

平成 30 年 4 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04036

研究課題名(和文) 複数回液状化時の特性変化とその予測手法に関する研究

研究課題名(英文) Study on property change during multiple liquefaction events and its prediction

研究代表者

古関 潤一 (KOSEKI, Junichi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：30272511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：砂質地盤の地震時液状化が複数回生じる場合の特性変化を実験的に明らかにするために、等体積繰返し多層リング単純せん断試験、非排水繰返し中空ねじり試験、および水平飽和砂地盤模型の振動台実験を系統的に実施した。その結果、再液状化強度の著しい低下は、それまでの液状化履歴に関わらず、直前に大きなせん断ひずみまで液状化させた後に生じること、および、直前の液状化過程における消散エネルギーをその時点での平均有効応力で正規化することにより、再液状化強度の予測精度が向上することなどを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate experimentally the property change during multiple liquefaction events, a series of stacked-ring simple shear tests under constant volume condition, undrained cyclic torsional shear tests on hollow cylindrical specimen, and shaking table tests on level saturated sand ground model was conducted. As a result, it was revealed that, irrespective of the past liquefaction histories, the re-liquefaction resistance is largely reduced when the immediate-past liquefaction stage induces a significant shear strain. It was also verified that the accuracy of prediction of the re-liquefaction resistance can be improved by normalizing the energy that is dissipated during the immediate-past liquefaction stage with the current mean effective stress.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 地盤防災 再液状化 室内土質試験 模型振動実験 初期せん断

1. 研究開始当初の背景

(1) 2011年東北地方太平洋沖地震では、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。これにより道路・住宅・産業施設や下水管路などのライフラインが甚大な被害を受け、いまだに復興途上の地域もある。研究代表者は、被災自治体（茨城県潮来市・稲敷市、千葉県香取市・我孫子市、埼玉県久喜市）が設置した液状化対策検討委員会の副委員長・委員として、家屋等の被害状況分析と、今後想定される地震動に対する液状化発生予測、効果的・経済的な液状化対策工法の検討を行ってきた。

(2) 地震後の各種調査の結果として、次に示す点が明らかになっていた。

利根川流域の液状化箇所には、1987年に発生した千葉県東方沖地震でも液状化した箇所があり、少なくとも2回は液状化している。東北地方では今回が4回目の箇所もある。

噴砂規模で比較すると、本震よりもその約30分後の最大余震における液状化のほうが著しかった箇所がある

地震前後に実施した地盤調査結果の比較では、液状化発生によりN値が増加する傾向が見られる場合があった。

(3) 以上の背景のもとで、研究代表者は多層リング単純せん断試験装置を用いて複数回の液状化試験を実施し、毎回同一の繰返し載荷条件で液状化履歴を与えた場合、次に示す特性変化が生じることを明らかにしてきた。

液状化履歴を受けると再圧縮により徐々に密度増加する。その後の再液状化特性は、同一密度で初めて液状化する場合よりも強い場合と弱い場合があり、液状化履歴を受けた際の变形程度によって異なる。特に2回目の液状化時は、平均的な密度が1回目より増加しても強度は逆に小さい場合がある。

変形が大きくなるほど、局所的なせん断ひずみ分布が非一様になる。大きな変形時には局所的に密度が低下し、次の液状化時の強度特性に影響を及ぼしている可能性がある。

(4) そこで、これらの調査結果および独自の研究成果をさらに発展させて活用することにより、実際の地震時と同様に毎回異なる繰返し載荷条件で液状化履歴を与えた場合における特性変化を明らかにし、さらに、その予測手法も開発する本研究の検討内容を立案するに至った。

2. 研究の目的

(1) 砂質地盤の地震時液状化が複数回生じる場合の特性変化を実験的に明らかにするために、等体積繰返し多層リング単純せん断試験、非排水繰返し中空ねじり試験、および水平飽和砂地盤模型の振動台実験を系統的に実施する。

(2) また、これらの試験結果の詳細な分析と比較検討を行うことで、このような特性変化を事前に予測する手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 図1に示す多層リングせん断試験装置を用いて、豊浦砂に対して毎回異なる繰返し載荷条件で液状化履歴を与え、その後の再液状化特性に及ぼす影響を実験的に評価した。



図1 多層リングせん断試験装置

(2) (1)の試験で計測した液状化過程でのせん断応力～ひずみ関係から消散エネルギーを算定し、これに基づいて次の再液状化時の強度特性を定量的に予測する手法について検討した。

(3) これまでの関連研究や実務において多用されている従来型の非排水繰返し中空ねじり試験を、多層リングせん断試験と同様な試験条件下で実施し、(1)の結果と比較することで、試験装置の違いが複数回の液状化挙動に及ぼす影響を実験的に評価した。

(4) 液状化して大きく変形した際の局所変形状況について検討するため、従来とは異なる透明な特殊メンブレンと着色した珪砂試料を用いた非排水繰返し中空ねじり試験と非排水繰返し三軸試験を実施し、供試体の局所変形状況の直接および間接的な計測を行ってこれらの結果を比較した。

(5) 高さ0.5mの水平飽和砂地盤模型を珪砂で作製して1g場で複数回の水平加振実験を行い、液状化特性の変化状況を計測した。地盤模型中の各深度におけるせん断応力～せん断ひずみ関係を計測した。

ん断ひずみ関係を、鉛直測線上に加速度計を10cm程度の間隔で密に配置し、その測定波形に一次元離散質点系応答モデルを適用して評価した。同じ珪砂を用いた繰返し三軸試験も並行して実施し、これらの試験結果を相互比較した。

4. 研究成果

(1) 等体積繰返し多層リング単純せん断試験に関しては、初期せん断がない場合の試験結果より、次の点を明らかにした。

大小さまざまなせん断ひずみ両振幅まで液状化させる試験を同一の供試体で複数回実施した結果、液状化回数の増加とともに相対密度も増加した。特に、大きなせん断ひずみを与えた後の密度増加が著しかった。

再液状化強度の著しい低下は、それまでの液状化履歴に関わらず、直前に大きなせん断ひずみまで液状化させた後に生じた。

同一のせん断ひずみを毎回与えた試験では、2回目の液状化時の強度が低下する場合があった。一方で、大小さまざまなせん断ひずみ履歴を与えた試験では、3回の液状化履歴後も液状化強度が著しく低下する場合があった。

直前の液状化過程における消散エネルギーと再液状化強度の関係について検討した結果、液状化中の消散エネルギーをその時点での平均有効応力で正規化することにより、図2,3に示すように再液状化強度の予測精度が向上することを明らかにした。

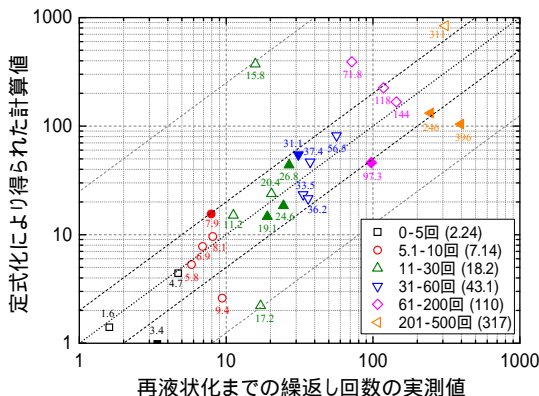


図2 液状化中の消散エネルギーに基づく再液状化強度の予測値と実測値の比較（正規化前）

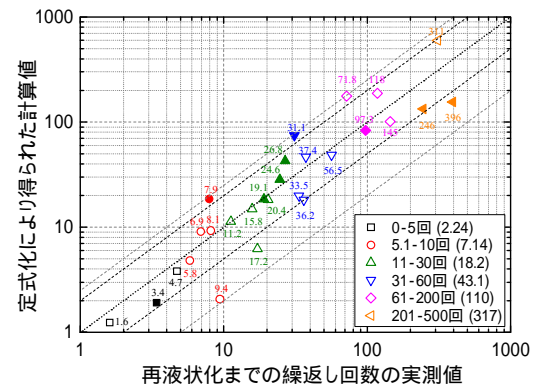


図3 液状化中の消散エネルギーに基づく再液状化強度の予測値と実測値の比較（正規化後）

(2) 初期せん断がある場合について等体積繰返し多層リング単純せん断試験を実施した結果の分析を行い、初期せん断があっても同一の繰返し載荷条件下では、初期せん断がない場合と同程度の正規化エネルギー増分で液状化に至ることを明らかにした。

(3) 非排水繰返し中空ねじり試験では、圧密時の拘束圧を変えて実施した初期せん断なしの試験結果の分析を行い、液状化過程に消散したエネルギーは各時点における平均有効応力で正規化することによって、累積ひずみとの関係が一意的になることを明らかにした。

(4) 透明メンブレンと図4に示すような着色砂試料を用いた非排水繰返し中空ねじり試験と非排水繰返し三軸試験の結果の例を図5に示す。いずれの試験においても過剰間隙水圧比が100%まで上昇した状態ではメンブレンと供試体の間ですべりが生じるため、供試体の変形状況を直接的に観測する必要があることを明らかにした。

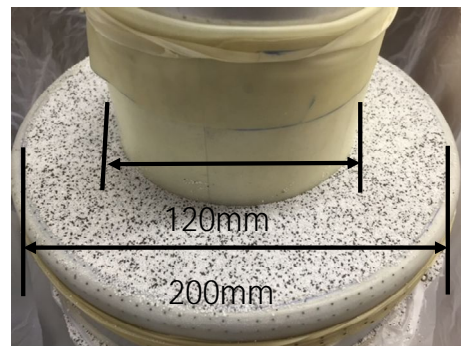


図4 着色砂を用いた中空円筒供試体の作成状況

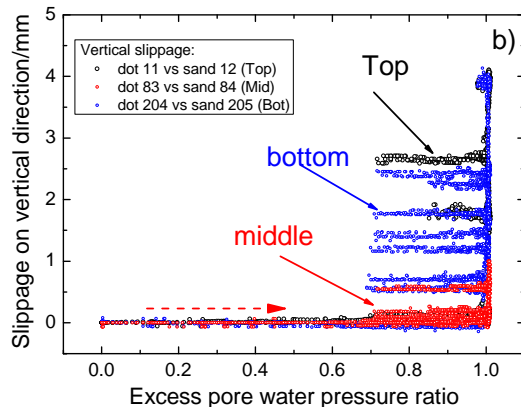


図5 メンブレン・供試体間のすべり量と過剰間隙水圧比の関係例(非排水繰返し中空ねじり試験)

(5) 水平飽和砂地盤模型の振動台実験では、同じ地盤材料を用いて実施した非排水繰返し三軸試験結果と再液状化特性の比較を行い、直前の液状化過程での正規化消散エネルギーの二つの成分（正負の効果）が再液状化強度に影響を及ぼす傾向が、これらの試験間で図6に示すように定性的に一致することを明らかにした。ただし、振動台実験に用いた

地盤模型は、三軸試験に用いた供試体よりも飽和度が低かったために、これらの試験の分析結果は定量的には一致しなかった。

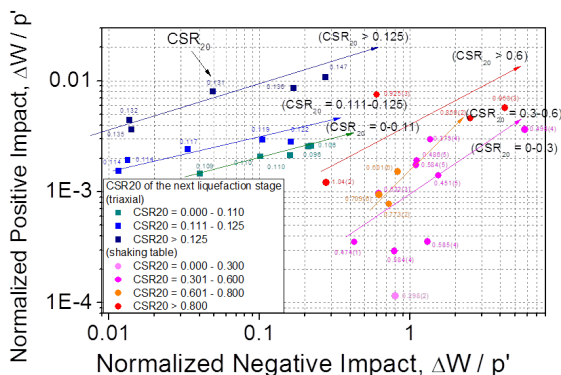


図 6 振動台実験と非排水繰返し三軸試験における再液状化特性の分析結果の比較

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 3 件)

Wahyudi, S., Koseki, J., Sato, T. and Chiaro, G.: Multiple-liquefaction behavior of sand in cyclic simple stacked-ring shear tests, International Journal of Geomechanics, ASCE, 査読有, 2015.

[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000596](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000596)

青柳悠大, Wahyudi, S., 古関潤一, 佐藤剛司, 宮下千花: 大小様々な液状化履歴を与えた複数回液状化試験と消散エネルギーを用いた分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, Vol. 72, No. 4 (地震工学論文集第 35 巻), 1_167-176, 2016. http://doi.org/10.2208/jscejsee.72.1_167

Koseki, J., Hoshino, R., Miyashita, Y. and Sato, T.: Direct and indirect observations of local deformation properties of saturated sand specimens in undrained cyclic triaxial tests, Proc. of 6th Japan-Korea Geotechnical Workshop, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 査読有, Vol. 4, No. 3, pp.36-39, 2016.9. <http://doi.org/10.3208/jgssp.v04.j01>

[学会発表](計 20 件)

古関潤一, Wahyudi, S., 青柳悠大: 消散エネルギーに着目した複数回液状化試験結果の分析, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山大学 (岡山県・岡山市), 2015.9.16-18

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, 北海道科学大学 (北

海道札幌市), 2015.9.3

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, 北海道科学大学 (北海道札幌市), 2015.9.3

青柳悠大, 古関潤一, Wahyudi, S.: 複数回液状化試験における消散エネルギーの正負の効果に着目した分析, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山大学 (岡山県・岡山市), 2015.9.16-18

青柳悠大, Wahyudi, S., 古関潤一, 佐藤剛司, 宮下千花: 大小様々な液状化履歴を与えた複数回液状化試験と消散エネルギーを用いた分析, 第 35 回地震工学研究発表会, 土木学会地震工学委員会, 東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区), 2015.10.7

宮下千花, 星野龍一郎, 古関潤一, 佐藤剛司: 三軸液状化試験における密な豊浦砂の画像解析による局所変形特性の評価, GeoKanto 2015, 地盤工学会関東支部, 日本科学未来館 (東京都江東区), 2015.10.9

Wahyudi, S., Sato, T., Koseki, J. and Aoyagi, Y.: Development of stacked-ring shear apparatus for multiple liquefaction tests, Deformation Characteristics of Geomaterials, Proc. IS-Buenos Aires, Rinaldi et al. (eds.), IOS Press, pp.307-314, Buenos Aires (Argentina), 2015.11.16

Fauji, U.J., Koseki, J., Miyashita, Y., Hoshino, R. and Nawir, H.: Local deformation measurement using image analysis technique in hollow cylindrical torsional shear test, Deformation Characteristics of Geomaterials, Proc. IS-Buenos Aires, Rinaldi et al. (eds.), IOS Press, pp.519-526, Buenos Aires (Argentina), 2015.11.16

青柳悠大, 古関潤一, 佐藤剛司: 豊浦砂の複数回液状化特性に及ぼす大小様々な応力履歴の影響, 第 51 回地盤工学研究発表会, 岡山大学 (岡山県岡山市), 2016.9.13-15

Teparaksa, J. and Koseki, J.: Behaviour of silica sand under repeated liquefaction using triaxial apparatus, 71st annual meeting of JSCE, 東北大学 (宮城県・仙台), 2016.9.7-9

Zhao, C. Miyashita, Y. and Koseki, J.: The comparison of direct and indirect local deformations of silica sand by image analysis in triaxial liquefaction tests, 71st annual meeting of JSCE, 東北大学 (宮城県・仙台), 2016.9.7-9

青柳悠大, 古関潤一: 複数回液状化試験結果における消散エネルギーを用いた分析方法の検討, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 東北大学 (宮城県・仙台), 2016.9.7-9

Zhao, C. Koseki, J. and Miyashita, Y.: Direct and indirect local deformations of

sand in undrained cyclic triaxial tests by image analysis technique, Proc. of International Workshop on Advances in Laboratory Testing & Modeling of Soils and Shales, Villars-sur-Ollon (Switzerland), 2017.1.18-20

青柳悠大, 古関潤一: 平均有効主応力で正規化した消散エネルギーに基づく複数回液状化試験の分析, 第 52 回地盤工学研究発表会, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市), 2017.7.12-14

山崎佑太郎, 古関潤一, 青柳悠大: 平均有効主応力で正規化した消散エネルギーに基づく豊浦砂の再液状化特性の定式化, 第 52 回地盤工学研究発表会, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市), 2017.7.12-14

森本時生, 青柳悠大, 古関潤一: 初期せん断応力下での複数回液状化特性に関する多層リング繰り返し単純せん断試験, 第 52 回地盤工学研究発表会, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市), 2017.7.12-14

Teperaksa, J. and Koseki, J.: Comparison of silica sand behaviour under repeated liquefaction using shake table and triaxial test, 72nd annual meeting of JSCE, 九州大学 (福岡県福岡市), 2017.9.11-13

Iqbal, M.S. and Koseki, J.: Shaking history effect on reliquefaction of sandy soils in model test, 72nd annual meeting of JSCE, 九州大学 (福岡県福岡市), 2017.9.11-13

山崎佑太郎, 青柳悠大, 古関潤一: 消散エネルギーに基づく豊浦砂の再液状化特性の定式化, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 九州大学 (福岡県福岡市), 2017.9.11-13

森本時生, 青柳悠大, 古関潤一: 初期せん断応力下での複数回液状化試験における再圧密条件の影響, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 九州大学 (福岡県福岡市), 2017.9.11-13

〔その他〕

ホームページ等

<http://geotle.t.u-tokyo.ac.jp/portfolio/analysis-of-multiple-liquefaction-characteristics-of-toyoura-sand-based-on-dissipated-energy/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古関 潤一 (KOSEKI, Junichi)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 30272511

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

宮下 千花 (MIYASHITA, Yukika)

東京大学・生産技術研究所・技術職員

研究者番号: 20396914

(平成 27 年度まで)

松丸 貴樹 (MATSUMARU, Takaki)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号: 00425927

(平成 27 年度まで)