



非排水せん断履歴を受けた砂の最大せん断応力の作用方向と降伏応力変化の関係

田中, 泰雄
中西, 徹
竹本, 正和
松本, 理恵

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 8:81-86

(Issue Date)

2004-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00422461>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00422461>



非排水せん断履歴を受けた砂の 最大せん断応力の作用方向と降伏応力変化の関係

The relationship between maximum shear stress direction and yield stress of the sand that
has been subjected to cyclic undrained shearing

田中 泰雄¹⁾
Yasuo Tanaka
中西 徹²⁾
Toru Nakanishi
竹本 正和³⁾
Masakazu Takemoto
松本 理恵⁴⁾
Rie Matumoto

概要：これまで地震動を受ける水平地盤を想定し，中空ねじり試験装置を用いて水平方向に非排水繰返しせん断を与えた砂の降伏応力変化について研究をしてきた．その結果，降伏応力はせん断履歴回数の違いによって τ （水平せん断応力）と p （平均主応力）の応力空間でその大きさと形状を変化する領域（降伏曲面）を示すことが分かった．本研究では，これまでと同様に水平方向に繰返しせん断応力履歴を与えた御崎公園砂について，水平面から $0^\circ \sim 45^\circ$ の角度で傾斜した方向に最大せん断応力を作用した場合にせん断強度特性，体積変化特性，そして降伏応力にどのような変化が生じるかについて，研究を行った．また，降伏応力の決定には AE（acoustic emission）計測を用いている．

キーワード：最大せん断応力，砂の堆積面，AE 計測

1. はじめに

砂が液状化する過程で，初期に水平方向に堆積面を持つ供試体においても，非排水せん断履歴によって初期構造は変化すると考えられるが，本研究ではその構造変化と降伏応力，さらには最大せん断応力の作用方向変化の関係について検討する．降伏応力の決定には AE（acoustic emission）計測を用いる．中空ねじり試験装置を用いて 3.5 回の非排水せん断履歴を与えた後，ある一定の等方応力状態に排水除荷し，その後，最大せん断応力が水平方向（堆積面）となす角度 θ を種々に変化させて排水せん断試験を行い，AE 計測により降伏応力の変化について検討した．

2. 試験概要

2. 1 実験試料

本研究では昨年度まで用いていた珪砂に変えて，比較的粒度分布が良好で粒子強度の大きい御崎公園砂を用いて実験を行った．粒度を調整するために 2mm より大きい粗粒分及び $74\mu\text{m}$ 以下の細粒分を除去した．

2. 2 試験方法

試験には中空ねじり試験装置を用いた．本試験装置では軸荷重はペロフラムシリンダーにより与え，トルク荷重はメガトルクモーターを用いて与えることが出来る．

まず供試体作製時に堆積面がほぼ水平となるように、試作した試料落下装置¹⁾を用いて、初期相対密度=48%, 初期乾燥密度=1.4g/cm³の条件で、外径100mm, 内径60mm, 高さ200mmの中空円筒供試体を作製した。供試体作製後、炭酸ガス流入, 脱気水通水, 背圧付加により試料を飽和させ、飽和しているかを確認した後、以下に示す過程に従って試験を進めた。

(1) 等方圧密過程

排水状態で、供試体の有効拘束圧を初期状態の20kPa(セル圧220kPa, 背圧200kPa)から側方向応力を30秒間に10kPaの割合で等方的に増加させ、最大圧密応力の400kPa(セル圧600kPa, 背圧200kPa)になるまで等方圧密を行い、このまま約60分間放置した。この放置時間は供試体の体積変化及びAEの発生が落ち着く時間を考慮したものである。

(2) 非排水繰返しせん断履歴過程

有効応力 $\sigma'_c = 400\text{kPa}$ で正規圧密状態の供試体を非排水状態とし、セル圧一定、繰返しせん断応力振幅 $\tau_a = \pm 92\text{kPa}$ (すなわちせん断応力比 $\tau_a/\sigma'_c = 0.23$)の条件で繰返しねじりせん断を与えた。試験は载荷が正弦波の3.5周期に達するまで行った。载荷は応力制御方式で行い、プログラム上で示される理想正弦波における応力の理想値と現在の応力を比較し、供試体に作用する応力が理想正弦波に近い波形を描くようにメガトルクモーターの入力パルス数を変化させて行った。図-2はその時の有効応力経路を示したものである。

(3) 等方除荷過程

繰返しせん断履歴载荷後、排水状態で最大圧密応力が200kPa(セル圧600kPa, 背圧400kPa)になるまで等方除荷を行い、約20分間放置した。尚、この放置時間は供試体の体積変化及びAEの発生が落ち着く時間を考慮したものである。

(4) せん断過程

$p' = 200\text{kPa}$ まで等方排水除荷を行った後、図-3に示すように θ を $+45^\circ \sim -45^\circ$ の間で変化させ正方向あるいは、負方向に θ を変化させた表-2に示すように $\theta = 0$ と固定して拘束圧を変化する実験(Aシリーズ)と $\theta \neq 0$ で同一拘束圧($p = 200$)での実験シリーズ(Bシリーズ)からなる合計14種類の排水せん断試験を行い、砂の変形特性を検討した。なおここでせん断方向は時計回りを正、半時計回りを負と定義した。またここでいう θ とは砂の堆積面と最大せん断応力作用方向のなす角度のことであり図-4のモールの応力円で表される。

表-2 実験シリーズ

実験シリーズ	p	試験番号	試験の種類	試験番号	試験の種類	θ
A	100	(4)	正方向ねじりせん断試験	(11)	負方向ねじりせん断試験	0°
	200	(4)	正方向ねじりせん断試験	(11)	負方向ねじりせん断試験	0°
B	200	(1)	三軸圧縮試験	(8)	三軸圧縮試験	$+45^\circ$
		(2)	正方向ねじり+圧縮せん断試験	(10)	負方向ねじり+圧縮せん断試験	$+30^\circ$
		(3)	正方向ねじり+圧縮せん断試験	(11)	負方向ねじり+圧縮せん断試験	$+15^\circ$
		(4)	正方向ねじりせん断試験	(12)	負方向ねじりせん断試験	0°
		(5)	正方向ねじり+引張せん断試験	(13)	負方向ねじり+引張せん断試験	-15°
		(6)	正方向ねじり+引張せん断試験	(14)	負方向ねじり+引張せん断試験	-30°
		(7)	三軸引張試験	(15)	三軸引張試験	-45°

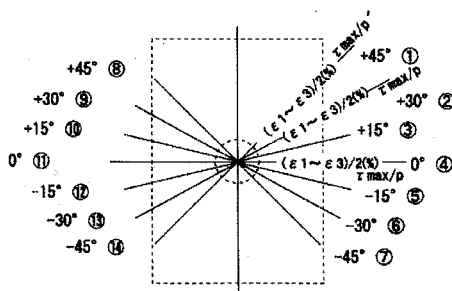


図-3 排水せん断試験の種類

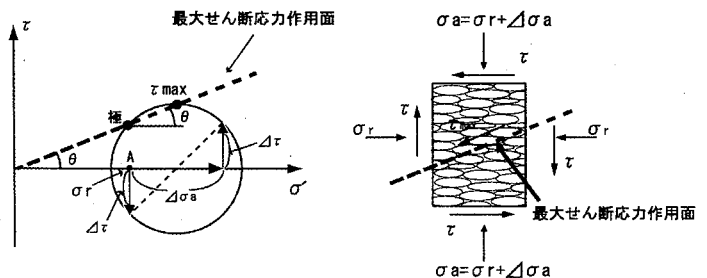


図-4 モールの応力円

3. 試験結果と考察

3. 1 AE の計測結果

本研究では AE を計測することで降伏点の決定を試みている。図-4 は本実験によって得られた最大せん断応力比 $\tau_{\max}/p'$ 、AE 係数率 $n_e \sim$ 最大せん断ひずみ $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) 関係を表したものである。最大せん断ひずみ $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) = 0.12 のあたりで n_e が急速に増加していることが確認できる。既存の研究より AE は弾性領域では発生しないことが明らかにされていることから、この n_e の急増点を本試験の降伏点とした。その急増点に対応する最大せん断応力比は $\tau_{\max}/p' = 0.2$ となった。

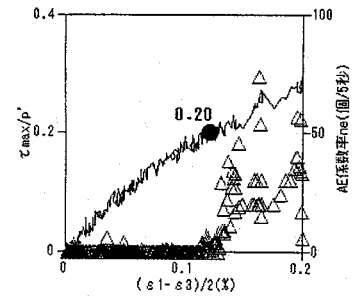


図-4 $\tau_{\max}/p'$ 、 $n_e \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) 関係

3. 2 単純せん断試験における変形・強度特性 (実験シリーズA)

① 初期有効拘束圧 200kPa における結果の比較

$p' = 200\text{kPa}$ の正方向ねじりせん断試験 (試験番号④) と負方向ねじりせん断試験 (試験番号⑪) について結果を比較する。図-5 (a) には、縦軸に最大せん断応力を平均有効拘束圧によって正規化した最大せん断応力比 $\tau_{\max}/p'$ をとり、横軸に最大せん断ひずみ $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) をとった $\tau_{\max}/p' \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) 関係を示す。また図-5 (b) には体積ひずみ $\varepsilon_v \sim$ 最大せん断ひずみ $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) 関係を示す。図-5(a)において、正方向回りの試験が負方向回りの試験を大きく上回っていることがわかる。また図-5(b)において、正方向の試験は体積が膨張しだすのに対して、負方向の試験では体積が圧縮しだすことがわかる。図中●で示す降伏応力については 0.36、0.10 と正方向が負方向を大きく上回っていることが分かる。

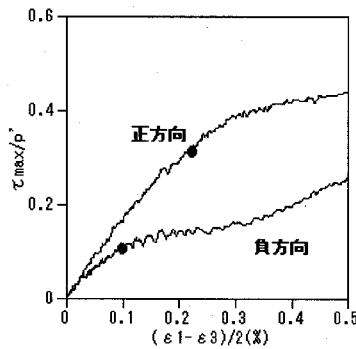


図-5 (a) $\tau_{\max}/p' \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) 関係

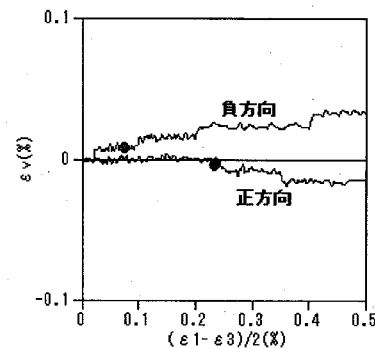


図-5 (b) $\varepsilon_v \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) 関係

② 初期有効拘束圧 100kPa における結果の比較

次に、 $p' = 100\text{kPa}$ の正方向ねじりせん断試験 (試験番号④) と負方向ねじりせん断試験 (試験番号⑪) について結果を比較する。図-6 (a) には、縦軸に最大せん断応力を平均有効拘束圧によって正規化した最大せん断応力比 $\tau_{\max}/p'$ をとり、横軸に最大せん断ひずみ $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) をとった $\tau_{\max}/p' \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) 関係を示す。また図-6 (b) には体積ひずみ $\varepsilon_v \sim$ 最大せん断ひずみ $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) 関係を示す。図-6 (a) において、正方向回りが負方向回りを若干上回っていることがわかる。また図-6 (b) において正方向の試験より負方向の試験の方が圧縮性が高いことがわかる。図中●で示す降伏応力については 0.24、0.18 とやや正方向が負方向を上回っていることがわかる。

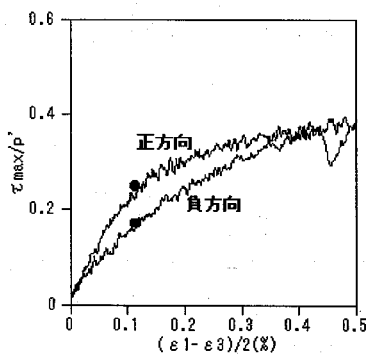


図-6 (a) $\tau_{\max}/p' \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) 関係

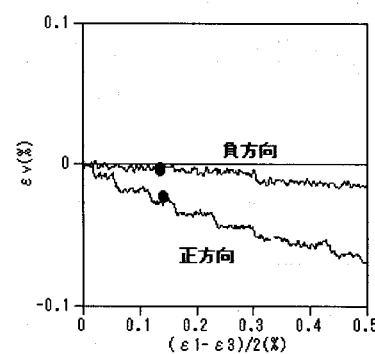


図-6 (b) $\varepsilon_v \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ (%) 関係

③単純せん断条件での降伏曲面

図-7は実験シリーズAの実験結果より得られた降伏応力を $p' \sim \tau$ 平面状にプロットしたものである。また、同時に等方圧密砂に対して同様な手順で得られた降伏曲面²⁾も記載する。図-7より、非排水履歴砂によって得られた降伏曲面は等方圧密の降伏曲面より最終履歴方向の正方向側に引きずられた形状を示し、負方向側では逆に縮小していることがわかる。これは、砂粒子の構造が非排水繰返し履歴によって変化した結果であると考えられる。

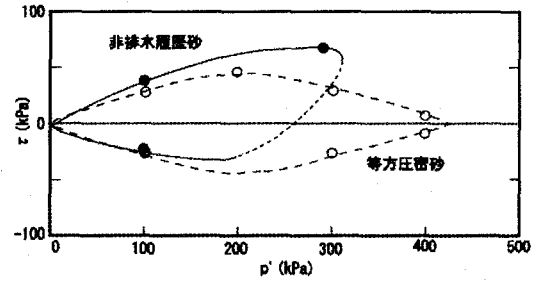


図-7 $p' \sim \tau$ 平面状の降伏曲面

3. 3 せん断方向 θ の違いによる変形特性(降伏応力)の変化について(実験シリーズB)

① $\theta = 45^\circ \sim 0^\circ$ 試験(正方向及び負方向)についての結果の比較

図-8には $45^\circ \sim 0^\circ$ (正方向)、 $45^\circ \sim 0^\circ$ (負方向)のせん断初期部分の $\tau_{\max}/p' \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 、図-9には、 $\varepsilon_v \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 関係を示す。

図-8(a), (b)の $\tau_{\max}/p' \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 関係より、最大せん断応力の作用方向角 θ を変えることによって応力ひずみ曲線が変化していることがわかる。また、せん断初期においては θ の変化に伴って連続的に変化しているようである。図-9(a), (b)の $\varepsilon_v \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 関係を見てみると三軸圧縮試験を除いて、 θ の変化に伴って連続的に変化しているようであるがこれは主に平均有効拘束圧の変化に応じた変化を示しているといえる。

降伏応力 $\tau_{\max}/p'$ (グラフ中に●で示す)は図-8(a)においては、 0° の時に一番値が大きく、 45° に近づくにつれ降伏応力が小さくなっていくのが分かる。逆に図-8(b)においては応力ひずみ曲線の変化同様、 0° の時に一番値が小さく、 45° に近づくにつれ降伏応力が大きくなっていくのが分かる。

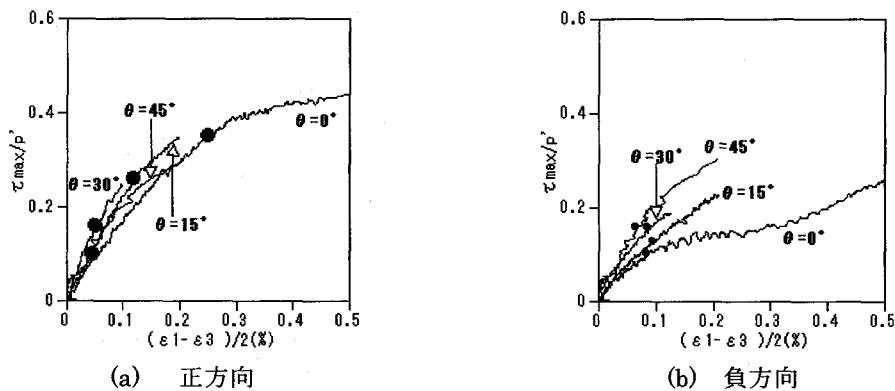


図-8 $\tau_{\max}/p' \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 関係

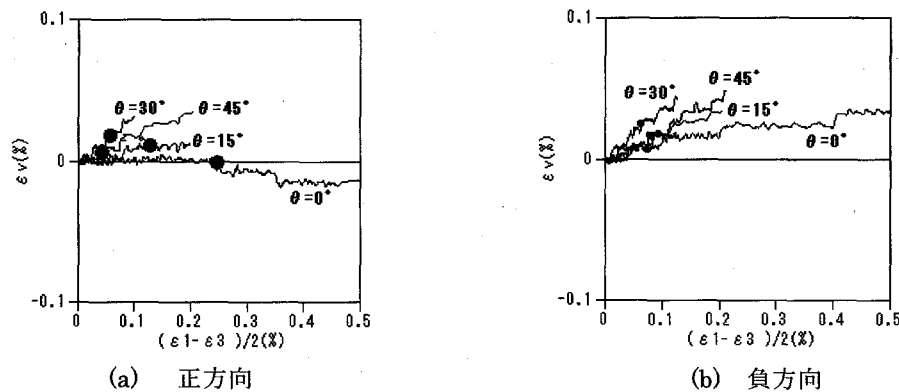


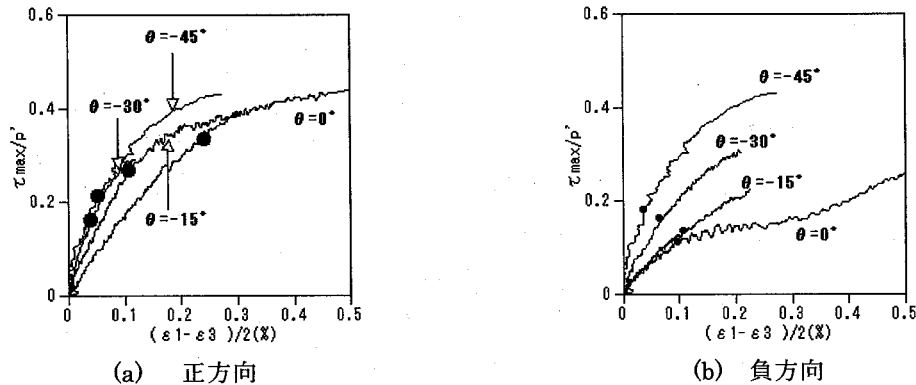
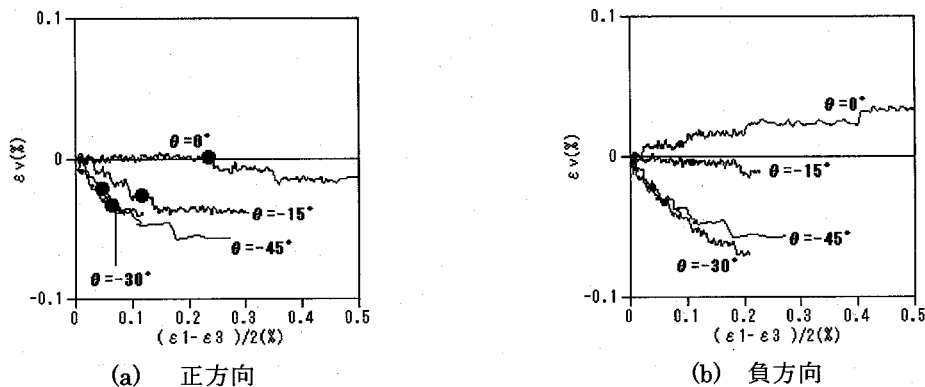
図-9 $\varepsilon_v \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 関係

② $\theta = 0^\circ \sim -45^\circ$ 試験 (正方向及び負方向) についての結果の比較

図-10 には $0^\circ \sim -45^\circ$ (正方向), $0^\circ \sim -45^\circ$ (負方向) のせん断初期部分の $\tau_{\max}/p' \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 図-11 には, $\varepsilon_v \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 関係を示す。

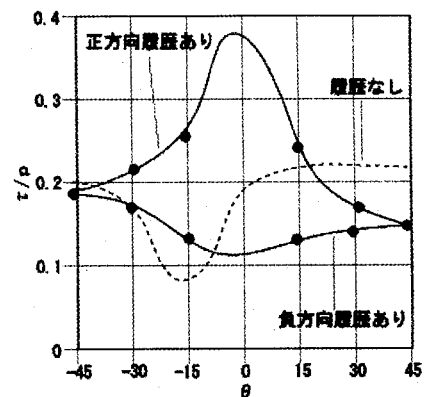
図-10 (a), (b) の $\tau_{\max}/p' \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 関係より, 最大せん断応力の作用方向角 θ を変えることによって応力ひずみ曲線が変化していることがわかる。また, せん断初期においては θ の変化に伴って連続的に変化しているようである。図-11 (a), (b) の $\varepsilon_v \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 関係を見てみると三軸圧縮試験を除いて, θ の変化に伴って連続的に変化しているようであるがこれは主に平均有効拘束圧の変化に応じた変化を示しているといえる。

降伏応力 $\tau_{\max}/p'$ (グラフ中に●で示す) は図-10 (a) においては, 0° の時に一番値が大きく, -45° に近づくにつれ降伏応力が小さくなっていくのが分かる。逆に図-10 (b) においては応力ひずみ曲線の変化同様, 0° の時に一番値が小さく, -45° に近づくにつれ降伏応力が大きくなっていくのが分かる。

図-10 $\tau_{\max}/p' \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 関係図-11 $\varepsilon_v \sim (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2(\%)$ 関係

③ 最大せん断応力の作用方向の違いによる降伏曲面の変化

図-12 は, それぞれの試験結果より得られた降伏点に対応する $\tau_{\max}/p'$ の分布をプロットしたものである。また図中の点線はせん断履歴のない砂の降伏応力変化である²⁾。なお, せん断応力の値は絶対値で示している。この結果から, まず正方向 (履歴あり) では θ が 0° のとき降伏応力が一番大きく θ が 45° 及び -45° に近づくにつれ降伏応力が小さくなっていくのが分かった。次に負方向 (履歴あり) では θ が 0° のとき降伏応力が一番小さく θ が 45° 及び -45° に近づくにつれ降伏応力が大きくなっていくのが分かった。すなわち正, 負方向の降伏応力を比較してみると, 履歴を与えた正方向に構造が強く, 逆に負方向ではせん断履歴により構造が弱くなっていることが分かる。

図-12 $\theta \sim \tau_{\max}/p'$ 平面上的降伏曲面

3. 4 A/Bシリーズでの降伏曲面の比較

AとBシリーズの実験より、降伏応力は $p'-\tau$ 平面のみならず、最大せん断応力の作用方向 θ の値によっても変化する。このため、X軸に p' 、Y軸に τ (τ_{max}) を、Z軸に θ をとり3次元の応力空間上で降伏曲面を描くと図-13のようになる。本試験では $p' = 200 \text{ kPa}$ のみ試験をしたため不明な部分もあるが、降伏曲面の形状は、 τ 、 p' 、 θ の三要素で連続的な変化を表現できると考えられる。

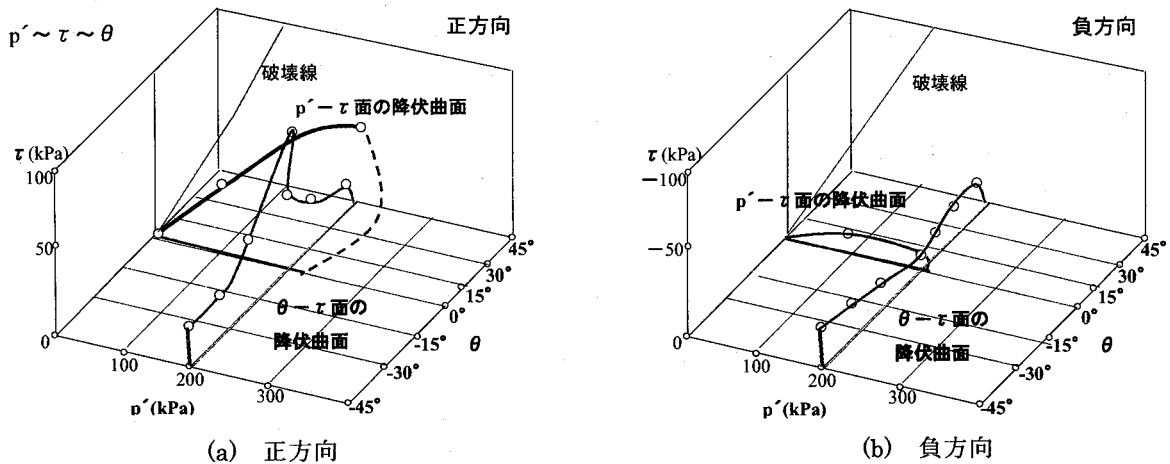


図 - 13 A+Bシリーズでの降伏曲面

4. 結論

本研究では、中空ねじり試験装置を用いて等方圧密砂と非排水せん断履歴を与えた御崎公園砂に対して、最大せん断応力が作用する方向を変えた種々の排水せん断試験を行った。

以下に得られた結果を示す。

- ・ 本年度用いた御崎公園砂において降伏曲面は等方圧密後の降伏曲面より最終履歴方向の正方向側に引きずられた形状を示し、負方向側では縮小していることが分かった。
- ・ 繰り返しせん断履歴を与えた砂に対して行ったせん断角度 θ を($45^\circ \sim -45^\circ$)の間で変化させて行った排水せん断試験より得られた降伏応力は正方向では θ が 0° のとき降伏応力が一番大きく θ が 45° 及び -45° に近づくにつれ降伏応力が小さくなっていくのが分かった。また負方向では θ が 0° のとき降伏応力が一番小さく θ が 45° 及び -45° に近づくにつれ降伏応力が大きくなっていくのが分かった。
- ・ 降伏曲面の形状を τ 、 p' 、 θ の三要素で表現すると、各要因の影響具合が明らかになると考えられる。

参考文献

- 1) 田中泰雄, 向井淳, 西牧洋一, (2000) AE 計測を併用する中空ねじり試験と供試体準方法 第 35 回地盤工学研究発表会 p p. 841-842
- 2) 田中泰雄, 中西徹, 竹本正和, 松本理恵, (2004) 御崎公園砂の強度・降伏応力に及ぼすせん断応力の作用方向の影響, 第 39 回地盤工学学会発表会 (投稿中)

著者: 1) 田中泰雄, 神戸大学安全研究センター, 教授; 2) 中西徹, 神戸大学大学院自然科学研究科, 学生; 3) 竹本正和, 神戸大学大学院自然科学研究科, 学生; 4) 松本理恵, 神戸大学工学部, 学生

THE RELATIONSHIP BETWEEN MAXIMUM SHEAR STRESS DIRECTION AND YIELD STRESS OF THE SAND THAT HAS BEEN SUBJECT TO CYCLIC UNDRAINED SHEARING

Yasuo Tanak
Toru Nakanishi
Masakazu Takemoto
Rie Matumoto

ABSTRACT

This study concerns with the changes of yield stress during the liquefaction process of sand. A hollow cylinder torsional test apparatus with AE measurement was used for the studying the yielding behavior of sand.

First, several cycles of undrained cyclic shearing in horizontal direction was applied to isotropically consolidated sand, and then the specimen was sheared under drained condition by varying the shearing directions with respect to the bedding plane. The changes of yield stress for these different shearing direction was studied by using the AE measurement.

- (1) It was found that the yield stress varies with the direction of shear with respect to the bedding plane and this variation of yield stress with shearing direction is different from the sand without undrained cyclic shearing.
- (2) It was found that the yield stress becomes the largest when shearing in the same direction of previous shear, while the yield stress becomes smaller towards the directions of triaxial compression and extension.

