

# 砂と粘土のせん断特性の類似性と そのメカニズムについて

村山 朔郎・松岡 元

## THE MECHANISM OF SHEARING AND ITS SIMILARITY FOR SANDS AND CLAYS

By *Sakuro MURAYAMA* and *Hajime MATSUOKA*

### Synopsis

Sand is an assembly of particles, therefore its mechanical properties should reflect the microscopic behavior of the individual particles. It is also seen that clays, which consist of very fine particles, show a granular property such as dilatancy. The granular nature of soil is considered to be one of its most essential properties. Therefore, in this investigation, the shearing mechanism of granular soil such as sand and gravel have been studied from the microscopic point of view in order to understand its macroscopic behavior better.

For this purpose, the shearing tests were carried out using not only real soils but also horizontal piles of aluminium rods and rods made of a photoelastic material with various diameters in order to simulate a two-dimensional granular mass. From these experiments, the slope angle of particle contact surface  $\theta$ , the interparticle force  $f$  and the frictional angle between the particles  $\delta$  were chosen as the fundamental factors that control the shearing resistance of soils. The concept of "the frequency distribution of  $\theta$ " was introduced in order to represent the macroscopic shearing resistance and dilatancy.

In this paper, the stress ratio ( $\tau/\sigma_N$ ) and strain-increment ratio ( $d\varepsilon_N/d\gamma$ ) relation is derived from these microscopic considerations as follows;

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = (1.4 \sim 1.5) \cdot \frac{d\varepsilon_N}{d\gamma} + \tan \delta$$

and it is found that this relation is applicable not only to sands but also to clays. From these experimental results the similarity of the shearing mechanism between sands and clays is shown. Furthermore, it is made clear that this stress ratio and strain-increment ratio relation is related to the stress ~ dilatancy theory of P. W. Rowe.

### 1. 緒 言

土質力学の分野では、主として砂と粘土を対象として応力～ひずみ～時間～温度関係などの力学特性、あるいはそれらを支配する法則を見出すべく多くの努力が続けられてきた。まず砂をみると、それは明らかに粒子の集合体であって、個々の粒子の挙動を反映してマクロな力学特性があらわれるものと考えられる。また砂だけでなく微細な粒子からなる粘土にもダイラタンシーなどの粒状性を示さずする現象がみられる。土の土たる特性はその粒状性によるのではなからうかという考えにもとづき、この数年来砂礫などの粒状土のせん断現象の内部機構を微視的な立場で把握して、それを巨視的なせん断特性と結びつける努力を続けてきた。このため、実際の砂礫だけでなく種々の径のアルミ棒および光弾性材料の丸棒の積層体を粒状土の2次元モデルとして用いてせん断試験を行なった。これより、すでに発表<sup>1), 2), 3), 4)</sup>したように粒状土のせん断特

性を直接的に支配する微視的要因として、粒子接点角  $\theta$ 、粒子間力  $f$ 、粒子間摩擦角  $\delta$  をあげ、粒子構造を評価する 1 つの指標として「 $\theta$  の度数分布」という概念を導入して、巨視的量子としてのせん断抵抗およびダイレタンシー量を表現した。ここでは、これらミクロな考察から応力比 (stress ratio) ~ ひずみ増分比 (strain-increment ratio) 関係を誘導し、この関係が砂の排水せん断試験結果のみならず、粘土の排水せん断試験結果にも適用可能なことを述べ、これより砂と粘土のせん断機構の類似性について考察した。また、この応力比 ~ ひずみ増分比関係と P.W. Rowe の応力 ~ ダイレタンシー理論<sup>5)</sup>との関係等についても言及した。

2. 応力比 ~ ひずみ増分比関係の誘導<sup>4)</sup>

まず粒状土のせん断抵抗とダイレタンシー量をその粒状性に着目して微視的な立場から評価することを試みる。Fig. 1 に示すようにせん断面 (必ずしもすべり面でなくてもよい) 上で相対的に滑動している個々

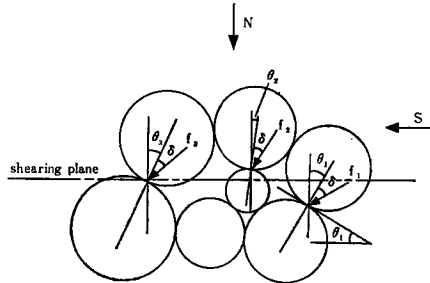


Fig. 1 The slope angle of particle contact surface  $\theta_i$ , the interparticle force  $f_i$  and the frictional angle between particles  $\delta$ .

の粒子接点に着目して、 $i$  番目の接点の粒子間力を  $f_i$ 、粒子接点角を  $\theta_i$  とし、粒子間摩擦角が各粒子接点で完全にモービライズ (mobilize) されて一定値  $\delta$  であるとすれば、せん断抵抗 ( $\tau/\sigma_N$ ) は一般に次のように表わされる。

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \frac{S}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot \sin(\theta_i + \delta)}{\sum_{i=1}^n f_i \cdot \cos(\theta_i + \delta)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに  $n$  はせん断面上の滑動粒子の接点数であり、 $S$  はせん断力、 $N$  は垂直力である。次に粒子接点角  $\theta$  の全範囲 ( $-90^\circ \sim +90^\circ$ ) をある間隔  $\Delta\theta$  の変域 (その中央値を  $\theta_j$  とする) に区分し、 $\theta_j$  変域内の粒子間力  $f_i$  の和として  $F_j [= \sum f_i (\theta_j - \Delta\theta/2 < \theta < \theta_j + \Delta\theta/2)]$  を導入すれば (1) 式は次式に変換できる。

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \frac{\sum_{j=1}^m F_j \cdot \sin(\theta_j + \delta)}{\sum_{j=1}^m F_j \cdot \cos(\theta_j + \delta)} \dots\dots\dots (2)$$

ここに  $m$  は  $\theta$  の分割変域の数である。各  $\theta_j$  変域 ( $j=1 \sim m$ ) 内の粒子接点数 ( $\theta$  の度数 (frequency) と総称する) を  $N_j$  とすれば、

$$\begin{aligned} F_j &= \sum f_i (\theta_j - \Delta\theta/2 < \theta < \theta_j + \Delta\theta/2) \\ &= \frac{\sum f_i}{N_j} \cdot N_j \\ &= \bar{f}_j \cdot N_j \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

であるから、 $F_j$  は  $\theta_j$  変域内の平均粒子間力  $\bar{f}_j$  と粒子接点数  $N_j$  との積の形で表わされることになる。そこで、Photo. 1 に示すような光弾性材料の丸棒 ( $\phi 6.2 \text{ mm}$ ,  $\phi 10 \text{ mm}$ ) の積層体についての光弾性実験によ

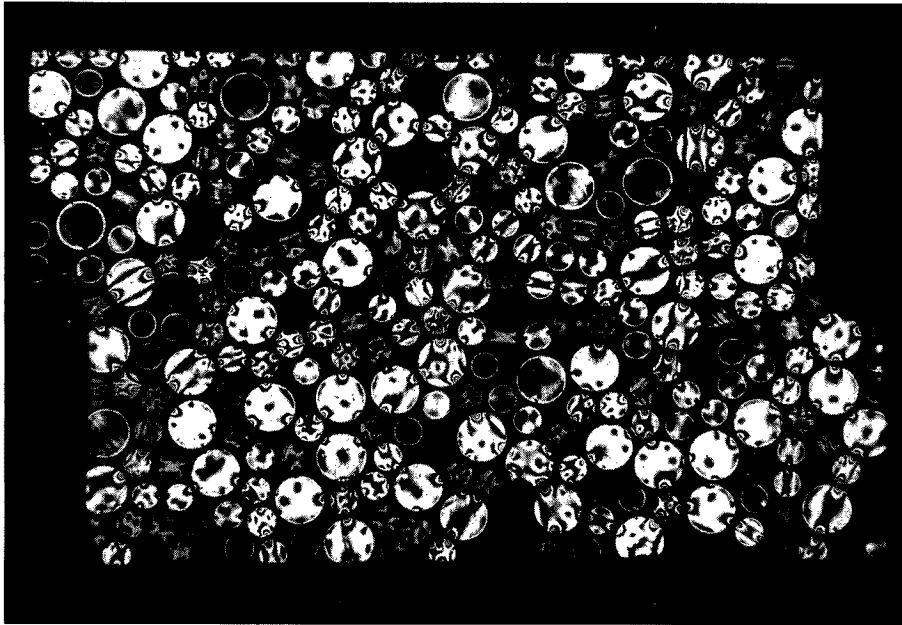


Photo. 1 Photoelastic photograph for a pile of rods at the residual strength.

る一面せん断試験を行ない、まず  $F_j$  と  $N_j$  の間の関係を調べた。その結果、せん断前およびせん断中の  $F_j \sim N_j$  関係の第 1 次近似として次の関係式を仮定してみた。

$$F_j = c \cdot N_j^k \quad (c, k: \text{const.}) \dots\dots\dots (4)$$

ここで (3) 式と (4) 式の比較より明らかなように、 $k=1$  は各変域内の平均粒子間力  $\bar{f}_j$  の大きさが  $\theta_j$  の値にかかわらず一定であることを示し、 $\bar{f}_j$  の  $\theta_j$  に対する分布形がランダムで一定の傾向をもたないことを意味する。 $k=2$  はせん断にともなう  $\bar{f}_j$  と  $N_j$  の分布形の変化の傾向が等しいことを意味している。以前に  $k=2$  という実測例を示したが、最近の測定では、特にせん断初期（ピーク強度以前）においては、 $k=1$  と推定される。今後、せん断にともなう  $\bar{f}_j$  の分布形の変化の傾向をさらに詳細に調べていきたい。

さて (4) 式を (2) 式へ代入すれば次式を得る。

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \frac{\sum_{j=1}^m N_j^k \cdot \sin(\theta_j + \delta)}{\sum_{j=1}^m N_j^k \cdot \cos(\theta_j + \delta)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで離散関数(discrete function)  $N_j$  を連続関数(continuous function)  $N(\theta)$  に近似して (5) 式を積分形で記述すれば、

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \{N(\theta)\}^k \cdot \sin(\theta + \delta) d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \{N(\theta)\}^k \cdot \cos(\theta + \delta) d\theta} \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式より  $N(\theta)$  の関数形さえ与えられれば、積分を遂行することによってせん断抵抗 ( $\tau/\sigma_N$ ) は直ちに算定される。

$\theta$  の度数分布  $N(\theta)$  のせん断にともなう変化の傾向については、各種径のアルミ棒および光弾性材料の丸棒の混合積層体、各種径の鋼球の集合体、粒径の大きい実際の砂礫などを試料として多くのせん断試験を行った結果、一貫してほぼ Fig. 2 のような傾向を示すようである。なお、鋼球および砂礫の場合には、透

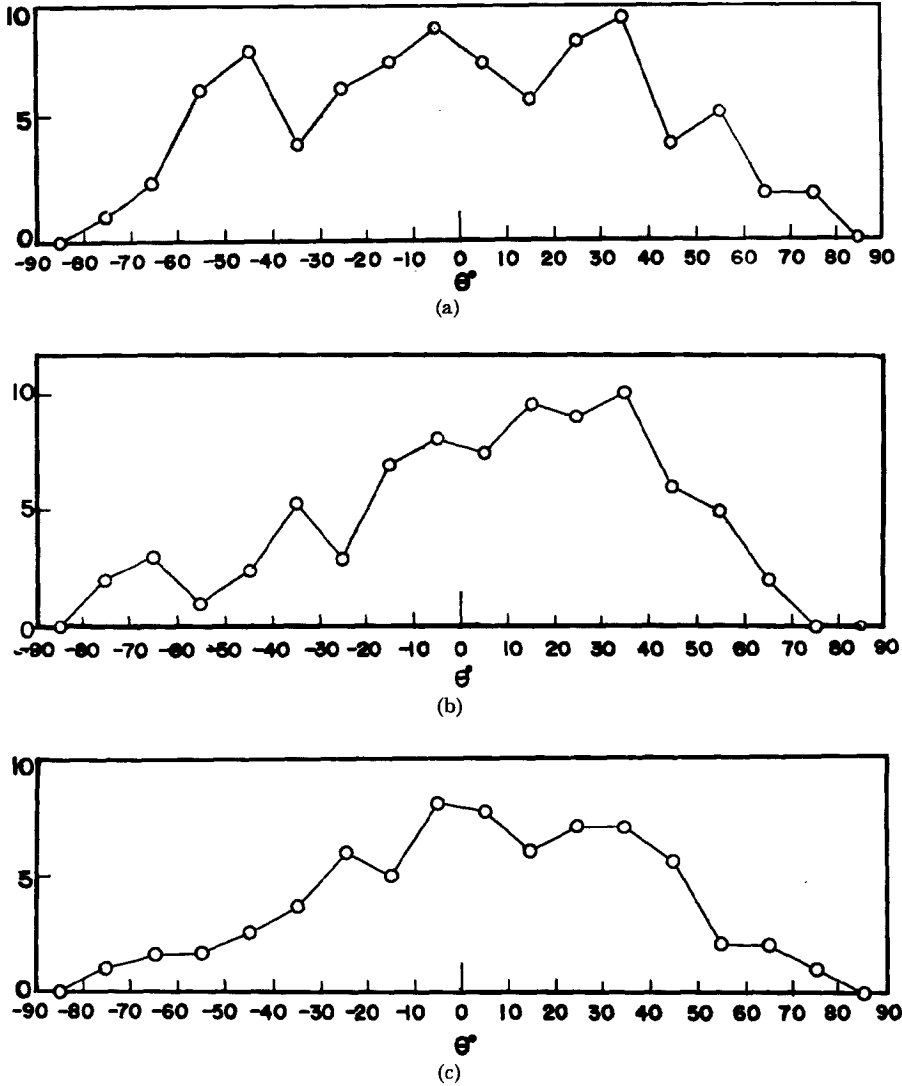


Fig. 2 Frequency distribution of  $\theta$ .  
 (a) before shear  
 (b) at the peak strength  
 (c) at the residual strength

明な側板をもつせん断箱の透明板近傍の粒子接点角が近似的に全体の傾向を代表するものとして調べた。Fig. 2より、 $N(\theta)$ に対してFig. 3に示すような台形分布と三角形分布を近似的に仮定すれば、せん断抵抗 ( $\tau/\sigma_N$ ) は  $k=1$  と  $k=2$  の場合に対してそれぞれ次のように計算される。なお、台形分布の場合は両肩の  $\theta_p$  と  $\theta_n$ 、三角形分布の場合は頂点の  $\theta_p$  がそれぞれ変数であって、せん断にともなう分布形の変化が表現されるわけである。

$k=1$  の場合で台形分布のときは、

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \frac{(\pi/2 - \theta_p) \cdot \sin(\theta_q + \delta) + (\theta_q + \pi/2) \cdot \sin(\theta_p + \delta) - (\theta_p + \theta_q) \cdot \cos \delta}{(\pi/2 - \theta_p) \cdot \cos(\theta_q + \delta) + (\theta_q + \pi/2) \cdot \cos(\theta_p + \delta) + (\theta_p + \theta_q) \cdot \sin \delta} \dots (7)$$

三角形分布 ( $\theta_p = \theta_q$ ) のときは、

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \frac{\pi \cdot \sin(\theta_p + \delta) - 2\theta_p \cdot \cos \delta}{\pi \cdot \cos(\theta_p + \delta) + 2\theta_p \cdot \sin \delta} \dots (8)$$

$k=2$  の場合については  $\alpha \equiv \pi/2 - \theta_p$ ,  $\beta \equiv \theta_q + \pi/2$  として台形分布のときは、

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \frac{\alpha^2 \beta \cdot \sin(\theta_q + \delta) + \alpha \beta^2 \cdot \sin(\theta_p + \delta) + \alpha^2 \cdot \cos(\theta_q + \delta) - \beta^2 \cdot \cos(\theta_p + \delta) - (\alpha^2 + \beta^2) \cdot \sin \delta}{\alpha^2 \beta \cdot \cos(\theta_q + \delta) + \alpha \beta^2 \cdot \cos(\theta_p + \delta) - \alpha^2 \cdot \sin(\theta_p + \delta) + \beta^2 \cdot \sin(\theta_p + \delta) - (\alpha^2 + \beta^2) \cdot \cos \delta} \dots (9)$$

三角形分布 ( $\theta_p = \theta_q$ ) のときは、

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \frac{\pi(\pi^2/4 - \theta_p^2) \cdot \sin(\theta_p + \delta) - 2\pi\theta_p \cdot \cos(\theta_p + \delta) - 2(\pi^2/4 + \theta_p^2) \cdot \sin \delta}{\pi(\pi^2/4 - \theta_p^2) \cdot \cos(\theta_p + \delta) + 2\pi\theta_p \cdot \sin(\theta_p + \delta) - 2(\pi^2/4 + \theta_p^2) \cdot \cos \delta} \dots (10)$$

次に Fig. 4 は粒状土のダイラテンシーの発生機構を微視的な観点からモデル的に示したものである。この図より  $i$  番目の粒子の上を粒子接点角  $\theta_i$  をなす  $(i+1)$  番目の粒子が  $\Delta\theta_i$  だけ角度変化したことによる高さの変化量  $\Delta l_i$  は  $\Delta l_i = (r_i + r_{i+1}) \cdot \sin \theta_i \cdot \Delta\theta_i$  と表現できる。ここに  $r_i$  は  $i$  番目の粒子の半径である。いま、せん断面に垂直な方向に  $n'$  個の粒子が存在するものとすれば、垂直方向の長さの変化量  $\Delta L$  および全体の長さ  $L$  はそれぞれ次のように表現できる。

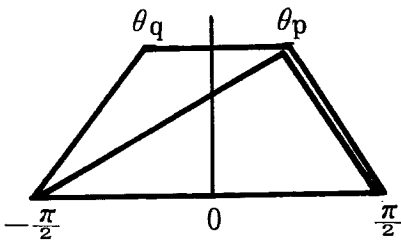


Fig. 3 The trapezoidal and triangular distributions of  $\theta$ .

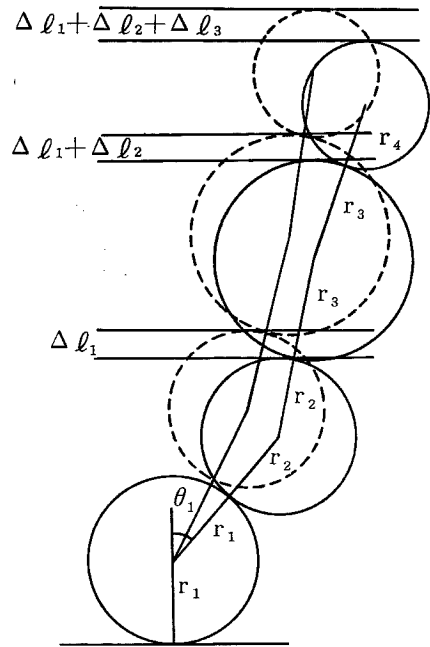


Fig. 4 The dilatancy mechanism.

$$\Delta L = \sum_{i=1}^{n'-1} \Delta l_i = \sum_{i=1}^{n'-1} (r_i + r_{i+1}) \cdot \sin \theta_i \cdot \Delta\theta_i \dots (11)$$

$$L = \sum_{i=1}^{n'-1} (r_i + r_{i+1}) \cdot \cos \theta_i + (r_1 + r_{n'}) \dots (12)$$

さて、単純せん断 (simple shear) 的な一様なせん断ひずみ  $\gamma$  を受けた場合を考えると、垂直 (高さ) 方向についての  $\theta$  の度数分布  $N(\theta)$  も Fig. 2 と同様な変化特性を示すと考えられる。(11), (12) 式において  $r_i$  と  $\theta_i$  は全く独立していて関数関係がないので、ここでは  $(r_i + r_{i+1})$  の平均値を  $\bar{d}$ 、 $\Delta\theta_i$  の平均値を  $\Delta\bar{\theta}$ 、 $\theta_i$  の平均値を

$$\bar{\theta} = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} N(\theta) \cdot \theta \cdot d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} N(\theta) \cdot d\theta} \dots\dots\dots (13)$$

として平均操作を行なった。すなわち、

$$\Delta L = (n' - 1) \cdot \bar{d} \cdot \sin \bar{\theta} \cdot \Delta\bar{\theta} \dots\dots\dots (14)$$

$$L = (n' - 1) \cdot \bar{d} \cdot \cos \bar{\theta} + \bar{d} \doteq (n' - 1) \cdot \bar{d} \cdot \cos \bar{\theta} \dots\dots\dots (15)$$

(14), (15) 式より、

$$(\Delta L / L) / \Delta\bar{\theta} = \tan \bar{\theta} \doteq \bar{\theta} \quad (\bar{\theta}: \text{small}) \dots\dots\dots (16)$$

ここで  $(\Delta L / L)$  は垂直ひずみの増分  $d\epsilon_N$  に相当し、 $\Delta\bar{\theta}$  はせん断ひずみの増分  $d\gamma$  に等しいと考えられる (実測データあり) ので、(16) 式は次式に書き換えられる。

$$d\epsilon_N / d\gamma = \tan \bar{\theta} \doteq \bar{\theta} \quad (\bar{\theta}: \text{small}) \dots\dots\dots (17)$$

なお、単純せん断試験のように試料の断面積が一定の場合には、 $d\epsilon_N$  は慣用の体積ひずみの増分  $d(\Delta V / V)$  に等しいので上式左辺は  $d(\Delta V / V) / d\gamma$  となる。ここで  $\bar{\theta}$  は (13) 式より  $N(\theta)$  が台形分布、三角形分布の場合についてそれぞれ、

$$\bar{\theta} = \frac{(\theta_p + \theta_q) \cdot (\pi/2 + \theta_p - \theta_q)}{3(\pi + \theta_p - \theta_q)} \dots\dots\dots (18)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_p}{3} \dots\dots\dots (19)$$

と計算できる。ここで応力比  $(\tau / \sigma_N)$  とひずみ増分比  $(d\epsilon_N / d\gamma)$  の間の関係を導びくため、ピーク強度付近までに注目して  $k=1$  を採用し、かつ  $\theta$  の度数分布形状の第 1 次近似として三角形分布を選んで (8), (19)

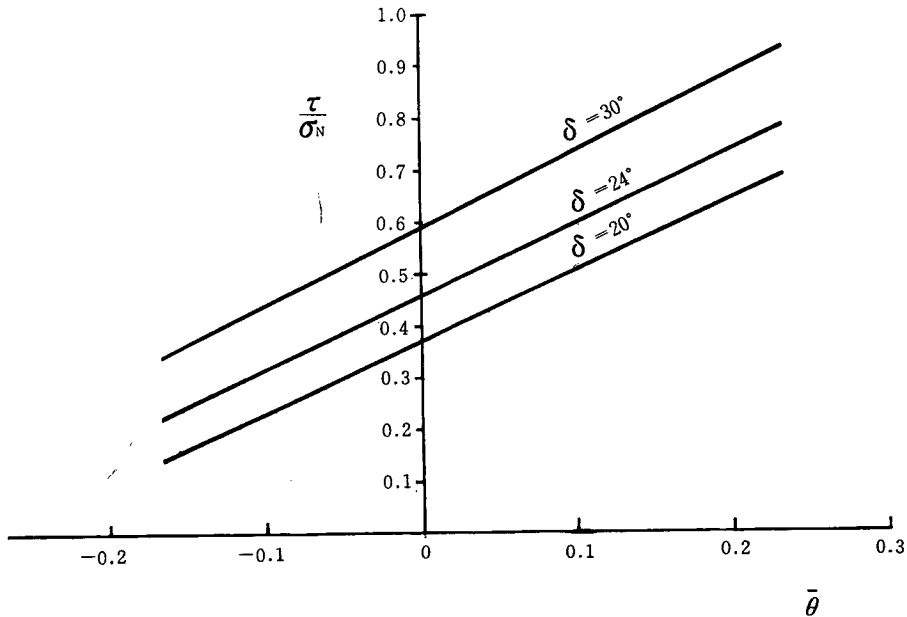


Fig. 5 Relationship between  $\tau / \sigma_N$  and  $\bar{\theta}$ .

式より  $\tau/\sigma_N$  を  $\bar{\theta}$  に対して計算した。この計算結果を Fig. 5 に示す。この図より  $\bar{\theta}$  のある範囲では  $\tau/\sigma_N$  は  $\bar{\theta}$  をパラメーターとして  $\bar{\theta}$  に対してほぼ直線関係をなすことがみられる。ここで (17) 式を考慮すれば応力比 ( $\tau/\sigma_N$ ) ~ ひずみ増分比 ( $d\varepsilon_N/d\gamma$ ) 関係として次式を得る。

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \lambda \cdot \frac{d\varepsilon_N}{d\gamma} + \mu \dots\dots\dots (20)$$

ここに  $\lambda$  は Fig. 5 の直線勾配からほぼ (1.4~1.5) の定数である。また  $\mu$  は粒子間摩擦  $\tan \delta$  に等しい物理定数である。(20) 式よりせん断抵抗 ( $\tau/\sigma_N$ ) が右辺第 1 項の粒子構造にもとづく抵抗 (ダイレタンシーによる抵抗とも解釈できる) の部分と第 2 項の粒子間摩擦にもとづく抵抗の部分にたまたま分離できる形になっているのは興味深い。原式の (8) 式などをみれば  $\tau/\sigma_N$  は  $\theta_p$  や  $\delta$  が入り混った形になっているが、(20) 式を誘導するにあたって設けたいくつかの仮定を用いればせん断抵抗 ( $\tau/\sigma_N$ ) は  $\bar{\theta}$  の部分と  $\tan \delta$  の部分に分離され、すなわち、ダイレタンシーによる抵抗と粒子間摩擦による抵抗の和として表現されることになる。

### 3. 応力比~ひずみ増分比関係の砂のせん断試験への適用

前節で誘導した応力比~ひずみ増分比関係 (20) 式を検証するため、まず砂の単純せん断試験結果を整理したのが Fig. 6 である。なお単純せん断試験機 (N. G. I. 製) では試料の断面積が一定で  $d\varepsilon_N/d\gamma$  は  $d(\Delta V/V)/d\gamma$  に等しくなるので、この図では  $\tau/\sigma_N \sim d(\Delta V/V)/d\gamma$  関係で整理している。Fig. 6 より、せん断初期においては  $\delta$  のモービライゼーション (mobilization) が十分でないのでプロットは下の方から上ってくる傾向があるが、その後はほぼ直線上にのり、ピーク強度までの直線 (実線で示す) の勾配は 1.4~1.5 で (20) 式の勾配と一致し、縦軸切片も 0.44 程度の値で Rowe の求めた砂の粒子間摩擦<sup>5)</sup> と等しい。ピーク強度後の直線 (点線で示す) が少し上になる傾向については、 $\theta$  の度数  $N_j$  の分布形の変化とともに平均粒子間力  $\bar{f}_j$  (3) 式などを参照) の分布形の変化をも考慮すれば説明できるようであるが、まだ定性的評価の段階で

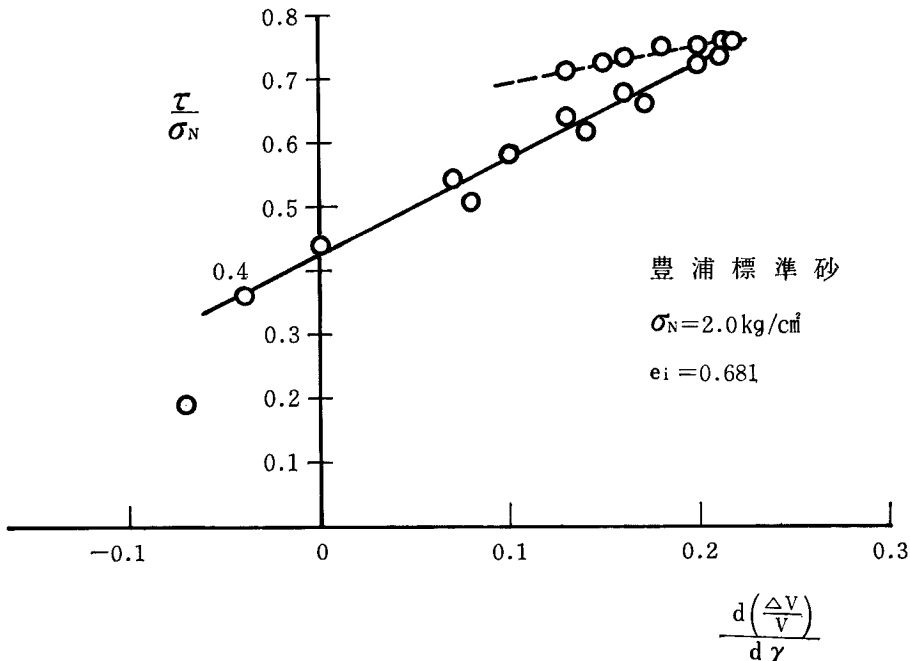


Fig. 6 Relationship between  $\tau/\sigma_N$  and  $d(\Delta V/V)/d\gamma$ .

あるので次の機会にゆずりたい。

次に (20) 式を三軸圧縮試験機による砂の排水試験データに適用する場合には、まず整理する応力面が問題になる。(20) 式を誘導した基本的な概念からすれば、将来その面で土粒子が活発に滑動するであろう潜在すべり面で整理するのが適当であると考えられ、単純せん断の場合もその面で整理しているので、 $(\tau/\sigma_N)_{\max}$  面すなわち  $(45^\circ + \phi_{m0}/2)$  面 (ここに  $\phi_{m0} = \tan^{-1} \tau/\sigma_N$ ) で整理してみた。Fig. 7 は豊浦標準砂の三軸試験データを  $(45^\circ + \phi_{m0}/2)$  面上の  $\tau/\sigma_N$  と  $d\varepsilon_N/d\gamma$  の関係で整理したものである。この図より直線勾配 (1.2~1.3) も縦軸切片 (0.43) もほぼ (20) 式に対応するのがみられる。なお、この図は三好・浅居の実験データ<sup>3)</sup>よりプロットしなおしたものである。

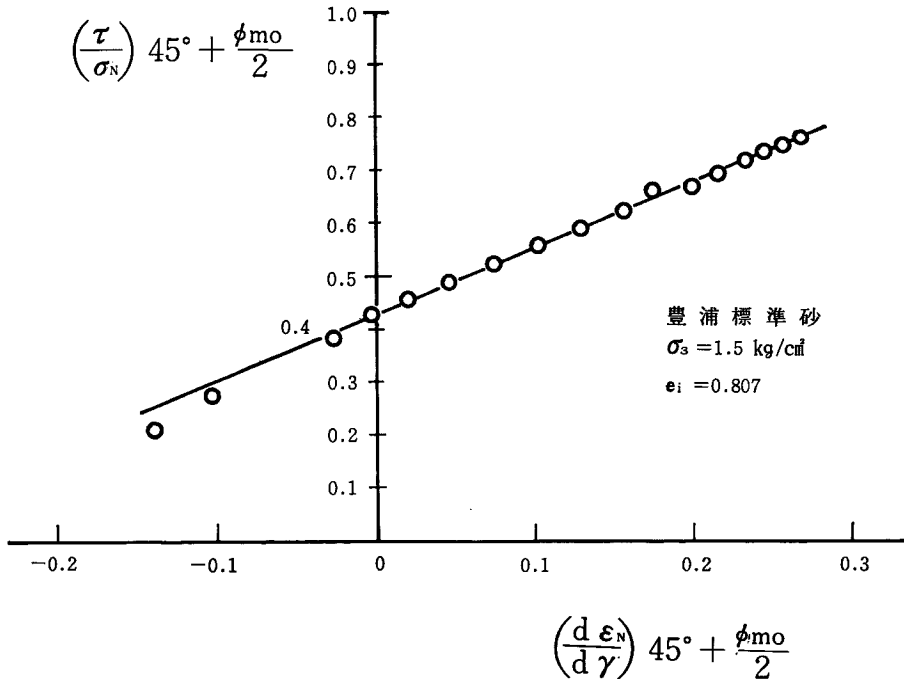


Fig. 7 Relationship between  $\tau/\sigma_N$  and  $d\varepsilon_N/d\gamma$  on the  $(45^\circ + \phi_{m0}/2)$  plane.

八木は豊浦標準砂に対してひずみ制御式で平均主応力  $\sigma_m$  を一定にした三軸試験を行ない、 $\sin \phi$  と  $d(4V/V)/d\gamma$  の関係で整理している<sup>7)</sup>。(20) 式を検証するため、上述の理由から  $(45^\circ + \phi_{m0}/2)$  面上の  $\tau/\sigma_N \sim d\varepsilon_N/d\gamma$  関係にプロットしなおすと Fig. 8 のようになる。この図より  $\sigma_m$  一定の条件でも Fig. 7 に示す側圧  $\sigma_3$  一定の場合の場合とほとんど同じ直線勾配、縦軸切片をもつようであり、また  $\sigma_m$  の値が 0.5 から 2.5 kg/cm<sup>2</sup> まで変化してもほぼ同一直線上にのるのがみられる。また Fig. 7 は比較的ゆるい砂 ( $e_i = 0.807$ ) を、Fig. 8 は比較的密な砂 ( $e_i = 0.639 \sim 0.655$ ) を整理したものであるが、この両図より試料がゆる詰めの場合は (20) 式であらわされる直線の左側の部分に、密詰めの場合は右側の部分にプロットされて、共に同一直線上にのるものと推察される。



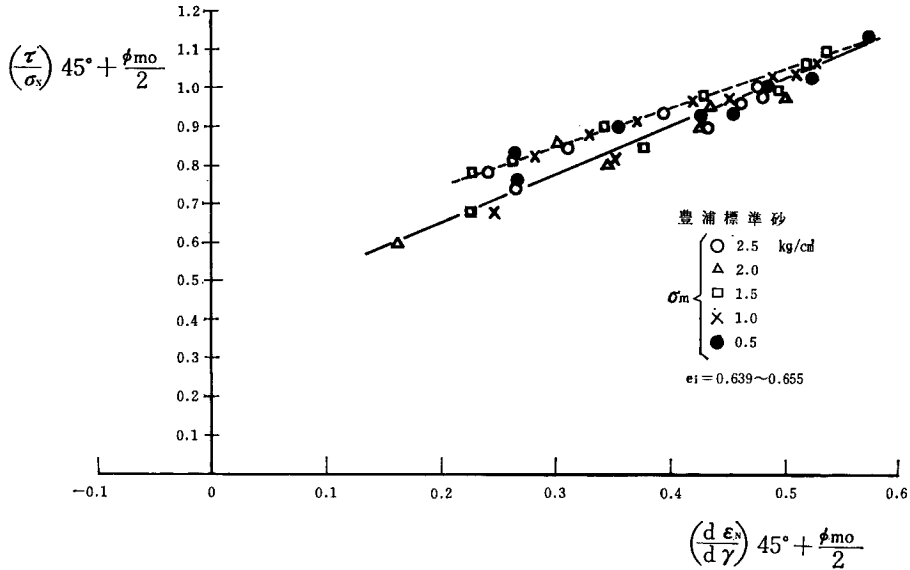


Fig. 8 Relationship between  $\tau/\sigma_N$  and  $d\epsilon_N/d\gamma$  on the  $(45^\circ + \phi_{m0}/2)$  plane.

#### 4. P. W. Rowe の応力～ダイレタンス理論との関係

Fig. 9 は Rowe の応力～ダイレタンス・プロット<sup>5)</sup>を  $(45^\circ + \phi_{m0}/2)$  面上の  $\tau/\sigma_N$  と  $d\epsilon_N/d\gamma$  の関係でプロットしなおしたものの一例である。この図から 5 種類の試料 (上からシルト, 砂 (2 種), ガラス・ビーズ, 鋼球) は互いに平行な直線関係をなし, その勾配は 1.2 でほぼ (20) 式の勾配と対応し, 縦軸切片もほ

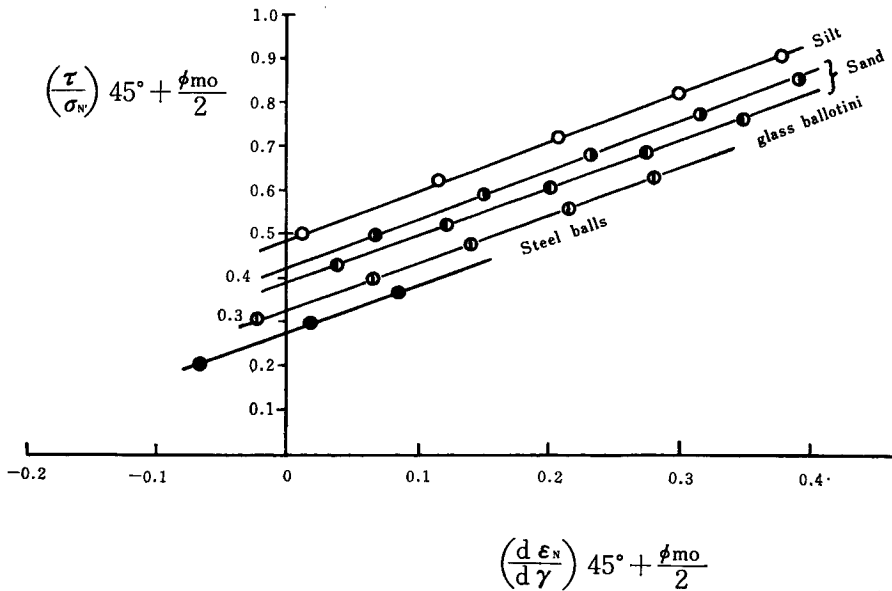


Fig. 9 Relationship between  $\tau/\sigma_N$  and  $d\epsilon_N/d\gamma$  on the  $(45^\circ + \phi_{m0}/2)$  plane.

それぞれの試料の物理摩擦に対応すると推定される。そこで Rowe の理論式<sup>5)</sup>

$$\frac{\sigma_1/\sigma_3}{1+d(V/V)/d\varepsilon_1} = \tan^2(45^\circ + \phi_f/2) \dots\dots\dots (21)$$

を式中の  $\phi_f$  をパラメーターとして  $(45^\circ + \phi_{m0}/2)$  面上の  $\tau/\sigma_N$  と  $d\varepsilon_N/d\gamma$  の関係で書き換えてみたのが Fig. 10 である。この図より、(21) 式は  $\phi_f$  をパラメーターとして (20) 式とほぼ同一の勾配をもつ平行な直線関係となり、(20) 式と (21) 式の間にはかなり密接な対応関係があることがわかる。Fig. 10 において縦軸切片を  $\tan \delta$  として  $\delta$  すなわち  $\phi_\mu$  を計算すると、図中に示すようにその直線の  $\phi_f$  より少し小さい値になるようである。このようなところに Rowe が  $\phi_\mu$  と  $\phi_{cv}$  (限界間げき比(C. V. R.) 状態での  $\phi$ ) の間の量というだけで物理的意味があいまいな  $\phi_f$  なる量を導入しなければならなかった原因があるのではないかと推測される。

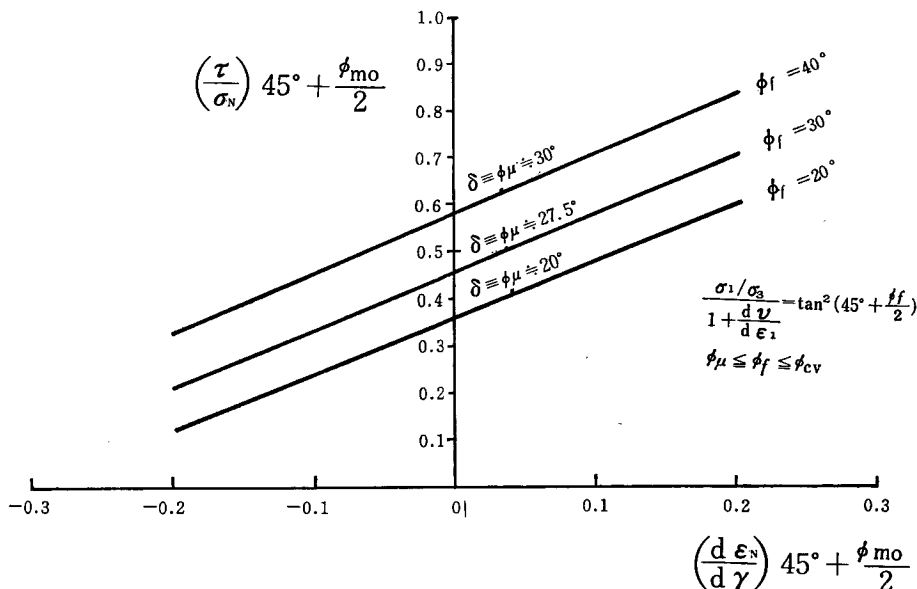


Fig. 10 Rowe's stress dilatancy theory in terms of the relation between  $\tau/\sigma_N$  and  $d\varepsilon_N/d\gamma$ .

### 5. 応力比~ひずみ増分比関係の粘土のせん断試験への適用

Fig. 11 は R. Pusch が多くの電子顕微鏡による粘土の構造の観察からスケッチした鋭敏な粘土 (quick clay) の構造図である<sup>8)</sup>。彼によれば aggregate と呼ばれるいくつかの粘土粒子が集合した固まりが存在するとのことであるが、もしこの aggregate がせん断時に行動単位として1個の砂粒と同様に挙動するものとする、前述の砂に対するせん断のメカニズムは粘土に対しても適用可能なように考えられる。

そこで B. Ladanyi 他が行なった粘土の排水せん断試験データ<sup>9)</sup>をさきほどと同じ  $(45^\circ + \phi_{m0}/2)$  面上の  $\tau/\sigma_N$  と  $d\varepsilon_N/d\gamma$  で整理したのが Fig. 12 である。このようにプロットはほぼ一直線上にのり、その直線勾配 1.2 もおおむね (20) 式と対応するようである。しかも興味あるのは正規圧密 (N. C.)、過圧密 (O. C.) を問わずほぼ一本の線上に整理されることである。このほか、D. J. Henkel の粘土の排水せん断試験データ<sup>10)</sup> (N. C. と O. C.; 過圧密比 O. C. R.=24) も A. D. M. Penman のシルトの排水せん断試験データ<sup>11)</sup>もこの整理をするとほぼ一直線上にのるようである (データ省略)。なお、上述の整理を行なった場合の縦軸切片の

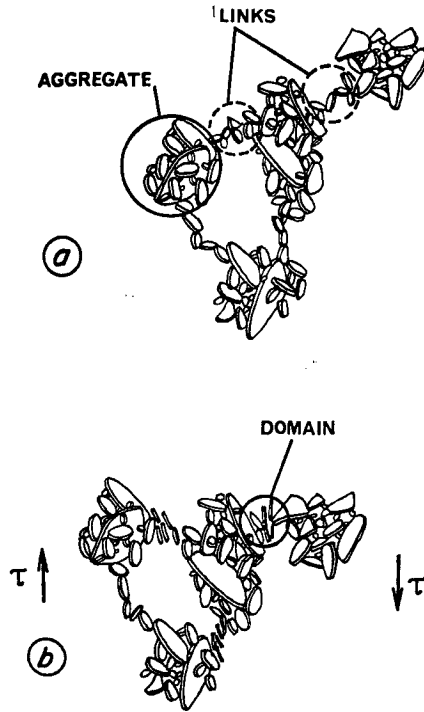


Fig. 11 Structure of quick clay.

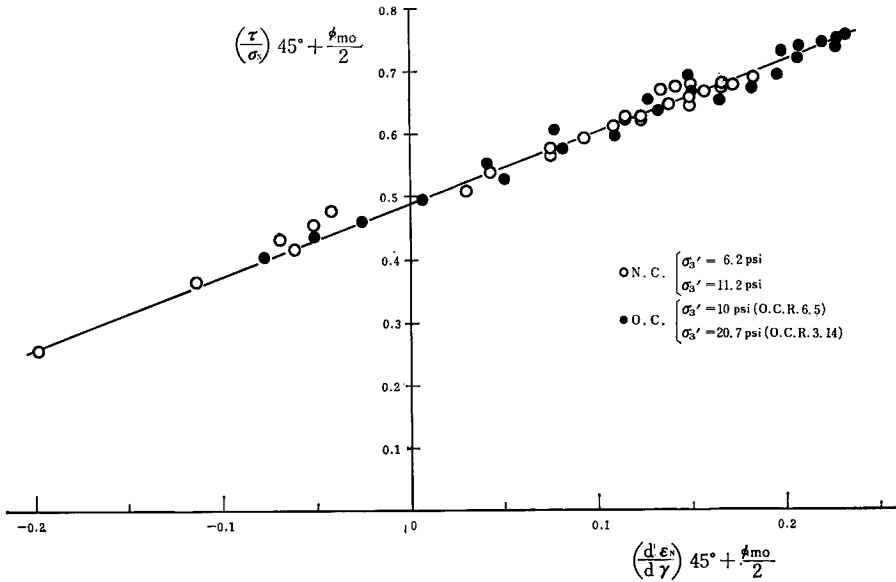


Fig. 12 Relationship between  $\tau/\sigma_N$  and  $d\epsilon_N/d\gamma$  on the  $(45^\circ + \phi_{m0}/2)$  plane.

値は粘土によって 0.35 から 0.5 あたりまで変化するようであるが、砂の物理摩擦に対応する物理定数と等価なものかどうかは目下調査している<sup>4)</sup>。今後、この縦軸切片と塑性指数 P. I. その他の量との関係を検討したい。また、(20) 式を検証する粘土のせん断試験は厳密には  $\sigma_m$  一定の条件で行なわねばならないので、現在実験中である。

ところで、粘土が非排水状態でせん断をうけると、その体積変化の傾向は間げき水圧の変化  $\Delta u$  に変換される。一般に体積ひずみ  $\Delta V/V$  は、 $\Delta V/V = C \cdot \Delta \sigma_m' + d$  ( $C$ : 圧縮係数,  $d$ : ダイレタンスー量) とあらわされるが、非排水の場合は  $\Delta V/V = 0$  であるからダイレタンスー量は  $d = C \cdot (\Delta u - \Delta \sigma_m)$  と表現される<sup>12)</sup>。そこで非排水せん断の場合の体積変化に対応する量として  $(\Delta u - \Delta \sigma_m)$  を採用し、カオリン粘土の非排水せん断試験結果を  $45^\circ$  面上の  $\tau/\sigma_N$  と  $-d(\Delta u - \Delta \sigma_m)/d\gamma_{45^\circ}$  の関係で整理したのが Fig. 13 である。このプロットもいままでの整理と同様、正規圧密・過圧密を問わず一直線上にのるようである。ここで圧縮係数  $C$  を圧密試験結果から推定してダイレタンスー相当量  $d$  を計算し、これを体積変化量と考えて同じように応力比～ひずみ増分比関係でプロットしてみると、その直線勾配は理論値とほぼ対応するようであるが、この点については今後の課題としたい。

なお以上の考え方によれば、Fig. 14 に示すような Mohr の破壊包絡線が正規圧密 (N. C.) と過圧密 (O. C.)

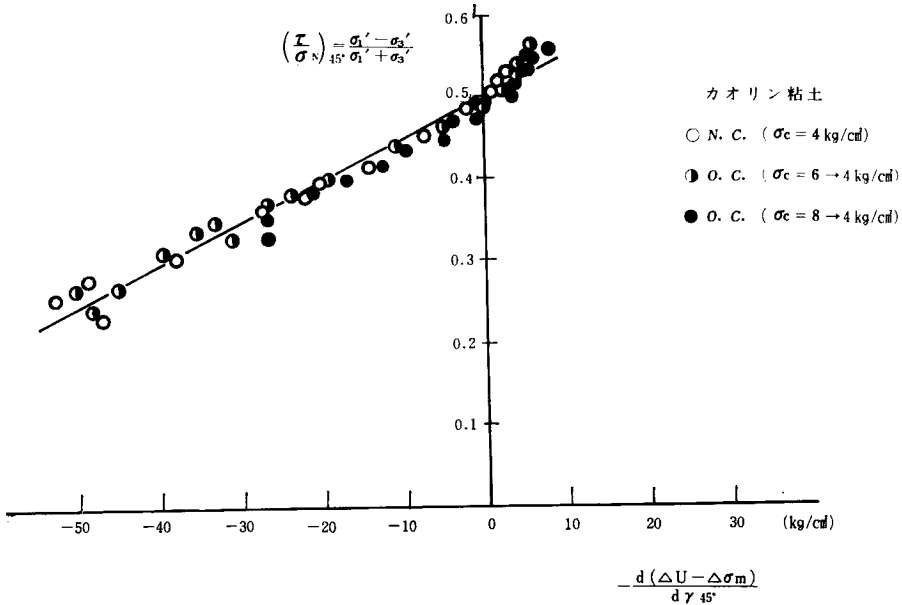


Fig. 13 Relationship between  $(\tau/\sigma_N)_{45^\circ}$  and  $-d(\Delta u - \Delta \sigma_m)/d\gamma_{45^\circ}$ .

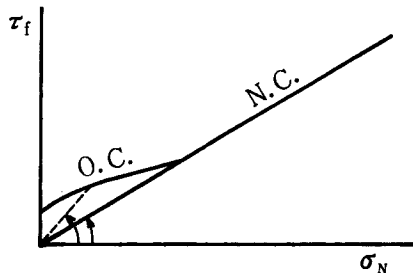


Fig. 14 Mohr's failure envelope of normally consolidated and overconsolidated clays.

C.) によって異なった2つの傾向の直線（あるいは曲線）となることは容易に説明できる。すなわち、正規圧密粘土の破壊包絡線が原点を通るほぼ直線になることが多いのは、正規圧密粘土がせん断をうけた場合には体積減少の一途をたどりほぼ  $d(V/V)/d\gamma=0$  あたりで破壊強度に達することが多いので、破壊時の応力比  $(\tau_f/\sigma_N)$  がほぼ一定値となるためと考えられる。これに対して過圧密粘土がせん断をうけると、 $d(V/V)/d\gamma$  の値が正（体積膨張側を正とする）の最大値になったとき破壊強度  $(\tau_f/\sigma_N)$  に達するようであるが、過圧密比 (O.C.R.) が大きくなるにつれてこの  $d(V/V)/d\gamma$  の最大値は大きくなる傾向があるので  $\tau_f/\sigma_N$  も大きくなり、Fig. 14 に示すような正規圧密の破壊包絡線よりも上に出る曲線になるものと解釈できる。

## 6. 結 言

砂と粘土は本質的に異なった面をもっていると考えられ、例えば時間効果や温度効果の差としてあらわれてくるが、以上述べたように砂も粘土も同一に整理できる面があるということは極めて興味深い。これは砂と粘土のせん断が根源的なところでは類似したメカニズムに従っているということを暗示しているように思われる。しかも正規圧密粘土も過圧密粘土も同一に整理され、排水せん断にも非排水せん断にも同一の法則が適用されそうであるということは非常に興味深いことであり、ここで述べた応力比 $\sim$ ひずみ増分比関係が砂・粘土を問わず土のせん断現象を支配する1つの法則ではなかろうかという期待がもたれるわけである。

最後に、この研究を進めるにあたり適切な御助言をいただいた柴田徹教授ならびに栗原則夫助手（現・日本道路公団勤務）に心からの謝意を表します。また卒業研究の一部として実験に協力していただいた本学学生吉田映、磯田真一両君にも感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 村山朔郎・松岡 元：粒状体のせん断現象の微視的考察，土木学会第24回年次学術講演会，Ⅲ-8，昭44.
- 2) 村山朔郎・松岡 元：2次元モデルによる粒状体のせん断現象の微視的考察，京都大学防災研究所年報，第13号B，昭45. 3, pp. 505-523.
- 3) 村山朔郎・松岡 元・坂東 弘・前田憲一：粒状土のせん断機構に関する微視的考察，第5回土質工学研究発表会，IV-25，昭45.
- 4) 村山朔郎・松岡 元：粒状土のせん断抵抗と粒子構造について，土木学会第25回年次学術講演会，Ⅲ-36，昭45.
- 5) Rowe, P. W.: The Stress-dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 269, 1962, pp. 500-527.
- 6) 三好 一・浅居賢二：砂の応力-変形特性に関する一考察，土木学会関西支部年次学術講演会，昭46.
- 7) 八木則男：砂のせん断抵抗について，京都大学防災研究所年報，第13号B，昭45. 3, pp. 493-503.
- 8) Pusch, R.: Micro-structural Changes in Soft Quick Clay of Failure, Canadian Geotech. J., Vol. 7, No. 1, 1970, pp. 1-7.
- 9) Ladanyi, B., P. Larochelle and L. Tanguay: Some Factors Controlling the Predictability of Stress-strain Behaviour of Clay, Canadian Geotech. J., Vol. 2, No. 2, 1965, pp. 60-89.
- 10) Henkel, D. J.: The Effect of Overconsolidation on the Behaviour of Clays during Shear, Geotech., Vol. 6, 1956, pp. 139-150.
- 11) Penman, A. D. M.: Shear Characteristics of a Saturated Silt Measured in Triaxial Compression, Geotech., Vol. 3, pp. 312-328.
- 12) 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.