

遠心実験による大地震時のセメント系格子状改良体の液状化抑止効果の評価

栗本 悠平 石川 明

(技術研究所)

(技術研究所)

Dynamic centrifuge model tests of liquefaction mitigation effect of soil-cement grid in very large earthquakes

Yuhei Kurimoto and Akira Ishikawa

2019年の建築基礎構造設計指針改定¹⁾に伴い、基礎構造に対して二次設計を行う基本方針が示された。大地震に対応した設計は液状化対策にも求められ、余震等の後続地震動に対する液状化抑止効果の評価も必要となる。そこで、液状化対策のセメント系格子状地盤改良に着目し、L1およびL2地震動を想定した加振波を連続で作用させる遠心模型実験を実施した。その結果、加振履歴を受けていない格子状改良体はL1相当の加振に対して液状化抑止効果を発揮したが、L2相当の加振では液状化が発生した。また、L2相当の加振履歴を受けた改良地盤では、面外壁を含めた格子間地盤が履歴前よりせん断変形しやすくなり、後続のL1相当の加振でも液状化する可能性が示唆された。

To ensure a reasonable structural design for a building where anti-liquefaction ground-improvement measures are employed, the behavior of the foundation ground in very large earthquakes should be evaluated. Focusing on soil-cement grid, its liquefaction mitigation effect during moderate and very large earthquakes is clarified through dynamic centrifuge tests on a model. The results show that soil-cement grid is effective as a liquefaction countermeasure against moderate earthquakes. However, once damaged by a very large earthquake, ground improved by this method may be more easily deformed than undamaged ground, leading to the possibility of liquefaction during a subsequent moderate earthquake.

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震等の大地震では、設計時に想定していたレベルを上回る外力を受けた基礎構造の被災に伴う建築物の傾斜・倒壊事例が報告されている。多くの建築物の基礎構造には二次設計が法的に求められておらず²⁾、基礎構造の地震被害を低減できない要因として考えられている。基礎構造の二次設計に対する社会的ニーズが高まるなか、2019年に建築基礎構造設計指針¹⁾が改定され、基礎構造の二次設計体系が示された。基礎構造だけでなく、液状化対策についても大地震に対応した設計が求められる。また、余震等の後続地震動に対する液状化抑止効果の評価も必要となる。

液状化対策の一つとして、格子状地盤改良がある。本工法の設計法については、設計に必要な諸係数を特定の地盤条件に対する安全評価に基づいて定

める手法³⁾が提案されている。改良地盤の地震応答を均質化モデルで計算し、液状化指数 R_L 値で示した例^{4),5)}もある。格子状地盤改良の工法原理は、せん断変形を抑制することで液状化を防止するものだが、既往の設計法では対策前後のせん断変形量が明確でない。そこで著者らは、地盤の初期せん断ひずみ量と、均質化理論⁶⁾に基づく格子状改良体および格子間地盤の等価なせん断剛性を用いた液状化評価法^{7),8)}を提案した。ただし本手法は、中地震を対象に、格子状改良体と格子間地盤が一樣にせん断変形すると仮定しており、大地震により生じると予想される格子状改良体の損傷を考慮していない。

既往の研究⁹⁾⁻¹⁹⁾では、遠心模型実験や数値解析による検証が行われている。格子状地盤改良に着目した既往の実験¹⁶⁾では、格子状改良体をアクリル等のプレート板で模擬し、改良地盤の応答や効果を検証することもある。しかしながら、大地震時の格子状改良体の挙動や損傷度、残存する液状化抑止効

果の検討には適していない。セメント系格子状改良体に複数回の地震動を作用させた遠心模型実験¹⁷⁾も報告されているが、格子状改良体によるフーチング基礎の沈下抑止を検証しており、液状化抑止効果については評価されていない。

本研究では、大地震時の液状化抑止効果の把握を目的に、セメント系格子状改良体を用いた遠心模型実験を50g場で実施した。格子状改良地盤にL1およびL2相当の加振波が複数回作用した場合の応答と液状化抑止効果の検証結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 地盤材料

地盤材料の物理特性を表-1と図-1に示す。液状化層は、既往の研究²⁰⁾を参考に、Fujian sandとカオリン10%を混ぜ合わせた材料(Clayey sand)とした。また、支持層として、透水性の高いCoarse sandを用いた。これは、模型地盤を均一に飽和させるためである。

表-1 地盤材料の物理特性

	Symbol	Unit	Clayey sand	Coarse Sand
Soil particle density	ρ_s	g/cm ³	2.65	2.65
Maximum void ratio	e_{max}	-	1.14	0.80
Minimum void ratio	e_{min}	-	0.60	0.57
Fine fraction content	F_c	%	15	0.2
Uniformity coefficient	U_c	-	40	1.4
50% diameter on the grain size diagram	D_{50}	mm	0.16	1.31
Permeability	k	m/s	8.04×10^{-6}	7.14×10^{-3}

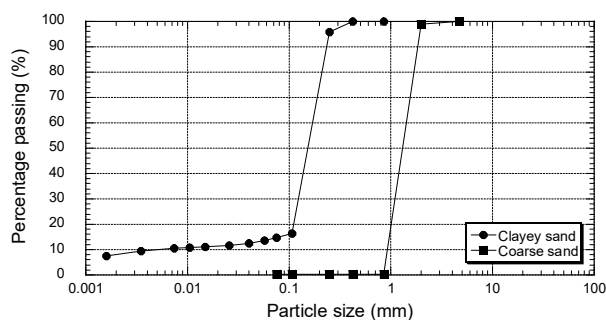


図-1 地盤材料の粒径加積曲線

2.2 土槽

土槽は、剛土槽(内寸：幅 770 mm×奥行き 400 mm×深さ 500 mm)を採用した。加振平行方向の土槽側面には、テフロンシートを貼り、改良壁と土槽の間に摩擦が生じないようにした。その状況を写真-1に示す。



写真-1 テフロンシートを貼り付けた土槽側面

2.3 模型地盤と格子状改良体

模型地盤の条件を表-2と図-2に示す。液状化層厚は15 m(以下、実スケール換算表記)であり、相対密度 $D_r = 50\%$ を目標に空中落下法により作製した。支持層厚は2.5 mとし、相対密度 $D_r = 80\%$ を目標に締め固めた。実験では、図-3に示す格子状改良体が連続して存在する状態を再現(外周地盤では液状化が生じないと仮定)するために、外周地盤を加振中でも剛性が保持される支持層と同様のCoarse sandとした。模型地盤は、土槽底面からシリコンオイルを真空状態で注入し、1週間程度で飽和させた。地下水の位置は、地表面と同じとした。

表-2 遠心模型実験の条件

Case	Soil		Soil-cement grid (2 X 3)				Peak input acceleration (g)	
	Material	T_g (m)	D_r (%)	A_r (%)	T_{sc} (m)	L (m)		H (m)
L1	CsA	15	50					0.15
L2A	CsB	2.5	80	25	0.9	8.25	15	0.4 → 0.15
L2B	CsB	15	80					0.6 → 0.4 → 0.15

* CsA: Clayey sand, CsB: Coarse sand, T_g : Thickness of ground, A_r : Area replacement ratio, T_{sc} : Thickness of soil-cement grid, L : Lattice spacing, H : Height

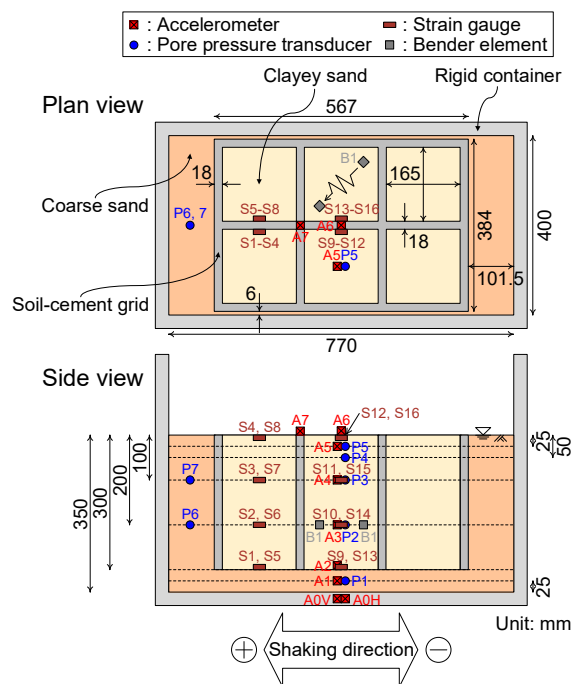


図-2 模型地盤(モデルスケール換算表記)

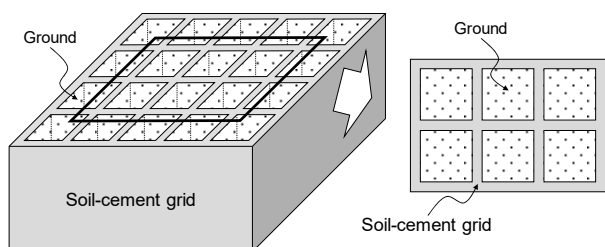


図-3 格子状改良体の対象領域

格子状改良体(2 X 3)は、既往の研究^{9),17)}を参考に、砂(Fujian sand)およびカオリン粘土、セメント、水を1.64 : 0.29 : 0.57 : 1.00の重量比率で配合し、せん断波速度 $V_s = 500 \sim 650$ m/s と一軸圧縮強さ $q_u = 3 \sim 4$ N/mm² を目標に作製した。格子状改良体のせん断波速度 V_s と一軸圧縮強さ q_u は、それぞれ80(8日)~560(12日) m/s、4(35日) N/mm² であった。実験時の格子状改良体の材齢は、各ケースで47日(Case L1)、57日(Case L2A)、44日(Case L2B)である。格子状改良地盤の面積改良率 A_r は、液状化対策として一般的に用いられる面積改良率を参考に25%を想定した。また、改良厚さ T_{sc} および改良間隔 L 、改良高さ H は、それぞれ0.9 m、8.25 m、15 mとした。

格子状改良体型枠の作製過程と脱型後の状態を写真-2と写真-3に示す。格子状改良体の作製には、写真-3に示す型枠を用いた。写真-3の左側のプレートは、脱型を容易にするために長手方向に三分割されており、それらを4個組み合わせることで箱型にした。その後、それぞれの隙間にテフロンテープを貼り付けることでスラリー状改良体の浸入を防止した。最後にそれらを所定の間隔で底板に配置し、四方から別プレートで囲うことで型枠を完成させた。スラリー状改良体を型枠に流し込む際には、外周プレートを軽く叩き、混入空気を除去した。

計測項目は、格子間地盤および外周地盤、格子状改良体の加速度と水圧である。加速度計は、支持層(A1)および格子間地盤(A2~A5)、改良体天端(A6:面内壁、A7:交差部)に設置した。土槽底面には、加速度計(A0V、A0H)を設置し、応答加速度を計測した。水圧計は、支持層(P1)および液状化層(P2~P5)、外周地盤(P6、P7)に設置した。また、格子状改良体の変形特性の把握を目的に、改良体内壁の加振平行方向にひずみゲージ(S1~S16)を設置した。

実験では、遠心加速度を50g場まで5g毎上昇させ、各過程で格子間地盤のせん断波速度 V_s をベンダーエレメントで測定した。50g場での格子間地盤のせん断波速度 V_s は、G.L.-10 mで180~216 m/sであった。

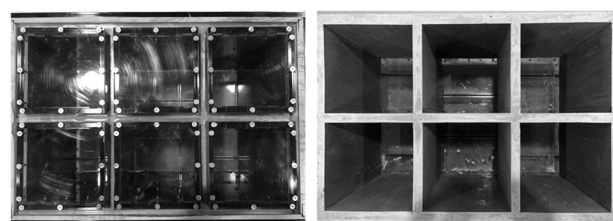


写真-2 格子状改良体(左:作製後、右:脱型後)



写真-3 格子状改良体の型枠

2.4 設定加振波

設定加振波を図-4に示す。加振波は、既往の研究²⁰⁾を参考に、sin波で振動数1.2Hz、50波とし、前後に漸増減波を5波与えた。Case L1は、L1地震動を想定し、最大加速度を0.15gとした。Case L2AとCase L2Bは、L2地震動を想定し、Case L2Aでは最大0.4gで加振した。その後、計測値の定常化を確認し、最大0.15gで再加振した。Case L2Bは、最大0.6gで加振した後、Case L2Aと同条件で再加振した。各ケースの土槽底面で観測された応答加速度(A0H)の最大値(PBA: Peak Base Acceleration)を表-3に示す。土槽底面の応答加速度は、Case L2Bの第1波目を除いて、全体的に設定加振波を超える値を示した。

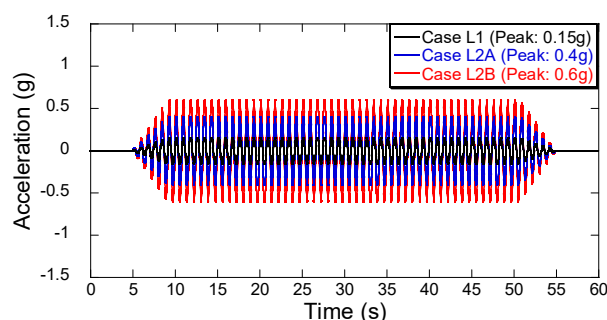


図-4 設定加振波

表-3 土槽底面の最大応答加速度

Case	1st input motion: PBA (g)	2nd input motion: PBA (g)	3rd input motion: PBA (g)
L1	0.23	-	-
L2A	0.45	0.2	-
L2B	0.58	0.56	0.19

3. 実験結果

本章では、格子間地盤の過剰間隙水圧比、および地表面付近の格子間地盤と格子状改良体の応答加速度に着目し、①無損傷の改良体にL1およびL2相当の加振波を作用させたケースと②加振履歴を受けた改良体にL1相当の加振波(0.15g)を作用させたケースの比較結果を報告する。また、改良体面内壁の加振平行方向に発生したひずみをまとめた。

3.1 無損傷の改良体にL1およびL2相当の加振波を作用させたケース

各ケースにおける格子間地盤の過剰間隙水圧比の時刻歴を図-5に示す。本研究では、過剰間隙水圧比が1.0に到達した場合を液状化と判断した。L2相当の加振を受けたCase L2A(PBA: 0.45g)とCase L2B(PBA: 0.58g)は、加振初期での過剰間隙水圧の上昇率が高く、加振中に生じた液状化が加振後も継続した。一方、L1相当の加振を受けたCase L1(PBA: 0.23g)では、格子間地盤深部(P2)の過剰間隙水圧比が瞬間的に0.98を示したが、加振後には直ちに低下し始め、300~1,000秒程度で完全に消散した。これらの結果より、Case L1の加振レベルであれば、格子状改良体は液状化対策としての効果を発揮するといえる。Case L2Aと比較してCase L2Bの消散時間が短いのは、加振による改良体の損傷度に起因していると考えられる(写真-4)。これは、改良体面外壁と交差部の多くが損傷したCase L2Bでは、過剰間隙水圧が鉛直(地表面)方向に加えて、クラックを介して透水性の高い外周地盤に分散したという推察に基づいている。この考察が正しければ、特に外周地盤に接した格子間地盤では、クラックの発生により、外周地盤で生じた過剰間隙水圧の影響を受ける可能性がある。

地表面付近の格子間地盤(A5)と改良体面内壁の天端(A6)の応答加速度を土槽底面(A0H)の応答加速度で除した応答加速度のスペクトル比を図-6に示す。Case L2AとCase L2Bにおける格子間地盤の応答は、液状化の影響で1秒より短周期側でCase L1を大きく下回った。このことは、過剰間隙水圧比に基づく液状化の有無と整合している。また、全てのケースで格子間地盤と改良体の応答が類似しており、格子間地盤と改良体が一体で変形していることがわかる。

改良体面内壁の各計測点で観測した最大水平ひずみ分布を図-7に示す。ここで、水平ひずみは面内壁の加振平行方向に生じたひずみである。各ケース

の最大水平ひずみは、それぞれ0.02%(Case L1: S1)および0.03%(Case L2A: S1, S5)、0.04%(Case L2B: S1)であった。Case L2AとCase L2Bでは、改良体下部のひずみ量が上部と比較して大きく、より変形した。L2相当の加振により、支持層と改良体の応答差が大きくなったためと推察される。

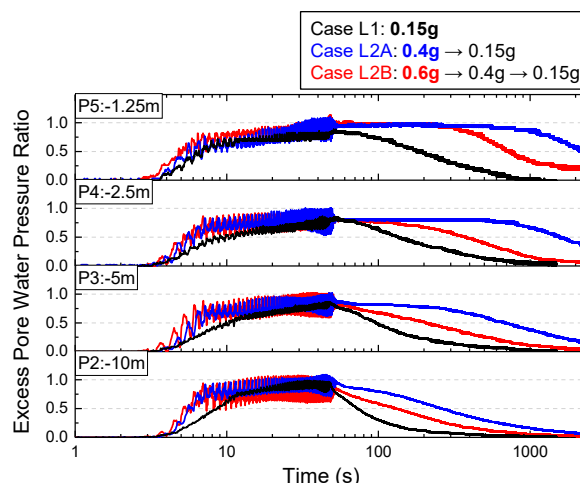


図-5 過剰間隙水圧比の時刻歴

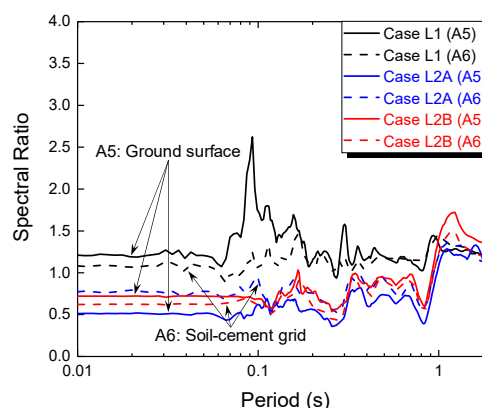


図-6 応答加速度のスペクトル比

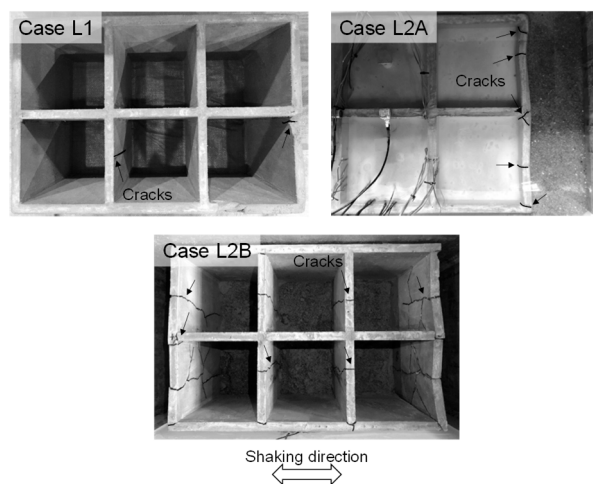


写真-4 全加振完了後の格子状改良体

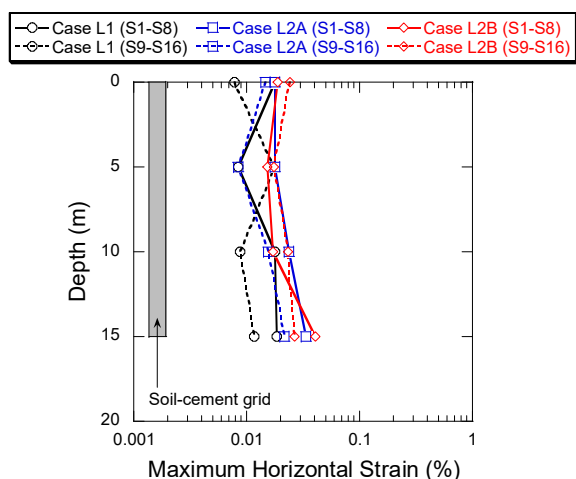


図-7 面内壁の最大水平ひずみ分布

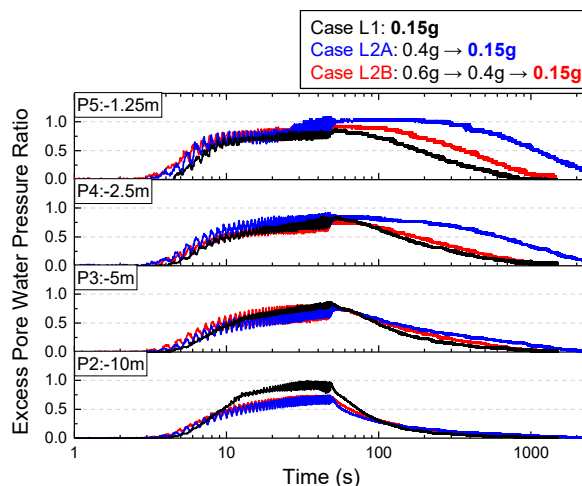


図-8 過剰間隙水圧比の時刻歴(0.15g 比較)

3.2 加振履歴を受けた改良体に L1 相当の加振波 (0.15g) を作用させたケース

加振履歴の無い Case L1 および加振履歴を受けた Case L2A、Case L2B において 0.15g で加振した場合の格子間地盤の過剰間隙水圧比の時刻歴を図-8 に示す。Case L1(PBA: 0.23g)と Case L2B(PBA: 0.19g)では液状化は生じていないが、Case L2A (PBA: 0.2g)では地表面付近(P5)の過剰間隙水圧比が 1.0 に到達し、液状化した。これらの結果より、L2 相当の加振履歴を受けて改良体が損傷した格子状改良地盤は、損傷がなければ液状化を抑止できる L1 相当の加振でも液状化する可能性が示唆された。Case L2B で液状化しない理由としては、模型地盤が加振履歴により密になった可能性が考えられる。これは、Case L2A と Case L2B において加振時の過剰間隙水圧変動が Case L1 と比較して大きく、サイクリックモビリティの挙動を示していることから推察される。

地表面付近の格子間地盤(A5)と改良体面内壁の天端(A6)の応答加速度のスペクトル比を図-9 に示す。Case L2A と Case L2B の格子間地盤の応答は、Case L1 と同等かそれを上回った。これについても前述したように、格子間地盤が密になった影響と考えられる。改良体の応答に明確な違いがみられないのは、面内壁自体の応答には大きな差が生じていないことを示している。

改良体面内壁の各計測点で観測した最大水平ひずみを図-10 に示す。各ケースにおける最大水平ひずみは、それぞれ 0.02%(Case L1: S1)および 0.01%(Case L2A: S3)、0.01%(Case L2B: S4)であり、各ケースでの差は小さい。このことは、図-9 に示した改良体の応答と整合している。

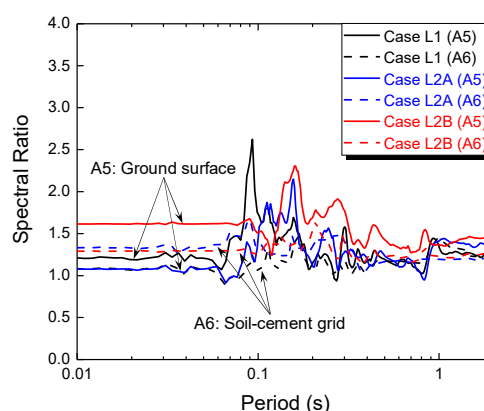


図-9 応答加速度のスペクトル比(0.15g 比較)

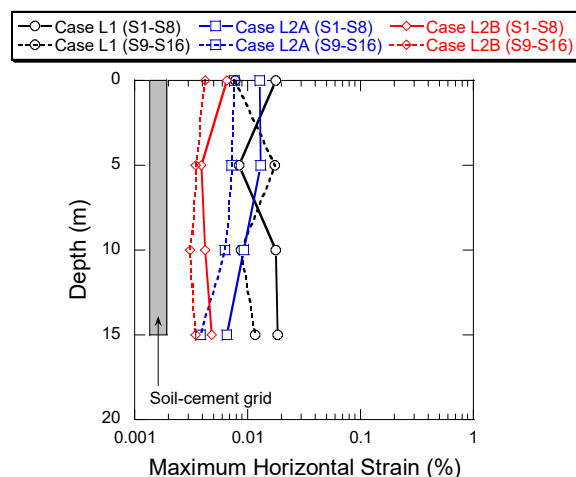


図-10 面内壁の最大水平ひずみ分布(0.15g 比較)

4. 結論

本研究では、基礎構造の設計時に検討する液状化対策の格子状地盤改良(面積改良率 25%、せん断波速度 500 m/s 程度、一軸圧縮強さ 4 N/mm²)に着目し、L1 および L2 相当の加振波を連続で作用させる遠心模型実験を実施した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 無損傷の格子状改良体に L1 および L2 相当の加振波を作用させた場合、L2 相当の加振では格子間地盤が液状化し、格子間地盤と改良体の応答は一体で低下した。L1 相当の加振でも瞬間的には液状化したが、過剰間隙水圧は加振後に直ちに低下し始め、300~1,000 秒程度で完全に消散した。Case L1(PBA: 0.23g)の加振レベルであれば、格子状改良体は液状化対策としての効果を発揮するといえる。
 - 2) L2 相当の加振履歴を受けた格子状改良体に L1 相当の加振波を作用させた場合、面内壁の応答は初期加振として L1 相当の加振を受けたケースと大きな差はないが、Case L2A(PBA: 0.2g)では地表面付近の過剰間隙水圧比が 1.0 に到達し、液状化した。L2 相当の加振履歴を受けて改良体が損傷すると、L1 相当の加振でも液状化する可能性がある。
 - 3) 改良体が損傷してクラックが生じると、格子間地盤で発生した過剰間隙水圧の消散時間は、外周地盤の透水特性や過剰間隙水圧の消散速度に影響を受ける可能性がある。
- 7) 石川明, 社本康広, 張至鎬, 木村匠: “格子状改良体で拘束された砂地盤の簡易液状化評価法”, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.68, No.2, pp.297-304, 2012
 - 8) Ishikawa, A., Shamoto, Y. and Kimura, T.: “A simplified method for evaluating the liquefaction of sandy soil confined by a lattice-type deep mixing wall”, Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.2, No.63, pp.2153-2158, 2016
 - 9) Ishikawa, A. and Asaka, Y.: “Seismic responses of column and grid-type improved grounds”, Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, pp.521-526, 2006
 - 10) Namikawa, T., Koseki, J. and Suzuki, Y.: “Finite element analysis of lattice-shaped ground improvement by cement-mixing for liquefaction mitigation”, Soils and Foundations, Vol.47, No.3, pp.559-576, 2007
 - 11) Koseki, J. and Namikawa, T.: “Behavior of lattice-type ground improvement by cement-mixing for liquefaction mitigation”, Proceedings of the International Symposium on Ground Improvement Technologies and Case Histories, pp.257-262, 2010
 - 12) Bradley, B. A., Araki, K., Ishii, T. and Saitoh, K.: “Effect of lattice-shaped ground improvement geometry on seismic response of liquefiable soil deposits via 3-D seismic effective stress analysis”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.48, pp.35-47, 2013
 - 13) Khosravi, M., Tamura, S., Boulanger, R. W., Wilson, D. W., Olgun, C. G., Rayamajhi, D. and Wang, Y.: “Dynamic centrifuge tests on soft clay reinforced by soil-cement grids”, Proceedings of the International Foundations Congress and Equipment Expo 2015, pp.2349-2358, 2015
 - 14) Khosravi, M., Boulanger, R. W., Wilson, D. W., Tamura, S., Olgun, C. G. and Wang Y.: “Seismic performance of soil-cement grid supporting a structure over soft clay”, Proceedings of the Deep Mixing 2015, pp.631-640, 2015
 - 15) Rayamajhi, D., Tamura, S., Khosravi, M., Boulanger, R. W., Wilson, D. W., Ashford, S. A. and Olgun, C. G.: “Dynamic centrifuge tests to evaluate reinforcing mechanisms of soil-cement columns in liquefiable sand”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.141, No.6, pp.04015015-1-12, 2015
 - 16) Hamada, J., Honda, T. and Nakatsu, N.: “Dynamic centrifuge model tests on failure behavior of grid-form DMWs supporting a tall building”, Takenaka Technical Research Report, No.72, pp.1-13, 2016

謝辞

本研究を遂行するにあたり御助言頂いた社本康広 博士、浙江大学 教授 Yan-Guo Zhou 博士、Yuan Cao 氏、清水建設株式会社 福武毅芳 博士、浅香美治 博士、周友昊 氏に深謝の意を表す。また、遠心模型実験に協力頂いた 同社 岩井俊之 氏、吉成勝美 氏、同大学 Jun-Chao Li 博士、Zi-Zhuang Yan 氏に感謝する。

<参考文献>

- 1) 一般社団法人日本建築学会: “建築基礎構造設計指針”, 2019
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所: “2015年版建築物の構造関係技術基準解説書”, 全国官報販売協同組合, 2015
- 3) 田屋裕司, 内田明彦, 山下清, 鬼丸貞友, 津國正一: “格子状地盤改良における格子間隔の設定法(その1)”, 第42回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1881-1882, 2007
- 4) 佐藤友美, 前田健一, 林宏一, 村田芳信, 高原利幸: “液状化対策地盤の巨視的動的応答特性とその調査法に関する検討”, 材料, Vol.54, No.11, pp.1141-1146, 2005
- 5) 若井明彦, 鶴飼恵三, 萩原吉洋: “柱状改良体を有する複合地盤の地震応答特性に基づく均質モデル化”, 応用力学論文集, Vol.7, pp.899-908, 2004
- 6) 寺田賢二郎, 菊池昇: “均質化法入門”, 丸善出版, 2003

- 17) Khosravi, M., Boulanger, R. W., Wilson, D. W., Olgun, C. G., Tamura, S. and Wang, Y.: “Dynamic centrifuge tests of structures with shallow foundations on soft clay reinforced by soil-cement grids”, *Soils and Foundations*, Vol.57, No.4, pp.501-513, 2017
- 18) Malidarreh, N. R., Shooshpasha, I., Mirhosseini, S. M. and Dehestani, M.: “Effects of reinforcement on mechanical behaviour of cement treated sand using direct shear and triaxial tests”, *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.12, No.5, pp.491-499, 2018
- 19) Tamura, S., Khosravi, M., Wilson, D., Rayamajhi, D., Boulanger, R. W., Olgun, C. G. and Wang, Y.: “A simple method for detecting cracks in soil-cement reinforcement for centrifuge modelling”, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol.18, No.6, pp.281-289, 2018
- 20) Ishikawa, A., Zhou, Y. G., Shamoto, Y., Mano, H., Chen, Y. M. and Ling, D. S.: “Observation of post-liquefaction progressive failure of shallow foundation in centrifuge model tests”, *Soils and Foundations*, Vol.55, No.6, pp.1501-1511, 2015