

## せん断応力除荷時の粘性土の弾性的挙動

清水正喜・三村 衛

## ELASTIC BEHAVIOUR OF A SATURATED CLAY DURING UNLOADING OF SHEAR STRESS

By Masayoshi SHIMIZU and Mamoru MIMURA

## Synopsis

It is one of the major problems in soil mechanics to describe the mechanical response of soils under cyclic loading conditions. The objective of this study is to clarify the stress-strain behaviors when the loading direction is reversed. For the purpose conventional triaxial tests for a saturated clay were performed in which deviator stress was applied in compression state and unloaded to failure in extension state.

Stress-strain behavior has been found to be elastic in some portion after the moment of unloading of shear stress and beyond the portion the behavior begins to be elasto-plastic. Such a limit of elasticity can be determined in stress space and the variation with the deformation history having been given before unloading are discussed. On the other hand shear modulus  $G$  can be determined as the slope of the linear portion of stress-strain relationship. The effects of deformation history on  $G$  are also discussed.

A few of conclusions are summarized as follows:

- 1) A parameter defined as a function of stress ratio at the start of unloading and stress ratio at the limit of elasticity appears to be related to shear strain given before unloading uniquely in spite of both drainage condition and OCR.
- 2)  $G$  is not influenced by the degree of the deformation history if effective mean stress is not altered during deformation history as in drained tests but it decreases in the case when effective mean stress decreases with shear as in undrained tests for normally consolidated clays.

## 1. 序 論

地震等の振動荷重下の土の挙動を予測する必要性が高まり、荷重方向を逆転させたときの応力-ひずみ挙動を解明することの重要性が認識されている。一般に、三軸あるいは一軸応力条件下で、ある応力状態にある土に、軸荷重を作用させ、ある大きさの変形を与えたのち、その荷重を取り除いたときに戻るひずみは、すべて弾性的であるとする、実験事実を十分に説明できず、その戻るひずみには塑性ひずみが含まれると考えざるを得ない。このような挙動は、一様な引張り歪を受けた多結晶金属に反対方向の圧縮力を加えたときに観察される Bauschinger 効果<sup>1)</sup>と同様の性質をもつものであろう。

弾塑性理論を用いて、土の応力-ひずみ挙動を記述する試みが多くなされているが、このような Bauschinger 効果は、いわゆる降伏曲面の変化に対して Kinematic hardening モデルを取り入れることにより可能となる。実際、そのようなモデルを導入した応力-ひずみ関係式<sup>2),3)</sup>が提案されている。

本報告は、荷重方向を逆転したときの土の応力-ひずみ挙動を解明する目的で行ってきた研究<sup>4)</sup>によって得た成果を新たに行った実験により検討し、さらに発展させようとするものである。すなわち、前報<sup>4)</sup>では三軸応力条件下で、軸荷重を取り除いたときに弾性的挙動が現われることを指摘したが、本論文では、その

弾性的性質の現われる領域の大きさと、弾性定数に対するせん断応力履歴の効果について実験的に考察する。実験はすべて軸対称応力条件下で行い、用いた粘性土は完全に飽和しているものとする。

#### 用いた記号

$\sigma_a$ : 軸応力

$\sigma_r$ : 側方応力

$\sigma_B$ : バックプレッシャー

$p$ : 平均有効応力 ( $=(\sigma_a + 2\sigma_r)/3$ )

$q$ : せん断応力パラメータ ( $=\sigma_a - \sigma_r$ )

$\eta$ : 有効応力比パラメータ ( $=q/p$ )

$\epsilon_a$ : 軸ひずみ

$v$ : 体積ひずみ

$\epsilon$ : せん断ひずみパラメータ ( $=\epsilon_a - v/3$ )

R: 除荷を始めるときの状態に対応する添字

$E_e$ :  $q-\epsilon$  関係に基づく弾性限界点に対応する添字

$E_p$ : ダイラテンション特性に基づく弾性限界点に対応する添字

$p_0$ : 最大先行圧密圧力

## 2. 実 験

### 2.1 試料および実験装置

試料は、市販の粉末乾燥粘土（通称「藤の森粘土」）を高含水比で繰り返した後、大型一次元圧密容器内で圧密・膨潤させたものである。最大予備圧密圧力は 49kPa である。粘土分（粒径  $2\mu\text{m}$  以下）含有率15%，土粒子比重2.64，塑性限界7.8，液性限界54.0，塑性指数26.2のシルト質粘土である。三軸試験に供するときの含水比は、試料作製時の圧密バッチにより多少の変動はあるが、約40%である。また、実験用供試体は、断面積  $10\text{cm}^2$ 、高さ 8cm の円柱形である。試料作製方法、粒度の詳細は、文献<sup>5)</sup>に譲る。

実験装置は、N. G. I. 型三軸試験機を用いた。同三軸試験機においては、元来、応力制御によって三軸伸張状態にすることができなかったが、それを可能ならしめるために載荷装置は改良したものをを用いた<sup>4),5)</sup>。また、非排水試験においては、排水・バックプレッシャー径路と間隙水圧測定径路とが完全に独立するように改良した三軸セルを用いている。同一供試体で三軸圧縮と伸張の両応力状態を作用させるとき、載荷用ラムと供試体キャップとを剛結させる必要があるが、その剛結の際、試料を乱す恐れがある。そこで圧密が終了したとき、載荷用ラムをいったんキャップから浮かせて、ラムをロードセルに取り付け、その後三軸セルを所定のせん断速度に調整した速さで上昇させ、圧縮応力状態で軸差応力が加わってから載荷用ラムとキャップとを剛結させる方法をとった。このような手法により、せん断初期に生ずる試料の乱れは生じていないと思われる。

### 2.2 実験の種類と方法

平均有効応力  $p$  一定の排水試験と側圧  $\sigma_r$  一定の非排水試験を行った。

#### (1) 排水試験

平均有効応力一定の応力制御による排水試験で、作用させた有効応力径路の概念図を Fig. 1 に示す。せん断に先立って、所定の圧力  $p = p_0$  まで等方的に正規圧密した後、所定の過圧密比 ( $OCR=1, 2$  または  $8$ ) に応じて  $p = p_0/OCR$  まで膨潤させた。その後、 $p$  を一定に保ちながら応力比  $\eta$  を 0.1 ずつ増

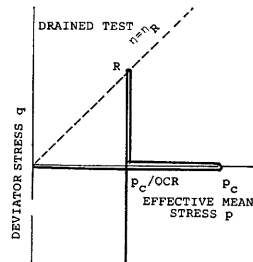


Fig. 1. Schematic diagram of effective stress path for drained tests.

加させて所定の応力比  $\eta = \eta_R$  に達すると  $\eta$  を 0.1 ずつ減少させて除荷した。等方応力状態を経て、伸張応力状態で破壊させた。各応力段階において、変形が十分に落ちつくまで放置し、次の応力段階に移った。各応力段階における放置時間は、OCR により多少異なるが、2～3日を要している。

## (2) 非排水試験

### a. 圧密過程

まずパバックプレッシャーを作用させないで、98kPa で等方圧密した（第1段階の圧密）。次いで、パバックプレッシャー  $\sigma_B = 196\text{kPa}$  を作用させて所定の圧力まで段階的に圧密した。非排水試験はすべて正規圧密状態でを行い、圧密圧力は  $p_c = 392, 196$  又は  $98\text{ kPa}$  の3種類である。

第1段階の圧密が終了した時点でフラッシングを行って系内の飽和度を高めた。フラッシングには、19.6 kPa の被圧水を用いた（付録1を参照）。

### b. 非排水せん断過程

圧密終了後、まず圧縮応力状態でせん断して、所定の有効応力比  $\eta = \eta_R$  になったとき除荷させ、等方応力状態を経て、伸張応力状態で破壊させた。また圧縮応力状態で載荷・除荷をくり返して圧縮応力状態で破壊させる実験も行った。

採用したせん断速度は、 $\dot{\epsilon}_s = 3.24 \times 10^{-4} (\%/min)$  と非常に小さいが、これは、

- (i) 間隙水圧が側圧の変化に対して必ずしも瞬間的に応答せず、時間遅れを伴うことが予想される（付録1参照）。
  - (ii) 従来の実験によれば、除荷直後には、少しの軸ひずみの変化に対して、せん断応力  $q$  は大きく変化するので、除荷後の挙動を詳しくみるためにはせん断速度は小さい方が適している。
  - (iii) 静的な応力-ひずみ挙動の解明が主目的であるので、なるべく粘性による抵抗を少くする意味で、小さいせん断速度が好ましい。
  - (iv) 排水試験の結果と比較するためには、全試験時間をなるべく排水試験のそれに近づけたい。
- という理由による。ただし、小さい速度で実験を行うことによって、時間的ロスや、それ以外にも複雑な問題が生じることも否めない。

## 3. 結果の考察

正規圧密状態で排水せん断した結果については、既に報告している<sup>4)</sup>ので、ここでは過圧密状態で排水せん断した結果と、正規圧密状態の非排水試験結果を述べることにする。

### 3.1 排水試験の結果

#### (1) ひずみ～時間関係

OCR = 8,  $\eta_R = 0.4$  の実験を例にとり、せん断ひずみ  $\epsilon$  および体積ひずみ  $v$  と時間の関係を Fig. 2 (a), (b) にそれぞれ示した。 $\epsilon, v$  はともにクリープ的に変化していて、完全に止まることがないようだ。ただ、長時間経過後の挙動をみると、ひずみ速度は時間とともに明らかに減少している。各応力段階における最終ひずみをその応力に対応するひずみとして扱う。

#### (2) ダイレイタンスー特性

OCR = 8 の場合の応力比  $\eta$  と体積ひずみ  $v$  の関係を Fig. 3 に示す。平均有効応力一定試験であるため、体積ひずみは、ダイレイタンスーを表わす。Fig. 3 において、せん断応力の増加に伴い正のダイレイタンスー（負の体積ひずみ）が発生しているが、除荷すると  $v$  にはほとんど変化のない領域を経て、再び  $v$  の変化が顕著になって破壊に至っている。

除荷した後、ダイレイタンスーの変化の少ない部分が存在するという特性は、OCR = 1 の場合<sup>4)</sup>、および OCR = 2 の場合にも同様に見られた。

#### (3) 応力比～せん断ひずみ関係

OCR = 8 の場合の応力比  $\eta$  とせん断ひずみ  $\epsilon$  の関係を Fig. 4 に示した。 $\eta$  の増加とともに  $\epsilon$  は非線型

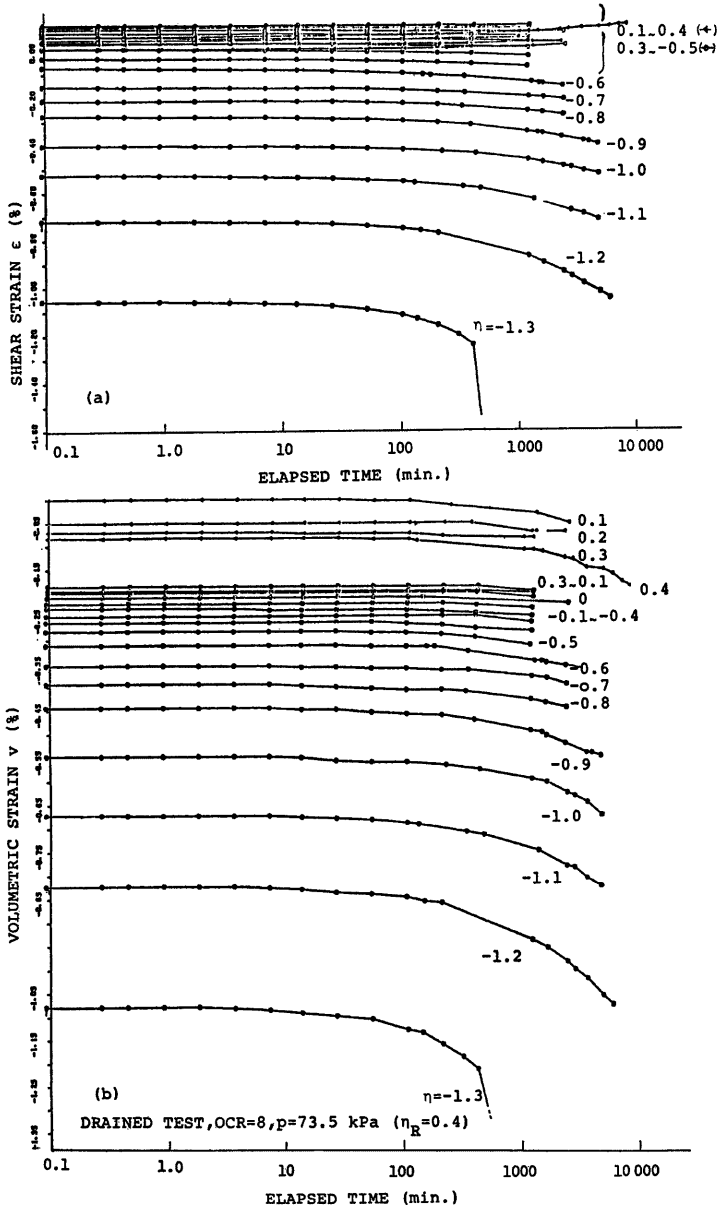


Fig. 2. Strain-time behaviours observed in a drained test; (a) shear strain  $\epsilon$ -elapsed time  $t$ . (b) volumetric strain  $v$ -elapsed time  $t$

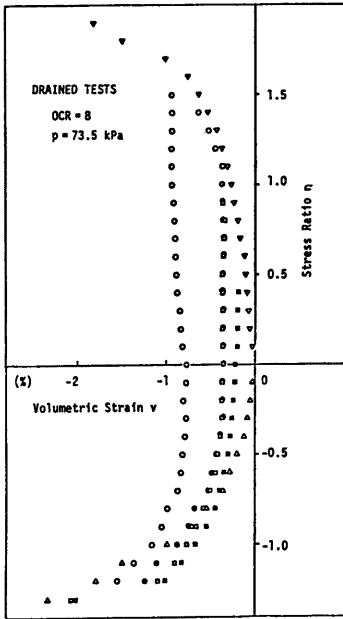


Fig. 3. Relations between volumetric strain  $v$  and effective stress ratio  $\eta$  obtained from drained tests.

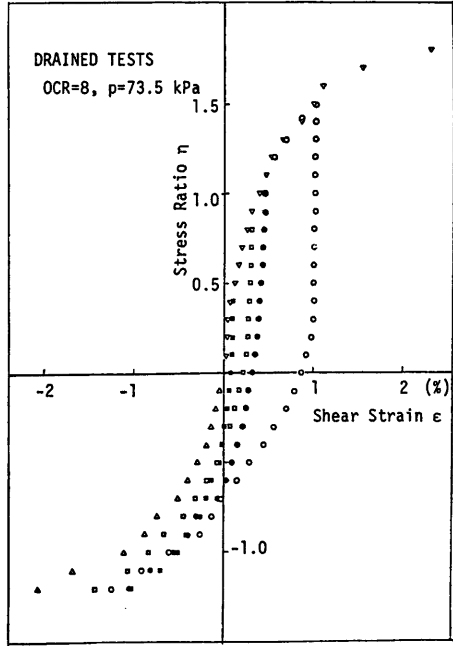


Fig. 4. Relations between shear strain  $\epsilon$  and effective stress ratio  $\eta$  obtained from drained tests.

的に生じているが、除荷をはじめるとしばらく  $\eta$  と  $\epsilon$  の関係は直線的になっている。平均有効応力一定の試験であるので、せん断応力  $q$  とせん断ひずみ  $\epsilon$  の関係が直線的であることになる。 $\eta$  をさらに減少させると、 $\epsilon$  は再び非線型的な変化を示すようになり破壊に至っている。

除荷後、 $q$  と  $\epsilon$  との間に直線的な関係が見られることは、 $OCR=1$  の場合にも  $OCR=2$  の場合にも見られた。

(4) 瞬時ひずみ

Fig. 2 に示した実験を例にとって、各応力段階での載荷直後に発生した瞬時ひずみ（載荷後6秒のひずみで代用）の累積量 ( $\Sigma \epsilon_{ai}$ ) と応力比の関係を Fig. 5 に示した。図よりわかるように、除荷をはじめ前の載荷部分 ( $\eta: 0 \rightarrow \eta_R$ ) において、両者の関係は直線的であり、さらに除荷後には、ほぼ同じ線上を戻って伸張状態に至っていることがわかる。したがって、瞬時に発生する軸ひ

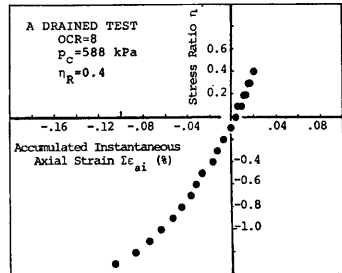


Fig. 5. Relation between shear stress  $q$  and accumulated axial strain  $\Sigma \epsilon_{ai}$  occurring instantaneously at the application of increment of shear stress.

ずみの大部分は可逆的、線型弾性的であるといえる。時間的な遅れを伴って生じるひずみにも可逆的な成分は含まれているが、少くとも除荷後に見られる  $q \sim \epsilon$  関係が直線的になる部分においては、時間的な遅れを伴って生じるひずみは殆んどない (Fig. 2 参照) ことを考え併せると、Fig. 3 や Fig. 4 に示した応力 $\sim$ ひずみ関係の非線型の部分では、塑性的 (非弾性的) ひずみが発生していると思われる。つまり、Fig. 4 でみられた、 $q \sim \epsilon$  の直線部分において生じているひずみは弾性的であるといえる。

この瞬時ひずみと応力関係が線型的であるという特性は、OCR=1 の場合や OCR=2 の場合にも見られたことを付け加えておく。

### 3.2 非排水試験の結果

非排水試験は、すべて正規圧密状態で行っており、以下に述べる結果は、どの圧密圧力の場合にも共通しているので、ここでは、 $p_c = 196 \text{ kPa}$  の場合をとり上げて述べることにする。

#### (1) 有効応力径路

Fig. 6 に有効応力径路を示すが、除荷するまでの径路は  $\eta_R = 1.1$  の場合で代表させた。せん断を開始して除荷をはじめるまでは、ダイレタンシーにより正の間隙水圧が発生して平均有効応力  $p$  は減少していく。除荷部分の有効応力径路は、その形から2つの部分に分けられる。ひとつは、除荷開始点からしばらく続く直線部分であり、他はその直線関係がなくなって破壊に至るまでの非線型部分である。

除荷開始応力比  $\eta_R$  が小さい場合 ( $\eta_R = 0.2, 0.4$ ) は直線部分において  $p$  の変化は無視できるほど小さく、それを過ぎると同じ有効応力径路に沿って破壊に至っている。この直線部分以後にたどる同一の有効応力径路は、単調に伸張側でせん断した場合の有効応力径路と合致していることが予想される。(実際  $p_c = 392 \text{ kPa}$  の試験ではそのことを確かめている<sup>5)</sup>) この挙動は、有効応力径路の非線型部分の形は別として、Cam Clay モデル<sup>10)</sup>や修正 Cam Clay モデル<sup>11)</sup>により予想される。

次に、 $\eta_R$  が大きい場合 ( $\eta_R = 0.8, 1.1$ ) には、除荷直後の直線部分においても、 $p$  は減少をつづけていて、それを過ぎると、 $\eta_R = 0.8$  の場合には  $p$  はさらに減少する形で、 $\eta_R = 1.1$  の場合には  $p$  は反対に増加する形で破壊に至っている。破壊時の有効応力状態は、 $\eta_R$  の大きさによらず、ほぼ一定となっていることがわかる。

$\eta_R$  の大きさによって、除荷開始点から破壊に至る間の有効応力径路の形は異なるわけであるが、いづれにしても、除荷直後に現われる直線部分は、そこでの  $p$  の変化がその前後の過程における変化に比べて小さく、本質的には、ダイレタンシーの発生しにくい領域であるといえる。このダイレタンシーの発生しにくい領域の大きさに及ぼすせん断履歴の影響については次章で詳しく論じる。

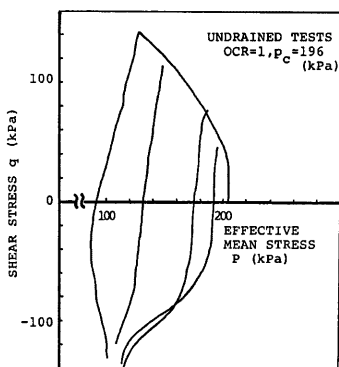


Fig. 6. Effective stress paths obtained from undrained tests.

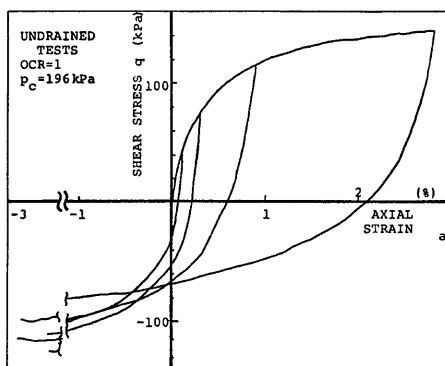


Fig. 7. Relations between shear stress  $q$  and shear strain  $\epsilon$  obtained from undrained tests.

(2) せん断応力  $q$ ～せん断ひずみ  $\epsilon$  関係 (Fig. 7)

せん断を開始して除荷するまでの部分は、 $\eta_R=1.1$  の場合の関係で代表させている。せん断を開始してすぐ、 $q$  と  $\epsilon$  の関係は非線形的に発達しているが、除荷を始めると両者の間には直線関係がみられる。さらに除荷をつづけると再び非線形的に  $\epsilon$  の発生が大きくなって破壊に至っている。除荷直後に現われた直線部分の長さと同配は、ともに、 $\eta_R$  が大きくなるほど小さくなる傾向が見られている。この直線部分の現われ方に対するせん断の履歴の影響について、次章で詳しく述べる。

3.3 結果のまとめと考察

せん断応力を除荷したときの粘土の挙動に関する以上の結果のうち、排水条件（排水か非排水か）や過圧密の程度（正規圧密か過圧密か）に拘らず共通していることとして、

- (i)せん断応力を除荷すると、せん断応力  $q$ ～せん断ひずみ  $\epsilon$  の関係が直線的になる部分が存在する、
- (ii)せん断応力～ダイラテンシー関係または有効応力経路図において、せん断応力を除荷するとダイラテンシーの発生が小さい領域が存在する、

ことを挙げる事ができる。

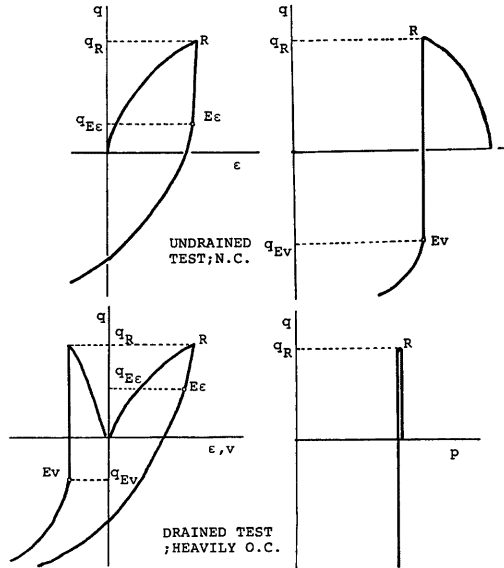


Fig. 8. Schematic representation of characteristics observed in unloading stage.

(i)および(ii)の特性を模式的に表わすと Fig. 8 のようになる。除荷時に(i)の特性が失われる状態に添字 E<sub>ε</sub> を、(ii)の特性が失われる状態に添字 E<sub>v</sub> を付す。

特性(i)および(ii)は、次式で表わされるような、Hook の法則に従う等方性材料の特性<sup>1)</sup>と同じである。

$$de_{\alpha\alpha} = \frac{1}{3K} d\sigma_{\alpha\alpha} \dots\dots\dots (1)$$

$$de_{ij} = \frac{1}{2G} d\tau_{ij} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\epsilon_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  をそれぞれひずみおよび応力のテンソルとしたとき、

- $\epsilon_{aa}$ : 微小ひずみにおける体積ひずみ
- $\sigma_{aa}$ : (平均有効応力)×3
- $e_{ij}$ : 偏差ひずみテンソル ( $=\epsilon_{ij}-\frac{1}{3}\delta_{ij}\epsilon_{aa}$ )
- $\tau_{ij}$ : 偏差応力テンソル ( $=\sigma_{ij}-\frac{1}{3}\delta_{ij}\sigma_{aa}$ )
- $K$ : 体積弾性係数
- $G$ : せん断弾性定数

(1), (2)式を軸対称応力状態に適用すると：

$$dv = \frac{1}{K} dp \dots\dots\dots(1')$$

$$d\epsilon = \frac{1}{3G} dq \dots\dots\dots(2')$$

となる。(1') および (2') 式で表わされる材料に平均有効応力  $p$  一定の排水試験を行うと、(i)式より  $dv=0$ , すなわち、ダイラテンシーが発生しない。同様に、非排水試験を行うと、 $dv=0$  より  $dp=0$  となり ( $p, q$ ) 面上の有効応力径路は  $q$  軸に平行となることがわかる。

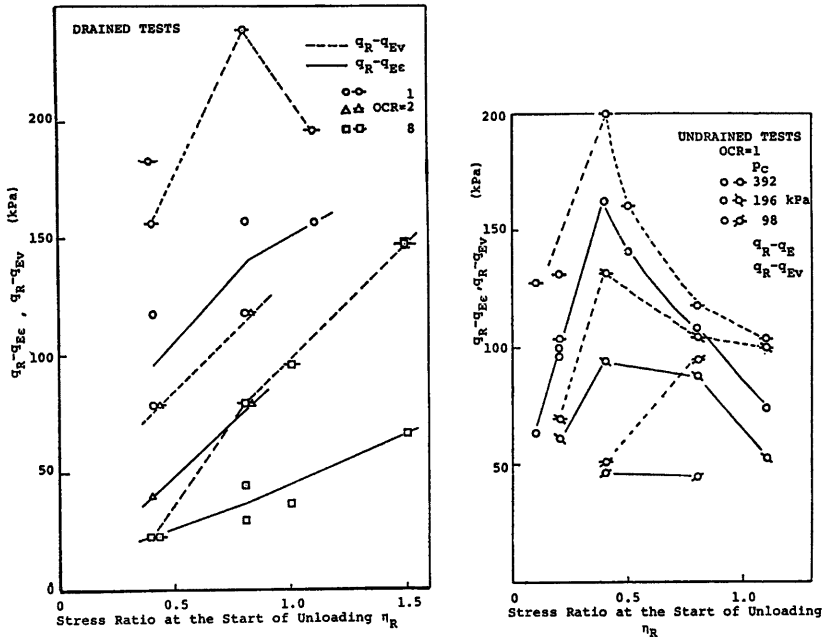


Fig. 9. Comparison between two kinds of elastic regions: elastic regions defined based on the characteristics either of no dilatancy or of linearity in  $q$ - $\epsilon'$   
 (a) Results of drained tests.  
 (b) Results of undrained tests.



以上のことから、除荷時における応力 $\sim$ ひずみ関係や有効応力径路図において、(i)の特性を満たす部分 (Fig. 8 における R と E<sub>1</sub> 点の間の部分) を  $q\sim\epsilon$  関係に基づく弾性領域、(ii)の特性を満たす部分 (同じく R と E<sub>2</sub> 点の間の部分) をダイレタンシー特性に基づく弾性領域と呼ぶ。

次に、同じせん断履歴をもつ場合に、 $q\sim\epsilon$  関係に基づいた弾性領域と、ダイレタンシー特性に基づいた弾性領域の大きさを比較する。弾性領域の大きさを表わす量として、 $q_R - q_{E_1}$ 、または  $q_R - q_{E_2}$  を選ぶ。

Fig. 9 (a) は、排水試験から得られた両弾性領域の大きさとせん断履歴応力比  $\eta_R$  の関係を示したものである。この図からわかるように、いずれの O. C. R. の場合にも、ダイレタンシーに基づく弾性領域の方が大きいことがわかる。

非排水試験から得られた同様の結果を Fig. 9 (b) に示したが、同じ圧密履歴をもつものについて比べると、やはり、ダイレタンシー特性に基づく弾性領域の方が大きいことがわかる。結局、除荷時の弾性特性として、ダイレタンシーの発生しない部分で  $q\sim\epsilon$  関係に直線性が見られ、その直線性が消えてから、再びダイレタンシーの発生が顕著になると言える。したがって、 $q\sim\epsilon$  関係の直線部分は、線型弾性体の応力 $\sim$ ひずみ関係式 (1')、および (2') の両方を満たしている。このことを利用して、その直線部分の勾配より、せん断弾性定数  $G$  を決定することができる。後章で、 $G$  の大きさに対するせん断履歴の影響について考察する。

#### 4. 弾性領域の大きさに及ぼすせん断履歴の影響

弾性領域の大きさを  $q_R - q_{E_1}$  や  $q_R - q_{E_2}$  で表わし、一方、せん断の履歴を  $\eta_R$  で表わした場合には、弾性領域の大きさに及ぼすせん断履歴の影響の仕方は、Fig. 9 で見たように、排水条件の相違 (排水か非排水か) や圧密履歴の相違などによって異なっている。本章では、弾性領域の大きさとせん断の履歴を適確に評価し得るパラメータを用いて、せん断履歴による弾性領域の変化について、圧密条件や排水条件の相違に依らない形で统一的に論じることを試みる。

##### 4.1 $q\sim\epsilon$ 関係に基づく弾性領域の変化

Fig. 10 に除荷開始時の応力比  $\eta_R$  と弾性領域の限界点の応力比  $\eta_{E_1}$  の関係を示す。この図を見る限り、両者の関係は、排水条件や圧密の履歴に依らない、ユニークなものにみえる。

さて、除荷時の弾性領域の大きさが除荷前に受けたせん断履歴によって変化するということは、圧密の条件が同じであれば、せん断によって生じた土の内部構造の変化の程度がせん断履歴の大きさによって変わるためと考えられよう。また、せん断の履歴を受ける前の初期の内部構造が異なっていると、すなわち圧密の条件が異なっていれば、せん断の履歴を与えたときに生じる内部構造の変化の仕方もまた異なると考えられる。

Fig. 10 においては、せん断の履歴を表わすパラメータとして、除荷開始時の応力比  $\eta_R$  を選んだが、 $\eta_R$  でもってせん断履歴中の土の内部構造の変化を表わすことは、あまり一般的でないと言える。それは、O. C. R. が異なれば、同じ  $\eta_R$  までせん断してもそのときのひずみの発生仕方は異なり、ひずみが異なれば、内部構造の変化の程度も異なると考えられるからである。したがって、Fig. 10 に示した関係が O. C. R. に依らないものにみえたのは、むしろ偶然であると考えるのが妥当であろう。

せん断の履歴を土の内部構造の変化と考える立場から、履歴の大きさを表わすパラメータとして、除荷開始までに生じたせん断ひずみをとる、一方、弾性領域の大きさを表わすパラメータとして、式(3)で定義され

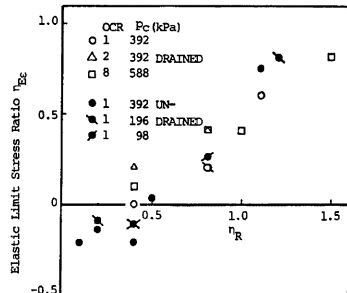


Fig. 10. Elastic limit stress ratio  $\eta_{E_1}$  and stress ratio at the start of unloading  $\eta_R$ .

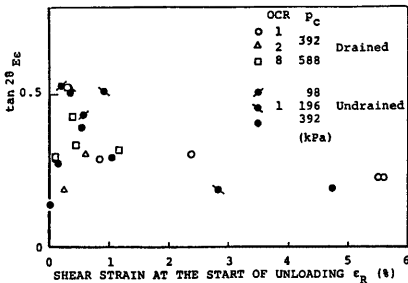


Fig. 11. Parameter  $\theta$  describing the elastic region during unloading and shear history  $\epsilon_R$ .

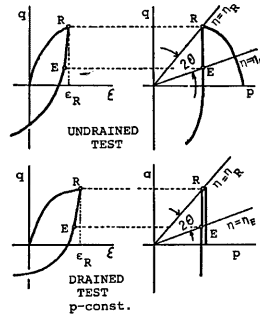


Fig. 12. Schematic representation of a parameter  $\theta (= \tan 2\theta)$ .

た量 :  $\theta$  をとって両者の関係を調べた (Fig. 11).

$$\theta = \tan 2\theta = \frac{\eta_R - \eta_{E_e}}{1 + \eta_R \cdot \eta_{E_e}} \dots \dots \dots (3)$$

$\theta$  は, Fig. 12 に示すように,  $\eta = \eta_R$  と  $\eta = \eta_{E_e}$  との成す角の1/2である。Fig. 11 から, 弾性領域パラメータ  $\theta$  は, 圧密条件や排水条件の相違にも拘らず, せん断履歴パラメータ  $\epsilon_R$  とユニークな関係にあるように見える。せん断履歴過程に生じた内部構造の変化の程度は,  $\epsilon_R$  である程度評価できても, 初期構造が異なれば, 同じ  $\epsilon_R$  を受けても, 除荷開始時の土の内部構造は同じとは言えないので, Fig. 12 の関係も, 本来, O. C. R. により異っているのかも知れない。

4.2 ダイレクシー特性に基づく弾性領域の変化

ダイレクシー特性に基づく弾性限界の応力比  $\eta_{E_e}$  と除荷開始点の応力比  $\eta_R$  との関係を Fig. 13 に示した。先に示した Fig. 10 においては,  $\eta_R$  と  $\eta_{E_e}$  の関係は, 圧密履歴による相違があまり見られなかったのに対して, Fig. 11 においては, O. C. R.=1 または2の場合と O. C. R.=8 の場合とで特性が全く異なっていることがわかる。

O. C. R.=1 の場合に注目すると,  $\eta_R$  と  $\eta_{E_e}$  の関係は, 排水条件や圧密圧力の相違によりあまり影響を受けないことがわかる。これは, 正規圧密粘土のダイレクシーが応力比とユニークな関係に表わされる<sup>7),8)</sup> ということと, せん断ひずみ  $\epsilon$  と応力比の関係も, 圧密圧力に拘らずユニークに決まるという性質と関係していると思われる。即ち, 排水・非排水に拘らず, 同じ応力比までせん断すると, 同じせん断ひずみ, 同じダイレクシーが発生するため, せん断履歴を与えたときの土の内部構造の変化の仕方が同じになると考えられるからである。

次に O. C. R.=8 の場合をみると,  $\eta_{E_e}$  は,  $\eta$  がある程度大きくなるとあまり変化していない。つまり, 過圧密比が大きい過圧密粘土の除荷時のダイレクシー特性が, せん断履歴の影響をあまり受けない, ということを表わしている。過圧密の履歴を受けていることにより, すでに, より弾性体的な, 言い方を換える

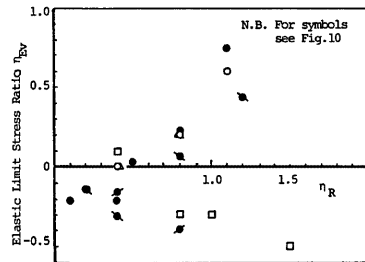


Fig. 13. Relations between the elastic limit stress ratio  $\eta_{E_e}$  and stress ratio at the start of unloading  $\eta_R$ .

と内部構造の変化を受けにくい構造となっているためと思われる。

#### 4.3 除荷時のダイレタンスー特性の三次元的考察

$O. C. R. = 1$  の場合には、圧密圧力や排水・非排水に関係なく、 $\eta_E$  と  $\eta_R$  との間にはユニークな関係が見られた (Fig. 13) が、このことを  $(p, q, w)$  の三次元空間で考える。ここに  $w$  は含水比である。

土の状態を  $(p, q, w)$  空間で定義した場合、ある領域の外部には土の状態が存在しないという領域の境界：状態境界面 (State Boundary Surface: S. B. S.) の概念を導入する<sup>9), 10)</sup>。ここで、

①等方応力状態で正規圧密された粘性土を非排水状態でせん断した場合の状態径路群 (State Paths) は、圧密圧力または含水比をパラメータとして、 $(p, q, w)$  空間に S. B. S. を形成する。

②非排水状態径路を  $(p, q)$  面に投影した有効応力径路は、圧密圧力  $p_c$  に拘らず、原点に関して相似になる、

③ $q=0$  面上の正規圧密曲線は、ひとつの土に対して唯一つ決まり、 $w-\log p$  関係は直線になる、という3つの仮定を用いると、三次元的な S. B. S. は、 $(q/p_c, p/p_c)$  平面上で1本の曲線として表わすことができる。ここに、 $p_c$  は Hvorslev の等価圧密圧力である。さらに、

④正規圧密状態で、平均有効応力  $p$  を一定にした排水試験を行ったときの状態径路群は、S. B. S. 上にある、と仮定すると、圧密圧力や排水条件の異なるせん断履歴を受けても、正規圧密土の状態径路を  $(q/p_c, p/p_c)$  面上のひとつの曲線で表わすことができる。すなわち、S. B. S. 上で大きさの異なるせん断履歴を与えて後除荷したときのダイレタンスーの挙動を比較するうえで、 $(q/p_c, p/p_c)$  面を利用すれば都合が良い。

Fig. 14 は、上述の観点に立ち、 $O. C. R. = 1$  の場合の、 $p$  一定排水試験の結果と、非排水試験の結果を

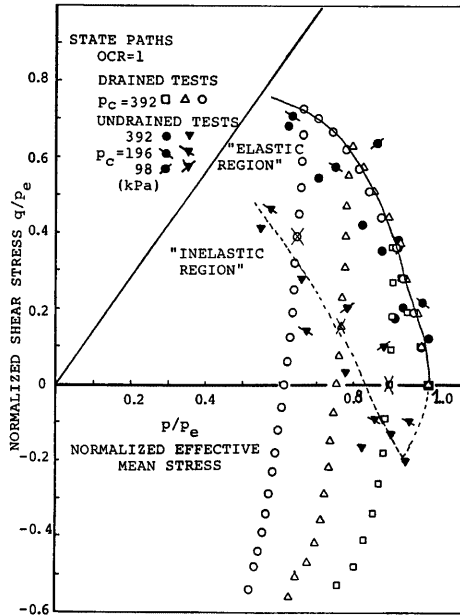


Fig. 14. State paths on normalized stress plane  $(q/p_c, p/p_c)$  of both drained and undrained tests for  $O. C. R. = 1$ .

( $q/p$ ,  $p/p$ ) 面上で表わしたものである。非排水試験の結果は、複雑さを避けるために、除荷開始点 (●, ◆, ◆) と除荷時のダイレタンシー特性に基づく弾性限界点 (▲, ▼, ▼) のみをプロットしている。

Fig. 14 において、せん断履歴過程中的径路は、履歴が大きくなるにつれて排水と非排水とで若干のずれが出てきているが、ほぼ同一の曲線上にあって、先の①~④の4つの仮定が妥当であることを示している。除荷後の挙動を比べると、排水試験で状態径路が  $q/p$  軸と平行でなくなる点 (図には×印で示す) が、非排水試験から得られた弾性限界点とよく一致していることがわかる。

以上のことから、S. B. S. 上でせん断の履歴を与えた場合、そのときの圧密圧力や排水・非排水の区別に拘らず、( $p$ ,  $q$ ,  $w$ ) 空間で、ダイレタンシー発生量の小さい固有の領域が形成されることがわかる。

5. せん断弾性定数  $G$  とせん断の履歴

除荷時に  $q-\epsilon$  関係が直線的になる部分では、ダイレタンシーの発生が殆んど無い、またはあってもその前後の過程に比べて小さいことを既に指摘した。したがって  $q-\epsilon$  関係の直線部の勾配からせん断弾性定数  $G$  を決定することできる。すなわち、(2') 式より、

$$G = \frac{\Delta q}{3 \cdot \Delta \epsilon} \dots\dots\dots (4)$$

本章では、 $G$  に対するせん断履歴の影響について考察する。

Fig. 15 は、平均有効応力  $p$  一定の排水試験から得られた、無次元化したせん断弾性定数  $\bar{G}(=3G/p)$  とせん断履歴応力比  $\eta_R$  の関係を示したものである。同図より、各 O. C. R. に対して、 $\bar{G}$  は  $\eta_R$  に依らず一定値になっていることがわかる。少くとも  $p$  一定の排水試験においては、 $G$  はせん断の履歴に無関係であるといえる。

Fig. 16 は、非排水試験から求めた  $G$  と  $\eta_R$  との関係を示したものである。 $\eta_R$  が増加するにつれて、 $G$  が減少している。 $p$  一定の排水試験の場合に、 $G$  が  $\eta_R$  に依らず一定値をとったことと考え合わせると、 $G$

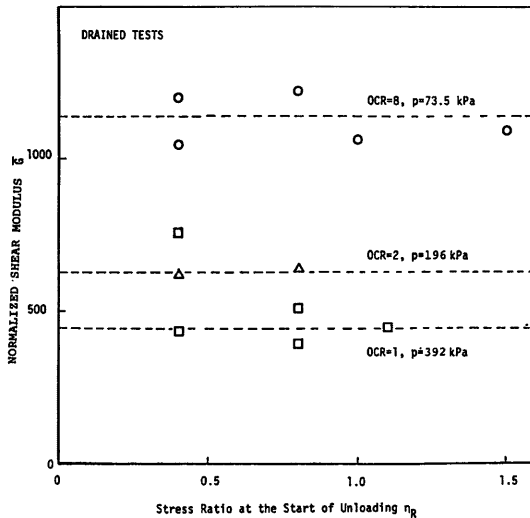


Fig. 15. Normalized shear modulus  $G$ , determined from the linear portion of  $\eta-\epsilon$  relation, and stress ratio history  $\eta_R$  ( $p$ -const. drained tests).

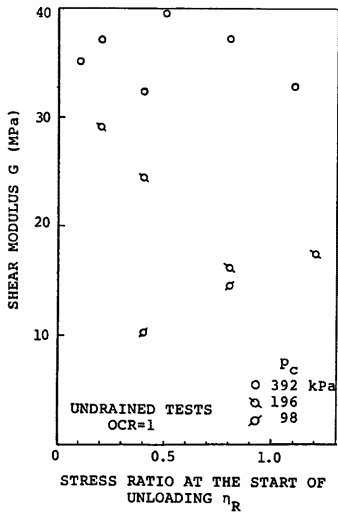


Fig. 16. Relations between shear modulus  $G$  and stress ratio history  $\eta_R$  obtained from the results of undrained tests.

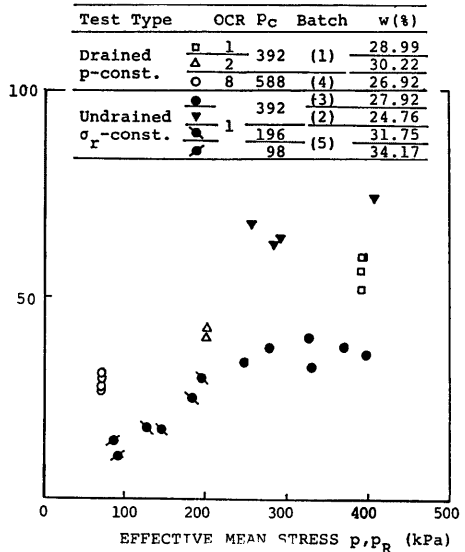


Fig. 17. Relations between shear modulus  $G$  and effective mean stress  $p$ .

はせん断の履歴を受けても、その間に  $p$  が変化しない限り変らないが、正規圧密粘土の非排水試験のように、せん断に伴って  $p$  が減少する場合には、 $G$  が減少することが予想される。

次に、 $G$  の  $p$  依存性について、もう少し詳しくみよう。**Fig. 17** は、**Fig. 15** および**16**の結果を、 $G$  と  $p$  の関係で表わしたものである。非排水試験においては、除荷時の有効応径路は、 $\eta_R$  が大きい場合には除荷直後でも  $p$  一定とはならなかったが、除荷開始時の  $p$  の値、すなわち  $p_R$  をとった。同図において、同じ記号のプロットは、同じ圧密履歴と同じ排水条件のもとでせん断履歴を与えられているが、せん断履歴の大きさが異なるものである。

**Fig. 17** より次のことが言える。

まず  $O.C.R. = 1$  の非排水試験の結果に注目すると、

同一記号のプロットでは、せん断履歴が大きくなるに伴って  $p$  は減少するが、それとともに  $G$  が減少する。

同一圧密履歴を有するが、試料作製バッチが異なるために含水比の異なるもの (▼と●) を比べると、含水比の小さい方が  $G$  は大きい。

同一圧密バッチから作製し、圧密圧力が異なるもの (▲と●) を比較すると、圧密圧力 (または含水比) が異っているにも拘らず、 $G \sim p$  の関係は同一の直線上にくる。このことは、圧密圧力の相違による  $G$  の変動とせん断履歴に伴う  $p$  の変化による  $G$  の変化とが同一の現象であることを示す。言い方を換えれば、せん断の履歴を与えたことにより  $p$  を減少させようと、圧密圧力が小さいことによって  $p$  が小さくなっていようと、 $G$  に対する影響の仕方に差はない。

次に排水試験の結果に注目すると

同一バッチの試料で、同じ先行圧密圧力を受けた場合(□と△)には過圧密即ち膨潤により $p$ が減少しても、それに対する $G$ の減少の仕方は、非排水試験において $G$ が $p_R$ に対して減少する仕方と類似している。

以上のことをまとめると、 $G$ はせん断変形の進行に伴って変化するものでなく、そのときに作用している平均有効応力 $p$ だけに関係し、 $p$ が減少すれば $G$ は直線的に減少する、といえよう。

Fig. 17の結果は、すべて異なる供試体から得られたものであった。ひとつの供試体に対して、三軸圧縮状態でくり返しせん断応力作用させる実験を行って、 $G$ と $p$ の関係について調べた。すなわち、試料は、Fig. 17の●や●と同じであり、圧密の履歴は●と同じである。

Fig. 18(a)は、くり返し試験により得られた応力-ひずみ関係、(b)は有効応力径路を表わしている。いずれも、複雑さを避けるために、除荷部分のみプロットしている。さらに、Fig. 19は、Fig. 18(a)に示した除荷直線の勾配と、除荷時の平均応力 $p_R$ との関係を示したものである。除荷の回数1~9に対応して

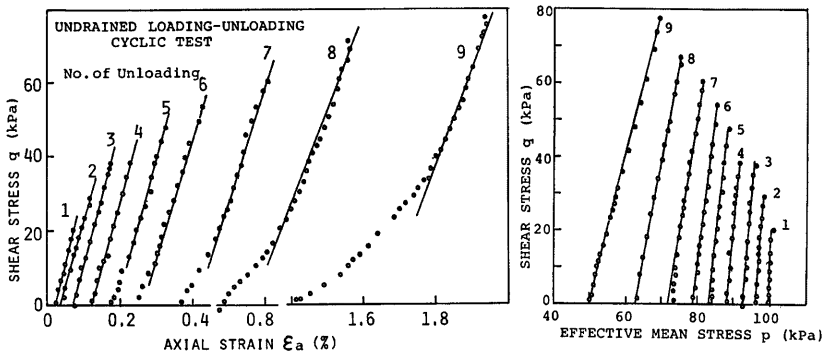


Fig. 18. Results of a repeated loading test in triaxial compression;

- (a) Stress  $q$ -strain  $\epsilon$  relation during unloading stages.  
 (b) Effective stress paths during unloading stages.

$G$ は減少しており、さらにその減少の仕方は、Fig. 17における同一試料の $G$ と $p$ の関係と同じになっている。連続的にせん断の履歴を与えても、除荷過程をはさんでせん断の履歴をはさんでも、とにかく $p$ が減少すれば $G$ は減少し、その減少の仕方は、 $p$ を減少させる方法に拘らず一義的であることがわかる。

## 6. 結 語

粘性土にせん断応力を与え、それを取り除いたときに、弾性的挙動が顕著に現われることを実験的に確かめ、応力面上で定義した弾性領域の大きさ、せん断弾性定数と与えるせん断応力履歴の効果について考察した。得られた主な結論を列挙する。

- 1) 除荷をして $q \sim \epsilon$ 関係が直線的である間は、ダイレタンシーの発生は無い、または無視できるほど小さ

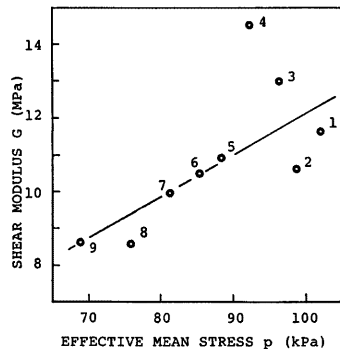


Fig. 19. Variation of  $G$  with effective mean stress  $p$  from repeated loading test.

い。したがって、 $q \sim \epsilon$  関係が直線である部分を弾性領域と定めることができる。

2) 除荷開始点の応力比  $\eta_R$  と弾性限界応力比  $\eta_{R_e}$  との関数  $\theta$  (式(3)) で弾性領域の大きさを評価し、除荷以前に与えたせん断履歴を除荷開始点のせん断ひずみ  $\epsilon_R$  で評価した場合、 $\theta$  と  $\epsilon_R$  との間には、排水条件(排水か非排水か)や、圧密履歴(正規か過圧密か)を問わず、ほぼ一義的な関係が見られた (Fig. 11)。

3) 正規圧密状態から  $p$  一定で排水、または側圧一定で非排水せん断したときの、 $(p, q, w)$  空間における状態径路は状態境界面を構成するが、状態境界面上でせん断履歴を与えて除荷した場合には、圧密圧力や排水条件に拘らず、 $(p, q, w)$  空間にある固有の弾性領域が形成される (Fig. 14)。

4)  $q \sim \epsilon$  関係の直線部分の勾配からせん断弾性定数  $G$  を決定し、それに対するせん断履歴の影響を調べた結果、 $G$  は、平均応力  $p$  が変化しないような履歴を与えた場合には履歴に影響されないが、 $p$  が変化するような履歴(非排水せん断履歴)に対しては、 $p$  が減少するにつれて  $G$  も減少することがわかった。さらに  $G$  と  $p$  の関係は、土が同じであれば、圧密圧力に拘らず一本の直線で表わされる (Fig. 17, 19)。

さて、本論文で用いた方法から決定されるせん断弾性定数が、一般に行われている動的試験<sup>12)</sup>から決定された値と、どのような関係にあるかという点は非常に興味深い、今後の課題としたい。

#### 謝 辞

末筆ではありますが、御指導を賜った本研究所柴田徹教授、同足立紀尚助教授に心より謝意を表します。また、実験に際しては、清水博樹技官に非常にお世話になったことを記し、感謝する次第です。

#### 参 考 文 献

- 1) Hill, R. : The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford Univ. Press, 1950
- 2) Prévost, J.-H. : Mathematical Modelling of Monotonic and Cyclic Undrained Clay Behaviour, Int J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 1, 1977, pp. 195-216.
- 3) Mróz, Z et al. : An Anisotropic Hardening Model for Soils and its Application to Cyclic Loading, Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 2, 1978, pp. 203-221.
- 4) 清水正喜：粘性土の三軸伸張および等方圧縮挙動に対するせん断履歴の影響、京大防災研究所年報、第23号B-2, 昭55. 4, pp. 73-86.
- 5) 今里悦二：飽和粘性土の変形特性に及ぼすせん断履歴の影響、京大工学部卒業研究論文、昭55. 3
- 6) 三村 衛：除荷による粘性土の挙動に関する研究、京大工学部卒業研究論文、昭56. 3
- 7) Fund, Y. G. : Foundations of Solid Mechanics, Prentice Hall. Inc., 1965
- 8) 柴田 徹：粘土のダイラタンシーについて、京大防災研究所年報第6号、昭38. 4, pp. 128-134.
- 9) 軽部大蔵、栗原則夫：繰り返し粘土のダイラタンシーとせん断強度について、土木学会論文集、第135号、昭41, pp. 16-24
- 10) Wroth, P. and Schofield, A. N. : Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, 1968
- 11) Roscoe, K. H. and Burland J. B. : On the Generalized Stress-Strain Behaviour of 'Wet' Clay, Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, 1968, pp. 539-609
- 12) 石原研而：土質力学の基礎、鹿島出版会、昭51

#### 付録1. 間隙水圧応答に対するフラッシングの効果

非排水試験において最も重要なことは、試料の飽和度を高めて、正しい間隙水圧を測定することである。試料自体の飽和度が高くても、それを三軸セル内にセットしたとき系内の飽和度が十分に高いという補償はない。供試体にゴムスリーブを被せる際に、供試体とゴムスリーブの間に入った空気は、その大部分が、第1段階の圧密により排水した水と共に系外へ出るが、一部はポーラスストーン内や系内の排水径路中に残っていることが予想されるからである。このような気泡を取り除くためには、フラッシングをしなければならない。フラッシング水の圧力を変えて、間隙水圧応答特性に対するフラッシング水の圧力の効果を調べた。Fig. A1 にその結果を示す。図中、Test a は 9.8kPa の被圧水を用いた場合、Test b は 19.6kPa の被圧水を用いた場合である。各々の場合の曲線(1)は、バックプレジチャーを作用させない第1段階の圧密終了後

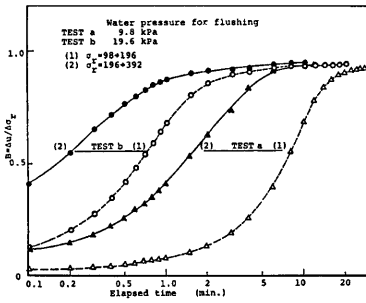


Fig. A. 1. Effects of the use of pressure water for flushing on time dependent behaviour of pore water pressure response to change in confined pressure.

にフラッシングを行って、非排水状態で圧力を98kPaから392kPaに上げたときの間隙水圧係数Bの時間的変化である。フラッシングに19.6kPaの被圧水を用いた場合 (Test b) の方が、かなり応答が良いことがわかる。曲線②は、バックプレッシャーを作用させた次の段階の圧密 ( $\sigma_v = 392$ ,  $\sigma_B = 196$  kPa) が終了した時点で、 $\sigma_v$  を588kPaに上げたときのB値の変化である。9.8kPaの被圧水を用いてフラッシングした場合 (Test a) には、バックプレッシャーを作用させた圧密を行ってもB値の応答は良くないが、19.6kPaの被圧水を用いた場合には、バックプレッシャーの作用によりさらに間隙水圧の応答が早くなっていることがわかる。この試験の結果から、フラッシングには、19.6kPaの被圧水を用いることにした。尚、フラッシング水の圧力が高すぎると、圧力が急激に下がったときに溶存空気が気泡

として出ることが予想されるが、少なくとも19.6kPa程度の被圧水では、その問題はないと思われる。