

**中空ねじりせん断試験装置を用いた
砂の液状化に及ぼす初期異方性の影響に関する基礎的研究**
**Basic study on Influence of initial anisotropy on liquefaction of sand
using hollow cylindrical torsional shear test apparatus**

岡田麻希¹, 山田正太郎¹, 野田利弘², 中野正樹¹

1 名古屋大学大学院・工学研究科・s-yamada@civil.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学・減災連携研究センター

概 要

初期異方性が砂の液状化挙動に及ぼす影響を検討するにあたり、主応力方向と中間主応力の大きさを自由に変化させて実験を行うことが可能な中空ねじりせん断試験装置を用いて実験を行った。実験を行うにあたり、はじめに供試体寸法が実験結果に与える影響について考察した。供試体寸法の影響を検討した結果より外径 10cm, 内径 6cm, 高さ 15cm の供試体を用いて、主応力方向の設定を系統的に変化させて繰返し非排水せん断を与えたところ、初期異方性を有する砂では、最大主応力方向と堆積面のなす角が小さいほど、ゆるい砂に似た挙動を示すことが分かった。

キーワード：液状化、初期異方性、主応力方向、砂、中空ねじりせん断試験装置

1. はじめに

近年、液状化挙動や再液状化挙動に対する異方性の重要性が認識されつつある。例えば、Yamada et al.¹⁾は、三軸試験装置を用いて液状化中には異方性が規則的かつ連続的な変化を生じていることを示すと共に、液状化終了時の異方性の状態が再液状化抵抗を大きく左右することを示した。このような実験結果に基づいて、液状化現象を合理的に記述しうる弾塑性構成式を開発するためには、より一般的な応力条件の下で、異方性の性質ならびに異方性が砂の液状化および再液状化挙動に与える影響について調べることが重要になってくる。そこで本研究では、主応力方向や中間主応力の大きさを任意に設定することが可能な中空ねじりせん断試験装置を用いて、初期異方性が砂の液状化挙動に及ぼす影響について調べた。

2. 実験条件

2.1 実験で用いた試料と供試体

実験には豊浦砂(土粒子密度 $\rho_s=2.646\text{g/cm}^3$, 最大間隙比 $e_{\max}=0.985$, 最小間隙比 $e_{\min}=0.639$)を用いた。供試体は空中落下法を用いて作成した。用いた供試体の寸法は、図1に示すように、肉厚(外径 8cm, 内径 4cm, 高さ 8cm)なもの、薄肉(外径 10cm, 内径 6cm)で高さが 10cm, 15cm, 20cm

の供試体の 4 種類である。3.において供試体形状が実験結果に与える影響について調べ、最も妥当な供試体寸法を決定する。4.では3.で最適と判断した寸法の供試体を用いて初期異方性が砂の液状化に与える影響について調べる。

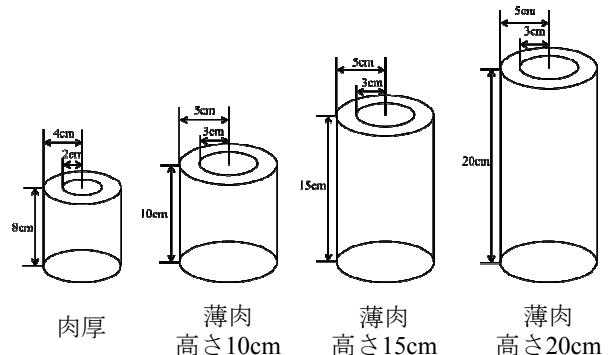


図1 供試体寸法概略図

2.2 実験に用いた試験装置と制御方法

本研究で用いた中空ねじりせん断試験装置は、供試体上端面に作用するトルクを制御するトルク制御と、供試体上端面の回転角を制御する回転角制御が可能である。いずれもサーボ機構により制御が行われる。今回の実験では回転角制御を採用した。また、中空ねじりせん断試験装置では、

トルクないしは回転角に加え、内側圧、外側圧および鉛直荷重を制御することにより、主応力方向と中間主応力を任意に設定することができる。回転角制御を採用する本研究では、供試体上端面を一定の速度で回転させることにより発生するトルクに対し、以下の条件が満たされるように、内側圧、外側圧、鉛直荷重を電空変換器を用いて、PCにより自動制御した。

2.3 実験条件

本研究では、1)平均応力、2)主応力方向、3)中間主応力とその他の主応力の割合がせん断中に変化しないように、軸差応力振幅一定の繰返し非排水せん断を行った。平均応力は $p=196\text{kPa}$ とした。供試体の半径方向軸を中間主応力軸とし、残る二つの主応力軸を図2に示すいずれかの角度に設定した。また、純粹に主応力方向の影響だけを見るために、中間主応力は最大主応力と最小主応力のちょうど半分になるような条件 ($b=(\sigma_{\text{mid}}-\sigma_{\text{min}})/(\sigma_{\text{max}}-\sigma_{\text{min}})=0.5$) でせん断を行った。

なお、上記の条件下では、最大主応力方向が繰返しせん断中に、等方応力状態を経て 90° 入れ替わる。例えば、図2(2)に示す条件では、供試体上端面を時計まわりにねじっているときには鉛直軸と最大主応力軸のなす角度が 30° となり、供試体上端面を反時計まわりにねじっているときには鉛直軸と最大主応力軸のなす角度が 60° となる。以下では鉛直軸と最大主応力軸のなす角を最大主応力角 α として表記する。

3. 供試体寸法が実験結果に与える影響

3.1 限界状態線の傾きと中間主応力の関係

限界状態線の傾きは中間主応力が最大主応力に近いほど大きく、最小主応力に近いほど小さくなると言われている（例えば、Matsuoka and Nakai²⁾）。本研究では、すべての試験において、中間主応力が常に最大主応力と最小主応力のちょうど半分の値となるような応力状態を設定している。このような応力状態では、限界状態線の傾きは主応力方向に依存せず、一定の値をとると考えられる。

3.2 限界状態線の傾きから見た供試体寸法の影響

図1に示した4種類の供試体寸法それぞれに対し、最大主応力角を $30^\circ\text{-}60^\circ$ 、 $75^\circ\text{-}15^\circ$ 、 $45^\circ\text{-}45^\circ$ と設定した場合の実験結果を図3に示す（図中に示した角度は最大主応力角 α の値を表している）。ただし、ここでの実験結果は、1本の供試体に対して主応力方向を変えて3度試験を行った結果である（図3では、上から1回目、2回目、3回目の順で示している）。限界状態線の傾きを検証する上では、1本の供試体を用いて複数回実験を行っても影響はないと思われる。また、図3の結果では、(a)～(d)で液状化に至るまでの繰返し回数が大きく異なっている。これは、それぞれの実験で、相対密度およびB値が異なっているためである。これらの違いが限界状態線の傾きに何らかの影響を与

えていることも考えられる。しかし、相対密度をそろえ、B値を高めて行った実験結果においても限界状態線の傾きは、図3の結果と変わらなかつたため、限界状態線の傾きを検討していく上では結論に影響を与えないと思われる。以上の2点を踏まえて、限界状態線の傾きに注目して図3を見ていく。

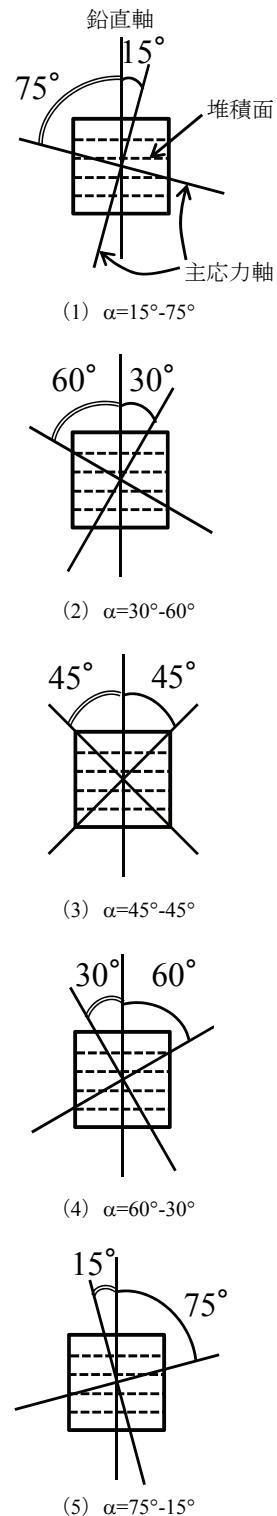


図2 主応力軸の方向

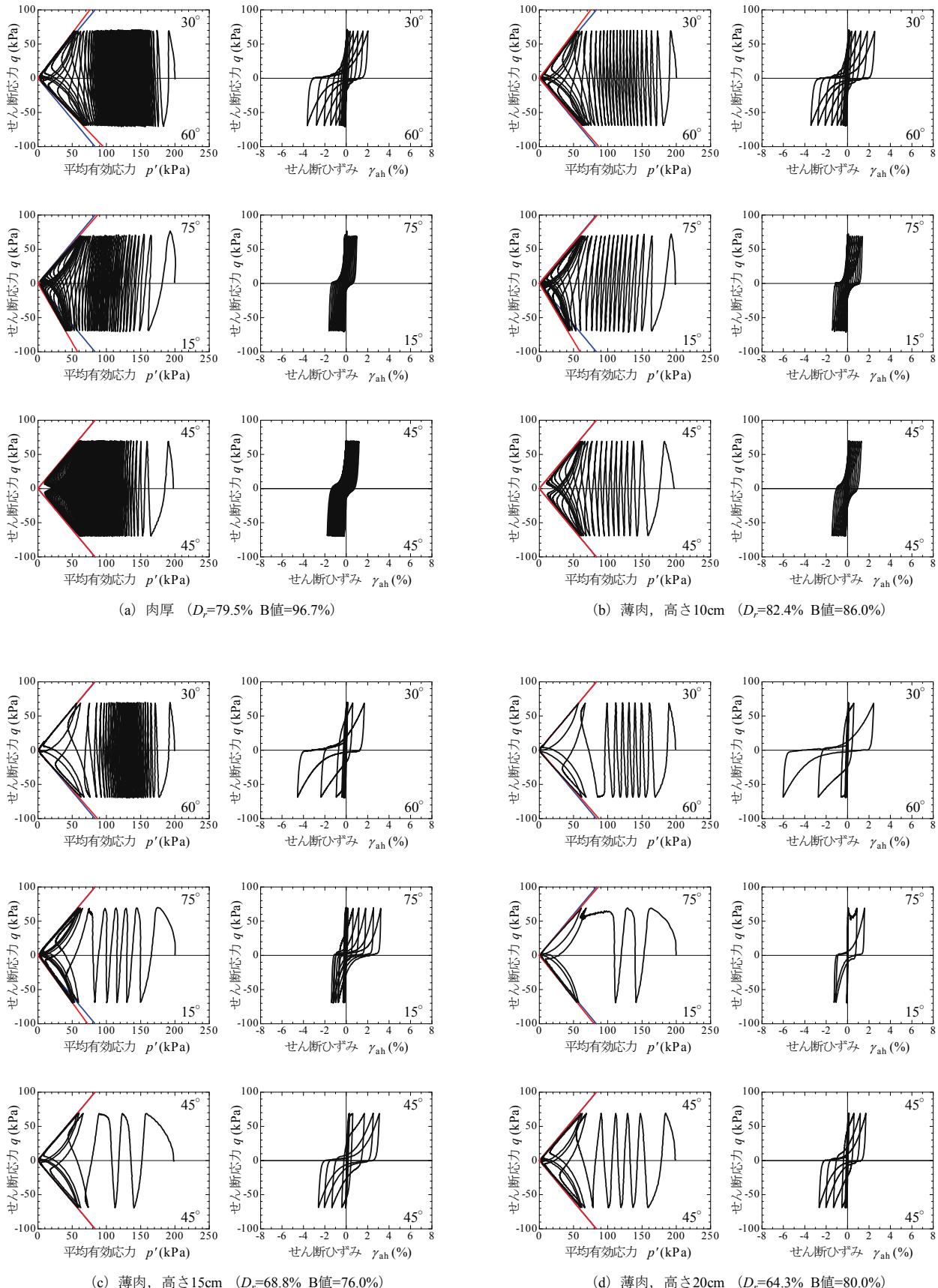


図3 供試体寸法を変化させた繰返し非排水せん断試験結果

はじめに、最大主応力角が 45° の結果を見ると、限界状態線の傾きは供試体寸法によらず一定になっていることが分かる。それに対して、最大主応力角が $15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ の場合では供試体寸法によって限界状態線の傾きが異なっている。図3では、最大主応力角 45° の場合の限界状態線を青線で、それぞれの実験結果から得られた、 45° 以外の最大主応力角に対する限界状態線を赤線で示し、限界状態線の傾きの比較を行う。図3を見ると、供試体が肉厚の(a)の場合では、主応力方向によって限界状態線の傾きが大きく異なっていることが分かる。特に最大主応力角が 15° の結果にその影響が顕著に現れている。3.1で述べたように、試験中、中間主応力が一定である本研究では、限界状態線の傾きは常に一定となると考えられるが、図3の実験結果では、最大主応力方向の違いに応じて限界状態線の傾きが異なっている。限界状態線の傾きが主応力方向によって異なってしまった原因としては、次の2点が考えられる。1) 供試体の半径方向に応力が分布する影響が顕著に現れている。2) 供試体の端面に摩擦が発生することにより供試体に余計な応力が発生している。このような影響を受けた場合、供試体内の応力状態がマスとして整理した応力状態と大きく異なっており、中間主応力が設定した状態にならない影響が限界状態線の傾きに違いを与えていていると考えられる。また、(a)~(d)の結果を比較すると、供試体の厚さを肉厚から薄肉に、また薄肉な供試体で高さを高くしていくことにより、限界状態線の傾きの違いが改善されていくことが分かる。そこで次に、主応力角と限界状態線の傾きの関係をまとめたものを図4に示し、供試体寸法が限界状態線の傾きに及ぼす影響について具体的に検証していく。

はじめに、供試体の厚さによる限界状態線への影響を検証する。厚さの影響を検証するにあたり、表1より、外径と高さの比が同じで、外径に対する内径の大きさが異なる、肉厚な供試体と薄肉で高さ10cmの供試体を用いた実験結果の比較を行う。

表1 供試体寸法の諸量

	外径:高さ	内径/外径
肉厚	1:1	0.5
薄肉、高さ10cm	1:1	0.6
薄肉、高さ15cm	1:1.5	0.6
薄肉、高さ20cm	1:2	0.6

赤線で示した肉厚の供試体と、緑線で示した薄肉で高さ10cmの供試体の結果を比較すると、最大主応力角が 60° と 75° の場合では、供試体の厚さを薄くしたことにより、限界状態線の傾きの違いが最大主応力角 45° の結果に近づいていることが分かる。このような改善が見られた理由としては、供試体の厚さを薄くしたことにより、供試体内の半径方向の応力状態が不均質になるのを軽減できたためであると考えられる。次に、供試体の高さによる影響を検証する。高さによる影響を検証する際には、表1より外径

に対する内径の大きさが同じで、外径と高さの比が異なる、薄肉で高さが10cm、15cm、20cmの供試体を用いた実験結果の比較を行う。3つの供試体の結果を比較すると、高さが15cmと20cmの供試体を用いた場合、高さ10cmの供試体を用いた場合に見られる最大主応力方向による限界状態線の傾きの大きな違いが見られなくなっていることが分かる。これは、供試体の高さを高くすることにより、供試体端面の摩擦の影響を受けにくくなつたため、改善が見られたと考えられる。限界状態線の傾きという観点では、薄肉で高さが20cmの供試体を用いて実験を行うことが妥当であると言える。なお、主応力角 45° の結果では、供試体の厚さによる影響も高さによる影響も受けていない。その理由としては、次の2点が考えられる。1) 内側圧および外側圧の大きさが試験中常に同じであるため、半径方向に応力が分布しにくく、均質に近い応力状態となっている(ただし、水平面に働く円周方向のせん断応力 τ を除く)。2) 内側圧および外側圧が同じ大きさであるため、供試体が半径方向に膨らむ、また縮むといった変形が起こりづらく、端面における半径方向の摩擦が発生しにくくなっている。以上の2点より、主応力角が 45° の場合では、供試体寸法によらず限界状態線の傾きが一定であったと考えられる。

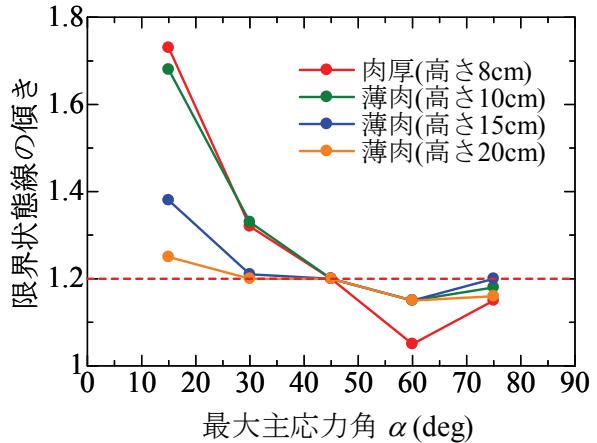


図4 主応力角と限界状態線の傾きの関係

3.3 実験中の供試体形状から見た供試体寸法の影響

3.2で限界状態線の傾きより供試体寸法の影響を検証した結果を考慮して、薄肉で高さ20cmの供試体を用いて実験を行った。実験結果を図5に、試験中の供試体の様子を写真1に示す。写真1は、図5の結果において、液状化中に剛性が回復せず、せん断ひずみが伸び続けているとき(図5、点(A))の供試体を撮影したものであるが、供試体上部の試料が下方に移動し、供試体形状が崩れていることが分かる。限界状態線の傾きという観点では、薄肉で高さ20cmの供試体を用いることが妥当だと思われた。しかし、供試体形状が崩れるという影響が生じたため、次に、薄肉で高さ15cmの供試体を用いて実験を行った。実験結果を図6に、試験中の供試体の様子を写真2に示す。写真

2は、図6において、せん断ひずみが10%程度生じているとき(図6、点(B))の供試体を撮影したものである。写真を見ると、せん断ひずみが大きく生じているにも係わらず、供試体形状は維持されていることが分かる。高さ15cmの供試体は、3.2で限界状態線の傾きを検証した結果においても、高さ20cmの場合と大きな違いは見られなかった。そのため、実験中の供試体形状も考慮した場合、薄肉で高さ15cmの供試体を用いて実験を行うことが妥当であると思われる。

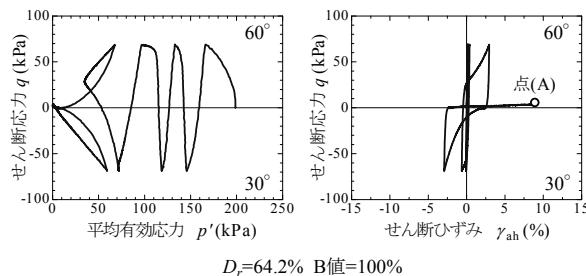


図5 繰返し非排水せん断試験結果(薄肉、高さ20cm)



写真1 供試体の様子(薄肉、高さ20cm)

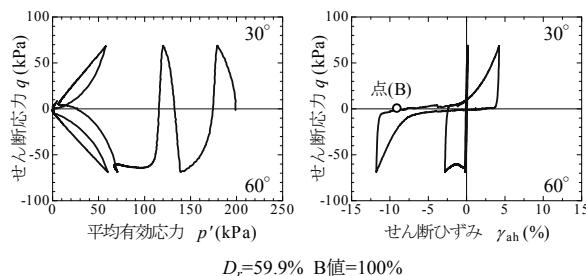


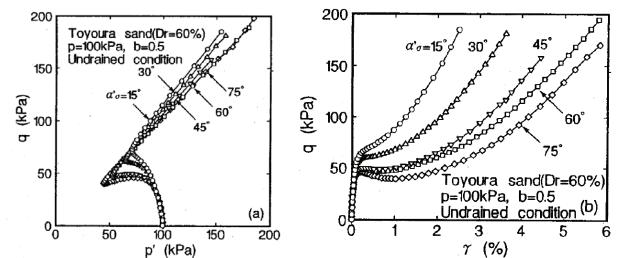
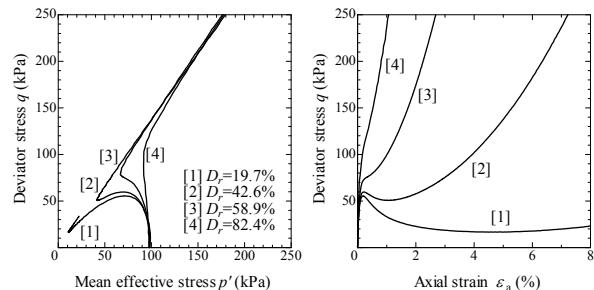
図6 繰返し非排水せん断試験結果(薄肉、高さ15cm)



写真2 供試体の様子(薄肉、高さ15cm)

4. 主応力方向が初期異方性を有する砂の液状化挙動に及ぼす影響

初期異方性を有する砂の液状化挙動に対して主応力方向が及ぼす影響を示すにあたり、はじめに、既往の研究を参考する。図7は中田ら³⁾が中空ねじりせん断試験装置を用いて行った、単調非排水せん断試験結果である(図中に示した角度は最大主応力角 α である)。最大主応力角が大きくなる、すなわち堆積面と平行に近い方向に最大主応力軸がある状態ほど、平均有効応力の低下が著しいことが分かる。図8は三軸試験装置を用いて相対密度の異なる供試体に対して行った単調非排水せん断試験結果である。図7と図8を比較してみると、最大主応力角が大きいときに現れる、いったん原点に向かって軟化する挙動が、相対密度が低い場合(ゆるい砂)の挙動とよく似ていることが分かる。

図7 単調非排水せん断挙動に与える主応力方向の影響
(中空ねじりせん断試験、中田ら³⁾)図8 密度の異なる砂の繰返し非排水せん断試験結果
(三軸試験、Yamada et al.¹⁾)

次に、本研究で行った主応力方向の設定を変化させた繰返し非排水せん断試験の結果を図9に示し、既往の研究で得られているような挙動が砂の繰返し非排水せん断挙動にどのような影響を及ぼすのか示していく。実験には、3.2および3.3で供試体寸法が実験結果に与える影響を検証した結果より、薄肉で高さ15cmの供試体を用いた。図9の実験結果を見ると、(a) $\alpha=30^\circ\text{--}60^\circ$ 、(c) $\alpha=60^\circ\text{--}30^\circ$ のどちらの場合においても、最大主応力角が 30° の方向にせん断した時に比べ、 60° の方向にせん断した際に間隙水圧が発生しやすく、平均有効応力の低下が顕著に現れている。一方で、(b) $\alpha=45^\circ\text{--}45^\circ$ の場合では最大主応力角が常に 45° であるため、有効応力経路はせん断方向によらず、平均有効応

力軸を挟んで対称な挙動をしていることが分かる。以上より、繰返し非排水せん断時においても単調非排水せん断時と同様に最大主応力角が大きくなる,すなわち堆積面と平行に近い方向に最大主応力軸がある状態ほど、平均有効応力が大きく低下し、ゆるい砂に似た挙動を示すことが分かった。Yamada et al.¹⁾は、液状化中は異方性がめまぐるしく変化することを実験的に示している。一方、図9の(a)や(c)で見られる非対称な有効応力経路は、液状化するまでの繰返し非排水せん断過程においては、初期異方性が大きな変化を受けないことを示している。

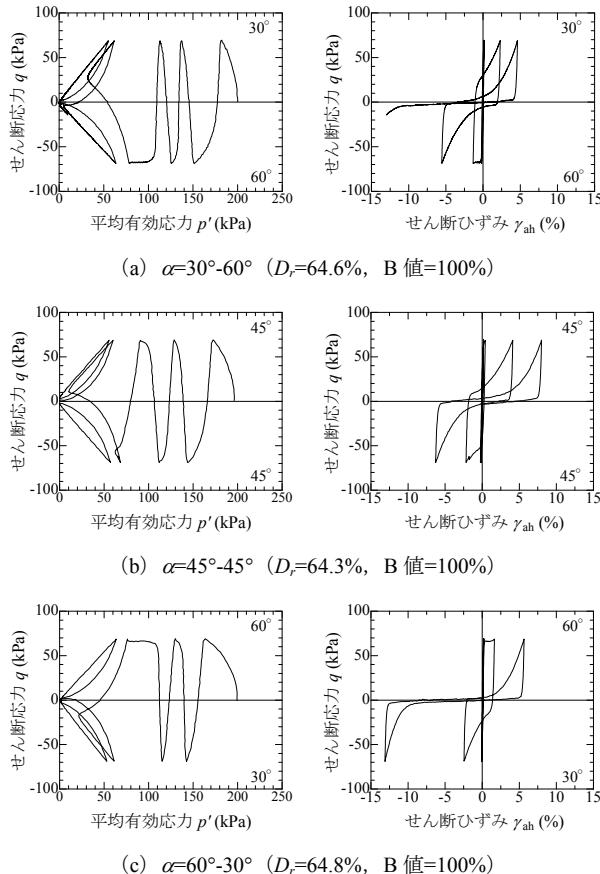


図9 主応力方向を変化させた繰返し非排水せん断試験結果

なお、繰返し非排水せん断試験では、一度等方応力状態を経て、最大主応力方向と最小主応力方向を入れ替わるため、(a) $\alpha=30^\circ\text{-}60^\circ$ と (c) $\alpha=60^\circ\text{-}30^\circ$ の実験は、せん断開始時

の最大主応力方向と最小主応力方向が反対であるのみで、実験中に供試体が受ける応力履歴は基本的に同じである。このような面から図9の実験結果を見ると、(a) $\alpha=30^\circ\text{-}60^\circ$ と (c) $\alpha=60^\circ\text{-}30^\circ$ の2つの結果が対称的な挙動をしていることで、供試体内が想定したような応力状態になっており、妥当な実験が行われていることを確認することもできた。

5. まとめ

本研究では、中空ねじりせん断試験装置を用いて主応力方向の設定を変化させて繰返し非排水せん断試験を行った。実験を行うにあたり、はじめに最も実験に適した供試体寸法を検討した。その結果、供試体の厚さを薄くすることにより供試体内部の応力状態が半径方向に不均質になることを軽減でき、また、高さを高くすることにより端面摩擦の影響を受けにくくなるため、薄肉で高さの高い供試体を用いることが、供試体を理想的な応力状態に近づけるためには有効であることが分かった。しかし、供試体の高さが高い場合、実験中に供試体形状が崩れることがあるため、その点も考慮すると、今回用いた供試体の中では外径10cm、内径6cm、高さ15cmの供試体を用いて実験を行うことが妥当であると考えられる。また、主応力方向を変化させ繰返し非排水せん断試験を行った結果、単調非排水せん断時と同様に、最大主応力角が大きくなる、すなわち堆積面と平行に近い方向に最大主応力軸がある状態ほど、平均有効応力が低下しやすく、ゆるい砂に似た挙動が現れることが分かった。なお、この結果より液状化するまでの繰返し非排水せん断過程では、初期異方性が大きな変化を受けないことが分かった。

参考文献

- 1) Yamada, S., Takamori, T. and Sato, K.: Effects on liquefaction resistance produced by changes in anisotropy during liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol. 50, No. 1, pp. 9-25, 2010.
- 2) Matsuoka, H. and Nakai, T.: Relationship among Tresca, Mises, Mohr-Coulomb and Matsuoka-Nakai failure criteria, *Vol. 25, No. 4*, pp. 123-128, 1985.
- 3) 中田幸男, 安福規之, 村田秀一, 兵動正幸, 永島剛圭: 主応力方向固定条件下における異方性砂の非排水・排水せん断挙動, 土木学会論文集, No. 511/III-30, pp.209-220, 1955.著作権