

2/15

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

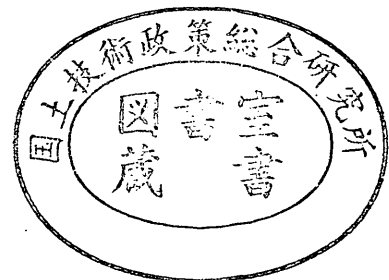
---

VOL. 8

NO. 1

MAR. 1969

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。ただし第1巻から第6巻および欧文編第1号から第15号までは下記のとおり不定期に刊行された。  
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。

和文篇 (Japanese Edition)

- Vol. 1. No. 1 (1963)
- Vol. 2. Nos. 1~3 (1963~1964)
- Vol. 3. Nos. 1~7 (1964)
- Vol. 4. Nos. 1~11 (1965)
- Vol. 5. Nos. 1~15 (1966)
- Vol. 6. Nos. 1~8 (1967)

欧文篇 (English Edition)

- Report Nos. 1~15 (1963~1967)

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 report prior to the seventh volume were published in two series in Japanese and English as listed above.

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8巻 第1号 (Vol. 8, No. 1), 1969年3月 (March 1969)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Measurement of Wind Velocity Fluctuations over Waves in a  
Wind-Wave Tunnel .....Hajime KATO and Kikuo SANO..... 3  
(風洞水路における波の上の風速変動の性質について.....加藤 始・佐野喜久雄)
2. 沖積粘土層におけるサウンディング (数種の方法による試験結果について)  
..... 柳瀬重靖..... 37  
(Soundings in the Alluvial Clay Stratum (On the results of several methods)  
..... Shigeyasu YANASE)
3. 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—— .....奥村樹郎..... 59  
(Studies on the Disturbance of Clay Samples (1st Report)——Remolding Tests  
by the Repeated Triaxial Compression—— .....Tatsuro OKUMURA)
4. 飽和砂層の振動性状 .....荒井秀夫・梅原靖文..... 85  
(Vibration of Saturated Sand Layers .....Hideo ARAI and Yasuhumi UMEHARA)
5. 音響測深機に関する研究 .....木原純孝.....123  
(Study on Echo-Sounder.....Sumitaka KIHARA)
6. 砂, 砂利混合時の浚渫ポンプの特性  
..... 八木得次・宮崎昭児・奥出 律.....165  
(Characteristic of the Dredging Pump in Case of Mixed with Sand and Gravel  
..... Tokuji YAGI, Shoji MIYAZAKI and Tadasu OKUDE)

### 3. 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——

奥村樹郎\*

#### 要 旨

サンプリングによる攪乱が粘土の非排水強度の低下に及ぼす影響を調べるために繰り返し三軸圧縮破壊試験を実施した。攪乱による残留有効応力の低下は膨潤による有効応力の低下と同様の効果を持ち、繰り返し破壊試験から少ない試料で容易に精度良く Hvorslev のパラメーターを求めることができた。攪乱の種類を問わず、攪乱試料と完全試料との強度の比はそれぞれの残留有効応力の比と一義的な関係にあり、繰り返し破壊試験による最も簡単で実用的な攪乱強度の補正法が見出された。

---

\* 土質部 土質試験課長

**Studies on the Disturbance of Clay Samples (1st Report)**  
—Remolding Tests by the Repeated Triaxial Compression—

**Tatsuro OKUMURA\***

**Synopsis**

In order to investigate the effect of disturbance due to sampling upon the undrained strength of clay, several repeated triaxial compression tests up to failure were carried out. The decrease in the residual effective stress due to disturbance results in a similar effect on the strength behavior to that due to rebound, and the repeated compression test gives an easy method to obtain accurately the Hvorslev's strength parameters with few specimens. The strength ratio of the disturbed sample to the perfect one has a unique relation with the residual effective stress ratio of the latter to the former, regardless the kind of disturbance, and the repeated loading test suggests a most simple and practical method for correcting the undrained strength of a disturbed sample.

---

\* Chief, Soil Test and Investigation Section, Soils Division

## 目 次

要 旨 .....	59
1. ま え が き .....	63
2. 実 験 方 法 .....	63
2.1. 試料の調整 .....	63
2.2. 実験の種類 .....	63
2.3. 供試体の調整 .....	63
2.4. 供試体の圧密 .....	64
2.5. 供試体のセン断 .....	65
2.6. 誤差要因と信頼限界 .....	65
3. 実験結果とその検討 .....	66
3.1. 圧密特性 .....	66
3.2. セン断試験結果 .....	69
3.3. 攪乱に伴うセン断特性の変化 .....	76
4. 強度補正への応用 .....	79
5. む す び .....	82
6. 謝 辞 .....	82
参 考 文 献 .....	82
記 号 表 .....	84

## 1. まえがき

サンプリングによって実験室に持ち込まれた粘土試料は多かれ少なかれ攪乱されており、原地盤とは異なった諸特性を示すようになる。このうちには破壊強度、弾性係数などセン断常数値の低下、体積圧縮係数、透水係数、圧密係数など圧密常数値の低下があり、中でも非排水強度の低下はこれが構造物の設計に直接影響するだけに現場技術者にとって深刻な問題となっている。このため一方ではサンプリング方法や使用機器と攪乱との相関性を調べ(たとえば藤下, 松本, 堀江, 1966)<sup>1)</sup>, できるだけ攪乱の少ないサンプリング方法を開発する研究が(たとえば藤下, 1963)<sup>6)</sup>, 他方では攪乱の影響を受けない常数を用いて構造物を設計する研究が進められているが(たとえば中瀬, 1969)<sup>12)</sup>, いずれも現状では問題を解決したとはいえない。第3の方法は攪乱による強度低下量を補正することであり, Noorany and Seed (1965)<sup>13)</sup>の研究が新しい。

著者はMIT留学中に第3の方法に関連して繰り返し三軸圧縮試験による攪乱実験を行なったのでここにその結果を報告し, 強度補正法に若干の考察を加える。

## 2. 実験方法

### 2.1. 試料の調整

実験に用いた土は粉末状に乾燥した Boston Blue Clay でその特性は表-1のとおりである。初めに16g/lの塩分濃度を持つ食塩水でペースト状に練り返し, 直径12in, 高さ4inの再圧密箱を用い, 鋼板を通じ空気圧で圧密した。圧密圧力は2kg/cm<sup>2</sup>, 圧密期間は5日である。圧密した土塊は3分して油漬けし, 恒温恒湿室(湿度100%)に保存した。実験供試体は適宜この塊から切り出したので, 最大保存期間は110日に達するが後述のように含水比の変化は認められなかった。

表-1 Boston Blue Clay の特性

土 粒 子 比 重 ( $G_s$ )	2.78
液 性 限 界 (L.L.)	33%
塑 性 限 界 (P.L.)	13%
塑 性 指 数 ( $I_p$ )	20%
粘 土 分 ( $<2\mu$ )	54%

### 2.2. 実験の種類

実験の種類は大別すると圧密非排水繰り返し三軸圧縮試験と非圧密非排水繰り返し三軸圧縮試験であり, その

内訳は次のとおりである。

#### (i) $\overline{CK_0U}$

$K_0$  条件で  $\sigma_{1c}' = 4 \text{ kg/cm}^2$  まで圧密し, そのまま非排水条件で繰り返し破壊試験を行なった。第1サイクルは原地盤強度に相当するいわゆる理想試料 (ideal sample) の強度常数を得るためのものであり, 第2サイクル以降は繰り返し破壊による攪乱とその影響を調べるためのものである。最後に供試体をセルから取り出し, 含水比を変えないで完全に攪乱した後再度非圧密非排水試験を行なって攪乱強度を得た。

#### (ii) $\overline{CK_0PU}$

機械的な攪乱のないいわゆる完全試料 (perfect sample) のデータを得るための試験で, 供試体は (i) と同じ  $K_0$  条件で圧密され, 非排水条件で軸差応力を解除した。そのままの状態の間隙水圧の平衡を待ち, 続いて (i) と同様の繰り返しセン断を行なった。第1サイクルは完全試料の強度常数を得るためのものであり, 第2サイクル以降は攪乱の影響を調べるためのものである。

#### (iii) $\overline{CK_0RK_0U}$

(i) と同じ  $K_0$  圧密の後  $\sigma_{1c}' = 1 \text{ kg/cm}^2$  まで  $K_0$  条件で膨潤させ, 非排水セン断を (i) と同様に行なった。過圧密粘土の強度特性と攪乱に対する特性を調べるためのものである。

#### (iv) $CK_0SU$

(ii) と同様に  $K_0$  圧密から完全試料を得た後, 実際のサンプリングに似せるため供試体を別の三軸セルに移し変えて非圧密非排水くり返し破壊試験を行なった。

#### (v) $CK_0RK_0SU$

(iii) と同じ  $K_0$  圧密,  $K_0$  膨潤の後 (iv) と同様の模擬サンプリングとくり返しセン断を行なった。

#### (vi) $UU$

保存試料から成形した供試体をそのまま非圧密非排水繰り返しセン断にかけた。(iv) と同様にサンプリングの効果を見るためのものであるが, 圧密圧力, 保存方法の相異, 時間効果などの影響が予測される。

以上のとおり実施した各種の試験の個数, サイクル数, 攪乱試験の有無を表-2に示す。

### 2.3. 供試体の調整

保存試料から直径3.5cm, 高さ8cmに成形された供試体は大気中で三軸セルにセットされた。

ゴムスリーブは極薄のもの2枚を使用し, 間にシリコングリースを充填したが (iv), (v), (vi) の非圧密非排

表-2 実験の種類と個数

No.	サイクル数	攪乱試験
$\overline{CK_0U-1}$ (T-1)	3	×
$\overline{CK_0U-2}$ (T-4)	4	○
$\overline{CK_0PU-1}$ (T-3)	3	○
$\overline{CK_0PU-2}$ (T-5)	4	○
$\overline{CK_0RK_0U-1}$ (T-2)	3	○
$\overline{CK_0RK_0U-2}$ (T-9)	3	○
$CK_0SU-1$ (T-6)	3	○
$CK_0SU-2$ (T-8)	3	○
$CK_0RK_0SU-1$ (T-7)	3	○
$UU-1$	1	×
$UU-2$	2	×
$UU-3$	2	○
$UU-4$	2	○
$UU-5$	1	○

水セン断試験および一部の攪乱試験では漏水の危険が少ないので1枚のゴムスリーブとした。圧密を促進させるためのフィルターには6.4mm幅の短冊状の口紙8枚を使用した。T-7~T-9の試験についてはフィルター補正を省略するために同じ幅で同量の口紙をラセン状に巻いた。

2.4. 供試体の圧密

圧密荷重は15段階に分けて載荷し、除荷は6段階に分けた。第1段階は0.5 kg/cm<sup>2</sup>の等方圧密とし、第4段階以降で $K_0=0.5$ の非等方圧密となるよう第2、第3段階を遷移領域とした。間隙係数を $\bar{A}=B=1$ と仮定すると載荷直後の有効応力比 $K_i$ が推定できる。破壊時に予想される応力比 $K_f=0.35$ に較べ十分安全な $K_i=0.41\sim 0.46$ となるよう荷重段階を表-3のように定めた。載荷に際しては前段階での断面積の変化量( $\Delta A$ )を次式で計算し、これを勘案して値に多少の修正を施した。

$$\Delta A = (\Delta V - \Delta L A_0) / L_0 \quad \dots\dots (1)$$

ここに  $\Delta V$ : 圧密中の体積変化 (cm<sup>3</sup>)

$\Delta L$ : 圧密中の試料長変化量 (cm)

$A_0$ : 初期断面積 (cm<sup>2</sup>)

$L_0$ : 初期試料長 (cm)

膨潤時の $K_0$ 値はBoston Blue Clayに関する過去のデータに基づいて表-3の16段階以降のように定めたが実際には圧密時と同様多少の修正を施した。なお圧密中は3 kg/cm<sup>2</sup>のバックプレッシャーを使用している。

載荷重( $P$ )は予定の軸差応力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )、フィルターおよびゴムスリーブによる応力補正量( $\Delta \sigma_1$ )、供試体の

表-3 圧密および膨潤時の荷重段階

荷重段階	$\sigma_{1c}'$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{1c}'$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$K_i$ [ $K_0$ ]
1	0.50	0.50	1.00
2	0.80	0.50	0.40
3	0.95	0.50	0.44
4	1.10	0.55	0.42
5	1.20	0.60	0.46
6	1.40	0.70	0.42
7	1.60	0.80	0.43
8	1.90	0.95	0.41
9	2.20	1.10	0.42
10	2.50	1.25	0.43
11	2.70	1.35	0.46
12	3.00	1.50	0.45
13	3.30	1.65	0.45
14	3.60	1.80	0.46
15	4.00	2.00	0.45
16	3.20	1.88	[0.59]
17	2.50	1.67	[0.67]
18	2.00	1.50	[0.75]
19	1.60	1.31	[0.82]
20	1.25	1.12	[0.90]
21	1.00	0.96	[0.96]

断面積( $A$ )、セル圧およびピストンの断面積( $\sigma_3, a$ )、ハンガー重量( $P_0$ )、ピストン重量( $W_p$ )、キャップ重量( $W_c$ )、水中供試体重量( $W_s'$ )、ダイヤルゲージ反力( $R_a$ )およびピストンの摩擦( $F$ )を考慮して次式から計算した。

$$P = \{(\sigma_1 - \sigma_3) + \Delta \sigma_1\} A + \sigma_3 a - (P_0 + W_p + W_c + W_s' / 2 - R_a \mp F) \quad \dots (2)$$

このうちフィルターおよびゴムスリーブによる応力補正は問題の多いところであるが、ここでは圧縮ひずみが2%以上で0.1 kg/cm<sup>2</sup>、それまではひずみとともに直線的に増加するものとして計算した。フィルター補正が必要な主要因はフィルター自体の圧縮強度ではなく、ゴムスリーブの拘束を打ち破ってフィルターに横じわが生じることと思われるので膨潤時のフィルター補正はしていない。またピストン摩擦の複号はそれぞれ圧密時および膨潤時に対応している。なお圧密中にはバックプレッシャーおよびセル圧に多少の変動があるので圧密終了時の値を再計算し、以後のデータ整理にはこれを用いた。

圧密時間は第10段階までと膨潤時とは0.5~1日、これ以外は1日とした。ただし圧密および膨潤時の最終段



階だけは試料調整時の最終荷重段階と同じ36時間として2次圧密の影響を揃えた。

圧密に使用したポーラストンは目の粗い通常のものであるが、非圧密非排水セン断の時には残留間隙水圧の測定に便利な細目のポーラスセラミックを用いた。

### 2.5. 供試体のセン断

圧密非排水セン断は1%/hrのヒズミ速度で試験し、零位法による間隙水圧測定を行なった。非圧密非排水試験(サンプリングを行なったものを含む)と攪乱試験ではヒズミ速度を30%/hrとし、セン断中の間隙水圧は測定しなかった。いずれの場合でもセン断直前の残留間隙水圧は十分時間をかけて測定した。

1サイクルの試験が終わった後は軸差応力を零に保ったままで1時間程度放置し、間隙水圧の平衡を待って次のサイクルに移った。サイクル数が増すにつれて供試体にクラックが発生する。クラックが顕著になってゴムスリーブの外からはっきり見えたところで試験を中止し、最後の攪乱試験に移った。

軸差応力の計算は圧密時と同様の考え方で行なった。フィルターおよびゴムスリーブによる応力補正も圧密時と同様であるが、繰返しセン断の部分で次の考え方を採った。すなわち前サイクルの最大ヒズミを超えた部分では0.1 kg/cm<sup>2</sup>の補正を行ない、それまではヒズミに比例する補正を行なった。なおフィルターを使用していないものについてはゴムスリーブの影響を無視して一切の補正をしなかった。

非圧密非排水試験および攪乱試験の拘束圧は間隙圧係数Bが1となるまでとし、通常1 kg/cm<sup>2</sup>程度であった。

### 2.6. 誤差要因と信頼限界

実験結果のばらつきの中には試料の不均一性、測定法固有の欠陥などによる実験誤差の他に測定に用いる計器の精度に由来する必然の誤差が含まれる。実験結果から引き出される結論や他の常数との相関々係にもこれらの計器誤差が影響し、一概にばらつきが大きいからといってその相関性を否定することはできない。ここでは次章に示される実験結果がどの程度信頼できるかを知る資料として計器の精度を中心とした誤差範囲を検討する。

実験で扱った測定計器とその誤差には次のようなものがある。

#### (i) 圧力計

セル圧、バックプレッシャー、圧密非排水試験の間隙水圧測定にブルドン管を用いた。ブルドン管は精度が悪いのでキャリブレーションカーブを作成したが、キャリ

ブレーター自体に±0.1 psiの誤差があり、折線で作成されたキャリブレーションカーブからのばらつきによっても±0.01 kg/cm<sup>2</sup>の誤差が見込まれる。

非圧密非排水試験の残留間隙水圧の測定に用いた圧力変換器は±0.004 kg/cm<sup>2</sup>以下の高精度のものではあるが、大気圧の影響を受けることもあって零点移動に難点があり、ブルドン管と同じ±0.01 kg/cm<sup>2</sup>の誤差が見込まれる。

#### (ii) ブルーピングリング

荷重の測定に用いたブルーピングリングは折線によるキャリブレーションカーブを作成して正確を期したが、しばしば1目盛程度の零点移動があり、±0.06 kgの誤差は避けられない。ピストンによる摩擦の変動もこの程度であったので摩擦誤差にも上記の値が見込まれる。

#### (iii) 天秤、ノギス、その他

供試体などの重量測定には自動天秤を用い、誤差は±0.005 gである。

長さの測定にはノギスを用いたが測定例のばらつきなどからその誤差は±0.002 cmと判定された。

供試体の円周は細い紙を巻いて測ったが、紙が円筒母線に直角でなかったり、表面に密着しなかったりしてかなりの誤差が伴った。プラスチック製の標準供試体に直接ノギスを当てて直径を測ったものと比較してその誤差は±0.06 cmと判定された。

供試体の変位はダイヤルゲージにより、誤差は±0.00013 cm程度と推定された。また供試体の体積変化は排水量の測定から誤差±0.005 cm<sup>3</sup>の精度で測定された。

以上に見込まれた計器の精度から誤差伝播の推定に通常用いられる次式によって主な実験結果に含まれる誤差を推定すると表-4のようになる。

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \Delta E_i \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \right\}^2} \quad \dots\dots (3)$$

ここに E: 計算値の誤差

$\Delta E_i$ : 各測定値の誤差

$x_i$ : 測定値, 独立変数

$f(x_i)$ : 計算式, 測定値の関数

ただし計算の途中で用いる測定値にはかなりの範囲があり、表の値はその範囲の平均値または代表値に基づくものであって全体に亘って正しくはない。

一方供試体の長さを実験の前後に測定し、ダイヤルゲージで測った変位を仲だちに比較するとかなりの差が見られる。17ケの測定値について初めの値との差を標準偏差の形で計算すると0.07 cmとなり、実験誤差の目安

表-4 実験誤差推定値

	計器誤差	実験誤差
圧力 ( $\sigma_3, u_B, u$ )	$\pm 0.01$ (kg/cm <sup>2</sup> )	[0.4] [0.05]
荷重 ( $P$ )	$\pm 0.06$ (kg)	
摩擦 ( $F$ )	$\pm 0.06$ (kg)	
重量 ( $W$ )	$\pm 0.005$ (g)	
長さ ( $L$ )	$\pm 0.002$ (cm)	
円周 ( $\pi D$ )	$\pm 0.06$ (cm)	
変位 ( $\Delta L$ )	$\pm 0.00013$ (cm)	
体積変化 ( $\Delta V$ )	$\pm 0.005$ (cm <sup>3</sup> )	
歪 ( $\epsilon$ )	$\pm 0.004$ (%)	(0.03)
断面積 ( $A$ )	$\pm 0.11$ (cm <sup>2</sup> )	[0.11]
断面変化 ( $\Delta A$ )	$\pm 0.003$ (cm <sup>2</sup> )	(0.003)
体積 ( $V$ )	$\pm 0.9$ (cm <sup>3</sup> )	(1.0)
含水比 ( $w$ )	$\pm 0.006$ (%)	(0.5)
間隙比 ( $e$ )	$\pm 0.02$	(0.03)
有効側圧 ( $\sigma_{3c}', \sigma_3', \sigma_p', \sigma_s', \sigma_r'$ )	$\pm 0.014$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
鉛直圧密圧力 ( $\sigma_{1c}'$ )	$\pm 0.015$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
平均圧密圧力 ( $\sigma_m'$ )	$\pm 0.011$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
圧密圧力比 ( $K_c$ )	$\pm 0.008$	
軸差応力 ( $\sigma^1 - \sigma_3$ )	$\pm 0.02$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
強度 ( $S_u, q$ )	$\pm 0.011$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
平均主応力 ( $P'$ )	$\pm 0.018$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
最大主応力 ( $\sigma_1'$ )	$\pm 0.03$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
有効主応力比 ( $\sigma_1'/\sigma_3'$ )	$\pm 0.018$	
間隙圧係数 ( $\bar{A}$ )	$\pm 0.008$	
弾性係数 ( $E$ )	$\pm 4$ (kg/cm <sup>2</sup> )	

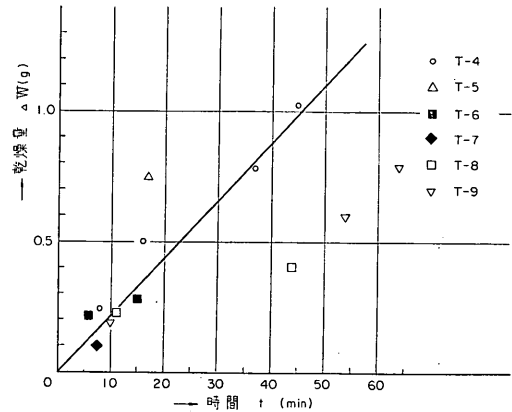


図-1 乾燥量の時間的变化

求めたものであり、対象となる数分内の範囲でもなお±0.1gほどの誤差は考えられるものの、大部分はその他の原因と思われる。すなわちあらかじめ湿したフィルターやポーラストンから余分の水を吸い込んだ影響などが大きいと思われる。いずれにしても重量に関する実験誤差は表-4の〔 〕内に示された0.4gに代表される。

上述の実験誤差を基に計器誤差の修正を施したものを表-4の( )内に示す。計器誤差の項でも述べたようにこれらの値は誤差の代表値ともいべきものであり、また検討資料数もまちまちなのでさらに詳しくは確率論に基づいた有意性の検定などが必要ではあるが、実験結果のばらつきに一応の目安は与えよう。

### 3. 実験結果とその検討

#### 3.1. 圧密特性

2 kg/cm<sup>2</sup>で予備圧密された試料は最大110日間放置されたが、その間の含水比の変化を供試体の初期含水比から調べると図-2となる。図からわかるように時間的な含水比の変化はほとんどなく、その平均は $w_i=32.8\%$ 、標準偏差は0.2%で予想された実験誤差より少なかった(表-4参照)。

間隙比( $e$ )と圧密圧力( $\sigma_m'$ )との関係を図-3に示す。初期荷重段階が等方圧密であることなどを考慮して圧密圧力には平均主応力  $\sigma_m' = (\sigma_{1c}' + 2\sigma_{3c}')/3$  を用いた。±0.03の実験誤差が予想される間隙比の絶対値にはかなりのばらつきがあるが、体積変化に基づく曲線のコウ配にはそれほどばらつきはなく、正規圧密部のコウ配から圧縮指数は $C_c=0.21$ となる。最終荷重段階の2.7 kg/cm<sup>2</sup>の点で間隙比が急に落ちているのはこの段階の圧密期間が36hrと他の段階に較べて長く、2次圧密

を与える。計器誤差より1桁大きい原因として成形時の端面の凹凸、実験終了から測定までの伸張などが考えられる。この誤差はしかし前後2回の測定と変位測定との誤差が総合されたものなので、これを逆算すると実験誤差は表-4の〔 〕に示すように0.05 cmとなる。

同様に断面積の差を変位と体積変化から算出して標準偏差で表わすと19ヶの測定値で0.16 cm<sup>2</sup>となる。これを検査の過程から逆算すると実験誤差は0.11 cm<sup>2</sup>となり、この場合は計器誤差と一致する。

供試体の重量を圧密中の排水量から同様に検査すると22ヶの測定値で0.6 gの標準偏差がある。このうち最も大きな原因の一つと考えられるものは操作中の供試体の乾燥であり、気温、湿度、試料の含水比等の関係でばらつきはあるが、図-1に示されるように曝気1分間当たり0.022 g程度となる。しかし上記の標準偏差は各供試体ごとの実測値を基に乾燥の影響を補正したものについて

粘土試料の攪乱に関する研究 (第1報)

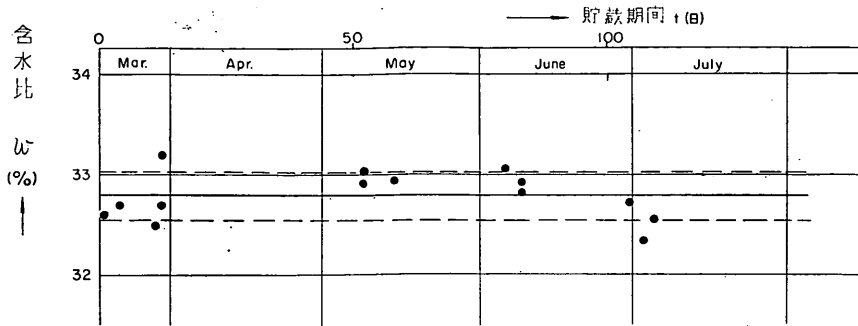


図-2 初期含水比の時間的变化

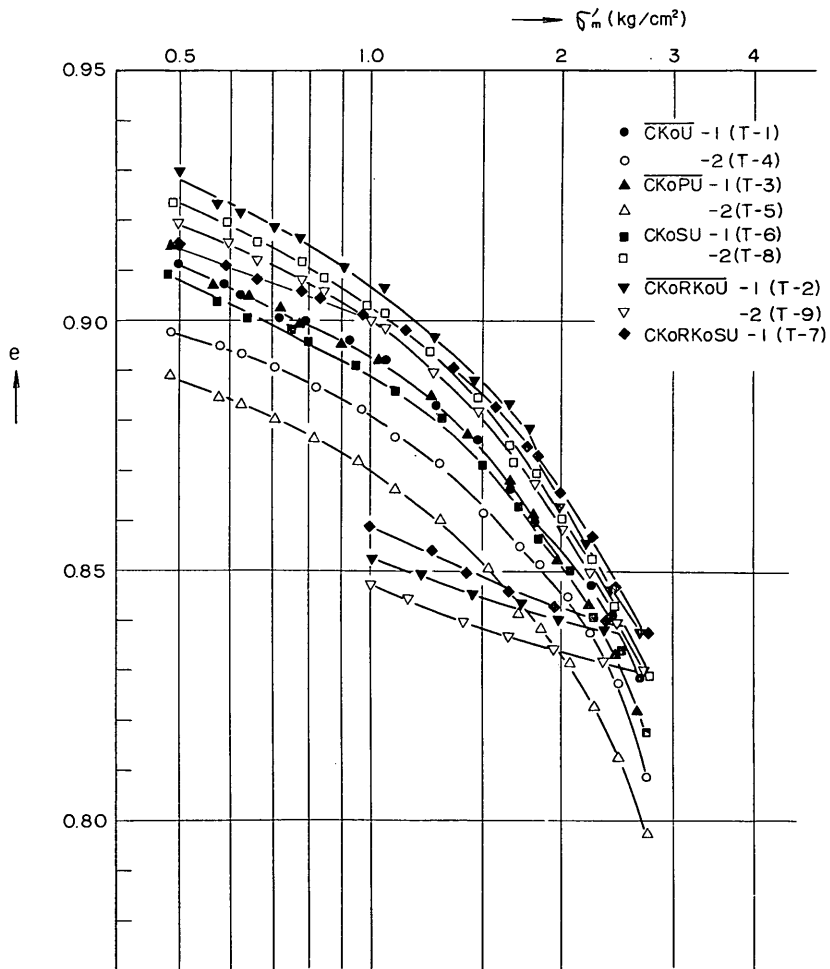


図-3 平均圧密圧力と間隙比との関係

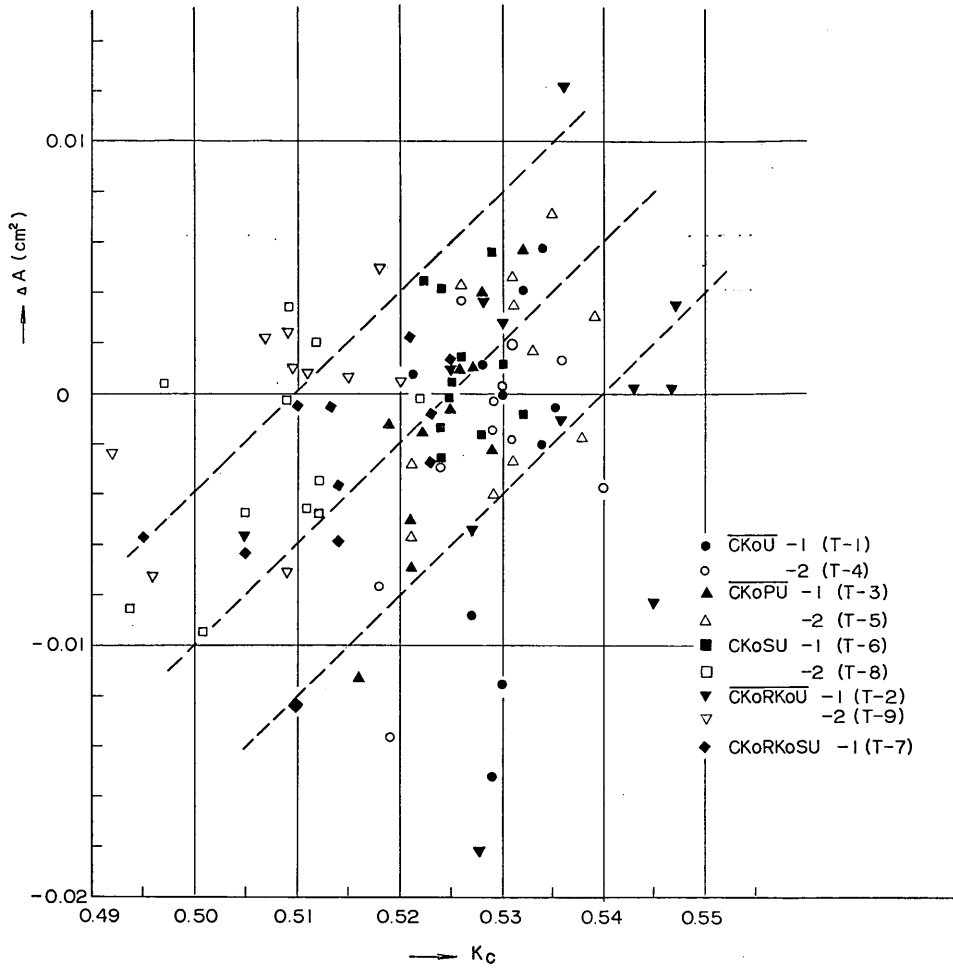


図-4 圧密圧力比と断面積変化量との関係

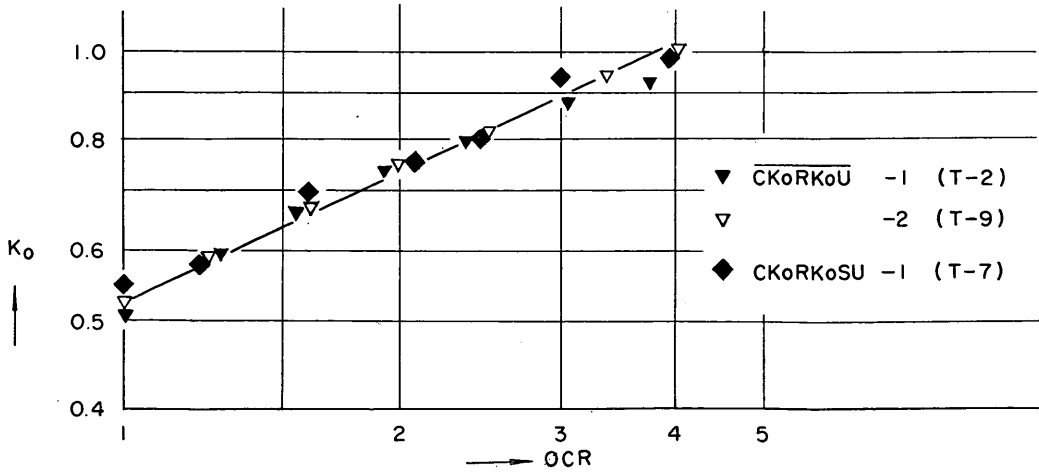


図-5 過圧密比と静止土圧係数との関係

の影響が大きいためである。圧密期間が異なるためと思われる点のばらつきは他の段階でも随所に見られた。

圧密時の有効圧力比  $K_0 = \sigma_{3c}' / \sigma_{1c}'$  と断面積の変化量  $\Delta A$  との関係は  $K_0$  圧密に到達し終わった第5荷重段階以降についてプロットすると 図-4 のようになる。かなりのばらつきはあるが図中の点線で示された範囲内にあると見ることができ、 $\Delta A = 0$  となる圧密圧力比からこの粘土の静止土圧係数は  $K_0 = 0.525 \pm 0.015$  であるといえる。

鉛直圧密圧力で表わした過圧密比 OCR と圧密圧力比との関係を 図-5 に示す。断面積の変化は  $0.00075 \pm 0.00326 \text{ (cm}^2\text{)}$  ときわめて小さく、この図が過圧密状態での静止土圧係数  $K_0$  を示すものといえる。各点はわずかに上に凸の曲線上にあるが、近似的に図の直線で表わすことができ、これより  $K_0 = 0.525(\text{OCR})^{0.49}$  となる。

3.2. セン断試験結果

セン断試験結果のうち  $\overline{CK_0U}$ ,  $\overline{CK_0PU}$ ,  $\overline{CK_0RK_0U}$ ,  $\overline{CK_0SU}$ ,  $\overline{CK_0RK_0SU}$ ,  $\overline{UU}$  および攪乱試験のおおのについて一例ずつを 図-6 に示す。またそれぞれの応力経路図を 図-7 に示す。

$\overline{CK_0U}$  試験の第1サイクルから得られた非排水強度は  $S_u = 1.22 \pm 0.03 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$  であり、この時の平均有効応力は  $p' = 2.97 \pm 0.03 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$  であった。見掛けの有効粘着力  $c'$  を 0 と仮定し、最大軸差応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$  における有効セン断抵抗角  $\phi'$  を求めると  $24.4 \pm 0.4^\circ$  となる。この値から Brooker and Ireland (1965)<sup>2)</sup> の実験式  $K_0 = 0.95 - \sin \phi'$  により静止土圧係数を求めると 0.538 となり、圧密試験結果から推定した 0.525 に近い値が得られる。またこの時の鉛直圧密圧力  $\sigma_{1c}' = 3.94 \pm 0.04 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$  から得られた強度増加率は  $c_u/p = 0.311 \pm 0.005$  であり、破壊時の間隙圧係数は  $\overline{A}_f = 0.55 \pm 0.04$  であった。

$\overline{CK_0PU}$  および  $\overline{CK_0SU}$  試験から求められた完全試料の残留有効応力は  $\sigma_p' = 2.14 \pm 0.02 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$  であり、鉛直圧密圧力  $\sigma_{1c}' = 3.97 \pm 0.04 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$  との比は  $\sigma_p' / \sigma_{1c}' = 0.539 \pm 0.006$  であった。またこの時の圧密圧力比  $K_0 = 0.520 \pm 0.002$  から完全サンプリングにおける間隙圧係数  $\overline{A}_p$  を求めると  $0.039 \pm 0.016$  となった。完全サンプリングを行なわない他の試験で  $\sigma_p'$  を推定するにはこの係数を用いて次式で計算するのが妥当な方法であろうが (Noorany and Seed, 1965)<sup>13)</sup>

$$\sigma_p' = \sigma_{1c}' \{K_0 + (1 - K_0)\overline{A}_p\} \quad \dots\dots (4)$$

鉛直圧密圧力との直接の比率  $\sigma_p' / \sigma_{1c}' = 0.539$  を利用す

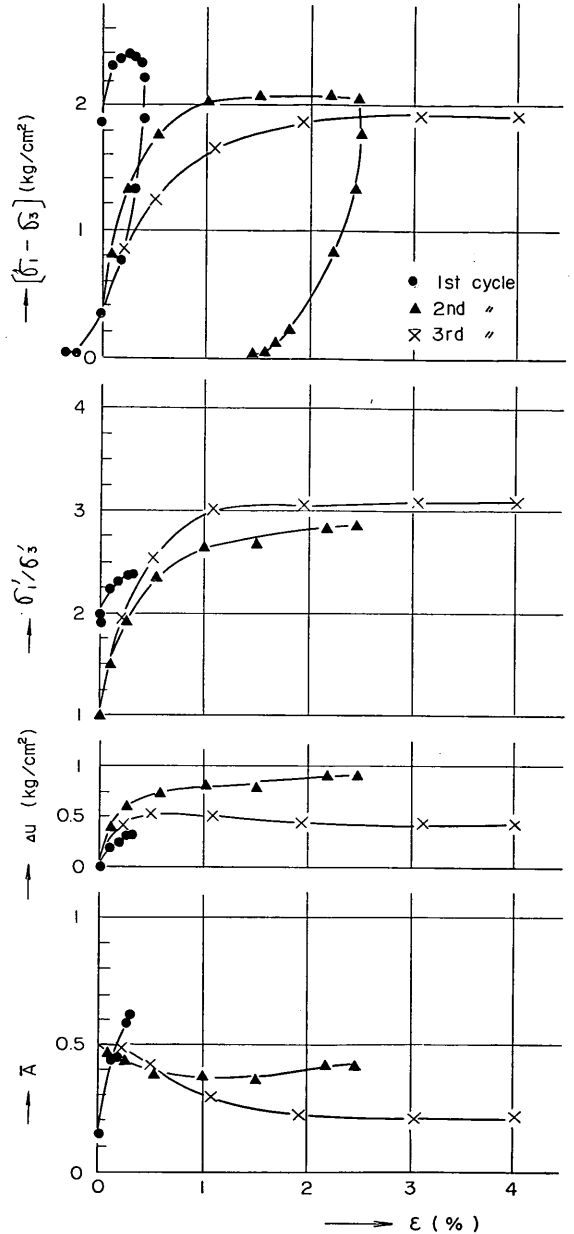


図-6 セン断試験結果  
(a)  $\overline{CK_0U}$ -1 (T-1)

こともできる。4個の試験について両者を比較すると実測値からの偏差は後者の方が少ないという結果を得たので、実際には両者の平均値をとることにした。いずれにしても両者の差は 1% 以内に止っている。

$\overline{CK_0PU}$  試験の第1サイクルから求めた完全試料の非

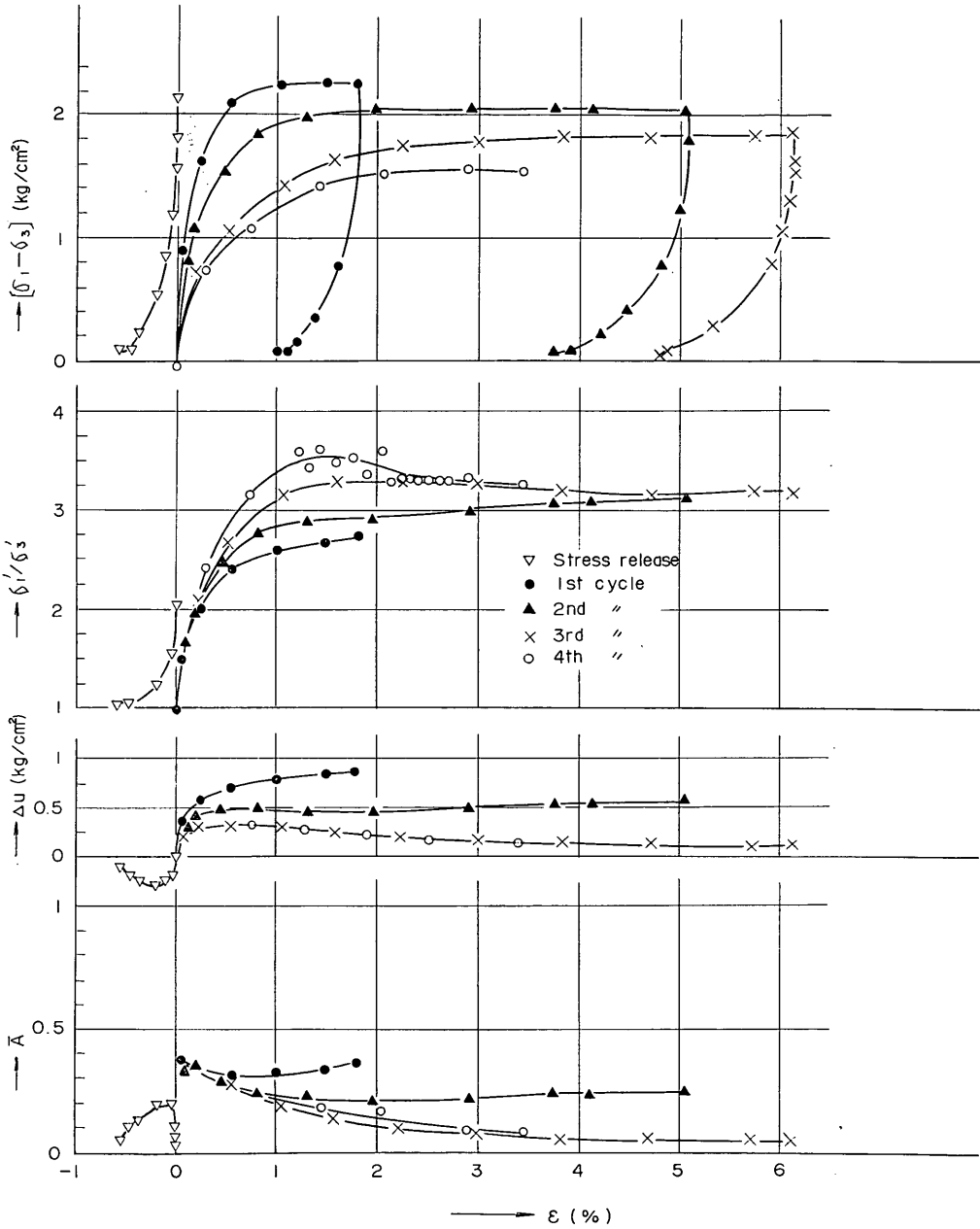


図-6 セン断試験結果  
(b)  $CK_0PU-2$  (T-5)

粘土試料の攪乱に関する研究 (第1報)

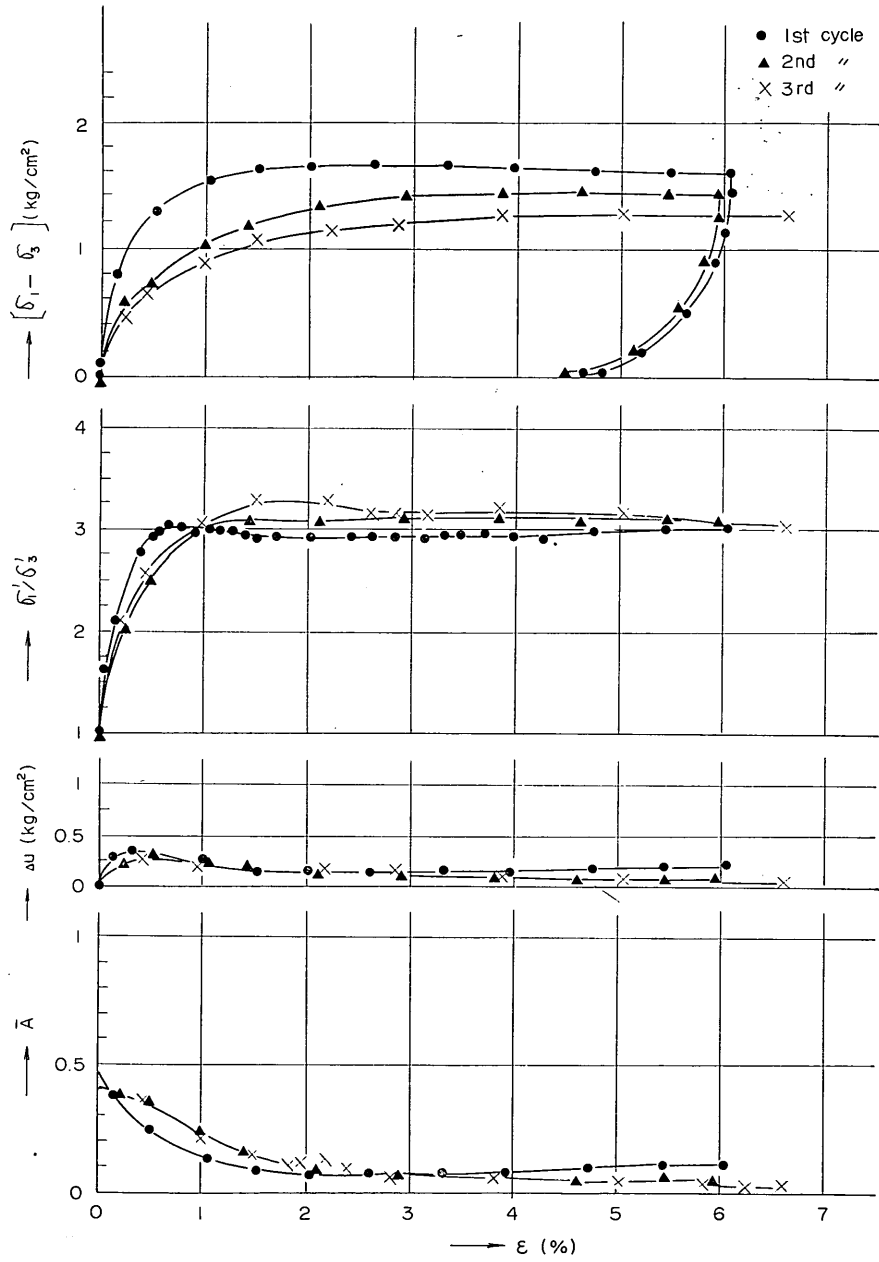


図-6 セン断試験結果  
(c)  $CK_0RK_0U-1$  (T-2)

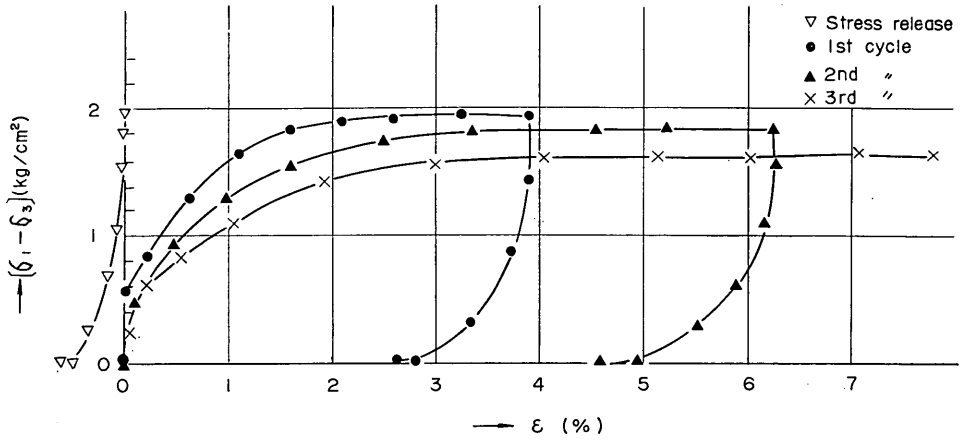


図-6 セン断試験結果  
(d)  $CK_0SU-2$  (T-8)

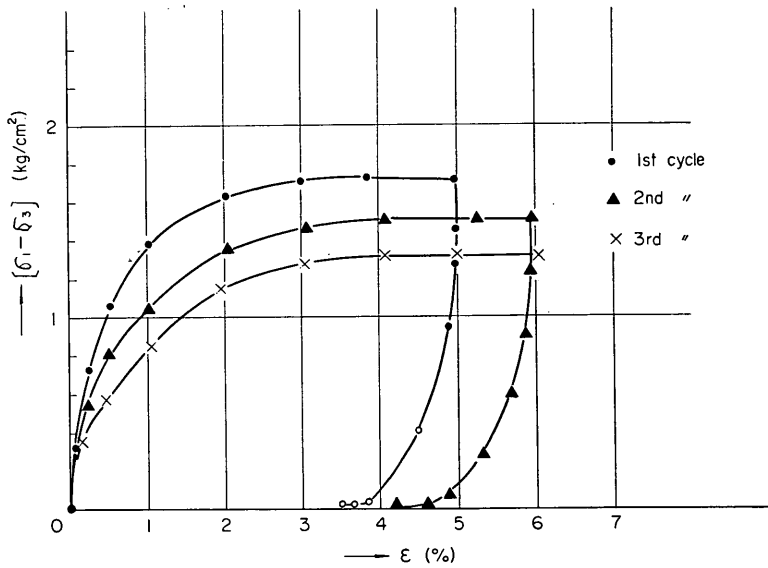


図-6 セン断試験結果  
(e)  $CK_0RK_0SU-1$  (T-7)



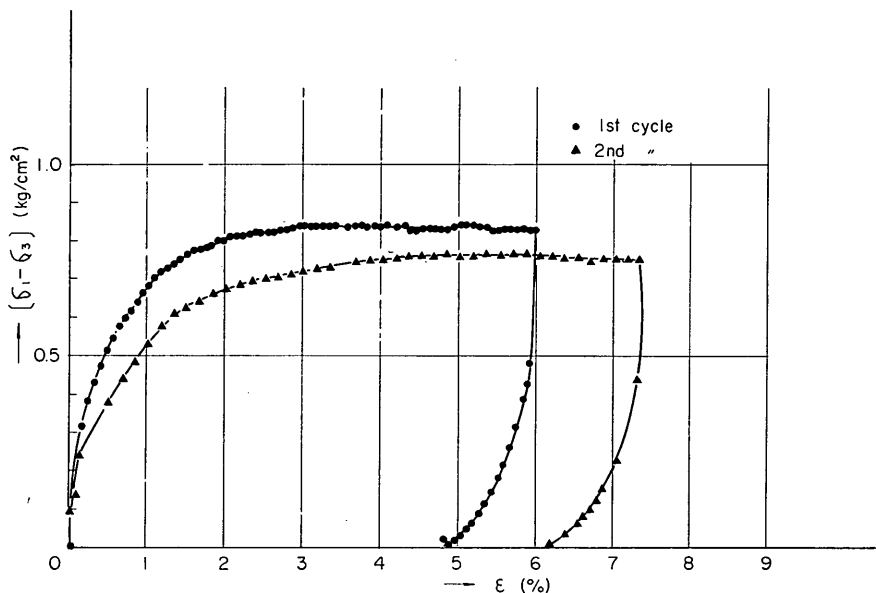


図-6 セン断試験結果  
(f) UU-2

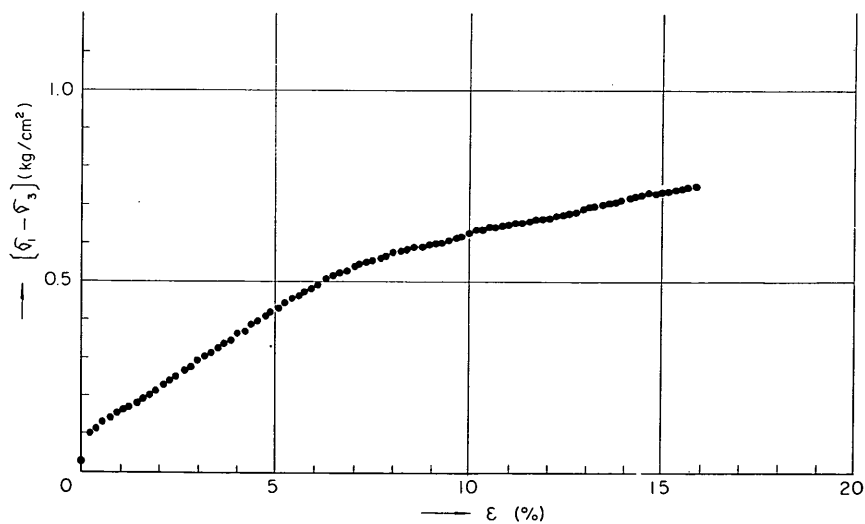


図-6 セン断試験結果  
(g) CK<sub>0</sub>U-2 (T-4) R<sub>m</sub>

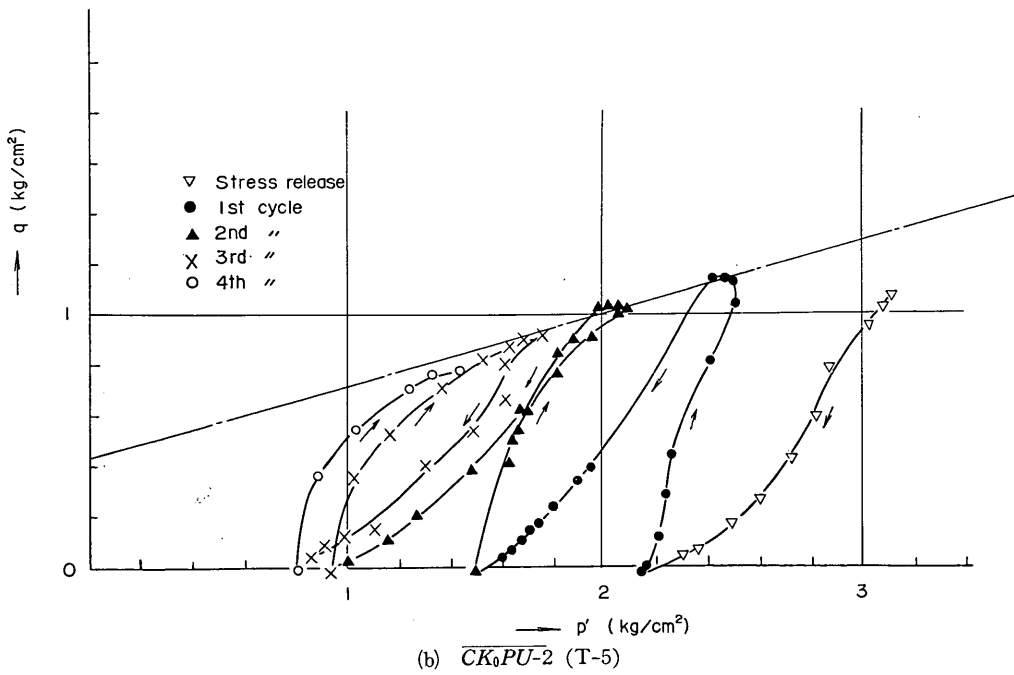
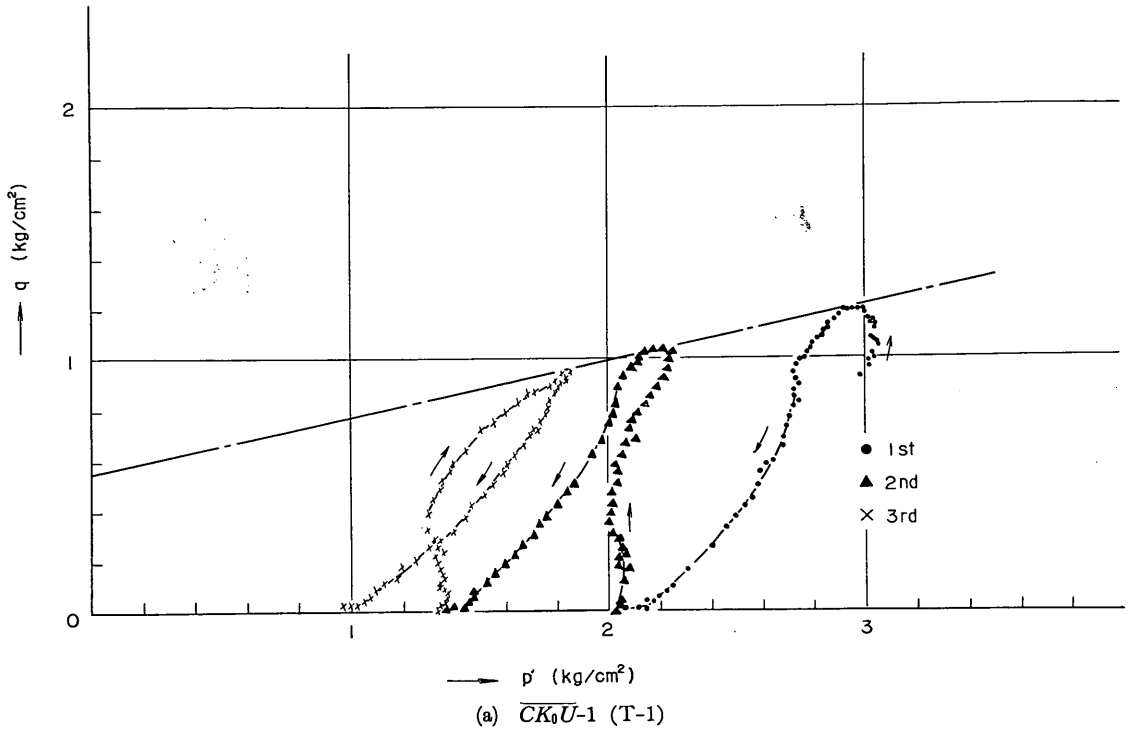


図-7 応力経路図

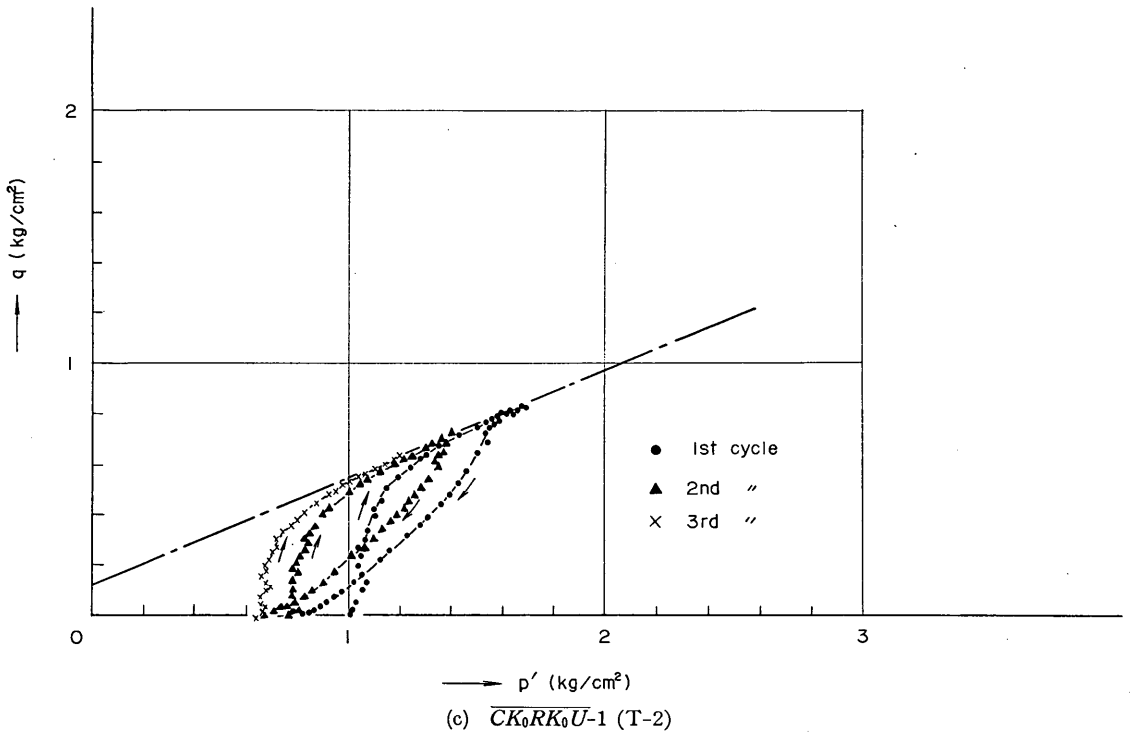


図-7 応力経路図

排水強度は  $S_{up}=1.141\pm 0.011$  (kg/cm<sup>2</sup>) であり、圧密圧力  $\sigma_{1c}'=3.95\pm 0.04$  (kg/cm<sup>2</sup>) との比は  $S_{up}/\sigma_{1c}'=0.289\pm 0.006$  となって  $\overline{CK_0U}$  試験の強度増加率に較べると 7% 小さい。すなわちいわゆる機械的な攪乱のない完全試料でも原地盤強度より 7% だけ低下することを示す。この値は Weald Clay の 1.5% よりかなり大きく (Skempton and Sowa, 1963)<sup>16)</sup>, San Francisco Bay Mud の 6% (Noorany and Seed, 1965)<sup>13)</sup>, 川崎粘土の 10% (Ladd and Varallyay, 1965)<sup>9)</sup> と同程度であり、カオリンの 18% (Davis and Poulos, 1966)<sup>8)</sup> より小さい。Boston Blue Clay についてのこれまでの結果の平均値は 8% なので (Ladd and Varallyay, 1965)<sup>9)</sup>; Braathen, 1966<sup>11)</sup>, これに較べても実験値は妥当な値であろう。なお完全試料の非排水強度と残留有効応力との比は  $S_{up}/\sigma_p'=0.531\pm 0.010$  であり、破壊時の間隙圧係数は  $\bar{A}_f=0.28\pm 0.08$  であった。完全試料の非排水強度が得られない他の試験で  $S_{up}$  を推定するには初めに  $\sigma_p'$  を求め、次に  $S_{up}/\sigma_p'=0.531$  を用いて推定するのが妥当な方法ではあるが、2重の推定であるために誤差の拡大することが考えられ、実際には圧密圧力との直接の比率  $S_{up}/\sigma_{1c}'=0.289$  を用いたものとの平均値をとった。

両者の差は 2% 以内であった。

過圧密比が  $OCR=3.90\pm 0.13$  の  $\overline{CK_0RK_0U}$  試験で得られた非排水強度は  $S_{u0}=0.840\pm 0.014$  (kg/cm<sup>2</sup>) である。この時の最大圧密圧力  $\sigma_{1c}'=3.95\pm 0.04$  (kg/cm<sup>2</sup>) から  $S_u/\sigma_{1c}'=0.311$  を使って推定した正規圧密強度は  $S_u=1.228\pm 0.013$  (kg/cm<sup>2</sup>) なので、両者の比は  $S_{u0}/S_u=0.684\pm 0.004$  となる。この値は錦城粘土の 0.77 に較べて小さく (中瀬, 小林, 勝野, 1968)<sup>11)</sup>, Boston Blue Clay についてのこれまでの平均値 (ただし  $\overline{CK_0RIU}$ ) 0.66 にほぼ等しい (Ladd and Varallyay, 1965)<sup>9)</sup>; Braathen, 1966<sup>11)</sup>。

完全試料を他のセルに移し変えるという最も単純なサンプリング操作を施した  $\overline{CK_0SU}$  試験で第1サイクルから得られた非排水強度は  $S_{us}=0.974\pm 0.001$  (kg/cm<sup>2</sup>) であった。推定による完全試料強度は  $S_{up}=1.141\pm 0.004$  (kg/cm<sup>2</sup>) であり、両者の比は  $S_{us}/S_{up}=0.852\pm 0.004$  となってこのように単純な操作でも 15% の強度低下を惹き起こすことがわかる。完全試料の残留有効応力と攪乱された試料の残留応力との比  $\sigma_p'/\sigma_r'$  は機械的な攪乱の程度を表わす1つの目安であり (Ladd and Lambe, 1963)<sup>8)</sup>, これを攪乱度と呼ぶことにすると、完全試料の

攪乱度は1となり、完全に攪乱された試料では $\infty$ に近づくであろう。上述のサンプリングを経た試料の残留有効応力は $\sigma'_s=1.40\pm 0.06$  (kg/cm<sup>2</sup>)であり完全試料の残留有効応力は $\sigma'_p=2.126\pm 0.008$  (kg/cm<sup>2</sup>)であったので、攪乱度は $\sigma'_p/\sigma'_s=1.52\pm 0.05$ となる。

一方過圧密比 4.01 まで膨潤させてから他のセルに移し変えた  $CK_0RK_0SU$  試験では残留有効応力が $\sigma'_s=0.92$  (kg/cm<sup>2</sup>)であり、完全試料の残留応力 $\sigma'_p=0.99$  (kg/cm<sup>2</sup>)との比は $\sigma'_p/\sigma'_s=1.08$ となって正規圧密の場合に較べ攪乱度は非常に小さい。この時の最大圧密圧力は $\sigma'_{1c}=3.98$  (kg/cm<sup>2</sup>)、圧密圧力比は $K_0=1.0$ であり、OCR,  $\sigma'_{1c}$ ,  $K_0$  ともにほぼ等しい  $CK_0RK_0U-1$  (T-9) の  $S_{u0}/\sigma'_{1c}=0.214$  から完全試料強度を推定すると  $S_{up}=0.853$  (kg/cm<sup>2</sup>)となり、測定されたサンプリング強度  $S_{us}=0.866$  (kg/cm<sup>2</sup>)との比は  $S_{us}/S_{up}=1.015$  とむしろ大きくなる。試験数が1個であり、実験誤差や推定誤差のあることを考えると判然とはしないが、正規圧密の場合と同じサンプリング操作で攪乱による強度低下は格段に少ないといえよう。この傾向は過圧密された Weald Clay の完全試料強度が理想試料強度より大きいことや (Skempton and Sowa, 1963)<sup>16)</sup>、過圧密粘土のダイラタンシーからもうなずけることである。

5個の  $UU$  試験では圧密圧力が $\sigma'_{1c}=2.0$  (kg/cm<sup>2</sup>)であり、推定による完全試料の残留応力 $\sigma'_p=1.08$  (kg/cm<sup>2</sup>)に対して残留有効応力は $\sigma'_s=0.34\pm 0.1$  (kg/cm<sup>2</sup>)なので攪乱度は $\sigma'_p/\sigma'_s=3.4\pm 0.8$ となって前述のサンプリングに較べかなりの攪乱を受けていることがわかる。第1サイクルの非排水強度  $S_{us}=0.39\pm 0.02$  (kg/cm<sup>2</sup>)と推定による完全試料強度  $S_{up}=0.58$  (kg/cm<sup>2</sup>)との比は  $S_{us}/S_{up}=0.68\pm 0.04$  であり、この場合の強度低下量は3割となる。なおこれらの試験では貯蔵期間が異なる他にヒズミ速度に幅があり、最大5倍の開きがあるが試験結果への影響は認められなかった。

一般に粘土の鋭敏比は不攪乱試料の強度と攪乱強度との比で定義されるが、Terzaghi と Tschebotarioff との表示法の違いを別としても、かなりあいまいなものであることが上の結果からも推察される。鋭敏比を完全試料強度と完全攪乱強度との比で定義すれば通常求められる方法では  $UU$  試験の結果から類推しても数十%の誤差は避けられない。この意味で  $UU$  試験から得られた鋭敏比  $S_t=3.14\pm 0.05$  は単なる目安を与えるに過ぎない。

### 3.3. 攪乱に伴うセン断特性の変化

図-7 に見られるようにセン断試験のサイクルが進むと試料の平均有効応力は次第に小さくなり、一種の過圧

密状態を現出する。この傾向は応力経路図の形状にも現われており、初めのサイクルでは円弧またはこれに近い形で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の放物線形状となって過圧密粘土の特性を示すようになる。さらに 図-6 に示す間隙圧係数  $\bar{A}$  にもこの傾向が見られ、サイクルが進むにつれて破壊時の間隙圧係数  $\bar{A}_f$  は小さくなっている。またサイクルが進むにつれて破壊強度と弾性係数が小さくなり、破壊ヒズミが大きくなることは一般に攪乱に伴う現象として知られている傾向と一致する。

図-7 に示す鎖線は各サイクルの最大軸差応力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sub>max</sub> の点を最小自乗法で整理した直線である。この場合非排水セン断であるために供試体の含水比は厳密に一定であり、破線はとりもなおさず Hvorslev のパラメーターを表わす直線となる。すでに Noorany は  $K_0$  圧

表-5 Hvorslev のパラメーター  
(a) Noorany 法

Test No.	w (%)	P' (kg/cm <sup>2</sup> )	q (kg/cm <sup>2</sup> )
$CK_0U-1$ (T-1)	29.0	2.933	1.193
-2 (T-4)	29.0	3.001	1.254
$CK_0PU-1$ (T-3)	29.3	2.802	1.152
-2 (T-5)	29.3	2.480	1.130

組 合 せ	$\phi_e$ (°)	$C_e$ (kg/cm <sup>2</sup> )
T-1, T-3	18.2	0.290
T-1, T-5	8.0	0.793
T-4, T-3	30.8	-0.331
T-4, T-5	13.8	0.556
平 均	17.7	0.327
標 準 偏 差	8.4	0.418

(b) 繰り返し試験法

Test No.	$\phi_e$ (°)	$C_e$ (kg/cm <sup>2</sup> )	サイクル数
$CK_0U-1$ (T-1)	12.7	0.565	3
-2 (T-4)	15.4	0.489	4
$CK_0PU-1$ (T-3)	12.9	0.538	3
-2 (T-5)	16.6	0.448	3
平 均	14.4	0.510	
標 準 偏 差	1.7	0.045	

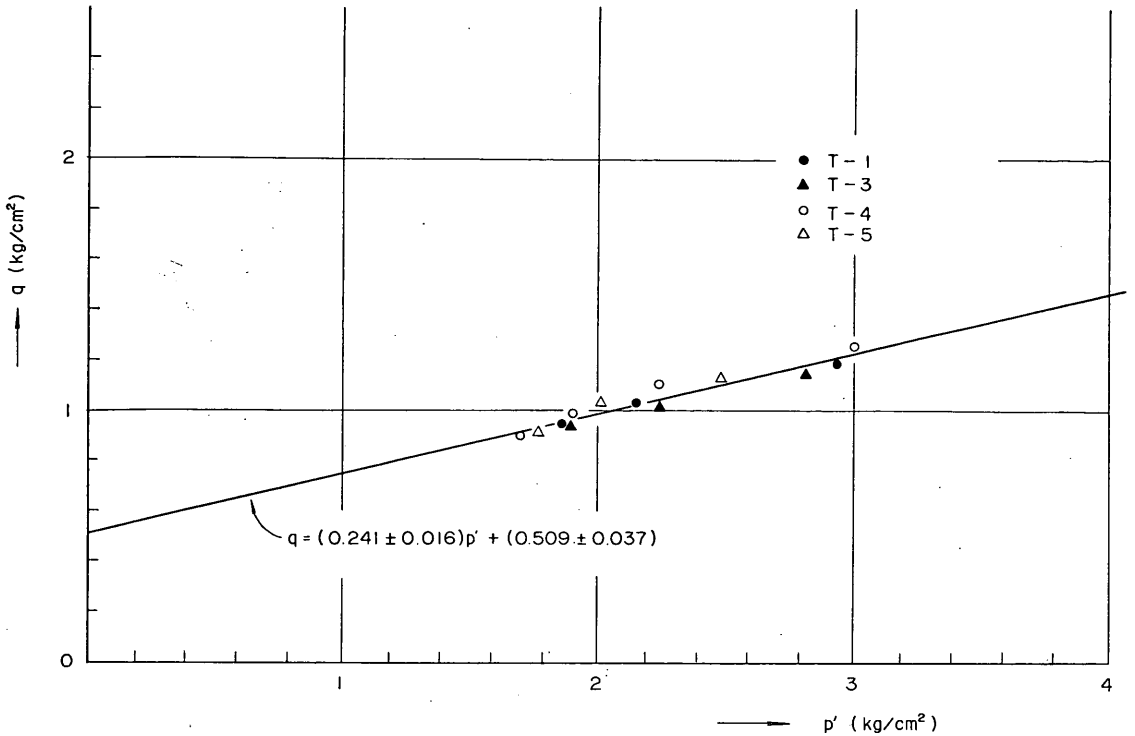


図-8 Hvorslev のパラメーター

密された理想試料と完全試料との非排水せん断強度の組合わせから Hvorslev のパラメーターを求める方法を提唱しているが (Seed, Noorany and Smith, 1964)<sup>15)</sup>, 上に述べたくり返し破壊試験から求める方法はこれを一步進めたものといえよう。Noorany 法では2個の供試体が必要であり、このため含水比が厳密に等しい試料を得ることがむずかしいので圧密圧力を3通りに変えた3組の供試体から求めるよう推奨されている。しかしこの場合でも両試料から得られる点が接近しているために実際問題としてはかなりの誤差を生ずる。ちなみに今回の実験から含水比がほぼ同じ  $\overline{CK_0U}$  と  $\overline{CK_0PU}$  とから Hvorslev のパラメーターを求めると表-5(a) のようになり、甚だしいのでは  $c_e$  が負になる。これに対し繰り返し破壊試験による方法は数個の点が適当な間隔に配置され、しかも含水比が一定なので精度は良くなり、表-5(b) に示すように単独の供試体でもほぼ妥当な値が得られる。またそのばらつきも前者に比べ1桁ほど小さい。

含水比のほぼ等しい4供試体の試験結果をまとめると図-8 のようになり、最小自乗法で整理した直線から Hvorslev のパラメーターを求めると  $\phi_e=14.0(^{\circ})$ ,  $c_e=$

0.525 (kg/cm<sup>2</sup>) となって表-5(b) の平均値とほぼ等しい。しかし図-8 を詳細に眺めるとわかるように各サイクルから得られた点はわずかに上に凸の曲線を形成しており、攪乱が進むにつれて  $c_e$  が小さく  $\phi_e$  が大きくなる傾向を示している。このことは攪乱によって粘土の構造が綿毛状 (flocculent) から分散状 (dispersed) に変わって行き、粘土粒子の端面接触 (edge to face contact) が少なくなることから推測されるところであるが、今回の実験では供試体に生ずるわずかなクラックの影響なども考えられ、これを確認するためにはより攪乱度の大きい、しかもクラックのない実験が必要であろう。

攪乱度  $\sigma_p'/\sigma_r'$  と破壊時の間隙圧係数  $\bar{A}_f$  との関係を図-9 に示した。かなりのばらつきはあるが過圧密度 OCR が大きくなるにつれて  $\bar{A}_f$  が小さくなる過圧密粘土の特性とよく一致している。

乱された試料と完全試料との強度の比率(攪乱強度比,  $S_{ur}/S_{up}$ ) は図-10 に示されるように攪乱度が大きくなるにつれて一義的に減少し、過圧密度が大きくなるにつれて強度が減少する過圧密粘土の特性と一致している (Nakase, 1968)<sup>10)</sup>。図-10 は今回の全ての実験結果を含

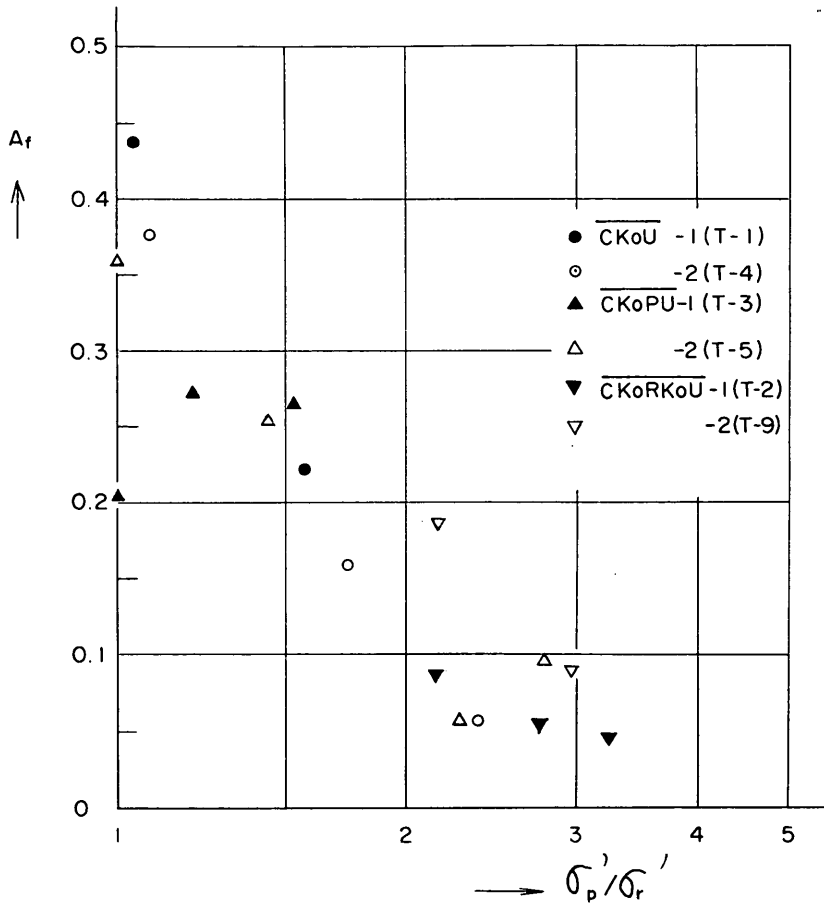


図-9 攪乱度と破壊間隙圧係数との関係

んでいるが、実験の種類による大きな差異は認められない。すなわち理想試料から直接くり返しセン断を行なったもの ( $\overline{CK_0U}$ ,  $\overline{CK_0RK_0U}$ ), 一たん完全試料となつてから試験されたもの ( $\overline{CK_0PU}$ ) さらには実際のサンプリングに相当する操作を加えたもの ( $CK_0SU$ ,  $CK_0RK_0SU$ ,  $UU$ ) および機械的に攪乱されたものが全て一様に同一曲線上にあってこの表示法が攪乱による強度低下を表わすのにきわめて好都合なことを示している。ただし過圧密粘土の試験結果 ( $\overline{CK_0RK_0U}$ ,  $CK_0RK_0SU$ ) を整理するには過圧密状態にある完全試料ではなく、最大圧密荷重段階から推定した完全試料強度と残留応力とを用いている。このことは膨潤を一種の攪乱とみることに、あるいは逆に攪乱を一種の膨潤とみることに相当し、結果的にはこの取り扱いが正しいことをも示している。

Davis and Poulos (1966)<sup>9)</sup> が指摘しているように攪乱

による変形特性の変化は強度の変化より一般に大きい。今回の実験から最大軸差応力の 1/2 までの平均弾性係数  $E_{50}$  と攪乱度との関係をプロットしても 図-11 に示されるように 3 桁の開きが出ており、攪乱度の 2 桁、攪乱強度比の 1 桁に較べ遙かに大きい。図-11 の場合でも試験の種類による大きな差異は認められないが、圧密圧力が小さい  $UU$  試験だけは点線で示されるように他の試験とは異なる値となっている。この点に関しては圧密圧力の相異だけではなく貯蔵期間の相異も影響するものと思われるので今後の検討が必要であろう。

弾性係数  $E_{50}$  と攪乱強度比  $S_{ur}/S_{up}$  との関係を 図-12 に示した。この場合にも両者に密接な相関性があり、しかも片対数表示ではほぼ直線となる。図-11 と同様に  $UU$  試験の結果が離れているのは圧密圧力、貯蔵期間などの影響であろう。

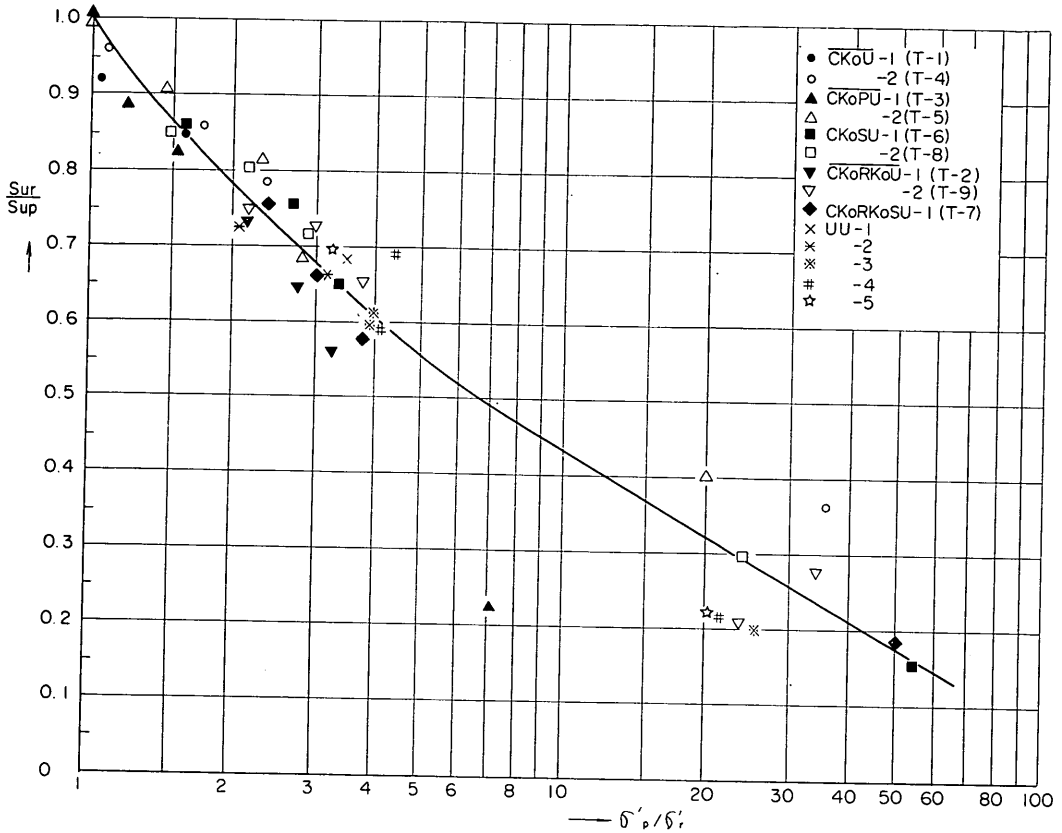


図-10 攪乱度と攪乱強度比との関係

#### 4. 強度補正への応用

サンプリングなどの操作で乱された試料の非排水強度を完全不攪乱強度に補正することは現場における最大関心事の一つであり、古くから多くの提案がなされている。すなわち Casagrande and Rutledge (1947)<sup>4)</sup>, Calhoon (1956)<sup>3)</sup>, Schmertman (1956)<sup>14)</sup>, Ladd and Lambe (1963)<sup>8)</sup> および Noorany and Seed (1965)<sup>18)</sup> 等である。このうち理想試料強度への補正にまで言及しているのは Noorany and Seed だけであり、残留有効応力を用いているのは Ladd and Lambe と Noorany and Seed である。しかしいずれの方法を用いても強度を補正するために多くの供試体を必要とし、現場で実用する上では実際のでない。

前章までに述べた繰り返し破壊試験の結果はこの意味で最も簡単な補正法を示唆する。具体的にその方法を記せば、

(i) 代表的な採取試料から1組2個の供試体を選び、 $K_0$  条件で乱れの影響のない圧力まで圧密する。必

要な圧密圧力は先行荷重の2~4倍といわれている。

(ii) 供試体の1個はそのまま非排水条件でセン断し ( $CK_0U$ )、理想試料強度  $S_u$  を得る。引き続いてくり返し破壊試験を行ない、最後に人為的に攪乱して攪乱強度  $S_{ur}$  を測る。いずれのサイクルでもセン断前の残留有効応力  $\sigma'_r$  は測っておく。

(iii) 残りの供試体は圧密終了後軸差応力を解除し、完全試料の残留有効応力  $\sigma'_p$  を測ってからセン断試験を行なう ( $CK_0PU$ )。完全試料強度  $S_{up}$  を得た後は (ii) と同様にできるだけ攪乱度の広い範囲に亘ってくり返し破壊試験および攪乱試験を行なう。

(iv) 以上で得た非排水強度  $S_{ur}$  を攪乱度  $\sigma'_p/\sigma'_r$  と攪乱強度比  $S_{ur}/S_{up}$  との関係にプロットし、図-10 のような補正曲線を作成する。また別に理想試料強度と完全試料強度との比率  $S_u/S_{up}$  および完全試料の残留有効応力と圧密圧力との比率  $\sigma'_p/\sigma'_{10}$  を計算しておく。

(v) 採取試料の残留有効応力  $\sigma'_r$  を測定し、そのまま非圧密非排水試験または一軸圧縮試験を行なって非排

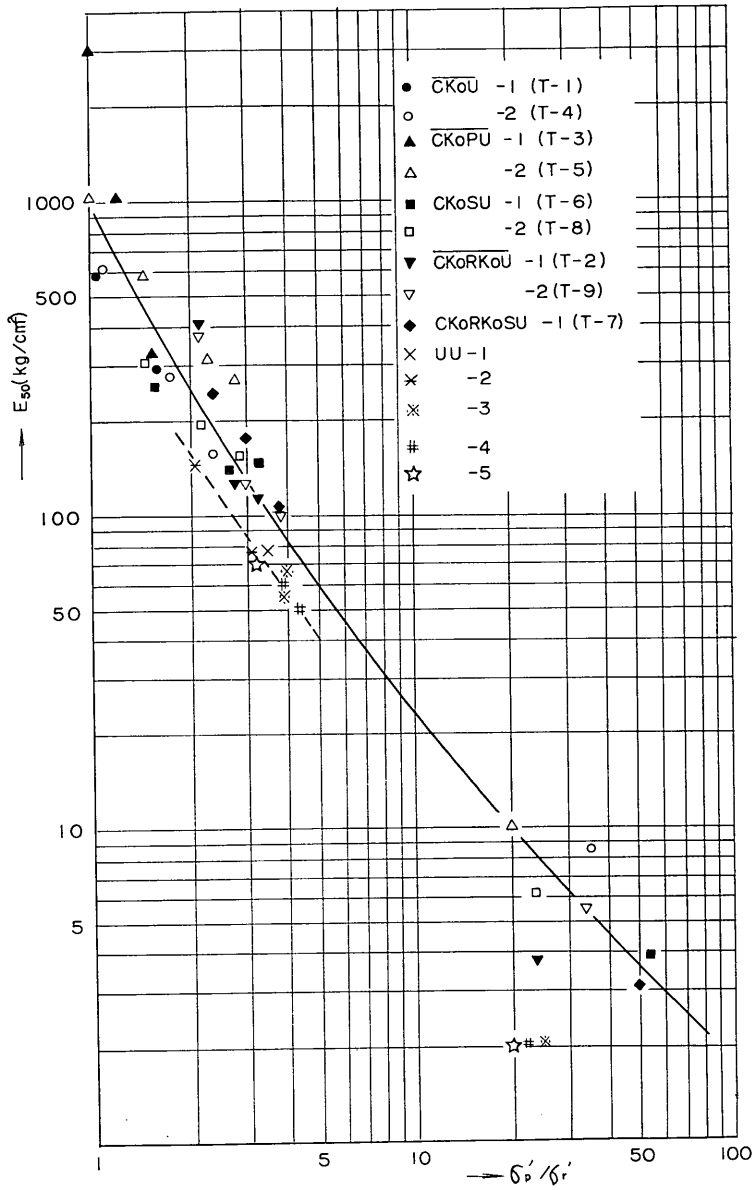


図-11 攪乱度と弾性係数との関係

水強度  $S_{us}$  を得る。試料の採取深度と単位体積重量および過圧密荷重などから先行圧密圧力  $\sigma'_{10}$  を推定し、(iv) で得た比率  $\sigma'_p/\sigma'_{10}$  を基に完全試料の残留有効応力  $\sigma'_p$  を推定しておおのの攪乱度  $\sigma'_p/\sigma'_s$  を計算する。

(vi) 補正曲線を用いて採取試料の完全試料強度  $S_{up}$  を推定し、最後に理想試料強度との比率  $S_u/S_{up}$  を掛けておおのの理想試料強度  $S_u$  を計算する。

上の方法は基本的には Ladd and Lanbe (1963) が提案した2つの方法のうち UU 試験から強度を補正する第1の方法と同じものであるが、攪乱の効果を通圧密の効果に置き換えるのではなく、直接攪乱試験を行なって補正曲線を作成すること、試料数がごく少なくて済むことなどの点でこれを一歩進めたものといえる。この場合攪乱を起こすためには必ずしも繰り返し破壊である必要



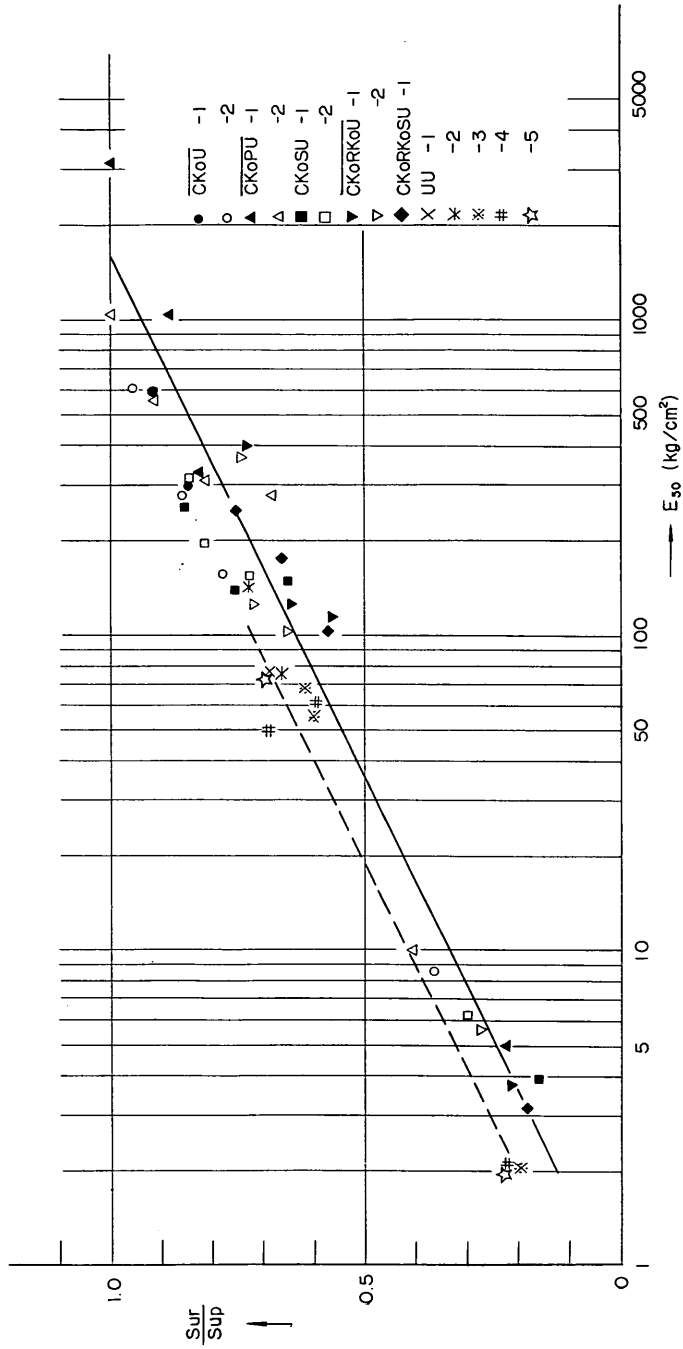


図-12 弾性係数と攪乱強度比との関係

はなく、他の適当な人為法で良いわけであるが、実際問題としては供試体全体に一律な所定の攪乱を与えることがむずかしく、個人誤差も入りやすいので、今のところ繰り返し破壊による方法が良いと思われる。しかしこの方法の欠点はサイクルが進むにつれて試料にクラックが生じ、また試料の曲りやバルジングから実験誤差が大きくなることで、これを避けて攪乱度の広い範囲で試験するためには圧縮と引張りの交互の適用、あるいは人為的な助けを借りてその都度試料の形状を修正することなども一法であろう。

構造物の建設に当って用いるべき強度は必ずしも理想試料強度ではなく、土の異方性、クリープなどの時間効果、平面ヒズミ条件、および地盤の不均一性、さらには現行の設計法などを考慮した総合的なものでなければならぬ。この意味で攪乱による強度低下の補正は必然的に土質力学の根本問題につながるものであり、サンプリングや試験の個人誤差を補正すること、あるいは現行のサンプリングによる攪乱の程度を量的に捉えることに当面の目標を止めるならば、必要なものは完全試料強度で十分といえる。この場合、上の補正法によれば唯一個の供試体で行なうことが可能であり、実際上もきわめて簡単であって現場での実用に十分耐えられよう。

しかしこの方法にも問題がないわけではない。たとえばセメンテーションなどで知られる地質学的時間効果の問題がその一つであり、室内の圧密で得た非排水強度と攪乱強度との比率が原地盤での非排水強度と攪乱強度との比率に等しいとすることには大きな疑問が残る。また原地盤の不均一性、実験精度などを考慮するとこの場合でもできるだけ多くの供試体で試験することが必要となろう。ちなみに今回の実験から圧密圧力のみが与えられたものとし、実測による  $\sigma_r'$ ,  $S_{ur}$  から 図-10 の補正曲線および前章の諸係数を用いて不攪乱強度を推定すると表-6 のように実測値からの偏差は 5% 程度となる。すなわちこの補正法の精度は ±5% 程度であるといえる。

実験誤差のうち最も大きな要因は残留有効応力を知るための残留間隙水圧の測定にあると思われ、これには間

隙水圧計と導管内の水との圧縮性およびこれに伴うタイムラグ、試料の飽和度などが影響する。この意味で間隙水圧の測定を必要としない弾性係数と攪乱強度比との関係から強度を補正する方法は実用上の意義が大きき、将来性のあるものといえよう。今回の実験では完全試料の弾性係数にばらつきがあり、この点を十分検討することはできなかったが、今後この観点からの研究が必要となる。

## 5. むすび

Boston Blue Clay についての繰り返し三軸圧縮試験の結果から結論的にいえることの 2, 3 を要約すると、

(i) 繰り返し破壊試験の結果から少ない試料で容易に精度よく Hvorslev のパラメーターを求めることができる。しかし攪乱が進んで粘土の微細構造に大きな変化を来した場合でもこのパラメーターは一定であるとの仮定は成り立たない可能性が大きい。

(ii) 繰り返し破壊による攪乱はその他の原因による攪乱と同性質のものであり、しかも攪乱による残留有効応力の低下は膨潤による過圧密の状態と多くの類似点を持っている。すなわち残留有効応力の低下に伴って応力経路は過密粘土の特性を示し、破壊時の間隙圧係数と非排水強度および弾性係数が減少し、破壊ヒズミが大きくなる。

(iii) 繰り返し破壊試験の結果から強度補正曲線を作成することができ、最も簡単に採取試料の非排水強度を補正する方法が見出される。

## 6. 謝 辞

終りにこの実験は著者が MIT 留学中に Associate Prof. C.C. Ladd の指導の下に Mr. E.B. Kinner の協力を得て行なったものであり、結果の解析・考察に Prof. Ladd および中瀬土性研究室長から多くの示唆を戴いたことを付記し、各位に深甚の謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) Braathen, N.F. (1966): Investigation of Effects of Disturbance on Undrained Shear Strength of Boston Blue Clay, SM Thesis, MIT
- 2) Brooker, E.W. and Ireland, H.O. (1965): Earth Pressures at Rest Related to Stress History, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 2, No. 1 pp. 1~15
- 3) Calhoun, M.L. (1956): Effect of a Sample Disturbance on the Strength of Clay, Trans. ASCE, Vol. 121, pp. 925~939.

表-6 強度補正法の誤差

Test No.	サイクル数	実測値 (kg/cm <sup>2</sup> )	偏 差 (kg/cm <sup>2</sup> , %)
$\overline{CK_0U}$ -1	2	1.193	0.046 (4.2)
-2	3	1.254	0.042 (3.3)
$\overline{CK_0PU}$ -1	2	1.152	0.050 (4.4)
-2	3	1.130	0.063 (5.6)

粘土試料の攪乱に関する研究 (第1報)

- 4) Casagrande, A. and Rutledge, P.C. (1947): Cooperative Triaxial Shear Research, Waterways Experiment Station
- 5) Davis, E.H. and Poulos, H.G. (1966): Laboratory Investigations of the Effects of Sampling, Symposium on Site Investigation (Sydney, Australia)
- 6) 藤下利男 (1963): 軟弱地盤におけるボーリング(土木ライブラリー 22) 山海堂
- 7) 藤下利男, 松本一明, 堀江宏保 (1966): チェウ積粘土のサンプリングに関する研究(第一報), 土と基礎 14巻6号 (100号) pp. 7~13.
- 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) pp. 342~371.
- 9) Ladd, C.C. and Varallyay, J. (1965): The Influence of Saturated Clays during Undrained Shear, Research Report R 65-11, MIT
- 10) Nakase, A. (1968): The Effect of Overconsolidation on the Undrained Strength of Clays, 港湾技術研究所報告 7巻1号 pp. 3~24
- 11) 中瀬明男, 小林正樹, 勝野克 (1968): 過圧密粘土のせん断強度, 第6回港湾技術研究所研究発表会講演概要 pp. 87~95
- 12) 中瀬明男 (1969): 土のせん断 [最上武雄編: 土質力学], 土木工学双書, 技報堂
- 13) Noorany, I. and Seed, H.B. (1965): In-situ Strength Characteristics of Soft Clays, Proc. ASCE, Vol. 91, No. SM 2 pp. 49~80
- 14) Schmertman, J. (1956): Discussion of Calhoon (1956), Trans. ASCE, Vol. 121 pp. 939~950
- 15) Seed, H.B., Noorany, I. and Smith, I.M. (1964): Effects of Sampling and Disturbance on the Strength of Soft Clays, Research Report TE-64-1, Univ. of California, Berkeley
- 16) Skempton, A.W. and Sowa, V.A. (1963): The Behaviour of Saturated Clays during Sampling and Testing, Geotech. Vol. 13, No. 4 pp. 269~290

(1969. 1. 10 受付)

記号表

$A$ : 供試体断面積 (cm <sup>2</sup> )	$p'$ : 平均有効応力 [( $\sigma_1' + \sigma_3'$ )/2] (kg/cm <sup>2</sup> )
$A_0$ : 供試体初期断面積 (cm <sup>2</sup> )	$q$ : 平均軸差応力 [( $\sigma_1 - \sigma_3$ )/2] (kg/cm <sup>2</sup> )
$\Delta A$ : 断面積変化量 (cm <sup>2</sup> )	$R_a$ : ダイヤルゲージ反力 (kg)
$\bar{A}$ : Skempton の間隙圧係数	$R_m$ : 攪乱試験
$\bar{A}_f$ : 破壊時の間隙圧係数	$S_c$ : 鋭敏比
$\bar{A}_p$ : 完全サンプリングにおける間隙圧係数	$S_u$ : 非排水強度,特に理想試料の非排水強度(kg/cm <sup>2</sup> )
$a$ : ピストン断面積 (cm <sup>2</sup> )	$S_{u0}$ : 過圧密試料の非排水強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
$B$ : Skempton の間隙圧係数	$S_{up}$ : 完全試料の非排水強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
$C_c$ : 圧縮指数	$S_{ur}$ : 機械的に攪乱された試料の非排水強度(kg/cm <sup>2</sup> )
$c'$ : 見掛けの有効粘着力 (kg/cm <sup>2</sup> )	$S_{us}$ : サンプリングされた試料の非排水強度(kg/cm <sup>2</sup> )
$c_e$ : Hvorslev の粘着力 (kg/cm <sup>2</sup> )	$UU$ : 非圧密非排水試験
$c_u/p$ : 強度増加率. 非排水強度 $S_u$ と鉛直圧密圧力 $\sigma_{1c}'$ との比	$u$ : 間隙水圧 (kg/cm <sup>2</sup> )
$\overline{CK_0U}$ : $K_0$ 圧密非排水試験 (間隙水圧測定)	$u_B$ : バックプレッシャー (kg/cm <sup>2</sup> )
$\overline{CK_0PU}$ : $K_0$ 圧密, 完全サンプリング, 非排水試験 (間隙水圧測定)	$V$ : 供試体体積 (cm <sup>3</sup> )
$\overline{CK_0RK_0U}$ : $K_0$ 圧密 $K_0$ 膨潤非排水試験 (間隙水圧測定)	$\Delta V$ : 体積変化量 (cm <sup>3</sup> )
$CK_0SU$ : $K_0$ 圧密, サンプリング, 非排水試験	$W_c$ : キャップ重量 (kg)
$CK_0RK_0SU$ : $K_0$ 圧密 $K_0$ 膨潤, サンプリング, 非排水試験	$W_p$ : ピストン重量 (kg)
$\overline{CK_0RIU}$ : $K_0$ 圧密等方膨潤非排水試験	$W_s'$ : 水中供試体重量 (kg)
$E_{50}$ : 最大軸差応力の 1/2 までの平均弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	$w_i$ : 初期含水比 (%)
$e$ : 間隙比	$\varepsilon$ : 軸ヒズミ (%)
$\Delta e$ : 間隙比変化量	$\sigma_1$ : 最大全主応力, 鉛直全応力 (kg/cm <sup>2</sup> )
$F$ : ピストンの摩擦 (kg)	$\sigma_1'$ : 鉛直有効主応力 (kg/cm <sup>2</sup> )
$G_s$ : 土粒子比重	$\sigma_{1c}'$ : 鉛直圧密圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )
$K_c$ : 圧密圧力比 [ $\sigma_{3c}'/\sigma_{1c}'$ ]	$\Delta\sigma_1$ : フィルターおよびゴムスリーブによる応力補正量 (kg/cm <sup>2</sup> )
$K_f$ : 破壊時の有効応力比	$\sigma_3$ : 最小全主応力, 水平全応力 (kg/cm <sup>2</sup> )
$K_i$ : 載荷直後の有効応力比	$\sigma_3'$ : 水平有効応力 (kg/cm <sup>2</sup> )
$K_0$ : 静止土圧係数	$\sigma_{3c}'$ : 水平圧密圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )
$L_0$ : 初期試料長 (cm)	$\sigma_m'$ : 平均有効圧密圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )
$\Delta L$ : 試料長変化量 (cm)	$\sigma_p'$ : 完全試料の残留有効応力 (kg/cm <sup>2</sup> )
$P$ : 載荷重 (kg)	$\sigma_r'$ : 機械的に攪乱された試料の残留有効応力 (kg/cm <sup>2</sup> )
$P_0$ : ハンガー重量 (kg)	$\sigma_s'$ : サンプリングされた試料の残留有効応力 (kg/cm <sup>2</sup> )
	$\sigma_1'/\sigma_3'$ : 有効主応力比
	$\phi'$ : 有効せん断抵抗角 (°)
	$\phi_e$ : Hvorslev の有効摩擦角 (°)