

令和 3 年 4 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01531

研究課題名（和文）密な砂地盤の液状化特性と上部構造物の地震時挙動に過去の地震履歴が及ぼす影響の解明

研究課題名（英文）Investigation into effects of past earthquake histories on liquefaction properties of dense sandy ground and seismic behavior of superstructures resting on it

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） 13,600,000 円

研究成果の概要（和文）：多数の地震履歴を経て密になっていく砂地盤の液状化強度がどこまで増加し得るか、また、このような密な砂地盤とその上部構造物が巨大な地震動を受けたときにどのように挙動するかを明らかにすることを研究目的として設定し、各種の実験的検討を実施した。その結果、密な砂の液状化特性が平均的な相対密度だけに依存するわけではなく、同じ平均相対密度ではあるが加振履歴が異なる密な支持地盤上の構造物挙動が、加振履歴の影響を大きく受けることを明らかにした。また、多数の地震履歴を経て密になっていく砂地盤の液状化強度は、部分液状化履歴を繰返し受けることで特に顕著に増加することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

密な砂地盤の液状化特性が、平均的な相対密度だけでなく地震履歴の影響も受けることを明らかにした点に学術的な意義がある。実務においては密な砂地盤が重要構造物の支持地盤とされる場合が多いため、この研究成果は社会的にも意義も有する。

さらに、液状化しやすい砂地盤を締め固めて改良する際には、部分液状化履歴に相当する履歴を与えていくことで効果が高まると考えられることを示した点で、今後の応用研究の方向性も提示している。

研究成果の概要（英文）：Experimental investigations were conducted to study the increase of the liquefaction resistance of sandy soil deposits that undergo gradual densification due to many earthquake histories as well as to reveal its effect on the seismic performance of superstructures resting on such dense sandy soil deposits. As a result, the liquefaction properties of dense sands were found not simply to depend on their overall relative density. The structural performance was largely affected by the past shaking histories under otherwise similar conditions of the dense subsoils, including their overall relative density. It was also demonstrated that the liquefaction resistance of dense sands could be more significantly raised by applying partial liquefaction histories repeatedly.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 液状化 振動台実験 室内土質試験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2011年の東北地方太平洋沖地震で被災した市街地の液状化対策を検討する際に、「年代効果」を経験的に考慮した液状化強度の評価が行われたが、地震履歴等による土粒子構造の変化と経時的なセメンテーションの発現に起因すると考えられている「年代効果」の詳細は、未解明な点が多数残っていた。

2. 研究の目的

重要構造物の支持地盤となる密な砂地盤に及ぼす地震履歴の影響に着目し、多数の地震履歴を経て密になっていく砂地盤の液状化強度がどこまで増加し得るか、また、このような密な砂地盤とその上部構造物が巨大な地震動を受けたときにどのように挙動するかを明らかにすることを当初の研究目的として設定した。

3. 研究の方法

以下に示す各項目の研究を実施した。

(1) 水平飽和砂地盤模型の振動台実験

高さ0.5m、長さ2.6m、奥行き0.4mの水平飽和砂地盤模型を珪砂7号で作成して水平加振実験を行い、多数の加振履歴等を経て相対密度が80%程度以上に高まった場合と、最初から高い相対密度で地盤を作成した場合の液状化特性を計測し比較した。

また、上記と同様な水平飽和砂地盤模型に対し、実務で適用されている静的な締固めを模擬した地盤改良を施工して相対密度を高めた場合の液状化特性を計測し、締固め時の回転貫入・引抜きの有無等の施工条件の影響について検討した。

(2) 水平飽和砂地盤と上部構造物模型の振動台実験

1)と同様な2通りの場合について相対密度が70%程度となるように作成した水平飽和砂地盤上に構造物模型を設置して水平加振実験を行い、構造物と地盤の応答特性と、加振中と加振後の構造物の沈下挙動および周辺地盤の変形挙動を計測し比較した。

(3) 飽和砂の中空ねじり試験

振動台実験と同じ珪砂7号を用いて高さ30cm、外径20cm、内径12cmの中空円筒供試体を作成し、飽和・圧密後に初期せん断ゼロの条件下で非排水繰返しねじりせん断試験を行った。多数の繰返し載荷履歴を経て相対密度が80%程度以上に高まった場合と、最初から高い相対密度で供試体を作成した場合などについて液状化特性と液状化後の再圧密特性を計測し比較した。

また、供試体寸法を小さくした場合(高さ20cm、外径10cm、内径6cm)の試験も並行して多数実施し、載荷履歴の影響をより詳細に検討した。

4. 研究成果

研究成果の概要を3の項目毎に示す。

(1) 水平飽和砂地盤模型の振動台実験結果

水平地盤模型中の鉛直測線に加速度計を10cm程度の間隔で配置し、図1に示す一次元離散質点系応答モデルを測定波形に適用して各深度におけるせん断応力とひずみを算定した結果の例を図2に示す。せん断剛性が著しく低下する液状化発生時特有の挙動や、その後に剛性が一時的に回復するサイクリックモビリティ挙動を精度よく計測することができた。

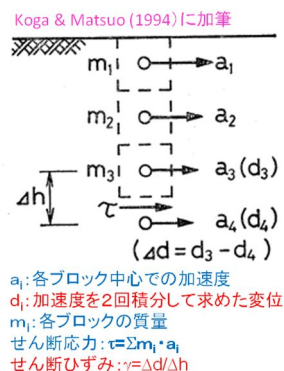


図1 一次元離散質点系応答モデル

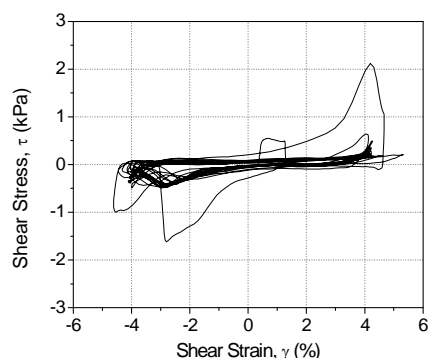


図2 加振中の応力ひずみ関係の例

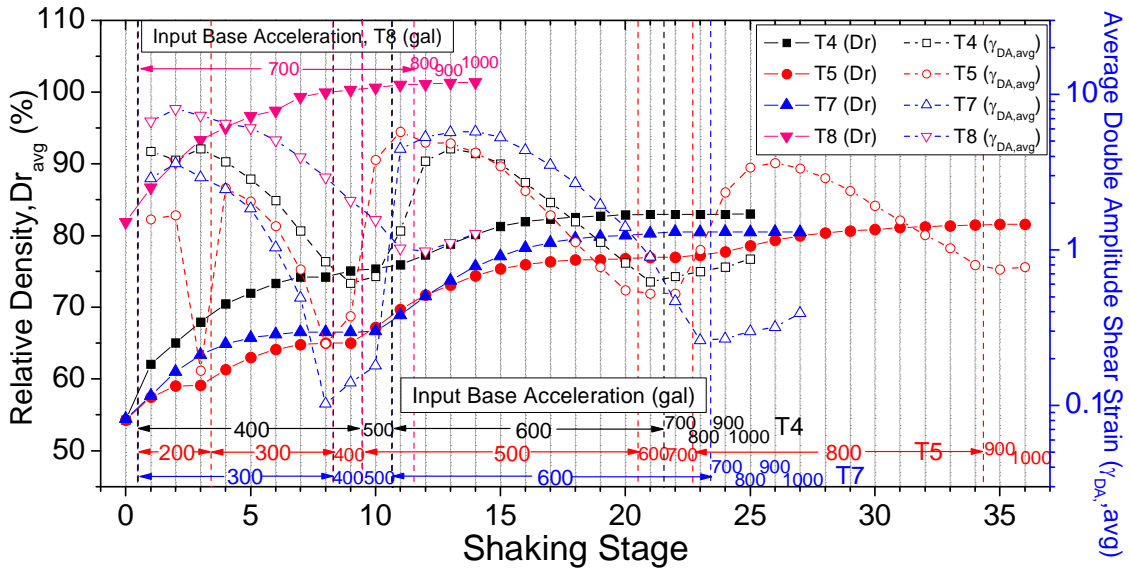


図3 計4ケースの振動台実験における複数回加振時の応答特性と相対密度の変化

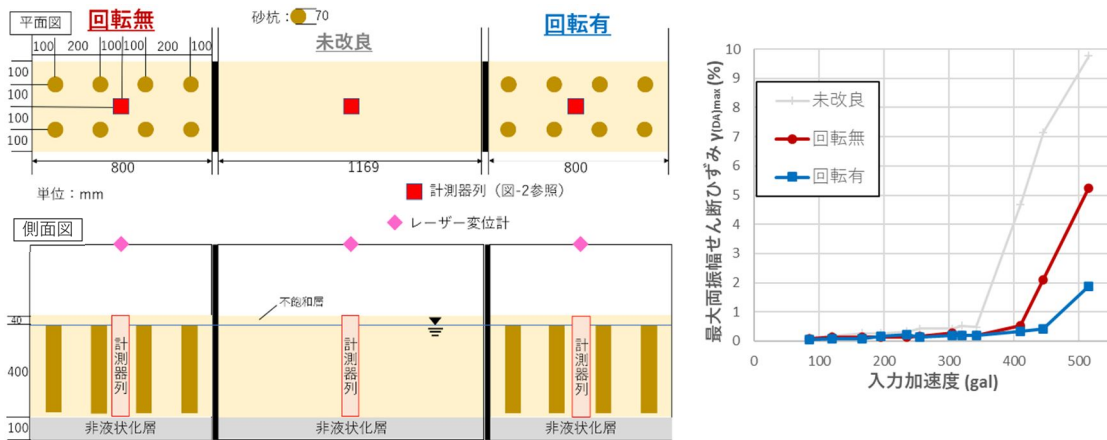


図4 静的な締固め地盤改良を模擬した模型地盤と各部の応答特性の変化

計4ケースの振動台実験結果の比較を図3に示す。複数回加振時の応答特性として、4深度で計測した最大せん断ひずみ両振幅の平均値の変化を図の右側のスケールに対して白抜ききのデータとして示したが、入力加速度が同一の条件で複数回加振すると、当初は大きかったせん断ひずみ振幅が徐々に低下し、液状化時の変形が生じにくくなった。

合わせて、各加振後の沈下量から算定した平均的な相対密度の変化も図3の左側のスケールに対して塗りつぶしデータとして示した。最初から80%程度の高い相対密度で模型地盤を作製したT8の実験では700gal加振を繰り返すことで、100%近い相対密度まで密実化が生じた。一方で、55%程度の相対密度から多数の加振履歴を与えて密実化させたT5の実験では、相対密度が75%程度まで高まった状態で800gal加振を繰り返しても、それ以上の密実化がほとんど進行しなかった。これらの挙動の違いから、密な砂の液状化特性が平均的な相対密度だけに依存するわけではないことを明らかにした。

静的な締固めを模擬した地盤改良を施工して相対密度を高めた振動台実験に用いた模型地盤の平面・側面図と各部の応答特性の変化を図4に示す。各部ともに、4深度で計測した最大せん断ひずみ両振幅の平均値が、入力加速度とともに当初は徐々に増加し、液状化が生じた以降は著しく増加した。締固め時に回転貫入を併用した場合には、回転させなかった場合と比較して、液状化が遅れて発生したことから、ほぼ同じ平均相対密度でも回転貫入の有無が液状化特性に顕著な影響を及ぼすことを明らかにした。

(2) 水平飽和砂地盤と上部構造物模型の振動台実験結果

最初から70%程度の相対密度で作製した水平飽和砂地盤模型上に上部構造物模型を設置して800gal加振を行った場合と、40%程度の相対密度から多数の加振履歴を与えて相対密度70%程度まで密実化させたうえで上部構造物模型を設置して800gal加振を行った場合の挙動の比較を図5に示す。Test 3が前者の場合の結果(上段が加振前、下段が加振後の状況)で構造物模型が40mm沈下したのに対し、後者の場合の結果であるTest 4-Bと5-Bにおける沈下量はそれぞれ

65, 17mmであった。Test 4-Bでは加振履歴を与える際に入力加速度振幅を一定に保った一方で、Test 5-Bでは入力加速度振幅を徐々に低減させたことから、これらの加振履歴の違いによって、同じ平均相対密度でも構造物の沈下量が最大4倍程度まで異なり得ることを明らかにした。

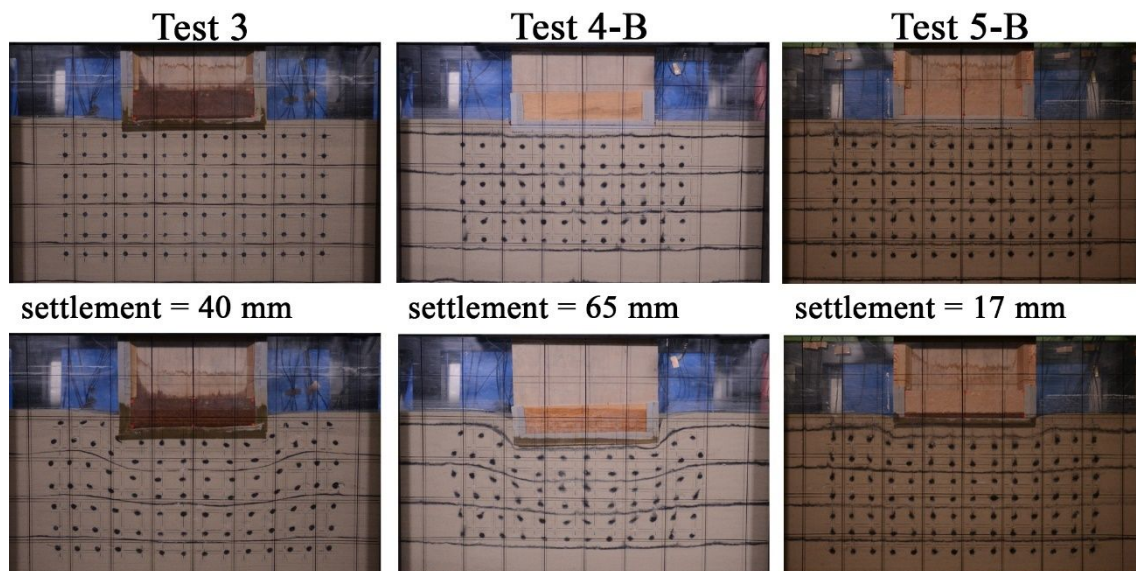


図5 相対密度70%程度の地盤上の構造物模型の沈下挙動の比較
(上段：加振前，下段：800gal 加振後)

(3) 飽和砂の中空ねじり試験結果

80%程度の初期相対密度となるように作製した供試体を同一の繰返し載荷条件のもとで複数回液状化させた場合の結果を図6に示す。20回で両振幅せん断ひずみが7.5%となるせん断応力比を液状化強度として比較すると、1回目の液状化時には0.25程度であったのに対して、4回目の液状化時にはこれが1.1程度まで増加し、あわせて平均相対密度も85%以上まで密実化した。

上記の複数回液状化試験時の平均相対密度と「所定のせん断応力比で両振幅せん断ひずみが7.5%となり液状化する回数」の関係を図7に示す。この液状化回数は平均相対密度とともに増加していることから、この結果だけを見ると、これらに相関があることになる。

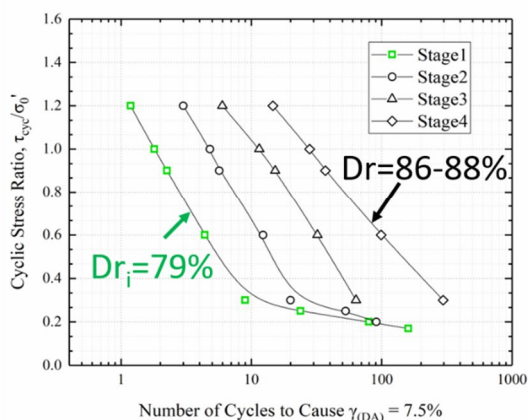


図6 複数回液状化試験結果

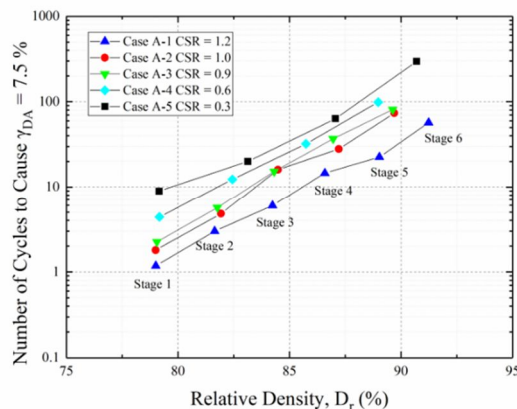


図7 平均相対密度と液状化回数の関係(その1)

一方で、87%程度まで初期相対密度を高めた場合の追加試験を実施して、初期相対密度80%の場合の試験結果と比較すると図8aが得られる。例えば、液状化履歴を与えて平均相対密度が90%程度まで高まった時点における「所定のせん断応力比(この場合は1.0)で両振幅せん断ひずみが7.5%となり液状化する回数」は、両者の試験で大きく異なっていることから、液状化強度特性は平均相対密度だけに依存するわけではないことを明らかにした。この知見は、前述した振動台実験結果とも整合する。

次に、液状化履歴の代わりに「排水条件下で比較的小さい繰返しせん断履歴を与えた」場合の試験結果を図8b中に赤丸で囲ったデータとして示す。一部の試験では液状化強度が顕著に増加

したが、このような効果を得るためには、繰返しせん断履歴を与える際の両振幅せん断ひずみを0.6%まで大きくし、さらに繰返し載荷回数も200回以上に増加させる必要があった。

さらに、図9に例示するような「非排水条件下で過剰間隙水圧比が0.5まで上昇した時点で繰返し載荷を中止して再圧密させる」過程を繰返した場合の試験結果を、上記の各試験結果とともに図10にまとめて示す。過剰間隙水圧比を0.5まで上昇させる部分液化履歴を複数回与えた試験の結果は青いプロットとして示したが、このような履歴を18回与えることで最も高い液状化強度が得られ、「20回で両振幅せん断ひずみが7.5%となるせん断応力比」が1.6程度まで上昇した。

以上の検討結果より、多数の地震履歴を経て密になっていく砂地盤の液状化強度は、部分液化履歴を繰返し受けることで特に顕著に増加することを明らかにした。液状化しやすい砂地盤を締め固めて改良する際には、これに相当する履歴を与えていくことで効果が高まると考えられる。

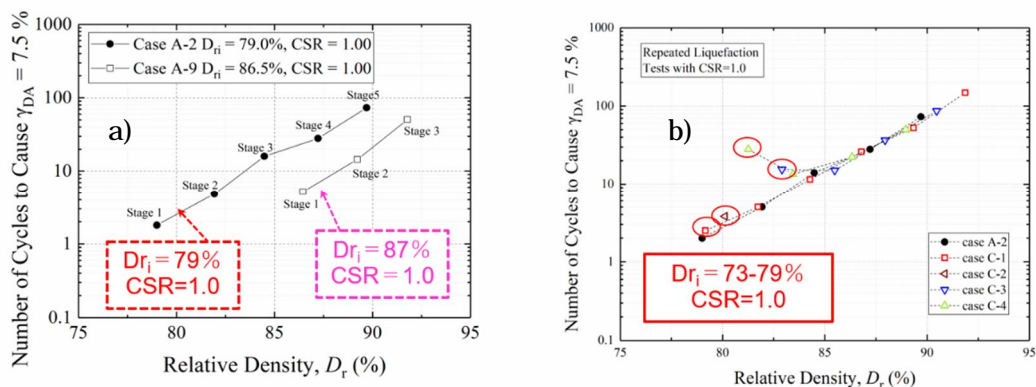


図8 平均相対密度と液状化回数の関係(その2)

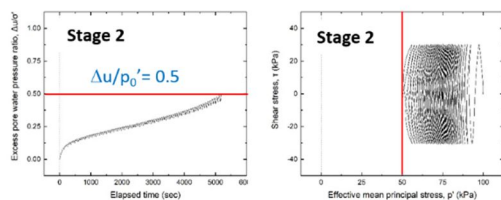


図9 部分液状化履歴の例

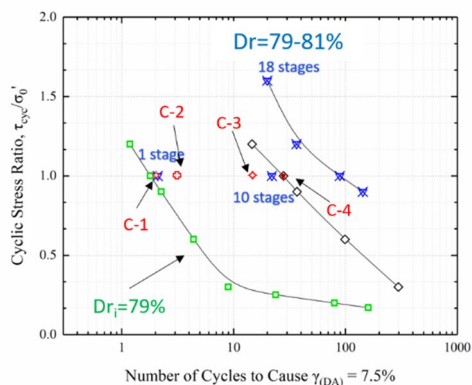


図10 複数回液状化試験結果(1および4回目)と他の繰返しせん断履歴を与えた試験結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Koseki Junichi, Yokoyama Daichi, Morimoto Tokio	4. 巻 7
2. 論文標題 Cyclic Bi-Axial Tests on Assembly of Metal Rods Under Constant-Volume Condition to Study Re-Liquefaction Behavior	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transportation Infrastructure Geotechnology	6. 最初と最後の頁 478 ~ 495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40515-020-00123-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Liu Weichen, Koseki Junichi	4. 巻 8
2. 論文標題 A procedure to reach high liquefaction resistance in laboratory testing on reconstituted sand specimens using hollow cylindrical torsional shear apparatus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Society Special Publication	6. 最初と最後の頁 476 ~ 479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgssp.v08.j14	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Sasaki Tomoko, Kawamura Shima, Koseki Junichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Effects of compaction thickness on liquefaction properties of two kinds of sandy soils prepared by moist-tamping method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Society Special Publication	6. 最初と最後の頁 355 ~ 359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgssp.v08.j12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Koseki Junichi	4. 巻 22
2. 論文標題 Several challenges in advanced laboratory testing of geomaterials with emphasis on unconventional types of liquefaction tests	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geomechanics for Energy and the Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gete.2019.100157	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Morimoto, T., Aoyagi, Y. and Koseki, J.	4. 巻 59 (5)
2. 論文標題 Effects of induced anisotropy on multiple liquefaction properties of sand with initial static shear	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1148-1159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2019.03.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Morimoto, T., Aoyagi, Y. and Koseki, J.	4. 巻 59 (6)
2. 論文標題 Effects of small and large shear histories on multiple liquefaction properties of sand with initial static shear	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 2024-2035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2019.11.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 古関潤一	4. 巻 46 (11)
2. 論文標題 締固め砂杭の施工が液状化強度特性に及ぼす影響に関する最近の知見	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 基礎工	6. 最初と最後の頁 2~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 SASAKI Tomoko, SATO Takeshi, ZHAO Chuang, KOSEKI Junichi	4. 巻 13 (4)
2. 論文標題 Effects of compaction thickness and initial water content on liquefaction properties of compacted sand specimen	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Journal	6. 最初と最後の頁 379~392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgs.13.379	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Teparaksa J., Koseki J.	4. 巻 8
2. 論文標題 Effect of past history on liquefaction resistance of level ground in shaking table test	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geotechnique Letters	6. 最初と最後の頁 256 ~ 261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1680/jgele.18.00085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 横山大智, 森本時生, 古関潤一
2. 発表標題 二軸載荷試験装置を用いた再液化試験および画像解析による微視的構造の変化に関する考察
3. 学会等名 第55 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日下部真佑, 古関潤一, 原田健二
2. 発表標題 締固め砂杭打設を模擬した水平地盤模型の振動台実験
3. 学会等名 第55 回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日下部真佑, 古関潤一, 原田健二
2. 発表標題 砂締固め砂杭打設を模擬した水平地盤模型の振動台実験における応力ひずみ関係
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teparaksa, J. and Koseki, J.
2. 発表標題 Analysis of repeated liquefaction behavior in shaking table test and triaxial test using energy approach
3. 学会等名 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koseki, J., Aoyagi, Y., Morimoto, T., Wahyudi, S., Teparaksa, J. and Iqbal, M.S.
2. 発表標題 Multiple-liquefaction behavior of sands in shaking table tests and cyclic stacked-ring shear tests
3. 学会等名 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Baboz, E., Watanabe, K. and Koseki, J.
2. 発表標題 1-g shaking table test study of the impact of repeated liquefactions
3. 学会等名 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Iqbal, M.S., Teparaksa, J. and Koseki, J.
2. 発表標題 The effect of strain amplitude on the repeated liquefactions of levelled ground in a model test
3. 学会等名 9th Asian Young Geotechnical Engineer 's Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Liu, W. and Koseki, J.
2. 発表標題 Effects of pre-shear history on repeated liquefaction behavior of dense sand using hollow cylindrical torsional shear apparatus
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Liu, W., 古関潤一
2. 発表標題 実験室で液状化強度が高い砂供試体を作る手法およびその複数回液状化挙動に関する研究
3. 学会等名 第16回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Study of Pre-Shake Effects on Liquefaction http://geotile.t.u-tokyo.ac.jp/portfolio/study-of-pre-shake-effects-on-liquefaction-in-shake-table/ Impact of the Repeated Liquefaction on Structure geotile.t.u-tokyo.ac.jp/portfolio/impact-of-the-repeated-liquefaction-on-superstructure/ Study of Pre-Shake Effects on Liquefaction http://geotile.t.u-tokyo.ac.jp/portfolio/study-of-pre-shake-effects-on-liquefaction-in-shake-table/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	京川 裕之 (Kyokawa Hiroyuki) (60799865)	東京大学・工学系研究科・助教 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	渡邊 健治 (Watanabe Kenji) (80425925)	東京大学・工学系研究科・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関