

液状化程度の異なる砂の液状化後の圧縮・変形特性および骨格構造変化の把握

Compression-deformation characteristics and soil skeleton structural change of sands with different degree of liquefaction

沈策¹, 中井健太郎², 野田利弘³

- 1 名古屋大学大学院・工学研究科・shence213163559@gmail.com
- 2 名古屋大学大学院・工学研究科
- 3 名古屋大学大学院・工学研究科

概 要

本報では、液状化発生の有無という観点ではなく、液状化の程度がポスト液状化挙動や液状化中の骨格構造変化に与える影響を実験的に把握することを目的に、ひずみ制御非排水繰返し三軸試験を実施した。得られた結論は以下の通りである。1) 変位制御非排水繰返し試験によって、異なる液状化履歴の状態を作り出すことができた。2) 液状化履歴が大きいと、その後の単調載荷挙動において、剛性回復が生じにくいことを示した。3) 液状化履歴が大きいほど、液状化後の体積圧縮量が大きくなることを示した。4) 液状化した供試体は液状化後の圧縮によって密実化、つまり、過圧密の高位化が生じるが、それに加えて、液状化履歴が大きいと液状化時に構造が高位化するため、相対密度が大きいにもかかわらずせん断初期に著しい塑性圧縮を示すことを新たに示した。

キーワード：砂質土、ひずみ制御非排水繰返しせん断、液状化程度、骨格構造変化

1. はじめに

地震時の地盤の液状化被害が広く認識されるようになったのは、日本では新潟地震（1964）である。鉄筋コンクリート造の共同住宅が基礎ごと傾倒し、港湾施設の流動被害や埋設管の破損が見られた。これを契機に地盤の液状化が構造物の設計に反映されるようになり、地震による作用せん断応力と地盤の液状化強度を比較して液状化抵抗率 F_L を求める液状化判定法が考案され、現在でもその考えに従って液状化判定が行われている。兵庫県南部地震（1995）では、それまでに考えられてきた設計地震動を遥かに超える大きな地震動が作用し、液状化抵抗が大きいと考えられてきた礫質土も液状化の対象とする必要性が指摘されるとともに、耐震設計に2段階の設計外力を考慮する考えが導入されるようになった。東北地方太平洋沖地震（2011）では、東北から関東に至るまでの広範囲で液状化被害が観測されたが、特に東京湾沿岸部の埋立て地盤における宅地の液状化被害が甚大であり、地層構成や堆積年代といった地形・地質情報に加えて、継続時間や余震の影響など地震動特性が液状化に及ぼす影響を解明することの必要性が指摘されている¹⁾。古くは、一度液状化した地盤は地震後の密実化によって液状化しにくくなると考えられていたが、東北地方太平洋沖地震では、千葉県東方沖地震（1987）で液状化が発生した場所と同じ場所で再び液状化が観測

されており、再液状化の発生メカニズム解明も求められている。

このように、液状化被害の発生が認知されるとともに、砂質土の液状化に対する研究も数多く行われてきた²⁾⁴⁾など。その後、もともとは地盤が液状化するかしないかを把握するために疲労破壊的な強度を求めることが目的であったが、液状化後に地盤がどの程度沈下するのかといったポスト液状化挙動に関する研究や⁵⁾⁶⁾など、従来の応力的判定法に変わって地震中のエネルギー損失に着目し、地震動の繰返し回数や波形の違いの影響を考量する取り組み⁷⁾⁸⁾なども行われてきている。また、液状化/再液状化発生メカニズム解明のために、繰返し載荷中のひずみ履歴や骨格構造変化に着目した研究も実施されてきている⁹⁾¹¹⁾など。

本報では、単に液状化発生の有無という観点ではなく、液状化の程度がポスト液状化挙動（ここでは、液状化中の変形特性および液状化直後の圧縮特性）や液状化中の骨格構造変化に与える影響を実験的に把握することを目的とする。なお、液状化強度を調べるために一般的に行われる応力振幅一定応力制御非排水繰返しせん断試験では、液状化到達後に供試体が破壊に至るため、多数回の繰返し載荷（大きな液状化履歴）を与えることができない。そこで本報では、ひずみ振幅一定ひずみ制御非排水繰返しせん断を実施した。

2. 実験に用いた砂試料の基本的性質

2.1 物理特性

実験には三河珪砂と呼ばれる人口珪砂を使用した。三河珪砂の主な鉱物組成は、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 であり、大部分を SiO_2 が占めている。愛知県岡崎市東部周辺に広がる良質な石英片岩類を原料に粉砕加工して作成されている。三河珪砂は粒径ごとに4号～9号に分けられており、本研究では珪砂6号を使用した。物性を表1に、粒径加積曲線を図1に示す。なお、粒径加積曲線は豊浦標準砂と類似しており、粒径幅が狭く分級した砂試料である。

表1 三河珪砂6号の物性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.650
平均粒径 D_{50} (mm)	0.022
均等係数 U_c	1.790
曲率係数 U_c'	0.926
最大間隙比 e_{\max}	1.055
最小間隙比 e_{\min}	0.663

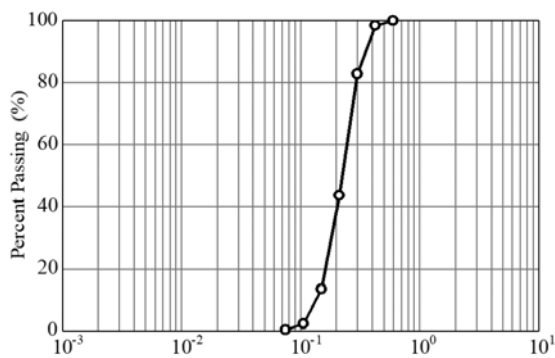


図1 粒径加積曲線

2.2 非排水せん断特性と骨格構造概念に基づく解釈

続いて、図2に初期相対密度の異なる単調非排水三軸圧縮試験結果を示す¹²⁾。図から、相対密度が小さい緩詰め砂は塑性圧縮を伴う軟化挙動(平均有効応力 p' の減少を伴う軸差応力 q の減少)のみを示すが、相対密度の増加に伴って塑性圧縮を伴う軟化の程度が小さくなり、代わりに塑性膨張を伴う硬化挙動 (p' の増加を伴う q の増加) が支配的となる。

これら砂質土の典型的な非排水せん断特性は、土の骨格構造概念¹³⁾に基づくと、塑性変形の進展に伴う構造低位化は塑性圧縮(非排水せん断時の p' 減少)として、過圧密解消は塑性膨張(非排水せん断時の p' 増加)として働くことから、相対密度の小さい緩詰め砂は構造高位で過圧密低位な土として、相対密度の大きい密詰め砂は構造低位で過圧密高位な土として記述できる¹⁴⁾。

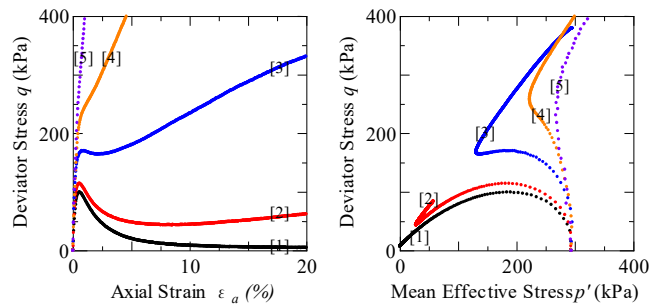


図2 初期間隙比の異なる砂の非排水せん断挙動

表2 非排水せん断前の間隙比

	間隙比 e	相対密度 D_r
[1]	1.07	-0.03
[2]	0.97	0.23
[3]	0.92	0.33
[4]	0.87	0.45
[5]	0.77	0.69

3. 液状化程度を変化させる繰返しせん断方法

本章では、一般的に液状化試験として行われている応力振幅一定応力制御非排水繰返しせん断試験(以降、応力制御非排水繰返しせん断試験と呼ぶ)と、本研究で用いるひずみ振幅一定ひずみ制御非排水繰返しせん断試験(以降、ひずみ制御非排水繰返しせん断試験と呼ぶ)、2通りの試験方法と試験結果を示して、本研究で着目する「液状化程度」を議論するためにはひずみ制御式が適していることを述べる。その後で、本研究の実験方法を説明する。

3.1 応力制御とひずみ制御非排水繰返しせん断試験

図3に応力制御非排水繰返しせん断試験結果を示す。有効応力パス ($q \sim p'$ 関係図) に着目すると、繰返し回数の増加とともに p' が減少して(初期)液状化 ($q = p' = 0$) に達する。一度液状化に達した後も、塑性膨張硬化 (p' の増加を伴う q の増加) と塑性圧縮軟化 (p' の減少を伴う q の減少) を繰り返す「く」の字型の繰返し挙動を示す。応力状態がほとんどゼロとなっているが、この段階では供試体は円筒形を保ち、すぐには破壊しない。応力ひずみ関係 ($q \sim \epsilon_a$ 関係図) を見ると、初期液状化に達するまでは ϵ_a がほとんど発生しないが、有効応力パスにおける「く」の字の繰返し挙動を示す頃には、 ϵ_a が圧縮・伸張側両方に進展していく。液状化到達後の載荷挙動に着目すると、載荷時に曲線は下に凸のカーブを描き、一度失った剛性を回復する様子がわかる。載荷方向が逆転すると $q = 0$ まで剛性が急減し、剛性を失ったまま流動する。この繰返し載荷中の剛性回復と流動を伴うひずみ進展挙動はサイクリックモビリティと呼ばれ、砂質土の特徴的な繰返しせん断挙動である。なお、試験結果からわかるように、応力制御試験の場合、サイクリックモビリティ到達後は ϵ_a が徐々に進展するため、供試体は最終的に破壊する。

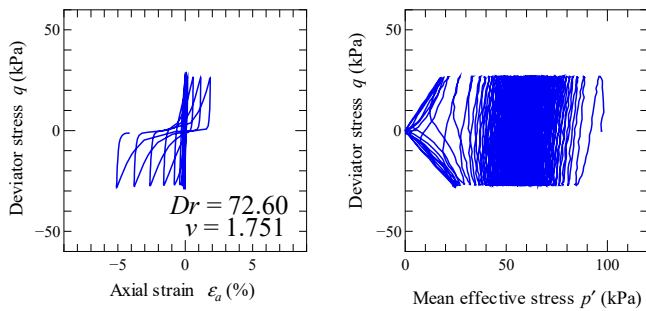


図 3 応力制御非排水繰返しせん断挙動

図 4 にひずみ制御非排水繰返しせん断試験結果を示す。有効応力パスを見ると、図 3 の応力制御と同様に、繰返しとともに有効応力が減少して $q = p' = 0$ となり、液状化を示す。応力ひずみ曲線を見ると、載荷初期は q が大きく高い剛性を示すが、繰返し回数の増加とともに剛性は次第に低下し、最終的にはほぼゼロとなる。応力制御と同様、ひずみは下に凸の曲線を描き、サイクリックモビリティを示す。ひずみ振幅を一定に制御しているため、液状化到達後も供試体は変形が進展せず円筒形を保ち、多数回の繰返し載荷を与えることができる。

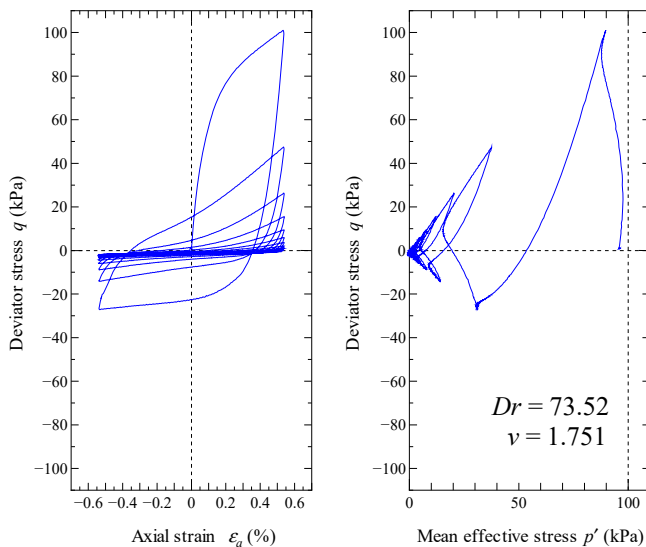


図 4 応力制御非排水繰返しせん断挙動

図 3 に示す応力制御非排水繰返しせん断は、土の疲労破壊的な強度を与えているため、1) 低サイクルでの強度を求めることが難しいこと、2) 載荷中のひずみ速度が異なること、3) ひずみが大きくなった時の挙動の要素特性としての信頼性、などの問題点が指摘されている。そのため、供試体の要素性を保ったまま液状化の程度を変えることが難しい。そこで本研究では、繰返し載荷中の変形を拘束することのできるひずみ制御非排水繰返しせん断を実施し、液状化程度（液状化到達後の繰返し回数）の違いが、液状化後の力学挙動に及ぼす影響について、三軸試験機を用いて調べることにした。

3.2 本研究における実験方法

実験に用いた供試体は、高さ 100mm、直径 50mm であり、相対密度が約 60% となるように密度調整した。乾燥砂をモールドに自由落下させて投入した後、細い棒を 15 回モールド底面まで突いて、抜き差しした。この作業によって、自由落下時に発達した固有異方性の影響を消すことができる。供試体内に二酸化炭素と脱気水を通して飽和度を高めた後、拘束圧 300kPa（側圧 500kPa、背圧 200kPa）で等方圧密した。いずれの供試体も B 値が 0.95 以上であることを確認している。等方圧密後、ひずみ振幅を供試体高さの 1% (1mm) または 3% (3mm) に制御して、ひずみ制御非排水繰返しせん断試験を行った。載荷速度は 4mm/min である。

図 5 にひずみ振幅 3% の時の非排水繰返しせん断挙動を示す。同じ条件下で複数回の実験を実施しているが、十分な再現性を有することを確認している。繰返し回数の増加に伴う剛性変化を図 6 に示す。図 5 からわかるように、繰返しとともにせん断剛性 (q の最大値) が減少していく。10 回も繰り返すと、供試体は剛性回復をほとんど示さなくなることがわかる。しかし、ひずみ振幅一定で制御しているため、応力制御繰返し試験とは異なり、多数回の繰返し載荷を与えても供試体は円筒形を保つ。つまり、液状化到達後の繰返し回数を変えることで、液状化の程度を変えることが可能である。ただし、図 7 は 100 回繰り返した時の供試体の写真である。液状化程度を変えるとはいえ、あまりに繰返し回数が多いと供試体内部で砂試料が沈降してキャップと砂試料の間にギャップが生じてしまい、要素性を保つことができなくなる点は注意が必要である。

なお、Yamada et. al¹¹⁾ は、サイクリックモビリティ中に異方性が目まぐるしく変化することを実験的に確認し、残留ひずみが正の時は圧縮側に、残留ひずみが負の時は伸長側に異方性が発達し、同方向に載荷すると強度が強くなることを示している。本研究では、この異方性の影響を無視できるように、残留ひずみがゼロの状態 (図 5 中の A) で繰返し載荷を止めることを基本とした。

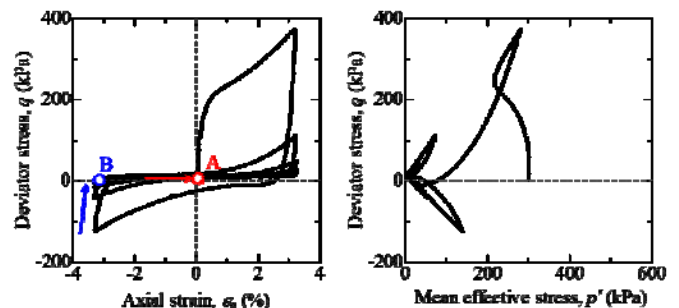


図 5 ひずみ振幅 3% での非排水繰返しせん断挙動

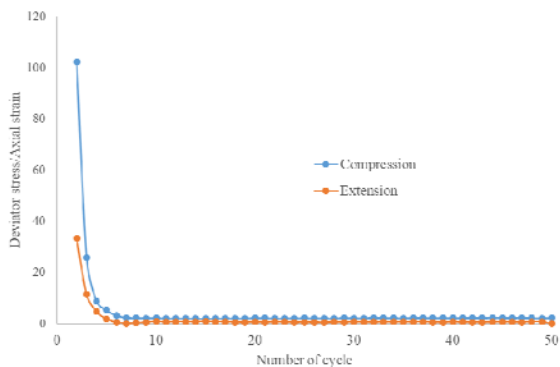


図 6 繰返しに伴うせん断剛性の低下



図 7 100 回繰り返した時の供試体の様子

このように、異なる液状化程度となるよう、任意回数の非排水繰返しせん断を与えた後、以下の実験を実施した。

- (1) 非排水繰返し载荷後、非排水状態を保ったまま、単調载荷非排水三軸圧縮試験
- (2) 非排水繰返し载荷後、排水コックを開いて圧縮試験
- (3) (2)の後で、単調载荷非排水三軸圧縮/伸長試験

4. 液状化程度がポスト液状化挙動に与える影響

本章では、液状化程度が異なる供試体のポスト液状化挙動として、液状化供試体の変形特性/剛性回復特性（上記(1)の実験）および液状化後の体積圧縮特性（上記(2)の実験）を実験的に確認した。

4.1 液状化供試体の変形挙動

図 8 に単調载荷時の荷重変位関係を示す（実験(1)）。なお、単調载荷前に実施した非排水繰返し载荷のひずみ振幅は全て 1%である。いずれの供試体も液状化しているため、再载荷時の初期剛性はゼロであるが、载荷が進むと下に凸の曲線を描きながら剛性が回復（ q が増加）する、いわゆるモビリティ挙動を示す。繰返し回数が少なく液状化程度の小さい供試体は小さい変形でも剛性回復を示すが、繰返し回数が多く液状化程度の大きい供試体は剛性回復を示すのに大きな変形を要する。このように、液状化の程度が異なると、その後の供試体の変形挙動/剛性回復挙動が異なることがわかる。

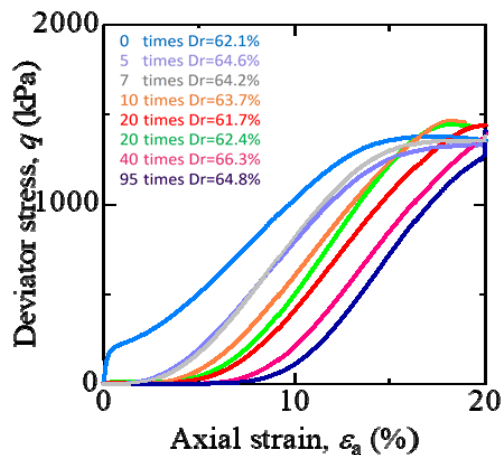


図 8 液状化供試体の剛性回復の様子

4.2 液状化後の圧縮挙動

図 9 に非排水繰返し载荷後の体積圧縮量を示す（実験(2)）。非排水繰返し载荷のひずみ振幅は 3%である。繰返し回数 50 回でバラツキが見られるが、繰返し回数が少なく液状化程度が小さい供試体に比べて、繰返し回数が多く液状化程度が大きい供試体の方が、液状化後の体積圧縮量が大きい。図 10 にはひずみ振幅 1%と 3%のまとめを示す。非排水繰返し回数の増加とともに体積圧縮量は増加するが、やがて収束傾向を示す。同じ繰返し回数であれば、ひずみ振幅が大きい方が体積圧縮量は大きくなるが、体積圧縮量の収束値はひずみ振幅に依らずほぼ等しい。

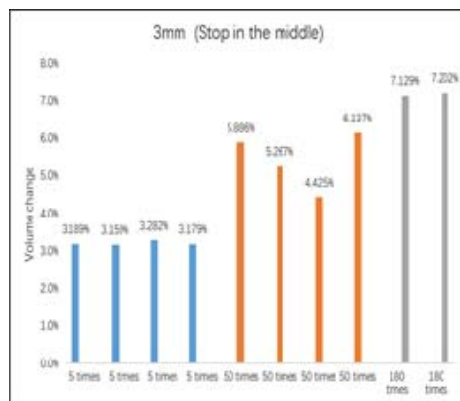


図 9 液状化後の体積圧縮挙動

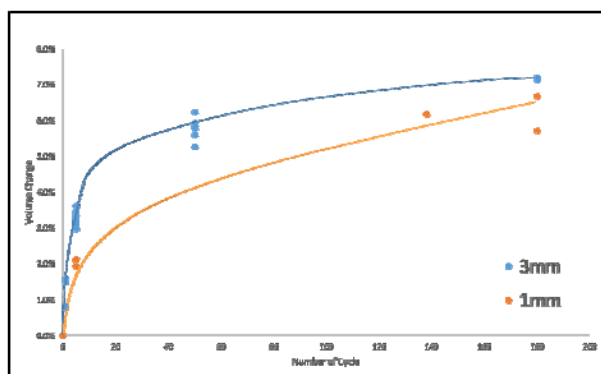


図 10 ひずみ振幅による液状化後の体積圧縮量の比較

5. 液状化中の骨格構造変化

ここでは、液状化程度の異なる供試体を再圧縮した後の単調載荷非排水せん断挙動から、液状化中の骨格構造変化の把握を試みる(実験(3))。図 11 と図 12 に有効応力パス ($q \sim p'$ 関係) と応力ひずみ図 ($q \sim \varepsilon_a$ 関係) を示す。(a) は液状化履歴なし、(b) は液状化履歴を大きく与えた(50 回の非排水繰返しせん断) 時の試験結果である。液状化後の圧縮によって、(b) の方が、相対密度が 30%ほど大きくなって密な状態になっている。

有効応力パス(図 11)を見ると、液状化履歴のない(a)だけでなく、大きな液状化履歴を与えた(b)も、圧縮側と伸張側でほぼ対称的な挙動を示しており、非排水繰返しせん断を残留ひずみゼロで止めたため、固有異方性がほぼない等方状態であったことがわかる。せん断初期の有効応力パスに着目すると、相対密度が大きいにもかかわらず、大きな液状化履歴を与えた(b)の方が、圧縮・伸張両方向において、有効応力 p' 減少の程度が顕著である。2.2 で述べた骨格構造概念に基づくと、 p' 減少(塑性圧縮)は構造低位化によって生じるので、大きな液状化履歴を与えた(b)の方が、液状化履歴なしの(a)よりも構造が高位な状態にあることを意味する。従来、構造は塑性変形の進展によって低位化する一方であると考えられてきたが、剛性を失った液状化中は土粒子が浮遊状態にあるため、構造が高位化したと捉えることができる。続いて、応力ひずみ関係(図 12)を見ると、せん断初期はやはり、大きな液状化履歴を与えた(b)の方が軸差応力 q は小さいが、変形が進むと逆転する(伸長試験はせん断途中のネッキング破壊が原因で逆転しない)。このことは、液状化後の再堆積時の密度増加に伴う過圧密比の高位化で説明することができる。

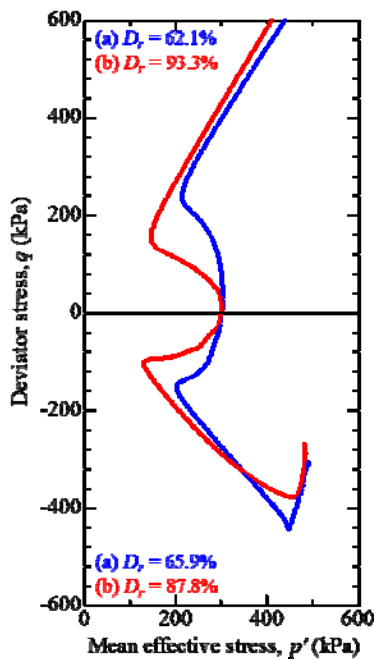


図 11 液状化履歴の異なる砂の有効応力パス(残留ひずみなし)

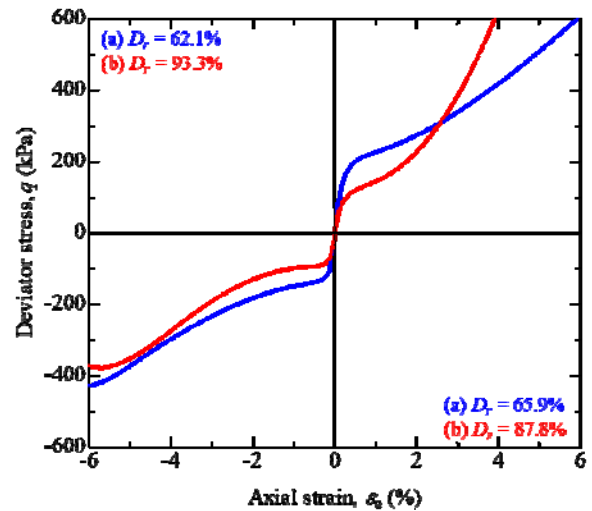


図 12 液状化履歴の異なる砂の応力ひずみ(残留ひずみなし)

構造・過圧密だけでなく、異方性の発展についても確認するために、残留ひずみがマイナス(図 5 中の B 点)で非排水繰返し載荷を止めた時の単調載荷非排水せん断挙動を図 13 と図 14 に示す。(a) は液状化履歴なし、(c) は液状化履歴を大きく与えた(50 回の非排水繰返しせん断) 時の試験結果である。液状化後の圧縮によって、(c) の方が、相対密度が 30%ほど大きくなって密な状態になっている。

有効応力パス(図 13)を見ると、図 11 とは異なり、圧縮側と伸張側で非対称な挙動を示す。伸長側に強く (p' 減少の程度が小さい)、圧縮側では(a) > (c) だが、伸長側では(a) < (c) となる。サイクリックモビリティ中は異方性が目まぐるしく変化するが¹¹⁾、非排水繰返し載荷を B 点で止めて異方状態(伸長側)にあったため、圧縮挙動に比べて伸張挙動が強くなったと捉えることができる。

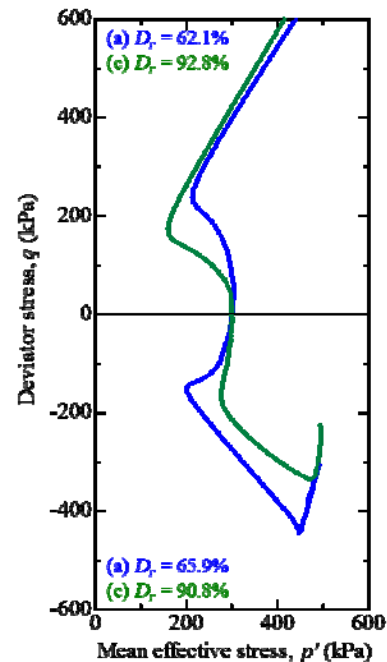


図 13 液状化履歴の異なる砂の有効応力パス(残留ひずみあり)

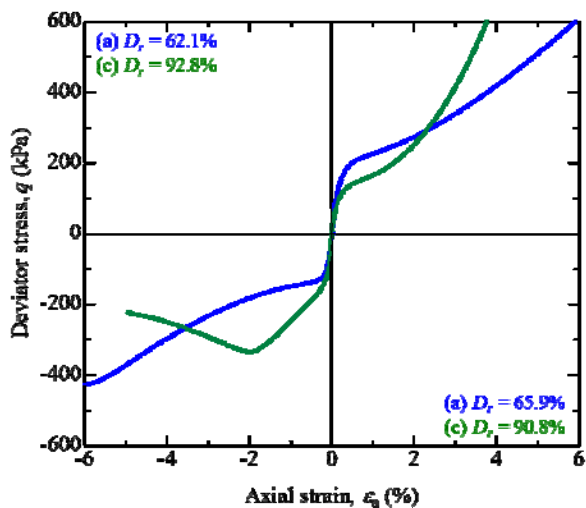


図 14 液状化履歴の異なる砂の応力ひずみ (残留ひずみあり)

以上から、Yamada et. al¹¹⁾ が述べるように、サイクリックモビリティ中は異方性が目まぐるしく変化することを確認した。また、液状化した供試体は液状化後の圧縮によって密実化、つまり、過圧密の高位化が生じるが、それに加えて、液状化履歴が大きいと、液状化時に構造が高位化し、相対密度が大きいにもかかわらずせん断初期に著しい塑性圧縮を示すことを新たに示した。

6. おわりに

本報では、液状化発生の有無という観点ではなく、液状化の程度がポスト液状化挙動や液状化中の骨格構造変化に与える影響を実験的に把握することを目的に、ひずみ制御非排水繰返しせん断試験を実施した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 変位制御非排水繰返し試験によって、異なる液状化履歴の状態を作り出すことができた。
- 2) 液状化履歴が大きいと、その後の単調載荷挙動において、剛性回復が生じにくいことを示した。
- 3) 液状化履歴が大きいほど、液状化後の体積圧縮量が大きくなることを示した。
- 4) 液状化した供試体は液状化後の圧縮によって密実化、つまり、過圧密の高位化が生じるが、それに加えて、液状化履歴が大きいと液状化時に構造が高位化するため、相対密度が大きいにもかかわらずせん断初期に著しい塑性圧縮を示すことを新たに示した。

本報では単調載荷挙動しか示すことができなかったが、高位な構造が低位化するときは塑性圧縮 (p' の減少) として働くため、繰返しせん断時には液状化強度が小さくなると考えられる。このことは、再液状化発生の有無は、従前

にどの程度の繰返し履歴を受けたのかが影響している可能性を示唆している。今後は液状化履歴の大きさが非排水繰返しせん断特性に与える影響を調査し、再液状化発生メカニズムの解明に貢献していく。

参考文献

- 1) 国土交通省: 液状化対策技術検討会議, 2011.
<https://www.mlit.go.jp/common/000169750.pdf>
- 2) Iwasaki, Y.: Liquefaction of sand interpreted as fatigue failure and its predictive method of analysis, Proc. of 6th annual research convention of soil engineering, pp. 523-526, 1971.
- 3) Tanimono, K. and Suga, Y.: Liquefying process of saturated sand subjected to dynamic loading, Proc. of 4th Asian regional conference on soil mechanics and foundation engineering, Vol. 1, pp. 235-239, 1971.
- 4) Ishihara, K., Tatsuoka, F. and Yasuda, S.: Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses, Soils and Foundations, Vol. 15, No. 1, pp. 29-44, 1975.
- 5) Nagase, H. and Ishihara, K.: Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 28, No. 1, pp. 65-76, 1988.
- 6) 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介: 非排水繰返しせん断履歴後の再圧密実験と体積収縮特性のモデル化, 土木学会論文集, Vol. 764, III-67, pp. 307-317, 2004.
- 7) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳澤栄司: 地盤へ入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用, 土木学会論文集, No. 631, III=48, pp. 161-177, 1999.
- 8) 國生剛治: エネルギーによる液状化判定法の適用性検討と FL 法との対比, 地盤工学ジャーナル, Vol. 8, No. 3, pp. 463-475, 2012.
- 9) Finn, W. D. L., Bransby, P. L. and Pickering, D. J.: Effect of strain history on liquefaction of sand, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 96, No. 6, pp. 1917-1934, 1970.
- 10) Yasuda, S. and Tohno, I.: Sites of reliquefaction caused by the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake, Soils and Foundations, Vol. 28, No. 2, pp. 61-72, 1988.
- 11) Yamada S., Takamori, T. 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.
- 12) 中井健太郎: 構造・過圧密・異方性の発展則に基づく土の弾塑性構成式の開発とその粘土, 砂, 特殊土への適用性に関する基礎的研究, 名古屋大学学位請求論文, 2005.
- 13) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol. 42, No. 5, pp. 47-57, 2002.
- 14) Nakano, M., Nakai, K. and Asaoka, A.: A description of mechanical behavior of clay and sand based on evolutions of soil structure and overconsolidation, ASCE Geotechnical Special Publication No.143, Geomechanics: Testing Modeling and Simulation, pp.136-153, 2003.