



# 非排水せん断履歴を受けた砂の降伏応力とせん断応力作用方向との関係

田中, 泰雄  
小澤, 盛生  
中西, 徹

---

**(Citation)**

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 6:73-79

**(Issue Date)**

2002-03

**(Resource Type)**

departmental bulletin paper

**(Version)**

Version of Record

**(JaLCD0I)**

<https://doi.org/10.24546/00317569>

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00317569>



# 非排水せん断履歴を受けた砂の 降伏応力とせん断応力作用方向との関係

Yield stress varies with shear stress direction relative to soil fabric after  
 undrained cyclic loading

田中 泰雄<sup>1)</sup>  
 Yasuo Tanaka  
 小澤 盛生<sup>2)</sup>  
 Morio Ozawa  
 中西 徹<sup>3)</sup>  
 Toru Nakanishi

概要: これまで AE 計測を併用した中空ねじり試験装置を用いて飽和砂の非排水繰返しせん断試験を行ない、液状化過程における降伏応力の変化について研究してきた。従来の研究では、三軸試験と中空ねじり試験で得られた降伏応力を比較した結果、せん断履歴による影響の傾向が一致する場合もあったが、昨年度の実験では両者が明らかに一致していないという場合があった。この降伏応力の差は土粒子堆積面に作用するせん断応力の作用方向が異なることによって起こるのではないかと推論された。<sup>1)</sup>このため今年度の研究では、最大せん断応力の作用方向と堆積面との角度を変化させ、降伏応力がどのように変化するかを検討した。

キーワード: 排水せん断, 降伏, 土の構造

## 1. 序論

本研究は砂の液状化過程における特に非排水せん断履歴における粒子構造の変化と降伏応力との関係について研究したものである。降伏応力の決定には AE (acoustic emission) 計測を用いており、せん断履歴による降伏応力の変化について研究したものである。具体的な研究手法としては、中空ねじり試験装置を用いて正規圧密された飽和砂に数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、最大せん断応力が堆積面となす角度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

### (1) 実験試料

本研究では珪砂を用いて実験を行った。粒度調整のために珪砂6号と7号を重量比1:1で混合し、74 $\mu$ m以下の細粒分を除去したものを使用した。図-1に今年度使用した試料の粒径加積曲線を豊浦標準砂と併せて示す。また、表-1に試料の物理的性質を示す。

### (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

表-1 試料の物理的特性

	珪砂(調整後)	豊浦標準砂
最大粒径(mm)	0.850	0.42
D <sub>60</sub> (mm)	0.270	0.190
D <sub>50</sub> (mm)	0.250	0.180
D <sub>30</sub> (mm)	0.200	0.160
D <sub>10</sub> (mm)	2.000	0.125
均等係数	1.097	1.520
曲率係数	2.620	1.077
土粒子密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.646	2.638
最大間隙比	1.111	0.970
最小間隙比	0.664	0.608
最大密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.590	3.016
最小密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.253	1.831

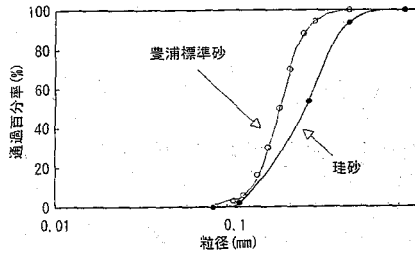


図-1 粒径加積曲線

表-2 実験シリーズ

試験番号	試験の種類	θ
①	正方向ねじりせん断試験	0°
②	正方向ねじり+圧縮せん断試験	+15°
③	正方向ねじり+圧縮せん断試験	+30°
④	正方向ねじり+引張せん断試験	-15°
⑤	正方向ねじり+引張せん断試験	-30°
⑥	三軸圧縮試験	+45°
⑦	三軸引張試験	-45°

注) ①、⑥、⑦は昨年度も実施

を用いて与えることが出来る。また、せん断中の AE を計測するために、供試体下部ペDESTAL 内に加速度計を設置した。まず供試体の作製時にあたっては、粒子堆積面がほぼ水平となるように、一昨年度試作した試料落下装置<sup>1)</sup>を用いて、初期相対密度=50%、初期乾燥密度=1.400g/cm<sup>3</sup>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た。

① 等方圧密過程

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 非排水せん断履歴過程

有効応力  $\sigma'_v = 400\text{kPa}$  の正規圧密状態から非排水条件で、繰返しせん断応力振幅  $\tau_d = \pm 72\text{kPa}$  (すなわちせん断応力比  $\tau_d / \sigma'_v = 0.18$ ) の繰返しねじりせん断を 2.5 サイクル与えた。有効応力  $\sigma'_v$  は 230kPa 付近まで減少したが、そのまません断応力が 0kPa の状態で、非排水状態から排水状態に切り替えた。その際、背圧をあらかじめ発生した過剰間隙水圧と同じになるように増加させて、その後排水バルブを開けて排水状態とした。その後 AE の発生がないことを確認し、等方応力状態で  $p' = 200\text{kPa}$  まで除荷を行った。

③ せん断過程

$p' = 200\text{kPa}$  まで等方排水除荷後、表-2 に示すように軸応力とせん断応力を同時に変化させながら 7 種類の排水せん断試験を行い、AE 計測により降伏応力を決定した。ここで  $\theta$  は図-2 に示すように水平面と最大せん断応力作用面と水平面の角度である。

3. 試験結果と考察

(1) 昨年度と今年度の試験内容

図-3 の(1)及び(2)にそれぞれ昨年度と今年度の応力経路を示す。昨年度の試験は図-3(1)のようであり、昨年度の試験は、 $\tau_d = \pm 80\text{kPa}$  の条件で 2.5 サイクルの非排水せん断繰返しでねじりせん断履歴を与えて、 $p' = 200\text{kPa}$  まで除荷した。その後、正方向ねじり排水単純せ

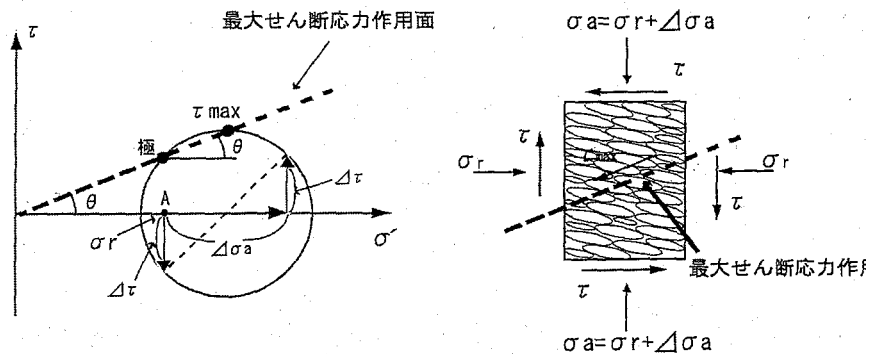


図-2 モーアの応力円

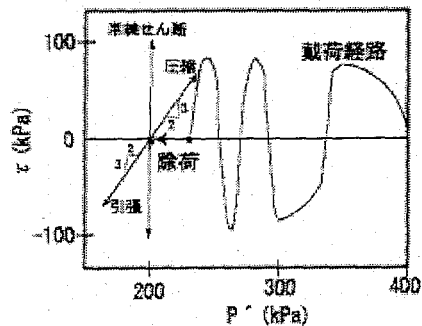


図-3(1) 昨年度の応力経路

せん断試験及び三軸圧縮・伸張試験を行った。今年度は図-3(2)に示すように今年度は、 $\tau_d = \pm 72\text{kPa}$ の条件で2.5サイクルの非排水せん断繰返しでねじりせん断履歴を与えて、 $p' = 200\text{kPa}$ まで排水除荷した後、表2に示す計7種類の試験を行った。また表-3により昨年度と今年度の試験条件を比較した。有効拘束圧、初期密度、初期相対密度はほぼ同じであることが分かる。

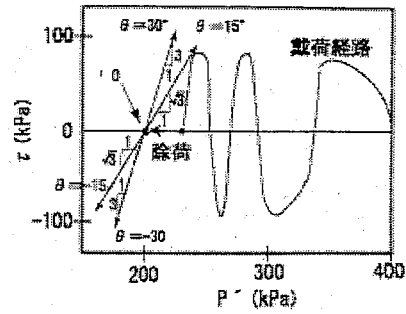


図-3(2) 今年度の応力経路

表-3 試験試料の比較

試験番号	有効拘束圧 $P'$ (kPa)	初期密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	初期相対密度 (%)
①	200	1.402	49.98
②			
③			
④			
⑤			
⑥	200	1.400	49.54
⑦	200	1.396	48.27

昨年度の試験試料

試験番号	有効拘束圧 $P'$ (kPa)	初期密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	初期相対密度 (%)
①	200	1.404	50.77
②	200	1.399	49.20
③	200	1.402	50.06
④	200	1.405	50.87
⑤	200	1.390	48.80
⑥	200	1.400	49.54
⑦	200	1.396	48.27

今年度の試験試料

## (2) 試験結果の比較

非排水繰返しせん断履歴後の排水単純せん断試験における  $\tau \sim \gamma$ ,  $\varepsilon_v \sim \gamma$  関係について昨年度と今年度の比較を行うと図-4に示す結果が得られた。昨年度はせん断応力振幅  $\tau_d = 80\text{kPa}$  のせん断履歴を与えたが、今年度はせん断応力振幅  $\tau_d = 72\text{kPa}$  のせん断履歴を与えている。このためせん断応力に若干の違いはあるが、全体を比較すると、最終強度ならびに体積変化量はほぼ一致していると言える。またせん断初期部分を比較すると、変形特性及び体積変化のいずれも  $\gamma = 0 \sim 0.5\%$  の間で良く一致していると言える。よって本試験の再現性は良いといえる。

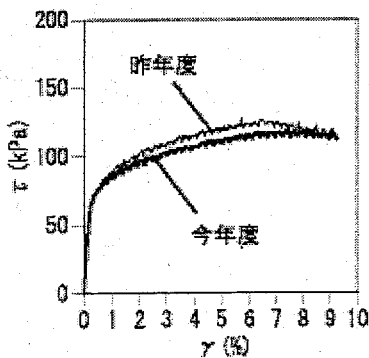


図4 (a) 試験結果の比較  $\tau \sim \gamma$  全体部分

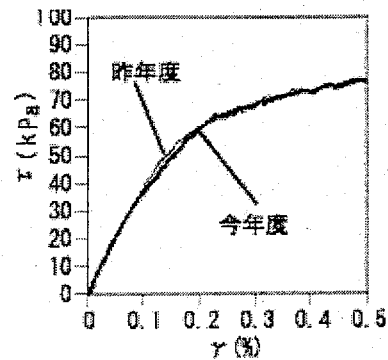


図4 (b) 試験結果の比較  $\tau \sim \gamma$  せん断初期部分

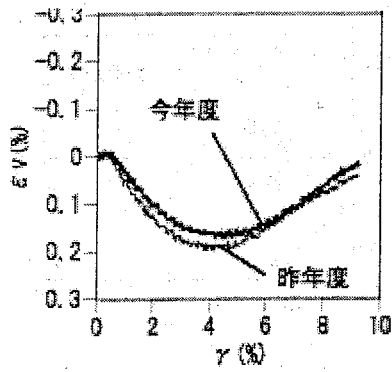


図4(c) 試験結果の比較  $\tau \sim \gamma$  全体部分

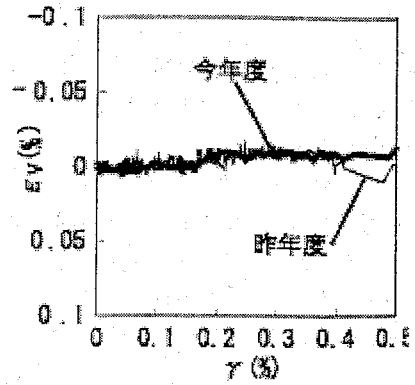


図4(d) 試験結果の比較  $\varepsilon_v \sim \gamma$  せん断初期部分

### (3) 今年度の試験結果

試験番号①の排水せん断試験実験結果を図-5に示す。ここでAE計測による降伏応力の決定方法を述べる。図-5に示す  $\varepsilon_v$ 、 $n_a$ 、 $\tau$  の関係からせん断初期においてはAEはほとんど発生していないが、 $\tau = 65\text{kPa}$  のあたりからAEが急激に発生していることが分かる。昨年度までは図5の判定に加えて試験中に直接ヘッドホンを通してAEを聞いて図の結果と総合的に降伏応力  $\tau_y$  を決定してきた。上記の試験番号①の排水せん断試験実験結果を  $\gamma \sim \varepsilon_v \sim \tau/p'$  関係、AE総数  $N \sim \tau/p'$  関係で整理したものが図-6である。ここで体積圧縮の増加に着目すると図-6の  $\varepsilon_v \sim \tau/p'$  関係より、 $\tau/p' \approx 0.38$  の付近から体積圧縮の急激な増加が始まっている。また  $\tau/p' = 0.38$  でAE総数  $N$  も急増している事が分かる。

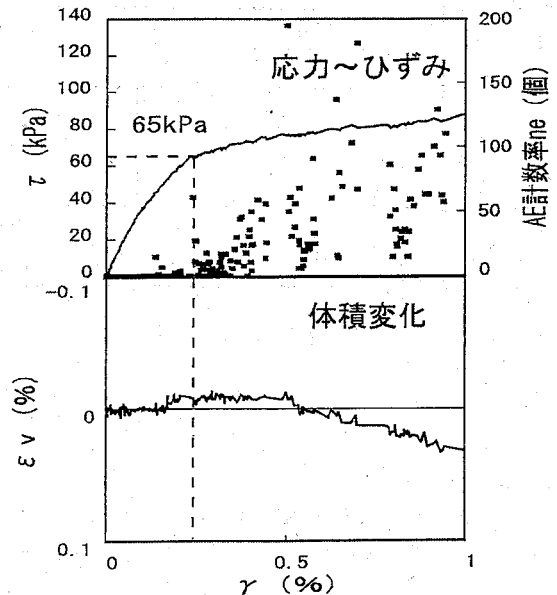


図-5 従来の降伏点決定方法

本研究の目的の一つは、降伏応力の変化に基づく液状化予測モデルの構築であるため、せん断による間隙水圧上昇の予測降伏応力の決定が重要と考えられる。この  $\tau/p' = 0.38$  は体積変化点に対応する降伏点である。次にAEの発生し始める点に着目すると図-6のAE総数  $N \sim \tau/p'$  関係よりAEは  $\tau/p' = 0.33$  あたりで出始めていることが分かる。又この時  $p' = 200\text{kPa}$  であり、せん断応力はおおよそ  $65\text{kPa}$  であるからこれが従来の降伏点である。以上のことから今回は降伏点を、AEが出始める点(降伏点A、 $\tau/p' = 0.33$ )とAE総数  $N$  のさらなる急増点(降伏点B、 $\tau/p' = 0.38$ )の2段階で規定する事にした。

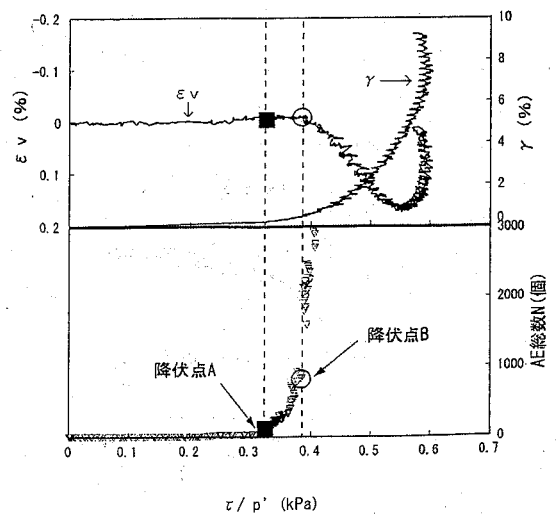


図-6 今年度の降伏点決定方法

次に最大せん断応力作用角  $\theta$  の変化による変形及びAE特性の変化を検討するため、図-7に  $\theta = -30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $+30^\circ$  の実験で得られた  $\tau/p' \sim \varepsilon_v \sim \text{AE総数 } N$  関係を示す。ここでプロットされた記号は、■は降伏応力Aであり、○は降伏応力Bである。この図-7から  $\theta$  を変化させた試験においても、先程の試験①の結果と同様に2つの異なる降伏点が規定され、降伏点Bと体積変化特性が一致することが分かる。また  $\theta = -30^\circ$ 、 $+30^\circ$  では、 $\theta = 0^\circ$  に比べて降伏応力A、降伏応力Bの値が小さくなっている事がわかる。

ここで全ての排水せん断試験結果について AB 計測によって求めた降伏応力 A, B を表-4 に示す。又降伏応力を最大せん断応力作用方向角  $\theta$  に着目して整理したのが図-8 である。同図では最大せん断応力の作用面の傾きを直接示すとともに、降伏応力の大きさを中心点からの距離としてプロットした。また垂直軸の右及び左の空間はせん断方向が時計方向・反時計の場合に対応している。またプロットされた記号は、■は降伏応力 A, ○は降伏応力 B を表す。また△は昨年度の実験より求めた降伏応力 A を表す。表-3, 図-8 から分かるように  $\theta$  が  $0^\circ$  から  $45^\circ$  及び  $-45^\circ$  に変化するにつれて降伏応力は連続的に減少する傾向を示す。非排水繰返しせん断履歴を与えたことによって、砂の粒子構造が大きく変化し、その結果、降伏特性にも大きな影響を与えた結果ではないかと思われる。一方、図-6, 7 に示した降伏点 B と降伏点 A との応力の比を表-4 に示すが、その値は一定ではないようである。今後両応力の関係についての検討が必要である。

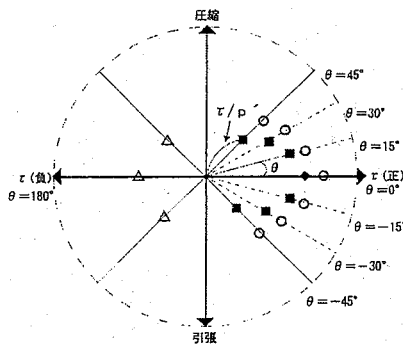


図-8 降伏曲面

最後に、最大せん断応力作用方向  $\theta$  の変化による強度との関係について考察する。

小田<sup>2)</sup>らは堆積面を様々な角度に傾けた供試体を作成して三軸試験を行い、最小主応力面と堆積面の成す角度  $\delta$  の大きさが強度に大きな影響を及ぼすことを示した。図-9 は  $\delta$  の定義を示したものである。図-10 から堆積面の角度  $\delta$  が  $30^\circ$  付近で最も強度 ( $\sigma_1 / \sigma_3$ ) が弱く、 $\delta$  が  $0^\circ$  及び  $45^\circ$  に近づくにつれて強度 ( $\sigma_1 / \sigma_3$ ) が強くなっていくことが分かる。

一方、本試験における繰返しせん断履歴後の最小主応力面と堆積面(履歴の影響により水平ではない)の角度  $\delta u$  と強度との関係を図-11 に示す。図-11 の結果からは  $\delta$  が  $45^\circ$  の付近で最も強度は大きく、 $\delta$  が  $0^\circ$  及び  $90^\circ$  に変化するにつれて強度は小さくなっている。この強度の違いから、排水せん断をする方向が履歴を与えた方向と同じになる場合(水平方向)は、せん断に対する強度が最も強くなる。それに比べてせん断する方向を変化させると、せん断に対する強度が弱くなることが分かる。

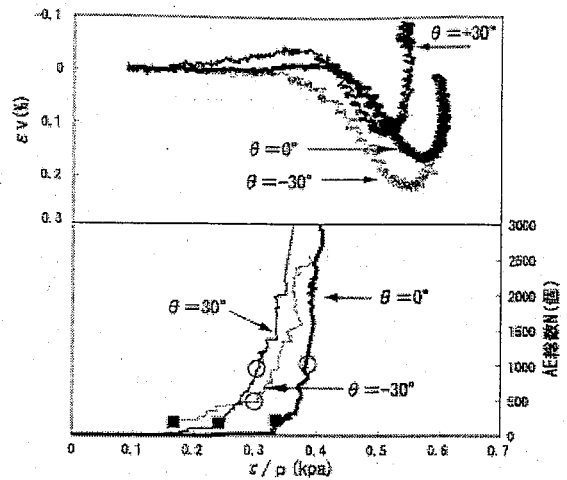


図-7  $\theta$  の違いによる比較

表-4 降伏応力

$\theta$	降伏応力 A ( $\tau/P$ )	降伏応力 B ( $\tau/p$ )	B/A
45	0.14	0.25	1.79
30	0.25	0.3	1.20
15	0.28	0.33	1.18
0	0.33	0.38	1.15
-15	0.27	0.34	1.26
-30	0.23	0.3	1.30
-45	0.14	0.25	1.43

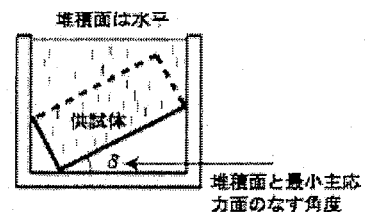


図-9 三軸試験による破壊面と堆積面

表-5  $\theta$  と  $\delta u$  との関係

$\theta$	$\delta uA$	$\delta uB$
45	90	90
30	66	66
15	60	62
0	45	45
-15	29	28
-30	25	26
-45	0	0

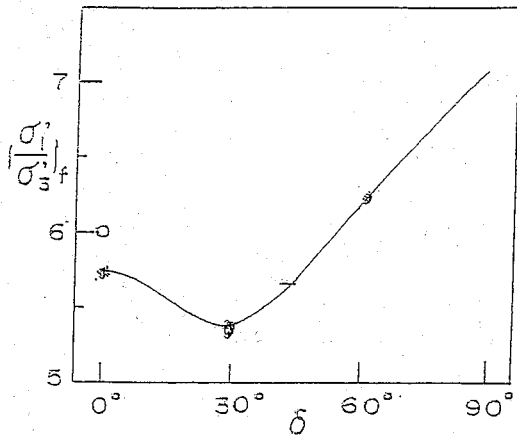


図-10 小田<sup>(1)</sup>らの試験による堆積面の角度  $\delta$  と強度との関係

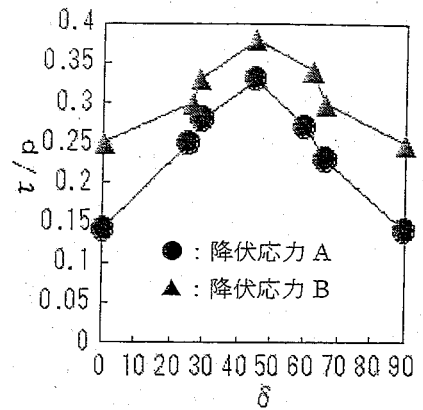


図-11 本試験による堆積面の角度  $\delta$  と強度との関係

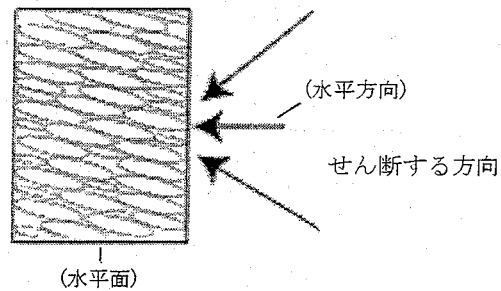


図-12 履歴後のせん断方向

#### 4. まとめ

本研究では中空ねじり試験を用いて非排水せん断履歴を与えた珪砂に対して、最大せん断応力が水平面となす角度を変化させて排水せん断試験を行い、降伏応力及び強度がどのように変化するかについて検討した。

- ① 昨年度と今年度の試験結果から、体積変化特性及びせん断強度特性についてほぼ同様な結果が得られた。このことから本実験の再現性は良く、信頼性が高いと考えられる。
- ② AEによる降伏点の決定に関して、AEが出始める点とAE総数Nのさらなる急増点の2ヶ所において降伏点を規定した。
- ③ 土粒子構造と最大せん断応力作用方向角との関係は降伏応力についても強度と同様に、大きな影響を及ぼすことが判明した。

#### 参考文献

- 1) 田中泰雄, 向井淳, 西牧祥一, (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 pp. 841-842
- 2) 小田匡寛, 浜嶋良吉, 古戸幸博: 等方的な砂質土の変形・強度特性, 14回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 373-376. 1979. 6

著者: 1) 田中泰雄, 神戸大学都市安全研究センター、教授; 2) 小澤盛生, 神戸大学自然科学研究科、学生; 3) 中西徹, 神戸大学自然科学研究科、学生

# **Yield stress varies with shear stress direction relative to soil fabric after undrained cyclic loading**

Yasuo Tanaka

Morio Ozawa

Toru Nakanishi

## Abstract

This study deals with the yielding behavior of saturated sand during liquefaction process. The acoustic emission, AE, measurement technique was used to define the yielding stress of sand. A hollow cylinder torsional testing device equipped with AE measurement was used to apply several cycles of undrained shear stress history to a Silica sand, and then the change of yielding stress after such undrained shear history was examined. Our previous studies on yielding behavior due to undrained cyclic shear using triaxial testing have indicated a similar trend as obtained from the hollow cylinder torsional device. However, when the direction of shearing relative to the bedding plane of soil fabric is changed, a completely different yielding behavior was obtained as compared with the previous result from the triaxial test results. This paper discusses the yield behavior of saturated sand with undrained cyclic shear history, and examines the changes of yield stress due to the changes of shear stress direction relative to the bedding plane of soil fabric.



