

## 繰返し荷重を受けた飽和粘土の非排水せん断特性

## UNDRAINED SHEAR OF SOFT CLAY AFTER A CYCLIC STRESS HISTORY

安原一哉\*・平尾和年\*\*

By Kazuya YASUHARA and Kazutoshi HIRAO

Effects of undrained cyclic stress-strain history on clay behavior were studied by cyclic triaxial compression tests. An apparently-overconsolidated clay produced by undrained cyclic loading decreases its undrained strength because of the decrease in effective stress in clay, while a clay subjected to drained cyclic loading gains the strength similarly to the long-termed consolidated clay. Undrained strengths of a reconstituted marine soft clay were predicted by a method which was formerly extended from the empirical relation existing between overconsolidated and normally-consolidated clays. In terms of the effective stress analysis, the critical state parameter in clay has nothing to do with undrained cyclic loading histories.

## 1. 緒 言

近年、粘性土から成る海洋構造物の基礎地盤の波や風に対する動的応答や、道路・鉄道のための低盛土下の軟弱路床土の沈下など、地震時以外の動的外力による土質工学的問題が増えてきた。たとえば、Sangreyら(1969)<sup>1)</sup>の研究は有効応力の立場からみたこの領域における先駆的研究といえよう。北海の油田開発に関連して NGI、ノッチンガム大学の研究成果は Andersen (1976)<sup>2)</sup>がまとめている。同じ会議(Boss'76)で Wood<sup>3)</sup>は静的な繰返し荷重を受けた粘土のストレス・パスが過圧密粘土のそれに類似していることを指摘したが、わが国では松井ら(1978)<sup>4)</sup>も比較的早い周期(1 Hz)の繰返し荷重を受けた粘土についても同様の傾向を確かめている。HydeとBrown(1976)<sup>5)</sup>は、繰返し荷重下での挙動とクリープ荷重下での挙動との類似性を指摘した。しかし、このような繰返し荷重下での挙動の時間依存性を調べた研究は現在のところあまり多くないようである。

ところで、海床土は、掘削や侵食あるいは地下水位の上昇による有効応力の解放などの複雑な地質学的履歴の

ため、しばしば過圧密状態であることが多いといわれている。一方、遅延圧密(長時間圧密または二次圧密)を受けた粘土は、続成作用や膠結作用によって、見掛け上あたかも過圧密土のような挙動を示すこともある。加えて、繰返し荷重は土中の有効応力の変化をもたらすので、正規圧密粘土でさえ、過圧密土に類似の挙動を示す可能性がある。特に、粘土の繰返し荷重の問題は地震時のみでなく、海洋構造物下の海成粘土に対する波や風による作用の影響も含んでいる。この意味で、このような原因で引き起こされた過圧密土は、応力解放や地下水位の上昇による通常の過圧密と区別するために、“見掛けの過圧密土”あるいは、“擬似過圧密土”とよばれることがある。それゆえ、この過圧密土と擬似過圧密土の工学的性質がどのような関係にあるかを見極めることは、土質力学上重要で興味ある問題と考えられる。

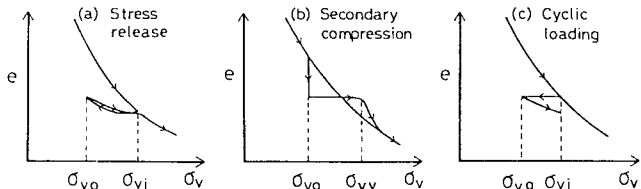
本文では、応力解放によってもたらされる過圧密土の挙動に関する従来の研究成果<sup>6), 7), 12), 13)</sup>を踏まえて、動的な繰返し荷重によってもたらされた擬似過圧密土の非排水せん断挙動を説明することが試みられている。

2. 応力履歴と  $e-p'$  関係

前節で述べたように、地盤が過圧密に至るにはいくつかの様式がある。図—1(a), (b), (c)は、このこと

\* 正会員 工博 西日本工業大学教授 工学部土木工学科  
(〒800-03 福岡県京都郡苅田町大字新津 1633)

\*\* 正会員 西日本工業大学助手 工学部土木工学科(同上)



図一 異なる履歴による過圧密状態

を間隙比-有効圧密圧力の関係 ( $e-p'$  関係) によって表示したものである。これらのうち、擬似過圧密は先述のように、上載荷重の解放の場合を除いたいくつかの地質学的履歴によって達せられる。たとえば、図一 (b) に示されるように、いくつかの粘土は堆積後のエージングやセメンテーション作用を受けることがある。ペーラム<sup>8)</sup>はこの種の土を“正規圧密時令粘土”(Normally-consolidated aged clay) とよんだ。そして彼は、この場合の過圧密比は堆積時間と塑性指数に依存することを明らかにした。

一方、これに対し、図一 (c) に示すように、地盤は地震や波の作用のような繰返し荷重あるいは急速荷重による有効応力の変化を受けることもある。このように、図一にまとめられた  $e-p'$  表示によって、過圧密土と擬似過圧密土の挙動の相違をよりよく理解することができる。

このように、異なる地質履歴によるこれらの過圧密履歴間の相違や類似性を確かめることは、自然粘性土に対するより一般的な構成式の確立のために特に重要である。本論文では第一近似として、繰返し荷重によって誘起された擬似過圧密土は、応力解放や地下水位の上昇による過圧密土の挙動と等価であると仮定されている<sup>4)</sup>。

著者らは、長時間圧密履歴と繰返し応力履歴という2つの異なった履歴によってもたらされた擬似過圧密に分類している。海底に堆積する粘性土は、しばしばこれらの2つの環境下に置かれる可能性がある。しかし、本論文は地震や波などの自然の力の繰返しによって生じる動的荷重を受けた飽和粘土のせん断挙動についての言及している。なお、二次圧密による擬似過圧密粘土の非排水せん断特性は他の論文において論じられている<sup>10)</sup>。

### 3. 繰返し荷重を受ける粘土の非排水せん断挙動

#### (1) 繰返し履歴を受けた飽和粘土の応力径路

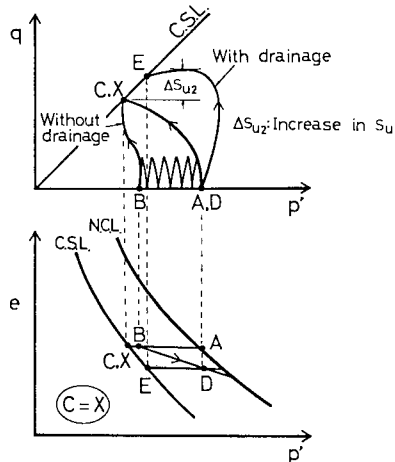
飽和した正規圧密土が非排水条件で繰返し応力の履歴を受けるとき、すでに示したように、累積する正の間隙水圧によって有効応力の低下を招来する。その後の非排水せん断時の応力径路は図二と図三に示すように2つの可能性がある(ここで、 $p'$ : 平均有効主応力、 $q$ :

主応力差)。すなわち、図二に示すように、限界状態においては、繰返し応力の履歴を受けない供試体の挙動と一致する場合(この場合乱れによる強度低下を考慮していないことになる)と、図三のように両者は一致せず、履歴を受ける前より非排水強さは低下することになる場合とが考えられる。前者は限界状態の概念を適用し得るけれども、後者は何ら

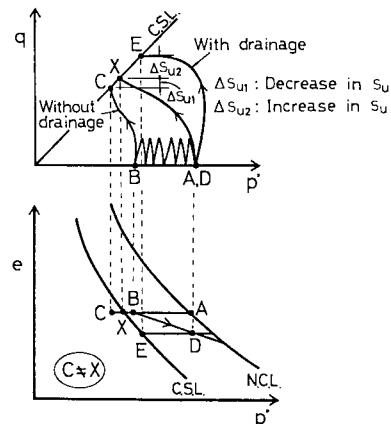
かの工夫を施さなければうまく説明できないようである。そこで、正規圧密土が繰返し応力履歴を受けた後の非排水強さについて以下のように別の観点から考察を加え、これを評価する方法を考えてみた。

#### (2) 過圧密粘土の非排水強さ

土と岩石の境界領域の研究対象としてクローズ・アップされてきた堆積軟岩や硬質土上の土木構造物の建設の需要から近年、過圧密土のせん断挙動に関する研究が増えてきたようである。たとえば、中瀬ら<sup>8)</sup>は、除荷に伴



図二 繰返し荷重を受けた土の状態径路 (ケース A)



図三 繰返し荷重を受けた土の状態径路 (ケース B)

う非排水強さの低下に対する重要な貢献をしてきた。その主たる成果として、正規圧密粘土と除荷による過圧密粘土の非排水強さの比が次式によって表わされることを見出した。

$$\frac{(s_u)_{OC}}{(s_u)_{NC}} = (1-r) \cdot n^{-\lambda} + r \cdot n^{-\mu} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $(s_u)_{OC}$ 、 $(s_u)_{NC}$ ：過圧密粘土と正規圧密粘土の非排水強さ、 $n$ ：過圧密比、 $r$ 、 $\lambda$ 、 $\mu$ ：実験定数である。中瀬らの研究を踏まえた三田地ら<sup>6)</sup>は過圧密粘土と正規圧密粘土の非排水強度増加率の比として

$$\frac{\left(\frac{s_u}{p}\right)_{(OC)}}{\left(\frac{s_u}{p}\right)_{(NC)}} = n^{A_0} \dots \dots \dots (2)$$

を提案している。ここで、 $OC$ 、 $NC$ は過圧密粘土、正規圧密粘土を示すサフィックス、 $A_0$ ：実験定数である。Mayne<sup>7)</sup>および山下ら<sup>14)</sup>もそれぞれ別の立場から上式の成り立つことを確かめている。上式における $A_0$ を求める方法として、以下のような式が提案されている。

$$A_0 = 1 - C_s/C_c, \text{ (Mayne : 1980), } \dots \dots \dots (3 \cdot a)$$

(山下ら : 1981)

$$A_0 = \ln\left(\frac{M}{2m}\right), \text{ (三田地ほか : 1980) } \dots \dots \dots (3 \cdot b)$$

$$A_0 = \frac{1}{\ln 2} \ln\left(\frac{M}{2m}\right), \text{ (三田地ほか : 1980) } \dots \dots \dots (3 \cdot c)$$

$$A_0 = 0.805(1 - C_s/C_c) + 0.0305 \dots \dots \dots (3 \cdot d)$$

(Mayne : 1980)

ここで、 $M$ ：限界状態における有効応力比 ( $=(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$ )、 $m$ ：正規圧密粘土の非排水強度増加比である。なお、式(3・b)はカム・クレイモデル、(3・c)は修正カム・クレイモデルによって得られたものである。

さて、式(2)は非排水強さの比として

$$\frac{(s_u)_{OC}}{(s_u)_{NC}} = n^{A_0-1} \dots \dots \dots (4)$$

と書き直される。本文では、繰返し荷重による非排水強さの変化を評価するために式(4)を用いている。すでに述べたように、急速荷重あるいは二次圧密の停止によって発生した間隙水圧によって有効応力が低下する。このことによって飽和粘土は擬似過圧密に至るが、このときの $e-p'-s_u$ 関係が図-4に模式的に示されている。この図から除荷に伴う過圧密土の過圧密比 $n$ 、非排水繰返し応力履歴による擬似過圧密土の過圧密比 $n_q$ 、とはそれぞれ

$$n = \frac{p'_c}{p'_0} \dots \dots \dots (5 \cdot a)$$

$$n_q = \frac{p'_i}{p'_0} \dots \dots \dots (5 \cdot b)$$

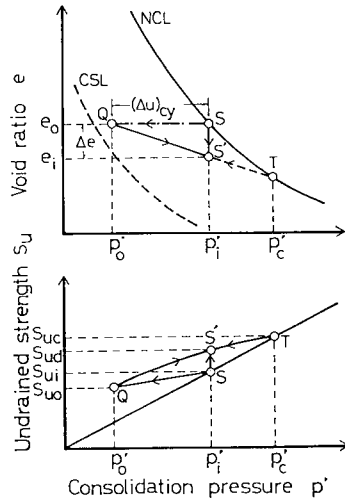


図-4 繰返し応力履歴を受けた正規圧密土の $e-p'-s_u$ 関係

と表わされることがわかる。それゆえ、これら2つの過圧密比は相互に次のような関係がある。

$$n = (n_q)^{1/(1-\lambda)}, \text{ } (\lambda = C_s/C_c) \dots \dots \dots (6)$$

(3) 繰返し荷重を受けた粘土の非排水強さ

図-4を参照すると、繰返し応力履歴前の正規圧密状態における非排水強さ $s_{ui}$ と繰返し応力履歴後の擬似過圧密状態における強さ $s_{u0}$ の比は式(4)から

$$\frac{s_{u0}}{s_{ui}} = n^{A_0-1} \dots \dots \dots (7)$$

によって与えられる。上式によれば、 $A_0 = 1 - \lambda$ のとき

$$s_{u0} = s_{ui} \dots \dots \dots (8)$$

となる。すなわち、式(3・a)が成り立つとき、飽和土が繰返し応力履歴を受けてもその後の非排水強さは何ら変わらないことになるが、このことは他の研究報告<sup>10)</sup>や後述する実験事実と反する。

次に、式(7)における過圧密比として式(6)を代入するとすれば、

$$n = \left\{ \frac{1}{1 - \frac{(\Delta u)_{cy}}{p_i}} \right\}^{1/\lambda} \dots \dots \dots (9)$$

によって与えられるのでこれを式(7)へ代入すれば、次式となる。

$$\frac{s_{u0}}{s_{ui}} = \left\{ \frac{1}{1 - \frac{(\Delta u)_{cy}}{p_i}} \right\}^{A_0-1} \dots \dots \dots (10)$$

式(9)、式(10)における $(\Delta u)_{cy}$ は繰返し応力によって蓄積された間隙水圧である。一方、繰返し応力の負荷が一定期間後停止することによって、土供試体に累積した動的間隙水圧が消失すると同時に排水が生じる。このとき、有効応力状態は図-4の点QからS'へ移行する。

したがって、このときの非排水強さは  $s_{uo}$  から  $s_{ud}$  へ増加すると考えられる。Q から S' へ移行する過程において生じた間隙比の変化量は  $p_i$  なる一定荷重のもとで生じる排水クリープ（二次圧密）による体積変化と等価であると考えても不自然ではなからう。このように仮定すると、動の間隙水圧の消失後の非排水強さはやはり、繰返し応力履歴前の強さとの比という形で次式のように与えられる。

$$\frac{s_{ud}}{s_{ui}} = \left\{ \frac{1}{1 - \frac{(\Delta u)_{cy}}{p_i}} \right\}^{\lambda \cdot A_o} \dots\dots\dots (11)$$

式 (10) や式 (11) を用いて排水強さの比を算定するに当たって最も重要な事項は、これらの式中に含まれる 2 つのパラメーター、 $\lambda$ ,  $A_o$  を正確に決めることである。

4. 実験概要

繰返し再圧密有明粘土に対し、一連の非排水繰返し三軸圧縮試験が行われた。用いた有明粘土の指数的性質は、土粒子の真比重  $G_s=2.65$ , 液性限界  $w_l=123\%$ , 塑性指数  $I_p=69$ , 圧縮指数  $C_c=0.700$ , 膨張指数  $C_s=0.163$ , 有効内部摩擦角  $\phi'=40^\circ$  である。また、繰返し三軸圧縮装置は、図-5 にその系統図を示すように松井ら<sup>15)</sup>らその一連の研究に用いたものとはほぼ同じであり、すでに著者ら<sup>19)</sup>の先の論文で紹介している。

本文中で用いられた繰返し三軸試験の試験条件は表-1 にまとめられているように、拘束圧、繰返し応力、周波数および載荷回数が組み合わされた。いずれも繰返し応力負荷時においては応力制御で行われている。表中に示されるタイプ A のシリーズでは一方向繰返し応力がそれぞれの供試体に負荷されるのに対し、タイプ B シリーズでは、二方向繰返し応力が適用されている。繰返し荷重の周波数は表中にみられるように、二、三の試験を除けばすべて 1.0 Hz が用いられた。二方向載荷は主応力の反転を伴うので、二方向載荷時の粘土の挙動は一方向載荷の場合とは異なる事実には注意を払わなければならない。

タイプ C とタイプ D の繰返し三軸試験のシリーズは図-6 に示されるように、非排水せん断前の繰返し載荷後すぐ排水が許される。動的強度を決めるためのひずみ制御三軸圧縮試験は、先行圧密、繰返し載荷および排水過程 (C, D シリーズのみ) に引き続いて行われる。それゆえ、これらの要因は表-1 に掲げられている試験に組み合わされている。繰返し載荷後排水を伴わないタイプ A とタイプ B は非排水強さを減ずる可能性があるのに対し、排水を伴うタイプ C とタイプ D のシリーズでは粘土は非排水強さが増加する可能性がある。

図-6 に示された一連の実験の手順において、繰返し

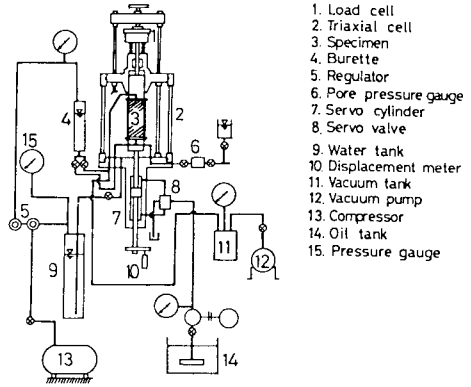


図-5 繰返し三軸圧縮試験機の系統図

表-1 繰返し三軸試験の概要

Test no.	$\sigma_c^*$ (kPa)	$\Delta\sigma_r^{**}$ (kPa)	N (cycles)	f (Hz.)	$w_l$ (%)
A-1	200	40	3600	1.0	95.6
A-2	"	80	"	"	93.3
A-3	"	100	"	"	90.6
A-4	"	120	"	"	93.8
A-5	"	140	"	"	90.5
A-6	"	160	"	"	90.8
A-7	"	100	172800	"	92.5
A-10	"	120	"	"	93.2
A-11	"	160	91800	"	92.0
A-12	"	100	60	"	90.5
A-13	"	"	3600	0.1	94.1
A-14	"	"	"	3.0	95.0
B-1	"	40	"	1.0	88.9
B-2	"	80	"	"	93.2
B-3	"	100	"	"	92.1
B-4	"	120	"	"	93.8
B-5	"	160	"	"	90.9
B-6	"	120	172800	"	92.1
B-7	"	160	"	"	90.9
C-1	"	100	3600	"	90.9
C-2	"	120	172800	"	91.7
C-3	"	140	3600	"	92.7
D-1	"	100	"	"	84.6
D-2	"	120	172800	"	94.5
D-3	"	140	3600	"	90.5

(Remark : \* ; consolidation pressure, \*\* ; cyclic load intensity)

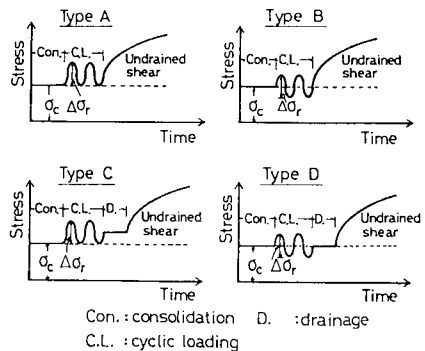


図-6 繰返し三軸圧縮試験の手順

荷重負荷後の非排水せん断試験はひずみ制御 (0.1 % /min) で行われた。本文においては、繰返し応力-ひずみ履歴を受けた後のひずみ制御の静的三軸圧縮試験結果から得られる最大軸差応力の半分をもって動的強度を定義した。

このように、本研究で採用された三軸試験の手順は次の2つに大別される。

- i) 先行等方圧密→非排水繰返し載荷→静的非排水せん断
- ii) 先行等方圧密→非排水繰返し載荷→排水→静的非排水せん断

5. 試験結果とその解析

非排水せん断挙動に及ぼす先行繰返し応力-ひずみ履歴の影響を述べる前に、準備作業として繰返し応力履歴を受けていない粘土供試体に対し通常の圧密試験と三軸圧縮試験が行われ、非排水強さの変化予測のために必要なパラメーター、 $C_s$ 、 $C_c$ 、 $\Lambda_0$ が決められた。

(1) 単調静的載荷時の非排水せん断挙動

すべての三軸圧縮試験に対して、液性限界の2倍の含水比で繰返した後、大型圧密容器で58 kPaの荷重強度で再圧密された海成粘土供試体が使われた。この大きな粘土ブロックから直径3.5 cm、高さ8.75 cmの粘土供試体が切り出され、シリコングリースの塗布された2枚のテフロンシートが敷かれた三軸セル内の下部ベダスタルに置かれた。単調載荷圧縮試験は先行圧密後、せん断中に体積変化のない状態でせん断ひずみを生じさせることによって行われた。まず、等方応力 ( $\sigma_c=200$  kPa) 状態で24時間圧密させた後、正規圧密土は非排水条件で主応力を増加させて供試体をせん断破壊させた。過圧密土では、200 kPaから1~20の過圧密比で24時間膨潤させた後せん断された。

過圧密試体の非排水せん断時の有効応力径路は図-7に示されている。図-8は同じ試験結果から軸差応力とせん断ひずみ曲線を示している。最大軸差応力の半分を非排水強さと定義し、過圧密土と正規圧密土の強さの比  $s_{uo}/s_{ui}$  と過圧密比  $n$  とをプロットすると図-9が得られた。これから実験定数  $\Lambda_0$  として0.720が決定された。圧縮指数  $C_c$  と膨張指数  $C_s$  は標準圧密試験と等方圧密試験から得られた値の平均値とした。

(2) 繰返し応力履歴を受けた粘土の有効応力径路

図-10~図-13は所定の回数だけ繰返し応力を受けた粘土供試体の非排水三軸圧縮試験から得られた有効応力径路を示している。すべての試験の載荷回数は3600回に維持された。繰返し荷重強さのその後の非排水せん断中の  $p'-q$  関係に及ぼす影響は図-10から理解される。太い実線は繰返し応力履歴を受けていない正規圧密

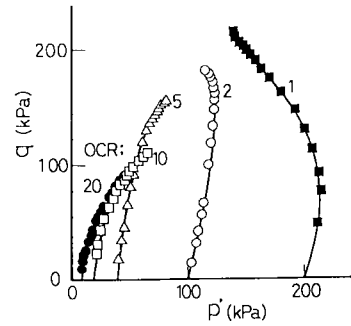


図-7 繰返し有明粘土の三軸非排水せん断時の有効応力径路

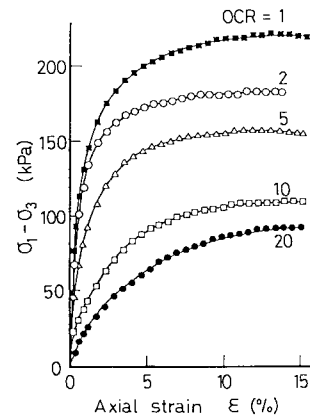


図-8 非排水三軸圧縮試験における応力-ひずみ関係

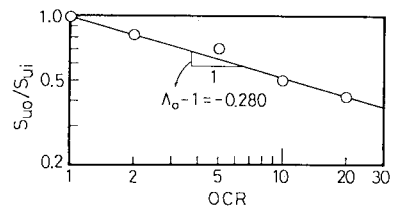


図-9 有明粘土の応力解放に伴う非排水強さ

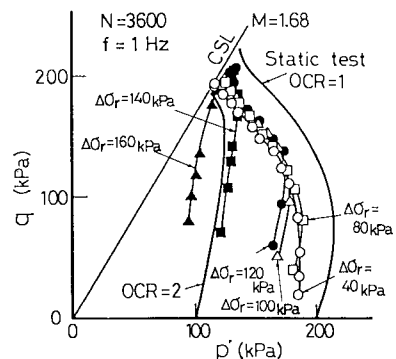


図-10 非排水ストレス・パルスに及ぼす繰返し荷重強度の影響

土と過圧密土の応力径路を示している。繰返し载荷を受けた粘土供試体の応力径路は Wood<sup>9)</sup>や松井ら<sup>15)</sup>によって指摘されたように、応力解放を受けた過圧密供試体のそれとかなりよく一致していることがわかる。この類似性に加えて、ほとんどの繰返し履歴を受けた供試体のストレス・パスは正規圧密土と過圧密土 (OCR=2) の径路の範囲に位置しており、破壊時のすべての最終点は限界状態線 (CSL) 上あるいは、その近傍に位置していることがわかる。

$\Delta\sigma_r=120$  kPa, 160 kPa の繰返し荷重が長時間 ( $N=172800$  回) にわたって負荷された他の試験から、繰返し荷重強度のみでなく主応力の反転の影響が図-11 に示されている。図-11 からいくつかの二方向载荷を受けた供試体の破壊時の有効応力状態が限界状態線を超えるものがあることがわかる。

図-12 は  $p'-q$  空間の挙動に及ぼす载荷回数の影響を示している。载荷回数が大きくなるほど有効応力パスは  $p'-q$  空間の左側に向かって移行する。そして、この傾向は二方向载荷の場合より、一方向载荷を受ける供試体において、より顕著に観察される。

過圧密粘土と擬似過圧密粘土の挙動が巨視的に一致することは、前節の理論的考察において仮定された。ここに示された実験結果に関する限り、過圧密土と擬似過圧

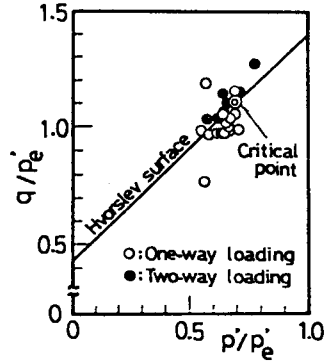


図-13 繰返し荷重履歴後の破壊時における有効応力状態

密土の有効応力径路にあまり有意な差がみられないので、この仮定は無理ではないといえよう。

図-13 は排水を伴わない繰返し载荷後の粘土供試体の非排水せん断における破壊点をまとめたものである。すべての点は限界状態線 (CSL) 近傍にあるが、二方向载荷履歴を受けた供試体の方が CSL を少し上回る位置に集まっているように思われる。

(3) 繰返し応力履歴を受けた粘土のダイレイタンスー特性

飽和粘土のせん断時の体積変化  $\Delta v$  は周知のように、圧密による  $\Delta v_c$  とダイレイタンスーによる  $\Delta v_d$  によって成り立ち、第一近似として両者の線形的な重ね合わせによって

$$\Delta v = \Delta v_c + \Delta v_d \dots\dots\dots (12)$$

と表わされる。非排水条件のもとでは、 $\Delta v=0$  であることを考慮すれば、次式で表わされると考えられる。

$$\Delta v_d = -\Delta v_c = -\frac{C_c}{1+e_0} \frac{\Delta p'}{p'} \dots\dots\dots (13)$$

この量は、ダイレイタンスー相当量とよばれることがある<sup>16)</sup>。

そこで、ダイレイタンスー挙動に及ぼす繰返し応力履歴の影響について調べてみよう。まず、図-14 は同一の繰返し荷重 ( $\Delta\sigma_r=100$  kPa) と载荷回数 ( $N=3600$ )

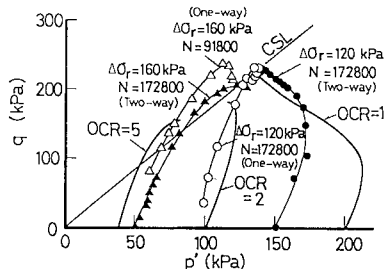


図-11 非排水ストレス・パスに及ぼす繰返し荷重強度、载荷回数および载荷方式の影響

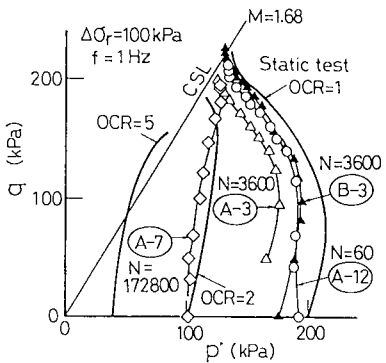


図-12 非排水ストレス・パスに及ぼす载荷回数の影響

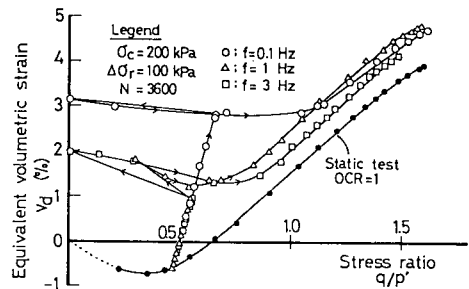


図-14 繰返し応力履歴後の非排水せん断時における等価ダイレイタンスー挙動

異なる周波数のもつて繰返し応力履歴を受けた粘土の非排水せん断時のダイレイタンスー相当量と応力比の関係を示している。これによれば、非排水繰返し载荷中のダイレイタンスー挙動は周波数の影響によらず同一の傾向で増加するが、繰返し応力除去後の非排水せん断時では、いったん膨張後、ある応力レベルを過ぎると負のダイレイタンスーを示し正規圧密土の  $v_a - q/p'$  関係へ復帰するようである。この傾向は異なる繰返し回数と負荷を受けた粘土についても全く同様である。

これらを要するに、粘土のダイレイタンスー特性に及ぼす繰返し荷重の影響については、周波数の相違や繰返し荷重強度の相違によらず、過圧密土に類似して挙動するが、ある応力レベルを過ぎると正規圧密土と類似した挙動をするようになることと結論することができる。

(4) 繰返し载荷履歴を受けた粘土の応力-ひずみ関係と非排水強さ

飽和粘土の繰返し载荷時においては、2つの要因が非排水強さの変化に貢献していると考えられる。そのうちの1つは、有効応力の増加または減少であり、いま1つは繰返しによるシキソトロピクな骨格構造の変化であ

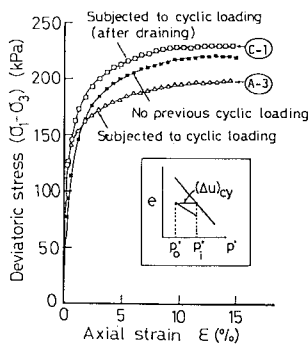


図-15 繰返し応力履歴後の応力-ひずみ関係 (有明粘土)

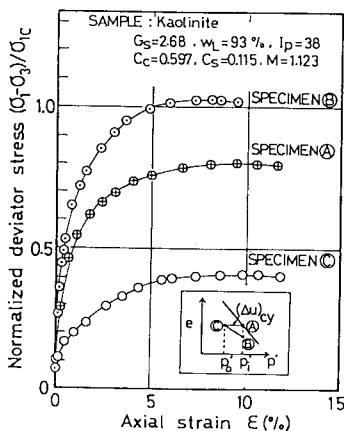


図-16 繰返し応力履歴後の応力-ひずみ関係 (カオリナイト, 松井による)

る。後者の要因は、吸着水を含めた粘土粒子構造における軟化あるいは硬化を引き起こすと考えられ、これらの2つの要因はお互いに影響し合うようであるが、先に述べた理論的考察では、粘土のシキソトロピー効果については考慮に入れていない。

図-15は、(a) 繰返し応力履歴を全く受けていない、(b) 非排水繰返し応力履歴を受けた、(c) 非排水繰返し载荷後排水を許した3つの有明粘土供試体の非排水静的三軸圧縮試験結果から得られる軸差応力-軸ひずみ曲線の相違を比較したものである。高塑性粘土 ( $I_p=69$ ) においては、予期されたほど著しい非排水強さの差がみられない。これに対し、松井ら<sup>15)</sup>の行った低塑性の繰返し粘土 ( $I_p=45$ ) に対する繰返し三軸圧縮試験によれば、図-16に示すように、繰返し応力履歴を受けた供試体と履歴を受けていない供試体の非排水強さの差異は顕著である。

前述のように、正規圧密粘土は繰返し载荷によって有効応力の低下を招来する。一方、排水を許すことによって、初期の応力状態 (図-4では  $p'_i$ ) に復帰する。そして、このとき、松井ら<sup>15)</sup>によって指摘されたように、二次圧密を受けた粘土の挙動とほとんど同様にその非排水強さを増加することになる。これらの繰返し応力履歴による非排水強さの変化は式 (10) と式 (11) によって与えられるように、繰返し応力履歴を受けない正規圧密粘土のそれと比較するという形で予測されると考えられる。先に示した繰返し三軸圧縮試験から得られる種々の条件で、繰返し応力履歴を受けた後の粘土供試体の非排水強さの比  $s_{u0}/s_{ui}$  と理論式による予測結果が図-17に比較される。非排水強さの比の変化が初期拘束圧  $p'_i$  によって正規化された繰返し間隙水圧  $(\Delta u)_{cy}/p'_i$  に対してプロットされている。測定結果は白丸と黒丸によって、また計算結果は太い実線によって示されている。2つの計算結果は式 (10) におけるパラメーター  $\Lambda_0$  として、それぞれ、0.611 (式 (3-c) から) および 0.720 (静的ひずみ制御三軸圧縮試験から) を用いた結果である。実験結果は少しばらつきがあるけれども、2つの曲線は実験

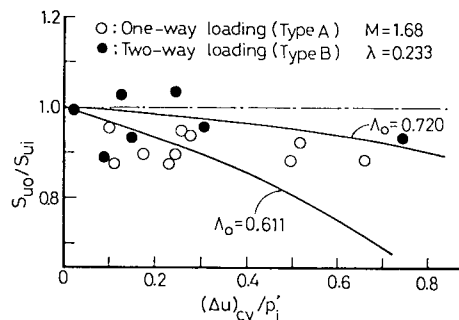


図-17 非排水繰返し応力履歴後の非排水強さ (有明粘土)

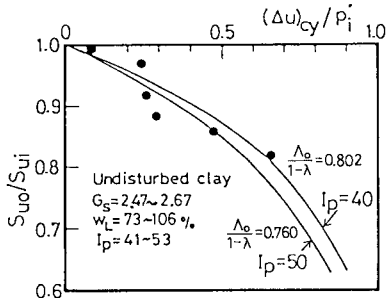


図-18 非排水繰返し応力履歴後の非排水強さ (不攪乱粘土, 佐々木ほか)

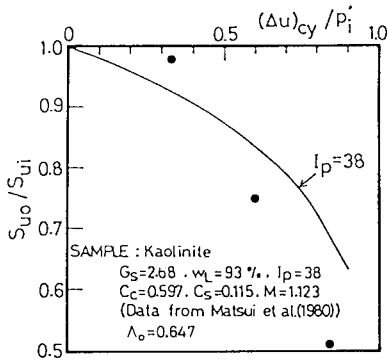


図-19 非排水繰返し応力履歴後の非排水強さの変化 (カオリナイト)

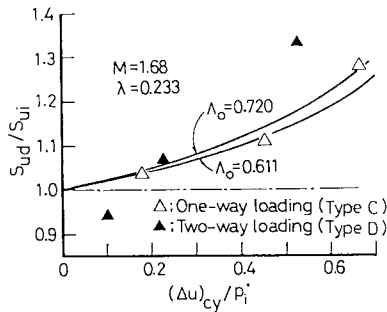


図-20 排水を伴う繰返し応力履歴後の非排水強さの変化 (有明粘土)

結果をかなりよく説明し得ているようである。しかしながら、上述のどちらの方法によって  $\Lambda_o$  を決めた方がよいか、この結果に関する限りは明らかではない。

ここで提案された繰返し荷重による強度低下評価式の妥当性を他の研究結果に適用することによって確かめてみよう。図-18 および図-19 は佐々木ら<sup>17)</sup>による不攪乱粘土、松井ら<sup>15)</sup>による再圧密カオリンに対する繰返し三軸圧縮試験の結果を示している。両図とも非排水強さに関する計算結果はよく測定値を説明し得ていると思わ

れる。

反対に、以前に考察したように、繰返し応力によって誘起された間隙水圧の消散を許した粘土供試体は非排水強さを増加させる。この仮定の正しさは、シリーズ C とシリーズ D によって得られた非排水強さの実験値と計算値とを比較した図-20 において確かめられる。計算された非排水強さは、繰返し三軸試験において観測された値とよく一致している。しかしながら、図-20 においては、塑性指数の異なる粘土に対する同種の実験的検討がシキントロピー効果に加えて、繰返し応力下での粘土の挙動のメカニズムを明らかにするために必要であることが示唆される。

(5) 繰返し非排水応力履歴後の粘土の変形係数

次に、繰返し応力履歴を受けた繰返し再圧密有明粘土の非排水せん断時の応力-ひずみ曲線から割線係数  $(E_{50})_{cy}$  を求め、これと非排水強さ  $(s_{uo})_{cy}$  との比、 $(E_{50})_{cy}/(s_{uo})_{cy}$  と正規化された動的間隙水圧  $(\Delta u)_{cy}/p'_i$  に対して整理すると、図-21 のようになる。 $(\Delta u)_{cy}/p'_i$  の小さい範囲ではばらつきはあるものの、 $(E_{50})_{cy}/(s_{uo})_{cy}$  の値は間隙水圧の増加、つまり有効応力の減少に伴い低下するようである。また、 $(E_{50})_{cy}/(s_{uo})_{cy}$  の値を次式で松井らによって定義された等価過圧密比

$$n_q = \frac{p_i}{p_i - (\Delta u)_{cy}} = \frac{1}{1 - \frac{(\Delta u)_{cy}}{p_i}}$$

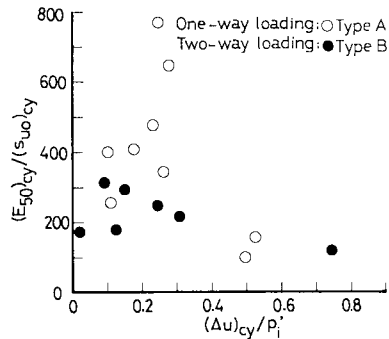


図-21 非排水繰返し履歴後の  $E_{50}/s_u$  比

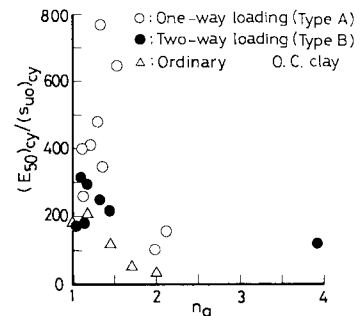


図-22  $E_{50}/s_u$  比に及ぼす繰返し応力履歴と過圧密の影響



に対しプロットすると、図—22のように整理される。比較のために、図中には応力解放による過圧密土の( $E_{50}$ )/( $s_{u0}$ )も同様に示されている。繰返し応力履歴を受けた粘土供試体の( $E_{50}$ )<sub>cs</sub>/( $s_u$ )<sub>cs</sub>の値は過圧密土と同様に、 $n_q$ が大きいくほど低下する傾向を示している。しかし、その程度は通常の過圧密粘土に比べて顕著のようである。したがって、繰返し荷重は粘土供試体を軟化させる要因となるとともに、特にひずみレベルの低い(つまり有効応力の低下があまり顕著でない)領域においては逆に、硬化現象をもたらすことがあることを示唆しているようであるが、詳しいメカニズムは今後の重要な課題であろう。

## 6. 結 論

本文では、わが国における典型的な軟弱海成粘土の非排水せん断挙動に及ぼす繰返し応力-ひずみ履歴の影響が繰返し三軸圧縮試験によって調べられ、試験結果は全応力および有効応力の両方の立場から考察された。繰返し荷重によって引き起こされた擬似過圧密粘土のせん断挙動が有効応力の解放による過圧密粘土の挙動と比較されて議論されている。とりわけ、繰返し荷重を受けた粘土の非排水強さの変化を予測する方法が提案され、その妥当性が実験結果によって調べられた。その結果、本文で得られた結論は以下のようにまとめられる。

(1) Woodや松井らによって確かめられたように、繰返し荷重によって引き起こされた擬似過圧密粘土の非排水せん断挙動は、通常の過圧密粘土の挙動と見掛け上かなりよく一致している。特に、有明粘土のような鋭敏な粘土においても、両者の非排水せん断時の有効応力経路はきわめてよく類似している。

(2) 繰返し荷重を受けた粘土供試体の破壊時の応力状態はほぼ限界状態線近傍に位置する。しかし、二方向荷重を受けた粘土の破壊点は一方向荷重とは異なり、限界状態線よりやや上にプロットされる。

(3) 繰返し荷重時の荷重回数や荷重周期は、その後の非排水せん断によって得られる有効応力パラメータにはあまり関与しない。

(4) 粘土のダイレイタンシー特性に及ぼす繰返し荷重の影響については、周波数や繰返し回数によって過圧密土と類似に挙動するが、ある応力レベルを超えると正規圧密土に復帰する傾向がある。

(5) 繰返し荷重後排水を許さない粘土供試体の非排水せん断強さは低下するけれども、繰返し荷重によって生じた間隙水圧を消散させ排水を許した粘土供試体は非排水強さを増加させる。このような非排水強さの変化を評価する方法を提案し、その妥当性を確かめた。

(6) 繰返し荷重を受けた粘土供試体の割線係数と非

排水強さの比( $E_{50}$ )<sub>cs</sub>/( $s_u$ )<sub>cs</sub>は過圧密比に伴って低下するものの、一般に応力解放による過圧密粘土のそれより大きい。それゆえ、繰返し荷重を受ける粘土は軟化現象と硬化現象とが複合して挙動を複雑にしていることが予想される。

謝 辞：本研究のうち特に図—16は大阪大学工学部 松井 保教授にご提供いただいた。付記して謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) Sangrey, D. A. et al. : The effective stress response of a saturated clay soil to repeated loading, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 241~252, 1969.
- 2) Andersen, K. H. : Behaviour of clay subjected to undrained cyclic loading, Proc. Int. Conf. on behaviour of off-shore structures, Trondheim, 1, pp. 392~403, 1976.
- 3) Wood, D. M. : Comments on cyclic loading of clay, Proc. BOSS '76, pp. 1~7, 1976.
- 4) Matsui, et al. : Behavior of clay on cyclic stress-strain history, Proc. 10th ICSMFE, Stockholm, Vol. 3, pp. 261~264, 1981.
- 5) Hyde, A. F. L. and Brown, S. F. : The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading, Geotechnique, Vol. 26, No. 1, pp. 173~184, 1976.
- 6) Mitachi, T. and Kitago, S. : Change in undrained strength characteristics of saturated remolded clay due to swelling, Soils and Foundations, Vol. 16, No. 1, pp. 45~58, 1976.
- 7) Mayne, P. W. : Cam-clay prediction of undrained strength, Proc. ASCE, Vol. 106, No. GT 11, pp. 1219~1242, 1980.
- 8) Bjerrum, L. : Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of structures, Geotechnique, Vol. 17, No. 3, pp. 63~117, 1967.
- 9) Yasuhara, K. et al. (1983, a) : Undrained shear behaviour of quasi-overconsolidated seabed clay induced by cyclic loading, Proc. IUTAM 1983 Symp. "Seabed Mechanics", Newcastle Upon Tyne, U. K., 1983.
- 10) Yasuhara, K. and Ue, S. (1983, b) : Increase in undrained shear strength due to secondary compression, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 3, pp. 50~64, 1983.
- 11) Schofield, A. N. and Wroth, C. P. : Critical State Soil Mechanics, MacGraw Hill, 1968.
- 12) 中瀬ほか：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, Vol. 8, No. 4, pp. 104~143, 1969.
- 13) Nakase, A. and Kobayashi, M. : Change in undrained shear strength of saturated clay due to rebound, Proc. 4th Asian Reg. Conf. SMFE, Vol. 2, pp. 147~150, 1971.
- 14) 山下ほか：飽和粘性土の非排水せん断強度に関する考察,

- 第16回土質工学研究発表会講演集, pp.321～324, 1981.
- 15) Matsui, T. et al. : Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay, Proc. ASCE, Vol.106, No. GT 10, pp.1101～1120, 1980.
- 16) Yasuhara, K. et al. : Cyclic strength and deformation of normally-consolidated clay (closure), Soils and Foundations, Vol.24, No.1, 1984.
- 17) 佐々木ほか：粘土の動的強度, 土木技術資料, Vol.22, No.8, pp.36～42, 1980.
- 18) Yasuhara, K. : Undrained and drained cyclic triaxial compression tests on a marine clay, Proc. 11th Intn'l. Conf. SMFE, Vol.2, pp.1095～1098, 1985.
- 19) Yasuhara, K. et al. : Cyclic strength and deformation of normally-consolidated clay, Soils and Foundations, Vol.22, No.3, pp.77～91, 1984.
- 20) 対馬・及川：泥炭質有機質土の強度とダイレイタンスーについて, 土質工学会論文報告集, Vol.22, No.2, pp.133～141, 1982.
- 21) 中瀬明男：海底土質, 新体系土木工学講座, 技報堂, 1984.
- 22) Yasuhara, K. and Ue, S. : Increase in undrained shear strength due to secondary compression (closure), Soils and Foundations, Vol.25, No.1, pp.120～123, 1985. (1984.12.10・受付)
-