

平面変形状態における粘土のせん断特性について (2)

村山 朔郎・軽部 大蔵

PLANE STRAIN TEST ON UNDISTURBED CLAY

By *Sakuro* MURAYAMA and *Daizo* KARUBE

Synopsis

A bye-axial compression apparatus by which one could measure plane strain characteristics of clay conveniently was constructed. And undisturbed Osaka alluvial clay was tested by this apparatus and unconfined compression apparatus.

Test results are:

1) Axial strain ϵ_1 at failure under plane strain condition is less than one under unconfined condition. But $\gamma_{45^\circ} = \epsilon_1 - \epsilon_3$ at failure of two tests are almost equal.

2) Axial strength under plane strain condition is slightly less than one under unconfined condition. It would be referred to higher pore pressure set up which is caused by intermediate principal stress in the plane strain test.

1. ま え が き

著者らは粘土の変形の幾何的な条件がそのせん断特性に及ぼす影響を研究してきた。すなわち昨報¹⁾では、繰り返し正規圧密粘土を三軸圧縮試験した結果と、試作された平面変形試験装置を用いて試験した結果を比較することにより、軸対称変形条件と平面変形条件におけるせん断特性の差の一部を明らかにした。またこの研究の詳しい結果は別の機会²⁾にも報告している。

ところで周知のように、土は種類がちがえばそのせん断特性を異にするのが普通である。したがって何らかの一般的な結論に達するためには種々の土質および履歴の試料の試験結果をつみかさねなければならない。著者らのこの研究にもこの意味でやはり多数の供試体を短時間で処理できる試験方法が必要となった。今回の報告はその一つの試みとして、軸対称試験には一軸圧縮試験機を用い、平面変形試験には新しく試作した装置を用いて行なった一連の試験の結果を述べるものである。

2. 試 験 装 置

軸対称条件の試験に用いた試験機は手動式の一軸圧縮試験機であって、供試体の寸法は平面変形試験に用いたものと同じである。

新しく試作した平面変形試験機は Fig. 1 (a) に示すような構造を持っている。図中の1は供試体であって、その寸法は Fig. 1 (b) に示すように 7cm×4cm×2.8cm の直方体である。

最大主応力はハンドル2を回転させることによりブルーベリグリング3を介して供試体に作用する。この応力による供試体の圧縮量はダイヤルゲージ4で測定される。最大主応力の作用によって、供試体は軸対称的に上下および前後方向に膨張しようとするから、この上下方向の変位をダイヤルゲージ5で検出し、膨張が起らないようにハンドル6を回転させてブルーベリグリング7を介して供試体の上下面に応力を作用させる。この応力が中間主応力となる。中間主応力の作用によって上下の載荷板8と供試体の間に摩擦力が発生

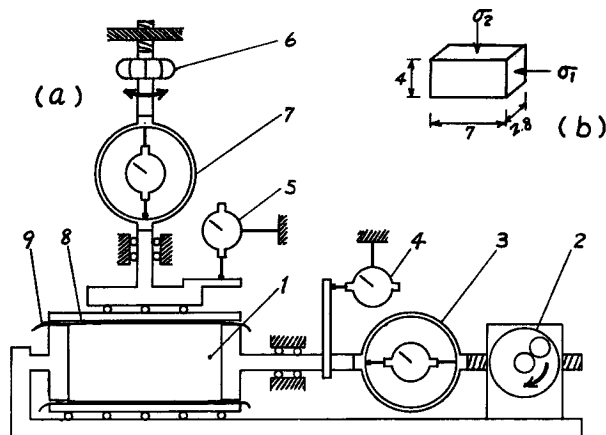


Fig. 1 Layout of Plane Strain Apparatus

する。この摩擦力を軽減させるために載荷板と試料の間にシリコングリースを塗ったうすいゴム膜9をはさみ、さらに全体をボールで支持した。シリコングリースを塗ったゴム膜の摩擦係数は0.07と測定され、この摩擦のために供試体の中央断面における最大主応力は端断面における値より、最も著しい場合で5%小さくなると推定されている。

3. 試 料

試料は大阪梅田の地表面下13m~13.9m (「13m 試料」と呼ぶ)、および17m~17.9m (「17m 試料」と呼ぶ) からシンウォールサンプラーで採取された乱さない粘土であって、物理試験の結果はともに粘土含有量36.5%, LL=69%, PL=33%である。試料には十分に風化していない貝がかなり混入している。

4. 試 験 方 法

13m 試料も17m 試料もともに深さの浅い部分を用いて一軸圧縮試験を行なった。圧縮の速さは毎分1mmとした。

各試料の深さの深い部分を用いて平面変形試験を行なった。圧縮の速さは毎分0.75mmおよび1mmの2種類とした。室温はいずれの場合も約20°Cであった。試験後、供試体の表面を5mm程度削り捨てて中心部の含水比を求めた。平面変形試験では上下面の摩擦のために最大主応力の値が一様にならない。今、摩擦力 F は単位上下面積当り $F=f \cdot \sigma_2$ (ただし f は摩擦係数) で与えられると仮定すると、最大主応力軸に垂直な断面上の平均最大主応力は Fig. 2 下のような分布をすることになる。試験中の最大主応力の

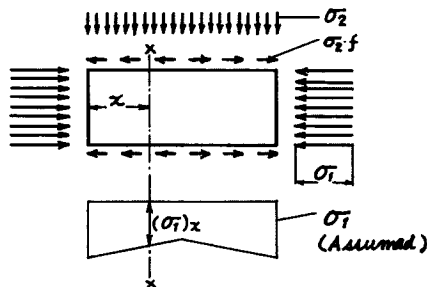


Fig. 2 Stress Condition of Specimen

はこの分布の平均値を用いた。

5. 試験結果

結果の一覧を Table 1 に示す。また試験結果を供試体含水比 w と破壊強度 σ_{1f} の関係に整理すると Fig. 3 のようになる。図中、() に入れて示したプロットは Table 1 の試験名 13-3P に対応するものであって、本来は 13 m 試料であるが、含水比から見ても強度からみても 17 m 試料に近いので、以下の整理は 17 m 試料として行なう。

応力-ひずみ関係 最大主応力方向のひずみと、最大主応力 σ_1 、中間主応力 σ_2 および主応力比 σ_2/σ_1 の関係は Figs. 4 (a), 4 (b), 4 (c) 4 (d) のようである。軸対称試験 (Figs. 4 (a), 4 (b)) と平面変形試験 (Figs. 4 (c), 4 (d)) を比較すると、試験初期の弾性係数 $E_1 = \sigma_1/\epsilon_1$ は平面変形試験の方が大きくなっており、破壊ひずみは平面変形試験の方が小さくなっている。次に、供試体は体積変化を起こさないと仮定して、中間主応力方向に平行で σ_1 に対して 45° をなす平面の方向 (以下では 45° 面と呼ぶ) のせん断ひずみ γ_{45° を計算してみると、

$$\text{平面変形の場合； } \gamma_{45^\circ} = \epsilon_1 - \epsilon_3 = 2\epsilon_1 \quad \therefore (\gamma_{45^\circ})/2 = \epsilon_1$$

$$\text{軸対称変形の場合； } \gamma_{45^\circ} = \epsilon_1 - \epsilon_3 = 1.5\epsilon_1 \quad \therefore (\gamma_{45^\circ})/2 = 0.75\epsilon_1$$

したがって、軸対称試験と平面変形試験の応力-ひずみ関係を $\sigma_1 \sim \gamma_{45^\circ}$ という形で比較しようとすれば、Figs. 4(a), 4(b) の横軸を 0.75 倍にした図、すなわち Figs. 5(a), 5(b) と平面変形試験をあらわす Figs. 4(c), 4(d) を比較すればよことになる。Fig. 5(a) と Fig. 4(c) および Fig. 5(b) と Fig. 4(d) はそれぞれ全体と

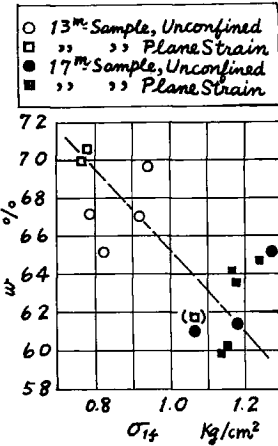


Fig. 3 Axial Strength plotted to Water Content

Table 1 Test Results

Test	Test No.	Sampling Depth (m)	Water Content w (%)	Axial Strain at Failure	Axial Strength	σ_2 at Failure	$(\sigma_{2f}/\sigma_{1f})$
				ϵ_{1f} (%)	σ_{1f} (kg/cm ²)	σ_{2f} (kg/cm ²)	
Unconfined	13-1	13	65.08	5.5	0.826	—	
	13-2	"	66.99	5.5	0.922	—	
	13-3	"	69.72	4.1	0.942	—	
	13-4	"	67.20	4.4	0.789	—	
Unconfined	17-1	17	61.03	6.3	1.065	—	
	17-2	"	61.36	5.0	1.180	—	
	17-3	"	65.20	6.0	1.273	—	
Plane Strain	13-1P	13	70.59	3.8	0.779	0.130	0.167
	13-2P	"	69.96	3.3	0.765	0.115	0.151
	13-3P	"	61.81	4.1	1.062	0.242	0.228
Plane Strain	17-1P*	17	64.69	3.4	1.240	0.330	0.266
	17-2P*	"	64.23	4.2	1.162	0.285	0.245
	17-3P*	"	60.28	4.7	1.152	0.180	0.156
	17-4P	"	63.57	4.3	1.178	0.295	0.256
	17-5P*	"	59.92	4.5	1.035	0.275	0.266

Note * ; Axial Strain Rate, 0.75 mm/min. Others; Axial Strain Rate 1 mm/min

して一致しているといえるであろう。

次に平面変形試験における中間主応力 σ_2 の変化をみると、 $\epsilon_1=0.5\%$ あたりまでは σ_2 はほとんど 0 に近い。このことは、 $\epsilon_1=0.5\%$ までは最大主応力方向の圧縮のみが起ることを示している。この試料は自然含水比、土粒子の比重および単位体積重量から算出した飽和度は 100% であるが、別の実験によれば、三軸圧密後の間げき水圧係数 B は 0.5 であったというからやや不飽和であるのかも知れない。不飽和ならば体積圧縮が生じることも考えられる。また、試験装置は Fig. 1 のような構造であるので、たとえば載荷板 8、ゴム膜 9 および供試体 1 の間の接触が十分でなければ上下方向の膨張を検出するダイヤルゲージ 5 は供試体の変化を正確に反映しないであろう。これら 2 つの考察から、Fig. 4(c), 4(d) が飽和粘土の平面変形条件を正確にあらわしているとは考えられない。主応力比 σ_2/σ_1 は $\epsilon_1=0.5\% \sim 1\%$ の間に急激に増加し、その後はほぼ一定値を保ち、 σ_1 が最大のときの σ_2/σ_1 の値は 0.2~0.3 程度となっている。

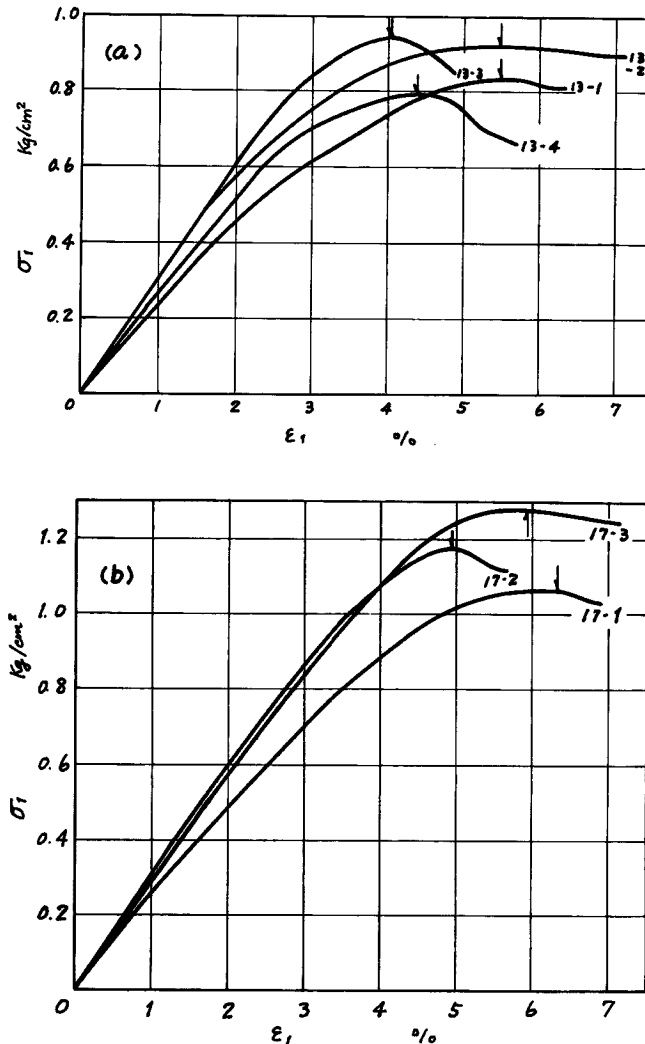


Fig. 4 Stress-Strain Relations, (a) Unconfined Test on 13m-Sample, (b) Unconfined Test on 17m-Samples,

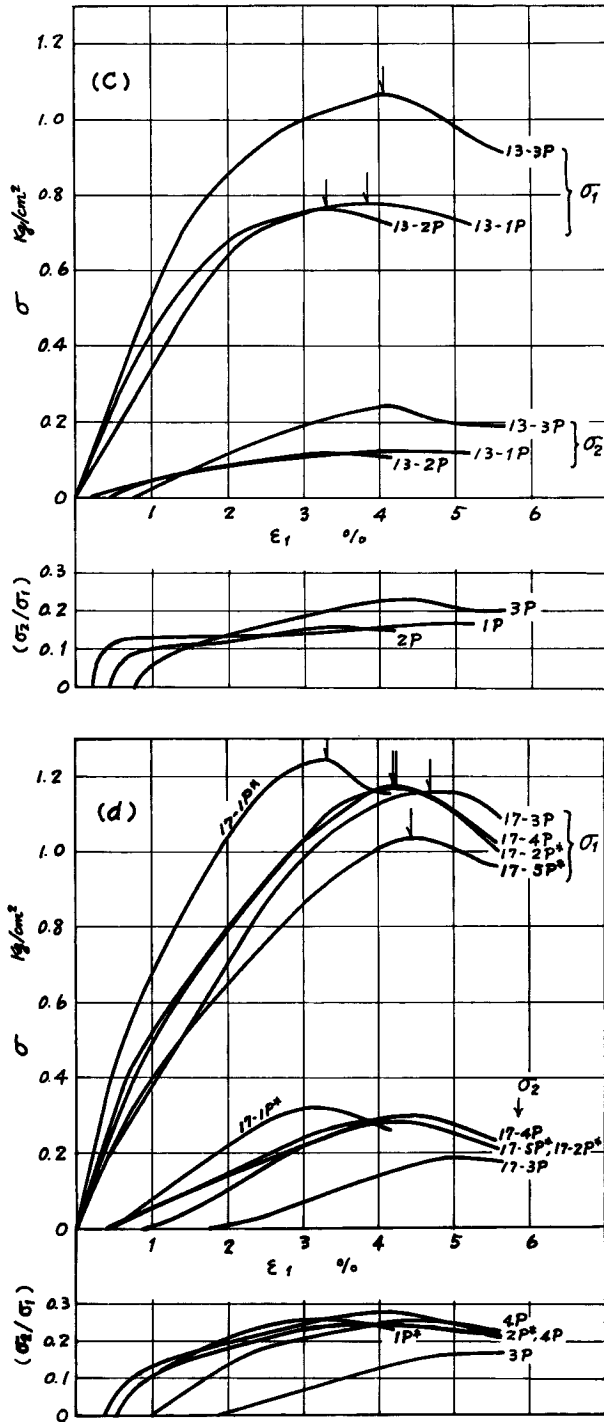


Fig. 4 Stress-strain Relations, (c) Plane Strain Test on 13m-Samples, (d) Plane Strain Test on 17m-Samples.

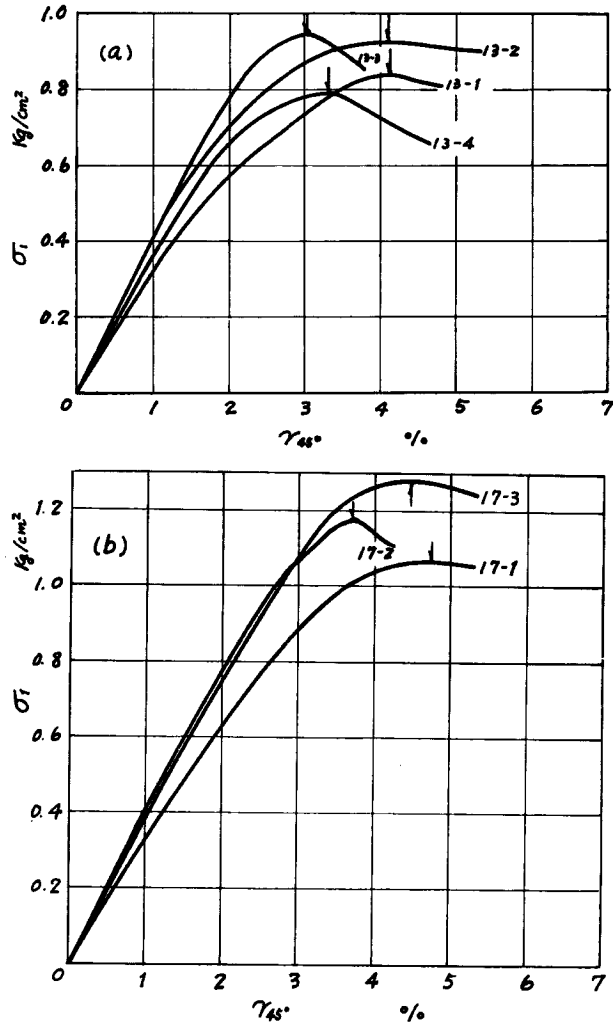


Fig. 5 Relationship between γ_{45° and σ_1 (Unconfined Test)

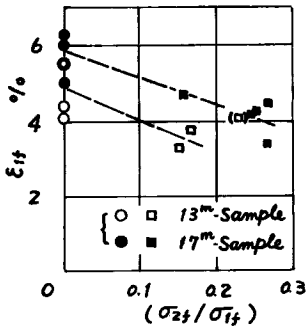


Fig. 6 Axial Strain at Failure plotted to Principal Stress Ratio

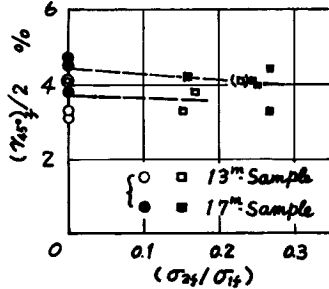


Fig. 7 γ_{45° at Failure plotted to Principal Stress Ratio

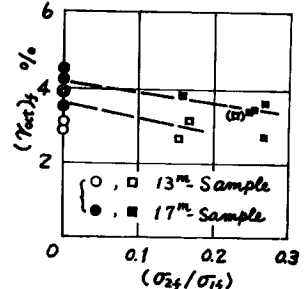


Fig. 8 γ_{70° at Failure plotted to Principal Stress Ratio

破壊ひずみ 最大主応力の最大値 σ_{1F} に対応する最大主応力方向のひずみ ϵ_{1F} を上下方向のこう束の強さをあらわす主応力比 σ_{2F}/σ_{1F} に対してプロットすると Fig. 6 のようである。13 m 試料の破壊ひずみは全体として 17 m 試料のそれより小さく、また同じ深さの試料では上下方向のこう束があるものの方が ϵ_{1F} が小さくなっている。この原因の一つは、上下方向のこう束にともなって最大主応力が不均等となるため、供試体内の限定された部分に破壊が起るためであろう。しかしここではこの原因は無視することとする。次に前述の 45° 面方向のせん断ひずみの破壊時における値 $(\gamma_{45^\circ})_F$ をこう束の強さ σ_{2F}/σ_{1F} に対してプロットすると Fig. 7 に示すようにこう束の影響をあまり受けないことがわかる。また各主応力軸に対して等角度をなす 8 面体面方向のせん断ひずみ $(\gamma_{oct})_F$ と σ_{2F}/σ_{1F} の関係は Fig. 8 のようになって、こう束の影響を受けることがわかる。これら 3 つの破壊ひずみの整理から、巨視的に見る限り、破壊が間主応力に平行な方向のせん断ひずみに支配されることがわかる。

破壊強度 Fig. 9 は破壊強度 σ_{1F} を上下方向のこう束の強さ σ_{2F}/σ_{1F} に対してプロットしたものである。図からわかるように、こう束があれば σ_{1F} はいく分小さくなるようである。この結果は既報^{1),2)}において正規圧密粘土から得た結果——こう束がある場合の方が内部摩擦角が大きくなる——と矛盾しているかのようである。

今回の結果を全応力表示のモールの応力図に描けば、たとえば Fig. 10(a) のようになるであろう。とこ

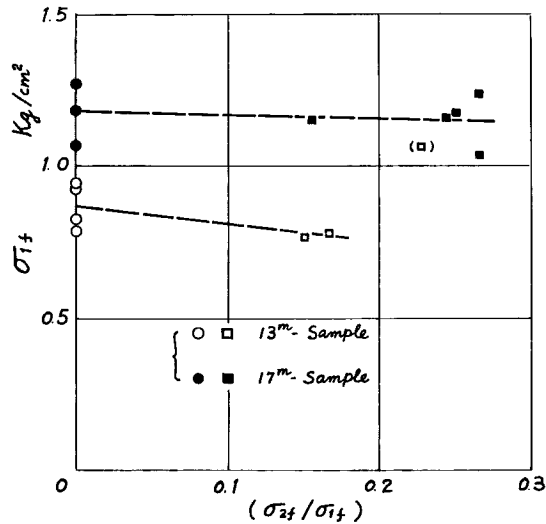


Fig. 9 Axial Strength plotted to Principal stress Ratio

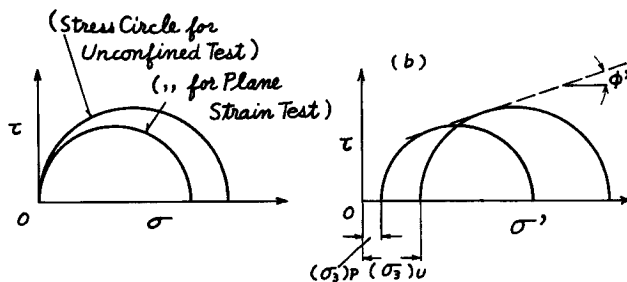


Fig. 10 Failure Conditions in terms of Total Stress and Effective Stress.

ろで供試体は試料が採取されたときに生ずる毛管圧力によって有効応力 σ_0 を持っている。したがって、破壊時の有効最小主応力 σ'_3 は σ_0 からせん断中に発生した間げき水圧 Δu を差し引いた値となっている。すなわち

$$\sigma'_3 = \sigma_0 - \Delta u \quad \dots\dots\dots(1)$$

せん断試験中に発生する間げき水圧 Δu は経験的に次式であらわされる⁸⁾。

$$\Delta u = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3}{3} + a \cdot \Delta \left(\frac{\tau_{0et}}{\sigma_m'} \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに $\Delta\sigma_i$ は試験中に作用させられた全応力表示の主応力の増分、 a は試料によってきまる一定の係数、 σ_m' は平均有効応力 $(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$ である。

Eq 2. において、破壊時の (τ_{0et}/σ_m') の値は平面変形の方が小さいのが普通である。また a は同じ試料ならば過圧密比によってきまり、この場合は $a \leq 0$ であろう。したがって Eq. 2 の右辺第 2 項は平面変形の場合の方が大きいであろう。一方右辺第 1 項は、平面変形試験では $(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2)/3$ であり、軸対称試験では $\Delta\sigma_1/3$ であって、平面変形の方が大きい。したがって、平面変形試験中に発生する間げき水圧を Δu_P 、軸対称のそれを Δu_D であらわせば、

$$\Delta u_P > \Delta u_D \quad \dots\dots\dots(3)$$

したがって、平面変形試験中の有効最小主応力を $(\sigma'_3)_P$ 、軸対称試験のそれを $(\sigma'_3)_D$ であらわすと、Eqs. 2, 3 から、

$$(\sigma'_3)_P < (\sigma'_3)_D \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。したがって、かりに平面変形条件と軸対称条件の両者が過圧密の領域で共通の破壊包絡線を持っているとすれば両者の応力円の位置の関係は Fig. 10 (b) のようになるから、平面変形の強度が軸対称に比べて小さくなるのが当然である。このことは両者が共通の包絡線を持たないで、平面変形試験の包絡線の方が上方にある場合でも、その差がわずかであれば同様にいえるであろう。

Fig. 11 は破壊時の 8 面体せん断応力 $(\tau_{0et})_f$ を σ_{2f}/σ_{1f} に対してプロットした結果をあらわしているが、図からわかるように、平面変形条件では 8 面体せん断応力は軸対称条件に比べてかなり小さくなるようである。

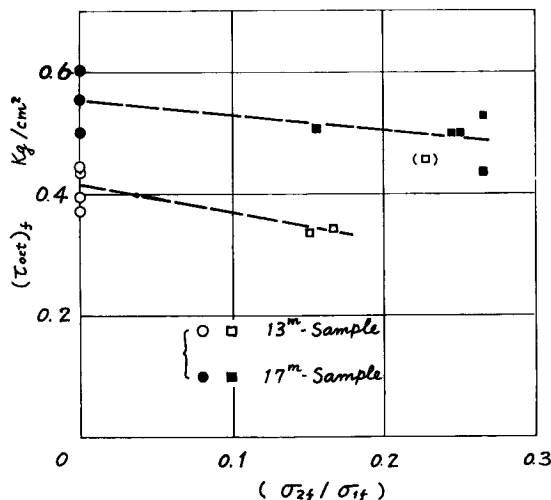


Fig. 11 τ_{0et} at Failure plotted to Principal Stress Ratio

6. 結 論

粘性土のせん断特性に及ぼす変形条件の影響を簡単に測定する一方法として、一軸圧縮試験と新たに試作した平面変形試験装置による試験結果を比較してみたが、試験結果を有効応力で評価できないために、こう東条件の差によってあらわれる破壊強度の差そのものは求めることができなかった。

このことは従来の全応力せん断試験機、たとえば一面せん断試験機、ベーン試験機、一軸圧縮試験機などによる試験結果を比較する際にも念頭におくべきことであり、また逆に、試験結果を現場に適用する際にも「平面変形ならば強度が大きくなる」と一概に考えてはいけないということを示しているであろう。

末筆ではあるが、この報告に用いた試験を実施するにあたって京都大学大学院学生大嶺正紀氏の御協力を受けたことに感謝する。

参 考 文 献

- 1) 軽部大蔵：平面変形状態における粘土のせん断特性について，防災研究所年報10号，昭42.
- 2) 軽部大蔵・原田柁四郎：練り返し粘土の平面変形条件について，土木学会論文集147号，昭42.
- 3) 軽部大蔵・栗原則夫：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 135号，昭41.