

# 粘土の応力ヒズミ関係について

柴田 徹・軽部大蔵

## STRESS-STRAIN RELATIONSHIP OF THE NORMALLY CONSOLIDATED CLAY

By Toru SHIBATA and Daizo KARUBE

### Synopsis

The results of experimental study of deformations, pore-water pressures and shear strengths of normally consolidated clay in  $\sigma_2 = \sigma_3$ -plane are presented.

Axial strain controlled and stress controlled triaxial compression and extension tests and stress relaxation tests of remolded and reconsolidated clay were performed in the undrained condition. During the shearing tests, applied stress were controlled so that radial stress, axial stress or the mean value of the three principal stresses may be kept constant. The failure strain of the clay is almost same value in the all tests, i.e. about 10% of axial strain, and strength of the clay is expected by the Mohr-Coulomb theory. The pore-water pressure induced by the dilatancy is a function of the magnitude of the octahedral shear stress, and is not affected by its direction.

### 1. ま え が き

この報告は正規粘土に作用する応力～せん断ヒズミ～体積ヒズミの関係を最も簡単な形でとらえようとする一連の試験の中間報告である。

飽和土中の有効応力が、 $\Delta\sigma_1'$ ,  $\Delta\sigma_2'$ ,  $\Delta\sigma_3'$  だけ変化したときに起る土の体積ヒズミ ( $\Delta V/V$ ) は一般に次式であらわされるであろう。

$$(\Delta V/V) = C \cdot \Delta\sigma_m' + d \quad \dots\dots\dots(1a)$$

ここに  $C$ : 圧縮係数,  $\Delta\sigma_m' = (1/3) \cdot (\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_2' + \Delta\sigma_3')$ : 平均有効主応力の変化量,  $d$ : ダイランシー (第1項であらわしきれない部分) である。この土を非排水状態として、体積ヒズミを許さない場合には、Eq. 1a において  $(\Delta V/V) = 0$ , また  $\sigma' = \sigma - u$  ( $u$  は間ゲキ水圧) であるから次式が得られる。

$$\Delta u = \Delta\sigma_m + (1/C)d \quad \dots\dots\dots(1b)$$

Henkel<sup>1)</sup> は Eqs. 1a, 1bの項  $d$  を次のように与えた

$$d = D \cdot \tau_{\text{oct}}$$

ここに  $D$ : ダイランシー係数,  $\tau_{\text{oct}} = (1/3) \cdot \sqrt{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)^2 + (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_1)^2}$ ; 八面体せん断応力である。したがって Eq. 1b は次のように書ける。

$$\Delta u = \Delta\sigma_m + a \cdot \tau_{\text{oct}} \quad \dots\dots\dots(1c)$$

ここに  $a = (D/C)$  である。Eq. 1b, 1c は、土中の応力状態の変化によってひき起される土の体積変化の傾向は非排水試験からも求められることを示している。そこでこの報告では、三軸試験機を用いて非排水試験

を行なった結果から土の体積変化の傾向を調べてみた。

試験に用いた試料は、練返し再圧密飽和粘土で、これを次の応力条件下で、おもに定ヒズミ式で非排水セン断した。

セン断中の応力条件 ( $\sigma_a$ : 軸方向応力,  $\sigma_r$ : 側方応力):

- Case a:  $\sigma_r$  一定,  $\sigma_a$  増加 (軸方向圧縮)
- Case b:  $\sigma_r$  一定,  $\sigma_a$  減少 (軸方向 Extension)
- Case c:  $\sigma_a$  一定,  $\sigma_r$  減少 (軸方向圧縮)
- Case d:  $\sigma_a$  一定,  $\sigma_r$  増加 (軸方向 Extension)
- Case e:  $\sigma_m = (1/3)(\sigma_a + 2\sigma_r)$  一定,  $\sigma_a$  増加,  $\sigma_r$  減少 (軸方向圧縮)
- Case f:  $\sigma_m$  一定,  $\sigma_a$  減少,  $\sigma_r$  増加 (軸方向 Extension)

また比較資料を得るために、少数の定荷重式試験と応力緩和試験を行なった。

## 2. 定ヒズミ式非排水セン断試験

### 2.1 試料と試験法

試料は大阪沖積層粘土を練返し、荷重  $0.5\text{kg/cm}^2$  で再圧密した飽和粘土であって、その物性は、L.L.77.5%, P.L.40.5%, 粘土含有量44%の粘土である。供試体の寸法は高さ 8cm 直径の 3.5cm 円柱形であって、これにスパイラル型のペーパードレインをとりつけ、約24時間圧密後、 $1\text{kg/cm}^2$  の back pressure を与えた。セン断の速さは軸方向ヒズミで  $0.02\%/min$  とし、セン断の間ゲキ水圧は試料底面で測定した。セン断中には、1の Case a~f に示した応力条件を満足させるために側圧を調節した。

### 2.2 試験結果

#### 2.2.1 軸方向ヒズミ~応力および強度

セン断中の側圧  $\sigma_r$  を一定に保った試験 (Case a, b) を圧密圧力  $\sigma_c = 1, 2, 3, 4 \text{ kg/cm}^2$  について行なった。試験から得られたヒズミ~応力関係の一例を Fig. 1 に示す。圧密圧力  $\sigma_c$  が軸方向ヒズミ  $\epsilon_a$  ~主応力差  $(\sigma_a - \sigma_r)$  ~間ゲキ水圧  $u$  の関係におよぼす影響は、応力~ヒズミ図において応力軸を  $\sigma_c$  で割った値にとれば  $\sigma_c$  に関係なくすべての試験結果がほぼ同一の曲線であらわせることから、任意の軸方向ヒズミ  $\epsilon_a$  における  $(\sigma_a - \sigma_r)$  および  $u$  は各 Case ごとに

$$(\sigma_a - \sigma_r) = \sigma_c \cdot f_\sigma(\epsilon_a) \dots\dots\dots (2a)$$

$$u = \sigma_c \cdot f_u(\epsilon_a) \dots\dots\dots (2b)$$

の形であらわされることが容易にわかる。ただし、 $f_\sigma$  および  $f_u$  は  $\epsilon_a$  の関数をあらわす。

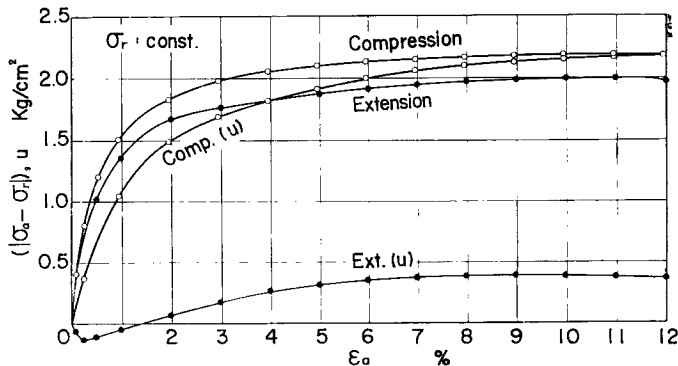


Fig. 1. Stress-strain-pore-water pressure relationship in the strain controlled tests. ( $\sigma_r$ : const.)

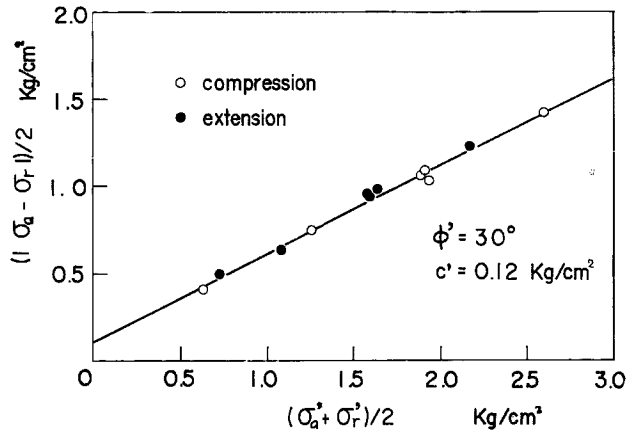


Fig. 2. Shear strength characteristic of clay.

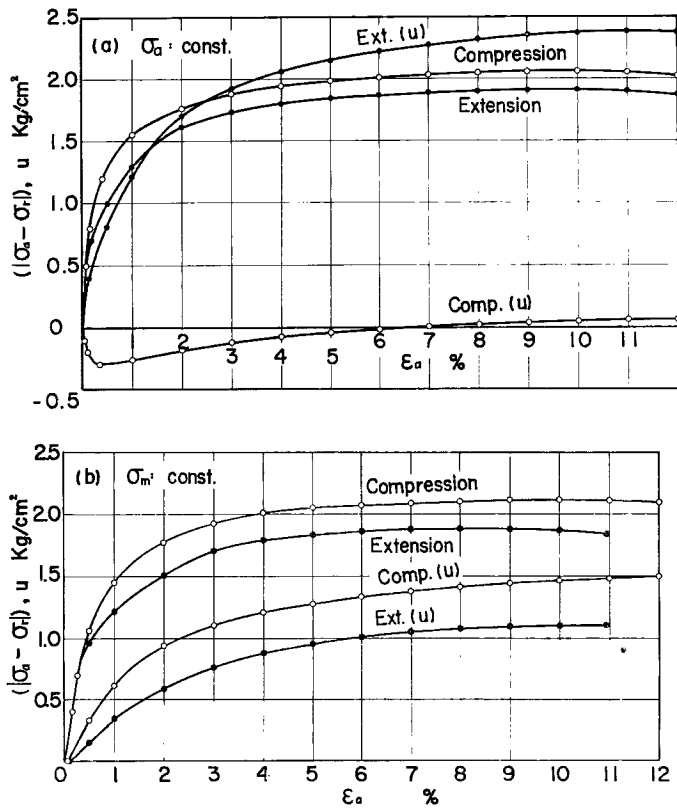


Fig. 3. Stress-strain-pore-water pressure relationship in the strain controlled tests. a.  $\sigma_a$  : const, b.  $\sigma_m$  : const.

破壊を主応力差の最大値  $|\sigma_a - \sigma_r|_{\max}$  で定義すると、Case a, b ともに  $\epsilon_a \approx 10\%$  程度ですべての試料が破壊しているようである。このときの応力をモールの応力図に対応する  $(|\sigma_a - \sigma_r|)/2 \sim (\sigma'_a + \sigma'_r)/2$  関係にプロットすると Fig. 2 のように Case a, b ともに同一の直線 ( $\phi = 30^\circ$ ,  $c' = 0.12 \text{ kg/cm}^2$ ) にのって、 $\tau_{\text{oct}}$  の方向がたがいに逆の場合でも(すなわち圧縮側と Extension 側の両側で)モール・クローンの破壊理論は満足されていることがわかる。

上述の Case a, b の試験結果から、他の Case についてもそれぞれ同一 Case 内では圧密圧力が応力～ヒズミ関係に与える影響は Eq. 2 と同様であると予想されるから、これらの Case については  $\sigma_c = 3 \text{ kg/cm}^2$  のものに限って試験を行なった。Figs. 3 a, b はそれらの試験結果をあらわしているが、図からわかるように、破壊ヒズミはやはり  $\epsilon_a = 10\%$  程度であり、 $\tau_{\text{oct}}$  の方向がたがいに逆の場合でもモール・クローンの破壊理論は満足されている。

### 2.2.2 セン断中の有効応力径路

Case a, b ( $\sigma_r : \text{const.}$ ) の試験においては Eq. 2 が成立しているから、セン断中の有効応力径路をレンドリックの応力図であらわせば、それぞれの Case について相似比が  $\sigma_c$  であるような径路が得られることは明らかである。Fig. 4 は  $\sigma_c = 3 \text{ kg/cm}^2$  の場合の各 Case の有効応力径路をレンドリックの応力図であらわしたものである。図からわかるように、各 Case の応力径路は圧縮側と Extension 側でそれぞれ1つの曲線で代表される傾向がある。

### 2.2.3 間ゲキ水圧特性(ダイレタンシー)

Eq. 1b からわかるように、セン断中の供試体中に発生する間ゲキ水圧  $du$  と、供試体に作用する主応力の変化量の平均値  $d\sigma_m$  との差  $(du - d\sigma_m)$  は、ダイレタンシーと呼ばれる体積変化の傾向に関連する量である。いまダイレタンシーがセン断中の供試体がおかれているどの条件によって支配されているかを調べるために、 $\sigma_c = 3 \text{ kg/cm}^2$  の各 Case の試験結果から得た  $(du - d\sigma_m)$  の値をまず軸方向ヒズミに対してプロットしてみると Fig. 5 のようになって、圧縮側と Extension 側でちがった曲線を与える。次に Henkel の式、Eq. 1c の関係にプロットしてみると Fig. 6 のようになって、セン断の終期にはすべての Case が大体1つの  $(du - d\sigma_m) \sim a\tau_{\text{oct}}$  曲線にまとめられることがわかる。これらの図、およびセン断中の応力条件が  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  の場合の柴田・軽部<sup>2)</sup>の結果から類推すると、ダイレタンシーはセン断ヒズミよりもセン断応力に深い関連を持ち、しかもこれは少なくともセン断の終期には  $\tau_{\text{oct}}$  の大きさのみによって定まるものであり、 $\tau_{\text{oct}}$  の方向には無関係であることがわかる。また Extension 試験の破壊時の  $\tau_{\text{oct}}$  は圧縮試験のそれに比べて小さいが、この破壊時のダイレタンシーさえも他の一般の  $\tau_{\text{oct}}$  に対する点と同様に  $(du - d\sigma_m) \sim a\tau_{\text{oct}}$  線上の点であらわされていることは、ダイレタンシーと破壊とが直接に関係を持たないことを示していると考えられる。さらに、Fig. 6 は“破壊時の  $a$  の値  $a_f$  は Extension 側の方が圧縮側より少し小さい”という Henkel<sup>1)</sup>の結果を説明するものであろう。

## 3. 定荷重式非排水セン断および応力緩和試験

定ヒズミ式セン断の結果と比較し、また応力～ヒズミ関係をさらに詳しく調べるために  $\sigma_c = 3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma_r = \text{const.}$  (Case a, b) の定荷重式セン断試験(1段階の応力増分:  $0.2 \text{ kg/cm}^2$ , 载荷時間: 30分～1時間)と応力緩和試験(1段階のヒズミ増分:  $0.5 \sim 1\%$ , 载荷時間: 15分～30分)を行なった。いずれの試験でも  $\epsilon_a = 12\%$  程度までヒズませるに要する時間は2. の定ヒズミ試験と大体同一である。試験結果を、各载荷段階ごとの経過時間をパラメータとして、軸方向ヒズミ  $\epsilon_a \sim$  主応力差  $(|\sigma_a - \sigma_r|)$  または間ゲキ水圧  $u$  の関係に整理すると Figs. 7, 8 のようになる。試験結果の特異な傾向として、圧縮側の両試験では間ゲキ水圧は経過時間とは無関係に軸方向ヒズミのみによってきまるのに反し、Extension 側では経過時間に大きく影響されていることがわかるが、この現象は粘土の力学的特性の本質ではなく、三軸試験機を用いて、しかも間ゲキ水圧を試料底面で測定したために起る誤差が圧縮側では時間的にうまく相殺し、Extension では助成

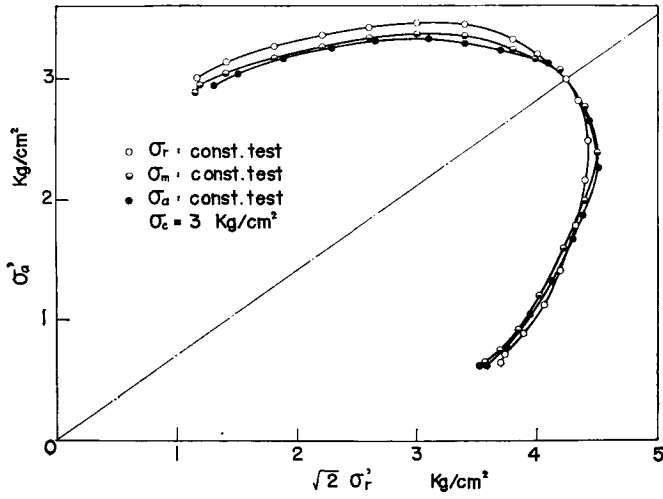


Fig. 4. Effective stress paths in the strain controlled tests.

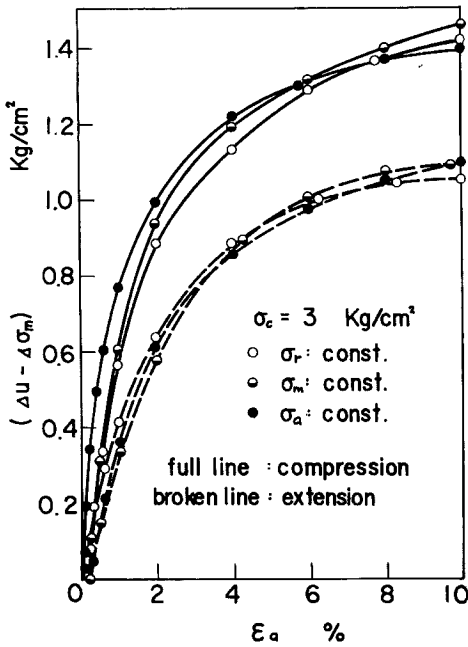


Fig. 5. Pore-water pressure induced by dilatancy-axial strain relationship.

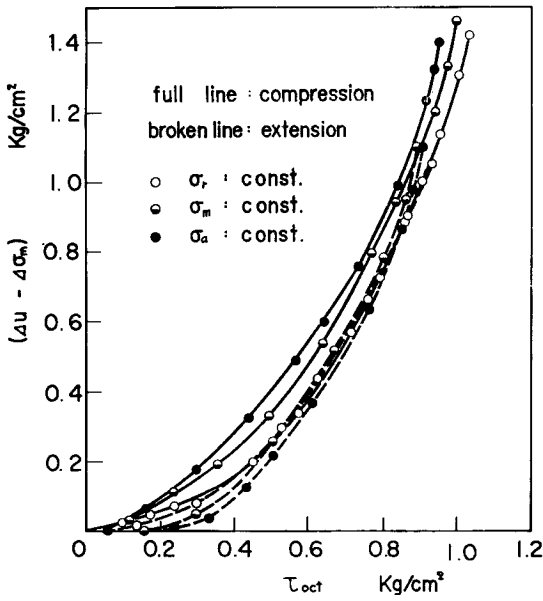


Fig. 6. Pore-water pressure induced by dilatancy-octahedral stress relationship.

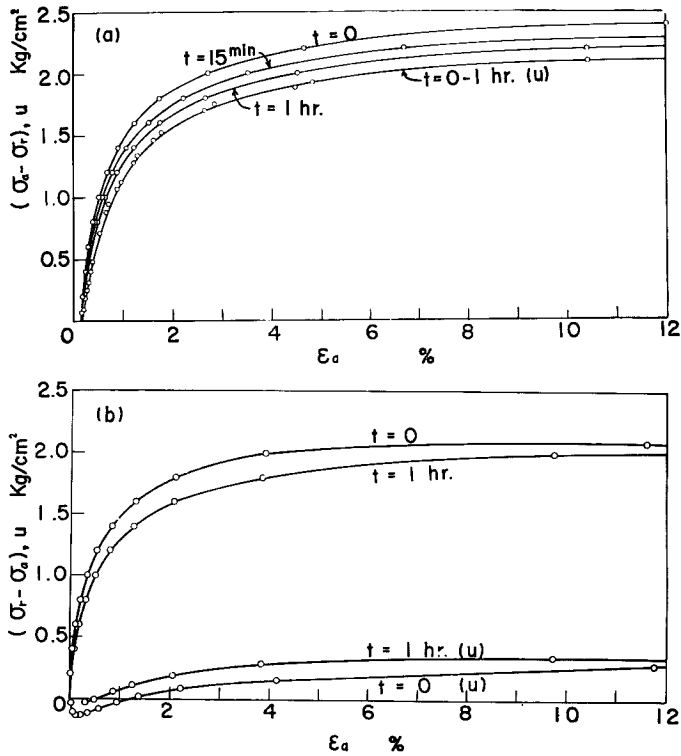


Fig. 7. Stress-strain-pore-water pressure relationship in the stress controlled tests ( $\sigma_r$ : const.), a. compression, b. extension.

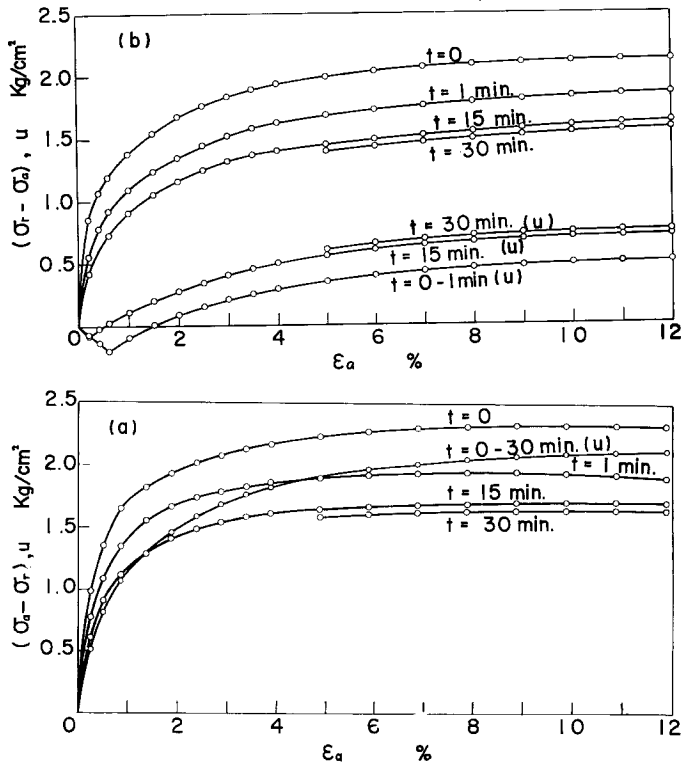


Fig. 8. Stress-strain-pore-water pressure relationship in the stress relaxation tests ( $\sigma_r$ : const.), a. compression, b. extension.

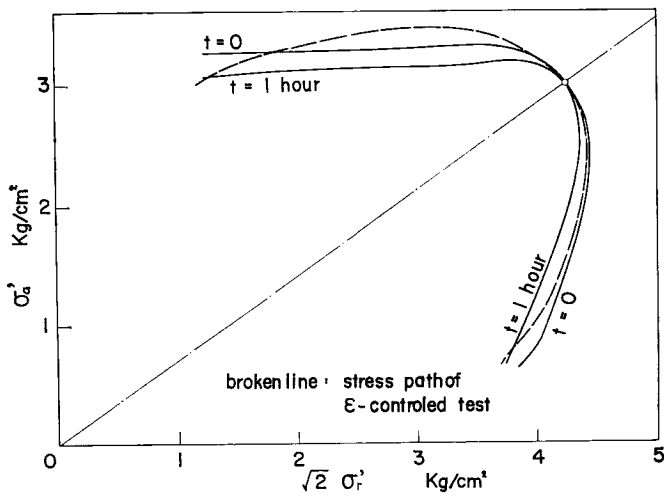


Fig. 9. Effective stress paths in the stress controlled tests.

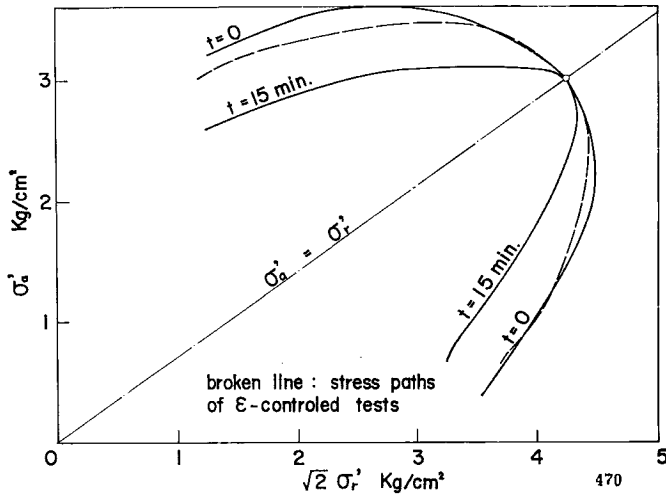


Fig. 10. Effective stress paths in the stress relaxation tests.

し合った結果と考えられる。この誤差は定ヒズミ試験でも起っていると考えられるから、2で求めた Extension 試験の有効応力径路はセン断の初期の部分にかなりの誤差が含まれており、実際はこの部分でもっと大きいダイレタンシーが起っているのであろう。

試験結果から、載荷段階ごとの経過時間をパラメータとした測定上の有効応力径路を求めると Figs. 9, 10 のようになる。図中の破線は定ヒズミ試験の結果である。間ゲキ水圧の測定値の時間的なズレなどを考慮すると、以上の試験結果から直ちにダイレタンシーが、セン断ヒズミやセン断応力にどのように支配されているかを判断することは困難である。

#### 4. 結 び

正規粘土の応力～セン断ヒズミ～体積ヒズミの関係を非排水試験によって調べようとしているが、従来の三軸試験機を用いる以上、かなりの誤差が入ることはまぬがれない。さらに現在までの試験数が十分でないことも相まって、信頼するに足る結果は得られていないが、中間報告的な結論を列挙すれば次のようである。

a. 正規粘土の定ヒズミ式圧密非排水試験から得られる応力～ヒズミ関係に及ぼす圧密圧力  $\sigma_c$  の影響は、応力の加え方が同じであれば（同一 Case 内では）、ほぼ次の関係であらわすことができる。

$$(\sigma_a - \sigma_r) = \sigma_c f_\sigma(\epsilon_a)$$

また

$$u = \sigma_c f_u(\epsilon_a)$$

ここに  $f(\epsilon_a)$  は  $\epsilon_a$  の関数である。

b. すべての Case の試験において、最大主応力差で定義した破壊ヒズミは、圧密圧力にかかわらず軸方向ヒズミであらわして  $\epsilon_a \approx 10\%$  であり、その強度は共通のモールの破壊包絡線であらわされる。

c. 圧密圧力  $\sigma_c$  が同じならば、すべての Case のセン断中の有効応力径路は、圧縮側と Extension 側でそれぞれ1つの径路であらわされる傾向がある。 $\sigma_c$  がことなれば、Case a, b からわかるように、相似比が  $\sigma_c$  であるような径路をとる。

d. ダイレタンシーは粘土に作用する八面体セン断応力の大きさによってきまり、その方向には無関係である。また破壊とダイレタンシーは直接には結びつかない。



今後は定荷重式試験や応力緩和試験，繰返し載荷などを多数行ない，応力～ヒズミ関係をさらに詳しく調べる予定である。

末筆ではあるが，この試験の協同者である京都大学工学部土木工学科4回生栗原則夫君に感謝する。

#### 参 考 文 献

- 1) Henkel, D.J.: "The shear strength of saturated remoulded clays" Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, sponsored by A.S.C.E., 1960, pp. 533-554.
- 2) 柴田徹・軽部大蔵  
"複合応力状態における土の挙動について" 京都大学防災研究所年報，第7号1964，pp. 1-9.