



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | 砂の変形・強度特性に及ぼす生得異方性と誘導異方性の影響   |
| Author(s)        | 三浦, 均也; Miura, Kinya; 土岐, 祥介 他  |
| Citation         | 北海道大學工學部研究報告, 141, 1-17   |
| Issue Date       | 1988-07-29  |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/42123">https://hdl.handle.net/2115/42123</a> |
| Type             | departmental bulletin paper   |
| File Information | 141_1-18.pdf  |



砂の変形・強度特性に及ぼす生得異方性と  
誘導異方性の影響

三 浦 均 也   土 岐 祥 介   島 屋   進\*  
(昭和63年 3 月31日受理)

**The Effects of Inherent and Induced Anisotropies  
on Sand Deformation-Strength Characteristics**

Kinya MIURA, Shosuke TOKI and Susumu SHIMAYA  
(Received March 31, 1988)

**Abstract**

Usual sand in the ground often acquires significant anisotropic deformation-strength characteristics. The anisotropies of sand can be classified into two types, based on their sources: inherent anisotropy and induced anisotropy. The former is due to original anisotropic sand fabric, and the latter is due to the shear deformation history. The aim of this paper is to show the effects of the two types of anisotropies on sand deformation behaviors experimentally and analytically.

Two series of stress probe tests were performed on medium dense sand specimens with an anisotropic fabric by means of hollow cylinder torsional shear apparatus. In the first test series isotropically consolidated specimens were sheared in different principal stress axes directions to investigate the inherent anisotropic effects. The second test series was carried out for induced anisotropy effects, where specimens were first subjected to one cycle of loading and reloading of shear stress in a prescribed principal stress axes direction, and then sheared in different directions. Examining the observed deformation behaviors clarified some experimental facts of anisotropy effects on strength, dilatancy and shear deformation behaviors and principal strain axes direction.

In order to explain some aspects of anisotropic deformation behaviors, the concept of the three-dimensional constitutive model for sand referred to as Multi-Directional Sliding Model is applied. The model assumes that the soil element has innumerable potential sliding planes and its deformation behavior is governed by the sliding deformation mechanisms on the planes. It is shown that varying the shear resistance on the plane depending on its relative direction with respect to the bedding plane and incorporating Masing's criteria into the hyperbolic shear-normal stress ratio vs. shear strain relationship on the planes, are useful to evaluate the inherent and induced anisotropy

effects, respectively.

## 1. ま え が き

砂および砂質土の力学的な特性は顕著な異方性を示す場合が多く、その成因によって次の二つのタイプに分けて考えることができる<sup>1)</sup>。

生得異方性 (*Inherent Anisotropy*) は、土の堆積時に形成される異方的な内部構造に起因するものである。実験室において、重力の影響の下で砂試料を落下・堆積させて準備した供試体は、原位置地盤と類似した二軸直交異方的な粒子の配列構造が発達している。Oda<sup>2)</sup>および Arthur and Menzies<sup>3)</sup>はそのような供試体について室内試験を実施し、砂質土の変形・強度特性に及ぼす内部構造の異方性の顕著な影響を示した。筆者ら<sup>4,5)</sup>はこれまで、中空円筒ねじりせん断試験機を用いて、初期異方構造を有する密詰め砂の変形挙動を調べた。その結果、堆積作用によって作製された供試体における堆積面上では、砂粒子同士の噛み合わせが最も弱いために、この面とある傾きをなす他の面に比べてすべりが発生し易いという考えに着目すると、主応力軸回転の有無によらず砂の変形・強度特性を統一的に説明できることを示した。

一方、誘導異方性 (*Induced Anisotropy*) は以前にせん断変形を受けることにより土が異方的な硬化特性を示すことに起因するもので、土がせん断応力履歴を有する場合に考慮しなければならない。Arthurら<sup>6,7,8)</sup>、Wong and Arthur<sup>9)</sup>およびStureら<sup>10)</sup>は *Directional Shear Cell* を用いて、主応力軸回転を含む応力条件で、変形・強度特性に及ぼす誘導異方性の影響を砂要素の等方的な面において調べた。一連の研究によって彼らは、誘導異方性によって生じる異方的な硬化および軟化特性を主応力軸方向との関連によって示し、異方性の程度は土が受けたせん断応力の大きさに強く依存していることを明らかにした。

一般に、地盤および土構造物では、生成過程における重力の影響などによって粒子配列構造はもとより力学特性がかなり生得的に異方的である<sup>11,12)</sup>。さらに、原位置地盤における土要素は構造物の建設過程において、複雑なせん断応力履歴を受けるため誘導異方性が導入されている。したがって、土の力学特性における生得異方性および誘導異方性の影響、並びにそれらの相互作用を主応力軸回転を含むような一般的な応力条件において明らかにし、その評価法について検討する必要がある。

本研究では、初期異方構造を有する供試体を中空円筒ねじりせん断試験装置を用いて排水条件で試験した。最初、供試体は所定の主応力軸方向でせん断応力を載荷・除荷し、次に、異なった主応力軸方向でせん断応力を負荷した。一連の試験で観測された砂の変形挙動を比較・検討することによって、変形挙動に及ぼす生得異方性と誘導異方性の影響についていくつかの知見が得られた。また、一般応力条件下における土の構成モデル「多方向すべりモデル」<sup>13,14,15)</sup>に従って、砂要素において無限個の潜在的すべり面を仮定して、それらのすべり面上におけるすべり変形機構を総合的に評価することによって、砂の変形・強度特性の異方性を説明できることを示している。

## 2. 試験装置および応力とひずみの表示法

室内試験で用いた中空円筒ねじりせん断試験装置は図 1(a)に示す同筒供試体 (高さ  $H=20\text{cm}$ , 外半径  $R_o=5\text{cm}$ , 内半径  $R_i=3\text{cm}$ ) に軸力  $F$ , トルク  $T$  および異なる内, 外セル圧力  $p_i$ ,  $p_o$  を載

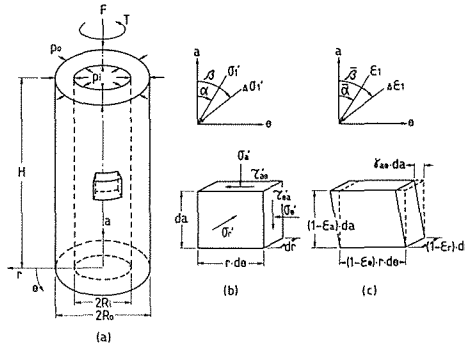


Fig. 1 (a) Hollow cylindrical sand specimen, (b) stress condition in sand element, (c) strain condition on sand element.

荷し，軸変位  $\Delta H$ ，ねじれ角  $\Delta\theta$  および内，外半径の変化  $\Delta R_i$ ， $\Delta R_o$  を測定することができる<sup>4)</sup>。供試体内の要素に作用している応力状態および発生する変形は，以下に定義する応力とひずみの成分によって表示している（図 1 (b), (c)）。

- |                                    |          |  |           |
|------------------------------------|----------|--|-----------|
| $\sigma_a$                         | : 軸応力    | $\epsilon_a$                           | : 軸方向ひずみ  |
| $\sigma_\theta$                    | : 周方向応力  | $\epsilon_\theta$                      | : 周方向ひずみ  |
| $\tau_{a\theta} = \tau_{\theta a}$ | : せん断応力  | $\gamma_{a\theta} = \gamma_{\theta a}$ | : せん断ひずみ  |
| $\sigma_r$                         | : 半径方向応力 | $\epsilon_r$                           | : 半径方向ひずみ |

これらの応力およびひずみ成分の値は供試体全体の平均値として計算した<sup>4,16)</sup>。

特に，主応力軸および主ひずみ軸の回転を含む  $a-\theta$  面における応力と変形状態を表示するために，新たに以下の応力およびひずみ成分を採用した（図 2）。

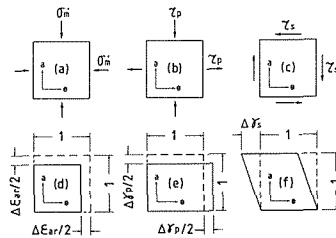


Fig. 2 Definition of stress and strain components in  $a-\theta$  plane; (a) mean normal stress, (b) pure shear stress, (c) simple shear stress, (d) areal strain increment, (e) pure shear strain increment, (f) simple shear strain increment.

- |   |           |   |            |
|---|-----------|---|------------|
| $\sigma_m' = (\sigma_a + \sigma_\theta)/2 - u$                  | : 有効平均応力  | $\epsilon_{ar} = \epsilon_a + \epsilon_\theta$                        | : 面積ひずみ    |
| $\tau_p = (\sigma_a - \sigma_\theta)/2$                         | : 純粋せん断応力 | $\gamma_p = \epsilon_a - \epsilon_\theta$                             | : 純粋せん断ひずみ |
| $\tau_s = \tau_{a\theta}$                                       | : 単純せん断応力 | $\gamma_s = \gamma_{a\theta}$   | : 単純せん断ひずみ |
| $\tau_m = \sqrt{\tau_p^2 + \tau_s^2} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ | : 最大せん断応力 | $\gamma_m = \sqrt{\gamma_p^2 + \gamma_s^2} = \epsilon_1 - \epsilon_3$ | : 最大せん断ひずみ |

$$\tau_m/\sigma'_m = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/(\sigma'_1 + \sigma'_3) = \sin\phi_m : \text{応力比}$$

ここで、 $u$  は間隙水圧、 $\phi_m$  は動員されている内部摩擦角である。

図 1(b),(c)に示すような最大主応力 ( $\sigma_1$ ) 軸、最大主応力増分 ( $\Delta\sigma_1$ ) 軸および最大主ひずみ ( $\epsilon_1$ ) 軸、最大主ひずみ増分 ( $\Delta\epsilon_1$ ) 軸の鉛直方向から測った角度はそれぞれ次のように定義される。

$$\begin{aligned} \tan 2\alpha &= \tau_s/\tau_p & : \text{最大主応力軸の傾角} & \quad \tan 2\beta &= \Delta\tau_s/\Delta\tau_p & : \text{最大主応力増分軸の傾角} \\ \tan 2\bar{\alpha} &= \gamma_s/\gamma_p & : \text{最大主ひずみ軸の傾角} & \quad \tan 2\bar{\beta} &= \Delta\gamma_s/\Delta\gamma_p & : \text{最大主ひずみ増分軸の傾角} \end{aligned}$$

図 3(a),(b)には  $a-\theta$  面におけるせん断応力とせん断変形の状態を示すために、正規化された応力面とひずみ面を示した。これらの面上では応力とひずみの主方向が視覚的に理解できる。

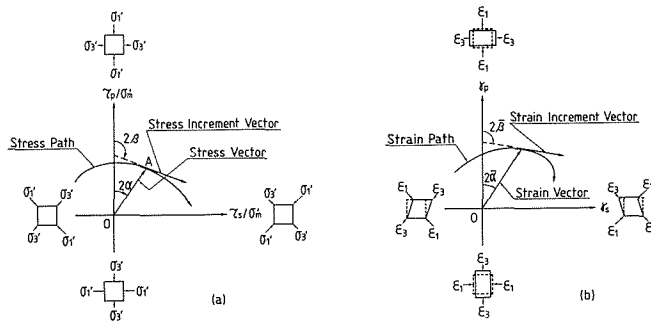


Fig. 3 (a) Normalized stress plane, (b) strain plane.

### 3. 試験方法と応力経路

試験に用いた試料は豊浦標準砂 ( $G_s=2.65$ ,  $e_{max}=0.992$ ,  $e_{min}=0.625$ ) で、多重ふるい落下法<sup>17)</sup>により、やや密詰めの円筒供試体 ( $D_r=60\pm 6\%$ ) を作製した。このような供試体は、異方的な粒子配列構造を有し、その力学特性は鉛直方向  $a$ -軸を対称軸とする二軸直交異方性体で近似できる<sup>18)</sup>。

まず、供試体を三軸セル内で飽和し、等方圧密 (98kPa) した後、排水を許してせん断応力を負荷した。この時、せん断応力の負荷のみによる変形挙動を観測するために、試験中のすべての段階において有効半径方向応力  $\sigma'_r$  と有効平均主応力  $\sigma'_m$  を一定値 98kPa に保持した。

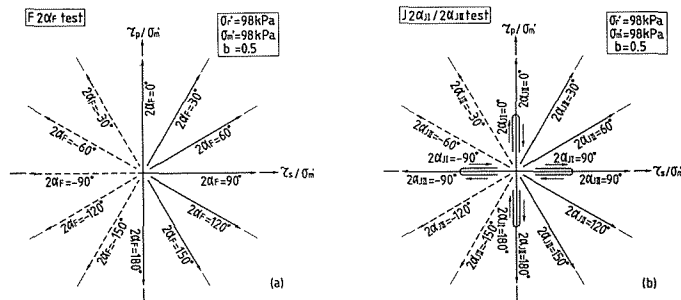


Fig. 4 Prescribed stress paths; (a) for  $F_{test}$ , (b)  $J_{test}$ .

本研究では、せん断応力履歴の有無により以下に示す2種類のせん断試験を行なった。

**Ftest** この試験では、供試体にせん断応力履歴を与えずに、所定の主応力軸方向でせん断応力を単調に載荷した。応力経路は図4(a)に示す通りの放射状直線である。試験は $F2\alpha_F$ testと称し、鉛直方向から測った最大主応力軸方向は $\alpha_F$ である。主応力軸方向は $2\alpha_F=30^\circ$ 間隔で設定した。供試体の内部構造および力学挙動は鉛直軸について対称なため、図3(a),(b)において、縦軸( $\tau_p/\sigma'_m$ 軸および $\gamma_p$ 軸)について変形・強度特性は対称になる。したがって、試験は $F0^\circ$ ,  $F180^\circ$ testを含む右側の図上に実線で示した7ケースについてのみ行なった。しかし、考察においては縦軸の左側の破線で示した試験における挙動は、左右の対称性を考慮して示している。すなわち、 $F-2\alpha_F$ testの挙動は $F2\alpha_F$ testにおいて $\tau_s$ と $\gamma_s$ の符号を入れ換えたものになっている。

**Jtest** この試験では、ある主応力軸方向でせん断応力履歴を与えた後、指定した主応力軸方向に再びせん断応力を載荷した。応力経路は図4(b)に示した通りである。試験は $J2\alpha_{J1}/2\alpha_{J11}$ testと称し、初め、鉛直方向から測った最大主応力軸方向 $\alpha_{J1}$ において $\tau_m/\sigma'_m=\sin\phi_m=0.5$ まで載荷し、除荷した後、 $\alpha_{J11}$ 方向で再度破壊まで載荷した。図示のように前載荷の方向は $2\alpha_{J1}=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, -90^\circ$ の4方向で、また、再載荷はFtestと同様に $2\alpha_{J11}=30^\circ$ 間隔で行なった。

力学特性の対称性を考慮し、載荷方向は図4(b)の実線で示した $2\alpha_{J11}$ が正の範囲に限定した。ただし、 $J2\alpha_{J1}/-2\alpha_{J11}$ testにおける変形・強度特性は $J-2\alpha_{J1}/2\alpha_{J11}$ testで測定されたものについて、 $\tau_s$ と $\gamma_s$ の符号を入れ換えたものと考えて良いので、随時このような変換を行なって考察を行っている。

すべてのFtestでは $\sigma_2=\sigma_1=\text{const}$ , および $\sigma_m=\text{const}$ , 条件により、3個の主応力値はそれぞれ同じ割合で変化し、主応力軸の方向のみが異なっている。したがって、それらの試験で測定された変形挙動を比較することによって、砂の力学特性に及ぼす生得異方性の影響を知ることができる。Jtestでは、せん断履歴の異なるケースについて測定された挙動を比較することによって、砂の力学特性に及ぼす誘導異方性の影響を知ることができる。さらに、それらを総合することによって、生得異方性と誘導異方性の相乗効果を評価することができる。

#### 4. 実験結果および考察

図5～7には、試験結果の典型的な例として $J2\alpha_{J1}/0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ testで測定されたひずみ経路、体積変化挙動およびせん断変形挙動を示している。図5(a)～(d)には比較のために $F0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ testで測定されたひずみ経路を、Jtestにおける再載荷時のひずみ経路と共通の原点を持つように移動して破線で示した。また、図6(a)～(d)には、Ftestで測定された体積変化挙動を再載荷時の挙動と比較できるように破線で示している。図7(a)～(d)にはJtestにおける再載荷時の最大せん断ひずみ $\gamma_m$ と応力比 $\tau_m/\sigma'_m=\sin\phi_m$ との関係を、Ftestで測定された $\gamma_m-\sin\phi_m$ 関係も含めて示している。

供試体の初期構造が異方的なため、すなわち、生得異方性が顕著なため、 $F0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ testにおける変形挙動は大きく異なっている<sup>4,5)</sup>。また、各々の図において挙動を比較すると、せん断応力履歴を受ける主応力軸方向の相違によって、それ以後の変形挙動が明らかに異なることが分かり、誘導異方性の無視できない影響が認められる。

次節以降では、試験結果に基づいて、強度、せん断変形、ダイレイタンスーおよび主ひずみ方向について考察を行ない、それらに及ぼす生得異方性および誘導異方性の影響を明らかにしてい

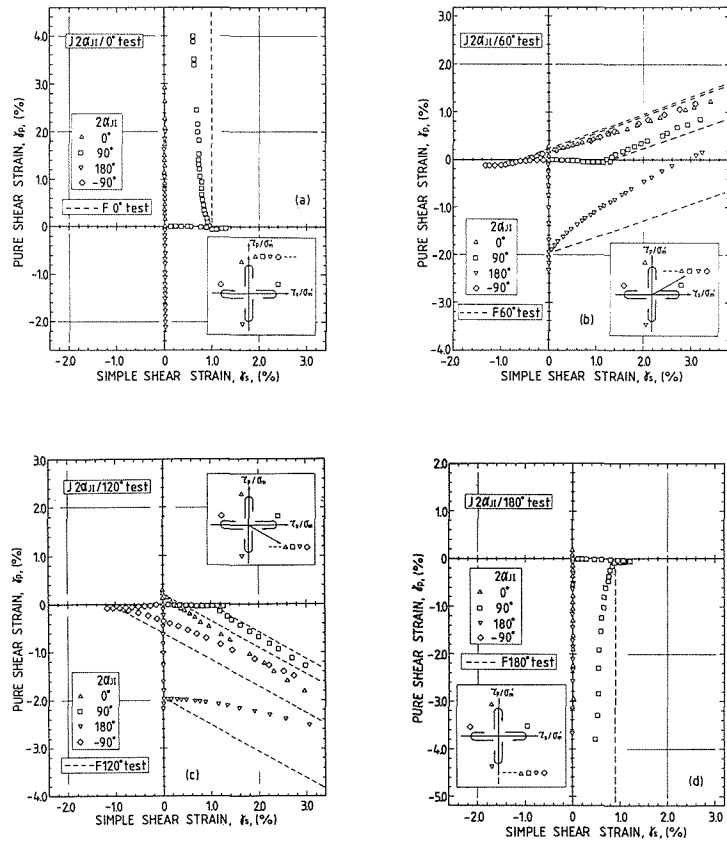


Fig. 5 Strain paths; (a) for  $J2 \alpha_{J1}/0^\circ$  test, (b) for  $J2 \alpha_{J1}/60^\circ$  test, (c) for  $J2 \alpha_{J1}/120^\circ$  test, (d) for  $J2 \alpha_{J1}/180^\circ$  test.

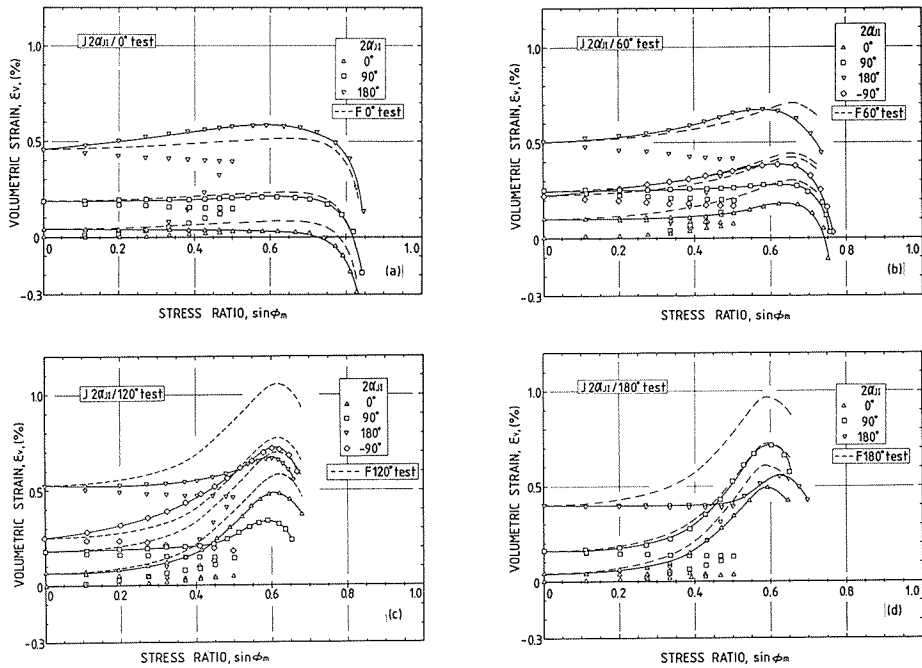


Fig. 6 Dilatancy behaviors; (a) for  $J2\alpha_{J1}/0^\circ$  test, (b) for  $J2\alpha_{J1}/60^\circ$  test, (c) for  $J2\alpha_{J1}/120^\circ$  test, (d) for  $J2\alpha_{J1}/180^\circ$  test.

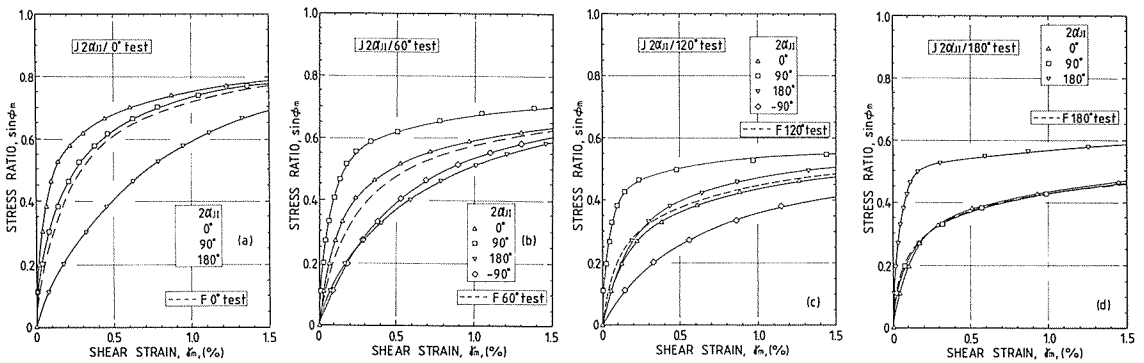


Fig. 7 Shear deformation behaviors; (a) for  $J2\alpha_{J1}/0^\circ$  test, (b) for  $J2\alpha_{J1}/60^\circ$  test, (c) for  $J2\alpha_{J1}/120^\circ$  test, (d) for  $J2\alpha_{J1}/180^\circ$  test.

る。さらに、「多方向すべりモデル」の概念<sup>13,14,15)</sup>に従って、砂の変形挙動における生得異方性と誘導異方性の発現機構について考察を行なっている。

4.1 強度特性

図8には、せん断破壊時の応力比  $\sin\phi_d$  を示した。図にはせん断応力履歴を与えていない Ftest

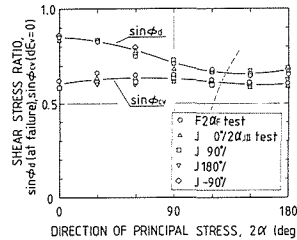


Fig. 8 Strength anisotropy of sand.

と、異なった主応力軸方向でせん断応力履歴を受けた Jtest で測定された  $\sin\phi_d$  が共に示されているが、それらの間に有為な差は認められない。すなわち、応力比  $\sin\phi_m=0.5$  程度の応力履歴によって  $\phi_d$  は変化しないことが分かり、強度特性はせん断応力履歴（誘導異方性）の影響をほとんど受けないと言える。

また、図から分かるように、せん断破壊強度は、せん断载荷を受ける主応力軸方向によって大きく変化しており、強度と主応力軸方向の間にはせん断応力履歴の有無によらず、一義的な関係が存在する。すなわち、主応力軸方向  $2\alpha=0^\circ$  で  $\phi_d$  は最も大きく、 $2\alpha$  の増加とともに減少し  $2\alpha=120^\circ$  と  $150^\circ$  の間で最小値を示している。

以上のような生得異方的な強度特性を「多方向すべりモデル」<sup>13,14,15)</sup>に基づいて説明してみる。まず、砂要素があらゆる方向に無数の潜在的すべり面を有しているとの仮定に従って、ある主応力軸方向で応力比  $\sin\phi_m$  が動員されている時のすべり面上における垂直・せん断応力比  $\tau/\sigma'_n$  と

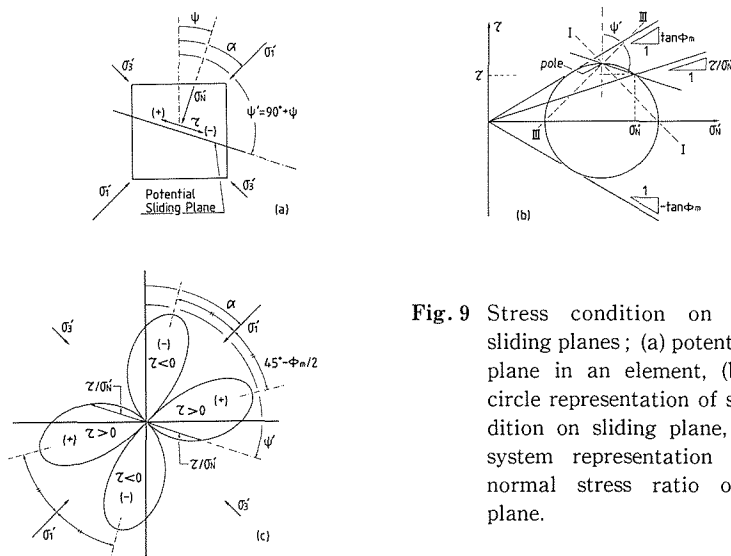


Fig. 9 Stress condition on potential sliding planes; (a) potential sliding plane in an element, (b) Mohr's circle representation of stress condition on sliding plane, (c) Polar system representation of shear-normal stress ratio on sliding plane.

すべり面の方向  $\psi'$  との関係を示しているのが図 9(a)~(c)である。図 9(b)に示すように、 $\tau/\sigma_N'$  は Mohr の応力図から求められ、図 9(c)には半径方向に応力比の大きさを取りすべり面の方向との関係を示している。図示のように、最大の垂直・せん断応力比は最大主応力軸方向から  $\pi/4 - \phi_m/2$  の方向のすべり面上で発揮されることが分かる。図 8 には水平面(堆積面)上で最も大きな垂直・せん断応力比が生じるときの主応力軸方向  $\alpha$  と動員内部摩擦角  $\phi_m$  との関係 ( $2\alpha - \phi_m = \pi/2$ ) を破線で示した。Miuraら<sup>4)</sup>が示したように、堆積構造を有する砂では粒子長軸が水平方向へ卓越して配列しているために、堆積面上では粒子の噛み合わせが乏しく、すべりに対する抵抗が最も弱いと考えられることができる。したがって、図 8 の破線が示すような堆積面上で最も大きな垂直・せん断応力比が作用するような条件の時にせん断強度は最低になるといえる。

4.2 せん断変形およびダイレイタンスー

生得異方性 図 7(a)~(d)に破線で示されている  $F0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$  test のせん断変形挙動は明らかに異なっており、せん断変形特性には初期異方構造の無視できない影響が認められる。せん断変形特性に及ぼす生得異方性の影響を定量的に示すために、以前にせん断応力履歴を受けていない  $F_{test}$  における応力比  $\sin\phi_m = 0.5$  までのせん断過程で生じた最大せん断ひずみ  $\gamma_{m0.5}$  を主応

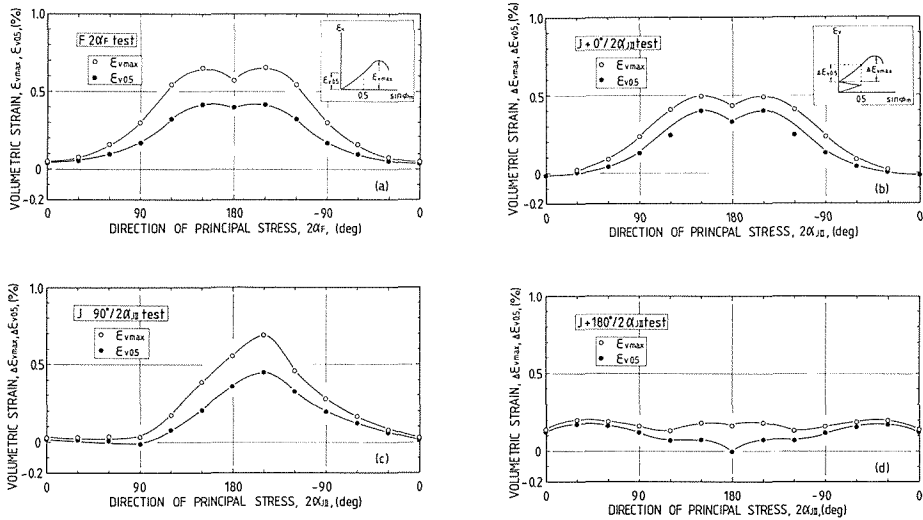


Fig. 10 Variation of  $\epsilon_{vmax}$  and  $\epsilon_{v0.5}$  with the change of principal stress axes direction  $2\alpha$ ; (a) for  $F_{test}$ , (b) for  $J0^\circ/2 \alpha_{JII}$  test, (c) for  $J90^\circ/2 \alpha_{JII}$  test, (d) for  $J180^\circ/2 \alpha_{JII}$  test.

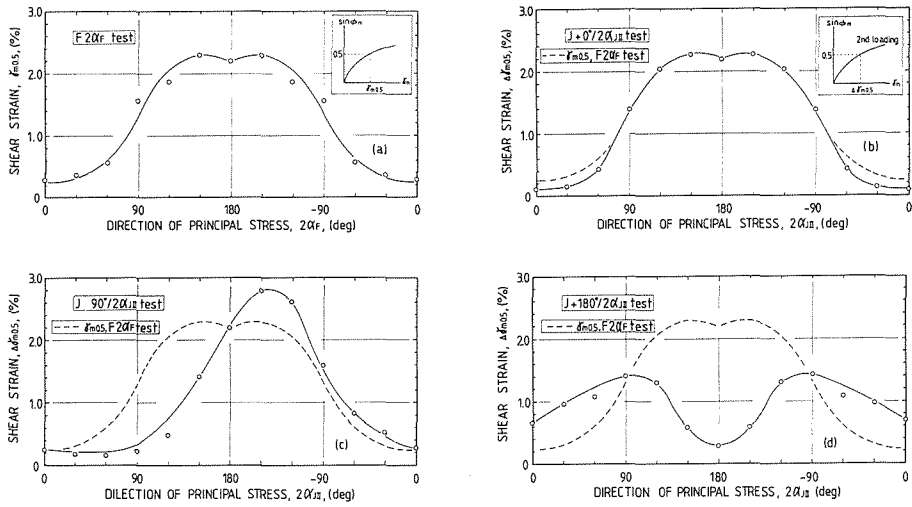


Fig. 11 Variation of  $\gamma_{m0.5}$  with the change in principal stress axes direction  $2\alpha$ ; (a) for Ftest, (b) for  $J0^\circ/2 \alpha_{JII}$  test, (c) for  $J90^\circ/2 \alpha_{JII}$  test, (d) for  $J180^\circ/2 \alpha_{JII}$  test.

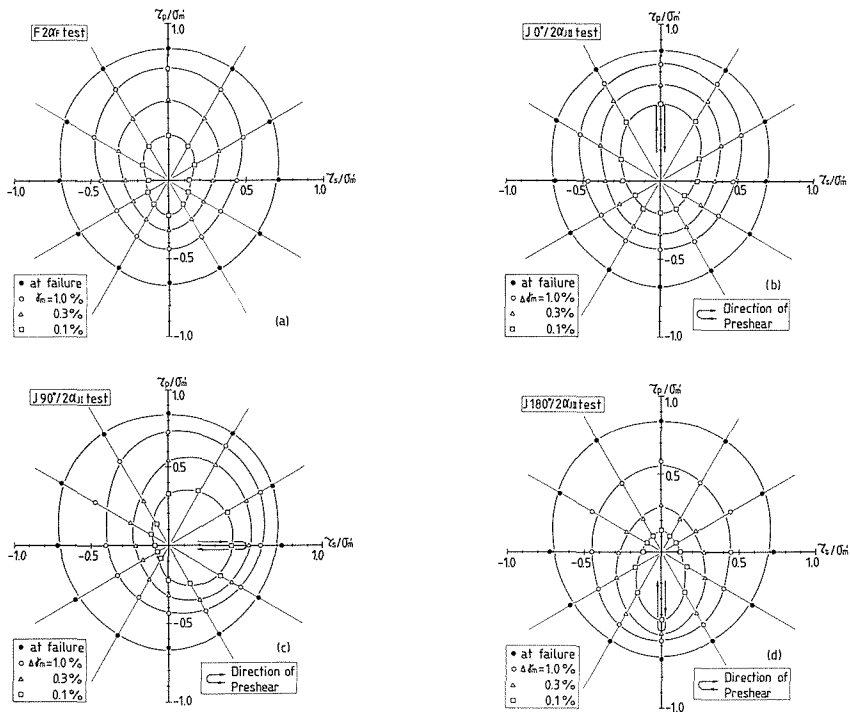


Fig. 12 Equi-maximum shear strain lines; (a) for Ftest, (b) for  $J0^\circ/2 \alpha_{JII}$  test, (c) for  $J90^\circ/2 \alpha_{JII}$  test, (d) for  $J180^\circ/2 \alpha_{JII}$  test.

力軸方向 $2\alpha_F$ との関係で図11(a)に示している。もし、供試体の力学特性が等方的ならば $\gamma_{m0.5}$ は主応力軸方向 $2\alpha_F$ によらず一定になるはずである。しかし、図示のように生じるせん断ひずみは主応力軸方向に依存して異なっている。このことは図12(a)に描かれている応力面上の等 $\gamma_m$ 線の形状からも明らかで、等 $\gamma_m$ 線は $2\alpha=0^\circ$ 方向で間隔が広く、その方向で剛性が高いことが分かる。図11(a)から、 $2\alpha_F=0^\circ$ 方向では剛性が最も高く $\gamma_{m0.5}$ は最小値約0.25%をとり、 $2\alpha_F=\pm 150^\circ$ 方向で剛性が最も低く $\gamma_{m0.5}$ は最大値約2.3%をとっている。このようなせん断変形・強度特性の顕著な異方性は、砂試料の堆積過程において形成される砂粒子の配列構造の微視的な観察に基づいてMiuraら<sup>4)</sup>が説明している。すなわち、すべり変形が最も生じ易い堆積面上で他の面に比べて最も大きなせん断・垂直応力比が作用して卓越したすべりが生じるために、 $2\alpha_F=\pm 150^\circ$ の付近で最も剛性が低くなると説明できる（図9(a)~(c)参照）。

本研究で行なった試験はすべて、平均主応力を一定に保持して行なったので、測定される体積変化挙動の相違はダイレイタンスー特性の相違によるものと考えられる。図5~8(b)に示すように、砂のような粒状体は一般にせん断変形を受けると、最初の低い応力比では体積は収縮し、その後応力比の増加にともなって膨張に転じる。図8には体積変化傾向が収縮から膨張へ遷移するときの応力比 $\sin\phi_{cv}$ と主応力軸方向 $2\alpha$ との関係を示している。図中にはせん断応力履歴を与えていないFtestで測定された値を○丸印で示している。 $\phi_{cv}$ は初期構造の異方性の影響を若干受け、破壊強度 $\phi_d$ と同様に、 $2\alpha=150^\circ$ 付近で最小値となっている。

図6(a)~(d)に破線で示されている $F0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ testで観察された体積変化特性には大きな差が認められる。ダイレイタンスー特性に及ぼす生得異方性の影響を定量的に示すために、Ftestにおいて応力比 $\sin\phi_m=0.5$ までに発生した体積ひずみ $\epsilon_{v0.5}$ およびせん断過程で生じた最大体積ひずみ $\epsilon_{vmax}$ と主応力軸方向 $2\alpha_F$ との関係を図10(a)に示している。 $\epsilon_{v0.5}$ と $\epsilon_{vmax}$ は、ともにせん断ひずみ $\gamma_{m0.5}$ と同じような挙動を示すことから、せん断変形とダイレイタンスーは密接に関連していて、生得異方性の影響は類似したメカニズムで発揮されると推定できる。

**誘導異方性** 図8にはせん断応力履歴を受けた後のせん断変形過程で測定された体積変化挙動が収縮傾向から膨張傾向へと変化する時の応力比 $\sin\phi_{cv}$ を履歴を受けていない場合の $\sin\phi_{cv}$ とともに示している。図示のようにせん断応力履歴を受けていない場合と受けた場合との $\sin\phi_{cv}$ には明瞭な差が認められないことから、 $\phi_{cv}$ は誘導異方性の影響を受けないことは明らかである。

図6, 7(a)~(d)に示す以前に異なる主応力軸方向でせん断履歴を受けた供試体のダイレイタンスー挙動とせん断変形挙動について調べてみる。もしも、せん断応力履歴による影響がなければ、各図に示されている再載荷時の変形挙動は破線と与えられている履歴を受けていない挙動に一致するはずである。しかし、図示のように、それらの間には明瞭な差があり、せん断応力履歴の無視できない影響が認められる。

図11(b)~(d)には、それぞれ以前に $2\alpha_{J1}=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 方向でせん断応力( $\sin\phi_m=0.5$ )を受けた後の再載荷時において、応力比 $\sin\phi_m=0.5$ までに発生した最大せん断ひずみの大きさ $\Delta\gamma_{m0.5}$ と主応力軸方向 $2\alpha_{J11}$ との関係を示している。また、比較のために図11(a)に示した応力履歴を受けていない場合の $\gamma_{m0.5}$ を破線で示している。まず、図11(b)に示す以前に $2\alpha_{J1}=0^\circ$ 方向でせん断応力を受けた場合には、履歴を受けていないものに比べて $2\alpha_{J11}=0^\circ$ 付近でひずみの発生量が小さく、この方向でせん断応力に対する抵抗は大きくなっていることが分かる。また、図11(d)に示した $2\alpha_{J1}=180^\circ$ の場合には、 $2\alpha_{J11}=180^\circ$ を中心に $90^\circ\sim-90^\circ$ の範囲ではせん断応力に対する抵抗は著しく増大する傾向が見られ、一方、 $0^\circ$ を中心に $-90^\circ\sim90^\circ$ の範囲では逆に抵抗は減少する傾向が認められる。

図12(b)~(d)に示す応力履歴を受けた場合の等せん断ひずみ線は、以前にせん断応力履歴を受けた主応力軸方向に大きく張り出しており、反対側では逆に内側へ入り込んでいることがよく読み取れる。すなわち、せん断応力履歴を受けた方向の違いによらず、履歴を受けた方向ではせん断剛性は増大する（硬化する）が、反対方向ではせん断剛性は減少する（軟化する）という傾向を読みとることができる。

図10(b)~(d)には、以前にそれぞれ $2\alpha_{J1}=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 方向でせん断応力 ( $\sin\phi_m-0.5$ ) を受けた後の再載荷時において、応力比  $\sin\phi_m=0.5$  までに発生した体積ひずみ  $\Delta\varepsilon_{v0.5}$  および発生した最大体積ひずみ  $\Delta\varepsilon_{vmax}$  と主応力軸方向  $2\alpha_{JII}$  との関係を示している。体積変化挙動にもせん断変形挙動の場合と同様に、せん断応力履歴を受けることによって、砂の硬化および軟化現象が認められ、また、その傾向は極めて類似していることが分かる。

以上のことから、せん断応力履歴を受けることによって、それ以後のせん断載荷過程において、せん断応力に対する剛性の増大および減少、すなわち、ひずみ硬化およびひずみ軟化が、せん断変形挙動と体積変化挙動の両方において見られる。そうして、その傾向は履歴を受けた方向との相対的な関係によって決まることが明らかである。

図10(b)~(d)および図11(b)~(d)に示されている  $\Delta\varepsilon_{v0.5}$ ,  $\Delta\varepsilon_{vmax}$  および  $\Delta\gamma_{m0.5}$  には生得異方性と誘導異方性の両方の影響が現れていると考えられるので、図13(a)~(c)には、誘導異方性の影響を相対的な変形量に基づいて評価するために、履歴与えていない Ftest で測定された  $\varepsilon_{v0.5}$ ,  $\varepsilon_{vmax}$  および  $\gamma_{m0.5}$  に対するそれらの値の比を前載荷時から再載荷時への主応力軸の回転角 ( $2\alpha_{JII}-2\alpha_{J1}$ ) との関係において示した。

これらの図から、誘導異方性の影響はせん断ひずみおよび体積ひずみにほとんど同じように現れ、せん断履歴を受けた方向 ( $2\alpha_{JII}-2\alpha_{J1}=0^\circ$ ) の近くでひずみの発生量が減少する傾向にあり、また、その反対側ではひずみの発生量はほとんど変わらないかまたは増加する傾向にあることが分かる。この傾向を詳しく読みとると、主応力軸回転角が  $(2\alpha_{JII}-2\alpha_{J1})=\pm 150^\circ$  の方向でせん断応力履歴による剛性の低下が最も著しいと言える。

Arthurら<sup>9,19)</sup>は前載荷時において最も大きなせん断・垂直応力比が動員される面 (maximum stress obliquity plane) と垂直ひずみが0になる面 (no-extension plane) に着目して、異方的

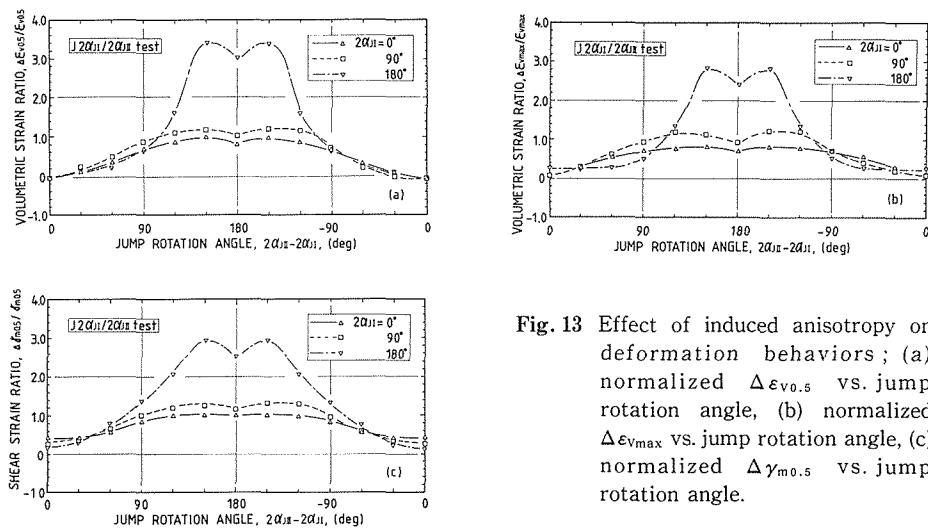


Fig. 13 Effect of induced anisotropy on deformation behaviors; (a) normalized  $\Delta\varepsilon_{v0.5}$  vs. jump rotation angle, (b) normalized  $\Delta\varepsilon_{vmax}$  vs. jump rotation angle, (c) normalized  $\Delta\gamma_{m0.5}$  vs. jump rotation angle.

な硬化特性を定性的に説明することを試みた。ここでは、「多方向すべりモデル」<sup>13,14,15)</sup>に基づいて、仮定した無数の潜在的すべり面における変形に着目して説明してみる。

図14(a)には、双曲線関係に *Masing* 則<sup>20)</sup>を取り込み、*Bauschinger* 効果を考慮して算定したすべ

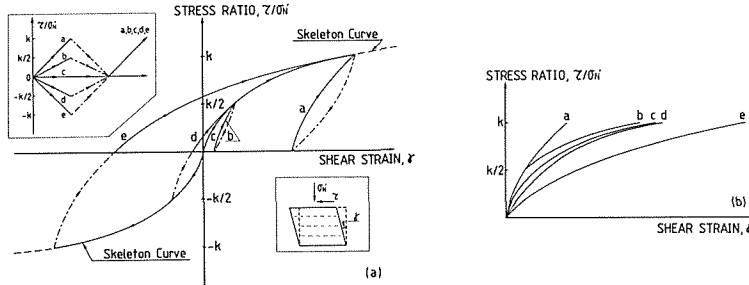


Fig. 14 Hyperbolic shear-normal stress ratio vs. shear strain relationship with *Masing*'s rule on potential sliding plane; (a) deformation behaviors for various loading programs, (b) comparison of re-loading deformation behaviors.

り面上における応力比  $\tau/\sigma'_N$  とせん断ひずみ  $\gamma$  との関係を種々の応力繰返し過程について示している。変形挙動は図示のように前載荷条件の相違により異なっており、再載荷時の挙動のみを重ねて描いた図14(b)が示すように、前載荷時において再載荷時と同じ方向に大きなせん断応力を受けたものほど再載荷時の剛性は高く、また逆方向に大きなせん断応力を受けたものほど剛性は低くなる事が分かる。

次に、履歴を与えたときに砂要素中の無数の潜在的すべり面に働くせん断・垂直応力比  $\tau/\sigma'_N$  の大きさを計算すると、 $\sin\phi_m=0.5$ ,  $2\alpha_{JII}=0^\circ$  の場合には、鉛直面から  $\psi'=\pi/4-\phi_m/2=\pm 30^\circ$  の方向のすべり面で極大となる図15(a)のような分布になる(図9(a)~(c)参照)。さらに、再載荷時に主応力軸方向  $2\alpha_{JII}=0^\circ, 150^\circ, 180^\circ$  で  $\sin\phi_m=0.5$  まで載荷した場合について計算すると、それぞれ、図15(a)~(c)ようになる。図中には前載荷時と再載荷時で動員されるせん断応力の向きが逆になる、すなわち前載荷を受けることによってその後のせん断変形に対する剛性が低下するすべり面の方向を斜線で示している。図から、 $2\alpha_{JII}=0^\circ$  の時には、動員されるせん断応力の向きが等しい正と正、負と負の領域が完全に一致し、一方、 $2\alpha_{JII}=150^\circ$  および  $180^\circ$  では、広い主応力軸方向の範囲で正と負の領域の交わりが見られる。したがって、すべり面上で生じるせん断変形を *Bauschinger* 効果を考慮して解析的に評価することによって、主応力軸方向が  $2\alpha_{JII}=0^\circ$  の場合には他の方向の場合に比べて生じる変形が最も小さくこの方向に砂は硬化しているが、 $2\alpha_{JII}=150^\circ$  や  $180^\circ$  の方向では逆に砂は軟化していると説明できる。さらに、 $2\alpha_{JII}=150^\circ$  の場合(図15(b))では  $2\alpha_{JII}=180^\circ$  の場合(図15(c))に比べて高い応力レベルのところで、前載荷時と再載荷時のせん断応力の向きの逆転がみられることから、この方向の近くで砂の軟化が最も著しくなるのではないかと推定できる。

次に、誘導異方性の程度について調べてみる。図13(a)~(c)に示すように、誘導異方性の程度、

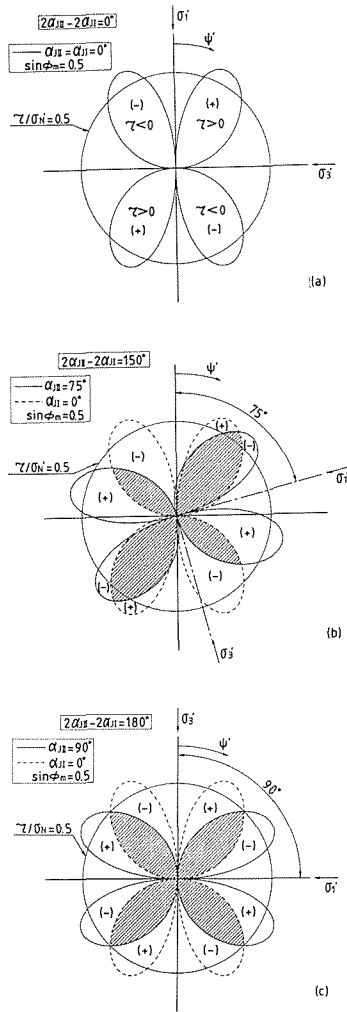


Fig. 15 Change in shear-normal stress ratio on potential sliding planes during Jtests; (a) for  $J0^\circ/0^\circ$  test, (b) for  $J0^\circ/150^\circ$  test, (c) for  $J0^\circ/180^\circ$  test.

すなわちひずみ硬化とひずみ軟化の程度は、せん断応力履歴を受けた方向に依存していて、今回の実験条件の下では  $2\alpha_{J1} = 180^\circ$  の場合に誘導異方性の影響が最も大きく、 $2\alpha_{J1} = 0^\circ$  の場合に最も小さいということが体積変化挙動とせん断変形挙動に共通して言える。Wong and Arthur<sup>9)</sup>およびSture ら<sup>10)</sup>は、砂供試体の力学特性が等方的な面において前載荷時の応力比を変化させて、主応力軸が回転する応力条件で誘導異方性の影響を調べた結果、誘導異方性の程度は以前に受けた応力比に依存していることを示した。しかし、本研究では前載荷時に載荷する応力比はすべて  $\sin\phi_m = 0.5$  に等しい。そこで、前載荷時において発生した変形の量に注目してみると、図11(a)に示されているように、応力比  $\sin\phi_m = 0.5$  の載荷時に動員されるせん断ひずみ量は、 $2\alpha_F = 180^\circ$  の時  $\gamma_{m0.5} = 2.2\%$  で、 $2\alpha_F = 0^\circ, 90^\circ$  の場合に比べて2倍以上も大きい。したがって、たとえ前載荷時に

動員された応力比は等しくても、そのときに発生するせん断ひずみ量が大きければ誘導異方性の影響は大きくなることから、誘導異方性の程度は前載荷時に載荷した応力比よりもその時に動員されたひずみ量に直接的に関連していると考えられる。

#### 4.3 主なひずみ増分方向

生得異方性 図16(a)には、せん断応力履歴を与えていない Ftest で観察されたひずみ経路が、破

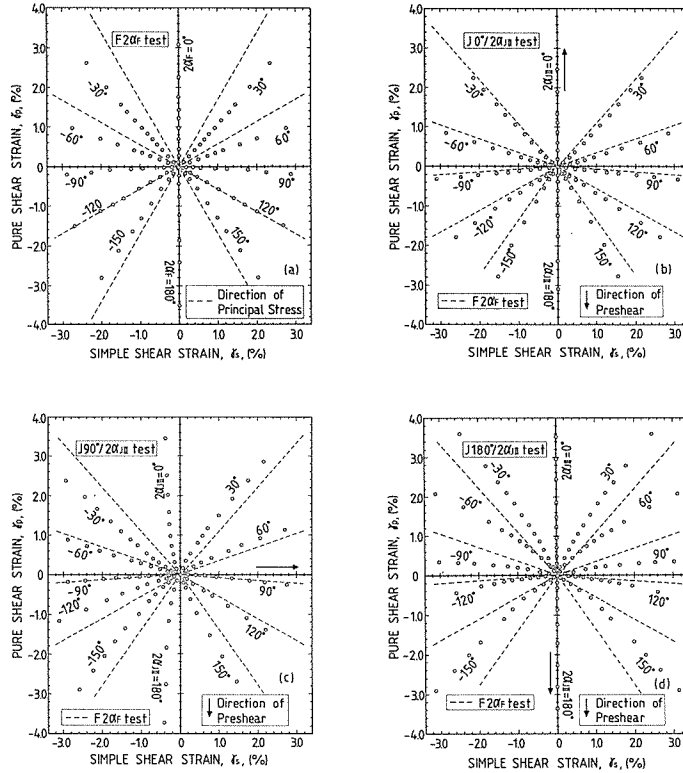


Fig. 16 Strain paths ; (a) for Ftest, (b) for  $J0^\circ/2\alpha_{JII}$  test, (c) for  $J90^\circ/2\alpha_{JII}$  test, (d) for  $J180^\circ/2\alpha_{JII}$  test.

線で示されている主応力軸方向と共に示してある。図示のように、主応力軸が回転せず固定している場合でも材料の力学特性が異方的であれば、一般に主応力軸と主ひずみ軸の方向は一致しないことが分かる。Miura ら<sup>4)</sup>は異方的な粒子配列構造に着目し、せん断応力に対する抵抗が最も小さい堆積面上で生じるすべり変形が支配的なために、せん断変形のうち単純せん断変形成分  $\gamma_s$  が卓越する傾向があり、全体的に主ひずみ軸およびひずみ経路は  $2\alpha = \pm 90^\circ$  へ偏向することを密詰め砂 ( $D_r = 80\%$ ) において示した。やや密詰め砂 ( $D_r = 60\%$ ) について行なった本研究についても、それと同じような傾向を示している。

誘導異方性 図5(a)~(d)には、前載荷、除荷および再載荷時のひずみ経路を示し、破線で示した応力履歴を受けていない場合のひずみ経路と比較している。これらの図に示すように、両者のひずみ経路には明瞭な差があることから、ひずみ量のみならず、ひずみ経路においても誘導異方性の顕著な影響があることが分かる。図16(b)~(d)には、以前に  $2\alpha_{J1} = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  方向でせん断

応力 ( $\sin\phi_m=0.5$ ) を受けた後の、再載荷時におけるひずみ経路を示している。図には、せん断応力履歴を受けていない場合のひずみ経路が破線で示されているが、ひずみ経路はせん断応力履歴を受けるとある傾向を持って、その向きを変えていることが分かる。それらの図を検討することによって、ひずみ経路、すなわち主ひずみ方向は、以前にせん断応力履歴を受けた方向から遠ざかるように向きを変えろという統一的な傾向を指摘することができる。また、図16(b)~(d)の比較から、このような主ひずみ軸の偏向は、 $2\alpha_{J1}=180^\circ$ の場合に最も明瞭に現れている。したがって、主ひずみ軸方向においても、前載荷時に受けた変形量が大きいほど誘導異方性の程度は大きいといえる。

## 5. あ と が き

中空同筒ねじりせん断試験装置を用いて、異方的な初期構造を有する砂について、主応力軸回転場で排水せん断試験を行った。以前にせん断応力履歴を受けた砂、および受けていない砂のせん断変形、ダイレイタンシーおよび強度特性を検討することによって、以下の点が明らかにされた。

- 1) せん断破壊強度は誘導異方性の影響を受けないが、生得異方性の影響を受けて強い異方性を示し、主応力軸方向が $2\alpha = \pm 150^\circ$ で最小値を示す。体積変化傾向が収縮から膨張へ変化する時の応力比は、破壊強度と同じように誘導異方性の影響を受けず、生得異方性の影響を受ける。しかし、主応力軸方向への依存性は破壊強度ほど著しくない。
- 2) せん断変形挙動および体積変化挙動には共に顕著な生得異方構造の影響が認められ、主応力軸方向が $2\alpha = \pm 150^\circ$ の時にせん断剛性が最小になる。
- 3) せん断応力履歴を受けることによって、せん断変形挙動および体積変化挙動にはひずみ硬化あるいはひずみ軟化現象が認められる。このような誘導異方性の影響は応力履歴を受けた主応力軸方向と再載荷時の主応力軸方向との相対的な関係によって決まり、主応力軸回転角が $(2\alpha_{J11} - 2\alpha_{J1}) = \pm 150^\circ$ の方向で、せん断剛性の低下が最も著しい。また、誘導異方性の程度はせん断応力履歴を受けたときに動員された応力比よりも、ひずみ量に強く依存している。
- 4) 初期異方構造に起因する生得異方性によって、主応力軸と主ひずみ軸の共軸性は満たされていない。主ひずみ軸の方向は $2\alpha = \pm 90^\circ$ 方向へ偏っていて、せん断変形において単純せん断成分が卓越している。
- 5) せん断応力履歴を受けることにより、再載荷時のひずみ経路の方向は前載荷時における主応力軸方向から遠ざかるように変化する。

また、砂要素内に無数の潜在的なすべり面が存在していると考える「多方向すべりモデル」の概念に従って解析を行なった結果、砂の変形挙動の生得および誘導異方性の発現機構は次のように説明できる。

- 1) 堆積過程に形成される初期異方構造を有する砂では、砂粒子の長軸が水平方向に卓越して配列しているため、堆積面では粒子同士の噛み合わせが乏しくせん断応力に対する抵抗が最小となっていると考えて良い。このような考えに基づく実験結果が示す砂の変形強度の生得異方性を適切に説明できる。すなわち、動員されている応力比が等しくても、堆積面上で発生するせん断・垂直応力比が大きい主応力軸方向の場合には変形が大きく、強度も低下する。

- 2) 各潜在的すべり面上で生じるすべり変形を応力の繰返し・反転による *Bauschinger* 効果を取り入れるために、せん断・垂直応力比とせん断ひずみの双曲線間関係に *Masing* の規約を取り入れてすべり面上のすべり変形を規定する。このようにすると、せん断応力履歴を受ける砂の硬化および軟化特性を、前載荷時の主応力軸方向との関連において適切に評価でき、砂の変形挙動の誘導異方性を良く説明できる。

最後に、実験およびデータの整理等に多大なる協力を得た金内隆宜君(青木建設)、柴原正之君(前田建設)、および、山岸保君(北海道大学工学部4年)に、記して感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) Casagrande, A. and Carillo, N.: Proc., Boston Society of Civil Engineers, Vol. 31 (1944), pp. 74-85.
- 2) Oda, M.: Soils and Foundations, Vol. 12 (1972), No. 1, pp. 17-36.
- 3) Arthur, J. R. F. and Menzies, B.: Geotechnique, Vol. 22 (1972), No. 1, pp. 115-128.
- 4) Miura, K., Miura, S. and Toki, S.: Soils and Foundations, Vol. 26 (1986), No. 1, pp. 36-52.
- 5) Toki, S. Miura, S. and Miura, K.: Proc. of 8th Asian Resional Conf. on SMFE (1987), Kyoto, Vol. 1, pp. 113-116.
- 6) Arthur, J. R. F. Chua, K. S. and Dunstan, T.: Geotechnique, Vol. 27 (1977), No. 1, pp. 13-30.
- 7) Arthur, J. R. F. Chua, K. S., Dunstan, T. and Rodriguez, del C. J. I.: Journal of GT Div., Proc., ASCE, Vol. 106 (1980), No. GT4, pp. 419-433.
- 8) Arthur, J. R. F., Beckenstein, S., Germaine, J. T. and Ladd, C. C.: Laboratory Shear Stear Strength of Soils, ASTM, STP740 (1981), pp. 7-77.
- 9) Wong, R. K. S. and Arthur, J. R. F.: Geotechnique, Vol. 35 (1985), No. 4, pp. 471-481.
- 10) Sture, S., Budiman, J. S., Ontuna, A. K. and Ko, H. Y.: Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 10 (1987), No. 2, pp. 71-79.
- 11) 小田匡寛, 小石川功: 土木学会論文報告集, 第173号 (1978), pp. 11-120.
- 12) Miura, S. and Toki, S.: Soils and Foundations, Vol. 24 (1984), No. 3, pp. 69-84.
- 13) Miura, K., Toki, S. and Miura, S.: Soils and Foundations, Vol. 26 (1986), No. 3, pp. 42-56.
- 14) Miura, K. and Finn, W. D. L.: Proc., Int. Work Shop on Constitutive Equations for Non-Cohesive Soils (1988), (to be published).
- 15) 三浦均也, 土岐祥介, Finn, W. D. L.: 北海道大学工学部研究報告, 第140号 (1988), pp. 1-13.
- 16) Miura, K., Miura, S. and Toki, S.: Soils and Foundations, Vol. 26 (1986), No. 4, pp. 162-165.
- 17) Miura, S. and Toki, S.: Soils and Foundations, Vol. 22 (1982), No. 1, pp. 61-77.
- 18) Miura, S. and Toki, S.: Soils and Foundations, Vol. 24 (1984), No. 2, pp. 43-57.
- 19) Arthur, J. R. F., Dunstan, T., Al-Ani, Q. A. J. L. and Assadi, A.: Geotechnique, Vol. 27 (1977), No. 1, pp. 53-74.
- 20) Masing, G.: Proc., 2nd International Congress of Applied Mechanics (1926), Zurich.