# 三軸試験機および中空ねじり試験機を用いた砂の非排水繰返しせん断挙動比較

名古屋大学　学生会員　○黒川雄一　堀利明　小林直樹
名古屋大学　正会員　　中井健太郎　中野正樹　野田利弘

## 1．はじめに

砂地盤で生じる地震被害としては、液状化現象が有名である。従来から、砂地盤の耐震性能を評価するために、非排水繰返しせん断試験結果から液状化強度特性を調べている。本報では、密度・拘束圧は等しいが、供試体作成方法の異なる砂供試体の液状化強度特性を比較するとともに、せん断挙動の差異について考察する。さらに、主応力載荷型せん断試験である三軸試験とせん断応力載荷型せん断試験である中空ねじり試験結果を特に変形モードに着目しながら比較する。

## 2．試験に用いた試料の物理的性質と実験方法

試験に用いた試料は三河珪砂 6 号で、物理特性を表-1 に示す。供試体作成方法は様々にあるが、ここではモールド内に乾燥砂を空中落下させ、側面を四方から木槌でたたいて締め固める乾燥堆積法（Dry deposition, DD 法）および乾燥堆積法で作成した供試体上面に細い金属棒（直径 1.5mm）を供試体底部まで数十回突き刺した棒突き法の 2 通りで実施した。乾燥堆積法は、試料堆積時に鉛直方向（圧縮方向）に異方性が発達すると考えられるが、棒突き法は棒の抜き差しによって堆積時に発達した異方性が消滅すると考えられる。初期比体積 $v_0$=1.84（相対密度 $Dr$=55%）を目指した供試体を用いて、圧密圧力 294kPa（側圧 490kPa、背圧 196kPa）で約 10 分間等方圧密した後、非排水繰返しせん断試験を行った。繰返し載荷はすべて、応力振幅 90kPa（せん断応力比 $\tau/p'_0=0.15$ ）繰返し周期 $T$ =60 秒の正弦波形で与えた。

表-1 試料の物理特性

| | |
|---|---|
| 土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm$^3$) | 2.65 |
| 平均粒径 $D_{50}$ (mm) | 0.022 |
| 均等係数 $Uc$ | 1.79 |
| 曲率係数 $Uc'$ | 0.926 |
| 最大間隙比 $e_{max}$ | 1.04 |
| 最小間隙比 $e_{min}$ | 0.65 |

## 3．供試体作成方法が異なる砂の非排水繰返し三軸圧縮／伸張試験

図-1 に、乾燥堆積法の試験結果（$v_0$=1.841）を示す。有効応力パスを見ると、繰返しとともに平均有効応力 $p'$ は次第に減少し（過剰間隙水圧の上昇）、やがて $q=p'=0$ 近辺を通りながら「くの字」型の繰返し挙動、サイクリックモビリティを示す。サイクリックモビリティに達するまでの繰返し回数は、15 回であった。繰返し初期は軸ひずみがほとんど発生しないが、サイクリックモビリティ中は剛性の増大（下に凸の圧縮線）を描きながら、圧縮（$q$>0）・伸張（$q$<0）側両方向に進展していく。軸ひずみの進展は伸張側で特に顕著であり、最終的には伸張側で供試体がネッキング（括れ）を生じ破壊に至る。1 波ごとのひずみの進展量はほぼ均等であった。サイクリックモビリティ中の有効応力パスの勾配 $q/p'$ を調べると、圧縮側で 1.50、伸張側で 1.11 と異なることがわかる。図-1 は繰返しせん断を圧縮側から開

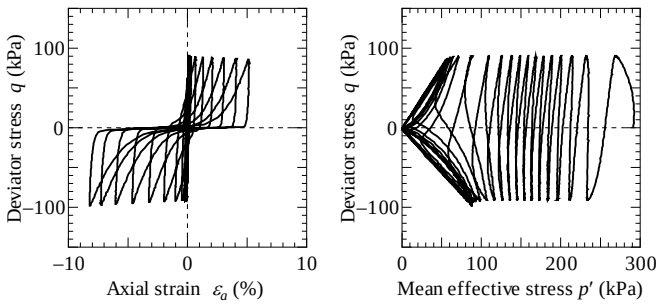


図-1　DD 法(圧縮開始)の非排水繰返しせん断挙動

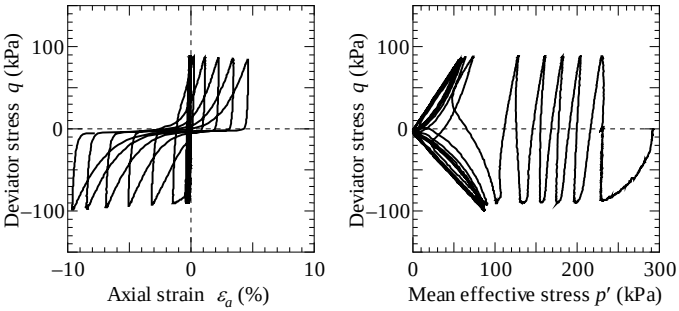


図-2　DD 法(伸張開始)の非排水繰返しせん断挙動

始したが、図-2 は伸張側から開始したときの試験結果（$v_0$=1.841）である。図-1 と比較すると、繰返し初期の平均有効応力減少の程度が大きく、少ない繰返し回数（7 回）でサイクリックモビリティに達する（液状化強度が小さい）。サイクリックモビリティ到達後の挙動は有効応力パスの勾配、ひずみの進展の仕方ともによく似ている。サイクリックモビリティ到達前の挙動の差異は、供試体作成時に発達した異方性の影響だと考えられる。図-3 に、棒付き法の試験結果（$v_0$=1.834）を示す。サイクリックモビリティに達するまでの繰返し回数は 8 回と、乾燥堆積法に比べて小さく、液状化強度が小さいことがわかる。サイクリックモビリティ中の有効応力パスの勾配は乾燥堆積法と違いはないが、軸ひずみの進展の仕方は伸張側への偏りが小さく、圧縮／伸張両方向へ同程度進展していくことがわかる。

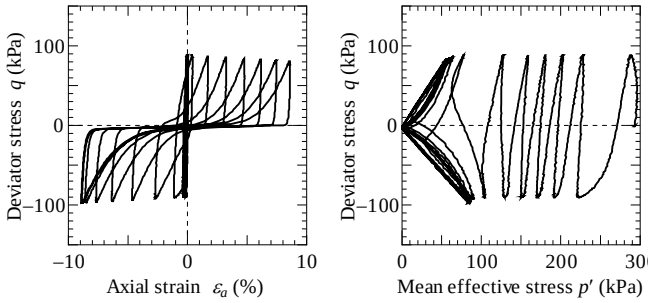


図-3　棒突き法の非排水繰返しせん断挙動

## 4．中空ねじり試験機を用いた砂の非排水繰返しせん断挙動

三軸繰返しせん断試験と中空ねじり繰返しせん断試験の違いとして、せん断力の作用する方向が考えられる。三軸試験では圧縮力を加えることで間接的にせん断するため、最大せん断力が水平方向に作用しない。一方、中空ねじり試験では供試体に直接せん断力を与えるため、せん断力が水平方向に作用する。そこで、両試験結果が非排水繰返しせん断挙動に与える影響について調べるために、三軸試験結果と初期比体積および応力振幅比の等しい条件下で中空ねじり試験を実施した。供試体は乾燥堆積法で作成している。図-4 に中空ねじり試験の結果（$v_0$=1.845）を示す。なお、縦軸はせん断応力 $\tau$ で整理している。

試験結果を見ると、三軸試験同様、繰返しとともに $p'$ が減少してサイクリックモビリティを示す。しかし、同比体積、同応力振幅で実施したにもかかわらず、三軸試験結果と比較するとサイクリックモビリティに達するまでの繰返し回数は著しく多くなり、中空ねじり試験の方が液状化強度は大きくなることがわかる。せん断力が水平方向に作用するため、圧縮側と伸張側で挙動の差異は見られない。繰返しの増加とともに、供試体中央がねじれながら括れてゆき、供試体上部から下部に向けて斜めのしわが複数入る。サイクリックモビリティ中の勾配を比較すると、三軸試験は圧縮で $\tau/p' = 0.75$、伸張で 0.56 に対して、中空ねじり試験は 0.71 と三軸試験結果の圧縮側にほぼ等しい。

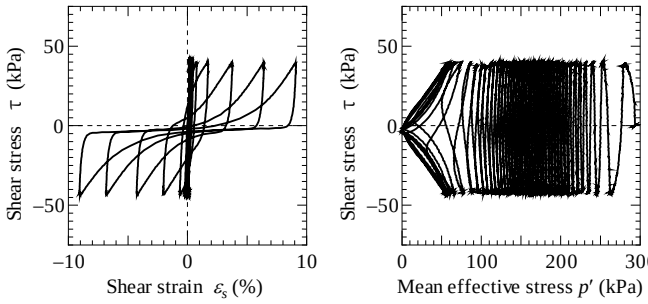


図-4　中空ねじり試験の非排水繰返しせん断挙動

## 5．まとめと考察

実験結果から、①供試体作成方法の差異によって、サイクリックモビリティに到達するまでの繰返し回数および軸ひずみの進展の仕方が異なる、②三軸試験と中空ねじり試験ではサイクリックモビリティ中の勾配が異なる、ことがわかった。今後、①については、実験結果の差異を供試体作成時に発達した骨格構造の程度の差として捉え、名古屋大学提案の SYS カムクレイモデル [1)]に基づいて記述することを試みる。②については、供試体の変形モードが大きく異なるので、どこまでが要素挙動でどこから境界値問題として捉えなくてはならないのか、3 次元の FEM 解析を通じて考察していきたい。

**参考文献**　1）Asaoka A. (2003) : Consolidation of Clay ..., Proc.of 12th Asian Regional Conf..., Vol.2, pp.1157-1195.