

異方性の発達のしやすさの違いが 再液状化挙動に及ぼす影響

高森智子¹・山田正太郎²・佐藤研一³

¹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

²福岡大学社会デザイン工学学科助教 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

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

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

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

Finn et al.によって、砂質土が液状化した際に、液状化後の排水によって密度が増加したにもかかわらず、液状化前よりも著しく液状化しやすくなる現象が報告されている。本研究では、異なる特徴を持った5種類の砂質土に対して再液状化実験を行うことで、実際には、このような現象を生じる砂質土と生じない砂質土があることを示した。また、著者らはこれまでに、液状化履歴に伴う液状化抵抗の低下現象のメカニズムを異方性に着目することで明らかにしているが、本研究ではこれを踏まえ、異方性が発達しやすい砂質土だけがこのような現象を生じることを示した。

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

1. はじめに

砂質土が液状化した際に、液状化後の排水によって密度が増加したにもかかわらず、液状化前よりも著しく液状化しやすくなる現象が、Finn et al.¹⁾を始め多くの研究者によって確かめられてきた。一方で、Seed et al.²⁾に代表されるように、砂質土は液状化履歴を受ければ素直に液状化しにくくなるという報告も多い。それでは、私たちは、過去の地震により液状化したことがある地盤を、再び液状化を生じる可能性が高い危険な地盤と判断すべきなのであるのか、それとも容易には再液状化を生じ得ない比較的安全な地盤と判断すべきなのであるのか？相対する実験結果を前に、私たちは過去の地震による液状化の情報を有益に利用することができない。

以上の議論をするに当たり、まずは一つの実験結果を紹介したい。図-1 は豊浦砂で作成した供試体に対し、三軸試験装置を用いて液状化試験を計 5 回繰り返した際の挙動を示している。この結果より、実際には、液状化履歴を受けることで液状化抵抗が低下する場合もあれば、増加する場合もあることが分かる。著者らはこれまでに、このような現象が生じるメカニズムについて調べるために、系統的な三軸試験を行ってきた^{3), 4)}。その結果、液状化中は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、液状化後は著しく異方的な状態から比較

的等方的な状態まで様々な状態を取り得ることを示した。またさらに、液状化後に著しく異方性が発達している場合には、あるせん断方向で非常にゆるい砂に似た挙動を示すために著しく低い液状化抵抗が示されることを示した。もちろん、このメカニズムによれば、液状化履歴を受けることで、液状化前よりも等方的な状態に近づいた場合は、液状化抵抗が増加することも示される。現時点において地盤内の異方性の状態を精度よく把握することが困難である以上、このメカニズムを知ることで、私たちは過去の地震による液状化の情報を有効に活用することの難しさだけを感じるかもしれない。

しかし、このような現実には絶望する必要は決していない。本研究では、液状化抵抗が著しく低下する現象は、限られた性質を持った砂質土でのみ生じる現象であり、その他の砂質土では液状化抵抗が複雑に増減するようなことはないことを主張する。つまり、多くの砂質土では、液状化履歴を受けることで、液状化の可能性が低まったと判断していいことを主張する。もちろん、ここで言う限られた性質を持った砂質土とは、異方性の高位に発達し得る砂質土のことである。本研究では、自然界には異方性が発達しやすい砂質土と発達しにくい砂質土が存在し、異方性がさほど高位に発達しない砂質土では、液状化抵抗が著しく低下する現象は生じないことを実験的に示す。

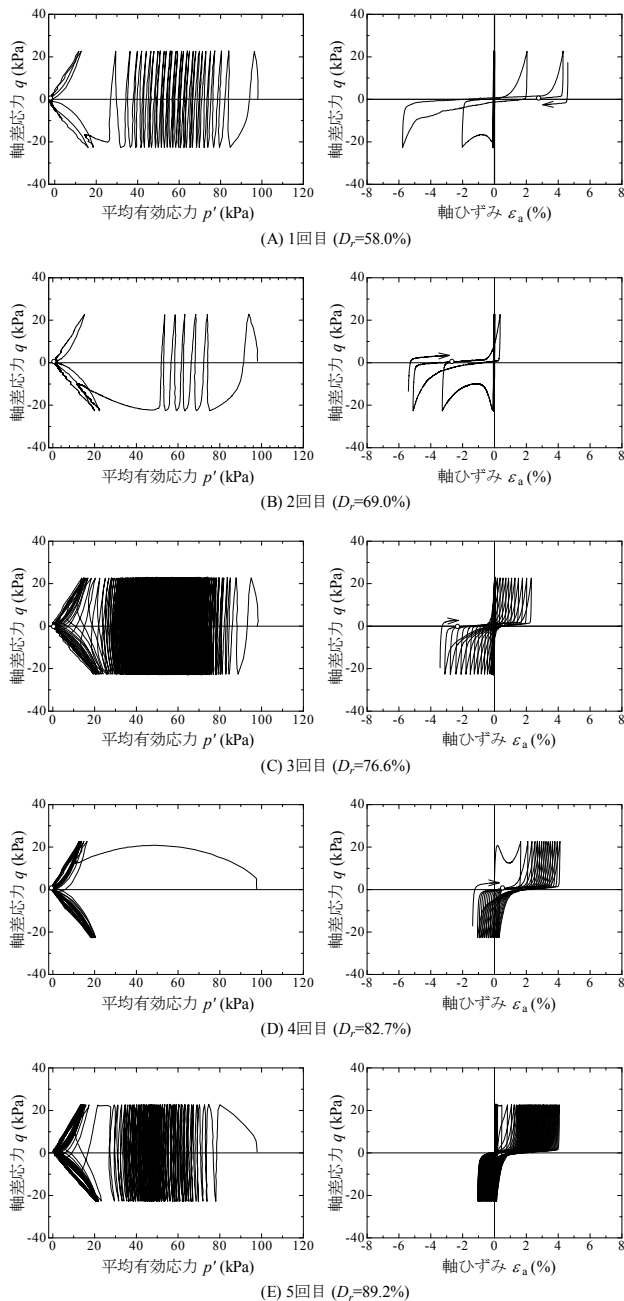


図-1 豊浦砂を用いた再液状化実験

2. 実験概要

(1) 実験に用いた試料および供試体作製法

実験試料には以下に示す A～E の 5 つの試料を用いた。試料 A は豊浦砂，試料 B は太宰府で採取されたまさ土（試料 E）を粒度調整した砂質土，試料 C は筑後川流域で採取された沖積砂，試料 D は北九州の埋立地で採取された砂質土，試料 E は太宰府で採取されたまさ土である。各試料の粒径加積曲線を図-2 に，物理特性を表-1 に示す。特に粒度組成に関し，それぞれが異なる特徴を持っていることが分かる。

すべての実験は，三軸試験装置を用いて行った。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80%とした。各実験の正確な相対密度はそれぞれの実験結果を示した図中に記す。

(2) 実験条件

三軸試験は拘束圧 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

単調非排水せん断，繰返し非排水せん断共にひずみ制御にて行った。載荷速度は 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，圧縮側と伸張側に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。

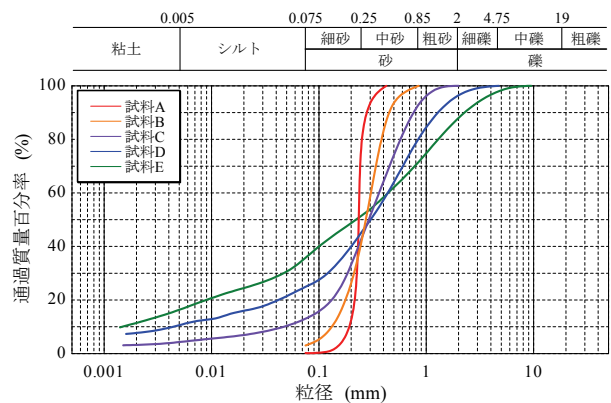


図-2 各試料の粒径加積曲線

表-1 各試料の物理特性

試料記号	試料A	試料B	試料C	試料D	試料E
土粒子の密度 $\rho_t (\text{g/cm}^3)$	2.646	2.633	2.716	2.700	2.623
最大間隙比 $e_{\max}$	0.985	1.290	0.941	1.289	1.091
最小間隙比 $e_{\min}$	0.639	0.777	0.528	0.672	0.583
細粒分 (%)	0.2	3.0	13.0	24.9	35.6
砂分 (%)	99.8	97.0	87.0	71.6	52.4
礫分 (%)	0.0	0.0	0.0	3.5	12.0
平均粒径 $D_{50} (\text{mm})$	0.236	0.275	0.294	0.305	0.223
均等係数 U_c	1.24	2.31	7.85	101	304
曲率係数 U_c'	1.11	1.13	2.02	7.79	3.50

3. 各試料の液状化挙動

図-3～7 に各試料の繰返し非排水せん断挙動（＝液状化挙動）を示す．図中には、点線で単調非排水せん断挙動も示した．図中に示した相対密度は繰返し非排水せん断に用いた供試体の相対密度である．はじめに、単調非排水せん断挙動に着目する．まず、粒径が揃っているほど硬化の程度が甚だしいことが

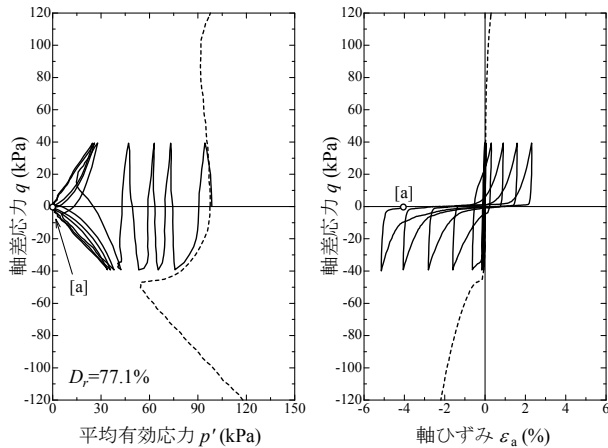


図-3 試料Aの液状化挙動

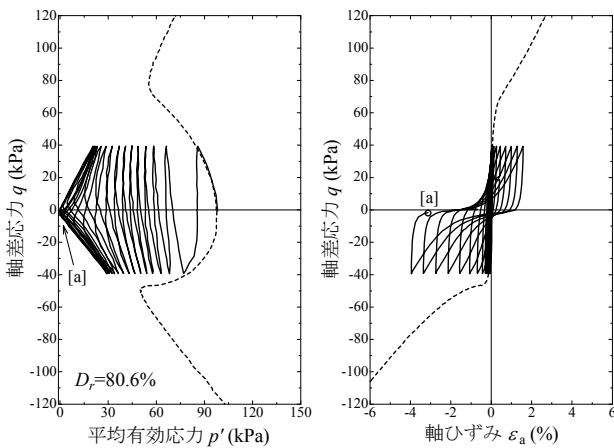


図-4 試料Bの液状化挙動

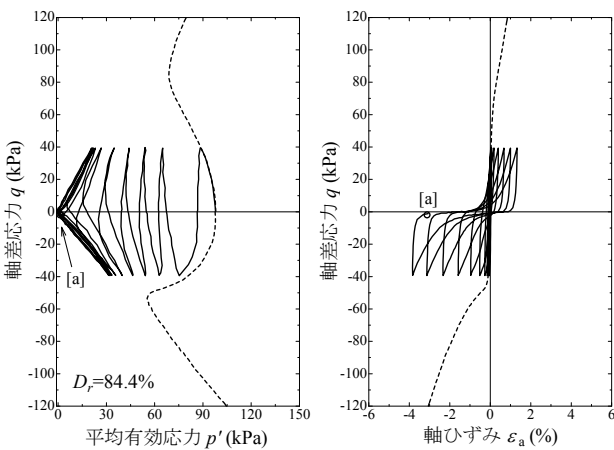


図-5 試料Cの液状化挙動

分かる．また、試料 A は、同じ軸差応力に対し、圧縮側よりも伸張側でひずみが大きく生じていることから、圧縮側に初期異方性が発達していることが分かる．異方性がこのような状態にあるとき、伸張側ではゆる詰め状態に似た一旦平均有効応力が減少する有効応力経路をとることが分かる．一方、試料 B、試料 C も初期に異方的であるが、圧縮側でも伸張側でも平均有効応力が一旦減少しており、試料 A ほど明確に異方性の影響が表れていない．試料 D と E は試料 A～C の挙動とは異なり、かなり等方的な挙動を示している．以上のように、粒度組成の違いに応じてそれぞれが異なる特徴を持った単調非排水せん断挙動を示す．

次に、繰返し非排水せん断挙動に着目する．試料 A では繰返しせん断を与えると徐々に有効応力が減少し、ある瞬間を境に急激に剛性が低下して、ひずみが顕著に現れている．このような状態に至ると、各サイクルの途中で、平均有効応力 $p' \approx 0$ 、軸差応力 $q \approx 0$ でひずみを生じる状態が現れる．有効応力ゼロ、尚且つ剛性がほぼゼロというこの状態はまさに液状化と呼ぶにふさわしい状態である．しかし、このような状態はいつまでも続かず、せん断中に急激に剛性が回復し、いわゆるサイクリックモビリティが描かれている．試料 B、試料 C の挙動は試料 A

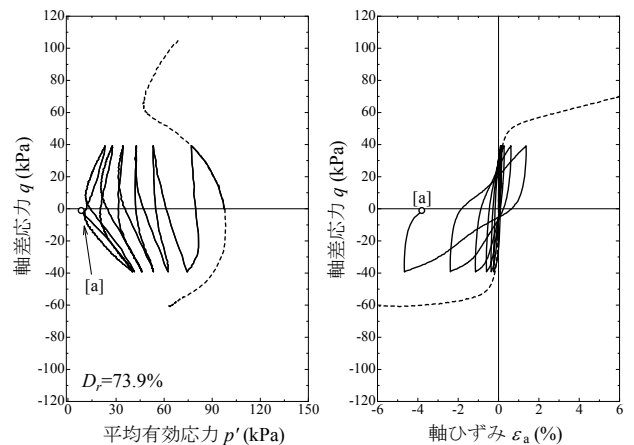


図-6 試料Dの液状化挙動

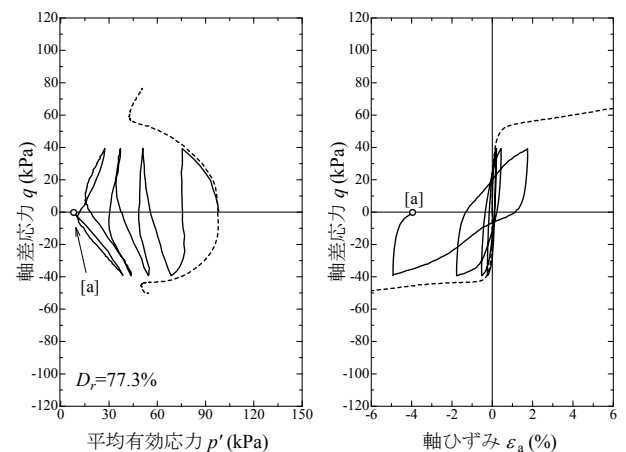


図-7 試料Eの液状化挙動

の挙動と似ているが、剛性が完全になくならない点で異なる。また、剛性の回復の仕方が試料 A に比べて緩やかである。加えて、試料 A はサイクリックモビリティを描き始めるのと同時に、ひずみが顕著に生じるようになるのに対し、試料 D や E はサイクリックモビリティを描く前からひずみが徐々に大きくなっていく。試料 D や E が示す挙動は“準液状化”と呼ぶのがふさわしいような挙動であるが、これらの挙動が液状化に相当する流動的なものである

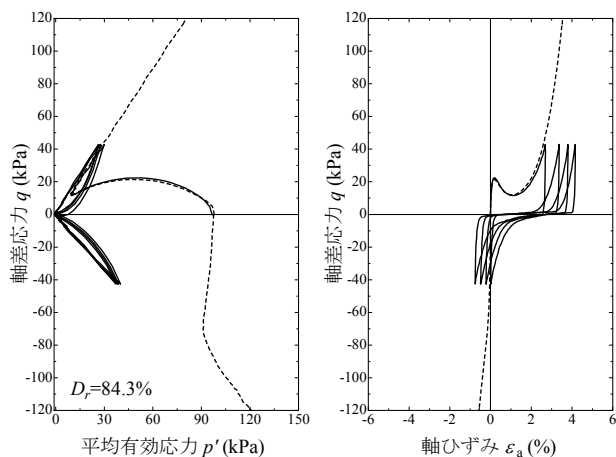


図-8 試料Aの再液状化挙動

ることに間違いはない。特に単調非排水せん断時に顕著な硬化を示さない試料 D や E は、試料 A が液状化中に示すような急激な剛性の回復を見せないため、1 サイクル毎のひずみの伸展量が大きく危険である。また、上記の違いに加えてもう一点抑えておきたいことは、試料 A が液状化前の繰返しの段階で、伸張せん断時に有効応力を大きく減少させる点である。これが異方性の影響であることは破線で示した単調せん断の有効応力経路との比較から分かる。他の試料では明確に見られない点である。

また、一般に粒径の揃った砂は粒度の良い砂質土に比べ液状化しやすいと考えられがちであるが、両振幅軸ひずみが 5%に達するまでの繰返し回数は、粒度が揃っている試料 B が最も多く、非常に粒度が良い試料 E が最も少ない。このように、粒度の良さと液状化のしやすさの関係は一般に言われるほど単純ではないことが分かる。

4. 各試料の再液状化挙動

次に、各試料が液状化履歴を受けることでどのような挙動を示すように変化するかを示す。液状化履歴は、図-3～7 に示す液状化試験を伸張側から等方応

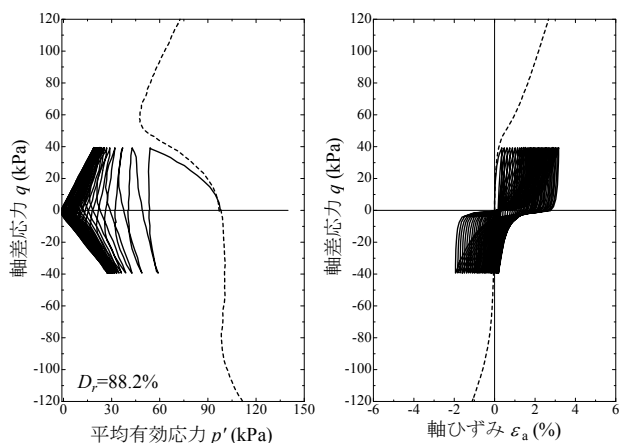


図-9 試料Bの再液状化挙動

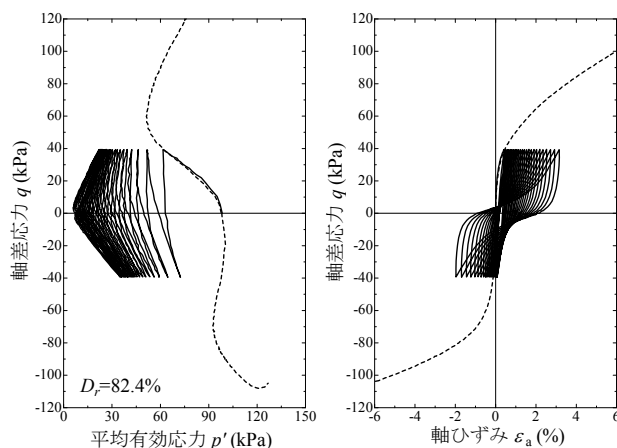


図-11 試料Dの再液状化挙動

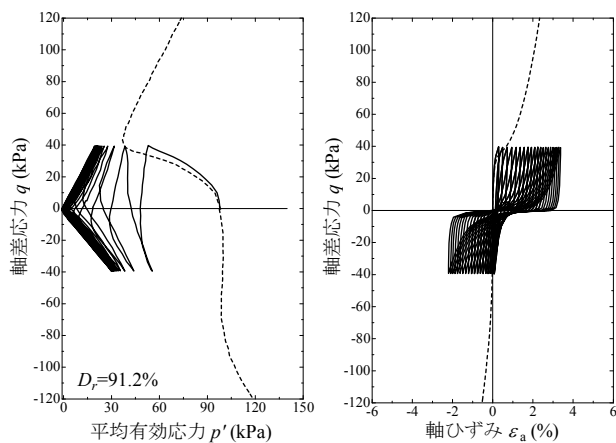


図-10 試料Cの再液状化挙動

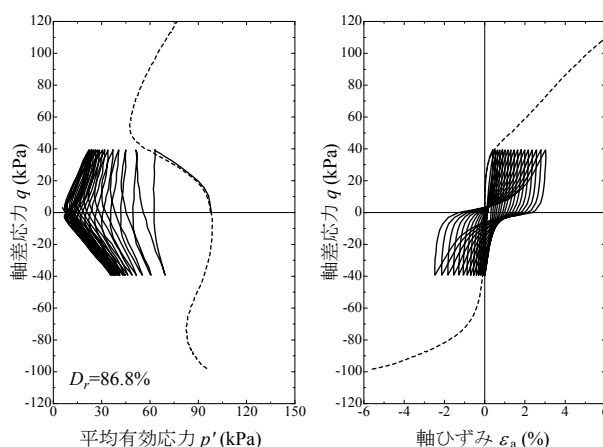


図-12 試料Eの再液状化挙動

力状態に戻ってきた瞬間、すなわち同図の点[a]で止めた後に、軸変位を許した状態で一旦排水するという流れで与えた。液状化履歴を受けた供試体の繰返し非排水せん断挙動（＝再液状化挙動）を図-8～12に示す。図中には、同様な液状化履歴を受けた供試体の単調非排水せん断挙動も破線で示した。まず、試料 A の繰返し非排水せん断挙動に着目してみると、せん断直後に平均有効応力が圧縮側で一気に減少し、一発で液状化を生じていることが分かる。

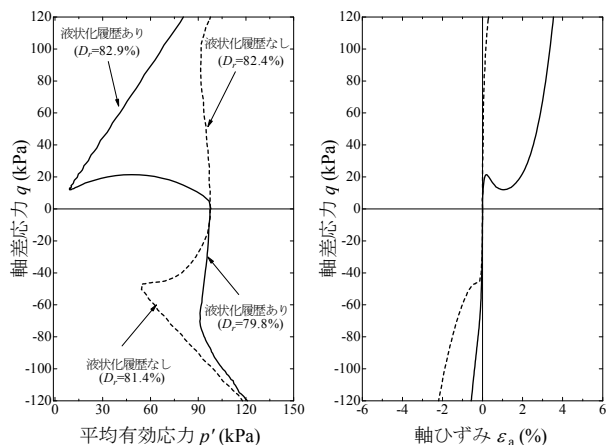


図-13 試料Aの単調非排水せん断挙動

5. 各試料の異方性の発達のしやすさの違い

次に、どのような性質を持った砂質土が再液状化時に著しく低い液状化抵抗を示し得るか探る。図-13～17に各試料の液状化履歴受ける前後の単調非排水せん断挙動を示す。これらの挙動から一目見てわかるように、液状化後の異方性の発達程度に大きな違いがあることが分かる。図-13の液状化履歴を受けた状態での単調非排水せん断挙動の圧縮側と伸張側の違いから、試料 A は、液状化履歴を受けたことによって、異方性が高位に発達していることが分かる。このような状態では、あるせん断方向で非常にゆるい砂に似た挙動を示すために、再液状化を容

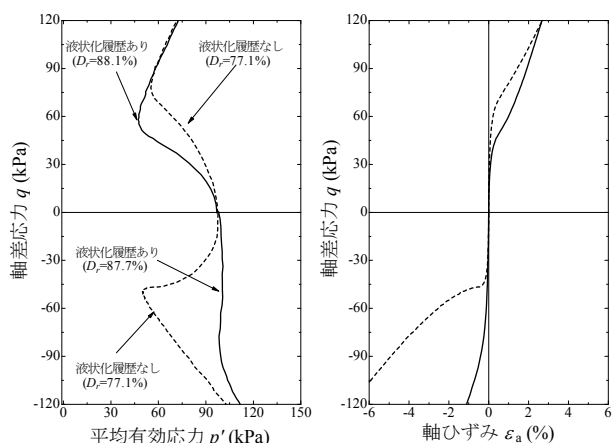


図-14 試料Bの単調非排水せん断挙動

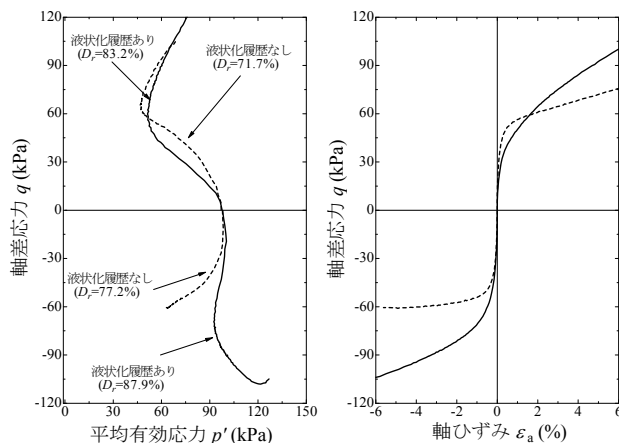


図-16 試料Dの単調非排水せん断挙動

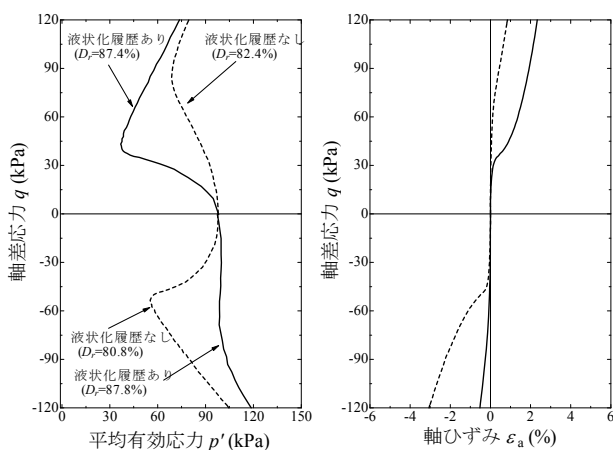


図-15 試料Cの単調非排水せん断挙動

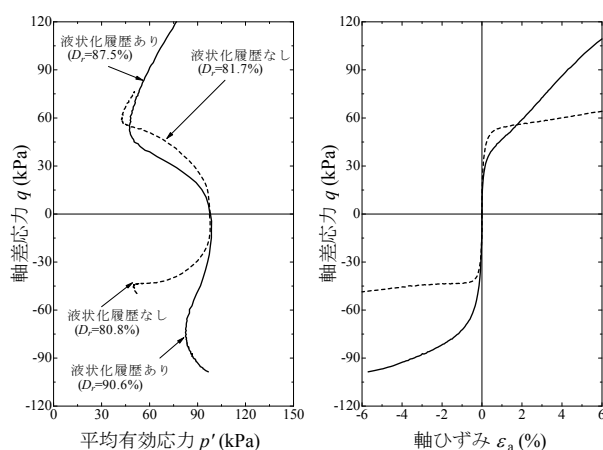


図-17 試料Eの単調非排水せん断挙動

易に生じることが、図-8 の単調せん断と繰返しせん断の比較から分かる。図-14, 15 に示す試料 B や C の挙動でも、液状化履歴を受けることで異方性が発達したことは読み取れるが、非常にゆるい砂に似た挙動は表れておらず、試料 A ほど高位に発達していないことが分かる。図-16, 17 に示す試料 D や E の挙動に至っては、試料 B や C 以上に異方性が発達していないことが分かる。このように、同じ砂質土に分類される土であっても、異方性の発達のしやすさが異なることが分かる。また、再液状化時に、試料 B～E が著しく低い液状化抵抗を示さないのは、試料 A のように異方性が高位に発達しないため、つまりあるせん断方向で非常にゆるい砂に似た挙動を示さないためである。このことは、図-9～12 に示す液状化履歴を受けた各試料の繰返し非排水せん断挙動と単調非排水せん断挙動の違いから分かる。

6. 異方性の発達のしやすさに違いを生む原因に関する一考察

以上の結果を見る限り、試料Aが際立って異方性が発達しやすく、液状化抵抗の低下現象を生じ得るのは、粒径が非常に揃っているためであるように思える。しかし一方で、図-13～17では、粒径が揃っているほど異方性が発達しやすくなっているような傾向は表れていないため、粒度が異方性の発達のしやすさを司る最も重要な因子になっていないようにも思える。そこで、試料Eの太宰府まさ土を、試料Aと同じ粒度になるように粒度調整した砂質土を新たに試料A'とし、再液状化試験を行った。試料Aと試料A'の土粒子の密度および最大・最小間隙比を表-2に示す。試料Aと同じ粒度組成を有しながらも、最大・最小間隙比は試料A'の方がかなり大きいことが分かる。図-18, 19に試料A'の液状化および再液状化挙動をそれぞれ示す。最大・最小間隙比は試料A'の方が大きいため、同程度の相対密度では、試料Aよりも試料A'の方が間隙比は大きい、それにもかかわらず、試料A（図-3）よりも試料A'（図-18）の方が若干液状化しにくい。また、再液状化試験時に、試料A'（図-19）は試料A（図-8）のように著しく低い液状化抵抗を示しておらず、非常に粒径が揃っていることに起因して異方性が発達しやすくなっているわけではないことが分かる。

一般に、液状化のしやすさを議論する際に、粒度は第一に着目される点であるため、再液状化を議論する際も粒度が主要な因子になると考えて実験を進めたが、液状化にせよ再液状化にせよ、実際には粒度の他に重要な因子があることを示唆するような実験結果が得られた。残念ながらここでどの因子が異方性の発達にとって重要か特定することはできないが、粒子特性は一つの重要な因子になっていると思われる。例えば、試料Aの豊浦砂は砂丘に堆積した風成砂であり、堆積するまでの過程で粒子の角がと

れ、角粒子が丸みを帯びた形状をしているのに対し、試料A'の元となるまさ土は山から採取されてきたものであり、河川を流れて堆積するような過程を経ないため、粒子形状は一般に角張っている。また、豊浦砂は硅砂であり、粒子が硬度や靱性に優れているが、一方のまさ土は風化した比較的脆い粒子からなることが多い。このような違いを視野に入れ、今後はどのような因子が異方性の発達にとって重要であるか調べることを一つの課題としたい。

表-2 試料AおよびA'の土粒子の密度および最大・最小間隙比

試料記号	試料A	試料A'
土粒子の密度 ρ_t (g/cm ³)	2.646	2.632
最大間隙比 $e_{\max}$	0.985	1.455
最小間隙比 $e_{\min}$	0.639	0.921

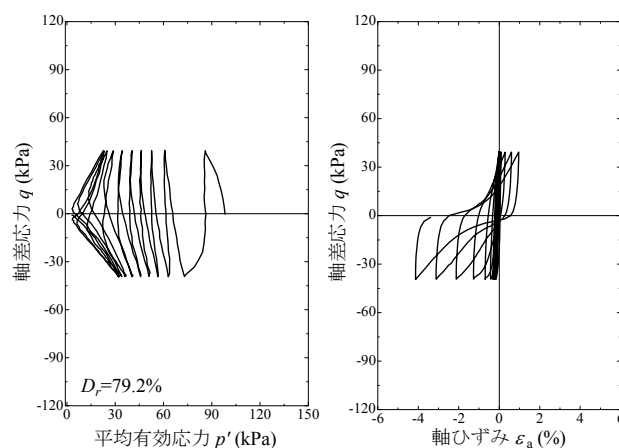


図-18 試料A'の液状化挙動

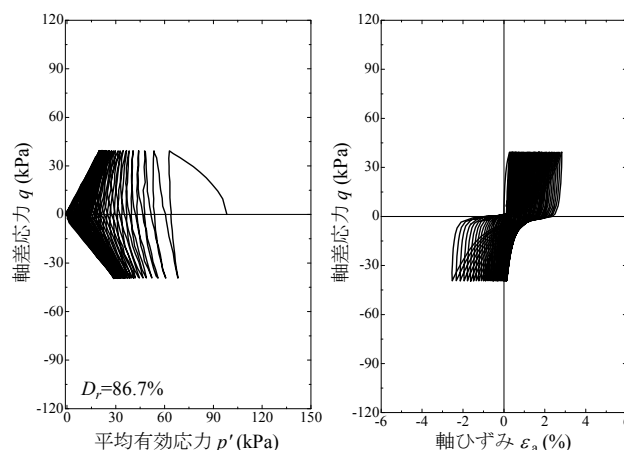


図-19 試料A'の再液状化挙動

7. おわりに

本研究では、同じ砂質土に分類される土であっても、異方性の発達のしやすさに大きな違いがあることを示した。また、液状化履歴に伴う液状化抵抗の低下現象は、異方性が高位に発達し得る砂質土でのみ生じる現象であることを示した。今後は、物理特性や粒子特性にどのような特徴を持った土が異方性を高位に発達させ得るか調べていく。

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) Seed, H. B., Mori, K. and Chan, C. K.: Influence of seismic history on liquefaction of sands, *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol. 103, No. 4, pp. 257-270, 1977.
- 3) Yamada, S. and Takamori, T., Sato, K.: Effects on reliquefaction resistance produced by changes in anisotropy during liquefaction, *Soils and Foundations*, under contribution.
- 4) 山田正太郎, 高森智子, 佐藤研一: 液状化履歴に伴う液状化抵抗の低下現象のメカニズム, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集 (本論文集) .

EFFECT OF DIFFERENCE IN THE EASE OF DEVELOPMENT OF ANISOTROPY ON RELIQUEFACTION BEHAVIOR

Tomoko TAKAMORI, Shotaro YAMADA and Kenichi SATO

Finn et al. reported the phenomenon in which sandy soils that have experienced liquefaction become much more prone to liquefaction than they were previously, in spite of the increase in density caused by drainage after liquefaction. Through reliquefaction experiments using five types of sandy soils with differing properties, the present study showed that only some sandy soils exhibit the above phenomenon. The authors previously clarified the mechanism of decrease in liquefaction resistance caused by liquefaction history by paying attention to the induced anisotropy. The present study shows that the above phenomenon occurs only in sandy soils of which the anisotropy can develop to high levels.