

Title	ミニ三軸試験の開発と自然堆積粘土への適用性に関する研究
Author(s)	鍋島, 康之
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3129101">https://doi.org/10.11501/3129101</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

# ミニ三軸試験の開発と自然堆積粘土への 適用性に関する研究

平成 9 年 1 月

鍋島 康之

ミニ三軸試験の開発と自然堆積粘土への  
適用性に関する研究

平成 9 年 1 月

鍋 島 康 之

# 目次

## 第1章 序論

1.1	研究の目的	1
1.2	論文の内容と構成	2
	参考文献 (第1章)	

## 第2章 ミニ三軸圧縮試験機および試験方法の開発

2.1	概説	6
2.2	ミニ三軸試験で用いる供試体	6
2.3	ミニ三軸試験機の概要	7
2.3.1	ミニ三軸試験機	7
2.3.2	中圧ミニ三軸試験機	10
2.3.3	パソコン制御ミニ三軸試験機	11
2.3.4	ひずみ経路制御ミニ三軸試験機	14
2.4	ミニ三軸試験の試験手順	16
2.4.1	供試体の成形とセット	16
2.4.2	飽和過程	17
2.4.3	等方圧密過程	17
2.4.4	軸圧縮過程	19
2.5	供試体の飽和方法	20
2.5.1	飽和度の測定方法	20
2.5.2	三軸試験における既往の飽和方法	21
2.5.3	ミニ三軸試験における飽和方法	22
2.6	まとめ	23
	参考文献 (第2章)	

## 第3章 粘土の三軸試験結果に及ぼす供試体寸法の影響

3.1	概説	25
3.2	三軸供試体の寸法効果に関する既往の研究	25
3.3	弾粘塑性有限要素解析による寸法効果の検討	26
3.3.1	弾粘塑性構成式	26
3.3.2	三軸供試体のモデル化	28

3.3.3	解析条件および解析パラメータ	30
3.3.4	三軸等方圧密解析における供試体寸法の影響	33
3.3.5	非排水三軸圧縮解析における供試体寸法の影響	39
3.4	粘土の三軸試験による寸法効果の検討	40
3.4.1	試料および試験条件	40
3.4.2	三軸等方圧密試験における寸法効果の影響	40
3.4.3	非排水三軸試験における寸法効果の影響	42
3.5	まとめ	44

参考文献 (第3章)

#### 第4章 ミニ三軸試験の自然堆積粘土への適用

4.1	概説	50
4.2	大阪湾海底堆積粘土に関する既往の調査・研究	50
4.2.1	地盤概要	50
4.2.2	物理特性	52
4.2.3	力学特性	55
4.3	ミニ三軸試験で用いた試料の概要	59
4.4	ミニ三軸試験の適用性の検討	62
4.4.1	非排水せん断特性	62
4.4.2	降伏曲面およびダイレイタンシー特性	70
4.4.3	非排水クリープ特性	74
4.5	まとめ	75

参考文献 (第4章)

#### 第5章 ひずみ経路制御ミニ三軸試験の自然堆積粘土への適用

5.1	概説	82
5.2	ひずみ経路制御試験における砂質土の力学挙動	83
5.3	試料および試験条件	84
5.4	練返し粘土のひずみ経路依存特性	85
5.4.1	ひずみ経路依存性挙動	85
5.4.2	ひずみ経路依存性挙動とダイレイタンシーの関係	88
5.5	自然堆積粘土のひずみ経路依存特性	89
5.5.1	ひずみ経路依存性挙動	89
5.5.2	ひずみ経路依存性挙動とダイレイタンシーの関係	91

5.6	まとめ	92
	参考文献 (第5章)	
<b>第6章 ミニ三軸試験の有用性</b>		
6.1	概説	94
6.2	ミニ三軸試験の有用性の確認	94
6.2.1	粘土の堆積環境と力学特性	95
6.2.2	粘土の年代効果と力学特性	97
6.2.3	ミニ三軸試験結果による弾塑性・弾粘塑性パラメータの決定	104
6.3	まとめ	108
	参考文献 (第6章)	
<b>第7章 結 論</b>		
		110
<b>謝 辞</b>		
		113

# 第1章 序 論

## 1.1 研究の目的

近年、ウォーターフロントの開発が大阪湾や東京湾をはじめとして各地で盛んに行われるようになり、多くのビックプロジェクトが現在も進行中である。大阪湾でも図-1.1に示すように関西国際空港（第二期工事）、臨空タウン、ポートアイランド（第二期工事）、テクノポート大阪、大阪湾フェニックス計画など大規模なベイエリア開発<sup>1)</sup>が行われている。これらの開発計画は従来の沿岸地域の埋立から沖合人工島の建設へと移行してきている。沖合人工島が建設される地域の水深はかなり深いため埋立に用いる土砂も膨大な量になり、埋立荷重も非常に大きなものになっている。さらに最近の埋立工事は工期が短い急速施工が多く、技術的・工学的問題はかなり複雑である。また大阪湾の海底地盤は、完新世<sup>2)</sup>および更新世<sup>3)</sup>の粘土層、砂・礫層から構成されているほとんど未固結状態の軟弱な地盤である。このため埋立人工島建設地の大水深化にともなう埋立荷重の増大により、かなり深部の地盤まで埋立荷重の影響が及び、大きな沈下が生じると考えられる。このように開発プロジェクトが大規模かつ複雑化するにしたがい、地盤工学上、今までに経験しなかったことが問題となる可能性があり、地盤の工学的性質を十分に把握しておく必要がある。しかし、沖積粘土よりもさらに深層にある洪積粘土についてはボーリングデータも少なく、採取される試料の量も決して多くない。このため十分な力学的調査が行えないのが現状であり、限られた量の試料においても十分な力学的調査ができる手段が必要となっている。

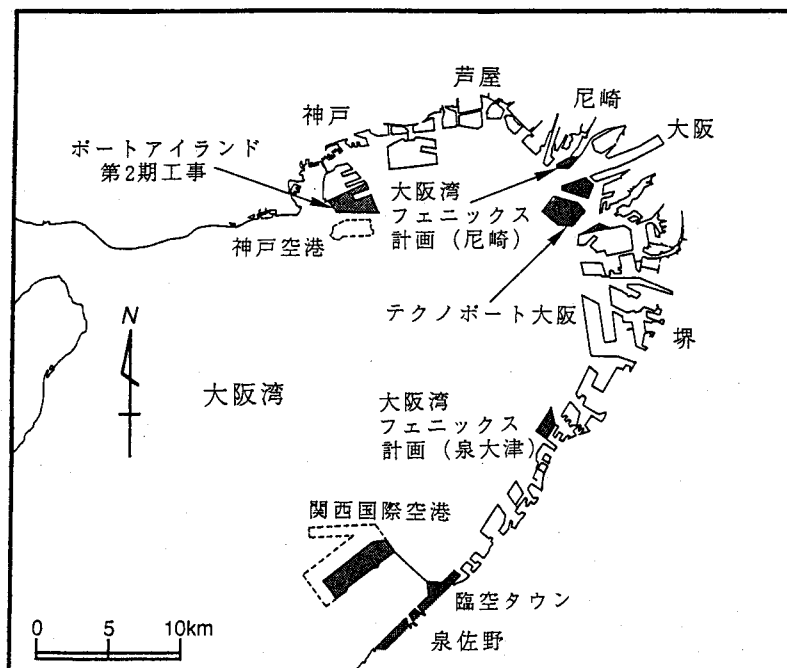


図-1.1 大阪湾におけるビックプロジェクト

また最近、地質学的な地盤調査法の一つとして微化石総合調査<sup>9)</sup>が発達し、関西国際空港の地盤調査などで多くの成果をあげている。微化石とは表-1.1に示すようなプランクトンなど微生物の化石であり、この微化石の産

表-1.1 微化石の種類

微化石	ナノ化石	海棲で浮遊性の単細胞植物である石灰質ナノプランクトンの化石。
	珪藻化石	微細藻類である珪藻の化石。珪藻は河川・湖沼などの淡水域から海水域まで生息する。
	有孔虫化石	根足虫綱に属する海棲原生動物である有孔虫の化石。浮遊性と底生とがある。
	このほか、貝形虫化石、放散虫化石、花粉化石、ダイノフラゲータ（渦鞭毛藻）化石などがある。	

出状況をもとに地層の決定や堆積環境の判断などが可能である。この微化石調査の結果、図-1.2に示すように、たとえ同一の粘土層内においてもその堆積環境は同一ではなく、かなり変化していることが解明されている。さらに、堆積環境の変化は土質工学的性質に影響を及ぼし、同一層内でも土質工学的性質が大きく変化している可能性が指摘されている<sup>9)</sup>。このため、同一の地層内においても詳細な力学的調査をする必要性が認められる。

本研究の目的は、このように複雑な地盤の力学的特性を詳細に、しかも正確に解明することができる土質試験法を提案し、その適用性を確かめることである。本研究では、まず洪積粘土のような限られた量の試料

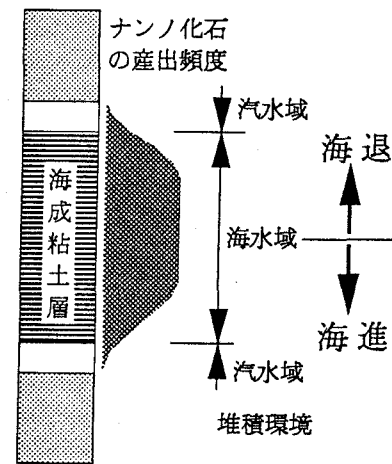


図-1.2 ナノ化石の産出パターン

についても多くの三軸試験が行えるように通常の三軸供試体よりも小さい供試体（直径22.5mm、高さ45mm）を用いる三軸試験装置（ミニ三軸圧縮試験機）を新しく開発する。非常に小さい供試体を用いる三軸試験であるため、ミニ三軸試験では通常のボーリングサンプル（直径75mm程度）から深さ約5cm毎に4本の供試体を作成でき、少量の試料からでも多くの三軸試験が行える。さらに同一粘土層内における深度方向の力学特性の変化についても詳細かつ精度の高い調査が可能である。そして、このミニ三軸圧縮試験機をもとにそれぞれの用途にあわせて中圧ミニ三軸圧縮試験機、パソコン制御ミニ三軸試験機、ひずみ経路制御ミニ三軸試験機を開発する。

さらに、これらのミニ三軸試験機を自然堆積粘土に適用し、等方圧密非排水せん断（ $\overline{CIU}$ ）試験、異方圧密非排水せん断（ $\overline{CKU}$ ）試験、非排水クリープ試験、平均有効主応力一定試験、ひずみ経路制御試験などの三軸試験を行い、既往の研究結果との比較を通して土質試験としてのミニ三軸試験の適用性を検討する。

## 1.2 本論文の内容と構成



本研究は原地盤の力学特性を詳細かつ正確に調査することができる試験法（試験装置）の開発と、その試験法の適用性について検証することを目的とする。本論文中では、まずミニ三軸圧縮試験機とその試験法の開発について述べ、次に供試体寸法の影響が試験結果に及ぼす影響を調べる。そして、自然堆積粘土にミニ三軸試験を適用し、その結果をもとにミニ三軸試験の適用性について検討する。

本論文は6つの章から構成されている。本論文の構成の概要は図-1.3 に示すフローチャートに示されている。

第1章は序論であり、現在のウォーターフロント開発の現状を述べ、問題点を明かにするとともに、本研究の目的と本論文の内容および構成についてまとめる。

第2章では、ミニ三軸試験で使用する供試体と通常の三軸試験で使用する供試体の寸法を比較し、供試体が小さいことによる利点を述べる。次に、ミニ三軸圧縮試験機をはじめとする4種類のミニ三軸試験機の概要について述べ、ミニ三軸試験の試験方法についてまとめる。また、ミニ三軸試験において供試体の飽和方法として採用している二重負圧法と他の飽和方法の比較について述べると共に、背圧や軸ひずみ速度などの試験条件をどのようにして決定したかについてまとめる。

第3章では、三軸供試体の寸法や形状が異なることによる三軸試験結果への影響、つまり寸法効果について弾粘塑性構成式を用いた有限要素解析や実際の自然堆積粘土を用いた三軸（ $\overline{CU}$ ）試験によって解析的・試験的に検討する。まず、Matsui & Abe<sup>9</sup>により提案された弾粘塑性構成式を用いた有限要素解析によってミニ三軸試験で使用する供試体（直径22.5mm）と一般的な三軸試験で使用する供試体（直径35mm, 50mm）について三軸（ $\overline{CU}$ ）試験のシミュレーション解析を行い、等方圧密過程や軸圧縮過程に現れる寸法効果について比較検討する。次に、実際の自然堆積粘土を試料として寸法の異なる供試体（直径22.5mm, 35mm, 50mm）を作成し、三軸（ $\overline{CU}$ ）試験を行う。そして、三軸供試体の寸法効果の影響が三軸試験結果にどのように現れるのかについて検討するとともに、有限要素解析の結果と実際に得られた三軸（ $\overline{CU}$ ）試験結果とではどのような点で異なるのか、またそれはどのような理由によるものかについて検討する。さらに、まとめとしてミニ三軸試験を自然堆積粘土へ適用した場合、どの様な点に留意すべきかについて述べる。

第4章では、大阪湾およびその周辺部で採取された不攪乱自然堆積粘土試料を用いて各種のミニ三軸試験を行った結果についてまとめるとともに、既存の調査・研究と比較して様々な角度からミニ三軸試験の適用性について検討する。まず、大阪湾周辺部で採取された不攪乱自然堆積粘土にミニ三軸試験を適用し、その試験結果をもとにせん断特性についてまとめる。ここでは、単に強度・変形特性について述べるだけでなく、不攪乱自然堆積粘土のダイレイタンス特性や降伏曲面、クリープ特性などについても述べ、既往の調査・研究との比較を通してミニ三軸試験の適用性を総合的に検討する。

第5章では、自然堆積粘土へひずみ経路制御ミニ三軸試験を適用した結果について述べる。ひずみ経路制御試験はせん断中の供試体内部における応力・ひずみの状態を均一に保持することや自由なひずみ経路に沿ったせん断試験を行うことを目的として開発された試験で

あるが、これまでは透水性の問題から砂質土についてのみ適用されていた。ここでは、ミニ三軸試験を用いることによって、粘性土に対してもひずみ経路制御試験が実施可能であることを示し、ひずみ経路制御試験における練返し粘土や自然堆積粘土のせん断特性について述べる。

第6章では、ミニ三軸試験の特徴を利用したいくつかの適用例を示すことによって、ミニ三軸試験の有用性を確認する。一つは、ミニ三軸試験を用いることによって、従来の三軸試験よりも詳細な地盤調査が可能になることの例として、堆積環境と粘土の力学特性の関係について述べる。すなわち、自然堆積粘土の微化石調査の結果をもとに試料の堆積環境を判断し、堆積環境が粘土の力学的性質に与える影響について考察する。次に、試料が比較的少量の場合でも三軸試験が可能である点を利用した例として、少量の試料からでも年代（aging）効果の影響について考察できることや弾塑性・弾粘塑性構成式に含まれるパラメータを決定できることを述べる。

第7章では、本研究の総括と第1章から第6章までの各章で得られた結果をまとめ、結論としてまとめる。

## 参考文献（第1章）

- 1) 大阪湾岸土木工事マップ：日経コンストラクション，日経BP社，1-8，No.73，pp.36～59，1993.
- 2) 陶野郁雄：沖積層の堆積環境と第四紀学，土と基礎，地盤工学会，Vol.43，No.10，pp.1～2，1995.
- 3) 中世古幸次郎，西村明子，山内守明，菅野耕三，竹村厚司：微化石総合調査，関西国際空港地盤地質調査，災害科学研究所，pp.7～12，1984.
- 4) 谷本喜一，末広匡基，田中泰雄：六甲アイランド洪積粘土（Ma12）の地質および土質工学的特性，応用地質，応用地質研究会，第28巻，第2号，pp.20～27，1987.
- 5) Matsui, T. and Abe, N. (1986): Flow surface model of viscoplasticity for normally consolidated clay, Proceedings of Second International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, pp.157～164, 1986.

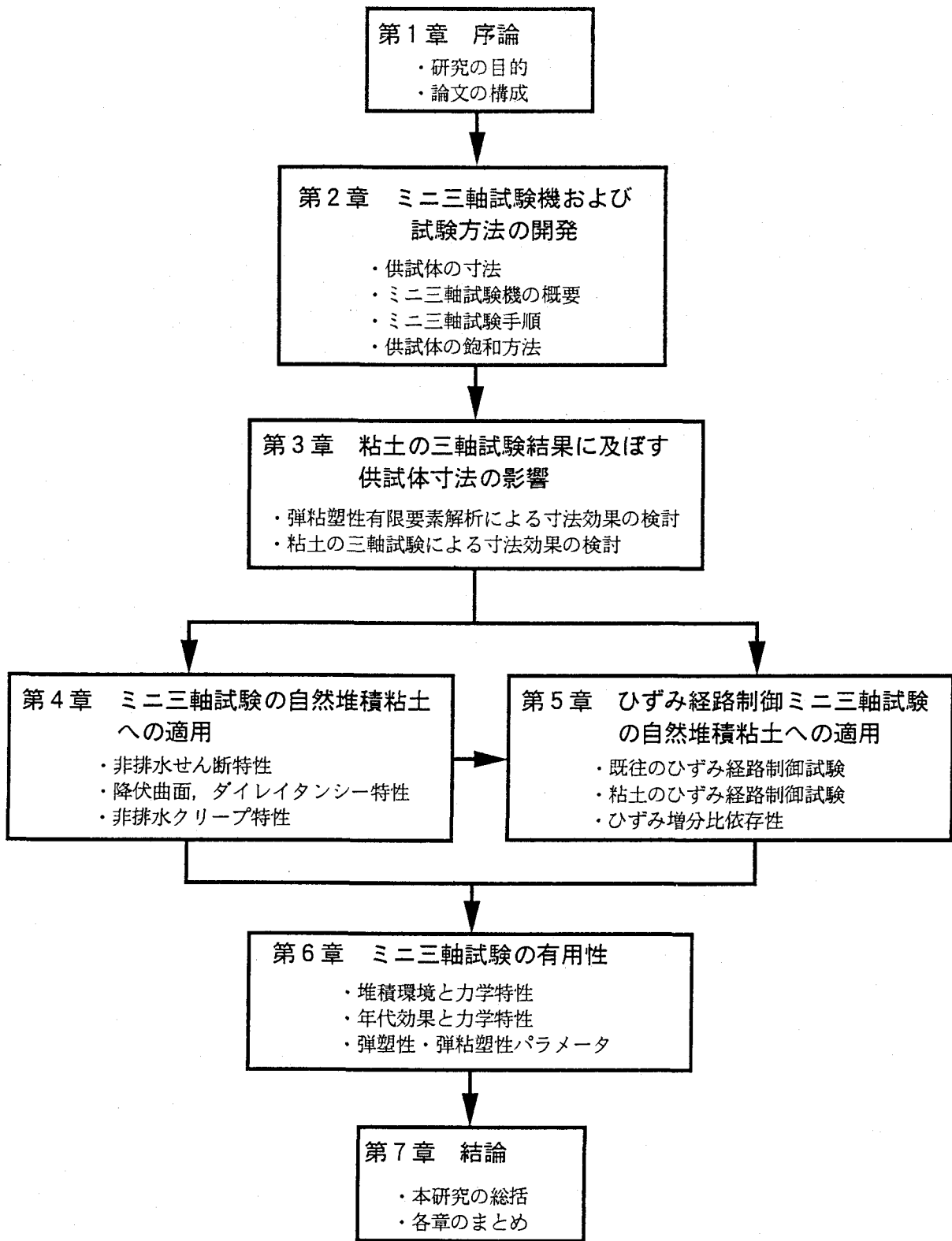


図-1.3 本論文のフローチャート

## 第2章 ミニ三軸試験機および試験方法の開発

### 2.1 概説

本論文では、直径22.5mm、高さ45.0mmという通常の供試体よりも小さい寸法の供試体を用いる4種類のミニ三軸試験機を用いて、自然堆積粘土の力学特性を調べている。本章では、これら4種類のミニ三軸試験機の特徴、構造およびシステムについて述べるとともに、ミニ三軸試験の試験手順、供試体の飽和方法や基本的な試験条件についても説明する。また、供試体の飽和方法については特に節を設けて取りあげる。これは、ミニ三軸試験では間隙水圧をいかに精度よく計測するかが開発にあたっての最大の問題点であり、このことについて様々な工夫を凝らし、細心の注意を払っているためである。

### 2.2 ミニ三軸試験で用いる供試体<sup>1), 2), 3)</sup>

すべてのミニ三軸試験機で使用する三軸供試体の寸法は、直径22.5mm×高さ45.0mmである（写真-2.1）。この供試体は従来一般的に使用されていた直径35.0mm×高さ70.0mm、直径50.0mm×高さ100.0mmの供試体と比べ、非常に小さい（写真-2.2）。このため、通常のボーリングサンプル（直径75mm）が高さ50mm程度あれば、数個の供試体を作成することが可能である。現在、ボーリングサンプルから供試体を作成する場合、直径75mm×高さ50mmのボーリングサンプルを写真-2.3に示すように4分割し、その4分割したボーリング試料から供試体を1本作成している。このため、同一地点のボーリング試料から、同一の深度における供試体を4本得られることになり、本質的な意味において均質な試料を用いた三軸試験が行うことができる。さらに、1本のボーリングサンプルについて深さ方向約5cm毎に供試体を作成していくことが可能であり、従来の大きさの供試体を用いる三軸試験よりも遥かに多くの三軸試験を行うことができる。これらの特徴により、

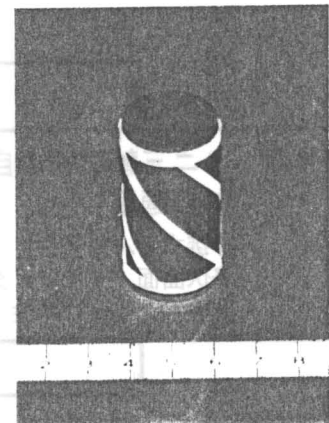


写真-2.1 ミニ三軸試験供試体

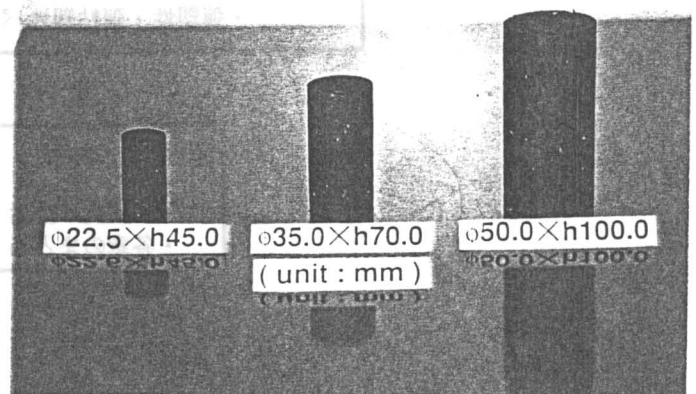


写真-2.2 各三軸供試体の寸法比較

ミニ三軸試験は、限られた量の試料についても詳細な調査が可能となる有効な調査手段である。

### 2.3 ミニ三軸試験機の概要

本研究では、試験で使用する圧力域やその試験目的により、使用する試験装置をわけて設計・開発している。三軸試験で通常使用される0~1MPaの圧力域ではミニ三軸試験機を使用し、通常よりもやや高い1~5MPaの圧力域では中圧ミニ三軸試験機を使用する。また、異方圧密試験や平均主応力一定試験等の応力経路を制御する必要がある試験を行う場合はパソコン制御ミニ三軸試験機を、ひずみ経路制御試験を行う場合にはひずみ経路制御ミニ三軸試験機をそれぞれ使用している。ここでは、これら4種類の試験機の概要について説明する。

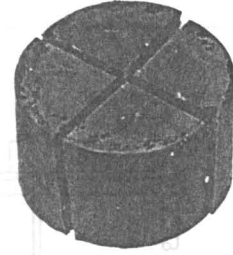


写真-2.3 ボーリングサンプルの分割

#### 2.3.1 ミニ三軸試験機

ミニ三軸試験機の概要を図-2.1と写真-2.4に示す。このミニ三軸試験機は、(1) 荷重装置、(2) 三軸セル、(3) 側圧制御装置、(4) 飽和および排水径路、(5) 測定・記録装置の5つの部分に分かれる。以下に各部分について説明を行う。

##### (1) 荷重装置

ミニ三軸試験機の荷重装置は、変位速度制御方式と荷重制御方式の2種類の荷重方式による荷重が可能である。変位速度制御方式の場合、電気サーボモーター方式によって最大20kNまでの荷重が可能である。また、変位速度は $5.0 \times 10^0 \sim 1.0 \times 10^{-6}$  mm/minの間で自由に設定でき、種々のひずみ速度におけるせん断試験が可能である。一方、荷重制御方式ではベロフラムシリンダーにより軸荷重を載荷し、ベロフラムシリンダーの付けかえによって最大2.0kNまでの荷重が可能である。この荷重装置は荷重フレームの高さを自由に調節できるため、中圧ミニ三軸試験機でもこの荷重装置を使用している。

##### (2) 三軸セル

ミニ三軸試験機で用いる三軸セルは、三軸試験で通常使用する0~1MPaの圧力域を対象としているた

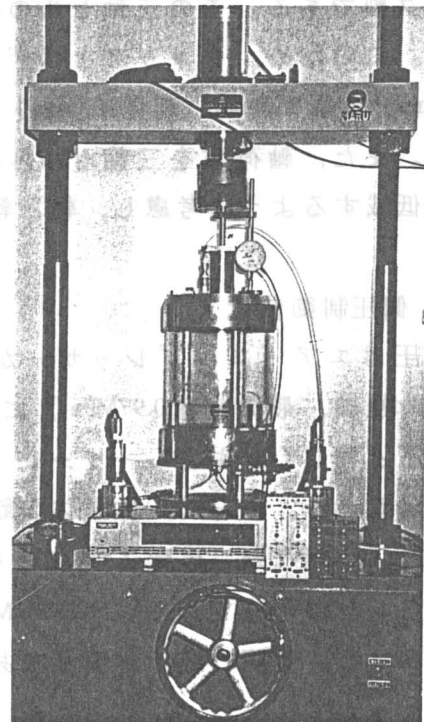


写真-2.4 ミニ三軸試験機の全景

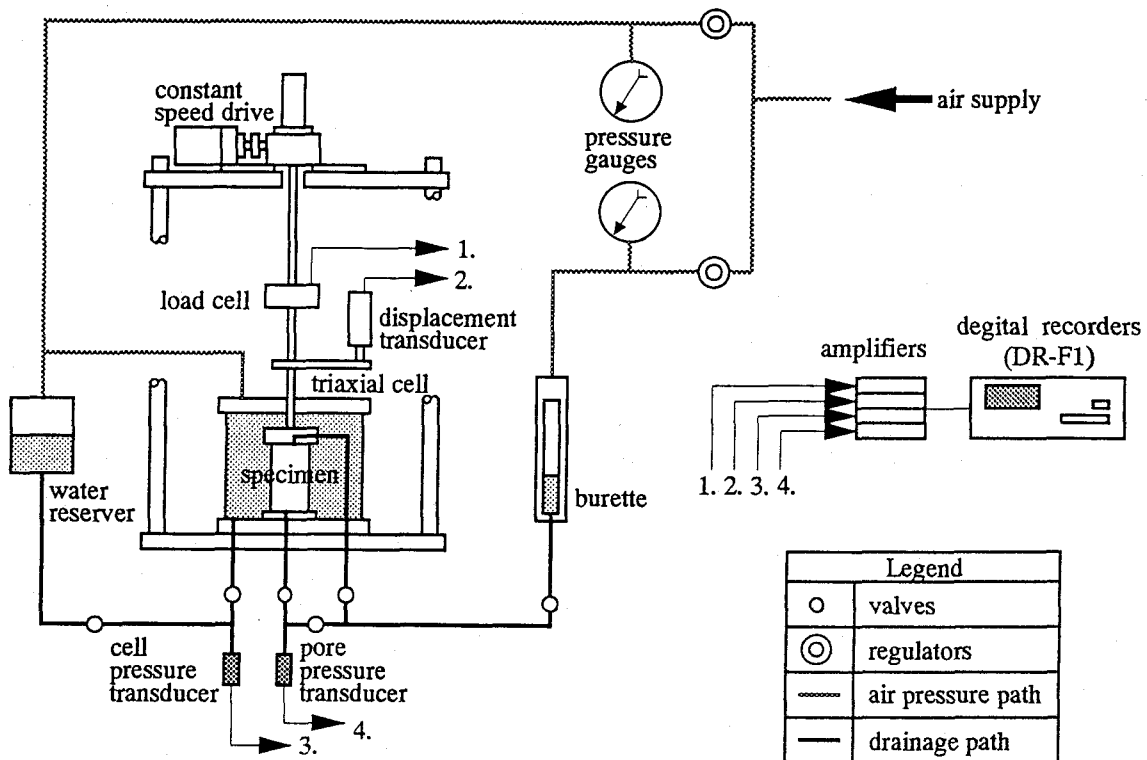


図-2.1 ミニ三軸試験機の概要

め、最大耐圧1MPaとして設計している。耐圧セル部分はアクリル製、その他の部分はステンレス製である。この三軸セルの特徴はキャップとペDESTAL部分が脱着可能である点である。このため、キャップとペDESTALの交換だけで寸法の異なる三種類の供試体（直径22.5mm, 直径35.0mm, 直径50.0mm）について三軸試験を同一の三軸セルで行うことが可能である。また、軸荷重を三軸セル外部のロードセルによって計測するため、軸の摩擦抵抗を極力低減するように考慮し、軸と軸受け間の間隔を約0.02mmと設計した。

### (3) 側圧制御装置

側圧はエア・コンプレッサーから供給される1MPaの圧力をエア・レギュレーター（Fairchild社製、最大容量0.97MPa）により制御し、三軸セルに直接圧力を負荷している。背圧も側圧と同じくレギュレーターによって制御して二重ビュレット（最大耐圧0.88MPa）に作用させている。さらに、供試体の飽和方法として二重負圧法<sup>4)</sup>を採用しているため、真空発生装置（CONVUM, 写真-2.5）により、-93.2kPaの負圧を三軸セルや2個の脱気水槽へ作用させることが可能である。CONVUMは正の空気圧をレギュレーターで制御して負圧の値を制御するため、負圧の制御が簡便であるのが特徴である。

### (4) 飽和装置および排水径路

ミニ三軸圧縮試験機の排水径路は図-2.1 に示しているような構成になっている。これは通常の三軸試験の排水径路と同じである。ただし、通常の三軸試験の排水径路の他に二重負圧法によって供試体を飽和させるための経路が追加されている。二重負圧法の詳細については後で述べるが、2個の脱気水槽を三軸試験の排水径路に組み込むことによって供試体の底部から頂部へ向かって脱気水を通水でき、同時に排水径路全体を脱気水で満たすことが可能となっている。また、排水径路に用いる全てのチューブは、圧力による断面変形がほとんど無視できるように、常用耐圧4.7MPaのシンフレックスチューブ（Group II）を使用している。また、ジョイント金具類は図-2.2のようなダブルウェッジ式の金具（Swagelok社製）を使用し、二方向バルブや三方向バルブはボールバルブ（Whity社製）を使用している。これは、ジョイント金具やバルブ接続部に気泡が残留することを防ぎ、精度よく測定するための処置である。この他にも、ミニ三軸試験機ではジョイント金具やバルブなどの個数を最小限に抑え、断面変化による圧力減少を極力なくすように配慮している。

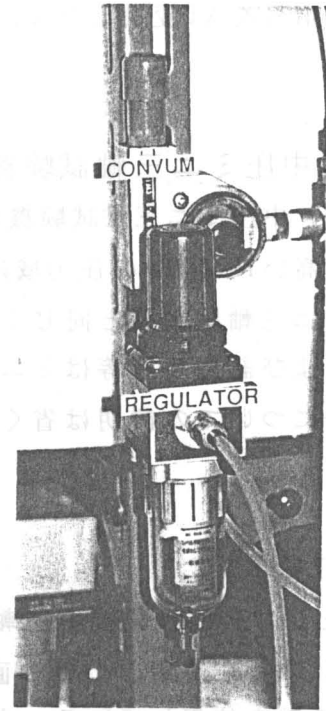


写真-2.5 真空発生装置 (CONVUM)

(5) 測定・記録装置

ミニ三軸試験で測定する項目は、軸荷重、軸方向変位、セル圧、間隙水圧および体積変化の5項目である。軸荷重は三軸セル外部のロードセルで測定する。側圧や背圧等の圧力は圧力計で測定しているが、三軸セル内の圧力を正確に測定するために直接三軸セル内の圧力をひずみゲージ式圧力変換器で測定している。また、間隙水圧についても、セル圧を測定する圧力変換器と同型の圧力変換器を用いて供試体底部の間隙水圧を測定している。軸方向変位はひずみゲージ式の変位計により測定し、供試体の体積変化はビュレットで測定している。表-2.1 は各測定器の測定精度（最小測定値）を示している。

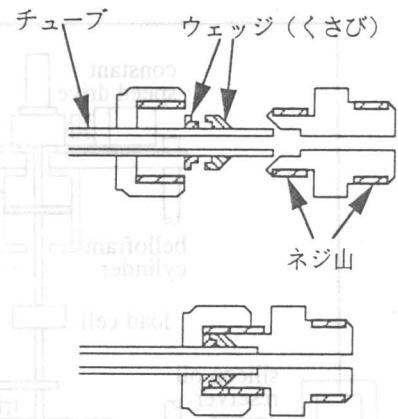


図-2.2 ダブルウェッジ式ジョイント金具

表-2.1 ミニ三軸試験機の測定精度

軸荷重	$1.0 \times 10^{-2} \text{N}$
軸ひずみ	0.01%
セル圧	0.5kPa
間隙水圧	0.5kPa
体積変化	$0.02 \text{cm}^3$

次に、記録装置はデジタル・データ・レコーダー（TEAC社製 DR-F1）を使用し、各測定項目は自動計測される。このデジタル・

レコーダーは14bitのA/Dコンバーターを内蔵し、各変器から出力されアンプで増幅されたアナログ信号をA/D変換した後に、フロッピーディスクに記録できる。

### 2.3.2 中圧ミニ三軸試験機

まず、中圧ミニ三軸試験機の概要を図-2.3に示す。中圧ミニ三軸試験機はミニ三軸試験機よりも高い1~5MPaの圧力域における三軸試験を想定して設計している。中圧ミニ三軸試験機もミニ三軸試験機と同じく直径22.5mm、高さ45.0mmの供試体を使用し、荷重装置、飽和装置および記録装置等はミニ三軸試験機と同じ装置を使用している。したがって、共通する部分についての説明は省くことにし、以下ではミニ三軸試験機と異なる部分について述べる。

#### (1) 三軸セル

中圧ミニ三軸試験機の三軸セルは、圧力域が通常よりも高いために鋼鉄製の耐圧セル（写真-2.6）を使用し、軸の直径もミニ三軸圧縮試験機の軸（直径13mm）よりも太い直径16mmの軸を使用している。また、軸の直径が増大したことによる摩擦力の増大により、軸荷重の測定に誤差が生じる可能性があるため、ロードセルを三軸セル内に配置した。

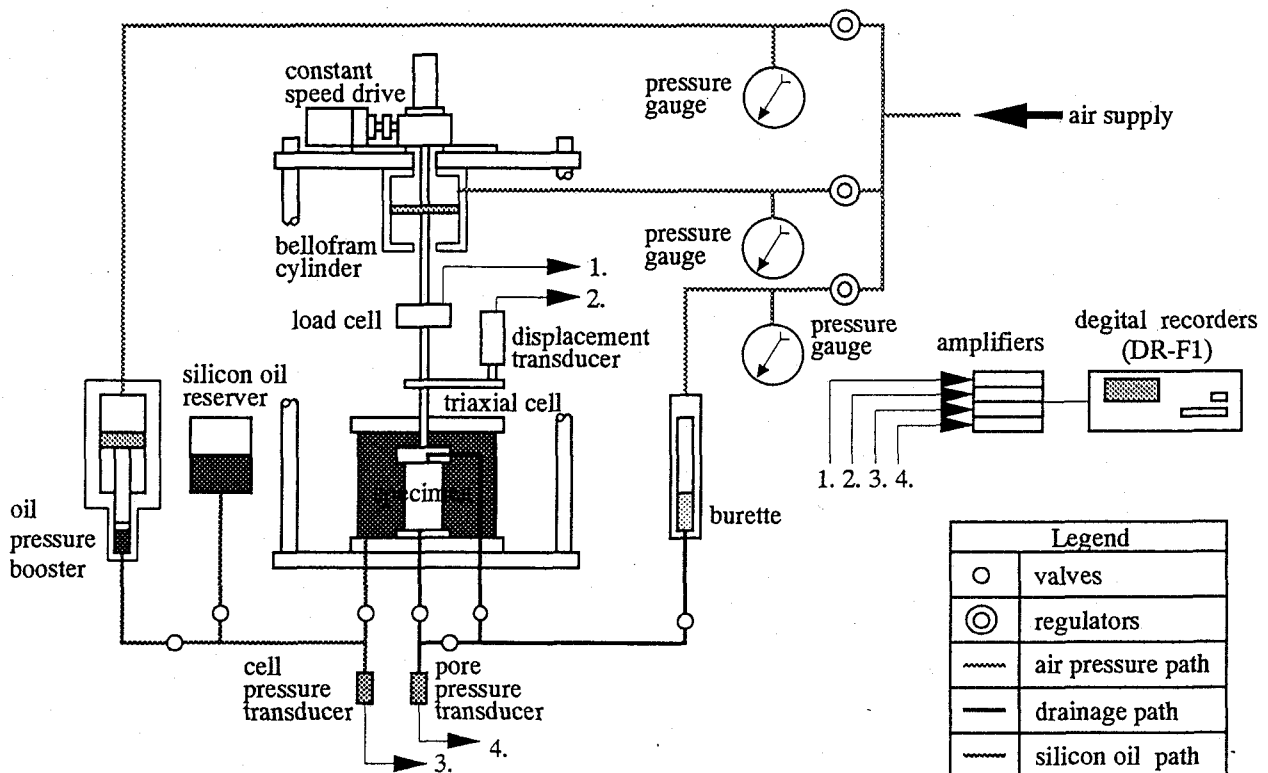


図-2.3 中圧ミニ三軸試験機の概要



## (2) 側圧制御装置

1MPa以上の圧力を空気圧によって負荷することは危険なために、中圧ミニ三軸試験機では側圧をシリコンオイルによる油圧によって負荷している。写真-2.7のような圧力ブースターを用いて最大5MPaまでの圧力を負荷できる。この圧力ブースターはピストン上下の圧力差をパスカルの原理を用いて増幅する装置である。シリコンオイルの粘性は水に比べて非常に高いため、圧力ブースターで圧力を増幅しても、セル圧が上昇し安定するまでにある程度の時間を要する。この時間をできるだけ短縮できるようにシリコンオイルの粘性を変化させて予備実験を行い、中圧ミニ三軸試験機で使用するシリコンオイルを決定した。現在使用しているシリコンオイル（信越化学工業 KF-96-10CS）は非常に低粘性のシリコンオイルである。

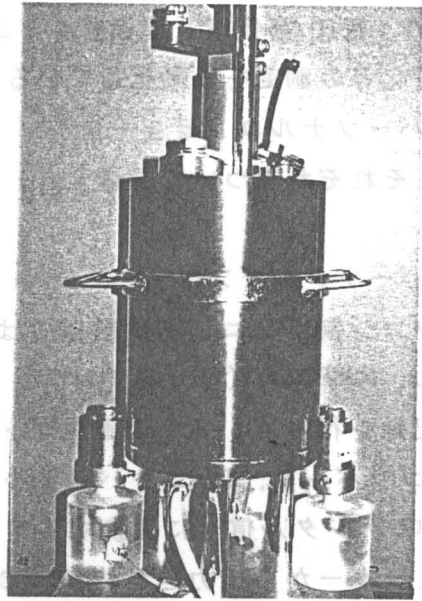


写真-2.6 耐圧セル

## (3) 測定装置

中圧ミニ三軸試験で測定する項目は、ミニ三軸試験と同じく軸荷重、軸方向変位、セル圧、間隙水圧および体積変化の5項目である。軸方向変位や体積変化の測定方法はミニ三軸試験機と同じである。軸荷重を測定するロードセルは、三軸セル内に配置されているため、圧力やシリコンオイルによる影響を受けにくいロードセルを使用している。また、セル圧や間隙水圧を測定する各圧力変換器の最大容量は、使用する圧力範囲を考慮して、ともに5.0MPaの変換器を使用している。表-2.2は各測定器の測定精度（最小測定値）を示している。

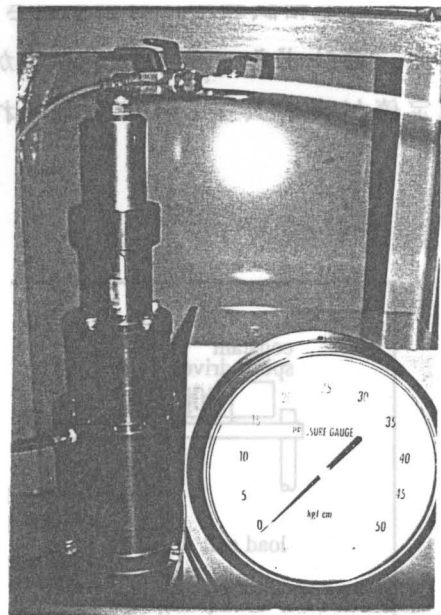


写真-2.7 圧力ブースター

表-2.2 中圧ミニ三軸試験機の測定精度

軸荷重	0.1N
軸ひずみ	0.01%
セル圧	1.0kPa
間隙水圧	1.0kPa
体積変化	0.02cm <sup>3</sup>

### 2.3.3 パソコン制御ミニ三軸試験機

パソコン制御ミニ三軸圧縮試験機の概要を図-2.4に示す。この試験機はミニ三軸試験機の側圧制御や試験データ測定を自動化するこ

とを目的として製作したものである。そのために、A/D、D/Aコンバータを組み込んだパソコン、E/P（電圧/空気圧）変換器をミニ三軸試験機に追加し、側圧制御および軸力、軸変位、体積変化等の測定を自動化している。以下では、三軸セル等の共通している部分は省略し、(1) パーソナルコンピューター、(2) 載荷および側圧制御装置、(3) 測定装置の3つに分け、それぞれについて詳述する。

(1) パーソナルコンピューター

パソコン制御ミニ三軸試験機では、16bit パーソナルコンピューター（NEC PC9801VX）を使用し、N88BASIC（86）をプログラミング言語として側圧の自動制御、各測定項目の自動測定・記録を行っている。自動制御・測定を行うため、コンピューター内部の拡張スロットにA/Dコンバータ、D/Aコンバータを組み込んでいる。A/Dコンバータは、各測定器からの電圧を12bitのデジタル信号に変換するインターフェイスボード、D/Aコンバータはパーソナルコンピューターから出力された12bitのデジタル信号を電圧に変換するインターフェイスボードである。これらのボード類を装備することによって、異方圧密試験や平均主応力一定試験等の応力経路制御試験が自動的に行える。

また、ミニ三軸試験中に自動測定されたデータをもとに逐次、軸差応力、過剰間隙水圧、有効応力、軸ひずみ、体積ひずみ等が計算されハードディスク内に記録される。それと同時に測定値がディスプレイに表示されるため試験の進行状況が確認でき、異常が発生した

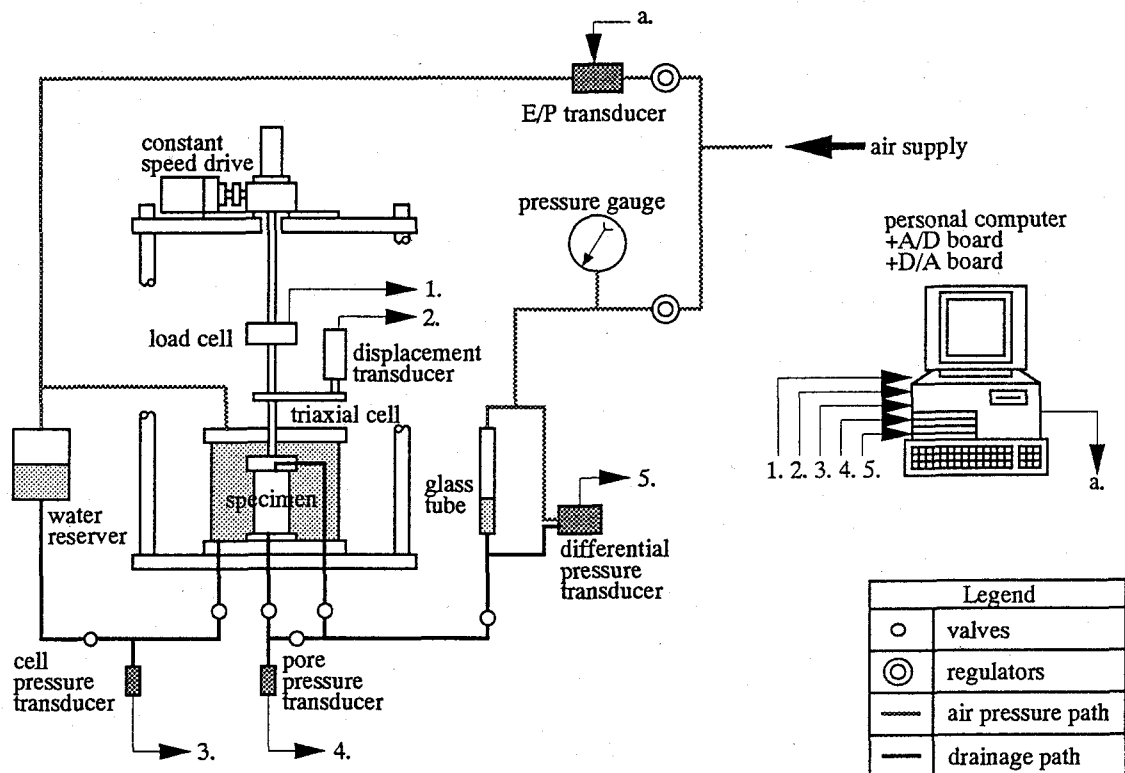


図-2.4 パソコン制御ミニ三軸試験機

際にはすぐに試験を中止できる。また、ディスプレイには軸差応力-軸ひずみ関係、過剰間隙水圧-軸ひずみ関係および有効応力経路があわせて表示される。

### (2) 载荷および側圧制御装置

パソコン制御ミニ三軸試験機では、軸力、側圧および背圧をそれぞれ独立して制御する機構になっている。軸力はスクリーギアとDCモーターを用いた载荷装置（変位速度制御式）で载荷し、最大1.0kNまで载荷することができる。パソコン制御ミニ三軸試験機では、応力比一定圧密試験や平均主応力一定試験等の排水試験を行うため、軸ひずみ速度をかなり低速にする必要がある。このため、DCモーターの回転数の制御と中間ギヤの組合せによって $1.0 \times 10^{-5}$  mm/minまで減速することができる。また、側圧はE/P（電圧/空気圧）変換器を用いて自動制御している。この電/空変換器（Bellofram社製 1000型）はパーソナルコンピュータから出力されたデジタル信号にしたがって、最大530kPaまで三軸セルに負荷することができる。また、背圧は圧密過程・軸圧縮過程を通して変化させる必要がないので、最大容量491kPaのレギュレーターを用いてこれまでの試験装置と同じくマニュアルで制御している。

### (3) 測定装置

パソコン制御ミニ三軸試験における測定項目は、軸力、軸ひずみ、側圧、間隙水圧および体積変化であり、パーソナルコンピュータにより自動計測される。軸力はロードセル、軸ひずみはゲージ式変位計、側圧および間隙水圧はひずみゲージ式圧力計を使用し、体積変化は図-2.5に示すような差圧計（Validyne社製 PS309）を用いたシステムを使用している。この試験機では、ビュレットの代用としてステンレス管（内径3.0mm、外径6.0mm）を使用している。体積変化は管内の水頭の変化として差圧計で測定され、A/Dコンバータを介してパーソナルコンピュータに記録される。ただし、パーソナルコンピュータに記録される際には、水頭の変化とステンレス管の断面積から体積変化を計算し、体積ひずみとして記録される。この測定装置は1mmの水頭差で約 $7.07 \times 10^{-3}$  cm<sup>3</sup>の体積変化を測定でき、これはミニ三軸試験機で使用する供試体の場合、 $3.93 \times 10^{-2}$  %の体積ひずみに相当する。各項目の測定精度は体積変化を除いてミニ三軸試験機と同じである。

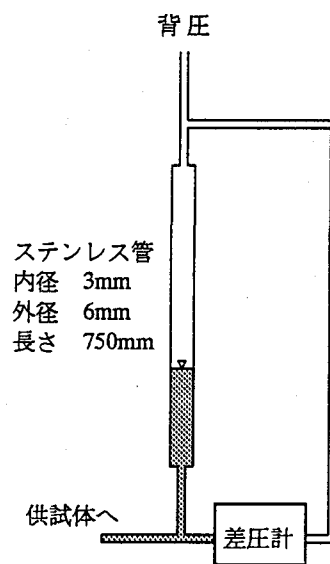


図-2.5 体積変化測定装置

### 2.3.4 ひずみ経路制御ミニ三軸試験機

ひずみ経路制御ミニ三軸圧縮試験機の概要を図-2.6に示す。ひずみ経路制御試験は、任意のひずみ経路に沿ったせん断試験の実施とせん断時における供試体内部の応力・ひずみ状態を均一に維持することを目的として、Chu & Lo<sup>4)</sup>によって開発された試験である。その後、多くの研究者<sup>5) 6) 7)</sup>によって様々なタイプのひずみ経路制御試験機が提案されている。

ひずみ経路制御ミニ三軸試験機はパソコン制御ミニ三軸試験機で得られたノウハウをもとに製作しているため、共通する部分は省略し、(1) パーソナルコンピューター、(2) 載荷および側圧制御装置、(3) 体積変化制御装置、(4) 測定装置に分けて、それぞれについて詳述する。

#### (1) パーソナルコンピューター

ひずみ経路制御ミニ三軸試験機で使用するパーソナルコンピューターは基本的にはパソコン制御ミニ三軸試験機と同じである。ただし、ひずみ経路制御ミニ三軸試験機は、等方または異方圧密した後にひずみ経路制御試験を行うことを想定しているために、側圧に加えて、体積変化および軸力を制御する必要がある。このため、パーソナルコンピューター

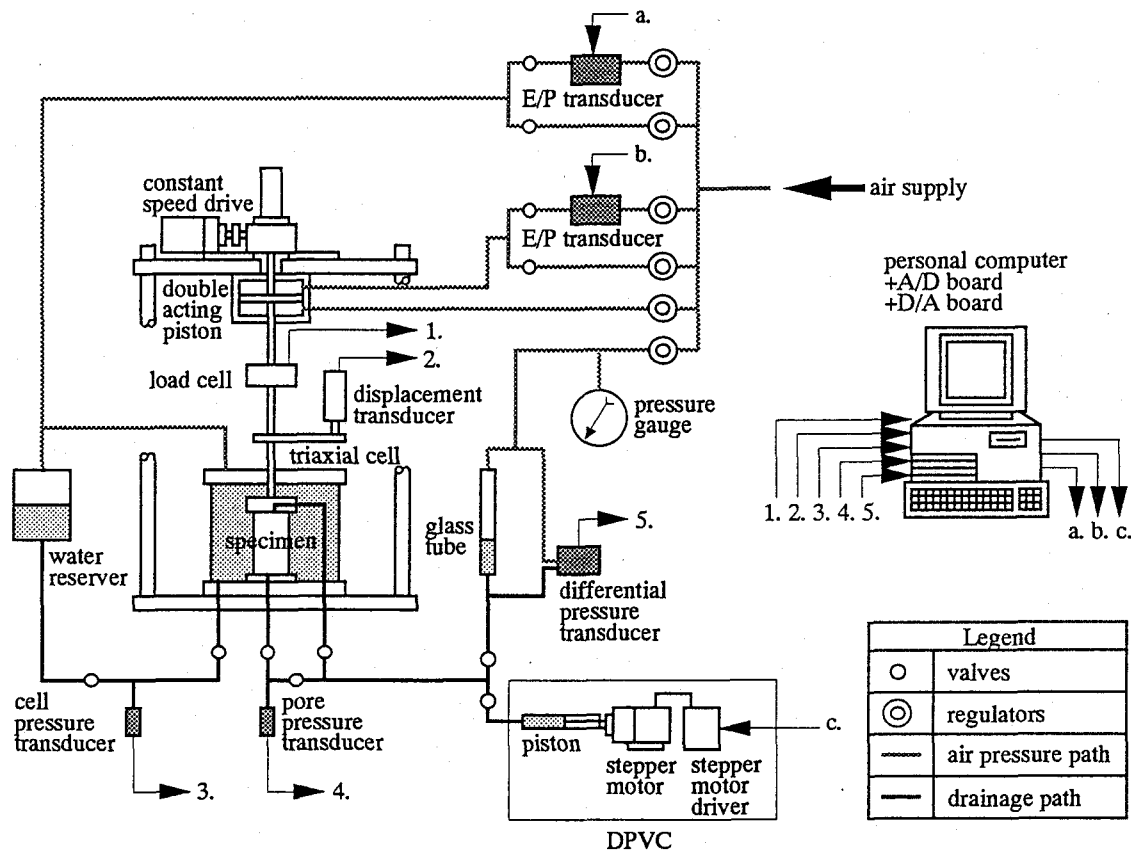


図-2.6 ひずみ経路制御ミニ三軸試験機

で2台の電/空変換器（側圧用，軸力用）と体積変化制御装置（ステッパ・モータードライバー）を制御している。ひずみ経路制御ミニ三軸試験機では軸力の自動制御を行えるため，繰返し載荷試験も行うことが可能である。

また，パソコン制御ミニ三軸試験機と同じく，圧密過程およびひずみ経路制御試験中におけるデータは自動測定される。自動測定されたデータから逐次，軸差応力，過剰間隙水圧，有効応力，軸ひずみ，体積ひずみ等が計算され，ハードディスク内に記録される。また，同時に測定値がディスプレイに表示されるため，試験の進行状況が確認できる。

## (2) 載荷および側圧制御装置

軸力，側圧および背圧は，パソコン制御ミニ三軸試験機と同じく，それぞれ独立して制御できる機構になっている。しかし，軸力は変位速度制御式だけでなく，応力制御式によっても載荷できる。変位速度制御式では，パソコン制御ミニ三軸試験機と同様の載荷方式により，最大1.0kNまで載荷できる。また，変位速度は $1\sim 1.0\times 10^{-5}$  mm/minの範囲で変化が可能である。一方，応力制御式では，複動型ペロフラムシリンダーにより最大196Nまで載荷できる。この場合，軸力は，ペロフラムシリンダーに供給する空気圧を電/空変換器を用いて電圧に変換し，パーソナルコンピュータで制御されている。このため，等方・異方圧密だけでなく繰返し載荷などの軸力の制御が可能である。また，バルブの切替でレギュレーターによるマニュアル制御も可能で，最大1.0MPaまで負荷することができる。側圧も電/空変換器を用いてパーソナルコンピュータで制御されている。同じくバルブの切替でレギュレーターによるマニュアル制御も可能で，最大1.0MPaまで負荷することができる。背圧はレギュレーターによるマニュアル制御により最大491kPaまで負荷することが可能である。

## (3) 体積変化制御装置

ひずみ経路制御ミニ三軸試験機における最大の特徴は体積変化制御装置である。いくつか提案されている体積変化制御装置の中から，本研究ではDPVC<sup>4) 5)</sup> (Digital Pressure-Volume Control device) と呼ばれるシステムを採用した。DPVCはステッピングモーター，スクリューギアおよびピストンより構成されており，構造が単純で制御が簡単であるのが特徴である。DPVCの概要を図-2.7に示す。DPVCはステッピングモーターの回転をスクリューギアにより直線運動に変え，ピストンを前後移動させることによって体積変化を制御できるシステムである。本研究で用いたステッピングモーターの分解能は $0.72^\circ/\text{step}$ であり，ステッピングモータードライバーを介してパーソナルコンピュータにより制御される。このステッピングモータードライバーから出力される100パルス当たりの体積変化

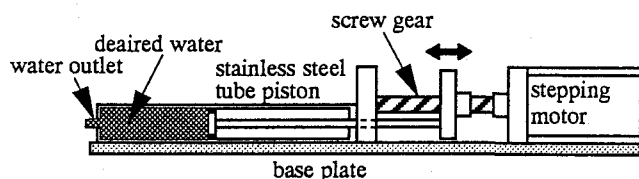


図-2.7 DPVC (Digital Pressure-Volume Control device)

量は0.000750cm<sup>3</sup>である。

#### (4) 測定装置

ひずみ経路制御ミニ三軸試験機では、圧密過程とひずみ経路制御せん断過程において測定項目が異なる。圧密課程では、軸力、軸変位、側圧、間隙水圧および体積変化量の5項目である。軸力はロードセル、側圧および間隙水圧はひずみゲージ式圧力計、軸変位はひずみゲージ式変位計によりそれぞれ測定され、体積変化量はパソコン制御ミニ三軸試験機と同じく差圧計を用いたシステムを使用している。しかし、ひずみ経路制御せん断過程において、体積変化量はDPVCによって制御され、体積変化が測定されないため、軸力、軸変位、側圧および間隙水圧の4項目となる。そのかわりに、必要に応じてDPVCのステッピングモーター回転数を測定することができる。

## 2.4 ミニ三軸試験の試験手順

各ミニ三軸試験における試験手順は、供試体の作成・セット、飽和過程、等方（異方）圧密過程および軸圧縮（せん断）過程にわけられる。各ミニ三軸試験によってそれぞれの過程における内容に多少の差があるが、ミニ三軸試験機を使用する場合の試験手順が最も基本的な手順となるため、以下にはミニ三軸試験機を使用する場合の過程について述べる。

### 2.4.1 供試体の作成とセット

供試体の作成とセットのために必要な器具は通常の三軸試験で使用する器具と全く同じであるが、供試体の寸法が直径22.5mm、高さ45.0mmであるため、トリマー、マイターボックス、メンブレン拡大器は供試体寸法にあわせて特注したものを使用している。寸法の小さい供試体を成形する場合、その成形方法としてトリミング法<sup>9)</sup>と型抜き法<sup>9)</sup>が考えられる。しかし、どちらの成形方法が優れているかについての結論が確定していない<sup>10)</sup>ことや、ミニ三軸試験では等方（異方）圧密を行うことから供試体成形時における乱れが三軸試験結果に及ぼす影響が小さいと考えられることから、ミニ三軸試験ではトリミング法により供試体を成形することにした。トリミング法を選んだもう一つの理由として洪積粘土のような硬質の粘土の場合、型抜き法では周面摩擦が大きくなり成形が困難であると判断したためである。

次に、具体的な手順を示す。ミニ三軸試験では①～⑧までの手順に従って供試体を成形し、三軸セル内にセットする。

- ① 4分割したボーリングサンプルをトリマーにセットする。（写真-2.8(a)）
- ② ワイヤソーと直ナイフで円柱形に成形する。（写真-2.8(b)）
- ③ トリマーで成形した供試体をマイターボックスにとり、ワイヤソーと直ナイフで供試体の端面を仕上げる。整形後、供試体の直径、高さおよび質量を測定する。（写真-2.8(c)）
- ④ 整形した供試体にろ紙を巻く。この時、あらかじめ拡大器にメンブレンとOリングをセ

ットしておく。(写真-2.8(d))

- ⑤ 供試体にメンブレンをかぶせ、そのまま三軸セル内のペDESTAL上 に供試体をセッ  
トする。(写真-2.8(e))
- ⑥ しわがよらないようにメンブレンを供試体に装着させる。(写真-2.8(f))
- ⑦ O-リングを外し、メンブレンのシールを行う。(写真-2.8(g))
- ⑧ 拡大器をはずし、供試体のセッ完了。(写真-2.8(h))

また、④で排水用に供試体側面に巻き付けるろ紙は乾燥状態のものを使用する。ろ紙の形状は図-2.8のような短冊状のものである。乾燥したろ紙とポーラスストーンを用いて供試体をセッする方法を乾燥セッ<sup>11)</sup>と呼ぶ。このセッ法を用いると次のような利点がある。まず、従来のように飽和したろ紙やポーラスストーンを用い、かつメンブレンと供試体の間を水で満たして空気が入らないようにして供試体をセッすると供試体が水を吸収し弱化する。特に不飽和状態の洪積粘土は著しく吸水して膨張するので吸水による弱化を防ぐことになる。さらに飽和したろ紙やポーラスストーンを用いる場合には手際が悪いと、このような吸水による弱化の程度が大きくなるが、乾燥セッの場合には多少手際が悪くてもあまり問題が生じない。

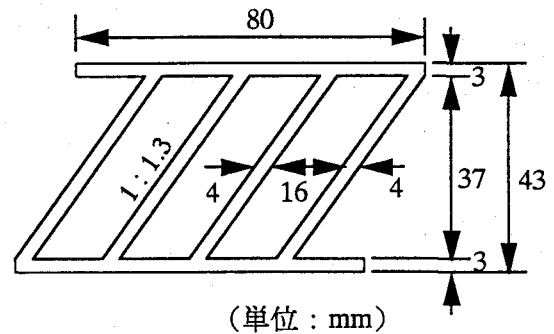


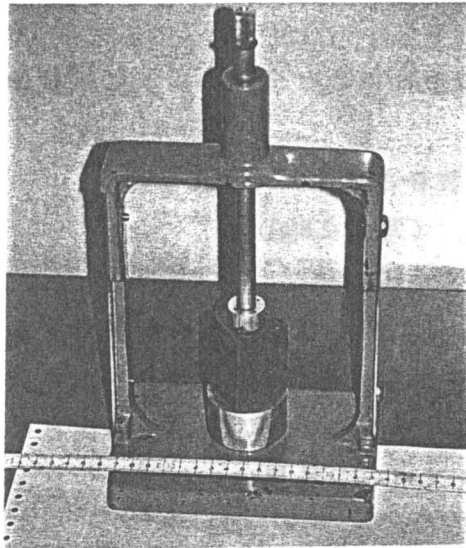
図-2.8 ろ紙の形状・寸法

#### 2.4.2 飽和過程

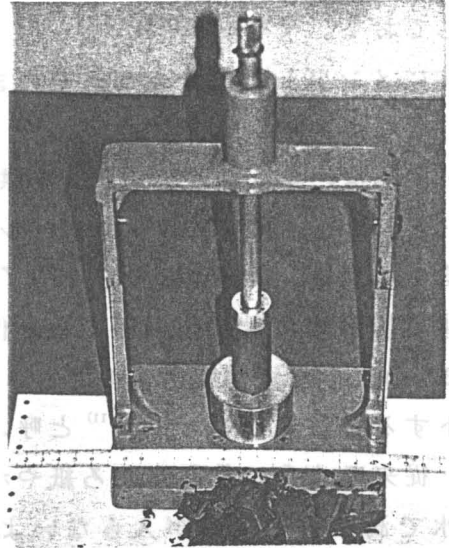
自然堆積粘土試料は、一般的に応力解放等により不飽和状態にあると考えられる。特に、洪積粘土のように大深度から採取された試料では、その傾向が強くみられる。ミニ三軸試験では飽和度を上げるため、圧密過程に入る前に供試体を飽和させる過程を設けている。飽和方法として二重負圧法、フラッシング法および背圧法の3手法を組合わせて用いている。各飽和方法については別に節を設けて詳しく述べる。飽和度は飽和過程終了時と圧密過程終了時の2回測定し、飽和過程終了時の飽和度が低い場合には、もう一度、二重負圧法により通水を行う。

#### 2.4.3 等方圧密過程

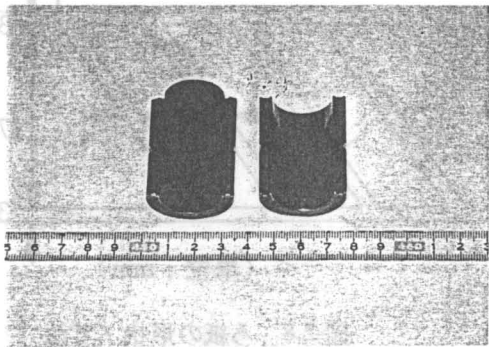
ミニ三軸試験では、供試体を飽和させた後等方圧密を行う。圧密圧力は標準圧密試験の  $e - \log p$  曲線から求めた圧密降伏応力から判断して決定し、背圧は294.3kPaを基準として用いている。これは、採取される以前に試料に作用していた静水圧を回復させ、応力解放により低下していた飽和度を上昇させる(背圧法)ためである。土田らの研究<sup>12)</sup>により、背圧



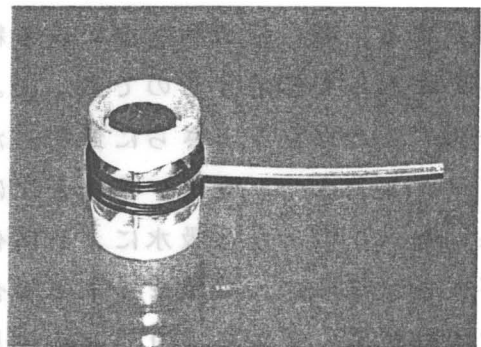
(a) ボーリングサンプルのセット



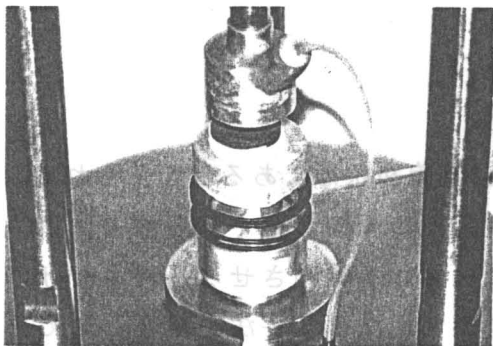
(b) 供試体の整形



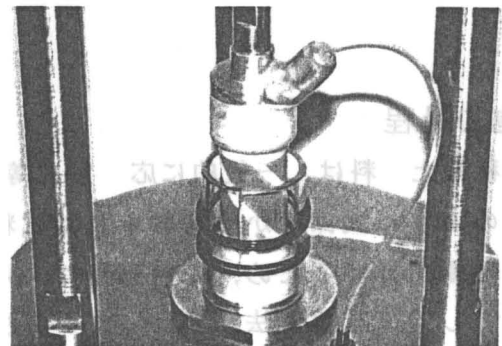
(c) 供試体端面の整形



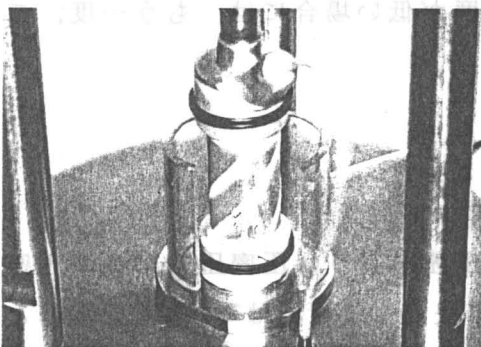
(d) メンブレン拡大器



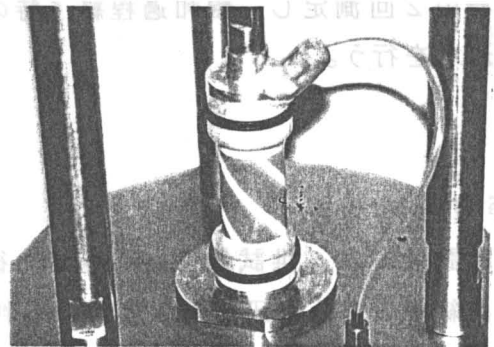
(e) 供試体の設置



(f) メンブレンの装着



(g) メンブレンのシール



(h) 供試体のセット完了

写真-2.8 ミニ三軸試験の手順



の大きさが試料の採取深度で作用していた静水圧の1/3～1/2以上であれば、非排水せん断試験中の軸差応力や間隙水圧の挙動に有為な差がみられないと報告されている。したがって、背圧の値は洪積粘土試料の採取深度や試験装置の容量から判断して、294.3kPaを基準として用いた。また、この294.3kPaの背圧が妥当な値であるかどうかを調べるため、市販のクラウンクレイを用いて表-2.3に示すような試験条件でミニ三軸試験を行った。特に、ここでは過剰間隙水圧の挙動に着目して背圧の大きさの妥当性を検証した。図-2.9はミニ三軸試験結果の過剰間隙水圧－軸ひずみ関係である。背圧が294.3kPa以上の場合、背圧の大きさにかかわらず間隙水圧の挙動はほとんど変化しないことから、背圧の値は294.3kPaで十分であると判断した。

表-2.3 予備試験の試験条件（背圧の影響）

有効圧密圧力 (kPa)	背 圧 (kPa)	軸ひずみ速度 (%/min)
196.2	294.3	2.0
196.2	294.3	0.2
196.2	294.3	0.02
196.2	294.3	0.002

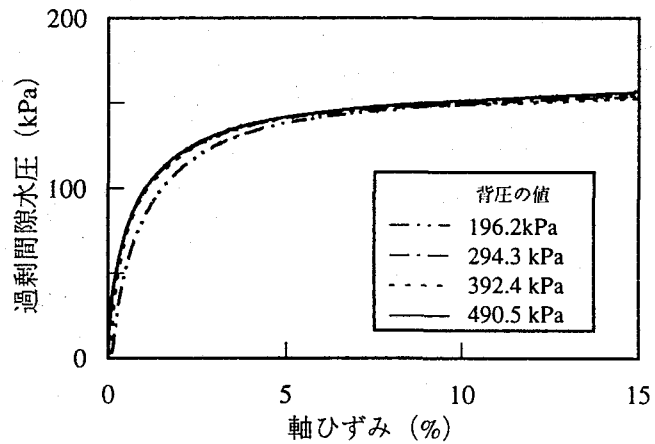


図-2.9 過剰間隙水圧－軸ひずみ関係（背圧の影響）

圧密の終了は、排水量－時間（対数目盛）曲線において一次圧密が明確に認められる場合は3t法によって決定し、一次圧密が明確に認められない場合は過剰間隙水圧が消散した時点で圧密を終了した。

#### 2.4.4 軸圧縮過程

等方圧密過程終了後、排水径路を閉じ非排水せん断試験または非排水クリープ試験を行った。非排水せん断試験は軸ひずみ速度一定の変位制御方式で圧縮を行っている。ミニ三軸試験における非排水せん断試験の軸ひずみ速度を決定するために、表-2.4に示すような試験条件で非排水せん断試験を行った。図-2.10は過剰間隙水圧－軸ひずみ関係である。背圧の妥当性を調べた場合と同じく過剰間隙水圧の挙動に着目すると、軸ひ

表-2.4 予備試験の試験条件（軸ひずみ速度の影響）

有効圧密圧力 (kPa)	背 圧 (kPa)	軸ひずみ速度 (%/min)
196.2	196.2	0.02
196.2	294.3	0.02
196.2	392.4	0.02
196.2	490.5	0.02

ずみ速度 0.2, 0.02 および 0.002%/min の間隙水圧がほぼ等しいことから、軸ひずみ速度が  $10^{-2}$  %/min のオーダーであれば問題がないと判断し、軸ひずみ速度を 0.05%/min と決定した。そして、非排水せん断試験の終了は、軸差応力のピークの有無にかかわらず、軸ひずみが 15% に達した時点とした。

また、土の時間依存性挙動を調べる非排水クリープ試験は一定の軸荷重を載荷する荷重制御方式で行っている。クリープ荷重の大きさは各試験ケースにより異なるが、試験の終了は供試体の破壊した時点とした。

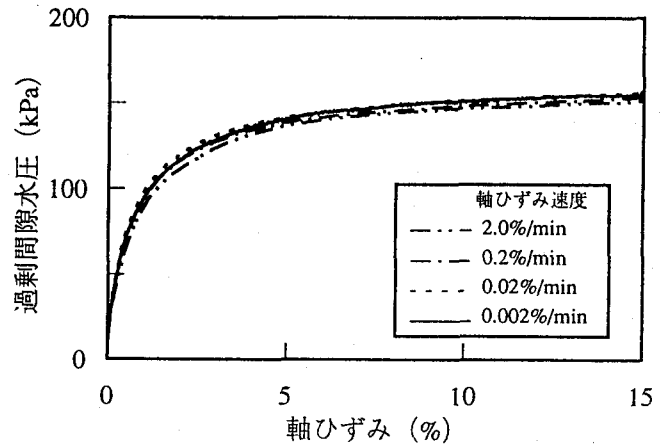


図-2.10 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係 (軸ひずみ速度の影響)

## 2.5 供試体の飽和方法

ミニ三軸試験の大きな特徴として、使用する三軸供試体の寸法が従来の供試体に比べて非常に小さいことがあげられる。このため、採取試料の有効利用ができるなどの利点があるが、その反面、供試体の飽和度が低いと間隙水圧を正確に測定できないという欠点がある。通常の三軸試験においても供試体の飽和度が低い場合、非排水せん断試験中に発生する間隙水圧を正確に測定できないが、特にミニ三軸試験の場合、供試体の体積が小さいために供試体内部に残留したわずかな気泡でも強く影響を受ける。このため、通常寸法の供試体を用いる三軸試験よりも飽和度をかなり高くする必要がある。ミニ三軸試験では、供試体や排水経路を十分に飽和するために様々な飽和方法を試みた。ここでは、ミニ三軸試験で用いた飽和方法についてまとめる。

### 2.5.1 飽和度の測定方法

土の飽和度を調べるためには、Skempton の間隙水圧係数  $B$  の値が有効なインデックスとなっている。間隙水圧係数  $B$  は式(2.1)に含まれる係数で、係数  $A$  と共に間隙水圧係数と呼ばれている。三軸試験の場合、間隙水圧、側圧および軸圧の増分と間隙水圧係数は式(2.1)で表すことができる。

$$\Delta u = B \{ \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \} \quad (2.1)$$

間隙水圧係数  $B$  の値は飽和状態に近づくにつれて 1 に近づき、完全な飽和状態であれば  $B = 1$  になる。そして、側圧と軸圧を等方的に変化 ( $\Delta \sigma_1 = \Delta \sigma_3 = \Delta \sigma$ ) させると、式(2.1)は次の様に変形できる。

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (2.2)$$

等方圧の変化量  $\Delta \sigma$  に対する間隙水圧の変化量を測定することによってB値を式(2.2)から求めることができる。ミニ三軸試験では、等方圧密前と等方圧密後にB値の測定を行っている。測定方法は、等方圧を下降・上昇させ、その間の間隙水圧の挙動を測定し、下降側と上昇側で得られたB値を平均して飽和度の判定に用いている。

### 2.5.2 三軸試験における既往の飽和方法

三軸試験において、従来から種々の方法により供試体の飽和がはかられている。ここでは一般的な飽和方法として、炭酸ガスを用いる方法、背圧法、フラッシング法および二重負圧法についてまとめる。

#### (1) 炭酸ガスを用いる方法<sup>19)</sup>

一般に不飽和状態の供試体内に存在する気体は、間隙圧が増加するとその体積が減少すると同時に間隙水中に溶解し、飽和度が上昇する。間隙内の気体は一般に空気（主に窒素）であるが、これを炭酸ガスに置換すれば、炭酸ガスは同じ圧力でも空気よりも水に溶解しやすいので、高い飽和度が得られる。この性質を利用して飽和度を上げる飽和方法である。この方法は排水経路を通して炭酸ガスを供試体に送り込み空気と置換する。そして、ほぼ空気が炭酸ガスに置換された時点で脱気水を供試体に通水し、最後に背圧を与えて飽和させる。この炭酸ガスを用いる方法は、砂質土の飽和度を高めるためによく用いられる飽和方法であるが、細粒分の多い供試体や粘性土の供試体については炭酸ガスが浸透しにくいためにあまり用いられていない。

#### (2) 背圧法<sup>19)</sup>

地下水位以下の地盤から採取された自然堆積試料の場合、それまでに作用していた静水圧の解放により間隙水圧が減少するので、間隙水中に溶在していた気体が気泡化して飽和度を低下させる。背圧法はこの気泡を再び間隙水中に溶かすために背圧を段階的に加えて行き、飽和度を上げていく方法である。この方法は、細粒分が多く透水性の低い供試体にも有効であるため、粘性土などに用いられる方法である。

#### (3) フラッシング法<sup>19)</sup>

フラッシングとは、供試体下面から脱気水を送り込み、供試体上面から排水させる操作である。供試体をセットする場合、供試体の側面にドレーンペーパーとしての紙をはり、ラバーメンブレンを被せるが、このときメンブレンと供試体の間に空気が入る。この空気を取り除くためにフラッシングを用いる。この操作を繰り返すことにより、供試体の飽和度を上げると共に、排水経路やポーラスストーンに残留している気泡を取り除く。

#### (4) 二重負圧法<sup>13)</sup>

二重負圧法は砂質土の飽和方法として開発されたものであるが、龍岡らの研究<sup>13)</sup>によって粘性土の飽和方法としても究めて有効であることが報告されている。

以下に二重負圧法の概要について示す。図-2.11は二重負圧法の概略を模式的に示したものである。まず、供試体を $-19.6\text{kPa}$ の負圧で圧密し、供試体周辺に残留している空気や供試体内の気泡を吸い出す。さらに、供試体や水槽内部に $-88.3\text{kPa}$ 、三軸セル内に $-68.7\text{kPa}$ の負圧を作用させ、水槽内の水位差によって通水を行い、脱気水で供試体を飽和させる。これら一連の操作段階における有効応力は $19.6\text{kPa}$ のまま一定である。この飽和方法によって供試体や排水経路内の気泡を有効に排除でき、高い飽和度が得られる。

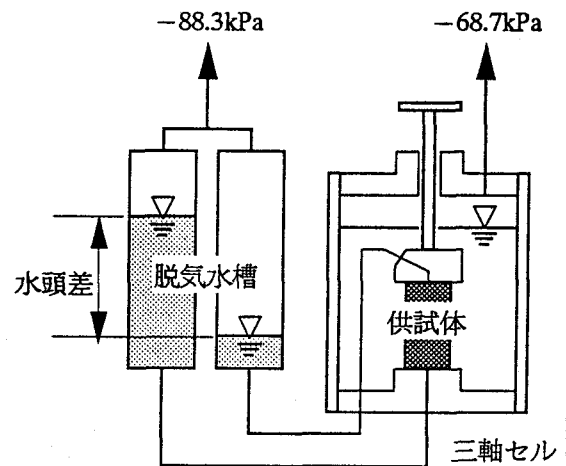


図-2.11 二重負圧法の概略

#### 2.5.3 ミニ三軸試験における飽和方法

ミニ三軸試験では、当初、供試体の飽和方法として2.5.2に示した背圧法やフラッシング法を用いていたが、あまり高い飽和度は得られなかった。そこで、確実に高い飽和度が得られるように、二重負圧法と共にフラッシング法と背圧法を併用して供試体の飽和を行っている。

以下に本研究で行っている飽和方法の具体的な手順を示す。

- ① 供試体に $-19.6\text{kPa}$ の負圧を作用させる。
- ② 軸方向変位を測定しながら、 $-19.6\text{kPa}$ の負圧で供試体を予圧密する。
- ③ 予圧密終了後、有効応力 $+19.6\text{kPa}$ を保ちながら、セル圧を $-68.7\text{kPa}$ 、供試体内の圧力を $-88.3\text{kPa}$ まで段階的に降下させる。
- ④ ③の状態を維持しながら、脱気水槽に水頭差を与え、供試体下部から上部に向かって脱気水を通水させる。
- ⑤ ④の操作後も、供試体や排水経路内に残留している気泡があれば、フラッシングを数回行って完全に排除する。
- ⑥ 有効応力 $+19.6\text{kPa}$ を維持しながら、セル圧を大気圧、供試体内の圧力を $-19.6\text{kPa}$ まで段階的に上昇させる。
- ⑦ 三軸セルに正の圧力が作用するようにする。
- ⑧ セル圧を $19.6\text{kPa}$ 、供試体内の圧力を大気圧まで上昇させる。
- ⑨ 有効応力 $+19.6\text{kPa}$ を保ちながら、セル圧 $313.9\text{kPa}$ 、背圧 $294.3\text{kPa}$ まで段階的に上昇させ

る。

⑩ セル圧を所定の値まで上昇させて、圧密を開始する。

供試体の予圧密終了時間は、試料によりかなり異なるため軸方向変位－時間関係から判断した。今回、本試験で用いた沖積粘土の予圧密時間は30分前後であった。また、セル圧や背圧を上昇・下降させる場合の一段階あたりの圧力の変化は4.9kPaを基準としている。

## 2.6 まとめ

本章では、まずミニ三軸試験で使用する三軸供試体と通常の三軸供試体を比較し、その寸法的な特徴について述べている。次に、本研究で使用する試験装置（ミニ三軸試験機、中圧ミニ三軸試験機、パソコン制御ミニ三軸試験機、ひずみ経路制御ミニ三軸試験機）の各システムについて概要や特徴を述べ、ミニ三軸試験における試験手順や試験方法、特にミニ三軸試験で使用している供試体の飽和方法（二重負圧法）について述べた。

## 参考文献（第2章）

- 1) Matsui, T., Oda, K. and Nabeshima, Y. : Development of mini-triaxial compression apparatus, Proceedings of the Eleventh Southeast Asian Geotechnical Conference, pp.171~176, 1993.
- 2) 松井保, 小田和広, 鍋島康之 : ミニ三軸圧縮試験機の開発と自然堆積粘土への適用, 土と基礎, Vol.42, No.11, pp.17~22, 1994.
- 3) Matsui, T., Oda K. and Nabeshima, Y. : Applicability of mini-triaxial test for undisturbed clays, Proceedings of 10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.37~40, 1995.
- 4) Chu, J. and Lo, S.-C. R. : Asymptotic behavior of a granular soil in strain path testing, Geotechnique, Vol.44, No.1, pp.65~82, 1994.
- 5) Uchida, K. and Vaid, Y. P. : Sand behavior under strain path control, Proceedings of 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.17~20, 1994.
- 6) 前川昌教, 山田恭央, 五十嵐正剛 : 排水量を制御した砂の液状化試験, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp.737~738, 1991.
- 7) 社本康弘, 張建民, 楠亀鉄男 : 三軸ひずみ経路試験の簡易手法と試験結果の分析, 第30回土質工学研究発表会講演集, pp.599~602, 1995.
- 8) 正垣孝晴, 木暮敬二 : 携帯型一軸圧縮試験による粘性土の非排水強度特性の推定, 新しい調査・設計技術に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.271~276, 1990.
- 9) 亀井健史, 常田亮 : 一軸圧縮強度・変形特性に及ぼす供試体寸法の影響, 土木学会論文集, No.436, III-16, pp.131~134, 1991.
- 10) 正垣孝晴, 亀井健史, 常田亮 : “一軸圧縮強度・変形特性に及ぼす供試体寸法の影響”への討議・回答, 土木学会論文集, No.457, III-21, pp.155~157, 1992.
- 11) 龍岡文夫 : 第3回三軸圧縮試験実技講習会報告, 土と基礎, Vol.35, No.11, pp.89~93,

1987.

- 12) 土田孝, 菊池喜昭, 中島謙二郎, 小林正樹: 大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質(その3) せん断特性, 港湾技研資料, No.498, pp.89~114, 1984.
- 13) 三浦清一: 三軸試験供試体の飽和度の上げ方-炭酸ガスを用いる方法-, 土と基礎, Vol.31, No.7, pp.59~60, 1983.
- 14) 岡島洋一: 三軸試験供試体の飽和度の上げ方-背圧を用いる方法-, 土と基礎, Vol.31, No.7, pp.60~61, 1983.
- 15) 清水正喜: 三軸試験供試体の飽和度の上げ方-フラッシングを用いる方法-, 土と基礎, Vol.31, No.7, pp.61~62, 1983.

## 第3章 粘土の三軸試験結果に及ぼす供試体寸法の影響

### 3.1 概説

土の一軸圧縮試験や三軸試験で使用する供試体は直径35mm または50mm（土質試験法の改訂で三軸試験では直径75mm と100mm も新たに基準化された）、高さが直径の約2倍（一軸圧縮試験では直径の1.8～2.5倍、三軸試験では2.0～2.5倍）の円柱形供試体を基準として定めている。これは供試体の形状によって応力-ひずみ挙動が変化し、試験結果が異なることを防ぐためである。供試体の寸法が異なることによって、力学的特性の差が生じることを寸法効果と言う。ミニ三軸試験は、従来の三軸供試体（直径50mm あるいは35mm）よりも小さい寸法の供試体（直径22.5mm、高さ45.0mm）を用いて三軸試験を行うため、寸法効果によって試験結果が異なることが考えられた。そこで第3章では、三軸供試体の寸法が異なる場合、強度・変形特性に及ぼす供試体寸法の影響について調べた。

本章では、まずミニ三軸試験で用いる供試体（直径22.5mm）と通常の三軸試験で用いる供試体（直径35mm および50mm）をモデル化し、弾粘塑性有限要素解析を行った。本章で行った弾粘塑性有限要素解析は、通常の三軸試験と同じく等方圧密圧力で圧密を行う圧密過程と非排水状態・軸ひずみ速度一定で軸圧縮する軸圧縮過程をシミュレーション解析したものである。そして、圧密過程および軸圧縮過程において、供試体寸法が異なることによって三軸供試体内部にどのような差が生じるのかについて述べる。次に、実際の不攪乱粘性土を用いて三軸CU試験を行い、寸法効果について実験的にも検証を行う。特に、粘性土の三軸試験としてミニ三軸試験が適用性を持つのかという点について着目しながら、従来の三軸試験結果と比較・検討を行う。

### 3.2 三軸試験の寸法効果に関する既往の研究

三軸試験が要素試験として成立するならば、供試体の寸法や形状によらず、応力-ひずみ関係をはじめ強度的特性はすべて一致するはずである。しかし、実際の三軸試験では、供試体の寸法や形状が異なると非排水強度などのせん断特性が異なることがある。そのため、「土質試験の方法と解説」<sup>1)</sup>では、三軸試験における供試体の直径、高さ/直径比、形状などの基準を示し、供試体の寸法や形状の統一化をはかっている。

岩盤力学の分野では、供試体が大きくなると強度が低下することや強度にばらつきがでてくるなどの寸法効果を示すことが知られている<sup>2) 3)</sup>。土の場合には、土粒子の形状や硬さ、粒径分布、間隙比、土の構造などによってかなり変化するので一概に傾向を論じることはできないが、一般的には同様の傾向があるといえる。特に、砂は土粒子の粒径が粘土よりも大き

いため、その傾向が顕著にあらわれる。

砂の三軸試験では、供試体の大きさが同じであれば平均粒径が大きいほどせん断強度は小さくなることや、最大粒径が供試体直径に比べて大きい場合にはせん断強度のばらつきが大きく信頼性の高い結果が得られないことが知られている<sup>4)</sup>。このため、砂の三軸試験では「供試体高さ／直径比、および寸法の影響」や「供試体境界条件（端部の摩擦力）の影響」についての研究が数多くある（例えば Bishop<sup>5)</sup>、後藤・龍岡<sup>6)</sup>）。しかし、これらの影響は各試験の試験条件と複雑にからみあい、複合しているため、個々の影響について調べることは困難である。このように不明瞭な部分もあるが、これらの研究結果は通常の三軸試験を無条件に要素試験として考えることにはやや問題があり、三軸試験結果の解釈には多少の注意が必要なことを示唆している。

一方、粘性土の場合は砂のように最大粒径の影響について考慮する必要はないと考えられるが、力学的特性に与える供試体高さ／直径（ $H/D$ ）比や供試体寸法は砂の場合と同じように試験結果に影響すると考えられる。粘性土（泥炭、関東ロームを含む）の供試体高さ／直径比の影響について調べた一軸圧縮試験や三軸試験の結果<sup>7~16)</sup>を総合すると、供試体高さ／直径比によって強度・変形特性は変化し、供試体高さ／直径比が小さくなるほどその差が明確にあらわれる。そして、一般的な傾向として、供試体の直径が小さくなるほど、せん断強度は大きくなることが報告されている。しかしながら、供試体寸法は強度・変形特性にほとんど影響しないと言う結果も報告されており、明確な結論には至っていない<sup>17)</sup>。また、三軸 CU 試験結果<sup>18), 19)</sup>では、供試体が小さくなるほど供試体内部における過剰間隙水圧の発生が遅れる傾向があり、このため供試体寸法の差がせん断強度などに影響することなどが報告されている。

このように三軸試験における供試体寸法・形状とせん断特性には密接な関係があり、ミニ三軸試験のように非常に小さい供試体を用いる試験の場合にはこの影響について十分検証しておく必要がある。

### 3.3 弾粘塑性有限要素解析による寸法効果の検討

三軸供試体の寸法が試験結果に及ぼす影響について調べるため、まず弾粘塑性有限要素解析によりシミュレーション解析を行った。三軸供試体の等方圧密ならびに非排水三軸圧縮過程における変形・破壊を統一的に取り扱うことができる解析法として弾粘塑性多次元圧密解析法を用いている。ここでは、弾粘塑性構成式、三軸供試体のモデル化、解析条件および解析パラメータについて述べた後、等方圧密過程ならびに軸圧縮過程における寸法効果の影響について検討を行う。三軸供試体（円柱形）をモデル化した解析を行うため、軸対称応力状態を仮定した。

#### 3.3.1 弾粘塑性構成式

本論文中で用いる弾粘塑性構成式は Matsui & Abe<sup>20)</sup>によって提案された弾粘塑性構成式で



ある。この弾粘塑性構成式は粘塑性体積ひずみをひずみ硬化パラメータとする等方硬化流動曲面理論に基づく降伏関数を持つ。また、この流動曲面理論に基づく降伏関数とは異なる粘塑性ポテンシャル曲面を仮定し、構成関係式を誘導している。Matsui & Abeの提案した弾粘塑性構成式の降伏関数は次式で表される。

$$f = \mu \ln \left[ \frac{1}{\delta} \left\{ \left( 1 - \exp \left( -\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^p t \right) \right) \exp \left( \frac{v^p}{\mu} \right) + \delta \exp \left( -\frac{\delta}{\mu} \dot{v}_r^p t \right) \right\} \right] - v^{vp} = 0 \quad (3.1)$$

ここで、 $v^{vp}$  は粘塑性体積ひずみを示し、 $v^p$  は塑性体積ひずみを示す。この流動曲面理論に基づく弾粘塑性構成式の時間依存性挙動は収束性を示すのが特徴である。そして、式(3.1)中の塑性体積ひずみは、Matsui & Abe<sup>2)</sup>によって提案された弾塑性構成式に基づいて与えられ、Ko圧密状態において式(3.2) および(3.3) で表される。

(主働状態)

$$v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[ \ln \left( \frac{p}{p_0} \right) + \frac{\alpha_a}{\alpha_a - 1} \ln \left\{ \frac{M_a - (\alpha_a - 1)\eta}{M_a - (\alpha_a - 1)\eta_{Ko}} \right\} \right] \quad (3.2)$$

(受働状態)

$$v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[ \ln \left( \frac{p}{p_0} \right) + \frac{\alpha_p}{1 - \alpha_p} \ln \left\{ \frac{M_p - (1 - \alpha_p)\eta}{M_p - (1 - \alpha_p)\eta_{Ko}} \right\} \right] \quad (3.3)$$

ここで、 $M_a$  および  $M_p$  ( $M_p > 0$ ) はそれぞれ主働状態および受働状態における限界状態の応力比を示し、 $\eta_{Ko}$  はKo圧密状態における応力比を示している。また、 $\alpha_a$  および  $\alpha_p$  ( $\alpha_a, \alpha_p \neq 0$ ) はそれぞれ主働状態および受働状態におけるパラメータであり、Matsui & Abeの提案する弾塑性構成式に含まれる固有のパラメータである。また、 $\alpha_a$  および  $\alpha_p$  は  $\eta = \eta_{Ko}$  において式(3.4) および(3.5) で表される。

$$\alpha_a = \frac{2}{3}(M_a - \eta_{Ko}) \quad (3.4)$$

$$\alpha_p = \frac{2}{3}(M_p + \eta_{Ko}) \quad (3.5)$$

このパラメータ  $\alpha_a$  および  $\alpha_p$  を導入することにより、主働状態と受働状態における降伏関数はKo線上で滑らかに接続されることになり、特異点を持たない。

そして、この弾粘塑性構成式は非関連流れ則を仮定しているため、粘塑性体積ひずみは式(3.6) および(3.7) で示される粘塑性ポテンシャル関数により決定される。

(主働状態)

$$g = p' \left\{ \frac{M_a - (\alpha_a - 1)\eta}{M_a - (\alpha_a - 1)\eta_{Ko}} \right\}^{\frac{\alpha_a}{\alpha_a - 1}} \quad (3.6)$$

(受動状態)

$$g = p' \left\{ \frac{M_p - (1 - \alpha_p) \eta}{M_p - (1 - \alpha_p) \eta_{K0}} \right\}^{1 - \alpha_p} \quad (3.7)$$

この Matsui & Abe によって提案された弾粘塑性構成式は寸法効果による影響について考慮していないため、供試体寸法が異なってもその挙動に差は生じない。したがって、本節で行う弾粘塑性有限要素解析では、弾粘塑性構成式が原因となる寸法効果の影響は応力-ひずみ挙動にあらわれない。

### 3.3.2 三軸供試体のモデル化

ここで行う三軸CU試験のシミュレーション解析は、3.3.1で示した弾粘塑性構成式を用いた多次元圧密有限要素法により行う。図-3.1は三軸供試体のモデル図とメッシュ分割図を示している。粘土供試体の上下に載荷板（剛体）を配置し、供試体は載荷板と固定されているものと仮定した。また軸対称応力状態を仮定しているため、三軸供試体内部は中心軸に対して対称となる。また、これまでの研究結果<sup>23)</sup>から供試体中央部を境として上下方向に対称な要素についてもその挙動がほぼ同じであることがわかっているため、今回の解析では三軸供試体の1/4のみをモデル化し、要素数35、節点数48のメッシュに分割した。図-3.2は三軸試験の圧密過程と軸圧縮（非排水せん断）過程における境界排水条件について示している。今回、モデル化を行った供試体は、直径50mm×高さ100mm、直径35mm×高さ70mm、直径22.5mm×高さ45mmの3種類である。

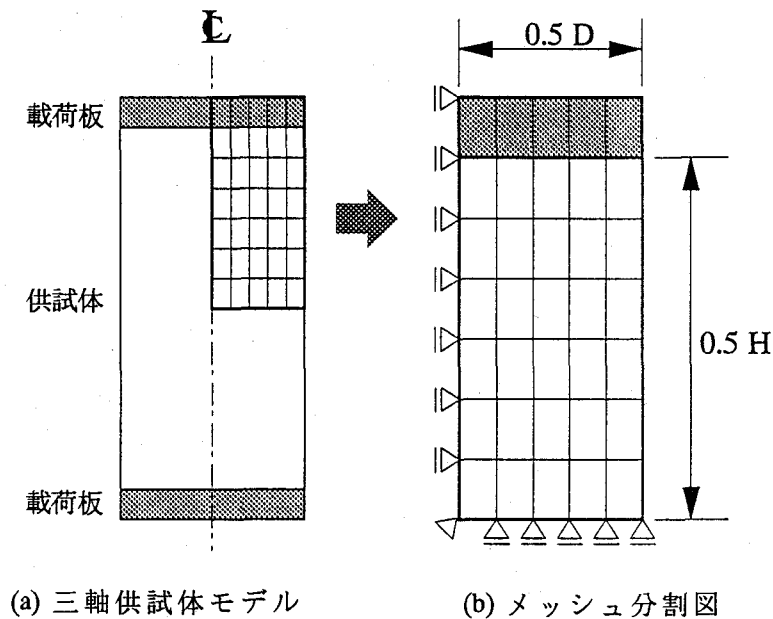


図-3.1 三軸供試体のモデルおよびメッシュ図

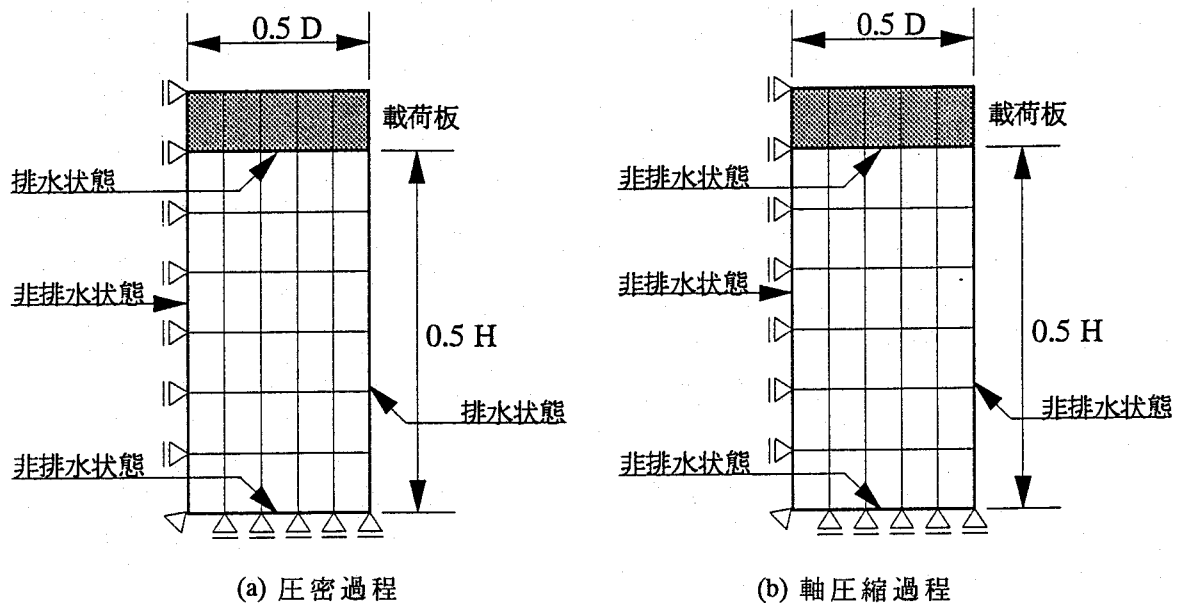


図-3.2 境界排水条件

また、図-3.1のモデルでは載荷板と供試体が固定されているために、供試体端部において摩擦の影響<sup>23)</sup>があると考えられる。そこで供試体端部における摩擦の影響を緩和するためにJOINT要素を載荷板と供試体の間に挿入したモデルについて考え、同様のシミュレーション解析を行った。図-3.3はJOINT要素を挿入した三軸供試体モデルのモデル図とメッシュ分割図を示し、図-3.4は等方圧密過程と非排水三軸圧縮過程における境界排水条件を示したものである。

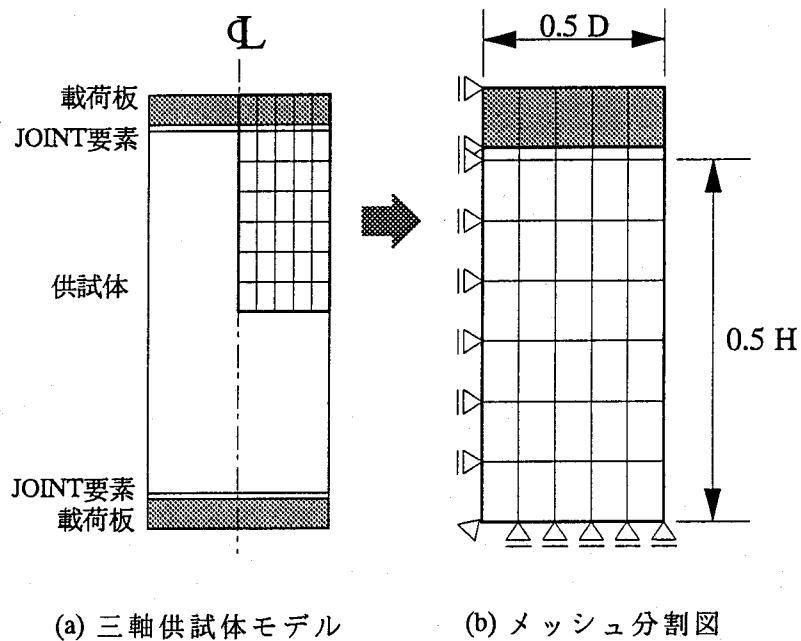


図-3.3 三軸供試体のモデルおよびメッシュ図 (JOINT要素挿入)

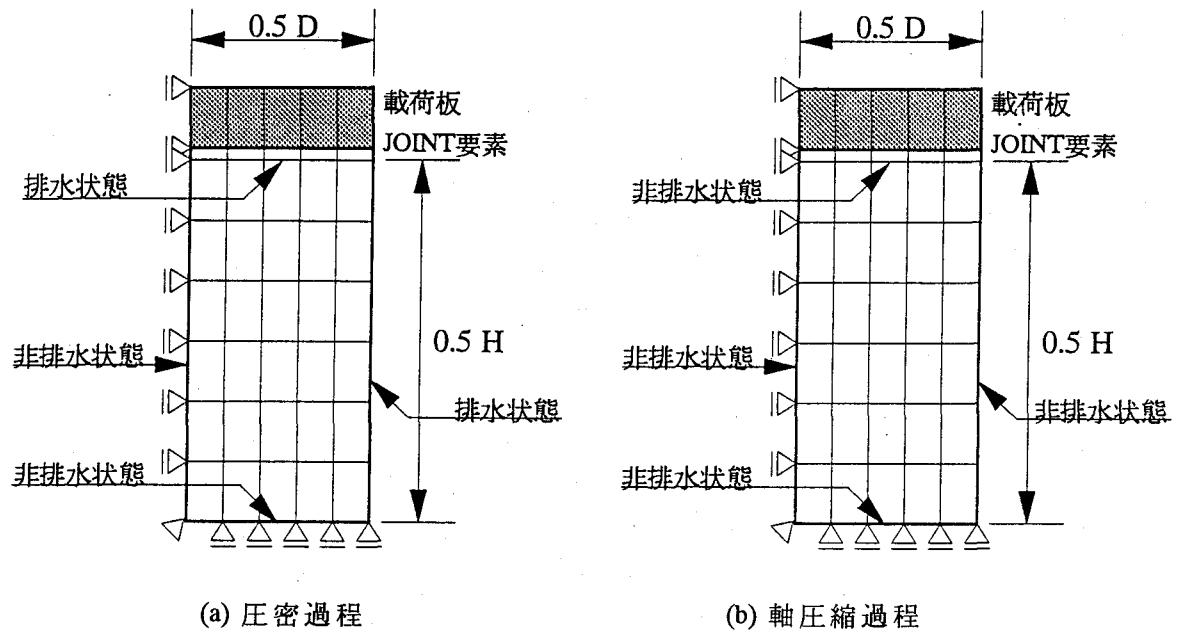


図-3.4 境界排水条件 (JOINT要素挿入)

### 3.3.3 解析条件および解析パラメータ

#### (1) 解析条件

まず、供試体内部の応力状態は98.1kPaで等方圧密された状態とし、初期応力・ひずみ状態は均一な分布であるとした。圧密過程では、この初期状態に等方圧密圧力 98.1kPaを載荷し、多次元圧密解析を行った。この圧密解析における等方圧密圧力の載荷速度は19.6MPa/min、載荷時間は0.005minである。そして、供試体中央部の過剰間隙水圧が98%消散した時点で圧密解析を終了した。

次に、等方圧密過程終了時における供試体の応力・ひずみ状態を初期状態として非排水三軸圧縮過程を行った。軸ひずみ速度は0.02%/min、境界における排水条件はすべて非排水である。そして、供試体内(要素)の応力状態が限界(破壊)状態に達した時点で圧縮解析を終了した。

#### (2) 解析パラメータ

次に、弾粘塑性多次元圧密解析を行う場合、多数の弾粘塑性パラメータが必要となる。本章で行う数値解析は定性的な挙動を問題としているため、実際の粘性土のパラメータを特に使用する必要はないと考えられる。そこで、Nakase et al<sup>24)</sup>によって報告されている塑性指数と各パラメータの関係式から、塑性指数  $I_p=40$  である仮想的な粘性土を考えて材料パラメータを決定した。

・圧縮指数および膨潤指数

図-3.5は圧縮指数および膨潤指数と塑性指数の関係を示している。圧縮指数および膨潤指数ともに塑性指数と線形関係が得られている。この関係式から圧縮指数と膨潤指数を決定した。

$$\lambda = 0.20 \quad (3.8)$$

$$\kappa = 0.03 \quad (3.9)$$

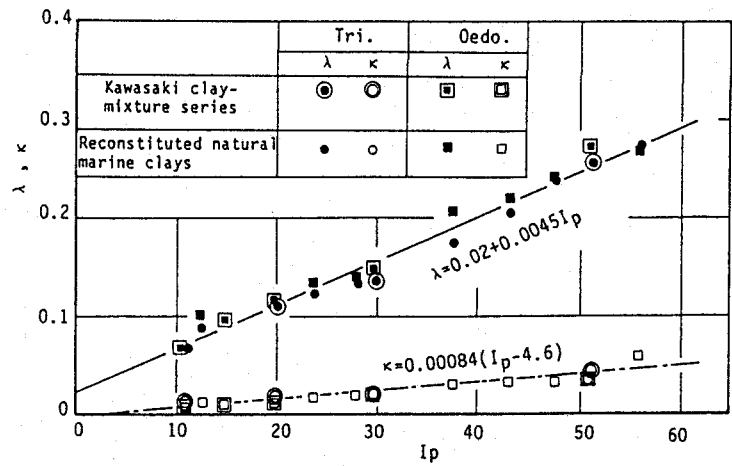


図-3.5 圧縮指数・膨潤指数－塑性指数関係

・初期間隙比

図-3.6は比体積と塑性指数の関係を示している。ただし、図中の比体積 ( $N = 1 + e$ ) は正規圧密状態で圧密圧力  $p = 98.1 \text{ kPa}$  における値である。比体積も同じく塑性指数と線形関係が得られているので、初期間隙比は式(3.10)のように決定した。

$$e_0 = N - 1 = 1.28 \quad (3.10)$$

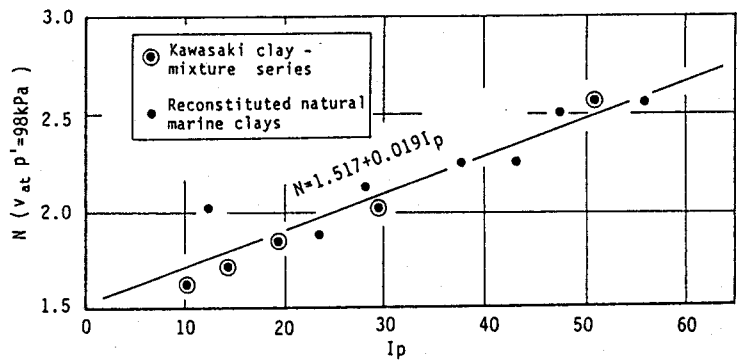


図-3.6 比体積－塑性指数関係

・破壊応力比

図-3.7は破壊応力比と塑性指数の関係を示している。ここで示している破壊応力比は三軸試験の結果である。圧縮側の破壊応力比は塑性指数によらず一定値を示し、伸張側の破壊応力比は塑性指数の増加とともに減少する傾向が得られている。これらの結果をもとに破壊応力比（圧縮側）を決定した。

$$M = 1.65 \quad (3.11)$$

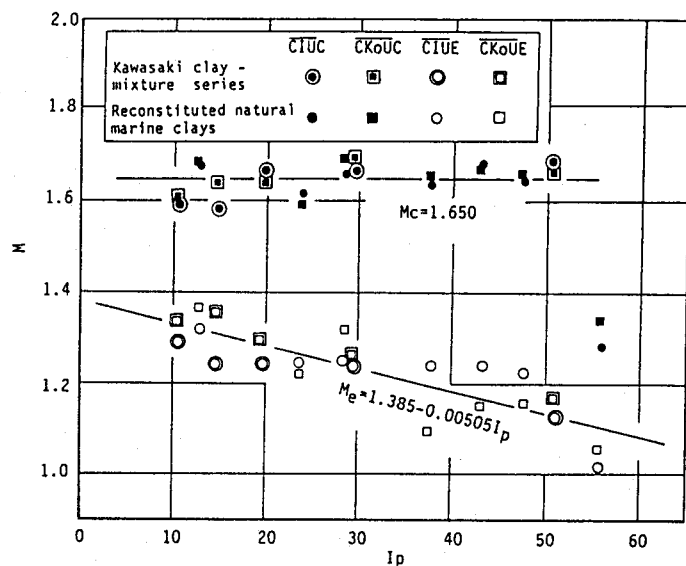


図-3.7 破壊応力比－塑性指数関係

・二次圧密係数

図-3.8は二次圧密係数と塑性指数の関係を示している。二次圧密係数は圧縮指数と同様に塑性指数の増加と共にほぼ直線的に増加して行く傾向が認められる。また、圧縮指数と二次圧密係数の関係は図-3.9の様に0.032の一定値を示すことが報告されている。今回の解析では、図-3.9の関係式を用いて二次圧密係数を決定した。

$$\mu = \frac{\lambda}{1+e_0} \frac{C_\alpha}{C_c} = 2.80 \times 10^{-3} \quad (3.12)$$

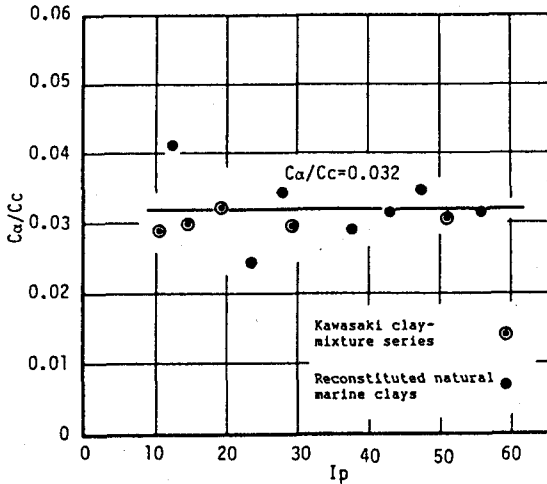


図-3.8 二次圧密係数 - 塑性指数関係

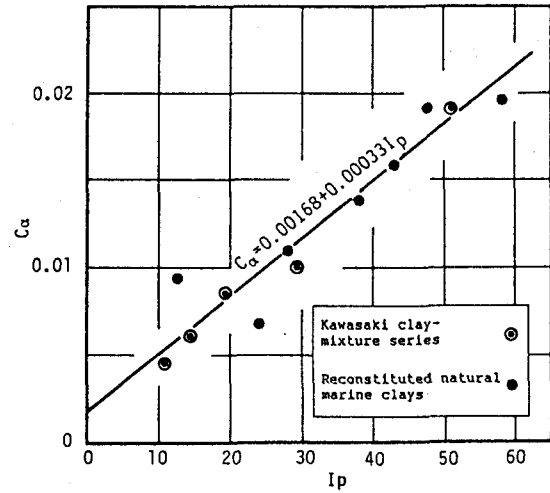


図-3.9 圧縮指数 - 二次圧密係数関係

・その他の粘性パラメータ

Matsui & Abe が提案する弾粘塑性構成式には、以上のパラメータ以外に基準粘性体積ひずみ速度  $\dot{\gamma}_T^v$  と内部拘束ひずみ速度  $\delta$  の粘性パラメータが必要である。これらのパラメータは塑性指数から直接的には求めることができないため、これまでの数値解析を行った経験からみて妥当と思われる値を用いることにした。

$$\dot{\gamma}_T^v = 1.67 \times 10^{-8} \text{ (1/sec)} \quad (3.13)$$

$$\delta = 1.00 \times 10^{-2} \quad (3.14)$$

・透水係数

透水係数も塑性指数から決定することは困難であるため、亀井ら<sup>25)</sup>の研究結果を基に、図-3.10 から  $I_p=40$  を用いて、透水係数の初期値として  $5.0 \times 10^{-10} \text{ m/sec} = 3.0 \times 10^{-6} \text{ cm/min}$  を決定した。

$$k_0 = 3.00 \times 10^{-6} \text{ (cm/sec)} \quad (3.15)$$

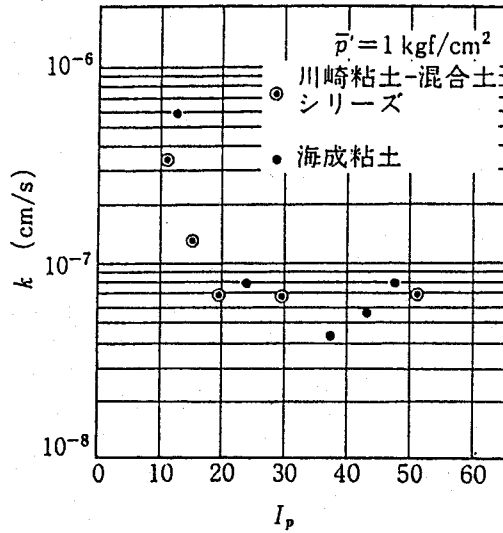


図-3.10 透水係数－塑性指数関係

以上のようにして決定した材料パラメータのまとめと一覧をそれぞれ表-3.1および3.2に示す。

表-3.1 材料パラメータのまとめ

圧縮指数	: $\lambda = 0.02 + 0.0045 \cdot I_p$
膨潤指数	: $\kappa = 0.00084 \cdot (I_p - 4.6)$
初期比体積	: $N = 1 + e = 1.517 + 0.019 \cdot I_p$
破壊応力比	: $M = 1.650$ (圧縮側)
二次圧密係数	: $\mu = 0.032 \frac{\lambda}{1 + e_0} = 2.80 \times 10^{-3}$
基準粘性体積ひずみ速度	: $\dot{v}_r^v = 1.67 \times 10^{-8}$ (経験値)
内部拘束ひずみ速度	: $\delta = 1.00 \times 10^{-2}$ (経験値)
透水係数	: $k_0 = 3.00 \times 10^{-6}$ (概略値)

表-3.2 材料パラメータ一覧

圧縮指数	0.20
膨潤指数	0.03
初期間隙比	1.28
破壊応力比	1.65
二次圧密係数	$2.80 \times 10^{-3}$
基準粘性体ひずみ速度 (1/sec)	$1.67 \times 10^{-8}$
内部拘束ひずみ速度	$1.00 \times 10^{-2}$
透水係数 (cm/sec)	$3.00 \times 10^{-6}$

### 3.3.4 三軸等方圧密解析における供試体寸法の影響

図-3.11は圧密終了時における三軸供試体内部の間隙比と応力比の半径方向分布を示している。各要素における間隙比を実線で、応力比を破線で示している。また、一点鎖線はシミュ

レーション解析で用いた初期間隙比と圧縮指数から計算した間隙比の値である。松井らの研究<sup>26)</sup>によって明かにされているように、排水を半径方向にも行うため、供試体内部の間隙比や応力比が半径方向に不均一になる傾向が供試体の寸法にかかわらずみられる。また、載荷板と供試体の変位を拘束しているため、供試体端部における要素において他の部分よりも大きな応力比が発生している。この供試体端部の要素における応力比の大きさを比較すると、供試体の寸法が小さくなるほど応力比の値が大きくなる傾向を示し、三軸供試体の寸法が小さくなるほど載荷板と供試体の変位を拘束した影響が大きくなる傾向がみられる。

次に、図-3.12は各供試体の軸ひずみ-時間関係を示している。供試体寸法が小さくなるほど排水距離が短くなるために圧密の進行がはやく、直径22.5mmの供試体は他の供試体に比べて早い段階で一次圧密が終了していることがわかる。また、図-3.13は各供試体中央部の要素における過剰間隙水圧の経時変化を示している。Mandel-Cryer効果によって供試体中心部付近の要素で圧密圧力98.1kPaよりも大きな過剰間隙水圧が発生しているが、供試体寸法が小さいほど過剰間隙水圧の消散がはやく、過剰間隙水圧が消散するのに要する時間は短くなる傾向を示す。過剰間隙水圧が消散するまでの所要時間は、直径22.5mm, 35mm, 50mmの供試体でそれぞれ40, 100, 300分程度であり、最小の供試体の所要時間は、最大の供試体と比較すると1/8程度である。

以上のように、等方圧密解析結果に及ぼす供試体寸法の影響について調べた結果、供試体寸法が小さくなるほど、過剰間隙水圧の消散に要する時間は短くなり、一次圧密終了に要する時間も短縮される。しかし、載荷板と供試体の変位を拘束した影響は供試体が小さくなるほど大きくあらわれる。つまり、供試体端部の摩擦による影響は供試体が小さいほどその影響は大きくなる傾向が示唆された。

そこで、次に供試体端部摩擦の影響を考慮した弾粘塑性有限要素解析を行った結果について述べる。供試体端部摩擦の影響を考慮するために、図-3.3で示したように供試体と載荷板の間にJOINT要素を挿入し、供試体と載荷板の拘束の程度を摩擦角（摩擦角90度：完全変位拘束、摩擦角0度：完全変位自由）の大きさを端部摩擦の影響を表現した。供試体寸法、材料定数、解析条件等はすべて同じである。また、この解析では、供試体端部の摩擦が多少ある場合（摩擦角20度）と完全に摩擦がない場合（摩擦角0度）の2種類について解析を行った。

ここでは、供試体端部の変位を拘束した影響が明らかに見られた供試体内部の間隙比と応力比の半径方向分布について述べる。図-3.14および3.15はそれぞれ摩擦角20度と0度における各供試体の間隙比と応力比の半径方向分布を示している。図-3.11と比較すると端部摩擦が小さくなるほど、各三軸供試体内の間隙比や応力比の分布が均一になる傾向を示し、各供試体間の差が小さくなる傾向がみられる。

以上のことから、三軸供試体の寸法が小さくなることによって供試体内部にみられる応力・ひずみ状態の不均一性は供試体端部の摩擦が大きくなるほど明確になり、供試体端部の摩擦を完全になくした場合には、供試体の寸法によらずほぼ同様の応力・ひずみ状態になることが示された。



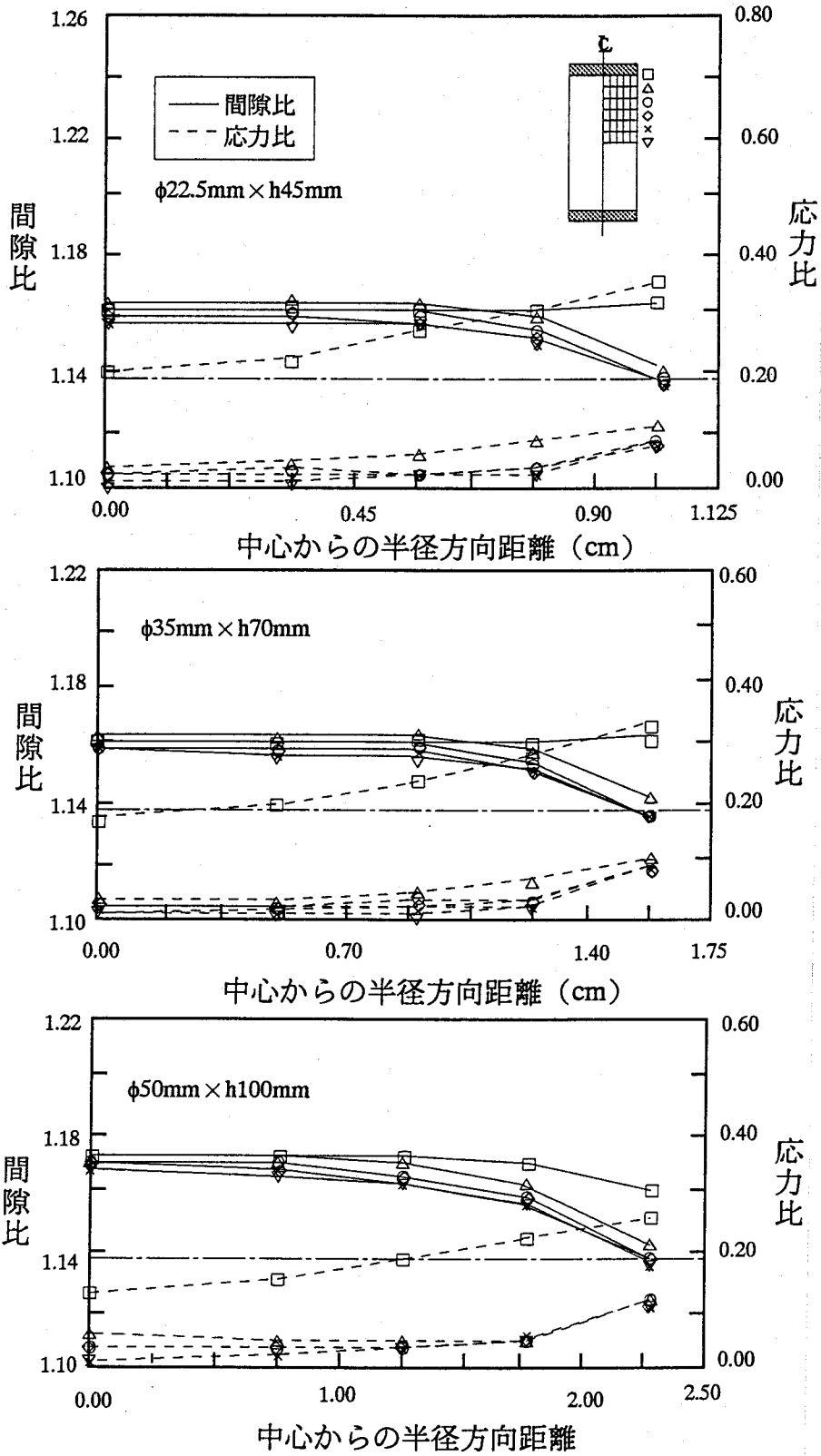


図-3.11 供試体内部における間隙比・応力比の半径方向分布

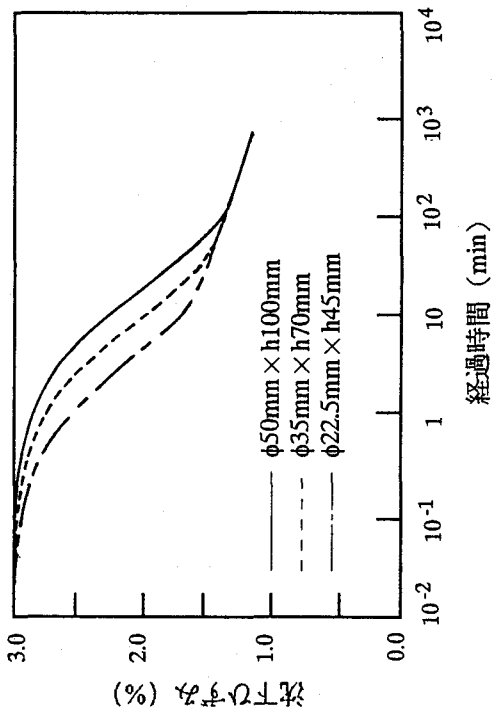
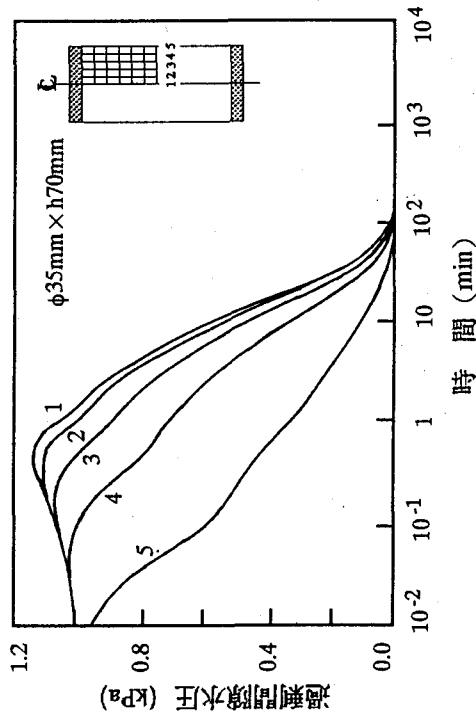
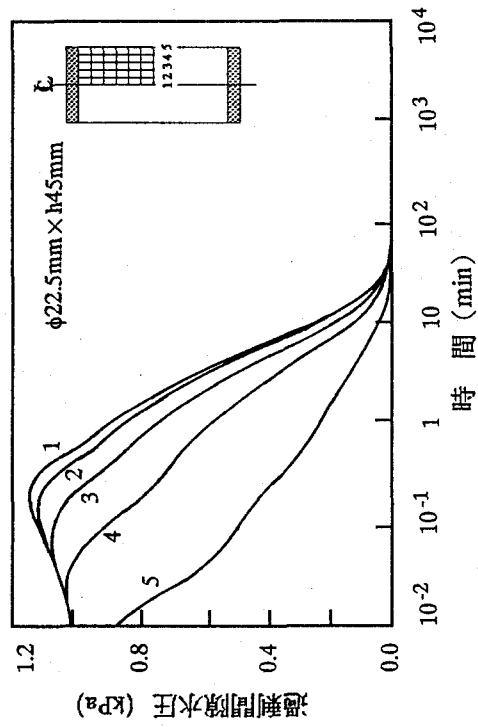


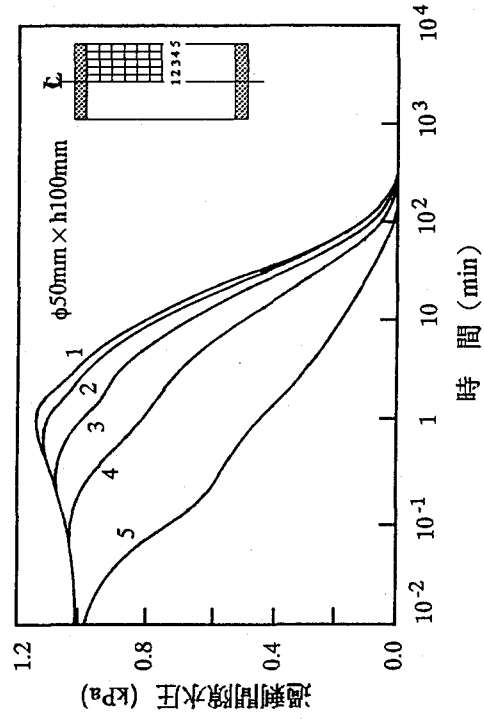
図-3.12 軸ひずみ—時間関係



(b) φ 35mm × h70mm  
図-3.13 過剰間隙水圧—時間関係



(a) φ 22.5mm × h45mm  
図-3.13 過剰間隙水圧—時間関係



(c) φ 50mm × h100mm  
図-3.13 過剰間隙水圧—時間関係

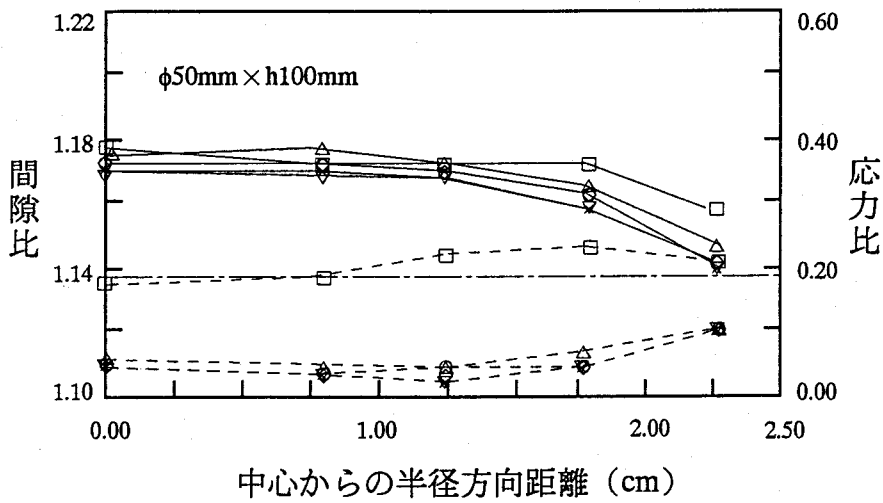
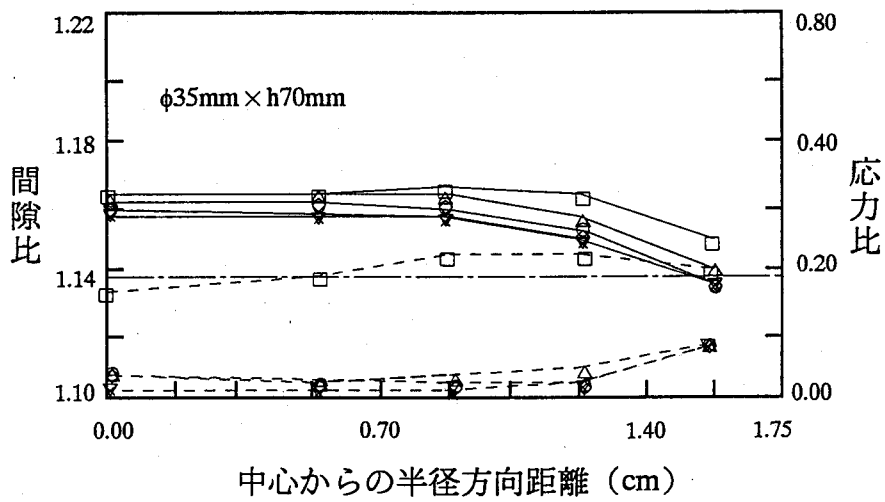
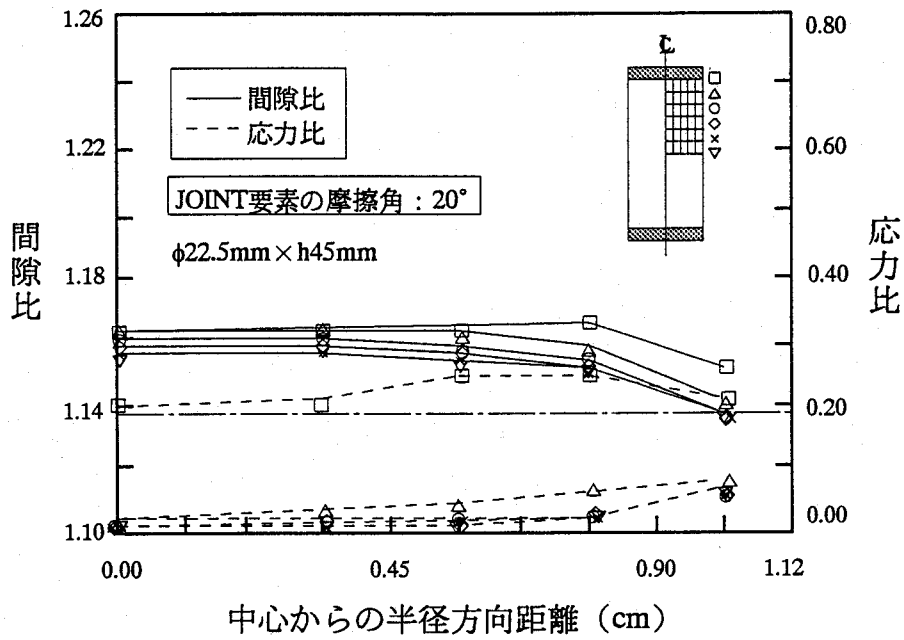


図-3.14 供試体内部における間隙比・応力比の半径方向分布 (JOINT要素の内部摩擦角20度)

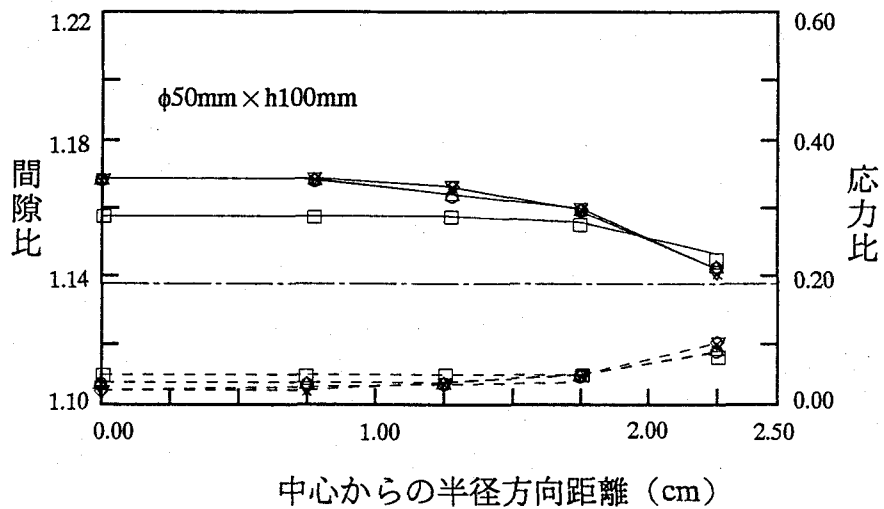
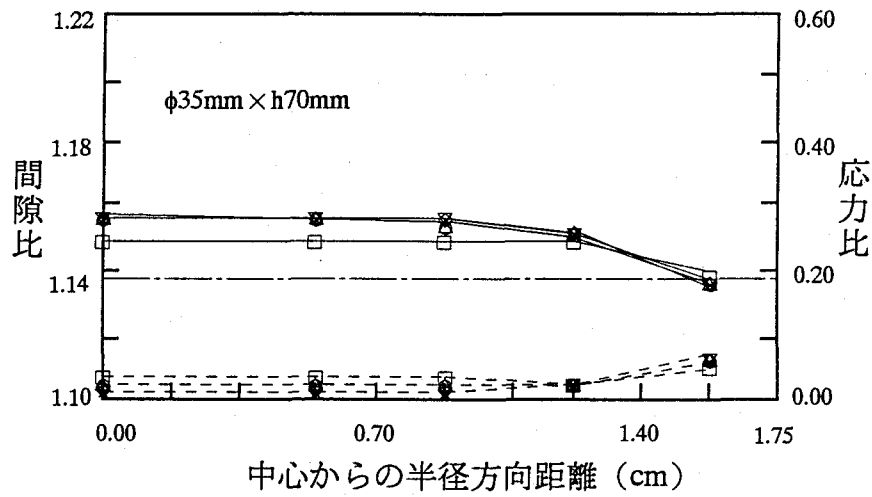
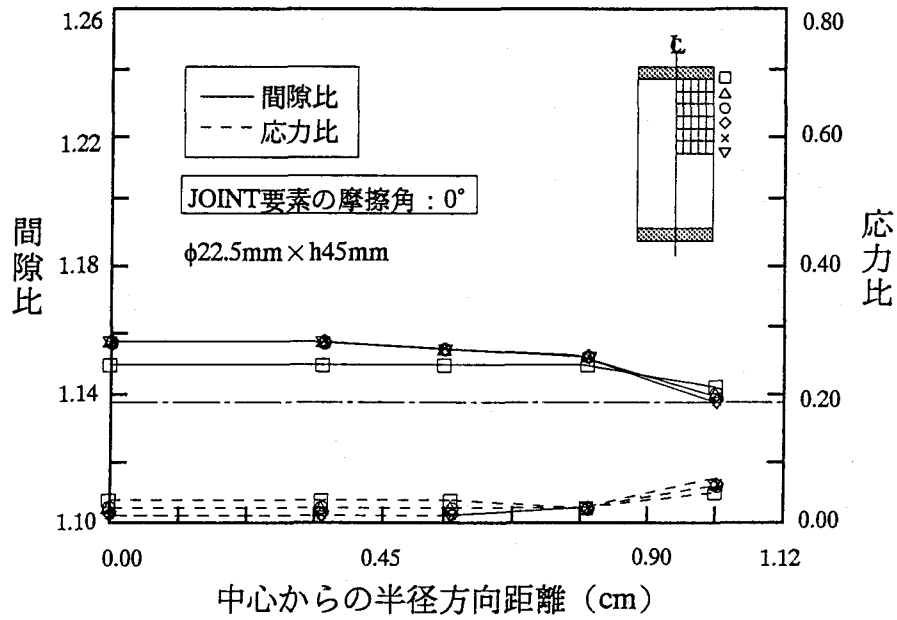


図-3.15 供試体内部における間隙比・応力比の半径方向分布 (JOINT要素の内部摩擦角  $0^\circ$ )

### 3.3.5 非排水三軸圧縮解析における供試体寸法の影響

三軸等方圧密解析に引き続き行った非排水三軸圧縮解析の結果について述べる。図-3.16は非排水三軸圧縮過程における各供試体の軸差応力-軸ひずみ関係を示している。各供試体の応力-ひずみ関係には多少差がみられる。しかし、最大軸差応力の値は供試体の寸法によらずほぼ等しく、明確な寸法効果の影響はみられない。

次に、三軸等方圧密解析の場合と同様、供試体端部摩擦の影響を考慮した三軸圧縮解析を行った。供試体寸法、材料定数、解析条件等はすべて同じである。JOINT要素の摩擦角も同じく20度と0度の2種類について行った。図-3.17および3.18はそれぞれ摩擦角20度と0度における各供試体の軸差応力-軸ひずみ関係を示している。図-3.16と比較すると、供試体端部の摩擦の影響が小さくなるほど、明らかに各供試体の軸差応力-軸ひずみ関係の差は小さくなる。さらに、供試体端部の摩擦を完全になくした場合には、すべての軸差応力-軸ひずみ関係は完全に一致している。

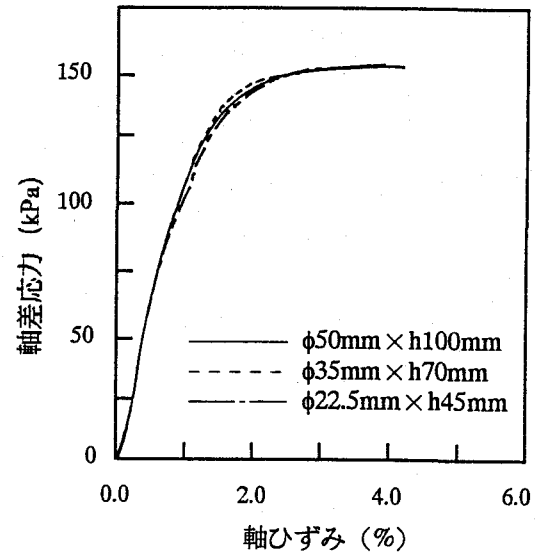


図-3.16 軸差応力-軸ひずみ関係

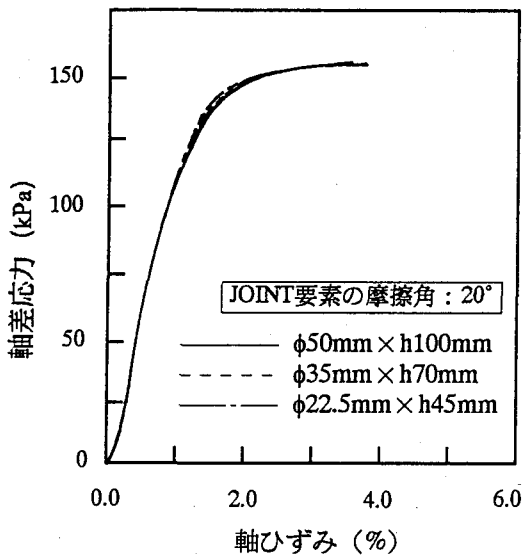


図-3.17 軸差応力-軸ひずみ関係  
(JOINT要素 内部摩擦角20度)

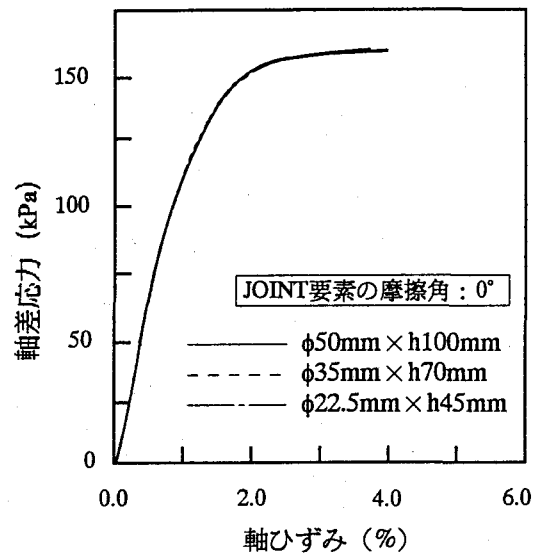


図-3.18 軸差応力-軸ひずみ関係  
(JOINT要素 内部摩擦角0度)

以上のことから、三軸等方圧密解析の場合と同じく、供試体端部の摩擦を完全になくした場合には、供試体の寸法によらずほぼ同一の軸差応力-軸ひずみ関係が得られることがわかった。したがって、実際の三軸 $\overline{CU}$ 試験においても、供試体端部の摩擦を完全になくすれば、供試体の寸法によらず同一の応力-ひずみ関係が得られる可能性が示唆された。つまり、弾粘塑性有限要素解析の結果から、従来、供試体の寸法が異なることによって生じる応力-ひずみ挙動の差は、粘土本来のメカニズムによるものではなく供試体端部における摩擦の影響によるものである可能性が示された。

### 3.4 粘土の三軸試験による寸法効果の検討

三軸試験結果に及ぼす寸法効果の影響について検討するため、実際に寸法の異なる3種類の自然堆積粘土供試体を用いて圧密非排水三軸試験（三軸 $\overline{CU}$ 試験）を行った。この三軸 $\overline{CU}$ 試験で用いた供試体の寸法は、土質試験法で規定されている直径50mmおよび35mmとミニ三軸試験で使用する直径22.5mmである。また、供試体の高さは直径の2倍とした。これまで、このような比較試験を行う場合、3種類の大きさの三軸セルを用意する必要があった。しかし、各三軸セルで軸（シャフト）と軸受け（ベアリング）の摩擦特性が異なるために、三軸 $\overline{CU}$ 試験結果に大きな差が生じることが考えられた。そこで、寸法効果の影響についてより正確に調べるため、同一の三軸セルを用いて試験が行えるように三軸セル自体を改良した。この三軸セルでは、キャップとペDESTALが脱着可能であるため、供試体寸法にあわせたキャップとペDESTALを装着することによって同一の三軸セルで寸法の異なる供試体を用いた三軸試験が行えるようになった。このため、供試体寸法による影響のみについて検証することができる。

#### 3.4.1 試料および試験条件

表-3.3および3.4は、本節で行った三軸 $\overline{CU}$ 試験で使用した試料の物理特性および圧密特性と試験条件を示している。試験結果に一般性を持たせるため、練返し再圧密したカオリン粘土のような調整された粘土試料を使用せずに、大阪湾や大阪市内で採取した不攪乱自然堆積粘土試料を使用した。試料の塑性は中塑性から高塑性の範囲に分布し、シルト分の多い粘土や年代効果<sup>27)</sup>を受けた粘土も含まれている。

三軸 $\overline{CU}$ 試験では、まず供試体を正規圧密状態まで等方圧密した。等方圧密終了後、飽和度を調べ、引続いて非排水三軸圧縮試験（軸ひずみ速度0.05%/min）を行なった。各試験における供試体の飽和度はすべて0.95以上であった。

#### 3.4.2 三軸等方圧密試験における寸法効果の影響

ここでは、等方圧密時の体積ひずみ-時間関係から、等方圧密過程における寸法効果の影

表-3.3 各試料の物理特性および圧密特性

	沖積粘土(1)	沖積粘土(2)	鋭敏粘土	洪積粘土
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.71	2.71	2.67	2.66
液性限界 $w_L$ (%)	98.1	67.0	58.9	125.4
塑性限界 $w_p$ (%)	30.1	44.5	25.3	38.9
塑性指数 $I_p$	68.0	22.5	33.6	86.5
圧密降伏応力 $p_c$ (kPa)	60	110	130	294
圧縮指数 $C_c$	0.70	0.50	0.41	1.23
膨潤指数 $C_s$	0.13	0.07	0.05	0.12

表-3.4 三軸CU試験条件

	沖積粘土(1)	沖積粘土(2)	鋭敏粘土	洪積粘土
有効圧密圧力 $\sigma'_c$ (kPa)	196.2	392.4	196.2	392.4
背圧 $\sigma_{BP}$ (kPa)	294.3	294.3	294.3	294.3
軸ひずみ速度 $\epsilon$ (%/min)	0.05	0.05	0.05	0.05

響について述べる。4種類の試料の中から特徴的な傾向があらわれている沖積粘土(1)、鋭敏粘土および洪積粘土の結果について述べる。

図-3.19~3.21は、それぞれ沖積粘土(1)、鋭敏粘土および洪積粘土の体積ひずみ-時間関係を示している。これらの体積ひずみ-時間関係に共通する傾向として、供試体寸法が小さくなるほど圧密の進行がはやく、一次圧密の終了もはやくなることがわかる。等方圧密に要した圧密時間は、沖積粘土(1)と鋭敏粘土の場合、直径22.5mmの供試体で約3時間、直径35mmと50mmの供試体でそれぞれ6時間と24時間程度であった。また洪積粘土の場合は、直径22.5mmの供試体で同じく約3時間、直径35mmと50mmの供試体でそれぞれ24時間と

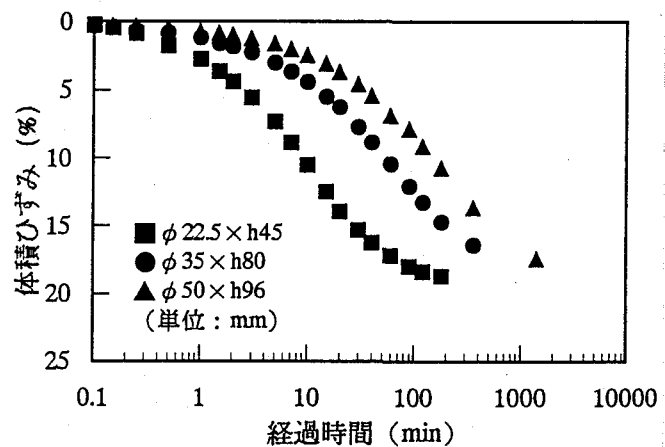


図-3.19 体積ひずみ-時間関係(沖積粘土(1))

36時間程度であった。したがって、直径22.5mmの供試体の圧密終了に要する圧密時間は、直径50mmの供試体と比べると、約1/8以下に短縮されることがわかる。透水係数の違いによって、圧密終了に要する時間には差があると考えられるが、直径22.5mmの供試体と直径50mmの供試体の一次圧密終了に要する時間の比率は、おおむねこの程度であると考えられる。

以上のことから供試体寸法が小さくなるほど、等方圧密過程で要する試験時間は短くなることがわかった。このことは、ミニ三軸試験では採取した試料を有効に利用できるだけでなく、試験時間の短縮という点においても優れているということを示している。

### 3.4.3 非排水三軸圧縮試験における寸法効果の影響

ここでは、非排水三軸圧縮試験における寸法効果の影響について述べる。供試体端部の摩擦を軽減する摩擦軽減方法が途中で変更されているため、沖積粘土(1)の結果から順に述べていくことにする。

まず、沖積粘土(1)の軸差応力-軸ひずみ関係、過剰間隙水圧-軸ひずみ関係および有効応力経路を図-3.22に示す。図中の数字は供試体寸法である。軸差応力の挙動はせん断初期(軸ひずみが1.5%以下)においてほぼ同一の傾向を示すが、軸ひずみが増大するにしたがって明確な差がみられた。また、供試体寸法が小さくなるほど大きな軸差応力が発生する傾向が見られ、軸ひずみが8%の時点における最小寸法の供試体(直径22.5mm)の軸差応力は最大寸法の供試体(直径50mm)の軸差応力よりも約20%大きい値を示した。しかし、過剰間隙水圧は供試体寸法によらずほぼ同一の挙動を示し、軸差応力と異なる挙動を示した。また、有効応力経路は軸差応力-軸ひずみ関係を反映し、せん断初期は供試体寸法によらず同一の挙

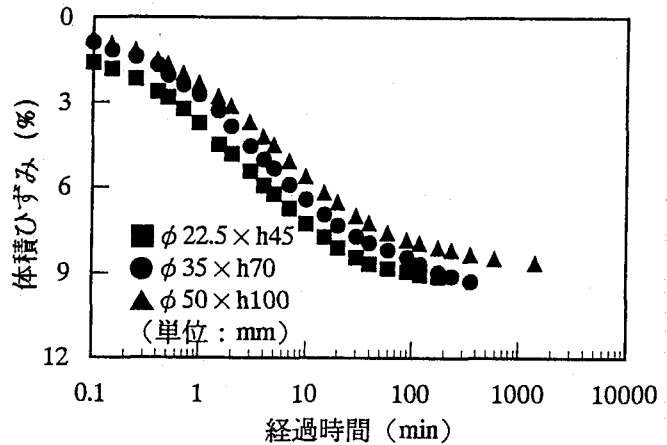


図-3.20 体積ひずみ-時間関係(鋭敏粘土)

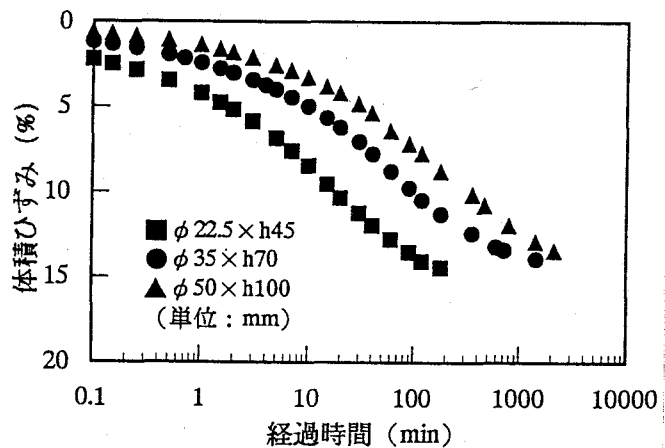


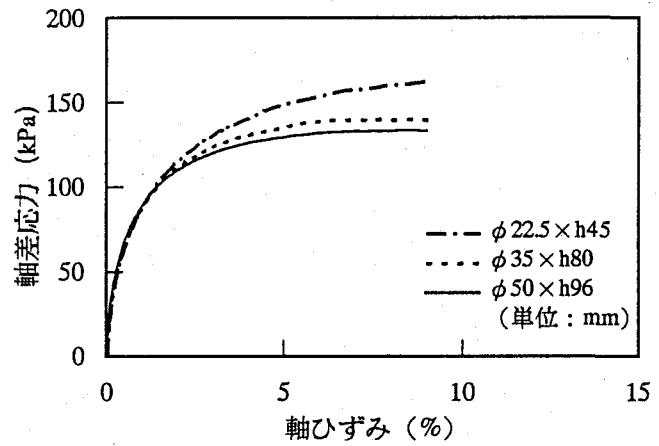
図-3.21 体積ひずみ-時間関係(洪積粘土)



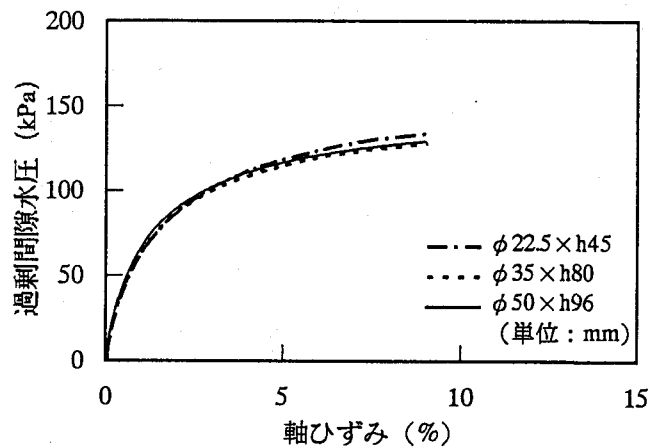
効応力経路は軸差応力-軸ひずみ関係を反映し、せん断初期は供試体寸法によらず同一の挙動を示すが、せん断が進行するにしたがって有効応力経路に差が見られた。この結果、小さい供試体ほど大きな破壊応力比を示し、最小寸法の供試体（直径22.5mm）で1.40、最大寸法の供試体（直径50mm）で1.20であった。

この供試体寸法が小さくなるほど軸差応力が大きくなる原因として、3.3で述べた供試体端面における摩擦の影響が考えられた。つまり、供試体端面における摩擦の影響は、供試体寸法が小さいほど影響を大きく受けるため、軸差応力が大きくなったものと考えられた。このため、これまでの供試体端面の摩擦軽減策を改良し、以後の沖積粘土(2)や鋭敏粘土、洪積粘土の試験を行なった。具体的には摩擦軽減用に使用していたテフロンシートを粘土との摩擦の小さい材質<sup>23)</sup>に変更した。最終的に本研究で採用した摩擦軽減策を図-3.23に示す。

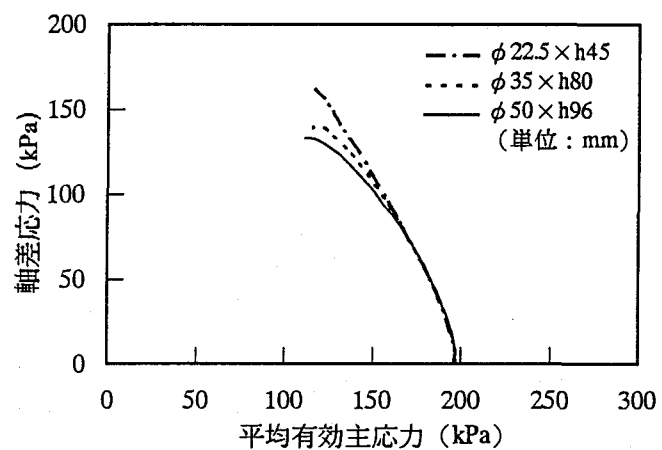
供試体端面の摩擦軽減策を講じた後、沖積粘土(2)、鋭敏粘土および洪積粘土の三軸 $\overline{CU}$ 試験を行った。図-3.24は沖積粘土(2)の試験結果を示している。図中の数字は供試体寸法である。軸差応力-軸ひずみ関係における各供試体間の軸差応力の差は大きく減少し、直径22.5mmと50mmの供試体の軸差応



(a) 軸差応力-軸ひずみ関係



(b) 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係



(c) 有効応力経路図

図-3.22 三軸 $\overline{CU}$ 試験結果（沖積粘土(1)）

力-軸ひずみ関係はほとんど一致した。また、すべての試験結果において過剰間隙水圧-軸ひずみ関係はほぼ完全に一致し、供試体の寸法効果による影響はまったく見られなかった。有効応力経路も同様の挙動を示し、破壊応力比の値も供試体寸法によらずほぼ等しい値を示した。このように供試体端面の摩擦を軽減したことによって、沖積粘土(1)の場合には見られた寸法効果の影響がほとんど見られなくなった。同じく東大阪市で採取された不攪乱鋭敏粘土の三軸 $\overline{CU}$ 試験結果を図-3.25

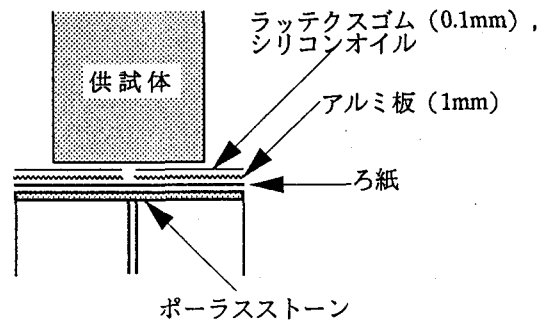


図-3.23 供試体端面の摩擦軽減策

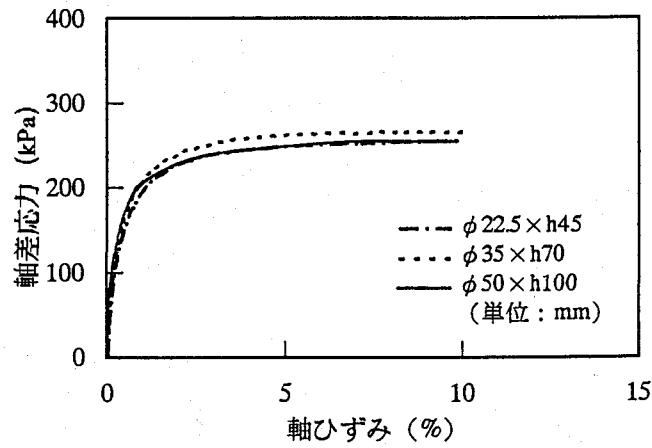
に示す。鋭敏粘土でも寸法効果の影響は見られず、軸差応力、過剰間隙水圧および有効応力経路のどの挙動もよく一致した。鋭敏粘土の各供試体間の差は、沖積粘土(2)の試験結果と比較しても非常に小さいものであった。したがって、鋭敏粘土の試験結果においても供試体の寸法効果による影響はほとんど見られなかった。最後に、大阪湾泉州沖で採取された洪積粘土(Ma12)を用いて三軸 $\overline{CU}$ 試験を行った。図-3.26は洪積粘土の三軸 $\overline{CU}$ 試験結果を示している。これまでの沖積粘土(1)、(2)や鋭敏粘土とは異なり、この洪積粘土(Ma12)は年代効果の影響を受けた粘土として知られている。軸差応力-軸ひずみ関係には各供試体間に差が見られたが、年代効果の影響や十分な正規圧密状態に至っていない点を考慮するとそれほど大きな差ではないと考えられた。また過剰間隙水圧は供試体の寸法によらずほぼ同一の挙動を示し、有効応力経路も比較的良好に似た挙動を示した。

以上のことから、供試体端面における摩擦の影響を十分に除去した場合、供試体の寸法によらず、得られる試験結果は同一であると考えられる。つまり、ミニ三軸試験でも通常の三軸試験とまったく同じ試験結果が得られることを示している。

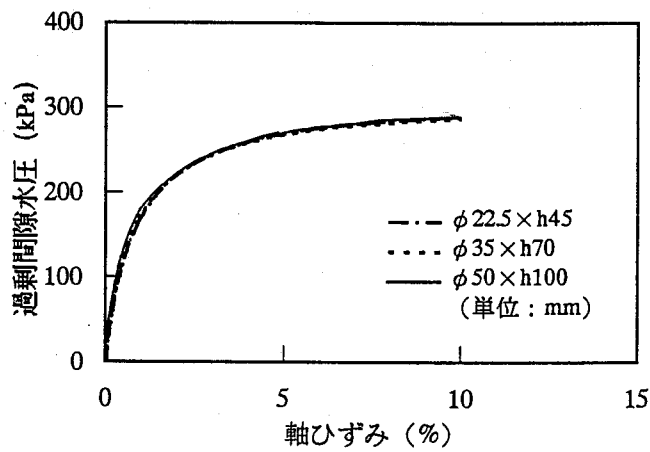
### 3.5 まとめ

本章では、ミニ三軸試験のように通常使用されている三軸供試体よりも小さい寸法の供試体を用いる際、最も重要な問題となる三軸供試体の寸法効果について検討を行った。寸法の異なる3種類の三軸供試体(直径22.5mm, 35mm, 50mm)を用いて、まず弾粘塑性有限要素解析を行い、続いて不攪乱自然堆積粘土を用いた三軸 $\overline{CU}$ 試験を行なった。そして、等方圧密過程および非排水せん断過程における寸法効果の影響について調べ、三軸試験としてのミニ三軸試験の適用性について検討を行った。本章の結論は以下のようにまとめられる。

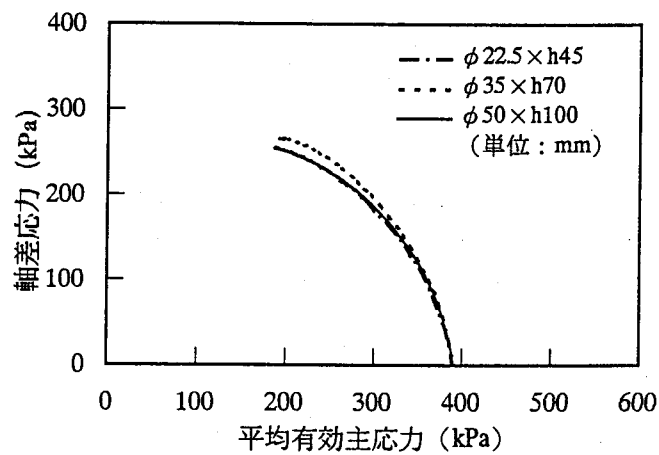
- 1) 等方圧密過程においては、載荷板と供試体間に摩擦がある場合、等方圧密終了時における三軸供試体内部の間隙比と応力比には供試体端面における摩擦の影響がみられ、その影響は供試体の寸法が小さくなるほど大きくあらわれる傾向がある。しかし、載荷板と供試体



(a) 軸差応力 - 軸ひずみ関係

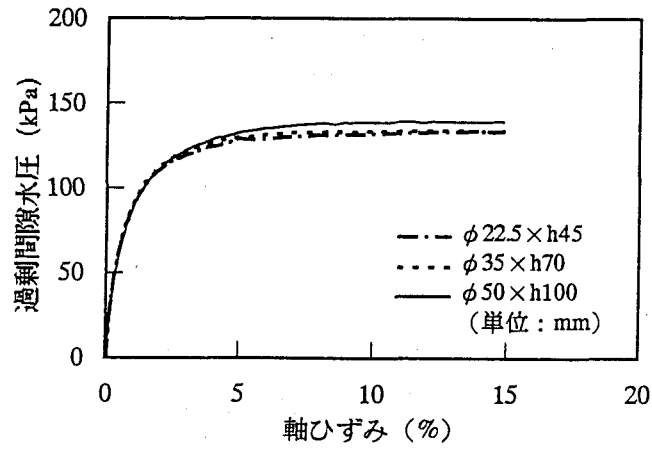


(b) 過剰間隙水圧 - 軸ひずみ関係

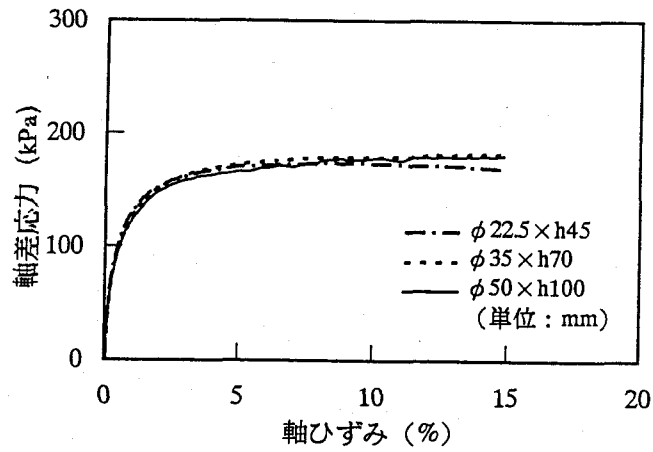


(c) 有効応力経路図

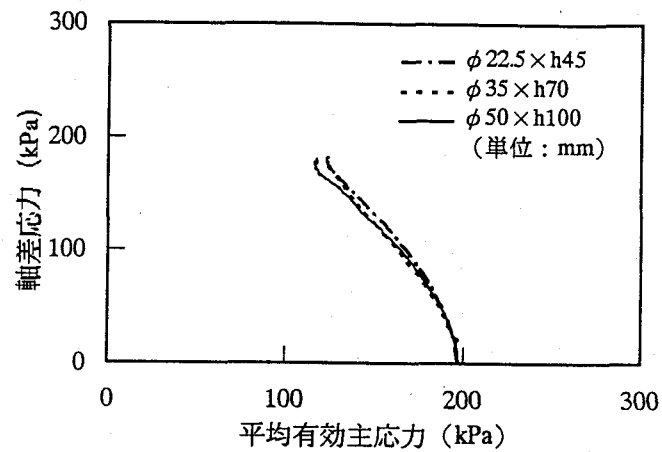
図-3.24 三軸 $\overline{CU}$ 試験結果 (沖積粘土 (2))



(a) 軸差応力 - 軸ひずみ関係

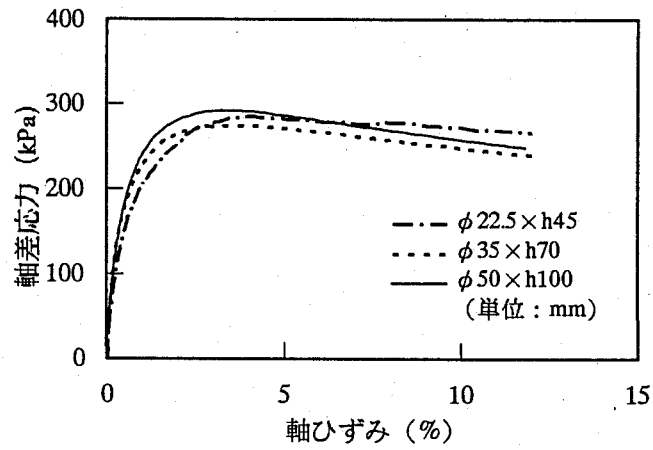


(b) 過剰間隙水圧 - 軸ひずみ関係

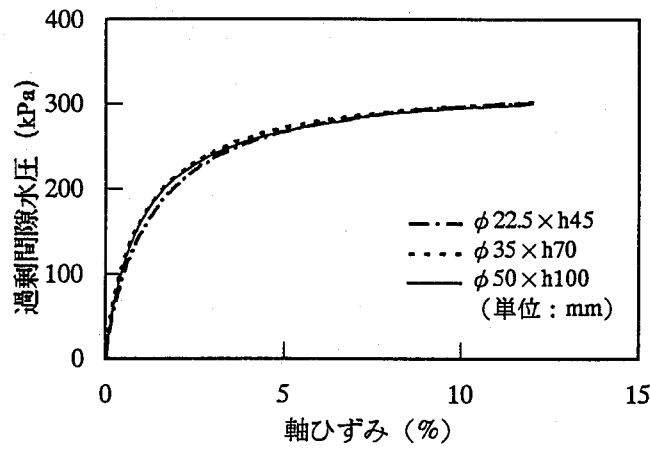


(c) 有効応力経路図

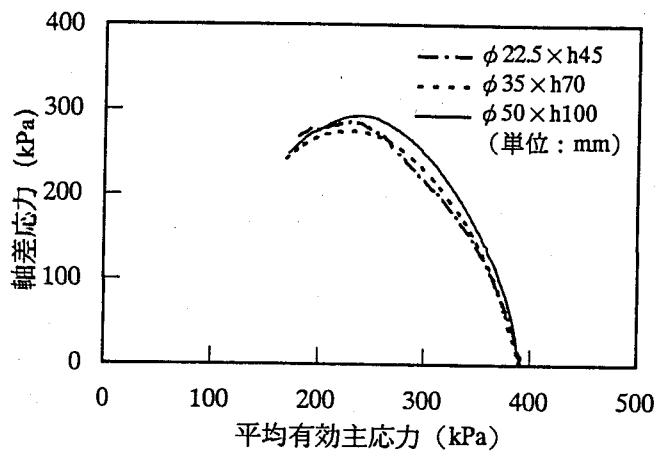
図-3.25 三軸CU試験結果 (鋭敏粘土)



(a) 軸差応力 - 軸ひずみ関係



(b) 過剰間隙水圧 - 軸ひずみ関係



(c) 有効応力経路図

図-3.26 三軸CU試験結果 (洪積粘土)

間の摩擦を完全に除去した場合、供試体の寸法による差はほとんど見られなくなる。

- 2) 等方圧密過程においては、三軸供試体の寸法が小さいほど、過剰間隙水圧の消散に要する時間は短く、一次圧密終了に要する時間も短縮される。実際の不攪乱粘土を用いた等方圧密試験では、直径22.5mmの供試体の場合、一次圧密終了に要する時間は直径50mmの供試体の圧密時間の約1/8程度である。
- 3) 非排水三軸圧縮過程においては、三軸供試体端面における摩擦が大きい場合、供試体寸法が小さくなるほど供試体端面において供試体の変形が拘束されるため、最大軸差応力は大きくあらわれる。逆に、三軸供試体端面における摩擦がほとんど無視できる場合、供試体寸法に関わらず軸差応力-軸ひずみ関係はほぼ同一の挙動を示す。
- 4) 非排水三軸圧縮過程においては、過剰間隙水圧-軸ひずみ関係は、三軸供試体の寸法や端面における摩擦の大小に関わらずほぼ同一の挙動を示す。

以上の結論から、三軸供試体端面における摩擦を十分に除去すれば、三軸供試体の寸法が三軸試験結果に与える影響はほとんど無いと言え、小さい供試体を用いた三軸試験でも通常の三軸試験と同じ結果が得られる。したがって、自然堆積粘土に対してミニ三軸試験は十分、適用可能であると結論づけられる。

### 参考文献（第3章）

- 1) 土質試験法（第3回改訂版）編集委員会：土質試験の方法と解説，土質工学会，1990.
- 2) R. E. Goodman著，大西有三・谷本親伯 共訳：わかりやすい岩盤力学，鹿島出版会，1984.
- 3) 吉中龍之進：岩石質地盤の強度に関する寸法効果，施工技術，Vol.9, No.8, pp.58～60, 1976.
- 4) 柳沢栄司：設計におけるせん断強さと $c$ ,  $\phi$ の考え方，土と基礎，Vol.32, No.7, pp.77～83, 1984.
- 5) Bishop, A. W. and Green, G. E. : The influence of end restraint on the compressional strength of a cohesionless soil, ASTM, STP977, Advanced Triaxial Testing on Soil and Rock, pp.692～705, 1988.
- 6) 後藤聡・龍岡文夫：砂と礫の三軸圧縮試験における各種実験要因の影響，土と基礎，Vol.39, No.9, pp.13～18, 1988.
- 7) Lo, K. Y. : The Operational strength of fissured clays, Geotechnique, Vol.20, No.1, pp.57～74, 1970.
- 8) 正垣孝晴，白川修治，木暮敬二：一軸および三軸UU強度特性に土の塑性と供試体寸法の与える影響，三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.245～250, 1991.
- 10) 正垣孝晴，白川修治，木暮敬二，鶴居正行：一軸圧縮強度の形状・寸法効果に与える攪乱の影響，第46回土木学会年次学術講演会講演概要集，第三部門，pp.340～341, 1991.
- 11) 正垣孝晴，丸山仁和，須藤剛史：繰り返し再圧密粘土の非排水強度特性に与える供試体の形状・寸法効果，第47回土木学会年次学術講演会講演概要集，第三部門，pp.422～423,

1992.

- 12) 亀井健史, 中村嘉博, 常田亮: 浅層部より採取した不攪乱試料の寸法効果, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第三部門, pp.338~339, 1991.
- 13) 亀井健史, 常田亮: 一軸圧縮強度・変形特性に及ぼす供試体寸法の影響, 土木学会論文集, no.436, III-16, pp.131~134, 1991.
- 14) 常田亮, 亀井健史: 極小供試体による一軸圧縮試験結果の経済的評価法, 長野工業高等専門学校紀要, 第26号, pp.47~57, 1992.
- 15) 関子睦夫, 木暮敬二, 山口晴幸: 供試体寸法の相違が泥炭の非排水せん断特性に及ぼす影響, 第40回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第三部門, pp.531~532, 1985.
- 16) 山田眞一, 龍岡文夫: 関東ロームの非排水せん断特性に及ぼす供試体の寸法効果, 第18回土質工学研究発表会講演集, pp.465~468, 1983.
- 17) 正垣孝晴, 亀井健史, 常田亮: “一軸圧縮強度・変形特性に及ぼす供試体寸法の影響”への討議・回答, 土木学会論文集, No.457, III-21, pp.155~157, 1992.
- 18) 荒井克彦, 町原秀夫: 三軸圧縮供試体内間隙水圧分布の計測, 第24回土質工学研究発表会講演集, pp.495~496, 1989.
- 19) 荒井克彦, 町原秀夫, 杉本明: 三軸圧縮供試体内間隙水圧分布の計測(続報), 第25回土質工学研究発表会講演集, pp.601~602, 1990.
- 20) Matsui, T. and Abe, N.: Flow surface model of viscoplasticity for normally consolidated clay, Proceedings of Second International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, pp.157~164, 1986.
- 21) Matsui, T. and Abe, N.: Multi-dimensional elasto-plastic consolidation analysis by finite element method, Soils and Foundations, Vol.21, No.1, pp.79~95, 1981.
- 22) 松井保, 阿部信晴, 中野雅文, 梅野修一: 三軸粘土供試体の弾粘塑性圧密解析, 第42回土木学会年次学術講演会概要集, 第三部門, pp.266~267, 1987.
- 23) 松井保, 阿部信晴, 梅野修一, 鍋島康之: 三軸等方圧密試験における載荷板の拘束の影響について, 第43回土木学会年次学術講演会概要集, 第三部門, pp.350~351, 1988.
- 24) Nakase, A., Kamei, T. and Kusakabe, O.: Constitutive parameters estimated by plasticity index, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 114, No. 7, pp.844~858, 1988.
- 25) 例えば 亀井健史, 小林正樹, 土田孝: 中間土-砂か粘土か-, ジオテクノート, No.2, 土質工学会, 1992.
- 26) 松井保, 阿部信晴, 中野雅文, 梅野修一: 三軸粘土供試体の圧密について, 第22回土質工学研究発表会講演集, pp.231~232, 1987.
- 27) 例えば 足立紀尚, 佐野郁雄: 過圧密粘土の力学特性, 土と基礎, Vol.33, No.3, pp.3~8, 1985.
- 28) 吉村喜代一: 粘土と試験材料との摩擦, 土と基礎, Vol.31, No.7, pp.69, 1983.

## 第4章 ミニ三軸試験の自然堆積粘土への適用

### 4.1 概 説

第3章では三軸試験結果に及ぼす供試体寸法の影響について検討し、ミニ三軸試験のように土質試験法で規定された寸法よりも小さい供試体を使用した場合でも、通常の三軸試験結果とほぼ同じ結果が得られることを明らかにした。しかしながら、ミニ三軸試験が実際の地盤調査法・土質試験法としての適用性を有するかどうかについての検討は必要であると考えられる。そこで本章では、地盤調査法・土質試験法としてのミニ三軸試験の適用性を検討するために、実際の自然堆積粘土に対して行ったミニ三軸試験の結果を既往の地盤調査結果や室内試験結果等と比較することにより、ミニ三軸試験の自然堆積粘土への適用性を検討する。

### 4.2 大阪湾海底堆積粘土に関する既往の調査・研究

本章では、ミニ三軸試験の自然堆積粘土への適用性を確認するために、大阪湾沿岸で採取された自然堆積粘土を用いて試験を行うが、まず、大阪湾沿岸の地盤の物理特性ならびに力学特性に関する既往の調査・研究のまとめを行う。

#### 4.2.1 地盤概要<sup>1)9)</sup>

大阪湾ならびに大阪湾周辺における地盤の層序は図-4.1に示す昭和38年に行われた深層ボーリングOD-1に基づいて標準層序が決定されている。このOD-1の調査から始まって現在までに様々な機関によって地質調査が実施され、Ma 0~Ma13まで14層の海底堆積粘土層の存在が確認されている。また、地盤工学会関西支部「大阪湾海底の地盤調査研究委員会」の活動により大阪湾全体での地層対比がなされ、これらの海成粘土が大阪湾全体に広く堆積していることが明らかになった。海成粘土の標準層序は以下に示す沖積層、上部洪積層、大阪層群の3つに大別されている。

##### (1) 沖積層

沖積層は、約1万年前から現在に至るまでに堆積した軟弱な海成粘土を主とする堆積物から構成される層であり、大阪湾および大阪平野に広く分布する。大阪平野における沖積層の層相は一般的に粘土層と砂層の互相からなる下部層、海成粘土層からなる中部粘土層(Ma13, 梅田粘土層)、砂層を主とする上部層に3区分される。

##### (2) 上部洪積層

上部洪積層は大阪層群の上位にある洪積層で礫、砂、粘土の互相からなり、Ma11層およびMa12層の2層の海成粘土層を挟んでいる。大阪平野部における上部洪積層の最上部は、従来、天満層と呼ばれてきた砂、礫からなる洪積砂礫層で、大阪平野縁辺部では段丘相当層



に該当する。上部洪積層内のMa12層は、近年、土木構造物の大型化・重量化にともない土質工学的に問題となり、調査・研究が進められている。このためMa12層については参考となる調査結果も比較的多く、その力学特性が解明されつつある。また、Ma11層は分布深度がMa12に比べ深いことから参考となる研究も少数であったが、最近の研究では次第にその分布状況や堆積環境等が明らかにされつつある。

### (3) 大阪層群

大阪層群（鮮新，更新統）は京阪神地域の丘陵地や平野地下を構成し、下半部は砂礫主体の淡水成の粘土，シルト，砂，礫の互相で，上半部は11層の海成粘土（下位よりMa0層，Ma1層，・・・，Ma10層）と淡水成の粘土層および砂礫層との互相になっている。特に，大阪層群に挟まれる海成粘土層や火山灰層は層序を決定する上での重要な鍵層として利用されている。

近年，土木構造物の大型化や大深度地下利用にともない調査長の大きい深層ボーリングが増加してきている。この結果，沖積層に加えて洪積砂礫層およびMa12層についての地盤情報が質・量ともに飛躍的に向上することになり，Ma12層以深の各地層の分布や地質構造について，より詳細な検討が可能となった。また，地盤工学会関西支部「大阪湾海底の地盤研究委員会」，「大阪湾海底地盤情報の活用に関する研究委員会」によって構築された大阪湾周辺の地盤情報に関するデータベースによって，図-4.2に示すように神戸・

ポートアイランドから泉州・関西国際空港までの大阪湾岸に沿った，広範な地域の地質断面を検討することが可能となった。この結果，次の2点が明らかになった。①大阪湾海底地盤には，ポートアイランドー六甲アイランド間と大和川河口付近の2箇所で大きな撓曲構造がみられる。②この撓曲構造を境として，地質構造は「神戸」，「大阪」および「泉州」の3地域に分類できる。特に大和川以南の湾岸部では，沖積粘土（Ma13）層と上部洪積粘土（Ma12）層は確認されず，Ma11層以深の海成粘土層が地表面近くに出現する。また，Ma11層も大阪湾沖では単一の粘土層であるが，神戸沖や岸和田付近では3層，関西国際空港付近の海底では2層存在することが明かとなった。

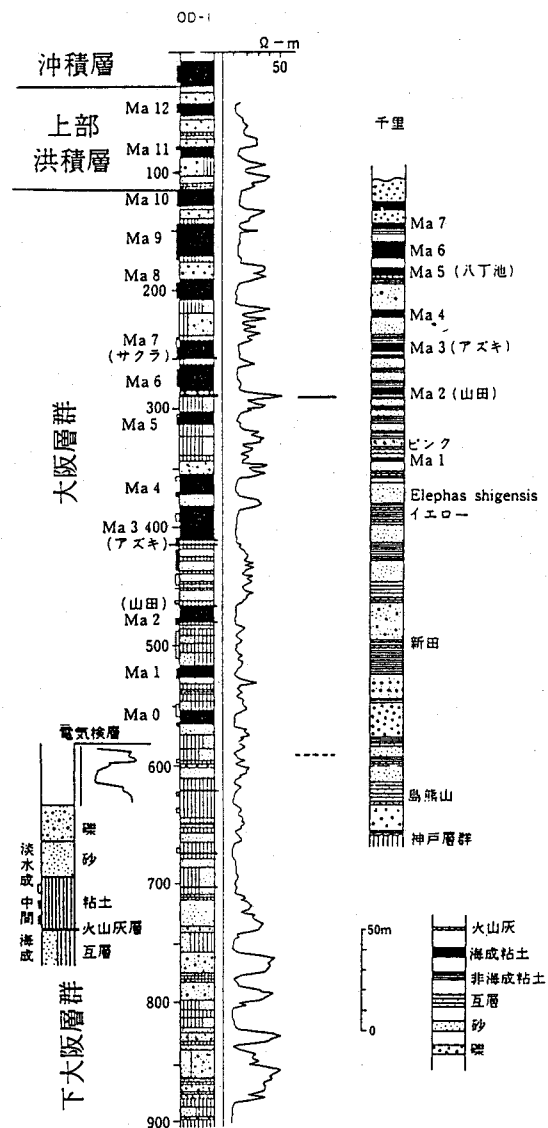


図-4.1 深層ボーリングOD-1の地層区分<sup>3)</sup>

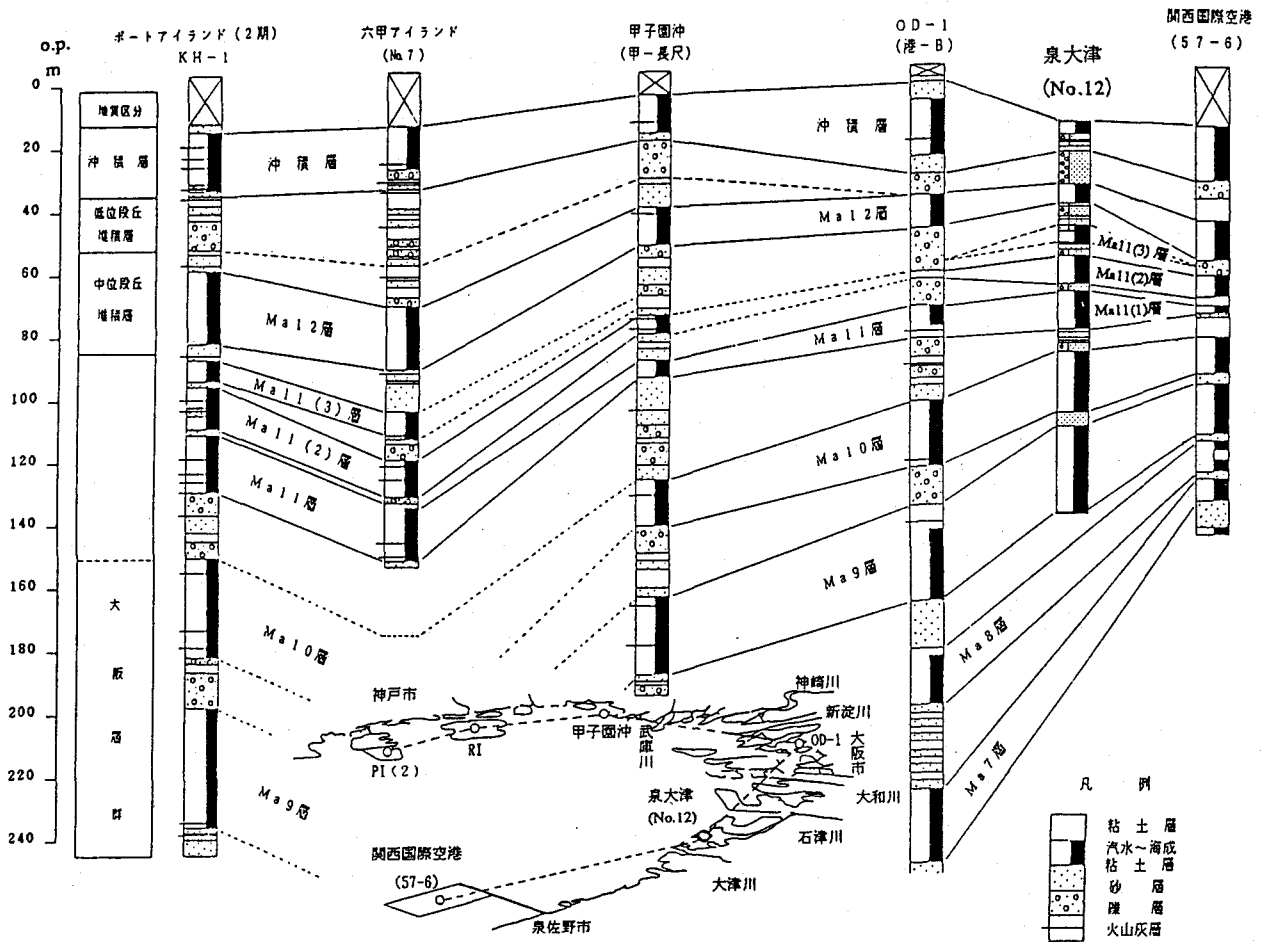


図-4.2 大阪湾沿岸部の地層対比図<sup>7)</sup>

今後、さらに大阪湾周辺の地盤情報が収集されることによって、より詳細な大阪湾の地盤構成が明らかになると考えられる。

#### 4.2.2 物理特性<sup>4) 7) 11)~13)</sup>

前述した委員会によって、神戸・ポートアイランドから芦屋沖、大阪港沖を経て泉州沖に至るまで、大阪湾沿岸部で採取されたボーリングデータをもとに地盤情報に関するデータベースが構築されている。大阪湾海底地盤の物理特性については「海底地盤—大阪湾を例として—」で詳細に述べられているが、ここでは最もデータ数の多い沖積粘土 (Ma13) と次にデータ数の多い上部洪積粘土 (Ma12) の物理特性について特徴的なことをまとめる。

##### (1) 沖積粘土 (Ma13層)

大阪湾海底の沖積粘土層 (Ma13) は土質工学的性質、特に物理特性には地域による変化があり、神戸・ポートアイランド沖を中心とする「神戸型」、大阪港沖を中心とする「大阪型」、関西国際空港海域を中心とする「泉南型」に区分され、4.2.1の地盤概要で述べた地盤構成と対応している。これらの地域の特徴としては、図-4.3に示すように大阪湾沖の沖積粘土は他

の地域と比べて液性限界が約80~120%と高く、その深度分布は層中央部で高くなる弓型の分布を示す。この様な液性限界の分布形状は大阪港沖で典型的にみられ、神戸・ポートアイランド沖や泉州沖の沖積粘土では大阪港沖よりやや異なる傾向を示す。また、大阪港沖では液性限界が不連続になる深度が存在し、沖積粘土層の特性が上下2層にわかれる傾向にあることが指摘されている。この様な液性限界の分布に反して、塑性限界は地域や深度によらず20~40%のほぼ一定の範囲内の値を示し、あまり差がみられない。また、自然含水比は図-4.4のように液性限界に近い値を示し、液性限界と同様な分布形状を示す。そして、粘土含有率は神戸沖で50%程度で深さによらずほぼ一定値であるが、大阪沖で70%程度に増加し深くなるほ

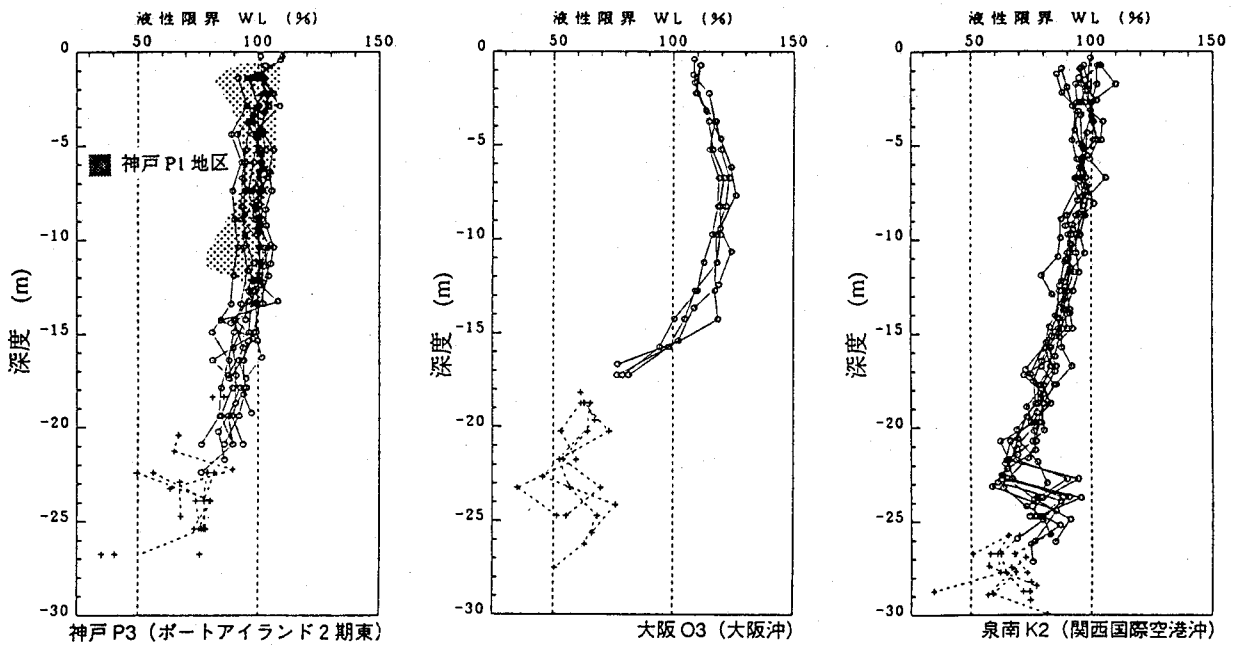


図-4.3 大阪湾沖積粘土の液性限界の深度分布<sup>7)</sup>

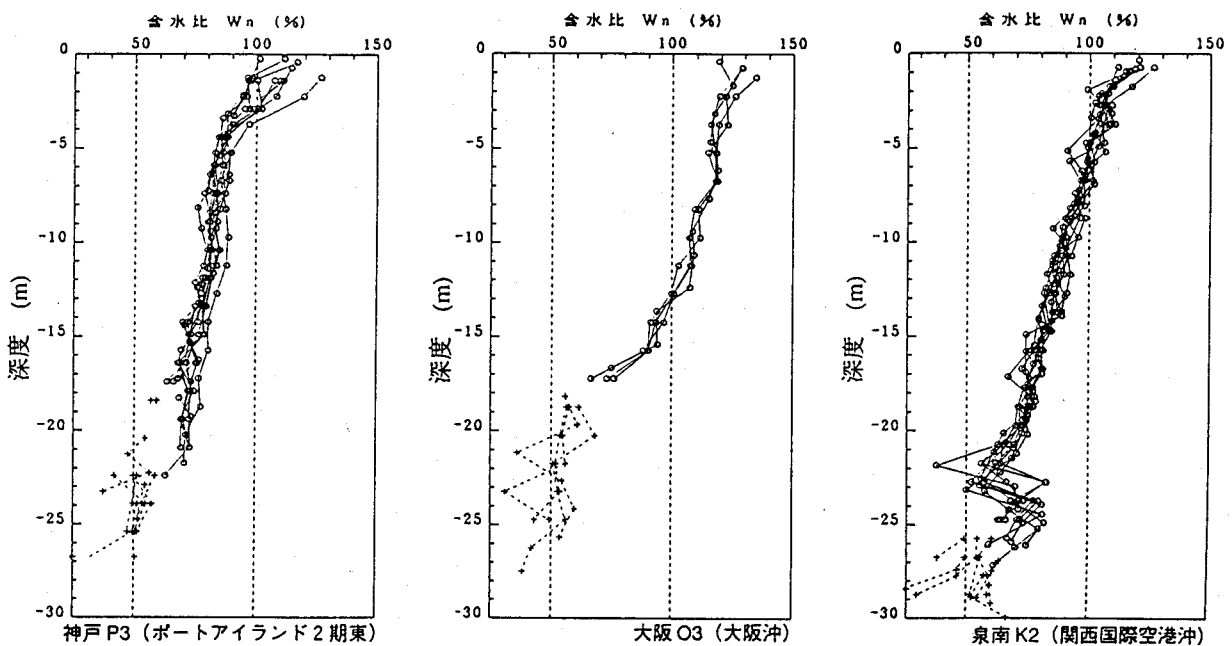


図-4.4 大阪湾沖積粘土の自然含水比の深度分布<sup>7)</sup>

ど粘土含有率は減少し、さらに大和川以南の泉州沖では粘土含有率は再び50%程度まで減少する傾向を示すことが明らかになっている。

(2)上部洪積粘土 (Ma12層)

上部洪積粘土 (Ma12) と沖積粘土は土質特性の地域分布の上で類似性が存在する<sup>14)</sup> ことが確認されており、図-4.5 および4.6 に示すように、液性限界と自然含水比の分布は沖積粘土と同様に大阪港沖の地域で高い値を示し、神戸沖、泉州沖では大阪港沖よりも低い値を示す。全体的な傾向として、上部洪積粘土の液性限界は沖積粘土よりもやや大きな値を示し、大阪港沖で100~120%程度である。このように液性限界は沖積粘土と同じく地域によってやや差が

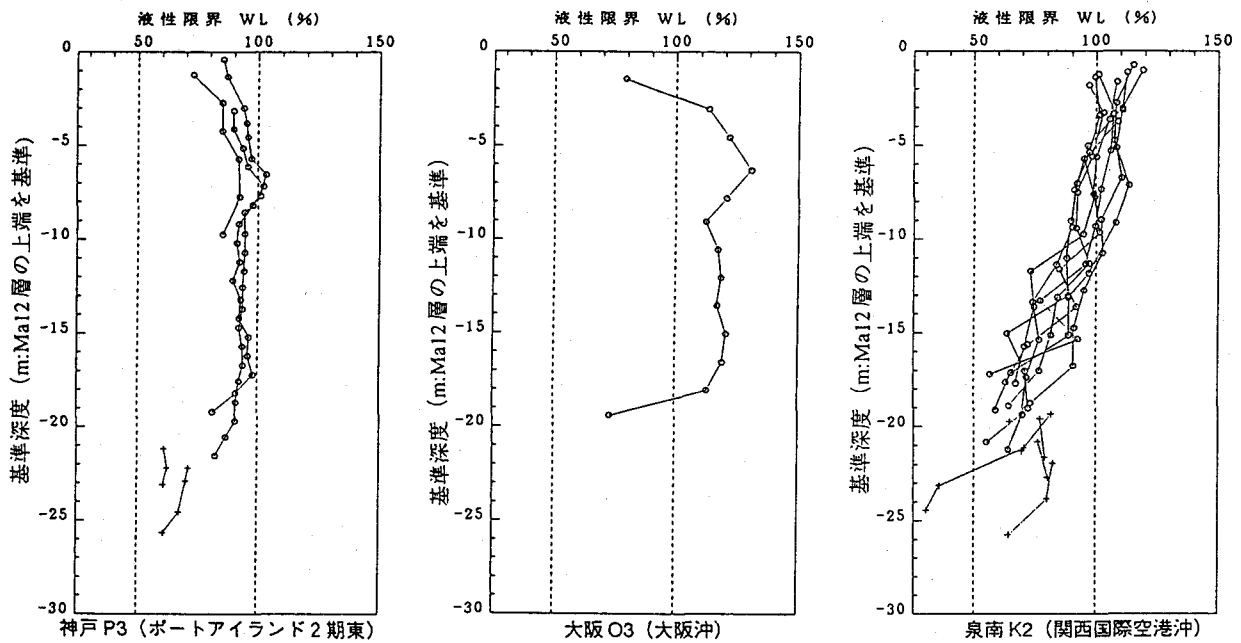


図-4.5 大阪湾洪積粘土の液性限界の深度分布<sup>7)</sup>

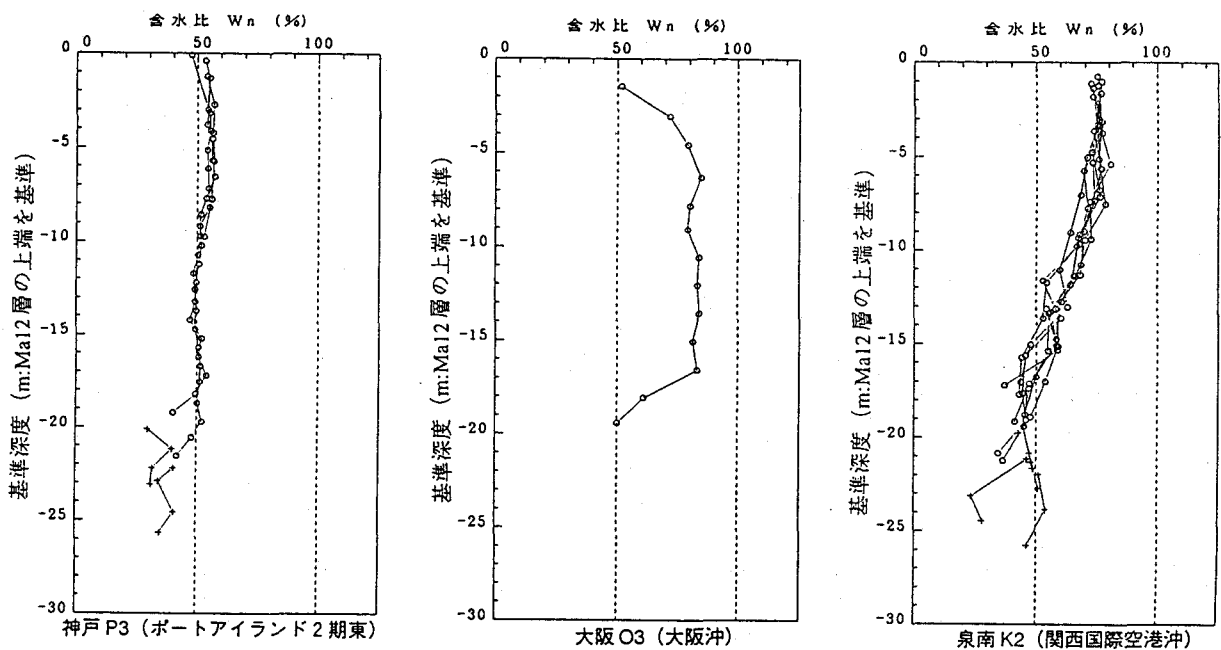


図-4.6 大阪湾洪積粘土の自然含水比の深度分布<sup>7)</sup>

みられるが、塑性限界は沖積粘土と同じく地域による差はみられず、ほぼ20~40%の範囲に分布している。粘土含有量も沖積粘土と同じく地域性が見られ、大阪港沖が最も大きく約70%前後、泉州沖で50~70%、そして神戸沖が最も少なく30~50%の値を示す。特に、神戸沖の粘土含有量が極端に少ないのが特徴である。

#### 4.2.3 力学特性<sup>4),7),12),13),17)~29)</sup>

ここでは、4.2.2と同じく沖積粘土層 (Ma13) および上部洪積粘土層 (Ma12) の力学特性 (圧密特性, せん断特性, クリープ特性) について既往の研究・報告をまとめる。最近の土木構造物の大型化・重量化傾向ともない圧密荷重が非常に大きくなってきているため、これら海底堆積粘土の圧密特性を知ることが非常に重要になってきている。また、これに伴って、沖積粘土だけでなく洪積粘土のせん断特性についても調査・研究が進んでいる。しかし、我が国では粘性土地盤の強度決定は一軸圧縮試験によって行われる例が多く、強度特性の参考となる資料としては一軸圧縮強度が最も多い。沖積粘土では強度決定法として広く採用され、上部洪積粘土についても一軸圧縮試験結果が報告されているが、洪積粘土地盤の強度を一軸圧縮試験から決定することの問題点<sup>10), 11)</sup>が指摘されているため、ここでは言及しないことにする。最後に、粘土の時間依存性を調べた試験結果としてクリープ特性についてまとめる。

##### (1) 圧密特性

粘土の圧密特性、特に圧縮指数については液性限界との関係が古くから研究され、Skemptonの経験式や運輸省港湾技術研究所の式に代表されるように、圧縮指数と液性限界は比例関係があることなどが指摘されている。大阪湾海底堆積粘土の圧縮指数は一般的に沖積粘土より上部洪積粘土の方が大きく、図-4.7 および4.8 に示すように、沖積粘土が0.4~1.6の範囲に分布するのに対して、上部洪積粘土は1.0を超えるものが多くかなり大きな圧縮指数を

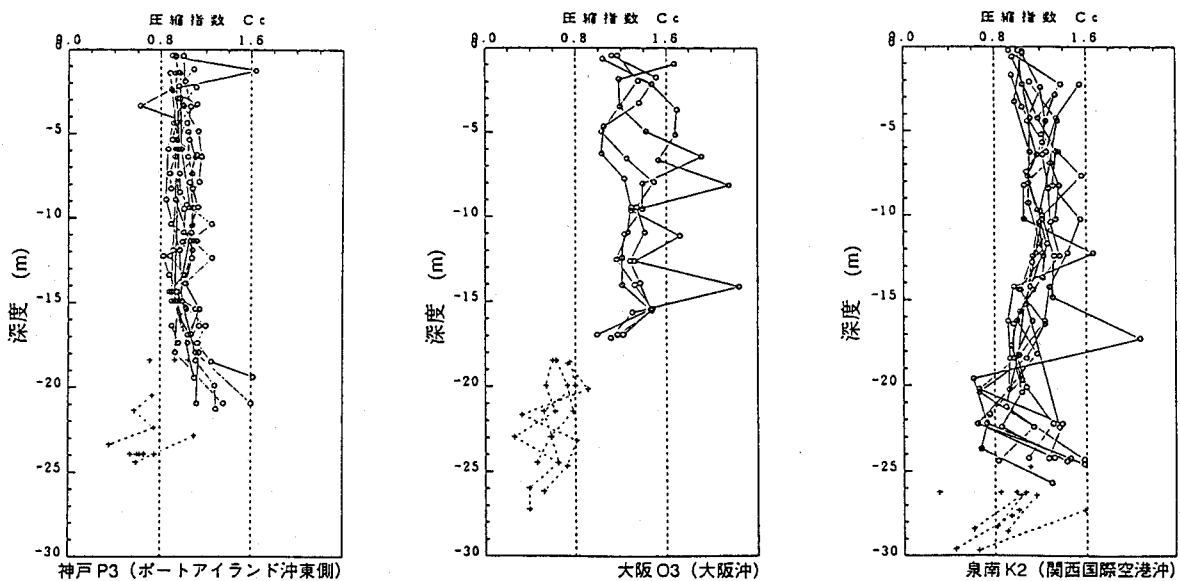


図-4.7 大阪湾沖積粘土の圧縮指数の深度分布<sup>7)</sup>

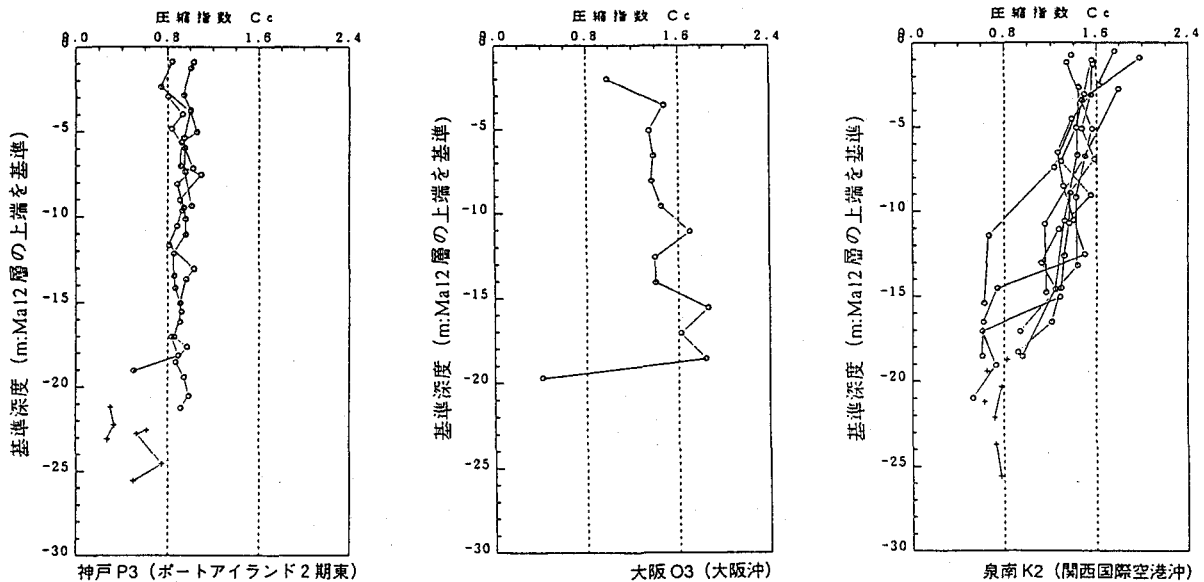


図-4.8 大阪湾洪積粘土の圧縮指数の深度分布<sup>7)</sup>

示す。ただし、圧縮指数の値は地域や深度によってかなり差があり、液性限界と同じく地域性があることが確認されている。したがって、沖積粘土層および上部洪積粘土層とも液性限界の傾向と同じく大阪港沖が最も大きい値を示す傾向があり、神戸沖と泉州沖の圧縮指数はやや小さい値を示す。また、沖積粘土の一部と上部洪積粘土は、年代効果によるセメンテーションの影響で大きな圧縮指数を示すことが報告されている。次に、圧密降伏応力は大阪港沖の沖積粘土で60～100kPa、上部洪積粘土（Ma12）で400～700kPaの値を示し、過圧密比は、沖積粘土では、1.0～1.6程度でほぼ正規～過圧密状態、上部洪積粘土（Ma12）では1.25～2.0程度の過圧密状態を示す。この上部洪積粘土の過圧密比は深度方向にほぼ一定であるため、上部洪積粘土が示す過圧密は年代効果による疑似過圧密であることが指摘されている<sup>9)</sup>。また、関西国際空港島の沈下問題等で洪積粘土の二次圧密沈下が重要視されてきている。沖積粘土は様々な地盤改良が施されているため二次圧密による沈下量はあまり重要視されていないが、洪積粘土の二次圧密による沈下は最近の土木構造物の大型化に伴ってますます重要になってきている。しかしながら、洪積粘土の二次圧密係数に関する既往の調査結果は非常に少なく、大阪湾全体の傾向を述べるには至っていない。

(2)せん断特性

沖積粘土層（Ma13）については、神戸沖から泉州沖までの大阪湾沿岸地域において数多くの一軸圧縮試験が行われており、非排水強度の地域性や深度方向の強度増加率が詳細に調べられている。この結果、大阪湾沖積粘土の非排水強度はコンシステンシー特性の地域的な変動に連動して変化し、液性限界や過圧密特性の違いが沖積粘土の非排水強度特性に影響していることが判明している。沖積粘土層の非排水強度は深度や地域によって大きく異なるが、図-4.9に示すようにおおむね0～150kPaの範囲に分布する。また、非排水強度は深度方向にほぼ直線的に増加し、その強度増加率は地域性を示すことが確認されている。強度増加率は神戸沖が最も大きく、大阪湾全体の強度増加率の平均は約0.35である。また、洪積粘土で顕著

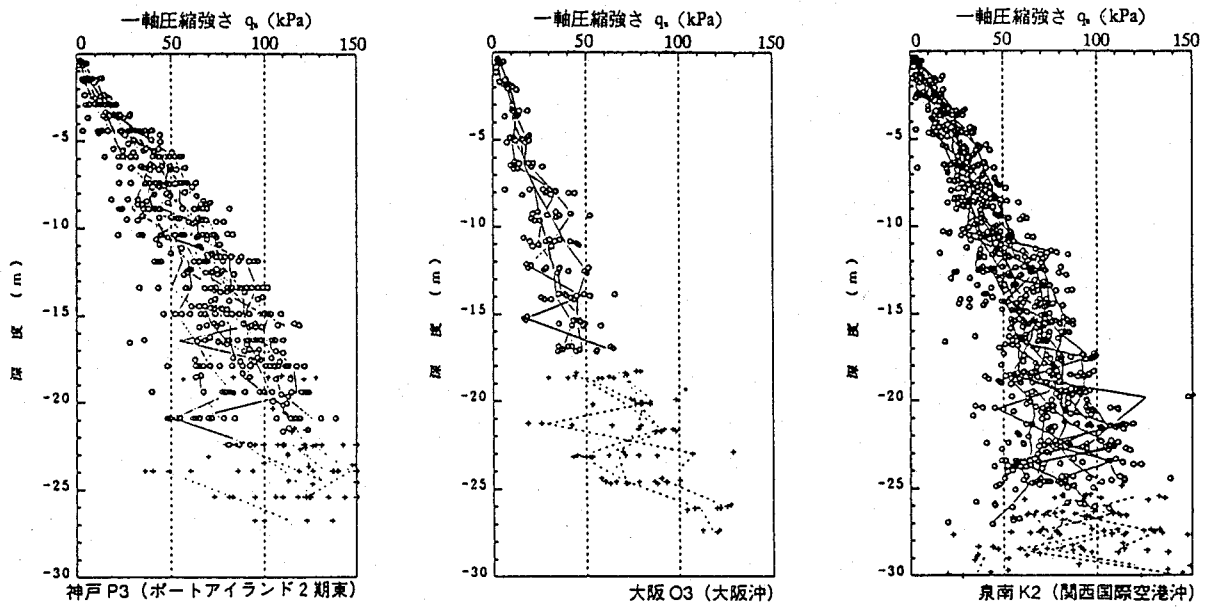


図-4.9 大阪湾沖積粘土の一軸圧縮強度の深度分布<sup>7)</sup>

に見られる年代効果の影響を一部の沖積粘土も受けていることが指摘されており、神戸沖の沖積粘土では、明らかに年代効果の影響によると思われる強度増加が確認されている。さらに、正規圧密状態における三軸非排水せん断試験から求めた内部摩擦角は $\phi=30\sim 35^\circ$ であることが報告されている。

次に、上部洪積粘土層 (Ma12) については、一軸圧縮試験も行われているものの、大深度から採取された試料は応力解放による微細なクラック等による試料の乱れにより一軸圧縮強度にばらつき大きいことや大阪湾沿岸地域全体にわたるデータが収集されていないため、ここでは一軸圧縮試験結果については言及しない。この一軸圧縮試験のかわりに、大深度から採取された洪積粘土のせん断強度を調べる試験法として、最近、原位置応力と等しい拘束圧で三軸非圧密非排水 (UU) 試験や三軸圧密非排水 (CU) 試験を実施し、せん断強度を調べるケースが増加してきている。三軸 UU 試験や三軸 CU 試験結果も限られた地域について行われたものであるが、一軸圧縮試験結果よりもばらつきが小さいため、これらの試験結果をまとめる。上部洪積粘土の強度増加率および内部摩擦角は、図-4.10 および 4.11 に示すように、

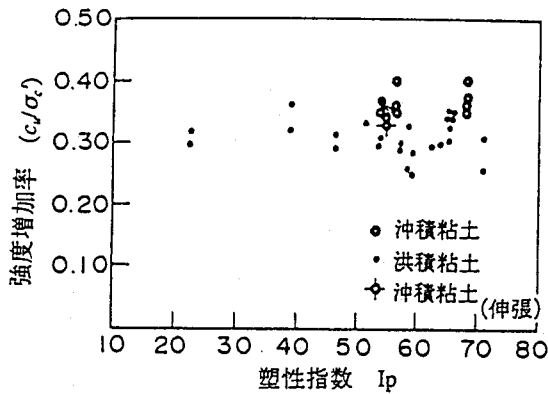


図-4.10 大阪湾洪積粘土の強度増加率<sup>21)</sup>

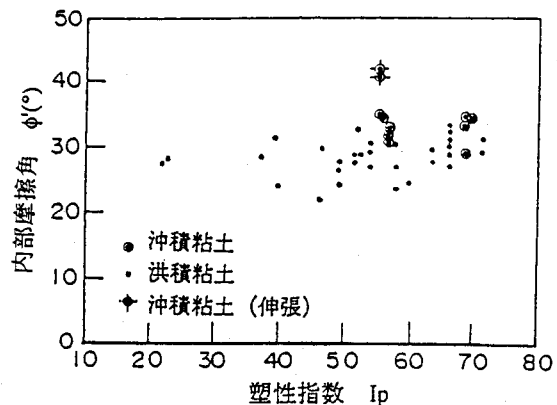


図-4.11 大阪湾洪積粘土の内部摩擦角<sup>21)</sup>

沖積粘土に比べてやや小さく、強度増加率は0.30を中心に0.26~0.34、内部摩擦角は $\phi=24\sim 34^\circ$ の範囲に分布している。また、上部洪積粘土は沖積粘土と物性的には大きな差がないにもかかわらず、年代効果の影響により変形特性やダイレイタンスー特性は沖積粘土と異なる傾向を示すことが明らかにされている。さらに、三軸CU試験結果に影響する要因として、図-4.12に示すように背圧の大きさが重要であることが報告されている。大深度地盤から採取された試料は、一般的に原位置で作用していた高い静水圧が解除されるために不飽和状態である。この様な試料を飽和させるため、供試体に背圧を負荷する方法がよく採用されるが、この背圧の大きさによってせん断特性（軸差応力や過剰間隙水圧）が変化することが指摘されている。

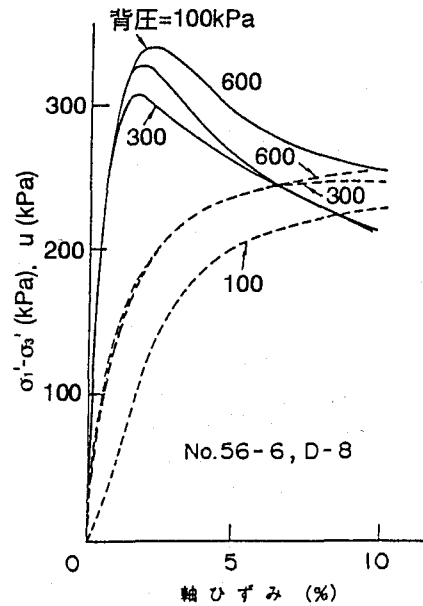


図-4.12 洪積粘土のせん断挙動に及ぼす背圧の影響<sup>21)</sup>

### (3) クリープ特性

大阪湾海底堆積粘土の時間依存性挙動（クリープ挙動）に関する三軸試験（クリープ試験）結果の報告例は非常に少ない。したがって、大阪湾全体についての傾向を述べるには至っていないために、ここでは、大阪湾泉州沖で採取された不攪乱沖積粘土に関する試験結果<sup>21)</sup>をまとめる。大阪湾沖積粘土は、等方圧密後に非排水クリープ試験を行った場合と $K_0$ 圧密後に非排水クリープ試験を行った場合とでは同一のクリープ荷重に対する破壊時間が異なり、 $K_0$ 圧密履歴を受けた供試体の方が早く破壊に至ることが報告されている。しかし、図-4.13に示すように、最小軸ひずみ速度-破壊時間関係は両対数グラフ上で直線関係になり、圧密履歴によらずほぼ同一の直線で表せることや、大阪湾沖積粘土と東京湾沖積粘土の結果がほぼ同じであることが報告されている。また、図-4.14に示すように、大阪湾沖積粘土が示す最大軸差応力-破壊時間関係はほぼ一義的な関係を示すことがわかっている。

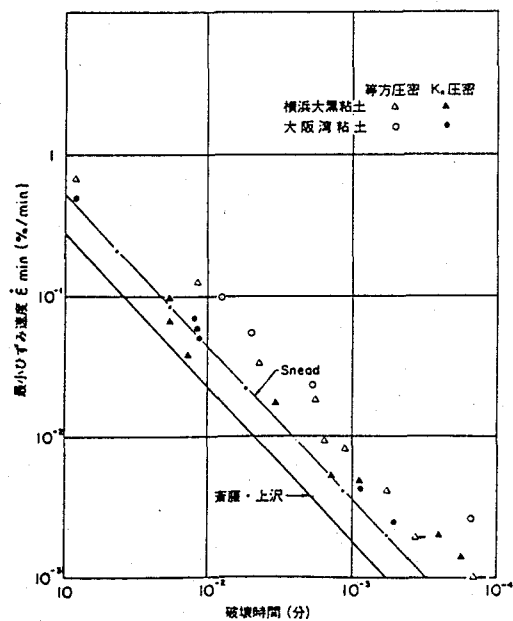
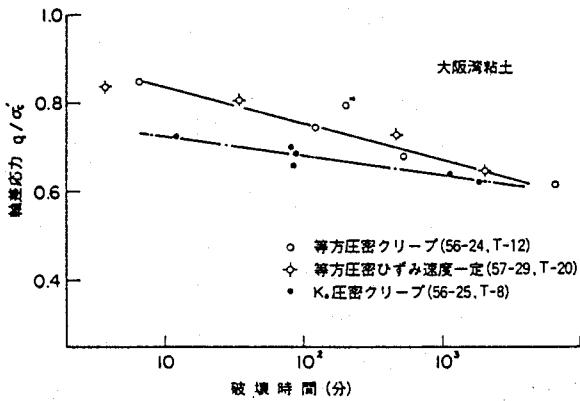
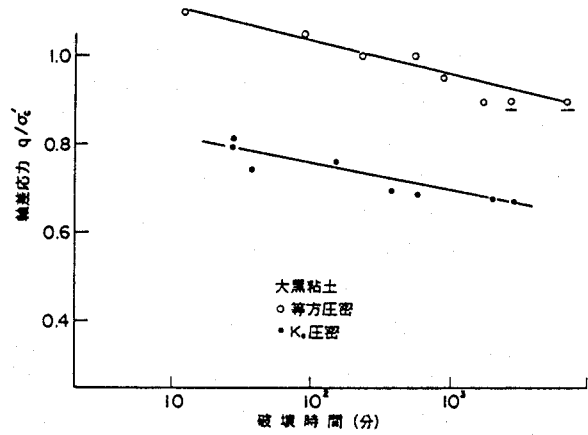


図-4.13 最小軸ひずみ速度-破壊時間関係<sup>21)</sup>





(a) 大阪湾沖積粘土



(b) 横浜大黒粘土

図-4.14 最大軸差応力-破壊時間関係<sup>21)</sup>

### 4.3 ミニ三軸試験で用いた試料の概要

本研究で用いる試料は大阪湾または大阪湾周辺で採取された自然堆積粘土で、すべてシンウォール・サンプラーまたはブロックサンプルで採取された不攪乱試料である。図-4.15は試料の採取位置を示している。表-4.1は各試料の採取位置、採取深度および物理特性である。比重は2.65を中心に2.6~2.7の範囲に分布し、大阪湾海底堆積粘土の平均的な値を示している。次に、コンシステンシー特性に基づいて工学的に分類する。図-4.16は本研究で用いた試料の塑性図である。ほとんどの試料がA線に沿って分布し、[CH]に分類される高塑性の粘土であることがわかる。大阪湾海底堆積粘土は比較的高い塑性を示す<sup>30)</sup>ことからこれらの試料は典型的な大阪湾海底堆積粘土であると言える。また、表-4.2に標準圧

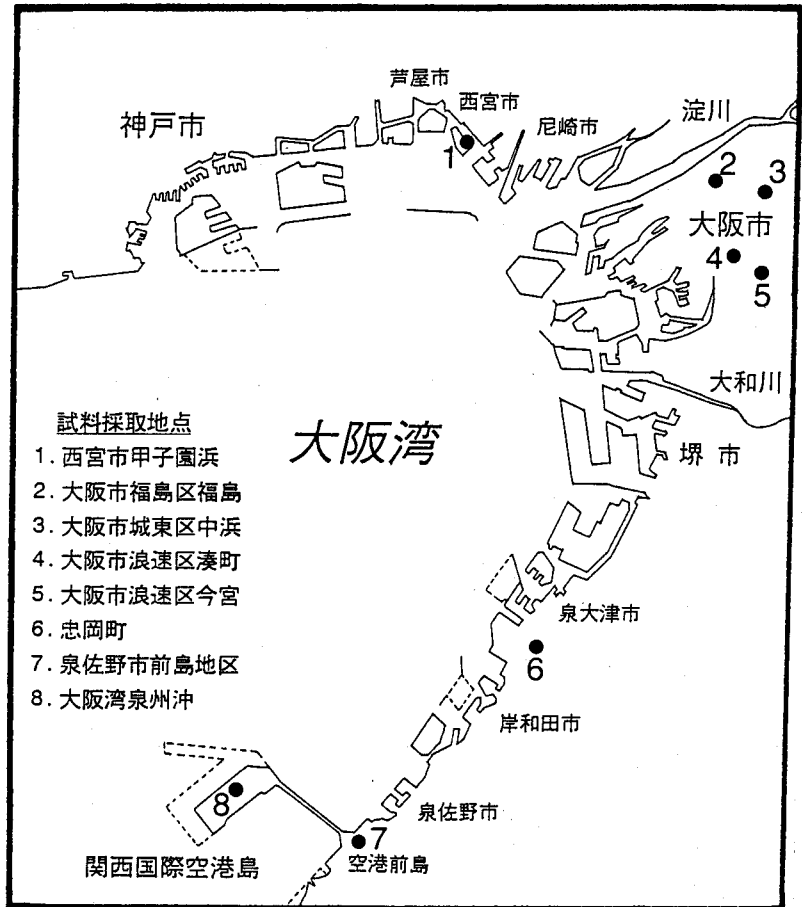


図-4.15 ミニ三軸試験試料の採取地点

表-4.1 試料の採取地点, 採取位置および物理特性

試料記号	採取地点	採取深度 (m)	地層区分	土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	塑性限界 (%)	液性限界 (%)	塑性指数
KS1	西宮市甲子園浜	11.0~11.8	Ma13	2.70	27.9	83.2	55.3
KS2		13.0~13.8	Ma13	2.71	30.1	98.1	68.0
KS3		43.0~43.8	Ma12	2.67	31.9	110.8	78.9
IM1	大阪市浪速区今宮	15.0~15.8	Ma13	2.69	21.4	41.1	19.7
IM2		31.0~32.0	Ma12	2.73	27.8	103.2	75.4
TO1	忠岡町	11.0~11.8	—	2.70	17.0	33.0	16.0
TO2		16.5~17.3	—	2.72	30.0	63.6	33.6
MS1	泉佐野市前島地区	38.5~39.3	Ma3	2.79	23.6	99.6	76.0
MS2		52.0~52.8	Ma2	2.72	23.5	73.1	49.6
MS3		53.0~53.8	Ma2	2.73	19.8	112.7	92.9
PT1	大阪湾泉州沖 (旅客ターミナル)	62.0~62.4	Ma12	2.66	38.9	125.4	86.5
PT2		66.0~68.0	Ma12	2.71	39.4	118.9	79.5
PT3		83.0~85.0	Ma11(2)	2.67	25.6	92.0	66.4
PT4		91.0~93.0	Ma11(1)	2.73	27.5	82.2	54.7
PT5		102.0~104.0	Ma10	2.73	21.7	90.8	69.1
PT6		112.0~114.0	Doc4	2.69	31.5	102.8	71.3
PT7		120.0~122.0	Ma9	2.73	25.1	87.3	62.2
PT8		139.0~141.0	Doc5	2.70	26.6	149.4	122.8
PT9		163.0~165.0	Ma8	2.53	35.6	65.7	30.1
PT10		169.0~171.0	Ma7	2.64	29.3	100.0	70.7
TB1	大阪湾泉州沖 (タンカーバース)	50.0~50.8	Ma12	2.62	33.6	104.1	70.5
TB2		62.0~62.8	Ma11(2)	2.71	25.8	88.0	62.2
FS1	大阪市福島区福島	12.0~12.8	Ma13	2.71	44.5	67.0	22.5
NH1	大阪市城東区中浜	10.0~11.0	Ma13	2.67	25.3	58.9	33.6
MM1	大阪市浪速区湊町	8.0~8.5	Ma13	2.66	28.9	61.0	32.1
MM2		10.0~10.5	Ma13	2.66	29.0	41.6	12.6

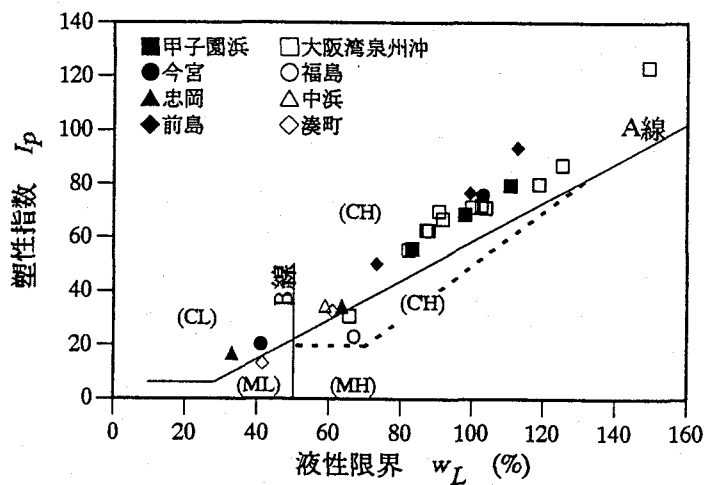


図-4.16 採取試料の塑性図

密試験から求めた圧密降伏応力，圧縮指数および膨潤指数を示す。図-4.17の洪積粘土（Ma12）の $e-\log p$ 関係にみられるように，洪積粘土の圧密降伏応力は沖積粘土に比べて非常に大きく，なかには圧密降伏応力が1MPaを越える試料も存在する。ただし，標準圧密試験結果であるため，1MPaを越える洪積粘土の圧密降伏応力はあまり正確な値ではないことを考慮しておく必要がある。また，図-4.17の標準圧密試験結果から，年代効果を受けた洪積粘土では，圧密降伏応力を超えると

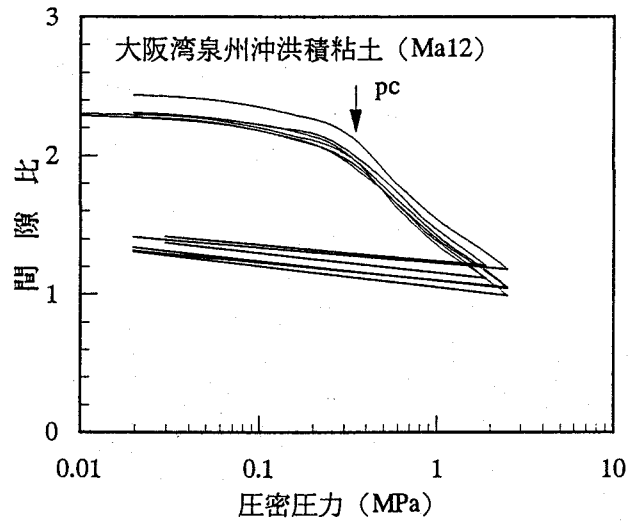


図-4.17 洪積粘土（Ma12）の $e-\log p$ 曲線

表-4.2 試料の標準圧密試験結果

試料記号	採取地点	圧密降伏応力 (MPa)	圧縮指数	膨潤指数
KS1	西宮市甲子園浜	0.057	0.72	0.13
KS2		0.059	0.70	0.13
KS3		0.284	1.03	0.12
IM1	大阪市浪速区今宮	0.353	0.35	0.04
IM2		0.549	1.17	0.12
TO1	忠岡町	0.343	0.21	0.04
TO2		0.392	0.55	0.06
MS1	泉佐野市前島地区	0.633	1.46	0.07
MS2		0.800	1.07	0.06
MS3		0.817	1.27	0.14
PT1	大阪湾泉州沖 (旅客ターミナル)	0.294	1.23	0.12
PT2		0.304	1.25	0.14
PT3		0.380	0.85	0.12
PT4		0.552	1.13	0.05
PT5		0.546	1.02	0.11
PT6		0.631	1.43	0.11
PT7		0.739	1.01	0.07
PT8		0.94*	1.44	0.19
PT9		1.05*	0.46	0.04
PT10		1.09*	1.16	0.12
TB1	大阪湾泉州沖 (タンカーバース)	0.245	1.04	0.12
TB2		0.340	0.86	0.12
FS1	大阪市福島区福島	0.108	0.50	0.07
NH1	大阪市城東区中浜	0.130	0.41	0.06
MM1	大阪市浪速区湊町	0.120	0.43	0.05
MM2		0.216	0.25	0.01

急激に圧縮性が高くなるため、沖積粘土よりも大きな圧縮指数を示すことがわかる。

#### 4.4 ミニ三軸試験の適用性の検討

ミニ三軸試験が地盤調査法・土質試験法としての適用性を有するか否かについて検討するため、大阪湾およびその周辺で採取された自然堆積粘土に対して種々のミニ三軸試験を行い、既往の地盤調査結果や室内試験結果との比較を通して、ミニ三軸試験の自然堆積粘土への適用性を検討する。ミニ三軸試験ならびに中圧ミニ三軸試験の三軸 $\overline{CU}$ 試験の等方圧密過程におけるセル圧および有効圧密圧力を表-4.3に示す。ミニ三軸圧縮試験機と中圧ミニ三軸圧縮試験機は圧密圧力により使い分け、セル圧が800kPa以下の場合にはミニ三軸圧縮試験機、これより大きい場合は中圧ミニ三軸圧縮試験機を使用した。ミニ三軸圧縮試験機は最大耐圧1MPaで設計しているが、あまり高い圧力を空気圧で負荷するのは危険なため、セル圧が800kPa以上の場合には油圧により側圧を負荷する中圧ミニ三軸圧縮試験機を使用することにした。また、応力比一定圧密試験、平均有効主応力一定試験および非排水クリープ試験における試験条件を表-4.4~4.6に示す。応力比一定圧密試験と平均有効主応力一定試験はパソコン制御ミニ三軸試験機を使用し、非排水クリープ試験は主に中圧ミニ三軸試験機を使用した。非排水クリープ試験における軸力はベロフラムシリンダーによって載荷し、軸荷重を一定に制御する荷重制御方式でクリープ試験を行った。

##### 4.4.1 非排水せん断特性

###### (1) 沖積粘土と洪積粘土の応力-ひずみ関係

図-4.18(a)および4.19(a)はそれぞれ沖積粘土と洪積粘土の典型的な軸差応力-軸ひずみ関係の一例である。沖積粘土の軸差応力-軸ひずみ関係は軸ひずみの増加に対して単調に増加するひずみ硬化型の軸差応力-ひずみ関係を示すのに対して、洪積粘土の軸差応力-ひずみ関係は比較的小さい軸ひずみで軸差応力が最大値を示した後、ひずみ軟化挙動を示す。特に、大深度から採取された洪積粘土の軸差応力-軸ひずみ関係ほど顕著なひずみ軟化挙動を示し、有効圧密圧力が増大するにしたがって、ひずみ硬化型の応力-ひずみ関係を示すようになる。図-4.18(b)および4.19(b)は同じく沖積粘土と洪積粘土の過剰間隙水圧-軸ひずみ関係である。いずれの試験ケースにおいても、過剰間隙水圧は軸ひずみとともに一様に増加し、沖積粘土と洪積粘土の差は明確ではない。また、図-4.18(c)および4.19(c)は沖積粘土と洪積粘土の有効応力経路図である。洪積粘土は沖積粘土よりも若干大きな破壊応力比を示す。このように沖積粘土と洪積粘土の軸差応力-軸ひずみ関係には差がみられるが、その他の挙動についてはあまり差がなく、洪積粘土のもつ年代効果の影響は主に軸差応力-軸ひずみ関係にあらわれる。

###### (2) 沖積粘土と洪積粘土の非排水せん断特性

本節では、ミニ三軸試験ならびに中圧ミニ三軸試験結果から得られた強度定数の内、強度

表-4.3 ミニ三軸試験・中圧ミニ三軸試験試験条件および試験結果一覧（その1）

試験番号	試料番号 (地層区分)	$\sigma_3'$ (MPa)	$\sigma_{BP}'$ (MPa)	$\dot{\epsilon}$ (%/min)	$q_{max}$ (MPa)	M	$E_{50}$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$A_f$	$c_u/\sigma_3'$
KS101	KS1 (Ma13)	0.196	0.294	0.05	0.170	1.45	13.62	9.6	0.79	0.43
KS102		0.294			0.251	1.42	22.08	11.9	0.80	0.43
KS103		0.392			0.317	1.41	23.65	13.2	0.86	0.40
KS201	KS2 (Ma13)	0.196	0.294	0.05	0.195	1.51	8.80	10.2	0.68	0.50
KS202		0.294			0.234	1.33	17.61	9.2	0.84	0.40
KS203		0.392			0.347	1.40	14.65	11.4	0.75	0.44
KS301	KS3 (Ma12)	0.196	0.294	0.05	0.307	1.70	35.07	2.8	0.36	0.78
KS302		0.294			0.386	1.63	45.01	2.8	0.44	0.66
KS303		0.392			0.408	1.49	49.97	3.4	0.56	0.52
IM101	IM1 (Ma13)	0.196	0.294	0.05	0.249	1.60	31.53	11.3	0.49	0.64
IM102		0.294			0.301	1.55	38.13	14.1	0.66	0.51
IM103		0.392			0.389	1.55	57.93	12.7	0.70	0.50
IM201	IM2 (Ma12)	0.196	0.294	0.05	0.360	1.64	28.92	3.1	0.27	0.92
IM202		0.294			0.436	1.54	41.29	3.2	0.35	0.74
IM203		0.392			0.475	1.41	46.03	2.9	0.44	0.61
TO101	TO1	0.196	0.294	0.05	0.504	1.71	50.34	15.0	0.09	1.29
TO102		0.294			0.550	1.69	63.27	15.0	0.23	0.94
TO103		0.392			0.432	1.53	56.39	6.4	0.59	0.55
TO201	TO2	0.196	0.294	0.05	0.335	1.69	22.34	10.0	0.32	0.85
TO202		0.294			0.390	1.61	32.96	10.3	0.47	0.66
TO203		0.392			0.452	1.59	47.74	11.0	0.57	0.58
MS101	MS1 (Ma3)	0.392	0.294	0.05	0.462	1.41	45.21	3.3	0.45	0.59
MS102		0.491			0.489	1.40	46.81	3.8	0.55	0.50
MS103		0.682			0.511	1.40	71.78	3.8	0.81	0.38
MS104		0.948			0.643	1.40	73.18	5.9	1.00	0.34
MS105		1.153			0.755	1.35	86.25	6.2	1.02	0.33
MS106		1.411			0.935	1.33	97.46	6.9	1.01	0.33
MS201	MS2 (Ma2)	0.392	0.294	0.05	0.580	1.66	59.07	2.1	0.37	0.74
MS202		0.491			0.609	1.60	77.46	2.2	0.46	0.62
MS203		0.688			0.590	1.54	78.27	3.3	0.74	0.43
MS204		0.972			0.656	1.42	105.52	3.5	0.97	0.34
MS205		1.437			0.941	1.41	113.98	4.7	1.04	0.33
MS206		1.988			1.516	1.32	170.19	15.0	0.83	0.38
MS301	MS3 (Ma2)	0.392	0.294	0.05	0.681	1.87	70.58	1.8	0.37	0.87
MS302		0.491			0.610	1.61	82.68	1.9	0.62	0.62
MS303		0.697			0.784	1.49	85.56	1.7	0.53	0.56
MS304		0.940			0.641	1.39	77.82	4.3	0.94	0.34
MS305		1.404			0.853	1.25	99.98	4.9	1.00	0.30
MS306		1.898			1.404	1.24	115.95	7.4	0.79	0.37
PT101	PT1 (Ma12)	0.294	0.294	0.05	0.259	1.70	26.91	5.4	0.83	0.44
PT102		0.390			0.319	1.62	36.10	5.4	0.87	0.41
PT103		0.544			0.441	1.58	34.89	8.6	0.90	0.41
PT104		0.952			0.752	1.63	80.31	9.8	0.96	0.40
PT105		0.684			0.615	1.78	71.25	8.7	0.86	0.45
PT106		0.491			0.360	1.64	48.31	4.8	0.97	0.37
PT107		1.164			0.891	1.60	105.44	8.7	0.98	0.38
PT108		1.474			1.162	1.47	121.02	15.0	0.92	0.39
PT109		1.641			1.400	1.33	123.85	14.8	0.76	0.43
PT201	PT2 (Ma12)	0.294	0.294	0.05	0.285	1.66	22.40	7.0	0.74	0.49
PT202		0.391			0.325	1.59	34.45	5.4	0.84	0.42
PT203		0.489			0.374	1.54	42.82	5.6	0.91	0.38
PT204		0.694			0.588	1.57	62.41	9.1	0.85	0.42
PT205		0.881			0.726	1.47	93.25	8.2	0.83	0.41
PT301	PT3 (Ma11(2))	0.391	0.294	0.05	0.344	1.37	25.27	6.1	0.70	0.44
PT302		0.490			0.395	1.35	39.85	5.1	0.75	0.40
PT303		0.684			0.517	1.33	60.67	6.3	0.84	0.38
PT304		0.972			0.752	1.33	79.53	8.4	0.84	0.39

表-4.3 ミニ三軸試験・中圧ミニ三軸試験試験条件および試験結果一覧（その2）

試験番号	試料番号 (地層区分)	$\sigma_3'$ (MPa)	$\sigma_{BP}'$ (MPa)	$\dot{\epsilon}$ (%/min)	$q_{max}$ (MPa)	M	$E_{50}$ (MPa)	$\epsilon_f$ (%)	$A_f$	$c_u/\sigma_3'$
PT401	PT4 (Ma11(1))	0.711	0.294	0.05	0.594	1.47	65.31	5.5	0.77	0.42
PT402		1.039			0.795	1.39	78.37	6.7	0.86	0.39
PT403		0.391			0.411	1.49	40.33	2.9	0.55	0.53
PT404		0.491			0.449	1.42	64.01	3.0	0.65	0.46
PT501	PT5 (Ma10)	0.491	0.294	0.05	0.390	1.36	49.44	4.3	0.78	0.40
PT502		0.677			0.467	1.32	53.03	5.9	0.94	0.35
PT503		0.966			0.742	1.35	85.75	8.8	0.89	0.38
PT504		1.143			0.808	1.28	100.66	8.7	0.94	0.35
PT601	PT6 (Doc4)	0.682	0.294	0.05	0.594	1.56	73.33	3.4	0.74	0.44
PT602		0.960			0.713	1.50	80.39	3.9	0.87	0.37
PT603		1.158			0.820	1.40	83.92	5.0	0.92	0.35
PT604		1.438			1.020	1.38	114.59	5.5	0.94	0.36
PT701	PT7 (Ma9)	0.773	0.294	0.05	0.618	1.52	87.00	3.8	0.82	0.40
PT702		0.971			0.730	1.48	94.53	3.7	0.87	0.38
PT703		1.198			0.834	1.40	118.47	4.2	0.95	0.35
PT704		1.476			1.023	1.39	133.18	4.9	0.97	0.35
PT705		1.455			0.997	1.36	136.88	5.3	0.97	0.34
PT801	PT8 (Doc5)	0.991	0.294	0.05	0.815	1.54	92.05	3.5	0.72	0.41
PT802		1.185			0.915	1.53	109.61	4.2	0.83	0.39
PT803		1.474			0.979	1.52	110.89	4.5	1.00	0.33
PT804		1.657			1.088	1.43	124.30	4.9	1.00	0.33
PT805		1.964			1.335	1.48	142.86	5.6	1.03	0.34
PT901	PT9 (Ma8)	1.190	0.294	0.05	0.956	1.63	157.35	2.6	0.84	0.40
PT902		1.492			1.043	1.69	158.79	4.2	0.97	0.38
PT903		1.677			1.256	1.67	178.90	4.5	1.00	0.37
PT904		1.971			1.425	1.66	200.19	4.6	1.03	0.36
PT1001	PT10 (Ma7)	1.174	0.294	0.05	0.870	1.40	103.89	3.7	0.84	0.37
PT1002		1.447			0.985	1.37	134.02	4.5	0.94	0.34
PT1003		1.650			1.095	1.32	172.67	4.3	0.96	0.33
PT1004		1.936			1.266	1.29	196.82	4.7	0.96	0.33
TB101	TB1 (Ma12)	0.477	0.294	0.05	0.344	1.52	42.44	4.7	0.94	0.36
TB102		0.390			0.286	1.52	33.76	4.1	0.90	0.37
TB103		0.296			0.285	1.59	37.95	2.6	0.65	0.48
TB104		0.685			0.585	1.59	56.63	6.8	0.82	0.43
TB105		0.713			0.571	1.47	66.02	6.3	0.82	0.40
TB201	TB2 (Ma11(2))	0.392	0.294	0.05	0.333	1.32	36.18	4.2	0.68	0.42
TB202		0.488			0.337	1.31	47.51	4.9	0.92	0.35
TB203		0.694			0.485	1.30	66.11	5.0	0.87	0.35
TB204		0.963			0.626	1.23	88.49	7.4	0.99	0.33
FS101	FS1 (Ma13)	0.294	0.294	0.05	0.205	1.43	31.16	9.8	1.06	0.35
FS102		0.392			0.257	1.38	45.34	9.5	1.13	0.33
NH101	NH1 (Ma13)	0.049	0.294	0.05	0.101	1.59	5.19	14.5	0.19	1.03
NH102		0.059			0.095	1.65	7.58	15.0	0.34	0.80
NH103		0.069			0.079	1.67	6.78	14.8	0.60	0.58
NH104		0.196			0.195	1.53	31.03	11.7	0.67	0.50
NH105		0.196			0.206	1.57	19.77	9.9	0.65	0.52
NH106		0.196			0.227	1.49	18.72	14.9	0.53	0.58
NH107		0.294			0.277	1.53	43.66	13.9	0.73	0.47
NH108		0.294			0.262	1.47	36.03	14.9	0.77	0.45
MM101	MM1 (Ma13)	0.196	0.294	0.05	0.216	1.72	16.86	14.8	0.82	0.55
MM102		0.245			0.237	1.73	21.18	15.0	0.98	0.48
MM103		0.294			0.312	1.69	29.76	14.9	0.80	0.53
MM201	MM2 (Ma13)	0.196	0.294	0.05	0.274	1.76	15.98	15.0	0.51	0.70
MM202		0.245			0.302	1.78	14.78	14.9	0.59	0.62
MM203		0.294			0.337	1.73	19.86	14.9	0.67	0.57

表-4.4 応力比一定圧密試験試験条件

試験番号	試験試料	応力比	背圧 (kPa)	軸ひずみ速度 (%/min)
CNH101	NH1 大阪市 城東区 中浜	0.0	294.3	0.020
CNH102		0.3		
CNH103		0.6		
CNH104		0.9		
CNH105		1.2		

表-4.5 平均主応力一定試験試験条件

試験番号	試験試料	応力比	平均有効主応力 (kPa)	背圧 (kPa)	軸ひずみ速度 (%/min)
PMM101	MM2 大阪市 浪速区 湊町	0.0	39.2	294.3	0.020
PMM102		0.0	78.5		
PMM103		0.0	157.0		
PMM104		0.0	313.9		
PMM201		0.3	78.5		
PMM202		0.6	78.5		

増加率，変形係数および破壊時の間隙水圧係数の3項目について，圧密降伏応力で正規化した有効圧密圧力との関係について述べる。そして，ミニ三軸試験の土質試験法としての適用性について検討するために，大阪湾泉州沖で採取された不攪乱沖積ならびに洪積粘土に対して土田らが行った三軸CU試験結果<sup>29)</sup>とミニ三軸試験により得られたこれらの結果を比較する。

・強度増加率

図-4.20 (a), (b) および(c) は，それぞれ Ma13, Ma12 および Ma12 以外の洪積粘土の強度増加率と圧密降伏応力で正規化した有効圧密圧力の関係である。圧密降伏応力で正規化した有効圧密圧力は過圧密比の逆数であり，1.0 未満の場合は過圧密状態，1.0 以上の場合は正規圧密状態を示す。強度増加率は，過圧密領域では正規化した有効圧密圧力の増加とともに一様に減少し，正規圧密状態では一定ないしわずかに減少する傾向を示す。この傾向は Ma13, Ma12 および Ma12 以外の洪積粘土に関わらずみられ，正規圧密状態における強度増加率はほぼ0.4前後の値を示す。つまり，正規圧密状態では沖積粘土と洪積粘土の差は明確ではないことがわかる。以上の傾向は同地域で採取された洪積粘土について行われた土田らの三軸CU試験結果<sup>29)</sup>によっても報告されており，ミニ三軸試験の結果と同じである。

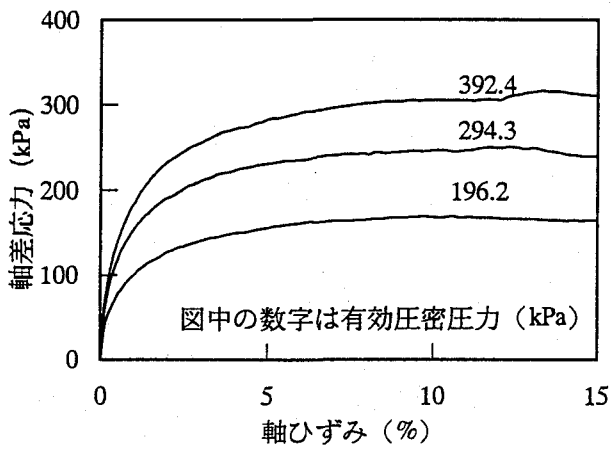
・変形係数

図-4.21 (a), (b) および(c) は同じく Ma13, Ma12 および Ma12 以外の洪積粘土の変形係数と圧密降伏応力で正規化した有効圧密圧力の関係である。Ma12では，正規化した有効圧密圧力の増加にしたがって，変形係数は一様に増加する傾向を示している。また，正規圧密状態における Ma13と Ma12の変形係数を比較すると，明らかに Ma12の変形係数の方が大きい。これは，

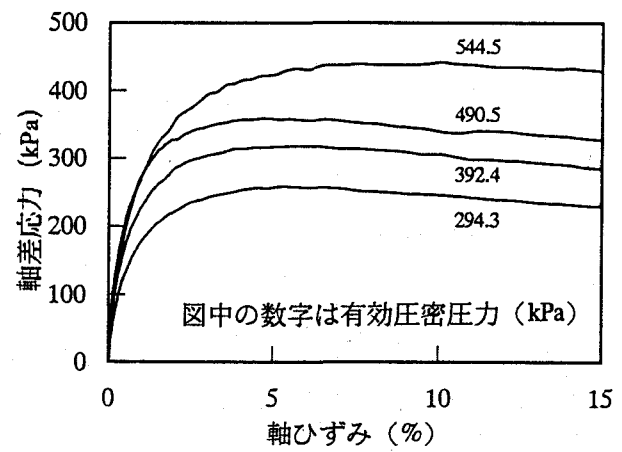
表-4.6 非排水クリーブ試験試験条件

試験番号	試料番号 (地層区分)	有効圧密圧力 (MPa)	初期軸差応力 (MPa)	応力比	破壊時間 (min)	最小ひずみ速度 (1/min)
CPT101	PT1 (Ma12)	0.687	0.642	0.93	15.0	$1.22 \times 10^{-2}$
CPT102		0.683	0.607	0.90	14.3	$1.44 \times 10^{-2}$
CPT103		0.689	0.567	0.82	76.0	$2.22 \times 10^{-3}$
CPT104		0.685	0.534	0.78	196.0	$8.80 \times 10^{-4}$
CPT105		0.688	0.568	0.83	133.8	$1.09 \times 10^{-3}$
CPT106		0.665	0.560	0.84	48.3	$1.55 \times 10^{-3}$
CPT111		1.175	0.951	0.81	49.5	$2.54 \times 10^{-3}$
CPT112		1.169	0.981	0.84	40.7	$4.73 \times 10^{-3}$
CPT113		1.175	1.090	0.93	6.8	$2.20 \times 10^{-2}$
CPT114		1.171	0.965	0.82	37.6	$4.75 \times 10^{-3}$
CPT115		1.162	0.854	0.74	239.1	$5.85 \times 10^{-4}$
CPT116		1.178	0.917	0.78	180.5	$5.94 \times 10^{-4}$
CPT121		1.559	1.332	0.86	23.5	$7.11 \times 10^{-3}$
CPT122		1.476	1.256	0.85	27.8	$4.42 \times 10^{-3}$
CPT123		1.470	1.218	0.83	92.5	$1.65 \times 10^{-3}$
CPT124		1.490	1.166	0.78	225.5	$5.61 \times 10^{-4}$
CPT125		1.519	1.233	0.81	60.0	$2.26 \times 10^{-3}$
CPT126		1.523	1.208	0.79	149.5	$8.98 \times 10^{-4}$
CPT201	PT2 (Ma12)	0.682	0.616	0.90	234.0	$4.66 \times 10^{-4}$
CTB101	TB1 (Ma12)	0.778	0.713	0.92	31.8	$3.05 \times 10^{-3}$
CPT301	PT3 (Ma11(2))	0.660	0.498	0.76	227.0	$1.17 \times 10^{-4}$
CTB201	TB2 (Ma11(2))	0.728	0.596	0.82	154.5	$8.07 \times 10^{-4}$
CPT401	PT4 (Ma11(1))	0.749	0.741	0.99	5.8	$2.66 \times 10^{-2}$
CPT402		0.651	0.597	0.92	112.2	$3.39 \times 10^{-4}$
CPT501	PT5 (Ma10)	0.951	0.710	0.75	86.5	$1.20 \times 10^{-3}$
CPT502		0.977	0.715	0.73	78.1	$1.01 \times 10^{-3}$
CPT601	PT6 (Doc4)	0.969	0.757	0.78	98.6	$1.24 \times 10^{-3}$
CPT602		0.975	0.805	0.83	10.2	$1.19 \times 10^{-2}$
CPT701	PT7 (Ma9)	0.987	0.793	0.80	103.8	$1.74 \times 10^{-3}$
CPT702		0.977	0.854	0.88	12.3	$8.61 \times 10^{-3}$
CPT801	PT8 (Doc5)	1.487	0.974	0.66	256.0	$1.52 \times 10^{-4}$
CPT802		1.448	1.036	0.72	23.9	$2.86 \times 10^{-3}$
CPT803		1.468	1.000	0.68	58.7	$1.07 \times 10^{-3}$
CPT901	PT9 (Ma8)	1.489	1.138	0.76	220.5	$3.51 \times 10^{-4}$
CPT902		1.485	1.224	0.82	48.4	$1.43 \times 10^{-3}$
CPT903		1.475	1.316	0.89	10.3	$1.69 \times 10^{-2}$
CPT1001	PT10 (Ma7)	1.524	1.132	0.74	140.3	$5.32 \times 10^{-4}$
CPT1002		1.534	1.323	0.84	1.7	$5.05 \times 10^{-2}$
CPT1003		1.561	1.243	0.80	20.1	$4.89 \times 10^{-3}$

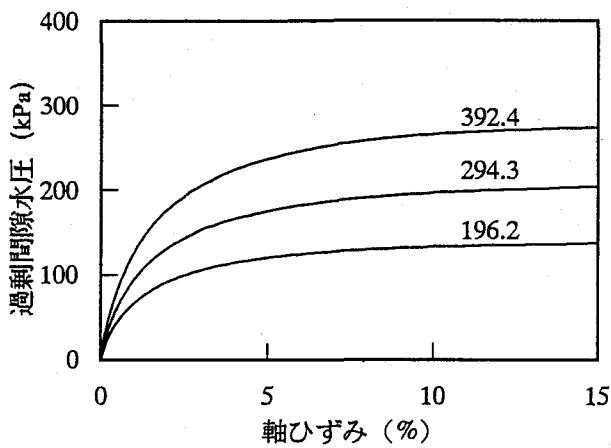




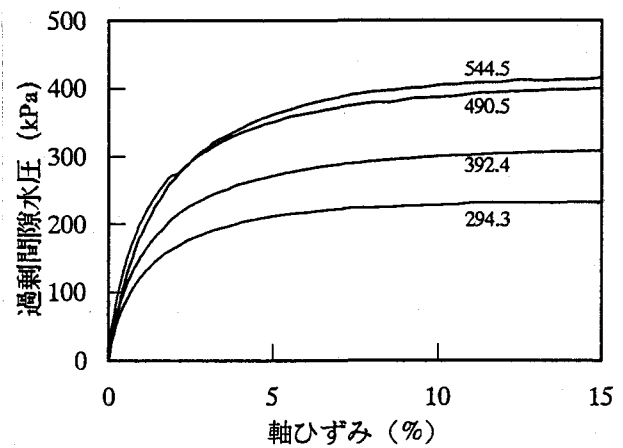
(a) 軸差応力-軸ひずみ関係



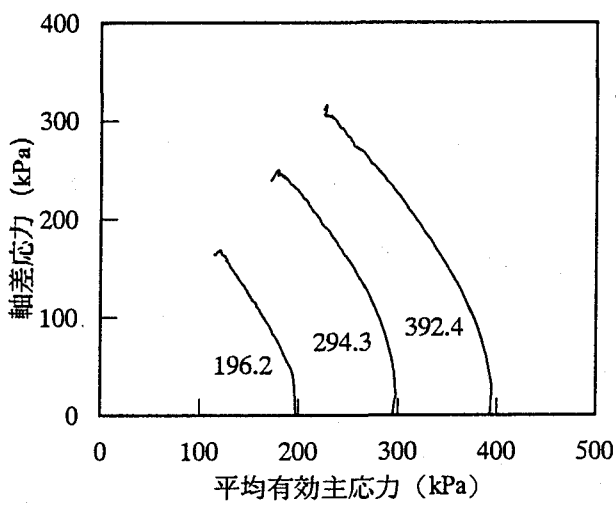
(a) 軸差応力-軸ひずみ関係



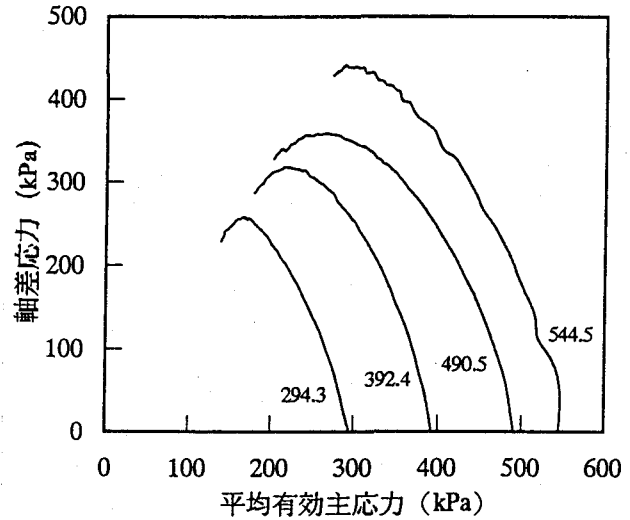
(b) 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係



(b) 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係



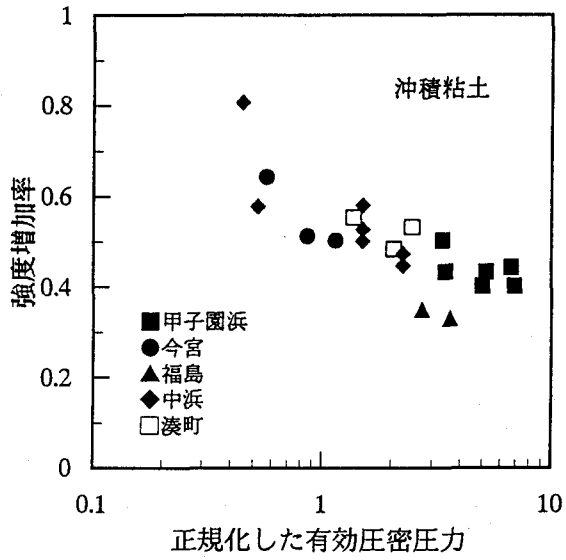
(c) 有効応力経路図



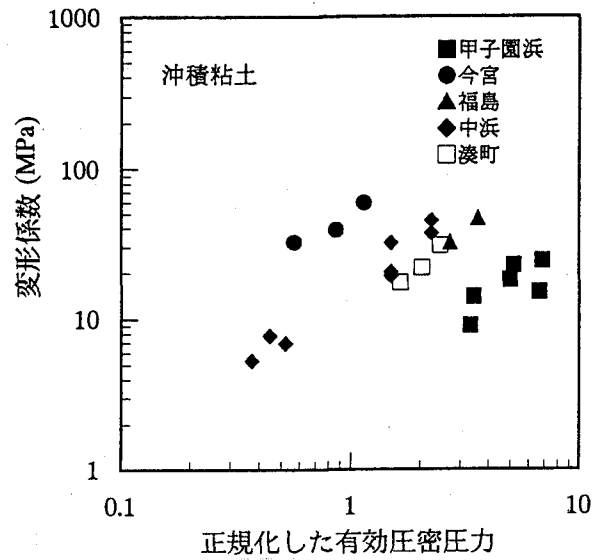
(c) 有効応力経路図

図-4.18 沖積粘土 (Ma13) の三軸 $\overline{CU}$ 試験結果

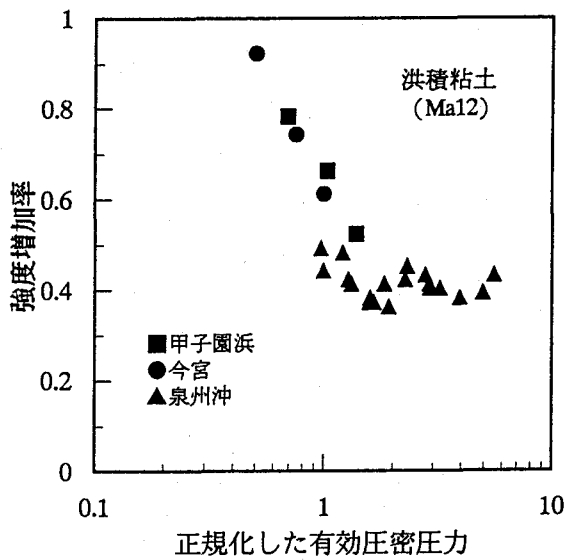
図-4.19 洪積粘土 (Ma12) の三軸 $\overline{CU}$ 試験結果



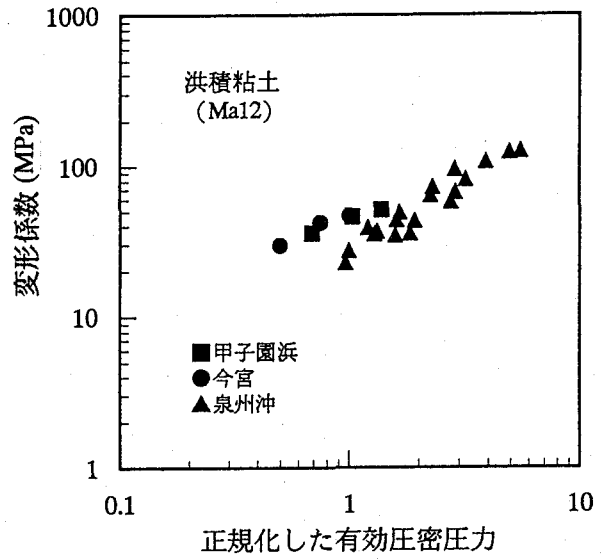
(a) 沖積粘土 (Ma13)



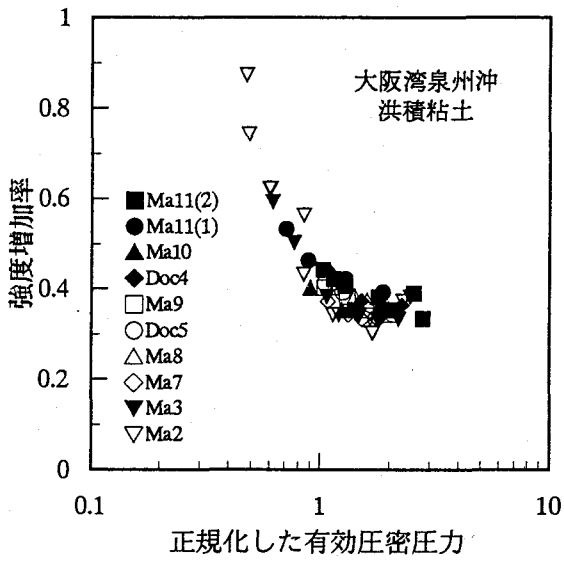
(a) 沖積粘土 (Ma13)



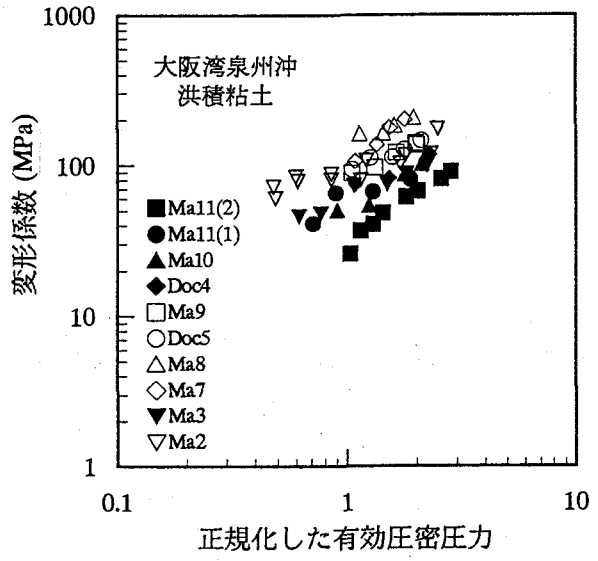
(b) 洪積粘土 (Ma12)



(b) 洪積粘土 (Ma12)



(c) 洪積粘土 (Ma12以外の洪積粘土)



(c) 洪積粘土 (Ma12以外の洪積粘土)

図-4.20 強度増加率-正規化した有効圧密圧力関係

図-4.21 変形係数-正規化した有効圧密圧力関係

Ma13とMa12の圧密履歴の違い、いわゆる年代効果の影響により、構造骨格が発達しているためである。このことから、年代効果の影響は強度増加率よりも変形係数のような変形特性に影響することが言える。同様の結果が前述の論文<sup>2)</sup>で報告されている。

・破壊時間隙水圧係数

図-4.22 (a), (b) および(c) は, Ma13, Ma12 およびMa12 以外の洪積粘土の破壊時間隙水圧係数と圧密降伏応力で正規化した有効圧密圧力の関係である。破壊時間隙水圧係数 $A_f$ は次式で表される。

$$A_f = \frac{\Delta u_f}{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (4.1)$$

ここに、 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  : 最大軸差応力 (kPa),  $\Delta u_f$  : 最大軸差応力時の過剰間隙水圧 (kPa) である。一般に破壊時の間隙水圧係数は過圧密比の増加とともに減少と言われているが、Ma13とMa12ともこの結果と同様の傾向がみられる。また正規圧密状態の間隙水圧係数の値は沖積粘土で0.8前後、洪積粘土で0.8~1.0の範囲であり、洪積粘土の方が沖積粘土よりも若

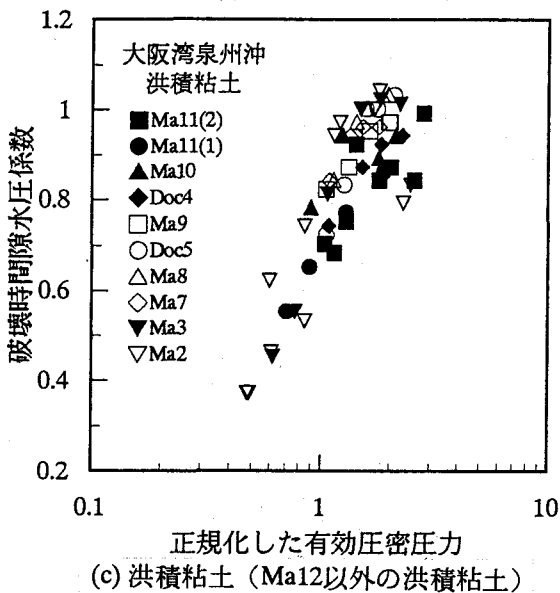
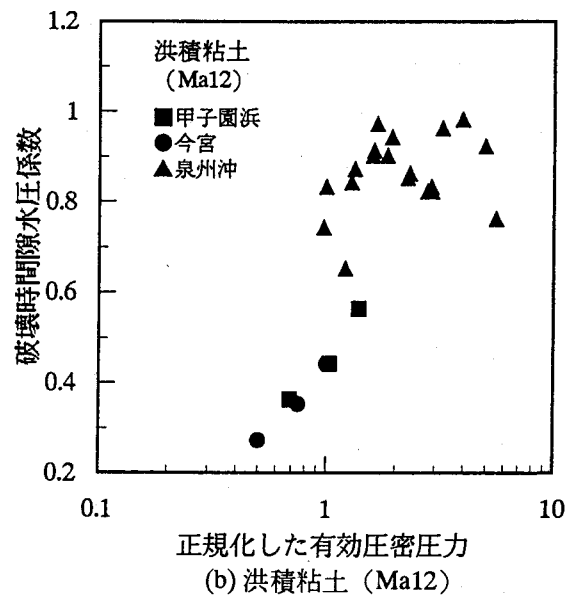
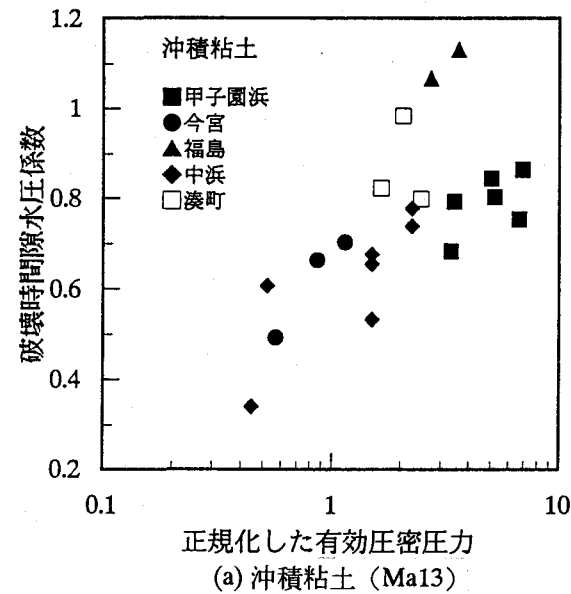


図-4.22 破壊時間隙水圧係数—  
正規化した有効圧密圧力

干大きな値を示す。この結果も前述の論文<sup>20)</sup>で報告されている結果と同じである。

以上のように、強度増加率、変形係数および破壊時の過剰間隙水圧係数の3項目について、ミニ三軸試験結果と既往の三軸試験結果を比較した。その結果、ミニ三軸試験は既往の三軸試験結果と同様の結果を示し、強度定数を求める土質試験としての適用性が確認された。すべてのミニ三軸試験結果から決定した強度定数を表-4.3に示す。

#### 4.4.2 降伏曲面およびダイレイタンスー特性

パソコン制御ミニ三軸試験では、任意の応力経路に沿った圧密試験やせん断試験が可能である。本節では、パソコン制御ミニ三軸圧縮試験機を用いて自然堆積粘土の降伏曲面を決定し、その降伏曲面の妥当性について検討する。また、排水せん断試験や平均主応力一定試験から求めた自然堆積粘土のダイレイタンスー特性について調べ、代表的な弾塑性構成式のストレス-ダイレイタンスー式と比較する。そして、これらの結果を通してパソコン制御ミニ三軸試験の適用性について検討する。

##### (1)自然堆積粘土の降伏曲面

大阪市城東区で採取された沖積粘土を用いて、等方圧密および応力比一定圧密試験を行い、自然堆積粘土の降伏曲面の決定を試みた。試料の物理特性と圧密降伏応力はそれぞれ表-4.1 および4.2 に示した通りである。また、事前に行った三軸CU試験の結果から、有効内部摩擦角 $\phi=37.3^\circ$ が得られている。降伏曲面は、図-4.23 に示すように、応力比一定圧密試験と平均有効主応力一定試験を行い、両試験の結果から降伏点を求めて決定した。応力比一定圧密試験および平均有効主応力一定試験における軸ひずみ速度および背圧の値は、それぞれ0.025%/min および98.1kPaである。

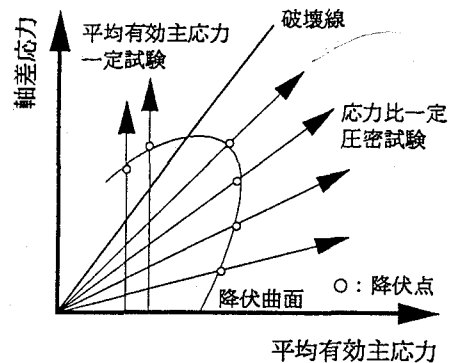


図-4.23 降伏曲面の決定方法

図-4.24は応力比一定圧密試験における体積ひずみ-軸応力関係を示している。応力比が大きくなるほど、降伏挙動が明らかになっている。降伏応力の決定方法はカサグランデの方法を用いて行った。図-4.25は応力比一定圧密試験の応力比と降伏時における体積ひずみと軸ひずみの増分の比である。Ko圧密状態では体積ひずみと軸ひずみの増分が同じであることから、Ko圧密時の応力比は1.2である。

また、三軸試験ではKo圧密時の静止土圧係数 (Ko値) は式(4.2) で表される。

$$K_o = \frac{3 - \eta_{K_o}}{3 + 2\eta_{K_o}} \quad (4.2)$$

ここに、Koは静止土圧係数、 $\eta_{K_o}$ はKo圧密時の応力比である。したがって、この自然堆積粘土のKo値は1/3 (0.333)になる。また、粘土のKo値は内部摩擦角と式(4.3)<sup>30)</sup>あるいは(4.4)<sup>30)</sup>によ

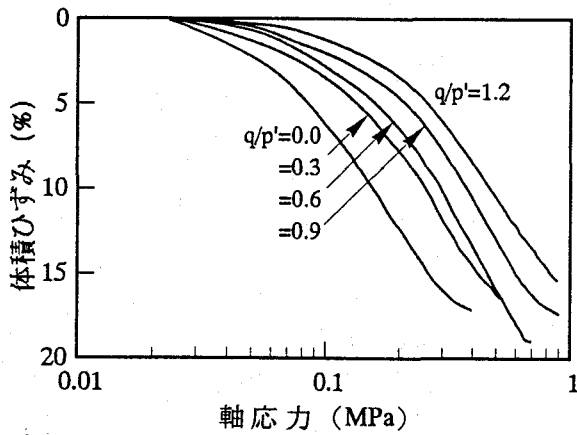


図-4.24 体積ひずみ－軸応力関係

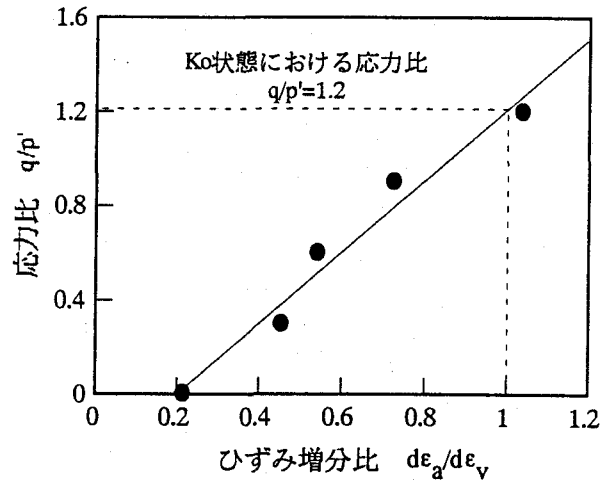


図-4.25 ひずみ増分比－応力比関係

って表されることが知られている。

$$K_o = 0.95 - \sin \phi \quad (4.3)$$

$$K_o = \frac{\sqrt{2} - \frac{2}{\pi} \tan \phi' - 0.1}{\sqrt{2} - \frac{4}{\pi} \tan \phi' + 0.2} \quad (4.4)$$

ここに、 $\phi'$  は内部摩擦角である。式(4.3) および(4.4) に内部摩擦角 $\phi'=37.3^\circ$  を代入すると、それぞれ0.344 と0.321 になり、試験結果から求めた $K_o$ 値 0.333とほぼ一致することがわかる。また、図-4.26は有効応力平面における降伏曲面の形状を示している。図中には、Matsui & Abe<sup>39)</sup> によって提案された弾塑性構成式の降伏曲面もあわせて示している。Matsui & Abe によって提案された弾塑性構成式の降伏曲面は式(4.5) および(4.6) によって表される。

(主働側 :  $\eta \geq \eta_{K_o}$  )

$$f_a = p' \left\{ \frac{M_a + (\alpha_a - 1)\eta}{M_a + (\alpha_a - 1)\eta_{K_o}} \right\} \left( \frac{\alpha_a}{\alpha_a - 1} \right) \quad (4.5)$$

(受働側 :  $\eta < \eta_{K_o}$  )

$$f_p = p' \left\{ \frac{M_p + (1 - \alpha_p)\eta}{M_p + (1 - \alpha_p)\eta_{K_o}} \right\} \left( \frac{\alpha_p}{\alpha_p - 1} \right) \quad (4.6)$$

ここに、 $M_a$  および  $M_p$  はそれぞれ主働側および受働側の破壊応力比、 $\eta$  は応力比、 $\alpha_a$  および  $\alpha_p$  はMatsui & Abe の構成式に含まれる固有のパラメータである。この構成式の降伏曲面と実験値を比較すると、非常によく一致していることがわかる。

結論として、応力比一定圧密試験や平均主応力一定試験結果から求めた静止土圧係数 ( $K_o$  値) および降伏曲面の形状から、小さい供試体を用いるミニ三軸試験でも、従来と同じ結果が得られることが示され、その適用性が示された。

(2)自然堆積粘土のダイレイタンスー

特性

パソコン制御ミニ三軸試験は様々な応力経路に沿ったせん断試験が可能である。そこで、パソコン制御ミニ三軸試験を用いて平均主応力一定試験を行い、自然堆積粘土のダイレイタンスー特性と既往の研究で提案されているストレス-ダイレイタンスー関係の比較を通して、パソコン制御ミニ三軸試験の適用性を検討する。

まず、パソコン制御ミニ三軸試験において、平均有効主応力一定試験が達成されているか否かを確認する。試験

条件は表-4.5に示した通りである。図-4.27は等方圧密した後、平均有効主応力一定試験を行ったケースの有効応力経路を示す。各試験ケースの有効応力経路から、平均主応力一定試験がほぼ正確に実行されていることがわかる。次に、図-4.28は同じ平均有効主応力一定試験における軸差応力-軸ひずみ関係、体積ひずみ-軸ひずみ関係である。平均有効主応力の増加に伴って最大軸差応力は増加するが、体積ひずみの最大値は、正規圧密状態において平均有効主応力の大きさによらず、ほぼ同一の値を示すことがわかる。また、図-4.29は、異方圧密した後平均有効主応力一定試験を行った結果である。初期弾性係数は応力比一定圧密試験時の応力比の影響がみられるが、最大軸差応力はほぼ同一の値を示す。また、体積ひずみ-軸ひずみ関係における体積ひずみの最大値は、異方圧密時の応力比が小さくなるほど減少する。そして、図-4.30 および 4.31 は、これらの平均有効主応力一定試験におけるストレス-ダイレイタンスー関係である。dv と dy はそれぞれ体積ひずみ増分はせん断ひずみ増分であり、せん断ひずみは式(4.7)で示される。

$$\gamma = \frac{2}{3}(\epsilon_a - \epsilon_r) = \epsilon_a - \frac{v}{3} \quad (4.7)$$

また、図中の破線と一点鎖線はそれぞれ Original Cam clay モデル<sup>30)</sup>と Modified Cam clay モデル<sup>31)</sup>のストレス-ダイレイタンスー関係である。両構成式のストレス-ダイレイタンスー関係に含まれる塑性体積ひずみ増分  $d\epsilon_v^p$ 、塑性せん断ひずみ増分  $d\epsilon_s^p$  はそれぞれ dv と dy で置き換え、式(4.8)と(4.9)で表した。

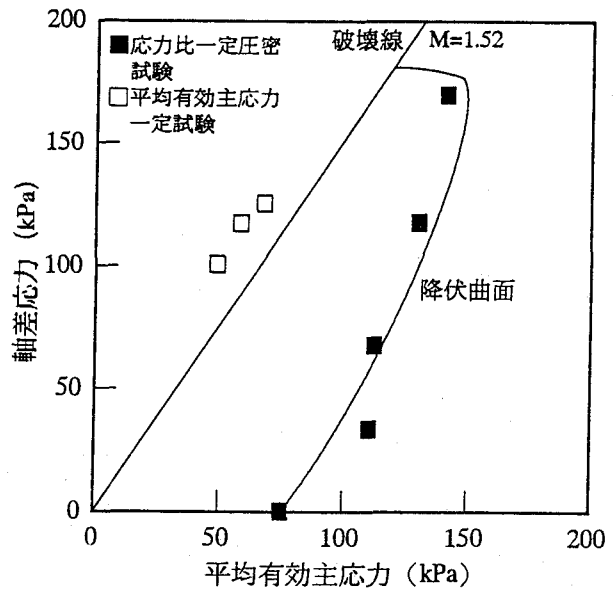


図-4.26 沖積粘土の降伏曲面

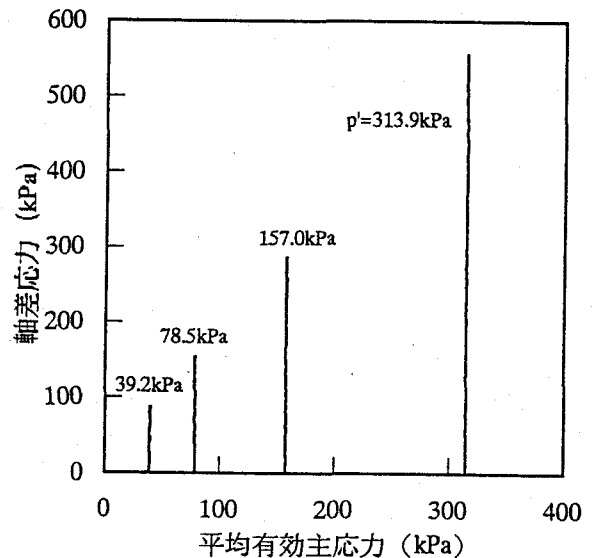
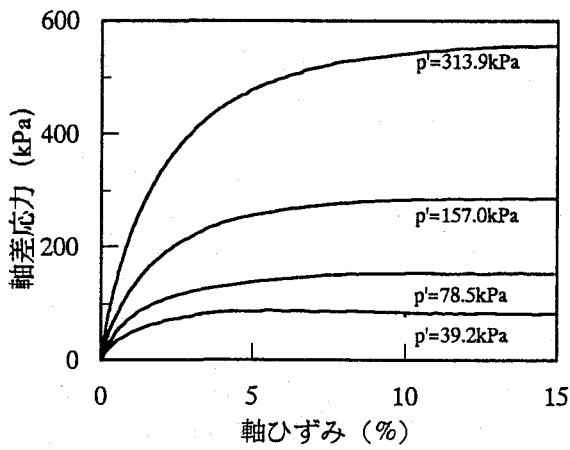
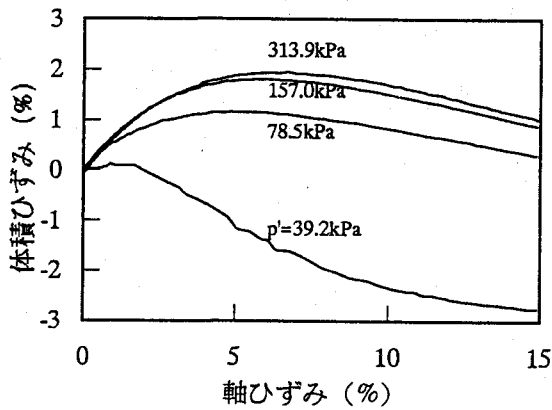


図-4.27 平均有効主応力一定試験の有効応力経路

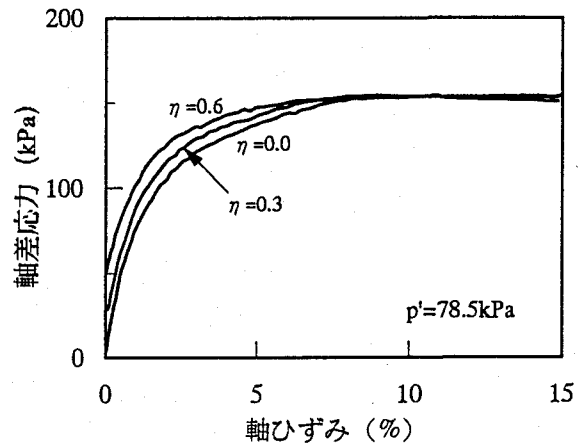


(a) 軸差応力-軸ひずみ関係

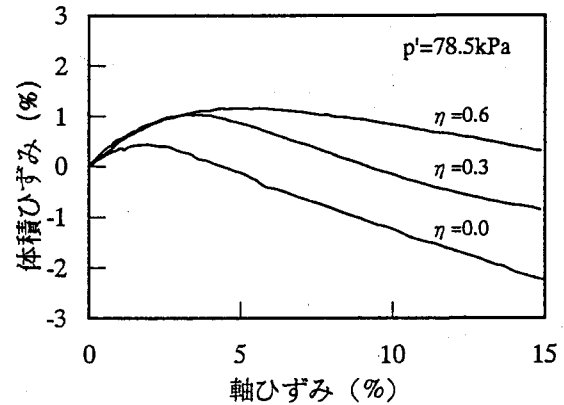


(b) 体積ひずみ-軸ひずみ関係

図-4.28 平均主応力一定試験結果 (等方圧密)



(a) 軸差応力-軸ひずみ関係



(b) 体積ひずみ-軸ひずみ関係

図-4.29 平均主応力一定試験結果 (異方圧密)

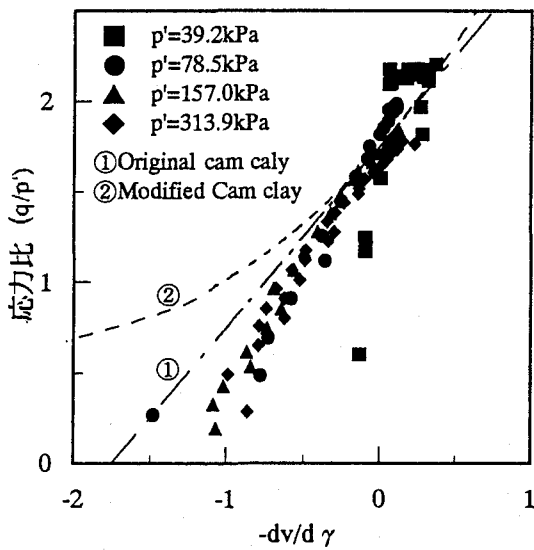


図-4.30 ストレス-ダイレイタンス挙動 (等方圧密)

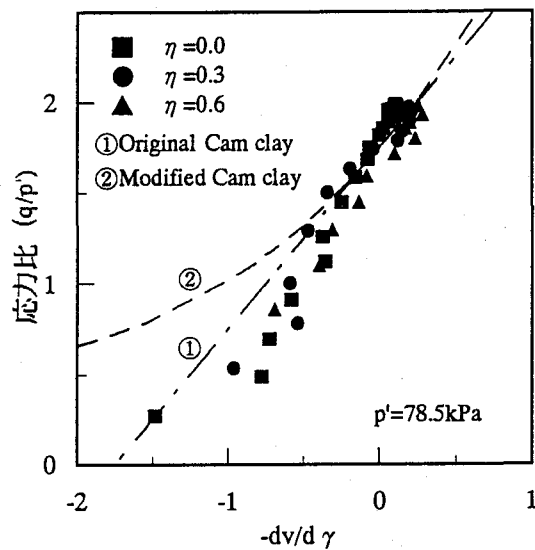


図-4.31 ストレス-ダイレイタンス挙動 (異方圧密)

(Original Cam clay モデル)

$$\frac{q}{p'} = M - \frac{dv}{d\gamma} \quad (4.8)$$

(Modified Cam clay モデル)

$$\frac{q}{p'} = \sqrt{\left(\frac{dv}{d\gamma}\right)^2 + M^2} - \frac{dv}{d\gamma} \quad (4.9)$$

両図からわかるように正規圧密自然堆積粘土のストレス-ダイレイタンスー関係はほぼ直線関係を示し、Original Cam clay モデルによく似た関係を示す。従って、正規圧密自然堆積粘土のダイレイタンスー特性はOriginal Cam clay モデルで比較的良好に表現され得ると言える。また、Modified Cam clay モデルも破壊応力比付近ではOriginal Cam clay モデルとほぼ同様のストレス-ダイレイタンスー関係を示し、両モデルの差は明確ではない。一方、自然堆積粘土のダイレイタンスー挙動も破壊状態に近づくほど平均有効主応力の大きさによらず唯一的な挙動を示す。同様のことが異方圧密平均有効主応力一定試験結果にも観察できる。異方圧密履歴の影響はせん断初期において見られるが、破壊状態に近づくに従ってOriginal cam clay モデルやModified cam clay モデルのストレス-ダイレイタンスー関係と一致する。

以上のように、パソコン制御ミニ三軸試験機を用いた平均有効主応力一定試験から得られた自然堆積粘土のダイレイタンスー特性は、既存の弾塑性構成式におけるストレス-ダイレイタンスー関係とよく一致したことから、パソコン制御ミニ三軸試験の自然堆積粘土への適用性が確認された。

#### 4.4.3 非排水クリープ特性

粘土の時間依存的な変形で最も大きな問題は圧密現象による変形であるが、その他に構造骨格のレオロジー的な性質に起因する時間依存的な変形挙動がある。この時間依存的な変形挙動には、二次圧密などがあげられ、粘土地盤の変形挙動を精度よく予測するために、このような挙動についても十分に調べる必要がある。非排水クリープ試験は粘土の時間依存性挙動を調べる代表的な試験である。ここでは、大阪湾泉州沖の洪積粘土について行った非排水三軸クリープ試験結果について述べるとともに、既往の大阪湾沖積粘土の非排水クリープ試験結果と比較し、ミニ三軸試験の適用性を検討する。非排水三軸クリープ試験では、圧密降伏応力の大きい洪積粘土を正規圧密するために、中圧ミニ三軸試験機を主に使用した。等方圧密過程終了後、表-4.6に示した試験条件にもとづいて、定荷重載荷方式で非排水クリープ試験を行った。

まず、洪積粘土の非排水クリープ特性に及ぼす有効圧密圧力の影響を調べるために、0.69, 1.18 および1.47MPa の3種類の有効圧密圧力のもとで非排水クリープ試験を行った。いずれの有効圧密圧力も洪積粘土 (Ma12) の圧密降伏応力よりも高く、すべての非排水クリープ試験は正規圧密状態で行っている。図-4.32 および4.33 はそれぞれ洪積粘土 (Ma12) の軸ひずみ-時間関係および軸ひずみ速度-時間関係である。一般に、クリープ挙動は①載荷直後から



のひずみ速度の減少過程（遷移クリープ）、②ひずみ速度がほぼ一定でひずみが増加する過程（定常クリープ）、③ひずみ速度が増加し破壊に至る過程（加速クリープ）の3つに分類できる。図からわかるように、有効圧密圧力に関わらず同様の挙動が見られ、正規圧密粘土の非排水クリープ挙動は有効圧密圧力に依存しないことがわかる。また、図-4.34は洪積粘土（Ma12）の軸差応力－破壊時間関係である。軸差応力は有効圧密圧力で正規化した値で示している。一般に、粘性土の非排水強度は急速載荷された場合には大きく、緩速載荷すると小さくなる。このため、軸差応力は破壊時間の増加に対して減少する傾向を示し、有効圧密圧力の大きさにかかわらずほぼ同様の挙動を示している。また、これらの直線の傾きは大阪湾沖積粘土に対して求められた結果<sup>21)</sup>と概ね等しい値を示している。また、図-4.35は洪積粘土（Ma12）の最小ひずみ速度－破壊時間関係である。一般に、最小ひずみ速度と破壊時間は両対数グラフ上で直線関係<sup>23)26)</sup>を示すとされている。今回のミニ三軸試験結果でも、比較的よい直線関係が見られ、有効圧密応力の大きさに関わらず同様の傾向を示している。この様に、正規圧密された洪積粘土（Ma12）の非排水クリープ試験では、有効圧密圧力の大きさにかかわらずほぼ同様の結果が得られ、既往のクリープ試験結果と同じ傾向を示した。

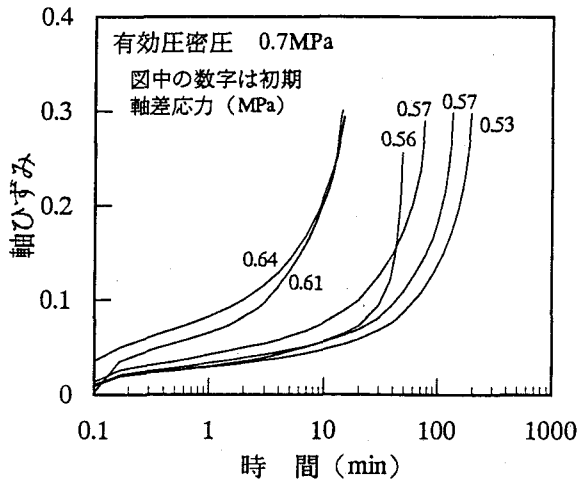
次に、Ma12以外の洪積粘土について行った非排水クリープ試験結果を示す。図-4.36および4.37は軸差応力－破壊時間関係および最小ひずみ速度－時間関係である。Ma12以外の洪積粘土でも、Ma12と同様の傾向を示し、図中に示したMa12のデータから求めた回帰直線と比較すると、Ma12以外の洪積粘土は回帰線よりも下方に位置し、同一の軸差応力や最小軸ひずみ速度に対してMa12よりも小さい破壊時間を示すことがわかる。

以上のことより、大阪湾泉州沖で採取された洪積粘土の非排水クリープ特性は、正規圧密状態であれば有効圧密圧力に依存しないことや破壊時間－最小ひずみ速度関係および破壊時間－初期軸差応力関係の一義的な関係が見られることが明らかになった。また、ミニ三軸試験による非排水クリープ試験結果と既往の非排水クリープ試験結果は比較的よく一致し、ミニ三軸試験による非排水クリープ試験の妥当性が示された。

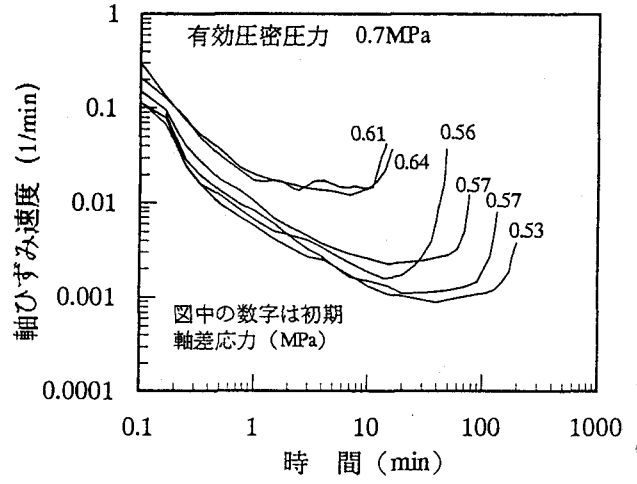
#### 4.5 まとめ

本章では、これまで行った種々のミニ三軸試験結果と既往の調査・研究結果との比較を通して、ミニ三軸試験の自然堆積粘土への適用性について検討した。本章の結論は以下のよう

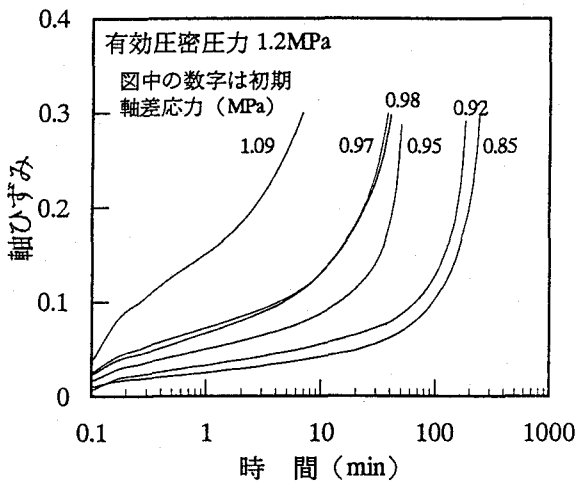
- 1) 大阪湾および大阪湾周辺で採取された不攪乱自然堆積粘土に対して行ったミニ三軸試験結果（強度増加率、変形係数、破壊時間隙水圧係数）と既往の三軸 $\overline{CU}$ 試験結果はほぼ一致し、ミニ三軸試験が土質試験として十分な適用性をもつことが示された。
- 2) パソコン制御ミニ三軸試験機を用いた不攪乱沖積粘土の応力比一定圧密試験結果から、沖積粘土の $K_0$ 値および降伏曲面を決定し、既往の $K_0$ 値に関する研究結果ならびに弾塑性構成式の降伏曲面と比較した。その結果、両者はよく一致し、ミニ三軸試験の適用性が確認された。



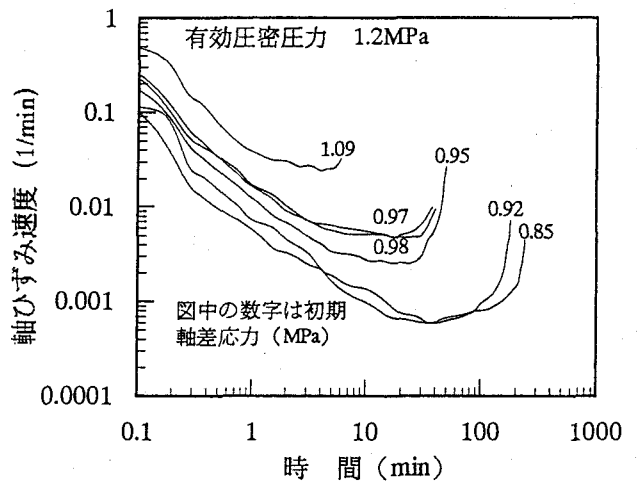
(a) 圧密圧力 0.7MPa



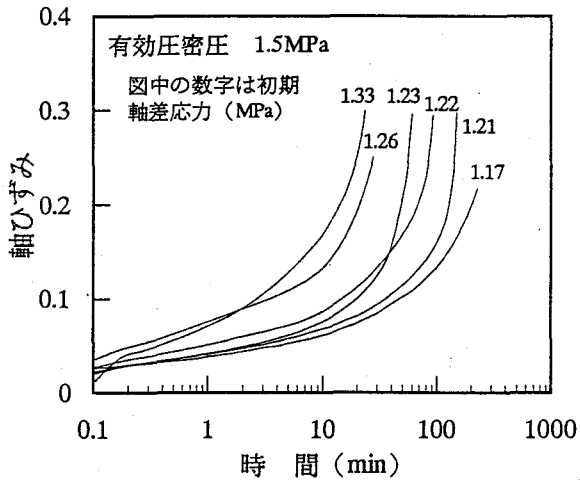
(a) 圧密圧力 0.7MPa



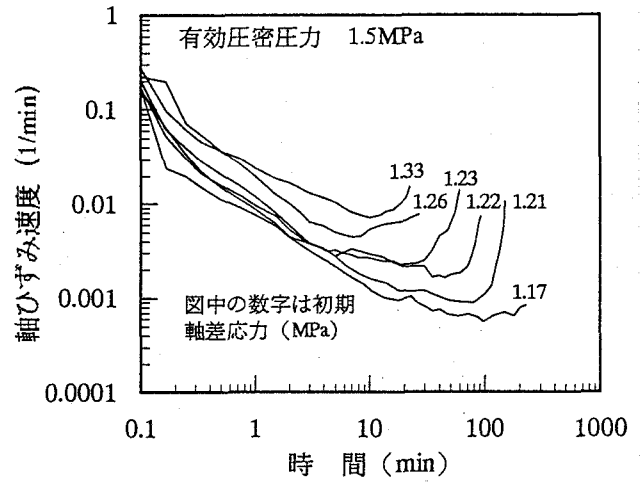
(b) 圧密圧力 1.2MPa



(b) 圧密圧力 1.2MPa



(c) 圧密圧力 1.5MPa



(c) 圧密圧力 1.5MPa

図-4.32 軸ひずみ-時間関係 (Ma12)

図-4.33 軸ひずみ速度-時間関係 (Ma12)

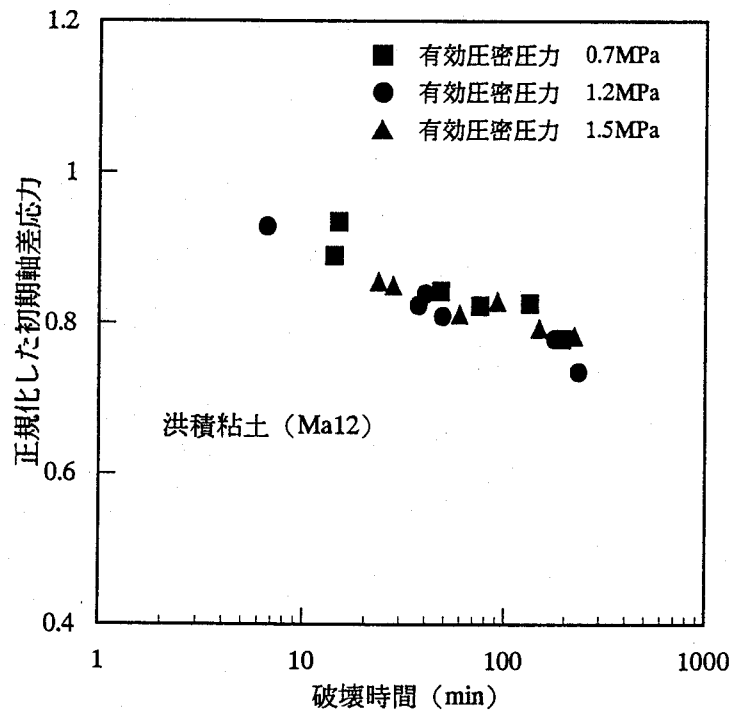


図-34 軸差応力-破壊時間関係 (Ma12)

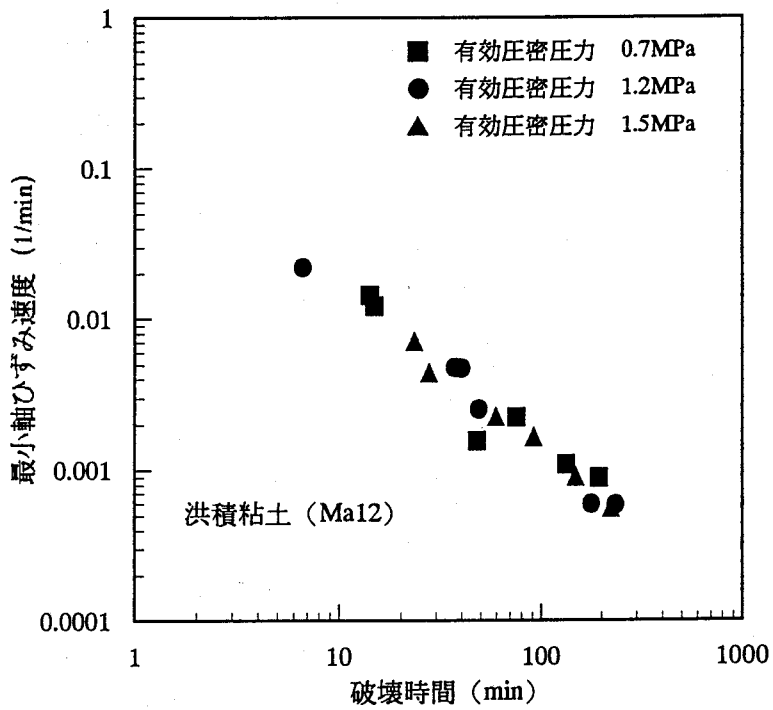


図-35 最小軸ひずみ速度-破壊時間関係 (Ma12)

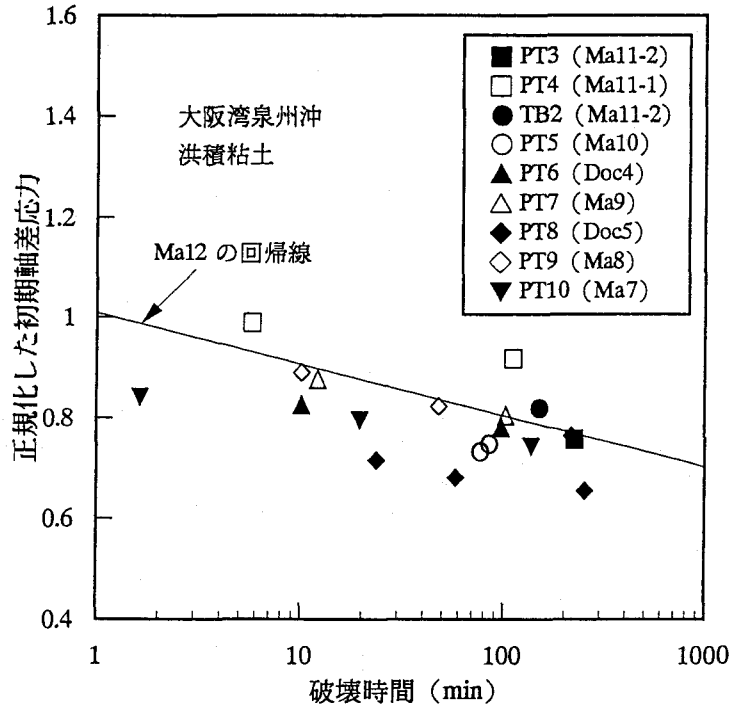


図-36 軸差応力-破壊時間関係 (Ma12以外の洪積粘土)

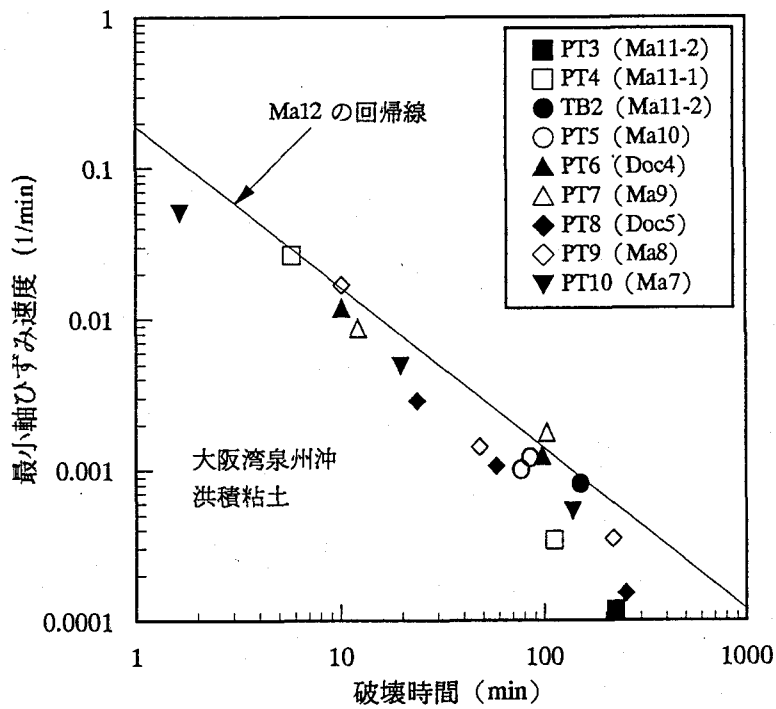


図-37 最小軸ひずみ速度-破壊時間関係 (Ma12以外の洪積粘土)

- 3) パソコン制御ミニ三軸試験機を用いた不攪乱沖積粘土の平均有効主応力一定試験結果と既往の弾塑性構成式におけるストレス-ダイレイタンスー関係を比較した。その結果、両者はよく一致し、ミニ三軸試験の適用性が確認された。
- 4) 中圧ミニ三軸試験機を用いた不攪乱洪積粘土の非排水クリープ試験結果と既往のクリープ試験結果はほぼ同様の傾向を示し、ミニ三軸試験の適用性が確認された。

#### 参考文献（第4章）

- 1) 日本建築学会近畿支部・土質工学会関西支部：大阪地盤図，コロナ社，1966.
- 2) 中世古幸次郎 他：関西国際空港地盤地質調査，災害科学研究所報告，災害科学研究所，1984.
- 3) 土質工学会関西支部・関西地質調査業協会：新編大阪地盤図，コロナ社，1987.
- 4) 土質工学会関西支部・大阪湾海底の地盤研究委員会：大阪湾海底地盤，土質学会関西支部，1990.
- 5) 土質工学会関西支部・関西の大深度地盤の地質構造とその特性の研究委員会・地下空間の活用と技術に関する研究協議会：関西地盤，土質工学会関西支部，1992.
- 6) 土質工学会関西支部・関西の大深度地盤の地質構造とその特性の研究委員会：関西地盤の地質構造と土質特性に関する最近の知見シンポジウム発表論文集，土質工学会関西支部，1992.
- 7) 土質工学会関西支部・大阪湾海底地盤情報の活用に関する研究委員会：海底地盤 大阪湾を例として，土質工学会関西支部，1995.
- 8) 菅野耕三，中世古幸次郎，山内守明：大阪西部で掘削されたボーリング”港-B”における生層序学的研究，大阪教育大学紀要，第Ⅲ部門，第35巻，第1号，pp.75～87，1986.
- 9) 上出定幸，坪田邦治，末廣匡基，古屋正和：日本の地盤-大阪府の地盤，地質と調査，第1号，土木春秋社，pp.67～74，1993.
- 10) 渡辺嘉道，水間収三，田中伸佳：神戸港の洪積層について，土と基礎，Vol.31，No.6，pp.45～49，1983.
- 11) 石井一郎，小川富美子，善功企：大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質（その2）物理特性，圧密特性および透水性，運輸省港湾技研資料，No.498，pp.49～86，1984.
- 12) 谷本喜一，末広匡基，田中泰雄：六甲アイランド洪積粘土（Ma-12層）の地質および土質工学的性質，応用地質，第28巻，第2号，pp.20～27，1987.
- 13) 中世古幸次郎，福代倫男，関塚良光，来馬章雄，木山正明，脇茂行，田村健一郎，野口秀喜，諏訪靖二：大阪湾海底地盤の地質と土質的性質について，海底地盤に関するシンポジウム論文集，pp.21～48，1987.
- 14) 諏訪靖二，山本浩司，木山正明，山本嘉一郎：大阪港海底粘土の物理的性質からみた地域性，第23回土質工学研究発表会講演集，pp.33～34，1988.
- 15) 谷本喜一，末広匡基，田中泰雄：神戸港における洪積粘土の堆積環境と物理特性，第23回土質工学研究発表会講演集，pp.203～204，1988.

- 16) 阪神高速道路公団神戸建設部・財団法人災害科学研究所：湾岸線建設予定地域の地盤特性に関する研究，1988.
- 17) 阪神高速道路公団大阪第一建設部：大阪湾沿岸域（大阪市港区～泉佐野市）における地質と土質の特性，1991.
- 18) 神田勝巳，白石修章，鈴木慎也，山本浩司，諏訪靖二：関西国際空港海域における沖積粘土層の地域性について，第29回土質工学研究発表会講演集，pp.63～64，1994.
- 19) 赤井浩一，佐野郁雄：大阪上部洪積層粘土の長期圧密特性，土と基礎，Vol.29，No.3，pp.43～47，1981.
- 20) 石井一郎，小林正樹，小川富美子：乱さない粘土の長期圧密試験，第19回土質工学研究発表会講演集，pp.235～236，1984.
- 21) 土田孝，菊地嘉昭，中島謙二郎，小林正樹：大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質（その3）静的せん断特性，運輸省港湾技研資料，No.498，pp.87～114，1984.
- 22) 谷本喜一，末広匡基，田中泰雄，田野雄紀夫，北橋将光：洪積粘土の圧密特性に関する一考察，第21回土質工学研究発表会講演集，pp.223～224，1986.
- 23) 谷本喜一，田中泰雄，末広匡基：大阪湾上部洪積粘土層（Ma12）の圧縮特性および強度特性，土木学会論文集，No.383，pp.189～196，1987.
- 24) 谷本喜一，田中泰雄，末広匡基，北橋将光，小西義広：大阪湾上部洪積粘土（Ma12）の排水圧密試験，第22回土質工学研究発表会講演集，pp.239～240，1987.
- 25) 土田孝，小林正樹，山川匠，平井聡：一軸圧縮強度のばらつきとその要因について，港湾技術研究所報告，第27巻，第1号，pp.93～124，1988.
- 26) 嘉門雅史，木山正明，福田 護，稲角 健：大阪湾上部洪積粘土層の沈下挙動とその二次圧密特性，第23回土質工学研究発表会講演集，pp.259～260，1988.
- 27) 諏訪靖二，山本浩司，木山正明，山本嘉一郎：大阪湾海底粘土の力学的性質からみた地域性，第23回土質工学研究発表会講演集，pp.35～36，1988.
- 28) 土田孝，水上純一，及川研，森好生：一軸圧縮試験と三軸試験を併用した新しい粘性土地盤の強度決定法，港湾技術研究所報告，第28巻，第3号，pp.81～145，1989.
- 29) 諏訪靖二，山本浩司：大阪湾海底の沖積粘土層と洪積粘土層（Ma12）の工学的性質について，第24回土質工学研究発表会講演集，pp.129～130，1989.
- 30) 大阪湾海底の地盤研究委員会：第4章 大阪湾海底地盤の土質工学的性質，大阪湾海底地盤，土質工学会関西支部，pp.79～171，1990.
- 31) Brooker, E. W. and Ireland, H. O. : Earth pressure at rest related to stress history, Canadian Geotechnical Journal, Vol.2, No.1, pp.1～5, 1965.
- 32) 山内豊聰，安原一哉：粘性土の静止土圧に関する一考察，土と基礎，Vol.11，No.2，pp.113～118，1974.
- 33) Matsui, T. and Abe, N. : Multi-dimensional elasto-plastic consolidation analysis by finite element method, Soils and Foundations, Vol.21, No.1, pp.79～95, 1986.
- 34) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, A. : Yielding of clays in states wetter than critical, Geotechnique, Vol.13, No.3, pp.211～240, 1963.

- 35) Roscoe, K. H. and Burland, J. B. : On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay, Engineering Plasticity, ed. J. Heyman and F. A. Leckie, Cambridge University Press, pp.535~609, 1968.
- 36) Vaid, Y. P. and Campanella, R. G. : Time-dependent behavior of undisturbed clay, ASCE, Vol. 103, GT 7, pp.693~709, 1977.

## 第5章 ひずみ経路制御ミニ三軸試験の自然堆積粘土への適用

### 5.1 概 説

ひずみ経路制御試験は、供試体内部の応力やひずみの分布状態を均一に保ち、大きなひずみ領域までせん断することを目的として、Chu & Lo<sup>1)</sup>によって開発された試験方法である。ひずみ経路制御とは、体積ひずみと軸ひずみの増分比であるひずみ増分比が一定となるように、体積変化（排水量）や変位を制御することである。このため、従来の排水と非排水に限らない任意のひずみ経路に沿ったせん断試験が可能である。排水および非排水試験とひずみ経路制御試験の違いを図-5.1に示す。排水試験では、供試体からの排水が自由であるため、供試体端部では過剰間隙水圧は発生しないが、排水面から遠くなるほど過剰間隙水圧が発生するため、供試体内部は不均一になる。逆に、非排水試験は、供試体からの排水をさせないために、せん断面に沿って過剰間隙水圧の分布が発生し、供試体内部がやはり不均一になる。これらの試験に対して、ひずみ経路制御試験は、過剰間隙水圧が均一になるような速度で体積変化を制御しながら圧縮を行うため、供試体内部は均一に近い状態でせん断される。したがって、ひずみ経路制御試験では、せん断面の発生なしに大きなひずみ領域までせん断することが可能である。

ひずみ経路制御試験は、これまで砂質土に対して適用されているが、粘性土に対してはまだまだ適用されていない。これは、砂質土に比べて粘性土の透水性が非常に低いため、供試体内部の間隙水圧分布を均一に維持するには非常に遅い速度で体積変化を制御する必要があるためである。したがって、供試体が大きくなるほど、供試体内部の間隙水圧を均一にするためには、体積変化制御速度や軸圧縮速度を遅くする必要がある。しかし、ミニ三軸試験では、通常の三軸試験よりも小さい寸法の供試体を使用しているために、排水距離が短く、圧密に要する時間を短縮できるという利点を持っている<sup>2)</sup>。つまり、ミニ三軸試験は従来の三軸試験よりも供試体内部の間隙水圧を制御しやすいことを示している。この特

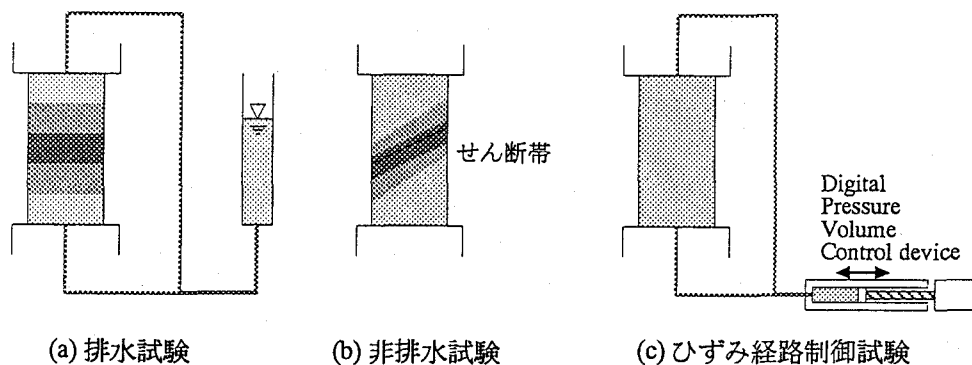


図-5.1 従来の三軸試験とひずみ経路制御試験の相違点



徴を利用して、ミニ三軸試験機を用いてひずみ経路制御試験を実施した。本章では、練返し粘土および自然堆積粘土にひずみ経路制御ミニ三軸試験を適用した結果を示し、粘土のひずみ経路依存性挙動について調べる。

## 5.2 ひずみ経路制御試験における砂質土の力学挙動

ひずみ経路制御試験における体積変化量の制御方法にはいくつかの方法がある。主なものにDPVC (Digital Pressure-Volume Control device) を用いる方法<sup>13)</sup>, 内セルを用いる方法<sup>4)</sup>および背圧を制御する方法<sup>9)</sup>の3種類がある。本研究で採用したDVPCを用いる方法は, Chu & Lo<sup>1)</sup>によって最初に開発され, その後, Uchida & Vaid<sup>9)</sup>によっても使用されている方法である。

DPVCは, 図-5.2 および写真-5.1 に示すように, ステッピングモーター, スクリューギヤおよびピストンを用いて体積変化を制御するシステムである。パーソナルコンピュータでステッピングモーターの回転数を制御することによって, 微少な体積変化を高い精度で制御できる。機構的には非常に簡単であり, 複雑なフィードバックシステムを必要としない点が他の装置に比べて有利である。

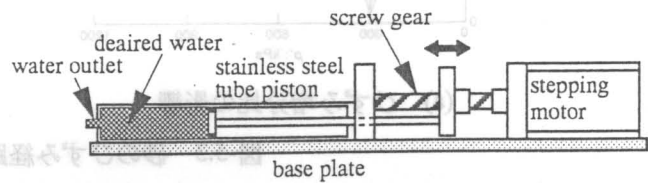


図-5.2 DPVCの概略図

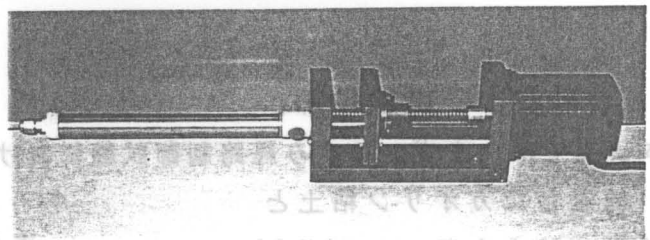
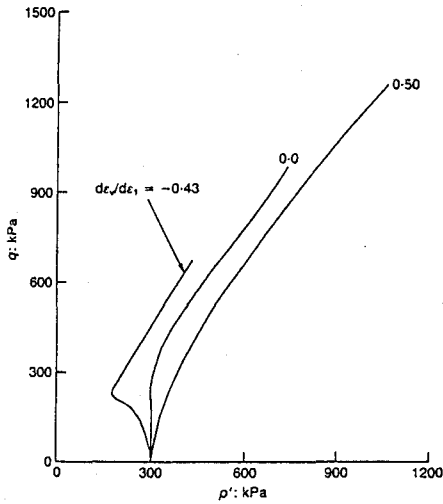
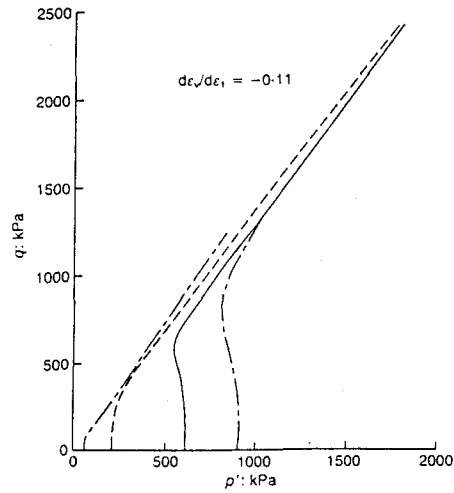


写真-5.1 Digital Pressure-Volume Control device

5.1の概説で述べたように, ひずみ経路制御試験は, 現在のところ透水性の問題から, 主に砂質土に対して適用されているのみである。したがって, ひずみ経路制御試験の結果としては砂質土に対する結果だけである。しかし, 従来の三軸試験では見られなかったような試験結果が報告されている。ここでは, 本研究と同じくDPVCを使用してひずみ経路制御試験を行っているChu & LoとUchida & Vaidの研究についてまとめる。まず, Uchida & Vaidは, ひずみ経路制御三軸試験ではせん断面の発生なしに大きなひずみ領域まで比較的均一なひずみの状態を保持しながらせん断できることを供試体表面の局部軸ひずみ分布をコンピューター画像解析することによって実証した。また, 密な砂でもせん断面の発生なしにひずみ軟化挙動が現れることを報告している。また, Chu & LoとUchida & Vaidの研究に共通する結果として, 図-5.3(a)に示すように, ひずみ経路制御試験における砂の挙動は軸ひずみ ( $\epsilon_1$ ) と体積ひずみ ( $\epsilon_v$ ) の増分比であるひずみ増分比 ( $R = d\epsilon_v/d\epsilon_1$ ) に大きく依存し, ひずみ増分比の値によって挙動が大きく異なることを報告している。そして, このようなひずみ経路依存性挙動は, 体積変化制御量とひずみ経路制御試験に用いた砂のダイレイタンスに依存していることをあげている。また, Chu & Loの研究では, 図-5.3(b)に示すように, 初期拘束圧に依存せず応力経路が一つの応力比に漸近する挙動が見られることが報告されており, 異なる試験システムでひずみ経路制



(a) ひずみ増分比の影響



(b) 初期拘束圧の影響

図-5.3 砂のひずみ経路制御試験結果<sup>1)</sup>

御試験を達成している五十嵐らの研究結果<sup>9)</sup>と一致している。

### 5.3 試料および試験条件

本研究では、まず、ひずみ経路制御試験における粘性土の基本的な挙動を確認するために、練返したカオリン粘土と自然堆積粘土を用いてひずみ経路制御試験を行った。カオリン粘土は液性限界の約3倍の含水比(260%)で十分に練返し、98.1kPaの上載圧で1週間圧密した試料を用いた。また、

表-5.1 物理特性(湊町粘土)

	土粒子密度 ( $g/cm^3$ )	塑性限界 (%)	液性限界 (%)	塑性指数
カオリン粘土	2.62	28.3	87.5	59.2
湊町粘土	2.66	28.9	61.0	32.1

不攪乱自然堆積粘土は第4章で使用した湊町粘土をひずみ経路制御ミニ三軸試験でも使用した。カオリン粘土および湊町粘土の物理特性を表-5.1に示す。湊町粘土は、大阪市浪速区湊町の掘削現場においてブロックサンプリングされた不攪乱試料で、物理特性や図-5.4の粒径加積曲線からもわかるように、比較的シルト分の多い試料(粘土分39.1%,シルト分55.3%,砂分5.6%)である。また、湊町粘土の標準圧密試験結果から求めた圧密降伏応力は

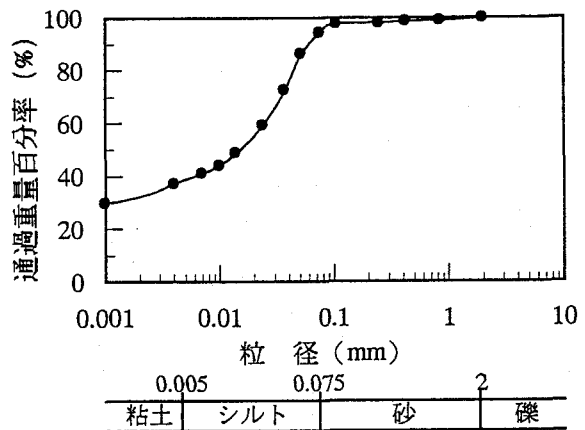


図-5.4 自然堆積粘土(湊町粘土)の粒径加積曲線

119.7kPa である。

練返したカオリン粘土と湊町粘土のひずみ経路制御ミニ三軸試験の試験条件をそれぞれ表-5.2 および5.3 に示す。両表には、比較のために行った非排水試験，排水試験および平均有効主応力一定試験の試験条件もあわせて示している。

表-5.2 カオリン粘土のひずみ経路制御試験，非排水試験，排水試験および平均有効主応力一定試験条件

	有効圧密圧力 (kPa)	背 圧 (kPa)	軸ひずみ速度 (%/min)	ひずみ 増分比
ひずみ経路制御 試験	100.0	100.0	0.05	0.08
	100.0	100.0	0.05	0.17
	100.0	100.0	0.05	0.26
	100.0	100.0	0.05	0.33
	100.0	100.0	0.05	0.41
非排水試験	100.0	100.0	0.04	0.0
排水試験	100.0	100.0	0.02	-----
平均有効主応力 一定試験	100.0	100.0	0.02	-----

表-5.3 湊町粘土のひずみ経路制御試験，非排水試験，排水試験および平均有効主応力一定試験条件

	有効圧密圧力 (kPa)	背 圧 (kPa)	軸ひずみ速度 (%/min)	ひずみ 増分比
ひずみ経路制御 試験	157.0	300.0	0.025	0.08
	157.0	300.0	0.025	0.15
	157.0	300.0	0.025	0.26
非排水試験	200.0	300.0	0.025	0.0
排水試験	157.0	300.0	0.025	-----
平均有効主応力 一定試験	157.0	300.0	0.025	-----

## 5.4 練返し粘土のひずみ経路依存特性

### 5.4.1 ひずみ経路依存性挙動

ひずみ経路制御ミニ三軸試験におけるひずみ経路を図-5.5に示す。ひずみ増分比 (R) は図中の直線の傾きで表される。非排水試験はせん断中における体積変化がないため，その

ひずみ増分比は0である。また、排水試験は軸ひずみの増加に対して体積変化が一定ではないため、そのひずみ経路はひずみ経路平面上では直線とはならない。次に、練返し粘土のひずみ経路制御ミニ三軸試験結果を図-5.6に示す。図-5.6(a)はひずみ経路制御ミニ三軸試験の軸差応力-軸ひずみ関係である。軸ひずみが1.0%前後まではひずみ増分比による差異はほとんど見られないが、軸ひずみが増大するにしたがって、ひずみ増分比に依存した挙動が明確に認められる。つまり、ひずみ増分

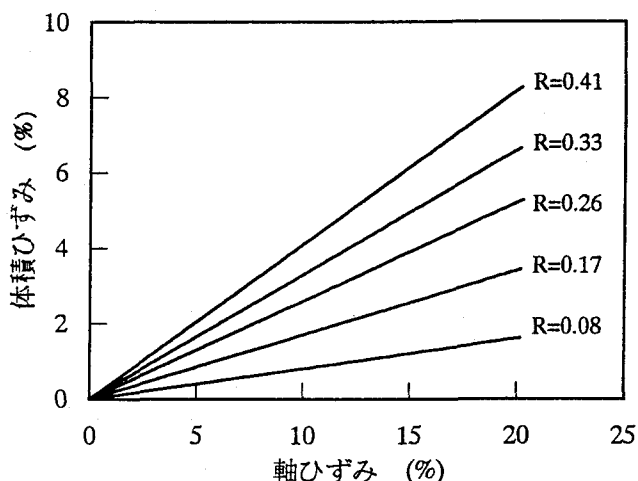
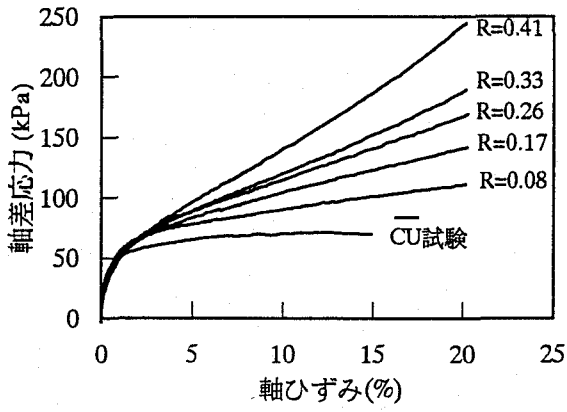


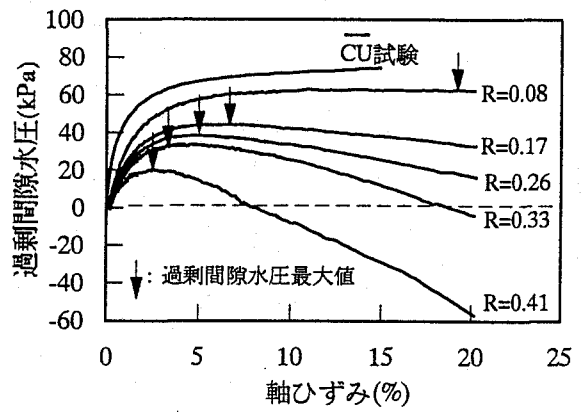
図-5.5 体積ひずみ-軸ひずみ関係

比が増大するほど軸差応力が急激に増加する傾向を示す。また、図-5.6(b)の過剰間隙水圧-軸ひずみ関係にも、ひずみ増分比に依存する挙動がみられ、ひずみ増分比が増大するにしたがって、過剰間隙水圧の最大値が小さくなる傾向を示す。これは、ひずみ増分比が大きな試験ケースほど、DPVCによる制御量(吸引量)が大きくなるためである。したがって、ひずみ増分比R=0.33と0.41の試験ケースにおいて、過剰間隙水圧が最終的に負の値を示すのは、軸圧縮により発生する過剰間隙水圧よりも、DPVCの制御(吸引)による過剰間隙水圧の低下が上回ったためである。このことを明確に表しているのが図-5.6(c)の有効応力経路である。ひずみ経路制御ミニ三軸試験の有効応力経路は従来の三軸試験の傾向と異なり、ひずみ増分比が増大するほど著しい右上がりの有効応力経路を示す。また、ひずみ経路制御試験の有効応力経路は、ひずみ増分比が増大するほど三軸(CU)試験の有効応力経路から離れ、三軸(CD)試験の有効応力経路に接近する傾向を示す。そして、ひずみ増分比の大きい試験ケースほど、有効応力経路は破壊線から遠ざかる傾向を示す。前述したひずみ増分比R=0.41の試験ケースでは、有効応力経路が三軸(CD)試験の有効応力経路と交差し、過剰間隙水圧が負になることがあらわれている。また、ひずみ増分比R=0.17~0.41の試験ケースにおける有効応力経路は、破壊線と同じような傾きで上昇していることがわかる。図-5.6(d)は有効応力比(q/p')-軸ひずみ関係である。ひずみ増分比R=0.17~0.41の試験ケースでは明らかにある一定の有効応力比に漸近していく傾向がみられる。これらの試験結果の傾向は図-5.3(a)および5.7に示しているChu & Lo<sup>9)</sup>のひずみ経路制御試験結果と一致している。また、図-5.8は有効応力経路に等軸ひずみ線を記入したものである。それぞれの等軸ひずみ線はひずみ経路制御試験、非排水試験および排水試験に関わらず、ほぼ直線で示すことができる。このように、ひずみ経路制御試験における練返し粘土の力学挙動は、ひずみ経路(ひずみ増分比)に依存してその挙動が大きく影響される。つまり、ひずみ経路依存性を示すことがわかった。

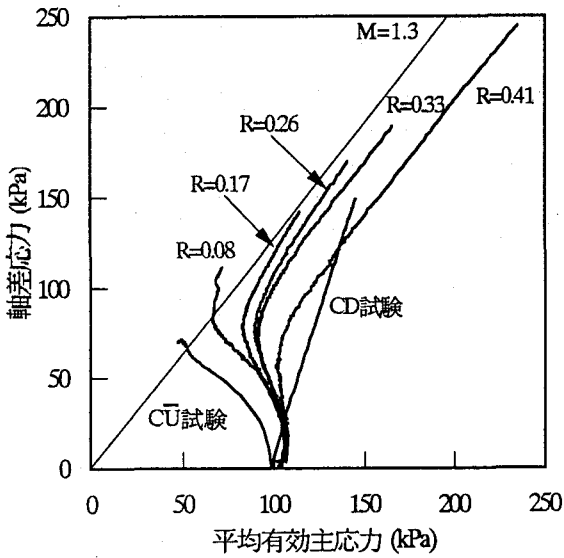
写真-5.2はひずみ増分比R=0.08, 0.27および0.41におけるひずみ経路制御ミニ三軸試験終



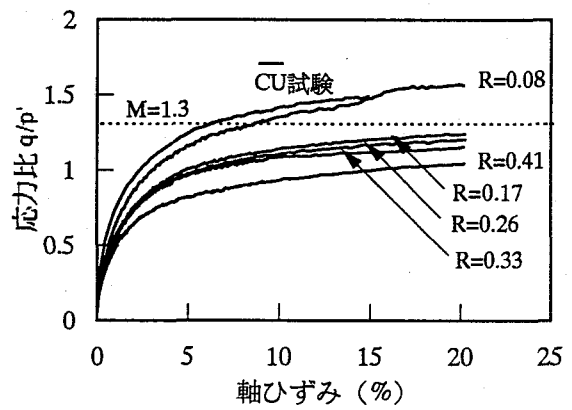
(a) 軸差応力-軸ひずみ関係



(b) 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係



(c) 有効応力経路図



(d) 有効応力比-軸ひずみ関係

図-5.6 ひずみ経路制御ミニ三軸試験結果 (カオリン粘土)

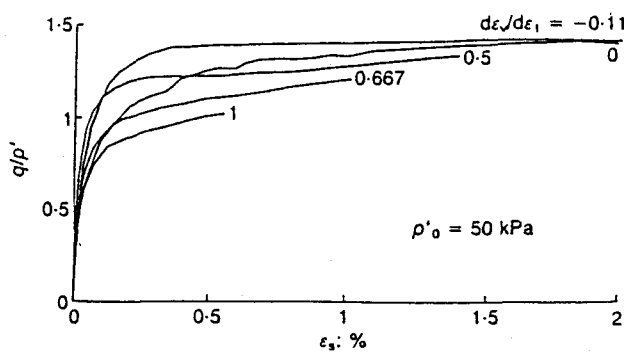


図-5.7 砂のひずみ経路制御試験における有効応力比-軸ひずみ関係<sup>1)</sup>

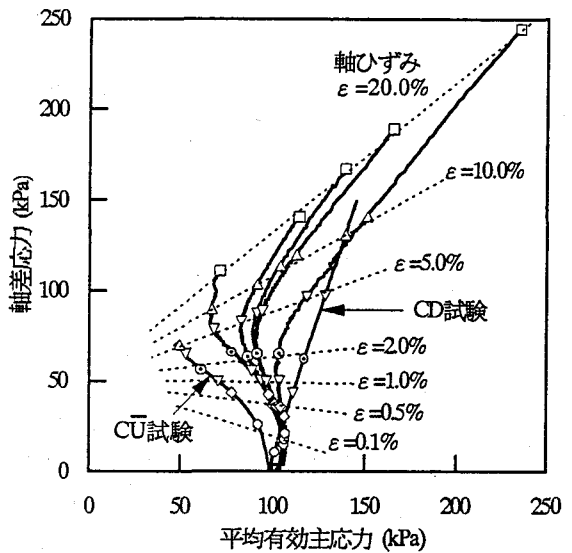
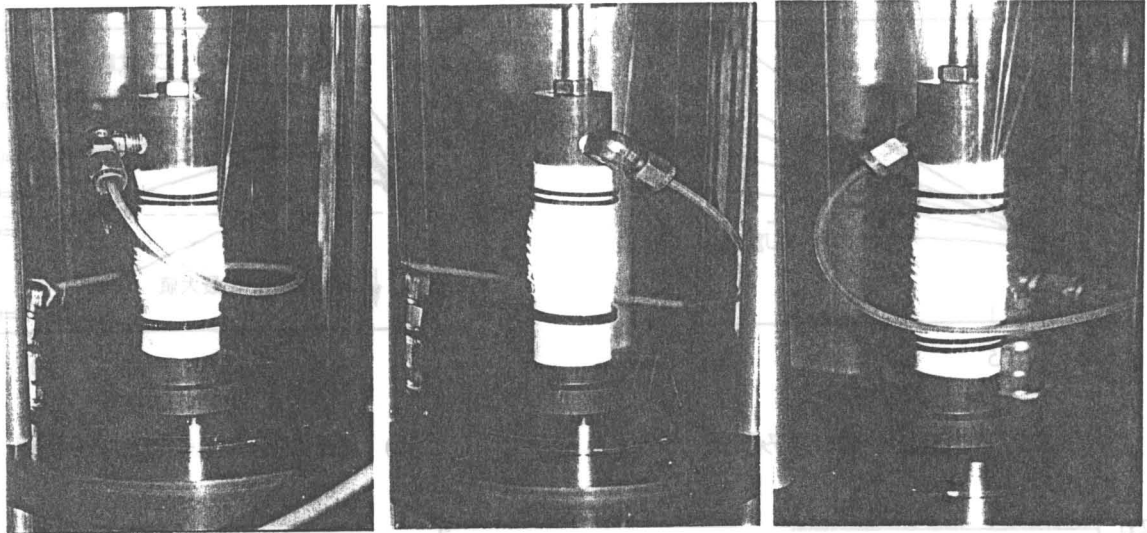


図-5.8 等軸ひずみ線図 (カオリン粘土)



(a) R=0.08

(b) R=0.27

(c) R=0.41

写真-5.2 ひずみ経路制御試験終了後の供試体の変形状況

了時（軸ひずみ20%）の供試体の変形状況である。ひずみ増分比が大きい試験ケースほど、供試体の側方への変形量が小さく、軸ひずみ20%という比較的大きなひずみ領域まで均一な変形状態を維持していることがわかる。

#### 5.4.2 ひずみ経路依存性挙動とダイレイタンスの関係

5.4.1 で述べたひずみ経路依存性挙動についてより詳細に調べるため、ひずみ増分比と粘土のダイレイタンス特性の関係について検討する。図-5.9 は平均有効主応力一定試験におけるひずみ増分比と軸ひずみの関係である。図中のデータポイントは実験結果を、実線は実験値の平均曲線を示す。練返したカオリン粘土は負のダイレイタンスを示し、軸ひずみの増加に伴って体積収縮量は一定値に収束する傾向を示す。したがって、平均有効主応力一定試験のひずみ増分比は、軸ひずみの増加に伴って単調に減少し、一定値に収束する傾向を示す。ひずみ増分比が R=0.08, 0.17, 0.26, 0.33 および 0.41 に到達した点における軸ひずみの値は、図-5.6(b) の過剰間隙水圧-軸ひずみ関係において、過剰間隙水圧が最大値を示す軸ひずみの値にほぼ対応している。また、図-5.10 は DPVC によって制御される体積ひずみからダイレイタ

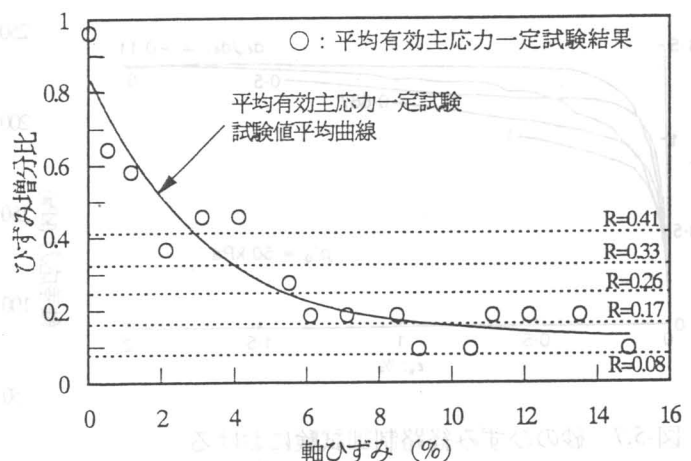


図-5.9 平均有効主応力一定試験におけるひずみ増分比-軸ひずみ関係（カオリン粘土）

ンシーによって生じる体積ひずみを差し引いた量と軸ひずみの関係である。明らかに、図-5.6(b)の過剰間隙水圧の挙動とほぼ同じ傾向を示しており、粘土のダイレイタンスによる体積ひずみをDPVCの制御量が上回ったときに、過剰間隙水圧が減少し始めることがわかる。以上のことから、練返し粘土のひずみ経路依存性挙動はダイレイタンス特性と密接に関連していることがわかる。

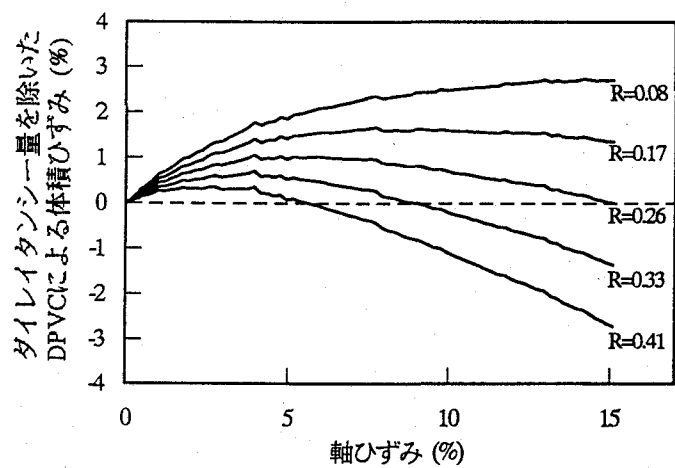


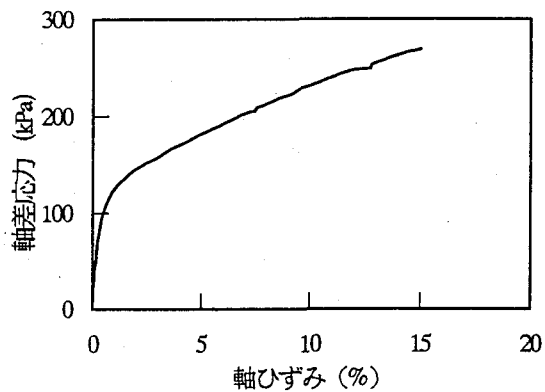
図-5.10 DPVCによる体積ひずみ制御量-軸ひずみ関係

## 5.5 自然堆積粘土のひずみ経路依存特性

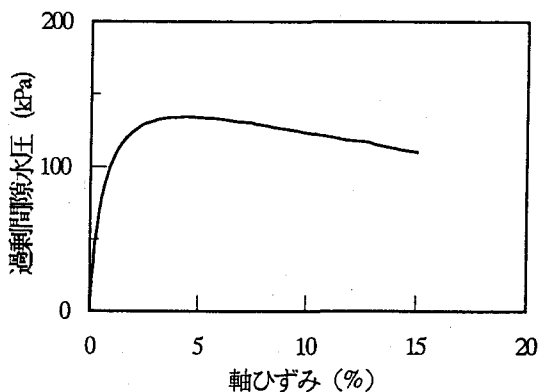
### 5.5.1 ひずみ経路依存性挙動

まず、湊町粘土の三軸 ( $\overline{CU}$ ) 試験結果を図-5.11に示す。シルト分が多い粘土によくみられるように、著しいひずみ硬化挙動が軸差応力-軸ひずみ関係にみられ、有効応力経路も破壊線 ( $M=1.5$ ) に沿って上昇する経路を示す。また、過剰間隙水圧は軸ひずみ約3%前後で最大値を示し、その後、単調に減少する傾向を示す。したがって、湊町粘土のダイレイタンス特性は、せん断初期において負のダイレイタンスを示すが、せん断が進むに連れて正のダイレイタンスに変化することがわかる。

次に、図-5.12は湊町粘土のひずみ経路制御試験結果である。図-5.12(a)の軸差応力-軸ひずみ関係において、軸ひずみ約1%まではひずみ増分比による差はみられないが、軸ひずみが増大するほどひずみ増分比の影響は顕著になる。つまり、ひずみ増分比が増大するほど軸差応力の最大値は増大する傾向を示す。これとは逆に、図-5.12(b)に示している過剰間隙水圧の最大値はひずみ増



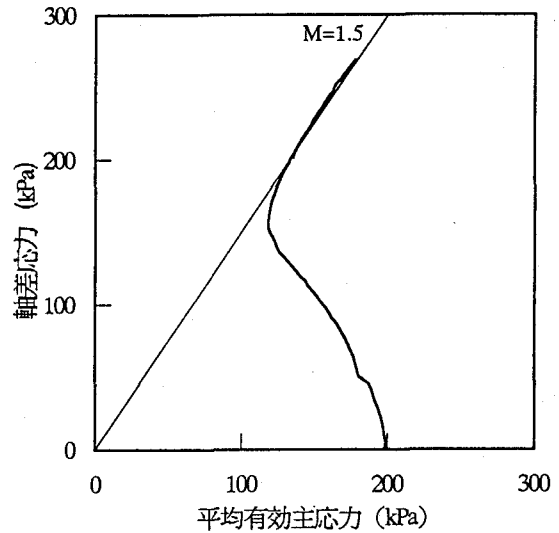
(a) 軸差応力-軸ひずみ関係



(b) 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係

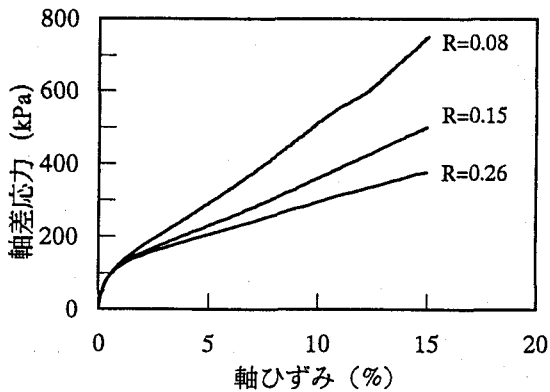
図-5.11 三軸 ( $\overline{CU}$ ) 試験結果 (湊町粘土)

分比の増加とともに減少し、ひずみ増分比  $R=0.15$  と  $0.26$  の試験ケースでは、過剰間隙水圧が最終的には負の値を示す。また、図-5.12(c)の有効応力経路はひずみ増分比が増大するにしたがって破壊線から遠ざかる傾向を示し、図-5.12(d)の有効応力比-軸ひずみ関係は一定値に漸近する挙動がみられる。これらのひずみ増分比に依存する挙動は、5.4.1の練返し粘土のひずみ経路制御試験結果でも同様の傾向が確認されている。したがって、ひずみ経路依存性挙動が、砂だけでなく一般的な粘土に対してもみられる挙動であることがわかる。図-5.13(a)は、図-5.12(d)でみられた漸近する有効応力比の値

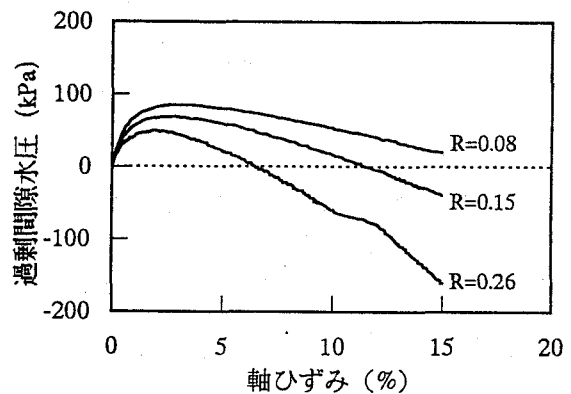


(c) 有効応力経路

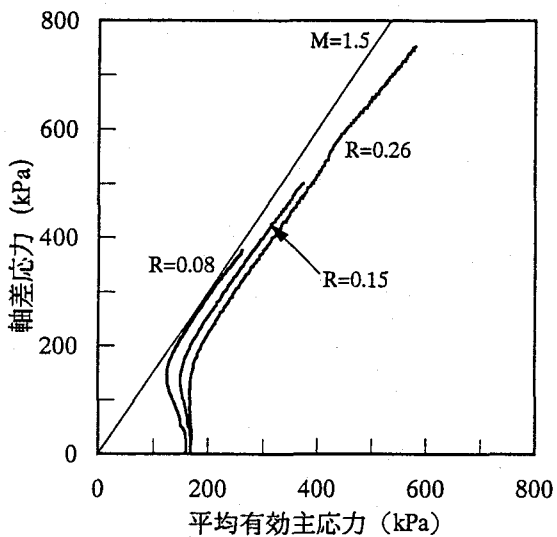
図-5.11 三軸 (CU) 試験結果 (湊町粘土)



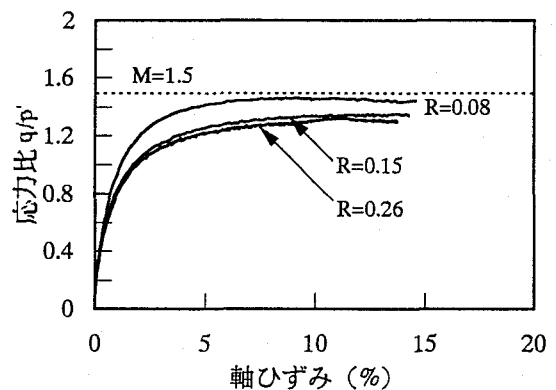
(a) 軸差応力-軸ひずみ関係



(b) 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係



(c) 有効応力経路図

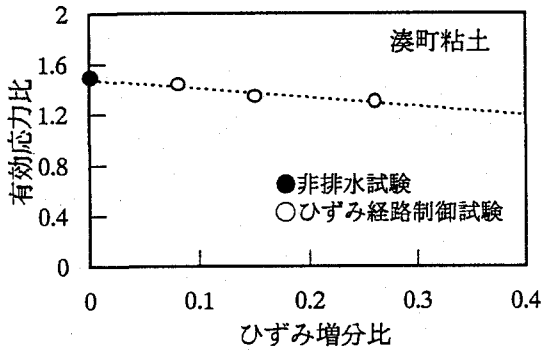


(d) 有効応力比-軸ひずみ関係

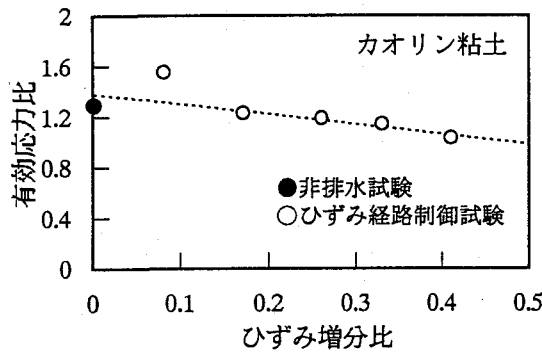
図-5.12 ひずみ経路制御ミニ三軸試験結果 (湊町粘土)



とひずみ増分比の関係である。ひずみ増分比の増大とともに、有効応力比の漸近値はほぼ直線的に減少し、ひずみ増分比が0（非排水状態）における有効応力比の値は、三軸（ $\overline{CU}$ ）試験で求めた破壊応力比の値とほぼ一致する。図-5.13(b)に示すように練返し粘土でも同様の傾向が認められ、有効応力比の漸近値もひずみ経路に依存することがわかる。また、図-5.14は有効応力経路上に等軸ひずみ線を記入した図である。やはり、練返し粘土の場合と同じく等軸ひずみ線を直線で示すことができる。



(a) 湊町粘土



(b) カオリン粘土

図-5.13 漸近する有効応力比-ひずみ増分比関係

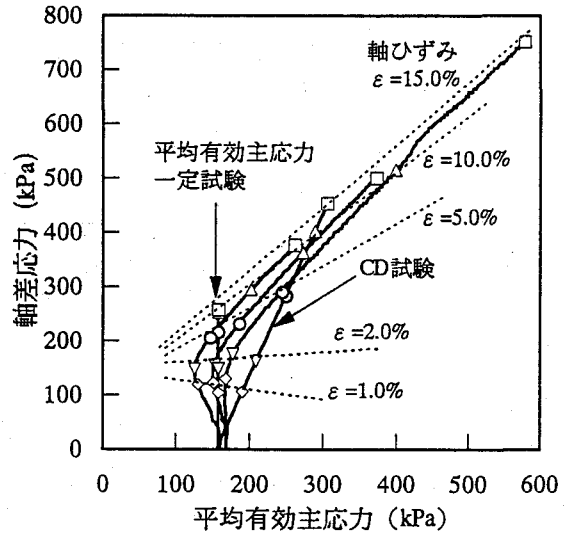


図-5.14 等軸ひずみ線図（湊町粘土）

### 5.5.2 ひずみ経路依存性挙動とダイレイタンスーの関係

図-5.15は、平均有効主応力一定試験結果から求めたひずみ増分比と軸ひずみの関係を示している。湊町粘土は体積収縮から体積膨張に転じるダイレイタンスー特性を示しているため、ひずみ増分比は最終的に負の値を示す。練返し粘土の場合にもみられたように、平均有効主応力一定試験結果のひずみ増分比が  $R =$

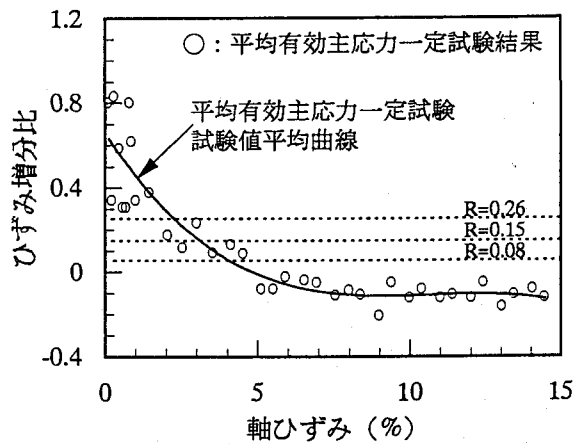


図-5.15 平均有効主応力一定試験におけるひずみ増分比-軸ひずみ関係（湊町粘土）

0.08, 0.15 および 0.26 に到達した点における軸ひずみの値は, 図-5.12(b) において過剰間隙水圧が最大値に達した軸ひずみとほぼ対応している。

また, 図-5.16 は湊町粘土のストレス-ダイレイタンスー関係を示している。図中には, ひずみ経路制御試験結果と Cam clay model のストレス-ダイレイタンスー関係をあわせて示している。平均有効主応力一定試験結果は, ばらつきながらも Cam clay model のストレス-ダイレイタンスー関係に漸近する挙動を示す。また, 今回のひずみ経路制御試験結果も Cam clay model のストレス-ダイレイタンスー関係とほぼ一致している。したがって, ひずみ経路制御試験で得られたストレス-ダイレイタンスー関係は, 湊町粘土のストレス-ダイレイタンスー関係と異ならない。つまり, ひずみ経路制御試験でみられたひずみ経路依存性挙動は, ストレス-ダイレイタンスー関係にもとづいた挙動であることがわかる。

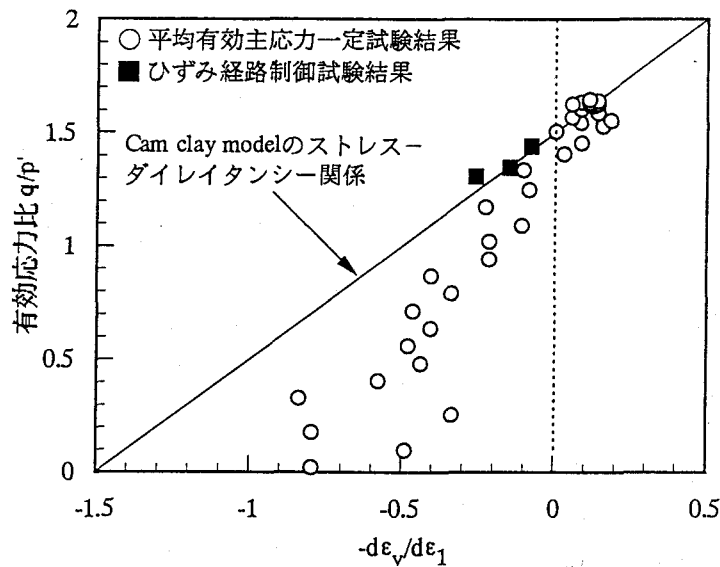


図-5.16 ストレス-ダイレイタンスー関係 (湊町粘土)

## 5.6 まとめ

ミニ三軸試験の特徴である圧密終了に要する時間が短い点を活用した例として, 粘性土のひずみ経路試験がミニ三軸試験機を用いることで実施できることを示した。ひずみ経路制御試験は, 透水性の問題から砂に対しては適用例があるものの, 粘土に対しては適用されていなかった試験である。粘土のひずみ経路制御試験では, これまでの三軸試験結果と異なる土の挙動がみられた。以下に, 本章で得られた結果を要約する。

- 1) 粘性土のひずみ経路制御試験において, 明らかなひずみ経路依存性がみられ, 体積ひずみと軸ひずみの増分比であるひずみ増分比によって, 軸差応力や過剰間隙水圧の挙動が変化する。このひずみ経路依存性は, 練返し粘土や不攪乱自然堆積粘土にかかわらず認められる。また, ひずみ増分比が大きくなるほど, ひずみ経路制御試験終了後の供試体

形状は円柱形に近く、ほぼ均一なせん断変形形状を示す。

- 2) ひずみ経路制御試験における粘土の有効応力経路はひずみ増分比によって変化し、ひずみ増分比が大きくなるほど、破壊線から遠ざかる傾向がみられる。この傾向も練返し粘土や不攪乱自然堆積粘土にかかわらず認められる。
- 3) ひずみ経路制御試験における有効応力比 ( $q/p'$ ) は、軸ひずみの増加とともに、ある一定の有効応力比に漸近する傾向を示す。この傾向も練返し粘土や不攪乱自然堆積粘土にかかわらず認められ、この有効応力比の漸近値はひずみ増分比の増加に伴って減少する。
- 4) ひずみ経路依存性挙動は、粘土のダイレイタンスー特性と密接に関連し、ひずみ増分比とダイレイタンスーの相関関係に起因して発生する。

#### 参考文献 (第5章)

- 1) Chu, J. and Lo, S. C. R. : Asymptotic behavior of a granular soil in strain path testing, *Geotechnique*, Vol.44, No.1, pp.65~82, 1994.
- 2) 松井保, 小田和広, 鍋島康之 : ミニ三軸試験機の開発と自然堆積粘土への適用, *土と基礎*, Vol.42, No.11, pp.17~22, 1994.
- 3) Uchida K. and Vaid, Y. P. : Sand behavior under strain path control, *Proceedings of 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.17~20, 1994.
- 4) 社本康弘, 張建民, 楠亀鉄男 : 三軸ひずみ経路試験の簡易手法と試験結果の分析, 第30回土質工学研究発表会講演集, pp.599~602, 1995.
- 5) 前川昌教, 山田恭央, 五十嵐正剛 : 排水量を制御した砂の液状化試験, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp.737~738, 1991.
- 6) 五十嵐正剛, 山田恭央 : 排水量を制御した砂の三軸試験, 第27回土質工学研究発表会講演集, pp.557~558, 1992.

## 第6章 ミニ三軸試験の有用性

### 6.1 概説

ミニ三軸試験の最大の特徴は、第2章で述べたように供試体の寸法が従来の三軸試験と比べて、直径22.5mm×高さ45.0mmと非常に小さい点である。図-6.1に示すように通常のボーリング試料（直径75mm）に対してミニ三軸試験を行う場合、深さ約50mm毎に4本の供試体を作成することができ、力学特性の深度方向の変化を詳細に調べることができる。また、供試体寸法が小さいため、通常の三軸試験では供試体を整形できない試料からでも供試体を整形でき、三軸試験結果に基づいた地盤調査が可能となる。したがって、大深度から採取された洪積粘土のように採取量が少ない上に、応力解放等により大小様々な亀裂を多く含む粘土に対してミニ三軸試験はその有用性を発揮する。本章では、ミニ三軸試験のこれらの特徴を活用した3つの適用例を示し、その有用性を確認する。

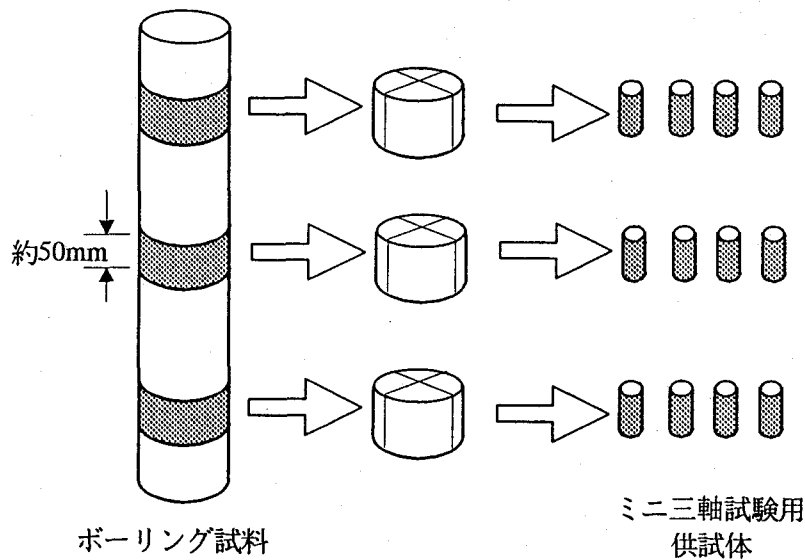


図-6.1 ミニ三軸試験用供試体の作成状況（模式図）

### 6.2 ミニ三軸試験の有用性の確認

ここでは、ミニ三軸試験の特徴を活用した例として、(1) 粘土の堆積環境と力学特性、(2) 粘土の年代効果と力学特性、(3) ミニ三軸試験結果と弾塑性・弾粘塑性パラメータ、について示し、ミニ三軸試験の有用性について確認する。

## 6.2.1 粘土の堆積環境と力学特性

大阪湾湾岸部において多くの大型プロジェクトが計画されるのに伴い、海底地盤について各種の地質調査が行われるようになった。最近では、微化石調査が急速に発展し、地層の年代決定や堆積環境の分析に多く利用され、成果<sup>12)</sup>をあげている。微化石とは顕微鏡によって観察される化石であり、地質調査の対象となる微化石はナンノプランクトン、珪藻、有孔虫、貝形虫などの化石である。それぞれの生息環境は表-6.1に示すように異なるため、微化石

表-6.1 各微化石の生息環境範囲

	主な生息範囲 (塩分濃度)	主な生息環境
ナンノプランクトン	30~40 ppt	一般的な海域
珪藻	0~50ppt	淡水~塩湖
有孔虫(石灰質)	20~45ppt	海域
有孔虫(砂質)	0~20ppt	淡水~汽水
ウニ	30~40ppt	一般的な海域
貝形虫	25~40ppt	一般的な海域
放散虫	30~40ppt	一般的な海域
ガラス海綿	30~40ppt	一般的な海域
二枚貝	25~40ppt	一般的な海域
巻貝	25~40ppt	一般的な海域

石の産出状況によってその地層の堆積環境が海水、汽水および淡水のように判定できる。海成粘土と非海成粘土の判定においては、微化石のなかで特にナンノ化石が重要な鍵となる。ナンノ化石とは、海棲の浮遊性単細胞植物である石灰質ナンノプランクトンの遺骸が海底に堆積し、化石化したものである。ナンノプランクトンは浮遊性であることから海洋における表層域の環境変化(水温、塩分濃度など)に対して敏感に反応するため、自然堆積粘土の堆積環境が変化すると微化石の産出頻度に増減がみられる。その増減パターンは図-6.2に示すような形状であり、それぞれ海進・海退における海水面の変化を示す。また、最近では、堆積環境が地盤特性に及ぼす影響<sup>3)</sup>が指摘されており、このような堆積環境と粘土の物理特性<sup>4)</sup>ならびに力学特性<sup>5)</sup>の関係を調べるのが重要となってきている。ミニ三軸試験は直径22.5mm×高さ45.0mmの供試体を使用するため、約50mm間隔で堆積環境が力学特性に及ぼす影響について調べることが可能である。ここでは、粘土の堆積環境と力学特性の関係について述べるとともに、ミニ三軸試験の有用性について検討する。

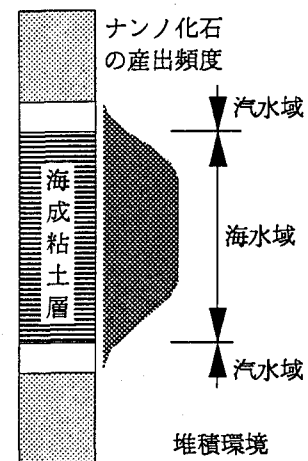


図-6.2 ナンノ化石の典型的な産出頻度曲線

まず、堆積環境が粘土の物理特性に与える影響について検討する。試料は甲子園浜で採取された2つの沖積粘土試料である。これらの試料は図-6.3に示すように同一の沖積粘土層内から採取されているが、表-6.2の微化石総合調査結果から、両試料の堆積環境に差があることがわかっている。ナンノ化石の産出パターンから両試料が堆積した環境は海進の時期であると判断でき、KS2試料の方が沖合いで堆積したことになる。このことは、図-6.3の粘土分とシルト分の割合をみると、KS2試料の方がKS1試料よりも粘土分(細粒分)が多いことから明らかである。また、表-6.3の比重、塑性限界、液性限界、塑性指数等の物理特性にも差

があり、堆積環境による影響があらわれている。この様に、堆積環境が異なれば試料の物理特性に差があらわれることが明らかとなった。次に、堆積環境が力学特性に及ぼす影響について検討する。図-6.4は両沖積粘土試料のミニ三軸試験結果である。軸差応力や過剰間隙水圧の挙動および有効応力経路には、明らかな差が見られる。したがって、表-6.4に示すように、破壊応力比や内部摩擦角と言った強度定数にも差があらわれている。

また、同様のことが大阪湾泉州沖洪積粘土 (Ma11) についても確認できる。図-6.5は泉州沖で採取された洪積粘土の地層層序およびナンノ化石の産出状況である。Ma11層は大阪港沖では単一層であるものが泉州沖ではこの様に2つの粘土層に分かれている。表-6.5はこれらのMa11層の物理特性を示しており、土粒子密度、塑性限界および液性限界に差が見られる。また、表-6.6の標準圧密試験結果や図-6.6のミニ三軸試験結果にも明確な差が見られ、Ma11(1)層とMa11(2)層とでは、その力学特性はかなり異なる

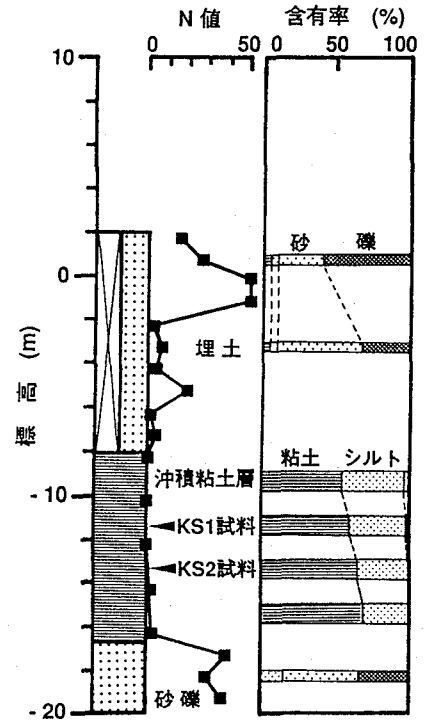


図-6.3 両沖積粘土試料の採取位置と粘土含有率

表-6.2 微化石総合調査結果<sup>2)</sup>

試料採取深度(m)	ナンノ化石	珪藻	有孔虫化石	貝形虫化石	貝殻片	火山ガラス	堆積環境
0.15~0.45	-	-	-	-	-	-	
1.15~1.45	-	-	-	-	-	-	
3.15~3.26	-	-	-	-	-	-	
4.15~4.45	-	-	-	-	-	-	
5.15~5.45	-	-	-	-	-	-	
6.15~6.45	-	-	-	-	-	-	
9.15~9.45	-	+	-	-	+	++	汽水域
10.00~10.50	++	++++	+++	+	++	+++	海域
○11.00~11.80	+	++++	+	+	++	+++	海域
12.00~12.50	++++	++++	+	+++	+++	++++	海域
○13.00~13.80	+++	+++	+++	+++	+++	+++	海域
14.00~14.80	++++	+++	++++	+++	++	++++	海域
15.00~15.80	++++	++++	++++	++	+++	++	海域
16.15~16.45	+++	++++	+	++	+++	+	海域
17.00~17.80	++++	+++	+++	++	++	++	海域
18.15~18.60	+++	++	++	+	++	+	海域
19.15~19.45	++	-	-	-	-	+	汽水域
20.15~20.45	++	-	-	-	+	-	汽水域
21.15~21.45	+++	-	-	-	+	-	汽水域
22.15~22.45	-	-	-	-	-	+++	
23.15~23.45	-	-	-	-	+	+	

傾向を示す。

以上のことから、同一粘土層内から採取された試料でもその堆積環境は必ずしも一様なものでなく、その堆積環境により物理特性、粒度組成および強度特性に差があらわれることが示された。また、ミニ三軸試験はこの様な同一粘土層内における力学特性の変化を詳細に調べることが示された。

### 6.2.2 粘土の年代効果と力学特性

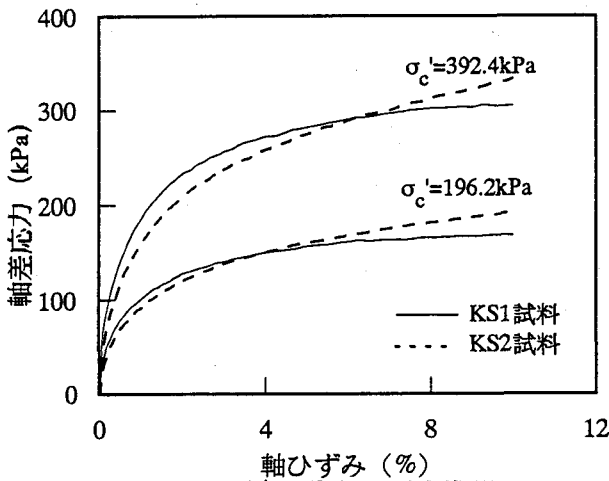
大阪湾の洪積粘土は、最も堆積年代の新しいMa12層でも約13万年が経過しており、沖積粘土（Ma13）の1万年と比べ非常に長い時間圧密されている。洪積粘土の

表-6.3 両沖積粘土試料の物理特性

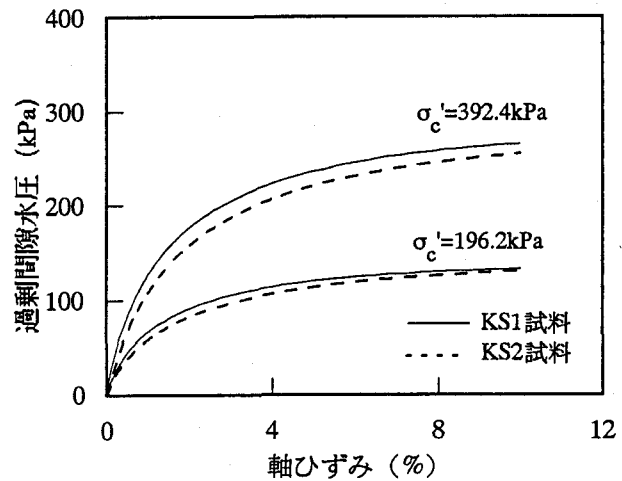
	KS1試料	KS2試料
採取深度 (m)	11.0~11.8	13.0~13.8
土粒子密度 ( $g/cm^3$ )	2.70	2.71
塑性限界 (%)	27.9	30.1
液性限界 (%)	83.2	98.1
塑性限界	55.3	68.0

表-6.4 両沖積粘土試料の強度定数

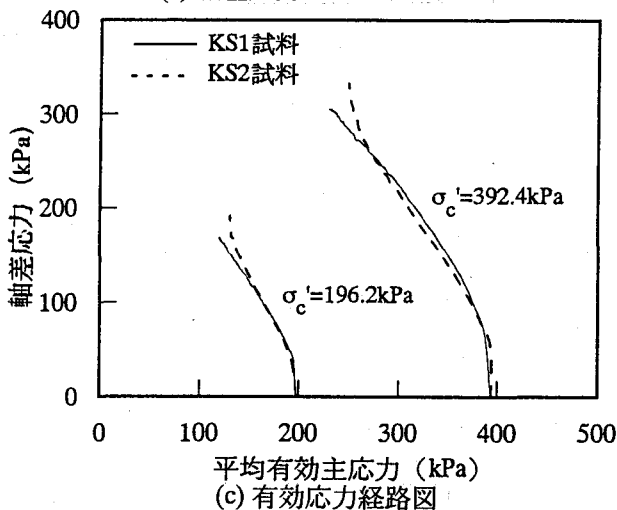
	KS1試料	KS2試料
圧密降伏応力 (kPa)	56.9	58.9
圧縮指数	0.72	0.70
膨潤指数	0.13	0.13
破壊応力比	1.42	1.35
有効内部摩擦角 ( $^{\circ}$ )	35.0	33.5
強度増加率	0.36	0.34



(a) 軸差応力-軸ひずみ関係

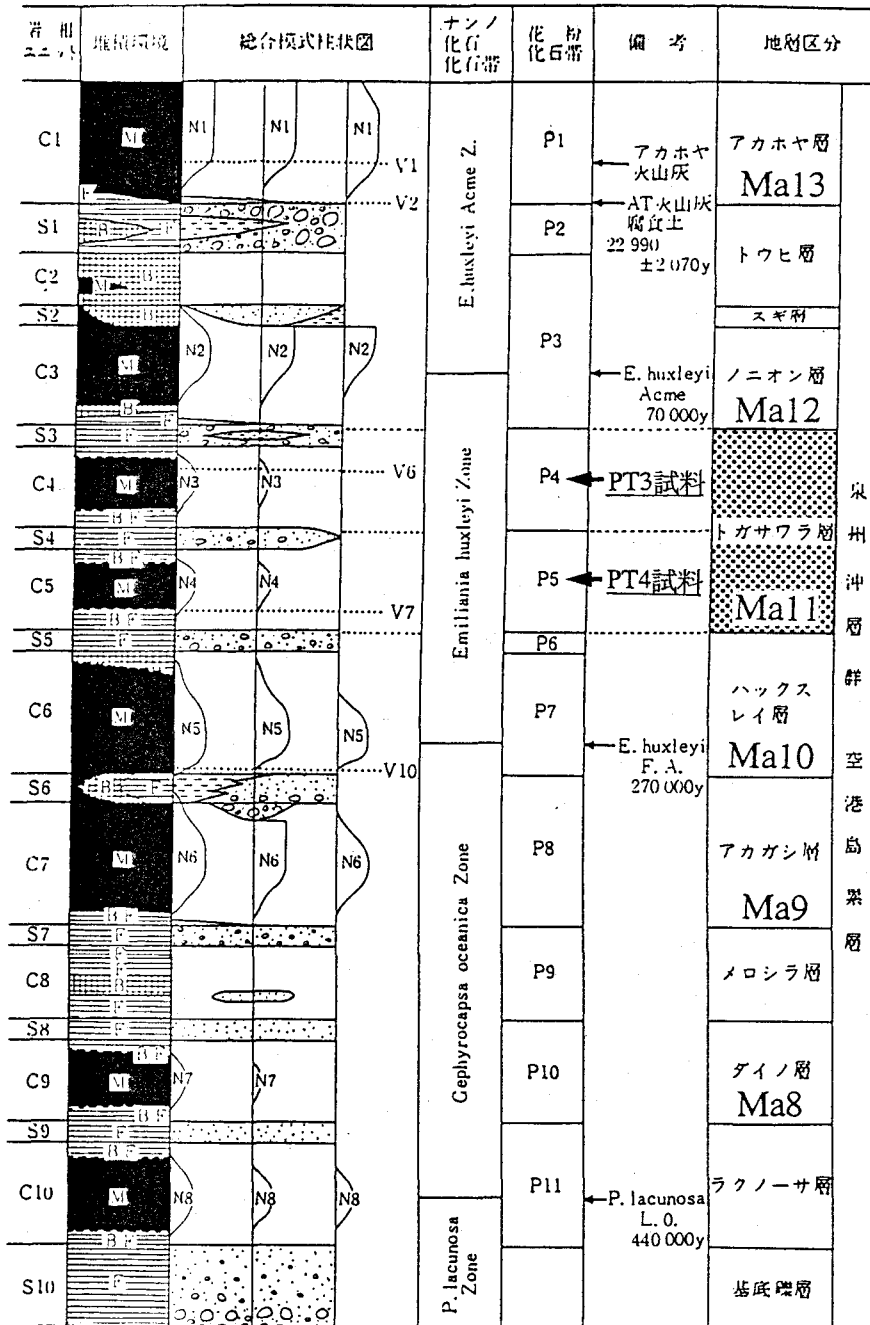


(b) 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係



(c) 有効応力経路図

図-6.4 両沖積粘土試料のミニ三軸試験結果



注：M：海成層， B：汽水成層， BF：汽水成または非海成層， F：非海成層。  
 (総合模式柱状図は左が沖合を，右が沿岸部を示し，堆積環境は模式柱状図と対応関係をとる。)

図-6.5 試料採取地点の地層層序およびナンノ化石産出状況<sup>1)</sup>



表-6.5 両洪積粘土試料の物理特性

	PT3試料	PT4試料
採取深度 (m)	83.0~85.0	91.0~93.0
土粒子密度 ( $g/cm^3$ )	2.67	2.73
塑性限界 (%)	25.6	27.5
液性限界 (%)	92.0	82.2
塑性限界	66.4	54.7

表-6.6 両洪積粘土試料の標準圧密試験結果

	PT3試料	PT4試料
圧密降伏応力 (kPa)	379.6	552.3
圧縮指数	0.85	1.13
膨潤指数	0.12	0.05

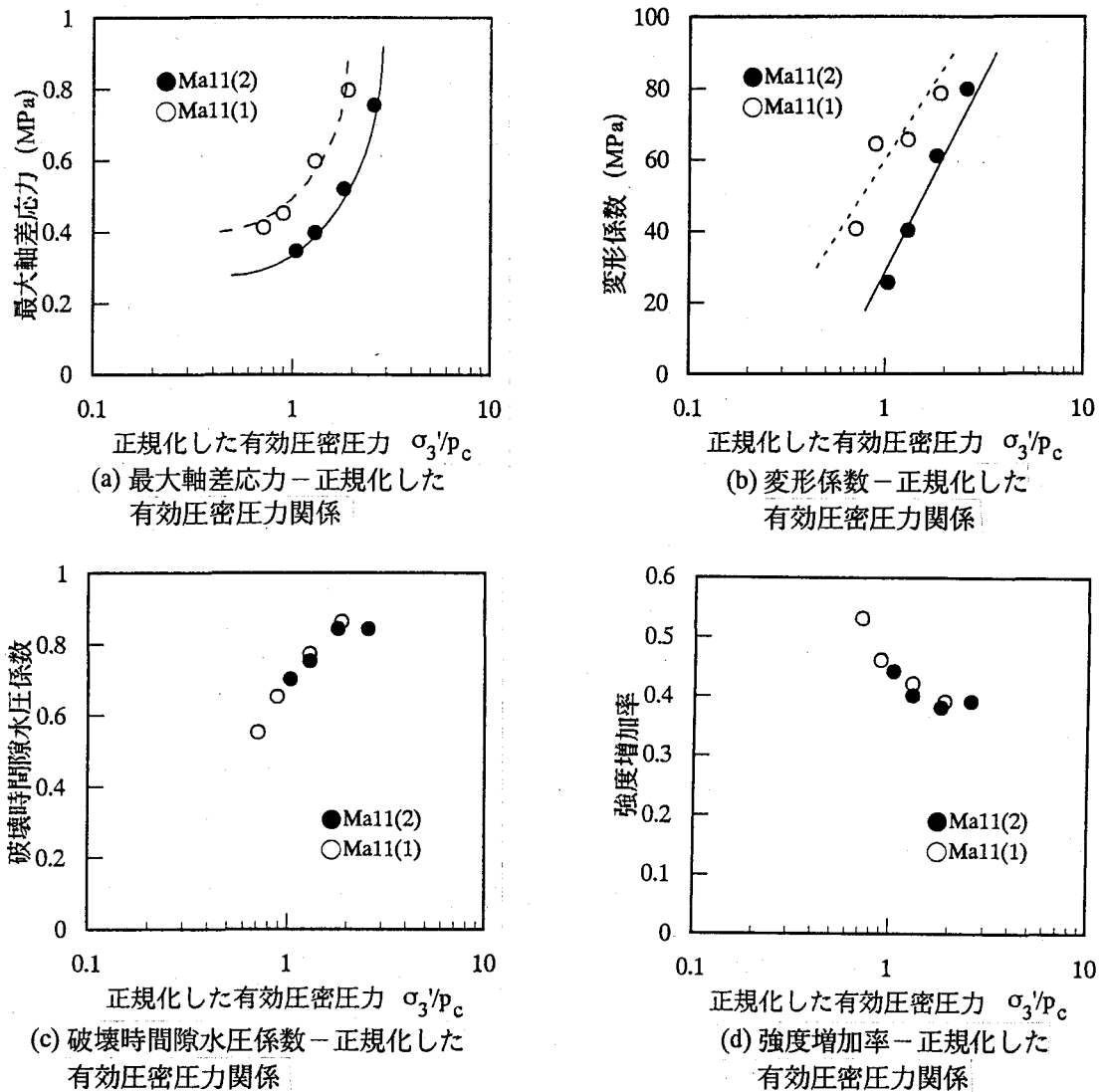


図-6.6 両洪積粘土試料のミニ三軸試験結果

ように長期にわたって圧密された粘土では、土粒子の構造骨格が発達し、強度や変形特性が向上する。これを年代効果（aging）と言い、洪積粘土が、同じ上載圧に対して沖積粘土よりも大きな間隙比を維持できることや擬似過圧密特性を示す原因である。本節では、ミニ三軸試験の特徴を活用し、大阪湾泉州沖で採取された30~50cmの不攪乱洪積粘土試料（Ma12, Ma11, Ma10）とこれらを液性限界に近い含水比で十分に練返し再圧密した試料を用いて、ミニ三軸試験を行い、少量の試料からでも年代効果の影響について検討できることを示す。軸ひずみ速度および背圧等の試験条件は、これまでのミニ三軸試験と同じく0.05%/minと98.1kPaである。

図-6.7は不攪乱洪積粘土（Ma12）と再圧密洪積粘土の代表的な応力-ひずみ挙動である。不攪乱洪積粘土は再圧密洪積粘土と比べて有効圧密圧力が大きく、軸差応力や過剰間隙水圧は不攪乱洪積粘土の方が再圧密洪積粘土よりもはるかに大きな値を示す。このため、軸差応力と過剰間隙水圧を有効圧密圧力で正規化した値で示す。正規化した軸差応力-軸ひずみ関係における不攪乱洪積粘土と再圧密洪積粘土の挙動を比較すると、せん断初期の応力-ひずみ関係はほぼ等しいが、せん断が進行するにつれて再圧密洪積粘土の応力-ひずみ関係がひずみ硬化を示すのに対し、不攪乱洪積粘土は明らかなひずみ軟化挙動を示す。また、正規化した過剰間隙水圧-軸ひずみ関係には明確な傾向はみられず、過剰間隙水圧の挙動は年代効

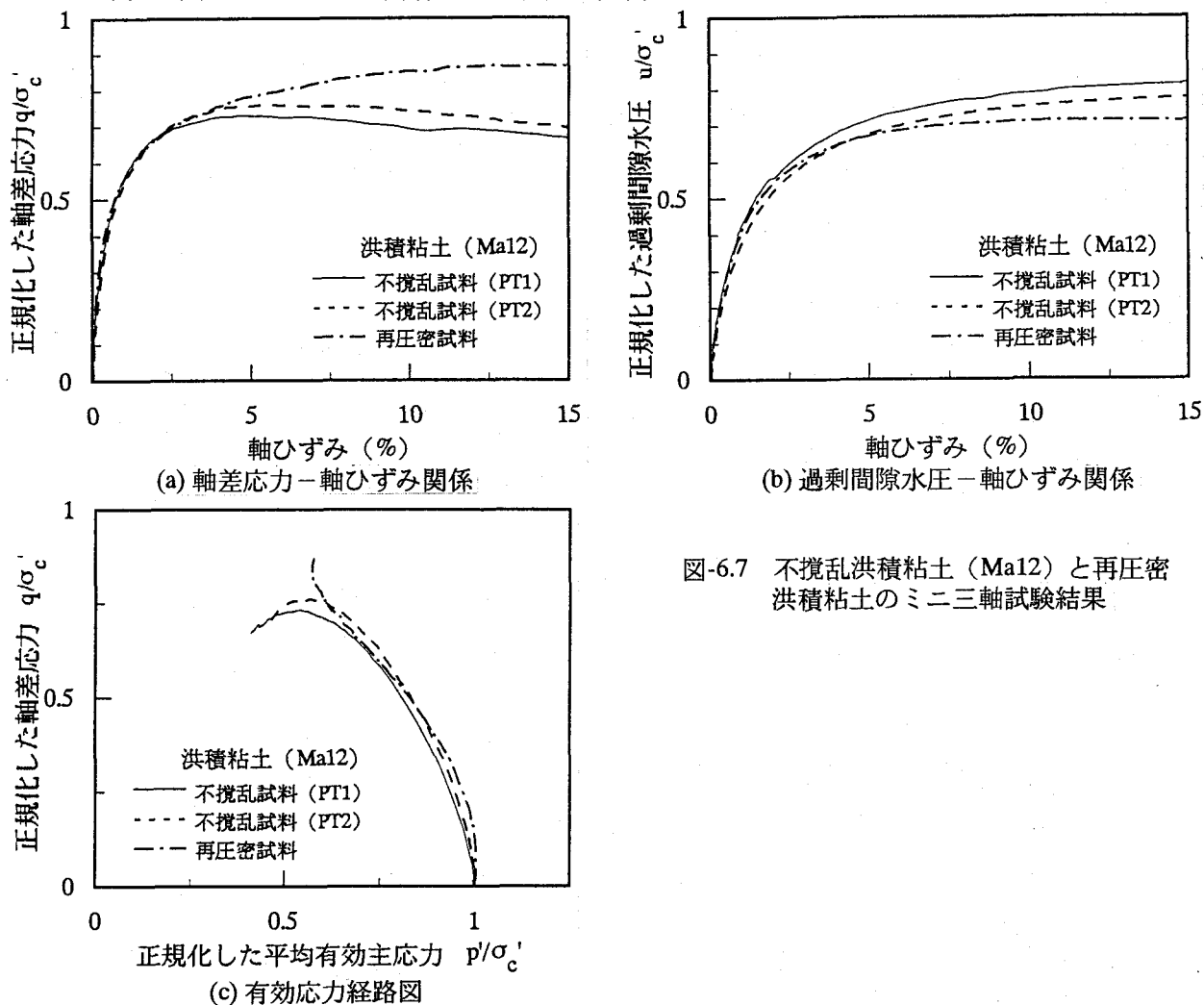


図-6.7 不攪乱洪積粘土（Ma12）と再圧密洪積粘土のミニ三軸試験結果

果による影響をあまり受けないことがわかる。次に、年代効果の影響がせん断試験結果にどの様に影響するのかを調べるため、不攪乱洪積粘土と再圧密洪積粘土試料の非排水三軸試験結果から得られた強度・変形定数の比較を行う。図-6.8は最大軸差応力と有効圧密圧力の関係を示している。有効圧密圧力は圧密降伏応力で正規化した値で示す。最大軸差応力は不攪乱・再圧密洪積粘土ともに正規化した有効圧密圧力の増加にともなって増加するが、同じ正規化した有効圧密圧力に対しては不攪乱洪積粘土の方がはるかに大きい。同様の傾向が図-6.9の変形係数-有効圧密圧力関係にもみられる。図-6.10は破壊時の間隙水圧係数-有効圧密圧力関係である。正規圧密領域における破壊時の間隙水圧係数の値は不攪乱・再圧密洪積粘土に関わらず、0.8~1.0程度の値を示す。これは、図-6.7(b)の過剰間隙水圧-軸ひずみ関係でみられたように、不攪乱洪積粘土と再圧密洪積粘土で間隙水圧の値に大きな差がないためである。図-6.11は強度増加率-有効圧密圧力関係である。強度増加率は有効圧密圧力が増大するほど一定値に漸近する挙動を示し、十分な正規圧密領域における不攪乱洪積粘土と再圧密洪積粘土の強度増加率の差は小さくなる。

以上のことから、有効圧密圧力が大きくなるにしたがって、年代効果の影響が小さくなり、練返し粘土に近い挙動を示すことがわかる。このことは、図-6.12の不攪乱洪積粘土と再圧密洪積粘土の標準圧密試験結果にもあらわれている。圧密降伏後、不攪乱洪積粘土の土粒子構

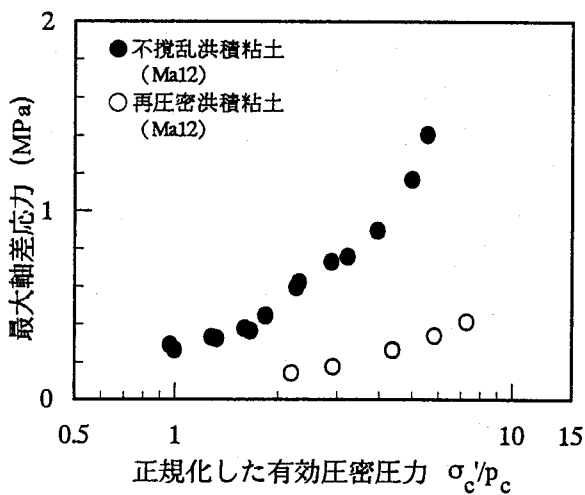


図-6.8 最大軸差応力-正規化した有効圧密圧力関係

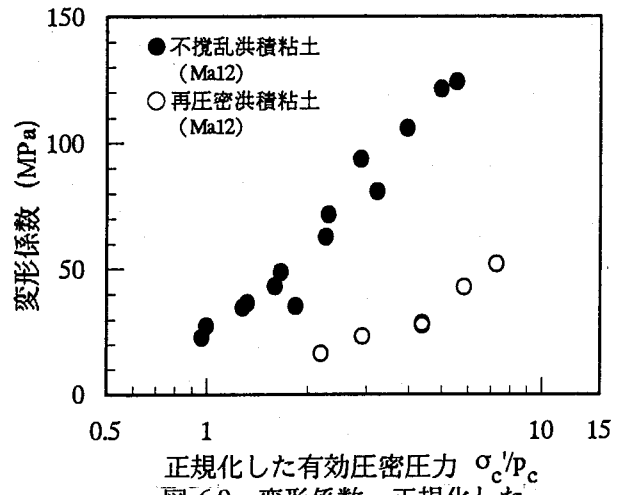


図-6.9 変形係数-正規化した有効圧密圧力関係

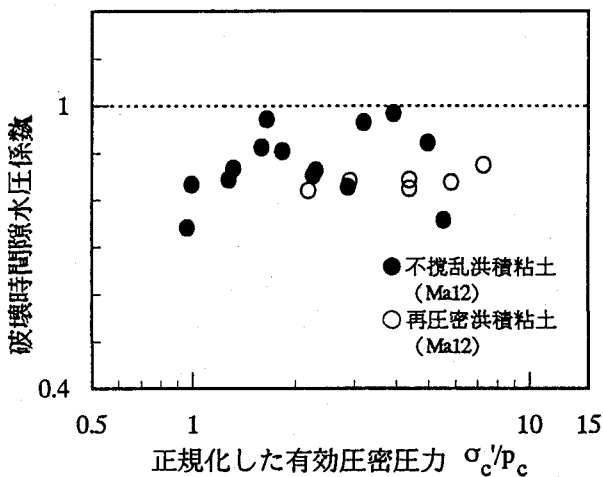


図-6.10 破壊時間隙水圧係数-正規化した有効圧密圧力関係

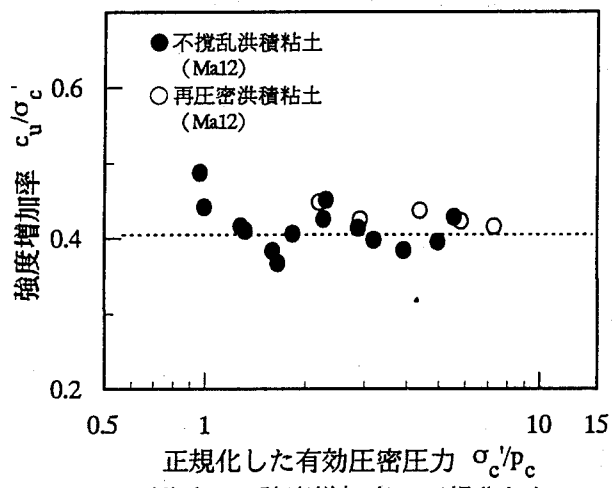


図-6.11 強度増加率-正規化した有効圧密圧力関係

造骨格は急激に崩壊し、再圧密洪積粘土の挙動に漸近する傾向を示す。この様に、年代効果の影響によって土粒子構造骨格が発達し、強度や変形特性が向上するが、有効圧密圧力が増大し構造骨格が崩壊することにより、練返し粘土の挙動を示すことが確認された。

しかしながら、異なる年代効果を受けている洪積粘土 (Ma12, Ma11, Ma10) の試験結果を統一的に解釈することは必ずしも容易ではない。そこで次に、これら様々な年代効果の影響を受けている洪積粘土の挙動を統一的に評価することを試みる。吉國ら<sup>9)</sup>は、Cam clay 理論では軸差応力の対数と間隙比には線形関係が成立することから、不攪乱粘土と再圧密粘土の一軸圧縮強度と間隙比の関係を整理し、年代効果によって不攪乱試料と再圧密試料の関係式が異なることを指摘している。図-6.13 は大阪湾泉州沖で採取された洪積粘土 (Ma12, Ma11, Ma10) の最大軸差応力-間隙比関係である。不攪乱洪積粘土と再圧密洪積粘土はそれぞれ異なる回帰直線で示すことができる。年代効果の影響を受けていない粘土では、圧密圧力が異なっても同一間隙比に対する非排水強度は一定値であるという落合ら<sup>7)</sup>の試験結果から判断すると、不攪乱洪積粘土の最大軸差応力は明らかに年代効果の影響で増加している。しかし、各洪積粘土の試験

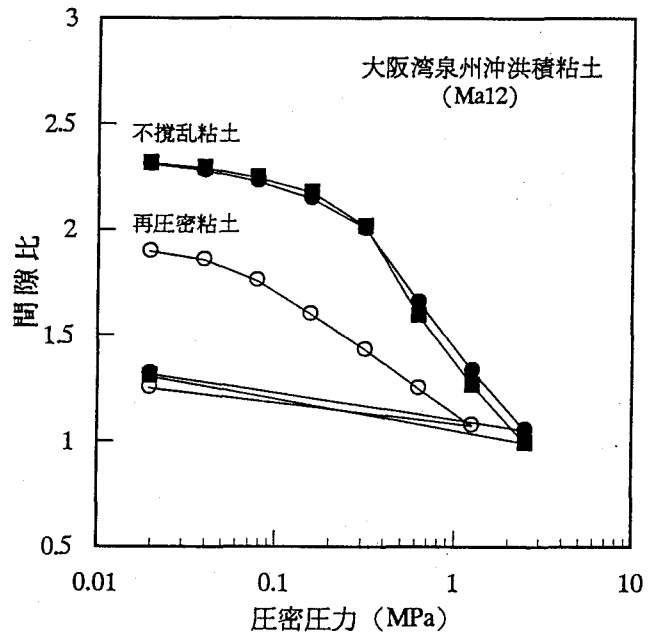


図-6.12 不攪乱洪積粘土 (Ma12) と再圧密洪積粘土のe-logp関係

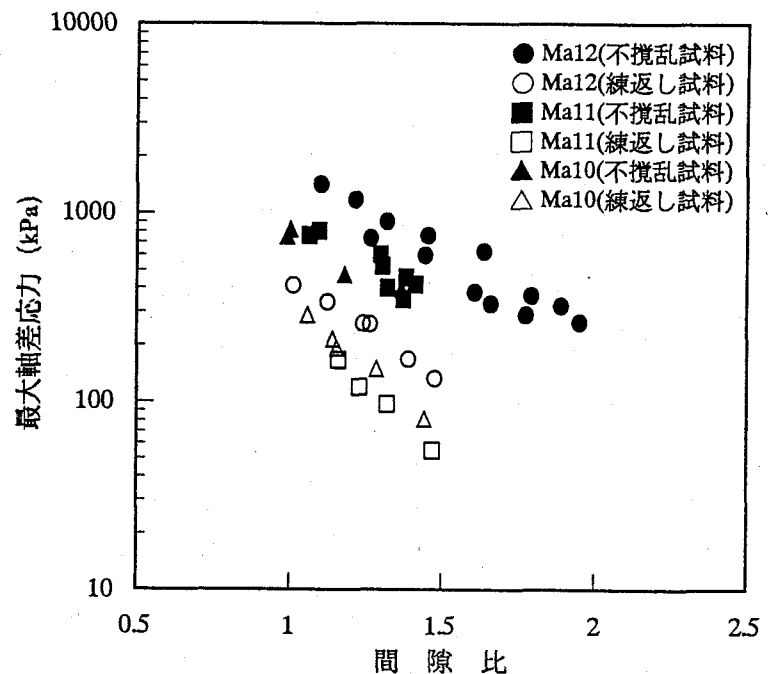


図-6.13 最大軸差応力-間隙比関係

結果を比較した場合、初期間隙比の値が試料によって異なり統一的に評価できないため、初期間隙比の影響を取り除く必要がある。Pandianら<sup>9)</sup>は液性限界における間隙比で初期間隙比を正規化することによって非排水せん断強度を統一的に表現できることを述べている。そこで、図-6.14 では間隙比のかわりに非排水せん断時の初期間隙比を液性限界における間隙比の

値で正規化した値で整理を行った。不攪乱洪積粘土と再圧密洪積粘土がそれぞれ異なる回帰直線で示され、回帰直線の傾きはほぼ平行であることがわかる。液性限界における再圧密洪積粘土の最大軸差応力の値は1.0~2.0kPaの範囲にありMittchell<sup>9</sup>や松井<sup>10</sup>の結果とも一致することから、再圧密洪積粘土の回帰直線は年代効果の影響を受けていない粘土の最大軸差応力-間隙比関係をほぼ正確に表現している。したがって、再圧密洪積粘土の回帰直線から不攪乱洪積粘土の回帰直線に移行するほど年代効果の影響が大きいと考えられる。この事を別の指標を用いて考察を行う。Burland<sup>11</sup>は練返し再圧密試料の圧密特性を間隙比指数 $I_v$ を用いて正規化し、粘土の種類に関わらず粘土に固有な圧密曲線が得られることを指摘している。この間隙比指数 $I_v$ を用いて先ほどの最大軸差応力-間隙比関係を整理する。図-6.15は最大軸差応力-間隙比指数関係である。図-6.14と同じく不攪乱洪積粘土と再圧密洪積粘土の関係はほぼ直線関係で表すことができ、同一の間隙比指数に対する最大軸差応力は再圧密洪積粘土よりも不攪乱洪積粘土の方が大きい値を示す。

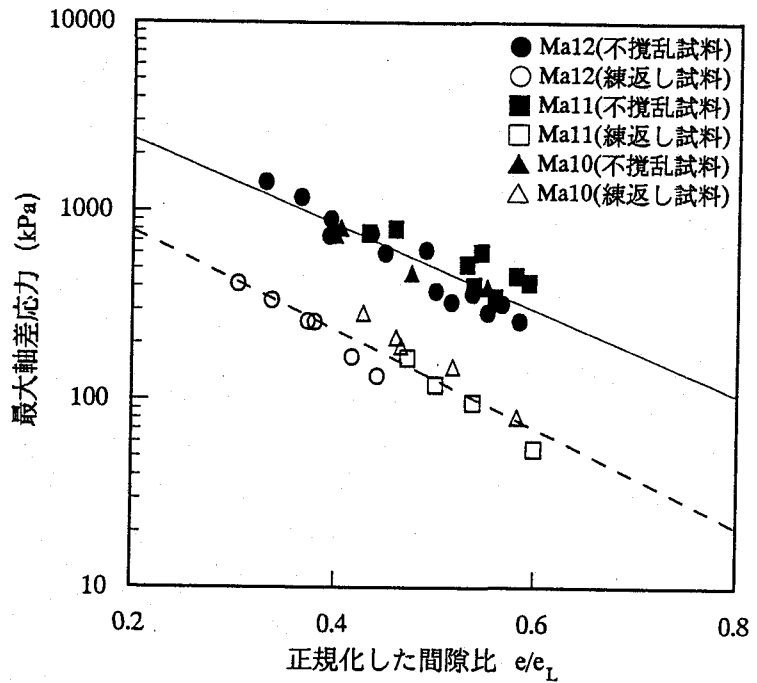


図-6.14 最大軸差応力-正規化した間隙比関係

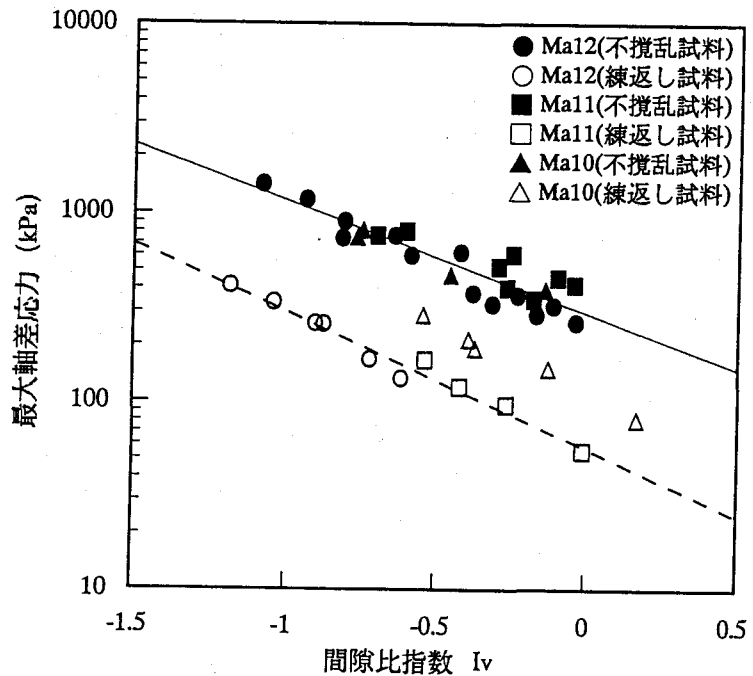


図-6.15 最大軸差応力-間隙比指数関係

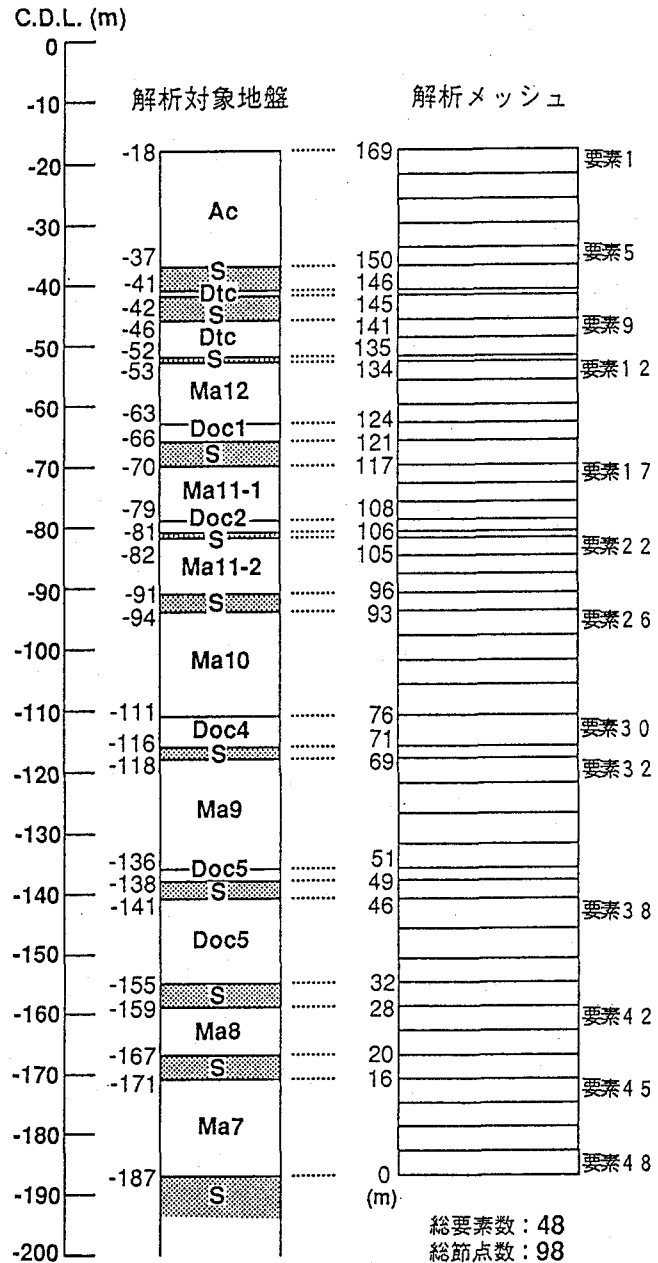
以上のことから液性限界における間隙比や間隙比指数を用いることによって最大軸差応力に及ぼす年代効果の影響を統一的に調べることができることがわかった。この様にわずか30~50cmのボーリング試料からでも、ミニ三軸試験の特徴を活用すれば年代効果の影響について詳細に検討可能であることが確認された。

### 6.2.3 ミニ三軸試験結果による弾塑性・弾粘塑性パラメータの決定

最近の大型計算機の発達により、地盤工学の分野では、有限要素法を用いて大規模な地盤の多次元的な圧密などの複雑な挙動や基礎の極限支持力等を予測することが可能となっている。このようなシミュレーション解析に対する信頼性は解析モデルと解析手法の選択、入力パラメータの決定および対象地盤や施工条件のモデル化によって左右される。特に重要な要因となるのは、解析モデル（構成式）と入力パラメータである。土の構成式については、1950年代から1960年代にかけて、

Cam clay モデルに代表される粘性土の弾塑性構成式が研究され、多くの成果を挙げている。さらに、粘性土が示す顕著な時間依存性を考慮した弾粘塑性構成式が提案されて今日に至っている。しかし、構成式に含まれる多数のパラメータを物理特性や単一の力学試験から正確に決定することは不可能であり、多種類の力学試験を多数行う必要がある。しかしながら、このような試験を行うことは多くの労力・時間・試料を要するものであり、容易に決定できるものではない。本節では、少ない試料からでも標準圧密試験とミニ三軸試験の結果をもとに、ある程度妥当性のある弾塑性ならびに弾粘塑性構成式に含まれるパラメータを決定できることを述べる。

まず、弾塑性構成式に含まれるパラメータを決定した例として、大阪湾泉州沖の海底地盤の一次元圧密解析結果を示す。数値解析の対象とした地盤は図-6.16 (a) の柱状図に示す典型的な大阪湾泉州沖の海底地盤である。この海底地盤から採取された不攪乱試料について、弾塑性パラメータの決定を行った。使用した試料の長さは約15~40cm程度であり、直径50mm×高さ100mm



(a) 地盤柱状図 (b) 解析メッシュ図

図-6.16 地盤柱状図および解析メッシュ図

の三軸供試体を使用する場合には，1～3本の供試体がかろうじて成形できる量である。しかし，大深度から採取された不攪乱洪積粘土試料は応力解放に伴う大小さまざまな亀裂が多数存在するため，直径22.5mm×高さ45mmの供試体でさえ成形することが困難で，直径50mm×高さ100mmの三軸供試体を成形することはほとんど不可能であった。

次に，弾塑性パラメータの決定手順を図-6.17に示す。沖積粘土や一部の洪積粘土については，不攪乱試料が入手できなかったため，既往の文献から妥当と思われる数値を用いることにした。この様にして決定した弾塑性パラメータの一覧を表-6.7に示す。そして，ミニ三軸試験と標準圧密試験結果から決定したこれらの弾塑性パラメータの妥当性を調べるため，一次元圧密解析を行った。図-6.16(a)に示した地盤を図-6.16(b)の解析メッシュのようにモデル化し，総要素数48，総節点数98のメッシュに分割した。粘性土はすべて弾塑性体，砂層は弾性体とし，弾塑性構成式はMatsui & Abeによって提案された構成式<sup>12)</sup>を用いた。砂層は層厚にかかわらず全層を排水層とし，図-6.18に示すような埋立工程を忠実に再現した。図-6.19は地盤改良完了後の日数と沈下量の関係を示している。解析結果は洪積粘土の沈下挙動を比較的良好に表現できていると考えられ，入力した弾塑性パラメータの妥当性が示された。

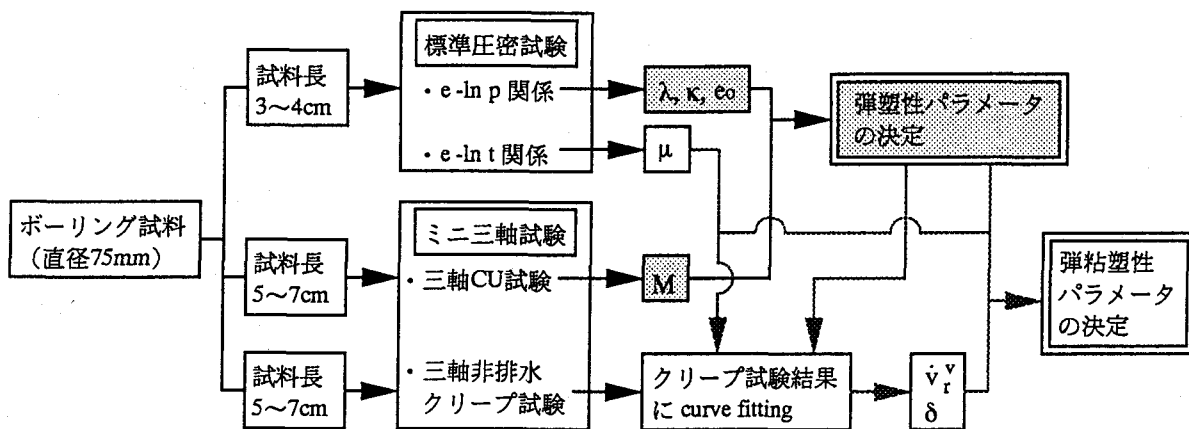


図-6.17 弾塑性・弾粘塑性パラメータの決定手順



図-6.18 埋立工程図

表-6.7 弾塑性パラメータ一覧

要素	地層区分	圧縮指数 $\lambda$	膨潤指数 $\kappa$	破壊 応力比 M	初期 間隙比 $e_0$	過圧密比 OCR	透水係数 k (m/day)	透水係数 変化指数 $\lambda k$	水中単位 体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
1	Ac	0.850	0.040	1.20	3.40	1.00	1.500E-1	1.200	4.41
2		0.800			3.30				5.40
3		0.750			3.20				
4		0.700			3.10				
5		0.650			3.00				
6	Sand	E=110.0(MPa)		—	—	—	—	9.81	
7	Dtc	0.269	0.027	1.20	1.645	1.40	8.530E-5	0.437	7.85
8	Sand	E=110.0(MPa)		—	—	—	—	9.81	
9	Dtc	0.381	0.038	1.20	1.441	1.40	5.348E-5	0.437	7.85
10		0.352	0.035		1.371		4.557E-5		
11	Sand	E=137.3(MPa)		—	—	—	—	9.81	
12	Ma12	0.555	0.061	1.33	2.040	1.40	7.030E-5	0.435	5.89
13					2.020		6.714E-5		
14					2.000		6.412E-5		
15	Doc1	0.555	0.061	1.33	1.980	—	6.124E-5	0.435	5.89
16	Sand	E=137.3(MPa)		—	—	—	—	9.81	
17	Ma11(2)	0.375	0.051	1.33	1.343	1.40	3.470E-5	0.296	5.89
18					1.333		3.355E-5		
19					1.323		3.243E-5		
20	Doc2	0.375	0.051	1.33	1.318	1.40	3.189E-5	0.296	7.36
21	Sand	E=137.3(MPa)		—	—	—	—	9.81	
22	Ma11(1)	0.490	0.020	1.42	1.440	1.40	2.730E-5	0.292	5.10
23					1.435		2.684E-5		
24					1.430		2.638E-5		
25	Sand	E=137.3(MPa)		—	—	—	—	9.81	
26	Ma10	0.443	0.048	1.32	1.595	1.40	2.630E-5	0.492	6.38
27					1.585		2.577E-5		
28					1.575		2.525E-5		
29					1.565		2.474E-5		
30	Doc4	0.621	0.049	1.39	1.589	1.40	3.700E-5	0.391	6.87
31	Sand	E=137.3(MPa)		—	—	—	—	9.81	
32	Ma9	0.440	0.032	1.38	1.275	1.40	3.430E-5	0.354	6.38
33					1.265		3.334E-5		
34					1.255		3.242E-5		
35					1.245		3.151E-5		
36	Doc5	0.626	0.080	1.48	1.590	1.50	1.710E-5	0.293	6.87
37	Sand	E=137.3(MPa)		—	—	—	—	9.81	
38	Doc5	0.626	0.080	1.48	1.575	1.50	1.625E-5	0.293	6.87
39					1.565		1.570E-5		
40					1.560		1.544E-5		
41	Sand	E=137.3(MPa)		—	—	—	—	9.81	
42	Ma8	0.200	0.018	1.66	1.060	1.50	2.240E-6	0.126	5.89
43					1.055		2.153E-6		
44	Sand	E=137.3(MPa)		—	—	—	—	9.81	
45	Ma7	0.506	0.051	1.38	1.315	1.50	1.840E-5	0.362	7.36
46					1.310		1.815E-5		
47					1.305		1.790E-5		
48					1.300		1.765E-5		



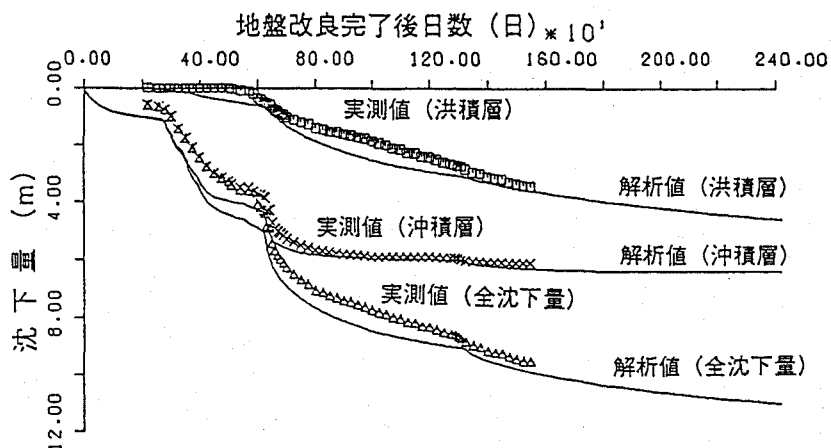


図-6.19 地盤改良後の日数-沈下量関係

次に、弾粘塑性構成式に含まれるパラメータを決定した例を示す。弾粘塑性構成式は弾塑性パラメータ以外に粘性パラメータを必要とする。粘性パラメータは構成式によって様々であるが、ここではMatsui & Abeによって提案された弾粘塑性構成式<sup>13)</sup>に含まれるパラメータを使用する。Matsui & Abeモデルに含まれる粘性パラメータは、二次圧密係数 $\mu$ 、基準粘性体積ひずみ速度 $\dot{v}_r^v$ 、内部拘束ひずみ速度 $\delta$ の3つである。これらの粘性パラメータを調べるためには、時間依存性挙動を調べる試験を行う必要があり、中圧ミニ三軸試験機で非排水クリープ試験を行った。二次圧密係数は、標準圧密試験において一次圧密終了後に現れる体積ひずみと自然対数表示の時間との直線部分の傾きによって決定できるが、他の粘性パラメータについては、クリープ試験などの結果にカーブフィッティングして決定した。弾粘塑性パラメータの決定についての詳細は参考文献<sup>14),15)</sup>を参照されたい。この様にして決定したパラメータを用いて、非排水せん断試験のシミュレーション解析を行った。使用した弾粘塑性パラメータとシミュレーション解析の結果を表-6.8 および図-6.20 に示す。ミニ三軸試験結果とシミュレーション解析の結果は大きく異なることから、ある程度妥当性のある弾粘塑性

表-6.8 弾粘塑性パラメータ一覧

圧縮指数	$\lambda$	0.44
膨潤指数	$\kappa$	0.03
初期間隙比	$e_0$	1.16
破壊応力比	$M$	1.38
二次圧密係数	$\mu$	$9.00 \times 10^{-3}$
基準粘性体積ひずみ速度	$\dot{v}_r^v$	$7.00 \times 10^{-8}$
内部拘束ひずみ速度	$\delta$	$2.00 \times 10^{-3}$

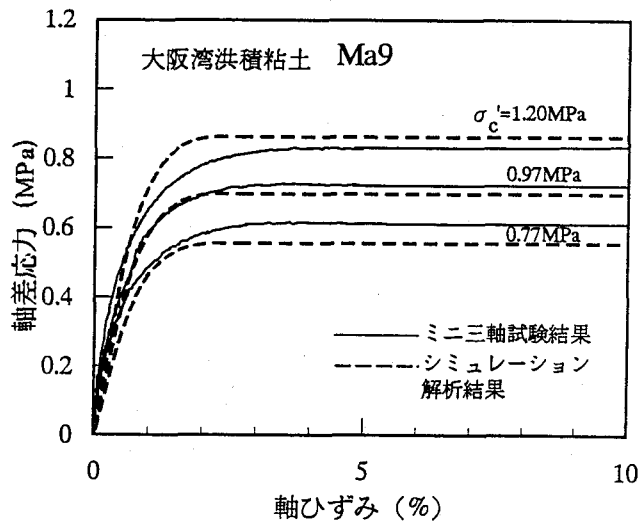


図-6.20 弾粘塑性シミュレーション解析

パラメータを決定できていることが示された。

以上のことから、標準圧密試験とミニ三軸試験を組み合わせることによって、少量の試料からでもある程度妥当性のある弾塑性あるいは弾粘塑性パラメータを決定できることが示された。

### 6.3 まとめ

本章では、少量の試料に対しても三軸試験が行えるミニ三軸試験の特徴を利用した適用例を示し、その有用性を確認した。本章の結論は以下に示す通りである。

- 1) 堆積環境の変化が粘土の力学特性に及ぼす影響について調べた結果、堆積環境が異なれば同一の粘土層内でも物理特性や力学特性は異なることが示された。また、ミニ三軸試験ではこの様な同一粘土層内の力学特性の変化を詳細に調べ得ることが示された。
- 2) 不攪乱洪積粘土の年代効果がせん断特性に及ぼす影響について、ミニ三軸試験結果をもとに検討した結果、有効圧密圧力が大きくなるほど年代効果の影響が小さくなり、練返し粘土の挙動に近づくことが示された。また、不攪乱洪積粘土と練返し洪積粘土の最大軸差応力を間隙比に関連する指標を用いて統一的に表現できる可能性について示した。
- 3) 少量のボーリング試料について行ったミニ三軸試験結果と標準圧密試験結果から、弾塑性・弾粘塑性パラメータを決定し、その妥当性を実測結果やミニ三軸試験結果との比較を通して検討した。その結果、決定した弾塑性・弾粘塑性パラメータはある程度妥当性を持つことが示された。

## 参考文献（第4章）

- 1) 中世古幸次郎 他：関西国際空港地盤地質調査，災害科学研究所報告，災害科学研究所，1984.
- 2) 阪神高速道路公団神戸建設部・財団法人災害科学研究所：湾岸線建設予定地域の地盤特性に関する研究，1988.
- 3) 堆積環境が地盤特性に及ぼす影響に関する研究委員会：堆積環境が地盤特性に及ぼす影響に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，1995.
- 4) 諏訪靖二，松井保：大阪盆地における堆積環境と土質特性，土と基礎，地盤工学会，Vol.43, No.10, pp.41~44, 1995.
- 5) 田中泰雄，正垣孝晴，板橋一雄，安福規之：沖積粘土層の力学的性質，土と基礎，地盤工学会，Vol.43, No.10, pp.27~30, 1995.
- 6) 吉國洋，森脇武夫：高温圧密した広島粘土の一軸圧縮挙動，第47回土木学会年次学術講演会概要集，pp.432~433, 1992.
- 7) 落合英俊，藤井邦男：換算圧密圧力に基づく練り返し粘土の非排水強度の予測，第27回土質工学研究発表会講演集，pp.707~710, 1992.
- 8) Pandian, N. S., Nagaraj, T. S. and Siva Kumar Babu, G. L. : Generalized state parameter for partly saturated soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.118, No.4, pp.622~627, 1992.
- 9) Mitchell, J. K. : Fundamentals of Soil Behavior, Jhon Wiley & Souns, Sons Inc., 1975.
- 10) 松井保：超軟弱地盤の流動・変形機構，超軟弱地盤に関するシンポジウム論文集，土質工学会，pp.25~34, 1977.
- 11) Burland, J. B. : On the compressibility and shear strength of natural clays, Geotechnique, Vol.40, No.3, pp.329~378, 1990.
- 12) Matsui, T. and Abe, N. : Multi-dimentional elasto-plastic consolidation analysis by finite element method, Soils and Foundations, Vol.21, No.1, pp.79~95, 1986.
- 13) Matsui, T. and Abe, N. : Flow surface model of viscoplasticity for normally consolidated clay, Proceedings of Second International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, pp.157~164, 1986.
- 14) 松井保，小田和広，鍋島康之：ミニ三軸試験による泉州地域海底粘土の力学パラメーターに関する研究，海底地盤に関するシンポジウム'94発表論文集，土質工学会関西支部，pp.107~112, 1994.
- 15) Matsui, T., Abe, N., Oda, K. and Nabeshima, Y. : Mechanical parameters of clays in Osaka Bay using mini-triaxial tests, Porceedings of the International Conference on Soft Soil Engineering, pp.184~189, 1993.

## 第7章 結 論

大阪湾をはじめとして各地でウォーターフロント開発が計画・進行中である。これらのプロジェクトは技術的・工学的にかなり複雑な問題を抱えており、これまでよりも詳細な地盤情報を必要としている。しかし、沖積粘土よりもさらに深部にある洪積粘土については、ボーリングデータも少なく、採取される試料の量も決して多くない。このため、十分な力学的調査が行えないのが現状であり、限られた量の採取試料においても十分な力学的調査ができる手段が必要となっている。また、沖積粘土層内においても、その地盤性状は同一ではなく、かなり変化していることが明らかにされている。このため、同一の地層内においても詳細な力学的調査をする必要性が生じている。本研究は、以上の社会的実状をふまえ、新しい三軸試験法として通常の供試体よりも小さい寸法の供試体を用いるミニ三軸試験機を開発し、ミニ三軸試験の適用性について検討するとともに、実際に自然堆積粘土へ適用することによって、ミニ三軸試験の有用性を示したものである。以下に本論文で得られた結果を各章ごとに要約し、結論とする。

第1章では、本研究の目的・意義について述べ、本論文の構成について述べた。

第2章では、まずミニ三軸試験で使用する供試体と土質試験法で規定されている三軸試験で使用する供試体の比較を行い、小さい供試体を用いることの利点について述べた。また、本研究において開発したミニ三軸試験機、中圧ミニ三軸試験機、パソコン制御ミニ三軸試験機およびひずみ経路制御ミニ三軸試験機の概要について説明すると共に、ミニ三軸試験における試験手順、試験条件ならびに供試体の飽和方法についてまとめた。

第3章では、土質試験法で規定されているよりも小さい寸法の供試体を使用する際に問題となる寸法効果の影響について、数値解析的・試験的に検討を行った。まず、ミニ三軸試験で用いる供試体（直径22.5mm）と従来の三軸試験で用いる供試体（直径35, 50mm）をモデル化し、弾粘塑性構成式を用いた有限要素解析によって三軸（ $\overline{CU}$ ）試験のシミュレーション解析を行った。また、実際の不攪乱自然堆積粘土を試料として、3種類の寸法の異なる供試体（直径22.5, 35, 50mm）を用いた三軸（ $\overline{CU}$ ）試験を行い、寸法効果の影響について実験的にも比較検討した。

弾粘塑性シミュレーション解析ならびに自然堆積粘土を用いた三軸（ $\overline{CU}$ ）試験の結果、圧密過程では、供試体寸法が小さくなるほど一次圧密終了に要する時間が短縮され、試験時間を短縮できることが示された。また、供試体端面に摩擦が存在する場合、供試体寸法が小さくなるほど、供試体端面の摩擦による影響が大きくなる。しかし、供試体端面の摩

擦を低減することによって、供試体の寸法によらずほぼ同一の応力-ひずみ挙動が得られることを明らかにした。つまり、供試体端面の摩擦の影響を十分に低減した場合、ミニ三軸試験は従来の三軸試験と同一の試験結果を比較的短時間に得られることを示した。

第4章では、大阪湾およびその周辺で採取された不攪乱自然堆積粘土試料を用いて、各種のミニ三軸試験を行った結果についてまとめるとともに、既存の調査・研究と比較して、様々な角度からミニ三軸試験の自然堆積粘土への適用性について検討した。

まず、大阪湾および大阪湾周辺で採取された不攪乱自然堆積粘土について行ったミニ三軸試験結果（強度増加率，変形係数，破壊時間隙水圧係数）と既往の三軸（ $\overline{CU}$ ）試験結果を比較検討した。その結果，比較したせん断特性はほぼ一致し，ミニ三軸試験が土質試験法として十分な適用性をもつことを示した。また，パソコン制御ミニ三軸試験機を用いた不攪乱沖積粘土の応力比一定圧密試験結果から，沖積粘土の $K_0$ 値および降伏曲面を決定し，既往の $K_0$ 値に関する研究結果ならびに弾塑性構成式の降伏曲面と比較検討した。その結果， $K_0$ 値ならびに降伏曲面はよく一致することを示した。次に，パソコン制御ミニ三軸試験機を用いた不攪乱沖積粘土の平均有効主応力一定試験結果と既往の弾塑性構成式におけるストレス-ダイレイタンスー関係を比較した。その結果，不攪乱沖積粘土のストレス-ダイレイタンスー関係は，Cam clay modelのストレス-ダイレイタンスー関係と比較的によく一致することを示した。さらに，中圧ミニ三軸試験機を用いた不攪乱洪積粘土の非排水クリープ試験結果と既往のクリープ試験結果を比較した。その結果，不攪乱洪積粘土の非排水クリープ挙動は，同じ地域で採取された不攪乱沖積粘土の非排水クリープ挙動とほぼ同じ傾向を示すことを示した。

第5章では，供試体内部の応力やひずみの分布状態を均一に保ち，大きなひずみ領域までせん断することを目的として開発されたひずみ経路制御試験を，ミニ三軸試験機を用いることによって，これまで適用例のなかった粘土に対してひずみ経路制御試験を行った。本研究では，練返し粘土ならびに自然堆積粘土を試料としてひずみ経路制御試験を行った。

ひずみ経路制御試験結果は，粘土の種類にかかわらず，軸ひずみと体積ひずみの増分比であるひずみ増分比に依存して大きく変化する，ひずみ経路依存性を示すことを明らかにした。また，ひずみ経路制御試験結果と平均主応力一定試験結果の比較を通して，粘土のひずみ経路依存性挙動はDPVCによる制御量とダイレイタンスーに関連していることを明らかにした。

第6章では，ミニ三軸試験の特徴を利用した3つの適用例を示し，その有用性を確認した。すなわち，堆積環境が粘土の力学特性に及ぼす影響について調べた結果，堆積環境が異なれば同一の粘土層内でも物理特性や力学特性は異なることが示され，ミニ三軸試験を用いることによって，この様な同一粘土層内の力学特性の変化を詳細に調べ得ることを示した。次に，不攪乱洪積粘土の年代効果がせん断特性に及ぼす影響について，ミニ三軸試験結果をもとに検討した結果，有効圧密圧力が大きくなるほど年代効果の影響が小さくなり，練返し粘土の

挙動に近づくことを示した。また、不攪乱洪積粘土と練返し洪積粘土の最大軸差応力を間隙比に関連する指標を用いて統一的に表現できる可能性について示した。さらに、少量のボーリング試料に対してミニ三軸試験と標準圧密試験を行い、その結果をもとに弾塑性・弾粘塑性パラメータを決定できることを示した。また、そのパラメータの妥当性を実測結果やミニ三軸試験結果との比較を通して検討した。その結果、ミニ三軸試験と標準圧密試験の結果から決定した弾塑性・弾粘塑性パラメータはある程度妥当性を持つことを示した。

第7章では、本論文の内容を総括し、第1章から第6章までの各章で得られた結果をまとめて結論とした。

## 謝 辞

本論文は、著者が大阪大学大学院博士課程および大阪大学工学部土木工学科土質基礎工学研究室 助手として今日に至るまでの研究成果をまとめたものであります。本論文をまとめるにあたって、多くの方々にご指導とご援助をいただきました。ここに感謝の意を表します。

まず、著者が学生としてこの土質基礎工学研究室に配属されて以来、終始変わらぬご指導、ご教示を賜りました大阪大学 松井 保教授には心より厚くお礼申しあげるとともに、ご論文をまとめる機会を与えて頂いたことに心から感謝いたします。松井 保教授には研究者としての物の考え方から、大学における教育者としての姿勢まで様々なことに対してご教授いただきました。時には厳しいお言葉もいただきましたが、常に暖かく見守っていただきました。先生からいただいた数々のお言葉を胸に優れた研究者・教育者となるべく努力いたします。また、貴重なご意見・ご提言を頂いた大阪大学 阿部信晴助教授には深甚な謝意を表します。さらに、著者が本研究を始めた当所から本研究全般にわたってご指導・ご援助頂きました大阪大学 小田和広助手には深く感謝いたします。この研究を始めた当初はなかなか研究が軌道に乗らず、深夜まで試験装置の改良を加えねばならないこともしばしばありましたが、愚痴一つ言わず著者につきあっていただいたことは一生忘れられません。心からお礼申しあげます。

また、ひずみ経路制御ミニ三軸試験機を製作するにあたって、カナダ・ブリティッシュコロンビア大学 Y. P. Vaid 教授、神戸大学農学部 内田一徳 教授には貴重なご意見とご協力をいただきました。ブリティッシュコロンビア大学で過ごした1月あまりの日々は、著者にとって非常に良い経験となりました。さらに、オーストラリア・ニューサウスウェールズ大学 R. S. C. Lo 博士には、ひずみ経路制御ミニ三軸試験について数々のご助言をいただきました。今日、著者が研究者としてあるものこれら先生方のご指導とご教示によるものと心から感謝しております。

なお、本研究を遂行するにあたって、試料の採取、三軸試験の遂行、図表の作成等、ご協力頂いた大阪大学工学部土木工学科土質基礎工学研究室の卒業生ならびに在学生の方々に心より感謝いたします。

最後に、著者が大学院博士課程に進学することを快く承諾し、常に著者の健康を気遣ってくれた両親・兄弟をはじめ、様々なご温情、ご配慮を頂いた方々に感謝いたします。今後とも、これらの方々からいただいたご高恩に報いるため、精一杯努力していく所存です。