

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760439

研究課題名(和文) 繰返しリング単純せん断試験による地盤材料の局所大変形挙動の解明

研究課題名(英文) Local deformation characteristics of re-liquefied soil in cyclic simple shear tests using stacked-ring

研究代表者

宮下 千花(堤千花)(Miyashita, Yukika)

東京大学・生産技術研究所・技術専門職員

研究者番号：20396914

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：独自に新規製作した繰返しリング単純せん断試験装置と画像解析システムを用いて、原位置で起こる崩壊現象をより忠実に再現できる試験システムを構築し、これを用いて液状化履歴を持つ地盤が再び液状化する「再液状化現象」を解明した。
具体的には、液状化履歴を受けることによる土の強度特性、密度、局所変形挙動の変化を系統的な実験により整理し、再液状化現象が起こりやすい条件を明らかにした。また、自然地盤にしばしば見られる、層構造を有する不均質な土を供試体で再現し、得られる強度変形特性の均質な材料の結果との違いを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A new system was established by the combination of uniquely developed simple shear test apparatus using stacked-ring and image analysis technique with high resolution. Mechanism of re-liquefaction was investigated by focusing on local deformation characteristics during liquefaction. Change of liquefaction properties during multiple events were evaluated in a systematic way to clarify the conditions in which re-liquefaction tended to take place easily. Difference of liquefaction properties of uniform and segregated sand specimens was also revealed.

研究分野：土質・基礎工学

キーワード：繰返しリング単純せん断 局所大変形 砂質土の再液状化 画像解析 中空ねじりせん断 三軸圧縮

1. 研究開始当初の背景

近年頻発する M7.0 以上の大地震の中でも、2011 年東日本大震災では、東北地方から関東地方にかけての広域で多数の液状化が生じた。これらの液状化発生箇所においては、過去の大地震で液状化履歴を有する箇所が再び液状化する「再液状化」が数多く報告された。液状化履歴を受けた地盤がそれ以前よりも強くなるのか、弱くなるのかの議論は分かれており、再液状化の発生条件やメカニズムは明らかにされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、独自に新規製作した繰返しリング単純せん断試験装置と画像解析システムを用いて、原位置で起こる崩壊現象をより忠実に再現できる試験システムを構築し、これを用いて液状化履歴を持つ地盤が再び液状化する「再液状化現象」を解明することを目的とした。具体的には、液状化履歴を受けることによる土の強度特性、密度、局所変形挙動の変化を系統的な実験により整理し、再液状化現象が起こりやすい条件を明らかにすることを試みた。また、自然地盤にしばしば見られる、層構造を有する不均質な土を供試体で再現し、得られる強度変形特性を均質な材料の結果と比較した。

3. 研究の方法

(1) 局所変形挙動の把握のための画像解析システムの構築

高解像度のデジタルカメラと、その解析に十分な機能を有する高機能の画像解析ソフトを組み合わせることにより高精度な画像解析システムを構築し、(2)、(3)、(4) の力学試験装置と連動させた (図 1、図 2)。

(2)、(3) の試験で撮影した画像の解析においては、供試体の曲率やレンズのゆがみの影響を補正するシステムティックな手法を開発し、せん断ひずみの水平、鉛直方向の計測を正しく行う工夫を施した。図 3 にリング単純せん断試験の解析座標の補正方法を示す。

(4) の三軸非排水繰返し載荷試験では、供試体を覆うゴム膜を通常用いるラテックス製ではなくシリコン製とし、供試体の内部とゴム膜表面の局所変形挙動を別々に評価する解析手法を開発した。図 4 に画像処理と解析手法のフローチャート、図 5 に画像処理を施した解析画像を示す。各ピクセルの RGB の色情報の違いを利用して、一枚のデジタル画像から、青の珪砂の分布を強調させたモノクロ画像と、赤の塗料でゴム膜に描いた 10 mm 間隔の標点を強調させたモノクロ画像の二枚の画像を作成し、それぞれを PIV により解析することで、砂供試体とゴム膜の局所変形を別々に計測した。

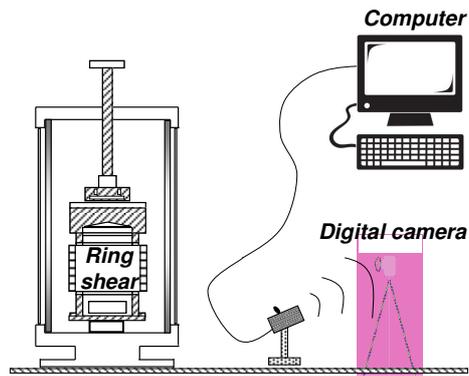


図 1 リング単純せん断試験における局所変形評価のための画像解析システムの概要

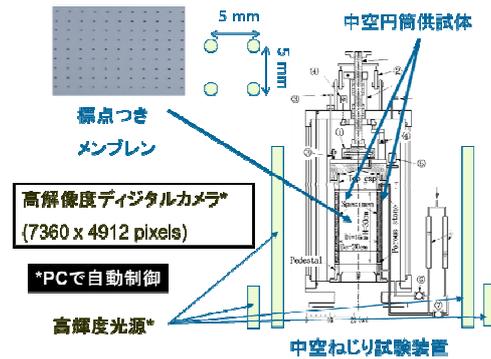


図 2 中空ねじり試験における局所変形評価のための画像解析システムの概要

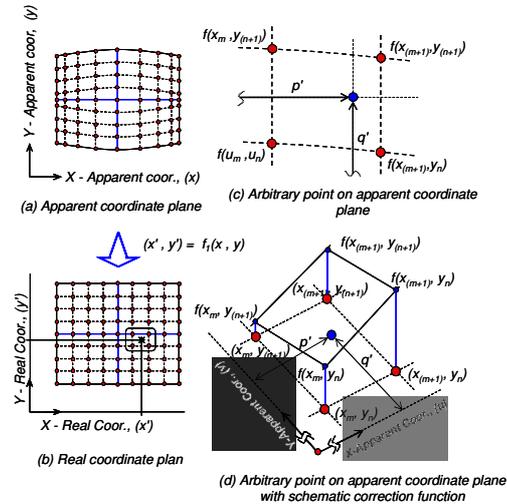


図 3 リング単純せん断試験の解析座標の補正方法

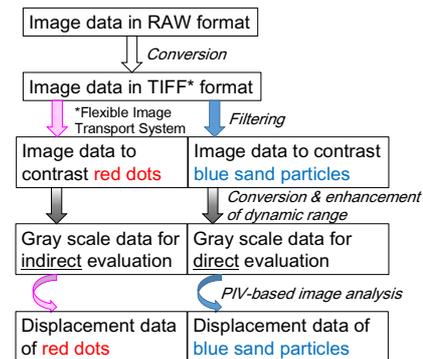


図 4 三軸圧縮試験における局所変形評価のための画像処理、解析のフローチャート

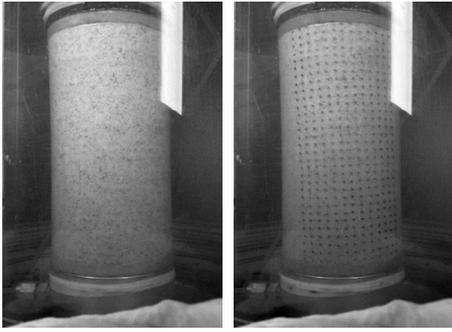


図 5 a) 砂供試体と b) ゴム膜のパターンを強調したモノクロ画像

(2) 均質な砂質土（豊浦砂）における繰返しリング単純せん断試験

均質な豊浦砂の中空円筒供試体を空中落下法により作成し、乾燥状態のまま繰返し載荷試験を実施した。200 kPa の鉛直応力による一次元圧密の後、体積一定の条件で繰返しせん断を行った。両振幅のせん断ひずみが 2% に達する段階を液状化と定義し、所定のひずみ振幅に到達するまで載荷を継続した。繰返し載荷と鉛直方向の一次元圧密を繰り返すことによって、液状化特性の変化を計測した。

複数の密度、繰返し載荷のひずみ振幅で同様の試験を実施し、これらの違いが液状化特性に及ぼす影響を、局所変形挙動と共に明らかにした。

(3) 分級構造を有する中空円筒供試体の非排水繰返しねじりせん断試験

不均一な地盤を想定した分級構造を有する中空円筒供試体を水中落下により作成し、中空ねじりせん断試験装置にて非排水繰返し載荷試験を実施した。ねじりせん断と等方圧密を繰り返すことによって、液状化特性の変化を計測した。

(4) 均質な砂質土（豊浦砂）の三軸非排水繰返し載荷試験

豊浦砂に平均粒径が約 0.5 mm の青色に着色した珪砂を質量比 5% で混合し、水分を加えて突固めにより円柱供試体を作成した。供試体の相対密度は約 80% とした。飽和化と 100 kPa の拘束圧下における等方圧密の後、非排水繰返し載荷試験を実施した。液状化特性と、砂供試体とゴム膜の局所変形挙動との関係を明らかにした。

4. 研究成果

(1) 均質な砂質土の液状化特性に及ぼす相対密度、液状化履歴と局所変形挙動との関係

繰返しリング単純せん断試験の応力ひずみ関係の典型的な例を図 6 に示す。いずれの試験条件においても、液状化履歴の回数が増えるほど再液状化における液状化強度（所定の両振幅せん断ひずみに達するまでの繰返し回数）が増し、相対密度も大きくなった。

液状化履歴により与えられた両振幅せん断ひずみの値が大きいほど、再液状化におけ

る液状化強度の増加率が小さかった（図 7）。液状化履歴回数が大きくなるほど相対密度は高くなり、与えられた両振幅せん断ひずみの値が大きいほど、相対密度の増加率は大きかった（図 8）。同一の相対密度であっても、液状化履歴により与えられた両振幅せん断ひずみの値が大きいほど再液状化における液状化強度が小さくなった（図 9）。

これらの傾向から、次のような挙動が推測された。ひずみ振幅の小さい液状化履歴は、相対密度の増加はわずかでも土粒子の骨格構造を強化させる作用があった。このため液状化履歴が加わるほど再液状化における液状化強度が劇的に増加した。一方、ひずみ振幅の大きい液状化履歴は、相対密度の増加は大きいものの、土粒子の骨格構造を弱化させる作用があった。このため液状化履歴が加わっても再液状化における液状化強度の増加が緩やかであった。

画像解析による局所変形計測の結果を供試体の高さ方向に 5 分割することで、供試体の局所的なせん断ひずみの違いを高さ方向に調べた。載荷軸に直結したキャップの変位から得られた供試体全体の代表値としてのせん断ひずみ（Potentiometer）と、画像解析から得られた局所的なせん断ひずみとの代表的な比較結果を図 10 に示す。これによると、局所的なせん断ひずみの最大振幅が全体的なせん断ひずみの最大振幅の 2 倍以上まで異なる場合のあること（図中の○1）、繰返し載荷終了時の全体的なせん断ひずみはゼロまで戻る一方で、局所的なせん断ひずみはゼロとはならないこと（図中の○2）が分かった。全体的なせん断ひずみと局所的なせん断ひずみの最大値の差と液状化履歴回数との関係を図 11、残留値の差と液状化履歴回数との関係を図 12 にそれぞれ示す。両振幅せん断ひずみの値が大きいほど、局所ひずみと全体的なせん断ひずみとの差が大きかった。局所ひずみが高さ方向に大きく異なった計測結果は供試体の変形が不均一であったことを示唆しており、この不均一な変形が土粒子骨格の構造を弱化させたため、再液状化における液状化強度があまり増加しなかったものと推測された。

以上の成果が得られた一方で、次の三つの課題が挙げられた。

- ① 試験装置の制約から、自然地盤のような層構造を有する土の局所変形挙動を検討できない
- ② 供試体の局所変形を外側の積層リングの変位から推測する手法の妥当性の検討が必要である
- ③ ①、②の課題が解決した上で、更にひずみ振幅が大きい液状化履歴が生じた場合の再液状化における強度変形特性の変化の検討が必要である

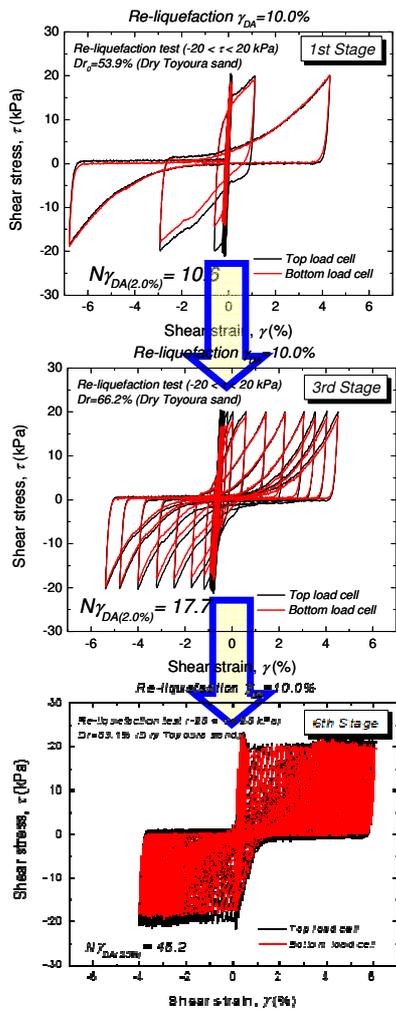


図6 繰返しリング単純せん断試験の応力ひずみ関係

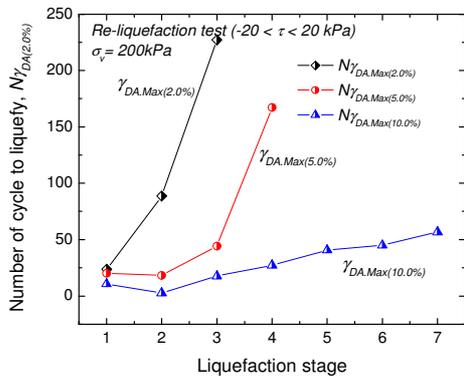


図7 液状化強度と液状化履歴回数との関係

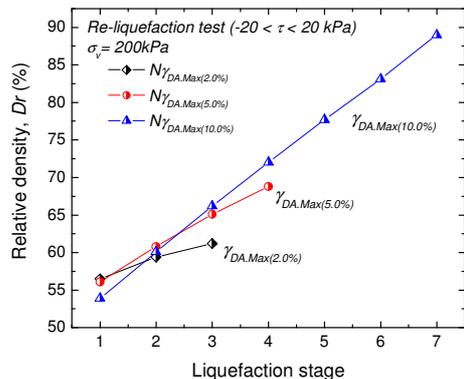


図8 相対密度と液状化履歴回数との関係

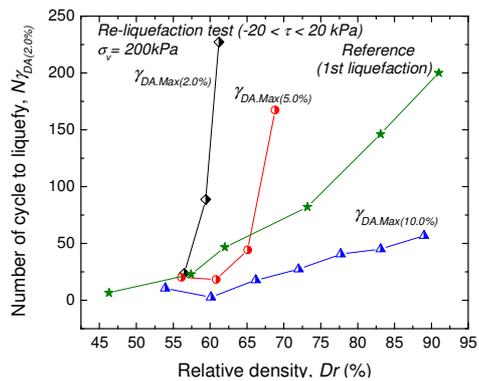


図9 液状化強度と相対密度との関係

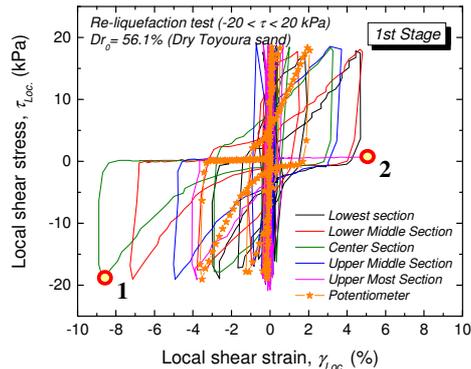


図10 せん断ひずみの全体的な計測値と局所的な計測値との比較

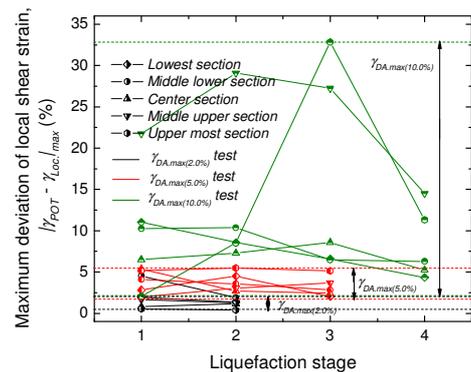


図11 局所ひずみと全体ひずみの差の最大値と液状化履歴回数との関係

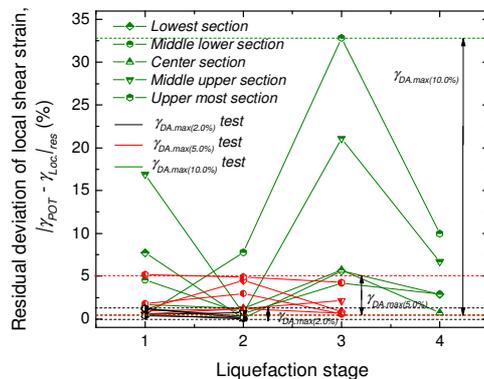


図12 局所ひずみと全体ひずみの差の残値と液状化履歴回数との関係

(2) 分級構造を有する中空円筒供試体の非排水繰返しねじりせん断試験

(1)で挙げられた課題を、中空ねじり試験装置で確認することを試みた。水中落下法に

より作成した分級構造を持つ供試体の粒度分布と分級構造の模式図を図 13 に示す。初回液状化時の特性に関して、図 6 に示すように分級構造を有する場合の液状化強度が、同じ材料およびほぼ同一の平均密度で分級構造がない場合よりも大きいことを示し、その理由として土粒子構造の違いによるダイレタンシー特性の変化が、液状化強度特性に影響を及ぼしていると考えられることを見出した。

複数回液状化時の特性変化に着目した非排水繰返しねじりせん断試験の結果を図 15 に示す。各液状化試験の後にせん断ひずみをゼロに戻した場合と、これをゼロに戻さずに実際の地震時の状況を再現した場合とでは、図 8 に示すようにその後の再液状化時の強度特性が大きく異なることを示し、既往の関連研究において分級構造を有しない供試体に対して観察されていた特性変化が、分級構造を有する場合にも生じることを確認した。

以上の成果が得られた一方で、ひずみ振幅の大きな液状化履歴が加わることによって生じたメンブレンの皺が供試体の局所変形挙動の詳細な分析を阻害し、液状化強度特性にも影響を与えることが確認された。すなわち、(1)で挙げられた課題②を十分に検討できなかった。

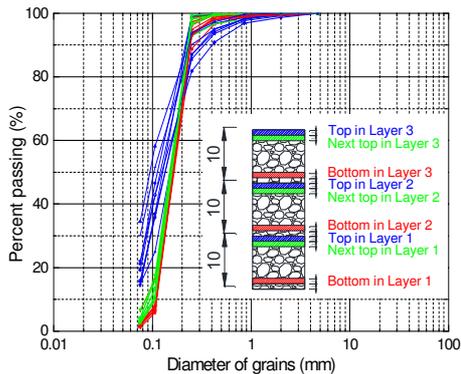


図 13 水中落下で作成した供試体各部の粒度

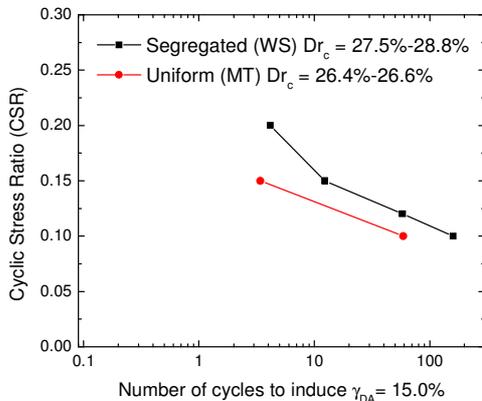


図 14 分級供試体 (WS) と均質供試体 (MT) の液状化強度曲線の比較

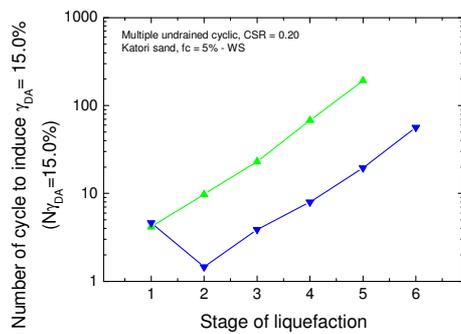


図 15 中空ねじり試験における再液状化特性

(3) 三軸非排水繰返し載荷試験による高密度な豊浦砂の三軸液状化試験

(2)で残された課題を、三軸非排水繰返し載荷試験で検討した。図 16 に応力ひずみ関係、図 17 に有効応力経路を示す。メンブレンの材質と厚さ (通常は 0.3 mm であるところを 0.5 mm とした) によらず、通常の液状化試験と同等の応力ひずみ関係、有効応力経路を得た。液状化強度も通常の方法による既往の研究結果と概ね一致した。

砂供試体/メンブレンの変形計測から得た局所変形特性を直接/間接的に評価した。図 18 に局所的な鉛直ひずみの分布を示す。各分布は繰返し波の第 8 波目 (赤印)、11 波目 (青印) で描かれたものであり、軸ひずみの最大 (●)、最小 (▲) 値、過剰間隙水圧比の圧縮側の最大値 (■)、引張側の最大値 (■) における局所ひずみの状況を示している。図 17 より、外部変位計による全体的な軸ひずみの両振幅が 5 % に達するまでの範囲においては、供試体の上下端部を除いて砂供試体とメンブレンの局所変形特性は概ね一致した。下端部では砂の流出 (図 19)、上端部では液状化した砂の再堆積の影響によるものと考えられる砂供試体のひずみの局所化が、メンブレンのひずみ分布には表れなかった。

今後は低密度な供試体で同様の実験と解析を行い、砂供試体の局所変形特性に及ぼす評価手法の影響について引き続き検討する予定である。また、シリコン製メンブレンによる試験と画像解析手法を (2) の中空ねじり試験に適用することにより、ねじりせん断を受けた層構造を持つ土の局所変形挙動について検討することが課題である。

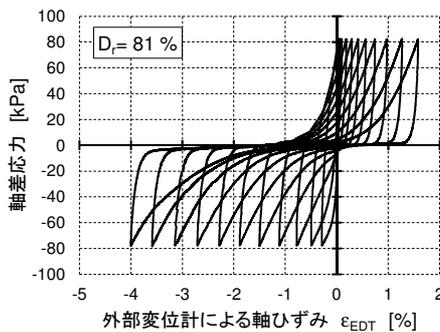


図 16 三軸非排水繰返し載荷試験における応力ひずみ関係

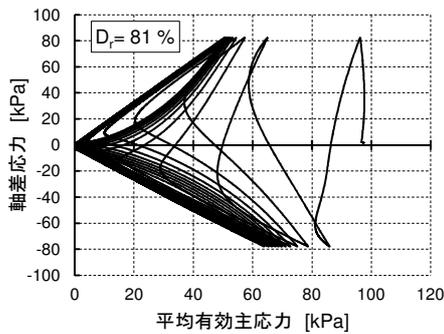


図 17 三軸非排水繰返し载荷試験における有効応力経路

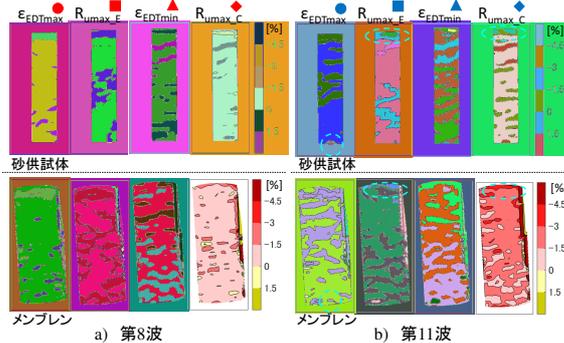


図 18 砂供試体とメンブレンの鉛直局所ひずみ分布

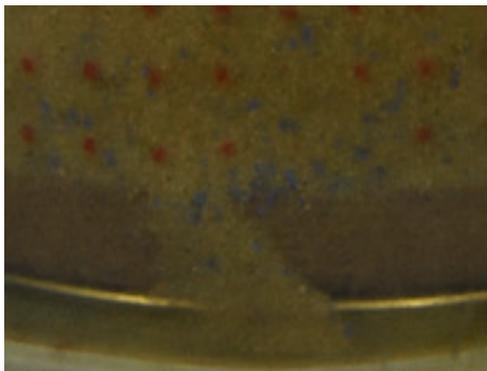


図 19 供試体下端部での砂の流出の様子

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Hoshino, R., Miyashita, Y., Sato, T. and Koseki, J.: Local deformation properties of sand specimens in triaxial liquefaction tests evaluated by direct and indirect observations, Bulletin of ERS, 査読なし, 48, 2015
- ② 古関 潤一, ファウジ ウサマジュニアンシャー, 佐藤 剛司, 宮下 千花: 浚渫土を用いて埋立てた砂質地盤の液状化挙動に関する実験的研究, 生産研究, 査読なし, 66(6), 565-568, 2014. 11
- ③ 古関 潤一, ワヒュディ セト, 佐藤 剛司, 宮下 千花: 多層リングを用いた繰返し単純せん断試験における多数回液状化時の特性変化, 生産研究, 査読なし, 66(6), 551-554,

2014. 11

④ Fauzi, U. J., Wahyudi, S., Miyashita, Y. and Koseki, J.: Application of image analysis to sand specimens in hollow cylindrical torsional shear tests, Proc. of 2nd JAEE International Symposium on Earthquake Engineering, 査読なし, pp.95-100, 2013. 11

⑤ Fauzi, U. J., Wahyudi, S., Miyashita, Y. and Koseki, J.: Image analysis technique for segregated specimen of Katori sand in hollow cylindrical torsional shear test, Proc. of 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, Okinawa, 査読なし, pp.163-166, 2013. 11

[学会発表] (計 5 件)

- ① 青柳悠大, 古関潤一, 佐藤剛司, 宮下千花: 複数回液状化時の特性変化に関する多層リング繰返し単純せん断試験 (その 3), 第 50 回地盤工学研究発表会, 札幌, 2015 年 9 月 1-3 日
- ② 星野龍一郎, 古関 潤一, 宮下千花, 佐藤剛司: 三軸液状化試験における砂供試体の局所変形特性の直接・間接評価, 第 50 回地盤工学研究発表会, 札幌, 2015 年 9 月 1-3 日
- ③ 古関潤一, Wahyudi Seto, 佐藤剛司, 宮下千花: 複数回液状化時の特性変化に関する多層リング繰返し単純せん断試験 (その 2), 第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, 2014 年 7 月 15-17 日
- ④ 古関潤一, Wahyudi Seto, 佐藤剛司, 宮下千花: 複数回液状化時の特性変化に関する多層リング繰返し単純せん断試験, 第 48 回地盤工学研究発表会, 北九州, 2013 年 7 月 25-27 日
- ⑤ 佐藤剛司, 古関潤一, Wahyudi Seto, 宮下千花: 多層リング単純せん断試験装置の開発, 第 48 回地盤工学研究発表会, 北九州, 2013 年 7 月 25-27 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮下 千花 (堤千花) (Miyashita Yukika)
 東京大学・生産技術研究所・技術専門職員
 研究者番号: 20396914