

# 砂の平面ひずみ試験と結果の整理方法

望月秋利\*・蔡 敏\*\*・高橋真一\*\*\*

$\sigma_2$  載荷装置や供試体の変形計測方法,  $\varepsilon_2$  制御方法等を改良の上, 砂の平面ひずみ試験を実施した。供試体変形計測用のための非接触変位計で得られたデータをもとに供試体端面拘束, ベディングエラーについて検討するとともに, 体積ひずみの計算方法を提案した。せん断特性については, 三軸強度よりも約 $3^\circ$ 大きく, また破壊ひずみは $1/2 \sim 2/3$ になること, また破壊時の中間主応力係数が $0.2 \sim 0.3$ になることその他,  $E$ ,  $\nu$ について検討し, 側方応力との関係を得た。

**Key Words** : sand, plane strain, shear strength, stress-strain curve, dilatancy

## 1. はじめに

平面ひずみ試験は古くから取り組まれている課題の一つで, 今までに多くの試験機が試作され, 砂の平面ひずみ条件下のせん断特性については, 軸対称三軸圧縮に比べて破壊軸ひずみが小さく, 圧縮強度は大きく, かつその強度差は密度の大きい試料の方が大きい, などが結論されている。

著者らは平面ひずみ条件の工学的重要性に注目し, 平面ひずみ条件下の変形~破壊挙動の構成式化の研究を進めてきたが<sup>1)</sup>, これに必要な精度を持つ試験を考えると,  $\varepsilon_2$  方向の制御精度や  $\sigma_2$  の測定精度,  $\sigma_2$  載荷面に働く摩擦の低減, 不飽和土の供試体の体積変化計測方法, 供試体の端面拘束およびベディングエラーの除去方法(後ろ3つは三軸圧縮試験と共通)など解決すべき問題を抱えたまま, せん断中の体積変化や中間主応力の挙動についての信頼できるデータはほとんどないというのが現状である。

本論文で用いた試験機は,  $\sigma_2$  載荷面の摩擦軽減,  $\sigma_3$  方向の供試体変形計測などを工夫したもので, 予備的に実施した試験結果の一部はすでに報告した<sup>2), 3)</sup>。ここでは, 平面ひずみのための  $\varepsilon_2$  制御条件,  $\sigma_1$  載荷面の端面拘束やベディングエラーなどの試験精度向上のための問題点や, 試験結果の整理方法および結果の解釈を中心に検討した結果をまとめた。

## 2. 従来の平面ひずみ試験機

平面ひずみ試験は Kjellman<sup>4)</sup> が3組の平行に向き合う剛板を組み合わせた三主応力制御試験機で行ったのが

最初であると言われている。この形式の試験機は Lorentz ら<sup>5)</sup>, Jakobson<sup>6)</sup>, Hambly ら<sup>7)</sup> が採用したが, 各剛板の交差部で生じるいわゆる“corner junction”の問題を解決するのがむずかしい。

平面ひずみを直接目的とした最初の試験は, Wood<sup>8)</sup> が長直方供試体(L41×W5×H10 cm)を用いる Bishop-Cornforth 型<sup>9)</sup> と呼ばれる試験機で実施したもので, 長供試体を用いることによって, 平面ひずみ制御が容易になる。この形式の試験機はその後, Finn ら<sup>10)</sup>, Lee<sup>11)</sup>, Marach ら<sup>12)</sup> の他, 我が国では市原ら<sup>13)</sup>, 徳江ら<sup>14)</sup> が採用した。しかし市原らが指摘しているように, このタイプは軸荷重載荷面に働く摩擦力の低減が難しく, 結果として  $\sigma_2$  を正確に計測することができない。

Green<sup>15)</sup> は, 8.4 cm×7.6 cm×5.3 cm の直方供試体を用いる試験機を開発した。供試体の小型化に伴い, 応力, ひずみの計測や平面ひずみ条件の制御方法の精度の向上が要求される。Green は  $\sigma_2$  載荷面に働く摩擦力を低減するために  $\sigma_2$  載荷装置をワイヤーで吊し, それが軸変位量のちょうど  $1/2$  だけ上下方向に動く独特な機構を開発した。理論的には, このシステムで  $\sigma_2$  載荷板と供試体との間に働く摩擦力を大幅に減らすことができる。しかし  $\sigma_2$  載荷装置をワイヤーで吊したため, その動きの任意性により, 結局 Bishop<sup>16)</sup> が “It is not a perfect system” と評しているように, この機構は必ずしも期待した通りには作動しなかったものと推測される。いずれにしても, その後に開発される試験機は小型直方供試体を用いるタイプが増えている。

## 3. 用いた試験機

**Fig.1** は試験機の概要図である。この装置はセル内に載荷枠を設け, L64×W41×H80 mm の直方供試体<sup>2)</sup>に底部方向から軸変位を与える<sup>17)</sup>。この構造は, 伸張試験を可能にし, また自立しない緩い砂や軟弱な粘土供試体

\* 正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

\*\* 学生会員 工修 大阪市立大学大学院後期博士課程

\*\*\* 正会員 工修 (株)大林組 技術研究所土木第2研究室

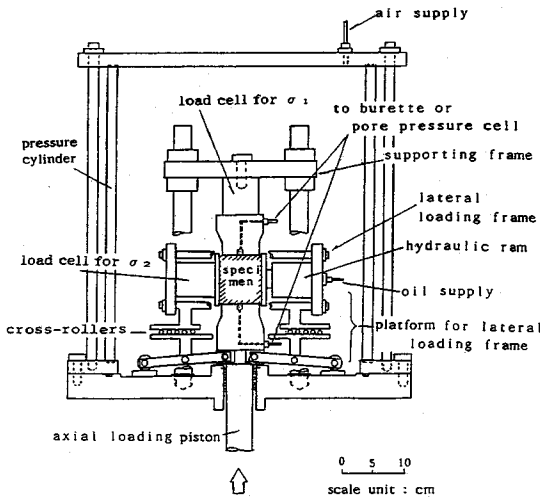


Fig.1 Schematic illustration of apparatus for plane strain test

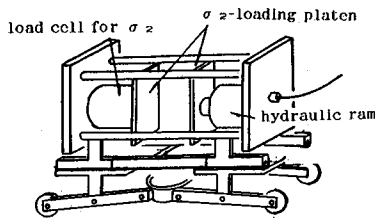


Fig.2 Device for  $\sigma_2$

のセットを容易にする。

Fig.2 は、 $\sigma_2$  载荷装置の概要図である。この装置は  $\sigma_2$  载荷板を  $\sigma_1$  軸変位のちょうど 1/2 だけ連動して上下させ、 $\sigma_2$  载荷軸を供試体中央高さに常に一致せしめる。これによって  $\sigma_2$  载荷面の  $\sigma_1$  方向の摩擦を減らし、この摩擦に起因する供試体下部への過度のひずみ集中を避けることができる<sup>2)</sup>。载荷面にはさらにテフロンコーティングし、グリスを塗布して摩擦低減 ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  方向) を図った。

供試体の変形計測は、Fig.3 に示す上下に移動する非接触変位計 (Gap-sensor, 以下 GS と記す) を用いる。標点は  $10 \times 20 \times 0.05$  mm のアルミ箔で、平面ひずみ試験では 2 面 ( $\sigma_3$  载荷面) 各 4 点、三軸試験では 4 面 ( $\sigma_3$  载荷面) 各 5 点を供試体側面に添付する。ただし GS は金属性载荷板に反応するので、標点は平面ひずみ試験では  $\sigma_1$  载荷板から 1.75 cm、三軸試験では 1 cm 離して添付したため、供試体両端部分の変形は計測できない。

Fig.4 は GS による測定例である。試験中適時 GS を鉛直方向に移動させ計測することによって、供試体に添付した各標点中央でピーク点を持つ計測結果が得られる。図中、ピーク点の大きさは供試体と GS の距離を示し、初期状態における計測結果と試験中の計測結果の差を求めることによって各標点の X, Y 方向への変化量が得ら

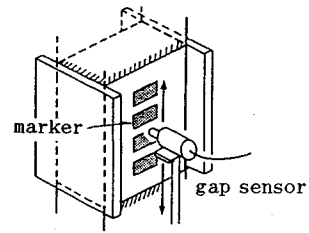


Fig.3 Gap-sensor system for lateral displacement

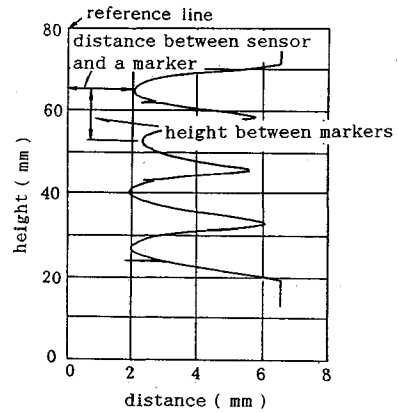


Fig.4 Output record by a gap sensor

れる。一方ピーク点同士の Z 方向の距離は標点間の鉛直距離を示し、この結果試験中の供試体の変形が把握できる。この計測方法で水平方向変位を 1/100 mm、鉛直方向変位を 2.5/100 mm の精度で計測することができる。この方法は、不飽和供試体の体積変化計測の場合問題となる配管内やエアートラップ内の空気圧縮の影響や、供試体へのゴムスリップ貫入の影響をほとんど受けない。

$\sigma_1$  軸方向の変位計測はこの GS 法の外、1/100 mm まで計測できる変位計も併せて用いた。なお、 $\sigma_2$  载荷装置や電気式計測装置を多用しているため、側圧は空気圧载荷とした。側圧と  $\varepsilon_2$  は、約 1.5 sec に 1 回の間隔で計測制御を繰返すフィードバック方式で制御する。

#### 4. 試験材料

Table 1 は実験に用いた 2 種類の砂の主な物理的性質、Table 2 は試験条件を示したものである。供試体は試料を 3 層に分けて、それぞれが所定の密度になるように突き棒と突き板を用いて作製する。

供試体は三軸、平面ひずみ試験とも直方供試体を用いた。なお  $\sigma_1$  载荷板の摩擦低減のために、シリコングリスを塗布した薄いゴム膜 (中央に  $\phi 1$  cm の穴有り) を供試体上下面に入れる。完成した供試体を  $\sigma_1$  载荷軸上に置き、モールドが付いたままの状態上方の  $\sigma_1$  载荷板を固定し、 $0.1 \text{ kgf/cm}^2$  に相当する力を加えて、上部

Table 1 Properties of sand specimen

	Toyoura Sand	Seto Sand
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.649	2.557
$d_{max}$ (mm)	0.42	2.00
Uc	1.57	3.07
$e_{max}$	0.97	0.81
$e_{min}$	0.60	0.54

Table 2 Test condition

Test	Triaxial compression test (TC)	
Drain Condition	Plane strain test (PS)	
Specimen Size	consolidated drain condition(CD)	
Lateral Pressure	L64×W41×H80 mm	
Compression Speed	0.5, 1, 2, 4 kgf/cm <sup>2</sup> (49, 98, 196, 392 kPa)	
Marker for GS	0.175 %/min data record every 0.25% or 0.5%	
Rubber Thickness	10×20×t0.1 mm TC test:5 pieces every 4 planes PS test:4 pieces every 2 planes specimen sleeve:1mm membrane placed on $\sigma_1$ platen:0.2mm	
Sand	Toyoura sand	Seto Sand
$e_0$	0.75	0.57
Dr(%)	58.4	90.0
w <sub>0</sub> (%)	0.0	7.5*
Sr(%)	0.0	33.9

\* A saturated specimen was only used in condition of  $\sigma_3=2\text{kgf/cm}^2$  to verify accuracy of gap-sensor method.

載荷板と試料との密着性を高めた。これにより応力-ひずみ関係の初期勾配の改善ができる。

試料作製後ゴムスリーブを上部載荷板に固定し、0.1 kgf/cm<sup>2</sup>の負圧を供試体内に負荷し、GS用標点を供試体面の所定の位置に貼付ける。その後、三軸圧縮試験の場合は鉛直変位計を、平面ひずみ試験の場合は $\epsilon_1$ 計測用変位計、 $\sigma_2$  載荷装置、 $\epsilon_2$  計測用変位計を取付け、圧力セルをかぶせて試験の準備を完了する。

側圧0.1 kgf/cm<sup>2</sup>を載荷後に供試体内の負圧を解放し、供試体形状をGSで計測し、これを供試体の初期値とする。側圧、軸圧を所定の圧力まで上げ、30分間等方圧密した後、せん断過程に移る。なお平面ひずみ試験の圧密過程では、 $\sigma_2$ を $\sigma_3(=\sigma_1)$ よりも常に0.05 kgf/cm<sup>2</sup>だけ先行させ、 $\sigma_2$  載荷板が供試体面から離れるのを防いだ。せん断中の $\epsilon_2$ 方向のひずみ制御方法は5.で示す。

5. 平面ひずみ条件のための $\epsilon_2$ の制御精度

平面ひずみ条件のための $\epsilon_2$ 制御の必要精度についての研究は少なく、結論は得られていない。Marachら<sup>12)</sup>は、長供試体(L21.6×W2.5×H10.1 cm)を用いた砂の平面ひずみ試験を $\epsilon_2 \leq 3\%$ の範囲に制御した場合、 $\phi$ の変動幅は4度以下と報告している。また、徳江ら<sup>14)</sup>は直方形供試体(8×4.5×8 cm)を用いて、 $0.002\% \leq \epsilon_2 \leq 0.23\%$ の範囲で制御精度を変えた実験を行い、制御精度に対しては $\sigma_2$ への影響が最も敏感で、体積変化、

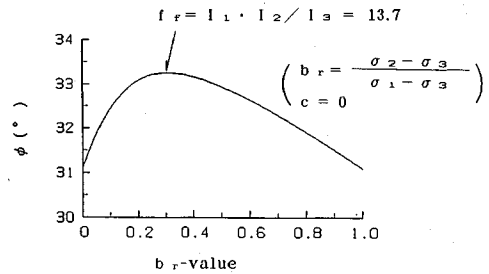


Fig.5 Evaluation of  $\phi$  by  $f_r=I_1 \cdot I_2 / I_3$  to  $b_r$

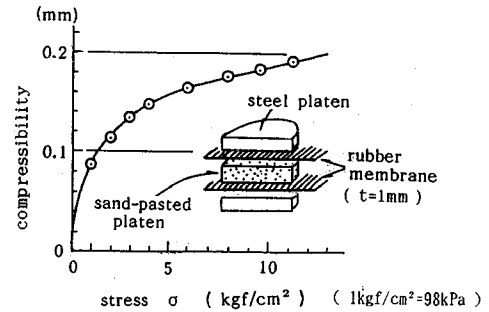


Fig.6 Compressibility of rubber membranes

軸差応力の順で少なくなり、平面ひずみと見なせる範囲は $\epsilon_2 \leq 0.06\%$ である、と結論している。

制御による強度誤差を、著者らが提案した式(1)で示す破壊基準式<sup>2)</sup>で検討した。

$$f_r = \frac{I_1 I_2}{I_3} - \kappa \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $I_1, I_2, I_3$ : 応力の変量

$\kappa$ : 実験定数=13.7

Fig.5は、試算した内部摩擦角 $\phi$ と $b_r$ 値 $[(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)]$ の関係である。三軸試験は $b_r=0$ 、平面ひずみ試験の $b_r$ はおおむね0.2~0.3と推定されるので(Fig.11, 12参照)、 $b_r$ 値の範囲を $0 \leq b_r < 0.3$ とすると、Fig.5の内部摩擦角の範囲は約2度となる。これは、前述のMarachらの範囲とほぼ等しく、むしろ、 $\epsilon_2$ の必要制御精度をこのようなわずかな強度差で議論することは難しく、適切ではない。

徳江らの示した $\epsilon_2 \leq 0.06\%$ の条件は、 $\epsilon_2$ 方向の供試体長さが64 mmであるので、0.04 mm以下の制御が必要となる。供試体への $\sigma_2$  載荷はゴムスリーブを介するので、ゴムスリーブの圧縮量の検討も必要となる。

Fig.6は試料のゴムスリーブへの食込みを含むゴムスリーブの圧縮量と応力の関係を示したものである。ゴムスリーブの圧縮量は無視できない程に大きいので、 $\sigma_2$ と圧縮量の関係を予めプログラムしておき、その量を $\sigma_2$ に応じて補正しながら $\epsilon_2$ を制御するという方法をとった。なお、 $\sigma_2$ 方向の変位計測のために1/1000 mmまで計測可能な変位計を用いた。この手法によって、供

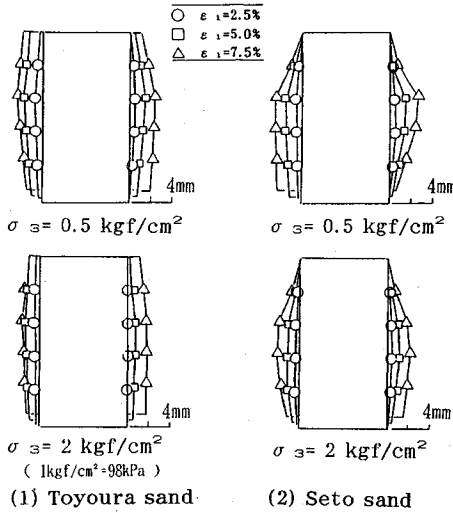


Fig.7 Deformation of specimens

試体の側方変位制御範囲を $\pm 1/100$  mm 以下 ( $\epsilon_2 \leq \pm 0.016\%$ ) にすることができる。この制御幅は徳江らの条件の約 1/4 である。

### 6. 載荷板の端面摩擦と端面拘束

三軸圧縮試験円柱供試体に対して Taylor<sup>18)</sup>, Rowe<sup>19)</sup>, Lee<sup>20)</sup>, Bishop<sup>21)</sup> は、各種の端面摩擦低減条件下での三軸圧縮試験を行い、供試体高さに対する直径比が 2 以上ならば端面摩擦の除去方法によらずほぼ一定強度になる、という結論を得ている。国内では日野ら<sup>22)</sup> が端面摩擦除去法について検討し、2 枚のゴム膜が必要なこと、応力に応じてグリスを使い分ける必要のあることを結論している。著者らは、「高さ/直径=2」の供試体に対して、ステンレス載荷面（中央に  $\phi 1$  cm のポラスストーン有）にグリスを塗布した 0.2 mm 厚のゴム膜を置く方法で端面の摩擦をかなり低減することができたので<sup>3)</sup>、この方法を用いた。

Fig.7 は、GS による平面ひずみ試験の供試体の変形計測結果である。水平変位は縦スケールの 5 倍で表示してある。豊浦砂の場合、わずかに供試体上下端での拘束が認められるものの、破壊後まで比較的一様な変形が生じている。これに対して瀬戸砂の場合は、破壊時以降の供試体上端の拘束が目立つ。瀬戸砂の  $D_r$  は 90% で、比較的早くから滑り面が発生した結果ではないかと考えている。いずれにしても、 $\sigma_1, \sigma_2$  載荷板の摩擦低減を行っているにもかかわらず、供試体上下端で多かれ少なかれ端面拘束の影響 ( $\sigma_3$  方向) を受け、供試体両端面付近の側方ひずみが小さくなる。載荷板の摩擦除去方法の改良も検討したが、7. で述べるベディングエラーが増し、また供試体の“すわり”が不安定となるので、拘束の影響の大きい供試体の上下端部分のひずみを計算から除外

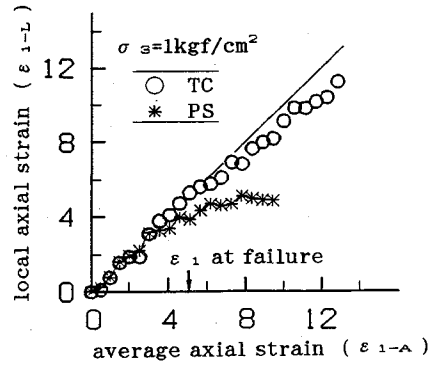


Fig.8 Comparison of  $\epsilon_{1-L}$  to  $\epsilon_{1-A}$  : Toyoura sand

する方法で、この影響の低減を図ることにした。なお、供試体の変形を見る限り、変形の下端部への集中も無く、これは  $\sigma_2$  載荷装置による効果と考えている。

### 7. ベディングエラー

軸ひずみ ( $\epsilon_1$ ) に対するベディングエラーについては、三軸圧縮試験で Sarsby<sup>23)</sup>, Daramola<sup>24)</sup>, Sagasetta<sup>25)</sup> が、またわが国では西垣ら<sup>26)</sup>, 野間ら<sup>27)</sup>, 金ら<sup>28)</sup> が検討し、①試料端部と載荷板との密着不良、②摩擦低減用ゴム膜の圧縮と試料の貫入、③載荷面の摩擦による端面拘束、が主原因であると指摘している。

Fig.8 は、平面ひずみ試験における GS で計測した局所軸ひずみ ( $\epsilon_{1-L}$ , ベディングエラー含まず) と通常の供試体全長で計測した平均軸ひずみ ( $\epsilon_{1-A}$ , ベディングエラー含む) を比較した一例である。局所軸ひずみは、供試体に貼り付けた GS 用標点のうち上下端の標点間の高さ変化から算出したもので、ベディングエラーの影響が無い結果である。破壊まではおおむね両者は等しいが、その後は局所軸ひずみ ( $\epsilon_{1-L}$ ) が小さくなる。これは載荷板の端部付近からすべり面が生じ、それが GS には感知されないためである。4. で記したように、載荷板と供試体の初期密着を十分に行えば、通常のひずみ域でのベディングエラーは実際問題になくてよいようで、軟化過程まで含めた  $\epsilon_1$  の経過は、平均軸ひずみ ( $\epsilon_{1-A}$ ) で表現するのが適切と考えた。

### 8. ギャップセンサー法の精度と体積変化

Fig.9 は、飽和供試体を用いて体積変化の計測精度をビューレット法と GS 法で比較したものである。GS による体積変化の計算では、供試体両端部の変位 (GS では変形が計測できない) を計測点の変位から外挿し、5 つの台形体の集合とし求めたものである<sup>3)</sup>。両者がほぼ等しいことから GS による計測精度はビューレット法と同等であると判断できる。

さて、6., 7. の検討で  $\epsilon_1$  には平均軸ひずみ ( $\epsilon_{1-A}$ ) を、

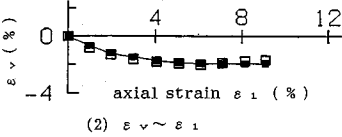
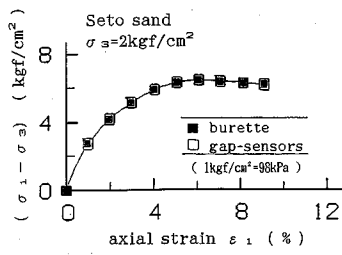


Fig.9 Accuracy of the Gap-Sensor methods

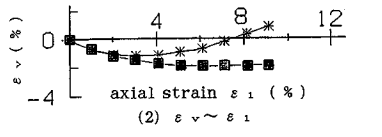
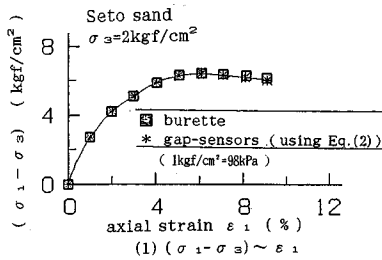


Fig.10 Comparison of Gap-Sensor method used Ep.(2) and burette method

$\epsilon_2, \epsilon_3$  には供試体両端部分のひずみを除外した平均ひずみ ( $\overline{\epsilon_{2-L}}, \overline{\epsilon_{3-L}}$ ) を用いることが適切と判断した。すなわち、供試体の体積変化は式 (2) で求める。この方法を提案法と呼ぶ。

$$\epsilon_v = \epsilon_{1-A} + \overline{\epsilon_{2-L}} + \overline{\epsilon_{3-L}} \dots \dots \dots (2)$$

Fig.10 は、Fig.9 と同じ試験結果 (飽和試料) を提案法とビューレット法で整理し、比較したものである。提案法による体積変化-軸ひずみ関係は、 $\epsilon_1=2\%$  付近までの差は明確ではないものの、その後ビューレット法による結果よりも膨張側に位置する。すなわち、この結果は Fig.7 で示した供試体両端における端面拘束の影響が少ない提案法で整理した結果と、端面拘束の影響を含むビューレット法で整理した結果の差が現れたものと考えられる。軸差応力-軸ひずみ関係には、この程度の体積変化の違いではほとんど影響がないが、体積変化に対してかなり大きな影響を与えるので、正確な体積変化が必要な場合は提案法によるべきである。以降のデータ整理はすべて提案法によった。

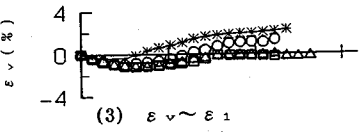
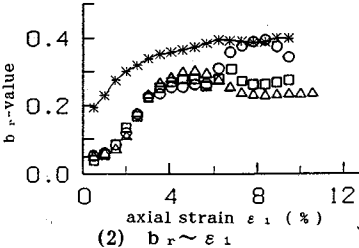
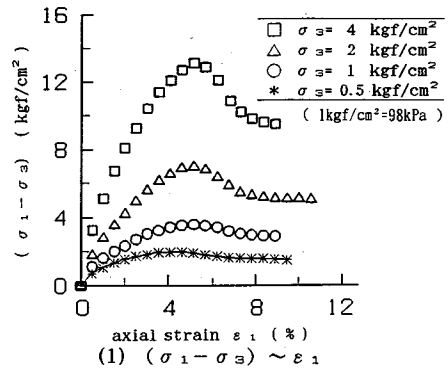


Fig.11 Plane strain test : Toyoura sand

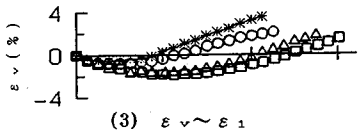
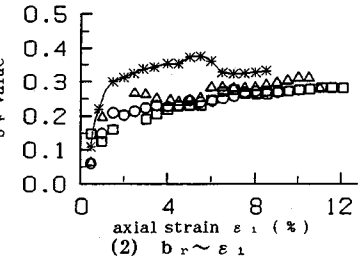
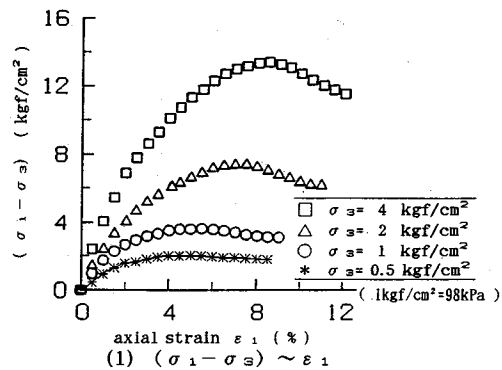


Fig.12 Plane strain test : Seto sand

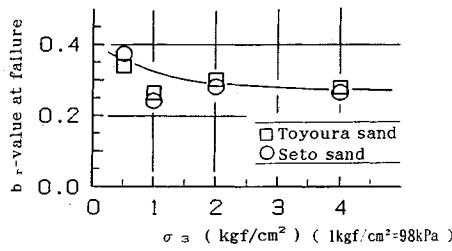


Fig.13  $b_r$ -value at failure

9. 平面ひずみ試験結果と三軸試験との比較

Figs.11, 12 は、平面ひずみ試験結果を提案法で整理した結果である。 $\sigma_3$ が大きくなると破壊ひずみは大きく、また破壊後の強度低下も大きくなる。 $b_r$ は圧縮初期に一旦低下してから増加するが、これは砂のダイラタンシー特性に起因した現象と考えている。Fig.13は破壊時の $b_r$ 値を示したものである。破壊時の $b_r$ は0.2~0.3であるが、側圧が大きくなるとやや小さくなる傾向がある。

Figs.14, 15 は平面ひずみ試験結果と三軸試験結果を比較したものである。平面ひずみ試験結果の方が破壊ひずみは小さく、また破壊軸差応力、破壊後の強度低下とも明確、かつ大きいことは、従来の研究結果と同じ傾向を示す。体積変化傾向は平面ひずみ試験の方が圧縮側に位置するが、これは平面ひずみ試験の平均主応力の方が大きいためと考えている。

Fig.16 は豊浦砂のモール円と、最小二乗法で求めた強度線を示したものである。Table 3 に強度定数をまとめた。 $\phi_{PS}$  (平面ひずみ)は $\phi_{TC}$  (三軸圧縮)よりも2.9~3.5度大きく、この差は式(1)で試算した結果とほぼ等しい。 $c_{PS}$ は $c_{TC}$ よりもわずかに小さい。Fig.17は $\phi_{PS}$ と $\phi_{TC}$ の関係で、図中には公表されている他の試験結果<sup>9),13)</sup>も合わせて示した。著者らの結果は、他のものよりもわずかに $\phi_{PS}$ が大きい。

Fig.18 は破壊ひずみを比較したものである。平面ひずみ試験の $\epsilon_{1f}$ は、三軸試験の1/2~2/3で、市原<sup>13)</sup>の結果よりもその差は大きい。

弾性定数を応力~ひずみ関係の初期接線勾配から定義する場合、線の引き方で変わる曖昧さを避けるために、 $\epsilon_1=0.25\%$  に対して  $E_{0.25}$ ,  $\nu_{0.25}$  を定義し、式(3), (4)で求めた。

三軸圧縮試験：フック則と  $\Delta\sigma_2=\Delta\sigma_3=0$  から、

$$E = \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) / \Delta\epsilon_1 \dots \dots \dots (3)$$

$$\nu = -\Delta\epsilon_3 / \Delta\epsilon_1$$

平面ひずみ試験：フック則と  $\Delta\epsilon_2=0$ ,  $\Delta\sigma_3=0$  から、

$$E = (1 - \nu^2) \cdot \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) / \Delta\epsilon_1 \dots \dots \dots (4)$$

$$\nu = 1(1 - \Delta\epsilon_1 / \Delta\epsilon_3)$$

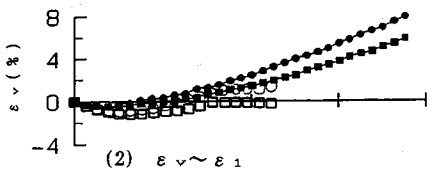
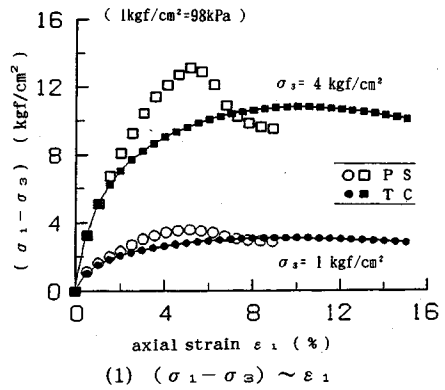


Fig.14 Comparison of plane strain and triaxial compression test : Toyoura sand

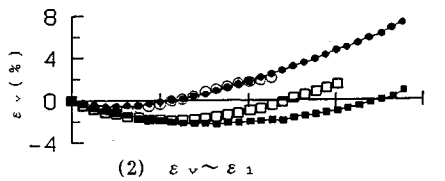
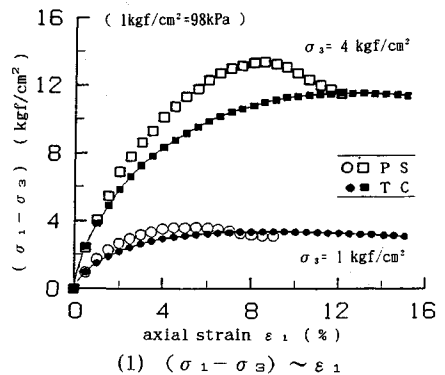


Fig.15 Comparison of plane strain and triaxial compression test : Seto sand

Table 3 Strength parameters

Sample	Triaxial Compression test		Plane strain	
	$c_{TC}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi_{TC}$ (°)	$c_{PS}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi_{PS}$ (°)
Toyoura Sand	0.13	34.4	0.11	37.9
Seto Sand	0.14	35.4	0.12	38.3

Fig.19 (1), (2) は平面ひずみ、三軸圧縮試験で得られた  $E_{0.25}$  と側圧  $\sigma_3$  の関係で、試験方法によらず直線関係が得られている。Fig.20 (1), (2) に  $\nu_{0.25}$  を  $\sigma_3$  の対数に対してプロットした。 $\nu_{0.25}$  は、 $\sigma_3$  が大きいと

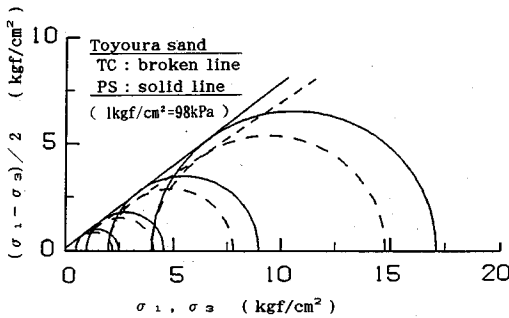


Fig.16 Mohr's circles and strength lines by triaxial and plane strain tests

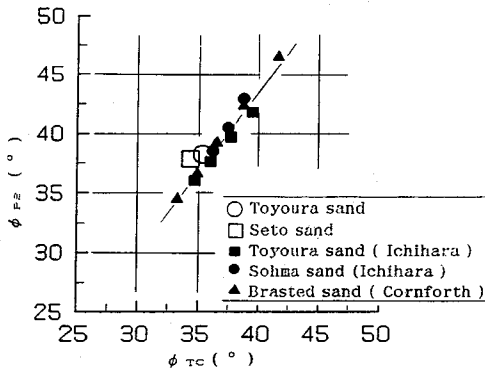


Fig.17 Comparison of  $\phi_{PS}$  and  $\phi_{TC}$

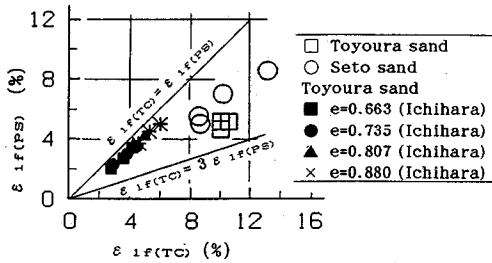


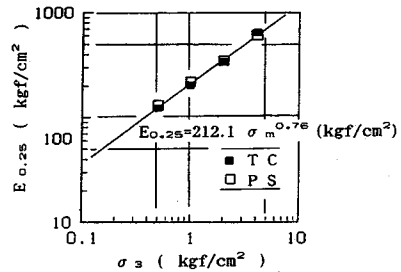
Fig.18 Comparison of axial strains at failure by triaxial compression and plane strain tests

やや小さくなる傾向が認められる。

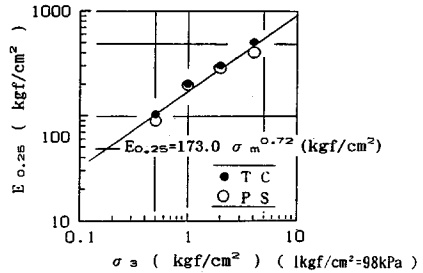
## 10. 結 論

平面ひずみ試験機および試験方法の問題点を検討し、  
 ①側方載荷板の摩擦低減のために開発した  $\sigma_2$  載荷装置の使用、  
 ②ゴムスリーブの圧縮量を補正した  $\epsilon_2$  制御法、  
 ③自動制御による  $\sigma_3$ ,  $\epsilon_2$  の制御法、  
 ④GSを用いた供試体形状の計測を採用した上で、2種類の砂の平面ひずみ試験および三軸圧縮試験を実施し、以下の結論を得た。

(1) グリスを塗布したゴム膜を入れて載荷板の摩擦の低減を行ったが、GSを用いた供試体形状の測定結果より  $\sigma_3$  方向の摩擦を完全に除去することはできないことが判断でき、その結果端面付近の側方ひずみは小さく

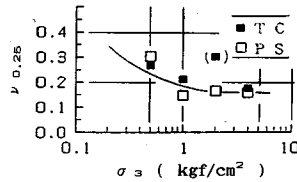


(1)Toyouira Sand

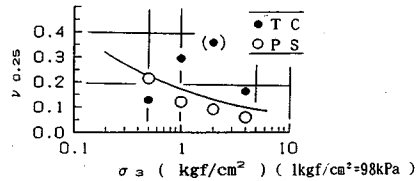


(2)Seto Sand

Fig.19 Relationship of  $E_{0.25}$  to  $\sigma_3$



(1)Toyouira Sand



(2)Seto Sand

Fig.20 Relationship of  $\nu_{0.25}$  to  $\sigma_3$

出る。

(2) GSを用いた局所軸ひずみと全体軸ひずみの比較の結果、載荷板と供試体の密着性を高めれば、通常域の軸ひずみに対するベディングエラーの影響は余り大きくないことが判断できた。

(3) 非接触変位計による体積変化計測法自身の精度は、飽和砂に対するビューレット法と同等である。

(4) 体積変化の計算は、端面拘束、ベディングエラーの検討結果に基づき、 $\epsilon_1$  に対しては供試体全長に対して計測した全軸ひずみを、 $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$  に対しては供試体両端部分を除く整理方法を提案した。この方法によると供試体の体積変化は従来法(飽和砂の場合のビューレット法に相当)で得られる特性とは異なるので、従来法で体積変化を評価することは適切でない。

(5) 平面ひずみにおける  $b_r$  値は一旦低下した後に増加し、破壊時に 0.2~0.3 に近づく。平面ひずみ試験における  $\phi$  は三軸強度よりも 2.9~3.5 度大きく、破壊ひずみは三軸試験の 1/2~2/3 である。

(6)  $\varepsilon_1 = 0.25\%$  に対して定義した弾性係数 E は、三軸、平面ひずみ試験に関わらず、両対数紙上で応力に対してほぼ直線関係を示す。ポアソン比  $\nu$  は応力が大きくなるとやや小さくなる傾向が認められる。

#### 謝 辞

本研究を進めるに当たりご指導頂いた三等正人大阪市立大学名誉教授、本稿をまとめるに当たり貴重な助言を頂いた高田直俊大阪市立大学教授にここに記して感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 望月秋利・蔡 敏・柴田卓詞：Lade モデルと砂における諸定数の決定，土と基礎，Vol.38, No.390, pp.33~38, 1990.
- 2) Mochizuki, A., Mikasa, M. and Takahashi, S.: A New Independent Principle Stress Control Apparatus, Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977, pp.844~858, 1988.
- 3) 望月秋利・高橋真一・蔡 敏：砂の平面ひずみ試験方法と結果の整理，三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.193~200, 1991.
- 4) Kjellman, W.: Report on an Apparatus for Consummate Investigation of the Mechanical Properties of Soils, 1st ICSMFE, Cambridge, Vol.2, pp.16~20, 1936.
- 5) Lorenz, H., Neumeuer, H. and Gudehus, G.: Tests Concerning Compaction and Displacements Performed on Samples of Sand in the State of Plane Deformation, 6th ICSMFE, Montreal, Vol.1, pp.293~297, 1965.
- 6) Jakobson, B.: Some Fundamental Properties of Sand, 4th ICSMFE, London, Vol.1, pp.167~171, 1957.
- 7) Hambly, E.C. and Roscoe, K.H.: Observations and Predictions of Stresses and Strains during Plane Strain of "Wet" Clays, 7th ICSMFE, Mexico, Vol.2, pp.173~181, 1969.
- 8) Wood, C.C.: Shear Strength and Volume Change Characteristics of Compacted Soil under Conditions of Plane Strain, Ph.D. thesis, University of London, 1958.
- 9) Cornforth, D.H.: Some Experiments on the Influence of Strain Conditions on the Strength of Sand, Geotechnique, Vol.14, No.2, pp.143~167, 1964.
- 10) Finn, W.D.L., Wade, N.H. and Lee, K.L.: Volume Change in Triaxial and PLane Strain Tests, ASCE, No. SM 6, December, pp.297~308, 1968.
- 11) Lee, K.L.: Comparison of Plane Strain and Triaxial Tests on Sand, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.96, No.SM 3, May, 1970.
- 12) Marach, N.D., Duncan, J.M., Chan, C.K. and Seed, H.B.: Plane Strain Testing of Sand, Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP 740, pp.294~302, 1981.
- 13) 市原松平・松沢宏：平面ひずみ状態と軸対称ひずみ状態における乾燥砂のせん断特性，土木学会論文報告集，第 173 号，pp.47~59, 1970.
- 14) 徳江俊秀・梅津喜美夫・長谷川浩久：砂のせん断特性に及ぼす側方拘束ひずみの影響，土木学会論文集，第 454 号，III-20, pp.65~74, 1992.
- 15) Green, G.E.: Strength and Deformation of Sand Measured in an Independent Stress Control Cell, Proceeding of the Roscoe Memorial Symposium, Cambridge, pp.285~323, 1971.
- 16) Bishop, A.W.: Thirty Five Years of Soil Testing, 10th ICSMFE, Stockholm, Vol.4, pp.185~193, 1981.
- 17) Mikasa, M.: On the New Type Triaxial Compression Apparatus, presented at the First Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Division I, 1960.
- 18) Taylor, D.W.: 7th Progress Report on shear Strength to U.S. Engineers, Massachusetts Institute of Technology, 1941.
- 19) Rowe, P.W. and Barden, L.: Importance of Free Ends in Triaxial Testing, ASCE, Vol.90, No. SM1, January, pp.1~27, 1964.
- 20) Lee, K.L. and Seed, H.B.: Discussion on Use of Free Ends in Triaxial Testing of Clays, ASCE, Vol.91, No.SM 6, November, pp.173~177, 1964.
- 21) Bishop, A.W. and Green, G.E.: The Influence of End Restraint on the Compression Strength of a Cohesionless Soil, Geotechnique, Vol.15, No.3, pp.243~266, 1965.
- 22) 日野努・龍岡文夫・Fans Molenkamp・鳥居剛・高木昌人：室内土質試験における端面摩擦除去法について，第 18 回土質工学研究発表会，pp.379~382, 1983.
- 23) Sarsby, R.W., Kalteziotis, N. and Haddad, E.H.: Bedding Error in Triaxial Tests on Granular Media, Geotechnique 30, No.3, pp.302~309, 1980.
- 24) Daramola, O.: Discussion on Bedding Error in Triaxial Tests on Granular Media, Geotechnique Vol.32, No.1, pp.71~73, 1982.
- 25) Sagaseta, C. and Sanchez, J.M.: Discussion on Bedding Error in Triaxial Tests on Granular Media, Geotechnique, Vol.32, No.1, pp.73~74, 1982.
- 26) 西垣好彦・岡島洋一：粘性土の変形係数について，第 27 回土木学会年次学術講演会，pp.161~164, 1972.
- 27) 野間達也・和久昭正・門田俊一・村山秀幸：非接触変位計による岩石の軸ひずみ測定方法について，土木学会岩盤力学委員会第 20 回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.61~65, 1988.
- 28) 金有性・越智健三・渋谷啓・石達民・龍岡文夫：人工および自然軟岩の微小ひずみでの変形計数と強度，三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.265~272, 1991.

(1992.11.6 受付)



---

## A METHOD FOR PLANE STRAIN TESTING OF SAND

Akitoshi MOCHIZUKI, Cai MIN and Shinichi TAKAHASHI

A series of triaxial and plane strain tests by using an apparatus having a special  $\sigma_2$ -loading device and a gap-sensor system for measuring the deformation of a specimen are presented. After the effects of the end restriction and the bedding error of a specimen were examined a new method to calculate the volume change of a specimen was proposed. Plane strain tests gave higher strength than triaxial tests by  $3^\circ$  of  $\phi$  and smaller failure axial strains about  $1/2 \sim 2/3$  of those in triaxial tests. The  $b$ -values at failure lie at a range of  $0.2 \sim 0.3$ .  $E$  and  $\nu$  values in relation to the confining pressure were also discussed.

---