

粒分流出量の違いが砂質土の単調・繰返しせん断挙動に及ぼす影響 The effect of outflow of fine particles on monotonic and cyclic shear behavior of sandy soil

廣田康起¹，酒井崇之²，中野正樹³

1 名古屋大学大学院工学研究科・hirota.koki@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学大学院工学研究科・t-sakai@civil.nagoya-u.ac.jp

3 名古屋大学大学院工学研究科・nakano@civil.nagoya-u.ac.jp

概 要

本報では、河川堤防の細粒分の抜け出しによる不安定化について要素レベルでの力学挙動を把握するため、細粒分流出量の違いが砂質土の単調せん断・繰返しせん断挙動に及ぼす影響を三軸圧縮試験により検討した。その結果、細粒分流出による粒度の変化よりも、密度の低下の方が単調せん断挙動に与える影響が大きいことがわかった。特に 5%流出については、限界状態線が流出していないケースと同じになっており、同じ密度であれば、ほとんど同じ単調せん断挙動を示した。一方で、10%流出の場合は、 $v-p'$ 空間における限界状態線に変化が見られた。繰返しせん断挙動については、細粒分が流出すればするほど、液状化しやすくなる傾向が得られた。特に細粒分流出が流出した試料については、わずかに応力振幅比が変化するだけで、大きく液状化に至る繰返し回数が変化した。

キーワード：砂質土，液状化，三軸試験

1. 研究の背景と目的

河川堤防の決壊のメカニズムとして、①河川水の越流による堤防決壊、②河川水の浸透による堤防決壊、③河川水の浸食・洗堀による堤防決壊の3種類に大別され、②と③の「越流なき破堤」については、裏尻付近の地盤の細粒分抜け出しが原因の一つであると言われている。この細粒分の抜け出しに関する研究は多く行われており、例えば、小高ら¹⁾は試料の細粒分含有率と供試体密度を調整し、土の細粒分流出を模擬して行われた三軸試験により、浸透に起因する細粒分流出による堤体土の劣化は、細粒分の流出に伴い間隙比が増加することで堤体土の強度変形特性が大きく変わることが原因であることを明らかにした。また近藤ら²⁾は二次元個別要素法を用いて内部侵食による変形・破壊メカニズムを把握しようとした。近藤ら³⁾は解析において、応力状態（平均主応力）を一定に保ちながら、各状態の粒度からその時点での最小径を有する粒子を強制除去（Removal）する Removal 試験を行い、内部侵食に起因する粒度変化に伴う土の変形・破壊挙動再現モデルの構築を試みた。これらの研究では、主に静的な問題を対象に細粒分の流出による力学挙動の変化を把握している。本研究では、近い将来、南海トラフ巨大地震が起きるとされており、津波が河川を遡上することもあり得ることから、動的な挙動も把握することが重要であると考え、細粒分流出量の違いが砂質土の単調せん断・繰返しせん断挙動に及

ぼす影響を三軸圧縮試験により検討した。また、細粒分が流出すると、土の粒度および相対密度が低下する。本研究では、将来的に細粒分流出を構成則でモデル化することも目指している。そのため、粒度・相対密度の両方を変化させた供試体だけではなく、相対密度のみ・粒度のみ変化をさせた供試体についても、三軸圧縮試験を行った。

本研究では、細粒分流出供試体の作製方法についても検討した。供試体の作製方法については、予め細粒分を抜いた試料を作製し、三軸圧縮試験用の供試体を作製する方法⁴⁾や、三軸圧縮試験機を改良し、供試体を作製した後に透水させることで、細粒分を流出させる方法がある⁵⁾。一方、本研究では、細粒分の流出を模擬するために、水溶性の尿素肥料を用いた。乾燥状態で砂に粒状の尿素肥料を混合した後に、乾燥状態で供試体を作製し、その後、通水することで尿素肥料が溶け出す。つまり、粒状の尿素肥料が溶け出すことで細粒分流出を模擬した。また、予め細粒分を流出した試料で供試体を作製し、両者の挙動の違いの比較を行った。

2. 実験に用いる試料の概要

試験試料について、細粒分が抜け出しやすい土の特徴²⁾に留意し、東北珪砂 4 号、5 号、6 号、8 号をそれぞれ 5:3:3:9 の質量比で混合したものを基本試料とした。また、本稿では粒径 106 μm 以下の粒子を細粒分と見なし、細粒分減少

率は全体質量の 5%, 10%に決定した。便宜上, 基本試料から 5%, 10%の細粒分を取り除いたものを, それぞれ細粒分 5%流出試料, 細粒分 10%流出試料と呼ぶ。表 1 と図 1 に, それぞれ基本試料と細粒分流出試料の物性値および粒径加積曲線を示す。

表 1 砂の物性値

試料名	土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	最大間隙比 $e_{\max}$	最少間隙比 $e_{\min}$
基本試料	2.651	0.885	0.486
細粒分 5%流出試料	2.649	0.908	0.486
細粒分 10%流出試料	2.660	0.912	0.509

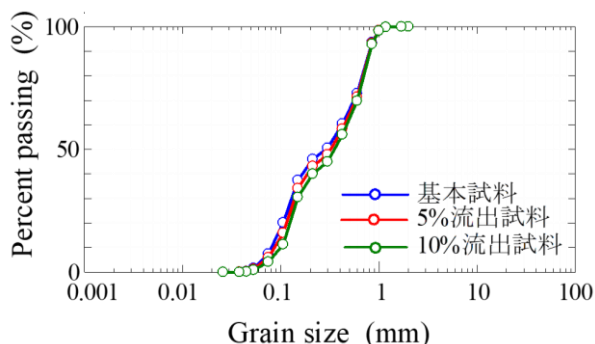


図1 実験試料の粒度分布

3. 肥料による細粒分流出の再現の検討

3.1 はじめに

1. でも述べたが, 従来の多くの要素試験では細粒分の流出を, 供試体作製前に細粒分を取り除くことで再現してきた。一方, 本研究では, 従来の方法に加え, 供試体の細粒分の一部を水に溶解する肥料に置き換えて乾燥状態で供試体を作製し, 通水を行うことで肥料を溶かすことにより細粒分流出を再現した。そして, 圧密三軸圧縮試験を実施し, 細粒分の抜け出しが土の力学特性に与える影響を実験的に把握することを試みた。

3.2 実験に用いる試料と供試体作製方法

実験に用いた尿素肥料は固体であるが, 水により容易に溶解する。この性質を利用して細粒分流出を模擬した。つまり, 細粒分 5%流出試料に 5%の細粒分と同体積の 106 μm ふるい通過尿素肥料を混入し肥料 5% 混入試料を作製した。この試料は基本試料と同じ試料と仮定でき, 通水過程において, 肥料が溶解し, 細粒分流出を表現する (図 2)。

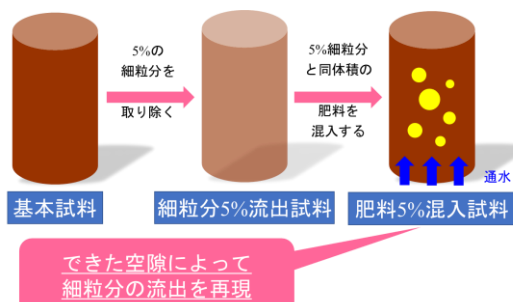


図2 肥料を用いた細粒分の流出の模擬方法

供試体は直径 5cm×高さ 10cm の円柱供試体であり, 目標相対密度は 80%, 拘束圧は 98.1kPa とした。B 値が 95% 以上になっていることを確認したのち, 等方圧密, その後軸ひずみ 1%/min のせん断速度で単調せん断を実施した。なお, 試験結果は排水条件での試験結果のみ示す。

3.3 実験結果

基本試料及び肥料 5%混入試料を用いて実施した試験結果を図 3 に示す。肥料 5%混入試料は, 基本試料に比べてせん断開始時, 圧密終了時の比体積が増加し, せん断過程において最大軸差応力が低下した。肥料の溶解, すなわち細粒分の抜け出しによって土の強度が減少する様子を示している。

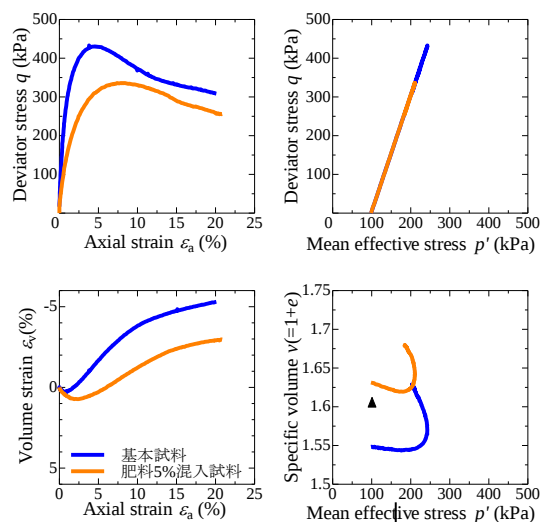


図 3 基本試料と肥料 5%混入試料の比較

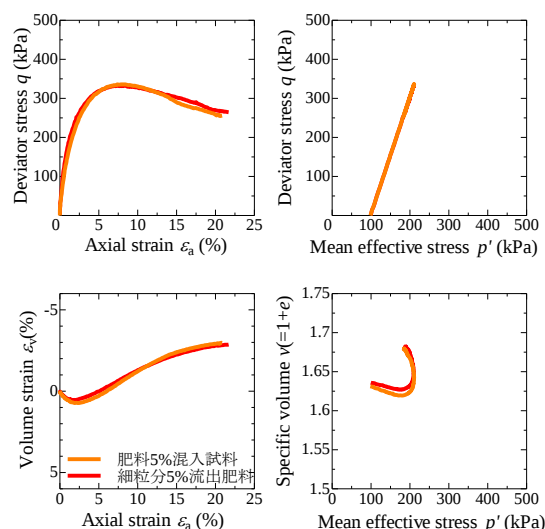


図 4 肥料 5%混入試料と細粒分 5%流出試料の比較

肥料溶解により供試体内に空隙を形成することから, 特別な土骨格構造が生み出され, 力学挙動に及ぼす影響があるか調べるため, 肥料 5%混入試料の肥料溶解後とほぼ同じ間隙比になるように細粒分 5%流出試料を用いて作製した供試体 (初期から細粒分を持たない供試体) に対し, 排

水せん断試験を実施し、両者の排水せん断挙動の比較を行った。実験結果を図4に示す。両者には顕著な違いが見られなかったことから、細粒分の流出によって生まれる骨格構造と、はじめから細粒分を持たない試料を空中で堆積させた供試体が有する骨格構造との間には顕著な違いはないといえる。そこで次章からは、供試体作製時から細粒分を取り除くことで細粒分の流出を模擬し、試験を実施する。

4. 細粒分流出量の違いが単調せん断挙動に及ぼす影響

4.1 はじめに

ここでは、細粒分5%流出試料と細粒分10%流出試料に対し、力学挙動の比較を行うことで、細粒分流出量の違いが力学特性へ及ぼす影響を調べた。また、細粒分流出による粒度変化の影響のみ調べるため、基本試料、細粒分5%流出試料、細粒分10%流出試料に対し、同じ相対密度で作製した供試体に対しても試験を行った。また、相対密度を変化させることで、様々な密度における力学挙動を比較するとともに、限界状態線の比較を行い、細粒分の流出により限界状態線がどのように変化するか把握することで、細粒分の流出を構成則で表現する際の基礎データを蓄積する。

4.2 実験条件

3.と同様に供試体は直径5cm×高さ10cmの円柱供試体であり、拘束圧は98.1kPaとした。基本試料の相対密度を80%とすると、細粒分が5%流出時には、相対密度が約59%となり、10%流出時相対密度は約36%になる。そこで、供試体の相対密度については、40、60、80%の3つに設定した。B値が95%以上になっていることを確認したのち、等方圧密後、軸ひずみ1%/minのせん断速度で単調せん断を実施した。なお、ここでは、非排水せん断のみ実施した。

4.3 細粒分流出が単調せん断に及ぼす影響

図5は基本試料($Dr=80\%$)、細粒分5%流出試料($Dr=60\%$)、細粒分10%流出試料($Dr=40\%$)の非排水せん断試験結果をそれぞれ示す。つまり、基本試料から単に細粒分流出が5、10%抜けた時のせん断挙動の比較になる。いずれの試験結果も細粒分が流出することにより、正のダイレイタンシー挙動が見られなくなり、また、硬化挙動が見られなくなり、最大軸差応力が小さくなった。

図6~8にそれぞれ、基本試料、細粒分5%流出試料、細粒分10%流出試料を対象に、3つの相対密度の非排水せん断試験結果を示す。いずれの試料についても、相対密度が大きくなるほど、最大軸差応力が増加し、また、変相点以降の塑性膨張挙動も著しく増大している。一方、同じ相対密度での細粒分流出の違いについては、相対密度の違いに比べて、最大軸差応力も塑性膨張挙動も著しい違いは見られなかった。このことは、図9からも見て取れる。細粒分流出に伴う粒度変化よりも、間隙比増加が砂質土の力学挙動に顕著に影響を及ぼすことがわかった。

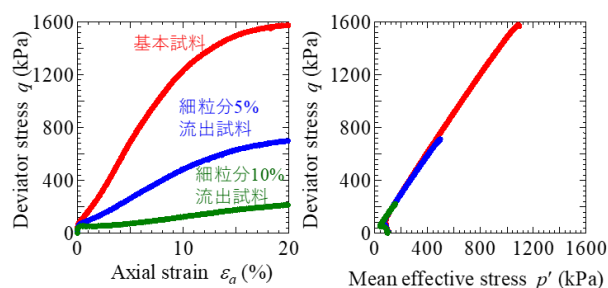


図5 細粒分の流出による非排水せん断挙動の変化

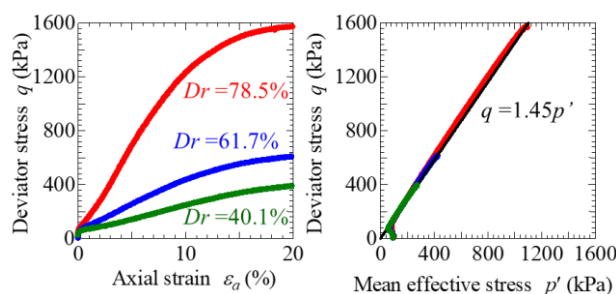


図6 基本試料の非排水三軸試験結果

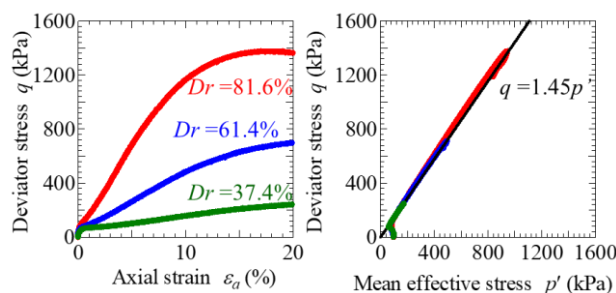


図7 細粒分5%流出試料の非排水三軸試験結果

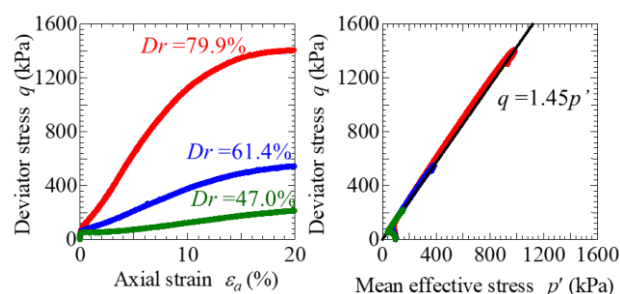


図8 細粒分10%流出試料の非排水三軸試験結果

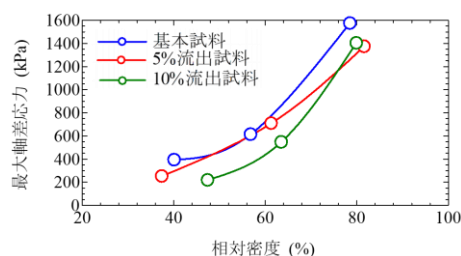


図9 最大軸差応力と相対密度の関係

4.4 限界状態線の比較

図7~9に p' - q 平面上における限界状態線を示した。い

ずれも限界状態線の傾きは 1.45 程度であり、細粒分が減ったとしても $p'-q$ 平面上における限界状態線に変化は見られない。図 10～12 は $p'-v$ 平面上における限界状態線を示す。5%流出試料は、基本試料と限界状態線がほぼ同じであった。しかし、細粒分 10%流出試料の場合、限界状態線の傾きおよび切片が小さくなった。Wood and Maeda⁶⁾は DEM シミュレーションにより、細粒分が流出すると限界状態線が上方に移動することを示したが、本研究で行った粒度の変化では異なる傾向であった。

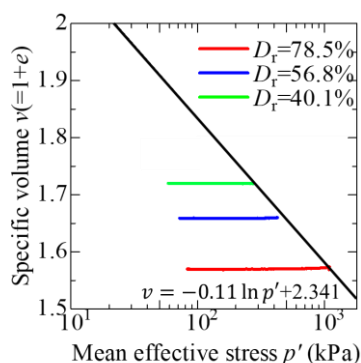


図 10 基本試料の限界状態線

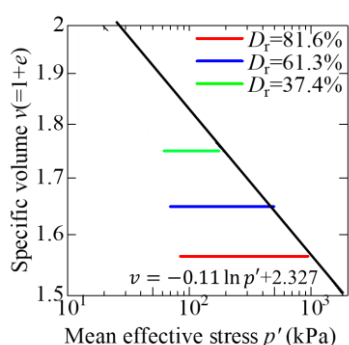


図 11 細粒分 5%流出試料の限界状態線

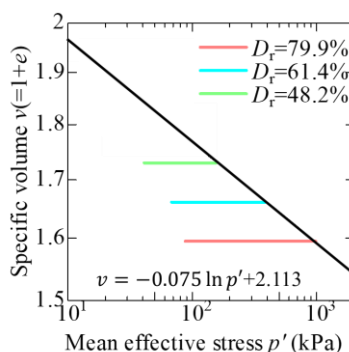


図 12 細粒分 10%流出試料の限界状態線

5. 細粒分流出量の違いが非排水繰返しせん断挙動に及ぼす影響

5.1 はじめに

本章では、非排水繰返しせん断試験を実施し、細粒分流出

量の違いが、液状化強度や液状化挙動に及ぼす影響や、サイクリックモビリティ中の挙動に及ぼす影響を把握した。

5.2 実験条件

3, 4 章と同様に供試体は直径 5cm×高さ 10cm の円柱供試体であり、拘束圧は 98.1kPa とした。相対密度は 60%である。B 値が 95%以上になっていることを確認したのち、等方圧密、その後、繰返しせん断を実施した。試験時の応力振幅比については、表 2 に示す。○は実施したケースで、×は実施していないケースである。

表 2 実施した応力振幅比

応力振幅(kPa)	22.5	25.0	27.5	30.0	32.5	37.5
基本試料	×	○	○	×	○	○
細粒分 5%流出試料	×	○	○	○	○	×
細粒分 10%流出試料	○	○	○	○	×	×

5.3 細粒分の流出が液状化挙動に及ぼす影響

本節では、同じ相対密度で、細粒分の流出量の違いが液状化挙動に及ぼす影響について調べた。図 13～15 はそれぞれ、基本試料、細粒分 5%流出試料、細粒分 10%流出試料を対象に、表 2 に示す応力振幅比で両振幅軸ひずみが 8%に達するまでせん断させたときの軸差応力-せん断ひずみ、有効応力パスを示す。実施したいずれのケースにおいても、サイクリックモビリティを示した。応力振幅比を大きくすると、液状化しやすくなる。また、サイクリックモビリティ中のひずみの進展の程度は基本試料に比べると、細粒分流出試料細粒分流出試料の方が若干大きい。細粒分 5%流出試料については応力振幅が小さいとき、基本試料や細粒分 10%流出試料と比較して液状化強度が著しく大きくなるという特徴があり、必ずしも細粒分の流出量と力学特性の変化の傾向が一定であるとは限らない。

図 16 に液状化強度曲線を示す。基本試料が最も傾きが大きく、細粒分流出試料については、5%流出も 10%流出も同じような曲線となった。ただし、曲線の位置は 10%流出の方が小さい。つまり、細粒分流出試料は、振幅が大きくなると、基本試料と比較して、液状化しやすくなることがわかった。また、細粒分流出試料については、5%流出試料の方が、10%流出試料よりも同じ応力振幅比であれば液状化しにくい傾向がある。

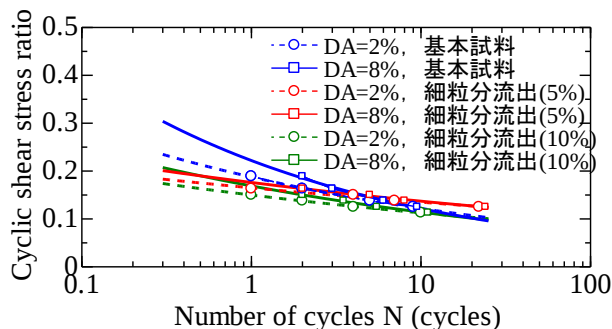


図 16 粒度の違いによる液状化強度曲線の違い

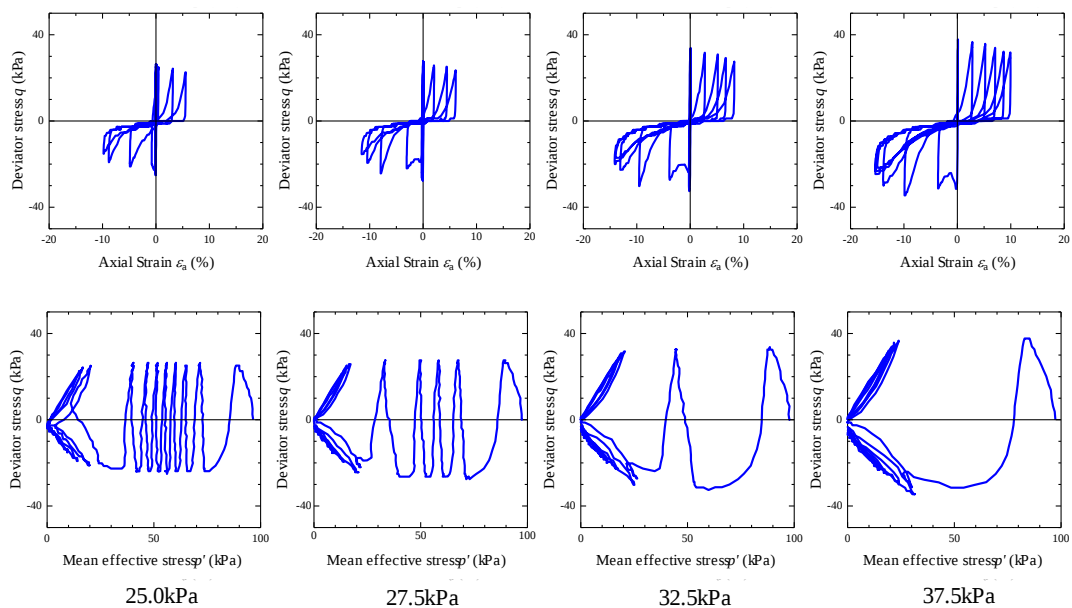


図 13 基本試料の繰返し非排水三軸試験結果

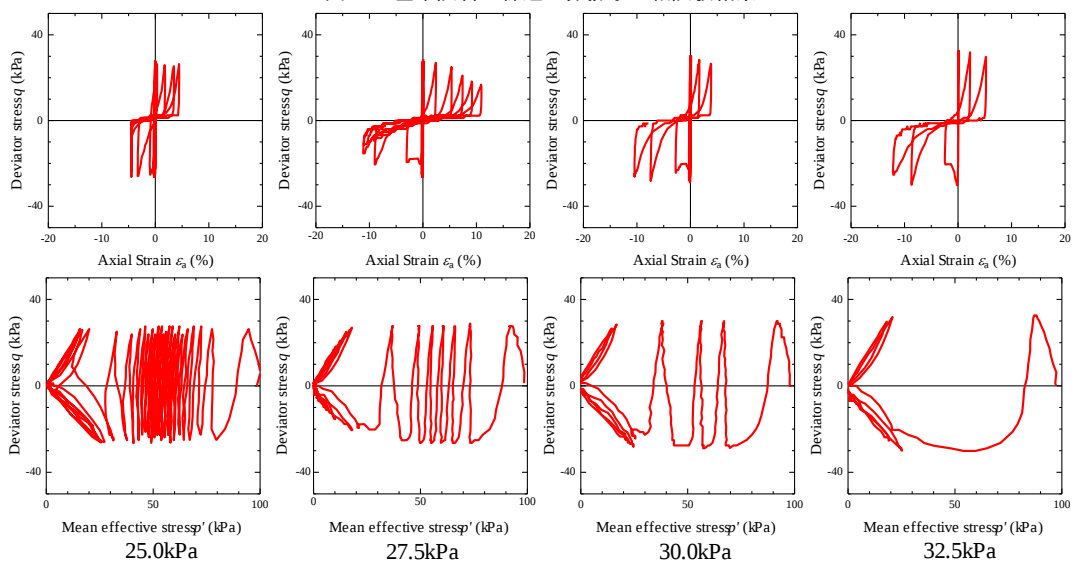


図 14 細粒分 5%流出試料の繰返し非排水三軸試験結果

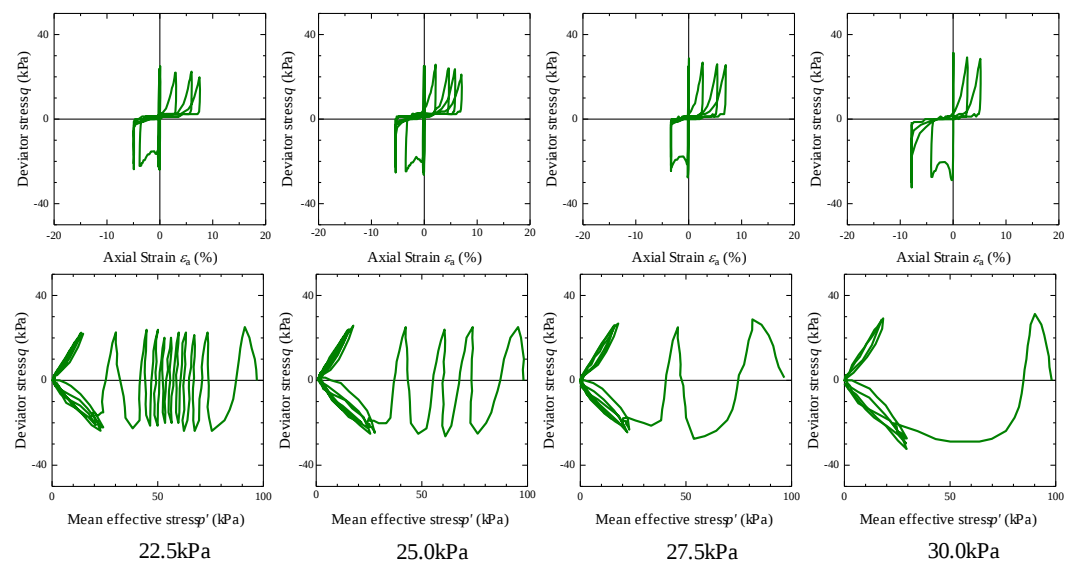


図 15 細粒分 10%流出試料の繰返し非排水三軸試験結果

5.4 細粒分流出が液状化強度に及ぼす影響

図 17 は、相対密度 60%の細粒分 5%流出試料と、別途実施した相対密度 80%の基本試料の液状化強度曲線の比較を示す。2つの液状化強度曲線を比較すると、曲線の傾きは、80%基本試料に比べて、細粒分 5%流出試料の方が小さく、少しの応力振幅の変化で液状化強度に大きな変化を及ぼすことが分かる。また、曲線の位置は、80%基本試料に比べて、細粒分流出試料の方が著しく小さくなっている。

4.2 において、相対密度 80%の基本試料に対し、細粒分が 5%流出すると、相対密度が約 59%となることを述べた。このことから、細粒分が流出しない健全な基本試料では液状化強度が大きい、5%の細粒分流出により、相対密度が低下することにより、液状化強度に対して脆弱になっていることが、図 17 の 2 試料の比較からも理解できる。

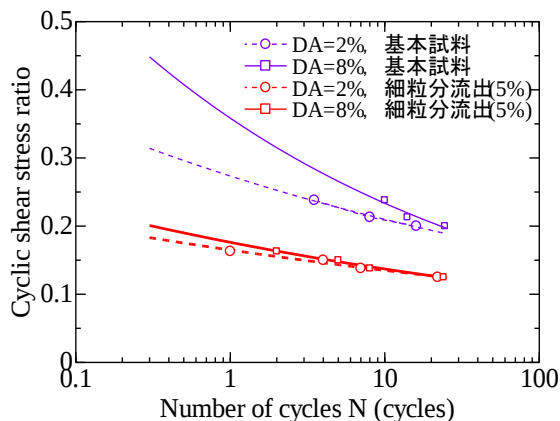


図 17 細粒分流出による液状化強度曲線の違い

6. 結論

本研究では、砂質土の細粒分流出試料を模擬した供試体を作製し、細粒分の流出量の違いが、単調載荷試験や繰返しせん断試験にどのような影響を及ぼすのか三軸圧縮試験機を用いて調べた。以下に結論を示す。

- 1) 肥料 5%混入試料は、吸水過程での肥料の溶解、空隙形成により、基本試料に比べ比体積が増加し、最大軸差応力が低下した。細粒分の抜け出しによって、単調せん断での土の強度（最大軸差応力）が減少する様子を示した。
- 2) 細粒分流出によって生じる砂供試体の骨格構造と、はじめから細粒分を持たない試料を空中堆積させた骨格構造との間には顕著な違いはない。
- 3) 単調非排水せん断挙動において、細粒分の流出よりも、相対密度の変化の方が砂質土の力学挙動に与える影響は大きい。また、細粒分が流出しても、 $p'-q$

平面上における限界状態線に変化は見られなかった。

一方、 $p'-v$ 平面上における限界状態線は、細粒分 5%流出試料においては変化がなかった。しかし、細粒分 10%流出試料においては、切片、傾きがともに小さくなった。

- 4) 繰返し非排水せん断挙動においては、細粒分流出により、相対密度が低下することで、液状化強度が低下した。また、相対密度が同じで粒度のみ変化させた場合、応力振幅比を大きくすると、どの試料についても液状化しやすくなる。また、細粒分流出試料については、5%流出試料の方が、10%流出試料よりも同じ応力振幅比であれば液状化しにくい傾向がある。
- 5) 相対密度 80%の基本試料と細粒分 5%流出試料の液状化強度曲線の比較から、細粒分が流出しない健全な基本試料では液状化強度が大きい、5%の細粒分流出により、比体積が増加し、粒度が変化することにより、液状化強度に対して脆弱になっていることがわかった。

謝辞

本研究は科学研究費補助金（基盤(A)：課題番号 17H01289, 基盤(B)：課題番号 16H04408）の補助を受けて実施した。

参考文献

- 1) 小高猛司, 崔瑛, 李圭太, 御手洗翔太, 高木竜二：細粒分流出に伴う砂質堤体土の劣化に関する考察, 第 28 回中部地盤工学シンポジウム, pp.101-106, 2016.
- 2) 近藤明彦, 山田高弘, 前田健一：内部侵食および目詰まりに及ぼす間隙構造の影響, 第 24 回中部地盤工学シンポジウム, pp.71-78, 2012.
- 3) 近藤明彦, 温谷恵美, 前田健一：細粒分のダイナミクスを考慮した内部侵食メカニズムの解明, 第 22 回中部地盤工学シンポジウム, pp.59-66, 2010.
- 4) 金乗洙, 渡優樹, 加藤正司, 竹下祐二：河川堤防の細粒分含有率が浸透特性に及ぼす影響, 地盤工学会中国支部論文報告集, Vol.34, No.1, pp.45-51, 2016.
- 5) 石丸太一, 鈴木素之, 若松知季, 神山惇：細粒分流出を伴う透水を受けたまさ土の力学特性, 地盤工学会中国支部論文報告集, Vol.37, No.1, pp.107-114, 2019.
- 6) D.Muir Wood, K.Maeda, E.Nukudani : Modelling mechanical consequences of erosion, Géotechnique60, No.6, pp.447-457, 2010.