

中空ねじりせん断試験装置を用いた砂の異方性に関する実験

名古屋大学 (正)岡田麻希 (正)山田正太郎 (フェロー)中野正樹 (フェロー)野田利弘

1. はじめに Yamada et al.¹⁾は三軸試験装置を用いて実施した砂の実験結果を元に、液状化中に異方性が規則的に変化していることを示した。このことは構成式によるサイクリックモビリティの記述において、異方性が重要な役割を果たすことを予見させる。そこで、構成式の高度化を視野に、中空ねじりせん断試験装置を用いて、三軸試験装置では実現し得ないより一般的な応力状態の下で異方性が変動する様子を捉えることを目的に実験を行った。

2. 実験方法 実験は中空ねじりせん断試験装置を用いて行った。使用した試験装置はトルクおよび鉛直荷重を空圧サーボで、内側圧、外側圧、背圧を電空レギュレーターで、PCより自動制御する機構となっている。試料には豊浦砂(最大間隙比 $e_{\max}=0.985$, 最小間隙比

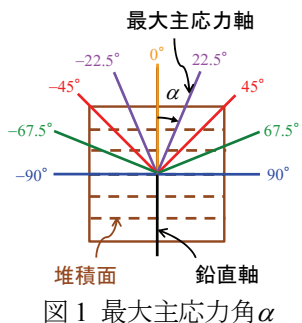


図1 最大主応力角α

$e_{\min}=0.639$)を用いた。供試体の大きさは高さ16cm, 外径8cm, 内径6cmである。供試体は基本的に空中堆積法(モールドを打撃して密度を調整しながら、徐々に試料を堆積)により作製した。ただし、一部の実験では、供試体作製過程において、堆積面を崩すべく細い棒で突いた供試体(棒付き法)も用いた。せん断は、平均応力 p , 中間主応力係数 b , 最大主応力角 α を一定に保つ条件下で行った。具体的には、いずれの試験においても $p=196\text{kPa}$, $b=0.0$ とし, α については図1に示すいずれかの値(ただし, 90° と -90° は同じ条件)に設定した。 $\alpha=0.0, 90.0^\circ$ のときは軸変位を, その他の場合は回転角を定率で変化させることでせん断した。メンブレン補正は施している。以下では、供試体作製時に与えられる初期異方性が非排水せん断挙動に与える影響について確認した後、せん断履歴によって誘導される異方性が非排水せん断挙動に与える影響について調べる。

3. 初期異方性に関する実験 はじめに、比較のために空中堆積法で作製した密度の異なる供試体に対し $\alpha=45^\circ$ で非排水せん断を行った際の挙動を図2に示す。ゆるい状態から密な状態まで典型的な挙動が現れている。次に、空中堆積法で作製した $D_r \div 60\%$ の供試体に対し, $\alpha=0.0, 22.5, 45.0, 67.5, 90.0^\circ$ で非排水せん断した際の挙動を図3に示す。これもよく知られた挙動^{2,3)}であるが, α が小さいほど, すなわち最大主応力軸と堆積面のなす角が大きいほど, あたかも密な砂に似た硬い挙動が表れている。この特徴は供試体作製時に与えられた初期異方性の影響であると考えられる。そのことをより確かなものにするために、棒付き法で作製した $D_r \div 60\%$ の供試体に対し, 主応力方向を変

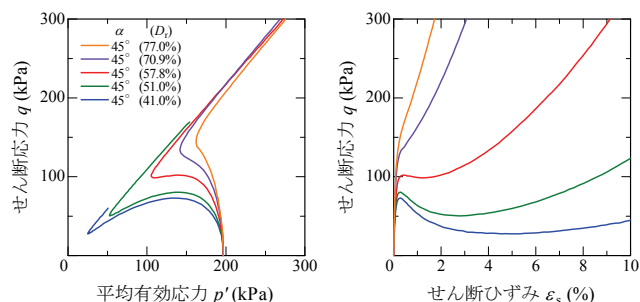


図2 密度の異なる供試体に対する非排水せん断試験結果 (供試体作製法: 空中堆積法)

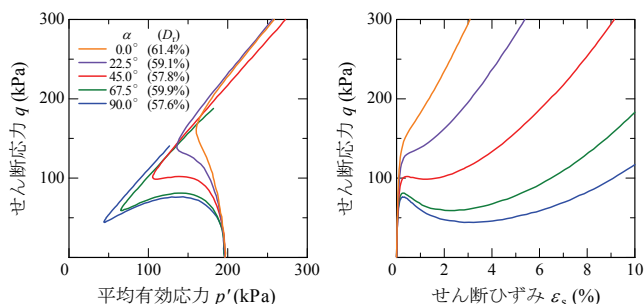


図3 主応力方向を変えた非排水せん断試験結果 (供試体作製法: 空中堆積法)

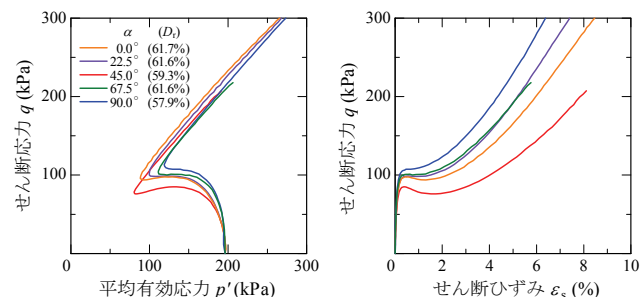


図4 主応力方向を変えた非排水せん断試験結果 (供試体作製法: 棒付き法)

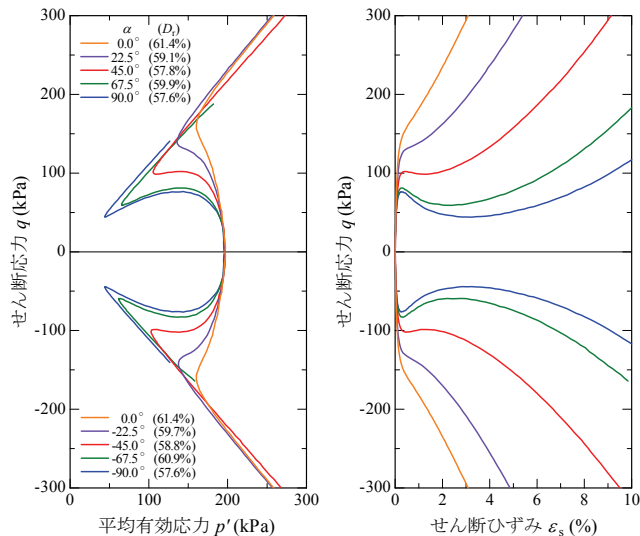


図5 主応力方向を変えた非排水せん断試験結果 (供試体作製法: 空中堆積法)

キーワード 中空ねじりせん断, 砂, 異方性

連絡先

〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学 TEL 052-789-4621

化させて非排水せん断試験を行った。実験結果を図4に示す。図3に見られたような明確な違いが見られないことより、先に挙げた特徴は初期異方性の影響であるとより確かに述べる事ができる。ここでは、次の議論のためにも、図3に示す結果に加えて、空中堆積法で作製した $D_r \approx 60\%$ の供試体に対し、最大主応力角が負となる方向に非排水せん断した結果を図5に示す。ただし、せん断応力 q には便宜上 α に合わせて符号をつけている。また、 $\alpha = 0.0^\circ$ の結果は正負どちらの側にも示した。さらに、 $\alpha = -90.0^\circ$ と 90° の結果は同じ結果である。図5には対称的な挙動が表れている。

このことは、図3に示す結果にとって堆積面とのなす角がやはり重要で、 α に応じて表れる挙動の違いが初期異方性の影響であるということをさらに強固にしている。

4. 誘導異方性に関する実験

次に、誘導異方性に関する実験結果を示す。ここでは、図6に示すように、 $D_r \approx 60\%$ の空中堆積法で作製した供試体に対し、 $\alpha = 45^\circ$ で $q = 150\text{kPa}$ まで非排水せん断した後、非排水条件を保ったまま等方応力状態になるまで q を除荷し、さらに排水コックを開けて等方

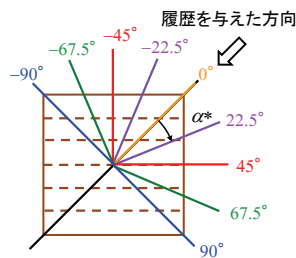


図8 履歴を与えた方向を基準にした最大主応力角 α^*

圧縮する履歴を与えた。そのような履歴を受けた供試体に対して、図1に示す各方向に非排水せん断を行った。実験結果を図7に示す。ただし、 $\alpha = 0$ や $\pm 90^\circ$ の結果については、図5と同様な取り扱いをしている。また、図中に示す相対密度は2回目のせん断時の値である。図7に示す結果は、図5に示す結果と異なり、不規則に並んでいる。そこで今度は、図8に示すように、载荷履歴を与えた方向を基準にとった最大主応力角を α^* と置き直して整理した結果を図9に示す。ただし、やはり $\alpha^* = 0^\circ$ や $\pm 90^\circ$ の結果については、図5と同様な取り扱いをしている。図9には間隔こそ異なるが、図5と同様に規則的に結果が並んでいる(間隔の広い方向については、破線で示すように間を補完するような実験を追加した)。 $\alpha^* = 0^\circ$ に近づくほど密な砂に似た挙動が表れていることから、载荷履歴を与えた方向に硬い挙動が表れるように誘導異方性が発達したといえる。また、载荷履歴を与えた図9に示す結果においても硬さの違いが擬似的な密度の違いとして表れていることより、供試体作製時に与えられた異方性と载荷履歴によって誘導された異方性の間には本質的な違いがなく、供試体作製時に与えられた異方性は誘導異方性の初期状態とみなすのが妥当であると考えられる。なお、図9には正負で非対称な結果が表れているが、これは初期異方性の影響が残っているためであり、より大きな履歴を加えれば対称な挙動に近づくと思われる。したがって裏を返せば、図9は誘導異方性の一発達過程を捉えた実験結果であるという事ができる。

5. まとめ 上記の実験は構成式の高度化を目標とした基礎的研究の一環として行ったものである。今後は、本稿で示した実験結果の構成式による再現結果を示してゆきたい。

参考文献 1) Yamada et al. (2010): Effects on reliquefaction resistance produced by changes in anisotropy during liquefaction, *S&F*, **50**(1), 9-25. 2) Nakata et al. (1998): Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation, *S&F*, **38**(2), 115-128. 3) Yoshimine et al. (1998): Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand, *S&F*, **38**(3), 179-188.

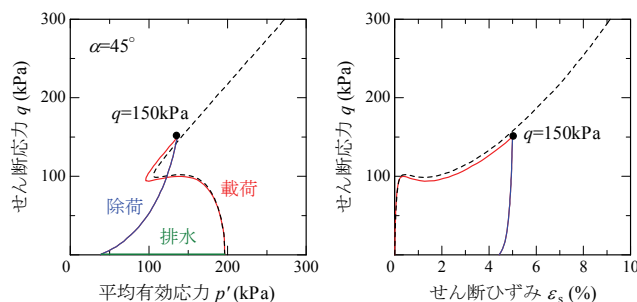


図6 せん断履歴の与え方

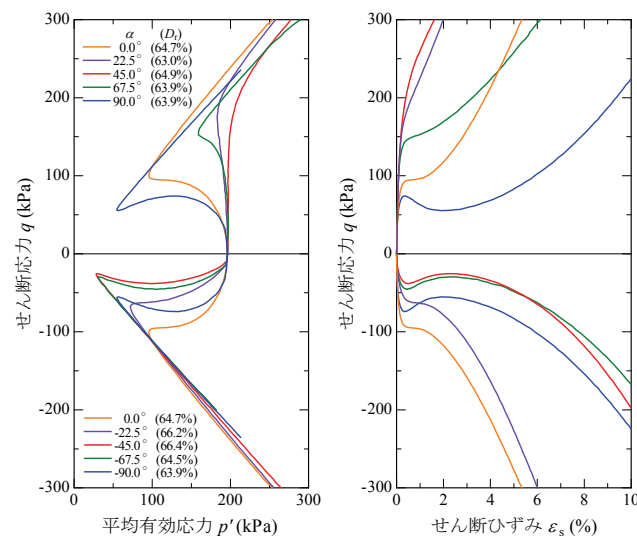


図7 せん断履歴を与えた供試体に対する主応力方向を変えた非排水せん断試験結果 (α で整理, 供試体作製法: 空中堆積法)

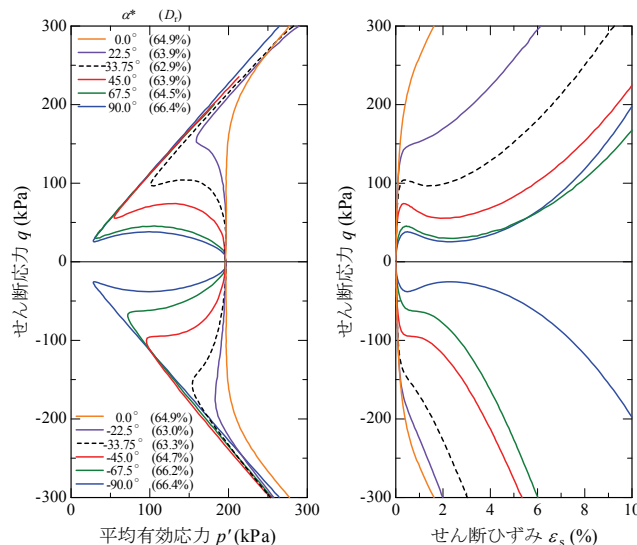


図9 せん断履歴を与えた供試体に対する主応力方向を変えた非排水せん断試験結果 (α^* で整理, 供試体作製法: 空中堆積法)