

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 4 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01425

研究課題名(和文) 粒子配向性に着目した液状化地盤の年代効果と再液状化評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of evaluation method of aging and reliquefaction for liquefied ground considering sand particle's orientation

研究代表者

豊田 浩史 (Toyota, Hirofumi)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：90272864

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、再液状化強度のメカニズムを解明するため、粒子配向性の観点から液状化強度の検討を行った。まず、振動台試験であるが、液状化強度は粒子配向性90°が最も小さく、液状化によって元の粒子配向性は90°方向へ変化することが明らかとなった。また、信濃川河川敷(新潟市中央区)における液状化層の不攪乱試料採取では、液状化層試料の粒子配向性が90°方向へ集中する傾向が確認され、振動台試験結果と一致する傾向が示された。これらの結果より、液状化履歴によって粒子配向性が変化し、飽和砂地盤は液状化に対し、脆弱な堆積構造へ変化することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一度液状化した緩い砂地盤は、その後、排水を伴って密になる。したがって、液状化した地盤は、液状化しにくくなると考えられる。しかし、実際には、過去に液状化した地盤が再液状化した事例が数多く報告されている。この再液状化のメカニズムを解明するため、粒子配向性に着目した研究を行った。その結果、液状化履歴によって粒子配向性が変化し、飽和砂地盤は液状化に対し、脆弱な堆積構造へ変化することが示された。今後、液状化履歴を有する地盤に対しては、その液状化強度を低く設定するなどの措置が必要であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Liquefaction resistance was investigated from the viewpoint of particle orientation to clarify the mechanism of reliquefaction strength. In the shaking table test, the liquefaction resistance was smallest at a particle orientation of 90 degrees and largest at 0 degrees. Moreover, the particle orientation tends to change 90 degrees in original 0 degrees deposition after the liquefaction. In addition, the particle orientation was measured using the undisturbed samples extracted from the Shinano riverbed in Chuo-ku, Niigata City. The particle orientation of the liquefied layers tended to be concentrated in 90 degree-direction, which was generally consistent with the results of the shake table tests. Those results indicate that liquefaction history generates the change of particle orientation. Consequently, the ground changes to be vulnerable to liquefaction, indicating weak sedimentary structure against liquefaction.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 年代効果 せん断剛性率 三軸試験 振動台試験 サンプリング

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

液状化被害の分析より、液状化抵抗の年代効果と再液状化問題が社会的に解明すべき重要事項として挙げられる。これまで経験的に、「若い埋立地盤ほど液状化しやすく、数百年経過した古い埋立地は液状化の可能性は低い」、「一度液状化した地盤は、再度液状化を起こす可能性がある」と言われているものの、そのメカニズムは不明確で、正確に実務問題に反映できているとは言えない状態である。

そこで本研究において、年代効果と再液状化に対して、これまで申請者らが得た力学特性(せん断波速度、変形特性、強度)の知見に、土粒子の配向性の変化を加味することで、経験則によらない、新たな液状化抵抗指標を提案するものである。さらに、これらの成果を、実務問題へ適用する手法についても検討する。

2. 研究の目的

国際会議や個別の講演会で、一度液状化が起こると、応力履歴や年代効果の影響が喪失する(液状化による砂試料の免疫喪失と表現)ことを主張してきた。免疫喪失時の力学特性の変化として、初期せん断剛性率はほとんど変化しないが、非線形性が現れるひずみが小さくなることを実験結果より示した。これを説明するため、ミクロ(土粒子レベル)の挙動に着目して、砂粒子の配向性が変化している可能性について検討を行う。このような挙動が確認できれば、これまでの、経験に頼るしかなかった年代効果や再液状化現象に対して、理論に基づいた数値解析(粒状体や異方性の理論を使用)が可能となる。

3. 研究の方法

本研究では、豊浦砂を用い振動台実験を行い、各粒子配向での液状強度比RLを求めた。また、液状化前後における粒子配向変化の調査、及び再液状化試験を実施し、過去の三軸液状化試験との比較を行った。さらに、信濃川河川敷から採取した不攪乱試料の粒子配向性も調べた。

(1) 供試体作製方法

砂供試体試料は、漏斗堆積法を用いて作製した。また、任意の配向角毎に供試体を作製するため傾式モールドを使用し、試料には豊浦砂を用いた。

(2) 試験内容

模型振動台で実施した試験内容を以下に示す。なお、試験1~試験3に関しては相対密度30%及び60%で試験を実施している。試験1: 粒子配向角毎の液状化強度比RL算出、試験2: 粒子配向角毎の再液状化強度、試験3: 液状化前後での粒子配向性変化、試験4: 信濃川河川敷の液状化層の粒子配向性

(3)

模型振動台実験での試験条件を Table 1

に示す。なお、今回の試験では加振条件として5Hz, 20Cycleを採用している。また、Fig. 1, Fig. 2に測定で使用した加速度計及び間隙水圧計の設置位置を示す。

Table 1. 試験条件

配向角	試験条件(5Hz, 20Cycle)				
	Dr (%)	Gal	測定 Dr (%)		
			液状化前	液状化後	再液状化後
0°	30	200	36.0	53.2	61.8
		225	36.0	53.2	61.8
		250	36.0	53.2	61.8
	60	300	66.5	74.6	87.6
		350	61.6	69.7	74.6
		375	66.5	74.6	82.7
45°	30	200	40.0	48.7	57.4
		225	43.7	50.6	60.1
		250	41.8	48.7	60.1
	60	300	59.4	67.9	76.3
		350	59.5	68.0	75.5
		375	47.8	56.2	64.6
90°	30	200	35.7	62.2	88.6
		225	36.5	62.6	71.3
		250	36.5	62.6	71.3
	60	300	60.4	72.0	80.3
		350	59.3	70.8	79.1
		375	57.2	68.9	79.1

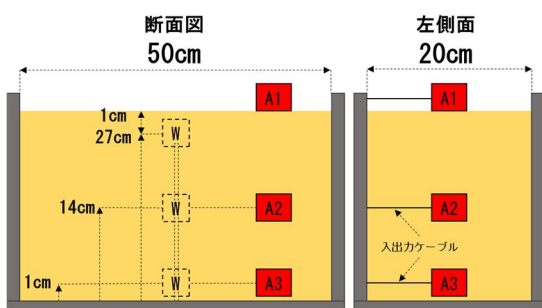


Fig. 1. 土槽内加速度計設置位置

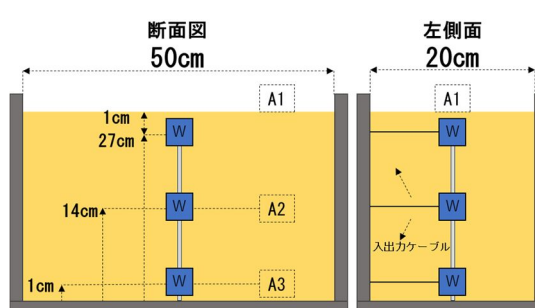


Fig. 2. 間隙水圧計設置位置

#### 4. 研究成果

##### (1) 過剰間隙水圧比

Fig. 2 に示した間隙水圧計より得られた液状化時の過剰間隙水圧比時刻歴を Fig. 3, Fig. 4 に示す．なお，今回示す結果は，200Gal,  $D_r=30\%$  の液状化試験の結果である．上部間隙水圧計の測定結果は機器の乱れの影響により割愛する．これらの図より，過剰間隙水圧比が 1 に到達する時間は， $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ$  の順となっており，液状化するまでの繰返し回数もこの順に少ないこととなる．本研究における液状化判定はすべて過剰間隙水圧比 1.0 地点を基準としており，液状化到達までの載荷回数  $N_c$  も，同地点に到達した時刻より算出を行っている．

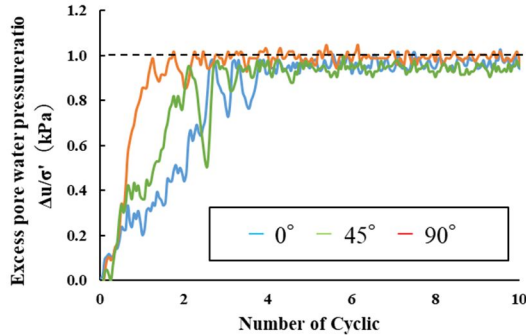


Fig. 3. 中間部間隙水圧計 ( $D_r=30\%$ , 200 Gal)

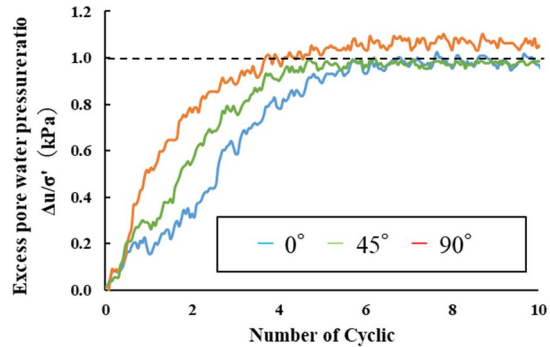


Fig. 4. 下部間隙水圧計 ( $D_r=30\%$ , 200 Gal)

##### (2) 液状化強度比の算出

(1) で得られた計測結果及び  $N_c$  を用いて粒子配向角毎の液状化強度比  $R_L$  の算出を行った．以下に繰返し応力振幅比  $\tau/\sigma_d$  の算出方法及び試験結果を示す．

中間部せん断力  $\tau_M$  は次式で求めた．

$$\tau_M = \frac{(A1+A2)}{2} \rho_{sat} H1 \quad (1)$$

下部せん断力  $\tau_B$  は次式で求めた．

$$\tau_B = \frac{(A1+A2)}{2} \rho_{sat} H1 + \frac{(A2+A3)}{2} \rho_{sat} H2 \quad (2)$$

中間部有効上載圧  $\sigma_{dM}$  は次式で求めた．

$$\sigma'_{dM} = (\rho_{sat} - \rho_w) g H1 \quad (3)$$

下部有効上載圧  $\sigma_{dB}$  は次式で求めた．

$$\sigma'_{dB} = (\rho_{sat} - \rho_w) g (H1 + H2) \quad (4)$$

ここに，

$A1$  : 上部せん断加速度,  $A2$  : 中間部せん断加速度,  $A3$  : 下部せん断加速度,  $\rho_{sat}$  : 供試体湿潤密度,  $\rho_w$  : 水の密度,  $H1$  : 中間部深さ,  $H2$  : 中間部～下部までの深さ,  $g$  : 重力加速度, なお,  $A1 \sim A3$  は各振幅の最大加速度の平均値である．

各試験で得られた液状化強度比を, Fig. 5, Fig. 6 に示す．これらの結果より, 各相対密度での強度関係はいずれも配向  $0^\circ$  の方が強くなる傾向を示した．これは, 粒子配向角により液状化強度が変化するという結果を模型振動台試験により示せたことになる．

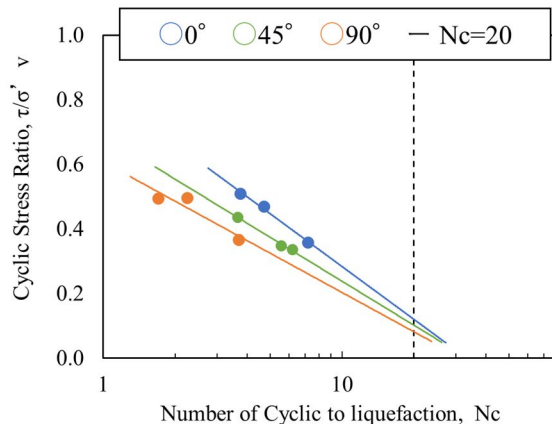


Fig. 5. 液状化強度曲線 ( $D_r=30\%$ )

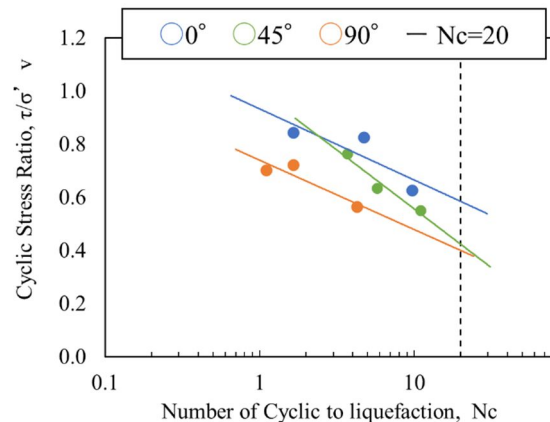


Fig. 6. 液状化強度曲線 ( $D_r=60\%$ )

##### (3) 三軸試験結果

振動台模型試験と比較するため, Fig. 7, Fig. 8 にこれまでに得られている三軸液状化試験での

液状化強度曲線を示す。Fig. 5, Fig. 6 で示した模型振動台実験での液状化強度曲線との比較から、試験のプロット点が、振動台模型試験では大きな CSR となっており、さらに小さな繰り返し数となっている。模型振動台試験で、繰り返し数を増やすため小さな CSR で試験も行ったが、液状化は発生しなかった。このことから、三軸試験は非排水条件で行われるため、間隙水圧の消散がないが、今回の模型振動台試験は、サイズが小さいため、間隙水圧消散の影響を強く受けていると考えられる。大きなサイズの振動台試験を行えば、この差は小さくなる可能性はある。

さらに重要な差異として、各供試体（配向角  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ ）での液状化強度関係が、振動台模型試験と三軸試験で逆転していることがわかる。これは模型振動台と三軸試験機での繰返しせん断断荷方法の違いによるものと推測される。つまり、異方性を有する供試体の場合は、せん断方向を考慮した液状化試験の実施が重要であることが明らかとなった。今回の場合は、間接せん断である三軸試験に比べ、模型振動台試験の方が、実際の地震動載荷により近いものになっていると考えられる。

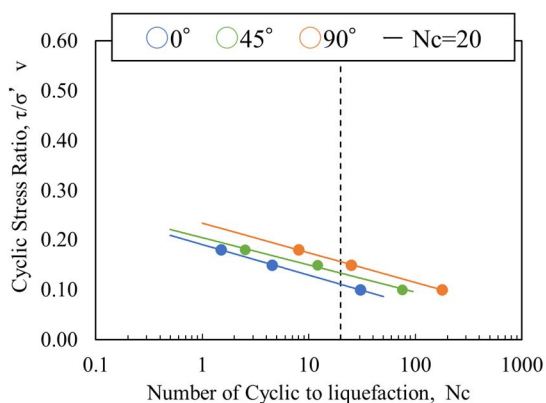


Fig. 7. 液状化強度曲線 ( $Dr=30\%$ )

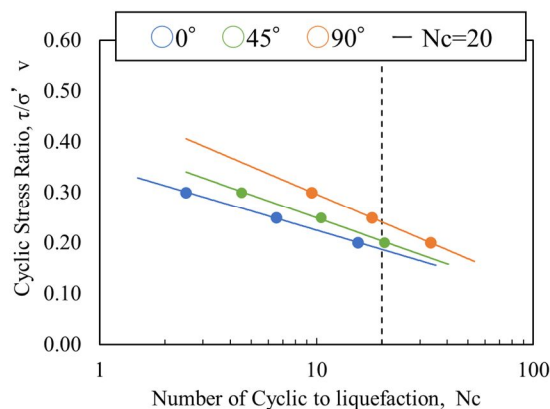


Fig. 8. 液状化強度曲線 ( $Dr=60\%$ )

#### (4) 再液状化強度

本研究では、(2)で示した液状化試験に続いて、30分経過後に再液状化試験を実施した。Fig. 9, Fig. 10 に再液状化試験結果を示す ( $Dr=30\%$ 、200Gal 加振時のみ)。なお、間隙水圧計は、定位置に固定してあるが、加速度計は固定していないため、液状化試験時に、大きく傾いたり沈下したりする。そのため、再液状化試験時は加速度計の信頼性が得られないため、過剰間隙水圧比の時刻歴で液状化強度評価を行う。これらの結果より、Table 1 で全体的な密度増加が確認されたにも関わらず、間隙水圧の上昇が急激になっていることがわかる。この1つの理由は、液状化により、粒子配向性が  $90^\circ$  に向かう傾向があった（後述の(5)参照）ことが考えられる。この粒子配向角の影響以上に、間隙水圧の上昇が急激であることから、液状化しやすい骨格構造に変化したことも考えられる。再液状化強度の大幅な低下が認められたが、液状化時のような各粒子配向角での液状化強度の差は確認できなくなった。

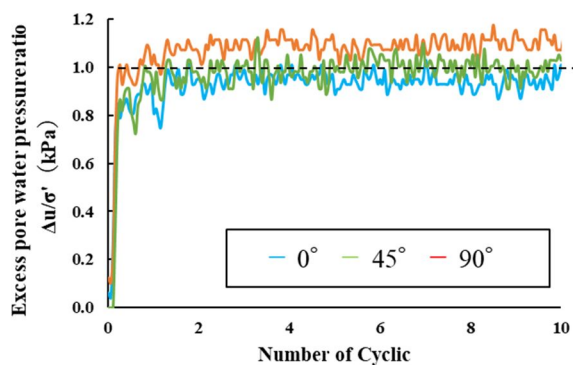


Fig. 9. 中間部間隙水圧計 ( $Dr=30\%$ 、200 Gal)

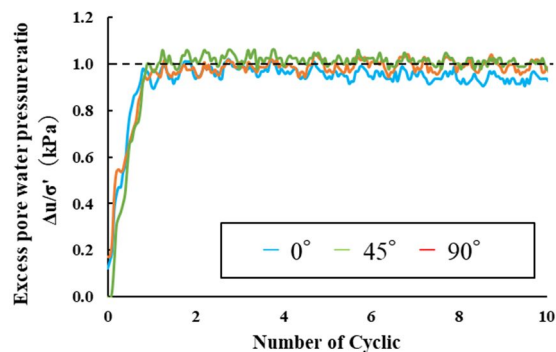


Fig. 10. 下部間隙水圧計 ( $Dr=30\%$ 、200 Gal)

#### (5) 粒子配向性

本研究では、振動台試験の模型地盤で、マイクロスコブを用いて、液状化前後における各模型地盤の砂粒子配向性変化を測定した。Fig. 11, Fig. 12 に粒子配向分布図を示す。液状化前は各配向角付近へ集中的に粒子が分布していることがわかる。一方、液状化後は全体的に液状化前の堆積角から  $90^\circ$  方向への変化が確認された。これは液状化により、砂粒子の堆積角度が  $90^\circ$  方

向に向かうことがわかる。つまり、再液状化強度評価には、この粒子配向性の変化を組み込む必要がある。今回は、 $Dr=30\%$ の結果のみ示したが、 $Dr=60\%$ においても、同様の結果が得られた。

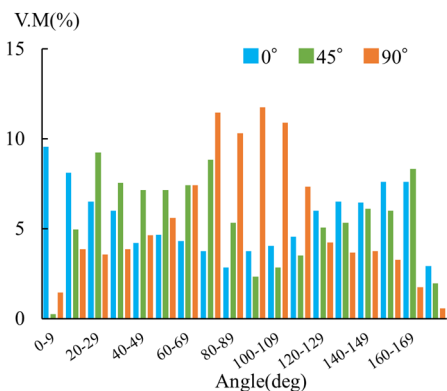


Fig. 10. 粒子配向性 (液状化前,  $Dr=30\%$ )

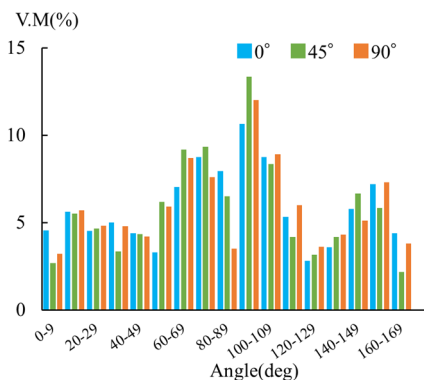


Fig. 11. 粒子配向性 (液状化後,  $Dr=30\%$ )

#### (6) 不攪乱試料の粒子配向性

本調査では、1964年に発生した新潟地震における液状化被害エリアを対象に地盤調査を実施した。具体的には、GS サンプルングにより得られた不攪乱試料を用いて(5)と同様に粒子配向性の測定を実施した。なお、試料は凍結状態のまま長さ150mmに切り分けたものを使用しており、150mmに満たない端片については、物理試験等に供する予備試料とした。

Fig. 11に調査位置を、GeoslicerやN値から、液状化したと思われる層の粒子配向性分布をFig. 12に、液状化しなかったと思われる層の結果をFig. 13にそれぞれ示す。これらの結果より、液状化層の配向性においては、 $90^\circ$ 方向へ集中する傾向が確認された。一方、非液状化層の配向性に関しては粒子配向が局所的に集中する傾向は弱く、全体に広く分散する傾向が確認された。これらの結果は、模型振動台実験でも、液状化後、粒子配向性が $90^\circ$ に向かう傾向と一致している。以上のように、不攪乱試料においても、液状化後に粒子配向性が $90^\circ$ に向かうことがわかり、これが再液状化強度に大きな影響を及ぼすこととなることが明らかとなった。



Fig. 12. 不攪乱試料採取位置 (新潟市中央区一番堀通町昭和大橋上流側)

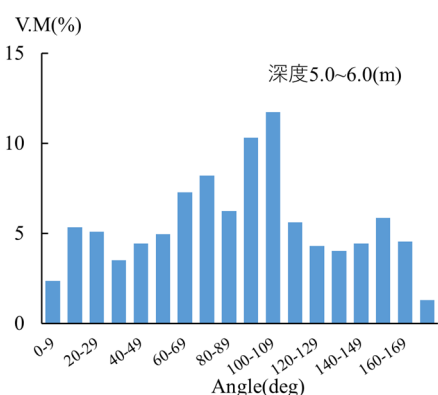


Fig. 13. 粒子配向性 (推定液状化層)

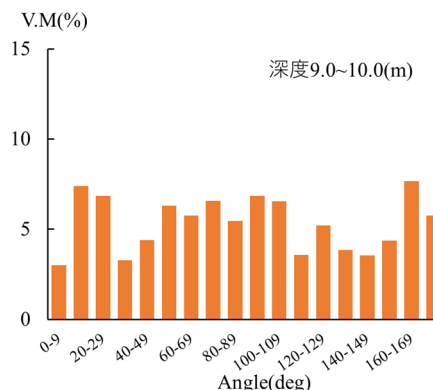


Fig. 14. 粒子配向性 (推定非液状化層)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Toyota Hirofumi, Takada Susumu	4. 巻 63
2. 論文標題 Aging effects on liquefaction resistance of sand estimated from laboratory investigation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 101318 ~ 101318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2023.101318	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 Jiang Mingjin, Kamura Akiyoshi, Kazama Motoki	4. 巻 62
2. 論文標題 Numerical study on liquefaction characteristics of granular materials under Rayleigh-wave strain conditions using 3D DEM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 101176 ~ 101176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2022.101176	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 Kim Jongkwan, Kazama Motoki, Kawai Tadashi	4. 巻 61
2. 論文標題 Evaluation of post-liquefaction volumetric strain of reconstituted samples based on soil compressibility	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1555 ~ 1564
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2021.09.002	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13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 塚田千広, 豊田浩史, 高田晋
2. 発表標題 液状化によるセメンテーション破壊と密実化が再液状化に及ぼす影響
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirofumi Toyota and Motoki Kazama
2. 発表標題 Liquefaction traces on the Shinano River left bank after the 1964 Niigata Earthquake - Liquefaction research issues suggested by geoslicer survey results -
3. 学会等名 8th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Motoki Kazama, Jongkwan Kim, Akiyoshi Kamura, Keigo Azuno, and Youngcheul Kwon
2. 発表標題 Challenges to Innovation of Liquefaction Prediction Technology
3. 学会等名 8th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Mingjin Jiang, Akiyoshi Kamura, and Motoki Kazama
2. 発表標題 Effects of residual effective stress and particle size distribution on reconsolidation characteristics of granular materials after undrained cyclic shear: a 3D DEM study
3. 学会等名 8th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 澤村 聡, 菊地史佳, 伊藤陸, 権永哲, 加村晃良, 風間基樹
2. 発表標題 孔内水平載荷を模擬した中空円筒供試体の非排水繰返しせん断挙動
3. 学会等名 令和5年度土木学会東北支部, 技術研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 塚田千広, 豊田浩史, 高田晋
2. 発表標題 セメント添加年代効果再現試料の液状化による力学特性の変化
3. 学会等名 第40回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩崎真也, 豊田浩史, 高田晋
2. 発表標題 豊浦砂の粒子配向性が液状化, 再液状化に及ぼす影響
3. 学会等名 第40回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塚田千広, 豊田浩史
2. 発表標題 セメント添加試料のひずみ領域で分類した液状化履歴による力学特性の変化
3. 学会等名 第2回地盤工学会北陸支部ユースネットワーク研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kazama, A. Kamura, J. Kim, and J. Han
2. 発表標題 Liquefaction research on anti-catastrophic strategies for external forces exceeding the design seismic level
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 M. Jiang, A. Kamura, and M. Kazama
2. 発表標題 Simulation of granular soil liquefaction due to Rayleigh wave transformation by 3D discrete element method
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kiyohara and M. Kazama
2. 発表標題 Evaluation of liquefaction/mudflow resistance of improved volcanic sandy ash soils focusing on dissipated energy
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chavez Garcia Carlos Alain, 豊田浩史, 高田晋, 藤原涼
2. 発表標題 粒子配向性を考慮した砂の液状化特性
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塚田千広, 豊田浩史, 高田晋
2. 発表標題 セメンテーションを与えた砂の再液状化に関する研究
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担者	風間 基樹  (Kazama Motoki)  (20261597)	東北大学・工学研究科・教授   (11301)	
研究 分担者	杉本 光隆  (Sugimoto Mitsutaka)  (50196755)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授   (13102)	

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
---------	---------