



中空ねじり試験を用いた液状化過程における珪砂の降伏・AE特性の研究

田中, 泰雄
向井, 淳
小澤, 盛生

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 5:61-69

(Issue Date)

2001-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00069935>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00069935>



中空ねじり試験を用いた液状化過程における 珪砂の降伏・AE 特性の研究

Yielding and Acoustic Emission Characteristics of Silica Sand during Liquefaction Testing
Using Hollow Cylinder Torsional Test Apparatus

田中 泰雄¹⁾

Yasuo Tanaka

向井 淳²⁾

Jun Mukai

小澤 盛生³⁾

Morio Ozawa

概要:

本研究では, AE 計測を併用する中空ねじり試験装置を用いて, 飽和砂が繰り返し荷重を受けて液状化に至る過程での降伏応力の変化について検討した。実験ではまず試験装置の作動性の確認試験を行い, その後液状化現象の進行過程における降伏曲面の変化を検討した。装置の作動性に関しては, 理想的な左右対称の両振り荷重を行うためには, 交番するせん断応力の最大値を一定に保つだけでは十分でなく, 各方向での荷重時間を同一にすることが重要であると判断された。また, 液状化過程での降伏曲面の変化に関しては, 繰返し非排水せん断履歴を複数回与えると, 砂の降伏曲面は発生した間隙水圧によって p' 軸原点方向に縮小し, 最終せん断応力の履歴方向に移動する, いわゆる異方硬化を示す形状となった。一方, 水平方向にねじりせん断履歴を与えた砂に対して, 三軸圧縮・伸張応力条件で荷重を行うと, 水平方向にねじりせん断した場合と大きく異なる降伏応力が得られた。このため, せん断履歴により土粒子構造が変化すると考えられ, その後のせん断応力の作用方向が粒子構造に対して変化すると, 降伏応力の値も変化すると考えられる。

キーワード: 中空ねじり試験, 砂, 液状化, アコースティック・エミッション(AE), 降伏曲面,

1. はじめに

砂の液状化過程における降伏曲面の研究について, 本研究室では AE 計測を併用する三軸試験によって様々な履歴を与えた砂の降伏曲面の変化を明らかにしてきた¹⁾。近年では, 地震時の荷重条件を忠実に再現する中空ねじり試験装置を用いて同様な研究を行ってきたが^{2,3)}、試作装置ではその作動性や供試体作製方法について種々の問題がある点を改善してきた。例えば, 供試体作成方法については, 中空円筒内で同時に等落下高さを保ちながら空中落下を行う器具を開発し, 左右異なる方向に排水せん断試験を行って, 堆積面がほぼ水平な供試体が作成可能であることを確認している⁴⁾。従って, 本研究では本供試体作成法の有効性を非排水条件での有効性を確認するため, ①非排水単純せん断試験と②非排水繰返しせん断試験を実施して, 左右対称荷重条件での結果を検討している。次に, 液状化過程における降伏曲面の変化を検討するため, 等方圧密砂に繰返し非排水せん断履歴を複数回与えた後, 種々の等方応力まで排水除荷を行い, その後に排水単純せん断等を実施して, 降伏応力の変化を検討した。また, 排水単純せん断試験の他に, 同一の除荷等方応力の値から, 三軸応力条件の圧縮或いは伸張試験を実施し, せん断応力の作用方向の違いが降伏応力に及ぼす影響についても検討を行った。

2. 試験概要

(1) 試験装置

本研究室で使用した中空ねじり試験装置の概要を図-1に示す。供試体の形状は外径100mm, 内径60mm, 高さ200mmの中空円筒である。軸荷重をペロフラムシリンダーにより与え, トルク荷重をメガトルクモーターにより与えている。また, せん断中のAEを計測するために, 供試体下部ペデスタル内にAEセンサーを設置した。試験時の計測では軸荷重, トルク荷重, 軸変位, 回転角, セル圧, 間隙水圧, 体積変化, AEの8項目についてパーソナルコンピューターにより自動計測した。

(2) 実験試料及び供試体作成法

試料には珪砂6号と7号を1:1の割合で混合し, 74 μ mの細粒分を除去したものをを用いた。試料の粒径加積曲線を図-2に, また, 物理的特性を表-1に示す。なお供試体作成にあたっては, 初期密度が1.400(g/cm³)となるように, すなわち相対密度が約50(%)になるように試料落下高さを調整した。先述のように, 供試体作成は昨年度に西牧⁴⁾が用いた試料落下装置を用いており, 内モールドと外モールドの間に挿入した装置から, ほぼ水平方向に堆積面ができるように一定落下高さで試料を落下させ, 必要に応じてはけで締め固めを行った。なお, 供試体密度の目標値からの誤差は ± 0.08 g/cm³以内となるようにした。

①ペロフラムシリンダー

②メガトルクモーター

③LVDT

④ポテンシオメーター

⑤セル

⑥二方向ロードセル

⑦供試体

⑧内孔

⑨AEセンサー

⑩セル圧計

⑪間隙水圧計

⑫二重管ビュレット

⑬差圧計

⑭載荷台

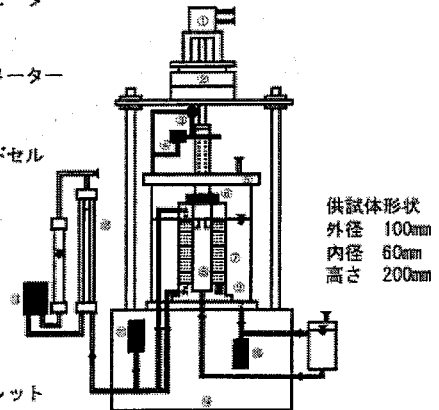


図-1 試験装置概要

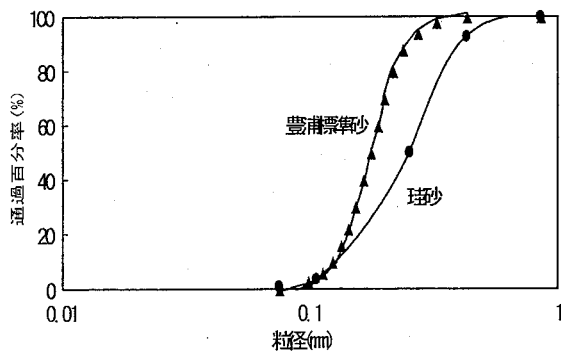


図-2 粒径加積曲線

表-1 物理的性質

最大粒径	0.85 (mm)	曲率係数	1.123
D ₆₀	0.26 (mm)	比重	2.65
D ₅₀	0.25 (mm)	最大密度	1.557 (g/cm ³)
D ₃₀	0.22 (mm)	最小密度	1.232 (g/cm ³)
D ₁₀	0.137 (mm)	最大間隙比	1.151
均等係数	1.898	最小間隙比	0.648

(3) 試験方法

供試体作成後, 下部ペデスタルより炭酸ガス流入・脱気水通水・背圧200kPaを与えて供試体を飽和させた。供試体飽和度の確認には, 非排水状態においてセル圧を増減させてB値を求め, B値が0.96以上のものについてのみ, それ以降のせん断試験を行った。全ての供試体について等方圧密履歴を与えており, 有効拘束圧 $p'_v=20$ kPaの初期状態から最大圧密応力400kPaまで段階的に圧密载荷を行い, 最大圧密応力下で体積変化, AEの発生がなくなるのを確認する。その後, 実験目的に併せて以下のような試験を行った。

実験装置の作動性並びに供試体作成法の有効性を確認実験：

ねじりせん断を左右それぞれの方向から開始する①非排水単純せん断試験と②非排水繰返しせん断試験を実施している。これは, 前述のように供試体の堆積面がほぼ水平であることを確認しようとするものである。①の非排水単純ねじりせん断においては, 時計方向のねじりを正方向, 反時計方向を負方向として, それぞれ一本ずつ非排水せん断を行った。また②の非排水繰返しせん断試験では, セル圧一定・応力振幅 $\tau_d=\pm 80$ kPaの条件で非排水繰返しねじりせん断を与えた。試験は供試体が軟化傾向を示し, 過剰間隙水圧が初期有効拘束圧の10%以下になるまで行った。载荷はねじり変位制御方式で行ったが, 载荷応力～時間関係ができるだ

け正弦波に近い状態になるように、最大せん断応力付近で変位速度を調整して実験した。

液状化過程における降伏曲面変化の検討実験：

本実験シリーズでは、以下に示すように、液状化過程の進展状況を変化させるために、非排水繰返しねじりせん断回数を2.5、4.5及び5サイクルの3種類に変化させた。このように異なる非排水せん断履歴を供試体に与えた後に、排水状態に切り替えて所定の等方応力まで除荷した後、正方向及び負方向に排水単純せん断試験を実施し、せん断過程におけるAE計測から、降伏応力（降伏曲面）を決定している。

Bシリーズ：有効応力 σ_v' が230kPa付近まで減少するようにせん断履歴を2.5サイクル与え、せん断応力が0kPaの状態履歴を止める。その後、所定の等方応力に除荷し、排水単純せん断試験等を行い、降伏応力を決定する（図-3.1参照）。

Cシリーズ：有効応力 σ_v' が150kPa付近まで減少するようにせん断履歴を4.5サイクル与え、せん断応力が0kPaの状態履歴を止める。その後、所定の等方応力に除荷し、排水単純せん断試験等を行い、降伏応力を決定する（図-3.2参照）。

Dシリーズ：有効応力 σ_v' が130kPa付近まで減少するようにせん断履歴を5サイクル与え、せん断応力が0kPaの状態履歴を止める。その後、所定の等方応力に除荷し、排水単純せん断試験を行い、降伏応力を決定する（図-3.3参照）。

なおせん断履歴後に非排水状態から排水状態に切り替える際、非排水状態で発生した過剰間隙水圧と同じになるようにまず背圧を増加させ、その後に二重管ビュレットと接続した排水弁を開き、排水状態にするという作業を行った。繰返し非排水せん断履歴から、等方排水除荷、排水せん断に至る有効応力経路は、図-3.1～3に示すようであり、それぞれB、C、Dシリーズに対応している。また、B、Cシリーズでは図のように排水せん断過程において三軸圧縮・伸張試験を行った。载荷応力の最大値は軸差応力 $q = \pm 20\text{kPa}$ （軸荷重 $\pm 100\text{kgf}$ ）までとした。

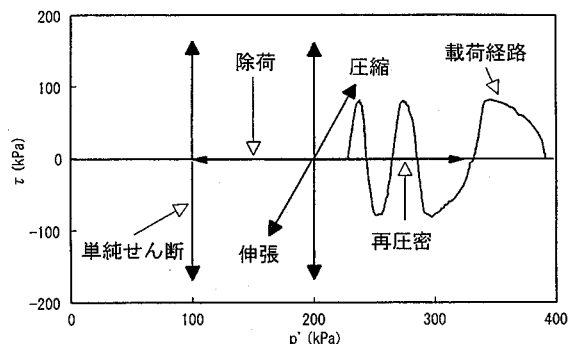


図-3.1 Bシリーズ

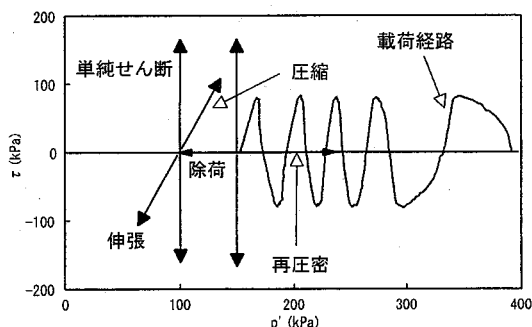


図-3.2 Cシリーズ

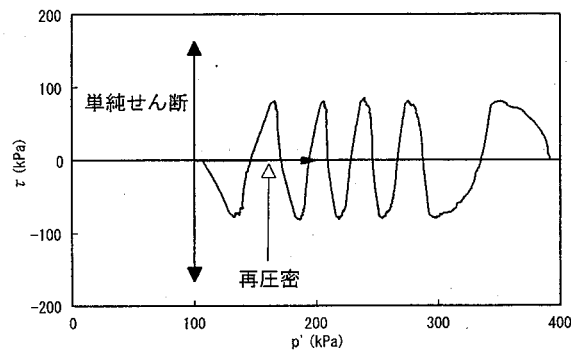


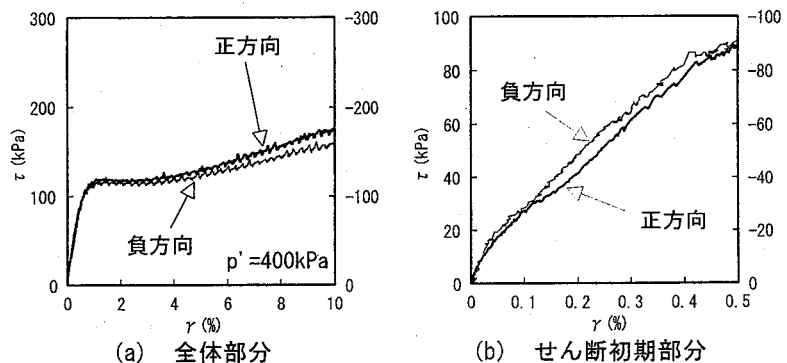
図-3.3 Dシリーズ

3. 試験結果と考察

3.1 実験装置の作動性確認：

(1) 非排水単純せん断試験

図-4.1にせん断応力 τ ～せん断ひずみ γ 関係とそのせん断初期部分を拡大したものを示す。図より応力～ひずみ関係では、せん断初期部分も含めてねじり方向の違いによる影響は見られない。次に、発生過剰間隙水圧 Δu ～せん断ひずみ γ 関係を図-4.2に、またせん断応力 τ ～平均有効主応力 p' 関係の有効応力経路を図-4.3に示す。



(a) 全体部分

(b) せん断初期部分

図-4.1 $\tau \sim \gamma$ 関係（非排水せん断， $p' = 400\text{kPa}$ ）

図-4.2では Δu の発生量に関して、 $\gamma=2\%$ 以降に若干差異が見られるが、両図からねじり方向の違いによる間隙水圧の発生傾向にほとんど影響は見られないと判断される。従って、本研究で用いた試料落下方法により、ほぼ水平な堆積面を持つ供試体を作成できると考えられる。

(2) 非排水繰返しせん断試験

以上のように、土粒子堆積面がほぼ水平な供試体を作製でき、ねじりせん断方向を正方向、負方向に変化させても強度特性、体積変化特性に変化が無い液状化試験が実施できると判断し、ねじりせん断をそれぞれ正方向・負方向から開始する非排水繰返しせん断を行った。その結果を示すと図-5 (a) (b) のようである。図のように、ねじりせん断をそれぞれ正方向・負方向から開始しているにも拘わらず、液状化の発生（除荷に伴う急激な正間隙水圧の発生）は常に正方向から負方向へのねじりせん断時に発生した。また、図から明らかなように、せん断応力の最大値は正・負方向で精度良く一定値が保たれていることが分かる。繰返しせん断応力が一定値に保たれているにも拘わらず、このように一方向で液状化が発生する原因を究明するため、せん断過程における間隙水圧及びせん断ひずみの蓄積傾向を検討した。まず、次式によりせん断ひずみの蓄積量の経時変化を求めると、図-6.1のような結果が得られる。

$$\gamma_{sum} = \int \dot{\gamma} \cdot dt \quad (1.1)$$

図のように、正方向からせん断を開始した場合、载荷3サイクルまで γ は正側に蓄積されているものの、载荷4サイクル目以降、徐々に負側にひずみが大きくなり、軟化傾向を示す直前では完全に負側に蓄積されていることが分かる。負方向から開始した場合はせん断開始時より γ は負側に蓄積され、その割合は増加する一方であることが分かる。このように、一定方向にひずみが累積するため、前述のように一方向で液状化が発生すると考えられる。変形量の

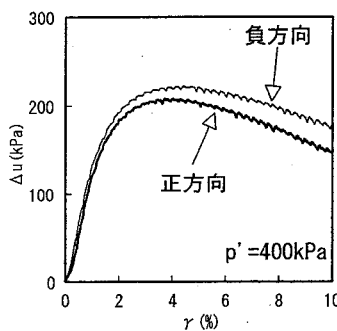


図-4.2 $\gamma \sim \Delta u$ 関係
(非排水せん断, $p' = 400 \text{ kPa}$)

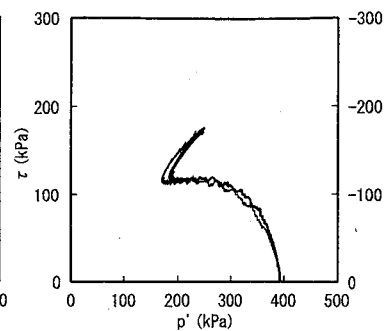
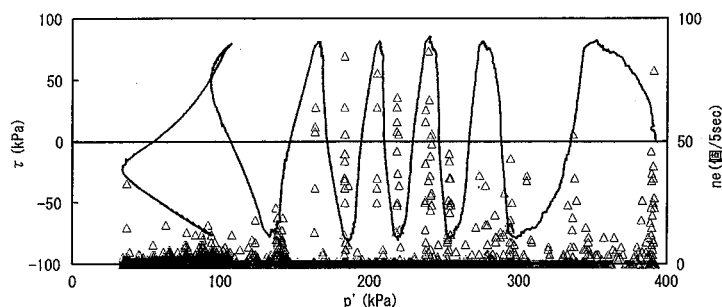
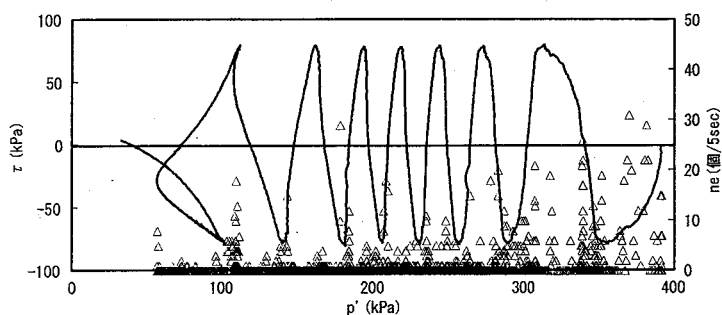


図-4.3 $p' \sim \tau$ 関係
(非排水せん断, $p' = 400 \text{ kPa}$)

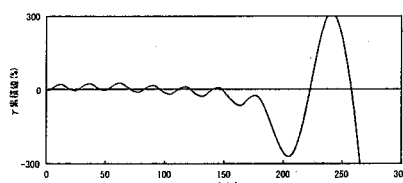


(a) 正方向

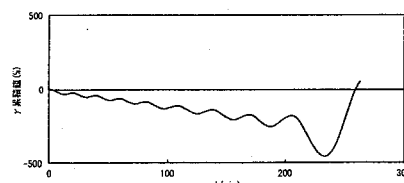


(b) 負方向

図-5 $p' \sim \tau, n_e$ 関係

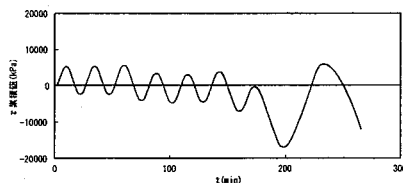


(a) 正せん断開始

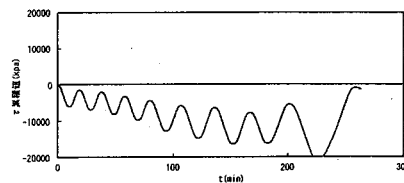


(b) 負せん断開始

図-6.1 $\gamma_{sum} \sim t$ 関係



(a) 正せん断開始



(b) 負せん断開始

図-6.2 $\tau_{sum} \sim t$ 関係

せん断応力の大小によると考えられるが、最大せん断応力の値は一定に保たれているため、ここではせん断応力の載荷時間の累積変化を次式により検討した。

$$\tau_{sum} = \int \tau \cdot dt \quad (1.2)$$

せん断応力 τ の累積値(τ_{sum})の経時変化を示すと図-6(b)のようである。図-6.2より τ_{sum} は γ_{sum} と同様の挙動を示しており、 γ_{sum} が負側へ卓越する原因は τ_{sum} の影響であると思われる。1サイクルにおける $\tau > 0$ の載荷時間と $\tau < 0$ の載荷時間では $\tau < 0$ の載荷時間の方が長くなるため、図のように累積した τ_{sum} の経時変化が負側に移動し、供試体に負のせん断ひずみが徐々に蓄積され、負方向への剛性が高まり正方向の載荷により流動変形を起こすと考えられる。本研究では、メガトルクモーターを使用しているため、変位制御により正弦波的な載荷を行っているが、載荷が進むにつれ $\gamma \sim \tau$ 関係の非線形性が卓越すると、変位に追従して応力を増加することが次第に困難になり、載荷時間が長くなると思われる。以上より、非排水繰返しせん断試験においてせん断応力の与え方に問題があることが判明した。今後、せん断応力について正負の載荷時間が一定になるような制御が必要だと思われる。

3.2 液状化過程における降伏曲面変化の検討：

本研究ではせん断履歴を受けた砂の降伏特性について AE 計測を用いて検討している。図-7 は B シリーズについての排水単純せん断試験の結果と、せん断初期における変形特性と AE 特性を示したものである。図のように、せん断初期の変形性はひずみ量が 0.1~0.2% 程度までほぼ線形的であり、それに以降に非線形な応答を顕著に示す。一方、AE 計測によって決定される降伏応力は、変形特性の非線形応答の開始点と良く対応しており、粒子の塑性的な変形移動を示す AE 発生点は、土粒子材料の降伏応力を決定する道具として有効であることが明らかである。

このようにして、B 及び C シリーズについて、種々のせん断経路に沿って AE 計測により降伏応力を決定し、それぞれのシリーズ毎に推定した降伏曲面の形状変化を示したものが図-8(a)(b)である。さらに、全てのシリーズから得られた降伏曲面形状の変化を併せて示したものが図-8(c)である。図のように、降伏曲面の位置はせん断履歴を受けた方向に移動しており、いわゆる異方硬化の特徴を示している。また、せん断履歴回数の増加により、降伏曲面のサイズは縮小しており、これは過剰間隙水圧の増加による有効拘束応力の減少が降伏曲面のサイズ縮小に対応していると考えられる。

次にせん断履歴による変形特性の変化について検討する。図-9 に平均有効主応力 $p' = 100\text{kPa}$ における B シリーズと昨年度の等方圧密砂のせん断応力 τ ~せん断ひずみ γ 関係の比較を示す。応力~ひずみ関係において、ひずみの大きい領域では同様の挙動を示しているが、せん断初期部分において正方向の結果は等方圧密砂と比較して応力~ひずみ関係の立ち上がりの傾きが大きく、負方向の結果では等方圧密砂と比較して応力~ひずみ関係の立ち上がりの傾きが小さいことが分

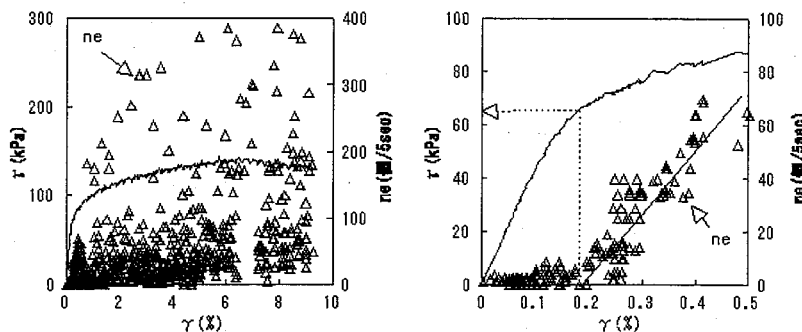
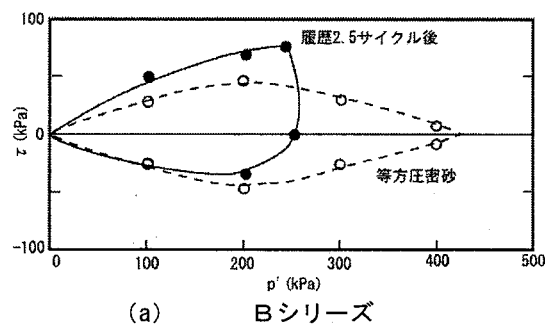
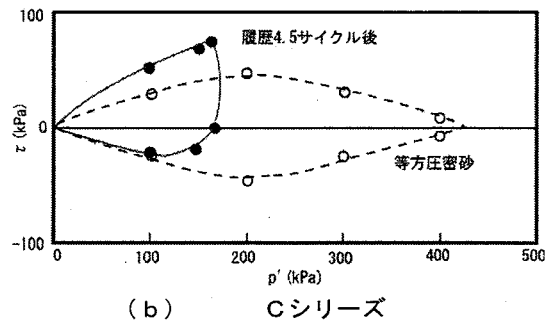


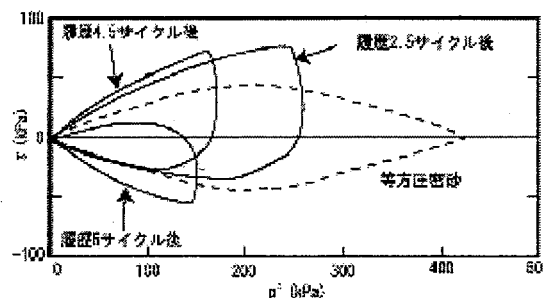
図-7 AE 計測による降伏応力の決定 (2.5 回載荷、100kPa 正方向)



(a) B シリーズ



(b) C シリーズ



(c) 全シリーズ

図-8 非排水せん断履歴の増加による降伏曲面形状の変化

かる。これはB, C, Dシリーズの各拘束圧に対して共通の傾向であり、履歴の影響が全てのシリーズにおいて顕著に表れたと考えられる。 $p' = 100\text{kPa}$ におけるBシリーズと昨年度の等方圧密砂の体積ひずみ ε_v ～せん断ひずみ γ 関係の比較を図-10に示す。図より正・負方向において履歴を受けた砂の方が等方圧密砂の結果より強い膨張傾向を示していることが分かる。これはB, C, Dシリーズの各拘束圧において共通の傾向であった。従ってせん断履歴の変形特性に及ぼす影響としては降伏前のせん断剛性率については顕著であるが、体積変化に関しては降伏後にひずみが増大した場合に顕著となっている。

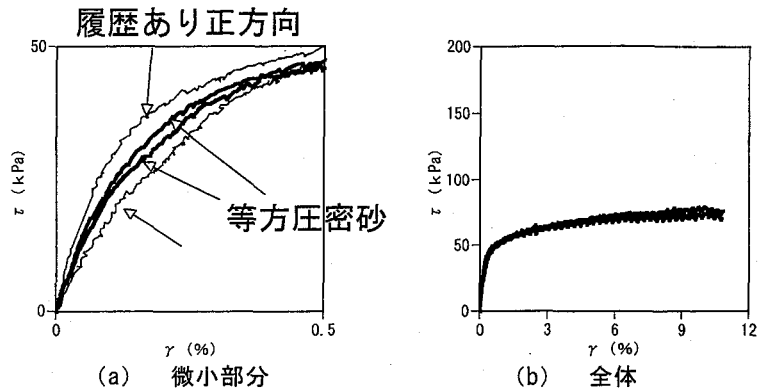


図-9 Bシリーズ $\tau \sim \gamma$ 関係

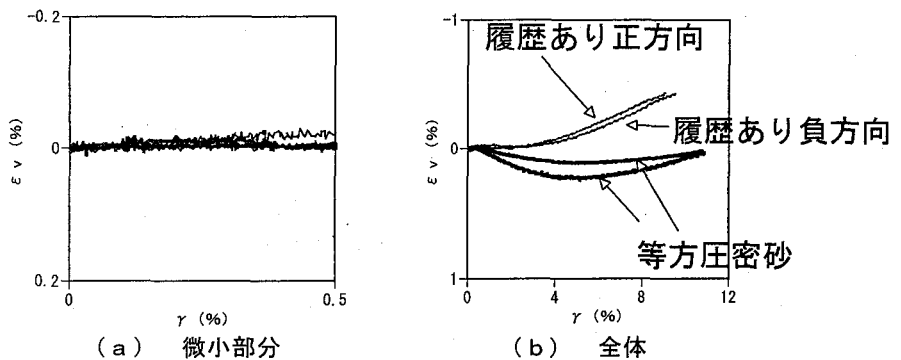


図-10 Bシリーズ $\varepsilon_v \sim \gamma$ 関係

異なるせん断応力経路(三軸圧縮・伸張載荷)における降伏応力

上記に示したねじりせん断履歴による降伏応力の変化は、水平地盤に地震力が作用した場合に土が液状化を生じる過程を想定したものである。一方、水平地盤上に盛土載荷等があると、斜面法尻では必ずしも水平方向にせん断応力が作用しない場合も考えられる。以下ではB及びCシリーズにおいて、正及び負方向の排水単純せん断に加えて、排水条件で三軸圧縮・伸張載荷を行い、水平方向以外にせん断応力が作用した場合に、降伏応力がどのように変化するかについて検討する。Bシリーズの実験において、水平ねじりせん断履歴を供試体に与えた後、 $p' = 200\text{kPa}$ において三軸圧縮・伸張試験を実施した。その場合に得られた降伏軸差応力 q_y を、先に示した降伏曲面上(図-7参照)に示したものが図-11(a)である。なお図においては、 $\tau = q_y/2$ と考えて、圧縮側と正方向を、伸張側と負方向を対応させてプロットしている。図より三軸載荷条件で得られた q_y と単純せん断条件で得られた降伏応力は大きく異なることが分かる。Cシリーズについても、同様な載荷試験を行い、その結果を比較したものが図-11(b)である。

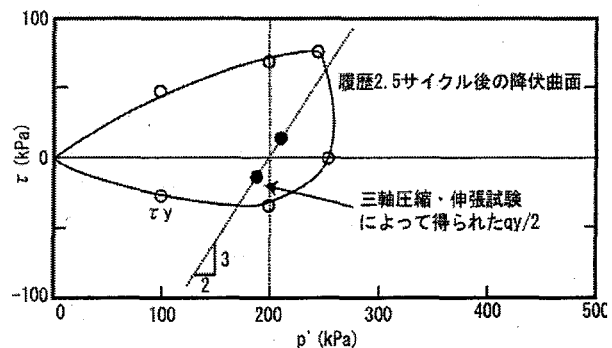


図-11 (a) 三軸試験によって得られた降伏応力 q と降伏曲面(Bシリーズ)

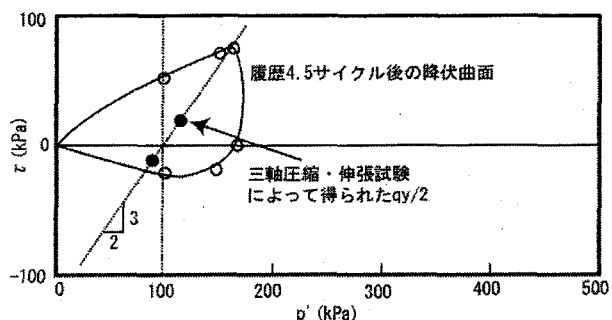


図-11 (b) 三軸試験によって得られた降伏応力 q と降伏曲面(Cシリーズ)

図から明らかなように、三軸載荷条件の q_y と単純せん断条件の降伏応力との間には大きな差があることが分かる。

このようにせん断応力の作用方向の違いにより大きく降伏応力が異なる理由について考察するためには、繰返しせん断による粒子構造の変化に着目する必要がある。すなわち水平方向にねじり繰返しせん断履歴を受けた供試体では、載荷回数の増加により、最初は堆積面がほぼ水平な粒子構造を持つ土要素が、徐々に水平方向に単純せん断変形を生じるため、堆積面がせん断方向に傾斜したものになることが考えられる。このような、傾斜粒子構造を持つ土要素にせん断応力が作用するとき、正及び負方向では異なるせん断応力で降伏するのは当然であるし、またせん断応力が三軸圧縮・伸張条件のように最大せん断応力の作用面が水平方向と 45 度となる場合には、さらに異なるせん断応力で降伏しても、不思議ではないものと考えられる。

したがって、以下では上記の水平ねじりせん断と三軸圧縮・伸張せん断によって得られた降伏応力の関連性を検討するため、供試体の土粒子堆積面に作用する最大せん断応力の向きと降伏応力の変化に着目した検討結果を以下に述べる。

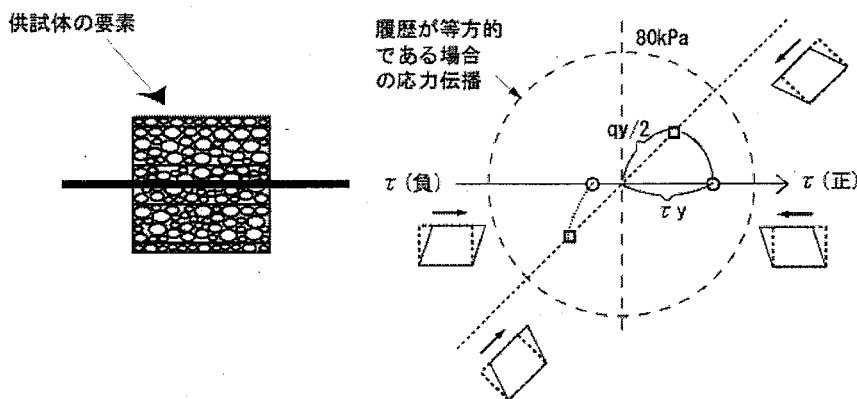
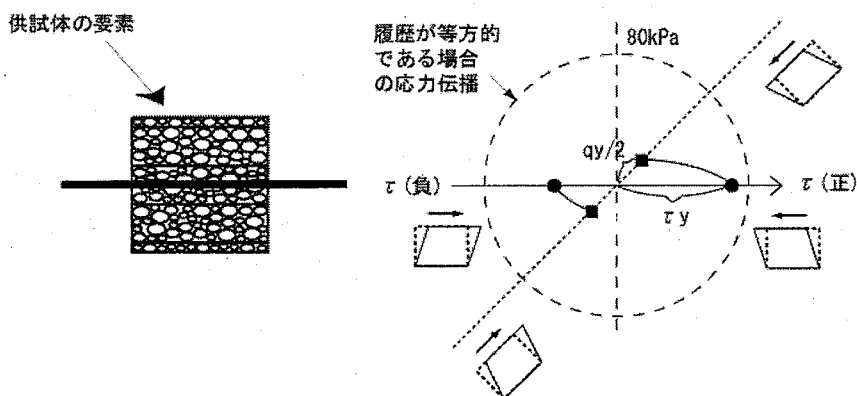
最大せん断応力作用方向に着目する方法

ここでは土粒子構造の変形モードと最大せん断応力の作用方向との関係を考える。先述のようにねじりせん断では最大せん断応力は水平方向 ($\theta = 0$ 度) に作用するが、正及び負方向では、粒子構造の変形モードがそれぞれ逆である。また三軸圧縮・伸張試験では、最大せん断応力は粒子構造に対し 45 度傾斜し、その変形モードもそれぞれ逆方向である。このように、粒子構造の変形モードと最大せん断応力の作用方向を基に、B シリーズの平均有効主応力 $p' = 200\text{kPa}$ の降伏応力測定結果を図示したものが図-12 (a) である。また、C シリーズの $p' = 100\text{kPa}$ の結果についてまとめたものが図-12 (b) である。図において水平軸は最大せん断応力の作用面を示し、軸の左右で正負を区別する。また、最大せん断応力が作用した面に沿って、得られた降伏応力の値を軸中心からの距離として表現している。

図より B, C シリーズとも水平面上では最終履歴方向の正方向に剛性が高まり、反対に負方向には剛性が低くなっていることが分かる。

45 度面上では B, C シリーズともに圧縮側、伸張側でほぼ同等の値を示しているが、C シリーズの方が大きい値を示していることが分かる。つまり、拘束圧の減少によって、水平方向の降伏応力 (τ_y) は減少しているのに対して、45° 方向の降伏応力は増加している。

この原因としては履歴の進行に伴い粒子構造が等方的になっているためだと考えられる。以上の結果は、試験条件が 4 種の限られた場合について得られた結果であるため、今後はせん断応力及び鉛直応力状態を変化させ、最大せん断応力と供試体土粒子堆積面との角度を変化させた実験を、正及び負方向のせん断モードで行い、降伏応力の変化を検討する必要があると考えられる。



4. 結論

本研究で得られた結論をまとめると以下のようである。

4.1 中空ねじりせん断試験装置の作動性について

試作した試料落下装置を用いて作製した供試体について非排水単純せん断試験を実施したところ、排水試験と同様、試験結果にせん断方向の違いによる影響は見られなかったため、本試料落下装置はほぼ水平な堆積面を持つ供試体の作成法として有効であると判断された。しかしながら、せん断開始方向を正方向と負方向で変化させ非排水繰返しせん断試験を実施したところ、せん断ひずみの発生に問題があることが判明した。この原因として、実験の制御方法に問題があることが判明した。砂は本来なら時間依存性の材料ではないが、液状化のように変形が大きくなると累積する変形量が後の力学挙動に影響を与えていると考えられる。今後、せん断応力について正負の載荷時間が一定になるような制御が必要だと思われる。

4.2 液状化過程における降伏応力の変化について

非排水繰返しせん断回数が3種類に変化するような非排水せん断履歴を与え、AE計測により降伏曲面の形状変化を明らかにした。せん断応力の繰返し回数が増加すると、間隙水圧の増加により降伏曲面の大きさは p' 軸原点方向に縮小し、またその形状は最終せん断履歴方向に広がるものとなり、いわゆる異方硬化の降伏面形状を示していた。

ねじりせん断履歴後、三軸圧縮・伸張試験と同様の載荷試験を実施し、せん断経路の違いによる降伏応力の変化を検討した。その結果、三軸載荷条件の q_y と単純せん断条件の降伏応力との間には大きな差があることが判明し、その違いは最大せん断応力の作用方向と土粒子構造の変形モードとの関係に余って生じるものと考えられる。

参考文献

- 1) 白川和靖, 田中泰雄, 平川和之, 久保勝俊, 中井博之: 繰返し非排水せん断による相馬砂の液状化と降伏曲面の変化、第31回地盤工学研究発表会
- 2) 前田和亭: 非排水繰返し単純せん断による砂の液状化について、修士論文, 神戸大学大学院自然科学研究科, 1998.
- 3) 川嶋篤司: 中空ねじり試験による砂の液状化と降伏曲面の変化について、修士論文, 神戸大学大学院自然科学研究科, 1999.
- 4) 西牧祥一: 中空ねじり試験における供試体作製方法について、卒業研究, 神戸大学工学部建設学科, 2000.

著者: 1) 田中 泰雄, 都市安全研究センター, 教授; 2) 向井 淳, 不動建設工業株式会社 (前自然科学研究科建設学専攻, 学生); 3) 小澤 盛生, 自然科学研究科建設学専攻, 学生

Yielding and Acoustic Emission Characteristics of Silica Sand during Liquefaction Testing Using Hollow Cylinder Torsional Test Apparatus

Yasuo Tanaka

Jun Mukai

Morio Ozawa

Abstract

In this paper, the Yielding and acoustic emission characteristics of silica sand were studied by performing a series of undrained cyclic loadings tests using hollow cylinder torsional test apparatus.

In the study, the performance of test apparatus was also examined by setting up the hollow cylinder specimen using a specially designed sand raining equipment. The equipment was to produce a specimen with its bedding plane of soil particle being nearly horizontal as much as possible. By changing the rotational directions of undrained shear both in monotonic and cyclic modes, it was found that the specimen has its bedding plane nearly horizontal but that improvement are needed in the cyclic loading procedure so that time duration of loading being equal in both rotational directions.

The yielding characteristics of silica sand during undrained cyclic loading showed that the yield locus changes its shape and size with the increases of cyclic loading. The yield locus skews its shape towards the direction of previous undrained shear and its size decrease as the excess pore pressure increases. Thus the yield locus changes its shape and size as if the soil behaves as an anisotropic hardening plastic model. The yielding behavior was also examined by performing triaxial compression and extension loadings after the undrained cyclic shear. It is also found that the yield stress changes its magnitude as the direction of subsequent shear is changed from the horizontal to the inclined direction with respect to the horizontal bedding plane. Such aspect of yielding behavior during the liquefaction test needs to be studied further.

