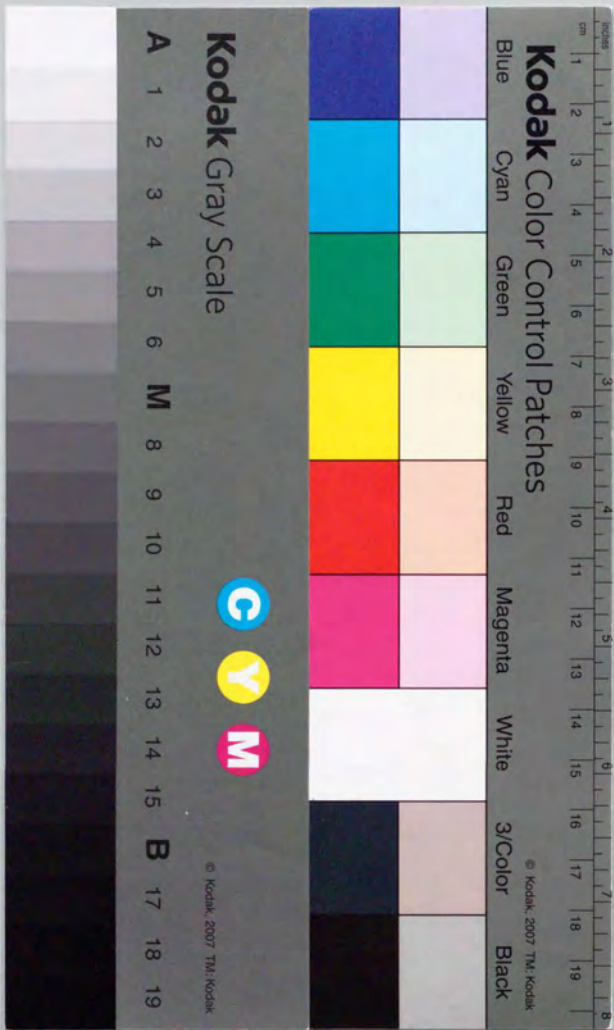


単調載荷による飽和砂の非排水
流動変形に関する研究

吉 嶺 充 俊



①

単調載荷による飽和砂の非排水 流動変形に関する研究

Undrained Flow Deformation of Saturated Sand
under Monotonic Loading Conditions

吉 嶺 充 俊

東京大学工学部土木工学科
土質/地盤研究室

1996 年

概要

沖積平野のゆるい砂地盤は地震時にしばしば液状化・流動化して、盛土の崩壊、傾斜地盤の側方変位などの大きな災害を発生させる。このような流動する地盤の挙動は静的な重力に支配された一方向への大きなせん断変形である。そこで、砂の流動挙動を把握するために砂の非排水単調載荷せん断試験が行われる。

流動 (flow) とは、土の不安定な変形に引き続く定常状態の発現であると定義できる。従って、土を非排水単調載荷せん断したときのピーク強度後の不安定な軟化過程に引き続いて現れる定常状態 (変相状態または準定常状態) における過剰間隙水圧の大きさと残留強度を知ることが、土の流動挙動の評価の上で最も重要な事項となる。

従来から三軸圧縮せん断試験結果を用いて砂質地盤の流動特性を評価することが試みられてきた。しかし、三軸圧縮せん断試験から得られる大せん断ひずみ条件下での砂のせん断強度は非常に大きなものとなり、現実の地盤流動被害を説明したり予測したりすることが著しく困難であった。そこで、本研究では三軸圧縮条件のみならずより一般的な応力条件のもとでの砂の非排水せん断特性を実験的に検証し、砂地盤の流動に関する力学特性を正しく評価することを試みた。本研究では、砂の流動化の評価に際して等方圧密状態から非排水せん断したときの最大過剰間隙水圧比 u_f を流動ポテンシャルと定義した。

まず、砂の非排水三軸圧縮試験と非排水三軸伸張試験を実施した。試験結果の代表例として、乾燥堆積法により最も緩く作成した豊浦砂供試体のせん断状況を図 0.1 に示す。三軸圧縮状態ではひずみ軟化がほとんど見られないのに対して、三軸伸張せん断では過剰間隙水圧比が 100% に達し、著しい軟化・流動挙動が発生している。

三軸圧縮せん断と三軸伸張せん断では、土の構造に対する最大主応力の方向と中間主応力の大きさという 2 つの応力条件に関して両極端の応力条件にある。上記のような三軸圧縮せん断と三軸伸張せん断における砂の非排水せん断挙動の大きな相違は、これらの応力条件が砂の非排水せん断挙動に大きく影響していることを示唆している。そこで、乾燥堆積法により作成した豊浦砂の供試体に対して、中空ねじりせん断試験機を用いて最大主応力が砂の

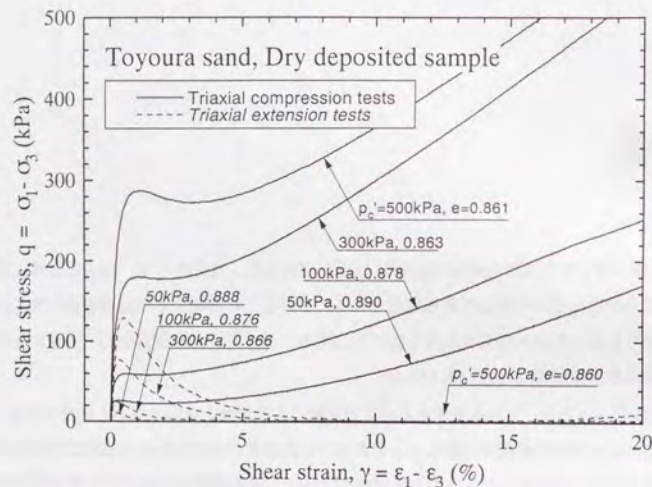


図 0.1 豊浦砂の非排水三軸圧縮・伸張せん断試験

堆積面の法線方向からなす角度 α と中間主応力係数 b に関する様々な組み合わせ条件のもとで非排水せん断試験を行い、この2つの応力条件が砂のせん断特性に与える影響を詳細に調べた。

図 0.2は、相対密度約 40%の豊浦砂に関する非排水せん断試験結果である。三軸圧縮状態 ($\alpha = 0^\circ, b = 0$) のせん断では全く過剰間隙水圧が発生せず ($u_f = 0$)、きわめて強固なせん断挙動を示すのに対して、三軸伸張状態 ($\alpha = 90^\circ, b = 1$) では90%以上の過剰間隙水圧を生じ、大きな流動挙動を示している。その中間の応力状態では、 α が大きくなるほど、また b が大きくなるほど砂のせん断挙動はより圧縮的となり、強度が低下する。

このように、砂の流動特性はせん断時の応力条件の影響を大きく受けるので、砂地盤の流動を予測するためには地盤の応力条件を把握し、的確な判断をすることが重要である。とくに、三軸圧縮試験結果を用いて地盤の流動挙動を評価することは著しく危険側の判断となことに注意しなければならない。

十分に広い傾斜地盤の非排水側方流動を考えると、その地盤の変形は単純せん断状態になっているので、単純せん断状態での砂の流動特性を調べることは非常に有用である。そこで、乾燥堆積法により作成した豊浦砂の供試体に対して、中空ねじりせん断試験機を用い

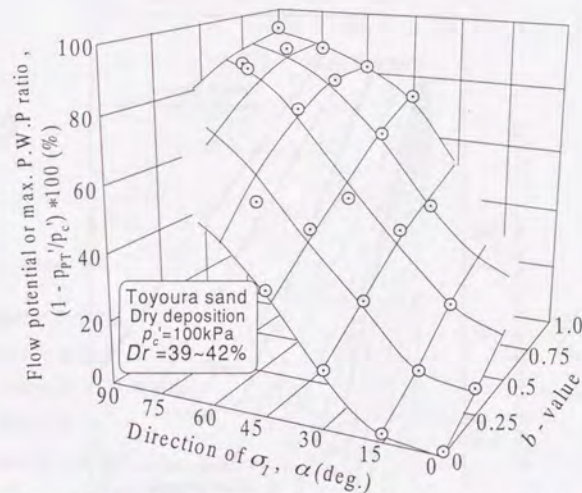


図 0.2 豊浦砂の非排水せん断に与える主応力方向と中間主応力の影響

て一連の単純せん断試験を行ったところ、非排水単純せん断にともない、主応力角度と中間主応力の大きさは変化するが、変相状態およびそれ以後の大変形状態においては、初期条件 (圧密応力の大きさ、圧密応力比、砂の密度) によらずに、 $\alpha = 40^\circ \sim 45^\circ, b = 0.25$ となることがわかった。また、三軸圧縮・三軸伸張・単純せん断における砂の流動傾向を比較検討したところ、砂の非排水単純せん断挙動は三軸圧縮と三軸伸張のほぼ中間的なものであることがわかった。

実験結果から砂の密度・初期圧密応力と流動ポテンシャルの関係を求め、砂の密度・初期圧密応力を既往の経験則に基づいて標準貫入試験の N 値に換算することにより、 N 値と流動ポテンシャルの相関を得ることができる。図 0.3は、このようにして導いた N 値-上載圧平面上の豊浦砂の単純せん断時の等流動ポテンシャル線である。図には、砂の動的特性に基づいた既往の研究による液状化 (サイクリックモビリティ) の発生条件も併せて表示してある。

一方、単純せん断状態での流動ポテンシャル u_f と砂の残留強度比 S_u/σ'_v の間には次のような関係がある。

$$\frac{S_u}{\sigma'_v} = 0.335 \left(1 - \frac{u_f}{100} \right) \quad (0.1)$$

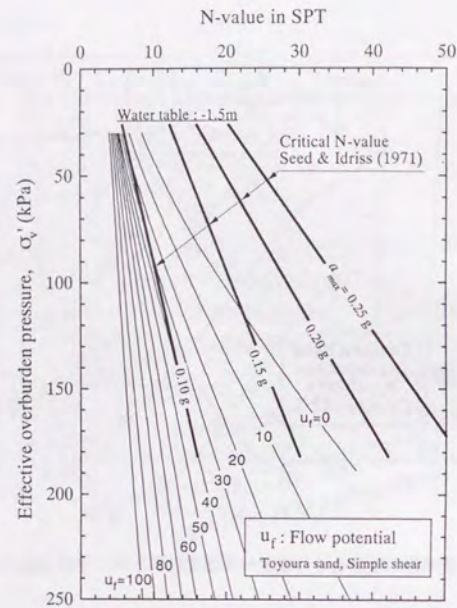


図 0.3 N 値と砂の流動ポテンシャルの相関

すなわち、流動ポテンシャルと砂の残留強度との間には 1 対 1 の関係があり、図 0.3 の等流動ポテンシャル線は等残留強度線であるとも言える。従って、現場で測定された N 値と図 0.3 の等流動ポテンシャル線をもちいて、次のような地盤の流動特性の判定が可能である。

まず、従来の砂の繰返しせん断特性に基づいた判断基準により、液状化(サイクリックモビリティ)が生じるかどうかを判定する。液状化を生じるときには以下の方法で地盤の流動特性を予測する。もし、流動ポテンシャルが $u_f = 100$ である場合には完全流動を生じる。間隙水圧の上昇によって地盤の有効応力は完全に失われ、液体状の挙動を示す。斜面地盤であれば、完全に水平になるまで流動が継続する。地盤に作用している重力による静的なせん断力を τ_{static} とする。地盤の変形が単純せん断のとき、 $100(1 - 3.0\tau_{static}/\sigma'_v) < u_f < 100$ であれば、限定流動を生じる。静的なせん断力と砂のせん断抵抗が釣り合うまで流動が継続する。 $u_f < 100(1 - 3.0\tau_{static}/\sigma'_v)$ のとき地盤の変形はサイクリックモビリティによるものとなり、流動は生じない。繰返しせん断荷重の停止と共に地盤の変形も終了する。

目次

1 序論	1
2 砂の流動とその評価	5
2.1 定常状態理論	5
2.2 砂の非排水せん断挙動	11
2.3 砂の流動	23
2.4 非排水残留強度	24
2.5 サイクリックモビリティ	25
2.6 流動ポテンシャル	26
3 砂の非排水単調せん断試験	33
3.1 三軸せん断試験装置	33
3.1.1 鉛直荷重・ねじり荷重・背圧装置	33
3.1.2 セル圧・背圧装置	34
3.1.3 背圧装置	34
3.1.4 測定装置	34
3.2 三軸せん断試験の手順(再構成供試体の作成)	39
3.3 三軸せん断試験の手順(不攪乱供試体)	45
3.4 三軸供試体の応力とひずみ	46
3.5 中空ねじりせん断装置	47
3.5.1 鉛直荷重・ねじり荷重・背圧装置	47
3.5.2 外セル圧・内セル圧・背圧装置	48
3.5.3 測定装置	49
3.6 中空ねじりせん断試験の手順	53
3.7 中空供試体の応力とひずみ	60

3.7.1 中空供試体の寸法と外力	60
3.7.2 中空供試体の応力の解析	62
3.7.3 中空供試体のひずみの解析	65
3.8 中空ねじりせん断試験における応力とひずみの制御	68
3.8.1 制御される応力ひずみ成分	68
3.8.2 非排水単純せん断試験	68
3.8.3 α, b 一定条件での非排水せん断試験	69
3.8.4 試験装置の機械制御	71
3.9 中空供試体の応力とひずみの不均一分布	72
3.10 間隙比測定の精度	79
3.11 実験に用いた試料	81
3.11.1 試料採取地点	81
3.11.2 既往の実験で用いられた試料	83
3.11.3 不攪乱試料の採取方法	83
3.11.4 試料の物理特性	85
4 三軸圧縮・伸張せん断における砂の流動	91
4.1 いろいろな砂の三軸圧縮・伸張せん断	91
4.2 豊浦砂の非排水三軸圧縮せん断特性	100
4.3 豊浦砂の非排水三軸伸張せん断特性	107
4.4 まとめ	116
5 砂の非排水せん断における主応力方向と中間主応力の影響	121
5.1 はじめに	121
5.2 中空ねじりせん断試験の概要と試験条件	122
5.3 中空供試体と中実供試体のせん断挙動の比較	123
5.4 非排水中空ねじりせん断試験結果	128
5.4.1 主応力方向と中間主応力の大きさの影響	128
5.4.2 $e - \log p$ 平面上での変相状態および準定常状態	129
5.4.3 内部摩擦角に与える主応力方向・中間主応力の影響	189
5.4.4 せん断試験における応力制御の精度	192
5.5 既往の実験結果との比較と考察	192

5.5.1 比較の対象	192
5.5.2 中空円筒供試体を用いた実験	193
5.5.3 直方体供試体を用いた3主応力実験	198
5.5.4 本研究との比較検討	200
5.6 まとめ	200
6 単純せん断状態における砂の流動特性	201
6.1 はじめに	201
6.2 単純せん断試験条件と実験結果	201
6.2.1 供試体高さ20cmの単純せん断試験	202
6.2.2 供試体高さ10cmの単純せん断試験	202
6.3 単純せん断にともなう主応力の回転と中間主応力の変化	205
6.4 主応力方向・中間主応力係数一定せん断試験との比較	224
6.5 単純せん断時の流動ポテンシャル	224
6.6 単純せん断における内部摩擦角の大きさ	231
6.7 高さが低い供試体による単純せん断試験	231
6.8 既往の実験結果との比較	237
7 不攪乱砂質土の非排水単調せん断特性	241
7.1 はじめに	241
7.2 せん断試験結果	242
7.2.1 川岸町砂	242
7.2.2 茂原砂 No.1	247
7.2.3 茂原砂 No.2	250
7.2.4 美浜砂	253
7.2.5 釧路町砂	253
7.2.6 関宿砂	255
7.2.7 大形砂	263
7.2.8 既往の試験結果	263
7.3 攪乱・不攪乱試料のせん断特性の相違と試料の物理特性の相関	270
7.3.1 攪乱・不攪乱試料の非排水せん断特性の相違	270
7.3.2 攪乱・不攪乱試料の非排水せん断挙動の相違の要因	271

7.4 不攪乱砂のせん断挙動に与える主応力方向と中間主応力の大きさの影響 . . .	276
7.5 不攪乱試料の極限定常状態	280
8 地盤の流動ポテンシャルの評価	289
8.1 各せん断モードでの流動ポテンシャル	289
8.2 N 値と流動ポテンシャルの関係	291
8.3 流動ポテンシャルと残留強度の関係	298
8.4 N 値を用いた地盤の流動予測	306
8.4.1 N 値から流動ポテンシャルを求める	306
8.4.2 流動ポテンシャルと地盤の流動特性の関係	307
8.4.3 限界 N 値	309
8.5 まとめ	309
9 結論	311

第1章

序論

土質材料の著しい特質として、その変形強度が有効拘束圧に大きく依存していること、およびダイレタンシーが挙げられる。言うまでもなく、ダイレタンシーとは物体にせん断変形を加えたときに体積変化を生じる性質である。もし土要素が体積変化を許さない拘束条件のもとにあるときには、せん断にともなって土のダイレタンシー特性に従い有効拘束圧が変動し、土の変形強度が著しく変化することになる。同じ土であっても変形の状況によっては岩のように硬くもなれば泥水のように流動もする。砂地盤の液化は、このような土質材料の特質の最も劇的な現れであろう。

ところで、地盤の液化化による被害の代表的な形態には次のようなものがある(図 1.1)。

- 建築物などの地上構造物の沈下・傾斜・転倒
- 埋設管・地下道路・タンクなどの地下構造物の浮上
- 盛土の変形・崩壊
- 地盤の側方流動
- 間隙水圧の消散に伴う地盤沈下

地震に伴う液化化の場合、土の間隙水圧を上昇させて強度低下をもたらす原因はいうまでもなく地震力による繰返し荷重である。そこで、新潟地震およびアラスカ地震後いち早く Seed et al(1966) によって繰返し三軸試験によって液化化強度を評価する方法が提案されて以来、室内力学試験による土の液化化強度の評価方法としては非排水繰返し載荷実験が用いられてきた。ところが、上に挙げたような液化化による被害形態を見直してみると、繰返し載荷試験ではとらえきれない次のような特質を有していることがわかる。

1. 土の変形(せん断・圧縮)はサイクリックな振動運動ではなく、一方向の単調変形である。
2. 土の変形を支配する外力としては、地震力のような繰返し荷重よりは重力のような静的な力が卓越している。

これらの地盤の変形形態を裏付ける事例として、地震発生からかなりの時間を経過して地震力のほとんど作用していない条件下で、建築物の傾斜・橋梁の落下・ダム・地盤の流動などが生じたことが報告されている(Gu, 1992 など)。

そこで、地盤の液状化を考える場合には、繰返し荷重による土の強度低下過程と、その結果として生じる静的荷重による土の単調変形すなわち流動破壊の問題を別々に考える必要があると言えよう。そのうち、砂質土の非排水動的強度・動的変形特性については1960年代後半から現在に至る膨大な研究成果によって詳細が明らかにされてきている。ところが一方、実際の液状化被害として眼前に現れてくるところの地盤の流動変形についてはあまり注目されてこなかったといえる。

土の非排水単調せん断試験を用いて土の液状化傾向を評価しようとする手法として、定常状態理論(steady-state concept)と呼ばれる一群の研究がある。定常状態理論においては、土が大変形したときの状態、特に定常状態と呼ばれる密度と応力状態が一对一に対応するような状態を基準として土のせん断挙動が評価される。近年、Sladen et al.(1985)らの提唱した collapse surface、Symes et al.(1984)らの提唱した bounding surface、Alarcon-Guzman(1988)らの提唱した state boundary などの考え方により、土の非排水単調せん断試験におけるピーク点またはピーク後の軟化過程の応力経路が繰返し載荷をふくむせん断に対する流動変形を生じる応力条件となっていることが明らかにされた。そこで、非排水単調せん断試験において観測される土の挙動の軟化の大きさ、不安定度、定常状態強度などは動的な荷重による流動特性の指標となるものであり、地震時の地盤の流動評価において非常に有効なパラメータとして活用できることが期待される。

はじめにも述べたように、土の非排水せん断挙動を大きく決定づけるものはダイレタンシー特性である。土のダイレタンシー特性は、土の構造や外力としての応力条件によって影響を受けることがこれまでの排水試験からわかっており、これらの要因が土の非排水せん断挙動を大きく支配していることが予想される。本研究では、特に異方性に関連する土の構造およびせん断時の応力条件が土の非排水単調せん断挙動に与える影響を詳しく分析し、土の非排水単調せん断試験を用いて地震時の地盤の流動特性を把握する方法を開発する。

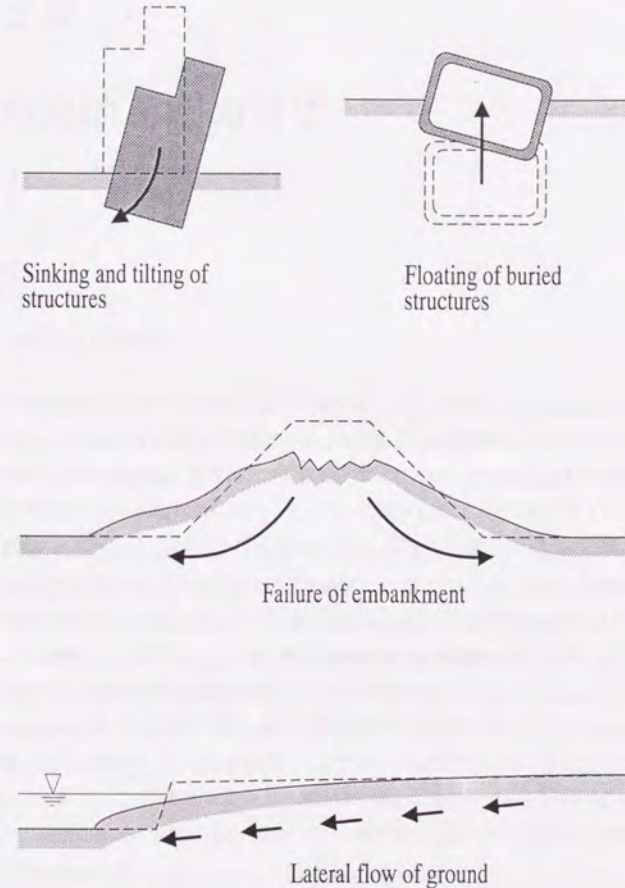


図 1.1 地盤の液状化による災害

第2章

砂の流動とその評価

2.1 定常状態理論

砂の単調載荷による大変形挙動を室内力学試験によって観察し、その強度特性から砂の液状化あるいは流動化を評価しようとする有力な手法が定常状態理論と呼ばれる一群の研究成果である。定常状態理論の特徴は、定常状態と呼ばれるせん断変形の最終状態における砂の密度と拘束圧の間に初期状態に関わらず一対一の関係を仮定することである。

まず最初に、Casagrande(1936)は、鉛直拘束圧 (P または $\bar{\sigma}_n$) が一定の砂の一面せん断試験においてせん断に伴う砂の密度の変化を観察した(図 2.1)。その結果、密な砂をせん断すると堆積の膨張により密度は減少し、緩い砂をせん断すると堆積の圧縮により密度は増加することが観測された。そして、せん断の最終段階では初期密度によらずに同じ密度(図 2.1(f) の点 G)へ収束することを見だし、これを限界間隙比(critical void ratio)と名付けた。Casagrande は、その後の実験によって限界間隙比は鉛直拘束圧と一対一の関係があることを見だし、間隙比(e)-鉛直拘束圧($\bar{\sigma}_n$)平面上に限界間隙比線(図 2.2(c) の E Line)を設定した。もし、この限界間隙比線が砂の非排水挙動にも適用できるとすれば、非排水せん断に伴う有効拘束圧の増減すなわち間隙水圧の発生量を定量的に予測することが可能となる(図 2.2(c) の $p \rightarrow q$)。

同様の実験結果は Roscoe et al.(1958) によっても示されている。彼らは直径 1mm の鉄球を試料として鉛直有効圧一定の単純せん断試験を行った。その結果、図 2.3 に示すように、試料の間隙比は初期密度によらずにせん断の最終段階において一つの限界間隙比(critical voids ratio)に収束することが観測された。また、いろいろな間隙比と有効鉛直圧の組み合わせのもとで単純せん断試験を行い、限界間隙比と鉛直拘束圧の間には一意的な関係がある

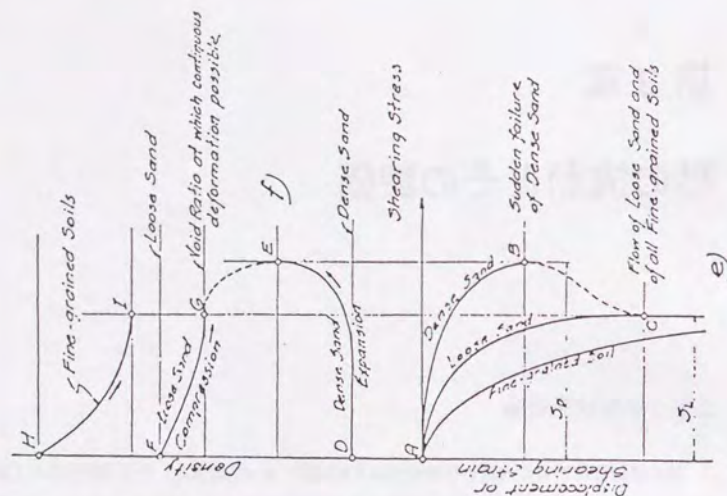


図 2.1 砂の排水一面せん断試験 (Casagrande, 1936)

ことを確認し、間隙比-鉛直拘束圧平面上に限界間隙比線 (図 2.4 の critical voids ratio line) を定義した。

これを受けて Castro(1969) は応力制御による砂の非排水三軸圧縮試験を行った。その結果、図 2.5 に示すように、緩い砂については a、やや緩い砂については b、密な砂については c のような挙動が観測された。Castro(1969) は、せん断抵抗の減少が見られる非排水せん断挙動 a、b を収縮的挙動 (contractive behavior) と呼び、この 2 種類の非排水せん断挙動 a、b をそれぞれ液状化 (liquefaction)、限定液状化 (limited liquefaction) と名付けた。また、非排水せん断挙動 c を膨張的挙動 (dilative behavior) と呼んだ。ここで、液状化 (liquefaction) および限定液状化 (limited liquefaction) においてせん断強度が極小となり、一定の密度と一定のせん断抵抗のもとで変形が進行する状態に対して Casagrande による限界間隙比と同様の取り扱いの適用を試みた。すなわち、幅広い密度と初期有効拘束圧の組み合わせ条件下で非排水三軸圧縮試験を行い、収縮的挙動を示した供試体の間隙比 (限界間隙比 e_c) と最小有効拘束圧 $\bar{\sigma}_{3f}$ のあいだに一意的な関係があるとし、間隙比 (e_c)-有効拘束圧 ($\bar{\sigma}_{3f}$) 平面上に限界間隙比線 (\bar{e}_F line) を設定した (図 2.6)。また、せん断初期状態に基づいて非排水せん断挙動を分類する手法として、間隙比 (e_c)-初期有効拘束圧 ($\bar{\sigma}_c$) 平面上に、収縮的挙動と膨張

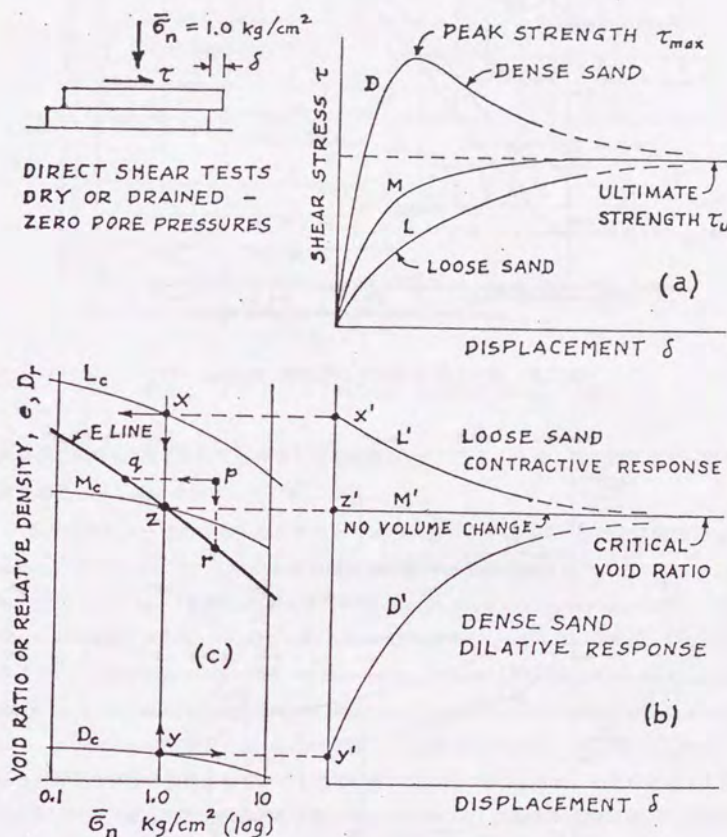


図 2.2 砂の排水せん断挙動 (Casagrande, 1975)

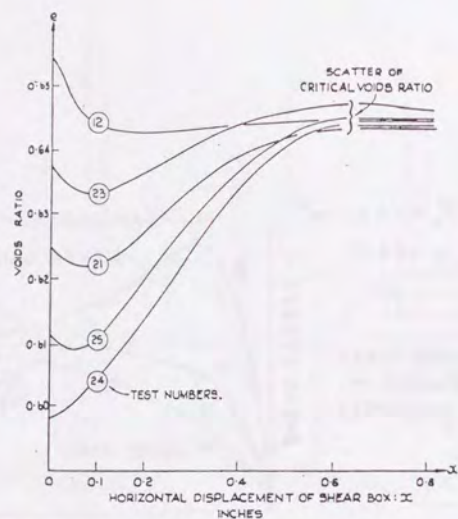


図 2.3 鉄球の排水単純せん断試験 (Roscoe, 1958)

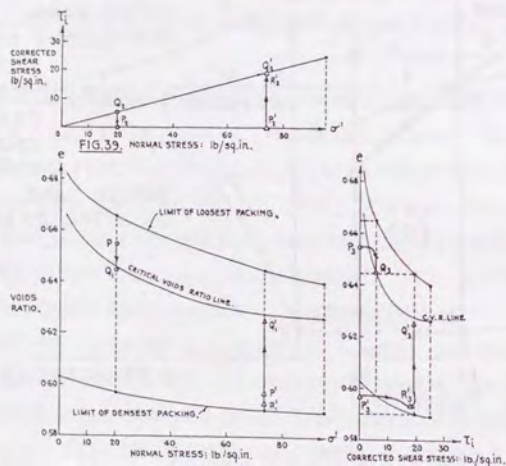


図 2.4 鉄球の排水単純せん断試験 (Roscoe, 1958)

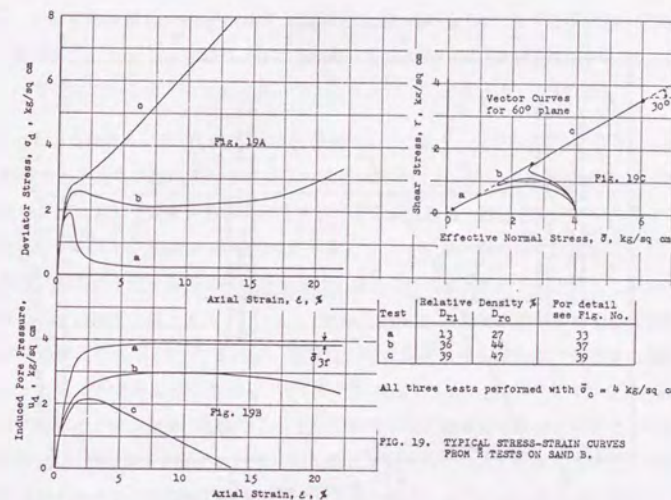


図 2.5 砂の非排水三軸圧縮せん断試験 (Castro, 1969)

的挙動の境界線 (限定液状化と非液状化の境界線) として P line を、限定液状化と液状化の境界線として L line を設定した (図 2.7)。

限界間隙比と一定のせん断抵抗のもとで変形が進行する状態は一般に定常状態 (steady state) と呼ばれており、上記の限界間隙比線も定常状態線と呼ばれることが多い。Poulos(1981)によれば、「変形における定常状態 (steady state of deformation) とは、一定体積・一定の鉛直有効応力・一定のせん断応力・一定の速度のもとで物体が継続的に変形している状態」(“The steady state of deformation for any mass of particles is that state in which the mass is continuously deforming at constant volume, constant normal effective stress, constant shear stress, and constant velocity.”) と定義されている。一定速度 (constant velocity) が定常状態の要件としてあげられていることからわかるように、もともとは、応力の釣り合い状態が破られて土が動的に流動している状況に対して定常状態が定義されていたものである。応力の釣り合いのもとに変形する静的な流動との違いについて、定常状態における流動構造 (flow structure) の有無をあげることがあるが (Castro, 1969, Casagrande, 1975, Poulos, 1981 など)、変形する砂の構造に関する実験的裏付けはなにもない。

本研究では、定常状態を次のように定義することとする。

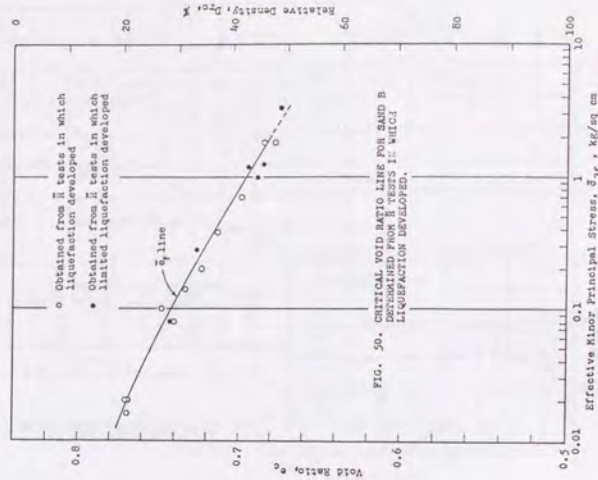


図 2.6 砂の三軸圧縮せん断における限界間隙比線 (Castro, 1969)

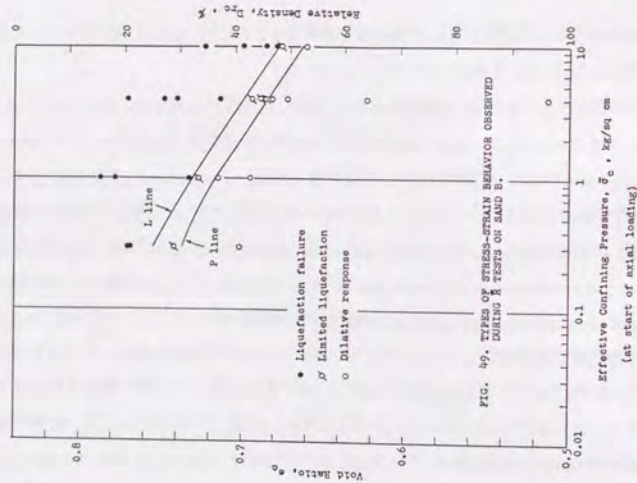


図 2.7 砂の初期状態に関する非排水三軸圧縮せん断挙動の分類 (Castro, 1969)

定義 土の定常状態 (steady state, SS) とは、応力状態が変化せずに等体積 (非排水) で変形が生じている状態である。すなわち、定常状態では応力増分はすべての成分についてゼロであるが、少なくとも一つのひずみ成分の増分がゼロではない。

以上のような考えに基づいた定常状態理論をまとめると、図 2.8 のようになる。せん断の最終状態である定常状態における有効応力状態は間隙比と一対一の関係にあり、間隙比-有効拘束圧平面において定常状態線を形成する。定常状態線は一般に右下がりの直線または曲線である。このため、間隙比-有効拘束圧平面において初期状態が定常状態線より上 (右) にあれば、間隙比一定の非排水せん断を受けた場合には間隙水圧の上昇とともに有効拘束圧が減少し、土の強度は低下する ($A \rightarrow A'$)。反対に間隙比-有効拘束圧平面において初期状態が定常状態線より下 (左) にあれば、間隙比一定の非排水せん断を受けた場合に間隙水圧の減少とともに有効拘束圧が増大し、土の硬化が生じる ($B \rightarrow B'$)。そこで、土の初期状態と定常状態線との位置関係・距離によって土の非排水せん断挙動を評価することが可能である。間隙比-有効拘束圧平面における初期状態点がより右上に遠く位置するほど、すなわち土の密度がより小さくまた有効拘束圧がより大きいほど、非排水せん断による液化・流動化の危険が大きいと判断される。また、定常状態における内部摩擦角が土の密度や拘束圧レベルにあまり影響されないと仮定すれば、定常状態における有効拘束圧から残留強度を計算することができ、残留強度とせん断荷重の大きさを比較することによって、流動破壊の発生を定量的に把握することも可能となる (図 2.9)。

図 2.8 や図 2.9 に見られるように、定常状態理論では収縮の挙動を示す場合にいったん定常状態に達すると以後は同じ定常状態が保たれることを仮定している。ところが現実には砂の非排水せん断試験を行ってみると、多くの場合で間隙水圧の増加が減少に反転することにより、定常状態が終了して再びせん断抵抗が増加する現象が見られる。このような状況を正しく評価するために、次の節では Verdugo (1992) の実験データを用いて現実の砂の非排水せん断挙動をさらに詳しく分析することを試みる。

2.2 砂の非排水せん断挙動

Verdugo (1992) は豊浦砂を用いて一連の非排水三軸圧縮試験を行った。その中では、湿潤堆積法 (wet tamping method) で供試体を作成して等方圧密した後、非排水条件で一定速度の軸圧縮を作用させる単調荷重せん断を行っている。供試体の作成方法が湿潤堆積法であることをのぞけば、試験条件・試験方法は後に述べる本研究における三軸せん断試験のものとほとんど同一である。この一連の試験の特徴は、供試体の作成に湿潤堆積法を用いている

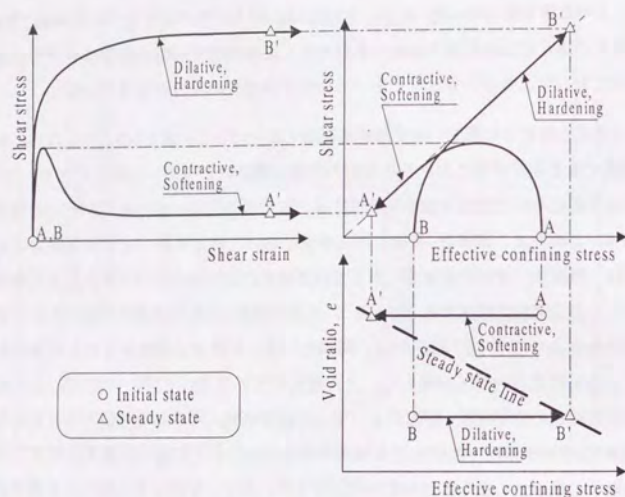


図 2.8 定常状態理論における土の非排水せん断挙動

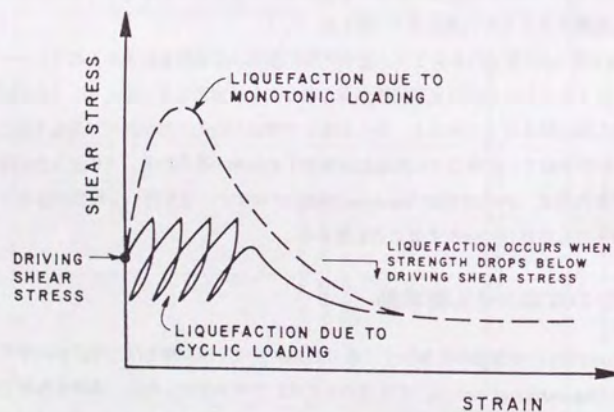


図 2.9 静的・動的荷重による土の非排水大変形 (Poulos, 1985)

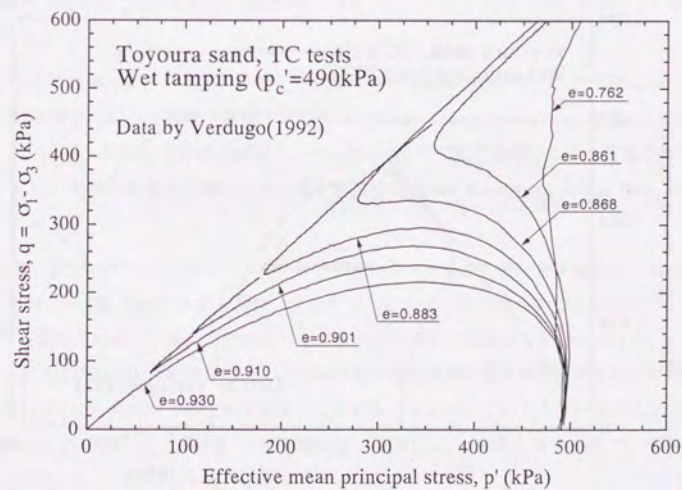
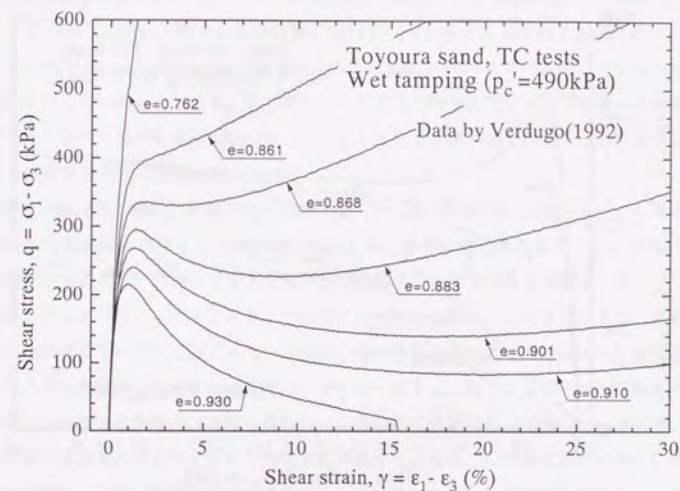


図 2.10 砂の非排水せん断挙動に及ぼす密度の影響

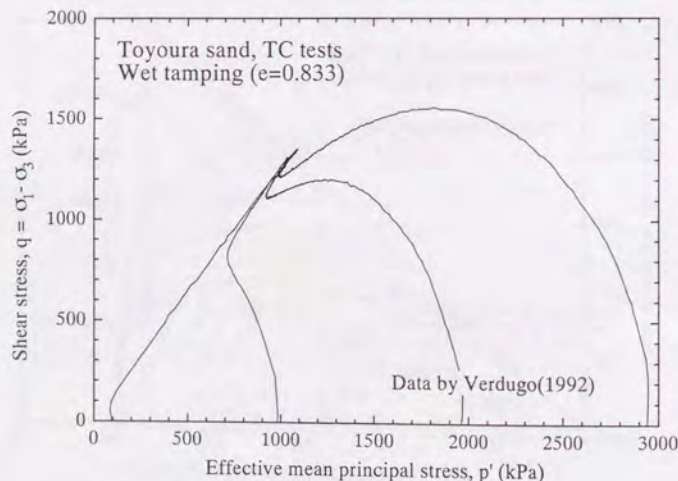
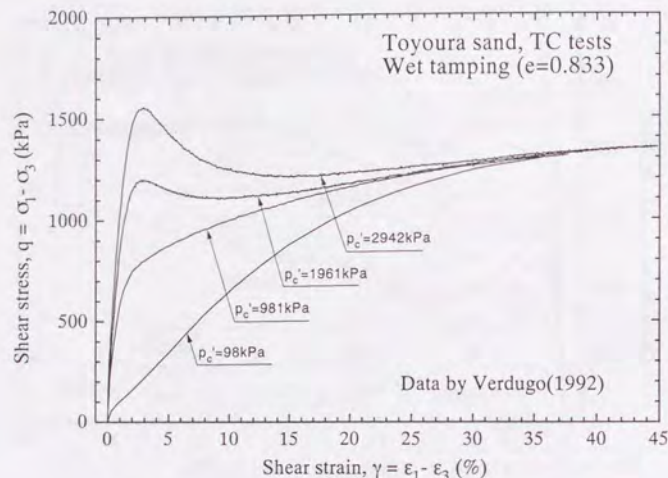


図 2.11 砂の非排水せん断挙動に及ぼす拘束圧の影響

ために非常に緩い供試体から非常に密な供試体まで幅広い密度の範囲の条件で実験を行っていること、また、高圧三軸せん断試験機を用いているためにせん断前の初期圧密拘束圧が $p'_c = 98 \text{ kPa}$ (1.0 kgf/cm^2) から $p'_c = 2942 \text{ kPa}$ (30.0 kgf/cm^2) までの非常に広い応力レベルで実験を行っていることである。ここでは、この実験データを用いて砂を非排水単調載荷せん断したときの一般的な挙動を明らかにし、またあわせて本研究で用いる砂の非排水せん断挙動を表現する用語の定義を明らかにする。

図 2.10 は、せん断前の初期圧密有効等方応力が $p'_c = 490 \text{ kPa}$ (5.0 kgf/cm^2) の条件で密度が異なる供試体の非排水せん断試験結果である。砂が非常に密な場合、すなわち図 2.10 で間隙比が $e = 0.762$ の場合を見るとせん断を開始しても過剰間隙水圧は全く発生せず、応力経路はまっすぐ立ち上がっている。せん断に伴ってせん断応力は急激に増大し、非常に強固な挙動を示している。間隙比が $e = 0.861$ の場合を見るとせん断開始とともに過剰間隙水圧が発生し応力経路は左寄りへ進んでゆくが、ある程度せん断力が増加すると間隙水圧の増加が減少に転じて応力経路は右側へ反転し、以後は硬化を続ける。Ishihara et al.(1975) は、砂を非排水単調せん断したときに有効拘束圧が最小になる点での内部摩擦角が砂の非排水繰返しせん断時に間隙水圧の発生が急増する応力条件になっていることを指摘してこの摩擦角を変相角 (angle of phase transformation) と名付けた。これにならって、本研究でも変相を定義する。

定義 土を単調に非排水せん断したときに、平均有効主応力圧が極小になり間隙水圧の増加が減少に転じる現象を**変相・変相状態 (phase transformation, PT)**と定義し、応力平面・間隙比-有効応力平面 ($e - \log p'$ 平面) 等で変相を生じる点を**変相点**と呼ぶ。また、変相点を連ねて構成される線を**変相線 (phase transformation line, PTL)**と呼ぶ。

さて、図 2.10 でさらに密度が小さくなり間隙比が $e = 0.883$ の場合を見ると、せん断ひずみ $\gamma = 1 \sim 2\%$ で応力ひずみ曲線にはっきりとしたピークが見られるようになり、その後にはせん断応力の低下が生じて変相点に達すると同時にせん断応力が極小となる。この場合、変相点では有効応力の増分がゼロとなっており定常状態の条件が成立するが、定常状態が保たれるのは一時的でやがて有効応力は増加に転じてゆく。このような一時的な定常状態を Alarcon-Guzman et al.(1988) は準定常状態 (quasi steady state) と名付けた。本研究でもこの呼称を用いるものとする。

定義 土を単調に非排水せん断したときに、すべての有効応力成分が極小となる状態を準定常状態 (quasi steady state, QSS) と定義し、応力平面・間隙比-有効応力平面

($e - \log p'$ 平面) 等の上の準定常状態を連ねて構成される線を準定常状態線 (quasi steady state line, QSSL) と呼ぶ。

明らかに準定常状態は変相状態の中に含まれる。すなわち、準定常状態はせん断応力の低下に引き続いて現れる変相状態である。間隙水圧の発生が小さくせん断応力の低下が小さい場合にはすべての応力成分の増分が厳密に同時にゼロとならず、応力経路が丸まってしまうこともあるが、この場合でもせん断応力の極小あるいは有効拘束圧の極小をもって準定常状態とする。

図 2.10 では $e = 0.868$ の場合に変相状態の直前で応力ひずみ曲線や応力経路がほぼ水平となり、準定常状態を生じる密度の上限となっている。一般に、細粒分をあまり含まないきれいな砂の場合、等方圧密状態からの非排水せん断にともなってせん断力が低下して準定常状態を生じるかどうかの限界における変相状態での平均有効主応力 p'_{PT} は初期等方圧密有効応力 p'_c の 1/2 程度である (Sladen et al., 1985, Ishihara, 1993)。

砂の密度が小さくなるほどせん断によって発生する過剰間隙水圧は大きくなって準定常状態における有効拘束圧 p'_{QSS} は小さくなってゆく。そして間隙比が $e = 0.930$ となると過剰間隙水圧は 100% に達し、砂の強度は完全に失われる。

図 2.11 は、せん断前の初期圧密有効等方応力 p'_c が 98kPa (1.0kgf/cm²)・981kPa (10.0kgf/cm²)・1961kPa (20.0kgf/cm²)・2942kPa (30.0kgf/cm²) の 4 つの条件で圧密後の間隙比がすべて $e = 0.833$ である供試体の非排水せん断試験結果である。 $p'_c = 98kPa$ ではせん断にともなってせん断抵抗は増加する一方であるのに対して、 $p'_c = 2942kPa$ ではピークの後に明確なせん断抵抗の低下と準定常状態の発現が認められ、砂の密度が同じ場合には初期有効拘束圧が大きいほどより圧縮的な挙動を示している。また、せん断ひずみが増大するにつれて 4 本の応力ひずみ曲線は 1 本に収束し、4 本の応力経路は 1 点に収束している。この事実、密度が同じ砂を大きくせん断すると最終的に初期有効拘束圧レベルに関係なく一つの定常状態に達することを示している。本研究ではこの状態を極限定常状態と呼ぶことにする。

定義 土を単調に非排水せん断したときに、最終的に到達する定常状態を極限定常状態 (ultimate steady state, USS) と定義する。間隙比-有効応力平面 ($e - \log p'$ 平面) 等の上の極限定常状態を連ねて構成される線を極限定常状態線 (ultimate steady state line, USSL) と呼ぶ。

図 2.12 は湿潤堆積法により作成された豊浦砂供試体にかんする Verdugo (1992) による非排水三軸圧縮試験で観測されたすべての変相状態と極限定常状態を $e - \log p'$ 平面上にプ

ロットしたものである。この図においてすべての極限定常状態は一つの極限定常状態線の上に位置している。このことは、非排水三軸圧縮試験において土の密度が同じならば初期拘束圧の大きさによらずに極限定常状態における応力状態は同一となることを示している。なお、せん断時の主応力の方向や中間主応力係数の大きさなどの応力条件が異なれば、砂の密度が同一であっても極限定常状態における有効拘束圧レベルやせん断抵抗の大きさは異なることが後で本研究の実験結果より示唆される。

また、図 2.12 には初期圧密拘束圧の大きさが同一である実験で観測された変相状態を結んだ変相状態線を描いてある。この図によれば、変相状態線は砂の密度が小さくなるほど、また初期有効拘束圧が大きくなるほど極限状態線に近づき、収束してゆくことがわかる。この状況をわかりやすく模式的に表示したのが図 2.13・2.14 である。すなわち、土が非常に密な場合には過剰間隙水圧は全く発生せず、初期圧密有効応力が最小有効拘束圧となるので変相状態は初期状態に一致している。砂の密度がやや小さくなるとせん断に伴う過剰間隙水圧の発生によって変相状態線は初期状態線から左側へ分岐して極限状態線へと近づいてゆく。変相状態における有効拘束圧の大きさが初期有効拘束圧の半分より小さくなるあたりからせん断応力の低下が生じ始め、変相状態は準定常状態となる。さらに砂の密度が小さくなると変相線は極限状態線に収束する。この状態では変相状態あるいは準定常状態は極限状態と一致している。すなわち、ピーク強度後に極小強度が現れた後に応力の増加が見られずにそのまま最終状態となる。この状態を限界定常状態と呼ぶことにする。

定義 土を単調に非排水せん断したときに、準定常状態と極限定常状態が一致している場合、これを限界定常状態 (critical steady state, CSS) と定義する。

砂の密度が非常に小さくなると限界定常状態における有効応力がゼロとなる。Castro and Poulos (1977) はこの状態を "quicksand" と名付けている。本研究ではこの状態をゼロ強度定常状態と呼ぶことにする。Verdugo (1992)、Ishihara (1993) によれば、非排水三軸圧縮せん断において豊浦砂がゼロ強度定常状態に達するのは間隙比が 0.930 よりも大きな時である。

定義 土を単調に非排水せん断したときに有効応力成分がゼロとなった場合、この状態をゼロ強度定常状態 (zero strength steady state, ZSS) と定義する。

砂の非排水せん断挙動は、図 2.12 や図 2.13 に示したような $e - \log p'$ 平面上の変相線 (PTL) と極限定常状態線 (USSL) の位置と形によって表される。当然、変相線と極限定常状態線が下方に位置する砂の方がより圧縮的で流動傾向の大きな挙動を示す。また、図 2.15 に模式的に表されているように、変相線と極限定常状態線の位置関係や傾きの大きさによって、変相

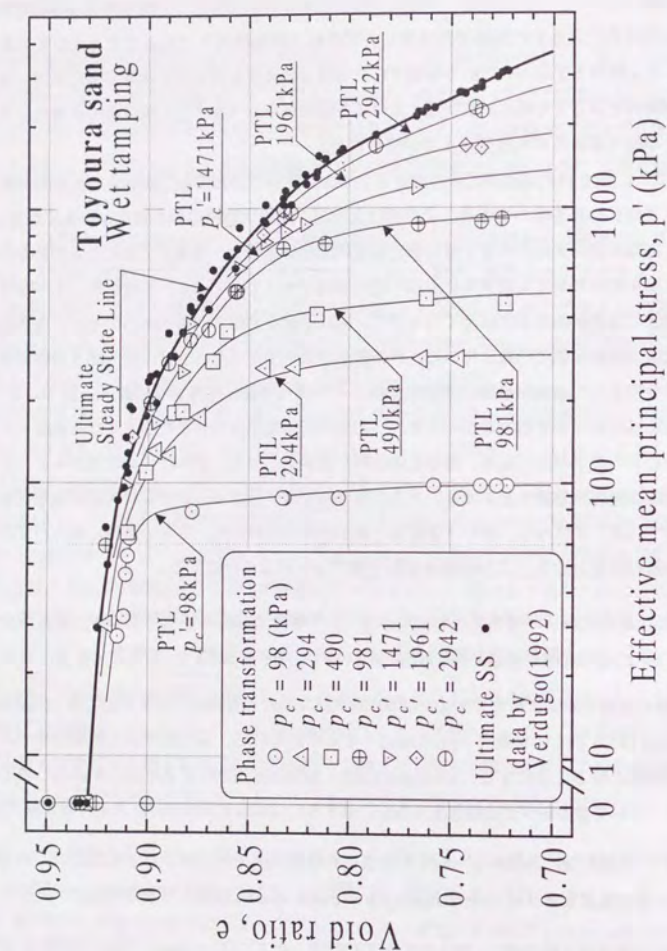


図 2.12 豊浦砂の非排水三軸圧縮試験によって得られた変相線と極限定常状態線

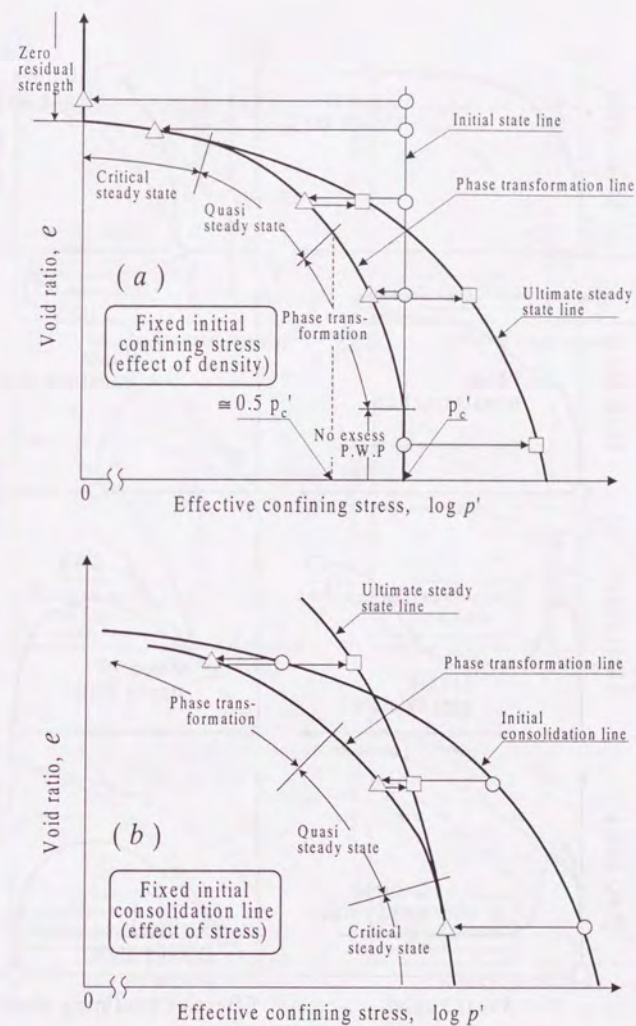


図 2.13 土の非排水せん断挙動の分類 (その1)

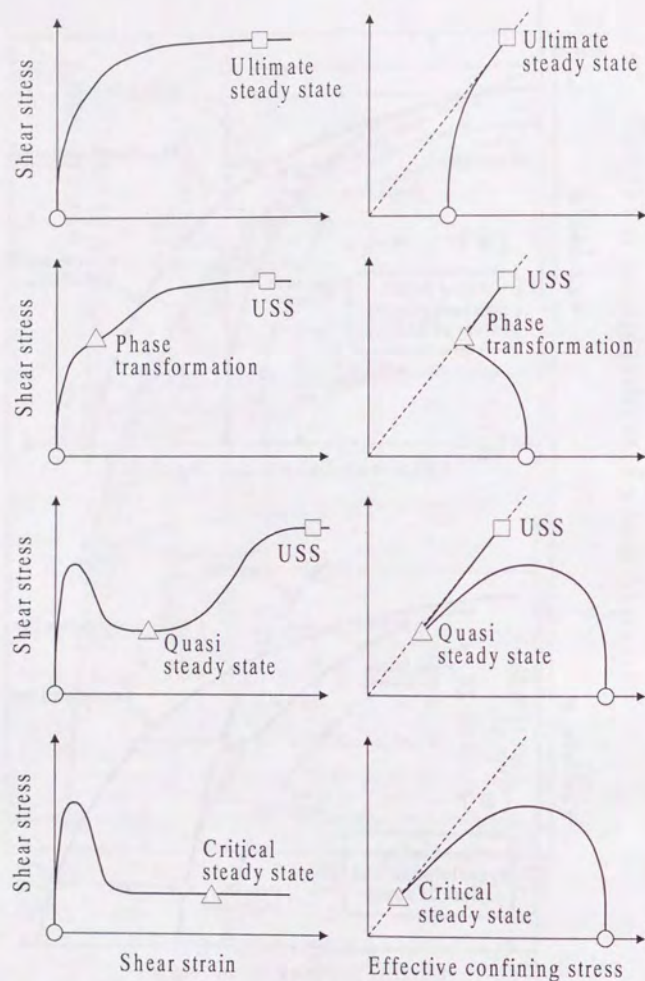


図 2.14 土の非排水せん断挙動の分類 (その2)

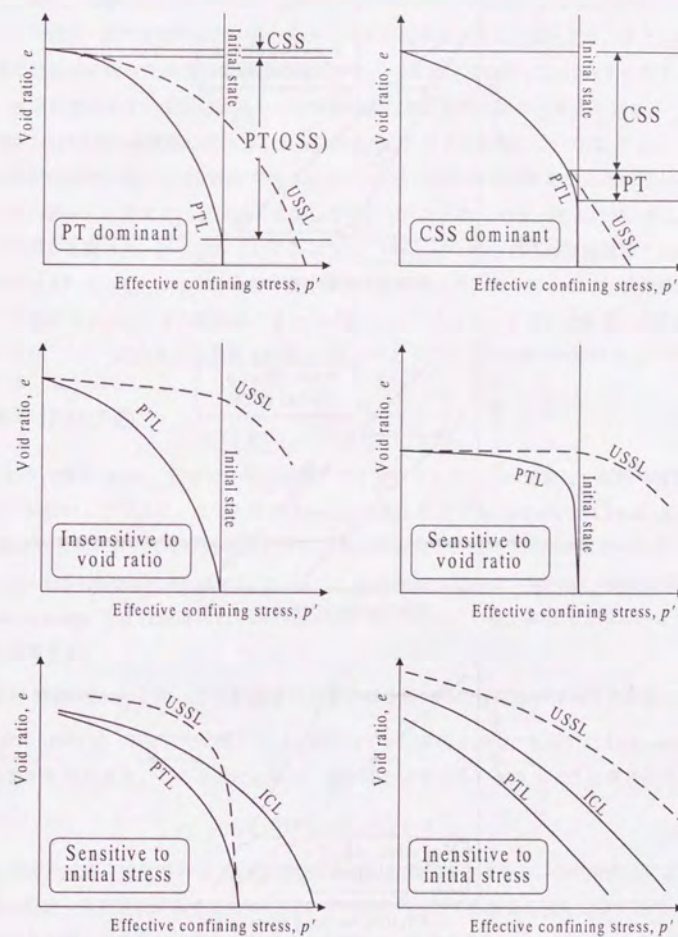


図 2.15 変相線と極限定常状態線によって表されるせん断特性

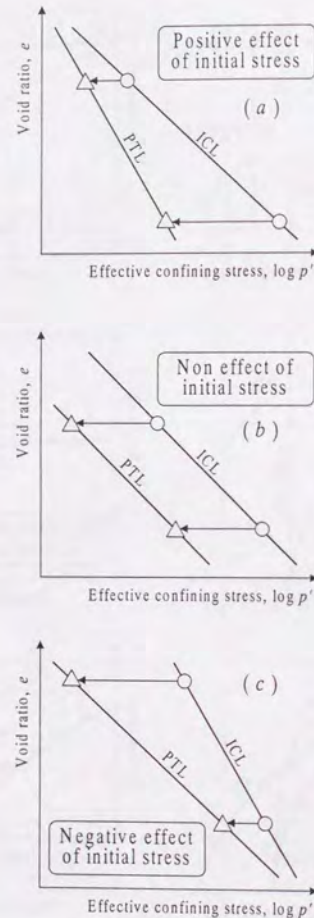


図 2.16 砂の非排水せん断特性に与える初期拘束圧の影響

傾向の大きさや、密度・初期有効拘束圧の変化に対する挙動の変化の敏感さなどが判断できる。一般に、圧縮性の小さなきれいな砂ほどせん断に伴って変相による硬化が生じやすく、わずかな密度・初期有効拘束圧の変化によってせん断挙動が急激に変化する。また、細粒分が多く圧縮性の大きな砂ほど変相後の硬化が小さく限界定常状態(CSS)を生じやすく、密度・初期有効拘束圧の変化によるせん断挙動の変化が比較的小さいと考えられる。

砂の非排水せん断挙動に与える初期有効拘束圧の大きさの影響については、Castro(1969)の三軸圧縮試験以降、図 2.13(b) や図 2.16(a) のように初期有効拘束圧が大きいほど非排水せん断に伴ってより大きな強度低下を生じるものと考えられている。図 2.11や、あとで 2.6 節で説明する図 2.22・図 2.23からわかるように、Verdugo(1992)の三軸圧縮試験でも同様の傾向が示されている。しかし、あとで第4章の三軸伸張試験結果や第6章の三軸伸張試験結果で示されるように、せん断条件によっては図 2.16(b) のように初期有効拘束圧の影響がなかったり、とくに低拘束圧圧条件では図 2.16(c) のように全く逆の傾向が現れることもある。

2.3 砂の流動

土の「流動(flow)」とはいかなる状態のことを指すのか、その明確で一般的な定義は定まっていないようである。たとえばRobertson(1994) および Robertson and Fear(1995) は、「非排水せん断においてひずみ軟化が生じ、せん断応力と有効拘束圧が一定になっている状態」(“strain softening response in undrained loading resulting in constant shear stress and effective stress”)を流動液化状態(flow liquefaction)と呼んでいる。本研究では次のように流動を定義する。

定義 流動(flow) とは、土の不安定な変形に引き続いて定常状態が発現する現象である。

変形の安定性・不安定性に関しては、塑性ひずみ仕事の2階増分を用いたDrucker(1954)の定義が有名である。この定義によれば、土の変形の安定条件は次のように表される。

$$d^2W = d\sigma'_{ij}d\varepsilon'_{ij} > 0 \quad (2.1)$$

$d\sigma'_{ij}$ は応力成分の増分であり、 $d\varepsilon'_{ij}$ はひずみ成分の塑性増分である。この条件式によれば、変形の安定・不安定を評価するためにはすべての応力・ひずみ増分の積について総和をとる必要があるが、本研究では簡単のためにせん断応力(偏差応力) $q = \sigma_1 - \sigma_3$ の増分とせん断ひずみ $\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$ の増分の正負によって安定・不安定を評価するものとする。

定義 土の非排水せん断変形において、 $dq \cdot d\gamma > 0$ の状態を安定(stable)な変形と呼び、 $dq \cdot d\gamma < 0$ の状態を不安定(unstable)な変形と呼ぶ。

すなわち、応力ひずみ曲線の傾きが正ならば安定、負ならば不安定な変形である。したがって、砂を単調に非排水せん断したときにせん断応力の低下にともなって準定常状態 (QSS)・限界定常状態 (CSS)・ゼロ強度定常状態 (ZSS) が現れたならば流動が観測されたということになる。この意味で、せん断応力の低下が生じる場合を圧縮的 (contractive) な挙動、せん断応力の低下が生じない場合を膨張的 (dilative) な挙動と呼ぶ。

定義 土の非排水せん断において、流動が生じた場合にはそのせん断挙動は圧縮的 (contractive) であるといい、流動が生じない場合にはそのせん断挙動は膨張的 (dilative) であるという。

さらに、本研究では次のように流動を完全流動と限定流動に分類する。

定義 土の流動において、ゼロ強度定常状態 (ZSS) が現れたならばそれを完全流動 (complete flow) あるいはゼロ強度流動 (flow with zero residual strength) といい、それ以外の場合、すなわち準定常状態 (QSS) または限界定常状態 (CSS) が現れたならばそれを限定流動 (limited flow) という。

一般には、限界定常状態 (CSS) が現れた場合にはこれを完全流動に分類することが多いが、本研究における定義では次に述べる残留強度がゼロであるか否かによって分類するものである。

2.4 非排水残留強度

重力によるせん断荷重が準定常状態 (QSS) または限界定常状態 (CSS) におけるせん断抵抗よりも大きいときに、動的荷重による間隙水圧の上昇などが引き金となって流動が発生する。従って、本研究では土の非排水残留強度を次のように定義する。

定義 土を非排水せん断したときに準定常状態 (QSS) または限界定常状態 (CSS) が現れる場合、この準定常状態または限界定常状態におけるせん断抵抗を非排水残留強度 (undrained residual strength) と呼ぶ。

重力による静的なせん断荷重が残留強度よりも大きいと流動が発生し、振動荷重の停止後も流動変形が継続する。限定流動の場合には、重力による静的なせん断荷重が残留強度よりも小さくなるか、または準定常状態後の変相によって土の強度が重力による静的なせん断荷重よりも大きくなるまで流動は継続する。完全流動が発生すると有効応力が完全に失われ非排水残留強度はゼロとなり、重力によるせん断荷重がゼロとなるまで流動は継続する。斜面であれば、地表面が完全に水平となるまで流動する。

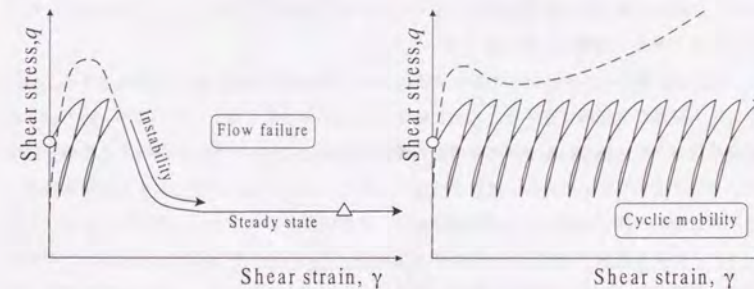


図 2.17 流動とサイクリックモビリティ

2.5 サイクリックモビリティ

重力による静的なせん断荷重が残留強度よりも小さい場合には流動は発生しないが、もし繰返し荷重の振幅が非常に大きかったりあるいは動的荷重の繰返し回数が非常に多い場合には、相当の大きさの地盤変形が生じる。このような現象をサイクリックモビリティと呼ぶことにする。

定義 繰返し荷重の作用によって過剰間隙水圧が発生して土が軟化し、変位振幅が大きくなったり一方へのひずみが蓄積したりして、何らかの被害が発生する程度にまで土の変形が大きくなる現象をサイクリックモビリティ (cyclic mobility) と呼ぶ。サイクリックモビリティの変形過程において不安定な変形は生じない。

サイクリックモビリティにおいては繰返し荷重が作用している間には変形が継続的に進行する。しかし、繰返し荷重の作用が停止すると直ちに変形も停止する点が流動との著しい相違である。ここでは、流動とサイクリックモビリティの違いは変形の安定・不安定によるものであって変形の大きさには関係がないことに注意する必要がある。相当地に密な砂であって繰返し荷重の振幅が十分に大きく、また繰返し回数が十分に多ければ大きな変形を生じ

るが、本研究での定義に従えば不安定な挙動が現れない限りはどんなに大きな変形を生じて流動変形とは判断されない(図2.17)。サイクリックモビリティに関する砂の強度特性を議論するためには、繰返し荷重振幅および判断の基準となる繰返し回数・変形量などを検討する必要がある。これは砂の繰返し荷重・変形特性に関わる問題であり、本研究の範囲外であるが、一般的な繰返し荷重試験から求められる液化化強度がサイクリックモビリティに関する強度であると理解して差し支えなからう。

図2.18は緩詰めめの砂に対する非排水繰返しせん断試験の一例である。間隙水圧の上昇に伴い応力経路が変相線に達すると急激に軟化してひずみ振幅が増大しているが、応力ひずみ経路を見るとその傾きは至る所で正であり不安定な変形は見られない。従ってこの挙動はサイクリックモビリティであり、流動ではない。図2.19は、密詰めめの砂に対する非排水繰返しせん断試験の一例である。この試験結果から、荷重回数が多くなるにつれてサイクリックモビリティによる変形が増大している様子が分かる。この場合、もし初期せん断荷重が存在すれば一定速度で方向への変形が蓄積し続けることが考えられるが、これも明らかにサイクリックモビリティである。

2.6 流動ポテンシャル

ある密度を持った砂がある応力状態のもとにあるときに、その砂がどの程度の液化化・流動化の傾向を有するかを表す指標として有名なものに、Been and Jefferies(1985)によって定義されたState parameter, ψ がある(図2.20)。 ψ は評価の対象となる砂の間隙比と、その初期有効拘束圧に対応する定常状態での間隙比の差であり、 $e - \log p'$ 平面上で初期状態が定常状態線の上側にあれば $\psi > 0$ 、下側にあれば $\psi < 0$ となる。当然、 ψ が大きいほど流動ポテンシャルは大きいと判断される。Been and Jefferies(1985)は流動後の変相については言及していないが、本研究における流動の定義を考慮すれば、基準となる定常状態としては極限定常状態(USS)ではなく準定常状態(QSS)または限界定常状態(CSS)を用いるべきである。

一方、Ishihara(1993)はState index, $Is = (e_0 - e)/(e_0 - e_s)$ を定義した。ここに、 e は土の間隙比、 e_0 は土の初期有効拘束圧に対応するゼロ強度となる間隙比またはもっとも緩い状態に堆積したときの間隙比、 e_s は初期有効拘束圧に対応する準定常状態での間隙比である(図2.21)。 $e - \log p'$ 平面上で初期状態が準定常状態線の上側にあれば $0 < \psi < 1$ 、下側にあれば $1 < \psi$ となる。 Is が小さいほど流動ポテンシャルは大きいと判断される。State index は異なる種類の土の間でも比較が可能である点が特徴である。

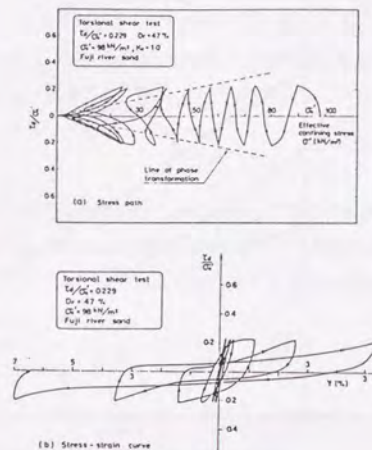


図 2.18 緩詰めめの砂の繰返しせん断試験 (Ishihara, 1985)

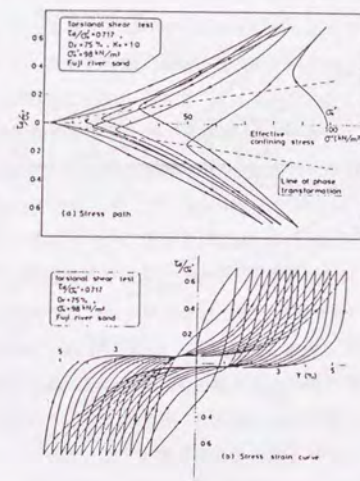
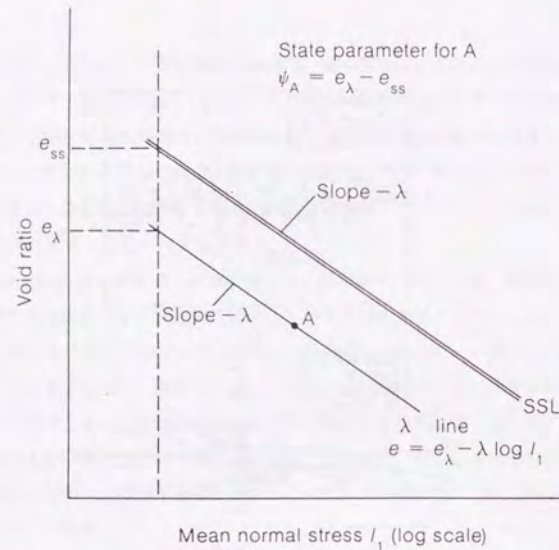
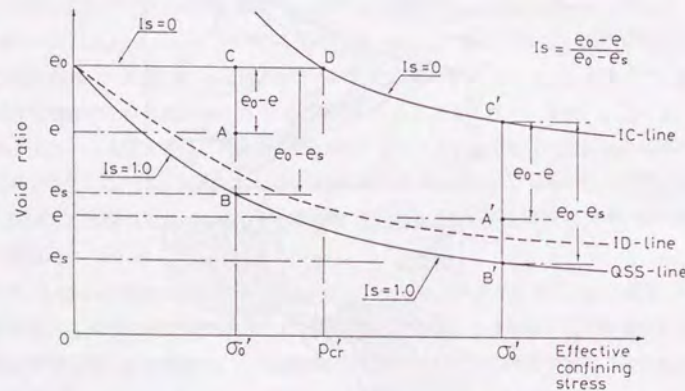


図 2.19 密詰めめの砂の繰返しせん断試験 (Ishihara, 1985)

図 2.20 Been and Jefferies(1985) の State parameter, ψ 図 2.21 Ishihara(1993) の State index, I_s

これらの State parameter や State index の定義は、 $e - \log p'$ 平面上的準定常状態線 (QSSL) が一つに定まることを前提としている。ところが、後に述べる本研究の実験結果が示すように、一般的には $e - \log p'$ 平面上的準定常状態線は一意に定まらない。このような状況に対応できるパラメータとして、Ishihara(1993) は次のような Initial state ratio, r_c を用いた。

$$r_c = \frac{p'_c}{p'_s} \quad (2.2)$$

p'_c , p'_s はそれぞれ初期状態および準定常状態における平均有効主応力である。このパラメータは非常に大きな間隙水圧が発生して完全流動に近づくとき無限大に発散してしまい、扱いがやや不便である。そこで、本研究ではせん断に伴う最大過剰間隙水圧比 u_f を流動ポテンシャルとして用いることにする。

定義 土を非排水せん断したときの最大過剰間隙水圧比

$$u_f = \left(1 - \frac{p'_{PT}}{p'_c}\right) \times 100(\%) \quad (2.3)$$

を流動ポテンシャルと定義する。

ここで、図 2.12 に示した各初期圧密拘束圧レベルに対する $e - \log p'$ 平面上的変相線 (PTL) を用いて任意の初期状態 (初期拘束圧・間隙比) に対する流動ポテンシャルの大きさを求めることを試みる。たとえば、初期有効拘束圧 981kPa に対する変相線に着目する。非排水単調せん断にともなって発生する最大過剰間隙水圧比が 50% であるとすれば、変相状態における有効拘束圧は 490kPa となる。そこで、 $e - \log p'$ 平面上で変相線が $p' = 490kPa$ を表す縦軸と交差する点を参照すると、間隙比が約 0.86 であることがわかる。また、非排水単調せん断にともなって発生する最大過剰間隙水圧比が 90% であるとすれば、変相状態における有効拘束圧は 98kPa となる。そこで、 $e - \log p'$ 平面において変相線が $p' = 98kPa$ を表す縦軸と交差する点を参照すると、間隙比が約 0.91 であることがわかる。このようにして初期有効拘束圧が 981kPa である場合について、任意の間隙比に対する最大過剰間隙水圧比の大きさ、すなわち流動ポテンシャルを求めることができる。

同様の作業を色々な初期有効拘束圧に対する変相線を参照して行えば、任意の初期有効拘束圧と密度の組み合わせ条件下で非排水三軸圧縮単調せん断を行ったときに生じる最大過剰間隙水圧の大きさを見積もることができる。各実験の初期状態に対する最大過剰間隙水圧の大きさを直接プロットしてもよいが、実験誤差のためにデータがばらつくので、上記のように変相線を参照して最大過剰間隙水圧の大きさを見積もる方がよりの確にせん断特性をとらえることができる。

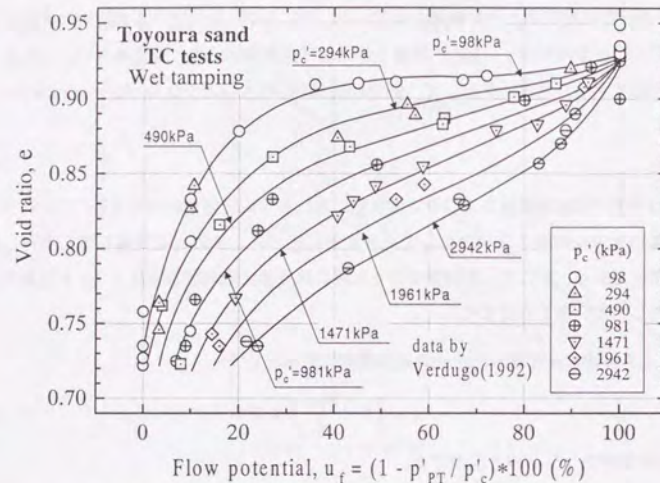


図 2.22 湿潤堆積豊浦砂の三軸圧縮せん断時の流動ポテンシャル

図 2.22は、各せん断試験の流動ポテンシャルを各初期有効圧密応力別に間隙比に対してプロットしたものであり、この図からも、流動ポテンシャル・密度・初期有効拘束圧の関係を得ることができる。

図 2.23は、図 2.12に示した変相線を用いて上記の方法により各初期状態に対する流動ポテンシャル(最大過剰間隙水圧比)を求めたうえで、等流動ポテンシャル線を間隙比-初期拘束圧平面($e - p'_c$ 平面あるいは $e - \log p'_c$ 平面)に描いたものである。ひとつの等流動ポテンシャル線上の各初期状態からせん断を行った時に発生する最大過剰間隙水圧比は等しくなり、初期拘束圧で正規化されたせん断挙動は類似のものになる。

2.2節に述べたように、等方圧密状態から非排水せん断を行った場合、 $r_c = p'_c / p'_{PT} \approx 2$ が限定流動と非流動の境界となっている。従って、 $u_f = 50$ の流動ポテンシャル線はCastro(1969)によるF lineやIshihara(1993)による初期分割線(initial deforming line, IDL)と同義のものである。等方圧密状態から非排水せん断を行った場合、 $u_f = 100$ の流動ポテンシャル線より上の領域は完全流動を生じる初期条件を、 $u_f = 100$ の流動ポテンシャル線と $u_f = 50$ の流動ポテンシャル線との領域は限定流動を生じる初期条件を、 $u_f = 50$ の流動ポテンシャル線より下の領域は非流動挙動を生じる初期条件を表している。

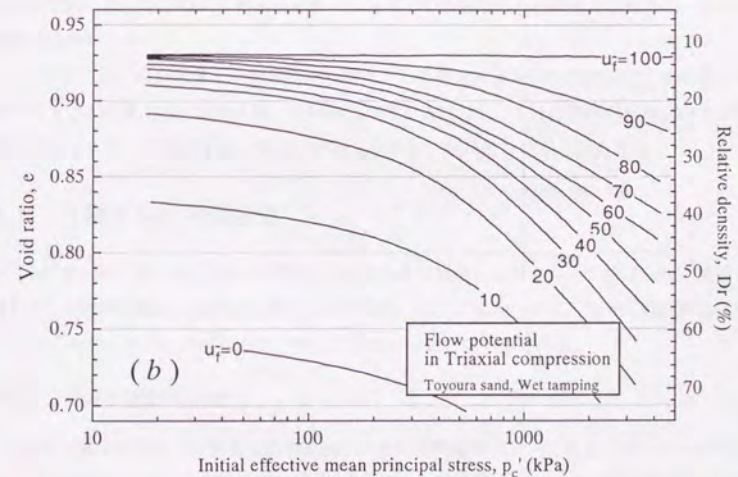
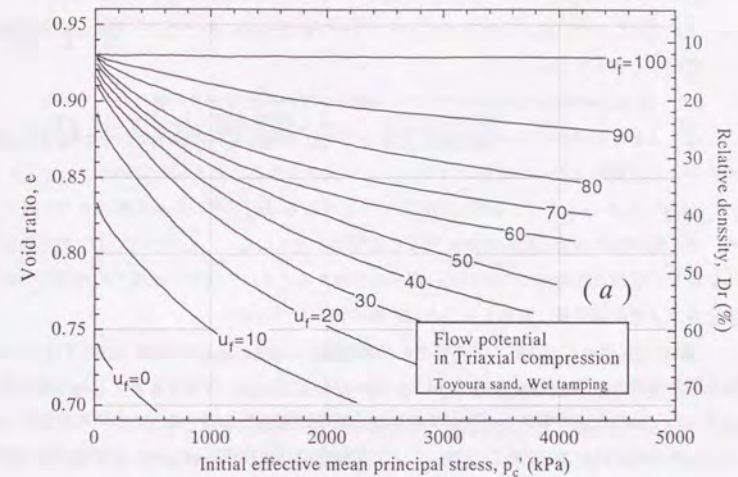


図 2.23 湿潤堆積豊浦砂の三軸圧縮せん断時の流動ポテンシャル

流動ポテンシャルが $u_f = 30$ 以上の流動ポテンシャル線は互いに非常に接近して密に分布している。このことは、三軸圧縮せん断ではわずかな密度の変化によってせん断挙動が敏感に変化することを示している。

また、図 2.23 に示した流動ポテンシャル線はいずれも右下がりの線になっている。このことは、三軸圧縮条件においては密度が同じであれば初期有効拘束圧が大きいほどせん断挙動がより圧縮的となって流動ポテンシャルが大きくなることを示している。しかし、図 2.23(b) からわかるように、初期有効応力が小さくなるほどポテンシャル線は水平に近くなり、せん断挙動に与える初期有効拘束圧の影響は小さくなる。したがって、1G 場でのモデル試験など低拘束圧条件での砂のせん断挙動を考えると、高拘束圧域での拘束圧の影響をそのまま低拘束圧域に延長することは判断の誤りにつながる。

これまでに述べてきた砂の非排水せん断特性は主に Verdugo(1992) によって行われた湿潤堆積豊浦砂の非排水三軸圧縮試験結果に基づくものである。次章以下では三軸圧縮条件に限らない一般的な応力条件での砂の非排水せん断挙動を詳しく調べる。いろいろな条件下でのせん断挙動の比較検討に際しては、ここで定義された流動ポテンシャルを活用する。流動ポテンシャルを用いた地盤流動の評価方法の詳細については第 8 章で述べることとする。

第3章

砂の非排水単調せん断試験

本研究では、砂の非排水単調せん断試験を行うために、三軸せん断試験機と中空ねじりせん断試験機を使用した。三軸せん断試験機を用いて三軸圧縮試験と三軸伸張試験を行った。また、中空ねじりせん断試験機を用いて単純せん断試験および、主応力方向と中間主応力係数が固定された条件でのせん断試験を行った。三軸せん断試験・中空ねじりせん断試験において、効率よく正確な測定を行うためにパーソナルコンピュータを用いた自動測定システムを作成した。中空ねじりせん断試験では効率よく正確な応力制御を行うために、自動制御装置を作成した。

この章では、載荷装置と計測装置から構成される各せん断試験装置の詳細、供試体の作成方法を含む試験方法・実験手順、供試体に作用する応力とひずみの解析方法およびその制御方法などについて記述する。また、実験で使用した試料についても記述する。

3.1 三軸せん断試験装置

三軸せん断試験には、2 台の (低圧) 三軸せん断試験機と 1 台の高圧三軸せん断試験機を用いた。基本的な構造は通常の三軸せん断試験機と同じである。高圧三軸せん断試験機においては、安全のために高圧力部分に空気を残さないことが必要である。

3.1.1 鉛直荷重載荷装置

鉛直荷重の載荷動力は装置下部に設置されている電動モーターである。モーターの回転はいくつかの減速ギアで速度を調整された後、ラック・ピニオン機構によって三軸圧力室台座の上下動に変換されて供試体に載荷される。供試体の圧密時などに軸荷重の応力制御を行うときには手動ハンドルを回すことにより載荷する。高圧三軸せん断装置では軸荷重を負 (引

張り荷重) とすることはできないので三軸伸張試験は不可能である。

3.1.2 セル圧載荷装置

外セル圧・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。コンプレッサーは空圧タンクの圧力が700kPa以下になると運転を開始し、1000kPaに達すると運転を停止するように設定されている。コンプレッサーで発生した変動空気圧は一次圧調圧用レギュレータで一定圧力600kPaに調整され、各載荷装置に供給される。

低圧三軸せん断装置では、セル圧載荷用空圧レギュレータによって調整された空気圧は直接セル内上部に導入され、セル内で水圧に変換された後供試体の側面に載荷される。セル圧容量は1000kPaであるが、実際には一次圧が上限となる。

一方、高圧三軸せん断装置ではセル圧載荷用空圧レギュレータによって調整された空気圧が面積比5倍のピストンに導入されて圧力が5倍に増幅されるとともに水圧に変換され、三軸セルに導入される。セル圧載荷時には三軸セルは水で満たし、空気を残さない。また、増幅後の圧力配管には銅管もしくはステンレス管を用いる。セル圧容量は5000kPaである。

3.1.3 背圧載荷装置

低圧三軸せん断装置では、背圧載荷用空圧レギュレータによって調整された空気圧は供試体体積変化測定用二重管ビュレット上部に導入され、ビュレット内で水圧に変換される。ビュレットの水圧はパイプを通してベDESTALと試料キャップの排水水路に伝達され、ポラスストーンを通して供試体に載荷される。

一方、高圧三軸せん断装置では背圧載荷用空圧レギュレータによって調整された空気圧が面積比2倍のピストンに導入されて圧力が2倍に増幅されるとともに水圧に変換され、供試体体積変化測定用二重管ビュレット外側下部に導入される。ビュレット上部にはマノメーターオイルが封入されており、圧力はいったん油圧に変換された後にビュレット内側で再び水圧に変換されて供試体に載荷される。増幅後の圧力配管には銅管もしくはステンレス管を用いる。背圧容量は2000kPaである。

3.1.4 測定装置

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た後、ADコンバーターカードによってパーソナルコンピュータに取り込まれ、表示されたり記録されたりする。観測値ディスプレイ表示のサンプリング周波数は条件によって多少異なるが10Hz程度である。記録周波数は1Hzに固定されている。ADコンバーターの入力レンジは

20V(±10V)、分解能は12bit(4.9mV)である。測定・記録項目は、鉛直軸荷重、セル圧、背圧(間隙水圧)、軸変位の4チャンネルである。実験中には上記4項目の測定値に加えて鉛直軸応力をリアルタイムでディスプレイ表示する。

垂直軸荷重測定装置

垂直軸荷重は、三軸室内に位置するロードセルおよび動ひずみ計によって電圧に変換される。ロードセルの定格容量は5000Nである。観測レンジを定格容量全体としたときには分解能は約1Nであるが、低拘束圧条件の試験では分解能が不足するので適宜観測レンジを縮小する必要がある。

外セル圧・背圧測定装置

圧力をひずみゲージ式圧力計と動ひずみ計によって電圧に変換して観測する。背圧システムの配管にはステンレス管・銅管もしくは肉厚細径のシンフレックスチューブを用いて体積誤差を極力小さくしている。低圧三軸せん断試験装置の圧計の定格容量は1000kPaであり、観測レンジを定格容量全体としたときには分解能は約0.2kPaである。また、高圧三軸せん断試験装置の圧計の定格容量は5000kPaであり、観測レンジを定格容量全体としたときには分解能は約1kPaである。

軸変位測定装置

セル外の載荷軸に取り付けられた垂直変位アタッチメントの垂直変位をひずみゲージ式変換器付きダイヤルゲージで測定する。変位計の定格容量は30mmであり、観測レンジを定格容量全体としたときには分解能は約0.01mmである。ダイヤルゲージの目視による観測では0.001mmを読みとることができる。

供試体体積変化測定装置

実験では飽和した供試体のみを用いるので、供試体内から排出される水の体積をビュレットで測定してこれを供試体の体積変化とすることができる。低圧三軸試験装置ではビュレット内の水面を、また高圧三軸せん断試験装置ではビュレット内の水とマノメーターオイルとの境界面を目測する。観測精度はおおよそ0.5cm³である。

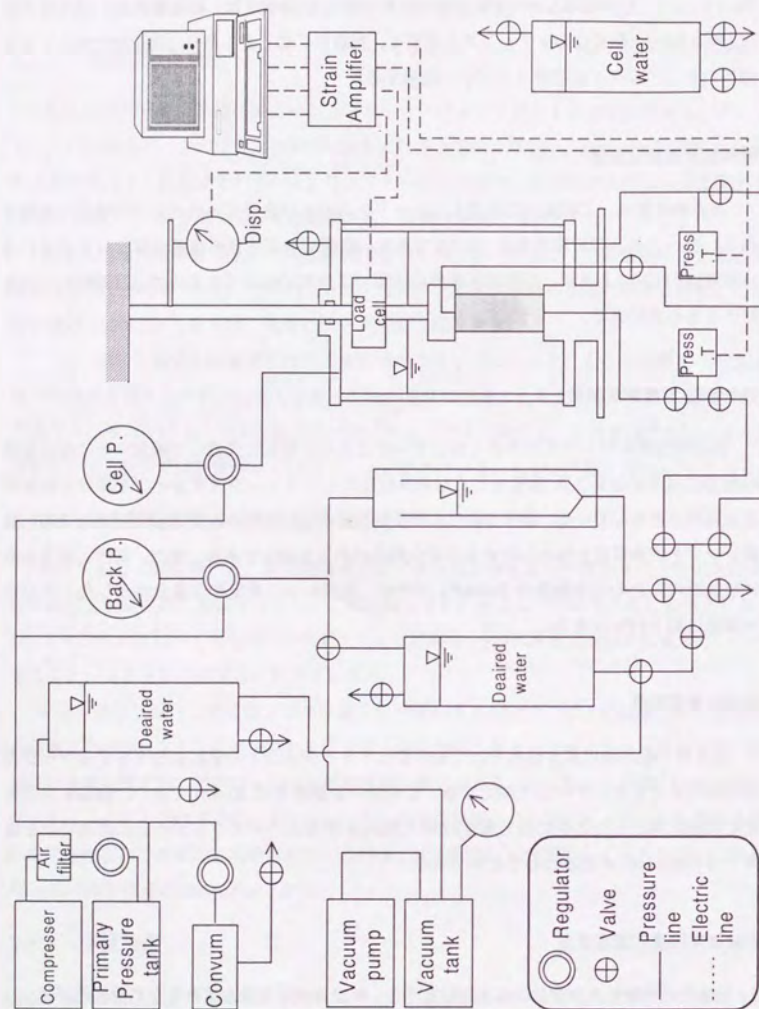


図 3.1 三軸せん断試験装置の配管・配線

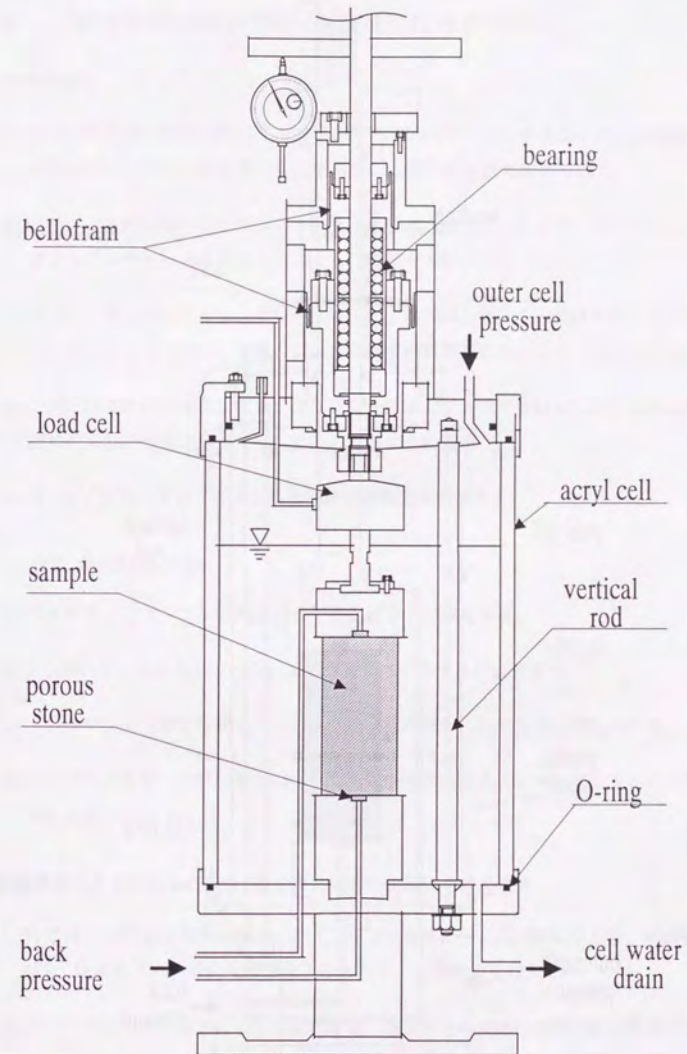


図 3.2 三軸せん断試験装置圧力室

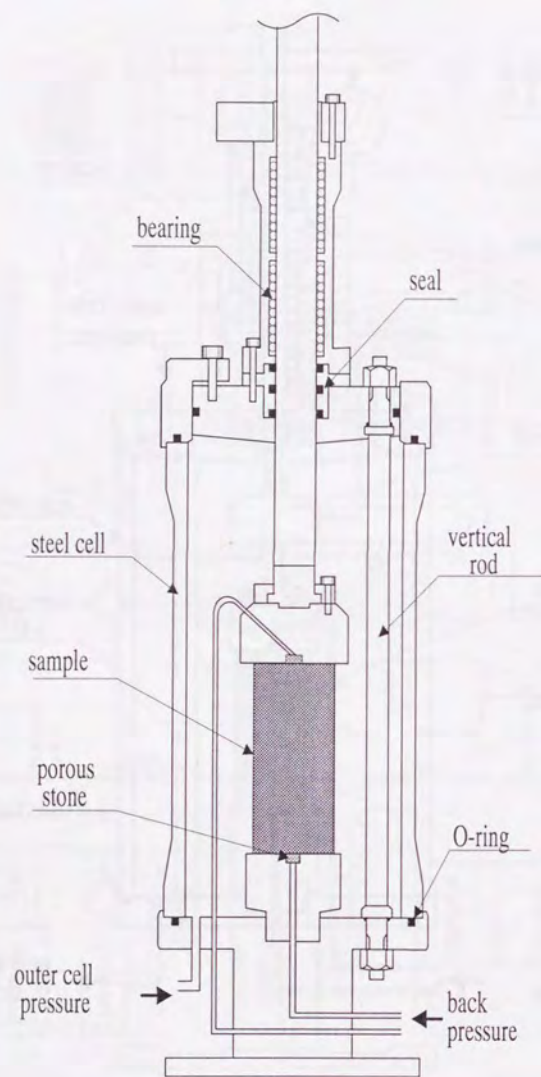


図 3.3 高圧三軸せん断試験装置圧力室

3.2 三軸せん断試験の手順 (再構成供試体の作成)

上下端面処理

1. 外径が供試体の直径と等しく、内径がポーラスストーンの直径より 5mm 程度大きな円盤状のメンブレンを 8 等分した扇型のゴム膜片を 4 組用意する。
2. ベDESTAL の上面にシリコングリースを薄く塗布する。このとき、ポーラスストーンにシリコングリースが付着しないように注意する。
3. ベDESTAL 上面のシリコングリース膜上に 8 枚のゴム膜片を円環状に張り付ける。このとき、シリコングリース膜とゴム膜の間に空気が残らないように気をつける。
4. この上にさらに同様にしてシリコングリース膜とゴム膜を重ねる。上下のゴム膜の放射状の切れ目が重ならず互い違いになるようにする。
5. キャップについてもベDESTAL と同様の端面処理を施す。

モールドとメンブレンのセット

1. ベDESTAL にメンブレンを装着し、ゴムバンドで固定する。
2. 2 つ割れモールドをセットし、止め金具でベDESTAL に固定する。
3. メンブレンの上端を外側モールドの外側に折り返し、O リングで仮止めする。
4. メンブレンとモールドの間に $-10 \sim -30 \text{ kPa}$ の負圧をかけ、メンブレンをモールドに密着させる。

乾燥堆積法による供試体の作成 (最も緩い状態の供試体を作る場合)

1. モールドの中心に最大間隙比試験 (土質工学会基準) に用いるのと同じ紙製ロート (図 3.4) を立て、所期の乾燥重量よりも若干多い乾燥砂を投入する。
2. ロートをまっすぐ静かに上方へ引き抜き、砂をモールド内に非常に緩く堆積させる。
3. モールドの上端面より上に盛り上がった砂を定規ですり切るようにして取り除き、供試体の上端面が平らでモールドの上端面と同じ高さになるように仕上げる。

乾燥堆積法による供試体の作成 (密度の調整を行う場合)

1. 供試体の高さが10cmの場合は4層、供試体の高さが12cmの場合は5層に分けて供試体を作成する。そのために、所定の全試料乾燥重量の4分の1または5分の1の重量の乾燥砂をはかりとる。気乾状態の砂の含水量は無視できるほどに小さいことが確認されているのでそのまま用いる。
2. モールドの中心に最大間隙比試験に用いるものと同じ紙製ロート (図3.4) を立て、その中へ1層分の砂を投入する。
3. ロートをまっすぐ静かに上方へ引き抜き、砂をモールド内に非常に緩く堆積させる。
4. 砂の表面を刷毛で丁寧に平らにならした後、スパナを用いて外モールドを四方から打撃して砂を締め固める。
5. 以上を4回または5回繰り返して所定の分量の砂をすべてモールド内に堆積させる。各層ごとの締め固めの際の打撃回数と強度は各層とも同一とし、最終層を投入したときの高さが所定の供試体高さよりも1~2mm高くなるようにする。
6. すべての砂をモールド内に投入し終わったならば、さらに適宜打撃によって締め固めを行いながら供試体の上面を定規を用いて砂の表面を平らに整形し、モールドの上端面と同じ高さになるように仕上げる。

水中堆積法による供試体の作成

1. ベDESTALに接続されている背圧配管から脱気水を供給して、モールド内を半分ほど脱気水で満たす。
2. モールドの中心に最大間隙比試験に用いるものと同じ寸法のプラスチック製ロートを立て、所期の乾燥重量よりも若干多い乾燥砂を投入する。その後ロート内に蒸留水を入れて、砂をほぼ飽和した状態とする。
3. ロート内に蒸留水を供給しながらロートをまっすぐ静かに上方へ引き抜き、砂をモールド内に緩く堆積させる。このとき、ロートの先端が常に水中に没しているようにする。
4. モールドの上端面より上に盛り上がった砂をへらなどで取り除き、供試体の上端面が平らでモールドの上端面と同じ高さになるように仕上げる。

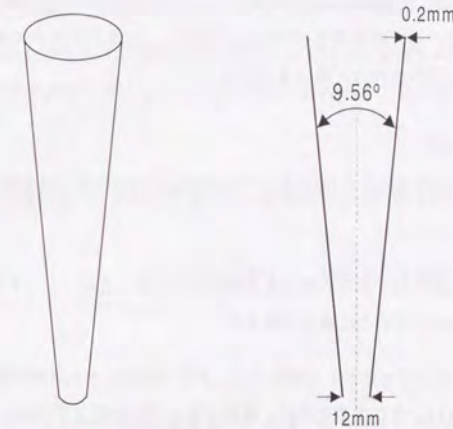


図 3.4 三軸供試体作成用紙ロート

5. 密度の調整を行うときには4ないし5層に分けて上記の方法により砂を緩く水中堆積させ、乾燥堆積法の場合と同様に各層ごとに締め固めを行うものとする。

供試体寸法の測定

1. 供試体の上端にキャップを設置し、メンブレン上端をOリングでキャップ側面に固定する。モールドとメンブレンの間にかけていた負圧を解除する。
2. ベDESTALとキャップに供試体排水経路用チューブを接続し、このチューブを通して供試体に-10 kPaの背圧をかけて自立させる。このとき、キャップの直径がモールドの内径よりも大きいために供試体高さは拘束されており供試体の変形が等方的にならないが、やむを得ないものとした。
3. モールドを取り外した後に、背圧を-20 kPaとする。
4. 供試体に負圧を供給している排水経路を閉じ、背圧に変化が起らないことを確かめる。もし、メンブレンに穴があるとそこから空気が流れ込み、負圧がだんだんぬけていく。

5. π テープを用いて外側メンブレン3カ所の直径を測定して平均し、これからメンブレン厚を差し引いて供試体の初期直径とする。また、ノギスを用いてセル台座からキャップ上端までの3カ所の高さを測定して平均し、これからベDESTALとキャップの高さを差し引いて供試体の初期高さとする。

セルのセッティング

1. セル三脚を供試体・キャップに当たらないように注意しながら静かにセル台座にセットする。
2. ロードセル用のひずみ計のゼロ点と増幅率を確認した後、ロッドのクランプをゆるめ、ロッドをキャップの上に静かに載せる。
3. ロッドとキャップをボルトで固定する。ボルト締めにとまってキャップが上方へ引き上げられないようにするために、最初はロッドを固定せずにゆっくりとボルトをねじ込む。ボルト締めのトルクが大きくなるとねじり力が供試体に作用する恐れがあるので、ロッドをクランプで固定してボルト締めを行う。
4. メンブレンの上部にゴムバンドを巻いてキャップへの固定を確実にした後、外セルと封印環をかぶせボルトで固定する。
5. 軸変位計をセットし、軸変位計とセル圧計用のひずみ計のゼロ点と増幅率を確認する。
6. セルに脱気水を供給する。供試体が完全に水没したら水の供給を止め、セル上部に空気を残す。

供試体の飽和

1. ロッドのクランプを解除して、供試体に作用する鉛直応力が0となるように軸力を調整する。
2. 供試体にかけていた負圧を少しづつ解除し、背圧を0とする。その際、有効拘束圧が一定に保たれるようにセル圧・鉛直圧を等方的に20 kPaまで加える。
3. 供試体通水時の飽和度をあげるために供試体下部から二酸化炭素を供給する。供給速度は1秒間に気泡数個程度とする。また、供給時間は1時間とする。

4. 供試体への二酸化炭素の供給を止め、脱気水タンクから供試体下部へ脱気した蒸留水を供給する。供給水圧は水頭差で50cm以下とする。
5. 蒸留水が供試体を満たし、供試体上部に通じる排水管から蒸留水が流出してくるのを確認し、飽和度をあげるためにさらに30分程度蒸留水を供試体下部から上部へ通水する。
6. 供試体への蒸留水の供給を止め供試体排水管(背圧管)と体積変化測定用ビュレットを接続する。
7. 供試体高さ変化とビュレットの初期値を記録する。供試体の直径が変化していないことを仮定して供試体の間隙比を計算する。

飽和度の確認と背圧の載荷

1. 排水バルブを閉じて供試体を非排水状態とした後、等方拘束圧(全応力)を20 kPaから50 kPa上昇させて70 kPaとする。その時の背圧の上昇量から間隙水圧係数 B 値を計算する。
2. 供試体体積変化測定用ビュレット内の圧力を0 kPaから50 kPa上昇させて50 kPaとした後、排水バルブを開けて供試体とビュレットを接続する。等方有効拘束圧は20 kPaに保たれる。
3. B 値が0.96以下の場合はそのまま10~20分放置し、背圧によって供試体内の気泡が間隙水に溶け込んで飽和度が上昇するのを待つ。
4. 再び排水バルブを閉じて供試体を非排水状態とした後、等方拘束圧(全応力)を70 kPaから50 kPa上昇させて120 kPaとする。その時の背圧の上昇量から最終的な間隙水圧係数 B 値を計算する。 B 値が0.96以上のものをせん断試験に使用する。
5. 供試体体積変化測定用ビュレット内の圧力を50 kPaから50 kPa上昇させて100 kPaとした後、排水バルブを開けて供試体とビュレットを接続する。以上の作業により、等方拘束圧は120 kPa、背圧は100 kPaとなり、有効拘束圧は20 kPaに保たれる。
6. 供試体高さ変化、供試体体積変化を記録し、背圧の載荷によって生じた供試体の寸法と間隙比の変化を計算する。

圧密過程

1. セル圧・軸力を制御して、有効等方拘束圧を 20 kPa から所定の値まで上昇させる。異方圧密を行う場合にはまず側圧が所定の値となるまで等方圧を上昇させ、その後直ちに鉛直圧を所定の値となるまで上昇させる。
2. 約1時間放置し、完全に圧密を終了させる。
3. 供試体高さ変化、供試体体積変化を記録し、圧密過程で生じた供試体の寸法と間隙比の変化を計算する。

せん断過程

1. 供試体排水バルブを閉じて非排水状態とした後、定速で軸圧縮または伸張変位を加える。せん断速度は、 $de_1 = \pm 1\%/min$ とする。
2. せん断中には、軸力 $F_v(N)$ 、間隙水圧 $u(kPa)$ 、セル圧 $p(kPa)$ 、供試体高さ変化 ΔH の合計4つの量を $1 H_z$ でサンプリングして記録する。
3. 軸変位が試験器の限界に達した時、軸力がロードセルの荷重限界に達したとき、あるいは、供試体の形状が著しく損なわれた時に、せん断を終了する。

間隙比の測定

1. せん断が終了したら、体積変化測定用ビュレットの読みを確認してから排水バルブを開ける。このとき、ロードセルの容量を超えないように注意する。
2. 供試体が液化化しないように注意しながらセル圧と背圧を減少させ、それぞれ 20 kPa 、 0 kPa とする。
3. ロッドを載荷軸から分離してセルを載荷台手前に引き出してから、手動でロッドに繰り返し荷重を加え、供試体から水を排水する。供試体が硬くなってきたならばセル圧を 10 kPa としてさらに繰返しせん断を加え、極力多くの間隙水を排水する。
4. 極限まで排水を行ったならば、ロッドをクランプで固定した後セル圧を 100 kPa 程度まで増加させてさらに排水した後、排水バルブを閉じて非排水条件でセル圧を 0 とする。供試体には負圧が発生し自立する。せん断後の排水量を記録する。

3.3 三軸せん断試験の手順 (不攪乱供試体)

5. セル水を排水した後セルを分解して供試体を取り出して湿潤質量を測定した後、炉乾燥する。また、メンブレンやポーラスストーンなどに付着している残りの試料もすべて取り出し炉乾燥する。
6. 24時間後に炉乾燥質量を測定し、供試体の含水比を求める。含水比と全炉乾燥質量から間隙比を計算する。

3.3 三軸せん断試験の手順 (不攪乱供試体)

1. 攪乱供試体の場合と同様の端面処理をベDESTALおよびキャップに施す。
2. 不攪乱試料は、直径が所定の供試体直径よりも 1 cm 程度大きく高さが所定の供試体高さよりも 2 cm 程度高い金属円筒容器に収納されて凍結保存されている。これを短時間高温の乾燥炉に入れるなどして試料の外周部の氷結をわずかにとかし、金属円筒容器から凍結不攪乱試料を抜き取る。
3. 凍結不攪乱試料をトリマーの上に立て、直ナイフで周面を削り取り、所定の直径の円柱を整形する。このとき、トリマーに接する試料の上下端面が溶解しないように、厚紙などの断熱材を挟む必要がある。
4. 円柱形凍結試料をマイターボックスに入れ、直ナイフで両端を所定の高さに削り取る。このとき、マイターボックスに接する試料の周面が溶解しないように、紙などの断熱材を供試体に巻いておく必要がある。
5. 成形の終了した凍結試料をマイターボックスから取り出し、メンブレンジャケットを用いてメンブレンをかぶせる。特に供試体の端面が変形しないように、供試体と同じ直径を持つポーラスストーンなどで保護する必要がある。メンブレンの上下端面は供試体の外側へ折り返しておく。
6. 供試体をベDESTALの上に立て、キャップを正しく供試体の上にセットした上でメンブレンの上下端面をベDESTALおよびキャップの側面にシールする。
7. π テープを用いて外側メンブレン3カ所の直径を測定して平均し、これからメンブレン厚を差し引いて供試体の初期直径とする。また、マイターボックスの高さを供試体の初期高さとする。

8. セルのセッティング以降の手順は攪乱供試体の場合と同様である。ただし、供試体に負圧は作用させず、セル圧を 20kPa まで上昇させた後で数時間から一晩放置して供試体を完全に溶解させる。

3.4 三軸供試体の応力とひずみ

鉛直応力 σ_z

供試体の水平断面積を A_s とする。軸力・セル圧力などの諸力の釣り合いを考えることにより、供試体に作用する平均鉛直応力は

$$\sigma_z = (F_v + W_c + \frac{1}{2} W_s - (A_s - A_r) p_c) / A_s \quad (3.1)$$

となる。ここに、 F_v は圧力室の外にあるロードセルで計測される軸力、 W_c はロードセルから供試体上端までの間にあるロッドやキャップの重量、 W_s は供試体の水中重量、 A_r は外セル圧を受けるロッドの断面積、 p_c はセル圧である。高圧三軸試験装置では軸力の測定は三軸圧力室外で行うため、ロードセルと供試体の中間にある軸受けの摩擦を補正した。

低圧三軸試験装置では軸力を測定するロードセルが三軸圧力室内に設置されている。このロードセルの読みを F_l とする。このとき、「ロードセルに作用する圧力の等方的な変化に対しては、ロードセルの読みは変動しない」と仮定する。また、ロードセルに作用する応力が等方状態であるときにロードセルの読みをゼロセットするものとする。するとロードセルの読みは

$$F_l = F_v - A_r p_c \quad (3.2)$$

となる。式 3.2 を式 3.1 に代入して

$$\sigma_z = (F_l + W_c + \frac{1}{2} W_s) / A_s \quad (3.3)$$

を得る。実際には、ロードセルに作用する圧力が等方的に変化すると、ロードセルそのもの(ひずみゲージが張ってある金属弾性体)も等方的に圧縮されるためにロードセルの読みはわずかに変化する。そこで、あらかじめロードセルの外気圧と出力の間の関係を調べておき、鉛直応力の計算時にそれを補正する必要がある。

側方拘束圧 σ_r ・間隙水圧 u

側方拘束圧 σ_r および間隙水圧 u は、水頭差が生じないように同じ高さに設置された 2 つのひずみゲージ式圧力変換器を用いて、それぞれ、セル水圧と間隙水圧を直接計測する。

メンブレン張力の補正

前記の方法によって計算された供試体の鉛直応力・側方応力成分に対し、メンブレン張力の補正を行う。メンブレンはポアソン比 $\nu = 0.5$ の線形弾性体であると仮定する。また、メンブレンは圧縮方向には座屈するために引張り方向の 1 次元の変形問題になると仮定して、応力の補正量はそれぞれ次のようになる。

$$\Delta\sigma_z = -4E_m t_m \varepsilon_{zm} / d_s \quad (3.4)$$

$$\Delta\sigma_r = -2E_m t_m \varepsilon_{\theta m} / d_s \quad (3.5)$$

ここに、 ε_{zm} はメンブレンの平均軸方向ひずみ、 $\varepsilon_{\theta m}$ はメンブレンの平均円周方向ひずみ、 d_s は供試体の直径である。また、 t_m はメンブレンの厚さ、 E_m はメンブレンのヤング率である。メンブレンのヤング率は、吉嶺 (1992) を参照して $E_m = 1400 \text{ kPa}$ とした。ただし、メンブレンの張力のみを補正し、メンブレンに圧縮力は発生しないものとする。すなわち、つねに $\Delta\sigma_z < 0$ かつ $\Delta\sigma_r < 0$ とする。

3.5 中空ねじりせん断装置

3.5.1 鉛直荷重・ねじり荷重・載荷装置

鉛直荷重およびねじり荷重の載荷には、Tatsuoka (1995)、佐藤ら (1992) が開発した電動モーター式微少繰返し載荷装置と同様の装置を用いている。この載荷装置の動力源であるスピードコントロールモーターの回転は、数個のギアによって減速された後に二つの常時逆回転するかさ歯車に伝えられる。このかさ歯車を薄型乾式単板電磁クラッチを用いて瞬時に回転軸に接続・解放することにより、回転軸の回転・停止・逆回転が可能である。回転軸の回転はバックラッシュの非常に小さい精密ボールネジによって直線運動に変換され、載荷軸に伝えられる。

鉛直荷重およびねじり荷重を自動制御するときには、パーソナルコンピュータ (NEC, PC9801 VM, V30, 10MHz) に組み込まれた DA コンバーターカードからの電圧信号によって回転用・停止用・逆転用の 3 つの電磁クラッチを接続・解放する。載荷あるいは除荷動作時から停止への切り替えの際には若干の応力の戻り (ループ) が現れる。しかし、動作切り替え時のバックラッシュは非常に小さく、載荷軸変位にして $1 \mu\text{m}$ 以下である。これはひずみで 0.001% のオーダーであり、弾性変形の範囲内であるといえる。載荷速度の調整は手動による連続的なモーター回転数の変更および減速ギアの抜き差しによって行う。

鉛直荷重載荷装置

試験装置の最上部に設置された電動モーター式鉛直荷重載荷軸の運動は回転切りジョイント・ボールスプライン・トルクロードセル・カップリングジョイントを介してセルの軸力ロッドへ伝達され、さらにトルクヘッド・試料キャップを通して供試体上部に載荷される。セルの軸力ロッドはストロークベアリングによってセル本体に保持されており、摩擦による軸力損失を抑えている。

ねじり荷重載荷装置

試験装置の上部右側に水平に設置された電動モーター式ねじり荷重載荷軸の運動は回転切りジョイントを通して揺動棒へ伝達され、揺動棒に装着されているワイヤー・ワイヤーブーリによってねじり力に変換される。ワイヤーブーリのねじり力は、ボールスプライン・トルクロードセル・カップリングジョイントを介してセルの軸力ロッドへ伝達され、さらにトルクヘッド・試料キャップを通して供試体上部に載荷される。ボールスプラインは軸の上下動を許してねじり力のみを軸に伝達するものである。また、セルの軸力ロッドはストロークベアリングによってセル本体に保持されており、摩擦によるねじり力損失を抑えている。

3.5.2 外セル圧・内セル圧・背圧載荷装置

外セル圧・内セル圧・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。コンプレッサーは空圧タンクの圧力が700kPa以下になると運転を開始し、1000kPaに達すると運転を停止するように設定されている。コンプレッサーで発生した変動空気圧は一次圧調圧用レギュレータで一定圧力600kPaに調整され、各載荷装置に供給される。載荷装置の圧力配管図を図3.5に示した。また、セルの概略図を図3.6に示した。

外セル圧載荷用空圧レギュレータ(正負バイアスリレー)によって調整された空気圧は直接外セル内上部に導入され、外セル内で水圧に変換された後供試体の外側面に載荷される。一方、内セル圧載荷用空圧レギュレータ(正負バイアスリレー)によって調整された空気圧は内セル体積変化測定用ピュレット上部に導入され、ピュレット内で水圧に変換される。ピュレットの水圧はパイプを通して内セル水に伝達され、供試体の内側面に載荷される。同様に、背圧載荷用空圧レギュレータによって調整された空気圧は供試体体積変化測定用ピュレット上部に導入され、ピュレット内で水圧に変換される。ピュレットの水圧はパイプを通してベDESTALと試料キャップの排水水路に伝達され、ポーラスストーンを通して供試体に載荷される。

3.5 中空ねじりせん断装置

正負バイアスリレーには電圧-空圧変換器(EPトランスデューサー)が接続されており、パーソナルコンピュータに組み込まれたDAコンバーターカードからの電圧信号によって外セル圧・内セル圧の自動制御が可能である。デジタル信号1bitによる空圧の増分は約0.2kPaである。電圧-空圧変換器からの出力空気圧は正負バイアスリレーによって手動で設定された空気圧に加算されて各載荷装置に供給される。電圧-空圧変換器のベース圧(入力電圧ゼロ時の出力空気圧)のために載荷圧ゼロは自動制御できない。そこで、ベース圧をバイアスリレーの負バイアスでキャンセルした上で、通常セル圧0~20kPaを手動で制御し、それ以上の圧力領域は自動制御を行う。

3.5.3 測定装置

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た後、ADコンバーターカードによってパーソナルコンピュータに取り込まれ、表示されたり記録されたりする。観測値ディスプレイ表示のサンプリング周波数は条件によって多少異なるが10Hz程度である。記録周波数は0.5Hzに固定されている。ADコンバーターの入力レンジは20V(±10V)、分解能は12bitである。ただし、差圧計を用いた測定では信号電圧レンジが0~10Vであるために、実質的な分解能は11bitとなる。観測項目は、鉛直軸荷重、ねじり荷重、外セル圧、内セル圧、背圧(間隙水圧)、軸変位、ねじり角、供試体体積変化、内セル体積変化の9チャンネルである。

垂直軸荷重・ねじり荷重測定装置

垂直軸荷重とねじり荷重は、三軸室外のボールスプラインと三軸室軸受けの間に位置するロード・トルクセルおよび動ひずみ計によって電圧に変換される。ロード・トルクセルの定格容量はそれぞれ2000N、2000N・cmである。観測レンジを定格容量全体としたときには分解能はそれぞれ約0.5N、0.5N・cmである。

外セル圧・内セル圧・背圧測定装置

外セルと背圧の間、および外セルと内セルの間に静電容量型の差圧計を接続し、それぞれの差圧を電圧に変換する。別途、外セル圧力をひずみゲージ式圧力計と動ひずみ計によって電圧に変換して観測し、これらの観測値から外セル圧・内セル圧・背圧を計算して表示したり記録したりする。内セルの有効圧力を直接測定しないのは、背圧系統の配管や測定装置を極力少なくして供試体体積変化の測定・制御の誤差を小さくするためである。水圧の変動

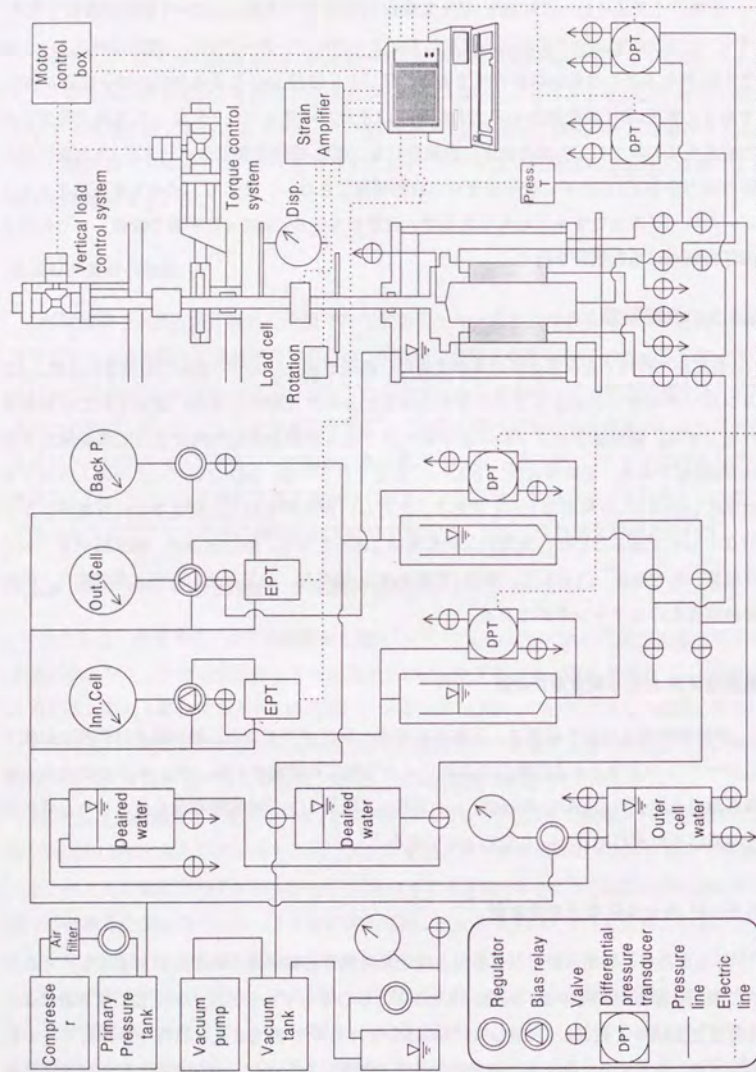


図 3.5 中空ねじりせん断試験装置の配管・配線

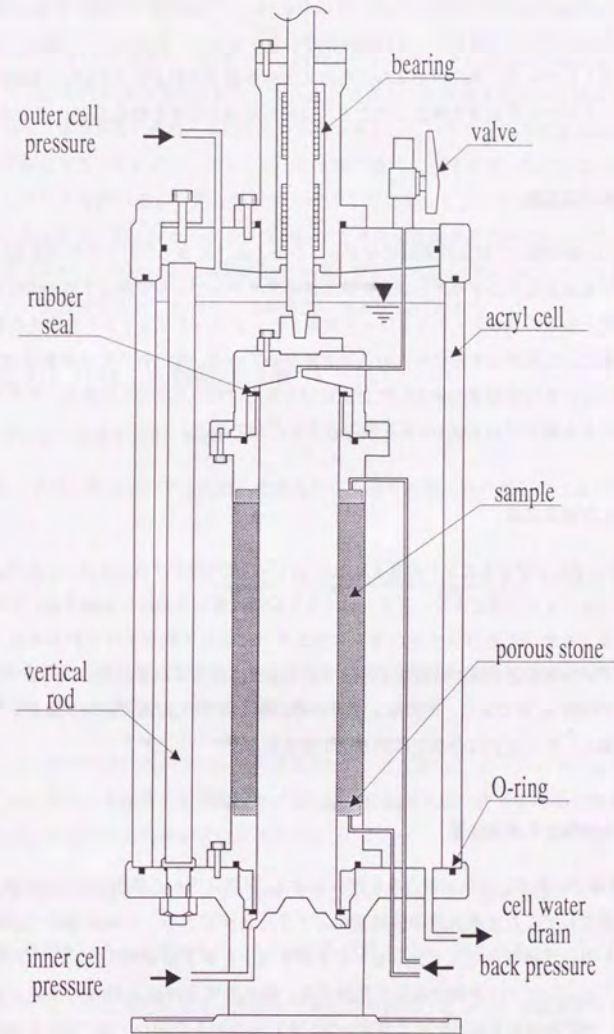


図 3.6 中空ねじりせん断試験装置圧力室

による差圧計圧力室の体積変化は十分に小さいことが確かめられている (Tatsuoka, 1981)。背圧系統の配管には銅管もしくは肉厚細径のシンプレックスチューブを用いて体積誤差を極力小さくしている。差圧計および水圧計の定格容量はそれぞれ 320kPa 、 1000kPa であり、観測レンジを定格容量全体としたときには分解能はそれぞれ約 0.3kPa 、 0.25kPa である。

軸変位測定装置

セル載荷軸の三軸室外回転切りジョイントの直上に取り付けられた垂直変位アタッチメントの垂直変位をひずみゲージ式変換器付きダイヤルゲージで測定する。回転切りジョイント・ボールスプライン・トルクロードセル・カップリングジョイントを含めた載荷軸の圧縮と伸張による誤差は十分に小さいことを確かめている。変位計の定格容量は 20mm であり、観測レンジを定格容量全体としたときには分解能は約 0.005mm である。ダイヤルゲージの目視による観測では 0.001mm を読みとることができる。

ねじり角測定装置

カップリングジョイントの直下にとりつけられた円盤型アタッチメントの側面にセットしたポテンシオメータにより、アタッチメントの回転変位を電圧に変換する。ポテンシオメータはワイヤーとカウンターバランスウェイトによって釣り下げられており、垂直変位アタッチメントの上下動に抵抗なく追従できるようになっている。ポテンシオメータの有効測定角は約 90° であり、供試体上端面の回転角にして約 20° である。観測レンジを定格容量全体としたときには分解能は約 0.005° である。

供試体体積変化測定装置

実験では飽和した供試体のみを用いるので、供試体内から排出される水の体積をビュレットで測定してこれを供試体の体積変化とすることができる。本試験装置では静電容量型差圧計を用いて体積測定用ビュレットの上部空気圧と最下部の水圧の差圧を測定することにより、ビュレットの水頭を電圧に変換する。差圧計は定格容量 $1300\text{mmH}_2\text{O}$ のものを用いるが、測定精度を上げるために測定レンジをビュレット水頭レンジと同一に設定する。ビュレットの容量は 25cm^3 であり、観測レンジを容量全体としたときには分解能は約 0.006cm^3 である。

内セル体積変化測定装置

実験では内セルは水で飽和しているので、内セル内から排出される水の体積をビュレットで測定してこれを内セルの体積変化とすることができる。供試体体積変化の測定の場合と同様に、静電容量型差圧計を用いて内セル体積測定用ビュレットの上部空気圧と最下部の水圧の差圧を測定することにより、ビュレットの水頭を電圧に変換する。差圧計は定格容量 $1300\text{mmH}_2\text{O}$ のものを用いるが、測定精度を上げるために測定レンジをビュレット水頭レンジと同一に設定する。ビュレットの容量は 50cm^3 であるが供試体高さが 20cm のときは容量が若干不足であり、せん断による体積変化を予測して初期水面レベルを設定する必要がある。観測レンジを容量全体としたときには分解能は約 0.01cm^3 である。

3.6 中空ねじりせん断試験の手順

モールドとメンブレンのセット

1. 内側メンブレンをベDESTALの内孔に挿入し、下端を外側へ折り返してゴムバンドで固定する。
2. 内側メンブレンを装着したベDESTALをセル台座に置き、固定ボルトでゆるく仮止める。
3. 4つ割れ内側モールドをメンブレンの中に立て、止め金具でセル台座にセットする。その後ベDESTALの固定ボルトを強く締める。
4. メンブレン厚を含めた内側モールドの直径を π テープを用いて上・中・下の3カ所測定し、その平均を供試体の初期内径とする。後で供試体を自立させるために負圧を作用させるときの供試体内径の変化は無視する。
5. ベDESTALの外側面に外側メンブレンを装着し、ゴムバンドで固定する。
6. 2つ割れ外側モールドをセットし、止め金具でベDESTALに固定する。
7. 外側メンブレンの上端を外側モールドの外側に折り返し、Oリングで仮止める。
8. 外側メンブレンと外側モールドの間に $-10 \sim -30\text{kPa}$ の負圧をかけ、外側メンブレンを外側モールドに密着させる。

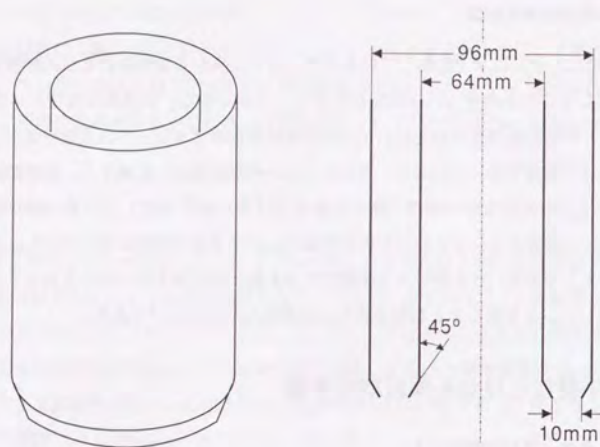


図 3.7 中空供試体作成用紙ロート

供試体の作成 (最も緩い状態の供試体を作る場合)

1. モールド内に中空円筒型の紙製ロート (図 3.7) を挿入し、所期の乾燥重量よりも若干多い乾燥砂を投入する。
2. ロートをまっすぐ静かに上方へ引き抜き、砂をモールド内に非常に緩く堆積させる。
3. 上端面の砂をスプーンで取り除きながら、供試体の上面をならすための定規を用いて砂の表面を整形し、供試体上端面が完全に平らで所定の高さになるように仕上げる。

供試体の作成 (密度の調整を行う場合)

1. 供試体の高さが 10cm の場合は 4 層、供試体の高さが 20cm の場合は 8 層に分けて供試体を作成する。そのために、所定の全試料乾燥重量の 4 分の 1 または 8 分の 1 の重量の乾燥砂をはかりとる。気乾状態の砂の含水量は無視できるほどに小さいことが確認されているのでそのまま用いる。

3.6 中空ねじりせん断試験の手順

2. モールド内に中空円筒型の紙製ロート (図 3.7) を挿入し、その中へ 1 層分の砂を均等に投入する。
3. ロートを静かに上方へ引き抜き、砂をモールド内に非常に緩く堆積させる。
4. 砂の表面を刷毛で丁寧に平らにならした後、スパナを用いて外モールドを四方から打撃して砂を締め固める。
5. 以上を 4 回または 8 回繰り返して所定の分量の砂をすべてモールド内に堆積させる。各層ごとの締め固めの際の打撃回数と強度は各層とも同一とし、最終層を投入したときの高さが所定の供試体高さよりも 1~2mm 高くなるようにする。
6. すべての砂をモールド内に投入し終わったならば、さらに適宜打撃によって締め固めを行いながら供試体の上面をならすための定規を用いて砂の表面を整形し、供試体上端面が完全に平らで所定の高さになるように仕上げる。

供試体寸法の測定

1. 供試体の上端にキャップを設置する。
2. 内メンブレン上端をキャップ上に折り返す。また、外メンブレン上端の仮止めをはずし、Oリングでキャップ側面に固定する。その後、外側モールドとメンブレンの間にかけていた負圧を解除する。
3. ベDESTALとキャップに供試体排水経路用チューブを接続し、このチューブを通して供試体に -20 kPa の背圧をかけて自立させる。
4. キャップ上に折り返した内メンブレンをゴムバンドで固定する。また、外メンブレンの上部にもゴムバンドを巻いてキャップへの固定を確実にする。
5. 内モールドと外モールドを取り外す。
6. 供試体に負圧を供給している排水経路を閉じ、背圧に変化が起こらないことを確かめる。もし、メンブレンに穴があるとそこから空気が流れ込み、負圧がだんだんぬけていく。
7. π テープを用いて外側メンブレン 3 カ所の直径を測定して平均し、これからメンブレン厚を差し引いて供試体の初期外径とする。また、ノギスを用いてセル台座からキャッ

ブ上端までの3カ所の高さを測定して平均し、これからベDESTALとキャップの高さを差し引いて供試体の初期高さとする。

セルのセッティング

1. セル上部を、供試体・キャップに当たらないように注意しながら静かにセル台座にセットする。
2. ロッドのクランプをゆるめ、ロッドとトルクヘッドをキャップの上に載せる。ロッド、トルクヘッド、キャップの重量のために鉛直応力が増加してしまうがやむを得ない。このときの鉛直有効応力は水平有効応力の約2倍(約40 kPa)である。
3. トルクヘッドとキャップをボルトで固定する。ボルト締めにもなつてキャップが上方へ引き上げられないようにするために、最初はロッドを固定せずにゆっくりとボルトをねじ込む。ボルト締めのトルクが大きくなるとねじり力が供試体に作用する恐れがあるので、ロッドをクランプで固定してボルト締めを行う。
4. 外セルと封印環をかぶせボルトで固定する。
5. 通水後の内セルの飽和を確保するために、二酸化炭素を内セルに供給する。その間に、セルを載荷位置まで押し込み固定する。
6. トルク・ロードセル用のひずみ計のゼロ点と増幅率を確認した後、載荷軸とロッドを連結し、ダイヤルゲージのセット・外セル圧供給管の接続を行う。
7. 二酸化炭素の供給を止め、内セルと外セルに同時に水位を等しく保ちながら脱気水を供給する。内セルについては、完全に水で満たされ、上部の内セル圧供給管から水が出るまで供給を続ける。外セルは、供試体が完全に水没したら水の供給を止め、セル上部に空気を残す。
8. 内セル圧力測定用、外セル圧力測定用、および内セル体積変化測定用のパイプ内の空気抜きを行い、その後内セル体積変化測定用ビュレットの水位を所定の高さに調整する。
9. 内セル体積変化測定用差圧計のゼロ設定を行った後、内セルと内セル体積変化測定用ビュレットを接続する。

供試体の飽和

1. ロッドのクランプを解除して、供試体に作用するねじりせん断力と鉛直応力が0となるようにトルクと軸力を調整する。
2. 供試体にかけていた負圧を少しずつ解除し、背圧を0とする。その際、有効拘束圧が一定に保たれるように内セル圧・外セル圧・鉛直圧を等方的に20 kPaまで加える。
3. 供試体通水時の飽和度をあげるために供試体に二酸化炭素を供給する。供給速度は1秒間に気泡数個程度とする。また、供給時間は1時間とする。
4. 供試体への二酸化炭素の供給を止め、脱気水タンクから供試体下部へ脱気した蒸留水を供給する。供給水圧は水頭差で50cm以下とする。
5. 蒸留水が供試体を満たし、供試体上部に通じる排水管から蒸留水が流出してくるのを確認し、飽和度をあげるためにさらに30分程度蒸留水を供試体下部から上部へ通水する。
6. 供試体への蒸留水の供給を止める。供試体体積変化測定用のパイプ内の空気抜きを行い、その後供試体体積変化測定用ビュレットの水位を所定の高さに調整する。
7. 供試体排水管(背圧管)と体積変化測定用ビュレットを接続する。
8. 供試体高さ変化、内セル体積変化を記録し、供試体体積変化測定用差圧計のゼロ設定を行う。供試体の半径方向の厚さが変化しないことを仮定して供試体の通水による寸法と間隙比の変化を記録する。

飽和度の確認と背圧の載荷

1. 排水バルブを閉じて供試体を非排水状態とした後、等方拘束圧(全応力)を20 kPaから50 kPa上昇させて70 kPaとする。その時の背圧の上昇量から間隙水圧係数 B 値を計算する。
2. 供試体体積変化測定用ビュレット内の圧力を0 kPaから50 kPa上昇させて50 kPaとした後、排水バルブを開けて供試体とビュレットを接続する。等方有効拘束圧は20 kPaに保たれる。
3. B 値が0.96以下の場合にはそのまま10~20分放置し、背圧によって供試体内の気泡が間隙水に溶け込んで飽和度が上昇するのを待つ。

4. 再び排水バルブを閉じて供試体を非排水状態とした後、等方拘束圧(全応力)を70 kPa から50 kPa 上昇させて120 kPa とする。その時の背圧の上昇量から最終的な間隙水圧係数 B 値を計算する。 B 値が0.96以上のもののみをせん断試験に使用する。
5. 供試体体積変化測定用ビュレット内の圧力を50 kPa から50 kPa 上昇させて100 kPa とした後、排水バルブを開けて供試体とビュレットを接続する。以上の作業により、等方拘束圧は120 kPa、背圧は100 kPa となり、有効拘束圧は20 kPa に保たれる。
6. 供試体高さ変化、供試体体積変化、内セル体積変化を記録し、背圧の荷重によって生じた供試体の寸法と間隙比の変化を計算する。

圧密過程

1. 内セル圧・外セル圧・軸力を制御して、有効等方拘束圧を20 kPa から所定の値まで上昇させる。拘束圧の上昇スピードは1秒間に全応力の0.5%とする。有効拘束圧を100 kPa まで上昇させるのに要する時間は約100秒である。異方圧密を行う場合にはまず側圧が所定の値となるまで等方圧を上昇させ、その後直ちに鉛直圧を所定の値となるまで上昇させる。
2. 約1時間放置し、完全に圧密を終了させる。
3. 供試体高さ変化、供試体体積変化、内セル体積変化を記録し、圧密過程で生じた供試体の寸法と間隙比の変化を計算する。

せん断過程

1. ロッドに回転角測定用のポテンシオメーターを設置する。
2. 単純せん断試験を行う場合には、供試体排水バルブ、内セル排水バルブを閉じてそれぞれの体積変化を拘束したうえで、鉛直荷重軸の上下動を固定し、供試体に一定速度のねじり変形を加える。すなわち、供試体の内径、外径、高さは全く変化せずにねじり変形のみを生じることになる。メンブレンペネトレーションによる内径、外径の変化は無視する。せん断速度は、およそ $d\gamma_{z\theta}/dt = 0.1\%/min$ とする。
3. 主応力方向 α と中間主応力係数 b を固定したせん断試験の場合は、非排水条件のもとで目的の α と b を保持するように内圧と鉛直圧を制御しながら定速のねじりせん断を加える。外圧は一定に保たれる。せん断速度は、およそ $d\gamma_{z\theta}/dt = 0.1\%/min$ と

する。ただし、 $b = 0$ または $b = 1$ の場合には内圧とトルク ($\sigma_{z\theta} = 0$) を制御しながら定速の鉛直変位を加えるものとし、せん断速度は、 $d\epsilon_z/dt = \pm 0.1\%/min$ とする。

4. せん断中には、トルク $T(N \cdot cm)$ 、軸力 $F_v(N)$ 、間隙水圧 $u(kPa)$ 、外セル圧 $p_o(kPa)$ 、内セル圧 $p_i(kPa)$ 、供試体上面の回転角 $\Delta\theta$ 、供試体高さ変化 ΔH 、供試体体積変化 ΔV 、内セル体積変化 ΔV_i の合計9つの量を $0.5 H_z$ でサンプリングして記録する。
5. ねじり変位が試験器の限界に達した時、トルクまたは軸力がロードセルの荷重限界に達したとき、あるいは、供試体が完全に液状化してその形状が著しく損なわれた時に、せん断を終了する。

間隙比の測定

1. せん断が終了したら、体積変化測定用ビュレットの読みを確認してから排水バルブを開ける。このとき、トルク-ロードセルの容量を超えないように注意する。
2. トルクをゼロに戻し、内圧と外圧を等しくする。
3. 供試体が液状化しないように注意しながらセル圧と背圧を減少させ、それぞれ50 kPa、0 kPa とする。
4. ロッドを荷重軸から分離してセルを載荷台手前に引き出してから、手動でロッドに繰り返しねじりせん断を加え、供試体から水を排水する。供試体が硬くなってきたならばセル圧を20 kPa としてさらにねじりせん断を加え、極力多くの間隙水を排水する。
5. 極限まで排水を行ったならば、ロッドをクランプで固定した後セル圧を100 kPa 程度まで増加させてさらに排水した後、排水バルブを閉じて非排水条件でセル圧を0 とする。供試体には負圧が発生し自立する。せん断後の排水量を記録する。
6. セル水を排水した後セルを分解して供試体を取り出す。供試体の端部にはポーラスストーンから流れだした水を吸収して含水比が高くなっている可能性があるため、必要に応じて供試体中央部の試料のみを取り出して湿潤質量を測定した後、炉乾燥する。また、残りの試料もすべて取り出し炉乾燥する。
7. 24時間後に炉乾燥質量を測定し、供試体の含水比を求める。含水比と全炉乾燥質量から間隙比を計算する。

3.7 中空供試体の応力とひずみ

中空ねじりせん断実験において所定の応力を供試体に載荷し、また測定値を解析して供試体の応力状態とひずみの大きさを正確に知るためには、円筒中空供試体の外力と応力の関係や測定される変位とひずみの関係を明らかにする必要がある。ここでは、中空供試体の応力とひずみの解析とその測定方法について述べる。

3.7.1 中空供試体の寸法と外力

中空供試体に関する実測値の定義と寸法の計算

中空供試体の成型時に、ノギスやパイプを用いて測定される初期寸法を次のように定義する。

H_0	:	初期高さ
r_{i0}	:	初期内径
r_{o0}	:	初期外径

次に、中空供試体の変形に関する測定値を次のように定義する。これらは、ダイヤルゲージ、ビュレット、ポテンシオメーターを用いて試験中に直接計測される実測値である。

ΔH	:	高さ変位 (軸変位), 圧縮を正とする
ΔV_s	:	供試体体積変化, 圧縮を正とする
ΔV_i	:	内セル体積変化, 体積減少を正とする
$\Delta \theta$:	供試体上端のねじれ角

中空供試体の高さ、内径及び外径は、供試体の形が正しく円筒型に保たれると仮定して、次のように計算される。

$$H = H_0 - \Delta H \quad (3.6)$$

$$r_i = \sqrt{\frac{\pi r_{i0}^2 H_0 - \Delta V_i}{\pi H}} \quad (3.7)$$

$$r_o = \sqrt{\frac{\pi(r_{o0}^2 - r_{i0}^2)H_0 - \Delta V_s}{\pi H} + r_i^2} \quad (3.8)$$

また、中空供試体に作用する外力を次のように定義する。これらは、圧力計、差圧計、ロードセル、トルクセルを用いて試験中に直接計測される実測値である。

p_i	:	内セル圧力
p_o	:	外セル圧力
F_v	:	軸力
T	:	トルク

3.7 中空供試体の応力とひずみ

メンブレン力の補正

中空供試体に作用する外セル圧・内セル圧・軸力・トルクに対し、メンブレン力の補正を行う。メンブレンが厚み方向に平面応力状態にあり、ポアソン比 $\nu = 0.5$ の円筒形の線形弾性体であると仮定すると、外セル圧・内セル圧・軸力・トルクの補正量はそれぞれ次のようになる。

$$p_{om} = -\frac{2}{3} \frac{E_m t_m}{r_o} (\epsilon_{zmo} + 2 \epsilon_{\theta mo}) \quad (3.9)$$

$$p_{im} = +\frac{2}{3} \frac{E_m t_m}{r_i} (\epsilon_{zmi} + 2 \epsilon_{\theta mi}) \quad (3.10)$$

$$F_{vm} = -\frac{4}{3} \pi E_m t_m \{ (2 \epsilon_{zmo} + \epsilon_{\theta mo}) r_o + (2 \epsilon_{zmi} + \epsilon_{\theta mi}) r_i \} \quad (3.11)$$

$$T_m = -\frac{2}{3} \pi E_m t_m (r_i^2 \gamma_{im} + r_o^2 \gamma_{om}) \quad (3.12)$$

ここに、 t_m はメンブレンの厚さ、 E_m はメンブレンのヤング率である。 ϵ_{zmo} 、 ϵ_{zmi} は外側および内側メンブレンの鉛直方向ひずみ、 $\epsilon_{\theta mo}$ 、 $\epsilon_{\theta mi}$ は外側および内側メンブレンの円周方向ひずみ、 γ_{om} 、 γ_{im} は外側および内側メンブレンのねじりせん断ひずみである。ひずみは圧縮を正とする。張力による伸縮がないときの外側および内側メンブレンの高さ、外側および内側メンブレンの半径をそれぞれ H_{mo} 、 H_{mi} 、 r_{mo} 、 r_{mi} とすれば、

$$\epsilon_{zmo} = \frac{H_{mo} - H}{H_{mo}} \quad (3.13)$$

$$\epsilon_{zmi} = \frac{H_{mi} - H}{H_{mi}} \quad (3.14)$$

$$\epsilon_{\theta mo} = \frac{r_{mo} - r_o}{r_{mo}} \quad (3.15)$$

$$\epsilon_{\theta mi} = \frac{r_{mi} - r_i}{r_{mi}} \quad (3.16)$$

$$\gamma_{mo} = \frac{r_o \Delta \theta}{H_{mo}} \quad (3.17)$$

$$\gamma_{mi} = \frac{r_i \Delta \theta}{H_{mi}} \quad (3.18)$$

である。メンブレンのヤング率は、吉嶺 (1992) を参照して $E_m = 1400 \text{ kPa}$ とした。

以後、特に断らない限り、メンブレン力を補正した外力 $p_o + p_{om}$ 、 $p_i + p_{im}$ 、 $F_v + F_{vm}$ 、 $T + T_m$ をそれぞれ p_o 、 p_i 、 F_v 、 T と記すこととする。

中空供試体の応力とひずみの定義

中空供試体に対して、図3.8に示すように円筒座標系を設定する。すると、中空供試体の微小要素に働く応力は

$$\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{zr}, \sigma_{r\theta}, \sigma_{z\theta}$$

となり、また、中空供試体の微小要素に関するひずみは

$$\varepsilon_z, \varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_{zr}, \varepsilon_{r\theta}, \varepsilon_{z\theta}$$

となる。中空供試体の内側面および外側面はメンブレンを介してセル水によって拘束されており、せん断応力は発生しない。したがって、微小要素においても r 面にはせん断力は生じないと仮定される。すなわち、

$$\sigma_{r\theta} = \sigma_{zr} = 0 \quad (3.19)$$

また、中空供試体は円筒形を保ち、微小要素においても r 面に関するせん断ひずみは生じないと仮定される。すなわち、

$$\varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{zr} = 0 \quad (3.20)$$

3.7.2 中空供試体の応力の解析

水平面内の応力 σ_r, σ_θ

円筒座標系における微小要素 $dz \times dr \times d\theta$ (図3.8) に作用する応力の釣り合いを考えると、

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{r \partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{r \partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\sigma_{r\theta}}{r} = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{r \partial \theta} + \frac{\sigma_{rz}}{r} = 0 \quad (3.23)$$

なる釣合方程式が得られる。これに式(3.19)を代入すれば、中空供試体の応力に関する釣合方程式が次のように求められる。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (3.24)$$

この微分方程式を解くためには変数を1つに減らす必要がある。そのための方法は種々あるが(Ampadu, 1991)、ここでは、弾性体の構成関係を用いて、 σ_r, σ_θ の半径方向の分布を仮定

3.7 中空供試体の応力とひずみ

し、 σ_r, σ_θ を r の関数として表すことを考える。等方弾性体の構成関係を中空円筒物体に適用すると、一般に水平応力成分の分布が次の形で表されることが知られている(山口, 1975)。

$$\sigma_r = \frac{A}{r^2} + 2C \quad (3.25)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{A}{r^2} + 2C \quad (3.26)$$

これを境界条件 $\sigma_r|_{r=r_i} = p_i, \sigma_r|_{r=r_o} = p_o$ のもとで定数 A, C に関して解くと

$$\sigma_r = \frac{p_o r_o^2 - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{r_o^2 r_i^2 (p_o - p_i)}{r_o^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (3.27)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_o r_o^2 - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{r_o^2 r_i^2 (p_o - p_i)}{r_o^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} \quad (3.28)$$

を得る。ここで、水平応力の半径方向の平均値を $\bar{\sigma}_r, \bar{\sigma}_\theta$ とすれば、

$$\int_{r_i}^{r_o} \bar{\sigma}_r dr = \bar{\sigma}_r (r_o - r_i) = \int_{r_i}^{r_o} \sigma_r dr \quad (3.29)$$

$$\int_{r_i}^{r_o} \bar{\sigma}_\theta dr = \bar{\sigma}_\theta (r_o - r_i) = \int_{r_i}^{r_o} \sigma_\theta dr \quad (3.30)$$

これに(3.27)(3.28)を代入して整理すると中空供試体の平均水平応力は次のように計算される。

$$\bar{\sigma}_r = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i} \quad (3.31)$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i} \quad (3.32)$$

以後、特に断らない限り、平均水平応力 $\bar{\sigma}_r, \bar{\sigma}_\theta$ をそれぞれ σ_r, σ_θ と記すこととする。

鉛直応力 σ_z

中空供試体の水平断面積を A_s とする。三軸試験器の場合と同様に軸力・セル圧力などの諸力の釣り合いを考えることにより、供試体に作用する平均鉛直応力は

$$\sigma_z = (F_v + W_c + \frac{1}{2} W_s + F_f + \pi(p_o r_o^2 - p_i r_i^2) - A_r p_o) / A_s \quad (3.33)$$

となる。ここに、 F_v は圧力室の外にあるロードセルで計測される軸力、 W_c はロードセルから供試体上端までの間にあるロッドの重量とキャップの水中重量、 W_s は供試体の水中重量、 A_r は外セル圧を受けるロッドの断面積である。ここで用いる外セル圧 p_o と内セル圧 p_i はメンブレン張力を補正していないセル圧である。なお、ロードセルと供試体の中間にある軸受けの摩擦は十分に小さいので無視した。

せん断応力 $\sigma_{z\theta}$

T を供試体上端面全体に作用するトルクとすれば、

$$T = \int_{r_i}^{r_o} \int_0^{2\pi} \sigma_{z\theta} r^2 d\theta dr = 2\pi \int_{r_i}^{r_o} \sigma_{z\theta} r^2 dr \quad (3.34)$$

これを解くためには、 $\sigma_{z\theta}$ の半径方向の分布を仮定する必要がある。

いま、供試体が完全塑性体であると仮定するとせん断応力は半径方向に様な分布となり、

$$\sigma_{z\theta} = \bar{\sigma}_{z\theta} = \text{const.} \quad (3.35)$$

これを式(3.34)に適用すれば、

$$T = 2\pi \bar{\sigma}_{z\theta} \int_{r_i}^{r_o} r^2 dr = \frac{2}{3} \pi \bar{\sigma}_{z\theta} (r_o^3 - r_i^3) \quad (3.36)$$

したがって、平均せん断応力が次のように計算される。

$$\bar{\sigma}_{z\theta} = \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad (3.37)$$

一方、供試体が線形弾性体であると仮定するとせん断応力は半径方向に線形な分布となり、

$$\sigma_{z\theta} = \xi r \quad (3.38)$$

とおける。これを式(3.34)に適用すれば、

$$T = 2\pi \xi \int_{r_i}^{r_o} r^3 dr = \frac{\pi}{2} (r_o^4 - r_i^4) \xi \quad (3.39)$$

$$\xi = \frac{2T}{\pi(r_o^4 - r_i^4)} \quad (3.40)$$

平均せん断応力を平均半径でのせん断応力として

$$\bar{\sigma}_{z\theta} = \xi \frac{r_i + r_o}{2} = \frac{T}{\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \quad (3.41)$$

実際の供試体は、完全塑性体と線形弾性体の中間的な挙動を示すと考えることができるので、最終的には式(3.37)と式(3.41)の単純平均をとり、

$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} + \frac{T}{\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \right\} \quad (3.42)$$

とする。

中空供試体に作用する主応力

式(3.19)より、 σ_r は常に主応力となる。 σ_r は最大主応力、中間主応力、最小主応力のいずれにもなりうるが、中空供試体の応力とひずみの均一性の観点から、本研究では σ_r を常に中間主応力とした。すなわち、中間主応力は r 方向に固定され、最大主応力と最小主応力は $z-\theta$ 面内の直行する2方向であり自由に回転できる。モーアの応力円(図3.9)を参照して、中空供試体の主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ は次のように表される。

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \sigma_{z\theta}^2} \quad (3.43)$$

$$\sigma_2 = \sigma_r \quad (3.44)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \sigma_{z\theta}^2} \quad (3.45)$$

また、最大主応力 σ_1 が鉛直方向からなす角度 α_σ は

$$\tan 2\alpha_\sigma = \frac{2\sigma_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \quad (3.46)$$

である。中間主応力係数 b は、式(3.43)(3.44)(3.45)から直ちに次のように計算される。

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_r - \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \sigma_{z\theta}^2}} + 1 \right) \quad (3.47)$$

3.7.3 中空供試体のひずみの解析

水平ひずみ $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$

中空供試体の半径方向変位を $u(r)$ とする。すると、半径方向の水平ひずみ ε_r が次のように定義される。

$$\varepsilon_r = -\frac{u(r+dr) - u(r)}{dr} = -\frac{du}{dr} \quad (3.48)$$

また、半径 r 、中心角 $d\theta$ の円弧の長さは $rd\theta$ であるので、円周方向の水平ひずみ ε_θ が次のように定義される。

$$\varepsilon_\theta = -\frac{(r+dr)d\theta - rd\theta}{rd\theta} = -\frac{u}{r} \quad (3.49)$$

いま、中空供試体の半径方向変位を $u(r)$ が r に対して線形であると仮定すると、 $u(r)$ は次のように表される。

$$u = \frac{u_o - u_i}{r_o - r_i} r + \frac{u_i r_o - u_o r_i}{r_o - r_i} \quad (3.50)$$

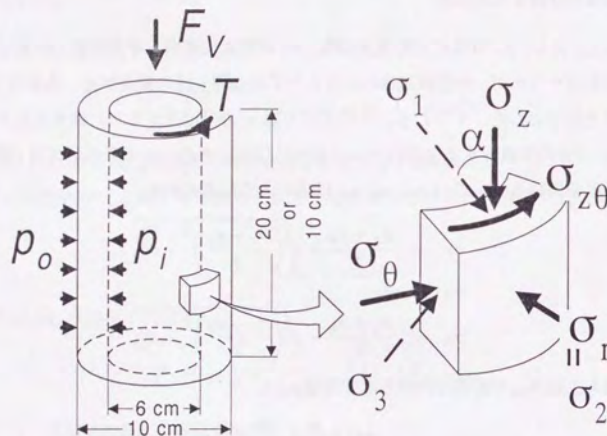


図 3.8 中空供試体の外力と応力

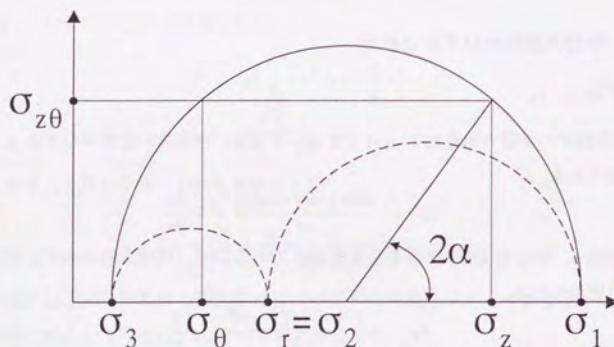


図 3.9 中空供試体のモールの応力円

ただし、 $u_o = r_o - r_{o0}$, $u_i = r_i - r_{i0}$ はそれぞれ供試体の外径・内径の変化量である。式(3.50)を式(3.48)へ代入すると、半径方向の平均水平ひずみ $\bar{\epsilon}_r$ が次のように計算される。

$$\bar{\epsilon}_r = -\frac{u_o - u_i}{r_o - r_i} \quad (3.51)$$

また、円周方向の平均水平ひずみを $\bar{\epsilon}_\theta$ とすれば、

$$\int_{r_i}^{r_o} \bar{\epsilon}_\theta r dr = \bar{\epsilon}_\theta (r_o^2 - r_i^2) = \int_{r_i}^{r_o} \epsilon_\theta r dr \quad (3.52)$$

これに式(3.49)を代入して $\bar{\epsilon}_\theta$ について解けば、次の結果が得られる。

$$\bar{\epsilon}_\theta = -\frac{u_o + u_i}{r_o + r_i} \quad (3.53)$$

以後、特に断らない限り、平均水平ひずみ $\bar{\epsilon}_r$, $\bar{\epsilon}_\theta$ をそれぞれ ϵ_r , ϵ_θ と記すこととする。

せん断ひずみ γ

中空供試体上面の回転角を $\Delta\theta$ とすれば、せん断ひずみ $\gamma = 2\epsilon_{z\theta}$ は

$$\gamma = \frac{r\Delta\theta}{H} \quad (3.54)$$

となる。平均せん断ひずみを $\bar{\gamma}$ とすれば

$$\int_{r_i}^{r_o} \bar{\gamma} 2\pi r dr = 2\pi \bar{\gamma} (r_o^2 - r_i^2) = \int_{r_i}^{r_o} \gamma 2\pi r dr \quad (3.55)$$

これに式(3.54)を代入して $\bar{\gamma}$ についてとけば、

$$\bar{\gamma} = \frac{2\Delta\theta}{3H} \frac{(r_o^3 - r_i^3)}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (3.56)$$

が得られる。以後、特に断らない限り、平均せん断ひずみ $\bar{\gamma}$ を γ と記すこととする。

鉛直ひずみ ϵ_z

中空供試体の鉛直ひずみは次のように定義される。

$$\epsilon_z = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (3.57)$$