

中空ねじり試験装置を用いた砂の誘導異方性に関する実験的研究
 Experimental study on the induced anisotropy of sand
 by using hollow cylindrical torsional shear test apparatus

山田正太郎¹, 岡田麻希², 中野正樹³, 野田利弘⁴

- 1 名古屋大学大学院・工学研究科・s-yamada@civil.nagoya-u.ac.jp
- 2 名古屋市・上下水道局
- 3 名古屋大学大学院・工学研究科
- 4 名古屋大学・減災連携研究センター

概 要

中空ねじり試験装置を用いて砂の誘導異方性について実験的に調べた。せん断応力だけでなく、鉛直応力、さらには内圧と外圧を独立に制御することで、主応力方向や中間主応力の大きさを自由に制御可能な装置を用いた。はじめに、堆積面を有する供試体に対し、密度や、主応力方向、中間主応力を変化させた実験を行うことで、初期異方性が砂のせん断挙動に与える影響について把握した。また、一度せん断履歴を与えた供試体に対し、再度せん断を行うことで、せん断中に誘導異方性が変化する様子を実験的に捉えた。さらに、誘導異方性が液状化現象や締固め現象にとって重要な役割を果たしていることを片振りおよび両振りの繰返しせん断試験を行うことで実験的に示した。

キーワード：誘導異方性，砂，中空ねじり試験

1. はじめに

図1~3はYamada et al.¹⁾が三軸試験装置を用いて実施した豊浦砂の実験結果を示している（図中の D_r は相対密度を表す）。図1と2は空中落下法によって作製した供試体に対し行った単調および繰返し非排水せん断試験結果をそれぞれ示している。また、図3は繰返し非排水せん断の最中に、図2の[a]~[c]で示す位置でせん断を停止した後に、せん断開始前の応力状態[s]まで排水してから、単調非排水せん断を行うことで得た実験結果を示している。

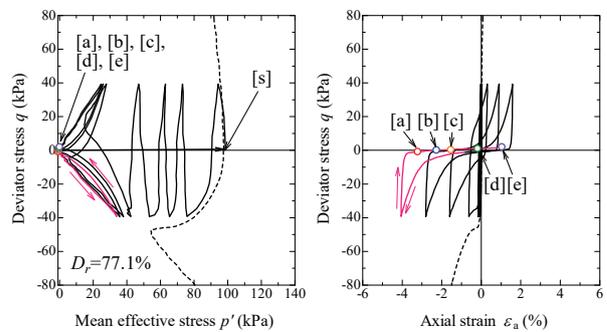


図2 液状化履歴の与え方¹⁾

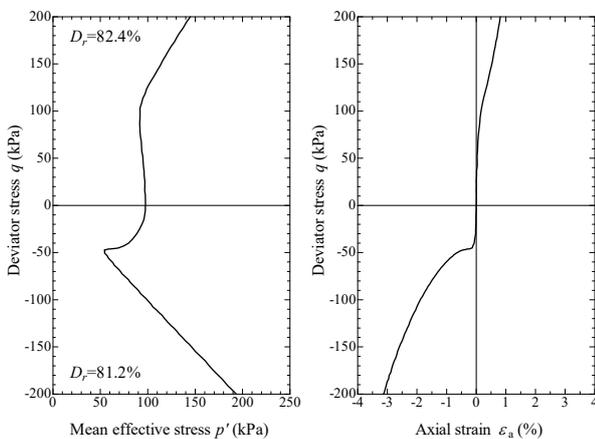


図1 液状化履歴を受けていない供試体の単調非排水せん断挙動¹⁾

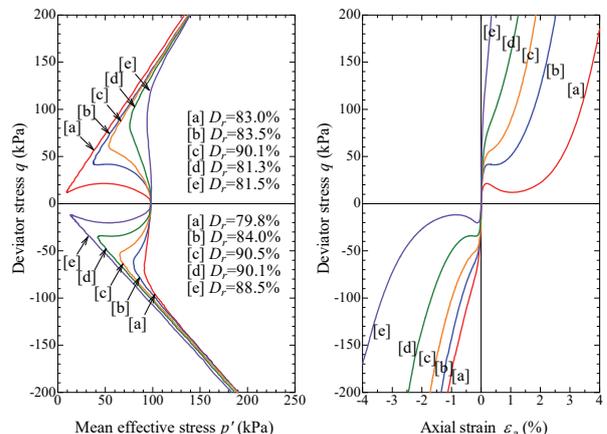


図3 液状化履歴を受けた供試体の単調非排水せん断挙動¹⁾

図1と図3を比べて、液状化履歴を受けると、液状化前とは全く異なるせん断挙動を取ようになることが分かる。また、図3から、液状化後の単調非排水せん断挙動は、それに先立つ液状化試験の停止位置に大きく依存することが分かる。Yamada et al.は一連の実験の考察を通して、このような結果は誘導異方性の存在に起因して生じること、また、これらの実験結果が系統立った変化を遂げていることから、液状化中は誘導異方性が規則的な変化を繰り返していることを主張している。さらに、Yamada et al.は液状化中に生じる誘導異方性の変化の影響で、再液状化抵抗が大きく変化することも実験的に示している。

さて、これらの実験結果は、サイクリックモビリティに代表される、繰返し載荷時に生じる砂の複雑な力学挙動にとって誘導異方性が重要な役割を果たしていることを予見させる。そこで、本研究では、新たに、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誘導異方性がせん断中に変動する様子を捉えることを目的に実験を行った。

以下では、まず、第2章で、本研究で中空ねじり試験装置を用いて行った実験の概要を示す。次に、第3章では堆積面を有する砂供試体に対し、密度や、主応力方向、中間主応力を変化させた実験を実施し、主に初期異方性が砂のせん断挙動に及ぼす影響について調べる。第4章では、非排水せん断履歴を与えた供試体に対し、様々な方向へ再度非排水せん断を行うことで、せん断中に生じる誘導異方性の変化について調べる。第5章と第6章では、片振りおよび両振りの繰返しせん断試験を実施することで、液状化現象や締め固め現象にとって誘導異方性の存在が如何に重要であるかを示す。

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 $e_{min}=0.639$)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、一部の試験では、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。せん断中は、平均応力 p , 中間主応力係数 b ($=$ [中間主応力-最小主応力]/[最大主応力-最小主応力]), 最大主応力角 α を一定に保った。いずれの試験においても $p=196\text{kPa}$ に設定した。 b については0.50を基本とし、中間主応力の影響について調べるときのみ、様々な値で実験した。 α については図4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。 $\alpha=0.0^\circ, 90.0^\circ$ 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。

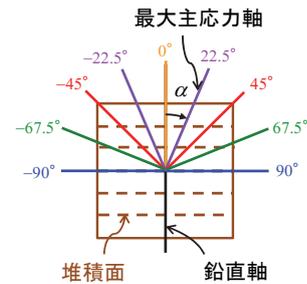


図4 最大主応力角 α

3. せん断履歴を受けていない供試体に対する実験

はじめに、空中堆積法で作製した堆積面を有する砂供試体に対し、密度・主応力方向・中間主応力を変えた実験結果を示す。

3.1 単調非排水せん断挙動に与える密度の影響

空中堆積法で作製した密度の異なる供試体に対し $b=0.50$, $\alpha=45.0^\circ$ で単調非排水せん断を行った。実験結果を図5に示す。ゆるい状態から密な状態まで典型的な砂の挙動が表れている。

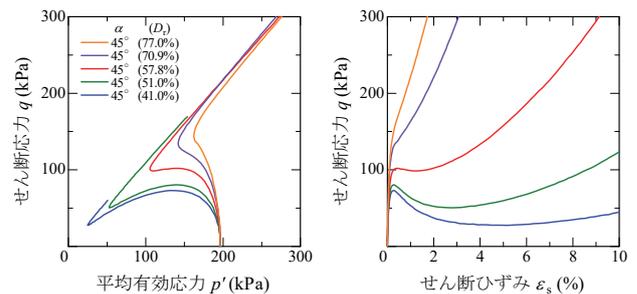


図5 密度の異なる供試体に対する非排水せん断試験結果(供試体作製法: 空中堆積法)

3.2 単調非排水せん断挙動に与える主応力方向の影響

空中堆積法で作製した $D_r=60\%$ の供試体に対し、 $b=0.50$, $\alpha=0.0, 22.5, 45.0, 67.5, 90.0^\circ$ で単調非排水せん断試験を実施した。実験結果を図6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 $D_r=60\%$ の供試体に対し、主応力方向を変化させて非排水せん断試験を行った。実験結果を図7に示す。図6に見られたような明確な違いが見られないことより、先に挙げた特徴はやはり初期異方性の影響であると言える。ここでは、次の議論のためにも、図6に示す結果に加えて、空中堆積法で作製した $D_r=60\%$ 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8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°の結果は正負どちらの側にも示した。さらに、 $\alpha = 90.0^\circ$ と -90.0° の結果は同じ結果である。図8にはほぼ対称な挙動が表れている。このことは、図6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。

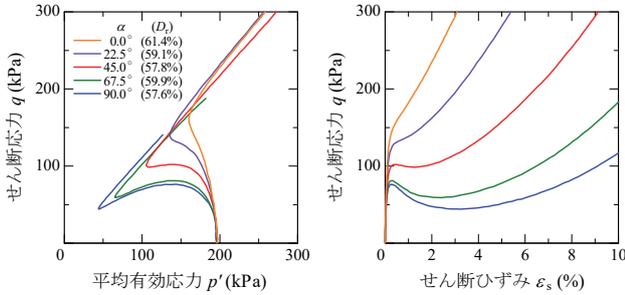


図6 主応力方向を変えた非排水せん断試験結果 (供試体作製法: 空中堆積法)

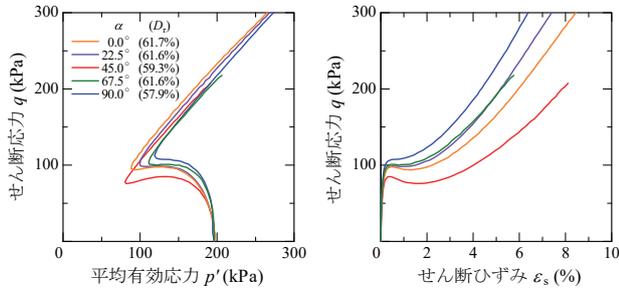


図7 主応力方向を変えた非排水せん断試験結果 (供試体作製法: 棒付き法)

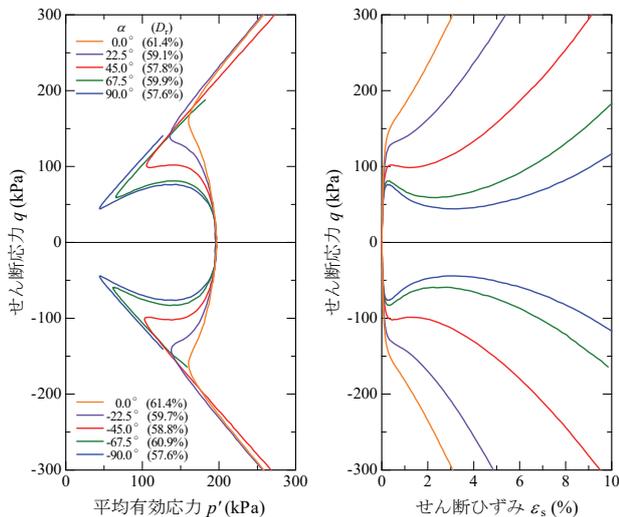


図8 主応力方向を変えた非排水せん断試験結果 (供試体作製法: 空中堆積法)

3.3 単調非排水せん断挙動に与える中間主応力の影響

空中堆積法で作製した $D_r \approx 60\%$ の供試体に対し、 $b = 0.50, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ 、 $\alpha = 0.0^\circ$ で非排水せん断した際の挙動を図9に示す。

中間主応力係数 b が大きくなるほど、すなわち、中間主応力が最大主応力に近づくほど、ゆるい砂で見られるような、有効応力が原点に向かって一旦低下する挙動が顕著に表れている。これは、図10に示す通り、本試験条件の下では、中間主応力が大きくなるほど、堆積面に沿う方向から押す力が強まるためであり、初期異方性の影響が表れていると言える。

また、 p' と q が上昇に転じた後の角度(ここでは慣習に従って破壊角と呼ぶ)に着目すると、中間主応力係数 b が大きくなるほど、破壊角が大きくなっている。これは、よく知られた土の破壊ないしは限界状態に与える中間主応力の影響であると考えられる。そこで、図11に、図10より得られる破壊角を Matsuoka-Nakai の破壊基準⁴⁾と、Lade-Duncan の破壊基準⁵⁾と比較した結果を示す。本実験で得られた破壊角は Lade-Duncan の破壊基準に近い値を示している。

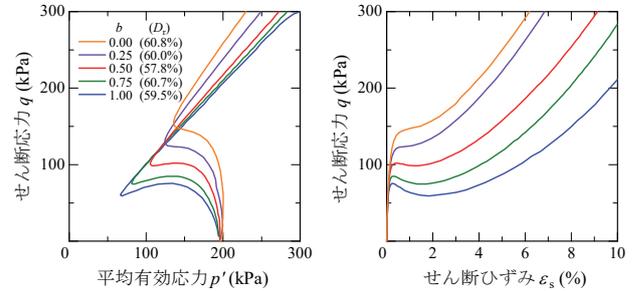


図9 中間主応力の大きさを変えた非排水せん断試験結果 (供試体作製法: 空中堆積法)

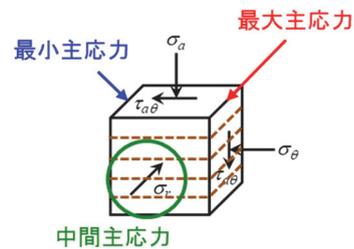


図10 中間主応力の作用方向

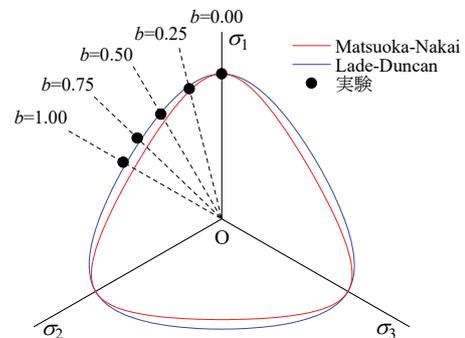


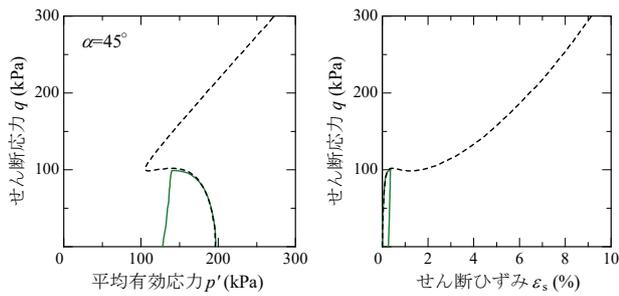
図11 実験で得られた破壊角と二つの破壊基準との比較

4. せん断履歴を与えた供試体に対する実験

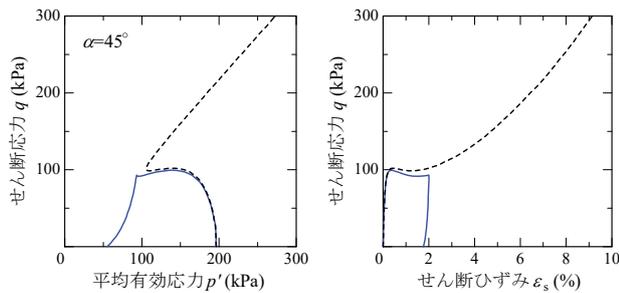
次に、誘導異方性に関する実験結果を示す。ここでは、せん断中に誘導異方性の発達程度が変化する過程と、せん断中に異方性の発達方向が変化する過程を捉えた実験結果を示す。

4.1 異なる大きさのせん断履歴を受けた供試体の単調非排水せん断挙動

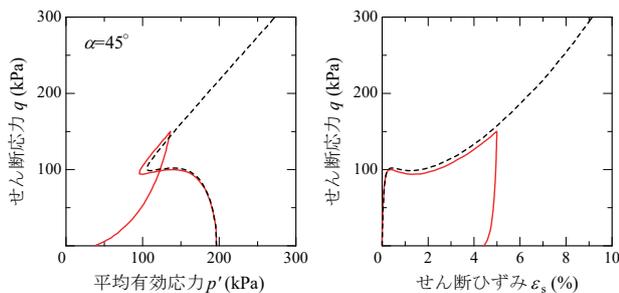
まず、図 12 に示すように、 $D_r=60\%$ の空中堆積法で作製した供試体に対し、 $b=0.50$ 、 $\alpha=45.0^\circ$ で、進捗程度の異なる三つのレベルの载荷履歴を与えた。進捗の目安として、いわゆる変相線に到達前・到達時・到達後を選んだ。その後、非排水条件を保ったまま等方圧力状態になるまで q を除荷し、さらに排水コックを開けて等方圧縮する履歴を与えた。そのような履歴を受けた供試体に対して、 $b=0.50$ 、 $\alpha=\pm 45.0^\circ$ で再び単調非排水せん断を行った。载荷履歴を受けた後の単調非排水せん断試験結果を図 13 に示す。比較のため、図 11 には、载荷履歴を受けていない状態の単調非排水せん断試験の結果も示している。



(a) 変相線到達前

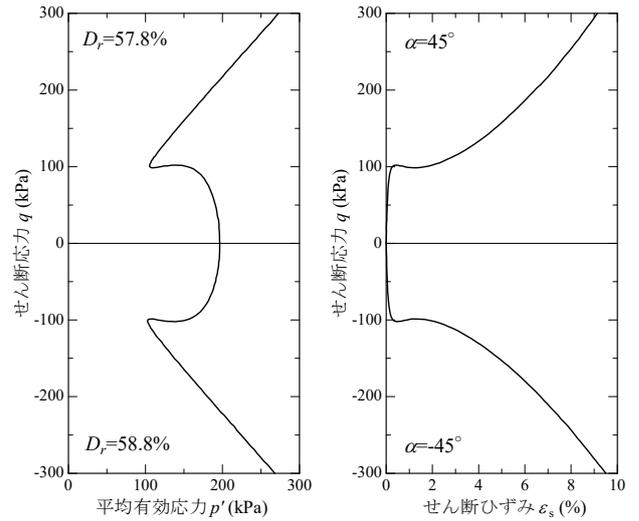


(b) 変相線到達時付近

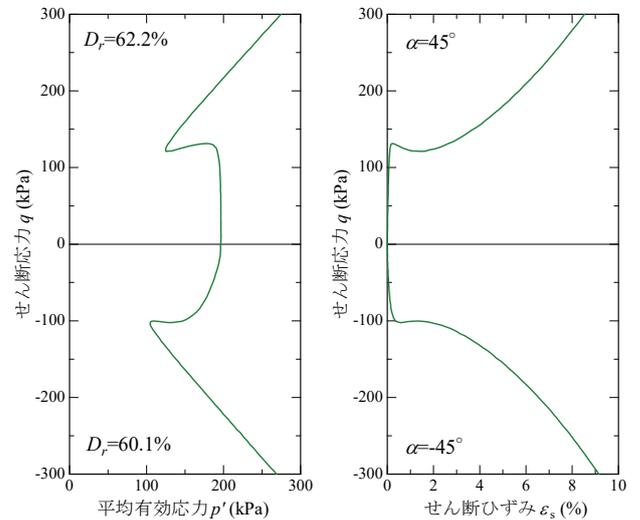


(c) 変相線到達後

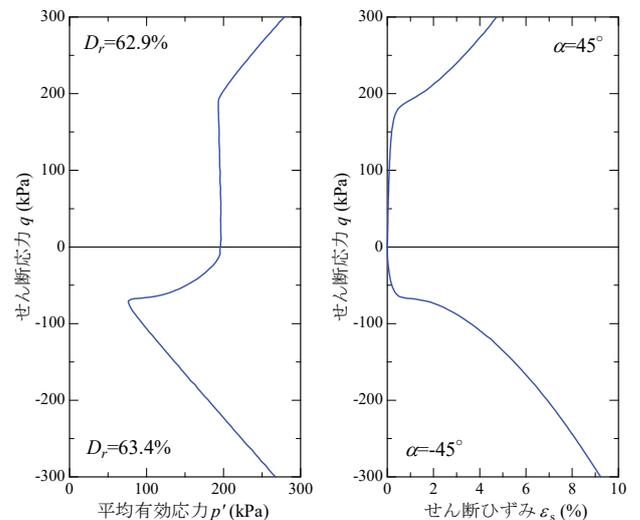
図12 せん断履歴の大きさの違い



(o) 履歴なし



(a) 履歴あり (変相線到達前)



(b) 履歴あり (変相線到達時付近)

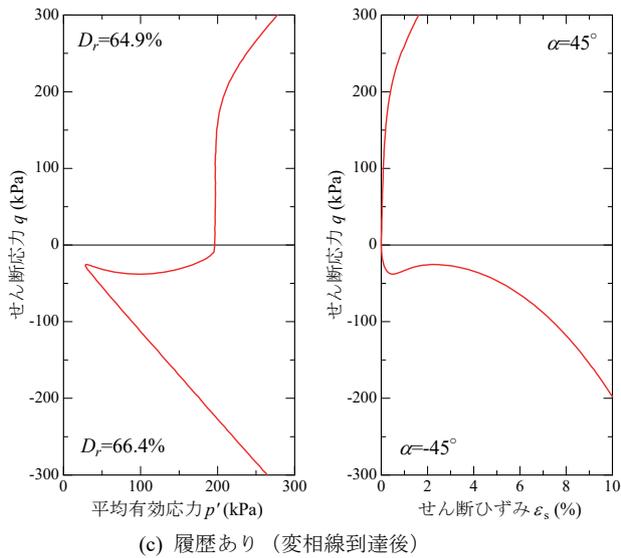


図13 異なる大きさのせん断履歴を受けた供試体の単調非排水せん断挙動

図13(a)が示すように、ひずみの顕著な発生を伴わないようなレベルのせん断履歴では、履歴を受けた方向と同一 ($\alpha=45.0^\circ$) 方向に載荷すると、初期に弾性的な挙動が表れるが、履歴を受けていない場合の挙動 (図13(o)) と比較して、その後のせん断挙動や、履歴と直交 ($\alpha=-45.0^\circ$) 方向に載荷した際の挙動には目立った違いが表れていない。図13(b)や(c)のように、せん断履歴のレベルが上がってゆくと、載荷方向の違い ($\alpha=45.0^\circ$ 方向へ載荷した場合と $\alpha=-45.0^\circ$ 方向へ載荷した場合の違い) が顕著に表れてくる。載荷履歴のレベルが上がるにつれ、載荷履歴を受けた方向と同一方向では、密な砂に似た挙動が表れ、載荷履歴を受けた方向と直交する方向では、ゆるい砂に似た挙動が表れている。これらの実験結果は、せん断中に生じる誘導異方性の発達程度の変化を捉えたものであると言える。

4.2 せん断履歴を受けた供試体の単調非排水せん断挙動に与える主応力方向の違い

図14に示すように、 $D_r=60\%$ の空中堆積法で作製した供試体に対し、 $b=0.50$ 、 $\alpha=45.0^\circ$ で $q=150\text{kPa}$ まで非排水せん断した後 (図12(c)と同じ載荷履歴)、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4に示す各方向に非排水せん断を行った。実験結果を図15に示す。ただし、 $\alpha=0.0^\circ$ や $\pm 90.0^\circ$ の結果については、図8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15に示す結果は、図8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16に示すように、載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17に示す。ただし、やはり $\alpha^*=0.0^\circ$ や $\pm 90.0^\circ$ の結果については、図8と同様な取り扱いをしている。図17には間隔こそ異なるが、図

8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)。 $\alpha^*=0.0^\circ$ に近づくほど密な砂に似た挙動が表れていることから、載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、載荷履歴を与えた図17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、少なくとも砂の場合、供試体作製時に与えられた異方性と載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17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、図17も誘導異方性の発達過程を捉えた実験結果であると言える。

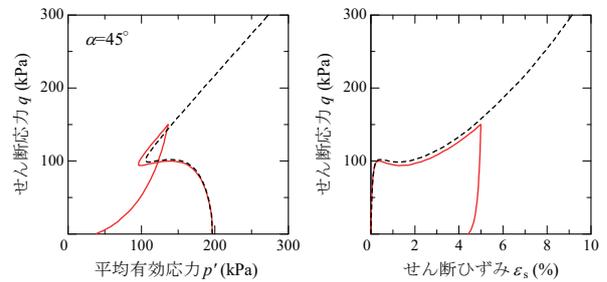


図14 せん断履歴の与え方

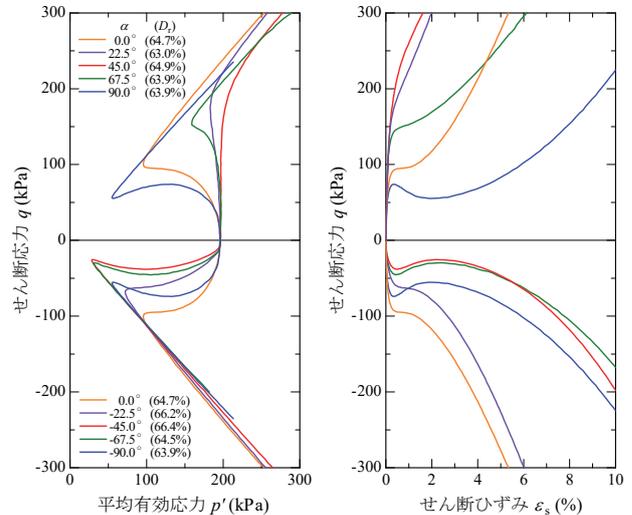


図15 せん断履歴を与えた供試体に対する主応力方向を変えた非排水せん断試験結果

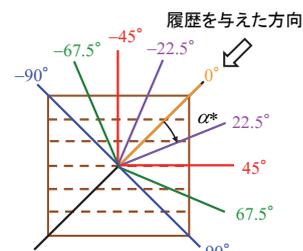


図16 履歴を与えた方向を基準にした最大主応力角 α^*

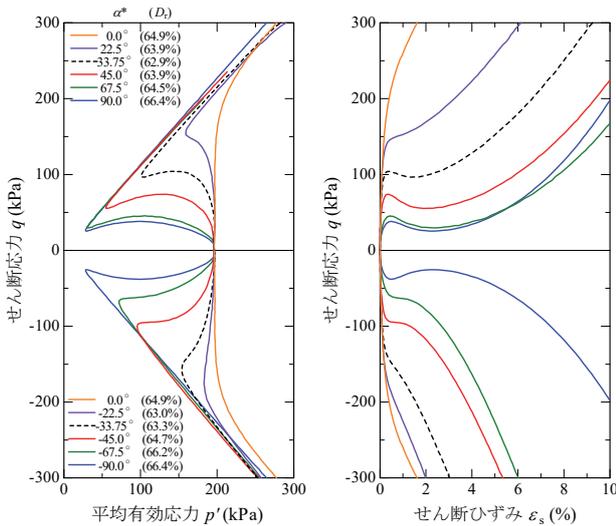


図17 せん断履歴を与えた供試体に対する主応力方向を変えた非排水せん断試験結果 (α^* で整理, 供試体作製法: 空中堆積法)

5. 誘導異方性が砂の液状化現象に及ぼす影響

はじめにでも述べた通り、液状化時に砂は規則的な誘導異方性の変化を繰り返し生じている。ここでは、誘導異方性の変化が液状化現象自体にとって、重要な役割を果たしていることを実験的に示す。

まず、 $D_r \approx 60\%$ の空中堆積法で作製した供試体に対し、 $b = 0.50$, $\alpha = \pm 45.0^\circ$ で行った非排水繰返しせん断試験の結果を示す。この荷重条件は、中空ねじりせん断試験装置を用いた一般的な液状化試験と同じである(ただし、回転角を漸増・漸減させるひずみ制御で試験を行っている)。せん断応力の振幅は $q_{amp} = 69\text{kPa}$ とした。図18に実験結果を示す。繰返し荷重に伴い、 p' が徐々に減少した後、液状化に至り、サイクリックモビリティを描いている。

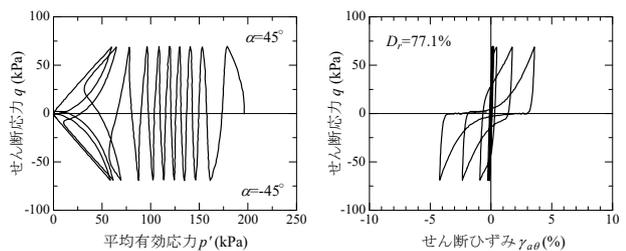


図18 繰返し非排水せん断試験結果(両振り)

次に、図19に液状化前の段階で振幅を片振りにした実験結果を示す。片振りになっている最中は有効応力経路が「足踏み」をするが、荷重方向を 90° 切り替えると、 p' の減少幅が両振り荷重をしているときと同様になることが分かる。これは、図13(a)が示すように、せん断履歴のレベルが小さい段階では、直前に荷重した方向へ再び荷重すると、比較的弾力的な挙動が表れるのに対し、直交方向へ荷重した場合には、顕著な履歴が表れないことに対応している。

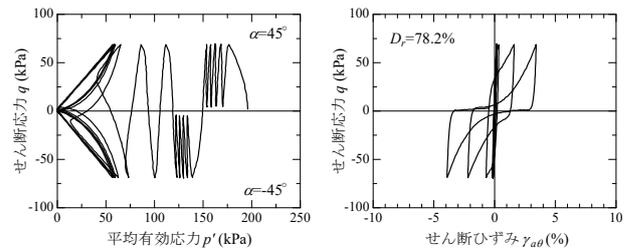


図19 繰返し非排水せん断試験結果(液状化前に片振り)

今度は、液状化中に両振りから片振りに変化した場合の実験結果を図20に示す。液状化中に片振りに変化させると、有効応力経路が同じループを周回し、液状化中に生じるひずみの進展が著しく抑制されることが分かる。図13(b)や(c)が示すように、ひずみの顕著な発生を伴うようなレベルのせん断履歴を受けると、誘導異方性が顕著に発達し、荷重履歴を受けた方向と直交方向に荷重されると、あたかもゆるい砂のような挙動が表れる。Yamada et al¹⁾によると、液状化中の誘導異方性の変化は、平均有効応力が有効応力空間の原点付近に突っ込み、剛性をほぼ失った、まさに液状化と呼ぶにふさわしい状態で生じる。液状化中に片振りに切り替えると、このような状態を経なくなるため、サイクリックモビリティが描かれなくなり、ひずみの進展が著しく抑制される。

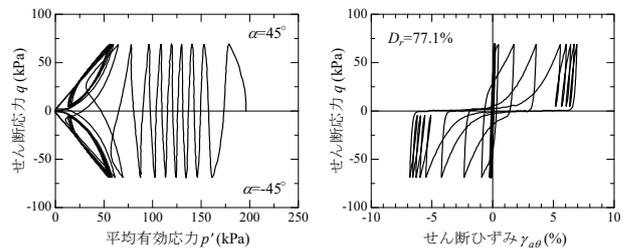


図20 繰返し非排水せん断試験結果(液状化中に片振り)

上記の実験結果が示す通り、液状化現象にとって、誘導異方性の変化は重要な役割を果たしている。この章の最後に、このことをより確かにする実験結果を二つほど示す。図21にせん断開始から片振りせん断を続けた結果を、図22に振幅を非対称に与えた両振りせん断の実験結果を示す。図21が示す通り、片振りせん断を続けている限りは液状化に至らないことが分かる。一方で、非対称な両振りを繰り返すと、対称に両振りを繰り返した場合(図18)に比べて回数は要するものの、液状化に至り、サイクリックモビリティを描く。なお、図21には、最終的に、片振りから両振りに切り替えた結果も示している。有効応力がそれなりに低下した後、片振りから両振りに切り替えると直ちに液状化に至り、サイクリックモビリティが描かれ始める。これらの結果から、液状化試験の場合、平均有効応力軸を跨ぐか否か、換言するならば、顕著な誘導異方性の変化を生じさせるか否かが、液状化現象にとって重要な意味合いを持っていると言える。

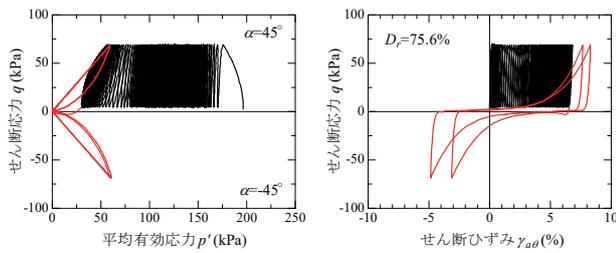


図 21 繰返し非排水せん断試験結果 (片振り)

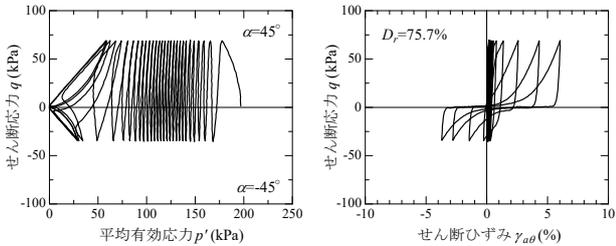


図 22 繰返し非排水せん断試験結果 (非対称両振り)

6. 誘導異方性が砂の締固め現象に及ぼす影響

液状化と締固めはコインの裏表であると言われる⁶⁾。前章では、液状化現象に与える誘導異方性の重要性について実験的に示したが、本章では、締固め現象においても誘導異方性が重要な役割を果たしていることを実験的に示す。

図 23 に、 $D_r \approx 45\%$ の空中堆積法で作製した供試体に対し、 $b=0.50$ 、 $\alpha = \pm 45.0^\circ$ で行った排水繰返しせん断試験の結果を示す。せん断応力の振幅は $q_{amp} = 196\text{kPa}$ とした。繰返しせん断に伴い徐々に間隙比が減少し、体積変化が収束する様子を見て取れる。

図 24 に、繰返しせん断の初期段階で、片振り試験を織り交ぜた結果を示す。片振りせん断中はほぼ弾性的な挙動を示すが、両振りせん断に切り替えると、ひずみが発生し、体積圧縮が進行することが分かる。これらの実験結果は、排水せん断中でも誘導異方性の変化が顕著に生じており、片振りせん断中はその変化が止まること、ならびに、締固め現象においても、誘導異方性の変化が重要な役割を果たしていることを示していると考えられる。なお、檜尾ら⁷⁾は同様な実験を三軸試験装置により行っている。

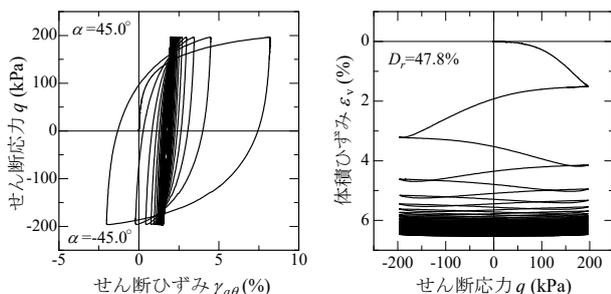


図 23 繰返し非排水せん断試験結果 (両振り)

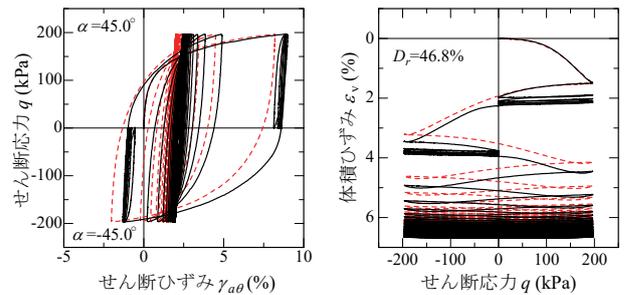


図 24 繰返し非排水せん断試験結果 (途中で片振り)

7. おわりに

本論文では、初期異方性および誘導異方性に関する基礎的な実験結果を提供した。これらの中には、せん断中における誘導異方性の变化を捉えた実験結果も含まれる。また、片振りや両振りの繰返しせん断試験を通して、液状化現象や締固め現象にとって、誘導異方性が重要な役割を果たしていることを実験的に示した。

なお、本論文で示した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もある。今後は、本論文で示した実験結果から得られた知見をもとに構成式の高度化を図り、これらの実験結果の再現を試みてゆきたい。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 (基盤研究(B): 課題番号 16H04408) の補助を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Yamada, S. Takamori, K. and Sato, K.: Effects on reliquefaction resistance produced by changes in anisotropy during liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol. 50, No. 1, pp. 9-25, 2010.
- 2) Nakata et al.: Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation, *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 2, pp. 115-128, 1998.
- 3) Yoshimine, M., Ishihara, K. and Vargas, W.: Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand, *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 3, pp. 179-188, 1998.
- 4) Matsuoka, H. and Nakai, T.: Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses, *Proc. of JSCE*, Vol. No. 232, pp. 59-70, 1974.
- 5) Lade, P. V. and Duncan, J. M.: Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil, *Proc. of ASCE*, Vol. 101, Issue 10, pp. 1037-1053, 1975.
- 6) Asaoka A.: Consolidation of clay and compaction of sand -An elasto-plastic description-, *Keynote lecture, Proc. of 12th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Leung et al, Singapore, Vol. 2, pp. 1157-1195, 2003.
- 7) 檜尾正也, 中井照夫, 星川拓哉, 吉田英生: 単調および繰返し載荷を受ける砂のダイレイタンス特性と異方性, *地盤工学会論文集*, Vol. 41, No. 3, pp. 107-124, 2001.