

表録

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

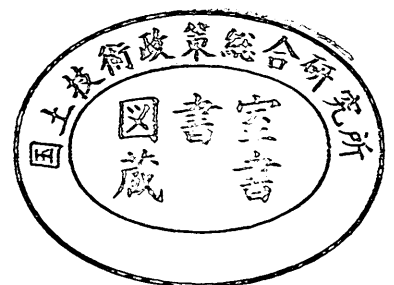
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 10

NO. 1

MAR. 1971

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告は第7巻第1号より年4回定期的に刊行する。
報告の入手を希望する方は論文番号を明記して港湾技術研究所長に申し込んで下さい。

The Report of the Port and Harbour Research Institute is published quarterly, either in Japanese or in occidental languages. The title and synopsis are given both in Japanese and in occidental languages.

The copies of the Report are distributed to the agencies interested on the basis of mutual exchange of technical publication.

Inquiries relating to the Report should be addressed to the director of the Institute specifying the numbers of papers in concern.

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第10巻 第1号 (Vol. 10, No. 1), 1971年3月 (Mar. 1971)

目 次 (CONTENTS)

1. An Experimental Study of the Turbulent Structure of Wind over Water WavesHajime KATO, Kikuo SANO..... 3
(水面波上の風の乱流構造に関する実験的研究.....加藤 始・佐野喜久雄)
2. 波浪データの集中処理方式について高橋智晴・鈴木禮実・佐々木 弘
副島 毅・菅原一晃・中井徹也..... 43
(On a Concentrative Handling and Analysis System for Wave Observation DataTomoharu TAKAHASHI, Yoshimi SUZUKI, Hiroshi SASAKI and Takeshi SOEJIMA, Kazuteru SUGAHARA, Tetsuya NAKAI)
3. 粘土試料のかく乱に関する研究 (第3報)
—単純せん断試験機による繰り返し破壊試験および圧密試験—
.....奥村樹郎・梅田裕史・成田 実..... 77
Studies on the Disturbance of Clay Samples (3rd Reports)
—Repeated Loading Tests and Consolidation Tests with a Simple Shear Apparatus—
.....Tatsuro OKUMURA, and Hirofumi UMEAD, Minoru NARITA)
4. 数値解による杭の横抵抗の基準曲線の作成山下生比古・稲富隆昌・小蔵紘一郎・奥山育英.....107
(New Standard Curves in the PHRI MethodIkuhiko YAMASHITA, Takamasa INATOMI, Koichiro OGURA and Yasuhide OKUYAMA)
5. 掘削時における砂の応力—ひずみ関係の一考察岩崎峯夫・麻山和正・石塚浩次・河野 茂.....169
(Study on the Stress-strain relationship of soils under excavationMineo IWASAKI, Kazumasa ASAYAMA, Kozi ISHIZUKA and Sigeru KONO)

3. 粘土試料のかく乱に関する研究 (第3報)

——単純せん断試験機による繰り返し破壊試験および圧密試験——

奥村 樹郎*・梅田 裕史**・成田 実**

要 旨

粘土試料のかく乱による力学特性の変化を調べるためノルウェー型の単純せん断試験機により本牧海底粘土の等体積繰り返し破壊試験および圧密試験を行ない、繰り返し三軸圧縮試験および標準圧密試験の結果と比較した。

単純せん断試験によるせん断強度は三軸圧縮試験の非排水強度より小さいが、かく乱に伴う強度特性の変化はほぼ同様で、残留有効応力の低下とともに強度は一義的に低下する。また Hvorslev のパラメーターもかく乱の範囲が大きいと変化して行く。

かく乱試料を圧密すると間げき比および体積圧縮係数と圧密圧力との関係は下方に移動するが、残留有効応力に基づいた整理方法により、圧密圧力やかく乱度にかかわらず一義的な関係が見出された。また圧密係数および透水係数はかく乱度が小さいうちは正規圧密状態より大きいことも判った。

* 土質部 地盤改良研究室長

** 土質部 土質試験課

Studies on the Disturbance of Clay Samples (3rd Report)

—Repeated Loading Tests and Consolidation Tests with a Simple Shear Apparatus—

Tatsuro OKUMURA*

Hirofumi UMEDA**

Minoru NARITA**

Synopsis

In order to investigate the changes in mechanical properties of a clay, repeated loading tests and consolidation tests with the Norwegian simple shear apparatus were carried out on the Honmoku marine clay and compared with the results of the repeated loading triaxial test and the oedometer test.

The shear strength in simple shear is less than the undrained strength in triaxial compression, but the change in strength properties with disturbance is similar to those in the triaxial test. Hvorslev's parameters change with a wide range of disturbance.

Consolidation of the disturbed sample results in a downward shift of the void ratio vs. and the coefficient of volume compressibility vs. consolidation pressure curve, but the residual effective stress helps to find a unique relationship on these properties regardless of the amount of the disturbance or the consolidation pressure. The coefficient of consolidation and the coefficient of permeability of the slightly disturbed sample are larger than those of the normally consolidated one.

* Chief of the Soil Stabilization Laboratory, Soils Division

** Member of the Soil Test and Investigation Section, Soils Division

目 次

要 旨	77
1. ま え が き	81
2. 単純せん断試験機の概要	81
2.1 試験機の特徴	81
2.2 圧密およびせん断装置の機構	82
3. 試験方法と試験誤差	84
3.1 試料の調整	84
3.2 試験の種類と方法	85
3.3 試験誤差	87
3.3.1 圧密に伴う横変位	87
3.3.2 せん断中の体積変化	87
3.3.3 その他の試験誤差	88
4. 試験結果とその検討	89
4.1 せん断試験	89
4.1.1 せん断試験結果	89
4.1.2 三軸圧縮試験との比較	96
4.1.3 かく乱による強度特性の変化	97
4.2 圧密試験	99
4.2.1 標準圧密試験との比較	99
4.2.2 かく乱による間げき比～圧密圧力関係の変化	100
4.2.3 かく乱による体積圧縮係数の変化	102
4.2.4 かく乱による圧密および透水係数の変化	103
5. む す び	105
6. あとがき	105
参考文献	105
記 号 表	106

1. まえがき

粘土試料に人工的なかく乱(攪)乱を与える方法の一つとして先に三軸圧縮試験機による繰り返し破壊試験を行ない、その結果に基づいて乱れた試料の強度補正法を提案したが(奥村, 1969), 三軸試験機を用いる方法では繰り返し破壊に伴う供試体断面の変化, クラックの発生など問題点も多い。そこで今回ノルウェー型の単純せん断試験機 (Direct-Simple Shear Apparatus) を購入し, 等体積 (非排水) 条件で繰り返し破壊試験を行なった。またかく乱試料の圧密特性を調べるために繰り返し破壊後の圧密試験をも行なっている。ここに試験機の概要とともにせん断および圧密試験の結果を報告する。

2. 単純せん断試験機の概要

2.1 試験機の特徴

ノルウェー型の単純せん断試験機は図-1 に示すよう

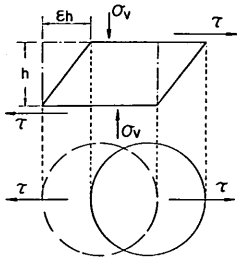


図-1 単純せん断説明図

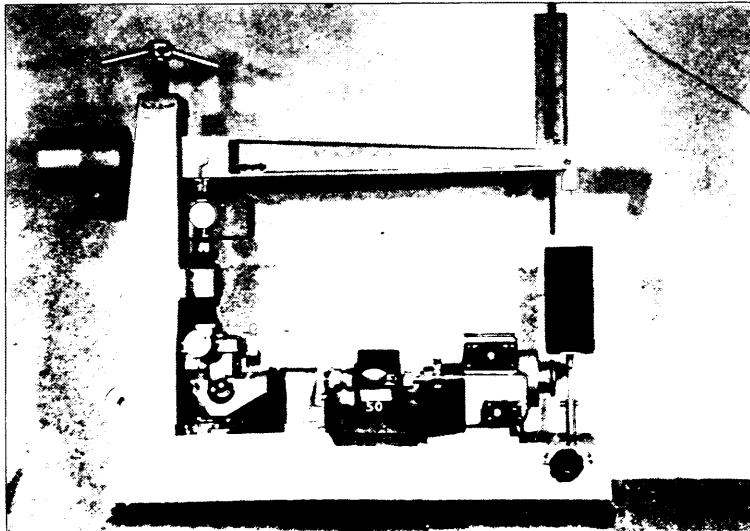


写真-1 ノルウェー型単純せん断試験機

にマッチ箱を潰すような型のせん断を行うための装置で写真-1 にその全容を, 図-2 に機構の概要を示す(Geonor A/S, 1968)。

土のせん断を行なう試験機では三軸および一軸圧縮試験機が最も一般的であるが, ここでは応力とひずみが軸対称であり, 現場の工事に多い平面ひずみの条件を満たさない。これに対しやはりよく用いられる一面せん断試験機はせん断面が一平面に限られるなどの欠点を持つ。これらの点を考慮して平面ひずみ試験機, ねじりせん断試験機など多くの特殊せん断試験機が開発されている。単純せん断試験機もそのうちの1つであり, 一様で正しい意味でのせん断ひずみを与えることができ, せん断面におけるせん断応力が明瞭である(せん断試験法委員会, 1969)。またせん断中に供試体断面積が変わらないこと, 圧密中に三軸試験機のような側方変位がないことなどにその特色がある。

単純せん断試験機にもいくつかの種類がある。1936年に Kjellman の作った試験機では高さ 2 cm, 直径 6 cm の供試体をゴム膜で包み, その周囲を互いにスライドし得るアルミリングが多数取り巻いている形となっている(Kjellman, 1951)。一方 Roscoe が 1953 年に考案した試験機は直方供試体の側面を剛性板で押える方法によって完全に一様なひずみを起させている(Roscoe, *et al.*, 1967)。これに対しノルウェー型の単純せん断試験機 (Bjerrum and Landva, 1966) は Kjellman 型のアルミリングの代りにピアノ線をらせん状に埋め込んだゴム膜を用いてお

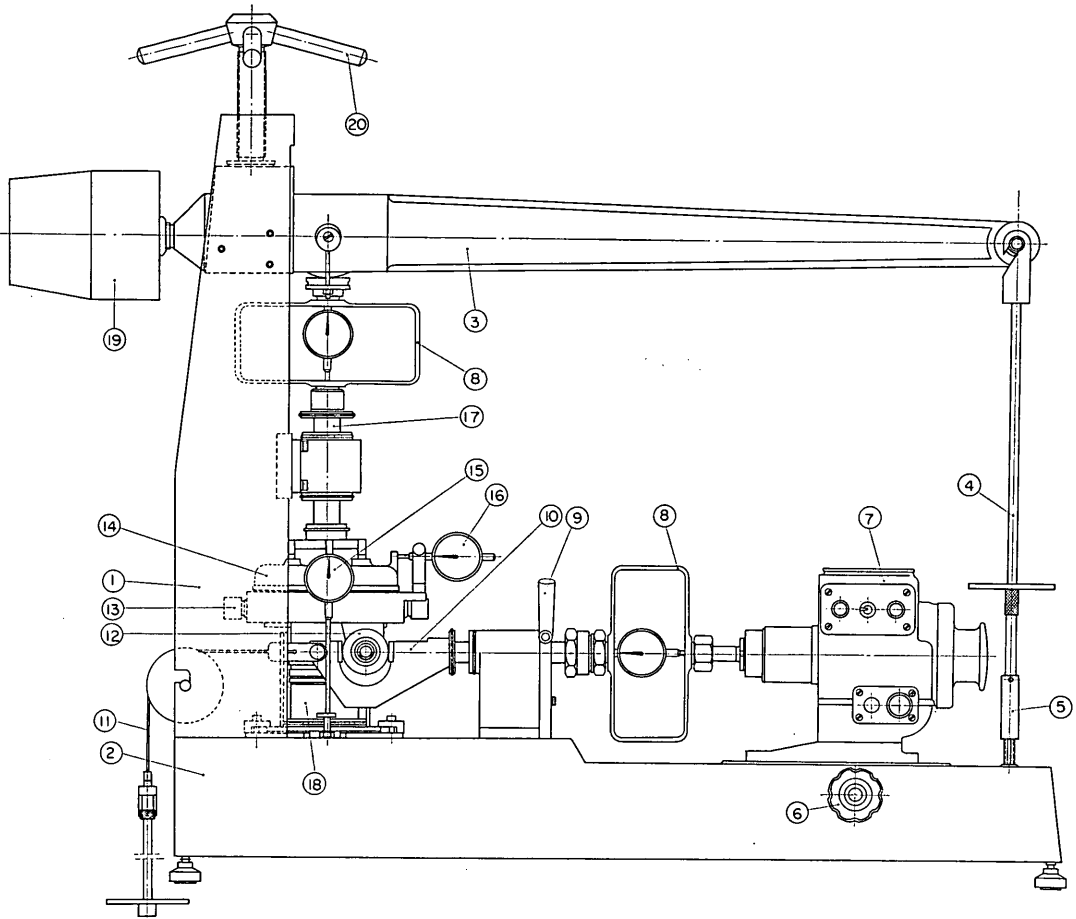


図-2 単純せん断試験機概要図

- | | | |
|------------------|---------------|------------------|
| ① 支持檜 | ② ベース | ③ レバー |
| ④ 鉛直荷重載荷台 | ⑤ 鉛直変位固定ネジ | ⑥ 鉛直変位微調整ネジ |
| ⑦ ギアボックス | ⑧ プルービングリング | ⑨ 水平変位ストッパー |
| ⑩ 水平載荷フォーク | ⑪ 水平荷重載荷台 | ⑫ 水平載荷輪 |
| ⑬ クランプネジ | ⑭ スライディングボックス | ⑮ ダイアルゲージ (鉛直変位) |
| ⑯ ダイアルゲージ (水平変位) | ⑰ 鉛直載荷シャフト | ⑱ ペDESTAL |
| ⑲ カウンターウェイト | ⑳ レベル調整用把手 | |

り、アルミリング間の摩擦の問題を解決して、より一様なひずみを与えることができる。Roscoe 型の試験機に較べるとひずみの一様性はより不完全であるが、取扱いは格段に容易である。またこの試験機では応力制御、ひずみ制御両方式のせん断を行うことができ、等体積 (非排水) せん断装置を有している。

2.2 圧密およびせん断装置の機構

図-2 に示した試験装置のうち 供試体附近の拡大図を 図-3 に示す (Geonor A/S, 1968)。

載荷台上に載った重錘荷重は 10 倍に拡大されて鉛直載荷シャフト ⑰ に伝わり、ポーラストンを通じて供試体 ⑱ を圧密させる。附属の試料成型器は供試体断面積を 50 cm^2 (直径 79.8 mm) に仕上げるので、圧密圧力 (kg/cm^2) の 5 倍の重錘 (kg) を用いねばよい。

圧密時の横方向土圧は補強ゴムスリーブ ⑳ で支えられる。ゴムスリーブは厚さ約 0.78 mm の生ゴムの内部に直径 0.15 mm 、弾性係数 $1.55 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$ 、引張強度約 5000 kg/cm^2 のコンスタンタン (銅 55%, ニッケ

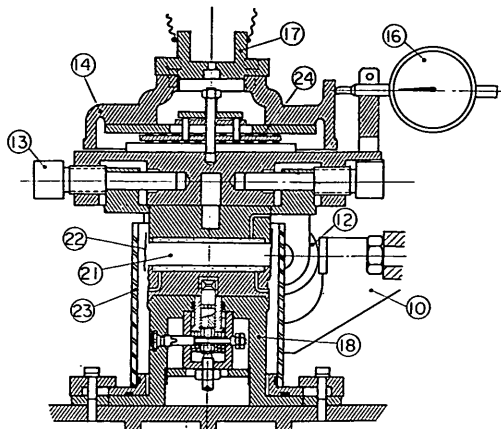


図-3 単純せん断試験機機構図

- ⑩ 水平荷重フォーク
- ⑫ 水平荷重輪
- ⑬ クランプネジ
- ⑭ スライディングボックス
- ⑮ ダイアルゲージ (水平変位)
- ⑰ 鉛直荷重シャフト
- ⑱ ペダスタル
- ⑲ 供試体
- ⑳ 補強ゴムスリーブ
- ㉑ プラスチック円筒
- ㉒ ボールベアリング

ル 44%) 製のワイヤーを 0.5 mm の中心間隔でバネ状に埋め込んだもので、横方向土圧による拡がりは 3.3.1 で述べるようにほとんど無視し得る。

ゴムスリーブの周りにはプラスチック円筒㉑があり、満水して乾燥を防ぐ。しかし、ポーラストンから浸み

出す水は排水孔を通じて自由に流出し、間げき水圧を測ることはできない。

せん断力は水平荷重フォーク ⑩ または水平荷重荷台 ⑪ によって加えられる。前者はひずみ制御の場合に、後者は応力制御の場合に用いられる。水平荷重フォークはブルーピングリング ⑧ を通じてギアボックス ⑦ に繋がり、変位は電動シンクロナスマーターで左右いずれの方向にも惹き起すことができる。変位速度はギアボックスで3通りに変えられ、附属のモーターを交換することにより 0.2~0.00002 mm/sec の間で 117 通りに変えられる。変位を調整するときのように急速に動かす場合にはギアを中間にして手動で廻すつまみがある。

せん断力が加わり水平変位が生ずると鉛直荷重が偏心してポーラストンを傾けようとする。これを防ぐためにボールベアリング ㉒ があり、偏心モーメントを吸収している。

せん断中の供試体高さを一定にするために鉛直変位固定ネジ ⑤ がある。しかし等体積せん断では鉛直応力がしだいに変化し、これに伴ってブルーピングリング ⑧ が変形してそれだけの誤差を生ずる。そこで鉛直変位用のダイアルゲージ ⑮ が動かないように鉛直変位微調整ネジ ⑥ を操作し、ブルーピングリングによる誤差を防ぐ。このようにしてもなおダイアルゲージで測定している範囲内の装置の変形(主としてポーラストンの変形など)があり、厳密には等体積の条件が満たされない。結局あらかじめ鉛直荷重に応じた装置の変形をダイアルゲージ ⑮ で測定して検定曲線を作成し、ダイアルゲージの読みが検定曲線上を移動するように鉛直変位微調整ネ

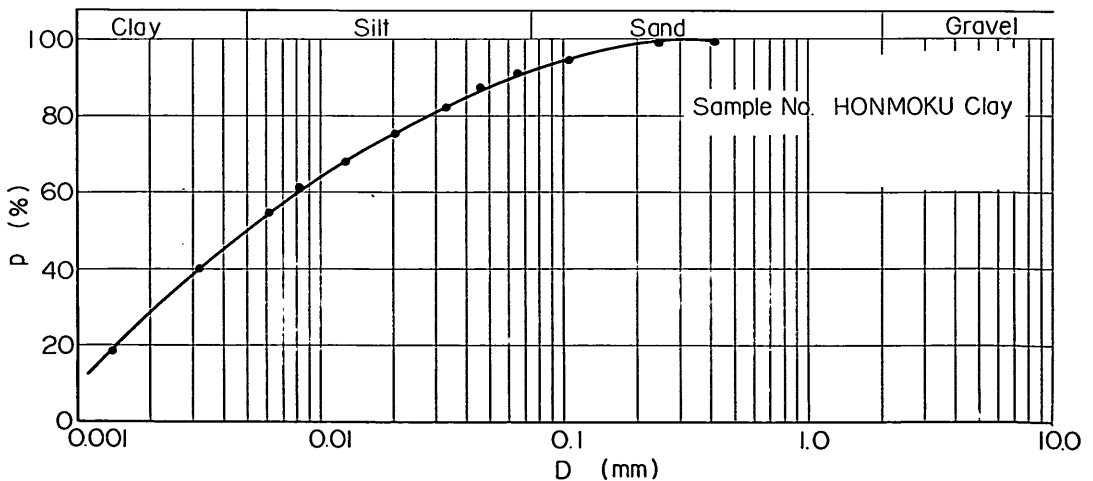


図-4 本牧海底粘土の粒径加積曲線

ジを操作して試験を進めることになる。なお等荷重条件でのせん断や圧密を行なうときには鉛直変位固定ネジ⑤をはずし、一定の重錘を載荷台④に載せればよい。

3. 試験方法と試験誤差

3.1 試料の調整

試験に用いた土は横浜港本牧地区の海底から採取して海水中に貯えた粘土でその特性を表-1に、粒度分布を図-4に示す。粘土は含水比120%程度で十分に練り返しながらか殻などを取り除き、内径14.3cm、高さ20.5cm

の再圧密箱で予備圧密を行なった。圧密載荷装置はレバー比1:5の標準型で、圧密圧力は0.5 kg/cm²を標準とした(表-2のN-2, N-3だけは1.0 kg/cm²としてゐる)。初めに0.1~0.2 kg/cm²の圧力で圧密した後、所定の圧力に上げ、10日間放置してか

表-1 本牧海底粘土の特性

土粒子比重	2.73
液性限界 (L.L.)	93%
塑性限界 (P.L.)	42%
塑性指数 (I _p)	51%
粘土分 (<2μ)	29%
日本統一分類	MH

表-2 試験の種類と方法

	試料番号	試験番号	含水比 (%)	圧密圧力 (kg/cm ²)	せん断方法	サイクル数	再圧密試験	
単純せん断試験	N-2	No. 3	77.5	4.000		1		
	N-3	4	77.5	4.010		1		
		5	76.6	4.001	サイクリック	4		
	N-4	6	76.7	4.002	"	4		
		7	82.8	4.006		1	○	
		8	82.9	4.006	サイクリック	4	○	
		9	83.1	3.994		(半)	○	
		10	83.2	4.008	サイクリック	10	○	
		11	83.4	4.010		1	○	
	N-5	12	85.5	4.009	零調整片側サイクル	(半)+5		
		13	85.5	8.042	サイクリック	10	○	
	N-6	14	85.1	4.021	零調整片側サイクル	7		
	三軸圧縮試験	U-1	$\overline{CK_0U-1}$	80.8	4.106 / 1.946	片側サイクル	3+(R _m)	
		U-2	2	83.5	2.149 / 0.957	"	4+(R _m)	
U-3		3	84.2	2.006 / 0.938	"	5+(R _m)		
U-1		$\overline{CK_0PU-1}$	80.4	4.593 / 1.943	"	3+(R _m)		
		2	81.2	4.411 / 1.946	"	3+(R _m)		
U-2		3	85.0	2.272 / 0.943	"	4+(R _m)		
		4	82.6	2.204 / 0.876	"	4+(R _m)		

ら除荷して試験に供している。

予備圧密を終った土塊はアルミフォイルに包み、底に水を入れたデシケーターに保存して乾燥を防いだ。表-2に試験前の各供試体の含水比を示したが、試料番号による多少の相異はあるものの、保存期間中の変化はあまりなく、若干含水比が増加する傾向を示している。

3.2 試験の種類と方法

今回の実験では単純せん断試験機による圧密等体積繰り返し破壊試験およびその後の再圧密試験を主体としたが、比較のため同じ粘土についての三軸圧縮試験も行なっている。表-2に試験の種類と個数を示した。

単純せん断試験の標準的な方法としては初めに 4 kg/cm^2 の圧力で供試体を圧密し、等体積の条件を守りながら、交互にせん断方向の異なる繰り返し破壊試験を数サイクル行ない、最後に水平変位を零に戻して再び圧密を行なった。一例だけではあるが圧密圧力を 8 kg/cm^2 に上げたものもある (No. 13)。せん断方法が若干異なるものとして2例については各サイクル毎に水平変位を零に戻し、せん断方向が片側だけの試験を行なった (No. 12, 14)。

三軸圧縮試験の方法は第1報 (奥村, 1969) の場合と同様で、初めに K_0 条件で圧密し (側方圧密圧力 $1, 2 \text{ kg/cm}^2$)、そのまま非排水条件で圧縮方向のみの繰り返し破壊試験を行なったもの ($\overline{CK_0U}$)、および K_0 圧密後非排水条件で軸差応力を解除し (いわゆる完全試料)、続いて圧縮方向のみの繰り返し破壊試験を行なったもの ($\overline{CK_0PU}$) の2種がある。

単純せん断試験を行なう供試体はカッティングエッジ

を有する成型器で直径 7.98 cm (実測値 7.973 cm)、高さ約 1.5 cm に仕上げる。供試体の高さは 2 cm まで可能であるが、あまり厚いと破壊時の水平変位が大きくなり、試料が曲りやすく、また圧密やせん断中の応力平衡に時間がかかる。逆にあまり薄いとポーラストンとの接触面の影響などがあって好ましくないので標準として 1.4 cm が推奨されている (Geonor A/S, 1968)。

成型した供試体は同じ成型器を用いてポーラストン付きのペDESTALに載せ、真空を利用して補強ゴムスリートを拡げながらこれを供試体に被せ、ポーラストン付きのキャップを載せる。しかしゴムスリーブの内径は供試体の直径より僅かに小さ目なので (実測による差は 0.175 mm)、操作に熟練が要り、また必ずしも供試体にポーラストンが密着していない。この点は圧密の第1段階の初期補正で調整した。なおゴムスリーブにOリングをはめて固定することはしなかった。

供試体の装填を終るとプラスチック円筒 (図-3の㊸) をはめ込んで水を注ぎ、試験機本体に装填して圧密荷重をかける。圧密試験の要領は通常の場合と同様で、 $0.5, 1, 2, 4 \text{ kg/cm}^2$ の圧密圧力を原則として24時間載荷した。繰り返し破壊試験で乱された試料の再圧密試験も同様で、原則として荷重増加率を1とした。

圧密を終るとスライディングボックス ㊹ の固定ピンをはずして供試体の上端が水平に移動できるようにし、水平載荷フォーク ㊺ の位置を手動で調整してからせん断に移る。せん断は全てひずみ制御で行ない、せん断速度は 78.7 min/mm ($0.11\%/min$) としたので1サイクルの試験に平均約10時間を要した。

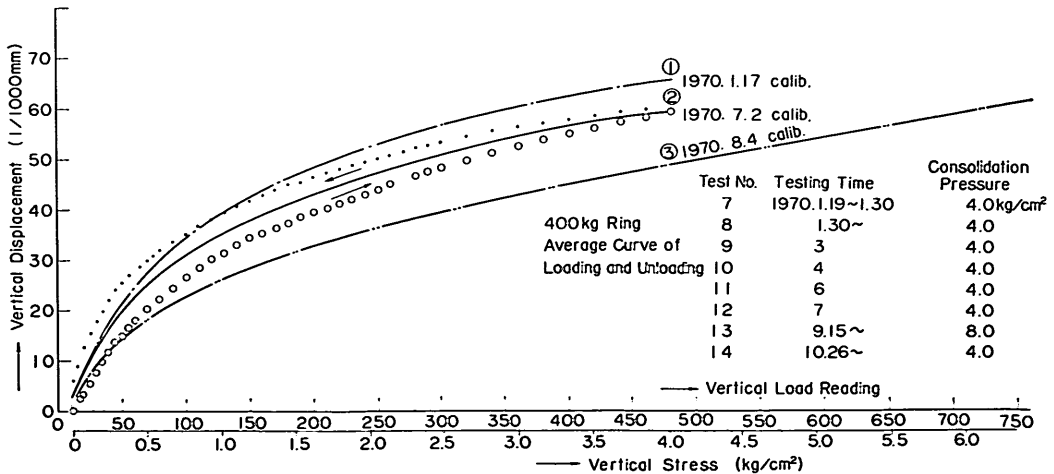


図-5 鉛直荷重と容器圧縮量との関係 (等体積調整用検定曲線)

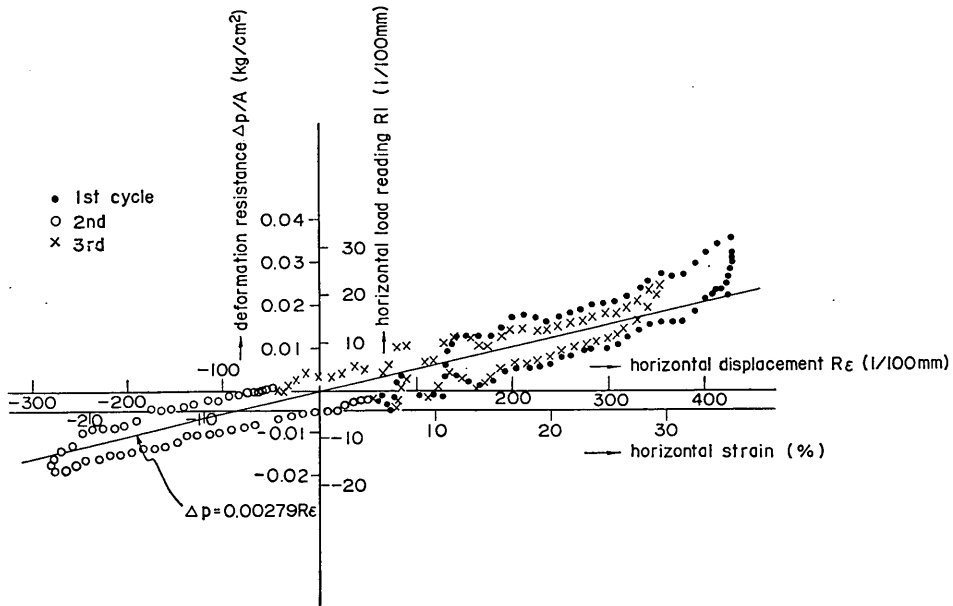


図-6 ゴムスリーブの変形抵抗

2.2 に述べたように等体積せん断を行なうためにはポーラスストーンなどの容器の変形を考慮して鉛直変位の微調整を行わなければならない。容器変形の検定曲線の例を図-5 に示す。図から判るように検定曲線はヒステリシスをもち、鉛直荷重が増加する時と減少する時とは異なる曲線をたどる。しかも最大荷重が大きいかほどヒステリシスループは大きくなる傾向があった。実際に繰り返し破壊試験を行なう場合には後で述べるように初めは荷重が減少する方向にあるが、サイクルが進むとせん断荷時には荷重が増加し、除荷時には減少し、さらに部分的には逆の場合もあって複雑な動きを示すのでこれに対応する検定曲線の作成は不可能に近い。しかし図-5 から判るように容器の変形量そのものは極く小さく（供試体高さの 0.5%）、さらにヒステリシスの大きさはそのまた 1 割以下なのでこれを無視した。すなわち予めブルーピングリングの容量一杯の最大荷重を 3~5 回加えて安定を良くし、次に予定の圧密荷重程度までの載荷・除荷を行ない、このヒステリシスループの平均(図-5 の実線)をとって検定曲線とした。

圧密およびせん断に伴う鉛直載荷シャフト(図-2の⑦)や水平載荷フォーク⑩の摩擦はブルーピングリングの目盛に現れないほど僅少であったが、せん断に伴うゴムスリーブの変形抵抗は無視できなかった。実測例を図-6 に示す。図から判るようにこの場合にもヒステリシス

ループが現れたが、他の実測例から変形範囲が小さい場合にはループも小さいことが判った。そこでデータ整理に用いた基準線としてはループの平均的な直線を取り(図-6 参照)、試験中のせん断力から変位に応じた抵抗を差し引き、これが実際に粘土試料にかかる力であるとした。

単純せん断試験のデータ整理は次式によっている。

$$\tau = \{a(R_l - R_{l0}) + b - 0.00279(R_\epsilon - R_{\epsilon 0})\} / 50 \quad \dots\dots (1)$$

$$\sigma_v = \{a(R_v - R_{v0}) + b\} / 50 \quad \dots\dots (2)$$

ここに a, b は各ブルーピングリングの換算係数で、計量研究所において検定した結果を最小自乗法で整理して求めている。次に R はダイヤルゲージの読みを意味し、サフィックス l は水平荷重測定用のブルーピングリング、サフィックス v は鉛直荷重測定用のブルーピングリング、サフィックス ϵ は水平変位測定用のダイヤルゲージ、またサフィックス 0 はそれぞれのインシャルリーディングを意味する。例えば $R_{\epsilon 0}$ は水平変位の読み(1/100 mm)の初期値である。したがって(1)式 { } 内の第 1, 2 項はブルーピングリングから換算した水平荷重、第 3 項はゴムスリーブによる抵抗の補正項を意味している。

三軸圧縮試験の装置は中瀬, 岸, 勝野 (1965) に述べられたものとはほぼ同様であるが、間げき水圧をナルインジケーターではなく半導体小型圧力変換器で測った点が異っている。

この間げき水圧計は受圧部の直径が 5 mm, 中心での変位が容量一杯の圧力に対して 4μ であり, その圧縮性は供試体に到るパイプ部分の水の圧縮性よりも小さいのでナルインジケータと同等以上の精度で水圧が測定されたと考えられる。実験に用いた間げき水圧計の容量は 5 kg/cm^2 であり, 記録は多ペンレコーダーにより自記させた。なおポーラスストーンには極目の細かいセラミックを使っている。

三軸圧縮試験の方法は第1報(奥村, 1969)に述べたのと同様であるが, 異なる点は次のようである。供試体の寸法は第1報と同様 $3.5 \text{ cm } \phi \times 8 \text{ cm}$ であるが, ゴムスリーブは全て1枚とし, 圧密を促進させるためのフィルターは 6 mm 幅のもの9枚を使用し, フィルター補正を行っていない。圧密時のバックプレッシャーは 1.0 kg/cm^2 とし, 荷重段階を5つに分けて $K_c=0.5$ 程度の圧密圧力比で載荷している。非排水せん断のひずみ速度は $0.03\%/ \text{min}$ としたが, かく乱試験だけは $0.1\%/ \text{min}$ とした。

3.3 試験誤差

3.3.1 圧密に伴う横変位

単純せん断試験機の補強ゴムスリーブは普通の圧密試験機における圧密リングほど剛ではない。したがって圧密試験に伴う試験誤差の1つとしてゴムスリーブを補強するピアノ線の伸びにより供試体断面積の変化することが考えられる。この場合のピアノ線の引張応力 σ_c は次式となる。

$$\sigma_c = K_c \sigma_v' r' / a \quad \dots\dots (3)$$

ここに K_c は圧密時の土圧係数, σ_v' は圧密圧力 (kg/cm^2), r' はゴムスリーブの半径 (4.03 cm), a はゴムスリーブ 1 cm 高当りのピアノ線断面積 ($3.62 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{cm}$) である。したがって供試体断面積の変化量 $\Delta A (\text{cm}^2)$ は次式で表わされる。

$$\frac{\Delta A}{A_0} = \frac{2K_c \sigma_v' r'}{Ea} \quad \dots\dots (4)$$

ここに A_0 は供試体の初期断面積 (50 cm^2), E はピアノ線の弾性係数 ($1.55 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$) である。圧密時の土圧係数を 0.44 とし, () 内に示したゴムスリーブの常数を用いると (4) 式は $\Delta A/A_0 = 6.3 \times 10^{-4} \sigma_v'$ となって通常の圧密圧力 4 kg/cm^2 では 0.25% , 最大圧密圧力 14 kg/cm^2 を載せた時には 0.88% の面積ひずみを生じることになるが, 実験の目的には差しさえない。

3.3.2 せん断中の体積変化

繰り返しせん断は等体積の条件で行ない, せん断中は

体積変化のないよう調整しながら試験を進めたが, 必ずしも 100% 等体積の条件が満足されているとは云えず, 一時的には微小な変位があったものと思われる。体積変化は微小であってもこれを応力に換算するとかなりの大きくなり, したがってせん断強度, 間げき圧係数などにも大きく影響することが予想されるので, その誤差を知り, また補正法を考えることは重要なポイントとなる。

試験中の調整は図-5 に示した検定曲線に基づいている。しかし調整応力とひずみとの間には若干のタイムラグがあり, ある程度先を見越して調整するので結果的には必ずしも曲線上をたどらない。また検定曲線が時間的に若干変ったために, 後で妥当と思われる曲線を定めると, 結果的には異なる曲線上をたどった場合もある。ある時点で変位が正しい検定曲線からずれている差を Δh (上側を正) とすれば, 供試体は Δh だけ圧縮されていたことになる。したがってもし厳密に等体積条件を満たしていれば Δh に対応する応力変化 $\Delta \sigma_v'$ だけ鉛直応力が減少していた筈である。鉛直有効応力の変化量 $\Delta \sigma_v'$ は次式で表わされる。

$$\Delta \sigma_v' = - \frac{\Delta h}{m_v h} \quad \dots\dots (5)$$

ここに h は供試体の高さであり, m_v は体積圧縮係数である。

せん断中の圧縮または膨張は通常の一次元圧密とは若干異なると思われる。また繰り返し破壊試験中の鉛直有効応力は概ね減少する方向にはあるが部分的には増加する場合もあり, さらに局部的には調整の不完全さから圧縮されたり膨張したりする。このような場合の体積圧縮係数は非常に複雑で現状ではよく判っていない。しかし鉛直有効応力が先行圧密圧力以上になることはないので近似的には弾性的挙動を示すものと考えられよう。そこで実

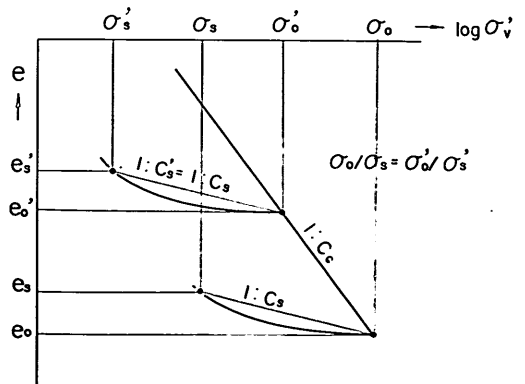


図-7 膨張指数説明図

際には膨張または再圧密の過程にあるものを圧密試験における膨張曲線で近似できるものとする。

中瀬, 小林, 勝野 (1969) によれば圧縮指数 C_c と膨張指数 C_s との比は先行圧密圧力にかかわらず過圧密比のみによって決り, ある先行圧力から膨張させた時の膨張指数は圧密試験で最大圧密圧力から膨張させた場合の同じ過圧密比における膨張指数に等しい (図-7 参照)。

上のことを体積膨張係数 m_s に云い換えれば, 図-7 を参照して次の関係が成り立つ。

$$e_{s'} = e_0' + C_s' \log \sigma_0' / \sigma_{s'}' \quad \dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} m_s' &= \frac{-1}{1+e_{s'}} \left[\frac{de}{d\sigma_{v'}} \right]_{s'} \\ &= \frac{1}{1+e_{s'}} \left[\frac{dC_s'}{d(\sigma_0'/\sigma_{s'}')} \cdot \log \frac{\sigma_0'}{\sigma_{s'}'} + C_s' \cdot \frac{\sigma_{s'}'}{\sigma_0'} \right]_{s'} \cdot \frac{\sigma_0'}{\sigma_{s'}'^2} \\ &= \frac{1}{\sigma_{s'}'(1+e_{s'})} \left[\frac{dC_s}{d(\sigma_0/\sigma_s)} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_s} \cdot \log \frac{\sigma_0}{\sigma_s} + C_s \right]_s \\ &= \frac{1+e_s}{1+e_{s'}} \cdot \frac{\sigma_s}{\sigma_{s'}} \cdot m_s \\ &= \frac{1+e_s}{1+e_{s'}} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_0'} \cdot m_s \quad \dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここで間げき比の相異を無視すると, 体積膨張係数は同じ過圧密比の係数に最大圧密圧力と先行圧密圧力との比を掛け合わせて近似値が求められる。

単純せん断試験機および標準圧密試験機によるこの粘土の膨張曲線を図-8 に示す。図の曲線を用いて, 上の関係から体積膨張係数を求め, (5) 式によって鉛直応力の補正量を算出すると大きい場合には 0.5 kg/cm^2 (No. 13) にもなり, 決して無視し得ない量であることが判った。

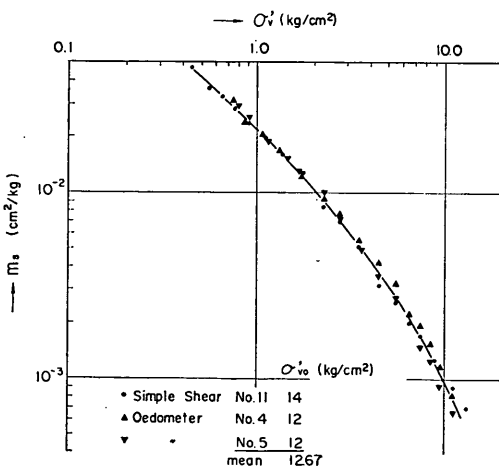


図-8 膨張時の体積膨張係数

次にこの鉛直有効応力補正量に対応するせん断応力の補正量 $\Delta\tau$ を求めるにはせん断応力 τ が鉛直有効応力 $\sigma_{v'}$ に比例するとして次式によった。

$$\Delta\tau = \frac{\tau}{\sigma_{v'}} \cdot \Delta\sigma_{v'} \quad \dots\dots (8)$$

以上の補正法には多くの問題点があり, 正しい方法とはいえないが, 元来あまり大きくない誤差を補正する点では充分目的に適うものと考えられる。また等体積の条件からずれている試験データを揃える意味でも有用であろう。そこで以後のデータ整理には全てこの補正法を適用した。

3.3.3 その他の試験誤差

せん断が進み, ひずみが大きくなると供試体の側面が曲って完全な平行四辺形ではなくなってくると云われている。しかし今回の実験では肉眼で判るような目立った曲りは見られなかった。

3.2 に述べたゴムスリーブの変形抵抗はゴムスリーブのせん断抵抗というより引張り抵抗であると考えられ, これがペDESTALとの摩擦に支えられて水平せん断力の一部を分担しているものと思われる。補強ゴムスリーブとペDESTALとの摩擦を少くし, ゴムスリーブの変形抵抗を減らす意味で0リングは使用しなかったが, なお図-6 に示すような抵抗がある。データ整理では図に直線で示す変位に応じた補正を行なったが, ヒステリシスによる誤差は $\pm 0.2 \text{ kg}$ (0.004 kg/cm^2) 程度である。

単純せん断試験において供試体に加わる外力はピアノ線のフープテンションに因る側圧を除き, 全体としては明瞭である。しかし, 供試体内部では応力, したがってひずみが必ずしも一様でなく, 試験結果の解釈に問題点を投げかける。例えば図-9 に示すようにせん断力がかかると供試体を回転させようとするモーメントが働き, 供試体両端面のずれとここに加わる鉛直力はさらにこの傾向を助長する。ところが試験機はこの回転を許さない

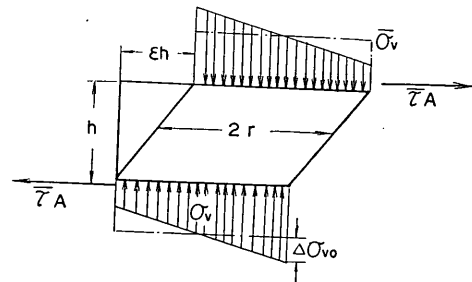


図-9 供試体の反力分布説明図

機構になっており、当然、供試体からの反力が上のモーメントに打ち克つ逆モーメントを形成するように分布することになる。ここで反力分布に直線を仮定し、モーメントの釣合いから平均鉛直応力 $\bar{\sigma}_v$ に対する最大偏差 $\Delta\sigma_{v0}$ の比を求めると次式となる。

$$\frac{\Delta\sigma_{v0}}{\bar{\sigma}_v} = \frac{2h}{r} \left(\frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}_v} + \varepsilon \right) \quad \dots\dots(9)$$

ここに h と r はそれぞれ供試体の高さと半径、 $\bar{\tau}$ は平均水平せん断応力、 ε は水平ひずみである。今回の実験でせん断中の供試体高さは 12 mm 程度であり、 $\bar{\tau}/\bar{\sigma}_v$ は第 1 サイクルの破壊時において 0.51 程度、また破壊ひずみ ε_f は 15% 程度であった。したがって (9) 式で与えられる $\Delta\sigma_{v0}/\bar{\sigma}_v$ は 40% 程度となり、仮定に問題はあるものの、決して無視し得ない偏差であることが判る。同様にせん断反力についても局部的に異なることが予想され、Roscoe 型の単純せん断試験機では有限要素法により放物線状の分布が報告されている (Duncan and Dunlop, 1969)。このように供試体端面における反力分布は一様でなく、さらに内部応力では一層複雑な分布が予想される。しかしその様相は現在明らかでなく、ここでは全て平均応力によって整理した。

4. 試験結果とその検討

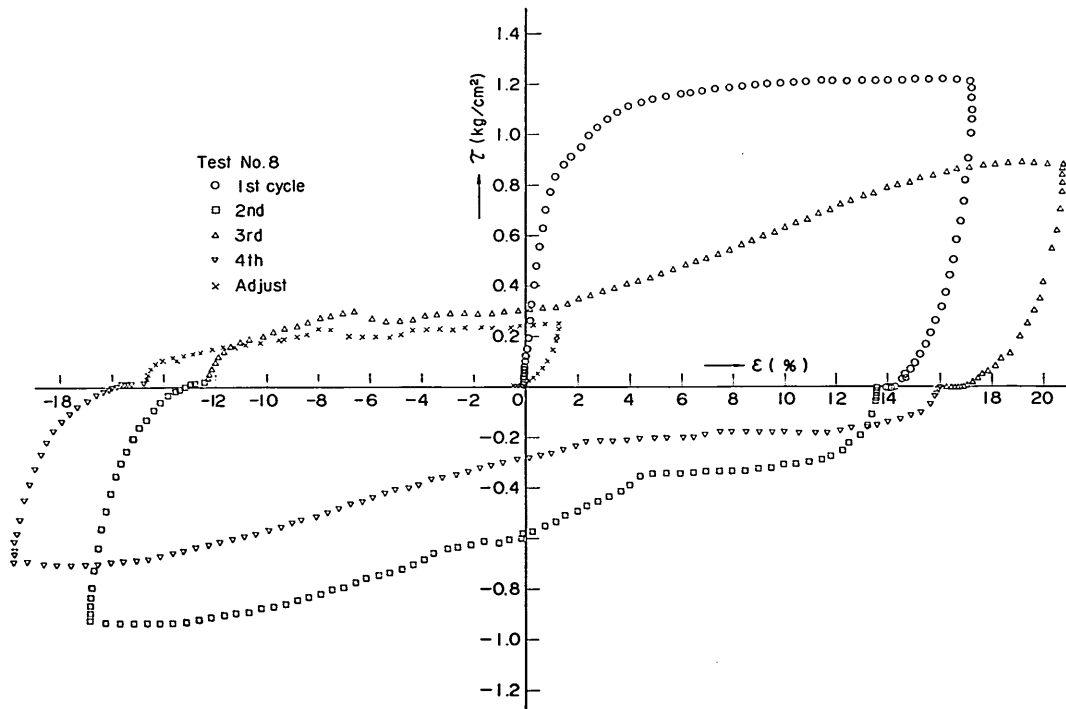
4.1 せん断試験

4.1.1 せん断試験結果

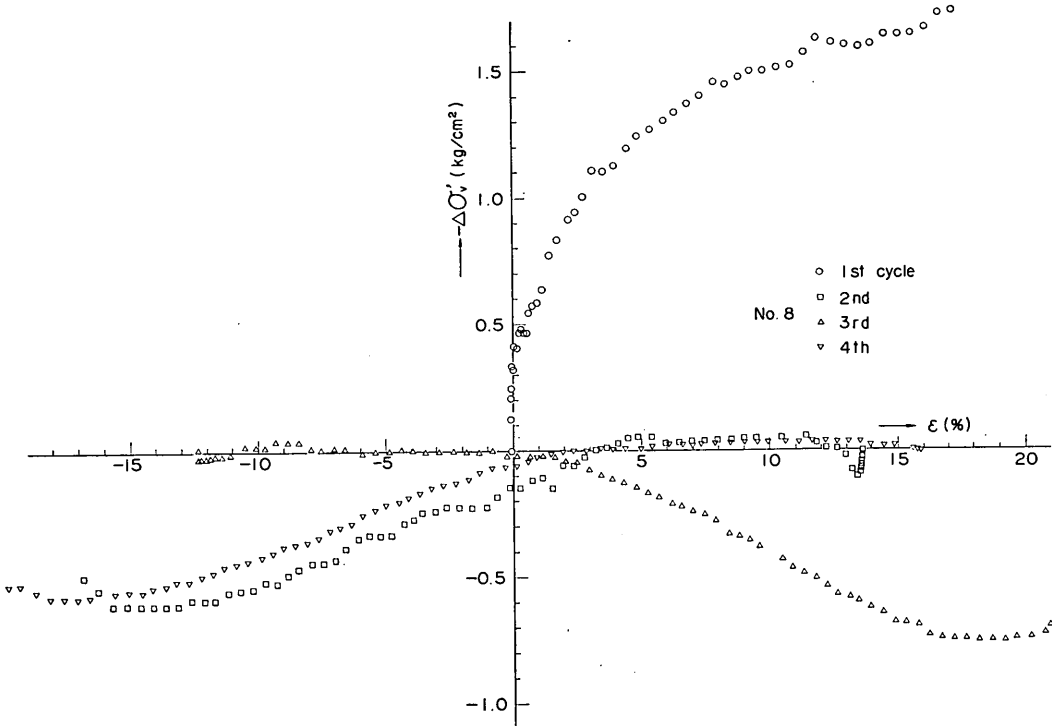
単純せん断試験機による繰り返し破壊試験結果の代表例を図-10~12 に示す。図-10 は交互にせん断方向の異なる 4 サイクルの破壊試験と、その後の圧密試験のための零調整を行なったものであり、単純せん断試験での典型例である。図-11 は初めに半サイクルのせん断と零調整を行ない、その後各サイクル毎に零調整を行ないながら一方方向に 5 サイクルの破壊試験を行なった例である (図では 4 サイクル以降を省略した)。また図-12 は圧密圧力を 2 倍の 8 kg/cm² に上げ、図-10 と同様の破壊試験を 10 サイクル行なった例である (5 サイクル以降省略)。

図-10~12 の (a) 図はせん断応力とせん断ひずみとの関係である。サイクルが多くなりかく乱が進むにつれて最大せん断応力すなわちせん断強度は低下し、この時のせん断ひずみすなわち破壊ひずみは増大する。図-10(a) に見られるように第 2 サイクル以降の応力ひずみ曲線は単純でなく、零ひずみに戻る前に擬似ピークが出る。この傾向は三軸試験機で圧縮と引張りを交互に行なう繰り返し

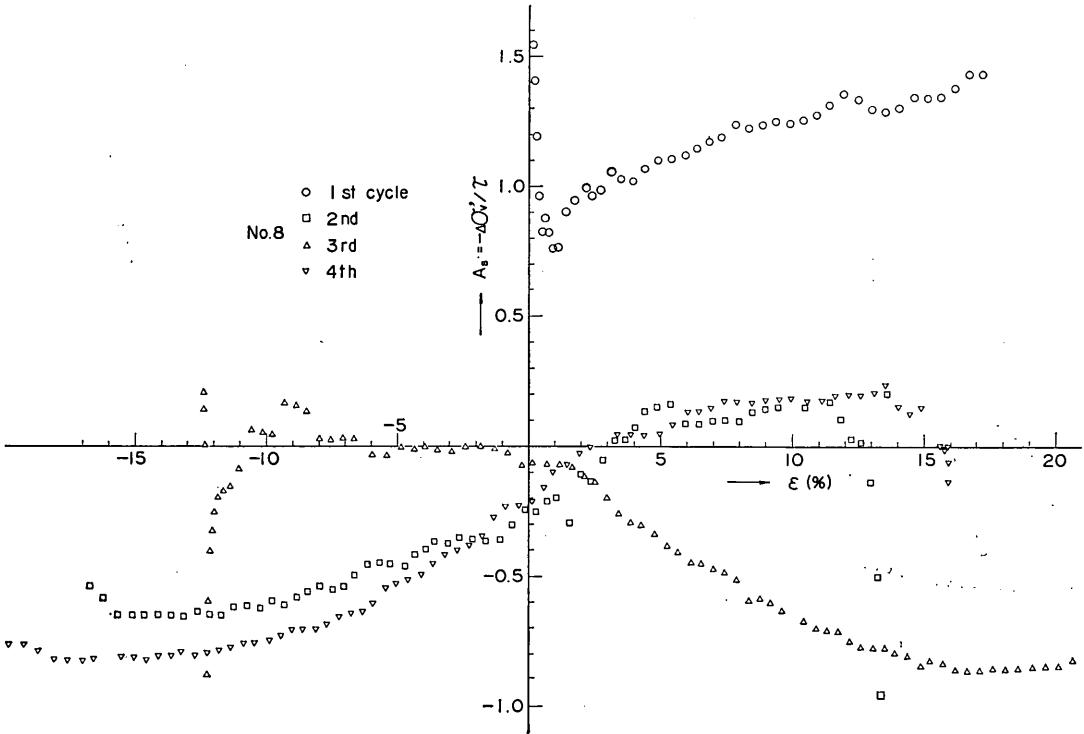
図-10 繰り返し単純せん断試験結果例 (No. 8)



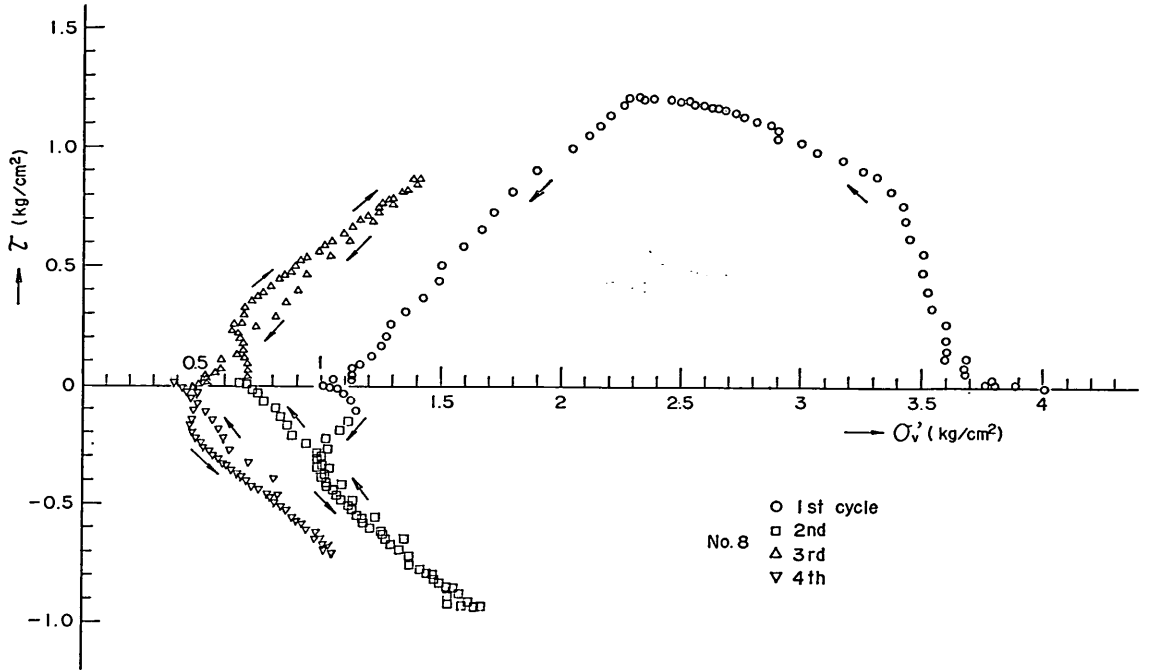
(a) 水平せん断応力とせん断ひずみとの関係



(b) 鉛直有効応力減少量とせん断ひずみとの関係

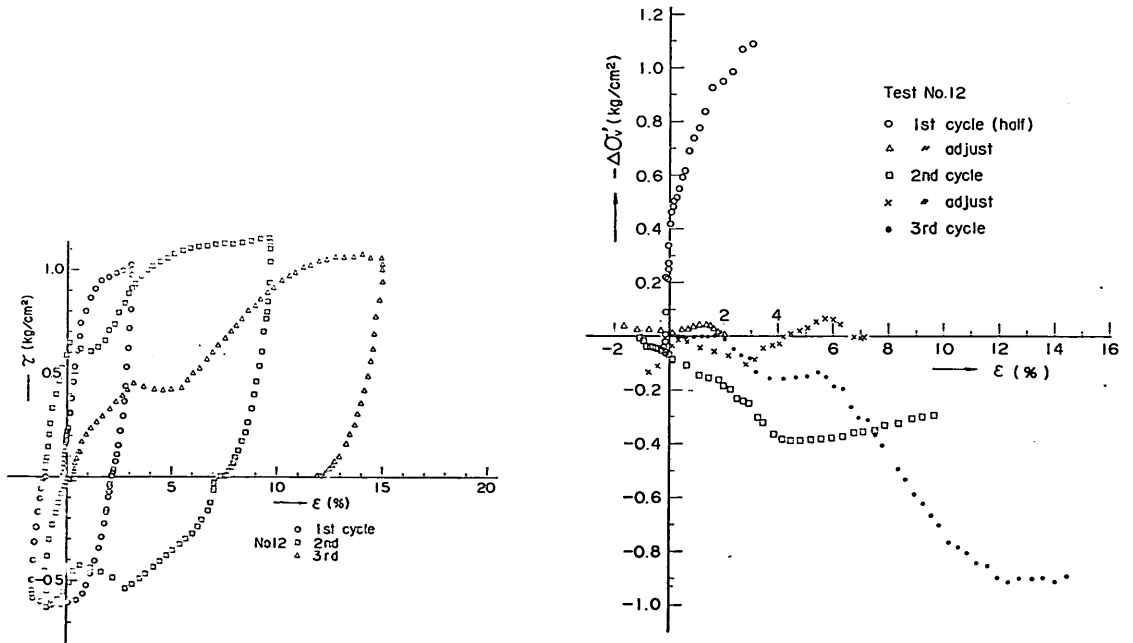


(c) 間げき圧係数とせん断ひずみとの関係



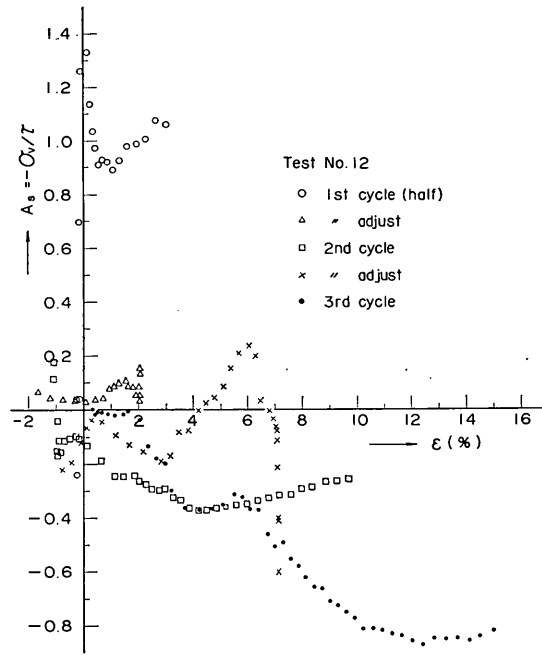
(d) 水平せん断応力と鉛直有効応力との関係

図-11 繰り返し単純せん断試験結果例 (No. 12)

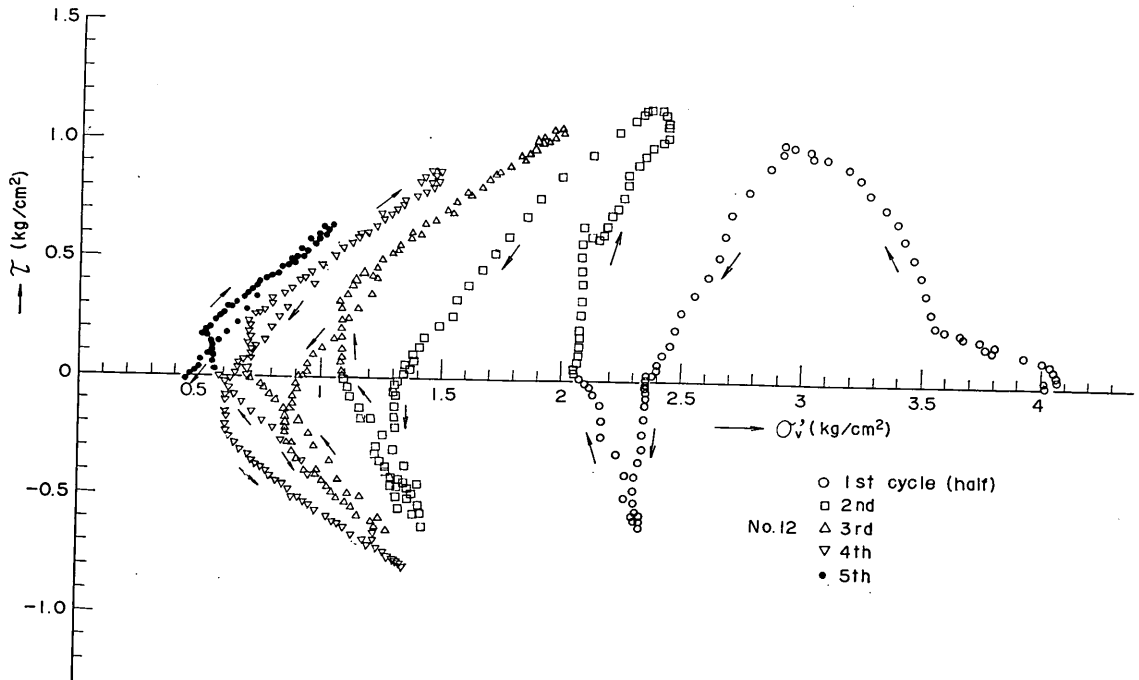


(a) 水平せん断応力とせん断ひずみとの関係

(b) 鉛直有効応力減少量とせん断ひずみとの関係



(c) 間げき圧係数とせん断ひずみとの関係



(d) 水平せん断応力と鉛直有効応力との関係

返し破壊試験でも観察される (Braathen, 1966)。これはひずみが残ったままで交互にせん断するためでないかと考え、図-11 (a) に示すような試験を行なったが同様の結果となった。

図-10~12 の (b) 図は非排水試験における間げき水圧に相当するものとして鉛直有効応力の減少量 ($-\Delta\sigma_v'$) をせん断ひずみとの関係でプロットしたものである。サイクルが進むにつれて正規圧密粘土の特性から過圧密粘土の特性に変わり、せん断中に間げき水圧が減少する傾向が現れる。

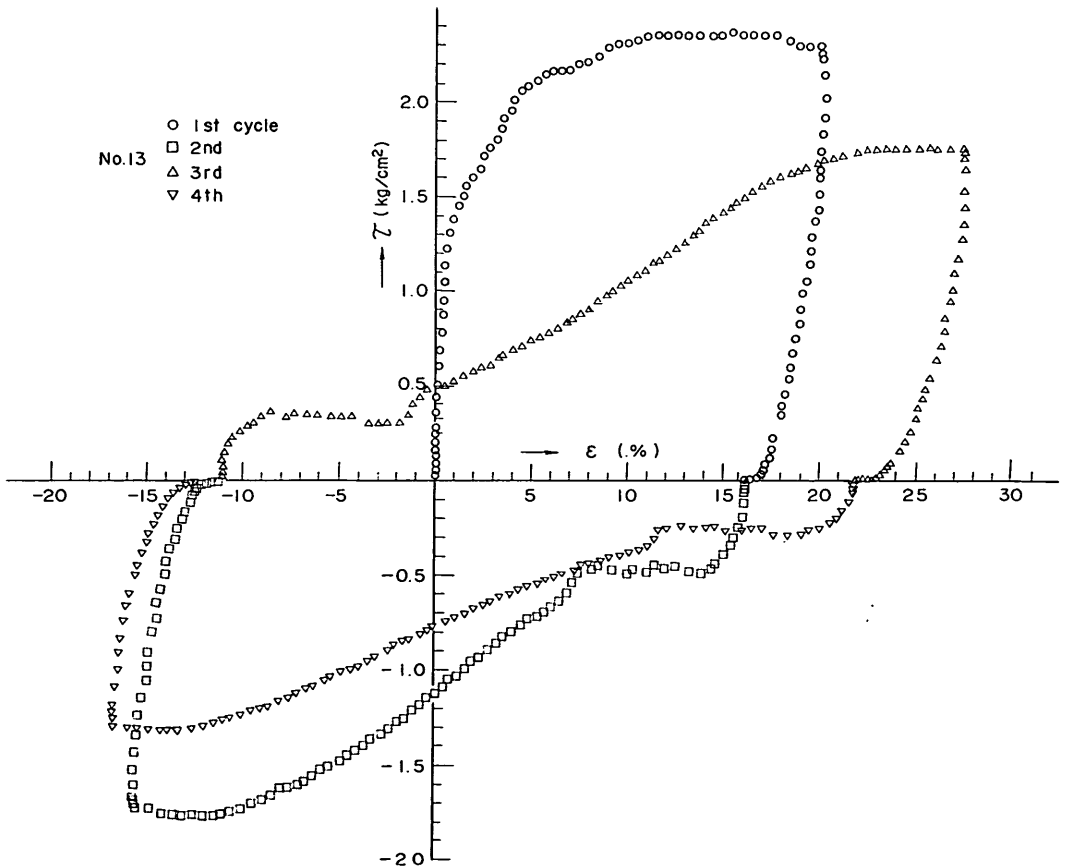
図-10~12 の (c) 図は Skempton の間げき圧係数 A に相当するものとして鉛直有効応力の減少量 ($-\Delta\sigma_v'$) とせん断応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$ の増加量に相当する) τ との比 A_s をプロットしたものである。(b) 図と同様にサイクルが進むにつれて過圧密粘土の特性が現れて来る。

図-10~12 の (d) 図は鉛直有効応力 σ_v' と水平せん

断応力 τ との関係プロットしたもので水平面における試験中の応力経路を示す。第1サイクルでは円弧状の経路となって正規圧密粘土の特性を示すが、サイクルが進むにつれて右上り (右下り) の放物線となって過圧密粘土の特性が現れる。

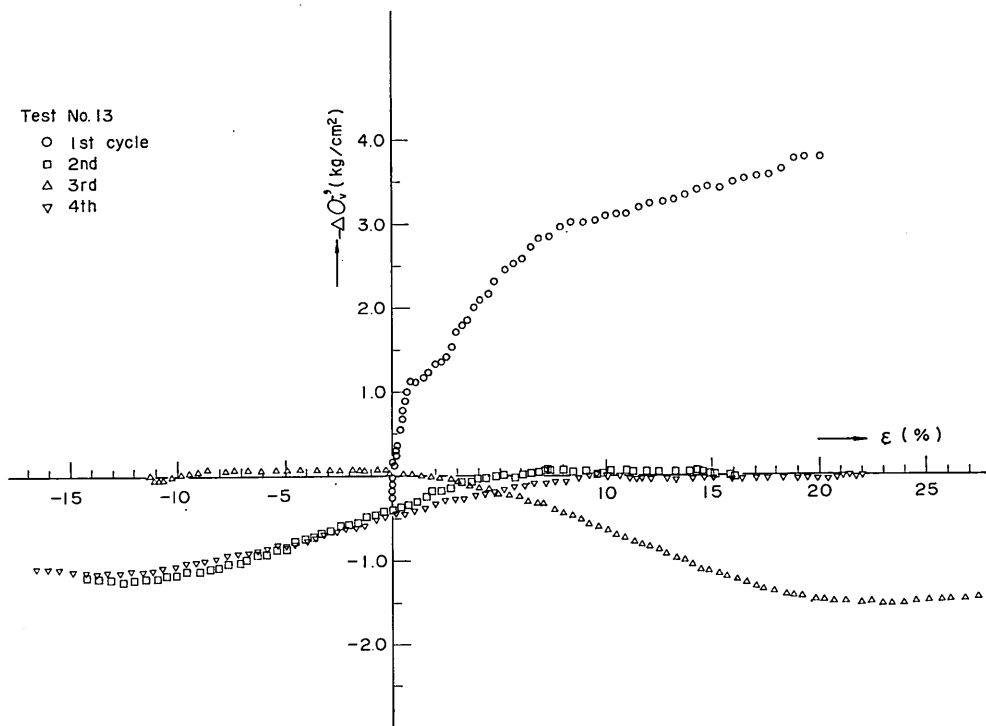
繰り返し破壊試験のうち第1サイクルの結果だけを取り上げて整理すると、圧密圧力 4 kg/cm^2 のもの9個についてせん断強度 τ_1 の平均は 1.18 kg/cm^2 、標準偏差は $\pm 0.09 \text{ kg/cm}^2$ であり、破壊時の間げき水圧は $-\sigma_v' = 1.62 \pm 0.10 \text{ kg/cm}^2$ 、間げき圧係数は $A_{sf} = 1.39 \pm 0.15$ 、破壊時のせん断ひずみは $\epsilon_f = 15.1 \pm 1.9\%$ であった。一方この時の先行圧密圧力は $\sigma_{v0}' = 4.007 \pm 0.006 \text{ kg/cm}^2$ であり、単純せん断におけるこの粘土の強度増加率は $\tau_1/\sigma_{v0}' = 0.296 \pm 0.022 (7.6\%)$ となった。なお圧密圧力 8.04 kg/cm^2 の No. 13 については $\tau_1/\sigma_{v0}' = 0.295$ であって圧密圧力 4 kg/cm^2 のものと誤差範囲内で一致しておりせん断強度

図-12 繰り返し単純せん断試験結果例 (No. 13)

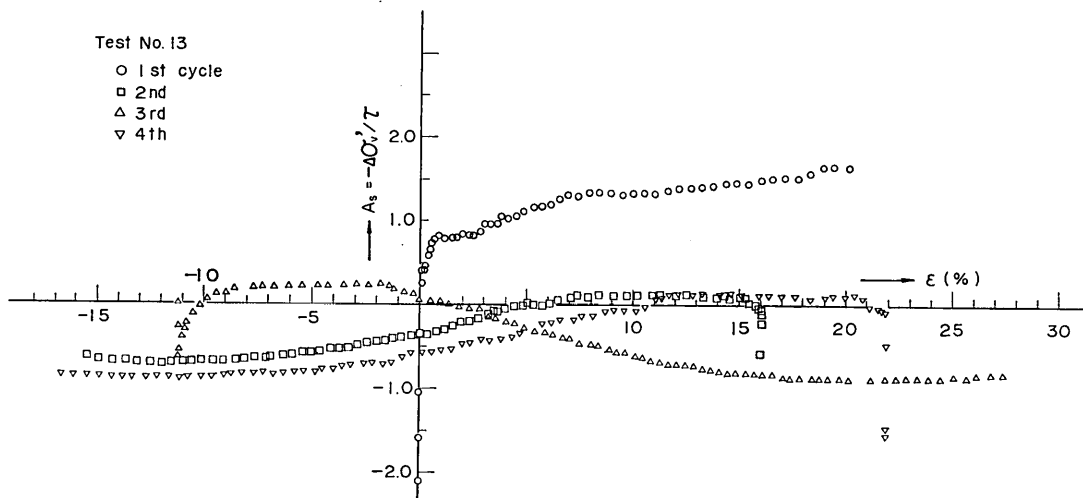


(a) 水平せん断応力とせん断ひずみとの関係

が圧密圧力に比例することを表わしている。



(b) 鉛直有効応力減少量とせん断ひずみとの関係



(c) 間げき圧係数とせん断ひずみとの関係

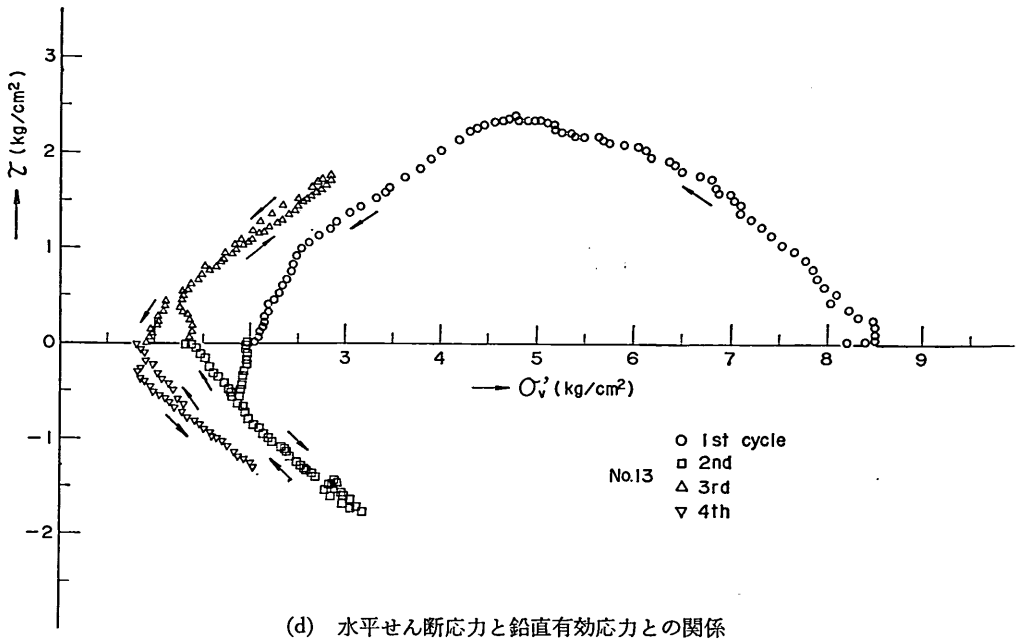


図-13 繰り返し三軸圧縮試験結果例 (CK₀U-2)

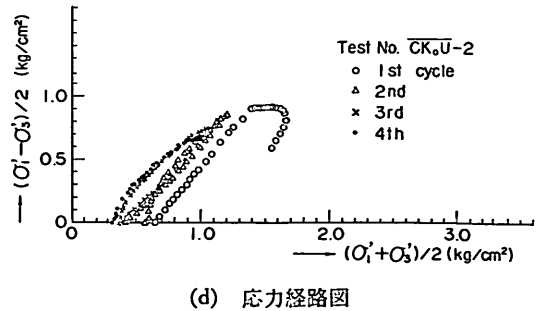
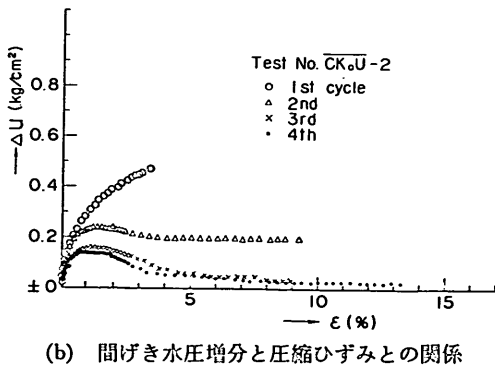
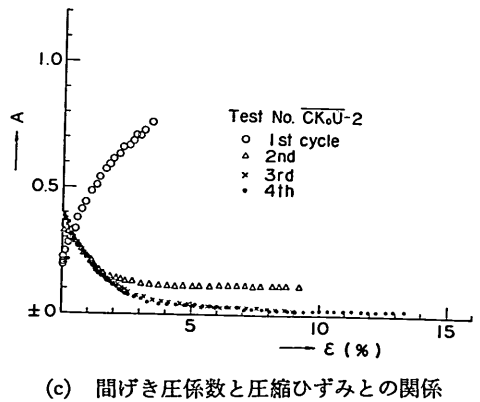
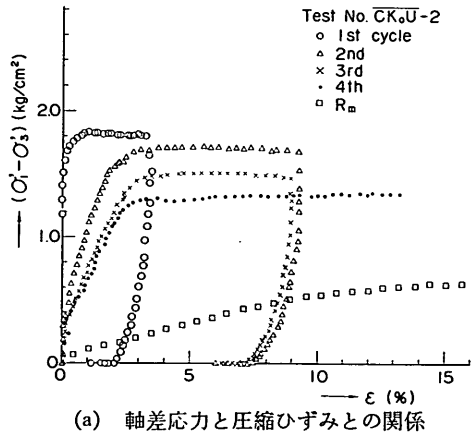
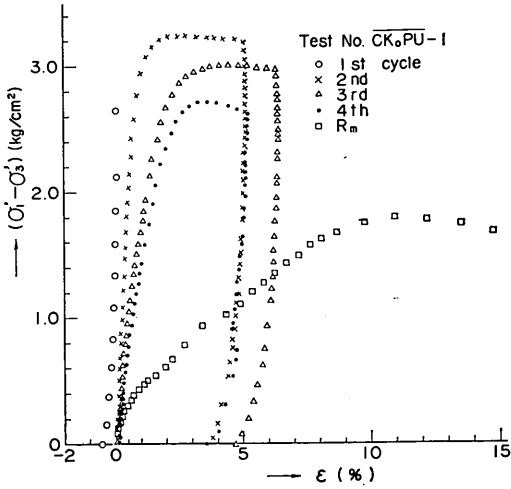
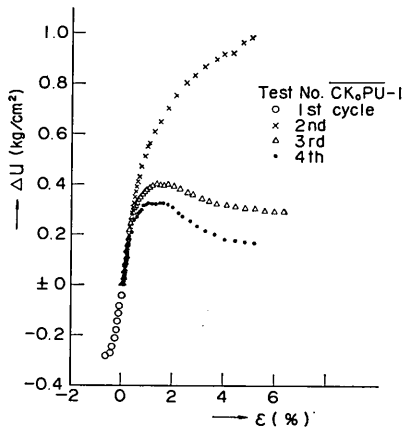


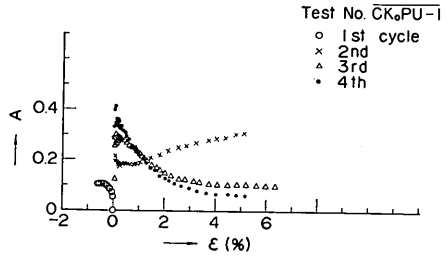
図-14 繰り返し三軸圧縮試験結果例 (CK₀PU-1)



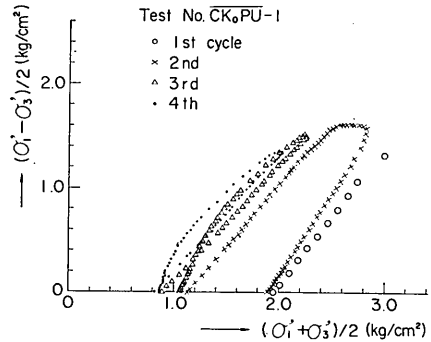
(a) 軸差応力と圧縮ひずみとの関係



(b) 間げき水圧増分と圧縮ひずみとの関係



(c) 間げき圧係数と圧縮ひずみとの関係



(d) 応力経路図

fective structural strength) の稼働率が単純せん断試験では 6~7 割の低さであることを指摘しているのでも同様の傾向が出るのであろう。その他、単純せん断では最大せん断応力面が必ずしも水平面と一致しないこと、供試体内の応力が一様でないことなどもその原因ではないかと思われる。なお破壊時の間げき圧係数は $A_f = 0.56 \pm 0.24$ であり、単純せん断試験における係数 $A_{sf} = 1.39 \pm 0.14$ よりかなり小さい。

4.1.2 三軸圧縮試験との比較

本牧海底粘土について行なった繰り返し三軸圧縮破壊試験の結果例を図-13, 14 に示す。第1報(奥村, 1969)の場合と同様、サイクルが進むにつれて過圧密粘土に類似の特性を示すようになる。

CK₀U 試験の第1サイクルから得られた非排水強度 $S_u = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}/2$ とそれぞれの鉛直圧密圧力 σ_{v0}' との比、いわゆる強度増加率は $S_u/\sigma_{v0}' = 0.415 \pm 0.010$ であり、単純せん断試験による強度増加率 $\tau_1/\sigma_{v0} = 0.296 \pm 0.021$ より 40% も大きい。しかし Bjerrum and Landva (1966) はノルウェーのクイック粘土について 6 割程度大きい値を示しており、その一因として有効構造強度 (ef-

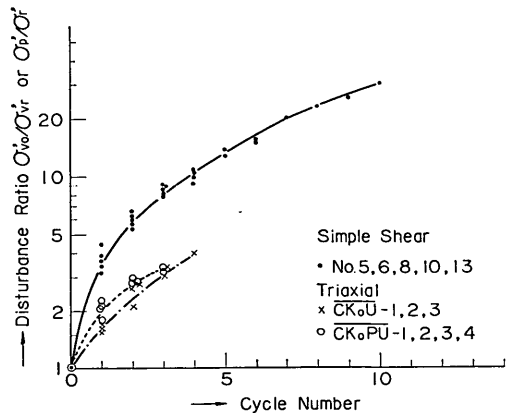


図-15 サイクル数とかく乱比との関係

$\overline{CK_0U}$ 試験の非排水強度と破壊時の平均有効主応力 $p'=(\sigma_1'+\sigma_3')/2$ との比は $S_{up}/p'=0.58\pm 0.24$ であった。見掛の有効粘着力 c' を 0 と仮定し、最大軸差応力 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ における有効せん断抵抗角を求めると $35.7\pm 1.7(^{\circ})$ となる。 $\overline{CK_0PU}$ 試験から求めた完全試料の残留有効応力 σ_p' と鉛直圧密圧力との比は $\sigma_p'/\sigma_{v0}'=0.44\pm 0.03$ であり、機械的にかく乱のない完全サンプルにおける間き圧係数 A_p は 0.04 ± 0.05 であった。 $\overline{CK_0PU}$ 試験の第1サイクルから求めた完全試料の非排水強度 S_{up} と鉛直圧密圧力との比は $S_{up}/\sigma_{v0}'=$

0.364 ± 0.009 (kg/cm²) であり、 $\overline{CK_0U}$ 試験から求めた理想試料のそれより 12% 低い。この低下量は一般の粘性土によく見かける値である(奥村, 1969)。

4.1.3 かく乱による強度特性の変化

水平せん断応力を解除した時の鉛直有効圧力すなわち残留鉛直有効応力 σ_{vr}' は繰り返し破壊試験のサイクルが進むにつれて減少する。残留鉛直有効応力に対する先行圧密圧力の比 $\sigma_{v0}'/\sigma_{vr}'$ を三軸圧縮試験の場合と同様にかく乱比と呼ぶこととし(奥村, 1969), サイクル数との関係を見ると図-15 のようになる。図には 4.1.2 に述

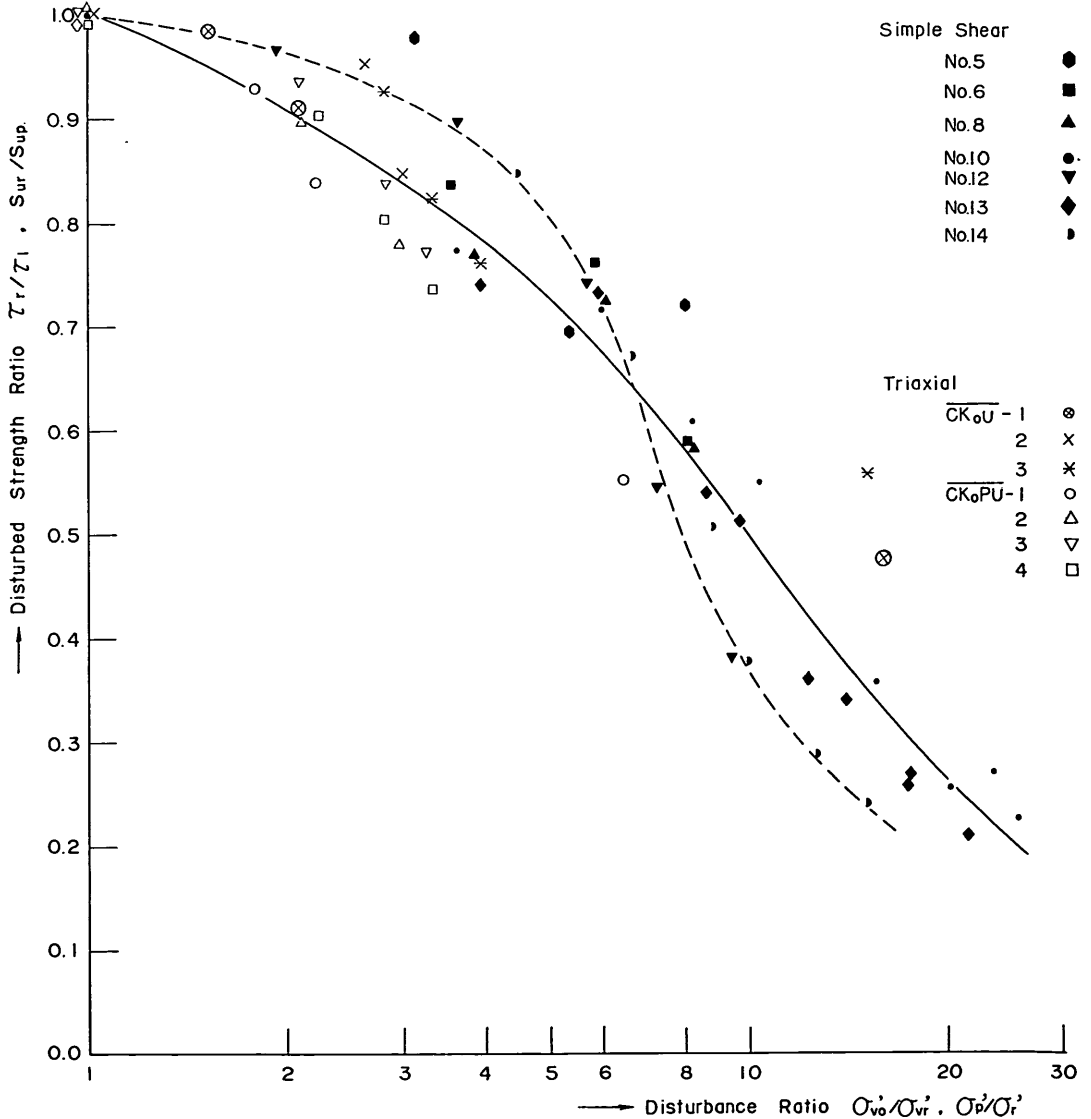


図-16 かく乱比とかく乱強度比との関係

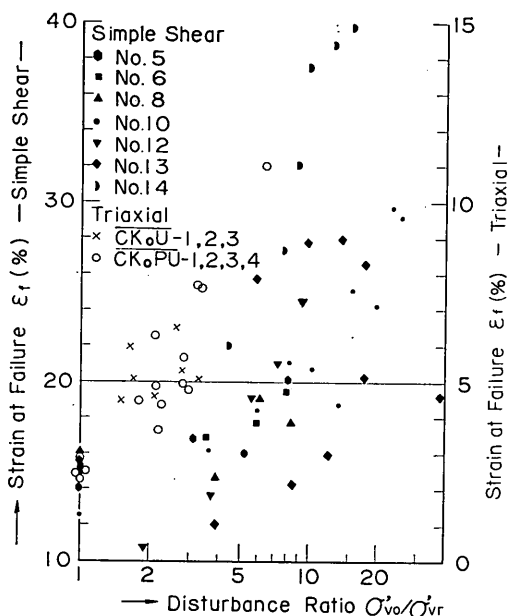


図-17 かく乱比と破壊ひずみとの関係

べた三軸圧縮試験の結果をも併示したが、いずれもサイクルが進むにつれてかく乱比が大きくなり、試料の乱れの度合いが進むことを示している。各サイクルの破壊強度 τ_r と第1サイクルのそれとの比(かく乱強度比) τ_r/τ^1 をかく乱比に対してプロットすると 図-16 のようになる。第1報(奥村, 1969)に示したものの同様、かく乱が進むにつれて一様に非排水強度も低下するが、第1報の場合とは異り、S字型のカーブを描きながら低下している。しかも完全試料を基準とした三軸圧縮試験の結果も同一曲線上にあり、この差が試験の種類によるというよりもむしろ土の種類によるものと考えられる。零調整を行ないながら試験した No. 12, 14 については一層曲りの激しいS字曲線(点線)となったが、これは残留有効応力の基準が異なるためではないかと考えられる。

各サイクルの破壊ひずみ ϵ_r とかく乱比との関係は図-17 のとおりである。ばらつき大きいのはピークが明瞭でないためであるが、かく乱比の対数にほぼ比例してひずみが増加する。

かく乱比 $\sigma'_{vo}/\sigma'_{vr}$ と各サイクルにおける破壊時の間げき圧係数 A_{sr} との関係を図-18 に示した。三軸圧縮試験の場合(破線)と同様かく乱比とともに間げき圧係数は低下し、過圧密粘土の間げき圧係数が過圧密比とともに減少する傾向と一致しているが、三軸試験の場合より変

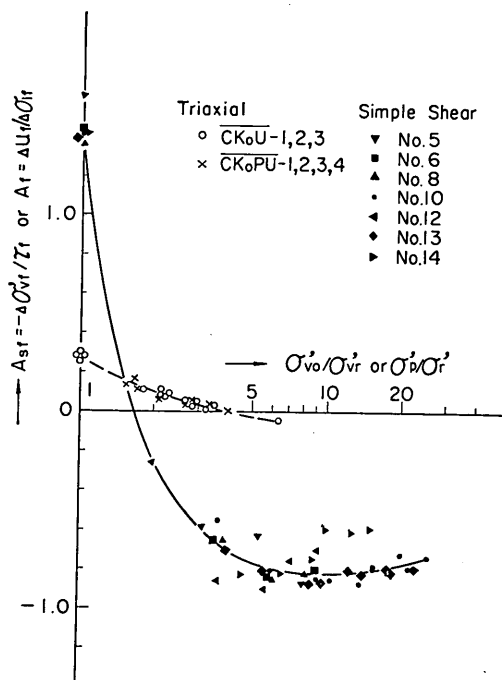


図-18 かく乱比と間隙圧係数との関係

動の幅が格段に大きい。かく乱比の大きいところで A_{sr} が僅かに増加しているのは実験誤差によるものではないかと思われる。

図-19 に破壊時の鉛直有効応力 σ_{vz}' と水平せん断応力 τ_r との関係を示す。第1報の場合と同様に含水比が一定なので(±0.9%), 図は Hvorslev のパラメーターを表わすが、サイクルが進み、かく乱の程度が大きくなるにつれて c_e は減少し、 ϕ_e は増大する傾向を示している。しかも点線で示したようにかく乱が充分に進み、完全に乱された状態になると土の粘着性は消え去り、摩擦成分のみが残る傾向をも示している。

第1報(奥村, 1969)で三軸試験の結果がほぼ一直線上に並び(詳細に見るとわずかに上に凸の曲線状ではあるが)、これより Hvorslev のパラメーターが求まることを示した。しかし第1報の場合にはサイクル数が少なく、有効応力が初めの2/3程度にまでしか低下しなかった。今回の繰り返し試験ではサイクル数も最大10回であり、有効応力も1/6程度に低下したので曲線的な傾向が明らかとなった。同様の傾向は中瀬, 小林, 勝野(1969)の繰り返し三軸圧縮試験の結果にも見られる。

このように Hvorslev パラメーターを表わす線が曲線状になる原因は粘土の微細構造が綿毛状(flocculent)か

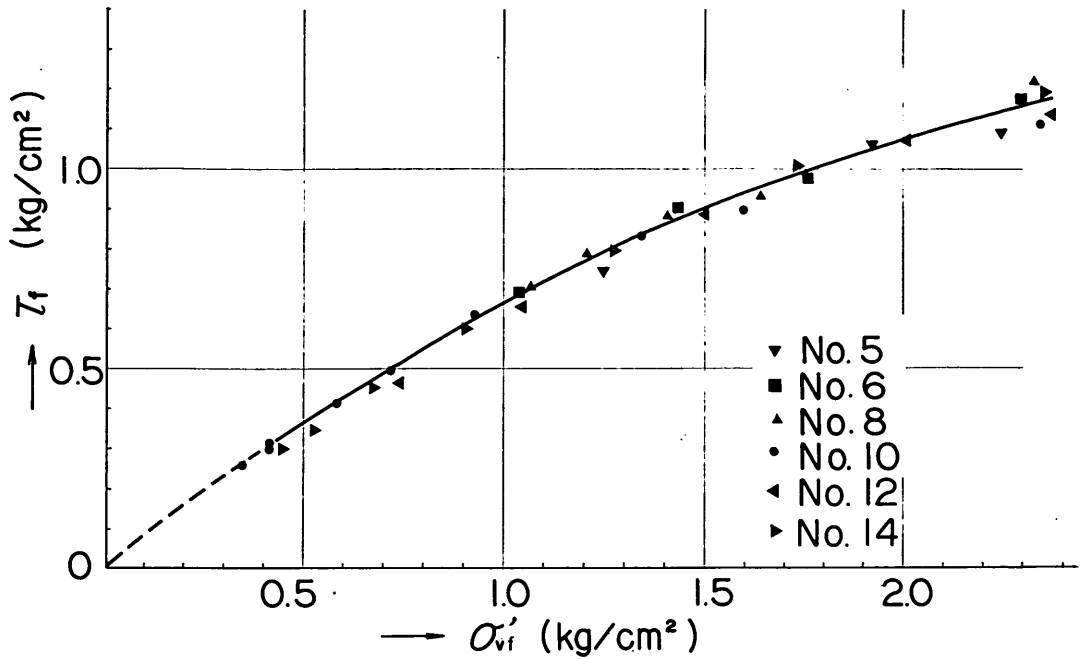


図-19 Hvorslev パラメーターの変化

ら分散状 (dispersed) に変化し、粘土粒子の端面接触 (edge to face contact) が少なくなったためであると考えられ、かく乱が土の構造を大きく変えることを物語るものであると云えよう。したがっていわゆる Hvorslev のパラメーターを求めるためには図の曲線の初期の接線に基づかなければならない。さらに厳密に云えば、第1サイクルのせん断にも若干のかく乱が含まれるので、図の曲線を延長し、初期の有効応力に対応した点の接線からこれを求める必要がある。しかし実際には試験にそれほどの精度がなく、また原位置での破壊ではその時々ケースによってかく乱の度合いが異なることも考慮しなければならない。したがって実用上は初めの数サイクルの結果を直線と見なし、繰り返し破壊試験から Hvorslev パラメーターを求めて充分と考えられる。むしろかく乱に伴う有効応力の低下がより重要な実用上の意味を持つであろう。

4.2 圧密試験

4.2.1 標準圧密試験との比較

単純せん断試験機で行なった圧密試験を同じ試料について行なった標準圧密試験と比較した例を図-20に示す。(a) 図に示す間げき比と圧密圧力との関係で前者が下方にありしかも勾配が若干小さい理由として次の諸原

因が考えられる。

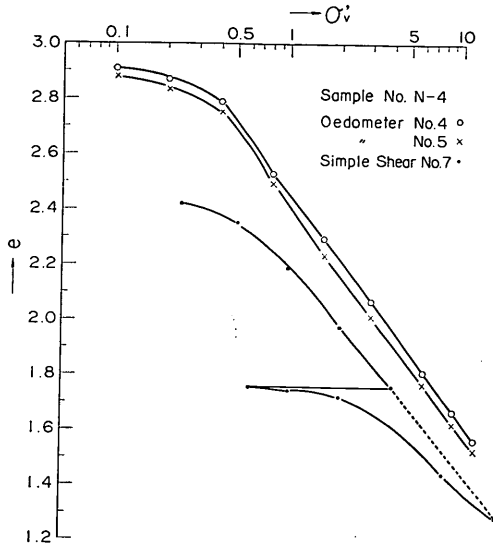
i) 標準試験では圧密リングとの間に側面摩擦が働くが、ゴムスリーブではほとんど摩擦がない。標準試験における側面摩擦の影響を補正したとすれば各点は左側に移動し、また勾配が小さくなる傾向にある (せん断試験法委員会, 1964)。この点に関しては単純せん断試験機による圧密がより正しい値を示すものと考えられる。

ii) 3.2 に述べたように単純せん断試験機では供試体の作製に手数をかけ、標準試験の場合より試料の乱される機会が多い。4.2.2 に述べるように乱れの大きい試料ほど間げき比が低下し、圧密圧力に対する勾配が小さくなるので (a) 図の傾向と一致する。しかし 4.2.3. で述べるように供試体のかく乱度は小さいと思われ、しかも主に対象とするかく乱後の圧密に対してその影響は一層小さいものと思われる。

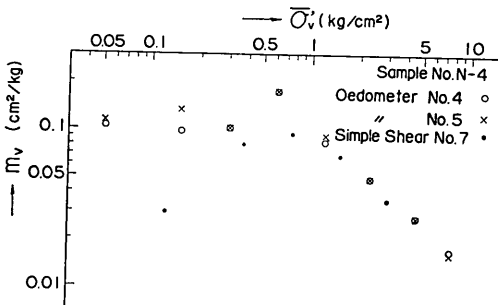
iii) 供試体をセットした時にゴムスリーブと供試体との間に若干の空げきがあったとすれば、圧密の初期段階で見掛けの間げき比減少があることになり、(a) 図の傾向と一致する。しかしこの場合にはその後の荷重段階への影響はほとんど考えられない。

iv) ゴムスリーブは剛度が小さく、圧密中に側方へ広がる傾向がある。しかし 3.3.1 で述べたようにその影響

図-20 標準圧密とゴムスリーブによる圧密との比較



(a) 間隙比と圧密圧力との関係



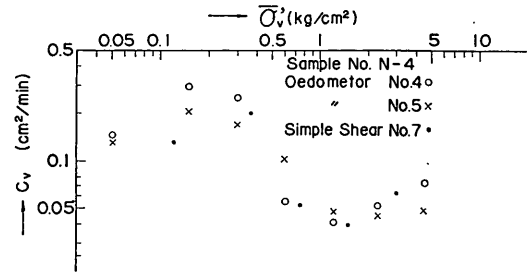
(b) 体積圧縮係数と平均圧密圧力との関係

は1%以下と考えられ、しかもこの場合には圧密圧力に対する勾配が大きくなる筈で(a)図の傾向とは逆になる。

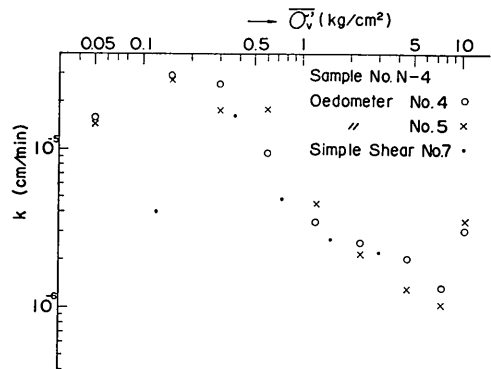
上述のように標準試験との差の原因としていくつかの理由が考えられるが、いずれにしても主に対象とするかく乱後の圧密にはほとんど影響しないと思われる。なお(b)~(d)図に示した体積圧縮係数、圧密係数、および透水係数と圧密圧力との関係では試験方法の相異による差はほとんど見られない。

4.2.2 かく乱による間げき比~圧密圧力関係の変化

繰り返し破壊試験を終った試料についてそのまま再び圧密を行なうと、図-21に示す間げき比~圧密圧力関係が得られる。ただし計算による間げき比の値は若干の誤差を含み、必ずしも実体を表わしてはいないと考えられるので、先行圧密圧力 $4.005 \pm 0.006 \text{ kg/cm}^2$ における間げき比を試験個数5個の平均値 1.669 (ただし標準偏差



(c) 圧密係数と平均圧密圧力との関係



(d) 透水係数と平均圧密圧力との関係

0.025)に揃え、上下に若干平行移動させて図を作成している。

くり返しせん断は等体積の条件で行なったのでせん断中の間げき比はほとんど変わらず、鉛直有効応力のみが低下して水平な「かく乱線」が形成される。そのまま再び圧

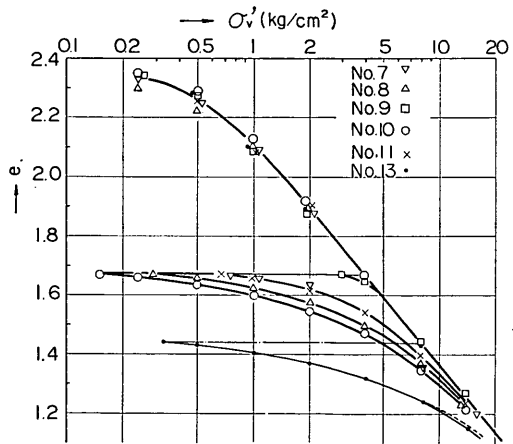


図-21 かく乱による間隙比圧密圧力関係の変化

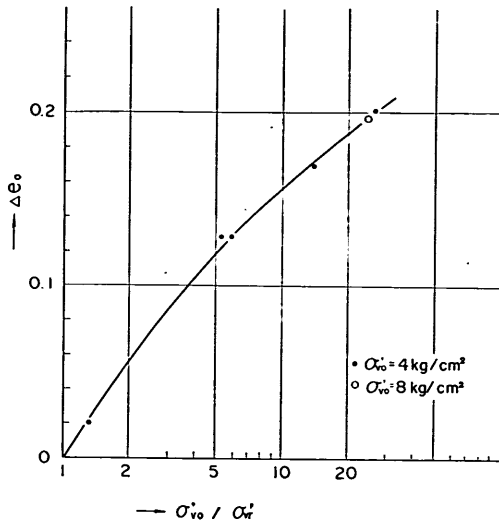


図 22 カク乱比と間げき比減少量との関係

密を行なうと、従来の研究 (例えば Davis and Poulos, 1966) でもその傾向が指摘されているように、かく乱の程度が大きく、残留鉛直有効応力が低下して左側に移動したもほど「再圧密曲線」は下方に移動し、処女圧密曲線に漸近する圧密圧力も大きい。この関係の一例として先行圧密圧力 σ'_{v0} における処女圧密曲線と再圧密曲線との間げき比の差 Δe_0 をかく乱比 $\sigma'_{v0}/\sigma'_{vr}$ に対してプロットすると図-22 が得られ、かく乱比の対数にほぼ比例して間げき比の差が増大することが判る。

ここでかく乱試料の再圧密比 RCR (Reconsolidation Ratio) を次のように定義しよう。

$$RCR \equiv \frac{\log \sigma'_{v0} - \log \sigma'_{vr}}{\log \sigma'_{v0} - \log \sigma'_{vr}} = \frac{\log \sigma'_{v0}/\sigma'_{vr}}{\log \sigma'_{v0}/\sigma'_{vr}} \dots\dots (10)$$

すなわち片対数紙上で圧密圧力と残留鉛直応力との距離を先行圧密圧力と残留鉛直応力との距離 (かく乱比) で割った比を再圧密比と呼ぶ (図-23(a)参照)。こうするとかく乱直後の状態では再圧密比が 0 であり、先行圧密圧力まで圧密されると 1 となり、さらに進むと 1 より大きくなる。次に間げき減少比 VDR (Void Decrease Ratio) を次式で定義する。

$$VDR \equiv \frac{\Delta e}{\Delta e_{max}} \equiv \begin{cases} (e_0 - e) / \Delta e_{max} \dots\dots \sigma'_{v0} \geq \sigma'_{vr} \\ (e_v - e) / \Delta e_{max} \dots\dots \sigma'_{v0} < \sigma'_{vr} \end{cases} \dots\dots (11)$$

ここに Δe_{max} は残留鉛直有効応力における処女圧密曲線上の点とかく乱線との縦距であり、 Δe は再圧密比が 1 より小さいうちはかく乱線と再圧密曲線との縦距 ($e_0 - e$)、

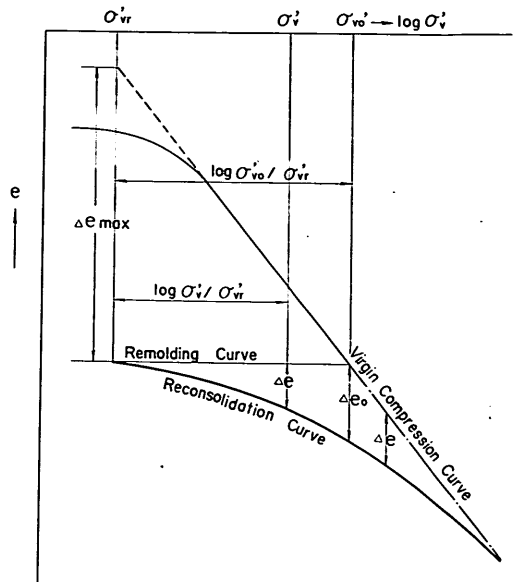


図-23 (a) 再圧密比および間げき減少比説明図

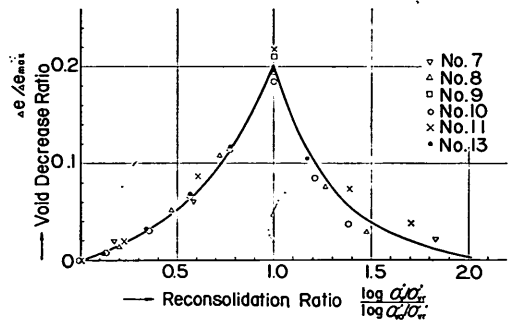


図-23 (b) 再圧密比と間げき減少比との関係

1 より大きいときは処女圧密曲線上の相当する圧力における点との縦距 ($e_0 - e$) をとることとする。

せん断前の圧密から得られた圧縮指数 0.76 を用いて処女圧密曲線を延長し、上の方式で整理すると図-23(b) が得られた。かく乱の程度と先行圧密圧力が異なる 6 個の実験結果がほぼ同一の曲線上に並び、この関係がかく乱比や圧密圧力にかかわらず一義的であることを示している。このことからある圧密圧力で、あるかく乱度の再圧密曲線が得られれば他の圧密圧力で他のかく乱度の再圧密曲線もその試料のかく乱比から推定することができると思えよう。また、より多くの実験により、他の種類の土についてもその一義性が確認されるならば、この関係は採取試料の乱れの判定や圧密降伏応力の推定などにも応用できよう。

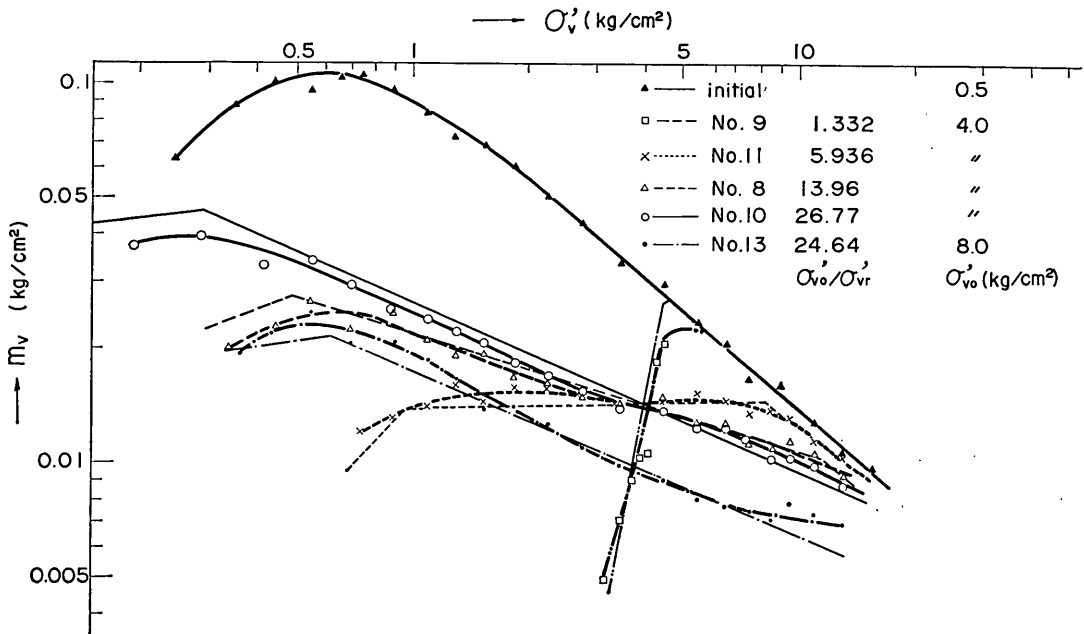


図-24 かく乱による体積圧縮係数の変化

図-23(b)は再圧密比が2ぐらいになるとかく乱の影響が消え、処女圧密曲線に戻ることを示している。このことは従来先行圧力の2~4倍で乱れの影響が消えると云われていた経験的事実(例えば Ladd and Lambe, 1963)をさらにかく乱の程度まで加味して規定するものとして興味深い。再圧密比が2以上であることは次式で表現され、

$$\sigma_v' \geq (\sigma_{v0}'/\sigma_{vr}')\sigma_{v0}' \quad \dots\dots(12)$$

先行圧力 σ_{v0}' の「かく乱比」倍の圧密圧力で乱れの影響が消えることになる。ただし図-23(b)ではデータ数が少なく、ばらつきも大きいので、なお今後の検討が必要であろう。

4.2.3 かく乱による体積圧縮係数の変化

かく乱に伴う体積圧縮係数 m_v の変化は図-24 のようである。通常行なわれる整理方法ではばらつきが大きくて傾向がつかめないの、図-21 の曲線を基に圧力区間を細分して次式から計算したものを点で示し、これらを滑らかな曲線(太線)で結んだ。

$$m_v = \frac{-1}{1+e} \cdot \frac{de}{d\sigma_v'} \quad \dots\dots(13)$$

図から判るように、一般に土が乱されるとその残留有効応力と同じ圧力の乱されない土よりは圧縮性が小さいけれどもその土の先行圧密圧力における圧縮性に較べる

と必ずしも小さくはない(No. 10, No. 13)。かく乱比の小さい No. 9 では初め極めて小さな圧縮性であるがすぐに増大し、乱されない土のそれに近づく。初期圧密の曲線がこれに類似しているのは用いた供試体があまり乱されていないことを示すものであろう。ところがかく乱比の大きい No. 10, No. 13 では初めから圧縮性が大きく、しかも急激な変化はない。また中間の各試料ではかく乱比に応じて順次その傾向が変わっている。

図-24 に示した体積圧縮係数を再圧密比との関係で整理してみよう。この場合、体積圧縮係数と間げき比との関係、および図-23(b) に示した一義性から体積圧縮係数そのものではなく、圧密圧力との積($m_v\sigma_v'$)と再圧密比との間にほぼ一義的な関係が予想される。結果は図-25 に示すとおりであり、かく乱度や先行圧密圧力にかかわらず予想以上に一義性のあることが判った。しかも両端部を除き片対数紙上でほぼ直線的な関係にある。図中の折線はこれらの値を最小自乗法で整理したものである。

図-25 の各直線は再圧密比 RCR の一次関数で次のように表わせる。

$$\log m_v\sigma_v' = (\log \alpha/\beta) \frac{\log \sigma_v'/\sigma_{vr}'}{\log \sigma_{v0}'/\sigma_{vr}'} + \log \beta \quad \dots\dots(14)$$

ここに α は $RCR=1$ における $m_v\sigma_v'$ の値、 β は RCR

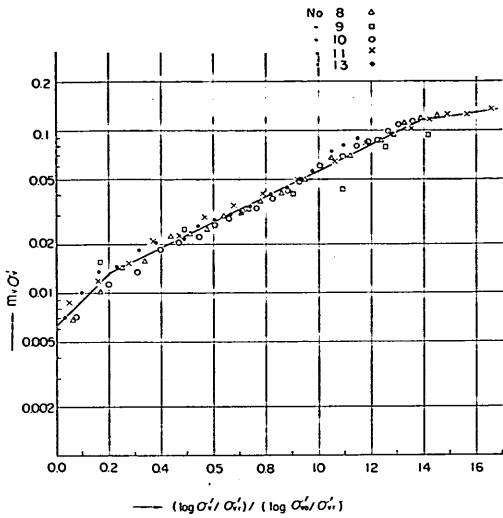


図-25 再圧密比と $m_v \sigma_v'$ との関係

表-3 $m_v \sigma_v'$ 関係の諸常数

	$RCR \leq 0.2$	$0.2 \leq RCR \leq 1.4$	$RCR \geq 1.4$
β	6.35×10^{-3}	9.23×10^{-3}	6.51×10^{-2}
$\log \alpha/\beta$	1.60339	0.79247	0.18621

=0 における $m_v \sigma_v'$ の値であり、表-3 に各常数を示す。上式を体積圧縮係数と圧密圧力との関係に直すと次式となる。

$$\log m_v = \left(\frac{\log \alpha/\beta}{\log \sigma_{v0}'/\sigma_{vr}'} - 1 \right) \log \sigma_v' + \left\{ \log \beta - \frac{\log \alpha/\beta}{(\log \sigma_{v0}')/(\log \sigma_{vr}') - 1} \right\} \dots (15)$$

上式から体積圧縮係数と圧密圧力との関係が両対数紙上で次のようになることが判る。すなわちかく乱比 $\sigma_{v0}'/\sigma_{vr}'$ が大きいほど m_v 曲線の勾配は小さく $\sigma_v'=1$ (kg/cm²) における切片は大きいことになり、図-24 の傾向と一致している。

表-3 に示した各常数を用い、各試験における先行圧密圧力 σ_{v0}' 、残留鉛直有効応力 σ_{vr}' から (15) 式によって $m_v \sim \sigma_v'$ 関係を求めると図-24 に示す細い折線となる。予め各点を結んだ滑らかな曲線 (太線) とほぼ一致し、上の整理方法が妥当であったことが判る。したがって 1 つの $m_v \sim \sigma_v'$ 関係が得られると、これを再圧密比で整理し、他のかく乱度や圧密圧力の $m_v \sim \sigma_v'$ 関係を推定することができる。実際問題としてかく乱度の低い場合の $m_v \sim \sigma_v'$ 関係は精度の悪い結果が得られるが、これ

を大きなかく乱度の試験から推定することができて便利である。

一般に体積圧縮係数 m_v は次式で定義される。

$$m_v = -\frac{1}{1+e} \frac{de}{d\sigma_v'} \dots (16)$$

(14) 式の関係を用いて上式を積分し、初期条件として残留鉛直有効応力 σ_{vr}' における間げき比 e_0 を採れば次式が得られる。

$$e = (1+e_0) \exp \left[\frac{\beta_1 \log \sigma_{v0}'/\sigma_{vr}'}{\log \alpha_1/\beta_1} \left\{ 1 - \left(\frac{\alpha_1}{\beta_1} \right)^{RCR} \right\} \right] - 1 \dots RCR \leq 0.2 \quad (17a)$$

同様に $0.2 \leq RCR \leq 1.4$, $RCR \geq 1.4$ の範囲ではそれぞれの初期間げき比 $e_{0.2}$, $e_{1.4}$ を用いて次のようになる。

$$e = (1+e_{0.2}) \exp \left[\frac{\beta_2 \log \sigma_{v0}'/\sigma_{vr}'}{\log \alpha_2/\beta_2} \left\{ \left(\frac{\alpha_2}{\beta_2} \right)^{0.2} - \left(\frac{\alpha_2}{\beta_2} \right)^{RCR} \right\} \right] - 1 \dots 0.2 \leq RCR \leq 1.4 \quad (17b)$$

$$e = (1+e_{1.4}) \exp \left[\frac{\beta_3 \log \sigma_{v0}'/\sigma_{vr}'}{\log \alpha_3/\beta_3} \left\{ \left(\frac{\alpha_3}{\beta_3} \right)^{1.4} - \left(\frac{\alpha_3}{\beta_3} \right)^{RCR} \right\} \right] - 1 \dots RCR \geq 1.4 \quad (17c)$$

ここに α, β のサフィックス 1, 2, 3 はそれぞれの範囲での値を示す。上の各式によって間げき比を計算し、図-21 に点線で示したが、初めに滑らかな曲線で結んだ間げき比~圧密圧力関係とほとんど変わらず、図-25 の直線関係がこれと矛盾しないことを表わしている。

同様のことは圧縮係数 a_v 、圧縮指数 C_c についても云える。すなわちいわゆる再圧密比 RCR と圧縮諸係数との一義的な関係が明らかとなった。

4.2.4 かく乱による圧密および透水係数の変化

単純せん断試験機で得られたかく乱前後の圧密係数を

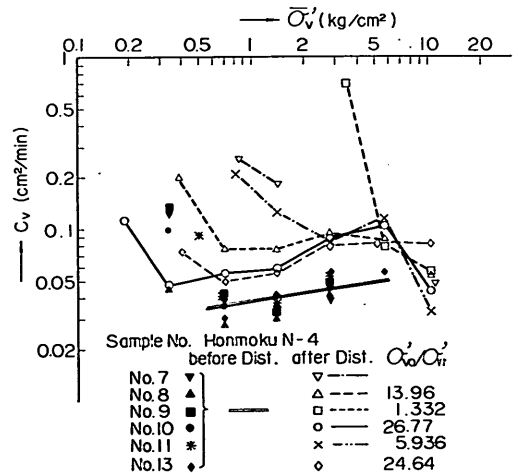


図-26 かく乱による圧密係数の変化

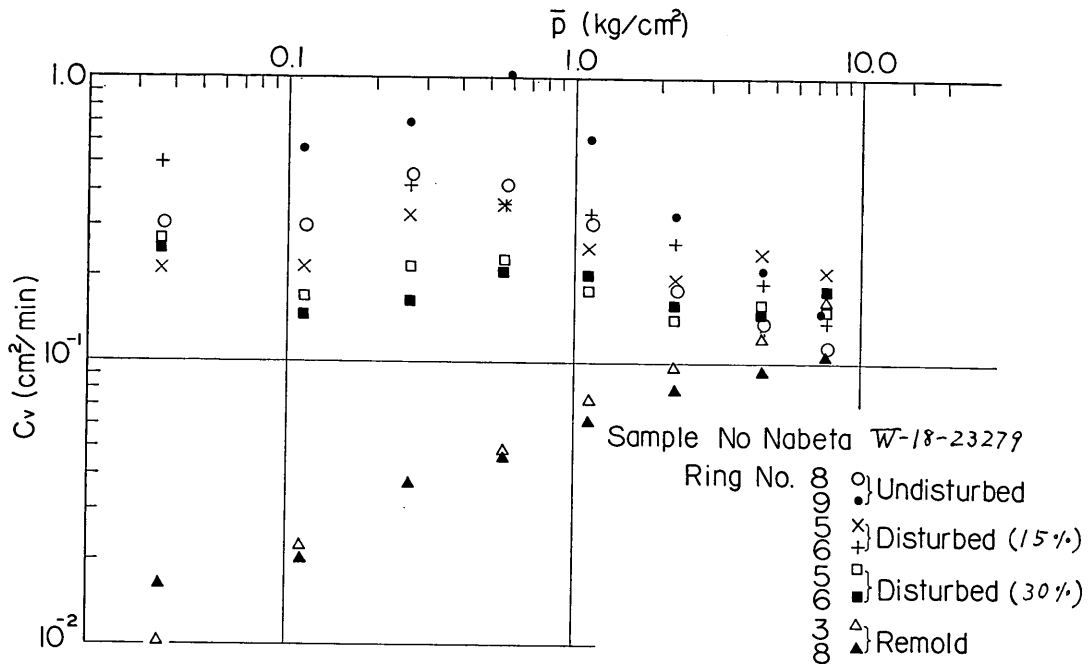


図-27 かく乱による圧密係数の変化 (名古屋港高潮防波)

図-26 に示す。かなりのばらつきはあるが次の傾向が読み取れる。

i) 一般に土を乱すとその圧密係数は低下すると信じられているが (例えば Casagrande and Poulos, 1969), 必ずしも常にそうであるとは限らず, 乱れの程度が小さいうちは正規圧密状態よりむしろ大きい値を示す。このことは過圧密粘土の圧密係数が大きいことと類似している。

ii) 乱れの程度が極く小さいうちは圧密係数もまた大きく, かく乱の度合が進むにつれてしだいに小さくなって行く。

iii) いずれの場合でも先行圧密圧力以上に圧密すると正規圧密状態に近いほぼ一定の値に収斂する。

図-27 は名古屋港高潮防波堤建設時に採取した不かく乱試料についての標準圧密試験結果の一例である(註)。かく乱の程度を変えるために 15% および 30% の圧縮ひずみを与えたもの, 完全に繰り返したものと比較している。図-26 で見られたようにかく乱の程度とともに圧密係数の低下する傾向がある。すなわちいわゆる不かく乱試料ではかく乱の程度が小さいので大きな圧密係数とな

註) 小川富美子の実験による

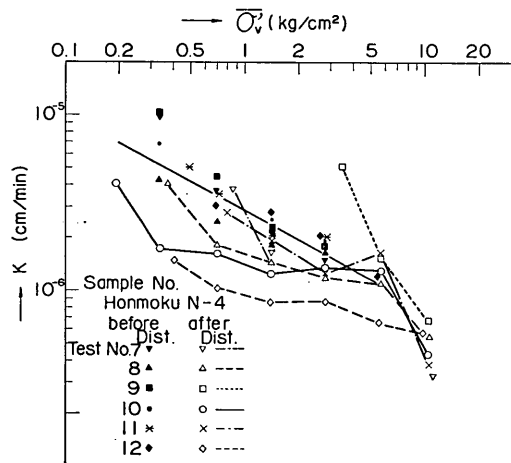


図-28 かく乱による透水係数の変化

っているが, 圧縮ひずみを与えたものは若干これが低下し, 完全に繰り返したものでは非常に小さな値となっている。いずれの試料も正規圧密状態となつてからはほぼ一定の値に収斂する傾向を示している。

図-28 にかく乱前後の透水係数を示す。ばらつきが大きいので判然とはしないが, 一般的に乱れのため透水係

数は低下する傾向を示している。しかし正規圧密状態より大きい値を示す No. 9 の例もあり、乱れの程度が極く小さい範囲では一概に透水係数が低下するとも云えないようである。

5. むすび

単純せん断試験機による繰り返し破壊試験と圧密試験、および若干の繰り返し三軸圧縮破壊試験から次のことが判った。

i) 単純せん断試験によるせん断強度は三軸圧縮試験の非排水強度よりかなり小さく、破壊時の間げき圧係数は前者が大きい。

ii) 単純せん断試験によるかく乱に伴う強度特性の変化は三軸圧縮試験の場合とはほぼ同様である。すなわちかく乱強度比はかく乱比 (残留有効応力減少比) とともに一義的に低下し、破壊ひずみは増大し、間げき圧係数は減少して過圧密粘土に類似の特性を示すようになる。

iii) かく乱の程度が大きいと Hvorslev のパラメータは変化し、しかもかく乱が充分に進むと土の粘着性は消え去り、摩擦成分のみが残る傾向が見える。この点からもかく乱を膨張と全く同一には取扱えないものと考えられる。

vi) 繰り返し破壊試験で乱した試料を圧密すると、間げき比～圧密圧力曲線および体積圧縮係数～圧密圧力曲線は正規圧密の場合よりも下方に移動し、かく乱の程度が大きくなるほど正規圧密状態から離れて行く。しかし試料のかく乱比に基づいた「再圧密比」でこれらを整理すると、かく乱の程度や先行圧密圧力にかかわらず一義的な関係が見出され、かく乱に伴う圧縮特性の変化の推定に役立つ。

v) 繰り返し破壊によるかく乱に伴い、圧密係数および透水係数はしだいに低下して行く。しかしかく乱の程度が小さいうちは必ずしも正規圧密状態より小さい値とはならない。

6. あとがき

今回の実験のうち単純せん断試験については成田が、三軸圧縮試験については梅田が担当し、奥村がこれらを取りまとめた。試験の種類や個数、あるいは結果の取りまとめについても不十分な点があり、今後とも補足的に実験・考察を進めたい。

新しい試験機、ことに外国製品の購入と試験には予想外の困難が伴う。同じ試験機を購入し、すでに一部の試

験を終えられた京都大学防災研究所八木則男助教授にいろいろの御教示を得たことを附記し、感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Bjerrum, L. and Landva, A. (1966): Direct Simple-Shear Tests on a Norwegian Quick Clay, *Geotech.*, Vol. 16, No. 1, p.p. 1~20.
- 2) Braathen, N.F. (1966): Investigation of Effects of Disturbance on Undrained Shear Strength of Boston Blue Clay, SM Thesis, MIT
- 3) Casagrande, L. and Poulos, S. (1969): On the Effectiveness of Sand Drains, *Canadian Geotech. Journal*, Vol. 6, p.p. 287~326
- 4) Davis, E.H. and Poulos, H.G. (1966): Laboratory Investigations of the Effects of Sampling, Proc. Site Investigation Symp., Civil Engrg. Trans. (Australia), Vol. CE9, No. 1, p.p. 86~94.
- 5) Duncan, J.M. and Dunlop, P. (1969): Behavior of Soils in Simple Shear Tests, Proc. 7 ICS MFE, Vol. I, p.p. 101~109.
- 6) Geonor A/S (1968): Description and Instruction for Use of Direct Simple-Shear Apparatus, Model h-12, 15p., Oslo, Norway
- 7) Kjellman, W. (1951): Testing of the Shear Strength of Clay in Sweden, *Geotech.*, Vol. 2, No. 3, p.p. 225~232.
- 8) Ladd, C.C. and Lambe, T.W. (1963): The Strength of "Undisturbed" Clay Determined from Undrained Tests, ASTM, STP 361 (Laboratory Shear Testing of Soils) p.p. 342~371
- 9) 中瀬明男, 岸正平, 勝野克 (1965): 土の三軸圧縮試験 (第1報), 港湾技術研究所報告, 4 巻1号, 27 p.
- 10) 中瀬明男, 小林正樹, 勝野克 (1969): 圧密および膨張による飽和粘土のせん断強度の変化, 港湾技術研究所報告, 8 巻4号, p.p. 103~143.
- 11) 奥村樹郎 (1969): 粘土試料の攪乱に関する研究 (第1報)——繰り返し三軸圧縮試験による攪乱実験——, 港湾技術研究所報告, 8 巻1号, p.p. 59~84
- 12) Rescoe, K.H., Bassett, R.H. and Cole, E.R.L. (1967): Principal Axes Observed during Simple Shear of a Sand, Proc. of the Geotech. Conf., Oslo, Vol. 1, p.p. 231~237.
- 13) セン断試験法委員会 (1969): 土の力学的性質の試験 (II), 土質試験法——第1回改訂版——, 第5編, p.p. 327~467, 土質工学会
- 14) セン断試験法委員会 (1964): 圧密試験における側面摩擦の影響, 土質試験法, 第9章, 5.2., p.p. 254~256, 土質工学会

記号表

A :	Skemton の間げき圧係数	p' :	平均有効主応力, $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$
A_f :	破壊時の間げき圧係数 (三軸圧縮試験)	ΔP :	ゴムスリーブの変形抵抗 (kg)
A_0 :	供試体の初期断面積 (cm^2)	RCR :	再圧密比 (Reconsolidation Ratio), $(\log \sigma_v'/\sigma_{vr}') / (\log \sigma_{v0}'/\sigma_{vr}')$
A_p :	完全サンプリングにおける間げき圧係数	R_m :	リモールド試験
A_s :	$-\Delta\sigma_v'/\tau$, 等体積単純せん断における間げき圧係数	r :	供試体の半径 (cm)
A_{sf} :	破壊時の間げき圧係数 (単純せん断試験)	r' :	ゴムスリーブの半径 (cm)
ΔA :	供試体断面積の変化量 (cm^2)	S_u :	非排水強度, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}/2$ (kg/cm^2)
a :	ゴムスリーブ 1 cm 高当りのピアノ線断面積 ($3.62 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{cm}$)	S_{up} :	完全試料の非排水強度 (kg/cm^2)
C_c :	圧縮指数	VDR :	間げき減少比 (Void Decrease Ratio), $\Delta e/\Delta e_{\max}$
$\overline{CK_0PU}$:	K_0 圧密完全サンプリング, 非排水三軸圧縮試験 (間げき水圧測定)	α :	$RCR=1$ における $m_v\sigma_v'$ の値
$\overline{CK_0U}$:	K_0 圧密非排水三軸圧縮試験 (間げき水圧測定)	β :	$RCR=0$ における $m_v\sigma_v'$ の値
C_s :	膨張指数	ϵ :	せん断ひずみ (単純せん断) または圧縮ひずみ (三軸圧縮)
c' :	見掛けの有効粘着力 (kg/cm^2)	ϵ_f :	破壊時のせん断ひずみ (%)
c_e :	Hvorslev の有効粘着力 (kg/cm^2)	σ_1 :	最大主応力 (kg/cm^2)
c_v :	圧密係数	σ_1' :	最大有効主応力 (kg/cm^2)
E :	ピアノ線の弾性係数 ($1.55 \times 10^{-6} \text{ kg}/\text{cm}^2$)	σ_3 :	最小主応力 (kg/cm^2)
e :	間げき比	σ_3' :	最小有効主応力 (kg/cm^2)
\bar{e} :	平均間げき比	σ_p' :	完全試料の残留有効応力 (kg/cm^2)
e_0 :	先行圧密圧力における間げき比	σ_t :	ピアノ線の引張応力 (kg/cm^2)
e_v :	$RCR \geq 1$ における処女圧密曲線上の間げき比	σ_v :	鉛直応力 (kg/cm^2)
de :	間げき比の微分	σ_v' :	鉛直有効応力または圧密圧力 (kg/cm^2)
Δe :	間げき比の変化量	$\bar{\sigma}_v$:	平均鉛直応力 (kg/cm^2)
Δe_0 :	先行圧密圧力における処女圧密曲線と再圧密曲線との間げき比の差	σ_{vf}' :	破壊時の鉛直有効応力 (kg/cm^2)
Δe_{\max} :	残留鉛直有効応力における処女圧密曲線上の点とかく乱線との縦距	σ_{v0}' :	先行圧密圧力 (kg/cm^2)
h :	供試体高さ (cm)	σ_{vr}' :	残留鉛直有効応力 (kg/cm^2)
Δh :	供試体高さの変化量 (cm)	$d\sigma_v'$:	圧密圧力の微分 (kg/cm^2)
K_c :	圧密時の土圧係数	$\Delta\sigma_v'$:	鉛直有効応力の増分または圧密圧力の増分 (kg/cm^2)
K_0 :	静止土圧係数	$\Delta\sigma_{v0}$:	供試体の鉛直反力の平均値からの最大偏差
k :	透水係数 (cm/min)	τ :	せん断応力 (kg/cm^2)
m_s :	体積膨張係数 (cm^3/kg)	$\bar{\tau}$:	平均水平せん断応力 (kg/cm^2)
m_v :	体積圧縮係数 (cm^3/kg)	τ_1 :	第1サイクルのせん断強度 (kg/cm^2)
		τ_f :	破壊時の水平せん断応力 (kg/cm^2)
		τ_r :	乱された試料のせん断強度 (kg/cm^2)
		$\Delta\tau$:	せん断応力の補正量 (kg/cm^2)
		ϕ' :	有効せん断抵抗角 ($^\circ$)
		ϕ_e :	Hvorslev の有効摩擦角 ($^\circ$)

(1970.12.28 受付)