

砂の平面ひずみ挙動に及ぼす 初期応力状態の影響

徳江俊秀¹・釜井俊孝²・梅津喜美夫³

¹正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)

²正会員 工博 日本大学助教授 同上

³正会員 工博 日本大学専任講師 同上

本研究は、従来あまり意識されていなかった平面ひずみ試験の初期応力状態に着目し、豊浦砂の直方体供試体（寸法9×8×5cm）を用いてその影響について調べてみたものである。平面ひずみ圧縮試験（CD試験、 $\sigma_x = \sigma_{x0} = \text{一定}$ ）の初期応力状態は、 $100 \leq \sigma_{x0} \leq 300$, $25 \leq \sigma_{y0} \leq 500$, $\sigma_{z0} = 100$ （単位：kN/m²）の範囲で種々設定した。その結果以下の様な結論が得られた。①初期応力状態は、その載荷中の体積変化特性に着目することにより3つのパターンに分けられる。②平面ひずみ圧縮試験中の応力経路は、上記のパターンに対応した3つのグループに分けられる。③また応力ひずみ関係もそのパターンに関連して2つのグループに分けられる。④しかしながら強度は初期応力の影響を受けず一定の大きさを示す。

Key Words : plane strain compression test, initial stress condition, induced anisotropy, dilatancy, stress strain relation, stress path, shear strength, sand

1. はじめに

堤体やロックフィルダムまたは長い帯基礎下の地盤など、建設工事の対象となる多くの土構造物や地盤は、一方向の変形が拘束される状況にあるため平面ひずみ状態と考えられる。実際の地盤をこのように2次元問題として扱うと、FEM等による電算機を用いた解析が容易になるというメリットがある上、一般的に平面ひずみ条件下の強度・変形特性は、常用されている軸対称の三軸試験によるものに比べ、設計に有利な結果を示す。土木工事は大規模で莫大な土工量を伴う場合が多いが、このような場合、上述のような平面ひずみ試験から、現実の状態に近く、しかも設計に有利な定数を得て安定解析を行い設計がなされれば、巨額の工事費の削減につながる。このようなことから平面ひずみ条件下の土の特性を調べる研究が重要視され、今まで様々な研究がなされてきている。

しかしながら、このような平面ひずみ状態にあるとされている実際の地盤の状況を考えると、土質の不均一性、作用荷重分布の非一様性等から、現実には地盤内の土要素が完全な平面ひずみ状態、すなわち、側方拘束ひずみがゼロという状態にあるとは考

えにくい。そこで既報¹⁾では、本来ゼロの側方ひずみを微小な範囲で許していく時、土における平面ひずみ条件として許容できる限界側方ひずみについての検討を行ない、更にこの限界側方ひずみより大きな側方ひずみの発生を許していくとき、その後の平面ひずみ挙動にこの発生ひずみがどう影響するかについて述べた。

また一方、平面ひずみ状態にあるとされている地中の実際の土要素を考えると、周辺の建造物の影響や掘削、盛土等の工事過程で様々な外力を受け、多様な応力状態を示していると考えられる。しかしながら、従来行なわれている平面ひずみ状態の土の研究において、平面ひずみ圧縮の直前における初期応力状態についてはほとんど意識されておらず、主に、①左右の側方拘束板をロッドで固定し、側方変位が発生し得ない状態で供試体を作製し、そのまま圧密を行なう^{2),3),1)}、②等方圧密を行なう^{5),6),7),8),9)}、③K₀圧密を行なう^{10),11),12),13),14),15),16)}、などの限られた方法でしか初期応力状態を作り出していない。実際の地盤は先にも述べたように、多様な応力状態を示すことが考えられるわけであり、このような単純な状態ではない。そこで本研究は、従来あまり意識されていなかった初期応力状態に着目し、豊浦砂の供試

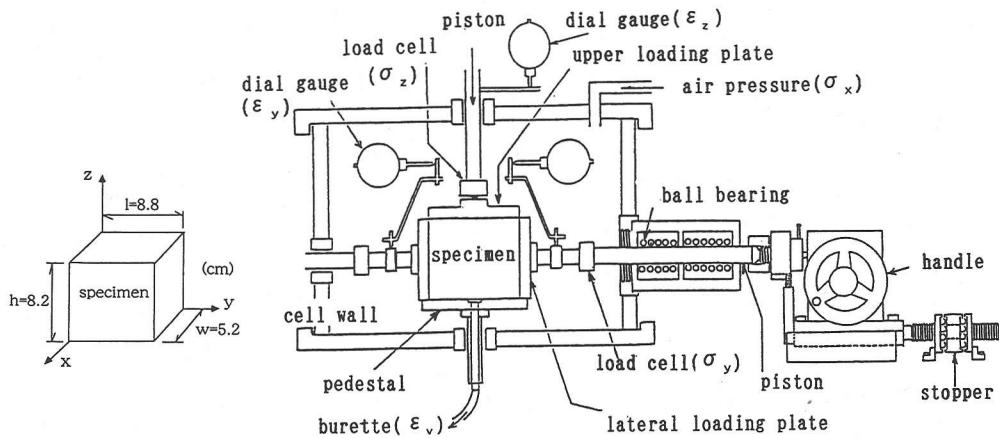


図-1 セル断面と側方変位（応力）調整装置

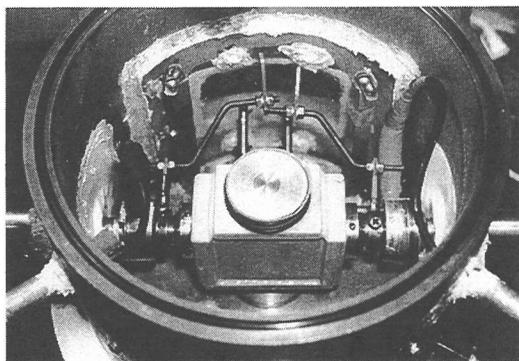


写真-1 セル内の供試体

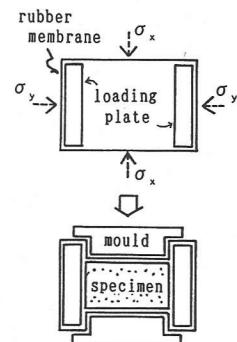


図-2 供試体の作製
(σ_z 方向)

体について、平面ひずみ挙動に及ぼす様々な初期応力状態の影響について調べてみた。

2. 装置と試験方法

(1) 試験装置

装置のセル断面を図-1に示す。主応力については、 σ_z , σ_y はピストンを介して剛板（寸法： σ_z , σ_y 両方向共8×6cm）で載荷され、 σ_x はセル内の空気圧によって載荷される。 σ_z の載荷は荷重制御・変位制御が共に可能であるが、 σ_y の載荷は、図-1に示すような側方変位調整装置のハンドルによって行なう。このハンドルは、60回転で側方変位が1mm（圧縮・引張両方向共）調整できる。また、 σ_z , σ_y および σ_x の載荷システムはそれぞれ独立であるため、任意の応力経路で載荷できる。

主応力の測定は、 σ_z , σ_y はロードセルで、 σ_x はプレッシャーゲージによってなされる。なお、ロードセルはセル内にセットされているため、ピストンとセル壁の間に働く摩擦は軸応力 σ_z , σ_y に影響しない。これらの計器の性能は以下の通りである。
 σ_z 方向ロードセル：定格容量、9.8kN. 最小読み取り値、2.45N(応力にすると0.54kN/m²)
 σ_y 方向ロードセル：定格容量、4.9kN. 最小読み取り値、1.67N(応力にすると0.39kN/m²)
プレッシャーゲージ：最大測定値、588 kN/m². 最小目盛り、1.96N/m².

主ひずみについては、 ε_z は図-1に示すように、セル上部にセットされた1/100mm精度のダイヤルゲージで測定され、 ε_y はセル内にセットされた1/1000mm精度のダイヤルゲージによって測定される。また、体積ひずみ ε_v はビューレット（測定容量：50cc, 最小目盛り：0.1cc(体積ひずみにする

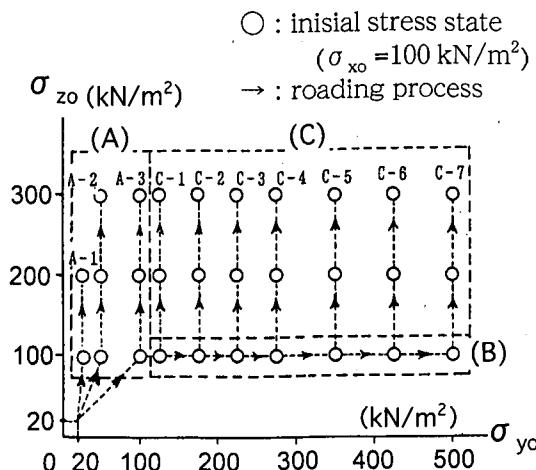


図-3 初期応力状態とその達成経路

と約0.027%)) によって測定される。

(2) 試料および供試体

a) 試料

試験に用いた試料は豊浦砂で、比重は $G_s = 2.64$ である。また、50%粒径は $D_{50} = 0.172 \text{ mm}$ であり、均等係数は $U_c = 1.32$ である。

b) 供試体

セル内の供試体の状況を写真-1に示す。供試体を被うゴムスリーブ（厚さ0.4mm）の形状は矩形で、左右の σ_y 載荷板を外側で被っているため、拘束方向の応力 σ_y はセル圧 σ_x より小さくできる。また、供試体と上下、左右の載荷板との間に働く摩擦は、既報¹⁾と同様、適切な量のシリコングリースを塗布した厚さ0.05mmのテフロンシートと厚さ0.2mmのゴムシートを用いて軽減してある。

供試体の作製方法は、図-2に示すように、 σ_x （空気圧）載荷面のゴムスリーブに凸型のモールドを設置し、その中に飽和砂を10層に分けて投入し、各層毎に突き棒で100回ずつ突き詰めて作製した。このモールドは供試体を密閉した後、20 kN/m²の負圧下で取りはずされる。この時の供試体の寸法は、図-1に示すように長さ8.8cm×高さ8.2cm×幅5.2cmであり、間げき比は $e_0 = 0.578 \sim 0.630$ である。

(3) 試験方法

供試体の作製完了時点には、 $\sigma_z = \sigma_y = \sigma_x = 20 \text{ kN/m}^2$ の等方応力状態であり、ここから様々な応力状態を作りだした後、平面ひずみ条件に切り替え、軸応力 σ_z を増加させて供試体を破壊させた。

表-1 初期応力状態の種類

Initial Stress States ($\text{kN/m}^2 \equiv 10^{-2} \text{ kgf/cm}^2$)		
Plane Strain Compression Test		
σ_{z_0}	σ_{y_0}	σ_{x_0}
100	25*	225
	50	275
	100	350
	200	100
200	125	425
	175	500
(* : $\sigma_{x_0} = 100, 200$)		
Triaxial Compression Test (σ_z increasing)		
σ_{z_0}	σ_{y_0}	σ_{x_0}
100	100	100
Triaxial Compression Test (σ_y increasing)		
σ_{z_0}	σ_{y_0}	σ_{x_0}
100	100	100

以下、前者の過程を「初期応力達成過程」、後者の過程を「平面ひずみ圧縮過程」と呼ぶ。これらの過程の詳細は次の通りである。

a) 初期応力達成過程

初期応力状態は、図-3に示すように、まず $\sigma_z = \sigma_y = \sigma_x = 20 \text{ kN/m}^2$ の供試体作製完了時点（等方応力状態）から、図に示すような→の載荷経路に沿って圧縮し、所定の初期応力状態（○印）を達成した。初期応力達成時点の σ_{x_0} は、どの供試体も全て 100 kN/m^2 となっている。この図からわかるように、初期応力状態が $\sigma_{y_0} \geq \sigma_{x_0} = 100 \text{ kN/m}^2$ の場合、すなわち、A-3経路とC、Bの範囲のものは、 20 kN/m^2 の等方状態から、更に等方載荷されて $\sigma_z = \sigma_y = \sigma_x = 100 \text{ kN/m}^2$ の応力状態を経て、所定の初期応力状態になっている。また、初期応力が $\sigma_{y_0} < \sigma_{x_0} = 100 \text{ kN/m}^2$ の場合、すなわち、A-1、A-2経路のものは、 20 kN/m^2 の等方状態から異方載荷（ $\sigma_z = \sigma_x > \sigma_y$ ）されて $\sigma_z = \sigma_x = 100 \text{ kN/m}^2$ の応力状態を経て、所定の初期応力状態になっている。ここで、A-1経路をたどる初期応力状態で $\sigma_{z_0} = 300 \text{ kN/m}^2$ のものが無いのは、達成過程で供試体が破壊したために設定できなかったからである。なお、所定の初期応力状態の達成後、30分間この応力を載荷し続け、応力が確実に伝達されるようはかった。

表-1は、このようにして設定した初期応力状態の種類を示している。試験はそれぞれの種類について2~3回実施し、ほぼ同様の結果が得られることを確認し、各種類の結果はそれらの平均した値を示している。平均の方法については、応力ひずみ関係については、同一の軸ひずみ ϵ_z に対して軸差応力 $(\sigma_z - \sigma_x)$ および体積ひずみ ϵ_v を平均し、また、

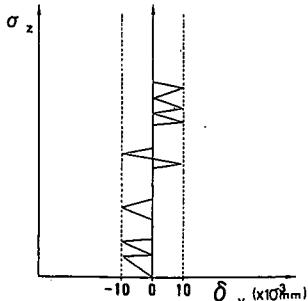


図-4 側方変位の調整

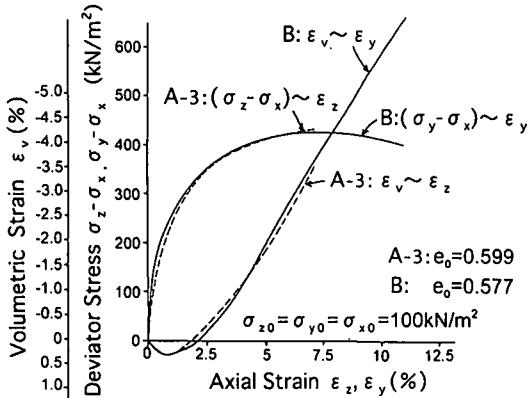


図-5 載荷方向の違いによる変形挙動の比較

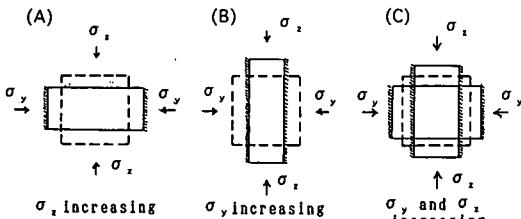


図-6 初期応力達成過程の供試体の変形パターン

応力経路については、同一の σ_z / σ_x に対して σ_y / σ_x を平均している。なお、表に示してある σ_y 方向圧縮の三軸試験は、初期応力 σ_{y0} の載荷による供試体の変形をあらかじめ把握しておくために行った予備的な試験である。

b) 平面ひずみ圧縮過程

初期応力達成後の供試体の平面ひずみ圧縮 (σ_z 方向の圧縮) は、 σ_y 方向の変位を拘束し、 $\sigma_x = 100 \text{ kN/m}^2 = \text{一定}$ にして、排水条件で行った。載荷方法については、応力制御で行った。平面ひずみ圧縮中の、ロードセル等の軸変位によって生じる左右それぞれの側方変位は、図-4 に示すように、膨張

側も収縮側も $10/1000 \text{ mm}$ ($\epsilon_y = 0.01\%$) の幅で制御を行い、平面ひずみ状態を維持した。

3. 試験結果と考察

(1) 供試体の初期構造特性

まず、図-5 の応力ひずみ関係は、 $\sigma_{z0} = \sigma_{y0} = \sigma_{x0} = 100 \text{ kN/m}^2$ の等方初期応力状態から、 σ_z 方向に圧縮していった場合 (A-3: $(\sigma_z - \sigma_x) \sim \epsilon_z$ 関係) と、 σ_y 方向に圧縮していった場合 (B: $(\sigma_y - \sigma_x) \sim \epsilon_y$ 関係) の、三軸圧縮試験結果を示したものである。これらの載荷経路は、それぞれ図-3 に示した A-3 の経路および B の経路と同じである。この図により、両者の応力ひずみ関係を比較すると、A-3 と B とでは、間げき比が 0.02 ほど異なるが、ほぼ同じような応力ひずみ関係になっていることが認められる。このことから、本実験の供試体作製方法で得られた供試体の初期構造は等方的であることがわかる。なお、図-3 の B 経路上にある $\sigma_{y0} = 500 \text{ kN/m}^2$ の初期応力状態は、軸差応力に直すと $(\sigma_y - \sigma_x) = 400 \text{ kN/m}^2$ となり、破壊 ($(\sigma_y - \sigma_x)$) $\approx 430 \text{ kN/m}^2$ 近くの状態を表していることがわかる。

(2) 初期応力達成過程

a) 供試体の変形パターン

実施した初期応力状態およびその達成経路を図-3 に示したが、初期応力達成過程の供試体の変形を分類すると、概ね図-6 のように (A), (B), (C) の 3 つに分けることができる。(A), (B), (C) の各図は、図-3 に示した記号と対応している。すなわち、(A) は σ_z が単調載荷されて、供試体の変形が横長になる応力状態であり、(B) は σ_y が単調載荷されて、縦長になる応力状態であり、C は σ_y がまず載荷され、その後 σ_z が載荷 (複合載荷) される場合で、両応力の大きさによって横長になったり縦長になったりする応力状態である ((A) と (B) の複合状態)。

b) 体積変化特性

次に、初期応力達成過程の体積変化特性を上記の (A), (B), (C) の代表例について示したものが図-7 (A), (B), (C) である。すなわち、(A), (B), (C) の各図は図-6 の (A), (B), (C) と対応し、また、図中の記号 (A-1など) は図-3 の記号と対応している。図-7 の (A), (B), (C) のそれぞれの場合の載荷経路とそれらの体積変化特性について以下に述べる。
A ((A) 図) : 載荷経路が $\sigma_z < 100 \text{ kN/m}^2$ の過程では、A-1, A-2 各経路とも $\sigma_z = \sigma_x$ の状態で応力が

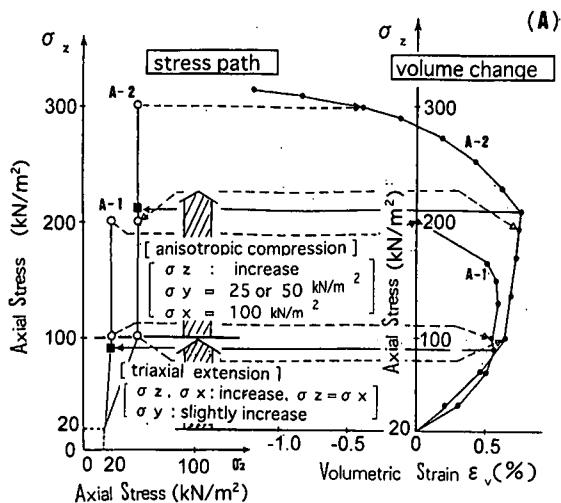


図-7 初期応力達成過程の体積変化特性

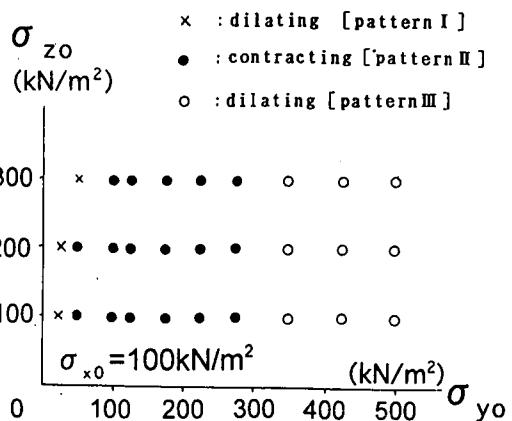


図-8 初期応力状態の体積変化特性による分類

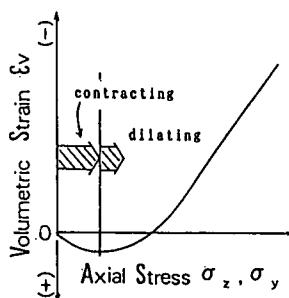


図-9 体積変化特性の領域分け

増加し、その増加量は、 σ_y の増加量より大きい。つまり、 σ_y 方向の伸張方向にひずみが生じていく三軸伸張過程となっている。載荷径路が $\sigma_z > 100$ kN/m² の過程では、各径路とも $\sigma_x = 100$ kN/m² =一定の状態で、かつ、 σ_y がそれぞれ一定の値の下で、 σ_z が単調に増加していく過程である。つまり、 σ_z 方向に圧縮される異方圧縮過程である。このような載荷にともなう供試体の体積変化は、載荷初期では体積は収縮していくが、載荷が進むと体積変化は膨張側に転じ、A-2 径路の $\sigma_{z0} = 300$ kN/m²、 $\sigma_{y0} = 50$ kN/m² の初期応力状態では、供試体作製時の体積より膨張している。図の応力径路に示した■印は、体積変化が収縮から膨張に変わることを示している。

B ((B)図)：載荷径路が $\sigma_y < 100$ kN/m² の過程は、等方圧縮の過程であり、図には示していないが供試体の体積は当然収縮に向かっている。載荷径路が $\sigma_y > 100$ kN/m² の過程では、 $\sigma_z = \sigma_x = 100$ kN/m² =一定の状態で、 σ_y が増加していく三軸圧縮の過程になっている。この径路の供試体の体積は、 $\sigma_y = 280$ kN/m²付近 (■印) を境に膨張するのが認められる。

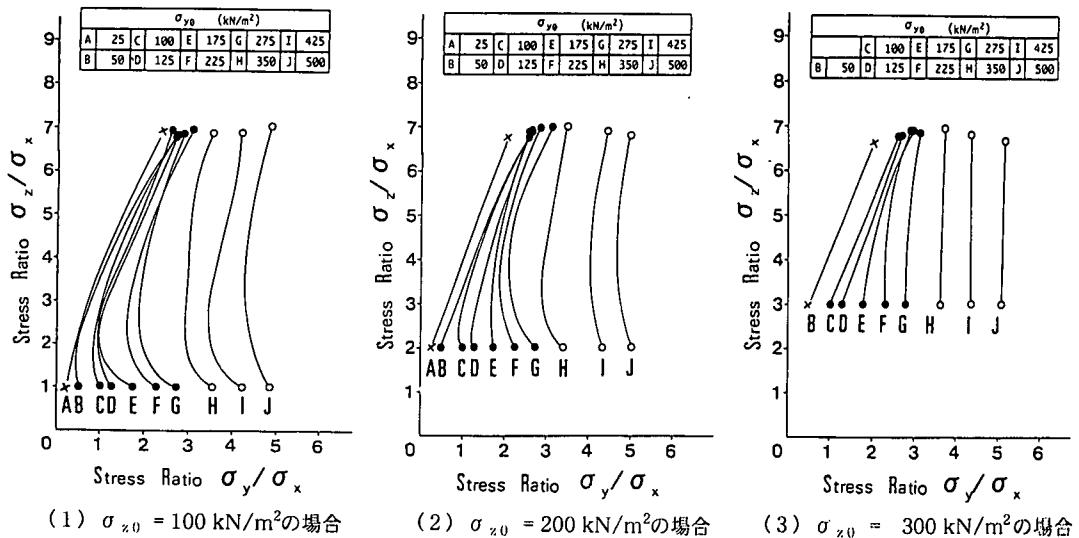


図-10 平面ひずみ圧縮過程の応力経路 (σ_{y0} の影響, $\sigma_x = \sigma_{x0} = 100 \text{ kN/m}^2$)

C ((C)図) : Bのある状態から, σ_y を一定にして, σ_z を増加していく, 異方圧縮過程である. 供試体の体積変化は, σ_z を増加すると, 新たに収縮の変化を示していく.

c) 体積変化特性による分類

図-8は, 各初期応力状態について, 上述の体積変化特性に着目して分類したものである. この分類は, 初期応力達成時の体積変化特性の状況が, 図-9のように, 膨張に転ずることなく一貫して収縮していくとする領域にある (contracting, 以下このような初期状態をこう呼ぶ) のか, または体積変化が膨張に転じた領域にある (dilating, 以下このような初期状態をこう呼ぶ) のかに着目して行ったものである. 図-8より, 今回達成した初期応力状態における体積変化状況は, 次のような3つのパターンに分けられる.

I のパターン: 初期応力状態が, $\sigma_{y0} < 100 \text{ kN/m}^2$ の場合で, 初期応力達成時の体積変化特性が, σ_z の単調載荷によりdilatingの状態にあるもの (×印).

II のパターン: 初期応力達成時の体積変化特性が, 一貫して収縮を示すcontractingの状態にあるもの (●印).

III のパターン: 初期応力達成時の体積変化特性が, I のパターンとは異なって, σ_y の載荷により膨張に転じたdilatingの状態にあるもの (○印). このパターンのものは, σ_z がさらに載荷された複合載荷の状態のものが多いが, この場合体積変化はまた収縮となる.

(3) 平面ひずみ圧縮過程

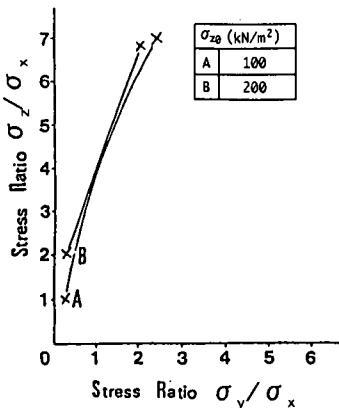
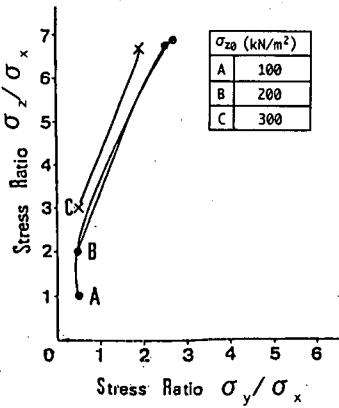
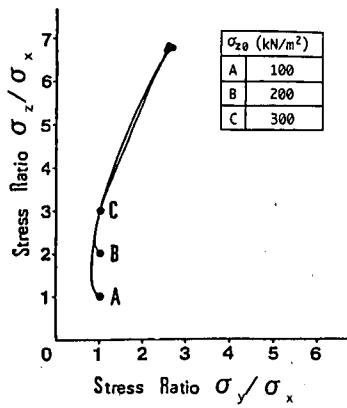
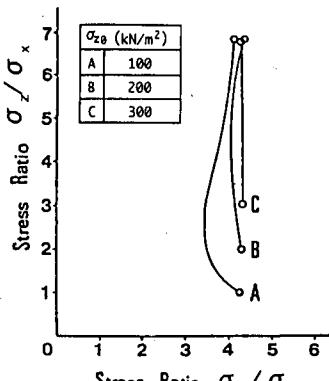
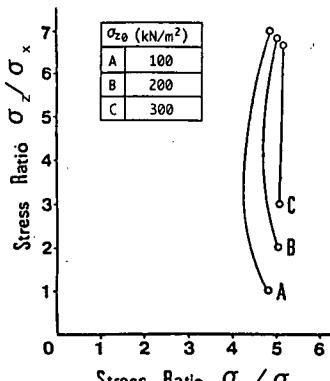
初期応力の及ぼす平面ひずみ圧縮過程のせん断挙動への影響を, 応力経路, 応力ひずみ関係, 強度の順に述べる.

a) 応力経路

i) 初期応力 σ_{y0} の影響 図-10は, 初期応力 σ_{z0} の大きさ別に, 平面ひずみ圧縮過程での応力経路へ及ぼす σ_{y0} の影響を示したものである. 図の ×, ●, ○印の応力経路は, 図-8 (体積変化特性による分類図) に示した印と対応している. これより, 次の諸点が認められる.

(イ) 応力経路は, 初期応力達成時の体積変化特性から分けた3つのパターンI, II, IIIに対応して区分けできる. すなわち, ①初期応力状態がcontractingの状態にあるIIのパターン (●印, $(\sigma_y / \sigma_x)_0 \geq 0.5$) の応力経路は, 破壊時の応力比 $(\sigma_y / \sigma_x)_f$ が2.5~3.1の範囲に収束していく傾向がある. ②初期応力状態がdilatingのもののうち, σ_z の単調載荷によるIのパターン (×印, $(\sigma_y / \sigma_x)_0 \leq 0.5$) の応力経路は, 破壊時の応力比 $(\sigma_y / \sigma_x)_f$ が, 上述の収束域より小さい側にずれる. ③初期応力状態が, ②と同様, dilatingのもののうち, σ_z , σ_y の複合載荷によるIIIのパターン (○印, $(\sigma_y / \sigma_x)_0 \geq 3.5$) の応力経路は, 破壊時の応力比 $(\sigma_y / \sigma_x)_f$ が, σ_{y0} 載荷による誘導異方性により上述の①の収束域より大きい側にあり, かつ, 初期応力状態の応力比 $(\sigma_y / \sigma_x)_0$ とほぼ同じ値になっている.

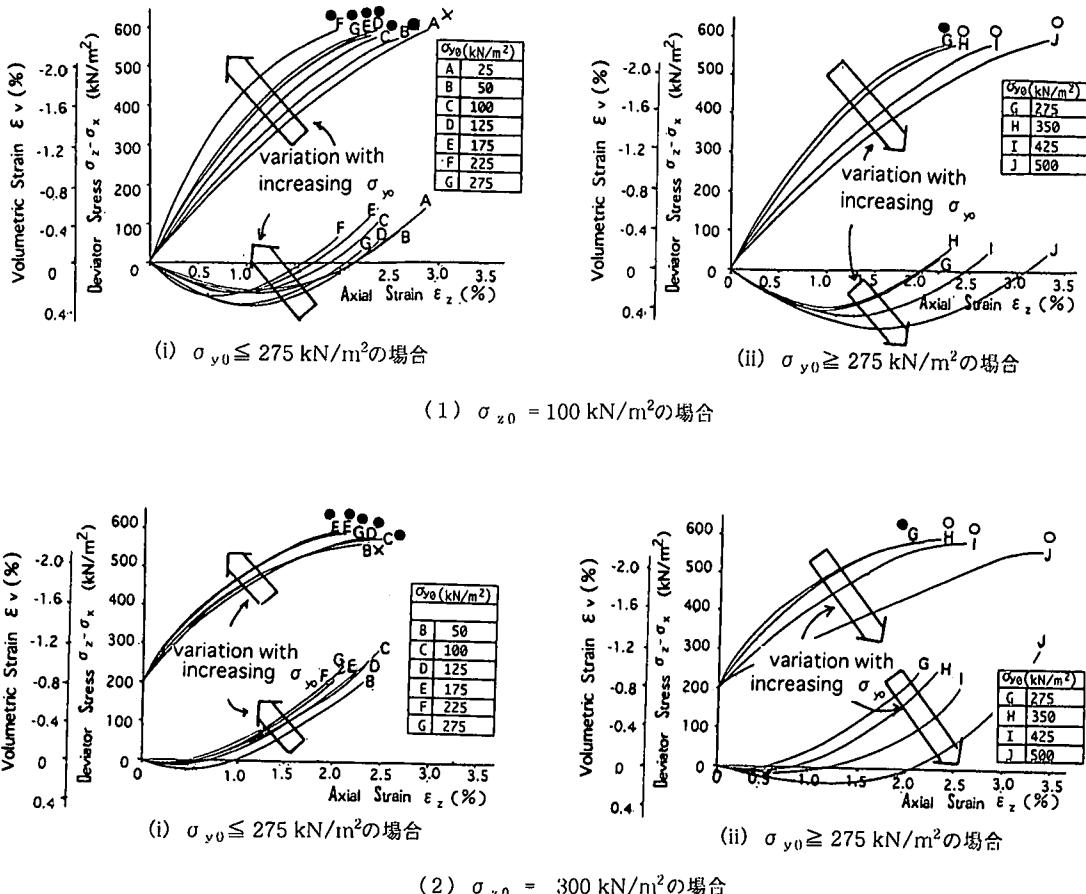
(ロ) このような応力経路のパターン分けは, 初期応力 σ_{z0} の値の場合にも, 同様に認められる.

(1) $\sigma_{y0} = 25 \text{ kN/m}^2$ の場合(2) $\sigma_{y0} = 50 \text{ kN/m}^2$ の場合(3) $\sigma_{y0} = 100 \text{ kN/m}^2$ の場合(4) $\sigma_{y0} = 425 \text{ kN/m}^2$ の場合(5) $\sigma_{y0} = 500 \text{ kN/m}^2$ の場合図-11 平面ひずみ圧縮過程の応力径路 (σ_{z0} の影響, $\sigma_x = \sigma_{x0} = 100 \text{ kN/m}^2$)

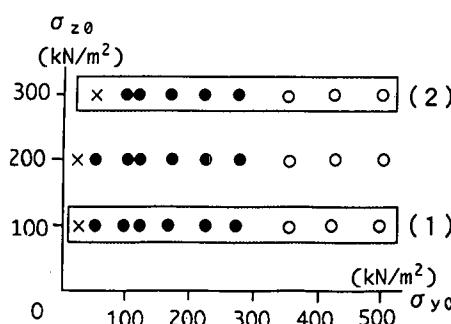
- (ハ) 破壊時の応力比(σ_z/σ_x)_tの大きさは、初期応力状態に無関係に、ほぼ同じ様な値になっている。
ii) 初期応力 σ_{z0} の影響 図-11は、前述の初期応力状態の3つのパターンについて、 σ_{y0} の大きさ別に応力径路の代表例を示したものである。図-11の応力径路に示してある×、●、○印は、前述と同様、それぞれI, II, IIIのパターンに属していることを示している。すなわち図中の(1)図($\sigma_{y0} = 25 \text{ kN/m}^2$)はI(×印)のパターン、(2)図($\sigma_{y0} = 50 \text{ kN/m}^2$)はI(×)とII(●)のパターン、(3)図($\sigma_{y0} = 100 \text{ kN/m}^2$)はII(●)のパターン、(4)図($\sigma_{y0} = 425 \text{ kN/m}^2$)と(5)図($\sigma_{y0} = 500 \text{ kN/m}^2$)はIII(○)のパターンの応力径路を示したものである。これららの図より、次の諸点が認められる。
① II, IIIのパターンの応力径路 ((2)～(5)図の●, ○印)は各図とも、破壊時の応力比(σ_z/σ_x)_tは σ_{z0} の大きさに関わらずそれぞれ同じ値に集まる。
②特に、IIIのパターンの応力径路 ((4)図,(5)図の○

印)は、前項でも指摘したように、破壊時の応力比(σ_z/σ_x)_tは σ_{y0} 載荷による誘導異方性の影響により初期応力比(σ_y/σ_x)₀とほぼ同じになっている。
③しかし、Iのパターンの応力径路 ((1)図の×印)は、初期応力 σ_{y0} が同じでも、破壊時の応力比(σ_z/σ_x)_tは異なり、 σ_{z0} が大きくなると小さくなる。また(2)図に示すように、初期応力 σ_{y0} が同じであるI(×印)とII(●印)のパターンを比べても、Iの破壊時の応力比(σ_z/σ_x)_tはIIのそれと比べて、かなり小さくなっている。

このように、応力径路については、初期応力 σ_{y0} の影響は、初期応力達成時の体積変化特性を考慮することにより、3つのパターンに対応して明確に把握できる。しかしながら、初期応力 σ_{z0} の影響については、今回の実験では σ_{y0} に比べ応力が小さく、また数も少ないためIのパターン(×印)を除き σ_{z0} の影響はあまり認められない。なお、これらの挙動は3.(1)でも述べているように、供試体の初期構造



(1) $\sigma_{z0} = 100 \text{ kN/m}^2$ の場合



(3) 初期応力状態

図-1-2 平面ひずみ圧縮過程の応力ひずみ関係 (σ_{y0} の影響, $\sigma_x = \sigma_{x0} = 100 \text{ kN/m}^2$)

特性は等方的なので、すべて σ_{y0} および σ_{z0} 載荷による誘導異方性により生じたものといえる。

b) 応力ひずみ関係

i) 初期応力 σ_{y0} の影響 図-1-2は、応力ひずみ関係に及ぼす初期応力 σ_{y0} の影響を、 σ_{z0} が 100 kN/m^2 ((1)図) の場合と 300 kN/m^2 ((2)図) の場合について示したものである。(1), (2)の各図の(i)図, (ii)図は、それぞれ $\sigma_{y0} \leq 275 \text{ kN/m}^2$,

$\sigma_{y0} \geq 275 \text{ kN/m}^2$ の場合の図である。また、(3)図は(1), (2)図に示したものとの初期応力状態を示している。なお、図中の記号A～Jは、図-1-10 (応力経路図, σ_{y0} の影響) と対応しており、また×, ●, ○の印は、前述と同様それぞれI, II, IIIのパターンを示している。これらの図より次のことが認められる。

① $\sigma_{z0} = 100 \text{ kN/m}^2$ ((1)図) の場合では、パターン

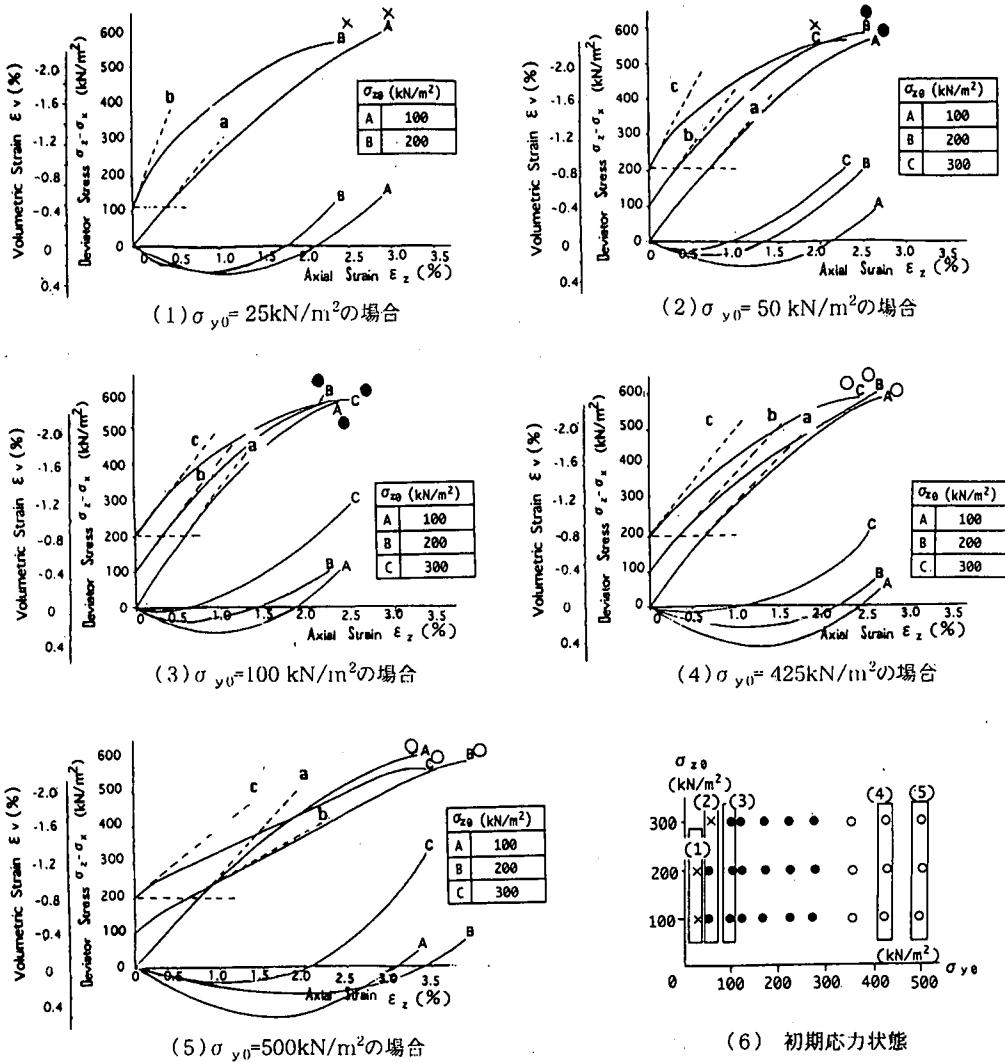


図-1-3 平面ひずみ圧縮過程の応力ひずみ関係 (σ_{z0} の影響, $\sigma_x = \sigma_{x0} = 100$ kN/m²)

II (●印) のB～Gの場合 ((i)図), 軸差応力-軸ひずみ曲線はGを除いて全てが, σ_{y0} が大きくなる (B→G) について, 矢印のように初期勾配が急になり, また破壊時の軸ひずみ ϵ_z も小さくなり, 剛性が大きくなる ($\sigma_{z0}=200$ kN/m²の場合の図は掲載していないが, この場合は, FとGの逆転はない). しかし, パターンIII (○印) のH～Jの場合 ((ii)図) では, 逆に, σ_{y0} が大きくなる (H→J) について, 軸差応力-軸ひずみ曲線の初期勾配はゆるくなり, また破壊時の軸ひずみ ϵ_z も大きくなり, 刚性が小さくなる. なお, (i)図のA (×印, $\sigma_{y0}=25$ kN/m²) のIのパターンは, 1つしかないので σ_{y0} の影響は分からぬが, IIのパターン (●印) の端に位置している.

② $\sigma_{z0}=300$ kN/m² ((2)図) の場合になると, (i)図

に示すパターンII (●) のC～Gの場合では, 上記の(1)図の(i)図と同様の傾向がみられるが, 変化の幅が小さくなり, まとまっている. (ii)図に示すパターンIII (○) のH～Jの場合では, 変化幅は変わらず, 上記の(1)図の(ii)図の場合と同様, σ_{y0} が大きくなると延性的になる.

③ 体積変化特性については, 少少のばらつきはあるが, 基本的に上述と同様の傾向が認められる. すなわち, (1)図(2)図とも (i)図に示すように, $(\sigma_y / \sigma_x)_0 < 3.5$ の場合 (IIのパターン) では, σ_{y0} が大きくなるに従って, 矢印のように体積の収縮量が小さくなる傾向があるが, この変化の幅は, σ_{z0} が 300 kN/m²と大きくなると小さくなり, まとまつくる. また, (ii)図に示す $(\sigma_y / \sigma_x)_0 \geq 3.5$ の場合 (IIIのパターン) では, (i)図の場合とは逆に, σ_{y0} が大

きくなるに従って、体積の収縮量が大きくなる傾向がある。但し、 σ_{z_0} が100から300kN/m²と大きくなつても、この変化の幅は変わらない。

ii) 初期応力 σ_{z_0} の影響 図-13の(1)～(5)図は、応力ひずみ関係に及ぼす σ_{z_0} の影響を、前掲の図-11(応力経路図、 σ_{z_0} の影響)に対応させて、 σ_{y_0} の大きさ別に示したものである。また図には、軸差応力-軸ひずみ曲線の初期接線勾配(a, b, c)も書き入れてある。なお、(6)図は、(1)～(5)図の場合の初期応力状態を示したものである。これより次のことが認められる。

①どの図の場合も、若干のばらつきはあるが、巨視的な傾向は等しい。つまり、軸差応力-軸ひずみ曲線は、 σ_{z_0} の相違に関係なく破壊付近で同じような軸ひずみに集まり、体積変化特性は、 σ_{z_0} の増加につれて膨張側に移動する傾向となる。

②しかし、($\sigma_z - \sigma_x$)が同じレベル(点線、 $\sigma_z - \sigma_x = 100, 200\text{kN/m}^2$)の軸差応力-軸ひずみ曲線の接線勾配に着目すると、(1)図の軸差応力-軸ひずみ曲線(Iのパターン、×印)は σ_{z_0} の増加によって剛性が高くなり、また、(2)図のC(Iのパターン、×印)も σ_{z_0} が小さいA, B(IIのパターン、●印)に比べると剛性が高くなっている。しかし、(5)図($\sigma_{y_0} = 500\text{kN/m}^2$)のように破壊状態に近いIIIのパターンは σ_{z_0} の増加によって逆に剛性が低下する傾向がみられる。その他の場合については、特別な傾向は認められない。

このように、応力ひずみ関係については、初期応力 σ_{y_0} の影響は、初期応力達成時の体積変化特性に着目したII, IIIの2つのパターンに対応して分類できる。しかし、初期応力 σ_{z_0} の影響については、破壊時の軸ひずみに着目すると3つのパターンに關係なくほぼ1つとして見ることができる。但し、Iのパターンについてはデータ数が少ない。

なお、前述(a)応力経路のように、本供試体の初期構造特性は等方的ないので、これらの挙動は全て初期応力 σ_{y_0} および σ_{z_0} 載荷による誘導異方性に起因しているわけであるが、しかしながら、これらの誘導異方性により生じた平面ひずみ挙動と初期応力状態との具体的な関連性については、現時点ではまだ述べるに至っていない。

c) せん断強さ

i) 破壊状況 まず、供試体の破壊状況について述べる。写真-2は、試験終了後、更に圧縮してすべり面の状況をはっきりさせた供試体を、 σ_y 方向(拘束板方向)から示したものである。今回実施した供試体は、いずれもこのようにすべり面はV字型に入った。これは、どの供試体も $\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x$ と

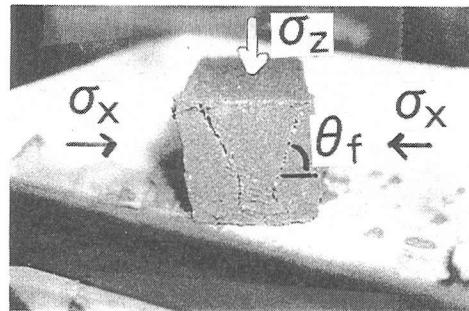


写真-2 供試体の破壊状況

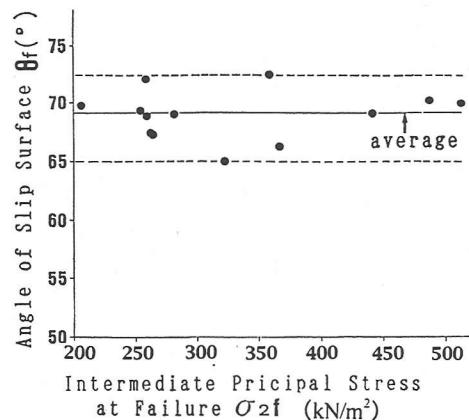


図-14 すべり面角度と破壊時の中間主応力の関係

いう関係にあるため、最小主応力の σ_x 方向に粒子がずれやすくなつたからである。また、このすべり面が单一すべり面でないのは、本実験の供試体の幅(w)に対して高さ(h)があまり高くないことに起因しているものである。なお、このすべり面の角度 θ_f (平均 $\theta_f \approx 69^\circ$)と、破壊時の中間主応力 σ_{2f} (= σ_{y_0})の関係を見ると、図-14のようになり、すべり面角度 θ_f に σ_{2f} の影響は認められないことがわかる。また、このすべり面角度から内部摩擦角を求める $\phi = 2\theta_f - (\pi/2) = 48^\circ$ となり、これは次節で述べている内部摩擦角47.2°～49.1°の中間の値となっている。

ii) せん断強さと間げき比 図-10の応力経路でも述べたが、各応力経路の終点の値(σ_z/σ_x)は、ほぼ同じような値になり、せん断強度には初期応力状態の影響は見受けられなかった。ここでは、間げき比の違いを考慮にいれて、せん断強さをより詳細に検討してみる。なお、間げき比は、初期応力の載荷によって0.01～0.02ほど微小ではあるが変化するので、初期応力達成時の間げき比 e_c を用いて検討した。

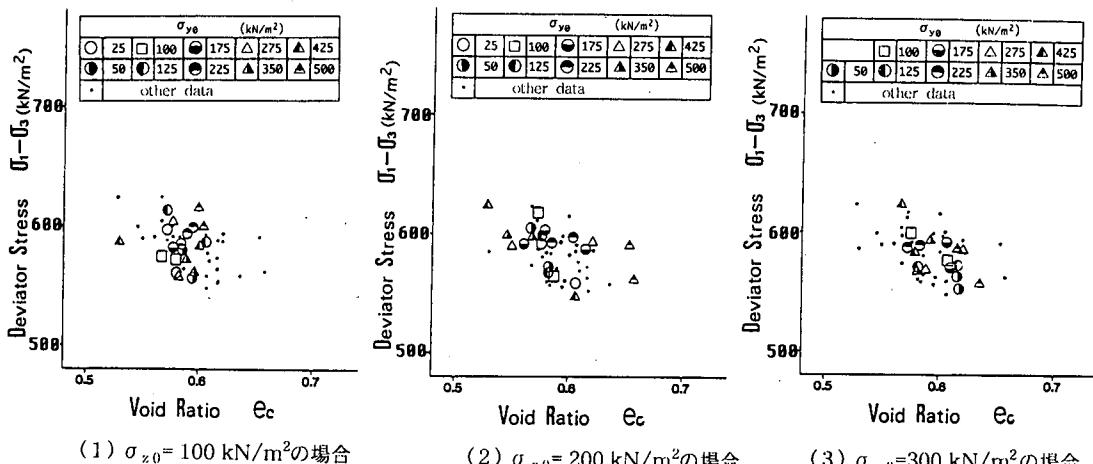


図-15 せん断強さと間隙比(初期応力達成時)の関係

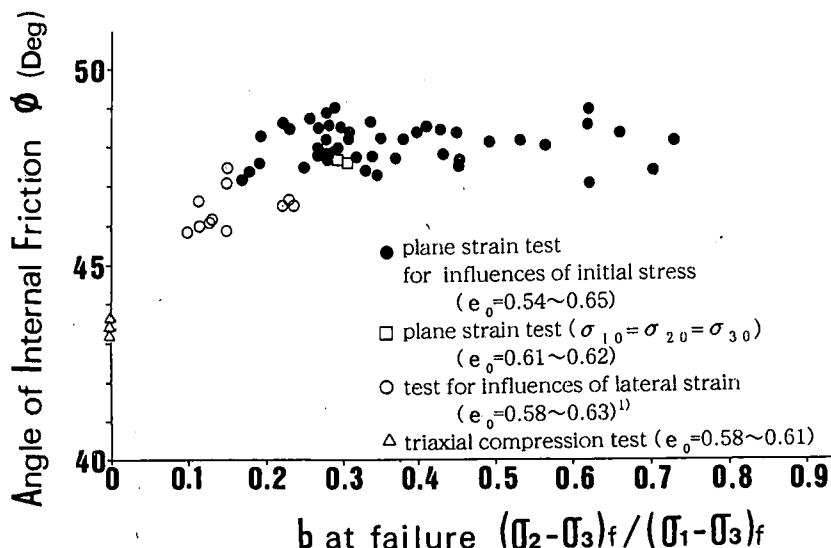


図-16 内部摩擦角とb値の関係

図-15に、初期応力達成時の間げき比 e_c とせん断強さ $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = (\sigma_z - \sigma_x)_f$ の関係を示す。(1) 図は $\sigma_{z0} = 100 \text{ kN/m}^2$, (2) 図は $\sigma_{z0} = 200 \text{ kN/m}^2$, (3) 図は $\sigma_{z0} = 300 \text{ kN/m}^2$ のものであり、各図の中の・印は、その図で取り上げた以外のデータを示している。これらより、 e_c は $0.53 \sim 0.66$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は $550 \sim 620 \text{ kN/m}^2$ (内部摩擦角 $\phi = \sin^{-1}[(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)]$ でいうと $47.2^\circ \sim 49.1^\circ$) の範囲に分布しており、ばらつきはあるが全体的に右下がりで、 e_c が大きいほどせん断強さは小さくなるという一般的な傾向を示している。このような状況を考慮すると、初期応力状態の影響はせん断強度には認められない。すまわち、誘導異方性の

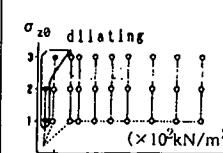
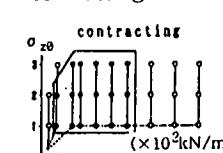
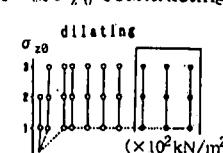
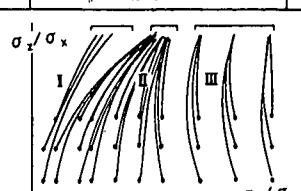
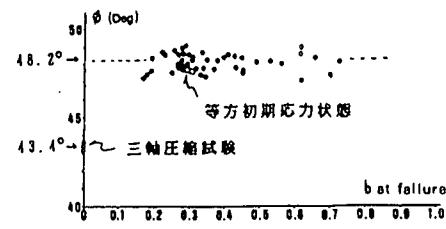
影響は強度には認められない。

iii) 内部摩擦角とb値の関係

図-16は、内部摩擦角とb値 $((\sigma_2 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_f = (\sigma_y - \sigma_x)_f / (\sigma_z - \sigma_x)_f$) の関係を示したものである。なお図の○、△印は既報¹⁾の「砂のせん断特性に及ぼす側方拘束ひずみの影響」での結果を示している。これより次の諸点が認められる。

- ① 初期応力の影響を調べた本研究の実験結果(●印)は、b値が $0.16 \sim 0.73$ と広範囲に渡っている。
- ② 初期応力を様々な変えた場合の内部摩擦角は、ばらついてはいるものの、等方状態の結果(□印)と同じかそれより若干大きい範囲に分布($\phi = 47.2 \sim 49.1^\circ$)しており、b値の影響は認められない。なお、このような傾向は山田¹⁷⁾のまとめたものによ

表-2 平面ひずみ挙動に及ぼす初期応力の影響

	パターン	I	II	III
		初期応力載荷による体積変化特性		
(1) 初期応力状態 ($\sigma_{z0}=100\text{kN/m}^2$ 一定)	σ_{z0} によりdilating	σ_{y0} および σ_{z0} 共にcontracting	σ_{y0} によりdilating,その後 σ_{z0} でcontracting	
				
(2) 応力 (応力経路)	$\sigma_{y0}/\sigma_x > (\sigma_y/\sigma_x)_0$ (収束しない)	$\sigma_{y0}/\sigma_x = 2.5 \sim 3.1$ (収束する)	$\sigma_{y0}/\sigma_x = (\sigma_y/\sigma_x)_0$ (収束しない)	
				
変形 (応力ひずみ関係)	③ σ_{y0} が増加したときの変化	データ不足	剛性増 $\sigma_{z0}-\sigma_x$ E_0 大, ϵ_{zf} 小, ϵ_v 膨脹	剛性減 $\sigma_{z0}-\sigma_x$ E_0 小, ϵ_{zf} 大, ϵ_v 収縮
	④ σ_{z0} が増加したときの変化	データ不足	$\sigma_{z0}-\sigma_{x1}$ σ_{y0} による変化幅D狭くなる	$\sigma_{z0}-\sigma_{x1}$ σ_{y0} による変化幅D変わらない
(5) 強度 (内部摩擦角)	内部摩擦角 ϕ と破壊時の b 値 ($(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$)の関係	データ不足	$\sigma_{z0}-\sigma_{x1}$ ϵ_v ϵ_{zf} 小, ϵ_v 膨脹	

ると、河上ら(1975), Ladeら(1973), Proctorら(1969)の実験にも見られる。

③また、既報¹⁾の側方ひずみの影響を調べた試験結果(○印)は、 b 値が小さくなっている、それに伴って内部摩擦角も若干小さくなっている($\phi = 45.8 \sim 47.6^\circ$)。しかしながら、この ϕ の低下は $b=0$ の三軸状態(△印、 $\phi=43.4^\circ$)に比べ完全な平面ひずみ試験(□印)に近い値となっている。

なお、図-1-6において、②で述べたように等方初期応力状態の ϕ (□印)が、他のもの(●印)の分布の下限に位置している。これは、初期応力達成時の間隙比が等方初期応力状態の場合 $e_c = 0.60 \sim 0.61$ となっているのに対して、周辺に分布している b 値が $0.26 \sim 0.37$ (初期応力達成時の体積変化特性はcontractingの状態)のデータの7割近くが $e_c = 0.55 \sim 0.59$ と小さい間隙比になっているため、この違いによるものと考えられる。

4. 結論

今回実施した平面ひずみ挙動へ及ぼす初期応力状態の影響を調べる実験から得られた結果をまとめると表-2のようになる。なお、表中の①～⑤の番号は、以下の結果に示した番号と対応している。

①初期応力状態：初期応力達成時における体積変化特性の状態、つまり体積が収縮していくことによる(contracting)状態にあるのか、またはその体積変化が膨張に転じた(dilating)状態にあるのかに着目することによって、初期応力状態を図のようにI, II, IIIの3つのパターンに分けることができる。

②応力(応力経路)：平面ひずみ圧縮試験の応力経路は、このような初期応力状態のパターンに対応して図に示すように3つに分類できる。すなわち、contractingの状態にあるIIのパターンのものは、圧縮が進むにつれて破壊時の応力比(σ_y/σ_x)_f(= $(\sigma_2/\sigma_3)_f$)はある領域(2.5～3.1)に収束していくとする。しかしながら、dilatingの状態にあるもののうち側方の初期応力 σ_{y0} が小さいIのパターンのものは、(σ_y/σ_x)_fは収束せず上記の領域よりも小さくなり、 σ_{y0} が大きいIIIのパターンの場合は、(σ_y/σ_x)_f=(σ_y/σ_x)₀となる。このようにdilatingの状態にあるIのパターンは σ_{z0} 載荷による誘導異方性が大きく、IIIのパターンは σ_{y0} 載荷による誘導異方性が大きい。

③変形(応力ひずみ関係、 σ_{y0} 増加の影響)：応力経路と同じように、初期応力状態のパターン分けに対応した影響が現れ、初期応力の載荷による誘導異

方性の影響を区別できる。側方の初期応力 σ_{y0} の変化に対して見てみると、IIのパターンのものは、 σ_{y0} 載荷の誘導異方性の影響が軸差応力-軸ひずみ曲線の初期接線勾配 E_0 の増加と破壊時の軸ひずみ $\epsilon_{z_f}(=\epsilon_{1f})$ の減少をまねき、供試体の剛性を高める。また、体積変化については膨張側の発生を促す。しかし、IIIのパターンの場合は、 σ_{y0} 載荷の誘導異方性の影響が全く逆の傾向をまねき、供試体の剛性を減少させ、収縮側の体積変化を促す。なお、Iのパターンについてはデータ不足で言及できない。

④変形(応力ひずみ関係、 σ_{z0} 増加の影響)：初期応力 σ_{z0} の影響については、 σ_{z0} が増加すると、パターンのIIとIIIとで、側方の初期応力 σ_{y0} の変化に対する応力ひずみ関係の変化幅が異なってくる。つまり、IIのパターンのものは、 σ_{y0} 載荷の誘導異方性の影響が、 σ_{z0} が増加することにより打ち消され、 σ_{y0} の変化による応力ひずみ関係の変化幅が非常に狭くなる。しかし、IIIのパターンのものは、 σ_{y0} 載荷の誘導異方性の影響が大きく、 σ_{z0} の増加によって影響を受けないので、変化幅は変わらない。

また、破壊時の軸ひずみ $\epsilon_{z_f}(=\epsilon_{1f})$ と体積変化については、Iのパターンはデータ不足で言及できないが、II、IIIのパターンでは共通して σ_{z0} の増加によって ϵ_{z_f} はほぼ同じ所に収束していき、体積変化は膨張側に生じる傾向を示す。

⑤強度(内部摩擦角)：今回設定した初期応力条件下での平面ひずみ状態の b 値は、0.2～0.7の広い範囲に分布しているが、内部摩擦角の違いは見られず、誘導異方性の影響を受けない。

5. おわりに

本研究をまとめるに当たり、有益なアドバイスを下さった東京大学龍岡文夫教授、また実験を実施してくれた卒研生の美野島央伸、李保、本多稔之君らに感謝するとともに、試験機の作製・改良に協力してくれた東京試機工業株式会社の橋本正夫氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 德江俊秀、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、No.454/I-20, pp.65～74, 1992.9.
- 2) Henkel,D.J. and Wade,N.H. : "Plane strain tests on a saturated remolded clay", ASCE, Vol.92, SM6, pp.67-80, 1966.

- 3) Nagaraj, T. S. and Somashekhar, B.V. : "Stress deformation and strength of soils in plane strain", *Proc. ARC(Asian Regional Conference) on SMFE*, Vol.1, pp.43-46, 1979.
- 4) Marachi,N.Dean, Duncan,J.M., Chan,C.K. and Seed,H.B.: "Plane-strain testing of sand", *Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP740*, R.N. Yong and F.C. Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials (ASTM), 1981, pp.294-302, 1981.
- 5) 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, 1970年1月。
- 6) 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", *Geotechnique* 25, No.2, pp.333-356, 1975.
- 7) Tatsuoka,F., Sakamoto,M., Kawamura,T. and Fukushima,S.: "Strength and deformation characteristics of sand in plane straincompression at extremely low pressures", *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.65-84, 1986.
- 8) 下辺悟:「砂の三軸・平面ひずみ挙動」日本大学博士論文, 1980.
- 9) 望月美登志, 福島伸二:「標準試験としての大三軸・平面ひずみ圧縮試験の適用性」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.181-186, 1991.
- 10) 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.
- 11) Finn,W.D.Liam, Wade,N.H. and Lee,Kenneth L. : "Volume Changes in Triaxial and Plane Strain Tests", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.93, No.SM6, Proc. Paper 5611, November 1967, pp.297-309, 1967.
- 12) Barden,L., Ismail,H. and Tong,P.: "Plane Strain Deformation of Granular Material at Low and High Pressures", *Geotechnique* 19, No.4, pp.441-452, 1969.
- 13) Lee,K.L.: "Comparison of plane strain and triaxial testson sands", *J.Soil Mech. Fdns. Div. Proc. ASCE*, Vol.96, No.SM3, pp.901-923, 1970.
- 14) Vaid,Y.P. and Campanella,R.G.: "Triaxial and plane strain behaviour of natural clay", *Proc. ASCE*, Vol.100, GT3, pp.207-224, 1974.
- 15) Oda , M. , Koishikawa , I. and Higuchi , T. "Experimental study of aniso- tropic shear strength of sand by plane strain test", *Soils and Foundations*, Vol.18, No.1, pp.25-38, 1978.
- 16) Mitachi,T. and Kitago,S.: "Undrained triaxial and plane strain behaviour of saturated remolded clay", *Soils and Foundations*, Vol.20, No.1, pp.13-28, 1980.
- 17) 土質工学会:ロックフィル材料の試験と設計強度, pp.18-19, 1982.

(1998. 3. 26 受付)

INFLUENCES OF INITIAL STRESS CONDITIONS ON PLANE STRAIN BEHAVIORS OF SAND SPECIMENS

Toshihide TOKUE, Toshitaka KAMAI and Kimio UMETSU

Plane strain compression tests (CD-test, $\sigma_x = \sigma_{x0} = \text{const.}$) were performed on Toyoura sand specimens measuring $9 \times 8 \times 5\text{cm}$. The initial stress conditions of these specimens varied within the range of $100 \leq \sigma_x \leq 300$, $25 \leq \sigma_{y0} \leq 500$ and $\sigma_{z0} = 100$ (kN/m^2 - unit). The following results were obtained:

(1) The initial stress conditions are divided into three groups according to the specimens' dilatancy during initial stress loading; (2) Stress paths and stress strain relations under plane strain compression are classified into two or three groups corresponding to these groups; (3) Strength parameter is unique irrespective of the initial stress conditions .