

原位置凍結・再構成砂質土の  
液状化強度特性と微小変形特性

Liquefaction strength and small strain properties of  
in-situ frozen and reconstituted sandy soils

2007 年

清田 隆

# 目次

第1章 序論 .....	1
第2章 試料と試験機の概要 .....	4
2.1 概説 .....	4
2.2 試験試料の概要 .....	5
2.2.1 利根川砂試料 .....	5
2.2.2 江戸川砂試料 .....	12
2.2.3 再構成試料 .....	21
2.3 実験装置の概要 .....	22
2.3.1 小型三軸試験装置 .....	22
2.3.2 中型中空ねじり試験装置 .....	26
2.4 応力とひずみの定義 .....	28
2.4.1 三軸円筒供試体 .....	28
2.4.2 中空円筒供試体 .....	30
2.5 実験手順 .....	39
2.5.1 小型三軸試験 .....	39
2.5.2 中型中空ねじり試験 .....	42
2.6 凍結採取試料の整形 .....	46
2.6.1 小型三軸試験用円筒供試体 .....	46
2.6.2 中型ねじり試験用中空円筒供試体 .....	47
2.7 微小変形特性の計測 .....	48
2.7.1 静的微小変形特性 .....	48
2.7.2 動的微小変形特性 .....	50
2.8 凍結・融解ひずみの測定 .....	52
参考文献 .....	53
第3章 微小変形特性概論 .....	54
3.1 概説 .....	54
3.2 土の微小変形特性 .....	55
3.2.1 弾性論の基本的概念 (広義の Hooke の法則) .....	55

3.2.2 地盤材料の弾性変形特性の基本仮定.....	57
3.2.3 静的ヤング率に及ぼす排水条件の影響とせん断剛性率.....	59
3.2.4 動的ヤング率と動的せん断剛性率.....	64
3.3 加速度計による弾性波速度の計測.....	71
3.3.1 弾性波伝播時間の同定.....	71
3.3.2 試料の飽和条件が弾性波速度に及ぼす影響.....	73
3.3.3 入力周波数の影響.....	77
3.4 飽和試料における微小変形特性の解釈.....	80
3.5 加速度計とベンダーエレメントとの比較.....	86
3.6 動的・静的微小変形特性の比較.....	89
参考文献.....	92

#### 第4章: 砂質土の微小変形特性に影響を及ぼす諸要因..... 95

4.1 概説.....	95
4.2 既往の研究.....	96
4.2.1 凍結融解履歴と体積変化に関する研究.....	96
4.2.2 微小変形特性に及ぼす構造異方性に関する研究.....	100
4.2.3 微小変形特性の応力状態依存性に関する研究.....	101
4.2.4 凍結試料の微小変形特性に関する研究.....	102
4.2.5 応力履歴と微小変形特性に関する研究.....	103
4.3 凍結採取試料の融解時体積ひずみ.....	105
4.4 等方圧密過程における微小変形特性.....	116
4.4.1 静的微小変形特性.....	116
4.4.2 動的微小変形特性.....	131
4.4.3 静的と動的微小変形特性の比較.....	147
4.5 再構成試料の微小変形特性に及ぼす応力履歴の影響.....	155
4.5.1 応力履歴に伴う体積変化.....	156
4.5.2 応力履歴と微小変形特性.....	160
4.6 年代効果の定量的評価.....	167
4.7 再構成試料の微小変形特性に及ぼす凍結融解履歴の影響.....	169
4.7.1 凍結融解履歴に伴う体積変化.....	169
4.7.2 凍結融解履歴と微小変形特性.....	176
4.8 まとめ.....	178
4.8.1 静的剛性と動的剛性.....	178
4.8.2 年代効果と微小変形特性.....	178
4.8.3 応力履歴による年代効果.....	179
4.8.4 凍結採取試料の乱れ.....	179

参考文献	184
<b>第5章 微小変形特性と液状化強度特性</b>	<b>187</b>
5.1 概説	187
5.2 既往の研究	188
5.2.1 従来設計における液状化判定に関する研究	188
5.2.2 不攪乱試料採取方法と静的強度および液状化強度に関する研究	190
5.2.3 地盤の凍結融解履歴と静的強度および液状化強度に関する研究	193
5.2.4 凍結試料の融解時拘束圧と液状化強度に関する研究	195
5.2.5 液状化強度と微小変形特性に関する研究	196
5.2.6 液状化中の微小変形特性の変化に関する研究	199
5.3 凍結試料の液状化特性	201
5.3.1 凍結試料の有効応力経路と応力-ひずみ曲線	201
5.3.2 凍結試料の液状化強度	208
5.3.3 凍結試料の液状化過程における微小変形特性	213
5.4 応力履歴のない再構成試料の液状化特性	228
5.4.1 応力履歴のない再構成試料の有効応力経路と応力-ひずみ曲線	228
5.4.2 応力履歴のない再構成試料の液状化強度	232
5.4.3 応力履歴のない再構成試料の液状化過程における微小変形特性	236
5.5 応力履歴を受けた再構成試料の液状化特性	244
5.5.1 応力履歴を受けた再構成試料の有効応力経路と応力-ひずみ曲線	244
5.5.2 応力履歴を受けた再構成試料の液状化強度	253
5.5.3 応力履歴を受けた再構成試料の液状化過程における微小変形特性	257
5.6 凍結融解履歴と液状化強度特性	265
5.7 液状化強度と微小変形特性との関係	267
5.8 まとめ	275
5.8.1 凍結試料の融解拘束圧が液状化強度に及ぼす影響について	275
5.8.2 凍結試料の液状化強度に及ぼす乱れの評価について	275
5.8.3 年代効果が液状化挙動に及ぼす影響について	276
5.8.4 液状化の検討に対する再構成試料の適用性	276
参考文献	278
<b>第6章 大ひずみ液状化試験</b>	<b>281</b>
6.1 概説	281
6.2 既往の研究	282
6.2.1 液状化残留変形のメカニズムに関する研究	282

6.2.2 完全液状化時のせん断ひずみのメカニズムに関する研究.....	283
6.2.3 液状化後の単調載荷特性に関する研究.....	284
6.2.4 液状化限界残留ひずみと補正 $N$ 値に関する研究.....	286
6.3 大ひずみ振幅時のメンブレン張力補正.....	288
6.4 豊浦砂による大ひずみ液状化試験.....	293
6.4.1 液状化試験における供試体の挙動.....	293
6.4.2 大ひずみレベルにおける液状化強度.....	307
6.4.3 液状化限界ひずみ $\gamma_L^*$ .....	310
6.4.4 豊浦砂の液状化による剛性低下率.....	324
6.5 原位置採取試料による大ひずみ液状化試験.....	325
6.5.1 凍結採取試料の大ひずみ液状化試験.....	325
6.5.2 再構成試料の大ひずみ液状化試験.....	337
6.5.3 原位置採取試料の大ひずみレベルにおける液状化強度.....	350
6.5.4 原位置採取試料の液状化限界ひずみ.....	357
6.5.5 原位置採取試料の液状化による剛性低下率.....	360
6.6 まとめ.....	363
6.6.1 大ひずみ液状化試験について.....	363
6.6.2 大ひずみ液状化試験による液状化限界ひずみ $\gamma_L^*$ について.....	364
6.6.3 動的せん断剛性率と大ひずみ液状化特性の関係について.....	364
6.6.4 年代効果が大ひずみ液状化特性に及ぼす影響について.....	365
参考文献.....	366
<b>第7章 結論.....</b>	<b>368</b>
<b>謝 辞.....</b>	<b>372</b>

# 第1章

## 序論

本論文は、砂質土層の液状化現象に影響を及ぼす要因について、主に堆積年代の違いと微小変形特性に着目して行った実験の結果をまとめたものである。

地震時における地盤の液状化挙動を予測する場合、原位置採取試料を用いた室内土質試験を実施することは非常に重要である。これは、自然地盤の堆積年代・過程および現在までの応力履歴の違いが、その力学的特性に多大な影響を及ぼすためであり、多くの研究者・技術者が実験・実務を通じて認識していることでもある。しかし、地盤工学の古典的概念によれば、液状化のような非排水挙動を含む飽和砂地盤の力学的特性は主に密度または間隙比により記述され、本来自然地盤が有する年代効果は考慮されない場合が多い。その主要な理由としては、年代効果は地域性を有することから一般化が困難であることや、数千年から数百万年以上に及ぶ続成作用に伴う地盤の固化現象を、時間的制約を伴う室内土質試験によって忠実に再現することが困難であることなどが考えられる。また、年代効果は試料の乱れと共にその効果が失われることが知られているが、原地盤から乱さない砂試料を採取することの困難さも、年代効果を定量的に把握できない理由の一つとなっている。

ここでいう「年代効果」とは、地盤が自然に堆積した年代により、その力学的挙動が変化することである。通常、自然堆積地盤は、堆積直後は正規圧密状態に近いが、土粒子の沈降に対応して、その上に次々に堆積物が重なって厚くなり、下位になった初期の堆積物は上載荷重の変化に伴う圧密と変形、温度上昇、粘土鉱物の変化などに伴って次第に強度を増してゆく。一方、既に続成作用により固結した地盤が風化作用により強度低下することも年代効果と呼ばれるが、本研究の対象は、前者の「正の年代効果」を有する地盤である。このような年代効果を有する地盤の設計を、密度のみで評価された結果に基づいて設計を行うことは過小評価に繋がりがやすい。

本研究では、現時点において最も乱れの影響が少ないといわれている凍結採取試料（以下では凍結試料と称する）と、その再構成試料を用い、自然地盤が有する年代効果が試料の通常～大変形に至る液状化特性に及ぼす影響について、三軸圧縮試験機と中型中空ねじり試験機を用いて調べた。年代効果については、その生成環境から「応力履歴による土粒子構造の安定化」と「セメンテーション」に分類できるものと仮定し、微小変形特性との対応を検討した。微小

変形特性は、応力状態と地盤の初期異方性（構造異方性）の影響を反映する、地盤の完全な弾性領域に限りなく近いひずみレベルでの変形特性であり、年代効果の影響も把握できる可能性がある。また、微小変形特性については、静的微小繰返し载荷によって求められるものと、供試体を伝播する弾性波速度より求められるものがあるが、本研究では前者を「静的微小変形特性」、後者を「動的微小変形特性」と称する。

本研究の実験に用いた試料は、液状化の検討が主目的であることから、地質学的には比較的新しい第四紀完新世（沖積試料）・更新世（洪積試料）の砂質土を対象としている。

以下に、本論文の構成を示す。

**第2章**では、本研究で用いた凍結試料、実験機および供試体のひずみと応力の定義について示した。凍結試料については、その物理的特性だけでなく、採取時に実施されたボーリング調査、PS検層の結果など、研究を進めていく上で不可欠な地盤情報を示す。また、既往文献に基づいて、試料採取層の堆積環境と地質年代について説明した。

次に、本研究で用いた三軸試験機と中型中空ねじり試験機の詳細を示す。なお、中型中空ねじり試験機については、液状化に伴う地盤の大変形挙動を把握するため、せん断ひずみ両振幅が100%程度まで計測できるよう改良された試験機を用いた。その他、試料の凍結・融解ひずみ計測方法、動的・静的微小変形特性の計測方法について詳細に説明した。また、ここでは実験手順や凍結試料の整形方法も示したが、実験開始までの凍結試料の乱れを防ぐ手法についても詳しく記述した。

**第3章**では、微小変形特性に関するこれまでの知見と本研究に対する適用についてまとめた。特に液状化時のような非排水条件下において静的微小変形特性を計測した場合、その値は間隙水圧の変化と異方性の影響を受けることから、排水条件を考慮した微小変形特性の補正法についても説明を加えた。また、本研究では動的微小変形特性の計測について、一般的に普及しているベンダーエレメントではなく、圧電素子（アクチュエーター）と加速度計を採用した。ここでは、豊浦砂と再構成試料による予備試験を示し、その結果をもとに加速度計による動的微小変形特性に影響を及ぼす諸要因（伝播時間の同定法、試料の飽和、入力周波数、ベンダーエレメントとの比較）を検討した。加速度計による動的微小変形特性の計測は比較的マイナーであることから、ここでの検討は以後のデータの信頼性を得る上で非常に重要である。

**第4章**では、小型三軸試験機による実験結果を示す。まず、原位置凍結採取試料と再構成試料の微小変形特性、体積変化に及ぼす凍結融解履歴の影響を示した。特に融解時拘束圧の違いが凍結試料の乱れに影響するかどうかについて、土粒子構造の安定化とセメンテーション効果の観点から考察を加えた。

次に、堆積年代の異なる数種類の凍結採取試料と、各再構成試料において、等方圧密中に微小変形特性を計測し、その値に年代効果がどの程度反映されるかを確認した。また、再構成試料では繰返し载荷履歴により土粒子構造の安定化を図り、微小変形特性に及ぼす影響を検討し

た。なお、凍結試料と再構成試料の年代効果を定量的に把握する目的で一軸圧縮試験を実施し、各試料の年代効果に関する考察を総合的に行った。

第5章では、各試料の小型三軸試験機による液状化試験結果を示し、その挙動について詳細に説明した。また、液状化直前に計測された微小変形特性と液状化強度の相関を求め、凍結試料についてはその乱れによる年代効果の喪失、再構成試料については応力履歴付与による土粒子構造の安定化が、それぞれの液状化強度の変化に及ぼす影響について考察を加えた。また、微小変形特性に関しては、液状化強度との単純な比較のみならず、液状化により有効応力が減少していく過程でも計測を行っている。これにより、年代効果の異なる試料について、液状化中における剛性の低下傾向がどのように変化するか確認した。最終的に、応力履歴を与えた再構成試料が凍結試料に準ずる試料として、どこまで再現性を有しているかを検討した。

第6章では、中型中空ねじり試験機による大ひずみ液状化試験結果を示す。従来、要素試験によって実施される液状化試験のせん断ひずみレベルは数%~20%程度であった。本研究で用いた中型中空ねじり試験機は、高さ30cm、外径15cm、内径9cmの供試体の変形を、せん断ひずみ両振幅100%程度まで計測できるものであり、過去に例のないものである。したがって、大ひずみ液状化試験に関する基礎的資料を収集するため、密度を変えた豊浦砂による実験を実施した。ここでは試験中の様子を撮影した写真とともに実験結果を示しており、供試体が一様に変形できる液状化限界ひずみが存在することを確認した。この豊浦砂による実験を踏まえ、凍結試料とその再構成試料でも同様の実験を行い、液状化限界ひずみと微小変形特性の関係に及ぼす年代効果の影響について検討した。また、再構成試料については三軸試験と同様、液状化試験前に応力履歴を付与したものについても実験を行っており、凍結試料との比較により年代効果が大ひずみ液状化挙動に及ぼす影響を検討した。

最後に、第7章で結論と今後の課題を示す。



## 第2章

### 試料と試験機の概要

#### 2.1 概説

本研究で用いた実験試料は、原位置より凍結サンプリングによって採取された第四紀完新統砂質土および更新統砂質土である。しかし、ここではこれら地質学的な用語は用いず、実務において一般的に用いられているように、それぞれ沖積層、洪積層と呼ぶこととする。沖積層と洪積層の地質学的な位置づけについては、例えば北田 (2007)による紹介等を参照されたい。また、本論文では試料が採取された地点名を用い、利根川砂試料、江戸川砂試料と称している。なお、江戸川砂試料については、三種類の異なる地層から採取された試料を用いている。

ここでは、原位置凍結採取試料（以下、凍結試料もしくはFS）の物理的特性、採取時に実施した地盤調査結果（ボーリング調査・標準貫入試験・PS 検層・花粉化石分析試験）、および文献に基づく凍結試料採取地の地盤概要を示す。また、これら凍結試料との対比を目的として、試験後の乱された凍結試料を再利用した試料（以下、再構成試料もしくはRS）、および我が国で標準的に用いられている豊浦砂でも一連の実験を実施しており、これらの供試体作成方法を述べる。

次に、本研究の実験で用いた小型三軸試験機と中型中空ねじり試験機の機構の詳細を示す。なお、中型中空ねじり試験機については、液状化に伴う供試体の大変形挙動を把握するため、せん断ひずみ両振幅 $\gamma_{DA}$ を100%程度まで計測できるよう改良された試験機を用いている。また、各試験供試体に関するメンブレン張力の影響も考慮した応力とひずみの定義を示す。各種ひずみの計測方法については、特に試料の凍結・融解ひずみ計測方法、動的・静的微小変形特性の計測方法について詳細に説明する。

なお、本研究では、凍結試料の試験開始までの取り扱い方に起因する乱れの影響について検討を行っている。したがって実験手順としては、通常の実験方法だけでなく、供試体整形時から試験開始までの凍結試料の乱れを防ぐ方法、および融解前初期寸法を適切に計測する方法についても詳細に述べている。

## 2.2 試験試料の概要

### 2.2.1 利根川砂試料

#### (1) 試料採取地の地盤概要

##### a) 地形概要

凍結試料採取地は図 2.2.1 に示すように、利根川河口から約 44 km 地点の右岸、霞ヶ浦の南東方向に位置している。この地域は、霞ヶ浦を含む大きな低地帯、または大きな谷地形が形成され、試料は沖積低地上において採取された。

宇都宮 (1981)によると、このような地形の形成は、更新世後期の最終間氷期の海進期である下末吉海進から始まったと考えられている。当時、試料採取地周辺には広く東京湾が入り込んでおり、以降の海水準の変動に伴って現在の地形が形成された。また、下末吉海進期以降、海水準は低下し、試料採取地周辺は河川の下刻作用を受け、約 2 万年前ごろの最終氷期の低海水準期に最も深い谷地形が形成されたと考えられている。

本研究で用いた利根川砂（沖積層）は、その後の後氷期の海水準の上昇に伴い、この谷地形を埋める形態で堆積した地層であると推定される。

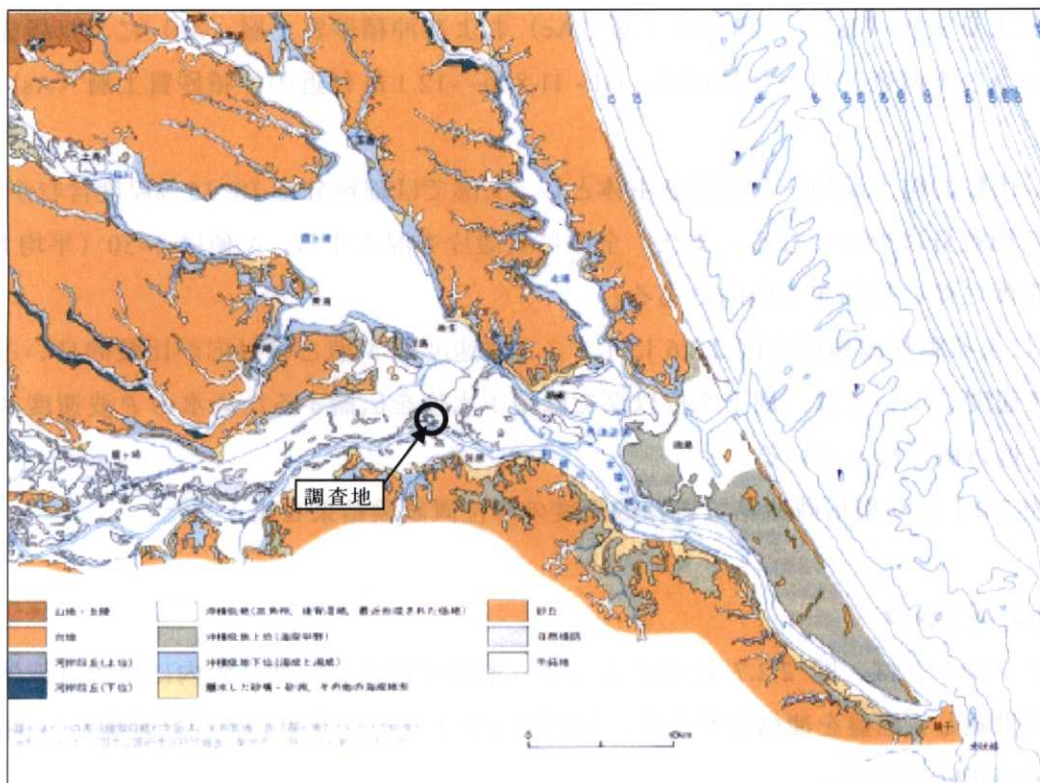


図 2.2.1 調査地周辺の地形概要（宇都宮, 1981 にもとづき一部省略）

## b) 地質概要

井内ら (1991) による過去のボーリング調査のまとめでは、試料採取地周辺の沖積層基盤面は最も深い所では約 50 m に達すると考えられている。地層構成は、沖積層基底の谷筋沿いに分布する粘土層の上位に、海進以前の河成堆積物（東京下町の「七号地層」に相当）が分布する。その上位に、本研究で対象としている、貝殻片を混入する海成の砂・礫質土層が分布している。この地層は一般的に「霞ヶ浦層」と称され、東京都内における「有楽町層」にほぼ相当する。約 30~40 m 程度の層厚を有すると考えられるが、凍結試料採取時の調査では、その下限深度は確認されていない。

なお、本研究対象層の堆積年代は、花粉化石分析試験により、8,500~7,000 年前と推定された。

## (2) ボーリング調査結果

凍結試料採取に伴い、標準貫入試験およびサスペンション式 PS 検層を伴うボーリング調査が実施された。ボーリング調査孔と凍結試料採取孔の配置図を図 2.2.2 に、ボーリング柱状図 (No.TO-P1, TO-P2) を図 2.2.3, 図 2.2.4 に示す。

調査地の地層推定断面図 (図 2.2.5) に示すように、各地層境界は概ね水平に分布しており、地層は上位より表層 (Ts)、沖積粘性土層 (Ac) および沖積砂質土層 (As) により構成されている。このうち本研究で用いた試料は、GL- 11.8 m~ -12.1 m 付近の沖積砂質土層 (As) に該当する。

A<sub>s</sub> 層は、比較的粒子が均一な細砂を主体とし、上部では細粒分を 10~15 %程度含むが、GL-10 m 以深より細粒分は少なくなる。また、全体に貝殻片を混入する。N 値は 4~50 (平均 N= 30) を示し、深度に伴い増加する傾向にある。

PS 検層による弾性波速度を図 2.2.6 に示す。S 波速度は N 値との対応が比較的良いと考えられる。P 波速度については、地下水位以深では地下水位を伝播するため水の P 波速度 ( $V_p = 1.5$  km/sec) に近い値となっている。

なお、表 2.2.1 に利根川砂凍結試料採取深度の原位置試験結果をまとめた。

## (3) 凍結サンプリング

凍結サンプリングは、図 2.2.7 に示すように、地盤に挿入した凍結管内に冷媒 (液体窒素) を連続して供給し、地盤を凍結させた後、大口径コアチューブを用いて凍結地盤から供試体 ( $\phi$  150 mm) を採取している。

凍結管周辺に形成される凍土柱の直径は約 1.20 m である。凍土柱の発達状況はサンプリング孔にセットされたケーシング底部 (GL-4.0 m の凍土柱頭部) に設置した温度計により観測し、同時に液体窒素の注入量の制御を実施した。地盤凍結時の温度管理記録を図 2.2.8 に示す。

試料採取後は、長さ調整の切断を行い、ビニールシートによるシール、緩衝材による包装を施して保冷库で保管。全サンプリング終了後、速やかに冷凍室に搬入した。

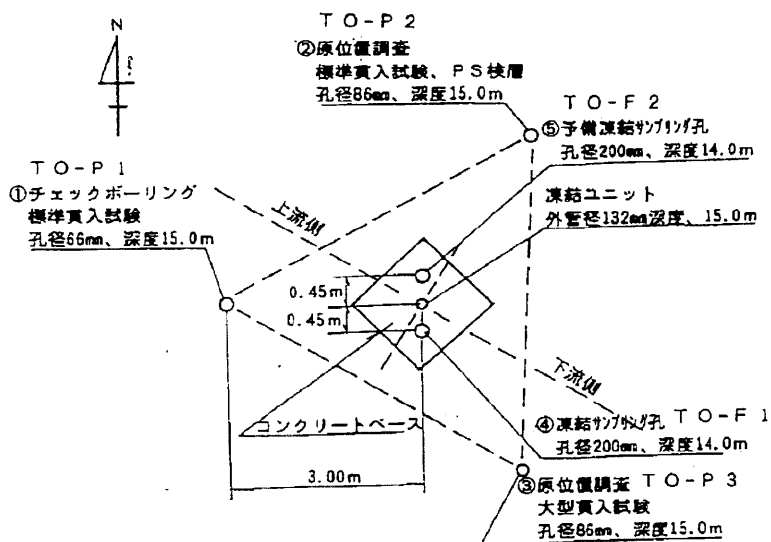


図 2.2.2 ボーリング孔配置図 (独立行政法人土木研究所, 1996 a)

表 2.2.1 利根川砂試料採取深度の原位置試験結果 (独立行政法人土木研究所, 1996 a)

項目		物性値	備考
採取深度 (GL- m)		11.8 ~ 12.1	φ 150 mm
標準貫入試験結果 (回)		32	Bor. No. TO-P1
		34	Bor. No. TO-P2
PS 検層結果 (m/sec)	P 波	1540	Bor. No. TO-P2
	S 波	240	

ボーリング名	No. TO-P1		調査位置	千葉県佐原市昭和町旭先 利根川右岸			北緯
発注機関	建設省土木研究所 土質研究室			調査期間	東経		
調査業者名	株式会社 東京ソイルリサーチ			調査現場	コアア 鑑定者		
主任技師				現場代理人	ボーリング責任者 近田清		
孔口標高	角 180° 上 10° 下 0°		方 270° 西 180° 東	地盤勾配	使用機種		
総掘進長	20.45m		度	同	試錐機	YBM-1	
					エンジン	ヤマハ NFD10	
					ハンマー	落下式	
					ポンプ	KANO V6S	

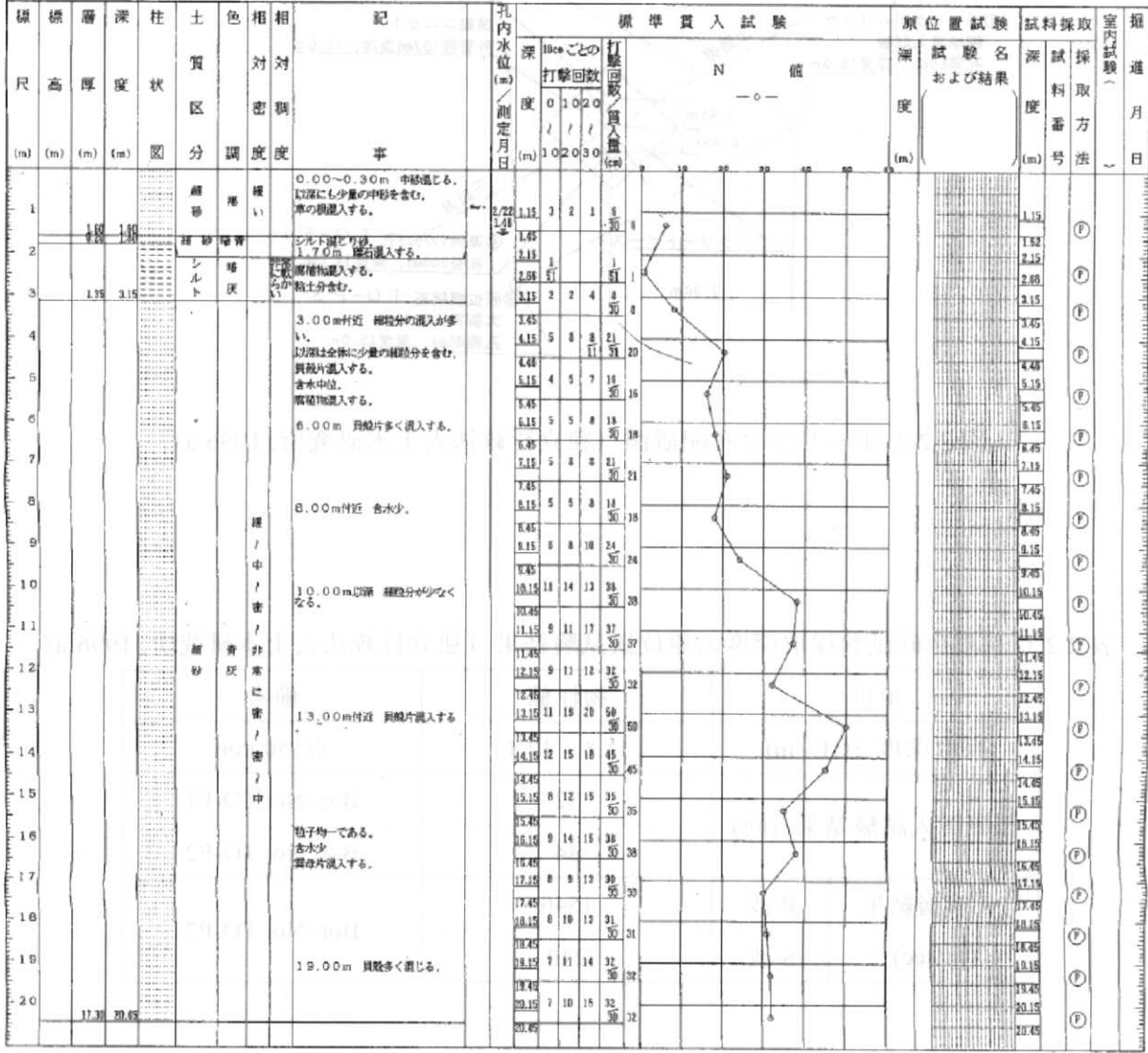


図 2.2.3 No. TO-P1 地点のボーリング柱状図 (独立行政法人土木研究所, 1996 a)

ボーリング名	No. TO-P2		調査位置	千葉県佐原市昭野町旭光 潮瀬川右岸			北 緯
発注機関	建設省土木研究所 土質調査課				調査期間	東 経	
調査業者名	株式会社 東京ソイルリサーチ		主任技師	現 場 代 理 人	コ ア 鑑定者	ボーリング 責任者	沼田 清
孔口 高さ	角 度	傾 斜 度	方 向	地 盤 勾 配	使用 機種	試 験 機	ハンマー 落下用具
総 掘 進 長	33.6m				エンジン	YBM-1	ポンプ
						ヤンマー NFD10	KANO VBS

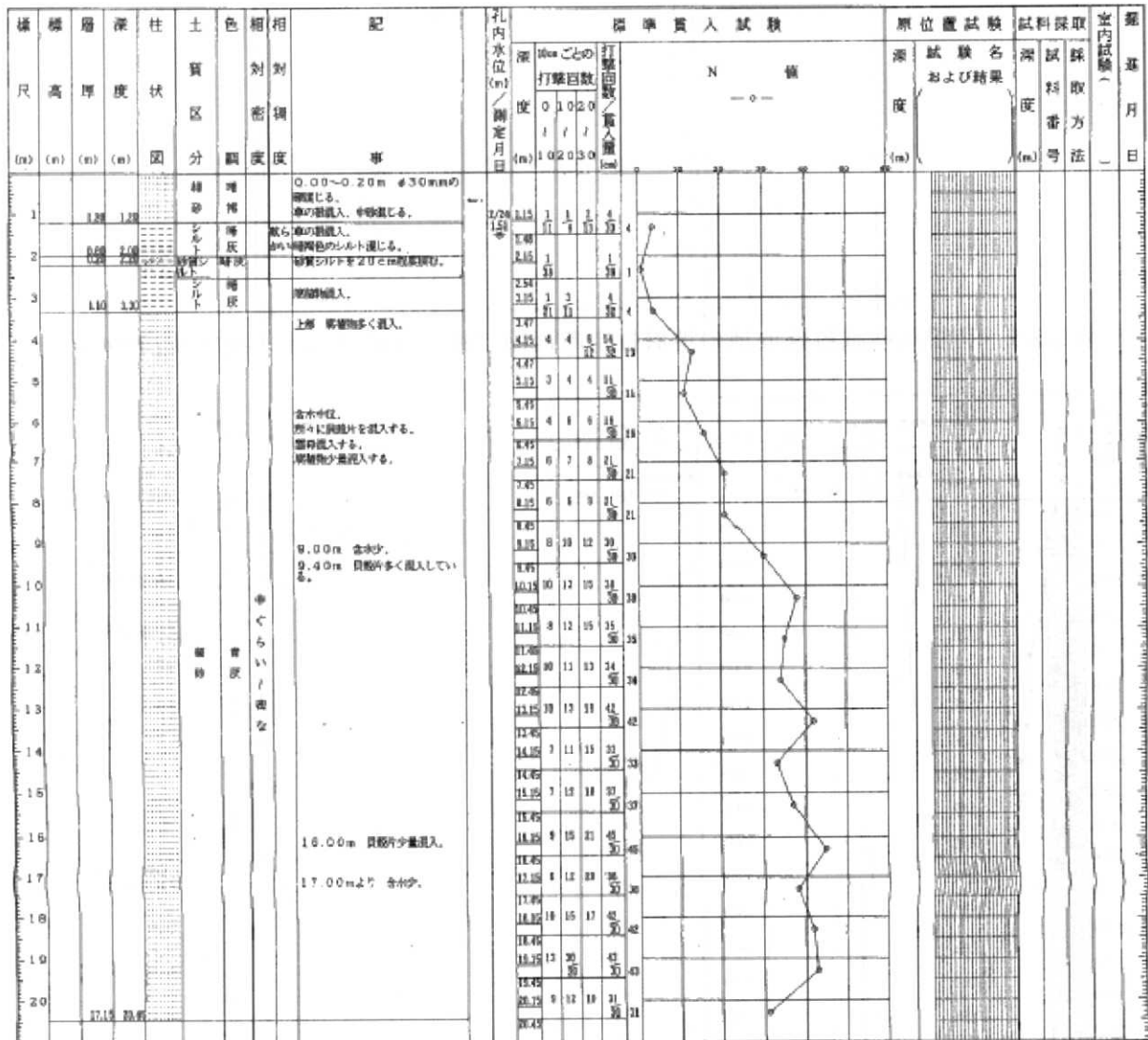


図 2.2.4 No. TO-P2 地点のボーリング柱状図 (独立行政法人土木研究所, 1996 a)

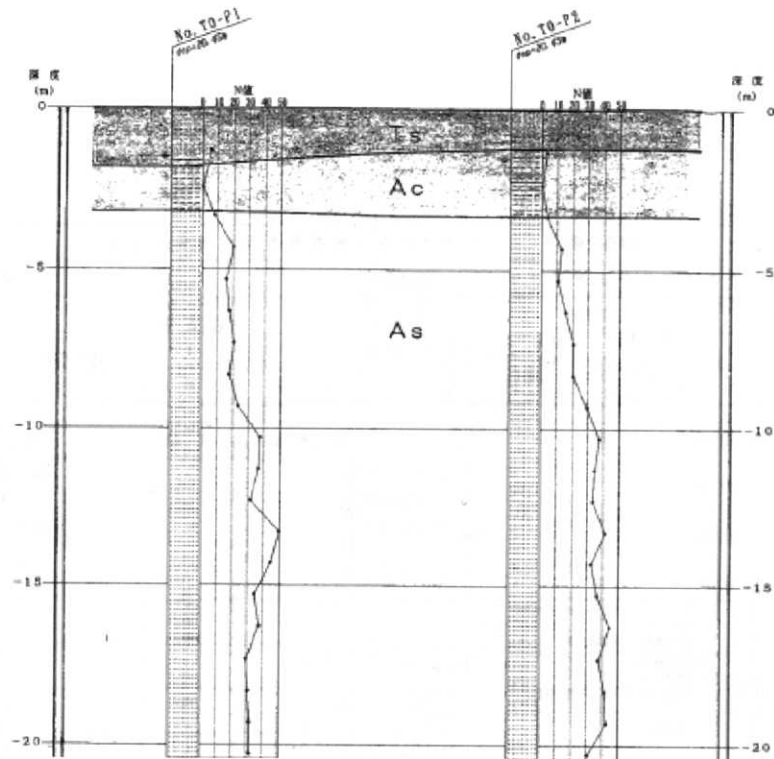


図 2.2.5 利根川砂試料採取地の地層推定断面図 (独立行政法人土木研究所, 1996 a)

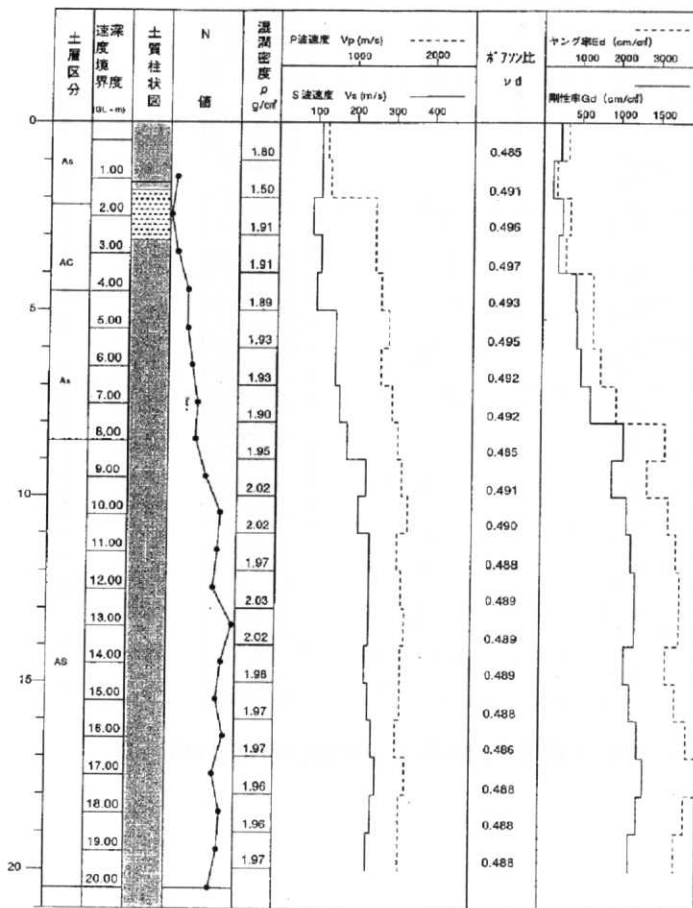


図 2.2.6 PS 検層結果 (No. TO-P2)  
(独立行政法人土木研究所, 1996 a)

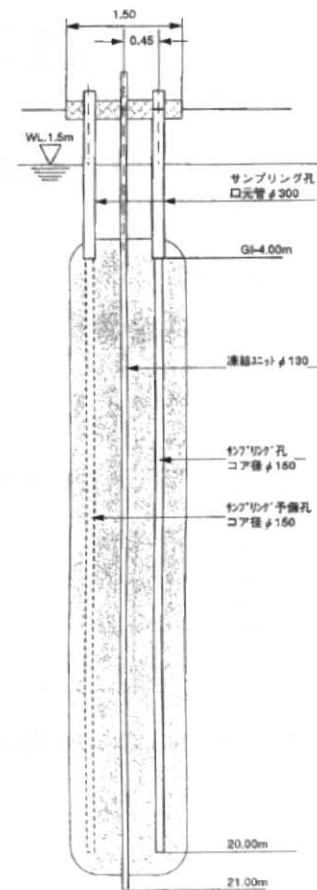


図 2.2.7 凍結サンプリング実施状況  
(独立行政法人土木研究所, 1996 a)



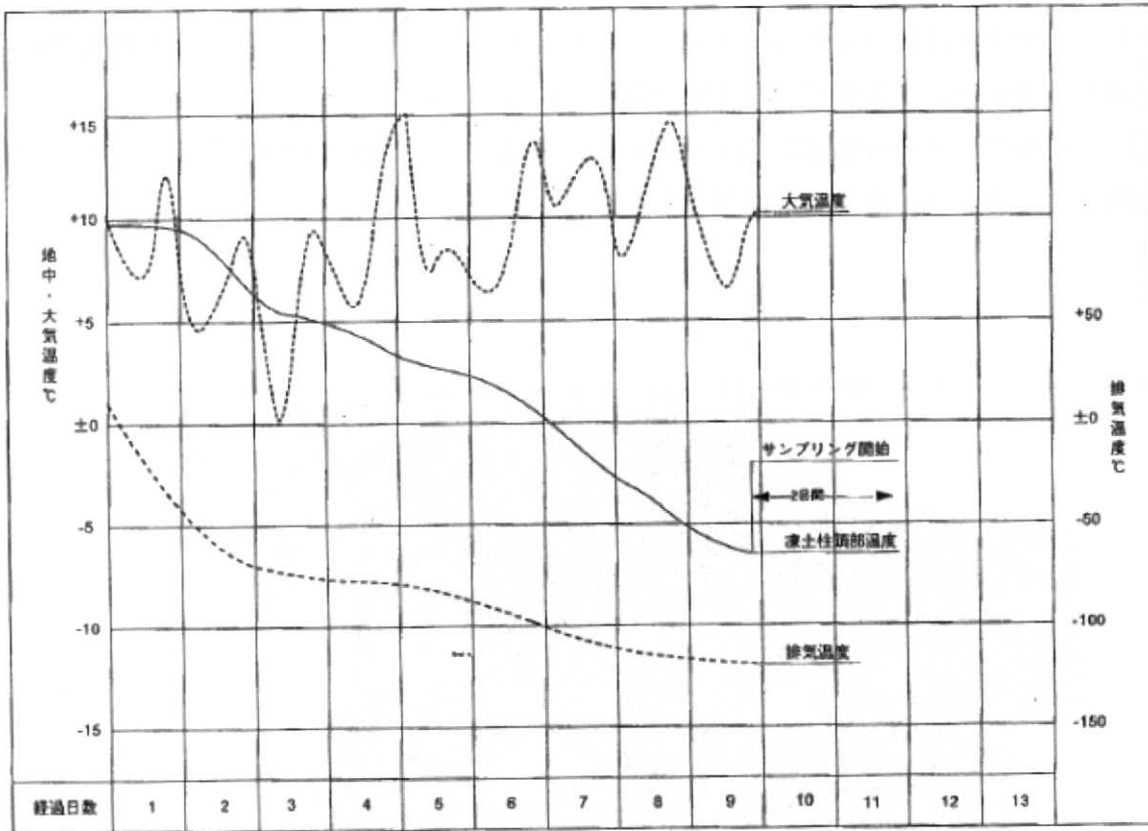


図 2.2.8 利根川砂試料採取時の地盤凍結温度管理記録 (独立行政法人土木研究所, 1996 a)



## 2.2.2 江戸川砂試料

### (1) 試料採取地の地盤概要

#### a) 地形概要

試料採取地はJR（東日本）武蔵野線・三郷駅の南約2km、江戸川左岸の河川敷に位置している。この地域は図2.2.9に示すように、下総台地と大宮台地間に広がる沖積低地の東縁に位置し、採取地のすぐ東側には下総台地が広がっている。

また、調査地周辺の旧地形は、江戸川沿いの湿地あるいは自然堤防であるが、現在では河川改修が進んでおり、盛土または埋土となっている。

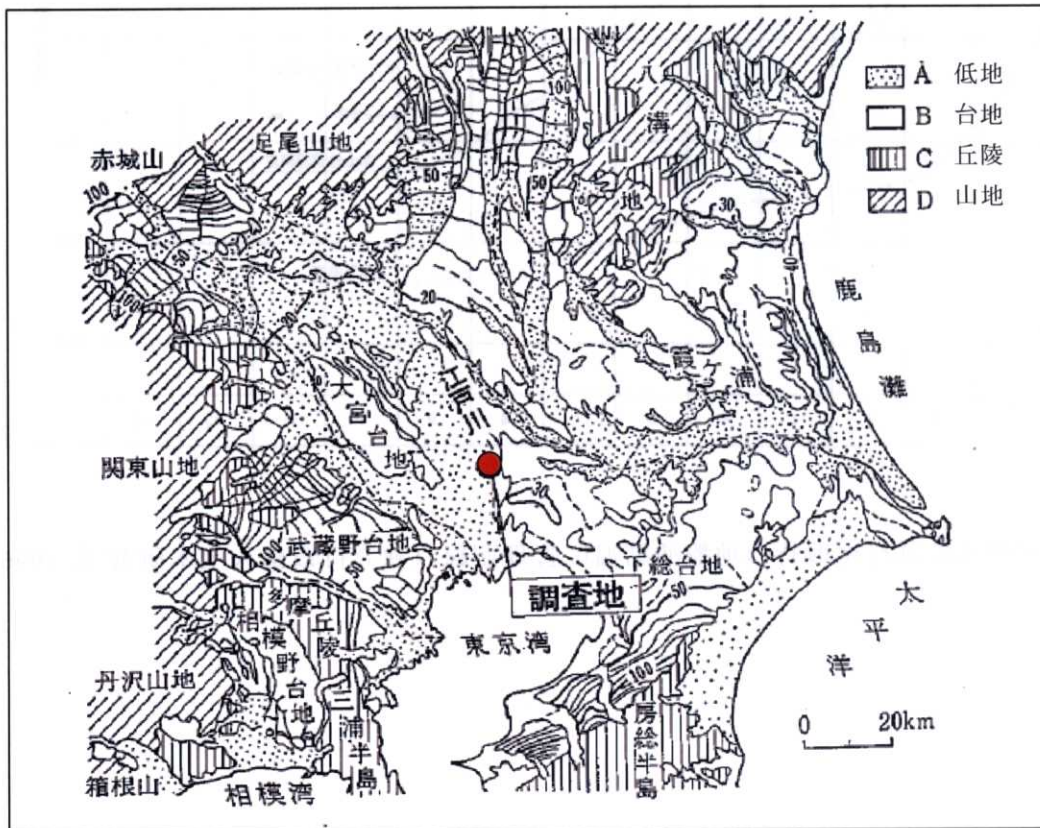


図 2.2.9 調査地周辺の地形概要（貝塚, 1958 に加筆）

b) 地質概要

調査地周辺を含む東京近傍の沖積層基底地形（貝塚，1979）によると、試料採取地付近には埋没侵食台が分布し、その上面は T.P.-10 m 程度と推定される（図 2.2.10）。また、遠藤ら（1983）が作成した調査地周辺を含む東西方向の地層横断面図（図 2.2.11）より、試料採取地付近の地層構成は、腐植物・貝殻片を混入したシルト・粘土および砂の互層からなる①有楽町相当層が分布し、その下位には②段丘礫層が分布する。また、基盤としてシルト・粘土および砂の互層により構成される③下総層群が分布する。本研究では、凍結サンプリングにより、上記①～③の地層から試料を採取している。

なお、縄文海進時（約 6,000 年前）においては、試料採取地付近は海中に没していたと推定される。

本研究で用いた江戸川砂凍結試料が採取された地層の堆積年代は、沖積層（有楽町層）については花粉分析により約 3,500～4,500 年前であると推定された。しかし、それ以深の洪積層は貧化石帯であったことから、堆積年代を特定することはできなかった。参考までに、表 2.2.2 に示す地質年代表（近藤，1996）によると、下総層群の堆積年代は約 13 万年～30 万年前とされている。

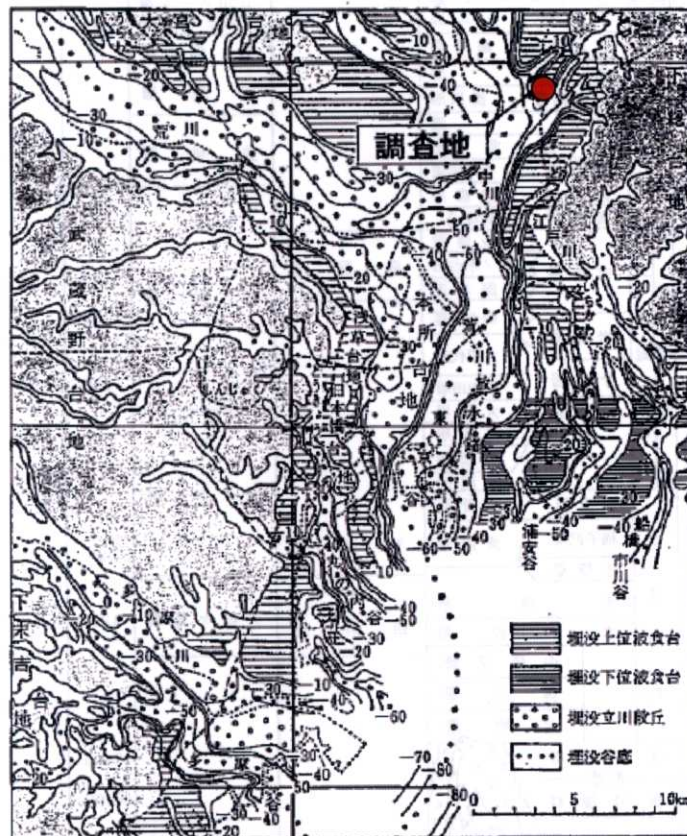


図 2.2.10 調査地周辺の沖積層基底地形とその区分（貝塚，1979 に加筆）



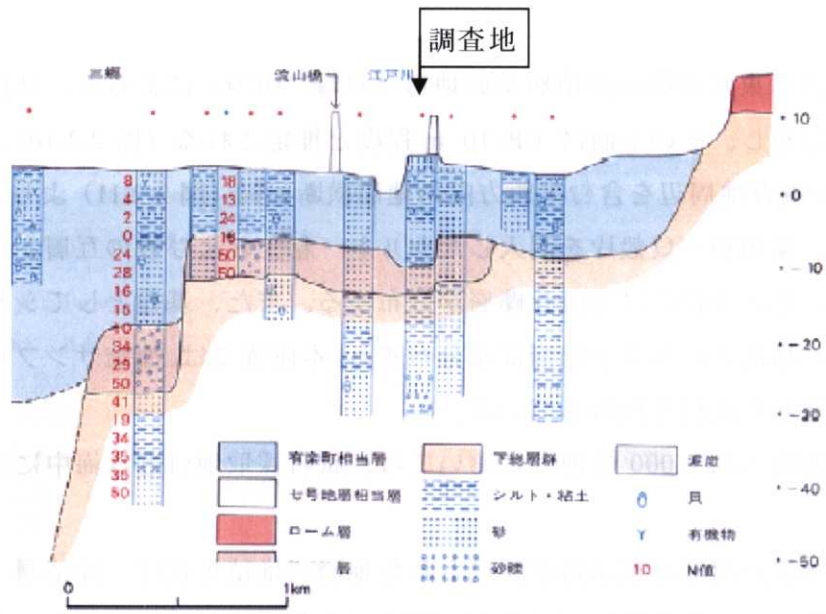


図 2.2.11 調査地周辺の地層横断面図（遠藤他, 1983 に加筆）

表 2.2.2 調査地周辺の地質年代一覧表（近藤, 1996）

地域時代	房総主部 (西←東)	房総南部	銚子	年代 万年
完新世	沖積層	沼層・沖積層	沖積層	1
第四紀	関東ローム層		立川ローム層	5
	武蔵野ローム層		武蔵野ローム層	13
	常総層	姉崎層	常総層	30
	① 木下層		香取層	60
	② 上岩橋層	清川層		
	下総層群		豊里層	100
	葦地蔵堂層			
	周南層	金剛地層		
	佐貫層	笠森層		
	長浜層	万田野層		
	上総層群		飯岡層	170
	市宿層	長南層		
	岩坂層	柿ノ木台層		
	十宮層	国本層		
竹岡層	梅ヶ瀬層			
鮮新世		大田代層		
第三紀	群	黄和田層		
	大原層			
	浪花層			
	勝浦層			
	黒滝層			
中更新世	萩生層	安野層	名洗層	500
第三紀	三浦層群		千倉層	1200
	稲子沢層	清澄層		
	千畑層			
	天津層		西岬層	
	木ノ根層			
	中尾原層			
古第三紀	奥山層			2400 (6400)
	大崩層			
白亜紀	保田層群 (断層)			
ジュラ紀	嶺岡層群			
三疊紀	蛇紋岩 玄武岩 はんれい岩		銚子層群	
			愛宕山層群	

## (2) ボーリング調査結果

凍結試料採取に伴い、標準貫入試験およびサスペンション式 *PS* 検層を伴うボーリング調査が実施された。ボーリング調査孔と凍結試料採取孔の配置図を図 2.2.12 に、ボーリング柱状図 (No.ED-2, ED-3) を図 2.2.13, 図 2.2.14 に示す。

調査地の地盤は、地層推定断面図 (図 2.2.15) に示すように、上位より表層 (F)、沖積層 ( $A_s, A_c, A_{sg}$ ) および洪積層 ( $D_{sg}, D_s, D_c$ ) により構成されている。このうち本研究で用いた試料は、GL-5.0~ -5.94 m の沖積砂質・粘性土層 ( $A_s, A_c$ )、段丘礫層と考えられる GL-10.3~ -11.0 m の洪積砂・礫質土層 ( $D_{sg}$ )、および GL- 16 m~ -17.6 m の洪積砂質土層 ( $D_s$ ) に該当する。以降、本研究ではそれぞれ江戸川砂 A 試料、B 試料、C 試料と称する。

*PS* 検層による弾性波速度を図 2.2.16 に示す。*S* 波速度は *N* 値との対応が比較的良いと考えられる。*P* 波速度については、地下水位以深では地下水位を伝播するため水の *P* 波速度 ( $V_p=1.5$  km/sec) に近い値となっている。

表 2.2.3 に江戸川砂凍結試料深度の原位置試験結果をまとめた。

## (3) 凍結サンプリング

凍結サンプリングは、前述の利根川砂と同じ手法 (図 2.2.7) により実施された。

地盤凍結時の温度管理記録を図 2.2.17 に示す。

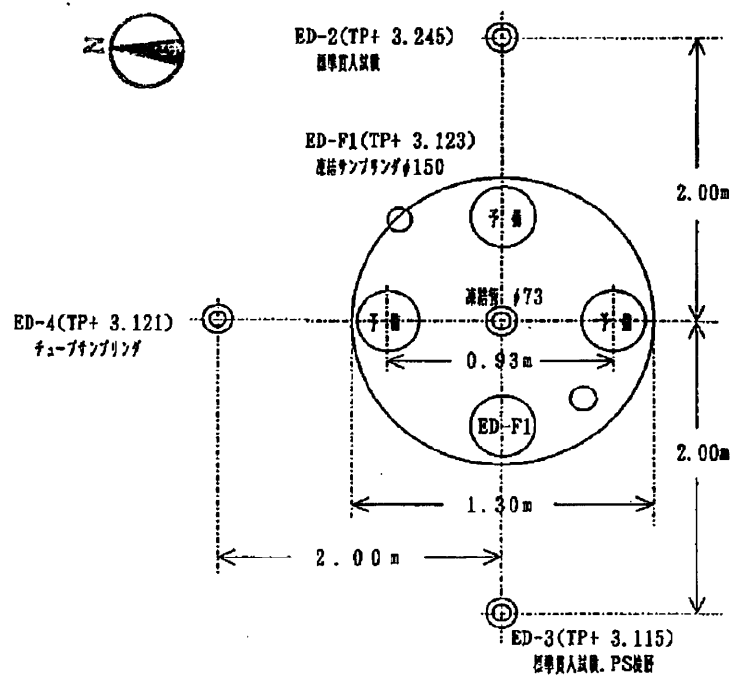


図 2.2.12 ボーリング孔配置図 (独立行政法人土木研究所, 1996 b)



ボーリング名	ED-3		調査位置	千葉県松戸市七石南門新田江戸川左岸農外地			北緯	0° 0' 0.0"	
発注機関	建設省土木研究所			調査期間	1996年 3月 6日~1996年 3月 7日			東経	0° 0' 0.0"
調査業者名	株式会社 東京ソイルリサーチ TEL 03-3483-2201		主任技師	福元 毅一		調査員	大西 晶光		
ボーリング機	自動落下		エンジン	クボタ EB-N		ポンプ	カノ-V6		
孔口標高	4.12 m	角	円		試機	大野 ORV-100			
総掘深長	20.45 m	径	φ100		ハンマー	落下用			

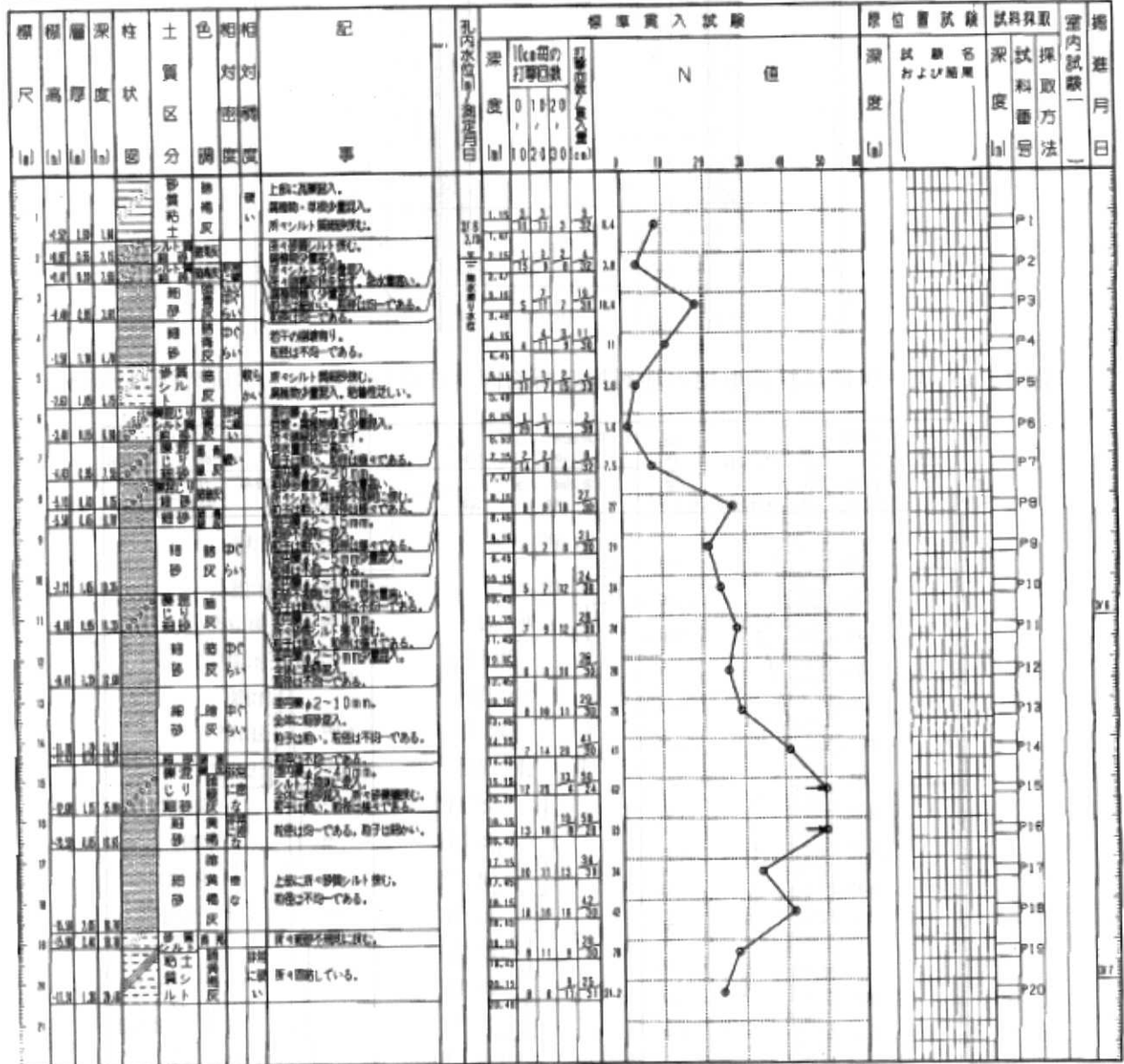


図 2.2.14 No. ED-3 地点のボーリング柱状図 (独立行政法人土木研究所, 1996 b)

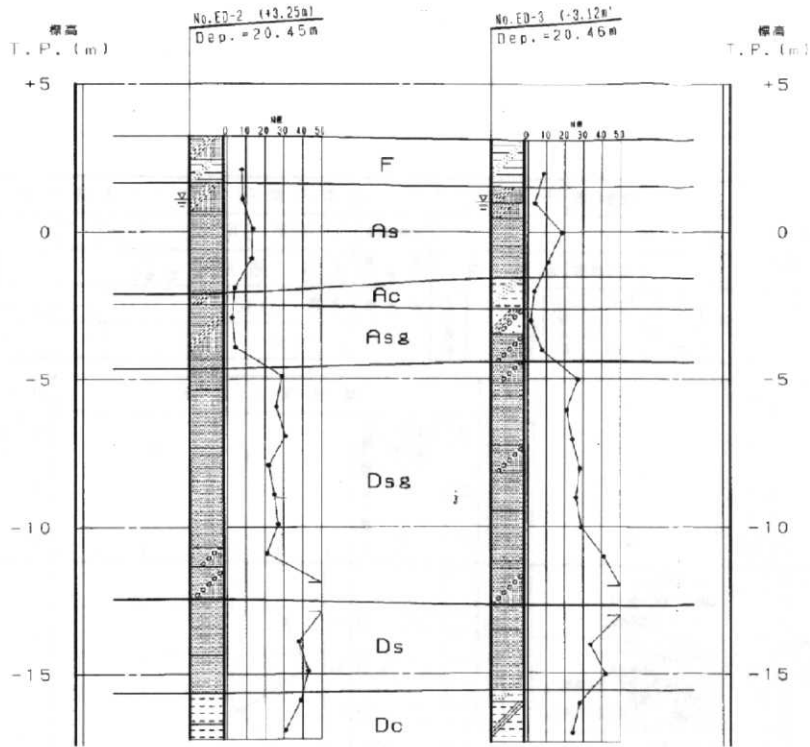


図 2.2.15 江戸川砂試料採取地の地層推定断面図 (独立行政法人土木研究所, 1996 b)

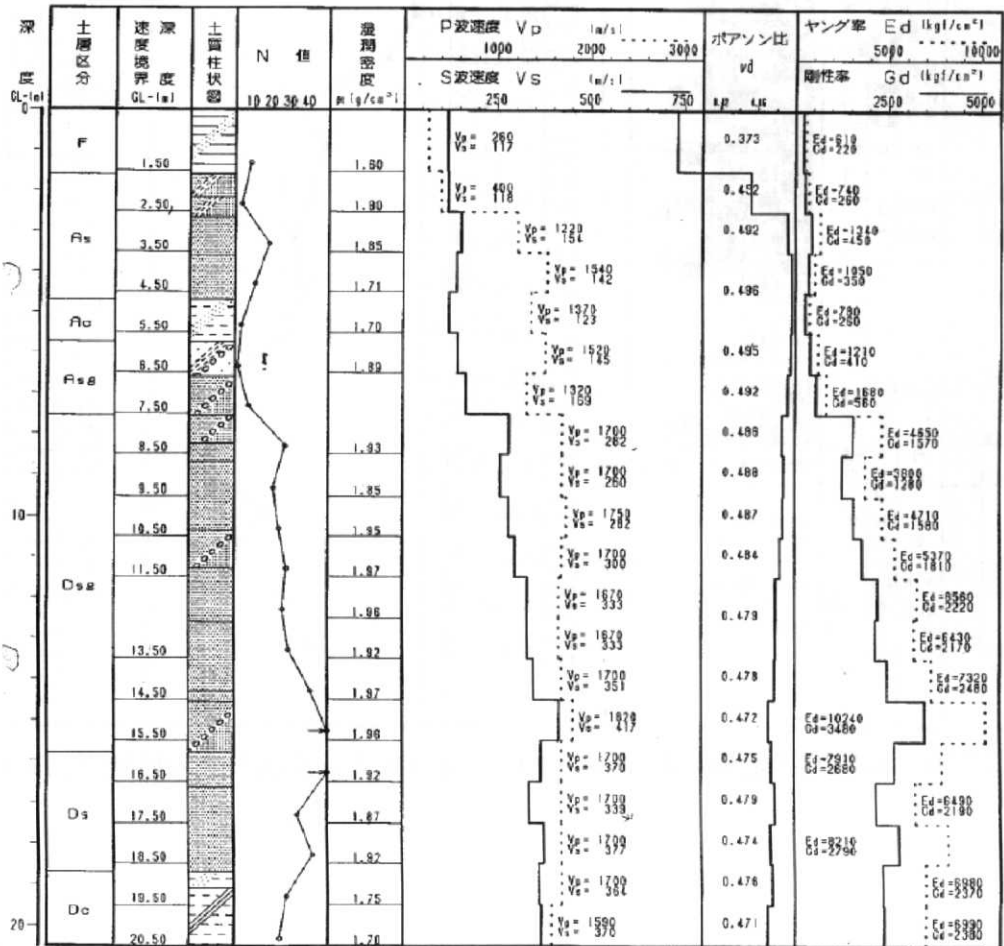


図 2.2.16 No. ED-3 地点の PS 検層結果 (独立行政法人土木研究所, 1996 b)

表 2.2.3 江戸川砂 A, B C 試料採取深度の原位置試験結果 (独立行政法人土木研究所, 1996 b)

項目		物性値			備考
種別		A (沖積)	B (洪積)	C (洪積)	
採取深度 (GL- m)		5.0 ~ 5.94	10.3 ~ 11.0	16.0 ~ 17.6	φ 150 mm
標準貫入試験結果 (回)		4	31	53, 38	Bor. No. ED-2
		3.6	24	53, 34	Bor. No. ED-3
PS 検層結果 (m/sec)	P 波	1370, 1520	1750, 1700	1700	Bor. No. ED-3
	S 波	134	270	390	

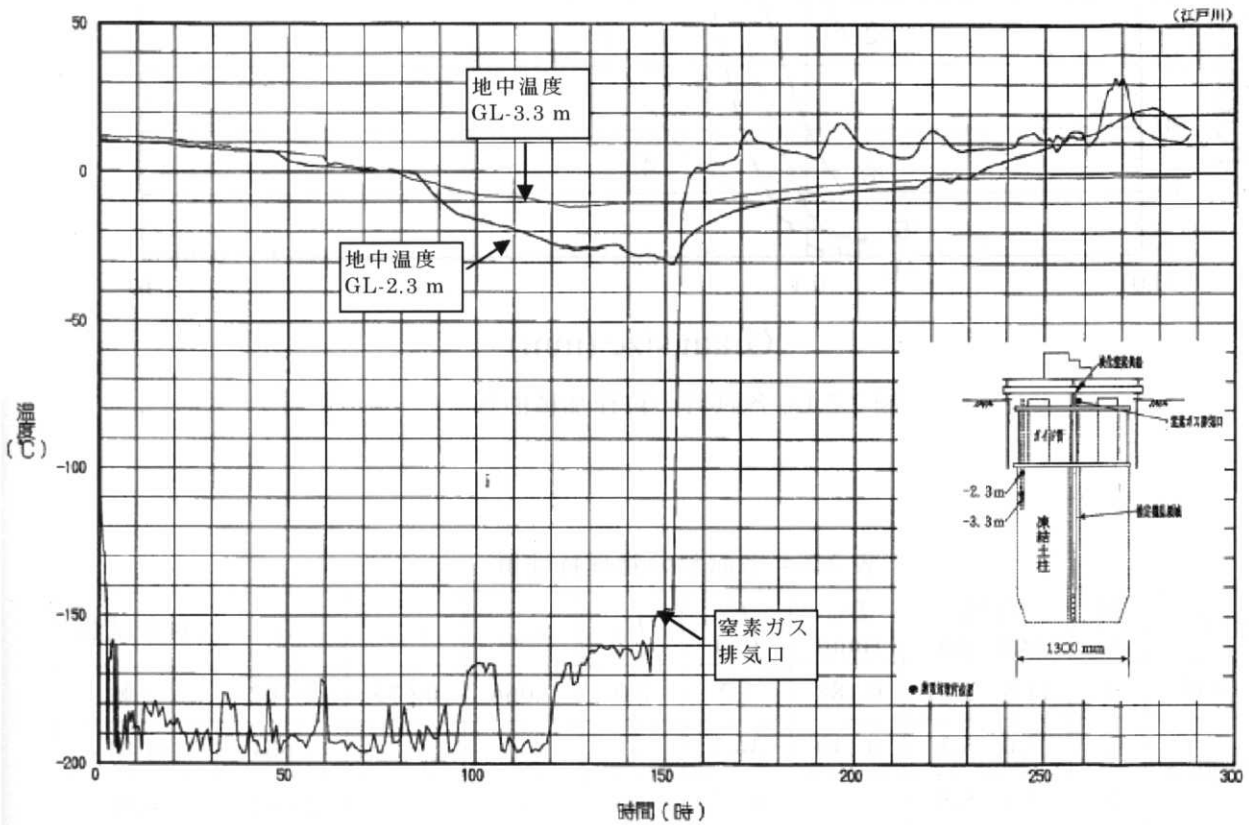


図 2.2.17 江戸川砂試料採取時の地盤凍結温度管理記録 (独立行政法人土木研究所, 1996 b)



本研究では、これまで概説した利根川砂および江戸川砂凍結試料との対比を目的として、豊浦砂でも一連の実験を実施している。

図 2.2.18 および表 2.2.4 に、本研究で用いた利根川砂、江戸川砂および豊浦砂の粒度分布と物理特性値を示す。

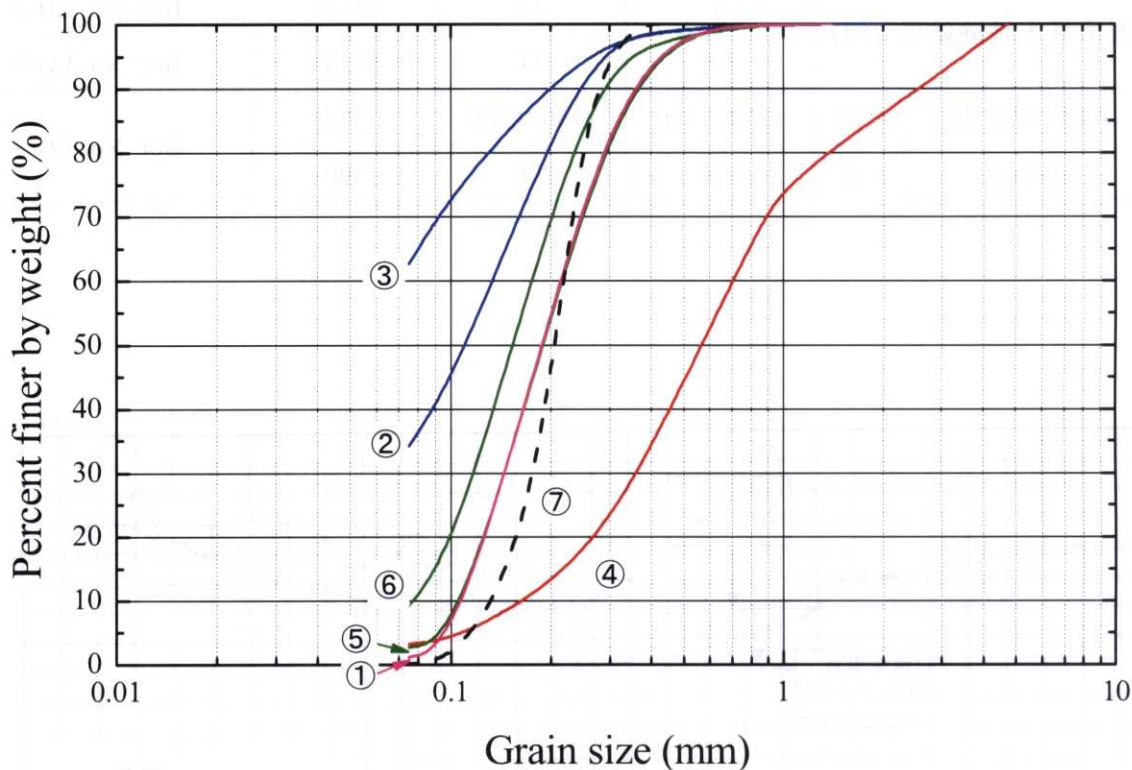


図 2.2.18 各試料の粒径加積曲線

表 2.2.4 各試料の物理特性値

試料名	記号	深度 (GL- m)	$D_{50}$ (mm)	$F_c$ (%)	$U_c$	$e_{max}$	$e_{min}$	$G_s$	対象試験
利根川砂	①	11.8~ 12.1	0.188	1.2	2.0	1.066	0.675	2.702	三軸
江戸川砂 A	②	5.0~ 5.3	0.110	34.3	-	-	-	2.661	中空
	③	5.3~ 5.5	-	62.7	-	-	-	2.661	三軸
江戸川砂 B	④	10.3~11.0	0.561	3.0	4.3	1.043	0.710	2.859	三軸・中空
江戸川砂 C	⑤	16.0~ 16.3	0.189	2.9	2.1	1.132	0.714	2.718	三軸
	⑥	17.0~17.6	0.153	9.4	1.8	1.765	1.052	2.758	中空
豊浦砂	⑦	-	0.204	0.1	1.6	0.975	0.561	2.635	三軸・中空

### 2.2.3 再構成試料

再構成試料は、各試料の試験終了後の攪乱試料を乾燥炉にて十分乾燥させた後、所定の密度になるよう調節して作成した。

利根川砂、および江戸川砂 C 試料の三軸試験で用いた再構成試料は、空中落下法により作成し、落下高さを変えることで凍結試料と同等の密度になるように調整した。江戸川砂 B 試料の三軸試験については、供試体を五層に区分して作成し、各層においてモールドに振動を与えて密度を調節した。同様に、江戸川砂 B, C 試料の中空供試体についても、モールドに振動を与えて密度調節を行ったが、供試体の区分は七層とした。

豊浦砂の三軸試験および中空ねじり試験で用いた供試体については、空中落下法により様々な密度の試料を作成して実験を実施した。

各再構成試料の作成手法を表 2.2.5 にまとめる。

本研究では所定の応力まで等方圧密後、液状化試験を実施する前に、一部の再構成試料において等方クリープ载荷や繰返し排水せん断履歴等の応力履歴を与え、その影響を検討している。このような再構成試料における初期応力履歴载荷については、第 4 章に詳細を述べる。

表 2.2.5 再構成試料の作成手法

試料名	対象試験	作成法	備考
利根川砂	三軸	空中落下	
江戸川砂 B	三軸	振動	5 層
	中空	振動	7 層
江戸川砂 C	三軸	空中落下	
	中空	振動	7 層
豊浦砂	三軸	空中落下	
	中空	空中落下	

## 2.3 実験装置の概要

### 2.3.1 小型三軸試験装置

#### (1) システム概要

鉛直荷重装置として、佐藤 (1991) が開発した AC サーボモーターと電磁クラッチ式軸荷重装置を用いた。この装置は電磁クラッチによる滑らかな荷重方向の反転と、AC サーボモーターによる 3000 倍までの軸ひずみ速度の変化が任意の変化率で可能である。

軸荷重装置は  $D/A$  変換機を介して、 $PC$  に接続されている。したがって、 $PC$  からの電気信号によって、任意の軸ひずみ速度で応力経路を自動制御することが可能である。

供試体の変形は外部軸変位計、ギャップセンサー、 $LDT$ 、および低差圧計を用いた体積変化測定装置によって計測し、有効応力（セル圧と間隙水圧の差）は高差圧計によって計測した。供試体を伝播する弾性波速度は、トップキャップ部に設置されたアクチュエーターによる  $P$  波と  $S$  波を、供試体側面に設置された加速度計により受信することで計測している。弾性波速度計測の詳細は 2.7 項で述べる。

本研究で用いた小型三軸せん断試験装置の概要を図 2.3.1 に示す。

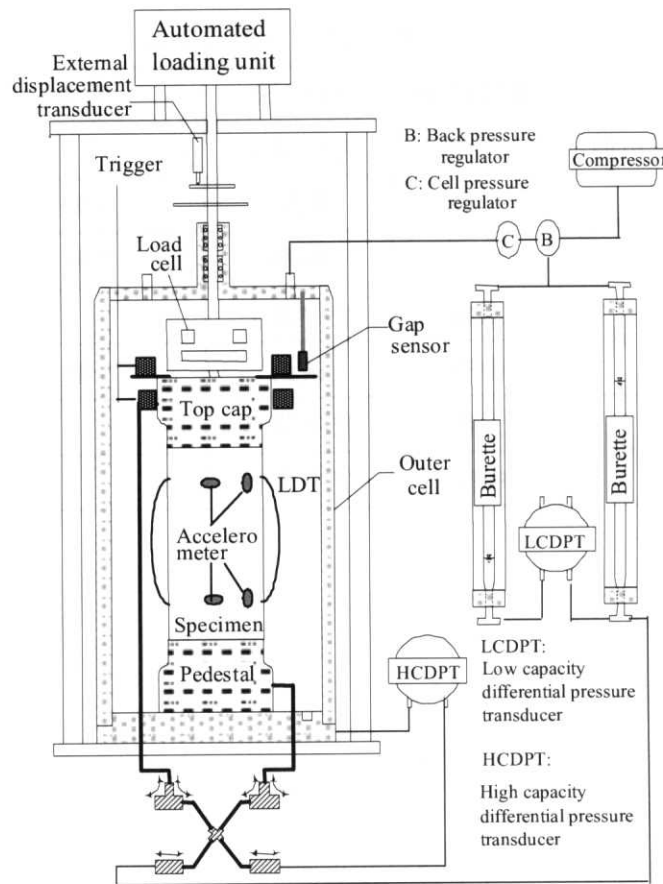


図 2.3.1 小型三軸せん断試験装置の概要（供試体サイズ  $h=10$  cm,  $\phi=5$  cm）

## (2) 鉛直荷重載荷装置

軸荷重の載荷には、電磁クラッチ式軸荷重載荷装置を用いた。この軸荷重載荷装置は最大 500 kgf (5 kN)まで載荷することが可能である。

### a) 電磁クラッチ式軸荷重載荷装置の仕組み

図 2.3.2 に載荷装置の詳細を示す。AC サーボモーターは試験中に反転させることなく、常に一方向に回転する。モータの回転はギヤによって減速され、平歯車を経て、かさ歯車 A, B に伝達される。かさ歯車 A, B は、回転速度は等しく、同じ軸を中心にして逆方向に回転する。かさ歯車 A と電磁クラッチ A が接続されていると、回転軸が載荷方向に回転する。一方、かさ歯車 B と電磁クラッチ B が接続されていると、回転軸が除荷方向に回転する。したがって、モータの回転方向を逆転させずに、電磁クラッチの切り替えだけで載荷方向を逆転させることができる。そのため、時間遅れのない滑らかな微小繰り返し載荷を行うことができる。

### b) 電磁クラッチ式軸載荷装置の特徴

以下に、電磁クラッチ式軸載荷装置の特徴を簡単に述べる。

1. ひずみ速度の一定性が高い。
2. 載荷方向の反転時のバックラッシュ(遊び)がない。
3. 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。
4. 電磁ブレーキにより、静止状態が安定して保持できる。
5. 安価である。
6. 載荷方向の制御が簡単である。
7. 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。

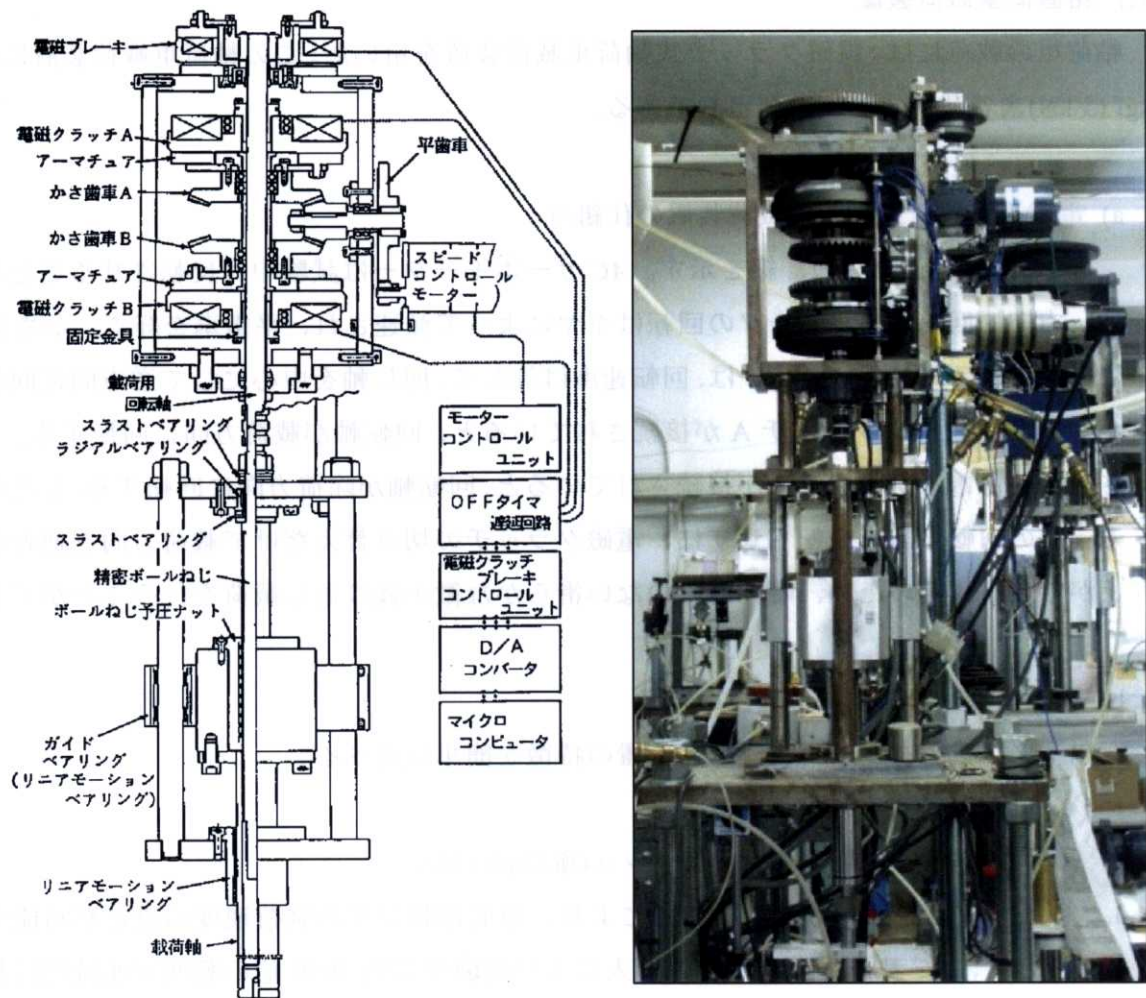


図 2.3.2 電気クラッチ式軸加重載荷装置とその写真

### (3) 背圧載荷装置

空圧レギュレータによって調整された一次圧は、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、パイプを通してペDESTアルと試料キャップの排水用水路に伝達され、ポーラスストーン及び濾紙を通して供試体に載荷される。

### (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、A/D 変換機によって PC に取り込まれ、記録される。A/D 変換機の入力レンジは、10V(±5V)である。測定項目は、鉛直軸荷重、側方有効拘束圧 (セル圧-間隙水圧)、軸変位 (外部軸変位計・ギャ

ップセンサー・*LDT*)、供試体体積変化量(排水量)である。記録項目は、測定した以下の5項目と時間である。

a) 荷重測定装置

鉛直軸荷重は、三軸セル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 100 kgf (1 kN) である。

b) 側方有効拘束圧測定装置

高差圧計により、セル圧と間隙水圧の差を有効応力として電圧に変換して計測した。背圧システムの配管に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。

c) 軸ひずみ測定装置

軸ひずみの測定は、外部軸変位計 (容量 25 mm)、うず電流式非接触型変位計 (以下ギャップセンサー (*GS*)・容量 4mm)、および *LDT* (容量 2mm) にて実施した。外部軸変位計は、三軸セルの外においてロッドの軸変位を測定し、*GS* はセル内において供試体上部のキャップの変位を測定している。また、*LDT* は供試体側面の鉛直変位を測定している。

*LDT* はりん青銅で作られ、サイズは長さ 75mm、幅 2.5mm、厚さ 0.2 mm であり、*LDT* 中央部に貼られた 2 枚のひずみゲージと 2 枚のダミーゲージでホイストンブリッジが組まれている。三軸試験等の室内要素試験における供試体の変形は必ずしも一様でなく、外部変位計や *GS* の計測値には、ベディングエラーの影響が含まれている。しかし、供試体中央部の変位を計測する *LDT* は、これらの影響を少なからず排除できる (Goto, et al., 1991)。

d) 供試体体積変化測定装置

本研究における主要な実験では飽和した供試体を用いるので、供試体上下端面と側面にベディングエラーがなければ、供試体内から排水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、低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し、体積変化量を測定する。ビュレットは、測定範囲が 25 ml までのものを用いた。

## 2.3.2 中型中空ねじり試験装置

### (1) システム概要

通常の非排水繰返し载荷試験のひずみレベルは数%~十%程度である。大変形を伴う液状化流動量の予測についてはケーススタディや模型実験に依存しており、要素レベルで検証した例は少ない。本研究では、液状化時の大変形挙動を把握するため、せん断ひずみ両振幅 $\gamma_{(DA)}$ を100%程度まで計測できるように改良された中型中空ねじり試験機(佐藤ら, 2007)を用いて、非排水繰返し载荷試験を実施した。

载荷装置は鉛直载荷装置部とねじり载荷装置部で構成され、小型三軸試験装置と同様、ACサーボモーターと電磁クラッチ式荷重载荷装置を用いている。軸载荷装置はD/A変換機を介して、PCに接続されている。したがって、PCからの電気信号によって、任意の軸ひずみ速度で応力経路を自動制御することが可能である。

供試体の変形は外部軸変位計、および低差圧計を用いた体積変化測定装置によって計測し、有効応力(セル圧と間隙水圧の差)は高差圧計によって計測した。これら測定装置の詳細は前述の小型三軸試験装置と同様である。供試体を伝播する弾性波速度は、トップキャップ部に設置されたアクチュエーターによるP波とS波を、供試体側面に設置された加速度計により受信することで計測している。弾性波速度計測の詳細は2.7項で述べる。

本研究で用いた中型中空ねじり試験装置の概要を図2.3.3に示す。

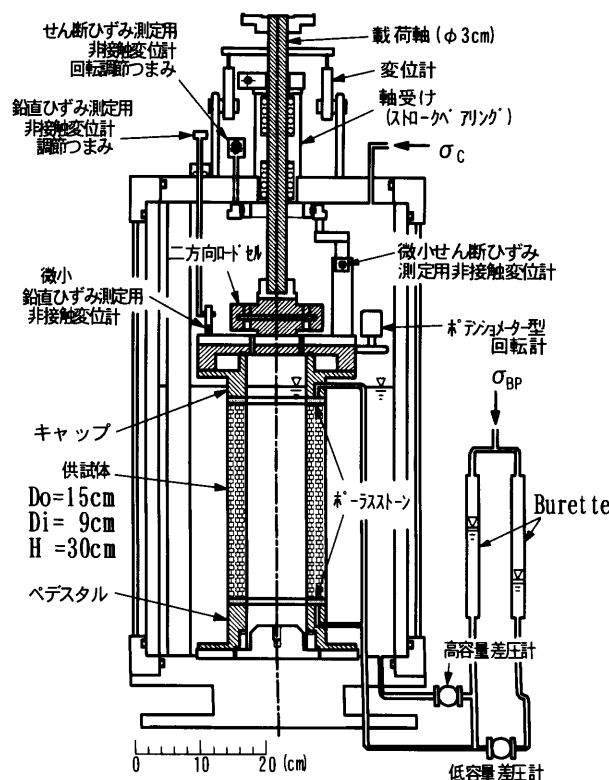


図 2.3.3 中型中空ねじり断試験装置の概要 (供試体サイズ  $h=30\text{ cm}$ ,  $d_i=5\text{ cm}$ ,  $d_o=15\text{ cm}$ )



## (2) 鉛直・ねじり荷重装置

鉛直軸荷重の荷重には、電磁クラッチ式軸荷重装置を用いた（図 2.3.4 a））。この軸荷重装置は最大 800 kgf (8 kN)まで載荷することが可能である。なお、電磁クラッチ式軸荷重装置の構造は、前述の小型三軸試験装置と同じである。また、上記ひずみ制御装置とは別に、ペロフラムシリンダーが左右対称に二個装備されており、応力制御載荷も可能となっている。しかし、本研究の実験はすべてひずみ制御で実施しており、ペロフラムシリンダーは用いていない。

ねじり荷重装置部分は、図 2.3.4 a) に示すように、ひずみ制御鉛直載荷と同じ装置を水平に置き、軸荷重と直行する方向の直線運動をボールねじナットが行う。ねじり荷重部分の詳細図（図 2.3.4 b））に示すように、ボールねじナットをねじり駆動円筒に巻きつけて固定した二本のスチールベルトで連結することで、水平直線運動を遊びのない状態で回転運動に変換することができ、 $10^{-3}$  %レベルの微小変形から、せん断ひずみ両振幅 100 %程度の大ひずみレベルまで載荷可能になっている。ねじり荷重容量は、最大トルク 150 Nm である。

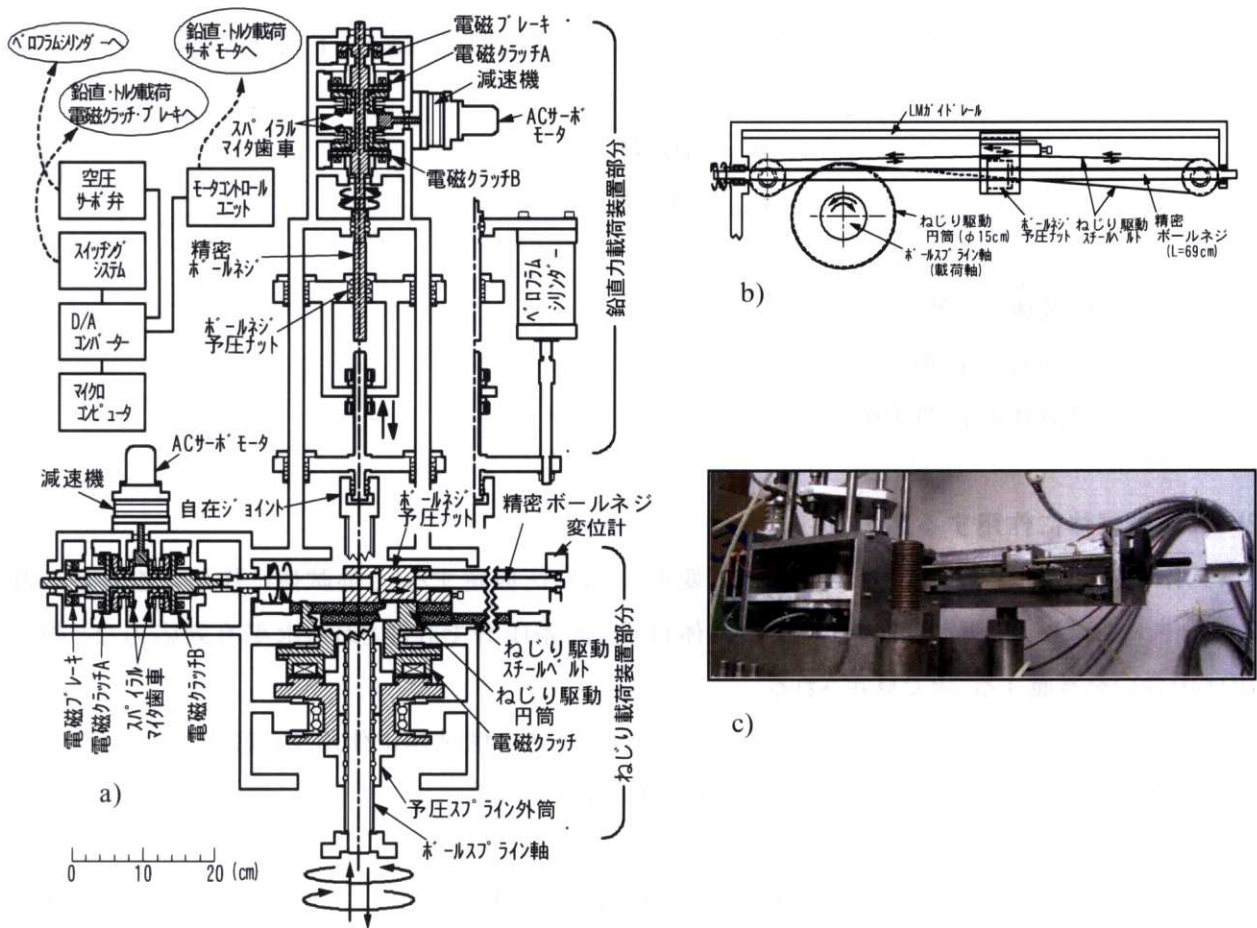


図 2.3.4 a) 中型中空ねじり試験装置、b) ねじり荷重部分詳細図と c) 写真



## 2.4 応力とひずみの定義

三軸試験や中空ねじり試験において、供試体の正確な応力・ひずみを知るために、また所定の応力・ひずみで制御するためには、外力、変位を計測した後、供試体に作用する応力とひずみを算定する必要がある。ここでは、そのための算定式を示す。

### 2.4.1 三軸円筒供試体

#### (1) 三軸供試体の寸法とひずみ

三軸供試体は、セル圧による側方全応力 $\sigma_r$ 一定条件下において鉛直全応力 $\sigma_v$ が変化する。この応力変化による供試体の変形に伴って、高さ変化量 $\Delta H$ 、供試体体積変化量 $\Delta V$ が計測されたとすると、三軸円筒供試体の高さ $H$ 、直径 $d$ は以下のように計算される。

$$\begin{aligned} H &= H_0 - \Delta H \\ d &= d_0 \times \sqrt{(1 - \varepsilon_{vol}) / (1 - \varepsilon_v)} \end{aligned} \quad [2.1]$$

上式における $\varepsilon_v$ 、 $\varepsilon_{vol}$ は、それぞれ鉛直ひずみ、および体積ひずみであり、下式で示される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= \Delta H / H_0 \\ \varepsilon_{vol} &= \Delta V / V_0 \end{aligned} \quad [2.2]$$

ここで、

- $d_0$ : 供試体の初期直径
- $H_0$ : 供試体の初期高さ
- $V_0$ : 供試体の初期体積

#### (2) 三軸供試体に作用する応力

供試体は、常に円筒形を保ったまま一様に変形していると仮定すると、供試体に作用する鉛直応力は、ロードセルによって測定される軸力、供試体自重、高差圧計で計測される水平有効応力などの緒力の釣り合いを考慮することで算定される。

以下に供試体を飽和させ、セル圧、背圧を作用させたときの供試体に作用する応力状態を考える。図 2.4.1 を参照して考えると、差圧計による応力差  $D.P.$  は、

$$D.P. = (\sigma_c - \sigma_{BP}) + (h_{cl} - h_B) \cdot \gamma_w \quad [2.3]$$

ここで、

$\sigma_{BP}$ : ピュレットを通じて作用させる背圧

$\sigma_c$ : セル圧

$h_{cl}$ : セル水位

$h_B$ : ピュレット水位

$\gamma_w$ : 水の単位体積重量

と表される。したがって、供試体断面(a-a)における応力は、メンブレンを等方弾性体と仮定した張力補正式 (Goto, 1986) を考慮し、以下のように表せる。

$$\begin{aligned}\sigma'_v &= D.P. + \frac{L_c}{A_s} + \Delta\sigma_{vm} + (h_{cl} - h) \cdot \frac{A_c}{A_s} \cdot \gamma_w + (h - z) \cdot \gamma'_s \\ \sigma'_h &= D.P. + \Delta\sigma_{rm}\end{aligned}\quad [2.4]$$

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{vm} &= - (8/3) [E_m \cdot t (2\varepsilon_{vm} + \varepsilon_{\theta m})] / d \\ \Delta\sigma_{rm} &= - (4/3) [E_m \cdot t (\varepsilon_{vm} + 2\varepsilon_{\theta m})] / d\end{aligned}\quad [2.5]$$

ここで、

$L_c$ : ロードセルによって計測される鉛直力 (供試体がない状態でゼロ設定)

$A_s$ : 供試体平均断面積

$A_c$ : キャップ断面積

$\Delta\sigma_{vm}$ : 鉛直方向メンブレン初期張力

$\Delta\sigma_{rm}$ : 半径方向メンブレン初期張力

$h$ : 供試体平均高さ

$\gamma'_s$ : 供試体水中単位体積重量

$\varepsilon_{vm}$ : メンブレン鉛直ひずみ (=  $\varepsilon_v$ )

$\varepsilon_{\theta m}$ : メンブレン半径ひずみ (=  $\varepsilon_h$ )

$E_m$ : メンブレンのヤング率 (= 1470 kPa)

$t$ : メンブレン厚 (= 0.03 cm)

本研究では、供試体応力の代表値としては、供試体中央高さ (式[2.4]において  $z = h/2$ ) における有効応力を用いた。

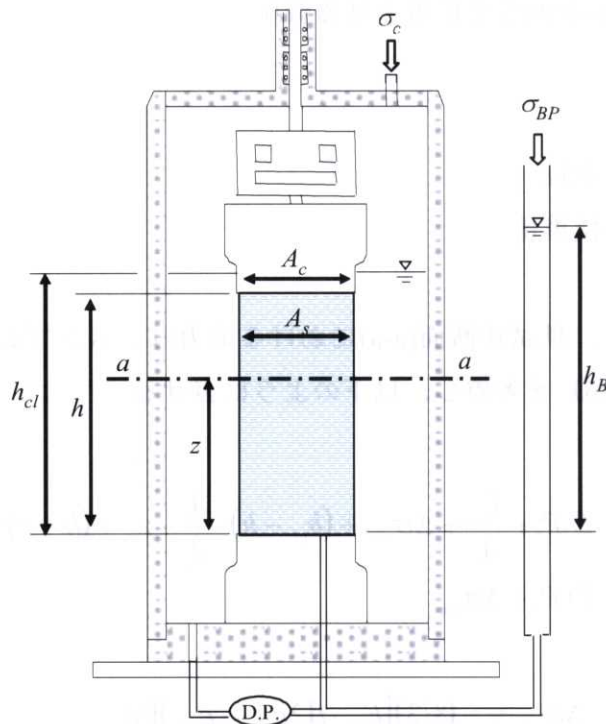


図 2.4.1 三軸供試体に作用する応力

## 2.4.2 中空円筒供試体

### (1) 中空円筒供試体の寸法とひずみ

#### a) 鉛直ひずみ $\varepsilon_v$ と体積ひずみ $\varepsilon_{vol}$

中空円筒供試体の鉛直ひずみ  $\varepsilon_v$  と体積ひずみ  $\varepsilon_{vol}$  については、前述の三軸供試体と同様の式 [2.2] で表される。中空供試体の変形に伴って、高さ変化量  $\Delta H$ 、供試体体積変化量  $\Delta V$  が計測されたとすると、中空円筒供試体の高さ  $H$ 、外径  $d_o$ 、内径  $d_i$  は以下のように計算される。

$$\begin{aligned}
 H &= H_0 - \Delta H \\
 d_o &= d_{o0} \times \sqrt{(1 - \varepsilon_{vol}) / (1 - \varepsilon_v)} \\
 d_i &= d_{i0} \times \sqrt{(1 - \varepsilon_{vol}) / (1 - \varepsilon_v)}
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

ここで、

$d_{o0}$ : 供試体の初期外径

$d_{i0}$ : 供試体の初期内径

$H_0$ : 供試体の初期高さ

$V_0$ : 供試体の初期体積

b) せん断ひずみ $\gamma$

中空供試体では、トルクがキャップ・ペDESTALを介して供試体に伝わる。したがって、供試体に生じるせん断ひずみ $\gamma$ は、図 2.4.2 a) に示すように半径方向に直線的に分布し、下式のように半径の比によって表せる。

$$\frac{\gamma_o}{\gamma_i} = \frac{r_o}{r_i} \quad [2.7]$$

ここで、

$\gamma_o$ : 外径におけるせん断ひずみ

$\gamma_i$ : 内径におけるせん断ひずみ

$r_o$ : 外半径

$r_i$ : 内半径

上式より、 $r_o$ と $r_i$ の差が大きいほど、せん断ひずみは非一様に分布する。三軸試験供試体のような中実円筒供試体 ( $r_i = 0$ ) では、中心におけるせん断ひずみ $\gamma_i$ はゼロとなる。中空供試体を用いるのは、このせん断ひずみ非一様性の改善のためであり、薄肉で半径が大きいほど理想的であるといえる。

図 2.4.2 a)を参照すると、断面積で重み付けしたせん断ひずみの平均値は下式で表される。本研究では、この平均せん断ひずみ $\gamma$ を用いている。

$$\gamma = \frac{\int r dA}{\int dA} = \frac{2\theta \cdot (r_o^3 - r_i^3)}{3(r_o^2 - r_i^2)} \quad [2.8]$$

ここで、

$\theta$ : 回転角 [rad]

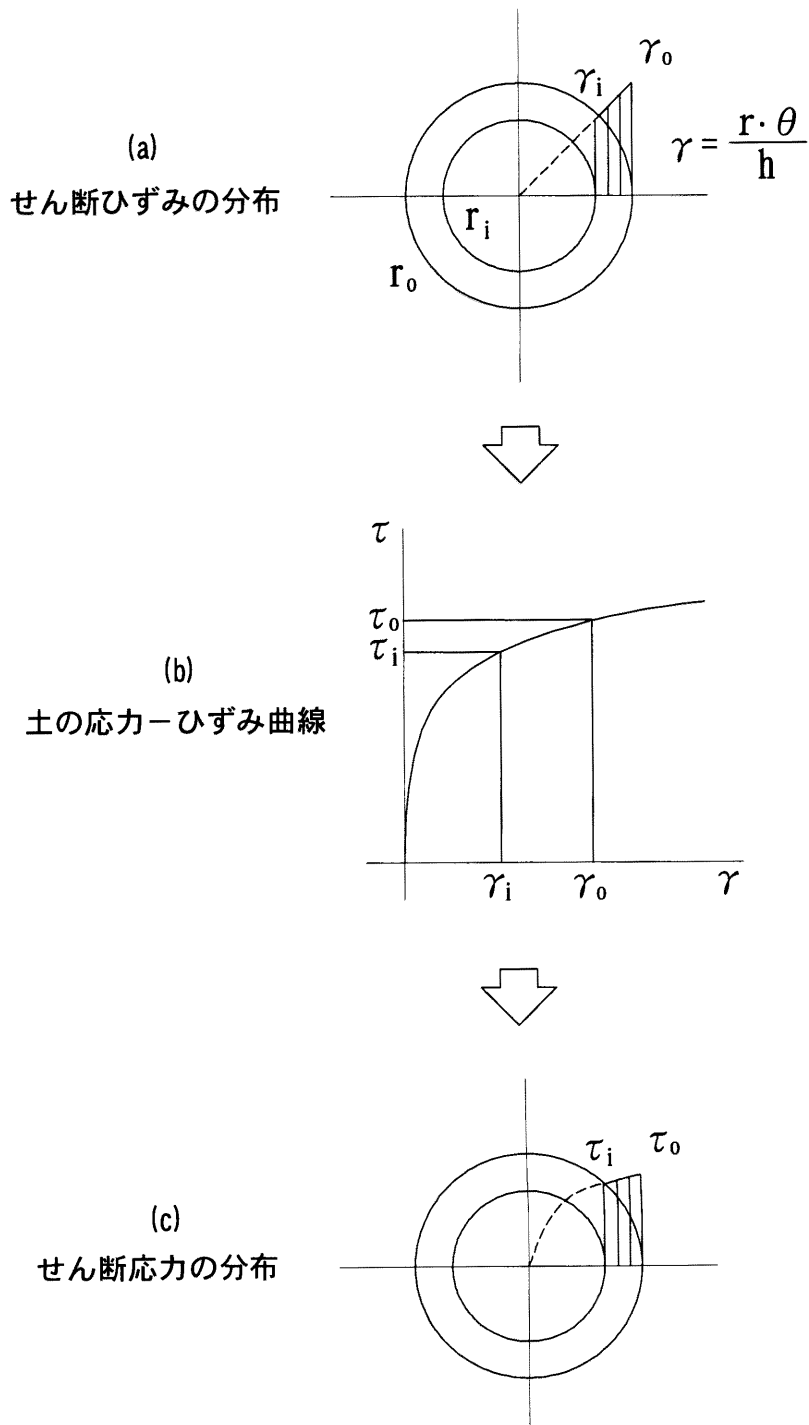


図 2.4.2 中空円筒供試体のせん断応力・せん断ひずみの分布

## (2) 中空円筒供試体に作用する応力

中空円筒供試体を図 2.4.3 に示すような座標軸で考え、供試体微小要素に作用する応力を図中に示したように定義する。

以下に各応力（せん断応力、水平面内応力、主応力）について述べるが、鉛直応力に関しては前述の三軸供試体と同じ式で表されるため、ここでは割愛する。

### a) せん断応力

ねじりせん断試験において中空供試体に作用するせん断応力  $\tau_{z\theta}$  は、図 2.4.2 c) に示したように半径方向に非線形に分布する。したがって、せん断応力についてはこの分布状態を仮定して算定する必要がある。

$T$  を供試体上端面全体に作用するトルクとすれば、

$$T = \int_{r_i}^{r_o} \int_0^{2\pi} \tau_{z\theta} r^2 d\theta dr = 2\pi \int_{r_i}^{r_o} \tau_{z\theta} r^2 dr \quad [2.9]$$

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

今、図 2.4.4 a) に示すように供試体を線形弾性体と仮定すると、せん断応力は半径方向に線形な分布となるので次式で表せる。

$$\tau_{z\theta} = k \cdot r \quad [2.10]$$

これを式[2.9]に適用すれば、

$$\begin{aligned} T &= 2\pi \int_{r_i}^{r_o} k \cdot r^3 dr = \frac{\pi}{2} \cdot (r_o^4 - r_i^4) \cdot k \\ \therefore k &= \frac{2T}{\pi \cdot (r_o^4 - r_i^4)} \end{aligned} \quad [2.11]$$

となり、平均半径でのせん断応力  $\tau_{z\theta}^e$  は下式となる。

$$\tau_{z\theta}^e = k \cdot \frac{r_o + r_i}{2} = \frac{T}{\pi \cdot (r_o^2 + r_i^2) \cdot (r_o - r_i)} \quad [2.12]$$

次に、図 2.4.4 b) に示すように供試体を剛-完全塑性体と仮定すると、せん断応力は半径方向に一様な分布となり、

$$\tau_{z\theta} = \tau_{z\theta}^p = \text{const.} \quad [2.13]$$

これを式[2.9]に適用すれば、

$$T = 2\pi \int_{r_i}^{r_o} \tau_{z\theta}^p \cdot r^2 dr = \frac{2}{3} \pi \cdot (r_o^3 - r_i^3) \cdot \tau_{z\theta}^p \quad [2.14]$$

となり、平均半径でのせん断応力  $\tau_{z\theta}^p$  は以下のように計算される。

$$\tau_{z\theta}^p = \frac{3T}{2\pi \cdot (r_o^3 - r_i^3)} \quad [2.15]$$

福島 (1982) は、せん断ひずみ $\gamma$ が小さいとき ( $\gamma < 1\%$ ) は、線形弾性体と剛一完全塑性体の平均を取った  $\tau_{z\theta}^m = (\tau_{z\theta}^e + \tau_{z\theta}^p)$  が、変形が大きいとき ( $\gamma > 1\%$ ) では  $\tau_{z\theta}^p$  を用いることが妥当であると指摘している。本研究における中空ねじり試験では、液状化に伴う大変形挙動 ( $\gamma$  数十~100%) を対象としていることから、せん断応力としては式[2.15]の  $\tau_{z\theta}^p$  を用いて算定した。(本研究では今後  $\tau$  として表す)

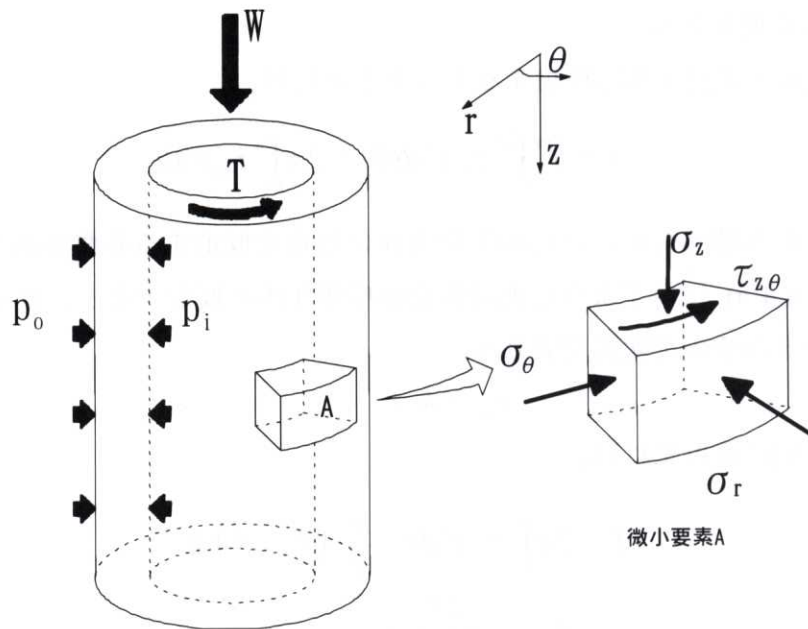


図 2.4.3 中空円筒供試体に作用する応力と座標軸

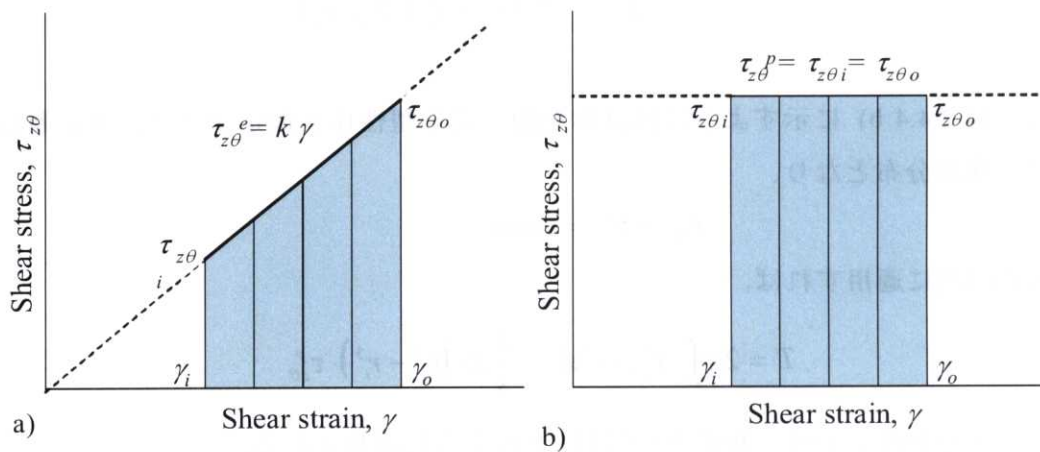


図 2.4.4 a) 弾性 b) 塑性せん断応力とせん断ひずみの関係

しかし、実際の中空ねじり試験では、供試体に加えられた応力の一部はメンブレンにも加わり、供試体は変形に伴うメンブレンによる拘束応力を受ける。したがって、ねじりせん断試験において供試体に作用する真のせん断応力  $T$  を求めるためには、下式のようにメンブレン張力  $\Delta T_m$  を、実測されたトルク  $T_{LC}$  から引いた後に算定する必要がある。

$$T = T_{LC} - \Delta T_m \quad [2.16]$$

以下に、図 2.4.5 を参照してメンブレン張力  $\Delta T_m$  の算定式を導く。なお、 $\Delta T_m$  の算定上、①メンブレンはヤング率  $E_m = 1470$  kPa、ポアソン比  $\nu = 0.5$  (吉嶺, 1996)、②メンブレンは完全弾性体であり、クリープ特性は考えない、および③メンブレンは円筒形を保持し、供試体と一体となって変形することを初期仮定として考慮している。

$$\begin{aligned} \Delta T_m &= r_o \cdot \left\{ \pi (r_o + t_m)^2 - \pi \cdot r_o^2 \right\} \cdot \tau_{z\theta mo} + r_i \cdot \left\{ \pi \cdot r_i^2 - \pi (r_i - t_m)^2 \right\} \cdot \tau_{z\theta mi} \\ &\approx 2\pi \cdot t_m \cdot \left( r_o^2 \cdot \tau_{z\theta mo} + r_i^2 \cdot \tau_{z\theta mi} \right) \end{aligned} \quad [2.17]$$

ここで、

$t_m$ : メンブレン厚

$r_o$ : 外半径

$r_i$ : 内半径

$\tau_{z\theta mo}$ : 外メンブレンに作用するせん断応力

$\tau_{z\theta mi}$ : 内メンブレンに作用するせん断応力

メンブレンのせん断剛性率  $G_m$  は、 $\nu = 0.5$  より、式[2.15]で表される。したがって、メンブレンに働くせん断応力  $\tau_{z\theta m}$  は、式[2.16]で表される。

$$G_m = \frac{E_m}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{E_m}{3} \quad [2.18]$$

$$\tau_{z\theta m} = G_m \cdot \gamma_{z\theta m} = \frac{E_m}{3} \cdot \gamma_{z\theta m} \quad [2.19]$$

ここで、

$\gamma_{z\theta m}$ : メンブレンのせん断ひずみ

式[2.19] を式[2.17]に代入すると、下式が得られる。

$$\Delta T_m = \frac{2}{3} \pi \cdot t_m \cdot E_m \cdot \left( r_o^2 \cdot \gamma_{z\theta mo} + r_i^2 \cdot \gamma_{z\theta mi} \right) \quad [2.20]$$



ここで、

$\gamma_{z\theta mo}$  : 外メンブレンのせん断ひずみ

$\gamma_{z\theta mi}$  : 内メンブレンのせん断ひずみ

前述の仮定③を考慮すると、メンブレンに生じるせん断ひずみは下式で表せる。

$$\begin{aligned}\gamma_{z\theta mo} &= \frac{r_o}{H} \cdot \theta \\ \gamma_{z\theta mi} &= \frac{r_i}{H} \cdot \theta\end{aligned}\tag{2.21}$$

ここで、

$\theta$ : 回転角 [rad]

$H$ : 供試体高さ

したがって、式[2.17]より、メンブレン張力 $\Delta T_m$ は下式で求められる。

$$\Delta T_m = \frac{2}{3} \pi \cdot t_m \cdot E_m \cdot (r_o^3 + r_i^3) \cdot \frac{\theta}{H}\tag{2.22}$$

しかし、このように導かれた理論式[2.16]および[2.22]によるメンブレン張力補正は、必ずしも実験結果と一致するとはいえない。本研究では第6章において、メンブレン内部を水に置き換えた供試体により、大ひずみ領域でのメンブレン張力を計測し、理論値との比較を実施している。

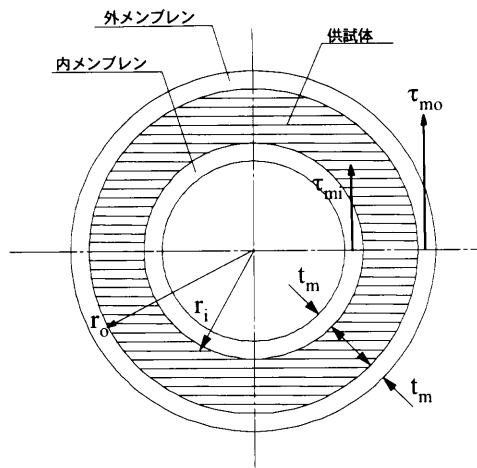


図 2.4.5 メンブレンに作用するせん断応力

b) 水平面内応力  $\sigma_r, \sigma_\theta$

図 2.4.3 にて示した微小要素に作用する応力の釣り合いを考慮すると、 $r$  面にはせん断応力が作用しないため、水平面内応力  $\sigma_r, \sigma_\theta$  の関係は下式で表される。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad [2.23]$$

この微分方程式を解くためには、変数を一つに減らす必要がある。ここでは、弾性体の構成関係を用いて、 $\sigma_r, \sigma_\theta$  の半径方向の分布を仮定し、 $\sigma_r, \sigma_\theta$  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要素に適用すると、一般に水平応力成分の分布が次のような形で表されることが知られている（吉嶺, 1996）。

$$\sigma_r = \frac{A}{r^2} + 2C \quad [2.24]$$

$$\sigma_\theta = -\frac{A}{r^2} + 2C \quad [2.25]$$

式[2.24]と式[2.25]を境界条件  $\sigma_r|_{r=r_i} = p_i, \sigma_r|_{r=r_o} = p_o$  の下で定数  $A, C$  に関して解くと、下式を得る。

$$\sigma_r = \frac{p_o \cdot r_o^2 - p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{r_o^2 \cdot r_i^2 \cdot (p_o - p_i)}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \frac{1}{r^2} \quad [2.26]$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_o \cdot r_o^2 - p_i \cdot r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{r_o^2 \cdot r_i^2 \cdot (p_o - p_i)}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \frac{1}{r^2} \quad [2.27]$$

ここで、水平応力の平均半径方向の平均値を  $\sigma_r^*, \sigma_\theta^*$  とすると、

$$\sigma_r^*(r_o - r_i) = \int_{r_i}^{r_o} \sigma_r dr \quad [2.28]$$

$$\sigma_\theta^*(r_o - r_i) = \int_{r_i}^{r_o} \sigma_\theta dr \quad [2.29]$$

上式に式[2.26], [2.27]を代入して整理すると、中空供試体の平均水平応力は下式のように計算される。

$$\sigma_r^* = \frac{p_o \cdot r_o + p_i \cdot r_i}{r_o + r_i} \quad [2.30]$$

$$\sigma_\theta^* = \frac{p_o \cdot r_o - p_i \cdot r_i}{r_o - r_i} \quad [2.31]$$

本研究では、 $p_o = p_i$  であるため、式[2.32]となり、水平面内に作用する応力は等しくなる。今後、水平面内の応力を一括して、 $\sigma_h$ と記する。

$$\sigma_r^* = \sigma_\theta^* \quad [2.32]$$

c) 主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$

図 2.4.6 を参照してモールの応力円を考えると、中空円筒供試体に作用する最大主応力 $\sigma_1$ 、中間主応力 $\sigma_2$ 、および最小主応力 $\sigma_3$ は下式で表される。

$$\begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{cases} = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2} \quad [2.33]$$

$$\sigma_2 = \sigma_r \quad [2.34]$$

また、最大主応力 $\sigma_1$ が鉛直方向からなす角 $\alpha$ は、下式となる。

$$\tan 2\alpha = \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \quad [2.35]$$

なお、式[2.33], [2.34]より、中間主応力係数 $b$ は下式で表される。

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\sigma_r - \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2}}{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2} + 1 \right] \quad [2.36]$$

なお、これまでは図 2.4.3 の座標系に倣い、鉛直応力を $\sigma_z$ と表記してきたが、今後鉛直応力は $\sigma_v$ と表記する。また、 $\sigma_v = \sigma_h$ のときの等方応力を $\sigma_c$ とする。

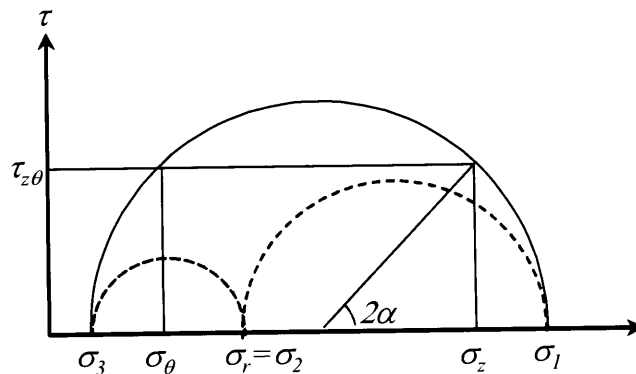


図 2.4.6 中空供試体の応力のモール円

## 2.5 実験手順

ここでは、本研究において実施した小型三軸試験と中型中空ねじり試験方法について述べる。なお、凍結試料を用いた三軸試験の準備については、融解時のひずみを適切に計測するため、供試体初期寸法を計測するまで供試体を常温に曝さないよう配慮している。ここでは、その手順も詳細に記している。

なお、凍結試料の整形、微小変形特性の計測、および凍結・融解ひずみ計測の詳細については、次項以降に述べる。

### 2.5.1 小型三軸試験

#### (1) 供試体準備

##### a) 凍結試料

1. メンブレンを用意し、供試体高さおよびLDTおよび加速度計装着位置の目安の印をつける。
2. セル上盤を取り付けた三軸セルを-20℃に保たれた冷凍室に搬入し、ペDESTALとキャップに高真空グリースを薄く塗る。
3. 供試体に初期上載圧が作用しないように、シャフト、ロードセルおよびキャップ（アクチュエーター含む）の重量に相当する錘を用いて、軸のバランスをとる。
4. 整形された凍結試料にメンブレンを被せ、ペDESTALにメンブレンを被せる。ペDESTALへの固定はゴムバンドを用いる。
5. バランスをとりながらキャップを静かに下ろし、供試体に接した時点で軸固定装置（クランプ）を締める。軸とキャップを固定した状態でメンブレンをキャップに被せ、ゴムバンドで固定する。
6. 排水用チューブをキャップとペDESTALに取り付ける。
7. クランプを開放し、キャップの動きを自由にした状態で真空レギュレーターにより所定の負圧（＝融解拘束圧）を作用させる。
8. クランプを締め、 $\pi$ テープで供試体直径を三箇所測定し、その平均値からメンブレン厚さの二倍を引くことで、供試体融解前直径とする。また、载荷軸上のアタッチメントとクランプ支持板の間を三箇所ノギスで測定し、その平均値と予めダミー供試体で測定したときの値から、供試体融解前高さを求める。以上の手順は、凍結試料に拘束圧を作用させて融解前体積を計測するまで、常温による僅かな融解体積変化も生じさせないことを目的としており、作業はすべて-20℃に保たれた冷凍室内にて実施する。
9. 錘を外し、供試体側の負圧のレバーを閉じる（非排気状態）。
10. 真空レギュレーターのホースを外し、供試体がセットされた三軸セルを実験室の計測装置に移動させる。この移動時間は短いほど良い（本研究では3分程度）。

11. 三軸セル移動後、直ちに錘をセットし、クランプを開放する。また、予め真空レギュレーターにより所定の負圧 (= 融解拘束圧) に設定しておいた脱気水槽用のタンクと三軸セルをホースでつなぎ、供試体側の排水 (排気) レバーを開ける。
12. 測定器を設置し、所定の拘束圧下における供試体の融解ひずみを計測する (2.8 参照)。
13. 融解後、クランプを締め、供試体の直径と高さを 8.の方法で計測する。

#### b) 再構成試料

1. メンブレンを用意し、供試体高さ  $LDT$  および加速度計装着位置の目安の印をつける。
2. ペDESTAL に高真空グリースを薄く塗り、メンブレンを装着した後、ゴムバンドで固定する。
3. 二つ割モールドをメンブレンの外側に組み立て、バンドにより固定し、モールド外側にメンブレンを折り返す。
4. メンブレンをモールドに密着させる目的で負圧を作用させ、砂受けを装着する。
5. 所定の相対密度になるように高さを決定し、漏斗を用いて空中落下法により供試体を作成する。また、振動法による場合は、供試体高さを五層に分け、所定の相対密度になるように各層にてモールドに木槌で振動を与える。
6. 供試体高さよりも余盛になる程度に試料を作成し、定規を用いて端面を平らで滑らかに整形する。
7. セル上盤を取り付け、錘によりバランスをとりながらキャップを静かに下ろし、供試体に接した時点で軸固定装置 (クランプ) を締める。軸とキャップを固定した状態でメンブレンをキャップに被せ、ゴムバンドで固定する。
8. 排水用チューブをキャップとペDESTAL に取り付ける。
9. クランプを開放し、キャップの動きを自由にした状態で、脱気水槽用のタンクを介して真空レギュレーターにより  $-30 \text{ kPa}$  を作用させ、供試体を自立させる。
10. 供試体の圧密が終了したことを確認し、クランプを締め、 $\pi$ テープで供試体直径を三箇所測定し、その平均値からメンブレン厚さの二倍を引くことで、供試体初期直径とする。また、載荷軸上のアタッチメントとクランプ支持板の間を三箇所ノギスで測定し、その平均値と予めダミー供試体で測定したときの値から、供試体初期高さを求める。

#### (2) 各種測定装置の設置と二重負圧および通水

1. 出力電圧を確認しながら、 $LDT$  を供試体側面に対角に二つ設置する。
2.  $P$  波、 $S$  波用の加速度計を上下二つずつ供試体側面に設置し、各加速度計の初期区間距離をノギスで計測する。
3. ギャップセンサー ( $GS$ ) をキャップ上面に設置したターゲットにあわせる。

4. 外部接触式変位計の支持板をシャフトに取り付け、変位計を取り付け支柱に設置する。
5. セルアクリル円筒を被せ、セルを載荷装置に設置する。
6. セルストッパーを締め、各種測定装置の配線を行い、軸を載荷軸に剛結する。
7. 制御プログラムにおいて外部接触式軸変位計の初期化を行う。
8. 供試体が常に等方状態を保つようプログラムにより制御し、クランプを開放する。
9. セル圧 0 kPa、および任意の初期背圧の状態から、初期有効拘束圧を維持したまま背圧を-98 kPa まで変化させる。
10. この状態で、凍結試料では 8 時間以上、再構成試料では 2 時間以上放置する。
11. 二つの脱気水槽用タンクの水頭差を利用して通水を行う。脱気水を給水タンク→ペデスタル→供試体→キャップ→排水タンクの経路で流す。
12. 供試体体積の 5 倍程度以上通水し、気泡が出ないことを確認し、通水を終了する。
13. 二重負圧前の応力状態に戻す。

### (3) 背圧の作用

1. プログラムにより等方応力状態が保たれるよう制御されているか確認する。
2. 加算式レギュレーターを用いて、初期有効拘束圧を保ったまま、負圧を正圧に置換する。
3. 高差圧計 (HCDPT)、低差圧計 (LCDPT) およびビュレットをチューブで配管し、フラッシングを行う。
4. 初期有効拘束圧を保ったまま、背圧を 200 kPa とする。
5. 有効拘束圧が安定した状態で 1 時間程度放置する。
6.  $B$  値が 0.96 以上であることを確認する。 $B$  値が低い場合は、再度通水を行う。

### (4) 圧密・微小変形特性計測・液状化試験

1. プログラムにより等方応力状態が保たれるよう制御されているか確認する。
2. 供試体が排水条件下であることを確認した後、レギュレーターにより、応力状態を確認しながら圧密を行う。
3. 等方圧密過程において微小変形特性を計測する場合は、所定の圧密応力に到達後、10 分間程度放置してから計測する。
4. 等方圧密は、原則として原位置有効上載圧まで実施する。なお、豊浦砂の場合は、 $\sigma_c' = 100$  kPa とする。
5. 液状化試験（非排水繰り返し三軸試験）は、圧密終了後、供試体が非排水条件下であることを確認し、所定の応力振幅をプログラムによる自動制御で実施する。液状化試験時の軸ひずみ速度は、0.2 %/min とした。また、試験中に微小変形特性を計測するときは、軸ひずみ速度を 0.02 %/min とした。

## (5) 応力履歴

1. 等方圧密終了後、等方クリープを与える場合は、そのままの状態です定の時間放置する。クリープ中の等方応力状態は、プログラムによる自動制御で保たれる。
2. 排水繰返しせん断を与える場合は、その軸ひずみ両振幅を 0.1 %とし、所定の回数（本研究では 10,000 回もしくは 20,000 回）の繰返し載荷をプログラムにより自動制御で与える。

## 2.5.2 中型中空ねじり試験

### (1) 供試体準備

#### a) 凍結試料

1. メンブレンを用意し、供試体高さや加速度計装着位置の目安の印をつける。
2. 供試体の内径をノギスで三箇所計測し、その平均値を融解前内径とする。
3. ペDESTALとキャップを-20℃に保たれた冷凍室に搬入し、その表面に高真空グリースを薄く塗る。
4. 整形された凍結試料にメンブレンを被せ、ペDESTALとキャップに装着する。ペDESTALとキャップへの固定はゴムバンドを用いる。
5.  $\pi$ テープで供試体外径を三箇所測定し、その平均値からメンブレン厚さの二倍を引くことで、供試体融解前外径とする。また、ノギスで供試体高さを三箇所計測し、その平均値を供試体融解前高さとする。以上の手順は、冷凍室内で拘束圧を作用させないという点で、前述の三軸凍結試料の手順と異なる。これは、中型中空セルは冷凍室に搬入するには大きすぎるためである。ここでは、常温下です定の拘束圧を作用させるまでの時間をなるべく短縮するために、供試体とキャップおよびペDESTALのセットを-20℃に保たれた冷凍室内にて実施する。
6. ペDESTALとキャップにセットされた供試体を実験室の計測装置に移動させる。この移動時間は短いほど良い（本研究では 5 分程度）。
7. 供試体移動後、直ちにキャップと供試体をペDESTALと共にセル下盤に固定し、キャップの重量に相当する錘でバランスをとる。また、予め真空レギュレーターにより所定の負圧（＝融解拘束圧）に設定しておいた脱気水槽用のタンクと中空セルをホースでつなぎ、供試体側の排水（排気）レバーを開ける。
8. 融解後、キャップ固定装置によりキャップとタイロッドを固定する。

#### b) 再構成試料

1. 内メンブレンと外メンブレンを用意し、供試体高さや加速度計装着位置の目安の印をつける。

2. ベDESTAL内メンブレン止めシーリング用の高真空グリースを薄く塗り、内メンブレンを装着した後、ゴムバンドで固定し、ベDESTALと共にセル下盤に固定する。
3. 四つ割内モールドを、モールド固定部品を用いて内セル内に組み立てる。
4. 四つ割内モールドに内メンブレンが密着した状態で $\pi$ テープを用いて外径を計測し、供試体初期内径とする。
5. ベDESTAL側面に高真空グリースを薄く塗り、外メンブレンを装着した後、ゴムバンドにより固定する。
6. 二つ割外モールドを組み立て、バンドにより固定し、モールド外側にメンブレンを折り返す。
7. 外メンブレンを外モールドに密着させる目的で負圧を作用させ、砂受けを装着する。
8. 所定の相対密度になるように落下高さを決定し、漏斗を用いて空中落下法により供試体を作成する。また、振動法による場合は、供試体高さを七層に分け、所定の相対密度になるように各層にてモールドに木槌で振動を与える。
9. 供試体高さよりも余盛になる程度に試料を作成し、定規を用いて端面を平らで滑らかに整形する。
10. タイロッドにキャップ固定装置を取り付ける。
11. キャップの自重をカウンターバランスでキャンセルしながら、キャップを供試体上面に静かにおく。
12. キャップ固定装置でキャップとタイロッドを固定する。
13. キャップ側面に高真空グリースを薄く塗り、外メンブレンと内メンブレンをそれぞれキャップに装着し、ゴムバンドで固定する。
14. 排水用チューブをキャップとベDESTALに取り付ける。
15. キャップ固定装置を外し、キャップの動きを自由にする。
16. 脱気水槽用のタンクを介して真空レギュレーターにより-30 kPa を作用させ、供試体を自立させる。
17. 供試体の圧密が終了したことを確認し、キャップ固定装置により再びキャップを固定する。

## (2) セル上盤の取り付け

1. 二つ割外モールドと四つ割内モールドを取り外し、 $\pi$ テープを用いてメンブレンが装着した状態の供試体外径を三箇所測定し、その平均値からメンブレン厚さの二倍を引くことで、供試体初期外径とする。
2. リフトを用いてセル上盤を吊り上げ、キャップに当たらないように静かに設置し、タイロッドとセル上盤を固定する。



3. 軸とキャップ上盤の重量を、錘を用いてバランスをとりながら、軸を静かに下ろす。中心が一致していることを確認し、キャップ上盤と既に供試体に固定されているキャップを固定する。このとき、キャップ重量をキャンセルするように、錘を追加する。
4. キャップ固定装置を取り外す。
5. クランプを締め、載荷軸上のアタッチメントとクランプ支持板の間を三箇所ノギスで測定し、その平均値と予めダミー供試体で測定したときの値から、供試体初期高さを求める。

### (3) 各種測定装置の設置と二重負圧および通水

1.  $P$  波、 $S$  波用の加速度計を上下二つずつ供試体側面に設置し、各加速度計の初期区間距離をノギスで計測する。
2. 外部接触式変位計の支持板をシャフトに取り付け、変位計を取り付け支柱に設置する。
3. セルアクリル円筒を被せる。
4. 軸重量をカウンターバランスで取り、クランプを開放する。
5. 排気用のカプラーを取り付け、加速度計が水没しない水位までセル水を注水する。
6. セル圧 0 kPa、および任意の初期背圧の状態から、初期有効拘束圧を維持したまま背圧を -98 kPa まで変化させる。この時、等方応力状態となるようにカウンターバランスで調節する。
7. この状態で、凍結試料では 10 時間以上、再構成試料では 5 時間以上放置する。
8. 二つの脱気水槽用タンクの水頭差を利用して通水を行う。脱気水を給水タンク→ペDESTAL→供試体→キャップ→排水タンクの経路で流す。
9. 供試体体積 2 倍程度以上通水し、気泡が出ないことを確認し、通水を終了する。
10. 二重負圧前の応力状態に戻す。

### (4) 背圧の作用

1. 加算式レギュレーターを用いて、初期有効拘束圧を保ったまま、負圧を正圧に置換する。
2. 高差圧計 ( $HCDPT$ )、低差圧計 ( $LCDPT$ ) およびビュレットをチューブで配管し、フラッシングを行う。
3. 初期有効拘束圧を保ったまま、背圧を 200 kPa とする。この時、等方応力状態となるようにカウンターバランスで調節する。
4. セルを載荷枠下盤に接合し、軸を載荷軸に剛結する。
5. 有効拘束圧が安定した状態で 1 時間程度放置する。
6.  $B$  値が 0.96 以上であることを確認する。 $B$  値が低い場合は、再度通水を行う。

#### (5) 圧密・動的微小変形特性計測・液状化試験

1. プログラムを起動し、各種測定装置の初期化を行う。
2. 供試体が排水条件下であることを確認した後、レギュレーターにより、応力状態を確認しながら圧密を行う。このとき、等方応力状態の保持は手動で行う。
3. 等方圧密過程において動的微小変形特性を計測する場合は、所定の圧密応力に到達後、10 分間程度放置してから計測する。
4. 等方圧密は、原則として原位置有効上載圧まで実施する。なお、豊浦砂の場合は、 $\sigma_c' = 100$  kPa とする。
5. 最終等方圧密応力での動的微小変形特性計測が終了したら、クランプを締め、供試体を非排水状態にした後、セル水をセル圧より若干高い圧力で供試体上面まで注水する。
6. セル水注水後、クランプを開放し、供試体を排水状態に戻す。
7. *HCDPT* と *LCDPT* の測定値が安定するまで待つ。
8. 液状化試験（非排水繰返し中空ねじり試験）は、圧密終了後、供試体が非排水条件下であることを確認し、所定の応力振幅をプログラムによる自動制御で与えることで実施する。液状化試験時のせん断ひずみ速度は、2.3 %～5.5 %/min とした。

#### (6) 排水繰返しせん断履歴

1. 等方圧密後、供試体に排水繰返しせん断を与える場合は、その軸ひずみ両振幅を 0.2 % とし、所定の回数の繰返し载荷（本研究では 20,000 回）をプログラムにより自動制御で与える。

## 2.6 凍結採取試料の整形

原位置より採取された凍結試料の直径は約 15 cm であり、高さ約 15~30 cm に切り分けられ、冷凍室の中で密封状態にて保管した。この凍結試料は、本研究の室内試験に用いるために所定のサイズに整形を行う必要がある。しかし、凍結試料を融解させたり乱したりすることなく整形を行うことは非常に難しい。

本研究では、用いる試験装置によって供試体サイズと形状が異なっている。各供試体の整形方法を以下に述べる。

### 2.6.1 小型三軸試験用円筒供試体

小型三軸試験に用いた供試体サイズは、高さ 10 cm、直径 5 cm の円筒供試体である。本研究では、直径 15 cm、高さ約 10 cm の凍結サンプリング試料から、内径 50 mm のコアチューブにより鉛直方向に 4 供試体ずつ削り貫いた試料を、試験供試体として用いた(図 2.6.1 の①~④)。

この作業は、通常温度条件下では凍結試料が融解し、コアチューブ内部の摩擦により試料が乱れる可能性が高い。したがって、本研究ではコアカッターを室温約-20℃に保たれた冷凍室内に搬入し、コアチューブが完全に冷えたことを確認した後、冷凍室内でコアリングを実施した。作業中コアチューブ内の摩擦による融解を避けるため、掘削は出来る限り早く(10 cm/30 sec)実施し、掘削中は削り屑をコアチューブの外側から排出させるため、約 600 kPa の空圧をコアチューブ内側から載荷した。なお、この手法によりコアリングした三軸試料は、江戸川砂 A, C 試料である(表 2.2.4 における③、⑤)。

コアリング後、供試体の上下端面をのこぎりとヤスリにより水平に整形した。なお、この作業も冷凍室内で実施している。整形された凍結試料は、実験に用いるまでの間の昇華を防ぐため、ラッピングを行い冷凍室内にて保管した。

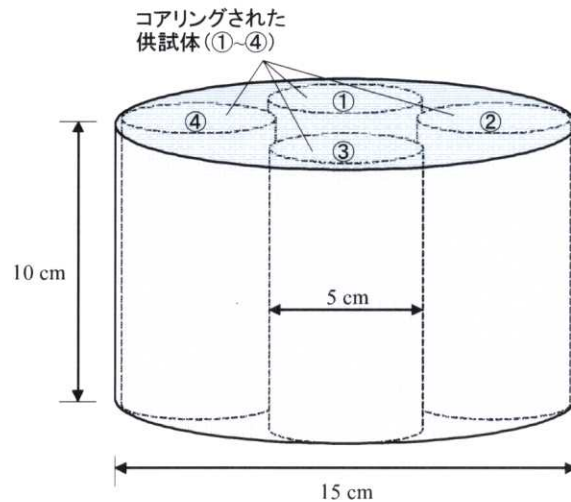


図 2.6.1 凍結採取試料から整形した小型三軸供試体

## 2.6.2 中型ねじり試験用中空円筒供試体

中型ねじり試験に用いた供試体サイズは、高さ 30 cm、内径 9 cm、外径 15 cm の中空円筒供試体である。本研究では、直径 15 cm、高さ約 30 cm の凍結サンプリング試料の中心を、外径 90 mm のコアチューブにより鉛直方向に削り貫くことで、供試体を整形した（図 2.3.2）。なお、削り貫かれた中心部の試料は、更に内径 50 mm のコアチューブで小型三軸試験用の供試体に整形した（図 2.6.2 の①~③）。

φ 90 mm のコアチューブで掘削するこの作業は、前述の小型三軸供試体のコアリング時よりもトルクの大きいコアカッターを用いて実施した。しかし、作業は通常温度条件下で実施したことから、凍結試料が融解しないような対策を講じる必要があった。本研究では、液体窒素により約-12℃を保つように調整された塩化カルシウム溶液を、水中ポンプによりウォータースイベルを介してコアチューブ内に循環させた。これにより、凍結試料の表面と掘削面の、外気および摩擦による融解を防ぎながら、約 10 cm/min の掘削速度でコアリングを行った。この手法によりコアリングされた中空・三軸試料は、江戸川砂 A, B, C 試料である（表 2.2.4 における②、④、⑥）。また、利根川砂三軸試料（表 2.2.4 における①）についても、この塩化カルシウム溶液を用いる手法により図 2.6.1 の様にコアリングを実施している。

コアリング後、供試体の上下端面をのこぎりとヤスリにより水平に整形した。なお、この作業は室温約-20℃に保たれた冷凍室内で実施している。整形された凍結試料は、実験に用いるまでの間の昇華を防ぐため、ラッピングを行い冷凍室内にて保管した。

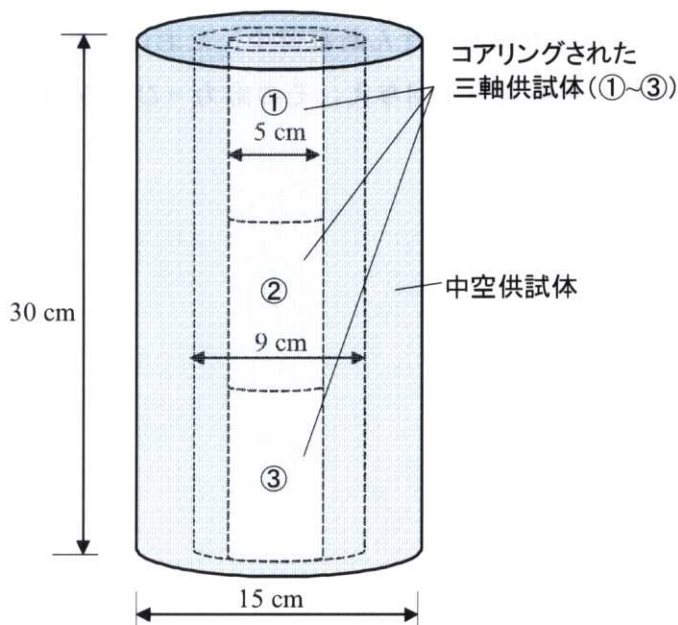


図 2.6.2 凍結採取試料から整形した中型中空供試体と小型三軸供試体

## 2.7 微小変形特性の計測

本研究では、等方圧密過程、および液状化試験中に微小変形特性を計測している。微小変形特性については、静的または動的な方法を用いて計測した。

以下に各微小変形特性の計測手法について述べる。

### 2.7.1 静的微小変形特性

静的微小変形特性は、供試体の任意の面に微小な振幅（ひずみ換算で  $10^{-5}$  レベル）の繰返し載荷を与え、その応力-ひずみ関係の傾きから求められる。本研究では、三軸試験において鉛直方向に軸ひずみ両振幅  $\varepsilon_{v(DA)} = 0.002$  % 程度の微小繰返し載荷を行い、静的鉛直ヤング率  $E_s$  を求めている。ここで、本研究における静的微小変形特性とは、主に *LDT* により計測された局所変形特性を指している。これは、従来の接触式外部変位計や *GS* では、ベディングエラーにより供試体の本来の変形を計測することが困難であるためである。特に、接触式外部変位計の計測精度は非常に低く、清田(2005)の実験による *LDT* との比較では、静的鉛直ヤング率が 1/3 程度にまで過小評価されることが報告されている。

本研究の圧密過程における静的微小変形特性の計測は、図 2.7.1 に示すように、微小な繰返し載荷を排水条件下で 6 波与え、その 5 波目の応力-ひずみ関係より静的排水ヤング率  $E_s$  を求めている。また、一部の試料では、同様の微小繰返し載荷を非排水条件下でも行い、静的非排水ヤング率  $E_{su}$  も求めている。なお、静的ヤング率の値に及ぼす排水条件の影響については、第 3 章に詳細を述べる。

一方、液状化試験中（非排水繰返しせん断載荷中）における静的微小変形特性は、図 2.7.2 に示すように微小な除荷・再載荷を 1 回与え、その応力-ひずみ関係より静的非排水ヤング率  $E_{su}$  を求めている。

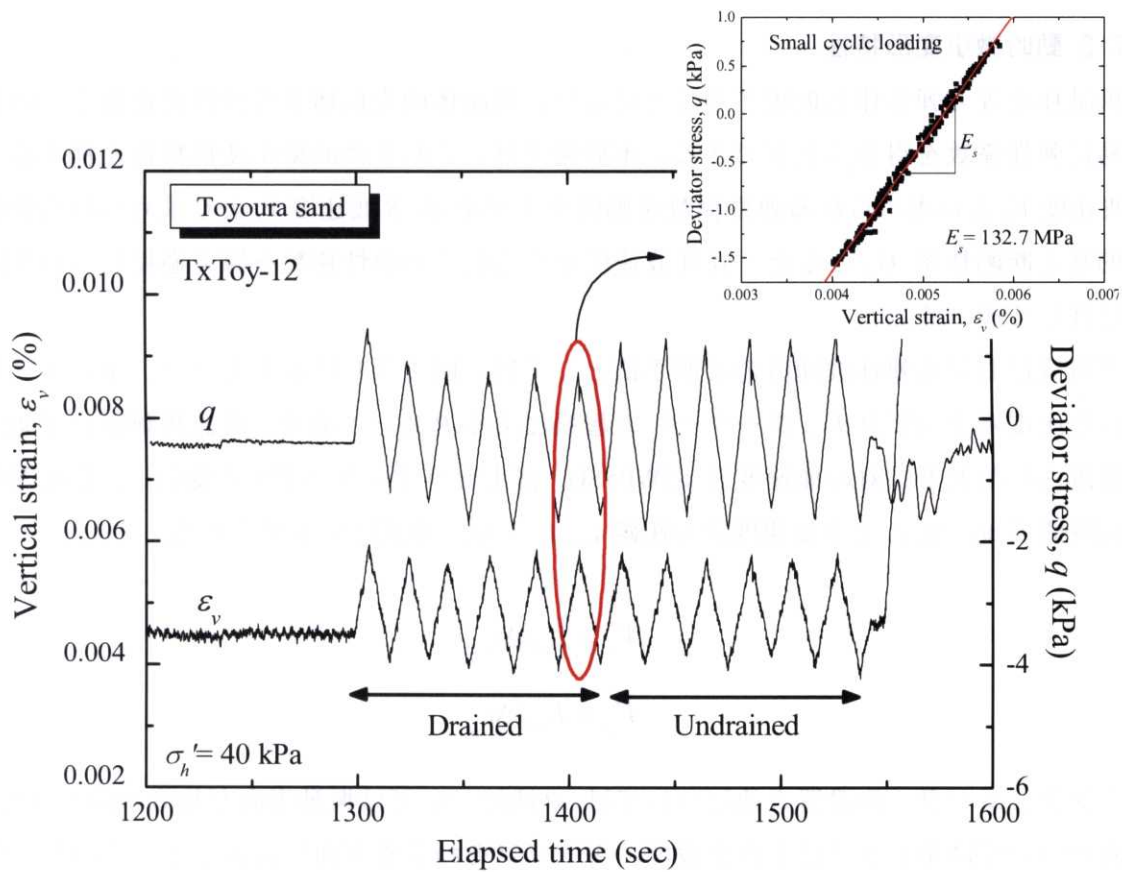


図 2.7.1 等方圧密過程における静的微小変形特性計測例

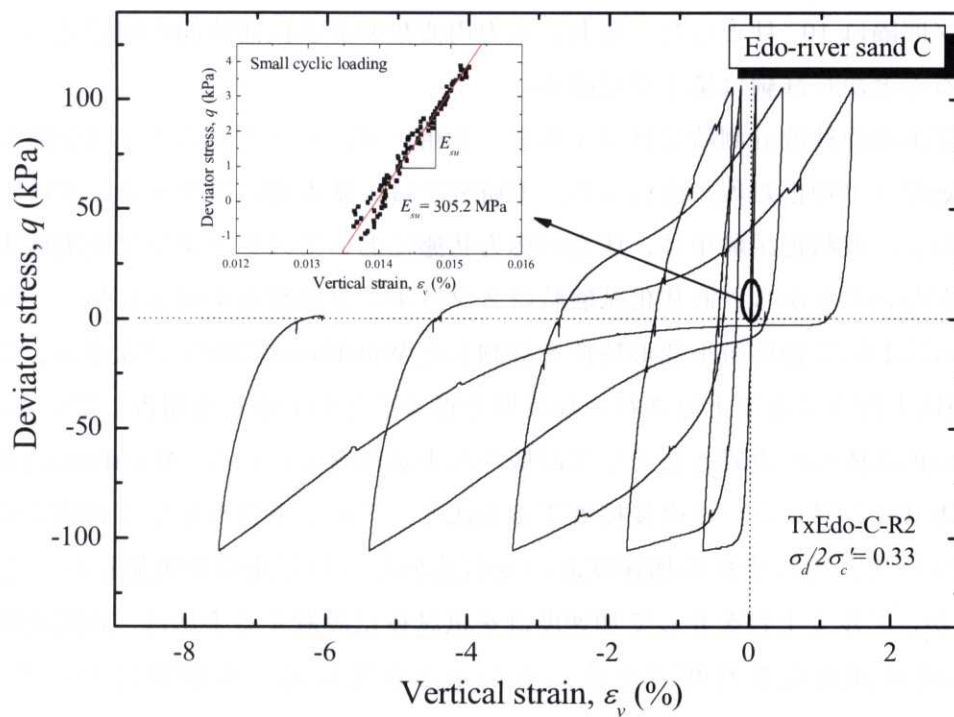


図 2.7.2 液状化試験時における静的微小変形特性計測例



## 2.7.2 動的微小変形特性

供試体を等方弾性体と仮定することにより、供試体内を伝播する弾性波速度とその密度から簡易に弾性係数を得ることができる。本研究では、これを動的微小変形特性と称する。また、 $P$ 波速度  $V_p$  より求められる弾性係数を動的ヤング率  $E_d$ 、 $S$ 波速度  $V_s$  より求められる弾性係数を動的せん断剛性率  $G_d$  とした。弾性波速度からこれらの弾性係数を導く過程については、第3章に詳しく述べる。

本研究における弾性波速度の計測手法としては、図 2.7.3 に示すように、キャップ部に設置された圧電素子（アクチュエーター）の起振による  $P$ 波と  $S$ 波を、供試体側面に  $P$ 波・ $S$ 波用に設置された上下二対の加速度計（SW05SG、富士セラミックス製）で受信し、それぞれの波の受信時間差  $\Delta t_p$ 、 $\Delta t_s$  と上下加速度計の距離  $L_p$ 、 $L_s$  より、下式にて求められる。

$$V_s = L_s / \Delta t_s \quad [2.37 \text{ a}]$$

$$V_p = L_p / \Delta t_p \quad [2.38 \text{ b}]$$

アクチュエーターの設置方法については、 $P$ 波については振動方向が鉛直方向となるように、 $S$ 波についてはキャップに土台を設け、キャップをねじる方向に設置した。このような加速度計による弾性波速度の計測手法は、従来のベンダーエレメントによる手法と比較して、供試体中央部を伝播する弾性波速度を計測することから、ベディングエラーの影響を排除することができると考えられる。アクチュエーターへの入力波は、電圧  $\pm 10 \text{ V}$  とし、加速度計の電圧値のサンプリング間隔は  $10^{-6}$  秒とした。なお、入力周波数および伝播時間の同定については、別途検討を要することから詳細は第3章に譲る。

加速度計による弾性波計測時にはフィルターを用いず、データからノイズを除去するためスタッキング処理（平均化処理）を行った。本研究では、基本的にスタッキングは 128 回実施している。しかし、液状化試験中は、任意の応力状態においてスタッキングを実施する時間的余裕がほとんどないことから、液状化試験時はスタッキング回数を 4 回とした。一方、本研究と同じシステムにおいて動的微小変形特性を計測した Wicaksono (2007) によると、このスタッキングは 32 回以上行うことで十分きれいな波形を得ることができると報告している。

加速度計の供試体への設置方法としては様々な手法が考えられる。Wicaksono (2007) は加速度計を供試体（メンブレン）に直接接着する方法と、アルミ土台を介して設置する方法の二通りの手法について、それぞれの加速度計の受信波形について比較を実施した。その結果を図 2.7.4 に示すが、アルミ土台を介して加速度計を供試体に設置する手法は、直接設置する場合よりも明瞭に波の到達点を判断できることが示されている。本研究においても基本的に Wicaksono (2007) の推奨するアルミ土台を用いた方法を踏襲しているが、この手法を導入する以前に実施した一部の試験では、加速度計をメンブレン表面に直接設置している。



今後、アルミ土台を使用する前の結果については「加速度計改良前」、使用後を「加速度計改良後」と称する。

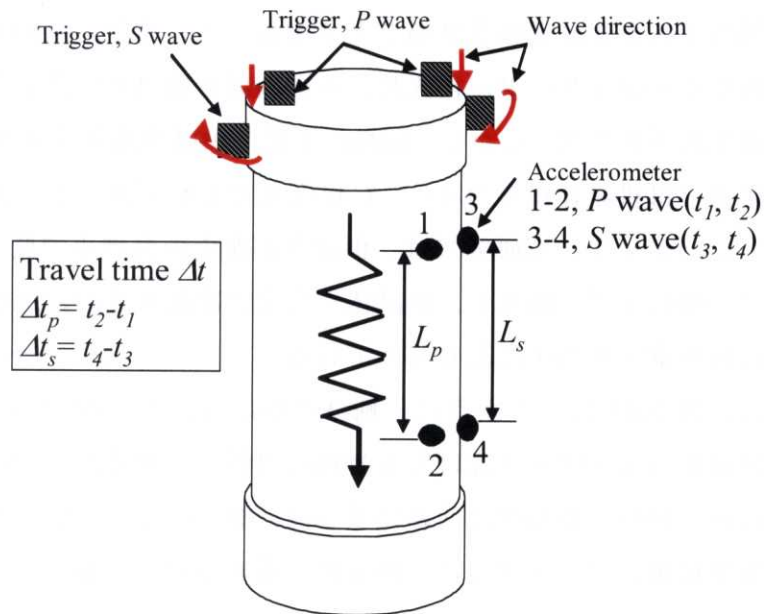


図 2.7.3 アクチュエーターと加速度計による弾性波速度計測手法（円筒・中空供試体）

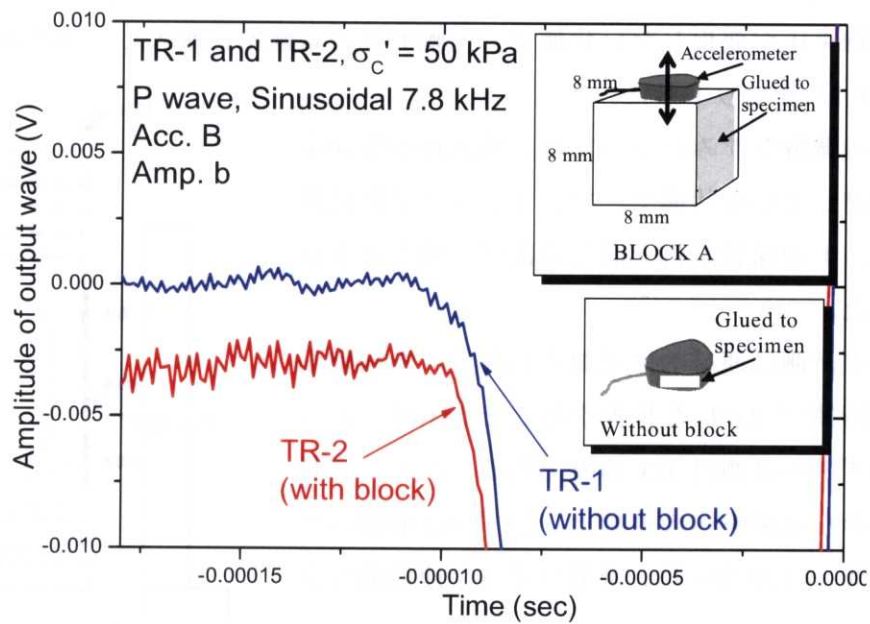


図 2.7.4 加速度計設置方法の違いが受信波形に及ぼす影響（Wicaksono, 2007）

## 2.8 凍結・融解ひずみの測定

試料の凍結ひずみの測定は、三軸再構成供試体において実施した。

供試体凍結手順としては、供試体に所定の有効拘束圧を負圧によって与えた状態で、 $-20^{\circ}\text{C}$ の不凍液を銅製の下部ペDESTALに循環させることで実施した。また、室内常温では供試体が凍結しないため、三軸セルをデシケーターに入れ、その内部に約  $1^{\circ}\text{C}$ の冷却空気を循環させることで供試体周辺温度を低下させた。しかし、同様の手法で供試体凍結を試みた飯島 (2002)の報告によると、この手法では供試体温度は $-1\sim-2^{\circ}\text{C}$ 程度までしか下がらず、凍結状態は安定しているとはいえない。したがって、本研究では、供試体が所定の温度まで低下した後、約 $-20^{\circ}\text{C}$ に設定した冷凍室に三軸セルごと搬入し、供試体を完全に凍結させた。なお、供試体には冷凍室の中でも所定の有効拘束圧を負圧により与えている。

凍結時のひずみは、図 2.8.1 に示すように、軸ひずみについては *GS* および *LDT* を用い、水平ひずみは *GS* を供試体の上・中・下部に左右対称に設置して連続的に測定した。三軸セルと供試体が冷凍室に移動した後の連続的な凍結ひずみは計測されていない。本研究では、供試体が冷凍室の中で完全凍結後、マニュアルにて供試体寸法を計測して算定した供試体体積を以って最終凍結ひずみとして用いている。

供試体の融解ひずみの計測は、凍結採取試料および上述のように三軸セルで凍結された再構成試料を用いて実施した。凍結採取試料の融解手順としては、整形された凍結供試体を冷凍室の中で三軸セルにセットし、所定の有効拘束圧を負圧によって与え、供試体初期寸法をマニュアルで計測した（再構成試料では既に三軸セルにセットされた状態である）。その後、供試体に作用する有効拘束圧が変化しない状態で、三軸セルを試験室に搬入し、凍結時と同様のひずみ計測器（図 2.8.1）をセットした。

再構成試料の融解ひずみについては、供試体が冷凍室の中で完全凍結している状態で、マニュアルにて供試体寸法を計測し、上記凍結試料と同じ方法で三軸セルを試験室に搬入した。

融解ひずみの計測は連続的に記録されたが、冷凍室から搬出後の短時間で *LDT* を装着することが困難であったため、軸ひずみの計測は *GS* のみである。なお、三軸セルの冷凍室から試験室への運搬と、ひずみ計測器のセッティングの間（約 20 分）は、融解ひずみの連続的な計測は行っていない。

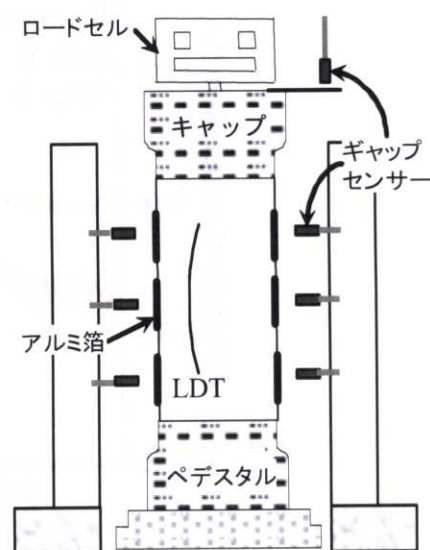


図 2.8.1 供試体の凍結・融解ひずみ測定時における計測機器の概要

## 《参考文献》

- 1) Goto, S. (1986): Strength and characteristics of granular materials in triaxial tests, Dr. of Eng. Thesis, Univ. of Tokyo
- 2) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S. and Sato, T. (1991): A simple gauge for local small strain measurement in the laboratory, *Soils and Foundations*, **31**(1), 169-180.
- 3) Wicaksono, R. I. (2007): Small strain stiffness of sand and gravel based on dynamic and static measurements, Master. of Eng. Thesis, Univ. of Tokyo
- 4) 飯島正敏 (2002): 原位置採取凍結試料と再構成試料の液状化特性に関する研究, 修士論文, 日本大学大学院.
- 5) 井内美郎, 斎藤文紀 (1993): 海跡湖の地史-3 霞ヶ浦, *アーバンクボタ*, 株式会社クボタ, **32**, 56-63.
- 6) 宇都宮陽二郎 (1981): 霞ヶ浦とその周辺の低地の地形について, *国立公害研究所特別研究報告*, R-20-81, 1-23.
- 7) 遠藤邦彦, 関本勝久, 高野司, 鈴木正章, 平井幸弘 (1983): 最終氷期以降の関東平野-3 関東平野の《沖積層》, *アーバンクボタ*, 株式会社クボタ, **21**, 26-43.
- 8) 貝塚爽平 (1958): 関東平野の地形発達史, *地理学評論*, **31**(2).
- 9) 貝塚爽平 (1979): 東京の自然史, 紀伊国屋書店, 153.
- 10) 北田奈緒子 (2007): 沖積層と洪積層, *土と基礎*, **55**(6), 33-34.
- 11) 清田隆 (2005): 室内試験における地盤変形強度特性の高精度な測定, 東京大学産学連携フォーラムポスターセッション
- 12) 近藤清造 (1996): 千葉県地盤と地質環境, 近代文芸社
- 13) 佐藤剛司 (1991): 変位制御微小繰り返し載荷装置, 第 26 回土質工学研究発表会論文集, 567-570.
- 14) 佐藤剛司, 清田隆, 古関潤一 (2007): 大ひずみ中空ねじりせん断試験装置の開発, 第 42 回地盤工学研究発表会論文集, CD-ROM.
- 15) 独立行政法人土木研究所 動土質研究室 (1996 a): 地盤の凍結サンプリング及び室内土質試験業務報告書 (利根川右岸)
- 16) 独立行政法人土木研究所 動土質研究室 (1996 b): 地盤の凍結サンプリング及び室内土質試験業務報告書 (江戸川左岸)
- 17) 福島伸二 (1982): ねじりせん断試験による砂の変形・強度特性の実験的研究, 博士論文, 東京大学大学院.
- 18) 吉嶺充俊 (1996): 単調載荷による飽和砂の非排水流動変形に関する研究, 博士論文, 東京大学大学院.