

# 練り返し粘土の平面変形条件について\*

## PLANE STRAIN TESTS ON REMOLDED CLAY

軽部 大蔵\*\*・原田 柁四郎\*\*\*  
By Daizo Karube and Seishiro Harada

### 1. ま え が き

堤体やトンネルのように長い構造物の周辺の地盤は長軸方向の変位が許されないために平面変形状態を呈し、それにともなって土塊に作用する三つの主応力が相異なった状態 ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) にあると考えられる。ところがこれらの構造物の設計にあたって必要となる土の強度定数はしばしば一軸または三軸試験など軸対称応力状態の試験から求められる。

もし土の破壊条件がモール・クーロンの破壊応力条件で仮定されているような土塊内の仮想平面上のすべりの条件で済むのであれば、破壊面は必然的に中間主応力方向に平行となるため中間主応力は破壊に影響しなくなり、破壊は有効最大主応力と有効最小主応力のみで済み、したがって土構造物の設計には土塊の幾何的な変形条件を考慮しなくてよいことになる。

軸対称応力条件における粘性土の破壊応力条件に中間主応力  $\sigma_2'$  が入ってこないことはすでに多くの実験結果から明らかである (たとえば Henkel<sup>1)</sup>, 軽部, 栗原<sup>2)</sup>)。すなわち三軸圧縮条件 ( $\sigma_1' > \sigma_2' = \sigma_3'$ ) と三軸 Extension 条件 ( $\sigma_1' = \sigma_2' > \sigma_3'$ ) における練り返し粘土のモール・クーロンの破壊包絡線は事実上同一となる。中間主応力が最大主応力と最小主応力の中間にある条件 ( $\sigma_1' > \sigma_2' > \sigma_3'$ ) での粘性土の破壊条件についても 2, 3 の研究がなされている。Wu<sup>3)</sup> らは練り返し粘土の中空円筒供試体に相異なる内外圧力および長軸方向圧力を加えて  $\sigma_1' > \sigma_2' > \sigma_3'$ -条件を作り出し、その結果、Hvorslev の強度定数を用いると中間主応力は破壊に影響しないという結論を得た。柴田・軽部<sup>4)</sup> は練り返し粘土の直方体供試体の 3 組の側面に相異なる主応力を作用させ、この破壊応力条件が、 $\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3'$ -直交座標空間内ではモール・クーロンの破壊 6 角すいに外接するすい面であるとの結論を得た。Henkel and Wade<sup>5)</sup> は練り返し粘土の直方体供試体を平面変形条件のもとで破壊させ、有効応力にもとづく内部摩擦角  $\phi'$  が 8% だけ軸対称応力供試体より大きいという結論を得た。ここで問題となるのは、平面変

形試験の供試体が高さ 10 cm, 幅 15 cm, 厚さ 5 cm の直方体であるのに対し、軸対称試験は「普通の三軸試験装置」によって行なわれたとあるところから高さ 8 cm, 直径 3.5 cm の円柱形と推測されることである。寸法効果が試験結果に影響している可能性があると思われる。

砂についても  $\sigma_1' > \sigma_2' > \sigma_3'$ -条件下の圧縮試験が 2, 3 行なわれているが、Bishop<sup>6)</sup> は Cornforth<sup>7)</sup> の平面変形試験の結果などから砂の破壊応力条件として次式を提案している。

$$\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} = \frac{K_1}{1 - K_2 \sqrt{b(1-b)}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに  $b = (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$ ,  $K_1, K_2$  は定数で  $b=1$  または  $b=0$  のとき  $K_1 = \sin \phi'$  となる。また  $b=0.5$  のとき右辺は最大となる。赤井・森・小葉竹<sup>8)</sup> は砂岩の立方体供試体を  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ -条件下で圧縮試験し、式 (1) の係数を求めた。ただし試験の性質上全応力表示が用いられている。

上に引用したすべての試験結果は、土の破壊が基本的にはモール・クーロン系の応力条件にしたがうこと、すなわち土はすべりによって破壊することを証明している。 $\sigma_1' > \sigma_2' > \sigma_3'$ -条件の場合に軸対称応力条件の場合より大きい強度が得られる原因は、多分土塊内に発生するすべり面の方向または個々の土粒子の移動の方向が  $\sigma_2'$  によって制約されるためであろう。土粒子の移動方向が、全体的に見て  $\sigma_2'$  方向への変位成分を持たないように限定された変形条件が平面変形条件である。したがって土塊のせん断抵抗角はこのとき最大値を示すものと考えられる。ところで、土塊が等方性でせん断中の弾性率が一定で、しかも非圧縮性ならば、平面変形を起こす応力条件は式 (9) より、

$$\frac{\sigma_2' - \sigma_3'}{\sigma_1' - \sigma_3'} = \frac{1}{2} \dots \dots \dots (2)$$

と与えられるが、現実の土の平面変形条件に対応する応力条件は式 (2) とはことなっているであろう。この見地からすれば、Bishop の破壊応力条件式 (1) は理論的根拠が薄弱である。

この論文の前半は平面変形条件および軸対称応力条件における粘土のせん断試験の結果をのべており、後半は  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ -条件下のクリープ試験の結果をのべ、これら

\* 概要は土木学会第 22 回年次学術講演会 (昭.42.5) で発表した。

\*\* 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

\*\*\* 正会員 名古屋市役所

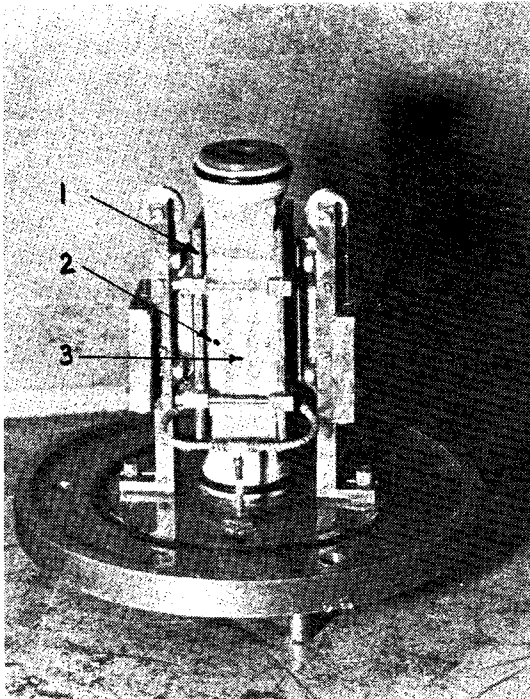
を通じて粘土のせん断機構を探ろうとするものである。

## 2. 試験装置

土のせん断試験装置に望ましい最小限度の性能は、土供試体に均等な有効応力またはひずみを与えること、およびその有効応力とひずみが測定できることである。 $\sigma_1' > \sigma_2' > \sigma_3'$ -条件下で土をせん断する装置は従来いろいろと考案されているが、上の性能を持つものは少ない。一面せん断試験機やペーン試験機は供試体のせん断機構が不明である。また Habib<sup>9)</sup> の用いたねじり試験機や Kirkpatrick<sup>10)</sup>, Wu ら<sup>3)</sup> の用いた中空円筒供試体は供試体内の応力分布が一様でない。Cornforth<sup>7)</sup> や Henkel and Wade<sup>8)</sup> の用いた装置は平面変形試験だけを対象とすれば現在のところ最も理想に近いが、やはり側方変位を拘束している平板と供試体の摩擦が、たとえ平均値としては小さいとしても応力-ひずみ関係に微妙に影響しているであろう。赤井・森・小葉竹の用いた試験機は立方体供試体の各面を剛な加圧板で圧縮するものであるから、粘土の試験に要求される大きい変位を与えることや、小さい力の測定は困難である。

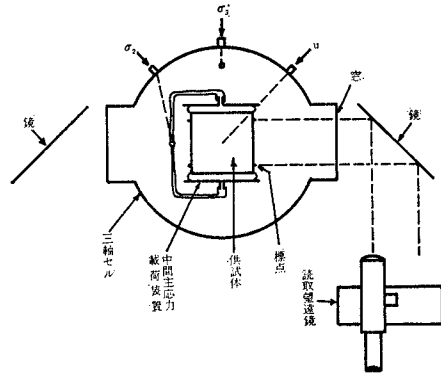
筆者らが用いた装置の概略はつぎのようである。使用する供試体の寸法は高さ 7 cm, 断面が 2.8×2.8 cm の正方形の 4 角柱である。試験装置は普通の NGI 型三軸試験機一式と、中間主応力載荷装置、窓付き三軸セル、読取望遠鏡から成っている。写真一1 は試験終了後窓付きセルをとりはずしたところであり、図一1 は装置主要

写真一1 実験装置の主要部



1. 中間主応力載荷装置 2. 標点 3. 供試体

図一1 装置主要部の平面略図



部の平面略図である。供試体は窓付きセル内に中間主応力載荷装置とともに納められており、最大主応力  $\sigma_1$  と最小主応力  $\sigma_3$  は通常の三軸試験機と全く同様の方法で与えられる。中間主応力  $\sigma_2$  は、中間主応力載荷装置に送りこまれる水圧によって供試体の 1 組の側面に与えられ、供試体のこの方向の変位は、供試体の側面につけた標点をセルの窓を通じて読取望遠鏡で観測することにより求められる。中間主応力載荷装置については、文献 11) で述べているのでここでは省略する。この装置の長所は、 $\sigma_2$  が作用している供試体側面に摩擦力の分布がないことであって、短所は  $\sigma_2$  方向の変位の測定精度が約 20 mm のゲージレンジスに対し 3/100 mm 程度となっていることである。なお、供試体内の間げき水圧は電氣的に自動記録させている。

## 3. 試料

大阪ちゅう積層粘土を含水比 200% 以上の状態で完全に練り返し、試料作成用の大型圧密容器内の圧力 0.5 kg/cm<sup>2</sup> で再圧密したものであって、物性は  $LL=64.4\%$ ,  $PL=27.4\%$ , 粘土含有量は 30.0% である。

## 4. 平面変形および軸対称圧縮試験

### (1) 試験方法

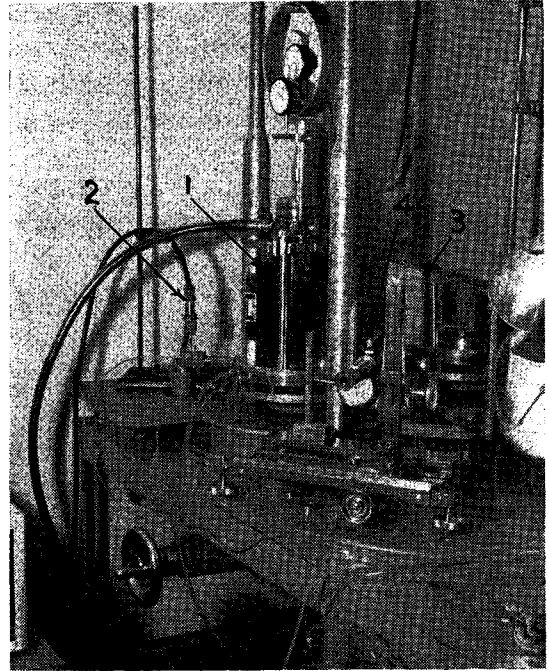
試験はすべて圧密非排水試験であって、試験条件は表一1 に示すようである。「圧密条件」の欄に  $K_1$ -圧密とあるのは等方圧力のもとで圧密されたことを示し、 $\sigma_c$  はその圧力である。また  $K_0$ -圧密は圧密中の長軸方向の圧力  $\sigma_{1c}$  を一定に保ち、側方圧力  $\sigma_{2c} = \sigma_{3c}$  は供試体の側方変位が起こらないように調節する圧密であって、表中の  $\sigma_{3c}$  は圧密終了時の値を示している。試験名は、その第 1 および第 2 文字が圧密条件をあらわし、第 3 文字として  $P$  がついているものはせん断条件が平面変形であることを示し、これがないものは軸対称条件 ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) であることを示している。

所定の寸法に成形された供試体は、4 側面にろ紙がつ

表-1 試験条件

試験名	圧密条件	せん断条件
$K_1-1P$	$K_1$ -圧密 $\sigma_c = 1 \text{ kg/cm}^2$	$\epsilon_2 = 0$
$K_1-2P$	$K_1$ -圧密 $\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$	$\epsilon_2 = 0$
$K_1-2(0.4)$	$K_1$ -圧密 $\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$	$\epsilon_1 = 3.5\%$ まで ( $\sigma_2 - \sigma_3 = 0.4(\sigma_1 - \sigma_3)$ ) $\epsilon_2 = 0$
$K_0-2PA$	$K_0$ -圧密 $\sigma_{1c} = 2, \sigma_{3c} = 1 \text{ kg/cm}^2$	$\epsilon_2 = 0$
$K_0-2PB$	$K_0$ -圧密 $\sigma_{1c} = 2, \sigma_{3c} = 0.9 \text{ kg/cm}^2$	$\epsilon_2 = 0$
$K_1-1$	$K_1$ -圧密 $\sigma_c = 1 \text{ kg/cm}^2$	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$
$K_1-2$	$K_1$ -圧密 $\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$	上に同じ
$K_1-3$	$K_1$ -圧密 $\sigma_c = 3 \text{ kg/cm}^2$	上に同じ
$K_0-1$	$K_0$ -圧密 $\sigma_{1c} = 1, \sigma_{3c} = 0.5 \text{ kg/cm}^2$	上に同じ
$K_0-2$	$K_0$ -圧密 $\sigma_{1c} = 2, \sigma_{3c} = 1 \text{ kg/cm}^2$	上に同じ

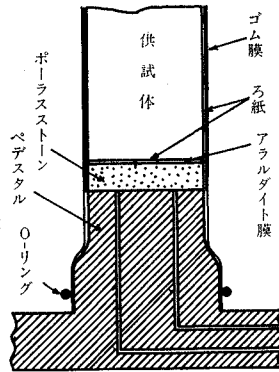
写真-2 せん断装置の配置



1. 窓付き三軸セル 2. 間引き水圧計 3. 鏡 4. 読取望遠鏡

けられ、ポーラスストーンの上におかれる。ポーラスストーンは、その上面を平滑にするために中央部に直径 5 mm の穴をあけたアラルダイトの薄層がつけてあって、ろ紙とポーラスストーンの連結は図-2 に示すようにポーラスストーンの側面で行なわれている。これらゴムスリーブで水密にした後、側圧  $\sigma_3$  を

図-2 供試体の排水経路



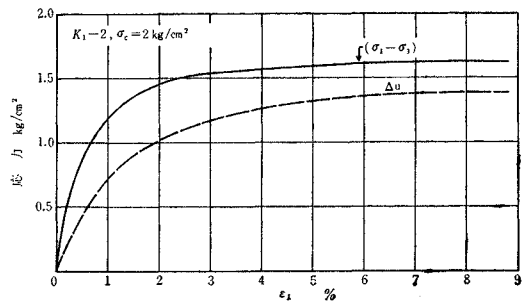
うける 2 側面の中央高さに約 2 cm の水平距離をあけてゴム膜上にマジックインキで 2 個ずつ標点をつける。つぎに写真-1 のように中間主応力装置を組み立て、窓付きセルをかぶせて圧密を行なう。約 24 時間の圧密の後、 $1 \text{ kg/cm}^2$  のバックプレッシャーを 1 時間以上作用させた。せん断は、側圧  $\sigma_3$  を一定に保ち、長軸方向のひずみ速さを  $0.024\%/min$  としてひずみ制御式で行なった。写真-2 はせん断中の装置の配置状況である。平面変形試験では  $\sigma_2 = \sigma_3$  の条件でせん断を開始し、たえず標点間の距離 ( $\sigma_2$  方向の変位) を測定して変化が起こればただちに中間主応力装置を働かせてつねに  $\sigma_2$  方向の変位が起こらないようにした。しかし、実際には距離の測定の精度がよくないために、かなりの変位を起こしてから  $\sigma_2$  を調節するという傾向があった。この影響を除くために、試験  $K_1-1P$  ではそれまでの試験結果からの予測にもつぎ、せん断開始時から ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) =  $0.4(\sigma_1 - \sigma_3)$  になるように  $\sigma_2$  を増加させたところ、 $\sigma_1$  方向のひずみ  $\epsilon_1 = 1.2\%$  までは平面変形状態を保ってせん断が進行したが、 $\epsilon_1 = 1.2\%$  をこえると  $\sigma_2$  方向に圧縮が起こりはじめたのでただちに  $\sigma_2$  の増加を停止させた。試験  $K_1-2(0.4)$  も、図-5 に示すように ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) =  $0.4(\sigma_1 - \sigma_3)$  の応力条件でせん断を開始したが、 $\epsilon_1 = 0.5$

% に達すると  $\sigma_2$  方向に圧縮がはじまった。 $\epsilon_1 = 3.5\%$  以後は  $\sigma_2$  を一定に保ったが、 $\sigma_2$  方向の圧縮は続いた。

(2) せん断強度

図-3~7 はせん断中の応力-ひずみ関係の例である。強度がモール・クローン系の破壊応力条件にしたがうと仮定して、 $\sigma_2'$  方向に平行で  $\sigma_1'$  と  $\sigma_3'$  にそれぞれ  $45^\circ$  の傾きを持つ平面上の有効垂直応力  $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$  とせん断応力  $(\sigma_1' - \sigma_3')/2$  のせん断の進行にともなう推移を求めると図-8 のようである。図中の実線の曲線は軸対称応力条件試験の応力経路の包絡線(ただし試験  $K_0-2$  は除外する)であるが、図からすべての平面変形試験の応力経路が軸対称試験の包絡線より上方までのびており、同じ垂直応力  $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$  に対するせん断応力  $(\sigma_1' - \sigma_3')/2$  は  $K_0$ -圧密供試体で約 9%,  $K_1$ -圧密供試体で約 20% 大きいことがわかる。つぎに Von Mises 系の破壊応力条件を前提として、 $\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3'$  方向に対して

図-3 応力-ひずみ関係



それぞれ等しい角度をなして交わる平面(8面体面)上の有効垂直応力  $\sigma_m'$  とせん断応力  $\tau_{oct}$  の推移を求めると図-9 のようである。図中の実線の曲線は軸対称試験に対する包絡線である。平面変形試験の応力径路が包絡線に達せず、同じ  $\sigma_m'$  に対する  $\tau_{oct}$  は軸対称試験より約 7% 小さいことがわかる。

せん断中の供試体内の有効応力 ( $\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3'$ ) は図-10 のように  $\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3'$  を座標軸とする交直座標空間内の1点  $P(\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3')$  であらわすことができる。この座標空間に各座標軸に対して切片値  $\sqrt{3}$  を持つ 8 面体平面

を考え、座標原点  $O$  と点  $P$  を結ぶ直線がこの平面と交わる点を  $P'$  とする。点  $P$  がせん断の進行にともなって空間内を移動すると点  $P'$  も平面上を移動して1本の径路を描く。図-11 はこの平面上の各試験の径路をまとめたものである。ただし図の右半は繁雑さをさけるた

図-4 応力-ひずみ関係

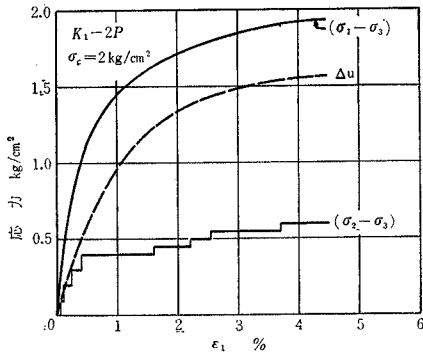


図-5 応力-ひずみ関係

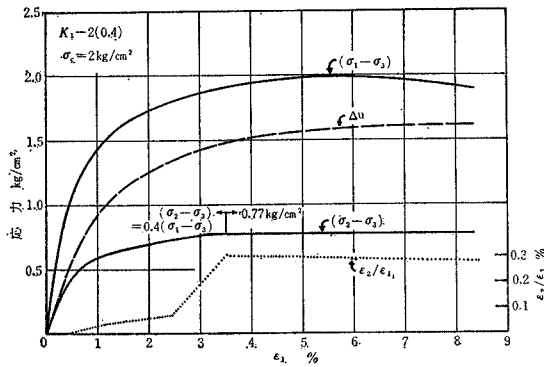


図-6 応力-ひずみ関係

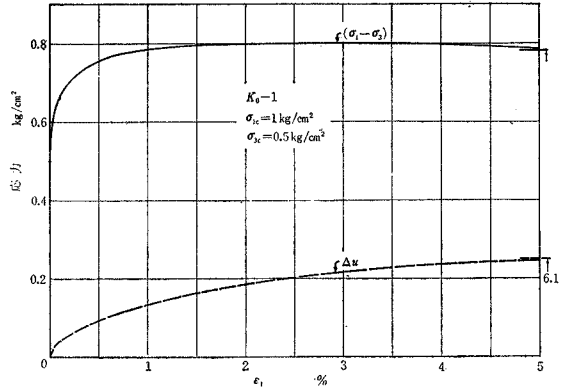


図-7 応力-ひずみ関係

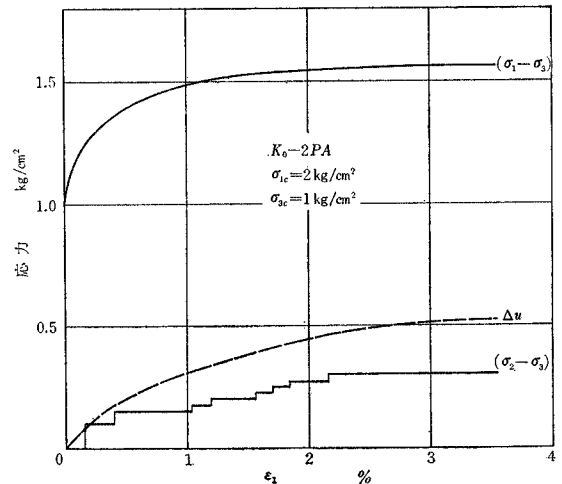


図-8 45° 面上の応力径路

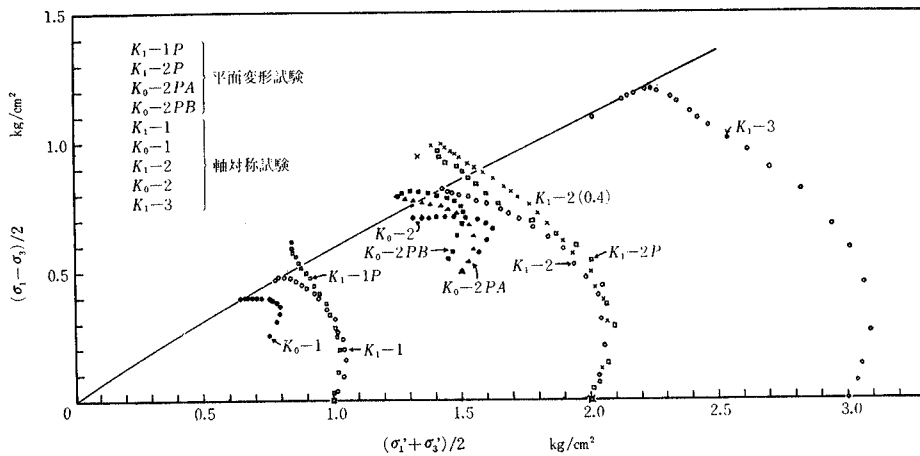


図-9 8面体面上の応力経路

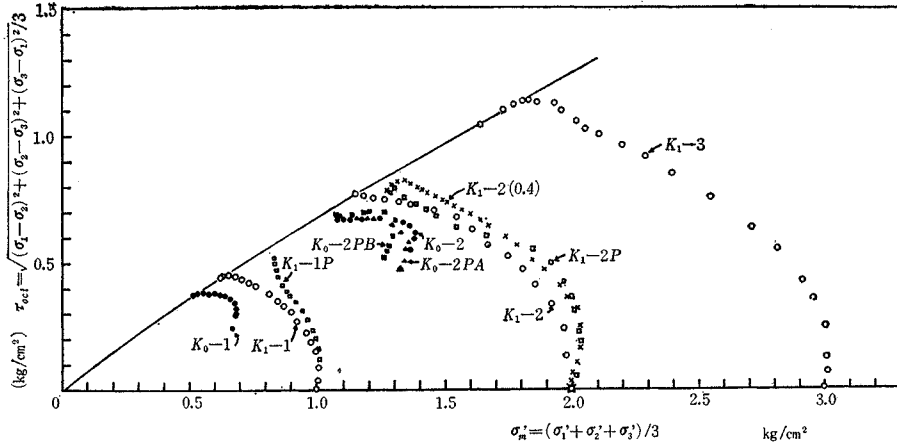


図-10 応力経路の8面体面上への投影

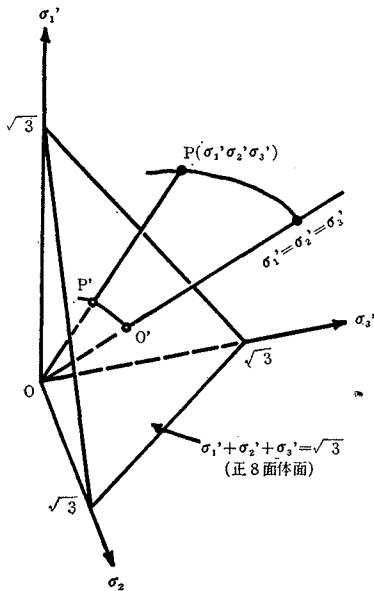
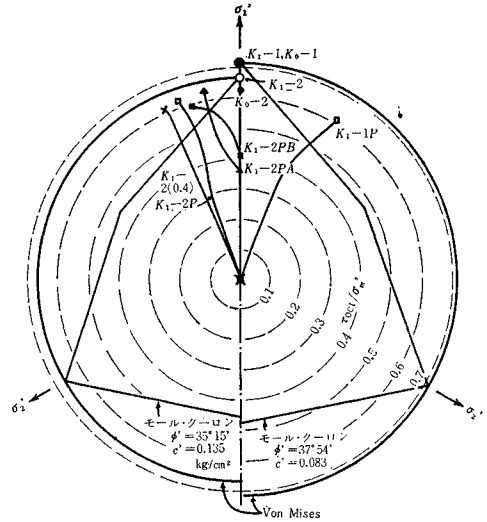


図-11 8面体面上に投影された応力経路



め試験 \$K\_1-1P\$ のみをたて中心線に関して対称に折り返したものである。また図中にモール・クーロンおよび Von Mises として示されている実線は、その左半は \$K\_1-2\$、右半は \$K\_1-1\$ がそれぞれの破壊応力条件に適合すると仮定したときの理論上の破壊包絡面と 8 面体平面の交線をあらわしている。この図から平面変形試験の結果はモール・クーロンと Von Mises の中間の強度を与えることが一層あきらかとなっている。

(3) 応力一ひずみ関係

まえがきにも述べたように粘性土の破壊条件は基本的にすべりの条件であるモール・クーロンの破壊応力条件に合致する。したがって粘性土の応力一ひずみ関係は中間主応力 \$\sigma\_2'\$ に平行な斜面上で論ずるのがよいであろう。この斜面は \$\sigma\_2'\$ に平行であればどの面をとっても一般性は失なわれないので、便宜上 \$\sigma\_1'\$ と \$\sigma\_3'\$ にそれぞれ \$45^\circ\$

の角度をなす平面 (\$45^\circ\$ 平面と呼ぶ) 上で整理を行なう。図-12, 13, 14 の実線は \$45^\circ\$-平面方向のせん断ひずみ \$\gamma\_{45} = (\epsilon\_1 - \epsilon\_3) / 2\$ と \$45^\circ\$ 平面上のせん断応力と有効垂直応力の比 \$(\tau / \sigma\_n')\_{45} = (\sigma\_1' - \sigma\_3') / (\sigma\_1' + \sigma\_3')\$ の関係を示しており、破線は平面変形試験等の \$(\tau / \sigma\_n')\_{45}\$ と軸対称試験の \$(\tau / \sigma\_n')\_{45}\$ の比をあらわしている。軽部・栗原<sup>2)</sup>によれば、2つの軸対称応力条件、\$\sigma\_1' > \sigma\_2' = \sigma\_3'\$ と \$\sigma\_1' = \sigma\_2' > \sigma\_3'\$ のもとにおける \$45^\circ\$ 平面上の応力一ひずみ関係は同一である。したがって図-12, 13, 14 において同一のせん断ひずみ \$\gamma\_{45}\$ に対して平面変形の方が大きい \$(\tau / \sigma\_n')\_{45}\$ を示すのは変形の幾何的条件の影響であろう。

(4) ダイレイタンシー

非排水せん断をうける飽和土中に発生する間げき水圧 \$4u\$ は次式であらわされる<sup>2)</sup>。

$$4u = \Delta\sigma_m + d/C \dots\dots\dots (3)$$

ここに \$\Delta\sigma\_m\$ は粘土塊に作用する全応力表示の各主応力

の増分の平均値  $(1/3)(d\sigma_1 + d\sigma_2 + d\sigma_3)$  を示し、 $d$  は体積減少率であらわしたダイレイタンス、 $C$  は等方圧力による粘土の体積圧縮係数 ( $m_v$  に等しい) である。式 (3) を用いてダイレイタンスを逆算する場合には  $C$  を適当にきめる必要がある。軽部・栗原<sup>2)</sup> は  $C$  を圧密曲線の正規部分の圧縮指数  $C_c$  を用いてつぎのように与えた。

$$C = C_c \frac{0.434}{\sigma_c} \cdot \frac{1}{1-e} \dots\dots\dots (4)$$

式 (4) の  $C_c$  が正規部分の圧縮指数である限り、 $C$  は供試体の平均有効主応力の増分  $d\sigma_m'$  がつねに正である範囲にしか適用できないことはあきらかであって、この

研究のようにせん断中の平均有効応力が減少する試験には膨潤指数  $C_s$  を用いる方が適当であろう。この研究に用いた試料の  $C_s$  は求められていないので、 $C$  を数値的に算出することは不可能である。しかし繰り返し粘土の  $C_s$  は圧力に無関係にほぼ一定となるので、 $C$  は非排水試験中には一定であるとしてよいであろう。したがって、ダイレイタンス  $d$  のかわりに、 $d$  に比例する量として  $(du - d\sigma_m)$  をとれば、同じ圧密圧力の試験同志のダイレイタンスの比較が可能となる。ダイレイタンスがせん断中の他の要素といかなる関係を持つかを追求することはせん断の機構を解明する上で重要なことであろう。軽部・栗原<sup>2)</sup> は柴田の式<sup>12)</sup> を一般化して、 $\sigma'_1 > \sigma'_2 > \sigma'_3$  一条件も含む広範な応力条件のもとにおける正規粘土のせん断試験中のダイレイタンスは次式であらわされるとの結果を得ている。

$$d = a' \left( \frac{\tau_{oct}}{\sigma_m'} - c \right) \dots\dots\dots (5)$$

ここに  $d$  は体積圧縮率であらわしたダイレイタンス、 $a'$  は一定係数、 $\tau_{oct}$  は 8 面体面上のせん断応力、 $\sigma_m'$  は

図-12 45° 面上の応力-ひずみ関係

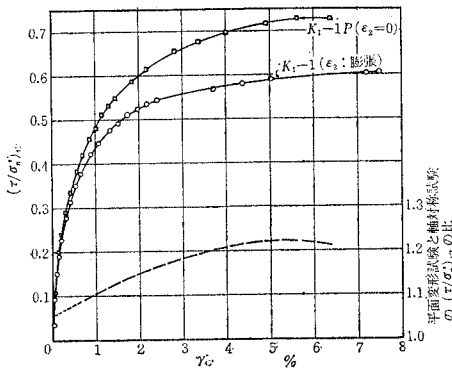


図-13 45° 面上の応力-ひずみ関係

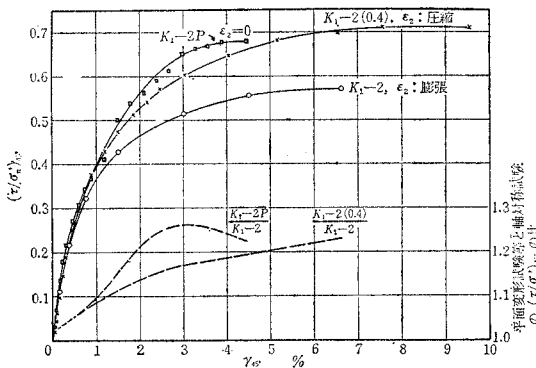


図-14 45° 面上の応力-ひずみ関係

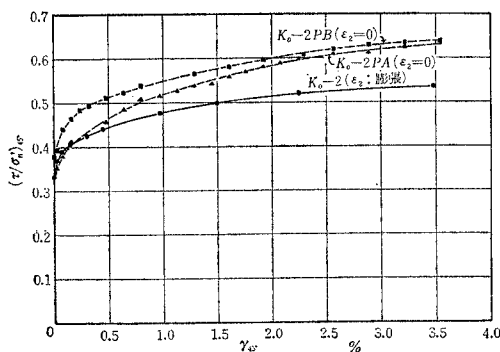


図-15 ダイレイタンス

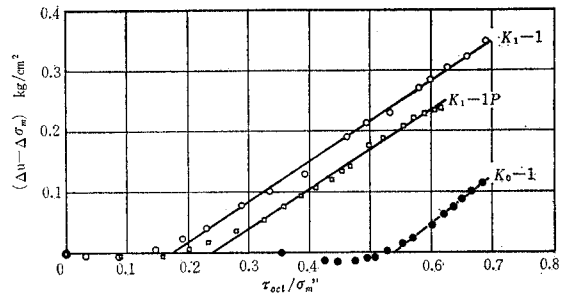
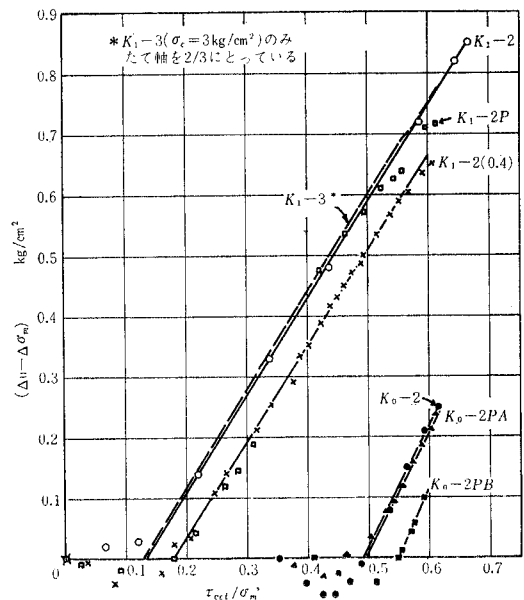


図-16 ダイレイタンス



有効垂直応力,  $c$  は定数である。しかしこの式は平面変形条件の試験では検照されていない。Henkel and Wade<sup>5)</sup> は, 平面変形試験中の 8 面体面上の有効応力径路 ( $\sigma_m'$  と  $\tau_{oct}$  の関係) は軸対称試験の往路とほとんど重なるという結果を得た。これらの結果はダイレイタンシーが変形条件に影響をうけないことを示している。図-15, 16 は  $(\Delta u - \Delta \sigma_m)$  と  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  の関係を示している。図からわかるように, 平面変形試験はダイレイタンシーのはじまる  $(\tau_{oct}/\sigma_m') = c$  の値が軸対称試験より大きい。この結果は式 (5) および Henkel and Wade の結果と矛盾している。変形条件がダイレイタンシーに影響するかどうかの結論はもっと多くの研究結果が得られてから出されるべきものであろう。

5. 3 主応力が異なる条件下でのクリープ試験

(1) 試験方法

供試体はクリープ試験に先立って  $2 \text{ kg/cm}^2$  の等方圧力のもとで約 24 時圧密された後,  $1 \text{ kg/cm}^2$  のバックプレッシャーを 1 時間以上作用させられた。クリープ試験は非排水条件下で行ない, その荷重条件は表-2 に示すようである。供試体の変位は  $\sigma_1$  方向と  $\sigma_2$  方向で測定し, 間げき水圧は電氣的に自動記録させた。

(2) 時間とひずみの関係

図-17~20 はクリープ時間  $t$  と  $\sigma_1$  方向のひずみ  $\epsilon_1$ ,

表-2 試験条件

試験名 (No.)	$\text{kg/cm}^2$ ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )	$\text{kg/cm}^2$ ( $\sigma_2 - \sigma_3$ )	$\frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_2)}$
1	0.978	0	0
2	1.304	0	0
3	1.074	0.197	0.184
4	1.413	0.260	0.184
5	1.204	0.490	0.406
6	1.243	0.650	0.522
	1.435	0.750	0.523
	1.725	0.900	0.522
7	1.300	0.782	0.601
8	0.853	0.600	0.704
	1.200	0.700	0.583

図-17 クリープ試験中のひずみおよび間げき水圧

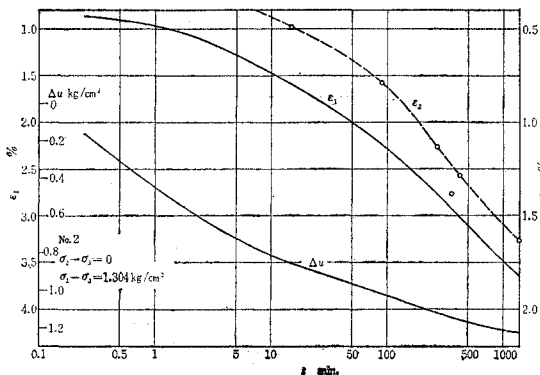


図-18 クリープ試験中のひずみおよび間げき水圧

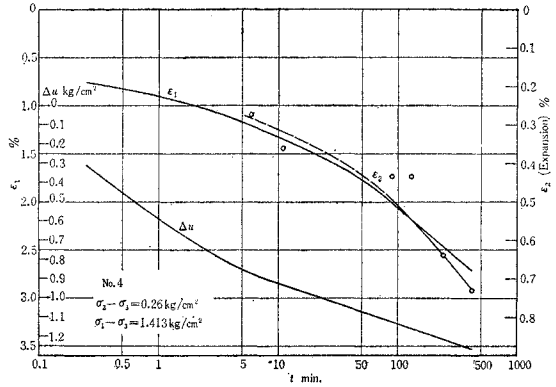


図-19 クリープ試験中のひずみおよび間げき水圧

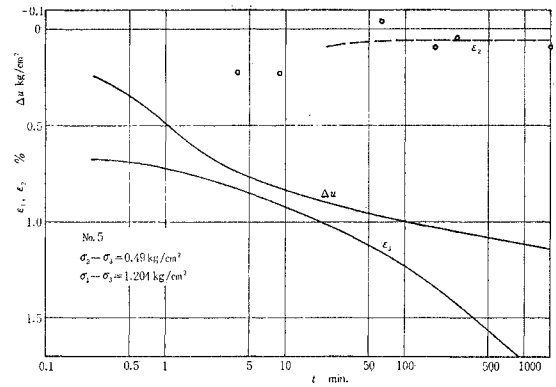
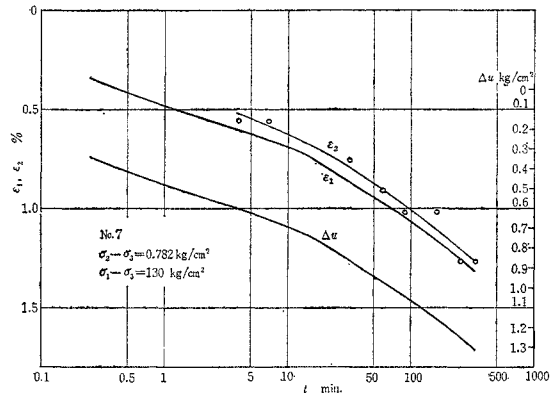


図-20 クリープ試験中のひずみおよび間げき水圧



$\sigma_2$  方向のひずみ  $\epsilon_2$ , 発生間げき水圧  $\Delta u$  の関係の例である。図中のプロットは  $\epsilon_2$  の測定値をあらわしているが, かなりのばらつきが認められる。試験は非排水条件下で行なわれているから近似的に次式が成立していなければならない。

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \dots\dots\dots (6)$$

したがって  $\sigma_2 = \sigma_3$  条件で行なわれた試験 No. 2 (図-17) では

$$\epsilon_2 = \epsilon_3 = -0.5 \epsilon_1$$

が成立すべきであるが、実測値は  $t=1000$  分において  $\epsilon_2 = -0.45 \epsilon_1$  であった。図は省略しているが No. 1 も同様の結果を得た。これは多分実験技術に関連して、つぎのうちのどれかが原因となっているものと思われる。すなわち、ろ紙やポーラスストーンに空気が残留している間げき水圧計の受圧面やパッキングがたむむ、ピストンとキャップの接点においてガタがあるなどである。

一般にクリープ量とクリープ時間の対数は直線関係を示すといわれており、事実、従来の単軸または非圧密三軸クリープ試験からは破壊荷重に近い荷重の場合でもクリープ時間が短い範囲では直線関係が得られている。しかし 図-17~20 に示したクリープ曲線にはこのような関係は見出されない。単軸あるいは非圧密三軸クリープ試験とこの研究で行なった圧密クリープ試験のちがいは、前者が過圧密状態で行なわれるのに対し、後者は正規に近い状態で行なわれることである。もし正規状態の試料に発生する間げき水圧は、図-17~20 のように時間とともに漸増するのが本来の姿であるならば、仮想すべり面上の  $(\tau/\sigma_n')$  は時間とともに増加し、したがってクリープは加速されるであろう。反対に、単軸または非圧密三軸クリープでは過圧密比が大きいためクリープ荷重によって間げき水圧が発生し、これが時間とともに負側へ増大するとすれば仮想すべり面上の  $(\tau/\sigma_n')$  は時間とともに減少し、したがってクリープは減速されるであろう。ゆえにクリープ現象は単に供試体に作用している荷重またはせん断応力のみで解析されるべきでなく、仮想すべり面上の有効垂直応力も同時に考慮すべきであると思われる。

(3) クリープ量におよぼす中間主応力差の影響

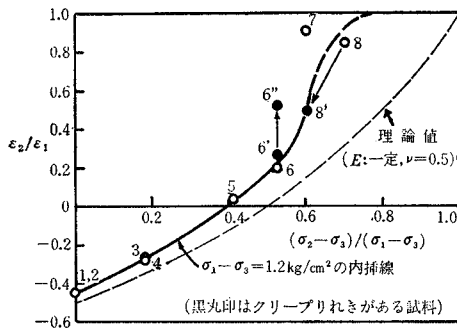
せん断中の試料が等方性で、弾性係数  $E$  およびポアソン比  $\nu$  が一定ならば次式が成立する。

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1' - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \dots\dots\dots(7)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2' - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)] \dots\dots\dots(8)$$

ここに  $\epsilon_1$  および  $\epsilon_2$  はそれぞれ  $\sigma_1'$  および  $\sigma_2'$  方向のひずみである。 $\epsilon_1$  と  $\epsilon_2$  を比較するために比  $(\epsilon_2/\epsilon_1)$  を

図-21 主応力差の比とひずみの比の関係



とり、対応する応力を  $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$  の形で与え、さらにポアソン比を  $\nu=0.5$  とおくと次式を得る。

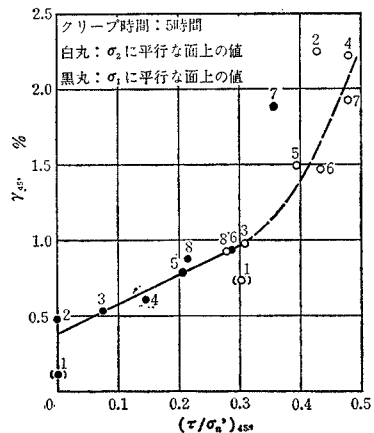
$$\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1}{2 - \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}} \dots\dots\dots(9)$$

図-21 の細い破線はたて軸に  $\epsilon_2/\epsilon_1$  をとり横軸に  $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$  をとって式 (9) を図示したものである。またプロットは各試験の最終ひずみを用いて計算した実測値であって、その番号は試験番号をあらわしている。 $\epsilon_2/\epsilon_1$  の実測値は  $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$  の値が一定であっても  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  の値が大きくなれば増加する傾向があるので、その影響を除くため  $(\sigma_1 - \sigma_3) = \text{一定} = 1.2 \text{ kg/cm}^2$  の内挿線を描くと実線の曲線のようになる。内挿線は  $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) = 0$  において  $\epsilon_2/\epsilon_1 = -0.45$  を示し、供試体が前述のように等方圧縮を併発していることを示している。平面変形条件は  $\epsilon_2/\epsilon_1 = 0$  で与えられるが、これに対応する応力条件は  $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) = 0.39$  となり、理論値の 0.5 と一致しない。 $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$  の値が 0.6 をこえると  $\epsilon_2/\epsilon_1$  は急激に増大する。しかし、測定上の問題点として、 $\epsilon_1$  が供試体全高の平均値であるのに対し、 $\epsilon_2$  は供試体中央部のもっともひずみを受けやすい場所の値であることを考慮すると、 $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$  の値が大きいような条件のもとでは  $\epsilon_2$  が過大に測定される可能性が十分にあると思われる。いずれにせよ、 $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) = 1$  において  $\epsilon_2/\epsilon_1 = 1$  が成立すべきことはいうまでもない。

(4) 応力-ひずみ関係

供試体のせん断変形がすべりによって起こるものならば、ある仮想すべり面方向のせん断ひずみはその面に平行な応力にはあまり影響されず、おもにその面上の  $(\tau/\sigma_n')$  に支配されるであろう。図-22 はクリープ時間  $t = 300$  分における  $\epsilon_1, \epsilon_2$  および  $\Delta u$  から求めた  $\sigma_2'$  方向に平行で  $\sigma_3'$  方向と  $45^\circ$  をなす平面 (平面 1-3 と呼

図-22 45° 面上のクリープ荷重とせん断ひずみの関係





ぶ) 上の  $(\tau/\sigma_n')_{15} = (\sigma_1' - \sigma_3') / (\sigma_1' + \sigma_3')$  と、その平面の方向のせん断ひずみ  $r_{15} = (\epsilon_1 - \epsilon_3) / 2$  の関係 (白丸印)、および  $\sigma_1'$  に平行で  $\sigma_3'$  と  $45^\circ$  をなす平面 (平面 2-3 と呼ぶ) 上の  $(\tau/\sigma_n')_{23} = (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_2' + \sigma_3')$  とその平面の方向のせん断ひずみ  $r_{23} = (\epsilon_2 - \epsilon_3) / 2$  の関係 (黒丸印) をあらわしている。結果はかなりばらついてはいるが、平面 (1-3) 上の値と平面 (2-3) 上の値は共通の  $r - (\tau/\sigma_n')$  関係を形成しており、さらにくわしく見れば、考えている平面上の  $(\tau/\sigma_n')$  にくらべて平行応力が大きい試験は  $r$  が小さい方向に偏差していることがわかる。これらの事実は供試体のクリープによるせん断ひずみがモール・クーロン系のすべりによって起こっていることを示している。

$r$  と  $(\tau/\sigma_n')$  は  $(\tau/\sigma_n') \leq 0.3$  の範囲で直線関係を示している。しかし直線の切片のみならず  $(\tau/\sigma_n') = 0$  における  $r$  の実測値が 0 とならないのは不合理である。これは供試体の等方圧縮のために計算上あらわれたものであろう。また  $(\tau/\sigma_n')$  の値は  $t = 300$  分における値であるのに対し、 $r$  は刻々変化する  $(\tau/\sigma_n')$  に応じて発生した  $d r$  の集積されたものであることも注意すべき点である。

## 6. 結 論

(1) 平面変形条件に対応する応力条件について：まず等方圧力のもとで圧密された供試体について検討する。試験  $K_1 - 2P$  (図-4) では  $\epsilon_1 = 0.5\%$  ( $(\sigma_1 - \sigma_3) = 1.1 \text{ kg/cm}^2$ ) のとき  $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0.35$  であって破壊時 ( $(\sigma_1 - \sigma_3) = 1.9 \text{ kg/cm}^2$ ) には  $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0.31$  である。 $K_1 - 1P$  ではせん断の初期には  $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0.40$ 、最終的に 0.30 に到達した。 $K_1 - 2(0.4)$  (図-5) ではせん断の初期には  $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0.40$  で平面変形状態であったが、せん断の進行にともなって  $\sigma_2'$  の方向に圧縮がはじまった。 $(\sigma_1 - \sigma_3) = 1.20 \text{ kg/cm}^2$ 、 $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0.406$  の条件で行なわれたクリープ試験 No. 5 (図-19) では  $\sigma_2$  方向にわずかに圧縮した。これらの結果を総合すれば、平面変形を起こさせる応力条件はせん断の初期 ( $(\sigma_1 - \sigma_3)$  が小さいとき) には 0.40 であり、破壊時には 0.30~0.31 に低下するといえるであろう。

つぎに  $K_0$ -圧密された供試体の平面変形条件に対応する  $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ -値はせん断開始時には 0 であり、せん断の進行にともなって増加し、破壊時の値は  $K_0 - 2PA$  (図-7) では 0.20、 $K_0 - 2PB$  では 0.28 である。Henkel and Wade によれば、破壊時の  $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$  の値は 0.32 である。

(2) せん断強度および応力-ひずみ関係：従来の研究から、2つの軸対称応力条件、 $\sigma_1' > \sigma_2' = \sigma_3'$  と  $\sigma_1' =$

$\sigma_2' > \sigma_3'$  における破壊条件はモール・クーロンの破壊応力条件に合致すること、および  $\sigma_2'$  方向に平行な  $45^\circ$  面上の  $(\tau/\sigma_n')$  とその面の方向のせん断ひずみ  $r$  の関係が同じであることがわかっている。これらは粘性土のせん断強度現象がすべりと密接に結びついていることを示している。この研究によって、平面変形条件における粘性土のせん断強度は、軸対称試験から計算されたモール・クーロンのせん断強度より 9~20% 大きいことがわかった。また  $r_{45^\circ} - (\tau/\sigma_n')_{45^\circ}$  関係は、同じ  $r_{45^\circ}$  に対して平面変形試験は軸対称試験よりつねに大きい  $(\tau/\sigma_n')_{45^\circ}$  を示すことがわかった。一方クリープ試験からは、仮想すべり面上の  $(\tau/\sigma_n')$  と  $r$  の関係はすべり面に平行な応力 (たとえそれが最大主応力であっても) の影響はあまり強く受けず、クリープ時間が一定ならば唯一の関係が成立する可能性が見出された。またクリープ現象を論ずる場合にはせん断応力  $\tau$  の大きさばかりでなく有効垂直応力  $\sigma_n'$  も考慮すべきことが指摘された。

末筆ではあるが、筆者らの指導者村山朔郎先生ならびに有益なご助言を賜った柴田 徹先生に謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) Henkel, D.J.: "The Shear Strength of Saturated Remoulded Clays", Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, 1960.
- 2) 軽部・栗原: "練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, 1966.
- 3) Wu, T.H., Loh, A.K. and Malvern, L.E.: "Study of the Shear Strength of Saturated Clays", Proc. of ASCE, Vol. 89, SM 1, 1963.
- 4) 柴田・軽部: "Influence of the Variation of the Intermediate Principal Stress on the Mechanical Properties of Normally Consolidated Clays", Proc. 6th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, 1965.
- 5) Henkel, D.J. and Wade, N.H.: "Plane Strain Tests on a Saturated Remoulded Clay", Proc. of ASCE, Vol. 92, SM 6, 1966.
- 6) Bishop, A.W.: "The Strength of Soil as Engineering Materials", Géotechnique, Vol. 16, No. 2, 1966.
- 7) Cornforth, D.H.: "Some Experiments on the Influence of Strain Conditions on the Strength of Sand", Géotechnique, Vol. 14, No. 2, 1964.
- 8) 赤井・森・小栗竹: "多軸応力下における岩石の破壊機構に関する研究", 土木学会第 22 回年次学術講演概要集 III, 1967.
- 9) Habib, M.P.: "Influence of the Variation of Intermediate Principal Stress on the Shearing Strength of Soils", Proc. 3th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, 1953.
- 10) Kirkpatrick, W.M.: "The Condition of Failure for Sands", Proc. 4th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, 1957.
- 11) 軽部・原田: "平面変形状態における粘土のせん断試験", 土木学会第 22 回年次学術講演会講演概要集 III, 1967.
- 12) 柴田 徹: "粘土のダイラタンシーについて", 京都大学防災研究所年報 6 号, 1963.