

剛板載荷型およびセル型三主応力制御試験機について

Rigid plates type and chamber type of true triaxial test apparatuses

まつ 松 おか 岡 はじめ 元* なか 中 い 井 てる 照 お 夫**

1. まえがき

土の力学挙動を調べる室内試験は三軸圧縮試験に代表されるように軸対称応力下で行われるものが多い。しかし、実際の地盤は多くの場合軸対称応力下でなく相異なる三主応力下にあることから、真の三次元応力状態を再現させるべく種々のタイプの三主応力制御試験機（多軸試験機）が開発されている。いま、直方体あるいは立方体形の試料を用いる三主応力制御試験機を大別すれば、(i)三主応力を剛板で載荷する方式^{1),2),3)}（剛板載荷型）、(ii)三主応力を柔らかいプレッシャーバッグで載荷する方式^{4),5),6)}（プレッシャーバッグ型）、(iii)通常の三軸セル内に一対の応力の載荷機構を設置し相異なる三主応力を載荷する方式^{7),8),9),10)}（セル型）の3種に分類されるが、各々のタイプの試験機はそれぞれ次のような長所、短所を持っており決定的な試験方法はまだ確立されていないようである。

(i) 剛板載荷型 3方向の測定精度が同じで、また一様なひずみを与えることができるが、載荷板と試料間の摩擦のため応力分布の非一様性や試料隅角部のアーチングの影響が問題となる。

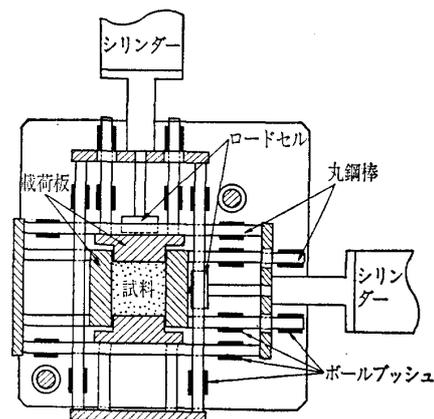
(ii) プレッシャーバッグ型 3方向とも一様な応力を与えることができるが、ひずみ分布の非一様性や試料隅角部におけるプレッシャーバッグのはらみ出しによる影響の問題がある。

(iii) セル型 3方向の載荷方法やひずみの測定方法が異なるので、精度のバランスをいかに保つかが問題となる。また、セルの液圧以外で載荷する二主応力の載荷面の摩擦等の影響を小さくする必要がある。

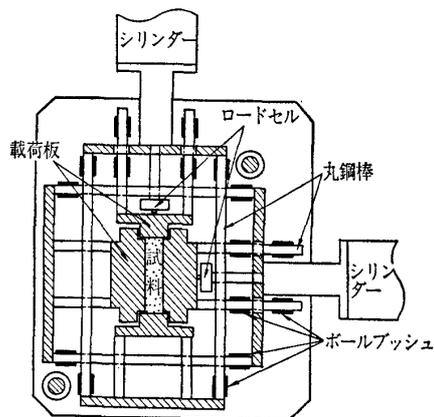
そこで、本報文では現在名古屋工業大学にある剛板載荷型三主応力制御試験機（剛板載荷型平面ひずみ試験機を含む）、セル型三主応力制御試験機の特徴を紹介するとともに、各々の試験の精度向上のための技術について述べる。

2. 剛板載荷型三主応力制御試験機および剛板載荷型平面ひずみ試験機

口絵写真—12, 13および図—1, 2にそれぞれ剛板載荷型三主応力制御試験機および剛板載荷型平面ひずみ試験機



図—1 剛板載荷型三主応力制御試験機の平面図



図—2 剛板載荷型平面ひずみ試験機の平面図

の概要写真、平面図を示す。三主応力制御試験機の供試体寸法は、約100×100×100 mmであり、平面ひずみ試験機の場合は約75×40×160 mmと約75×75×160 mmの2種を用いた。いずれの場合も試料は角型ゴムスリーブの中にセットされる。両試験機の載荷機構は全く同一であり、工夫した点は水平2方向の載荷板、ベロフラムシリンダーなどの載荷装置をすべてボールプッシュで支持し、摩擦なく自由に移動し得るようにして、相対する二つの載荷板が互いにその反力をほかの一つの載荷板からとるという機構にしていることである。このようにすれば、ボールプッシュに摩擦がなければ相対する二つの載荷板に同時に等しい大きさの力が載荷できることになり、変位も二つの載荷板でほぼ等しくなる（シリンダーを左右に一対ずつ設置することも考えられるが、シリンダーには個性があって等しい空

*名古屋工業大学助教授 工学部土木工学科

**名古屋工業大学講師 工学部土木工学科

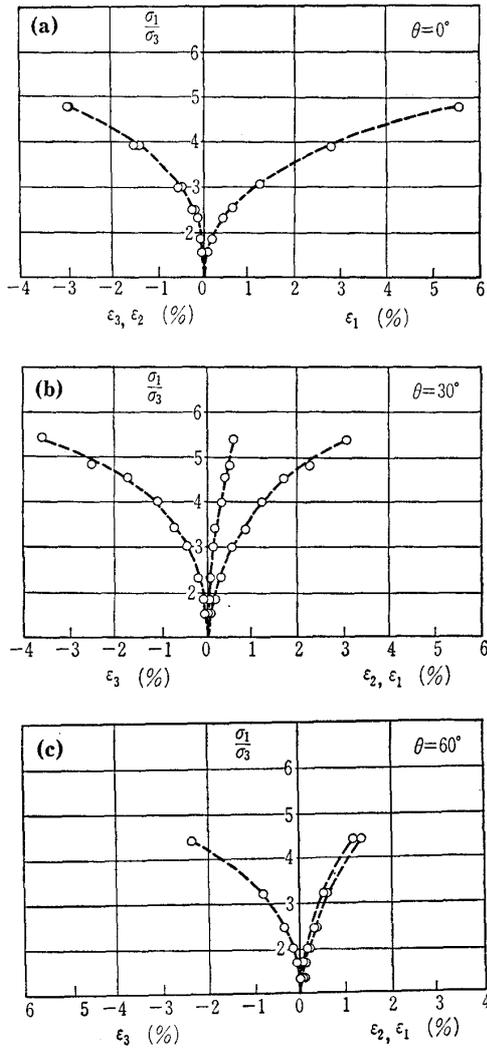


図-3 等方的な乾燥豊浦砂の剛板载荷型三主応力制御試験機による最大・最小主応力比 σ_1/σ_3 ~ 主ひずみ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 関係 (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=30^\circ$, (c) $\theta=60^\circ$

気圧を同時に送ってもピストンが同じ出方をするとはいえない。

このタイプの試験機は、三主応力をすべて剛板で独立に载荷するので3方向の測定精度が同じと考えられ、各試料面にそれぞれ一様な変位(ひずみ)を与えることができる。また3方向のひずみを体積ひずみを介さずに直接ダイヤルゲージで測定することができるので、ひずみの測定精度は高いと考えられる。载荷板と試料間の摩擦を軽減させるため、载荷板と角型ゴムスリーブにシリコングリースを塗り、最近では更にテフロンシートを挿入している。また試料隅角部のアーチングなどによる隣接载荷板間の相互干渉(コーナー・エフェクト)を極力低減させるため、隣接する载荷板間の間隔は応力経路を考慮して適宜調節した。平面ひずみ試験機の場合は、変位の拘束方向の長さを長くして(160 mm)拘束端面の摩擦の影響を少なくするように配慮した。試料としては、乾燥砂、飽和砂ともに実験可能であり、せん断速度を遅くすれば粘性土についても可能と思われる。また、多重ふるい落下法¹¹⁾で作製された異方性堆

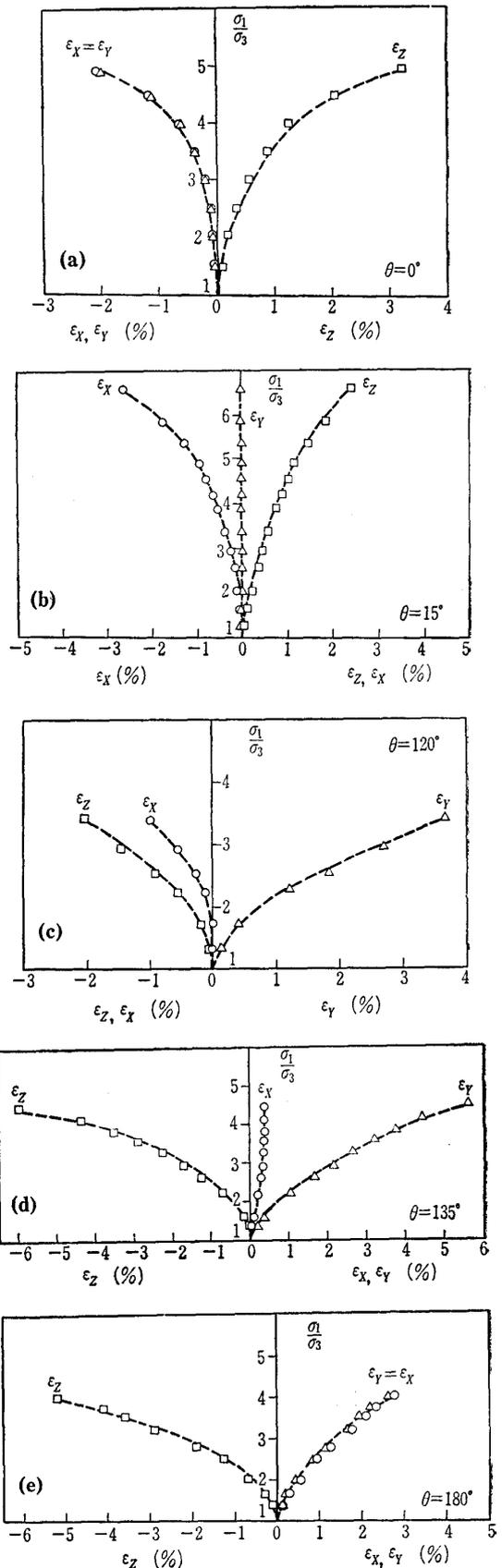
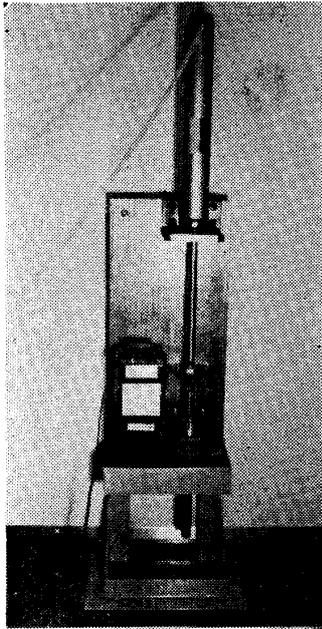


図-4 水平堆積構造をもつ乾燥豊浦砂の剛板载荷型三主応力制御試験機による最大・最小主応力比 σ_1/σ_3 ~ 鉛直主ひずみ ϵ_z , 水平二主ひずみ ϵ_x, ϵ_y 関係 (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=15^\circ$, (c) $\theta=120^\circ$, (d) $\theta=135^\circ$, (e) $\theta=180^\circ$



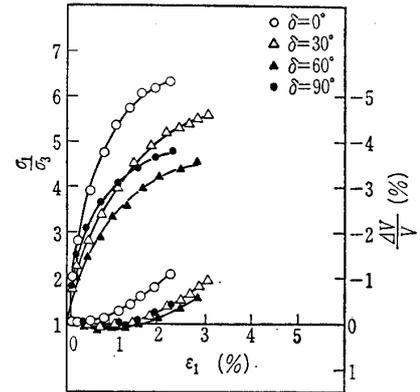
写真一 ひずみ制御試験機のためにシリコン・オイルを一定速度で押し出す装置

積構造をもつ乾燥砂試料や凍結砂試料についても容易に実験することができる。更に、シリンダーにシリコンオイルを一定速度で送り込む装置（写真一参照）を作つて、ひずみ制御試験も可能にした。なお、本試験機はケンブリッジ大学¹⁾やカールスルーエ大学²⁾の剛板載荷型三主応力制御試験機^{1),2)}に比べて、その載荷機構が非常に単純である。本試験機による等方性砂および異方性砂の実験結果を次に示す。

図一3(a)~(c)は、乾燥状態の豊浦砂を突き棒で突き固めて作製した試料（せん断直前の間隙比 $e_0 = 0.74 \sim 0.76$ 、ほぼ等方的な構造と考えられる）の剛板載荷型三主応力制御試験機による試験結果（平均主応力 $\sigma_m = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ ）を示したものである¹²⁾。同図中の θ は正八面体面上の放射状応力経路の σ_1 軸からなす角度を意味し、 $\theta = 0^\circ (120^\circ)$ は三軸圧縮条件、 $\theta = 60^\circ (180^\circ)$ は三軸伸張条件に対応する。これらの図より、 $\theta = 0^\circ (\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3)$ では $\epsilon_2 \approx \epsilon_3$ 、 $\theta = 60^\circ (\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3)$ では $\epsilon_1 \approx \epsilon_2$ となるのがみられ、妥当なデータと考えられる。また $\theta = 0^\circ, 60^\circ$ では破壊時の主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f = 4 \sim 5$ 、 $\theta = 30^\circ (\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2)$ では少し大きくなって $(\sigma_1/\sigma_3)_f = 5 \sim 6$ となるのがみられる。

図一4(a)~(e)は、乾燥状態の豊浦砂を多重ふるい落下法で高さ 22 cm (5 cm 間隔の 3 枚の金網の最上面から供試体中心までの距離) から落下させて作製した異方的な堆積構造をもつ試料 ($e_0 = 0.69 \sim 0.74$) の三主応力制御試験結果 ($\sigma_m = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$) を示したものである¹³⁾。これらの図より、堆積構造の異方性を反映して応力経路により破壊時の主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ に顕著な差がみられる。また(c)図の $\theta = 120^\circ (\sigma_Y > \sigma_X = \sigma_Z : Z$ 軸は鉛直軸, X, Y 軸は水平 2 軸を表す) のとき、 $\sigma_X = \sigma_Z$ であるにもかかわらず、 $\epsilon_X \neq \epsilon_Z$ であるのは異方的な堆積構造のためと考えられ興味深い。

図一5は、最大主応力面と堆積面のなす角度 δ を種々に変えた飽和砂試料の剛板載荷型平面ひずみ試験結果を示したものである¹⁴⁾。試料は、乾燥状態の豊浦砂を多重ふるい落下法で高さ 46 cm (4.5 cm 間隔の 5 枚の金網の最上面から供試体中心までの距離) から空中落下させて堆積させ、浸水後凍結し種々の角度で切り出して作製した。この供試体を等方圧密した後、写真一1の装置を用いてひずみ制御（鉛直方向のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1 = 0.06\%/min$ ）で平面ひずみ条



図一5 各種堆積角度をもつ飽和豊浦砂の剛板載荷型平面ひずみ試験機による最大・最小主応力比 $\sigma_1/\sigma_3 \sim$ 最大主ひずみ $\epsilon_1 \sim$ 体積ひずみ $\Delta V/V$ 関係

件下の排水せん断試験 ($(\sigma_1 + \sigma_3)/2 = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$) を行った。供試体寸法は $75 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ 、せん断直前の間隙比 e_0 は約 0.65 であった。この図より、最大主応力面と堆積面が一致する $\delta = 0^\circ$ の場合に破壊時の主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ が最大で、ダイレイタンスも最も大きいのがみられる。また $\delta = 60^\circ$ の場合に $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ が最小で、ダイレイタンスも最も小さくなっているが、これは $\delta = 60^\circ$ のときに堆積面とすべり面がほぼ一致することを思えば理解される。

現在、写真二に示すように剛板載荷型三主応力制御試験機の各載荷板（一对の載荷板の片方）の中央部に $\phi 70 \text{ mm}$ の円形荷重測定部を設け、試料隅角部のアーチングや載荷板と試料間の摩擦の影響を検討している。円形荷重測定部は載荷板と同一の変位をしつつ、円形部分に作用する荷重だけを測定できるように工夫されている。通常の載荷板全体 ($100 \times 100 \text{ mm}$) に作用する荷重から算定された応力（全体応力と名付ける）と載荷板中央の円形部分 ($\phi 70 \text{ mm}$) の応力（中央部応力と名付ける）を比較することにより、アーチングや摩擦の影響を検討した結果、次のようなことが明らかになってきた。

- 1) 2方向の載荷板が接近するような状況では、予想に



写真二 剛板載荷型三主応力制御試験機の載荷板に設置された円形荷重測定部

No. 1387

反して、試料の隅角部で大きな力が伝達されるのではなく、むしろ試料の中央部に大きな力が伝達される。そして、中央部の応力比は小さくなり、その結果ひずみも小さくなると考えられる。したがって、このような状況では中央部応力を信用すべきである。

2) ただし、鉛直方向 (Z方向) は上の載荷板のみが変位し下の底板は固定されているので、載荷板と試料間の摩擦はかなりあると考えられ、試料中心部分の応力は上板の全体応力と底板の中央部応力 (底板では中央部応力しか測っていない) の平均値として近似的に算定すべきであると考えられる。

なお、これらの結果は現在進行中の研究によるものであるので、中間報告的なものとお考えいただきたい。

3. セル型三主応力制御試験機

セル型三主応力制御試験機は通常の三軸セル内に水平方向の応力載荷装置を設置することにより、セル内の直方体あるいは立方体供試体に相異なる三主応力を載荷できるようにしたものである。しかし、一般のセル型三主応力制御試験機ではセル内の水平応力載荷装置の載荷面が供試体を包んでいるゴムスリーブの外側にあるため、セル圧 (液圧) より小さい応力をこの水平応力載荷装置でかけることはできない。したがって通常このタイプの試験機では最大主応力 σ_1 を鉛直方向のピストンで、中間主応力 σ_2 をセル内のプレッシャーバッグあるいはシリンダーを用いた水平応力載荷装置で、最小主応力 σ_3 をセル内の液圧で載荷することが多い。しかし、このような組合わせで三主応力制御試験を行えば、例えば三軸伸張試験 ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) に近い応力状態の場合最大主応力 σ_1 方向の鉛直方向応力載荷面 (剛板) と中間主応力 σ_2 方向の水平方向応力載荷面 (剛板あるいはプレッシャーバッグ) の変位がともに供試体に対して圧縮側となり、試料内部がアーチングの影響をかなり受けることが分かってきた。そこで著者らは以前にセル型三主応力制御試験の載荷方法を工夫することによりこの問題点の解消をはかった¹⁵⁾。図-6に示すように、最大主応力

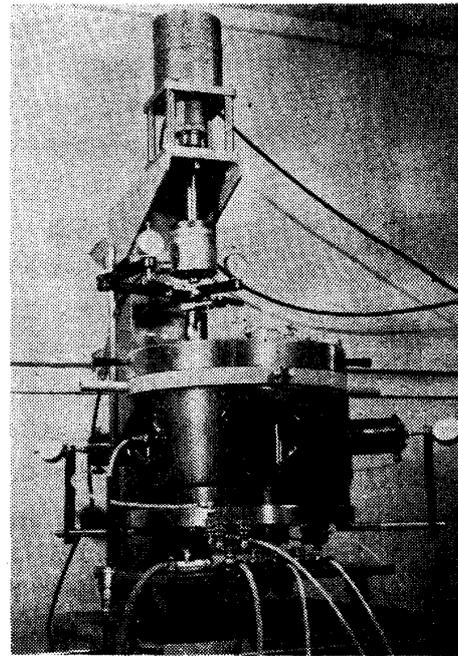


写真-3 新セル型三主応力制御試験機

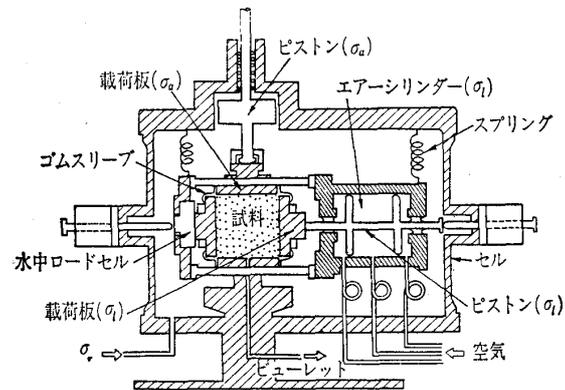


図-7 新セル型三主応力制御試験機の概要図

σ_1 は側方の剛板を介してプレッシャーバッグで、中間主応力 σ_2 はセル内の液圧で、最小主応力 σ_3 はキャップ (剛板) を介して鉛直方向のピストンで載荷している。このようにすれば、側方の σ_1 方向の剛板は試料に押し込まれ、 σ_3 方向のキャップ (剛板) は引き出されることになるので、セル型三主応力制御試験機の欠点の一つである試料内部のアーチングの影響をかなり小さくすることができた。

今回、上述の載荷方法の工夫による試験精度向上の長所を生かし、かつ実験可能な応力範囲を広げたセル型三主応力制御試験機を新たに試作した¹⁶⁾ので、ここではまずその試験機の概略と実験方法について述べる。写真-3に試験機のセル部分の全体写真を、口絵写真-14および図-7にセル内部の写真および概要図を示す。本装置では、図-7に示すように100×100×70mmの直方体供試体に鉛直方向 (a方向) の応力 σ_a を剛板を介して鉛直方向のピストンで、水平1方向 (l方向) の応力 σ_l は側方の剛板を介してセル内に懸架されたエアシリンダー (復動式ベロフラムシリンダー) で、もう一つの水平方向 (r方向: 紙面に垂直な方向) の応力 σ_r はセル内の液圧で載荷される。またこの装置

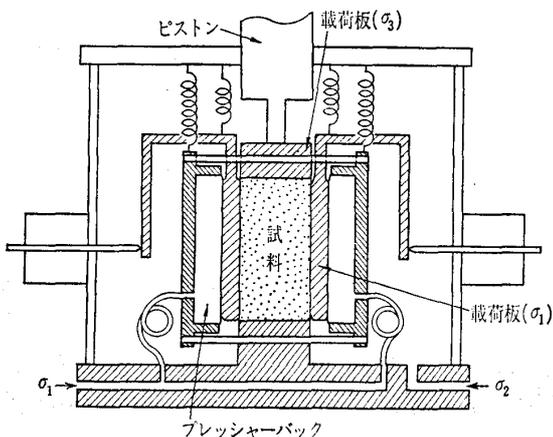


図-6 旧セル型三主応力制御試験機の概要図

の特徴の一つとして、鉛直方向 (a 方向) および側方 (ℓ 方向) の剛板がゴムスリーブによって包みこまれているため、セル内の液圧 (σ_r) より小さい σ_a や σ_ℓ も載荷できることにある。したがって、原理上セル圧に関係なく三主応力の大きさを任意に変えることが可能である。ただし、前述したように剛板で載荷する二主応力の載荷方向 (a 方向, ℓ 方向) がともに圧縮側になる場合は両方向間でアーチングの影響を受けるため、ここではなるべく a 方向と ℓ 方向の剛板がともに圧縮側とならないようにしている。またセル内のエアースリンダーは試料への摩擦の影響を軽減させるため、スプリングでつり下げ浮動式としており、 a 方向上部の剛板および ℓ 方向シリンダー側の剛板とピストンの結合部は剛接せず自由度をもたせている。剛板と試料の間の端面摩擦については、シリコングリスを塗布したテフロンシート、スリット入りゴム膜、スリットなしゴム膜を剛板と試料の間に順に挿入し、その除去に努めている。

次に応力およびひずみの測定方法について述べる。 a 方向の応力は通常の三軸試験機同様、鉛直方向のピストンにかかる荷重をロードセルで測ることにより、ひずみはピストンの変位をダイヤルゲージ (最小目盛 1/100 mm) で計測することにより求められる。 ℓ 方向の応力はセル内に懸架された復動式エアースリンダーで載荷しているが、応力の測定はシリンダーの反対側に設置されている水中ロードセル (容量 500 kgf, フルスケール 2000×10^{-6}) で行い、 ℓ 方向のひずみは図-7, 写真-3 から分かるように供試体左右の剛板の変位をそれぞれロッドでセルの外側に取り出し、それをダイヤルゲージで測定することにより求められる。最後に r 方向の応力はセル内の液圧を精密ブルドン型圧力計 (0.25 級, フルスケール 3.0 kgf/cm^2 および 10.0 kgf/cm^2) で測定し、 r 方向のひずみは、ビューレット (最小目盛 1/10 cc) により測定した体積ひずみ ϵ_v と a 方向および ℓ 方向のひずみ ϵ_a , ϵ_ℓ から算定している。なお、液圧の変化によるメンブレンの貫入量補正は、供試体の体積 ($10 \times 10 \times 7 \text{ cm} = 700 \text{ cm}^3$) に比べ液圧で載荷する載荷面の面積 ($10 \times 10 \text{ cm} \times 2 = 200 \text{ cm}^2$) が通常の円筒供試体の三軸試験ほど大きくないので、今回は行っていない。なお、用いたゴムスリーブの厚さは 0.25 mm である。

試料は剛板載荷型三主応力制御試験機の場合同様豊浦砂を用いている。供試体は脱気水で飽和した豊浦砂をゴムスリーブを密着させたモールド内 (写真-4 参照) で締め固めることにより作製している。供試体の作製にあたっては試料を 4 層につめ、各層ごとに径 6 mm の棒で突き固めることにより構造を乱し、できるだけ初期構造の異方性が入らないようにした。供試体の初期間隙比は、約 0.68 になるようにしている。実験は応力制御法で行っている。応力制御の方法は、ある応力を段階応力で与え、その応力状態での各軸ひずみ速度が $0.001\%/\text{min}$ 以下になった後に次の段階応力を加えている。また、ここでは実験はすべて平均主

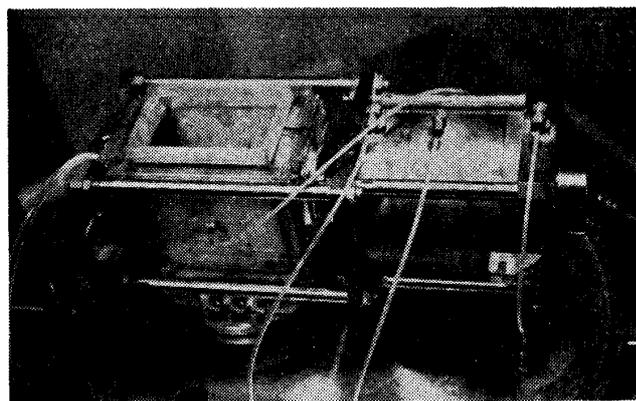


写真-4 応力載荷シリンダーとともに組み立てられた供試体作製用モールド (供試体寸法 $100 \times 100 \times 70 \text{ mm}$)

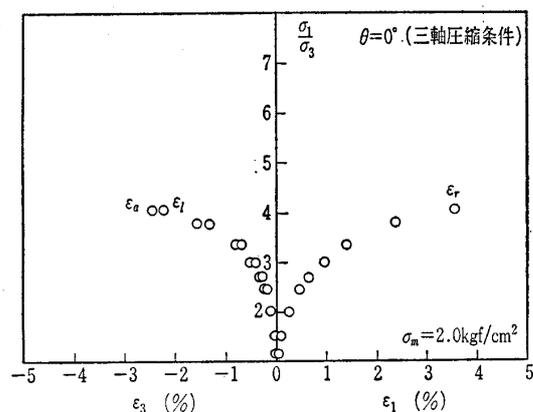


図-8 試料の等方性を検討するための三軸圧縮試験の最大・最小主応力比 $\sigma_1/\sigma_3 \sim$ 主ひずみ ϵ_r , ϵ_a , ϵ_ℓ 関係

応力一定条件下 ($\sigma_m = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$) で行われている。

次に試作試験機による実験結果について述べる。まず、試料の初期構造の異方性について検討する。供試体の作製方法から水平面内 (ℓ 方向と r 方向) では面内等方性があると考えられるので、ここでは鉛直方向と水平方向との間で初期構造の異方性の有無について調べる。図-8は最大主応力 $\sigma_1 = \sigma_r$, 最小主応力 $\sigma_3 = \sigma_a = \sigma_\ell$ なる三軸圧縮試験結果を示したものである。本装置では a 方向と ℓ 方向の応力はともに剛板載荷であり、両方向の応力やひずみの測定精度は同一と考えられる。同図をみるかぎり、 ϵ_a がわずかながら ϵ_ℓ よりも膨張側となっているものの、両者の間には有意な差は認められないので、試料はほぼ等方性試料と考えてよいようである。

等方圧密後応力経路を正八面体面 ($\sigma_m = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$) 上で直線的に動かすせん断試験結果 ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$) について述べる。 θ は前述したように正八面体面上の放射状応力経路が σ_1 方向となす角を表し、 $\theta = 0^\circ$ は三軸圧縮条件 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$), $\theta = 60^\circ$ は三軸伸張条件 ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$), $0^\circ < \theta < 60^\circ$ は相異なる三主応力が作用していること ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) を意味している。なお、ここでは、旧試験機による結果¹⁵⁾との対応関係を調べるため、最大主応力 $\sigma_1 = \sigma_\ell$, 中間主応力 $\sigma_2 = \sigma_r$, 最小主応力 $\sigma_3 = \sigma_a$ として

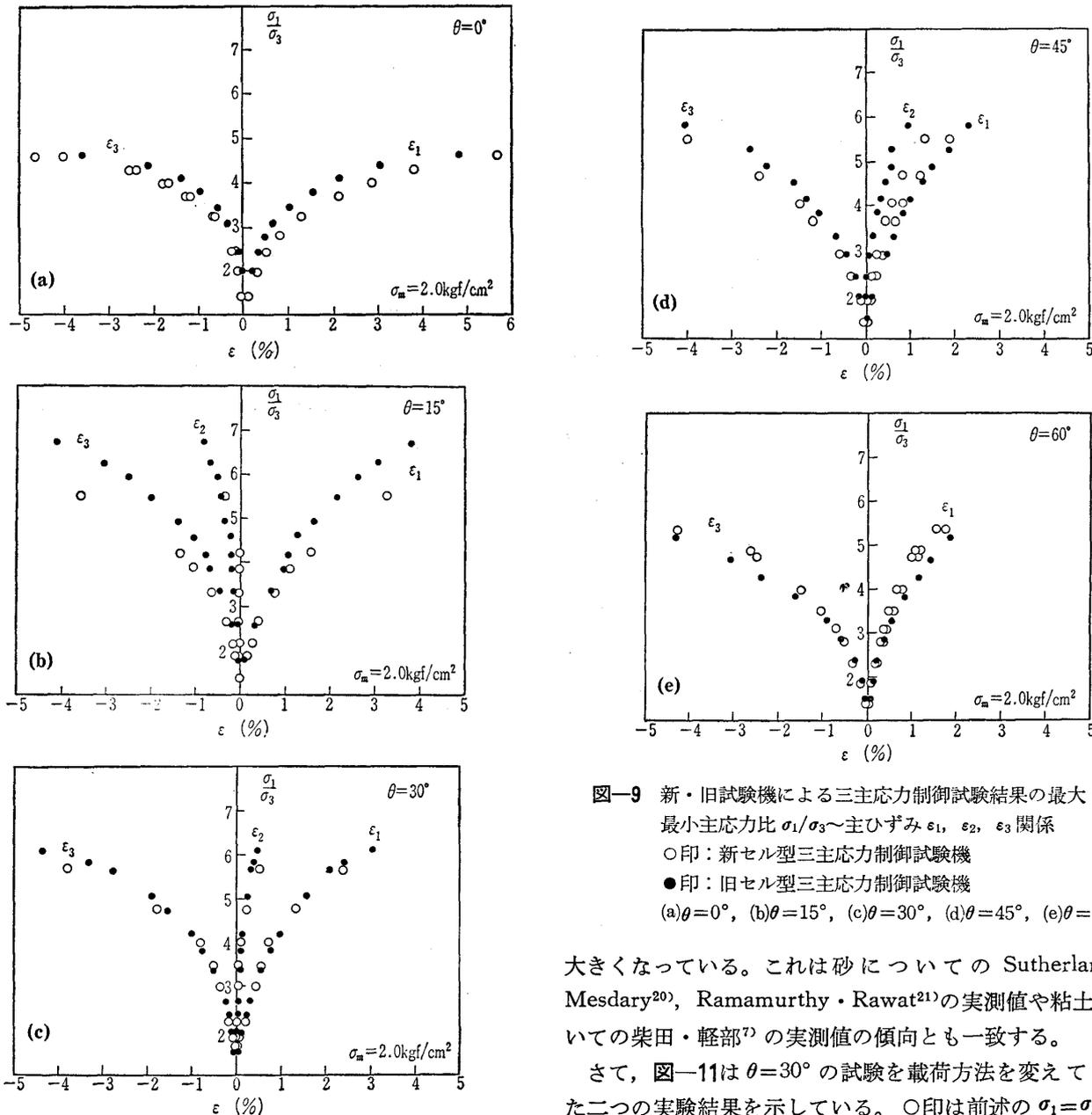


図-9 新・旧試験機による三主応力制御試験結果の最大・最小主応力比 σ_1/σ_3 ~ 主ひずみ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 関係
 ○印：新セル型三主応力制御試験機
 ●印：旧セル型三主応力制御試験機
 (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=15^\circ$, (c) $\theta=30^\circ$, (d) $\theta=45^\circ$, (e) $\theta=60^\circ$

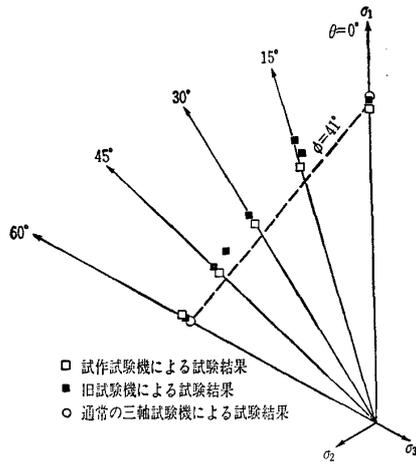
実験を行っている。図-9(a)~(e)の○印は試作試験機による結果¹⁷⁾を、●印は旧試験機による結果¹⁵⁾を表しているが両プロットはほぼよい対応関係を示しており、試作試験機も旧試験機と同程度の試験精度を有していることが分かる。なお同図から、 $\epsilon_2=0$ となる平面ひずみ条件は $\theta=15^\circ\sim 30^\circ$ に位置することになるが、これは今までに報告されている結果^{9), 18)}とも一致する。図-10は破壊時の応力状態の実測値を正八面体面上で表したものである。□印が試作試験機による結果を、■印が旧三主応力制御試験機による結果¹⁵⁾を、○印が通常の円筒供試体による三軸圧縮・伸張試験結果¹⁵⁾を表している。なお、同図にはMohr-Coulomb (モール・クーロン)の破壊規準を破線で示している。実測値は軸対称応力下 (三軸圧縮条件： $\theta=0^\circ$ ，三軸伸張条件： $\theta=60^\circ$)ではMohr-Coulombの規準にはほぼ一致しているものの、相異なる三主応力下 ($0^\circ < \theta < 60^\circ$ ，例えば平面ひずみ条件等)ではMohr-Coulombの規準より強度が

大きくなっている。これは砂についてのSutherland・Mesdary²⁰⁾，Ramamurthy・Rawat²¹⁾の実測値や粘土についての柴田・軽部⁷⁾の実測値の傾向とも一致する。

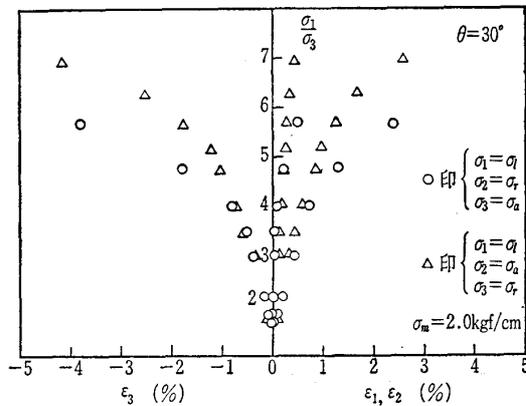
さて、図-11は $\theta=30^\circ$ の試験を載荷方法を変えて行った二つの実験結果を示している。○印は前述の $\sigma_1=\sigma_t, \sigma_2=\sigma_r, \sigma_3=\sigma_a$ として行った実測値を再録したものである。一方、△印は $\sigma_1=\sigma_t, \sigma_2=\sigma_a, \sigma_3=\sigma_r$ として行った試験結果であるが、○印の場合と同じ応力条件にあるにもかかわらず、この場合ひずみが小さくなり、破壊強度が大きくなっている。これは、△印の試験結果の場合、 σ_t と σ_a が共に剛板で載荷されており、かつ ϵ_t と ϵ_a が圧縮ひずみとなるため、試料内部のアーチングが影響してひずみが小さく、また破壊強度が大きくなったものと想像される。

4. あとがき

本報告では、三主応力を剛板で載荷する方式および二主応力を剛板で、一主応力を液圧で載荷する方式の三主応力制御試験機について、試験方法ならびに試験精度を中心に紹介した。一般にどのような形式の三主応力制御試験機でも均一な三主応力と均一な三主ひずみを同時に与えることは不可能なうえに、本文中で述べたように応力の載荷面と



図一〇 三主応力制御試験および三軸圧縮・伸張試験の正八面体面上の破壊応力状態



図一〇 載荷方法を変えた二つの三主応力制御試験 ($\theta=30^\circ$) における最大・最小主応力比 σ_1/σ_3 ~ 主ひずみ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 関係の比較

試料間の摩擦や試料内のアーチングは試験結果にかなりの影響を与えるようである。したがって、精度のよい三主応力制御試験を行うには、これらの問題を認識しその影響を極力小さくするように、載荷方法や計測方法を工夫する必要がある。なお、三主応力制御試験では2方向のひずみが圧縮側となる場合に、特にアーチングの影響が顕著となるので、三軸伸張条件下の試験結果を通常の円筒供試体による三軸伸張試験結果と比較することが、試験精度を検討する一つの方法のように思われる。

最後に、日ごろ御援助いただいている本学山内利彦教授、剛板載荷型三主応力制御試験および剛板載荷型平面ひずみ試験に協力いただいた元・本学大学院生石崎仁君（現・住友セメント）、元・本学学部生津村博史君（現・鳥取県庁）、鈴木寿君（現・名古屋大学）、元・本学大学院生平尾淳一君（現・大林組）、本学大学院生小山浩史君、福武毅芳君、山崎浩之君、ならびにセル型三主応力制御試験に協力いただいた元・本学大学院生三原泰司君（現・清水建設）、本学大学院生藤原幸一君、元・本学学部生狩谷伸一君（現・愛知県庁）に感謝致します。

参考文献

- 1) Pearce, J.A.: A New True Triaxial Apparatus, Stress-Strain Behavior of Soils, Proc. Roscoe Memorial Symposium, Cambridge Univ., pp. 330-339, 1971.
- 2) Goldscheider, M. and Gudehus, G.: Rectilinear Extension of Dry Sand, Testing Apparatus and Experimental Results, Proc. 8th ICSMFE, Vol. 1, pp. 143-149, 1973.
- 3) 巻内勝彦・Shackel, B・山内豊聡: 繰返し載荷による立方体三軸試験法とその問題点, 第24回土質工学シンポジウム論文集, pp. 151-158, 1979.
- 4) Ko, H.Y. and Scott, R.F.: A New Soil Testing Apparatus, Géotechnique, Vol. 17, No. 1, pp. 40-57, 1967.
- 5) 宮森建樹: 多軸応力状態における砂のせん断強さと変形特性, 土木学会論文報告集, 第255号, pp. 81-91, 1976.
- 6) Yamada, Y.: Deformation Characteristics of Sand in Three Dimensional Stress State. Proc. U.S.-Japan Seminar on Continuum-Mechanical and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials, pp. 91-97, 1978.
- 7) Shibata, T. and Karube, D.: Influence of the Intermediate Principal Stress on the Mechanical Properties of Normally Consolidated Clay, Proc. 6th ICSMFE, Vol. 1, pp. 359-363, 1965.
- 8) Green, G.E.: Strength and Deformation of Sand Measured in an Independent Stress Control Cell, Stress-Strain Behaviour of Soils, Proc. Roscoe Memorial Symposium, Cambridge Univ., pp. 285-323, 1971.
- 9) Lade, P.V. and Duncan, J.M.: Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soil, Proc. ASCE, Vol. 99, No. SM10, pp. 793-812, 1973.
- 10) 足立紀尚・北村良介: 試作修正三軸装置について, 第24回土質工学シンポジウム発表論文集, pp. 137-142, 1979.
- 11) 土岐洋介・三浦清一: 室内実験に用いる砂供試体の作成法について, 第24回土質工学シンポジウム発表論文集, pp. 173-180, 1979.
- 12) 松岡 元・中井照夫・石崎 仁・津村博史: 剛板載荷三主応力制御試験機の試作とその測定結果の解析, 第14回土質工学研究発表会講演集, pp. 361-364, 1979.
- 13) Matsuoka, H. and Ishizaki, H.: Deformation and Strength of Anisotropic Soil, Proc. 10th ICSMFE, Vol. 1, pp. 699-702, 1981.
- 14) 松岡 元・平尾淳一・福武毅芳: 平面ひずみ条件下の異方性砂のせん断挙動の解析, 第18回土質工学研究発表会講演集, pp. 293-294, 1983.
- 15) 中井照夫・松岡 元: 三主応力下の土のせん断挙動に関する統一的解釈, 土木学会論文報告集, 第303号, pp. 65-77, 1980.
- 16) 三原泰司・中井照夫・松岡 元: 新たなセル型多軸試験機による砂のせん断試験について, 第36回土木学会年次講演会概要集, 第3部, pp. 17-18, 1981.
- 17) 中井照夫・三原泰司・狩谷伸一: 力学量 ϵ_{ij} に基づいた球モデルによる土のせん断挙動の解析, 第18回土質工学研究発表会講演集, pp. 339-342, 1983.
- 18) Green, G.E. and Reades, D.W.: Boundary Conditions, Anisotropy and Sample Shape Effects on the Stress-Strain Behaviour of Sand in Triaxial Compression and Plane Strain, Géotechnique, Vol. 25, No. 2, pp. 333-356, 1975.
- 19) Yong, R.N. and Mckays, E.: Yield and Failure of Clay under Triaxial Stresses, Proc. ASCE, Vol. 97, No. SM1, pp. 159-176, 1971.
- 20) Sutherland, H.B. and Mesdary, M.S.: The Influence of the Intermediate Principal Stress on the Strength of Sand, Proc. 7th ICSMFE, Vol. 1, pp. 391-399, 1969.
- 21) Ramamurthy, T. and Rawat, P.C.: Shear Strength of Sand under General Stress System, Proc. 8th ICSMFE, Vol. 1.2, pp. 339-342, 1973.

(原稿受理 1983.4.22)