



非排水繰返しせん断による砂の液状化とAE計測による降伏応力の変化について

田中, 泰雄
前田, 和亨
松本, 正暁

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 2:103-108

(Issue Date)

1998-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00317470>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00317470>



非排水繰返しせん断による砂の液状化と AE計測による降伏応力の変化について

Liquefaction of Sand Under Undrained Cyclic Stress and Changes of Yielding Stress as
Measured by Acoustic Emission

田中泰雄¹⁾
Yasuo Tanaka
前田和亨²⁾
Kazuyuki Maeda
松本正暁³⁾
Masaaki Matsumoto

概要：飽和した緩い砂地盤が地震などの急激な繰返し荷重を受けると、液状化という特徴的な現象が起こる。液状化に関する研究は数多く行われているが、依然として不明な点が多く、特に、液状化に至る過程における降伏曲面形状の変化についての研究は少ないようである。数値解析用の液状化モデルを構築する際には、繰返し載荷時の降伏曲面形状を精度よく予測することが重要である。そこで本研究では、中空円筒ねじり試験装置を用いて、非排水せん断履歴を受けた砂の降伏曲面について検討した。また、繰返し非排水ねじりせん断試験を行い、液状化に至る過程における降伏曲面の形状変化について検討した。その結果、非排水せん断履歴を受けることによって、降伏曲面は最終せん断履歴方向へ移動し、また、繰返し非排水せん断過程における降伏曲面は、載荷方向により上下に移動しながら、 p' 軸原点方向へ縮小することが明らかとなった。なお、降伏応力の決定はAE計測を利用して行った。

キーワード：砂、降伏、液状化、アコースティック・エミッション、中空円筒ねじり試験

1.はじめに

飽和した緩い砂地盤が地震などの急激な繰返し荷重を受けると、液状化という特徴的な現象が起こる。また、液状化に至らないまでも、繰返し載荷中に地盤の粒子構造は大きく変化し、降伏、変形特性が複雑に変化すると考えられる。液状化に関する研究は数多く行われているが、依然として不明な点が多く、特に、液状化に至る過程における降伏曲面形状の変化についての研究は少ないようである。近年よく液状化の数値モデルに適用される弾塑性理論による液状化モデルを構築する際には、繰返し載荷時の降伏曲面形状を精度よく予測することが重要である。砂の降伏応力に関する研究として、これまで土の音響エネルギー計測であるアコースティック・エミッション（AE）計測を併用した室内試験を実施してきたが、これらの研究の多くは、限られた応力状態しか再現できない三軸試験によるものであった¹⁾²⁾。そこで本研究では、液状化における降伏曲面の変化を知る基礎的研究として、AE計測を利用し、実地盤の応力状態を忠実に再現できる中空円筒ねじり試験装置を用いて、非排水条件でせん断履歴を受けた砂の降伏曲面について検討したものである。

2.実験方法

実験に用いた試料は、珪砂（6号と7号を1：1の比で混合し、細粒分を除去したもの）であり、その物理的性質は、平均粒径0.22mm、土粒子密度2.62g/cm³、最大間隙比1.090、最小間隙比0.674であった。なお、試料はく

り返して使用を行った。今回使用した珪砂の粒度分布は、図-1の実線で示すようであり、5回使用後のものを破線で示す。図から、くり返し使用後の粒度分布にあまり差は見られないが、若干の細粒分の増加が見られるため、繰返し使用回数は最大5回とした。また、図中には比較のため、豊浦標準砂の粒径加積曲線を一点鎖線で示す。

使用した中空円筒ねじり試験装置の概要を図-2に示す。本試験装置では、軸力、トルク、内圧および外圧をそれぞれ独立に中空円筒供試体に作用させることができる。また、ペダスタル内に設置したAEセンサーにより供試体で発生したAEを計測した。

供試体は、内径50mm、外径100mm、高さ200mm、相対密度が約50% ($\rho_d=1.4\text{g/cm}^3$) となるように空中落下法で作製し、炭酸ガスの透過、脱気水の浸透、背圧 (2.0kgf/cm^2) 供給の手順を経て飽和させた。また、実験は、間隙水圧係数B値が95%以上の供試体についてのみ行った。この後、 $p'=4.0\text{kgf/cm}^2$ まで等方圧密を行い、約1.5時間の放置後、図-3に示す2種類の非排水せん断履歴を与えた。(1) 1方向 (片振り) の非排水単純せん断履歴：等方圧密後に非排水条件で $\tau=0.8\text{kgf/cm}^2$ のせん断履歴を与え (点A)、AEの発生が落ち着くまで約30分の放置を行う。(2) 2方向 (両振り) の非排水単純せん断履歴：点Aの応力状態から、せん断応力を反転させ、 $\tau=-0.8\text{kgf/cm}^2$ の単純せん断履歴を与え (点B)、AEの発生が落ち着くまで約30分の放置を行う。せん断履歴後は、排水状態に切り替え、 τ と p' を1:2の割合で等方応力状態となるまで段階的に、ゆっくりと除荷を行った。除荷に要した時間は約15分間であった。この後、所定の過圧密比まで等方的に除荷または再载荷を行い、排水条件で単純ねじりせん断試験を行った。なお、本研究では、常に $\sigma_a=\sigma_r=\sigma_\theta$ で制御を行ったため、中間主応力係数 $b=0.5$ である。また、主応力方向角 α はモーターの回転方向により変わり、時計方向 (以下、正方向とする) に回転させれば $+45^\circ$ 、反時計方向 (以下、負方向とする) では -45° となる。

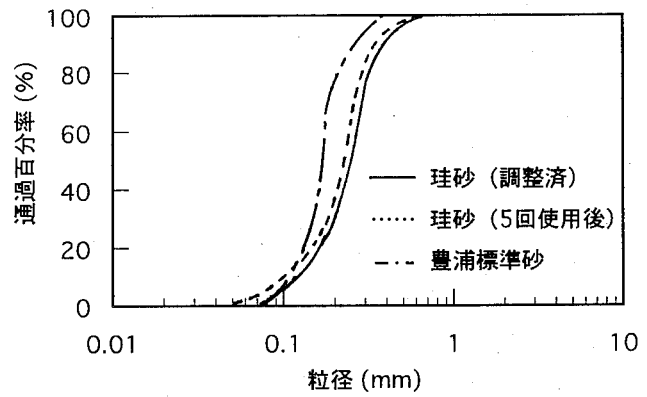


図-1 粒度曲線

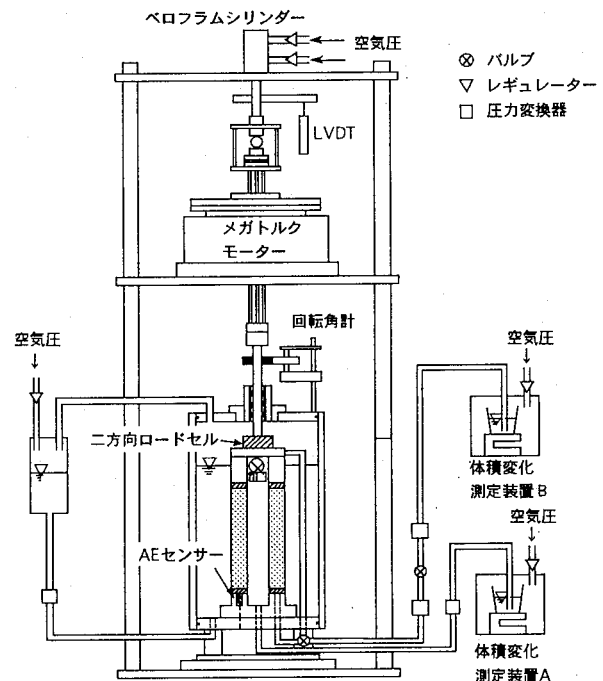


図-2 実験装置

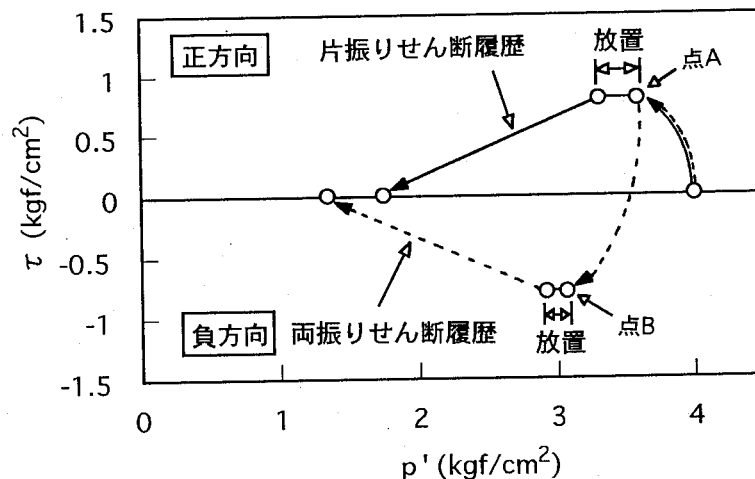


図-3 せん断履歴経路

3.実験結果

(1) 非排水単純せん断履歴過程

図4、5に片振りおよび両振りせん断履歴過程におけるせん断応力 τ 、AE計数率 ne の経時変化を示す。まず、片振りせん断履歴（図4）では、AEは載荷後、応力の増加と共に発生していくことが分かる。従って、供試体がせん断履歴の開始とともに塑性変形を起こしていると考えられる。次に、両振りせん断履歴（図5）では、AEは載荷直後から発生し始め、急増していくが、せん断応力が反転した直後（点I）は急激に減少していることが分かる。また、せん断応力が点IIに達すると、再びAEが発生し始める。これは、まず、点Iまでの載荷で、砂の弾性領域が変化し、点Iから逆方向への載荷で、応力状態が弾性領域を横切り、点IIを境に再び塑性領域に入ったものと考えられる。しかし、点Iから点IIへ応力が変化する間にもAEは若干発生しており、正側への載荷で形成された弾性領域は、まだ完全に定着していなかったものと推測される。また、両シリーズとも、AEの発生は履歴載荷終了後の放置中に減少していき、放置開始から約30分間でAEの発生はほとんどみられなくなった。除荷中にもAEの発生はみられず、この過程で採用した放置時間が、弾性領域を定着させるのに十分なものであり、また、除荷経路が弾性領域内であったものと考えられる。

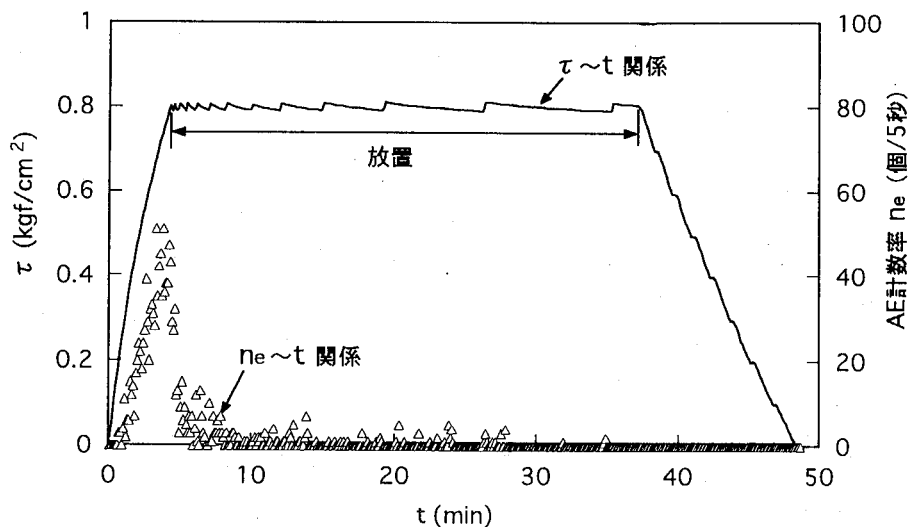


図4 経時変化（片振りせん断履歴）

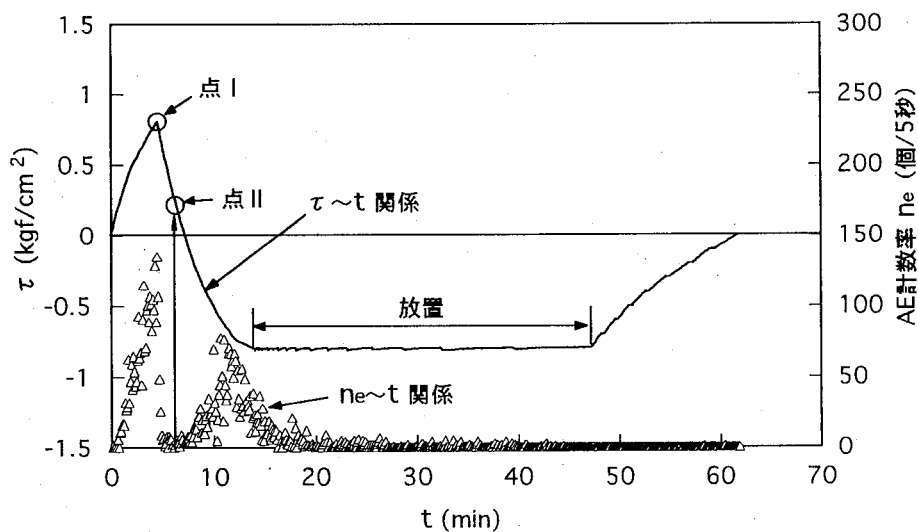


図5 経時変化（両振りせん断履歴）

(2) 排水せん断試験結果

図-6、7に、それぞれ片振りせん断履歴および両振りせん断履歴を与えた後の単純ねじりせん断過程で得られた応力～ひずみ関係の微小ひずみ部分を示す。なお、図中には、等方圧密履歴のみを受けた供試体の応力～ひずみ曲線も併せて示している。図から、せん断履歴を受けた砂の応力ひずみ曲線は、等方圧密砂とは異なり、剛性がせん断履歴の影響を受けていることが分かる。すなわち、最終せん断履歴方向と同方向（片振りせん断履歴：正方向、両振りせん断履歴：負方向）へのせん断では剛性が増加し、逆方向へのせん断では剛性が低下していることが分かる。せん断履歴による微小ひずみ部分の剛性の変化は、三軸試験による実験結果³⁾と同様の傾向である。

図-8にせん断中のAE計測結果の一例を示す。図は、片振りせん断履歴を受けた砂の $p'=2.0\text{kgf/cm}^2$ における正方向への単純ねじり試験結果である。図から、AEはせん断の初期から発生しているように伺える。そこで、図-8の微小ひずみ部分を拡大したものが図-9である。図から、せん断の初期にはAEは発生せず、せん断ひずみが増加していることが分かる。そして、せん断応力がある値に達すると、AEが発生し始めて、以後急増している。AEが塑性変形に伴って発生すると考えられるので、AEの急増点に対応するせん断応力 τ_y を降伏応力と決定した。他の試験についても同様に降伏応力を決定することができた。

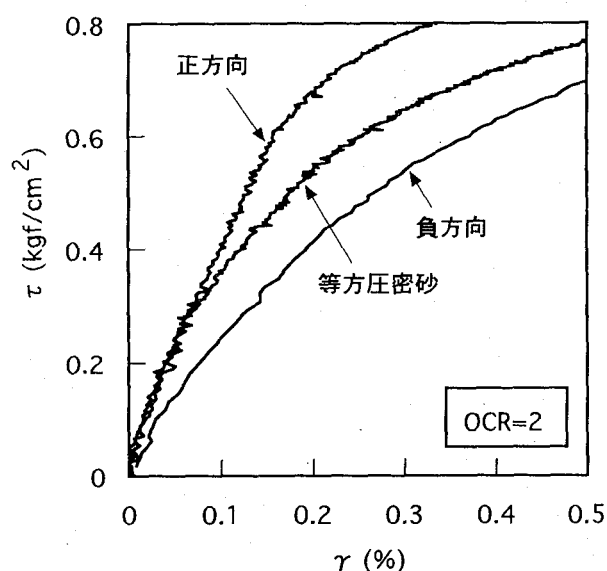


図-6 せん断試験結果
(片振りせん断履歴)

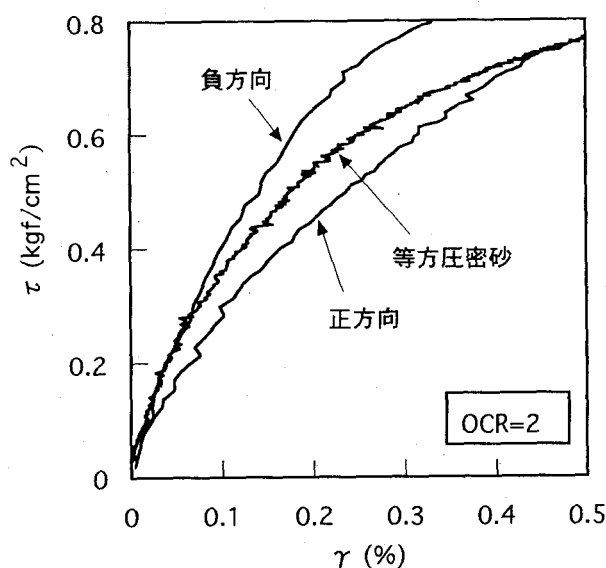


図-7 せん断試験結果
(両振りせん断履歴)

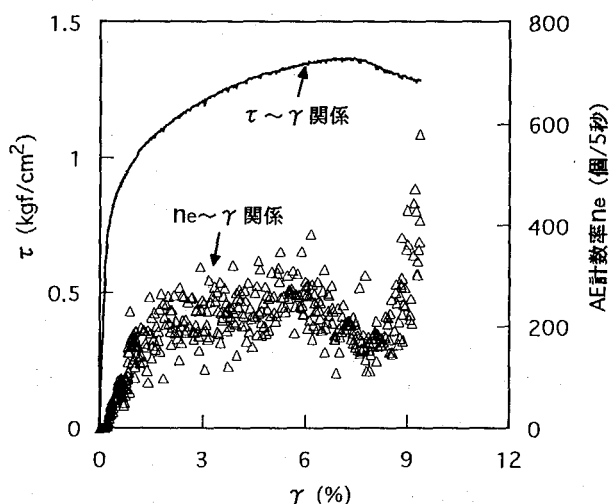


図-8 AE計測結果
($p'=2.0\text{kgf/cm}^2$ 、片振りせん断履歴)

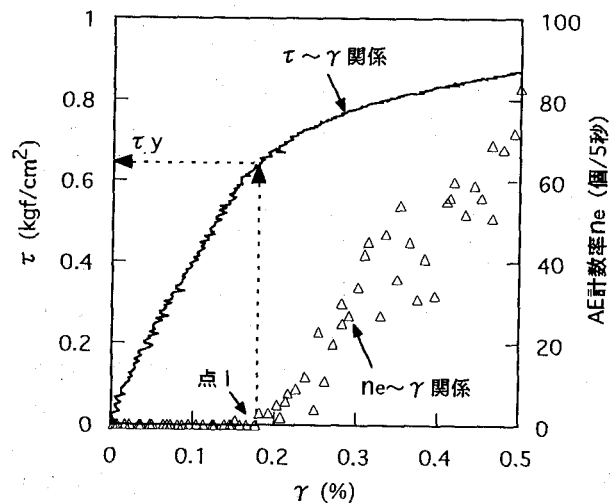


図-9 微小ひずみ部分

(3) 降伏曲面の形状変化について

図-10は、すべての試験から求められた降伏点を $\tau \sim p'$ の応力平面にプロットしたものである。図中には、等方圧密砂の降伏応力を併せて示している。図から、せん断履歴を受けた砂の降伏曲面は、等方圧密砂のものと大きく異なっていることが分かる。まず、片振りせん断履歴を受けた砂の降伏曲面は、正側へのせん断履歴により上方へと移動し、また、非排水せん断履歴による間隙水圧の増加（有効主応力の減少）により、 p' 軸原点方向に縮小していることが分かる。次に、両振りせん断履歴を受けた砂においては、引き続き負側へのせん断履歴により降伏曲面は下方へと移動し、さらに p' 軸原点方向へと縮小している。従って、非排水せん断履歴の繰返し回数を増やしていけば、弾性領域は次第に縮小していき、原点に近づいていくものと考えられる。

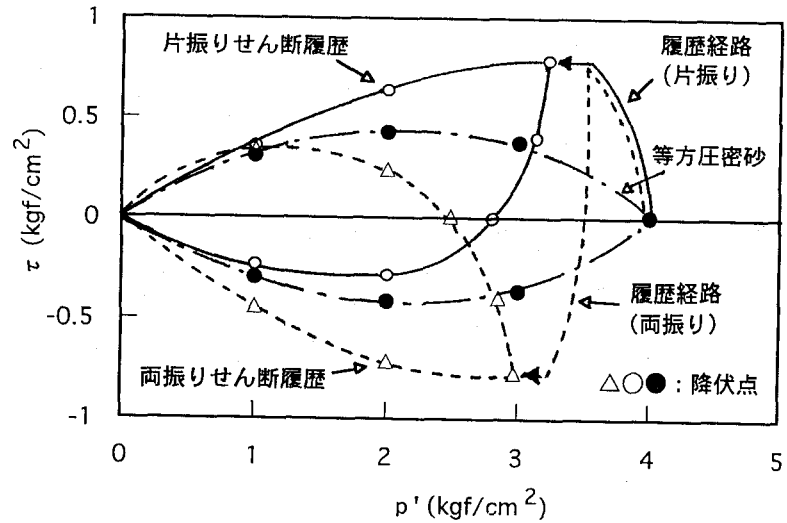


図-10 降伏曲面の形状変化

図-11は、繰返し非排水ねじりせん断試験におけるAE計測結果を示したものである。なお、図中における $\tau \sim p'$ 関係は、供試体が軟化挙動を起こすまでのものである。図より、AEは、载荷の開始とともに発生しているが、せん断応力が反転した直後にその発生が減少していくことがわかる。また、せん断応力が負に変わる前にAEが再び発生し始めており、このことから、応力状態が再び塑性領域に入ったものと考えられる。その後のサイクルにおけるAE特性も、1サイクル目と同様に、せん断応力が反転した直後はAEの発生が止まり、逆方向へのせん断が進行するに伴い、再びAEが発生している。これは、繰返しねじり载荷中に、次々と新しい降伏曲面が形成されていることを意味するものである。なお、図中における○プロットは、AEが発生し始める応力、すなわち、降伏応力を示したものである。

すでに述べた、非排水せん断履歴を受けた砂の降伏特性および図-11より求まる降伏応力から、繰返し载荷中における降伏曲面の変化を推定したものが、図-12のようである。図より、降伏曲面は、くり返し回数の増加とともに次第に上下方向に広がりながら、 p' 軸原点方向に縮小していくことが考えられる。

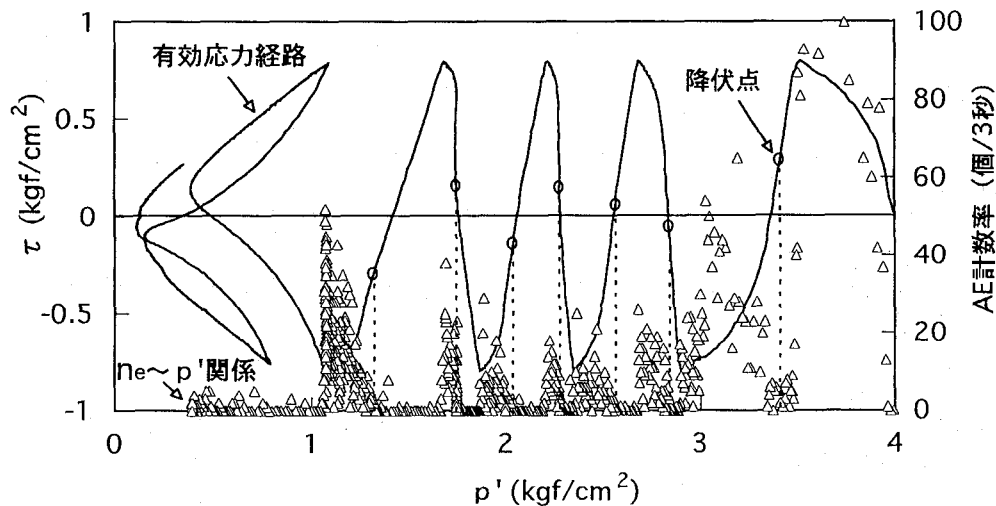


図-11 繰返しせん断中のAE計測結果

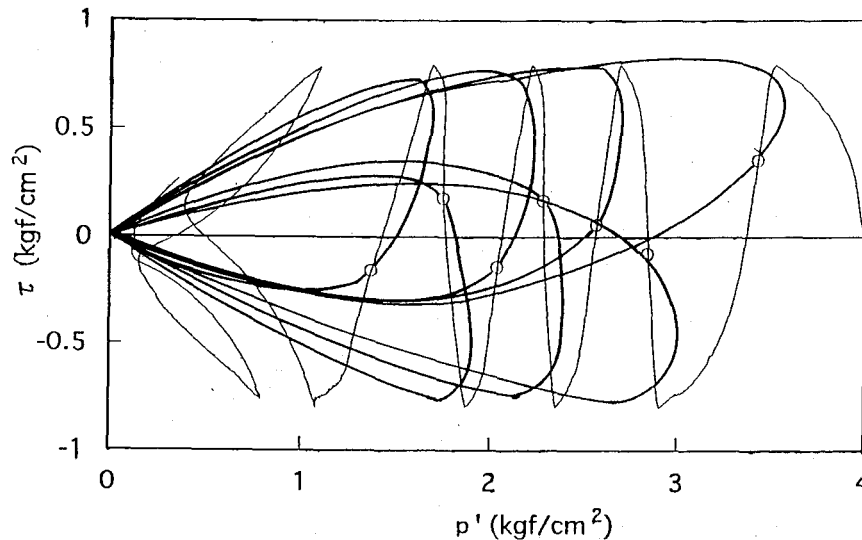


図-12 繰返しせん断中の降伏曲面

4.まとめ

本研究から得られた結論をまとめると以下のようである。

- 1) 1方向のみの片振り非排水せん断履歴を受けた砂は、等方圧密砂に比べて、せん断履歴と同方向（正方向）では初期剛性が増し、逆方向（負方向）では初期剛性が低下する。このような傾向は、三軸試験による試験結果³⁾と同様のものである。また、降伏曲面は、せん断履歴の方向（正方向）に移動し、 p' 軸原点方向に縮小する。
- 2) 2方向の両振り非排水せん断履歴を受けた砂は、等方圧密砂と比べて、最終せん断履歴方向と同方向（負方向）では初期剛性が増し、逆方向（正方向）では初期剛性が低下する。また、降伏曲面は、最終せん断履歴方向（負方向）に移動し、 p' 軸原点方向に縮小する。
- 3) 液状化過程においても三軸試験⁴⁾と同様にAE計測によって降伏応力を求めることができる。繰返し非排水ねじりせん断過程における降伏曲面形状は、正方向、負方向に繰返される载荷に伴い、上下に次々と移動しながら、 p' 軸原点方向に縮小していき、最後に液状化に達すると推定される。

参考文献

- 1) Tanimoto, K. & Tanaka, Y.: Yielding of Soil as Determined by Acoustic Emission, Soils and Foundations Vol.26, No.3, pp.69-80, 1986
- 2) Tanaka, Y. & K. Shirakawa: Evolution of Yield Locus during the Undrained Cyclic Loading of Sand, First Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Eng. (Is-Tokyo'95), Vol.1, 257-264, 1994
- 3) 田中泰雄、平川和之、福田雅人：繰返し非排水せん断による砂の降伏応力の変化、第27回土質工学研究発表会、pp.461-462、1992
- 4) 白川和靖、田中泰雄、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30回土質工学研究発表会、pp.481-482、1995

著者：1) 田中泰雄、都市安全研究センター、助教授；2) 前田和亨、前田建設工業株式会社（前神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程学生）；3) 松本正暁、工学部建設学科、学生