

液状化履歴に伴う 液状化抵抗の低下現象のメカニズム

山田正太郎¹・高森智子²・佐藤研一³

¹福岡大学社会デザイン工学科助教 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail:s-yamada@fukuoka-u.ac.jp

²福岡大学大学院工学研究科建設工学専攻 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail:td084009@cis.fukuoka-u.ac.jp

³福岡大学社会デザイン工学科教授 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail:sato@fukuoka-u.ac.jp

再液状化に関する特徴的な現象として、液状化後に排水を伴って密度が増加したにもかかわらず、液状化抵抗が著しく低下する場合があることが知られている。この事実は、密度の他に、液状化抵抗を大きく左右する因子が存在することを示唆している。これに対し、本研究では、異方性が液状化抵抗にとって重要な因子であり、異方性が高位に発達しているほど液状化抵抗が低いことを系統的な三軸せん断試験によって明らかにした。また、このことを立証する過程において、液状化中に異方性が連続的かつ規則的な変化をめまぐるしく繰り返していることなどを示した。

Key Words : Sand, Liquefaction, Reliquefaction, Anisotropy, Triaxial shear test

1. はじめに

砂地盤は液状化すると、その後排水を伴って必ず密になる。一般に密な地盤ほど液状化を生じにくい。ため、一旦液状化を経験すると、その地盤は以前よりも液状化しにくい状態になるはずである。この単純な論理に最初に異議を唱えたのはFinn et al.¹⁾である。彼らは、砂が一度液状化履歴を受けると、密度が増加するにもかかわらず著しく液状化しやすくなること、すなわち再液状化抵抗が液状化抵抗を大きく下回ることを、単純せん断試験と三軸せん断試験によって示した。単純には説明がつかないこの現象は、この論文を端緒に一躍脚光を浴び、その後多くの研究者によって実験的に確かめられてきた。

それではどのようなメカニズムで、液状化抵抗は減少するのであろうか？これまで出されてきた再液状化に関する論文の多くと同様に、本論文の最大の目的はこの疑問に答えることにある。先に結論的に本論文のキーワードを挙げるのであれば、それは異方性である。本論文では、液状化中に異方性が連続的かつ規則的な変化をめまぐるしく繰り返すため、液状化後の砂供試体は著しく異方的なものからほぼ等方的なものまで様々な状態を取りうることを示した上で、液状化後の異方性の発達程度の違いが再液状化抵抗を大きく左右することを示す。

2. 実験概要

(1) 実験に用いた試料および供試体作製法

実験には豊浦砂を用いた。豊浦砂の物理定数を表-1 に、粒径加積曲線を図-1 に示す。周知の通り、豊浦砂は非常に粒径の揃った硅砂である。

三軸せん断試験に用いる供試体は空中落下法により作成した。供試体の大きさは、直径7.5cm、高さ15cmである。供試体作成時の目標相対密度は図-3 に示す実験を除き80%である。各実験の正確な相対密度はそれぞれの実験結果を示す図中に記す。

(2) 実験条件

すべての実験を拘束圧 98.1kPa、バックプレッシャー294kPa の下で行った。いずれの試料も B 値が 0.96 以上であることを確認している。実験パターンは大きく分けて以下の 4 通りである。

- I 単調非排水せん断試験 (液状化履歴なし)
- II 繰返し非排水せん断試験 (液状化履歴なし)
＝液状化試験
- III 単調非排水せん断試験 (液状化履歴あり)
- IV 繰返し非排水せん断試験 (液状化履歴あり)
＝再液状化試験

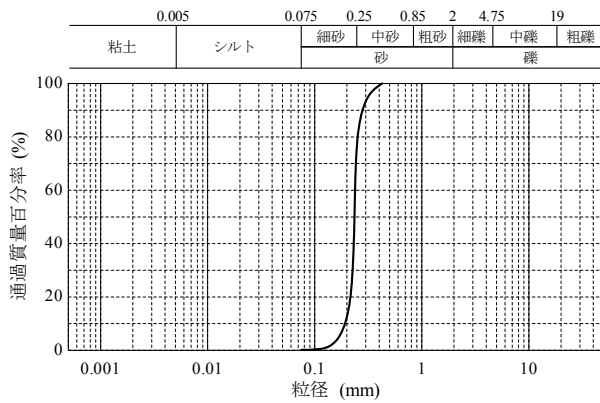


図-1 豊浦砂の粒径加積曲線

表-1 豊浦砂の物理特性

土粒度の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.646
最大間隙比 $e_{\max}$	0.985
最小間隙比 $e_{\min}$	0.639
平均粒径 D_{50} (mm)	0.236
均等係数 U_c	1.24
曲率係数 U_c'	1.11

単調非排水せん断試験，繰返し非排水せん断試験共にひずみ制御にて行った．载荷速度は 0.12%/min 以上である．液状化試験の応力振幅は $q_{\max} = 39.2\text{kPa}$ として，圧縮側と伸張側で等しい大きさで振った．液状化履歴の与え方については該当する箇所述べる．

以下では，まず空中落下法で作成した液状化履歴を受けていない砂供試体に対する実験結果（ⅠおよびⅡ）を示しながら，初期異方性が砂の単調非排水せん断挙動と繰返し非排水せん断挙動にどのような影響を与えるのか述べる．ここで述べた特徴を念頭に置きながら，次に，液状化履歴を受けた砂の単調非排水せん断挙動（Ⅲ）について示すことにより，液状化後の異方性の発達状態について調べる．ここでは特に，液状化試験の停止条件に応じて液状化後の単調非排水せん断挙動がどのように変化するのか系統的に示すことで，液状化中における異方性の変動の様子について推察する．そして最後に，これらの実験（Ⅲ）と同様な液状化履歴を与えた後，今度は再度繰返し非排水せん断試験（Ⅳ）を行うことにより，液状化後の異方性の発達状態が再液状化のしやすさにどのような影響を及ぼすのか示す．

なお，本研究で採用した载荷速度は液状化試験としては遅いが，土と水が分離するような現象は見られなかった．また，今回与えた程度のひずみではネッキングが生じることもなく，供試体形状の一様性は高かった．

3. 液状化履歴を受けていない砂の単調非排水せん断挙動（初期異方性が単調非排水せん断挙動に与える影響）

はじめに，単調非排水せん断挙動に与える初期異方性の影響について示す．図-2 は空中落下法で作成した液状化履歴を受けていない砂供試体の単調非排水せん断挙動である．空中落下法で作成した砂供試体は，圧縮側と伸張側で異なる挙動を示しており，初期に異方性を有していることが確認できる．

図-3 に同じく空中落下法で作成した様々な密度の豊浦砂の単調圧縮非排水せん断挙動を示す．図-2 と図-3 の有効応力経路を見比べると，図-2 では圧縮側と伸張側で供試体の密度がほぼ同じであるにもかかわらず，伸張側では圧縮側よりもあたかもゆるい砂のような挙動が現れていることが分かる．つまり，高い剛性を示すせん断方向には相対的に密な砂に似た挙動が現れ，低い剛性を示すせん断方向には相対的にゆるい砂に似た挙動が現れる．砂の場合，せん断方向に応じた“硬さの違い”は，“疑似的な密度の違い”として表れると言える．

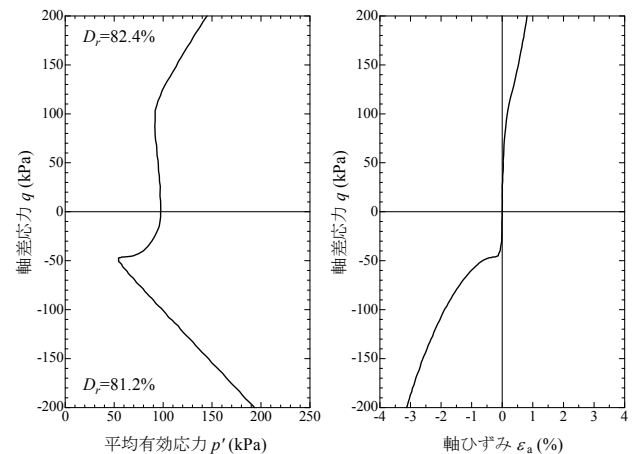


図-2 液状化履歴を受けていない砂供試体の単調非排水せん断挙動

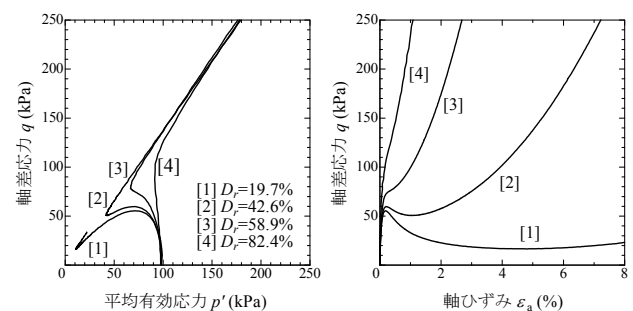


図-3 密度の異なる砂供試体の単調非排水せん断挙動

4. 液状化履歴を受けていない砂の繰返し非排水せん断挙動（初期異方性が液状化挙動に与える影響）

次に、砂の液状化挙動に与える初期異方性の影響について示す。図-4 は空中落下法で作成した液状化履歴を受けていない砂供試体の繰返し非排水せん断挙動である。図-4 には同様な状態にある砂供試体の単調非排水せん断挙動（図-2 と同じ）も破線で示してある。空中落下法で作成した砂供試体の繰返し非排水せん断挙動の特徴として、(1)有効応力経路図から、サイクリックモビリティを描き始めるまでに圧縮側に比べ伸張側で大きく平均有効応力が減少すること、すなわち伸張側で顕著に間隙水圧が上昇することと、(2)軸差応力-軸ひずみ関係から、液状化中は伸張側に片寄ってひずみが伸展することの2点を挙げることができる。(2)の特徴はもちろんのこと、(1)の特徴が初期異方性の影響であることは、単調非排水せん断時の有効応力経路との比較から容易に分かる。

さて、上記の二つの特徴は、空中落下法で作成した砂供試体は、単調非排水せん断時同様、繰返し非排水せん断時にも、圧縮側に比べ伸張側でゆるい砂に似た挙動を生じることを示している。また、(1)の特徴は、異方性が発達しているほど、あるせん断方向ではよりゆるい砂に似た挙動が現れるために、液状化抵抗がその挙動に依存して低くなることを示唆している。

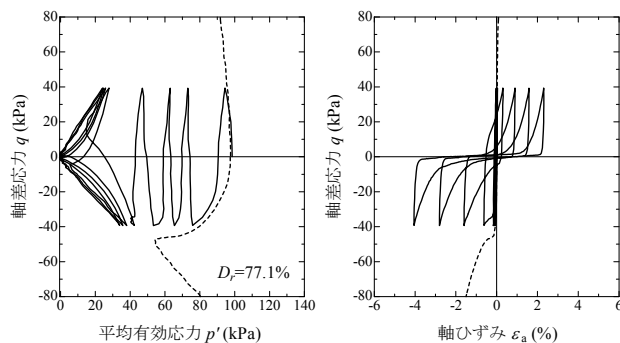


図-4 液状化履歴を受けていない砂供試体の繰返し非排水せん断挙動

5. 液状化履歴を受けた砂の単調非排水せん断挙動（液状化中に発達した異方性が単調非排水せん断挙動に与える影響）

次に、液状化履歴を受けた砂の単調非排水せん断挙動を示すことで、液状化後の異方性の状態について調べる。実験結果を示す前に、図-5 を用いて液状化履歴を与える場合の実験手順について説明する。

ステップ 1: まず、空中落下法で作成した砂供試体を、液状化履歴を与えない場合と同様にひずみ制御の繰返し非排水せん断にて液状化させる。

ステップ 2: 次に、軸ひずみの最大値と最小値の差が 5%以上生じたことを確認した後、繰返し非排水せん断を様々な状態（図-5 の点[a]から[f]の位置）で停止する。

ステップ 3: 軸変位を許した状態で、排水させ、応力状態を繰返し非排水せん断開始時と同じ状態まで等方的に変化させる。

ステップ 4: 再び非排水状態にして、ひずみ制御により圧縮側と伸張側に単調非排水せん断を行う。なお、排水完了時における供試体形状をひずみの基準状態に取り直す。

以下では、ステップ 2 における繰返し非排水せん断の停止条件の違いが、液状化後の異方性の発達状態に及ぼす影響について調べる。

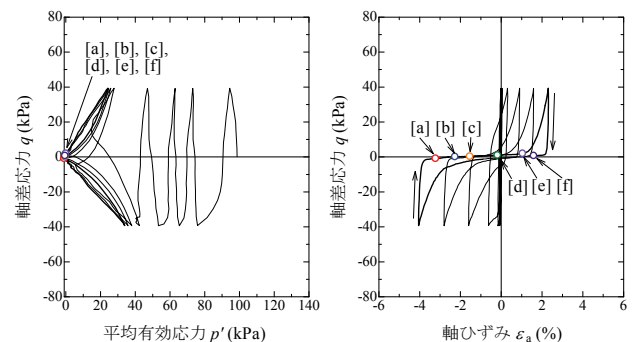


図-5 液状化履歴の与え方

(1) 除荷直後における異方性の発達状態（最終的なせん断方向の影響）

ここではまず、最終的に伸張側にせん断した後、除荷して等方応力状態に戻ってきた瞬間に（図-5 の点[a]に相当する位置で）繰返し非排水せん断を停止する場合について調べる。図-6 にこのような液状化履歴を受けた砂供試体の単調非排水せん断挙動を示す（図-6, 7, 8 の中に記された相対密度は排水後、すなわち単調非排水せん断中の相対密度である）。液状化履歴を与えない場合（図-2）とは異なり、圧縮側でゆるい砂に似た挙動が、伸張側で密な砂に似た挙動が現れている。液状化履歴を受けたことで、初期に有していた異方性が完全に消失し、全く別方向に異方性が発達したことが分かる。しかもその異方性の発達程度は初期よりも高位である。

今度は、最終的に圧縮側にせん断した後、除荷して等方応力状態に戻ってきた瞬間に（図-5 の点[f]に相当する位置で）繰返し非排水せん断を停止する場合について調べる。図-7 にこのような液状化履歴を受けた砂供試体の単調非排水せん断挙動を示す。

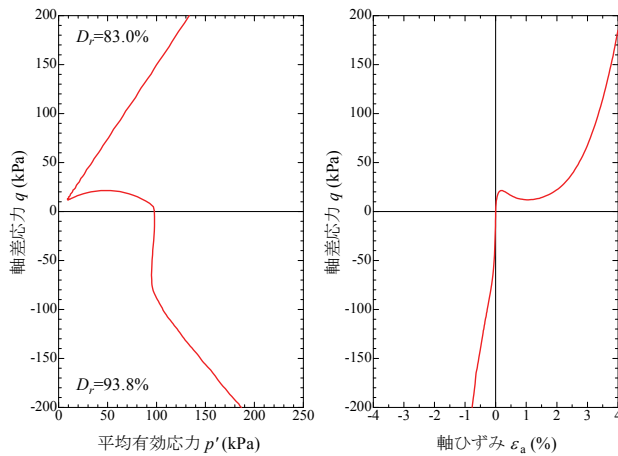


図-6 液状化履歴を受けた砂供試体の単調非排水せん断挙動（繰返し非排水せん断を図-5点[a]に相当する位置で停止する場合）

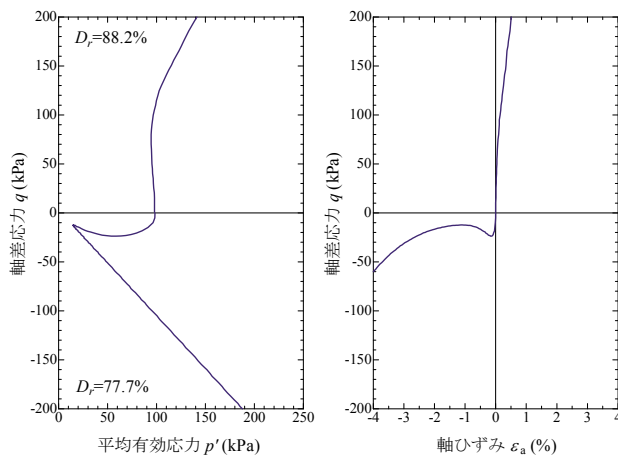


図-7 液状化履歴を受けた砂供試体の単調非排水せん断挙動（繰返し非排水せん断を図-5点[f]に相当する位置で停止する場合）

最終的に伸張側にせん断した場合（図-6）と最終的に圧縮側にせん断した場合（図-7）とで、ほぼ対称な挙動が現れている。最終的に伸張側にせん断した場合には、伸張側で密な砂に似た挙動を示しているのに対し、最終的に圧縮側にせん断した場合には、圧縮側で密な砂に似た挙動を示している。つまり、繰返し非排水せん断中に異方性が大きく変化し、等方応力状態に戻ってきた瞬間は、単純に最終的にせん断された方向に再びせん断されると高い剛性を示す状態になっていることが分かる。途中で再圧密という過程が入るものの、载荷方向と異方性の発達方向に関するこのような傾向は誘導異方性を示す固体材料に共通した一般的な性質である。

さて、これまで土のような粒状材料では、堆積時に獲得した異方性は固有異方性と称され、塑性変形を伴う応力履歴と共に発達する誘導異方性と分けて考えられてきた。固有異方性という表現によく表れているように、地盤の堆積時ないしは供試体作成時

に獲得した異方性は、その材料に固有な不変の異方性として捉えられがちであるが、上記の結果は、実際には堆積時に獲得した異方性が液状化履歴を受けることでほぼ完全に消滅することを示している。また、せん断方向の違いに応じた硬さの違いが、疑似的な密度の違いとして表れるという点において、堆積時に獲得した異方性と塑性変形を伴う応力履歴によって発達した異方性に違いはない。得られた実験結果は、砂においては、両異方性の間に本質的な差はなく、これまで固有異方性と呼ばれてきた異方性は誘導異方性の一状態に過ぎないことを教えている。なお、少なくとも砂の場合、両異方性を特に区別する必要がないという観点から、本論文では誘導異方性のことを単に異方性と呼び、供試体作成時に獲得した異方性のことを誘導異方性の初期状態という意味で初期異方性と呼んでいる。

(2) 液状化中における異方性の変動

図-6 および 7 からサイクリックモビリティが描かれる過程において異方性が大きく変化することが分かった。このような異方性の変化が図-5の点[a]から[f]に至る半サイクルの間にどのように進行するのか調べるために、今度は、図-5に示す点[a]～[e]に相当する位置で液状化試験を停止する。実験の手順はこれまでと全く同じである。これらの液状化履歴を受けた砂の単調非排水せん断挙動を図-8に示す（図中の[a]から[e]の文字はそれぞれ液状化試験の停止位置に対応している）。さて、図-8は一見、様々な密度の砂の非排水せん断挙動を示した図-3に似ている。しかし、図-8に示す各実験の相対密度には大きな違いがない。また少し注意深く見てみると、停止位置が点[a]から[e]に向かうに従って、圧縮側では徐々に密な砂に似た挙動が現れているのに対し、伸張側では逆に徐々にゆるい砂に似た挙動が現れていることに気付く。[a]から順に個々の挙動に着目していくと、点[a]では伸張側に卓越

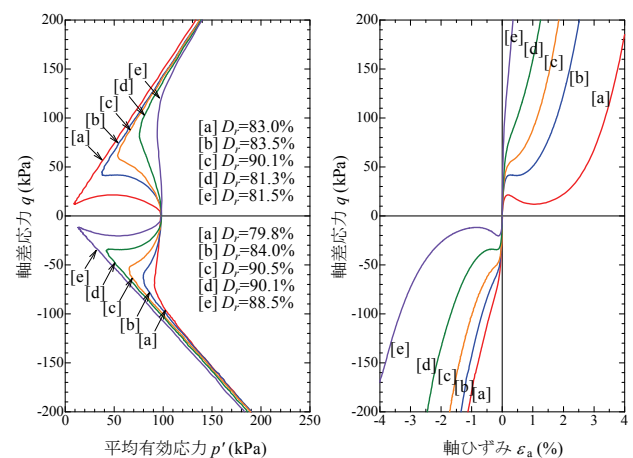


図-8 液状化履歴を受けた砂供試体の単調非排水せん断挙動（繰返し非排水せん断を図-5点[a]から[e]に相当する位置で停止する場合）

していた異方性が、液状化中に徐々に消滅し、点[c]付近で一旦等方的になり、そしてさらに続く液状化中に再び異方性が発達し始め、点[e]では圧縮側に点[a]と同程度まで発達することが分かる。液状化中にはこのような異方性の連続的かつ規則的な変化がめまぐるしく繰り返されていると考えられる。

6. 液状化履歴を受けた砂の繰返し非排水せん断挙動（液状化中に発達した異方性が再液状化挙動に与える影響）

次に、液状化中に発達した異方性の状態と再液状化のしやすさの関係について示す。先程同様、図-5の点[a]～[e]に相当する位置で液状化試験を停止した後、今度は単調非排水せん断の代わりに、繰返し非排水せん断を行った。各停止位置に対する2回目の繰返し非排水せん断時の挙動、すなわち再液状化挙動を図-9に示す（排水前後の相対密度を図中に示す）。また、それぞれの図中にはほぼ同じ位置で停止した場合の単調非排水せん断挙動（図-8から該当する挙動を抽出したもの）も破線で示す。

各図において、繰返し非排水せん断挙動と単調非排水せん断挙動とを比較することにより、液状化のしやすさが異方性の発達状態の影響を受けていることがすぐに分かる。また、すべての繰返し非排水せん断挙動を比較することにより、異方性が発達しているほど、液状化しやすい状態にあることも容易に分かる。また、液状化履歴を受けていない場合の繰返し非排水せん断挙動（図-4）と比較すると、点[a]や[e]に相当する位置で停止した場合は液状化前よりも明らかに高位に異方性が発達した状態にあるため、密度が増加しているにもかかわらず、液状化履歴を受ける前よりも著しく液状化抵抗が低くなっていることが分かる。もはや十分に理解されていることと思うが、高位に異方性が発達しているほど液状化抵抗が低いのは、異方性が発達した状態では潜在的によりゆるい砂に似た挙動を示しうるのである。初期異方性が繰返し非排水せん断挙動に与える影響と同様に、ゆるい砂に似た挙動が液状化抵抗を大きく左右している。なお、図-9では、液状化に至るまでの繰返し回数に大きな差が表れていないが、これは比較的振幅が大きいためであり、振幅が小さい場合にはより顕著な差が表れる。以上で見たように、液状化抵抗にとって異方性は密度をも凌駕する主要な因子となっている。

なお、1 サイクル毎のひずみの伸展量は、1 回目の液状化試験よりも2回目の方が小さくなっている。液状化抵抗にとって、異方性が密度をも凌ぐ重要な因子であるのに対し、液状化中の変形にとっては、密度がより重要な因子であると言える。

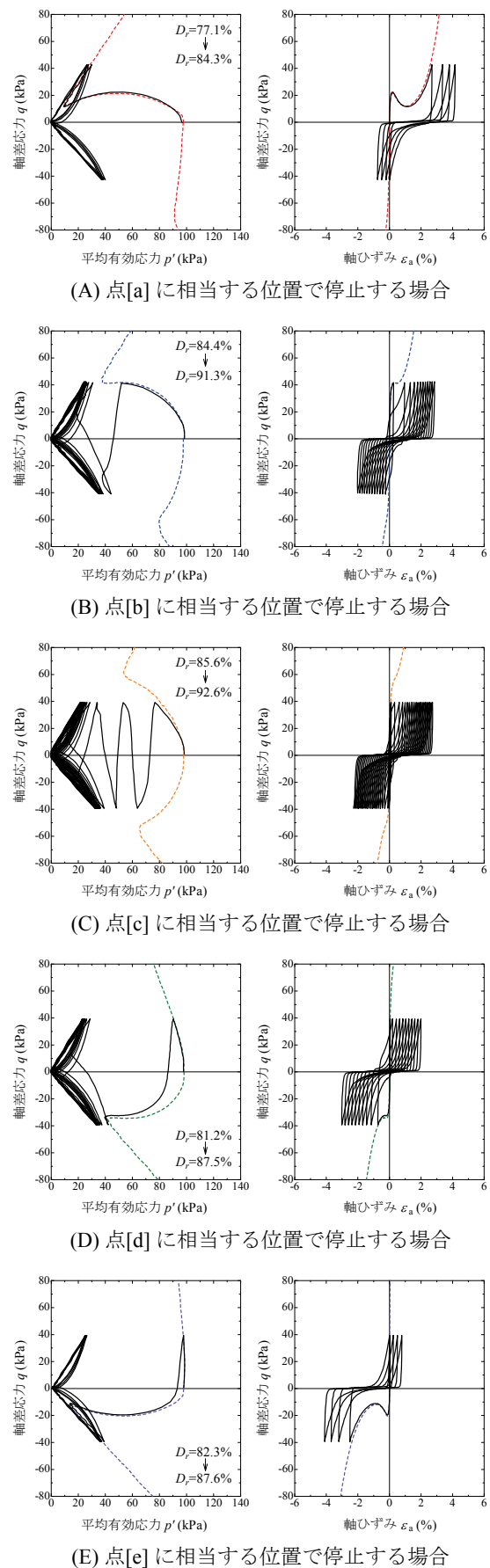


図-9 液状化履歴を受けた砂供試体の繰返し非排水せん断挙動（1 回目の繰返し非排水せん断を図-5 点[a] から[e] に相当する位置で停止する場合）

7. 結論

本研究では、豊浦砂を用いて、液状化中に生じる異方性の変動と、液状化中に発達した異方性が再液状化抵抗に与える影響について調べた。本研究で得られた主要な結論を以下に列挙する。

- 1) 粒径が揃った砂では、液状化中は異方性が連続的かつ規則的な変化をめぐり繰り返す。このため、液状化終了時には異方性は様々な発達状態にある。
- 2) 異方性が発達しているほど、ある方向にせん断した際によりゆるい砂に似た挙動を示すため、液状化しやすい。
- 3) 液状化履歴を受けることで液状化前よりも異方性が顕著に発達する場合には、密度が増加して

いるにもかかわらず、あるせん断方向では極端にゆるい砂に似た挙動を示すようになるため、液状化抵抗は著しく低くなる。

なお、本研究に興味を持たれた方はYamada et al.²⁾も参照されたい。

参考文献

- 1) Finn, W. D. L., Bransby P. L. and Pickering D. J.: Effect of strain history on liquefaction of sand, *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, Vol. 96, No. 6, pp. 1917-1934, 1970.
- 2) Yamada, S. and Takamori, T., Sato, K.: Effects on relque-faction resistance produced by changes in anisotropy during liquefaction, *Soils and Foundations*, under contribution.

THE MECHANISM OF DECREASING PHNOMENON IN LIQUEFACTION RESISTANCE DUE TO LIQUEFACTION HISTORY

Shotaro YAMADA, Tomoko TAKAMORI and Kenichi SATO

A distinctive characteristic of the relquefaction behavior of soils is that there are instances where the phenomenon of a sharp decrease in liquefaction resistance occurs in spite of increases in soil density caused by drainage of water after liquefaction. This fact points to the existence of factors other than density that sway the liquefaction resistance of soils. The current paper demonstrates that, in fact, anisotropy is an important factor influencing liquefaction resistance. This is made clear through the results of systematic triaxial shear tests, which show that the higher the level of developed anisotropy, the lower the liquefaction resistance. In the process of verifying the above, we found that continuous and orderly changes in anisotropy are repeated with dizzying rapidity during liquefaction.