

初期構造異方性を有する砂の排水時繰返せん断挙動特性

鈴木輝一¹・菅野高弘²・柳澤栄司³

¹正会員 工修 鹿島建設(株)情報システム部主査(〒107 港区元赤坂1-2-7)

²正会員 工博 運輸省港湾技術研究所主任研究官

³正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

初期構造異方性を有する豊浦標準砂について、大型中空ねじり試験機を用い平均応力一定かつ b 値が 0.5 のもと、主応力軸が不連続に 90° 変化する繰返し試験ならびに主応力軸回転試験を行い、単調載荷の範囲のみならず除荷を含む範囲での排水時せん断挙動の現象解明を試みた。この結果、単調載荷時のせん断挙動特性を基本特性とし、偏差応力面上における塑性係数の場の概念および繰返し載荷による硬化を表す正規化塑性仕事量の関数を用いることによって、初期構造異方性を有する砂の排水時繰返せん断挙動が統一的に表せることを示した。

Key Words: inherent anisotropy, cyclic plasticity, drained shear, sand

1. まえがき

一般に、砂地盤は初期構造異方性を有し載荷方向によって異なる挙動を示すとされており、初期構造異方性を有する砂の変形・強度特性の把握および構成モデルの構築が、実務レベルにおいても望まれるようになってきている¹⁾。前報²⁾では初期構造異方性(横等方性)を有する豊浦標準砂について、主応力軸が堆積面の法線方向となす角度を初期構造異方性の指標とし、かつ中間主応力の相対的大ささ(b 値)の影響を考慮した提案手法によって、除荷を含まない範囲での排水時せん断挙動を統一的に評価できることを示した。しかしながら、地震や波浪による地盤と構造物の相互作用問題を対象とする場合には、成層地盤において卓越する繰返し単純せん断挙動のみならず、種々の複雑な応力条件下での排水時繰返せん断挙動についても、統一的に評価する必要がある。

従来、載荷方向が限られた試験において応力振幅一定の繰返し載荷を与えると、繰返し回数の増加とともに履歴曲線のループが狭くなり、発生するせん断変形と体積ひずみが小さくなることが、実験的に調べられている^{3)~6)}。同様に、せん断荷重一定のもと、主応力軸方向を回転させる主応力軸回転試験の繰返し載荷においても硬化することが示されている^{7)~9)}。更に、松岡他¹⁰⁾は任意応力を独立に制御できる 2 次元任意応力試験機(アルミ丸棒積層体)を用いて、1 回のせん断載荷・除荷毎に主応力方向を 45° ずつ変化させる十字経路繰返し載荷によって、2 巡目の載荷以降、急に硬化することを示すな

ど、種々の応力経路での繰返し載荷の研究^{11), 12)}が行われつつある。

このような繰返し載荷による硬化特性を表すために、Ghaboussi and Momen¹³⁾ や Gutierrez et al.⁹⁾ は、それぞれ、累積相当塑性ひずみ量、正規化塑性仕事量の関数である塑性係数の場の概念¹⁴⁾を用いている。Towhata and Ishihara¹⁵⁾ は多重ばねモデルを提案し、ひずみエネルギー量の関数によって塑性係数が異なるとしている。また、Nishi and Kanatani⁵⁾ は、繰返しに伴ってダイレイタンシー特性が変化することに着目し、その時点の応力比を用いた繰返し載荷によって生じる最終体積ひずみ量(平均応力と材料定数から求まる)とその時点の体積ひずみ量との関数を用いて、ダイレイタンシー関係を提案している。

しかしながら、主応力軸が堆積面となす角度すなわち初期構造異方性の影響を定量的に考慮し、かつ単調載荷時と繰返し載荷時のせん断挙動特性の関連性ならびに繰返し載荷による硬化について統一的に評価した研究は、まだ確立されていないのが現状である。

本研究の目的は、初期構造異方性を有する砂について、繰返し載荷時すなわち単調載荷の範囲のみならず除荷を含む範囲において、排水時せん断挙動を定量的かつ統一的に評価することにある。

ここでは、大型中空ねじり試験機を用いて平均応力一定かつ b 値が 0.5 のもと、主応力軸が不連続に 90° 変化する繰返せん断試験ならびに 1 回転の主応力軸回転せん断試験を行い、実験結果から塑性成分を求めて、初期

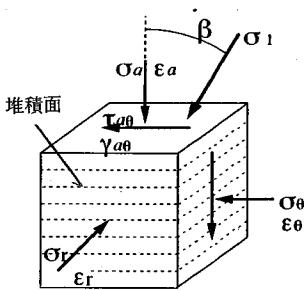


図-1 最大主応力方向と堆積面の関係

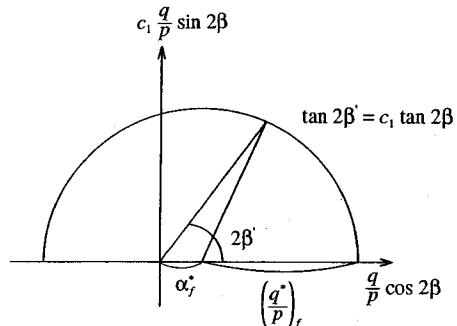


図-2 破壊曲面

構造異方性を有する砂の繰返しせん断挙動特性を塑性成分によって評価する。次に、単調載荷時のせん断挙動特性を基本特性として、偏差応力面上における塑性係数の場の概念および繰返し載荷による硬化を表す正規化塑性仕事量の関数を用いることによって、排水時繰返しせん断挙動を表すことの妥当性を検討する。

2. 中空ねじり試験

前報²⁾と同様に外径 25 cm、内径 20 cm、高さ 25 cm の大型中空ねじり試験機（空気圧式）を用い、平均応力 98 kPa一定 b 値 0.5 一定の条件下で、主応力軸が不連続に 90° 変化する繰返し試験（1 回繰返し試験、7 回繰返し試験）と、応力比 q/p 一定のもとで主応力軸が連続的に変化する主応力軸回転試験を行った。ここに、

$$\begin{aligned} p &= \sigma_{ii}/3 \\ q &= \{(3/2)S_{ij}S_{ij}\}^{1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

p は平均応力、 q は相当応力、 S_{ij} は偏差応力を表す。

試料としては豊浦標準砂（比重 $G_s=2.65$ 、最大・最小間隙比 $e_{max}=0.969$ 、 $e_{min}=0.614$ ）を用い、多重ふるい落下法によって強い初期構造異方性（鉛直軸を対称軸とする横等方性）を持つ供試体を作成し、圧密終了時 ($\sigma_c=98$ kPa) で相対密度 $D_r=73\pm 2.5\%$ とした。

1 回繰返し試験については、図-1 に示すように、最大主応力方向と鉛直方向（堆積面の法線方向）のなす角度 β を 0° から 90° まで 15° 間隔で固定した 7 種類について行う。各角度 β において、応力比 $q/p=0.69$ まで載荷後、逆方向に $q/p=0.69$ になるまで載荷し（途中で、主応力軸が不連続に 90° 変化）、その後、最初の方向（再度、主応力軸が 90° 変化）に載荷して破壊に至らせる。

7 回繰返し試験については、 $\beta=0^\circ$ と 45° の 2 種類について、 $q/p=0.69$ まで載荷後、1 回繰返し試験と同様の手順で 7 回の繰返し載荷を行う。

主応力軸回転試験については、最初に $\beta=0^\circ$ 方向に圧

縮後、応力比 $q/p=0.81$ 一定のまま $\Delta\beta=5^\circ$ で $\beta=180^\circ$ まで主応力軸を回転させる。

3. 実験結果および考察

(1) 破壊強度

既に、Arthur et al.¹⁶⁾ によって、破壊強度に対する主たる影響要因は初期構造異方性であり、誘導異方性は破壊強度にあまり影響を与えないことが示されている。よって、ここでは 1 回繰返し試験結果を用いて破壊強度を求める。破壊曲面は、図-2 に示すように応力比 q/p を用いた偏差応力面上で曲面の中心が $\beta=0^\circ$ 方向にずれた形で表される²⁾。破壊曲面の関数は次式で表される。

$$\{(q/p)_f \cos 2\beta - \alpha_f^*\}^2 + \{c_1(q/p)_f \sin 2\beta\}^2 = (q^*/p)_f^2 \quad (2)$$

$(q/p)_f$ は任意の β に対する破壊強度。 α_f^* 、 $(q^*/p)_f$ 、 c_1 は、それぞれ破壊曲面の中心位置、半径および橍円形状パラメータで、ここでは、実験結果から $\alpha_f^*=0.25$ 、 $(q^*/p)_f=1.11$ 、 $c_1=1.0$ である。

(2) ダイレイタンシー

1 回繰返し試験において、各載荷ステップの単位相当応力 $dq=1$ kPa に対する正規化仕事増分量 dW/p と相当ひずみ増分量 de^2 の関係を図-3 に示す。ただし、図-3 は全載荷ステップのうち、単位相当応力に対する相当ひずみ増分量が比較的小さい範囲についてのみ示している。単位相当応力に対する正規化仕事量が小さくなるに従い、ある相当ひずみ量に収束していくことが分かる。単位相当応力に対する相当弾性ひずみ量は常に一定であることから、この収束値が相当弾性ひずみ量に相当する。次式の弾性関係を用いて、弾性ボアソン比 ν を 0.2¹⁷⁾ としヤング係数 E を求めた。

$$dq=3E/(2(1+\nu))de \quad (3)$$

ヤング係数は、図-3 (a) の軸差応力が卓越する $\beta=0^\circ$ 、 90° で 160 MPa、図-3 (c) の単純せん断応力

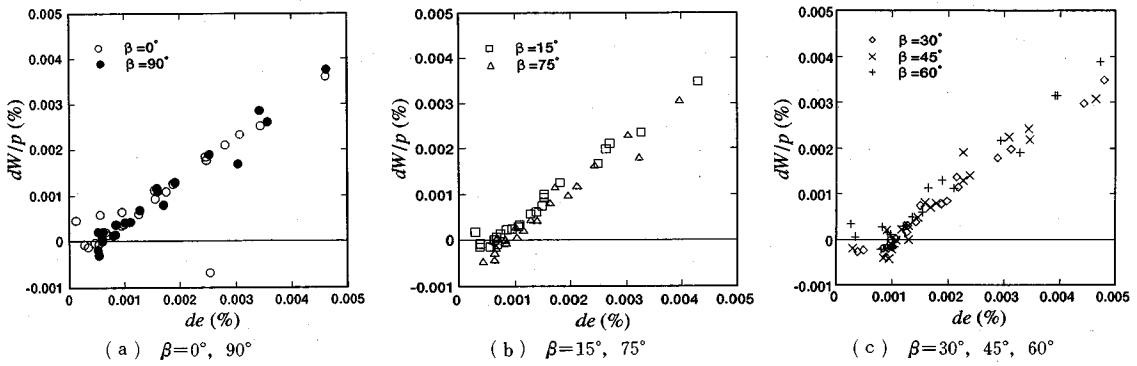


図-3 単位相当応力に対する正規化仕事増分と相当ひずみ増分の関係

が卓越する $\beta=45^\circ$ で 80 MPa となり、その間は橿円関数で補間できる。微小ひずみ領域では等方弾性である¹⁸⁾とされているが、ここでは、測定誤差などを含むことによって見掛け上異方性をもつ弾性定数と考えて弾性ひずみ増分を求め、実験で得られるひずみ増分との差から塑性ひずみ増分を求める。

$\beta=0^\circ$ の 1 回繰返し試験における正規化仕事と累積相当ひずみとの関係を、弾性成分を含む場合と塑性成分のみの場合について図-4 (a), (b) に示す。塑性成分によってのみダイレイタンシー関係が一義的に求まることが分かる。

図-5 に正規化塑性仕事と累積相当塑性ひずみとの関係を示す。(a) 1回繰返し試験と(b) 7回繰返し試験では、累積相当塑性ひずみが約 1% 程度からその勾配、変相応力比がやや小さくなる傾向がみられる。Pradhan et al.⁴⁾ は同様な実験結果から、厳密にみれば繰返し回数とともに変相応力比が小さくなるものの、全体的にはほぼ線形関係が成立つとしている。初期構造異方性の指標である β の値が連続的に変化する(c) 主応力軸回転試験においても、(a), (b) と同様にその勾配 μ は 0.7 一定(図-5 の実線)とみなせることから、ここでは次式によってダイレイタンシー関係を表す。

$$dW^p/p = S_{ij}de_{ij}^p/p + d\varepsilon_v^p = \mu de^p$$

$$\therefore d\varepsilon_v^p = \mu de^p - S_{ij}de_{ij}^p/p \quad (4)$$

ここで、 $d\varepsilon_v^p$ 、 de^p 、 de_{ij}^p は、それぞれ塑性体積ひずみ増分、相当塑性ひずみ増分、塑性偏差ひずみ増分であり、相当塑性ひずみ増分は次式で表される。

$$de^p = \{(2/3)de_{ij}^p de_{ij}^p\}^{1/2} \quad (5)$$

(3) 硬化則

前報²⁾で提案した負荷曲面の一般形を次式に示す。

$$\{(q/p)\cos 2\beta - \bar{\alpha}_x^*\}^2 + \{c_1(q/p)\sin 2\beta - \bar{\alpha}_y^*\}^2 = (q^*/p)^2 \quad (6)$$

$\bar{\alpha}_x^*$ 、 $\bar{\alpha}_y^*$ 、 q^*/p は、各負荷曲面の横軸、縦軸それぞれの

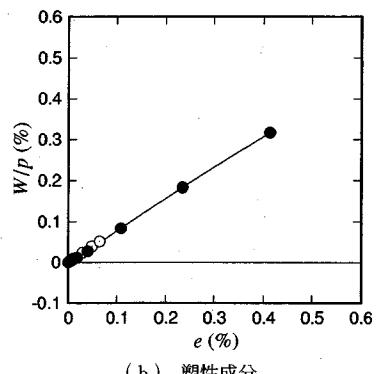
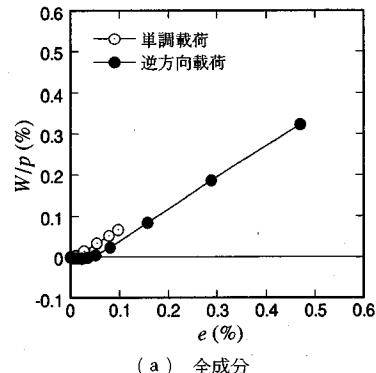


図-4 正規化仕事と累積相当ひずみの関係

中心位置および半径を示し、 $\bar{\alpha}_x^*$ 、 $\bar{\alpha}_y^*$ は移動硬化パラメータである。また q^*/p は初期構造異方性を考慮した応力量であることから修正応力比とする²⁾。

図-6 (a), (b) に、1回繰返し試験の最初の載荷方向と次の逆方向載荷における q^*/p と修正相当塑性ひずみ増分 de^{p*} の累積量 e^{p*} (ただし、除荷開始時に零に再設定する) の関係を示す。ここで、

$$de^{p*} = de^p (dq^*/p) / (dq/p) \quad (7)$$

dq/p は応力経路の増分量を示す。

一般に、実験で得られる応力・ひずみ関係に双曲線の

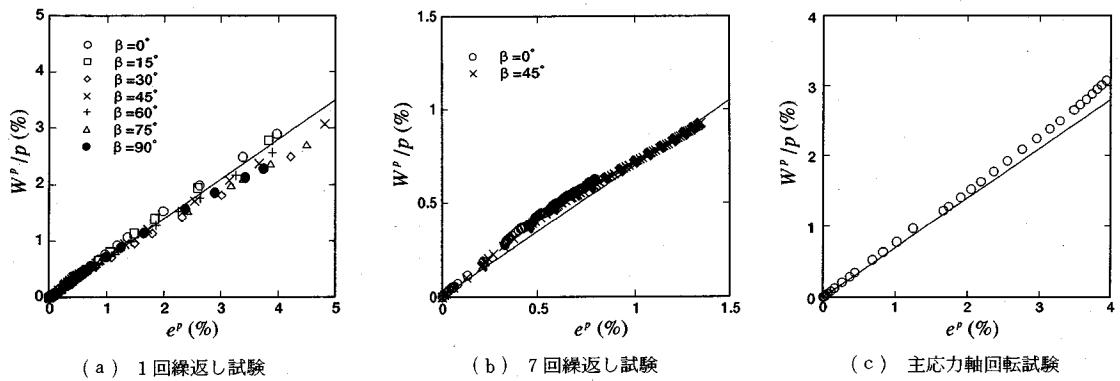


図-5 正規化塑性仕事と累積相当塑性ひずみの関係

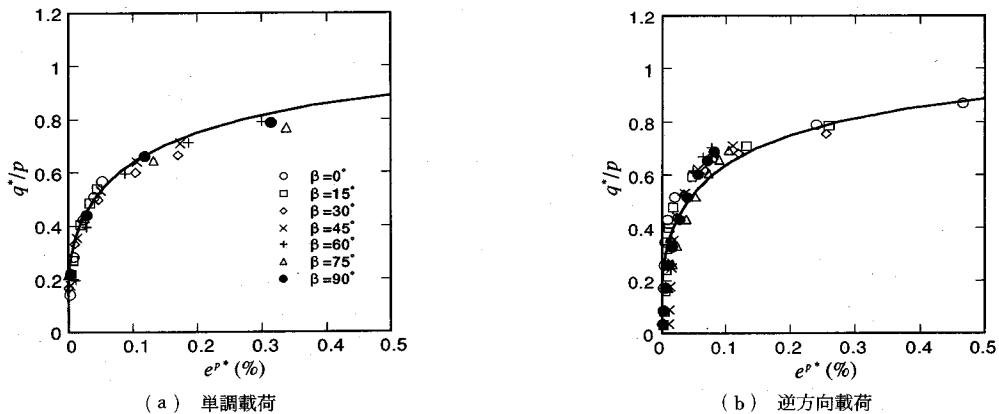


図-6 修正応力比と累積修正相当塑性ひずみの関係

近似式を用いた場合、繰返し載荷時には適しても、単調載荷時には適さないことが多い¹⁹⁾。ここでは累積修正相当塑性ひずみに対する近似式として次式を提案する。

$$e^{p*} = \frac{a^* b^* ((q^*/p) - (q^*/p)_0)^2}{1 - b^* ((q^*/p) - (q^*/p)_0)} \quad (8)$$

ここで、 $(q^*/p)_0$ は弾性領域の修正応力比、 b^* は次式で得られ、 a^* は実験の曲線に合うように定める材料定数である。 $(q^*/p)_0=0.15$ 、 $a^*=0.2$ として、式(8)の応力・ひずみ関係の提案式を図-6に実線で示す。

$$b^* = 1 / ((q^*/p)_f - (q^*/p)_0) \quad (9)$$

図-6(a)に示すように、修正応力比 q^*/p を用いることによって初期構造異方性に関わらず一義的な応力・ひずみ関係が得られ、提案式(8)によってその応力・ひずみ関係を良く近似することができる。

塑性係数は式(8)を q^*/p で微分して、その逆数によって得られる。

$$h^p =$$

$$\frac{[1 - b^* ((q^*/p) - (q^*/p)_0)]^2}{a^* b^* ((q^*/p) - (q^*/p)_0) [2 - b^* ((q^*/p) - (q^*/p)_0)]} \quad (10)$$

式(10)は塑性開始時に $h^p = \infty$ 、破壊時に $h^p = 0$ の条件を満たす。

図-6(b)に示すように1回目の逆方向載荷において、実験結果は既に式(8)の曲線からずれており硬化が生じていることが分かる。

図-7(a), (b)に、 $\beta=0^\circ$ と $\beta=45^\circ$ の7回繰返し試験の逆方向載荷（それぞれ $\beta=90^\circ$ と $\beta=135^\circ$ ）における1, 2, 3および7回目の $q^*/p - e^{p*}$ 関係を示す。この場合、比較的早い繰返し回数で硬化が進み、収束値に向かう傾向を示している。ここで、図-7の太い実線は図-6と同様に式(8)の応力・ひずみ関係を示す。

繰返し載荷による硬化のモデル化として、負荷曲面の大きさを変化させて移動硬化する、いわゆる複合硬化則を用いる方法²⁰⁾と、Gutierrez et al.³⁾の負荷曲面の塑性係数を変化させる方法があるが、ここでは後者の考え方を用いて実験結果を整理する。負荷曲面の移動の概念を図-8に示す。

図-9には、1回および7回の各繰返し試験について、単調載荷時におけるそれぞれの最大の修正応力比に対する繰返し載荷による硬化と正規化塑性仕事量との関係を

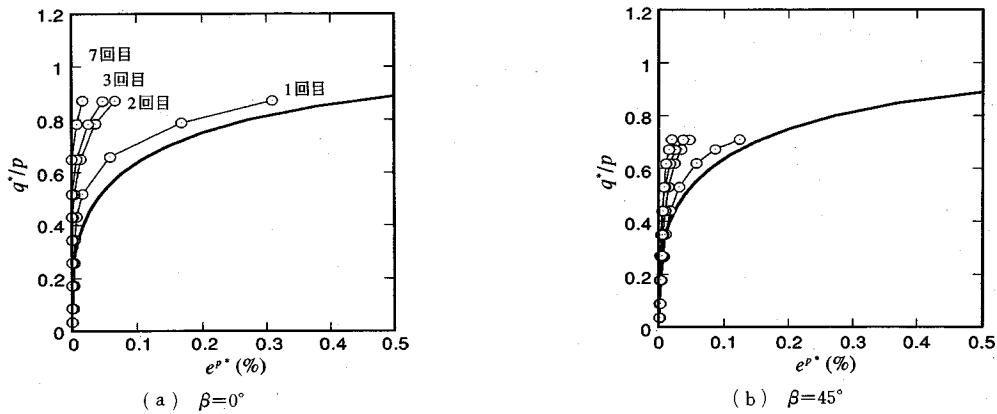


図-7 7回繰返し試験における修正応力比と累積修正相当塑性ひずみの関係

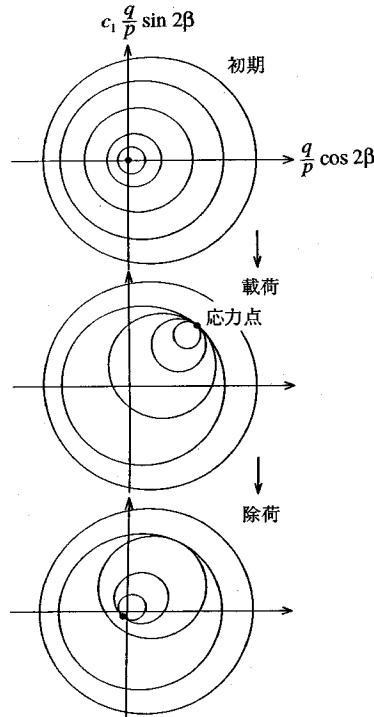


図-8 負荷曲面の移動の概念

示す。縦軸は式(8)で表される単調載荷時の値 e^{p*} に対する繰返し載荷時の e_{cyc}^{p*} の比で、式(10)で表される単調載荷時の塑性係数 h^p に対する繰返し時の h_{cyc}^p の比(繰返し載荷による硬化程度を表す)の逆数となる。図-9では、応力・ひずみ関係の勾配すなわち塑性係数ではなく、ばらつきの少ないひずみを用いて繰返し載荷による硬化を示した。初期構造異方性に関わらず、図-9の実線で示される次式の正規化塑性仕事量の関数として、概ね表すことができる。

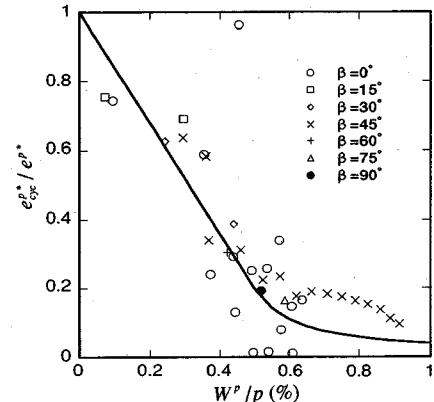


図-9 繰返し載荷による硬化と正規化塑性仕事の関係

$$\frac{h_{cyc}^p}{h_p} = \frac{1}{1 - 1.6 \frac{W^p}{p}} \quad \left(\frac{W^p}{p} \leq 0.5 \right)$$

$$\frac{h_{cyc}^p}{h_p} = 5 + 40 \left(\frac{W^p}{p} - 0.5 \right) \quad \left(\frac{W^p}{p} \geq 0.5 \right) \quad (11)$$

(4) 主塑性偏差ひずみ増分比

前報²⁾では、主応力軸固定単調試験および主応力軸回転試験に関わらず、各 b 値で主偏差ひずみ増分比が一定であることを示した。等方弾性の範囲では、主偏差ひずみ増分比は主偏差応力増分比と一致することから考えると、主偏差ひずみ増分比は塑性ひずみ成分で表すのが妥当である。

図-10に1回繰返し試験における相当塑性ひずみ増分と最大主塑性偏差ひずみ増分、最小主塑性偏差ひずみ増分の関係を示す。実線は主偏差応力増分比の方向から $\tan^{-1}\{1/(2\sqrt{3})\}$ だけ一様にずれた方向に相当し、前報²⁾と同様、主応力増分と主塑性ひずみ増分を重ね合せた空間において、主塑性偏差ひずみ増分比の方向が主偏差応

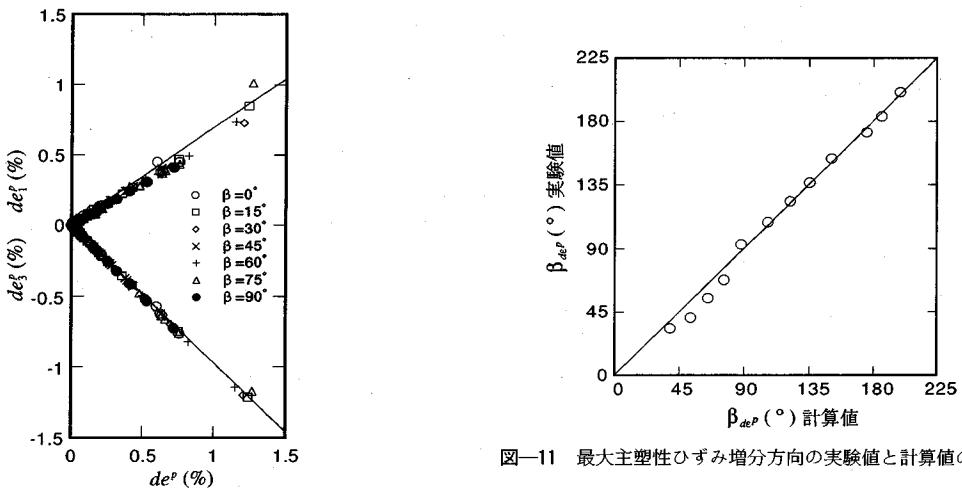


図-11 最大主塑性ひずみ増分方向の実験値と計算値の比較

図-10 主塑性偏差ひずみ増分と相当塑性ひずみ増分の関係

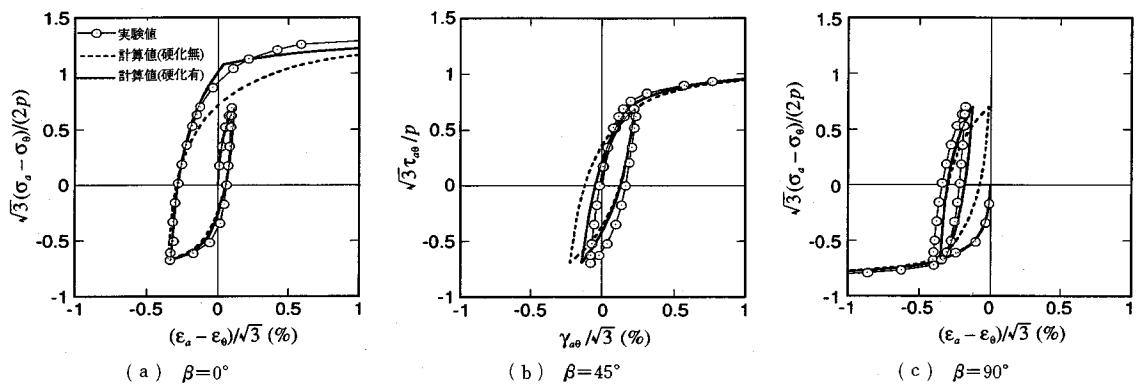


図-12 1回線返し試験におけるせん断ひずみの実験値と計算値の比較

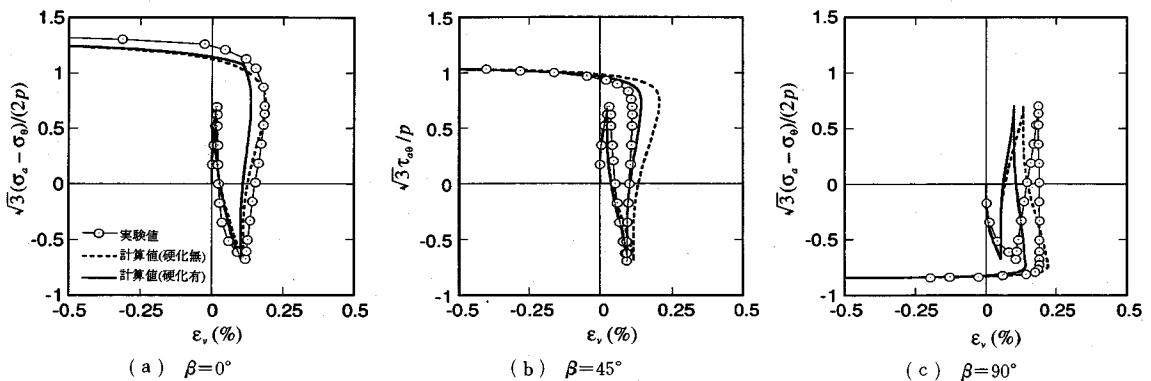


図-13 1回線返し試験における体積ひずみの実験値と計算値の比較

力増分比の方向から $\tan^{-1}|1/(2\sqrt{3})|$ だけ一様にずれた方向で表されることを意味する。

(5) 最大主塑性ひずみ増分方向

ひずみ増分方向が弾性時には応力増分方向に一致し、破壊時に破壊曲面の法線方向になることから考察して、前報²⁾では最大主ひずみ増分方向を次式で表すことを提

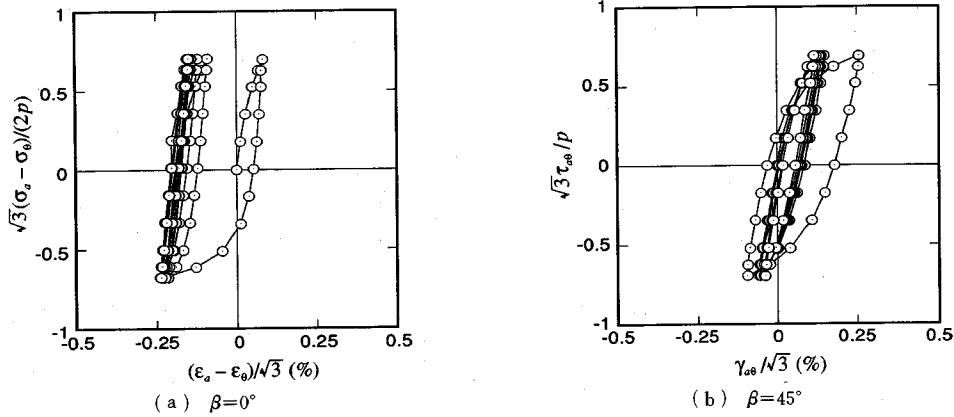


図-14 7回繰返し試験におけるせん断ひずみの実験値

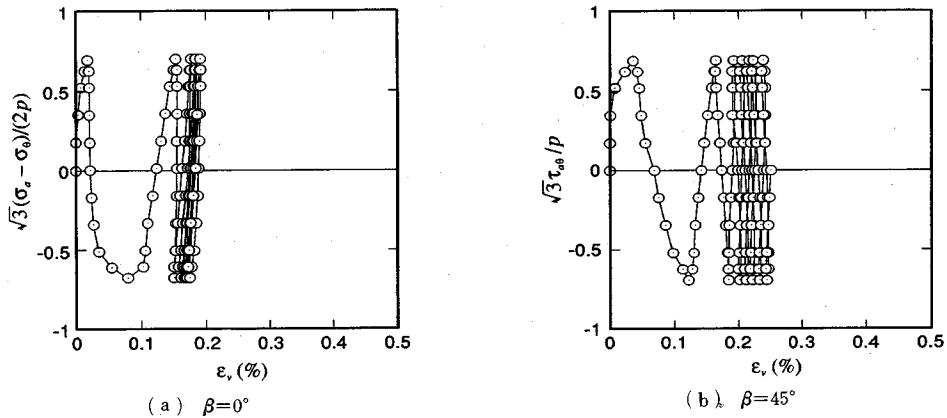


図-15 7回繰返し試験における体積ひずみの実験値

案した。

$$\beta_{de} = (\beta_f - \beta_{do}) (q^*/p) / (q^*/p)_f + \beta_{do} \quad (12)$$

ここで β_{de} および β_f は、それぞれ任意の修正応力比 q^*/p と破壊時において最大主ひずみ増分の方向が鉛直方向から時計回りになす角度であり、 β_{do} は最大主応力増分方向を示す。破壊時におけるひずみ増分方向 β_f は、その時点の負荷曲面上の応力点に対応する破壊曲面上の応力点の法線方向によって表せるとした。すなわち、破壊曲面および負荷曲面が相似形であることから、 β_f はその時点の負荷曲面の法線方向と同じになる。式 (12) は任意の載荷経路に対して適用できる。

ここでは、塑性ひずみ成分について式 (12) の考え方を拡張し、更に弾性領域を考慮することによって最大主塑性ひずみ増分方向 β_{des} が次式で表せると仮定する。

$$\beta_{des} = (\beta_f - \beta_{do}) \frac{(q^*/p) - (q^*/p)_0}{(q^*/p)_f - (q^*/p)_0} + \beta_{do} \quad (13)$$

図-11 には、 β が 0° から 180° までの主応力軸回転試験 (応力比 $q/p=0.81$) において、式 (13) による計算

値と実験値が一致していることを示す。

4. 実験値と計算値の比較

3. の実験結果および考察において、繰返し載荷時の硬化が単調載荷時の硬化よりも大きくなることを除いては、初期構造異方性を有する砂の排水時繰返せん断挙動特性は、前報²⁾で述べた除荷を含まない範囲でのせん断挙動特性（破壊強度、ダイレイタンシー、硬化則、主塑性偏差ひずみ増分比、最大主塑性ひずみ増分方向）と同じであることを示した。

ここでは、単調載荷時の砂の排水時せん断挙動特性を基本特性とし、かつ、塑性係数の場の概念および繰返し載荷による硬化を表す正規化塑性仕事量の関数を用いて、排水時繰返し試験および主応力軸回転試験に対する計算を行った。

堆積面に対して軸差圧縮成分が卓越する $\beta=0^\circ$ 、単純せん断成分が卓越する $\beta=45^\circ$ 、軸差伸長成分が卓越す

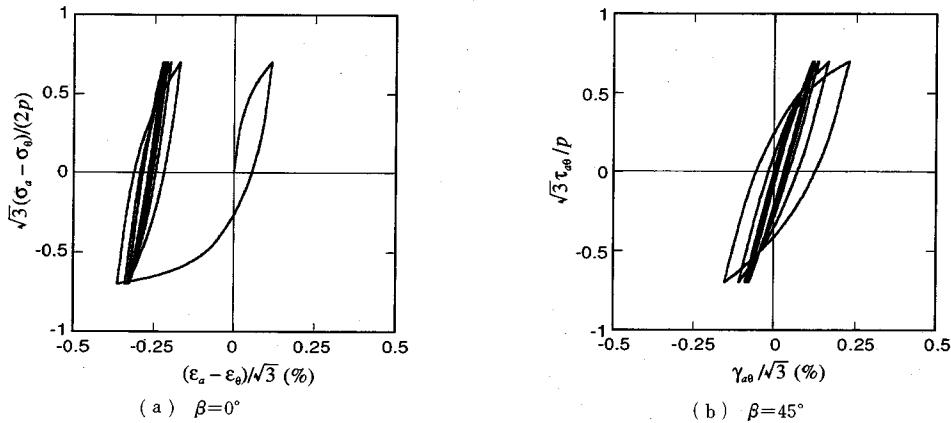


図-16 7回繰返し試験におけるせん断ひずみの計算値

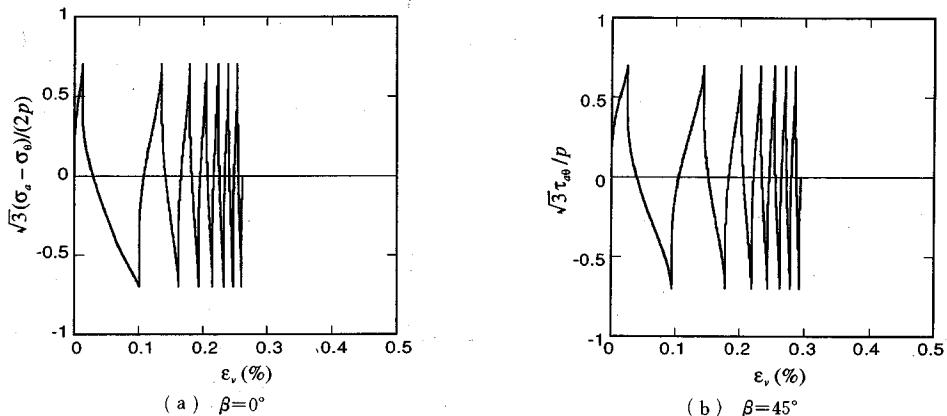


図-17 7回繰返し試験における体積ひずみの計算値

る $\beta=90^\circ$ の 1 回繰返し試験における応力比と塑性ひずみ関係について、実験値と計算値の比較を図-12に示す。異なる履歴曲線を示す実験結果に対して、移動硬化則のみを用いた計算結果（破線）でも実験結果の傾向を良く表しており、移動硬化則に繰返し載荷による硬化を考慮した計算結果（実線）では更に良い一致を示している。同様に、図-13に応力比と体積ひずみとの関係を示す。図-12と比較すると、定量的にやや見劣りがするものの実験結果を良く表している。なお、繰返し硬化は過去の履歴の中での最大負荷曲面の内部でのみ生じると仮定して計算している。

図-14～図-17には 7 回繰返し試験の結果を示す。移動硬化則のみ用いた計算では、1 回繰返し載荷以降、閉じたループとなるため、図-14、図-15の実験結果にみられる繰返し載荷による硬化を表現できない。よって、ここでは繰返し載荷による硬化を考慮して得られた計算結果のみを図-16、図-17 に示した。 $\beta=0^\circ$ の実験結果では体積ひずみの収束が急であるのに対して、計算結果では比較的ゆるやかな傾向になっていることを除い

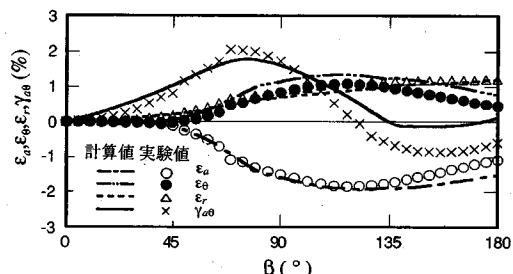


図-18 主応力軸回転試験における各ひずみ成分の実験値と計算値の比較

て、実験結果と計算結果は良い一致を示している。

図-18 には、 β が 0° から 180° までの 1 回転の主応力軸回転試験について、移動硬化則のみ用いた計算値と実験値との比較を示す。ただし、実験では必ずしも $q/p=0.81$ 一定となっておらず、 β が 0° から 90° まで減少、 β が 90° から 180° まで増加しているので計算でも同じ条件としている。また、主応力軸を回転させる前の $\beta=0^\circ$

方向への単調載荷時において、実験の応力・ひずみ曲線が1回および7回繰返し試験の応力・ひずみ曲線と異なっているため、ここでは、主応力軸回転試験（単調載荷時および主応力軸回転時）で得られる $q^*/p - e^{p*}$ 曲線に合うように、 $(q^*/p)_f = 1.2$ および $a^* = 0.10$ とパラメータを求め直して計算した。

図-12、図-13および図-18に示されるように、移動硬化則のみを用いた計算によっても、初期構造異方性を有する砂の繰返しによる硬化の程度が小さい範囲の挙動に対しては、概ね妥当な結果が得られた。繰返しによる硬化についてみると、主応力軸が不連続に 90° 変化する繰返し試験に対しては、本研究で提案した正規化塑性仕事量の関数は妥当であるが、主応力軸回転に対して同じ関数を用いると、 β が 90° 付近からほとんど弾性的挙動となってしまい実験結果との整合性に欠けてくる。繰返し載荷による硬化を表すための統一的な内部変数の発展則²¹⁾については今後の課題である。

5. 結論

初期構造異方性を有する豊浦標準砂について、大型中空ねじり試験機を用いて平均応力一定かつ b 値 0.5 のもと、主応力軸が不連続に 90° 変化する排水繰返し試験および1回転の主応力軸回転試験を行い、単調載荷の範囲のみならず除荷を含む範囲でのせん断挙動特性について検討を行った。その結果を要約すると次のようである。

(1) 各載荷ステップにおける実験値から、単位相当応力に対する正規化仕事増分量および相当ひずみ増分量の関係を求めるとき、正規化仕事増分量が小さくなるに従い、相当ひずみ増分量がある値に収束することが分かる。この収束値が相当弾性ひずみ増分量に相当することを用いて、弾性定数を算定し塑性ひずみ成分を求める手法を示した。

(2) (1) の方法を用いることによって、主応力軸が不連続に 90° 変化する繰返し試験や主応力軸回転試験においても、単調載荷試験と同様に正規化塑性仕事と累積相当塑性ひずみとの関係がほぼ線形として得られる。

(3) 塑性係数が塑性開始時に無限、破壊時に零となる簡単な提案式によって、実験結果の修正応力比 q^*/p と修正相当塑性ひずみ e^{p*} の関係を良く近似できる。

(4) 主応力軸が不連続に 90° 変化する排水繰返し試験における繰返し載荷による硬化は、正規化塑性仕事量の関数として表せる。

(5) 主塑性偏差ひずみ増分比は一定となり、主偏差応力増分比から $\tan^{-1} [1/(2\sqrt{3})]$ だけ一様にずれた関係になる。すなわち、主偏差応力増分比に対して主塑性偏差ひずみ増分比は一義的に得られる。

(6) 最大主塑性ひずみ増分方向は、応力増分方向およ

び負荷曲面上の応力点の法線方向との間で修正応力比の関数による線形関係で表される。

(7) 単調載荷時のせん断挙動特性を基本特性として、偏差応力面上の塑性係数の場の概念および繰返し載荷による硬化を表す正規化塑性仕事量の関数を用いることによって、初期構造異方性を有する砂の排水時繰返せん断挙動を表すことができる。

謝辞：本研究を行うにあたり、八戸工業大学・飛田善雄助教授および東北大学大学院に在籍されていた大花博重氏（現・新潟県庁）に多大なる御助力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 小田匡寛, 風間秀彦：2. 土と岩盤の構造異方性, 講座「地盤の異方性」, 土と基礎, Vol. 41, No. 4, pp. 73-80, 1993.
- 鈴木輝一, 菅野高弘, 柳澤栄司：初期構造異方性を有する砂の排水時せん断挙動特性, 土木学会論文集, No. 481/III-25, pp. 117-124, 1993.
- 東畠郁生, 芳賀鑑, 中村伸也：繰り返し排水せん断が砂の剛性に及ぼす影響, 第20回土質工学研究発表会, pp. 591-594, 1985.
- Pradhan, T.B.S., Tatsuoka, F. and Sato, Y. : Experimental stress-dilatancy relations of sand subjected to cyclic loading, *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 1, pp. 45-64, 1989.
- Nishi, K. and Kanatani, M. : Constitutive relations for sand under cyclic loading based on elasto-plasticity theory, *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 2, pp. 43-59, 1990.
- 中田幸男, 西川明宏, 大原誠, 安福規之, 村田秀一：排水繰返し載荷を受けた等方圧密砂の変形特性について, 第27回土質工学研究発表会, pp. 463-466, 1992.
- Miura, K., Miura, S. and Toki, S. : Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation, *Soils and Foundations*, Vol. 26, No. 1, pp. 36-52, 1986.
- 大花博重：異方性砂の排水せん断変形特性に及ぼす応力経路の影響, 東北大学修士学位論文, 1988.
- Gutierrez, M., Ishihara, K. and Towhata, I. : Model for the deformation of sand during rotation of principal stress directions, *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 3, pp. 105-117, 1993.
- 松岡元, 水谷雅裕, 竹内章博, 本田道識：粒状体の任意応力下の「十字」経路繰返せん断試験, 第27回土質工学研究発表会, pp. 483-486, 1992.
- 三浦均也, 林正幸, 土岐祥介：主応力軸回転場で繰返し荷重を受ける砂の変形挙動, 第25回土質工学研究発表会, pp. 457-460, 1990.
- 中井照夫, 船田智己：異方性砂の3主応力制御試験の解析, 第26回土質工学研究発表会, pp. 509-512, 1991.
- Ghaboussi, J. and Momen, H. : Modelling and analysis of cyclic behaviour of sands, *Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads*, edited by Pande, G. N. and Zienkiewicz, O. C., John Wiley & Sons, pp. 313-342, 1982.

- 14) Mroz, Z. : On the description of anisotropic workhardening, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.15, pp.163-175, 1967.
- 15) Towhata, I. and Ishihara, K. : Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, *Proc. 5th Int. Conf. Numer. Meth. Geomech.*, Nagoya, pp.523-530, 1985.
- 16) Arthur, J. R. F., Chua, K. S. and Dunstan, T. : Induced anisotropy in a sand, *Géotechnique*, Vol.27, No.1, pp.13-30, 1977.
- 17) 見郷浩二, Teachavorasinskun, Supot, 龍岡文夫, 安原一哉:砂の変形特性・液状化強度に与える繰返し載荷履歴の影響, 第27回土質工学研究発表会, pp.475-478, 1992.
- 18) 朴春植, 神明進, 龍岡文夫, 濵谷啓:平面ひずみ圧縮試験による Silver Leighton Buzzard sand の変形・強度特
性の異方性, 第25回土質工学研究発表会, pp.439-442, 1990.
- 19) 龍岡文夫, 濵谷啓, スポット ティチャフォラシンスケン, 金有性:土質工学40年のあゆみ—室内試験法, 土と基礎, Vol. 37, No. 12, pp. 33-37, 1989.
- 20) Suzuki, K. and Desai, C. S. : Finite element analysis using an elasto-plastic anisotropic hardening model, *Proc. 5th Int. Conf. Numer. Meth. Geomech.*, Nagoya, pp.317-324, 1985.
- 21) 飛田善雄, 吉田望:砂の様な粒状体の増分非線形モデル:重要性と定式化, 構造工学論文集, Vol.39 A, pp.387-398, 1993.

(1994.3.29 受付)

DRAINED CYCLIC SHEAR BEHAVIOR OF SAND WITH INHERENT ANISOTROPY

Kiichi SUZUKI, Takahiro SUGANO and Eiji YANAGISAWA

The purpose of this paper is to study the fundamental characteristics of inherent anisotropic Toyoura sand under drained cyclic shear conditions. Towards this end, cyclic loading tests and a loading test with rotation of principal stress axes were carried out using a large hollow cylindrical apparatus. Through the analysis of the experiment results, it is verified that the drained cyclic shear behavior of sand with inherent anisotropy could well be simulated, using the concept of a field of hardening moduli on the deviatoric stress plane and a function of normalized plastic work, based on the characteristics regarding drained shear behavior under monotonic loading.