

# 練り返し粘土のダイレタンシーとせん断強度について\*

DILATANCY AND SHEAR STRENGTH OF SATURATED REMOULDED CLAY

軽部大蔵\*・栗原則夫\*\*

By Daizo Karube and Norio Kurihara

## 1. まえがき

地盤に基礎を置いたり、掘削を行なったりすると、地盤中の土塊に作用する応力が変化するために、土塊は変形と体積変化をひきおこす。この作用外力の変化量を主応力で表わして  $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3$  とし、それによって生じる土塊の体積ひずみ（体積減少を正とする）を  $\Delta\varepsilon$ 、発生する間げき水圧を  $\Delta u$  とすると、弾性学によれば次式が成立する。

$$\Delta\varepsilon = \frac{1-2\nu}{E} (\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_2' + \Delta\sigma_3') \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\nu$ : 土のポアソン比、 $E$ : 土の弾性率、 $\Delta\sigma_i' = \Delta\sigma_i - \Delta u$ （有効応力表示の主応力の変化量）。

しかし現実の土の挙動は次式で表わされるといわれている。

$$\Delta\varepsilon = C \cdot \frac{(\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_2' + \Delta\sigma_3')}{3} + d \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $C$ : 土の体積圧縮率

式(1)は体積ひずみが有効応力表示の主応力の変化の合計できることを示しており、式(2)の右辺第1項はそれに対応している。したがって式(2)は、土の体積ひずみは有効主応力の変化の合計（または有効平均主応力の変化量）できることを示している。この成分  $d$  はダイレタンシーと呼ばれ、土塊がせん断変形する際に土の骨格を形成する土粒子の接触点ですべりや回転が起こるために発生する体積変化であるといわれている。

柴田<sup>1)</sup>は乱さない尼崎粘土の排水3軸圧縮試験を行ない、また Henkel<sup>2)</sup>および水野ら<sup>3)</sup>の正規圧密粘土の排水せん断試験の結果も用いて、正規粘土のダイレタンシーが次式で与えられることを示した。

$$\varepsilon_d = D \left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_0}{\sigma_m'} \right\} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $\varepsilon_d$ : ダイレタンシー（体積圧縮ひずみ）、 $D$ : ダイレタンシー係数、 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ : 主応力差、 $\sigma_0$ : ダイレタンシーが起こらない限界の主応力差、 $\sigma_m'$ : 有効平均主応力、なおダイレタンシー係数  $D$  は、それぞれの粘

\* 土木学会第20回年次学術講演会（昭.40.5）で報告した試験資料を解析したものである。

\*\* 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

\*\*\* 学生会員 京都大学大学院工学研究科修士課程

土について全せん断期間を通じて一定である。

ところで間げきが水で飽和している厚い粘土層地盤を考えると、土塊に作用する応力が変化しても粘土の透水係数が非常に小さいために短時間内には体積ひずみは起こらず、間げき水圧のみが変化する。この水圧の変化  $\Delta u$  は式(2)からつぎのように求められる。

$$\Delta u = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} + \frac{d}{C} \quad \dots \dots \dots (4)$$

式(4)の右辺の第1項は平均主応力の変化によってひきおこされる水圧を表わし、第2項はダイレタンシーによるものを表わしている。Henkel<sup>2)</sup>は式(4)の第2項をつぎのように与えて、非排水試験中に発生する間げき水圧の式を提案している。

$$\frac{d}{C} = \alpha \sqrt{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)^2 + (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_1)^2} \quad \dots \dots \dots (4a)$$

彼は練り返した Weald Clay を非排水状態で3軸圧縮および Extension 試験（周圧が軸圧より大きい状態の3軸試験）し、破壊時の  $\alpha$  は両試験で等しいという結果を得た。

沖積層などの正規粘土はせん断によって体積を減少させる方向にダイレタンシーが起こるから、その上に載荷を行なうと大きい間げき水圧が発生するために有効応力が減少せん断抵抗力の低下をひきおこす。このようにダイレタンシーは地盤の支持力を見積る上で重要であるばかりでなく、元来せん断によって発生するものであるから、せん断の機構を調べる上でも重要な要素である。

この研究は、練り返し粘土を圧密非排水せん断して、そのダイレタンシー特性と強度特性を求め、粘土のせん断の機構の一端を調べようとしたものであって、本文の前半はひずみ制御式3軸せん断について、後半は圧縮と Extension の両状態にわたるくり返せん断について述べている。

## 2. ひずみ制御式圧密非排水せん断試験

粘土のせん断挙動は応力やひずみの作用のさせ方や排水条件に大きく影響される。そこでこの一連の試験ではひずみの条件をそろえるためにひずみ制御式を採用し、作用させる外力（全応力）の組み合わせをいろいろにか

えて一般的なせん断特性をつかもうとした。

### (1) 試料および試験方法

大阪沖積層粘土を含水比 200% 以上の状態で完全に練り返し、大型圧密容器に入れ、 $0.5 \text{ kg/cm}^2$  の圧力で再圧密したもので、その物性は L.L. 77.5%, P.L. 40.5 %, 3 角座標による土質判定は粘土（粘土分 43.5%, シルト分 46.0%, 砂分 10.5%）であって、等方圧力による圧密曲線は図-1 のようである。

この試料を直径 3.57 cm, 高さ 8 cm の円柱形に成形し、スパイラル型のペーパードレーンをまいりて 3 軸容器に設置する。供試体の上端に

とりつける載荷用のキャップおよびそれに組み合わせるピストンは Extension 試験にも用いられるような形（図-2）のものである。すなわちピストンには枝がつけてあって、中空のキャップの上面にはカギ穴状の穴があけてある。Extension 試験の場合にはピストンをキャップに挿入した後 90° 回転して枝をキャップの上面にひっかけて引き上げるわけである。

3 軸容器内に 1~4 kg/cm<sup>2</sup> の所定の圧力を加えて約 24 時間の等方圧密を行なった後、 $1 \text{ kg/cm}^2$  のバックプレッシャー

を 1 時間作用させる。予備試験によればこの操作で供試体の  $B$  値は 1 となる。続いて供試体の底面で間げき水圧を測定しながら軸方向ひずみ速さ  $0.02\%/\text{min}$  で圧縮あるいはひきのばしをはじめる。せん断中の軸圧および周圧はあらかじめ予定したつぎのような応力条件を満たすように調節する。

$\sigma_r$ —一定試験：せん断中の周圧  $\sigma_r$  を一定に保つ試験

$\sigma_a$ —一定試験：せん断中の軸圧  $\sigma_a$  を一定に保つ試験

$\sigma_m$ —一定試験：せん断中の平均主応力  $\sigma_m = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$

### 3 を一定に保つ試験

### (2) せん断ひずみとせん断抵抗力の関係

試験から得た主応力差 ( $\sigma_a - \sigma_r$ ) と軸方向ひずみ  $\epsilon_a$  の関係の数例を 図-3 に示す。すべての試験を通じて、圧密圧力や試験の種別に関係なく、主応力差の最大値は軸方向ひずみが 10% の付近で表われた。Parry<sup>4)</sup> は練り返し Weald Clay および London Clay で同様の結果を得ている。

供試体の強度を主応力差の最大値で定義し、モールの破壊包絡線を求めるためにその点における応力を用いて  $(\sigma_a - \sigma_r)/2$  と  $(\sigma_a + \sigma_r)/2$  の関係をプロットすると、図-4 に示すようにすべての試験結果は原点を通る一つの曲線上に集まるようである。したがって、せん断中のひずみの条件が同じならば強度は全応力の影響を受けず、モールの破壊基準にしたがうことがわかる。Parry

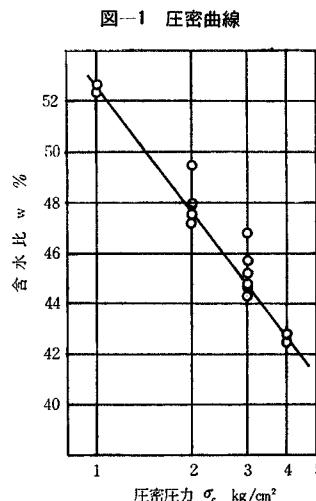
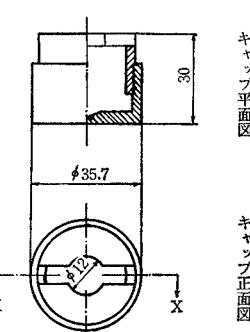
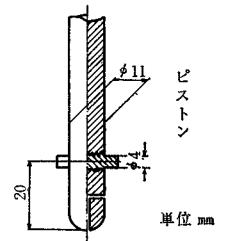


図-1 圧密曲線



キャップ正面図

図-2 (a) 3 軸試験用のピストンおよびキャップ

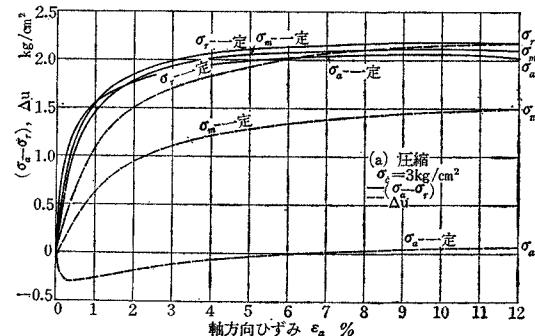


図-3 (a) 応力～ひずみ～間げき水圧関係 (圧縮)

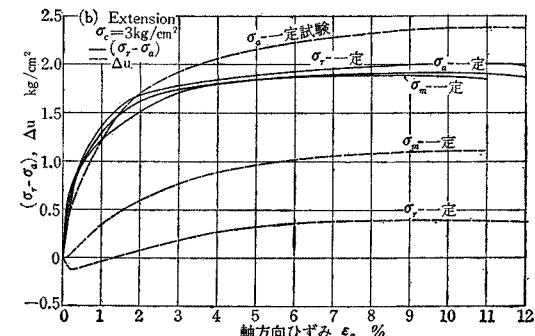


図-3 (b) 応力～ひずみ～間げき水圧関係 (Extension)

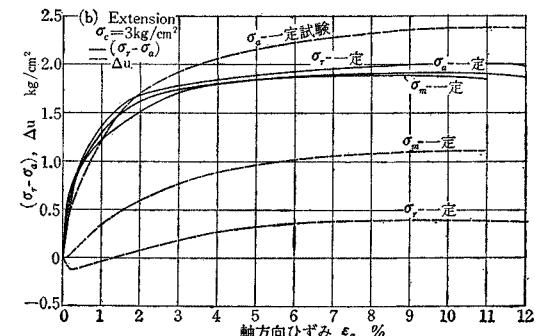
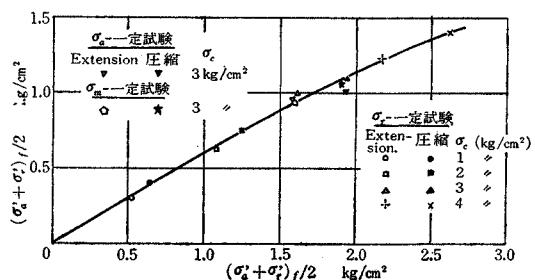


図-4 供試体の強度特性



は London Clay と Weald Clay で同様の結果を得ている。

供試体のせん断が進行する過程で、どのようにせん断抵抗力が発揮されていくかを調べることは興味ある問題である。供試体内のある平面上ですべり破壊が起こる条件は、その平面上のせん断応力  $\tau$  と有効垂直応力  $\sigma'$  の比が一定値  $(\tau/\sigma')_f$  に達することであると仮定すると、ある時点では平面上の応力条件がどの程度すべきの条件に近付いたかはそのときの  $(\tau/\sigma')$  の値ではかられる。いま、供試体内の有効応力表示の主応力を  $\sigma_1' \geq \sigma_2' \geq \sigma_3'$  で表わすと、中間主応力  $\sigma_2'$  方向に平行で最小主応力  $\sigma_3'$  方向に対して  $\alpha$  の角度を持つ平面上に作用するせん断応力  $\tau$  と垂直応力  $\sigma'$  はそれぞれ、

$$\tau = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \sin 2\alpha, \quad \sigma' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \cos 2\alpha$$

であるから、この平面上の  $(\tau/\sigma')$  は

$$\frac{\tau}{\sigma'} = \frac{\sin 2\alpha}{[(\sigma_1' + \sigma_3')/(\sigma_1' - \sigma_3')] - \cos 2\alpha} \quad \dots (5)$$

となり、ある時点における  $(\tau/\sigma')$  は  $\alpha$  の関数であるので、たとえば  $\alpha=45^\circ$  の平面を考えれば

$$\left( \frac{\tau}{\sigma'} \right)_{\alpha=45^\circ} = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} \quad \dots (5a)$$

一方せん断応力をひきおこすひずみをせん断ひずみ  $r$  として次式のように与える。

$$r = \frac{1}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad \dots (6)$$

ここに、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$  は主ひずみである。 $\epsilon_1$  として供試体の長軸方向のひずみ  $\epsilon_a$  をとり、 $\epsilon_2=\epsilon_3$  として半径方向のひずみ  $\epsilon_r$  をとるとし、またせん断中に体積変化がないことを考慮すると、式(6)より

$$r = (1/\sqrt{2})\epsilon_a \quad \dots (6a)$$

となりせん断ひずみと長軸方向ひずみは比例関係にあるので、以下にはせん断ひずみのかわりに軸方向ひずみを用いることにする。

$\sigma_c=3 \text{ kg/cm}^2$  の試験結果から、 $\epsilon_a$  と  $(\tau/\sigma')_{\alpha=45^\circ}$  の関係を求めるに図-5 のようであって、同じひずみに対しても Extension の方が圧縮よりも大きい  $(\tau/\sigma')_{\alpha=45^\circ}$  が発生していることがわかる。これは  $(\tau/\sigma')$  がひずみ以

図-5

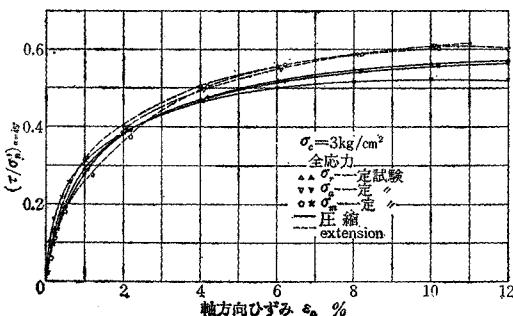
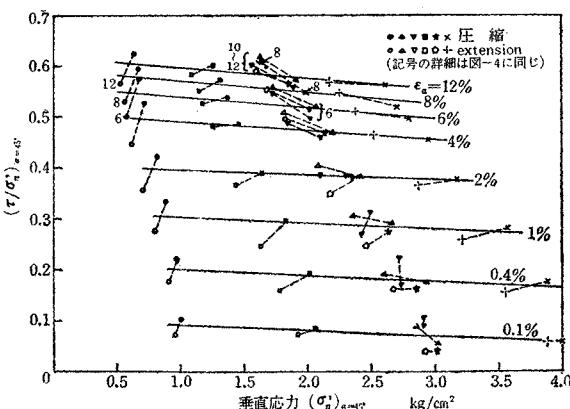


図-6



外の他の要素の影響をうけることを示している。その要素として垂直応力  $\sigma'$  そのものを想定し、これと  $(\tau/\sigma')_{\alpha=45^\circ}$  の関係を  $\epsilon_a$  をパラメーターとして全試験について求めると図-6 のようである。小さいひずみに対する  $(\tau/\sigma_m')$  の値は各試験によってまちまちであるが、ひずみの増大とともに全試験は一つの  $(\tau/\sigma_m')_{\alpha=45^\circ} \sim \sigma_m' \sim \epsilon_a$  関係に収束する傾向が明らかなので、図-6 より  $\sigma_2'$  方向に平行で  $\sigma_3'$  方向に 45 度の角度をなす平面上のせん断応力はせん断ひずみと有効垂直応力できまるとの結論を導いてもよいであろう。また式(5)から明らかなように  $\sigma_2'$  方向に平行な他の平面上のせん断応力の発生についても同様の結論を下してもよいことになる。しかし、 $\sigma_2'$  方向に平行でない平面上では図-6 のような関係は見出されない。たとえば 3 主応力方向に対して等角をなす平面(8面体面)上でこれらの関係を求めてみると図-7 のように圧縮試験と Extension 試験では同じひずみに対して  $(\tau/\sigma') = (\tau_{oct}/\sigma_m')$  の値に大きな差が表われる。

ここで  $(\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3')$  を軸とする直交座標空間を考え

図-7 (a)

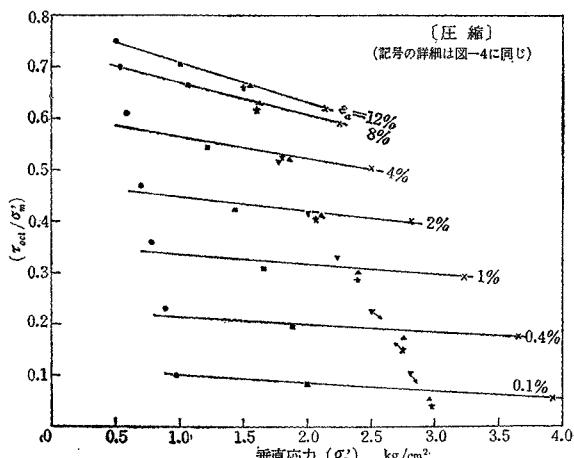
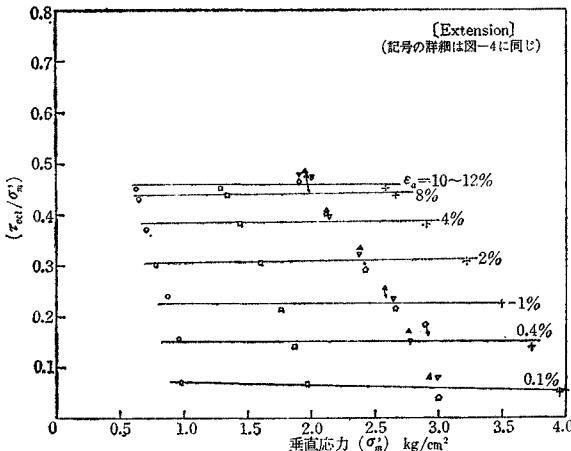


図-7 (b)



ると、供試体内的有効応力は空間内の1点  $P(\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3)$  で表わされることになる。この点  $P$  を含み座標軸と  $A(k, o, o), B(o, k, o), C(o, o, k)$  で交わる平面  $\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 = k$  を考え、この平面に対する法線  $\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3$  の足を  $O'$  とするとつぎの関係が成立する<sup>5)</sup>。

$$\overline{OO'} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$$\overline{OP} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_1' - \sigma_2')^2 + (\sigma_2' - \sigma_3')^2 + (\sigma_3' - \sigma_1')^2} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

また  $P$  の方向を  $O'A$  と  $O'P$  のなす角  $\omega$  で定義すると

$$\sin \omega = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sigma_2' - \sigma_3'}{O'P} \quad \dots \dots \dots (9)$$

一方、供試体内に想定した先述の8面体面上の有効垂直応力  $\sigma_m'$  およびせん断応力  $\tau_{oct}$  はつぎのように表わされる。

$$\sigma_m' = \frac{1}{3}(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') = \frac{1}{\sqrt{3}}(\overline{OO'}) \dots\dots\dots(10)$$

これらはちょうど  $\overline{OO'}$  および  $\overline{OP}$  の  $(1/\sqrt{3})$  になっているので、 $\tau_{oct}$  の方向を  $P$  の方向で表わすことすれば、結局 8 面体面上の垂直応力  $\sigma_m'$  とせん断応力  $\tau_{oct}$  は  $(\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3')$  空間内の点  $P(\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3')$  の位置の相似图形で表わされることになる。

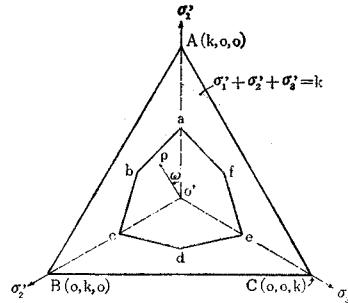
一方、モール・クーロンの破壊条件は、試料の有効応力表示の内部摩擦角を  $\phi'$ 、粘着力を  $c'$  とすれば次式で表わされる。

$$\sigma_1' = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \cdot \sigma_3' + \frac{2 c' \cdot \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}, \quad (\sigma_1' \geqq \sigma_2' \geqq \sigma_3')$$

.....(12)

有効主応力  $\sigma_1'$ ,  $\sigma_2'$ ,  $\sigma_3'$  の大小関係が変われば同様の式が式(12)を含めて六つ成立する。それらの式は  $(\sigma_1'$ ,

図-8 応力空間内のモール・クーロンの破壊面



$\sigma_2'$ ,  $\sigma_3'$ ) 空間では頂点を  $(-c' \cdot \cot \phi', -c' \cdot \cot \phi', -c' \cdot \cot \phi')$  とし、長軸を  $\sigma_1' = \sigma_2' = \sigma_3'$  とする 6 角すいを表わしている。この 6 角すいの直断面は平面  $\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3' = k$  上にあり、その形は図-8 の  $a, b, c, d, e, f$  のようである。ここに、

$$\overline{aO'} = \overline{cO'} = \overline{eO'} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2k \cdot \sin \phi' + 6c' \cdot \cos \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

$$b\overline{O}' = d\overline{O}' = f\overline{O}' = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2k \cdot \sin \phi' + 6c' \cdot \cos \phi'}{3 + \sin \phi'} \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$\angle aO'b = \angle bO'c = \dots = \angle fO'a = 60^\circ \quad \dots (15)$$

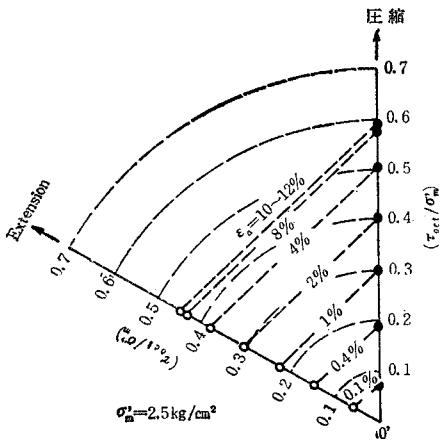
また式(13), (14)より

$$\frac{aO'}{bO'} = \frac{3 + \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

$\sigma_1' \geq \sigma_2' \geq \sigma_3'$  を満たす範囲は  $O'a$  方向と  $O'b$  方向にはさまれた部分であって、軸方向圧縮状態  $\sigma_1' \geq \sigma_2' = \sigma_3'$  は  $O'a$  上に、軸方向 Extension 状態  $\sigma_1' = \sigma_2' \geq \sigma_3'$  は  $O'b$  上の点であった。この試験では図-4に示したようにモールの破壊条件が圧縮側と Extension 側で共通に満たされているので、 $\sigma_m'$  が同じならば圧縮破壊時の 8 面体せん断応力は Extension 破壊時のそれの  $(3 + \sin \phi') / (3 - \sin \phi')$  倍の値を持つわけである（式(16)）。圧縮と Extension の中間 ( $\sigma_1' > \sigma_2' > \sigma_3'$ ) の状態でのせん断試験はここでは行なわれていないが、柴田・輕部<sup>6)</sup>によれば、練り返し大阪沖積層粘土の破壊面はモール・クーロンの破壊 6 角すいに外接する曲面である。また Wu ら<sup>7)</sup>によれば、強度定数にボキュレの定数を用いると練り返し粘土の破壊面はモール・クーロンの破壊 6 角すいに一致する。

図-9は、図-7を用いて、平面  $\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3' = 2.5$  kg/cm<sup>2</sup> 上で  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  がせん断ひずみの増加とともに増大していく様子を示している。圧縮と Extension の中間の状態で行なわれた従来の研究にはせん断ひずみ  $\tau$  と応力の関係を求めた例がないので、圧縮方向と Extension 方向以外の方向についてはこれらの関係を推定することすらできないが、ともかく図-9によれば8面体面上の  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  とひずみの関係は  $\tau_{oct}$  の方向に影

図-9 8面体せん断応力とせん断ひずみの関係



響されることが明らかである。

### (3) ダイレタンシー

非排水せん断をうける飽和粘土に発生する間げき水圧は式(4)で表わされる。

$$\Delta u = \frac{1}{3} (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3) + \frac{d}{C} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $d$  はダイレタンシーであって、体積減少方向を正とする。したがって試験から  $\Delta u$  および  $\Delta \sigma_1$ ,  $\Delta \sigma_2$ ,  $\Delta \sigma_3$  を求めると、体積圧縮係数  $C$  が既知ならばダイレタンシー  $d$  が逆算できる。

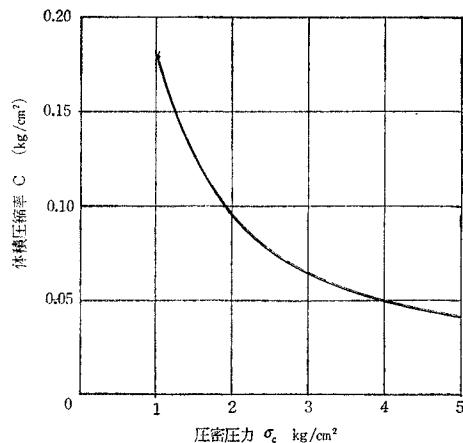
圧縮率  $C$  は、土に作用する応力の増分を  $\Delta \sigma$  とし、それによって起こる体積ひずみ（体積減少を正とする）を  $\Delta e$  とすると  $C = \Delta e / \Delta \sigma$  で与えられ、粘土の骨格の軟かさを表わしている。したがってその値は土の間げき比によって変化するほかに、せん断中には変形による練り返し効果のために変化するであろう。等方圧力をうける正規粘土の体積圧縮率は圧縮指数  $C_c$  ( $e \sim \log p$  関係の直線部分の勾配) からつぎのように求められる。

$$C = m_e = \frac{\Delta e / (1 + e)}{\Delta \sigma} = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma} \cdot \frac{1}{1 + e}$$

$$= C_c \cdot \frac{1}{\sigma_c} \cdot \frac{1}{1 + e} \quad \dots \dots \dots (17)$$

ここに、 $e$  は試料の間げき比、 $\Delta e$  はその変化量、 $\Delta \sigma$  は  $\Delta e$  をおこさせた作用応力の変化量、 $C_c$  は圧縮指数、 $\sigma_c$  は圧密圧力である。この試験に用いた試料の  $C$  は図-1を用いて図-10のように求められる。つぎにせん断による練り返し効果が圧縮率に与える影響については一本の研究<sup>8)</sup>がある。一本は乱さない大阪沖積層粘土（鋭敏比 5）を村山・畠<sup>9)</sup>の練り返し機でいろいろな度合に練り返した後、標準圧密試験を行なって  $C_c$  や他の土性の変化を調べている。彼によれば、 $C_c$  は練り返し速さ、練り返し回数および練り返し角度（変形の角度）の増加とともに減少する。練り返し角度  $\theta$  による  $C_c$  の変化の様子は、練り返し回数が 50 回で練り返し速さが

図-10 体積圧縮率と圧密圧力の関係



$30/\text{sec}$  のときは、 $\theta = 0^\circ$ （乱さない状態）に対する  $C_c = 0.96$  から  $\theta = 45^\circ$  に対する  $C_c = 0.69$  まで  $\theta$  とともに直線的に減少し、 $45^\circ$  以上の  $\theta$  に対しては一定の値を示す。また彼の引用した Skempton の研究によれば、鋭敏比が中位（2~4）の乱さない粘土の圧縮指数は練り返した場合のそれの 1.3 倍程度である。以上の研究結果は乱さない粘土に関するものであって、この試験に用いた練り返し再圧密試料では再練り返しによる  $C_c$  の減少量はもっと小さいとみてよいであろう。また、せん断試験中の練り返し程度は一本の練り返しひずみによる練り返しの程度にくらべてかなり小さくとも考え合わせると、せん断試験中の圧縮率の変化量は非常に小さく、これを無視してもよいと思われる。

さて、ダイレタンシーは先述のように、土粒子で構成される骨格構造がせん断変形を起こす際に、土粒子同士の接触点ですべりや回転が起こるために発生するものであるから、せん断ひずみやせん断応力と深い関係を持っているはずである。そこでまず式(4)を用いて全試験からせん断中に発生したダイレタンシー（体積減少率で表わす）を求め、これと供試体の軸方向ひずみ（せん断ひずみに比例）の関係を求めるところ（図-11）のように圧密圧力や全応力の加え方には無関係であるが、圧縮か Extension かの別によってダイレタンシーの値に大きい差が見られることがわかる。

つぎに土粒子間に起こるすべりの条件を考えてみると。粒子同士は微小な面積を持つ面で接触しているとすると、すべりが起こる条件は接触面上のせん断応力と垂直応力の比が一定値に達したときである。接触面（点）の個数は供試体内には無数にあり、面の方向も制限されていないから、供試体全体としてみれば、すべりの発生回数、すなわちダイレタンシーの増加率は接触面の方向の平均値を表わす 8 面体面上のせん断応力  $\tau_{oct}$  と垂直応力  $\sigma_m'$  の比  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  に関係するであろう。この観点から、ダイレタンシーと  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  の関係を求める

図-11 軸方向ひずみとダイレタンシーの関係

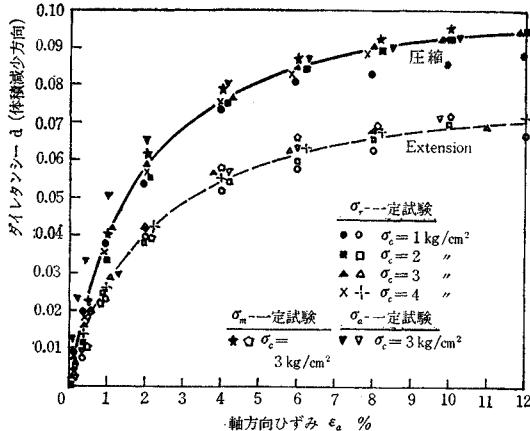
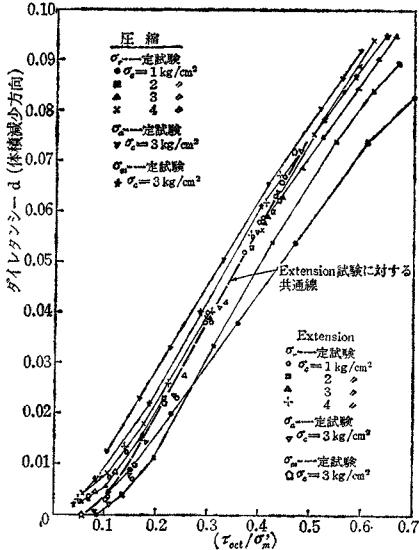
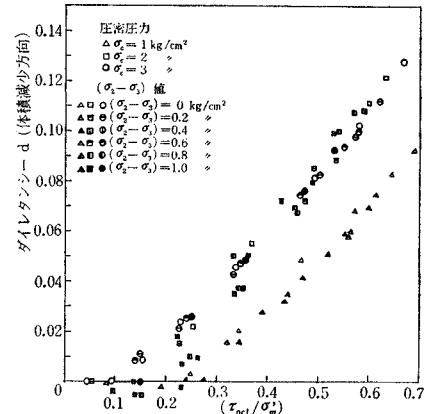
図-12  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  とダイレタンシーの関係

図-12 が得られる。両者はほとんど直線関係にあって、圧縮試験では  $\sigma_c = 1 \text{ kg/cm}^2$  の結果を除けば直線部分の勾配は  $0.17 (\sigma_m'/\tau_{oct})$  であり、直線部を延長して近似的にダイレタンシーが起こらない限界の  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  を求めると  $0.03 \sim 0.08$  となる。また Extension 試験では直線部の勾配は  $0.19 (\sigma_m'/\tau_{oct})$  でありダイレタンシーの発生限界は  $0.08 \sim 0.11$  となる。Extension 試験では端部摩擦のために間げき水压の測定値に時間的な遅れがあることを考慮すると、図-12 は、ダイレタンシーが  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  の関数として圧縮側でも Extension 側でも共通に表わされることを示しているといつてよいであろう。

図-12 によって、 $\tau_{oct}$  の方向が  $\omega=0^\circ$ （圧縮）と  $\omega=60^\circ$ （Extension）の2方向では同じ  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  に対して同じダイレタンシーが発生することが明らかにされたが、この2方向にはさまれた  $0^\circ < \omega < 60^\circ$  の部分では

図-13  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  とダイレタンシーの関係  
(柴田・軽部の資料より)

どうであろうか。柴田・軽部<sup>6)</sup>の大坂冲積層粘土の圧密非排水試験の結果によれば、 $(d u - d\sigma_m)/\sigma_m$  と  $(\tau_{oct}/\sigma_m)$  の間には圧密圧力やのにかかわらず一定の関係がある。しかし、両者の関係は物理的な意味が不明瞭なので、ダイレタンシーと  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  の関係に整理しなおすと図-13 が得られる。図から明らかのように、ダイレタンシーは  $\tau_{oct}$  の方向  $\omega$  には無関係に  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  に対して直線的に増加する。圧密圧力の影響については、 $\sigma_c = 1 \text{ kg/cm}^2$  の試験結果が他とはなっているが、これは試料作成時の圧密圧力 ( $0.5 \text{ kg/cm}^2$ ) が試験中の周圧に近すぎるためと、この試験にはバック プレッシャーが用いられなかったためであると考えられ、本来は圧密圧はダイレタンシーに影響しないものと思われる。図-12、13 から、正規粘土のダイレタンシーが次式で与えられることがわかる。

$$\begin{aligned} d &= 0 \quad (\text{ただし } \tau_{oct}/\sigma_m' \leq c) \\ d &= a' \{(\tau_{oct}/\sigma_m') - c\} \quad (\text{ただし } \tau_{oct}/\sigma_m' > c) \end{aligned} \quad \dots \quad (18)$$

ここに、 $a'$  は係数で、この試験では  $0.17 \sim 0.19$ 、 $c$  は定数で  $0.03 \sim 0.11$  である。式 (18) は全応力や圧密圧力や  $\tau_{oct}$  の方向には無関係である。

式 (18) は柴田<sup>1)</sup>が排水圧縮試験から得た式 (3) と同じものであるから、結局柴田の式は圧縮試験のみならずすべての  $\tau_{oct}$  の方向について成立することが証明されたわけである。なお3軸状態では

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} (\sigma_1' \sim \sigma_3')$$

であるから式 (3) のダイレタンシー係数  $D$  およびダイレタンシーの発生限界  $\sigma_0$  と式 (18) の係数  $a'$  および定数  $c$  の間にはつぎの関係が成立する。

$$a' = \frac{3}{\sqrt{2}} D, \quad c = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{\sigma_0}{\sigma_m'}$$

これらの関係を用いて柴田の結果を換算すれば、練り返し Weald Clay では  $a'=0.096$ 、 $c=0.17$ 、また練り返し

し London Clay では  $\alpha' = 0.16$ ,  $c = 0.16$  となる。さらに Henkel<sup>2)</sup> の  $a$  (式 (4 a)) を筆者らの  $\sigma_c = 3 \text{ kg/cm}^2$  の試験結果から求めると図-14 のようである。破壊時の  $a$  (図中の F印) は圧縮試験の平均値が 0.14, Extension の平均値は 0.12 となり, Henkel が得たよ

うな両試験の  $a$  の一致はみられなかった。

### 3. くり返しせん断試験

#### (1) 試験方法

試料は 2. と同じものでせん断に先立つ圧密は  $\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$  の下で行なった。供試体が上下端で拘束されているとせん断ひずみが均等に分布しなくなり、特にくり返し試験ではその影響が大きく表われそうなので、拘束を軽減するために供試体の上面とキャップの間にはシリコングリースを塗ったアルミはくをはさみ、下面とポーラスストーンの間にはシリコングリースを塗った厚さ 2 mm のプラスチック板をはさんだ。供試体とポーラスストーンの連絡はポーラスストーンの側面までのびる長いペーパードレーンによっている。

せん断は周圧を一定に保ち、ひずみ制御式（軸方向ひずみ速さ 0.02%/min）で、一つの試験ではまず軸方向に 5% ひきのばし、続いてせん断前を基準として 5% 圧縮し、再び 5% ひきのばすというサイクルを 3 回くり返した後、Extension 破壊を起こさせた。もう一つの試験は  $\pm 10\%$  ずつひずませたが、1 サイクルする前に破壊を起こした。この試験についてはここではふれていない。

#### (2) 応力・ひずみおよび間げき水圧の関係

軸方向ひずみと主応力差および軸方向ひずみと間げき水圧の関係はそれぞれ 図-15 (a), (b) のようである。図-15 (a) からわかるように粘土にはバウシンガー効果が認められる。またサイクルを増すごとに主応力差～ひずみ関係のループは偏平となってくるが、図-15 (b) によれば間げき水圧～ひずみ関係のループはサイクルごとに高くなる。有効応力経路は 図-16 に示すようにサイクルを増すごとに座標原点へ近づいていく。軸方向ひずみが  $\pm 5\%$  の点における応力を用いて  $(\sigma_a - \sigma_r)/2$  と  $(\sigma_a' + \sigma_r')/2$  の関係を求めるとき 図-17 のようにくり返し履歴のない粘土から求めた破壊線 (図中の破線) —— 図

図-14 8 面体せん断応力と Henkel の間げき水圧係数  $a$  の関係

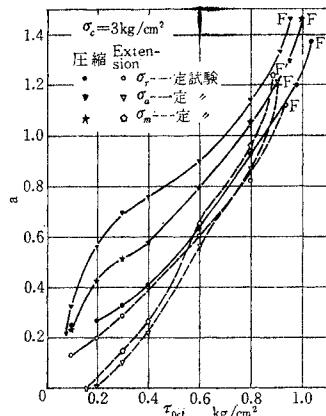


図-15 (a) 応力～ひずみ関係

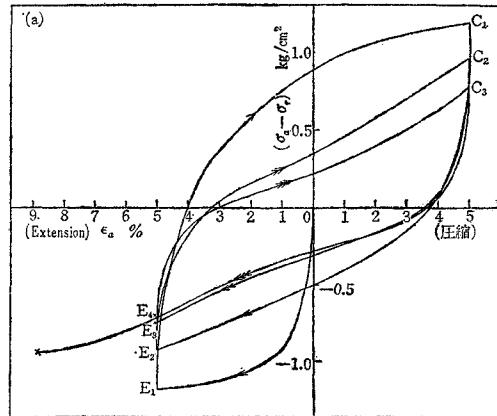


図-15 (b) 間げき水圧～ひずみ関係

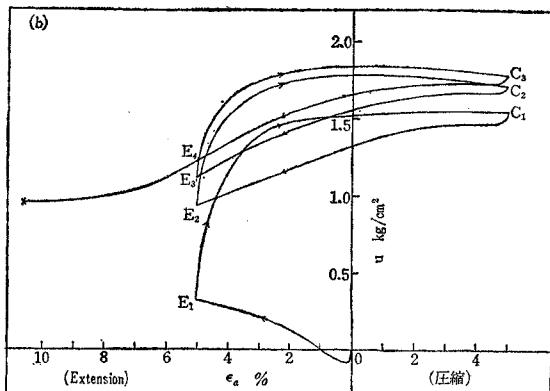
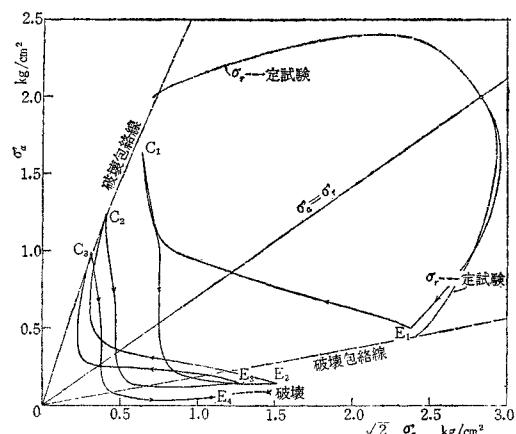


図-16 有効応力経路



4 をうつしたもの) より上方に応力点がプロットされることになって、くり返しによって強度が増加することがわかる。これは高い間げき水圧の発生によって、供試体が過圧密状態になったためと思われる。

#### (3) ダイレタンシーについて

体積圧縮率  $C$  はくり返しひずみを受けても変化しないと仮定すると、 $(\tau_{oxi}/\sigma_m')$  とダイレタンシーの関係は図

図-17 クリ返しそん断による強度増加

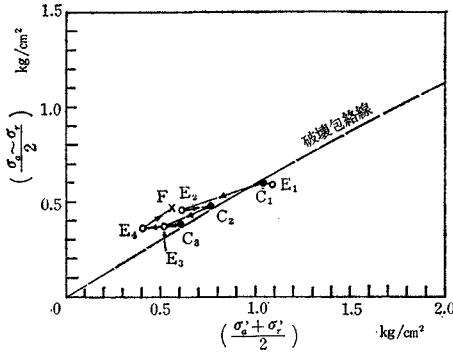
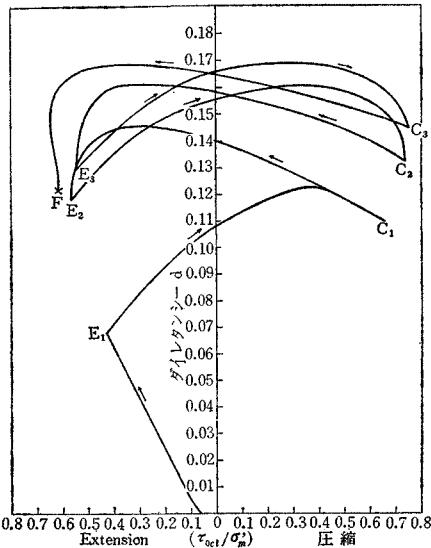


図-18 クリ返しそん断によるダイレタンシーの変化

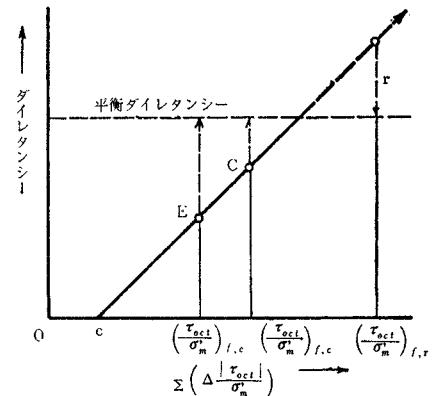


-18 のようになる。サイクルを増すごとにダイレタンシーは増加の傾向を示すが、これはくり返しひずみによって圧縮指数が減少するという一本<sup>5)</sup>の研究結果を考慮すれば単なる見かけ上の傾向なのかもしれない。

図-18において特徴的なことは、ひずみが  $\pm 5\%$  の点でせん断の進行方向が逆転するとダイレタンシーは  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  の変化(減少)に対して直線的に増加しはじめ、やがてたて軸を横切って  $\tau_{oct}$  の方向が変わっても増加を続け、 $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  が 0.3~0.4 をこえると今度は急激に減少はじめるという関係である。

Hvorslev<sup>10)</sup>は圧縮試験中に何かのはずみでせん断応力が減少すると、常識に反して間げき水圧が増加するという観察を述べ、これは Henkel の式(式(4)に式(4a)を代入したもの)において発生する間げき水圧  $d u$  が  $4\tau_{oct}$  の絶対値の関数で表わされるためであろうとしている。また Lo<sup>11)</sup>は乱さない正規圧密粘土をくり返し圧縮試験し、発生する間げき水圧は軸方向ひずみの関数となると述べているが、この試験結果を図-18にならっ

図-19 ダイレタンシーの増大に関する単純な仮定



て整理しなおすと、やはり除荷段階にダイレタンシーが顕著な増加を示すこと、サイクルを増すごとにダイレタンシーが全体として増加することなどがわかる。これらの結果は、ダイレタンシーが巨視的な応力ひずみ関係とはちがって、せん断ひずみまたは  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  の変化に対して非可逆的に起こること、すなわちせん断変形や  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  の変化は、その変化の方向にかかわらず、ある間げき比に近づこうとする方向へのダイレタンシーの発達に寄与することを示しているのではないであろうか。この考えをさらに進めるとつぎのような仮説に到達する。

ダイレタンシーは  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  が図-19の c 点以上になると  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  の変化の絶対値、すなわち  $d(|\tau_{oct}|/\sigma_m')$  に対して一定の発生率で起こる。したがってダイレタンシーと  $d[|\tau_{oct}|/\sigma_m']$  は破壊現象を度外視すれば、理想的にはある程度まで直線関係にある。一方、試料に非常に大きいひずみを与えるとその間げき比は有効平均主応力によってきまる一定値に落着くから、すべての試料には初期間げき比  $e_0$  と有効平均主応力  $\sigma_m'$  できまる究極のダイレタンシー(平衡ダイレタンシーと仮称)が、先述のせん断にともなって増加するダイレタンシーとは一応無関係に存在する。普通の3軸試験において見られるダイレタンシーの推移は、せん断がはじまって  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  が図-19の c をこえると、ダイレタンシーは  $d = a'[(\tau_{oct}/\sigma_m') - c]$  の関係を保って増大する。やがて応力条件が破壊のそれに達すると土粒子同士の接触が不安定となるために急激に平衡ダイレタンシーに近づく。この時せん断が圧縮か Extension かによって破壊の  $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  の値が異なるから、平衡ダイレタンシーへの移行点(図-19の C, E 点)も当然ちがうわけである。ところがくり返しひずみ試験では、 $(\tau_{oct}/\sigma_m')$  の値が破壊応力条件に達する前にその変化の方向が反転してしまうので、ダイレタンシーは増加を続け、ついに平衡ダイレタンシーを越えてしまうことも起こり得る。しかしくり返しの途上で応力条件があまりにも破壊のそれに近づくとやはり粒子同士の接触が不安定となって、ダ

イレタンシーは急激に平衡ダイレタンシーへ下落するであろう(図-19の破線 $r$ )。

この仮説は数少ない例を説明するための暫定的なものであるが、ダイレタンシーとせん断ひずみの性質のちがいを強調するうえで有用ではないかと考える。

#### 4. むすび

練り返し粘土のダイレタンシーと強度の関連を調べようとしたが、特に強調したい結論はつぎのようである。

i) 正規粘土に発生するダイレタンシーを $(\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3')$ 座標空間内で表わせば、等ダイレタンシーに対応する応力点は、原点 $O$ を頂点とし、 $\sigma_1' = \sigma_2' = \sigma_3'$ 線を長軸とする円すい面上にある(図-20(a))。したがって平面 $\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3' = k$ 上では等ダイレタンシーのセンターは図-20(b)の $O'$ を中心とする同心円群となる(図-20(b))。

ii) それに対して等せん断ひずみに対応する応力面は円すい面ではない。

iii) 中間主応力方向に平行な平面上のせん断応力と有効垂直応力およびせん断ひずみの関係は、せん断の方向が圧縮の場合とExtensionの場合で共通である。しかし、両方向にはさまれた部分( $\sigma_1' > \sigma_2' > \sigma_3'$ )におけるこれらの関係は不明である。

iv) 破壊現象を度外視すれば、正規粘土のダイレタンシー $d$ はつぎの単純化した式で表わされるような性質のものであろう。

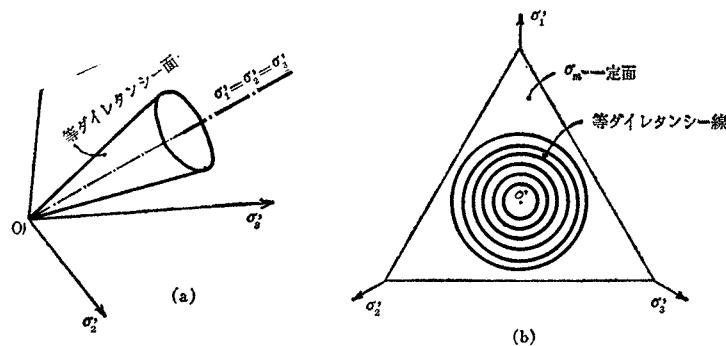
$$d = a' \left[ \Sigma 4 \left( \frac{|\tau_{oct}|}{\sigma_m'} \right) - c \right] \dots \dots \dots \quad (19)$$

ここに、 $\Sigma 4(|\tau_{oct}|/\sigma_m')$ は8面体面上のせん断応力と有効応力の比の絶対値の変化量、 $c$ はダイレタンシーが起らぬ限界の $(|\tau_{oct}|/\sigma_m')$ であり、 $a'$ は一定の係数である。

i)~iv)を総合すれば、ダイレタンシーとせん断強度(またはせん断抵抗)は直接には関係のない現象であると結論せざるを得ない。

末筆ではあるが、筆者らの指導者村山朔郎博士および

図-20  
(a) 応力空間内の等ダイレタンシー面  
(b) 応力空間内に仮想した8面体面上の等ダイレタンシーコンター



この研究を直接ご指導下さった柴田 徹博士に深く感謝する。

#### 参考文献

- 1) 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, pp. 128-134.
- 2) Henkel, D.J.: "The Shear Strength of Saturated Remoulded Clays", Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, 1960, pp. 533-554.
- 3) 水野・徳光・川上：“三軸試験中の間げき水圧について”，土木学会17回年次学術講演会概要 III, 1962, pp. 25-26.
- 4) Parry, R.H.G.: "Triaxial Compression and Extension Tests on Remoulded Saturated Clay", Geotechnique Vol. 10, 1960, pp. 166-180.
- 5) 星埜 和：“土の力学における塑性の基本理論と三軸試験への適用”，土木学会論文集 No. 21, 1954.
- 6) 柴田・輕部：“Influence of the Variation of the Intermediate Principal Stress on the Mechanical Properties of Normally Consolidated Clays”, 6th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, 1965, pp. 359-363.
- 7) Wu, T.H., Loh, A.K. and Malvern, L.E.: "Study of Failure Envelope of Soils", Proc. ASCE, Vol. 89, SM 1, 1963.
- 8) 一木英三郎：“粘土の練り返し効果に関する研究”，京都大学大学院修士論文, 1962.
- 9) 村山・畠：“On the Effect of Remoulding Clay”, 4th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, 1957, pp. 80-82.
- 10) Hvorslev, M.J.: "Physical Components of the Shear Strength of Saturated Clays", Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, 1960, pp. 169-273.
- 11) Lo, K.Y.: Stress-Strain Relationship and Pore Water Pressure Characteristics of a Normally-Consolidated Clay", 5th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, 1961, pp. 219-224.

(1966.5.7・受付)