

博士論文

現場と室内で締め固めた砂質土供試体の
非一様性の評価と強度変形特性への影響

Evaluation of non-uniformity of sandy soil specimens
compacted in the field and in the laboratory and its effect
on strength and deformation characteristics

2021 年 3 月

東京大学工学系研究科
社会基盤学専攻

富田 佑一

Yuichi Tomita

論文の内容の要旨

論文題目 現場と室内で締め固めた砂質土供試体の非一様性の評価と強度変形特性への影響
(Evaluation of non-uniformity of sandy soil specimens compacted in the field and in the laboratory
and its effect on strength and deformation characteristics)

氏 名 富田 佑一

本論文は、乾燥密度や飽和度の鉛直深度分布を有する現場で締め固めた砂質土供試体と室内で締め固めた砂質土供試体の非一様性をそれぞれ評価し、鉛直深度方向別に設置した局所変位計を用いて供試体の非一様性を考慮した不飽和排気・排水三軸圧縮試験を実施して、両者の強度変形特性を比較し、まとめたものである。

研究背景と目的を以下に示す。

近年では大型締固め機械の利用による締固めエネルギーの向上や GNSS 等の締固め機械の位置情報管理システムの活用による面的で等締固めエネルギーの施工管理が実現し、盛土構造物の施工品質は更なる向上が期待されている。通常の施工管理は設計定数を反映した乾燥密度や含水比等の物性指標を測定して間接的にその確認をするが、最近では従来補足的に用いられてきた現場 CBR、地盤反力係数 K_{30} 等に加え、締固め管理の効率化を目的とした物性指標の中の CBR や K_{30} 等の地盤剛性指標に加え、CCV 値等の振動ローラーの応答加速度データから求めた地盤剛性指標を先の位置情報システムと関連付けする事による面的で迅速な施工管理が提案されている。これら現場の高い締固めエネルギーで締め固めた土で測定した物性指標や地盤剛性指標と、室内で締め固めて作製した供試体の設計条件(通常湿潤・飽和条件)の下で三軸圧縮試験等により測定した強度変形特性の相関は明らかになっておらず、高い締固めエネルギー条件や、高い乾燥密度条件に応じた地盤剛性指標を設計値に反映する事が出来ていない。

既往の研究によると、現場不飽和盛土の地盤剛性指標は、乾燥密度に加えて締固め時の飽和度に強く影響される事が明らかにされており、また浸水、飽和化が強度変形特性に与える影響も、上記の相関検討には考慮が必要である。さらに、三軸圧縮試験の供試体は通常は室内で変形が拘束されたモールド内で突固め法により、5 層に分けて締め固めて作製されるが、現場締固めでは、所定の厚さで撒き出した土の上を締固め機械を走行させて締め固める為、各締固め層で鉛直深度方向に大きな密度分布が生じる。また、地盤の拘束が弱い為、締固め時に大きなせん断変形が生じる可能性があり、室内と現場の締固め方法の違いが強度変形特性に影響を与える可能性がある。そこで、本研究では、現場と室内で締め固めた供試体の乾燥密度分布の影響、飽和度分布の影響、締固め方法の違いによる影響に関する締固め土の非一様性に着目して物理特性を評価し、それらの違いが強度変形特性に与える影響を調べる事とした。具体的には、大型鋼製土槽内に小型締固め機械を用いて作製した試験盛土で実大締固め実験を行い、試験盛土から採取した乱れの少ない供試体と同一の土質を用いて室内で締め固めた供試体の物理特性試験による供試体の非一様性評価と鉛直深度別に設置した局所変位計の不飽和排気・排水三軸圧縮試験を行い、両者の強度変形特性を比較した。

本論文の構成と研究内容を以下に示す。

第1章では、研究背景、研究目的を設定し、論文構成を示した。

第2章では、関連する既往の研究を整理し、現場締固め土は鉛直深度方向に乾燥密度分布が生じている事、室内で作製した供試体であっても、突固め法により締め固めた供試体は局所的に非一様である可能性がある事を確認した。これら供試体の非一様性は供試体全体の変形特性の予測を難しくしているが、この非一様性を考慮した強度特性へ与える影響や局所的な変形特性に関する研究例は殆ど確認されていない。供試体の非一様性に起因する問題を解決するにはそれを出来るだけ考慮した変形特性の評価方法が必要と考え、本研究で取り組むべき課題とした。

第3章では、実大締固め実験の試験盛土から採取した供試体と室内締固め供試体それぞれの作製方法と三軸圧縮試験方法を示した。また、供試体の非一様性が与える変形特性への影響評価を目的に鉛直深度方向の局所変位の測定計画を示し、ダミー供試体等を用いた三軸圧縮試験結果から試験方法と試験結果の評価方法の妥当性を検証した。

第4章では、現場と室内で締め固めた供試体の非一様性を考慮した物理特性を示した。その結果、現場と室内で締め固めた供試体はそれぞれ異なる乾燥密度の鉛直深度分布を有しており、既往の研究と整合する事を確認した。これら両供試体に含水比分布はなく、飽和度分布が生じている事を示し、非一様性評価結果に基づいて後の章の強度変形特性評価に用いる供試体の局所乾燥密度と局所飽和度を定めた。また、室内締固め供試体は締固めエネルギーが大きいほど、上部と下部で乾燥密度の差が生じており、これは締固め時の突固めによる撃力の影響が関連する事を示唆した。さらに、現場と室内に関わらず締め固めた供試体の初期サクシオンと飽和度との関係には乾燥密度の影響が含まれるが、初期サクシオンと含水比との関係には乾燥密度の影響が殆ど含まれない事を示した。その他には現場で締め固めた供試体と室内で締め固めた供試体の粒度分布の違い、飽和化後の鉛直透水係数の違いについてまとめた。

第5章では、室内で締め固めた供試体の非一様性を考慮した三軸圧縮試験による強度変形特性を整理した。その結果、締固めエネルギーが大きく、乾燥密度の上下差が大きい供試体ほど、局所乾燥密度の小さい供試体上部が局所的に破壊する事、供試体の上部と下部で局所的な変形特性の違いが大きくなる事を明らかにした。さらに、最大軸差応力、割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率について、供試体の乾燥密度と飽和度の非一様性を考慮すれば、飽和度の影響は受けるが乾燥密度と相関関係がある事を示した。

第6章では、現場で締め固めた供試体の非一様性を考慮した三軸圧縮試験による強度変形特性を整理した。その結果、供試体上部は下部に比べて局所乾燥密度が大きいにも関わらず、ピーク強度までの剛性が低い傾向であることを示した。最大軸差応力、割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率について、供試体の乾燥密度と飽和度の非一様性を考慮すれば、飽和度の影響は受けるが乾燥密度と相関関係がある事、試験盛土の表面付近に位置する供試体上部はこれと異なり軟らかい挙動を示す事を確認した。供試体上部が低剛性挙動を示すのは、現場締固めにより地盤表面付近にせん断破壊領域が生じている事が原因であると仮定し、鉛直深度方向へのその影響範囲を示した。さらに、試験盛土締固め層の上部と下部から別個に採取した小型供試体について小型三軸圧縮試験を上下別実施し、乾燥密度の大きい締固め層上部供試体の方が乾燥密度の小さい締固め層下部供試体よりピーク強度までの剛性は小さいが、最大軸差応力は大きい事を示した。このことから、試験盛土表面付近のせん断破壊領域は鉛直ひずみの進行に伴い、一様化して乾燥密度と飽和度に相応の高い最大軸差応力を示す事を示した。最後に飽和化した供試体と不飽和供試体の強度変形特性を比較し、締め固めた供試体の飽和化が強度変形特性に与える影響を調べた。その結果、特に乾燥側では供試体の飽和化により強度変形特性が低下する事を明らかにし、最適飽和度付近では飽和化の影響は無視できる程度の違いである事を示した。

第7章では、現場と室内で締め固めた供試体の強度変形特性を比較整理した。両供試体の強度変形特性と乾燥密度の関係に与える飽和度の影響の程度は、試験盛土表面付近を除いてほぼ一致する事を確認した。試験盛土表面付近はせん断破壊領域の影響を受け、同一(w , ρ_d)平面上にある室内締固め土に比べて変形特性が低下する事を

確認した。この実験結果に基づいて、設計時に室内で作製した供試体の飽和三軸圧縮試験で求めた強度変形特性は、現場で求めた強度変形特性に飽和度の影響、乾燥密度の影響、せん断破壊領域の影響、飽和化の影響を考慮する事でほぼ一致する事を示し、現場に対する適用性の高い式を提案した。また、最適飽和度付近で管理すれば、せん断破壊領域の影響と飽和化の影響は無視できる程小さい事も示した。さらに、強度変形特性～乾燥密度関係に影響を与えるパラメーターを飽和度で整理した場合と含水比で整理した場合で比較し、整理パラメーター別に強度変形特性の推定値と実測値のばらつきの程度を評価する事で、どちらのパラメーターで整理する方が適しているのか検討した。第8章では、本研究の結論と今後の課題を示した。

本研究により得られた主な結論の概略を示す。

- (1) 現場と室内で締め固めた供試体はともに、程度は異なるが鉛直深度方向の乾燥密度、飽和度に違いが見られ、非一様である。また、両者は供試体の作製方法に起因する粒度特性や初期サクシオン等の物理特性にわずかな違いは見られたが、他の物理特性や強度変形特性へ影響を与える程大きくない。
- (2) 現場と室内で締め固めた供試体の最大軸差応力は、同等の乾燥密度と飽和度条件下において、ほぼ類似する傾向であった。その一方で、変形特性は異なり、特に割線ヤング率 E_{50} は現場で締め固めた供試体が室内で締め固めた供試体より著しく小さい。
- (3) 特に試験盛土供試体は最大軸差応力と乾燥密度関係において供試体の乾燥密度分布によるばらつきが無視できない程大きく、この程度の乾燥密度分布があれば供試体の非一様性の影響検討が必須である。
- (4) 現場締め固め土の表面付近は締め固め機械との境界問題(接触問題)によってせん断破壊している事が予想され、乾燥密度によらず低い割線ヤング率 E_{50} を示し、現場で締め固めた供試体平均の割線ヤング率 E_{50} の低下を招いている。ただし、現場締め固め土表層付近も大きい鉛直ひずみレベルで剛性の回復が見られることから、せん断破壊で非一様化していた土が鉛直ひずみの進行とともに一様化すると推察される。
- (5) 室内締め固め供試体の乾燥密度と飽和度の非一様性を考慮した強度変形特性の推定式を定式化し、せん断破壊領域の影響、飽和化の影響を併せて考慮すれば、現場の強度変形特性を推定する事が出来る。また、最適飽和度付近で締め固めた土はせん断破壊領域の影響、飽和化による影響が無視できる程非常に小さい。
- (6) せん断破壊領域の影響深度は盛土表層から 10cm 程度であり、特に低飽和度で締め固めた土はせん断破壊の影響を著しく受ける。これに対して最適飽和度付近で締め固めた土はせん断破壊の影響が小さい。
- (7) 現場で締め固めた供試体上部のせん断破壊領域の影響による剛性の低い層は等方圧密過程において異方的な構造は示すものの、室内締め固め供試体に比べてやや等方的に近い挙動を示す。これは現場締め固め時の表層付近は比較的拘束効果が弱い為、室内締め固め供試体のような強い構造異方性を得られなかったと考えられ、せん断破壊領域の特徴の一つである事を示唆している。また、この現場締め固め土表層付近は、高い応力条件下または応力履歴を付与する事により、変形特性の向上が期待できる。
- (8) 局所変位計を鉛直深度方向別に配置すれば、計測方法による測定範囲の限界はあるが、非一様供試体の変形特性を評価することが出来る。

目次

第1章 序論

1.1	研究背景	1-1
1.2	研究目的	1-5
1.3	本論文の構成	1-7
	参考文献	1-9

第2章 既往の研究

2.1	概要	2-1
2.2	不飽和土の力学特性に関する研究	2-1
2.3	土の締め固め特性に関する研究	2-9
2.4	締め固めた土の強度変形特性に関する研究	2-15
2.5	供試体の局所変形が強度変形特性に与える影響に関する研究	2-30
2.6	本章のまとめ	2-34
	参考文献	2-35

第3章 試験計画と試験方法

3.1	概要	3-1
3.2	試験計画	3-1
3.3	供試体の作製方法	3-9
3.4	試験装置概要	3-18
3.5	試験手順	3-25
3.6	応力～ひずみ関係の評価に用いる記号と算出方法	3-31
3.7	局所変位計を用いた鉛直深度別の変形特性評価方法の検証	3-37
3.8	本章のまとめ	3-44
	参考文献	3-45

第4章 室内締め固め供試体と試験盛土供試体の物理特性

4.1	概要	4-1
4.2	使用材料の締め固め特性	4-1
4.3	締め固めた供試体の鉛直密度分布	4-3
4.4	締め固めた供試体の鉛直深度方向の粒度分布	4-21
4.5	締め固めた供試体の初期サクシオン	4-27

4.6	締め固めた供試体の透水性	4-39
4.7	本章のまとめ	4-46
	参考文献	4-48

第5章 非一様性を考慮した室内締め固め供試体の強度変形特性

5.1	概要	5-1
5.2	供試体の非一様性が単調載荷時の強度変形特性に与える影響	5-1
5.3	供試体の非一様性が等方圧密時の変形特性に与える影響	5-21
5.4	中圧等方圧密が非一様供試体の強度変形特性に与える影響	5-28
5.5	非一様供試体の荷重保持載荷による変形特性	5-41
5.6	非一様供試体の繰返し載荷による変形特性	5-45
5.7	変形特性の鉛直深度分布に対する評価	5-53
5.8	本章のまとめ	5-58
	参考文献	5-60

第6章 非一様性を考慮した試験盛土供試体の強度変形特性

6.1	概要	6-1
6.2	供試体の非一様性が単調載荷時の強度変形特性に与える影響	6-1
6.3	供試体の非一様性が等方圧密時の変形特性に与える影響	6-20
6.4	中圧等方圧密が非一様供試体の強度変形特性に与える影響	6-27
6.5	非一様供試体の荷重保持載荷による変形特性	6-39
6.6	非一様供試体の繰返し載荷による変形特性	6-43
6.7	変形特性の鉛直深度分布に対する評価	6-50
6.8	締め固め層から上下別に採取した小型供試体の強度変形特性	6-56
6.9	飽和化した供試体の強度変形特性	6-62
6.10	本章のまとめ	6-68
	参考文献	6-70

第7章 室内締め固め土を用いた現場締め固め土の強度変形特性推定方法の提案

7.1	概要	7-1
7.2	現場と室内で締め固めた供試体の強度変形特性の比較	7-1
7.3	供試体の非一様性を考慮した強度変形特性の推定	7-11
7.4	室内締め固め土を用いた現場締め固め土の強度変形特性推定方法の提案	7-22
7.5	各推定方法のばらつき評価と妥当性の検証	7-28
7.6	本章のまとめ	7-50
	参考文献	7-52

第8章 結論と今後の課題

8.1 結論 8-1

8.2 今後の課題 8-5

参考文献 8-8

付録

A.1 1層で締固めた室内締固め供試体の強度変形特性 A-1

A.2 走査型電子顕微鏡を用いた締固め供試体の粒子構造観察 A-5

謝辞

第1章

序論

1.1 研究背景

海に囲まれた日本列島は温暖で湿潤な気候であり、豊かな自然や水源に恵まれている。その一方で、活発な地殻変動により発達した山地や丘陵地が国土の約 7 割を占めており、人口の多くが残りの平野部に局地的に集中している(国土交通省 2020)。我が国は人々の生活や経済活動を支える為に、常に地形や地質の厳しい条件に直面しながら、それらを繋ぐネットワーク形成を目的とした社会資本整備を進めてきた。具体的には、幹線道路、新幹線・在来線等の鉄道を、また安定した水源やエネルギーの確保を目的としたダム、河川や砂防等が挙げられる。それらの中でも延長の長い幹線道路や鉄道等の線状構造物は、整備に際して建設費が比較的低い事を理由に盛土構造物が利用されるが、近年多発する地震・豪雨等に対する被害軽減、維持管理費の低減等の面で盛土構造物はより高い安定性が社会的に求められている。

現在の盛土構造物の締固め管理は Proctor(1933a,b,c,d)の提案した突固めによる締固め試験に準じて作られたものであり、実務において指標となる締固め度 D_c を規定するための最大乾燥密度 ρ_{dmax} やその時の最適含水比 w_{opt} を求める締固め曲線を作成する事に利用されている。この時の締固めエネルギーは標準プロクター(締固めエネルギー $1.0E_c$)と呼ばれ、その後に重交通の支持を求められる道路や飛行場の建設に合わせて大型締固め機械に対応するよう作成された修正プロクター(締固めエネルギー $4.5E_c$)と称する試験方法が登場した(久野 1963)。

地盤工学会(2013)は道路、高速道路、宅地、鉄道、河川に関して(図 1-1-1)、林(2020)は道路、鉄道、河川堤防、ダム、ため池及び宅地に関する締固め管理方法と規定値について整理している。これらの文献によると各機関の管理基準値はそれぞれ異なるが、規定する締固めエネルギーのみ抽出すると、礫質土を対象とする場合の鉄道を除き殆ど標準プロクター相当の A 法及び B 法を適用している事がわかる。これらのことから Proctor の提案から 100 年近く経過した現在においても標準プロクターの締固め試験により求める締固め曲線が実務の指標に用いられている。

その一方で、近代化に伴って締固め機械は大型化し、締固めエネルギーの大きい大型締固め機械が容易に利用できるようになっている。根本、佐々木(1994)は大型コンクリートピット内に試験用の盛土を構築し、多様な締固め機械を用いた実大締固め試験を実施している。その結果、大型締固め機械が標準プロクターの締固め曲線より高い乾燥密度を実現している事を示している。さらに、国土交通省(情報化施工推進会議 2013)を中心に、ICT(情報化通信技術)の活用による高効率で高精度な施工の推進が進められ、GNSS 等を用いた締固め機械の位置情報管理システムの活用による面的な施工管理によって均等な締固め施工とそれを保証する為の客観的なデータ収集が実現化してきた。

これらのことから、龍岡、平川(2019)を中心に盛土締固め管理を合理化し、盛土構造物の要求性能の実現を目指す動きが推進されてきた。先にも述べたように盛土構造物はより高い安定性が社会的に求められており、これに応じるためには設計での要求性能を適切に定め、それを満足する施工管理が必要となる。フィルダム(農業土木学会 2003)等の特に重要度の高い盛土構造物の設計定数や使用する盛土材は、一般的に室内で締め固めた供試体の三軸圧縮試験等に基づいて検討される。この方法は、現場締固め土と室内締固め土が同じ含水比 w 、乾燥密度 ρ_d で同じ特性を示す事を仮定して用いられている。しかしながら、同一材料であってもこの (w, ρ_d) 平面上で一致する現場

締固め土と室内締固め土の強度変形特性が一致するかどうか、言い換えると、室内にて作製された供試体は現場の締め固めた状態を再現出来ているのかどうかは、実際には明らかにされていない。これを明らかにする為にはまず、密度条件、含水条件及び締固め方法の違いに伴う、締め固めた土の非一様性の評価とそれが強度変形特性に与える影響を調べる事が必要である。

また、現場品質管理では設計で定めた内部摩擦角 ϕ やヤング率 E 等の要求性能を反映した物性指標を測定して間接的にその確認をする。その指標としては、土の締固め度 D_c (乾燥密度 ρ_d)、支持力(現場 CBR 等)、地盤反力係数 (K_{30} 等) が測定されているが、これら物性指標と三軸圧縮試験などで設計条件(不飽和・飽和条件)の下で測定した強度変形特性の相関は詳しくわかっていない。さらに、これまでの設計では安全側に飽和条件を仮定してきたが、今後の性能設計では十分な排水性能の付与とその適切な維持管理を前提として、不飽和条件の強度変形特性も重要と考える。佐藤ら(2017)は既設の鉄道盛土を対象に、不飽和土の三軸圧縮試験による盛土材の強度特性評価と、得られた強度特性を用いた耐震診断、補強設計法を提案している。

さらに、締固め管理の効率化を目的とした物性指標の中の CBR や K_{30} 等の地盤剛性指標に加え、最近では CCV 値等の振動ローラーの応答加速度データから求めた地盤剛性指標を先の位置情報システムと関連付けする事による面的で迅速な施工管理が提案されている。龍岡、橋本(2020)は、締固めによる地盤の乾燥密度の上昇は地盤の剛性向上に影響するが、飽和度の上昇は地盤の剛性低下に影響する事に着目し、土木研究所で実施した実大締固め実験で得た締固め条件と小型 FWD 試験による地盤反力係数 K_{30} 相当値のデータを解析している。その結果、図 1-1-2 の乾燥密度～含水比関係に示す K_{30} の等高線はサクシオン等の影響により、低い飽和度範囲では等飽和度線にはほぼ直交し、等締固めエネルギー線(締固め曲線)には平行であるのに対し、高い飽和度範囲では等飽和度線に平行で、等締固めエネルギー線にはほぼ直交する事を明らかにしている。これはある程度の乾燥側の土であれば、乾燥密度が低くても高い剛性指標が得られるという事を意味している。乾燥側で締め固めた土は乾燥密度が小さく、浸水に対する安定性が低いにも関わらず、剛性指標が大きくなりやすい事を考慮すると、剛性指標の大小だけで施工管理する事は不十分である事を示したと同時に、現場の一定締固めエネルギーによる等締固めエネルギー線と現場の最適な剛性指標の上下限値を設けてそれを指標に施工管理すれば、現場の密度、含水状態を迅速に推定しながら施工する事が出来る事を説明している。仮に設計時に室内三軸圧縮試験で求めるような初期ヤング率や割線ヤング率 E_{50} 等を現場で締め固めた土でも測定する事が出来れば、高い締固めエネルギーで締め固めた現場の施工品質を設計値へフィードバックする事も実現可能性である。ただし、これには先述した現場品質管理と設計との間にある不飽和・飽和条件の相関を明らかにしておく必要がある。

図 1-1-3 には室内及び現場で締め固めた土の強度変形特性に関する飽和条件別の研究状況の模式図を示す。室内で締め固めた土に関する研究は古くから飽和条件、不飽和条件に関わらず多く存在し、国内においても多くの知見が得られている。一方で、現場で締め固めた土に関する研究は施工機械の近代化や幹線道路の建設計画に伴い多くの研究が存在するが、一部の研究に実盛土から採取した供試体の三軸圧縮試験例があるものの、殆どが原位置試験の測定データに基づいた評価に留まっている。従って、室内で締め固めた供試体と現場で締め固めた供試体を比較した例は確認されず、室内締固め土と現場締固め土の関連はわかっていない。なお、本研究に関連する既往の研究は内容を抽出し、次章にまとめている。

表-1.3.1 各機関の品質管理項目と規定値

品質管理項目	分野	道路 (国道等)		高速道路		
	基準書等	道路土工	盛土工指針 ¹⁾	NEXCO 土工施工管理要領 ²⁾		
	区分	路体	路床	路体	下部路床	上部路床
密度比	突固め試験名	JIS A 1210 (A, B 法)	JIS A 1210	JIS A 1210 (B 法)	JIS A 1210 (E 法)	JIS A 1210 (E 法)
	D 値	砂質土 90 %以上* ¹	砂質土 (A, B 法) 95 %以上* ¹ (C, D, E 法) 90 %以上* ¹	92 %以上* ³	92 %以上* ³	97 %以上* ³
空気間隙率	v_a	粘性土 10 %以下* ¹	粘性土 8 %以下* ¹	8 %以下* ⁴ 13 %以下* ⁵	8 %以下* ⁴ 13 %以下* ⁵	8 %以下* ⁴ 13 %以下* ⁵
飽和度	S_r	粘性土 85 %以上* ¹	—	—	—	—
強度・変形特性	試験方法	コーン指数	平板載荷試験, 現場 CBR 試験	—	—	たわみ測定
	規定値	※必要に応じて実施	—	—	—	仕上がり面で 5 mm 以下
施工含水比		* ²	最適含水比付近	自然含水比及びトラフィカビリティーが確保できる含水比	自然含水比及びトラフィカビリティーが確保できる含水比	締固め度及び所定たわみ規定を満足す含水比
一層の仕上がり厚さ		30 cm 以下	20 cm 以下	30 cm 以下	20 cm 以下	20 cm 以下
盛土材料最大粒径		—	—	300 mm 以下	150 mm 以下	100 mm 以下
品質管理項目	分野	宅地		鉄道		河川
	基準書等	基盤整備工事共通仕様書・施工関係基準 ³⁾		鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物 ⁴⁾		河川土工マニュアル ⁵⁾
	区分	宅地土工	道路・河川土工	性能ランク I * ⁷		堤体
密度比	突固め試験名	JIS A 1210 (B 法)	JIS A 1210 (B 法)	JIS A 1210 (砂: B 法, 礫: E 法)	JIS A 1210 (砂: B 法, 礫: E 法)	JIS A 1210
	D 値	87 %以上* ⁶ ただし、特記による重要な部位は 90 %以上* ⁶	90 %以上* ⁶	礫 平均値 90 %以上 (下限値 87 %以上) 砂 平均値 95 %以上 (下限値 92 %以上)	平均値 95 %以上 (下限値 92 %以上)	シルト・粘性土 < 25 % 90 %以上* ⁹
空気間隙率	v_a	13 %以下* ⁶ ただし、特記による重要な部位は 10 %以下* ⁶	10 %以下* ⁶	—	—	砂質土 (25 % ≤ シルト・粘土分 < 50 %) 15 %以下 粘性土 2 ~ 10 %
飽和度	S_r	—	—	—	—	粘性土 85 ~ 95 %
強度・変形特性	試験方法	コーン指数 $q_c \geq 400 \text{ kN/m}^2$ ※空気間隙率管理の場合	コーン指数 $q_c \geq 400 \text{ kN/m}^2$ ※空気間隙率管理の場合	—	道路の平板載荷試験, FWD 試験, 小型 FWD の試験いずれか	—
	規定値	—	—	—	K_{30} 値 平均値 110 MN/m ³ 以上 (下限値 70 MN/m ³ 以上)	—
施工含水比		最適含水比に近い含水比	最適含水比に近い含水比	最適含水比に近い含水比	最適含水比に近い含水比	・定められた締固め度を満足する含水比 ・トラフィカビリティーを確保し得る含水比* ¹⁰
一層の仕上がり厚さ		30 cm 以下	30 cm 以下	30 cm 程度	30 cm 程度	30 cm* ¹¹
盛土材料最大粒径		300 mm	300 mm	300 mm 程度* ⁸	300 mm 程度* ⁸	10 ~ 15 cm 以下* ¹²

1) (財)日本道路協会：道路土工盛土工指針 (平成22年度版), 2010.

2) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)：土工施工管理要領, 2011.

3) 鈿都市再生機構：基盤整備工事共通仕様書・施工関係基準, 2008.

4) 国土交通省鉄道局監修・財鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 2007.

5) (財)国土技術研究センター：河川土工マニュアル, 2009.

*1 管理基準値の目安で、1回3点以上の試験を行った場合の最低値に対するもの。

*2 密度比管理の場合は、締固め曲線の管理基準値以上となる含水比範囲。空気間隙率、飽和度管理の場合は、自然含水比またはトラフィカビリティーが確保できる含水比。

*3 盛土材料の粒度における $F_c < 20\%$ の場合で、管理基準値は RI 法により管理する場合で測定値15点の平均値。*4 盛土材料の粒度における $50\% \leq F_c$ の場合で、管理基準値は RI 法により管理する場合で測定値15点の平均値。*5 盛土材料の粒度における $20\% \leq F_c < 50\%$ の場合で、管理基準値は RI 法により管理する場合で測定値15点の平均値。

*6 管理基準値は RI 法により管理する場合で測定値の平均値。

*7 性能ランク I：常時においては小さな変形であり、極めて稀な偶発作用に対しても過大な変形が生じない程度の性能を有する土構造物。

*8 岩ずり及び岩質材料の場合。

*9 管理基準値は RI 法により管理する場合で測定値の平均値。

*10 砂質土 ($25\% \leq F_c < 50\%$)、粘性土の場合。

*11 一般的河川堤防の場合。

*12 堤体材料として望ましい土。

図 1-1-1 締固め管理方法と規定値(地盤工学会, 2013)

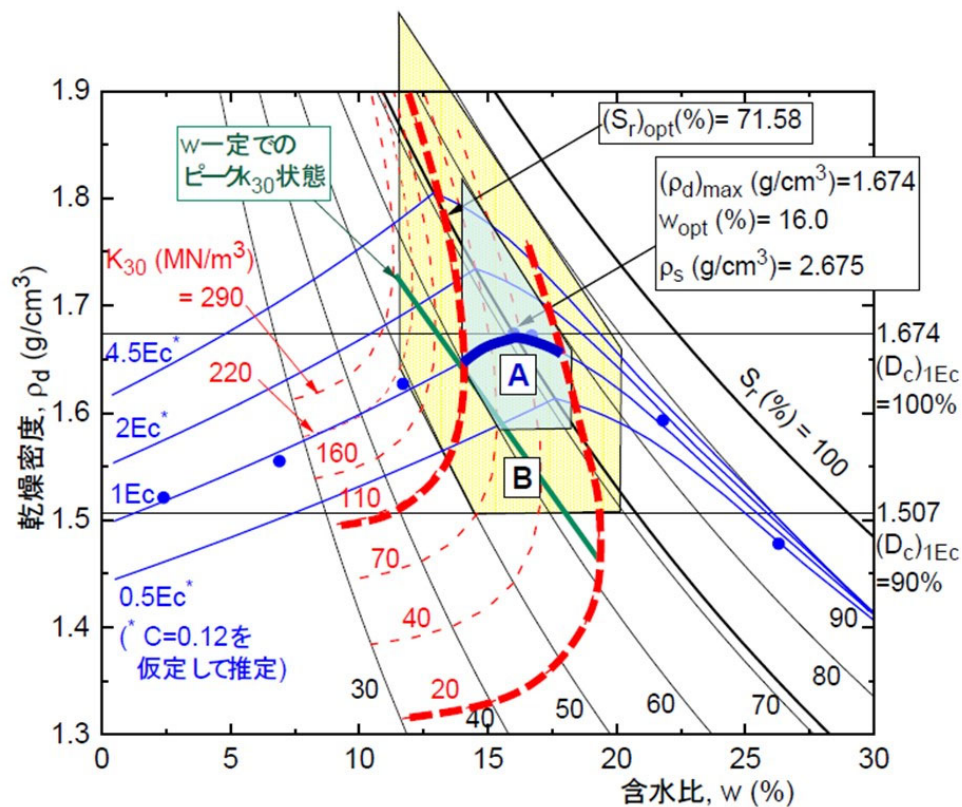


図 1-1-2 実大締固め試験に基づく現場締固め曲線と鉛直地盤反力係数 K_{30} の等高線
(龍岡、橋本 2020)

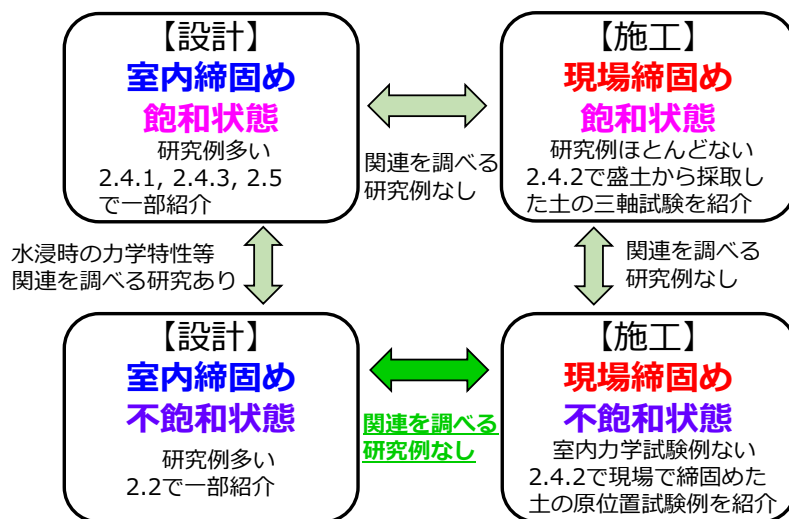


図 1-1-3 室内及び現場で締め固めた土の強度変形特性に関する飽和条件別の研究状況

1.2 研究目的

以上に記述した事を背景に、本研究では現場で締め固めた供試体と室内で締め固めた供試体の違いに着目し、強度変形特性を調べる事を目的とした。この両者の関連を調べる事は、現場で実現する盛土の乾燥密度や含水比の結果から室内試験に基づいた盛土構造物の適切な設計法を確立する事や、現場で測定する初期ヤング率等の地盤剛性指標を用いた測定値に関する評価方法、施工管理方法の確立等に寄与すると考える。なお、本研究では不飽和状態の締め固め土の強度変形特性を中心に着目する事とした。飽和状態の締め固め土の研究についてはデータ数が少ないが、6.9 に示す事とした。一般的に実務では飽和状態の土の強度変形特性を基に設計値を定める事が多い為、不飽和供試体と飽和化した供試体の強度変形特性の違いを定量的に評価する事は、上述した適切な設計法の確立に重要な知見となる。

地盤工学会(2009)によると、土の三軸試験の供試体作製・設置方法(JGS 0520)で規定されている供試体の作製方法には、凍結した試料、サンプリングした試料及び事前の圧密や締め固めにより作製された試料等の室温で安定した塊状をなすものを対象とするトリミング法と、ときほぐされた試料で塊状にならないものを対象にする負圧法の二つに分類される。トリミング法は締め固めた試料も対象にしているが、供試体の取扱い等はサンプリング試料を例に説明されている。一方で、負圧法は空中落下法、水中落下法、締め固め法等を例に説明されている。ランマーを用いた突固め法で締め固める供試体作製方法に関して、JGS0520 には使用器具に関する記述は多少あるものの、詳しい規準は示されていない。そのような中で平川ら(2008)、Tatsuoka et al.(2013)、Kongsukprasert et al.(2005)等の砂礫材やセメント系安定処理土を扱う研究に用いられている供試体作製方法には「5 層突固め法」が挙げられる。これは地盤工学会(2009)の「突固めによる土の締め固め試験(JIS A 1210)」や「安定処理度の突固めによる供試体作製方法(JGS 0811)」で定めた締め固めエネルギー E_c と対応させる事で、現場管理における乾燥密度や強度変形特性の指標を設ける事が出来る事から、実務においても多く利用される。

図 1-2-1 には、室内締め固めと現場締め固めの違いと供試体の非一様性の概念を示す。「5 層突固め法」に代表される室内締め固め供試体は鋼製モールド内に含水調整した試料を 5 層に分けて投入し、ランマーで各層を所定回数で一次元方向に突き固めて作製する。一般的に締め固め時に土に伝わる荷重は分散し、地盤内応力は鉛直深度方向に変化するため、表面付近の方が密になりやすい。これによる密度分布の非一様化の影響を低減するために室内要素試験では供試体高さ $h=200\text{mm}$ に対して、1 層厚を $t=40\sim 50\text{mm}$ 程度以内になるよう多層とし、平均密度が鉛直深度方向にほぼ一定という仮定の基に供試体が準備される。その一方で、現場締め固め土は、含水調整した盛土材料を所定厚さで撒き出し、締め固め機械がその直上を水平方向に移動しながら転圧する。撒き出し厚や締め固め機械の通過回数(転圧回数)は、盛土構造物の要求性能や盛土材料、締め固め機械等の設計条件・現場条件に応じて試験施工を実施して検討されることが望ましいが、一般的には撒き出し厚は $t=250\text{mm}\sim 300\text{mm}$ 程度、締め固め機械の通過回数は $N_p=8\sim 16$ 回程度であることが多い。すなわち、現場締め固め土は一つの層の高さ $h=200\text{mm}$ の要素に着目すると単層であり、盛土表面から地盤内応力の変化により、鉛直深度方向に密度分布が生じていると考えられる。また、表面付近の地盤は拘束が弱いいため締め固め時に大きなせん断変形を生じる可能性がある。

一般的に三軸圧縮試験のような要素試験は供試体が一樣である事を前提としているが、現場締め固め土と室内締め固め土の平均的な見かけの含水比や乾燥密度が同じ供試体であっても上記のような締め固め方法の影響により供試体は非一様性を有している可能性があり、その様態はそれぞれ異なると考えられる。従って、現場締め固め土と室内締め固め土の供試体は、異なる物理特性や強度変形特性を示す可能性がある。そこで本研究では、大型鋼製土槽内に小型締め固め機械を用いて作製した試験盛土で実大締め固め実験を行い、試験盛土から採取した乱れの少ない供試体と同一の土質を用いて室内で締め固めた供試体それぞれの乾燥密度や含水比、飽和度等の物性に関する非一様性の

評価と、供試体の非一様性が強度変形特性に与える影響について不飽和排気・排水三軸圧縮試験を中心に定量的に調べる事とした。

室内締固め(5層突固め法)



現場締固め(締固め機械)

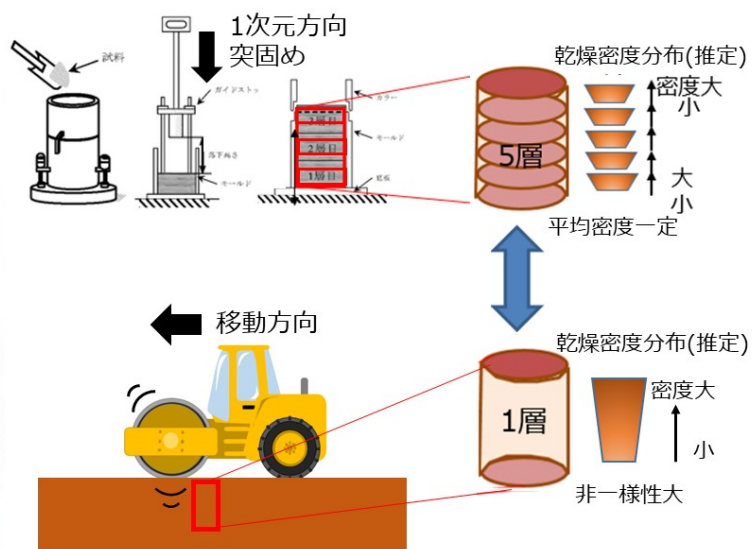


図 1-2-1 室内締固めと現場締固めの違いと供試体の非一様性の概念

1.3 本論文の構成

本論文の構成を図 1-3-1 に示す。

第1章では、研究背景、研究目的を設定し、論文構成を示した。

第2章では、関連する既往の研究を整理し、現場締固め土は鉛直深度方向に乾燥密度分布が生じている事、室内で作製した供試体であっても、突固め法により締め固めた供試体は局所的に非一様である可能性がある事を確認した。これら供試体の非一様性は供試体全体の変形特性の予測を難しくしているが、この非一様性を考慮した強度特性へ与える影響や局所的な変形特性に関する研究例は殆ど確認されていない。供試体の非一様性に起因する問題を解決するにはそれを出来るだけ考慮した変形特性評価方法が必要と考え、本研究で取り組むべき課題とした。

第3章では、実大締固め実験の試験盛土から採取した供試体と室内締固め供試体それぞれの作製方法と三軸圧縮試験方法を示した。また、供試体の非一様性が与える変形特性への影響評価を目的に鉛直深度方向の局所変位の測定計画を示し、ダミー供試体等を用いた三軸圧縮試験結果から試験方法と試験結果の評価方法の妥当性を検証した。

第4章では、現場と室内で締め固めた供試体の非一様性を考慮した物理特性を示した。その結果、現場と室内で締め固めた供試体はそれぞれ異なる乾燥密度の鉛直深度分布を有しており、既往の研究と整合する事を確認した。これら両供試体に含水比分布はなく、飽和度分布が生じている事を示し、非一様性評価結果に基づいて後の章の強度変形特性評価に用いる供試体の局所乾燥密度と局所飽和度を定めた。また、室内締固め供試体は締固めエネルギーが大きいほど、乾燥密度分布が大きく生じており、これは締固め時の突固めによる撃力の影響がある事を示唆した。さらに、現場と室内に関わらず締め固めた供試体の初期サクシオンと飽和度との関係には乾燥密度の影響が含まれるが、初期サクシオンと含水比との関係には乾燥密度の影響が殆ど含まれない事を示した。その他には現場で締め固めた供試体と室内で締め固めた供試体の粒度分布の違い、飽和化後の鉛直透水係数の違いについてまとめた。

第5章では、室内で締め固めた供試体の非一様性を考慮した三軸圧縮試験による強度変形特性を整理した。その結果、締固めエネルギーが大きく、乾燥密度分布の大きい供試体ほど、局所乾燥密度の小さい供試体上部が局所的に破壊する事、供試体の上部と下部で局所的な変形特性の違いが大きくなる事を明らかにした。さらに、最大軸差応力、割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率について、供試体の乾燥密度と飽和度の非一様性を考慮すれば、飽和度の影響は受けるが乾燥密度と相関関係がある事を示した。

第6章では、現場で締め固めた供試体の非一様性を考慮した三軸圧縮試験による強度変形特性を整理した。その結果、供試体上部は下部に比べて局所乾燥密度が大きいにも関わらず、ピーク強度までの剛性が低い傾向である事を示した。最大軸差応力、割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率について、供試体の乾燥密度と飽和度の非一様性を考慮すれば、飽和度の影響は受けるが乾燥密度と相関関係がある事、試験盛土の表面付近に位置する供試体上部はこれと異なる挙動を示す事を確認した。供試体上部が低剛性挙動を示すのは、現場締固めにより地盤表面付近にせん断破壊領域が生じている事が原因であると仮定し、鉛直深度方向へのその影響範囲を示した。さらに、試験盛土締固め層の上部と下部から別個に採取した小型供試体について小型三軸圧縮試験を上下別々に実施し、乾燥密度の大きい締固め層上部供試体の方が乾燥密度の小さい締固め層下部供試体よりピーク強度までの剛性は小さいが、最大軸差応力は大きい事を示した。このことから、試験盛土表面付近のせん断破壊領域が鉛直ひずみの進行に伴い、一様化して高い最大軸差応力を示す事を確認した。また、供試体の飽和化が強度変形特性に与える影響を調べ、乾燥側で強度変形特性が低下し、最適飽和度付近では強度変形特性の低下は殆ど見られない事を示した。

第7章では、現場と室内で締め固めた供試体の強度変形特性を比較整理した。両供試体の強度変形特性と乾燥密度の関係に与える飽和度の影響の程度は、試験盛土表面付近を除いてほぼ一致する事を確認した。試験盛土表

面付近はせん断破壊領域の影響を受け、同一(w , ρ_d)平面上にある室内締固め土に比べて変形特性が低下する事を確認した。この実験結果に基づいて、設計時に室内で作製した供試体の飽和三軸圧縮試験で求めた強度変形特性は、現場で求めた強度変形特性に飽和度の影響、乾燥密度の影響、せん断破壊領域の影響、飽和化の影響を考慮する事でほぼ一致する事を示し、現場に対する適用性の高い式を提案した。また、室内締固め供試体を用いて作成した強度変形特性の推定式は現場に対して適用性の高い式である事も明らかにした。さらに、最適飽和度付近で管理すれば、せん断破壊領域の影響と飽和化の影響は無視できる程小さい事も示した。最後に強度変形特性～乾燥密度関係に影響を与えるパラメーターを飽和度で整理した場合と含水比で整理した場合で比較し、整理パラメーター別に強度変形特性の推定値と実測値のばらつきの程度を評価する事で、どちらのパラメーターで整理する方が適しているのか検討した。

第8章では、本研究の結論と今後の課題を示した。

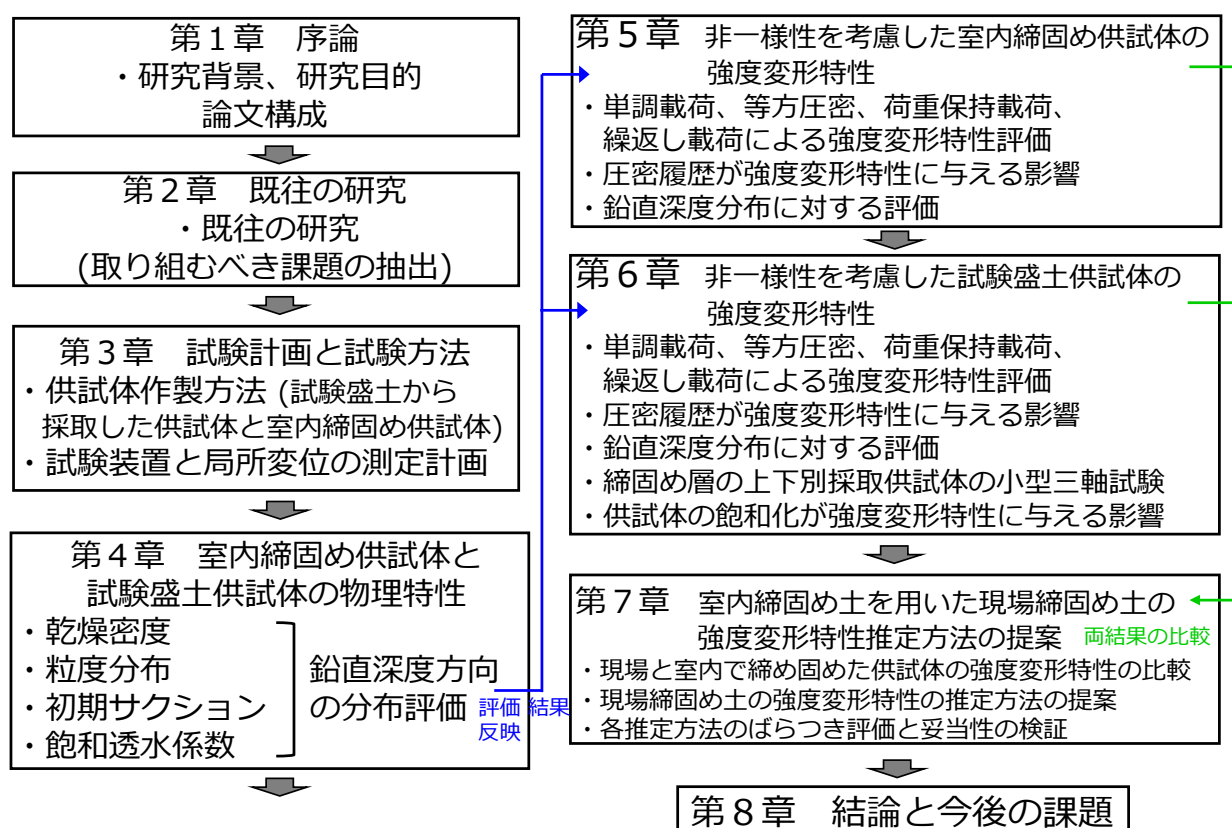


図 1-3-1 本論文の構成

【1章の参考文献】

- 1) Kongsukprasert, L., Tatsuoka, F. and Tateyama, M.(2005): Several factors affecting the strength and deformation characteristics of cement-mixed gravel, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.3, pp.107-124.
- 2) Proctor, R.R.(1933a): Fundamental principles of soil compaction, *Engineering News-Record*, Vol.111, No.9, August 31, pp.245-248.
- 3) Proctor, R.R.(1933b): Description of field and laboratory methods, *Engineering News-Record*, September 7, pp.286-289.
- 4) Proctor, R.R.(1933c): Field and laboratory verification of soil suitability, *Engineering News-Record*, September 21, pp.348-351.
- 5) Proctor, R.R.(1933d): New principal applied to actual dam-building, *Engineering News-Record*, September 28, pp.372-376.
- 6) Tatsuoka, F., Tomita, Y., Iguchi, Y. and Hirakawa, D.(2013): Strength and stiffness of compacted crushed concrete aggregate, *Soils and Foundations*, Vol.53, No.6, pp.835-852.
- 7) 久野悟郎(1963): 土の締固め ―主として道路土工に関連して―, 技報堂.
- 8) 国土交通省 情報化施工推進会議(2013): 情報化施工推進戦略～「使う」から「活かす」へ、新たな建設生産の段階へ挑む！！～.
- 9) 国土交通省(2020): 国土交通白書 社会と暮らしのデザイン改革～国土交通省 20 年目の挑戦～.
- 10) 佐藤武斗, 松丸貴樹, 中島進, 小湊祐輝, 山田孝弘, 藤原雅仁(2017): 不飽和土の強度特性を考慮した既設盛土の耐震診断法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.7, pp.23-28.
- 11) 地盤工学会(2009): 地盤材料の試験方法と解説, 丸善出版株式会社.
- 12) 地盤工学会(2013): 地盤調査の方法と解説, 丸善出版株式会社.
- 13) 龍岡文夫, 平川大貴(2019): 土構造物の要求性能の実現を目指した盛土締固め管理の合理化に関する研究委員会活動報告, 第 16 回地盤工学会関東支部発表会.
- 14) 龍岡文夫, 橋本毅(2020): 実大締固め試験に基づく土の締固め管理における地盤剛性の活用法の検討, 第 55 回地盤工学研究発表会, 21-10-3-01.
- 15) 根本忠, 佐々木隆男(1994): 土の締固め特性, 日本建設機械化研究所創立 30 周年記念論文集, pp. 45-58.
- 16) 農業土木学会(2003): 土地改良事業計画設計基準 設計「ダム」技術書, 社団法人農業土木学会.
- 17) 林良樹(2020): 締固め管理の現状と課題, 基礎工, Vol.48, No.11, pp.10-13.
- 18) 平川大貴, 川原園美幸, 龍岡文夫(2008): 砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, pp.253-266.

第2章

既往の研究

2.1 概要

本研究は現場と室内で締め固めた砂の強度変形特性に関して調べるが、前章で記述したように現場で締め固めた土は室内突固め法で締め固めた土と比べて、締固め機構が異なる。そこで、本章では、不飽和土の力学特性、土の締固め特性、室内で締め固めた土の強度変形特性、現場で締め固めた土の強度変形特性、異なる締固め方法が強度変形特性に与える影響、供試体の局所変形が強度変形特性に与える影響等の関連する研究を抽出し、本研究の進め方や関連研究の中に残された課題を整理した。

2.2 不飽和土の力学特性に関する研究

2.2.1 不飽和土の力学概説

締め固めた土のほとんどは不飽和状態であり、その力学特性は複雑であることが知られている。本項では、地盤工学会 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会(2004)を参考に、不飽和土の一般的な力学特性に関する概説と既往の研究について記述する。

(1) 土質力学における不飽和土

土は土粒子、間隙水および間隙空気から構成されており、土の間隙が空気だけであれば「乾燥土」、水だけであれば「飽和土」と呼ばれ、間隙に空気と水が共存する土が「不飽和土」とされる。土の飽和度 S_r は式 2-2-1 で示すように、間隙の体積に占める間隙水の体積を百分率で表示される。乾燥土は飽和度 $S_r=0\%$ 、飽和土は飽和度 $S_r=100\%$ であることから、飽和度 S_r が 0% より大きく、 100% 未満の土($0\% < S_r < 100\%$)は不飽和土に該当する。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100(\%) \quad (2-2-1)$$

ここで、 V_w は間隙水の体積、 V_v は間隙の体積である。

不飽和土はその間隙中に存在する水と空気が混在する状態が異なるため、飽和度の違いが力学特性に与える影響は大きく、飽和土や乾燥土に比べて複雑な力学特性となる。水は表面張力が大きく、凝集する性質があるため、不飽和土の間隙中では、土粒子表面を膜にして覆う性質がある。このため、土中に水がある限り、間隙空気が土粒子に直接接触することはない。この水の凝集性に起因して、土粒子骨格の鋭くくびれた部分に間隙水が滑らかな凹面を形成する。この凹面はメニスカスと呼ばれ、メニスカスの水圧は表面張力の寄与分だけ間隙空気の圧力より低くなる。締固め直後の土のような間隙水が静止している場合は、土の間隙水の圧力はメニスカスの圧力に等しく、間隙空気圧が

大気圧と等しい場合は、間隙水圧が大気圧より低い「負圧」となっている。

土中水は先述した表面張力の他に、土粒子表面からの吸着力(クーロン力、ファンデルワールス力等)や土粒子の荷電により吸着されているイオンの影響(浸透圧)等を受けて吸引されている。また、土粒子近傍の間隙水は誘電率や粘性、密度等が通常の水と異なる事が知られている。これらの作用を勘案して、不飽和状態の土中水は飽和状態の間隙水より低い化学ポテンシャルを持つとされている。従って、不飽和土の特性を把握するためには土中水の量だけでなく、質的な状態としてポテンシャルエネルギーを考慮する事が必要となる。そこで、土質や含水量に依存せず、間隙水の質的な状態を定量的に表現する化学ポテンシャルが導入された。土中水の化学ポテンシャルは、主に土の吸着力や表面張力で決まるマトリックポテンシャルと、土中水が含むイオン濃度によって決まる浸透圧成分に分けられる。

マトリックポテンシャルは化学ポテンシャルから間隙水中に溶存するイオンの影響を除き、水が土粒子を表面張力により引き付ける作用だけを取り出したものである。土が飽和している場合、または土粒子の影響を受けていない水面が大気と接しているような場合を基準(0kPa)とし、負の値を示す。マトリックポテンシャルはマトリックサクションや圧力水頭とも呼ばれ、その絶対値はサクションと呼ばれている。

土中水のマトリックポテンシャルは、前述のように化学ポテンシャルから溶存するイオンの影響を除き、土粒子と水の相互作用の寄与分を取り出したものである。つまり、同一温度、同一気圧条件下の同じ位置(高さ)にある土中水と同じ化学組成の水の化学ポテンシャルを基準に土中水の化学ポテンシャルとの差が土中水のマトリックポテンシャルとなる。

土中水の化学ポテンシャル ψ_T は、式 2-2-2 のように表現される。

$$\psi_T = \psi_g + \psi_o + \psi_m + \psi_a \quad (2-2-2)$$

ここで、 ψ_g は重力ポテンシャル、 ψ_o は浸透ポテンシャル、 ψ_m はマトリックポテンシャル、 ψ_a は空気圧ポテンシャル(大気圧下では $\psi_a=0$ を仮定)である。

重力ポテンシャルは、基準点からの高さの差によるポテンシャルであり、式 2-2-3 で表される。

$$\psi_g = \rho_w g z \quad (2-2-3)$$

ここで、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 z は基準位置からの高さである。

土中水の化学組成に由来する浸透ポテンシャル ψ_o は、溶質の濃度が十分に低い場合において、式 2-2-4 に示すように、大気圧下で同一温度の蒸留水に対する土中水の化学ポテンシャルの低下量 $\Delta\psi_o$ (Pa)を求める事で表現される。

$$\Delta\psi_o = -\frac{R_a T}{V} \rho_w \sum \ln(1 - m_i) = -RT \rho_w \sum C_i \quad (2-2-4)$$

ここで、 R_a : 気体定数 (J/(K・mol))

T : 絶対温度 (K)

ρ_w : 水の密度 (kg/m³)

m_i, C_i : 溶質 i のモル量、モル濃度 (mol/m³)

V : 液相の体積(m^3)

土の保水性試験(JGS 0151)の吸引法は、セラミックディスクを介して負圧を土中水に接触させて、供試体内の空気圧を大気圧に保ちながら土中水のポテンシャルを測定する方法であるが、土中水のマトリックポテンシャル ψ_m は大気圧を基準にして、空気圧 $u_a=0$ となり、式 2-2-5 のように表される。

$$\psi_m = -(u_a - u_w) = u_w \quad (2-2-5)$$

ここで、 u_a : 間隙空気圧

u_w : 間隙水圧

サククション s はマトリックポテンシャルの絶対値($s \geq 0$)であるため、式 2-2-6 と表される。

$$s = u_a - u_w \quad (2-2-6)$$

(2) 水分特性曲線

土中水のマトリックポテンシャルについて、土の含水量との関係を表すものとして水分特性曲線で、図 2-2-1 のようにマトリックポテンシャル ψ_m と体積含水率 θ に加え、含水比 w 、飽和度 S_r の関係で示されることが多い。

大気圧下で同一高さにある自由水と平衡している飽和土の静水圧は 0 である。この飽和土中の水に吸引圧をかけると、吸引圧がある値に達した時点から土中水の流れが生じ始め、土中水が排水される事により土は不飽和状態となる。土が飽和から不飽和に移行する吸引圧を空気侵入吸引圧と呼び、土中水のマトリックポテンシャルは空気侵入値 (Air Entry Value: AEV) と呼ばれる。

水分特性曲線中の勾配 $\Delta \theta / \Delta \psi_m$ はそのマトリックポテンシャルに対応して土中の保水量を示しており、比水分容量と呼ばれる。比水分容量は、あるマトリックポテンシャル時にどの程度水分が保水されているかを示す重要な物理量である。

水分特性曲線は図 2-2-2 に示すように土の吸排水過程で大きく異なり、ヒステリシスを有する。ヒステリシスを持つ原因には、土の間隙に膨らみや絞り部分がある事や、土粒子と水との接触角が吸排水で異なる事等が考えられている。また、ヒステリシスがある場合、同じマトリックポテンシャルであっても排水時の土の水分量と吸水時の土の水分量は異なるため、ヒステリシスが土中の水分量の推定値に与える影響は大きい。

(3) 力学特性

不飽和土の力学特性には、サククションを考慮する必要がある。一般的にサククションとはマトリックサククションを指しており、前述した式 2-2-6 で定義される。飽和土における有効応力式は Terzaghi によって式 2-2-7 ように表されている。

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2-2-7)$$

ここで、 σ' : 有効応力

σ : 全応力

u_w : 間隙水圧

不飽和土における有効応力式は多く存在するが、式 2-2-8 に示す Bishop(1960)の有効応力式が一般的である。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi(u_w - u_a) \quad (2-2-8)$$

ここで、 χ : サクシヨンの有効応力への寄与分を表すパラメーターで、 $0 \leq \chi \leq 1$ となる。

飽和条件で $\chi = 1$ で式 2-2-7 と一致する。

有効応力は二つの応力成分から構成されており、 $(\sigma - u_a)$ は基底応力 σ_{net} 、 $(u_a - u_w)$ はマトリックサクシヨン s である。
式 2-2-8 は、式 2-2-9 のようにも表す事ができる。

$$\sigma' = \sigma_{net} + \chi s \quad (2-2-9)$$

その他に力学挙動に関する主な応力変数は次のように定義される。

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2-2-10)$$

$$p_{net} = \sigma_m - u_a \quad (2-2-11)$$

ここで、 σ_m : 平均主応力

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力

p_{net} : 平均基底主応力

2.2.2 不飽和土の力学に関する既往の研究

Kohgo et.al. (1993) は土の不飽和状態を図 2-2-3 に示すに三つに分類した。一つ目は(a)のように、飽和度が高く、間隙中の空気は水中の気泡として存在している状態で、間隙水が土粒子間を連続している状態である。これは封入不飽和状態(Insular air saturation)と呼ばれる。二つ目は(b)のように、間隙内の水が排水されることでサクシオンが大きくなり、間隙水は土粒子接触点間の周りにメニスカスを作って保持されている状態である。この状態は懸垂水不飽和状態(Pendular saturation)と呼ばれる。三つめは(c)のように過渡的不飽和状態(Fuzzy saturation)と呼ばれる(a)と(b)の中間的な不飽和状態が生じていると考えられる。間隙が大きい場合は、比較的小さなサクシオンの値で間隙水は排水され、懸垂水不飽和状態となっているが、小さな間隙では、より大きなサクシオンの値まで封入不飽和状態にある事を示している。また、一般的にサクシオンの履歴や毛管力の履歴が異なると、変形特性やピーク強度が異なる事が知られているが、これについて、サクシオンだけでなくサクシオンによる土粒子骨格の軟化や硬化を考慮する必要がある事を示し、不飽和土の有効応力を次のように提案している。

$$\sigma' = \sigma - u_{eq} \quad (2-2-12)$$

$$u_{eq} = u_a - s \quad (s \leq s_e) \quad (2-2-13)$$

$$u_{eq} = u_a - \left(s_e + \frac{a_e}{s^* + a_e} s^* \right) \quad (s > s_e) \quad (2-2-14)$$

$$s^* = 0 \quad (s \leq s_e) \quad (2-2-15)$$

$$s^* = s - s_e \quad (s > s_e) \quad (2-2-16)$$

ここで、 u_e : 等価間隙圧

a_e : 材料パラメーター

s^* : 有効サクシオン

s_e : 空気侵入時のサクシオン

この定義によれば、封入不飽和状態では Terzaghi の有効応力式が成り立つことを示している。

軽部ら(1996)は不飽和細粒度の力学的挙動を水分特性曲線より考察し、間隙水を吸着水、メニスカス水、バルク水の三つの状態に分類し、それぞれの状態におけるサクシオンによる応力を定義している。吸着水は土粒子表面に固着しており、それが占める含水比は常に一定とする。メニスカス水は土粒子の接触点周りに形成されるメニスカスに保持される自由水とし、メニスカス水が土粒子に及ぼす力は接点内力に留まる。バルク水は骨格間隙を満たす自由水で骨格の間隙に連続して存在するものとし、土塊境界面に作用する垂直全応力を骨格、間隙空気とともに分担して伝達するとし(図 2-2-4)、バルク水とメニスカス水の圧力を全断面応力に換算し、それぞれの応力を定義している。また、圧密排水三軸圧縮試験の主応力差からサクシオン応力を算定し、それらの応力とビショップの有効応力式の χ の関係を明らかにしている。

Romero et al. (1999) は、締め固めた Boom clay の水分特性曲線と透水係数の関係について、実験データに基づ

いて考察している。図 2-2-5 には様々な応力条件で静的に締め固めた土の乾燥密度～含水比関係を示すが、同図内に縦方向に伸びるサクシジョンの等高線を示している。また、低含水比領域と飽和度 70%以下の領域について、多孔性粒子の間隙のコラップスに伴う圧縮沈下が確認されており、この低飽和度領域では、粘土粒子の間隙内に拘束された間隙水によってサクシジョンが制御されている事を説明している。すなわち、この領域では定含水比試験は定サクシジョン試験であるとも言える。また、この検討を SEM による観察や MIP(水銀圧入式ポロシメーター)による PSD(間隙径分布)測定することにより、Boom clay の微細な間隙構造が水分特性曲線に与える影響をより正確に示している。PSD 測定で定義した団粒間間隙(inter-aggregate porosity)を基に、初期の含水比が同じで乾燥密度が異なる二つの水分特性曲線を比較し(図 2-2-6)、サクシジョンが 2MPa より大きい場合は水分特性曲線が一致する事を確認している。両者の低サクシジョン領域で異なるのは、団粒間間隙内の自由水に関係があるとしている。

王、古関(2018)は、鉄鋼粉を材料に不飽和土の保水性を評価する水分特性曲線のパラメーターに下式に示す間隙水比 R_w を定義し、既往の保水性試験結果も踏まえて間隙水の変化について考察している。

$$R_w = w \cdot G_s = e \cdot S_r = (1 + e) \cdot \theta \quad (2-2-17)$$

土の間隙体積 V_v を図 2-2-7 に示すように、粒子間の間隙 V_{vw} と微細孔等の粒子塊内部を含む粒子自体の間隙 V_{vs} の 2 種類に区分し、これらに支配された水をそれぞれ粒子間の間隙水 V_{vw} と粒子の表面吸引力や粒子の微細孔の毛管力で保持される間隙水 V_{sw} と細分する事で、パラメーター別の水分特性曲線の違いとサクシジョンの傾向について考察している(図 2-2-8)。その結果、間隙水比～サクシジョン関係において、サクシジョンの小さい範囲では同じ間隙水比でも供試体の間隙比によってサクシジョンが異なるが、間隙水の排水に伴いサクシジョンの大きい範囲では供試体の間隙比条件に依存せず、一定の間隙水比になる事を確認している。この間隙水比～サクシジョン関係において、間隙比依存性が変化する低サクシジョン範囲から高サクシジョンへ移行する境界(支配境界)において、間隙水の排水に伴って間隙水 V_{vw} が消失し、間隙水 V_{sw} が間隙比に依存せずサクシジョンを支配している事を仮定し、間隙水比～サクシジョンモデルを提案している。

以上より、異なる供試体条件の水分特性曲線は整理するパラメーターによって異なる為、土の間隙状況に適した整理方法が求められる。

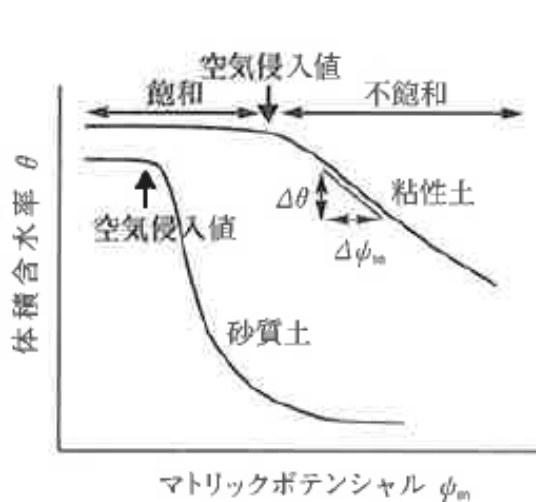


図 2-2-1 水分特性曲線

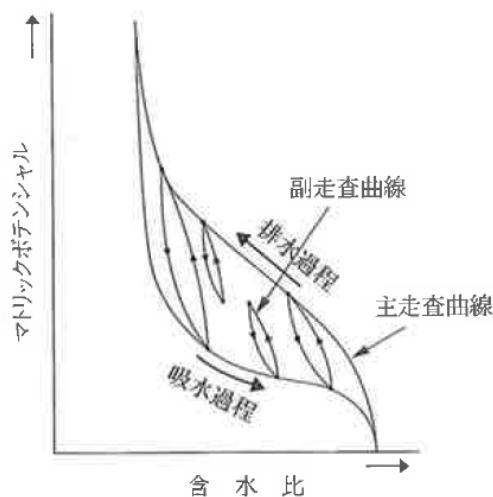


図 2-2-2 水分特性曲線のヒステリシス

(地盤工学会 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会, 2004)

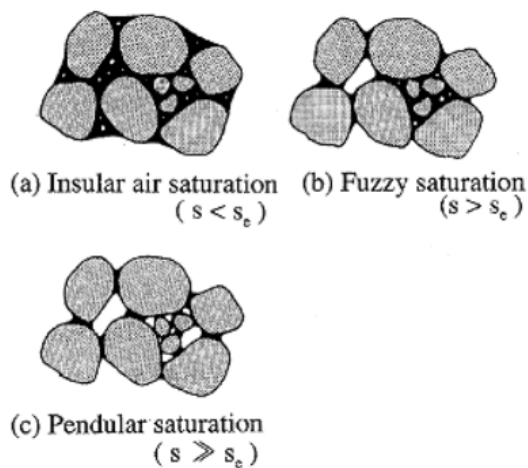


図 2-2-3 三種類の不飽和状態模式図 (Kohgo et.al. 1993)

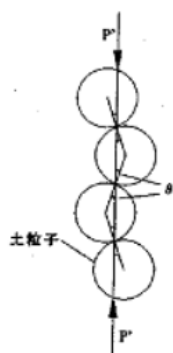


Fig.6 骨格要素

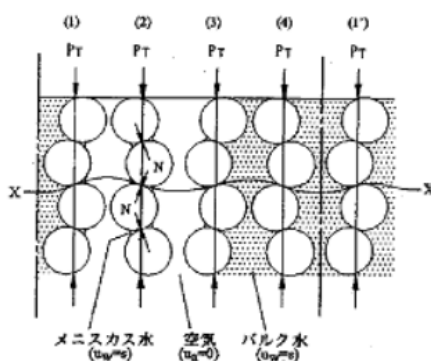


Fig.7 不飽和土の一次元模型

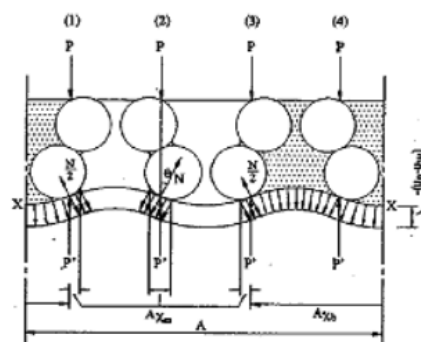


Fig.8 作用力の釣合

図 2-2-4 不飽和土の一次元模式図と作用力の釣合 (軽部ら, 1996)

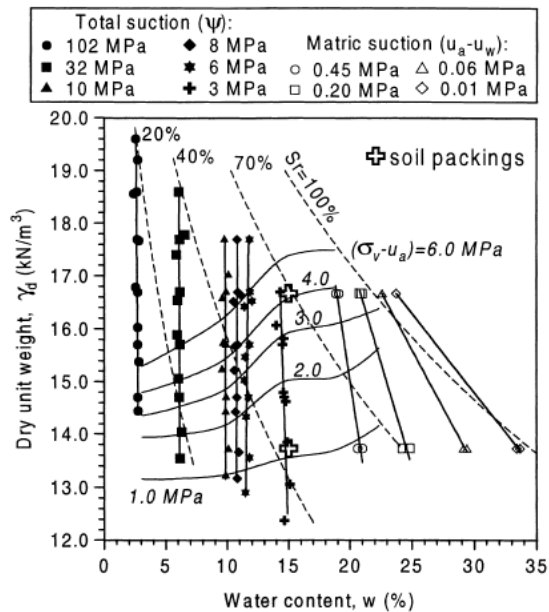


図 2-2-5 乾燥密度～含水比関係とサクシオン等高線

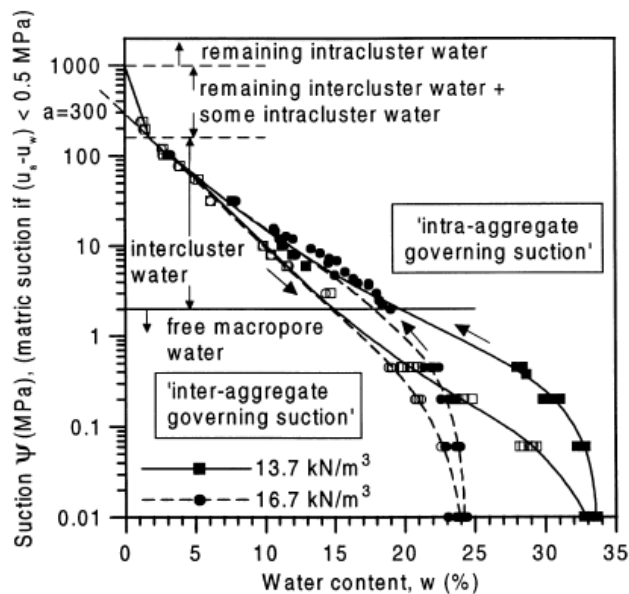


図 2-2-6 水分特性曲線

(Romero et al. 1999)

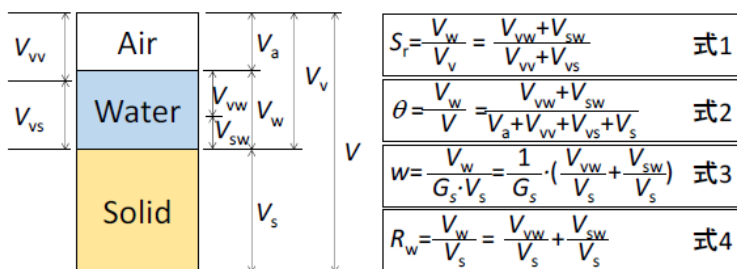


図 2-2-7 物理パラメータの定義 (王, 古関, 2018)

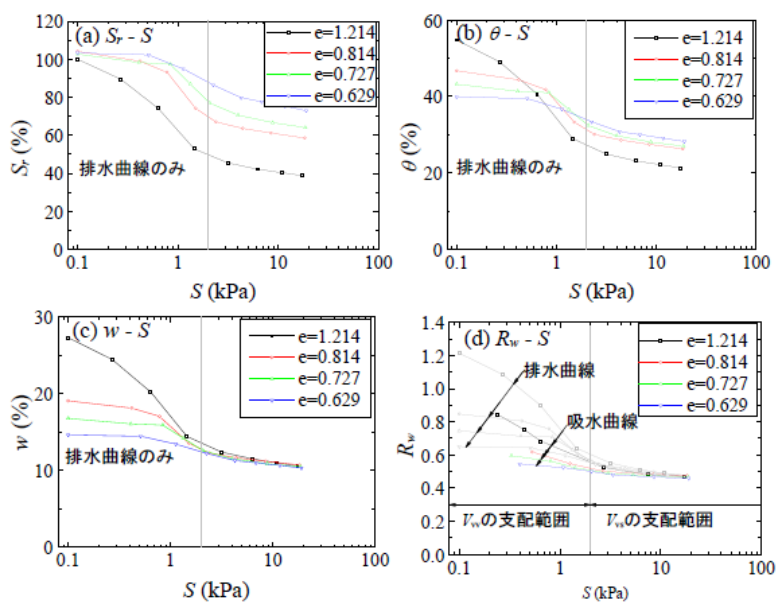


図 2-2-8 物理パラメータ別の水分特性曲線 (王, 古関, 2018)

2.3 土の締固め特性に関する研究

2.3.1 土の締固め曲線と飽和度の関係

Tatsuoka (2015)は、乾燥密度と含水比で表現される土の締固め特性が土質、締固めエネルギーおよび含水比の三因子で変化する事、土の締固め特性が乾燥密度と飽和度(土の間隙体積に対する間隙水の体積)に依存する性質に着目し、等締固めエネルギーレベルにおける最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} における飽和度を最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ として、乾燥密度と飽和度の平面上で定義している(図 2-3-1 c)。さらに、この平面上で土質や締固めエネルギーの異なる条件においても締固め曲線が相似形である特性を利用して、正規化締固め曲線($\rho_d/\rho_{dmax} \sim S_r - (S_r)_{opt}$ 関係)が、土質と締固めエネルギーの変化の影響をほとんど受けず一定の傾向を示す事を示している(図 2-3-1 d)。

Matsumura, Tatsuoka (2018)は、締固め時の飽和度の異なる三種類の供試体の水平断面を X 線 CT スキャナで撮影し、締固め土の土粒子と間隙の配置関係を視覚的に観察している(図 2-3-2)。ここで、供試体に用いた試料は駒岡火山灰土(細粒分礫混り砂)であり、最大粒径を 9.5mm となるよう調整した試料である。三種類の供試体はそれぞれ $1.0E_c$ での最適含水比の 0.8 倍(w =約 32.4%:低飽和側), 1.0 倍(w =40.5%:最適飽和度)および 1.2 倍(w =48.6%:高飽和側)となるよう含水調整し、締固めて作製している。図中の明るい色は高い密度の土粒子、暗い色は粒子の水または空気存在する間隙であり、三種類それぞれ明確に異なる事が示された。a)低飽和側供試体は強いサクシジョンの影響により、細粒分の集合構造体が形成されている。この強いサクシジョンの影響により、細粒分粒子は大粒子に密着して大粒子同士の点接触を支持する働きをしている。c)高飽和側供試体はほとんどサクシジョンがないため、細粒分粒子は大粒子の間の間隙に分散して配置され、低飽和側供試体に見られた細粒分粒子からなる集合構造体は見られない。b)最適飽和度供試体は a)と c)の中間的な構造を示しており、大粒子同士の接点間の空隙に細粒分が拡がって配置されるが、締固めによって多くの集合構造体が形成されている。これらの事から、締固め時の飽和度が締め固めやすさや、強度変形特性、透水特性等の諸特性に大きい影響を与えている事を示唆している。

2.3.2 締め固めた土の鉛直密度分布とその評価

岡野、大谷(2012)は、最適含水状態の山砂について、ランマーの落下高さの異なる二種類の締固め方法(Case-1, Case-2)を使って締固めエネルギーを突固め回数別に段階的に変化させて 1 層で作製した供試体の測定した空隙率(すなわち空隙率 $n = e/(1+e)$)と締固めエネルギーの関係を整理している(図 2-3-3)。その結果、同一の締固めエネルギーであっても異なる締固め方法の両者の空隙率の収束の仕方は異なることが確認されている。また、この両者の異なる空隙率の現れ方について μ フォーカス X 線 CT スキャナを用いて視覚的に空隙分布を解析し(図 2-3-4)、締固めエネルギーレベルが小さい場合は空隙が全体的に分散しているのに対し、締固めエネルギーが大きい場合は空隙が少なくなる事に加え、供試体下部に空隙が残ることを確認し、鉛直方向に異なる空隙分布が生じる事が示されている(図 2-3-5)。さらに、室内で突固め法により締め固めた供試体の乾燥密度は鉛直深度方向に非一様となる可能性が示唆されている。

益村ら(1998)は、コンクリート製の大型土槽(全長 20m、幅 3m、深さ 0.95m)内に砂質土を撒き出し、30t 級振動ローラーを用いた試験転圧施工を実施している。締め固めた地盤の鉛直深度方向の乾燥密度を砂置換法、RI 法により測定し、締固め機械による転圧効果と深度方向の乾燥密度に及ぼす含水比と細粒分の影響について考察している。その結果、上層・中層・下層部の鉛直深度方向の密度分布に違いが確認され、現場締固め土には明確な密度勾配が存在する事、上中下層それぞれの密度分布の差には、含水比や細粒分含有率が影響している可能性がある事を説明している(図 2-3-6、図 2-3-7)。なお、当論文中には記述されていなかったが、図 2-3-7 中の上下の乾燥密度分布が

ら、含水比はほぼ一定である事が確認される。すなわち、上下の乾燥密度分布に伴って、締固め土中に上下の飽和度分布が生じている事が示唆されている。また、この締め固めた盛土地盤内に鉛直深度方向の密度分布が生じる傾向は、土木研究所共同研究報告書(2014)による大型土槽実験で多様な締固め機械を用いた調べた結果や、渡邊(2019)によるフランスの鉄道盛土建設時の試験施工後の調査結果(図 2-3-8)と整合している。

2.3.3 締固め機械による土の締固め特性に関する研究

土質工学会(1991)は、現場において締固め機械が、土の締め固めに与える影響する要因として、境界問題(接触問題)を指摘している。これは、締固め機械は地盤上を走行して締め固めをする事から、表面の密度・強度が低下する現象を指しており、軟らかい締固め地盤に対して絶対剛性を有する振動ローラー等により、締固め地盤は極限支持力以上の荷重が載荷されて塑性化してしまう。これはローラー接触面直下の土がせん断破壊し、せん断面より上では締め固まらない事を説明している。締固め地盤表面が剛な振動ローラーと接触することにより、極限支持力、接地圧、ローラーのスリップ等が締固めに影響を与える要因である事を指摘しているが、定性的な説明に留まっている。

建山ら(1985)は、振動ローラーによる土の締め固めと突固め法による室内締固め試験の比較を行っている。振動ローラーによる締め固めの動線圧に着目し、これが突固め法による締固めエネルギー(ランマー重量と落下高さ)と相関性がある事を確認し、室内締固め試験から現場締固め地盤の乾燥密度を推定する方法を提案している。この時に建山、畠(1989)は、室内締固め土は現場締固め土に比べて、モールドによる拘束や突固め時の底板からの反射波等の存在が、両者の違いに現れている可能性がある事を指摘している。

藤井、横田(1989)は、振動ローラーで締め固めた礫質地盤の計測データに基づき、有限要素法による数値モデルを作成している。その結果、振動ローラーの起振力を静的接地圧に置き換えることで、現地締固め挙動をある程度推定可能である事を示している。

平川(2000)は、剛なローラーを用いて平面ひずみ条件での模型砂地盤地表面に転圧を加える事により、地盤の締固め特性について調べており、実験と解析によってそのメカニズムの検討を行っている。実験の中で、転圧回数が増加すると生じていた地表面の沈下は徐々に収束する傾向を示し、ローラーと地盤の接触面積が減少している事を確認している、また、転圧回数が増加すると応力分散を示す事から転圧による締固め効果は地表面付近に限定される事、地表面付近に剛性の高い層が形成されている事を述べている。一方で、地盤中に色砂層を配置して転圧前後の地盤の変形状態を観察した結果、転圧により地表面に近い領域での地盤変形は著しく、ローラー転圧時に地表面付近の土粒子がローラー前後方向に回転しながら水平移動する粒状体挙動が観察されている(図 2-3-9)。この挙動について、模型砂地盤は粒状体の集合したマスの非線形挙動を示しており、実験値と解析による一様等方弾性解との一致は、地盤材料の強度変形特性に影響を与える様々な要因が互いに打ち消された結果と考察している。

以上より、土の締固め状態は、現場の締固め機械や室内突固め法等の方法に依らず、乾燥密度というパラメータを介してある程度一定に評価する事ができる事がわかっている。ただし、その一方で締固め機械と地盤の境界問題に起因する締め固めた地盤表面付近の限定的なせん断破壊領域の存在が示唆されている。

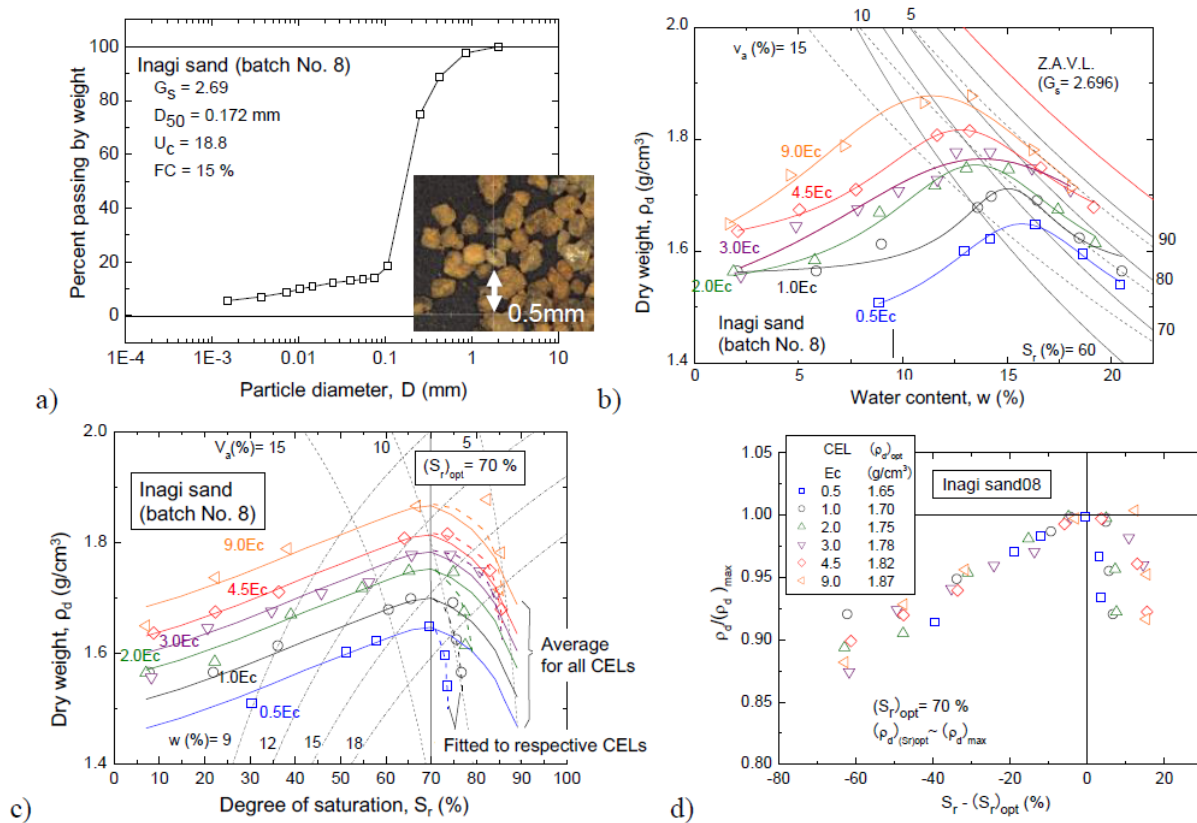


図 2-3-1 稲城砂の締め固め特性, a) 粒径加積曲線, b) 乾燥密度～含水比関係, c) 乾燥密度～飽和度関係
 d) $\rho_d / \rho_{dmax} \sim S_r / (S_r)_{opt}$ 関係、(Tatsuoka, 2015)

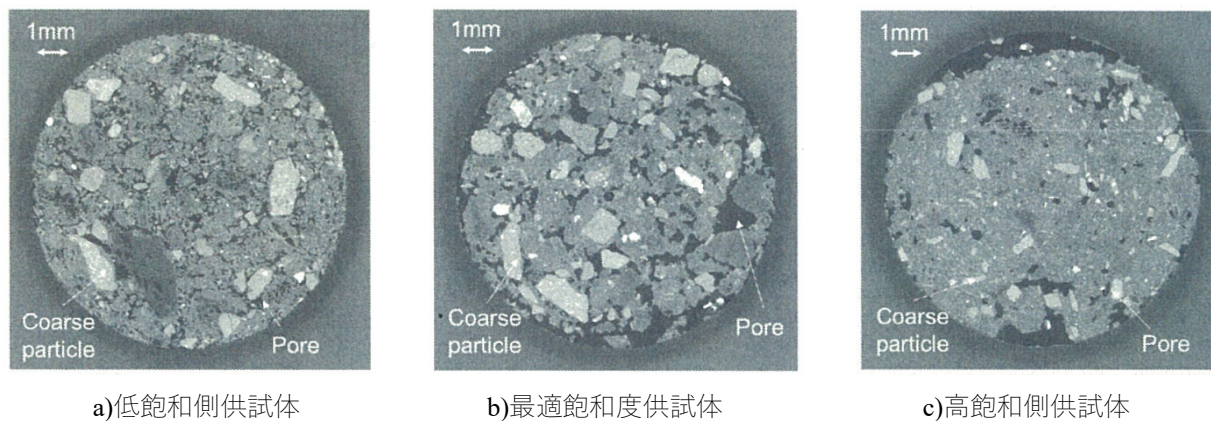


図 2-3-2 締め固め時飽和度の異なる 3 種類の供試体の X 線 CT スキャナによる水平断面写真

Matsumura, Tatsuoka (2018)

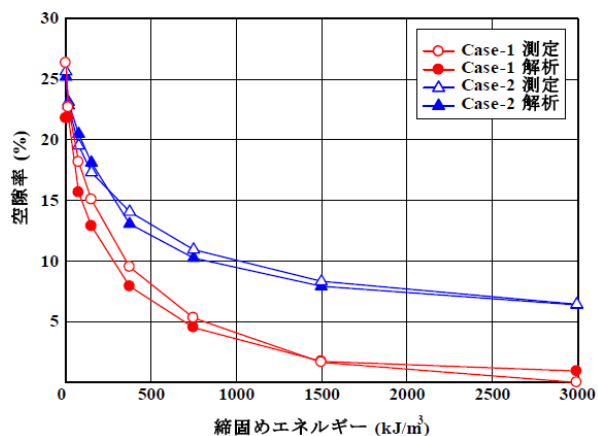


図 2-3-3 締固め方法の異なる供試体の空隙率と
締固めエネルギーの関係

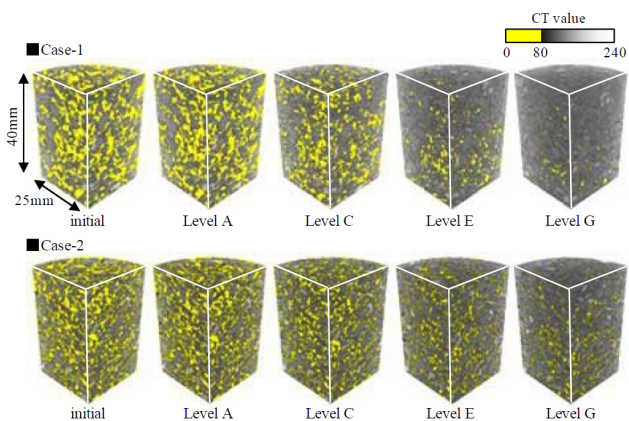


図 2-3-4 μ フォーカス X 線 CT スキャナで示した
空間的孔隙分布

(岡野、大谷, 2012)

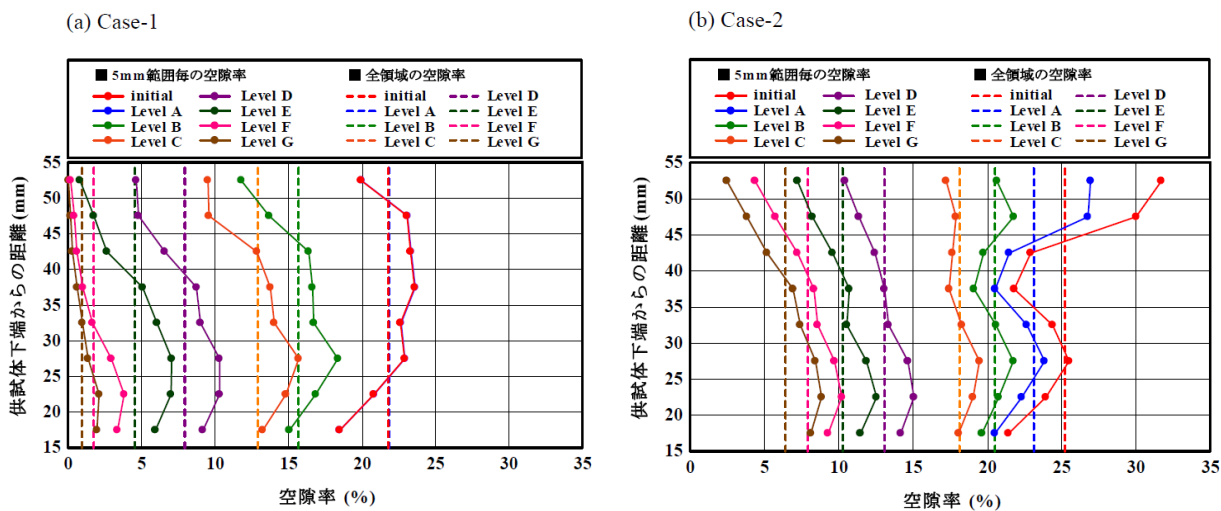


図 2-3-5 鉛直方向の空隙率のばらつき

(岡野、大谷, 2012)

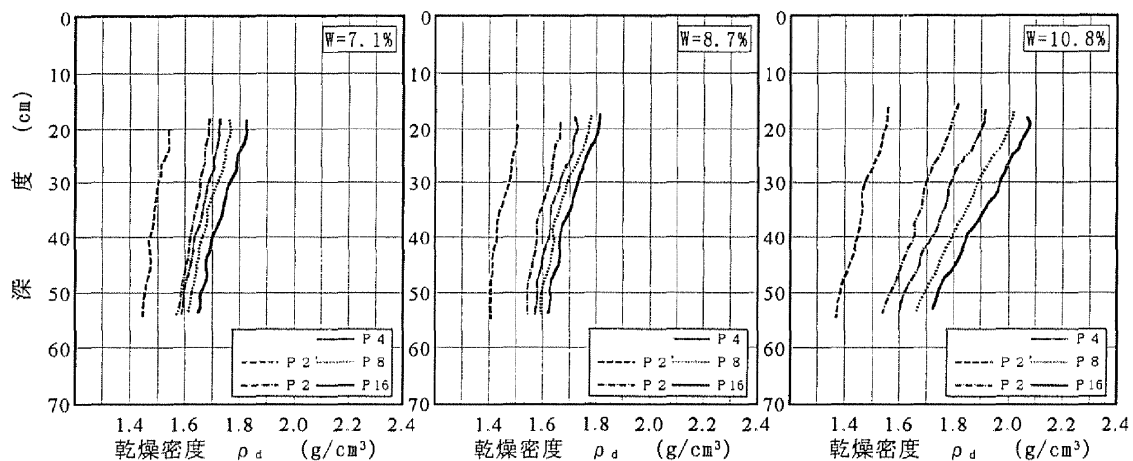


図 2-3-6 含水比別の転圧土槽内の乾燥密度分布
(益村ら, 1998)

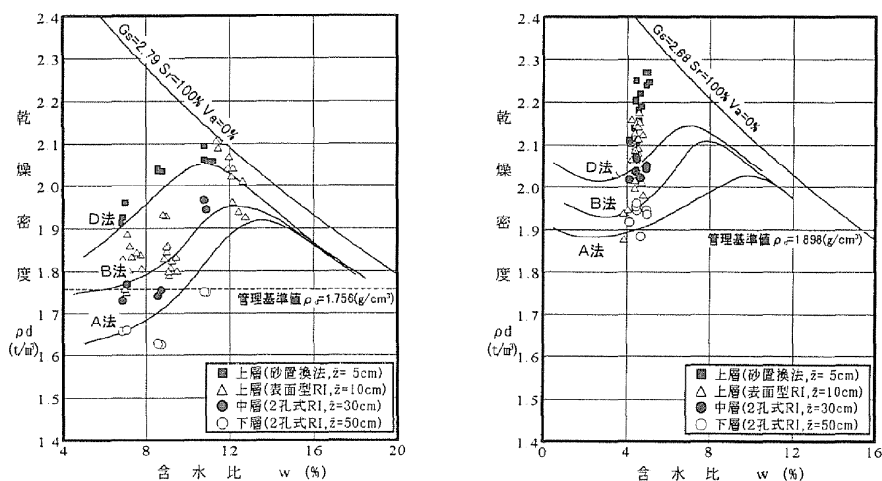


図 2-3-7 2 種類の砂質土の上中下層別の含水比～乾燥密度分布
(益村ら, 1998)

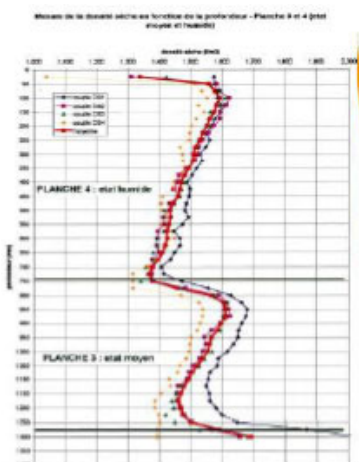


図 2-3-8 フランス新設鉄道盛土建設時の試験施工による盛土締固め後の鉛直密度分布例
(渡邊, 2019)

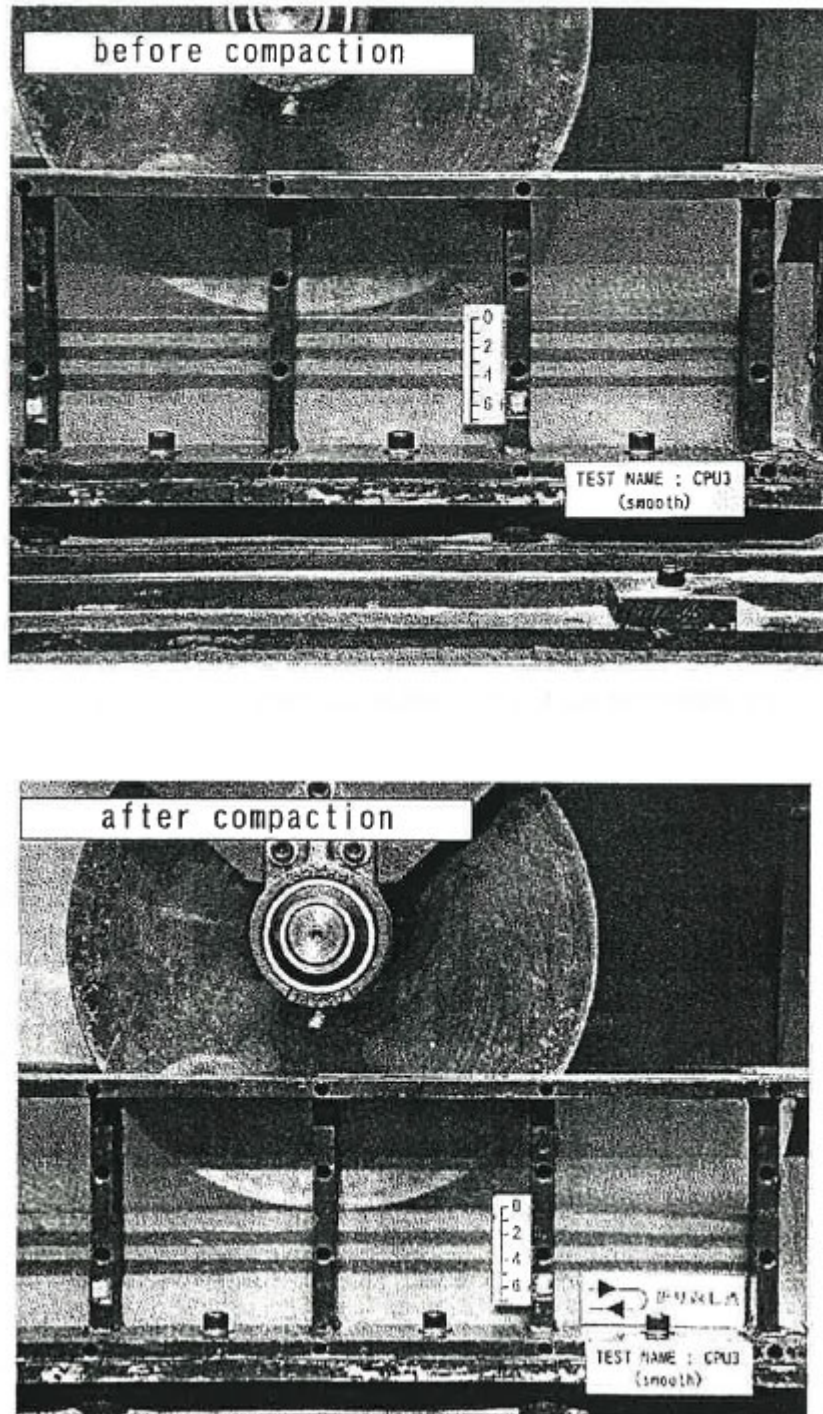


図 2-3-9 転圧前後の地表面の色砂の移動
(平川, 2000)

2.4 締め固めた土の強度変形特性に関する研究

2.4.1 室内締め固め供試体の強度変形特性に関する研究

龍岡ら(2010)は、砂質土から碎石や円礫を含む礫質土まで多様な地盤材料に対して、室内突固め法で締め固めた供試体の作製条件別に三軸圧縮試験、平面ひずみ圧縮試験を実施し、せん断強度と締め固め度、相対密度との相関について議論している(図 2-4-1、図 2-4-2)。その結果、乾燥密度と内部摩擦角 ϕ_0 との相関性が良い事を示し(図 2-4-3)、締め固めエネルギー $1.0E_c$ (標準 Proctor)、 $4.5E_c$ (修正 Proctor)に基づく従来の締め固め度管理が合理的である事について、相対密度を用いる方法と比較しながら考察している。

平川ら(2008)は、6種類の砂礫材料に対して、室内で突固めて締め固めた供試体の作製条件別に三軸圧縮試験、平面ひずみ圧縮試験を実施し、締め固め度($\rho_d/\rho_{dmax} \times 100\%$)や含水比等の締め固め時の供試体条件が強度変形特性に及ぼす影響を定量的に検討している(図 2-4-4)。その結果、締め固め度が大きくなることにより、強度変形特性は向上することを確認している。さらに、排水条件の違いにより最大せん断強度が変化するが、これも締め固め度条件により変化割合が異なる事を、締め固め状態の違いも踏まえて考察している。また、同一材料に対して異なる含水比で締め固めた場合でも、最大偏差応力は締め固め後の乾燥密度が大きくなるとある程度一義的な上昇傾向が見られる事を確認している(図 2-4-5)。含水比が最適含水比より湿潤側に位置する場合は、同一の乾燥密度であっても応力～ひずみ関係における剛性は著しく低下し、クリープ載荷時の鉛直ひずみ、体積変化時の収縮量も増加する事が示され(図 2-4-6)、実験結果に基づいた施工管理手法について課題を挙げている。

須藤ら(2013)は、締め固め時の締め固め度や飽和度条件が飽和砂質土の三軸圧縮試験の強度変形特性に与える影響を系統的に調べる事を目的に、締め固め度と飽和度をパラメーターとした様々な供試体条件(図 2-4-7)について、単調載荷と異なる偏差応力時における2時間の持続載荷(クリープ載荷)を行っている。その結果、実施した全ての飽和度の範囲で締め固め度が向上すると内部摩擦角が向上するが、締め固め度が向上しても飽和度が大きくなると割線剛性は著しく低下する事、また締め固め度が向上しても飽和度が大きくなるとクリープ変形量 Δe_a は増加することを明らかにしている(図 2-4-8)。この実験結果によって、締め固め度の増加による正の影響と飽和度の増加による負の影響を定量化し、割線剛性とクリープ変形量について、締め固め度と飽和度を二変数とする変数分離関数で表現している。

三浦ら(2011)は、含水比と締め固めエネルギーの異なる条件で締め固めて作製した飽和砂質シルト供試体について、圧密非排水三軸圧縮試験、ベンダーエレメント試験および透水試験を実施し、締め固め特性と強度、せん断剛性率と透水性の関係を調べている。その結果、せん断剛性率～締め固め度関係と、透水係数～締め固め度関係(図 2-4-9)から締め固め曲線と力学特性の関係を整理し、締め固め時の土の含水条件が強度、剛性、透水性への影響を与えている事を示(図 2-4-10)、同一の締め固め度条件においても含水比の違いにより締め固め土内部の間隙構造が異なる事を示唆している。横浜ら(2012)は、得られたせん断剛性、透水性に基づいて含水比の違いによる締め固めた土の土粒子配列変化を概念図に整理している(図 2-4-11)。

2.4.2 現場で締め固めた盛土地盤の強度変形特性に関する研究

Tatsuoka(2015)、Tatsuoka, Correia (2018)は、従来の締め固め管理に用いる強度・剛性に関するパラメーターを、含水比で整理するより飽和度で整理する方が適切に土質力学で説明する事が出来ることを示し、合理的な施工管理が可能となる事を説明している。その一部として、根本ら(1994)の実大締め固め試験のデータを解析して、現場で締め固めた土の状態での強度・剛性は (w, ρ_d) ではなく、 (S_r, ρ_d) の関数であることを示している。龍岡ら(2013)にも詳しく説明されているが、この実験は長さ24m、幅3.5m、深さ1.0mのコンクリートピット内に砂質ロームを厚さ60cmの底部層の上に異なる含水比の厚さ30cmの試験層を撒き出し、様々な形式の施工機械を用いて締め固めている。所定の締め固め機械を $N=2, 4, 8$, および16回通過後に締め固め層で (w, ρ_d) を砂置換法で求めるとともに現場CBRを測定している。図2-4-12には室内締め固め試験の結果とともに振動タイラローラ(15.6t)を用いた代表的な締め固め試験の結果を示している。また、東京理科大学地盤工学研究室による室内締め固め試験($1.0E_c$, $4.5E_c$)の結果も示している。実大締め固め試験による締め固め曲線も室内締め固め試験と同様に、機械通過回数 N の増加とともに左上方へ移動している。また、 $N>4$ で締め固めエネルギーは $1.0E_c$ 相当以上、 $N=16$ において $4.5E_c$ 以上である。図2-4-13 a)には $N=16$ 後に測定したCBR値～乾燥密度関係を示している。締め固め時の含水比をパラメーターとして整理している。乾燥密度の増加および含水比の減少に伴ってCBR値は増加する傾向がある。しかし、含水比が9%程度より大きくなると、含水比一定条件では乾燥密度の増加に伴いCBR値は低下し始める。これは含水比が一定で乾燥密度が増加すると飽和度が大きくなるためである。その結果、このCBRの測定値を乾燥密度と含水比を関数で表現しようとすると非常に複雑になる。これに対して、図2-4-13 b)に締め固め時の飽和度をパラメーターにしたCBR～飽和度関係を示している。飽和度一定条件では乾燥密度の増加に対してCBR値は常に増加しており、乾燥密度一定条件では飽和度が増加するとCBR値は常に規則的に減少する。さらに、異なる飽和度でのCBR～乾燥密度関係は相似形である。これらのことは、CBR値を乾燥密度と飽和度の関数で表現できることを示唆している。含水比をパラメーターとした整理から飽和度をパラメーターにした整理に変えたことで複雑さを解消することができたが、これは含水比(=水の質量/土粒子の質量×100%)には水の量は含まれるが、空気の量が含まれない事が理由としている。一方、飽和度(=水の体積/水と空気の体積×100%)には水と空気の量が含まれている。飽和度が最適飽和度 $(S_{r,opt})$ よりも低くなるとサクシオンが大きくなるためにその結果で締め固まりにくくなることは先にも述べたが、同じ理由で飽和度が低下してサクシオンが増加すると見かけの粘着力が増加して同じ乾燥密度でもCBR値は大きくなる。また、飽和度が最適飽和度より高くなるとサクシオンの低下によって見かけの粘着力は減少するため、同じ乾燥密度でもCBR値は減少する。以上のことから、乾燥密度とともに飽和度を変数とした関数がCBR値を適切に表現できることが分かる。図2-4-13 b)中の曲線群は、CBR値を乾燥密度の関数 g_{CBR} と飽和度の関数 f_{CBR} の積とした経験式2-4-1、式2-4-2によるものである。

$$CBR = f_{CBR}(S_r) \cdot g_{CBR}(\rho_d) \quad (2-4-1)$$

$$g_{CBR}(\rho_d) = (\rho_d/\rho_w - a)^b \quad (2-4-2)$$

ここで、土質材料により異なる係数は $a=0.4$ と $b=9.5$ であり、データ全体のフィッティングで得たものである。

図2-4-14は、飽和度の関数 $f_{CBR}(S_r)$ ～飽和度 S_r 関係である。これは、飽和度がそれぞれの選択した値を中心とした5%あるいは10%の幅の内にある全データのCBR～乾燥密度関係をプロットし、それに飽和度の関数 $f_{CBR}(S_r)$ を未定係数として式2-4-3のようにフィッティングして得ている。

$$f_{CBR}(S_r) = CBR/(\rho_d/\rho_w - a)^b \quad (2-4-3)$$

この関係は、同じ乾燥密度における飽和度の増加に伴い CBR 値は大きく低下することを示している。図 2-4-12 に式 2-4-3 による CBR 値の等高線群を示している。その等高線は、CBR 値が低含水比領域において乾燥密度の増加とともに単調に増加し得る事、高含水比領域では乾燥密度の増加とともに飽和度も増加して単調には増加しない事を示している。要するに、現場で締め固めた土においても強度特性には締め固め度の増加による正の影響と飽和度の増加による負の影響が生じており、現場で強度特性を求めるには締め固めた(w, ρ_d)状態を CBR 値だけでは推定できず、締め固め時の飽和度の測定値も必要であることが説明されている。

龍岡、橋本(2020)は、土木研究所共同研究報告書(2014) の実大締め固め試験のデータを解析し、現場で締め固めた土の物性試験で得た小型 FWD 試験による地盤反力係数 K_{30} 相当値のデータから地盤の剛性指標を締め固め管理に活用する方法を検討している。10t 級締め固め機械から小型のプレートやランマー等で締め固めた山砂の締め固め条件($\rho_d \sim w$ 関係)は図 2-4-15 内に、標準プロクター($1.0E_c$)における締め固め状態とそのフィッティング曲線、別途推定した異なる締め固めエネルギーレベルとともに示している。図 2-4-16 には、含水比(上図)または飽和度(下図)をパラメーターとした地盤反力係数 $K_{30} \sim$ 乾燥密度関係を示しているが、上述した CBR 値と同様に、含水量の増加に伴い地盤反力係数は低下する事、乾燥密度の増加に伴う変化は飽和度をパラメーターとして整理する方が規則的である事が確認され、締め固め機種や機械通過回数に依存しない事が示されている。さらに、乾燥密度と飽和度を分離した関数を仮定して、式 2-4-4、式 2-4-5 のように地盤反力係数を同定する式を提案している。

$$K_{30} = f_{K30}(S_r) \cdot g_{K30}(\rho_d) \quad (2-4-4)$$

$$g_{K30}(\rho_d) = (\rho_d / \rho_w - a)^b \quad (2-4-5)$$

ここで、土質材料により異なる係数は $a=0.4$ と $b=9.5$ であり、データ全体のフィッティングで得ている。

また、図 2-4-17 に示すように式 2-4-6 で定めた $f_{K30}(S_r) \sim S_r$ 関係が締め固め機械や機械通過回数に依存しない事を示し、飽和度の影響を考慮した地盤反力係数～乾燥密度関係を推定する事で、現場施工管理に用いられる現場剛性指標を活用した締め固め管理方法を提案している。さらに吉田ら(2020)は、この提案に基づいて実現場の施工管理に剛性指標を設けて適用検討をしている。

$$f_{K30}(S_r) = K_{30} / (\rho_d / \rho_w - a)^b \quad (2-4-6)$$

藤井、渡辺(1985)は、締め固めた礫混じり土の乾燥密度と沈下量、コーン貫入抵抗の関係を、実験値と数値解析を比較して検討している。その中で、コーン貫入抵抗値の転圧回数による推移を整理しているが、転圧前は一定の低い貫入抵抗値を示しているのに対し、転圧回数の増加とともに、鉛直深度方向に貫入抵抗値の分布が生じる事が確認されており、(図 2-4-18)。これは乾燥密度と比例関係があることが説明されている。また、貫入抵抗が大きくなりやすいのは地表面から 10cm 程度以深であり、地表面から 10cm 程度は前述したように、振動ローラーの境界問題による、現場締め固め特有のせん断破壊領域の影響が現れている可能性がある。

益村ら(1999)は、大型振動ローラーを用いて締め固めた道路盛土から鉛直深度方向に密度分布が生じている土のブロックサンプリング試料を採取し、乱れの少ない現場転圧盛土の供試体として三軸圧縮試験により強度特性を調べている。一層の仕上がり厚が 30cm の盛土からは 30cm×30cm×30cm のブロックサンプルを、一層の仕上がり厚が

60cmの盛土からは上層及び下層にそれぞれ分けて 30cm×30cm×30cm のブロックサンプルを採取している(図 2-4-19)。ブロックサンプルから軸方向を鉛直方向と水平方向に分けて $\phi 10\text{cm}$ 、 $h20\text{cm}$ に切り出した供試体(鉛直:BVL、水平:BHL)を、それぞれ所定の拘束圧で非圧密非排水条件にて圧縮している。その結果、転圧した盛土地盤から採取した供試体のせん断強度は、乾燥密度の増加とともに向上する事、つまり乾燥密度の大きい上層の方がせん断強度は大きい事を確認している。また、BVL 供試体と BHL 供試体のせん断強度は異なり、若干の強度異方性がある事を指摘している(図 2-4-20、図 2-4-21)。以上のような、締固め機械で締め固めた盛土から採取した供試体について、その強度変形特性を調べた例はまだ少ない。

2.4.3 異なる締固め方法の影響が強度変形特性に与える影響に関する研究

Seed, Chan(1959)は、シルト質粘土を材料に異なる締固め方法で供試体を作製し、三軸圧縮試験によって含水比別に供試体の強度特性を評価している。静的締固め(Static compaction)とこね混ぜによる締固め(Kneading compaction)で作製した同一乾燥密度供試体の非圧密非排水三軸圧縮試験による軸差応力～軸ひずみ関係を比較した結果、最適含水比より乾燥側では同一乾燥密度の供試体において Static compaction と Kneading compaction の軸ひずみ 5%時の軸差応力(Static:4.8kg/cm²、Kneading:4.6kg/cm²)が類似している。その一方で、最適含水比より湿潤側では同一乾燥密度の供試体において Static compaction と Kneading compaction の軸ひずみ 5%時の軸差応力(Static:3.4kg/cm²、Kneading:0.9kg/cm²)に大きな差があり、Kneading compaction が著しく低下する事が示されている(図 2-4-22)。図 2-4-23 には静的締固め方法(Static compaction)、振動締固め(Vibratory compaction)、突固め法による締固め(Impact compaction)について、それぞれの方法で作製した供試体の軸ひずみ 5%時の軸差応力をこね混ぜによる締固め(Kneading compaction)における軸ひずみ 5%時の軸差応力で除した応力比～含水比関係を示している。その結果、最適含水比より乾燥側の含水比の領域において、締固め方法の違いが応力比に与える影響が小さい一方で、湿潤側では締固め方法の違いが応力比に与える影響が大きい事が明らかにされている。ここで、図 2-4-22 の軸差応力～軸ひずみ関係において、軸ひずみ 5%時の軸差応力は Static compaction(乾燥側:4.8kg/cm²、湿潤側:3.4kg/cm²)、Kneading compaction(乾燥側:4.6kg/cm²、湿潤側:0.9kg/cm²)ともに、乾燥側が大きい事が確認されている事も確認される。乾燥側では軸ひずみ 5%で両供試体がピーク強度を迎えるが、湿潤側のピーク強度は軸ひずみ 20%以降であり、これは同じ締固め方法でも乾燥側と湿潤側で変形特性が大きく異なる事を示唆している。

鬼塚ら(1979, 1983)は、静的締固め(圧縮装置による)及び動的締固め(エネルギーを規定したランマーによる突固め)の異なる方法によって作製した試料について、締固め軸方向に並行及び水平になるように切出して供試体を作製し、含水比及び乾燥密度をパラメーターに強度特性を考察している。走査顕微鏡による微視的観察、圧密試験、一面せん断試験、三軸圧縮試験を実施した結果、突固め法で作製した供試体は比較的ランダムな構造、静的締固め供試体は比較的配向した構造であると結論付けているものの、供試体の強度異方性については土の粒度分布により異なる事も述べており、締固め方法や土質の違いによる差異の詳細は引き続きの検討が必要であることを示唆している。

川尻ら(2011)は、細粒分質礫質砂について、締固め時の含水比や締固め方法が強度変形特性に与える影響を、圧密非排水三軸圧縮試験とベンダーエレメント試験を通して調べている。その結果、同一の含水比および乾燥密度において、油圧ジャッキを用いて静的に締め固めた供試体は、全断面ピストンを打撃により動的に締め固めた供試体よりも最大軸差応力のはるかに大きい事を確認している(図 2-4-23)。また、静的に締め固めた供試体はせん断中の過剰間隙水圧が負値に転じており、膨張的な体積変化挙動を示す過圧密供試体のような土粒子の配向性が高い強度を示す理由であることを説明するとともに、静的締固めの締固めエネルギーが動的締固め締固めエネルギーに比べて実質的に大きい事を示唆している。さらに、ベンダーエレメント試験により得られる水平方向せん断弾性係数 G_{vh} 及び鉛直方向せん断弾性係数 G_{hh} の比である G_{hh}/G_{vh} を異方性の程度を表す指標とし、圧密非排水三軸圧縮試験で得ら

れた最大軸差応力との相関がある事を確認しており、前述した締固めエネルギーの大小と土構造の異方性(配向性)が相関している事を示唆している(図 2-4-24)。Kawajiri et al. (2017)は、上記の結果に加えて静的締固め供試体と動的締固め供試体のせん断弾性係数の鉛直深度方向分布を調べ、動的締固め供試体は下層の方がせん断弾性係数が大きくなる傾向を示し、供試体の非一様性も両供試体の強度変形特性の違いに関連している可能性がある事を述べている(図 2-4-25)。

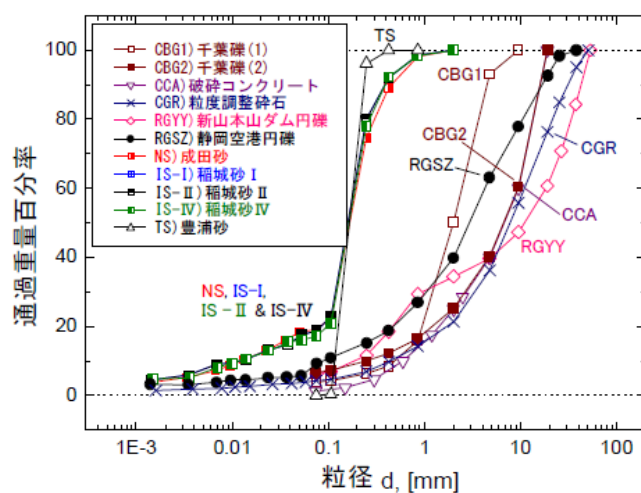


図 2-4-1 多様な盛土材料の粒径加積曲線 (龍岡ら, 2010)

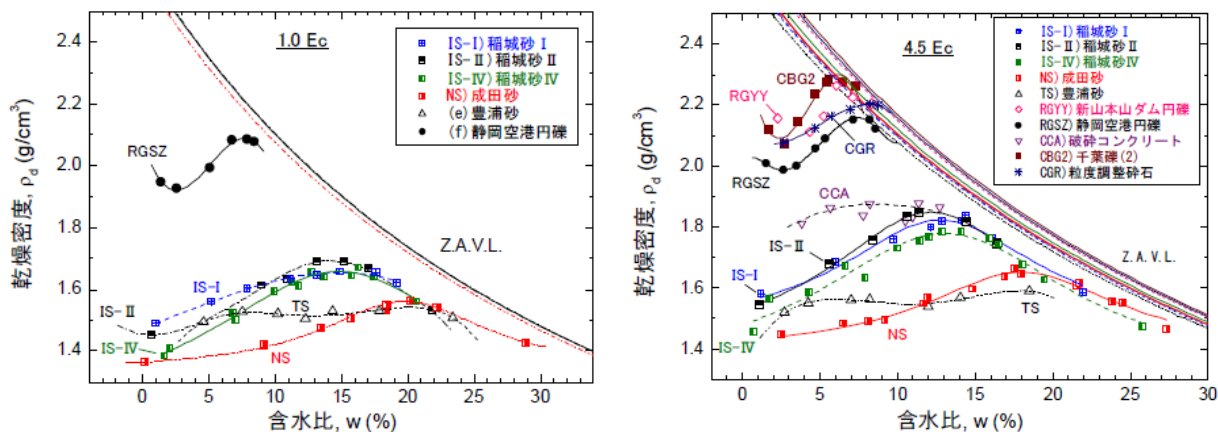


図 2-4-2 多様な盛土材料の締固め曲線(左:1.0Ec, 右:4.5Ec) (龍岡ら, 2010)

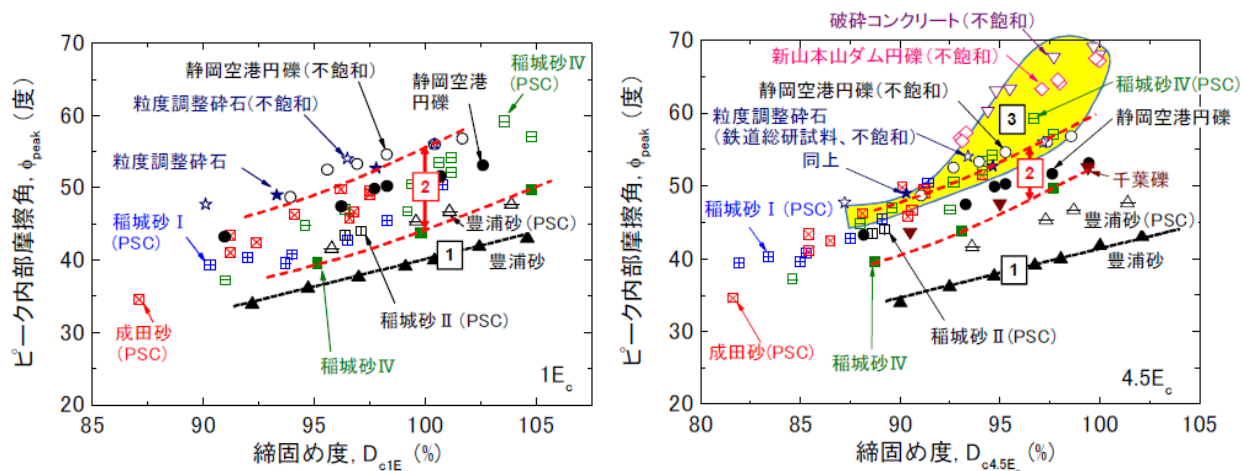


図 2-4-3 多様な盛土材料の内部摩擦角～締固め度関係 (左:1.0Ec, 右:4.5Ec) (龍岡ら, 2010)

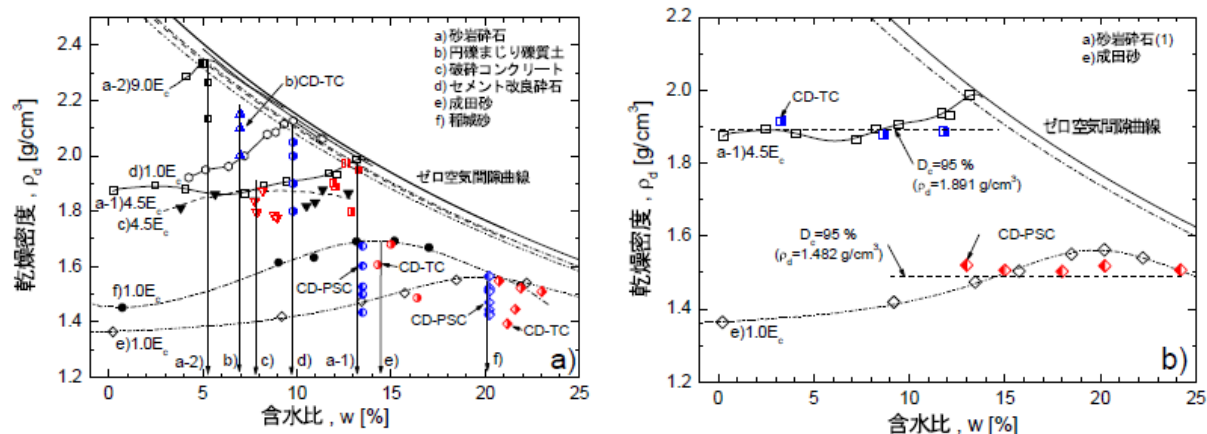


図 2-4-4 締固め曲線と供試体条件(左: D_c の影響検討, 右: w の影響検討) (平川ら, 2008)

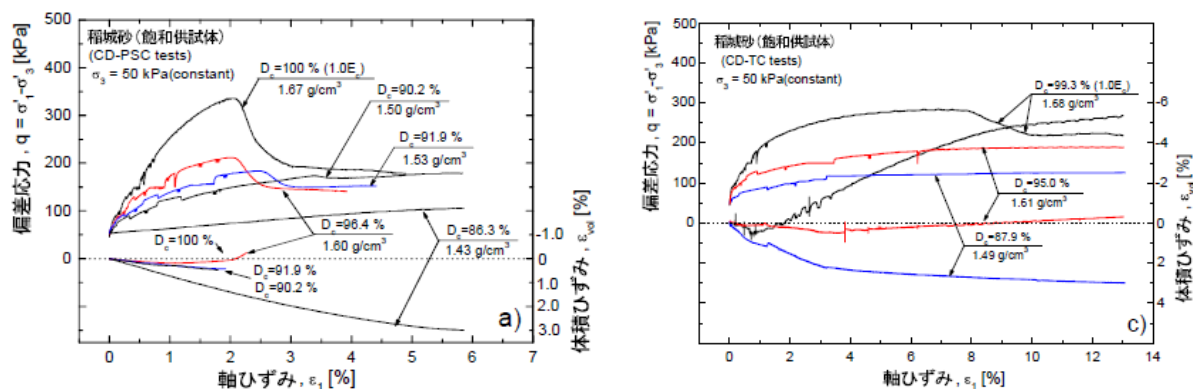


図 2-4-5 締固め度別供試体の応力-軸ひずみ関係(左: 平面ひずみ圧縮試験, 右: 三軸圧縮試験) (平川ら, 2008)

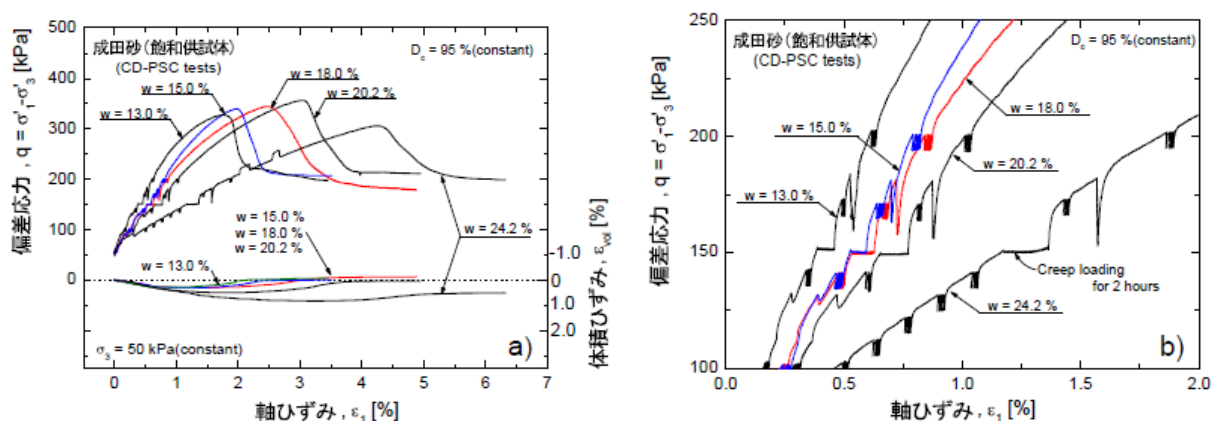


図 2-4-6 含水比別供試体の応力-軸ひずみ関係(平面ひずみ圧縮試験) (左: 外部変位計, 右: LDT 測定) (平川ら, 2008)

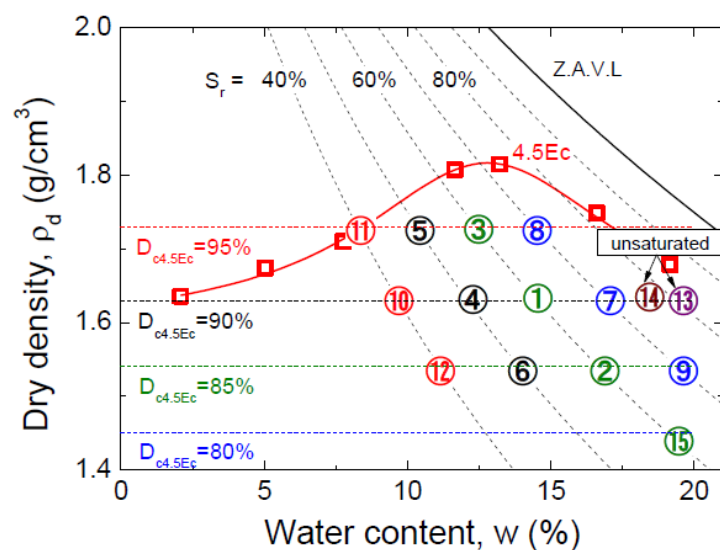


図 2-4-7 締固め曲線と供試体条件 (須藤ら, 2013)

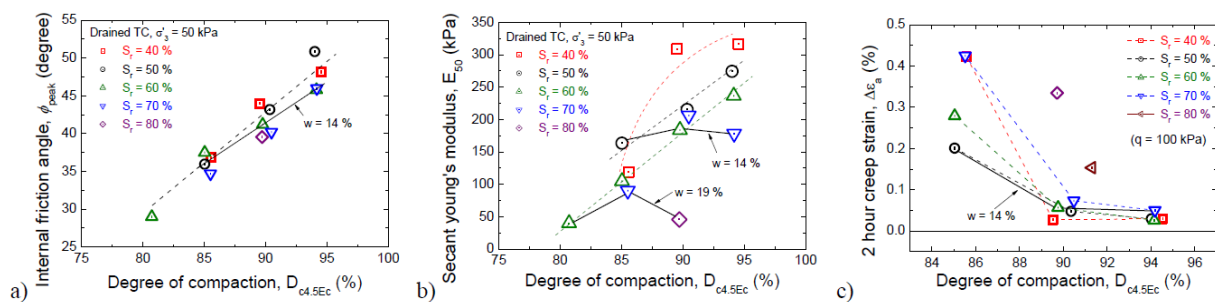


図 2-4-8 同一飽和度での締固め度と強度変形特性の関係(a:内部摩擦角, b:割線剛性, c:クリープ変形量) (須藤ら, 2013)

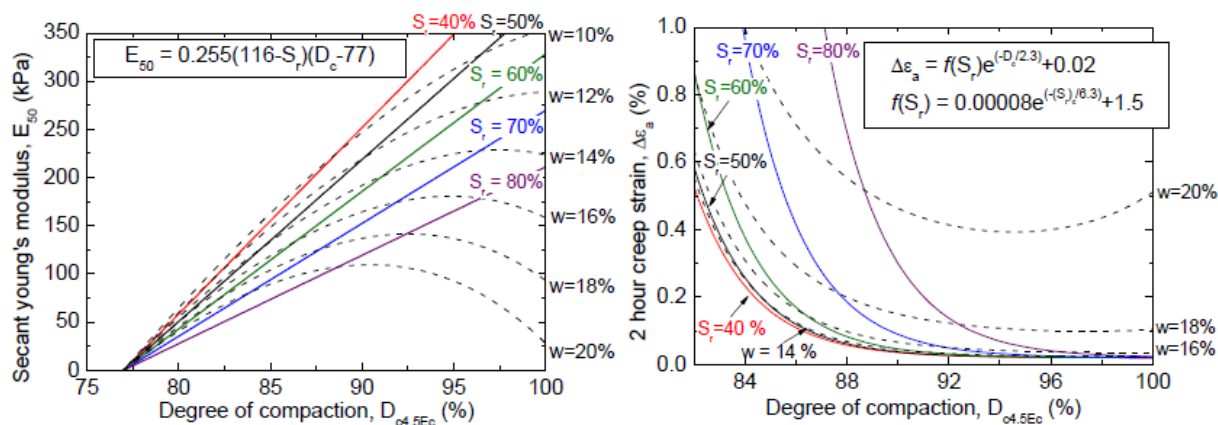


図 2-4-9 同一飽和度での締固め度と式で表現した強度変形特性の関係(左:割線剛性、右:クリープ変形量) (須藤ら, 2013)

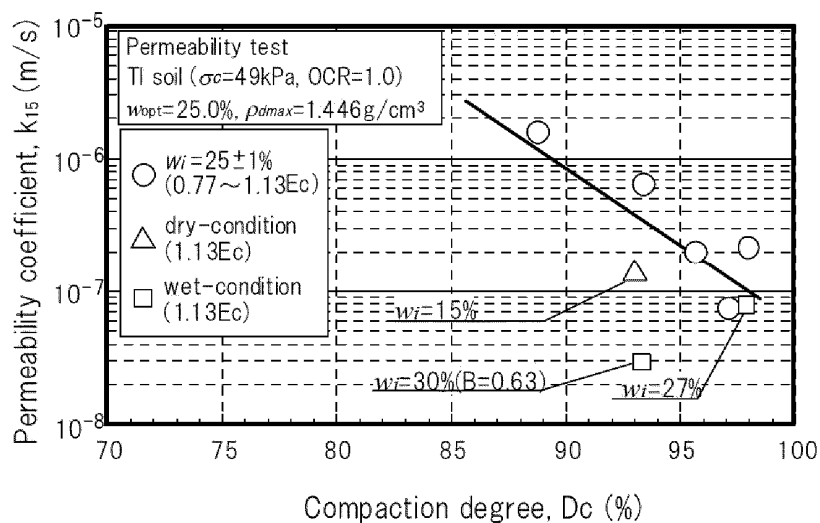


図 2-4-9 透水係数～締固め度関係 (三浦ら, 2011)

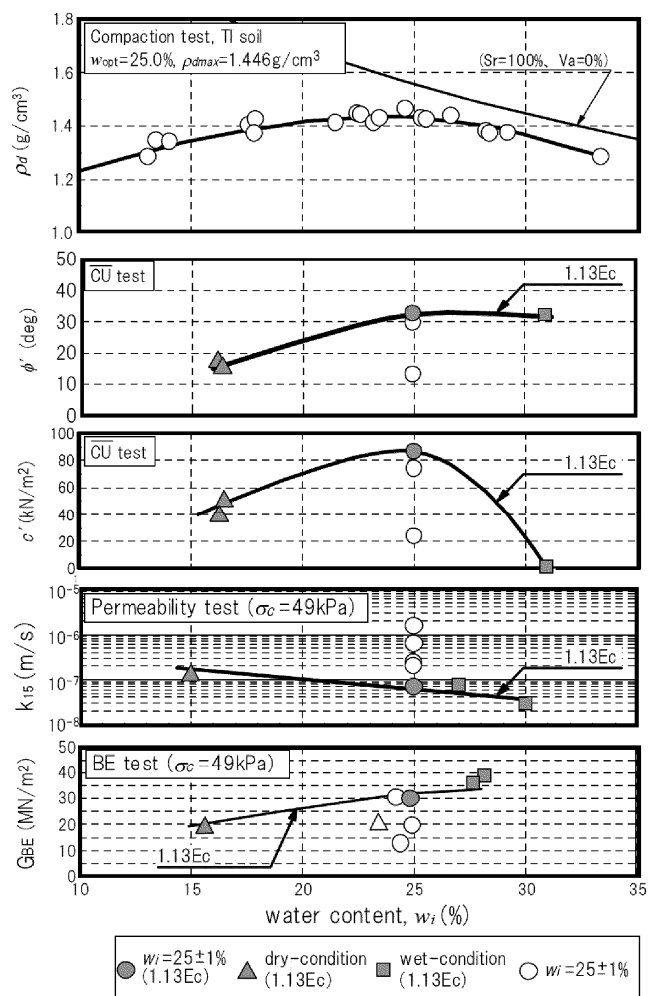


図 2-4-10 締固め曲線と力学特性の関係(三浦ら, 2011)

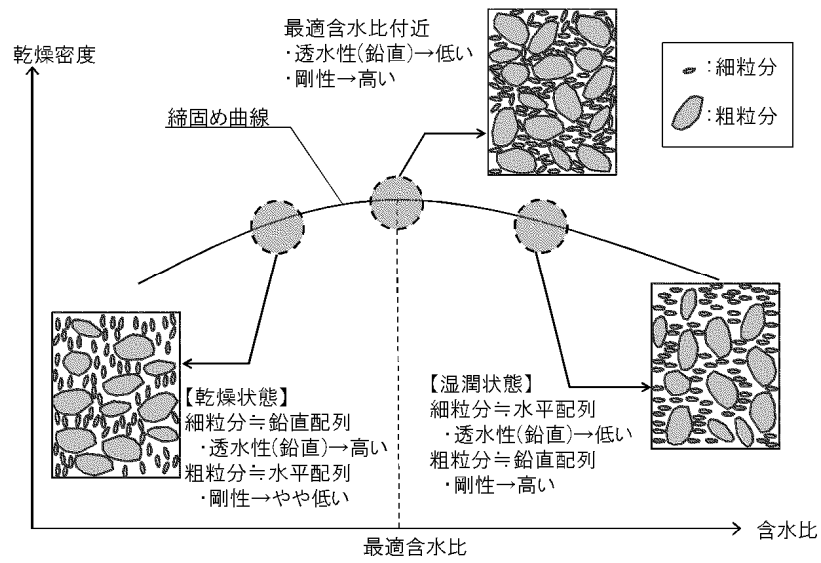


図 2-4-11 締固め時含水比別の土粒子配列変化 (横浜ら, 2012)

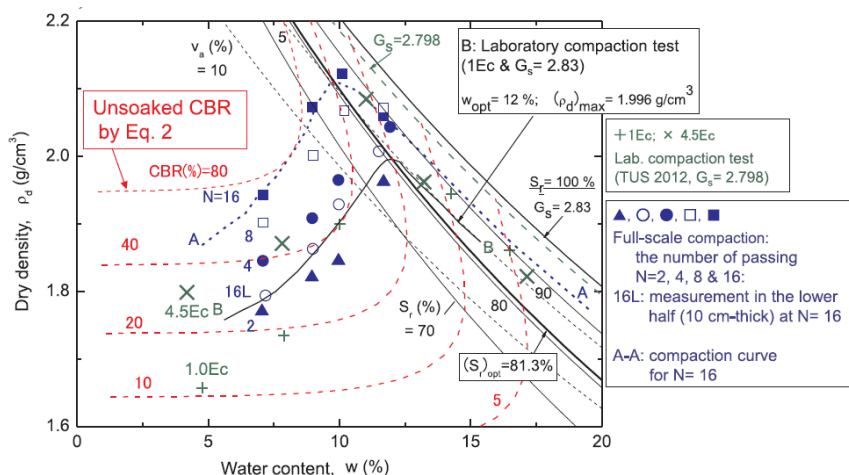


図 2-4-12 実大締固め試験と室内試験による締固め曲線 (Tatsuoka, Correia, 2018)

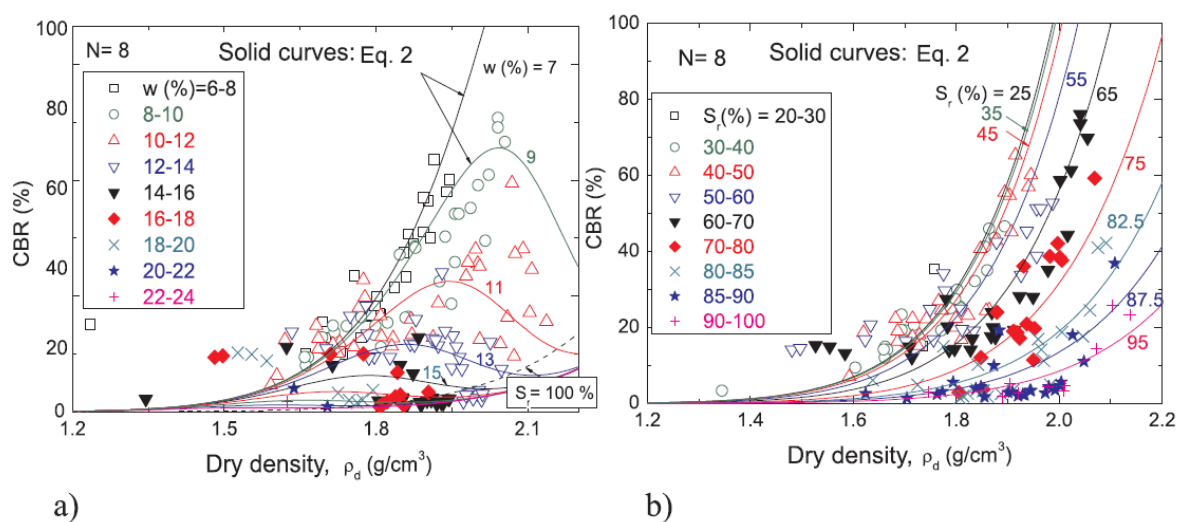


図 2-4-13 CBR 値～乾燥密度関係

(a: 締固め時の含水比がパラメーター、b: 締固め時の飽和度がパラメーター)

(Tatsuoka, Correia, 2018)

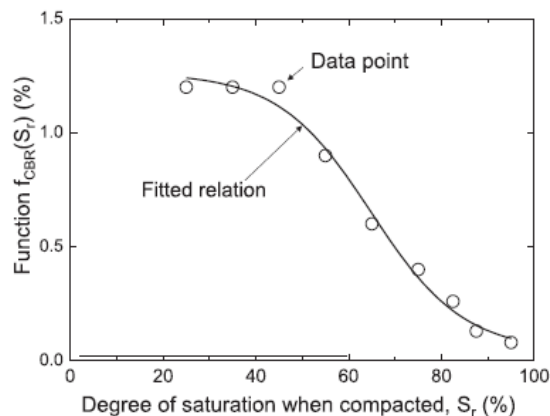


図 2-4-14 CBR 値に対する飽和度の関数 $f_{CBR}(S_r)$ ～飽和度の関係 (Tatsuoka, Correia, 2018)

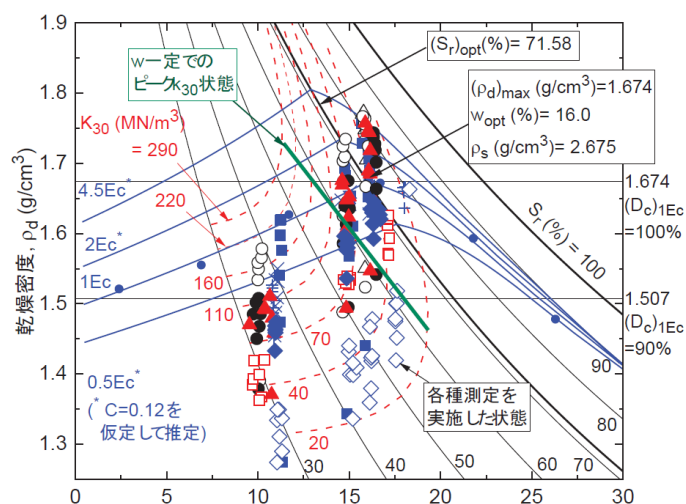


図 2-4-15 実大締固め試験による測定 $\rho_d \sim w$ 関係と K_{30} 等高線

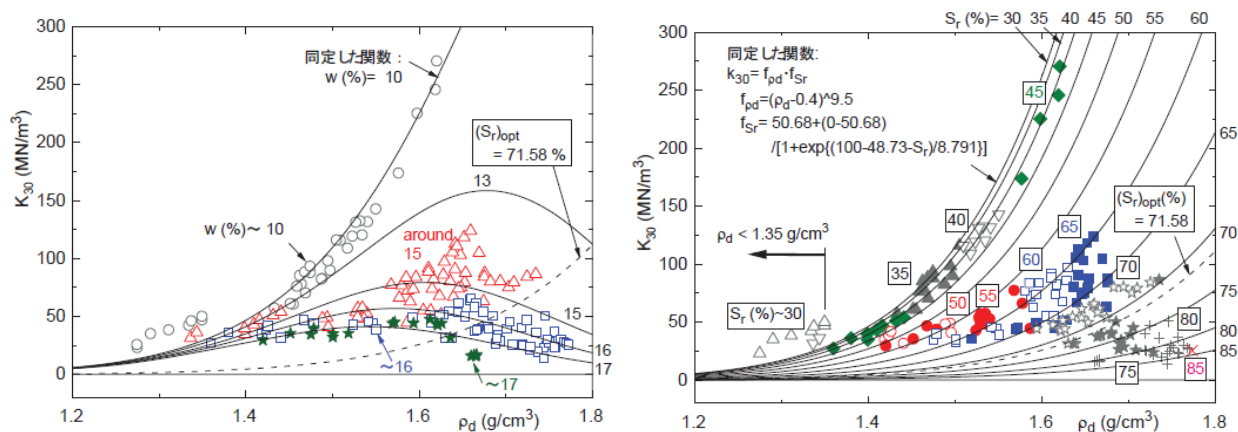


図 2-4-16 地盤反力係数 K_{30} 値～乾燥密度関係

(a: 締固め時の含水比がパラメーター、b: 締固め時の飽和度がパラメーター)

(龍岡, 橋本, 2020)

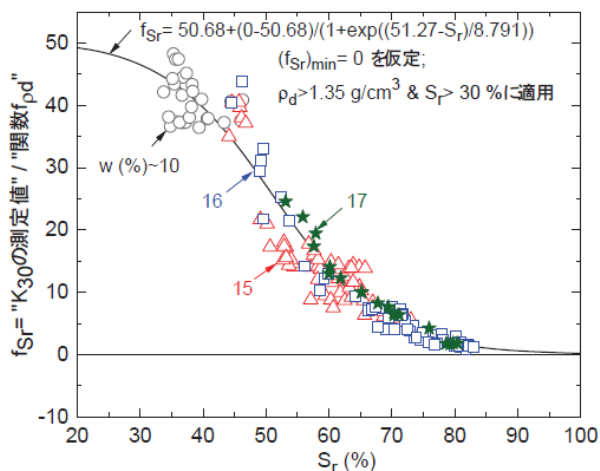


図 2-4-17 地盤反力係数 K_{30} に対する飽和度の関数 $f_{K30}(S_r) \sim$ 飽和度の関係 (龍岡, 橋本, 2020)

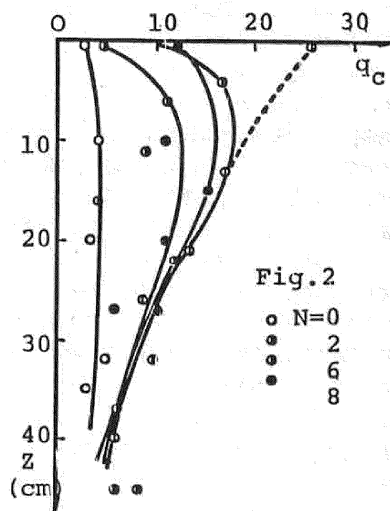


図 2-4-18 締固め機械で転圧した礫混じり土の深度～貫入抵抗関係の転圧回数推移
(藤井、渡辺, 1985)

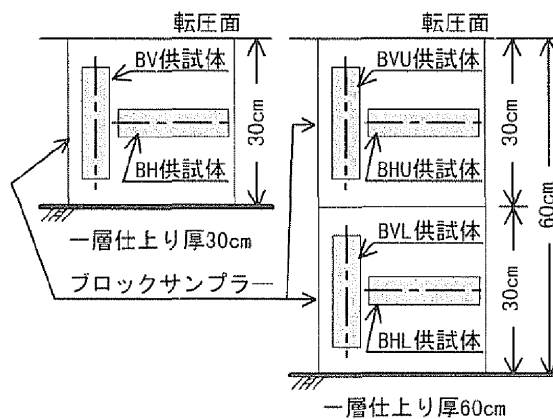


図 2-4-19 締固め機械で転圧した盛土から採取する供試体 (益村ら, 1999)

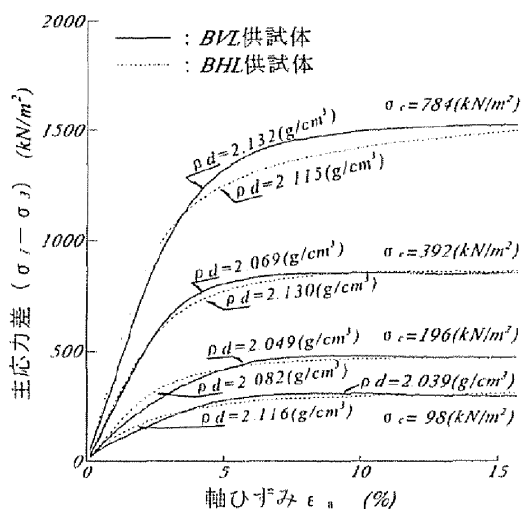


図 2-4-20 盛土採取供試体の応力～ひずみ関係

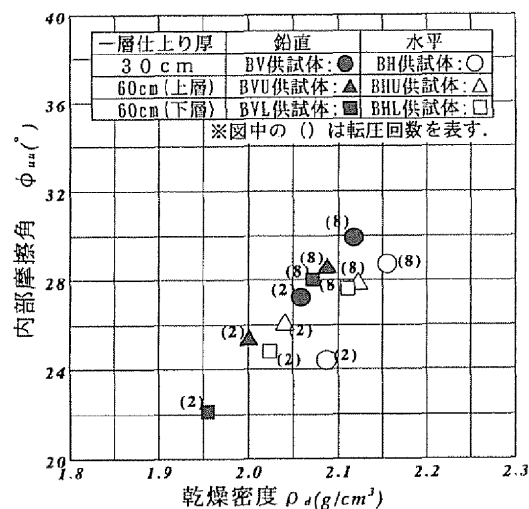


図 2-4-21 内部摩擦角～乾燥密度関係

(益村ら, 1999)

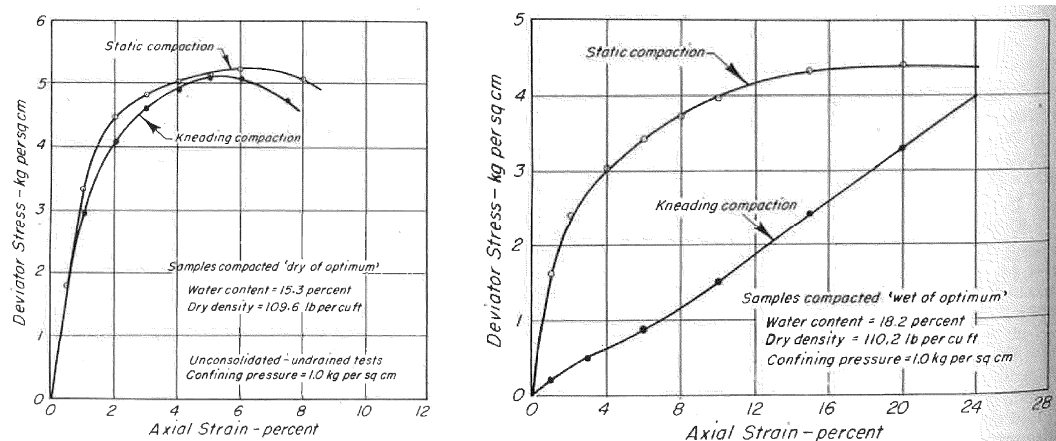


図 2-4-22 締固め方法の異なる供試体の非圧密非排水三軸圧縮試験による軸差応力～軸ひずみ関係
(左:乾燥側、右:湿潤側)
(Seed, Chan, 1959)

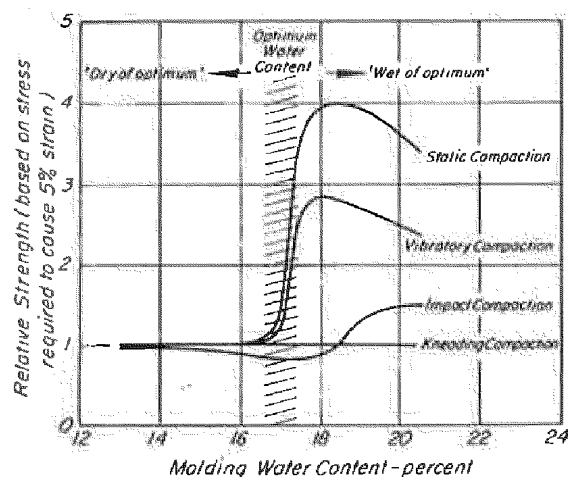


図 2-4-23 締固め方法別の軸ひずみ 5%時の軸差応力比～含水比関係
(Seed, Chan, 1959)

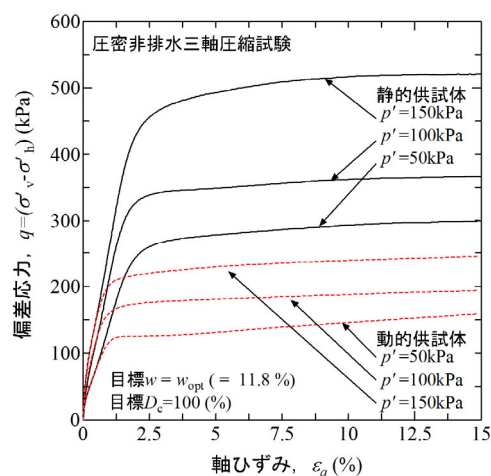


図 2-4-24 締固め方法の異なる供試体の圧密非排水三軸圧縮試験による軸差応力～軸ひずみ関係
(川尻ら, 2011)

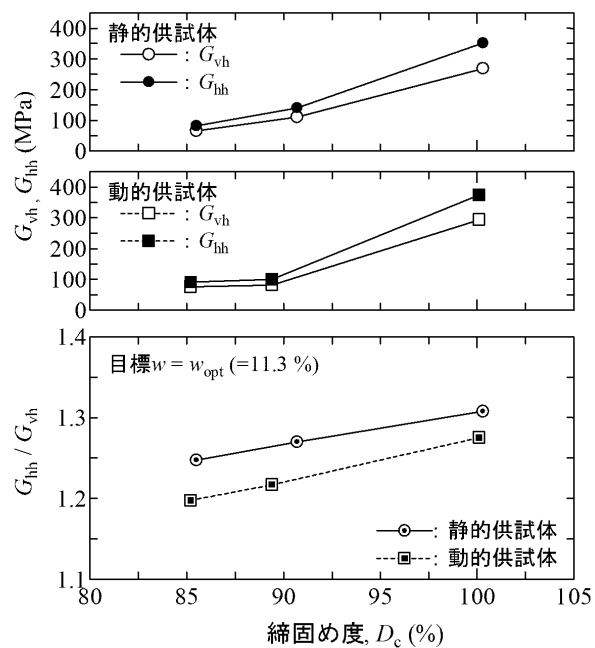


図 2-4-25 締固め方法の異なる供試体のせん断弾性率～乾燥密度関係
(川尻ら, 2011)

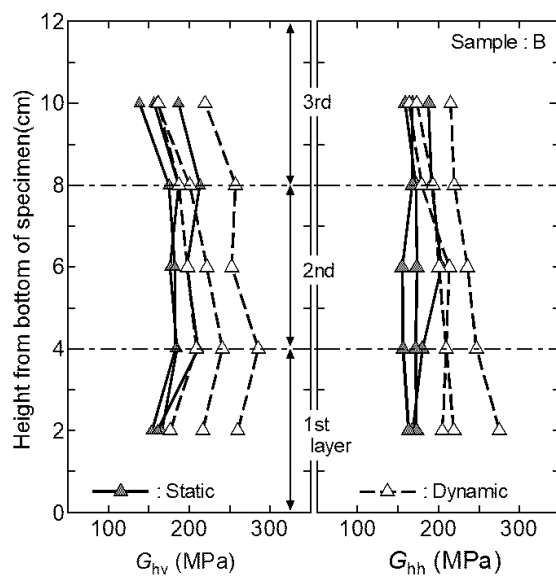


図 2-4-26 締固め方法の異なる供試体のせん断弾性率～乾燥密度関係
(Kawajiri et al., 2017)

2.5 供試体の局所変形が強度変形特性に与える影響に関する研究

2.5.1 一様供試体の局所変形挙動に関する研究

吉田ら(1992, 1994, 1995)は、砂質土や礫質土のような硬質地盤材料を対象に平面ひずみ圧縮試験を実施し、平面ひずみ状態のアクリル拘束板の面を通してメンブレンにあらかじめ付けられた標点をせん断中に撮影することで、せん断中の標点の変位から局所変形挙動を観察した。その結果、ピーク強度発揮前にひずみの帯状部分が複数現れ、そのうちの1本がほぼピーク強度発揮時にせん断層へと発展して供試体を貫通する事(図 2-5-1)を確認している。また、せん断層が水平面となす角度やせん断層の幅が粒径と関係している事を明らかにしている。

山川ら(1999, 2002)は、要素試験で前提とされる変形の一様性の仮定について、実際の供試体内部に生じるすべりやせん断帯や境界条件の影響等により進行する不均一な変形が発生すると、計測により得られる応力やひずみを供試体全体の平均化された物理量となってしまう事に着目し、三軸圧縮試験による供試体の変形モードと強度変形特性との関連について調べている。その結果、供試体の寸法が大きくなると圧縮強度が増加する「正の寸法効果」を確認し、これが供試体の形状比(H/D)とそれによる変形モードの変動も影響しているため、その挙動が複雑であることを結論付けている。また、変形モードの分類を行い、供試体形状との関連について整理を行っている。

辻ら(2003)は、供試体の圧縮変形時のひずみの局所化に着目し、細粒分含有率別にゆる詰め砂供試体の圧縮時の変形パターンを観察している。その結果、粗粒子同士の構造とそれに吸着する細粒分が圧縮特性に影響し、初期間隙比が大きく、また細粒分含有率が大きい程に帯状の局所化したひずみが生じやすい事を報告している。

2.5.2 供試体の非一様性が強度変形特性に与える影響に関する研究

小高ら(1994)は、三軸圧縮試験時の変形から破壊までに供試体に現れる様々な形状の変化及び局所化が、供試体の初期不整が原因となる可能性に着目し、締固め法と水中落下法の二種類の方法で、供試体層数別に人為的に初期不整を与えて作製した飽和砂供試体のせん断特性と破壊形態を排水三軸圧縮試験により調べている。その結果、供試体は層数が多いほど層の境界をきっかけにして局所化した破壊形態を示し、膨潤しない剛体的な領域が発達する事を観察している(図 2-5-2)。また、水中落下法の方が締固め法よりせん断強度が大きく、より一様な供試体である事を示唆している。

佐々木ら(2018)、Zhao et al.(2018)は、湿潤締固め法で作製する供試体の締固め層厚や初期含水比が与える液状化強度特性及び、供試体の変形挙動を液状化試験と画像解析により調べている。締固め層厚が4層と10層の供試体の鉛直深度方向の局所的な乾燥密度分布を測定した結果、締固め層厚が少ない4層供試体が10層供試体より上下の密度分布の差が大きく非一様になりやすい事を確認している。また、全体として上層の乾燥密度が大きい事、各締固め層毎に密度勾配が生じている事を示している(図 2-5-3)。締固め層厚が液状化強度曲線に与える影響は、わずかであるが認められ、層厚が薄いと液状化強度が大きくなることを示している(図 2-5-4)。繰返し載荷回数が20回で両振幅軸ひずみ DA が5%となる繰返し応力振幅比は、締固め層数が10層の供試体が最も高い結果であったが、変形挙動は層数の少ない4層締固め供試体より、最も低強度であった空中落下法により作製した供試体に類似する傾向が見られた。画像解析による軸ひずみ分布は、締固め層厚によって異なる傾向が認められ、4層で締め固めた供試体は密度勾配の影響と思われる軸ひずみ分布が示されている(図 2-5-5)。従って、湿潤締固め法による供試体作製方法は、締固め層厚が小さく、層数が多い供試体である程、密度分布及び繰返し載荷によるひずみ分布は比較的一様となる。しかし、繰返し載荷による液状化強度は、同じく一様なひずみ分布を示す空中落下法で作製した供試体に比べて、湿潤締固め法による供試体の方が大きく、供試体作製方法の影響が生じている事を示唆している。

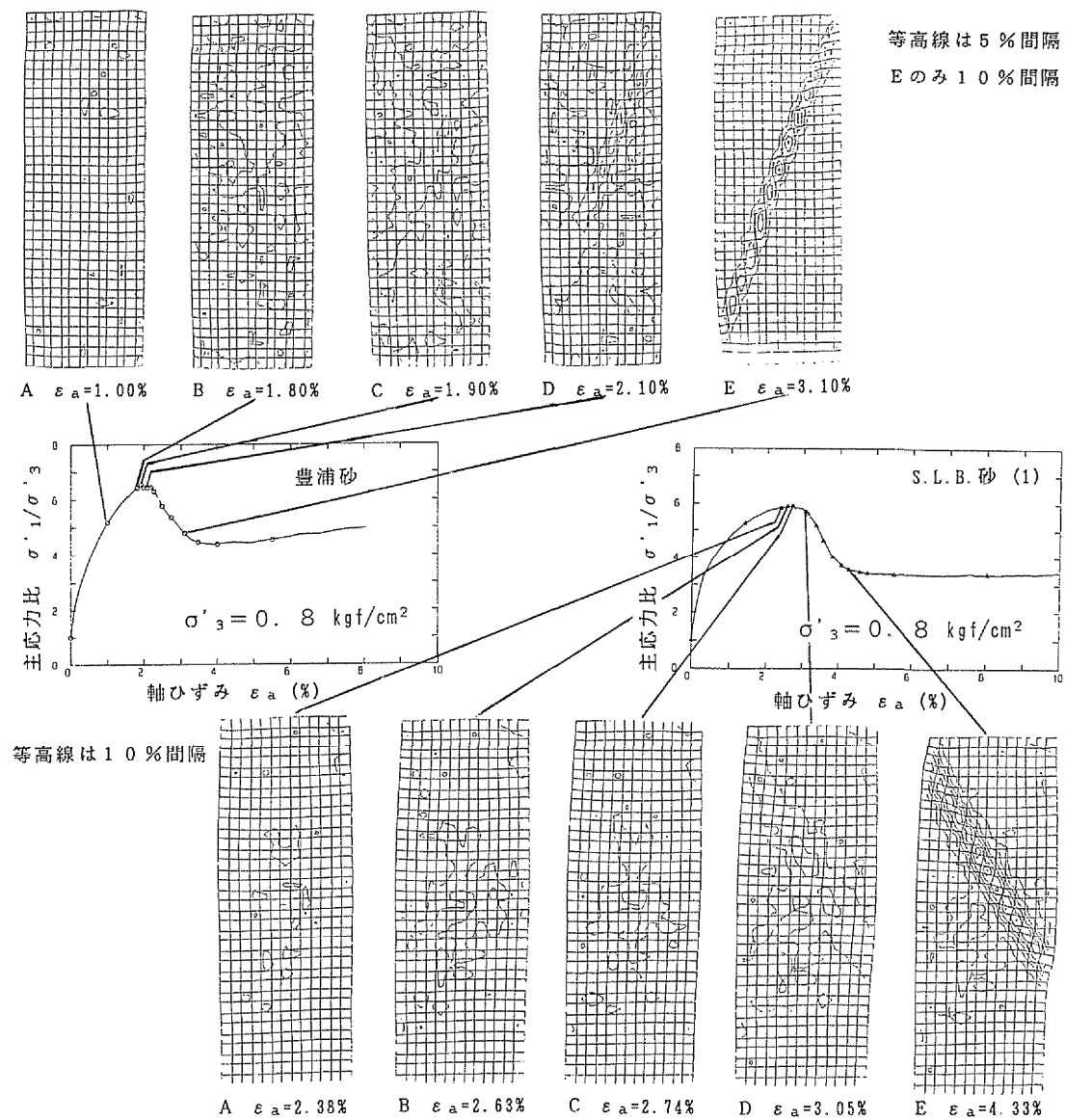


図 2-5-1 応力～ひずみ関係とせん断ひずみの分布

(吉田ら, 1992)

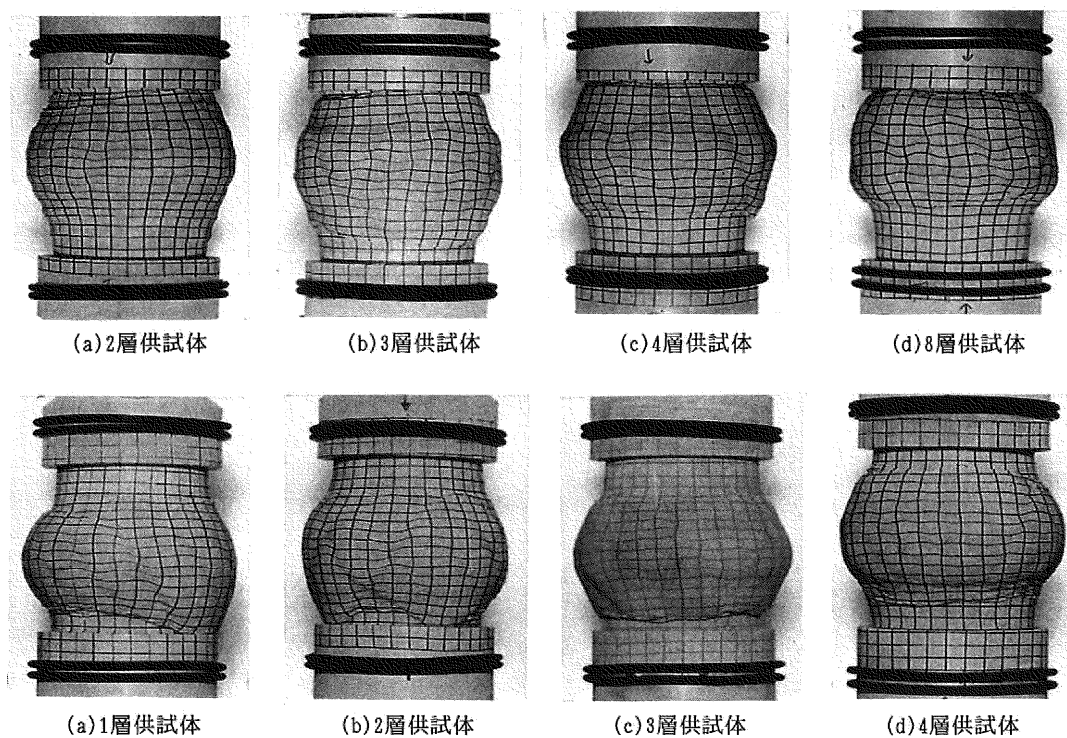


図 2-5-2 層数の異なる初期不整を含む排水せん断試験後の供試体状況
(上: 締固め法, 下: 水中落下法)
(小高ら, 1994)

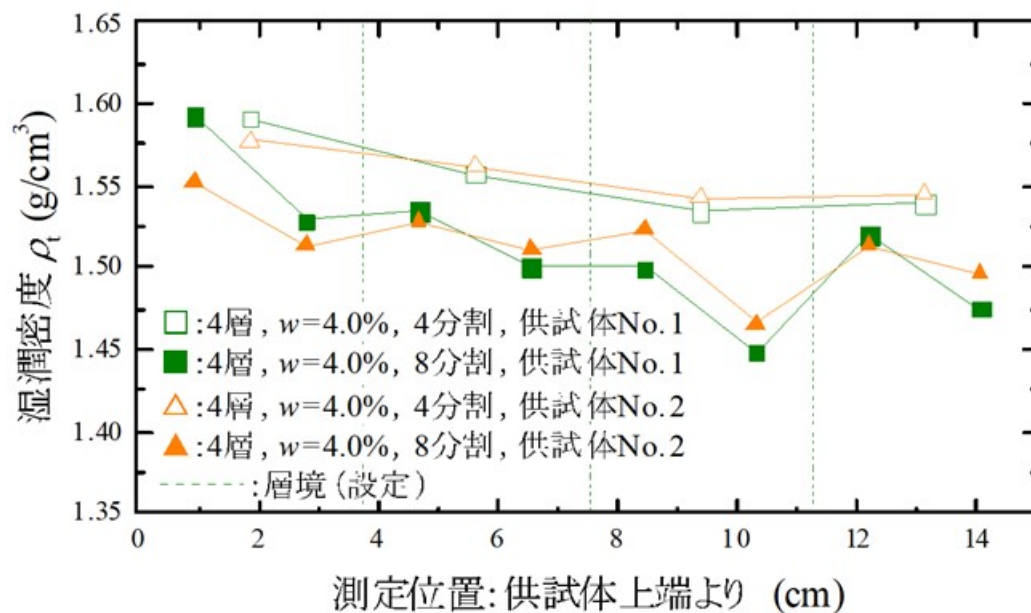


図 2-5-3 締固め層厚の異なる供試体の湿潤密度分布
(佐々木ら, 2018)

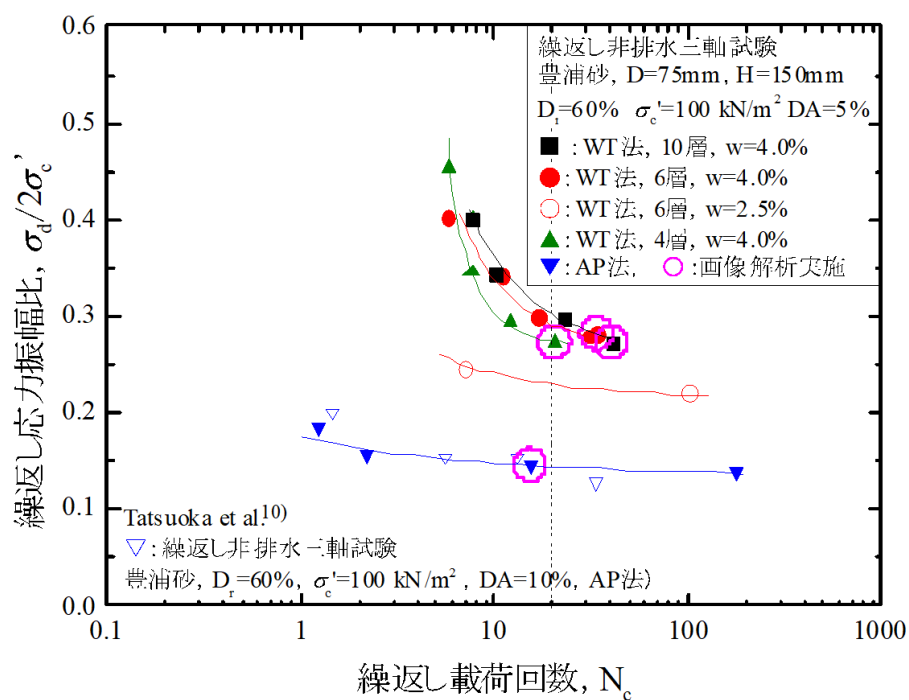


図 2-5-4 締固め層厚の異なる供試体の液状化強度曲線
(佐々木ら, 2018)

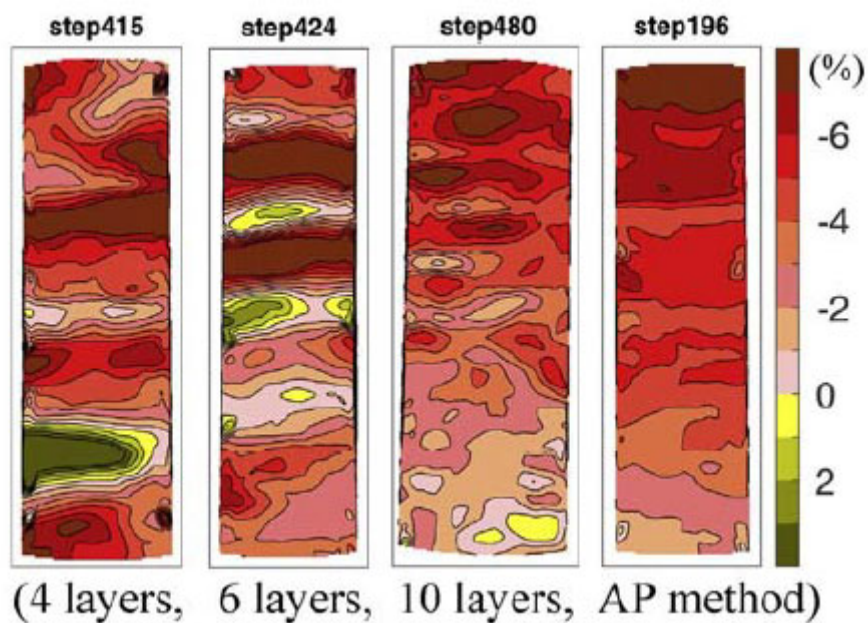


図 2-5-3 締固め層厚の異なる供試体の軸方向ひずみ分布
(Zhao et al., 2018)

2.6 本章のまとめ

本章では、不飽和土の力学特性、土の締固め特性、室内で締め固めた土の強度変形特性、現場で締め固めた土の強度変形特性、異なる締固め方法が強度変形特性に与える影響、供試体の局所変形が強度変形特性に与える影響等の関連する研究を抽出した。本研究の進め方や関連研究の中に残された課題に関して得られた知見を以下に示す。

- ① 不飽和土の水分特性曲線は、締め固めた土の飽和度と微細な間隙構造の影響を受けたサクシオンに依存しており、現場と室内で締め固めた土の力学特性を比較する上で重要な因子である。
- ② 土の含水状態は、土の間隙体積に対する間隙水の体積を示す飽和度で表現する方が本質的であり、土の締固め特性や締め固めた土の強度変形特性は含水比ではなく飽和度を用いて整理した方が統一的となる。
- ③ 締固め時の土の飽和度が異なると、土のサクシオンに起因して大粒子と細粒子の配置関係が異なる集合構造体が形成される。この集合構造体の違いが土の締固め特性や強度変形特性、透水性に影響を与えている。
- ④ 現場で締め固めた盛土は締め固めた一つの層毎に鉛直深度方向に明確な密度分布を有している事が確認されており、これを理由に盛土から採取した供試体の強度特性について三軸圧縮試験で調べられている。しかし、それらの研究は強度異方性に関する知見を得る事に留まっており、設計目標との比較や供試体の非一様性を考慮した変形特性に関する研究は殆ど確認されていない。
- ⑤ 振動ローラーで締め固めながら水平に移動する現場締固め土は、剛なローラーと直接接触する地盤表面付近は境界問題によって砂粒子が水平方向に移動するせん断破壊領域のような部分が存在し、効果的に締め固めが出来ていない可能性があるが、この強度変形特性について、詳しく調べた例はほとんどない。
- ⑥ 異なる締固め方法で作製した供試体の強度変形特性は、古くから多くの研究がされており、いくつか定性的な違いが示されている。しかし、強度変形特性に与える締固め方法の違いによる締固めメカニズムや土の骨格構造との関連については詳しくわかっておらず、まだまだ研究が必要とされている。
- ⑦ 室内で作製した供試体であっても、突固めにより締め固めた供試体は局所的に非一様である事を確認した例があり、この非一様性に起因する局所的な変形が、供試体全体の変形特性の予測を難しくしている。これを解決するにはこの非一様性を出来るだけ考慮した供試体の変形特性の評価が必要である。

以上より、本研究では締め固めた不飽和供試体の非一様性を考慮した三軸圧縮試験により強度変形特性を調べる事とした。また、現場と室内で締め固めた供試体は乾燥密度と飽和度の影響を考慮した強度変形特性に加え、サクシオンや透水性に対する両者の比較を実施する。

【2章の参考文献】

- 1) Bishop, A. W.(1960): The Principle of Effective Stress, *Professor A.W. Bishop's Finest Papers A Commemorative Volume*, Laurie Wesley, pp.46-50.
- 2) Kawajiri, S., Kawaguchi, T., Yamasaki, S., Nakamura, D., Yamashita, S. & Shibuya, S.(2017) : Strength characteristics of compacted soil with particular reference to soil structure and anisotropy, *International Journal of GEOMATE*, Vol.13, Issue 38, pp.178-185.
- 3) Kohgo, Y., Nakano, M., & Miyazaki, T(1993).: Theoretical Aspects of Constitutive Modeling for Unsaturated Soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63.
- 4) Matsumura S., Tatsuoka F. (2018): Effect of compaction conditions and fines content on cyclic undrained strength of saturated soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No.112, pp.152-161.
- 5) Romero E., Gens A. & Lloret A.(1999): Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay, *Engineering Geology*, 54, pp.117-127.
- 6) Seed, H.B., Mitchell, J. K & Chan, C.K (1959): Structure and strength characteristics of compacted clays, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division Proceedings of ASCE* , Vol.54, SM1, pp.87-128.
- 7) Tatsuoka, F. (2015): Compaction characteristics and physical properties of compacted soil controlled by the degree of saturation, *Proc. 15th Pan-American Conf. on SMGE & 6th IC on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Buenos Aires, pp.40-76.
- 8) Tatsuoka, F., Gomes Correia, A. (2018): Importance of controlling the degree of saturation in soil compaction linked to soil structure design, *Transportation Geotechnics* 17, pp.3-23.
- 9) Zhao, C., Koseki, J.& Sasaki, T. (2018): Image based local deformation measurement of saturated sand specimen in undrained cyclic triaxial tests, *Soils and Foundations*, Vol.58, pp.1313-1325.
- 10) 岡野寛雄, 大谷順(2012): μ フォーカス X 線 CT を用いた締固め土の力学的考察, 平成 23 年度土木学会西部支部研究発表会, pp.415-416.
- 11) 鬼塚克忠, 林重徳, 吉武茂樹, 大石英隆(1979): 締固めた土の圧縮及び強度異方性について, 土質工学会論文報告集, Vol.19, No.3, pp.113-123.
- 12) 鬼塚克忠, 吉武茂樹(1983): 締固めた混合度の強度異方性について, 土質工学会論文報告集, Vol.23, No.4, pp.150-156.
- 13) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道織(1996): 不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について, 土木学会論文集, No.535, III-34.
- 14) 川尻峻三, 川口貴之, 澁谷啓, 高橋正和(2011): 締固めた地盤材料の変形・強度特性に及ぼす締固め時の含水比および締固め方法の影響, 土木学会論文集 C, Vol.67, No.4, pp.532-543.
- 15) 小高猛司, 浅岡顕, 鈴木建爾(1994): 初期不整を有する砂供試体のせん断特性と破壊形態, 土木学会第 49 回年次学術講演会, pp.306-307.
- 16) 佐々木朋子, 佐藤剛司, Chuang ZHAO, 古関潤一 (2018): 締固め法によって作製した砂供試体の締固め層厚および初期含水比が液状化特性に及ぼす影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.4, pp.379-392.
- 17) 土質工学会 (1991): 土の締固めと管理, 土質基礎工学ライブラリー36, 土質工学会.
- 18) 地盤工学会 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会(2004): 不飽和地盤の挙動と評価, 丸善出版株式会社.
- 19) 須藤雅人, 川邊翔平, 菊池喜昭, 龍岡文夫(2013): 飽和稲城砂の排水変形・強度特性に対する締固め時飽和

- 度の影響, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp.573-574.
- 20) 龍岡文夫, DUTTINE Antoine, 原大地, 望月勝紀, 望月一宏, 奥野大輔, 平川大貴, 清田隆(2010): 多様な砂礫のせん断強度と締固め度・相対密度との相関, 第 45 回地盤工学研究発表会, pp.371-372.
- 21) 龍岡文夫, 藤代健司, 川辺翔平, 菊池喜昭, 建山和由, 根本忠(2013): 盛土の締固め③, 基礎工, Vol.41, No.9, pp.103-106.
- 22) 龍岡文夫, 橋本毅(2020): 実大締固め試験に基づく土の締固め管理における地盤剛性の活用法の検討, 第 55 回地盤工学研究発表会, 21-10-3-01.
- 23) 建山和由, 畠昭治郎, 石沢利明(1985): 振動ローラーによる現場締固めと室内突固め試験との対応について, 土木学会第 40 回年次学術講演会, pp.587-588.
- 24) 辻千之, 岡二三生, 小高猛司, 谷崎史織(2003): 細粒分を含むゆる詰め砂の変形パターンと圧縮帯, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.435-436.
- 25) 独立行政法人土木研究所 (2014): 盛土施工手法及び品質管理向上技術に関する研究, 共同研究報告書, 整理番号第 461 号.
- 26) 根本忠, 佐々木隆男(1994): 土の締固め特性, 創立 30 周年論文集, 建設機械化研究所, pp.45-58.
- 27) 平川大貴(2000): 砂地盤内における応力分布の検討, 東京大学修士論文.
- 28) 平川大貴, 川原園美幸, 龍岡文夫(2008): 砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, pp.253-266.
- 29) 平川大貴, 荒木裕行, 三橋斎(2019): 締固めた礫質土の工学的性質に及ぼす粒子形状の影響, 第 54 回地盤工学研究発表会, pp.919-920.
- 30) 藤井弘章, 渡辺忠(1985): 現地締固めに関する二、三の考察, 土木学会第 40 回年次学術講演会, pp.581-582.
- 31) 藤井弘章, 横田真一(1989): 現地締固め機構に関する一考察, 土木学会第 44 回年次学術講演会, pp.290-291.
- 32) 益村公人, 殿垣内正人, 川井洋二, 建山和由(1998): 一層締固め層内の締固め効果に及ぼす含水比と細粒分の影響, 第 33 回地盤工学研究発表会, pp.2073-2074.
- 33) 益村公人, 三嶋信雄, 緒方健治, 川井洋二(1999): 一層締固め層内の締固め効果に及ぼす含水比と細粒分の影響, 第 33 回地盤工学研究発表会, pp.2073-2074.
- 34) 三浦清一, 横浜勝司, 松村聡, 泉信太郎, 細野雄太(2011): 締固めされた築堤材としての砂質シルトの強度－剛性－透水性の相互関係, 第 46 回地盤工学研究発表会, pp.339-340.
- 35) 山川優樹, 須藤良清, 鈴木英明(1999): 供試体の寸法・形状効果と変形モード分析, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.449-450.
- 36) 山川優樹, 池田清宏, 須藤良清, 寺井信夫, 鳥居邦夫(2002): 砂の三軸試験供試体の分岐変形モードと寸法・形状効果, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.357-371.
- 37) 横浜勝司, 三浦清一, 松村聡(2012): 築堤材に用いられる砂質シルトの強度・透水性・せん断剛性に及ぼす締固め管理条件の影響, 土木学会論文集 C, Vol.68, No.2, pp.422-432.
- 38) 吉田輝, 龍岡文夫, 新城浩一(1992): 砂の平面ひずみ圧縮試験におけるせん断層の観察, 第 27 回土質工学研究発表会, pp.543-546.
- 39) 吉田輝, 中村慎一郎, 亀谷泰久, 董軍, 龍岡文夫, 木幡行宏, 朴春植(1994): 各種粒状体の平面ひずみ圧縮試験におけるせん断層の変形特性, 土質工学研究発表会, pp.451-454.
- 40) 吉田輝(1995): 砂の破壊に伴うひずみの局所化とせん断層の発生, 東京大学博士論文.
- 41) 吉田輝, 辻良祐, 藤崎勝利, 小林弘明, 小原隆志, 龍岡文夫, 坂本博紀, 曾田英揮(2020): 土の締固め過程

における剛性・強度に対する乾燥密度と飽和度の影響, 第 55 回地盤工学研究発表会, 21-10-4-03.

- 42) 渡邊健治(2019): 鉄道土構造物の施工管理手法に関する日仏の技術基準類の比較, 東京大学調査研究報告書.
- 43) 王海龍, 古関潤一(2018): 不飽和材料の”間隙水比—サクシヨン”モデルの提案, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.711-712.

第3章

試験計画と試験方法

3.1 概要

盛土の強度変形特性に関する研究の多くは室内の拘束されたモールド内で突固め法により作製した供試体を対象としており、現場で締め固めた盛土地盤から採取した供試体を対象にした例は少ない。そこで、本研究では現場と室内で締め固めた砂質土の供試体の強度変形特性の違いを調べる事とした。現場で締め固めた供試体を採取する為に、鋼製土槽内に小型締め固め機械を用いて試験盛土を作製し、試験盛土から採取した供試体について三軸圧縮試験を計画した。また、室内作製供試体との変形強度特性の違いを比較する為に、供試体の鉛直深度方向の非一様性の測定方法を計画し、その評価方法を検証した。

3.2 試験計画

3.2.1 現場と室内で締め固めた土の比較方法

既往の研究を参考に、締め固め機械を用いる現場で締め固めた土と、室内にて突固め法で締め固めた土の特徴を次の様に仮定した。

- ① 室内で突き固めて作製する供試体は、重量や含水比等の試料調整した土を薄層で締め固める事でほぼ様な物理特性の供試体を作製される。
- ② 現場で撒き出した土を締め固め機械(振動ローラー)を用いて締め固めた土は、単層の表面を転圧するため、表面から層下端までの間には、鉛直深度方向の乾燥密度分布が非一様になる。
- ③ 室内で突固め法により締め固めた土は拘束されたモールドで鉛直深度方向に1次元的に締め固められる為、上層から下層まで力学的に安定した構造を有する。
- ④ 現場で締め固めた土は周辺地盤表面の拘束は比較的弱く、締め固め機械による締め固めにより、土は鉛直深度方向だけでなく水平方向にも移動し、局所的に不安定な領域(せん断破壊領域)を有する。

上記の特徴が物理特性や強度変形特性の違いに現れると考え、本研究では同一試料を現場と室内で締め固めて供試体を作製し、物理特性や三軸圧縮試験による強度変形特性を比較する。

3.2.2 試験材料

本研究で用いた試料は、地盤工学の研究試料にも多く扱われてきた稲城砂である(例えば、平川ら(2008))。稲城砂は三浦層群に属する洪積細砂層で、東京都稲城市や多摩市を中心とした多摩ニュータウン計画区域内に広く分布しており、宅地造成盛土にも多く利用されてきたことから試験材料に選定した。稲城砂の物理特性は、吉岡ら(1973)、山口ら(1978)に詳しいが、本研究で取り扱うに際して特筆すべき特徴を以下に示す。

- ① 稲城砂の物理特性は同じ区域内であっても過去の風化履歴等の影響により、採取する場所や層準によって多少

異なる。

- ② 稲城砂は凝灰質の粒子を多く含み、風化された粒子を締め固めると細粒子が破碎されるため、粒度分布の変化によって材料の物理特性や力学特性に変化が生じる可能性がある。
- ③ 稲城砂は凝灰質粒子の影響で同種の砂に比べて、粘性土の性質が共存するような特殊な性質を示す事があり、これは締め固めによって顕著になりやすい。

本試料は稲城市矢野口地内で採取した。採取した試料は炉乾燥後に石や木片等を除去しながら最大粒径 $D_{\max}=2\text{mm}$ 以下となるようにふるい分けて調整した。表 3-2-1 にふるい分け後の物理特性試験結果を示す。採取時の稲城砂試料を図 3-2-1、ふるい分け状況を図 3-2-2、試料拡大図を図 3-2-3、粒径加積曲線を図 3-2-4 に示す。試料の締め固め特性等の詳細は後の章で説明するが、粒度分布に関して既往の研究等(平川ら 2008、須藤ら 2013)で扱われた稲城砂の細粒分含有率 $F_c=10\sim 20\%$ 程度である事に対して、当試料の細粒分含有率 $F_c=8.4\%$ であった。この事から同じ稲城砂を扱った既往の研究の物理特性や強度変形特性との比較には留意が必要である。

表 3-2-1 稲城砂の物理特性

土粒子密度 ρ_s	2.687 g/cm ³	JIS A 1202	
最大粒径 D_{\max}	2.0 mm	JIS A 1204	
平均粒径 D_{50}	0.25 mm	JIS A 1204	
細粒分含有率 F_c	8.4%	JIS A 1204	
均等係数 U_c	2.8	JIS A 1204	
最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$	1.684 g/cm ³	JIS A 1210	A-c法
	1.738 g/cm ³	JIS A 1210	E-c法
最適含水比 w_{opt}	14.2%	JIS A 1210	A-c法
	12.5%	JIS A 1210	E-c法
最適飽和度 [※] $(S_r)_{\text{opt}}$	64.1%	(JIS A 1210)	A-c法
	61.5%	(JIS A 1210)	E-c法
最大間隙比 e_{\max}	1.064	JIS A 1224	($\rho_d=1.302 \text{ g/cm}^3$)
最小間隙比 e_{\min}	0.672	JIS A 1224	($\rho_d=1.607 \text{ g/cm}^3$)

※ 最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ における飽和度 S_r

3.2.3 現場で締め固めた供試体の作製計画

現場で締め固めた供試体は、締め固め機械で転圧して締め固めた試験盛土を作製し、この試験盛土からサンプリングして採取する事とした。

(1) 試験盛土土槽と構成

試験盛土は幅 2.2m×延長 3.2m×高さ 0.6m の鋼製土槽内に作製する。図 3-2-5 に鋼製土槽の一般図を示す。または、試験盛土は供試体をサンプリングする単一の締め固め層と、転圧時に圧縮しない程度に締め固めた干渉層(厚さ $t=0.3\text{m}$)の上に実験対象層を作製する。図 3-2-6 に土層構成を示す。締め固め層は、含水調整した盛土材

を1層(転圧後の層厚 $t=0.21\text{m}$ 程度)で撒き出し、締め固める。

(2) 締め固め機械

締め固め機械は、起振力 11.8kN、質量 605kg、幅 0.7m のハンドガイドタイプの 1ton 振動ローラーを選定した(図 3-2-7)。当機械はフィルダムや大規模盛土土工に用いられる 10～20ton 級の締め固め機械に比べると小型である。また、撒き出し後の軟らかい盛土の締め固めで局所的な沈下を避ける為、1 回目は小型プレートを使用する事とした(図 3-2-8)。

(3) 締め固め方法

試験盛土上を通過する締め固め機械は、図 3-2-6 に示す平面図中の三つに区別したレーンを重複なく通過させ、通過回数 $N_p=1$ とする。締め固め時に表面付近の土の水平移動が一方に偏る事を避ける目的で、建物側レーン、道路側レーン、中央レーンの順番に通過させる事とした。

(4) 供試体のサンプリング

乱れの少ないサンプリングは多くの方法が提案されているが、試験盛土の通過回数が所定の値($N_p=4, 8, 12, 16$)にて、比較的短時間で多くの供試体をサンプリングする事のできる押切式ブロックサンプリング(JGS1231)を採用した。サンプリングモールドは内面の摩擦係数が小さい塩化ビニール製(VP100 管)を選定し、図 3-2-9 に示すように、二つ割り式で下端を刃先加工している。また、既成の VP100 管を半分に切断するとわずかに変形し、切断断面の直径が小さくなってしまい、熱を与えながら直径 $\phi 100 \pm 1\text{mm}$ 程度となるよう修正している。

押切式ブロックサンプリングによる供試体採取方法は、地盤工学会(2013)を参考に計画した。供試体の採取位置は土槽の拘束効果の影響を低減する事を目的に中央レーン内の 5 箇所からそれぞれ 3 供試体ずつ採取する。さらに、飽和透水試験を実施する事を目的に、押切式ブロックサンプリングで透水試験用モールド内に試験盛土の上下深度別の供試体を採取した。土層断面中の採取位置は図 3-2-10 に示す。

一般的に、ブロックサンプリングは乱れの少ない供試体採取方法の一つである。菊地ら(2014)、大浦ら(2014)は、ブロックサンプリングに類似するサンプリング方法として、サンプラーを静的に圧入する簡易法について、採取した供試体の物理特性や強度変形特性を切出し式ブロックサンプリング、押切式ブロックサンプリングで採取した供試体と比較する事で、サンプリング方法の評価検討をしている。その結果、簡易法で採取した供試体は圧入時に生じる供試体の圧縮変形の影響で、強度変形特性の類似する切出し式ブロックサンプリングと押切式ブロックサンプリングにより採取した供試体に比べて強度変形特性が過剰に大きくなる傾向を確認している。また、尤ら(2016)は砂質地盤に打込み式簡易サンプラー(塩ビ管(VP100))と二重管サンプラーをハンマーで打ち込んで供試体を採取し、三軸圧縮試験における強度特性の違いは少ない事を確認している。本研究で用いた押切式ブロックサンプリングはこれらの簡易サンプリングと異なり、サンプリングモールドの押込みによる供試体の圧縮を避けるために周辺土を先行除去する事で最小限の静的な力で圧入しながらサンプリングしている。採取方法について詳しくは後に述べる。

砂のサンプリングした供試体の品質評価については、チューブサンプルと凍結サンプルの強度特性の相違を比較した Tokimatsu & Hosaka(1986)や、供試体の乱れが剛性率～ひずみレベル関係に与える影響を示した善ら(1981)の方法が挙げられる。また、小高ら(1998)は堆積軟岩の応力～ひずみ関係における接線ヤング率の低下に着目し、乱れの評価方法を提案している。本研究では、供試体の乱れが強度変形特性に与える影響についてもこれらの点に留意する事とした。

(5) 供試体寸法

三軸圧縮試験の供試体は、鉛直深度方向に非一様な供試体を採取する事が出来る十分な供試体高さを有する事、サンプリングによる多少の乱れの影響を受けにくい程度の十分な大きさである事(有効断面率の確保)、供試体の保管や三軸圧縮試験時に取り扱いが可能な大きさである事を踏まえ、直径 $\phi 100\text{mm}$ ×高さ $h200\text{mm}$ とした。

また、本研究では試験盛土の締固め層上部と下部を区別して強度変形特性を調べる事を目的に、少量ではあるが試験盛土の締固め層の上層と下層からそれぞれ直径 $\phi 50\text{mm}$ ×高さ $h100\text{mm}$ の独立した供試体を採取した。この供試体も一様供試体とは呼ぶ事は出来ないが、 $\phi 100$ 供試体に比べて比較的非一様性の小さい供試体という位置付けで実験に用いた。

3.2.4 三軸圧縮試験計画

室内せん断試験は主に三軸圧縮試験、平面ひずみ圧縮試験、一面せん断試験、単純せん断試験等、多くの試験方法とそれに合わせた試験装置、計測機器が存在する。地盤工学会(1991)で詳しく説明されているが、いずれの方法も上載荷重等の外力に対して地盤内で生ずる変形やすべり面の発生等を地盤内の要素の変形として再現し、強度変形特性を得るためのものである。本研究では圧密条件(排水条件、圧密応力比等)やせん断条件(圧縮や伸張、載荷速度等)の実験条件を多様に設定する事が可能で、かつ国内外における実験実績も多く、データが豊富な三軸圧縮試験を選定した。また、土の応力～ひずみ関係は非線形性が強く、過圧密や載荷除荷等の応力履歴や排水条件、ひずみ速度の影響を多く受けるため、現場と室内で締め固めて作製する供試体はなるべく乱れを少ない状態で準備し、せん断試験を行う事が望ましい。三軸圧縮試験のように円柱供試体であれば、円柱形モールドの手配が比較的容易で、試験前の供試体の寸法加工等の準備に要する時間が少なく済む為、これらの事も三軸圧縮試験を選定した理由に挙げられる。

次に、三軸圧縮試験の試験条件の設定について、地盤工学会(2012)は試験の目的に合わせた以下の三種類の土質試験に分類している。

- ① 第一種土質試験: 原位置での強度変形特性を求める為の標準化した指標試験(簡略化した試験)
- ② 第二種土質試験: 出来る限り原位置での応力～ひずみ状態を再現して、原位置での強度変形特性を直接求めようとするシミュレーション試験
- ③ 第三種土質試験: 土の強度変形特性の基本的性質や全体像、これまで明らかでなかった新しい影響因子とその影響を研究する試験

吉田ら(2020)は採取試料を用いて現場と同じ乾燥密度の供試体を室内で作製し、非圧密非排水三軸圧縮試験により、ダムコア材の盛り立て時の原位置試験を用いた施工管理の指標値を検討している。このように盛土表面(原位置)の強度変形特性を求める為には、第一種土質試験として、拘束圧や排水履歴を考慮しない方法を選定していると考えられる。龍岡ら(1997)は無拘束状態で実施する一軸圧縮試験のような比較的簡便な力学試験による評価は、無拘束状態の強度特性を評価するには妥当であるが、無拘束状態では試料の乱れの影響が大きい為、原位置強度を過小評価してしまう事や、変形特性の正確な把握が困難となる事が懸念されることを説明している。本研究では現場と室内で作製した供試体の強度変形特性の違いを把握する事を目的としている事から、供試体の乱れやばらつきの影響を出来るだけ排除する事が出来るよう、第三種土質試験として拘束圧を与える三軸圧縮試験により、両供試体の特性比較を実施する。

本研究では非一様性の影響が大きい円柱供試体の中型三軸圧縮試験($\phi 100\text{mm} \times h 200\text{ mm}$)及び非一様性の影響が比較的少ない円柱小型三軸圧縮試験($\phi 50\text{mm} \times h 100\text{ mm}$)を用いた。ここで試験装置に「中型」という言葉に明確な定義はないが、供試体寸法の違いからそのように区別して呼ぶ事にした。

また、非一様の供試体の強度変形特性を詳細に調べる為には、想定されるシステムコンプライアンスが与える測定結果への影響を極力排除する必要がある。主な要因には、供試体端面拘束の影響による供試体内部の応力分布・変形の非一様化、供試体整形時の上下端面の乱れ・不陸の存在に起因する測定誤差(ベディングエラー)が挙げられ、後藤ら(1986)、佐藤ら(1991)、澁谷ら(1991)、Goto.et.al(1991, 1993)、龍岡、木幡(1994)に詳しい。これら、端面摩擦の処理、ベディングエラーの排除や微小変形特性測定のために、中型三軸圧縮試験には微小変位制御載荷装置と局所変位計を用いたシステムを採用している。

試験装置システムの詳細については後述するが、鉛直方向(軸方向)の変位測定には長さ 170mm の LDT (Local Deformation Transducer) (以下、LDT170 と称す)を、供試体の全体の鉛直ひずみ ε_v は外部変位計(External Displacement Transducer)により測定した。LDT については、Goto.et.al(1991)に詳しい。水平方向(側方方向)の変位測定にクリップゲージ(Clip Gauge)を用いて供試体の上中下の 3 箇所測定する。さらに、鉛直深度方向の変形特性の違いを評価する事を目的に、長さ 80mm の LDT(以下、LDT80 と称す)を深度別に設置した。図 3-2-11 に局所変位計配置を示す。本研究では非一様な供試体の局所ひずみを平均(average)、上端部(top)、上部(upper)、下部(lower)、下端部(bottom)、の 5 つに区分して測定する。

鉛直深度別に設置した局所変位計を用いる中型三軸圧縮試験は、鉛直深度方向に非一様性を有する供試体の局所的な変形特性を同時に評価する事に適するが、共通した一つのロードセルを用いる為、得られる鉛直荷重は一つである。従って供試体の鉛直深度方向の強度特性の評価が出来ない。そこで小型三軸圧縮試験では、締固め層の上層と下層から別個に採取した比較的非一様性の小さい小型供試体($\phi 50\text{mm} \times h 100\text{ mm}$)の強度変形特性を評価する事とした。局所変位計 LDT80 を周長方向に対となるよう設置して鉛直ひずみを測定した(図 3-2-12)。小型三軸圧縮試験時の水平変位は測定出来なかった為、軸差応力算定時の供試体の断面積補正は実施していない。

現場と室内で締め固めた供試体は 6.9 を除いて全て不飽和状態で自立させ、基底応力 $p_{\text{net}}=10\text{ kPa}$ から 50 kPa まで 1 kPa/min 以下で等方圧密し、 $\sigma_{\text{h net}}$ を保持したまま、載荷速度 $\dot{\varepsilon}_v=0.02\%/min$ で排気・排水条件で単調鉛直載荷した。一般に設計で用いられる強度定数や変形係数は締め固めた供試体の飽和三軸圧縮試験から求められる事が多いが、本研究では締め固めた土の不飽和状態の供試体の強度変形特性を調べる事から始める事とした。また、6.9 では現場で測定した不飽和状態の締固め土の強度変形特性と室内試験から定めた設計値との対応を調べる事を目的に、締め固めた土の供試体の飽和化が与える強度変形特性への影響を、不飽和供試体の強度変形特性と比較検討した。飽和化した供試体も全て不飽和状態で自立させ、有効応力 $p'=10\text{ kPa}$ から 50 kPa まで 1 kPa/min 以下で等方圧密し、 σ'_h を保持したまま、排水条件で単調鉛直載荷した。

本研究では単調載荷の他に等方圧密履歴の影響を調べる事を目的とした「中圧等方圧密試験」、局所的な土の変形特性を調べる事を目的とした「繰返し載荷試験」を実施している。これらそれぞれの試験については、応力経路や応力時刻歴等でその都度説明する事とし、本章では「単調載荷試験」として共通する基本的な操作についてのみ説明する。



図 3-2-1 採取時の稲城砂試料



図 3-2-2 炉乾燥後の試料のふるい分け

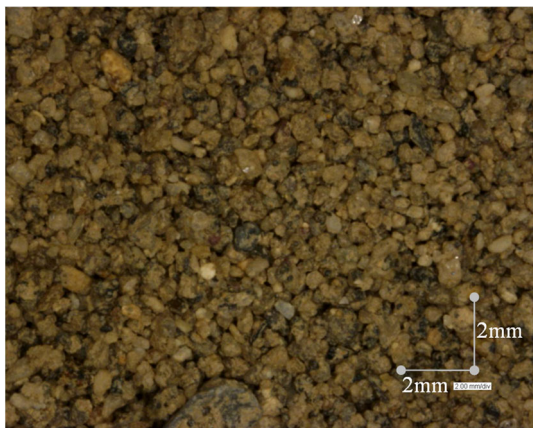


図 3-2-3 稲城砂試料の拡大状況

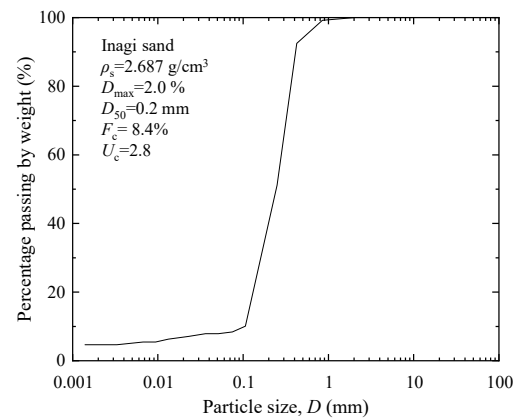


図 3-2-4 稲城砂の粒径加積曲線

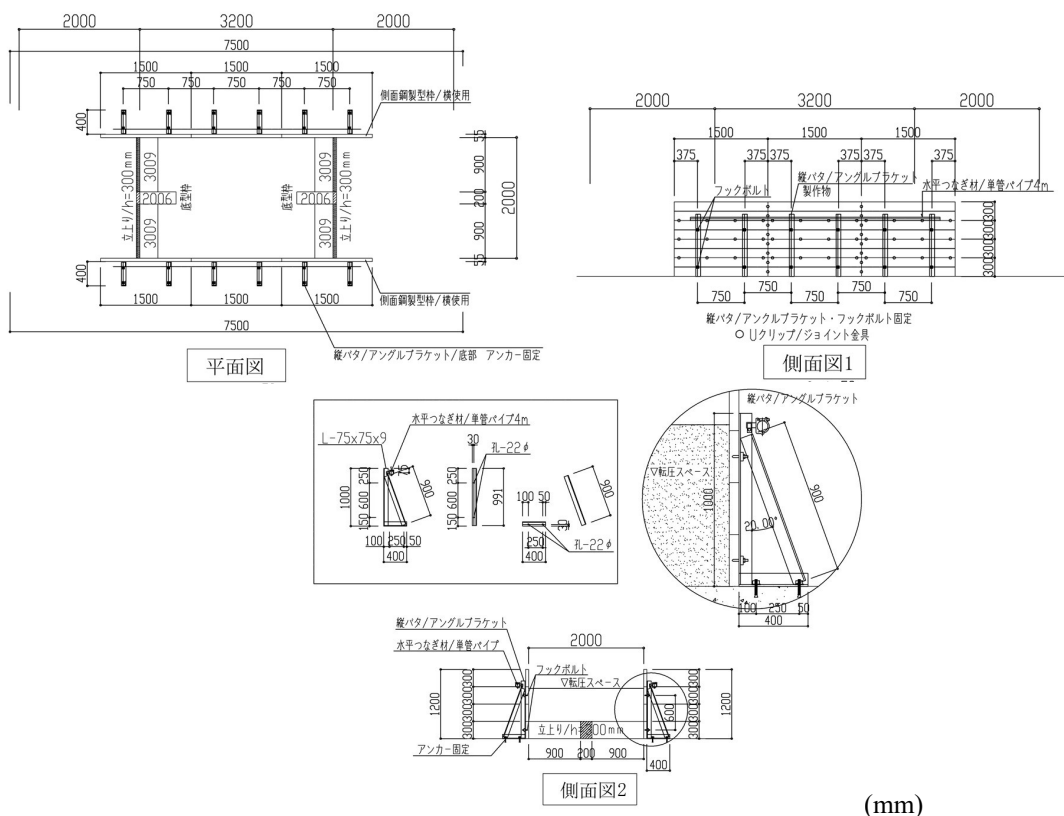


図 3-2-5 鋼製土槽一般図

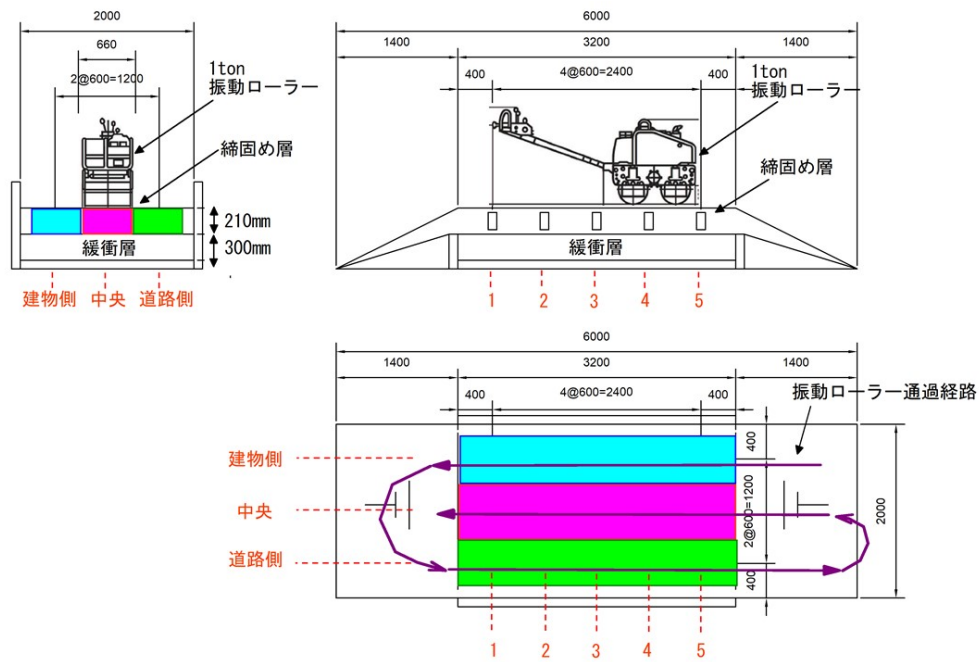


図 3-2-6 試験盛土の土層構成



図 3-2-7 1ton 振動ローラー



図 3-2-8 小型プレート

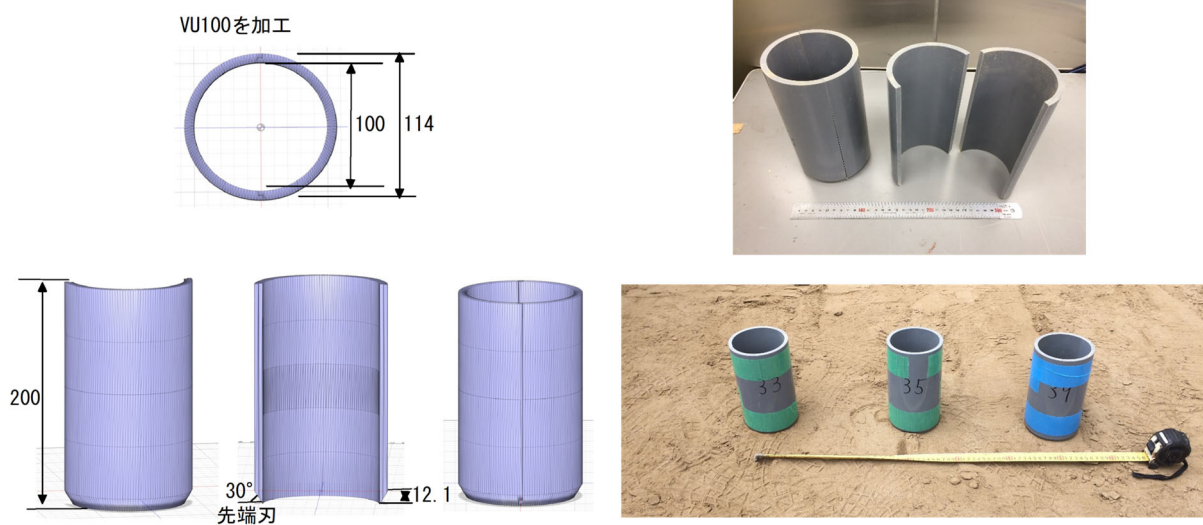


図 3-2-9 三軸用サンプリングモールド

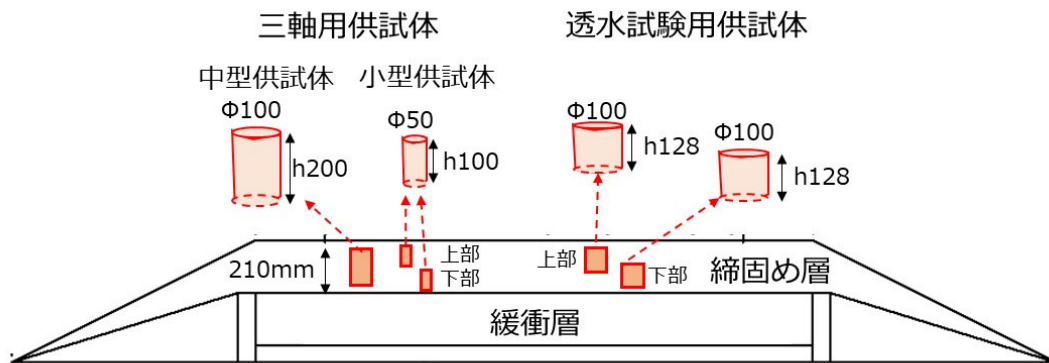


図 3-2-10 供試体採取位置

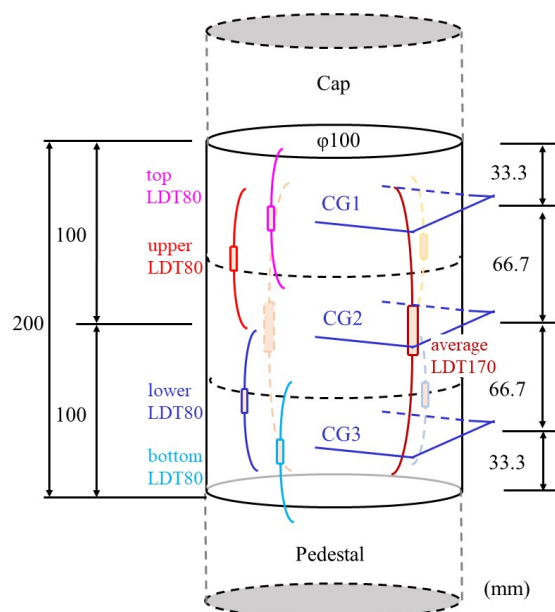


図 3-2-11 局所変位計配置(中型三軸供試体)

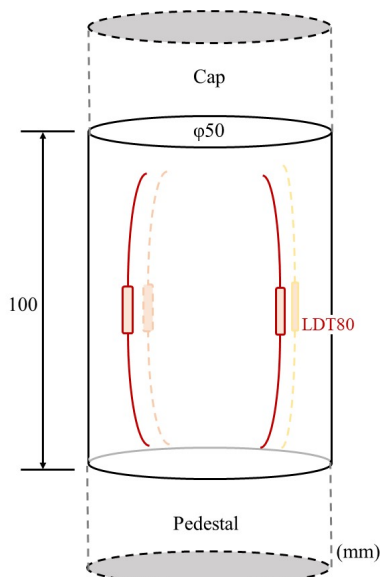


図 3-2-12 局所変位計配置(小型三軸供試体)

3.3 供試体の作製方法

3.3.1 試験盛土の作製方法

試験盛土は以下の手順で作製した。

(1) 土槽と干渉層の作製

1. コンクリート床板にあと施工アンカー(M16)を打設する(図 3-3-1)。
2. アンカー位置に合わせてブラケットと鋼製壁を建て込む(図 3-3-2)。
3. ブラケットと固定しながら側壁を組み立てる(図 3-3-3)。
4. 妻壁を設置する(図 3-3-4)。
5. 干渉層の土を投入し、敷き均しする(図 3-3-5)。
6. 盛土層へのアプローチスロープを設置し、ゴムマットで固定する(図 3-3-6)。
7. 小型プレートと 1ton 振動ローラーで沈下が収束するまで十分に締め固める(図 3-3-7)。
8. 干渉層表面を不陸修正する(図 3-3-8)。

(2) 試験盛土の作製

1. あらかじめ測定しておいた自然含水比の試料をコンテナ箱内に用意する(図 3-3-9)。
2. 試料の自然含水比を基にして、試験盛土が計画含水比になるように砂試料の単位重量あたりの加える水を準備する(図 3-3-10)。

ここで、準備した試料の単位重量 W_s あたりの加水量 W_A は、試料の自然含水比を考慮して下式のように設定した。

$$W_A = W_w - W_s + W_d \quad (3-3-1)$$

ここで、 W_w : 砂試料の含水比を目標値に調整する為に必要な水重量 $= W_d \times \frac{w_t}{100}$

$$W_d: \text{絶対乾燥状態の試料重量} = \frac{W_s}{1 + \frac{w_n}{100}}$$

w_t : 目標含水比

w_n : 試料の自然含水比

3. 練混ぜミキサー内に準備した砂試料と試料の単位重量あたりの水を投入し、2 分程度攪拌混合する(図 3-3-11)。
4. 混合した試料を土槽内に撒き出し、敷き均しする(図 3-3-12)。なお、締め固め後に盛土層厚が $t=210\text{mm}$ 程度となる撒き出し・敷き均し厚は、経験的に $t=270\sim 290\text{mm}$ 程度であった。
5. オートレベルで試験盛土の天端の高さを測定し、締め固め前の初期状態(沈下量 $S=0$)とする(図 3-3-13)。
6. 転圧による局所的に大きい沈下を防ぐため、小型プレートで盛土表面を一様に予備転圧する(図 3-3-14)。
7. 1ton 振動ローラーで所定の回数を転圧する(図 3-3-15)。

ここで、1ton 振動ローラーは重複しないように建物側レーン、歩道側レーン、中央レーンの順に通過した時点で通過回数を $N_p=1$ とし、 $N_p=4, 8, 12, 16$ の時点で試験盛土天端の沈下量を測定した後に供試体採取する。図 3-3-16 に含水比別の 1ton 振動ローラーの通過回数と盛土天端の平均沈下量測定例を示す。

3.3.2 試験盛土供試体の採取及び保管

試験盛土供試体の採取は及び保管は以下の手順で実施した。

1. 対となる半割モールドを合わせ、テープで上下を固定する。
2. 試験盛土中央レーン上の採取箇所を設置する(図 3-3-17)。
3. モールド内面より内側(採取予定の部分)を傷つけないように、モールド周辺を先行掘削する(図 3-3-18)。
4. モールド下端の刃先と掘削部下端の差が 20～30mm になったら、モールドを掘削下端まで鉛直方向に静かに落とし込む。
5. 落とし込んだモールド周辺に溜まった土を排出する。
6. 刃先が盛土天端から 210mm 程度となるように、手順 3～6 を繰り返す(図 3-3-19)。
7. 刃先下端からさらに 30～50mm 掘削し、刃先下端の下部盛土を円錐状に切り落とし、盛土と縁切りする。
8. 円錐状の下部盛土を含む供試体とモールドを取り上げる。
9. 上下反転して盛土上に設置し、モールド下部(刃先側)の供試体端面を直ナイフで整形する。
10. モールド下部に蓋を設置し、上下反転してモールド上部の供試体端面を直ナイフで整形する(図 3-3-20)。
11. モールド上部にも蓋を設置し、テープで蓋の固定と隙間の養生をする(図 3-3-21)。
12. 乾燥を防ぐために、ポリ塩化ビニール袋またはラップフィルムで養生し、湿らせた布を敷いたコンテナ箱内で保管する(図 3-3-22)。

3.3.3 室内締固め供試体の作製方法

本研究では突固め法で 5 層に分けて締め固めて作製した供試体を室内締固め供試体としている。ただし、本章では局所変位計による供試体の変形特性評価方法の検証を目的に、異なる 2 つの方法(空中落下法、湿潤振動締固め法)で作製した供試体も準備した。

【5 層突固め法】

5 層突固め法は地盤工学会(2009)の「土の三軸試験の供試体作製・設置方法(JGS 0520)」において、「トリミング法」に分類されるが、使用器具に関する記述はあるものの供試体作製方法に関する詳しい規準は示されていない。ただし、5 層突固め法は「突固めによる土の締固め試験(JIS A 1210)」や「安定処理度の突固めによる供試体作製方法(JGS 0811)」で定めた締固めエネルギー E_c と対応させる事で、現場管理における乾燥密度や強度変形特性の指標を設ける事が出来る事から、平川ら(2008)、Tatsuoka et al.(2013)、Kongsukprasert et al(2005)等の砂礫材やセメント系安定処理土を扱う研究に用いられている。

5 層突固め法で締め固めた供試体は以下の手順で作製した。

1. あらかじめ測定しておいた自然含水比を基にして、供試体含水比が所定の値になるようコンテナ箱内にて加水し、よく攪拌する(図 3-3-23)。
2. 内径 10 cm、高さ 20 cm の鋼製モールド(コンクリート用拘束モールド)内に試料を投入する。ただし、試料と構成モールドが締固め後に密着すると、脱型時に供試体が損傷する恐れがあるため、鋼製モールド内側面と底面にポリエステル・ポリエチレン製で厚さ 0.1mm の縁切りフィルムシートを設置する(図 3-3-24)。
3. 締固めた状態で各層 4 cm 程度となるように 5 層に分けて調整した試料を 1 層分ずつ鋼製モールド内に投入し、突固め回数一定条件で、突固め法のランマー($W_R=2.5\text{kg}$ または 4.5kg)で締め固める(図 3-3-25)。4 層目から、カラーを取り付けた。

ここで、締め固めた後の供試体の乾燥密度を目標値に近づけるために、下式に目標の乾燥密度を代入して得られた1層あたりの試料重量をモールド内で高さ 4 cm になるまで締め固めた。

$$m = \left(\rho_d \times V \times \frac{1+w}{100} \right) / 5 \quad (3-3-2)$$

m : 1 層あたりの試料重量 (g)

ρ_d : 試料の設定乾燥密度 (g/cm³)

V : モールド容積 (cm³)

w : 試料の設定含水比 (%)

締固めエネルギー E_c (kJ/m³) は、下式で定義している。

$$E_c = \frac{W_R \times H \times N_L \times N_B}{V} \quad (3-3-3)$$

W_R : ランマーの重量 (kN)

H : ランマーの落下高さ (m)

N_L : 層数

N_B : 1 層あたりの突固め回数

V : モールド容積 (m³)

本研究で扱った締固めエネルギーは 3 種類である。詳細は以下の通りである。

$0.2E_c = 120 \text{ kJ/m}^3$: $W_R=0.0245\text{kN}$ (2.5 kg ランマー)、 $H=0.3\text{m}$ 、 $N_L=5$ 、 $N_B=5$ 、 $V=0.00157 \text{ m}^3$

$1.0E_c = 570 \text{ kJ/m}^3$: $W_R=0.0245\text{kN}$ (2.5 kg ランマー)、 $H=0.3\text{m}$ 、 $N_L=5$ 、 $N_B=24$ 、 $V=0.00157 \text{ cm}^3$

$4.5E_c = 2530 \text{ kJ/m}^3$: $W_R=0.0441\text{kN}$ (4.5 kg ランマー)、 $H=0.45\text{m}$ 、 $N_L=5$ 、 $N_B=40$ 、 $V=0.00157 \text{ cm}^3$

4. カラーを取り外し、供試体上端面はなるべくフラットになるように試料で空隙を埋めながら、直ナイフで整える(図 3-3-26)。
5. コンテナ箱内に余った試料を用いて含水比を測定し、これを供試体の含水比とする。

なお、Ladd(1978)は多層に分けて密度調整しながら締め固める供試体について、下層ほど乾燥密度が大きくなる事を防ぐ事を目的に、各層の試料投入量を調整する **under-compaction method** を提案しているが、本研究では式 3-3-3 の各層の締固めエネルギーを一定に供試体作製する事とし、この方法は適用しなかった。

【空中落下法】

空中落下法は、地盤工学会(2009)の「土の三軸試験の供試体作製・設置方法(JGS 0520)」において、「空中落下法」に該当する。本研究では、比較的一様な緩詰め供試体として、鉛直深度方向に設置した局所変位計による供試体の変形特性評価の検証を目的に作製した。

空中落下法による供試体は「砂の最小密度・最大密度試験方法(JIS A 1224)」の最小密度試験に用いる漏斗(図 3-3-27)で以下の手順で作製した。また、三軸圧縮試験結果は後に示す。

1. 炉乾燥した試料をデシケーターに移して室温になるまで冷ます。
2. ペDESTAL上にはメンブレンと負圧法用のモールドを設置する(図 3-3-28)。
3. モールド内のペDESTAL中央に漏斗を立て、試料の分級が起こらないように漏斗の中に試料を入れる。
4. 漏斗を一定の速度で鉛直に上げる。この時、モールド内の砂の最頂部と漏斗の口先が常に一致し、かつ試料の流れが途切れないう試料 5g 程度を漏斗内に継ぎ足すよう注意を払う(図 3-3-29)。
5. モールド上面まで漏斗の口先を上げ、モールド上端面全周から溢れさせる。
6. モールド上端面の縁に直ナイフを載せ、滑らせながら余盛部分を除去する。
7. 以降は 3.5.1 試験手順の手順 8 へ進んで、キャップを設置し((図 3-3-30))、供試体自立時にモールドを解体する。

【湿潤振動締固め法】

湿潤振動締固め法は、地盤工学会(2009)の「土の三軸試験の供試体作製・設置方法(JGS 0520)」において、「締固め法」に該当する。本研究では、比較的一様な密詰め供試体として、鉛直深度方向に設置した局所変位計による供試体の変形特性評価の検証を目的に作製した。

湿潤振動締固め法の詳しい作製基準に関する詳しい記述はないため、越智ら(1984)を参考に鋼製モールド、木づち、重錘を用いて以下の手順で作製した(図 3-3-31)。また、三軸圧縮試験結果は後に示す。

- 1～2. 5 層突固め法と手順 1～2 は同様
3. 締固めた状態で各層 4 cm となるように 5 層に分けて調整した試料を鋼製モールド内に投入し、重錘($W=2.95\text{kg}$)を死荷重として載せる。
4. 鋼製モールドと重錘を片手で軽く押さえ、木づちをモールド側壁に垂直に打撃する。振幅は 5cm 程度とし、同一点を 5 連打する(図 3-3-32)。
5. モールドを 45° 程度回転させ、5 連打を繰り返し、モールド側面を 100 回程度打撃する。
6. 試料の層厚を確認し、層厚が 4cm となるまで手順 4 を繰り返す。
7. 上層の試料を投入し、手順 3～5 を繰り返す。4 層目から、カラーを取り付けた。
8. カラーを取り外し、供試体上端面はなるべくフラットになるように試料で空隙を埋めながら、直ナイフで整える。
9. コンテナ箱内に余った試料を用いて含水比を測定し、これを供試体の含水比とする。



図 3-3-1 あと施工アンカー



図 3-3-2 ブラケット建て込みと鋼製壁組み立て



図 3-3-3 側壁組み立て



図 3-3-4 妻壁設置・固定



図 3-3-5 緩衝層の土投入・敷き均し

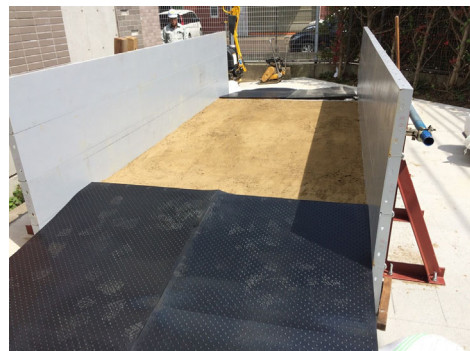


図 3-3-6 アプローチスロープの設置



図 3-3-7 干渉層の締め固め



図 3-3-8 干渉層表面の不陸修正



図 3-3-9 砂試料準備



図 3-3-10 加水量調整



図 3-3-11 試料の攪拌混合



図 3-3-12 砂試料の撒き出し・敷き均し



図 3-3-13 試験盛土天端高測定



図 3-3-14 小型プレートで予備転圧



図 3-3-15 1ton 振動ローラーで締め固め

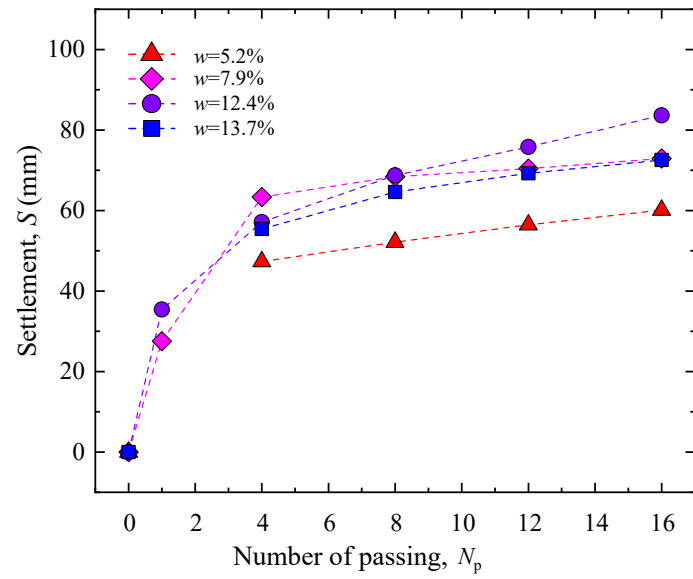


図 3-3-16 試験盛土の沈下量 S ～締固め機械通過回数 N_p 関係



図 3-3-17 試験盛土上へのモールド設置



図 3-3-18 周辺土掘削



図 3-3-19 盛土層下端まで掘削



図 3-3-20 供試体端面整形



図 3-3-21 試験盛土供試体養生



図 3-3-22 試験盛土供試体保管



図 3-3-23 加水した試料と締め固め器具



図 3-3-24 モールド内に縁切りフィルム設置



図 3-3-25 突固め法による締め固め



図 3-3-26 供試体上端面整形



図 3-3-27 空中落下法に使用した漏斗

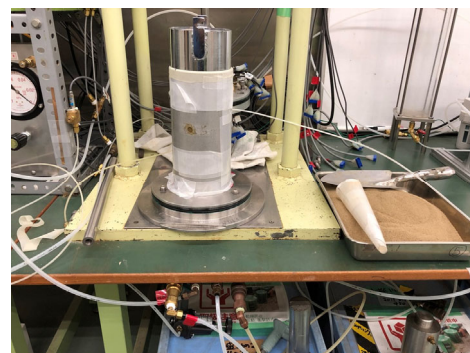


図 3-3-28 負圧法のモールドと試料準備



図 3-3-29 試料投入状況



図 3-3-30 キャップ設置



図 3-3-31 湿潤振動締固めに使用した重錘と木づち



図 3-3-32 鋼製モールド打撃

3.4 試験装置概要

3.4.1 試験装置システム概要

鉛直荷重載荷装置として、AC サーボモーターと電磁クラッチ式載荷装置からなるシステムを用いた。この装置は、電磁クラッチによる滑らかな載荷方向の回転の制御により、軸ひずみ速度の変化を任意の変化率で実現することが可能である。鉛直荷重載荷装置は 12 bit D/A 変換器を介して PC に接続されており、PC からの電気信号で、任意の軸ひずみ速度での載荷を自動制御によって行うことが可能である。供試体に加わる軸荷重はロードセルで測定し、供試体の軸変形は外部変位計および LDT、側方ひずみはクリップゲージ、間隙水圧およびセル圧はひずみゲージ式圧力計で測定した。計測データは、任意の時間間隔で 16bit A/D 変換器を介して PC に記録した。不飽和供試体の三軸圧縮試験装置の概略図を図 3-4-1、試験装置システム外観を図 3-4-2 に示す。また、飽和化した供試体の三軸圧縮試験装置を図 3-4-3 に示す。

3.4.2 鉛直荷重載荷装置

本研究で用いた中型三軸圧縮試験の供試体寸法は、初期高さが $\phi 100 \times h 200$ mm である。鉛直載荷はギヤ式載荷装置(図 3-4-4)で行い、ひずみ速度制御、応力制御を連続的に制御可能となっている(佐藤ら, 1994)、(Tatsuoka et al., 1999)。載荷能力は 50 kN(=5 tonf)である。動力源である AC サーボモーターの回転数は 1~3000 rpm の範囲まで 1 rpm 単位で制御可能であり、広い範囲のひずみ速度が設定可能である。そのモーターの軸回転は減速ギヤによって一定速度まで減速され、平歯車を経てかさ歯車 A・B に伝達される。モーターの回転はギヤによって減速され、ボールネジにより軸方向に裁荷する。かさ歯車 A・B は、回転速度が等しく、同じ軸を中心にして逆方向に回転しており、かさ歯車 A・B にそれぞれ設置されている電磁クラッチ A・B のどちらかを接続することにより、載荷軸の回転方向が逆転する。したがって、モーターの回転方向を逆転させずに電磁クラッチの接続切替のみで載荷方向を瞬時に逆転させることができる。モーターの回転数はサーボドライバーに 0~10 V の電圧を与えることにより任意の速度に設定できる。さらに、載荷速度を一定に保つ場合は、モーター回転数および減速ギヤを調整することにより、任意の載荷速度を実現する。また、載荷速度を急変させる場合はモーター回転数を制御することにより最大 3000 倍の載荷速度領域を制御することが可能である。また、電磁クラッチの接続切り替えにより連続的な除荷・再載荷、クリープ載荷、応力緩和が可能である。電磁クラッチ式載荷装置の特徴を以下に挙げる。

- ・ ひずみ速度の変動が少ない。
- ・ 載荷方向の反転時のバックラッシュ(遊び)が少ない。
- ・ ギヤボックスを積み重ねることにより、超低速軸ひずみ載荷速度の設定が可能である。さらに AC サーボモーターの導入により試験中に約 3000 倍の範囲で連続的に軸ひずみ載荷速度を変えることが可能である。
- ・ 電磁ブレーキにより、静止状態が安定して保持できる。
- ・ 安価である。
- ・ 載荷方向の制御が簡単である。
- ・ 低速時のトルクが高い。

サーボモーターの回転速度と載荷軸の変形速度との関係には高い線形性があり、サーボモーターの回転数を変えることによって、軸載荷変位速度を高精度で制御することが可能である。

3.4.3 水平荷重載荷装置

供試体側面への圧力の載荷は拘束圧が 90 kPa までの範囲において、大気圧下で供試体内に負圧を発生させることで実施可能である。それ以上の拘束圧を供試体側面へ載荷する場合は、三軸耐圧セルを用いて拘束圧を加えて行った。セル圧・背圧載荷装置の動力はコンプレッサーによって発生する空気圧である。コンプレッサーで発生した変動空気圧は、一次タンク、二次タンク、調整用レギュレーターを介して載荷装置に供給される。側圧載荷装置として載荷用空圧レギュレーターを用いた。セル圧はセル上部に取り付けられたカプラーよりセル内部の供試体の側面に載荷される。

3.4.4 計測装置

供試体に作用する荷重と供試体の変形は、各測定装置によって電圧に変換される。その後、測定電圧はカットオフ周波数 5Hz~100Hz の低周波数帯用のノイズフィルターボックスとローパスフィルター付きの動ひずみアンプで高周波数域のノイズを減衰し、A/D 変換器によって PC に取り込まれて記録される。A/D 変換器の入力レンジは、10 V(±5 V)、分解能は 16 bit である。測定項目は鉛直軸荷重、外部軸変位、拘束圧、間隙水圧、局所変位(LDT、クリップゲージ)の 5 項目であり、その時間とともに変化する出力電圧を自動記録した。計測チャンネルは上記の 5 項目(LDT はチャンネル 8 つ、クリップゲージはチャンネル 3 つ)で 15 チャンネルである。また、飽和化した供試体の三軸試験は体積変化測定装置を含め 16 チャンネル使用した。なお、各測定装置については以下に示す。

(1) 鉛直軸荷重計(ロードセル)

本研究で使用した鉛直軸荷重計(以下、ロードセル)は、平行平板型一方向ロードセルである(図 3-4-5)。このロードセルは三軸セル内に設置されており、測定された荷重は載荷軸の摩擦の影響を受けない。容量は 20 kN(2 tonf)である。

(2) 外部軸変位計(External Displacement Transducer)

本研究では供試体全体の鉛直ひずみの測定に外部軸変位測定装置(以下、外部変位計または EDT と称す)を用いた(図 3-4-6)。変位をひずみゲージ式変位変換器と動ひずみアンプにより電圧変換して観測している。定格容量は 25 mm であり、分解能は 10 μ m である。外部変位計は、実験全体を通じた供試体の高さの変化を測定するために取り付けられており、実験中は常に供試体高さを測定している。この結果は載荷装置の変形(システムコンプライアンス)と供試体上下端面でのベディングエラーの影響を含んでいるため、供試体の鉛直ひずみが局所変位計で測定する事の難しいひずみレベル $\varepsilon_v=3\sim 10\%$ 程度の変形特性を考察する際に用いた。実験結果を示す図の鉛直変位、鉛直ひずみに「EDT」と記載がない場合は、局所変位計で測定したデータである。

(3) セル圧・背圧測定装置

側圧載荷装置から受ける空気圧力をひずみゲージ式圧力計(共和電業、PGMC-A-200KP)と動ひずみアンプによって電圧に変換して測定した。拘束圧 98 kPa 以下の際は三軸耐圧セルを使用せず、拘束圧として供試体内部に作用する負圧を測定した。圧力計の定格容量は 200 kPa である。拘束圧 98 kPa 以上については、空気圧力をひずみゲージ式圧力計(共和電業、PGM-20KH)と動ひずみアンプによって電圧に変換して測定した。この場合は、三軸耐圧セルを設置してセル圧を測定した。また、空気圧力系統の配管には肉厚細径のシンフレックスチューブを用いることで、空気圧力の強弱で径の変化による体積誤差を極力小さくしている。ひずみゲージ式圧力計を図 3-4-7 に示す。

(4) 局所軸変位測定装置(Local Deformation Transducer)

局所軸変位測定装置として、LDT(Local Deformation Transducer)を用いた。これは細長く薄いリン青銅(焼き入れたバネ材料)にひずみゲージを貼り付けたものであり、リン青銅板両端の長軸方向の変位によって生じる曲げひずみをひずみゲージによって計測する変位計である。LDTを用いて供試体の局所ひずみを計測する最大の利点は、ベッディングエラーを含まないひずみの計測が出来ることである。LDT は両端をメンブレン表面に接着剤を用いて一体化されたヒンジで固定する。ヒンジ間の変位は LDT の曲げひずみの変化として計測され、ホイートストンブリッジ回路を構成しているアクティブゲージの抵抗値変化によって生じる電圧変化を動ひずみアンプにより増幅・計測される。LDT は供試体上下端面を含まず供試体の平均変位を測定する長さ 170mm の LDT170(4 ゲージ)と、供試体の上半と下半の局所的な変位を測定する長さ 80mm の LDT80(2 ゲージ)が直径の両端に対になるよう設置し、軸ひずみを二つの値を平均して求めた。供試体端面を含む供試体の局所変位を測定する LDT80 は上下に一つずつ設置している。なお、これらの LDT の出力特性は二次曲線により近似した。

(5) 水平変位測定装置

中型供試体の水平変位測定装置として、クリップゲージ(Clip Gauge)を用いた。メカニズムは LDT と同様でリン青銅バネにひずみゲージを貼り付けてあり、アクティブゲージの抵抗値変化によって生じる電圧変化を動ひずみアンプで計測する。あらかじめ供試体直径サイズに合わせたフレームに固定しており、LDT と同様にメンブレン上に接着した二つのヒンジに取り付け測定する。実験は上(CG1)・中(CG2)・下(CG3)の三箇所に分けて設置した。

LDT170、LDT80 及びクリップゲージを図 3-4-8 に、局所変位計を供試体に設置した例を図 3-4-9 に示す。

(6) 飽和供試体の体積変化測定装置

飽和化した小型供試体の体積変化測定は、差圧発信器(低差圧計 FKCS35V5-BACY-Y-BA)を用いた。差圧の測定範囲は $\pm 130\text{kPa}$ である。排水試験時のビュレット内の水圧変化を飽和供試体内の間隙水量の出入りによる体積変化として測定している。載荷中の供試体の体積は時々刻々と変化する為、精度が高く、圧力変化によるタイムラグの少ない当装置を選定した。

飽和供試体の体積変化測定装置を図 3-4-10 に示す。

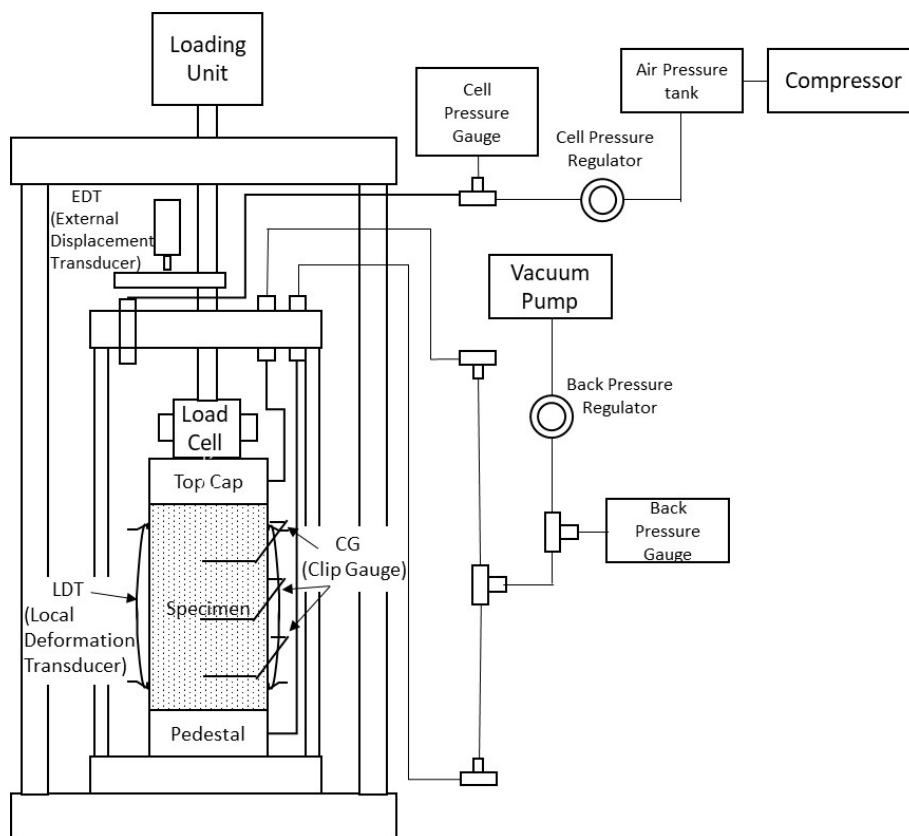


図 3-4-1 三軸試験装置概略図(不飽和供試体)

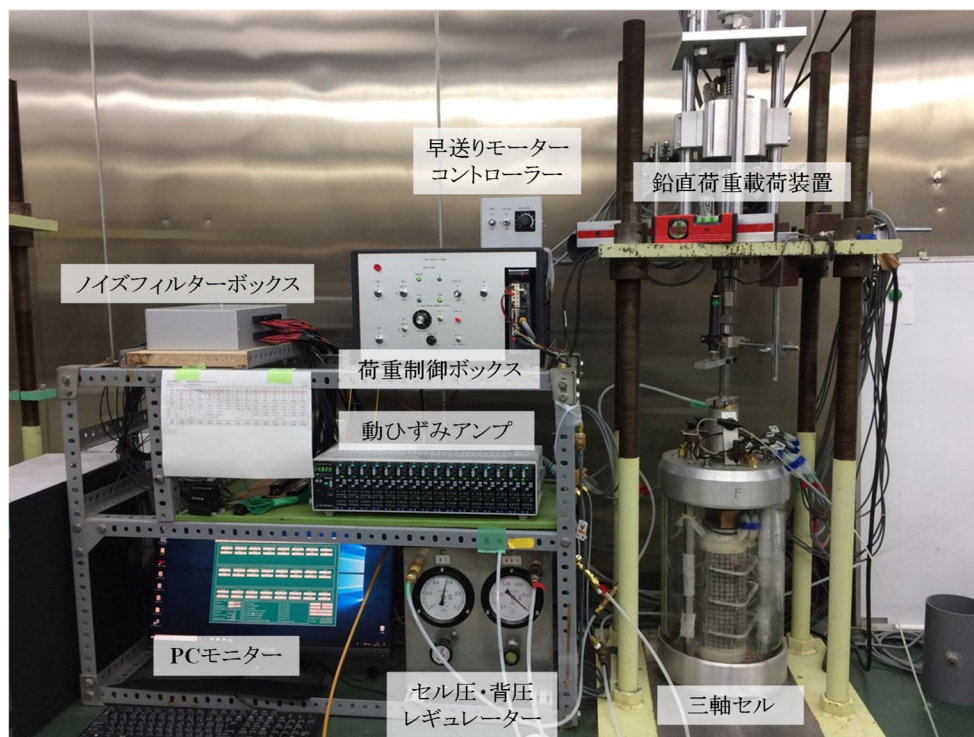


図 3-4-2 載荷装置外観

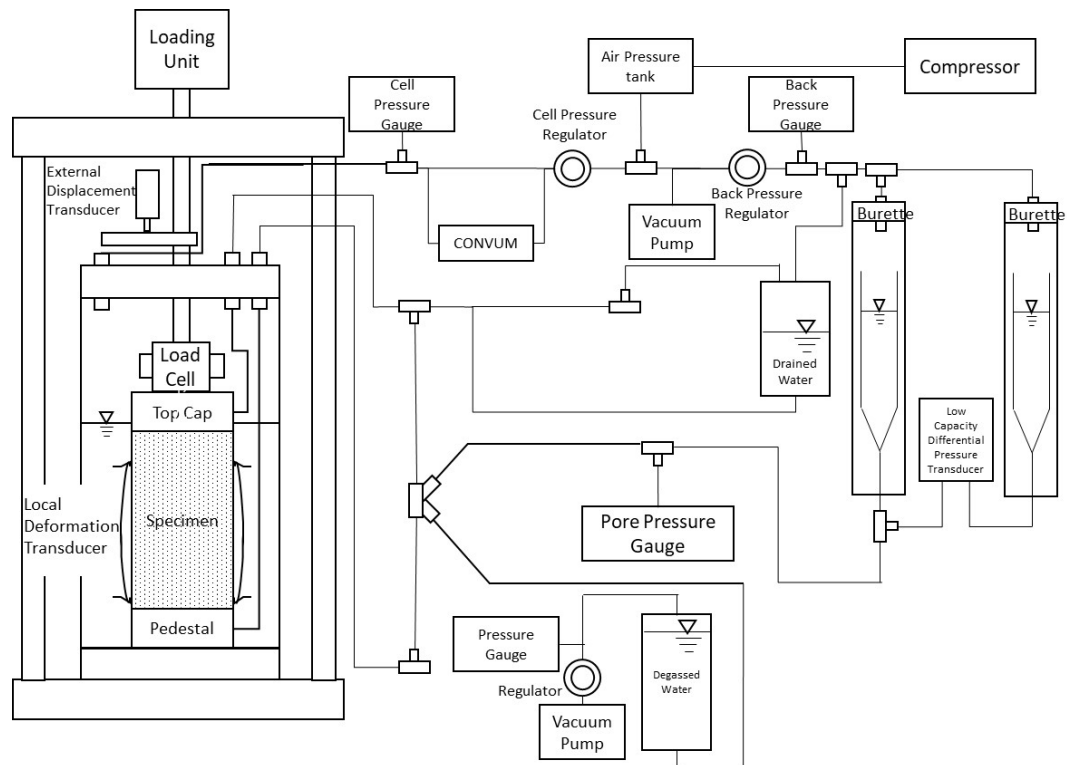


図 3-4-3 三軸試験装置概略図(飽和供試体)

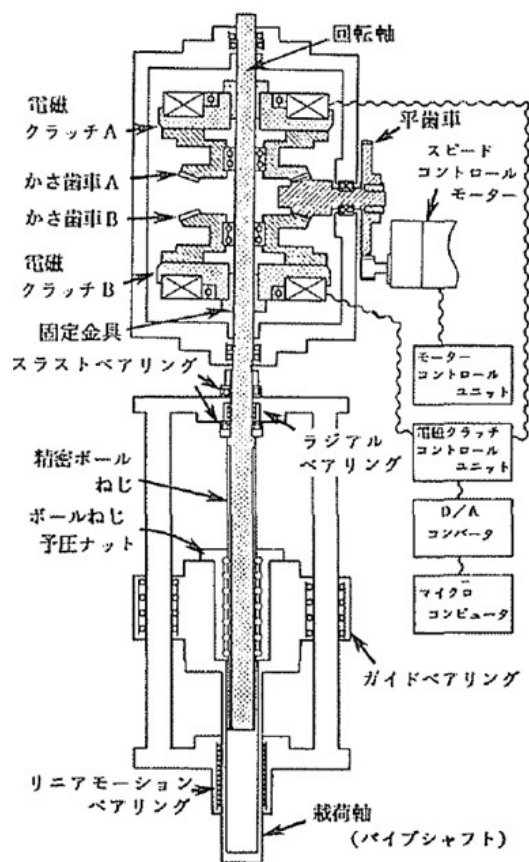
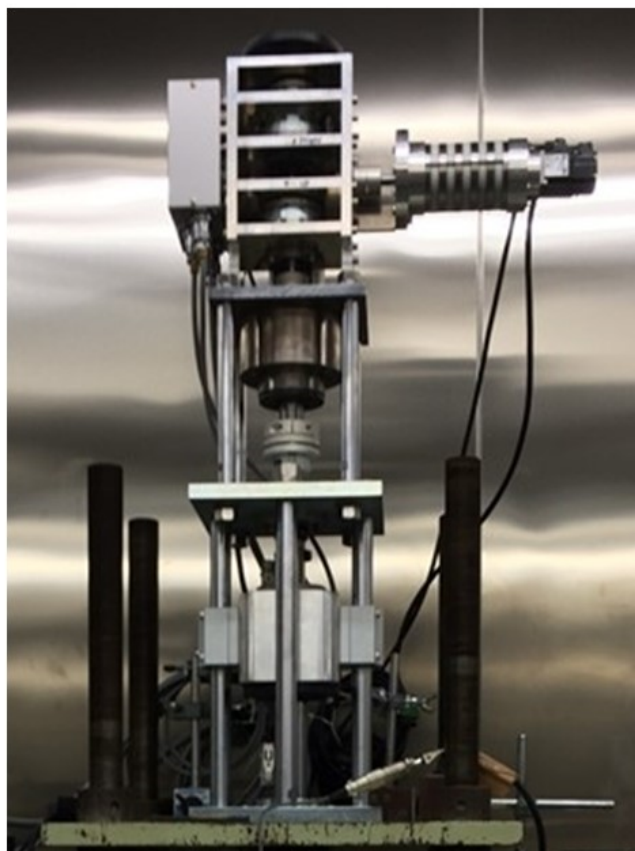


図 3-4-4 電磁クラッチ式鉛直荷重装置(左模式図:佐藤ら, 1992)



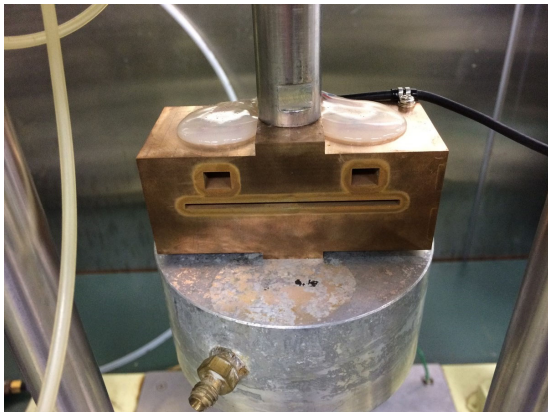


図 3-4-5 鉛直軸荷重計(ロードセル)



図 3-4-6 外部変位計(EDT)



図 3-4-7 ひずみゲージ式圧力計

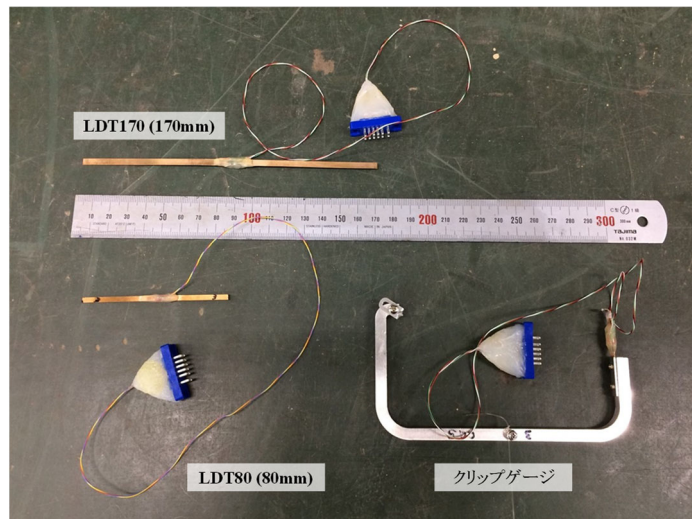


図 3-4-8 局所変位計 (LDT とクリップゲージ)

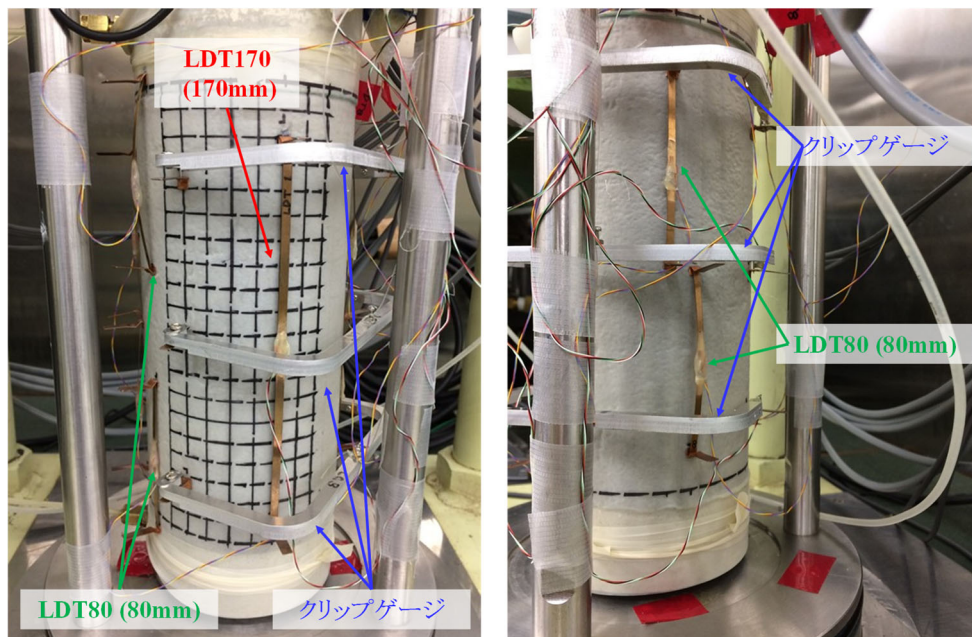


図 3-4-9 局所変位計供試体設置例



図 3-4-10 飽和供試体の体積変化測定装置

3.5 試験手順

3.5.1 不飽和供試体の中型三軸圧縮試験

1. PC の電源を入れ、三軸圧縮試験の制御・計測プログラムを起動する。
2. 供試体とペDESTAL及びキャップの接触面に摩擦軽減層(グリースとメンブレン)を設置する。
ここで、排水孔には $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ のろ紙を設置し、排気・排水路を確保する。
3. モールドや蓋、固定用テープを含む供試体の重量を測定する(図 3-5-1)。
4. 作製した供試体をモールドより脱型し、ペDESTAL上にセットする(図 3-5-2)。
ここで、供試体とモールドの重量から脱型後のモールドおよび供試体作製に使用したフィルムシートやテープの重量を引くことによって、供試体重量を求めておく。
5. メンブレン拡張器を用いてメンブレンを供試体にかぶせる。
ここで、メンブレンにはあらかじめマーカーペンを用いて、供試体の局所変形を目視確認するための格子線と、局所変位計ヒンジ位置の標点を設けておく。
6. ペDESTALにメンブレンを被せ O リング(本研究では帯状にしたメンブレンを使用)でシールする。
7. 三軸用支柱と上盤を設置し、軸荷重が加わっていない状態で、ロードセルのゼロ点設定と校正係数の入力を行う。
8. 軸クランプを解放し、供試体にキャップを載せる。ロードセルの読み値を $1 \sim 15 \text{ N}$ 程度にキャップを設置し、再び軸クランプを締める。
9. キャップにメンブレンを被せ O リング(本研究では帯状にしたメンブレンを使用)でシールする。
10. 大気圧開放状態で間隙水圧計のゼロ点設定と校正係数の入力を行う。
11. 軸クランプを締めたまま、載荷軸と結合する。
12. 外部変位計(EDT)をセルの上板のガイドに設置する。
13. 軸クランプを開放し、外部変位計のゼロ設定と校正係数の入力を行う。
14. 最大軸ひずみ速度を $0.01 \text{ \%}/\text{min}$ 程度で軸荷重制御しながら等方圧密し、供試体に負の間隙水圧(以下、負圧と称す)を $u_w = -10 \text{ kPa}$ とする(図 3-5-3)。
15. メンブレン厚や摩擦軽減層厚を除いた供試体寸法(高さ及びクリップゲージを設置する 3 深度の直径)を、直線定規とノギスを用いて測定する。
この時点を締め固めた供試体の初期状態とした。(供試体自立時と称す)
16. 局所変位計として LDT とクリップゲージ(CG)を設置するためのヒンジを、メンブレン上の標点に CN 接着剤(東京測器研究所製)で貼り付ける。
17. LDT は変位を与えないよう鉛直に自由に釣った状態で所定の電圧に合わせ、校正係数の入力及びゼロ点設定する。また、クリップゲージは水平に置き、測定部分に触れない状態で、所定の電圧に合わせ、校正係数を入力する。
18. LDT をヒンジに設置し、ゼロ点設定時からの変位(mm)を確認する。
この時の LDT のヒンジ間距離(LDT 全長－ヒンジ設置時の変位)が供試体自立時の鉛直方向の初期高さであり、等方圧密前の初期状態(鉛直ひずみ $\epsilon_v=0$)とする。
19. クリップゲージをヒンジに設置し、ゼロ点設定する(図 3-5-4)。
この時のクリップゲージのヒンジ間距離を供試体自立時の水平方向変位の初期値とし、等方圧密前の初期状態(水平ひずみ $\epsilon_h=0$)とする。
20. 等方圧密データを保存するフォルダを指定し、計測を開始する。

21. 最大軸ひずみ速度を 0.01 %/min 程度で軸荷重制御しながら等方圧密し、供試体に背圧の負圧を増加させて所定の拘束圧まで載荷する。(等方圧密過程と称す)
22. 所定の圧密圧力にて 1 時間以上圧密後、外部変位計、LDT、クリップゲージの圧密による変位 (mm)をそれぞれ確認し、等方圧密過程により変化した供試体寸法を求める。これを載荷前の初期状態とし、外部変位計、LDT、クリップゲージの値をゼロ点設定する。
23. PC で載荷プログラムを入力し、設定する。
24. 載荷データを保存するフォルダを指定し、計測を開始する。
25. 載荷装置が、PC 制御になっていることを確認し、軸ひずみ速度 0.02%/min で鉛直軸荷重載荷を開始する。(載荷過程と称す)
26. LDT とクリップゲージは測定限界前に取り外す。
27. 外部変位計が鉛直軸ひずみ 10 %程度に達したら実験終了とする。
28. 載荷制御と載荷データの計測を停止し、軸クランプを締める。
29. 拘束圧を徐荷し、載荷軸との接合部を緩め、供試体を解体する。
30. 解体した供試体の重量を測定し、供試体の含水比を確認する。

3.5.2 不飽和供試体の小型三軸圧縮試験

3.5.1 不飽和供試体の中型三軸圧縮試験の手順 13 まで同様で、手順 14 から以下に示す。小型三軸試験では水平変位を測定しておらず、等方圧密過程～載荷過程における水平変位が一定であると仮定し、水平ひずみは無視した。

14. メンブレン厚や摩擦軽減層厚を除いた供試体寸法(高さ及び 3 深度の直径平均)を、直線定規とノギスを用いて測定する(図 3-5-5)。

この時点を締め固めた供試体の初期状態とした。(供試体自立時)

15. 局所変位計として LDT を設置するためのヒンジを、メンブレン上の標点に CN 接着剤(東京測器研究所製)で貼り付ける。
16. LDT は変位を与えないよう鉛直に自由に釣った状態で所定の電圧に合わせ、校正係数の入力及びゼロ点設定する。
17. LDT をヒンジに設置し、ゼロ点設定時からの変位(mm)を確認する(図 3-5-6)。

この時の LDT のヒンジ間距離(LDT 全長－ヒンジ設置時の変位)が供試体自立時の鉛直方向の初期高さであり、等方圧密前の初期状態(鉛直ひずみ $\epsilon_v=0$)とする。

以降は、3.5.1 中型三軸圧縮試験の手順 20 以降と同様である。

3.5.3 飽和供試体の中型三軸圧縮試験

3.5.1 不飽和供試体の中型三軸圧縮試験の手順 20 まで同様で、手順 21 から以下に示す。

21. 最大軸ひずみ速度を 0.01 %/min 程度で軸荷重制御しながら等方圧密し、供試体に負圧を $u_w=-20$ kPa 与える(図 3-5-7 I)。
22. 外セルを設置し、セル内に負圧が作用するように配管を接続し、大気圧開放状態で間隙水压計のゼロ点設定と校正係数の入力を行う。
23. 供試体内の負圧とセル内の負圧の差を $\Delta u_w=20$ kPa に維持しながら供試体内に負圧を $u_w=-95$ kPa まで与え(図 3-5-7 II)、この状態で一晩放置する(二重負圧過程と称す)。
24. 供試体内に脱気水を注入する(通水過程と称す)。通水量は経験的に供試体間隙の体積の 3 倍程度を目安とし

た。

25. 供試体内の負圧とセル内の負圧の差を $\Delta u_w=20\text{kPa}$ に維持しながら供試体内の負圧が $u_w=-20\text{ kPa}$ まで除荷する。
26. 供試体を非排水状態にし、セル内に正圧 $\sigma_{\text{cell}}=20\text{kPa}$ を与え、その後に $\sigma_{\text{cell}}=0\text{kPa}$ まで除荷する(図 3-5-7 III)。この载荷、除荷過程でそれぞれ 10 分程度放置し、セル圧変化分 $\Delta\sigma_{\text{cell}}$ に対する間隙水圧の変化分 Δu_w を測定し、次のように間隙圧係数 B 値を求める。

$$B = \frac{(\Delta u_w)_{\text{load}} + (\Delta u_w)_{\text{unload}}}{(\Delta\sigma_{\text{cell}})_{\text{load}} + (\Delta\sigma_{\text{cell}})_{\text{unload}}} \quad (3-5-1)$$

なお、背圧が低いこの測定方法では間隙圧係数 $B=0.6\sim0.7$ 程度に留まる傾向であったが、排水試験であることから強度変形特性に大きな影響が現れにくいと判断し、この程度の間隙圧係数であっても試験を続ける事とした。

27. 供試体を排水状態に戻し、外セルを外す。

以降は、3.5.1 不飽和供試体の中型三軸圧縮試験の手順 20 以降と同様である。

3.5.4 飽和供試体の小型三軸圧縮試験

3.5.2 不飽和供試体の小型三軸圧縮試験の手順 17 まで同様で、手順 18 から以下に示す。

18. 最大軸ひずみ速度を 0.01 %/min 程度で軸荷重制御しながら等方圧密し、供試体に負圧を $u_w=-20\text{ kPa}$ とする(図 3-5-8 I)。
19. 外セルを設置し、セル内に負圧が作用するように配管を接続し、大気圧開放状態で間隙水圧計のゼロ点設定と較正係数の入力を行う。
20. 供試体内の負圧とセル内の負圧の差を $\Delta u_w=20\text{kPa}$ に維持しながら供試体内に負圧を $u_w=-95\text{ kPa}$ まで与え(図 3-5-8 II)、この状態で一晩放置する(二重負圧過程)。
21. 供試体内に脱気水を注入する(通水過程)。通水量は経験的に供試体間隙の体積の 3 倍程度を目安とした。
22. 供試体内の負圧とセル内の負圧の差を $\Delta u_w=20\text{kPa}$ に維持しながら供試体内の負圧が $u_w=-20\text{ kPa}$ まで除荷する。
23. 排水管を体積変化測定装置に切り替え、供試体内に背圧を与える(図 3-5-8 III)。セル圧と背圧の差を $\sigma_{\text{cell}} - \sigma_{\text{BP}}=20\text{kPa}$ に維持しながらセル圧が $\sigma_{\text{cell}}=200\text{ kPa}$ まで载荷する(背圧上昇過程)。
24. 供試体を非排水状態にし、セル内に正圧 $\sigma_{\text{cell}}=220\text{kPa}$ を与え、その後に $\sigma_{\text{cell}}=200\text{kPa}$ まで除荷する(図 3-5-8 IV)。この载荷、除荷過程でそれぞれ 10 分程度放置し、セル圧変化分 $\Delta\sigma_{\text{cell}}$ に対する間隙水圧の変化分 Δu_w から式 3-5-1 より間隙圧係数 B 値を求める。

なお、この測定方法では間隙圧係数 $B=0.95$ 程度を確保する事が出来ている。

25. 供試体を排水状態に戻し、セル圧と背圧の差を $\sigma_{\text{cell}} - \sigma_{\text{BP}}=20\text{kPa}$ に維持しながらセル圧が $\sigma_{\text{cell}}=220\text{ kPa}$ まで载荷する(背圧上昇過程)。
26. 等方圧密データを保存するフォルダを指定し、計測を開始する。
27. 最大軸ひずみ速度を 0.01 %/min 程度で軸荷重制御しながら等方圧密し、供試体に背圧の負圧を増加させて所定の拘束圧まで载荷する。(等方圧密過程) (図 3-5-8 V)
28. 所定の圧密圧力にて 1 時間以上圧密後、外部変位計、LDT (mm)、体積変化測定装置をそれぞれ確認し、等方圧密過程により変化した供試体寸法を求める。これを载荷前の初期状態とし、外部変位計、LDT、体積変化測定

装置の値をゼロ点設定する。

以降は、3.5.1 不飽和供試体の中型三軸圧縮試験の手順 23 以降と同様である。

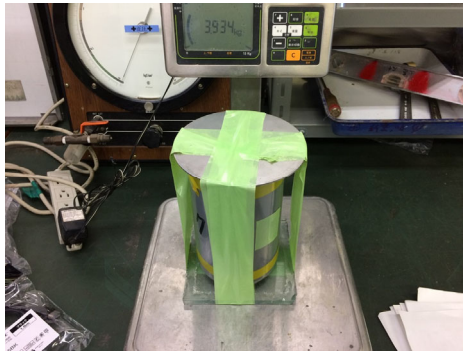


図 3-5-1 供試体重量測定

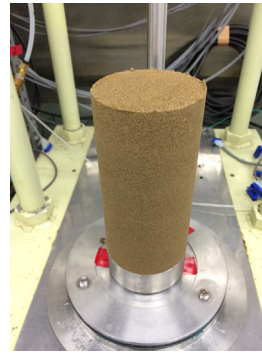


図 3-5-2 供試体設置



図 3-5-3 供試体自立時



図 3-5-4 局所変位計設置

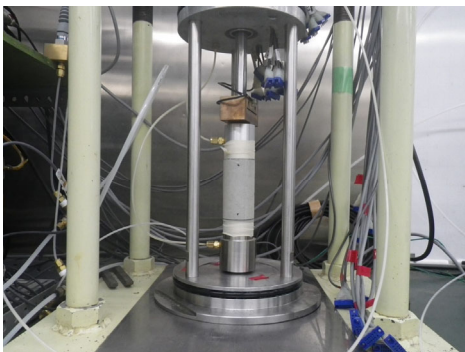


図 3-5-5 小型三軸試験の供試体自立時

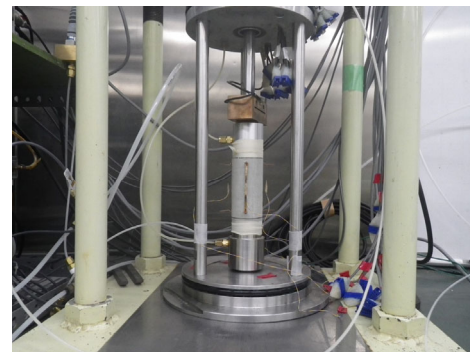


図 3-5-6 小型三軸試験の局所変位計設置

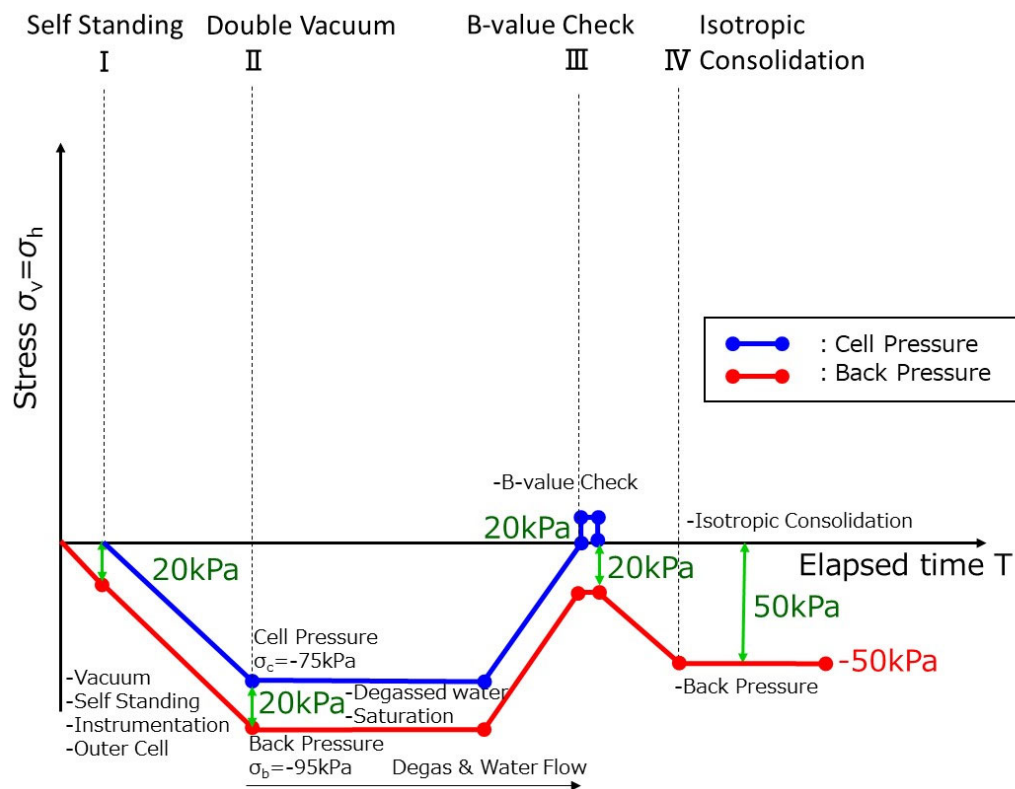


図 3-5-7 中型供試体の飽和過程

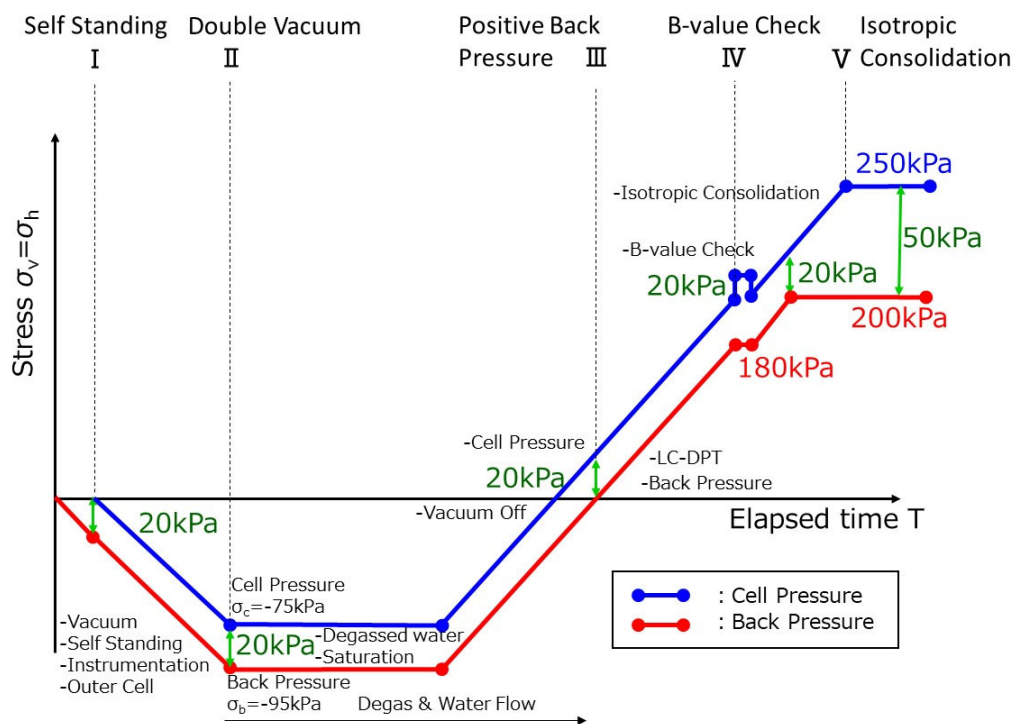


図 3-5-8 小型供試体の飽和過程

3.6 応力～ひずみ関係の評価に用いる記号と算出方法

土質力学の慣用に従って応力、ひずみともに圧縮を正とする。三軸圧縮試験における、鉛直方向及び水平方向に対する全応力は σ_v 、 σ_h 、不飽和土の力学における基底応力は $\sigma_{v\ net}$ 、 $\sigma_{h\ net}$ で表す。間隙空気圧は u_a 、間隙水圧は u_w で表す。本研究で扱う不飽和供試体の軸差応力 q は、

$$q = \sigma_{v\ net} - \sigma_{h\ net} = (\sigma_v - u_a) - (\sigma_h - u_a) \quad (3-6-1)$$

として定義する。三軸圧縮状態で $q > 0$ ，三軸伸張状態で $q < 0$ である。ロードセルから求める軸差荷重 P より q は、

$$q = \frac{P}{A} \quad (3-6-2)$$

より求める。

三軸圧縮試験における鉛直方向の基底応力 $\sigma_{v\ net}$ は、

$$\sigma_{v\ net} = \frac{P}{A} + \sigma_{h\ net} \quad (3-6-3)$$

ここで、水平方向の基底応力 $\sigma_{h\ net}$ である。

水平方向の基底応力 $\sigma_{h\ net}$ と拘束圧 σ_c との関係は次のように表す。

$$\sigma_{h\ net} = \sigma_c \quad (3-6-4)$$

平均基底主応力 p_{net} 及びモール円の平均基底主応力 $\sigma_{m\ net}$ はそれぞれ次のように求める。

$$p_{net} = \frac{\sigma_{v\ net} + 2\sigma_{h\ net}}{3} \quad (3-6-5)$$

$$\sigma_{m\ net} = \frac{\sigma_{v\ net} + \sigma_{h\ net}}{2} \quad (3-6-6)$$

また、 A は供試体断面積であり、次のように算出する。

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \pi \left\{ \frac{D_0}{2} + \frac{(D_0/2) \cdot (-\varepsilon_h)}{100} \right\}^2 \quad (3-6-7)$$

次に圧縮方向を正に鉛直ひずみ ε_v は、

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (3-6-8)$$

圧縮方向を正に水平ひずみ ε_h は、

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta D}{D_0} \quad (3-6-9)$$

によって算出する。

また、体積ひずみ ε_{vol} は収縮方向を正として、次式のように表す。

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_v + 2\varepsilon_h \quad (3-6-10)$$

ここで、 ΔH : LDT によって計測した供試体高さの変位

H_0 : 変位計測前の供試体の初期高さ

ΔD : クリップゲージによって計測した供試体直径の変位

D_0 : 変位計測前の供試体の初期直径

である。

最大体積圧縮ひずみ(ε_{vol})_{max} は、収縮方向の体積ひずみの最大値を示す。

本研究では非一様な供試体の局所ひずみを区別して測定している。局所変位計による鉛直ひずみの測定範囲を図 3-6-1 に示す。また、各部分の算定方法を以下に示す。

① 平均(average)

鉛直ひずみ ε_v : 供試体円周方向で対になるように配置した LDT170 の平均鉛直変位から式 3-6-8 より求める。

水平ひずみ ε_h : 供試体鉛直方向 3 深度に設置したクリップゲージの平均水平変位から式 3-6-9 より求める。

体積ひずみ ε_{vol} : ①の鉛直ひずみと水平ひずみから式 3-6-10 より求める。

② 上端部(top)

鉛直ひずみ ε_v : 供試体端面を含む最上部に設置した局所変位計 LDT80(top)の鉛直変位から式 3-6-11 より求める。LDT80 は LDT の上ヒンジをキャップに設置するため、LDT の初期長さからキャップのラップ長(H_{lap})を差し引いておく。

水平ひずみ ε_h : 最上部に設置したクリップゲージ(CG1)の水平変位から式 3-6-9 より求める。

体積ひずみ ε_{vol} : ②の鉛直ひずみと水平ひずみから式 3-6-10 より求める。

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{(H_0 - H_{lap})} \quad (3-6-11)$$

③ 上部(upper)

鉛直ひずみ ε_v : 供試体端面を含まない上半部に円周方向で対になるように配置した局所変位計 LDT80(upper)の平均鉛直変位から式 3-6-8 より求める。

水平ひずみ ε_h : 最上部(CG1)と中央部(CG2)に設置したクリップゲージの水平変位から各々の分担範囲を踏まえて式 3-6-12 より求める。

体積ひずみ ε_{vol} : ③の鉛直ひずみと水平ひずみから式 3-6-10 より求める。

$$\varepsilon_h = \varepsilon_{h \text{ top}} \times \frac{d_{\text{top}}}{d_{\text{LDT80}}} + \varepsilon_{h \text{ middle}} \times \frac{d_{\text{middle}}}{d_{\text{LDT80}}} \quad (3-6-12)$$

ここで、 $\varepsilon_{h \text{ top}}$:最上部のクリップゲージ(CG1)で測定した水平ひずみ

$\varepsilon_{h \text{ middle}}$:中央部のクリップゲージ(CG2)で測定した水平ひずみ

d_{top} :上部の LDT80 が供試体最上部 1/3 範囲の分担長さ=46.7mm (図 3-6-1)

d_{middle} :上部の LDT80 が供試体中央部 1/3 範囲の分担長さ=33.3mm (図 3-6-1)

④ 下部(lower)

鉛直ひずみ ε_v :供試体端面を含まない下半部に円周方向で対になるように配置した局所変位計 LDT80(lower)の平均鉛直変位から式 3-6-8 より求める。

水平ひずみ ε_h :最下部(CG3)と中央部(CG2)に設置したクリップゲージの水平変位から各々の分担範囲を踏まえて式 3-6-13 より求める。

体積ひずみ ε_{vol} :④の鉛直ひずみと水平ひずみから式 3-6-10 より求める。

$$\varepsilon_h = \varepsilon_{h \text{ bottom}} \times \frac{d_{\text{bottom}}}{d_{\text{LDT80}}} + \varepsilon_{h \text{ middle}} \times \frac{d_{\text{middle}}}{d_{\text{LDT80}}} \quad (3-6-13)$$

ここで、 $\varepsilon_{h \text{ bottom}}$:最下部のクリップゲージ(CG3)で測定した水平ひずみ

$\varepsilon_{h \text{ middle}}$:中央部のクリップゲージ(CG2)で測定した水平ひずみ

d_{bottom} :下部の LDT80 が供試体最下部 1/3 範囲の分担長さ=46.7mm (図 3-6-1)

d_{middle} :下部の LDT80 が供試体中央部 1/3 範囲の分担長さ=33.3mm (図 3-6-1)

⑤ 下端部(bottom)

鉛直ひずみ ε_v :供試体端面を含む最下部に設置した局所変位計 LDT80(bottom)の鉛直変位から式 3-6-11 より求める。LDT80 は LDT の下ヒンジをキャップに設置するため、LDT の初期長さからキャップのラップ長(H_{lap})を差し引いておく。

水平ひずみ ε_h :最下部に設置したクリップゲージ(CG3)の水平変位から式 3-6-9 より求める。

体積ひずみ ε_{vol} :⑤の鉛直ひずみと水平ひずみから式 3-6-10 より求める。

次に、三軸圧縮試験で得られる軸差応力～鉛直ひずみ関係の模式図(図 3-6-2)を用いて説明する。

割線ヤング率 E_{50} は地盤の変形解析に用いられる変形係数として用いられるが、 (ε_v, q) 平面における载荷開始時の原点(0, 0)から最大軸差応力半分の値 $[(\varepsilon_v)_{\text{at } q_{\text{max}}/2}, q_{\text{max}}/2]$ を結ぶ線であり次のように表す。

$$E_{50} = \frac{q_{\text{max}}/2}{(\varepsilon_v)_{\text{at } q_{\text{max}}/2}} \quad (3-6-14)$$

なお、軸差応力～鉛直ひずみ関係において、測定範囲内($\varepsilon_v \text{ EDT} < 10\%$ 程度)に明確な軸差応力のピークが現れない場合は、測定範囲内における軸差応力の最大値を q_{max} として E_{50} を算定する。

接線ヤング率 E_{tan} は、軸差応力～鉛直ひずみ関係における接線の傾きを表したものであり、载荷中の任意の時点の鉛直ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_v$ に対する軸差応力の増分 Δq で表す。

$$E_{tan} = \frac{\Delta q}{\Delta\varepsilon_v} \quad (3-6-15)$$

本研究では任意の時点で鉛直ひずみ増分が外部変位計で $\Delta\varepsilon_v=0.01\%$ 程度となるサンプリングデータ数(30 点)を最小二乗法で算出している。 E_{tan} は模式図中にもあるように、鉛直ひずみの進行とともに低下し、非弾性的な変形成分を含むみかけのヤング率である。初期ヤング率 E_0 は、等方圧密後の载荷開始からサンプリングデータ数(30 点)を最小二乗法で算出している。なお、LDT で測定した鉛直ひずみは $\Delta\varepsilon_v=0.001\%$ 程度の弾性的挙動を示す範囲である。接線ポアソン比 ν_{tan} は、接線ヤング率と同様に任意の時点の鉛直ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_v$ に対する水平ひずみの増分 $\Delta\varepsilon_h$ で表す。

$$\nu_{tan} = -\frac{\Delta\varepsilon_h}{\Delta\varepsilon_v} \quad (3-6-16)$$

等価ヤング率 E_{eq} は、模式図のように軸差応力～鉛直ひずみ関係の除荷・再载荷における履歴ループによって得られるピーク値を結ぶ直線の傾きとして求める。同じ軸差応力においても時間依存性に伴う鉛直ひずみの進行が生じるため、地盤工学会(2009)に基づいて鉛直荷重及び鉛直ひずみのずれに対する補正を行っている。等価ポアソン比 ν_{eq} も同様に鉛直ひずみ及び水平ひずみのずれに対する補正を行っている。

$$E_{eq} = \left\{ \frac{\frac{q_1+q_3}{2}-q_2}{\frac{(\varepsilon_v)_1+(\varepsilon_v)_3}{2}-(\varepsilon_v)_2} \right\} \quad (3-6-17)$$

$$\nu_{eq} = -\left\{ \frac{\frac{(\varepsilon_h)_1+(\varepsilon_h)_3}{2}-(\varepsilon_h)_2}{\frac{(\varepsilon_v)_1+(\varepsilon_v)_3}{2}-(\varepsilon_v)_2} \right\} \quad (3-6-18)$$

ここで、 q_1 : 除荷前の軸差応力、 q_2 : 再载荷前の軸差応力、 q_3 : 再载荷時の軸差応力($q_3 \doteq q_1$)

$(\varepsilon_v)_1$ 、 $(\varepsilon_v)_2$ 、 $(\varepsilon_v)_3$: q_1 、 q_2 、 q_3 における鉛直ひずみ

$(\varepsilon_h)_1$ 、 $(\varepsilon_h)_2$ 、 $(\varepsilon_h)_3$: $(\varepsilon_v)_1$ 、 $(\varepsilon_v)_2$ 、 $(\varepsilon_v)_3$ における水平ひずみ

また、繰返し载荷時の履歴減衰率 h は、地盤工学会(2009)に基づいて次の通りとした。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (3-6-19)$$

ここで、 ΔW : 繰返しサイクルでの減衰エネルギーで履歴曲線の面積

W : 繰返しサイクルでの等価弾性エネルギー

本研究で扱う飽和供試体の軸差応力 q は、鉛直方向及び水平方向に対する有効応力を σ'_v, σ'_h で表すから、

$$q = \sigma'_v - \sigma'_h = (\sigma_v - u_w) - (\sigma_h - u_w) \quad (3-6-20)$$

として定義する。三軸圧縮状態で $q > 0$, 三軸伸張状態で $q < 0$ である。ロードセルから求める軸差応力 q は、式 3-6-2 で示した。

三軸圧縮試験における鉛直方向の有効応力 σ'_v は、

$$\sigma'_v = \frac{P}{A} + \sigma'_h \quad (3-6-21)$$

ここで、 σ'_h は水平方向の有効応力である。

水平方向の有効応力 σ'_h と拘束圧 σ_c との関係は次のように表す。

$$\sigma'_h = \sigma_c \quad (3-6-22)$$

平均有効主応力 p' 及びモール円の平均主応力 σ'_m はそれぞれ次のように求める。

$$p' = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3} \quad (3-6-23)$$

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} \quad (3-6-24)$$

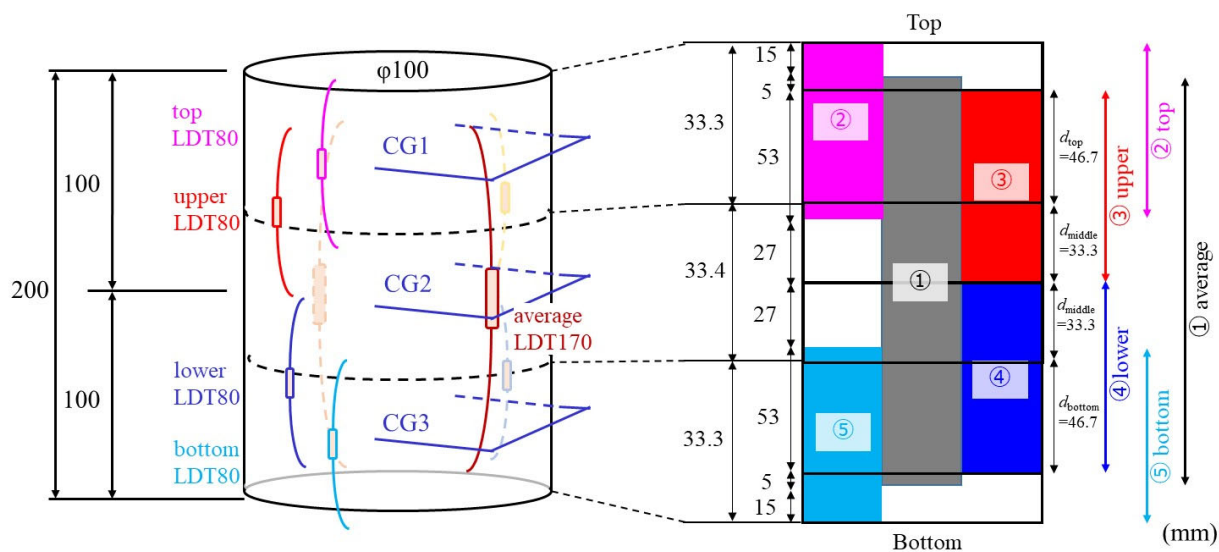


図 3-6-1 局所変位計と鉛直ひずみの測定範囲

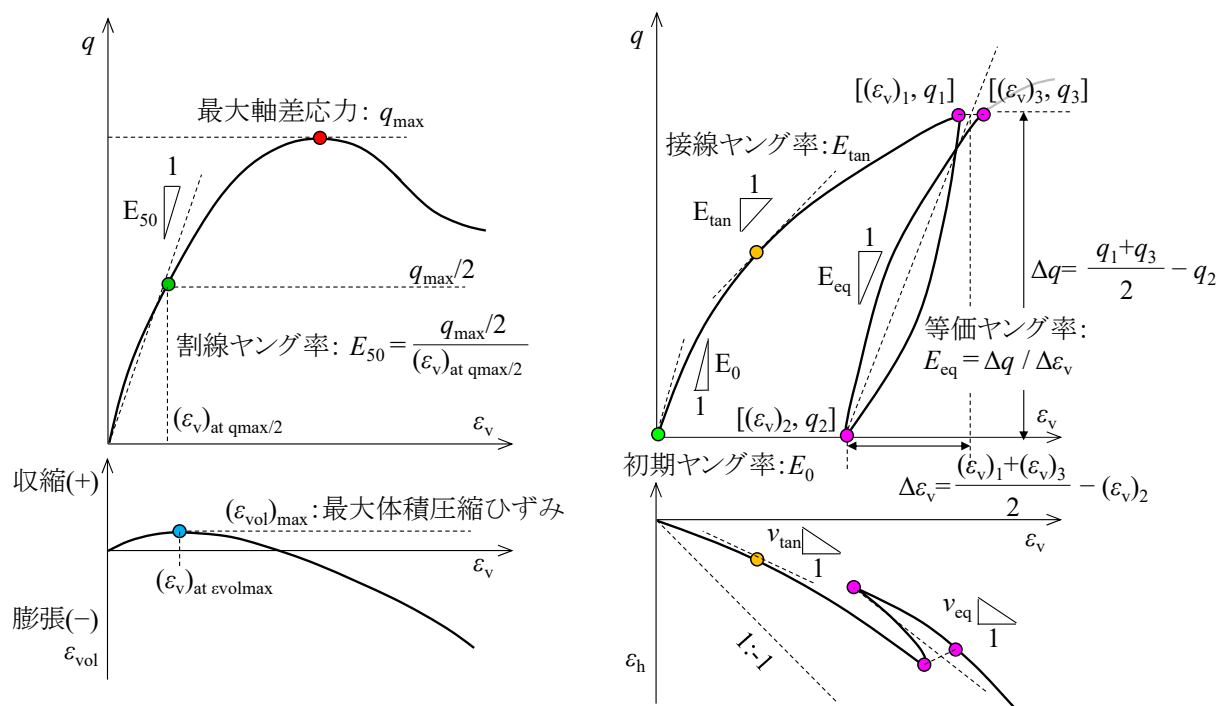


図 3-6-2 三軸圧縮試験で得られる軸差応力～鉛直ひずみ関係の模式図

3.7 局所変位計を用いた鉛直深度別の変形特性評価方法の検証

本節では鉛直深度別に設置した局所変位計を用いた中型三軸圧縮試験による変形特性評価方法を検証する。用いた供試体はポリウレタン系弾性ゴムのダミー供試体、空中落下法で作製した供試体、湿潤振動締固め法で作製した供試体である。ポリウレタン系弾性ゴムのダミー供試体は材料物性が一定で一様弾性供試体である。佐々木ら(2018)は湿潤締固め法で作製した砂質供試体の締固め層数と三軸圧縮時の局所的な鉛直ひずみの関係を調べており、比較用に作製した空中落下法供試体は層別にタンパーで締め固めた湿潤締固め法供試体に比べ、三軸圧縮時の局所的な鉛直ひずみ分布は層境の影響が無く、連続的で比較的一様な様態である事を示している。そこで、同じ稲城砂を用いた比較的一様な供試体の変形特性を把握する為に、突固めをしない空中落下法と湿潤振動締固め法により作製した供試体を検証に適用した。

3.7.1 ポリウレタン系弾性ゴムのダミー供試体の局所ひずみ

ダミー供試体にはショア A 硬度 70 のポリウレタン系弾性ゴムを用いた。弾性供試体を用いているが、システムコンプライアンスを含めた変形挙動を確認するため、稲城砂試料を用いた供試体と同様にメンブレンを設置し、メンブレン上に局所変位計のヒンジを取り付けた。また、所定の拘束圧 $\sigma_c=50\text{kPa}$ で等方圧密後に載荷している。

軸差応力の時刻歴を図 3-7-1 に示す。軸差応力の両振幅を $2\text{kPa}\sim 15\text{kPa}$ まで圧縮方向に 5 回の繰返し載荷をしている。また、軸差応力 $q=50\text{kPa}\sim 170\text{kPa}$ までは、両振幅 5kPa の除荷・再載荷による 5 回の繰返し載荷をし、軸差応力 $q=180\text{kPa}$ に達した所で除荷している。

図 3-7-2 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示す。鉛直ひずみは外部変位計と LDT170 で測定し、供試体の平均を比較している。いずれも載荷・除荷の変形挙動から弾性体に近い性質を測定している事が確認されるが、外部変位計で測定した鉛直ひずみは同じ応力レベルにおける LDT の鉛直ひずみに比べてわずかに大きい。一般的に外部変位計が LDT に比べて鉛直ひずみが大きく測定される理由には、供試体上下端面のベディングエラーや載荷装置の変形に伴うシステムコンプライアンスの影響等が挙げられる。ダミー供試体は上下端面の乱れは殆どないと考えられることから、外部変位計で測定した鉛直ひずみが大きいのは、供試体端面とキャップ・ペDESTAL との不完全接触の問題に起因するベディングエラー及び外部変位計の軸受けの微小変形に起因する載荷装置の変形等が外部変位計の測定した鉛直ひずみに含まれる為と考えられる。

図 3-7-3 は、供試体上部と下部の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。上部の割線ヤング率は $E_{50}=16.8\text{MPa}$ 、下部の割線ヤング率は $E_{50}=15.0\text{MPa}$ であり、わずかに下部が小さい結果であった。図 3-7-4 は、供試体平均、上端部と下端部を含む軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。供試体平均の割線ヤング率は $E_{50}=16.1\text{MPa}$ 、上端部の割線ヤング率は $E_{50}=16.5\text{MPa}$ 、下端部の割線ヤング率は $E_{50}=14.5\text{MPa}$ であり、わずかに下端部が小さい結果であった。供試体端面には摩擦軽減層を考慮しても上端部から下端部まで割線ヤング率 E_{50} の違いは $E_{50}=14.5\text{MPa}\sim 16.5\text{MPa}$ で 2MPa 程度(平均 E_{50} の 13%程度)であり、ダミー供試体が一様な弾性体であると仮定すると、この違いは測定誤差と考えられる。また、体積ひずみは鉛直ひずみが増加しても、供試体のいずれの部分も変化せず、概ね $\varepsilon_{vol}=0\%$ 程度であった。ポリウレタン系弾性ゴムのポアソン比は一般的に $\nu=0.5$ とされており、式 3-6-10 と次式より、理論値と整合する試験結果が得られた。

ポアソン比 $\nu=0.5$ と仮定すると、

$$\varepsilon_v = -2\varepsilon_h \quad (3-7-1)$$

式 3-6-10 に代入して、

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_v + 2\varepsilon_h = -2\varepsilon_h + 2\varepsilon_h = 0 \quad (3-7-2)$$

図 3-7-5 は、供試体上部と下部の鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\% \sim 0.1\%$ 範囲の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。軸差応力 $q=2\text{kPa}$, 5kPa , 10kPa 及び 15kPa にて除荷・再載荷で 5 回繰返し載荷しているが、ほぼ弾性的な挙動を示している。載荷初期の上部のヤング率は $E_0=18.6\text{MPa}$ 、下部の初期ヤング率は $E_0=16.3\text{MPa}$ で、その差は 2.3MPa 程度であった。また、先述した E_{50} と比較してもその差は 2MPa 程度で小さい。体積ひずみは概ね $\varepsilon_{vol}=0$ であるが、繰返し載荷とともに膨張方向にシフトしている。これは本来、弾性供試体に発生する挙動ではないことから、供試体、メンブレン、接着剤、ヒンジ、LDT またはクリップゲージ間のずれ等に起因するシステムコンプライアンスの影響と考えられる。小さいひずみレベルの繰返し載荷による体積変化特性を調べる際には留意が必要である。

図 3-7-6 は、供試体上部と下部の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。供試体上部及び下部ともに、載荷・除荷は弾性挙動を示している。図内には $1:-1$ 及び $1:-0.5$ の補助線を示しているが、供試体上部及び下部ともに $1:-0.5$ の補助線にほぼ沿っている。これは、供試体のポアソン比が $\nu=-\varepsilon_h/\varepsilon_v=0.5$ である事を意味し、ポリウレタン系弾性ゴムの仕様通りの値を計測出来ている事を確認した。

3.7.2 空中落下法で作製した供試体の局所ひずみ

空中落下法で作製した供試体は含水比 $w=1.4\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.277\text{g/cm}^3$ である。試料の最大間隙比は $e_{\max}=1.064$ であるから、この時の乾燥密度は $e=\rho_s/\rho_d-1$ 関係より、 $\rho_d=1.302\text{g/cm}^3$ であり、この供試体の方がやや小さい。最大間隙比試験は端部処理時に試料が締め固まらないように留意が必要であるが、三軸圧縮試験の供試体の乾燥密度が小さかったのは、最大間隙比試験のモールドに比べて全体体積が大きく、端部処理時の乾燥密度増加が全体の乾燥密度に与える影響が小さい為と考えられる。

図 3-7-7 は、軸差応力の時刻歴を示す。軸差応力の両振幅を $2\text{kPa} \sim 30\text{kPa}$ まで圧縮方向に 10 回の繰返し載荷を実施し、軸差応力 $q=60\text{kPa}$ の除荷・再載荷以降は単調載荷している。

図 3-7-8 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示す。鉛直ひずみは外部変位計と LDT170 で測定した各々供試体の平均である。いずれも非線形挙動を示しているが、外部変位計で測定した鉛直ひずみは同じ応力レベルにおける LDT の鉛直ひずみに比べて大きい傾向であった。LDT は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.5\%$ 程度が測定限界である。また、外部変位計で測定した鉛直ひずみは $\varepsilon_v=10\%$ 程度まで測定したが、軸差応力の明確なピークは確認されなかった。

図 3-7-9 は、供試体上部と下部の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。供試体上部と下部各々の割線ヤング率 E_{50} は、 $q_{\max}/2$ まで鉛直ひずみを測定する事が出来なかったため算定していないが、軸差応力～鉛直ひずみ関係は概ね同等である事がわかる。図 3-7-10 は、供試体平均、上端部と下端部の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。供試体平均、上端部及び下端部の軸差応力～鉛直ひずみ関係に大きな差は見られなかった。また、供試体のいずれの部分も体積ひずみは収縮傾向であった。供試体は上下端部も含めて全体的に非常に緩いため、ベディングエラーが軸差応力～鉛直ひずみ関係に与える影響は少なく、上下端部と平均の違いが見られなかったと考える。

図 3-7-11 は、供試体上部と下部の鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\% \sim 0.02\%$ 範囲の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。軸差応力 $q=2\text{kPa}$ 及び 5kPa にて除荷・再載荷で 10 回繰返し載荷しているが、軸差応力 $q=2\text{kPa}$ の繰返し載荷でも鉛直ひずみは $\varepsilon_v=0.003\%$ 程度まで進行し、体積ひずみも収縮方向に進行しており、非線形挙動を示している。載荷初期の上部のヤング率は $E_0=78.4\text{MPa}$ 、下部の初期ヤング率は $E_0=88.1\text{MPa}$ で、その差は 9.7MPa 程度(平

均 E_0 の 11%程度)で小さい。

図 3-7-12 は、供試体上部と下部の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。供試体上部及び下部ともに、載荷・除荷時の変形挙動はほぼ同等である。図内には 1: -1 及び 1: -0.2 の補助線を示しているが、供試体上部及び下部ともに 1: -0.2 の補助線にほぼ沿っており、全体的に供試体の接線ポアソン比、等価ポアソン比は 0.2 程度であると考えられる。佐藤ら(1991)は、空中落下法で作製した乾燥豊浦砂供試体の鉛直ひずみを LDT で、水平ひずみを Proximeter(ギャップセンサー)で測定しながら繰返し三軸圧縮試験を実施しており、等価ポアソン比 $\nu_{eq}=0.15\sim0.20$ 程度である事を示している。この結果を踏まえると不飽和土の当供試体の弾性範囲のポアソン比が 0.2 程度である事は妥当であると考えられる。

3.7.3 湿潤振動締固め法で作製した供試体の局所ひずみ

湿潤振動締固め法で作製した供試体は含水比 $w=8.1\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.593\text{g/cm}^3$ である。試料の最大間隙比は $e_{max}=0.672$ であるから、この時の乾燥密度は $e=\rho_s/\rho_d-1$ 関係より、 $\rho_d=1.607\text{g/cm}^3$ であり、この供試体の方がやや小さい。また、試料の最大乾燥密度は $\rho_{dmax}=1.684\text{g/cm}^3$ (JIS A 1210, A-c 法)であるから、締固め度で $D_c=95\%$ 程度である。

図 3-7-13 は、軸差応力の時刻歴を示す。軸差応力の両振幅を 2kPa～150kPa まで圧縮方向に 10 回の繰返し載荷を実施し、軸差応力 $q=200\text{kPa}$ の除荷・再載荷以降は単調載荷している。

図 3-7-14 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示す。鉛直ひずみは外部変位計と LDT170 で測定した供試体平均である。いずれも非線形挙動を示しているが、外部変位計で測定した鉛直ひずみは同じ応力レベルにおける LDT の鉛直ひずみに比べて大きい傾向であった。図 3-7-15 は、供試体上部と下部の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。上部の割線ヤング率は $E_{50}=68.1\text{MPa}$ 、下部の割線ヤング率は $E_{50}=69.3\text{MPa}$ であり、わずかに下部が大きい結果であった。上部と下部の割線ヤング率 E_{50} の差は 1.2MPa 程度(平均 E_{50} の 1.7%程度)であり、軸差応力～鉛直ひずみ関係は概ね同等である事がわかる。図 3-7-16 は、供試体平均、上端部と下端部の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。供試体平均の割線ヤング率は $E_{50}=61.5\text{MPa}$ 、上端部の割線ヤング率は $E_{50}=25.6\text{MPa}$ 、下端部の割線ヤング率は $E_{50}=54.2\text{MPa}$ であった。供試体平均の割線ヤング率 E_{50} はほぼ同等であるのに対し、上端部及び下端部は低い値を示した。供試体平均と上端部の割線ヤング率 E_{50} の差は 35.9MPa 程度(平均 E_{50} の 58%程度)、供試体平均と下端部の割線ヤング率 E_{50} の差は 7.3MPa 程度(平均 E_{50} の 11%程度)と比較的大きい。一般的に剛性の高い供試体はベディングエラーが大きくなりやすい事が知られている。供試体作製時に上下端面の薄く乱れた軟らかい層が発生しており、乾燥密度が大きく剛性の高い供試体ほどベディングエラーとして変形特性に影響を与えていると考えられる。下端部の割線ヤング率 E_{50} に比べて上端部の割線ヤング率 E_{50} が著しく小さくなった事に詳しい理由は分からないが、供試体作製過程における上端面処理の影響である可能性が考えられる。また、供試体上部、下部及び供試体平均は共通して鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.4\%$ 付近で最大体積圧縮ひずみとなり、膨張挙動へ転じるのに対し、上端部および下端部は収縮傾向が続く。この上端部と下端部の収縮傾向を示す体積変形特性が低い割線ヤング率 E_{50} を示す原因と考えられる。

図 3-7-17 は、供試体上部と下部の鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\%\sim0.02\%$ 範囲の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。この範囲では軸差応力 $q=2\text{kPa}\sim15\text{kPa}$ にて除荷・再載荷で 10 回繰返し載荷が測定されている。軸差応力 $q=2\text{kPa}$ の繰返し載荷は鉛直ひずみが $\varepsilon_v=0\%\sim0.002\%$ 程度の範囲では比較的弾性挙動を示し、それ以降は鉛直ひずみが進行し、体積ひずみも収縮方向に進行している。載荷初期の上部のヤング率は $E_0=147.3\text{MPa}$ 、下部の初期ヤング率は $E_0=192.2\text{MPa}$ で、その差は 44.9MPa 程度(平均 E_0 の 26%程度)で下部がやや大きい。上下の差は割線ヤング率 E_{50} よりも初期ヤング率の方が大きい傾向であった。

図 3-7-18 は、供試体上部と下部の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。供試体上部及び下部ともに、載荷・除

荷時の変形挙動はほぼ同等である。図内には $1:-1$ 及び $1:-0.2$ の補助線を示しているが、供試体下部の鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.1\sim0.2\%$ 付近まで $1:-0.2$ の補助線にほぼ沿っており、載荷初期の供試体下部の接線ポアソン比、等価ポアソン比は 0.2 程度であると考えられる。 $\varepsilon_v=0.1\sim0.2\%$ 以降は $1:-1$ の平行線に漸近し、これは図 3-7-15 にも観測されるように軸差応力～鉛直ひずみ関係の非線形性が強まっている事に起因すると考えられる。

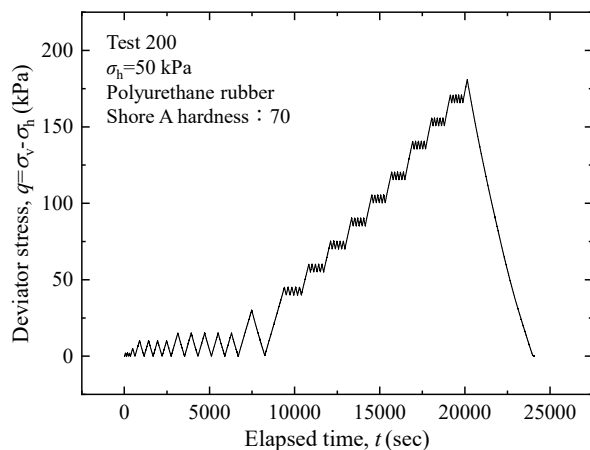


図 3-7-1 軸差応力の時刻歴

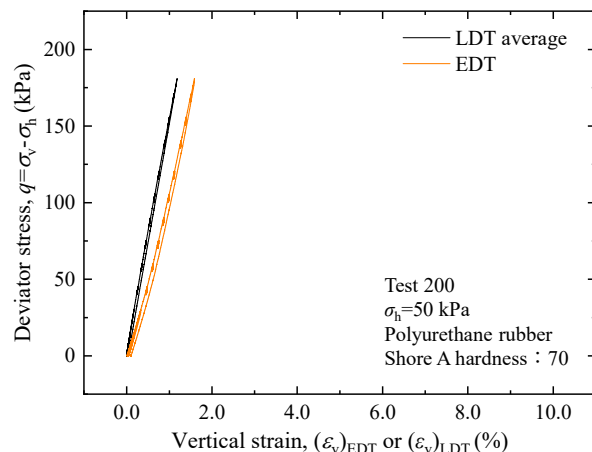


図 3-7-2 軸差応力～鉛直ひずみ関係(EDT と LDT)

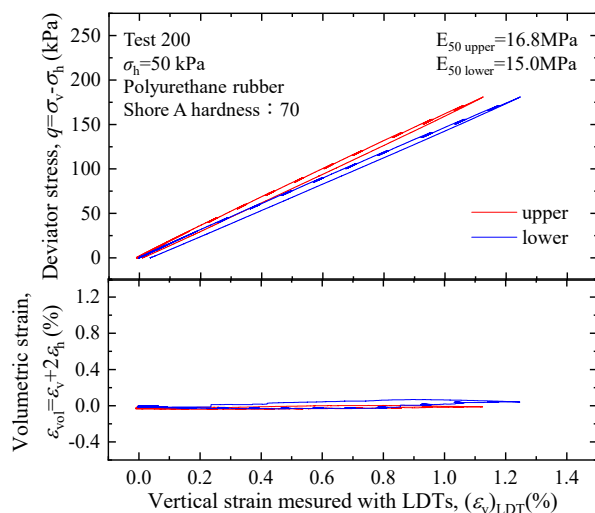


図 3-7-3 軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係
(供試体上部、下部)

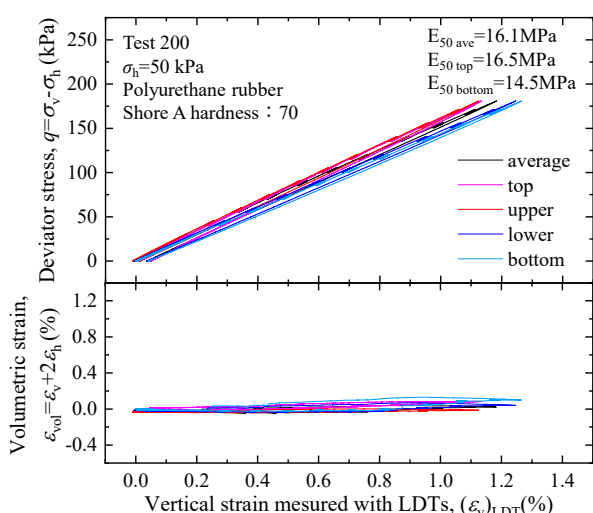


図 3-7-4 軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係
(供試体平均、上端部、上部、下部、下端部)

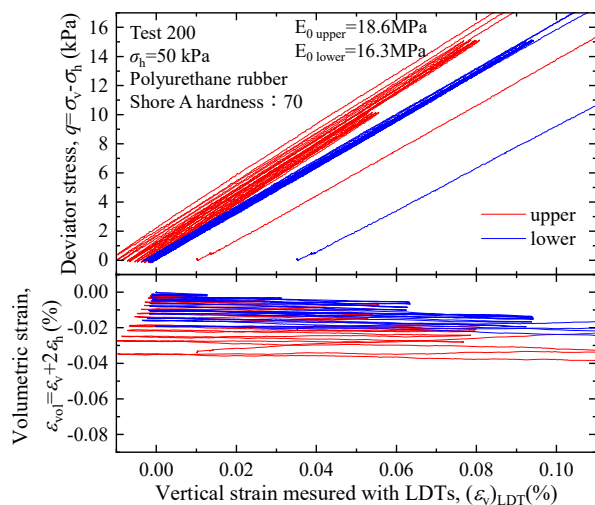


図 3-7-5 小ひずみ範囲の応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係
(上部、下部)

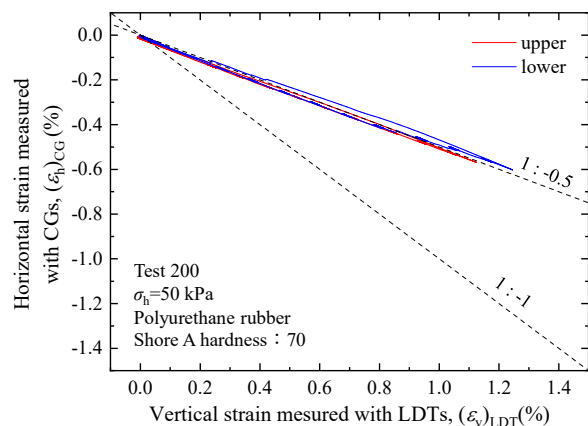


図 3-7-6 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

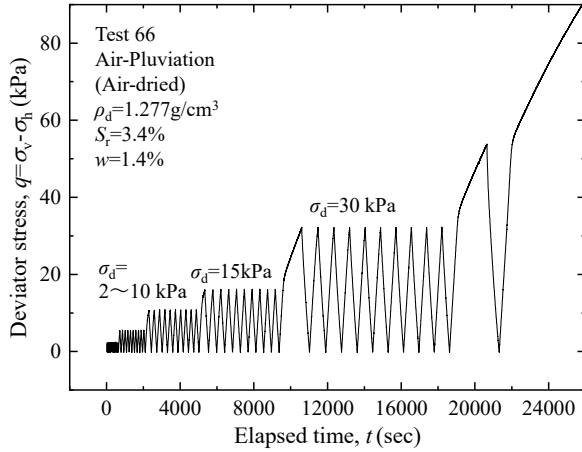


図 3-7-7 軸差応力の時刻歴

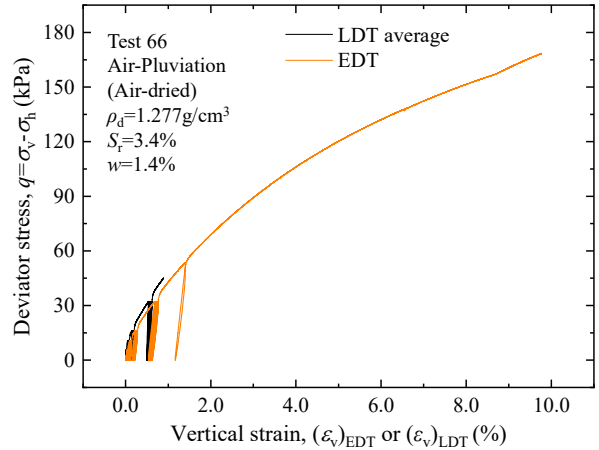


図 3-7-8 軸差応力～鉛直ひずみ関係(EDT と LDT)

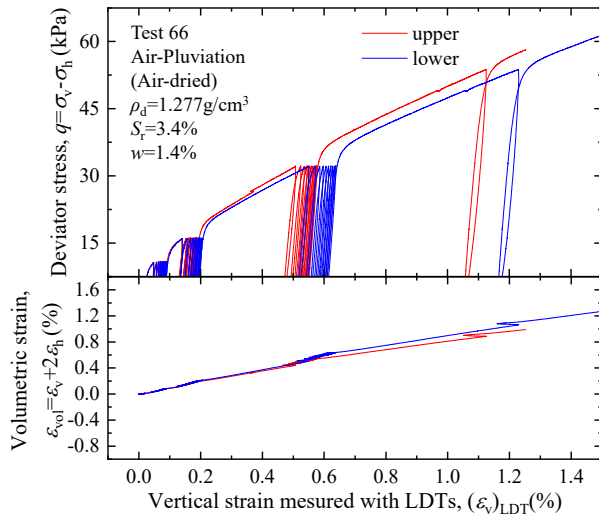


図 3-7-9 軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係
(供試体上部、下部)

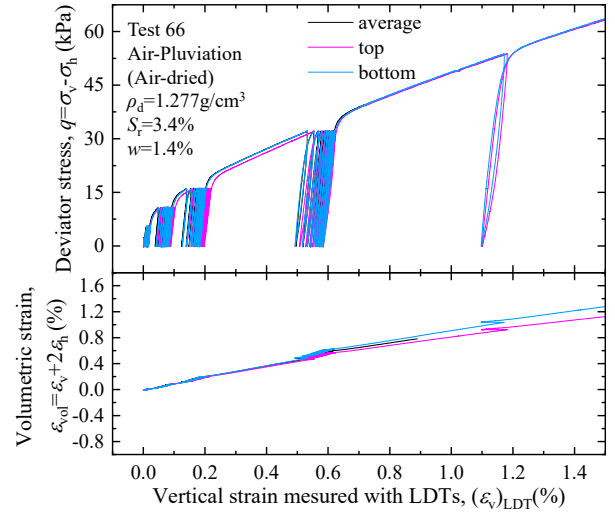


図 3-7-10 軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係
(供試体平均、上端部、下端部)

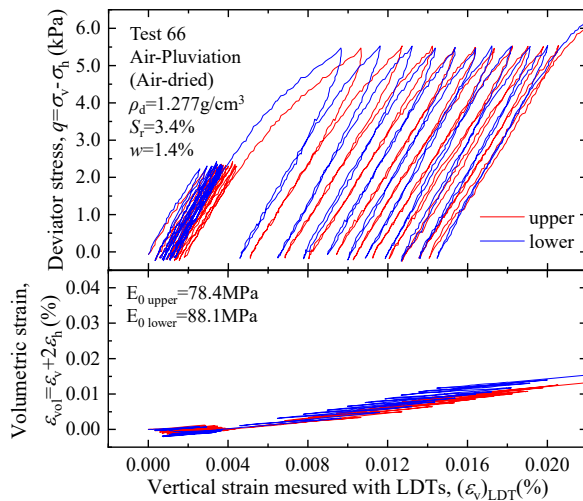


図 3-7-11 小ひずみ範囲の応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係
(上部、下部)

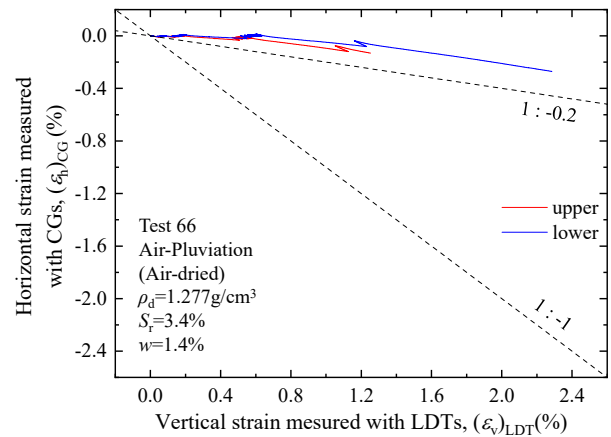


図 3-7-12 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

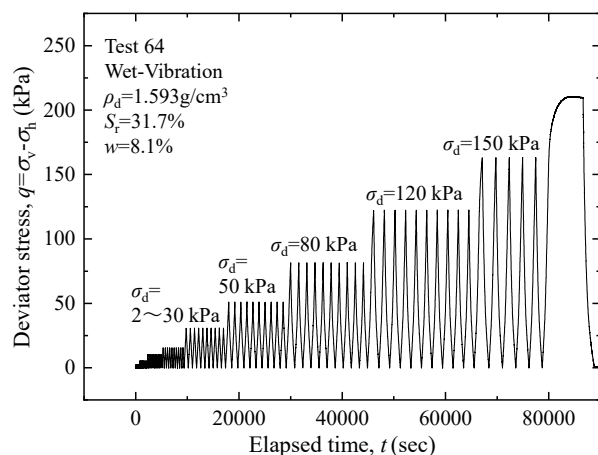


図 3-7-13 軸差応力の時刻歴

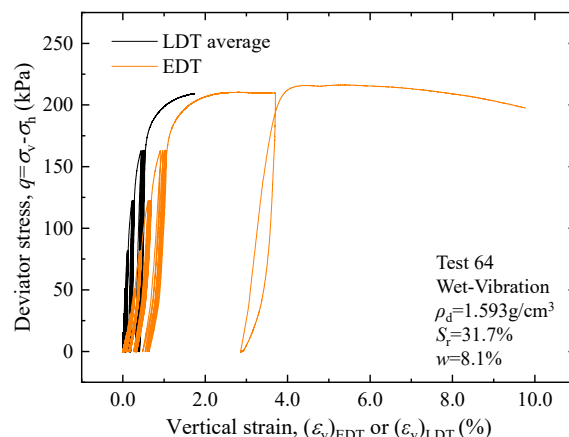


図 3-7-14 軸差応力～鉛直ひずみ関係(EDTとLDT)

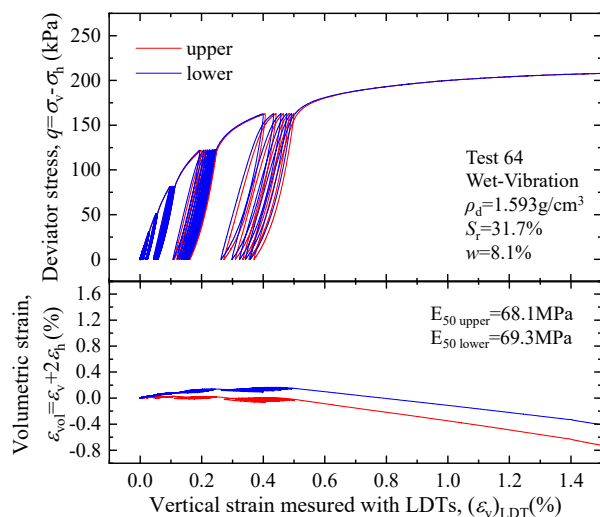


図 3-7-15 軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係
(供試体上部、下部)

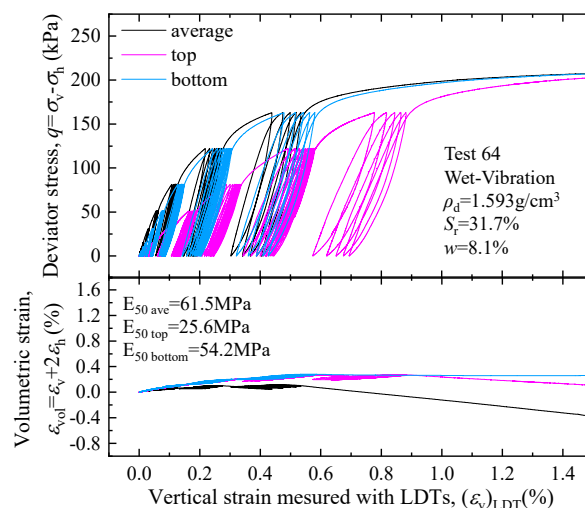


図 3-7-16 軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係
(供試体平均、上端部、上部、下部、下端部)

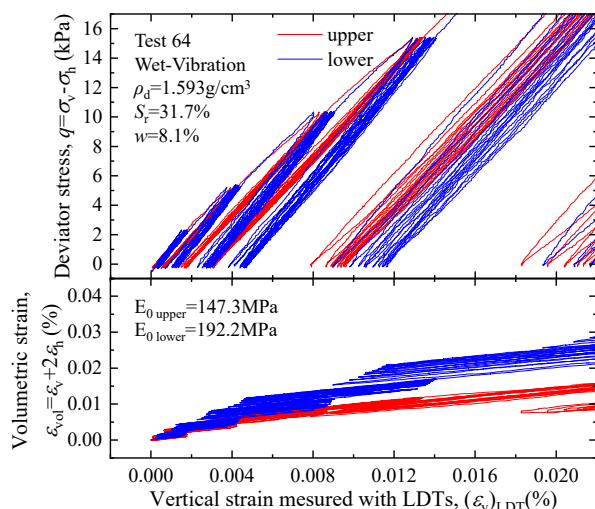


図 3-7-17 小ひずみ範囲の応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係
(上部、下部)

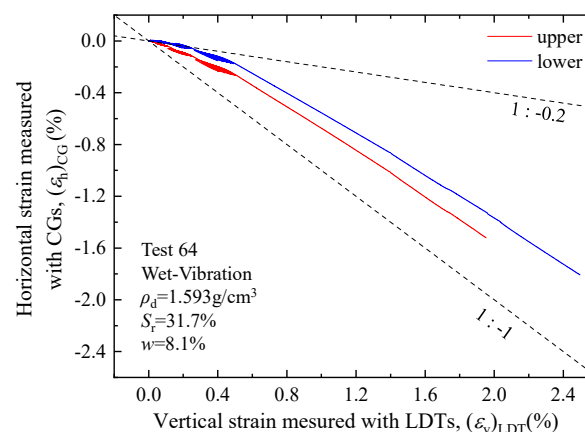


図 3-7-18 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

3.8 本章のまとめ

本章では、現場で締め固めた供試体を採用する為に、鋼製土槽内で締め固め機械を用いて試験盛土を作製し、試験盛土から採取した供試体について三軸圧縮試験を実施し、室内作製供試体との変形強度特性の違いを比較する計画を示した。さらに、鉛直深度方向に非一様供試体の測定方法について、局所変位計を鉛直深度別に配置して計画し、ダミー供試体を含む比較的一様な供試体の三軸圧縮試験で検証した。検証結果から得られた知見を以下に示す。

- ① ポリウレタン系弾性ゴムのダミー供試体の軸差応力～鉛直ひずみ関係より、同じ応力において外部変位計で測定した鉛直ひずみはLDT170で測定した鉛直ひずみより大きい。これは供試体端面とキャップ・ペDESTALとの不完全接触によるベディングエラー、試験装置の変形等によるシステムコンプライアンス等が外部変位計の測定した鉛直ひずみに含まれる為と考えられる。
- ② LDT80で測定したポリウレタン系弾性ゴムのダミー供試体の軸差応力～鉛直ひずみ関係より、供試体上部、下部及び供試体平均は、誤差は含まれるがほぼ同等の変形特性を示す事を確認した。また、供試体上端部、下端部はベディングエラーの影響は多少含まれるが、その影響は非常に小さい。
- ③ ポリウレタン系弾性ゴムのダミー供試体の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係から求めた供試体上部と下部のポアソン比は、ポリウレタン系弾性ゴムのポアソン比とほぼ一致する事から、鉛直深度別に設置した局所変位計で供試体上部と下部を分けて変形特性を評価することが出来た。
- ④ 微小ひずみの繰返し载荷中に体積ひずみが膨張方向にわずかにシフトする現象が確認された。これは、測定している鉛直ひずみと水平ひずみの値がわずかにシフトする為と考えられ、詳しくは不明であるが局所変位計、ヒンジ、接着剤、メンブレン、供試体間に生じるずれ(システムコンプライアンス)が原因である可能性がある。
- ⑤ 空中落下法で作製した緩詰め砂の供試体は、小さい軸差応力の繰返し载荷でも鉛直ひずみが進行し、非線形挙動を示したが、上部と下部の変形特性に大きな違いは確認されなかった。また、比較的緩い供試体であったため上下端部のベディングエラーによる変形特性への影響は殆ど確認されなかった。従って空中落下法で作製した緩詰め供試体は、ほぼ一様な変形挙動を示し、佐々木ら(2018)の結果と整合する事を確認した。
- ⑥ 湿潤振動締め固め法で作製した比較的密詰め砂の供試体は、小さい鉛直ひずみ範囲では弾性的な挙動を示し、鉛直ひずみの進行とともに非線形挙動を示したが、供試体は上部と下部の変形挙動に大きな違いは確認されず、供試体はほぼ一様な変形特性を示す事を確認した。供試体上端部と下端部は、ベディングエラーの影響で割線ヤング E_{50} がやや小さくなる傾向を示した。特に、供試体上端部は供試体作製過程における上端面処理の影響で割線ヤング率 E_{50} の低下が大きい。

以上より、本研究では鉛直深度別に設置した局所変位計を用いて、三軸圧縮試験により供試体の非一様性を考慮した強度変形特性を評価する。ただし、変形特性の評価に際してはダミー供試体及び比較的一様な供試体で確認した当三軸試験装置と局所変位計が持つシステムコンプライアンスの影響にも留意しておく必要がある。

【3章の参考文献】

- 1) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.-S. and Sato, T.(1991): A simple gauge for small strain measurements in the laboratory, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.1, pp169-180.
- 2) Goto, S., Park, C.-S., Tatsuoka, F. and Molenkamp, F.(1993): Quality of the lubrication layer used in element tests on granular materials, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.2, pp47-59.
- 3) Ladd, R.S.,(1978): Preparing test specimens using undercompaction, *Geotechnical testing journal*, GTJODJ, Vol.1, No.1, pp.16-23.
- 4) Kongsukprasert, L., Tatsuoka, F. and Tateyama, M.(2005): Several factors affecting the strength and deformation characteristics of cement-mixed gravel, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.3, pp.107-124.
- 5) Tatsuoka, F. Modoni, G., Jiang, G.L., Anh Dan, Q., Flola, A., Matushita,M. and Koseki, J.(1999): Stress-strain behavior at small strains of unbound granular materials and its laboratory tests, *Keynote Lecture, Proc.of Workshop on modeling and Advanced testing for Unbound Granular Materials-1999*, Balkema, pp.17-62.
- 6) Tatsuoka, F., Tomita, Y., Iguchi, Y. and Hirakawa, D.(2013): Strength and stiffness of compacted crushed concrete aggregate, *Soils and Foundations*, Vol.53, No.6, pp.835-852.
- 7) Tokimatsu, K. and Hosaka, Y.(1986): Effects of sample disturbance on dynamic properties of sand, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.53-64.
- 8) 大浦和香子, 菊地康明, 上廣太(2014): 簡易サンプリング手法による試料の乱れに関する研究(その 2.力学特性), 第 49 回地盤工学研究発表会, pp.243-244.
- 9) 越智健三, 龍岡文夫, 山本博之(1984): ねじりせん断液状化強度と三軸液状化強度の関係について, 第 19 回土質工学研究発表会, pp.583-586.
- 10) 菊地康明, 大浦和香子, 上廣太(2014): 簡易サンプリング手法による試料の乱れに関する研究(その 1.概要), 第 49 回地盤工学研究発表会, pp.241-242.
- 11) 小高猛司, 早野公敏, 古関潤一, 龍岡文夫, 壺内達也, 松本正士, 松下政史(1998): 堆積軟岩試料のサンプリングによる乱れの評価法, 土と基礎, Vol.46, No.5, pp.11-14.
- 12) 後藤聡, 龍岡文夫, 井口豊一(1986): 三軸供試体の寸法および境界条件が粗粒材の静的変形強度特性に与える影響, 粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集, pp.1-8.
- 13) 佐藤剛司, 澁谷啓, 龍岡文夫, 金有性, スポットティチャフォラシンスクン, 朴春植(1991): 三軸および一軸供試体の微小ひずみでの変形係数の測定方法, 三軸試験に関するシンポジウム発表論文集, pp.173-180.
- 14) 佐藤剛司, 朴春植, 金有性, 龍岡文夫(1992): 室内圧縮試験用高容量微小繰返し載荷装置, 土質工学研究発表会, pp.11-14.
- 15) 佐藤剛司, 木幡行宏, 龍岡文夫, 吉田輝, 王林(1994): 高荷重微小変位制御載荷システム, 生研リーフレット, No.250.
- 16) 地盤工学会 (1991): 土の強さと地盤の破壊入門, 丸善出版株式会社, 入門シリーズ 13.
- 17) 地盤工学会 (2009): 地盤材料の試験方法と解説, 丸善出版株式会社.
- 18) 地盤工学会 (2012): 三軸圧縮試験実技講習会テキスト, 公益社団法人地盤工学会.
- 19) 地盤工学会 (2013): 地盤調査の方法と解説, 丸善出版株式会社.
- 20) 澁谷啓, M.J. Symes, D.W. Hight(1991): 砂の三軸強度に及ぼす端面摩擦の影響, 三軸試験に関するシンポジウム発表論文集, pp.105-112.

- 21) 須藤雅人, 川邊翔平, 菊池喜昭, 龍岡文夫(2013): 飽和稲城砂の排水変形・強度特性に対する締固め時飽和度の影響, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp.573-574.
- 22) 善功企, 松本一明, 梅原靖文, 奥村樹郎(1981): サンドサンプリングと品質評価の試みについて, 昭和 56 年度サンプリングシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.55-62.
- 23) 龍岡文夫, 木幡行宏(1994): ベディングエラー, 土と基礎, Vo.42, No.9, pp53-55.
- 24) 龍岡文夫, 小高猛司, 王林, 早野公敏, 古関潤一(1997): 研究展望 堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文集 No.561, III-38, pp.1-17.
- 25) 平川大貴, 川原園美幸, 龍岡文夫(2008): 砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, pp.253-266.
- 26) 山口宏, 木賀一美, 芥川真知, 風間秀彦(1978): 稲城砂の土質工学的性質と微視的考察, 土と基礎, Vol.26, No.2, pp.41-48.
- 27) 尤原, 田村太郎, 小高猛司, 崔瑛, 李圭太, 石原雅規(2016): 簡易サンプリングで採取した砂質土堤防の力学特性の評価, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.1049-1050.
- 28) 吉岡昭三, 木賀一美, 小杉紘平, 前田穂積(1973): 稲城砂の土質工学的性質と土工事設計基準, 土と基礎, Vol.21, No.12, pp.23-29.
- 29) 吉田輝, 辻良祐, 藤崎勝利, 小林弘明, 小原隆志, 龍岡文夫, 坂本博紀, 曾田英揮(2020): 土の締固め過程における剛性・強度に対する乾燥密度と飽和度の影響, 第 55 回地盤工学研究発表会, 21-10-4-03.

第4章

室内締固め供試体と試験盛土供試体の物理特性

4.1 概要

これまでに、現場で締め固めた土は主に鉛直深度方向の乾燥密度勾配等により非一様である事、室内締固め供試体も作製方法によっては強度変形特性に非一様性の影響が現れる可能性がある事を確認し、それを供試体の鉛直深度別に設置した局所変位計で三軸圧縮試験により評価する事を計画した。

本章では現場と室内で締め固めた供試体の非一様性の評価とそれが与える物理特性への影響を調べた。具体的には、試験盛土供試体および室内締固め供試体を鉛直深度別のパートに分けて、それぞれの乾燥密度と含水比の分布を調べた。また、室内締固め供試体の締固め層別のランマー撃力を測定し、室内締固め供試体の乾燥密度分布に対する考察を行った。さらに、パート別に分けた供試体の粒度分布や初期サクシオン、透水性を調べ、現場と室内で締め固めた供試体の物理特性の違いを比較した。

4.2 使用材料の締固め特性

4.2.1 室内で締め固めた土の締固め曲線

前章で詳しく説明したが、使用材料は稲城砂である。図 4-2-1 には、乾燥密度～含水比関係を示す。図中には地盤工学会(2009)の突固めによる締固め試験(JIS A 1210)による A-c 法($1.0E_c$)、E-c 法($4.5E_c$)に加え、 $25.0E_c$ (E-c 法の 1 層の突固め回数 $N_b \times 5.5$)及び、 $0.2E_c$ (A-c 法の 1 層の突固め回数 $N_b \times 1/5$)の 4 種類の締固めエネルギー別の締固め曲線を示している。 $1.0E_c$ の最適含水比は $w_{opt}=14.2\%$ で、最大乾燥密度は $\rho_{dmax}=1.684\text{g/cm}^3$ である。また、 $4.5E_c$ の最適含水比は $w_{opt}=12.5\%$ で、最大乾燥密度は $\rho_{dmax}=1.738\text{g/cm}^3$ である。4 種類の締固めエネルギーはそれぞれ 4.5 倍～5.5 倍程度の割合で増加するのに対し、締固め曲線の乾燥密度は同程度の割合で増加しなかった。特に $1.0E_c$ と $4.5E_c$ の最大乾燥密度の差が 0.05g/cm^3 程度であるのに対し、 $4.5E_c$ と $25.0E_c$ の最大乾燥密度の差が 0.25g/cm^3 程度と大きくなっている。この理由について詳しく調べる事は出来なかったが、1 層の突固め回数が著しく大きい事から粒子破碎の影響で粒度分布が改善し、乾燥密度が向上したと考えられる。図中には締固め度 $D_c=95\%$ 及び 90% における乾燥密度($\rho_d=1.600\text{g/cm}^3$ 及び $\rho_d=1.516\text{g/cm}^3$)を示す。 $1.0E_c$ の締固め曲線の含水比 $w=3\%\sim 20\%$ は盛土土工の一般的な指標となる締固め度 $D_c=95\%$ 及び 90% を満足している事がわかる。

図 4-2-2 には、図 4-2-1 で示した締固め曲線の乾燥密度～飽和度関係を示す。Tatsuoka (2015)は、乾燥密度と含水比で表現される土の締固め特性が同じ土質でも、締固めエネルギーおよび含水比によって変化するのに対し、土の締固め特性が乾燥密度と飽和度に依存する性質に着目し、乾燥密度～飽和度関係における締固め曲線がそれぞれ相似形である事を示している。最適飽和度(最適含水比における飽和度)は、 $1.0E_c$ において $(S_r)_{opt}=64.1\%$ 、 $4.5E_c$ において $(S_r)_{opt}=61.5\%$ であった。本研究で扱う試料の最適飽和度は、締固めエネルギーで少し異なるが各々が概ね相似形である。先述した締固め度 $D_c=95\%$ 及び 90% を満足する $1.0E_c$ の飽和度は、 $S_r=15\%\sim 80\%$ 程度である。

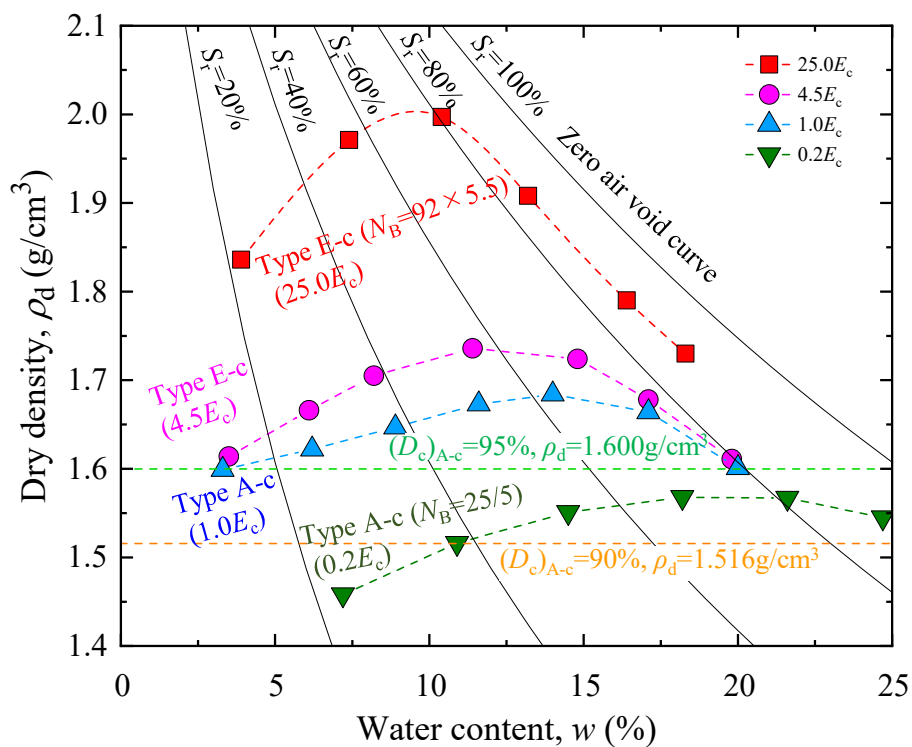


図 4-2-1 突固めによる締固め試験結果 (乾燥密度～含水比関係)

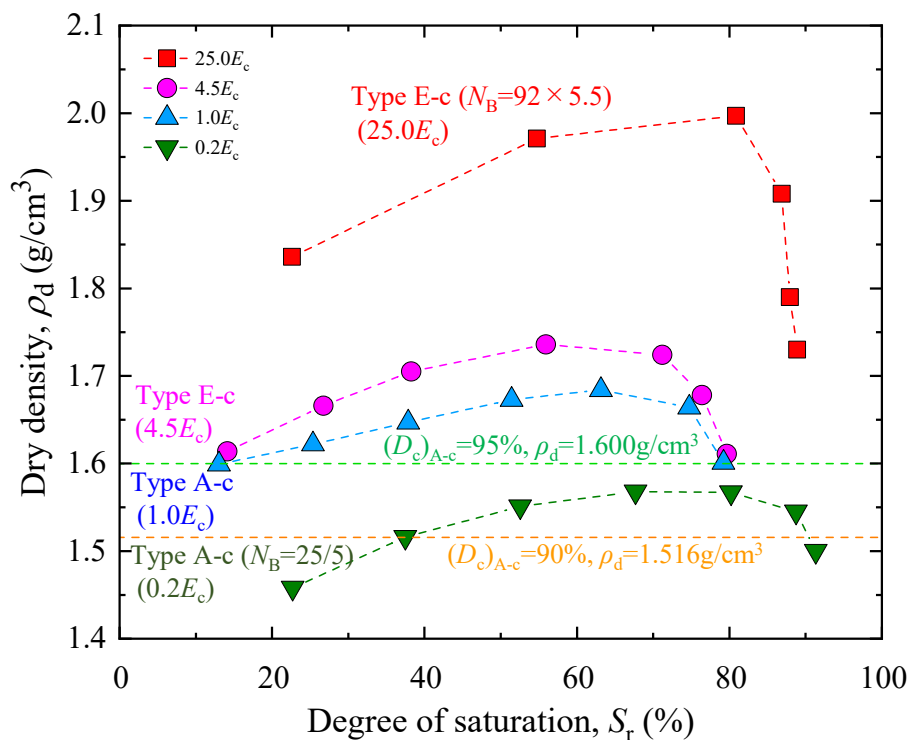


図 4-2-2 突固めによる締固め試験結果 (乾燥密度～飽和度関係)

4.3 締め固めた供試体の鉛直密度分布

先に述べたように、試験盛土から採取した供試体は非一様である事が想定される。また、佐々木ら(2018)、Zhao et al.(2018)は湿潤締固め法により室内で締め固めた供試体の三軸圧縮試験時の供試体中の局所的な鉛直ひずみを観測している。そこで、局所的なひずみが供試体の鉛直密度分布と関連する事を仮定し、突固め法で 5 層に分けて作製する室内締固め三軸供試体の鉛直密度分布を調べた。

4.3.1 鉛直密度分布の測定方法

直径 $\phi 100\text{mm}$ ×高さ $h 200\text{mm}$ の三軸供試体は、下端からの押出し法によってモールドから解放して上端部・中央部・下端部の 3 パートに分けた。また試験盛土の上部と下部の深度別に採取した透水試験用モールド内の直径 $\phi 100\text{mm}$ ×高さ $h 120\text{mm}$ の供試体は、それぞれ下端からの押出し法によってモールドから解放した。それぞれの供試体の湿潤密度と含水比から乾燥密度を算出し、試験盛土の鉛直深度別に乾燥密度分布を算出する。試験盛土供試体の測定状況を図 4-3-1 に、室内締固め供試体の測定状況を図 4-3-2 に示す。

4.3.2 室内締固め供試体の鉛直密度分布

図 4-3-3 は、鉛直密度分布の測定に用いた室内締固め供試体の乾燥密度～含水比関係を示す。含水比は $w=7\% \sim 20\%$ 、飽和度は $S_r=15\% \sim 90\%$ の範囲である。締固めエネルギーは $4.5E_c$ 、 $1.0E_c$ 及び $0.2E_c$ の三種類で、締め固めた供試体の乾燥密度、含水比はそれぞれ供試体全体の平均値であるが、突固めによる土の締固め試験(JIS A 1210)で求めた同じ締固めエネルギーの締固め曲線に比べて乾燥密度が大きい傾向であった。同じ締固めエネルギー条件でもこれらの違いは主に締固め層数とモールド容積である。例えば、今回の三軸圧縮試験用の $1.0E_c$ 供試体は締固め層数が $N_L=5$ で、突固め回数が $N_B=24$ 、モールド容積 $V=0.00157\text{m}^3$ であるのに対し、同じ締固めエネルギーの A-c 法は締固め層数が $N_L=3$ で、突固め回数が $N_B=25$ 、モールド容積 $V=0.00100\text{m}^3$ である。モールド容積が大きい三軸圧縮試験用の供試体は比較的層数が多い事から、突固めの総回数の影響や上層締固め時の下層への影響等が考えられるが、詳細には調べられなかった。

図 4-3-4 は、上端部、中央部、下端部に分けて測定した乾燥密度～含水比関係を示す。それぞれの締固めエネルギーで作製した供試体の乾燥密度と含水比の分布が示されている。図 4-3-5 は、上端部、中央部、下端部の 3 パートの乾燥密度を下式によって上部と下部の 2 パートに整理した後の乾燥密度と含水比の分布を示す。

$$[(\rho_d)_{local}]_{upper} = \{2 \times [(\rho_d)_{local}]_{top} + [(\rho_d)_{local}]_{middle}\} / 3 \quad (4-3-1)$$

$$[(\rho_d)_{local}]_{lower} = \{2 \times [(\rho_d)_{local}]_{bottom} + [(\rho_d)_{local}]_{middle}\} / 3 \quad (4-3-2)$$

ここで、 $[(\rho_d)_{local}]_{upper}$: 供試体上部の乾燥密度 (g/cm^3)

$[(\rho_d)_{local}]_{lower}$: 供試体下部の乾燥密度 (g/cm^3)

$[(\rho_d)_{local}]_{top}$: 供試体上端部の乾燥密度 (g/cm^3)

$[(\rho_d)_{local}]_{middle}$: 供試体中央部の乾燥密度 (g/cm^3)

$[(\rho_d)_{local}]_{bottom}$: 供試体下端部の乾燥密度 (g/cm^3)

上部と下部の乾燥密度の差は小さいが、わずかに下部の方が大きい傾向である。また、 $0.2E_c$ で作製した供試体に

比べて締固めエネルギーの大きい $4.5E_c$ の供試体は乾燥密度と含水比の上下差が大きい傾向が認められる。これらについては、以降に示す図でも確認する。ここで、飽和度が最も小さい $S_r=35\%$ の乾燥側供試体は $4.5E_c$ 、 $1.0E_c$ とともに上端部、下端部の乾燥密度が中央部の乾燥密度より小さい結果で、他の供試体結果と整合しなかった。鉛直密度分布の測定試験時の押出しによる供試体の脱枠は最も小さい飽和度の場合、鋼製モールドとの摩擦が他の飽和度の供試体と比べて著しく大きい上に、乾燥側の供試体は崩れやすかった。このことから乾燥密度の測定誤差が大きく含まれている可能性がある。詳細な原因は不明であり、これ以上調べられなかった。

図 4-3-6 は、上部の乾燥密度と下部の乾燥密度の差～平均含水比の関係を示す。 $(\rho_d)_{upper} - (\rho_d)_{lower}$ が負値を示していることから全体的に上部より下部の方が局所的な乾燥密度(以下、局所乾燥密度と称す)が大きい傾向である。 $w_{ave}=12\% \sim 15\%$ において特に上下差が大きいのは $4.5E_c$ 供試体であった。また、 $w_{ave}=7\%$ 付近では締固めエネルギーが異なっても上下差は小さい結果であった。図 4-3-7 は、上部の乾燥密度と下部の乾燥密度の差～平均飽和度の関係を示す。 $(S_r)_{ave}=60\% \sim 85\%$ において特に上下差が大きいのは $4.5E_c$ 供試体であった。また、 $(S_r)_{ave}=30\%$ 付近では締固めエネルギーが異なっても上下差は小さい結果であり、含水比と同じ傾向であった。図 4-3-8 は、上部の乾燥密度と下部の乾燥密度の差～平均乾燥密度の関係を示す。平均乾燥密度が大きくなると局所乾燥密度の上下差が大きくなる傾向が確認される。これは、締固めエネルギーの大きさも影響しており、締固めエネルギーが大きい程、局所乾燥密度の上下差が大きくなる事を示している。図 4-3-9 は、上部の乾燥密度と下部の乾燥密度の差～締固めエネルギーの関係を示す。含水比や飽和度の影響によりばらつきがあるが、締固めエネルギーが大きい程、局所乾燥密度の上下差が大きくなる傾向が確認される。供試体それぞれの平均乾燥密度に対する上部と下部の乾燥密度の差の割合は、締固めエネルギー $0.2E_c$ の供試体で 0.4% 、 $1.0E_c$ 供試体で 0.3% とほぼ同等であるのに対し、 $4.5E_c$ 供試体は、 1.1% とやや大きい。

図 4-3-10 は、局所乾燥密度～平均乾燥密度関係を示す。図中に示す 1:1 の補助線は局所乾燥密度と平均乾燥密度が一致する事を意味する。図 4-3-8、図 4-3-9 でも確認したように、乾燥密度と締固めエネルギーが大きい程、局所乾燥密度の上下差が大きい事がわかる。特に締固めエネルギー $4.5E_c$ の供試体の局所乾燥密度の上下差は $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ に比べて突出して大きい。これは締固めエネルギーの大きさだけではなく、使用しているランマーが $4.5E_c$ に用いた 4.5kg ランマーと $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ に用いた 2.5kg ランマーで異なる事も要因に含まれている可能性がある。これについては以降に示す、撃力との関係や粒度分布との関係から改めて考察する。

次に、供試体の平均乾燥密度から供試体の上部と下部それぞれの局所乾燥密度の推定方法を示す。図 4-3-11 には、供試体上部と下部それぞれの局所乾燥密度と平均乾燥密度の比 $[(\rho_d)_{local} / (\rho_d)_{ave} - 1] \times 100(\%)$ ～締固めエネルギーの関係を示す。供試体上部の局所乾燥密度は平均乾燥密度より小さく、供試体下部の局所乾燥密度は平均乾燥密度より大きい。そして締固めエネルギーが大きい程その差は大きい。本研究では局所乾燥密度と締固めエネルギー関係において、供試体上部と下部それぞれを一次関数でフィット出来る事を仮定し、以下の式を得た。

$$[(\rho_d)_{upper}] / [(\rho_d)_{ave}] - 1 = -0.0003E_c - 0.2904 \quad (4-3-3)$$

$$[(\rho_d)_{lower}] / [(\rho_d)_{ave}] - 1 = 0.0002E_c + 0.0362 \quad (4-3-4)$$

なお、図中の白抜き記号は後で補足的に採取したデータであるためフィット曲線に用いる事が出来なかった。上式より、供試体の平均乾燥密度から締固めエネルギー別の局所乾燥密度の上下分担率を次のように設定した。

$0.2E_c$ (120 kJ/m^3) の時、

$$[(\rho_d)_{upper}]_{0.2Ec} = [(\rho_d)_{ave}] \times \left(1 + \frac{-0.33}{100}\right) \quad (4-3-5)$$

$$[(\rho_d)_{lower}]_{0.2Ec} = [(\rho_d)_{ave}] \times \left(1 + \frac{0.060}{100}\right) \quad (4-3-6)$$

1.0Ec (570 kJ/m³)の時、

$$[(\rho_d)_{upper}]_{1.0Ec} = [(\rho_d)_{ave}] \times \left(1 + \frac{-0.46}{100}\right) \quad (4-3-7)$$

$$[(\rho_d)_{lower}]_{1.0Ec} = [(\rho_d)_{ave}] \times \left(1 + \frac{0.15}{100}\right) \quad (4-3-8)$$

4.5Ec (2580 kJ/m³)の時、

$$[(\rho_d)_{upper}]_{4.5Ec} = [(\rho_d)_{ave}] \times \left(1 + \frac{-1.1}{100}\right) \quad (4-3-9)$$

$$[(\rho_d)_{lower}]_{4.5Ec} = [(\rho_d)_{ave}] \times \left(1 + \frac{0.55}{100}\right) \quad (4-3-10)$$

図 4-3-12～図 4-3-14 では、締固めエネルギー別に、供試体上部と下部へ推定した乾燥密度分布と実測データの比較をしている。1.0Ec と 0.2Ec 供試体は破線に示す推定線と整合している。その一方で、4.5Ec 供試体は上部と下部の違いが他の締固めエネルギーと比べて大きい事は分かるが、ばらつきが大きい。いずれにしても、締固めエネルギーが大きくなる程、上部と下部の乾燥密度の差が大きくなりやすく、供試体が非一様となりやすい事がわかる。

これらの事を詳細に調べるには別途、飽和度や含水比の影響も踏まえて検討ケースを増やす必要があるが、本研究ではここまでで得られた室内締固め供試体の乾燥密度分布に基づいて、三軸圧縮試験の強度変形特性に与える供試体の非一様性の影響を検討する事とした。室内締固め供試体の上部と下部の含水比の違いに関する明確な傾向は見られなかったが、含水比の鉛直深度方向の上部と下部の差が殆どないものと仮定した。これは後に示す試験盛土供試体の傾向と同じである。

4.3.3 試験盛土供試体の鉛直密度分布

図 4-3-15 は、鉛直密度分布の測定に用いた試験盛土供試体の乾燥密度～含水比関係を示す。含水比は $w=5\% \sim 14\%$ 、飽和度は $S_r=20\% \sim 70\%$ の範囲である。締固め機械の通過回数は $N_p=4, 16$ の二種類で、締め固めた供試体の乾燥密度、含水比はそれぞれ供試体全体の平均値であるが、突固めによる土の締固め試験(JIS A 1210)で求めた締固めエネルギーの締固め曲線と比較すると含水比にも依るが、0.2Ec～4.5Ec と同等の範囲に位置している。締固め機械の通過回数別に比較すると、 $w=6\%, 13\%$ 付近においてそれぞれ類似する含水比で $N_p=4$ の乾燥密度が $N_p=16$ より大きい事が確認される。これは試験盛土の製作ケースが異なる事によるばらつきが生じている可能性があり、この規模の試験盛土で詳細に含水比と転圧回数管理を試みたが、試験ケースによるばらつきは避けられなかったと考える。製作ケースのばらつきには、試験盛土作製時の試料攪拌～撒き出し、締固め、供試体採取における人為的なばらつきや、気温や湿度等に起因する天候の影響によるばらつき、作製した試験盛土が有する空間的ばらつき等が含まれていると考える。

図 4-3-16 は、上端部、中央部、下端部に分けて測定した乾燥密度～含水比関係を示す。また、図 4-3-17 は、上端部、中央部、下端部の乾燥密度を式 4-3-1、式 4-3-2 によって上部と下部に整理した後の乾燥密度と含水比の分布を示す。試験盛土供試体は上部の乾燥密度が下部より大きく、その乾燥密度の差も比較的大きい。この事から試験盛土供試体の鉛直深度方向に乾燥密度分布は非一様であるとわかる。これは、益村ら(1998)が実盛土で測定した乾燥密度の鉛直深度分布の傾向と類似している。次に、供試体上部と下部の乾燥密度の変化に対する含水比の変化に着目すると、上部と下部の差は非常に小さい事がわかる。含水比 $w=5\%$ 付近は、等飽和度線 $S_r=20\%$ が横軸(含水比)に対してほぼ垂直であるため、含水比の違いが飽和度の違いに現れにくい、それ以上の含水比の範囲では、供試

体の上部と下部で含水比が同等で、乾燥密度が異なるという事は、供試体上部と下部で局所的な飽和度(以下、局所飽和度と称す)が異なる事を意味する。図 4-3-18 は、供試体上部と下部の乾燥密度と飽和度関係を示す。飽和度 $S_r=20\%$ 付近を除いて、全体的に供試体上部と下部の局所飽和度が異なる事が確認され、この事から試験盛土供試体の鉛直深度方向の局所飽和度分布は非一様であるとわかる。

図 4-3-19 は、上部の乾燥密度と下部の乾燥密度の差～平均含水比の関係を示す。 $(\rho_d)_{upper} - (\rho_d)_{lower}$ の殆どが正值を示していることから、全体的に下部より上部の方が局所乾燥密度は大きい傾向を示している。また、締固め機械の通過回数別に整理しているが、 $N_p=16$ は $(\rho_d)_{upper} - (\rho_d)_{lower} = -0.05 \text{ g/cm}^3 \sim 0.15 \text{ g/cm}^3$ の範囲で幅を持っており、 $N_p=4$ との違いを見つける事は出来なかった。図 4-3-20 は、上部の乾燥密度と下部の乾燥密度の差～平均飽和度の関係を示す。飽和度で整理した場合も含水比と同様に、締固め機械の通過回数による違いが明確には現れていない。図 4-3-21 は、上部の乾燥密度と下部の乾燥密度の差～平均乾燥密度の関係を示す。同様に、締固め機械の通過回数による違いが明確には現れていない。図 4-3-22 は、上部の乾燥密度と下部の乾燥密度の差～締固め機械通過回数関係を示す。締固め機械の通過回数が与える局所乾燥密度の上下差に与える影響は殆ど見られない。益村ら(1998)は、鉛直深度方向の乾燥密度分布が締固め機械の転圧回数増加とともに乾燥密度及び密度分布が変化することを報告しているが、本研究の試験盛土はそれと異なる傾向であった。この原因は上述した試験盛土の有するばらつきの影響が大きい可能性があり、これ以上詳しく調べる事が出来なかった。また、供試体それぞれの平均乾燥密度に対する上部と下部の乾燥密度の差の割合は、締固め機械通過回数 $N_p=4$ での供試体で 3.9%、 $N_p=16$ での供試体で 4.0%とほぼ同等で締固め機械通過回数に依存せず、図 4-3-9 で説明した室内締固め供試体の割合に比べて著しく大きい事がわかる。これは、締固め度 $D_c(=\rho_d/\rho_{dmax})$ に換算すると $\Delta D_c=4\%$ であり、非常に大きい事がわかる。

次に、供試体の平均乾燥密度から供試体の上部と下部それぞれの局所乾燥密度の推定方法を提案する。図 4-3-23 には、供試体上部と下部それぞれの局所乾燥密度と平均乾燥密度の比 $[(\rho_d)_{local} / (\rho_d)_{ave} - 1] \times 100(\%)$ ～締固め機械の通過回数の関係を示す。供試体上部の局所乾燥密度は平均乾燥密度より大きく、供試体下部の局所乾燥密度は平均乾燥密度より小さい。そしてその差は締固め機械の通過回数の影響が殆ど見られない。本研究では局所乾燥密度と締固め機械通過回数関係において、供試体上部と下部それぞれを一次関数でフィット出来る事を仮定し、下式を得た。

$$[(\rho_d)_{upper}] / [(\rho_d)_{ave}] - 1 = 0.007N_p + 1.92 \cong 2.0 \quad (4-3-11)$$

$$[(\rho_d)_{lower}] / [(\rho_d)_{ave}] - 1 = -0.008N_p - 1.90 \cong -2.0 \quad (4-3-12)$$

上式より、供試体の平均乾燥密度から締固めエネルギー別の局所乾燥密度の上下分担率は上端部を次のように設定した。

$$[(\rho_d)_{upper}]_{Fill} = [(\rho_d)_{ave}] \times \left(1 + \frac{2.0}{100}\right) \quad (4-3-13)$$

$$[(\rho_d)_{lower}]_{Fill} = [(\rho_d)_{ave}] \times \left(1 + \frac{-2.0}{100}\right) \quad (4-3-14)$$

図 4-3-24 は、局所乾燥密度～平均乾燥密度関係を示す。図中に示す 1:1 の補助線は局所乾燥密度と平均乾燥密度が一致する事を意味する。図 4-3-23 でも確認したように、乾燥密度が締固め機械の通過回数の影響を殆ど受けていないため、供試体の上部と下部の局所乾燥密度はそれぞれ 1:1.02、1:0.98 線上に分担される事としており、推定

した補助線と測定データで大きな差異はない事を確認した。

以上の事より、本研究ではここまでで得られた試験盛土供試体の乾燥密度分布及び飽和度分布結果に基づいて、三軸試験用試験盛土供試体の鉛直深度方向の乾燥密度分布と飽和度分布を上記の方法で仮定し、三軸圧縮試験の強度変形特性を検討する。

4.3.4 突固め法による室内締固めが供試体に与える撃力と鉛直密度分布の関係

突固め法で 5 層に分けて作製した室内締固め供試体は、締固めエネルギーが大きい程、供試体上部と下部の乾燥密度の差が大きい傾向にある事が確認されたが、この理由について突固め法の締固め機構に着目して考察する。

突固め法はモールド内の試料にランマーの重錘を鉛直方向に落下させ、ランマーが試料に与える撃力で各層を締固める方法である。ここで、撃力とは衝突や打撃における力を指す。谷口ら(1997)は、釘打ち作業を科学的に分析する事を目的に、打撃装置による自由落下打撃実験及び強度試験機による釘の押込み実験を行っている。その結果、打撃エネルギーと撃力及び釘の進入量との間には、正の相関性が認められる事を確認している。また、打撃エネルギー一定条件で繰り返し打撃する場合、釘の進入に伴う母材との摩擦の増加によって、撃力は増加し、打撃により釘に作用した力積はほぼ一定である事を明らかにしている。

ここで、突固め法で作製する室内締固め供試体は 5 層それぞれで、ランマーの重量、ランマーの落下高さ、1 層あたりの突固め回数が一定である。その一方で、谷口ら(1997)が明らかにした知見と同様に土においても締固め土の硬さは変化する事が予想される事から、ランマーの落下時の撃力が常に一定であるとは考えにくい。そこで、図 4-3-25 に示すように、鋼製モールドの下にロードセル(容量:50kN)を設置し、サンプリング周波数 2.0kHz の条件で締固め時の荷重を測定した。なお、本試験装置は平面的にモールド中心と荷重計の中心、をダブルナットで一軸線上に固定した構造であるため、締固め時のランマーと試料の接触する鉛直軸中心とモールド中心軸とのずれに伴う荷重の偏心の影響は評価出来ていない。また、本試験装置はおもり等で出来るだけ固定したが、締固め時の衝撃による多少のばたつきと、金属接合部間の接触に伴う衝突音が生じており、鋼製モールド下のロードセルがない標準的な室内締固め供試体に比べて多少の締固めエネルギー損失が発生している可能性がある。締固め時の撃力測定状況を図 4-3-26 に示す。

図 4-3-27 は、試料を入れず、空の鋼製モールド底板を突固め回数 $N_B=20$ で突き固めた時の鉛直荷重の時刻歴を示す。20 回の突固め中にばらつきはあるが、鉛直荷重 $P_v=1.5\text{kN}\sim 1.7\text{kN}$ 程度を示しており、4.5kg ランマー(≒ 44.1N)が瞬間的に 34 倍～39 倍もの値を示している。締固め中の鉛直荷重のばらつきが生じているがこれは、JIS の規定に従って締固め 1 サイクルをモールドの内縁に沿って $N_B=5\sim 6$ 、モールドの中心で 1 回としている為、モールド中心からの偏心やランマーの傾斜による偏心等が原因と考えられる。また、突固め回数の増加に伴い、無載荷時の鉛直荷重が 0kN から -0.2kN 程度ドリフトしている事が確認された。このドリフトは撃力に伴って生じており、詳しい原因は不明であった。以降の試験に際しては、測定を複数回に分け、鉛直荷重を 0kN に戻す事にした。図 4-3-28 は空の鋼製モールド内で突固めして測定した鉛直荷重が最大となる波形の拡大図を示す。白抜きの記号は測定値であり、実直線で測定値間を結んでいる。波形はピーク付近でも緩やかな曲線を描いており、サンプリング周波数 2.0kHz で問題なく測定出来ている事を確認した。

図 4-3-29 は、撃力測定試験に用いた供試体の乾燥密度～含水比関係を示す。これらの供試体は図 4-3-5 に示したデータの一部である。

図 4-3-30～図 4-3-34 は、締固めエネルギー $4.5E_c$ の供試体作製時の鉛直荷重の時刻歴で、締固め層数 $N_L=1^{\text{st}}\sim 5^{\text{th}}$ 別に示している。いずれの締固め層のケースも突固め回数 $N_B=1\sim 6$ 、 $N_B=7\sim 20$ 、 $N_B=21\sim 40$ の三つのグループに分け、鉛直荷重のドリフト修正をしている。締固め層数 $N_L=1^{\text{st}}\sim 5^{\text{th}}$ は共通して突固め回数 $N_B=1\sim 6$ は鉛直荷重が

増加しており、突固め回数 $N_B=7\sim 40$ はばらつきを含むが鉛直荷重は収束する傾向を示している。これは投入した試料が締め固められて、硬くなる事により、瞬間的な反力が大きくなっている事を意味する。

図 4-3-35、図 4-3-36 は、各層の鉛直荷重が最大時となる波形を重ねた時刻歴とその拡大図を示し、それぞれの载荷開始を $t=0$ sec として整理している。図中には図 4-3-28 で示したモールドのみの波形も示しているが、鉛直荷重の最大値が最も大きいのはモールドのみのケースであった。鉛直荷重の最大値が大きいのは、モールドのみの次に $N_L=1^{\text{st}}$ (1 層目)であり、それ以降は $N_L=2^{\text{nd}}$ (2 層目)、 $N_L=3^{\text{rd}}$ (3 層目)、 $N_L=4^{\text{th}}$ (4 層目)、 $N_L=5^{\text{th}}$ (5 層目)と層数の順番であった。また、鉛直荷重の最大値が小さい程、ピークまで要する時間が大きい傾向である事もわかる。大島、高田ら (1992)は、重錘落下締固めにおける締固め機構の分析研究により、重錘落下による締固め貫入量を下式に基づいて整理する事で、締固め効果は打撃エネルギーよりも重錘が打撃時に持っている運動量に依存する事を示している。

質量 m の重錘が落下高 H から自由落下し、衝突速度 v_0 で地盤に衝突した後、地盤に貫入し、時間 t 後に制止する場合を考えた時、運動量 mv_0 は重錘が静止するまでの力積 I に等しく一定値であるから、次式が成り立つ。

$$I = \int_0^t F(t)dt = -mv_0 \quad (4-3-15)$$

ここで、 $F(t)$ が撃力である。

従って、同じ重錘を使って同じ落下高で突固めた際に、締固め層数が増加すると鉛直荷重の最大値が減少するが、それぞれの力積が等しい事からピークまで要する時間が大きくなるのは、重錘が接触地盤へ貫入する時間が増加しているからである。すなわち、締固め層の上層は下層に比べてわずかに軟らかい事を意味する。すなわち、下層は鋼製モールド底板上の薄層である為に比較的剛性が高く、上層ほど下層を含めた締固め層の剛性がわずかに低くなる為、締固め時に重錘が接触地盤へ貫入する時間が増加し、一定の力積で締め固めていても撃力は低下する。

図 4-3-37 は、締固め層 $N_L=1^{\text{st}}\sim 5^{\text{th}}$ までそれぞれの鉛直荷重～突固め回数の関係を示す。記号はそれぞれの締固め層における突固め毎のピーク値を示しており、破線はそれぞれの締固め層における全てのピークの平均値を示す。鉛直荷重のピーク値は $N_B=6\sim 10$ 程度にかけて増加し、それ以降収束傾向にある事が確認されるが、上層と下層に関わらず同等の値であった。また、 $N_B=6\sim 10$ 以降は、ばらつきはあるが下層の方が上層に比べてピーク値が大きい傾向が確認された。ピークの平均値を比較しても、下層が上層に比べて大きい傾向を示している。平均鉛直荷重の最大値($N_L=1^{\text{st}}$)と最小値($N_L=5^{\text{th}}$)の差は 0.22kN であった。これは、下層は下面が堅固なモールドに接し、上層は下層の比較的軟らかい締固め土がランマーの貫入を許し、鉛直荷重のピーク値を低下させていると考えられる。この差は締固めにより試料がある程度硬くなってから生じる差である為、締固め開始から $N_B=6\sim 10$ 付近までは締固め層に関係なく同等のピーク値を示している。つまり、突固め法による締固めは、試料が締め固まるとともに、上層及び下層それぞれの下面の境界条件が異なる事に起因する平均鉛直荷重(平均撃力)に違いが生じている。

次に、供試体作製時の平均撃力と供試体の鉛直密度分布について考察する。上端部、中央部、下端部の 3 パートに分けた模式図を図 4-3-38 に、上部、下部の 2 パートに分けた模式図を図 4-3-39 に示している。これに基づき、平均鉛直荷重は次のようにパート分けした。

$$[(P_v)_{ave}]_{top} = \frac{26.7[(P_v)_{ave}]_{NL=4}}{66.7} + \frac{40[(P_v)_{ave}]_{NL=5}}{66.7} \quad (4-3-16)$$

$$[(P_v)_{ave}]_{middle} = \frac{13.3[(P_v)_{ave}]_{NL=2}}{66.6} + \frac{40[(P_v)_{ave}]_{NL=3}}{66.6} + \frac{13.3[(P_v)_{ave}]_{NL=4}}{66.6} \quad (4-3-17)$$

$$[(P_v)_{ave}]_{bottom} = \frac{40[(P_v)_{ave}]_{NL=1}}{66.7} + \frac{26.7[(P_v)_{ave}]_{NL=2}}{66.7} \quad (4-3-18)$$

$$[(P_v)_{ave}]_{upper} = \frac{40[(P_v)_{ave}]_{NL=1}}{100} + \frac{40[(P_v)_{ave}]_{NL=2}}{100} + \frac{20[(P_v)_{ave}]_{NL=3}}{100} \quad (4-3-19)$$

$$[(P_v)_{ave}]_{lower} = \frac{20[(P_v)_{ave}]_{NL=3}}{100} + \frac{40[(P_v)_{ave}]_{NL=4}}{100} + \frac{40[(P_v)_{ave}]_{NL=5}}{100} \quad (4-3-20)$$

上端部、中央部、下端部の3パートに分けた平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係を図4-3-40に示す。局所乾燥密度は下端部が上端部に比べて大きい事は図4-3-4でも説明したが、飽和度 $S_r=35.3\%$ の乾燥側供試体の下端部を除き、平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係は1:2.3の補助線に沿って比例関係にある事がわかる。乾燥側供試体の下端部の乾燥密度が低い事は先述した通り、測定誤差が多く含まれている可能性があり、詳しい理由はわからなかった。上部、下部の2パートに分けた平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係を図4-3-41に示す。これも同様に、飽和度 $S_r=35.3\%$ の乾燥側供試体を除き、平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係は1:2.3の補助線に沿った比例関係にある。これらの事から、 $4.5E_c$ で作製した供試体は $1.0E_c$ や $0.2E_c$ で作製した供試体に比べて上部と下部の乾燥密度の差が大きい傾向であったが、これは突固め法による締固め時の層別の撃力の違いにより生じている可能性がある事を確認した。

次に、2.5kgランマー(≒24.5N)で締め固めた供試体の撃力と鉛直密度分布の関係について考察する。図4-3-42～図4-3-46は、締固めエネルギー $1.0E_c$ の供試体作製時の鉛直荷重の時刻歴で、締固め層数 $N_L=1^{st} \sim 5^{th}$ 別に示している。いずれの締固め層のケースも突固め回数 $N_B=1 \sim 6$ 、 $N_B=7 \sim 12$ 、 $N_B=13 \sim 24$ の三つのグループに分け、鉛直荷重のドリフト修正をしている。締固め層数 $N_L=1^{st} \sim 5^{th}$ は共通して突固め回数 $N_B=1 \sim 6$ は鉛直荷重が増加しており、突固め回数 $N_B=7 \sim 24$ はばらつきを含むが鉛直荷重は収束する傾向を示しており、 $4.5E_c$ の締固め時と同様に投入した試料が締め固められて、硬くなる事により、瞬間的な反力が大きくなっている事を意味している。

図4-3-47、図4-3-48は、各層の鉛直荷重が最大時のみの波形を重ねた時刻歴とその拡大図を示し、それぞれの載荷開始を $t=0 \text{ sec}$ として整理している。図中には2.5kgランマーを空のモールド内で落下させた場合の波形も示しているが、鉛直荷重の最大値が最も大きいのはモールドのみのケースである。鉛直荷重の最大値が大きいのは、モールドのみの次に $N_L=1^{st}$ (1層目)であり、それ以降は $N_L=2^{nd}$ (2層目)、 $N_L=3^{rd}$ (3層目)の順番であり、 $N_L=4^{th}$ (4層目)と $N_L=5^{th}$ (5層目)はほぼ同等であった。また、鉛直荷重の最大値が小さい程、ピークまで要する時間が大きい傾向である事も $4.5E_c$ での測定結果と同じ傾向であった。

図4-3-49は、締固め層 $N_L=1^{st} \sim 5^{th}$ までそれぞれの鉛直荷重～突固め回数の関係を示す。記号はそれぞれの締固め層における突固め毎のピーク値を示しており、破線はそれぞれの締固め層における全てのピークの平均値を示す。鉛直荷重のピーク値は $N_B=6 \sim 10$ 程度にかけて増加し、それ以降収束傾向にある事が確認されるが、上層と下層に関わらず同等の値であった。また、 $N_B=6 \sim 10$ 以降は、ばらつきはあるが下層の方が上層に比べてピーク値がやや大きい傾向が確認された。ピークの平均値を比較しても、下層が上層に比べてやや大きい傾向を示している。平均鉛直荷重の最大値($N_L=2^{nd}$)と最小値($N_L=4^{th}$)の差は0.06kNであった。これらの傾向は、 $4.5E_c$ での締固め結果と同様に、試料が締め固まるとともに、上層及び下層それぞれの下面の境界条件が異なる事に起因する平均鉛直荷重(平均撃力)に違いが生じている事を意味するが、その差は $4.5E_c$ での締固め時に比べて非常に小さい事が確認された。

締固めエネルギー $1.0E_c$ 及び $0.2E_c$ で締め固めた供試体について、上端部、中央部、下端部の3パートに分けた平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係を図4-3-50に示す。局所乾燥密度は上下差が非常に小さいが、平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係は締固めエネルギー $1.0E_c$ 及び $0.2E_c$ で締め固めた供試体ともに1:1.7の補助線の付近に分布していた。締固めエネルギー $1.0E_c$ 及び $0.2E_c$ で締め固めた供試体が近い値を示すのは、共通して同じ2.5kgランマーを使用している影響が大きいと考える。上部、下部の2パートに分けた平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係を

図 4-3-51 に示す。これも同様に、平均鉛直荷重～局所乾燥密度の関係は 1:1.7 の補助線に沿って分布している。これらの事から、 $1.0E_c$ や $0.2E_c$ で作製した供試体は $4.5E_c$ で作製した供試体に比べて上部と下部の乾燥密度の差が小さい傾向であったが、これは突固め法による締固め時の層別の撃力の違いにより生じている可能性がある事を確認した。

図 4-3-52、図 4-3-53 には、 $4.5E_c$ の供試体に与えた応力～局所乾燥密度関係と、 $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ の供試体に与えた応力～局所乾燥密度関係を示す。 $4.5E_c$ の供試体は 4.5kg ランマーで $\sigma_v=170\text{kPa}\sim190\text{kPa}$ 程度、 $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ の供試体 2.5kg ランマーは $\sigma_v=70\text{kPa}\sim85\text{kPa}$ 程度であった。瞬間的にこの程度の応力を供試体は受けている事になる。



図 4-3-1 密度分布測定状況(試験盛土供試体)



図 4-3-2 密度分布測定状況(室内締固め供試体)

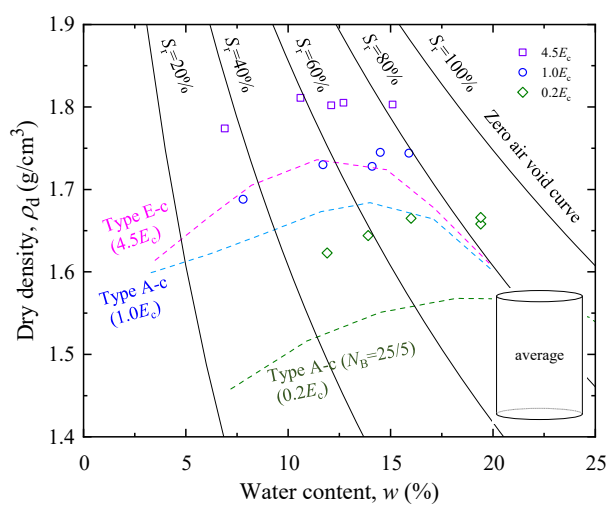


図 4-3-3 室内締固め供試体の $\rho_d \sim w$ 関係
(全体平均)

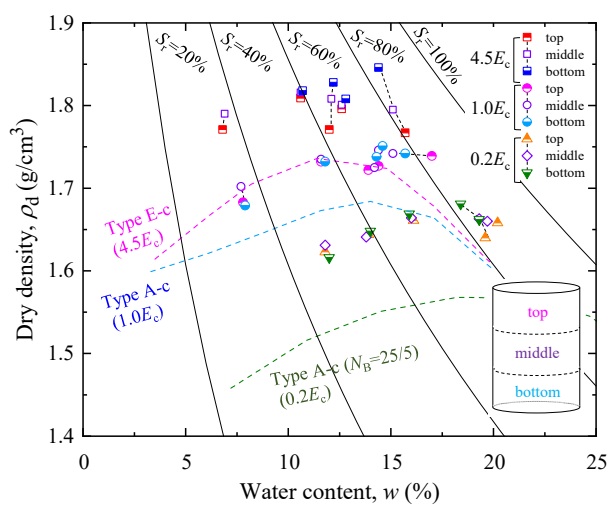


図 4-3-4 室内締固め供試体の $\rho_d \sim w$ 関係
(上端部、中央部、下端部)

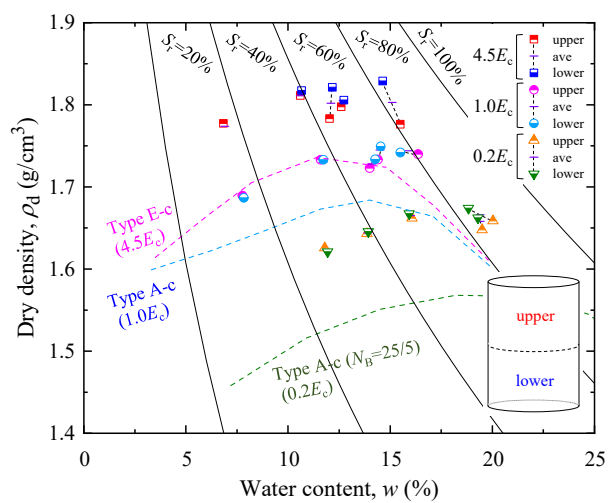


図 4-3-5 室内締固め供試体の $\rho_d \sim w$ 関係
(上部、下部に整理後)

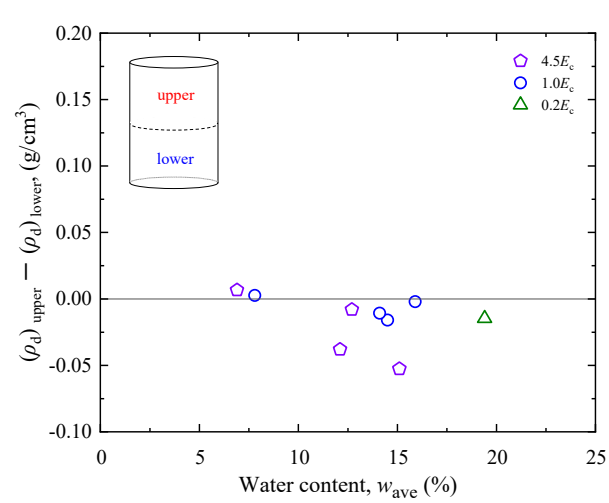


図 4-3-6 $(\rho_d)_{\text{upper}} - (\rho_d)_{\text{lower}} \sim w_{\text{ave}}$ 関係

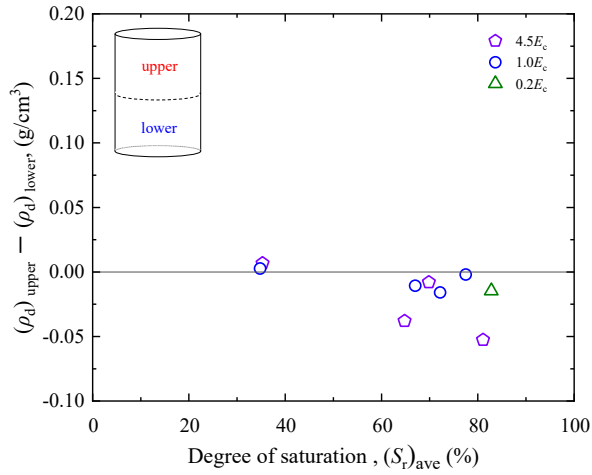


図 4-3-7 $(\rho_d)_{upper} - (\rho_d)_{lower} \sim (S_r)_{ave}$ 関係

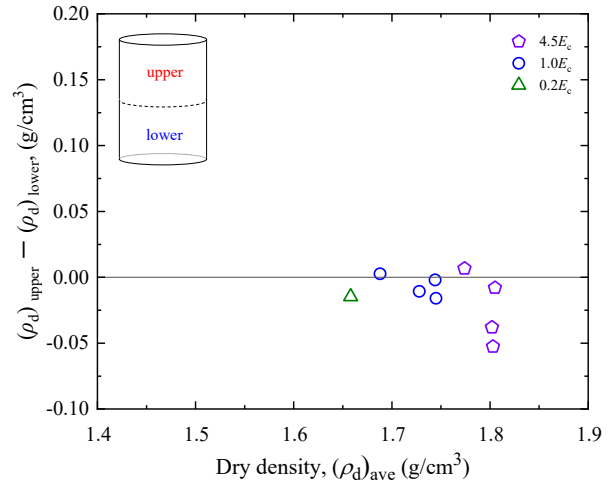


図 4-3-8 $(\rho_d)_{upper} - (\rho_d)_{lower} \sim (\rho_d)_{ave}$ 関係

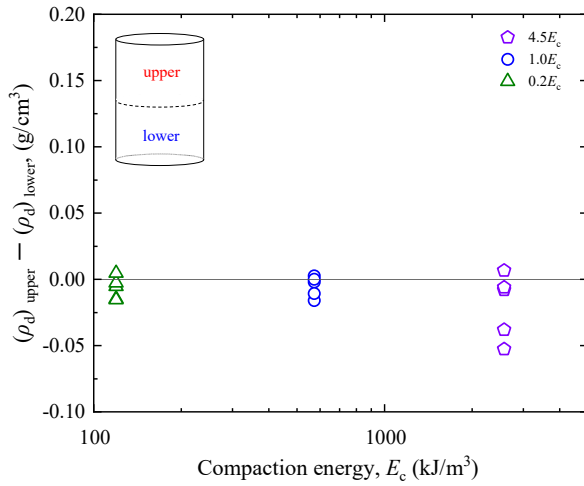


図 4-3-9 $(\rho_d)_{upper} - (\rho_d)_{lower} \sim E_c$ 関係

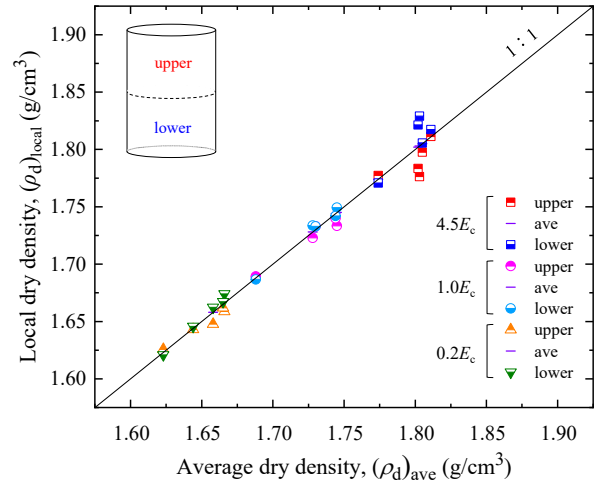


図 4-3-10 局所乾燥密度～平均乾燥密度関係

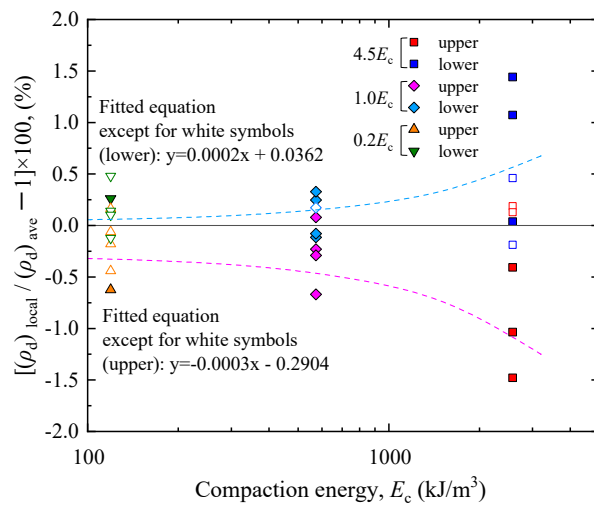


図 4-3-11 $(\rho_d)_{local} / (\rho_d)_{ave} \sim E_c$ 関係

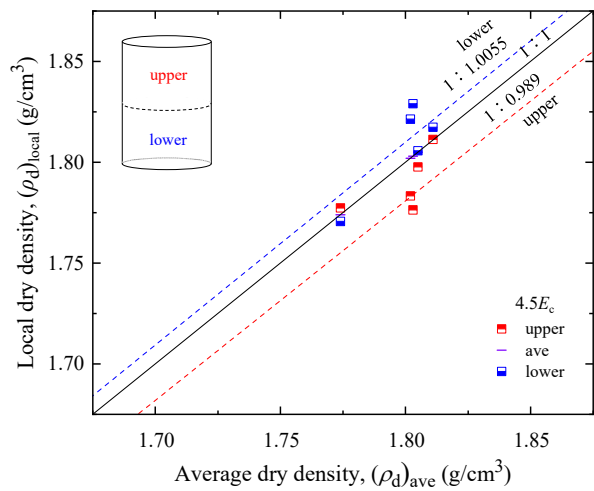


図 4-3-12 局所乾燥密度～平均乾燥密度関係
(4.5Ec)

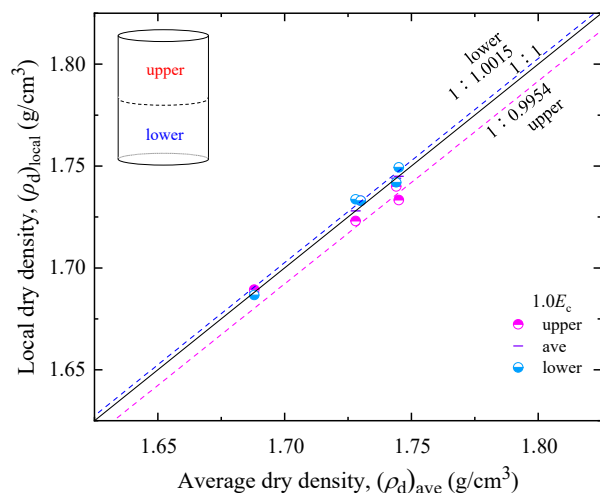


図 4-3-13 局所乾燥密度～平均乾燥密度関係
($1.0E_c$)

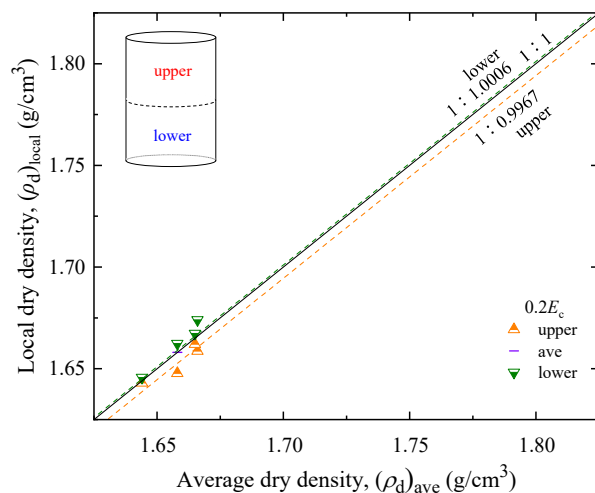


図 4-3-14 局所乾燥密度～平均乾燥密度関係
($0.2E_c$)

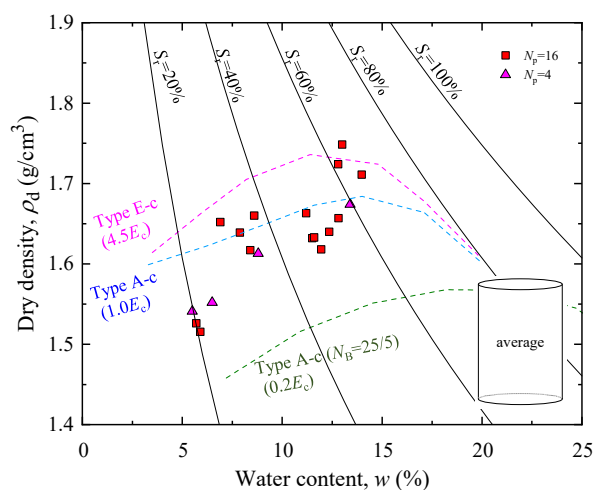


図 4-3-15 試験盛土供試体の $\rho_d \sim w$ 関係
(全体平均)

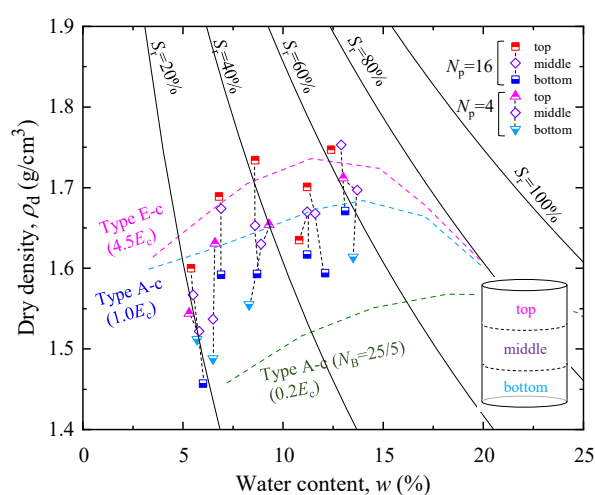


図 4-3-16 試験盛土供試体の $\rho_d \sim w$ 関係
(上端部、中央部、下端部)

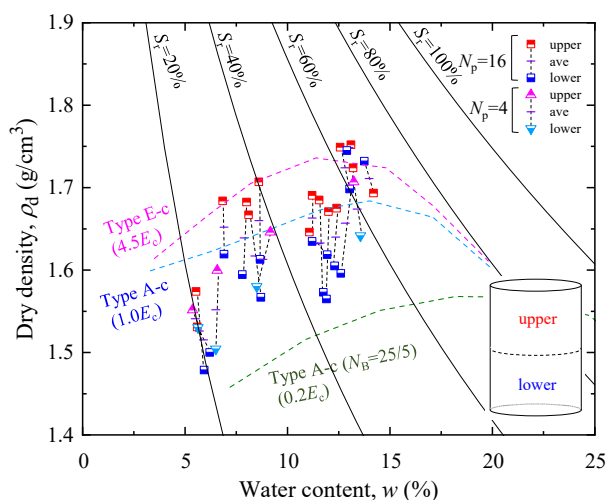


図 4-3-17 試験盛土供試体の $\rho_d \sim w$ 関係
(上部、下部に整理後)

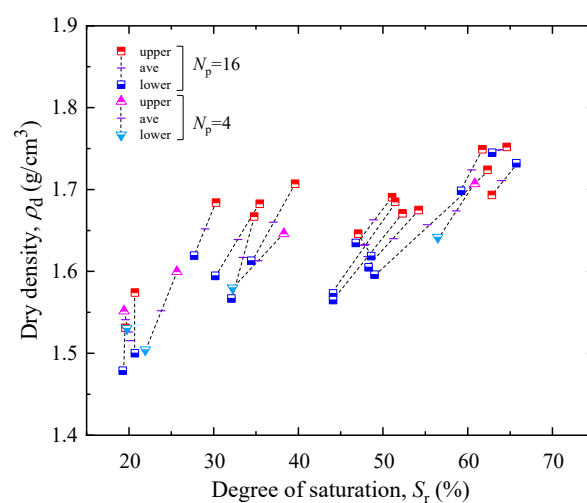


図 4-3-18 試験盛土供試体の $\rho_d \sim S_r$ 関係
(上部、下部)

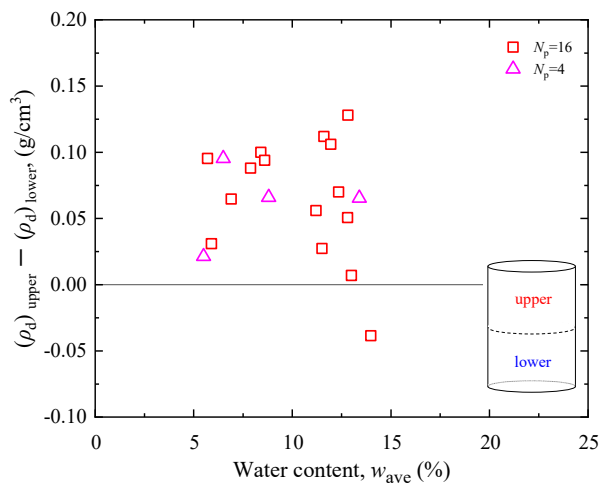


図 4-3-19 $(\rho_d)_{upper} - (\rho_d)_{lower} \sim w_{ave}$ 関係

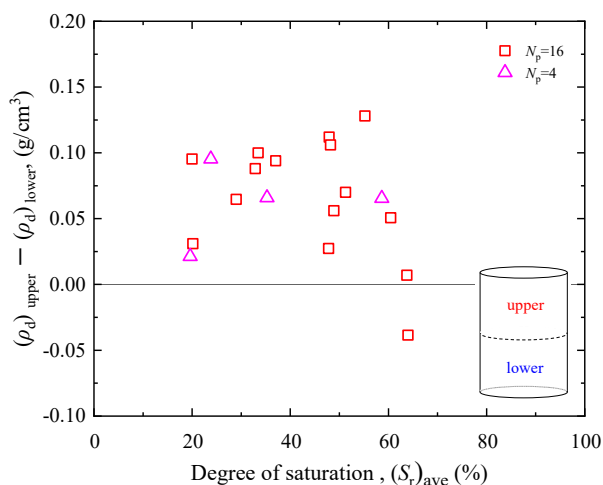


図 4-3-20 $(\rho_d)_{upper} - (\rho_d)_{lower} \sim (S_r)_{ave}$ 関係

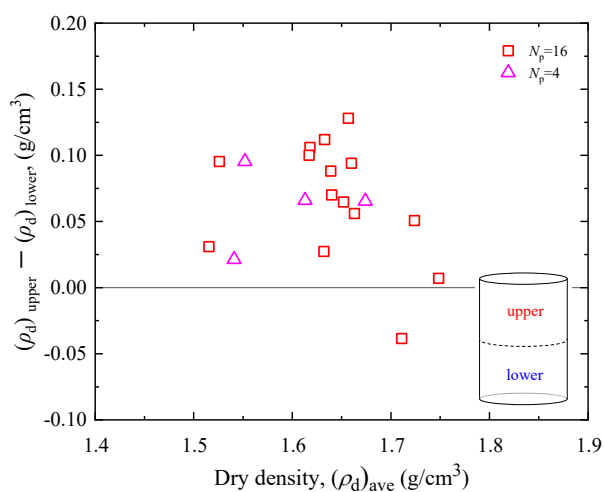


図 4-3-21 $(\rho_d)_{upper} - (\rho_d)_{lower} \sim (\rho_d)_{ave}$ 関係

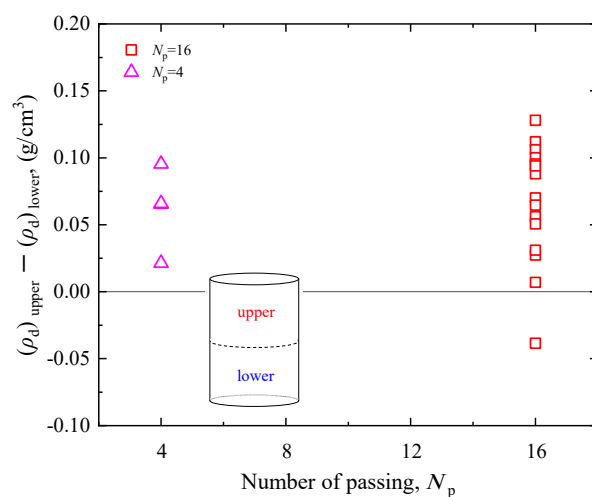


図 4-3-22 $(\rho_d)_{upper} - (\rho_d)_{lower} \sim N_p$ 関係

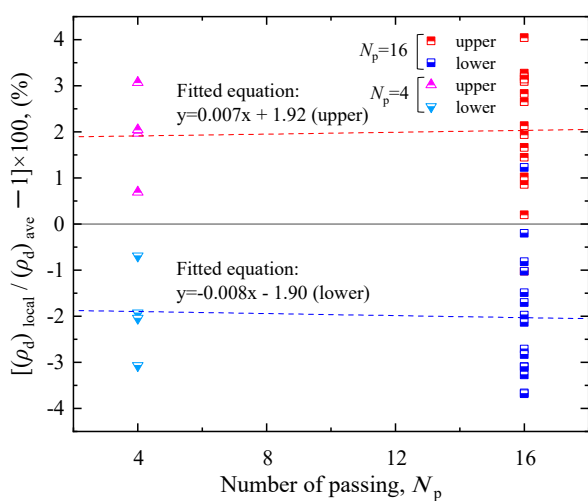


図 4-3-23 $(\rho_d)_{local} / (\rho_d)_{ave} \sim N_p$ 関係

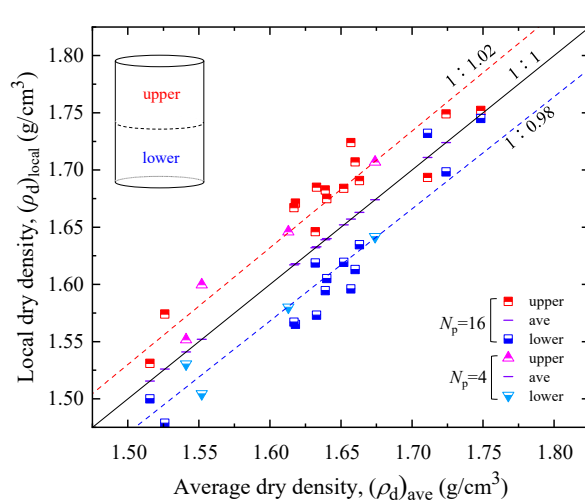


図 4-3-24 局所乾燥密度～平均乾燥密度関係

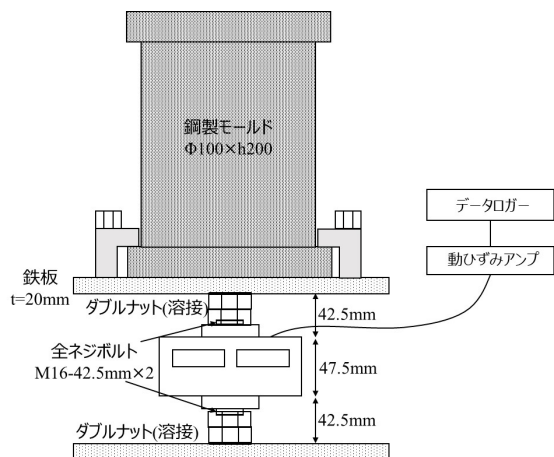


図 4-3-25 撃力測定装置概略



図 4-3-26 撃力測定試験状況

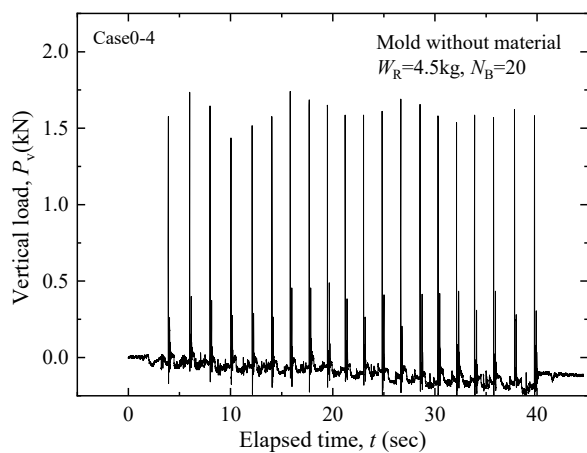


図 4-3-27 鋼製モールドのみの荷重時刻歴

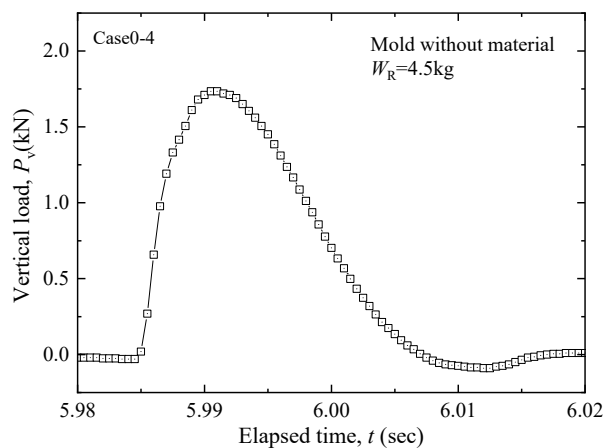


図 4-3-28 鋼製モールドのみの荷重時刻歴拡大

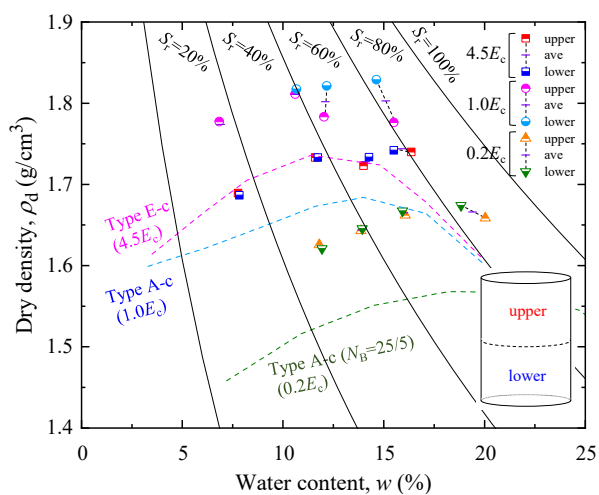


図 4-3-29 試験ケースの乾燥密度～含水比関係

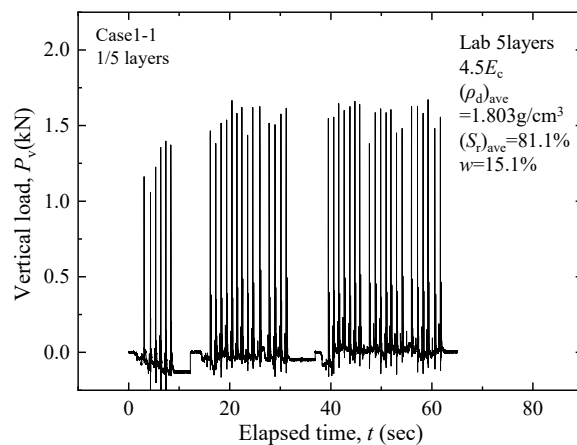


図 4-3-30 締固め層 1 層目の荷重時刻歴(4.5E_c)

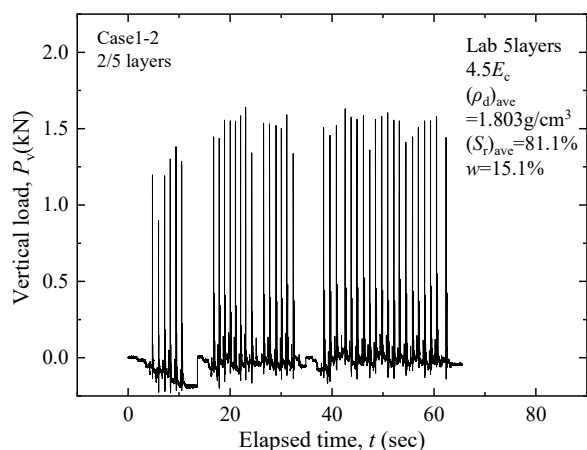


図 4-3-31 締固め層 2 層目の荷重時刻歴(4.5E_c)

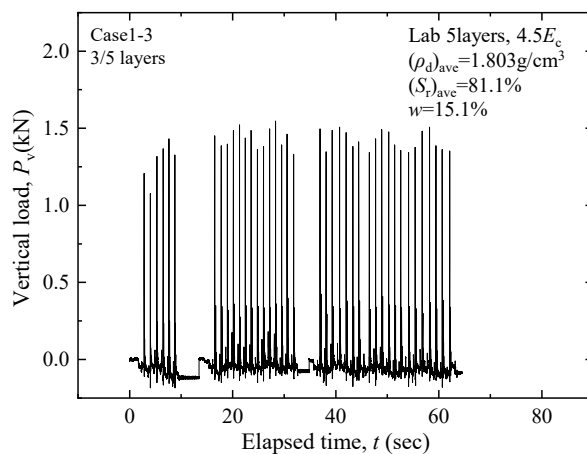


図 4-3-32 締固め層 3 層目の荷重時刻歴(4.5E_c)

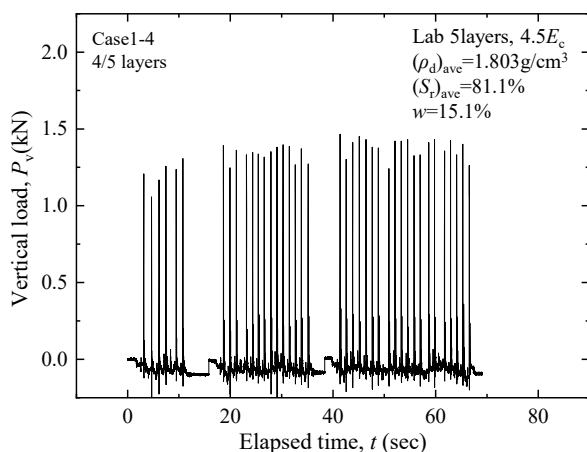


図 4-3-33 締固め層 4 層目の荷重時刻歴(4.5E_c)

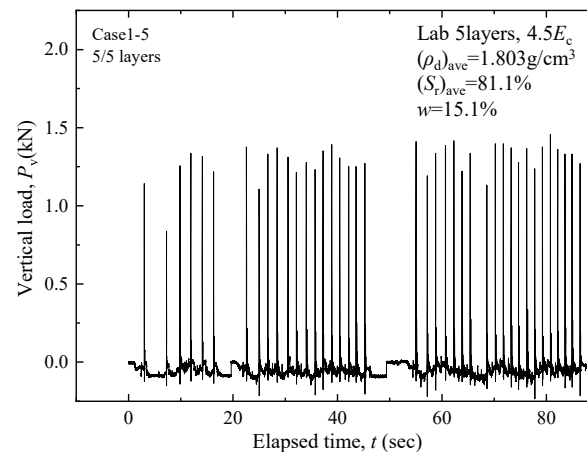


図 4-3-34 締固め層 5 層目の荷重時刻歴(4.5E_c)

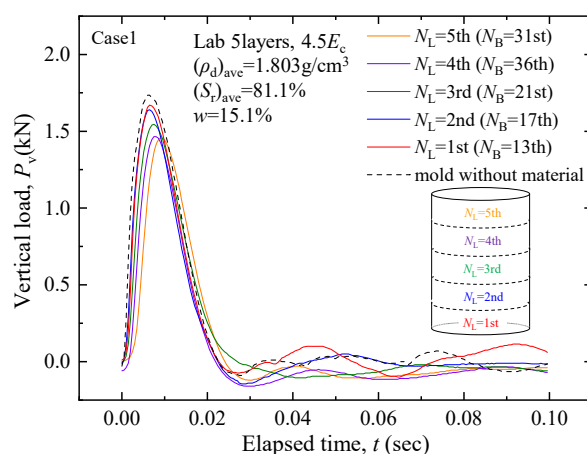


図 4-3-35 各層の最大荷重時の時刻歴(4.5E_c)

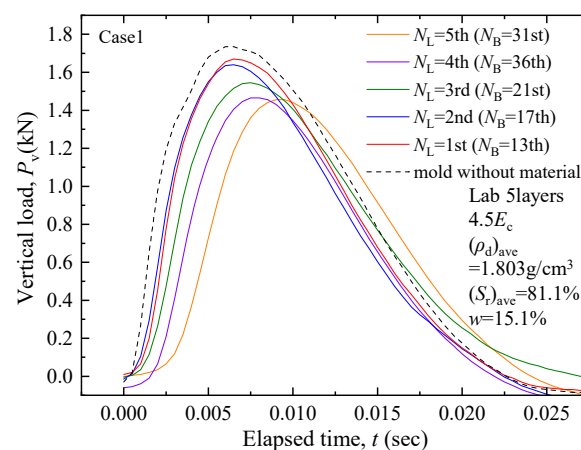


図 4-3-36 各層の最大荷重時の時刻歴拡大(4.5E_c)

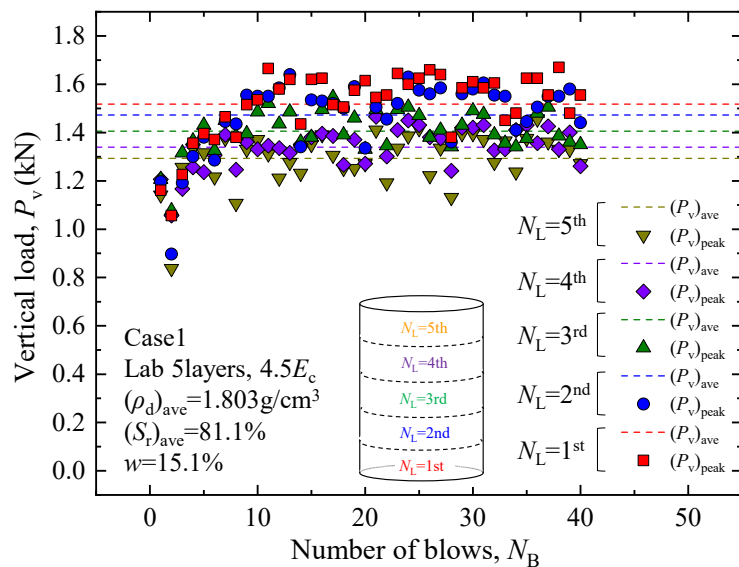


図 4-3-37 鉛直荷重～突固め回数関係($4.5E_c$)

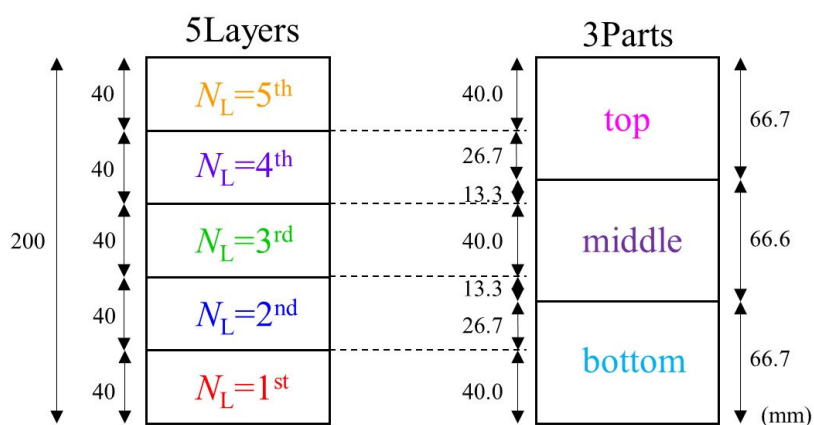


図 4-3-38 平均撃力のパート分けに用いた模式図(上端部、中央部、下端部)

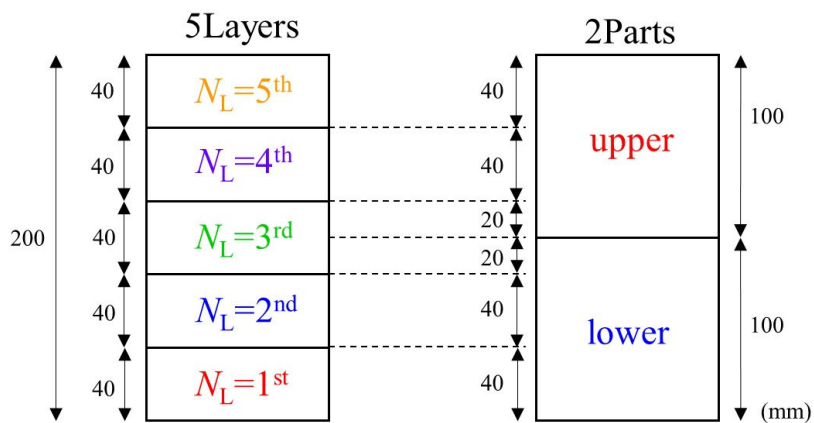


図 4-3-39 平均撃力のパート分けに用いた模式図(上部、下部)

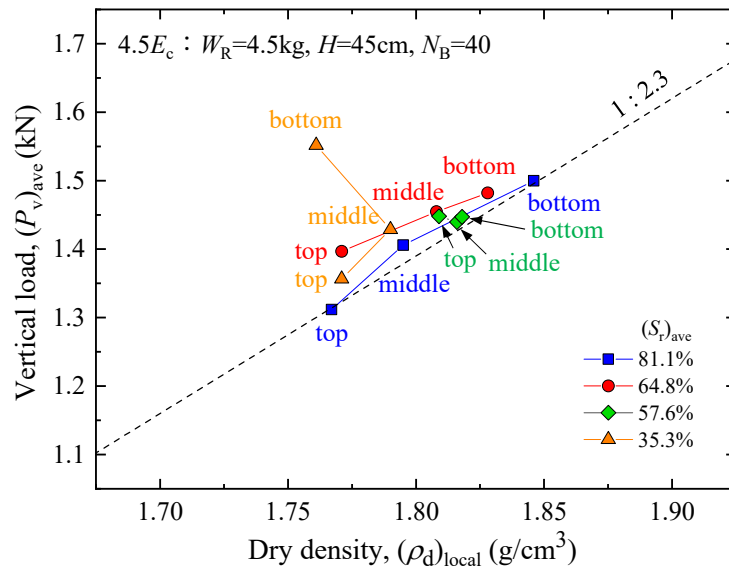


図 4-3-40 上中下部の $(P_v)_{ave}$ ～上中下部の $(\rho_d)_{local}$ 関係

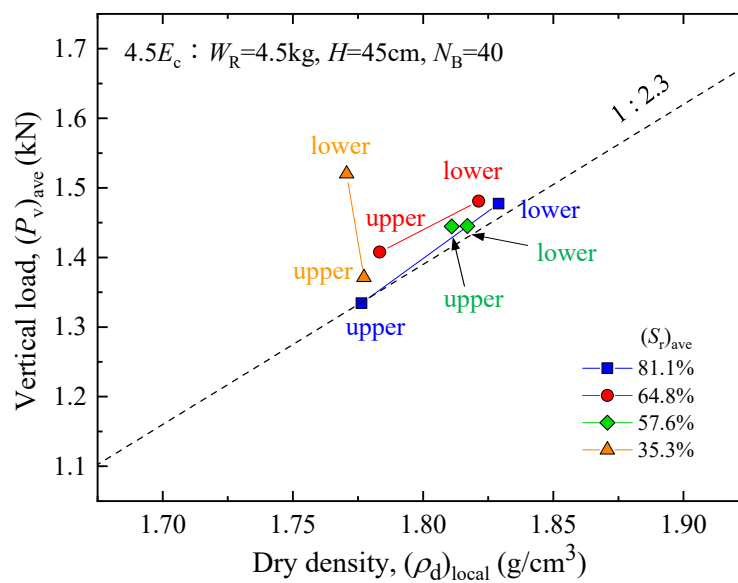


図 4-3-41 上下部の $(P_v)_{ave}$ ～上下部の $(\rho_d)_{local}$ 関係

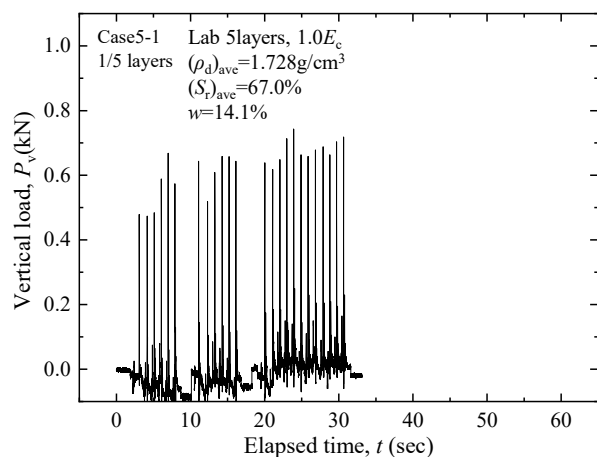


図 4-3-42 締固め層 2 層目の荷重時刻歴(1.0E_c)

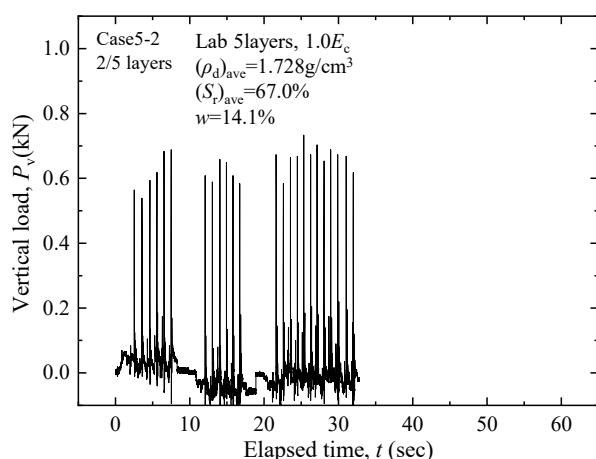


図 4-3-43 締固め層 3 層目の荷重時刻歴(1.0E_c)

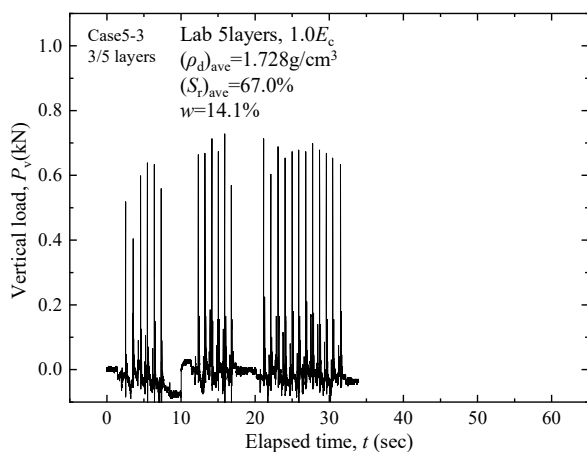


図 4-3-44 締固め層 4 層目の荷重時刻歴(1.0E_c)

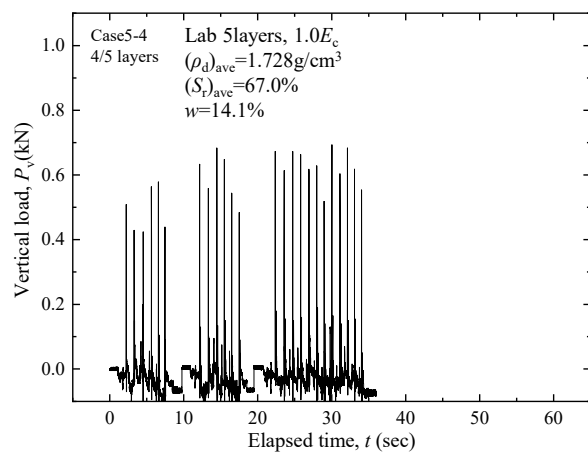


図 4-3-45 締固め層 5 層目の荷重時刻歴(1.0E_c)

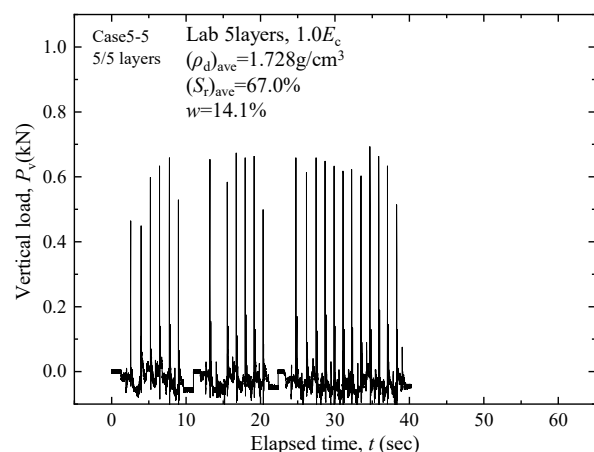


図 4-3-46 締固め層 5 層目の荷重時刻歴(1.0E_c)

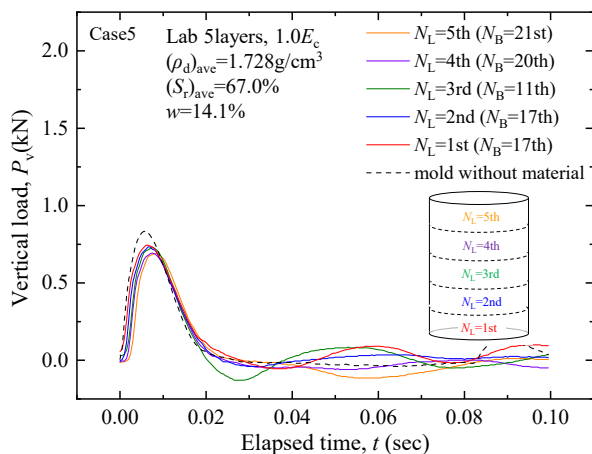


図 4-3-47 各層の最大荷重時の時刻歴(1.0E_c)

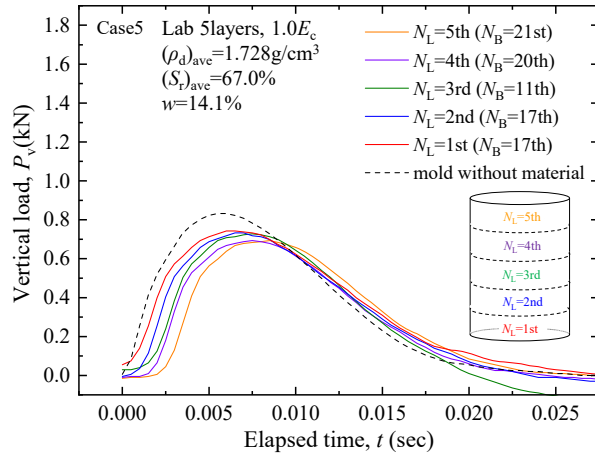


図 4-3-48 各層の最大荷重時の時刻歴拡大($1.0E_c$)

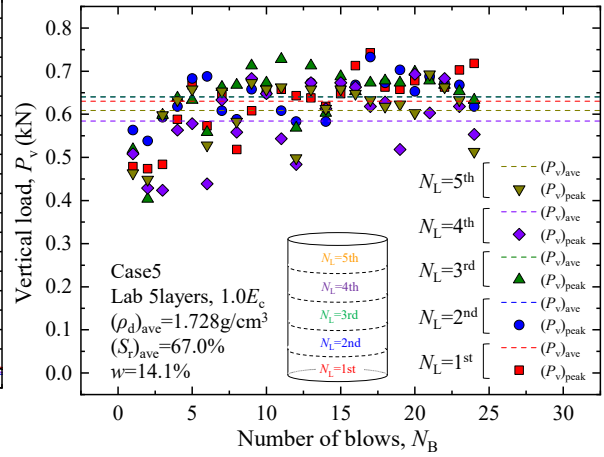


図 4-3-49 鉛直荷重～突固め回数関係($1.0E_c$)

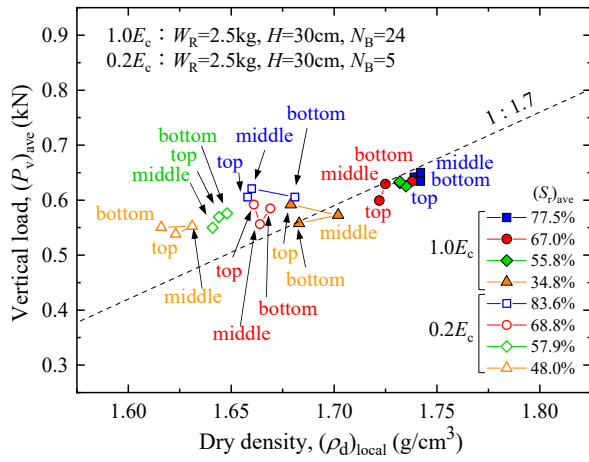


図 4-3-50 上中下部の $(P_v)_{ave}$ ～上中下部の $(\rho_d)_{local}$ 関係

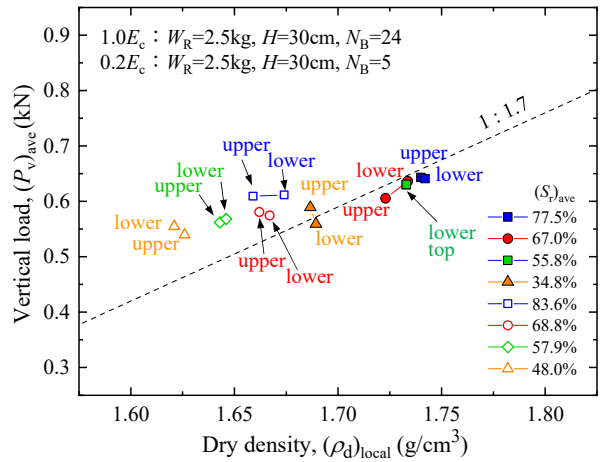


図 4-3-51 上下部の $(P_v)_{ave}$ ～上下部の $(\rho_d)_{local}$ 関係

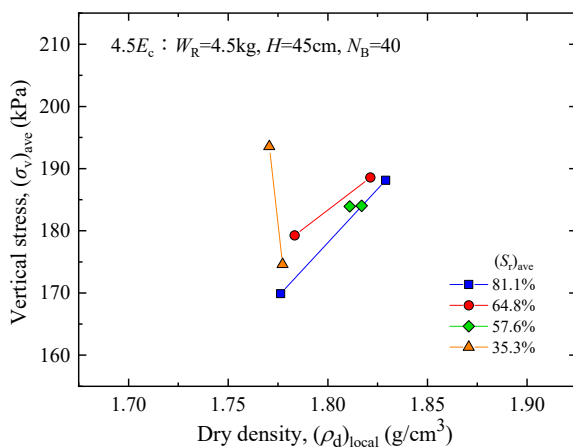


図 4-3-52 鉛直応力～乾燥密度関係($4.5E_c$)

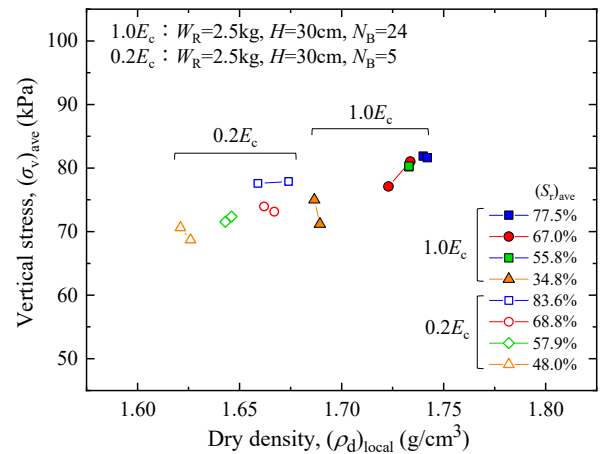


図 4-3-53 鉛直応力～乾燥密度関係($0.2E_c$, $1.0E_c$)

4.4 締め固めた供試体の鉛直深度方向の粒度分布

前節では室内締固め供試体、試験盛土供試体ともに、程度の大小に関わらず鉛直深度方向の乾燥密度分布を有している事を確認した。ここでは、各々の供試体の鉛直深度方向の粒度分布について調べ、鉛直深度方向の乾燥密度分布や撃力測定試験結果と比較しながら考察した。

4.4.1 鉛直深度方向の粒度分布の測定方法

鉛直深度方向の粒度分布は $\phi 100\text{mm} \times h 200\text{mm}$ の円柱供試体を下端からの押出し法によって解放し、上端部・中央部・下端部の 3 パートに分け、地盤工学会(2009)の土の粒度試験方法(JIS A 1204)に従い、それぞれの粒径加積曲線を求めて比較した。なお、室内締固め供試体は上部と下部の 2 パートに分けて、試験盛土供試体は上端部、中央部、下端部の 3 パートに分けて粒度試験を実施した。

4.4.2 室内締固め供試体の鉛直深度方向の粒度分布

図 4-4-1、図 4-4-2 には室内締固め供試体の試験ケースについて、上端部、中央部、下端部の 3 パートと上部、下部の 2 パートに分けた乾燥密度～含水比関係をそれぞれ示す。これは図 4-3-4、図 4-3-5 に示したデータの一部である。1.0E_c で締め固めた供試体は含水比 $w=8\% \sim 15\%$ ($S_r=15\% \sim 80\%$)までの 4 ケース、0.2E_c 及び 4.5E_c で締め固めた供試体は含水比 $w=12\% \sim 14\%$ ($S_r=55\% \sim 65\%$)で最適含水比(最適飽和度)付近のデータで 1 ケースずつである。

図 4-4-3～図 4-4-8 には、各供試体の上部と下部に分けた粒径加積曲線を示す。図中には前章で示した締固め前の粒径加積曲線を合わせて破線で示している。0.2E_c で締め固めた供試体は、締固め前と締固め後で $D=0.106\text{mm}$ 以下でわずかに違いが見られるが、上部と下部の間には粒度分布に殆ど違いは見られなかった。また、1.0E_c で締め固めた供試体も同様に含水比や飽和度に関わらず、締固め前と締固め後で $D=0.106\text{mm}$ 以下でわずかに違いが見られる程度で、上部と下部の間には粒度分布の違いは殆ど見られなかった。4.5E_c で締め固めた供試体は、締固め前と締固め後で $D=0.106\text{mm}$ 以下の粒度分布の違いが現れている事が確認された。締固め後の供試体の上部と下部の間にはわずかに違いが認められ、上部の方が下部に比べてやや細粒分が多い傾向が見られた。

図 4-4-9 は、締固めエネルギー別の細粒分含有率の変化を示している。縦軸は供試体高 $h 200\text{mm}$ に対する平均位置を示しており、上部と下部の平均位置を破線で示している。横軸は細粒分含有率を示しており、締固め前の細粒分含有率 $F_c=8.4\%$ を破線で示している。いずれの締固めエネルギーにおいても、締固め前から締固め後は供試体の細粒分含有率が $\Delta F_c=0.5 \sim 3.3\%$ 程度増加している。また、締固めエネルギーが増加すると細粒分含有率の増分も大きくなる傾向であった。平川ら(2008)は、稲城砂を 1.0E_c で締め固めた供試体の細粒分含有率は乾燥側と湿潤側で 5% 程度違いが現れる事を示したが、本研究で調べた範囲では異なる含水比において 1.0E_c 供試体の細粒分含有率に有意な違いを確認する事は出来なかった。

図 4-4-10 は、締固め後の細粒分含有率の増加分～締固めエネルギーの関係を示す。締固めエネルギーが増加すると、締固め後の細粒分含有率の増加分も大きくなる傾向であった。また、供試体上部の方が下部に比べて大きい傾向であった。試料は破碎する材料である事は先述したが、供試体の上部と下部が締固めによって粒子破碎し、細粒分含有率が変化した事を仮定すると、先に調べた室内締固め供試体上部と下部別に整理した撃力の大小関係(図 4-3-41、図 4-3-51)と整合しない。この理由について詳細は不明であるが、平川ら(2008)は、締固め時の粒子破碎は土粒子の骨格構造を脆弱化する事を説明している事から三軸試験結果に影響する可能性がある。また、山木ら(2011)は、堤防や道路の盛土材の細粒分含有率が強度特性に与える影響について調べており、低い細粒分含有率の範囲($F_c=10\% \sim 20\%$)では、細粒分含有率が圧密非排水三軸圧縮強度に与える影響が大きい事を示している。さらに、上

本ら(2011)は、砂礫盛土材の粒度特性が締固め特性や強度変形特性に与える影響を調べており、特に大きい粒径について言及されているが、この中で締固め時の破碎により強度特性が低下するのは粒子破碎の影響がある事を説明している。

4.4.3 試験盛土供試体の鉛直深度方向の粒度分布

図 4-4-11、図 4-4-12 には試験盛土供試体の試験ケースについて、上端部、中央部、下端部の 3 パートと上部、下部の 2 パートに分けた乾燥密度～含水比関係をそれぞれ示す。これは図 4-3-16、図 4-3-17 に示したデータの一部である。締固め機械の通過回数 $N_p=4$ の供試体は含水比 $w=5\% \sim 13\%$ ($S_r=20\% \sim 60\%$)までの 4 ケース、締固め機械の通過回数 $N_p=16$ の供試体も同じく含水比 $w=5\% \sim 13\%$ ($S_r=20\% \sim 60\%$)までの 4 ケースずつである。

図 4-4-13～図 4-4-20 には、各供試体の上部と下部に分けた粒度加積曲線を示す。図中には前章で示した締固め前の粒度加積曲線を合わせて破線で示している。 $N_p=4$ 、 $N_p=16$ ともに、締固め前と締固め後で $D=0.106\text{mm}$ 以下でわずかに違いが見られる程度で、上部と下部の間には粒度分布に殆ど違いは見られなかった。

図 4-4-21、図 4-4-22 は、供試体を上端部、中央部、下端部の 3 パートと上部、下部の 2 パートに分けたそれぞれに対する締固め機械の通過回数別の細粒分含有率の変化を示している。縦軸は供試体高 $h=200\text{mm}$ に対する平均位置を示しており、上端部、中央部、下端部及び、上部、下部の平均位置を破線でそれぞれ示している。横軸は細粒分含有率を示しており、締固め前の細粒分含有率 $F_c=8.4\%$ を破線で示している。いずれの締固め機械の通過回数においても、締固め前から締固め後は供試体の細粒分含有率は $\Delta F_c = \pm 1.5\%$ の範囲で分布している。また、締固め機械の通過回数が増加しても細粒分含有率が明確に増加する傾向は認められなかった。この程度の細粒分含有率の違いは試験盛土のばらつきによるものと考えられる。

図 4-4-23、図 4-4-24 は、締固め後の細粒分含有率の増加分～締固め機械の通過回数の関係を示す。締固め機械の通過回数が増加しても、締固め後の細粒分含有率の増加分に変化は見られなかった。供試体の上部と下部を比べると、上部の細粒分含有率がやや大きいけどほとんど差は認められない。試料は破碎する材料である事は先述したが、細粒分含有率の明確な違いが確認されない事から締固め機械による締固め時の粒子破碎は殆ど生じていないと考えられる。

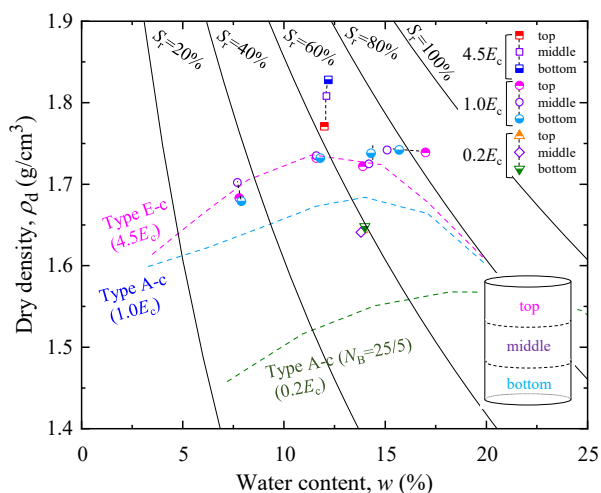


図 4-4-1 試験ケースの乾燥密度～含水比関係 (上端部、中央部、下端部)

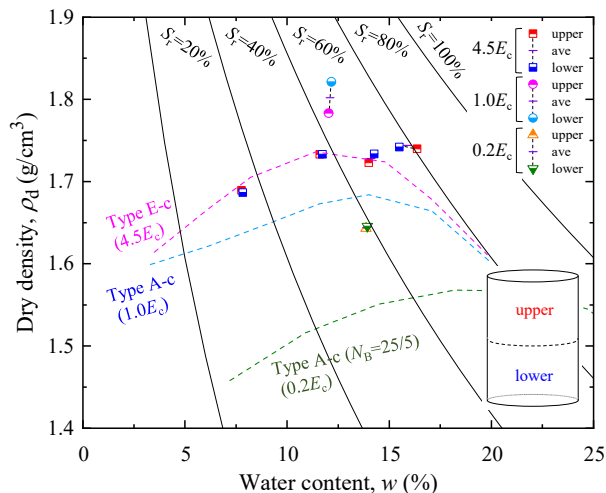


図 4-4-2 試験ケースの乾燥密度～含水比関係 (上部、下部)

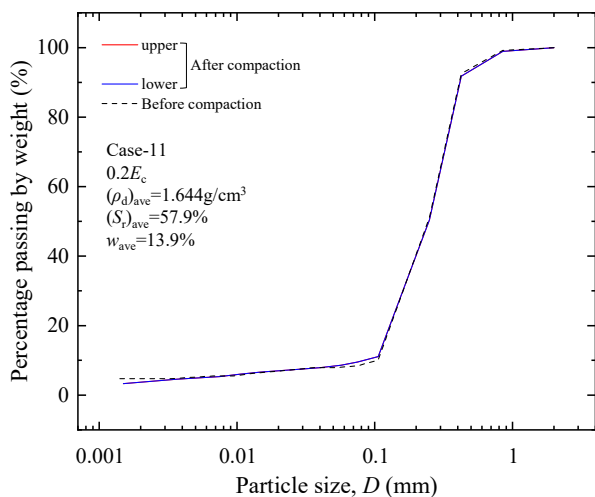


図 4-4-3 締固め前後の粒径加積曲線 (0.2Ec、 $(S_r)_{ave}=57.9\%$)

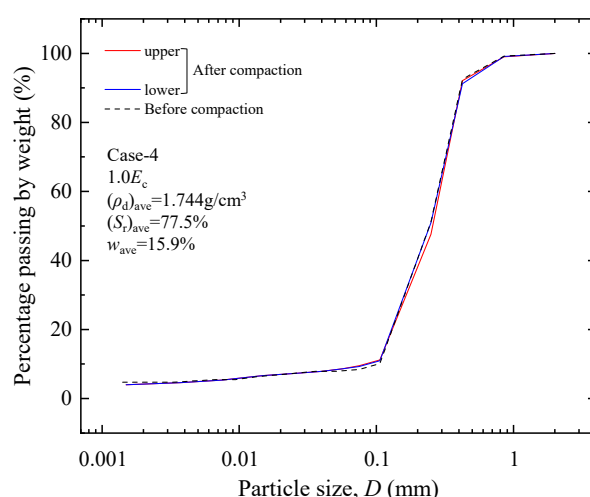


図 4-4-4 締固め前後の粒径加積曲線 (1.0Ec、 $(S_r)_{ave}=77.5\%$)

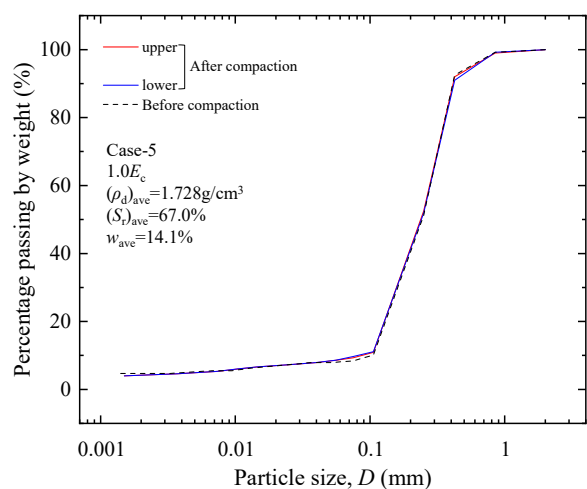


図 4-4-5 締固め前後の粒径加積曲線 (1.0Ec、 $(S_r)_{ave}=67.0\%$)

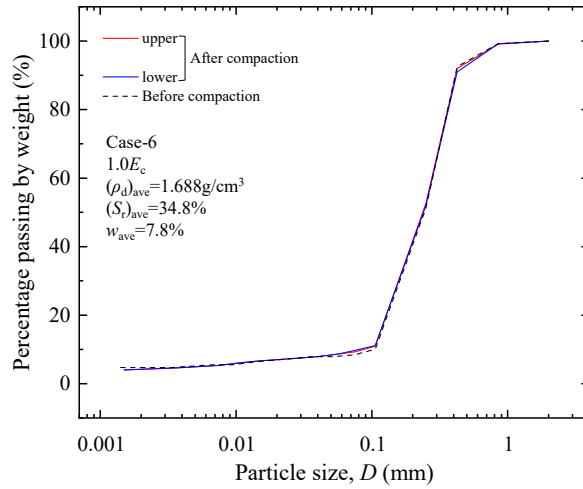


図 4-4-6 締固め前後の粒径加積曲線 (1.0Ec、 $(S_r)_{ave}=34.8\%$)

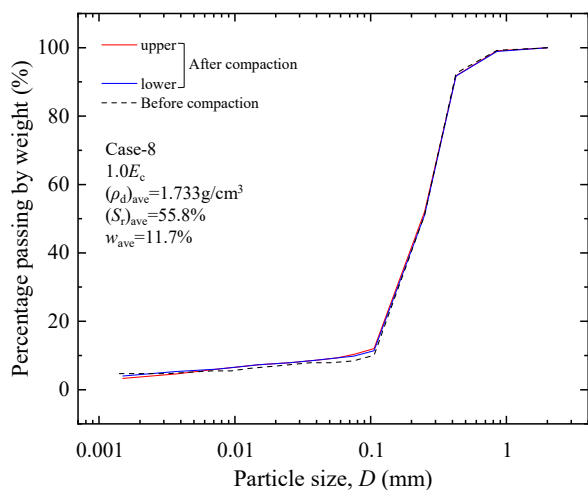


図 4-4-7 締固め前後の粒径加積曲線
($1.0E_c$ 、 $(S_r)_{ave}=55.8\%$)

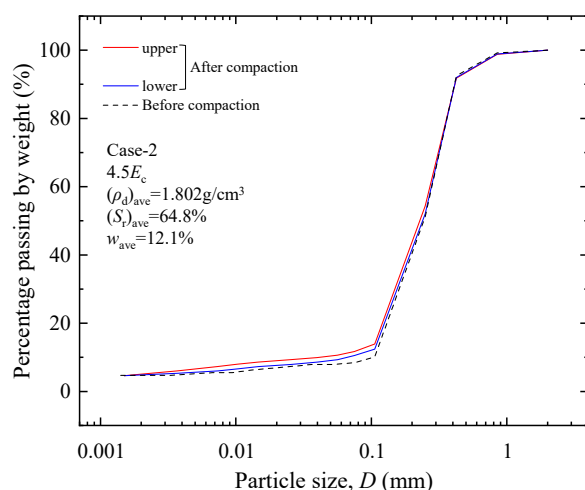


図 4-4-8 締固め前後の粒径加積曲線
($4.5E_c$ 、 $(S_r)_{ave}=64.8\%$)

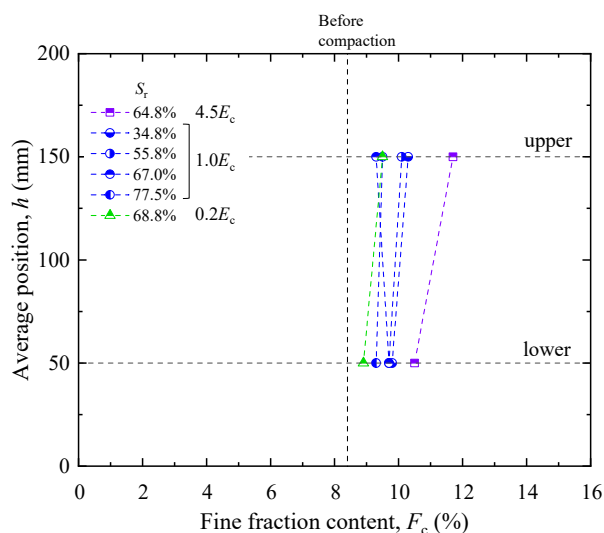


図 4-4-9 締固めエネルギー別の細粒分含有率の変化

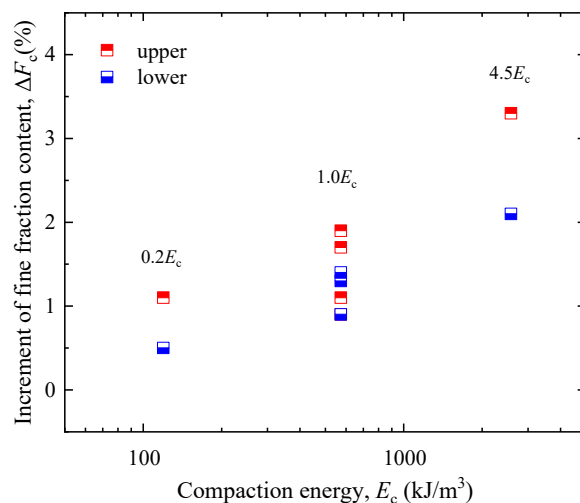


図 4-4-10 締固め後の F_c 増分～締固めエネルギー関係

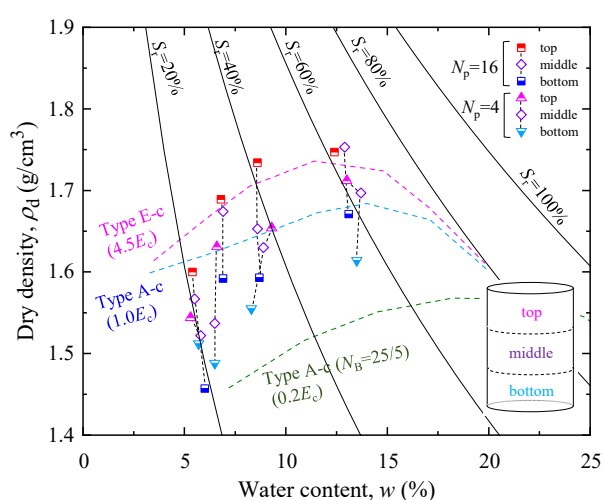


図 4-4-11 試験ケースの乾燥密度～含水比関係
(上端部、中央部、下端部)

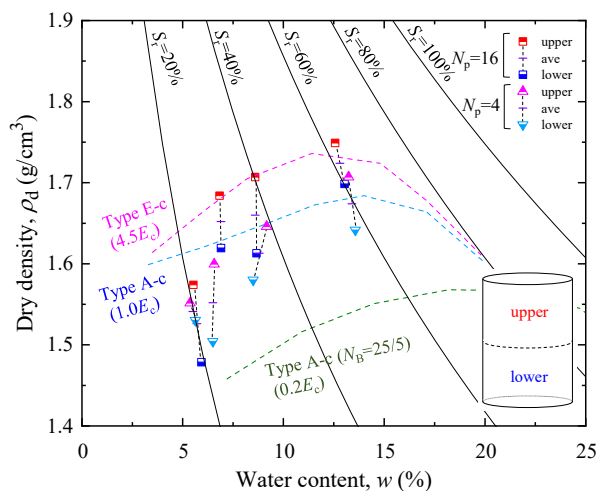


図 4-4-12 試験ケースの乾燥密度～含水比関係
(上部、下部)

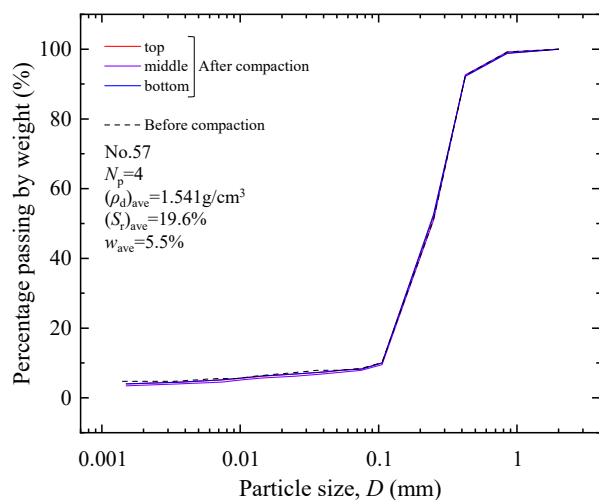


図 4-4-13 締固め前後の粒径加積曲線
($N_p=4$ 、 $(S_r)_{ave}=19.6\%$)

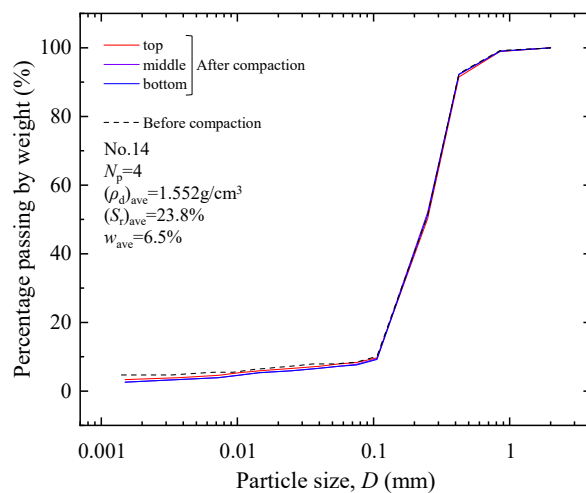


図 4-4-14 締固め前後の粒径加積曲線
($N_p=4$ 、 $(S_r)_{ave}=23.8\%$)

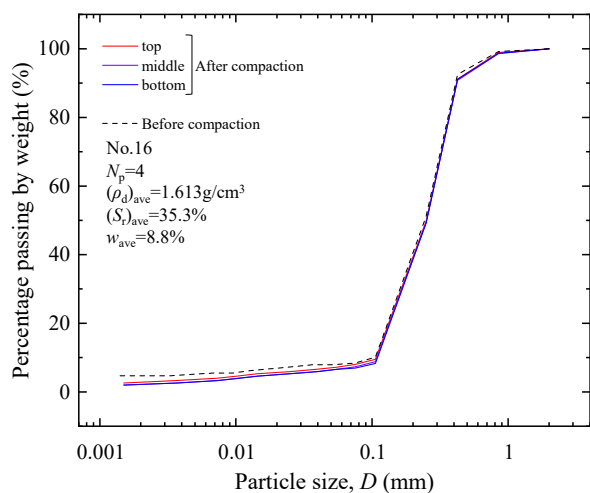


図 4-4-15 締固め前後の粒径加積曲線
($N_p=4$ 、 $(S_r)_{ave}=35.3\%$)

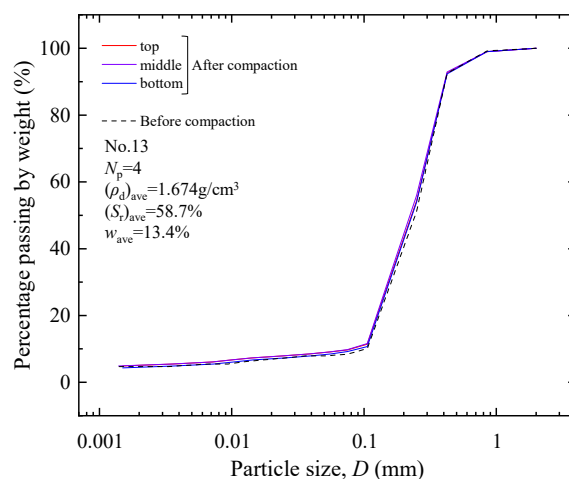


図 4-4-16 締固め前後の粒径加積曲線
($N_p=4$ 、 $(S_r)_{ave}=58.7\%$)

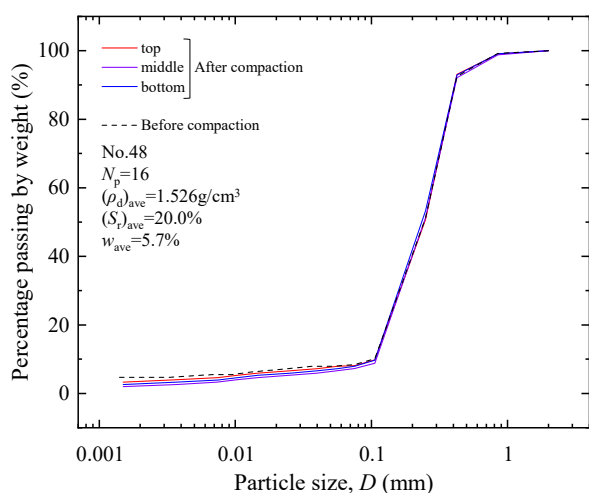


図 4-4-17 締固め前後の粒径加積曲線
($N_p=16$ 、 $(S_r)_{ave}=20.0\%$)

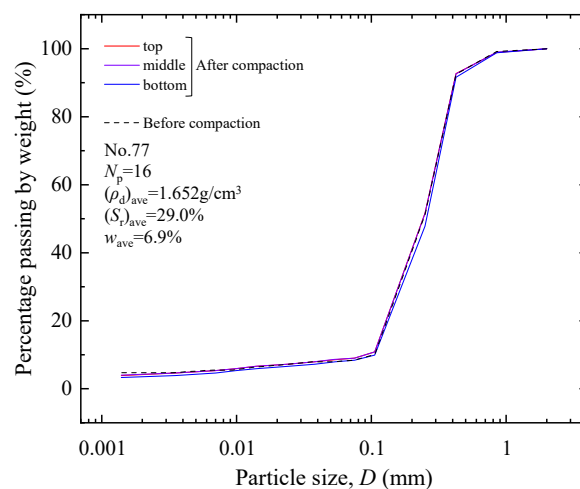


図 4-4-18 締固め前後の粒径加積曲線
($N_p=16$ 、 $(S_r)_{ave}=29.0\%$)

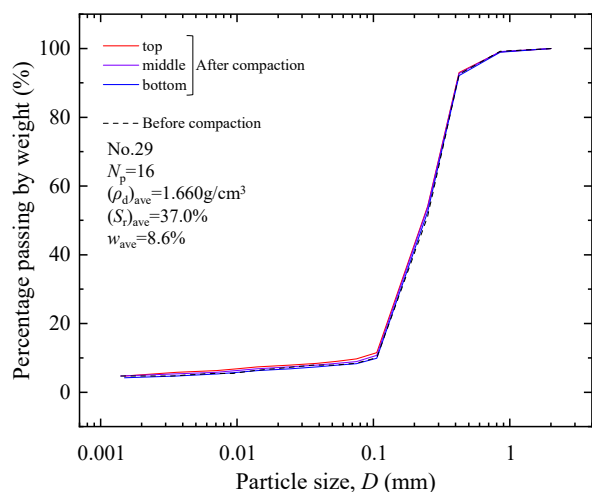


図 4-4-19 締固め前後の粒径加積曲線
($N_p=16$ 、 $(S_r)_{ave}=37.0\%$)

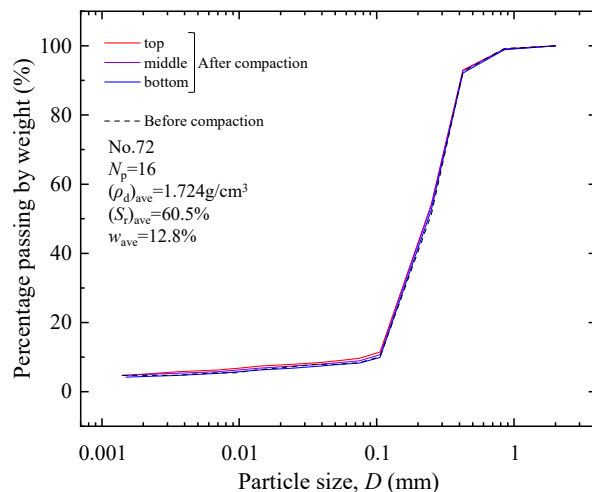


図 4-4-20 締固め前後の粒径加積曲線
($N_p=16$ 、 $(S_r)_{ave}=60.5\%$)

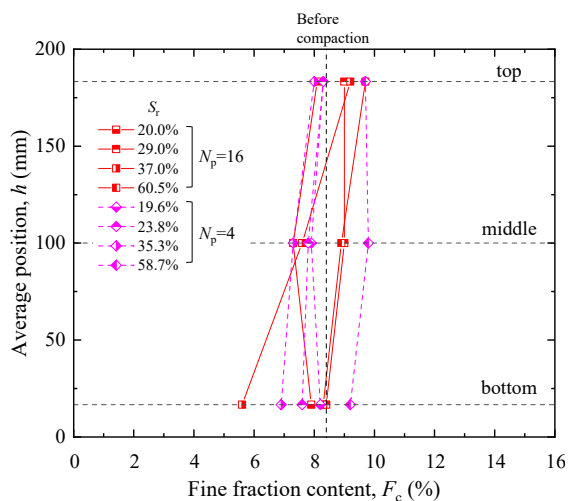


図 4-4-21 機械通過回数別の細粒分含有率の変化
(上端部、中央部、下端部)

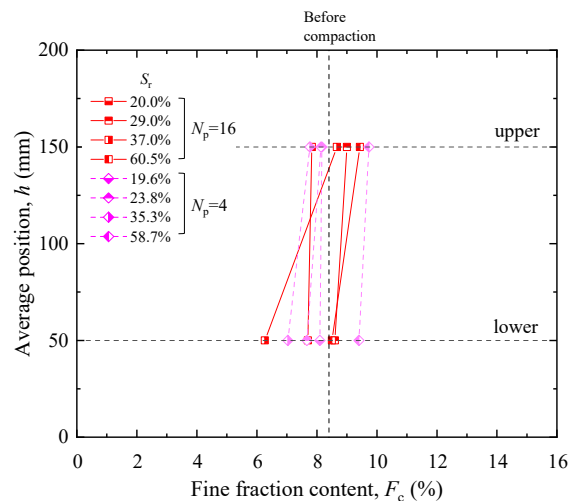


図 4-4-22 機械通過回数別の細粒分含有率の変化
(上部、下部)

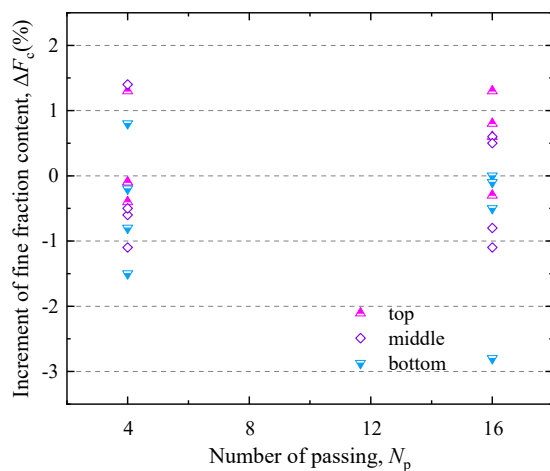


図 4-4-23 締固め後の F_c 増分～機械通過回数関係
(上端部、中央部、下端部)

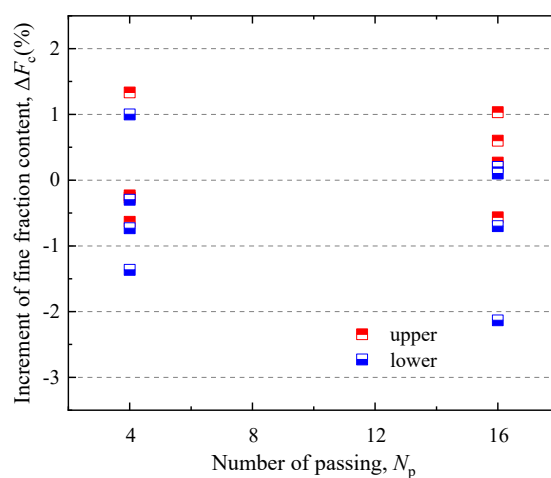


図 4-4-24 締固め後の F_c 増分～機械通過回数関係
(上部、下部)

4.5 締め固めた供試体の初期サククション

ここまでで、室内締固め供試体と試験盛土供試体は締固め方法が異なる事により、乾燥密度や飽和度の鉛直深度分布や細粒分含有率の鉛直深度分布が異なる事を示した。本節では、締め固めた供試体の初期サククションを測定し、供試体作製条件と初期サククションの関係について調べる事にした。三田地、工藤(1994)、三田地、遠藤(1996)は、粘性土供試体の一軸圧縮強度は供試体の残留有効応力と深く関連する事に着目し、供試体のサククション測定に伴う一軸圧縮強度や供試体の乱れの程度の評価方法を提案しており、本研究においても供試体の初期サククションの測定は、供試体の締固め特性と強度変形特性の関係を考察するのに有意義であると考えられる。

4.5.1 初期サククションの測定

供試体の初期サククション測定は地盤工学会(2004)に示される室内試験におけるサククション測定方法を参考に、三軸セルのペDESTALにセラミックディスクを埋め込んで実施した。セラミックディスクは素焼きの陶板で微細な孔が無数にあるため、完全飽和状態で空気圧を与えても空気侵入値(AEV)に達するまで空気は侵入できない。この性質を利用して、ペDESTAL上に設置した締め固めた供試体と接触する飽和したセラミックディスクの間隙空気圧を測定し、供試体に与えるサククションを式 2-2-6 により求める。ここで、AEV200kPa 以上のセラミックディスクを埋め込んだペDESTALを使用した。

サククション測定装置の概略図を図 4-5-1 に、セラミックディスク付きペDESTALを図 4-5-2 に、サククション測定状況を図 4-5-3 に示す。測定中の供試体の乾燥を防ぐため、側面のモールドと上面の蓋は設置した状態で下面をセラミックディスクに設置した。室内締固め供試体は拔出しが無いよう注意しながらモールド下板を取り外し、セラミックディスク上に設置して測定する。また、試験盛土供試体も同様に下板を取り外してセラミックディスク上に設置して測定を開始するが、供試体の非一様性を考慮して測定後に上下反転し、セラミックディスク上に供試体上面を設置し、供試体の上部の測定も実施した。本研究ではサククション測定開始から 6000 分後($t=6000\text{min}$)におけるサククションを締め固めた供試体の初期サククション s_i と定義した。測定開始から 6000 分後に定めた理由は後述する。

測定した初期サククションの考察への利用を目的に土の保水性試験(JGS 0151)を実施した。供試体は含水比が $w=13.8\%$ となるように調整した試料を 5 層に分けて湿潤締固め法で保水性試験用モールド内に締固め後の乾燥密度が $\rho_d=1.706\text{g/cm}^3$ となるように締め固めて作製した。これは最適含水比付近の試料を $1.0E_c$ で締め固めた供試体と同等の条件である。図 4-5-4 に土の保水性試験から得られた土中水のポテンシャル ψ ~ 含水比 w 関係水分特性曲線を示す。保水性試験は高飽和度範囲を測定する吸引法(排水・吸水)及び低飽和度範囲を測定する遠心法を実施しており、それぞれの試験方法について詳しくは地盤工学会(2009)土の保水性試験(JGS 0151)を参照されたい。吸引法と遠心法はそれぞれ供試体を飽和化させた後に間隙水の排水過程を測定するが、含水比 $w=11\%$ 付近において土中水のポテンシャルに差が確認された。詳しい理由は調べられなかったが、排水方法の違いによる影響と考えられる。本研究では土の保水性試験で得られた土中水のポテンシャルは、そのほとんどがマトリックポテンシャルである事を仮定し、式 2-2-5、式 2-2-6 から土中水のポテンシャルをサククション($-\psi=-\psi_m=s$)と同じとして扱う事にした。

4.5.2 室内締固め供試体の初期サククション

図 4-5-5 には、作製した供試体の乾燥密度 ~ 含水比関係を示す。供試体は $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ 、 $4.5E_c$ 及び $25.0E_c$ の 4 種類の締固めエネルギーをそれぞれ 3~4 種類の含水比で作製した。図中には突固めによる締固め締固め試験(JIS A 1210)による 4 種類の締固め曲線も示しているが、サククション試験用の供試体の方が同じ締固めエネルギーでも乾燥密度が大きい傾向である。これは、前節で説明した理由と同じと考える。また、図中には土の保水性試験に用いた供

試体条件も示すが、サクシオン試験用供試体の締固めエネルギー $1.0E_c$ 相当の乾燥密度である。図 4-5-6 には、作製した供試体の乾燥密度～飽和度関係を示す。等エネルギーで締め固めた供試体の乾燥密度～飽和度関係は、それぞれほぼ相似形であり、龍岡ら(2013)で示された傾向と一致する。

図 4-5-7 は、サクシオン測定の時時刻歴を示す。また、図 4-5-8 には小さいサクシオン範囲の時時刻歴拡大を示す。測定時間は $t=3000$ 分～ 12000 分程度である。最初の $t=1000$ 分はほとんどの供試体のサクシオンが上昇している。 $t=1000$ 分以降はサクシオンの上昇が緩やかになり、比較的低いサクシオンの供試体は $2\sim 3\text{kPa}$ の変動は認められるが収束傾向が見られる。一方で $t=1000$ 分の時点で $s_i=5\text{kPa}$ 以上のサクシオンを示す供試体は緩やかな上昇傾向が続く。図 4-5-9 には経過時間を対数にしたサクシオン測定の時時刻歴を示すが、 $t=6000$ 分でも収束傾向は確認されなかった。地盤工学会 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会(2004)や地盤工学会(2009)には、土の種類や供試体の大きさが平衡時間に影響を与えている事が記されており、当供試体が大きい事が影響していると考ええる。測定時間を長期に継続すると供試体の水分の蒸発等の影響が懸念されることから、本研究では、 $t=0$ 分～ 6000 分までの最大値を初期サクシオン s_i と定義する事にした。以上の事から初期サクシオンは特に $s_i=5\text{kPa}$ 以上の範囲では供試体が本来有するサクシオンよりやや低い値である可能性がある事に留意が必要である。ここで、今回測定した初期サクシオンは $s_i=1.2\text{kPa}\sim 69.5\text{kPa}$ であった。

図 4-5-10 は、初期サクシオン～乾燥密度関係を示す。また、図 4-5-11 には初期サクシオン～乾燥密度関係の片対数グラフを示す。図中には締固めエネルギー $25.0E_c$ 、 $4.5E_c$ 、 $1.0E_c$ 及び $0.2E_c$ を示しているが、これだけでは傾向が詳しくわからない。図中にはほぼ同等の含水比別に等高線を入れているが、ほぼ同等の含水条件であれば乾燥密度の増加に伴い初期サクシオンはやや増加傾向または横ばいに推移している。つまり初期サクシオンに与える乾燥密度の影響は、含水比に比べて大きい事が示唆される。

図 4-5-12 には、 E_c 別の初期サクシオン～含水比関係を示す。図中には土の保水性試験より求めた $1.0E_c$ 相当の供試体の水分特性曲線も併せて示している。初期サクシオンは低い含水比で大きく、高い含水比では小さい傾向であり、締固めエネルギーの大小に関わらずほぼ同じ値を示している。ここで、含水比 $w=5\%\sim 10\%$ 程度の範囲では、同じ含水比における水分特性曲線の値に比べてやや小さいが、これは上述した締固め供試体の初期サクシオンが平衡状態に達する前の値とした事が理由と考えられる。図 4-5-13 には E_c 別の初期サクシオン～含水比関係の片対数グラフを示す。含水比 $w=12\%\sim 20\%$ 程度の範囲では、同じ含水比における水分特性曲線の値に比べてやや小さく、締固めエネルギー別に違いが見られるが、これは初期サクシオンが $s_i=0\sim 5\text{kPa}$ の小さい範囲の変動であり、測定誤差も含まれると考えられる。図 4-5-14 及び図 4-5-15 は、 ρ_d 別の初期サクシオン～含水比関係及びその片対数グラフを示す。初期サクシオンは含水比 $w=3.8\%\sim 21.9\%$ の範囲で乾燥密度に関わらず、含水比に一義的な傾向を示す事が確認された。

図 4-5-16 は、 E_c 別の初期サクシオン～飽和度関係を示す。初期サクシオンは低い飽和度で大きく、高い飽和度では小さい傾向であり、締固めエネルギーの大小に関わらずほぼ同じ傾向を示しているが、初期サクシオンは締固めエネルギーによって異なる値を示している。飽和度 $S_r=20\%\sim 50\%$ 程度の範囲では、同じ飽和度における $1.0E_c$ 相当の供試体の水分特性曲線の値に比べてやや小さい。これは初期サクシオン～含水比関係と同じ理由によるものと考えられる。図 4-5-17 には E_c 別の初期サクシオン～飽和度関係の片対数グラフを示す。飽和度 $S_r=60\%\sim 95\%$ 程度の範囲では、同じ飽和度における水分特性曲線の値に比べてやや小さく、初期サクシオンが $s_i=0\sim 5\text{kPa}$ の小さい変動範囲内であると考えられる。図 4-5-18 及び図 4-5-19 は、 ρ_d 別の初期サクシオン～飽和度関係及びその片対数グラフを示す。飽和度 $S_r=63.5\%\sim 96.5\%$ の範囲では初期サクシオン～飽和度関係に与える乾燥密度の影響は目立たないが、飽和度 $S_r=19.7\%\sim 51.3\%$ の範囲では初期サクシオン～飽和度関係に与える乾燥密度の影響は大きい事が確認された。河井ら(2002)のシルト質粘土の締固め曲線と締固め時の初期サクシオンのデータを基に、龍岡、平川(2020)は、初期サ

クシオン～飽和度関係を整理しており、この関係が乾燥密度の影響を受ける事を示している。本研究で得られた結果と乾燥密度が影響を与えている点で傾向が一致している。

王、古閑(2018)は、不飽和土の保水性を評価する水分特性曲線のパラメーターとして式 2-2-17 に示す間隙水比 R_w を定義し、既往の保水性試験結果も踏まえて間隙水の変化について考察し、間隙水比～サクシオン関係において、サクシオンの小さい範囲では同じ間隙水比でも供試体の間隙比によってサクシオンが異なるが、間隙水の排水に伴いサクシオンの大きい範囲では供試体の間隙比条件に依存せず、一定の間隙水比になる事を確認している。同じ材料であれば比重 G_s が一定数である事から、ここに示した間隙水比は式 2-2-17 より、含水比の関数または間隙比(乾燥密度)と飽和度の二変数関数である事がわかる。ここで、間隙比 e と乾燥密度 ρ_d は式 4-5-1 に示す関係である。

$$\rho_d = \frac{G_s \cdot \rho_w}{1+e} = \frac{\rho_s}{1+e} \quad (4-5-1)$$

ここで、 ρ_w は水の密度、 ρ_s は土粒子密度である。

図 4-5-20 には、初期サクシオン～乾燥密度～含水比関係、図 4-5-21 には、初期サクシオン～乾燥密度～飽和度関係を示す。間隙水比を構成する含水比、乾燥密度(間隙比)及び飽和度の式の関係より、初期サクシオン～含水比関係は乾燥密度に独立し、初期サクシオン～飽和度関係は乾燥密度の影響を受ける事を理解する事が出来る。

以上の事から、室内締固め供試体の初期サクシオンは含水比 $w=3.8\% \sim 21.9\%$ の範囲で乾燥密度に関わらず、含水比に一義的な傾向を示し、また飽和度 $S_r=19.7\% \sim 51.3\%$ の範囲では乾燥密度の影響を受けるが、飽和度との相関関係がある事がわかった。初期サクシオンは土の強度変形特性の残留有効応力として関連する事から、土の強度変形特性について考察する際に考慮する必要がある。

4.5.3 試験盛土供試体の初期サクシオン

試験盛土供試体の初期サクシオンは供試体の上部と下部に有意な差が現れる事を想定し、供試体の上面と下面で測定している。室内締固め供試体で得られた測定結果も参考に考察する。

図 4-5-22 には、作製した供試体の乾燥密度～含水比関係を示す。締固め機械の通過回数 $N_p=4$ 及び $N_p=16$ の二種類について、それぞれ上部と下部に分けた四つの供試体の乾燥密度と含水比を測定した。供試体の含水比は $w=5.4\% \sim 13.6\%$ の範囲で作製している。また、それぞれの乾燥密度は多少のばらつきはあるが、 $w=8.5\%$ 付近で比較すると、最も乾燥密度が大きいのは $N_p=16$ の上部、続いて $N_p=4$ の上部、 $N_p=16$ の下部、最も小さいのは $N_p=4$ の下部であった。図中には土の保水性試験に用いた締固めエネルギー $1.0E_c$ 相当の供試体条件も示すが、試験盛土供試体と比較すると同等の含水比条件で締固め機械通過回数 $N_p=4$ の上部及び $N_p=16$ の下部相当の乾燥密度であった。図 4-5-23 には、作製した供試体の乾燥密度～飽和度関係を示す。試験盛土供試体の乾燥密度～飽和度関係も、一定エネルギーの室内突固め法による締固め曲線と平行しているが、最適飽和度付近から乾燥側である事がわかる。

図 4-5-24 は、サクシオン測定の時刻歴を示す。また、図 4-5-25 には小さいサクシオン範囲の時刻歴拡大を示す。測定時間は $t=8000$ 分～ 22000 分程度である。試験盛土供試体も室内締固め供試体と同様に最初の $t=1000$ 分はほとんどの供試体のサクシオンが上昇している。 $t=1000$ 分以降はサクシオンの上昇が緩やかになり、比較的低いサクシオンの供試体は多少の変動は認められるが収束する傾向である。一方で $t=1000$ 分の時点で $s=5\text{kPa}$ 以上のサクシオンを示す供試体は緩やかな上昇傾向が続く。ただし、小さい初期サクシオンの範囲では $2 \sim 3\text{kPa}$ 程度の測定誤差に起因する変動が確認されている。図 4-5-26 には経過時間を対数にしたサクシオン測定の時刻歴を示すが、 $t=6000$ 分でも収束傾向にない。さらに測定時間が $t=22000$ 分以上経過しても収束していない供試体が多い。本研究では、室内締

固め供試体と比較するため、初期サクシジョンの測定時間を統一し、 $t=0$ 分～6000 分までの最大値を初期サクシジョン s_i とした。従って、試験盛土供試体も初期サクシジョンは特に $s_i=5\text{kPa}$ 以上の範囲では供試体が本来有するサクシジョンよりやや低い値である可能性がある事に留意が必要である。ここで、今回測定した初期サクシジョンは $s_i=3.0\text{kPa}\sim72.9\text{kPa}$ であった。

図 4-5-27 は、初期サクシジョン～乾燥密度関係を示す。また、図 4-5-28 には初期サクシジョン～乾燥密度関係の片対数グラフを示す。また、図中には締固めエネルギー $25.0E_c$ 、 $4.5E_c$ 、 $1.0E_c$ 及び $0.2E_c$ に加えて、ほぼ同等の含水比別の等高線を示している。室内締固めと同様に、ほぼ同等の含水比であれば乾燥密度の増加に伴い初期サクシジョンはやや増加または横ばいに移動しており、含水比や飽和度より乾燥密度の影響が大きい事が示唆される。ただし、含水比 $w=7\%$ 以下の $N_p=4$ と $N_p=16$ で初期サクシジョンが大きく異なっている。この理由については分からないが、試験盛土の空間的ばらつきの影響の可能性がある。

図 4-5-29 には、 N_p 別の初期サクシジョン～含水比関係を示す。図中には土の保水性試験より求めた $1.0E_c$ 相当の供試体の水分特性曲線と室内締固め供試体のデータも併せて示している。室内締固め供試体と同様に初期サクシジョンは低い含水比で大きく、高い含水比では小さい傾向であり、締固め機械の通過回数に関わらず、ほぼ同じ値を示している。ここで、含水比 $w=5\%\sim10\%$ 程度の範囲では、同じ含水比における水分特性曲線の値に比べてやや小さい。これは締固め供試体の初期サクシジョンが平衡状態に達していない為と考えられる。また、室内締固め供試体よりやや大きい。これは乾燥密度の影響が大きいと考えられる為、後で考察する。また、含水比 $w=5.4\%$ 付近の $N_p=16$ 供試体は上部と下部ともに同じ含水比の他の締固め条件の供試体に比べて乾燥密度がやや小さい結果であった。図 4-5-30 には N_p 別の初期サクシジョン～含水比関係の片対数グラフを示す。含水比 $w=10\%\sim13.6\%$ の範囲に限られるがでは、同じ含水比における室内締固め供試体よりやや大きい事が確認された。図 4-5-31 及び図 4-5-32 は、 ρ_d 別の初期サクシジョン～含水比関係及びその片対数グラフを示す。初期サクシジョンは含水比 $w=5.4\%\sim13.6\%$ の範囲で乾燥密度に関わらず、含水比に一義的な傾向を示す事が確認された。ただし、含水比 $w=5.4\%$ 付近の $N_p=16$ 供試体は上部と下部ともに同じ含水比の他の締固め条件の供試体に比べて乾燥密度がやや小さく、他の供試体と異なる傾向を示している。また、試験盛土供試体は室内締固め供試体に比べて同じ乾燥密度、同じ含水比でもやや初期サクシジョンが大きい傾向を示す。試験盛土上部と下部では乾燥密度の非一様性を考慮するとほとんど違いが見られず、2.3.3 で示したような、現場締固めに起因するせん断破壊領域の影響は確認されていない。

図 4-5-33 は、 N_p 別の初期サクシジョン～飽和度関係を示す。飽和度 $S_r=19.3\%\sim61.7\%$ の範囲において低い飽和度で初期サクシジョンは大きく、高い飽和度では初期サクシジョンは小さい傾向であり、締固め機械の通過回数の大小に関わらずほぼ同じ傾向を示している。さらに、 $N_p=16$ を除いて初期サクシジョンは締固め機械の通過回数が多い方が初期サクシジョンは大きい傾向を示している。図 4-5-34 には N_p 別の初期サクシジョン～飽和度関係の片対数グラフを示す。飽和度 $S_r=60\%$ 付近では、同じ飽和度における水分特性曲線の値に近い値である。図 4-5-35 及び図 4-5-36 は、 ρ_d 別の初期サクシジョン～飽和度関係及びその片対数グラフを示す。飽和度 $S_r=60\%$ 付近では初期サクシジョン～飽和度関係に与える乾燥密度の影響は目立たないが、飽和度 $S_r=19.3\%\sim39.6\%$ の範囲では、室内締固め供試体と同様に初期サクシジョン～飽和度関係に与える乾燥密度の影響は大きい事が確認された。

以上の事から、試験盛土供試体の初期サクシジョンは含水比 $w=5.4\%\sim13.6\%$ の範囲で、室内締固め供試体と同様に乾燥密度に関わらずほぼ含水比に一義的な傾向を示し、また飽和度 $S_r=19.3\%\sim61.7\%$ の範囲では乾燥密度の影響を受けるが、飽和度との相関関係を示す事がわかった。また、試験盛土供試体の初期サクシジョン～含水比、飽和度関係は室内締固め供試体より明らかに大きい。一般的に細粒土の方がサクシジョンは大きい傾向にあるが、締固めにより細粒分含有率の増加が大きかった室内締固め供試体は、試験盛土供試体より初期サクシジョンが小さい為、これと整合しない。すなわち、この程度の細粒分含有率の増加分の違いが与える初期サクシジョンへの影響はほとんどないと

考えられる。

室内締固め供試体と試験盛土供試体の初期サクシオンは、共通して含水比や飽和度との相関関係がある事は示した。測定した含水比、飽和度の範囲において、初期サクシオン～含水比関係には乾燥密度の影響が少なく一義的な傾向であった事に対し、初期サクシオン～飽和度関係には乾燥密度の影響によるばらつきがある事が認められた。

王、古閑(2018)は水分特性曲線において、間隙水の排水に伴うサクシオンの大きい範囲では式 2-2-17 に示した間隙水比は供試体の間隙比条件に依存せず、一義的にサクシオンと対応する事を仮定して間隙水比～サクシオンモデルを提案している。

式 2-2-17 が成立する事を仮定すると、同一試料であればサクシオンは間隙水比の関数であり、下式のように表現できる。

$$s = f(R_w) = f(w) \cdot G_s = f(e) \cdot f(S_r) \quad (4-5-2)$$

ここで、 $f(e)$ は式 4-5-1 より、 $f(\rho_d)$ の式にする事が出来る事から、

$$s = f(R_w) = f(w) \cdot G_s = f(\rho_d) \cdot f(S_r) \quad (4-5-3)$$

と表現する事が出来る。

すなわち、初期サクシオンと間隙水比が一義的な相関関係であれば、初期サクシオンは含水比 w に比例し、また乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の積に比例する事が説明できる。本節では初期サクシオンを含水比で整理すると一義的な相関関係が得られ、飽和度で整理すると乾燥密度の影響が含まれる理論と整合する結果が得られた事になる。

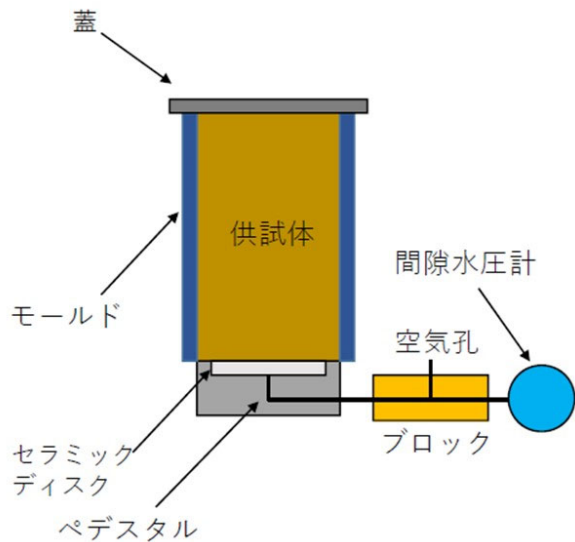


図 4-5-1 サクション測定装置概略

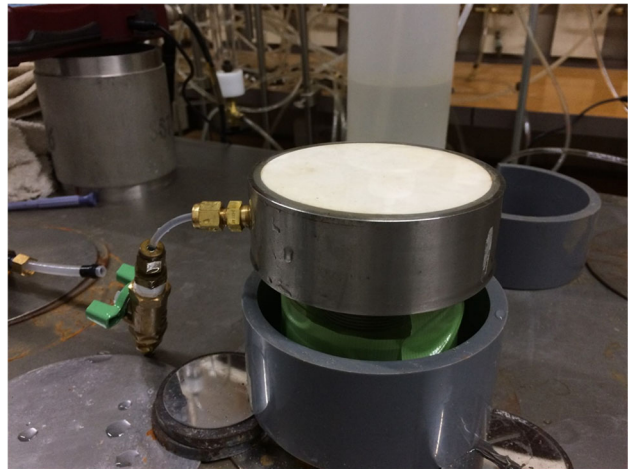


図 4-5-2 セラミックディスク付きペデスタル

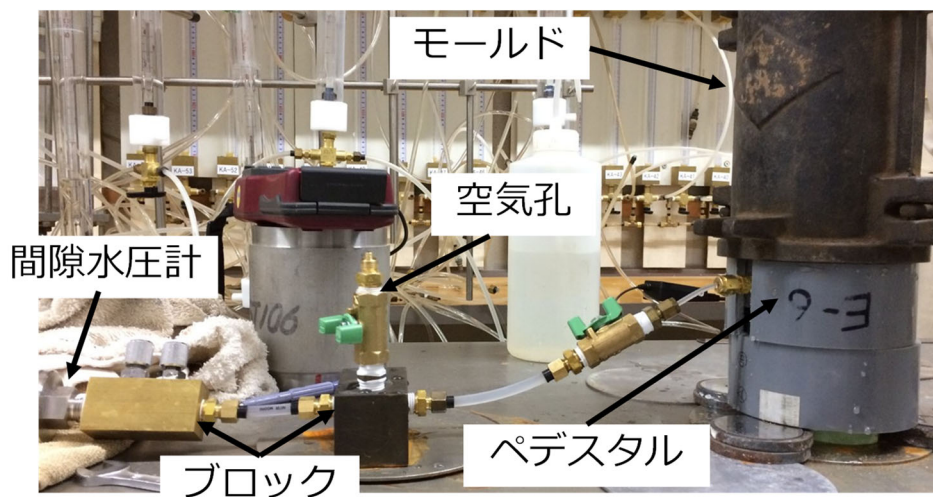


図 4-5-3 サクション測定状況

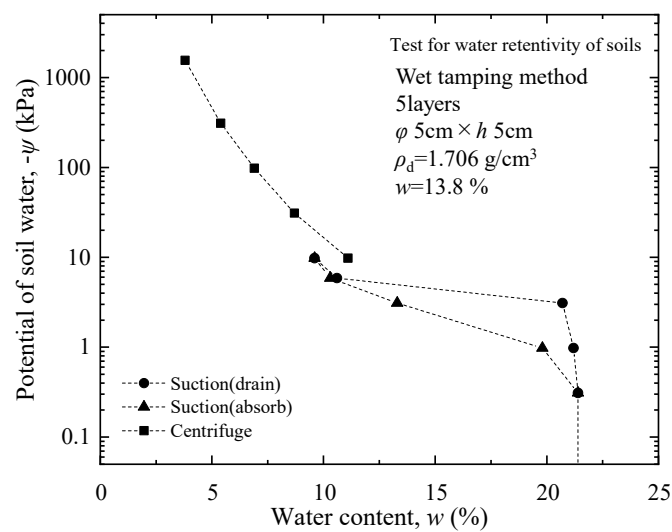


図 4-5-4 土の保水性試験による水分特性曲線

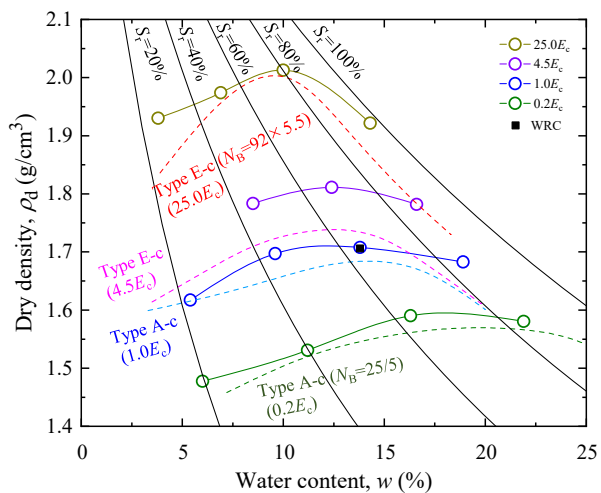


図 4-5-5 供試体作製条件($\rho_d \sim w$ 関係)

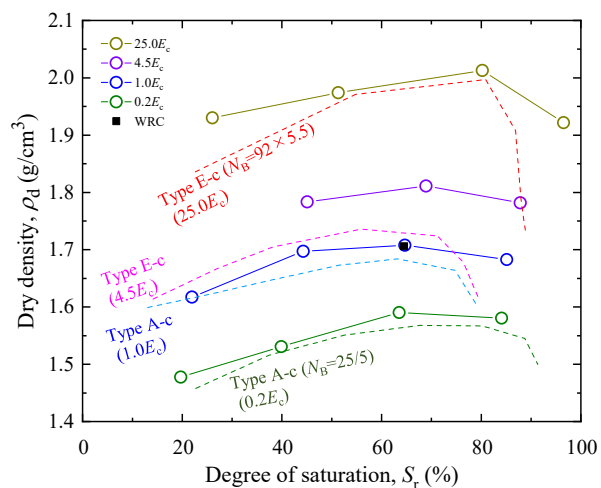


図 4-5-6 供試体作製条件($\rho_d \sim S_r$ 関係)

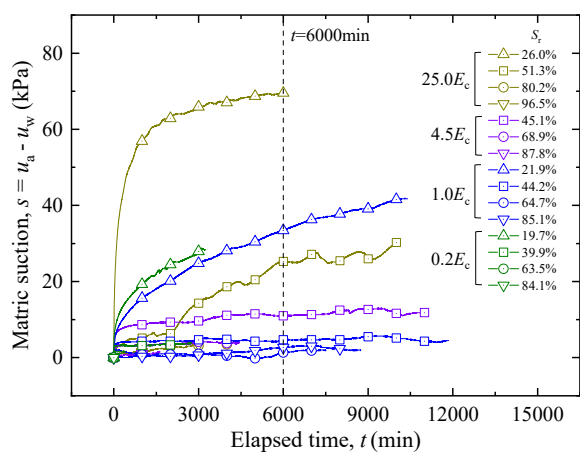


図 4-5-7 サクション測定の時刻歴

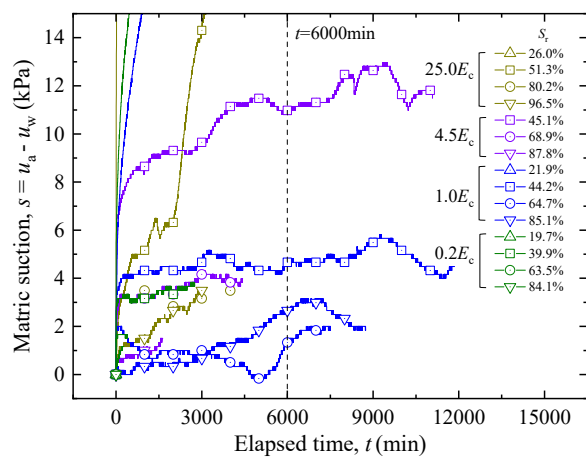


図 4-5-8 サクション測定の時刻歴(拡大)

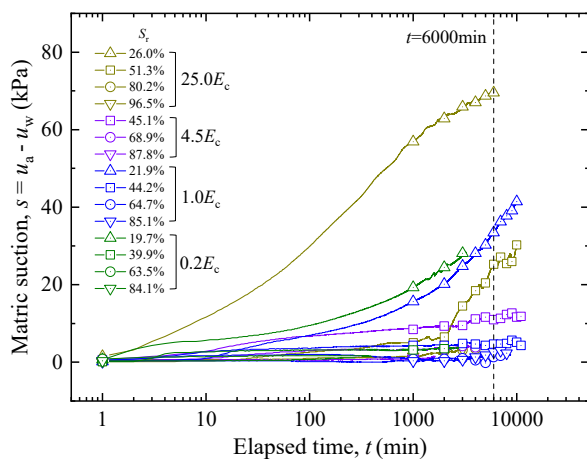


図 4-5-9 サクション測定の時刻歴(片対数)

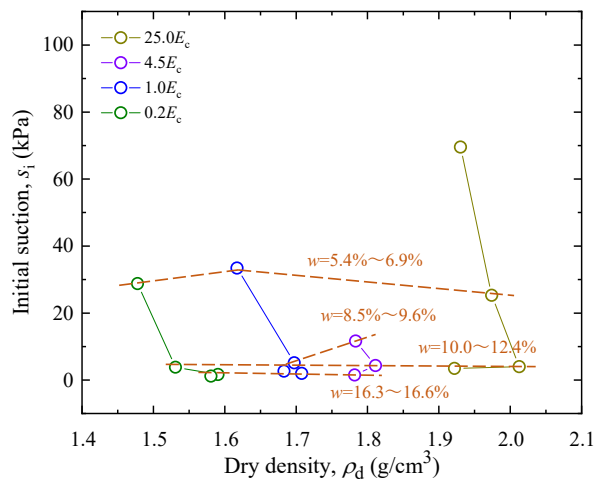


図 4-5-10 初期サクシオン～乾燥密度関係

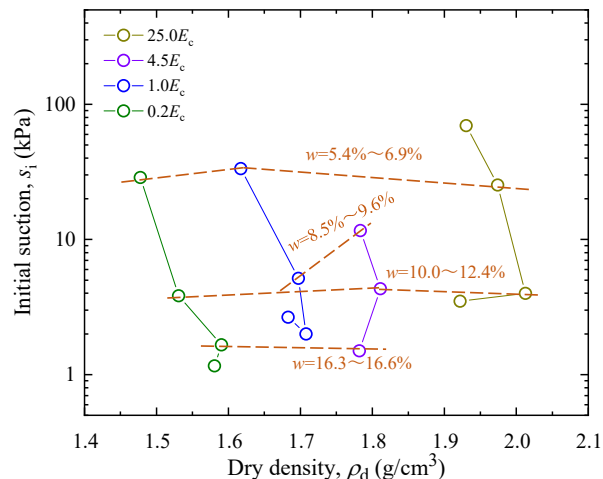


図 4-5-11 初期サクシオン～乾燥密度関係(片対数)

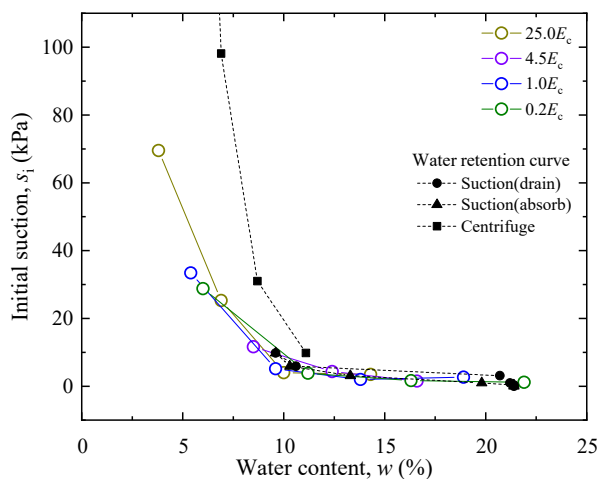


図 4-5-12 E_c 別の初期サクシオン～含水比関係

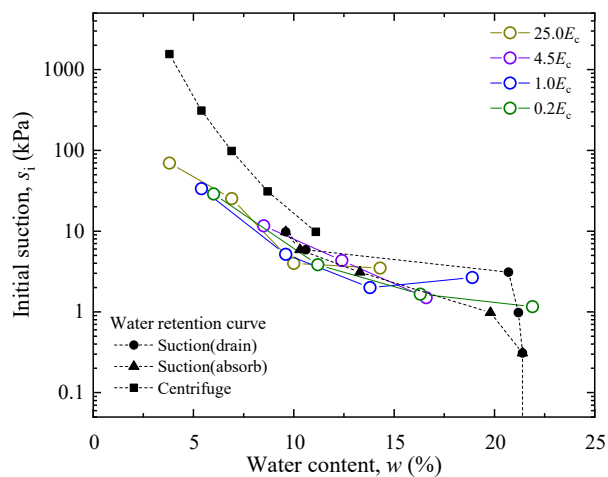


図 4-5-13 E_c 別の初期サクシオン～含水比関係(片対数)

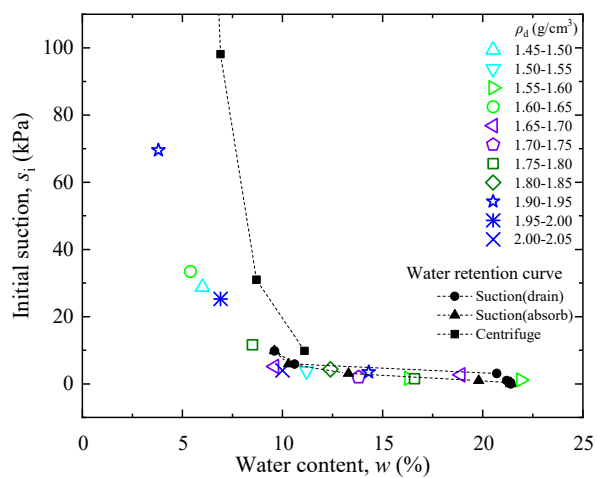


図 4-5-14 ρ_d 別の初期サクシオン～含水比関係

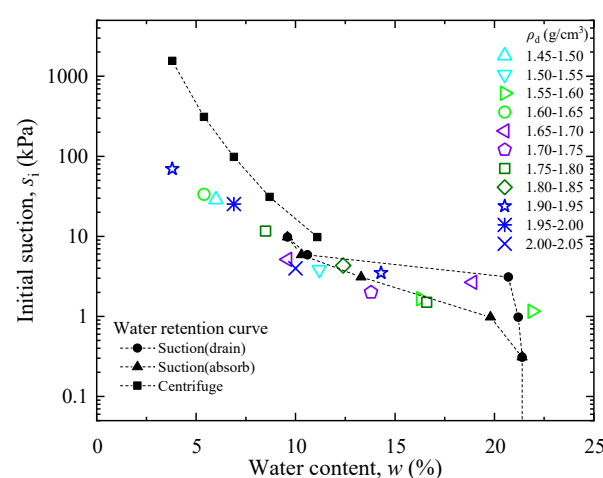


図 4-5-15 ρ_d 別の初期サクシオン～含水比関係(片対数)

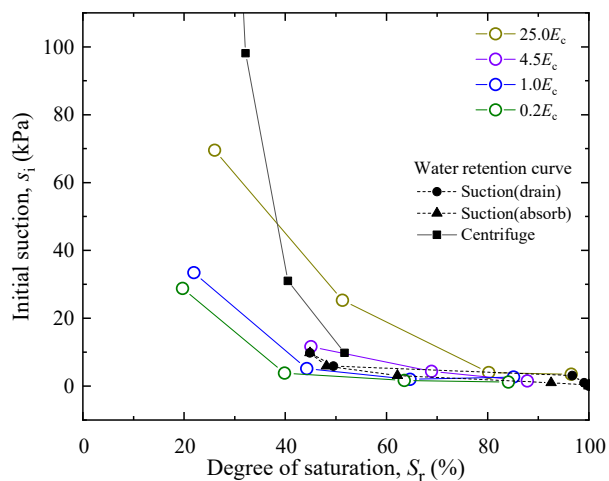


図 4-5-16 E_c 別の初期サクシオン～飽和度関係

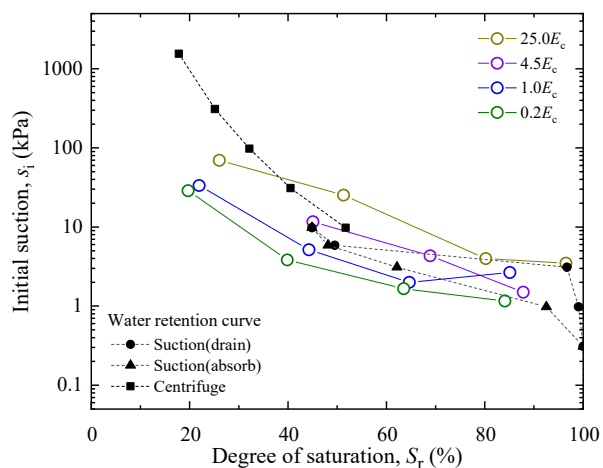


図 4-5-17 E_c 別の初期サクシオン～飽和度関係(片対数)

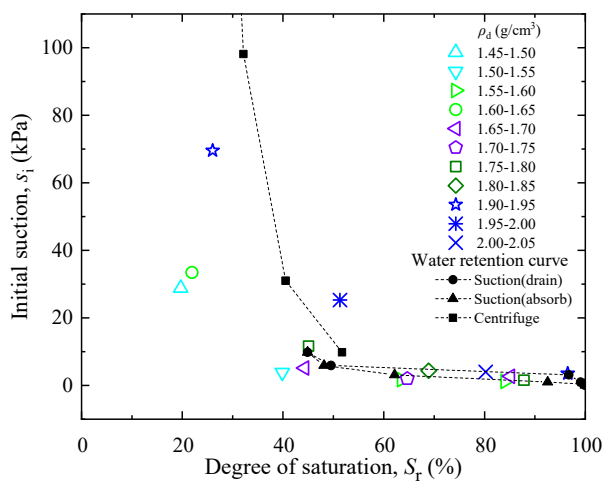


図 4-5-18 ρ_d 別の初期サクシオン～飽和度関係

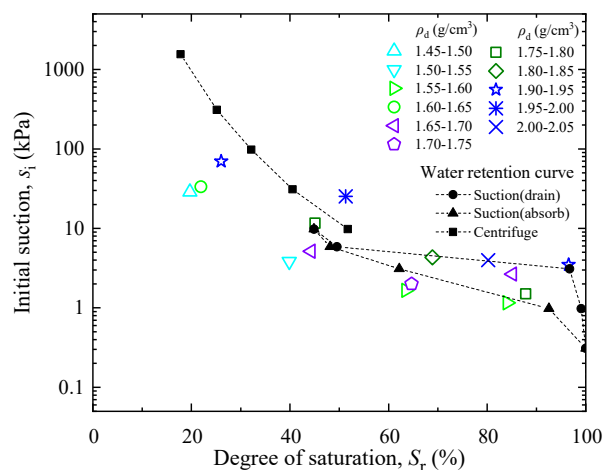


図 4-5-19 ρ_d 別の初期サクシオン～飽和度関係(片対数)

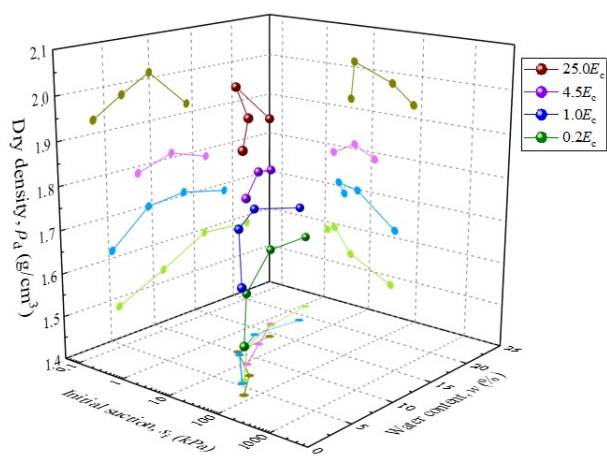


図 4-5-20 $s_i \sim \rho_d \sim w$ 関係

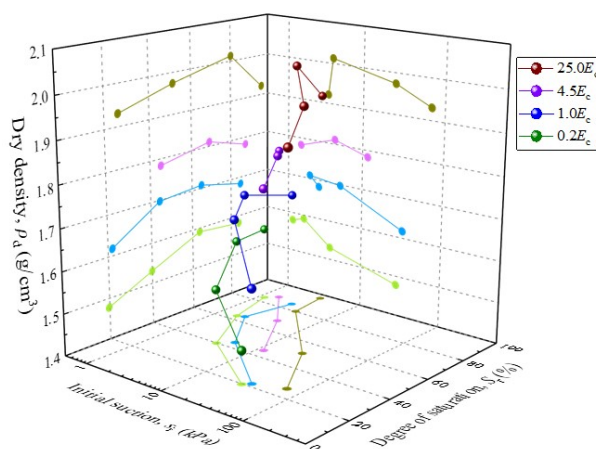


図 4-5-21 $s_i \sim \rho_d \sim S_r$ 関係

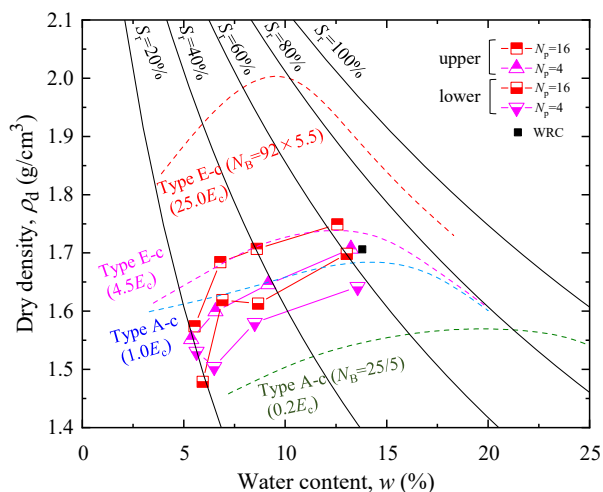


図 4-5-22 供試体作製条件($\rho_d \sim w$ 関係)

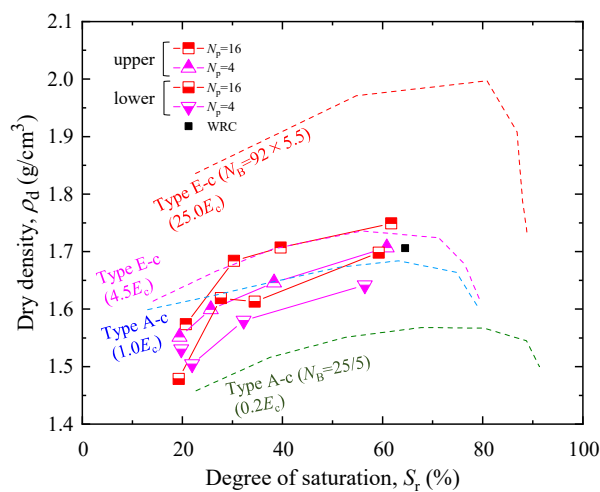


図 4-5-23 供試体作製条件($\rho_d \sim S_r$ 関係)

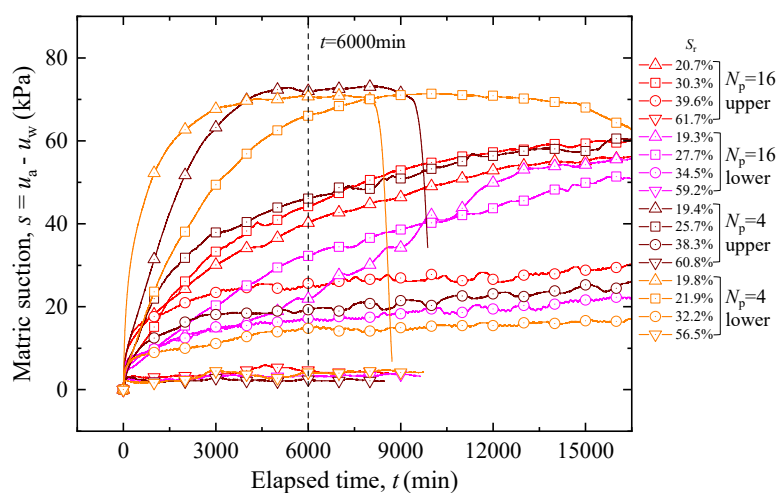


図 4-5-24 サクション測定の時刻歴

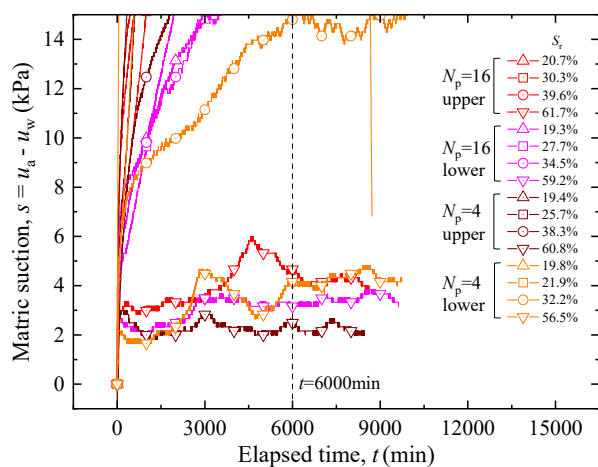


図 4-5-25 サクション測定の時刻歴(拡大)

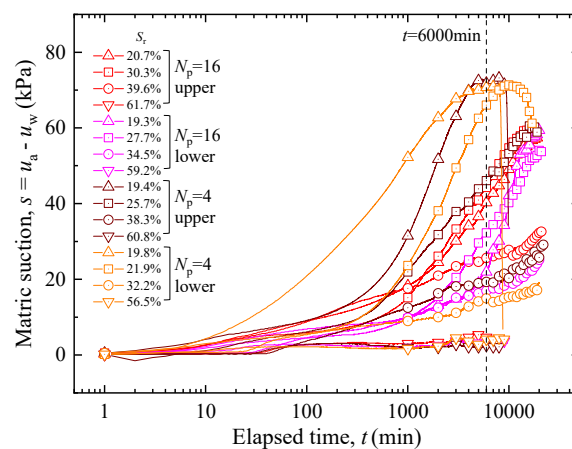


図 4-5-26 サクション測定の時刻歴(片対数)

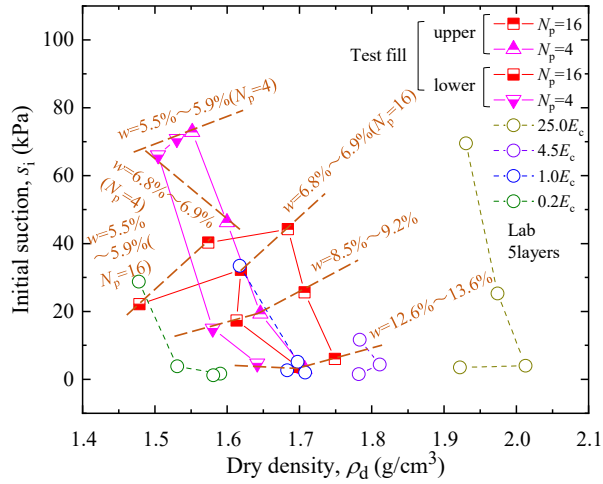


図 4-5-27 初期サクシオン～乾燥密度関係

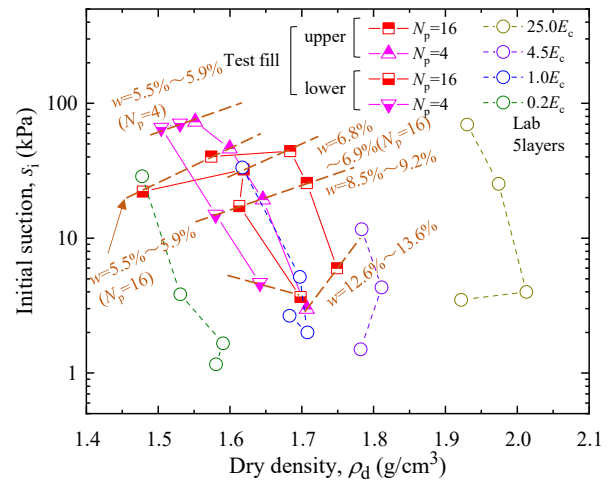


図 4-5-28 初期サクシオン～乾燥密度関係(片対数)

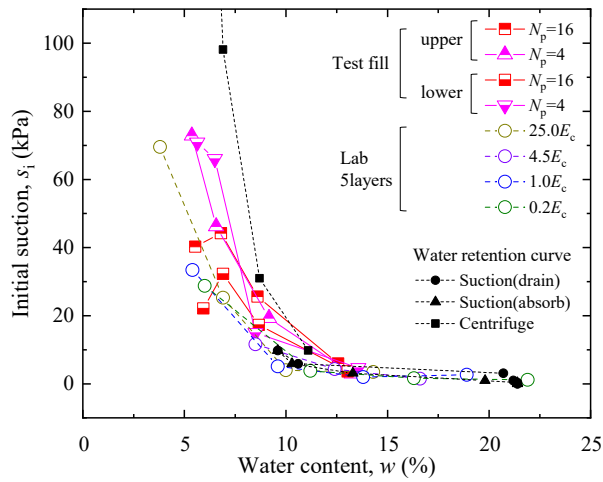


図 4-5-29 N_p 別の初期サクシオン～含水比関係

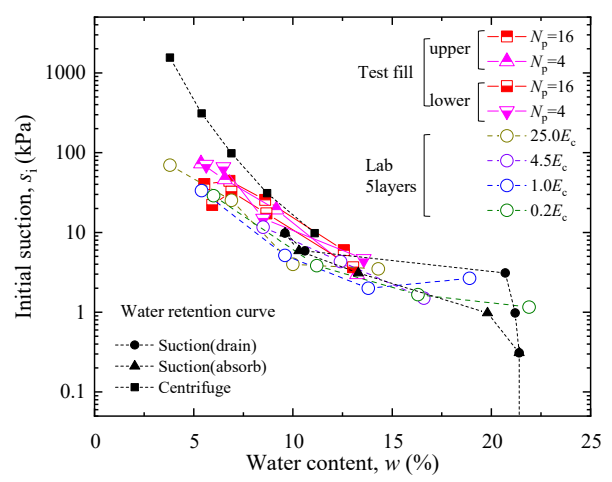


図 4-5-30 N_p 別の初期サクシオン～含水比関係(片対数)

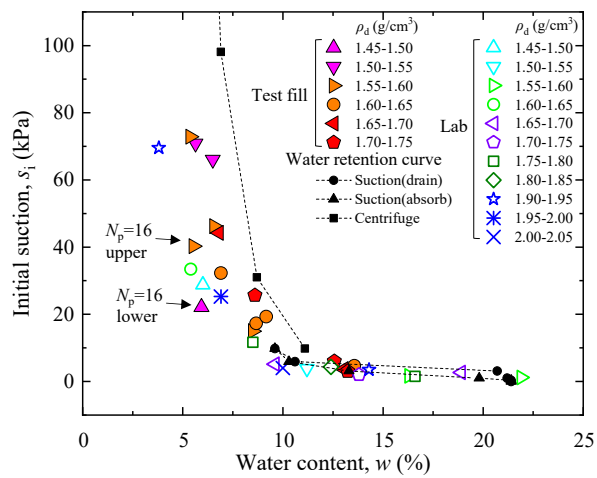


図 4-5-31 ρ_d 別の初期サクシオン～含水比関係

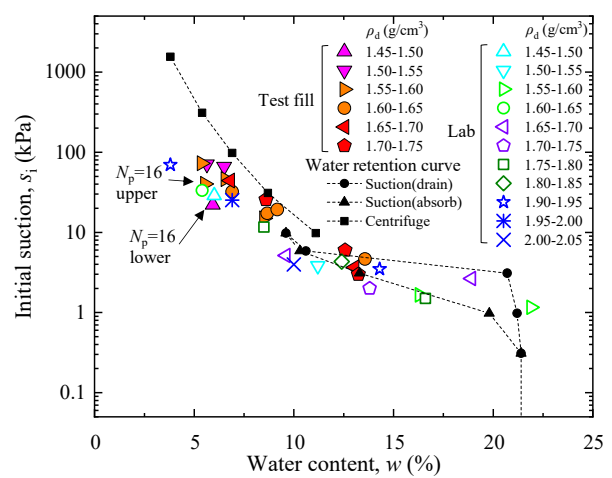


図 4-5-32 ρ_d 別の初期サクシオン～含水比関係(片対数)

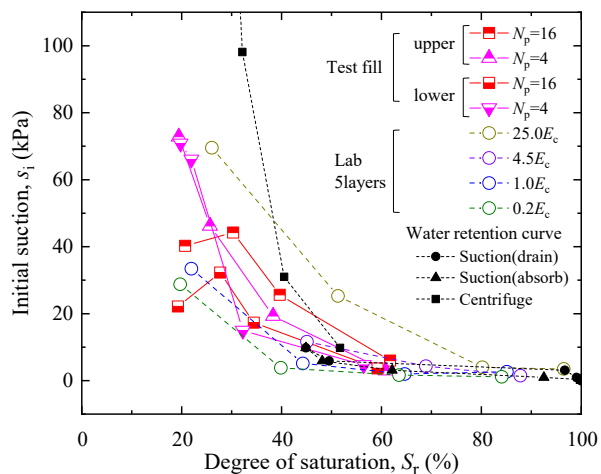


図 4-5-33 N_p 別の初期サクシオン～飽和度関係

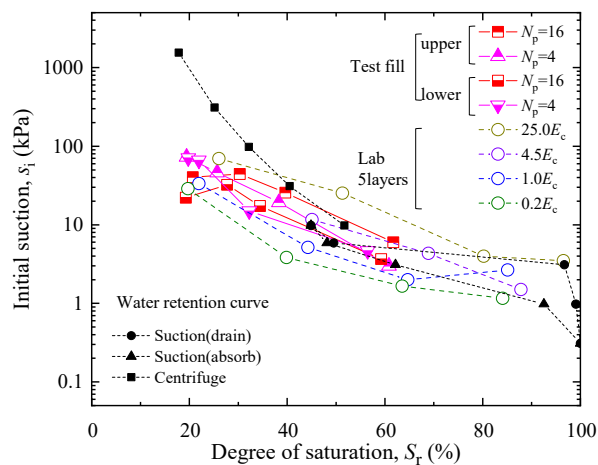


図 4-5-34 N_p 別の初期サクシオン～飽和度関係(片対数)

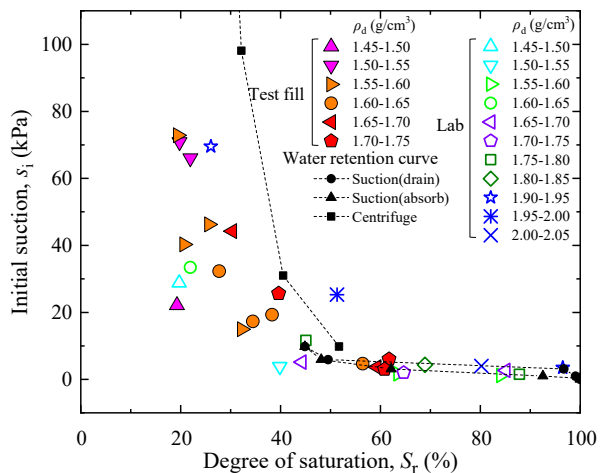


図 4-5-35 ρ_d 別の初期サクシオン～飽和度関係

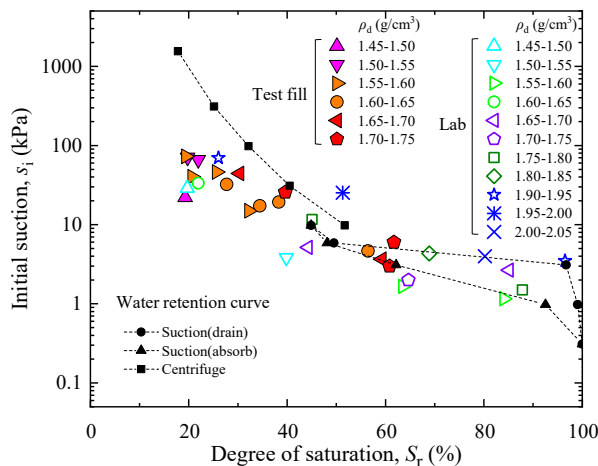


図 4-5-36 ρ_d 別の初期サクシオン～飽和度関係(片対数)

4.6 締め固めた供試体の透水性

締め固めた土の含水条件や密度条件は土粒子配列構造と関係している事が知られており、横浜ら(2012)は締め固めた砂質シルト供試体の透水係数と締固め条件、せん断剛性率及び非排水せん断強度の関係を整理する事で供試体作製条件が与える土粒子配列構造の変化への影響について推察している。そこで、本研究では室内締固め供試体と試験盛土供試体の鉛直方向の透水係数を測定し、両者に違いがあるのか確認する。

4.6.1 透水試験方法と供試体作製方法

透水試験は地盤工学会(2009)の土の透水試験方法(JIS A 1218)に従って内径 $\phi 100\text{mm}$ ×高さ $h120\text{mm}$ の透水円筒モールド内に供試体を締め固めて作製し、水浸脱気法で供試体を飽和化させた後に変水位透水試験を行った。

試験盛土の鉛直深度方向の非一様性を評価する事を目的に、締固め機械で作製した土槽内の盛土締固め層の上部と下部の供試体 2 パートを室内締固め供試体と同径の円筒サンプラー(図 4-6-1)内に採取し、(図 4-6-2)そのまま透水円筒として用いて透水試験を行った(図 4-6-3)。試験盛土の透水試験用供試体の採取方法は、三軸圧縮試験用の供試体と同様の押切式ブロックサンプリングである。

透水試験を正確に実施する為には、透水円筒モールド内の供試体とモールドとの境界面を含む断面方向の一様性が求められる。室内締固め供試体は円筒モールド内で試料を締め固めて作製する為、円筒モールドと供試体の密着性が高いが、試験盛土供試体のように乱れの少ないサンプリング供試体は、供試体周面沿いの漏水が問題になる事がある。地盤工学会(2009)は、円筒サンプラーで採取した試料はサンプラーを透水円筒として用い、内蔵する試料をそのまま供試体として試験を行う事が出来るとしているが、その一方で塊状の乱れの少ない試料を用いる場合は少し小さめの径で採取した供試体を透水試験用円筒モールド内に設置し、供試体の隙間に止水材を何層にも分けて塗布する方法を挙げている。本研究は砂質土供試体を扱う事から、乱れを受けやすいモールド解放状態で試験盛土供試体を放置・加工する事は望ましくないと判断し、円筒サンプラーをそのまま円筒モールドとして用いて透水試験を行う事とした。また、サンプリングによる供試体周面沿いの漏水の影響を確認する事を目的に、大径のモールド($\phi 150\text{mm}$)内に湿潤締固め法で所定の密度となるように 3 層に分けて締め固めた試料を準備し(図 4-6-4)、下面の供試体押出し器で試料を少しずつ押し出しながら(図 4-6-5)、試験盛土供試体と同じ円筒サンプラーでサンプリングした室内締固め供試体を作製した(図 4-6-6)。

4.6.2 室内締固め供試体の透水性

図 4-6-7 は、透水試験に用いた室内締固め供試体の乾燥密度～含水比関係を示す。図中の供試体は透水モールド内で突固め法により作製した室内締固め供試体及び、円筒サンプラーでサンプリングした室内締固め供試体であり、含水比は $w=4.9\%\sim 17.8\%$ の範囲で作製した。モールド内で締め固めた室内締固め供試体は締固めエネルギーが $1.0E_c$ と $0.2E_c$ であり、サンプリングした室内締固め供試体はそれと同程度の乾燥密度となるよう調整して作製した。

図 4-6-8 には鉛直透水係数～乾燥密度関係を示す。モールド内で締め固めた供試体とサンプリングした供試体は締固めエネルギー別に異なるが、同じ締固めエネルギーにおける同等の乾燥密度の両供試体の鉛直透水係数は類似する傾向であった。ただし、 $0.2E_c$ の締固め供試体は、サンプリングした供試体の方がやや鉛直透水係数大きい。また、いずれの供試体も全体的に乾燥密度が大きくなると急激に鉛直透水係数が低下する点が存在する。これについては含水比や飽和度の影響があるため、後で考察する。

Lambe & Whitman(1969)は透水係数に影響する 5 つの特性について、①粒径、②間隙比、③土の組成、④骨格

構造、⑤透水試験時の飽和度を挙げており、これらの特性と透水係数との関連を多く整理している。その中でも、多孔質体の透水係数を表現した下式に示す Kozeny-Carman の式等に用いられる間隙比係数 $e^3/(1+e)$ は、透水係数に直線的に比例する事を示している。

$$k = \frac{1}{k_0 S^2} \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{(1+e)} \quad (4-6-1)$$

ここで、 k_0 : 空隙形状や供試体厚に対する実流路長の比による係数

S : 表面特性値

γ : 流体の単位体積重量

μ : 流体の粘性係数

e : 間隙比

乾燥密度と間隙比の関係は式 4-5-1 で既に示している。図 4-6-9 は、鉛直透水係数～間隙比係数関係を示す。サンプリングした供試体は明確に現れなかったが、モールド内で締め固めた供試体は鉛直透水係数～間隙比係数関係は直線ではなく折れ曲がっている事が確認された。また、図中には原点(0,0)を通る補助線($1:1.5 \times 10^{-4}$)を示しているが、各供試体の鉛直透水係数～間隙比係数関係の一部のデータはこの補助線に近い値を示している事がわかる。プロットした各点は、一定の締固めエネルギーで含水比、飽和度が異なる事から、鉛直透水係数と間隙比の間には含水比や飽和度が影響を与えている事になる。

龍岡(2014)はダムのコア材の様々な含水比、乾燥密度条件における透水係数を系統的に整理しており、透水係数と、乾燥密度を水の密度で除して無次元化した ρ_d/ρ_w との関係において、締め固め時の飽和度によって異なるが一定の飽和度において透水係数を対数軸で示した場合の関係の勾配は-5.02 程度である事を示している。図 4-6-10 は、本研究で得た鉛直透水係数～ ρ_d/ρ_w 関係を示す。記号は供試体の飽和度別に整理している。また、図中には勾配-5.02 の補助線も示しており、モールド内で締め固めた供試体は飽和度 $S_r=15\% \sim 35\%$ の範囲で、サンプリングした供試体は飽和度 $S_r=25\% \sim 60\%$ の範囲で近い値を示した。この負の勾配は ρ_d/ρ_w が増加して間隙比が減少すると、透水係数も小さくなる事を意味し、先述した Lambe & Whitman(1969)の傾向と類似する。また、モールド内で締め固めた供試体は飽和度 $S_r=45\% \sim 75\%$ の範囲で、サンプリングした供試体は飽和度 $S_r=70\% \sim 75\%$ の範囲で先とは異なる線形関係を示している。飽和度が異なれば透水係数～ ρ_d/ρ_w 関係も異なる事は龍岡(2014)が示したが、これと類似する傾向であった。この傾向を踏まえると、鉛直透水係数～間隙比係数関係が同一線上に乗らない事も説明出来る可能性がある。詳しく調べるにはデータ数をもう少し収集する必要がある。

地盤工学会(2012)は、同じ締固めエネルギーで締め固めた供試体の透水係数～含水比関係において、透水係数の極小となる含水比は、同じ締固めエネルギーの締め固め曲線の最適含水比より湿潤側である事を説明しているが、龍岡(2014)はこれに加えて締め固めエネルギーが増加すれば等エネルギーにおける透水係数～含水比関係はシフトし、透水係数が極小となる含水比は減少する事を明らかにしている。つまり、透水係数～含水比関係は異なる締固めエネルギーで異なる値となる事がわかる。ここで、図 4-6-11 に鉛直透水係数～含水比関係を示す。モールド内で締め固めた供試体とサンプリングした供試体ともに、それぞれ $1.0E_c$ と $0.2E_c$ でシフトしており、互いに交わらない。この傾向は龍岡(2014)の傾向と一致し、乾燥密度の影響が含まれているためと考えられる。また、本試料は締固めエネルギーが高いと供試体の細粒分含有率がわずかに増加する事を確認したが、これも高い締固めエネルギーで透水係数を低下させる理由に含まれている。次に同じ締固めエネルギーにおけるモールド内で締め固めた供試体とサンプリングした供試体を比較すると、同じ乾燥密度でもサンプリングした供試体の方が透水係数は大きく、両者は交わらない結

果であった。これについては土の物性による影響とは考えにくく、供試体作製方法の違いによる影響、すなわち供試体周面沿いの漏水の影響である可能性が高いと考える。

図 4-6-12 に鉛直透水係数～飽和度関係を示す。モールド内で締め固めた供試体とサンプリングした供試体は鉛直透水係数～含水比関係に比べるとそれぞれ類似する傾向であった。この傾向は龍岡(2014)の傾向と一致する。また、多少のばらつきが見られるが、これは乾燥密度の影響が少しだけ含まれているためと考えられる。同じ締固めエネルギーにおけるモールド内で締め固めた供試体とサンプリングした供試体を比較すると、鉛直透水係数～含水比関係と同様に、同じ乾燥密度でもサンプリングした供試体の方が透水係数は大きく、両者は交わらない結果であった。

以上の事より、鉛直透水係数は締固めによる密度条件(乾燥密度や間隙比)及び含水条件(含水比や飽和度)の影響を強く受けており、これらの影響を考慮して透水性を評価する事が重要である事を既往の研究と照らし合わせて再確認した。また、サンプリングした供試体周面沿いの漏水の影響が透水試験結果に明確に出ている事が確認された。

4.6.3 試験盛土供試体の透水性

本項では試験盛土供試体の透水性について説明するが、先にサンプリングした室内締固め供試体の周面沿いの漏水の影響が透水試験結果に現れていることから、試験盛土供試体との比較には円筒サンプラーでサンプリングした室内締固め供試体を用いる。

図 4-6-13 は、透水試験に用いた試験盛土供試体と室内締固め供試体の乾燥密度～含水比関係を示す。試験盛土供試体は締固め機械の通過回数 $N_p=16$ における試験盛土層上部と下部それぞれ別個に採取している。試験盛土供試体の含水比は $w=5.6\% \sim 13.1\%$ の範囲である。また、室内締固め供試体は締固めエネルギーが $1.0E_c$ と $0.2E_c$ であり、試験盛土供試体の上部と $1.0E_c$ の室内締固め供試体が、試験盛土供試体の下部と $0.2E_c$ の室内締固め供試体が含水比 $w=8.0\%$ 付近と 12.0% 付近(図中の破線内)において同等の乾燥密度条件である。

図 4-6-14 には鉛直透水係数～乾燥密度関係を示す。室内締固め供試体は乾燥密度の増加で急激に透水係数が低下する事は先述したが、試験盛土は室内締固めと異なり、乾燥密度の増加に対して透水係数は緩やかに低下している。ただし、破線で囲んだ含水比 $w=8.0\%$ 付近と 12.0% 付近で同等の乾燥密度の供試体はどちらも鉛直透水係数が類似していた。

図 4-6-15 は、鉛直透水係数～間隙比係数関係を示す。試験盛土供試体はモールド内で締め固めた室内締固め供試体に見られたような折れ曲がりはなく、間隙比係数が増加すると透水係数は $1:1.5 \times 10^{-4}$ の補助線に沿わずに直線的に増加している事が確認され、モールド内で作製した室内締固め供試体と異なる。サンプリングした室内締固め供試体も明確な折れ曲がりはなく、試験盛土供試体の傾向に類似していることから、サンプリングした供試体周面沿いの漏水が鉛直透水係数～間隙比係数関係に影響を与えている可能性がある。

図 4-6-16 は、鉛直透水係数～ ρ_d/ρ_w 関係を示す。記号は供試体の飽和度別に整理している。また、図中には勾配 -5.02 の補助線も示しており、試験盛土供試体は飽和度 $S_r=15\% \sim 65\%$ の範囲で、室内締固め供試体は飽和度 $S_r=25\% \sim 60\%$ の範囲でこの補助線に近い値を示した。また、室内締固め供試体は飽和度 $S_r=70\% \sim 75\%$ の範囲で先とは異なる線形関係に位置しているのに対し、試験盛土供試体は高い飽和度範囲のデータも補助線から外れなかった。また、乾燥密度で整理する事で試験盛土の上部、下部の区別なく評価する事が出来た。

図 4-6-17 に鉛直透水係数～含水比関係を示す。試験盛土供試体上部と $1.0E_c$ 室内締固め供試体、試験盛土下部と $0.2E_c$ 室内締固め供試体がそれぞれシフトしており、互いに殆ど交わらない。この傾向は試験盛土供試体と室内締固め供試体とで一致する。ただし、乾燥密度の影響が含まれているため同じ含水比における試験盛土上部と試験盛土下部の透水係数は一致しない。

図 4-6-18 に鉛直透水係数～飽和度関係を示す。試験盛土供試体と室内締固め供試体は鉛直透水係数～含水比

関係に比べるとそれぞれ類似する傾向であり、多少のばらつきが生じているのは乾燥密度の影響が少しだけ含まれているためと考えられる。

以上の事より、試験盛土供試体及び室内締固め供試体について、密度条件(乾燥密度や間隙比)をパラメーターに比較すると鉛直透水係数～間隙比係数関係や鉛直透水係数～乾燥密度関係はある程度の飽和度の範囲内で試験盛土供試体も室内締固め供試体も共通して一定の傾向を示すが、飽和度が大きくなると飽和度の影響に起因するばらつきが大きく、詳しく調べる事が出来なかった。また、含水条件(含水比や飽和度)をパラメーターに両者を比較すると、乾燥密度の影響でばらつきはあるが、試験盛土供試体も室内締固め供試体ともに透水係数が類似する。すなわち、試験盛土のような乾燥密度と飽和度の鉛直深度分布を有する供試体も上部と下部に分け、それぞれの乾燥密度と飽和度を考慮する事で、室内締固め供試体と類似する透水特性として評価する事が出来る事を確認した。

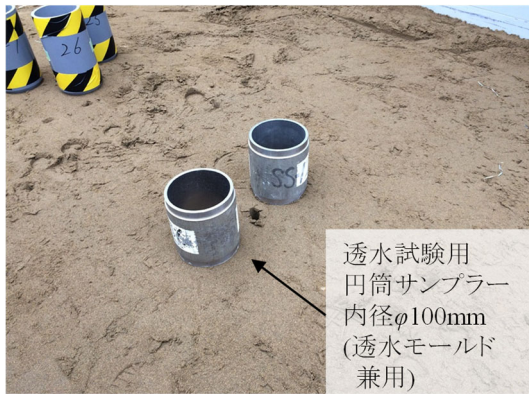


図 4-6-1 試験盛土の円筒サンプラー



図 4-6-2 試験盛土供試体採取状況



図 4-6-3 透水試験状況(変水位試験)

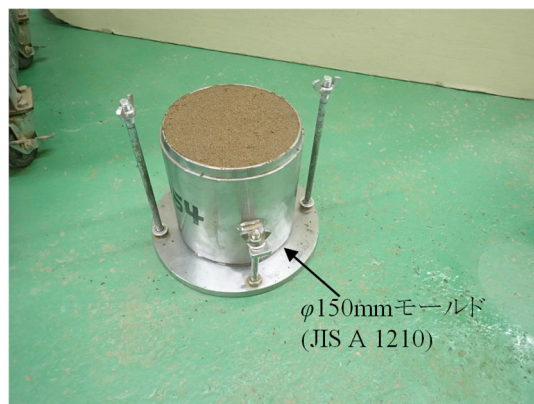


図 4-6-4 室内締め固め供試体のサンプリング前



図 4-6-5 室内締め固め供試体のサンプリング状況



図 4-6-6 サンプリングした室内締め固め供試体

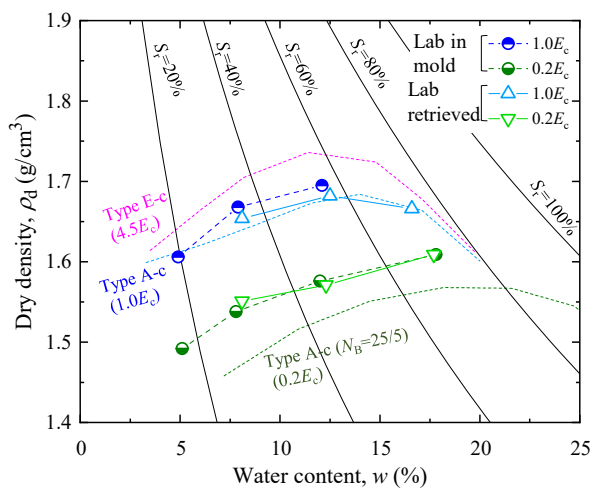


図 4-6-7 室内締固め供試体条件

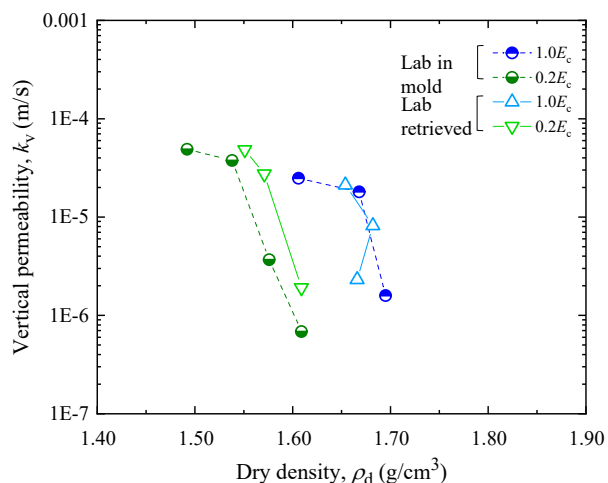


図 4-6-8 鉛直透水係数～乾燥密度関係(片対数)

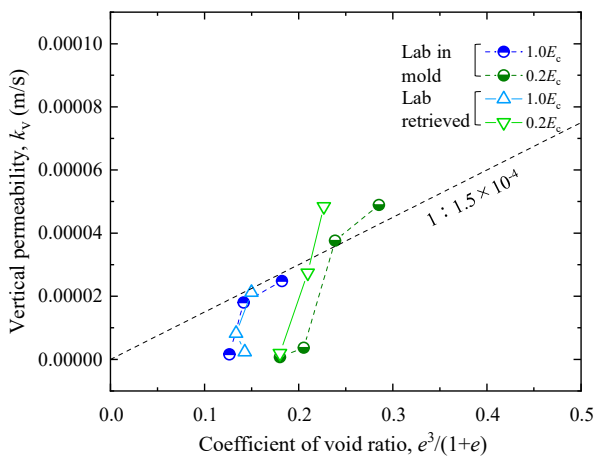


図 4-6-9 鉛直透水係数～間隙比係数関係

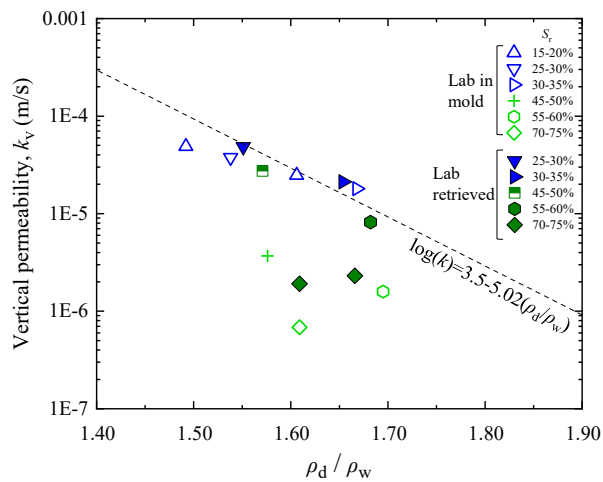


図 4-6-10 鉛直透水係数～ ρ_d/ρ_w 関係(片対数)

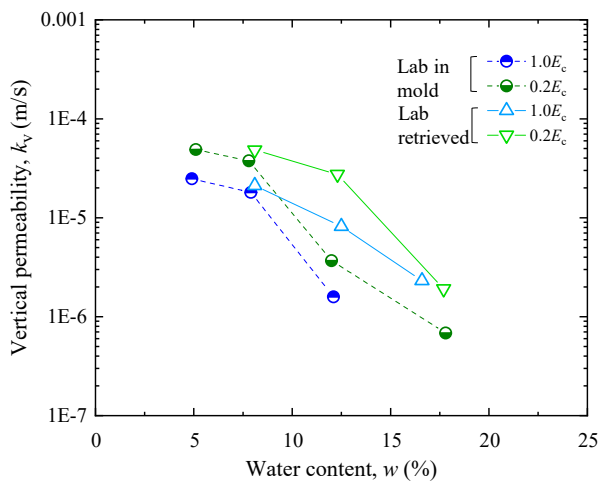


図 4-6-11 鉛直透水係数～含水比関係(片対数)

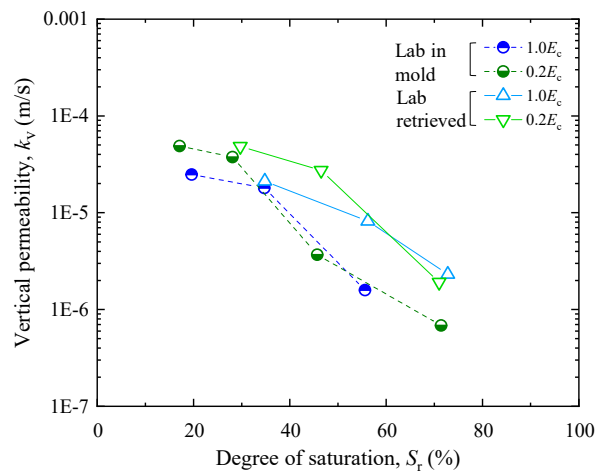


図 4-6-12 鉛直透水係数～飽和度関係(片対数)

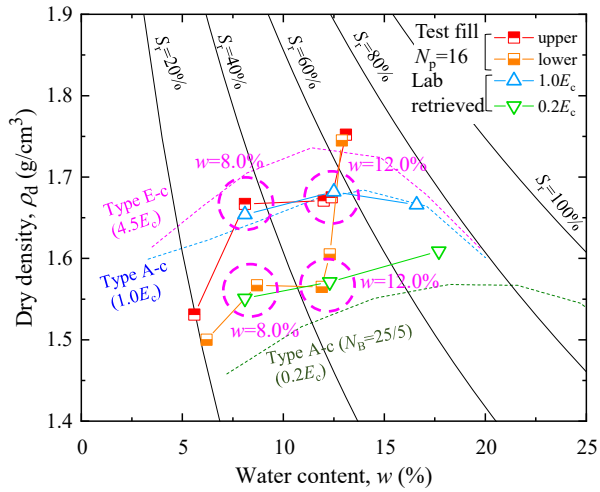


図 4-6-13 供試体作製条件($\rho_d \sim w$ 関係)

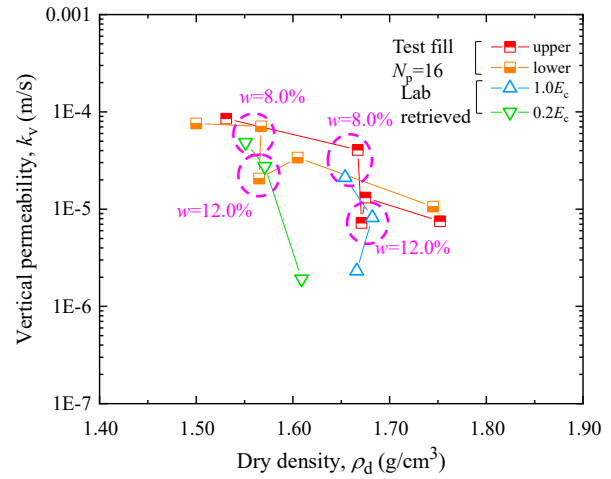


図 4-6-14 鉛直透水係数～乾燥密度関係(片対数)

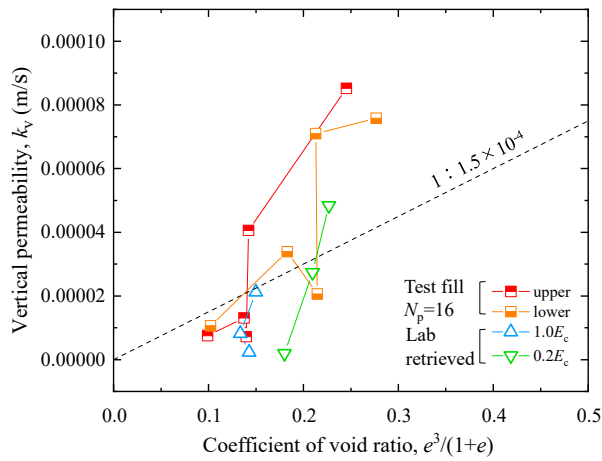


図 4-6-15 鉛直透水係数～間隙比係数関係

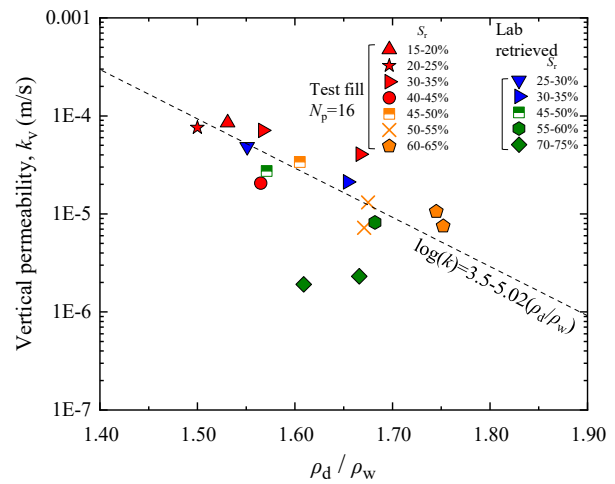


図 4-6-16 鉛直透水係数～ ρ_d/ρ_w 関係(片対数)

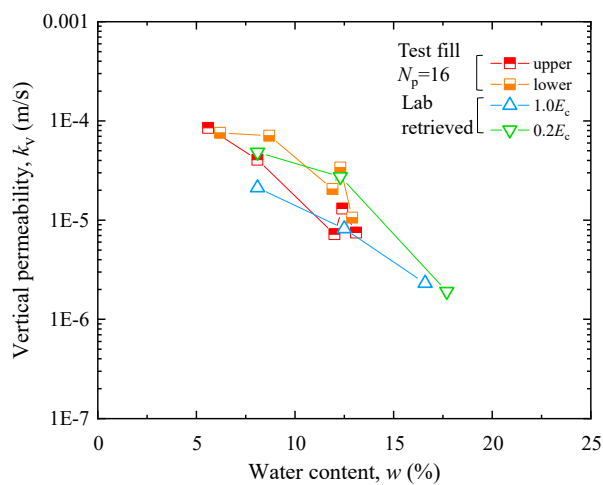


図 4-6-17 鉛直透水係数～含水比関係(片対数)

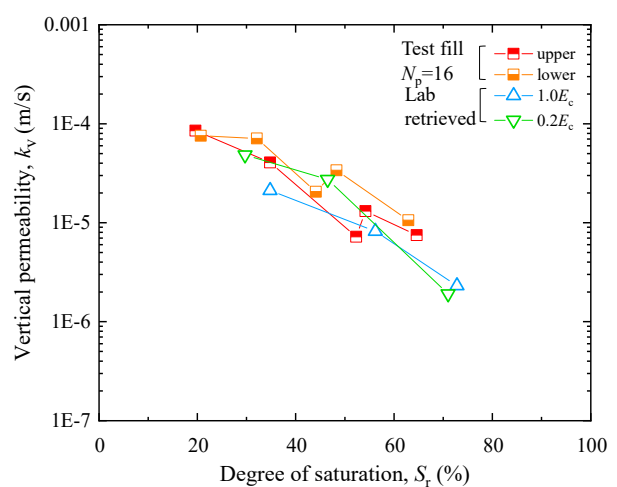


図 4-6-18 鉛直透水係数～飽和度関係(片対数)

4.7 本章のまとめ

本章では現場と室内で締め固めた供試体の非一様性の評価とそれが与える物理特性への影響を調べた。具体的には、試験盛土供試体および室内締固め供試体を鉛直深度別のパートに分けて、それぞれの乾燥密度と含水比の分布を調べた。また、室内締固め供試体の締固め層別のランマー撃力を測定し、室内締固め供試体の乾燥密度の非一様性に対する考察を行った。さらに、パート別に分けた供試体の粒度分布や初期サクシオン、透水性について調べ、現場と室内で締め固めた供試体の物理特性の違いについて比較した。

本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 試験盛土から押切式ブロックサンプリングで採取した試験盛土供試体は、鉛直深度方向の乾燥密度分布が確認された。供試体の上部と下部で乾燥密度が異なる事に対し、含水比は上部と下部の差が殆どなく、飽和度が上部と下部で異なっていた。
- ② 試験盛土供試体の乾燥密度は下部に比べて上部が大きく、その密度分布は締固め機械の通過回数 N_p に関わらずほぼ同等で、供試体全体平均の乾燥密度に対して上部は+2.0%、下部は-2.0%程度の違いがあった。
- ③ 突固め法で5層に分けて作製した室内締固め供試体はわずかに鉛直深度方向の乾燥密度分布が確認され、上部に比べて下部が大きい。その密度分布の程度は締固めエネルギーによって異なり、供試体全体平均の乾燥密度に対して $4.5E_c$ 供試体の上部は-1.1%、下部は+0.55%程度、 $1.0E_c$ 供試体の上部は-0.46%、下部は+0.15%程度、 $0.2E_c$ 供試体の上部は-0.33%、下部は+0.060%程度の違いがあった。
- ④ 室内締固め供試体の締固め時のモールド下面で測定した平均撃力は、締固め層が上になる程小さくなり、下になる程大きい事が確認された。これは、締固め層が上になる程、締固め時に重錘が締固め層に貫入する時間が増加し、等しい力積で締め固めていても平均撃力が低下する為である。これは、下層は剛な鋼製モールド底板上で薄い為、比較的剛性が高くなりやすい。その一方で締固め層が上になる程、下層が厚くなる為、比較的剛性が低くなる事が理由に挙げられる。また、特に $4.5E_c$ で締め固めた供試体の鉛直深度方向の乾燥密度分布と締固め時の平均撃力分布関係は一定の傾きを有する相関性が認められる。
- ⑤ 試験盛土供試体は締固め機械の転圧による粒度分布の変化は殆ど見られなかった。細粒分含有率の増加も明確には見られなかった。一方で、室内締固め供試体は粒度分布に大きな違いは見られなかったものの、細粒分含有率の増加がわずかに認められ、締固めエネルギーが大きい程粒子破碎が生じている事が確認された。ただし、締固め時の平均撃力が比較的小さい供試体上部の方が下部に比べて細粒分含有率の増加が大きく、平均撃力測定結果とは整合しない。
- ⑥ 試験盛土供試体の初期サクシオンは、室内締固め供試体と同様に含水比や飽和度との相関関係があり、測定した含水比の範囲において初期サクシオン～含水比関係には乾燥密度の影響が少なく一義的な傾向であった。一方で測定した飽和度の範囲において、初期サクシオン～飽和度関係には乾燥密度の影響によるばらつきが認められた。初期サクシオンと間隙水比が一義的な相関関係であれば、初期サクシオンは含水比 w に比例し、また間隙比 e (乾燥密度 $\rho_d = \rho_s / (e+1)$) と飽和度 S_r の積に比例する事が説明できる。
- ⑦ 試験盛土供試体の初期サクシオンは上部と下部の乾燥密度と含水比を考慮すれば、上部と下部の違いに有意な差は見られない。また、試験盛土供試体の初期サクシオンは同じ含水比の室内締固め供試体の初期サクシオンよりもわずかに大きい、初期サクシオン～含水比関係はほぼ等しい傾向である。
- ⑧ 飽和化した試験盛土供試体の鉛直透水係数と含水比関係、鉛直透水係数飽和度の関係は乾燥密度の影響を受けるが、室内締固め供試体と類似する傾向であった。

以上より、試験盛土供試体と室内締固め供試体は鉛直深度方向の乾燥密度、飽和度が異なり、非一様である。また、その程度は試験盛土供試体と室内締固め供試体で大きく異なる。一方で、両者は供試体の作製方法に起因する粒度特性や初期サクション、透水性等の物理特性に違いは見られたが、供試体の乾燥密度分布及び飽和度分布を考慮すればその差はわずかである。このことから、後の章では試験盛土供試体、室内締固め供試体ともに鉛直深度方向に乾燥密度、飽和度の異なる非一様供試体として三軸圧縮試験による強度変形特性の評価を行う。

【4章の参考文献】

- 1) Lambe, T. W. & Whitman, R. V. (1969) : *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons.
- 2) Tatsuoka, F. (2015): Compaction characteristics and physical properties of compacted soil controlled by the degree of saturation, *Proc. 15th Pan-American Conf. on SMGE & 6th IC on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Buenos Aires, pp.40-76.
- 3) Zhao, C., Koseki, J. & Sasaki, T. (2018): Image based local deformation measurement of saturated sand specimen in undrained cyclic triaxial tests, *Soils and Foundations* Vol.58, pp.1313-1325.
- 4) 上本雄也, 澁谷啓, 橋元洋典, 川尻峻三(2011): 砂礫盛土材の締固め特性および変形・強度特性に及ぼす粒度特性の影響, *地盤工学ジャーナル*, Vol.6, No.2, pp.181-190.
- 5) 大島昭彦, 高田直俊(1992): 重錘落下締固めにおける重錘運動量と締固め効果, 第 27 回土質工学研究発表会, pp.2103-2106.
- 6) 河井克之, 金銀羅, 流田寛之, 飯塚敦, 本田道識(2002): 不飽和土の力学を用いた締固め土における圧密降伏応力の簡易予測手法, *土木学会応用力学論文集*, Vol.5, pp.785-792.
- 7) 佐々木朋子, 佐藤剛司, Chuang ZHAO, 古関潤一 (2018): 締固め法によって作製した砂供試体の締固め層厚および初期含水比が液状化特性に及ぼす影響, *地盤工学ジャーナル*, Vol.13, No.4, pp.379-392.
- 8) 地盤工学会 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会(2004): 不飽和地盤の挙動と評価, 丸善出版株式会社.
- 9) 地盤工学会(2009): 地盤材料の試験方法と解説, 丸善出版株式会社.
- 10) 地盤工学会(2012): 地盤工学・実務シリーズ 土の締固め, 丸善出版株式会社.
- 11) 龍岡文夫, 藤代健司, 須藤雅人, 川辺翔平, 菊池喜昭, 澁谷啓, 李俊憲, 堀田崇由(2013): 連載:地盤工学・技術ノート 第 6 回 盛土の締固め⑥, *基礎工*, Vol.41, No.12, pp.92-97.
- 12) 龍岡文夫(2014): 連載:地盤工学・技術ノート 第 11 回 盛土の締固め⑪, *基礎工*, Vol.42, No.5, pp.81-84.
- 13) 龍岡文夫, 平川大貴(2020): 特集 盛土の締固めの新たな展開と展望, *基礎工*, Vol.48, No.11, pp.2-9.
- 14) 谷口義昭, 櫻田航介, 吉田誠(1997): げんのうによる釘打ちに関する研究, *教育実践研究指導センター研究紀要*, 第 6 巻, pp.59-67.
- 15) 平川大貴, 川原園美幸, 龍岡文夫(2008): 砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響, *土木学会論文集 C*, Vol.64, No.2, pp.253-266.
- 16) 益村公人, 殿垣内正人, 川井洋二, 建山和由(1998): 一層締固め層内の締固め効果に及ぼす含水比と細粒分の影響, 第 33 回地盤工学研究発表会, pp.2073-2074.
- 17) 三田地利之, 工藤豊(1994): 一軸圧縮試験結果に基づく原位置強度の推定法, *土と基礎*, Vol.42, No.4, pp.15-20.
- 18) 三田地利之, 遠藤大輔(1996): 一軸圧縮試験結果の評価方法について -サクシンの測定を伴う一軸圧縮試験の提案-, 第 41 回地盤工学シンポジウム, pp.43-48.
- 19) 山木正彦, 森啓年, 佐々木哲也, 榎本忠夫(2011): 細粒分含有率に着目した締固めによるせん断強度向上および透水係数低下に関する考察, 第 46 回地盤工学研究発表会, pp.333-334.
- 20) 横浜勝司, 三浦清一, 松村聡(2012): 築堤材に用いられる砂質シルトの強度・透水性・せん断剛性に及ぼす締固め管理条件の影響, *土木学会論文集 C*, Vol.68, No.2, pp.422-432.
- 21) 王海龍, 古関潤一(2018): 不飽和材料の"間隙水比-サクシン"モデルの提案, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.711-712.

第5章

非一様性を考慮した室内締固め供試体の強度変形特性

5.1 概要

本章では前に示した室内締固め供試体が有する乾燥密度、飽和度の非一様性に基づいて、供試体の局所的な変形を考慮しながら三軸圧縮試験による強度変形特性を調べた。三軸圧縮試験の単調載荷過程に加え、その等方圧密過程や、平均基底主応力 $p_{net}=700\text{kPa}$ 程度までの中圧等方圧密過程、荷重保持載荷及び繰返し載荷による変形特性の評価を実施した。また、圧密履歴の有無による強度変形特性の違いや変形特性の鉛直深度分布に対する評価を実施した。

5.2 供試体の非一様性が単調載荷時の強度変形特性に与える影響

5.2.1 室内締固め供試体の応力～ひずみ関係

図 5-2-1 には、作製した三軸圧縮試験用供試体の乾燥密度～含水比関係と $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ 及び $4.5E_c$ の締固め曲線を示す。また、図 5-2-2 には、同じ供試体の乾燥密度～飽和度で整理している。両図に示す乾燥密度、含水比、飽和度の供試体にはそれぞれ、平均値に加えて上部及び下部の局所的な値を示している。平均値は供試体作製時に測定して求めたもので、上部と下部の局所的な値は平均値に基づき、前章で示した式 4-3-5～式 4-3-10 を用いて推定している。典型的な試験結果の例を以下に示す。

(1) 締固めエネルギー $1.0E_c$ で作製した乾燥密度 $\rho_d=1.719\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=9.2\%$ 、飽和度 $S_r=43.9\%$ の供試体の試験結果

応力～ひずみ関係を示す。供試体は水平基底応力 $\sigma_{hnet}=50\text{kPa}$ 、圧密排気・排水条件で載荷している。図 5-2-3 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみと LDT による供試体端面を除く供試体の平均の鉛直ひずみを示している。EDT と LDT では供試体端面のベディングエラーの影響や試験装置の変形等のシステムコンプライアンスにより、応力～ひずみ関係に違いが生じているが、測定範囲において両者の鉛直ひずみの差は最大で 0.5% 程度であった。EDT で測定した応力～ひずみ関係では鉛直ひずみ $\varepsilon_v=2\%$ 付近でピークを迎え、鉛直ひずみの増加とともに軸差応力は緩やかに低下している。この供試体の最大軸差応力は $q_{max}=225.6\text{kPa}$ であった。図 5-2-4 は、供試体の上部と下部に設置した LDT80 により測定した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。LDT80 の配置は図 3-2-11 に示した通りである。ロードセルは共通した 1 つを利用して、軸差応力のピーク値は一致するが、ピークに達するまでの剛性は供試体の上部と下部を比較すると下部の方が大きい事がわかる。須藤ら(2013)は、室内で締め固めた稲城砂供試体の飽和排水三軸圧縮試験により、締固め時の供試体の飽和度の影響は受けるが乾燥密度が増加すると割線ヤング率 E_{50} が増加する事を示している。本研究では 1 つの室内締固め供試体を上部と下部に分けて評価しており、この点では既往の研究に例が見られない。上部より下部の乾燥密度がやや大きい事を踏まえると供試体下部の方が上部より剛性が大きく、定性的には乾燥密度と剛性との間に整合が取れている。定量的には他の締固め条件の供試体の三軸圧縮試験結果と併せ、初期ヤング率 E_0

や割線ヤング率 E_{50} を用いて評価する。载荷初期は上部と下部ともに体積ひずみは収縮傾向を示すが、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.2\%\sim 0.3\%$ 付近で膨張傾向に転じている。また、最大体積圧縮ひずみは供試体の上部が下部に比べてやや大きい。これは供試体上部と下部の乾燥密度の大小関係と整合する。

図 5-2-5 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\sim 0.01\%$ 範囲の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。等方圧密後の载荷初期のヤング率は上部で $(E_0)_{upper}=178.5\text{MPa}$ 、下部で $(E_0)_{lower}=200.6\text{MPa}$ であり、下部が大きい。また、体積ひずみは収縮傾向を示している。载荷初期の微小繰返し载荷により供試体上部と下部ともに体積ひずみの残留が観測されたが、この程度の体積ひずみは 3.7 に示したポリウレタン系弾性ゴムのダミー供試体での測定試験結果にも見られたようなシステムコンプライアンスの影響が現れていると考える。

図 5-2-6 は、供試体に設置した LDT により測定した平均的な鉛直ひずみと、上端部、上部、下部及び下端部それぞれの局所的な鉛直ひずみの関係を示す。また、体積ひずみと鉛直ひずみの関係も併せて示している。軸差応力～鉛直ひずみ関係について、供試体平均は先にも示した供試体の上部と下部との間に位置する。また、供試体下端部は下部と同等の剛性を示すが、下端部の方がやや小さい。また、上端部は上部に比較的近い剛性を示すが上端部の方が小さい。上端部と下端部が上部と下部に比べてそれぞれやや低い剛性を示す理由には供試体端面のベディングエラーの影響が考えられるが、その影響の程度は上端部の方が大きい。体積ひずみ～鉛直ひずみ関係は、軸差応力～鉛直ひずみのピーク強度までの剛性の大小と下端部を除いて同じく、下部、平均、上部、下端部、上端部の順番に早くから膨張挙動を示した。これらの結果から、局所変位計により観測された室内締固め供試体の局所変形挙動は局所的に異なる乾燥密度の影響を受ける事、供試体端面のベディングエラーの影響を受ける事、平均値は上部と下部の間に位置する事を確認し、ポリウレタン系弾性ゴムのダミー供試体のような一様の供試体に比べて供試体の非一様性が強く現れる事がわかった。

図 5-2-7 は、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、補助線として 1:-1 関係を破線で示す。载荷初期は鉛直ひずみが水平ひずみより大きく、補助線から離れるように推移するが鉛直ひずみの進行とともに補助線とほぼ平行となった。上部と下部の違いについては、上部の鉛直ひずみがやや大きい。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.6\%$ 程度以降はそれ以上の大きな差は生じていない。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.4\%$ 付近で上部と下部の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係が交差している。この理由はわからないが、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.4\%$ 付近以降は、クリップゲージで局所的に測定している水平ひずみも大きく、供試体の局所変形の影響を受ける為、詳細な評価には注意が必要である。

図 5-2-8 は、接線ヤング率～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ヤング率は低下するが、载荷初期から $\varepsilon_v=0.3\%$ 付近までは下部の接線ヤング率が上部よりやや大きい。それ以降はほぼ同等の値に収束しながら低下している。

図 5-2-9 は、 $E_{tan} / E_0 \sim q / q_{max}$ 関係を示す。小高ら(1998)は堆積軟岩の応力～ひずみ関係における接線ヤング率の低下に着目し、供試体の乱れの評価方法を提案している。これは堆積軟岩のサンプリング時に生じるマイクロクラックが载荷初期の接線剛性を低下させ、その後の鉛直ひずみの進行とともにマイクロクラックが閉塞・剛性回復する際に現れる S 字型の応力～ひずみ関係の特徴を用いる事で供試体の乱れの有無を判定している。本研究で扱う試料は砂質土であるが、三軸試験载荷前に供試体を一時的に型枠から解放する為、この方法に着目して評価を試みた。 E_{tan} / E_0 は、 $q / q_{max}=0\sim 0.2$ までの間に上部と下部ともに著しく低下し、 $q / q_{max}=0.2\sim 1.0$ 付近までかけて緩やかに低下する傾向であった。乱れのある堆積軟岩のように $q / q_{max}=0.1$ 付近での著しく低い値は確認されなかった。

図 5-2-10 は、接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\sim 0.01\%$ 付近までの接線ポアソン比は $\nu_{tan}=0.2$ 程度であり、弾性的挙動を示している。 $\varepsilon_v=0.01\%$ 付近以降は鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ポアソン比は増加している。

(2) 締固めエネルギー $0.2E_c$ で作製した乾燥密度 $\rho_d=1.618\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=8.3\%$ 、飽和度 $S_r=33.8\%$ の供試体の試験結果

図 5-2-11 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみと LDT による供試体端面を除く供試体の平均の鉛直ひずみを示している。EDT と LDT の応力～ひずみ関係において、鉛直ひずみの両者の差は測定範囲で最大 0.5%程度であった。EDT で測定した応力～ひずみ関係では鉛直ひずみの増加とともに軸差応力は緩やかに増加し、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=9\%$ 付近でピークを迎えている。この供試体の最大軸差応力は $q_{\max}=193.5\text{kPa}$ であった。図 5-2-12 は、供試体の上部と下部に設置した LDT80 により測定した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。ピークに達するまでの剛性は供試体の上部と下部を比較すると下部の方がやや大きい、その差は小さい。 $0.2E_c$ 供試体上部と下部との乾燥密度の違いが小さく非一様性が小さい事を考慮すると $1.0E_c$ 供試体に比べて剛性の上部と下部の差が小さい事は整合する。体積ひずみは、載荷初期は上部と下部ともに収縮傾向を示し、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.2\%\sim 0.4\%$ 付近で膨張傾向に転じるが、その傾向は緩やかである。最大体積圧縮ひずみは供試体の上部が下部に比べてやや大きい。これも供試体上部と下部の乾燥密度の大小と整合する。

図 5-2-13 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\sim 0.01\%$ 範囲の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。等方圧密後の載荷初期のヤング率は上部で $(E_0)_{\text{upper}}=110.5\text{MPa}$ 、下部で $(E_0)_{\text{lower}}=130.4\text{MPa}$ であり、やや下部が大きい。また、体積ひずみは収縮傾向を示している。

図 5-2-14 は、供試体に設置した LDT により測定した平均的な鉛直ひずみと、上端部、上部、下部及び下端部それぞれの局所的な鉛直ひずみの関係を示す。また、体積ひずみと鉛直ひずみの関係も併せて示している。軸差応力～鉛直ひずみ関係について、供試体平均は先にも示したように供試体の上部と下部との間に位置する。また、供試体下端部は下部と同等の剛性を示すが、下端部の方がやや小さい。また、上端部は上部に比較的近いが上端部の方が小さい。上部と下部、平均が類似傾向を示し、上端部と下端部はベディングエラーの影響でやや小さい剛性であった。体積ひずみ～鉛直ひずみ関係は、軸差応力～鉛直ひずみのピーク強度までの剛性の大小とほぼ等しく、下部、平均、上部、下端部、上端部の順番に早くから膨張挙動を示した。

図 5-2-15 は、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、補助線として 1:-1 関係を破線で示す。載荷初期は鉛直ひずみが水平ひずみより大きく、補助線から離れるように推移するが、その傾きは鉛直ひずみの進行とともに緩やかとなった。上部と下部の違いについては、同じ鉛直ひずみで、上部より下部の水平ひずみがやや大きい、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.6\%$ 程度以降ではそれ以上の大きな水平ひずみの差は生じない。

図 5-2-16 は、接線ヤング率～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ヤング率は低下するが、載荷初期から $\varepsilon_v=0.02\%$ 付近までは下部の接線ヤング率が上部よりやや大きい。それ以降はほぼ同等の値に収束しながら低下している。

図 5-2-17 は、 $E_{\tan}/E_0 \sim q/q_{\max}$ 関係を示す。 E_{\tan}/E_0 は、 $q/q_{\max}=0\sim 0.2$ までの間に上部と下部ともに著しく低下し、 $q/q_{\max}=0.2\sim 1.0$ 付近までかけて緩やかに低下する傾向であった。乱れのある堆積軟岩のように $q/q_{\max}=0.1$ 付近での著しく低い値は確認されなかった。

図 5-2-18 は、接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\sim 0.004\%$ 付近までの接線ポアソン比は $\nu_{\tan}=0.2$ 程度であるが上部と下部で異なり、弾性的挙動を示している。 $\varepsilon_v=0.004\%$ 付近以降は鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ポアソン比は増加している。 $0.2E_c$ の供試体は先に示した $1.0E_c$ の供試体と比べて上部と下部の変形挙動の差が小さい。これはこの供試体の非一様性の小ささを示唆している。

(3) 締固めエネルギー $4.5E_c$ で作製した乾燥密度 $\rho_d=1.746\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=15.7\%$ 、飽和度 $S_r=78.3\%$ の供試体の試験結果

図 5-2-19 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみと LDT による供試体端面を除く供試体の平均の鉛直ひずみを示している。EDT と LDT の応力～ひずみ関係において、鉛直ひずみの差は最大で 0.2% 程度であった。EDT で測定した応力～ひずみ関係では鉛直ひずみの増加とともに軸差応力は緩やかに増加し、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=6\%$ 付近でピークを迎えている。この供試体の最大軸差応力は $q_{\max}=237.2\text{kPa}$ であった。図 5-2-20 は、供試体の上部と下部に設置した LDT80 により測定した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。ピークに達するまでの剛性は供試体の上部と下部を比較すると下部の方が大きい。体積ひずみは、载荷初期は上部と下部ともに収縮傾向を示し、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%\sim 0.7\%$ 付近で膨張傾向に転じるがその傾向は緩やかである。最大体積圧縮ひずみは供試体の上部が下部に比べてやや大きい。これも供試体上部と下部の乾燥密度の大小と整合する。当供試体は先に示した二つの供試体に比べて飽和度が比較的高く、剛性や最大圧縮体積ひずみの比較や供試体上部と下部の剛性の差の大きさについては、飽和度も考慮した評価が必要であることから、詳細な比較は後で示す。

図 5-2-21 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\sim 0.01\%$ 範囲の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。等方圧密後の载荷初期のヤング率は上部で $(E_0)_{\text{upper}}=104.2\text{MPa}$ 、下部で $(E_0)_{\text{lower}}=147.7\text{MPa}$ であり、下部が大きい。また、体積ひずみは収縮傾向を示している。

図 5-2-22 は、供試体に設置した LDT により測定した平均的な鉛直ひずみと、上端部、上部、下部及び下端部それぞれの局所的な鉛直ひずみの関係を示す。また、体積ひずみと鉛直ひずみの関係も併せて示している。軸差応力～鉛直ひずみ関係について、供試体平均の応力～ひずみ関係は供試体の上部と下部との間に位置するが、剛性の低い上部に近い。また、供試体下端部は下部と同等の剛性を示すが、下端部の方がやや剛性が小さい。また、上端部は上部に比較的近いが剛性は上部より上端部の方が小さい。上部と下部に比べて上端部と下端部はベディングエラーの影響でやや小さい剛性であった。体積ひずみ～鉛直ひずみ関係は、軸差応力～鉛直ひずみのピーク強度までの剛性の大小とほぼ整合しており、下部、下端部、平均、上部、上端部の順番に早くから膨張挙動を示した。

図 5-2-23 は、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、補助線として 1:-1 関係を破線で示す。载荷初期は鉛直ひずみが水平ひずみより大きく、補助線から離れるように推移するが、その傾きは鉛直ひずみの進行とともに緩やかとなった。上部の鉛直ひずみは下部に比べてやや大きく、鉛直ひずみの進行とともに上部と下部の鉛直ひずみの差が増加している。

図 5-2-24 は、接線ヤング率～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ヤング率は低下するが、载荷初期から $\varepsilon_v=0.02\%$ 付近までは下部の接線ヤング率が上部よりやや大きい。それ以降はほぼ同等の値に収束しながら低下している。

図 5-2-25 は、 $E_{\text{tan}}/E_0 \sim q/q_{\max}$ 関係を示す。 E_{tan}/E_0 は、 $q/q_{\max}=0\sim 0.2$ までの間に上部と下部ともに著しく低下し、 $q/q_{\max}=0.2\sim 1.0$ 付近にかけて緩やかに低下する傾向であった。乱れのある堆積軟岩のように $q/q_{\max}=0.1$ 付近での著しく低い値は確認されなかった。

図 5-2-26 は、接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\sim 0.1\%$ 付近までの供試体上部の接線ポアソン比は $\nu_{\text{tan}}=0.2$ 程度、供試体下部の接線ポアソン比は $\nu_{\text{tan}}=0.4$ 程度で上部と下部で異なるがほぼ一定値を示した。 $\varepsilon_v=0.1\%$ 付近以降は鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ポアソン比は増加している。

5.2.2 室内締固め供試体の最大軸差応力～乾燥密度関係に与える飽和度の影響

図 5-2-27 は、各供試体の最大軸差応力～局所乾燥密度関係を示す。同じ供試体の上部と下部で対となる局所乾燥密度の二つのデータを破線で結んでいる。上部と下部をそれぞれ飽和度別のパラメーターとして記号に示している。全体の傾向として局所乾燥密度が増加すると最大軸差応力が増加しているが、ばらつきが生じている。このばらつき

には供試体の非一様性の影響と飽和度の影響が含まれるが、初めに供試体の非一様性について考察する。図中で締固めエネルギー別に破線でグループ分けをしているが、締固めエネルギーが大きい程、上部と下部の乾燥密度の差が大きく、全体のばらつきに影響を与えている事がわかる。最大軸差応力は供試体の破壊性状と深く関連する為、供試体の非一様性とその破壊性状について考察する。

図 5-2-28～30 には先に示した三軸圧縮試験後の供試体の破壊性状を示す。図 5-2-28 は、締固めエネルギー $1.0E_c$ で平均飽和度 $S_r=43.9\%$ で比較的乾燥側の供試体である。三軸圧縮試験後は供試体の膨張破壊が確認されたが、最も膨張しているのは供試体のやや上部であった。これは、供試体の上部が下部より乾燥密度がやや小さく、非一様であるため上部が先行して膨張破壊した為であると考ええる。次に、図 5-2-29 は、締固めエネルギー $0.2E_c$ 、平均飽和度 $S_r=33.8\%$ の比較的乾燥側の供試体である。三軸圧縮試験後は供試体の膨張破壊が確認されたが、膨張しているのは供試体の中央付近であった。このケースは締固めエネルギーが小さい為、供試体上部と下部の乾燥密度の差が小さく、非一様性が低い。これにより、供試体上部と下部に違いが現れなかったと考える。図 5-2-30 は、締固めエネルギー $4.5E_c$ で平均飽和度 $S_r=78.3\%$ で最適飽和度及び同じ締固めエネルギーの最適含水比に対しても比較的湿潤側の供試体である。三軸圧縮試験後は供試体の膨張破壊が確認されたが、最も膨張していたのは供試体の中央よりやや上部であった。これは、供試体の上部が下部より乾燥密度がやや小さく、非一様であるため上部が先行して膨張破壊したと考える。この供試体は湿潤側であることから乾燥側供試体の例として、図 5-2-31 に締固めエネルギー $4.5E_c$ 、平均飽和度 $S_r=44.5\%$ で比較的乾燥側供試体の破壊性状を示す。三軸圧縮試験後は供試体の膨張破壊が確認されたが、最も膨張しているのは供試体の上部であった。これは、供試体の上部が下部より乾燥密度が小さく、非一様であるため上部が先行して膨張破壊したと考える。

以上より、室内締固め供試体の最大軸差応力は飽和度や締固めエネルギーの影響がある事、先行して破壊するのは局所乾燥密度の小さい供試体上部である事が確認された。すなわち、最大軸差応力の評価には室内締固め供試体の非一様性を考慮し、上部の局所乾燥密度を適用する事で供試体の非一様性の影響を低減する事が出来る。図 4-3-9 の説明では、供試体それぞれの平均乾燥密度に対する上部と下部の乾燥密度の差の割合は、締固めエネルギー $4.5E_c$ の供試体になると 1.1% 程度と大きくなる事を述べた。図 5-2-27 から明らかであるが同じ最大軸差応力に対して異なる 2 つの局所乾燥密度が生じる事を踏まえると、供試体それぞれの平均乾燥密度に対する上部と下部の乾燥密度の差の割合が 1.0% 以上(締固めエネルギー $4.5E_c$ 以上)であれば、供試体の非一様性の影響検討を実施する事が望ましい。

図 5-2-32 は、最大軸差応力～供試体上部の局所乾燥密度関係を示す。図 5-2-27 で示した最大軸差応力～局所乾燥密度の関係から供試体の非一様性の影響を排除する事が出来た。次に、ばらつきを与える飽和度の影響について検討する。図の記号は飽和度別のパラメーターにしているが、さらに飽和度を $S_r=15\% \sim 30\%$ 、 $S_r=30\% \sim 50\%$ 、 $S_r=60\% \sim 80\%$ の 3 グループに色分けして示した。全体的に同じ乾燥密度では飽和度の低い方が飽和度の高い方に比べて最大軸差応力が大きい傾向を示している。これは、須藤ら(2013)が示した締固め時の飽和度が強度特性に与える影響の傾向と整合する。

図 5-2-33 は、最大軸差応力～供試体上部の局所飽和度関係を示す。また、乾燥密度を $\rho_d=1.50\text{g/cm}^3 \sim 1.60\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3 \sim 1.70\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.70\text{g/cm}^3 \sim 1.80\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.80\text{g/cm}^3 \sim 1.85\text{g/cm}^3$ の 4 グループに色分けして示した。全体的に飽和度が高いと最大軸差応力が緩やかに低下するような傾向を示すが、ばらつきが大きい。このばらつきは乾燥密度の影響であり、同じ飽和度でも乾燥密度が大きくなると最大軸差応力も大きくなっている。

図 5-2-34 は、最大軸差応力～供試体上部の含水比関係を示す。先と同様に乾燥密度を $\rho_d=1.50\text{g/cm}^3 \sim 1.60\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3 \sim 1.70\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.70\text{g/cm}^3 \sim 1.80\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.80\text{g/cm}^3 \sim 1.85\text{g/cm}^3$ の 4 グループに色分けして示した。全体的に含水比が高いと最大軸差応力が緩やかに低下するような傾向を示し、多少のばらつきは認められるが、最

大軸差応力～局所飽和度関係に比べてばらつきの程度はやや小さい。このばらつきは同じ乾燥密度の影響であり、同じ含水比でも乾燥密度が大きくなると最大軸差応力も大きくなっている。初期サクシオン～含水比関係は乾燥密度の影響がほとんど確認されなかったことから、供試体の残留有効応力が乾燥密度に関わらず各含水比で一定と考える事が出来る。従って、最大軸差応力～含水比関係に見られる同じ含水比における最大軸差応力の差は、残留有効応力の影響が含まれない乾燥密度に依存した骨格構造の強さによるものである事が示された。

図 5-2-35 は、最大軸差応力～乾燥密度～飽和度関係を示す。最大軸差応力は供試体の乾燥密度と飽和度の影響があり、最大軸差応力を適切に評価するには乾燥密度と飽和度を適切に考慮する必要がある。

Tatsuoka, Correia(2018)は、従来の締固め管理に用いる強度・剛性に関するパラメーターを、含水比で整理するより飽和度で整理する方が適切に土質力学で説明する事が出来ることを示し、乾燥密度とともに飽和度を変数とした関数として、CBR 値を乾燥密度の関数 g_{CBR} と飽和度の関数 f_{CBR} の積とした経験式 2-4-1、式 2-4-2 を提案している。さらに、飽和度の関数 $f_{CBR}(S_r)$ を未定係数として式 2-4-3 のようにフィッティングして得ている。本研究では三軸試験により得られた最大軸差応力、局所乾燥密度、局所飽和度を Tatsuoka, Correia(2018)の提案式に基づいて次のように整理する事とした。

最大軸差応力を飽和度の関数 f_{qmax} と乾燥密度の関数 g_{qmax} の変数分離形で表し、

$$q_{max} = f_{qmax}(S_r) \cdot g_{qmax}(\rho_d) \quad (5-2-1)$$

乾燥密度の関数 g_{qmax} を経験式から、次式で表す。

$$g_{qmax}(\rho_d) = (\rho_d / \rho_w - a)^b \quad (5-2-2)$$

ここで、水の密度は $\rho_w=1.0 \text{ g/cm}^3$ である。 a 、 b は土質材料に応じて異なる係数である。

上式より、飽和度の関数 f_{qmax} は次のように表す事が出来る。

$$f_{qmax}(S_r) = q_{max} / (\rho_d / \rho_w - a)^b \quad (5-2-3)$$

飽和度の関数 f_{qmax} ～飽和度関係において、 $a=0$ を仮定し、 b を $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ 、の四種類として、最も乾燥密度の影響の少ない b を探索する。

図 5-2-36～図 5-2-39 は、飽和度の関数 f_{qmax} ～飽和度関係を示しており、 b が $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ と異なる。 $b=1.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が大きいと飽和度の関数 f_{qmax} も大きい。 $b=6.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度の影響が小さいがやや含まれている。 $b=9.0$ ではこれらの中で最も乾燥密度の影響が小さい。 $b=16.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が小さいと飽和度の関数 f_{qmax} が大きく、乾燥密度の影響が多く含まれている。従って、本研究では乾燥密度の関数 g_{qmax} に用いる定数に $a=0$ 、 $b=9.0$ を適用する事とした。最大軸差応力の飽和度の関数 f_{qmax} ～飽和度関係から乾燥密度の影響を排除すると、飽和度が低い場合は最大軸差応力の飽和度の関数 f_{qmax} は大きく、飽和度が高い場合は最大軸差応力の飽和度の関数 f_{qmax} は小さくなる事が明確に示された。

以上より、非一様供試体の最大軸差応力～乾燥密度関係には供試体の飽和度の影響が含まれるが、Tatsuoka, Correia(2018)の提案式に基づいてその影響を考慮し、最大軸差応力は乾燥密度に相関がある事を示した。一方で、測定した含水比の範囲において、最大軸差応力～乾燥密度関係に含まれる含水比の影響を考慮した方が、ばらつきはやや少なくなる事を確認した。含水比の影響を考慮した最大軸差応力～乾燥密度関係の推定検討は、飽和度

の影響検討に加えて第7章に示す。

5.2.3 室内締固め供試体の初期ヤング率～乾燥密度関係に与える飽和度の影響

図 5-2-40 は、各供試体の初期ヤング率～局所乾燥密度関係を示す。同じ供試体の上部と下部で対となる局所乾燥密度の二つのデータを破線で結んでいる。上部と下部をそれぞれ飽和度別のパラメーターとして記号に示している。また、飽和度を $S_r=15\%\sim30\%$ 、 $S_r=30\%\sim55\%$ 、 $S_r=60\%\sim80\%$ の 3 グループに色分けして示した。全体の傾向として局所乾燥密度が増加すると初期ヤング率が増加しているがばらつきが生じている。このばらつきには飽和度の影響が含まれていることから、飽和度の影響に着目して考察する。

図 5-2-41 は、初期ヤング率～局所飽和度関係を示す。また、乾燥密度を $\rho_d=1.50\text{g/cm}^3\sim1.60\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3\sim1.70\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.70\text{g/cm}^3\sim1.80\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.80\text{g/cm}^3\sim1.85\text{g/cm}^3$ の 4 グループに色分けして示した。全体的に飽和度が高いと初期ヤング率が緩やかに低下する傾向を示すが、ばらつきが大きい。このばらつきには乾燥密度の影響が含まれ、同じ飽和度でも乾燥密度が大きくなると多少の例外はあるが初期ヤング率も大きくなっている。これは須藤ら(2013)が示した締固め時の飽和度が変形特性に与える影響の傾向と整合する。また、乾燥密度の小さい上部の方が下部より大きい初期ヤング率を示すケースも認められる。

図 5-2-42 は、初期ヤング率～含水比関係を示す。先と同様に乾燥密度を $\rho_d=1.50\text{g/cm}^3\sim1.60\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3\sim1.70\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.70\text{g/cm}^3\sim1.80\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.80\text{g/cm}^3\sim1.85\text{g/cm}^3$ の 4 グループに色分けして示した。全体的に含水比が高いと初期ヤング率が緩やかに低下するような傾向を示し、多少のばらつきは認められるが、初期ヤング率～局所飽和度関係に比べてばらつきの程度はやや小さい。このばらつきは同じく乾燥密度の影響であり、同じ含水比でも乾燥密度が大きくなると初期ヤング率も大きくなっている。初期サクシオン～含水比関係は乾燥密度の影響がほとんど確認されなかったことから、供試体の残留有効応力が乾燥密度に関わらず各含水比で一定と考える事ができる。従って、初期ヤング率～含水比関係に見られる同じ含水比における初期ヤング率の差は、残留有効応力の影響が含まれない乾燥密度に依存した骨格構造の硬さによるものである事が示された。

図 5-2-43 は、初期ヤング率～乾燥密度～飽和度関係を示す。初期ヤング率は供試体の乾燥密度と飽和度の影響があり、初期ヤング率を適切に評価するには乾燥密度と飽和度の影響を適切に考慮する必要がある。

龍岡、橋本(2020)は、従来の締固め管理に用いる剛性に関するパラメーターを、含水比で整理するより飽和度で整理する方が適切に土質力学で説明する事が出来ることを示し、乾燥密度とともに飽和度を変数とした関数が地盤反力係数 K_{30} を乾燥密度の関数 g_{K30} と飽和度の関数 f_{K30} の積とした経験式 2-4-4、式 2-4-5 を提案している。さらに、飽和度の関数 $f_{K30}(S_r)$ を未定係数として式 2-4-6 のようにフィッティングして得ている。本研究では三軸試験により得られた初期ヤング率、局所乾燥密度、局所飽和度を龍岡、橋本(2020)の提案式に基づいて次のように整理する事とした。

初期ヤング率を飽和度の関数 f_{E0} と乾燥密度の関数 g_{E0} の変数分離形で表し、

$$E_0 = f_{E0}(S_r) \cdot g_{E0}(\rho_d) \quad (5-2-4)$$

乾燥密度の関数 g_{E0} を経験式から、次式で表す。

$$g_{E0}(\rho_d) = (\rho_d/\rho_w - a)^b \quad (5-2-5)$$

ここで、 $\rho_w=1.0\text{ g/cm}^3$ である。 a 、 b は土質材料に応じて異なる係数である。

上式より、飽和度の関数 f_{E0} は次のように表す事が出来る。

$$f_{E0}(S_r) = E_0 / (\rho_d / \rho_w - a)^b \quad (5-2-6)$$

Hardin, Richart(1963)は様々な砂質系材料を中心に供試体の間隙比とせん断波速度の関係を整理しており、砂質土供試体のせん断剛性 G は供試体の間隙比 e によって異なる事から、測定した材料定数 A を間隙比に応じて補正する為の間隙比関数 $f(e)$ を粒子形状別に次のように提案している。

$$G = A \cdot f(e) \quad (5-2-7)$$

$$f(e) = \frac{(2.17-e)^2}{1+e} \quad (\text{丸い砂}) \quad (5-2-8)$$

$$f(e) = \frac{(2.97-e)^2}{1+e} \quad (\text{角張った砂}) \quad (5-2-9)$$

式 5-2-7 を本研究ではヤング率を求める式として適用する。また角張った砂の式 5-2-9 を用いて土質材料に応じて異なる係数 a を検討する。角張った砂の式は、間隙比 $e=2.97$ の時にヤング率が $E=0$ となる事から、この時の乾燥密度は式 4-5-1 より、 $\rho_d=0.677 \text{ g/cm}^3$ を得る。

これを用いて飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係において、 $a=0.677$ として b を $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ 、の四種類として、最も乾燥密度の影響の少ない b を探索する。

図 5-2-44～図 5-2-47 は、飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係を示しており、 b が $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ と異なる。 $b=1.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が大きいと飽和度の関数 f_{E0} も大きい。 $b=6.0$ ではこれらの中で最も乾燥密度の影響が小さい。 $b=9.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度の影響が小さいがやや含まれている。 $b=16.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が小さいと飽和度の関数 f_{E0} が大きく、乾燥密度の影響が多く含まれている。従って、本研究では乾燥密度の関数 g_{E0} に用いる定数に $a=0.677$ 、 $b=6.0$ を適用する事で、初期ヤング率の飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係から乾燥密度の影響を排除すると、飽和度が低い場合は初期ヤング率の飽和度の関数 f_{E0} は大きく、飽和度が高い場合は初期ヤング率の飽和度の関数 f_{E0} は小さくなる事が明確に示された。

以上より、非一様供試体の初期ヤング率～乾燥密度関係には供試体の飽和度の影響が含まれるが、龍岡、橋本(2020)の提案式に基づいてその影響を考慮し、初期ヤング率は乾燥密度に相関がある事を示した。一方で、測定した含水比の範囲において、初期ヤング率～乾燥密度関係に含まれる含水比の影響を考慮した方が、ばらつきはやや少なくなる事を確認し、含水比をパラメーターに用いた整理の方が高精度な初期ヤング率～乾燥密度関係を表現出来る可能性が示唆された。含水比の影響を考慮した初期ヤング率～乾燥密度関係の推定検討は、飽和度の影響検討に加えて第7章に示す。

5.2.4 室内締固め供試体の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係に与える飽和度の影響

図 5-2-48 は、各供試体の割線ヤング率 E_{50} ～局所乾燥密度関係を示す。同じ供試体の上部と下部で対となる局所乾燥密度の二つのデータを破線で結んでいる。上部と下部をそれぞれ飽和度別のパラメーターとして記号に示している。また、飽和度を $S_r=15\% \sim 30\%$ 、 $S_r=30\% \sim 55\%$ 、 $S_r=60\% \sim 80\%$ の 3 グループに色分けして示した。全体の傾向

として局所乾燥密度が増加すると割線ヤング率 E_{50} が増加しているが、ばらつきが生じている。そこで、ここでは飽和度の影響に着目して考察する。初期ヤング率と異なる点は、割線ヤング率 E_{50} は上部と下部の差が比較的大きい。

図 5-2-49 は、割線ヤング率 E_{50} ～局所飽和度関係を示す。また、乾燥密度を $\rho_d=1.50\text{g/cm}^3 \sim 1.60\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3 \sim 1.70\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.70\text{g/cm}^3 \sim 1.80\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.80\text{g/cm}^3 \sim 1.85\text{g/cm}^3$ の 4 グループに色分けして示した。全体的に飽和度が高いと割線ヤング率 E_{50} が緩やかに低下するような傾向を示すが、ばらつきが大きい。このばらつきは乾燥密度の影響であり、同じ飽和度でも乾燥密度が大きくなると割線ヤング率 E_{50} も大きくなっている。

図 5-2-50 は、割線ヤング率 E_{50} ～含水比関係を示す。先と同様に乾燥密度を $\rho_d=1.50\text{g/cm}^3 \sim 1.60\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3 \sim 1.70\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.70\text{g/cm}^3 \sim 1.80\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.80\text{g/cm}^3 \sim 1.85\text{g/cm}^3$ の 4 グループに色分けして示した。全体的に含水比が高いと割線ヤング率 E_{50} が緩やかに低下するような傾向を示し、多少のばらつきは認められるが、割線ヤング率 E_{50} ～局所飽和度関係に比べてばらつきの程度はやや小さい。このばらつきは同じ乾燥密度の影響であり、同じ含水比でも乾燥密度が大きくなると割線ヤング率 E_{50} は大きくなっている。初期サクシオン～含水比関係は乾燥密度の影響がほとんど確認されなかったことから、供試体の残留有効応力は乾燥密度に関わらず各含水比で一定と考える事ができる。従って、割線ヤング率 E_{50} ～含水比関係に見られる同じ含水比における割線ヤング率 E_{50} の差は、残留有効応力の影響が含まれない乾燥密度に依存した骨格構造の硬さによるものと考えられる。

図 5-2-51 は、割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度～飽和度関係を示す。初期ヤング率と同様に、割線ヤング率 E_{50} は供試体の乾燥密度と飽和度の影響があり、割線ヤング率を適切に評価するには乾燥密度と飽和度の影響を適切に考慮する必要がある。

三軸試験により得られた割線ヤング率 E_{50} 、局所乾燥密度、局所飽和度を龍岡、橋本(2020)の提案式に基づいて次のように整理する事とした。

割線ヤング率 E_{50} を飽和度の関数 f_{E50} と乾燥密度の関数 g_{E50} の変数分離形で表し、

$$E_{50} = f_{E50}(S_r) \cdot g_{E50}(\rho_d) \quad (5-2-10)$$

乾燥密度の関数 g_{E50} を経験式から、次式で表す。

$$g_{E50}(\rho_d) = (\rho_d/\rho_w - a)^b \quad (5-2-11)$$

ここで、水の密度は $\rho_w=1.0 \text{ g/cm}^3$ である。 a 、 b は土質材料に応じて異なる係数である。

上式より、飽和度の関数 f_{E50} は次のように表す事が出来る。

$$f_{E50}(S_r) = E_{50}/(\rho_d/\rho_w - a)^b \quad (5-2-12)$$

初期ヤング率と同様に、飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係において、 $a=0.677$ として b を $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ の四種類として、最も乾燥密度の影響の少ない b を探索する。

図 5-2-52～図 5-2-55 は、飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係を示しており、 b が $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ と異なる。 $b=1.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が大きいと飽和度の関数 f_{E50} も大きい。 $b=6.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度の影響が最も小さい。 $b=9.0$ では乾燥密度の影響は小さいがやや含まれている。 $b=16.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が小さいと飽和度の関数 f_{E50} が大きく、乾燥密度の影響が多く含まれている。従って、本研究では乾燥密度の関数

g_{E50} に用いる定数に $a=0$ 、 $b=9.0$ を適用する事で、割線ヤング率 E_{50} の飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係から乾燥密度の影響を排除すると、飽和度が低い場合は割線ヤング率 E_{50} の飽和度の関数 f_{E50} は大きく、飽和度が高い場合は割線ヤング率 E_{50} の飽和度の関数 f_{E50} は小さくなる事が明確に示された。

以上より、非一様供試体の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係には供試体の飽和度の影響が含まれるが、龍岡、橋本(2020)の提案式に基づいてその影響を考慮し、割線ヤング率 E_{50} は乾燥密度に相関がある事を示した。一方で、測定した含水比の範囲において、割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係に含まれる含水比の影響を考慮した方が、ばらつきはやや少なくなる事を確認し、含水比をパラメーターに用いた整理の方が高精度な割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係を表現出来る可能性が示唆された。含水比の影響を考慮した割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係の推定検討は、飽和度の影響検討に加えて第7章に示す。

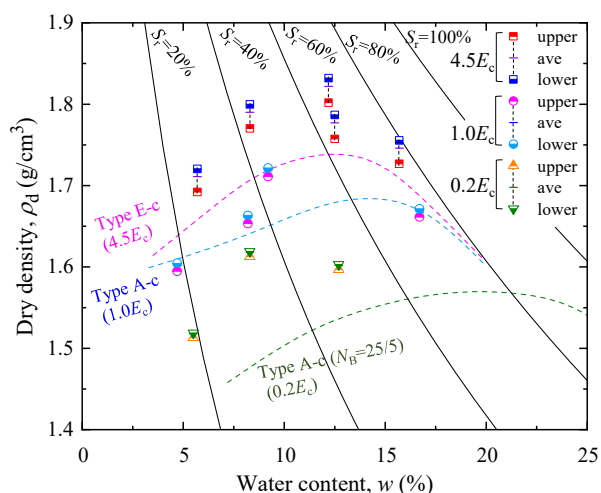


図 5-2-1 三軸試験供試体の乾燥密度～含水比関係

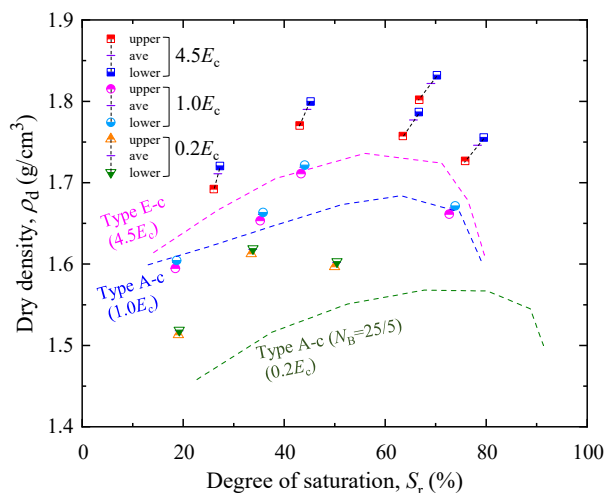


図 5-2-2 三軸試験供試体の乾燥密度～飽和度関係

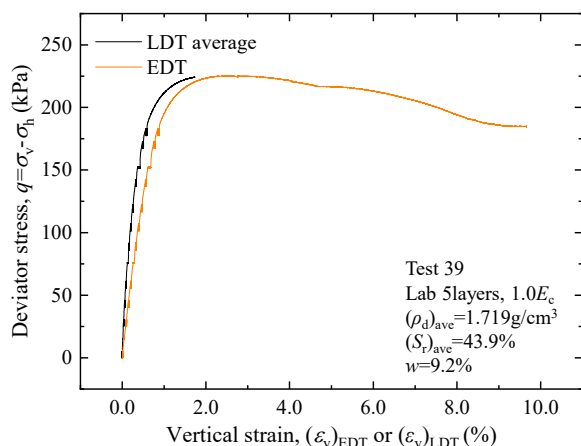


図 5-2-3 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

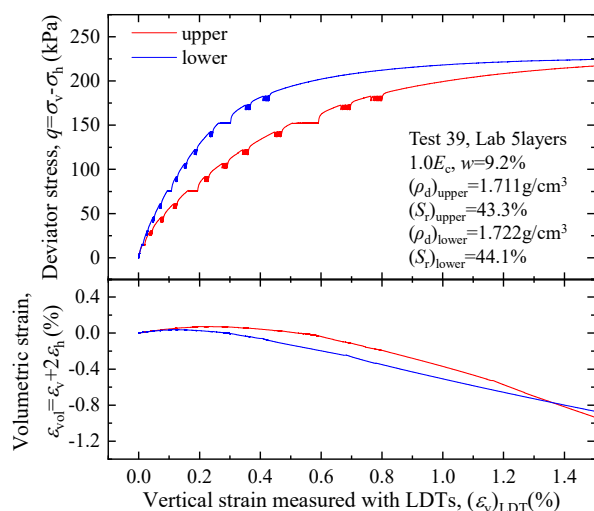


図 5-2-4 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

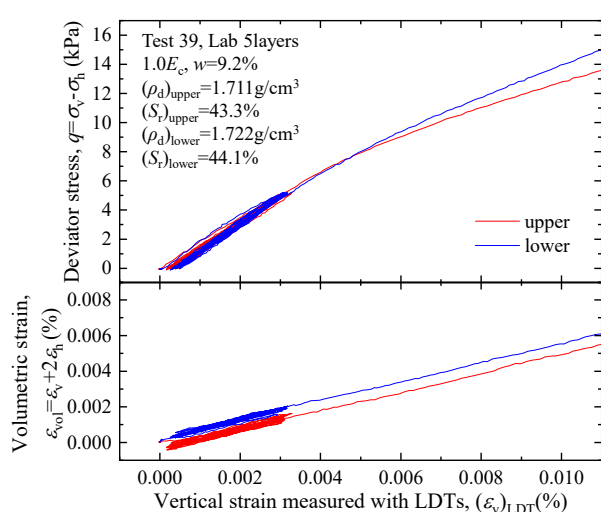


図 5-2-5 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

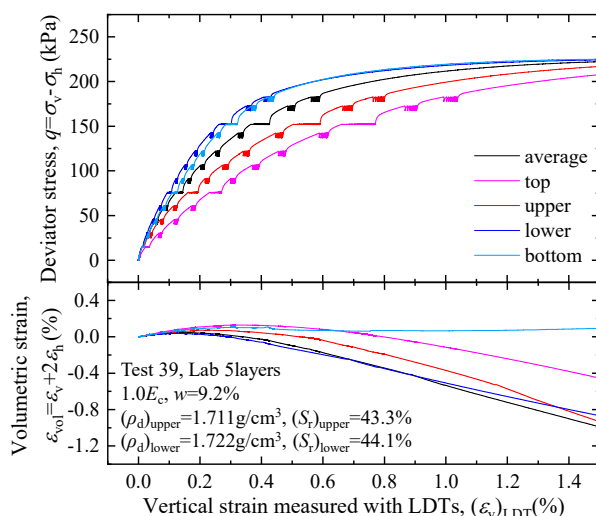


図 5-2-6 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 平均、上端部、上部、下部、下端部)

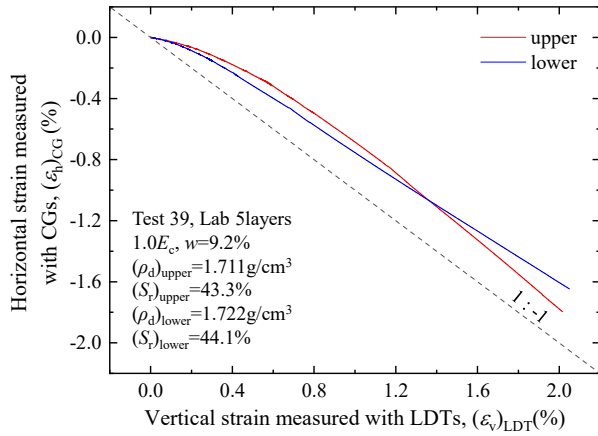


図 5-2-7 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

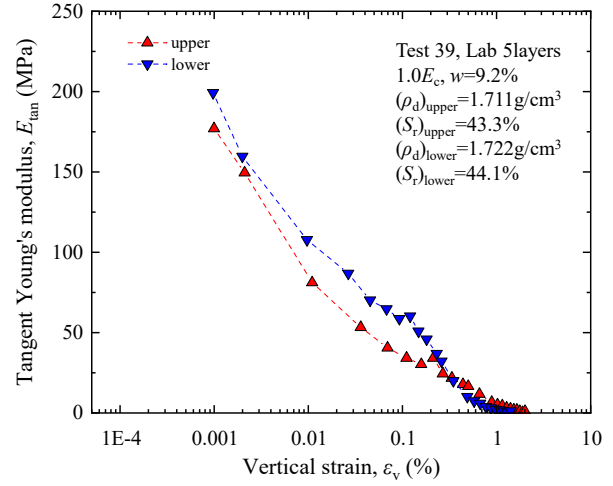


図 5-2-8 接線ヤング率～鉛直ひずみ関係(片対数)

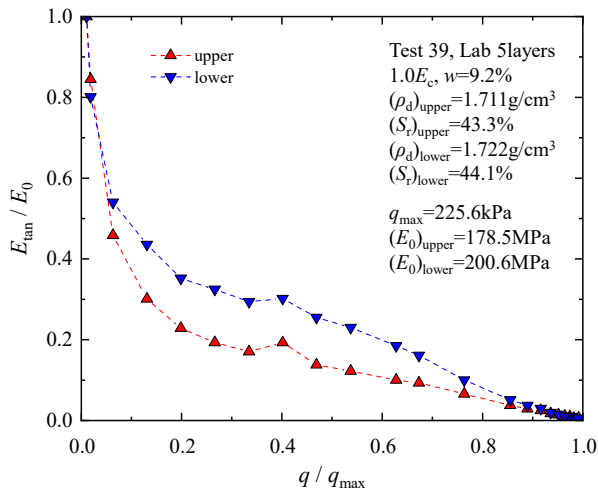


図 5-2-9 $E_{tan} / E_0 \sim q / q_{max}$ 関係

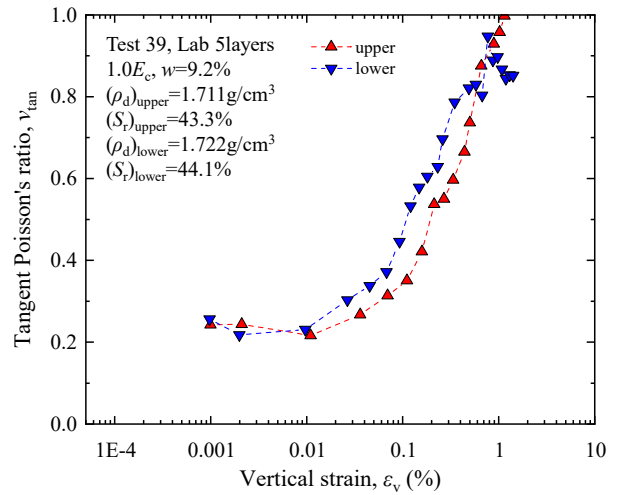


図 5-2-10 接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係(片対数)

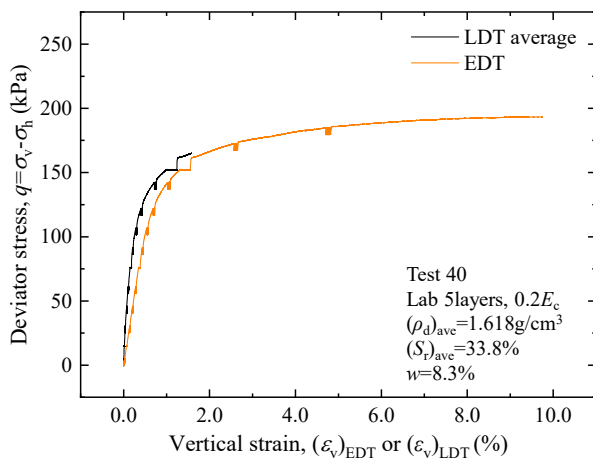


図 5-2-11 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

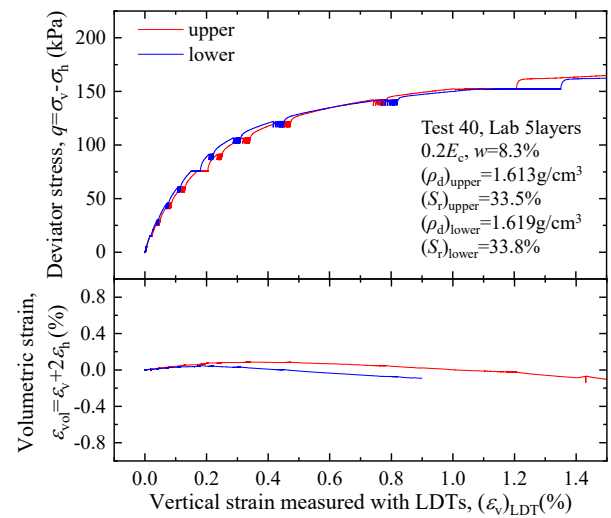


図 5-2-12 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

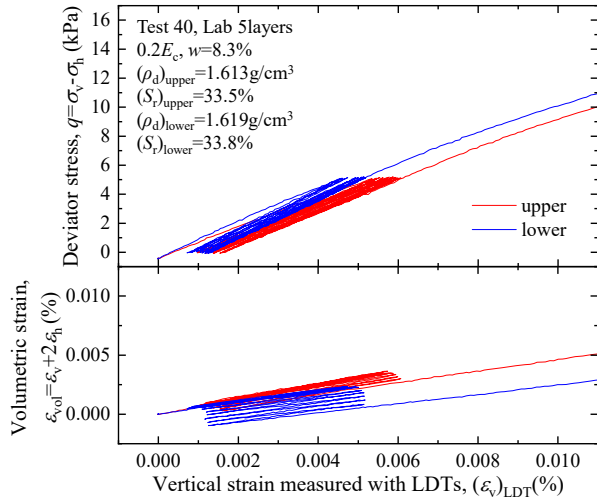


図 5-2-13 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

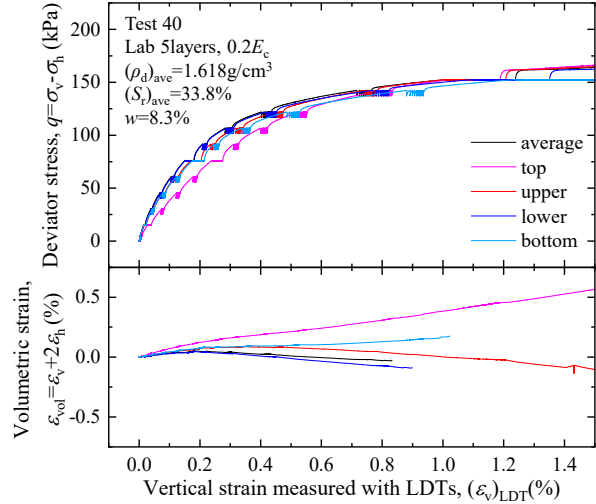


図 5-2-14 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 平均、上端部、上部、下部、下端部)

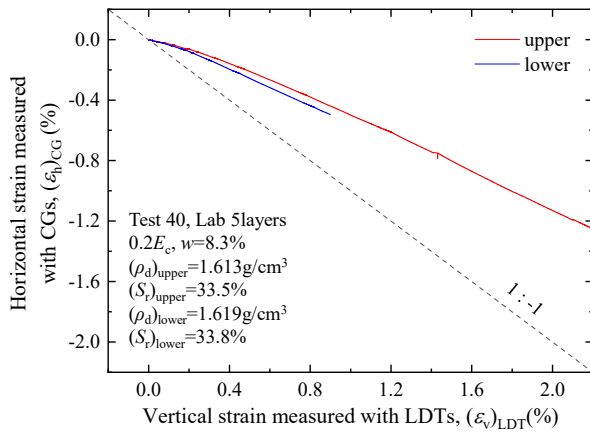


図 5-2-15 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

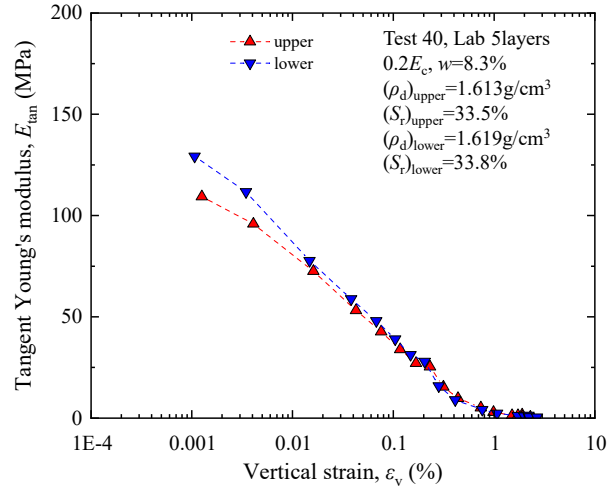


図 5-2-16 接線ヤング率～鉛直ひずみ関係(片対数)

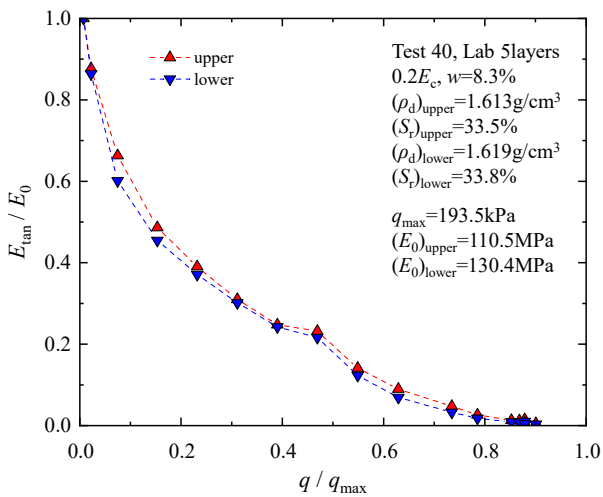


図 5-2-17 $E_{tan} / E_0 \sim q / q_{max}$ 関係

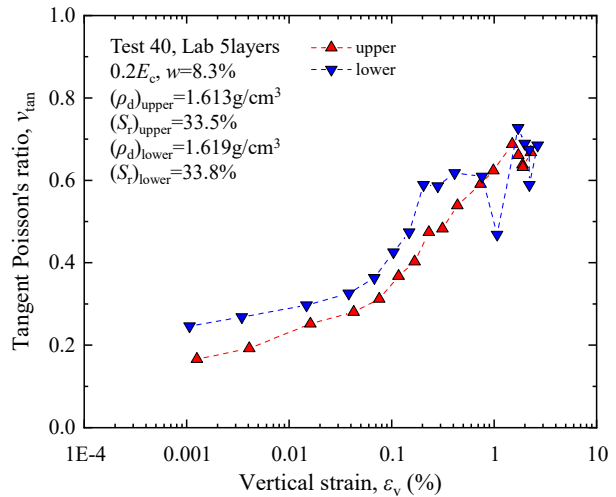


図 5-2-18 接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係(片対数)

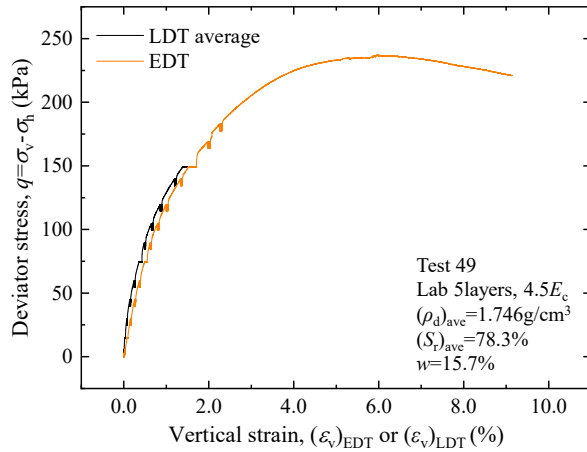


図 5-2-19 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

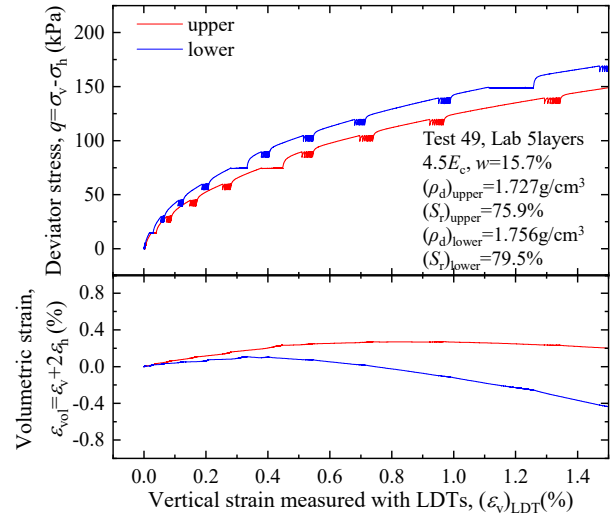


図 5-2-20 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

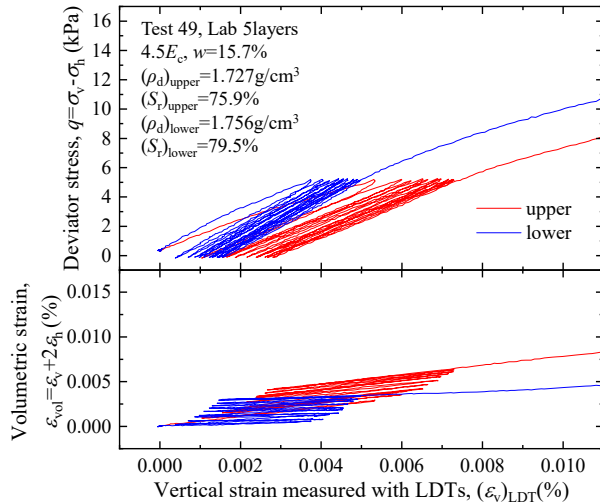


図 5-2-21 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

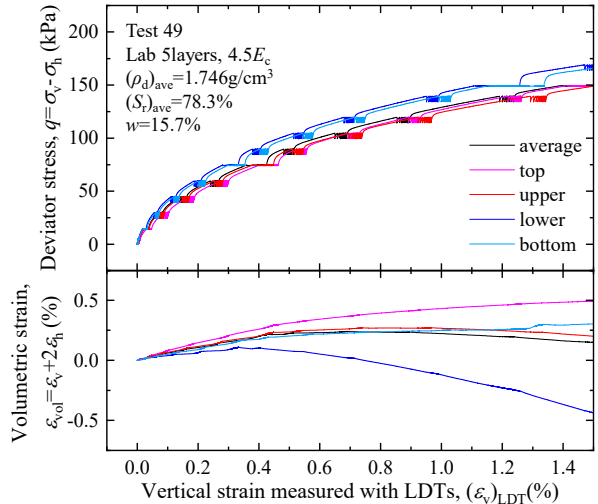


図 5-2-22 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 平均、上端部、上部、下部、下端部)

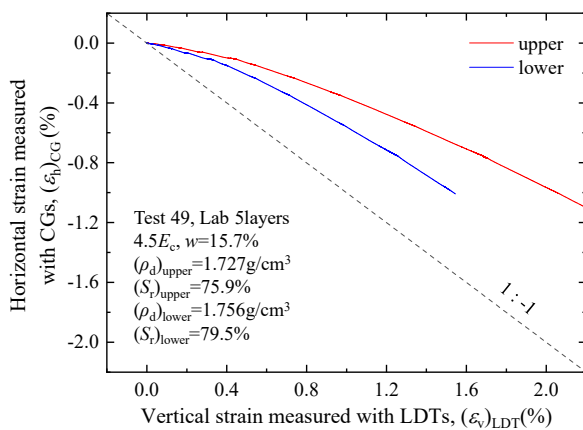


図 5-2-23 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

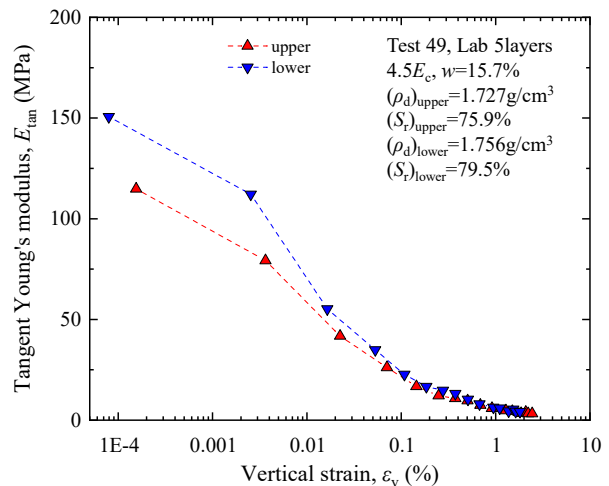


図 5-2-24 接線ヤング率～鉛直ひずみ関係(片対数)

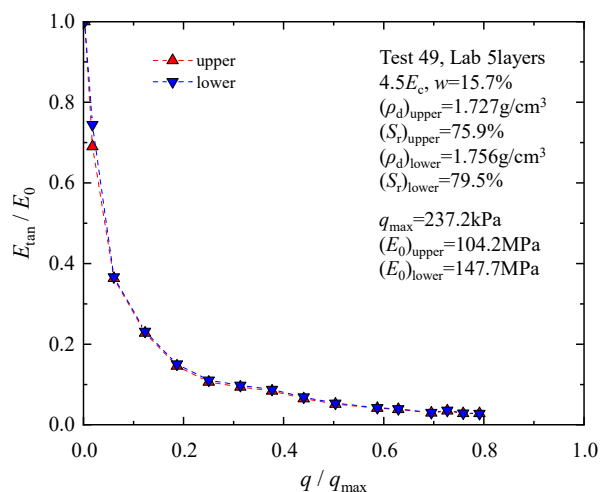


図 5-2-25 $E_{\text{tan}} / E_0 \sim q / q_{\text{max}}$ 関係

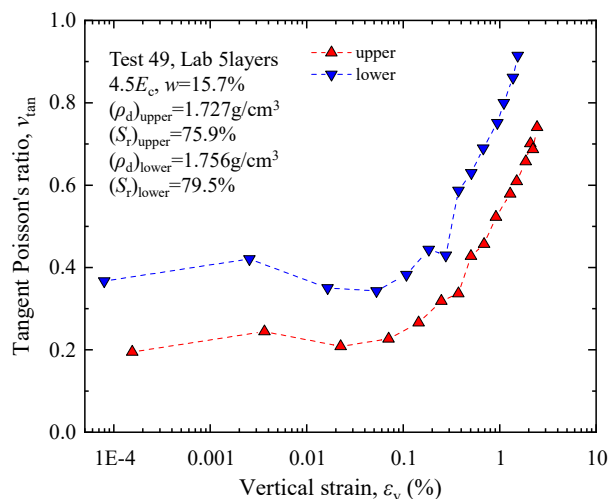


図 5-2-26 接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係(片対数)

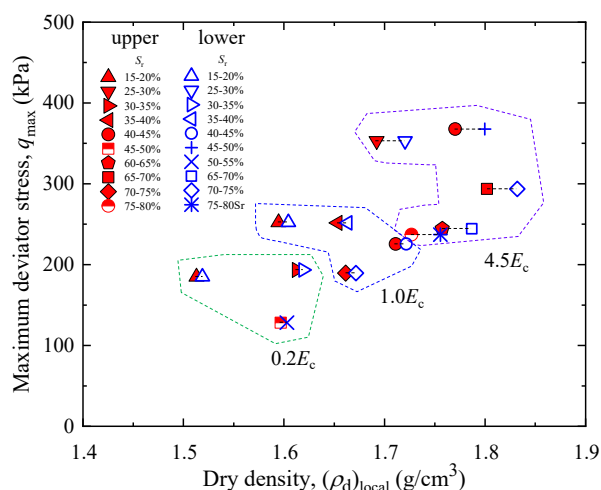


図 5-2-27 最大軸差応力～乾燥密度関係(上部、下部)

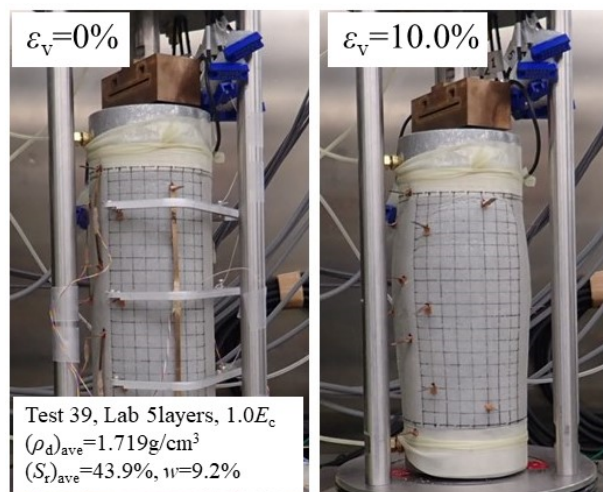


図 5-2-28 三軸圧縮試験後の破壊性状(1.0E_c, 低 S_r 側)

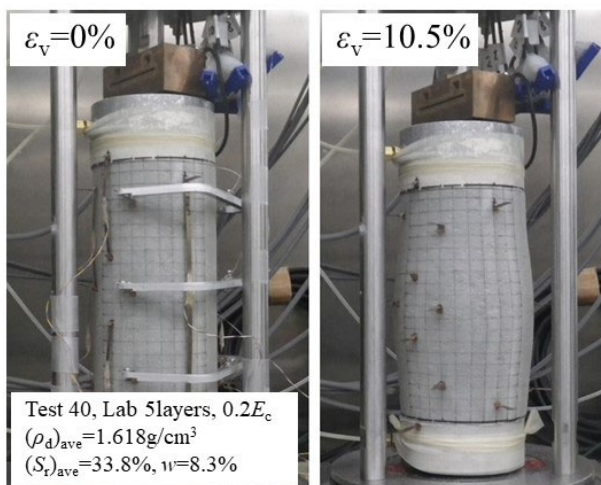


図 5-2-29 三軸圧縮試験後の破壊性状(0.2E_c, 低 S_r 側)

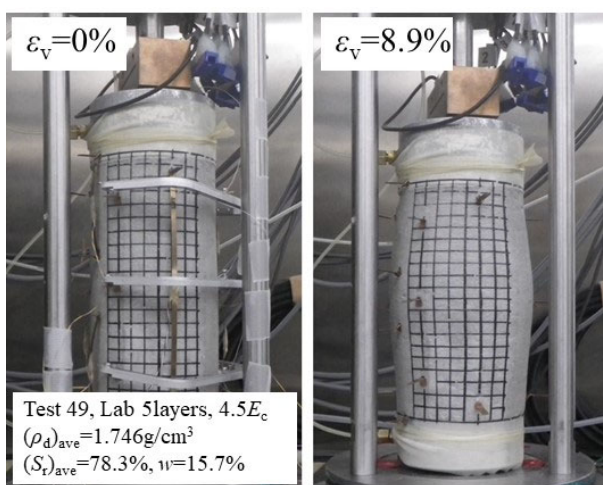


図 5-2-30 三軸圧縮試験後の破壊性状(4.5E_c, 高 S_r 側)

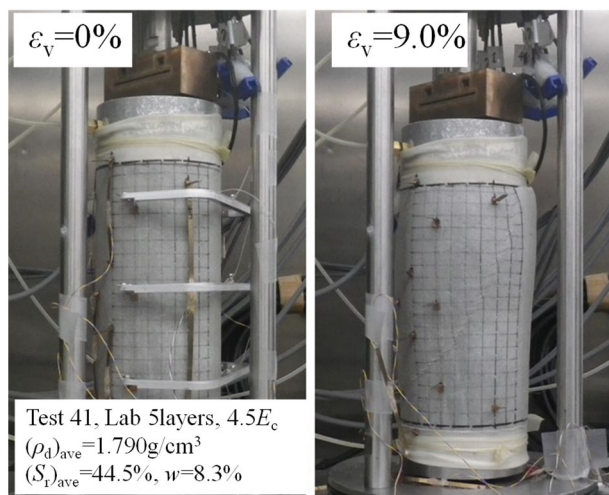


図 5-2-31 三軸圧縮試験後の破壊性状(4.5E_c, 低 S_r 側)

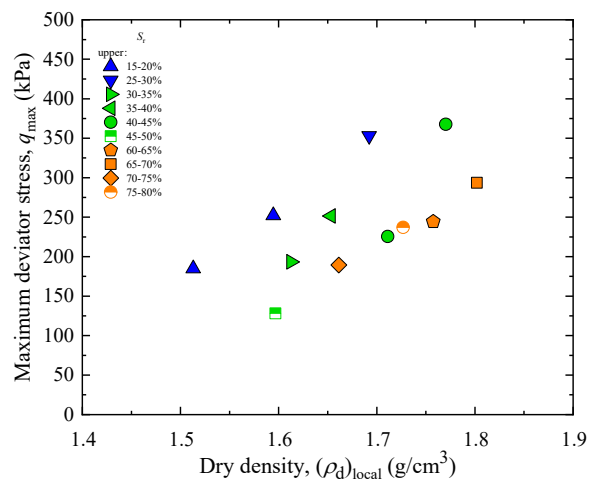


図 5-2-32 最大軸差応力～乾燥密度関係(上部)

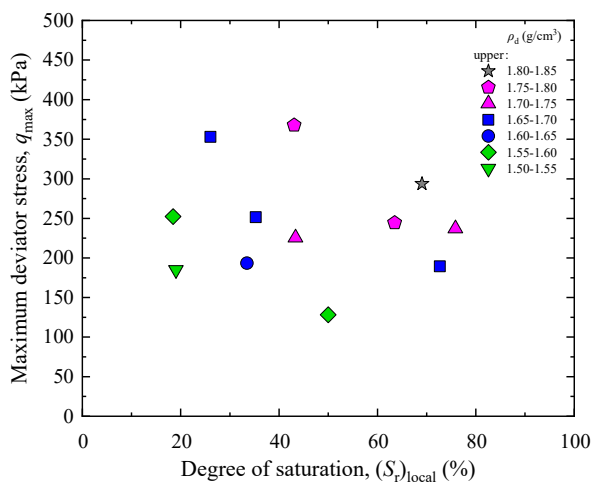


図 5-2-33 最大軸差応力～飽和度関係(上部)

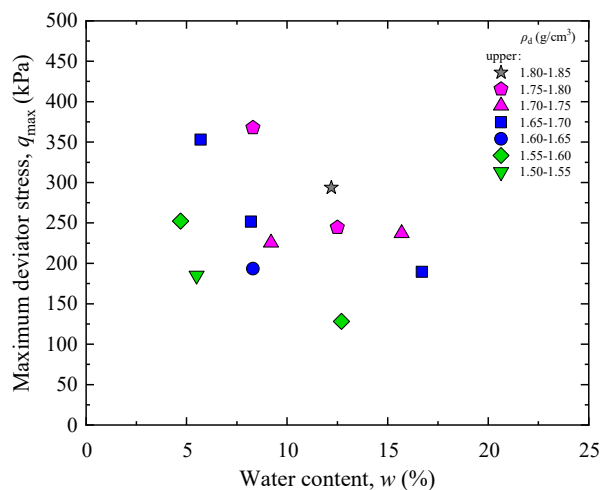


図 5-2-34 最大軸差応力～含水比関係(上部)

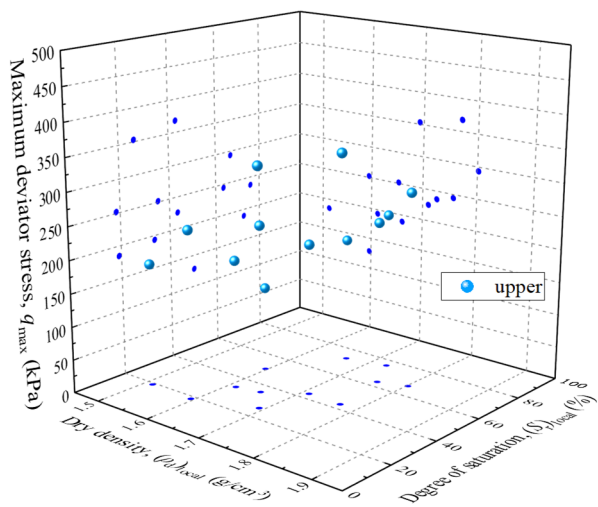


図 5-2-35 最大軸差応力～乾燥密度～飽和度関係

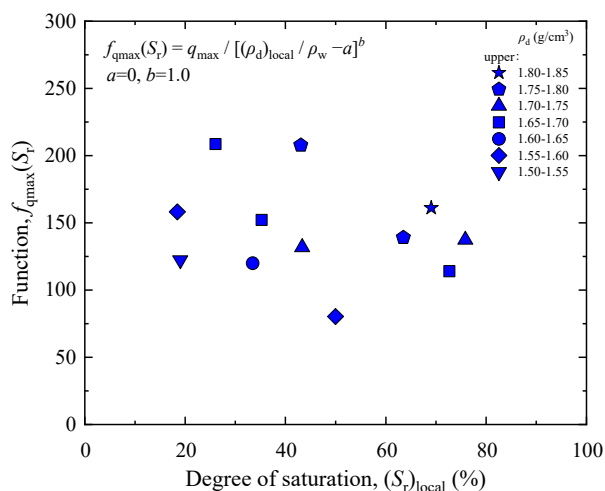


図 5-2-36 $f_{q\max}(S_r)$ ～飽和度関係(上部)
($a=0, b=1.0$)

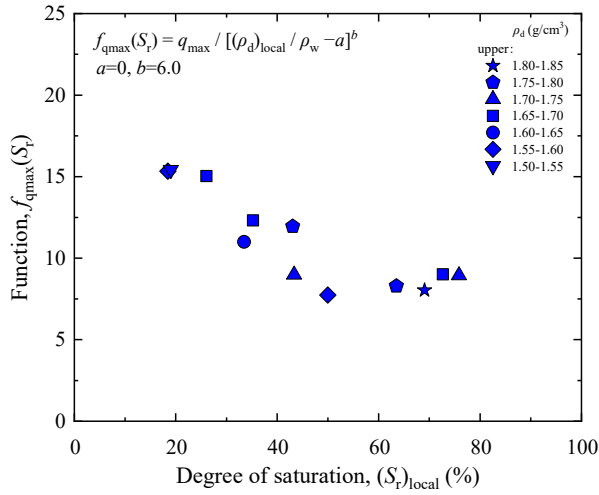


図 5-2-37 $f_{qmax}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部)
($a=0, b=6.0$)

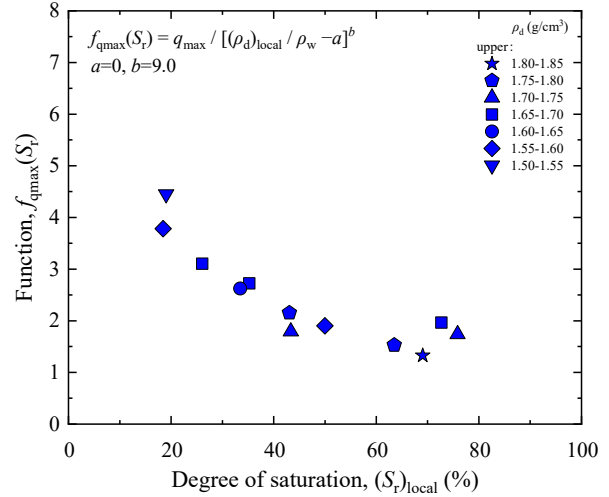


図 5-2-38 $f_{qmax}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部)
($a=0, b=9.0$)

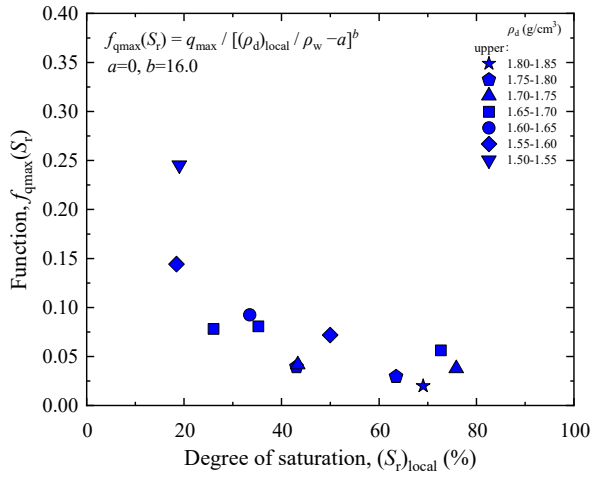


図 5-2-39 $f_{qmax}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部)
($a=0, b=16.0$)

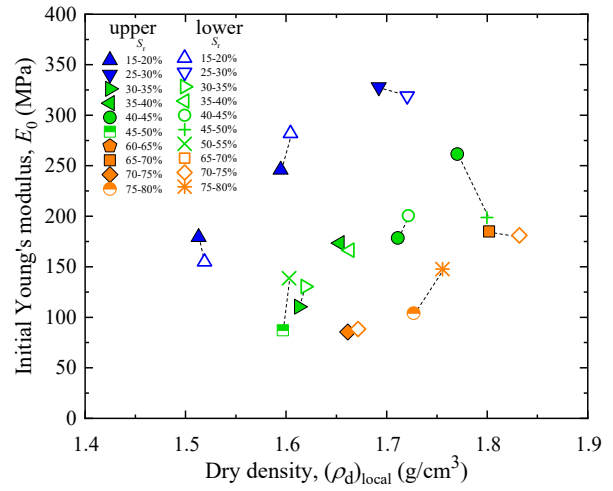


図 5-2-40 初期ヤング率～乾燥密度関係(上部、下部)

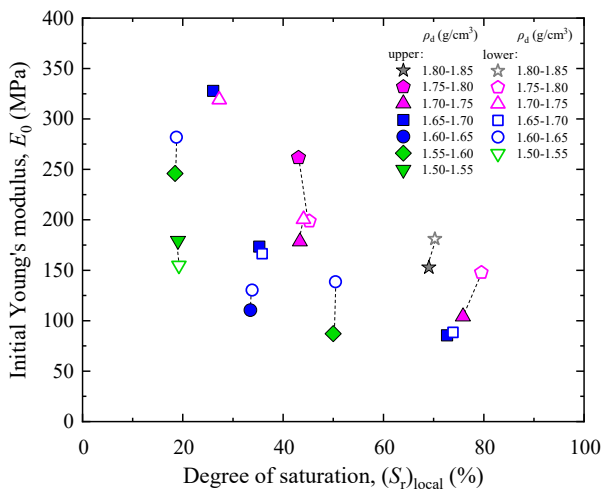


図 5-2-41 初期ヤング率～飽和度関係(上部、下部)

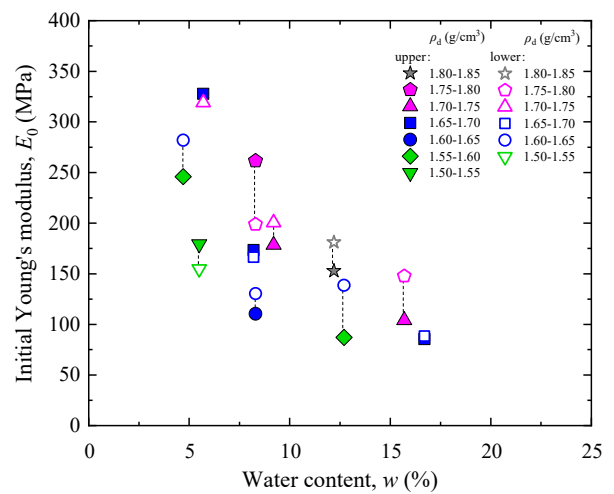


図 5-2-42 初期ヤング率～含水比関係(上部、下部)

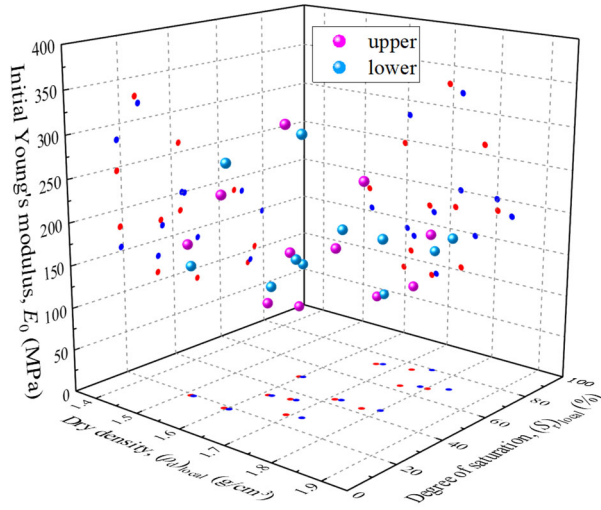


図 5-2-43 初期ヤング率～乾燥密度～飽和度関係

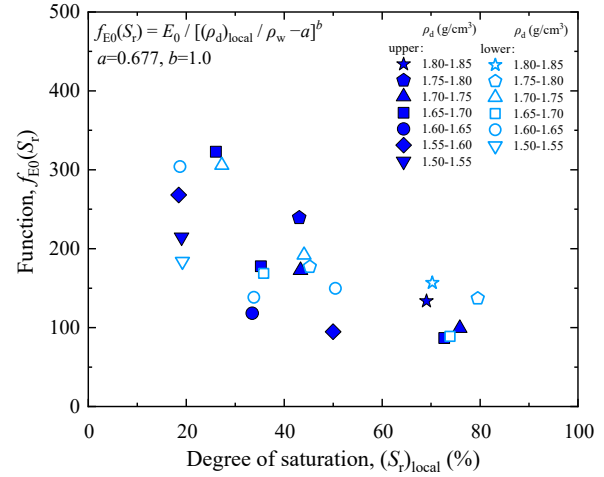


図 5-2-44 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=1.0$)

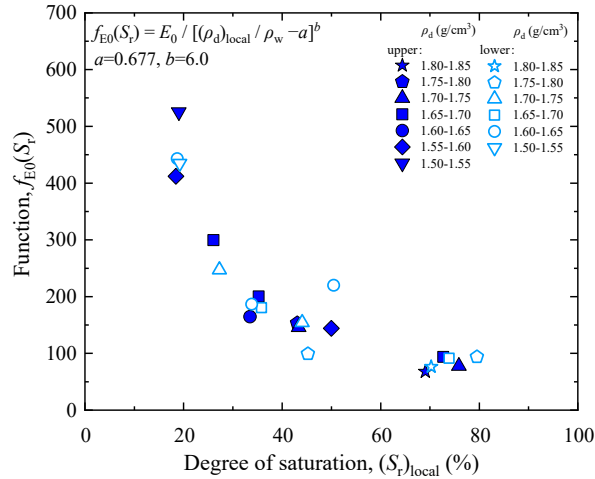


図 5-2-45 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=6.0$)

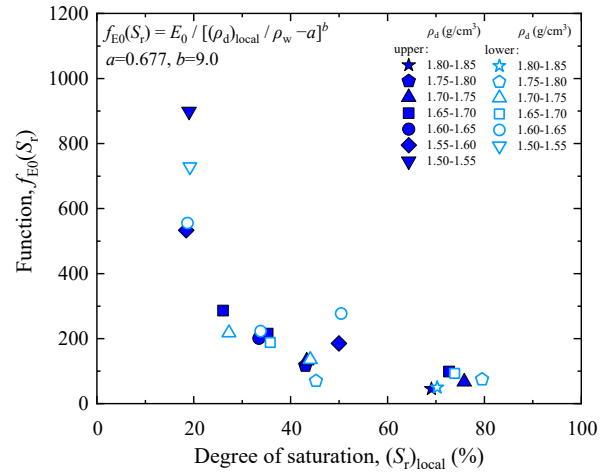


図 5-2-46 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=9.0$)

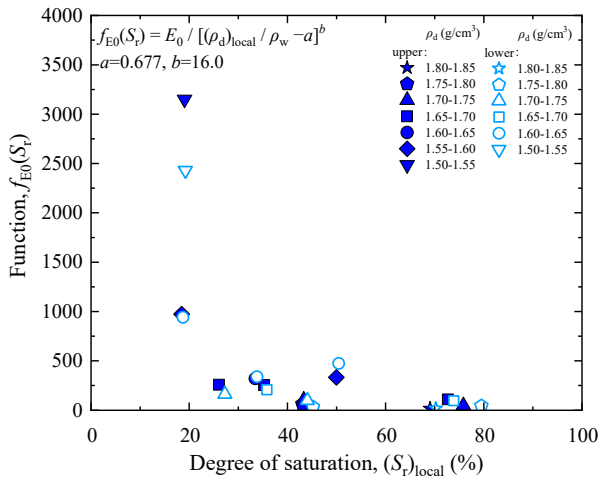


図 5-2-47 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)

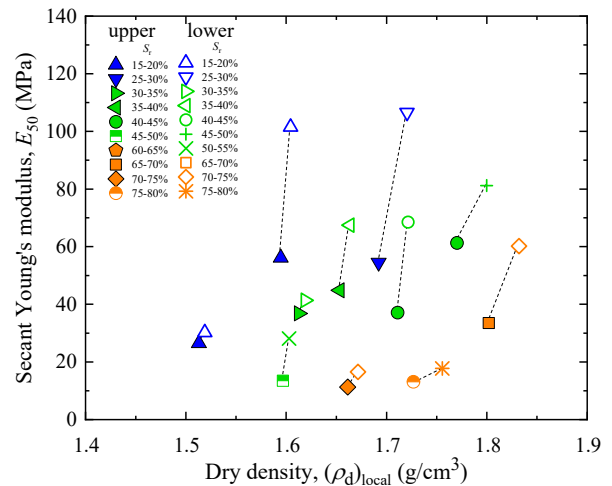


図 5-2-48 割線ヤング率～乾燥密度関係(上部、下部)

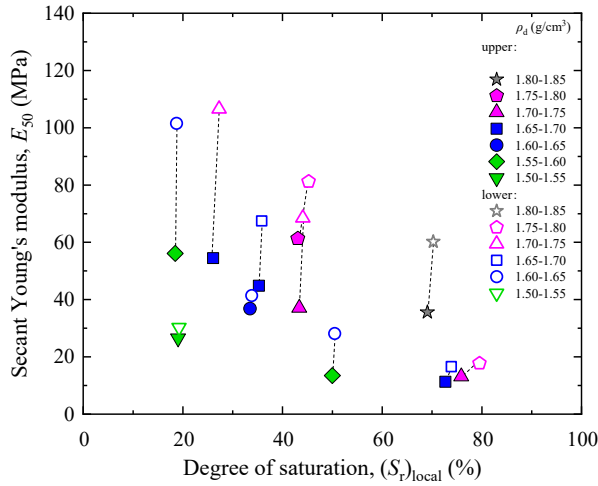


図 5-2-49 割線ヤング率～飽和度関係(上部、下部)

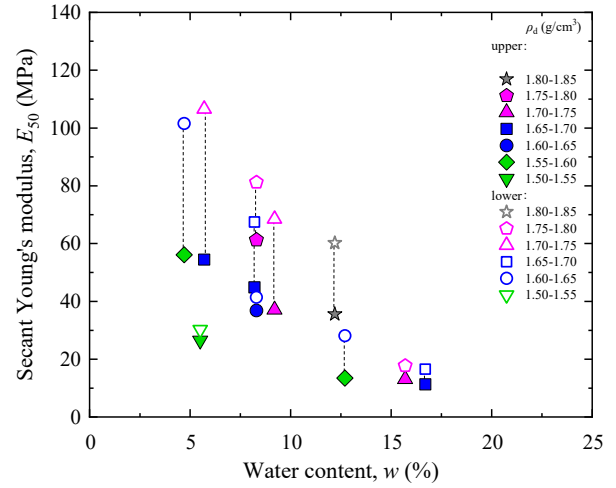


図 5-2-50 割線ヤング率～含水比関係(上部、下部)

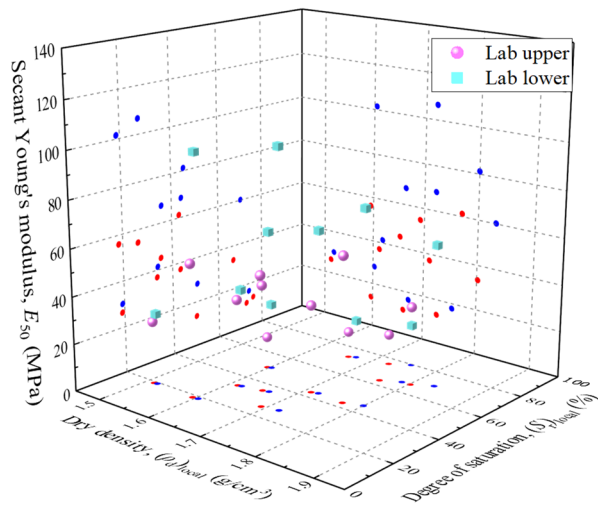


図 5-2-51 割線ヤング率～乾燥密度～飽和度関係

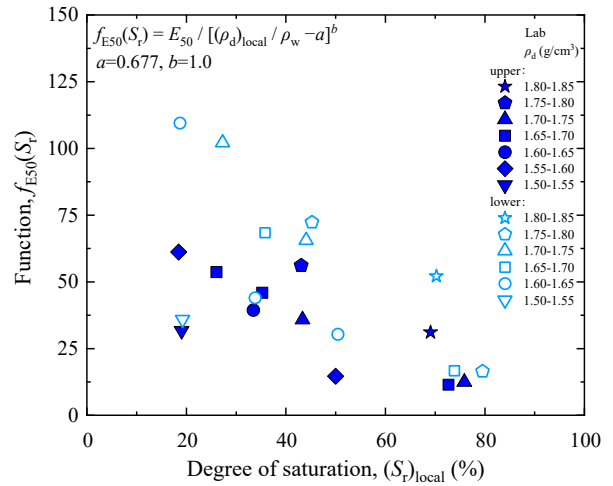


図 5-2-52 $f_{E50}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)

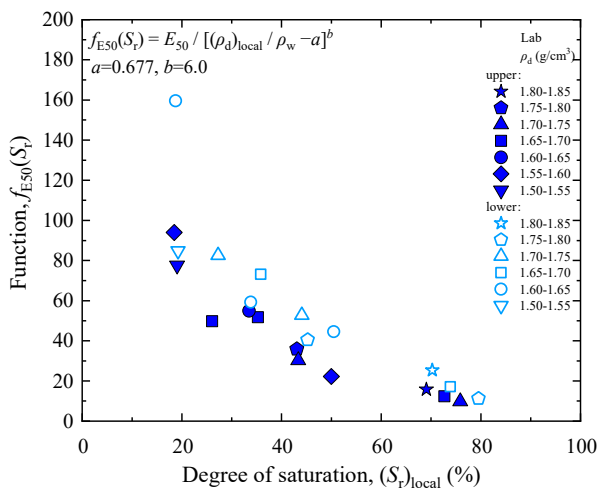


図 5-2-53 $f_{E50}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=6.0$)

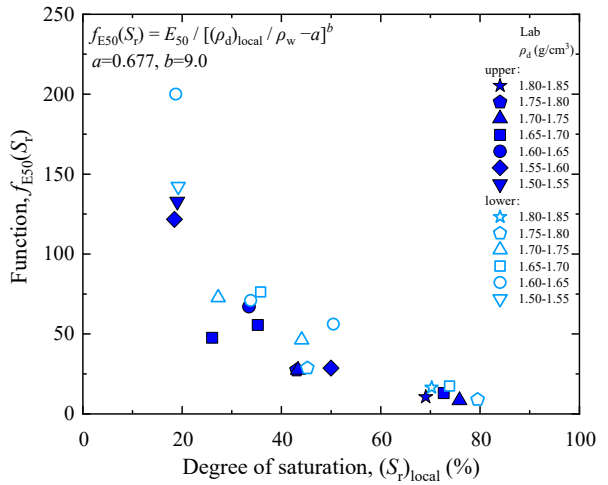


図 5-2-54 $f_{E50}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=9.0$)

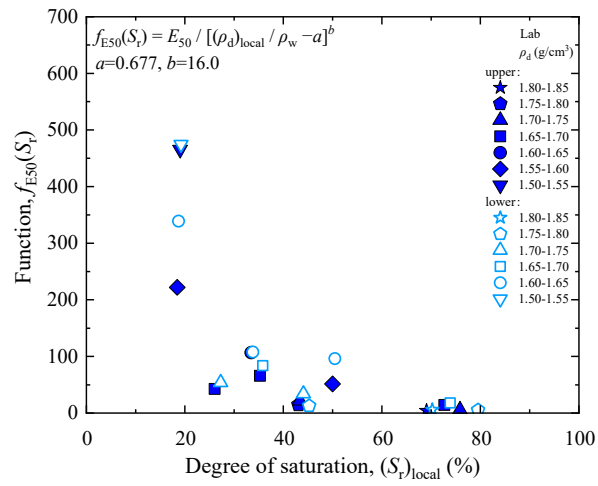


図 5-2-55 $f_{E50}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=16.0$)

5.3 供試体の非一様性が等方圧密時の変形特性に与える影響

本節では前節で示した供試体全てのケースを対象に、室内締固め供試体の自立から載荷前までの間の等方圧密過程における変形特性を調べた。鬼塚ら(1979, 1983)は、静的締固め及び動的締固めの異なる方法によって作製した試料について、締固め軸方向に並行及び水平になるように切出した供試体の強度特性を調べ、突固め法で作製した供試体は比較的ランダムな構造、静的締固め供試体は比較的配向した構造であると結論付けている。本研究では、非一様供試体の等方圧密過程における局所的な変形特性から供試体の構造異方性について考察した。

5.3.1 非一様供試体の等方圧密による変形特性

(1) 締固めエネルギー $1.0E_c$ で作製した乾燥密度 $\rho_d=1.719\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=9.2\%$ 、飽和度 $S_r=43.9\%$ の供試体の試験結果

図 5-3-1 には、等方圧密過程における平均基底主応力～鉛直ひずみ関係を示す。供試体上部と下部ともに、平均基底主応力の増加に伴い鉛直ひずみが増加している。乾燥密度は上部が $\rho_d=1.711\text{g/cm}^3$ 、下部が $\rho_d=1.722\text{g/cm}^3$ であり、下部がやや大きい。等方圧密過程における鉛直ひずみ増分は上部で $\Delta\varepsilon_v=0.069\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_v=0.074\%$ とやや下部が上部より大きい、ほぼ同等の変形挙動であった。上部と下部では下部の乾燥密度がやや大きい、鉛直ひずみ増分の違いに与える影響程大きくなく、両者ほぼ同等である事がわかる。

図 5-3-2 には、間隙比～平均基底主応力関係を示す。初期間隙比は上部が $e=0.57$ 、下部が $e=0.56$ で近い値であるが、平均基底主応力の増加に伴い、間隙比の変化は上部が $\Delta e=-0.004$ 、下部が $\Delta e=-0.004$ で等しく、ほぼ同等の挙動であった。

図 5-3-3 には、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:1 の補助線を示しており、この線上のデータは等方的な変形挙動である事を意味する。上部も下部も等方圧密開始付近は 1:1 線上付近に位置するが、鉛直ひずみが大きくなると、水平ひずみの方がやや大きくなっている事がわかる。この時の水平ひずみ増分は、上部で $\Delta\varepsilon_h=0.106\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_h=0.105\%$ とほぼ同等であった。図 5-3-4 には、体積ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:3 の補助線を示しており、この線上のデータは等方的な変形挙動である事を意味する。上部も下部も等方圧密開始付近は 1:3 線上付近に位置するが、鉛直ひずみが大きくなると、体積ひずみの方がやや大きくなっている事がわかる。この時の体積ひずみ増分は、上部で $\Delta\varepsilon_{vol}=0.281\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_{vol}=0.284\%$ とほぼ同等であった。

(2) 締固めエネルギー $0.2E_c$ で作製した乾燥密度 $\rho_d=1.618\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=8.3\%$ 、飽和度 $S_r=33.8\%$ の供試体の試験結果

図 5-3-5 には、平均基底主応力～鉛直ひずみ関係を示す。供試体上部と下部ともに、平均基底主応力の増加に伴い鉛直ひずみが増加している。乾燥密度は上部が $\rho_d=1.613\text{g/cm}^3$ 、下部が $\rho_d=1.619\text{g/cm}^3$ であり、下部がやや大きい。等方圧密過程における鉛直ひずみ増分は上部で $\Delta\varepsilon_v=0.007\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_v=0.067\%$ とやや下部が上部より大きい。さらに、上部は平均基底主応力 $p_{net}=50\text{kPa}$ に達した後において、鉛直ひずみが減少する傾向が見られた。これは、等方圧密時に時々見られる現象であるが、LDT、ヒンジ、接着剤及びメンブレン間のずれに伴うシステムコンプライアンスの影響ではないかと考えられる。

図 5-3-6 には、間隙比～平均基底主応力関係の片対数グラフを示す。初期間隙比は上部が $e=0.67$ 、下部が $e=0.66$ で近い値であるが、平均基底主応力の増加に伴い、間隙比の変化は上部が $\Delta e=-0.007$ 、下部が $\Delta e=-0.008$ でほぼ同等の挙動であった。

図 5-3-7 には、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:1 の補助線を示している。上部も下部も等方圧

密開始付近から 1:1 線から離れ、鉛直ひずみが大きくなると、水平ひずみの方が大きくなっている事がわかる。この時の水平ひずみ増分は、上部で $\Delta\epsilon_h=0.209\%$ 、下部で $\Delta\epsilon_h=0.218\%$ とやや下部が大きい傾向であった。図 5-3-8 には、体積ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:3 の補助線を示している。上部も下部も等方圧密開始付近から 1:3 線を離れ、鉛直ひずみが大きくなると、体積ひずみの方が大きくなっている事がわかる。この時の体積ひずみ増分は、上部で $\Delta\epsilon_{vol}=0.424\%$ 、下部で $\Delta\epsilon_{vol}=0.504\%$ とほぼ同等であった。

(3) 締固めエネルギー $4.5E_c$ で作製した乾燥密度 $\rho_d=1.746\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=15.7\%$ 、飽和度 $S_r=78.3\%$ の供試体の試験結果

図 5-3-9 には、等方圧密過程における、平均基底主応力～鉛直ひずみ関係を示す。供試体の飽和度が高く、平均基底主応力 $p_{net}=10\text{kPa}$ における供試体とメンブレン間の負圧による密着が弱くメンブレンが安定しなかった為、局所変位計が取り付けられなかった。そこで、本ケースは平均基底主応力 $p_{net}=20\text{kPa}$ で局所変位計を設置した。供試体上部と下部ともに、平均基底主応力の増加に伴い鉛直ひずみが増加している。乾燥密度は上部が $\rho_d=1.727\text{g/cm}^3$ 、下部が $\rho_d=1.756\text{g/cm}^3$ であり、下部が大きい鉛直ひずみは下部の方が大きい。等方圧密過程全体的に鉛直ひずみは上部が平均基底主応力に関わらず、鉛直ひずみが減少する傾向が見られた。これも、LDT、ヒンジ、接着剤及びメンブレン間のずれに伴うシステムコンプライアンスの影響ではないかと考えられる。鉛直ひずみ増分は上部で $\Delta\epsilon_v=0.012\%$ 、下部で $\Delta\epsilon_v=0.092\%$ であり下部が上部より大きい。

図 5-3-10 には、間隙比～平均基底主応力関係の片対数グラフを示す。初期間隙比は上部が $e=0.56$ 、下部が $e=0.53$ であるが、平均基底主応力の増加に伴い、間隙比の変化は上部が $\Delta e=-0.014$ 、下部が $\Delta e=-0.017$ でほぼ同等の挙動であった。

図 5-3-11 には、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:1 の補助線を示している。上部も下部も等方圧密開始付近から 1:1 線を離れ、鉛直ひずみが大きくなると、水平ひずみの方が大きくなっている事がわかる。この時の水平ひずみ増分は、上部で $\Delta\epsilon_h=0.450\%$ 、下部で $\Delta\epsilon_h=0.525\%$ とやや下部が大きい。図 5-3-12 には、体積ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:3 の補助線を示している。上部も下部も等方圧密開始付近から 1:3 線を離れ、鉛直ひずみが大きくなると、体積ひずみの方が大きくなっている事がわかる。この時の体積ひずみ増分は、上部で $\Delta\epsilon_{vol}=0.912\%$ 、下部で $\Delta\epsilon_{vol}=1.142\%$ と下部が大きい傾向であった。

5.3.2 室内締固め供試体の変形特性に与える飽和度の影響

図 5-3-13 は、平均基底主応力 $p_{net}=10\sim 50\text{kPa}$ までの等方圧密過程における鉛直ひずみ増分～乾燥密度関係を示す。鉛直ひずみは $\Delta\epsilon_v=-0.05\%\sim 0.20\%$ 程度の小さいひずみ範囲に分布している。等方圧密過程で鉛直ひずみに負値があるのは、先に示した供試体、メンブレン、接着剤、ヒンジ、LDT 間のずれに起因するシステムコンプライアンスの影響と考えられる。ばらつきはあるが、全体として供試体上部、下部どちらも乾燥密度が増加すると鉛直ひずみ増分は低下する。図 5-3-14 は、鉛直ひずみ増分～飽和度関係を示す。飽和度が $S_r=20\%\sim 80\%$ 程度の範囲で、鉛直ひずみ増分に違いは殆ど見られない。

図 5-3-15 は、等方圧密過程における水平ひずみ増分～乾燥密度関係を示す。水平ひずみは $\Delta\epsilon_h=0.05\%\sim 0.55\%$ 程度のひずみ範囲に分布しており、鉛直ひずみに比べて大きい。全体としてばらつきは大きい、飽和度別に着目すると水平ひずみ増分～乾燥密度関係が飽和度の影響を受けている事がわかる。飽和度 $S_r=15\%\sim 50\%$ 程度の範囲の水平ひずみは $\Delta\epsilon_h=0.05\%\sim 0.25\%$ 程度で、鉛直ひずみより大きい供試体上部、下部どちらも乾燥密度が増加すると水平ひずみ増分は低下する。飽和度 $S_r=50\%\sim 80\%$ 程度の範囲の水平ひずみは $\Delta\epsilon_h=0.25\%\sim 0.55\%$ 程度で、上部、下部ともに比較的大きい。また、この範囲ではばらつきが大きく、乾燥密度との相関関係は見られなかった。図 5-

3-16 は、水平ひずみ増分～飽和度関係を示す。飽和度が $S_r=20\%\sim 50\%$ 程度の範囲で、水平ひずみ増分に違いは殆ど見られないが、飽和度が $S_r=50\%\sim 80\%$ 程度の範囲で、飽和度が増加すると水平ひずみ増分も増加している。

図 5-3-17 には、供試体上部の水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係を示す。いずれの供試体も 1:1 補助線より上方に位置し、鉛直ひずみ増分よりも水平ひずみ増分が大きく、構造異方性がある事が確認された。飽和度の影響に着目すると、飽和度が $S_r=15\%\sim 50\%$ 程度の範囲では 1:2 の補助線付近に位置しており、 $S_r=65\%\sim 80\%$ 程度の範囲はそれ以上に異方性が強く、1:6 の補助線付近に位置する事がわかる。図 5-3-18 には、供試体下部の水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係を示す。いずれの供試体も 1:1 補助線より上方に位置し、鉛直ひずみ増分よりも水平ひずみ増分が大きく、構造異方性がある事が確認された。飽和度の影響に着目すると、飽和度が $S_r=15\%\sim 50\%$ 程度の範囲では 1:2 の補助線付近に位置しており、 $S_r=50\%\sim 80\%$ 程度の範囲はそれ以上に異方性が強く、1:6 の補助線付近に位置する事がわかる。

以上より、等方圧密過程における室内締固め供試体の変形特性は飽和度の高い範囲で飽和度の影響を強く受けるが、乾燥密度と相関性がある事が確認された。また、等方圧密中の変形特性は供試体上部と下部に関わらず異方的な構造である事を示唆している。

5.3.3 等方圧密による変形特性と載荷過程の強度変形特性との関係

図 5-3-19 は、載荷過程の最大軸差応力～等方圧密過程の供試体上部の鉛直ひずみ増分関係を示す。ばらつきはあるが、鉛直ひずみ増分が大きい方がやや最大軸差応力は小さい傾向であった。わずかであるが乾燥密度が鉛直ひずみ増分に与える影響が認められた事は図 5-3-13 に示したが、図 5-2-32 に示した最大軸差応力に与える乾燥密度の影響が大きい事がわかる。図 5-3-20 は、載荷過程の最大軸差応力～等方圧密過程の水平ひずみ増分関係を示す。ばらつきはあるが、飽和度が $S_r=15\%\sim 50\%$ の範囲において水平ひずみ増分が大きい方が最大軸差応力は小さくなる傾向を示している。飽和度が $S_r=15\%\sim 50\%$ の範囲において乾燥密度が水平ひずみ増分に与える影響が認められた事は図 5-3-15 に示したが、図 5-2-32 に示した最大軸差応力に与える乾燥密度の影響の方が大きい。

図 5-3-21 は、載荷過程の初期ヤング率～等方圧密過程の鉛直ひずみ増分関係を示す。ばらつきはあるが、鉛直ひずみ増分が初期ヤング率に与える影響は殆ど見られなかった。図 5-2-40 に示した初期ヤング率に与える乾燥密度の影響が大きい事がわかる。図 5-3-22 は、載荷過程の初期ヤング率～等方圧密過程の水平ひずみ増分関係を示す。ばらつきはあるが、供試体の上部と下部に関わらず飽和度が $S_r=15\%\sim 50\%$ の範囲において水平ひずみ増分が大きい方が初期ヤング率は小さくなる傾向を示している。ただし、飽和度が $S_r=15\%\sim 50\%$ の範囲において乾燥密度が水平ひずみ増分に与える影響がよりも、初期ヤング率に与える乾燥密度の影響の方が大きい。また、飽和度が $S_r=15\%\sim 80\%$ の範囲において、水平ひずみの増分が $(\Delta\epsilon_h)_{local}=0.30\%\sim 0.55\%$ の範囲で大きくなっても初期ヤング率は低下傾向を示さない。

図 5-3-23 は、載荷過程の割線ヤング率 E_{50} ～等方圧密過程の鉛直ひずみ増分関係を示す。ばらつきはあるが、鉛直ひずみ増分が割線ヤング率 E_{50} に与える影響は殆ど見られなかった。図 5-2-48 に示した割線ヤング率 E_{50} に与える乾燥密度の影響が大きい事がわかる。図 5-3-24 は、載荷過程の割線ヤング率 E_{50} ～等方圧密過程の水平ひずみ増分関係を示す。ばらつきはあるが、供試体の上部と下部に関わらず飽和度が $S_r=15\%\sim 50\%$ の範囲において水平ひずみ増分が大きい方が割線ヤング率 E_{50} は小さくなる傾向を示している。ただし、飽和度が $S_r=15\%\sim 50\%$ の範囲において乾燥密度が水平ひずみ増分に与える影響がよりも、割線ヤング率 E_{50} に与える乾燥密度の影響の方が大きい。また、飽和度が $S_r=15\%\sim 80\%$ の範囲において、水平ひずみの増分が $(\Delta\epsilon_h)_{local}=0.30\%\sim 0.55\%$ の範囲で大きくなっても割線ヤング率 E_{50} は低下傾向を示さない。

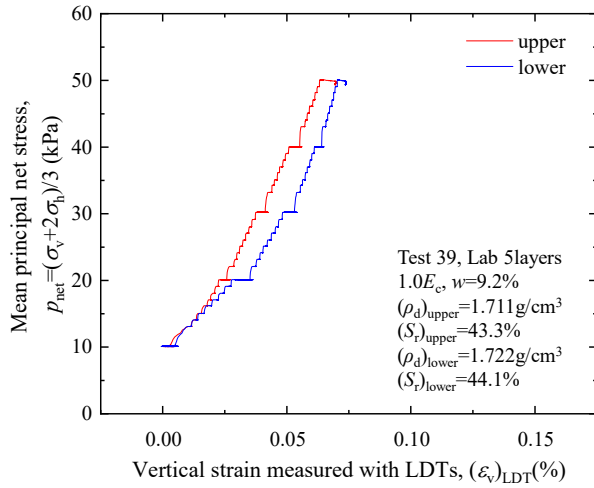


図 5-3-1 平均基底主応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

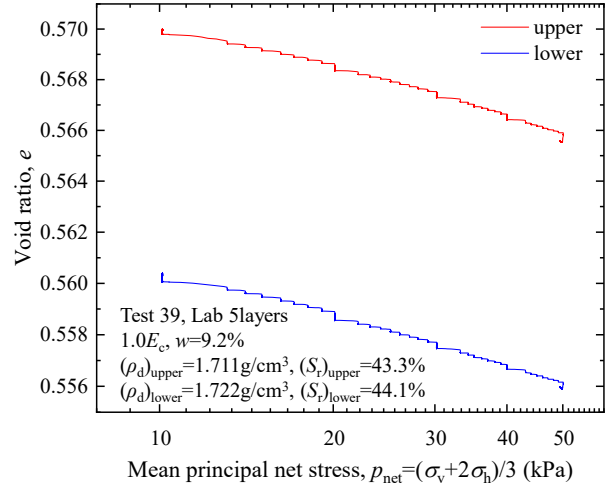


図 5-3-2 間隙比～平均基底主応力関係
(上部、下部) 片対数

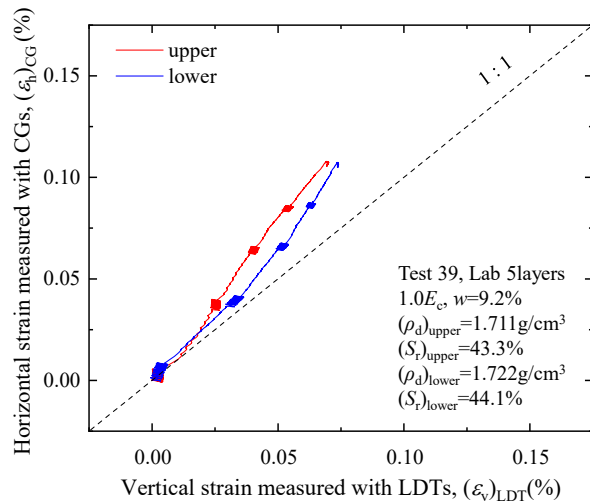


図 5-3-3 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

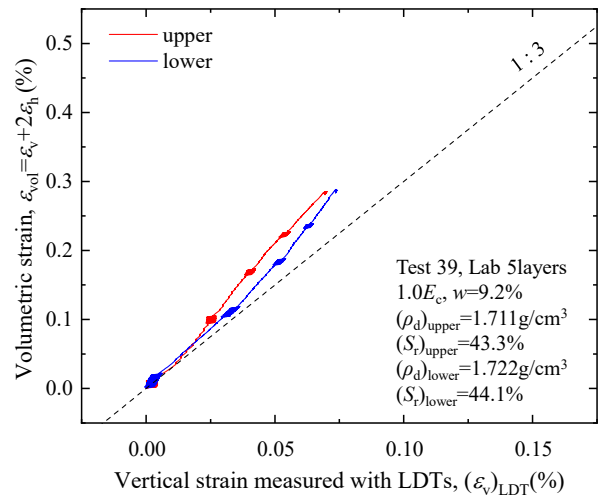


図 5-3-4 体積ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

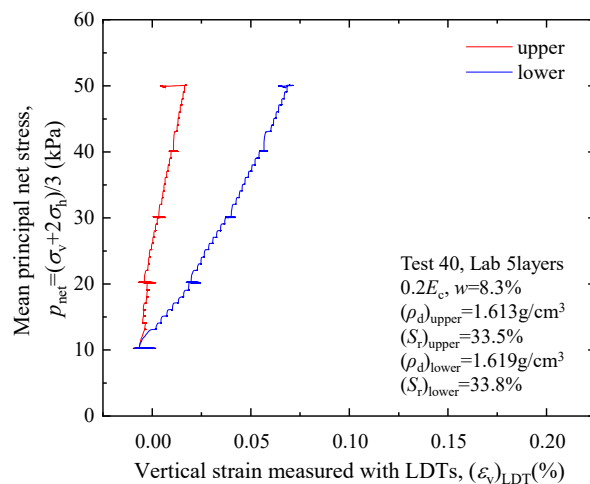


図 5-3-5 平均基底主応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

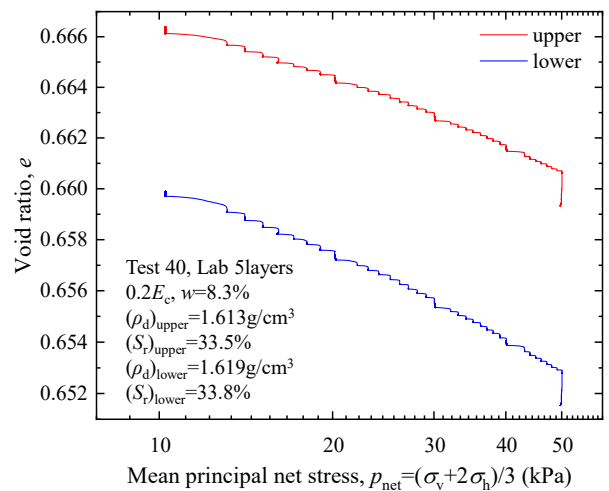


図 5-3-6 間隙比～平均基底主応力関係
(上部、下部) (片対数)

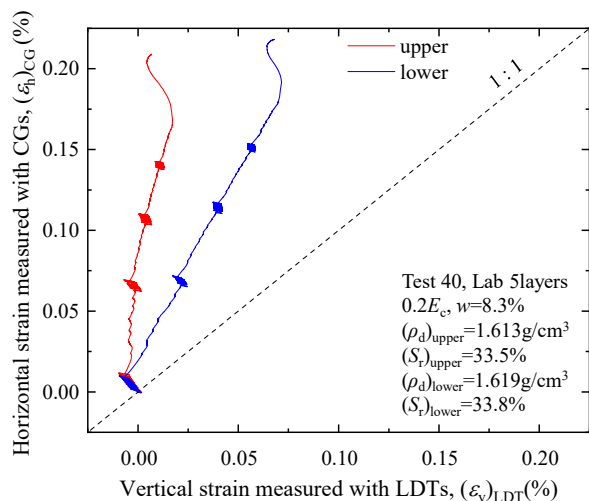


図 5-3-7 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

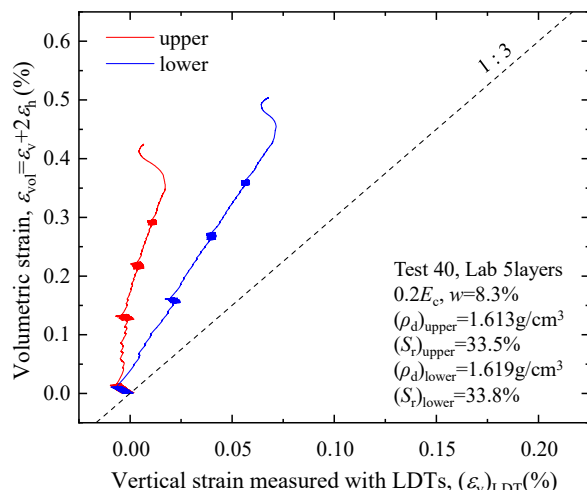


図 5-3-8 体積ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

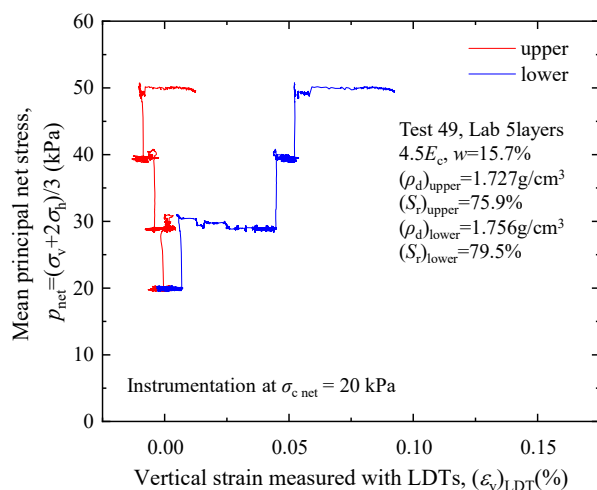


図 5-3-9 平均基底主応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

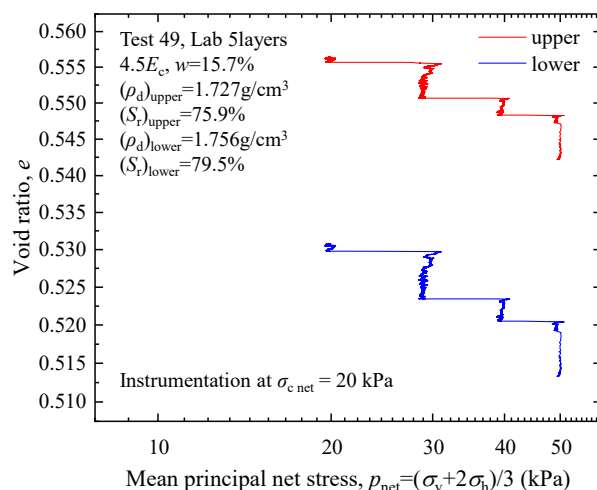


図 5-3-10 間隙比～平均基底主応力関係
(上部、下部) (片対数)

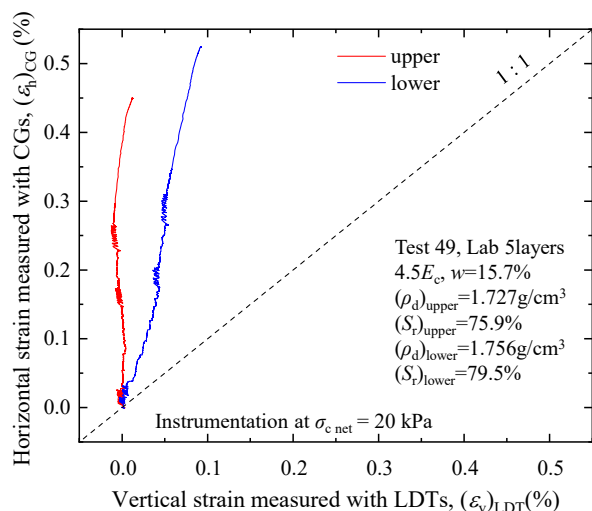


図 5-3-11 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

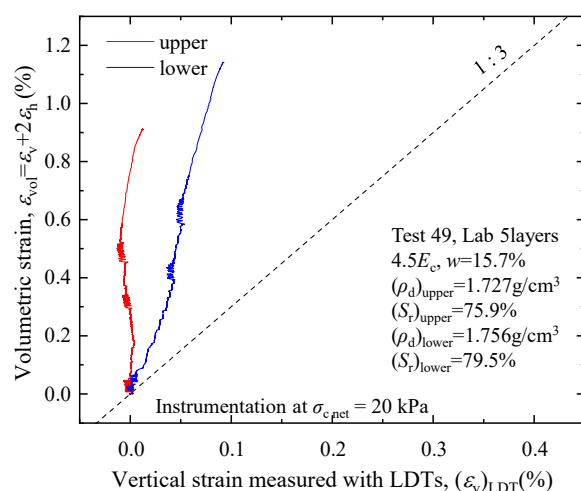


図 5-3-12 体積ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

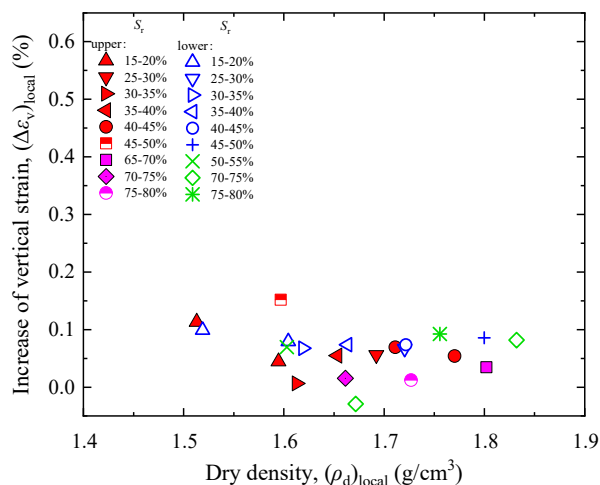


図 5-3-13 鉛直ひずみ増分～乾燥密度関係

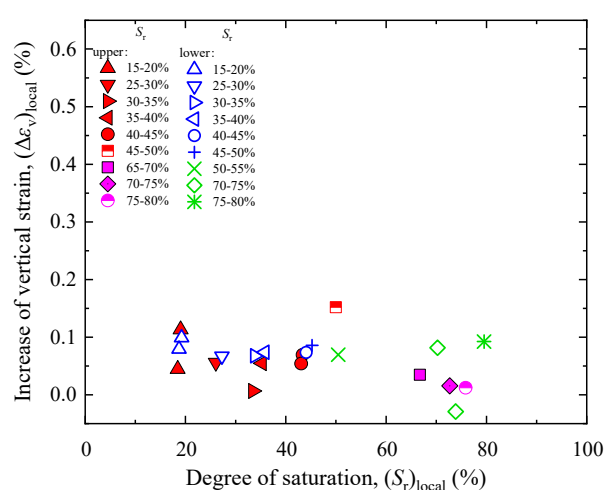


図 5-3-14 鉛直ひずみ増分～飽和度関係

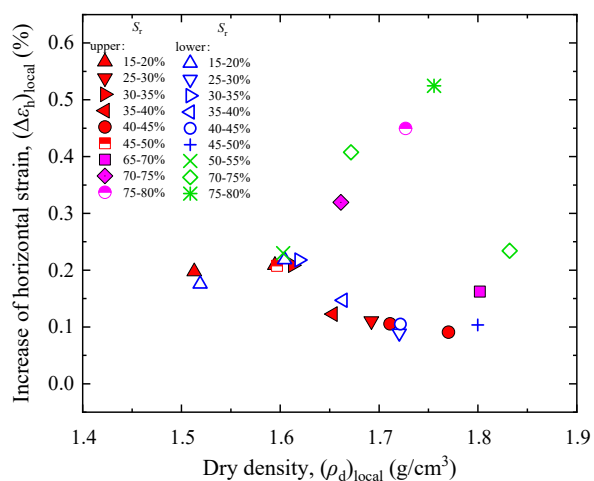


図 5-3-15 水平ひずみ増分～乾燥密度関係

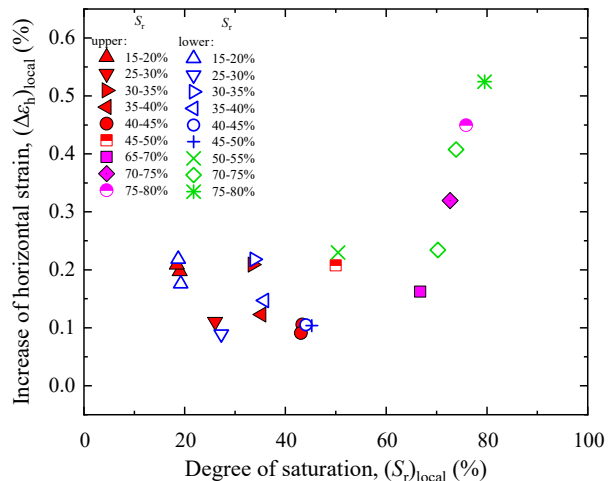


図 5-3-16 水平ひずみ増分～飽和度関係

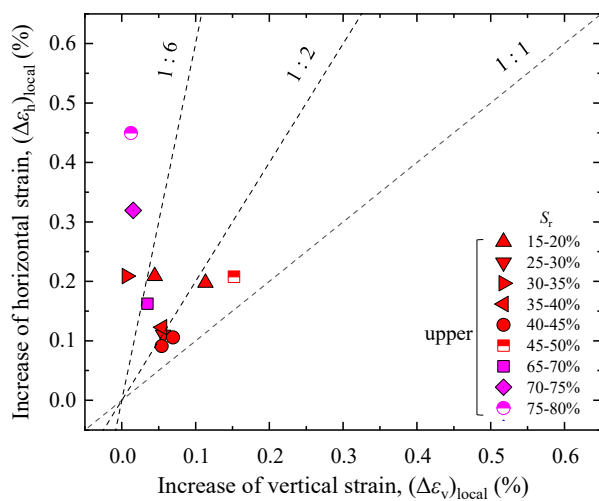


図 5-3-17 水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係 (上部)

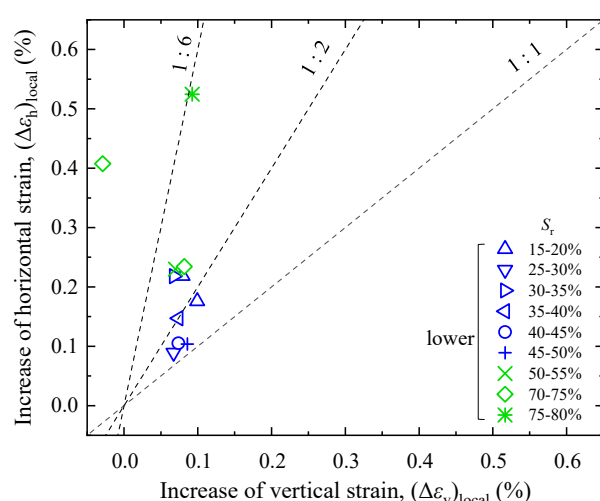


図 5-3-18 水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係 (下部)

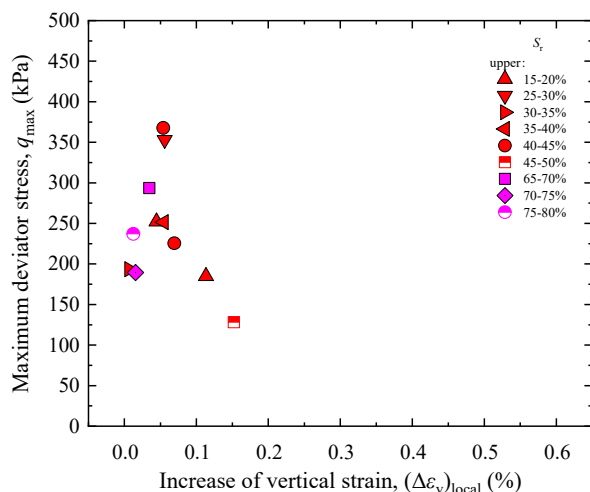


図 5-3-19 荷重過程の最大軸差応力
～等方圧密過程の鉛直ひずみ増分関係(上部)

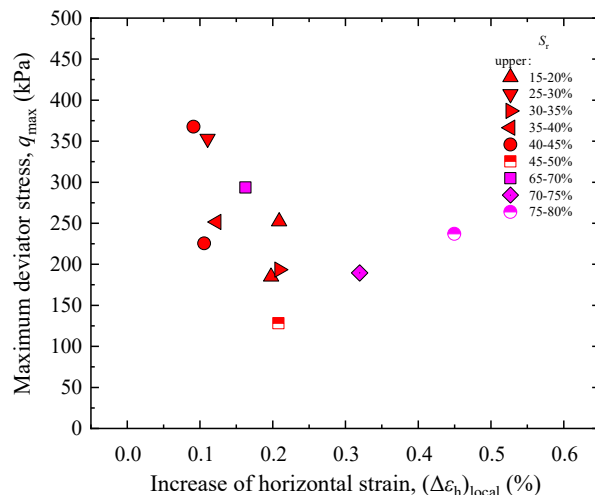


図 5-3-20 荷重過程の最大軸差応力
～等方圧密過程の水平ひずみ増分関係(上部)

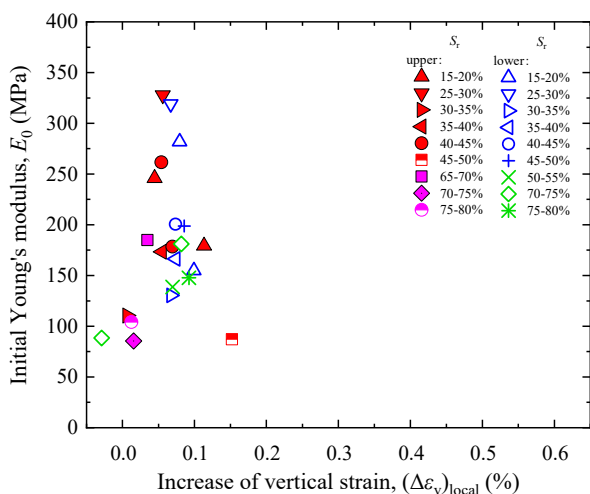


図 5-3-21 荷重過程の初期ヤング率
～等方圧密過程の鉛直ひずみ増分関係

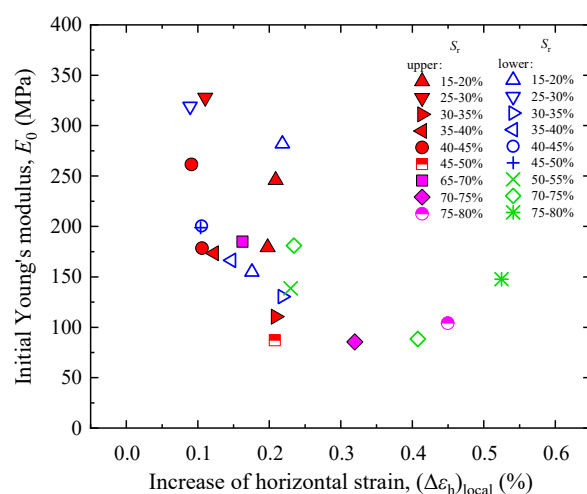


図 5-3-22 荷重過程の初期ヤング率
～等方圧密過程の水平ひずみ増分関係

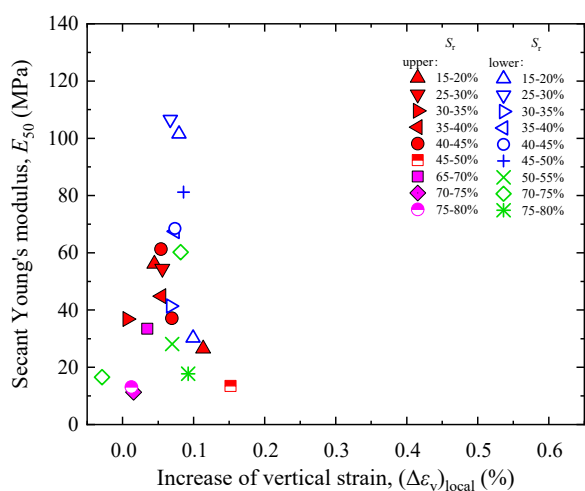


図 5-3-23 荷重過程の割線ヤング率
～等方圧密過程の鉛直ひずみ増分関係

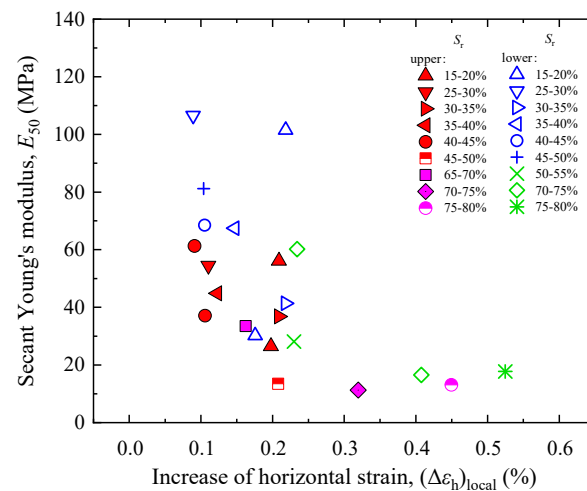


図 5-3-24 荷重過程の割線ヤング率
～等方圧密過程の水平ひずみ増分関係

5.4 中圧等方圧密が非一様供試体の強度変形特性に与える影響

前節では室内締固め供試体の供試体自立時から平均基底主応力 $p_{\text{net}}=10\text{kPa}\sim 50\text{kPa}$ でのせん断までの間の等方圧密過程における非一様性を考慮した等方圧密特性について説明した。Kohata et.al. (1997)は、砂質土供試体に微小な繰返しせん断履歴を与え、せん断履歴による初期ヤング率が向上する事を示している。また、前川ら(2018)は同一密度の細粒分を含む砂供試体の応力履歴による液状化強度やせん断波速度 V_s に与える影響を調べている。これらの結果から応力履歴は、土粒子構造に影響を与え、強度や剛性を変化させている事がわかる。そこで、本節では平均基底主応力 $p_{\text{net}}=10\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ まで等方圧密(中圧等方圧密と称す)してその後を除荷する事で、圧密履歴が非一様供試体の変形特性に与える影響を調べ、室内締固め供試体の構造異方性について考察した。また、中圧等方圧密過程における微小ひずみ領域の変形特性についても調べた。さらに、三軸圧縮試験により、飽和度を考慮した強度変形特性に与える圧密履歴の影響について考察した。

5.4.1 非一様供試体の中圧等方圧密による変形特性

図 5-4-1 には、作製した中圧等方圧密試験用供試体の乾燥密度～含水比関係と $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ 及び $4.5E_c$ の締固め曲線を示す。また、図 5-4-2 には、同じ供試体の乾燥密度～飽和度関係を整理している。両図に示す乾燥密度、含水比、飽和度の供試体にはそれぞれ、平均値と上部及び下部の局所的な値を示しており、これを圧密履歴の無い供試体と称す。さらに、中圧等方圧密後に除荷し、供試体自立時の供試体を圧密履歴のある供試体と称し、図中に乾燥密度～含水比関係、乾燥密度～飽和度関係を別途示している。なお、圧密履歴のある供試体は、中圧等方圧密前と供試体の含水比が一定である事を仮定し、中圧等方圧密及び除荷過程の体積変化から供試体平均、上部、下部それぞれの乾燥密度と飽和度を求めて図中に示している。

(1) 締固めエネルギー $1.0E_c$ で作製した乾燥密度 $\rho_d=1.606\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=4.9\%$ 、飽和度 $S_r=19.6\%$ の供試体の試験結果

図 5-4-3、図 5-4-4 には、中圧等方圧密過程における平均基底主応力の時刻歴及び軸差応力の時刻歴を示す。図中に示す(a)～(i)までのステップの詳細は下記の通りである。

- (a) : 圧密履歴のない供試体の平均基底主応力 $p_{\text{net}}=50\text{kPa}$ までの等方圧密過程(Isotropic Consolidation)
- (b) : 拘束圧 $\sigma_c=50\text{kPa}$ で、軸差応力 $q=30\text{kPa}$ まで載荷し、 $q=0\text{kPa}$ まで除荷過程(Load & Unload)
- (c) : 圧密履歴のない供試体の平均基底主応力 $p_{\text{net}}=200\text{kPa}$ までの等方圧密過程(Isotropic Consolidation)
- (d) : 拘束圧 $\sigma_c=200\text{kPa}$ で、軸差応力 $q=60\text{kPa}$ まで載荷し、 $q=0\text{kPa}$ まで除荷過程(Load & Unload)
- (e) : 圧密履歴のない供試体の平均基底主応力 $p_{\text{net}}=400\text{kPa}$ までの等方圧密過程(Isotropic Consolidation)
- (f) : 拘束圧 $\sigma_c=400\text{kPa}$ で、軸差応力 $q=120\text{kPa}$ まで載荷し、 $q=0\text{kPa}$ まで除荷過程(Load & Unload)
- (g) : 圧密履歴のない供試体の平均基底主応力 $p_{\text{net}}=700\text{kPa}$ までの等方圧密過程(Isotropic Consolidation)
- (h) : 平均基底主応力 $p_{\text{net}}=10\text{kPa}$ までの等方除荷過程(Unload)
- (i) : 圧密履歴のある供試体の平均基底主応力 $p_{\text{net}}=50\text{kPa}$ までの等方圧密過程(Isotropic Consolidation)

先に述べた図 5-4-1、図 5-4-2 中の圧密履歴のある供試体の乾燥密度はステップ(h)の後の時点までの局所変位計で求めた体積ひずみから算定している。また、中圧等方圧密過程及び除荷時の途中に、平均基底主応力 $p_{\text{net}}=10\text{kPa}\sim 50\text{kPa}$ まで 10kPa 毎に、 $100\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ まで 100kPa 毎に載荷速度 $\dot{\epsilon}_v=0.02\%/min$ で両振幅荷重 $\Delta q=5\text{kPa}$ 程度の微小繰返し載荷(載荷・除荷・再載荷)をそれぞれ 10 回実施している。10 回目の繰返しサイクルから鉛直応力段階毎の等価ヤング率を算定した。

図 5-4-5 には、供試体上部及び下部の平均基底主応力～鉛直ひずみ関係を示す。図中には供試体上部と下部をそれぞれ示す。上部と下部では下部の方が平均基底主応力の増加とともに鉛直ひずみが大きく生じている。この傾向は前節で示した等方圧密試験結果と整合している。また、供試体下部は除荷後に鉛直ひずみが残留している。供試体上部は、中圧等方圧密過程で鉛直ひずみが生じているが、除荷後の残留鉛直ひずみは負値となった。

図 5-4-6 には、供試体上部と下部の間隙比～平均基底主応力関係の片対数グラフを示す。供試体上部と下部ともに、中圧等方圧密過程で間隙比が小さくなり、除荷後に間隙比が元に戻らないことから収縮方向に体積ひずみが残留していることになる。図中の破線は図 4-3-53 に示した 2.5kg ランマーで測定した平均撃力から求めた平均鉛直応力 $\sigma_{ave}=80\text{kPa}$ を示している。締固めにより供試体は瞬間的にこの程度の荷重履歴を受けていることになる。砂質土供試体の間隙比～平均基底主応力関係は粘性土に比べて圧密降伏応力が明確に現れにくい為、圧密降伏応力を算定する事が出来なかったが、2.5kg ランマーによる平均鉛直応力より大きいように見える。

図 5-4-7 には、供試体上部と下部の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、図中には 1:1 の補助線を示す。供試体下部は中圧等方圧密過程の初期は補助線付近に位置していたが、鉛直ひずみが大きくなると水平ひずみが増加し、補助線から離れた。また、供試体上部は下部よりも水平ひずみが大きく生じており、構造的な異方性が確認された。一方で、除荷過程の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係は、供試体上部、下部ともに補助線にほぼ平行に推移しており、鉛直ひずみより水平ひずみの残留が大きい。

図 5-4-8 には、供試体上部と下部の体積ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、図中には 1:3 の補助線を示す。供試体下部は中圧等方圧密過程の初期は補助線付近に位置していたが、鉛直ひずみが大きくなると体積ひずみが増加した。また、供試体上部は下部よりも体積ひずみが大きく生じている。一方で、除荷過程の体積ひずみ～鉛直ひずみ関係は、供試体上部、下部ともに補助線にほぼ平行に推移しており、鉛直ひずみより体積ひずみの残留が大きい。

(2) 締固めエネルギー $4.5E_c$ で作製した乾燥密度 $\rho_d=1.718\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=12.9\%$ 、飽和度 $S_r=68.1\%$ の供試体の試験結果

図 5-4-9、図 5-4-10 には、中圧等方圧密過程における平均基底主応力の時刻歴及び軸差応力の時刻歴を示す。図中に示す(a)～(i)までのステップの詳細は先に示した通りである。

図 5-4-11 には、供試体上部及び下部の平均基底主応力～鉛直ひずみ関係を示す。図中には供試体上部と下部をそれぞれ示す。上部と下部では下部の方が平均基底主応力の増加とともに鉛直ひずみが大きく生じている。この傾向は前節で示した等方圧密試験結果と整合している。また、供試体下部は除荷後に鉛直ひずみが残留している。

図 5-4-12 には、供試体上部と下部の間隙比～平均基底主応力関係の片対数グラフを示す。供試体上部と下部ともに、中圧等方圧密過程で間隙比が小さくなり、除荷後に間隙比が元に戻らないことから収縮方向に体積ひずみが生じていることになる。また、圧密履歴のある供試体の等方圧密過程における勾配は、圧密履歴のない供試体の等方圧密過程における勾配より小さい。さらに、図中の破線は図 4-3-52 に示した 4.5kg ランマーで測定した平均撃力から求めた平均鉛直応力 $\sigma_{ave}=180\text{kPa}$ を示している。締固めにより供試体は瞬間的にこの程度の荷重履歴を受けていることになる。砂質土供試体の間隙比～平均基底主応力関係は粘性土に比べて圧密降伏応力が明確に現れにくい為、圧密降伏応力を算定する事が出来なかったが、4.5kg ランマーによる平均鉛直応力より大きいように見える。

図 5-4-13 には、供試体上部と下部の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、図中には 1:1 の補助線を示す。供試体下部は中圧等方圧密過程の初期は補助線付近に位置していたが、鉛直ひずみが大きくなると水平ひずみが増加した。さらに、水平ひずみ $\varepsilon_h=0.6\%$ 付近で水平ひずみの進行が小さくなっている。また、供試体上部と下部はほぼ同等の水平ひずみが生じており、鉛直ひずみより大きいことから、構造的な異方性が確認された。除荷過程の水平

ひずみ～鉛直ひずみ関係は、供試体上部、下部ともに補助線にほぼ平行に推移しており、鉛直ひずみより水平ひずみの残留が大きい。

図 5-4-14 には、供試体上部と下部の体積ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、図中には 1:3 の補助線を示す。供試体上部と下部は中圧等方圧密過程の初期は鉛直ひずみより水平ひずみが多く発生しているが、体積ひずみが大きくなると鉛直ひずみの進行も増加し、補助線に平行に進行している。また、供試体上部と下部はほぼ等しい体積ひずみであるが、やや下部が大きい。一方で、除荷過程の体積ひずみ～鉛直ひずみ関係は、供試体上部、下部ともに補助線にほぼ平行しており、鉛直ひずみより体積ひずみの残留が大きい。

5.4.2 非一様供試体の等方圧密過程の変形特性に与える圧密履歴の影響

図 5-4-15 には、先に示した圧密履歴のない供試体と圧密履歴のある供試体のそれぞれのステップ(a)と(i)の等方圧密過程における、上部の水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分を示す。圧密履歴のない飽和度 $S_r=66.0\%$ の供試体は、補助線 1:6 付近に、飽和度 $S_r=19.3\%$ の供試体は、補助線 1:6～1:2 の間に位置しており、図 5-3-17 で示された傾向と整合する。圧密履歴のある飽和度 $S_r=67.3\%$ の供試体は、補助線 1:2 付近に、飽和度 $S_r=19.6\%$ の供試体は、補助線 1:1 付近に位置している。中圧等方圧密による圧密履歴により、等方圧密時の鉛直ひずみ増分はほぼ等しいが、水平ひずみ増分が低下した。

図 5-4-16 には、圧密履歴のない供試体と圧密履歴のある供試体のそれぞれのステップ(a)と(i)の等方圧密過程における、下部の水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分を示す。圧密履歴のない飽和度 $S_r=69.3\%$ の供試体は、補助線 1:6～1:2 の間に、飽和度 $S_r=19.6\%$ の供試体は、補助線 1:2～1:1 の間に位置しており、図 5-3-18 で示された傾向と整合する。圧密履歴のある飽和度 $S_r=71.2\%$ の供試体は、補助線 1:2 付近に、飽和度 $S_r=19.9\%$ の供試体は、補助線 1:1 付近に位置している。中圧等方圧密による圧密履歴により、等方圧密時の鉛直ひずみ増分はほぼ等しいが、水平ひずみ増分が低下した。

以上より、室内締固め供試体は平均基底主応力 $p_{net}=700\text{kPa}$ 程度の中圧等方圧密の圧密履歴により、構造異方性を持つ供試体の水平ひずみの進行が低下し、等方圧密に対する変形特性が変化する。また、供試体上部と下部の変形特性の違いは小さいことから、供試体の非一様性による影響は小さい。

5.4.3 非一様供試体の中圧等方圧密過程における微小ひずみ領域における変形特性

図 5-4-17 には、締固めエネルギー $1.0E_c$ で作製した乾燥密度 $\rho_d=1.606\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=4.9\%$ 、飽和度 $S_r=19.6\%$ の供試体の中圧等方圧密及び除荷過程に実施した微小繰返し载荷により得られた等価ヤング率～鉛直応力関係の両対数グラフを示す。鉛直応力が大きくなると、等価ヤング率も増加している。供試体上部と下部の差はわずかであるが、下部が大きい。中圧等方圧密過程に比べて除荷過程の等価ヤング率はやや大きい傾向である。AnhDan & Koseki(2005)は三主応力制御試験により、密詰め豊浦砂の微小ひずみ領域の変形特性を調べているが、等方圧密中の鉛直方向の等価ヤング率は鉛直応力に依存する事が知られており、次式のように表される。

$$\frac{E_v}{f(e)} = \frac{E_{v0}}{f(e_0)} \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_0} \right)^m \quad (5-4-1)$$

ここで、 m 値は等価ヤング率の応力依存性を示す係数であり、砂は一般に $m=0.5$ 程度とされている。榎本(2012)や Enomoto et.al. (2013)は多様な砂礫材料の平均粒径 D_{50} と静的測定による m 値の関係を調べており、既往の研究成果と合わせてまとめている。それによると本研究に用いた試料($D_{50}=0.25\text{mm}$)は $m=0.4\sim0.6$ の範囲にある。

図 5-4-18 には、式 5-2-9 で示した間隙比関数で正規化した等価ヤング率～鉛直応力関係の両対数グラフを示す。供試体上部と下部ともに、鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲と、鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 600\text{kPa}$ の範囲では、 $E_{eq}/f(e)$ ～鉛直応力関係の勾配が異なる。桑野ら(2009)は洪積砂層から採取した不攪乱砂供試体を飽和化し、等方圧密排水三軸試験時に実施した弾性波速度測定から正規化したせん断剛性率を求めている。その結果、有効拘束圧が 20kPa 付近を境に拘束圧依存性が異なる事を示した。有効拘束圧が 20kPa 以上では、固結のない砂に対する $m=0.54$ を得たのに対し、有効拘束圧 20kPa 以下では粒子間の固結の影響で m 値が低くなることを説明している。本研究で作製した供試体が固結している事は考えにくい、不飽和状態で取り扱う為、鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲では初期サクシジョンの影響が生じている可能性がある。鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 600\text{kPa}$ の範囲で求めた m 値は供試体上部で $m=0.403$ 、下部で $m=0.446$ であり、榎本(2009)の示した結果と整合する。

図 5-4-19 には、等価ポアソン比～鉛直応力関係を示す。全体的に供試体上部及び下部の中圧等方圧密過程と除荷過程において、等価ポアソン比は $v_{eq}=0.2\sim 0.3$ 程度であるが、鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲の供試体上部は $v_{eq}=0.3\sim 0.5$ 程度とやや大きい。また鉛直応力が高い $\sigma_v=400\text{kPa}\sim 600\text{kPa}$ の除荷過程もやや高い値であった。

図 5-4-20 には、締固めエネルギー $4.5E_c$ で作製した乾燥密度 $\rho_d=1.718\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=12.9\%$ 、飽和度 $S_r=68.1\%$ の供試体の中圧等方圧密及び除荷過程に実施した微小繰返し载荷により得られた等価ヤング率～鉛直応力関係の両対数グラフを示す。鉛直応力が大きくなると、等価ヤング率も増加している。供試体上部と下部の差はわずかであるが、下部が大きい。中圧等方圧密過程に比べて除荷過程の等価ヤング率はやや大きい傾向である。これは圧密履歴の影響によるものと考えられる。

図 5-4-21 には、式 5-2-9 で示した間隙比関数で正規化した等価ヤング率～鉛直応力関係の両対数グラフを示す。供試体上部と下部ともに、鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲と、鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ の範囲では、 $E_{eq}/f(e)$ ～鉛直応力関係の勾配が異なる。これは先に示した供試体と同じ傾向である。鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ の範囲で求めた m 値は供試体上部で $m=0.535$ 、下部で $m=0.566$ であり、榎本(2009)の示した結果と整合する。また、先に示した供試体の m 値に比べて大きい結果であった。

図 5-4-22 には、等価ポアソン比～鉛直応力関係を示す。全体的に供試体上部及び下部の中圧等方圧密過程と除荷過程において、等価ポアソン比は $v_{eq}=0.2\sim 0.4$ 程度であるが、鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲の供試体上部は $v_{eq}=0.4\sim 0.6$ 程度とやや大きい。

以上より、鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲と、鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ の範囲では、微小ひずみ領域の変形特性は異なるが、供試体上部と下部の変形特性の違いは小さいことから、供試体の非一様性による影響は小さい。

5.4.4 非一様供試体の単調载荷過程の強度変形特性に与える圧密履歴の影響

図 5-4-23 には、締固めエネルギー $1.0E_c$ で作製した平均飽和度が $S_r=19.6\%$ の圧密履歴の影響のない供試体の軸差応力 $q=30\text{kPa}$ までの载荷・除荷過程(ステップ(b))及び、圧密履歴の影響のある供試体(ステップ(i)の後の供試体)の軸差応力～EDT、LDT170 で測定した鉛直ひずみ関係を示す。軸差応力～EDT で測定した鉛直ひずみ関係を見ると、圧密履歴のある供試体はピーク強度に達するまでほぼ線形的な変形挙動を示し過圧密供試体のようである。ピーク後は緩やかに軸差応力が低下している。また、その拡大図を図 5-4-24 に示す。軸差応力～LDT170 で測定した鉛直ひずみ関係を見ると、圧密履歴のない供試体の軸差応力 $q=30\text{kPa}$ で発生する鉛直ひずみは $\varepsilon_v=0.02\%$ 程度であるが、その範囲では圧密履歴のある供試体の変形挙動と類似している。詳しくは供試体の上部と下部に分けて考察する。また、EDT で測定した鉛直ひずみ関係と変形挙動は大きく異なり、ベディングエラーや試験装置の変形等の

影響が EDT の測定に多く含まれる事がわかる。

図 5-4-25 には、圧密履歴の影響のない供試体と圧密履歴のある供試体の上部と下部別の軸差応力～鉛直ひずみ関係を示す。圧密履歴のある供試体は上部と下部で類似する軸差応力～鉛直ひずみ関係を示しているが、やや下部の方がピーク強度までの剛性が高い。一方で、体積ひずみは供試体下部の方が上部に比べてやや収縮傾向が強く現れている。また、図 5-4-26 には拡大図を示している。圧密履歴の影響のない供試体は、上部と下部で軸差応力 $q=30\text{kPa}$ までの剛性はほぼ同等であるが、やや上部が大きい。圧密履歴のある供試体は、圧密履歴のない供試体に比べて上部と下部ともに軸差応力 $q=30\text{kPa}$ までの剛性がやや大きいが両者の差は小さい。また、この軸差応力の範囲において圧密履歴のある供試体の上部と下部の差はほとんど現れていない。また、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.02\%$ 程度の範囲において、圧密履歴のある供試体の体積ひずみは、圧密履歴のない供試体に比べて収縮傾向が小さくなっている。

図 5-4-27 には、圧密履歴のない供試体と圧密履歴のある供試体の上部と下部別の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。圧密履歴のある供試体は、下部の方が上部に比べてやや水平ひずみが小さい。また、図 5-4-28 には拡大図を示している。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.02\%$ 程度の範囲において、圧密履歴のある供試体は圧密履歴のない供試体に比べ、水平ひずみが小さくなっている。

図 5-4-29 には、締固めエネルギー $4.5E_c$ で作製した平均飽和度が $S_r=68.1\%$ の圧密履歴の影響のない供試体の軸差応力 $q=30\text{kPa}$ までの載荷・除荷過程及び、圧密履歴の影響のある供試体の軸差応力～EDT、LDT170 で測定した鉛直ひずみ関係を示す。軸差応力～EDT で測定した鉛直ひずみ関係を見ると、圧密履歴のある供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=4\%$ 程度に明確なピーク強度を示している。ピーク後は軸差応力 $q=200\text{kPa}$ 程度まで軸差応力が低下している。また、その拡大図を図 5-4-30 に示す。軸差応力～LDT170 で測定した鉛直ひずみ関係を見ると、圧密履歴のない供試体の軸差応力 $q=30\text{kPa}$ で発生する鉛直ひずみは $\varepsilon_v=0.05\%$ 程度であるが、その範囲では圧密履歴のある供試体の変形挙動と異なり、圧密履歴のある供試体の方が、鉛直ひずみが $\varepsilon_v=0.05\%$ における軸差応力は大きい。詳しくは供試体の上部と下部に分けて考察する。また、EDT で測定した鉛直ひずみ関係と変形挙動は大きく異なり、ベディングエラーや試験装置の変形等の影響が EDT の測定に多く含まれる事がわかる。

図 5-4-31 には、圧密履歴の影響のない供試体と圧密履歴のある供試体の上部と下部別の軸差応力～鉛直ひずみ関係を示す。圧密履歴のある供試体の上部と下部では、類似する軸差応力～鉛直ひずみ関係を示しているが、やや下部の方が、ピーク強度までの剛性が高い傾向である。体積ひずみは供試体上部と下部で類似傾向を示している。また、図 5-4-32 には拡大図を示している。圧密履歴のない供試体は、上部と下部で軸差応力 $q=30\text{kPa}$ までの剛性はほぼ同等であるが、やや上部が大きい。圧密履歴のある供試体は、圧密履歴のない供試体に比べて上部と下部ともに軸差応力 $q=30\text{kPa}$ までの剛性がやや大きい。また、この軸差応力の範囲において圧密履歴のある供試体の上部と下部の差はほとんど現れていない。また、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.05\%$ 程度の範囲において、圧密履歴のある供試体の体積ひずみは、圧密履歴のない供試体に比べて収縮傾向が小さくなっている。

図 5-4-33 には、圧密履歴の影響のない供試体と圧密履歴のある供試体の上部と下部別の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。圧密履歴のある供試体は、上部と下部ともに類似する傾向であった。また、図 5-4-34 には拡大図を示している。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.05\%$ 程度の範囲において、圧密履歴のある供試体は圧密履歴のない供試体に比べ、水平ひずみが小さくなっている。

以上より、室内締固め供試体は中圧等方圧密の圧密履歴により、水平ひずみの発生が抑制されて構造が変化する事は先に示したが、載荷過程においても圧密履歴の影響によって水平ひずみの発生が抑制されるため、若干の剛性増加や体積収縮量の低減等、変形特性の向上が確認された。

5.4.5 圧密履歴の影響がある供試体の強度変形特性に与える飽和度の影響

図 5-4-35 には、図 5-2-32 に示した圧密履歴のない供試体の最大軸差応力～乾燥密度関係に圧密履歴のある供試体上部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体のデータは、圧密履歴のない供試体の最大軸差応力～乾燥密度関係に良く整合している事がわかる。また、図 5-4-36 には、図 5-2-38 に示した圧密履歴のない供試体の $f_{qmax}(S_r)$ ～飽和度関係に圧密履歴のある供試体上部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体のデータは、圧密履歴のない供試体の $f_{qmax}(S_r)$ ～飽和度関係に良く整合している。すなわち、最大軸差応力～乾燥密度関係とそれに与える飽和度の影響は、圧密履歴の有無に関わらず同等である。

図 5-4-37 には、図 5-2-48 に示した圧密履歴のない供試体の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係に圧密履歴のある供試体上部及び下部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体のデータは、圧密履歴のない供試体の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係に類似した傾向を示しているが、圧密履歴のある供試体はやや割線ヤング率 E_{50} が大きく、また、上部と下部の差が小さい事がわかる。また、図 5-4-38 には、図 5-2-53 に示した圧密履歴のない供試体の $f_{E50}(S_r)$ ～飽和度関係に圧密履歴のある供試体上部及び下部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体のデータは、圧密履歴のない供試体の $f_{E50}(S_r)$ ～飽和度関係に類似している。ただし、飽和度 $S_r=20\%$ 付近において圧密履歴のある供試体の方が同じ飽和度の圧密履歴のない供試体に比べて $f_{E50}(S_r)$ が大きい。すなわち、圧密履歴の影響により割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係はやや向上している。

図 5-4-39 には、図 5-2-40 に示した圧密履歴のない供試体の初期ヤング率～乾燥密度関係に圧密履歴のある供試体上部及び下部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体のデータは、圧密履歴のない供試体の初期ヤング率～乾燥密度関係に良く整合している事がわかる。また、図 5-4-40 には、図 5-2-45 に示した圧密履歴のない供試体の $f_{E0}(S_r)$ ～飽和度関係に圧密履歴のある供試体上部及び下部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体のデータは、圧密履歴のない供試体の $f_{E0}(S_r)$ ～飽和度関係に良く整合している。すなわち、初期ヤング率～乾燥密度関係とその関係に与える飽和度の影響は、圧密履歴の有無に関わらず同等であった。

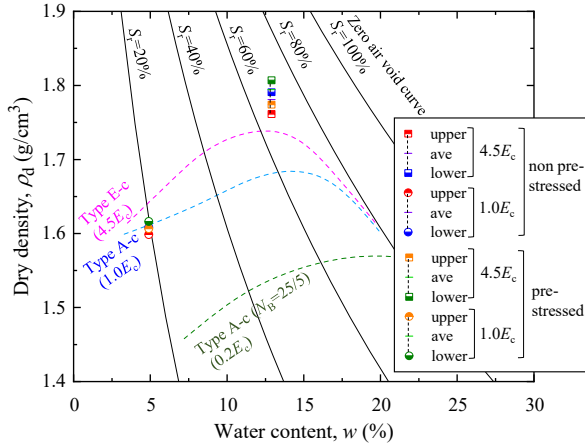


図 5-4-1 試験ケースの乾燥密度～含水比関係 (上端部、中央部、下端部)

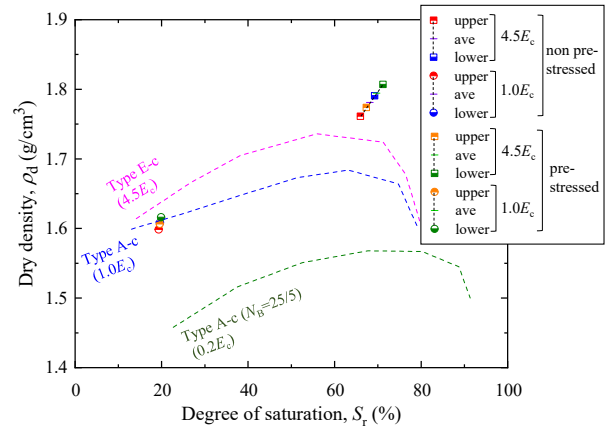


図 5-4-2 試験ケースの乾燥密度～飽和度関係 (上部、下部)

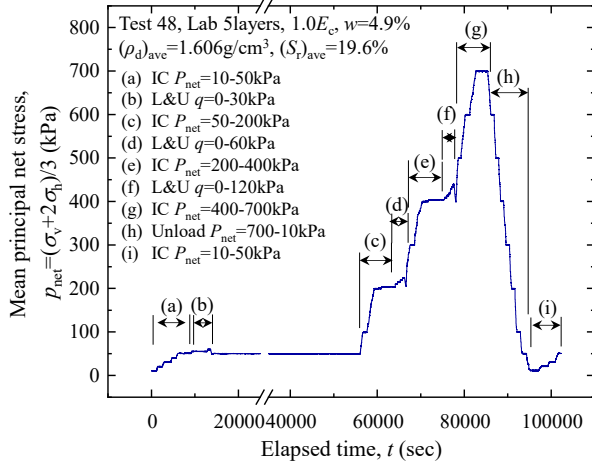


図 5-4-3 平均基底主応力の時刻歴

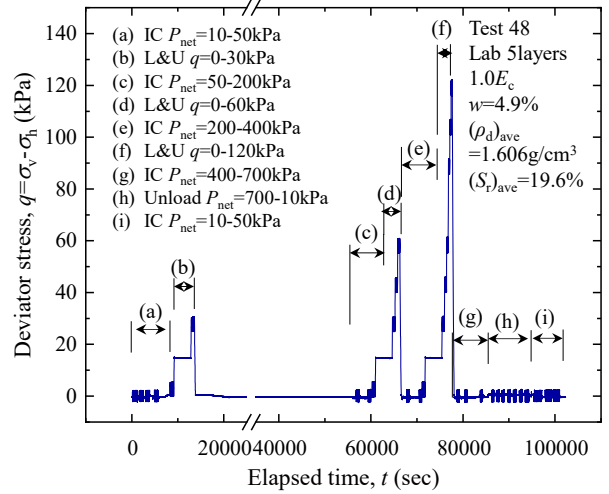


図 5-4-4 軸差応力の時刻歴

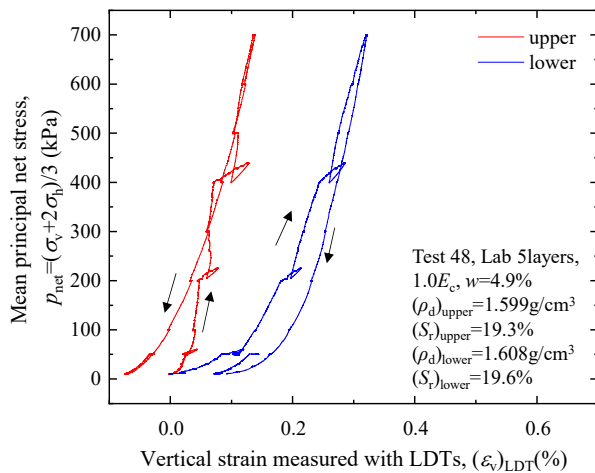


図 5-4-5 平均基底主応力～鉛直ひずみ関係

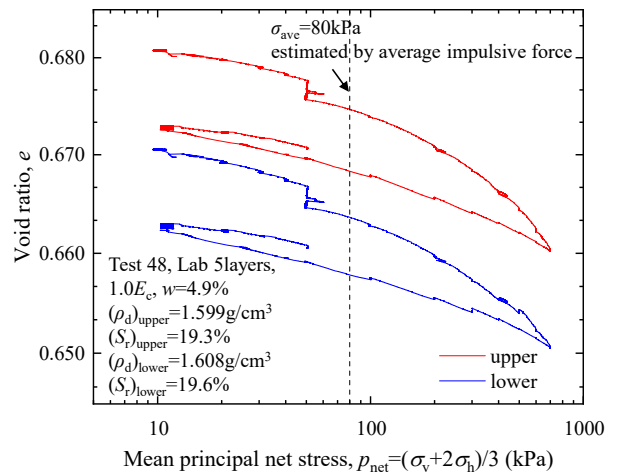


図 5-4-6 間隙比～平均基底主応力関係(片対数)

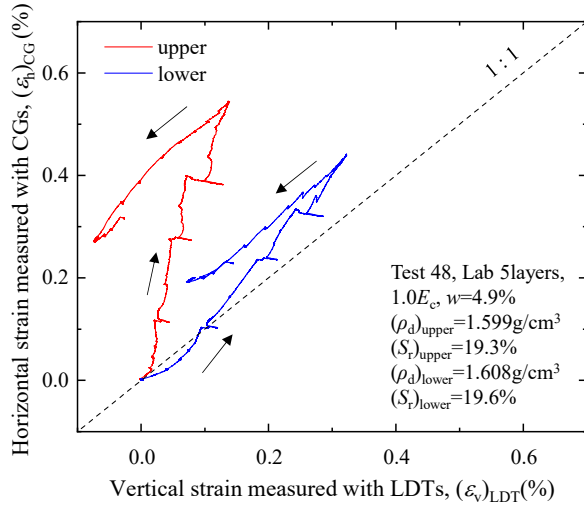


図 5-4-7 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

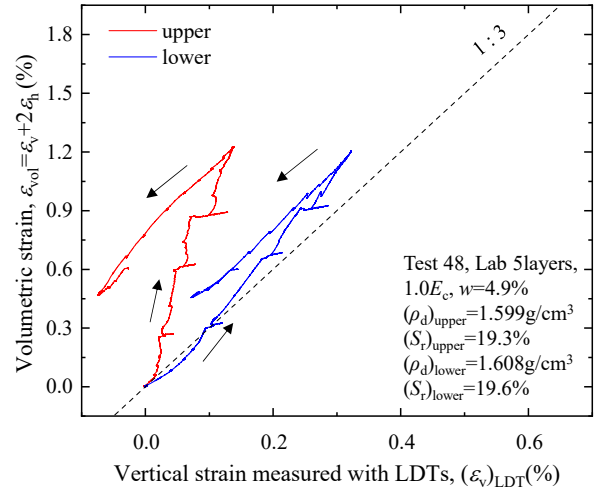


図 5-4-8 体積ひずみ～鉛直ひずみ関係

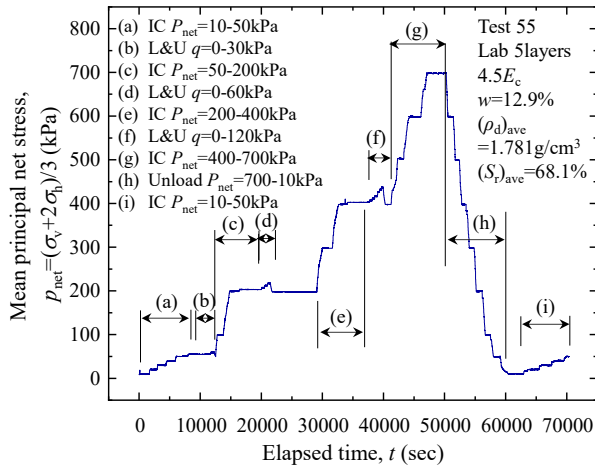


図 5-4-9 平均基底主応力の時刻歴

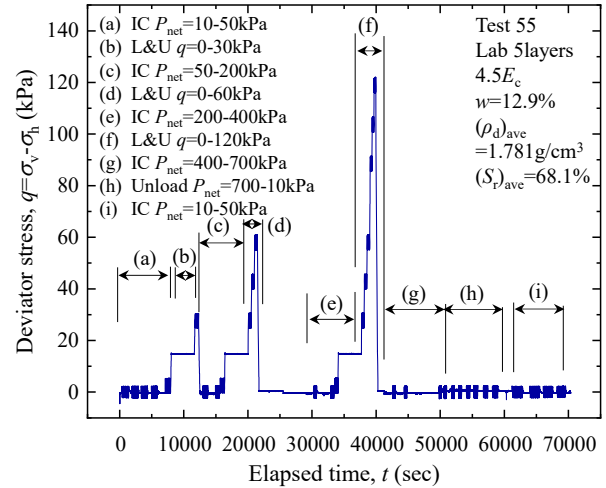


図 5-4-10 軸差応力の時刻歴

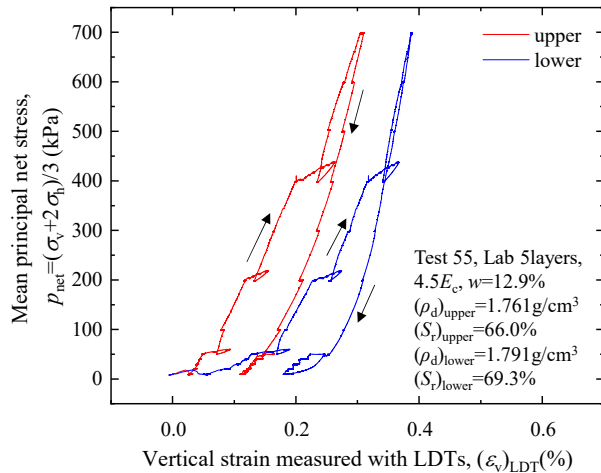


図 5-4-11 平均基底主応力～鉛直ひずみ関係

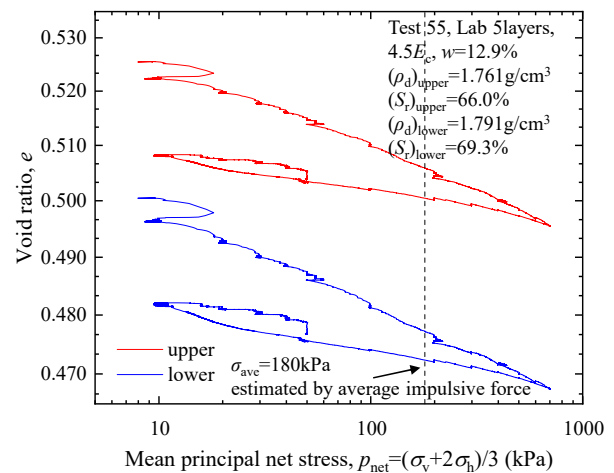


図 5-4-12 間隙比～平均基底主応力関係(片対数)

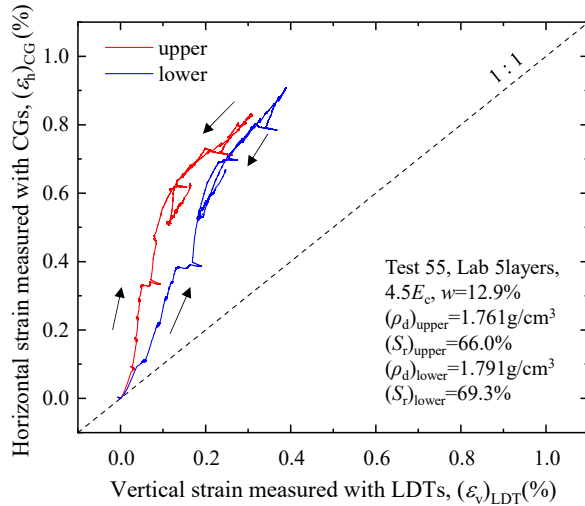


図 5-4-13 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

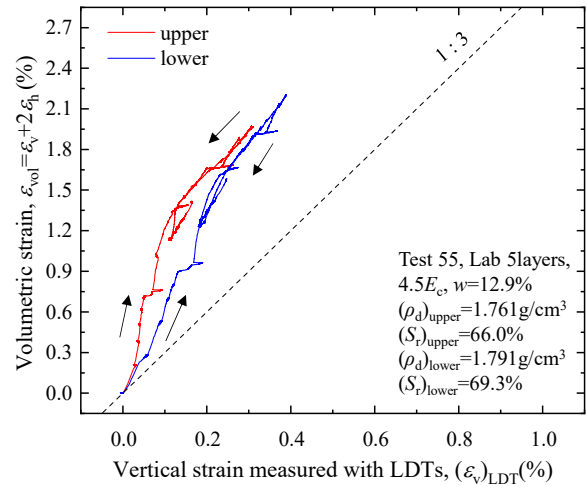


図 5-4-14 体積ひずみ～鉛直ひずみ関係

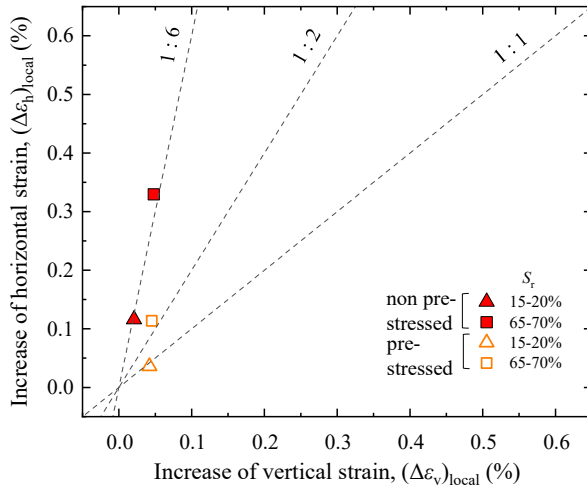


図 5-4-15 水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係 (上部)

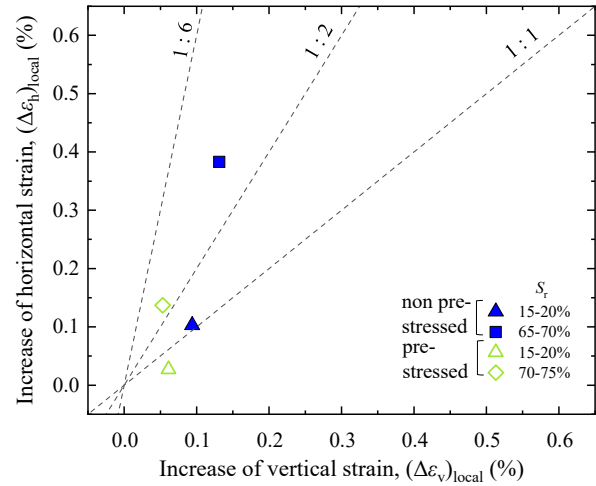


図 5-4-16 水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係 (下部)

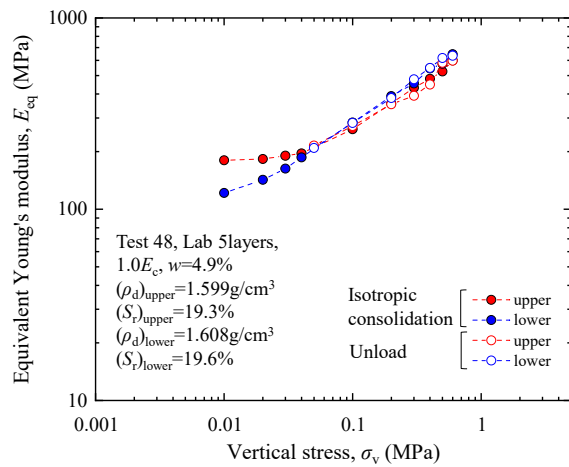


図 5-4-17 等価ヤング率～鉛直応力関係(両対数)

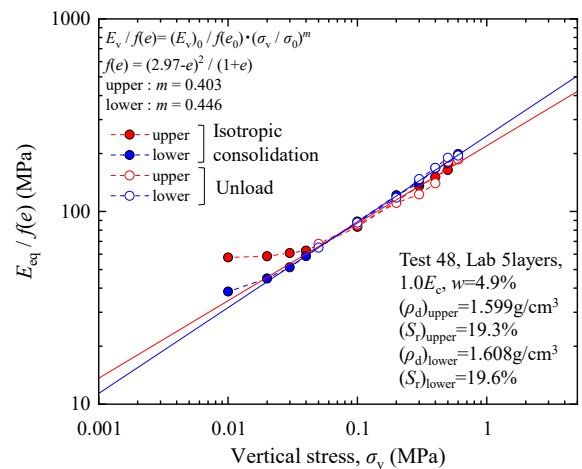


図 5-4-18 $E_{eq} / f(e)$ ～鉛直応力関係(両対数)

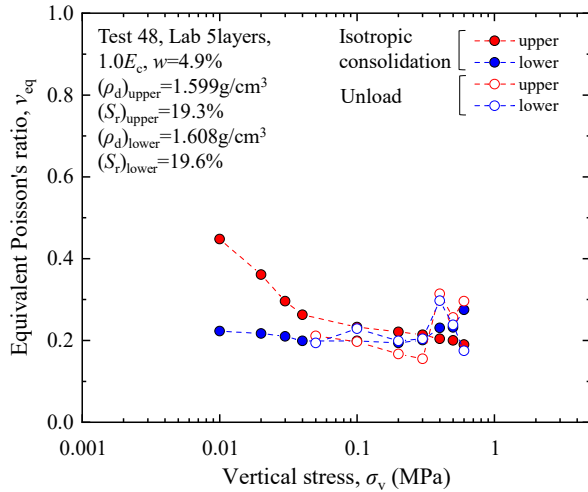


図 5-4-19 等価ポアソン比～鉛直応力関係(片対数)

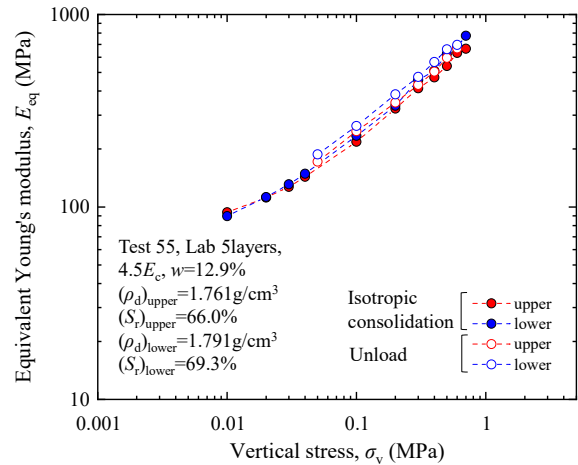


図 5-4-20 等価ヤング率～鉛直応力関係(両対数)

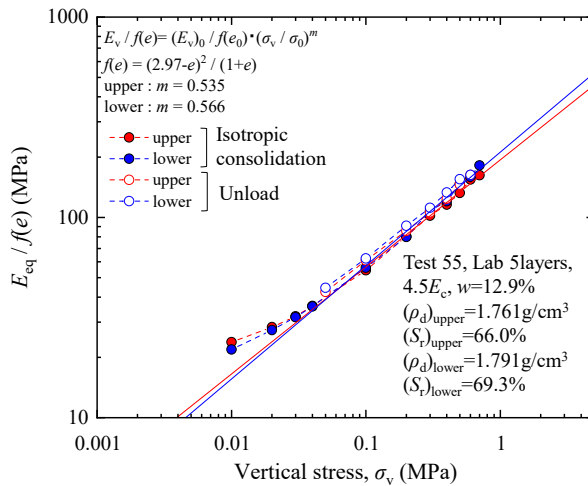


図 5-4-21 $E_{eq} / f(e)$ ～鉛直応力関係(両対数)

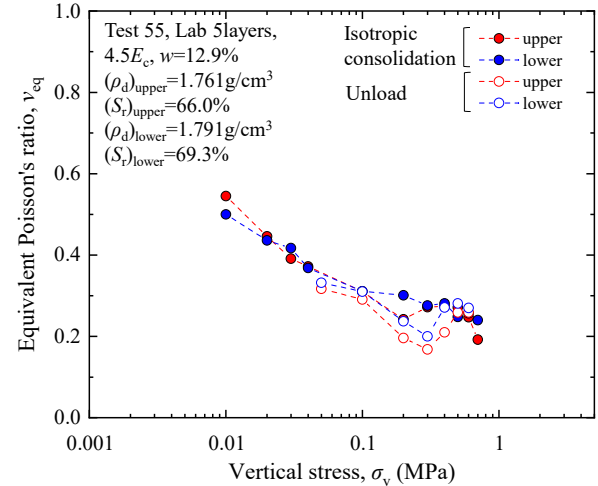


図 5-4-22 等価ポアソン比～鉛直応力関係(片対数)

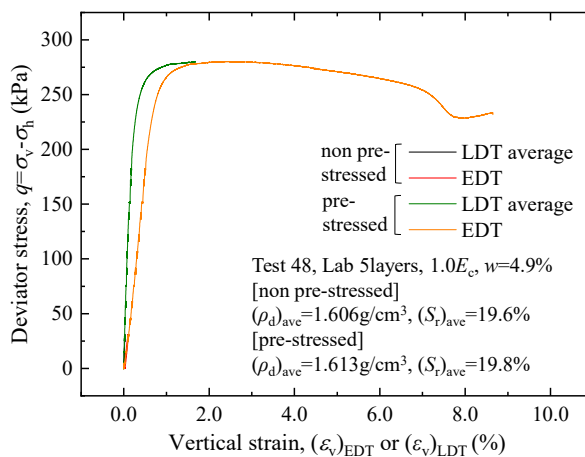


図 5-4-23 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

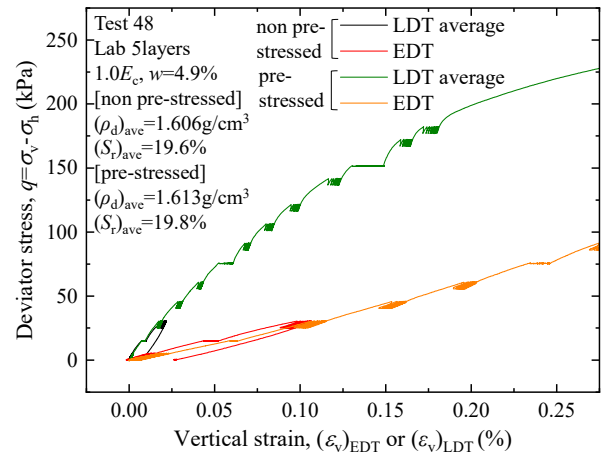


図 5-4-24 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(EDT、LDT 平均)

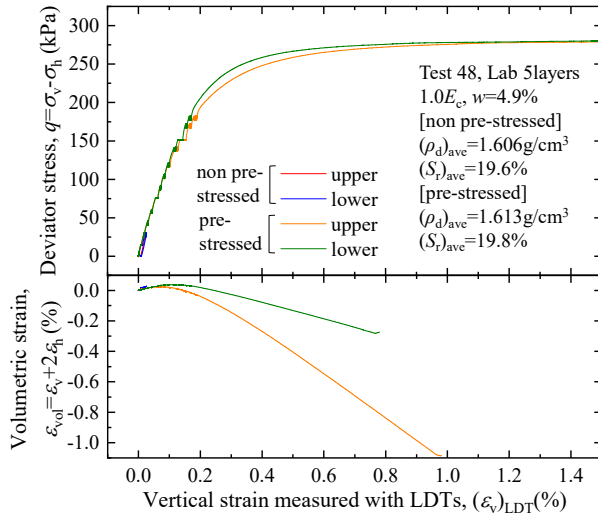


図 5-4-25 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

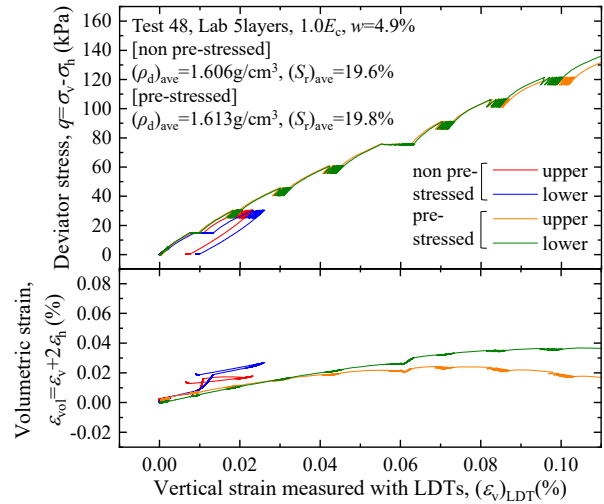


図 5-4-26 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

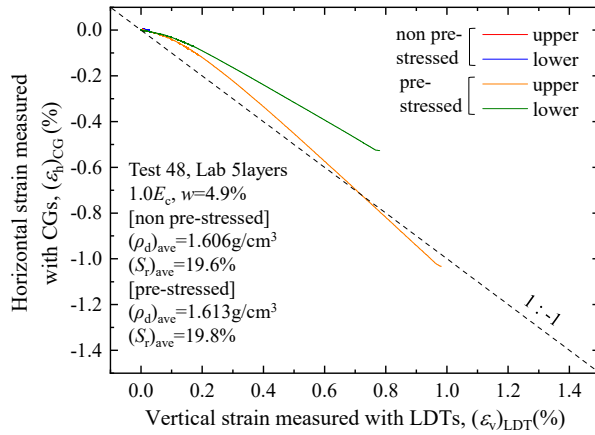


図 5-4-27 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

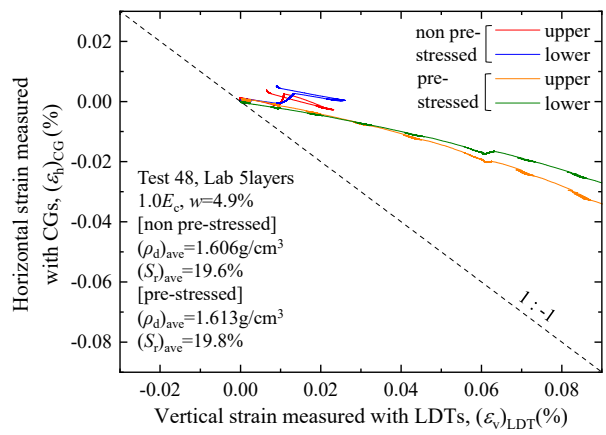


図 5-4-28 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

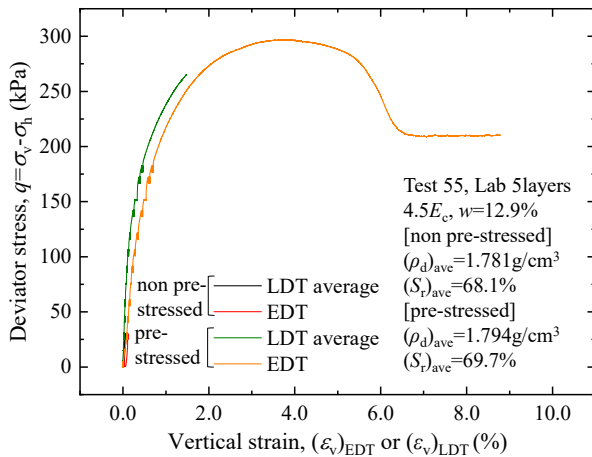


図 5-4-29 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

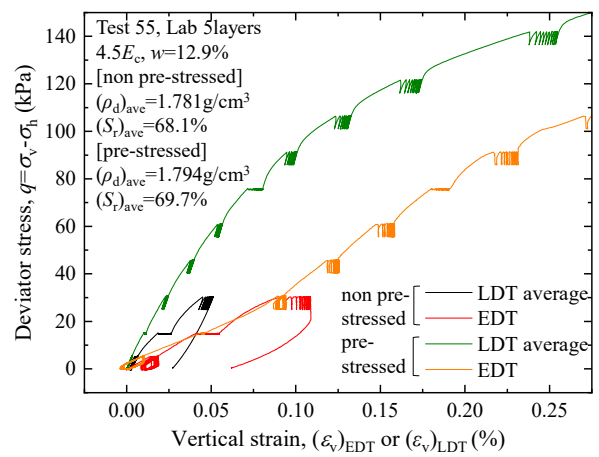


図 5-4-30 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(EDT、LDT 平均)

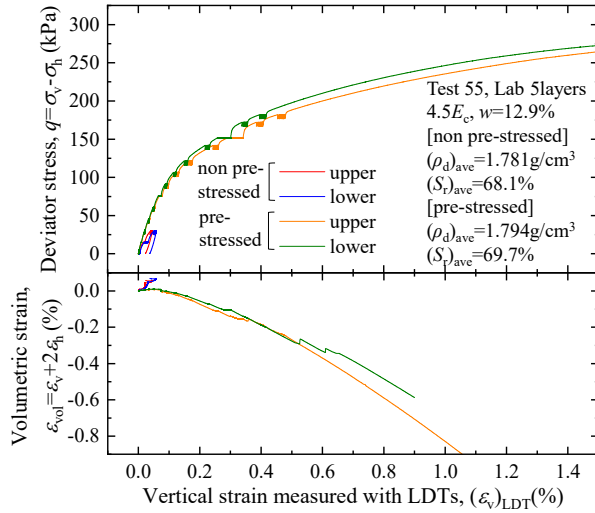


図 5-4-31 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

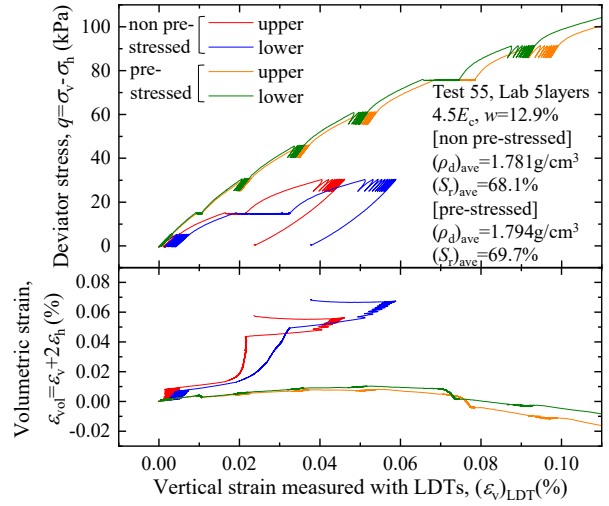


図 5-4-32 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

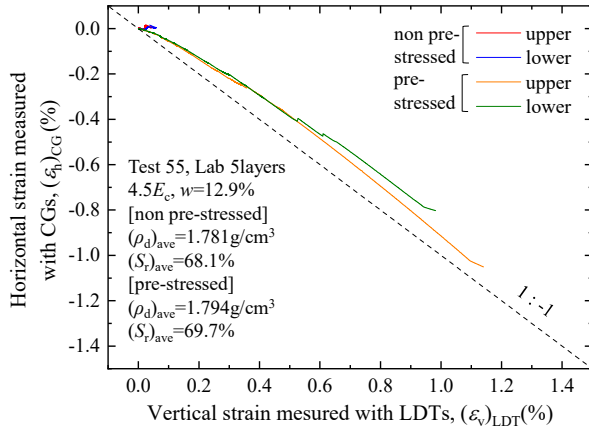


図 5-4-33 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

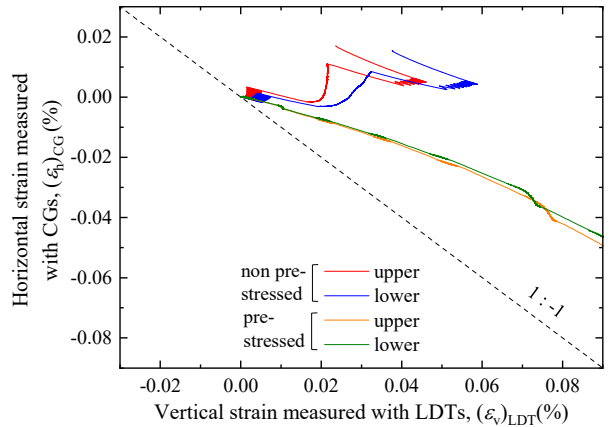


図 5-4-34 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

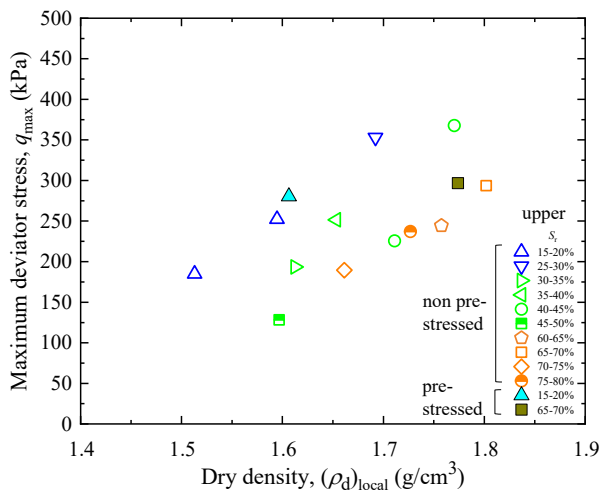


図 5-4-35 最大軸差応力～乾燥密度関係(上部)

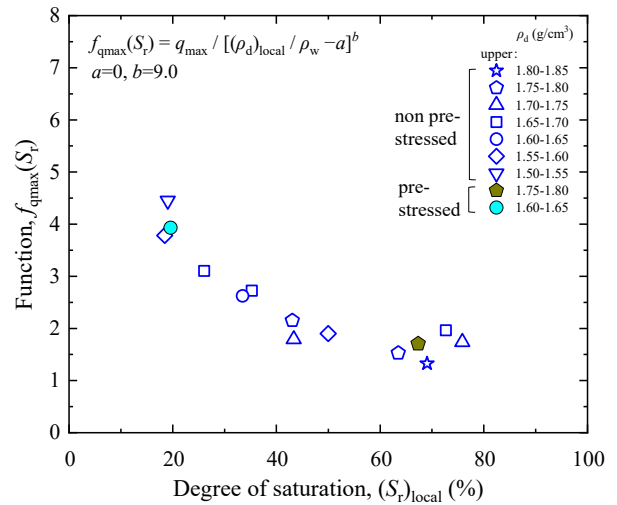


図 5-4-36 $f_{qmax}(S_r)$ ～飽和度関係(上部)
($a=0, b=9.0$)

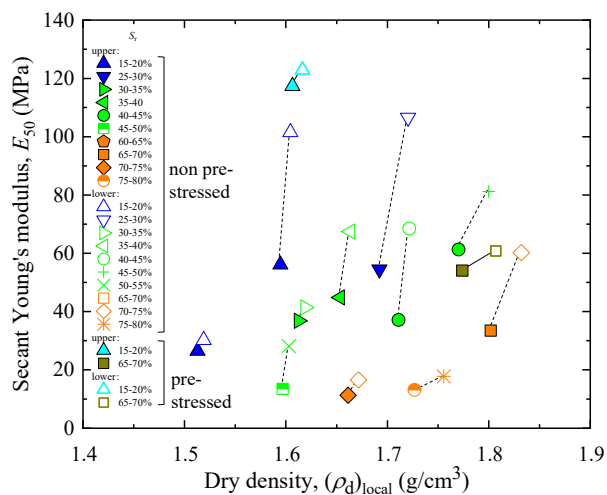


図 5-4-37 割線ヤング率～乾燥密度関係(上部、下部)

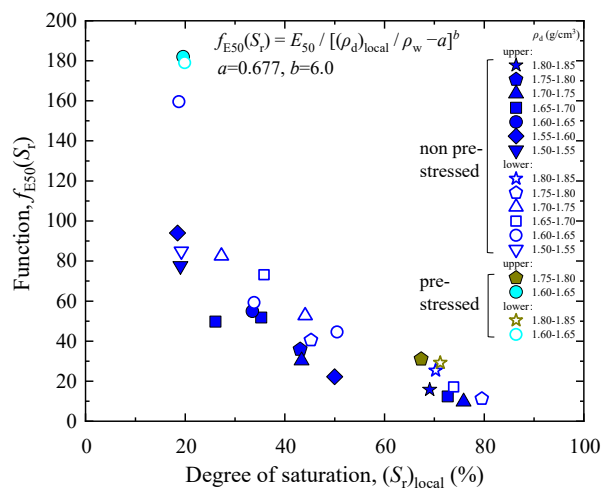


図 5-4-38 $f_{E50}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=6.0$)

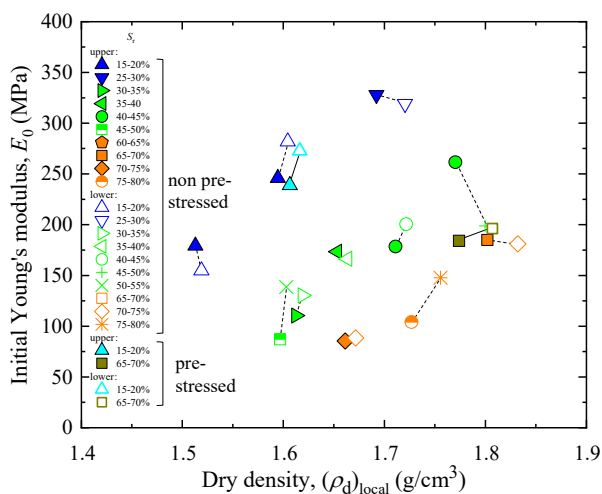


図 5-4-39 初期ヤング率～乾燥密度関係(上部、下部)

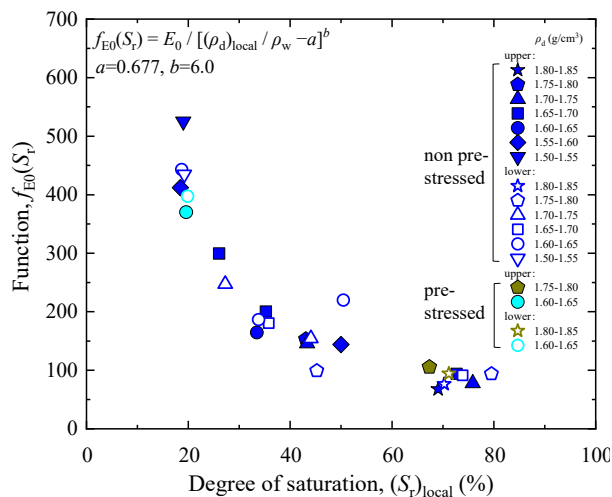


図 5-4-40 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=6.0$)

5.5 非一様供試体の荷重保持載荷による変形特性

須藤ら(2012、2013)は、締め固めた砂質土供試体に荷重保持載荷を段階的に与え、乾燥密度や締固め時の飽和度等の供試体条件が鉛直ひずみの増分に与える影響について調べており、その結果、軸差応力が大きくなると荷重保持載荷による鉛直ひずみ増分は大きくなる事、乾燥密度が大きくなると荷重保持載荷による鉛直ひずみ増分は小さくなる事、締め固め時の飽和度が大きくなると荷重保持載荷による鉛直ひずみ増分は大きくなる事を示している。荷重保持載荷による鉛直ひずみ増分と乾燥密度(締固め度)との関係については、平川ら(2008)も多様な砂礫材料について調べており、同様の報告をしている。そこで、本研究では荷重保持載荷が室内で締め固めた非一様供試体の変形特性に与える影響について調べた。

5.5.1 応力～ひずみ関係における荷重保持載荷による変形特性

図 5-5-1 には、図 5-2-4 の軸差応力～鉛直ひずみ関係に示した供試体上部と下部それぞれの、鉛直ひずみの時刻歴を示す。単調載荷過程における軸差応力 $q=15\text{kPa}$ 、 75kPa 、 150kPa の 3 段階で、1 時間の荷重保持載荷を実施している。いずれの軸差応力でも荷重保持載荷の初期に鉛直ひずみが多く生じ、時間の経過とともに収束傾向を示している。軸差応力 $q=15\text{kPa}$ 、 $q=75\text{kPa}$ において、1 時間の荷重保持載荷で鉛直ひずみの残留は目立たないが、軸差応力 $q=150\text{kPa}$ の特に供試体上部ではやや鉛直ひずみが収束していないように見える。須藤ら(2012、2013)は荷重保持載荷を 2 時間、平川ら(2008)は荷重保持載荷を 1 時間実施しており、本研究の試料には荷重保持載荷時間が十分な長さでなかった事も考えられるが、今回は荷重保持載荷 1 時間での鉛直ひずみ増分を用いて考察する事とした。

図 5-5-2 には、軸差応力 $q=15\text{kPa}$ 付近を拡大した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。供試体上部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0068\%$ 、下部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0033\%$ であり、供試体上部の方が大きい。また、荷重保持載荷中の体積ひずみは単調載荷中の挙動と同じく、鉛直ひずみの進行に伴って収縮傾向を示している。

図 5-5-3 には、軸差応力 $q=75\text{kPa}$ 付近を拡大した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。供試体上部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0313\%$ 、下部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0130\%$ であり、供試体上部の方が大きい。また、荷重保持載荷中の体積ひずみは単調載荷中の挙動と同じく、鉛直ひずみの進行に伴って収縮傾向を示している。

図 5-5-4 には、軸差応力 $q=150\text{kPa}$ 付近を拡大した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。供試体上部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0852\%$ 、下部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0390\%$ であり、供試体上部の方が大きい。また、荷重保持載荷中の体積ひずみは単調載荷中の挙動と同じく、鉛直ひずみの進行に伴って膨張傾向を示している。

5.5.2 荷重保持載荷による変形特性に与える飽和度の影響

図 5-5-5 には、飽和度 $S_r=15\%\sim 50\%$ の範囲の荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～軸差応力関係を示す。ほぼ全てのケースで軸差応力が増加すると、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は増加している。また、図 5-5-6 には、飽和度 $S_r=50\%\sim 80\%$ の範囲の荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～軸差応力関係を示す。ほぼ全てのケースで軸差応力が増加すると、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は増加している。

図 5-5-7 には、軸差応力 $q=15\text{kPa}$ における、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～局所乾燥密度関係を示す。供試体上部と下部ともに乾燥密度が増加すると、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は減少する傾向である。ま

た、乾燥密度 $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3$ と 1.65g/cm^3 の付近の一部の供試体上部のデータを除いて、同じ乾燥密度の供試体上部と下部では、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分の違いはほとんど見られなかった。さらに、供試体上部と下部ともに、同じ乾燥密度において飽和度が高い程、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は大きい傾向を示した。

図 5-5-8 には、軸差応力 $q=75\text{kPa}$ における、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～局所乾燥密度関係を示す。供試体上部と下部ともに乾燥密度が増加すると、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は減少する傾向である。また、同じ乾燥密度の供試体上部と下部では、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分の違いはほとんど認められない。さらに、供試体上部と下部ともに、同じ乾燥密度において飽和度が高い程、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は大きい傾向を示した。

図 5-5-9 には、軸差応力 $q=150\text{kPa}$ における、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～局所乾燥密度関係を示す。供試体上部と下部ともに乾燥密度が増加すると、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は減少する傾向である。また、同じ乾燥密度の供試体上部と下部では、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分の違いはほとんど認められない。さらに、供試体上部と下部ともに、同じ乾燥密度において飽和度が高い程、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は大きい傾向を示した。

以上より、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～乾燥密度関係は飽和度の影響ではばらつきはあるが、逆相関の関係である事がわかった。また、軸差応力が増加すると供試体上部と下部ともに鉛直ひずみの増分は大きくなるが、鉛直ひずみの増分～乾燥密度の関係は変わらない事が確認された。

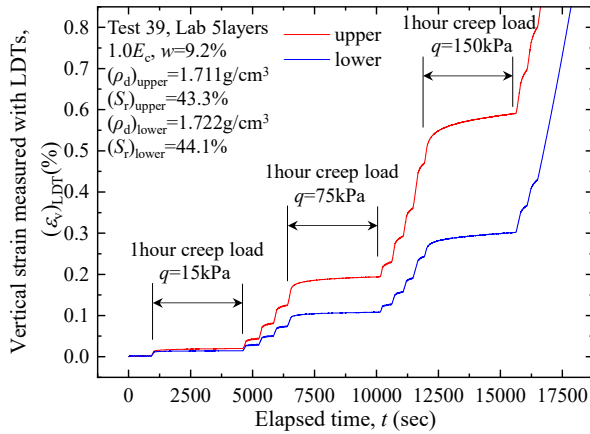


図 5-5-1 鉛直ひずみの時刻歴
(上部、下部)

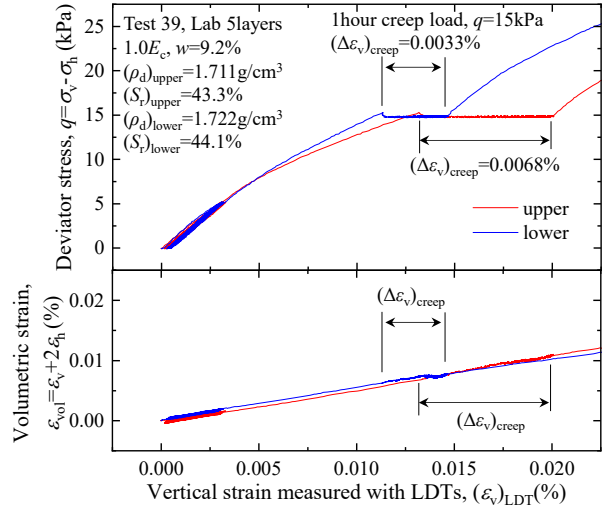


図 5-5-2 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部、 $q=15\text{kPa}$ 付近拡大)

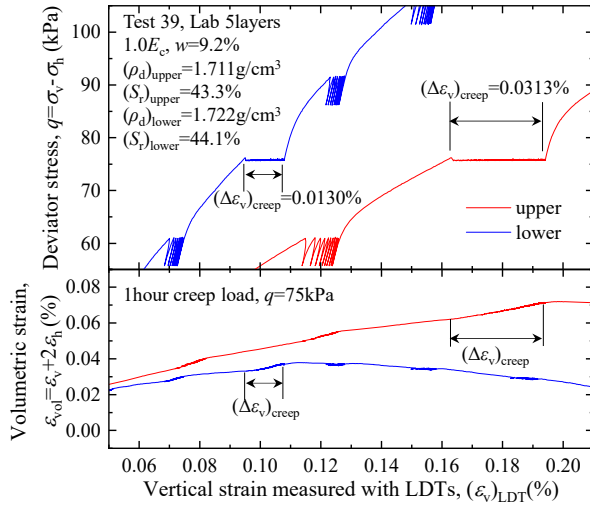


図 5-5-3 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部、 $q=75\text{kPa}$ 付近拡大)

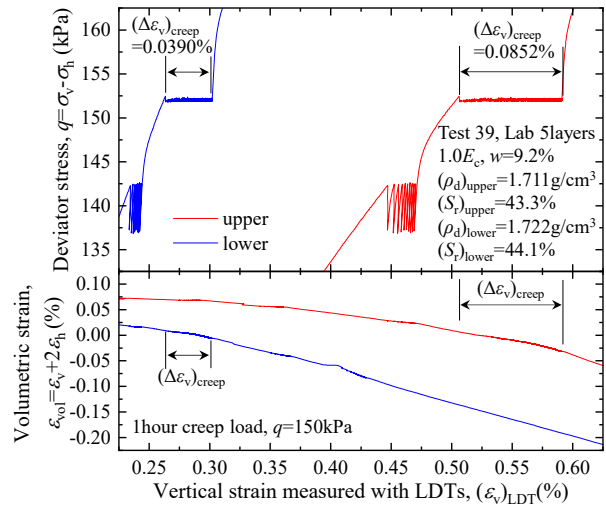


図 5-5-4 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部、 $q=150\text{kPa}$ 付近拡大)

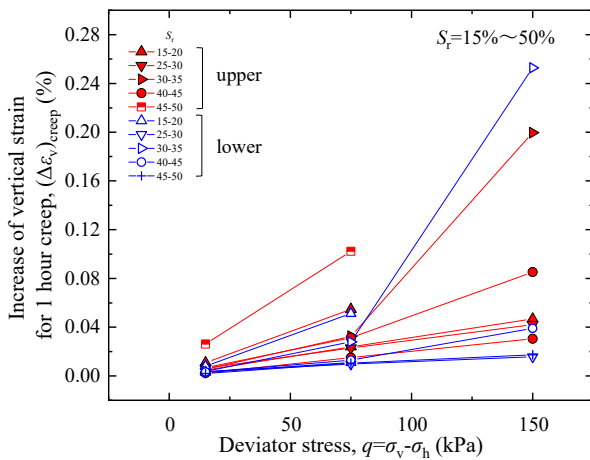


図 5-5-5 $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}} \sim q$ 関係
(飽和度 $S_r=15\% \sim 50\%$)

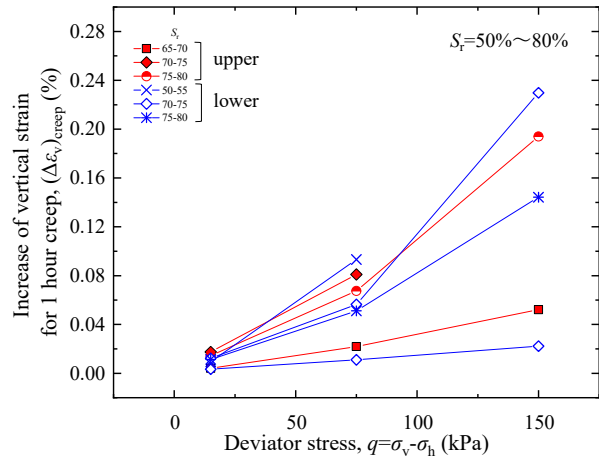


図 5-5-6 $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}} \sim q$ 関係
(飽和度 $S_r=50\% \sim 80\%$)

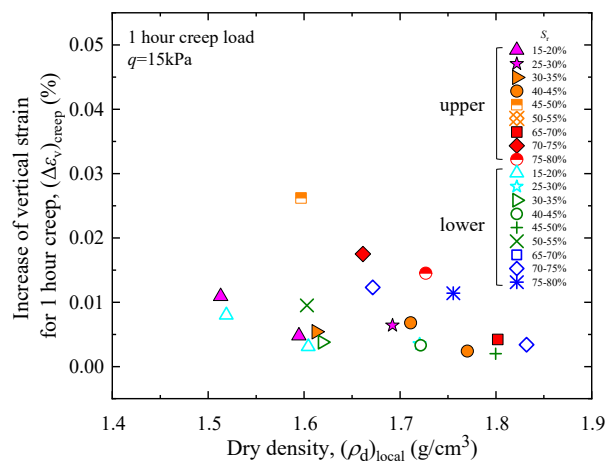


図 5-5-7 $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}} \sim (\rho_d)_{\text{local}}$ 関係
(軸差応力 $q=15\text{kPa}$)

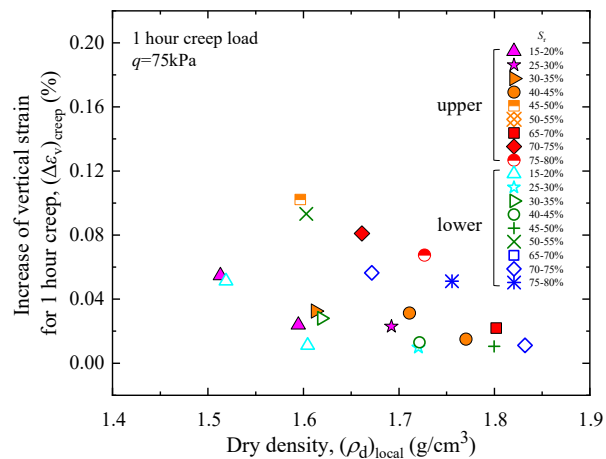


図 5-5-8 $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}} \sim (\rho_d)_{\text{local}}$ 関係
(軸差応力 $q=75\text{kPa}$)

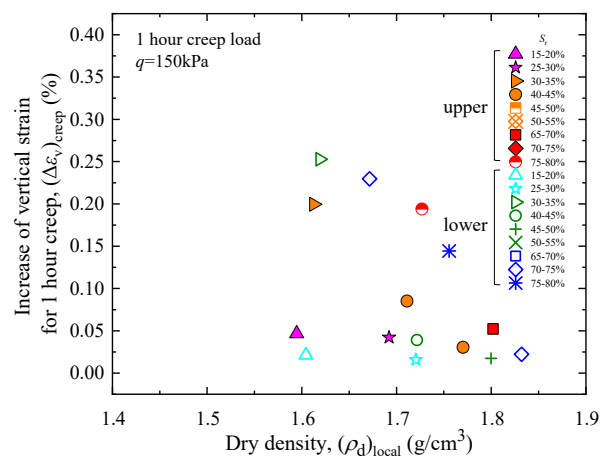


図 5-5-9 $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}} \sim (\rho_d)_{\text{local}}$ 関係
(軸差応力 $q=150\text{kPa}$)

5.6 非一様供試体の繰返し載荷による変形特性

地盤工学会(2009)の変形特性を求めるための繰返し試験(JGS 0542)は、地盤・基礎構造物の地震荷重や交通荷重等に対する交通荷重に対する数値解析に必要な変形特性を求める為、実務において繰返し載荷試験は多く利用される。松本ら(2009)、中島ら(2010)は、室内で静的に締め固めて作製した堤防砂の不飽和排気排水条件を実施し、不飽和砂質土供試体の飽和度やサクシオンと力学特性との関係を整理している。また、Akshay(2020)は、不飽和砂質土供試体の 1 万回の繰返し載荷試験により生じる残留変形と測定サクシオンとの影響について整理しており、不飽和土の繰返し載荷時の変形特性に関する研究はまだ研究が続けられている。本節で示す事の出来る室内締固め供試体のデータは 1 ケースだけであるが、室内締固め供試体に繰返し載荷を実施し、供試体上部と下部それぞれの変形特性について調べた。また、善ら(1981)は供試体の乱れが剛性率 \sim ひずみレベル関係に与える影響について整理しており、本節で求める室内締固め供試体の変形特性を次章の試験盛土供試体の乱れの影響評価の指標にする事とした。

5.6.1 繰返し載荷による応力 \sim ひずみ関係

供試体は締固めエネルギー $1.0E_c$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.661\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=8.2\%$ 、飽和度 $S_r=35.7\%$ の条件で作製した。図 5-6-1 は、軸差応力の時刻歴を示す。軸差応力の両振幅を $2\text{kPa}\sim 160\text{kPa}$ まで圧縮方向に 10 回の繰返し載荷を実施し、軸差応力 $q=200\text{kPa}$ の 5 回の除荷・再載荷以降は単調載荷している。図 5-6-2 には、軸差応力の時刻歴の拡大図を示した。

図 5-6-3 は、軸差応力 \sim EDT と LDT170 による鉛直ひずみ関係を示す。いずれも非線形挙動を示しているが、EDT で測定した鉛直ひずみは同じ軸差応力レベルにおける LDT の鉛直ひずみに比べて大きい傾向であった。

図 5-6-4 は、供試体上部と下部の軸差応力 \sim 鉛直ひずみ \sim 体積ひずみ関係を示す。上部の割線ヤング率は $E_{50}=44.9\text{MPa}$ 、下部の割線ヤング率は $E_{50}=67.4\text{MPa}$ であり、下部が大きい結果であった。上部と下部の割線ヤング率 E_{50} の差は 22.5MPa 程度(平均 E_{50} の 40% 程度)であり、軸差応力 \sim 鉛直ひずみ関係は明確に異なる。その一方で、供試体下部の体積ひずみは収縮傾向を示した後に膨張傾向に転じる事に対し、供試体上部の体積ひずみはほとんど収縮傾向を示さずに膨張傾向に転じている。供試体上部が供試体下部に比べて割線ヤング率 E_{50} が小さい事は先に示した単調載荷試験の結果と整合するが、供試体下部より先行して体積ひずみが膨張挙動を示す事は単調載荷試験の傾向と整合しない。この理由は不明であるが、図 3-7-15 に示した供試体上部と下部の軸差応力 \sim 鉛直ひずみ \sim 体積ひずみ関係にも同様の傾向が見られており、局所変位計を用いて非一様供試体の繰返し載荷試験による変形特性評価の難しい点であると考ええる。

図 5-6-5 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.014\%$ 付近までの供試体上部と下部の軸差応力 \sim 鉛直ひずみ \sim 体積ひずみ関係を示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.002\%$ 付近までは供試体上部と下部はほぼ線形挙動を示し、供試体上部と下部の違いは見られない。上部の初期ヤング率は $E_0=173.5\text{MPa}$ 、下部の初期ヤング率は $E_0=166.4\text{MPa}$ であり、上部と下部の初期ヤング率の差は 7.1MPa 程度(平均 E_0 の 4.2% 程度)であり、両者はほぼ同等である。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.01\%$ 付近の単調載荷の部分は非線形挙動を示し、みかけのヤング率の低下が確認されるが、繰返し載荷時は線形挙動が多く残っている。体積ひずみは鉛直ひずみの進行とともに多少の推移は見られるが、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.002\%$ 付近までは弾性的挙動を示している。供試体上部の体積ひずみはこの小さいひずみ範囲で膨張側に推移しているが、ポリウレタン系弾性ゴムのダミー供試体での測定試験結果にも見られたような、供試体、メンブレン、接着剤、ヒンジ、LDT またはクリップゲージ間のずれ等に起因するシステムコンプライアンスの影響が現れていると考える。図 5-6-6 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.06\%$ 付近までの供試体上部と下部の軸差応力 \sim 鉛直ひずみ \sim 体積ひずみ関係を示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.01\%$

～0.06%にかけて徐々に単調载荷の部分で非線形挙動を示し、みかけのヤング率の低下が確認されるが、繰返し载荷時は線形挙動が残っている。図 5-6-7 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.4\%$ 付近までの供試体上部と下部の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.1\%\sim0.4\%$ にかけて、繰返し载荷時の描くループが大きく開き、非線形挙動が現れ始めている。除荷時に供試体上部、下部ともに体積ひずみは収縮方向に転じるが载荷時の体積ひずみより膨張側に留まっている。さらに、再载荷時に体積ひずみが収縮方向に移動した後に膨張挙動へ転じる為、繰返し载荷時に体積ひずみ～鉛直ひずみ関係はループを描いている。中島ら(2010)や松本ら(2012)が示した繰返し载荷中の収縮方向に生じる体積変化挙動とやや異なる。これは、本研究の繰返し载荷が圧縮方向のみである事に起因すると考えるが、この膨張挙動を維持する体積変化挙動には、繰返し载荷による強度変形特性の向上が示唆される。

図 5-6-8 には、供試体上部と下部の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:-1 の補助線を示している。供試体上部と下部ともに、鉛直ひずみが増加するとともに 1:-1 の補助線から離れるが、全体的に緩やかにカーブして補助線に平行となる。同じ鉛直ひずみでは供試体上部の方が下部より水平ひずみが膨張方向に大きい傾向であった。

5.6.2 非一様供試体の繰返し载荷による変形特性

図 5-6-9～図 5-6-22 には、繰返し载荷時の軸差応力の両振幅 $\sigma_d=2\text{kPa}\sim160\text{kPa}$ までそれぞれ 10 回目の除荷・再载荷時の軸差応力～鉛直ひずみ関係と水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図 5-6-9～図 5-6-16 に示す、軸差応力の両振幅 $\sigma_d=2\text{kPa}\sim15\text{kPa}$ の範囲では軸差応力～鉛直ひずみ関係は線形挙動を示している。等価ヤング率は $E_{eq}=149.7\text{MPa}\sim180.4\text{MPa}$ で幅を持っているが、供試体上部と下部それぞれの違いは小さい。また、この範囲の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係も等価ポアソン比 $\nu_{eq}=0.21\sim0.24$ の範囲ではほぼ一定である。図 5-6-17、図 5-6-18 に示す、軸差応力の両振幅 $\sigma_d=30\text{kPa}$ では軸差応力～鉛直ひずみ関係のループがやや大きくなっている事がわかる。等価ヤング率は供試体上部($E_{eq,upper}=149.7\text{MPa}$)と供試体下部($E_{eq,lower}=142.8\text{MPa}$)でその差は小さい。また、この範囲の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係も等価ポアソン比 $\nu_{eq}=0.27\sim0.28$ となり、先の小さいひずみの繰返し载荷試験の結果に比べてやや大きくなった。図 5-6-19～図 5-6-22 に示す、軸差応力の両振幅 $\sigma_d=120\text{kPa}\sim160\text{kPa}$ では軸差応力～鉛直ひずみ関係のループがさらに大きくなっている。等価ヤング率は $E_{eq}=129.7\text{MPa}\sim139.6\text{MPa}$ で大きな違いは見られない。また、供試体上部と下部の等価ヤング率の違いも小さい。この範囲の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係も等価ポアソン比 $\nu_{eq}=0.40\sim0.50$ と大きくなり、弾性的挙動とは言えない。

図 5-6-23 には、供試体上部と下部それぞれの繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ 及び $N_{cyc}=10$ の等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ関係及び履歴減衰率～片振幅鉛直ひずみ関係を示す。全体の傾向として片振幅鉛直ひずみが大きくなると徐々に等価ヤング率は低下する事が確認された。また、繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ と $N_{cyc}=10$ では違いが小さく、供試体上部と下部の差も小さい結果であった。片振幅鉛直ひずみ $(\varepsilon_v)_{SA}=0.02\%$ 未満では履歴減衰率 $h=0\sim0.05$ 程度であるが、それ以上の片振幅鉛直ひずみでは履歴減衰率 $h=0.05\sim0.20$ まで増加している。等価ヤング率の変化に比べて履歴減衰率の方が片振幅鉛直ひずみの増加とともに明確な変化が現れている事がわかる。

図 5-6-24 には、供試体上部と下部それぞれの繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ 及び $N_{cyc}=10$ について、式 5-2-9 で示した間隙比関数で正規化した等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ関係を示す。全体傾向として片振幅鉛直ひずみが大きくなると徐々に $E_{eq}/f(e)$ は低下する事が確認された。また、繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ と $N_{cyc}=10$ では違いが小さく、供試体上部と下部の差も小さい結果であった。

図 5-6-25 には、供試体上部と下部それぞれの繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ 及び $N_{cyc}=10$ の等価ポアソン比～片振幅鉛直ひずみ関係を示す。全体傾向として片振幅鉛直ひずみが大きくなる $(\varepsilon_v)_{SA}=0.005\%$ 付近を境界に徐々に等価ポアソ

ン比は増加し、弾性範囲でなくなる。これは、図 5-6-9～図 5-6-22 で考察した弾性挙動の推移と整合する。また、繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ と $N_{cyc}=10$ では違いが小さく、供試体上部と下部の差も小さい結果であった。

以上より、等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ関係と共通して、 $E_{eq}/f(e)$ ～片振幅鉛直ひずみ関係より、等価ヤング率の供試体上部と下部の違いは見られなかった。また、地盤工学会(2009)の変形特性を求めるための繰返し試験(JGS 0542)に示されるような片振幅鉛直ひずみの増加に伴う等価ヤング率の明確な低下傾向が見られなかった。詳しい理由はわからないが圧縮側のみの繰返し载荷であったため、軸差応力の両振幅の増加とともに剛性が向上している可能性が考えられる。次章では、同等の乾燥密度、飽和度条件での試験盛土供試体と同じ繰返し载荷条件における変形特性を比較する。

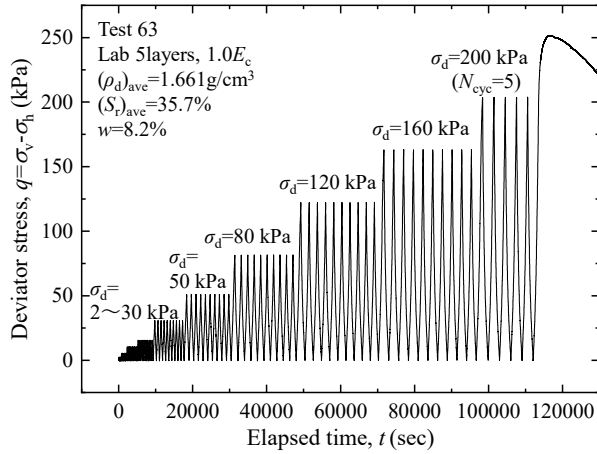


図 5-6-1 軸差応力の時刻歴

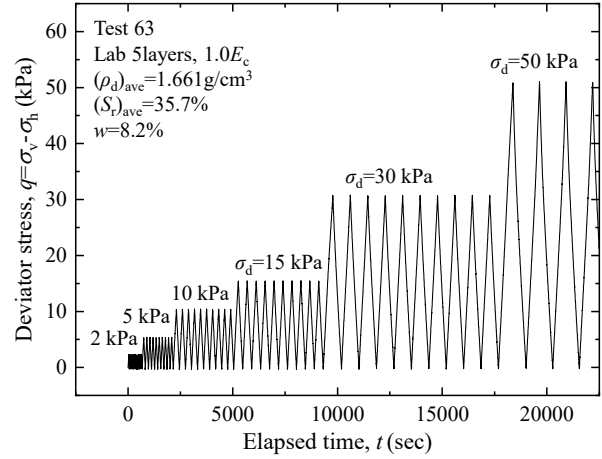


図 5-6-2 軸差応力の時刻歴(拡大)

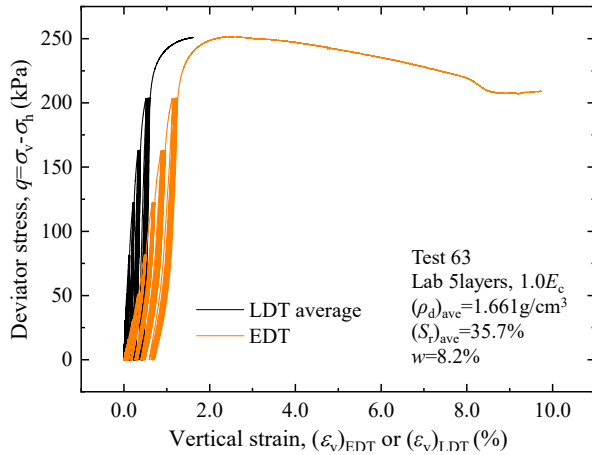


図 5-6-3 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

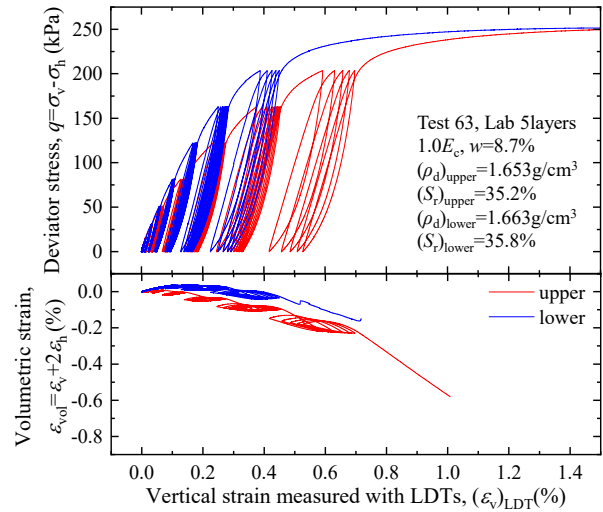


図 5-6-4 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

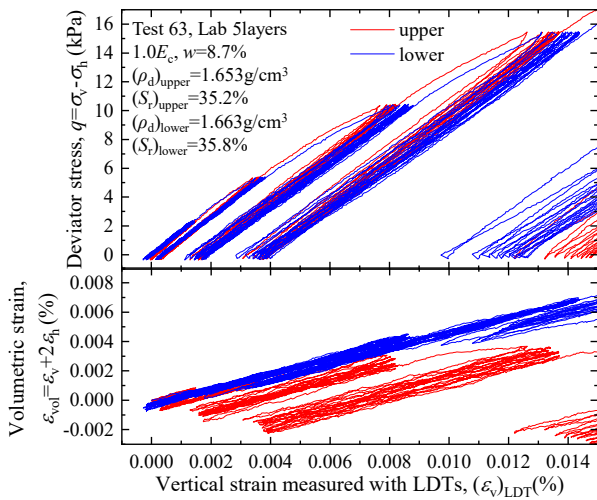


図 5-6-5 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

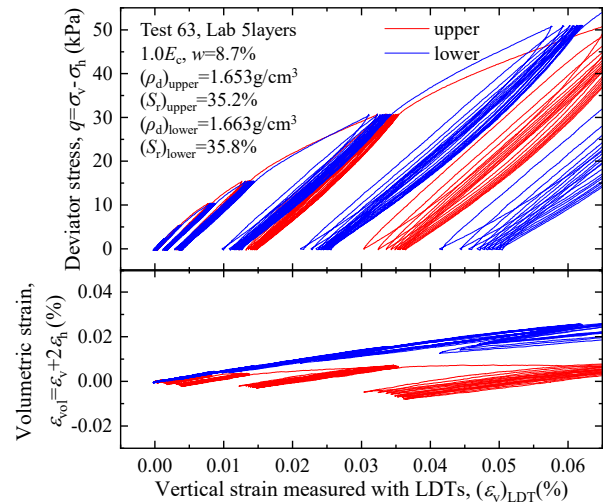


図 5-6-6 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

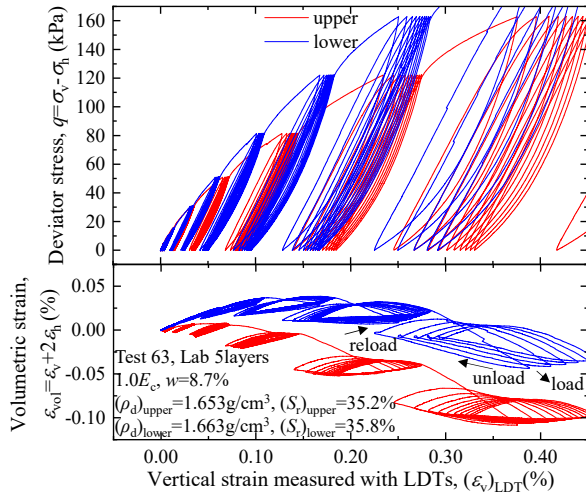


図 5-6-7 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

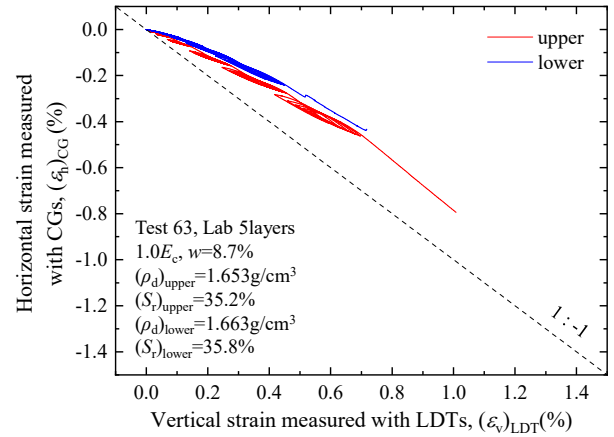


図 5-6-8 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

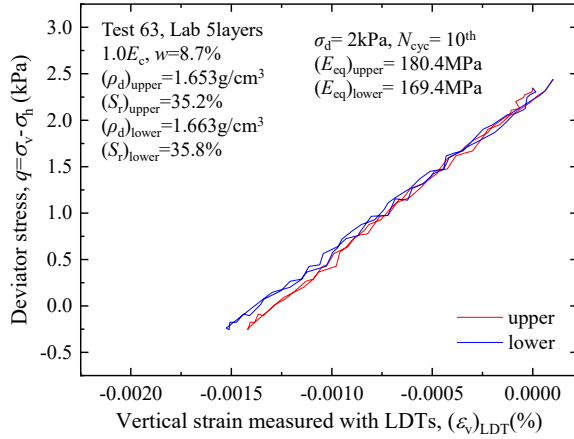


図 5-6-9 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=2\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

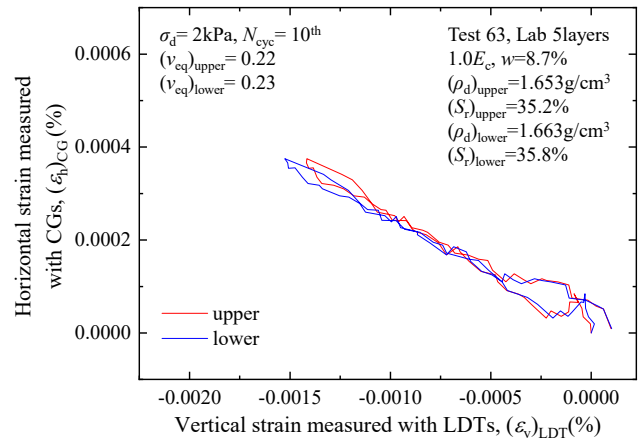


図 5-6-10 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=2\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

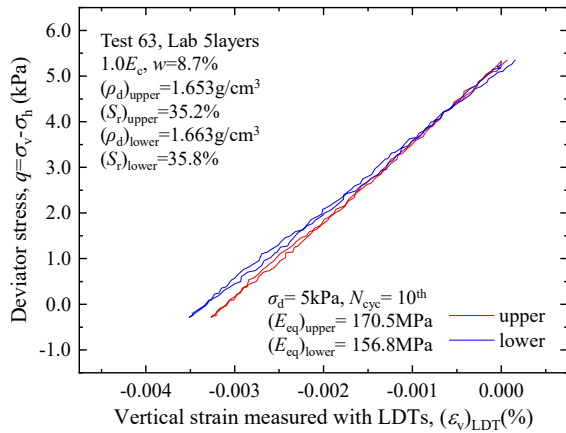


図 5-6-11 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=5\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

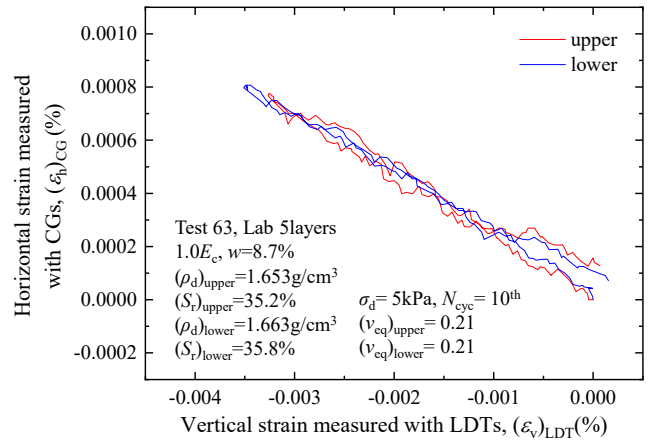


図 5-6-12 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=5\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

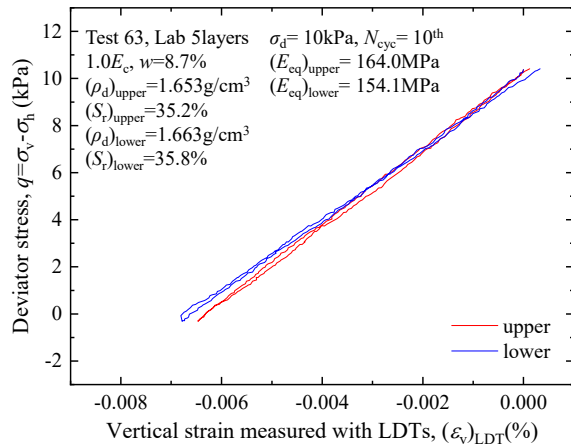


図 5-6-13 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=10\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

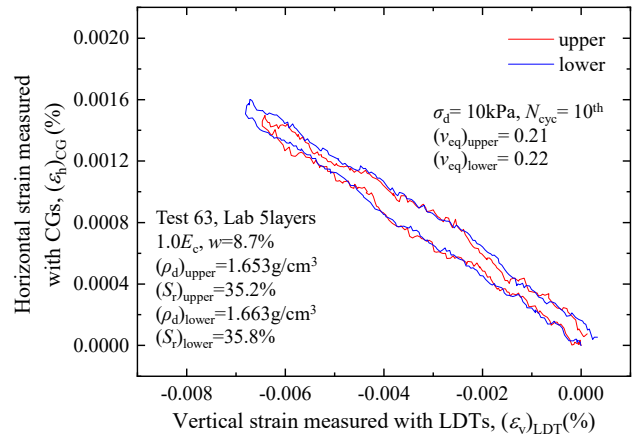


図 5-6-14 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=10\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

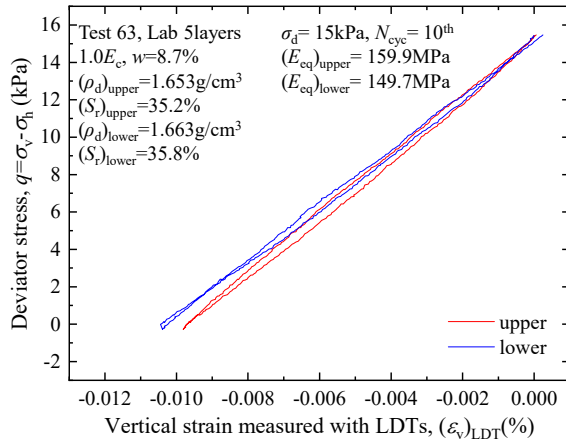


図 5-6-15 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=15\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

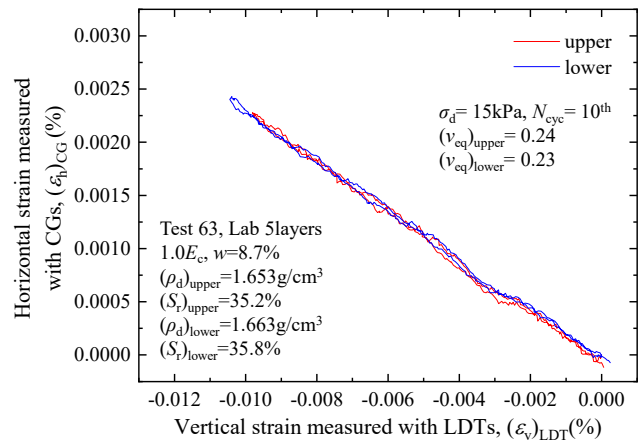


図 5-6-16 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=15\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

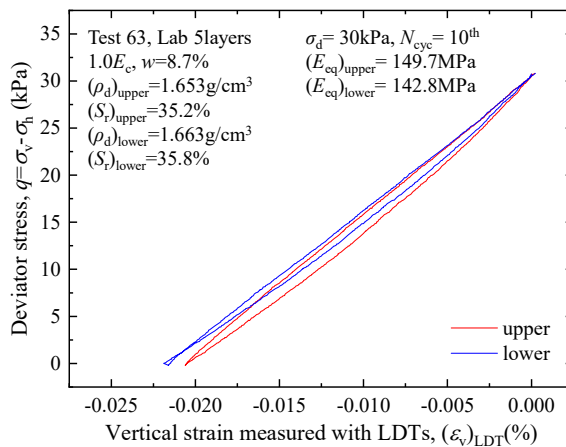


図 5-6-17 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=30\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

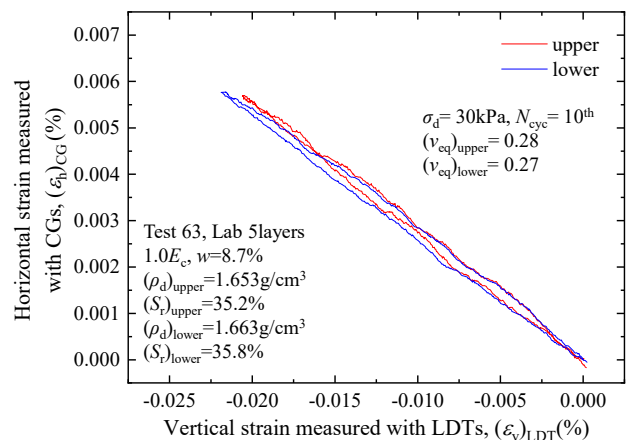


図 5-6-18 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=30\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

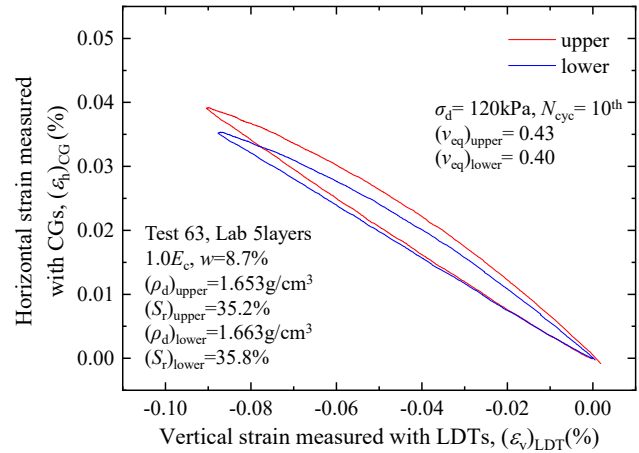
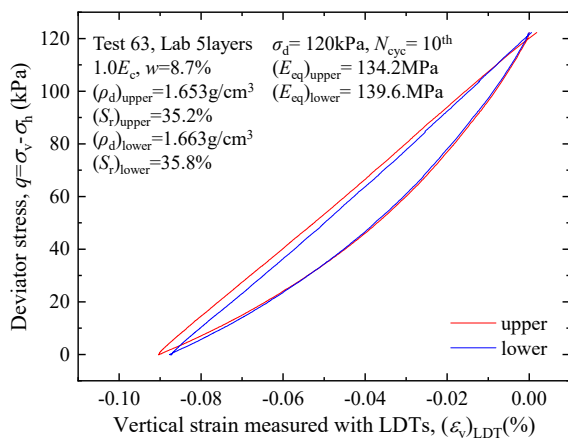


図 5-6-19 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=120\text{kPa}$) (LDT 上部、下部)

図 5-6-20 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=120\text{kPa}$) (LDT 上部、下部)

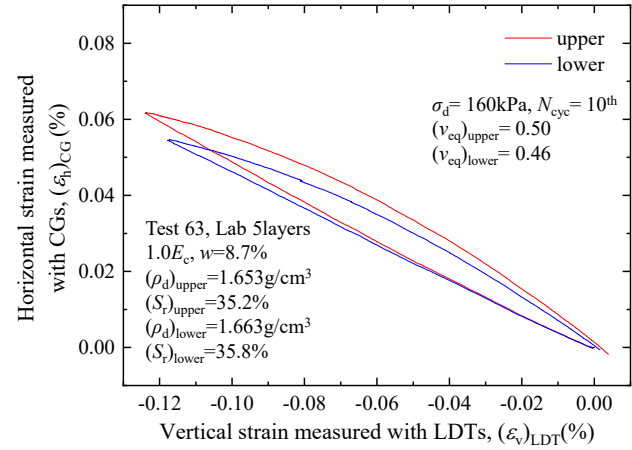
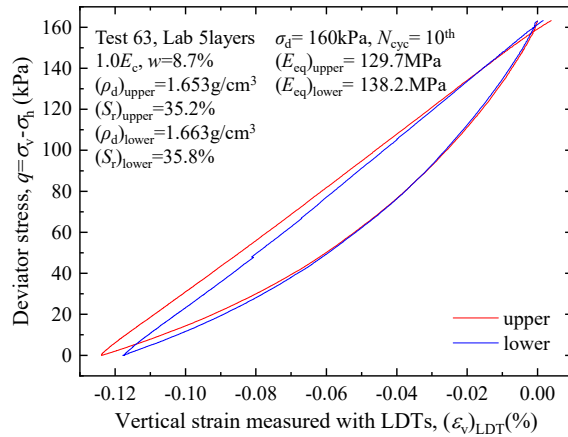


図 5-6-21 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=160\text{kPa}$) (LDT 上部、下部)

図 5-6-22 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=160\text{kPa}$) (LDT 上部、下部)

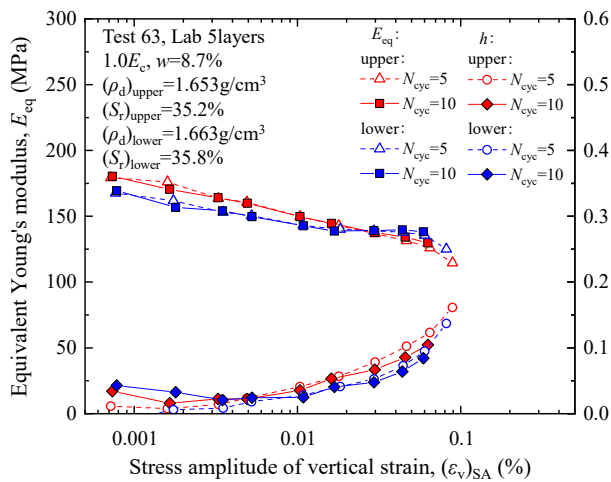


図 5-6-23 等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ～履歴減衰率関係 (LDT 上部、下部)

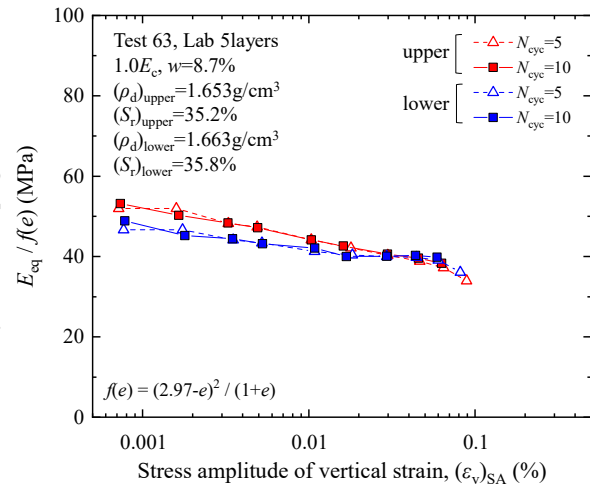


図 5-6-24 $E_{\text{eq}} / f(e)$ ～片振幅鉛直ひずみ関係 (LDT 上部、下部)

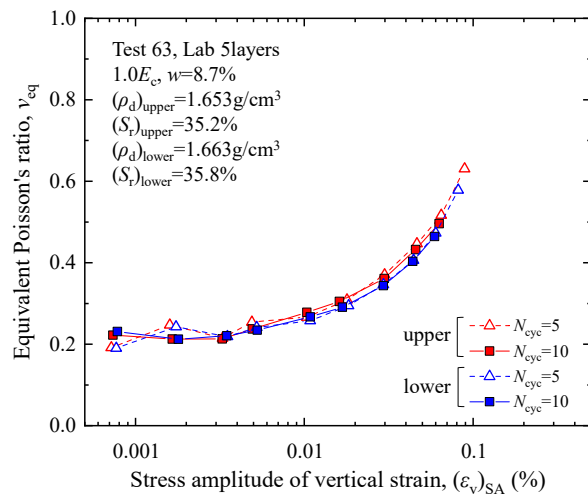


図 5-6-25 等価ポアソン比～片振幅鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

5.7 変形特性の鉛直深度分布に対する評価

室内締固め供試体の変形特性は乾燥密度や飽和度の影響を受けることから、供試体鉛直深度方向の乾燥密度分布や飽和度分布に応じて、変形特性も鉛直深度分布が非一様になる。そこで、本節では図 5-2-1、図 5-2-2 で示した室内締固め供試体の割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率について、図 3-6-1 に示した供試体の鉛直深度分布について調べた。

5.7.1 鉛直深度別の変形特性評価

図 5-7-1 には、締固めエネルギー $0.2E_c$ で作製した供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～割線ヤング率 E_{50} 関係を示す。全体的に割線ヤング率 E_{50} の上部と下部の差は小さいが、供試体平均の飽和度は $S_r=19.2\%$ と 33.8% の供試体に比べて飽和度 $S_r=50.4\%$ の供試体は比較的上部と下部の差がやや大きい。上端部の割線ヤング率は $E_{50}=10.1\text{MPa} \sim 28.4\text{MPa}$ で上部よりやや低く、下端部の割線ヤング率は $E_{50}=27.4\text{MPa} \sim 35.1\text{MPa}$ で下部よりやや低い。これは供試体上下端面にベディングエラーの影響が含まれている事が原因と考えられる。ベディングエラーの影響は上端部と下端部の両者に含まれるが、上端部と下端部では下端部の方が割線ヤング率 E_{50} はやや大きい。

図 5-7-2 には、締固めエネルギー $1.0E_c$ で作製した供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～割線ヤング率 E_{50} 関係を示す。全体的に割線ヤング率 E_{50} の上部と下部の差は $0.2E_c$ 供試体に比べて大きい。供試体平均の飽和度が $S_r=73.6\%$ の高い飽和度の供試体は上部に加えて下部の割線ヤング率 E_{50} も低く、上部と下部の差が小さい。上端部の割線ヤング率は $E_{50}=9.9\text{MPa} \sim 27.6\text{MPa}$ で上部より低く、下端部の割線ヤング率は $E_{50}=16.9\text{MPa} \sim 83.0\text{MPa}$ で下部よりやや低い。これも上端部、下端部ともにベディングエラーの影響が含まれている事が考えられるが、下端部は下部の割線ヤング率 E_{50} に比較的近い。

図 5-7-3 には、締固めエネルギー $4.5E_c$ で作製した供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～割線ヤング率 E_{50} 関係を示す。全体的に割線ヤング率 E_{50} の上部と下部の差は $0.2E_c$ 供試体に比べて大きく、 $1.0E_c$ 供試体の傾向と類似している。供試体平均の飽和度は $S_r=78.3\%$ の高い飽和度の供試体は下部の割線ヤング率 E_{50} も低く、上部と下部の差が小さい。上端部の割線ヤング率は $E_{50}=13.5\text{MPa} \sim 33.8\text{MPa}$ で上部より低く、下端部の割線ヤング率は $E_{50}=16.9\text{MPa} \sim 79.9\text{MPa}$ で下部よりやや低い。これも上端部、下端部ともにベディングエラーの影響が含まれている事が考えられるが、下端部は下部の割線ヤング率 E_{50} に比較的近い。

図 5-7-1～図 5-7-3 の傾向から、締固めエネルギーが大きい $1.0E_c$ 、 $4.5E_c$ 供試体は高い飽和度の供試体を除いて上部と下部の差が大きい。また、供試体上端部はベディングエラーの影響を受け、締固めエネルギーに関わらず割線ヤング率が $E_{50}=10\text{MPa} \sim 30\text{MPa}$ の範囲に留まっている。これに対して、供試体下端部はベディングエラーの影響を受けるが、供試体下部の割線ヤング率に近く $E_{50}=15\text{MPa} \sim 85\text{MPa}$ の範囲に分布している。ベディングエラーの影響を受ける上端部が締固めエネルギーに関わらず、下端部に比べて小さい割線ヤング率 E_{50} を示すのは、供試体作製時の上端面の平滑処理に伴う軟らかい層の存在が理由と考えられる。また、供試体下端部の試料は常にモールド底板に支えられ、上端部のような平滑処理は不要であった為、上端部と異なる結果であったと考える。

次に、全てのケースの供試体について、それぞれの割線ヤング率 E_{50} を供試体下部の割線ヤング率 E_{50} で正規化したデータ $E_{50} / (E_{50})_{\text{lower}}$ に着目し、締固めエネルギー別の割線ヤング率 E_{50} の鉛直深度分布について考察する。図 5-7-4 には、局所変位計 LDT80 の平均位置～ $E_{50} / (E_{50})_{\text{lower}}$ 関係を示す。供試体下部を基準に割線ヤング率 E_{50} を整理すると、供試体上部は供試体下部より小さい傾向が確認された。また、供試体平均の飽和度によってばらつきはあるが締固めエネルギーが大きい方が上部と下部の差が大きくなっている。供試体上端部はベディングエラーの影響が含まれるが上部よりやや小さく、下端部も下部に比べてやや小さい傾向であった。全体として、供試体端面のベディン

グエラーの影響は含まれるが、割線ヤング率 E_{50} の鉛直深度分布を評価する事が出来た。

図 5-7-5 には、締固めエネルギー $0.2E_c$ で作製した供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～初期ヤング率関係を示す。全体的に初期ヤング率の上部と下部の差は小さく、下部よりも上部の方が高い値であるケースも確認された。供試体平均の飽和度別に見ると、飽和度が低い供試体の方が大きい初期ヤング率が大きい傾向であった。供試体上端部は上部よりやや小さい値を示している。これはベディングエラーの影響が考えられ、割線ヤング率 E_{50} で示した傾向と整合する。供試体下端部は下部よりやや低いものとやや高いものが確認された。下端部にもベディングエラーの影響は含まれている事は割線ヤング率 E_{50} のデータで示したが、下部より大きいデータがある原因は不明である。

図 5-7-6 には、締固めエネルギー $1.0E_c$ で作製した供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～初期ヤング率関係を示す。供試体平均の飽和度によって初期ヤング率の大きさは異なるが、締固めエネルギー $0.2E_c$ の供試体と同様に上部と下部の差は小さい。また、割線ヤング率 E_{50} のデータと異なり、供試体上部の初期ヤング率が下部の初期ヤング率よりやや大きいケースも確認された。供試体上端部は上部よりやや小さい初期ヤング率を示しており、その一方で供試体下端部は下部よりやや低いものとやや高いものが確認された。これも締固めエネルギー $0.2E_c$ の供試体を示した傾向と同様であった。

図 5-7-7 には、締固めエネルギー $4.5E_c$ で作製した供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～初期ヤング率関係を示す。全体的に初期ヤング率の上部と下部の差はばらつきが大きく、上部の初期ヤング率が大きいものと下部の初期ヤング率が大きいものが混在している。供試体平均の飽和度によって初期ヤング率の大きさは異なるが、締固めエネルギー $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ の供試体と同様の傾向であった。供試体上端部、下端部ともにベディングエラーの影響が含まれていると考えられるが、下端部の初期ヤング率は供試体平均の飽和度 $S_r=26.8\%$ を除き、下部の初期ヤング率に比較的近い値である。また、供試体下部よりやや高いものが確認された。

図 5-7-5～図 5-7-7 の傾向から、締固めエネルギーに関わらず供試体は上部と下部の初期ヤング率の差に一定の傾向が見られなかった。初期ヤング率は微小ひずみ領域での測定であり、計測誤差が含まれている事を勘案すると、供試体の上部と下部の差は小さいと考えられる。また、供試体上端部はベディングエラーの影響を受け、締固めエネルギーに関わらず初期ヤング率は小さい範囲に留まっている。これに対して、供試体下端部はベディングエラーの影響を受けるが、初期ヤング率は一部を除いて供試体下部とほぼ同等の範囲に分布している。ベディングエラーの影響を受ける上端部が締固めエネルギーに関わらず、下端部に比べて特に小さい初期ヤング率を示すのは、割線ヤング率 E_{50} で示した理由と同様に、供試体作製時の上端面の平滑処理に伴う軟らかい層が存在する為であると考ええる。

次に、全てのケースの供試体について、それぞれの初期ヤング率を供試体下部の初期ヤング率で正規化したデータ $E_0 / (E_0)_{\text{lower}}$ に着目し、締固めエネルギー別の初期ヤング率の鉛直深度分布について考察する。図 5-7-8 には、局所変位計 LDT80 の平均位置～ $E_0 / (E_0)_{\text{lower}}$ 関係を示す。供試体下部を基準に初期ヤング率を整理すると、供試体上部と供試体下部の大小傾向は一定ではない。供試体下部と下端部も大小が一定ではない。供試体上端部は上部に比べてほぼ全てのケースで小さい値を示している。先述したように、供試体の上部と下部の差は小さいと考えると、初期ヤング率の鉛直深度分布は供試体上端部で低い値を示し、それ以深の上部、下部及び下端部の差は非常に小さい。全体として、供試体端面のベディングエラーの影響は含まれるが、初期ヤング率の鉛直深度分布を評価する事が出来た。

5.7.2 飽和度の影響を考慮した鉛直深度別の変形特性

強度変形特性と乾燥密度の関係には飽和度の影響がある事は 5.2 節に示している。本節では、先に示した供試体上端部と下端部を含めた供試体の局所的な割線ヤング率 E_{50} と初期ヤング率に与える飽和度の影響について考察する。

図 5-7-9 には、供試体上部と下部に対し、式 5-2-12 で示した $fE_{50}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係を示す。後に示す供試体上端部と下端部の局所的な乾燥密度や飽和度を測定していない事を理由に、図 5-7-9 では供試体平均の乾燥密度と飽和度を用いて整理している。供試体上部と下部を局所的な飽和度を用いて整理した図 5-2-53 とはこの点で異なる。供試体平均の飽和度で整理すると供試体上部は下部よりやや低い値を示す事がわかる。図 5-7-10 には、さらに供試体上端部と下端部を加えた $fE_{50}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係を示す。供試体上端部の $fE_{50}(S_r)$ は、同じ飽和度の上部、下部に比べて低い値を示す。また、この差は低い飽和度範囲の方が顕著に現れている。また、供試体下端部は同じ飽和度の下部に比べてやや低い値であった。

図 5-7-11 には、供試体上部と下部に対し、式 5-2-6 で示した $fE_0(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係を示す。この図も供試体上部と下部を局所的な乾燥密度と飽和度を用いて整理した図 5-2-45 とは供試体平均の飽和度を用いて整理している点が異なる。供試体平均の飽和度で整理しても供試体上部と下部はほぼ同等の値を示した。図 5-7-12 には、さらに供試体上端部と下端部を加えた $fE_0(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係を示す。供試体上端部の $fE_0(S_r)$ は、同じ飽和度の上部、下部に比べて低い値を示す。また、この差は低い飽和度範囲の方が顕著に現れている。また、供試体下端部は同じ飽和度の下部に比べてほぼ同等か、やや低い値であった。

以上より、室内締固め供試体の割線ヤング率 E_{50} は鉛直深度分布が明確に確認され、上層より下層の方が割線ヤング率 E_{50} は大きい傾向が確認された。また、初期ヤング率は上層と下層の違いに一定の傾向が見られなかった事からその差は小さい事が確認された。ただし、割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率ともに供試体端面を含む計測にはベディングエラーの影響が含まれる事がわかった。本研究では長さ $l=80\text{mm}$ の小型の局所変位計 LDT80 を用いて、高さ $h=200\text{mm}$ の供試体の局所変位を測定したが、より詳細に鉛直深度方向の局所的な変形特性を調べる為には、ベディングエラーの影響範囲を避けながら局所変位計の小型化や変位測定位置の計画等を実施する事が必要である。

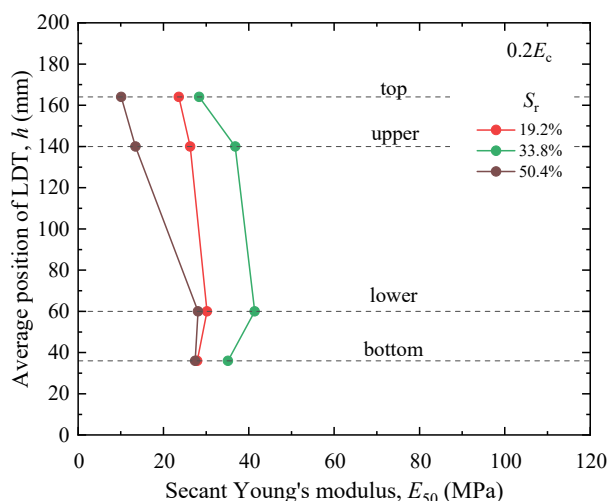


図 5-7-1 LDT 設置位置～割線ヤング率関係
(締固めエネルギー $0.2E_c$)

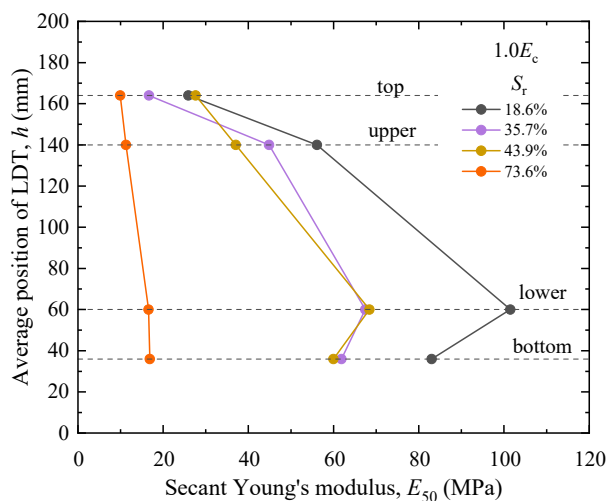


図 5-7-2 LDT 設置位置～割線ヤング率関係
(締固めエネルギー $1.0E_c$)

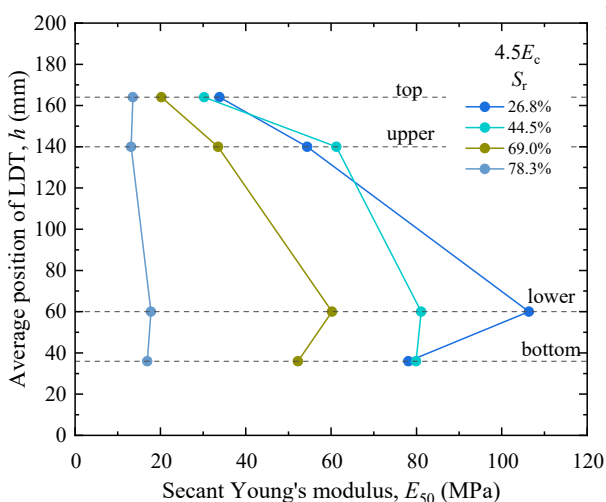


図 5-7-3 LDT 設置位置～割線ヤング率関係
(締固めエネルギー $4.5E_c$)

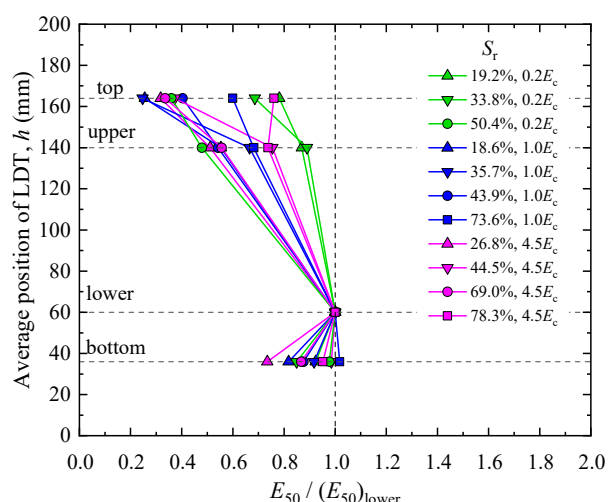


図 5-7-4 LDT 設置位置～ $E_{50}/(E_{50})_{lower}$ 関係

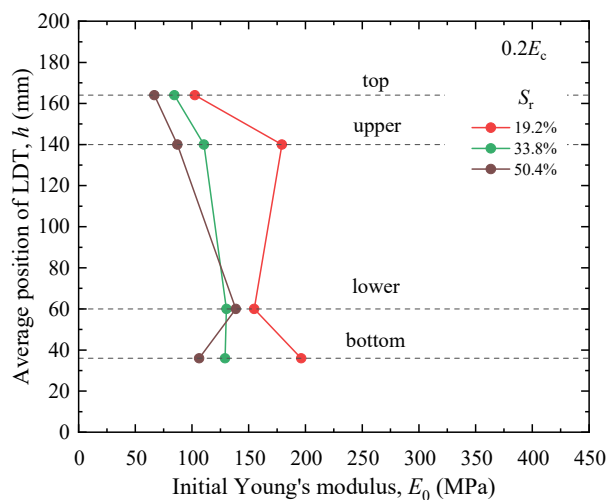


図 5-7-5 LDT 設置位置～初期ヤング率関係
(締固めエネルギー $0.2E_c$)

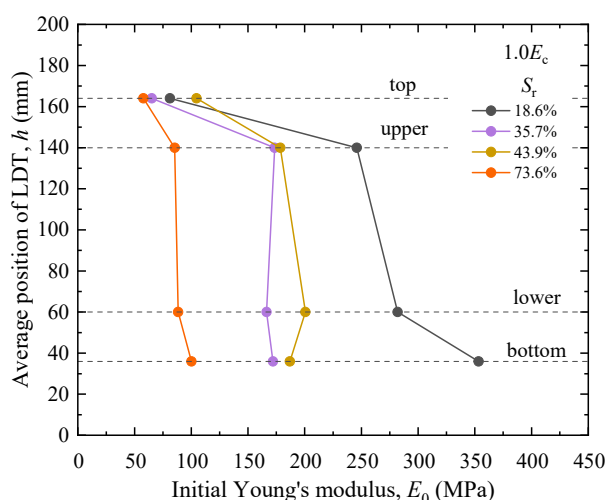


図 5-7-6 LDT 設置位置～初期ヤング率関係
(締固めエネルギー $1.0E_c$)

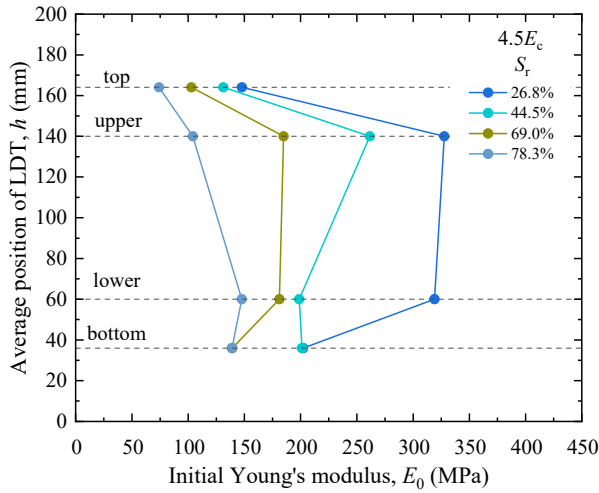


図 5-7-7 LDT 設置位置～初期ヤング率関係
(締固めエネルギー $4.5E_c$)

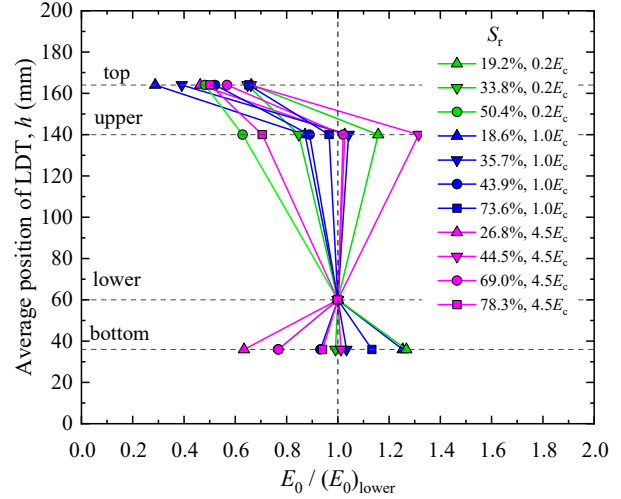


図 5-7-8 LDT 設置位置～ $E_0/(E_0)_{lower}$ 関係

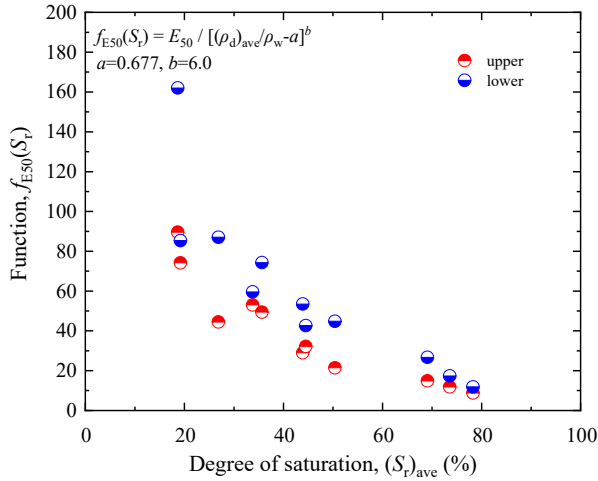


図 5-7-9 $f_{E50}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係
(上部、下部) ($a=0.677, b=6.0$)

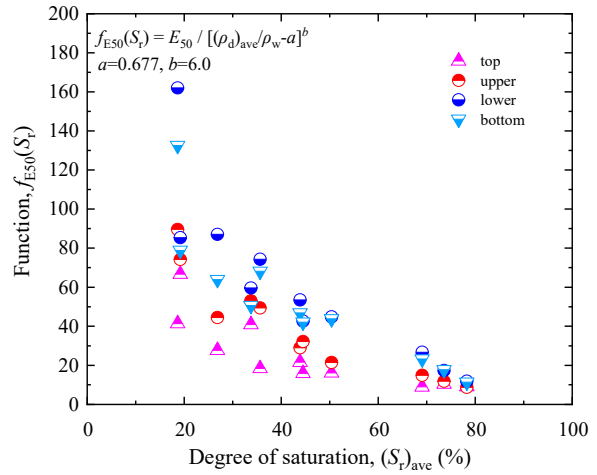


図 5-7-10 $f_{E50}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係
(上端部、上部、下部、下端部) ($a=0.677, b=6.0$)

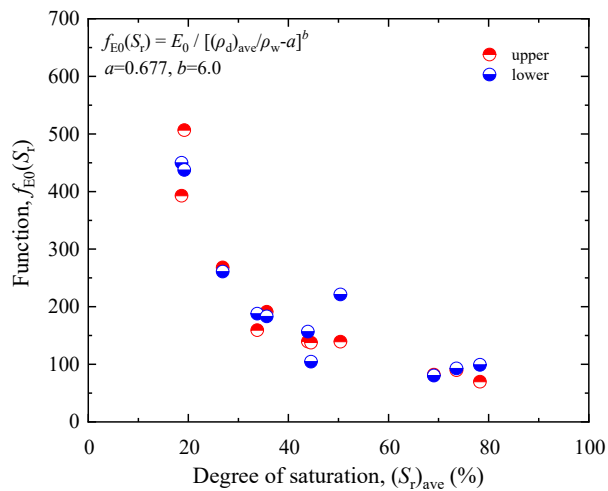


図 5-7-11 $f_{E0}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係
(上部、下部) ($a=0.677, b=6.0$)

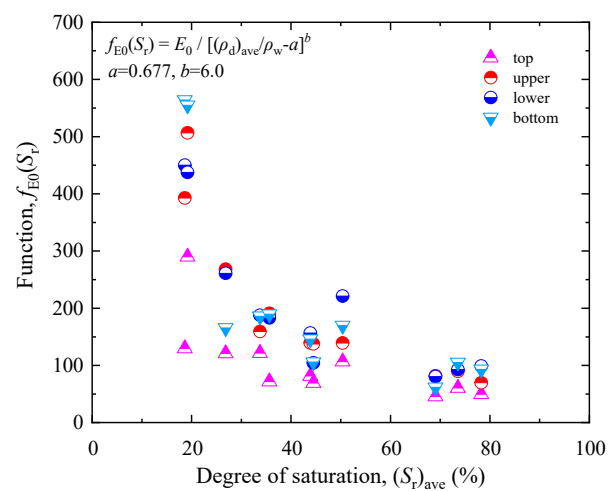


図 5-7-12 $f_{E0}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係
(上端部、上部、下部、下端部) ($a=0.677, b=6.0$)

5.8 本章のまとめ

本章では前に示した室内締固め供試体が有する乾燥密度、飽和度の非一様性に基づいて、供試体の局所的な変形を考慮しながら三軸圧縮試験による強度変形特性を調べた。三軸圧縮試験の単調載荷過程に加え、その等方圧密過程や、平均基底主応力 $p_{net}=700\text{kPa}$ 程度までの中圧等方圧密過程、荷重保持載荷及び繰返し載荷による変形特性の評価を実施した。また、圧密履歴の有無による強度変形特性の違いや変形特性の鉛直深度分布に対する評価を実施した。

本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 非一様供試体の最大軸差応力～乾燥密度関係には供試体の飽和度の影響が含まれるが、その影響を考慮すると最大軸差応力は乾燥密度と相関関係がある。
- ② 室内締固め供試体の締固めエネルギー $4.5E_c$ の供試体になると、最大軸差応力と乾燥密度関係において供試体の乾燥密度分布によるばらつきが無視できなくなる為、供試体それぞれの平均乾燥密度に対する上部と下部の乾燥密度の差の割合が 1.0%以上(締固めエネルギー $4.5E_c$ 以上)であれば、供試体の非一様性の影響検討を実施する事が望ましい。
- ③ 非一様供試体の初期ヤング率及び割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係には供試体の飽和度の影響が含まれるが、その影響を考慮すると初期ヤング率、割線ヤング率 E_{50} はそれぞれ乾燥密度と相関関係がある。
- ④ 一方で、測定した含水比の範囲において、上記の強度変形特性と乾燥密度との関係に含まれる含水比の影響を考慮した方が、ばらつきはやや少なくなる事を確認し、含水比をパラメーターに用いた整理の方が高精度な強度変形特性と乾燥密度の関係を表現出来る可能性が示唆された。
- ⑤ 等方圧密過程における室内締固め供試体の変形特性は高い飽和度の範囲で飽和度の影響を強く受けるが、乾燥密度と相関性がある。また、等方圧密中の変形特性は供試体上部と下部に関わらず異方的な構造である事を示唆している。
- ⑥ 室内締固め供試体は平均基底主応力 $p_{net}=700\text{kPa}$ 程度の中圧等方圧密の圧密履歴により、構造異方性を持つ供試体の水平ひずみの進行が低下し、等方圧密に対する変形特性が変化する。また、供試体上部と下部の変形特性の違いは小さいことから、供試体の非一様性による影響は小さい。
- ⑦ 鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲と、鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ の範囲では、微小ひずみ領域の変形特性は異なるが、供試体上部と下部の変形特性の違いは小さいことから、供試体の非一様性による影響は小さい。
- ⑧ 中圧等方圧密の圧密履歴のある供試体は、載荷過程においても水平ひずみの発生抑制効果が発揮される為、若干の剛性の増加や体積収縮量の低減等、変形特性が向上する。
- ⑨ 荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～乾燥密度関係は飽和度の影響でばらつきはあるが、逆相関の関係である。また、軸差応力が増加すると供試体上部と下部ともに鉛直ひずみの増分は大きくなるが、鉛直ひずみの増分～乾燥密度の関係は変わらない。
- ⑩ 等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ関係及び $E_{eq}/f(e)\sim$ 片振幅鉛直ひずみ関係より、等価ヤング率は供試体上部と下部の違いは小さい。ただし、載荷方法の影響で片振幅鉛直ひずみの増加に伴う等価ヤング率の著しい低下傾向は見られなかった。
- ⑪ 室内締固め供試体の割線ヤング E_{50} は鉛直深度分布が明確に確認され、上層より下層の方が割線ヤング率 E_{50} は大きい。また、初期ヤング率は上層と下層の違いに一定の傾向が見られず、その差は小さい。また、割線ヤン

グ率 E_{50} 、初期ヤング率ともに供試体端面を含む計測にはベディングエラーの影響が含まれる。

本章では、室内締固め供試体は非一様性を有していても、飽和度分布の影響を考慮すれば、強度変形特性は鉛直深度方向の乾燥密度分布と相関関係にあるという知見が得られた。次の章では、非一様性の大きい試験盛土供試体について同じ方法で評価を行う。

【5章の参考文献】

- 1) Akshay, R.(2020): Effective compaction method for utilizing low quality banking material for railway embankment, *Master of Engineering. Thesis, University of Tokyo.*
- 2) AnhDan, L.Q. & Koseki, J.(2005): Small strain behavior of dense granular soils by true triaxial tests, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.3, pp.21-38.
- 3) Enomoto, T., Qureshi, O., Sato, T. & Koseki, J.(2013): Strength and deformation characteristics and small strain properties of undisturbed gravelly soils, *Soils and Foundations*, Vol.53, No.6, pp.951-965.
- 4) Hardin, B.O. & Richart, F. E. (1963): Elastic wave velocities in granular soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division Proceedings of ASCE* , Vol.89, SM1, pp.33-65.
- 5) Kohata, Y., Tatsuoka, F., Wang, L., Jiang, G.L., Hoque, E. & Kodaka, T.(1997): Modeling the non-linear deformation properties of stiff geomaterials, *Geotechnique*, 47, No.3, 563-580.
- 6) Tatsuoka, F., Gomes Correia, A. (2018): Importance of controlling the degree of saturation in soil compaction linked to soil structure design, *Transportation Geotechnics* 17, pp.3-23.
- 7) 榎本忠夫(2012): 不攪乱礫質土の強度変形特性と粘性特性, 東京大学博士論文.
- 8) 鬼塚克忠, 林重徳, 吉武茂樹, 大石英隆(1979): 締固めた土の圧縮及び強度異方性について, 土質工学会論文報告集, Vol.19, No.3, pp.113-123.
- 9) 鬼塚克忠, 吉武茂樹(1983): 締固めた混合度の強度異方性について, 土質工学会論文報告集, Vol.23, No.4, pp.150-156.
- 10) 桑野玲子, ウィチャックソノ ルタ イレング, 古関潤一(2009): 不攪乱砂試料の粒子間固結に及ぼす圧密圧力の影響, 生産研究, 第 61 巻, 4 号, pp.694-697.
- 11) 小高猛司, 早野公敏, 古関潤一, 龍岡文夫, 壺内達也, 松本正士, 松下政史(1998): 堆積軟岩試料のサンプリングによる乱れの評価法, 土と基礎, Vol.46, No.5, pp.11-14.
- 12) 地盤工学会 (2009): 地盤材料の試験方法と解説, 丸善出版株式会社.
- 13) 須藤雅人, 榊原佑介, 佐々木亮太郎, 川邊翔平, 龍岡文夫(2012): 排水三軸圧縮での砂質土のクリープ特性に対する初期ひずみ速度・締固め度の影響, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp.369-370.
- 14) 須藤雅人, 川邊翔平, 菊池喜昭, 龍岡文夫(2013): 飽和稲城砂の排水変形・強度特性に対する締固め時飽和度の影響, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp.573-574.
- 15) 善功企, 松本一明, 梅原靖文, 奥村樹郎(1981): サンドサンプリングと品質評価の試みについて, 昭和 56 年度サンプリングシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.55-62.
- 16) 龍岡文夫, 橋本毅(2020): 実大締固め試験に基づく土の締固め管理における地盤剛性の活用法の検討, 第 55 回地盤工学研究発表会, 21-10-3-01.
- 17) 中島康介, 岡二三生, 木元小百合, 肥後陽介, 松本真明(2009): 不飽和砂質土の繰返し載荷時における力学特性, 第 45 回地盤工学研究発表会, pp.689-690.
- 18) 平川大貴, 川原園美幸, 龍岡文夫(2008): 砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, pp.253-266.
- 19) 前川侑太, 清田隆, 片桐俊彦(2018): 原位置と室内試験における Vs を用いた液状化強度の推定法について: 非塑性細粒分を含む砂への適用, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1841-1842.
- 20) 松本成, 井森紘平, 鈴木歩海, 川邊翔平, 塚本良道(2012): 稲城砂の繰返し強度に及ぼす飽和度の影響, 第

47 回地盤工学研究発表会, pp.651-652.

- 21) 松本真明, 岡二三生, 木元小百合, 肥後陽介, 矢吹太一(2010): 繰返し載荷時における不飽和砂質土の力学特性, 第 44 回地盤工学研究発表会, pp.657-658.
- 22) 三田地利之, 工藤豊(1994): 一軸圧縮試験結果に基づく原位置強度の推定法, 土と基礎, Vol.42, No.4, pp.15-20.
- 23) 三田地利之, 遠藤大輔(1996): 一軸圧縮試験結果の評価方法について -サクシヨンの測定を伴う一軸圧縮試験の提案-, 第 41 回地盤工学シンポジウム, pp.43-48.

第6章

非一様性を考慮した試験盛土供試体の強度変形特性

6.1 概要

本章では 4 章に示した供試体の非一様性に基づいて、試験盛土供試体の局所的な変形を考慮しながら三軸圧縮試験による強度変形特性を調べた。三軸圧縮試験の単調載荷過程に加え、等方圧密時や荷重保持載荷及び繰返し載荷時の変形特性を評価した。また、平均基底主応力 $p_{\text{net}}=700\text{kPa}$ 程度までの中圧等方圧密過程による圧密履歴の有無が強度変形特性に与える影響についても調べた。さらに、変形特性の鉛直深度分布に対する評価や、締固め層の上部と下部から別個に採取した供試体の小型三軸圧縮試験による強度変形特性の評価を実施した。また、飽和化した供試体の三軸圧縮試験を実施し、不飽和供試体との強度変形特性の比較を行った。

6.2 供試体の非一様性が単調載荷時の強度変形特性に与える影響

6.2.1 試験盛土供試体の応力～ひずみ関係

図 6-2-1 には、作製した三軸圧縮試験用の試験盛土供試体の乾燥密度～含水比関係と $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ 及び $4.5E_c$ の締固め曲線を示す。また、図 6-2-2 には、同じ供試体の乾燥密度～飽和度で整理している。両図に示す乾燥密度、含水比、飽和度の供試体にはそれぞれ、平均値に加えて上部及び下部の局所的な値を示している。平均値は供試体作製時に測定して求めたもので、上部と下部の局所的な値は平均値に基づき、前に示した式 4-3-13、式 4-3-14 を用いて推定している。小型の締固め機械(ハンドガイドタイプの 1ton 振動ローラー)で締固めた供試体の、平均乾燥密度は $1.0E_c$ 付近に位置している。一方で、供試体上部と下部の局所乾燥密度に着目すると、上部の乾燥密度は $4.5E_c$ 付近、下部の供試体は、 $1.0E_c$ と $0.2E_c$ の中間に位置する事がわかる。また試料の排水性が比較的高い為、飽和度が $S_r=80\%$ を越えるような高含水比の供試体を作製する事が出来なかった。本研究で扱う試験盛土供試体は最適含水比(最適飽和度)付近～乾燥側が中心となっている。

以下に典型的な試験結果の例を示す。

(1) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.584\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=5.2\%$ 、飽和度 $S_r=20.1\%$ の供試体の試験結果

供試体は水平基底応力 $\sigma_{\text{hnet}}=50\text{kPa}$ 、圧密排気・排水条件で載荷している。図 6-2-3 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみと LDT による供試体端面を除く供試体の平均の鉛直ひずみを示している。EDT と LDT では供試体端面のベディングエラーの影響や試験装置の変形等のシステムコンプライアンスにより、応力～ひずみ関係に違いが生じているが、測定範囲において両者の鉛直ひずみの差は最大で 0.5% 程度であった。EDT で測定した応力～ひずみ関係では鉛直ひずみ $\varepsilon_v=7\%$ 付近でピークを迎えている。この供試体の最大軸差応力は $q_{\text{max}}=235.8\text{kPa}$ であった。図 6-2-4 は、供試体の上部と下部に設置した LDT80 により測定した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。LDT80 の配置は図 3-2-11 に示した通りである。ロードセルは共通した 1 つを利用している為、軸差応力のピーク値は一致するが、ピークに達するまでの剛性は供試体の上部と下部を比較すると下部の方が大きい事がわかる。供試体上部が下部より乾燥密度が大きい事を踏まえると、供試

体下部の方が上部より剛性が大きい事は 5.2 の室内締固め供試体の三軸圧縮試験結果で示した乾燥密度と剛性の関係と整合しない。この傾向を定量的に示す為に他の締固め条件の供試体の三軸圧縮試験結果と併せ、初期ヤング率 E_0 や割線ヤング率 E_{50} を用いて後で評価する。また、局所乾燥密度が大きい供試体上部は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ 付近において局所乾燥密度が小さい供試体下部より軸差応力が小さいが、鉛直ひずみの進行とともに軸差応力は増加し、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.4\%$ 付近において供試体下部より軸差応力が大きくなっている。次に体積ひずみ～鉛直ひずみ関係について、载荷初期は上部と下部ともに体積ひずみは収縮傾向を示すが、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.2\% \sim 0.6\%$ 付近で膨張傾向に転じている。また、最大体積圧縮ひずみは供試体の上部が下部に比べてやや大きい。これも供試体上部と下部の乾燥密度の大小関係と整合しない。

図 6-2-5 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0 \sim 0.01\%$ 範囲の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。等方圧密後の载荷初期のヤング率は上部で $(E_0)_{upper}=164.9\text{MPa}$ 、下部で $(E_0)_{lower}=198.9\text{MPa}$ であり、下部が大きい。また、体積ひずみは収縮傾向を示している。

図 6-2-6 は、供試体に設置した LDT により測定した平均的な鉛直ひずみと、上端部、上部、下部及び下端部それぞれの局所的な鉛直ひずみの関係を示す。また、体積ひずみと鉛直ひずみの関係も併せて示している。軸差応力～鉛直ひずみ関係について、供試体平均は供試体上部に近い。また、供試体下端部は下部と同等の剛性を示すが、下端部の方がやや小さい。また、上端部は上部の剛性に比べて著しく小さい。上端部と下端部が上部と下部に比べてそれぞれ低い剛性を示す理由には供試体端面のベディングエラーの影響が考えられるが、その影響の程度は上端部の方が大きい。体積ひずみ～鉛直ひずみ関係は、軸差応力～鉛直ひずみのピーク強度までの剛性の大小と下端部を除いてほぼ等しく、下部、下端部のグループ、平均と上部のグループ、上端部の順番に早くから膨張挙動を示した。これらの結果から、試験盛土供試体は局所変位計の測定位置によって大きく異なる局所変形挙動が観測される事、LDT170(従来の供試体上下端面を除いた局所変位計)で測定する供試体平均の剛性は、剛性の低い供試体上部に近い結果となる事、供試体端面のベディングエラーの影響を受ける事を確認した。すなわち、ポリウレタン系弾性ゴムのダミー供試体のような一様の供試体に比べて、供試体の非一様性が変形特性に強く現れる事がわかった。

図 6-2-7 は、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、補助線として 1:-1 関係を破線で示す。载荷初期は鉛直ひずみが水平ひずみより大きく、補助線から離れるように推移するが鉛直ひずみの進行とともに補助線とほぼ平行となった。上部と下部の違いについては、上部の鉛直ひずみがやや大きい。

図 6-2-8 は、接線ヤング率～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ヤング率は低下するが、载荷初期から $\varepsilon_v=0.2\%$ 付近までは下部の接線ヤング率が上部よりやや大きい。それ以降は供試体上部の接線ヤング率が下部より大きい値を示している事がわかる。これは図 6-2-4 でも示したように、局所乾燥密度の大きい供試体上部は鉛直ひずみの進行とともに変形挙動が変化していると考えられる。

図 6-2-9 は、 $E_{tan} / E_0 \sim q / q_{max}$ 関係を示す。小高ら(1998)は堆積軟岩の応力～ひずみ関係における接線ヤング率の低下に着目し、供試体の乱れの評価方法を提案している。これは堆積軟岩のサンプリング時に生じるマイクロクラックが载荷初期の接線剛性を低下させ、その後の鉛直ひずみの進行とともにマイクロクラックが閉塞・剛性回復する際に現れる S 字型の応力～ひずみ関係の特徴を用いる事で供試体の乱れの有無を判定している。試験盛土供試体は押切式ブロックサンプリングにより採取している為、この方法に着目して評価を試みた。その結果、 E_{tan} / E_0 は、 $q / q_{max}=0 \sim 0.2$ までの間に上部がやや下部に比べて著しく低下したものの、 $q / q_{max}=0.2 \sim 1.0$ 付近までかけて緩やかに低下する傾向であり、剛性回復のような挙動は観測されなかった。

図 6-2-10 は、接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0 \sim 0.01\%$ 付近までの接線ポアソン比は $\nu_{tan}=0.2 \sim 0.3$ 程度であり、弾性的挙動を示している。 $\varepsilon_v=0.01\%$ 付近以降は鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ポアソン比は増加している。

(2) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.617\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=7.9\%$ 、飽和度 $S_r=32.1\%$ の供試体の試験結果

図 6-2-11 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみと LDT による供試体端面を除く供試体の平均の鉛直ひずみを示している。EDT と LDT の応力～ひずみ関係において、鉛直ひずみの両者の差は測定範囲で最大 0.5%程度であった。EDT で測定した応力～ひずみ関係では鉛直ひずみの増加とともに軸差応力は緩やかに増加し、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=4\%$ 付近でピークを迎えている。この供試体の最大軸差応力は $q_{\max}=228.8\text{kPa}$ であった。図 6-2-12 は、供試体の上部と下部に設置した LDT80 により測定した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。ピークに達するまでの剛性は供試体の上部と下部を比較すると下部の方がやや大きく、供試体上部と下部の局所乾燥密度の大小と整合しない。体積ひずみは、載荷初期は上部と下部ともに収縮傾向を示し、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.2\%\sim 0.6\%$ 付近で膨張傾向に転じるが、その傾向は緩やかである。最大体積圧縮ひずみは供試体の上部が下部に比べてやや大きい。これも供試体上部と下部の局所乾燥密度の大小と整合しない。

図 6-2-13 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\sim 0.01\%$ 範囲の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。等方圧密後の載荷初期のヤング率は上部で $(E_0)_{\text{upper}}=131.2\text{MPa}$ 、下部で $(E_0)_{\text{lower}}=136.1\text{MPa}$ であり、やや下部が大きい。また、体積ひずみは収縮傾向を示している。

図 6-2-14 は、供試体に設置した LDT により測定した平均的な鉛直ひずみと、上端部、上部、下部及び下端部それぞれの局所的な鉛直ひずみの関係を示す。また、体積ひずみと鉛直ひずみの関係も併せて示している。軸差応力～鉛直ひずみ関係について、供試体平均は供試体の上部と下部の間に位置するが上部に近い。また、供試体下端部は下部より剛性が小さい。また、上端部は上部に比べて著しく小さい。局所変位計の設置位置と測定される剛性の全体的な傾向としては飽和度や乾燥密度が変わっても図 6-2-6 で示した傾向と類似している。上端部と下端部はベディングエラーの影響で上部、下部それぞれに比べてやや小さい剛性であった。体積ひずみ～鉛直ひずみ関係は、軸差応力～鉛直ひずみのピーク強度までの剛性の大小とほぼ等しく、下部、平均、上部、下端部、上端部の順番に早くから膨張挙動を示した。

図 6-2-15 は、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、補助線として 1:-1 関係を破線で示す。載荷初期は鉛直ひずみが水平ひずみより大きく、補助線から離れるように推移するが、その傾きは鉛直ひずみの進行とともに緩やかとなった。上部と下部の違いについては、同じ鉛直ひずみで、上部より下部の水平ひずみがやや大きい、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.6\%$ 程度以降ではそれ以上の大きな水平ひずみの差は生じない。

図 6-2-16 は、接線ヤング率～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ヤング率は低下するが、載荷初期から $\varepsilon_v=0.2\%$ 付近までは下部の接線ヤング率が上部よりやや大きい。それ以降はほぼ上部の方が下部より大きい接線ヤング率を示している。

図 6-2-17 は、 $E_{\tan}/E_0 \sim q/q_{\max}$ 関係を示す。 E_{\tan}/E_0 は、 $q/q_{\max}=0\sim 0.1$ までの間に上部と下部ともに著しく低下し、 $q/q_{\max}=0.1\sim 1.0$ 付近までかけて緩やかに低下する傾向であった。乱れのある堆積軟岩のように $q/q_{\max}=0.1$ 付近での著しく低い値は確認されなかった。

図 6-2-18 は、接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\sim 0.004\%$ 付近までの接線ポアソン比は $\nu_{\tan}=0.2$ 程度であるが上部と下部で異なり、弾性的挙動を示している。 $\varepsilon_v=0.004\%$ 付近以降は鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ポアソン比は増加している。

(3) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.697\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=14.0\%$ 、飽和度 $S_r=64.6\%$ の供試体の試験結果

図 6-2-19 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみと

LDT による供試体端面を除く供試体の平均の鉛直ひずみを示している。EDT と LDT の応力～ひずみ関係において、鉛直ひずみの差は最大で 0.3% 程度であった。EDT で測定した応力～ひずみ関係では鉛直ひずみの増加とともに軸差応力は緩やかに増加し、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=4\%$ 付近でピークを迎えている。この供試体の最大軸差応力は $q_{\max}=254.0\text{kPa}$ であった。図 6-2-20 は、供試体の上部と下部に設置した LDT80 により測定した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。ピークに達するまでの剛性は供試体の上部と下部を比較すると下部の方がやや大きい、その差は小さい。載荷初期の体積ひずみは上部と下部ともに収縮傾向を示し、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%\sim 0.6\%$ 付近で膨張傾向に転じるがその傾向は緩やかである。最大体積圧縮ひずみは供試体の上部が下部に比べてやや大きい。これも供試体上部と下部の乾燥密度の大小と整合しない。当供試体は先に示した二つの供試体に比べて飽和度が比較的高く、剛性や供試体上部と下部の剛性の差の大きさについては、飽和度も考慮した評価が必要であることから、詳細な比較は後で示す。

図 6-2-21 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\sim 0.01\%$ 範囲の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。等方圧密後の載荷初期のヤング率は上部で $(E_0)_{\text{upper}}=138.3\text{MPa}$ 、下部で $(E_0)_{\text{lower}}=143.1\text{MPa}$ であり、下部が大きい。また、体積ひずみは収縮傾向を示している。

図 6-2-22 は、供試体に設置した LDT により測定した平均的な鉛直ひずみと、上端部、上部、下部及び下端部それぞれの局所的な鉛直ひずみの関係を示す。また、体積ひずみと鉛直ひずみの関係も併せて示している。軸差応力～鉛直ひずみ関係について、供試体平均の応力～ひずみ関係は供試体の上部と下部との中間に位置する。また、供試体下端部は下部と同等の剛性を示すが、下端部の方がやや剛性が大きい傾向を示した。上端部は上部に比較的近いが剛性は上部より上端部の方が小さい。上部に比べて上端部はベディングエラーの影響でやや小さい剛性である事は説明出来るが、下端部がベディングエラーの影響を含んでも下部より剛性が大きい理由はわからない。この傾向は 5.7 で室内締固め供試体の割線ヤング率 E_{50} 等でも見られており、供試体下端部と下部はほぼ同等であると解釈する方が妥当と考える。体積ひずみ～鉛直ひずみ関係は、軸差応力～鉛直ひずみのピーク強度までの剛性の大小とほぼ整合しており、下部、下端部、平均、上部、上端部の順番に早くから膨張挙動を示した。

図 6-2-23 は、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、補助線として 1:-1 関係を破線で示す。載荷初期は鉛直ひずみが水平ひずみより大きく、補助線から離れるように推移するが、その傾きは鉛直ひずみの進行とともに緩やかとなった。上部の鉛直ひずみは下部に比べてやや大きく、鉛直ひずみの進行とともに上部と下部の鉛直ひずみの差が増加している。

図 6-2-24 は、接線ヤング率～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ヤング率は低下するが、載荷初期から $\varepsilon_v=0.2\%$ 付近までは下部の接線ヤング率が上部よりやや大きい。それ以降はほぼ上部の方が下部より大きい接線ヤング率を示している。

図 6-2-25 は、 $E_{\text{tan}}/E_0 \sim q/q_{\max}$ 関係を示す。 E_{tan}/E_0 は、 $q/q_{\max}=0\sim 0.2$ までの間に上部と下部ともに著しく低下し、 $q/q_{\max}=0.2\sim 1.0$ 付近にかけて緩やかに低下する傾向であった。乱れのある堆積軟岩のように $q/q_{\max}=0.1$ 付近での著しく低い値は確認されなかった。これまで 3 つのケースに確認したが、この方法では供試体の採取による乱れは確認されなかった。

図 6-2-26 は、接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\sim 0.02\%$ 付近までの供試体上部と下部ともに接線ポアソン比は $\nu_{\text{tan}}=0.2$ 程度でほぼ一定値を示した。 $\varepsilon_v=0.02\%$ 付近以降は鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ポアソン比は増加している。

6.2.2 試験盛土供試体の最大軸差応力～乾燥密度関係に与える飽和度の影響

図 6-2-27 は、各供試体の最大軸差応力～局所乾燥密度関係を示す。同じ供試体の上部と下部で対となる局所乾

乾燥密度の二つのデータを破線で結んでいる。上部と下部をそれぞれ飽和度別のパラメーターとして記号に示している。上部と下部で対になる供試体は同じ軸差応力で乾燥密度が異なる為、全体の傾向は明確にはわからないが、同じ飽和度であれば局所乾燥密度が増加すると最大軸差応力が増加している。ばらつきが生じているのは供試体の非一様性の影響と飽和度の影響である。初めに供試体の非一様性について考察する。試験盛土供試体の方が室内締固め供試体に比べて鉛直深度方向の乾燥密度分布が大きい事は先述したが、これが全体のばらつきに影響を与えている。室内締固め供試体と同様に最大軸差応力は供試体の破壊性状と深く関連する為、供試体の非一様性とその破壊性状について次に示す。

図 6-2-28～30 には先に示した三軸圧縮試験後の供試体の破壊性状を示す。これらは締固め機械の通過回数は $N_p=16$ で等しく、飽和度が $S_r=20.1\% \sim 64.6\%$ と異なる。また、図 6-2-31 は、締固め機械の通過回数 $N_p=4$ 、飽和度が $S_r=67.1\%$ の供試体の破壊性状を示す。いずれの供試体も三軸圧縮試験後は供試体の膨張破壊が確認されたが、最も膨張しているのは供試体のやや下部であった。これは、供試体の下部が上部より乾燥密度が小さく非一様であり、下部が先行して膨張破壊した為であると考えられる。

以上より、試験盛土供試体の最大軸差応力は飽和度の影響がある事、先行して破壊するのは局所乾燥密度が小さい供試体下部である事が確認された。すなわち、最大軸差応力の評価には試験盛土供試体下部の局所乾燥密度を適用する事で、供試体の非一様性の影響を低減する事が出来る。図 4-3-22 の説明では、供試体それぞれの平均乾燥密度に対する上部と下部の乾燥密度の差の割合は、締固め機械通過回数に依らず 4.0%程度と非常に大きくなる事を述べた。図 6-2-27 からも明らかであるが同じ最大軸差応力に対して異なる 2 つの局所乾燥密度が生じる事を踏まえると、供試体それぞれの平均乾燥密度に対する上部と下部の乾燥密度の差の割合が 4.0%程度であれば、供試体の非一様性の影響検討を実施する事は必須であると言える。

図 6-2-32 は、最大軸差応力～供試体下部の局所乾燥密度関係を示す。図 6-2-27 で示した最大軸差応力～局所乾燥密度の関係から供試体の非一様性の影響を排除する事が出来た。次に、ばらつきを与える飽和度の影響について検討する。図の記号は飽和度別のパラメーターにしているが、さらに飽和度を $S_r=15\% \sim 30\%$ 、 $S_r=30\% \sim 50\%$ 、 $S_r=60\% \sim 80\%$ の 3 グループに色分けして示した。全体的に飽和度の低いグループは飽和度の高いグループに比べて同等の乾燥密度条件で最大軸差応力が大きい傾向を示している。これは、図 5-2-32 で示した室内締固め供試体の強度特性に与える影響の傾向と整合する。

図 6-2-33 は、最大軸差応力～供試体下部の局所飽和度関係を示す。また、乾燥密度を $\rho_d=1.50\text{g/cm}^3 \sim 1.60\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3 \sim 1.70\text{g/cm}^3$ の 2 グループに色分けして示した。全体的に飽和度が高いと最大軸差応力が緩やかに低下するような傾向を示すが、ばらつきが大きい。このばらつきは乾燥密度の影響であり、同じ飽和度でも乾燥密度が大きくなると最大軸差応力も大きくなっている。

図 6-2-34 は、最大軸差応力～供試体下部の含水比関係を示す。先と同様に乾燥密度を $\rho_d=1.50\text{g/cm}^3 \sim 1.60\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3 \sim 1.70\text{g/cm}^3$ の 2 グループに色分けして示した。全体的に含水比が高いと最大軸差応力が緩やかに低下するような傾向を示し、多少のばらつきは認められる。室内締固め供試体では最大軸差応力～局所飽和度関係に比べて最大軸差応力～含水比関係のばらつきの程度はやや小さい事を説明していたが、試験盛土供試体ではデータ数に限りがある為、明確には分らなかった。

図 6-2-35 は、最大軸差応力～乾燥密度～飽和度関係を示す。最大軸差応力は供試体の乾燥密度と飽和度の影響があり、最大軸差応力を適切に評価するには乾燥密度と飽和度を適切に考慮する必要がある。

次に式 5-2-1、式 5-2-2、式 5-2-3 を用いて、飽和度の関数 $f_{q_{\max}}$ ～飽和度関係において $a=0$ を仮定し、 b を $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ の四種類として、最も乾燥密度の影響の少ない b を探索する。

図 6-2-36～図 6-2-39 は、飽和度の関数 $f_{q_{\max}}$ ～飽和度関係を示しており、 b が $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ と異なる

る。 $b=1.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が大きいと飽和度の関数 f_{qmax} も大きい。 $b=6.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度の影響が小さいがやや含まれている。 $b=9.0$ ではこれらの中で最も乾燥密度の影響が小さい。 $b=16.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が小さいと飽和度の関数 f_{qmax} が大きく、乾燥密度の影響が多く含まれている。従って、本研究では乾燥密度の関数 g_{qmax} に用いる定数に $a=0$ 、 $b=9.0$ を適用する事とした。最大軸差応力の飽和度の関数 f_{qmax} ～飽和度関係から乾燥密度の影響を排除すると、飽和度が低い場合は最大軸差応力の飽和度の関数 f_{qmax} は大きく、飽和度が高い場合は最大軸差応力の飽和度の関数 f_{qmax} は小さくなる事が明確に示された。

以上より、非一様供試体の最大軸差応力～乾燥密度関係には供試体の飽和度の影響が含まれるが、室内締固め供試体と同様にその影響を考慮し、最大軸差応力は乾燥密度に相関がある事を示した。含水比の影響を考慮した最大軸差応力～乾燥密度関係の推定検討は、飽和度の影響検討に加えて第7章に示す。

6.2.3 試験盛土供試体の初期ヤング率～乾燥密度関係に与える飽和度の影響

図 6-2-40 は、各供試体の初期ヤング率～局所乾燥密度関係を示す。同じ供試体の上部と下部で対となる局所乾燥密度の二つのデータを破線で結んでいる。上部と下部をそれぞれ飽和度別のパラメーターとして記号に示している。また、飽和度を $S_r=15\% \sim 30\%$ 、 $S_r=30\% \sim 60\%$ 、 $S_r=60\% \sim 75\%$ の 3 グループに色分けして示した。全体の傾向として同じ飽和度のグループで局所乾燥密度が増加すると初期ヤング率が増加している。また、飽和度が低いグループでは、供試体上部は同じ供試体の対となる下部より乾燥密度が大きいにも関わらず初期ヤング率は低い傾向を示している。また、飽和度が高いグループになる程、上下の初期ヤング率の差が小さくなる事がわかる。供試体上部と下部の違いによるばらつきは確認されるが、飽和度の影響も含まれていると考えられる為、次には飽和度の影響に着目して考察する。

図 6-2-41 は、初期ヤング率～局所飽和度関係を示す。また、乾燥密度を $\rho_d=1.50g/cm^3 \sim 1.60g/cm^3$ 、 $\rho_d=1.60g/cm^3 \sim 1.70g/cm^3$ 、 $\rho_d=1.70g/cm^3 \sim 1.75g/cm^3$ の 3 グループに色分けして示した。全体的に飽和度が高いと初期ヤング率が緩やかに低下する傾向を示すが、ばらつきが大きい。このばらつきには乾燥密度の影響が含まれ、同じ飽和度でも乾燥密度が大きくなると多少の例外はあるが初期ヤング率も大きくなっている。ただし、乾燥密度の大きい供試体上部の方が下部よりやや小さい初期ヤング率を示すケースが多いのは供試体上部と下部の性質の違いが示唆される。

図 6-2-42 は、初期ヤング率～含水比関係を示す。先と同様に乾燥密度を $\rho_d=1.50g/cm^3 \sim 1.60g/cm^3$ 、 $\rho_d=1.60g/cm^3 \sim 1.70g/cm^3$ 、 $\rho_d=1.70g/cm^3 \sim 1.75g/cm^3$ の 3 グループに色分けして示した。全体的に含水比が高いと初期ヤング率が緩やかに低下するような傾向を示し、多少のばらつきは認められる。室内締固め供試体では初期ヤング率～局所飽和度関係に比べて初期ヤング率～含水比関係のばらつきの程度はやや小さい事を説明していたが、試験盛土供試体ではデータ数に限りがある為、明確には分からなかった。

図 6-2-43 は、初期ヤング率～乾燥密度～飽和度関係を示す。初期ヤング率は供試体の乾燥密度と飽和度の影響があり、初期ヤング率を適切に評価するには乾燥密度と飽和度の影響を適切に考慮する必要がある。

そこで、5.2.3 と同様に式 5-2-4～式 5-2-6、式 5-2-9 を用いて飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係において $a=0.677$ とし、 b を $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ 、の四種類として、最も乾燥密度の影響の少ない b を探索する。

図 6-2-44～図 6-2-47 は、飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係を示しており、 b が $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ と異なる。 $b=1.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が大きいと飽和度の関数 f_{E0} も大きい。 $b=6.0$ ではこれらの中で最も乾燥密度の影響が小さい。 $b=9.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度の影響が小さいがやや含まれている。 $b=16.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が小さいと飽和度の関数 f_{E0} が大きく、乾燥密度の影響が多く含まれている。従って、本研究では乾燥密度の関数 g_{E0} に用いる定数に $a=0.677$ 、 $b=6.0$ を適用する事で、初期ヤング率の飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係から乾燥密度の影響を排除すると、飽和度が低い場合は初期ヤング率の飽和度の関数 f_{E0} は大きく、飽和度が高い場合

は初期ヤング率の飽和度の関数 f_{E0} は小さくなる事が明確に示された。ただし、供試体上部と下部では特に飽和度 $S_r=15\%\sim 50\%$ 付近において飽和度が f_{E0} に与える影響はやや異なっている。これは乾燥密度の大きい供試体上部の初期ヤング率が小さい事を意味しており、飽和度によって異なるが供試体下部に対して一定の割合で低下している事がわかる。

以上より、非一様供試体の初期ヤング率～乾燥密度関係には供試体の飽和度の影響が含まれるが、室内締固め供試体と同様にその影響を考慮し、初期ヤング率は乾燥密度に相関がある事を示した。含水比の影響を考慮した初期ヤング率～乾燥密度関係の推定検討は、飽和度の影響比較に加えて第7章に示す。また、乾燥密度の影響を取り除いた飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係で整理する事で、特に低い飽和度の範囲で供試体上部の初期ヤング率は下部に比べてやや低い傾向を示す事が確認された。

6.2.4 試験盛土供試体の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係に与える飽和度の影響

図 6-2-48 は、各供試体の割線ヤング率 E_{50} ～局所乾燥密度関係を示す。同じ供試体の上部と下部で対となる局所乾燥密度の二つのデータを破線で結んでいる。上部と下部をそれぞれ飽和度別のパラメーターとして記号に示している。また、飽和度を $S_r=15\%\sim 30\%$ 、 $S_r=30\%\sim 55\%$ 、 $S_r=60\%\sim 75\%$ の 3 グループに色分けして示した。全体の傾向として同じ飽和度のグループで局所乾燥密度が増加すると割線ヤング率 E_{50} が増加している。また、飽和度が低いグループでは、供試体上部は同じ供試体の対となる下部より乾燥密度が大きいにも関わらず割線ヤング率 E_{50} は低い傾向を示している。また、飽和度が高いグループになる程、上下の割線ヤング率 E_{50} の差がやや小さくなっている。供試体上部と下部の違いによるばらつきは確認されるが、飽和度の影響も含まれていると考えられる為、次には飽和度の影響に着目して考察する。

図 6-2-49 は、割線ヤング率 E_{50} ～局所飽和度関係を示す。また、乾燥密度を $\rho_d=1.50\text{g/cm}^3\sim 1.60\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3\sim 1.70\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.70\text{g/cm}^3\sim 1.75\text{g/cm}^3$ の 3 グループに色分けして示した。全体的に飽和度が高いと割線ヤング率 E_{50} が緩やかに低下する傾向を示すが、ばらつきが大きい。このばらつきには乾燥密度の影響が含まれ、同じ飽和度でも乾燥密度が大きくなると多少の例外はあるが初期ヤング率も大きくなっている。ただし、乾燥密度の大きい供試体上部の方が下部より小さい割線ヤング率 E_{50} を示すケースが明らかに多いのは供試体上部と下部の性質の違いが示唆される。

図 6-2-50 は、割線ヤング率 E_{50} ～含水比関係を示す。先と同様に乾燥密度を $\rho_d=1.50\text{g/cm}^3\sim 1.60\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3\sim 1.70\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_d=1.70\text{g/cm}^3\sim 1.75\text{g/cm}^3$ の 3 グループに色分けして示した。全体的に含水比が高いと割線ヤング率 E_{50} が緩やかに低下するような傾向を示し、多少のばらつきは認められる。室内締固め供試体では割線ヤング率 E_{50} ～局所飽和度関係に比べて割線ヤング率 E_{50} ～含水比関係のばらつきの程度はやや小さい事を説明していたが、試験盛土供試体ではデータ数に限りがある為、明確には分からなかった。

図 6-2-51 は、割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度～飽和度関係を示す。初期ヤング率と同様に、割線ヤング率 E_{50} は供試体の乾燥密度と飽和度の影響があり、割線ヤング率 E_{50} を適切に評価するには乾燥密度と飽和度の影響を適切に考慮する必要がある。

そこで、5.2.4 と同様に式 5-2-10～式 5-2-12、式 5-2-9 を用いて飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係において $a=0.677$ とし、 b を $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ 、の四種類として、最も乾燥密度の影響の少ない b を探索する。

図 6-2-52～図 6-2-55 は、飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係を示しており、 b が $b=1.0$ 、 $b=6.0$ 、 $b=9.0$ 、 $b=16.0$ と異なる。 $b=1.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が大きいと飽和度の関数 f_{E50} も大きい。 $b=6.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度の影響が最も小さい。 $b=9.0$ では乾燥密度の影響は小さいがやや含まれている。 $b=16.0$ では同じ飽和度でも乾燥密度が小さいと飽和度の関数 f_{E50} が大きく、乾燥密度の影響が多く含まれている。従って、本研究では乾燥密度の関数

g_{E50} に用いる定数に $a=0$ 、 $b=9.0$ を適用する事で、割線ヤング率 E_{50} の飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係から乾燥密度の影響を排除すると、飽和度が低い場合は割線ヤング率 E_{50} の飽和度の関数 f_{E50} は大きく、飽和度が高い場合は割線ヤング率 E_{50} の飽和度の関数 f_{E50} は小さくなる事が明確に示された。ただし、供試体上部と下部では特に飽和度 $S_r=15\%\sim 50\%$ 付近において飽和度が f_{E50} に与える影響は明らかに異なる。これは乾燥密度の大きい供試体上部の割線ヤング率 E_{50} が著しく小さい事を意味しており、飽和度によって異なるが供試体下部に対して一定の割合で低下している事がわかる。

以上より、非一様供試体の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係には供試体の飽和度の影響が含まれるが、室内締固め供試体と同様にその影響を考慮し、割線ヤング率 E_{50} は乾燥密度に相関がある事を示した。含水比の影響を考慮した割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係の推定検討は、飽和度の影響比較に加えて第7章に示す。また、乾燥密度の影響を取り除いた飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係で整理する事で、特に低い飽和度の範囲で供試体上部の割線ヤング率 E_{50} は低い傾向を示す事が確認された。

実際に現場では締固めエネルギーを正確に制御し記録する事が出来ない為、乾燥密度と飽和度を求める事になるが、これらを独立変数とする事で、簡単で実用的な変数分離式表現する事が出来た。ただし、盛土表層付近では異なる性質である事が明らかとなった。2.3.3 では、現場において締固め機械が土の締め固めに与える影響する要因に境界問題(接触問題)があり、極限支持力以上の荷重により盛土表層の塑性化が指摘されている事を説明した。これは、軟らかい締固め地盤に対して絶対剛性を有する振動ローラーが直上を走行するとローラーとの接触面直下の土がせん断破壊している可能性があるという事である。図 6-2-56 には試験盛土締固め時の段階的な表層土の移動と表面で観測されたせん断破壊跡を、図 6-2-57 には締固め後の試験盛土表層に残るせん断破壊跡を示す。試験盛土表層の硬軟状態や締固め機械の偏心にも依存するが、土槽延長 3.2m の間に多くの筋状の跡が観測された。ただし、締固め時に一時的にローラーに付着し、締固め機械の進行とともに剥がれ落ちる数 cm 厚程度の土塊も締固め後の試験盛土表層に残っており、筋状の跡について詳細に考察するには、これらを排除した観察が必要である。本研究では、この現象についてこれ以上調べる事は出来なかった。

上述したように、試験盛土供試体上部は試験盛土の締固め層表層に位置する為、供試体上部は締固め時に既にせん断破壊していて、初期ヤング率や割線ヤング率 E_{50} 等の局所的な変形挙動に影響を与えている可能性がある。

以降では試験盛土供試体上部は締固め機械との境界問題に起因するせん断破壊領域の影響を受けている事を仮定し、本研究で観測された低い初期ヤング率、割線ヤング率 E_{50} を示す部分について、鉛直深度範囲、乾燥密度、飽和度や含水比の影響、室内締固め供試体との違いに着目して考察する。

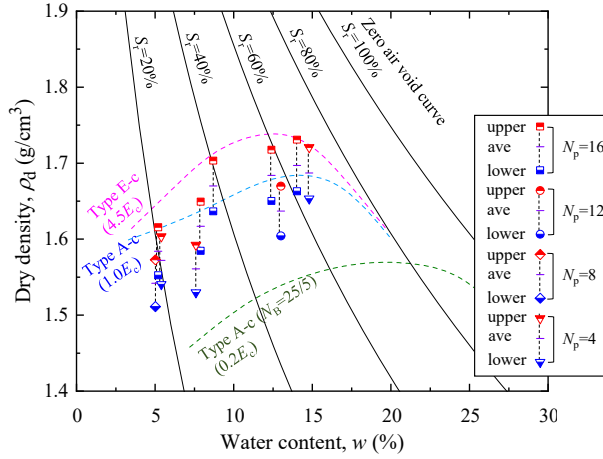


図 6-2-1 三軸試験供試体の乾燥密度～含水比関係

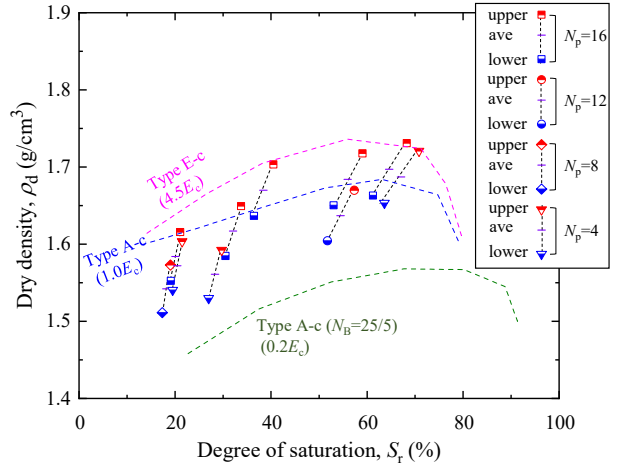


図 6-2-2 三軸試験供試体の乾燥密度～飽和度関係

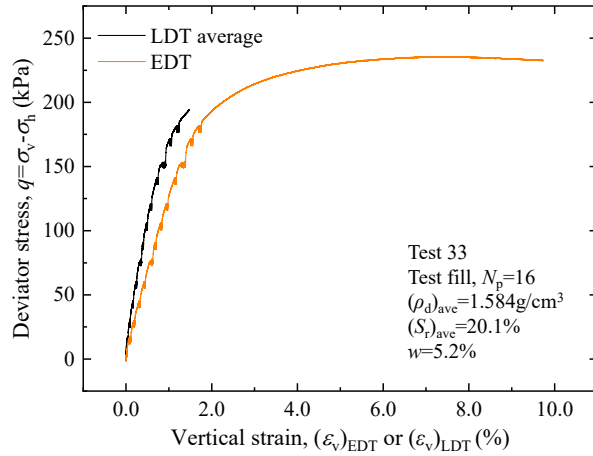


図 6-2-3 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

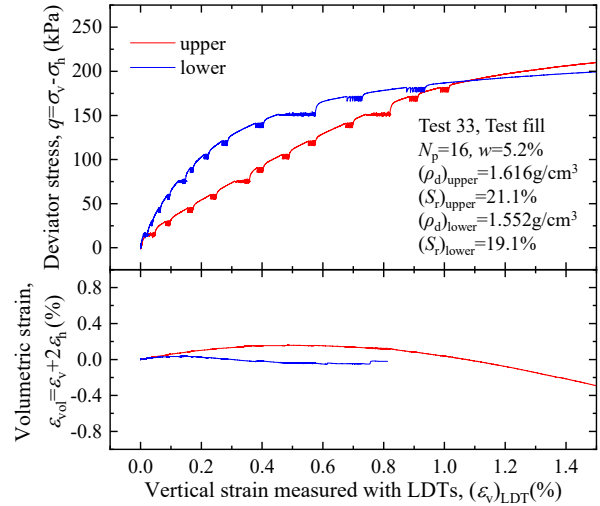


図 6-2-4 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

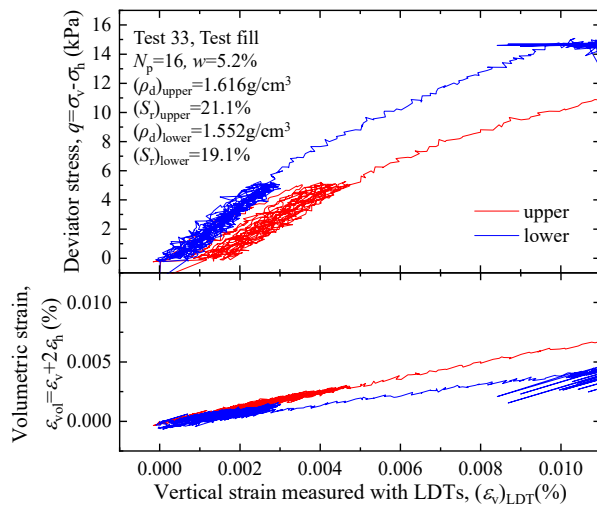


図 6-2-5 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

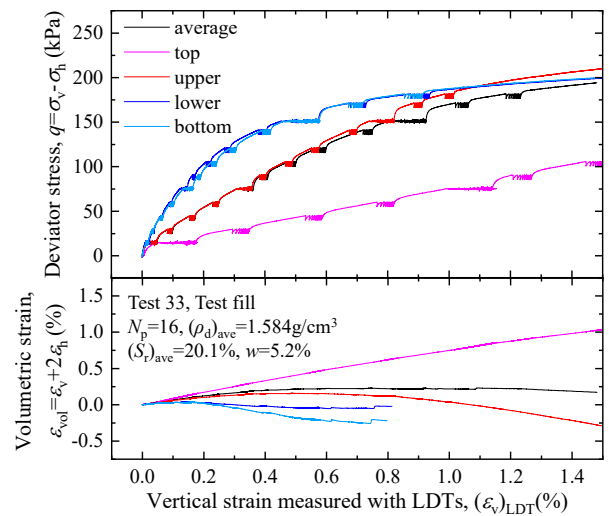


図 6-2-6 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 平均、上端部、上部、下部、下端部)

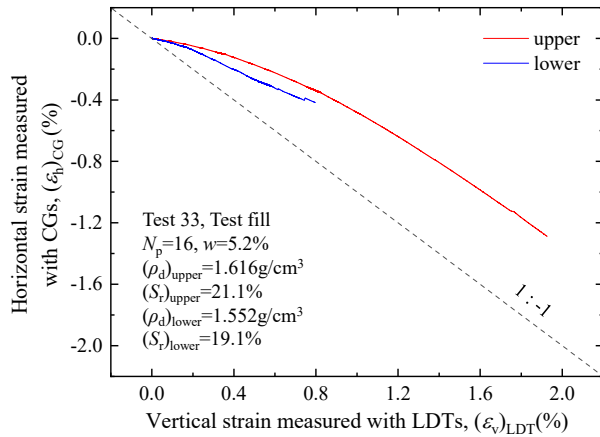


図 6-2-7 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

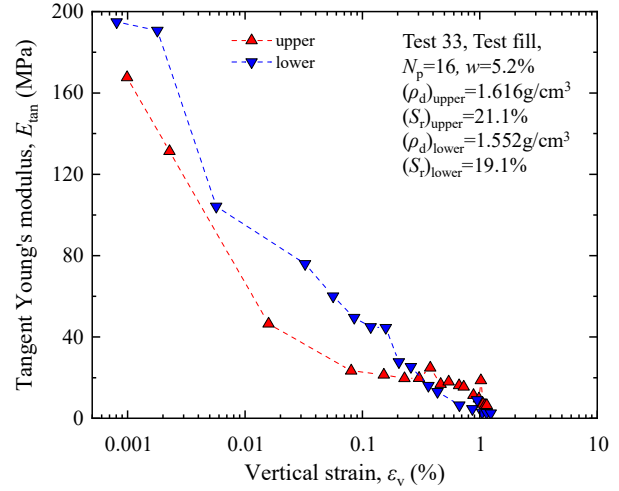


図 6-2-8 接線ヤング率～鉛直ひずみ関係(片対数)

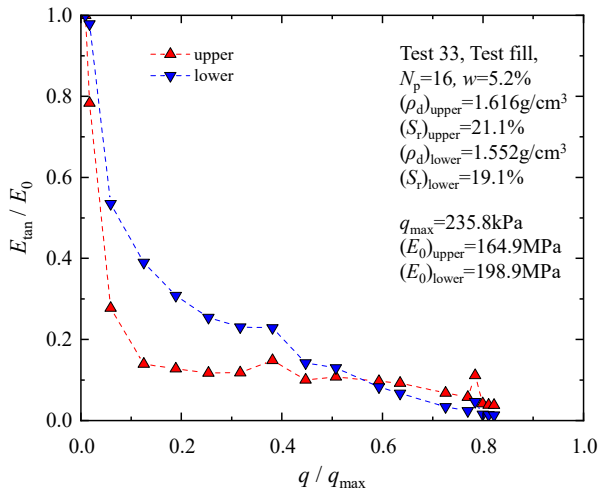


図 6-2-9 $E_{tan} / E_0 \sim q / q_{max}$ 関係

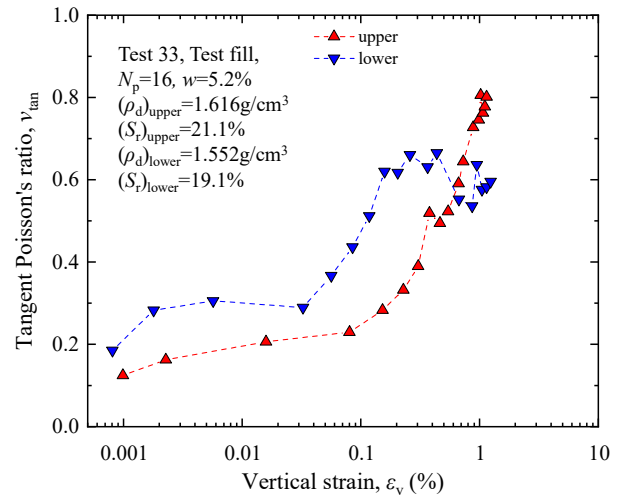


図 6-2-10 接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係(片対数)

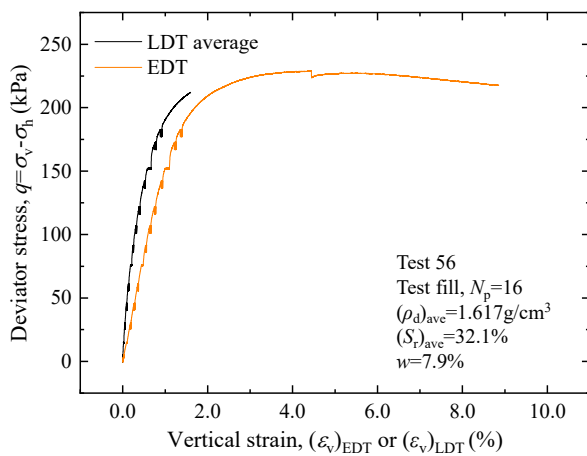


図 6-2-11 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

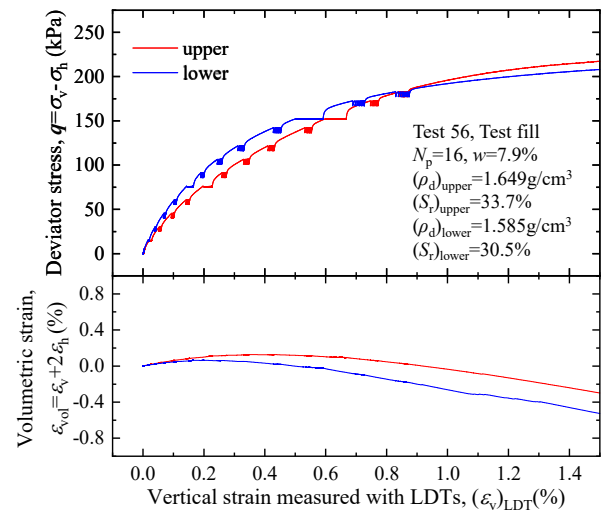


図 6-2-12 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

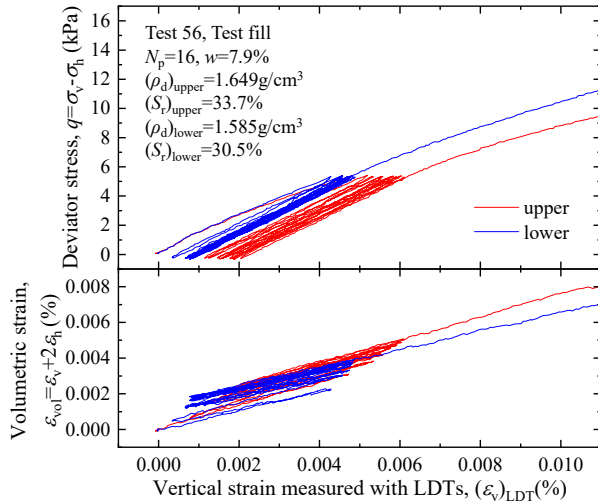


図 6-2-13 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

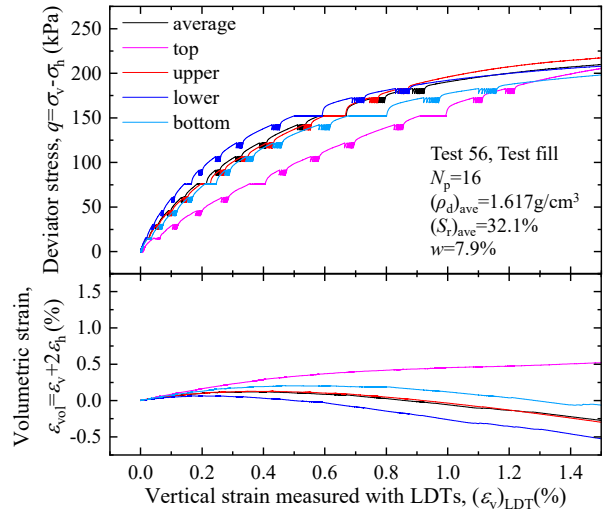


図 6-2-14 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 平均、上端部、上部、下部、下端部)

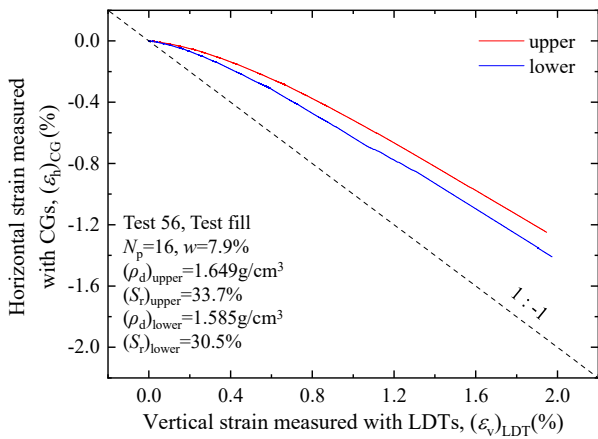


図 6-2-15 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

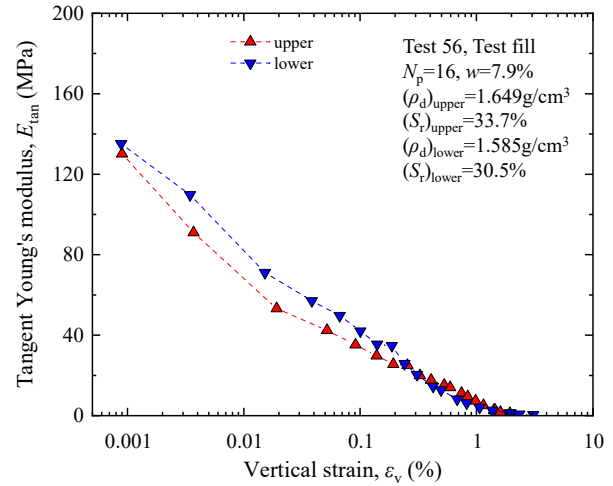


図 6-2-16 接線ヤング率～鉛直ひずみ関係(片対数)

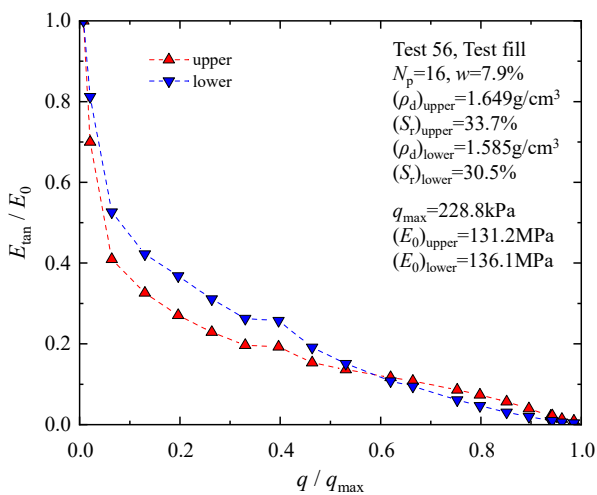


図 6-2-17 $E_{tan} / E_0 \sim q / q_{max}$ 関係

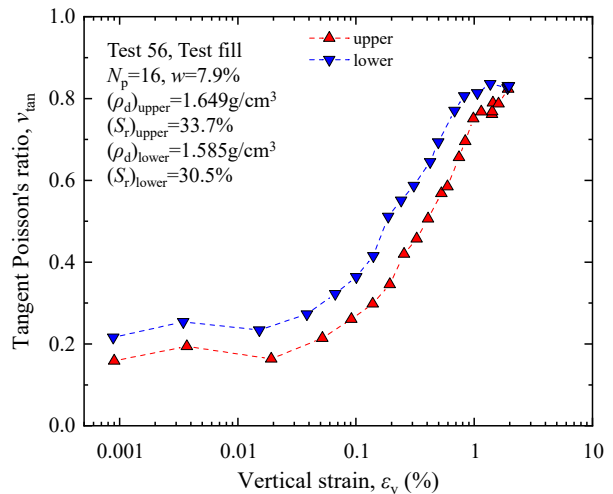


図 6-2-18 接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係(片対数)

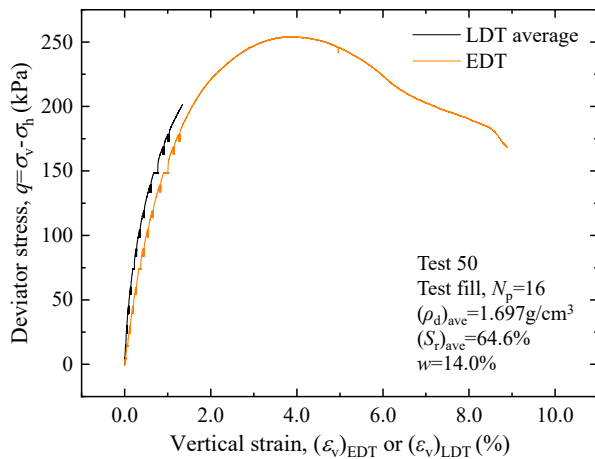


図 6-2-19 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

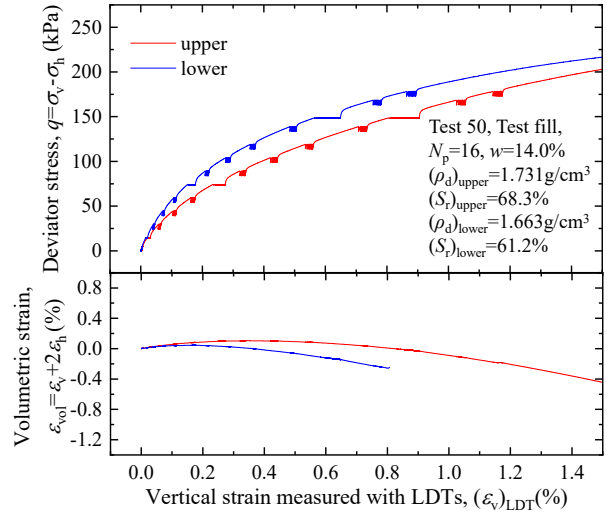


図 6-2-20 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

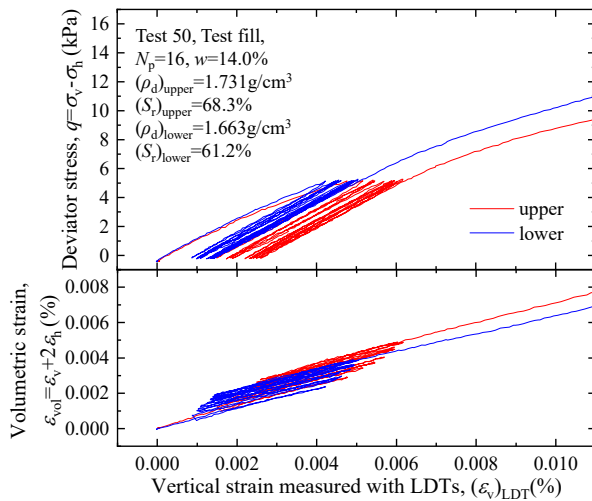


図 6-2-21 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

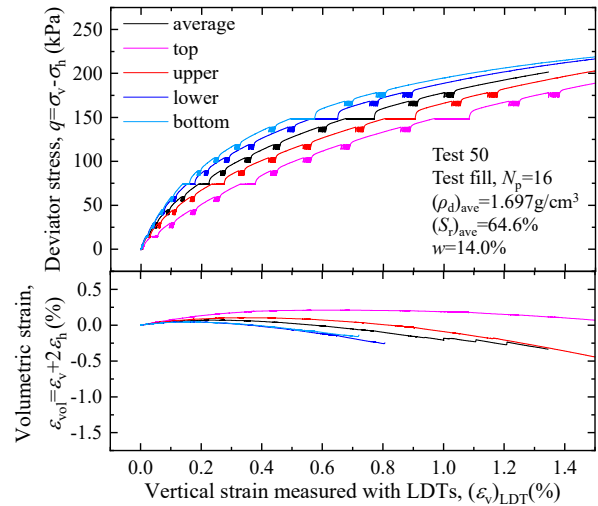


図 6-2-22 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 平均、上端部、上部、下部、下端部)

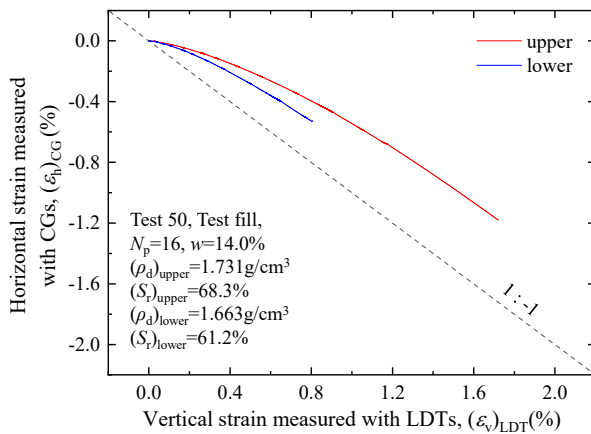


図 6-2-23 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

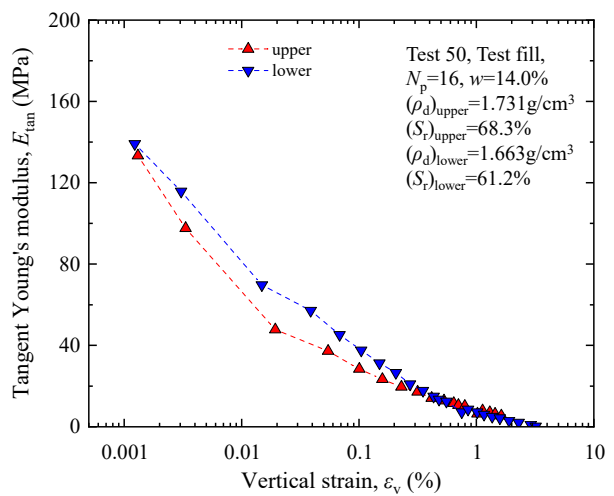


図 6-2-24 接線ヤング率～鉛直ひずみ関係(片対数)

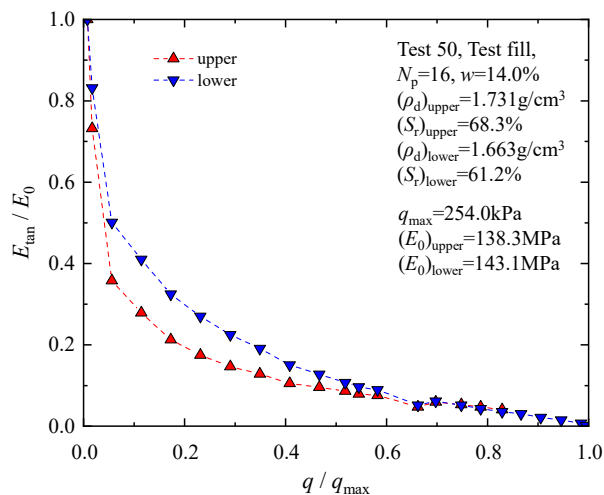


図 6-2-25 $E_{\text{tan}} / E_0 \sim q / q_{\text{max}}$ 関係

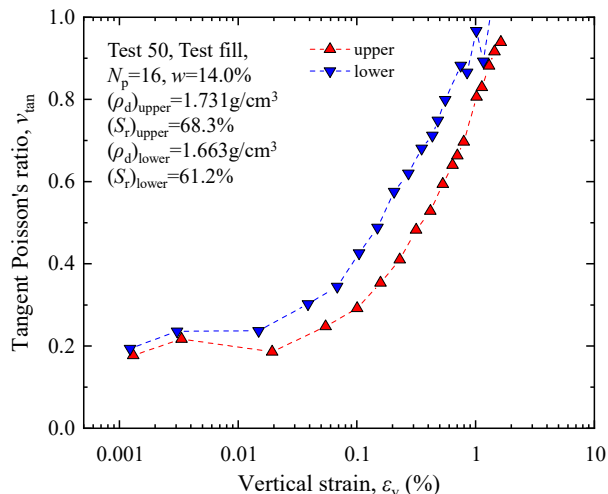


図 6-2-26 接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係(片対数)

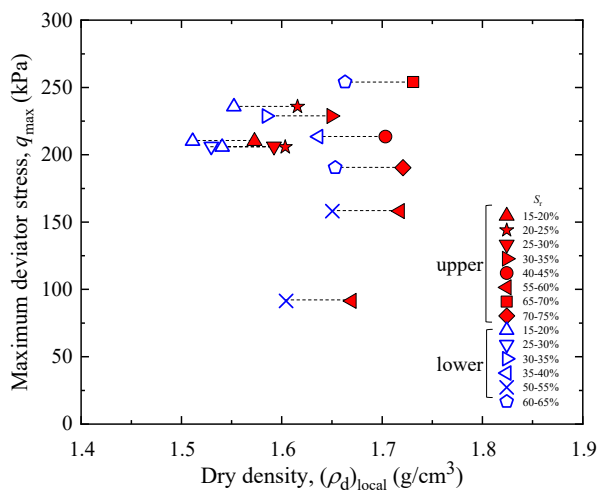


図 6-2-27 最大軸差応力～乾燥密度関係(上部、下部)

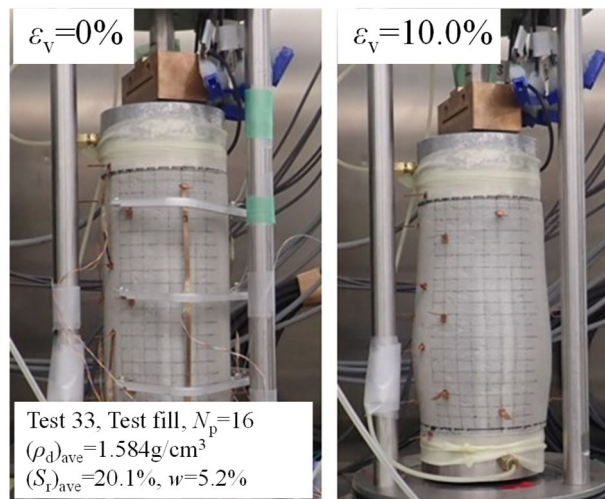


図 6-2-28 三軸圧縮試験後の破壊性状($N_p=16$, 低 S_r 側)

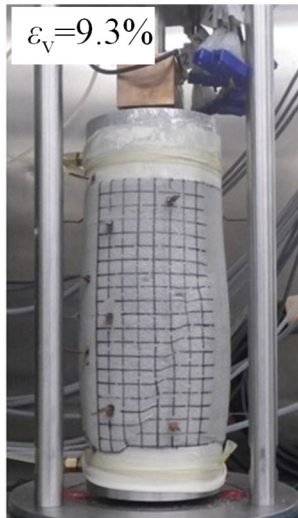
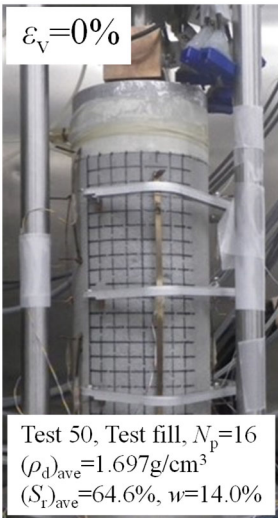
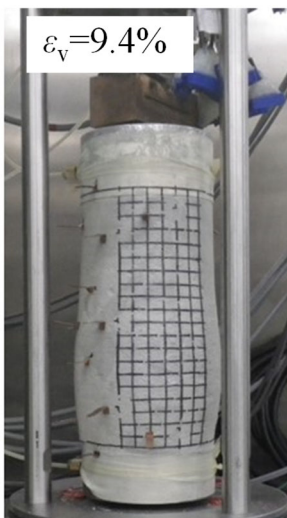


図 6-2-29 三軸圧縮試験後の破壊性状($N_p=16$, 低 S_r 側)

図 6-2-30 三軸圧縮試験後の破壊性状($N_p=16$, 最適 S_r 側)

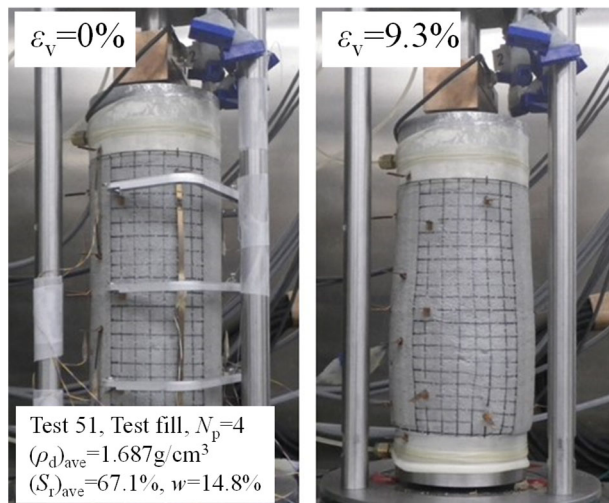


図 6-2-31 三軸圧縮試験後の破壊性状($N_p=4$, 高 S_r 側)

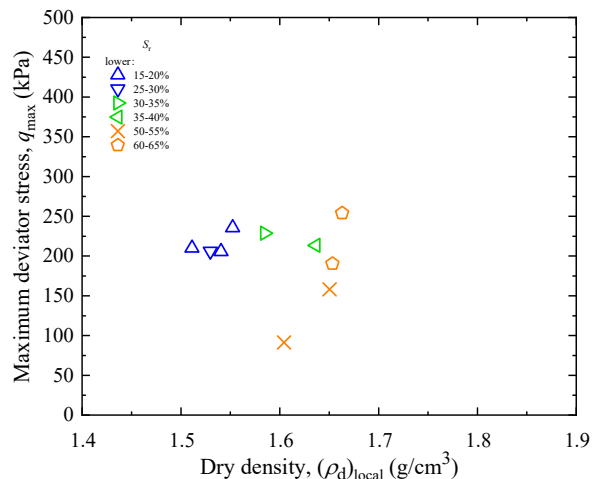


図 6-2-32 最大軸差応力～乾燥密度関係(下部)

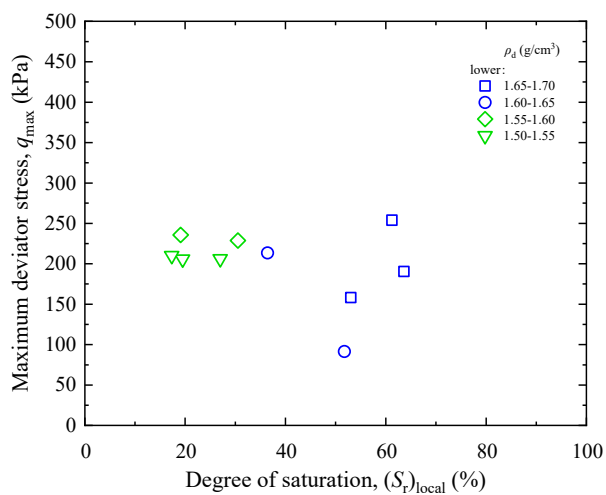


図 6-2-33 最大軸差応力～飽和度関係(下部)

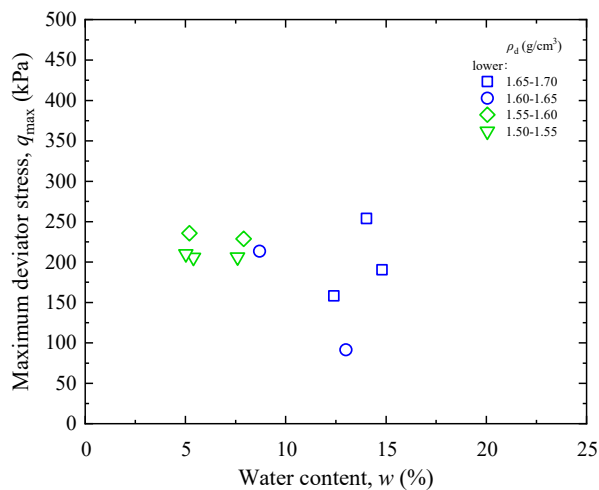


図 6-2-34 最大軸差応力～含水比関係(下部)

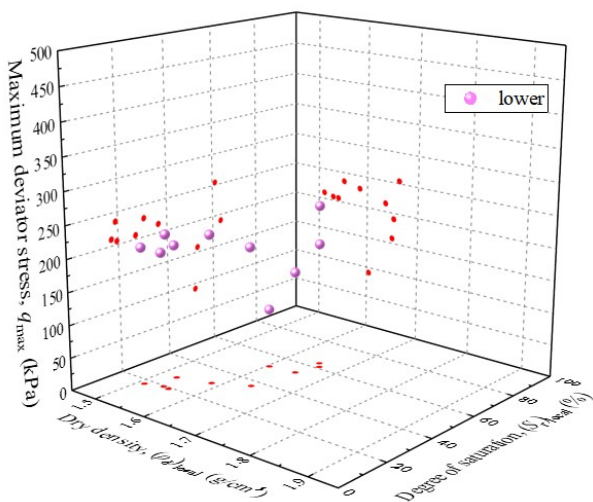


図 6-2-35 最大軸差応力～乾燥密度～飽和度関係

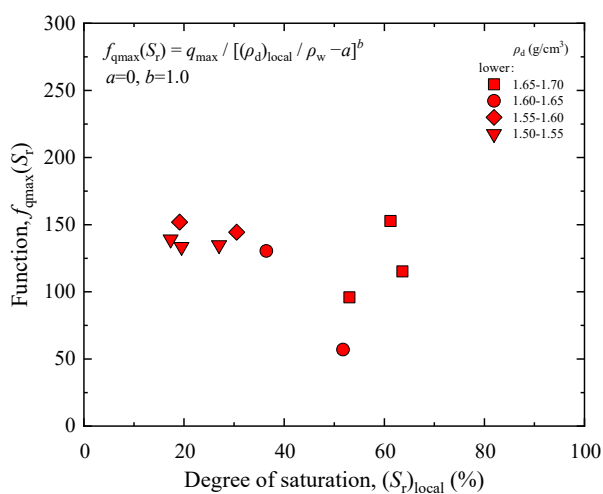


図 6-2-36 $f_{q_{\max}}(S_r) \sim$ 飽和度関係(下部)
($a=0, b=1.0$)

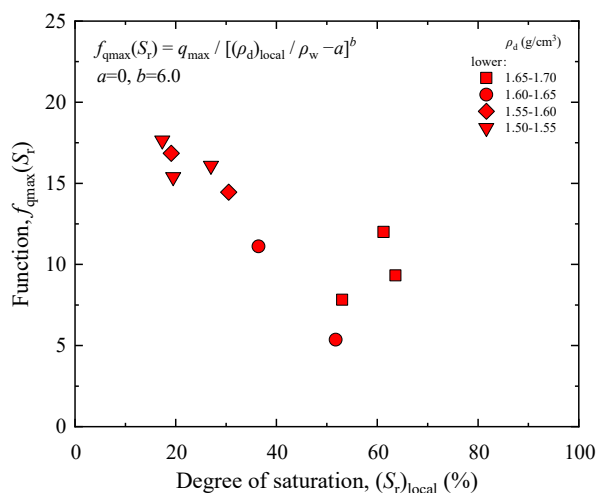


図 6-2-37 $f_{qmax}(S_r) \sim$ 飽和度関係(下部)
($a=0, b=6.0$)

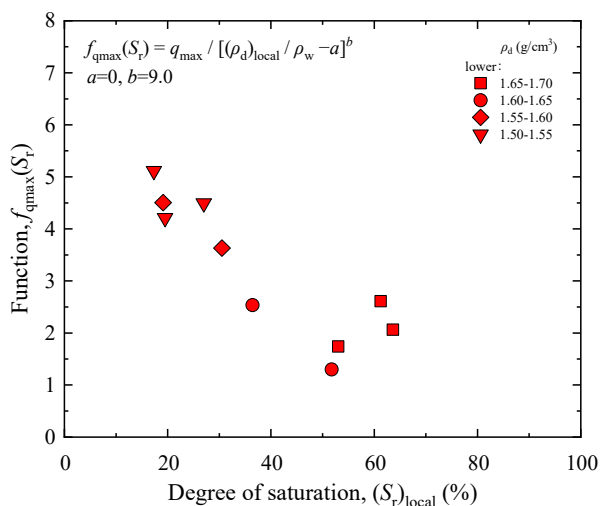


図 6-2-38 $f_{qmax}(S_r) \sim$ 飽和度関係(下部)
($a=0, b=9.0$)

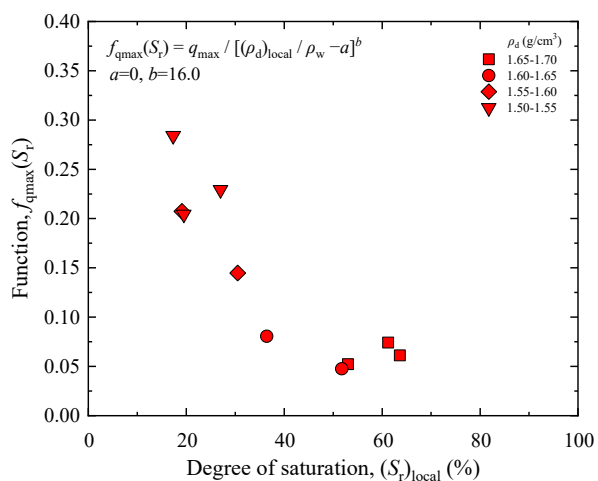


図 6-2-39 $f_{qmax}(S_r) \sim$ 飽和度関係(下部)
($a=0, b=16.0$)

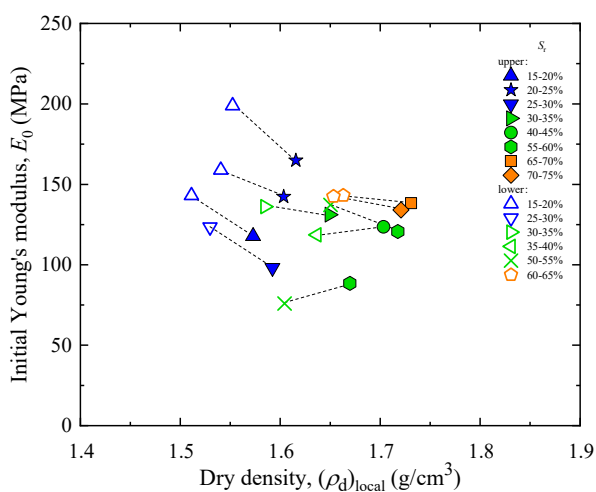


図 6-2-40 初期ヤング率～乾燥密度関係(上部、下部)

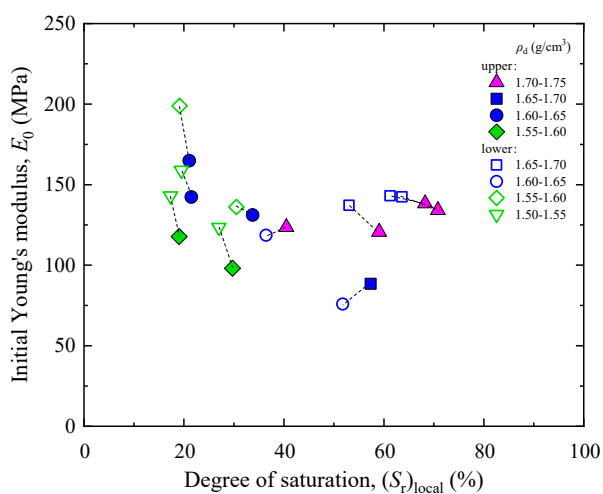


図 6-2-41 初期ヤング率～飽和度関係(上部、下部)

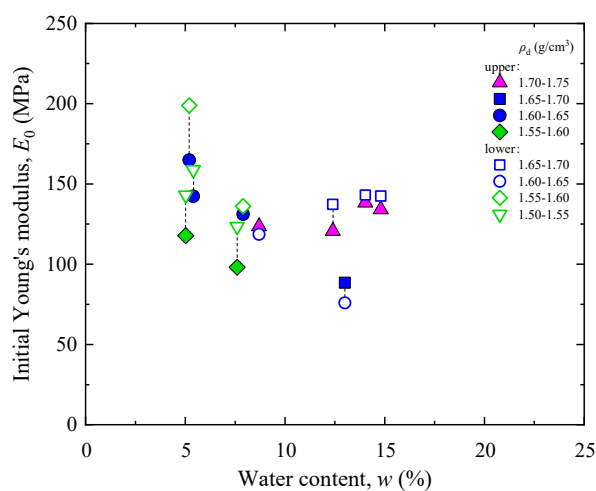


図 6-2-42 初期ヤング率～含水比関係(上部、下部)

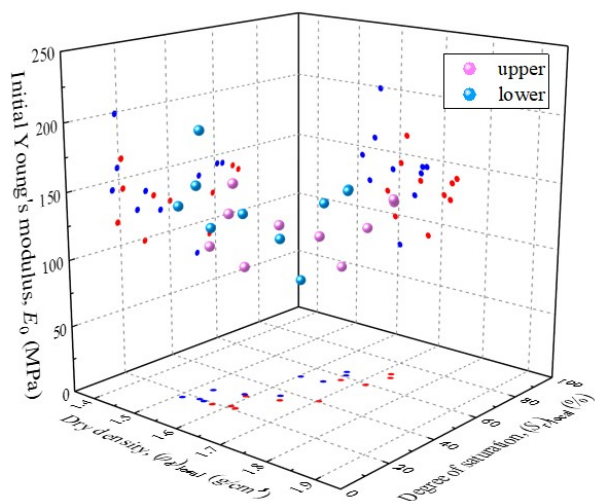


図 6-2-43 初期ヤング率～乾燥密度～飽和度関係

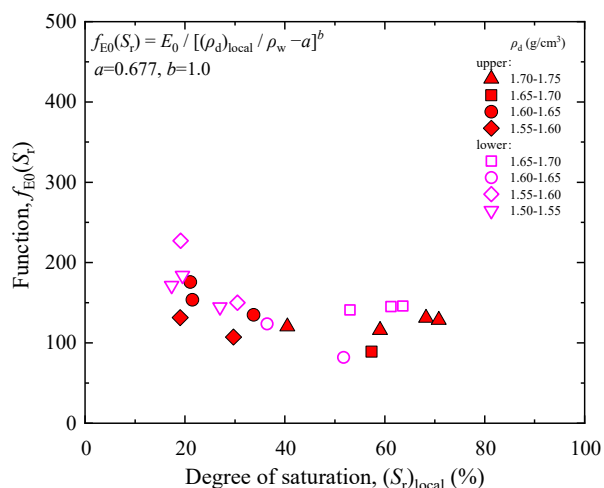


図 6-2-44 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=1.0$)

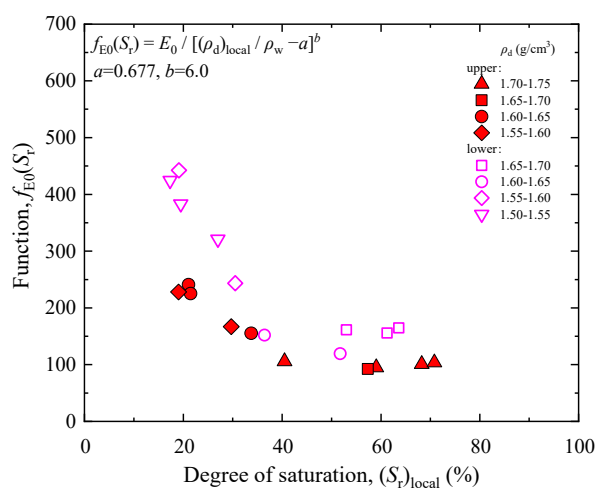


図 6-2-45 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=6.0$)

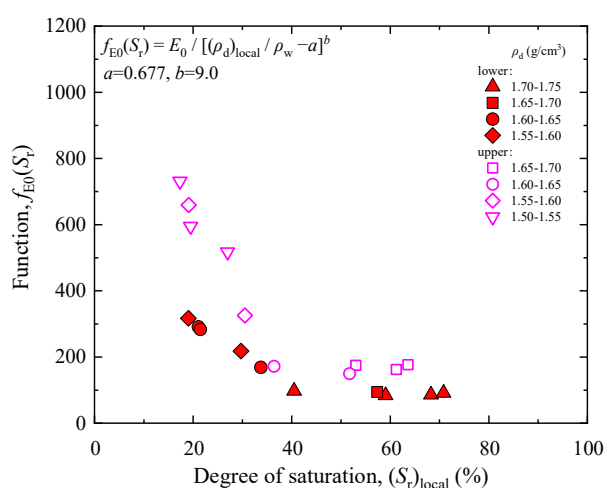


図 6-2-46 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=9.0$)

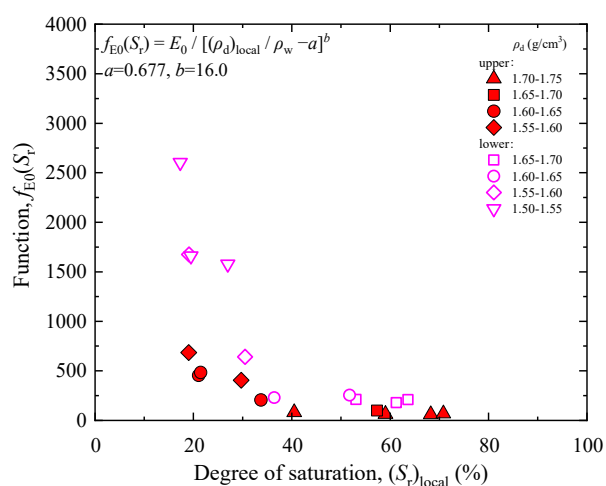


図 6-2-47 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=16.0$)

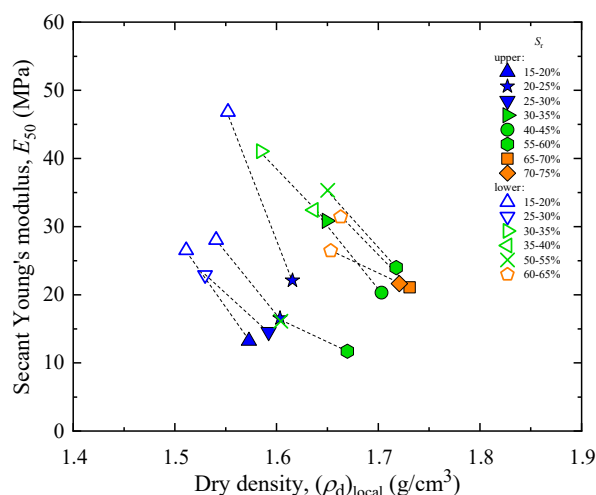


図 6-2-48 割線ヤング率～乾燥密度関係(上部、下部)

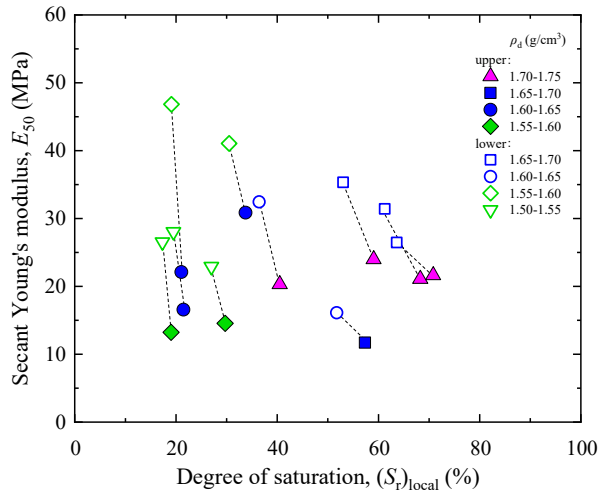


図 6-2-49 割線ヤング率～飽和度関係(上部、下部)

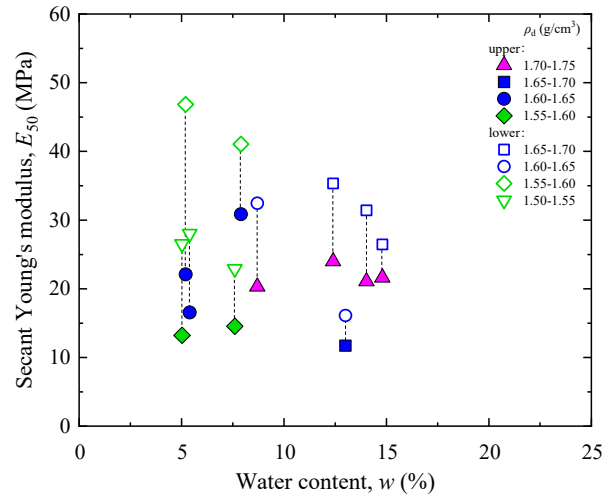


図 6-2-50 割線ヤング率～含水比関係(上部、下部)

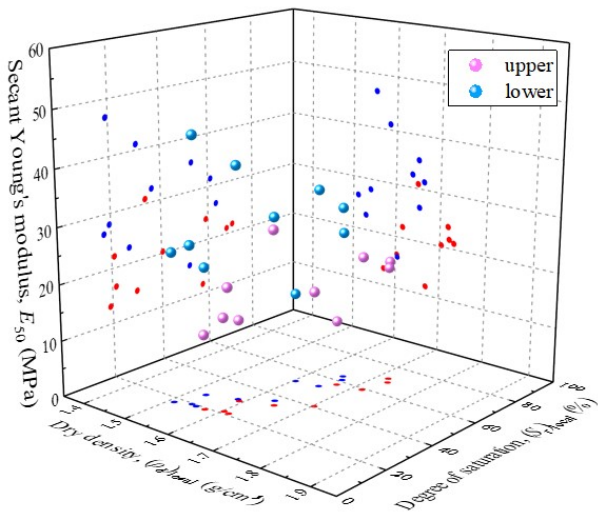


図 6-2-51 割線ヤング率～乾燥密度～飽和度関係

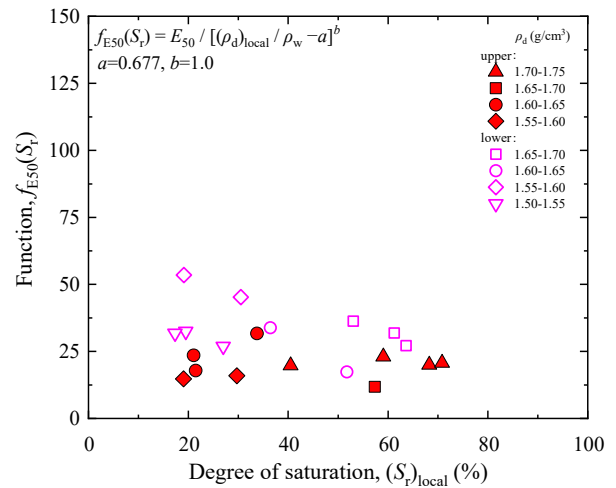


図 6-2-52 $f_{E50}(S_r)$ ～飽和度関係(上部、下部)

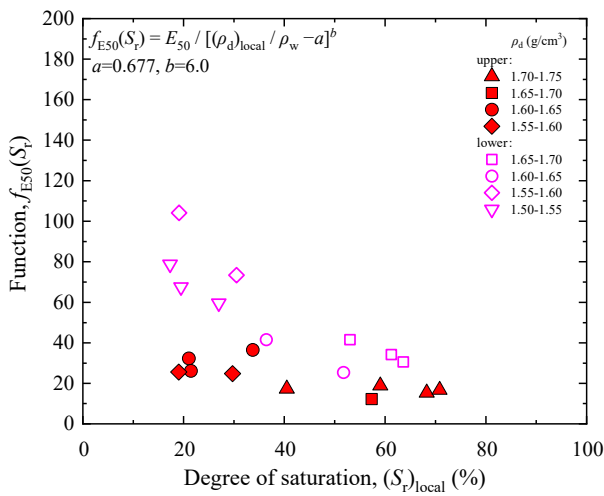


図 6-2-53 $f_{E50}(S_r)$ ～飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677$, $b=6.0$)

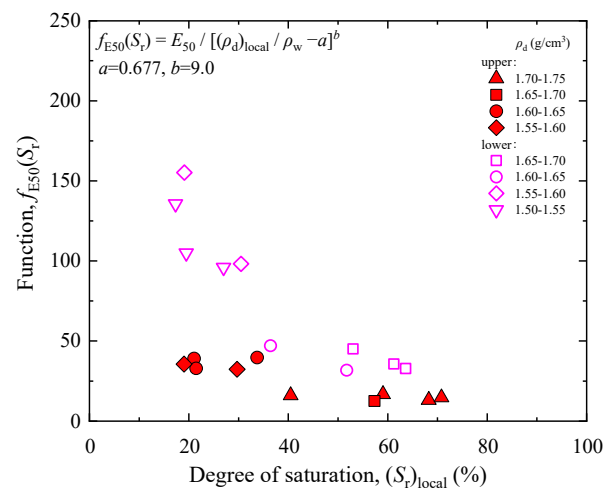


図 6-2-54 $f_{E50}(S_r)$ ～飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677$, $b=9.0$)

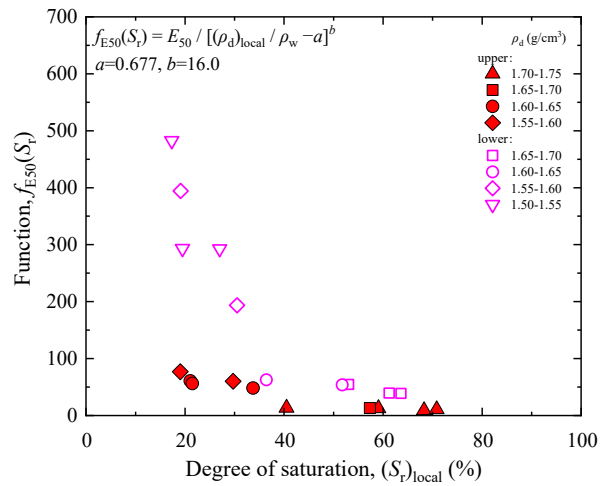


図 6-2-55 $f_{E50}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=16.0$)

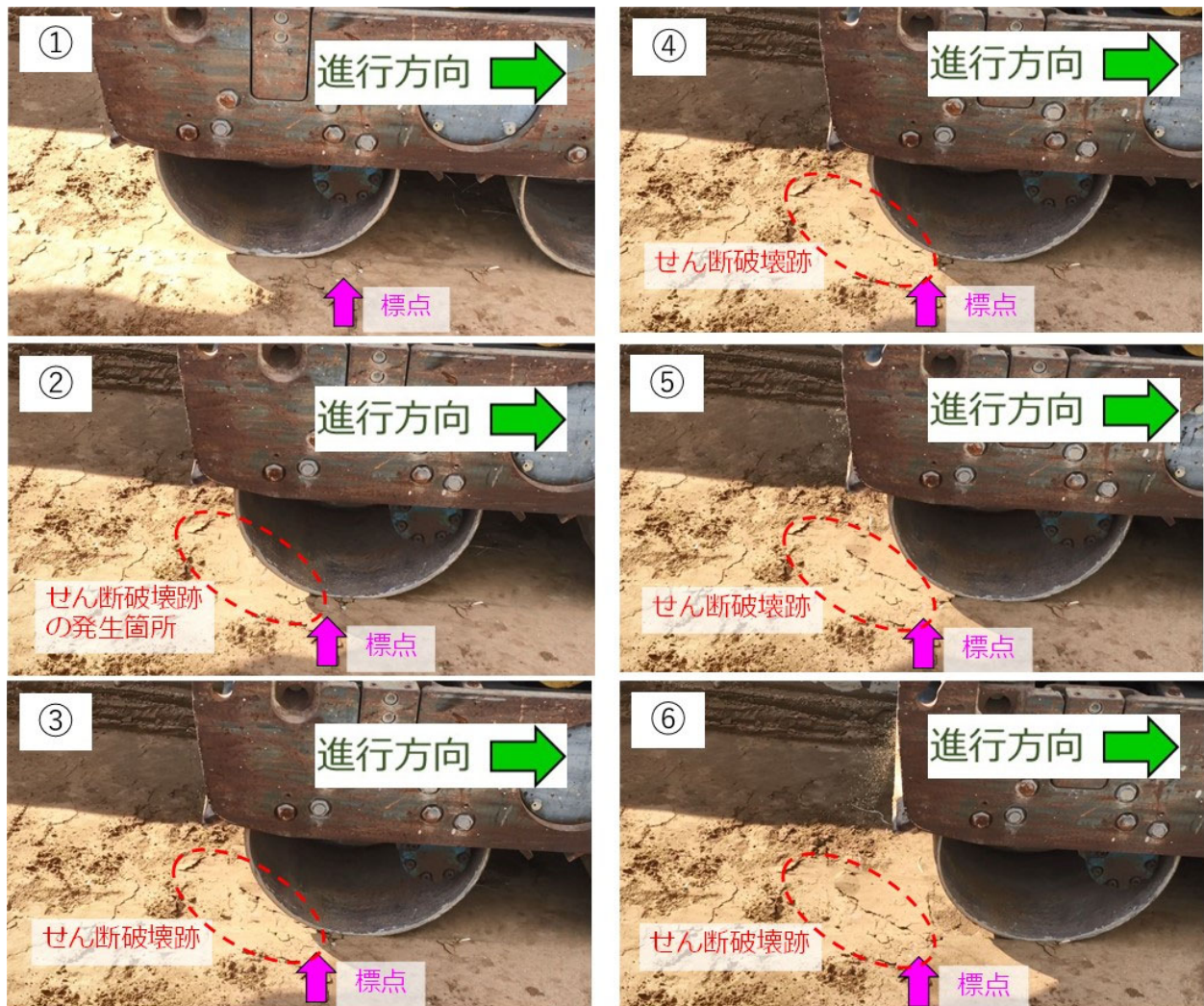


図 6-2-56 試験盛土締め時の表層土の移動と表面で観測されたせん断破壊跡

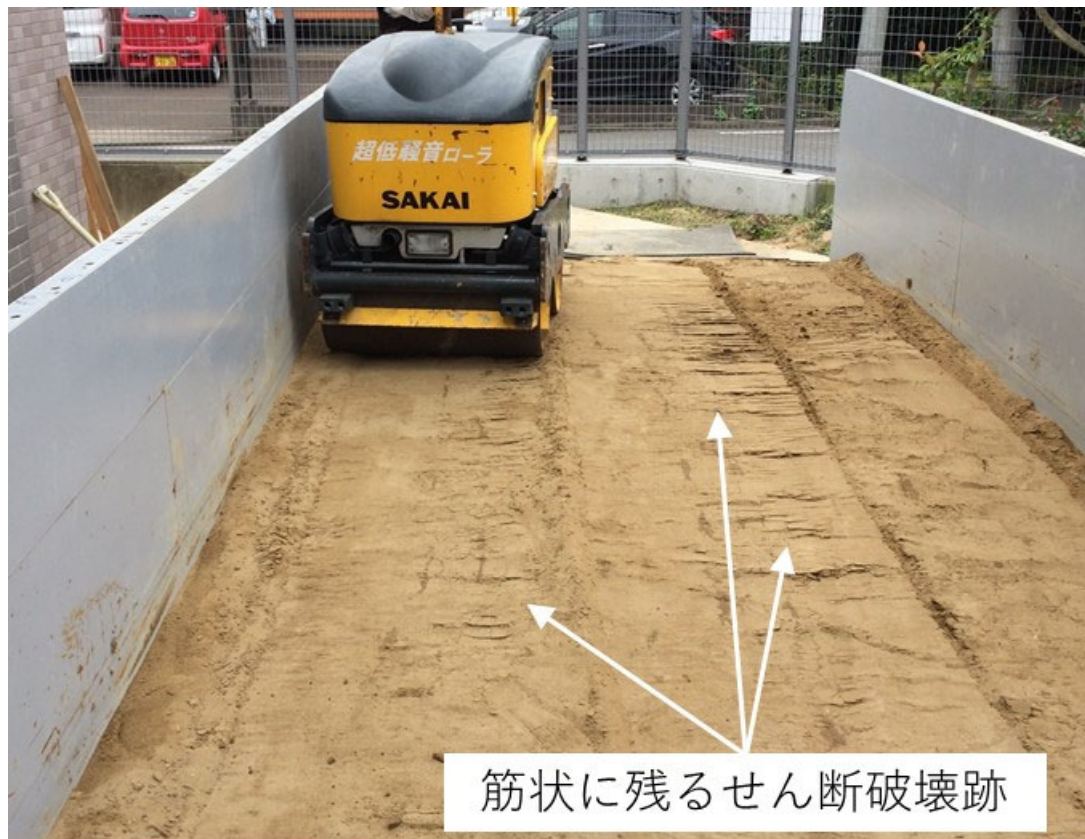


図 6-2-57 締固め後の試験盛土表面に残るせん断破壊跡

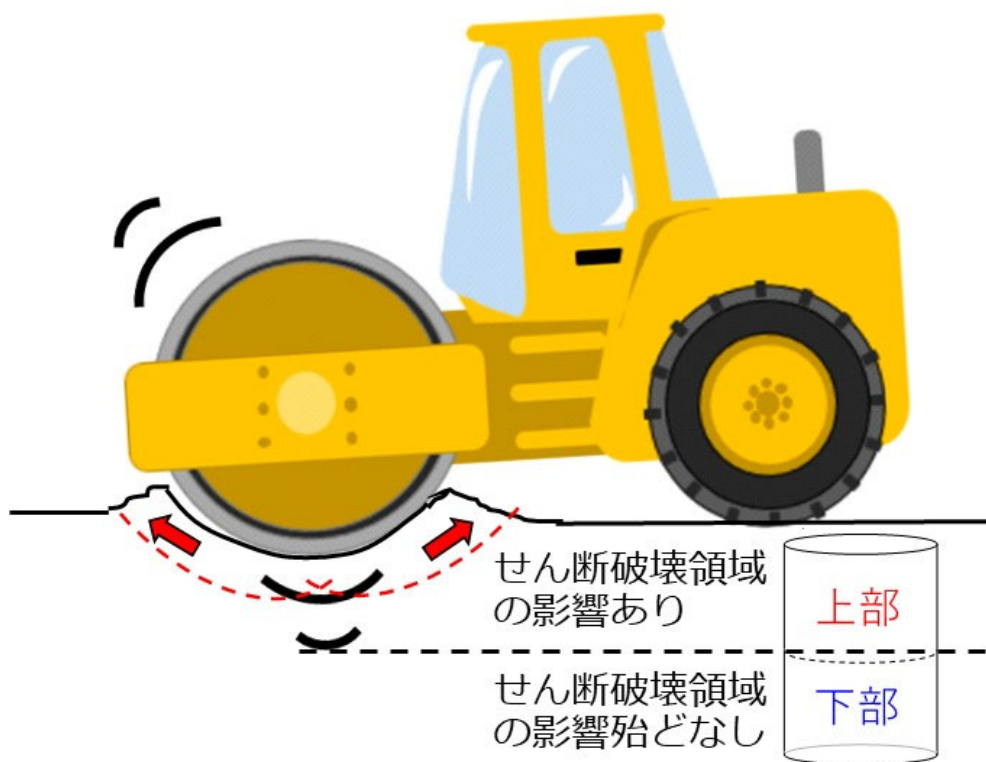


図 6-2-58 現場締固め時のせん断破壊領域発生イメージ

6.3 供試体の非一様性が等方圧密時の変形特性に与える影響

前節で示した供試体全てのケースを対象に、試験盛土供試体の自立から載荷前までの等方圧密過程における変形特性を調べた。室内締固め供試体は等方圧密過程における変形特性から構造異方性を有している事を確認したが、鉛直深度方向の非一様性による変形特性に有意な違いは見られていない。非一様性の強い試験盛土供試体の等方圧密過程の変形特性及びその構造異方性について室内締固め供試体の変形特性を参考に考察した。

6.3.1 非一様供試体の等方圧密による変形特性

(1) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.616\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=5.2\%$ 、飽和度 $S_r=20.1\%$ の供試体の試験結果

図 6-3-1 には、等方圧密過程における平均基底主応力～鉛直ひずみ関係を示す。供試体上部と下部ともに、平均基底主応力の増加に伴い鉛直ひずみが増加している。乾燥密度は上部が $\rho_d=1.616\text{g/cm}^3$ 、下部が $\rho_d=1.552\text{g/cm}^3$ であり、上部が大きい。等方圧密過程における鉛直ひずみ増分は上部で $\Delta\varepsilon_v=0.073\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_v=0.043\%$ とやや上部が下部よりやや大きい、ほぼ同等の変形挙動であった。上部と下部では上部の乾燥密度が大きい、鉛直ひずみ増分の違いに与える影響程大きくなく、上部の方が鉛直ひずみは大きい事がわかる。

図 6-3-2 には、間隙比～平均基底主応力関係を示す。初期間隙比は上部が $e=0.66$ 、下部が $e=0.73$ であるが、平均基底主応力の増加に伴い、間隙比の変化は上部が $\Delta e=-0.007$ 、下部が $\Delta e=-0.007$ で等しく、ほぼ同等の挙動であった。

図 6-3-3 には、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:1 の補助線を示しており、この線上のデータは等方的な変形挙動である事を意味する。上部も下部も等方圧密開始付近は 1:1 線上付近に位置するが、鉛直ひずみが大きくなると、水平ひずみの方がやや大きくなっている事がわかる。この時の水平ひずみ増分は、上部で $\Delta\varepsilon_h=0.169\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_h=0.175\%$ とほぼ同等であった。図 6-3-4 には、体積ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:3 の補助線を示しており、この線上のデータは等方的な変形挙動である事を意味する。上部も下部も等方圧密開始付近は 1:3 線上付近に位置するが、鉛直ひずみが大きくなると、体積ひずみの方がやや大きくなっている事がわかる。この時の体積ひずみ増分は、上部で $\Delta\varepsilon_{vol}=0.411\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_{vol}=0.394\%$ とほぼ同等であった。

(2) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.649\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=7.9\%$ 、飽和度 $S_r=32.1\%$ の供試体の試験結果

図 6-3-5 には、平均基底主応力～鉛直ひずみ関係を示す。供試体上部と下部ともに、平均基底主応力の増加に伴い鉛直ひずみが増加している。乾燥密度は上部が $\rho_d=1.649\text{g/cm}^3$ 、下部が $\rho_d=1.585\text{g/cm}^3$ であり、下部がやや大きい。等方圧密過程における鉛直ひずみ増分は上部で $\Delta\varepsilon_v=0.131\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_v=0.108\%$ とやや上部が下部より大きい。

図 6-3-6 には、間隙比～平均基底主応力関係の片対数グラフを示す。初期間隙比は上部が $e=0.63$ 、下部が $e=0.70$ であるが、平均基底主応力の増加に伴い、間隙比の変化は上部が $\Delta e=-0.009$ 、下部が $\Delta e=-0.012$ で下部がやや大きい挙動であった。

図 6-3-7 には、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:1 の補助線を示している。上部も下部も等方圧密開始付近から 1:1 線から離れ、鉛直ひずみが大きくなると、水平ひずみの方が大きくなっている事がわかる。この時の水平ひずみ増分は、上部で $\Delta\varepsilon_h=0.199\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_h=0.297\%$ とやや下部が大きい傾向であった。図 6-3-8 には、体積ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:3 の補助線を示している。上部も下部も等方圧密開始付近から 1:3 線を離れ、鉛直ひずみが大きくなると、体積ひずみの方が大きくなっている事がわかる。この時の体積ひずみ増分は、上部で $\Delta\varepsilon_{vol}=0.530\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_{vol}=0.702\%$ と下部が大きい。

(3) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.731\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=14.0\%$ 、飽和度 $S_r=64.6\%$ の供試体の試験結果

図 6-3-9 には、等方圧密過程における、平均基底主応力～鉛直ひずみ関係を示す。供試体上部と下部ともに、平均基底主応力の増加に伴い鉛直ひずみが増加している。乾燥密度は上部が $\rho_d=1.731\text{g/cm}^3$ 、下部が $\rho_d=1.663\text{g/cm}^3$ であり、上部が大きい鉛直ひずみは上部の方が大きい。鉛直ひずみ増分は上部で $\Delta\varepsilon_v=0.215\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_v=0.058\%$ であり下部が上部より大きい。

図 6-3-10 には、間隙比～平均基底主応力関係の片対数グラフを示す。初期間隙比は上部が $e=0.55$ 、下部が $e=0.62$ であるが、平均基底主応力の増加に伴い、間隙比の変化は上部が $\Delta e=-0.009$ 、下部が $\Delta e=-0.008$ でほぼ同等の挙動であった。

図 6-3-11 には、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:1 の補助線を示している。上部も下部も等方圧密開始付近から 1:1 線を離れ、鉛直ひずみが大きくなると、水平ひずみの方が大きくなっている事がわかる。この時の水平ひずみ増分は、上部で $\Delta\varepsilon_h=0.174\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_h=0.232\%$ とやや下部が大きい。図 6-3-12 には、体積ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:3 の補助線を示している。上部も下部も等方圧密開始付近から 1:3 線を離れ、鉛直ひずみが大きくなると、体積ひずみの方が大きくなっている事がわかる。この時の体積ひずみ増分は、上部で $\Delta\varepsilon_{vol}=0.562\%$ 、下部で $\Delta\varepsilon_{vol}=0.522\%$ とほぼ同等の傾向であった。

6.3.2 試験盛土供試体の変形特性に与える飽和度の影響

図 6-3-13 は、平均基底主応力 $p_{net}=10\sim 50\text{kPa}$ までの等方圧密過程における鉛直ひずみ増分～乾燥密度関係を示す。鉛直ひずみは $\Delta\varepsilon_v=0.01\%\sim 0.25\%$ 程度の小さいひずみ範囲に分布している。全体の傾向として供試体上部、下部どちらも乾燥密度が増加すると鉛直ひずみ増分はやや低下する。供試体上部と下部で比較すると供試体上部の方がやや鉛直ひずみの増分が大きい。これは図 5-3-13 に示した供試体上部と下部でほぼ同等の鉛直ひずみ増分を示す室内締固め供試体と異なる。図 6-3-14 は、鉛直ひずみ増分～飽和度関係を示す。飽和度が $S_r=15\%\sim 75\%$ 程度の範囲で、ばらつきはあるが鉛直ひずみ増分に違いは殆ど見られない。

図 6-3-15 は、等方圧密過程における水平ひずみ増分～乾燥密度関係を示す。水平ひずみは $\Delta\varepsilon_h=0.10\%\sim 0.50\%$ 程度のひずみ範囲に分布しており、鉛直ひずみに比べて大きい。全体としてばらつきは大きい、飽和度別に着目すると水平ひずみ増分～乾燥密度関係が飽和度の影響を受けている事がわかる。飽和度 $S_r=15\%\sim 50\%$ 程度の範囲の水平ひずみは $\Delta\varepsilon_h=0.10\%\sim 0.30\%$ 程度で、鉛直ひずみより大きい供試体上部、下部どちらも乾燥密度が増加すると水平ひずみ増分は低下する。飽和度 $S_r=50\%\sim 75\%$ 程度の範囲の水平ひずみは $\Delta\varepsilon_h=0.10\%\sim 0.50\%$ 程度で、上部、下部ともに比較的大きい。また、この範囲ではばらつきが大きく、乾燥密度との相関関係は見られなかった。図 6-3-16 は、水平ひずみ増分～飽和度関係を示す。飽和度が $S_r=15\%\sim 75\%$ 程度の範囲で、水平ひずみ増分に違いは殆ど見られないが、飽和度が $S_r=50\%\sim 75\%$ 程度の範囲で、飽和度が増加すると水平ひずみ増分も増加している。図 6-3-15、図 6-3-16 では飽和度 $S_r=53.0\%$ で水平ひずみは $\Delta\varepsilon_h=0.51\%$ を示す特異データが見られた。この供試体は供試体をペDESTAL 上に設置する際に、5mm 程度モールドから滑り落ちており、やや供試体取扱い時の乱れの影響が含まれている可能性が考えられる為、当データを用いる際には注意を要すると考える。

図 6-3-17 には、供試体上部の水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係を示す。いずれの供試体も 1:1 の補助線より一部を除いてほぼ上方に位置し、鉛直ひずみ増分よりも水平ひずみ増分がやや大きい。飽和度の影響に着目すると、飽和度が $S_r=15\%\sim 50\%$ 程度の範囲では 1:1～1:2 の補助線付近に位置しており、図 5-3-17 で示した室内締固め供試体と異なり、やや等方的な変形挙動に近い。 $S_r=65\%\sim 80\%$ 程度の範囲も同じく、1:1～1:2 の補助線付近に位置する事がわかる。図 6-3-18 には、供試体下部の水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係を示す。いずれの供試体

も 1:1 補助線より上方に位置し、鉛直ひずみ増分よりも水平ひずみ増分が大きく、構造異方性がある事が確認された。飽和度の影響に着目すると、飽和度が $S_r=15\% \sim 50\%$ 程度の範囲では 1:2 の補助線付近に位置しており、 $S_r=50\% \sim 80\%$ 程度の範囲はそれ以上に異方性が強く、1:2～1:6 の補助線付近に位置する事がわかる。これは、図 5-3-18 で示した室内締固め供試体の傾向と整合する。

以上より、等方圧密過程における試験盛土供試体は室内締固め供試体の変形特性と同様に鉛直ひずみ増分より水平ひずみの増分が大きく、構造異方性を示した。ただし、供試体上部はやや構造異方性を示すものの、室内締固め供試体に比べて鉛直ひずみの増分が大きく等方的な変形に近い傾向であった。試験盛土表面付近は締固め時の水平方向の拘束圧が小さい為、等方圧密中の鉛直応力に対する骨格構造が室内締固め供試体ほど整っていない可能性があり、先述したせん断破壊領域の影響が示唆される。

6.3.3 等方圧密による変形特性と載荷過程の強度変形特性との関係

図 6-3-19 は、載荷過程の最大軸差応力～等方圧密過程の供試体上部の鉛直ひずみ増分関係を示す。ばらつきは大きい、鉛直ひずみ増分が大きい方がやや最大軸差応力は小さい傾向であった。わずかであるが鉛直ひずみ増分が最大軸差応力に与える影響が認められた。ただし、図 6-3-13 と図 6-2-32 を見比べると、供試体の乾燥密度は等方圧密時の鉛直ひずみ増分に比べて最大軸差応力に与える影響の方が大きく、等方圧密時の鉛直ひずみにばらつきが大きい為、明確な傾向とは言い切れない。図 6-3-20 は、載荷過程の最大軸差応力～等方圧密過程の水平ひずみ増分関係を示す。ばらつきは大きい、水平ひずみ増分が大きい方がやや最大軸差応力は小さい傾向であった。わずかであるが水平ひずみ増分が最大軸差応力に与える影響が認められた。図中に確認される $\Delta e_h=0.51$ の他のデータと離れるデータは、図 6-3-15、図 6-3-16 にて説明した特異データである。また、図 6-3-15 と図 6-2-32 を見比べると、供試体の乾燥密度は等方圧密時の水平ひずみ増分に比べて最大軸差応力に与える影響の方が大きく、等方圧密時の水平ひずみにばらつきが大きい為、明確な傾向とは言い切れない。

図 6-3-21、図 6-3-22 は、載荷過程の初期ヤング率～等方圧密過程の鉛直ひずみ増分及び水平ひずみ増分関係を示す。ばらつきはあるが、鉛直ひずみ増分及び水平ひずみ増分が大きくなると初期ヤング率が低下する傾向が見られ、図 5-3-21、図 5-3-22 に示した室内締固め供試体と異なる。

図 6-3-23、図 6-3-24 は、載荷過程の割線ヤング率 E_{50} ～等方圧密過程の鉛直ひずみ増分及び水平ひずみ増分関係を示す。ばらつきはあるが、鉛直ひずみ増分及び水平ひずみ増分が大きくなると割線ヤング率 E_{50} が低下する傾向が見られ、図 5-3-23、図 5-3-24 に示した室内締固め供試体と異なる。

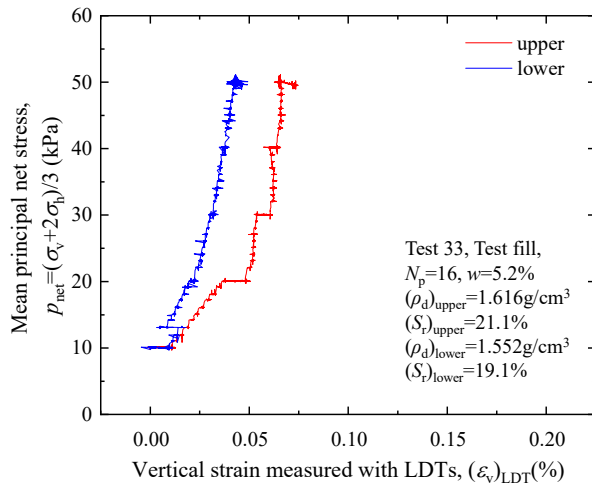


図 6-3-1 平均基底主応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

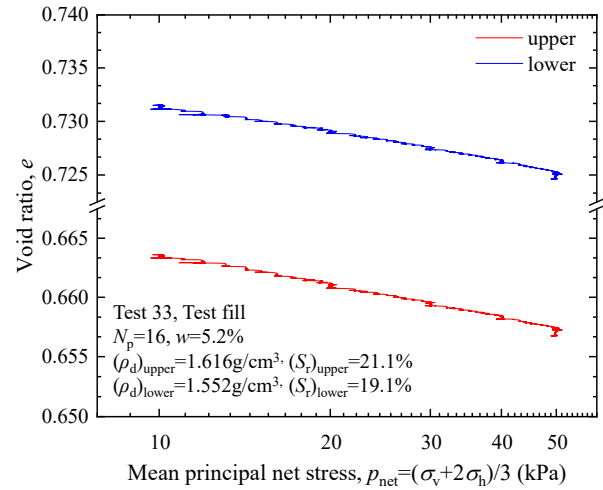


図 6-3-2 間隙比～平均基底主応力関係
(上部、下部) 片対数

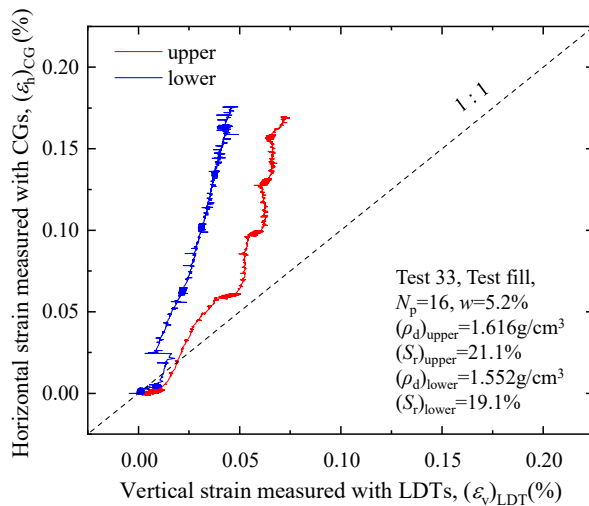


図 6-3-3 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

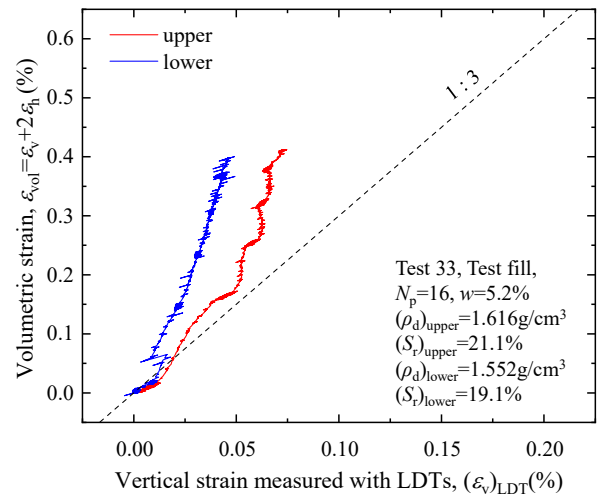


図 6-3-4 体積ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

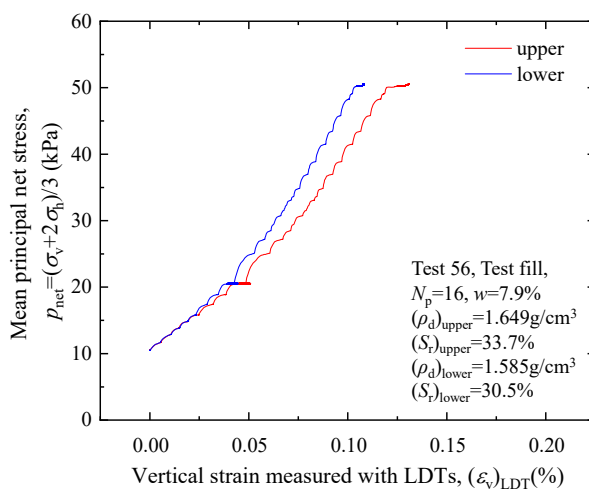


図 6-3-5 平均基底主応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

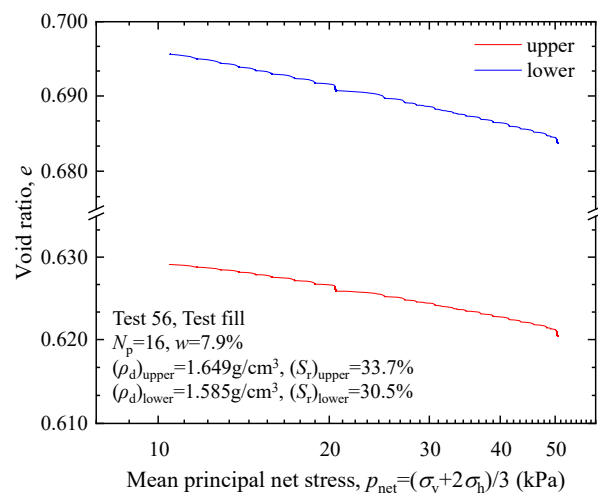


図 6-3-6 間隙比～平均基底主応力関係
(上部、下部) (片対数)

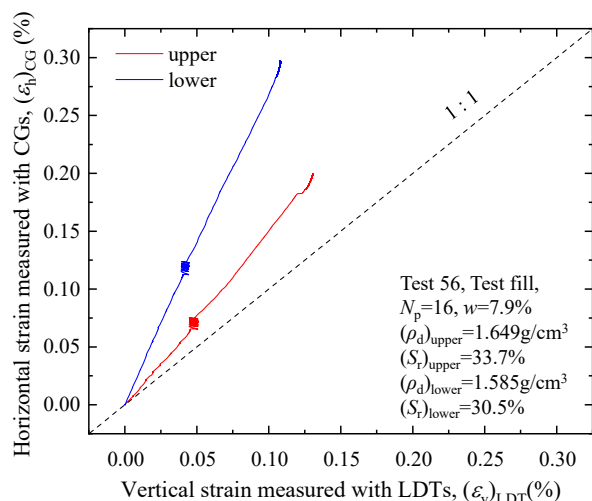


図 6-3-7 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

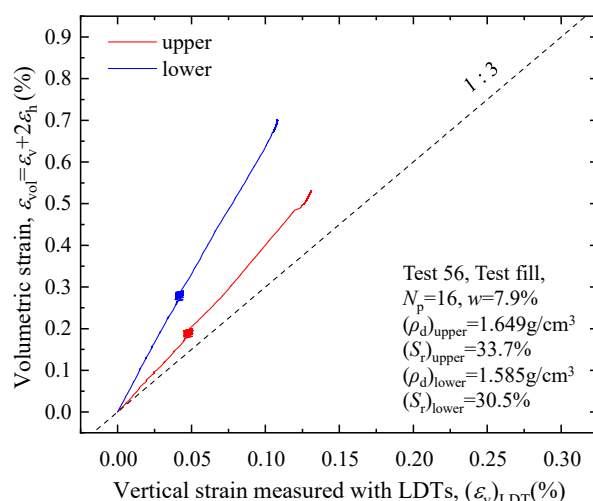


図 6-3-8 体積ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

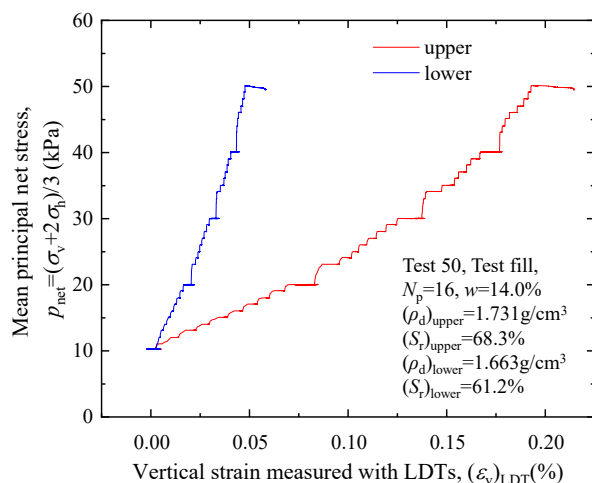


図 6-3-9 平均基底主応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

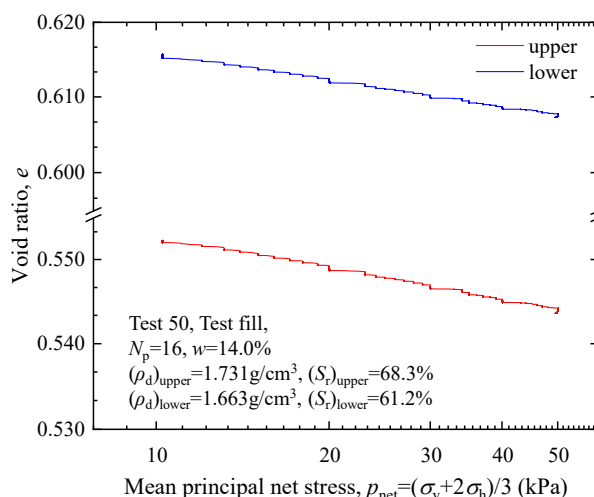


図 6-3-10 間隙比～平均基底主応力関係
(上部、下部) (片対数)

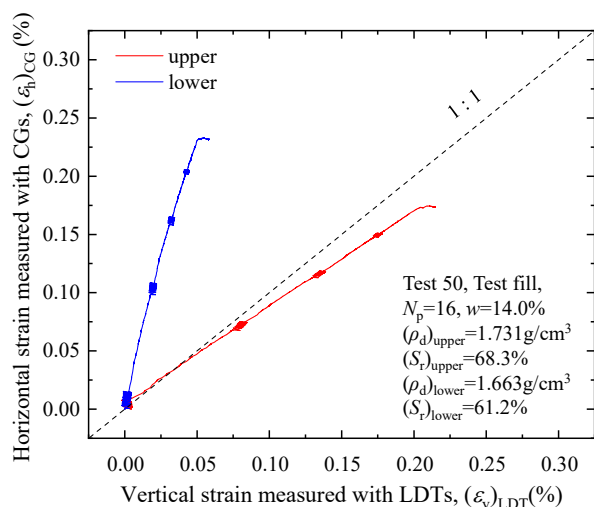


図 6-3-11 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

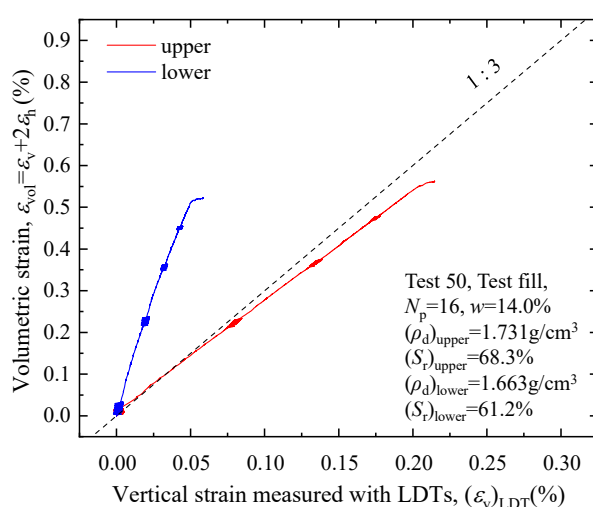


図 6-3-12 体積ひずみ～鉛直ひずみ関係
(上部、下部)

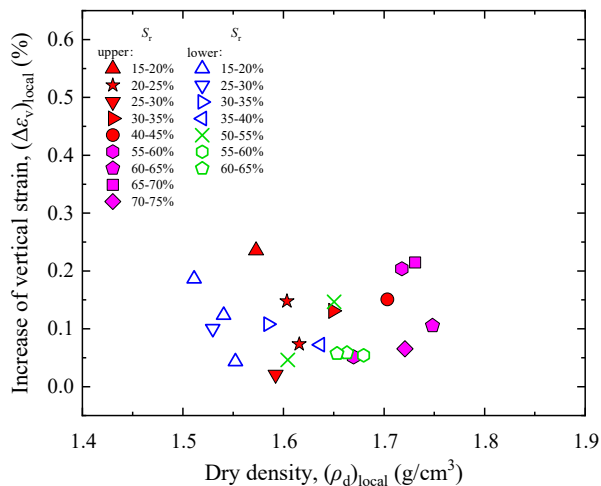


図 6-3-13 鉛直ひずみ増分～乾燥密度関係

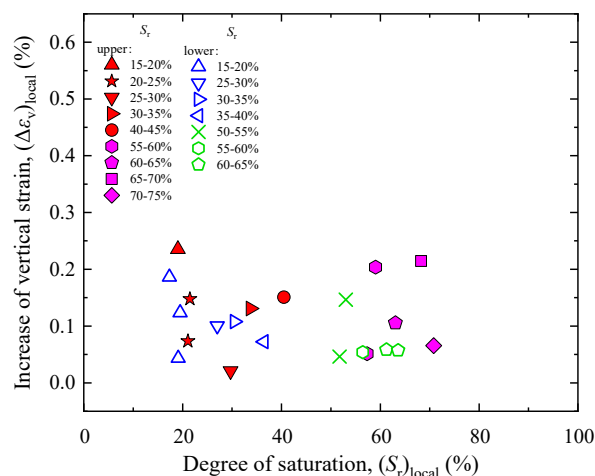


図 6-3-14 鉛直ひずみ増分～飽和度関係

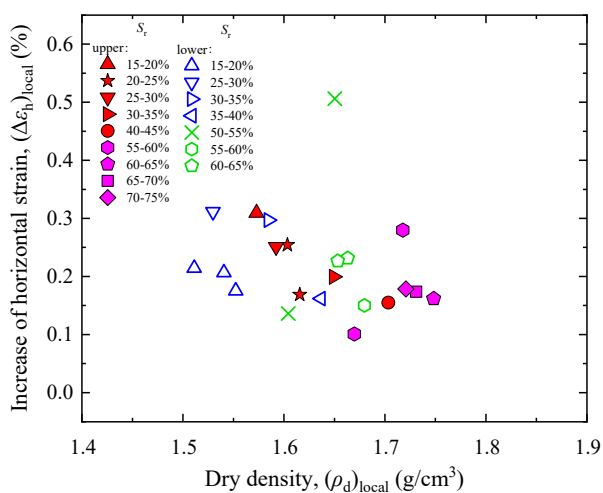


図 6-3-15 水平ひずみ増分～乾燥密度関係

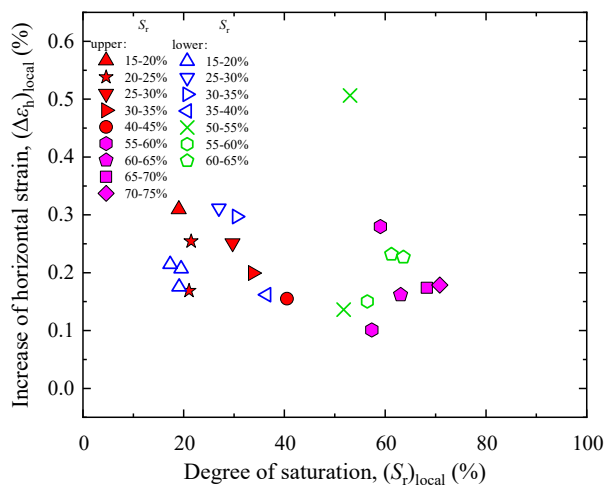


図 6-3-16 水平ひずみ増分～飽和度関係

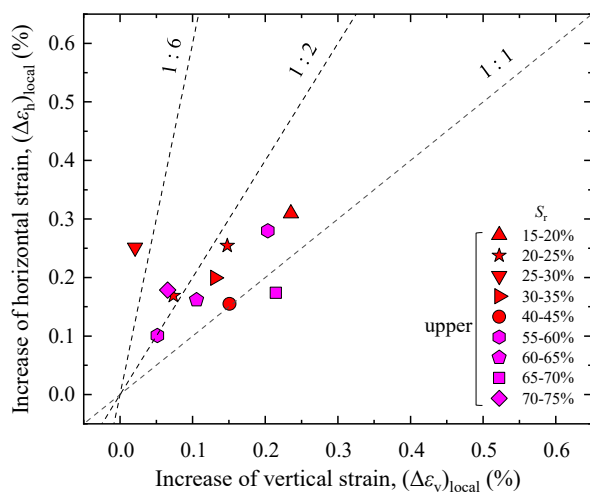


図 6-3-17 水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係
(上部)

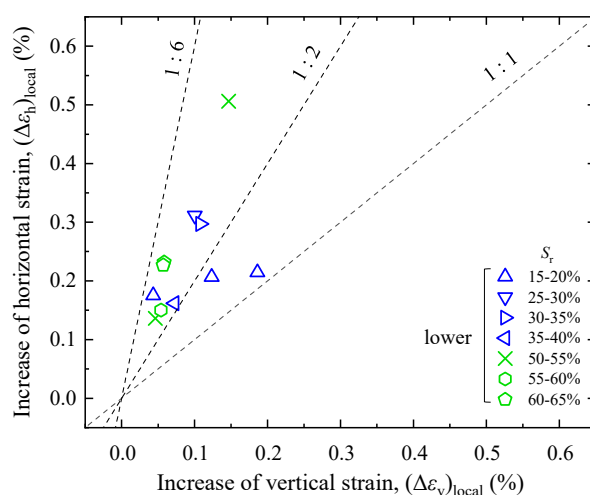


図 6-3-18 水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係
(下部)

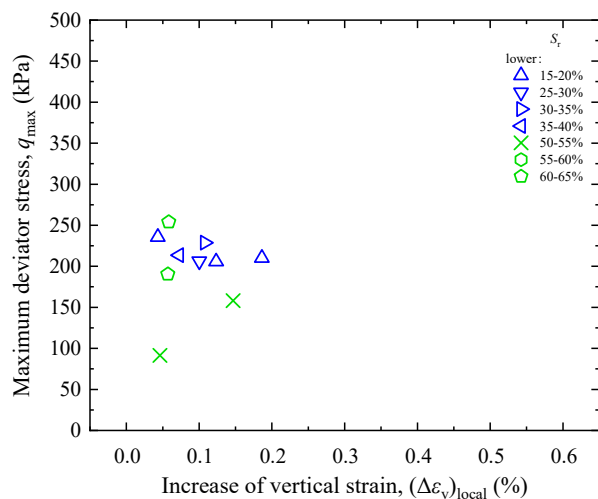


図 6-3-19 荷重過程の最大軸差応力
～等方圧密過程の鉛直ひずみ増分関係(上部)

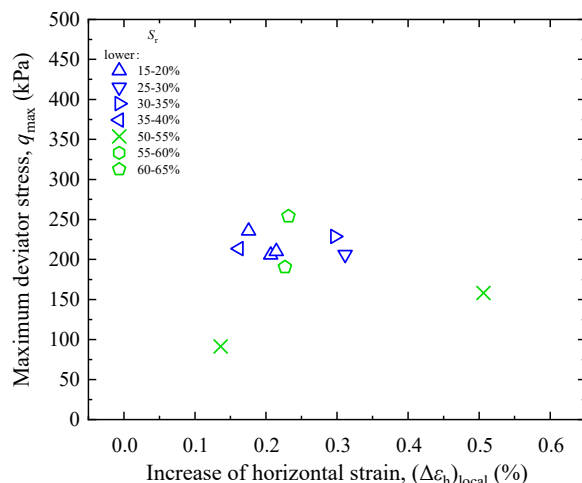


図 6-3-20 荷重過程の最大軸差応力
～等方圧密過程の水平ひずみ増分関係(上部)

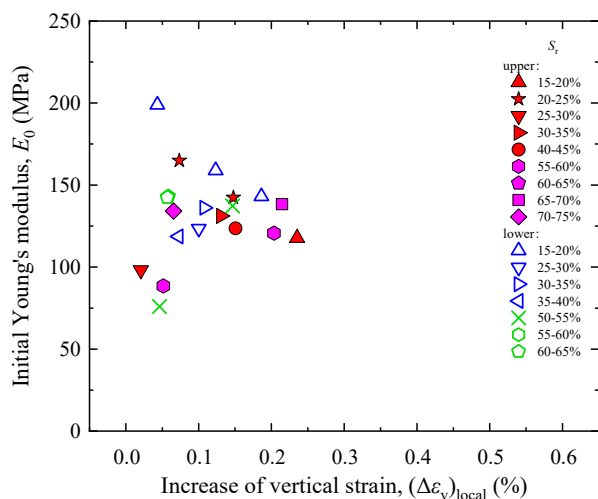


図 6-3-21 荷重過程の初期ヤング率
～等方圧密過程の鉛直ひずみ増分関係

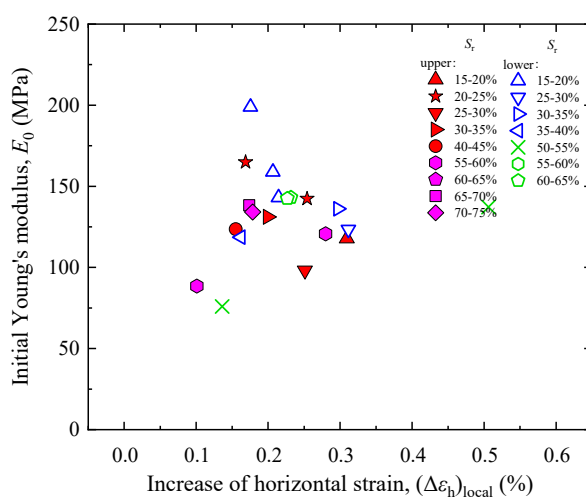


図 6-3-22 荷重過程の初期ヤング率
～等方圧密過程の水平ひずみ増分関係

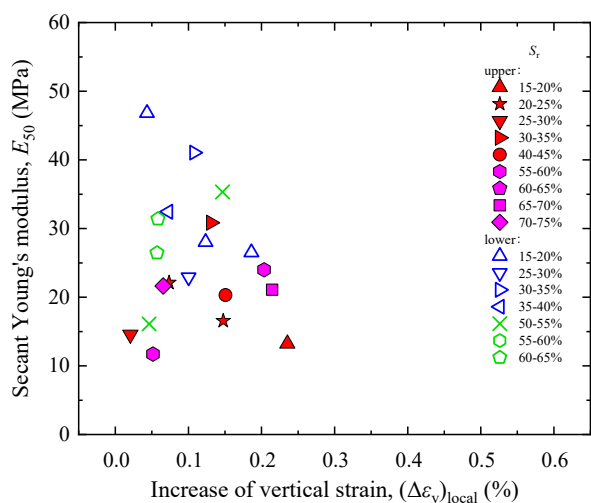


図 6-3-23 荷重過程の割線ヤング率
～等方圧密過程の鉛直ひずみ増分関係

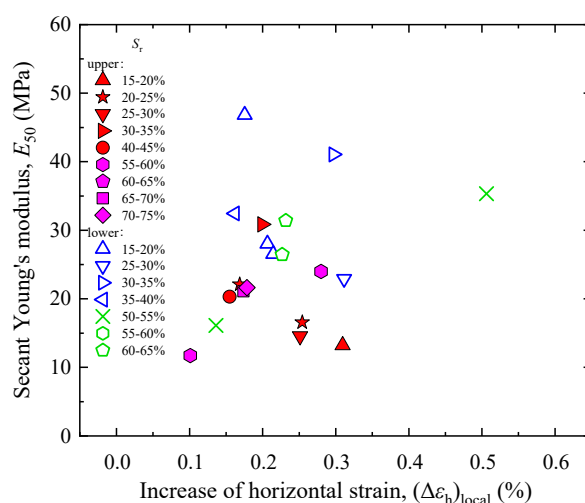


図 6-3-24 荷重過程の割線ヤング率
～等方圧密過程の水平ひずみ増分関係

6.4 中圧等方圧密が非一様供試体の強度変形特性に与える影響

前節では室内締固め供試体の供試体自立時から平均基底主応力 $p_{\text{net}}=10\text{kPa}\sim 50\text{kPa}$ でのせん断までの間の等方圧密過程における非一様性を考慮した等方圧密特性について説明した。Kohata et.al. (1997)や、前川ら(2018)が示した応力履歴が与える土粒子構造への影響は強度や剛性を変化させている。そこで、本節では平均基底主応力 $p_{\text{net}}=10\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ まで中圧等方圧密してその後に除荷する事で、圧密履歴がせん断破壊領域を含む非一様供試体の変形特性に与える影響を調べ、室内締固め供試体の構造異方性について考察した。また、中圧等方圧密過程における微小ひずみ領域の変形特性についても調べた。さらに、三軸圧縮試験により、飽和度を考慮した強度変形特性に与える圧密履歴の影響について考察した。

6.4.1 非一様供試体の中圧等方圧密による変形特性

図 6-4-1 には、作製した中圧等方圧密試験用供試体の乾燥密度～含水比関係と $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ 及び $4.5E_c$ の締固め曲線を示す。また、図 6-4-2 には、同じ供試体の乾燥密度～飽和度関係を整理している。両図に示す乾燥密度、含水比、飽和度の供試体にはそれぞれ、平均値と上部及び下部の局所的な値を示しており、これを圧密履歴の無い供試体と称す。さらに、中圧等方圧密後に除荷し、供試体自立時の供試体を圧密履歴のある供試体と称し、図中に乾燥密度～含水比関係、乾燥密度～飽和度関係を別途示している。なお、圧密履歴のある供試体は、中圧等方圧密前と供試体の含水比が一定である事を仮定し、中圧等方圧密及び除荷過程の体積変化から供試体平均、上部、下部それぞれの乾燥密度と飽和度を求めて図中に示している。

(1) 締固め機械通過回数 $N_p=8$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.681\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=8.2\%$ 、飽和度 $S_r=36.8\%$ の供試体の試験結果

図 6-4-3、図 6-4-4 には、中圧等方圧密過程における平均基底主応力の時刻歴及び軸差応力の時刻歴を示す。図中に示す(a)～(i)までのステップの詳細は下記の通りである。

- (a) : 圧密履歴のない供試体の平均基底主応力 $p_{\text{net}}=50\text{kPa}$ までの等方圧密過程(Isotropic Consolidation)
- (b) : 拘束圧 $\sigma_c=50\text{kPa}$ で、軸差応力 $q=30\text{kPa}$ まで載荷し、 $q=0\text{kPa}$ まで除荷過程(Load & Unload)
- (c) : 圧密履歴のない供試体の平均基底主応力 $p_{\text{net}}=200\text{kPa}$ までの等方圧密過程(Isotropic Consolidation)
- (d) : 拘束圧 $\sigma_c=200\text{kPa}$ で、軸差応力 $q=60\text{kPa}$ まで載荷し、 $q=0\text{kPa}$ まで除荷過程(Load & Unload)
- (e) : 圧密履歴のない供試体の平均基底主応力 $p_{\text{net}}=400\text{kPa}$ までの等方圧密過程(Isotropic Consolidation)
- (f) : 拘束圧 $\sigma_c=400\text{kPa}$ で、軸差応力 $q=120\text{kPa}$ まで載荷し、 $q=0\text{kPa}$ まで除荷過程(Load & Unload)
- (g) : 圧密履歴のない供試体の平均基底主応力 $p_{\text{net}}=700\text{kPa}$ までの等方圧密過程(Isotropic Consolidation)
- (h) : 平均基底主応力 $p_{\text{net}}=10\text{kPa}$ までの等方除荷過程(Unload)
- (i) : 圧密履歴のある供試体の平均基底主応力 $p_{\text{net}}=50\text{kPa}$ までの等方圧密過程(Isotropic Consolidation)

先に述べた図 6-4-1、図 6-4-2 中の圧密履歴のある供試体の乾燥密度はステップ(h)の後の時点までの局所変位計で求めた体積ひずみから算定している。また、中圧等方圧密過程及び除荷時の途中に、平均基底主応力 $p_{\text{net}}=10\text{kPa}\sim 50\text{kPa}$ まで 10kPa 毎に、 $100\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ まで 100kPa 毎に載荷速度 $\dot{\epsilon}_v=0.02\%/min$ で両振幅荷重 $\Delta q=5\text{kPa}$ 程度の微小繰返し載荷(載荷・除荷・再載荷)をそれぞれ 10 回実施している。10 回目の繰返しサイクルから鉛直応力段階毎の等価ヤング率を算定した。

図 6-4-5 には、供試体上部及び下部の平均基底主応力～鉛直ひずみ関係を示す。図中には供試体上部と下部をそれぞれ示す。上部と下部では上部の方が平均基底主応力の増加とともに鉛直ひずみが大きく生じている。この傾向は前節で示した等方圧密試験結果と整合している。また、供試体上部、下部ともに除荷後に鉛直ひずみが残留し

ている。

図 6-4-6 には、供試体上部と下部の間隙比～平均基底主応力関係の片対数グラフを示す。供試体上部と下部ともに、中圧等方圧密過程で間隙比が小さくなり、除荷後に間隙比が元に戻らないことから収縮方向に体積ひずみが残留している事になる。

図 6-4-7 には、供試体上部と下部の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、図中には 1:1 の補助線を示す。供試体下部は上部よりも水平ひずみが大きく生じており、室内締固め供試体と異なる。また、前節の等方圧密時に供試体上部の示した等方的に近い挙動と整合する。一方で、除荷過程の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係は、供試体上部、下部ともに補助線にほぼ平行に推移しており、鉛直ひずみより水平ひずみの残留が大きい。

図 6-4-8 には、供試体上部と下部の体積ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、図中には 1:3 の補助線を示す。供試体上部は下部よりも体積ひずみが大きく生じている。一方で、除荷過程の体積ひずみ～鉛直ひずみ関係は、供試体上部、下部ともに補助線にほぼ平行に推移しており、鉛直ひずみより体積ひずみの残留が大きい。

(2) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.718\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=13.7\%$ 、飽和度 $S_r=65.8\%$ の供試体の試験結果

図 6-4-9、図 6-4-10 には、中圧等方圧密過程における平均基底主応力の時刻歴及び軸差応力の時刻歴を示す。図中に示す(a)～(i)までのステップの詳細は先に示した通りである。

図 6-4-11 には、供試体上部及び下部の平均基底主応力～鉛直ひずみ関係を示す。図中には供試体上部と下部をそれぞれ示す。上部と下部では上部の方が平均基底主応力の増加とともに鉛直ひずみが大きく生じている。この傾向は前節で示した等方圧密試験結果と整合している。また、供試体下部は除荷後に鉛直ひずみが残留している。

図 6-4-12 には、供試体上部と下部の間隙比～平均基底主応力関係の片対数グラフを示す。供試体上部と下部ともに、中圧等方圧密過程で間隙比が小さくなり、除荷後に間隙比が元に戻らないことから収縮方向に体積ひずみが生じている事になる。また、圧密履歴のある供試体の等方圧密過程における勾配は、圧密履歴のない供試体の等方圧密過程における勾配より小さく、過圧密土のような挙動を示している。

図 6-4-13 には、供試体上部と下部の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、図中には 1:1 の補助線を示す。供試体下部は上部よりも水平ひずみが大きく生じており、図 6-4-7 と同様に室内締固め供試体と異なる。また、前節の等方圧密時に供試体上部の示した等方的に近い挙動と整合する。一方で、除荷過程の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係は、供試体上部、下部ともに補助線にほぼ平行に推移しており、鉛直ひずみより水平ひずみの残留が大きい。

図 6-4-14 には、供試体上部と下部の体積ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、図中には 1:3 の補助線を示す。供試体上部は下部よりも体積ひずみが大きく生じている。一方で、除荷過程の体積ひずみ～鉛直ひずみ関係は、供試体上部、下部ともに補助線にほぼ平行に推移しており、鉛直ひずみより体積ひずみの残留が大きい。

6.4.2 非一様供試体の等方圧密過程の変形特性に与える圧密履歴の影響

図 6-4-15 には、先に示した圧密履歴のない供試体と圧密履歴のある供試体のそれぞれのステップ(a)と(i)の等方圧密過程における、上部の水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係を示す。圧密履歴のない供試体は、補助線 1:1 ～1:2 付近に位置しており、図 6-3-17 で示された傾向と整合する。圧密履歴のある供試体はばらつきがあるものの、補助線 1:1 付近に位置しているという点で、室内締固め供試体上部と異なる。ただし、圧密履歴の有無に関わらず供試体上部の鉛直ひずみ増分に違い殆ど見られないが、水平ひずみ増分は明確に低下しているという点は室内締固め供試体の傾向と整合する。

図 6-4-16 には、圧密履歴のない供試体と圧密履歴のある供試体のそれぞれのステップ(a)と(i)の等方圧密過程に

おける、下部の水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係を示す。圧密履歴のない供試体は補助線 1:2 付近に位置しており、図 6-3-18 で示された傾向とほぼ整合する。圧密履歴のある供試体は補助線 1:1～1:2 付近に位置している。中圧等方圧密による圧密履歴により、等方圧密時の鉛直ひずみ増分はほぼ等しいが、水平ひずみ増分が低下した。

以上より、室内締固め供試体は平均基底主応力 $p_{\text{net}}=700\text{kPa}$ 程度の中圧等方圧密の圧密履歴により、構造異方性を持つ供試体の水平ひずみの進行が低下し、等方圧密に対する変形特性が変化する。また、供試体上部と下部の変形特性の違いは小さいことから、供試体の非一様性による影響は小さい。

6.4.3 非一様供試体の中圧等方圧密過程における微小ひずみ領域における変形特性

(1) 締固め機械通過回数 $N_p=8$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.681\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=8.2\%$ 、飽和度 $S_r=36.8\%$ の供試体の試験結果

図 6-4-17 には、中圧等方圧密及び除荷過程に実施した微小繰返し载荷により得られた等価ヤング率～鉛直応力関係の両対数グラフを示す。鉛直応力が大きくなると、等価ヤング率も増加している。供試体上部と下部の差はわずかなのであるが、下部が大きい。中圧等方圧密過程に比べて除荷過程の等価ヤング率はやや大きい傾向である。前章で示した式 5-4-1 を用いてこの関係を整理する。

図 6-4-18 には、式 5-2-9 で示した間隙比関数で正規化した等価ヤング率～鉛直応力関係の両対数グラフを示す。わずかなではあるが室内締固め供試体と同様に供試体上部と下部ともに、鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲と、鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 600\text{kPa}$ の範囲では、 $E_{eq}/f(e)$ ～鉛直応力関係の勾配が異なる。鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 600\text{kPa}$ の範囲で求めた m 値は供試体上部で $m=0.573$ 、下部で $m=0.525$ であり、榎本(2009)の示した砂供試体の結果と整合する。同じ鉛直応力で $E_{eq}/f(e)$ は供試体上部と下部はほぼ同等であるが、低い鉛直応力 $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ では供試体下部の方が大きい。

図 6-4-19 には、等価ポアソン比～鉛直応力関係を示す。全体的に供試体上部及び下部の中圧等方圧密過程と除荷過程において、等価ポアソン比は $\nu_{eq}=0.2\sim 0.3$ 程度であった。

(2) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.718\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=13.7\%$ 、飽和度 $S_r=65.8\%$ の供試体の試験結果

図 6-4-20 には、中圧等方圧密及び除荷過程に実施した微小繰返し载荷により得られた等価ヤング率～鉛直応力関係の両対数グラフを示す。鉛直応力が大きくなると、等価ヤング率も増加している。供試体上部と下部の差はわずかなのであるが、下部が大きい。中圧等方圧密過程に比べて除荷過程の等価ヤング率はやや大きい傾向である。これは圧密履歴の影響によるものと考ええる。

図 6-4-21 には、式 5-2-9 で示した間隙比関数で正規化した等価ヤング率～鉛直応力関係の両対数グラフを示す。供試体上部と下部ともに、鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲と、鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ の範囲では、 $E_{eq}/f(e)$ ～鉛直応力関係の勾配が異なる。これは先に示した供試体と同じ傾向である。鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ の範囲で求めた m 値は供試体上部で $m=0.517$ 、下部で $m=0.494$ であり、榎本(2009)の示した結果と整合する。また、先に示した供試体の m 値に比べてやや小さい結果であった。間隙比補正した $E_{eq}/f(e)$ は同じ鉛直応力で供試体下部が下部よりやや大きい。

図 6-4-22 には、等価ポアソン比～鉛直応力関係を示す。全体的に供試体上部及び下部の中圧等方圧密過程と除荷過程において、等価ポアソン比は $\nu_{eq}=0.2\sim 0.3$ 程度であるが、鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲の供試体上部は $\nu_{eq}=0.3\sim 0.4$ 程度とやや大きい。

以上より、試験盛土供試体の微小ひずみ領域における変形特性は、図 5-4-18、図 5-4-21 に示した室内締固め供

試体と同様に鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲と、鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ の範囲では異なるが、供試体上部と下部の変形特性の違いは小さいことから、供試体の非一様性による影響は小さい。

6.4.4 非一様供試体の単調載荷過程の強度変形特性に与える圧密履歴の影響

(1) 締固め機械通過回数 $N_p=8$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.681\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=8.2\%$ 、飽和度 $S_r=36.8\%$ の供試体の試験結果

図 6-4-23 には、軸差応力 $q=30\text{kPa}$ までの載荷・除荷過程(ステップ(b))及び、圧密履歴の影響のある供試体(ステップ(i)の後の供試体)の軸差応力～EDT、LDT170 で測定した鉛直ひずみ関係を示す。軸差応力～EDT で測定した鉛直ひずみ関係を見ると、圧密履歴のある供試体はピーク強度に達するまではほぼ線形的な変形挙動を示し過圧密供試体のものである。ピーク後は緩やかに軸差応力が低下している。また、その拡大図を図 6-4-24 に示す。軸差応力～LDT170 で測定した鉛直ひずみ関係を見ると、圧密履歴のない供試体の軸差応力 $q=30\text{kPa}$ で発生する鉛直ひずみは $\varepsilon_v=0.02\%$ 程度であるが、その範囲では圧密履歴のある供試体の変形挙動と類似している。詳しくは供試体の上部と下部に分けて考察する。また、EDT で測定した鉛直ひずみ関係と変形挙動は大きく異なり、ベディングエラーや試験装置の変形等の影響が EDT の測定に多く含まれる事がわかる。

図 6-4-25 には、圧密履歴の影響のない供試体と圧密履歴のある供試体の上部と下部別の軸差応力～鉛直ひずみ関係を示す。圧密履歴のある供試体は上部と下部で類似する軸差応力～鉛直ひずみ関係を示しているが、やや下部の方がピーク強度までの剛性が高い。一方で、体積ひずみは供試体下部の方が上部と下部ほぼ同等の体積変化挙動を示している。また、図 6-4-26 には拡大図を示している。圧密履歴の影響のない供試体は、上部と下部で軸差応力 $q=30\text{kPa}$ までの剛性は下部が大きい。圧密履歴のある供試体は、圧密履歴のない供試体に比べて上部と下部ともに軸差応力 $q=30\text{kPa}$ までの剛性がやや大きいが両者の差は小さい。また、この軸差応力の範囲において圧密履歴のある供試体の上部と下部の差はほとんど現れていない。また、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.02\%$ 程度の範囲において、圧密履歴のある供試体の体積ひずみは、圧密履歴のない供試体に比べて収縮傾向が小さくなっている。

図 6-4-27 には、圧密履歴のない供試体と圧密履歴のある供試体の上部と下部別の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。圧密履歴のある供試体は、上部と下部がほぼ同等の挙動を示している。また、図 6-4-28 には拡大図を示している。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.06\%$ 程度の範囲において、圧密履歴のある供試体は圧密履歴のない供試体に比べ、水平ひずみがわずかに小さくなっている。

(2) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.718\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=13.7\%$ 、飽和度 $S_r=65.8\%$ 供試体の試験結果

図 6-4-29 には、軸差応力 $q=30\text{kPa}$ までの載荷・除荷過程及び、圧密履歴の影響のある供試体の軸差応力～EDT、LDT170 で測定した鉛直ひずみ関係を示す。軸差応力～EDT で測定した鉛直ひずみ関係を見ると、圧密履歴のある供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=4\%$ 程度に明確なピーク強度を示している。ピーク後は軸差応力 $q=200\text{kPa}$ 程度まで軸差応力が低下している。また、その拡大図を図 6-4-30 に示す。軸差応力～LDT170 で測定した鉛直ひずみ関係を見ると、圧密履歴のない供試体の軸差応力 $q=30\text{kPa}$ で発生する鉛直ひずみは $\varepsilon_v=0.05\%$ 程度であるが、その範囲では圧密履歴のある供試体の変形挙動と異なり、圧密履歴のある供試体の方が、鉛直ひずみが $\varepsilon_v=0.05\%$ における軸差応力は大きい。圧密履歴の影響に関して詳しくは供試体の上部と下部に分けて考察する。また、EDT で測定した鉛直ひずみ関係と変形挙動は大きく異なり、ベディングエラーや試験装置の変形等の影響が EDT の測定に多く含まれる事がわかる。

図 6-4-31 には、圧密履歴の影響のない供試体と圧密履歴のある供試体の上部と下部別の軸差応力～鉛直ひずみ関係を示す。圧密履歴のある供試体の上部と下部では、やや下部の方がピーク強度までの剛性が高い傾向である。体積ひずみは供試体下部の方が上部より収縮傾向が残っている。また、図 6-4-32 には拡大図を示している。圧密履

歴のない供試体は、上部と下部で軸差応力 $q=30\text{kPa}$ 程度までの剛性はほぼ同等であるが、やや下部が大きい。圧密履歴のある供試体は、圧密履歴のない供試体に比べて上部と下部ともに軸差応力 $q=30\text{kPa}$ までの剛性がやや大きい。また、この軸差応力の範囲において圧密履歴のある供試体の上部と下部の差はほとんど現れていない。また、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.05\%$ 程度の範囲において、圧密履歴のある供試体の体積ひずみは、圧密履歴のない供試体に比べて収縮傾向が小さくなっている。

図 6-4-33 には、圧密履歴の影響のない供試体と圧密履歴のある供試体の上部と下部別の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。圧密履歴のある供試体は、上部の方が下部より水平ひずみがやや大きい傾向であった。また、図 6-4-34 には拡大図を示している。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.05\%$ 程度の範囲において、圧密履歴のある供試体は圧密履歴のない供試体に比べ、水平ひずみが小さくなっている。

以上より、試験盛土供試体は室内締固め供試体と同様に中圧等方圧密の圧密履歴により、水平ひずみの発生が抑制されて構造が変化する事は先に示したが、載荷過程においても圧密履歴の影響によって水平ひずみの発生が抑制され、剛性増加や体積収縮量の低減等、変形特性の向上が確認された。特に締固めによるせん断破壊帯の影響を有していた供試体上部の変形特性は大幅に改善される事を確認した。

6.4.5 圧密履歴の影響がある供試体の強度変形特性に与える飽和度の影響

図 6-4-35 には、図 6-2-32 に示した圧密履歴のない供試体の最大軸差応力～乾燥密度関係に圧密履歴のある供試体上部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体のデータは、圧密履歴のない供試体の最大軸差応力～乾燥密度関係に良く整合している事がわかる。また、図 6-4-36 には、図 6-2-38 に示した圧密履歴のない供試体の $f_{q\max}(S_r)$ ～飽和度関係に圧密履歴のある供試体上部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体のデータは、圧密履歴のない供試体の $f_{q\max}(S_r)$ ～飽和度関係に良く整合している。すなわち、最大軸差応力～乾燥密度関係とそれに与える飽和度の影響は、圧密履歴の有無に関わらず同等である。

図 6-4-37 には、図 6-2-48 に示した圧密履歴のない供試体の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係に圧密履歴のある供試体上部及び下部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体のデータは、圧密履歴のない供試体の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係に類似した傾向を示しているが、圧密履歴のある供試体は全体的に割線ヤング率 E_{50} が大きい。ただし、上部と下部の差がやや小さくなったものの、まだ供試体上部の割線ヤング率 E_{50} が小さい事がわかる。また、図 6-4-38 には、図 6-2-53 に示した圧密履歴のない供試体の $f_{E50}(S_r)$ ～飽和度関係に圧密履歴のある供試体上部及び下部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体の方が同じ飽和度の圧密履歴のない供試体に比べて $f_{E50}(S_r)$ が大きい。すなわち、圧密履歴の影響により割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係は供試体上部下部ともにやや向上している。

図 6-4-39 には、図 6-2-40 に示した圧密履歴のない供試体の初期ヤング率～乾燥密度関係に圧密履歴のある供試体上部及び下部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体のデータは、圧密履歴のない供試体の初期ヤング率～乾燥密度関係に良く整合している事がわかる。また、図 6-4-40 には、図 6-2-45 に示した圧密履歴のない供試体の $f_{E0}(S_r)$ ～飽和度関係に圧密履歴のある供試体上部及び下部のデータをプロットした図を示す。圧密履歴のある供試体のデータは、圧密履歴のない供試体の $f_{E0}(S_r)$ ～飽和度関係に良く整合している。すなわち、圧密履歴が初期ヤング率～乾燥密度関係とその関係に与える飽和度への影響はわずかであった。

以上より、平均基底主応力 $p_{\text{net}}=700\text{kPa}$ 程度の圧密履歴によって、試験盛土供試体の最大軸差応力と初期ヤング率はわずかであるが、やや向上する傾向が見られた。また、割線ヤング率 E_{50} は供試体上部、下部において大きく向上する事が認められた。これは、割線ヤング率 E_{50} の低下に影響していた供試体の水平方向の不安定さが、中圧等方圧密により改善された為であると考ええる。

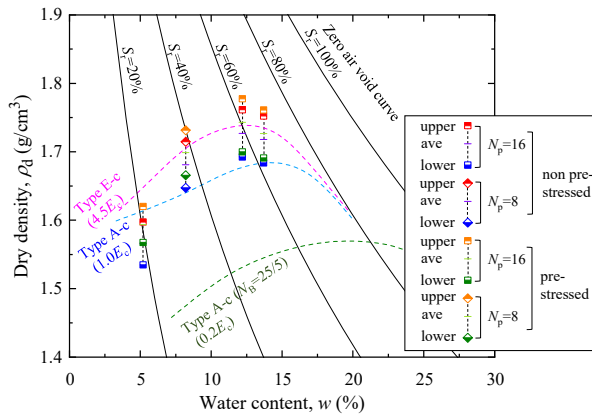


図 6-4-1 試験ケースの乾燥密度～含水比関係

(上端部、中央部、下端部)

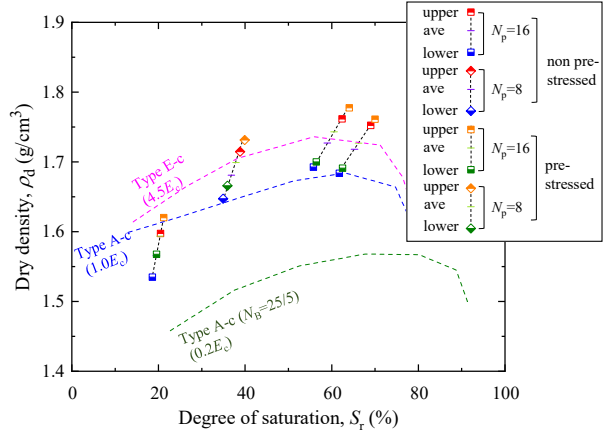


図 6-4-2 試験ケースの乾燥密度～飽和度関係

(上部、下部)

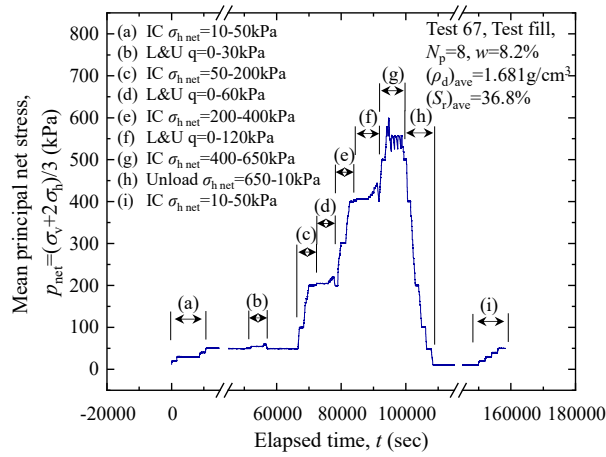


図 6-4-3 平均基底主応力の時刻歴

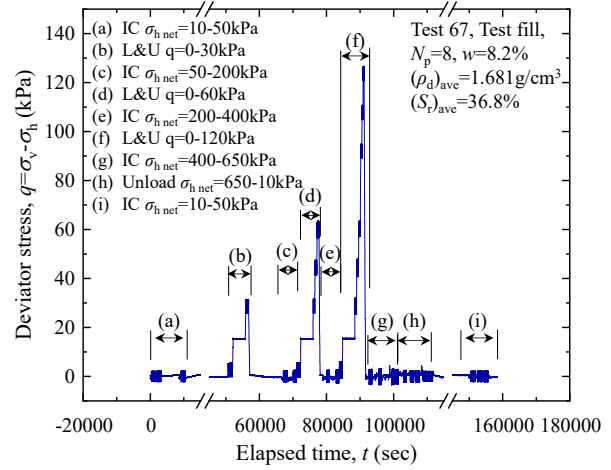


図 6-4-4 軸差応力の時刻歴

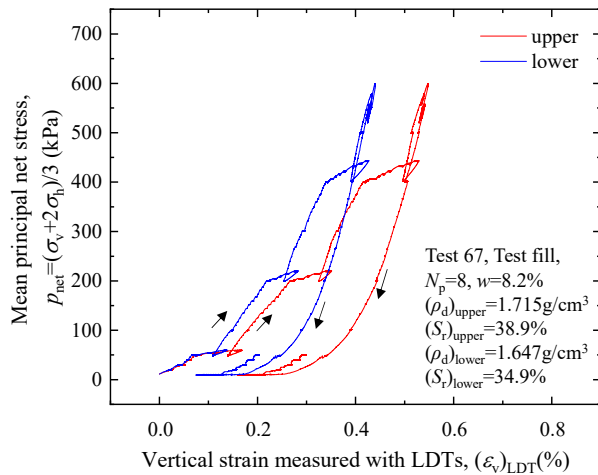


図 6-4-5 平均基底主応力～鉛直ひずみ関係

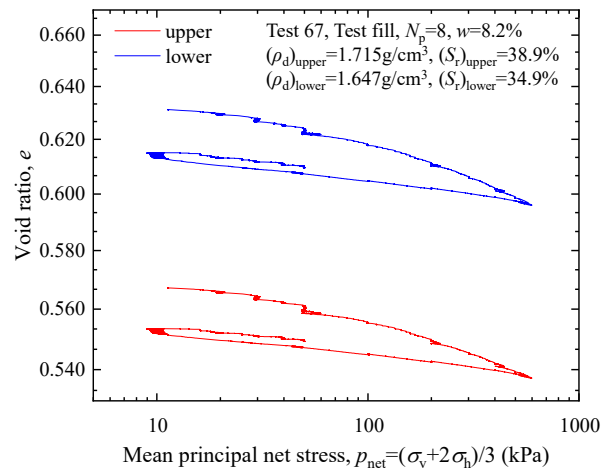


図 6-4-6 間隙比～平均基底主応力関係(片対数)

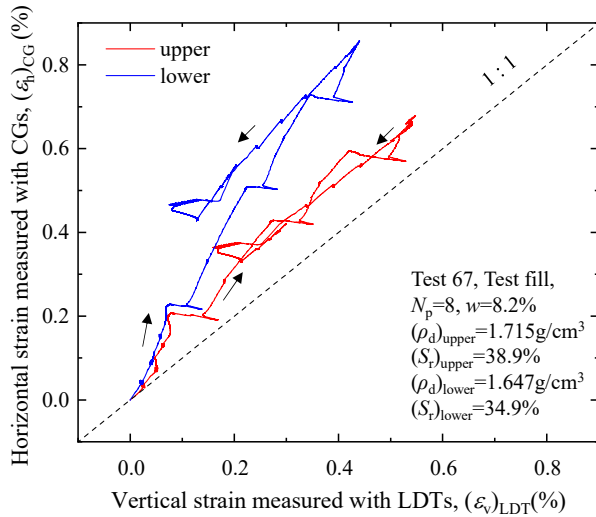


図 6-4-7 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

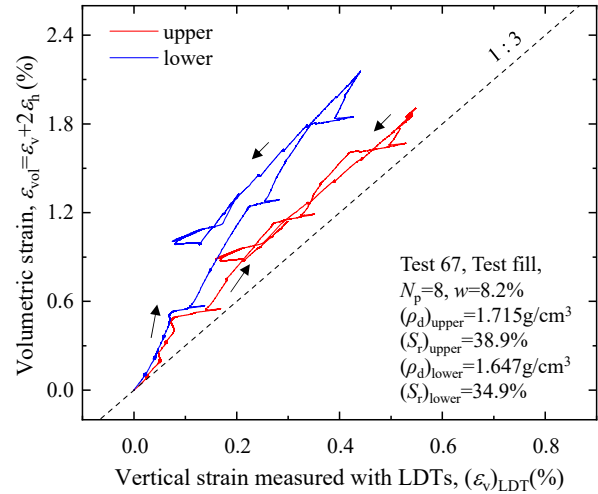


図 6-4-8 体積ひずみ～鉛直ひずみ関係

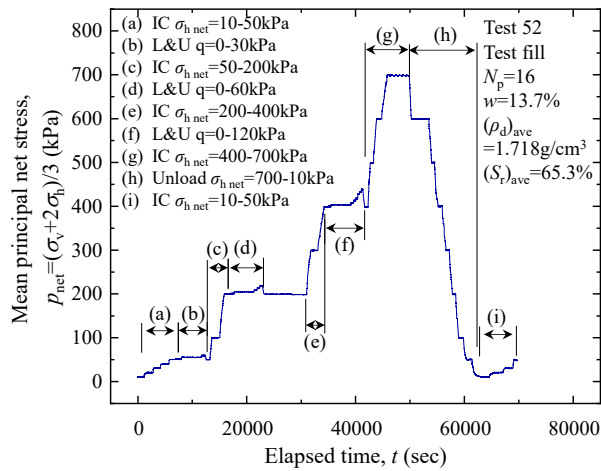


図 6-4-9 平均基底主応力の時刻歴

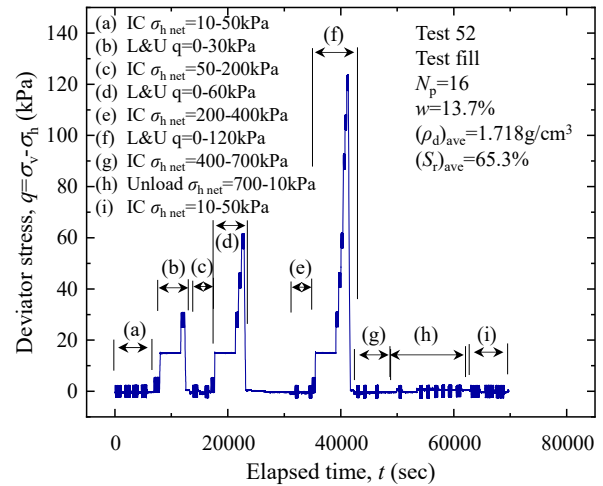


図 6-4-10 軸差応力の時刻歴

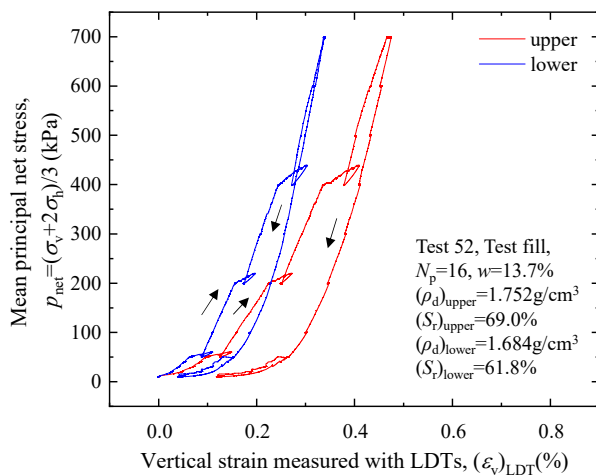


図 6-4-11 平均基底主応力～鉛直ひずみ関係

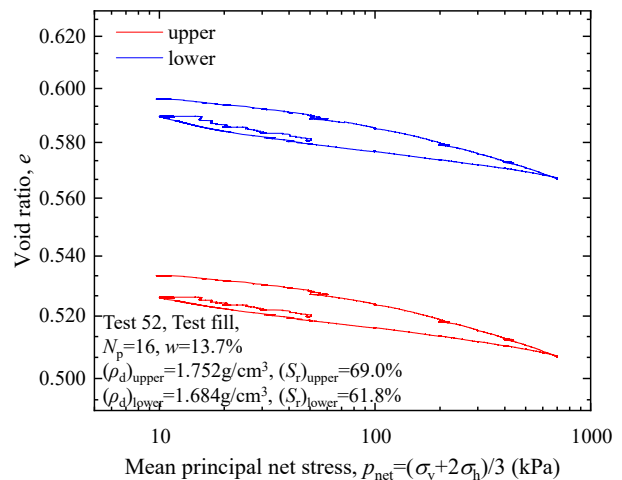


図 6-4-12 間隙比～平均基底主応力関係(片対数)

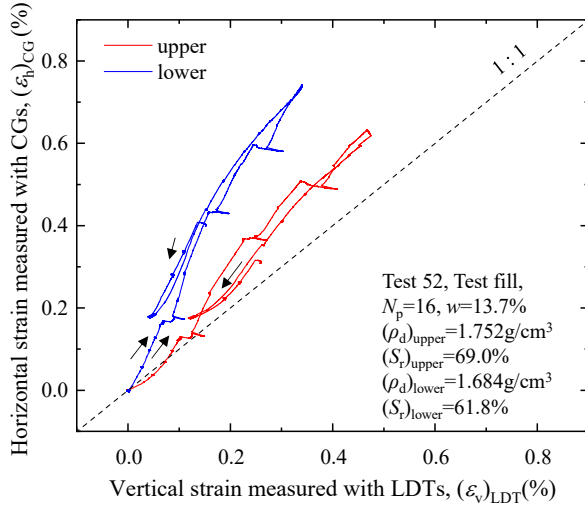


図 6-4-13 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

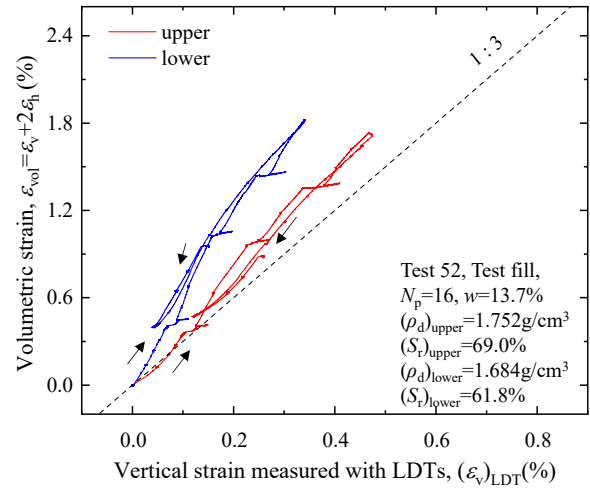


図 6-4-14 体積ひずみ～鉛直ひずみ関係

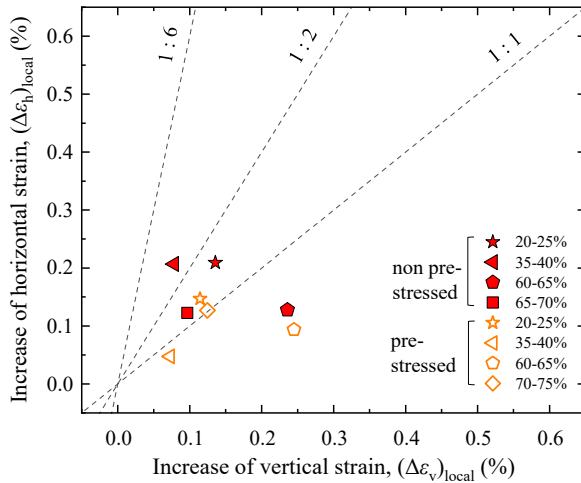


図 6-4-15 水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係 (上部)

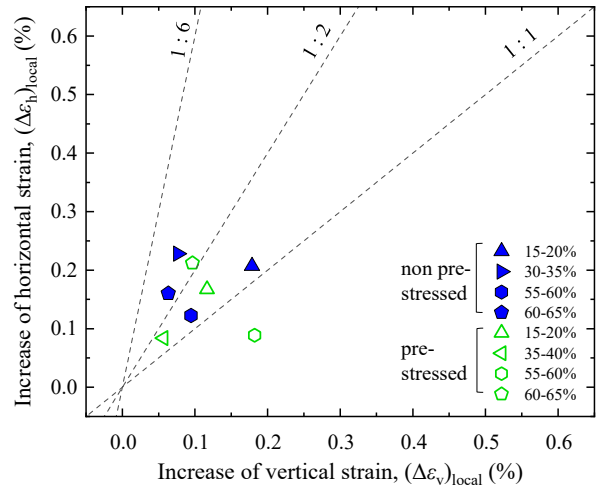


図 6-4-16 水平ひずみ増分～鉛直ひずみ増分関係 (下部)

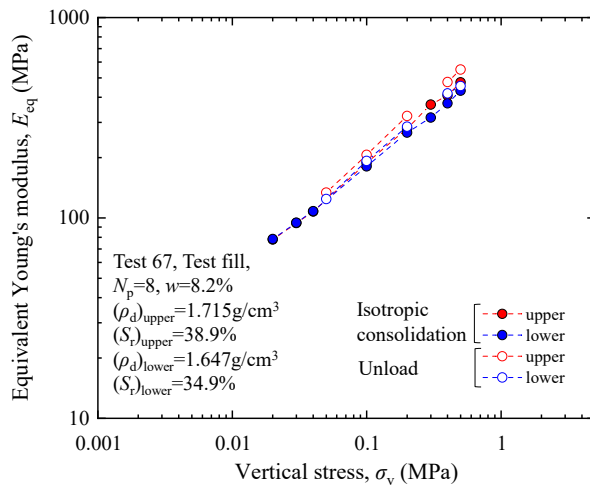


図 6-4-17 等価ヤング率～鉛直応力関係(両対数)

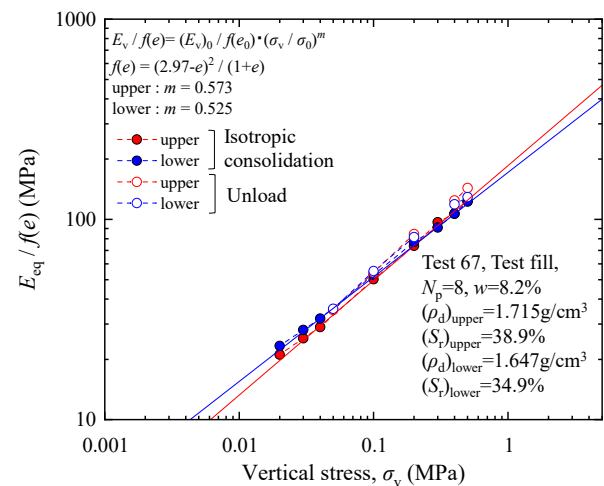


図 6-4-18 $E_{eq} / f(e) \sim$ 鉛直応力関係(両対数)

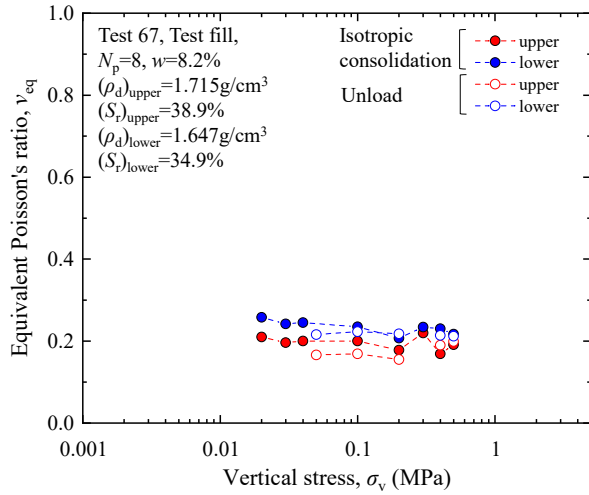


図 6-4-19 等価ポアソン比～鉛直応力関係(片対数)

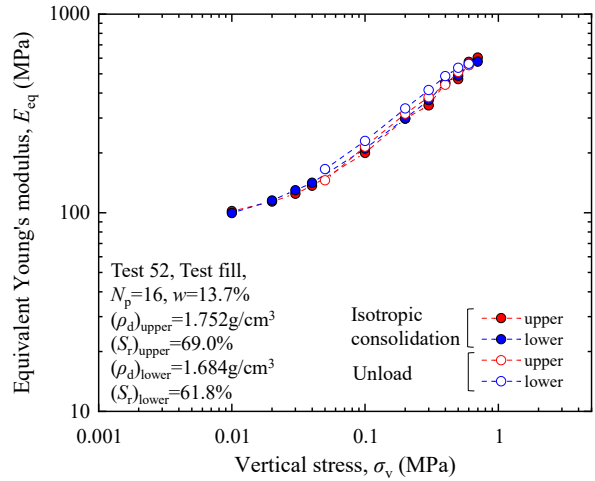


図 6-4-20 等価ヤング率～鉛直応力関係(両対数)

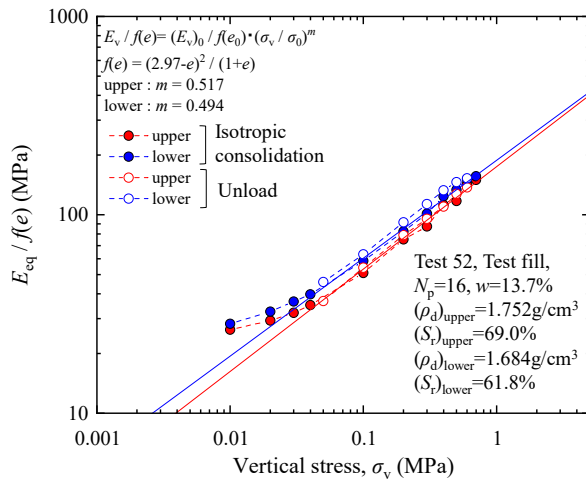


図 6-4-21 $E_{eq} / f(e)$ ～鉛直応力関係(両対数)

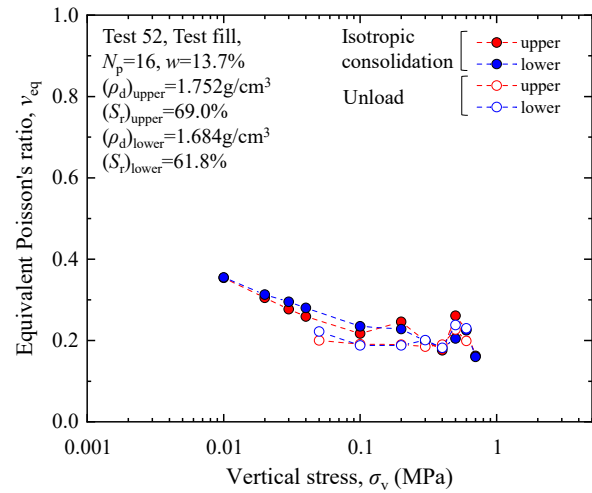


図 6-4-22 等価ポアソン比～鉛直応力関係(片対数)

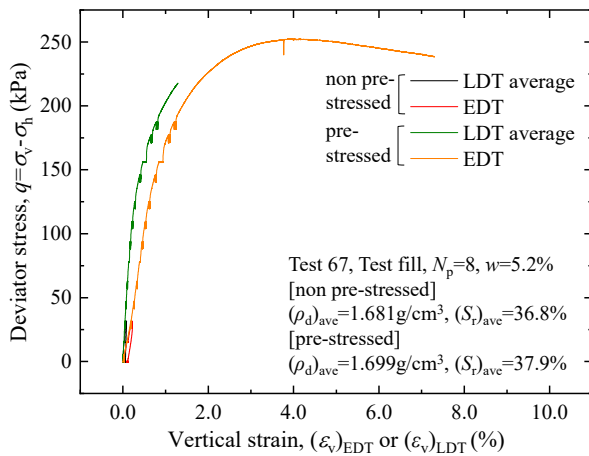


図 6-4-23 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

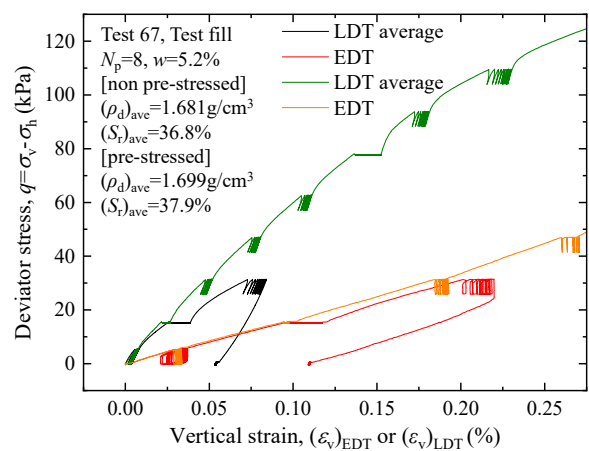


図 6-4-24 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(EDT、LDT 平均)

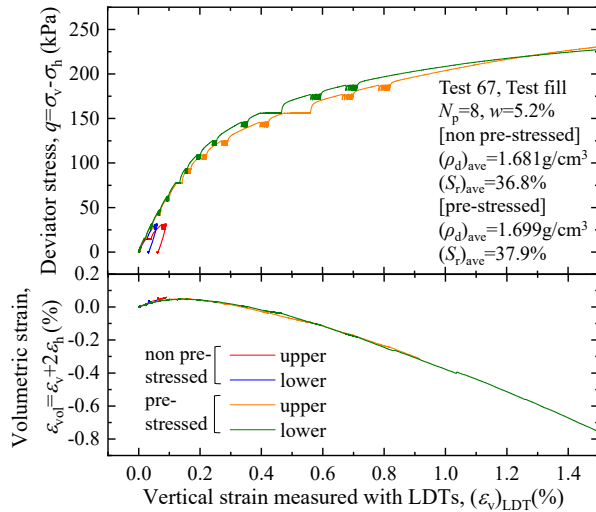


図 6-4-25 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

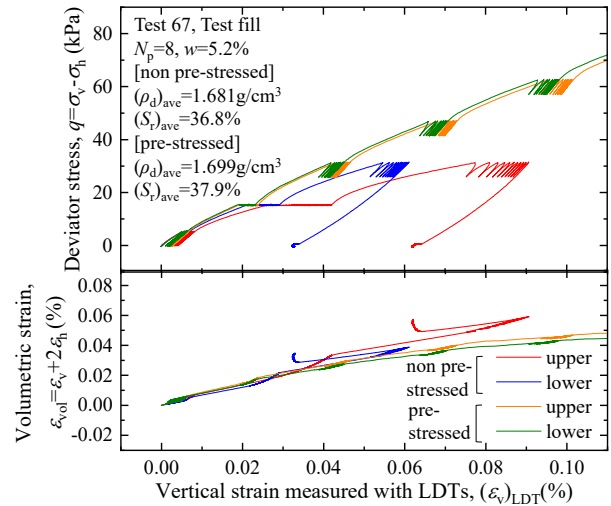


図 6-4-26 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

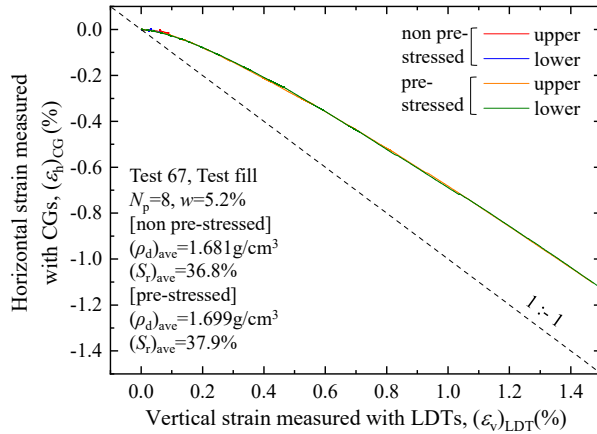


図 6-4-27 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

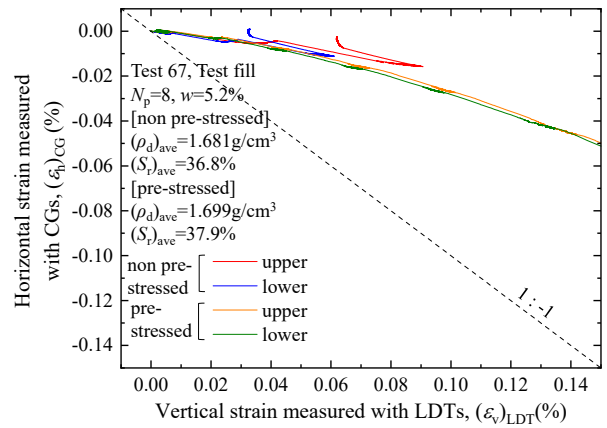


図 6-4-28 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

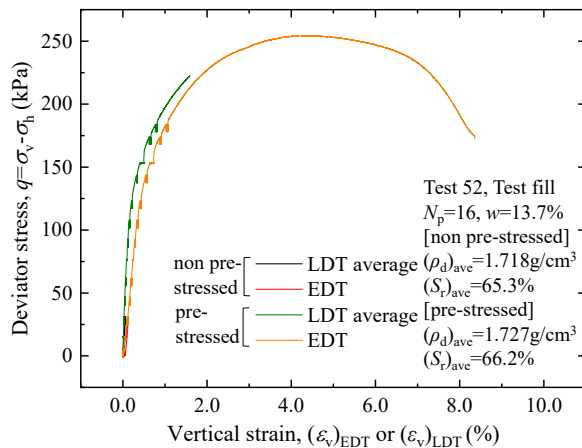


図 6-4-29 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

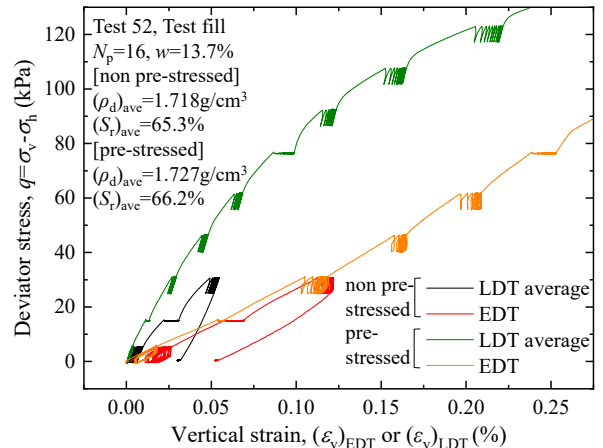


図 6-4-30 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(EDT、LDT 平均)

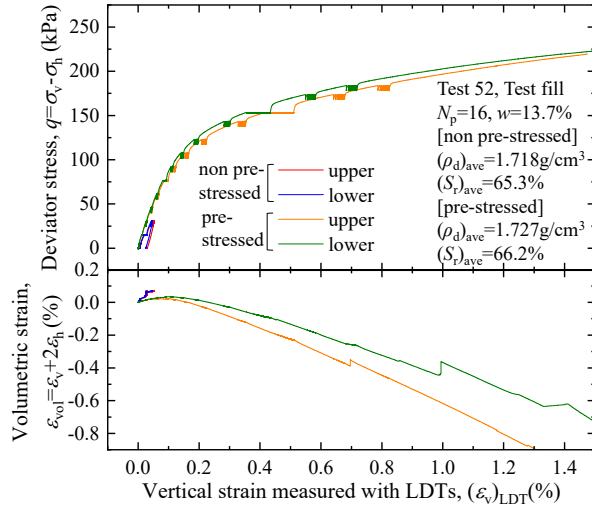


図 6-4-31 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

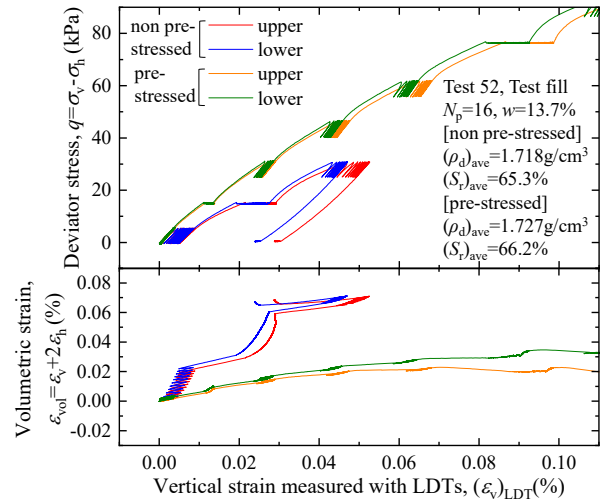


図 6-4-32 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

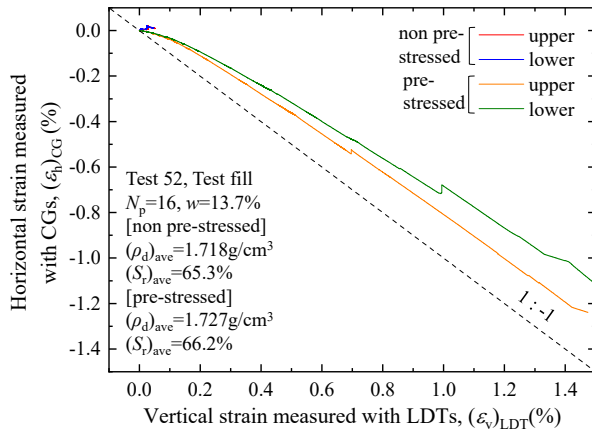


図 6-4-33 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

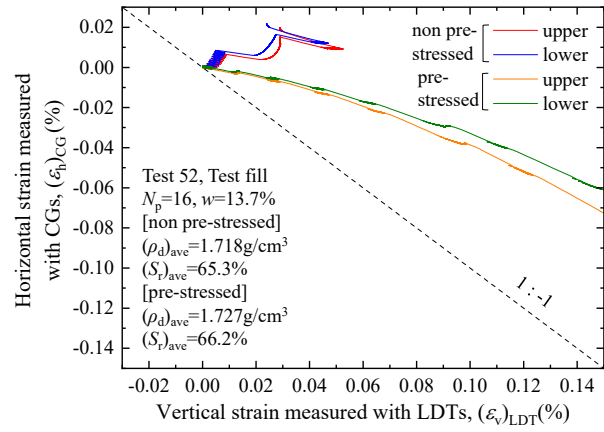


図 6-4-34 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

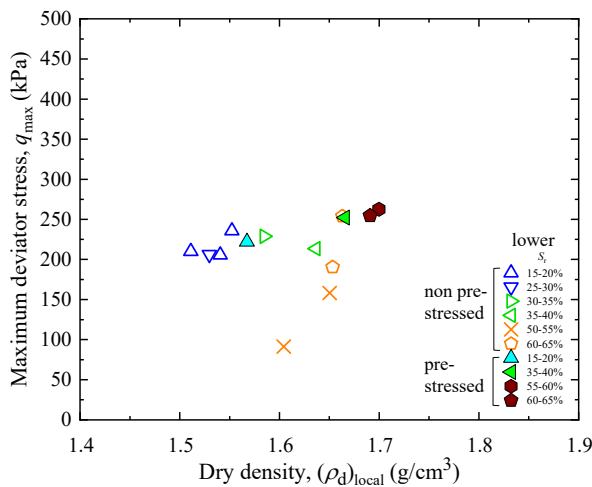


図 6-4-35 最大軸差応力～乾燥密度関係(下部)

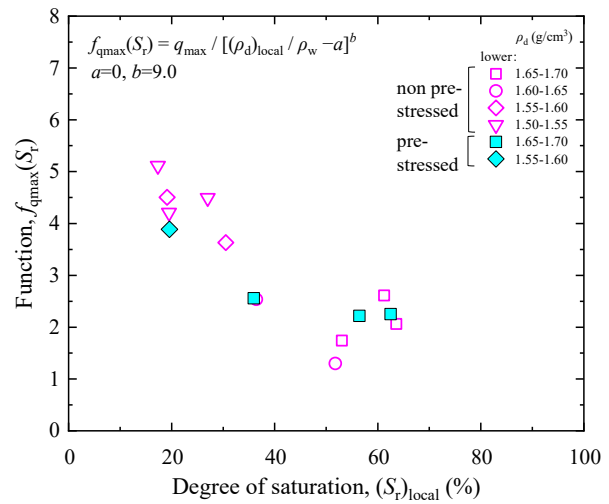


図 6-4-36 $f_{qmax}(S_r)$ ～飽和度関係(下部)
($a=0, b=9.0$)

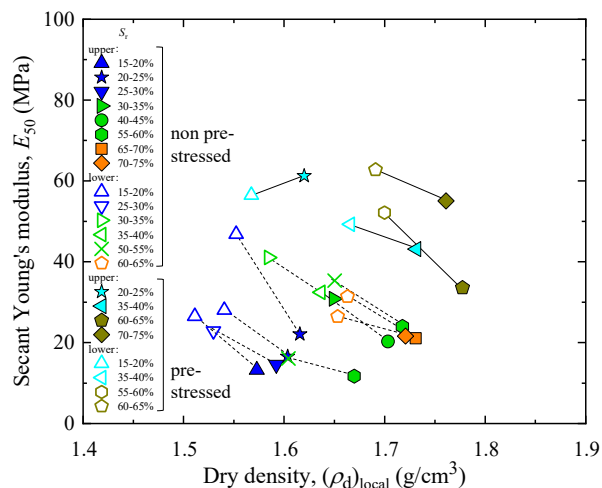


図 6-4-37 割線ヤング率～乾燥密度関係(上部、下部)

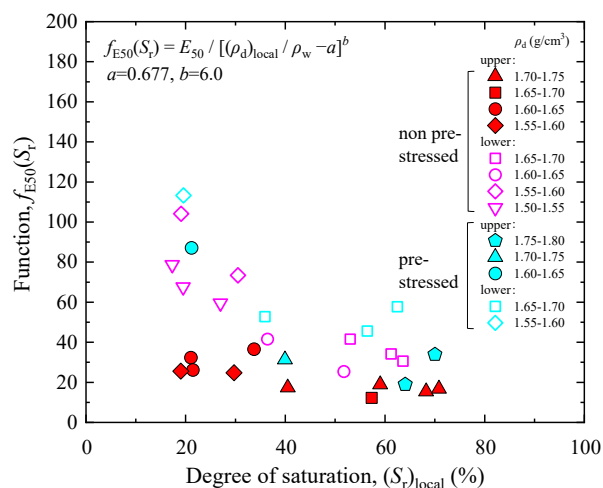


図 6-4-38 $f_{E50}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=6.0$)

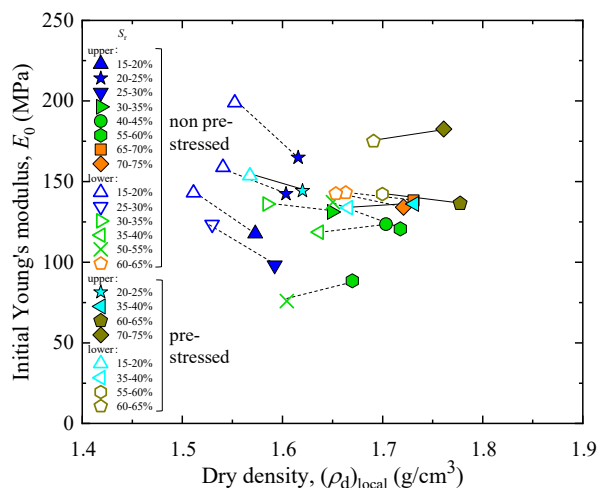


図 6-4-39 初期ヤング率～乾燥密度関係(上部、下部)

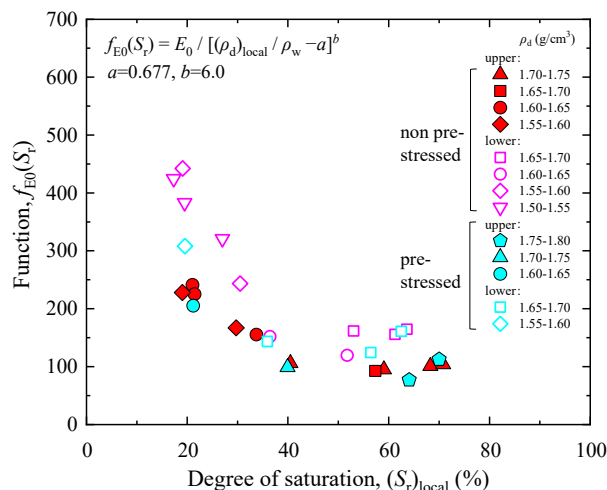


図 6-4-40 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係(上部、下部)
($a=0.677, b=6.0$)

6.5 非一様供試体の荷重保持載荷による変形特性

前章では室内締固め供試体に荷重保持載荷を段階的に与え、乾燥密度や締固め時の飽和度等の供試体条件が鉛直ひずみの増分に与える影響について調べた。その結果、供試体上部と下部に関わらず軸差応力が大きくなると荷重保持載荷による鉛直ひずみ増分は大きくなる事、乾燥密度が大きくなると荷重保持載荷による鉛直ひずみ増分は小さくなる事、締固め時の飽和度が大きくなると荷重保持載荷による鉛直ひずみ増分は大きくなる事を示した。本節では荷重保持載荷が試験盛土供試体の変形特性に与える影響について調べた。

6.5.1 応力～ひずみ関係における荷重保持載荷による変形特性

図 6-5-1 には、図 6-2-12 の軸差応力～鉛直ひずみ関係に示した供試体上部と下部それぞれの、鉛直ひずみの時刻歴を示す。単調載荷過程における軸差応力 $q=15\text{kPa}$ 、 75kPa 、 150kPa の 3 段階で、1 時間の荷重保持載荷を実施している。いずれの軸差応力でも荷重保持載荷の初期に鉛直ひずみが多く生じ、時間の経過とともに収束傾向を示している。軸差応力 $q=15\text{kPa}$ 、 $q=75\text{kPa}$ において、1 時間の荷重保持載荷で鉛直ひずみの残留は目立たないが、軸差応力 $q=150\text{kPa}$ の特に供試体上部ではやや鉛直ひずみが収束していないように見える。須藤ら(2012、2013)は荷重保持載荷を 2 時間、平川ら(2008)は荷重保持載荷を 1 時間実施しており、試験盛土供試体にも荷重保持載荷時間が十分な長さでなかった事も考えられるが、今回は室内締固め供試体と同様に荷重保持載荷 1 時間での鉛直ひずみ増分を用いて考察する事とした。

図 6-5-2 には、軸差応力 $q=15\text{kPa}$ 付近を拡大した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。供試体上部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0076\%$ 、下部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0040\%$ であり、供試体上部の方が大きい。また、荷重保持載荷中の体積ひずみは単調載荷中の挙動と同じく、鉛直ひずみの進行に伴って収縮傾向を示している。

図 6-5-3 には、軸差応力 $q=75\text{kPa}$ 付近を拡大した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。供試体上部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0300\%$ 、下部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0224\%$ であり、供試体上部の方が大きい。また、荷重保持載荷中の体積ひずみは単調載荷中の挙動と同じく、鉛直ひずみの進行に伴って収縮傾向を示している。

図 6-5-4 には、軸差応力 $q=150\text{kPa}$ 付近を拡大した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。供試体上部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0680\%$ 、下部の鉛直ひずみの増加は $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}}=0.0896\%$ であり、供試体下部の方が大きい。同じ供試体で軸差応力によって上部と下部の鉛直ひずみの増加が明確に逆転する事は室内締固め供試体には見られていない。軸差応力に応じた鉛直ひずみ増加の全体的な傾向については後で考察する。また、荷重保持載荷中の体積ひずみは単調載荷中の挙動と同じく、鉛直ひずみの進行に伴って膨張傾向を示している。

6.5.2 試験盛土供試体の荷重保持載荷による局所的な変形特性

図 6-5-5 には、飽和度 $S_r=15\%\sim 35\%$ の範囲の荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～軸差応力関係を示す。全てのケースで軸差応力が増加すると、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は増加している。ただし、軸差応力 $q=150\text{kPa}$ でその増加傾向は供試体上部と下部で異なる事がわかる。軸差応力 $q=15\text{kPa}$ 、 75kPa では供試体上部と下部はほぼ同等の鉛直ひずみの増加であるが、 $q=150\text{kPa}$ では供試体上部の鉛直ひずみの増加が供試体下部に比べて小さい。図 6-5-6 には、飽和度 $S_r=50\%\sim 75\%$ の範囲の荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～軸差応力関係を示す。データ数に限りはあるがほぼ全てのケースで軸差応力が増加すると、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は増加している。

図 6-5-7 には、軸差応力 $q=15\text{kPa}$ における、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～局所乾燥密度関係を示す。全体的な傾向として飽和度に関わらず、乾燥密度が増加すると荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は減少する傾向である。同じ乾燥密度で供試体上部は下部に比べて荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分が大きく、上部と下部でその関係は独立している。この点は図 5-5-7 に示した室内締固め供試体と明確に異なる。

図 6-5-8 には、軸差応力 $q=75\text{kPa}$ における、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～局所乾燥密度関係を示す。供試体上部と下部ともに乾燥密度が増加すると、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は減少する傾向である。また、同じ乾燥密度の供試体上部と下部では、供試体上部の荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分が大きく、上部と下部でその関係は独立している。

図 6-5-9 には、軸差応力 $q=150\text{kPa}$ における、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～局所乾燥密度関係を示す。供試体上部と下部ともに乾燥密度が増加すると、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分は減少する傾向である。また、同じ乾燥密度の供試体上部と下部では、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分の違いはほとんど認められない。すなわち、局所乾燥密度の大きい供試体上部は小さい軸差応力では鉛直ひずみ増分が大きかったが、軸差応力が $q=150\text{kPa}$ 程度では供試体上部の荷重保持載荷に対する剛性が増加したと考えられる。これは先述した供試体上部のせん断破壊領域の影響による剛性低下と単調載荷時の鉛直ひずみ、軸差応力の増加に伴う剛性増加と整合する。

以上より、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～乾燥密度関係は飽和度の影響で多少のばらつきはあるが、図 5-5-7～図 5-5-9 に示した室内締固め供試体と同様に逆相関の関係である事がわかった。また、軸差応力 $q=15\text{kPa}$ 、 75kPa において、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増加と局所乾燥密度の関係は供試体上部と下部で独立している。また、軸差応力 $q=150\text{kPa}$ において、荷重保持載荷による鉛直ひずみの増加と局所乾燥密度の関係は供試体上部と下部で同等である。これは、一見複雑な挙動であるが、試験盛土供試体は鉛直深度方向の乾燥密度分布や試験盛土表面のせん断破壊領域の影響によって低剛性の挙動を示し、その後鉛直ひずみの進行と軸差応力の増加に伴ってせん断破壊領域は一様化され、剛性増加の挙動を示す事を示唆している。すなわち、試験盛土供試体の変形特性に与える非一様性の影響には乾燥密度、飽和度に加え、せん断破壊領域の影響が含まれていると考えられる。これらを適切に考慮すれば、荷重保持載荷による鉛直ひずみ増分～局所乾燥密度関係で上部下部ともほぼ同様に評価する事が出来るとわかった。

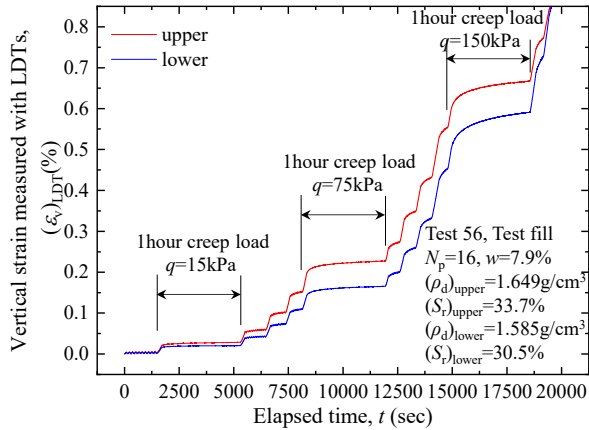


図 6-5-1 鉛直ひずみの時刻歴
(上部、下部)

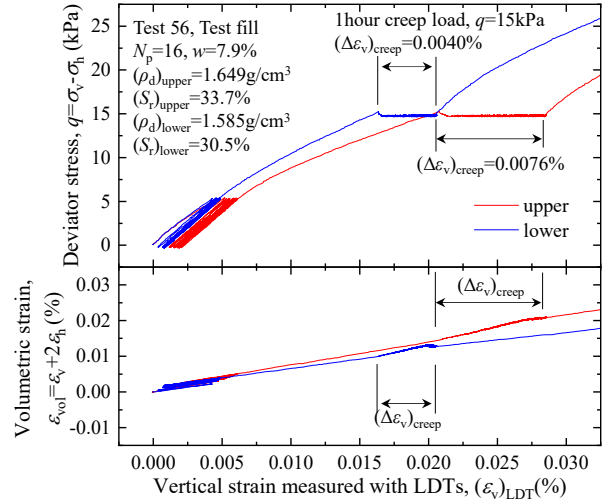


図 6-5-2 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部、 $q=15\text{kPa}$ 付近拡大)

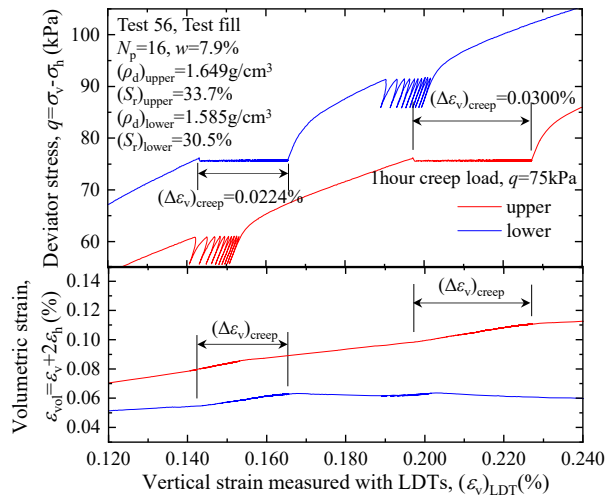


図 6-5-3 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部、 $q=75\text{kPa}$ 付近拡大)

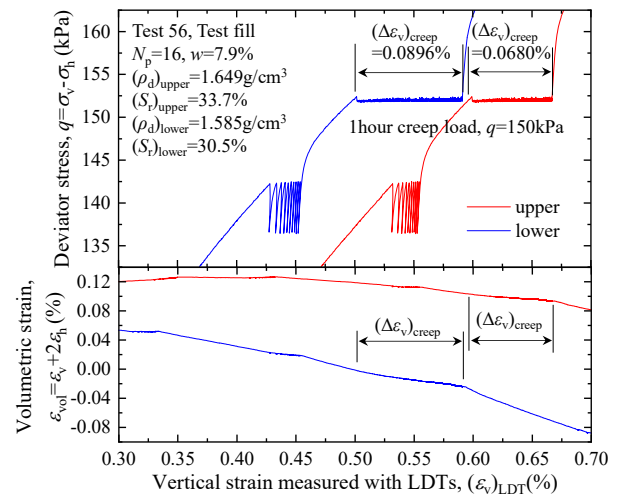


図 6-5-4 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(上部、下部、 $q=150\text{kPa}$ 付近拡大)

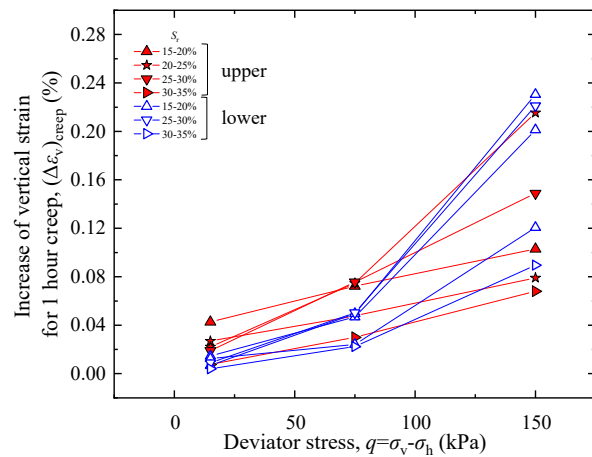


図 6-5-5 $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}} \sim q$ 関係
(飽和度 $S_r=15\% \sim 35\%$)

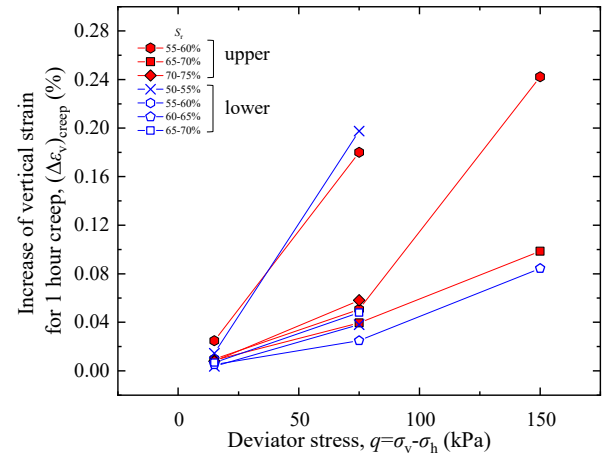


図 6-5-6 $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}} \sim q$ 関係
(飽和度 $S_r=50\% \sim 75\%$)

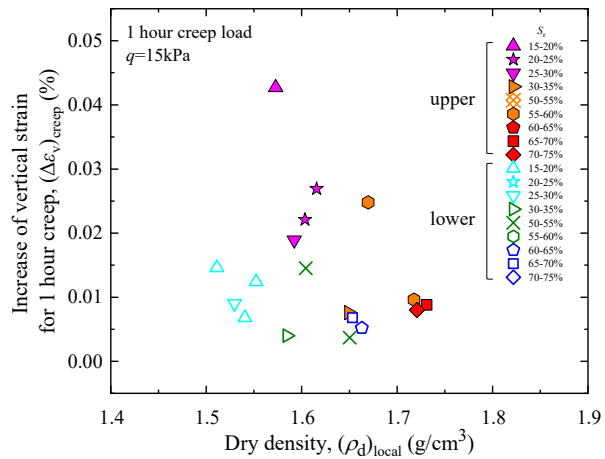


図 6-5-7 $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}} \sim (\rho_d)_{\text{local}}$ 関係
(軸差応力 $q=15\text{kPa}$)

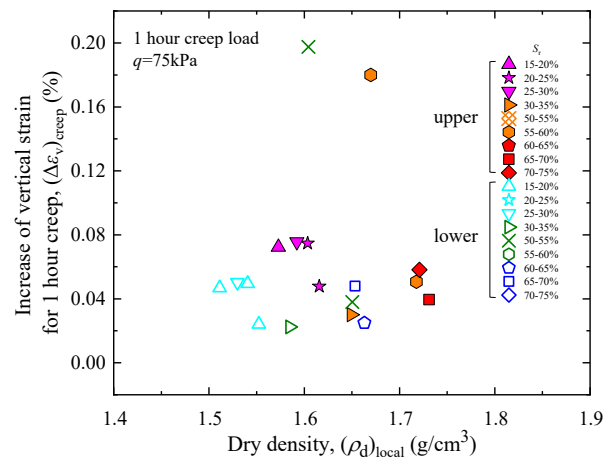


図 6-5-8 $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}} \sim (\rho_d)_{\text{local}}$ 関係
(軸差応力 $q=75\text{kPa}$)

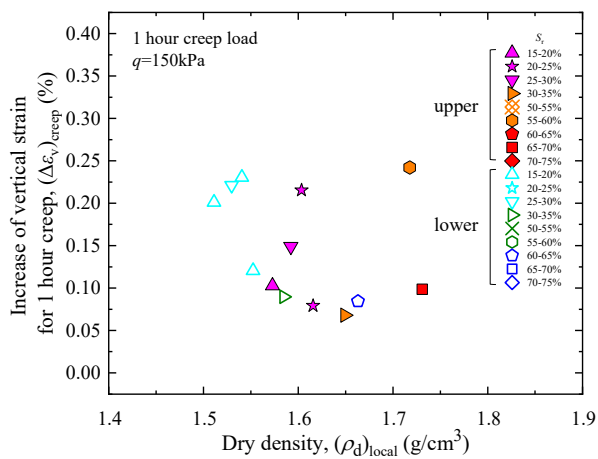


図 6-5-9 $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{creep}} \sim (\rho_d)_{\text{local}}$ 関係
(軸差応力 $q=150\text{kPa}$)

6.6 非一様供試体の繰返し載荷による変形特性

前章では、室内締固め供試体に繰返し載荷を実施し、供試体上部と下部それぞれの変形特性について調べた。その結果、等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ関係と共通して、 $E_{eq}/f(e)$ ～片振幅鉛直ひずみ関係より、等価ヤング率の供試体上部と下部の違いは見られなかった。本節では、同等の乾燥密度、飽和度条件での試験盛土供試体と同じ繰返し載荷条件における変形特性を比較する。本節で示す事の出来る試験盛土供試体のデータは 1 ケースだけであるが、前章の室内締固め供試体の繰返し載荷試験結果と比較しながら、供試体上部と下部それぞれの変形特性について調べた。また、善ら(1981)は供試体の乱れが剛性率～ひずみレベル関係に与える影響について整理しており、室内締固め供試体と試験盛土供試体の変形特性の比較により、試験盛土供試体の乱れの影響についても考察した。

6.6.1 繰返し載荷による応力～ひずみ関係

供試体は締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.670\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=8.7\%$ 、飽和度 $S_r=38.4\%$ の条件で作製した。図 6-6-1 は、軸差応力の時刻歴を示す。軸差応力の両振幅を $2\text{kPa}\sim 120\text{kPa}$ まで圧縮方向に 10 回の繰返し載荷を実施し、軸差応力 $q=150\text{kPa}$ の 5 回の除荷・再載荷以降は単調載荷している。図 6-6-2 には、軸差応力の時刻歴の拡大図を示した。

図 6-6-3 は、軸差応力～EDT と LDT170 による鉛直ひずみ関係を示す。いずれも非線形挙動を示しているが、EDT で測定した鉛直ひずみは同じ軸差応力レベルにおける LDT の鉛直ひずみに比べて大きい傾向であった。

図 6-6-4 は、供試体上部と下部の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。上部の割線ヤング率は $E_{50}=20.3\text{MPa}$ 、下部の割線ヤング率は $E_{50}=32.4\text{MPa}$ であり、下部が大きい結果であった。上部と下部の割線ヤング率 E_{50} の差は 12.1MPa 程度(平均 E_{50} の 46%程度)であり、軸差応力～鉛直ひずみ関係は明確に異なる。供試体上部と下部の体積ひずみはともに収縮傾向を示した後に膨張傾向に転じ、ほぼ同等の挙動を示している。供試体上部が供試体下部に比べて割線ヤング率 E_{50} が小さい事は先に示した単調載荷試験の結果と整合する

図 6-6-5 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.020\%$ 付近までの供試体上部と下部の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。室内締固め供試体と同様に鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.002\%$ 付近までは供試体上部と下部はほぼ線形挙動を示し、供試体上部と下部の違いは見られない。上部の初期ヤング率は $E_0=123.6\text{MPa}$ 、下部の初期ヤング率は $E_0=118.6\text{MPa}$ であり、上部と下部の初期ヤング率の差は 5.0MPa 程度(平均 E_0 の 4.1%程度)であり、両者はほぼ同等である。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.01\%$ 付近の単調載荷の部分は非線形挙動を示し、みかけのヤング率の低下が確認されるが、繰返し載荷時は線形挙動が多く残っている。また、繰返し載荷中にも鉛直ひずみは増加しており、その増分は供試体上部の方が供試体下部より大きい。これは前節で示した小さい軸差応力における、荷重保持載荷による供試体上部と下部の鉛直ひずみの増加挙動と整合する。体積ひずみは鉛直ひずみの進行とともに多少の推移は見られるが、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.002\%$ 付近までは弾性的挙動を示している。また、供試体上部と下部ともに体積ひずみは繰返し載荷中にも収縮挙動を示している。図 6-6-6 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.06\%$ 付近までの供試体上部と下部の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.01\%\sim 0.06\%$ にかけて徐々に単調載荷の部分で非線形挙動を示し、みかけのヤング率の低下が確認されるが、繰返し載荷時は線形挙動が残っている。図 6-6-7 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.4\%$ 付近までの供試体上部と下部の軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.1\%\sim 0.4\%$ にかけて、繰返し載荷時の描くループが大きく開き、非線形挙動が現れ始めている。体積ひずみは供試体上部、下部ともに載荷、除荷、再載荷の過程で収縮挙動を示す。繰返し載荷の 1 サイクル毎に体積ひずみが収縮挙動と膨張挙動を繰り返しながらループを描く室内締固め供試体と異なる。これは、中島ら(2010)や松本ら(2012)が示した繰返し載荷中の収縮方向に生じる体積変化挙動と整合する。

図 6-6-8 には、供試体上部と下部の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図中には 1:-1 の補助線を示している。供試体上部と下部ともに、鉛直ひずみが増加するとともに 1:-1 の補助線から離れるが、全体的に緩やかにカーブして補助線に平行となる。同じ鉛直ひずみでは供試体上部と下部同等の水平ひずみを示した。

6.6.2 非一様供試体の繰返し载荷による変形特性

図 6-6-9～図 6-6-20 には、繰返し载荷時の軸差応力の両振幅 $\sigma_d=2\text{kPa}\sim 120\text{kPa}$ までそれぞれ 10 回目の除荷・再载荷時の軸差応力～鉛直ひずみ関係と水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。図 6-6-9～図 6-6-16 に示す、軸差応力の両振幅 $\sigma_d=2\text{kPa}\sim 15\text{kPa}$ の範囲では軸差応力～鉛直ひずみ関係は線形挙動を示している。等価ヤング率は $E_{eq}=121.1\text{MPa}\sim 143.3\text{MPa}$ で幅を持っているが、供試体上部と下部それぞれの違いは小さい。また、この範囲の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係も等価ポアソン比 $\nu_{eq}=0.20\sim 0.26$ の範囲でほぼ一定である。図 6-6-17、図 6-6-18 に示す、軸差応力の両振幅 $\sigma_d=30\text{kPa}$ では軸差応力～鉛直ひずみ関係のループがやや大きくなっている事がわかる。等価ヤング率は供試体上部($E_{eq,upper}=116.7\text{MPa}$)と供試体下部($E_{eq,lower}=115.8\text{MPa}$)でその差は小さい。また、この範囲の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係も等価ポアソン比 $\nu_{eq}=0.23\sim 0.24$ であり、先の小さいひずみの繰返し载荷試験の結果と同等であった。図 6-6-19～図 6-6-20 に示す、軸差応力の両振幅 $\sigma_d=120\text{kPa}$ では軸差応力～鉛直ひずみ関係のループがさらに大きくなっている。等価ヤング率は $E_{eq}=108.4\text{MPa}\sim 112.1\text{MPa}$ で大きな違いは見られない。また、供試体上部と下部の等価ヤング率の違いも小さい。この範囲の水平ひずみ～鉛直ひずみ関係も等価ポアソン比 $\nu_{eq}=0.60\sim 0.63$ と大きくなり、弾性的挙動とは言えない。

図 6-6-21 には、供試体上部と下部それぞれの繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ 及び $N_{cyc}=10$ の等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ関係を示す。全体傾向として片振幅鉛直ひずみが大きくなると徐々に等価ヤング率は低下する事が確認された。また、繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ と $N_{cyc}=10$ では違いが小さく、供試体上部と下部の差も小さい結果であった。

図 6-6-22 には、供試体上部と下部それぞれの繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ 及び $N_{cyc}=10$ について、式 5-2-9 で示した間隙比関数で正規化した等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ関係を示す。全体傾向として片振幅鉛直ひずみが大きくなると徐々に $E_{eq}/f(e)$ は低下する事が確認された。また、繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ と $N_{cyc}=10$ では違いが小さいが、供試体上部は下部よりやや小さい傾向であったがその差は小さい。

図 6-6-23 には、供試体上部と下部それぞれの繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ 及び $N_{cyc}=10$ の等価ポアソン比～片振幅鉛直ひずみ関係を示す。全体傾向として片振幅鉛直ひずみが大きくなる(ε_v)_{SA}=0.02%付近を境界に徐々に等価ポアソン比は増加し、弾性範囲でなくなる。これは、図 6-6-9～図 6-6-20 で考察した弾性挙動の推移と整合する。また、繰返し载荷回数 $N_{cyc}=5$ と $N_{cyc}=10$ では違いが小さく、供試体上部と下部の差も小さい結果であった。片振幅鉛直ひずみ (ε_v)_{SA}=0.02%未満では履歴減衰率 $h=0\sim 0.05$ 程度であるが、それ以上の片振幅鉛直ひずみでは履歴減衰率 $h=0.05\sim 0.20$ まで増加している。等価ヤング率の変化に比べて履歴減衰率の方が片振幅鉛直ひずみの増加とともに明確な変化が現れている事がわかる。これは、図 5-6-23 で示した室内締固め供試体の結果と類似する。

図 6-6-24 には、試験盛土供試体と室内締固め供試体それぞれの上部と下部の繰返し载荷回数 $N_{cyc}=10$ について、間隙比関数で正規化した等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ関係を示す。供試体上部と下部でそれぞれやや異なるが、 $E_{eq}/f(e)$ は試験盛土供試体に比べて室内締固め供試体の方が大きい。

善ら(1981)は供試体の乱れが剛性率～ひずみレベル関係に与える影響について整理し、乱れのある供試体は乱れの少ない供試体に比べてひずみレベルの増加に伴う剛性率の低下量が大きい事を示している。試験盛土供試体は押切式ブロックサンプリングにより採取している為、この方法に着目して評価を試みた。その結果、試験盛土供試体は室内締固め供試体に比べて供試体上部と下部ともに片振幅鉛直ひずみの増加とともに目立って異なる等価ヤング率の低下は見られなかった。前章でも述べた通り、圧縮側のみの繰返し载荷による剛性向上効果が含まれている可

能性は否定できないが、善ら(1981)の方法においても試験盛土供試体の目立った乱れは確認されなかった。

以上より、等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ関係と共通して、 $E_{eq}/f(e)$ ～片振幅鉛直ひずみ関係より、等価ヤング率は供試体上部の方が下部よりやや小さい。また、試験盛土供試体の $E_{eq}/f(e)$ は室内締固め供試体よりやや小さい。

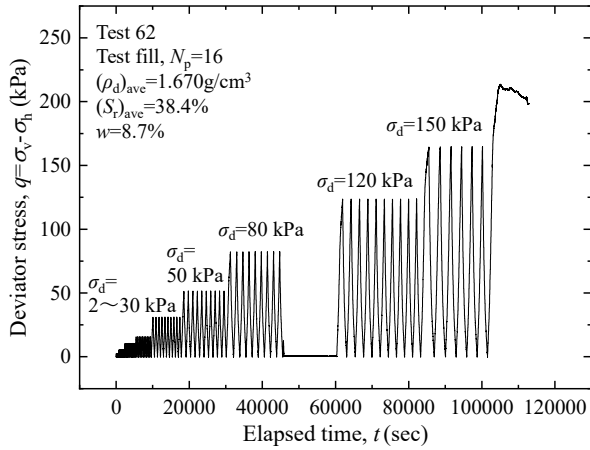


図 6-6-1 軸差応力の時刻歴

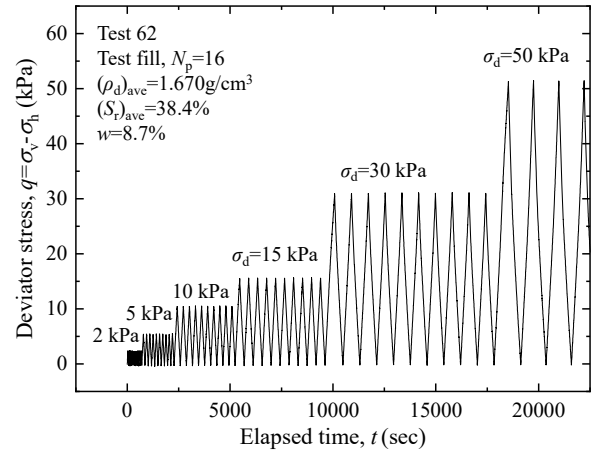


図 6-6-2 軸差応力の時刻歴(拡大)

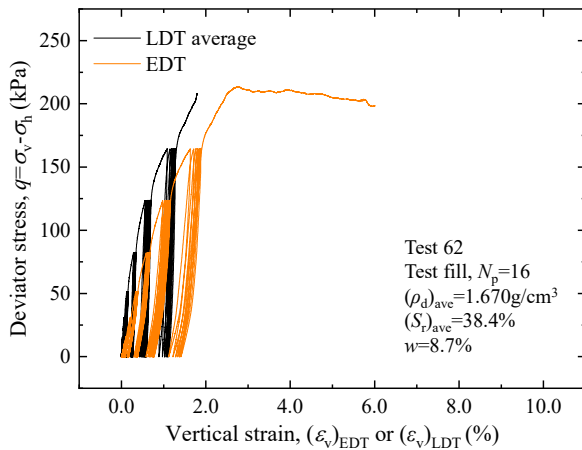


図 6-6-3 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

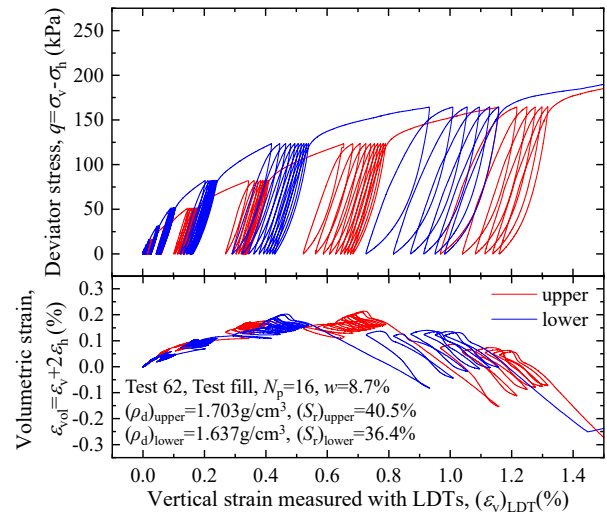


図 6-6-4 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

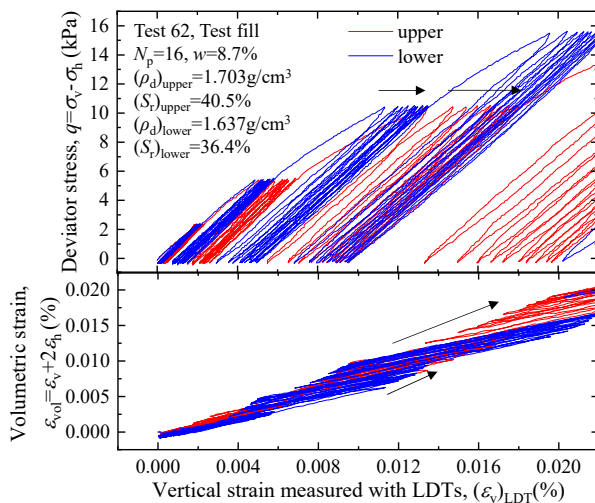


図 6-6-5 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

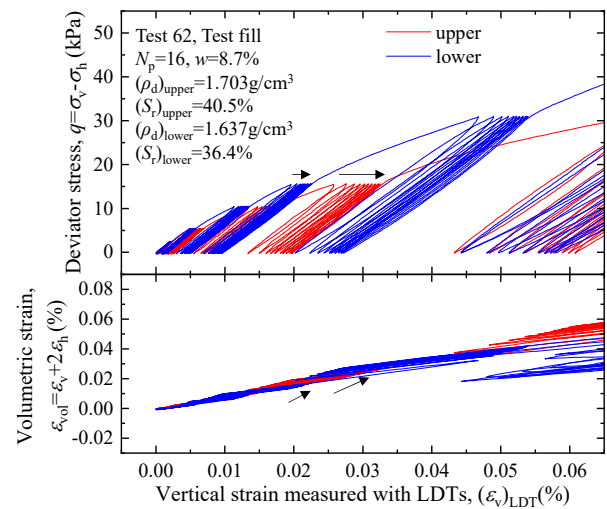


図 6-6-6 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

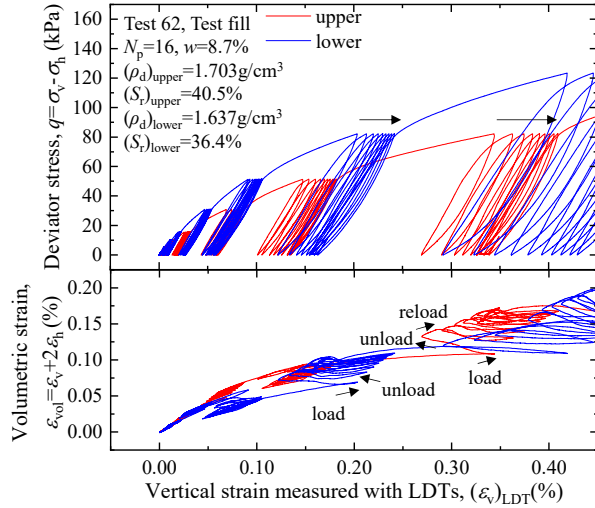


図 6-6-7 軸差応力～鉛直ひずみ関係(拡大)
(LDT 上部、下部)

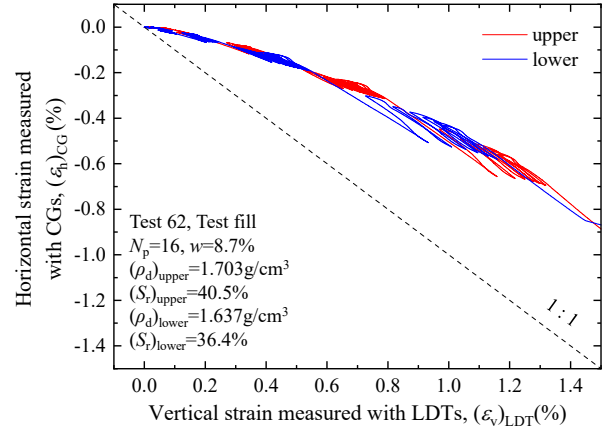


図 6-6-8 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

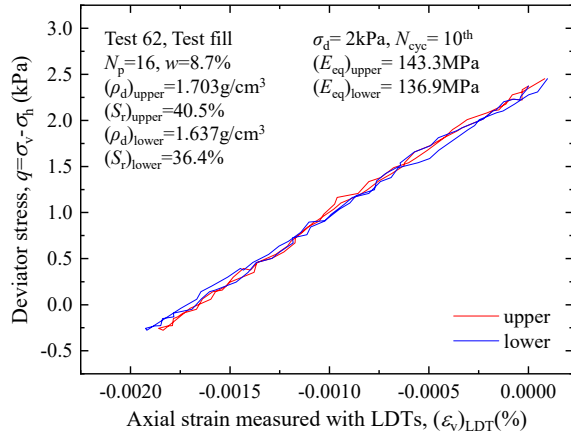


図 6-6-9 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=2\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

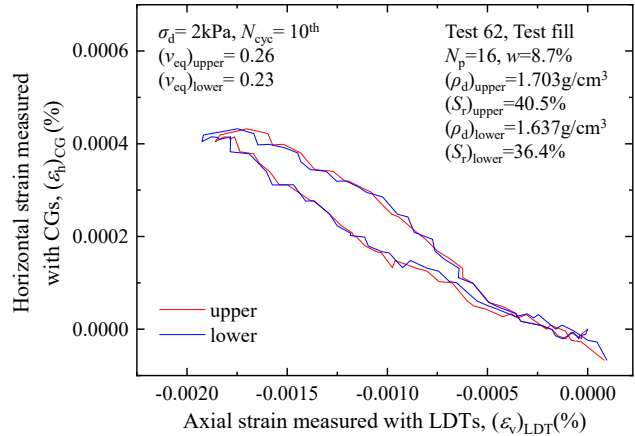


図 6-6-10 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=2\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

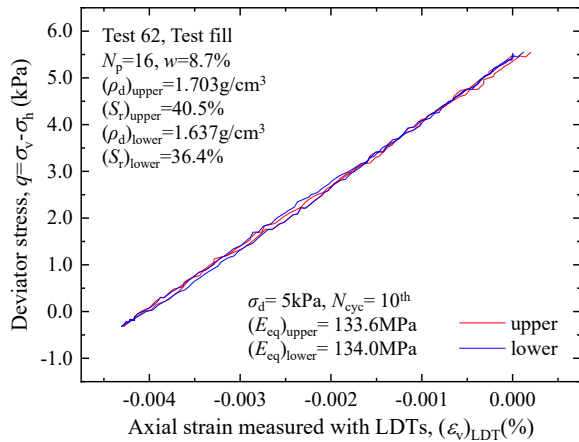


図 6-6-11 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=5\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

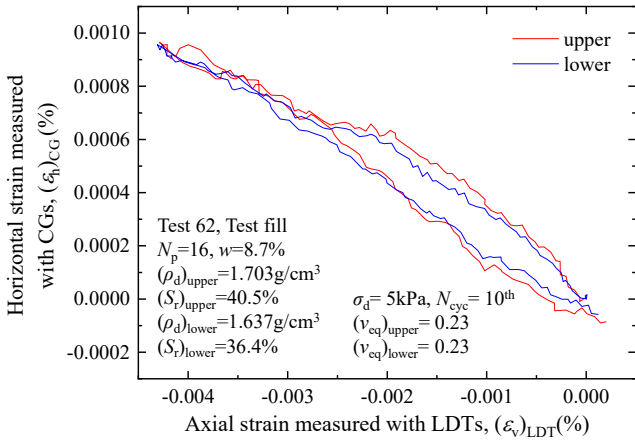


図 6-6-12 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=5\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

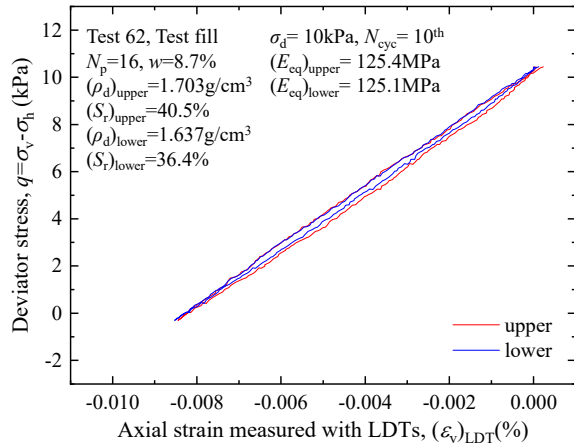


図 6-6-13 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=10\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

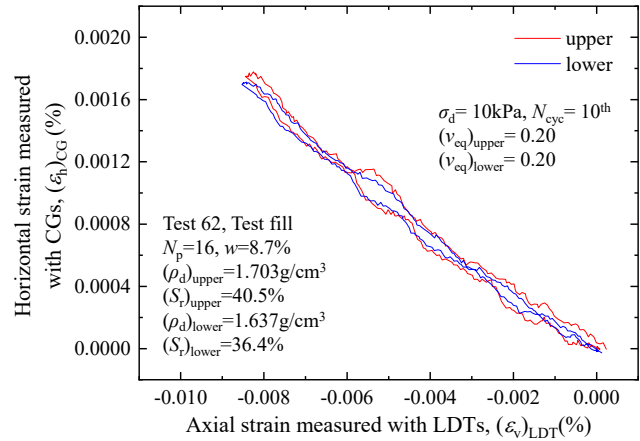


図 6-6-14 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=10\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

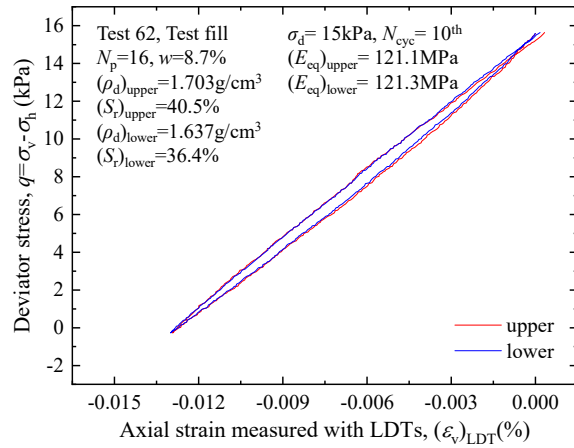


図 6-6-15 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=15\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

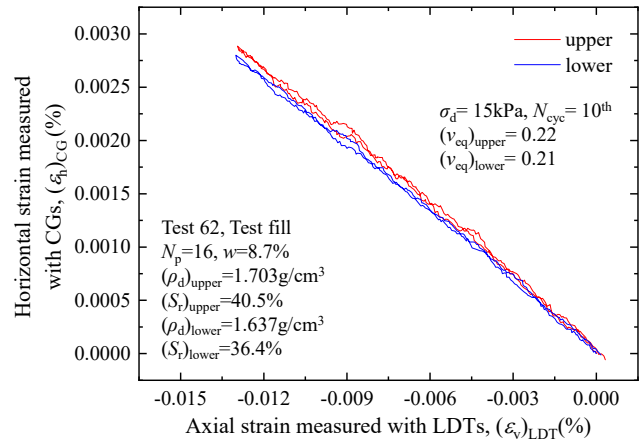


図 6-6-16 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=15\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

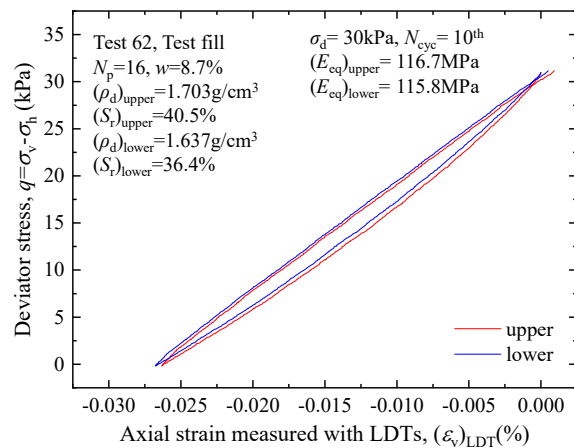


図 6-6-17 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=30\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

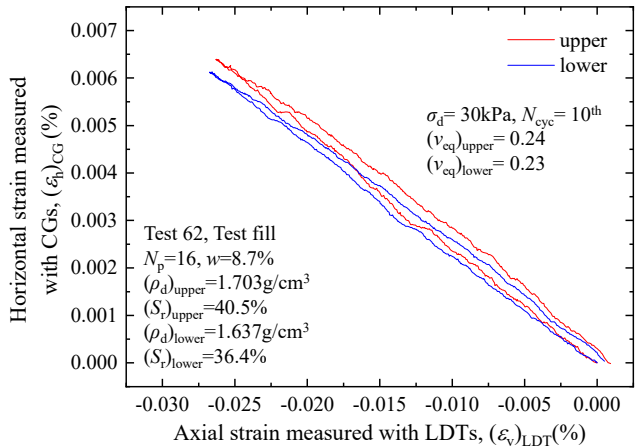


図 6-6-18 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=30\text{kPa}$)
(LDT 上部、下部)

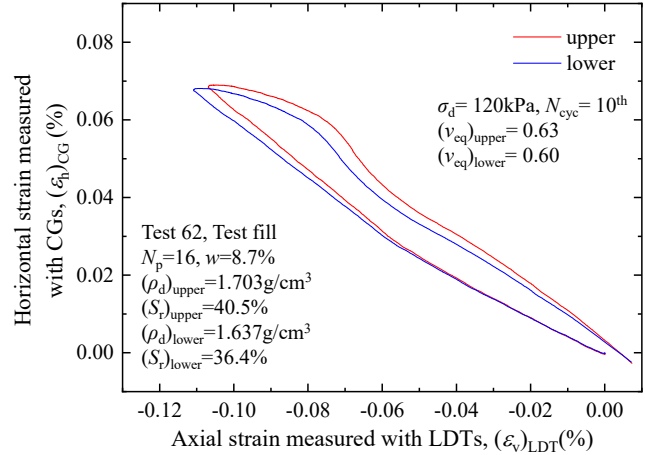
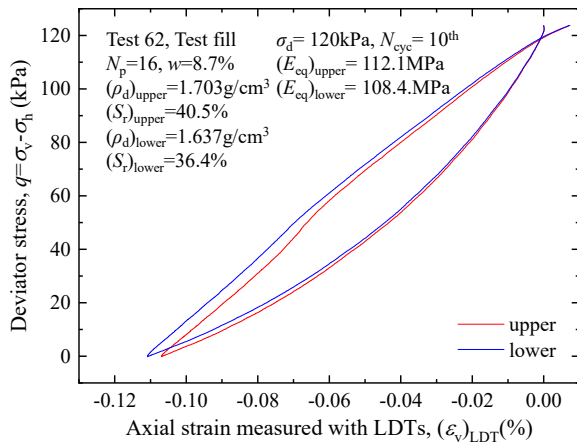


図 6-6-19 軸差応力～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=120\text{kPa}$) (LDT 上部、下部)

図 6-6-20 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係($\sigma_d=120\text{kPa}$) (LDT 上部、下部)

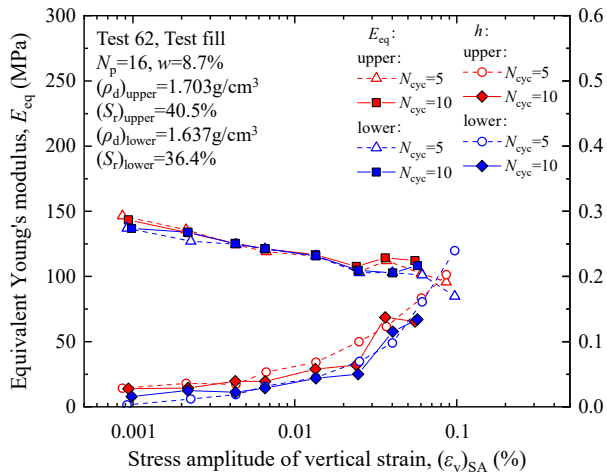


図 6-6-21 等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ～履歴減衰率関係 (LDT 上部、下部)

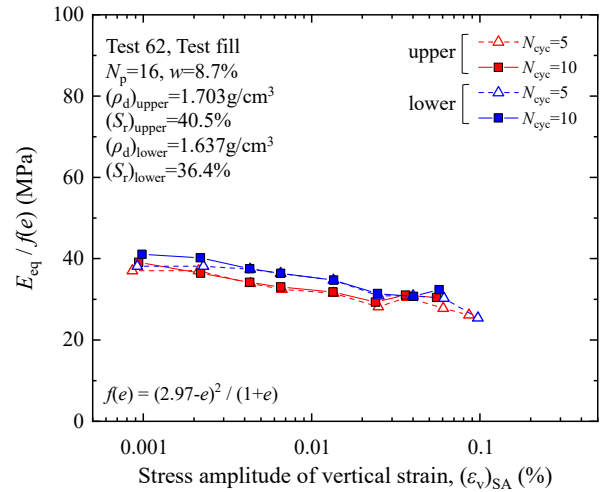


図 6-6-22 $E_{eq} / f(e)$ ～片振幅鉛直ひずみ関係 (LDT 上部、下部)

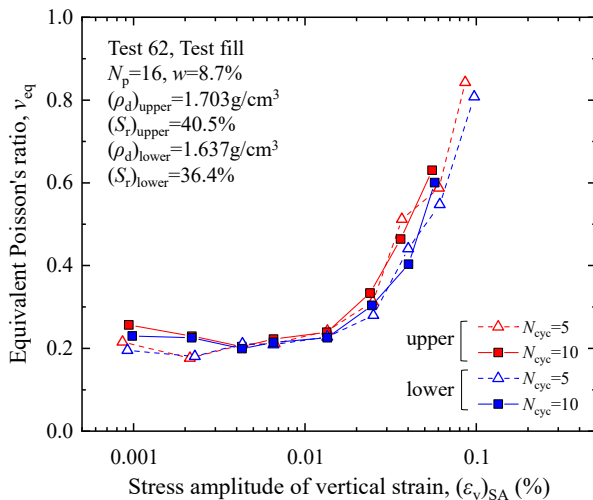


図 6-6-23 等価ポアソン比～片振幅鉛直ひずみ関係 (LDT 上部、下部)

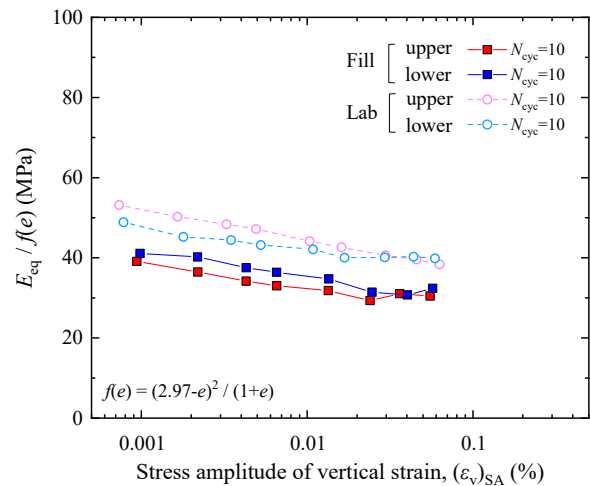


図 6-6-24 $E_{eq} / f(e)$ ～片振幅鉛直ひずみ関係 (試験盛土: 上部、下部、室内締固め: 上部、下部)

6.7 変形特性の鉛直深度分布に対する評価

前章では鉛直深度別に設置した局所変位計を用いて室内締固め供試体の鉛直深度方向の変形特性を評価した。本節では試験盛土供試体について同様の方法で鉛直深度方向の変形特性を評価する。試験盛土供試体はせん断破壊領域による局所的な剛性の低い箇所による供試体の非一様性も含まれる為、本節では図 6-2-1、図 6-2-2 で示した試験盛土供試体の割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率について、図 3-6-1 に示した供試体の鉛直深度分布について調べた。

6.7.1 鉛直深度別の変形特性評価

図 6-7-1 には、締固め機械通過回数 $N_p=4$ の試験盛土供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～割線ヤング率 E_{50} 関係を示す。全体的に割線ヤング率 E_{50} は下部が上部より大きく、上部と下部に差が確認される。供試体平均の飽和度は $S_r=20.5\%$ と 28.3% の比較的飽和度の低い供試体に比べて飽和度 $S_r=67.1\%$ の比較的飽和度の高い供試体は上部と下部の差がやや小さい。上端部の割線ヤング率 E_{50} は $E_{50}=8.3\text{MPa} \sim 19.4\text{MPa}$ で上部よりやや低く、下端部の割線ヤング率 E_{50} は $E_{50}=18.9\text{MPa} \sim 24.9\text{MPa}$ で下部よりやや低い。これは供試体上下端面にベディングエラーの影響が含まれている事が原因と考えられる。ベディングエラーの影響は上端部と下端部の両者に含まれるが、上端部と下端部では下端部の方が割線ヤング率 E_{50} はやや大きい。

図 6-7-2 には、締固め機械通過回数 $N_p=8, 12$ の試験盛土供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～割線ヤング率 E_{50} 関係を示す。供試体平均の飽和度は $S_r=18.2\%$ の比較的飽和度の低い供試体は割線ヤング率 E_{50} の上部と下部の差は $N_p=4$ の試験盛土供試体とほぼ同等である。また、供試体平均の飽和度が $S_r=54.5\%$ の比較的高い飽和度の供試体は上部に加えて下部の割線ヤング率 E_{50} も低く、上部と下部の差が小さい。上端部の割線ヤング率 E_{50} は $E_{50}=5.0\text{MPa}$ と 8.1MPa で上部より低い。下端部の割線ヤング率は $E_{50}=16.9\text{MPa}$ と 43.5MPa で下部より大きい。上端部はベディングエラーの影響が含まれている事が明らかであり、下端部はその影響が少なかったと考えられる。これについては室内締固め供試体についても同様の結果が確認されたが、これ以上詳しい理由は調べる事が出来なかった。

図 6-7-3 には、締固め機械通過回数 $N_p=16$ の試験盛土供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～割線ヤング率 E_{50} 関係を示す。全体的に割線ヤング率 E_{50} の上部と下部の差は $N_p=4$ の試験盛土供試体とほぼ同等である。これについて、図 4-3-23 で示した鉛直深度方向の乾燥密度分布と締固め機械の通過回数の関係を踏まえると、試験盛土供試体は室内締固め供試体と異なり、締固め機械の通過回数に依らず供試体鉛直深度方向の乾燥密度分布の程度がほぼ同等であり、妥当な結果であると考ええる。ただし、上部と下部の違いは飽和度の影響が強く現れている可能性があり、後に説明する。上端部の割線ヤング率は $E_{50}=7.3\text{MPa} \sim 20.9\text{MPa}$ で上部より低く、下端部の割線ヤング率は $E_{50}=24.3\text{MPa} \sim 43.1\text{MPa}$ で下部よりやや低い。これも上端部、下端部ともにベディングエラーの影響が含まれている事が考えられるが、下端部は上端部より割線ヤング率 E_{50} が大きく、また下部の割線ヤング率 E_{50} に比較的近い。

図 6-7-1～図 6-7-3 の傾向から、締固め機械の通過回数に関わらず試験盛土供試体の割線ヤング率 E_{50} は、高い飽和度の供試体を除いて上部と下部の差が大きい。また、供試体上端部はベディングエラーの影響を受け、締固めエネルギーに関わらず割線ヤング率が $E_{50}=5\text{MPa} \sim 25\text{MPa}$ 程度の範囲に留まっている。これに対して、供試体下端部はベディングエラーの影響を受けるが、供試体下部の割線ヤング率に近く $E_{50}=15\text{MPa} \sim 45\text{MPa}$ の範囲に分布している。ベディングエラーの影響を受ける上端部が締固め機械通過回数に関わらず、下端部に比べて小さい割線ヤング率 E_{50} を示すのは、供試体作製時の上端面の平滑処理に伴う軟らかい層の存在が理由と考えられ、これは図 5-7-1～図 5-7-3 に示した室内締固め供試体と共通する。

次に、全てのケースの供試体について、それぞれの割線ヤング率 E_{50} を供試体下部の割線ヤング率 E_{50} で正規化したデータ $E_{50} / (E_{50})_{\text{lower}}$ に着目し、締固め機械通過回数と飽和度別の割線ヤング率 E_{50} の鉛直深度分布について考察する。図 6-7-4 には、局所変位計 LDT80 の平均位置～ $E_{50} / (E_{50})_{\text{lower}}$ 関係を示す。供試体下部を基準に割線ヤング率 E_{50} を整理すると、全てのケースで供試体上部は供試体下部より小さい傾向が確認された。また、供試体平均の飽和度は供試体上部と下部の割線ヤング率 E_{50} の違いに与える影響が大きい事がわかる。比較的低い飽和度では供試体上部と下部の割線ヤング率 E_{50} の差が大きく、比較的高い飽和度では供試体上部と下部の割線ヤング率 E_{50} の差が小さい。

試験盛土供試体は鉛直深度方向に乾燥密度が小さくなる傾向である事と、図 6-7-4 に示す割線ヤング率 E_{50} の鉛直深度分布を考慮すると、供試体中央(盛土表面から深度 100mm)付近までが盛土表面付近のせん断破壊領域による低剛性範囲という事が示唆される。供試体下部がせん断破壊領域の影響を受けているかどうかは、次章に示す同等の局所乾燥密度条件の室内締固め供試体との変形特性比較により検討する。

図 6-7-5 には、締固め機械通過回数 $N_p=4$ の試験盛土供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～初期ヤング率関係を示す。全体的に初期ヤング率の上部と下部の差は小さいが、下部は上部よりやや高い値である。供試体平均の飽和度別に見ると、飽和度が比較的低い $S_r=20.5\%$ 、 28.3% の供試体の方が比較的高い $S_r=67.1\%$ の供試体に比べて上部と下部の初期ヤング率の差が大きい傾向であった。また、供試体上端部は $S_r=28.3\%$ の供試体を除き、上部よりやや小さい値を示している。これはベディングエラーの影響が考えられ、割線ヤング率 E_{50} で示した傾向と整合する。供試体下端部は下部よりやや低い。

図 6-7-6 には、締固め機械通過回数 $N_p=8, 12$ の試験盛土供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～初期ヤング率関係を示す。供試体平均の飽和度によって初期ヤング率の大きさは異なるが、飽和度が比較的高い $S_r=54.5\%$ の供試体は締固め機械通過回数 $N_p=4$ の試験盛土供試体と同様に上部と下部の差は小さい。一方で、飽和度が比較的高い $S_r=54.5\%$ の供試体、割線ヤング率 E_{50} のデータと異なり、供試体上部の初期ヤング率が下部よりやや大きいケースも確認された。供試体上端部は上部より小さい初期ヤング率を示している。また、供試体下端部も上端部程ではないが、下部より初期ヤング率がやや低い。

図 6-7-7 には、締固め機械通過回数 $N_p=16$ の試験盛土供試体の局所変位計 LDT80 の平均位置～初期ヤング率関係を示す。全体的に初期ヤング率の上部と下部の差は小さい。ただし、飽和度が比較的低い $S_r=20.1\%$ の供試体は上部と下部の初期ヤング率の差が比較的大きい。また、供試体平均の飽和度によって初期ヤング率の上部と下部の差の大きさは異なるが、締固め機械通過回数 $N_p=4$ の供試体と類似傾向であった。供試体上端部、下端部ともに、それぞれ上部と下部の初期ヤング率より低い。

図 6-7-5～図 6-7-7 の傾向から、締固め機械通過回数に関わらず供試体は上部と下部の初期ヤング率の差が目立った違いは見られなかった。初期ヤング率は微小ひずみ領域での測定であり、多少の計測誤差が含まれている事を勘案すると、供試体の上部と下部の差は割線ヤング率 E_{50} に比べて小さいと考えられる。また、供試体上端部と下端部はベディングエラーの影響を受け、上部と下部それぞれに比べて初期ヤング率はやや小さい。また、ベディングエラーの影響を受ける上端部が締固め機械の通過回数に関わらず、下端部に比べて特に小さい初期ヤング率を示すのは、割線ヤング率 E_{50} で示した理由と同様に、供試体作製時の上端面の平滑処理に伴う軟らかい層が存在する為であると考えられる。

次に、全てのケースの供試体について、それぞれの初期ヤング率を供試体下部の初期ヤング率で正規化したデータ $E_0 / (E_0)_{\text{lower}}$ に着目し、初期ヤング率の鉛直深度分布について考察する。図 6-7-8 には、局所変位計 LDT80 の平均位置～ $E_0 / (E_0)_{\text{lower}}$ 関係を示す。供試体下部を基準に初期ヤング率を整理すると、供試体上部と供試体下部の大小傾向は一定ではなく、ばらつきが確認される。供試体下端部は下部に比べてほぼ全てのケースで初期ヤング率が

小さい傾向を示している。供試体上端部も上部に比べてほぼ全てのケースで初期ヤング率が小さい傾向を示している。供試体の上部と下部の差については、図 6-2-40 でも説明したが比較的飽和度が低いほど上部と下部の差はやや大きく、飽和度が高くなるとその差は小さい。上部が下部よりやや大きいケースも確認されるが、試験盛土供試体は上部の方が下部より乾燥密度が大きい事を考慮すれば初期ヤング率が供試体下部より上部が大きい事は妥当である。図 6-7-4 で示した試験盛土表面から供試体中央(盛土表面から深度 100mm)付近までが盛土表面付近のせん断破壊領域による低剛性範囲である事を仮定すると、比較的飽和度が低い供試体を除き、鉛直ひずみレベルの小さい初期ヤング率はせん断破壊領域の影響が割線ヤング率 E_{50} に比べて小さいという事が示唆される。また、試験盛土供試体の初期ヤング率にも供試体端面のベディングエラーの影響は含まれる事を確認し、初期ヤング率の鉛直深度分布を評価する事が出来たと考える。

6.7.2 飽和度の影響を考慮した鉛直深度別の变形特性

強度変形特性と乾燥密度の関係には飽和度の影響がある事は 6.2 節に示している。本節では、先に示した供試体上端部と下端部を含めた供試体の局所的な割線ヤング率 E_{50} と初期ヤング率に与える飽和度の影響について考察する。

図 6-7-9 には、供試体上部と下部に対し、式 5-2-12 で示した $fE_{50}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係を示す。後に示す供試体上端部と下端部の局所的な乾燥密度や飽和度を測定していない事を理由に、図 6-7-9 では供試体平均の乾燥密度と飽和度を用いて整理している。供試体上部と下部を局所的な飽和度を用いて整理した図 6-2-53 とはこの点で異なる。供試体平均の飽和度で整理すると供試体上部の $fE_{50}(S_r)$ は下部より低い値を示している。特に飽和度が比較的低い範囲では上部と下部の差が大きくなる。図 6-7-10 には、さらに供試体上端部と下端部を加えた $fE_{50}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係を示す。供試体上端部の $fE_{50}(S_r)$ は、同じ飽和度の上部、下部に比べて著しく低い値を示す。この差は低い飽和度範囲の方が顕著に現れている。また、供試体下端部は同じ飽和度の下部に比べてやや低い値であった。

図 6-7-11 には、供試体上部と下部に対し、式 5-2-6 で示した $fE_0(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係を示す。この図も供試体上部と下部を局所的な乾燥密度と飽和度を用いて整理した図 6-2-45 と比べ、供試体平均の飽和度を用いて整理している点で異なる。供試体平均の飽和度で整理しても供試体上部と下部はほぼ同等の値を示した。ただし、比較的低い飽和度では上部と下部の差がやや現れている。図 6-7-12 には、さらに供試体上端部と下端部を加えた $fE_0(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係を示す。供試体上端部の $fE_0(S_r)$ は、同じ飽和度の上部、下部に比べて低い値を示す。また、この差は低い飽和度範囲の方が顕著に現れている。また、供試体下端部は同じ飽和度の下部に比べてほぼ同等か、やや低い値であった。

以上より、試験盛土供試体の割線ヤング率 E_{50} は鉛直深度分布が明確に確認され、上層より下層の方が割線ヤング率 E_{50} は大きい傾向が確認された。供試体の鉛直深度方向の乾燥密度分布を考慮すると、上層と下層の割線ヤング率 E_{50} の大小関係と整合しない。この点は室内締固め供試体と異なり、試験盛土供試体の割線ヤング率 E_{50} の鉛直深度分布を考慮すると、供試体中央(盛土表面から深度 100mm)付近までが盛土表面付近のせん断破壊領域による低剛性範囲という事が示唆された。試験盛土供試体下部がせん断破壊領域であるかどうかは、同じ乾燥密度、飽和度条件の室内締固め供試体と比較しながら次章で検討する。初期ヤング率は上層と下層の違いに一定の傾向が見られなかった事からその差は小さい事が確認され、この結果はせん断破壊領域の影響が割線ヤング率 E_{50} に比べて小さい事が示唆している事を述べた。ただし、割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率ともに供試体端面を含む計測にはベディングエラーの影響が含まれる事がわかった。室内締固め供試体と同様に長さ $l=80\text{mm}$ の小型の局所変位計 LDT80 を用いて、高さ $h=200\text{mm}$ の供試体の局所変位を測定したが、乾燥密度や飽和度に加え、せん断破壊領域

の影響範囲について鉛直深度方向分布を詳細に調べる為には、ベディングエラーの影響範囲を避けながら局所変位計の小型化や変位測定位置の計画等を実施する必要がある。

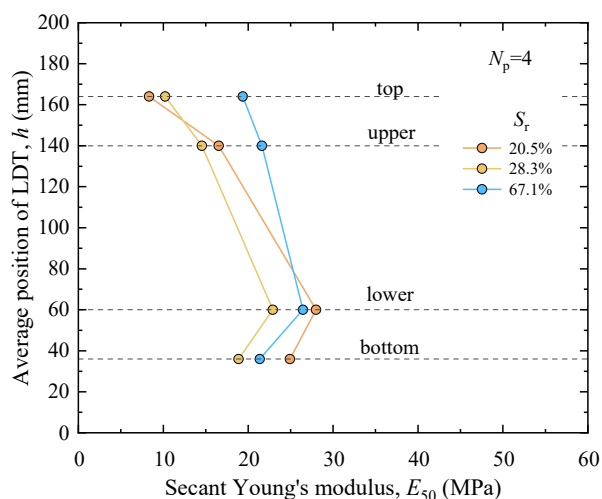


図 6-7-1 LDT 平均位置～割線ヤング率関係
(締固機械通過回数 $N_p=4$)

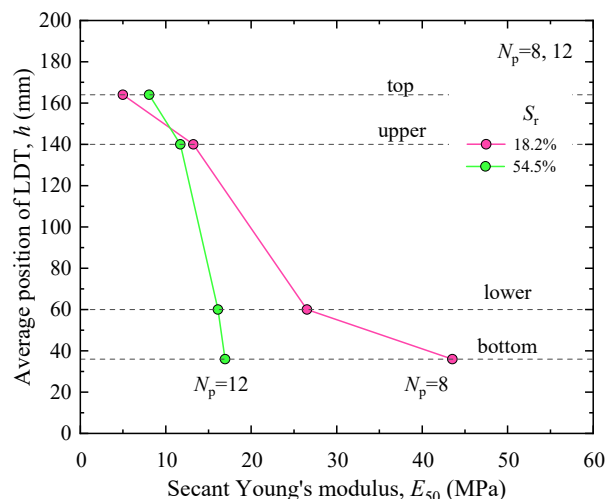


図 6-7-2 LDT 平均位置～割線ヤング率関係
(締固機械通過回数 $N_p=8, 12$)

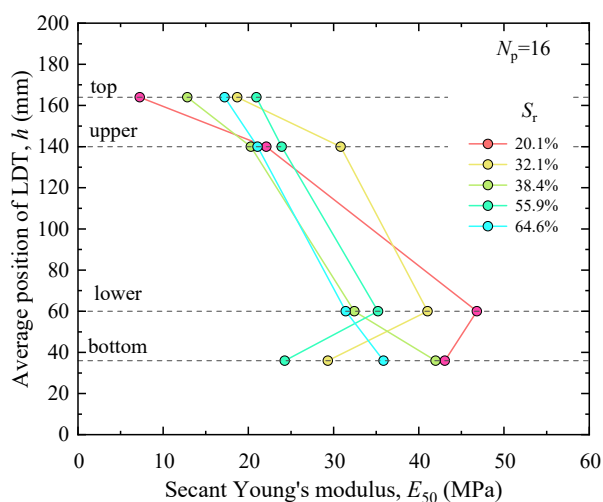


図 6-7-3 LDT 平均位置～割線ヤング率関係
(締固機械通過回数 $N_p=16$)

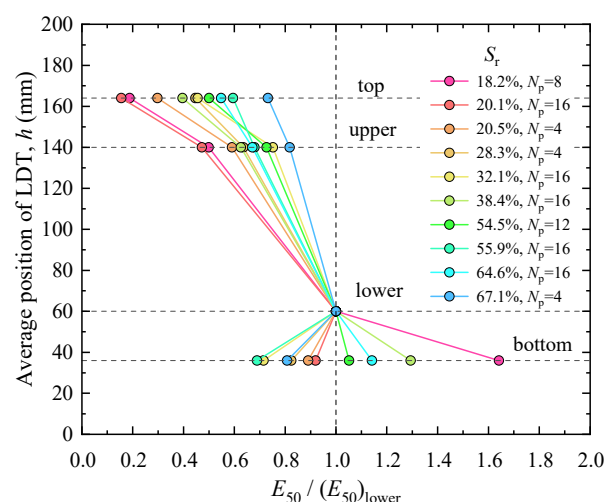


図 6-7-4 LDT 平均位置～ $E_{50}/(E_{50})_{lower}$ 関係

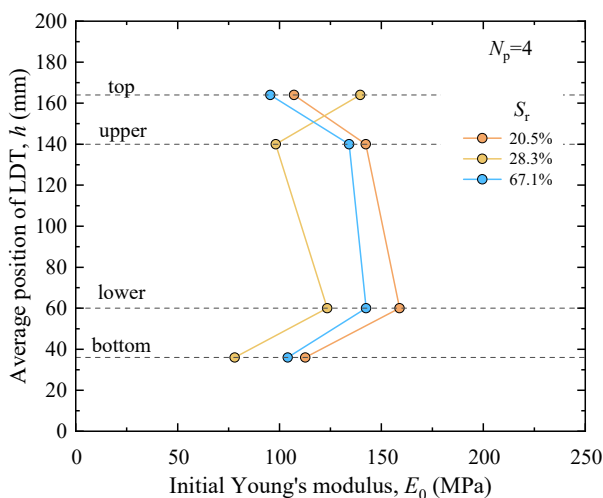


図 6-7-5 LDT 平均位置～初期ヤング率関係
(締固機械通過回数 $N_p=4$)

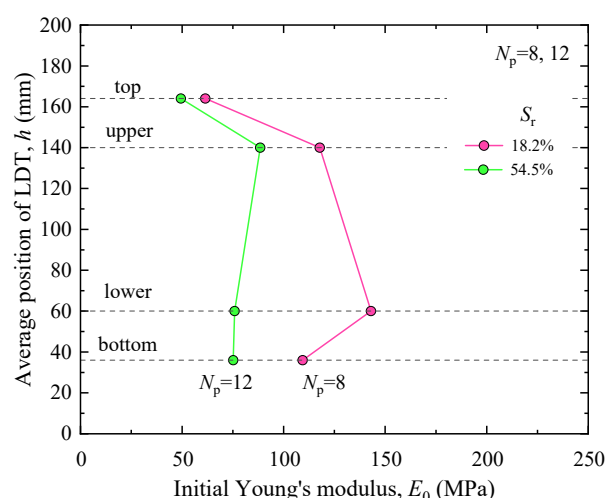


図 6-7-6 LDT 平均位置～初期ヤング率関係
(締固機械通過回数 $N_p=8, 12$)

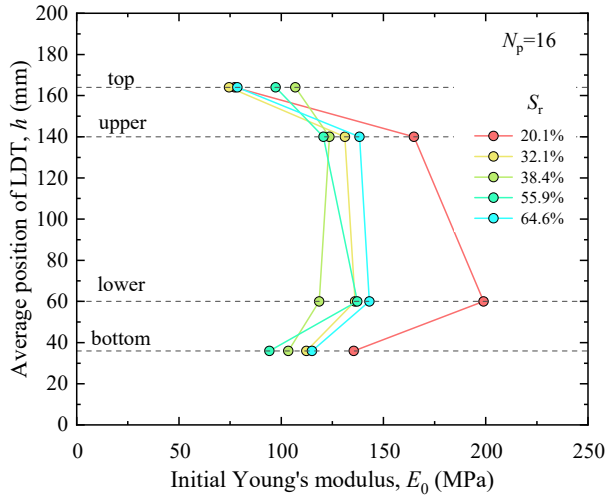


図 6-7-7 LDT 平均位置～初期ヤング率関係
(締固機械通過回数 $N_p=16$)

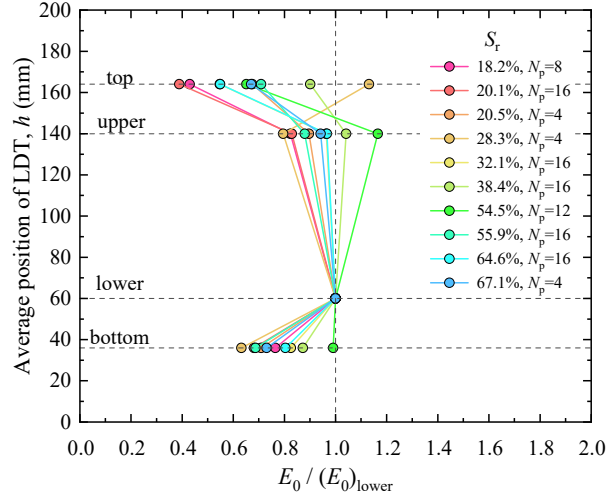


図 6-7-8 LDT 平均位置～ $E_0/(E_0)_{\text{lower}}$ 関係

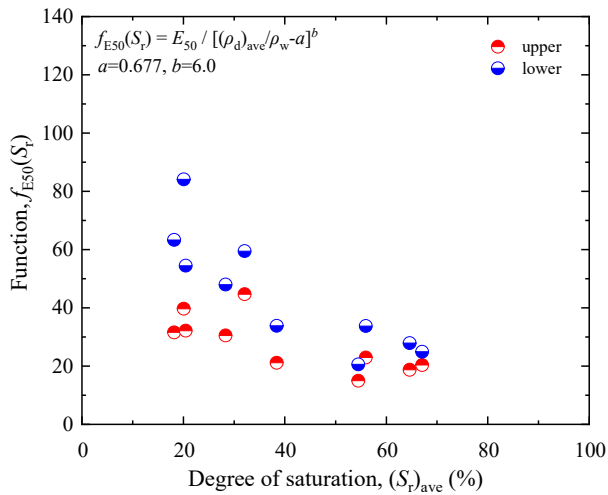


図 6-7-9 $f_{E50}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係
(上部、下部) ($a=0.677, b=6.0$)

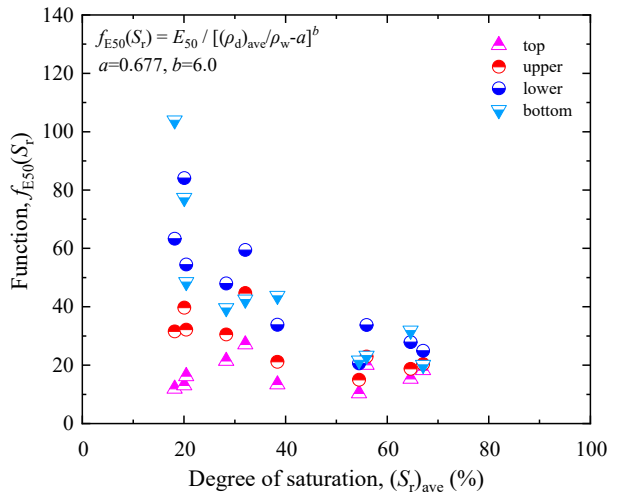


図 6-7-10 $f_{E50}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係
(上端部、上部、下部、下端部) ($a=0.677, b=6.0$)

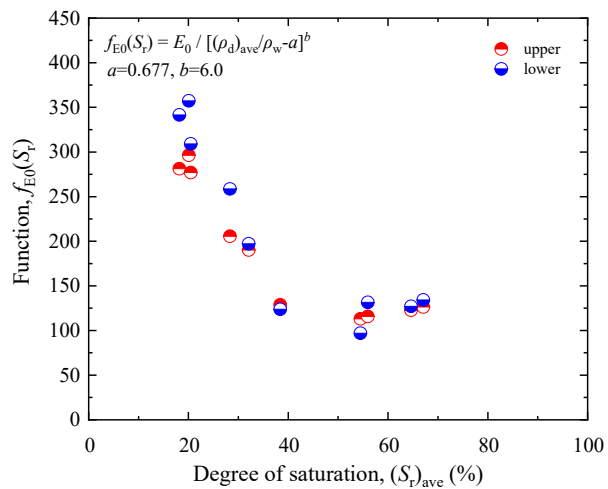


図 6-7-11 $f_{E0}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係
(上部、下部) ($a=0.677, b=6.0$)

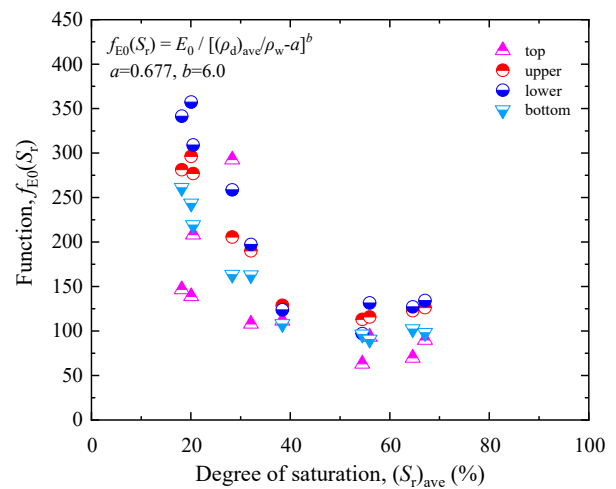


図 6-7-12 $f_{E0}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係
(上端部、上部、下部、下端部) ($a=0.677, b=6.0$)

6.8 締固め層から上下別に採取した小型供試体の強度変形特性

これまで試験盛土の締固め層全てから採取した 1 つの試験盛土供試体について、非一様性を考慮しながら物理特性と強度変形特性の関係について調べてきた。その結果、試験盛土は上層が下層より乾燥密度が高い一方で、飽和度の影響は受けるが上層の方が下層よりピーク強度までの剛性が低い事を確認した。これまで示した LDT80 を用いた中型供試体($\phi 100\text{mm} \times h 200\text{mm}$)の中型三軸圧縮試験では、供試体の局所的な変形挙動は測定できるが、ロードセルが一つである為、上層と下層それぞれの強度変形特性を把握する事はできない。そこで、図 3-2-10 に示すように締固め層の上層と下層から別個に採取した小型供試体($\phi 50\text{mm} \times h 100\text{mm}$)を用いた小型三軸圧縮試験を実施した。なお、締固め層の上部と下部から別個に採取した小型供試体にも多少の鉛直深度方向の非一様性が残る事に留意が必要である。

6.8.1 締固め層上部と下部の応力～ひずみ関係

図 6-8-1 には、試験盛土上層と下層から別個に採取した小型供試体の乾燥密度～含水比関係と図 6-2-1 に示した中型供試体の乾燥密度～含水比関係、 $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ 及び $4.5E_c$ の締固め曲線を示す。また、図 6-8-2 には、同じく供試体の乾燥密度～飽和度関係を整理している。両図には同じ試験盛土ケースで作製した締固め層上部と下部は実線で結んでいる。同じ試験盛土ケースでは、締固め層上部の乾燥密度が下部より大きく乾燥密度分布が確認された。また、 $S_r=60\%$ 付近の供試体を除き、締固め層上部と下部の含水比はほぼ等しく、飽和度分布が確認された。これは、図 4-3-17、図 4-3-18 で示した試験盛土供試体の乾燥密度と飽和度の分布傾向と整合する。また、小型供試体は全て締固め機械通過回数 $N_p=16$ であり、同じ締固め機械通過回数の中型供試体の乾燥密度の上下分布と傾向が類似する。

典型的な試験結果の例として、同じ試験盛土ケースの締固め層上部と下部の軸差応力～鉛直ひずみ関係を以下に示す。3.2 でも述べたが小型三軸圧縮試験は水平変位を測定していない為、供試体自立時から載荷過程まで供試体断面積は一定と仮定して軸差応力を算定している。

- (1) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、締固め層上部は乾燥密度 $\rho_d=1.740\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=12.4\%$ 、飽和度 $S_r=61.2\%$ 、締固め層下部は乾燥密度 $\rho_d=1.668\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=14.1\%$ 、飽和度 $S_r=62.0\%$ の供試体の試験結果

供試体は水平基底応力 $\sigma_{\text{hnet}}=50\text{kPa}$ 、圧密排気・排水条件で載荷している。図 6-8-3 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみを示している。締固め層上部供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=6\%$ 付近でピークを迎え、最大軸差応力は $q_{\text{max}}=301.4\text{kPa}$ である。その一方で、締固め層下部供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=4\%$ 付近でピークを迎え、最大軸差応力は $q_{\text{max}}=240.1\text{kPa}$ である。ピークに達するまでの剛性は締固め層上部より下部の方が大きく、中型供試体で測定した上部と下部の挙動と類似する。また、締固め層上部は下部より最大軸差応力が大きく、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=3\%$ 付近で締固め層上部と下部の軸差応力の大小関係が逆転している。締固め層上部が下部より最大軸差応力が大きい事は、乾燥密度の大小関係と整合する。

図 6-8-4 は、LDT による供試体端面を除く供試体の軸差応力～鉛直ひずみ関係を示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ 付近には締固め層上部と下部の軸差応力の差が明確に現れており、締固め層下部が上部より大きい。中型三軸圧縮試験では、 $\varepsilon_v=1.4\%$ 付近で供試体上部の軸差応力が下部と同等になる事が観測されたが、この段階では同等にはならなかった。

- (2) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、締固め層上部は乾燥密度 $\rho_d=1.685\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=7.8\%$ 、飽和度 $S_r=35.2\%$ 、締

固め層下部は乾燥密度 $\rho_d=1.557\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=6.0\%$ 、飽和度 $S_r=22.2\%$ の供試体の締固め試験結果

図 6-8-5 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみを示している。締固め層上部供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=6\%$ 付近でピークを迎え、最大軸差応力は $q_{\max}=335.7\text{kPa}$ である。その一方で、締固め層下部供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=3\%$ 付近でピークを迎え、最大軸差応力は $q_{\max}=309.7\text{kPa}$ である。ピークに達するまでの剛性は締固め層上部より下部の方が大きく、中型供試体で測定した上部と下部の挙動と類似する。また、締固め層上部は下部より最大軸差応力が大きく、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=4\%$ 付近で締固め層上部と下部の軸差応力の大小関係が逆転している。締固め層上部が下部より最大軸差応力が大きい事は、乾燥密度の大小関係と整合する。

図 6-8-6 は、LDT による供試体端面を除く供試体の軸差応力～鉛直ひずみ関係を示す。載荷初期から締固め層上部と下部の軸差応力の差が明確に現れており、締固め層下部が上部より大きい。中型三軸圧縮試験では $\varepsilon_v=1.4\%$ 付近で供試体上部の軸差応力が下部と同等になる事が観測されたが、この段階では同等にはならなかった。

6.8.2 締固め層上部と下部の強度変形特性～乾燥密度関係

図 6-8-7 は、小型供試体の締固め層上部と下部の最大軸差応力～乾燥密度関係を示す。また、図中には図 6-2-32 に示した中型供試体下部の最大軸差応力～乾燥密度関係も示している。全てのケースで、乾燥密度が大きい締固め層上部は下部より最大軸差応力は大きい。また、供試体の飽和度によってばらつきはあるが、飽和度別に見ると、中型供試体下部の最大軸差応力～乾燥密度関係と整合する事がわかる。

鉛直深度方向に非一様な締固め層上部と下部を有する中型供試体の最大軸差応力を求めると、局所乾燥密度の低い下部が先行破壊する為、供試体下部の局所乾燥密度で最大軸差応力が決定する事は先述した。小型供試体は中型三軸圧縮試験で先行破壊する下部を排除して締固め層上部の最大軸差応力を求めた事になる。すなわち、試験盛土表面のせん断破壊領域の影響を受ける締固め層上部は、軸差応力がピークとなる鉛直ひずみが下部に比べて大きい為、中型三軸圧縮試験で観測できなかったが、鉛直ひずみが大きくなると局所乾燥密度に応じた高い軸差応力を示す。また、締固め層上部の最大軸差応力は飽和度の影響を考慮すれば締固め層下部と中型供試体下部を含めた乾燥密度との間に一義的な関係を示している。

図 6-8-8 には、小型供試体の締固め層上部と下部の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係を示す。全てのケースで、締固め層上部は下部より割線ヤング率 E_{50} が小さい。また、供試体の飽和度によってばらつきはあるが、図 6-2-48 に示した中型供試体の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係と整合する。

図 6-8-9 には、小型供試体の締固め層上部の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係を示す。また、図 6-2-48 に示した中型供試体上部の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係も併せて示している。飽和度の影響がある為ばらつきはあるが、中型供試体の測定データと整合する。

図 6-8-10 には、小型供試体の締固め層下部の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係を示す。また、図 6-2-48 に示した中型供試体下部の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係も併せて示している。締固め層上部と同様に、飽和度の影響がある為ばらつきはあるが、中型供試体の測定データと整合する。

図 6-8-11 には、小型供試体の締固め層上部と下部の初期ヤング率～乾燥密度関係を示す。1 点測定出来なかったデータがあるが、残る全てのケースで締固め層上部は下部より初期ヤング率が小さい。また、供試体の飽和度によってばらつきはあるが、図 6-2-40 に示した中型供試体の初期ヤング率～乾燥密度関係と整合する。

図 6-8-12 には、小型供試体の締固め層上部の初期ヤング率～乾燥密度関係を示す。また、図 6-2-40 に示した中型供試体上部の初期ヤング率～乾燥密度関係も併せて示している。飽和度の影響がある為ばらつきはあるが、中型供試体の測定データと整合する。

図 6-8-13 には、小型供試体の締固め層下部の初期ヤング率～乾燥密度関係を示す。また、図 6-2-40 に示した中型供試体下部の初期ヤング率～乾燥密度関係も併せて示している。飽和度 $S_r=17.2\%$ の供試体は同等の乾燥密度の供試体と比べて初期ヤング率がやや大きい、その他は締固め層上部と同様に、飽和度の影響がある為ばらつきはあるが、中型供試体の測定データと整合する。

6.8.3 締固め層上部と下部の強度変形特性に与える飽和度の影響

図 6-8-14 は、締固め層上部と下部の飽和度の関数 f_{qmax} ～飽和度関係を示す。また、図中には図 6-2-38 に示した中型供試体下部の飽和度の関数 f_{qmax} ～飽和度関係を併せて示す。飽和度の関数 f_{qmax} に与える飽和度の影響は締固め層上部と下部でほぼ同等であり、飽和度が大きくなると飽和度の関数 f_{qmax} は低下する。また、中型供試体下部と比較してもほぼ同等の傾向である事が分かる。

図 6-8-15 は、締固め層上部と下部の飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係を示す。また、図中には図 6-2-53 に示した中型供試体上部と下部の飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係を併せて示す。飽和度の関数 f_{E50} に与える飽和度の影響は締固め層上部と下部で異なり、下部が大きい。また、上部と下部ともに飽和度が大きくなると飽和度の関数 f_{E50} は低下する。さらに、中型供試体と比較しても、上部と下部それぞれほぼ同等の傾向である事が分かる。

図 6-8-16 は、締固め層上部と下部の飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係を示す。また、図中には図 6-2-45 に示した中型供試体上部と下部の飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係を併せて示す。飽和度の関数 f_{E0} に与える飽和度の影響は締固め層上部と下部で異なり、下部がやや大きい。また、上部と下部ともに飽和度が大きくなると飽和度の関数 f_{E0} は低下する。さらに、中型供試体と比較しても、上部と下部それぞれほぼ同等の傾向である事が分かる。

以上より、中型供試体では局所乾燥密度の小さい下部が先行破壊する為観測できなかったが、試験盛土層上部と下部から別個に採取した小型供試体の強度特性をそれぞれ調べた結果、供試体乾燥密度の大きい上部は最大軸差応力が大きく、その傾向は飽和度の影響を受けるが中型供試体下部の最大軸差応力～局所乾燥密度関係と類似する事を確認した。また、締固め層上部と下部から別個に採取した小型供試体の割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率は、中型供試体の鉛直深度方向別に設置した局所変位計を用いて測定した変形特性と整合する事を確認し、中型供試体で測定した局所的な変形特性評価が妥当である事を示した。さらに、中型供試体と小型供試体の変形特性評価の間に大きな矛盾も無い事から、3.2 に示した供試体採取方法による乱れの影響等が供試体の変形特性に与える影響は殆ど無いと考えられる。これらの事から試験盛土供試体の上層は締固め時のせん断破壊領域の影響により載荷過程で低剛性挙動を示すが、鉛直ひずみの進行に伴い一様化する事で高い強度特性を有している事を示した。

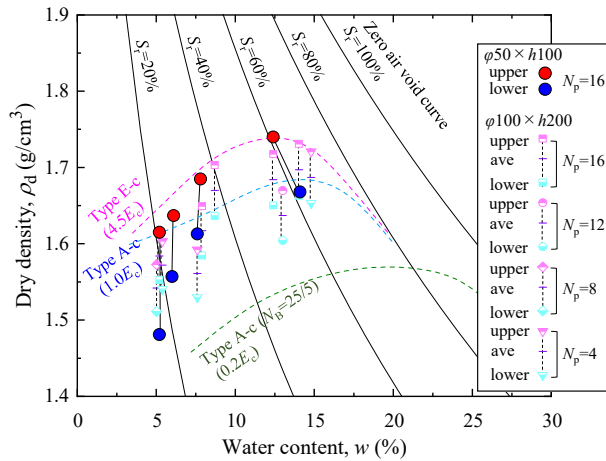


図 6-8-1 三軸試験供試体の乾燥密度～含水比関係

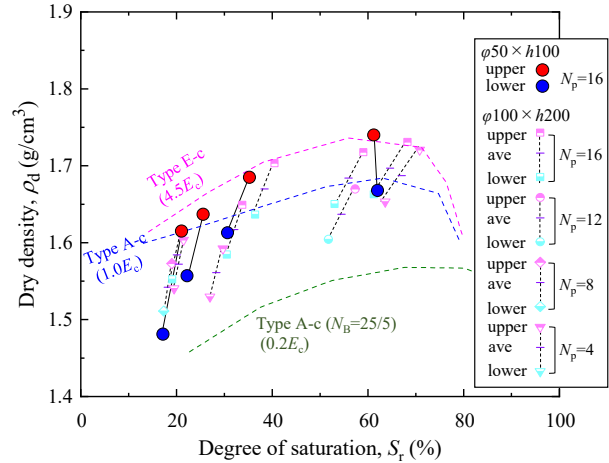


図 6-8-2 三軸試験供試体の乾燥密度～飽和度関係

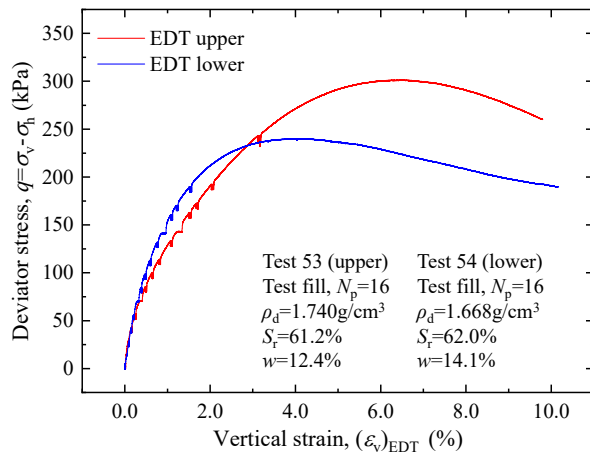


図 6-8-3 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

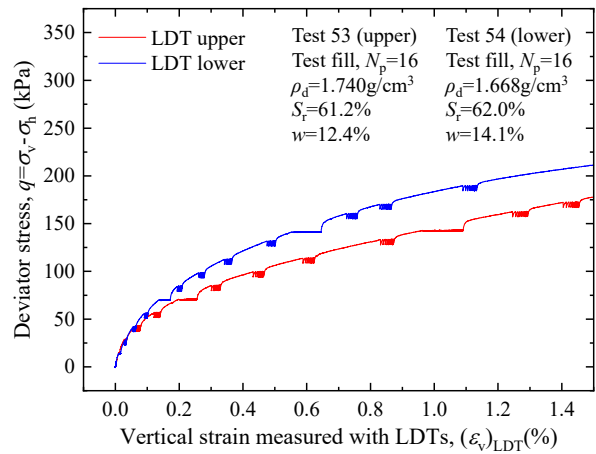


図 6-8-4 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

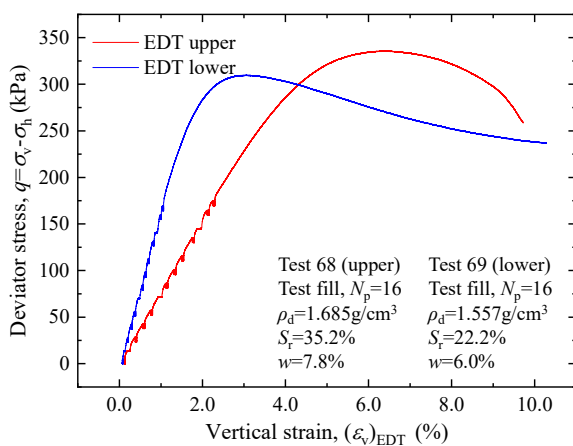


図 6-8-5 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

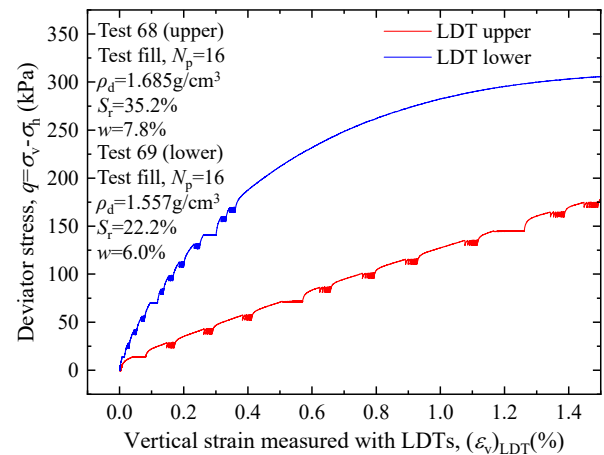


図 6-8-6 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

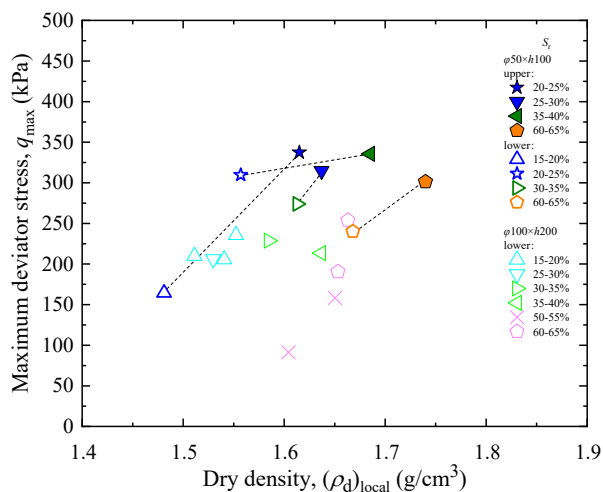


図 6-8-7 最大軸差応力～乾燥密度関係
(小型:上部、下部、中型:下部)

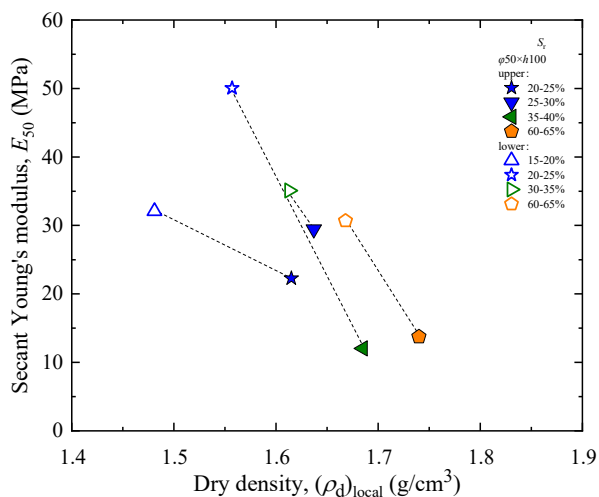


図 6-8-8 割線ヤング率～乾燥密度関係
(小型:上部、下部)

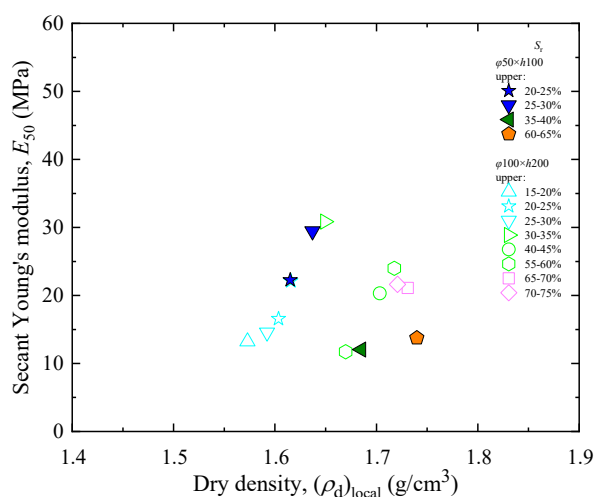


図 6-8-9 割線ヤング率～乾燥密度関係
(小型:上部、中型:上部)

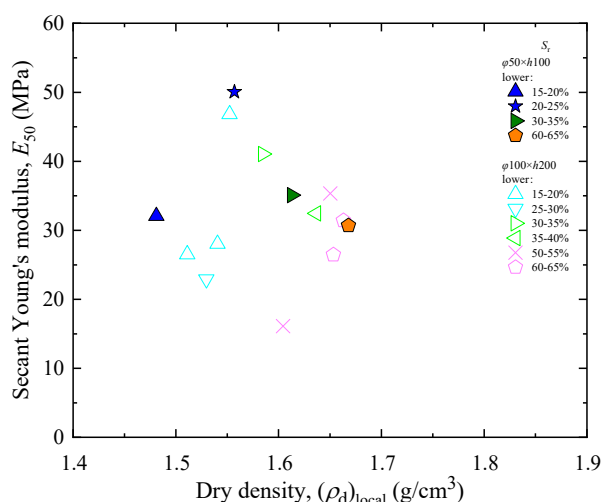


図 6-8-10 割線ヤング率～乾燥密度関係
(小型:下部、中型:下部)

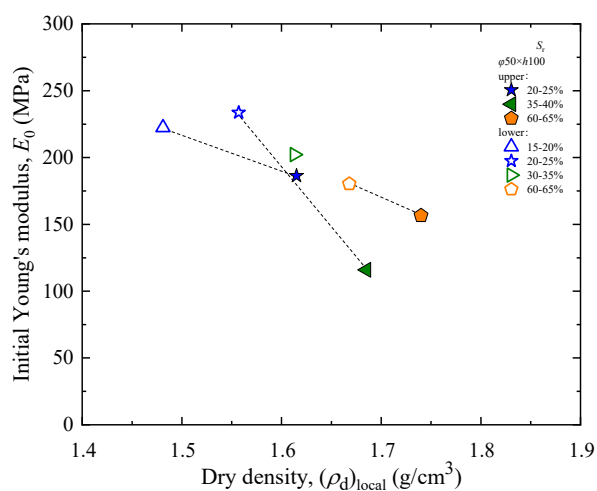


図 6-8-11 初期ヤング率～乾燥密度関係
(小型:上部、下部)

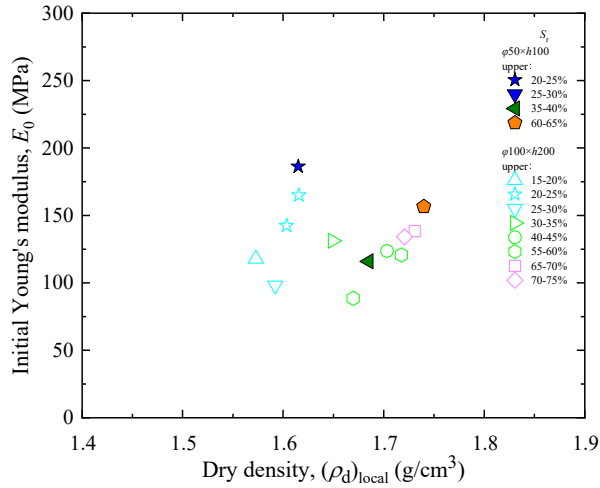


図 6-8-12 初期ヤング率～乾燥密度関係
(小型:上部、中型:上部)

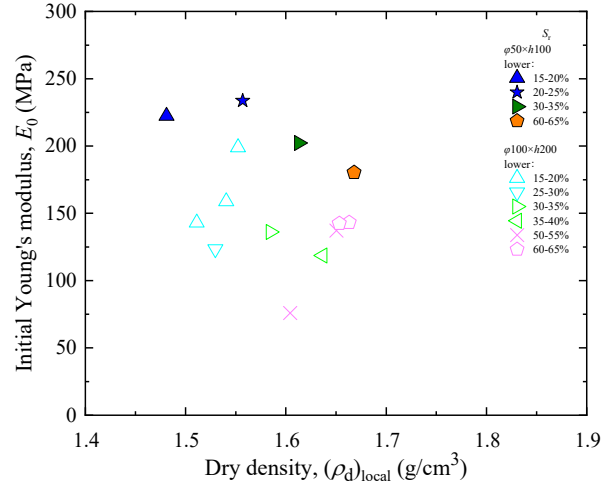


図 6-8-13 初期ヤング率～乾燥密度関係
(小型:下部、中型:下部)

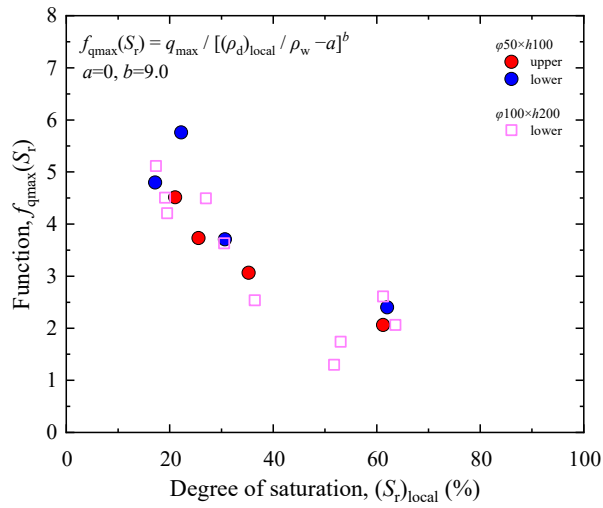


図 6-8-14 $f_{qmax}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係
(小型:上部、下部、中型:下部) ($a=0, b=9.0$)

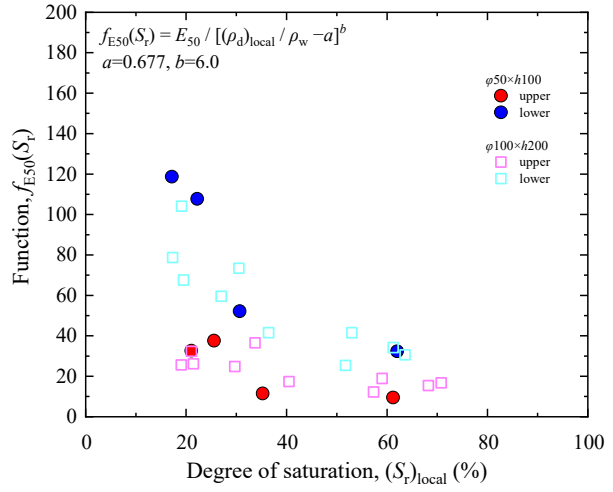


図 6-8-15 $f_{E50}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係
(小型:上部、下部、中型:上部、下部) ($a=0.677, b=6.0$)

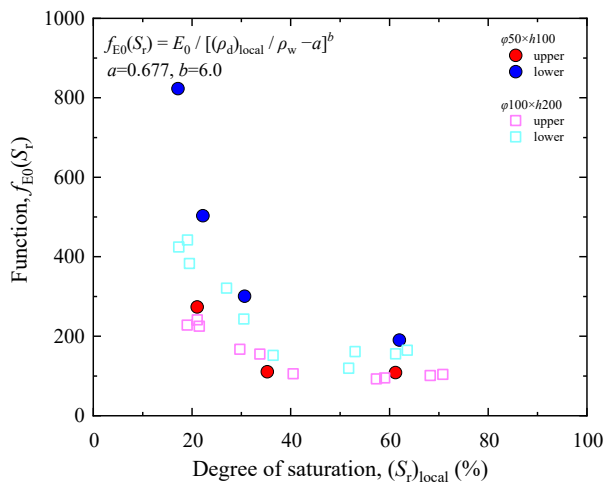


図 6-8-16 $f_{E0}(S_r) \sim$ 供試体平均の飽和度関係
(小型:上部、下部、中型:上部、下部) ($a=0.677, b=6.0$)

6.9 飽和化した供試体の強度変形特性

ここまで不飽和供試体は締固め時の乾燥密度に加え、締固め時の飽和度の影響を受けており、同じ乾燥密度では飽和度が低い供試体の方が最大軸差応力、割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率は高い値を示す事を説明してきた。これには、初期サクシオンによる残留有効応力の影響が考えられる。一般に設計で用いられる強度定数や変形係数は締め固めた供試体にサクシオンが生じないよう飽和三軸圧縮試験から設定される事が多い為、室内三軸試験で求められる、例えば初期ヤング率のような地盤剛性指標が現場で求められたとしても、設計値と直接比較するには締め固めた土の供試体の飽和化が与える強度変形特性への影響を明らかにする必要がある。そこで、本節では中型及び小型の試験盛土供試体を飽和化し、不飽和供試体と強度変形特性を比較する。

6.9.1 飽和化した供試体の応力～ひずみ関係

図 6-9-1 には、三軸試験に用いた試験盛土供試体の乾燥密度～含水比関係を示す。供試体は小型供試体 ($\phi 50\text{mm} \times h 100\text{ mm}$) 及び中型供試体 ($\phi 100\text{mm} \times h 200\text{ mm}$) である。中型供試体は同じ供試体の上部と下部で対となる局所乾燥密度の二つのデータを破線で結んでいる。また、いずれの供試体も締固め機械通過回数は $N_p=16$ である。図 6-9-2 には、同じ供試体を乾燥密度～飽和度関係に整理している。両図に示す乾燥密度、含水比、飽和度の供試体にはそれぞれ、平均値に加えて上部及び下部の局所的な値を示している。

以下に典型的な試験結果の例を示す。

- (1) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、締固め時の乾燥密度 $\rho_d=1.615\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=11.9\%$ 、飽和度 $S_r=48.2\%$ の中型供試体の試験結果

供試体は水平有効応力 $\sigma'_h=50\text{kPa}$ 、圧密排水条件で載荷している。図 6-9-3 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみと LDT による供試体端面を除く供試体の平均の鉛直ひずみを示している。EDT と LDT では供試体端面のベディングエラーの影響や試験装置の変形等のシステムコンプライアンスにより、応力～ひずみ関係に違いが生じているが、測定範囲において両者の鉛直ひずみの差は最大で 0.5% 程度であった。EDT で測定した応力～ひずみ関係では鉛直ひずみ $\varepsilon_v=4\%$ 付近でピークを迎えている。この供試体の最大軸差応力は $q_{\max}=213.5\text{kPa}$ であった。

図 6-9-4 は、供試体の上部と下部に設置した LDT80 により測定した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。LDT80 の配置は図 3-2-11 に示した通りである。供試体上部の割線ヤング率 E_{50} は $E_{50}=16.8\text{MPa}$ 、供試体下部は $E_{50}=28.0\text{MPa}$ であり、供試体下部の方が上部より剛性が大きい。この応力～ひずみ関係における供試体上部と下部の剛性の大小関係は、6.2.1 にも示した不飽和供試体の三軸圧縮試験結果と同じ傾向である。供試体上部の低剛性挙動には現場締固め時のせん断破壊領域の影響が示唆されるが、飽和化した供試体もこの影響が残っている事がわかる。この傾向を定量的に示す為に他の締固め条件の供試体の三軸圧縮試験結果と併せ、初期ヤング率や割線ヤング率 E_{50} を用いて後で評価する。また、局所乾燥密度が大きい供試体上部は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ 付近において局所乾燥密度が小さい供試体下部より軸差応力が小さいが、鉛直ひずみの進行とともに軸差応力は増加し、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.4\%$ 付近において供試体下部と軸差応力が同等になっている。

次に体積ひずみ～鉛直ひずみ関係について、載荷初期は上部と下部ともに体積ひずみは収縮傾向を示すが、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.2\%$ 付近で膨張傾向に転じている。また、最大体積圧縮ひずみは供試体の上部が下部に比べてやや大きい。これも不飽和供試体の上部と下部の大小関係と同じ傾向である。

(2) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、締固め時の乾燥密度 $\rho_d=1.685\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=7.8\%$ 、飽和度 $S_r=35.2\%$ の締固め層上部の不飽和供試体と、締固め時の乾燥密度 $\rho_d=1.681\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=9.5\%$ 、飽和度 $S_r=42.7\%$ の締固め層上部の飽和化した供試体の試験結果

図 6-9-5 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみを示している。締固め層上部の不飽和供試体は図 6-8-5 に示したものである。締固め層上部の飽和化した供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=7\%$ 付近でピークを迎え、最大軸差応力は $q_{\max}=312.6\text{kPa}$ であり、類似する締固め条件の不飽和供試体に比べてわずかに小さい程度である。

図 6-9-6 は、LDT による供試体端面を除く供試体の軸差応力～鉛直ひずみ関係を示す。不飽和供試体の割線ヤング率 E_{50} は $E_{50}=12.0\text{MPa}$ であるのに対し、飽和化した供試体の割線ヤング率 E_{50} は $E_{50}=11.5\text{MPa}$ であり、ほぼ同等である。割線ヤング率に関しても、飽和化した供試体は類似する締固め条件の不飽和供試体に比べてわずかに小さい程度である。

6.9.2 飽和化した供試体の強度変形特性～乾燥密度関係

図 6-9-7 は、中型供試体の下部及び小型供試体の締固め層上部と下部それぞれ飽和化した供試体の最大軸差応力～乾燥密度関係を示す。小型供試体の締固め層上部はせん断破壊領域の影響は受けるが、鉛直ひずみの進行とともに一様化し、最大軸差応力に与える影響は殆どない事は図 6-8-7、図 6-8-14 で示している。この事から飽和化した小型供試体の締固め層上部の結果を図 6-9-7 内に含める事とした。全てのケースで、乾燥密度が大きい締固め層上部は下部より最大軸差応力が大きい。また、供試体の飽和度は $S_r=10\%\sim 70\%$ の範囲であるが、飽和度によるばらつきは比較的小さい。飽和度の影響については、不飽和供試体の結果と後で詳しく比較する。

図 6-9-8 には、中型供試体の上部及び下部、小型供試体の締固め層上部と下部それぞれ飽和化した供試体の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係を示す。全体的に締固め層上部は下部より割線ヤング率 E_{50} が小さく、図 6-8-8 で示した不飽和供試体の傾向と類似する。

図 6-9-9 には、中型供試体の上部及び下部、小型供試体の締固め層上部と下部それぞれ飽和化した供試体の初期ヤング率～乾燥密度関係を示す。中型供試体の上部と下部の初期ヤング率の差は、割線ヤング率に比べて非常に小さい。締固め層下部の小型供試体で乾燥密度 $\rho_d=1.530\text{g/cm}^3$ 、飽和度 $S_r=24.0\%$ で著しく大きいデータが確認されたが、この理由について詳しくはわからなかった。後に示す図においても他のデータの傾向と異なる為、考察には注意が必要である。

飽和化した中型供試体は、試験方法の影響で間隙圧係数 B が小さい事は 3.5 で説明したが、排水試験であった事もあり間隙圧係数 B の高い小型供試体との違いは殆ど見られない事を確認した。

6.9.3 飽和化した供試体の強度変形特性に与える締固め時の飽和度の影響

図 6-9-10 は、中型供試体の下部及び小型供試体の締固め層上部と下部それぞれ飽和化した供試体の飽和度の関数 $f_{q_{\max}}$ ～締固め時の飽和度関係を示す。また、図中には図 5-2-38、図 6-8-14 に示した室内及び現場で締め固めた不飽和供試体の飽和度の関数 $f_{q_{\max}}$ ～飽和度関係を併せて示している。飽和化した供試体の飽和度の関数 $f_{q_{\max}}$ に与える締固め時の飽和度の影響は、不飽和供試体の関係に比べて締固め時の飽和度 $S_r=10\%\sim 30\%$ の範囲において、やや小さく、20%程度低下する傾向である。また、締固め時の飽和度 $S_r=40\%\sim 65\%$ の範囲においては不飽和供試体の傾向と同等かやや大きい傾向であった。すなわち、供試体の飽和化に伴い初期サクシオンを失う為、飽和化した供試体の方が不飽和供試体より飽和度の関数 $f_{q_{\max}}$ は低下するが、それは低飽和度範囲に見られる程度で最適飽和度付近ではほぼ同等である事がわかった。

龍岡ら(2014)は、2.4 で説明した実大締固め試験で用いた試料を用いた室内 CBR 試験を浸水前と浸水後で実施し、浸水が CBR 値に与える影響を定量的に調べており、その結果、低飽和度付近で締め固めた供試体の CBR 値は浸水により大きく低下するのに対し、最適飽和度付近から高飽和度付近で締め固めた供試体の CBR 値は浸水の影響による低下は見られていない。この既往の研究結果と本研究で得られた最大軸差応力を比較すると、最適飽和度付近で同等の値を示す事は一致するが、低飽和度範囲における強度低下の大きさは本研究で得られた結果の方が小さい。このような違いが生じた理由の一つには拘束圧の違いが考えられる。本研究で載荷した有効拘束圧 $\sigma'_c=50\text{kPa}$ 程度の拘束効果が浸水による強度低下を低減した可能性が考えられる。飽和化に伴う供試体の変化については本節の最後に考察する。

図 6-9-11 には中型供試体の室内、盛土下部、小型供試体の締固め層下部、図 6-9-12 は中型供試体も盛土上部、小型供試体の締固め層上部について、それぞれ飽和化した供試体の飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係を示す。また、図 6-9-13 には中型供試体の室内、盛土下部、小型供試体の締固め層下部、図 6-9-14 は中型供試体も盛土上部、小型供試体の締固め層上部について、同じく飽和化した供試体の飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係を示す。それぞれの図中には図 5-2-53、図 6-8-15 に示した中型供試体上部と下部の飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係と、図 5-2-45、図 6-8-16 に示した中型供試体上部と下部の飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係を併せて示す。ここで、図 6-9-11、図 6-9-13 はせん断破壊領域の影響のない室内締固め供試体上部、下部及び、試験盛土供試体下部のデータ、図 6-9-12、図 6-9-14 はせん断破壊領域の影響のある試験盛土供試体上部のデータをそれぞれ不飽和供試体と飽和化した供試体で比較している。図 6-9-11、図 6-9-13 の飽和度の関数 f_{E50} 、 f_{E0} に与える締固め時の飽和度の影響は、不飽和供試体の関係に比べて締固め時の飽和度 $S_r=10\%\sim 20\%$ の範囲において、著しく小さい傾向で、約 $50\%\sim 60\%$ 低下している。ただし、先に示した乾燥密度 $\rho_d=1.530\text{g/cm}^3$ 、飽和度 $S_r=24.0\%$ の小型供試体は全体の傾向から外れている。また、締固め時の飽和度 $S_r=30\%\sim 65\%$ の範囲においては不飽和供試体の傾向と同等の傾向であった。図 6-9-12、図 6-9-14 の飽和度の関数 f_{E50} 、 f_{E0} に与える締固め時の飽和度の影響は、わずかな差ではあるが不飽和供試体の関係に比べて締固め時の飽和度 $S_r=10\%\sim 30\%$ の範囲において、やや小さい傾向である。また、締固め時の飽和度 $S_r=30\%\sim 70\%$ の範囲においては不飽和供試体の傾向と同等の傾向であった。すなわち、飽和化した供試体は不飽和供試体に比べて飽和度の関数 f_{E50} 、 f_{E0} は低下するが、それは低飽和度範囲に見られる程度で最適飽和度付近ではほぼ同等である事がわかった。また、せん断破壊領域の影響がある場合も、ばらつきはあるものの飽和化した供試体は締固め時の飽和度 S_r が低い範囲で変形特性が低下する事が確認された。

図 6-9-15 は、飽和化小型供試体の二重負圧過程、通水過程、背圧上昇過程における、供試体の外部変位計で測定した鉛直ひずみ増分～締固め時の飽和度関係を示す。飽和度 $S_r=20\%\sim 50\%$ の範囲において飽和化過程における鉛直ひずみ増分が $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{EDT}}=0.5\%$ 程度以下であるのに対し、飽和度 $S_r=10\%\sim 20\%$ の範囲において飽和化過程における鉛直ひずみ増分が $(\Delta\varepsilon_v)_{\text{EDT}}=4\%\sim 9\%$ 程度であり著しく大きい。すなわち、図 6-9-10 における締固め時の飽和度の低い範囲において、飽和化に伴い初期サクシジョンの喪失による強度低下は生じるものの、不飽和供試体に比べてやや小さい値に留まるのは、先述した有効拘束圧の影響に加え、飽和化過程における鉛直ひずみの増大に伴う乾燥密度や構造の変化の影響も関連している可能性がある。

以上より、中型供試体と小型供試体に関わらず、飽和化した供試体の強度変形特性は不飽和供試体と同様に乾燥密度と締固め時の飽和度の影響を受ける事を示した。すなわち、最大軸差応力、割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率に与える締固め時の飽和度の影響は供試体の飽和化後にも残っている。また、飽和化した供試体の強度変形特性が低下するのは締固め時の低飽和度範囲であり、最適飽和度付近で締め固めた供試体は飽和化の影響を無視できる程、不飽和供試体と飽和化した供試体の差は小さい事を示した。これはせん断破壊領域の影響がある試験盛土供試体上部でも同様であり、飽和化した供試体の変形特性の低下が現れるのは飽和度の低い範囲である。

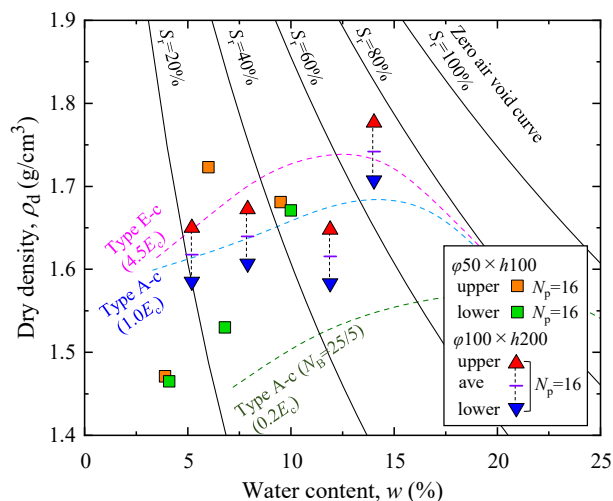


図 6-9-1 三軸試験供試体の乾燥密度～含水比関係

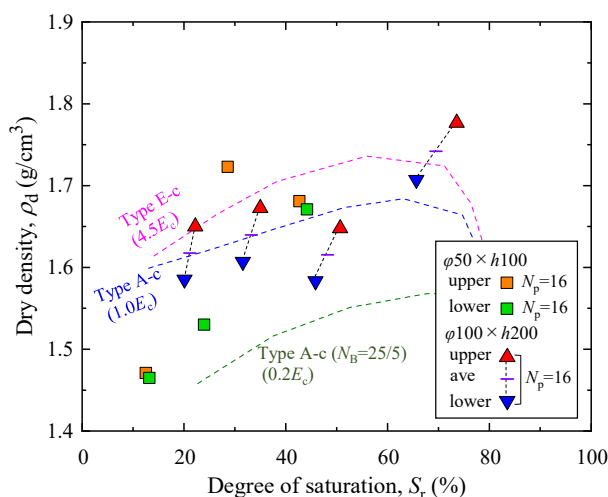


図 6-9-2 三軸試験供試体の乾燥密度～飽和度関係

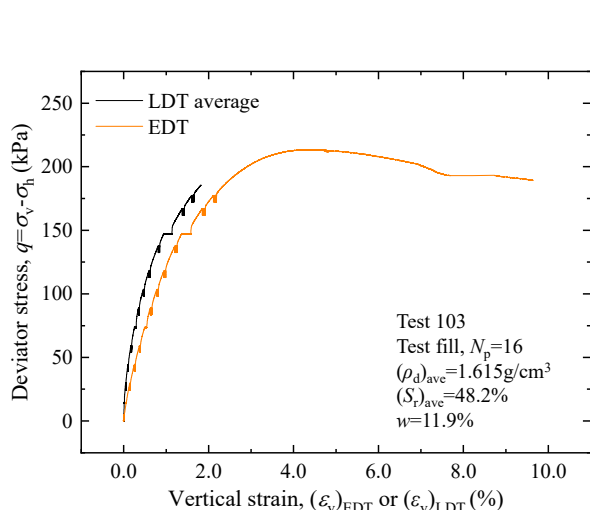


図 6-9-3 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

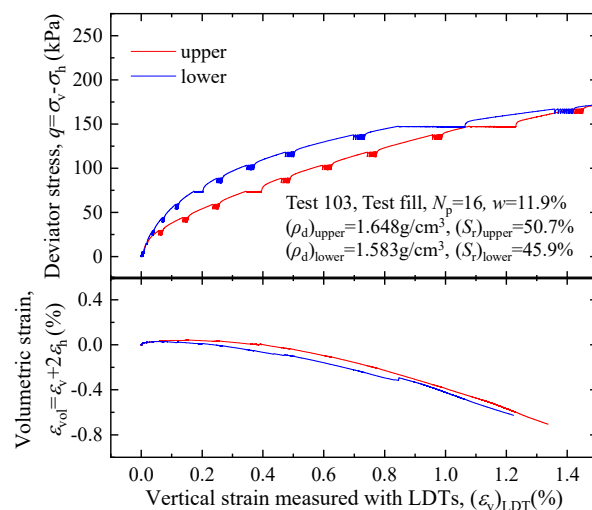


図 6-9-4 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

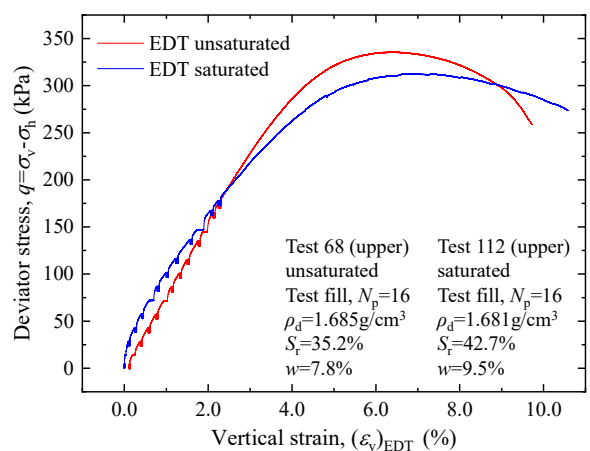


図 6-9-5 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT、LDT 平均)

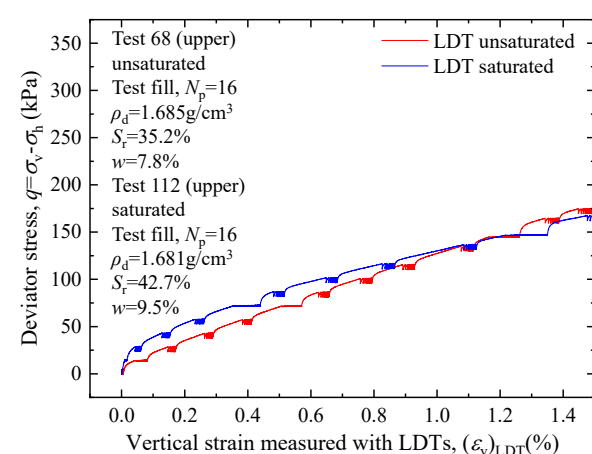


図 6-9-6 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

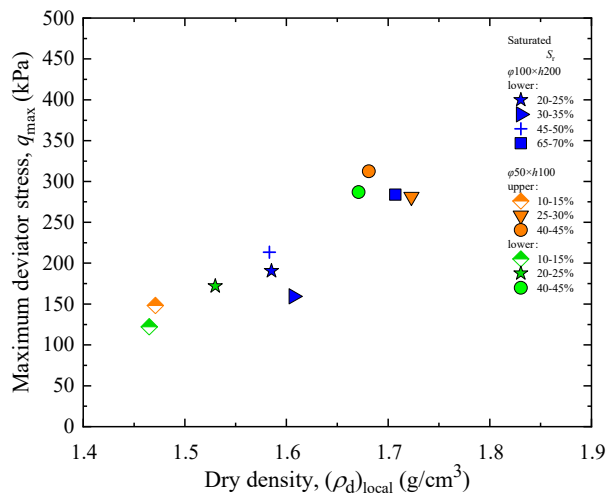


図 6-9-7 最大軸差応力～乾燥密度関係
(中型:下部、小型:上部、下部)

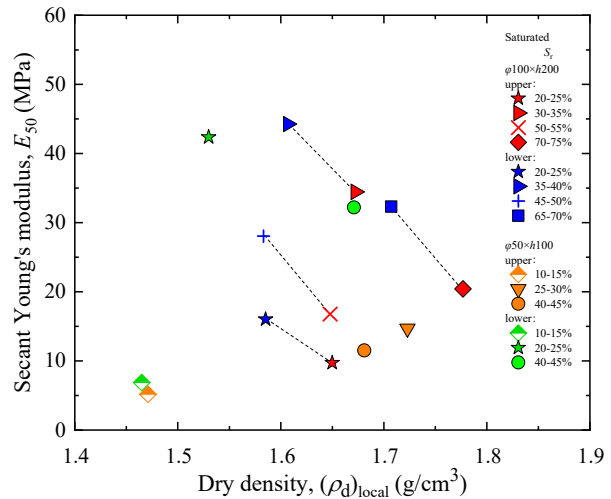


図 6-9-8 割線ヤング率～乾燥密度関係
(中型:上部、下部、小型:上部、下部)

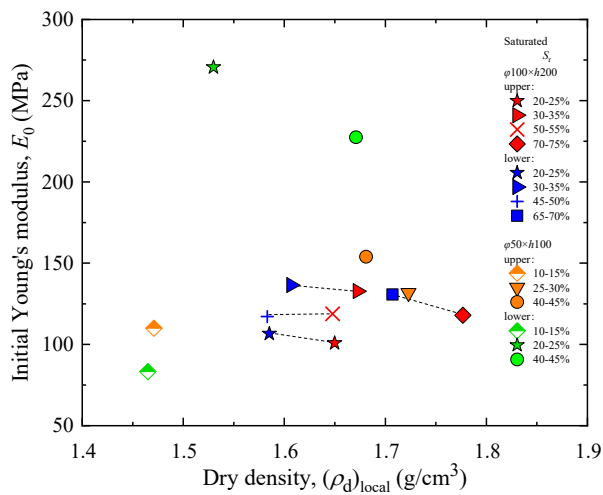


図 6-9-9 初期ヤング率～乾燥密度関係
(中型:上部、下部、小型:上部、下部)

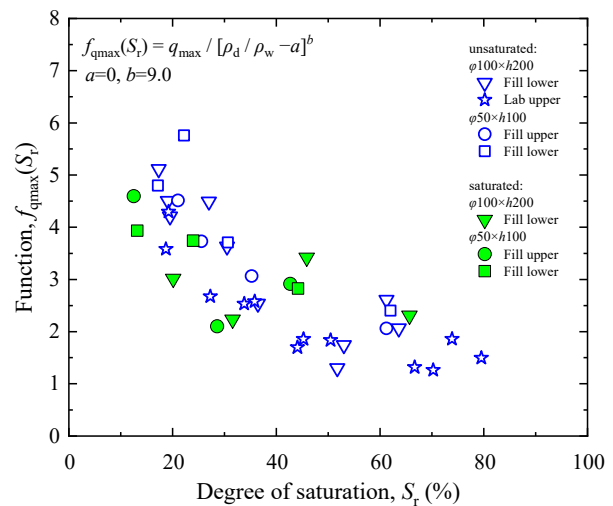


図 6-9-10 $f_{qmax}(S_r)$ ～締固め時の飽和度関係
(不飽和:室内、盛土、飽和:盛土) ($a=0, b=9.0$)

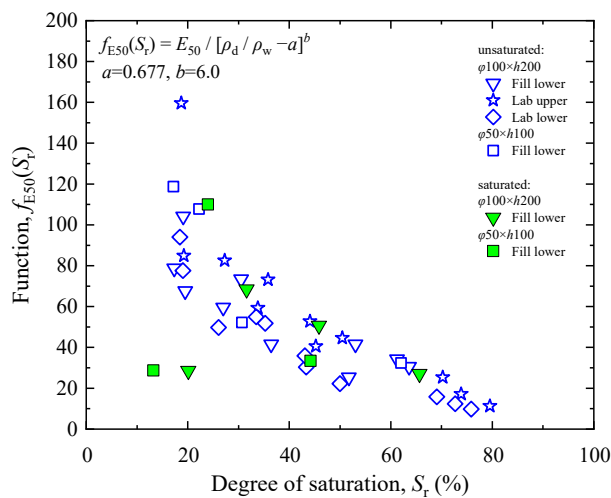


図 6-9-11 $f_{E50}(S_r)$ ～締固め時の飽和度($a=0.677, b=6.0$) (不飽和:室内、盛土下部、飽和:盛土下部)

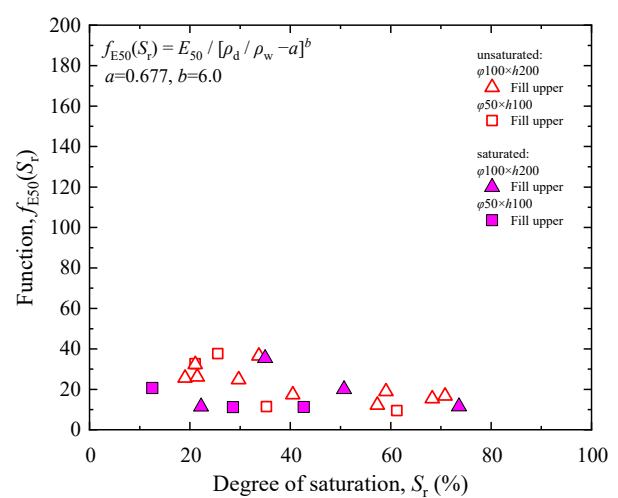


図 6-9-12 $f_{E50}(S_r)$ ～締固め時の飽和度($a=0.677, b=6.0$) (不飽和:盛土上部、飽和:盛土上部)

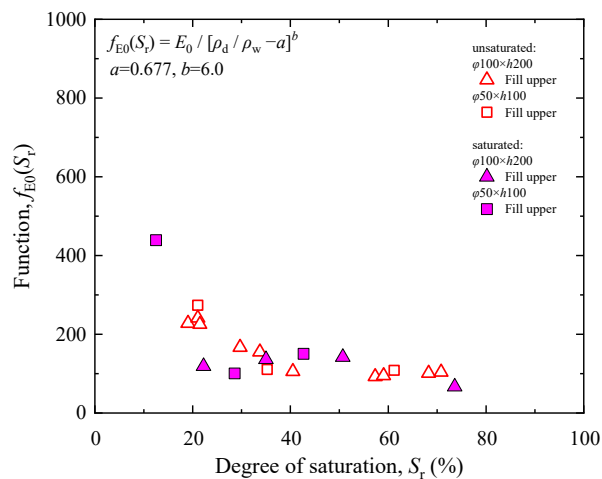
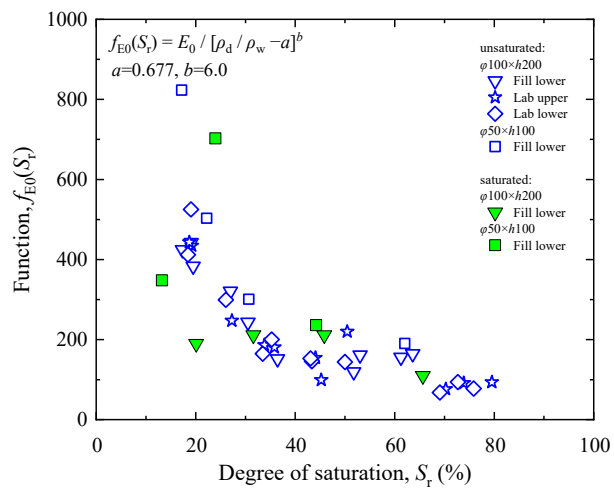


図 6-9-13 $f_{E0}(S_r) \sim$ 締固め時の飽和度 ($a=0.677, b=6.0$) 図 6-9-14 $f_{E0}(S_r) \sim$ 締固め時の飽和度 ($a=0.677, b=6.0$)
(不飽和:室内、盛土下部、飽和:盛土下部) (不飽和:盛土上部、飽和:盛土上部)

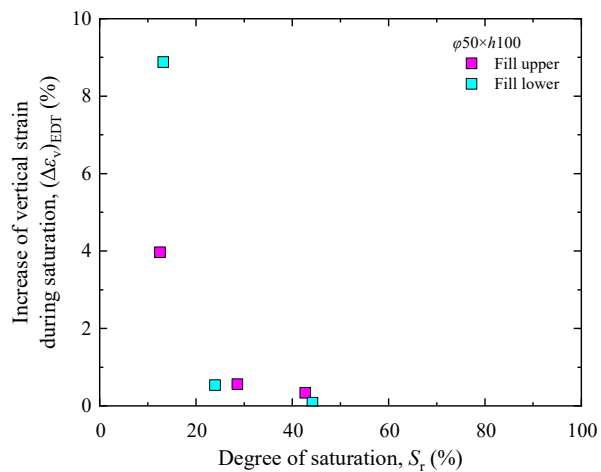


図 6-9-15 二重負圧・通水・背圧上昇による鉛直ひずみ増分
～締固め時の飽和度関係

6.10 本章のまとめ

本章では試験盛土供試体の鉛直深度方向の乾燥密度、飽和度の非一様性に基づいて、供試体の局所的な変形を考慮しながら三軸圧縮試験による強度変形特性を調べた。三軸圧縮試験の単調載荷過程に加え、その等方圧密過程や、平均基底主応力 $p_{\text{net}}=700\text{kPa}$ 程度までの中圧等方圧密過程、荷重保持載荷及び繰返し載荷による変形特性の評価を実施した。また、圧密履歴の有無による強度変形特性の違いや変形特性の鉛直深度分布に対する評価、さらには締固め層の上部と下部を別個に採取した小型供試体の強度変形特性評価を実施した。

本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 試験盛土供試体の最大軸差応力～乾燥密度関係には室内締固め供試体と同様に供試体の飽和度の影響が含まれるが、最大軸差応力は乾燥密度と相関関係がある。
- ② 試験盛土供試体は最大軸差応力と乾燥密度関係において供試体の乾燥密度分布によるばらつきが無視できない程大きい。供試体それぞれの平均乾燥密度に対する上部と下部の乾燥密度の差の割合が 4.0%程度であれば、供試体の非一様性の影響検討を実施する事は必須である。
- ③ 試験盛土供試体の初期ヤング率及び割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係には室内締固め供試体と同様に供試体の飽和度の影響が含まれるが、初期ヤング率と割線ヤング率 E_{50} はそれぞれ乾燥密度と相関関係がある。ただし、鉛直深度方向の乾燥密度分布、飽和度分布を考慮しても初期ヤング率は供試体上部が下部に比べてやや小さく、また割線ヤング率 E_{50} は供試体上部が下部に比べて著しく小さい。
- ④ 等方圧密過程における試験盛土供試体の変形特性は、供試体下部は室内締固め供試体と類似する強い構造異方性を有しているのに対し、供試体上部は構造異方性が残るものの、比較的等方的な変形挙動を示している。これは現場締固め時の表層付近は拘束効果が弱かった為、試験盛土供試体上部は室内締固め供試体のような強い構造異方性を得られなかったと考えられる。
- ⑤ 試験盛土供試体は室内締固め供試体と同様に、平均基底主応力 $p_{\text{net}}=700\text{kPa}$ 程度の中圧等方圧密の圧密履歴により、構造異方性を持つ供試体の水平ひずみの進行が低下し、等方圧密に対する変形特性が変化する。また、供試体上部の変形挙動は下部より鉛直ひずみの増分が大きく、供試体の非一様性による影響がやや現れている。
- ⑥ 鉛直応力が低い $\sigma_v=10\text{kPa}\sim 30\text{kPa}$ の範囲と、鉛直応力が高い $\sigma_v=40\text{kPa}\sim 700\text{kPa}$ の範囲では、微小ひずみ領域の変形特性は異なるが、供試体上部と下部の変形特性の違いは小さいことから、供試体の非一様性による影響は小さい。
- ⑦ 中圧等方圧密の圧密履歴のある供試体は、室内締固め供試体と同様に載荷過程においても正の水平ひずみの発生抑制効果が発揮される為、若干の剛性の増加や体積収縮量の低減等、変形特性が向上する。
- ⑧ 荷重保持載荷による鉛直ひずみの増分～乾燥密度関係は室内締固め供試体と同様に飽和度の影響ではばらつきはあるが、逆相関の関係である。鉛直ひずみの増分～乾燥密度の関係において、軸差応力が小さい場合は供試体上部が下部より鉛直ひずみ増分が大きい、軸差応力が大きくなると全体的に鉛直ひずみ増分は大きくなるが、供試体上部と下部の鉛直ひずみ増分は同等になる。これは、鉛直ひずみと軸差応力の増加に伴う供試体の剛性増加が理由と考えられる。
- ⑨ 等価ヤング率～片振幅鉛直ひずみ関係及び $E_{\text{eq}}/f(e)\sim$ 片振幅鉛直ひずみ関係から、室内締固め供試体と同様に等価ヤング率は供試体上部と下部の違いは小さい。ただし、載荷方法の影響で片振幅鉛直ひずみの増加に伴う等価ヤング率の著しい低下傾向は見られなかった。

- ⑩ 試験盛土供試体の割線ヤング率 E_{50} は鉛直深度分布と逆の傾向が確認され、上層より下層の方が割線ヤング率 E_{50} は大きい。また、初期ヤング率は上層と下層の違いは小さいがやや下部の初期ヤング率が大きい。供試体上部にあたる締固め層上半部には、変形特性に与える乾燥密度と飽和度以外の影響要因があると考えられる。また、割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率ともに供試体端面を含む計測にはベディングエラーの影響が含まれる。
- ⑪ 締固め層の上部と下部をそれぞれ別個に採取した小型供試体の三軸圧縮試験により、中型供試体では観測できなかった締固め層上部と下部の最大軸差応力の分布を測定し、その傾向は飽和度の影響を受けるが上部と下部の最大軸差応力～局所乾燥密度関係は類似する事を確認した。また、小型供試体の割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率は、中型供試体の鉛直深度方向別に設置した局所変位計を用いて測定した変形特性と整合する。
- ⑫ 試験盛土供試体の飽和化後の強度変形特性は、不飽和供試体に比べて乾燥側でやや低下が見られるが、最適飽和度付近で締め固めれば無視できる程度の違いである。これはせん断破壊領域の有無に関わらず同様である。

本章では試験盛土供試体の乾燥密度、飽和度の鉛直深度分布に着目し、室内締固め供試体の傾向を踏まえながら考察した。現場では締固めエネルギーを正確に制御し記録する事が出来ない事から乾燥密度と飽和度を求める事になるが、これらを独立変数とする事で、簡単で実用的な変数分離式により表現する事が出来た。また、試験盛土表層付近は乾燥密度と飽和度の影響だけでは強度変形特性を説明しきれない事がわかった。この主な特徴として試験盛土の締固め層上半部は乾燥密度や飽和度の影響を多少受けつつ、過半部の供試体に比べて著しく低い剛性を示す。また、局所的な乾燥密度が大きい為、鉛直ひずみの進行とともに一様化されてきて軸差応力が大きくなる。この低剛性挙動は三軸圧縮試験で観測した载荷過程における割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率の低下、等方圧密過程における鉛直ひずみ増分の増大、荷重保持载荷による鉛直ひずみ増分の増大等から示された。また、鉛直ひずみの進行とともに軸差応力が大きくなる事は中型三軸圧縮試験と小型三軸圧縮試験で求めた最大軸差応力から示した。現場締固め土の局所的に存在する軟らかい層の存在は層全体の剛性低下を招き、変形特性の予測を難しくする。

本研究ではこの試験盛土表層が低剛性である理由を、締固め機械を用いた締固め時に生じるせん断破壊領域と仮定して議論してきた。そこで、次章では現場と室内で締め固めた供試体の強度変形特性を直接比較し、せん断破壊領域の影響が試験盛土供試体に与える影響を定量化する。

また、押切式ブロックサンプリングにより試験盛土から採取した供試体の乱れの影響については、小高ら(1998)や善ら(1981)の方法で検討した結果、乱れのある供試体のような挙動は確認されなかった。また、等方圧密過程や载荷過程における変形挙動も、ばらつきはあるものの乾燥密度との相関性がある事からデータの再現性も認められる。さらには、中型供試体の上部と下部の変形特性と締固め層から別個に採取した上部と下部の小型供試体の変形特性も互いに整合が取れており、採取方法による局所的な乱れも認められない。以上より、本研究で採取した供試体の強度変形特性には、供試体採取方法による乱れの影響は少ないと考える。

さらに、飽和化した供試体の強度変形特性は不飽和供試体の強度変形特性に比べて締固め時の飽和度が $S_r=40\%$ 以下の場合は低下するのに対し、締固め時の飽和度が $S_r=40\%$ 以上ではほぼ同等である事を確認している。すなわち、最適飽和度付近で締め固めた不飽和供試体の強度変形特性を一般に設計で用いられる飽和供試体の強度変形特性とほぼ同等であるものとして利用出来る事がわかった。これは、初期ヤング率等の原位置で評価した現場締固め土の不飽和状態での強度変形特性を、室内で定めた初期ヤング率等の設計値と対応させることが可能である事を意味する。

【6章の参考文献】

- 1) Kohata, Y., Tatsuoka, F., Wang, L., Jiang, G.L., Hoque, E. & Kodaka, T.(1997): Modeling the non-linear deformation properties of stiff geomaterials, *Geotechnique*, 47, No.3, 563-580.
- 2) 榎本忠夫(2012): 不攪乱礫質土の強度変形特性と粘性特性, 東京大学博士論文.
- 3) 小高猛司, 早野公敏, 古関潤一, 龍岡文夫, 壺内達也, 松本正士, 松下政史(1998): 堆積軟岩試料のサンプリングによる乱れの評価法, 土と基礎, Vol.46, No.5, pp.11-14.
- 4) 須藤雅人, 榊原佑介, 佐々木亮太郎, 川邊翔平, 龍岡文夫(2012): 排水三軸圧縮での砂質土のクリープ特性に対する初期ひずみ速度・締固め度の影響, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp.369-370.
- 5) 須藤雅人, 川邊翔平, 菊池喜昭, 龍岡文夫(2013): 飽和稲城砂の排水変形・強度特性に対する締固め時飽和度の影響, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp.573-574.
- 6) 善功企, 松本一明, 梅原靖文, 奥村樹郎(1981): サンドサンプリングと品質評価の試みについて, 昭和 56 年度サンプリングシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.55-62.
- 7) 龍岡文夫, 藤代健司, 糟谷優太, 菊池喜昭, 建山和由(2014): 盛土の締固め⑬, 基礎工 7 月号, pp.97-100.
- 8) 中島康介, 岡二三生, 木元小百合, 肥後陽介, 松本真明(2009): 不飽和砂質土の繰返し載荷時における力学特性, 第 45 回地盤工学研究発表会, pp.689-690.
- 9) 平川大貴, 川原園美幸, 龍岡文夫(2008): 砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, pp.253-266.
- 10) 前川侑太, 清田隆, 片桐俊彦(2018): 原位置と室内試験における V_s を用いた液状化強度の推定法について: 非塑性細粒分を含む砂への適用, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1841-1842.
- 11) 松本成, 井森紘平, 鈴木歩海, 川邊翔平, 塚本良道(2012): 稲城砂の繰返し強度に及ぼす飽和度の影響, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp.651-652.

第7章

室内締固め土を用いた現場締固め土の 強度変形特性推定方法の提案

7.1 概要

本章ではこれまで調べてきた試験盛土供試体と室内締固め供試体の物理特性、強度変形特性から得られた知見に基づいて現場と室内で締め固めた供試体の非一様性が与える強度変形特性への影響を整理した。具体的には、非一様性を考慮した室内締固め供試体と試験盛土供試体の応力～ひずみ関係における特徴を比較整理している。また、それぞれの強度変形特性推定方法の提案、試験盛土供試体上部への存在が示唆されるせん断破壊領域の影響の定式化提案、飽和化に伴う強度変形特性変化の考え方の提案、さらには室内締固め供試体平均の変形特性から試験盛土供試体平均の変形特性推定方法の提案を実施した。また提案した推定式の妥当性検証を目的に、強度変形特性推定に用いる含水状態のパラメーターを飽和度別と含水比別に整理し、測定値との違いやばらつきをそれぞれ比較した。さらに、初期サクシオンについても同様に含水状態のパラメーターを比較する方法で測定値との違いやばらつきをそれぞれ比較した。最後に室内締固め供試体平均の変形特性から推定した試験盛土供試体平均の変形特性について、推定方法の妥当性を測定値と推定値の違いやばらつき比較により検証した。

7.2 現場と室内で締め固めた供試体の強度変形特性の比較

7.2.1 試験盛土供試体と室内締固め供試体の応力～ひずみ関係

図 7-2-1 には、作製した三軸圧縮試験用の試験盛土供試体と室内締固め供試体の乾燥密度～含水比関係と $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ 及び $4.5E_c$ の締固め曲線を示す。また、図 7-2-2 は同じ供試体を乾燥密度～飽和度で整理した図を示す。両図に示す乾燥密度、含水比、飽和度の供試体は、それぞれ測定した供試体の平均値である。図 7-2-3、図 7-2-4 にはそれに加えて上部と下部の局所的な乾燥密度～含水比、局所的な乾燥密度～飽和度を示す。これらは 5.2.1 と 6.2.1 に示した室内締固め供試体と試験盛土供試体それぞれの乾燥密度～含水比関係、乾燥密度～飽和度関係を合わせたものである。

乾燥密度、飽和度条件の類似する典型的な試験盛土供試体と室内締固め供試体の試験結果比較の例を以下に示す。供試体はいずれも水平基底応力 $\sigma_{hnt}=50\text{kPa}$ 、圧密排気・排水条件で載荷している。

- (1) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.584\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=5.2\%$ 、飽和度 $S_r=20.1\%$ の試験盛土供試体と、締固めエネルギー $1.0E_c$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.602\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=4.7\%$ 、飽和度 $S_r=18.6\%$ の室内締固め供試体の試験結果

図 7-2-5 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみを示している。EDT で測定した鉛直ひずみは供試体端面のベディングエラーの影響や試験装置の変形等のシステムコンプライアンスを含んでいる。試験盛土供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=7\%$ 付近でピーク強度を迎え、この時の最大軸差応力

は $q_{\max}=235.8\text{kPa}$ であった事に対し、室内締固め供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.5\%$ 付近でピーク強度を迎えており、この時の最大軸差応力は $q_{\max}=252.2\text{kPa}$ であった。最大軸差応力の差は 16.4kPa (平均 q_{\max} の 6.7% 程度) で小さいが、やや乾燥密度の大きい室内締固め供試体の方が大きく、乾燥密度の大小関係と整合性している。ただし、ピーク強度までの鉛直ひずみが両者で異なり、室内締固め供試体に比べて試験盛土供試体が著しく大きい。すなわち、ピーク強度までの剛性は試験盛土供試体が室内締固め供試体に比べて著しく小さい。

図 7-2-6 は、供試体それぞれの上部と下部に設置した LDT80 により測定した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。LDT80 の配置は図 3-2-11 に示した通りである。ロードセルは共通した 1 つを利用している為、供試体それぞれの軸差応力のピーク値は一致し、ピークに達するまでの剛性は供試体の上部と下部で異なる事は前章で述べた。また、試験盛土供試体と室内締固め供試体それぞれの変形挙動は上部と下部で異なる事とその特徴について前章までに説明したが、両供試体を合わせて比較する。供試体の局所的な乾燥密度は試験盛土供試体上部 ($\rho_d=1.616\text{g/cm}^3$)、室内締固め供試体下部 ($\rho_d=1.604\text{g/cm}^3$)、室内締固め供試体下部 ($\rho_d=1.595\text{g/cm}^3$)、試験盛土供試体下部 ($\rho_d=1.552\text{g/cm}^3$) の順に大きい事に対し、ピーク強度までの剛性は室内締固め供試体の下部、上部、試験盛土下部、上部の順に大きい。平均的な乾燥密度が類似する両供試体の非一様性と各応力～ひずみ曲線のピーク強度までの剛性を考慮すると、室内締固め供試体と試験盛土供試体下部は整合するが、試験盛土上部だけ整合しない事がわかる。

体積ひずみは、全ての供試体で一度収縮し、室内締固め供試体の下部、上部、試験盛土下部、上部の順に膨張挙動へ転じる。この体積変化挙動も室内締固め供試体と試験盛土供試体下部は整合するが、試験盛土上部だけ整合しない。図 7-2-5 に示した軸差応力～鉛直ひずみ関係において室内締固め供試体に比べて試験盛土供試体のピークまでの剛性が著しく低い理由は、試験盛土上部の局所的な変形の影響が大きい事がわかる。

図 7-2-7 は、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、補助線として 1:-1 関係を破線で示す。載荷初期は鉛直ひずみが水平ひずみより大きく、補助線から離れるように推移するが鉛直ひずみの進行とともに補助線とほぼ平行となる。特に試験盛土供試体は室内締固め供試体と比べて、鉛直ひずみの進展に伴う負の水平ひずみが生じ難い。これが先に示した供試体上部が強い体積収縮傾向を示す理由である。すなわち、前章で示したせん断破壊領域の影響の少ない試験盛土供試体下部は室内締固め供試体と同様の乾燥密度依存性を示し、せん断破壊領域の影響の大きい試験盛土供試体上部はそれと異なる性質を有する事が示唆される。

図 7-2-8 は、接線ヤング率～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ヤング率は低下するが、載荷初期から $\varepsilon_v=0.5\%$ 付近までは室内締固め供試体上部と下部の接線ヤング率が試験盛土供試体上部と下部より大きい。それ以降は試験盛土供試体上部の接線ヤング率が室内締固め供試体より大きく転じている事がわかる。これは、局所乾燥密度の大きい試験盛土供試体上部は鉛直ひずみの進行とともに変形挙動が変化する特有の傾向である。

図 7-2-9 は、 $E_{\tan}/E_0 \sim q/q_{\max}$ 関係を示す。室内締固め供試体と試験盛土供試体下部は、 E_{\tan}/E_0 は、 $q/q_{\max}=0 \sim 0.2$ までの間に著しく低下し、その後緩やかに低下する傾向を示す。その一方で試験盛土供試体上部は、 $q/q_{\max}=0.05 \sim 0.5$ 付近にかけて低い E_{\tan}/E_0 を示し、室内締固め供試体の示す傾向と異なる。

図 7-2-10 は、接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。室内締固め供試体上部と下部、試験盛土供試体下部が接線ポアソン比 $\nu_{\tan}=0.2 \sim 0.3$ 程度を示す鉛直ひずみは $\varepsilon_v=0 \sim 0.01\%$ 付近であるのに対し、試験盛土供試体上部が接線ポアソン比 $\nu_{\tan}=0.2 \sim 0.3$ 程度を示す鉛直ひずみは $\varepsilon_v=0 \sim 0.2\%$ 付近まで続く事がわかる。これは図 7-2-7 に示したが、試験盛土供試体上部は鉛直ひずみの進行とともに生じる水平ひずみが室内締固め供試体上部と下部、試験盛土下部に比べて小さい事が理由である。

- (2) 締固め機械通過回数 $N_p=16$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.617\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=7.9\%$ 、飽和度 $S_r=32.1\%$ の試験盛土供試体と、締固めエネルギー $0.2E_c$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.618\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=8.3\%$ 、飽和度 $S_r=33.8\%$ の室内締固め供試体の試験結果

図 7-2-11 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみを示している。試験盛土供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=4\%$ 付近でピークを迎え、この時の最大軸差応力は $q_{\max}=228.8\text{kPa}$ であった。一方で、締固めエネルギーの小さい室内締固め供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=9\%$ 付近でピークを迎えており、この時の最大軸差応力は $q_{\max}=193.5\text{kPa}$ である。最大軸差応力の差は 35.3kPa (平均 q_{\max} の 16.7% 程度)で比較的小さい。ピーク強度までの鉛直ひずみは先の供試体と異なり、室内締固め供試体に比べて試験盛土供試体が小さい。ただし、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1\%$ 付近までの剛性は試験盛土供試体が室内締固め供試体に比べて小さい。

図 7-2-12 は、供試体それぞれの上部和下部に設置した LDT80 により測定した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。供試体の局所的な乾燥密度は試験盛土供試体上部($\rho_d=1.649\text{g/cm}^3$)、室内締固め供試体下部($\rho_d=1.619\text{g/cm}^3$)、室内締固め供試体下部($\rho_d=1.613\text{g/cm}^3$)、試験盛土供試体下部($\rho_d=1.585\text{g/cm}^3$)の順に大きい事に対し、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ までの剛性は試験盛土供試体下部、室内締固め供試体の下部及び上部、試験盛土供試体上部の順に大きい。最大軸差応力は試験盛土供試体がやや大きい為、室内締固め供試体と厳密に比較するのは難しいが、他のケースと同様に局所的な乾燥密度に対して特に試験盛土供試体の剛性が低い事がわかる。

体積ひずみは、全ての供試体で一度収縮し、室内締固め供試体の下部、上部、試験盛土下部、上部の順に膨張挙動へ転じる。この体積変化挙動も室内締固め供試体と試験盛土供試体下部に対して、局所乾燥密度の大きい試験盛土上部は強い収縮傾向を示し、他と異なる。

図 7-2-13 は、水平ひずみ～鉛直ひずみ関係を示す。また、補助線として 1:-1 関係を破線で示す。載荷初期は鉛直ひずみが水平ひずみより大きく、補助線から離れるように推移するが鉛直ひずみの進行とともに補助線とほぼ平行となる。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0\sim0.8\%$ 付近までの範囲において、特に試験盛土供試体上部は室内締固め供試体と比べて、鉛直ひずみの進展に伴う、負の水平ひずみが生じ難く、先のケースとも整合する。

図 7-2-14 は、接線ヤング率～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。鉛直ひずみの進行とともに上部、下部の接線ヤング率は低下するが、 $\varepsilon_v=0.003\%\sim0.08\%$ 付近までは試験盛土供試体上部は室内締固め供試体上部と下部、試験盛土供試体下部に比べて接線ヤング率が小さい。それ以降は試験盛土供試体上部の接線ヤング率が室内締固め供試体、試験盛土供試体下部より大きく転じている。すなわち、局所乾燥密度の大きい供試体上部は鉛直ひずみの進行とともに変形挙動が他と異なり変化している。

図 7-2-15 は、 $E_{\tan}/E_0 \sim q/q_{\max}$ 関係を示す。室内締固め供試体と試験盛土供試体下部は、 E_{\tan}/E_0 は、 $q/q_{\max}=0\sim0.2$ までの間に著しく低下し、その後緩やかに低下する傾向を示す。その一方で試験盛土供試体上部は、 $q/q_{\max}=0.05\sim0.5$ 付近にかけて低い E_{\tan}/E_0 を示し、室内締固め供試体と異なる。

図 7-2-16 は、接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係の片対数グラフを示す。室内締固め供試体の上部と下部、試験盛土供試体下部が接線ポアソン比 $\nu_{\tan}=0.2\sim0.3$ 程度を示す鉛直ひずみは $\varepsilon_v=0\sim0.04\%$ 付近であるのに対し、試験盛土供試体上部が接線ポアソン比 $\nu_{\tan}=0.2\sim0.3$ 程度を示す鉛直ひずみは $\varepsilon_v=0\sim0.2\%$ 付近まで続く事がわかる。これは図 7-2-13 に示したが、試験盛土供試体上部は鉛直ひずみの進行とともに生じる水平ひずみが室内締固め供試体上部と下部、試験盛土供試体下部に比べて小さい事が理由である。

7.2.2 試験盛土供試体と室内締固め供試体上部と下部の鉛直ひずみの進行に伴う軸差応力の変化

本項では先に示した軸差応力～鉛直ひずみ関係を含めて、全てのケースの試験盛土供試体と室内締固め供試体の上部と下部それぞれの特徴を示す事を目的に、鉛直ひずみ別の軸差応力の変化について考察する。LDT を用い

た鉛直ひずみの計測は供試体条件にもよるが、およそ鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.5\%$ 程度でレンジオーバーとなる為、載荷過程前半の代表として $\varepsilon_v=1.5\%$ の 1/5 程度である鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ を採用した。また、載荷過程中間点の代表として $\varepsilon_v=1.5\%$ の 1/2 程度である鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.7\%$ を、載荷過程後半でピーク前の代表として $\varepsilon_v=1.4\%$ を採用した。

図 7-2-17 は、全ての供試体の鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ における試験盛土供試体と室内締固め供試体それぞれ上部と下部の軸差応力と乾燥密度関係を示す。供試体の飽和度は $S_r=15\%\sim 80\%$ の範囲であり、飽和度の影響でばらつきはあるが、破線で結ぶ対となる供試体上部と下部に着目すると室内締固め供試体は局所乾燥密度の大きい下部の軸差応力が大きいのに比べ、試験盛土供試体は飽和度に依らず局所乾燥密度の大きい上部の軸差応力が小さい事がわかる。これは先に示した接線ヤング率～鉛直ひずみ関係において、比較的小さい鉛直ひずみ範囲で試験盛土供試体の上部が低い接線ヤング率を示す事に対応する。

図 7-2-18 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ における軸差応力と乾燥密度関係から飽和度 $S_r=15\%\sim 30\%$ の範囲を抽出している。飽和度別に整理すると強度変形特性と乾燥密度関係に生じるばらつきが小さくなる事は前章までに説明したが、室内締固め供試体と試験盛土供試体下部の軸差応力～乾燥密度関係はまとまったグループとして類似傾向を示している。それに対して、試験盛土供試体上部はやや低い値を示し、室内締固め供試体と試験盛土供試体のグループから外れている。

図 7-2-19 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ における軸差応力と乾燥密度関係から飽和度 $S_r=30\%\sim 55\%$ の範囲を抽出している。この飽和度範囲においても室内締固め供試体と試験盛土供試体下部の軸差応力～乾燥密度関係はまとまったグループとして類似傾向を示している。それに対して、試験盛土供試体上部はやや低い値を示し、室内締固め供試体と試験盛土供試体のグループから外れている。試験盛土供試体上部でやや高い軸差応力を示しているのは局所的な飽和度 $S_r=33.7\%$ の供試体で、図 7-2-18 に示した飽和度 $S_r=15\%\sim 30\%$ の範囲の試験盛土供試体上部のグループに近い為である。

図 7-2-20 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ における軸差応力と乾燥密度関係から飽和度 $S_r=55\%\sim 80\%$ の範囲を抽出している。室内締固め供試体と試験盛土供試体下部の軸差応力～乾燥密度関係はまとまったグループとして類似傾向を示している。試験盛土供試体上部は下部に比べてやや低い値を示すが、室内締固め供試体のグループとの違いは殆どみられない。

図 7-2-21 は、全ての供試体の鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.4\%$ における試験盛土供試体と室内締固め供試体それぞれ上部と下部の軸差応力と乾燥密度関係を示す。図は供試体の飽和度 $S_r=15\%\sim 80\%$ の範囲を示しており、飽和度の影響でばらつきはあるが、破線で結ぶ対となる供試体上部と下部に着目して各供試体の軸差応力の変化について考察する。室内締固め供試体の多くはピーク強度付近に達する為、供試体上部と下部の軸差応力の差が小さい。これは先述した供試体の軸差応力は共通する 1 つのロードセルで測定している為で、ピーク時に上部と下部の軸差応力は等しくなる。ピークに達していない室内締固め供試体は、局所乾燥密度の大きい下部の軸差応力がやや大きいデータも確認される。一方で、試験盛土供試体は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.4\%$ において上部が下部と同等の軸差応力を示しているが、上部が下部より大きい値を示しているケースも確認された。これは、比較的小さい鉛直ひずみにおいて小さい軸差応力を示していた試験盛土供試体上部が、鉛直ひずみの進行とともに剛性が変化し、軸差応力が増加している為である。先に示した接線ヤング率～鉛直ひずみ関係において、鉛直ひずみの進行とともに試験盛土供試体上部の接線ヤング率が増加傾向を示す事に対応する。

図 7-2-22 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.4\%$ における軸差応力と乾燥密度関係から飽和度 $S_r=15\%\sim 30\%$ の範囲を抽出している。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ の時と同様に、室内締固め供試体上部及び下部と試験盛土供試体下部の軸差応力～乾燥密度関係はまとまったグループとして類似傾向を示している。それに対して、試験盛土供試体上部は下部と同等の軸差応力を示しているが、上部と下部の局所的な乾燥密度が異なる事から室内締固め供試体と試験盛土供試体下

部のグループから外れている。

図 7-2-23 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.4\%$ における軸差応力と乾燥密度関係から飽和度 $S_r=30\%\sim 55\%$ の範囲を抽出している。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ の時と異なり、室内締固め供試体と試験盛土供試体の軸差応力～乾燥密度関係はまとまったグループとして類似傾向を示す。

図 7-2-24 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.4\%$ における軸差応力と乾燥密度関係から飽和度 $S_r=55\%\sim 80\%$ の範囲を抽出している。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ の時と同様に、室内締固め供試体と試験盛土供試体の軸差応力～乾燥密度関係はまとまったグループとして類似傾向を示す。試験盛土供試体上部は室内締固め供試体と同等の軸差応力を示しており、試験盛土供試体下部は室内締固め供試体のグループから外れ、同じ局所乾燥密度ではやや大きい軸差応力を示している。

図 7-2-17～図 7-2-24 に示したように試験盛土供試体は締固め時の乾燥密度と飽和度に関する上部と下部の差が大きい為、乾燥密度を横軸に整理すると、上部と下部が異なるグループとなってしまう事がわかる。試験盛土供試体上部は鉛直ひずみの進行とともに一様化され、締固め時の乾燥密度に相応の高い剛性を発揮する事は 6.8 に示したが、非一様な供試体に対して大きい鉛直ひずみを与える際の様態の変化過程までは調べる事ができなかった。載荷過程における供試体上部と下部の非一様性の変化過程とそれが与える強度変形特性への影響について調べる事は、今後の課題に挙げられる。

図 7-2-25 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ における試験盛土供試体及び室内締固め供試体下部の軸差応力～供試体上部の軸差応力関係を示す。図中には上部と下部の軸差応力が一致する事を意味する 1:1 の補助線を併せて示す。同じ鉛直ひずみ条件において、試験盛土供試体と室内締固め供試体の軸差応力の大きさが異なる事はわかるが、いずれも供試体上部より下部の方が大きい。室内締固め供試体は特に軸差応力の大きい供試体が顕著に供試体下部の軸差応力が大きい。これは、締固めエネルギーが大きく、乾燥密度の上下差が大きい供試体に対応している。

図 7-2-26 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.7\%$ における試験盛土供試体及び室内締固め供試体下部の軸差応力～供試体上部の軸差応力関係を示す。図中には 1:1 の補助線を併せて示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ と同様に、いずれも供試体上部より下部の方が大きい。

図 7-2-27 は、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1.4\%$ における試験盛土供試体及び室内締固め供試体下部の軸差応力～供試体上部の軸差応力関係を示す。図中には 1:1 の補助線を併せて示す。鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.3\%$ 、 0.7% と異なり、殆ど全ての供試体が 1:1 の補助線付近に位置する。これは、上部と下部の軸差応力が同等になった事を意味する。試験盛土供試体の中には上部の方が大きい軸差応力を示した結果も見られるが、これは試験盛土供試体上部の剛性増加挙動によるものである。

図 7-2-25～図 7-2-27 をまとめた図を図 7-2-28 に示す。試験盛土供試体、室内締固め供試体ともに鉛直ひずみが大きくなると全体的に軸差応力が増加し、供試体上部と下部の軸差応力がほぼ等しい 1:1 の補助線に推移する事が示された。

本節では試験盛土供試体と室内締固め供試体の応力ひずみ関係を鉛直ひずみ別に比較し、試験盛土供試体の特徴を考察した。その結果、試験盛土供試体上部は締固め時に受けたせん断破壊領域の影響により、小さい鉛直ひずみ範囲では剛性が低く、鉛直ひずみの進行とともに一様化が進んで剛性が試験盛土供試体下部や室内締固め供試体と同等になる事が示された。さらに、試験盛土供試体下部の強度変形特性は室内締固め供試体とほぼ同等であり、強度変形特性～乾燥密度関係からも試験盛土供試体下部にはせん断破壊領域の影響が殆ど現れない事を示した。すなわち、本研究の現場締固め条件では、せん断破壊領域の影響を受ける範囲は締固め層表面から 100mm 程度であると考えられる。この影響深さは図 2-4-18 にも示したが藤井、渡辺(1985)が礫混じり土を対象として大型締固め機械で締め固めた実大締固め試験時に観測したコーン貫入抵抗の小さい深さ 100mm 程度と一致している。

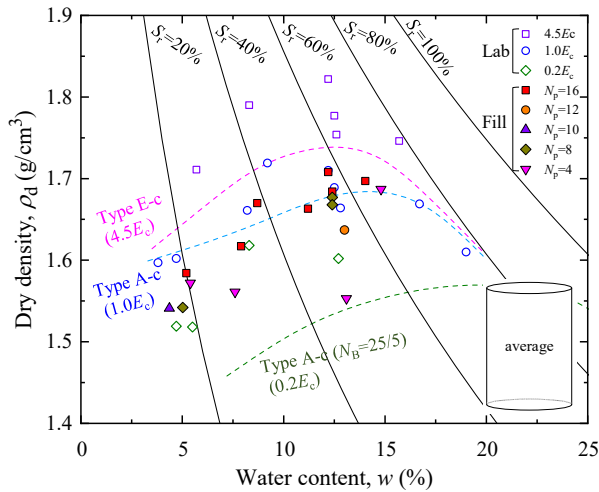


図 7-2-1 三軸試験供試体の乾燥密度～含水比関係
(供試体平均)

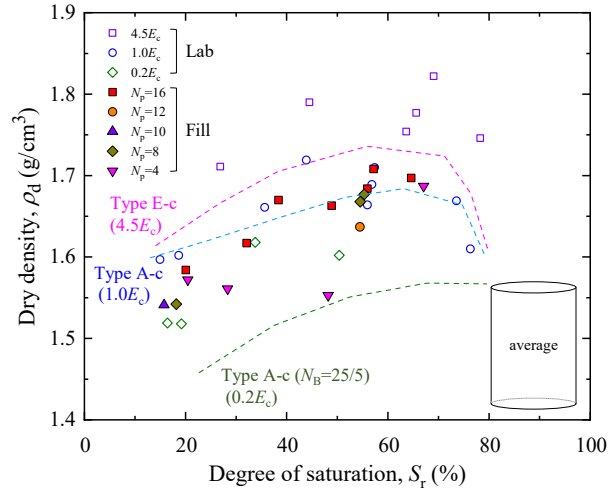


図 7-2-2 三軸試験供試体の乾燥密度～飽和度関係
(供試体平均)

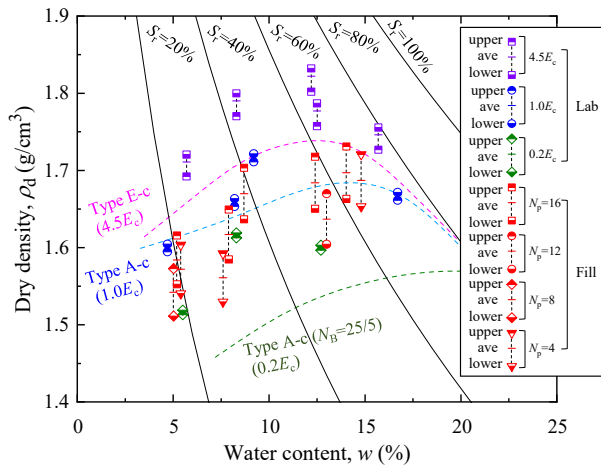


図 7-2-3 三軸試験供試体の乾燥密度～含水比関係
(供試体平均と供試体上部、下部)

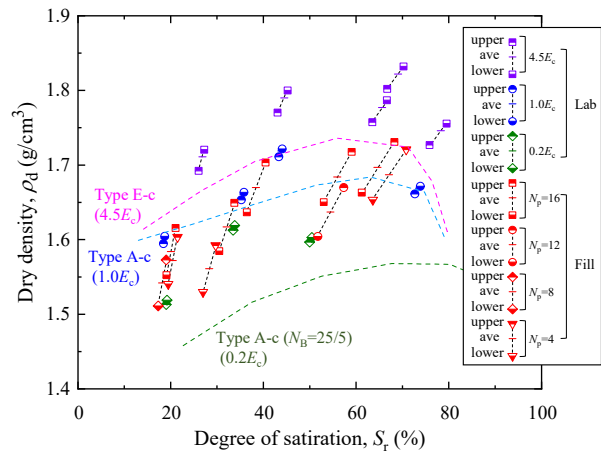


図 7-2-4 三軸試験供試体の乾燥密度～飽和度関係
(供試体平均と供試体上部、下部)

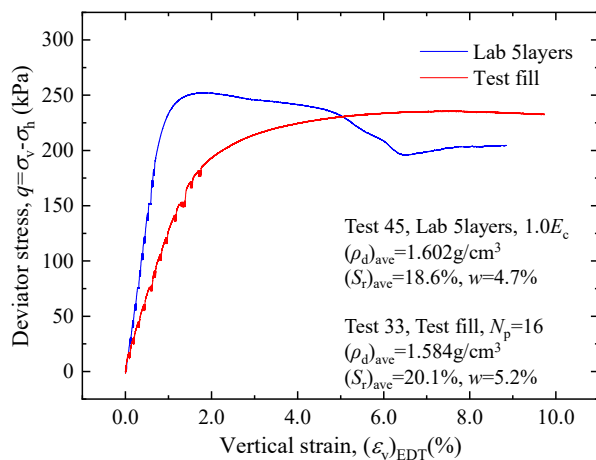


図 7-2-5 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT)

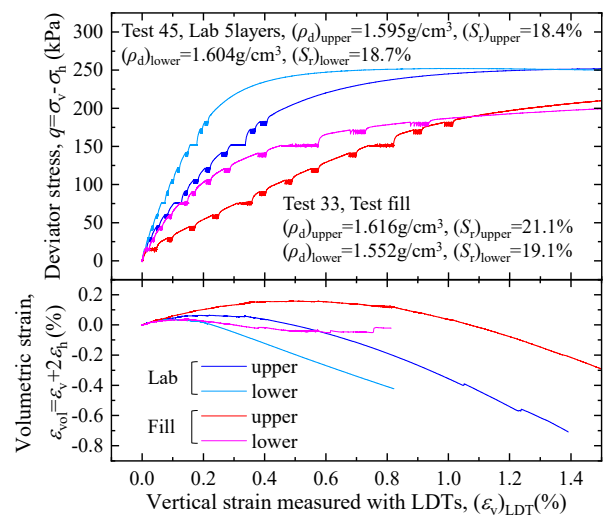


図 7-2-6 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

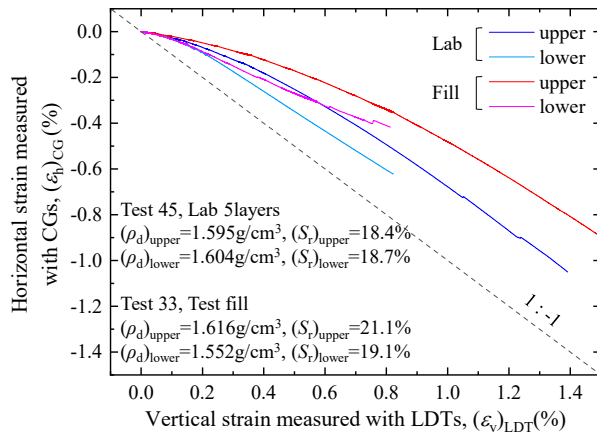


図 7-2-7 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

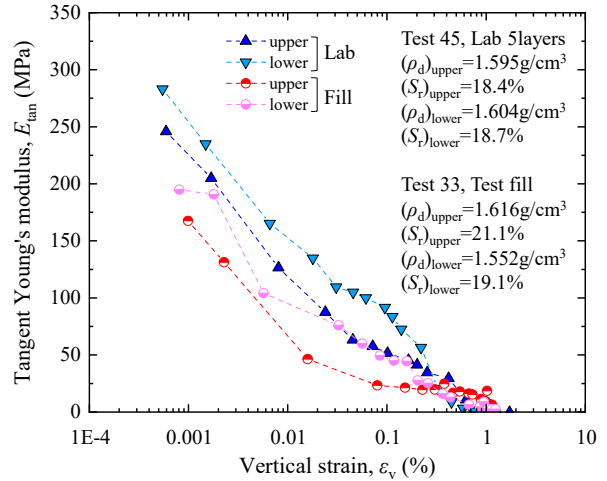


図 7-2-8 接線ヤング率～鉛直ひずみ関係(片対数)

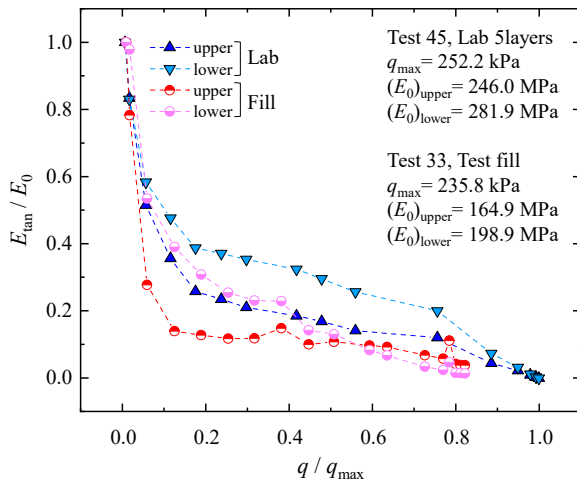


図 7-2-9 $E_{tan} / E_0 \sim q / q_{max}$ 関係

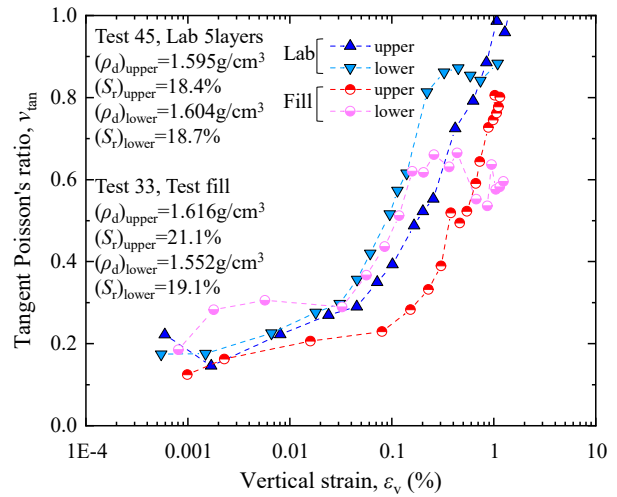


図 7-2-10 接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係(片対数)

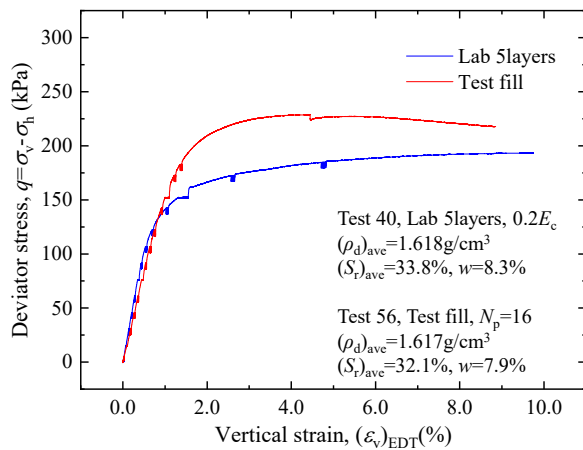


図 7-2-11 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT)

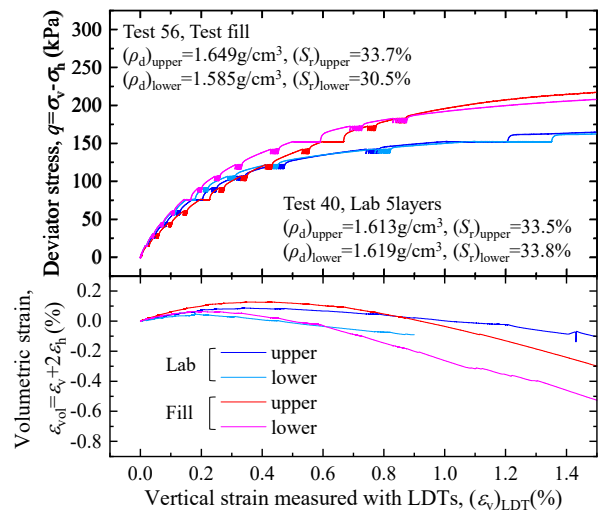


図 7-2-12 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

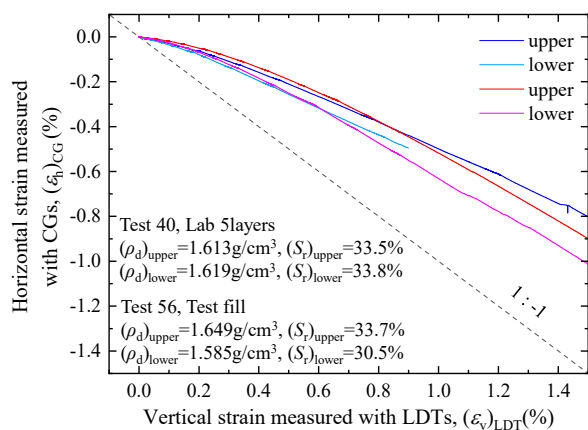


図 7-2-13 水平ひずみ～鉛直ひずみ関係

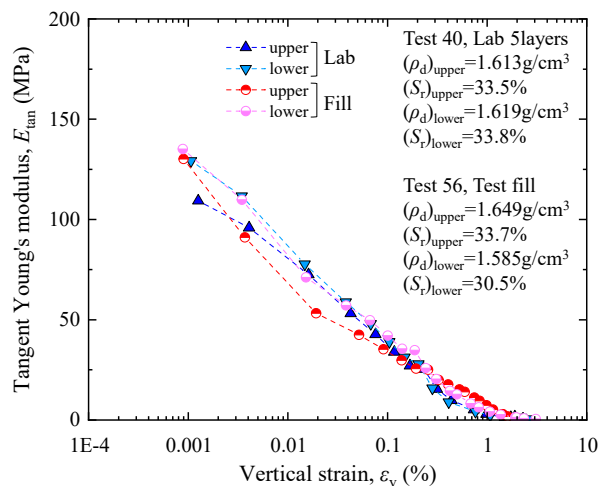


図 7-2-14 接線ヤング率～鉛直ひずみ関係(片対数)

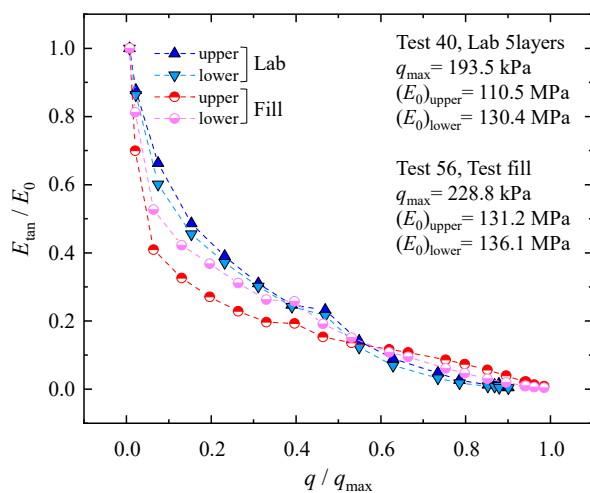


図 7-2-15 $E_{tan} / E_0 \sim q / q_{max}$ 関係

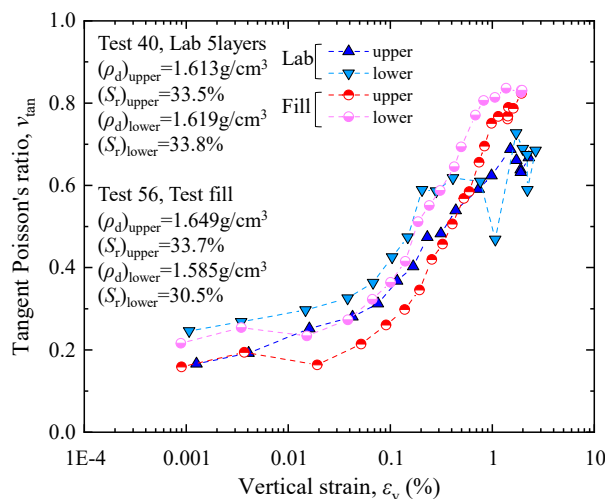


図 7-2-16 接線ポアソン比～鉛直ひずみ関係(片対数)

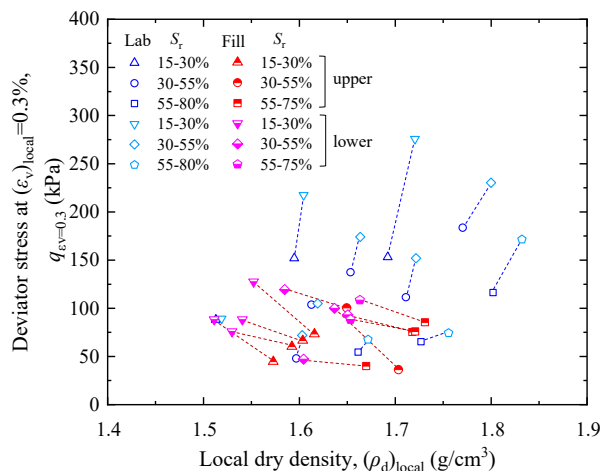


図 7-2-17 $\varepsilon_v=0.3\%$ における軸差応力～乾燥密度関係

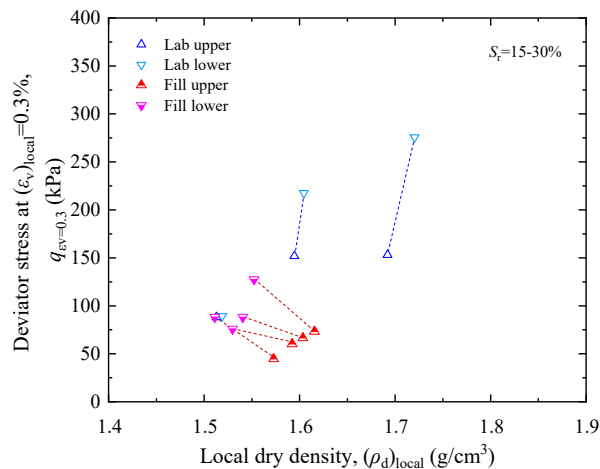


図 7-2-18 $\varepsilon_v=0.3\%$ における軸差応力～乾燥密度関係
($S_r=15-30\%$)

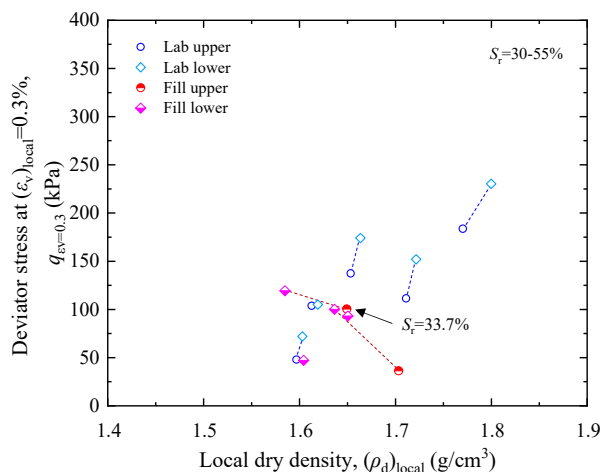


図 7-2-19 $\varepsilon_v=0.3\%$ における軸差応力～乾燥密度関係 ($S_r=30-55\%$)

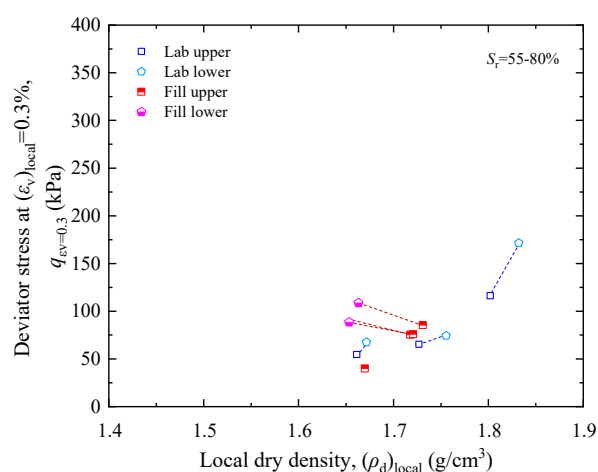


図 7-2-20 $\varepsilon_v=0.3\%$ における軸差応力～乾燥密度関係 ($S_r=55-80\%$)

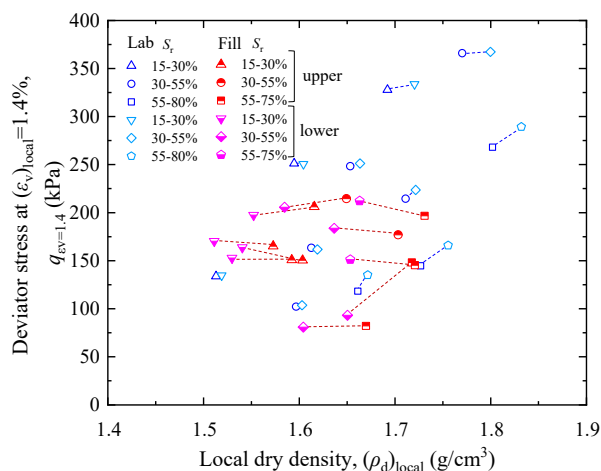


図 7-2-21 $\varepsilon_v=1.4\%$ における軸差応力～乾燥密度関係

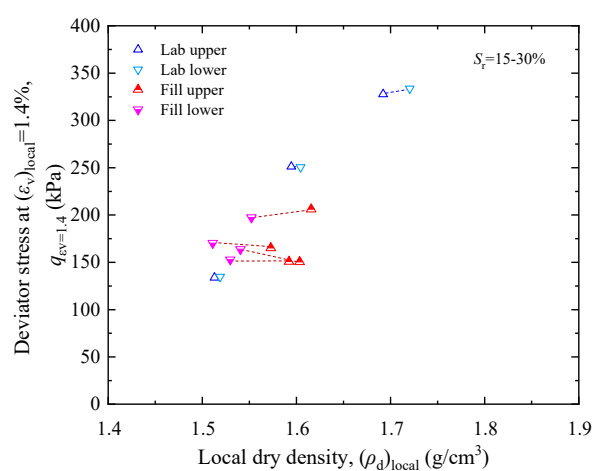


図 7-2-22 $\varepsilon_v=1.4\%$ における軸差応力～乾燥密度関係 ($S_r=15-30\%$)

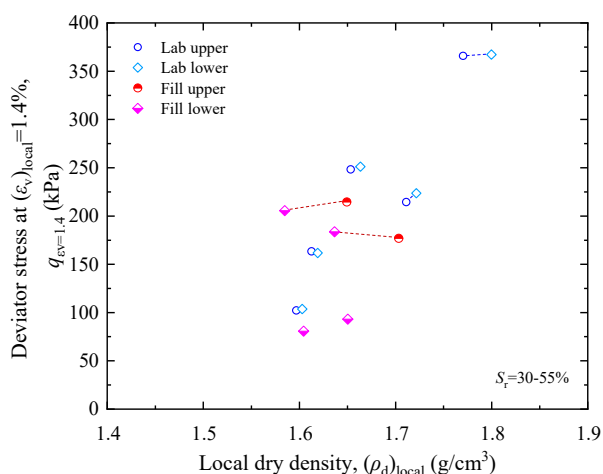


図 7-2-23 $\varepsilon_v=1.4\%$ における軸差応力～乾燥密度関係 ($S_r=30-55\%$)

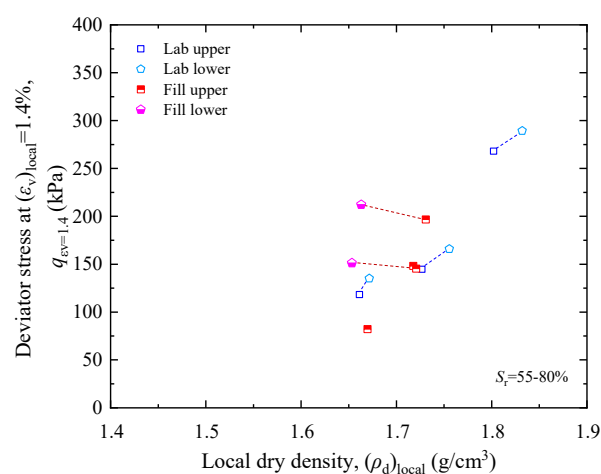


図 7-2-24 $\varepsilon_v=1.4\%$ における軸差応力～乾燥密度関係 ($S_r=55-80\%$)

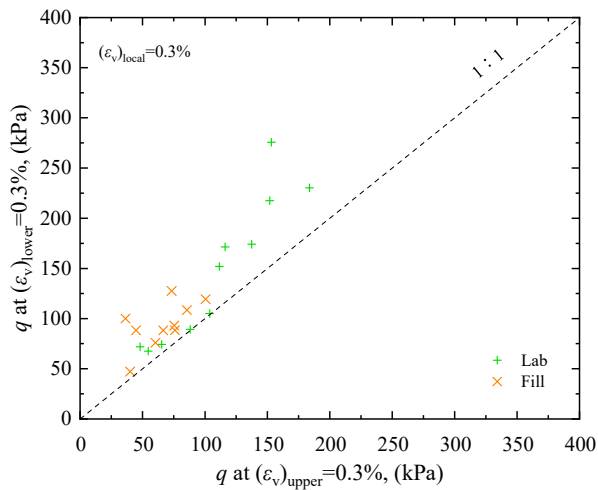


図 7-2-25 $\varepsilon_v=0.3\%$ における上部と下部の軸差応力

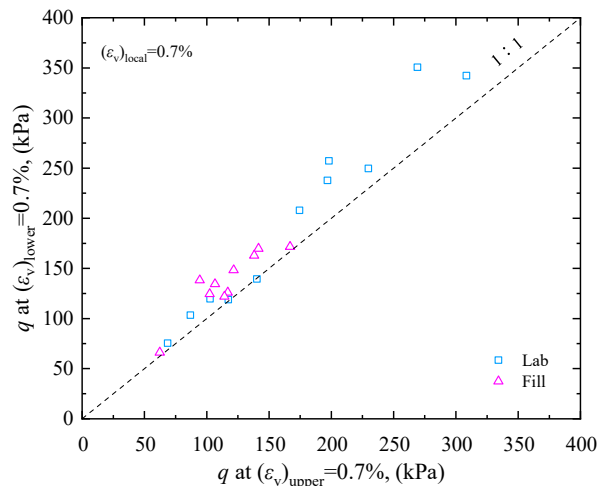


図 7-2-26 $\varepsilon_v=0.7\%$ における上部と下部の軸差応力

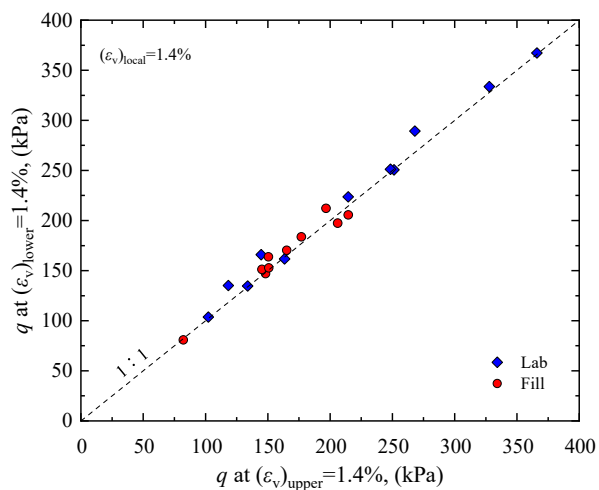


図 7-2-27 $\varepsilon_v=1.4\%$ における上部と下部の軸差応力

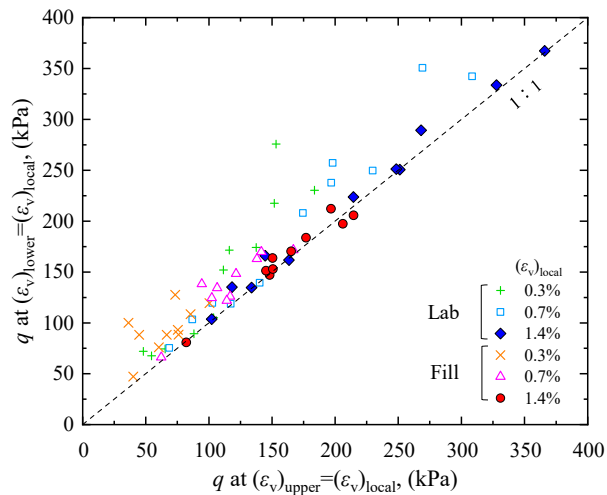


図 7-2-28 ε_v 別の上部と下部の軸差応力関係

7.3 供試体の非一様性を考慮した強度変形特性の推定

前節では試験盛土供試体の上部は室内締固め供試体と異なり、締固め時のせん断破壊領域が強度変形特性に影響を与えている事、試験盛土供試体下部は室内締固め供試体の強度変形特性に類似している事を示した。本節ではそれらの強度変形特性と乾燥密度の関係に与える飽和度の影響に着目し、試験盛土供試体と室内締固め供試体の違いを比較する。さらに、試験盛土供試体と室内締固め供試体それぞれの飽和度の影響を定量的に評価し、既往の経験式に基づいた試験盛土供試体の強度変形特性～乾燥密度関係の推定式及び、供試体の飽和化による強度変形特性の変化に対する考え方を提案する。

7.3.1 供試体の非一様性を考慮した最大軸差応力～乾燥密度関係の推定

図 7-3-1 には、試験盛土供試体下部と室内締固め供試体上部の最大軸差応力～乾燥密度関係を示す。試験盛土供試体と室内締固め供試体はいずれも、飽和度の影響を受けるが乾燥密度が大きくなると最大軸差応力は増加する。図 7-3-2 には式 5-2-3 に基づいて整理した飽和度の関数 f_{qmax} ～飽和度関係を示す。この時の土質材料に応じて異なる係数は、 $a=0$ 、 $b=9.0$ としている。両供試体ともに同じ飽和度で同等の飽和度の関数 f_{qmax} を示す。同じ飽和度で飽和度の関数 f_{qmax} が試験盛土供試体と室内締固め供試体が同等である事は、同じ乾燥密度、飽和度で最大軸差応力が同等である事を意味する。すなわち、非一様性を考慮した試験盛土供試体と室内締固め供試体の最大軸差応力は同等である事を示した。

また、飽和度が小さいと飽和度の関数 f_{qmax} は大きく、飽和度が大きくなると f_{qmax} は緩やかに低下して $f_{qmax}=1\sim2$ 程度に収束傾向を示す。ここで、飽和度の関数 f_{qmax} が大きい程、乾燥密度の増加に伴う最大軸差応力の増加率も大きい事を意味するが、飽和度 $S_r=0\%$ 付近の乾燥状態の供試体の最大軸差応力が本研究で扱った飽和度の範囲の供試体に比べて著しく大きくなる事は考え難い。2.4.2 にも示した Tatsuoka(2015)、Tatsuoka & Correia(2018)は、実大締固め試験のデータを解析して、現場で締め固めた土の状態での強度・剛性に与える飽和度の影響 f_{CBR} と飽和度関係を整理しており、この関係を Boltzmann 関数でフィッティングしている。本研究においても、次式に示す Boltzmann 関数によるフィッティングが境界条件を含めてデータの傾向に適すると考え採用した。

$$f_B(S_r) = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(S_r - x_0)/dx}} + A_2 \quad (7-3-1)$$

図 7-3-3 は、図 7-3-2 をフィッティングした図となる。フィッティングに用いるパラメーターは $A_1=5.5$ 、 $A_2=1.5$ 、 $x_0=26$ 、 $dx=7$ と設定した。

図 7-3-4 には、最大軸差応力～乾燥密度関係と飽和度 $S_r=20\%$ 、 40% 、 60% 、 80% における推定曲線を示す。最大軸差応力～乾燥密度関係の推定曲線は、 $0\% \leq S_r \leq 100\%$ の任意の飽和度における飽和度の関数 f_{qmax} を図 7-3-3 のフィッティング式から求め、式 5-2-1 に代入する事で得られる。

図 7-3-5～図 7-3-8 には最大軸差応力～乾燥密度関係における飽和度 $S_r=20\%$ 、 40% 、 60% 、 80% の推定曲線と各飽和度 $S_r \pm 10\%$ の測定値を示す。測定値は測定誤差によるばらつきと飽和度の影響によるばらつきが含まれるが比較的良く対応している。この推定曲線と実験データの測定値のばらつきについては後で別途評価する。

7.3.2 供試体の非一様性を考慮した割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係の推定

図 7-3-9 には、試験盛土供試体下部と室内締固め供試体上部の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係を示す。試験盛土供試体と室内締固め供試体はいずれも、飽和度の影響を受けるが乾燥密度が大きくなると割線ヤング率 E_{50} は

増加する。図 7-3-10 には式 5-2-12 に基づいて整理した飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係を示す。この時の土質材料に応じて異なる係数は、 $a=0.677$ 、 $b=6.0$ としている。また、室内締固め供試体は上部と下部ともに飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係は同等である事は 5.2 で、試験盛土供試体は上部と下部で飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係は異なる事を 6.2 で示した。さらに、試験盛土供試体下部の強度変形特性～乾燥密度関係は室内締固め供試体と同等である事を 7.2 で示したが、試験盛土供試体下部の飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係も、室内締固め供試体とほぼ同等の傾向である事がわかる。このことから、試験盛土供試体下部は室内締固め供試体と同様に飽和度の影響を受け、同じ乾燥密度であれば同等の割線ヤング率 E_{50} を示す事が確認された。ただし、試験盛土供試体上部が室内締固め供試体上部及び下部と試験盛土供試体下部と大きく異なるのは特に飽和度が小さい $S_r=15\%\sim 60\%$ の範囲である。

両供試体ともに共通して飽和度が小さいと飽和度の関数 f_{E50} が大きく、飽和度が大きくなると f_{E50} は緩やかに低下して $f_{qmax}=10$ 程度に収束する傾向を示す。ここで、割線ヤング率 E_{50} も最大軸差応力と同様に乾燥状態の供試体が本研究で扱った飽和度の範囲の供試体に比べて著しく大きくなる事は考え難い。従って、本研究においても、式 7-3-1 に示した Boltzmann 関数によるフィッティングがデータの傾向に適すると考え、室内締固め供試体上部と下部及び試験盛土供試体下部のデータ群に一つのフィッティング式 $f_{E50}(S_r)_1$ 、試験盛土供試体上部のデータ群に一つのフィッティング式 $f_{E50}(S_r)_2$ を適用した。

図 7-3-11 は、図 7-3-10 をフィッティングした図となる。フィッティング式 $f_{E50}(S_r)_1$ に用いたパラメーターは $A_1=160$ 、 $A_2=12$ 、 $x_0=22$ 、 $dx=16$ 、フィッティング式 $f_{E50}(S_r)_2$ に用いたパラメーターは $A_1=50$ 、 $A_2=12$ 、 $x_0=22$ 、 $dx=16$ である。

図 7-3-12 には、割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係と飽和度 $S_r=20\%$ 、 40% 、 60% 、 80% における推定曲線を示す。割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係の推定曲線は、 $0\%\leq S_r\leq 100\%$ の任意の飽和度における飽和度の関数 $f_{E50}(S_r)_1$ 、 $f_{E50}(S_r)_2$ を図 7-3-11 のフィッティング式からそれぞれ求め、式 5-2-10 に代入する事で得られる。

図 7-3-13～図 7-3-16 には割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係における飽和度 $S_r=20\%$ 、 40% 、 60% 、 80% の推定曲線と各飽和度 $S_r\pm 10\%$ の測定値を示す。室内締固め供試体上部、下部及び試験盛土供試体下部の推定式と試験盛土供試体上部の推定式はそれぞれ測定値と比較すると、測定誤差によるばらつきと飽和度の影響によるばらつきが含まれるが良く対応している事がわかる。この推定線と実験データの測定値のばらつきについては後で別途評価する。

7.3.3 供試体の非一様性を考慮した初期ヤング率～乾燥密度関係の推定

図 7-3-17 には、試験盛土供試体下部と室内締固め供試体上部の初期ヤング率～乾燥密度関係を示す。試験盛土供試体と室内締固め供試体はいずれも、飽和度の影響を受けるが乾燥密度が大きくなると初期ヤング率は増加する。図 7-3-18 には式 5-2-6 に基づいて整理した飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係を示す。この時の土質材料に応じて異なる係数は、 $a=0.677$ 、 $b=6.0$ としている。試験盛土供試体下部の強度変形特性～乾燥密度関係は室内締固め供試体と同等である事は 7.2 に示したが、割線ヤング率 E_{50} と同様に試験盛土供試体下部の飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係も、室内締固め供試体とほぼ同等の傾向である事がわかる。このことから、試験盛土供試体下部は室内締固め供試体と同様に飽和度の影響を受け、同じ乾燥密度であれば同等の初期ヤング率を示す事が確認された。ただし、試験盛土供試体上部が室内締固め供試体上部及び下部と試験盛土供試体下部と大きく異なるのは特に飽和度が小さい $S_r=15\%\sim 40\%$ の範囲である。

両供試体ともに共通して飽和度が小さいと飽和度の関数 f_{E0} は大きく、飽和度が大きくなると f_{E0} は緩やかに低下して $f_{qmax}=80$ 程度に収束する傾向を示す。ここで、初期ヤング率も割線ヤング率 E_{50} と同様に乾燥状態の供試体が本研究で扱った飽和度の範囲の供試体に比べて著しく大きくなる事は考え難い。従って、本研究においても、式 7-3-1 に示した Boltzmann 関数によるフィッティングがデータの傾向に適すると考え、室内締固め供試体上部と下部及び試験盛土供試体下部のデータ群に一つのフィッティング式 $f_{E0}(S_r)_1$ 、試験盛土供試体上部のデータ群に一つのフィッティン

グ式 $f_{E0}(S_r)_2$ を適用した。

図 7-3-19 は、図 7-3-18 をフィッティングした図となる。フィッティング式 $f_{E0}(S_r)_1$ に用いたパラメーターは $A_1=800$ 、 $A_2=80$ 、 $x_0=17$ 、 $dx=12$ 、フィッティング式 $f_{E0}(S_r)_2$ に用いたパラメーターは $A_1=450$ 、 $A_2=80$ 、 $x_0=17$ 、 $dx=12$ である。

図 7-3-20 には、初期ヤング率～乾燥密度関係と飽和度 $S_r=20\%$ 、 40% 、 60% 、 80% における推定曲線を示す。初期ヤング率～乾燥密度関係の推定曲線は、 $0\% \leq S_r \leq 100\%$ の任意の飽和度における飽和度の関数 $f_{E0}(S_r)_1$ 、 $f_{E0}(S_r)_2$ を図 7-3-19 のフィッティング式からそれぞれ求め、式 5-2-4 に代入する事で得られる。

図 7-3-21～図 7-3-24 には初期ヤング率～乾燥密度関係における飽和度 $S_r=20\%$ 、 40% 、 60% 、 80% の推定曲線と各飽和度 $S_r \pm 10\%$ の測定値を示す。室内締固め供試体上部、下部及び試験盛土供試体下部の推定式と試験盛土供試体上部の推定式はそれぞれ測定値と比較すると、測定誤差によるばらつきと飽和度の影響によるばらつきが含まれるが良く対応している事がわかる。この推定曲線と実験データの測定値のばらつきについては後で別途評価する。

7.3.4 セン断破壊領域の影響を考慮した非一様供試体の変形特性推定式の提案

Tatsuoka(2015)、Tatsuoka & Correia(2018)が示したように、締め固めた土は乾燥密度と飽和度の影響を同時に受けており、乾燥密度と飽和度の関数をそれぞれ考慮する事で強度変形特性を表現する事が出来る。これに基づき、本研究ではこれまでに鉛直深度方向の非一様供試体の強度と局所的な変形特性を評価してきた。その結果、試験盛土供試体の変形特性には現場締固めによるせん断破壊領域の影響が含まれる事を示唆し、乾燥密度と飽和度の影響を考慮しても室内締固め供試体と異なる変形特性を示す事を説明した。さらに、本研究の現場締固め条件では、せん断破壊領域の影響を受ける範囲は締固め層表面から深度 100mm 程度である事を述べた。これは、中型供試体 ($\phi 100\text{mm} \times h 200\text{mm}$) の場合は供試体上部、小型供試体 ($\phi 50\text{mm} \times h 100\text{mm}$) の場合は締固め層上部から採取した供試体に相当する。そこで、本節では先に示した Tatsuoka & Correia(2018)に基づいてせん断破壊領域の影響を定式化する。

室内締固め供試体上部と下部、及び試験盛土供試体下部の割線ヤング率 E_{s0} 及び初期ヤング率を含む鉛直ヤング率 E_v は、飽和度の関数 f_{Ev} と乾燥密度の関数 g_{Ev} を用いて式 5-2-4、式 5-2-10 で表現する事は既に示した。試験盛土供試体上部にはこれに加えて、せん断破壊領域の影響関数 h_{Ev} を考慮して次式に示すように仮定する。

$$E_v = f_{Ev}(S_r) \cdot g_{Ev}(\rho_d) \cdot h_{Ev}(D, S_r) \quad (7-3-2)$$

ここで、せん断破壊領域の影響関数 h_{Ev} は現場締固め時に表面に残留する損傷の影響 D を変数としているが、飽和度の影響も見られることから、 D と S_r の二変数関数として定義した。この仮定を用いると、試験盛土供試体上部と下部の境界を挟んで鉛直ヤング率が不連続に変化する事になる。また、供試体高さが異なる場合は、せん断破壊領域の影響範囲を考慮しながら適切に設定しなくてはならない事に留意が必要である。

式 7-3-2 を変形し、式 5-2-6 や式 5-2-12 のように鉛直ヤング率を乾燥密度の関数 g_{Ev} で除すと、下式のようになる。

$$E_v / g_{Ev}(\rho_d) = f_{Ev}(S_r) \cdot h_{Ev}(D, S_r) \quad (7-3-3)$$

せん断破壊領域の影響関数 h_{Ev} を考慮すると、図 7-3-10、図 7-3-11、図 7-3-18、図 7-3-19 で示した図はデータ自体をそのままに、縦軸は式 7-3-3 を考慮して図 7-3-25～図 7-3-28 のようにそれぞれ表す事が出来る。

さらに、せん断破壊領域の影響関数 h_{Ev} は式 7-3-4 のように表す事が出来る。

$$h_{Ev}(D, S_r) = E_v / [f_{Ev}(S_r) \cdot g_{Ev}(\rho_d)] \quad (7-3-4)$$

ここで、右辺の $[f_{Ev}(S_r) \cdot g_{Ev}(\rho_d)]$ に含まれる飽和度と乾燥密度は、室内締固め供試体上部と下部、及び試験盛土供試体下部と、試験盛土供試体上部とともに同条件であることから、室内締固め供試体上部と下部、及び試験盛土供試体下部の鉛直ヤング率 $(E_v)_1$ と、試験盛土供試体上部の鉛直ヤング率 $(E_v)_2$ の比を用いて、物理的に下式のようにも表す事が出来る。

$$(E_v)_2 / (E_v)_1 = h_{Ev}(D, S_r) \quad (7-3-5)$$

ここで、 $0 < h_{Ev}(D, S_r) \leq 1.0$ である。

この考えを用いて、飽和度の関数 $h_{E50}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係を図 7-3-29 に、 $h_{E0}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係を図 7-3-30 に示す。図中のプロットデータは試験盛土供試体上部の割線ヤング率 E_{50} 及び初期ヤング率それぞれに対する室内締固め供試体上部と下部、及び試験盛土供試体下部の割線ヤング率 E_{50} 及び初期ヤング率それぞれのフィッティングによる内挿データの比である。また、赤線で示す室内締固め供試体上部と下部、及び試験盛土供試体下部の $[f(S_r) \cdot h(D, S_r)]_1$ と試験盛土供試体上部 $[f(S_r) \cdot h(D, S_r)]_2$ のフィッティング線の比である。いずれのプロットデータもばらつきはあるが、図中のフィッティング線と整合しており、低飽和度側では割線ヤング率 E_{50} で 60%程度の低下、初期ヤング率で 40%程度の低下となる。また、この $h(D, S_r)$ の傾向は割線ヤング率 E_{50} と初期ヤング率で異なることから、ひずみレベルの影響も受けている事がわかる。また、最適飽和度付近では 10%～20%程度の低下に留まっており、せん断破壊領域の影響は少ない。図 6-2-56～図 6-2-58 に示した現場で観測されるせん断破壊のような現象は土の飽和度に関わらず発生しているが、乾燥側で締め固めた土は脆性的、湿潤側で締め固めた土は靱性があるため粘り強く、この差がせん断破壊領域の影響として現れたと考える。

飽和度の関数 $h_{E50}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係、 $h_{E0}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係の両図中に $(S_r, h_{Ev}(S_r)) = (100, 1.0)$ を通る近似直線を示した図を図 7-3-31、図 7-3-32 に示す。次節ではこの近似直線を用いて試験盛土供試体の割線ヤング率 E_{50} と初期ヤング率を簡易的に推定する。

以上より、試験盛土供試体の変形特性は鉛直深度方向に非一様であるが、現場で測定出来る乾燥密度と飽和度を独立したパラメーターとする事で、簡単に実用的な変数分離式で表現する事が出来た。さらに、現場締固め土に生じる、せん断破壊領域の影響を考慮して、乾燥密度、飽和度に加え、せん断破壊領域の影響を簡明な形で表現できる式となった事を示した。現場締固め土の変形特性を評価する為にはそれらを適切に考慮しなくてはならない。

最大軸差応力は試験盛土供試体上部と室内締固め供試体下部の局所的な先行破壊から決定し、局所的な乾燥密度と飽和度を考慮すれば両者同等である事は先述したが、試験盛土供試体の先行破壊する供試体下部とせん断破壊領域の影響を受ける供試体上部は一致していない。つまり、非一様性を考慮した試験盛土供試体の最大軸差応力にはせん断破壊領域の影響が殆ど含まれていないと考える。

7.3.5 供試体の飽和化の影響を考慮した非一様供試体の強度変形特性推定式の提案

図 6-9-10～図 6-9-14 に示した飽和化した供試体の強度変形特性～締固め時の飽和度関係のように、強度変形特性を低下させる飽和化の影響も、実務において現場で測定する指標と設計値との対応を検討する際には考慮が必要である。

供試体の飽和化の影響を考慮すると、最大軸差応力 q_{max} は次のように表す事が出来る。

$$q_{max} = f_{qmax}(S_r) \cdot g_{qmax}(\rho_d) \cdot h_{qmax}(D, S_r) \cdot j_{qmax}(S_a, S_r) \quad (7-3-6)$$

ここで、本研究では最大軸差応力はせん断破壊領域の影響が見られなかったことから、せん断破壊領域の影響 $h_{qmax}(D, S_r)$ 項を省略する。また、 $j_{qmax}(S_a, S_r)$ は飽和化による強度低下の影響で $0 < j_{qmax}(S_a, S_r) \leq 1.0$ である。いずれも締固め時の飽和度の影響が残る事から二変数としている。

式 7-3-6 を変形し、式 7-3-3 のように最大軸差応力を乾燥密度の関数 g_{qmax} で除すと、下式のようになる。

$$q_{max}/g_{qmax}(\rho_d) = f_{qmax}(S_r) \cdot j_{qmax}(S_a, S_r) \quad (7-3-7)$$

次に、割線ヤング率 E_{50} や初期ヤング率等の鉛直ヤング率 E_v は次のように変数分離式で表す事が出来る。

$$E_v = f_{Ev}(S_r) \cdot g_{Ev}(\rho_d) \cdot h_{Ev}(D, S_r) \cdot j_{Ev}(S_a, S_r) \quad (7-3-8)$$

ここで、せん断破壊領域の影響は、 $0 < h_{Ev}(D, S_r) \leq 1.0$ 、飽和化による剛性低下の影響は、 $0 < j_{Ev}(S_a, S_r) \leq 1.0$ である。いずれも締固め時の飽和度の影響が残る事から二変数としている。

式 7-3-8 を変形し、鉛直ヤング率を乾燥密度の関数 g_{qmax} で除すと、下式のようになる。

$$E_v/g_{qmax}(\rho_d) = f_{Ev}(S_r) \cdot h_{Ev}(D, S_r) \cdot j_{Ev}(S_a, S_r) \quad (7-3-9)$$

図 7-3-33、図 7-3-34 には図 6-9-10、図 6-9-13 に示した最大軸差応力、初期ヤング率を式 7-3-7、式 7-3-9 のように乾燥密度の関数で除した変数分離式～締固め時の飽和度関係を示す。それぞれ図中の不飽和供試体と飽和化した供試体のデータにはフィッティング線を併せて示している。飽和化した供試体の最大軸差応力のフィッティング式 $[f_{qmax}(S_r) \cdot j_{qmax}(S_a, S_r)]_2$ に用いたパラメーターは $A_1=4.5$ 、 $A_2=2.0$ 、 $x_0=26$ 、 $dx=7$ である。飽和度 $S_r=20\%$ において、飽和化の影響で $f_{qmax}(S_r) \cdot j_{qmax}(S_a, S_r)$ は、20%程度低下している事がわかる。また、高飽和度範囲では飽和化供試体の方がやや高い値を示す傾向であるが、詳しく考察するにはもう少しデータが必要である。次に、飽和化した供試体の初期ヤング率のフィッティング式 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r) \cdot j_{E0}(S_a, S_r)]_2$ に用いたパラメーターは $A_1=450$ 、 $A_2=120$ 、 $x_0=17$ 、 $dx=12$ である。飽和度 $S_r=20\%$ において、飽和化の影響で $f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r) \cdot j_{E0}(S_a, S_r)$ は、30%程度低下している事がわかる。また、最大軸差応力と同様に高飽和度範囲では飽和化供試体の方がやや高い値を示す傾向であった。

以上より、設計時に室内で作製した供試体の飽和三軸圧縮試験で求めた強度変形特性は、現場で求めた強度変形特性と飽和度の影響、乾燥密度の影響、せん断破壊領域の影響、飽和化の影響を考慮する事で推定する事ができ、現場に対する適用性の高い式が得られた。また、最適飽和度付近で管理すれば、せん断破壊領域の影響と飽和化の影響は無視できる程小さい事がわかった。飽和化の影響については、本研究でこれ以上調べる事が出来なかった為、飽和化が強度変形特性に与える影響に関する詳細な研究は今後の課題とする。

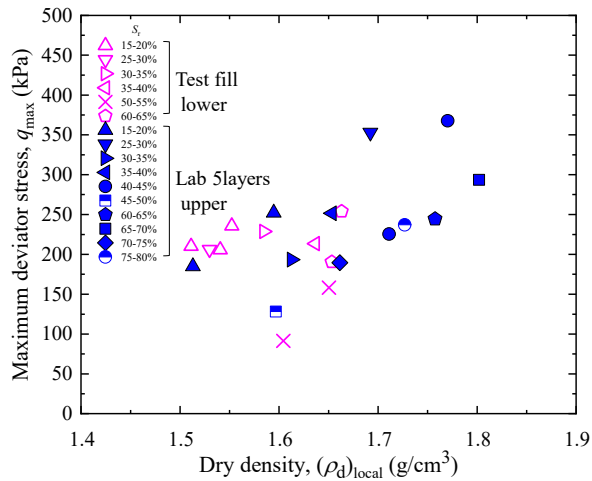


図 7-3-1 最大軸差応力～乾燥密度関係
(試験盛土下部、室内締固め上部)

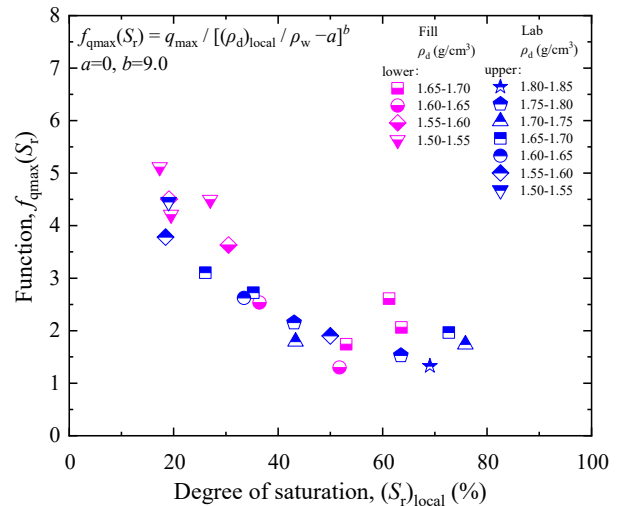


図 7-3-2 $f_{qmax}(S_r) \sim$ 飽和度関係
(試験盛土下部、室内締固め上部)

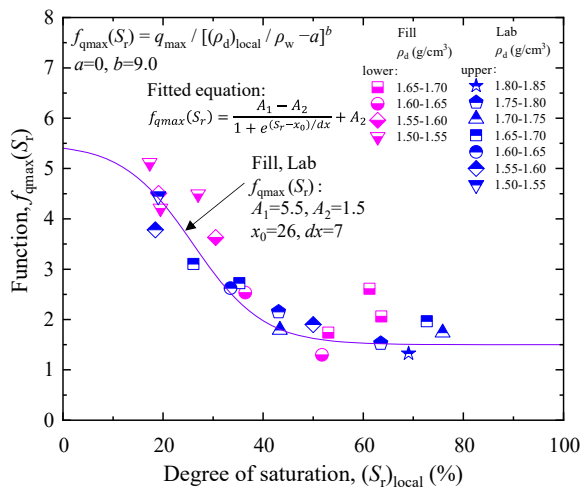


図 7-3-3 $f_{qmax}(S_r) \sim$ 飽和度関係と
フィッティング曲線

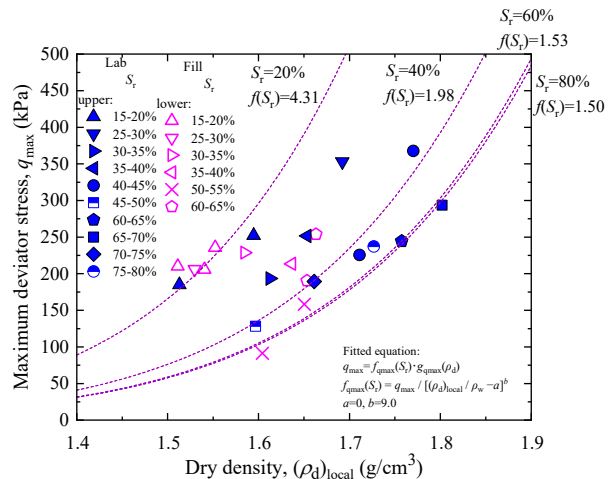


図 7-3-4 最大軸差応力～乾燥密度関係と
飽和度別の推定曲線

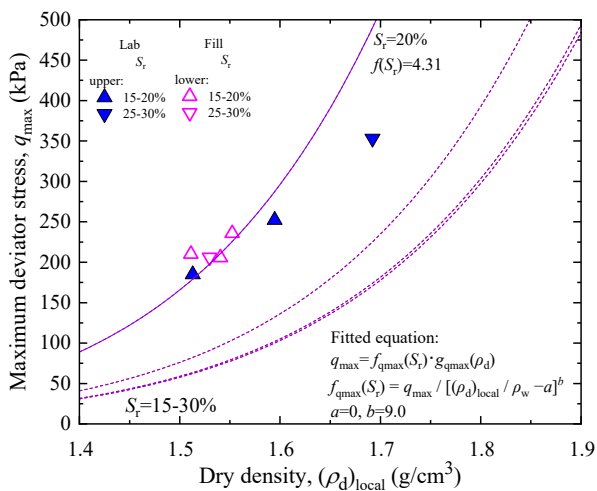


図 7-3-5 最大軸差応力～乾燥密度関係と
飽和度別推定曲線($S_r=20\%$)

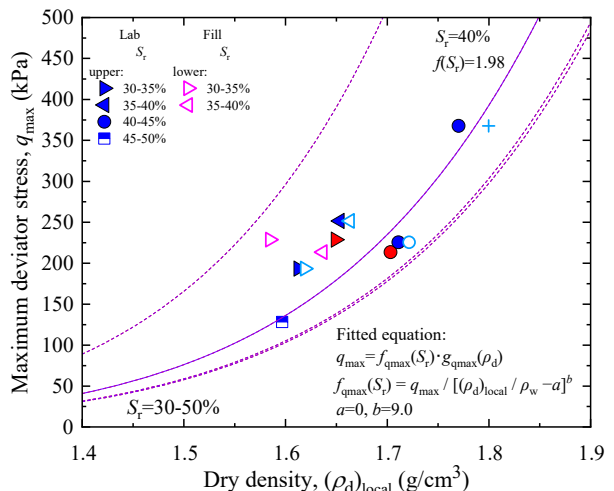


図 7-3-6 最大軸差応力～乾燥密度関係と
飽和度別推定曲線($S_r=40\%$)

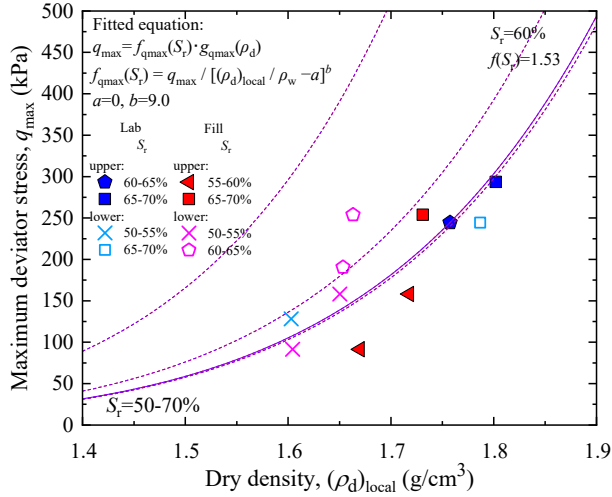


図 7-3-7 最大軸差応力～乾燥密度関係と飽和度別推定曲線($S_r=60\%$)

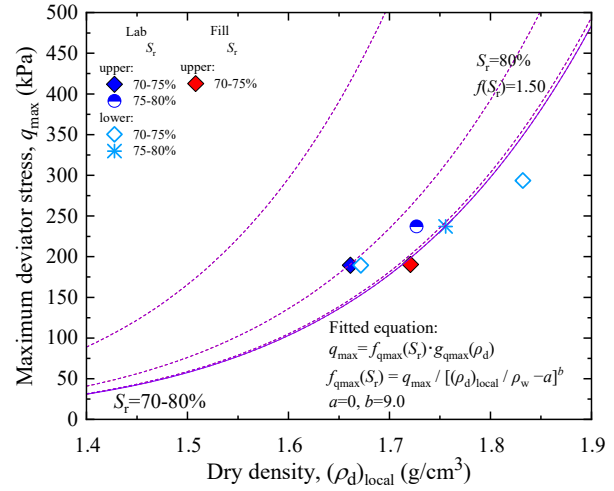


図 7-3-8 最大軸差応力～乾燥密度関係と飽和度別推定曲線($S_r=80\%$)

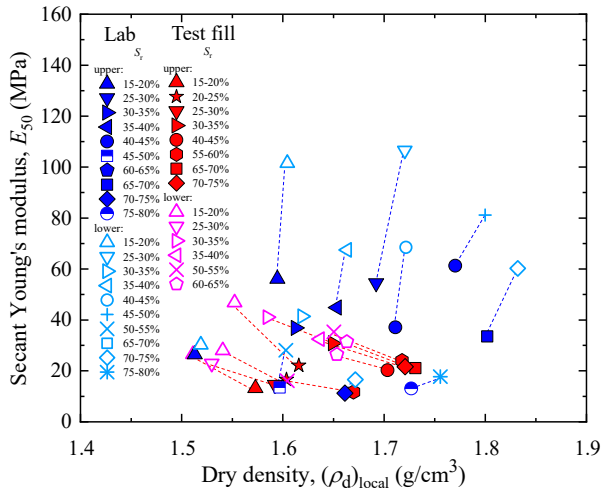


図 7-3-9 割線ヤング率～乾燥密度関係 (上部、下部)

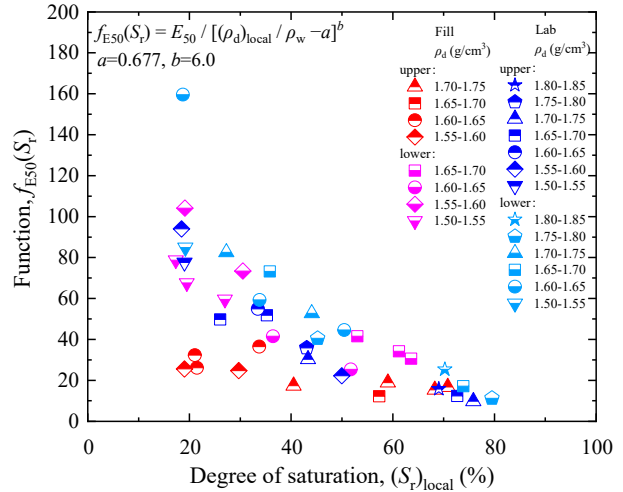


図 7-3-10 $f_{E50}(S_r)$ ～飽和度関係 (上部、下部)

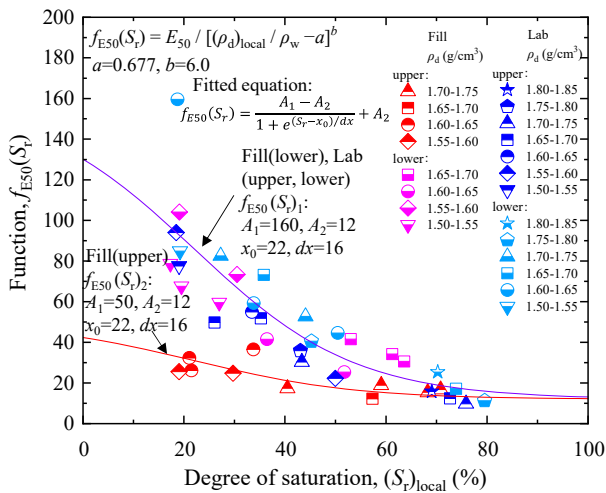


図 7-3-11 $f_{E50}(S_r)$ ～飽和度関係とフィッティング曲線

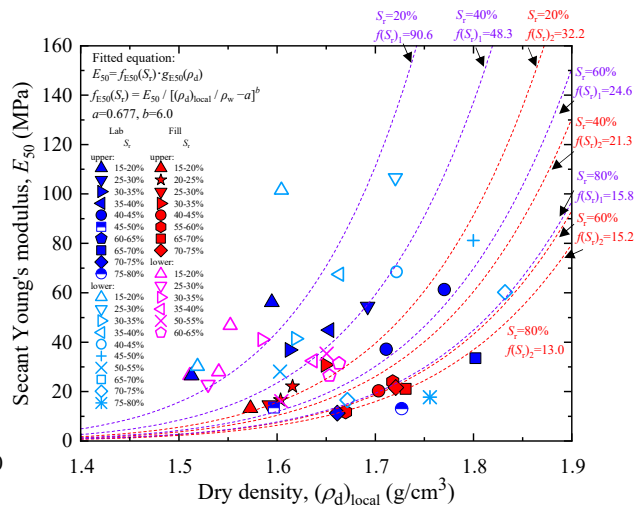


図 7-3-12 割線ヤング率～乾燥密度関係と飽和度別の推定曲線

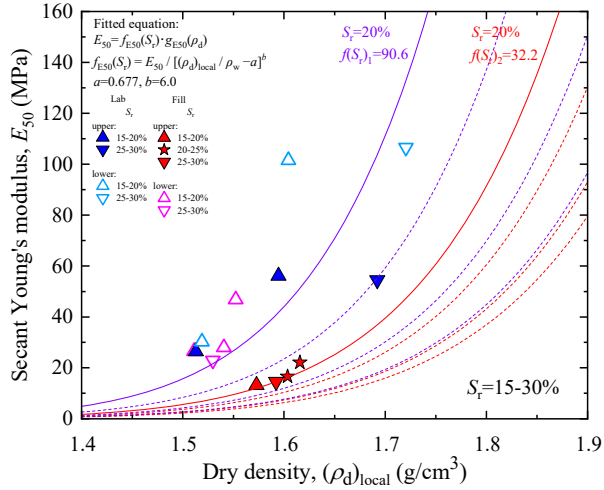


図 7-3-13 割線ヤング率～乾燥密度関係と飽和度別推定曲線($S_r=20\%$)

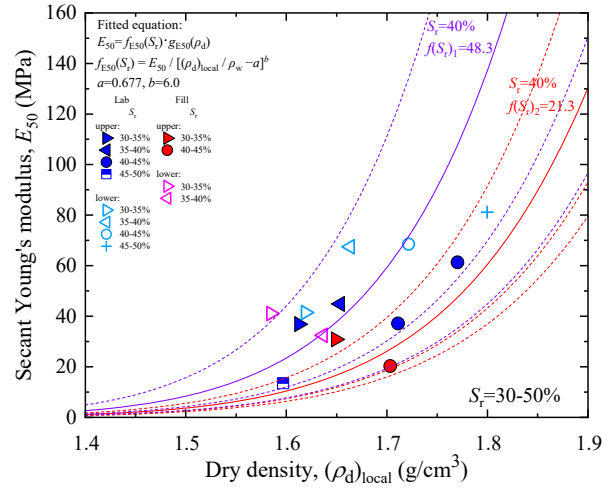


図 7-3-14 割線ヤング率～乾燥密度関係と飽和度別推定曲線($S_r=40\%$)

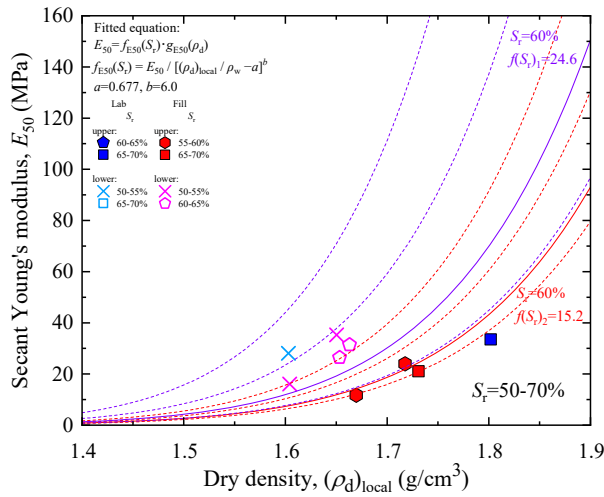


図 7-3-15 割線ヤング率～乾燥密度関係と飽和度別推定曲線($S_r=60\%$)

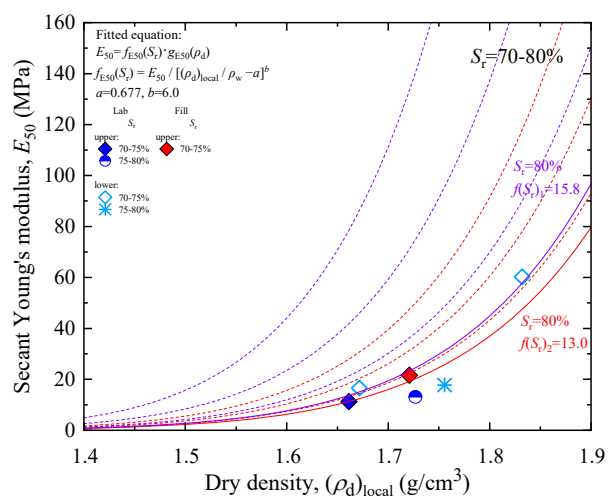


図 7-3-16 割線ヤング率～乾燥密度関係と飽和度別推定曲線($S_r=80\%$)

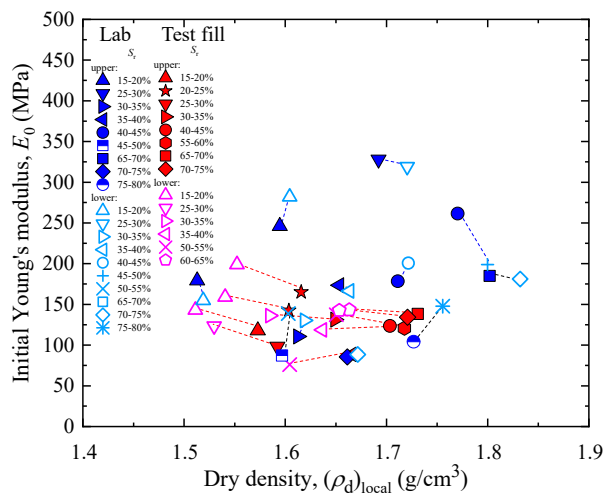


図 7-3-17 初期ヤング率～乾燥密度関係 (上部、下部)

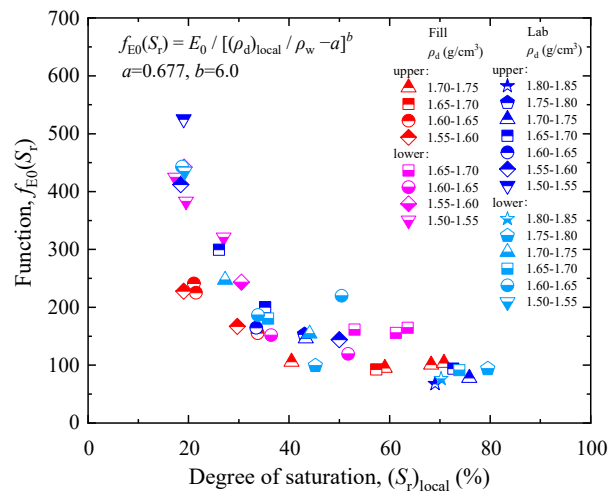


図 7-3-18 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係 (上部、下部)

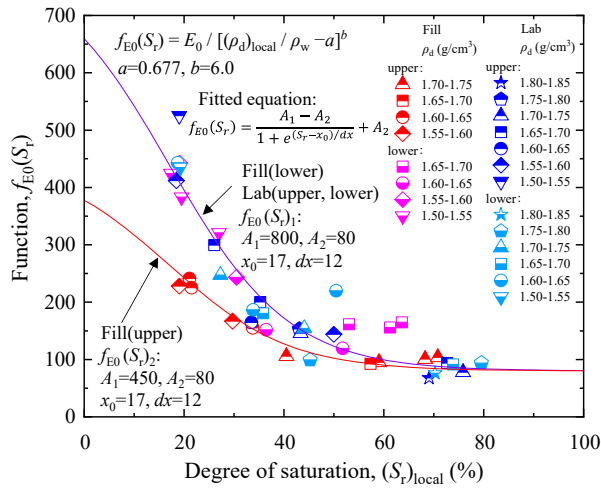


図 7-3-19 $f_{E0}(S_r) \sim$ 飽和度関係と
フィッティング曲線

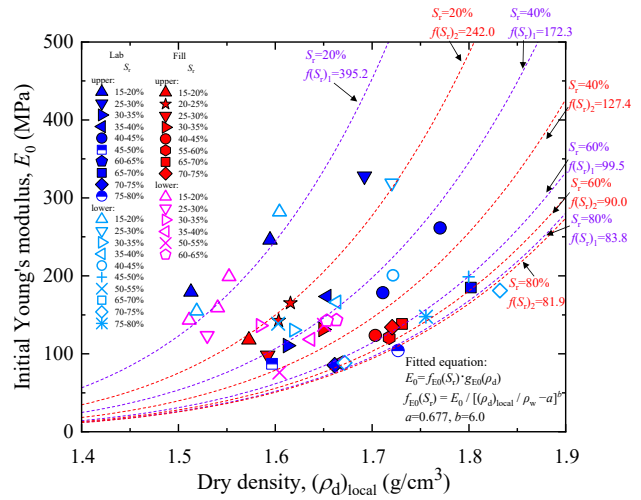


図 7-3-20 初期ヤング率～乾燥密度関係と
飽和度別の推定曲線

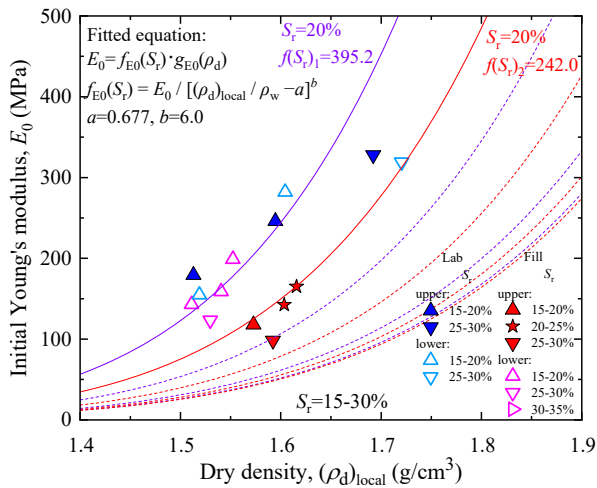


図 7-3-21 初期ヤング率～乾燥密度関係と
飽和度別推定曲線($S_r=20\%$)

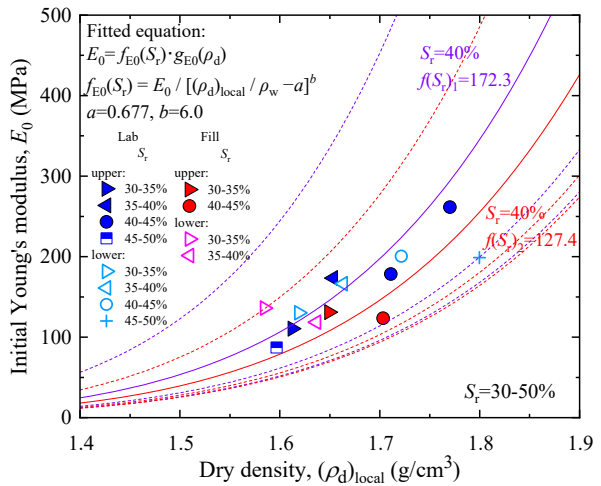


図 7-3-22 初期ヤング率～乾燥密度関係と
飽和度別推定曲線($S_r=40\%$)

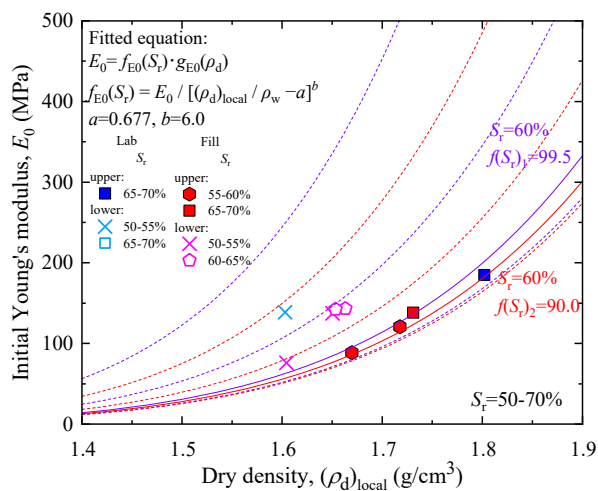


図 7-3-23 初期ヤング率～乾燥密度関係と
飽和度別推定曲線($S_r=60\%$)

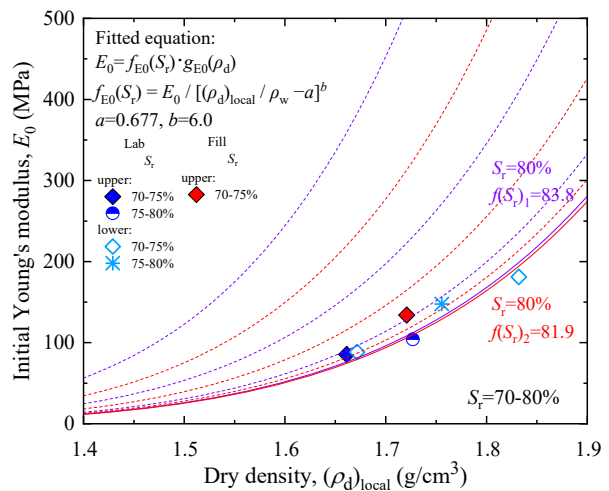


図 7-3-24 初期ヤング率～乾燥密度関係と
飽和度別推定曲線($S_r=80\%$)

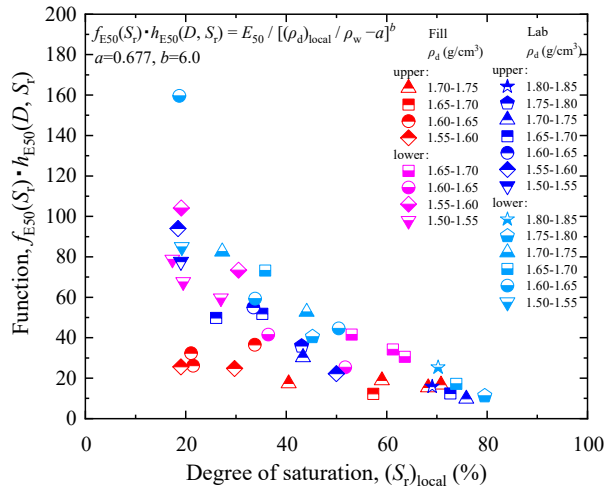


図 7-3-25 $f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係
(図 7-3-10 の縦軸を修正)

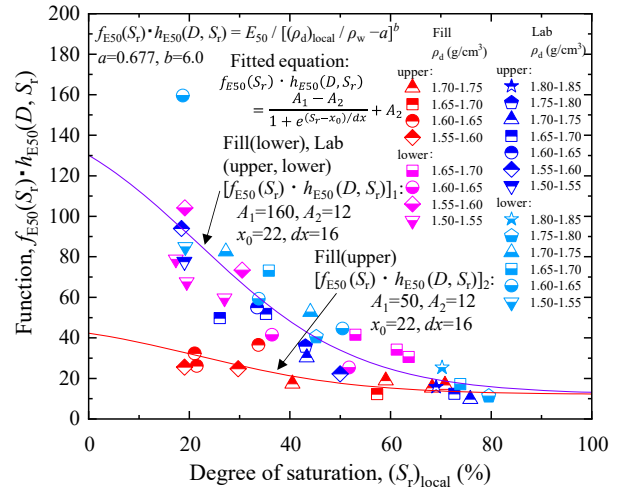


図 7-3-26 $f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係
(図 7-3-11 の縦軸を修正)

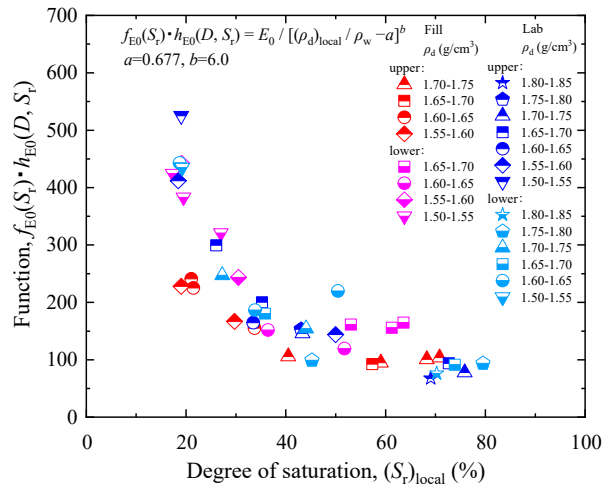


図 7-3-27 $f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係
(図 7-3-18 の縦軸を修正)

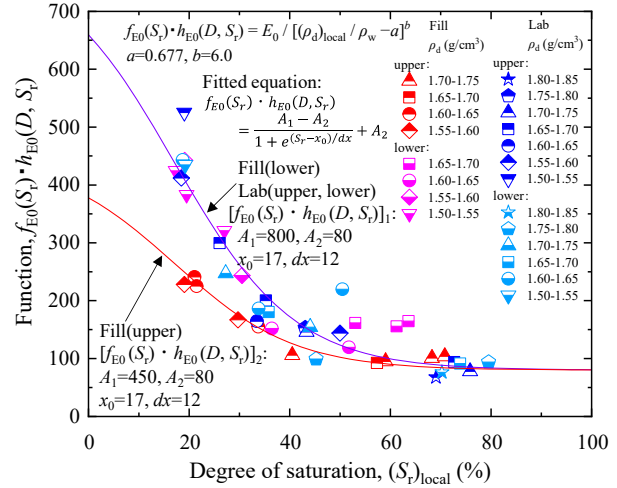


図 7-3-28 $f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係
(図 7-3-19 の縦軸を修正)

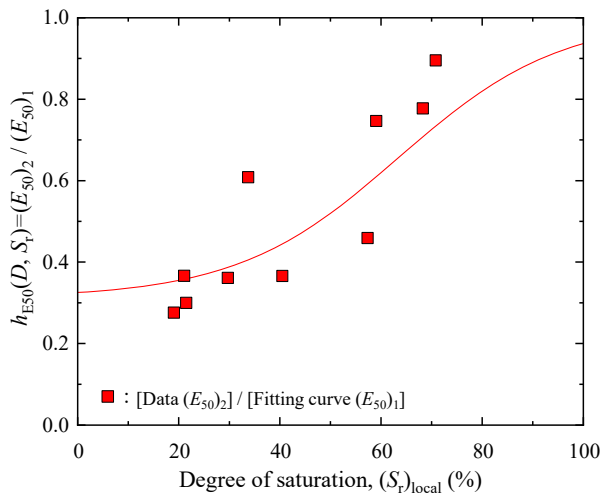


図 7-3-29 $h_{E50}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係
測定データとフィッティング線

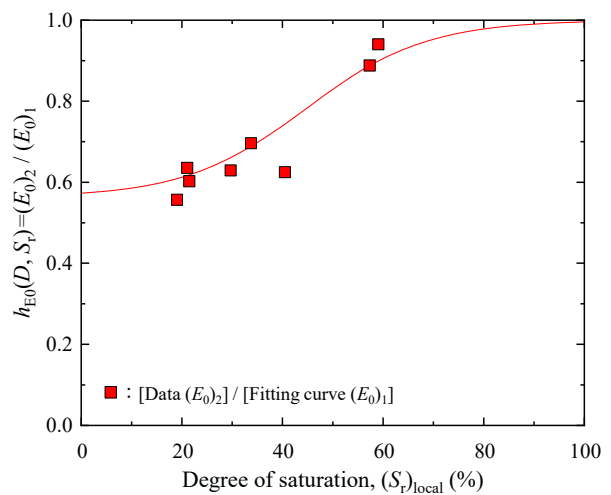


図 7-3-30 $h_{E0}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係
測定データとフィッティング線

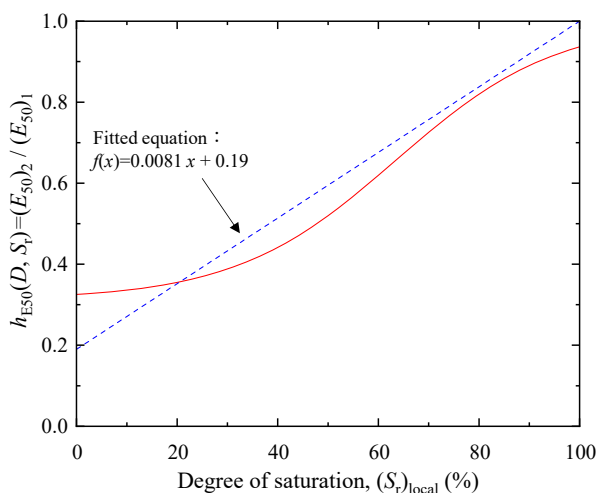


図 7-3-31 $h_{E50}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係と
フィッティング線

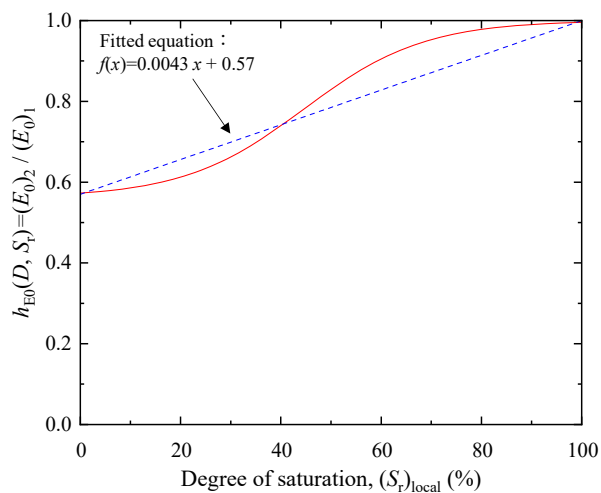


図 7-3-32 $h_{E0}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係と
フィッティング線

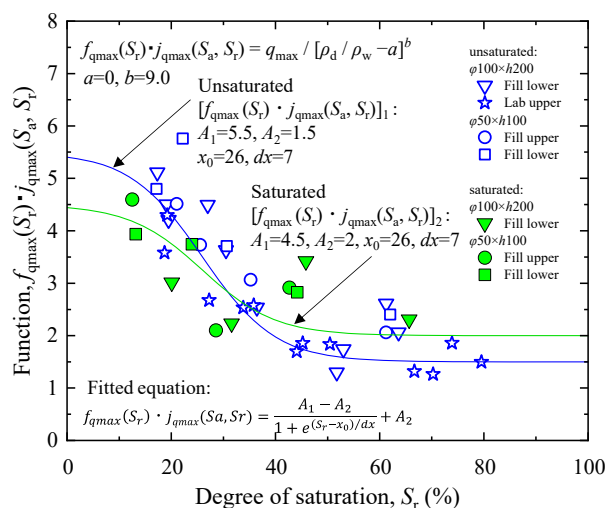


図 7-3-33 $f_{qmax}(S_r) \cdot j_{qmax}(S_a, S_r)$
～締固め時の飽和度関係 (図 6-9-10 を修正)

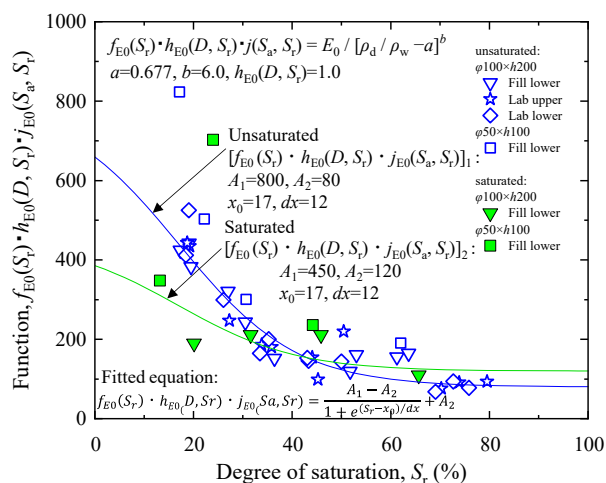


図 7-3-34 $f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r) \cdot j_{E0}(S_a, S_r)$
～締固め時の飽和度関係 (図 6-9-13 を修正)

7.4 室内締固め供試体を用いた現場締固め土の

強度変形特性推定方法の提案

ここまで室内締固め供試体及び試験盛土供試体は鉛直深度方向に非一様である事に着目し、局所的な破壊性を考慮した強度特性や鉛直深度別に設置した局所変位計による鉛直深度別の変形特性を評価してきた。しかし現在の実務に用いられる一般的な三軸圧縮試験は、供試体の非一様性を考慮する事は殆どなく、供試体の平均的な強度変形特性が評価される。そこで、本節では試験盛土供試体と室内締固め供試体について、これまでの供試体の非一様性を考慮して得られた強度変形特性を供試体平均から得られる強度変形特性と照らし合わせ、その違いを定量的に示し、室内締固め供試体を用いて簡易的に現場締固め供試体の強度変形特性を推定する事が可能である事を確認した。最後に供試体の非一様性の影響が小さい初期ヤング率から得られる最大軸差応力関係とそれに与える飽和度の影響について示した。

7.4.1 供試体の非一様性を考慮した強度変形特性と供試体平均の強度変形特性との比較

図 7-4-1 には、供試体平均の最大軸差応力～乾燥密度関係を示す。全体的な傾向として、試験盛土供試体と室内締固め供試体ともに乾燥密度が大きくなれば、最大軸差応力は増加する。さらに、この関係は飽和度の影響を受け、ばらつきが確認される。これは、図 7-3-1 に示した供試体の非一様性を考慮した最大軸差応力～乾燥密度関係と対応している。次に飽和度の関数 f_{qmax} ～飽和度関係を図 7-4-2 に示す。 f_{qmax} の算定方法とフィッティング線は図 7-3-2 と同様である。試験盛土供試体、室内締固め供試体ともにばらつきは認められるが、フィッティング線に沿って分布していることから、供試体平均の最大軸差応力は供試体の非一様性を考慮した強度変形特性と同等である。

すなわち、試験盛土供試体は室内締固め供試体に比べて非一様性が強い為、ピーク時に異なる破壊ひずみ、異なる局所破壊性状を示すものの、最大軸差応力発揮時には供試体平均の乾燥密度、飽和度を用いて評価できる事が示された。また、室内締固め供試体の最大軸差応力を用いれば、現場締固め供試体はほぼ同等の最大軸差応力であるとして推定する事が出来る事を確認した。

図 7-4-3 には、供試体平均の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係を示す。全体的な傾向として、試験盛土供試体と室内締固め供試体ともに乾燥密度が大きくなれば、割線ヤング率 E_{50} は増加する。さらに、この関係は飽和度の影響を受け、ばらつきが確認される。これは、図 7-3-9 に示した供試体の非一様性を考慮した割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係と類似するが、試験盛土供試体平均の割線ヤング率 E_{50} が小さいのは、試験盛土供試体上部が受けるせん断破壊領域の影響が含まれているからである。次に飽和度の関数 $f_{E50} \cdot h_{E50}$ ～飽和度関係を図 7-4-4 に示す。 $f_{E50} \cdot h_{E50}$ の算定方法とフィッティング線は図 7-3-25 と同様である。ここで、 $f_{E50} \cdot h_{E50}$ ～飽和度関係において、試験盛土供試体は室内締固め供試体と異なる傾向を示すが、これは試験盛土上部のせん断破壊領域の影響が含まれる為である。試験盛土供試体平均は試験盛土供試体上部のフィッティング関数 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_2$ に比較的近いが、室内締固め供試体上部及び下部、試験盛土供試体下部のフィッティング関数 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_1$ との中間に位置する。

本研究では試験盛土供試体の上部と下部で異なる変形特性を合成する評価をフックの法則に基づいて、鉛直ヤング率 E_v を次式に示すように直列に合成する方法を適用した。図 7-4-5 に模式図を示す。

$$(E_v)_{combined} = 2 / \{ 1 / (E_v)_{upper} + 1 / (E_v)_{lower} \} \quad (7-4-1)$$

飽和度の関数 $f_{E50} \cdot h_{E50}$ も式 5-2-12 に示す通り、割線ヤング率 E_{50} から構成される為、式 7-4-1 が適用可能で、

$$[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_{combined} = 2/\{1/[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_1 + 1/[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_2\} \quad (7-4-2)$$

と表す事が出来る。ここで、 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_1$ は室内締固め供試体上部と下部、試験盛土供試体下部の $f_{E50} \cdot h_{E50}$ ～飽和度関係におけるフィッティング関数、 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_2$ は試験盛土供試体上部のフィッティング関数であり、図 7-3-11 に示したものである。

図 7-4-6 は図 7-4-4 に式 7-4-2 を用いて合成したフィッティング関数 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_{combined}$ を加えている。 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_{combined}$ は、 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_1$ と $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_2$ の中間に位置し、やや $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_2$ に近い為、試験盛土供試体平均の $f_{E50} \cdot h_{E50}$ ～飽和度関係を良く表現出来ていると考える。

次に、図 7-4-7 には同じく飽和度の関数 $f_{E50} \cdot h_{E50}$ ～飽和度関係を示す。ここで、先と同様に $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_1$ は室内締固め供試体上部と下部、試験盛土供試体下部の $f_{E50} \cdot h_{E50}$ ～飽和度関係におけるフィッティング関数であるが、 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_3$ は図 7-3-31 に示したせん断破壊領域の影響関数 h_{E50} から簡易的に求めた関数である。 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_3$ は式の性質上、 $S_r=0\% \sim 15\%$ の範囲でやや低下しているが、測定値の飽和度の範囲 $S_r=15\% \sim 80\%$ では問題ないと考える。

図 7-4-8 は図 7-4-7 に式 7-4-2 を用いて合成した簡易推定曲線 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_{combined}$ を加えている。 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_{combined}$ は、 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_1$ と $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_3$ の中間に位置し、やや $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_3$ に近い為、測定した飽和度の範囲では、試験盛土供試体平均の $f_{E50} \cdot h_{E50}$ ～飽和度関係を十分に良く表現出来ている。

図 7-4-9 には、供試体平均の初期ヤング率～乾燥密度関係を示す。全体的な傾向は割線ヤング率 E_{50} と同様に、試験盛土供試体と室内締固め供試体ともに乾燥密度が大きくなれば、初期ヤング率は増加する。さらに、この関係は飽和度の影響を受け、ばらつきが確認される。これは、図 7-3-17 に示した供試体の非一様性を考慮した初期ヤング率～乾燥密度関係と類似するが、試験盛土供試体上部が受けるせん断破壊領域の影響が考慮されていない。次に飽和度の影響を評価する為に飽和度の関数 $f_{E0} \cdot h_{E0}$ ～飽和度関係を図 7-4-10 に示す。 $f_{E0} \cdot h_{E0}$ の算定方法とフィッティング線は図 7-3-27 と同様である。 $f_{E0} \cdot h_{E0}$ ～飽和度関係も試験盛土供試体は室内締固め供試体と異なる傾向を示すが、試験盛土上部のせん断破壊領域の影響が含まれる為である。試験盛土供試体平均は試験盛土供試体上部のフィッティング関数 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_2$ と、室内締固め供試体上部及び下部、試験盛土供試体下部のフィッティング関数 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_1$ との中間に位置する。

飽和度の関数 $f_{E0} \cdot h_{E0}$ も式 5-2-6 に示す通り、初期ヤング率から構成される為、式 7-4-1 が適用可能で、

$$[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_{combined} = 2/\{1/[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_1 + 1/[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_2\} \quad (7-4-3)$$

と表す事が出来る。ここで、 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_1$ は室内締固め供試体上部と下部、試験盛土供試体下部の $f_{E0} \cdot h_{E0}$ ～飽和度関係におけるフィッティング関数、 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_2$ は試験盛土供試体上部のフィッティング関数であり、図 7-3-19 に示したものである。

図 7-4-11 は図 7-4-10 に式 7-4-3 を用いて合成したフィッティング関数 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_{combined}$ を加えている。 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_{combined}$ は、 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_1$ と $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_2$ の中間に位置し、試験盛土供試体平均の $f_{E0} \cdot h_{E0}$ ～飽和度関係を良く表現出来ていると考える。

次に、図 7-4-12 には同じく飽和度の関数 $f_{E0} \cdot h_{E0}$ ～飽和度関係を示す。ここで、先と同様に $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_1$ は室内締固め供試体上部と下部、試験盛土供試体下部の $f_{E0} \cdot h_{E0}$ ～飽和度関係におけるフィッティング関数であるが、 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_3$ は図 7-3-30 に示したせん断破壊領域の影響関数 h_{E50} のフィッティング線より簡易的に求めた関数

である。測定値の飽和度の範囲 $S_r=15\% \sim 80\%$ では問題ないと考える。

図 7-4-13 は図 7-4-12 に式 7-4-3 を用いて合成した簡易推定曲線 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_{combined}$ を加えている。 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_{combined}$ は、 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_1$ と $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_3$ の中間に位置し、測定した飽和度の範囲では、試験盛土供試体平均の $f_{E0} \cdot h_{E0} \sim$ 飽和度関係を十分に良く表現出来ている。

以上より、試験盛土供試体平均の変形特性は室内締固め供試体上部及び下部、試験盛土供試体下部で求めた関数 $[f_{Ev}(S_r) \cdot h_{Ev}(D, S_r)]_1$ と、試験盛土供試体上部で求めた関数 $[f_{Ev}(S_r) \cdot h_{Ev}(D, S_r)]_2$ 、またはせん断破壊領域の影響関数 h_{E50} を考慮して簡易的に求めた関数 $[f_{Ev}(S_r) \cdot h_{Ev}(D, S_r)]_3$ を用いた合成ばねの式を用いた、 $[f_{Ev}(S_r) \cdot h_{Ev}(D, S_r)]_{combined}$ により供試体平均の変形特性を推定する方法を提案した。

7.4.2 最大軸差応力～初期ヤング率関係とそれに与える飽和度の影響

図 7-4-14 は、試験盛土供試体平均と室内締固め供試体平均の最大軸差応力～初期ヤング率関係を示す。試験盛土供試体及び室内締固め供試体はともにややばらつきはあるものの、初期ヤング率が大きくなると最大軸差応力は増加している。試験盛土供試体、室内締固め供試体ともに最大軸差応力～乾燥密度の間には正の相関関係があり、飽和度の影響も両供試体が同等である事は図 7-4-1、図 7-4-2 で示した。また、図 7-4-9、図 7-4-10 に示したが、両供試体の初期ヤング率は割線ヤング率 E_{50} に比べて乾燥密度との間の正の相関関係や飽和度の影響等が比較的類似しており、これが試験盛土供試体、室内締固め供試体ともに最大軸差応力～初期ヤング率関係が同等の比例関係を示す理由と考える。

図 7-4-15 には図 7-4-14 に加え、試験盛土供試体、室内締固め供試体の最大軸差応力～初期ヤング率の飽和度別の推定曲線を示す。この推定曲線は図 7-3-4、図 7-3-20 に示した飽和度別の最大軸差応力～乾燥密度の推定曲線と飽和度別の初期ヤング率～乾燥密度の推定曲線に基づいて作成している。推定曲線は飽和度 $S_r=20\% \sim 80\%$ の範囲で示しており、飽和度 $S_r=40\% \sim 80\%$ の範囲において試験盛土供試体と室内締固め供試体ともに飽和度の影響によるばらつきが少なく一義的な比例関係を示しているが、飽和度 $S_r=20\%$ 付近まで考慮すると、飽和度の影響が大きくなっている。

図 7-4-1、図 7-4-2 では室内締固め供試体の最大軸差応力から試験盛土供試体の最大軸差応力を精度よく推定する事が可能である事を述べたが、室内締固め供試体と試験盛土供試体の強度変形特性の違いの少ない最大軸差応力～乾燥密度関係及び初期ヤング率～乾燥密度関係を用いると、せん断破壊領域の影響による現場と室内の違いは多少含まれるが、最大軸差応力を初期ヤング率から推定する事が可能である事を示した。この初期ヤング率～最大軸差応力関係は、室内試験で求めた初期ヤング率だけでなく、現場で求めた初期ヤング率から現場の強度定数がある程度推定出来る事を示唆している。ただし、飽和度 $S_r=20\%$ 程度の低い飽和度範囲では飽和度の影響によるばらつきが生じやすい事も明らかにした。Tatsuoka & Miura(2019)は、藤沼ダムの復旧工事におけるコア材の締固め管理に締固め時の土の飽和度範囲を最適飽和度 $(S_r)_{opt} \pm 5\%$ 以内に規定して施工管理した事を報告している。本研究で扱った試料もこの程度の飽和度範囲で管理する事が出来れば、現場と室内で締め固めた供試体ともに飽和度の影響によるばらつきを殆ど無視する事が可能と考える。

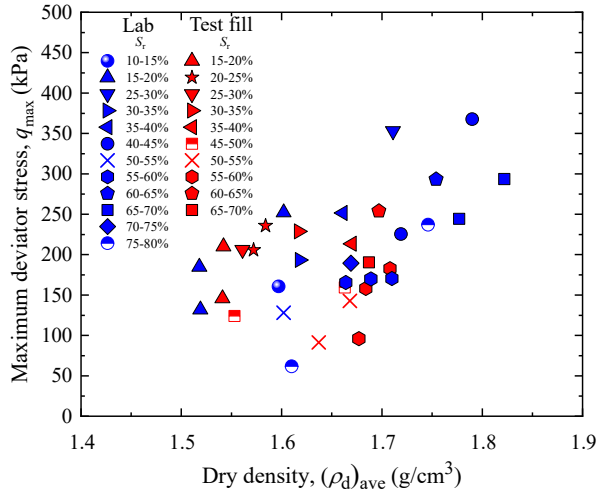


図 7-4-1 最大軸差応力～乾燥密度関係

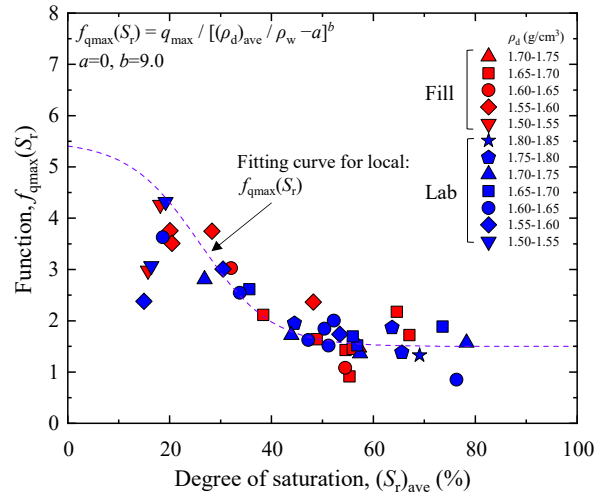


図 7-4-2 $f_{E50}(S_r) \sim$ 平均飽和度関係と
局所飽和度から求めたフィッティング曲線

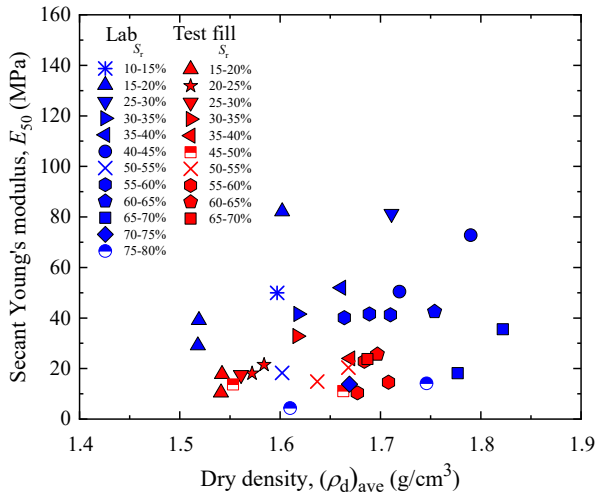


図 7-4-3 割線ヤング率～乾燥密度関係

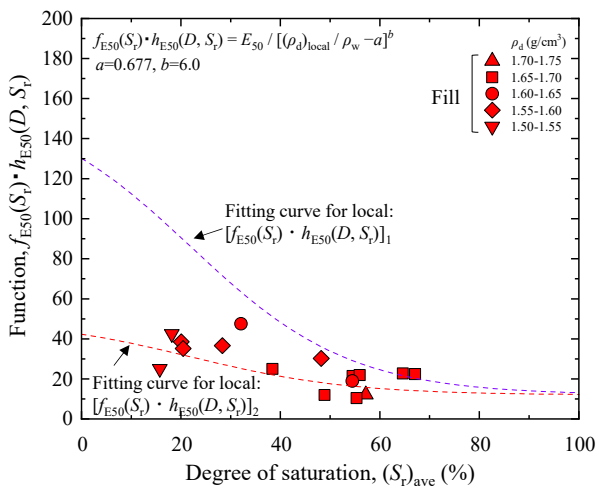


図 7-4-4 $f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r) \sim$ 平均飽和度関係と
局所飽和度から求めたフィッティング曲線

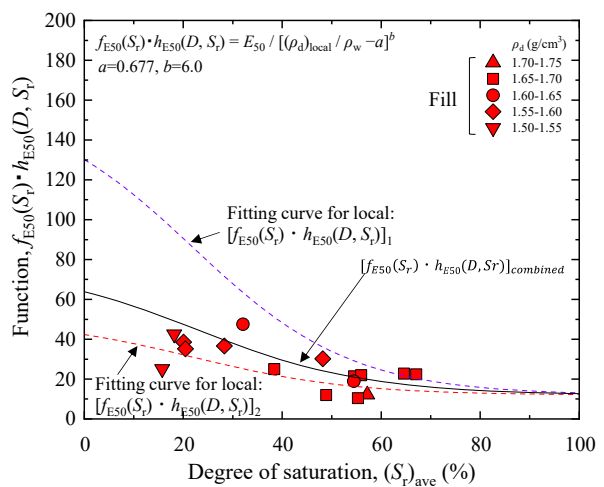


図 7-4-6 $f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r) \sim$ 平均飽和度関係と
試験盛土供試体平均の $f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)$ 推定曲線

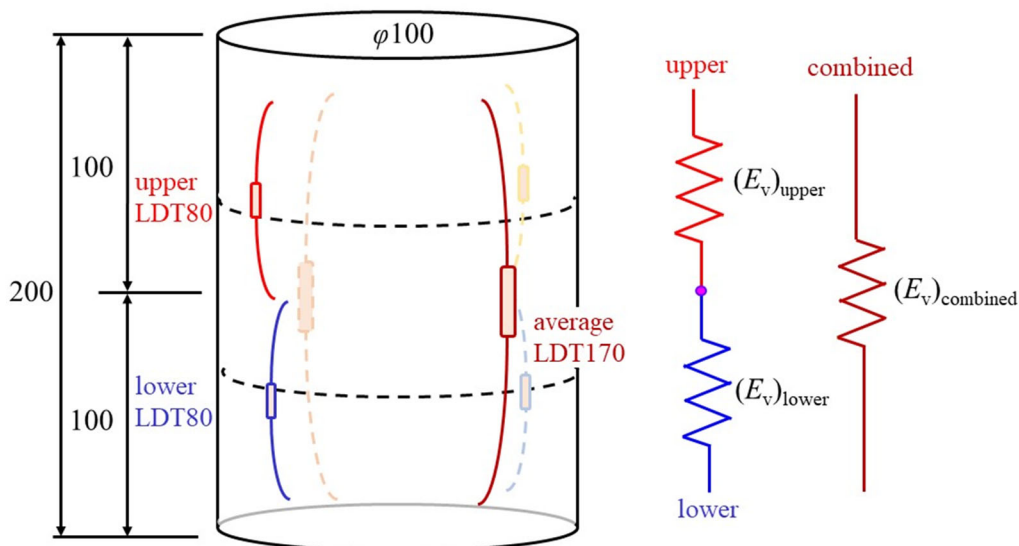


図 7-4-5 フックの法則による直列鉛直ヤング率の合成模式図

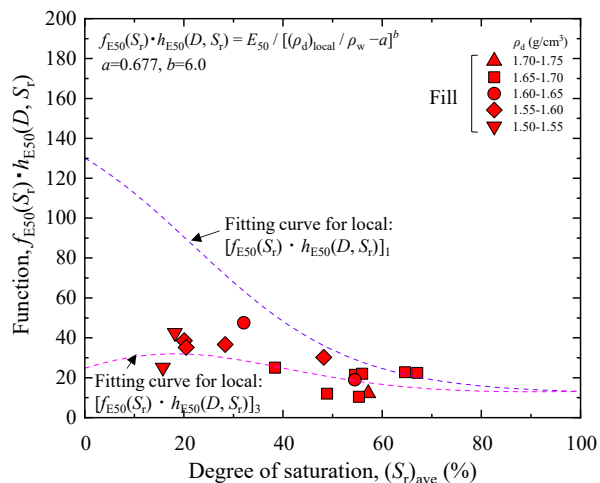


図 7-4-7 $f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r) \sim$ 平均飽和度関係
簡易的に求めたフィッティング曲線

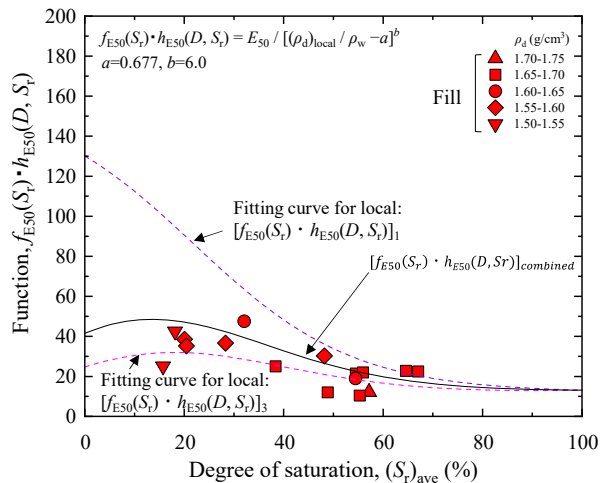


図 7-4-8 $f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r) \sim$ 平均飽和度関係と
試験盛土供試体平均の簡易推定曲線

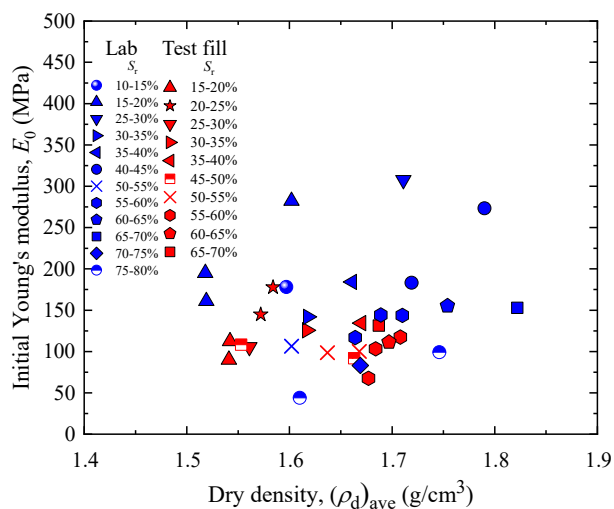


図 7-4-9 初期ヤング率～乾燥密度関係

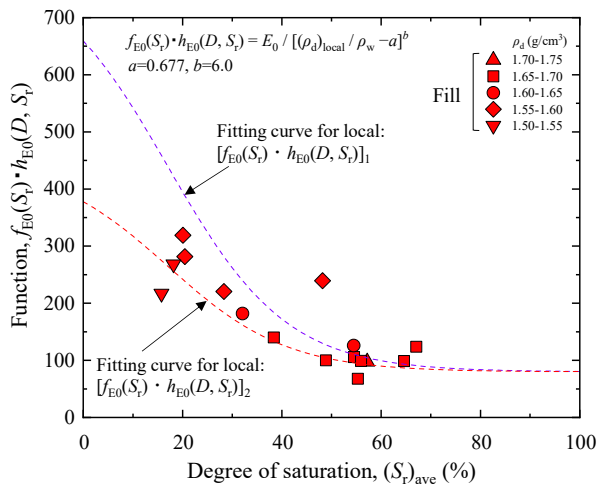


図 7-4-10 $f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r) \sim$ 平均飽和度関係と局所飽和度から求めたフィッティング曲線

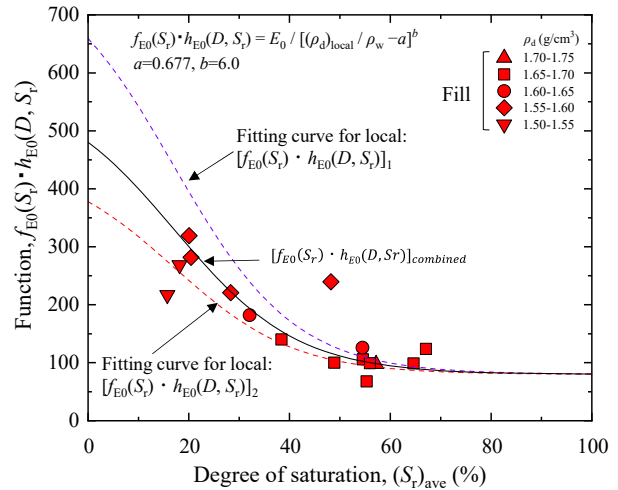


図 7-4-11 $f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r) \sim$ 平均飽和度関係と試験盛土供試体平均の $f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)$ 推定曲線

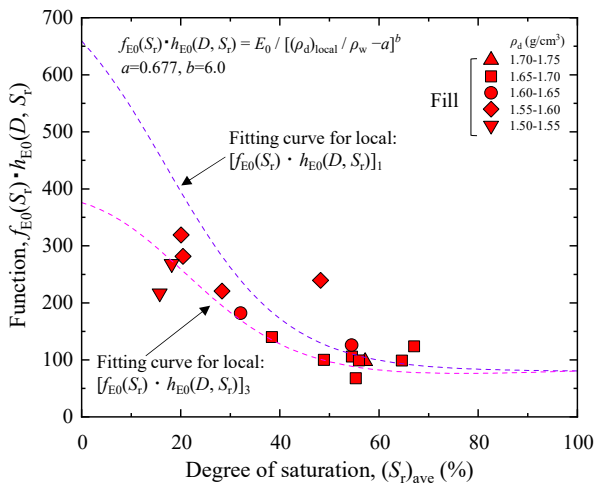


図 7-4-12 $f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r) \sim$ 平均飽和度関係と簡易的に求めたフィッティング曲線

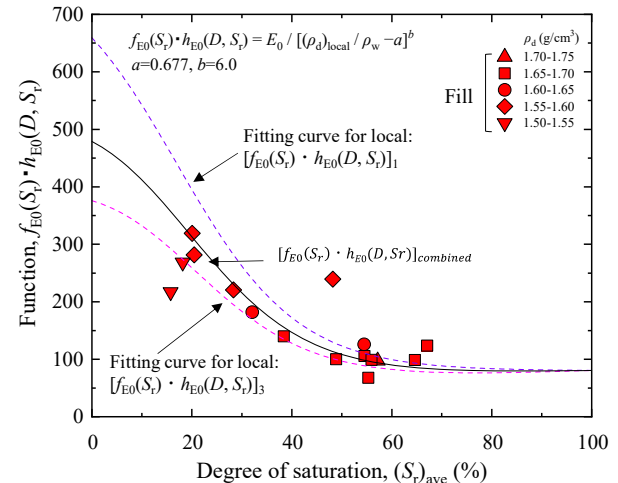


図 7-4-13 $f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r) \sim$ 平均飽和度関係と試験盛土供試体平均の簡易推定曲線

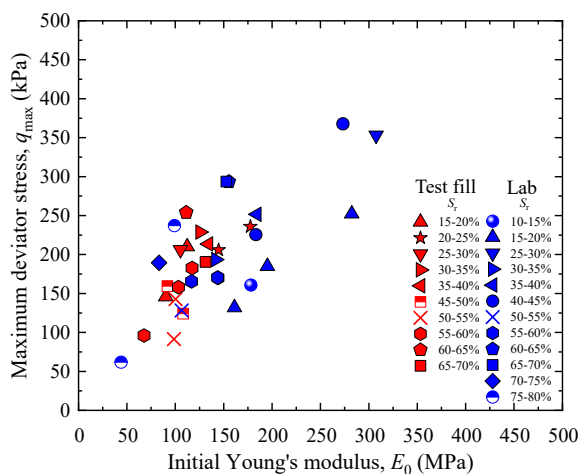


図 7-4-14 最大軸差応力～初期ヤング率関係

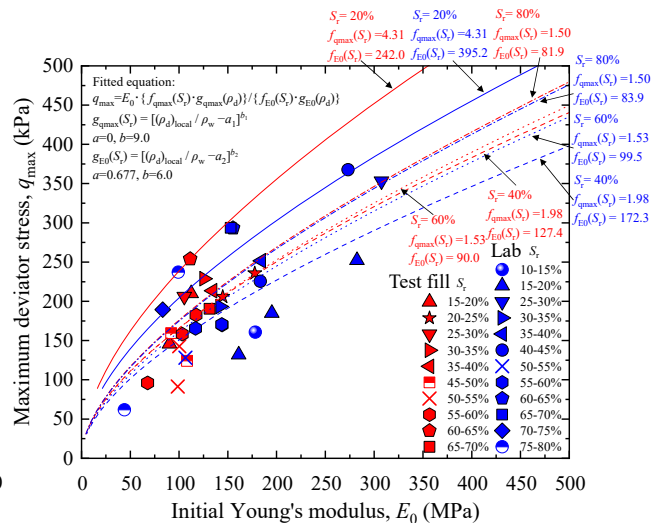


図 7-4-15 最大軸差応力～初期ヤング率関係と推定曲線 (供試体平均)

7.5 各推定方法のばらつき評価と妥当性の検証

これまで三軸圧縮試験により得られた最大軸差応力、割線ヤング率 E_{50} 及び初期ヤング率の測定値を基に、現場と室内で締め固めた供試体の強度変形特性の特徴を整理し、それらに含まれる乾燥密度の影響、飽和度の影響、せん断破壊領域の影響を考慮しながら推定方法を提案してきた。締め固めた土の強度変形特性を評価する際に生じるばらつきの主要因が上記の 3 つである事を仮定すると、それらの影響を考慮しても生じるばらつきは、供試体の取扱いや三軸圧縮試験機の操作、計測機器の設置等の物理特性とは異なる影響による測定の不確かさである事になる。

4.5 では締め固めた供試体の初期サクシオンについて、飽和度との関係を整理した場合と含水比との関係を整理した場合をそれぞれ比較した結果、飽和度で整理すると乾燥密度の影響でばらつきが生じるが、含水比で整理するとばらつきが殆ど現れない事を示した。また、5.2 及び 6.2 には室内締固め供試体と試験盛土供試体それぞれの強度変形特性は飽和度との関係で整理するより含水比で整理した方がばらつきは少ない事を述べた。Tatsuoka & Correia(2018)は図 2-4-13 で示したように、CBR 等の強度特性を土粒子重量に対する間隙水重量を意味する含水比で整理するより、間隙体積に対する間隙水の体積を意味する飽和度で整理する方が特に高含水状態においては本質的である事を説明している。本研究では最適含水比より乾燥側の供試体が多い為、飽和度で整理した場合と含水比で整理した場合の強度変形特性と乾燥密度関係における、測定値に対する推定値との違いとそのばらつきの程度を比較した。また、初期サクシオンについても同様に飽和度で整理した場合と含水比で整理した場合を比較し、初期サクシオンと乾燥密度関係における測定値に対する推定値との違いとばらつきの程度を評価した。最後に、7.3.4 及び 7.4 で提案した供試体平均の変形特性の簡易推定方法について測定値に対する推定値との違いとそのばらつきの程度を評価し、提案式の妥当性を検証した。

7.5.1 飽和度と含水比別に整理した強度変形特性のばらつき評価

図 7-5-1、図 7-5-2 にはそれぞれ飽和度と含水比別に整理した試験盛土供試体下部と室内締固め供試体上部の最大軸差応力～乾燥密度関係を示す。それぞれ同じ飽和度、同じ含水比条件において乾燥密度に対する最大軸差応力の増加傾向がやや異なり、含水比別に整理した方がやや緩やかである。図 7-5-3、図 7-5-4 は飽和度と含水比別それぞれの飽和度の関数 f_{qmax} ～飽和度関係と含水比の関数 f_{qmax} ～含水比関係を示す。ここで、土質材料による異なる係数について、飽和度の関数 f_{qmax} は $a=0$ 、 $b=9.0$ 、含水比の関数 f_{qmax} は $a=0$ 、 $b=6.0$ とし、各々乾燥密度の影響が小さくなるよう調整している。また、図中には式 7-3-1 を用いたフィッティング線も示している。飽和度の関数 f_{qmax} のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=5.5$ 、 $A_2=1.5$ 、 $x_0=26$ 、 $dx=7$ 、含水比の関数 f_{qmax} のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=21$ 、 $A_2=7$ 、 $x_0=7$ 、 $dx=3$ である。図 7-5-5、図 7-5-6 には図 7-5-1、図 7-5-2 で示した最大軸差応力～乾燥密度関係に加え、先に示したフィッティング曲線に基づいて作成した飽和度 $S_r=20\%$ 、 40% 、 60% 、 80% 、及び含水比 $w=5\%$ 、 9% 、 13% 、 17% それぞれの推定曲線を示す。最大軸差応力～乾燥密度関係を含水比別で整理すると、飽和度別に比べて緩やかな傾向を示す。また、含水比別の整理には Tatsuoka & Correia(2018)が CBR～乾燥密度関係で示したような乾燥密度が大きくなると最大軸差応力急に低下する傾向は見られていない。これは、本研究で扱った供試体の含水比が比較的低い範囲であった為であると考えられる。

飽和度別、含水比別の測定値と推定曲線とのばらつきを比較する事を目的に、測定値と推定値の差を測定値で正規化し、測定値と推定値間のばらつきを評価する事とした。図 7-5-7、図 7-5-8 には飽和度別、含水比別それぞれの測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度関係を示す。どちらの図も試験盛土供試体、室内締固め供試体ともに多少のばらつきは認められるが、全体的に乾燥密度に関わらず測定値と推定値の差は $\pm 0.5\%$ 程度である。乾燥密度の影響が殆どない事は、式 5-2-3 で示した式と土質定数に応じて異なる係数 a 、 b の設定が適切であった事を意味する。

また、測定値と推定値の差が 0 に近い程、式 7-3-1 で示した式とフィッティングに用いた係数 A_1 、 A_2 、 x_0 、 dx の設定が適切であった事を意味する。ただし、含水比別に整理したデータには-0.5 をやや超える特異点が 1 点認められる。これは供試体の取扱いや三軸圧縮試験機の操作、計測機器の設置等の物理特性とは異なる影響によるものである可能性がある。図 7-5-9、図 7-5-10 は、それぞれ最大軸差応力の測定値と推定値間のばらつき～飽和度関係、測定値と推定値間のばらつき～含水比関係を示す。飽和度別で整理した測定値と推定値の差のばらつきは飽和度の大小に関わらず一定で、飽和度の影響も現れていない。また、含水比別で整理した測定値と推定値の差のばらつきも含水比の大小に関わらず一定で、含水比の影響は現れていない。先に示した試験盛土供試体で確認された特異な点は含水比の影響ではない事がわかる。図 7-5-11、図 7-5-12 は、最大軸差応力の測定値と推定値間のばらつき～測定値関係を示す。どちらの図も試験盛土供試体、室内締固め供試体ともに多少のばらつきは認められるが、全体的に最大軸差応力に関わらず測定値と推定値の差は±0.5%程度である。

図 7-5-13、図 7-5-14 には飽和度別、含水比別それぞれ、最大軸差応力の測定値と推定値間のばらつきの頻度分布と確率密度曲線を示す。飽和度整理の平均値は $\mu=0.073$ 、標準偏差は $\sigma=0.155$ 、含水比整理の平均値は $\mu=-0.031$ 、標準偏差は $\sigma=0.185$ でやや含水比整理の標準偏差が大きい両者はほぼ同等であると考ええる。図 7-5-15、図 7-5-16 には飽和度別、含水比別それぞれ、最大軸差応力の推定値～測定値関係を示す。図中には 1:1、1:1.1、1:0.9、 $\mu \pm 1\sigma$ の補助線を併せて示す。測定値と推定値の差は、飽和度別整理と含水比別整理に関わらず±10%の範囲には収まらなかったが、±20%程度のばらつきで推定する事が出来る事がわかった。

図 7-5-17、図 7-5-18 にはそれぞれ飽和度と含水比別に整理した試験盛土供試体と室内締固め供試体の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係を示す。それぞれ同じ飽和度、同じ含水比条件において乾燥密度に対する割線ヤング率 E_{50} の増加傾向がやや異なり、含水比別に整理した方がやや緩やかな傾向である。図 7-5-19、図 7-5-20 は飽和度と含水比別それぞれの飽和度の関数 $f_{E50} \cdot h_{E50}$ ～飽和度関係と含水比の関数 $f_{E50} \cdot h_{E50}$ ～含水比関係を示す。ここで、土質材料による異なる係数について、飽和度の関数 $f_{E50} \cdot h_{E50}$ は $a=0.677$ 、 $b=6.0$ 、含水比の関数 $f_{E50} \cdot h_{E50}$ は $a=0.677$ 、 $b=3.0$ とし、各々乾燥密度の影響が小さくなるよう調整している。また、図中には式 7-3-1 を用いたフィッティング線も示している。飽和度の関数 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_1$ のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=160$ 、 $A_2=12$ 、 $x_0=22$ 、 $dx=16$ 、 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_2$ のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=50$ 、 $A_2=12$ 、 $x_0=22$ 、 $dx=16$ 、含水比の関数 $[f_{E50}(w) \cdot h_{E50}(D, w)]_1$ のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=130$ 、 $A_2=12$ 、 $x_0=7$ 、 $dx=3$ 、 $[f_{E50}(w) \cdot h_{E50}(D, w)]_2$ のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=35$ 、 $A_2=12$ 、 $x_0=7$ 、 $dx=3$ である。図 7-5-21、図 7-5-22 には図 7-5-17、図 7-5-18 で示した割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係に加え、先に示したフィッティング曲線に基づいて作成した飽和度 $S_r=20\%$ 、 40% 、 60% 、 80% 、及び含水比 $w=5\%$ 、 9% 、 13% 、 17% それぞれの推定曲線を示す。割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係を含水比別で整理すると、飽和度別に比べて緩やかな傾向を示す。

次に測定値と推定値の差を測定値で正規化し、測定値と推定値間のばらつきを評価について整理した結果を示す。図 7-5-23、図 7-5-24 には飽和度別、含水比別それぞれの測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度関係を示す。どちらの図も試験盛土供試体、室内締固め供試体ともにばらつきが大きい、全体的に乾燥密度に関わらず測定値と推定値の差は-1.0%～0.5%程度である。含水比別に整理した図 7-5-24 は乾燥密度 $\rho_d=1.50 \sim 1.60 \text{g/cm}^3$ の範囲でのみやや乾燥密度の影響が認められるが、それ以外は殆ど影響がないと考える。図 7-5-25、図 7-5-26 は、それぞれ割線ヤング率 E_{50} の測定値と推定値間のばらつき～飽和度関係、測定値と推定値間のばらつき～含水比関係を示す。飽和度別で整理した測定値と推定値の差のばらつきはやや大きい飽和度の大小に関わらず一定で、飽和度の影響も現れていない。また、含水比別で整理した測定値と推定値の差のばらつきもやや大きい含水比の大小に関わらず一定で、含水比の影響は現れていない。図 7-5-27、図 7-5-28 は、飽和度別、含水比別それぞれ、割線ヤング率 E_{50} の測定値と推定値間のばらつき～測定値関係を示す。どちらの図も試験盛土供試体、室内締固め供試体ともに

ややばらつきが大きく、全体的に割線ヤング率 E_{50} に関わらず測定値と推定値の差は-1.0%～0.5%程度であるが、やや含水比別整理の方がばらつきは大きいように見える。

図 7-5-29、図 7-5-30 には飽和度別、含水比別それぞれ、割線ヤング率 E_{50} の測定値と推定値間のばらつきの頻度分布と確率密度曲線を示す。飽和度整理の平均値は $\mu=-0.079$ 、標準偏差は $\sigma=0.280$ 、含水比整理の平均値は $\mu=-0.190$ 、標準偏差は $\sigma=0.371$ で含水比整理の標準偏差がやや大きい。図 7-5-31、図 7-5-32 には飽和度別、含水比別それぞれ、割線ヤング率 E_{50} の推定値～測定値関係を示す。図中には 1:1、1:1.1、1:0.9、 $\mu \pm 1\sigma$ の補助線を併せて示す。測定値と推定値の差は、飽和度別整理と含水比別整理に関わらず $\pm 10\%$ の範囲には収まらず、割線ヤング率 E_{50} の推定にはばらつきが多く含まれやすい事がわかる。

図 7-5-33、図 7-5-34 にはそれぞれ飽和度と含水比別に整理した試験盛土供試体と室内締固め供試体の初期ヤング率～乾燥密度関係を示す。それぞれ同じ飽和度、同じ含水比条件において乾燥密度に対する初期ヤング率の増加傾向がやや異なり、含水比別に整理した方がやや緩やかな傾向である。図 7-5-35、図 7-5-36 は飽和度と含水比別それぞれの飽和度の関数 $f_{E0} \cdot h_{E0} \sim$ 飽和度関係と含水比の関数 $f_{E0} \cdot h_{E0} \sim$ 含水比関係を示す。ここで、土質材料による異なる係数について、飽和度の関数 $f_{E0} \cdot h_{E0}$ は $a=0.677$ 、 $b=6.0$ 、含水比の関数 $f_{E0} \cdot h_{E0}$ は $a=0.677$ 、 $b=3.0$ とし、各々乾燥密度の影響が小さくなるよう調整しており、割線ヤング率 E_{50} で定めた係数と同じ値であった。また、図中には式 7-3-1 を用いたフィッティング線も示している。飽和度の関数 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_1$ のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=800$ 、 $A_2=80$ 、 $x_0=17$ 、 $dx=12$ 、 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_2$ のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=450$ 、 $A_2=80$ 、 $x_0=17$ 、 $dx=12$ 、含水比の関数 $[f_{E0}(w) \cdot h_{E0}(D, w)]_1$ のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=530$ 、 $A_2=80$ 、 $x_0=5$ 、 $dx=3$ 、 $[f_{E0}(w) \cdot h_{E0}(D, w)]_2$ のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=300$ 、 $A_2=80$ 、 $x_0=5$ 、 $dx=3$ である。図 7-5-37、図 7-5-38 には図 7-5-33、図 7-5-34 で示した初期ヤング率～乾燥密度関係に加え、先に示したフィッティング曲線に基づいて作成した飽和度 $S_r=20\%$ 、40%、60%、80%、及び含水比 $w=5\%$ 、9%、13%、17%それぞれの推定曲線を示す。初期ヤング率～乾燥密度関係を含水比別で整理すると、飽和度別に比べて緩やかな傾向を示す。

次に測定値と推定値の差を測定値で正規化し、測定値と推定値間のばらつきを評価について整理した結果を示す。図 7-5-39、図 7-5-40 には飽和度別、含水比別それぞれの測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度関係を示す。どちらの図も試験盛土供試体、室内締固め供試体ともに比較的ばらつきは小さく、全体的に乾燥密度に関わらず測定値と推定値の差は $\pm 0.5\%$ 程度である。図 7-5-41、図 7-5-42 は、それぞれ初期ヤング率の測定値と推定値間のばらつき～飽和度関係、測定値と推定値間のばらつき～含水比関係を示す。飽和度別、含水比別に関わらず整理した測定値と推定値の差のばらつきは割線ヤング率 E_{50} に比べて比較的小さく一定の傾向を示す。図 7-5-43、図 7-5-44 は、飽和度別、含水比別それぞれ、初期ヤング率の測定値と推定値間のばらつき～測定値関係を示す。どちらの図も試験盛土供試体、室内締固め供試体ともに比較的ばらつきが小さく、ほぼ同等である。

図 7-5-45、図 7-5-46 には飽和度別、含水比別それぞれ、初期ヤング率の測定値と推定値間のばらつきの頻度分布と確率密度曲線を示す。飽和度整理の平均値は $\mu=0.019$ 、標準偏差は $\sigma=0.212$ 、含水比整理の平均値は $\mu=-0.014$ 、標準偏差は $\sigma=0.180$ で含水比整理の標準偏差がやや小さい。図 7-5-47、図 7-5-48 には飽和度別、含水比別それぞれ、初期ヤング率の推定値～測定値関係を示す。図中には 1:1、1:1.1、1:0.9、 $\mu \pm 1\sigma$ の補助線を併せて示す。測定値と推定値の差は、飽和度別整理と含水比別整理に関わらず $\pm 10\%$ の範囲には収まらなかったが、 $\pm 20\%$ 程度のばらつきで推定する事が出来るとわかった。

本項では、本研究で使用した試料の最適飽和度 $(S_r)_{opt}=64.1\%$ (A-c 法)、最適含水比 $w_{opt}=14.2\%$ (A-c 法)であるのに対し、飽和度 $S_r=15\% \sim 80\%$ 程度、含水比 $w=5\% \sim 17\%$ 程度の含水条件で作製した供試体の強度変形特性の測定値と、これに基づいて飽和度別、含水比別に整理して求めた推定曲線との違いやばらつきに大きな差は殆ど見られなかった。すなわち、本研究で扱った含水条件では Tatsuoka & Correia(2018)が図 2-4-13 で示したような、高含水状

態において乾燥密度が大きくても CBR が低下する等の減少は確認出来なかったが、この程度の含水条件範囲、特に最適飽和度、最適含水比よりやや乾燥側では含水比別に強度変形特性を整理しても同等のばらつきの程度で推定曲線を作成する事が出来る事がわかった。

本章では、これまでに現場で測定できる乾燥密度と飽和度を独立変数とする事で簡単で実用的な変数分離式が表現出来た事を説明してきた。現場締固めは締固め機械の重量や通過回数等の締固めエネルギーを正確に室内締固めの締固めエネルギーと対応させて記録する事は難しい。図 7-5-49、図 7-5-50、図 7-5-51 には最大軸差応力、割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率それぞれの推定値～測定値の関係を示す。これらは、図 7-5-15、図 7-5-31、図 7-5-47 それぞれのデータのパラメーターを締固めエネルギー別または機械通過回数別にしている。いずれの図においても、締固めエネルギーや機械通過回数に関わらず、同じ式が成り立っている事がわかる。これは、実際の施工に適用するのに必要な一般性が担保されている事を意味する。

以上の事から現場締固め土特有のせん断破壊領域の影響を簡明な形で表現できる式となった事が確認された。さらに、6.9 より得られた飽和化の影響も加える事で現場に対する適用性の高い式が得られる事が分かった。

7.5.2 飽和度と含水比別に整理した初期サクシジョンのばらつき評価

4.5 では室内締固め供試体と試験盛土供試体の初期サクシジョンは共通して飽和度や含水比との相関性がある事を示した。初期サクシジョン～含水比関係には乾燥密度の影響が少なく一義的な傾向であった事に対し、初期サクシジョン～飽和度関係には乾燥密度の影響によるばらつきがある事が確認された。そこで本項では、飽和度別と含水比別の初期サクシジョン～乾燥密度関係について前節と同様の方法で両者を整理し、異なる整理方法から得られる推定値と測定値の違いとそのばらつきを比較した。また、初期サクシジョン～乾燥密度関係、最大軸差応力～乾燥密度関係に基づいて、飽和度別と含水比別の整理方法の最大軸差応力～初期サクシジョン関係の推定曲線を示し、それぞれの方法による最大軸差応力推定結果に対して既往の研究と照らし合わせながら考察する。

図 7-5-52、図 7-5-53 には、それぞれ飽和度と含水比別に整理した試験盛土供試体と室内締固め供試体の初期サクシジョン～乾燥密度関係を示す。それぞれ同じ飽和度、同じ含水比条件において乾燥密度に対する初期サクシジョンの増加傾向がやや異なり、含水比別に整理した方がやや緩やかである。図 7-5-54 には飽和度の関数 f_{si} ～飽和度関係を示す。また、図 7-5-55 には初期サクシジョン～含水比関係を示す。含水比別の整理では乾燥密度の影響が殆どない為、含水比の関数による整理はしていない。飽和度の関数 f_{si} の土質材料による異なる係数は $a=0$ 、 $b=3.0$ とし、乾燥密度の影響が小さくなるよう調整している。また、両図中には式 7-3-1 を用いたフィッティング線もそれぞれ示している。飽和度の関数 $f_{si}(S_r)$ のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=35$ 、 $A_2=0.5$ 、 $x_0=20$ 、 $dx=7$ 、初期サクシジョン～含水比関係のフィッティングに用いた係数は、 $A_1=100$ 、 $A_2=0.5$ 、 $x_0=6$ 、 $dx=1.5$ である。図 7-5-56、図 7-5-57 には図 7-5-52、図 7-5-53 で示した初期サクシジョン～乾燥密度関係に加え、先に示したフィッティング曲線に基づいて作成した飽和度 $S_r=20\%$ 、 40% 、 60% 、 80% 、及び含水比 $w=5\%$ 、 9% 、 13% 、 17% それぞれの推定曲線を示す。また、図 7-5-58、図 7-5-59 は同図を室内締固め供試体のみ、図 7-5-60、図 7-5-61 は試験盛土供試体のみ示したものである。初期サクシジョン～乾燥密度関係を含水比別で整理すると乾燥密度の影響を考慮しない為、乾燥密度に関わらず初期サクシジョンは一定となる。ただし測定値をよく見ると、試験盛土供試体及び室内締固め供試体ともに、乾燥密度が増加するとわずかに初期サクシジョンは増加している事がわかる。すなわち、初期サクシジョンは特に飽和度及び含水比が小さい範囲で、わずかに乾燥密度の影響を受けている。

次に測定値と推定値の差を測定値で正規化し、測定値と推定値間のばらつきを整理した結果を示す。図 7-5-62、図 7-5-63 は、飽和度別、含水比別それぞれ、初期サクシジョンの測定値と推定値間のばらつき～測定値関係を示す。どちらの図も試験盛土供試体、室内締固め供試体ともにややばらつきが大きい、全体的に初期サクシジョンに関わら

ず測定値と推定値の差は-2.0%～1.0%程度であるが、飽和度別整理の方がややばらつきは大きいように見える。飽和度別で整理した図について、試験盛土供試体はばらつきが-2.0 付近の大きい特異点を確認されるが、それを除いて 0 を中心にはほぼ均等にばらついている。一方で室内締固め供試体は全体的なばらつきが大きい事がわかる。含水比別で整理した図について、試験盛土供試体はばらつきの大きい特異点は-1.5 付近に位置しており、それを除いて 0 を中心にはほぼ均等にばらついている。一方で室内締固め供試体は全体的なばらつきが大きい事がわかる。また、測定値の小さい範囲 $s_i=0\text{kPa}\sim 20\text{kPa}$ の範囲では特にばらつきが大きい傾向であった。図 7-5-64、図 7-5-65 には飽和度別、含水比別それぞれ、初期サクシジョンの測定値と推定値間のばらつきの頻度分布と確率密度曲線を示す。飽和度整理の平均値は $\mu=-0.177$ 、標準偏差は $\sigma=0.558$ 、含水比整理の平均値は $\mu=0.102$ 、標準偏差は $\sigma=0.552$ で飽和度別整理がやや大きいとその差は小さい。図 7-5-66、図 7-5-67 には飽和度別、含水比別それぞれ、初期サクシジョンの推定値～測定値関係を示す。図中には 1:1、1:1.1、1:0.9、 $\mu\pm 1\sigma$ の補助線を併せて示す。測定値と推定値の差は、飽和度別整理と含水比別整理に関わらず $\pm 10\%$ の範囲には収まらず、初期サクシジョンの推定にはばらつきが多く含まれやすい事がわかる。

不飽和土のせん断特性とサクシジョンの関係を調べた例は多いが、比較的最近の代表的なものとして Vanapalli et.al. (1996)や加藤ら(2002、2003)、金ら(2007)、蔡ら(2007)の研究が挙げられる。いずれもサクシジョンが増加するとせん断強度は増加するが、その増加傾向は収束する事を示している。また、加藤ら(2003)は、一軸圧縮試験でサクシジョン応力を拘束応力として取り入れる考え方の妥当性を示し、不飽和土のサクシジョンは粘着力の増加が期待できることを説明している。本研究では供試体の初期サクシジョン測定値と直接紐づけた三軸圧縮試験を実施する事は出来なかったが、初期サクシジョン～乾燥密度関係、最大軸差応力～乾燥密度関係に基づいた、飽和度別と含水比別の最大軸差応力～初期サクシジョン関係の推定曲線をそれぞれ図 7-5-68、図 7-5-69 に示す。図中の曲線はそれぞれ乾燥密度 $\rho_d=1.40\text{g/cm}^3\sim 1.90\text{g/cm}^3$ の範囲で記号別に示しており、等飽和度、等含水比線も破線で併せて示している。飽和度別、含水比別の図ともに同じ乾燥密度条件で初期サクシジョンが増加すると最大軸差応力が増加しており、加藤ら(2003)の記した拘束応力、4.5 で示した残留有効応力との関連が示唆されている。また、初期サクシジョンが大きくなると次第に最大軸差応力は収束する傾向を示している。本研究の三軸圧縮試験は排気・排水条件であり、載荷過程におけるサクシジョン測定は実施していないが、この収束傾向は上に示した Vanapalli et.al. (1996)や金ら(2007)が示した傾向と類似する。また、乾燥密度が増加すると最大軸差応力は増加し、乾燥密度依存性を表現する事が出来ている。飽和度別の初期サクシジョン～最大軸差応力関係は含水比別に比べ、乾燥密度が小さい範囲では最大軸差応力はやや小さいか同等であるが、乾燥密度が大きくなるとサクシジョンも最大軸差応力も大きい傾向を示す。これは最大軸差応力～乾燥密度関係、初期サクシジョン～乾燥密度関係において、飽和度別整理の方が含水比別整理より乾燥密度の増加に対して最大軸差応力、初期サクシジョンそれぞれの増加率が大きい為である。

本研究で最大軸差応力～初期サクシジョン関係は定性的に既往の研究と整合する事を示す事が出来た。ただし、先述したように初期サクシジョンの測定値にはばらつきが多く含まれ、乾燥密度や飽和度、含水比の影響とは別に、供試体の取扱いやサクシジョン測定方法等に起因する物理特性とは異なる影響による測定値の不確かさが多く現れている事が認められる。また、推定曲線に対してばらつきの程度が同等であった飽和度別整理と含水比別整理で比較的不同なる最大軸差応力～初期サクシジョン関係が得られている事から、データを測定し、測定値との対比による考察が今後の課題として残る。

7.5.3 提案した試験盛土供試体平均の変形特性のばらつき評価

図 7-5-70、図 7-5-71 には、それぞれ図 7-4-6、図 7-4-8 で示した供試体上部の測定値を用いて推定した飽和度の関数 $f_{E50}\cdot h_{E50}$ と簡易推定式を用いて推定した飽和度の関数 $f_{E50}\cdot h_{E50}\sim$ 飽和度関係を示す。図中の試験盛土供試体

平均の測定値に対する推定式 $[f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r)]_{combined}$ との違いとそのばらつきの程度を先と同じ方法で比較する。図 7-5-72、図 7-5-73 には、供試体上部の測定値を用いた推定値、簡易推定式を用いた推定値それぞれの供試体平均の割線ヤング率 E_{50} 測定値と推定値間のばらつき～測定値関係を示す。どちらの図も試験盛土供試体、室内締固め供試体ともにややばらつきが大きく、全体的に測定値と推定値の差は-1.5%～0.5%程度であったが、乾燥密度の影響は殆ど見られない。図 7-5-74、図 7-5-75 は、供試体上部の測定値を用いた推定値、簡易推定式を用いた推定値それぞれの供試体平均の割線ヤング率 E_{50} 測定値と推定値間のばらつき～測定値関係を示す。どちらの図も低い割線ヤング率 E_{50} においてややばらつきが大きい、-1.0%～0.5%程度の範囲であり、両図にばらつきの違いは殆ど見られない。

図 7-5-76、図 7-5-77 は供試体上部の測定値を用いた推定値、簡易推定式を用いた推定値それぞれの供試体平均の割線ヤング率 E_{50} 測定値と推定値間のばらつきの頻度分布と確率密度曲線を示す。飽和度整理の平均値は $\mu=-0.236$ 、標準偏差は $\sigma=0.269$ 、含水比整理の平均値は $\mu=-0.278$ 、標準偏差は $\sigma=0.324$ で簡易推定式を用いて推定した方がやや大きい、ほぼ同等である。図 7-5-78、図 7-5-79 には供試体上部の測定値を用いた推定値、簡易推定式を用いた推定値それぞれの供試体平均の割線ヤング率 E_{50} 推定値～測定値関係を示す。図中には 1:1、1:1.1、1:0.9、 $\mu \pm 1\sigma$ の補助線を併せて示す。測定値と推定値の差は、飽和度別整理と含水比別整理に関わらず $\pm 10\%$ の範囲には収まらず、0%～50%程度のばらつきであった。

図 7-5-80、図 7-5-81 には、それぞれ図 7-4-11、図 7-4-13 で示した供試体上部の測定値を用いて推定した飽和度の関数 $f_{E0} \cdot h_{E0}$ と簡易推定式を用いて推定した飽和度の関数 $f_{E0} \cdot h_{E0}$ ～飽和度関係を示す。図中の試験盛土供試体平均の測定値に対する推定式 $[f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r)]_{combined}$ との違いとそのばらつきの程度を先と同じ方法で比較する。図 7-5-82、図 7-5-83 には、供試体上部の測定値を用いた推定値、簡易推定式を用いた推定値それぞれの供試体平均の初期ヤング率測定値と推定値間のばらつき～測定値関係を示す。どちらの図も試験盛土供試体、室内締固め供試体ともにばらつきは小さく、全体的に測定値と推定値の差は $\pm 0.5\%$ 程度であり、乾燥密度の影響も殆ど見られない。図 7-5-84、図 7-5-85 は、供試体上部の測定値を用いた推定値、簡易推定式を用いた推定値それぞれの供試体平均の初期ヤング率測定値と推定値間のばらつき～測定値関係を示す。どちらの図も低い初期ヤング率においてややばらつきが大きい、 $\pm 0.5\%$ 程度の範囲であり、両図にばらつきの違いは殆ど見られない。

図 7-5-86、図 7-5-87 は供試体上部の測定値を用いた推定値、簡易推定式を用いた推定値それぞれの供試体平均の初期ヤング率測定値と推定値間のばらつきの頻度分布と確率密度曲線を示す。飽和度整理の平均値は $\mu=-0.030$ 、標準偏差は $\sigma=0.157$ 、含水比整理の平均値は $\mu=-0.030$ 、標準偏差は $\sigma=0.162$ と両者でほぼ同等である。図 7-5-88、図 7-5-89 には供試体上部の測定値を用いた推定値、簡易推定式を用いた推定値それぞれの供試体平均の初期ヤング率推定値～測定値関係を示す。図中には 1:1、1:1.1、1:0.9、 $\mu \pm 1\sigma$ の補助線を併せて示す。測定値と推定値の差は、飽和度別整理と含水比別整理に関わらず $\pm 10\%$ の範囲には収まらなかったが、 $\pm 15\% \sim 20\%$ 程度のばらつきに留まる事がわかった。

本項では 7.6 で提案した供試体平均の変形特性の簡易推定方法について、測定値に基づいて推定した曲線と、簡易推定式を用いた推定曲線に対して実際の測定値との違い、及びそのばらつきの程度を評価した。その結果、測定値に基づいて推定した曲線と、提案した簡易推定式を用いた推定曲線では、どちらも測定値との違いやばらつきの程度はほぼ同等であり、提案した簡易推定方法が妥当である事を確認した。またこの提案方法を用いれば、室内で締固めた供試体の変形特性を用いて推定式を定式化し、現場締固め土の変形特性を推定する事が出来る事を示した。

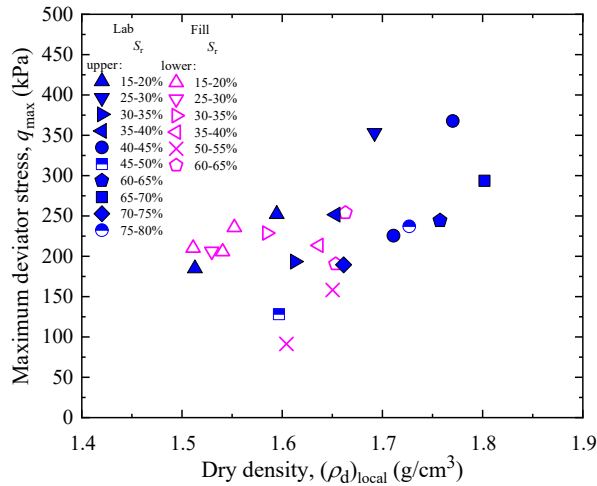


図 7-5-1 最大軸差応力～乾燥密度関係
(飽和度整理)

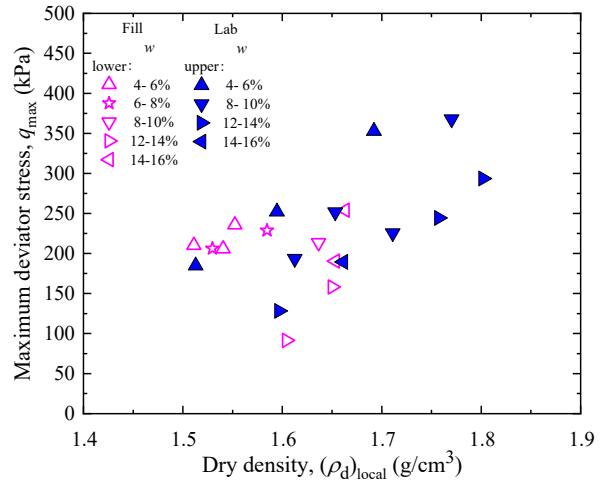


図 7-5-2 最大軸差応力～乾燥密度関係
(含水比整理)

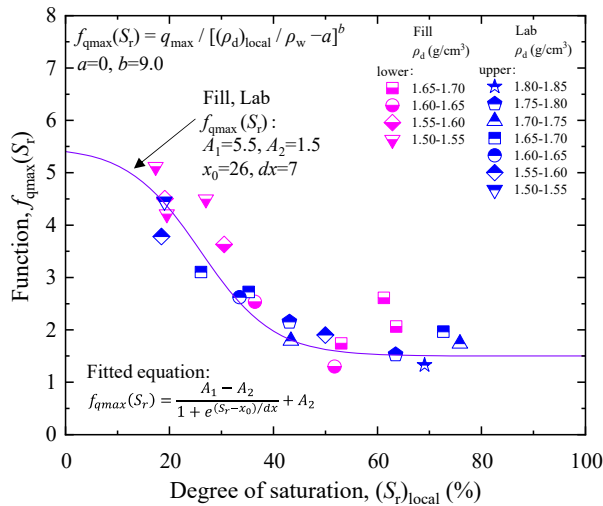


図 7-5-3 $f_{qmax}(S_r) \sim$ 飽和度関係
(飽和度整理)

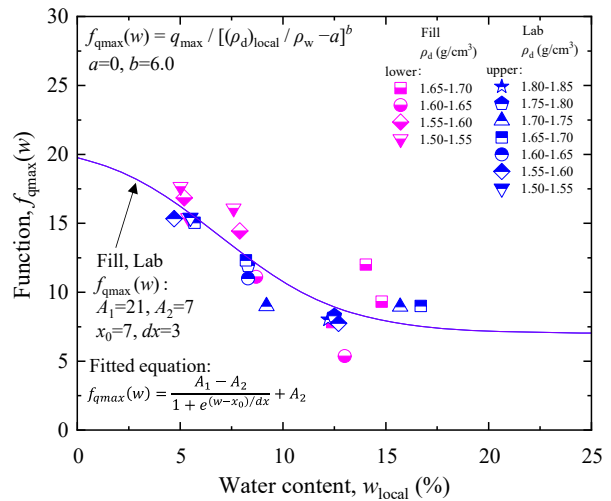


図 7-5-4 $f_{qmax}(w) \sim$ 含水比関係
(含水比整理)

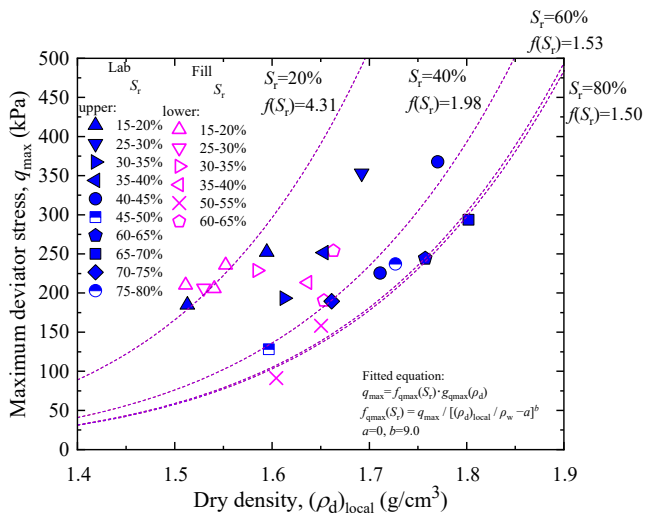


図 7-5-5 最大軸差応力～乾燥密度関係と推定曲線
(飽和度整理)

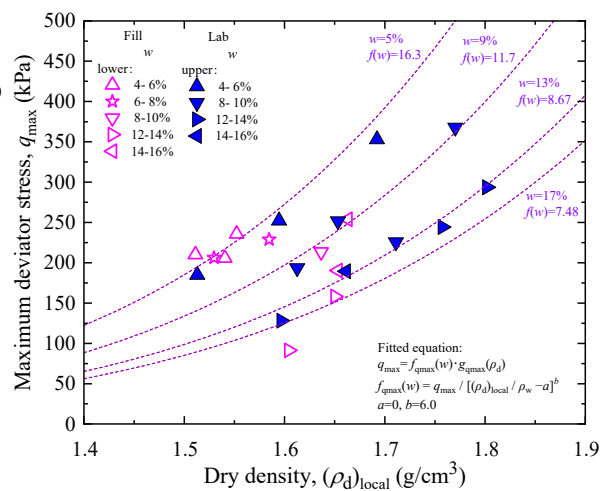


図 7-5-6 最大軸差応力～乾燥密度関係と推定曲線
(含水比整理)

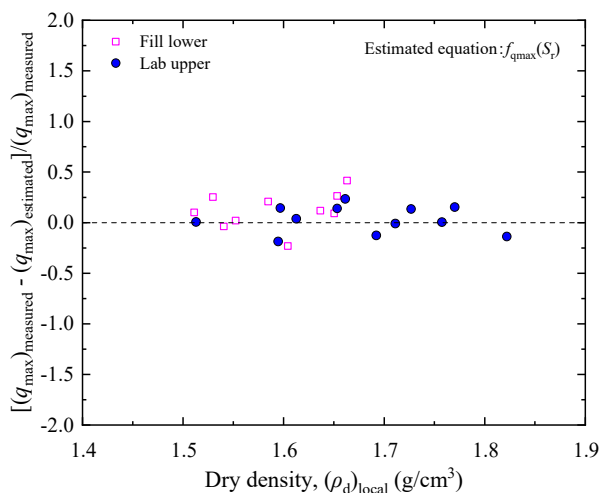


図 7-5-7 測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度
(飽和度整理)

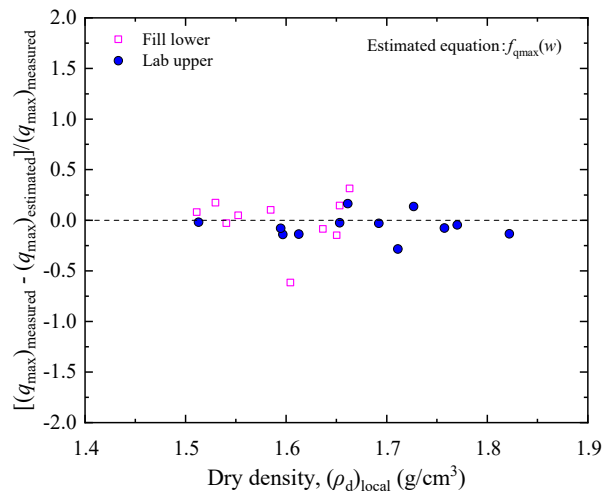


図 7-5-8 測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度
(含水比整理)

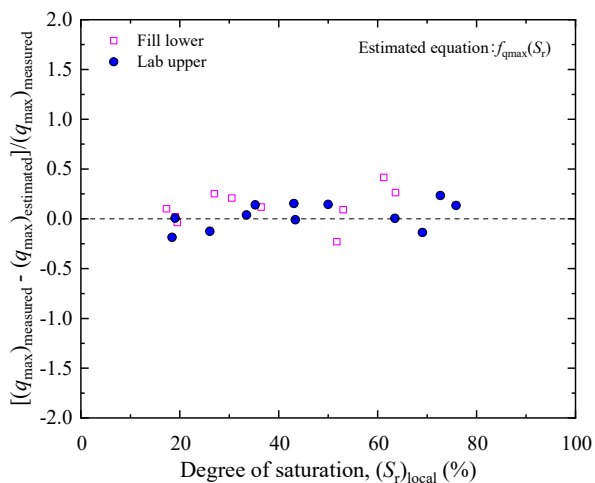


図 7-5-9 測定値と推定値間のばらつき～飽和度
(飽和度整理)

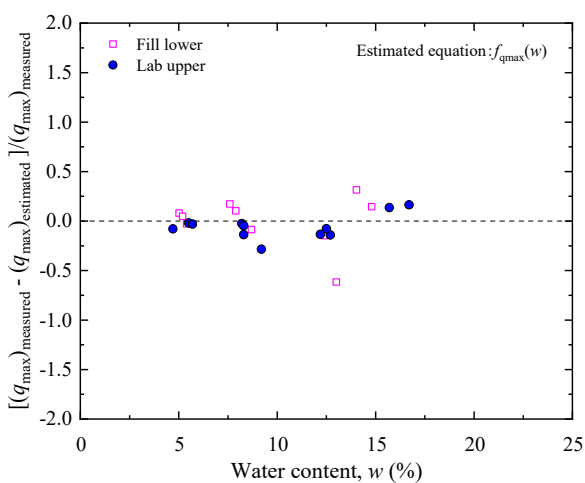


図 7-5-10 測定値と推定値間のばらつき～含水比
(含水比整理)

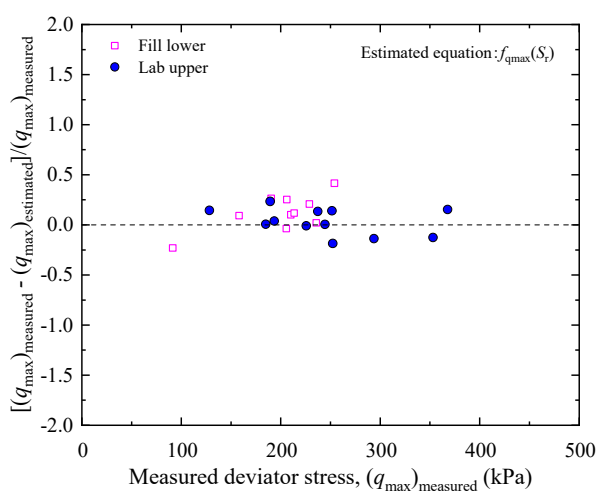


図 7-5-11 測定値と推定値間のばらつき～測定値
(飽和度整理)

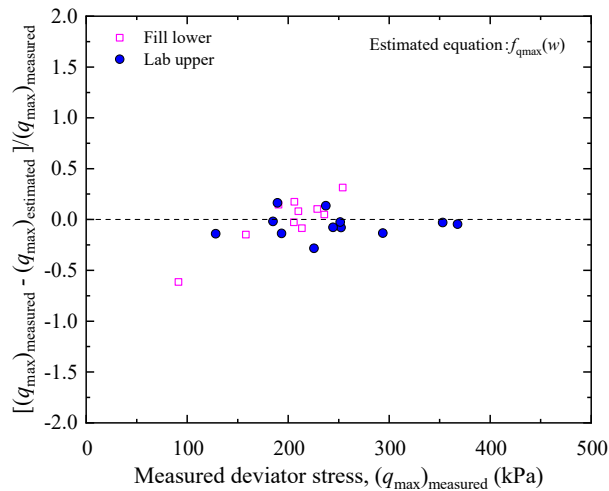


図 7-5-12 測定値と推定値間のばらつき～測定値
(含水比整理)

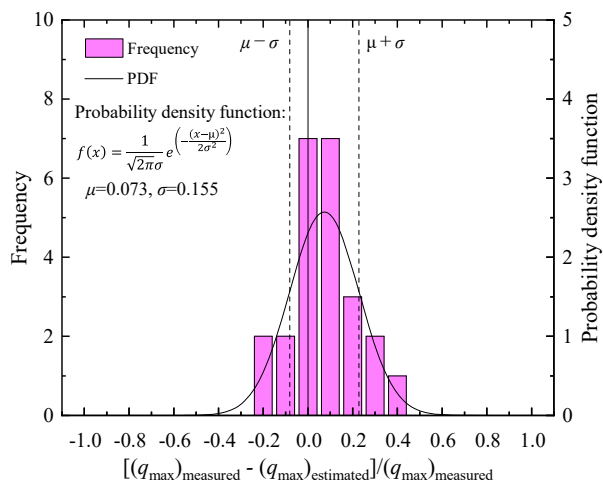


図 7-5-13 頻度分布と確率密度曲線
(飽和度整理)

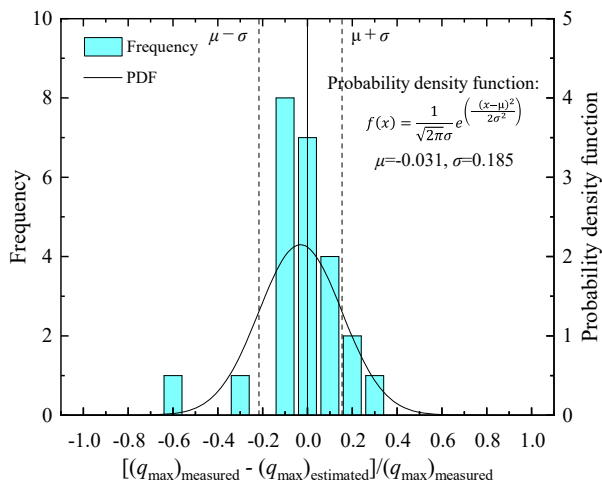


図 7-5-14 頻度分布と確率密度曲線
(含水比整理)

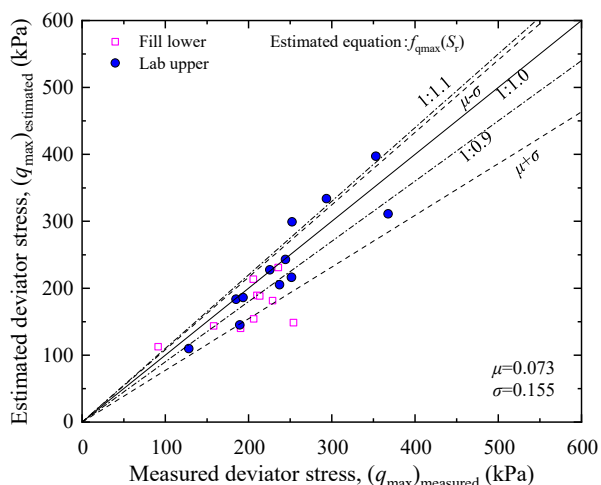


図 7-5-15 最大軸差応力の推定値～測定値関係
(飽和度整理)

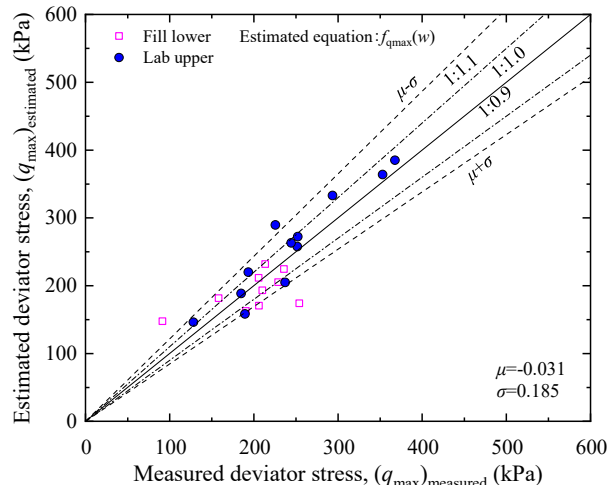


図 7-5-16 最大軸差応力の推定値～測定値関係
(含水比整理)

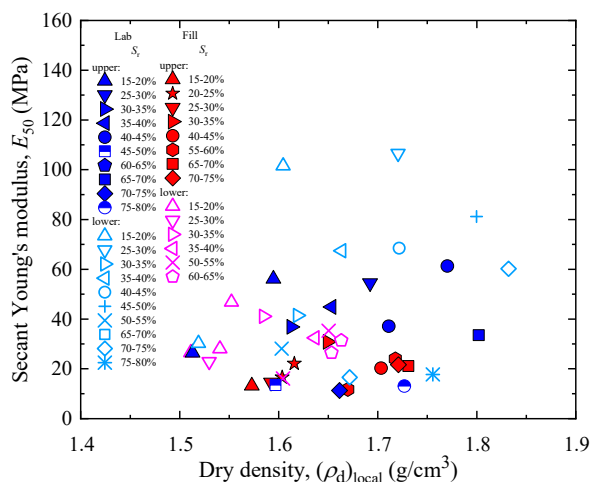


図 7-5-17 割線ヤング率～乾燥密度関係
(飽和度整理)

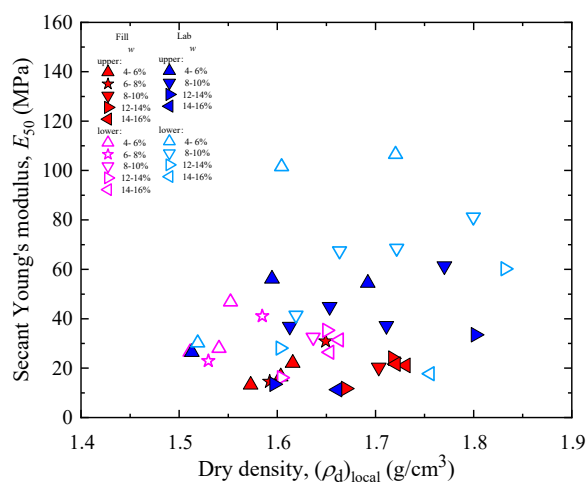


図 7-5-18 割線ヤング率～乾燥密度関係
(含水比整理)

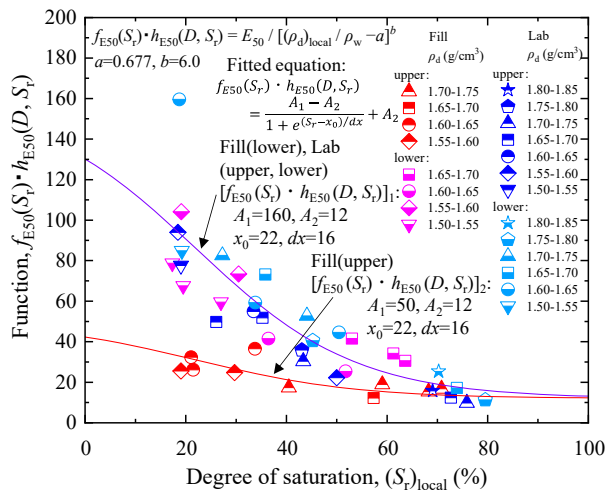


図 7-5-19 $f_{E50}(S_r) \cdot h_{E50}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係
(飽和度整理)

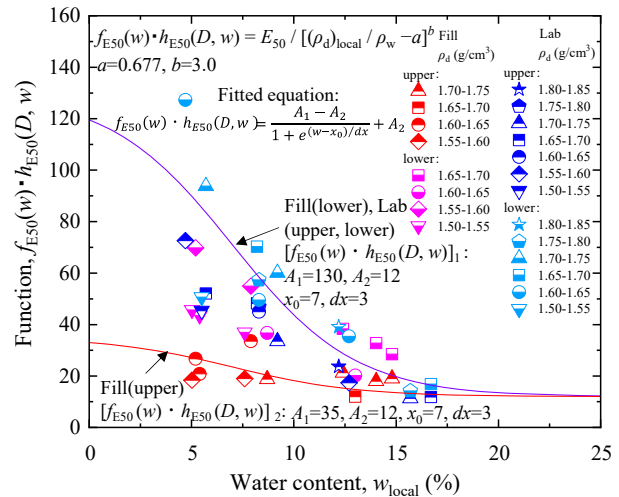


図 7-5-20 $f_{E50}(w) \cdot h_{E50}(D, w) \sim$ 含水比関係
(含水比整理)

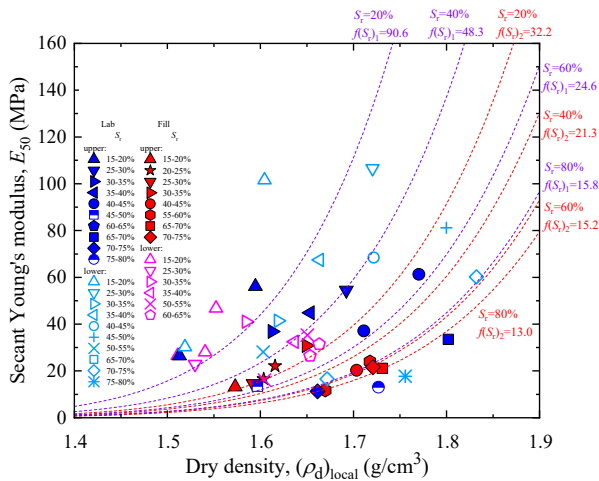


図 7-5-21 割線ヤング率～乾燥密度関係と推定曲線
(飽和度整理)

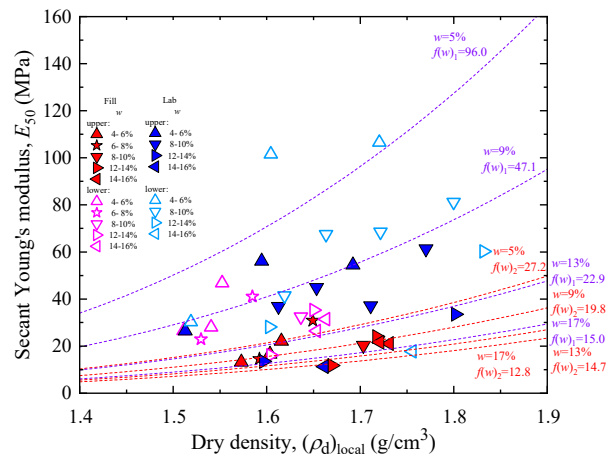


図 7-5-22 割線ヤング率～乾燥密度関係と推定曲線
(含水比整理)

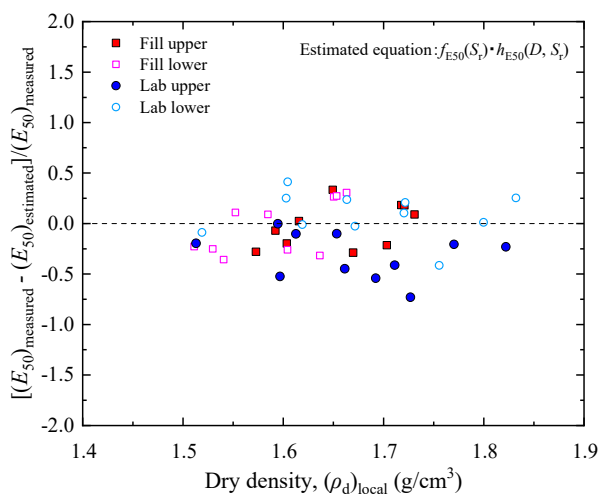


図 7-5-23 測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度
(飽和度整理)

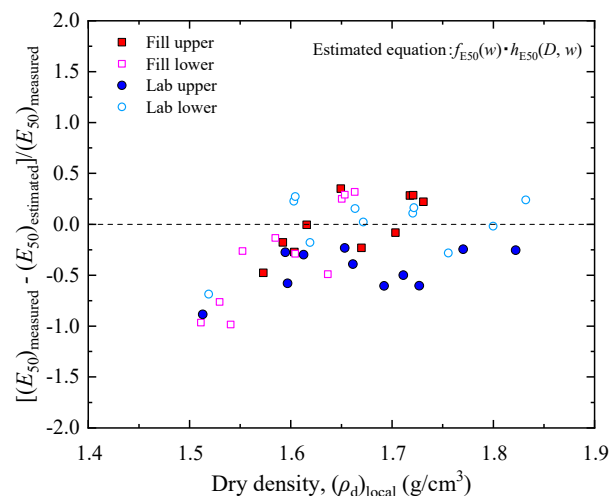


図 7-5-24 測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度
(含水比整理)

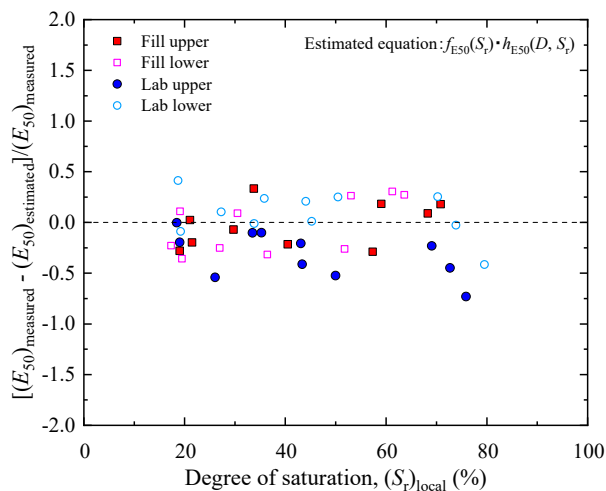


図 7-5-25 測定値と推定値間のばらつき～飽和度
(飽和度整理)

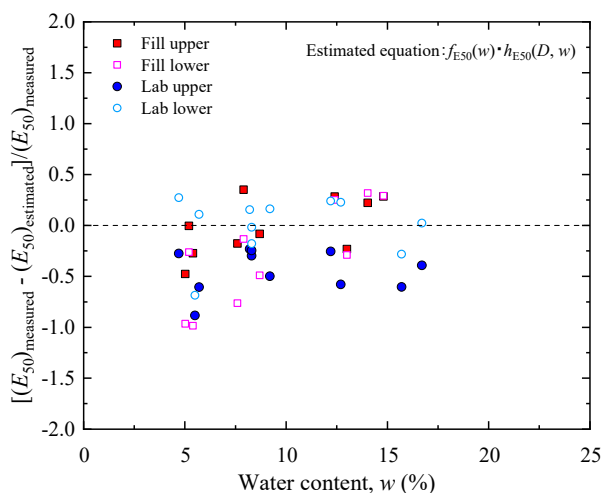


図 7-5-26 測定値と推定値間のばらつき～含水比
(含水比整理)

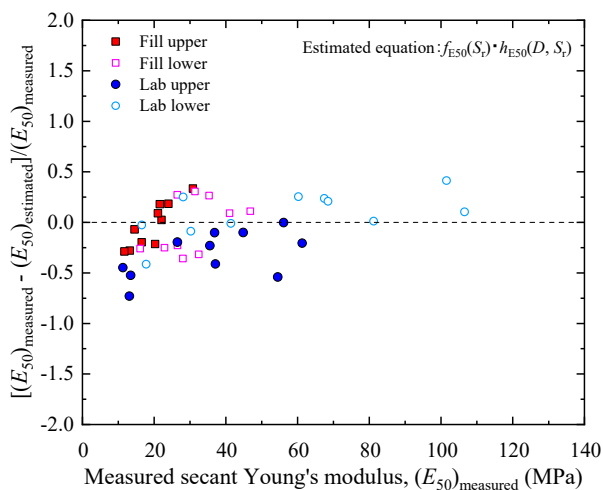


図 7-5-27 測定値と推定値間のばらつき～測定値
(飽和度整理)

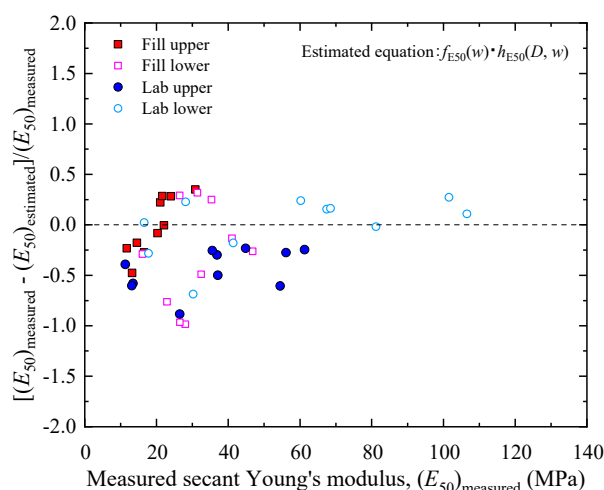


図 7-5-28 測定値と推定値間のばらつき～測定値
(含水比整理)

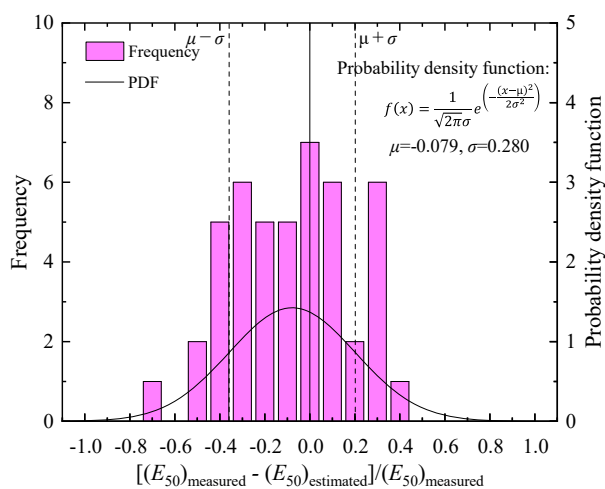


図 7-5-29 頻度分布と確率密度曲線
(飽和度整理)

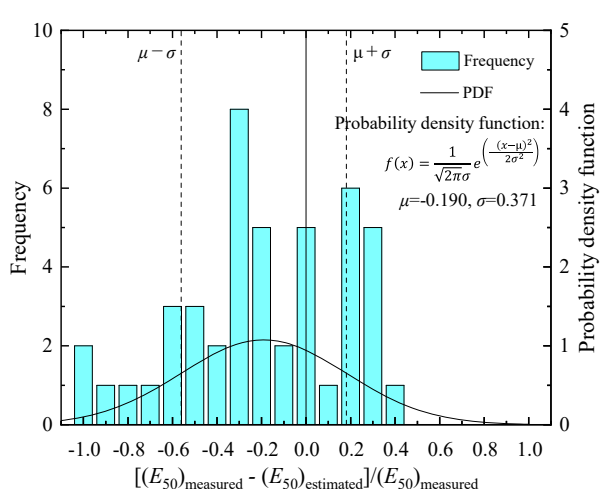


図 7-5-30 頻度分布と確率密度曲線
(含水比整理)

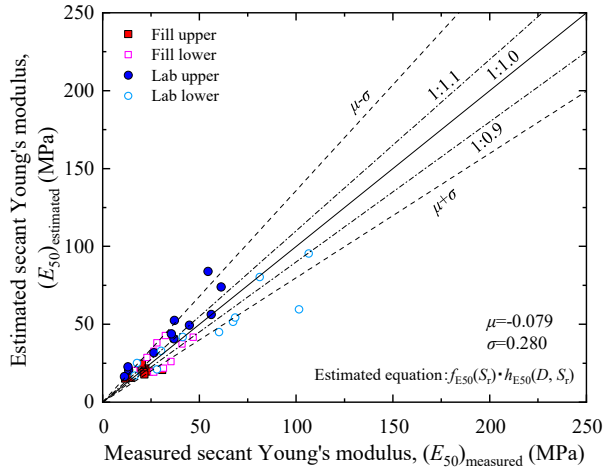


図 7-5-31 割線ヤング率の推定値～測定値関係
(飽和度整理)

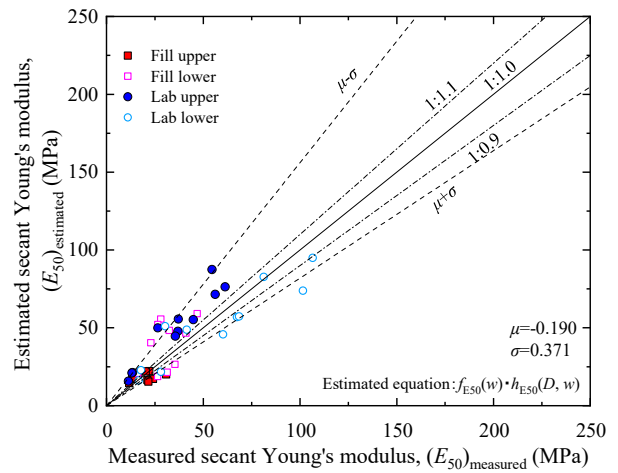


図 7-5-32 割線ヤング率の推定値～測定値関係
(含水比整理)

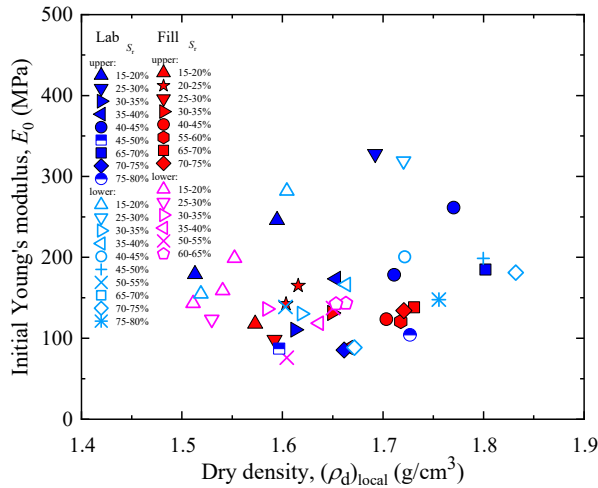


図 7-5-33 初期ヤング率～乾燥密度関係
(飽和度整理)

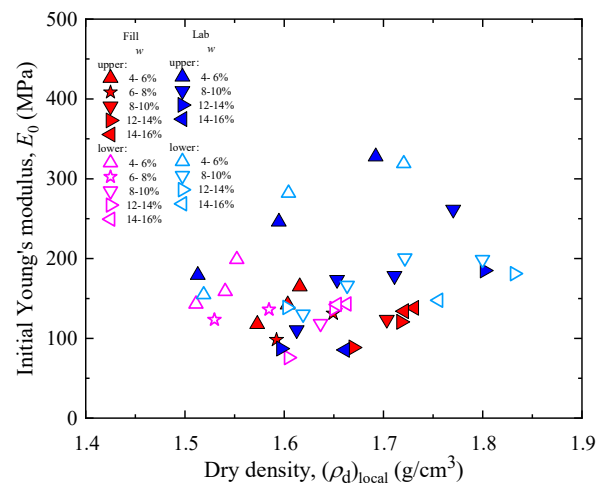


図 7-5-34 初期ヤング率～乾燥密度関係
(含水比整理)

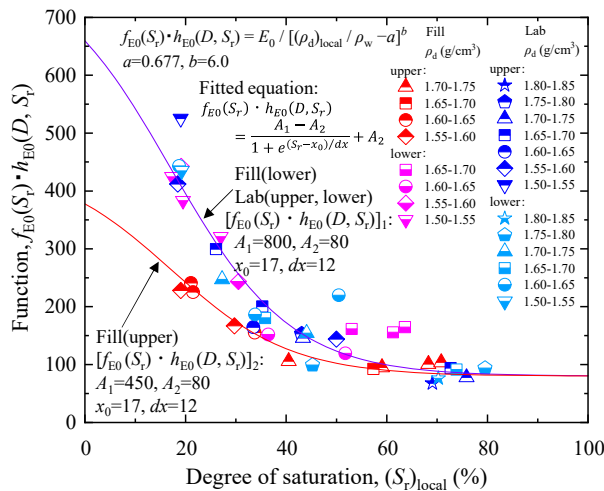


図 7-5-35 $f_{E0}(S_r) \cdot h_{E0}(D, S_r) \sim$ 飽和度関係
(飽和度整理)

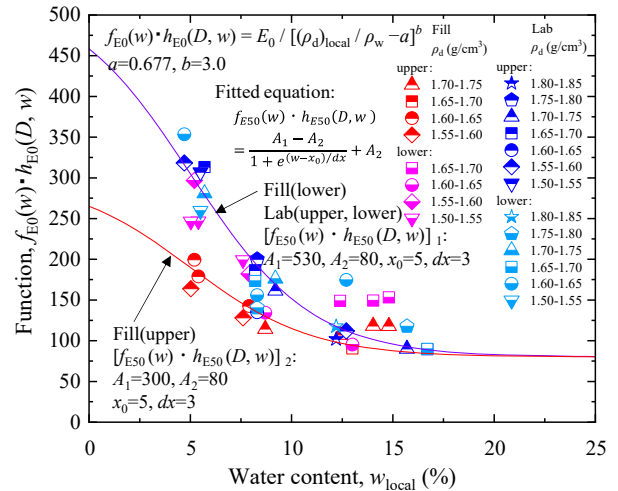


図 7-5-36 $f_{E0}(w) \cdot h_{E0}(D, w) \sim$ 含水比関係
(含水比整理)

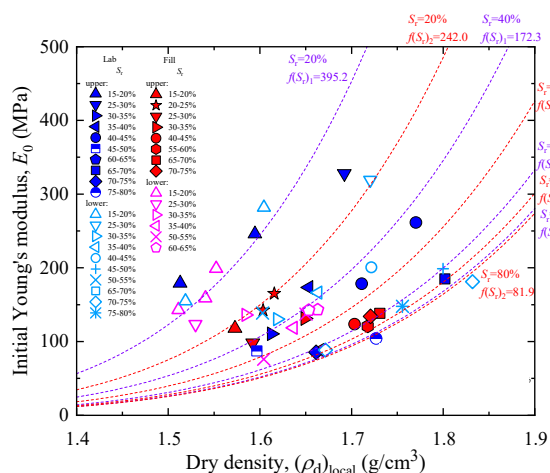


図 7-5-37 初期ヤング率～乾燥密度関係と推定曲線
(飽和度整理)

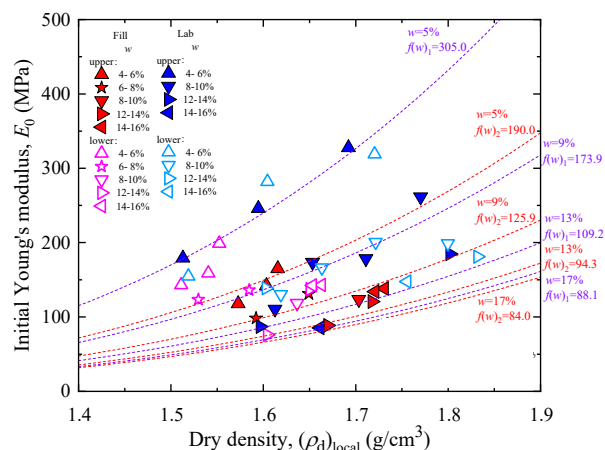


図 7-5-38 初期ヤング率～乾燥密度関係と推定曲線
(含水比整理)

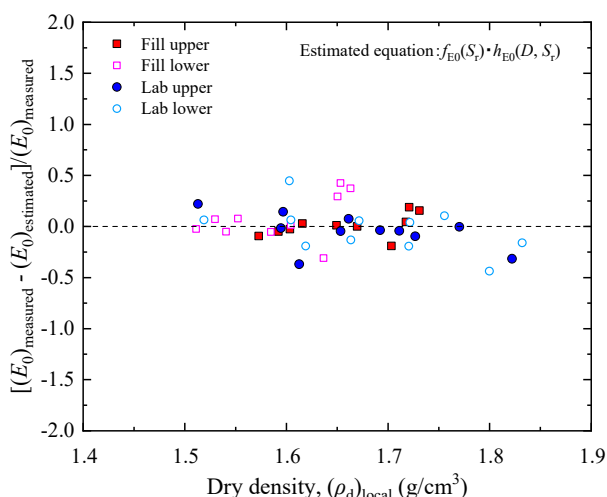


図 7-5-39 測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度
(飽和度整理)

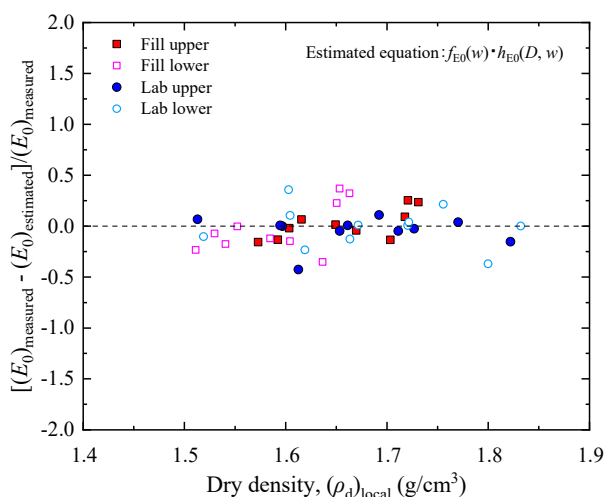


図 7-5-40 測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度
(含水比整理)

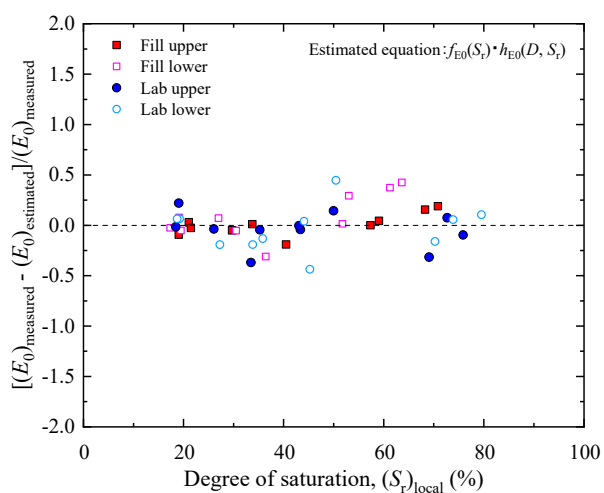


図 7-5-41 測定値と推定値間のばらつき～飽和度
(飽和度整理)

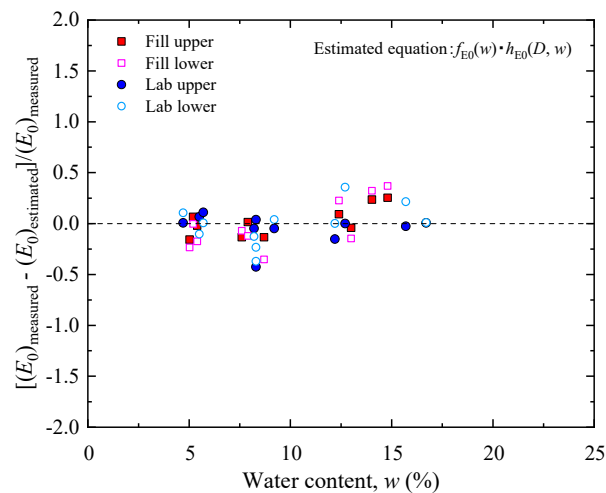


図 7-5-42 測定値と推定値間のばらつき～含水比
(含水比整理)

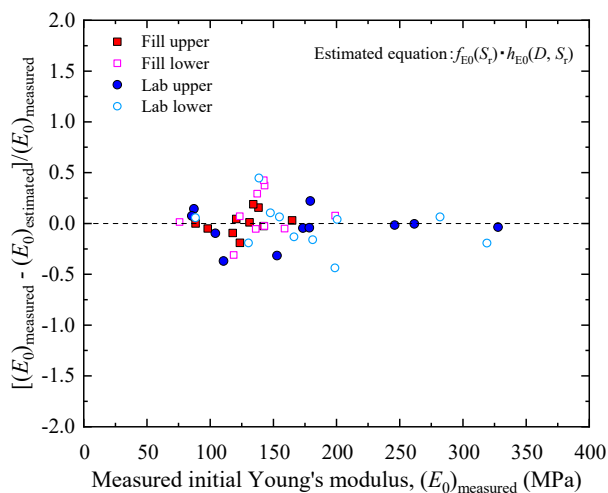


図 7-5-43 測定値と推定値間のばらつき～測定値
(飽和度整理)

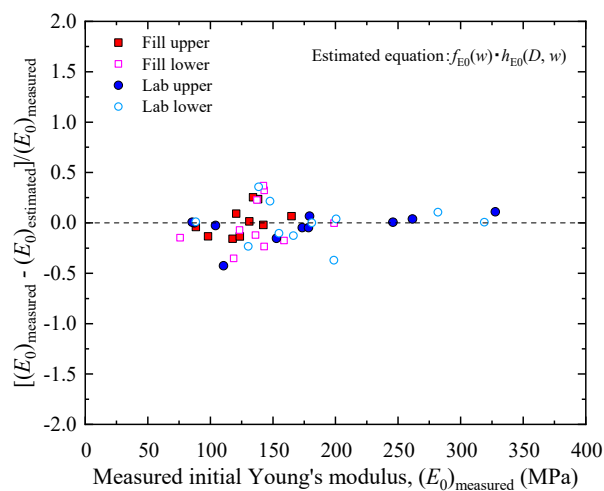


図 7-5-44 測定値と推定値間のばらつき～測定値
(含水比整理)

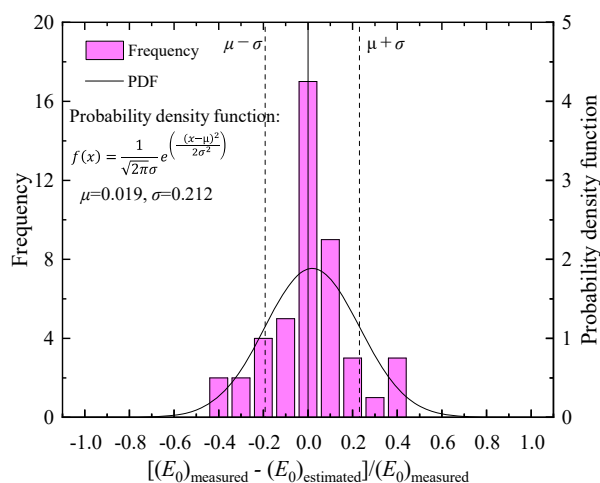


図 7-5-45 頻度分布と確率密度曲線
(飽和度整理)

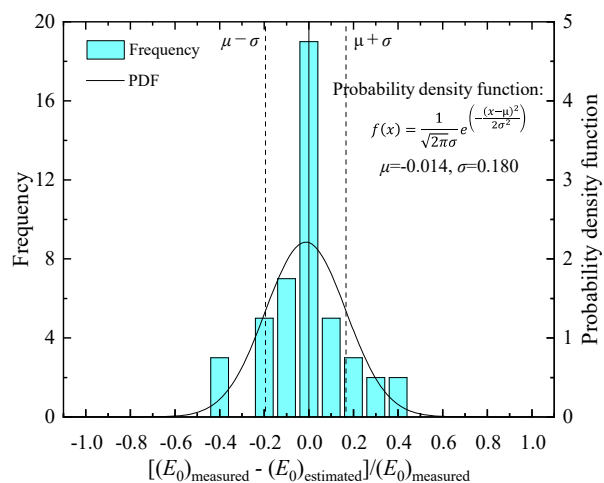


図 7-5-46 頻度分布と確率密度曲線
(含水比整理)

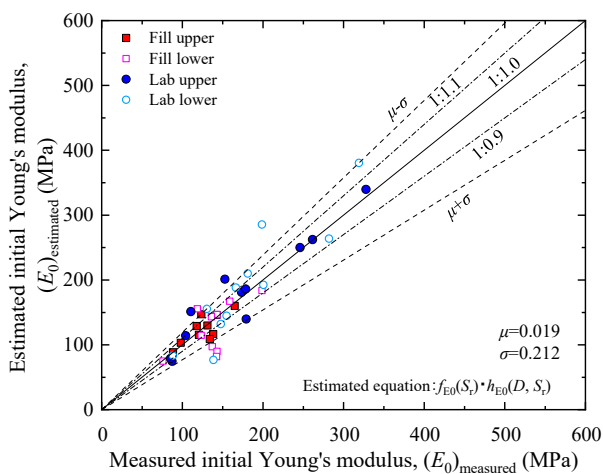


図 7-5-47 初期ヤング率の推定値～測定値関係
(飽和度整理)

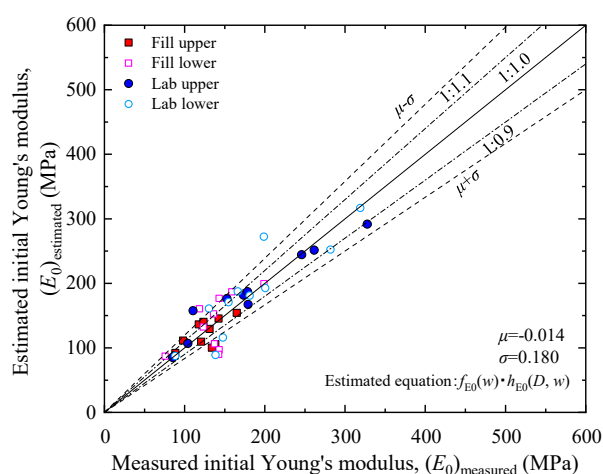


図 7-5-48 初期ヤング率の推定値～測定値関係
(含水比整理)

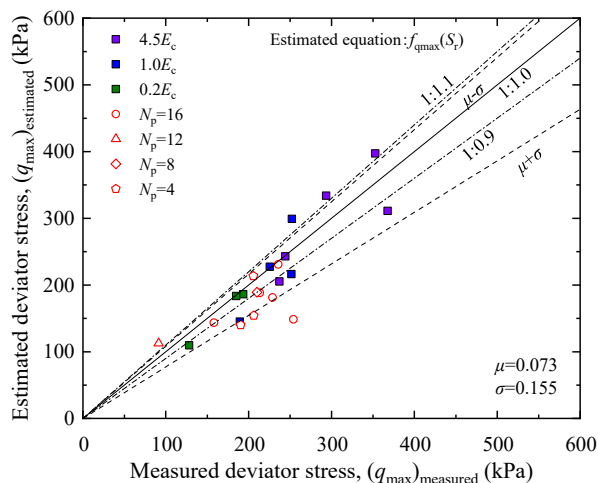


図 7-5-49 最大軸差応力の推定値～測定値関係
(E_c 別, 飽和度整理)

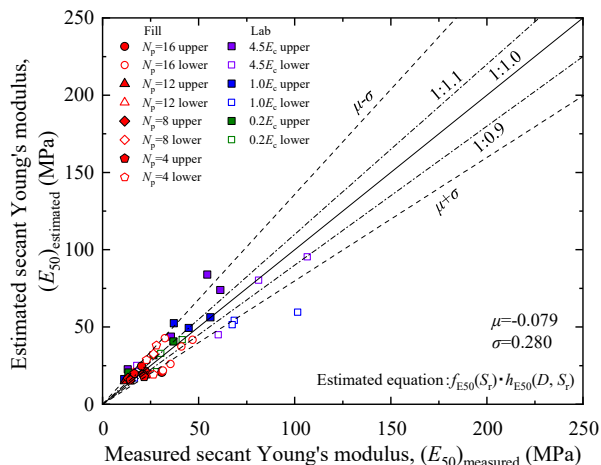


図 7-5-50 割線ヤング率 E_{50} の推定値～測定値関係
(E_c 別, 飽和度整理)

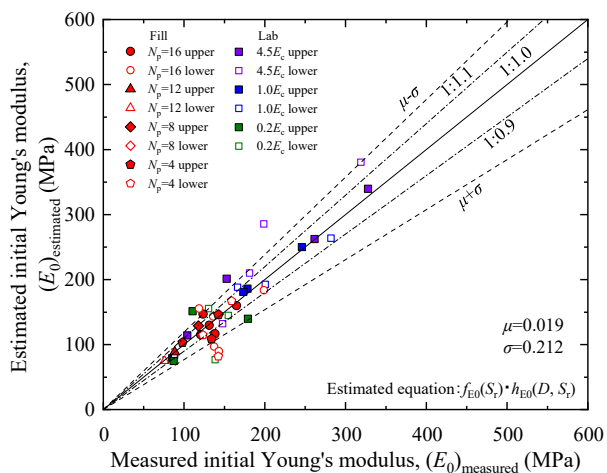


図 7-5-51 初期ヤング率の推定値～測定値関係
(E_c 別, 飽和度整理)

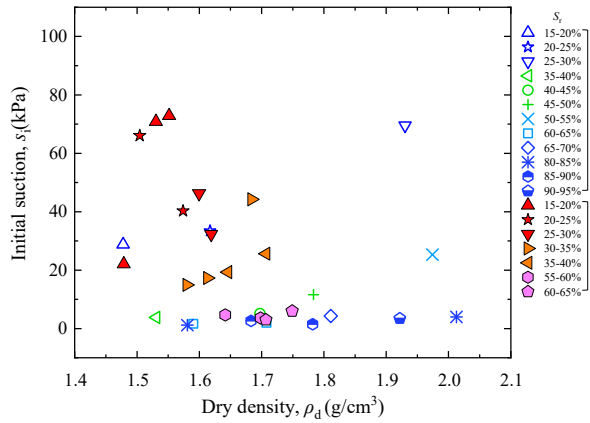


図 7-5-52 初期サクシオン～乾燥密度関係
(飽和度整理)

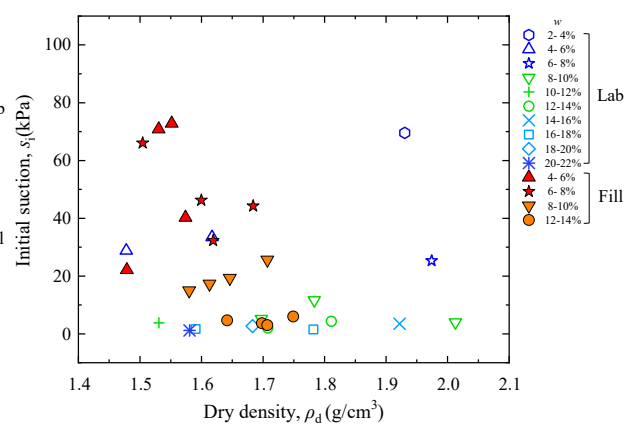


図 7-5-53 初期サクシオン～乾燥密度関係
(含水比整理)

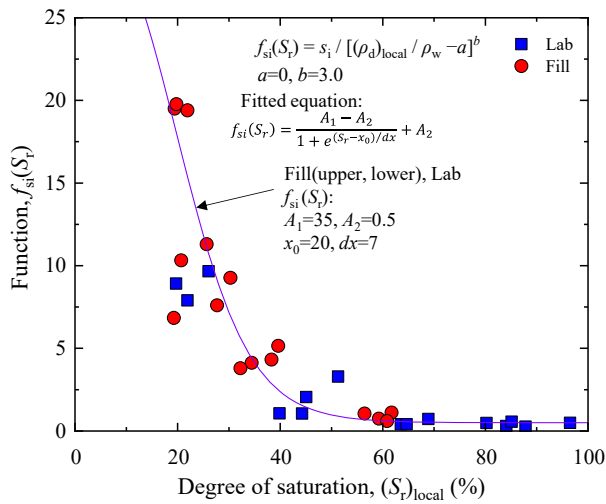


図 7-5-54 $f_{s_i}(S_r)$ ～飽和度関係
(飽和度整理)

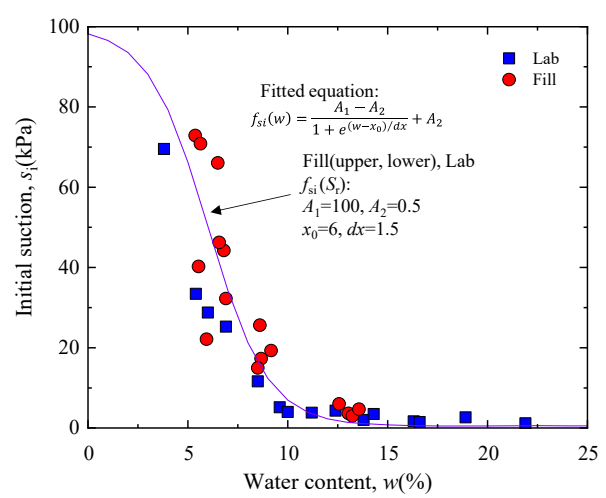


図 7-5-55 初期サクシオン～含水比関係
(含水比整理)

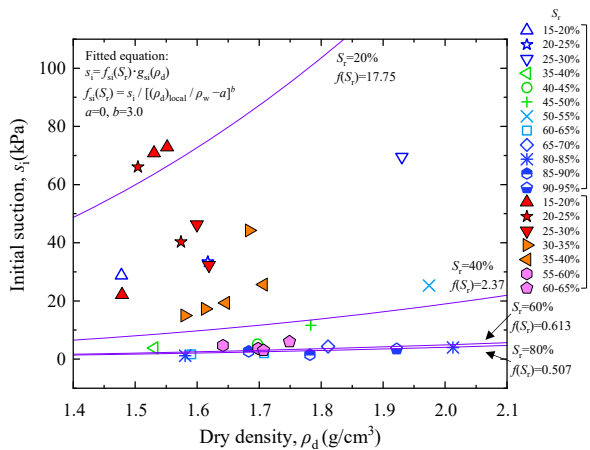


図 7-5-56 初期サクシオン～乾燥密度関係と推定曲線
(飽和度整理)

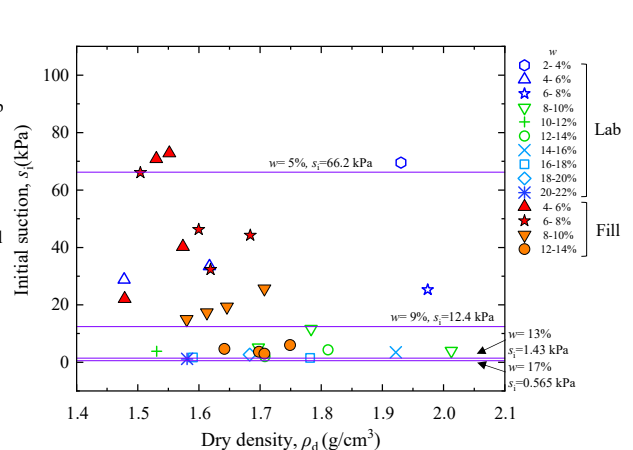


図 7-5-57 初期サクシオン～乾燥密度関係と推定曲線
(含水比整理)

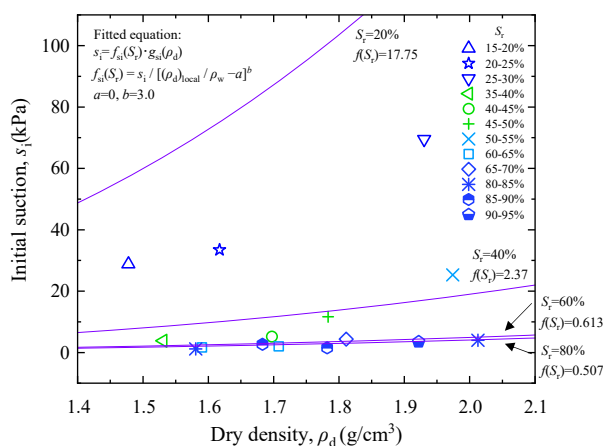


図 7-5-58 初期サクシオン～乾燥密度関係と推定曲線
(室内締固め、飽和度整理)

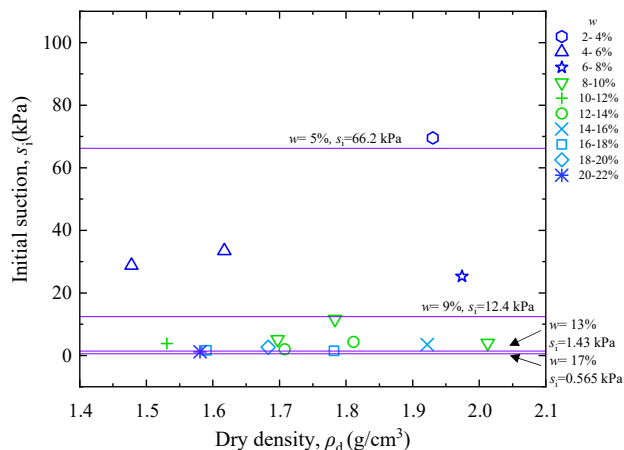


図 7-5-59 初期サクシオン～乾燥密度関係と推定曲線
(室内締固め、含水比整理)

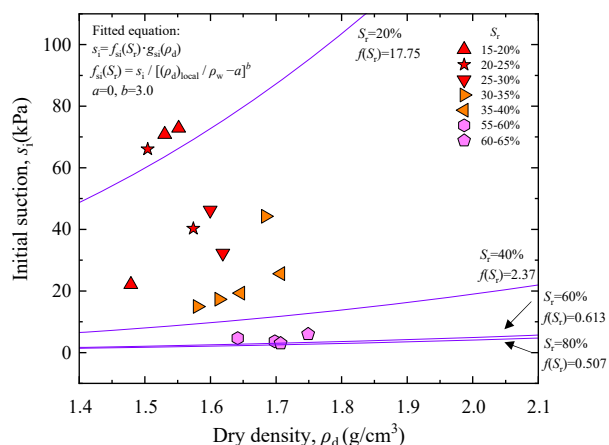


図 7-5-60 初期サクシオン～乾燥密度関係と推定曲線
(試験盛土、飽和度整理)

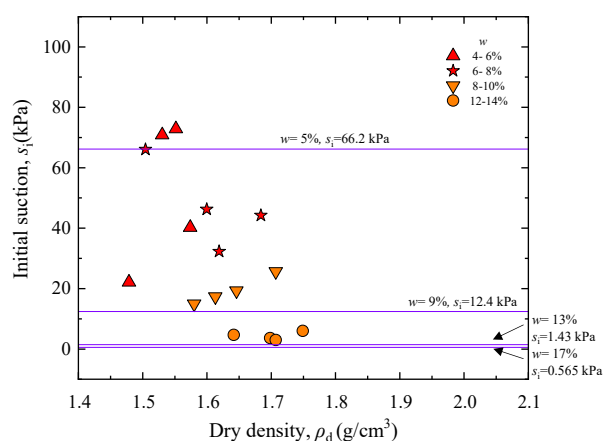


図 7-5-61 初期サクシオン～乾燥密度関係と推定曲線
(試験盛土、含水比整理)

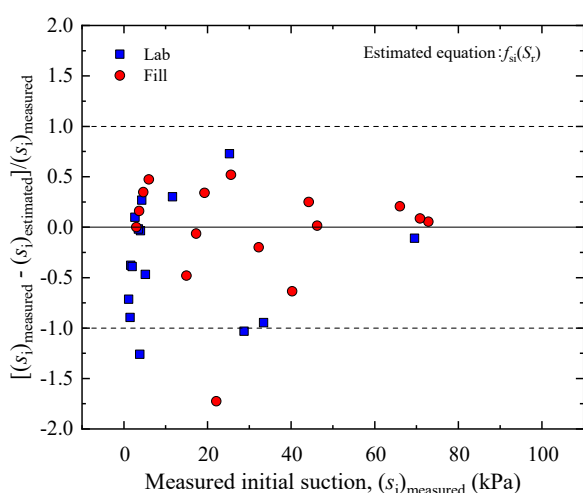


図 7-5-62 測定値と推定値間のばらつき
～測定値 (飽和度整理)

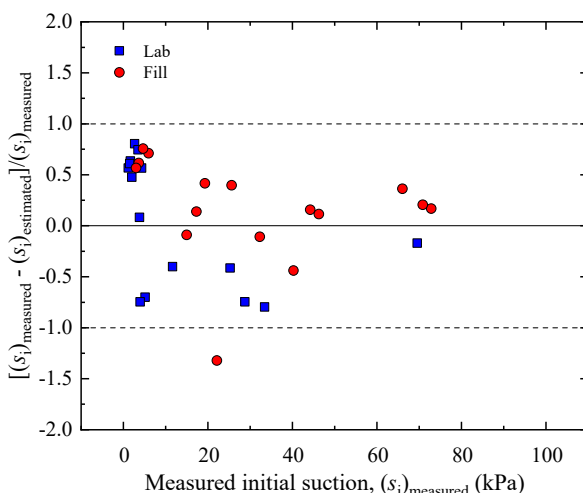


図 7-5-63 測定値と推定値間のばらつき
～測定値 (含水比整理)

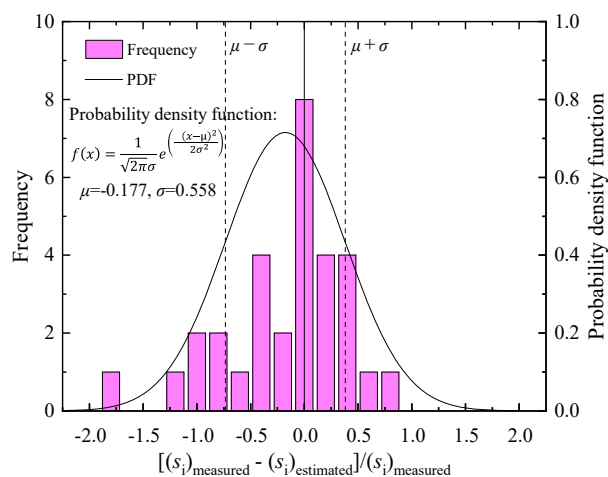


図 7-5-64 頻度分布と確率密度曲線
(飽和度整理)

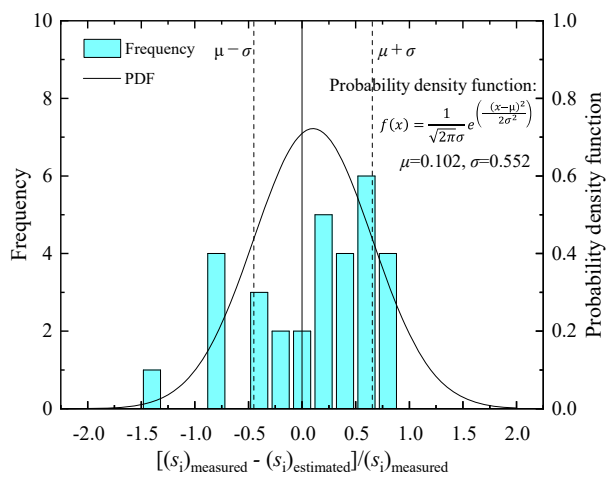


図 7-5-65 頻度分布と確率密度曲線
(含水比整理)

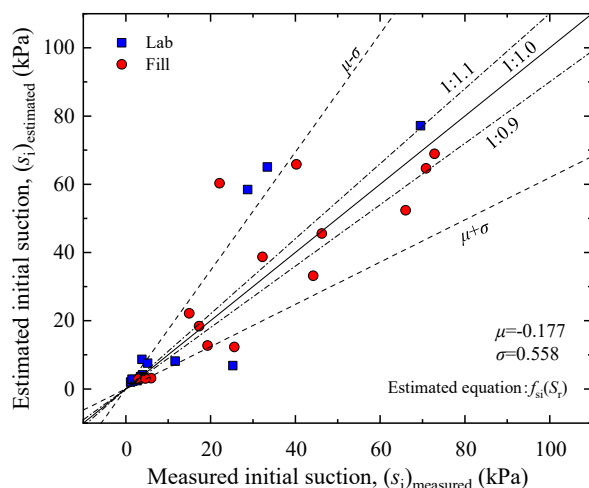


図 7-5-66 初期サクシジョンの推定値～測定値関係
(飽和度整理)

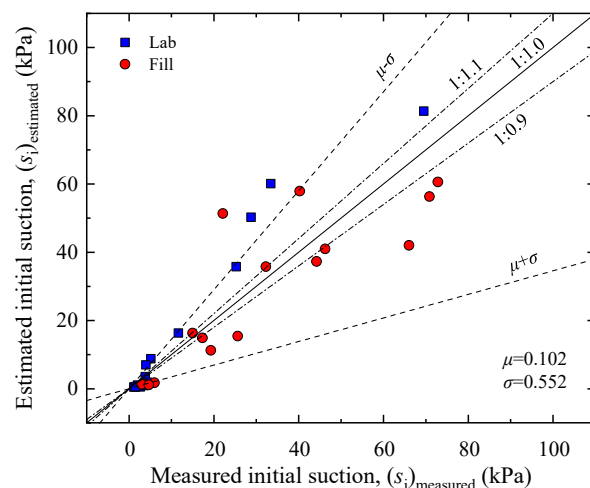


図 7-5-67 初期サクシジョンの推定値～測定値関係
(含水比整理)

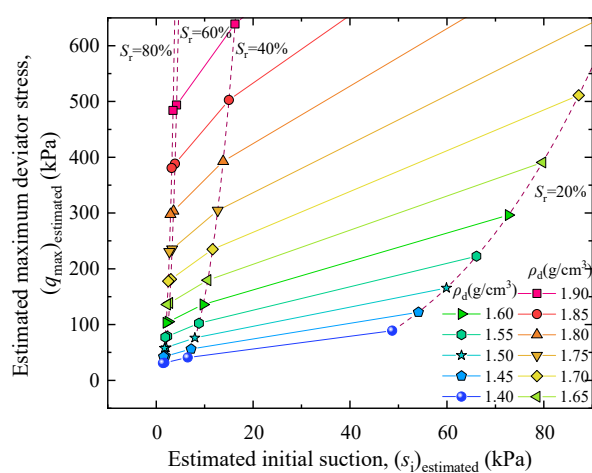


図 7-5-68 推定最大軸差応力～推定初期サクシジョン
(飽和度整理)

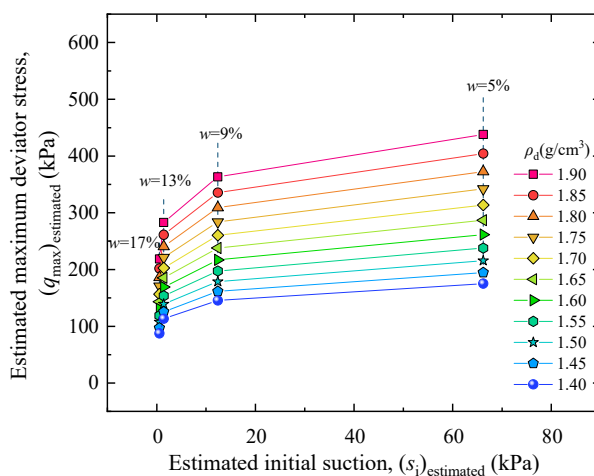


図 7-5-69 推定最大軸差応力～推定初期サクシジョン
(含水比整理)

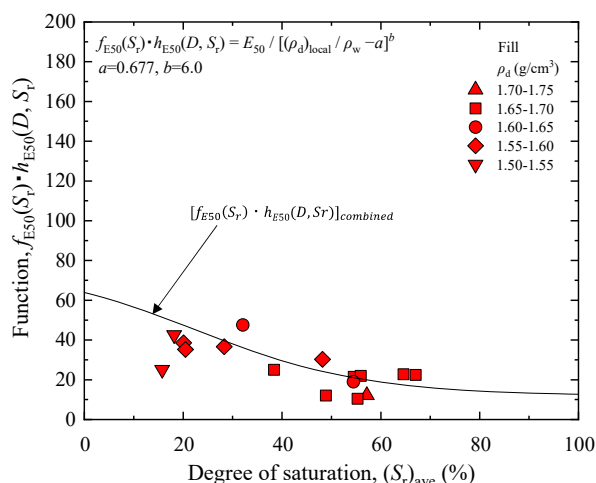


図 7-5-70 $f_{E50} \cdot h_{E50} \sim$ 飽和度と試験盛土平均推定曲線
(供試体上部の測定値を用いて推定)

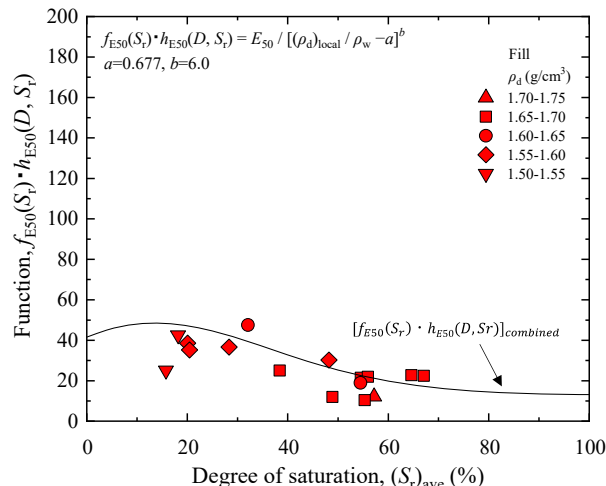


図 7-5-71 $f_{E50} \cdot h_{E50} \sim$ 飽和度と試験盛土平均推定曲線
(簡易推定式を用いて推定)

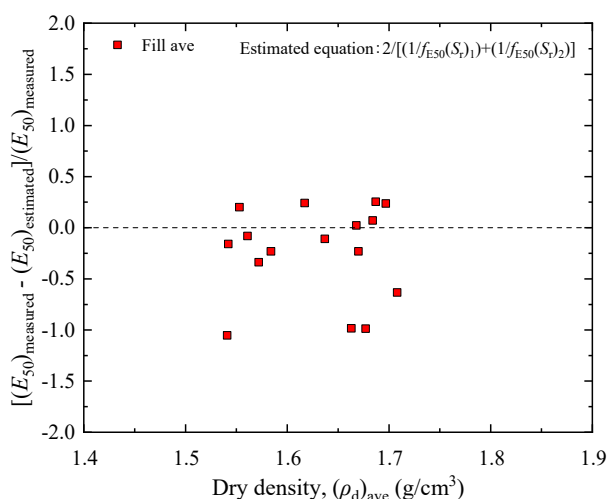


図 7-5-72 測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度
(供試体上部の測定値を用いて推定)

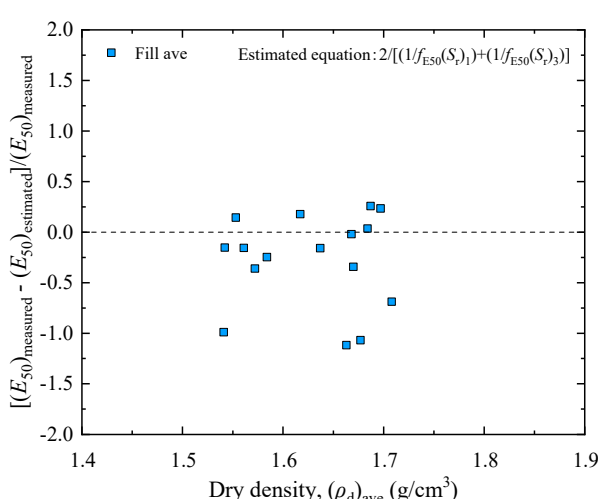


図 7-5-73 測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度
(簡易推定式を用いて推定)

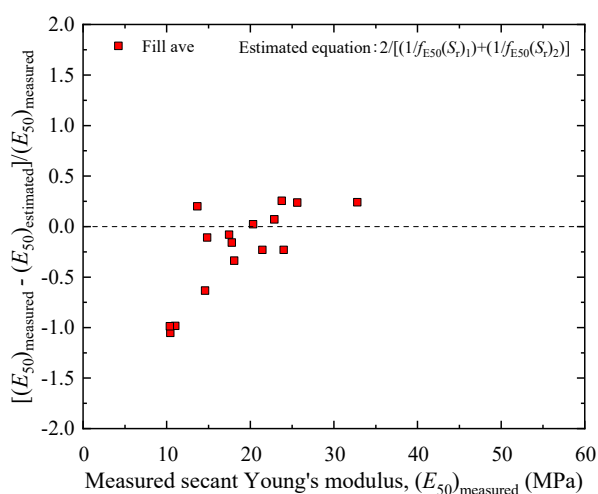


図 7-5-74 測定値と推定値間のばらつき～測定値
(供試体上部の測定値を用いて推定)

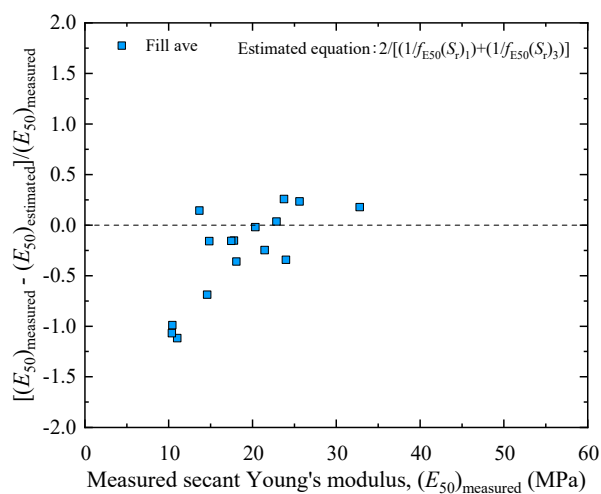


図 7-5-75 測定値と推定値間のばらつき～測定値
(簡易推定式を用いて推定)

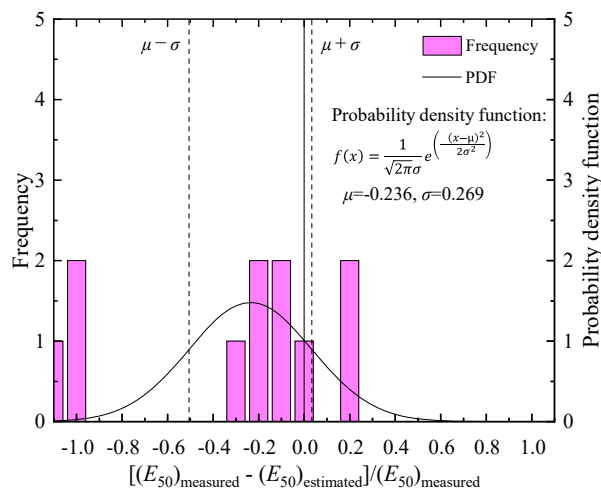


図 7-5-76 頻度分布と確率密度曲線
(供試体上部の測定値を用いて推定)

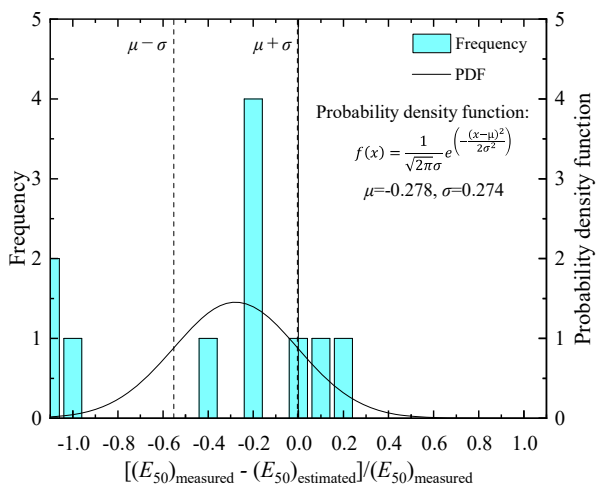


図 7-5-77 頻度分布と確率密度曲線
(簡易推定式を用いて推定)

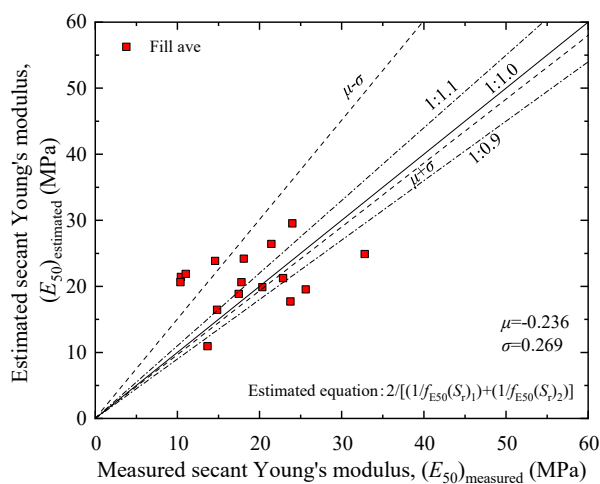


図 7-5-78 割線ヤング率の推定値～測定値関係
(供試体上部の測定値を用いて推定)

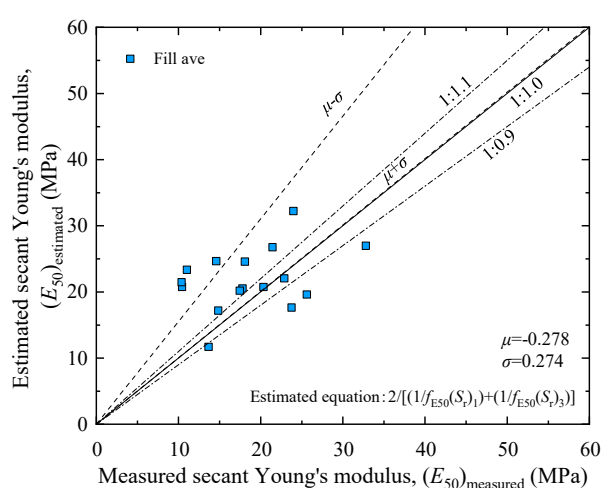


図 7-5-79 割線ヤング率の推定値～測定値関係
(簡易推定式を用いて推定)

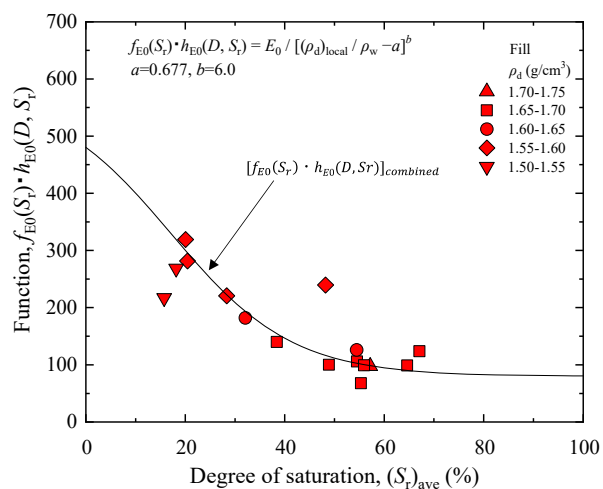


図 7-5-80 $f_{E0} \cdot h_{E0} \sim$ 飽和度と試験盛土平均推定曲線
(供試体上部の測定値を用いて推定)

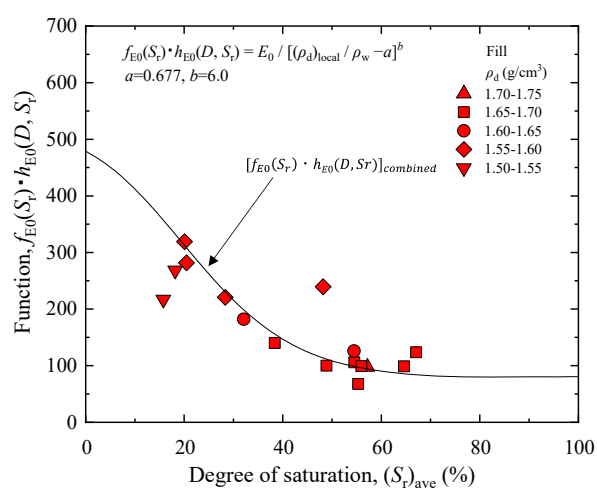


図 7-5-81 $f_{E0} \cdot h_{E0} \sim$ 飽和度と試験盛土平均推定曲線
(簡易推定式を用いて推定)

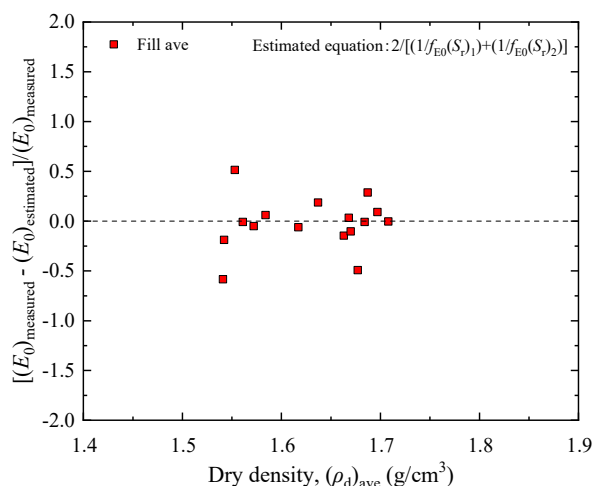


図 7-5-82 測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度
(供試体上部の測定値を用いて推定)

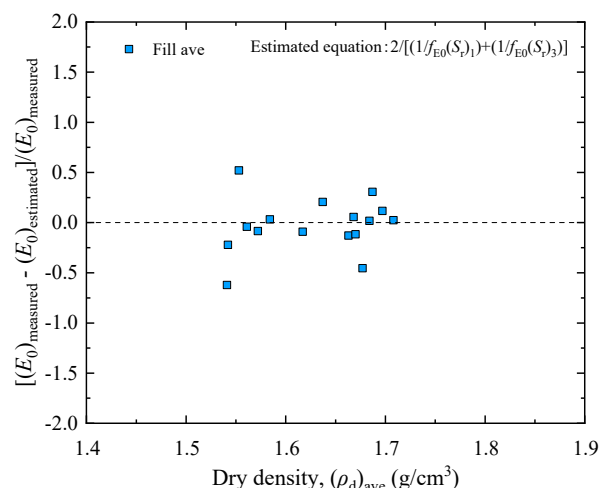


図 7-5-83 測定値と推定値間のばらつき～乾燥密度
(簡易推定式を用いて推定)

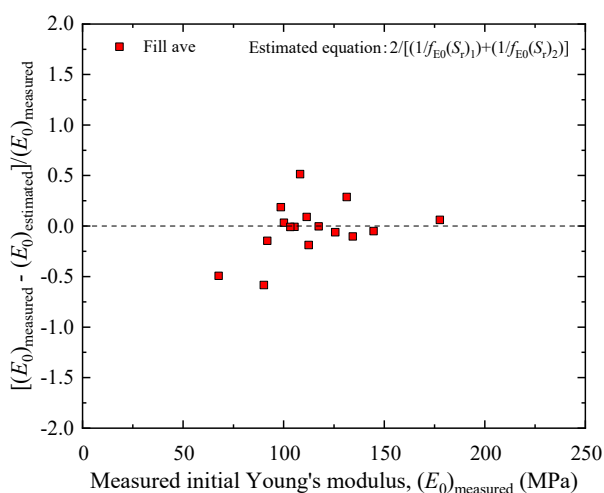


図 7-5-84 測定値と推定値間のばらつき～測定値
(供試体上部の測定値を用いて推定)

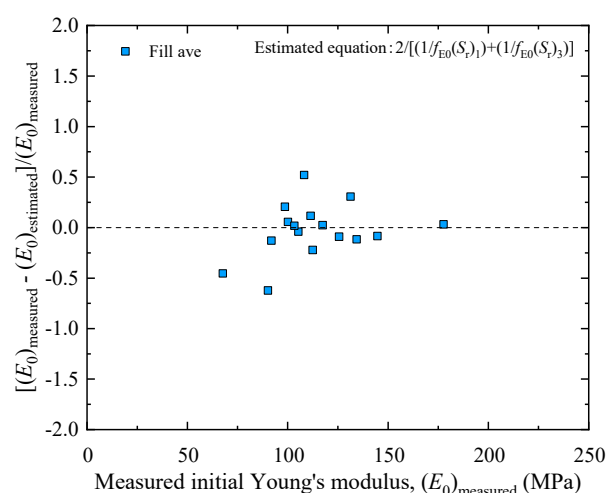


図 7-5-85 測定値と推定値間のばらつき～測定値
(簡易推定式を用いて推定)

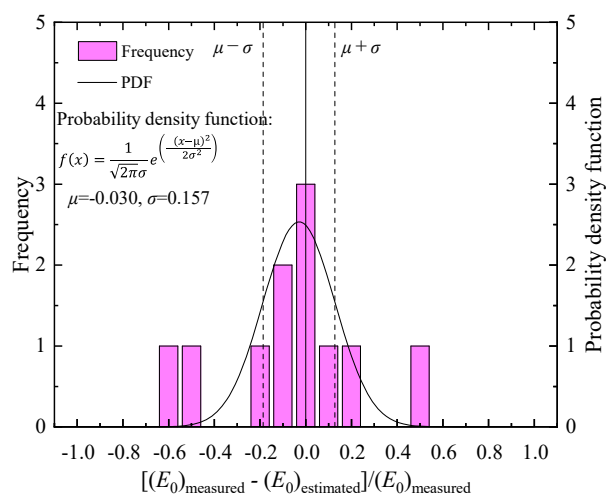


図 7-5-86 頻度分布と確率密度曲線
(供試体上部の測定値を用いて推定)

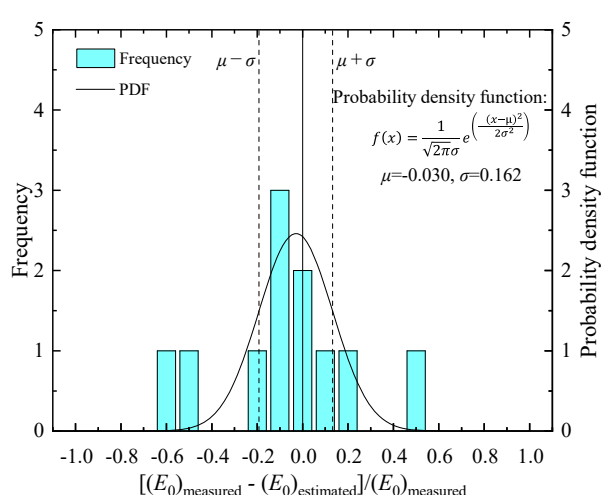


図 7-5-87 頻度分布と確率密度曲線
(簡易推定式を用いて推定)

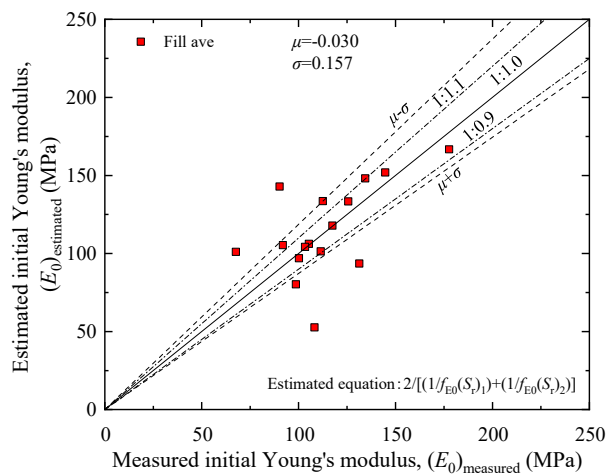


図 7-5-88 初期ヤング率の推定値～測定値関係
(供試体上部の測定値を用いて推定)

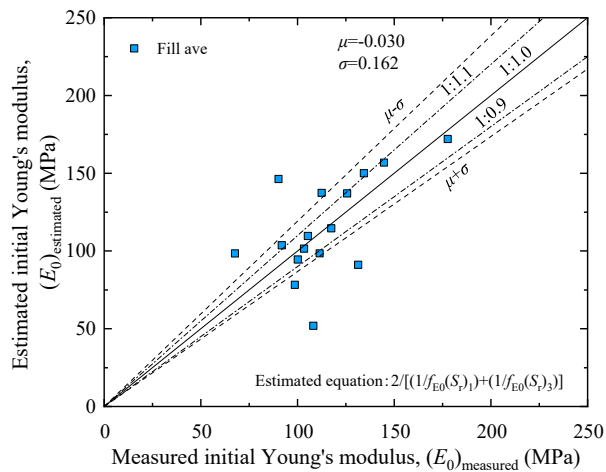


図 7-5-89 初期ヤング率の推定値～測定値関係
(簡易推定式を用いて推定)

7.6 本章のまとめ

本章では非一様性を考慮した室内締固め供試体と試験盛土供試体の応力～ひずみ関係における特徴の比較整理及びそれぞれの強度変形特性推定方法の提案、試験盛土供試体上部への存在が示唆されるせん断破壊領域の影響の定式化提案、供試体の飽和化による強度変形特性の変化に対する考え方、さらには室内締固め供試体平均の変形特性から試験盛土供試体平均の変形特性推定方法を提案した。また提案した推定式の妥当性検証を目的に、強度変形特性推定に用いる含水状態のパラメーターを飽和度別と含水比別に整理し、測定値との違いやばらつきをそれぞれ比較した。さらに、初期サクションについても同様に含水状態のパラメーターを比較する方法で測定値との違いやばらつきをそれぞれ比較した。最後に室内締固め供試体平均の変形特性から推定した試験盛土供試体平均の変形特性について、推定方法の妥当性を測定値と推定値の違いやばらつき比較により検証した。

本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 試験盛土供試体上部の軸差応力～鉛直ひずみ関係は締固め時に受けたせん断破壊領域の影響により、小さい鉛直ひずみ範囲では剛性が低く、鉛直ひずみの進行とともに一様化が進んで剛性が試験盛土供試体下部や室内締固め供試体と同等になる。
- ② 最大軸差応力は試験盛土供試体上部と室内締固め供試体下部の局所的な先行破壊から決定し、局所的な乾燥密度と飽和度を考慮すれば両者同等であり、ばらつき±15%程度である。このことから室内締固め供試体の試験データに基づいて推定式を定式化すれば、現場締固め土の強度特性を推定する事が出来る。
- ③ 試験盛土供試体下部の変形特性は室内締固め供試体とほぼ同等であり、変形特性～乾燥密度関係からも試験盛土供試体下部にはせん断破壊領域の影響が殆ど現れていない。このことから本研究の現場締固め条件では、せん断破壊領域の影響を受ける範囲は締固め層表面から 100mm 程度であると考えられる。
- ④ 試験盛土供試体の変形特性は鉛直深度方向に非一様であり、乾燥密度、飽和度に加え、せん断破壊領域の影響が含まれている。せん断破壊領域の影響で変形特性はひずみレベルの影響を受けるが、乾燥側で最大 40%～60%程度の低下となる。その一方で最適飽和度では 10%～20%程度の低下に留まり、わずかである。現場締固め土の変形特性を室内締固め土と比較評価する際には飽和度に応じたせん断破壊領域の影響を適切に考慮しなくてはならない。
- ⑤ 局所的な乾燥密度と飽和度、せん断破壊領域の影響を考慮すれば現場と室内の変形特性はほぼ同等であり、初期ヤング率に関してはばらつき±20%程度である。このことから室内締固め供試体の試験データに基づいて推定式を定式化すれば、現場締固め土の変形特性を推定する事が出来る。
- ⑥ 試験盛土供試体上部に含まれるせん断破壊領域の影響として、飽和度の関数 $h_{Ev}(D, S_r)$ を定義し、室内締固め供試体の変形特性から試験盛土供試体上部の変形特性を推定する簡易推定式と、それを用いて室内締固め供試体の変形特性との合成式から試験盛土供試体平均の推定方法を提案した。その結果、測定値から推定する方法との違いは殆どなく、提案方法の妥当性を確認した。提案した試験盛土供試体平均の鉛直ヤング率の推定の流れを図 7-6-1 に示す。
- ⑦ 試験盛土供試体と室内締固め供試体の最大軸差応力～初期ヤング率関係は比較的類似する事から、室内締固め供試体の三軸圧縮試験による初期ヤング率を測定すれば、試験盛土供試体の最大軸差応力がある程度推定する事が出来る。ただし、飽和度 $S_r=20\%$ 程度の低い飽和度範囲では飽和度の影響によるばらつきが生じやすい。
- ⑧ 本研究で作製した供試体の含水条件において三軸圧縮試験により得られた強度変形特性の測定値と、これに

基づいて飽和度別、含水比別に整理して求めた推定曲線との違いやばらつきに大きな差は殆ど見られず、この程度の含水条件範囲、特に最適飽和度、最適含水比よりやや乾燥側では含水比別に強度変形特性を整理しても同等のばらつきの程度で推定曲線を作成する事が出来る。

- ⑨ 本研究で作製した供試体の含水条件において初期サクシオン測定試験により得られた測定値と、供試体の飽和度別、含水比別に整理して求めた推定曲線との違いやばらつきに大きな差は殆ど見られない。さらに、最大軸差応力～初期サクシオン関係は測定値の不確実性に伴うばらつきは多く含まれるものの、同じ乾燥密度条件で初期サクシオンの増加とともに最大軸差応力は増加するが収束傾向を示す。

本章では、現場で測定する事の出来る乾燥密度と飽和度を独立した変数とし、簡単で実用的な変数分離式で表現出来る事を示した。また、現場では締固め機械による締固めエネルギーを記録する事は困難であるが、現場締固めや室内締固めの締固めエネルギーに関わらず、強度変形特性を乾燥密度と飽和度を用いた同一の式で表現可能である事から、実際の施工に適用するのに必要な一般性が担保されている事を示した。

以上の事から、現場に対する適用性の高い式が得られた事、現場締固め特有のせん断破壊領域の影響、飽和化の影響を簡明な形で表現出来る式となった。また、最適飽和度付近で締め固めた土はせん断破壊領域の影響、飽和化による影響が非常に小さく、無視できる程度である。これは、最適飽和度付近で締め固めた土は不飽和土での設計も適用可能である事を意味する。

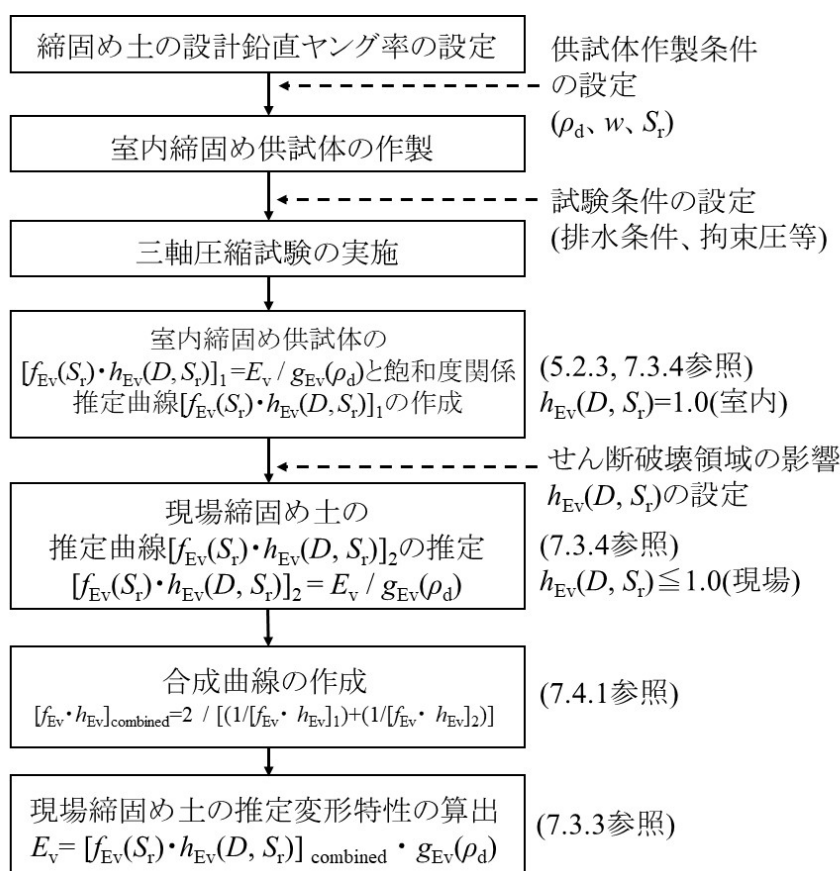


図 7-6-1 提案した試験盛土供試体平均の鉛直ヤング率の推定の流れ

【7章の参考文献】

- 1) Tatsuoka, F.(2015): Compaction characteristics and physical properties of compacted soil controlled by the degree of saturation, In: Keynote Lecture, Deformation characteristics of geomaterials, *Proc. Of 6th international conference on deformation characteristics of geomaterials*, Buenos Aires, pp.40-78.
- 2) Tatsuoka, F., Gomes Correia, A. (2018): Importance of controlling the degree of saturation in soil compaction linked to soil structure design, *Transportation Geotechnics* 17, pp.3-23.
- 3) Tatsuoka, F. & Miura, T. (2019): Compacted states and physical properties of soil controlled by the degree of saturation during compaction, IS-Glasgow 2019, *Proc. Of 7th international symposium on deformation characteristics of geomaterials*, 18002.
- 4) Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Paufahl, M.D., & Clifton, A.W.(1996): Model for prediction of shear strength with respect to soil suction, *Can. Geotech. J.*, Vol.33, pp.379-392.
- 5) 加藤正司, 吉村優治, 新海博之(2002): 不飽和マサ土の一軸圧縮試験時の変形強度特性に及ぼすサクシジョンの影響, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.949-950.
- 6) 加藤正司, 吉村優治, 新海博之(2003): サクシジョンが不飽和マサ土の一軸圧縮強度に与える影響, 豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関するシンポジウム, 地盤工学会, pp.23-28.
- 7) 金乗洙, Seong-Wan Park, 岡本弘史, 加藤正司, 澁谷啓, 蔡鍾吉(2007): 締固め土の一面せん断試験における変形強度特性へのサクシジョンの影響(その 1)ー試験装置及び材料特性ー, 第 42 回地盤工学研究発表会, pp. 751-752.
- 8) 蔡鍾吉, 岡本弘史, 金乗洙, Seong-Wan Park, 加藤正司, 澁谷啓, (2007): 締固め土の一面せん断試験における変形強度特性へのサクシジョンの影響(その 2), 第 42 回地盤工学研究発表会, pp. 749-750.
- 9) 藤井弘章, 渡辺忠(1985): 現地締固めに関する二、三の考察, 土木学会第 40 回年次学術講演会, pp.581-582.

第8章

結論と今後の課題

8.1 結論

本研究では現場と室内で締め固めた砂質土供試体それぞれの非一様性に着目し、大型土槽内に小型締め固め機械を用いて実大締め固め実験を行い、作製した試験盛土から採取した試験盛土供試体と、同一の土質を用いて5層突固め法で作製した室内締め固め供試体を作製し、それぞれの物理特性と強度変形特性の違いを調べた。実施した鉛直密度分布測定試験、初期サクシヨン測定試験や、鉛直深度別の局所変位計を用いた中型三軸圧縮試験装置による単調載荷試験、等方圧密試験、中圧等方圧密試験、荷重保持載荷試験、繰返し載荷試験等から得られた結論を以下に示す。

8.1.1 現場と室内で締め固めた供試体の物理特性

- ① 試験盛土供試体には明確な鉛直深度方向の乾燥密度分布が確認され、供試体上部は下部より乾燥密度が大きい。この局所的な乾燥密度分布に対し、上部と下部で含水比の差は殆どなく、飽和度が異なる。
- ② 室内締め固め供試体はわずかに鉛直深度方向の乾燥密度分布が確認され、供試体上部に比べて下部の乾燥密度が大きい。平均乾燥密度に対する供試体上下の乾燥密度差で評価すると締め固めエネルギー $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ では0.4%程度、締め固めエネルギー $4.5E_c$ では1.1%程度である。
- ③ この局所的な乾燥密度分布の程度は締め固めエネルギーやランマーの重量によって異なり、突固め時に各締め固め層に与える撃力の影響と関連している。
- ④ 試験盛土供試体は締め固め機械の転圧による粒度分布の変化は殆ど見られない。その一方で、室内締め固め供試体は締め固め時に粒子破碎が生じ、細粒分含有率がわずかに増加する。この細粒分の増加が他の物理特性や強度変形特性に与える影響は殆ど認められない。
- ⑤ 試験盛土供試体と室内締め固め供試体は、ほぼ同等の初期サクシヨンと含水比との関係及び、初期サクシヨンと飽和度との関係を示す。また、測定した含水条件において初期サクシヨンと含水比との関係は乾燥密度の影響が少なく、ほぼ一義的な傾向を示すのに対し、初期サクシヨンと飽和度との関係には乾燥密度の影響によるばらつきが含まれる。
- ⑥ 試験盛土供試体の初期サクシヨンは上部と下部の乾燥密度と含水比、飽和度を考慮すれば、上部と下部の違いに有意な差は見られず、現場締め固め時に盛土表層に生じるせん断破壊領域の影響は現れない。
- ⑦ 飽和化した試験盛土供試体の鉛直透水係数と含水比との関係、鉛直透水係数と飽和度との関係にはばらつきはあるものの、乾燥密度の影響を受けるが、その傾向は室内締め固め供試体と類似する。
- ⑧ 鉛直深度別に供試体をパート分けする事で、供試体の鉛直深度方向の物理特性に関する非一様性を評価する事が出来た。

以上より、現場と室内で締め固めた供試体はともに、程度は異なるが鉛直深度方向の乾燥密度、飽和度の違いが見られ、非一様である。また、両者は供試体の作製方法に起因する粒度特性や初期サクシヨン等の物理特性にわず

かな違いは見られたが、他の物理特性や強度変形特性へ影響を与える程大きくない。このことから、両者ともに鉛直深度方向の乾燥密度分布と飽和度分布を考慮すればほぼ同等に物理特性を評価できる。また、現場で締め固めた供試体表層付近への存在が示唆される、せん断破壊領域の影響は、室内で締め固めた供試体の粒度分布、初期サクシオン、透水係数等と比較しても明確な特徴は現れない。

8.1.2 現場と室内で締め固めた供試体の強度変形特性

- ① 非一様供試体の単調載荷試験により得られた強度変形特性は、鉛直深度方向の乾燥密度分布と飽和度分布の影響が含まれるため、鉛直深度方向に一様ではない。ただし、それら供試体の非一様性を考慮すると、飽和度の影響を受けるが強度変形特性と乾燥密度の関係には正の相関がある。
- ② 特に試験盛土供試体は最大軸差応力と乾燥密度関係において供試体の乾燥密度分布によるばらつきが無視できない程大きく、この程度の乾燥密度分布があれば供試体の非一様性の影響検討が必須である。
- ③ 非一様供試体の単調載荷試験では、局所的に乾燥密度の小さい部分が先行破壊する為、得られる最大軸差応力はその部分の局所乾燥密度と正の相関関係があり、局所的に同じ乾燥密度、飽和度条件で試験盛土供試体と室内締め固め供試体はほぼ同等の最大軸差応力を示す。
- ④ 試験盛土供試体上部の軸差応力と鉛直ひずみの関係は締め固め時に受けたせん断破壊領域の影響により、小さい鉛直ひずみ範囲では剛性が低い。これが試験盛土供試体平均の剛性低下を招いている。
- ⑤ 試験盛土供試体上部の軸差応力と鉛直ひずみ関係において、せん断破壊領域は鉛直ひずみの進行とともに一様化が進み、試験盛土供試体下部や室内締め固め供試体と同等の乾燥密度、飽和度に応じた軸差応力を示す。
- ⑥ 試験盛土供試体下部の変形特性は室内締め固め供試体とほぼ同等であり、変形特性と乾燥密度の関係からも試験盛土供試体下部にはせん断破壊領域の影響が現れていない。
- ⑦ 試験盛土供試体の変形特性は鉛直深度方向に非一様であり、乾燥密度、飽和度に加え、せん断破壊領域の影響が含まれている。現場締め固め土の変形特性を評価する為にはそれらを適切に考慮しなくてはならない。
- ⑧ 室内締め固め供試体の等方圧密過程における変形特性は飽和度の影響を受け、鉛直ひずみ増分より水平ひずみ増分が多く、異方的な構造である。この傾向はせん断破壊領域の影響を受けていない試験盛土供試体下部も類似する。
- ⑨ 試験盛土供試体上部は等方圧密過程において異方的な構造は示すものの、室内締め固め供試体に比べてやや等方的に近い挙動を示す。これは現場締め固め時の表層付近は比較的拘束効果が弱い為、室内締め固め供試体のような強い構造異方性を得られなかったと考えられ、せん断破壊領域の特徴の一つである事を示唆している。
- ⑩ 中圧等方圧密過程の微小ひずみ領域の変形特性は、同一試料であれば供試体上部と下部ともに応力依存性を示す係数 $m=0.5$ 程度でほぼ同等である。また室内締め固め供試体と試験盛土供試体の変形特性の違いは小さく、供試体の非一様性が微小ひずみ領域の変形特性に与える影響は小さい。
- ⑪ 中圧等方圧密の圧密履歴を与えると、試験盛土供試体、室内締め固め供試体ともに、単調載荷時に正の水平ひずみの発生抑制効果が発揮される為、若干の剛性増加や体積収縮量の低減等、変形特性が向上する。
- ⑫ 荷重保持載荷における鉛直ひずみの増分と乾燥密度の関係において、試験盛土供試体は室内締め固め供試体と異なり、軸差応力が小さい場合は供試体上部が下部より鉛直ひずみ増分が大きい為、軸差応力が大きくなると全体的に鉛直ひずみ増分は大きくなり、供試体上部と下部で同等となる。この低い軸差応力の範囲で試験盛土供試体上部の鉛直ひずみ増分が大きい事象はせん断破壊領域の影響と考えられ、単調載荷時に示した剛性変化と関連している。

- ⑬ 等価ヤング率と片振幅鉛直ひずみの関係及び $E_{eq}/f(e)$ と片振幅鉛直ひずみの関係から、供試体上部と下部の等価ヤング率の違いは小さい。また、試験盛土供試体及び室内締固め供試体の等価ヤング率の違いも小さい。
- ⑭ 鉛直深度別に設置した局所変位計を用いる事で、非一様供試体の鉛直深度方向の強度変形特性を評価する事が出来た。また、これにより本研究の現場締固め条件でせん断破壊領域の影響を受けるのは表層から深さ100mm程度である。
- ⑮ 締固め層の上部と下部をそれぞれ別個に採取した小型供試体の三軸圧縮試験により、せん断破壊領域の影響を受けた締固め層上部はピークまでの剛性は低いが、室内締固め供試体と同様に乾燥密度に応じた最大軸差応力を示す。この最大軸差応力は試験盛土供試体下部や室内締固め供試体の最大軸差応力と乾燥密度の関係とほぼ一致する。
- ⑯ 間接的ではあるが、試験盛土供試体、室内締固め供試体ともに同じ乾燥密度条件で初期サクシオンが増加すると、最大軸差応力は増加する。また、その最大軸差応力の増加は収束傾向を示し、乾燥密度に応じた上限がある事を示唆している。
- ⑰ 試験盛土供試体の飽和化後の強度変形特性は、不飽和供試体に比べて乾燥側でやや低下が見られるが、最適飽和度付近で締め固めれば無視できる程度の違いである。これはせん断破壊領域の有無に関わらず同様である。

現場で締め固めた供試体上部のせん断破壊領域の影響による剛性の低い層は圧密履歴を与える事で剛性が向上する事から、現場締固め土表層付近は、高い応力条件下または応力履歴を付与する事により、変形特性の向上が期待できる。さらに、このせん断破壊領域の影響は単調載荷試験や荷重保持載荷試験の方が、繰返し載荷試験や微小繰返し載荷試験に比べて変形特性に明確な違いが現れる。本研究では明らかに出来なかった事や、研究過程で新たに確認した課題が多く存在する。それらは次節に示す。

8.1.3 室内で締め固めた供試体を用いた現場で締め固めた供試体の強度変形特性推定方法

- ① Tatsuoka & Correia (2018)の提案した飽和度の影響 $f(S_r)$ の関数と乾燥密度の影響 $g(\rho_d)$ の関数から構成される変数分離形の経験式 $f(S_r) \cdot g(\rho_d)$ を用いた結果、現場と室内で締め固めた供試体の強度特性は供試体の非一様性を考慮すればほぼ同等であり、ばらつき±15%程度である。このことから室内締固め供試体の試験データに基づいて推定式を定式化し、現場締固め土の強度特性を推定する事が出来る。
- ② 試験盛土供試体の変形特性を推定するにはせん断破壊領域の影響の関数 $h(D, S_r)$ を考慮する必要がある、Tatsuoka & Correia (2018)の提案した経験式に加えて、本研究で測定したせん断破壊領域の影響に基づいて $h(D, S_r)$ を考慮した式 $f(S_r) \cdot g(\rho_d) \cdot h(D, S_r)$ を提案し、この式の精度検証をして提案の妥当性を確認した。初期ヤング率の推定時のばらつきは±20%程度である。このことから室内締固め供試体の試験データに基づいて推定式を定式化すれば、現場締固め土の変形特性を推定する事が出来る。また、飽和条件で定めた設計値と現場測定値を関連付けするには締め固めた土の飽和化の影響の考慮が必要である。
- ③ 試験盛土供試体と室内締固め供試体の最大軸差応力と初期ヤング率の関係は比較的類似する事から、室内締固め供試体の三軸圧縮試験による初期ヤング率を測定すれば、試験盛土供試体の最大軸差応力がある程度推定出来る。ただし、飽和度 $S_r=20\%$ 程度の低い飽和度範囲では飽和度の影響によるばらつきが生じやすい。
- ④ Tatsuoka & Correia (2018)の提案した飽和度の影響 $f(S_r)$ を含水比の影響 $f(w)$ として、乾燥密度の影響 $g(\rho_d)$ とともに同様の方法で適用した変数分離形の経験式 $f(w) \cdot g(\rho_d)$ は、本研究で扱った乾燥側から最適飽和度、最適含水比付近の含水条件においてほぼ同等の精度である事を確認し、非一様供試体の強度変形特性の推定に適

用する事が出来る。

- ⑤ 初期サクシオン測定試験により得られた測定値と、供試体の飽和度別、含水比別にそれぞれ整理して求めた推定曲線との違いやばらつきは比較的大きいが、飽和度別と含水比別の整理方法の違いによる差は殆どない。

本研究で供試体の非一様性、すなわち乾燥密度と飽和度、せん断破壊領域の影響、飽和化の影響を考慮する事で、現場と室内で締め固めた供試体の強度変形特性の概観を把握する事が出来た。また、室内締め固め供試体の乾燥密度と飽和度の非一様性を考慮した強度変形特性の推定式を定式化し、せん断破壊領域の影響、飽和化の影響を考慮すれば、現場の強度変形特性を推定出来る事を示した。これは、締め固めエネルギーや締め固め方法に関わらず同一の式が成り立つことから、実際の施工に適用するのに必要な一般性が担保されている事を意味する。また、締め固めた土の乾燥密度と強度変形特性の関係は非線形であり、さらに飽和度の影響によるばらつきも考慮すると、厳密にこの関係を表現するには多変量解析が必要となる。しかし、このような複雑な解析を扱うには精度の高いデータが多量に必要であり、現場で適用する事は困難である。それに比べて本研究で提案した式は現場で測定できる乾燥密度と飽和度を独立した分離変数の積の形式で表現出来ている。これらの事から、本研究では現場に対する適用性の高い式が得られており、せん断破壊領域の影響や飽和化の影響を簡明に表現出来る。

また、最適飽和度付近で締め固めた土はせん断破壊領域の影響、飽和化による影響が非常に小さく、無視できる程度である事も重要な知見である。これは、最適飽和度付近で締め固めた土は不飽和土での設計も適用可能である事を意味する。

8.1.4 実務への寄与について

- ① 現場で測定した含水比や乾燥密度が室内試験に基づいた盛土構造物の適切な設計法確立への寄与
- (1) 室内締め固め供試体の乾燥密度、含水比及び強度変形特性、せん断破壊領域の影響、飽和化の影響に基づいて定式化した推定式を用いれば、現場で測定した乾燥密度、含水比を用いて強度変形特性の推定や設計が出来る。
 - (2) 盛土で弱部となるのはせん断破壊領域より乾燥密度の小さい部分である事から、現場においては乾燥密度を高める事が盛土の強度確保に直結する為、薄層施工が重要である。
 - (3) 現場で締め固めた盛土表面は飽和度とせん断破壊領域の影響で軟らかい層は生じるもの、最適飽和度付近で施工すればこの層は生じ難く、盛土材を最適飽和度付近となるよう含水管管理が重要である。積み重ねて施工する際にこの層の剛性は改善すると予想され、実務上は大きな問題とならないと考える。
- ② 初期ヤング率等の地盤剛性指標が施工管理時の現場測定値に関する評価方法の確立への寄与
- (1) 現場 CBR 等の強度特性は設計で定めた値との対応確認が可能である。
 - (2) 道路の平板載荷試験等の変形特性はひずみレベルの考慮と表層の軟らかい層を考慮すれば設計で定めた値との対応確認が可能である。

8.2 今後の課題

本研究では明らかに出来なかった事や、研究過程で新たに確認した課題を以下に示す。

8.2.1 現場締固め土のせん断破壊領域の発生メカニズムと詳細な力学特性の解明

本研究では現場締固め時に試験盛土表層に生じるせん断破壊領域の存在を仮定して議論を進めてきた。その結果、せん断破壊領域の影響を受けた試験盛土供試体上部が、影響を受けていない同一作製条件の室内締固め供試体に比べて単調載荷時に低い剛性を示す事、単調載荷の鉛直ひずみの進行とともに一様化して軸差応力が向上する事、せん断破壊領域が室内締固め供試体と異なるやや等方的な構造である事、試験盛土供試体上部は圧密履歴により単調載荷時の剛性が向上する事等の知見を得ている。しかし、本研究ではせん断破壊領域の発生メカニズムの解明にまでは至らなかった。現場の締固め機械を用いた締固め特性に関する既往の研究例は 2.2.3 にも示したが、土質工学会(1990)、地盤工学会(1991)、平川(2000)にはせん断破壊領域の存在を示唆する記述はあるものの、発生メカニズムや力学特性に関する詳しい説明はされていない。また、本研究で実施した物理特性からその特徴を示す事は出来ていない。

地盤工学会(2013)は、盛土試験施工時の締固め層内の密度分布について、粘性土、砂質土、礫質土及び岩石質材料別に整理した土質工学会(1990)を引用し、材料別の傾向を加筆しているが、これによると、砂質土に比べて礫質土や岩石質材料の方が粒子間のインターロッキングにより、密度分布が大きく、含水比の高い粘性土は密度分布が小さい事を示しており、締固め機械の荷重とその分散による地盤内応力の鉛直深度方向への変化と材料区分との関連が示唆される。すなわち、現場締固め時の極限支持力以上の荷重載荷で塑性化により生じる表層のせん断破壊領域は、盛土材料に応じてその影響深度や強度変形特性に与える影響が異なる可能性がある。また、盛土材料と使用する締固め機械が締固め層の非一様性に与える影響は分かっておらず、解明すべき課題は多い。

室内締固め供試体を用いてせん断破壊領域の影響を有する供試体を再現する事が出来れば研究の進展が期待される。案として低拘束圧下で室内作製供試体を圧縮してせん断破壊させ、これを所定の拘束圧下で再度圧縮する方法が挙げられるが、本研究では実施できなかった。

[今後の課題]

- ① せん断破壊領域の発生メカニズム及び、より詳細な力学特性の解明
- ② 異なる盛土材料、締固め機械で締め固めた土のせん断破壊領域の範囲及び強度変形特性に与える影響の把握

8.2.2 室内締固め機構の解明

4.3 では突固め法で 5 層に分けて各層等エネルギーで作製した室内締固め供試体も、わずかに鉛直深度方向の乾燥密度分布が確認され、上部に比べて下部が大きい。これは、Ladd(1978)が示した説明と整合している。また、佐々木ら(2018)は湿潤締固め法で供試体を作製し、供試体内の各締固め層内も荷重分散の影響で非一様である事を示すとともに、同一の湿潤密度にする為に、下層より上層の方が突固め回数は多い事を報告している。これについて詳しい記述はなかったが、本研究で示した各締固め層の撃力の影響で下層が上層より締固めやすいという事と整合している。

また、締固め機構に関して大島、高田(1992)は重錘落下締固めにおける、重錘が持つ運動量に着目し、打撃時の加速度と貫入量のデータに基づいて重錘落下締固め工法と通常の締固め試験の締固め機構の分析を行っている。本研究でも室内締固め供試体の締固め撃力測定時に重錘落下による地盤の沈下量の測定を試みたが、不陸による

測定値の変動が大きい為に断念した。これについて重錘落下時の加速度との関連を調べる事が望まれる。

この突固め法による供試体の締固め特性は、上層の締固め時に荷重が下層へ伝達している影響も考えられる。すなわち、上層の締固め時の荷重が下層の乾燥密度増加に影響を与えている可能性がある。ただし、これについては、先述した佐々木(2018)らの突固め回数と湿潤密度分布の結果を踏まえると、単純に上層締固め荷重が下層に伝達する事を説明するのは難しく、試料と供試体作製用モールド間の摩擦や、下層への荷重分散等を説明する必要がある。これらの検討に際しては重錘落下による締固め地盤の変形に着目した大島ら(1996)、下平ら(1990)の研究等が参考になると考える。

また、室内締固め供試体の応力～ひずみ関係は過圧密土のような挙動を示すことから、供試体作製時に与えている重錘落下による瞬間的な鉛直応力と供試体の中圧等方圧密時の圧密降伏応力との関係に着目して検討したが、明確な傾向は見つける事が出来なかった。室内締固め供試体が単調載荷時に過圧密土のような挙動を示す原因の解明も残る課題の一つである。

[今後の課題]

- ③ 室内締固め供試体の上層の締固め効果が及ぼす下層への影響評価と締固め機構の解明
- ④ 室内締固め供試体の応力～ひずみ関係が過圧密土のような挙動を示す原因解明

8.2.3 締め固めた土の浸水が強度変形特性に与える影響

本研究では締め固めた不飽和供試体を中心に排気・排水三軸圧縮試験を実施し、同じ乾燥密度条件で締め固めた供試体は飽和度の低い乾燥側の供試体の方が、飽和度の高い湿潤側の供試体より強度変形特性は大きい事を示した。加藤ら(2003)は不飽和土に作用するサクションが強度に対して粘着力を増加させ、変形に対しては土の骨格剛性を増加する事を説明しており、本研究で得られた結果と整合する。しかし、サクションが与える強度変形特性への影響は降雨時の地盤の飽和化とともに消失し、安定性を損なう事を指摘している。本研究でも飽和化した供試体の三軸圧縮試験を実施しているが、十分なデータ数が得られておらず、飽和化した供試体の強度変形特性に関して詳細な検討が出来なかった。

龍岡、平川(2020)、中島(2020)は、実務からの視点で現行の盛土締固め管理の基準とその課題について整理している。それらの中では、飽和度の低い条件で締め固めた土は透水性が高く、供用後の降雨などによる浸水沈下(コラプス)や強度・剛性の低下を懸念しており、施工管理時に飽和度や含水比の下限值を設定する等の提案をしている。

締め固めた土の浸水による強度変形特性に関する先行研究には、龍岡ら(2014)や森(2018)が挙げられ、いずれも締め固めた土の浸水に伴う強度変形特性の著しい低下を示している。これらの浸水時の土の強度変形特性に関する研究は、その殆どが室内で作製した供試体である為、現場締固め土の浸水沈下特性との比較が必要と考える。

[今後の課題]

- ⑤ 現場と室内で締め固めた土の浸水による沈下特性の比較
- ⑥ 現場と室内で締め固めた供試体の飽和化後の強度変形特性の詳細な検討
- ⑦ 飽和化した供試体と不飽和供試体の強度変形特性の詳細な比較

8.2.4 非一様供試体の局所変形挙動のより詳細な評価

本研究で扱った直径 $\phi=100\text{mm}$ 、高さ $h=200\text{mm}$ の中型供試体の鉛直深度別の変形特性は長さ 80mm の LDT80 を鉛直深度別に配置し、主に供試体端面を除く上半部と下半部に対して調べ、非一様性をある程度は評価する事が出来た。ただし、鉛直深度方向に連続的に変化する非一様供試体の変形挙動を詳細に解明出来たわけではない。

これまで適用されてきた LDT の長さは短い場合でも 70mm～80mm 程度が標準であり、供試体端面のベディング

エラーの影響範囲を避けて配置する事を考えると、中型供試体高さに対して分割して測定できる範囲には限界がある。この為、詳細な局所変形挙動の把握には測定方法の再検討が必要である。また、非一様供試体の破壊形態は局所的であり、応力～ひずみ関係におけるピーク後はひずみの局所化が生じる事がわかっている。

非一様供試体の変形特性についてより詳しく調べるには局所的な変形が巨視的な力学挙動に及ぼす影響を評価する事が必要となる。供試体全体を対象とした局所変形特性を評価するには画像解析が挙げられ、Zhao et.al.(2018)が実施したメンブレンに付した標点の移動を追跡する方法、木戸ら(2017)が実施したマイクロフォーカス X 線 CT を用いる方法等が挙げられる。

また、本研究では飽和度 $S_r=15\% \sim 80\%$ の範囲について調べてきたが、飽和度 $S_r=0\% \sim 15\%$ 、 $S_r=80\% \sim 100\%$ の範囲は調べる事が出来なかった。この飽和度範囲は現場締固め土も室内締固め土も供試体が自立せず、これを調べるには供試体の作製や供試体の自立に工夫が必要である。実務では $S_r=80\%$ 以上の高い飽和度の盛土材を扱う機会も多く、本研究で提案した式の境界条件を適切に定める為にも今後の課題と考える。

[今後の課題]

- ⑧ 現場と室内で締め固めた供試体の載荷過程における詳細な局所変形挙動の把握
- ⑨ 飽和度 $S_r=0\% \sim 15\%$ 、 $S_r=80\% \sim 100\%$ の範囲の締固め土の強度変形特性の把握

【8章の参考文献】

- 1) Ladd, R.S.,(1978): Preparing test specimens using undercompaction, *Geotechnical testing journal*, GTJODJ, Vol.1, No.1, pp.16-23.
- 2) Zhao, C., Koseki, J.& Sasaki, T. (2018): Image based local deformation measurement of saturated sand specimen in undrained cyclic triaxial tests, *Soils and Foundations* Vol.58, pp.1313-1325.
- 3) 大島昭彦, 高田直俊(1992): 重錘落下締固めにおける重錘運動量と締固め効果, 第 27 回土質工学研究発表会, pp.2103-2106.
- 4) 大島昭彦, 高田直俊, 枋尾健, 住武人(1996): 重錘落下による締固め範囲に与える土の粒径と地盤密度の影響, 第 31 回地盤工学研究発表会, pp.2327-2328.
- 5) 加藤正司, 吉村優治, 新海博之(2003): サクションが不飽和マサ土の一軸圧縮強度に与える影響, 豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関するシンポジウム, 地盤工学会, pp.23-28.
- 6) 木戸隆之祐, 肥後陽介, 高村福志(2017): 三軸圧縮下の不飽和砂の進行的なせん断帯発達過程における間隙水の微視的特性, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.73, No.2, pp.233-247.
- 7) 地盤工学会(2013): 地盤調査の方法と解説, 地盤工学会. 丸善出版株式会社.
- 8) 佐々木朋子, 佐藤剛司, Chuang ZHAO, 古関潤一 (2018): 締固め法によって作製した砂供試体の締固め層厚および初期含水比が液状化特性に及ぼす影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.4, pp.379-392.
- 9) 下平祐司, 山肩邦男, 森国夫(1990): 重錘落下締固め工法における地盤内応力の推定, 第 25 回土質工学研究発表会, pp.1857-1860.
- 10) 龍岡文夫, 藤代健司, 糟谷優太, 菊池喜昭, 建山和由(2014): 盛土の締固め⑬, 基礎工, Vol.42, No.7, pp.97-100.
- 11) 龍岡文夫, 平川大貴(2020): .総説 盛土の締固めの新たな展開と展望, 基礎工, Vol.48, No.11, pp.18-21.
- 12) 土質工学会(1990): 粗粒材料の現場締固め, 社団法人土質工学会.
- 13) 土質工学会 (1991): 土の締固めと管理, 土質基礎工学ライブラリー36, 土質工学会.
- 14) 中島進(2020): 盛土の締固め施工管理基準の設定法, 基礎工, Vol.48, No.11, pp.18-21.
- 15) 平川大貴(2000): 砂地盤内における応力分布の検討, 東京大学修士論文.
- 16) 森友宏(2018): 降雨浸透による砂質造成盛土の圧縮沈下, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1765-1766.

付 録

A.1 1 層で締め固めた室内締め固め供試体の強度変形特性

本研究では現場で締め固めた1層の供試体と、室内で締め固めた5層の供試体の非一様性評価と強度変形特性を比較してきた。その結果、現場締め固め供試体は1層締め固め特有の鉛直密度分布、飽和度分布が生じている事を確認している。さらに、現場締め固め土はこれらの影響に加え、盛土表層に存在するせん断破壊領域が変形特性に影響を与えている事を説明した。本節では、現場締め固め供試体の鉛直密度分布、飽和度分布を模擬した1層室内締め固め供試体の強度変形特性を調べた。

A.1.1 1 層室内締め固め供試体の応力～ひずみ関係

図 A-1-1 には、作製した三軸圧縮試験用の室内締め固め供試体の乾燥密度～含水比関係と $0.2E_c$ 、 $1.0E_c$ 及び $4.5E_c$ の締め固め曲線を示す。また、図 A-1-2 には、同じ供試体の乾燥密度～飽和度関係を整理している。両図内には図 5-2-1、図 5-2-2 に示した室内5層締め固め供試体も併せて示している。図 A-1-1、図 A-1-2 中に示す室内1層締め固め供試体の上部と下部の乾燥密度分布は、4.3.2 で示した鉛直深度方向の密度分布試験と同じ方法で調べ、その結果に基づいて、供試体全体平均の乾燥密度に対し供試体上部は+3.4%、下部は-3.5%、含水比は上部と下部等しく、飽和度が異なる事を仮定して設定した。供試体の締め固めエネルギーは $1.0E_c(N_L=1, N_B=120)$ で、供試体平均の含水比 $w=7.9\%$ 、 12.7% の2ケースである。以下に典型的な試験結果の例として、締め固めエネルギー $1.0E_c$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.584\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w=7.9\%$ 、飽和度 $S_r=30.5\%$ の1層室内締め固め供試体の試験結果を示す。

供試体は不飽和条件で水平基底応力 $\sigma_{hnet}=50\text{kPa}$ 、圧密排気・排水条件で載荷している。図 A-1-3 は、軸差応力～鉛直ひずみ関係を示すが、横軸は EDT による供試体端面を含む全体の鉛直ひずみと LDT による供試体端面を除く供試体の平均の鉛直ひずみを示している。EDT と LDT では供試体端面のベディングエラーの影響や試験装置の変形等のシステムコンプライアンスにより、応力～ひずみ関係に違いが生じているが、測定範囲において両者の鉛直ひずみの差は最大で 0.5% 程度であった。EDT で測定した応力～ひずみ関係では鉛直ひずみ $\varepsilon_v=1\%$ 付近まで過圧密土のように高い剛性挙動を示し、それ以降は鉛直ひずみ $\varepsilon_v=9\%$ 付近まで軸差応力の微増が続いている。この供試体の最大軸差応力は $q_{max}=188.7\text{kPa}$ であった。図 A-1-4 は、供試体の上部と下部に設置した LDT80 により測定した軸差応力～鉛直ひずみ～体積ひずみ関係を示す。LDT80 の配置は図 3-2-11 に示した通りである。ロードセルは共通した1つを利用している為、軸差応力のピーク値は一致するが、ピークに達するまでの剛性は供試体の上部と下部を比較すると上部の方が大きい。供試体上部が下部より乾燥密度が大きい事を踏まえると、供試体上部の方が下部より剛性が大きい事は 5.2 の室内締め固め供試体の三軸圧縮試験結果で示した乾燥密度と剛性の関係と整合する。この傾向を定量的に示す為に他の締め固め条件の供試体の三軸圧縮試験結果と併せ、初期ヤング率 E_0 や割線ヤング率 E_{50} を用いて後で評価する。次に体積ひずみ～鉛直ひずみ関係について、載荷初期は上部と下部ともに体積ひずみは収縮傾向を示すが、鉛直ひずみ $\varepsilon_v=0.1\%\sim 0.2\%$ 付近で膨張傾向に転じている。また、最大体積圧縮ひずみは供試体の下部が上部に比べてやや大きい。これも供試体上部と下部の乾燥密度の大小関係と整合する。これらの傾向は 6.2 で説明した1層締め固め供試体である試験盛土供試体の結果と整合しない。これは、室内1層締め固め供試体には試験盛土供試体のように 7.3.4 で説明したせん断破壊領域の影響が殆ど含まれなかった為である。

A.1.2 1 層室内締固め供試体の強度変形特性～乾燥密度関係と飽和度の影響

図 A-1-5 には、図 7-5-5 中に示した 5 層締固め供試体上部の最大軸差応力～乾燥密度関係に 1 層室内締固め供試体下部データを加えて示した。1 層締固め供試体は下部の乾燥密度が小さいことから下部のデータのみを示している。また、1 層締固め供試体のデータは 2 点に限られているが、飽和度が大きいデータの方が乾燥密度は高くても最大軸差応力は低い。すなわち、5 層締固め供試体と同様に 1 層締固め供試体の最大軸差応力は乾燥密度と飽和度の影響を受けている事がわかる。

図 A-1-6 には図 7-5-3 中に示した 5 層締固め供試体上部の飽和度の関数 f_{qmax} ～飽和度関係を示す。両供試体ともに飽和度が低くなると飽和度の関数 f_{qmax} も低下する傾向を示している。ただし、5 層締固め供試体より、1 層締固め供試体の方が同じ飽和度でも飽和度の関数 f_{qmax} がやや大きい。1 層室内締固め供試体も 5 層締固め供試体と同様に乾燥密度と飽和度の影響を考慮すれば最大軸差応力を表現出来る事がわかった。

図 A-1-7、図 A-1-9 には、図 7-5-21、図 7-5-37 中に示した 5 層締固め供試体上部と下部の割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係、初期ヤング率～乾燥密度関係それぞれに 1 層室内締固め供試体上部と下部データを加えて示した。共通する供試体の対となる上部と下部は破線で結んでいる。いずれも、1 層締固め供試体のデータに限りはあるが、飽和度が大きいデータの方が乾燥密度は高くても割線ヤング率 E_{50} 、初期ヤング率は低い事がわかり、5 層締固め供試体と同様に乾燥密度と飽和度の影響を受けている事がわかる。

また、図 A-1-8、図 A-1-10 には図 7-5-19、図 7-5-35 中に示した 5 層締固め供試体上部の飽和度の関数 f_{E50} ～飽和度関係、飽和度の関数 f_{E0} ～飽和度関係を示す。両供試体ともに飽和度が低くなると飽和度の関数 f_{E50} 、 f_{E0} も低下する傾向を示している。ただし、5 層締固め供試体より 1 層締固め供試体の方が同じ飽和度でも飽和度の関数 f_{E50} 、 f_{E0} はやや大きく、現場締固め供試体に見られたせん断破壊領域の影響は殆どない事が確認された。詳細な検討は今後の課題と考える。

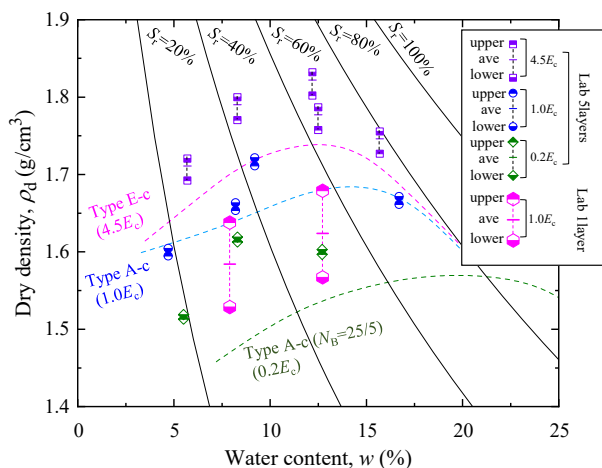


図 A-1-1 三軸試験供試体の乾燥密度～含水比関係
(室内 1 層と 5 層締固め供試体上部、下部)

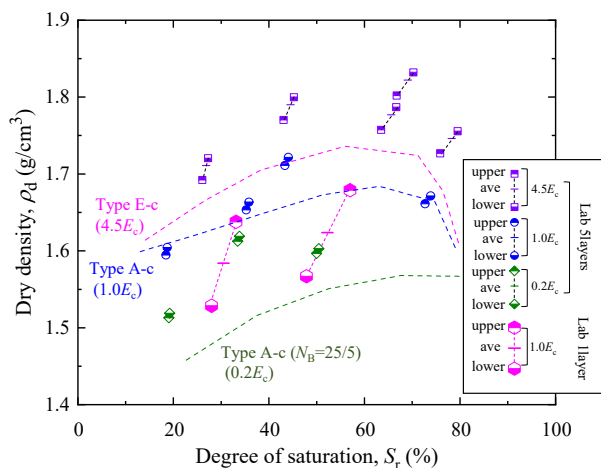


図 A-1-2 三軸試験供試体の乾燥密度～飽和度関係
(室内 1 層と 5 層締固め供試体上部、下部)

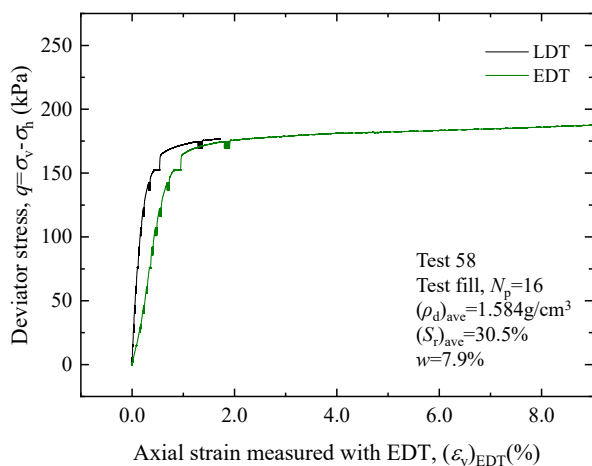


図 A-1-3 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(EDT, LDT)

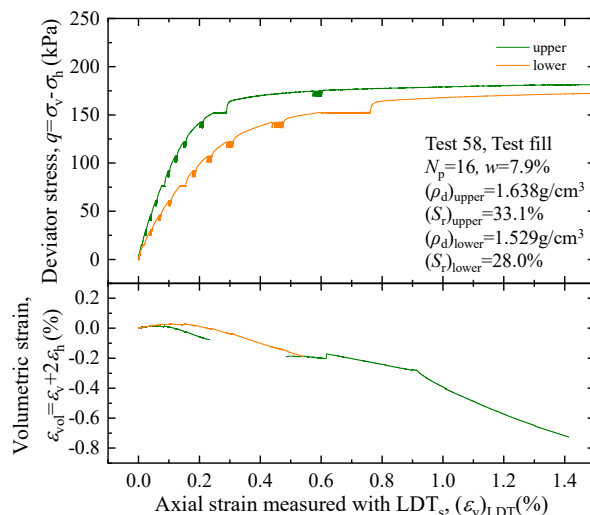


図 A-1-4 軸差応力～鉛直ひずみ関係
(LDT 上部、下部)

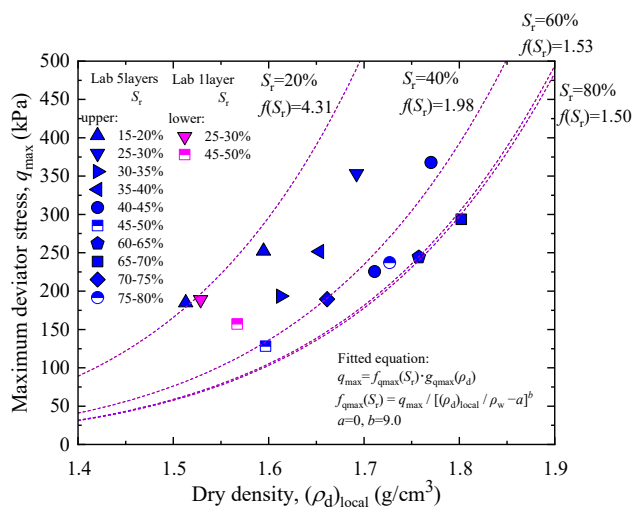


図 A-1-5 最大軸差応力～乾燥密度関係と
飽和度別の推定曲線

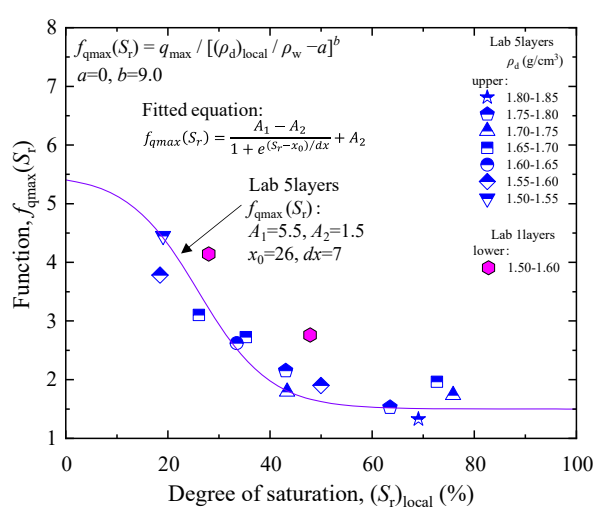


図 A-1-6 $f_{qmax}(S_r) \sim$ 飽和度関係と
フィッティング曲線

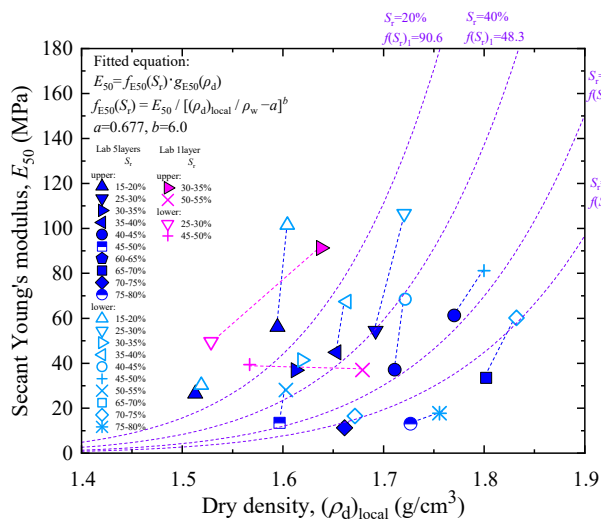


図 A-1-7 割線ヤング率 E_{50} ～乾燥密度関係と飽和度別の推定曲線

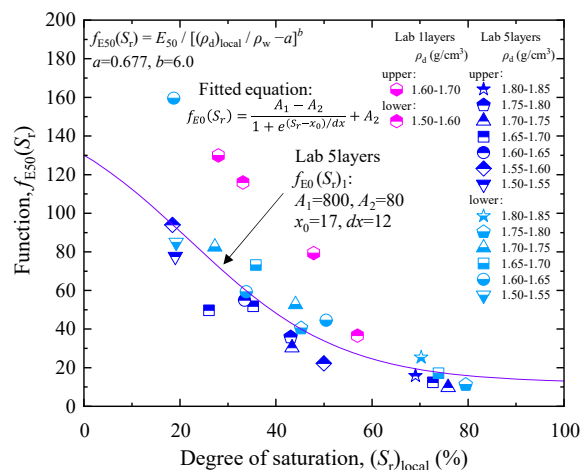


図 A-1-8 $f_{E50}(S_r)$ ～飽和度関係とフィッティング曲線

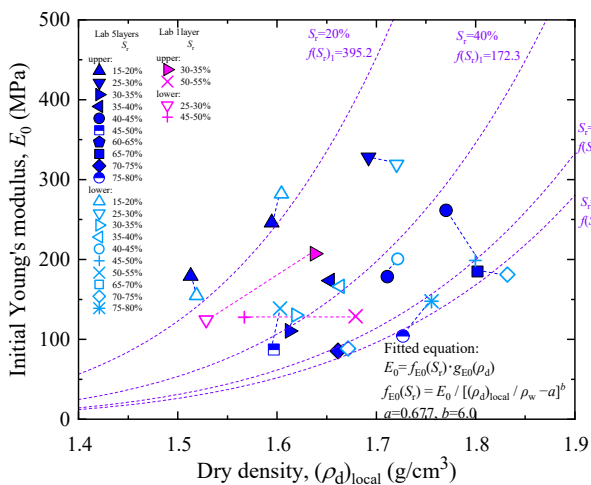


図 A-1-9 初期ヤング率～乾燥密度関係と飽和度別の推定曲線

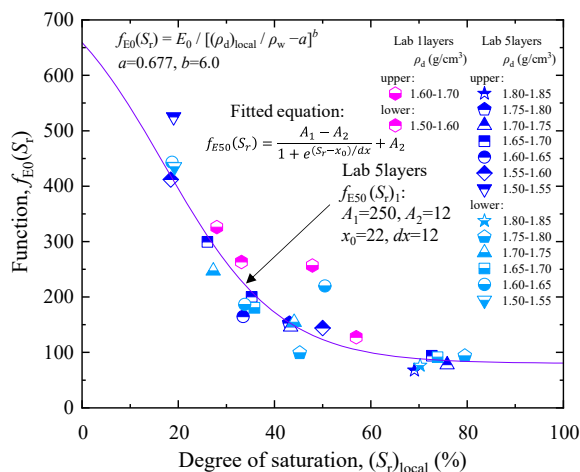


図 A-1-10 $f_{E0}(S_r)$ ～飽和度関係とフィッティング曲線

A.2 走査型電子顕微鏡を用いた締固め供試体の粒子構造観察

4.3 では、直径 $\phi 100\text{mm}$ × 高さ $h=200\text{mm}$ の現場と室内で締め固めた中型供試体について、鉛直深度方向の乾燥密度分布を調べ、それぞれの供試体の鉛直密度分布を評価した。さらに、試験盛土供試体上部には剛性を低下させるせん断破壊領域の存在が示唆されている。そこで、本設では、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた締固め供試体の粒子構造観察を行った。

A.2.1 走査型電子顕微鏡による粒子観察方法

使用した走査型電子顕微鏡(SEM)は図 A-2-1 に示す、日本電子(株)製の JSM-IT500LA である。また、走査型電子顕微鏡の仕様を表 A-2-1 に示す。

表 A-2-1 走査型電子顕微鏡の仕様

走査型電子顕微鏡 (SEM)	
使用機器	JSM-IT500LA 日本電子(株)製
観察条件	
観察イメージ	: 反射電子像 (組成像)
加速電圧	: 15kV
WD	: 10mm
真空度	: $100 \pm 10\text{Pa}$ (低真空モードモード)
観察倍率	: 100倍 ※モンタージュ(画像合成)は100倍画像を合成
試料条件	
試料加工	
導電コート	: なし
樹脂固定	: あり エポキシ樹脂 (エポフィックス) 使用
研磨処理	: あり $20\mu\text{m}$ ダイヤモンド研磨

使用樹脂材(図 A-2-2)に示すエポキシ樹脂(エポフィックス)である。当樹脂材は供試体への浸透性、硬化時間、硬化中の低発熱・低発泡性から最も適すると考えて選定した。

試験盛土供試体は締固め層の上層と下層からそれぞれ別個に採取した小型供試体(直径 $\phi 50\text{mm}$ × 高さ $h=100\text{mm}$)を用いた。また室内締固め供試体は中型供試体(直径 $\phi 100\text{mm}$ × 高さ $h=200\text{mm}$)の供試体下部を加工して作製した。供試体は図 A-2-3 に示すように、試験盛土供試体の締固め層上部と下部、室内締固め供試体下部の3ケースである。供試体作製時に測定した供試体条件は、試験盛土供試体上部で含水比 $w=3.5\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.607\text{g/cm}^3$ 、試験盛土供試体下部で含水比 $w=3.5\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.577\text{g/cm}^3$ 、室内締固め供試体下部で含水比 $w=8.3\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.593\text{g/cm}^3$ である。間隙水の多い空隙には樹脂が浸透できない為、これ以上湿潤側の供試体には適用出来なかった。

走査型電子顕微鏡の観測位置を図 A-2-4 に示す。 $\phi 50\text{mm}$ の円柱供試体に樹脂材が浸透するようあらかじめ正面と左右両側面を切削して加工する(図 A-2-5、図 A-2-6)。加工した供試体とモールドの隙間に樹脂を注入し、乱れの

ない供試体深部まで浸透した樹脂の硬化後に、乱れのない深部の観測面を研磨して観測する。供試体加工後の手順を以下に示す。

- (1) モールドと供試体を約 1 時間脱気し、モールド内に樹脂を注入する(図 A-2-7)
- (2) 樹脂硬化後にモールドを取り出し(図 A-2-8)、観測面が出るよう切断する(図 A-2-9)。
- (3) 観測面を研磨する(図 A-2-10)。

A.2.2 走査型電子顕微鏡による粒子観察結果

図 A-2-11～図 A-2-13 には試験盛土供試体上部、下部及び室内締固め供試体下部の観測位置と観測画像を示す。供試体観測は各供試体で 10mm×10mm サイズを図中に示す 3 深度の位置で観測した。観測画像は白黒二値化しており、各図中の右に示している。空隙が黒、土粒子は白であり、観測画像は 8bit で黒から白まで 0～255 階調であるが、今回は 60 階調を閾値に白黒二値化した。

図 A-2-11、図 A-2-12 の試験盛土供試体上部と下部を比較すると、供試体上部には筋状の空隙が見られるものの、全体的に下部より空隙が少ないように見える。さらに、同じ供試体上部、同じ供試体下部の中でもそれぞれ上中下で空隙の様子は異なり、非一様である事がわかる。また、供試体上部に見られたせん断破壊領域のような跡は明確には見られなかった。

図 A-2-13 の室内締固め供試体も上中下で空隙の様子が異なり、特に上部は筋状の空隙が多い。また、中部下部では細粒子がやや多く、試験盛土供試体に比べて密に詰まっているのがわかる。試験盛土供試体より室内締固め供試体の細粒分が多い事は、4.4.2 で示した結果と整合する。供試体上部に見える筋状の空隙は締固め後のテンションクラックとも解釈できるが、詳しくは分からなかった。詳細な研究は今後の課題である。

図 A-2-14 には供試体測定位置と走査型電子顕微鏡の白黒二値化画像から求めた乾燥密度関係を示す。局所乾燥密度は白(土粒子)と黒(空隙)の体積比から間隙比 e を算定し($e=V_v/V_s$)、式 4-5-1 を用いて局所乾燥密度をそれぞれ求めている。白黒二値化から求めた乾燥密度の値自体は閾値に依存する為、供試体平均の乾燥密度の測定値より低い。ただし、全体的に試験盛土供試体下部より上部の方が大きい傾向である事は、実測定値の傾向と一致する。

樹脂の浸透性に関する供試体の含水比の制限や、白黒二値化の適切な設定、供試体に上部付近に筋状の空隙が生じる原因の解明等、解決すべき課題はあるが、走査型電子顕微鏡による供試体の非一様性評価がある程度可能である事を確認した。



図 A-2-1 走査顕微鏡(SEM)



図 A-2-2 使用樹脂材

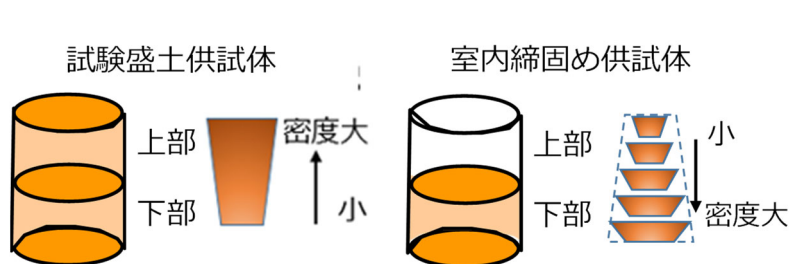


図 A-2-3 鉛直深度方向の密度分布概要

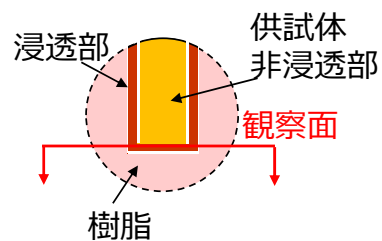


図 A-2-4 供試体断面中の観察位置



図 A-2-5 供試体切削加工状況



図 A-2-6 供試体加工後

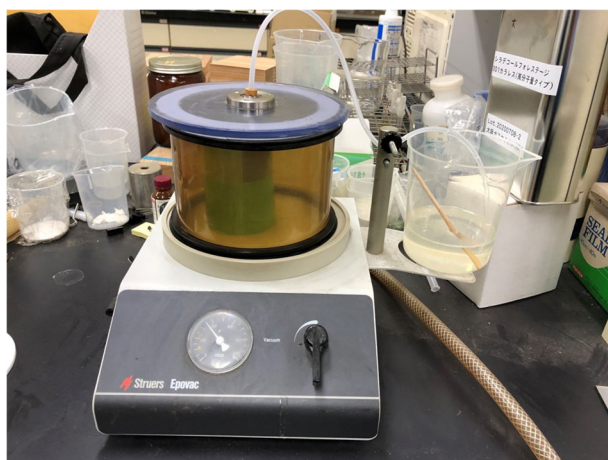


図 A-2-7 供試体の脱気と樹脂注入

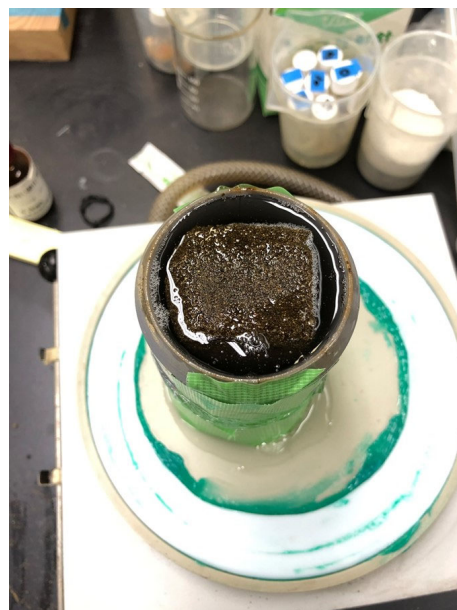


図 A-2-8 樹脂注入完了



図 A-2-9 観察面切断

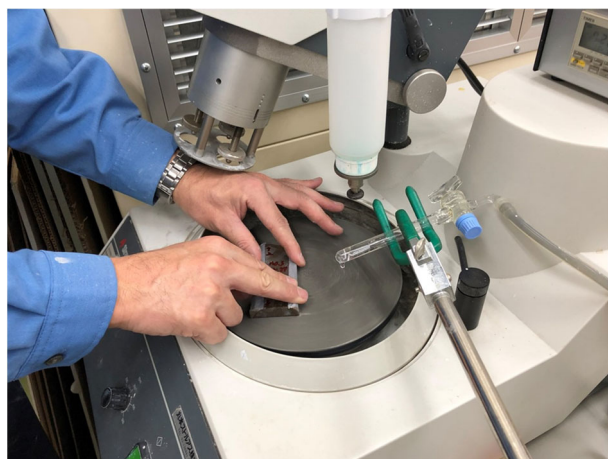


図 A-2-10 観察面研磨

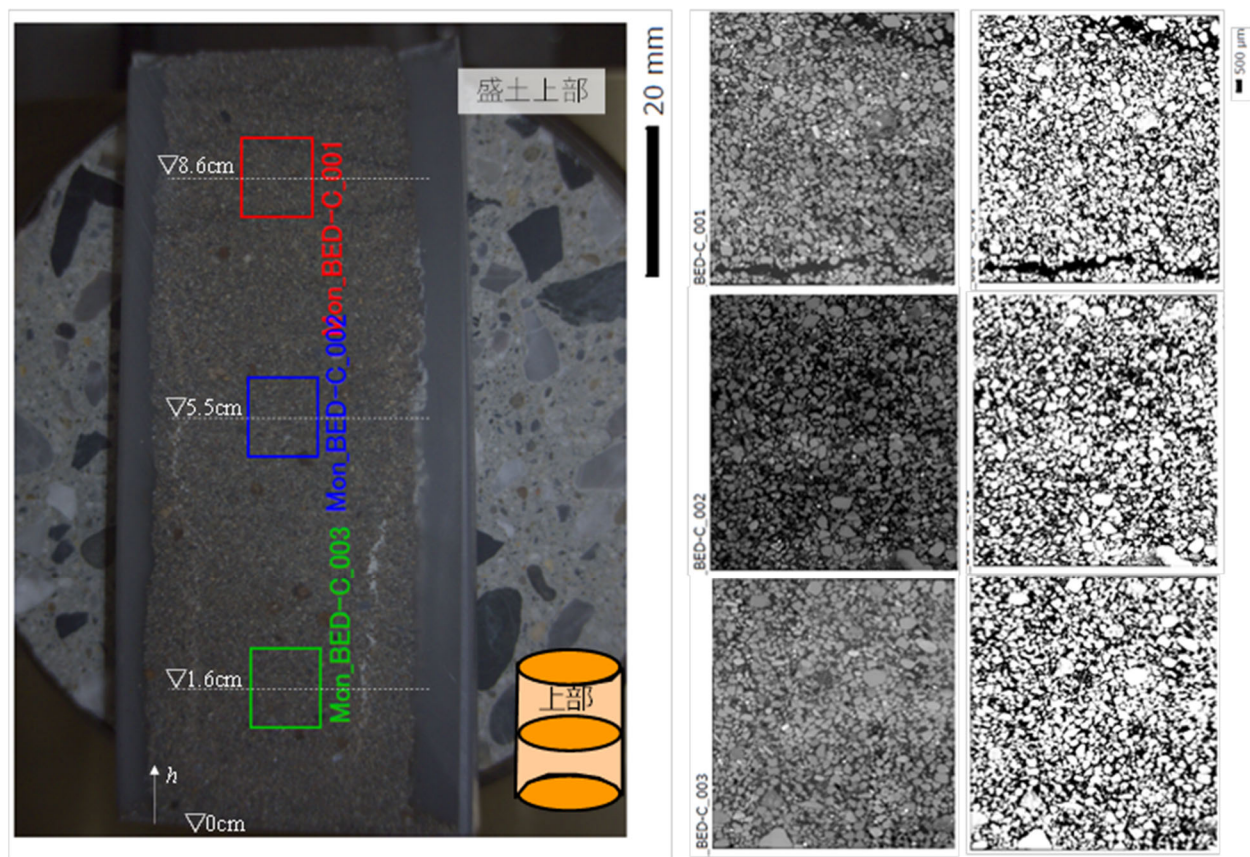


図 A-2-11 試験盛土供試体上部の観察位置と観察画像(左:白黒二値化前、右:白黒二値化後)

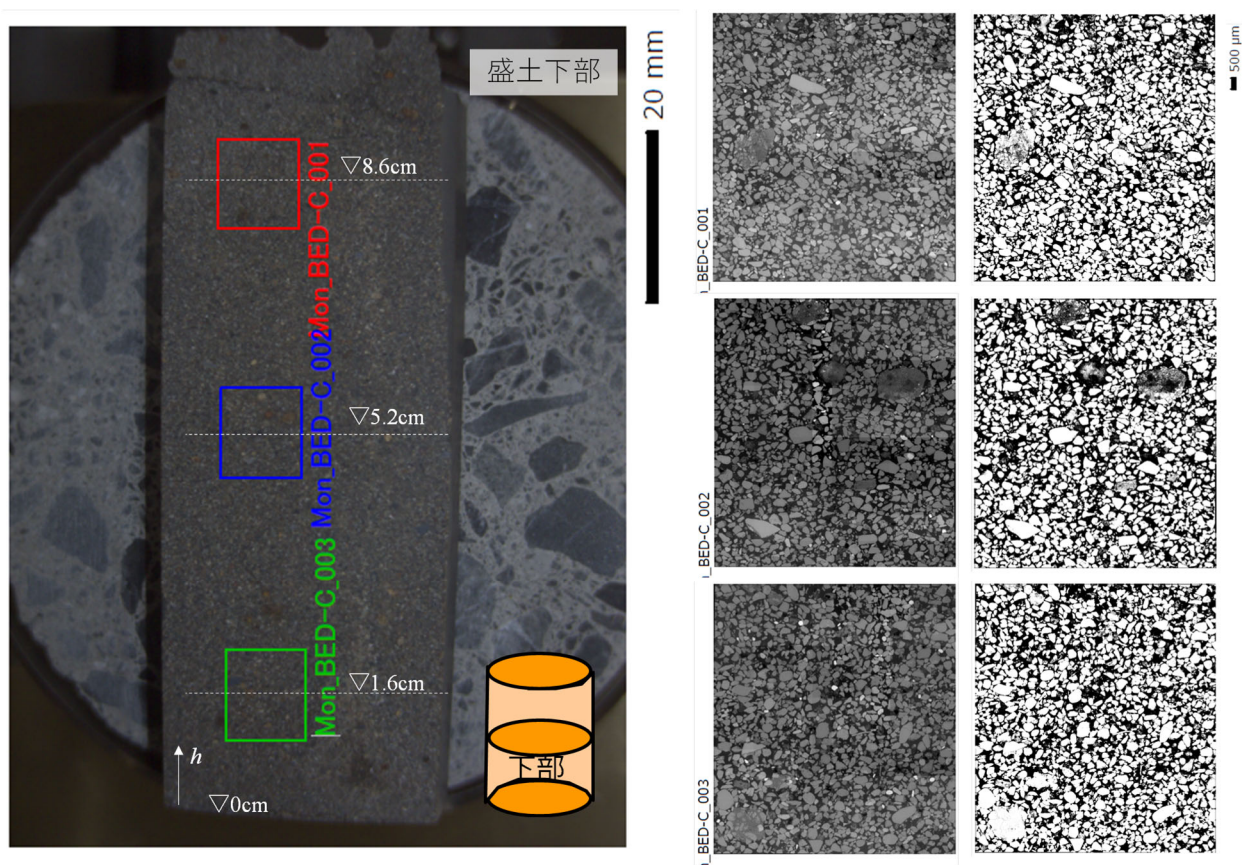


図 A-2-12 試験盛土供試体下部の観察位置と観察画像(左:白黒二値化前、右:白黒二値化後)

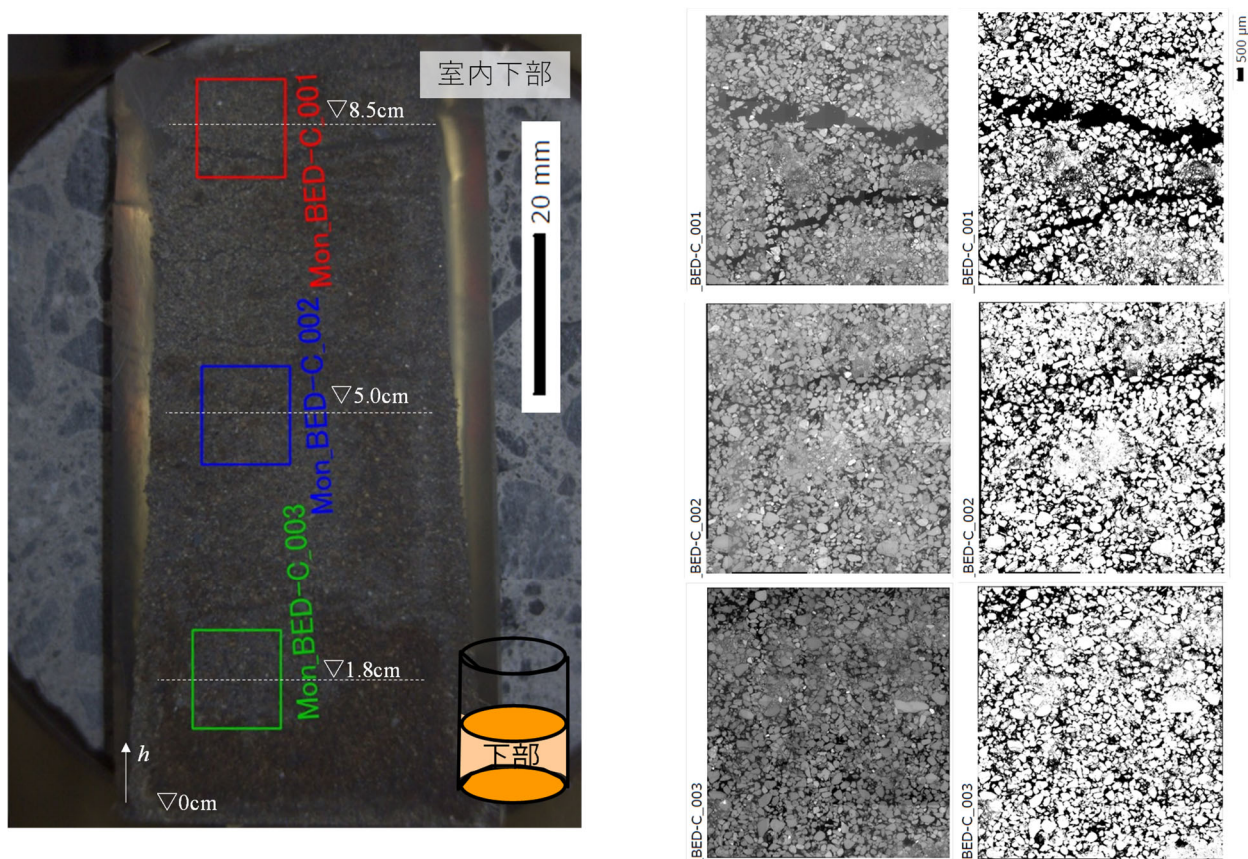


図 A-2-13 室内締め供試体下部の観察位置と観察画像(左:白黒二値化前、右:白黒二値化後)

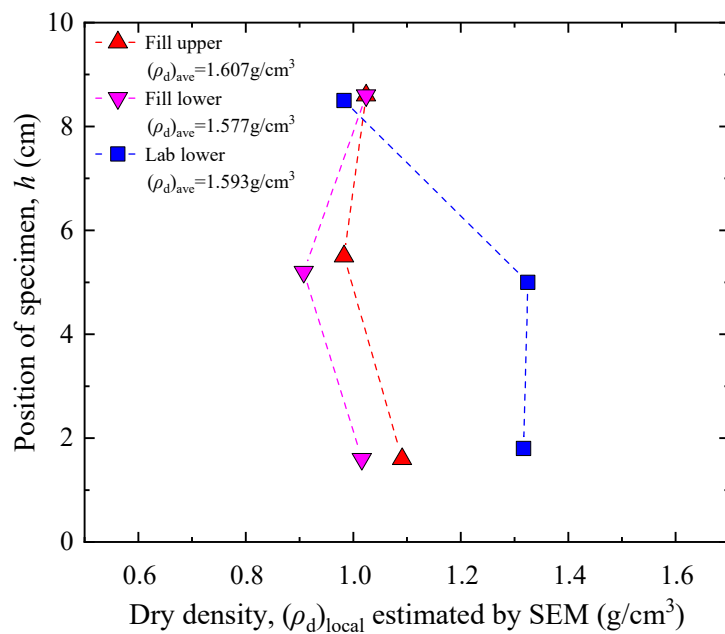


図 A-2-14 供試体測定位置とSEM の画像から求めた局所乾燥密度

謝 辞

本論文は東急建設株式会社に所属する筆者が、東京大学工学系研究科社会基盤学専攻博士課程 土質/地盤研究室に2018年～2021年まで在籍し、その3年間に実施した研究成果をまとめたものです。この間には2019年12月から流行が始まった新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の影響で感染拡大防止対策による活動制限がありましたが、そのような中でも多くの方々にご指導、ご助言とともにご支援を賜りました。ここに感謝の意を記します。

本論文をまとめるにあたり、東京大学工学系研究科社会基盤学専攻 教授 古関潤一先生には、研究全般にわたり多くの視点からきめ細かいご指導を頂きました。2017年の春に博士課程進学に関する急なご相談であったにも関わらず迎え入れて頂き、社会に出てから研究経歴の殆ど無かった私に、研究環境の整備から研究の進め方、研究結果の解釈について多大なご指導とご鞭撻を頂きました事、深く感謝申し上げます。新型コロナウイルス感染症(COVID-19)による活動制限やご多忙な中でも何度も研究結果のディスカッションに応じて頂きました。主観的になりがちだった筆者の実験結果の考察に対し、常に多くの角度から客観的に実験結果と向き合う事をご指導頂きました。期待するような実験結果がなかなか得られなかったのですが、その度に適切に方向付けし、常に励まして下さいました。

副査をお引き受け頂きました東京大学生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター 教授 桑野玲子先生、東京大学生産技術研究所基礎系部門 准教授 清田隆先生、東京大学工学系研究科社会基盤学専攻 准教授 渡邊健治先生、室蘭工業大学大学院工学研究科もの創造系領域 教授 川村志麻先生には、お時間を頂き多くのご助言を頂きました。本論文での現場締固め時のせん断破壊の影響については解明しきれなかった事が多く、課題が残りましたが、これを出来るだけ論文として残すべきであると微視的な観点や現場に残る形跡等から説明が出来ないか多くのご教示と激励を頂きました。心より感謝申し上げます。渡邊先生は土質/地盤研究室で共通する研究テーマがあった事もあり、いつも気にかけて下さいました。スウェーデンの研究員や留学生との意見交換会等の機会を設けて頂き、刺激を与えて頂くとともに沢山勉強させて頂きました。誠に感謝しています。

東京大学 名誉教授 東京理科大学 名誉教授 龍岡文夫先生には、本論文をまとめるにあたり、御多忙の中何度もディスカッションに応じて頂き、多くのご指導、ご助言を頂きました。特に締固め土の強度変形特性に与える乾燥密度と飽和度の影響について、本研究の工学的意義について、現場適用の為の一般性の立証について等、導いて頂いた事が本論文に多く含まれています。また、龍岡先生には筆者が東京理科大学理工学研究科土木工学専攻地盤工学研究室に修士課程として在学していた2004年～2006年以降も度々ご指導頂いており、博士課程への挑戦をご相談した際にご支援頂きました。本研究を進める上で蹟く事も少なくありませんでしたが、その度に懇切丁寧なご指導と最後まで諦めず探求するよう激励して下さい、いつも力づけて頂きました事忘れません。心から感謝申し上げます。

東京大学工学系研究科社会基盤学専攻 土質/地盤研究室の方々にも大変お世話になりました。助教 京川裕之先生は、ご自身の研究活動に精力的に力を注ぎながらも、多様な学生一人一人の研究活動がより良くなるよう、実験室の整備や研究室の細やかな運営に努めておられ、その姿勢にいつも刺激を受けておりました。筆者が供試体の初期サクシオンに着目して取り組むようになったのは、2019年6月のISグラスゴー滞在中の京川先生とのフリーディスカッションの影響が大きいです。技術支援職員 佐藤剛司氏、大岩敬太氏、特任研究員の Liu Weichen 氏には、本研究の三軸圧縮試験装置のセットアップに際し、沢山相談に乗って頂きました。博士課程で在籍されていた現国立研究開発法人港湾空港技術研究所 青柳悠大氏、修士課程で在籍されていた現清水建設株式会社 平賀美沙氏、現インド鉄道省 Akshay Singh Rathore 氏、博士課程三年 志賀正崇氏、博士課程二年 Li Xianfeng 氏、修士課程二年 新名航氏、依田光平氏、研究員として在籍されていた株式会社技研製作所 石原行博氏、尾川七瀬氏、株式会社不動産テトラ 矢部浩史氏、日下部真佑氏、武田尚也氏、東日本旅客鉄道株式会社 安田祐輔氏、高原剛士氏、中川文人氏には、筆者の研究室生活において大変お世話になりました。研究室ゼミ発表の前や履修授業の定期試験

前に不安と緊張を共にし、関連する研究の情報交換等、多くの面で筆者の研究生活を支えて下さいました。全ての方は書ききれませんでしたが在籍する研究室の方々、卒業生の方々にお世話になりました。ありがとうございました。

本研究テーマに関連して、公益社団法人地盤工学会関東支部の土構造物の要求性能の実現を目指した盛土締固め管理の合理化に関する研究委員会で委員長 龍岡文夫先生を始め、多くの方々にお世話になりました。中でも、委員会幹事を務められた中央大学理工学部都市環境学科 教授 平川大貴先生は試験盛土施工現場を視察して下さい、現場締固めの締固め機構や原位置試験装置の測定原理に関する知見をご教示下さいました。現場締固め土のせん断破壊領域の影響に着目したのは平川先生とのディスカッションの中からヒントを得ています。また、同研究委員会の WG でご一緒させて頂きました東京理科大学理工学部土木工学科 教授 菊池喜昭先生、中央開発株式会社ジオソリューションセンター 荒井靖仁氏、株式会社アースプライム 金子秀樹氏には土の締固めに関連する先行研究調査とそれに関するディスカッションに応じて頂きました。その時のディスカッションは本論文の既往の研究に活かされています。同研究委員会の委員で現一般財団法人国土技術研究センター 曾田英揮氏、鹿島建設株式会社 吉田輝氏、前田建設工業株式会社 石黒健氏には、建設中のフィルダムの施工現場視察に快く応じて頂き、実務における施工管理や課題について勉強させて頂きました。鉄道総合技術研究所 中島進氏には、学会内の意見交換時に多くのご助言を頂きました。本論文中の室内締固め供試体の変形特性が重錘落下による撃力の影響に依るものでないか着目したのはこの意見交換時にヒントを得ています。皆様に心よりお礼申し上げます。

株式会社複合技術研究所 田村幸彦氏、岡本正広氏、矢崎澄雄氏、小阪拓哉氏、佐藤純一氏、三平伸吾氏、福田正紀氏、Antoine Duttine 氏、鈴木聡氏、山田康裕氏、伊藤企陽司氏を始め、多くの方々から温かい支援を頂きました。岡本氏には筆者が博士課程進学に際して多く相談させて頂き、その都度ご指導、ご鞭撻を頂きました。三平氏は筆者が研究テーマを考える際に一緒になって考えて下さり、最近の研究話題に関する情報を惜しみなく提供下さいました。鈴木氏には実務設計に関して持っていた筆者の質問に丁寧に対応頂きました。複合技術研究所へは龍岡先生との打合せや勉強会、研究委員会の際に何度も伺っております。ここでは書ききれませんでしたが、どんな時も皆さまに温かく迎え入れて頂き、研究活動を精神的に支えて頂きました。ありがとうございました。

国立研究開発法人土木研究所 宮下千花氏には実大締固め実験の見学に応じて頂きました。本研究で作製した試験盛土よりはるかに規模が大きいですが、盛土材の扱いや実験準備時の留意すべき事、先行研究に関する情報等についてディスカッションして頂きました。その際に提供頂いた大型締固め機械で締め固めた現場締固め土供試体についても今後詳細に検討させて頂きたいと考えております。厚くお礼申し上げます。

株式会社アースプライム 木村勝氏、八巻博文氏、小林裕一郎氏、渡部雄司氏には本研究の現場締固め時の供試体採取、物性試験に関して多くのご支援を頂きました。中でも木村氏はご多忙にも関わらず、本研究の成果の為に優先的にご協力下さったと感じております。また、土質試験に関する多くの知見を惜しみなく筆者に提供下さり、三軸圧縮試験結果のわずかな違いの解釈について多くディスカッションに応じて頂きました。また、株式会社アースプライム 佐々木朋子氏とは研究テーマが関連している事もあり、供試体中の乾燥密度の非一様性についてディスカッションして頂きました。ありがとうございました。

この 3 年間に要する入学金、授業料等は東急建設株式会社内の博士取得支援制度によるご支援を頂いています。東急建設株式会社 代表取締役会長 飯塚恒生氏、代表取締役社長 寺田光宏氏、代表取締役副社長執行役員 高木基行氏、取締役専務執行役員管理本部長 清水正敏氏、取締役常務執行役員土木事業本部長 津久井雄史氏、常勤監査役 落合正氏、執行役員土木事業本部技術統括部長 酒井邦登氏、執行役員国際事業部長 渋沢重彦氏、建築事業本部付 沼上清氏、経営戦略本部経営企画部長 小西雅和氏、管理本部総務部長 佐々木啓示氏、管理本部法務部長 柴田直樹氏、管理本部人事部長 成島弘氏、管理本部人事部次長 信貴弘恵氏、管理本部人事部人事・労政 GL 吉田卓朗氏、管理本部人事部採用・育成 GL 石藤昭徳氏、現東急リニューアル株式会社管理

統括部副統括部長 柴田幸安氏には、筆者が大学院に進学する事、博士取得支援制度を利用する事を認めて頂きました。また、この3年間にもお会いする度に常に多くの激励を下され、集中して研究活動に取り組む事が出来ました。深謝申し上げます。また、博士取得支援制度の利用に際して、技術研究所研究企画 G 木村正彦氏、管理本部人事部人事・労政 G 弥栄伸一氏、杉山由美子氏に応援を頂くとともに大変お世話になりました。ありがとうございました。

東急建設株式会社 執行役員技術研究所長 遠藤修氏はいつも筆者の研究状況に気を掛けて下され、よく相談に乗って頂きました。技術研究所副所長 井上論氏、研究企画 GL 後久卓哉氏には研究が思うように進まない時も状況を理解頂き、よく励まして頂きました。土木事業本部技術統括部技術推進部長 伊藤正憲氏には技術研究所内での研究計画から土質実験室、三軸圧縮試験設備及び試験盛土ヤードの整備全般に関して、どんな事でも全面的にご支援頂きました。また、大学の先輩でもある伊藤氏は筆者が博士取得を目指す以前から、博士取得の重要性について何度も説明して下さいっており、筆者の背中を押して下さいと感じています。技術研究所土木材料 GL 早川健司氏は筆者の現在の直属上司でやりたい事を全て理解して下さい、研究活動に専念させて下さいました。また、博士論文の執筆工程や論文の論旨に関して適切なご助言を下され、実験に没頭しがちであった筆者を導いて下さいました。技術研究所土木材料 G 前原聡氏、鈴木将充氏、技術研究所土木構造 GL 黒岩俊之氏、技術研究所土木構造 G 笠倉亮太氏、金内敦氏、現東日本支店土木部 佐竹亮一郎氏には研究を進めるにあたり様々なご支援を頂きました。また、業務多忙な中、筆者の研究発表前や学内審査会前の発表練習にお付き合い下さいました。ご迷惑をかけた事も多かったと思いますが、常に支え続けてくれました。土木事業本部技術統括部土木技術部技術企画 G 梅津愛氏、技術研究所メカトロ G 井上大輔氏、技術研究所基礎・構造 G 川崎健二郎氏には現場締固め土のサンプリング方法の検討時に 3D プリンターでのモールド製作にご協力頂きました。技術研究所基礎・構造 GL 古垣内靖氏には応援頂くと同時に研究所報執時の社内査読者として忌憚のないご意見を賜りました。技術研究所構工法・材料 GL 佐藤良介氏、技術研究所構工法・材料 G 成瀬義幸氏にはご多忙の中、走査型電子顕微鏡による土粒子構造観察にご協力頂きました。技術研究所建設 ICTG 小池武史氏には実験計測装置のソフト面でのセットアップと、測定データ解析にご協力頂きました。新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の感染拡大防止対策下でも出勤して実験を続けていた筆者は、技術研究所総務 GL 降幡頭治氏、技術研究所総務 G 岡野弘美氏を始め、総務 G の皆さまにご心配とご迷惑ばかりお掛けしたと思いますが、いつも快く対応頂きました。技術研究所研究企画 G 邊見梨枝氏には本研究の先行研究論文や書籍検索に沢山ご協力頂きました。中にはとても古く検索が困難だった論文や書籍も少なくありません。技術研究所総務 G 武田公司氏、谷口信二氏、川田慎二郎氏には技術研究所内の実験施設の整備に際し、多くのご協力を頂きました。

東急建設株式会社 土木事業本部技術統括部技術推進部 野中隆博氏、鈴木一氏、土木事業本部技術統括部土木技術部 田中卓也氏、三浦雅也氏、前田欣昌氏、土木事業本部技術統括部土木設計部 藤井誠剛氏、相沢啓司氏、小島文寛氏、有田剛氏、土木事業本部技術統括部環境技術部 虫明晋哉氏、椿雅俊氏、柴野一則氏、現東日本土木支店営業部千葉支店営業支店長 西村伸氏、現札幌支店土木部長 笠谷政仁氏、現内閣府 伊藤誠氏、国際事業部 野村泰由氏、徳留修氏、宮蔭和人氏、中田直樹氏、永島裕太氏、小池紘二氏には、筆者が本社勤務時からお世話になっており、御多忙であったにも関わらず、筆者が博士課程に進学するにあたり多くの激励とともに快く送り出して下さいました。深くお礼申し上げます。

最後に、本研究をまとめる事が出来たのは心身共に健やかに育ててくれた両親、いつも近くで応援してくれていた妻 典佳、長女 雅のお陰です。心から感謝します。

本研究は本当に沢山の皆様からのご指導ご協力により達成する事が出来ました。ここに改めて皆様に感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。

2021 年 3 月

