

排水性の高い浮き形格子状地盤改良による繰返し地震動に対する液状化対策効果 Effects of floating grid type improvement with high drainage in liquefaction countermeasure under repeated earthquake

岡崎昂奈¹, 森河由紀弘², 前田健一³, 佐藤智範⁴

1 名古屋工業大学大学院・工学専攻社会工学系プログラム・t.okazaki.279@nitech.jp

2 名古屋工業大学 高度防災工学センター

3 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター

4 名古屋工業大学・技術部技術課

概 要

戸建て住宅等の既設小規模構造物にも適用可能な液状化対策の開発が求められている中、本研究ではこれまで浮き形格子状地盤改良に着目し、様々な検討を行ってきた。今日までに、浮き型格子状地盤改良に排水性改良体を用いることで液状化対策効果が向上することや、排水ドレンには液状化後における地盤強度の増加効果が期待できることから再液状化に対してもその有効性が期待された。そこで本研究では、排水性改良体を用いた浮き型格子状地盤改良による繰返し地震動に対する液状化対策効果について、重力場における二次元振動台模型実験による検討を行った。検討の結果、排水性の高い改良体を浮き型格子状地盤改良に用いることで、加振回数に応じて相対密度の増加に伴う効果以上に地盤の液状化強度が高くなることや、それに伴い液状化被害の抑制効果が大幅に向上することが明らかとなった。

キーワード：液状化，振動台実験，格子状地盤改良，排水工法

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震^{1),2)}など大規模な地震において、液状化の発生に伴う多くの構造物の沈下被害や傾斜被害が確認されている。また、今後においても大規模な地震の発生に伴う広範囲な液状化も危惧されており、戸建て住宅などの既設小規模構造物を対象とした施工性や経済性に優れた液状化対策工法の開発が求められている。ここで、内閣府が定める災害に係る住家の被害認定基準運用指針³⁾において液状化による住家の被災度判定は、沈下被害のみではなく傾斜被害によっても大きく異なることが示されている。そのため、住家を対象とした液状化対策方法には、構造物の沈下被害の抑制効果に加え、傾斜被害の抑制効果についても考慮しなければならない。

本研究では、既設小規模構造物に適用可能な改良深度を液状化層の浅い部分に留めた「浮き形格子状地盤改良」に着目した。ここで、液状化対策としての格子状地盤改良は、一般的に高い剛性を持つ地中連続壁を液状化層下端まで狭い間隔で造成することで、地震に伴う地盤のせん断変形を抑制し、液状化の発生を防止する工法であるため、これまで格子間隔が過剰間隙水圧や沈下量に及ぼす影響⁴⁾⁻⁹⁾、最適な格子間隔の算定方法^{10),11)}などが検討されてきた。

一方、本研究では改良深度を液状化層の比較的浅い部分

に留めた格子間隔の広い経済的な改良を行うことにより、液状化の発生は許容するものの、液状化地盤の側方流動を抑制することで構造物の液状化被害を低減させる方法に関する様々な検討を行ってきた¹²⁾⁻¹⁵⁾。その結果、排水性の高い改良体を用いることにより液状化対策効果が増加することや、不透水性改良体の上部に排水性改良体を組み合わせた複合型改良体の方が下部に排水性改良体を組み合わせるよりも高い液状化抑制効果が期待できることが明らかとなった¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。他にも、排水ドレンには、過剰間隙水圧の抑制効果や消散効果以外にも液状化地盤の低流動化や、液状化中・液状化後においても地盤強度の増加効果が得られ、再液状化に対しても液状化被害の抑制効果が期待できることが明らかとなった²⁰⁾⁻²¹⁾。

しかし、複合型改良体を用いた浮き型格子状地盤改良による繰返し地震動に対する液状化対策効果は検討されていない。そこで、本研究ではこれまで行ってきた重力場における振動台実験の結果を基に、不透水性改良体の上部1/3に排水性改良体を組み合わせた複合型改良体を用いた浮き形格子状地盤改良による繰返し地震動を与えた場合における液状化被害の低減効果、過剰間隙水圧の抑制効果について検討を行った。

2. 浮き形格子状地盤改良による液状化対策効果

2.1 実験概要および実験条件

本検討では、格子壁全体の改良長 H と排水性改良体長 H_d との比率が $H_d/H=1/3$ の条件で、不透水性改良体の上部に排水性改良体を組み合わせた複合型改良体による浮き形格子状地盤改良が、繰返し地震動を受けるときの液状化対策効果について振動台実験により検討を行った。

図1に本実験で用いた入力波を示す。入力周波数は17Hz、最大加速度は約 2.5m/s^2 とした。本実験では簡易的な振動台実験装置を用いており、振動モーターの周波数と電源供給時間のみを制御している。従って、モーターへの電源供給を停止した後、振動が徐々に弱まり電源供給停止から約10秒後にモーターが静止する。そこで本検討では、電源が供給されている3秒間を主要動とする。

図2に実験概要図を示す。本検討では液状化中における構造物や地盤の挙動を観察するために、幅 500mm × 奥行 85mm × 高さ 500mm の透明なアクリル製の二次元土槽を用いており、模型地盤は珪砂7号 ($k_{15} = 6.5 \times 10^{-5}\text{m/s}$) を層厚 300mm 、目標相対密度 $D_r=50\%$ の飽和地盤を作成した。不透水性改良体には幅 23mm × 奥行 85mm × 高さ 120mm のアクリル製改良体を用いており、排水性改良体にはステンレス製の多孔板を加工したメッシュケース内に珪砂2号 ($k_{15} = 2.2 \times 10^{-2}\text{m/s}$) を充填し、目詰まり防止のため全体をガーゼで巻いた改良体を用いた。

図3に本検討で用いた設置圧が偏心した模型構造物を示す。幅 80mm × 奥行 80mm × 高さ 20mm のアルミニウム製ブロックの片側に、幅 40mm × 奥行 80mm × 高さ 10mm のアルミニウム製ブロックを重ねており、偏心させることにより液状化時に構造物の傾斜被害が発生しやすい条件にした。ここで、模型縮尺は $1/30$ 程度を想定しており、模型構造物の平均接地圧は2階建ての戸建て住宅に相当する 0.67kPa であり、偏心量 e を基礎幅 B で除した偏心比は $e/B=1/20$ となる。また、構造物の幅 B で正規化した浮き型格子状地盤改良の格子間隔 L 、および改良深度 H はそれぞれ既往研究を参考に $L/B=1.20$ 、 $H/B=2.25$ とした。

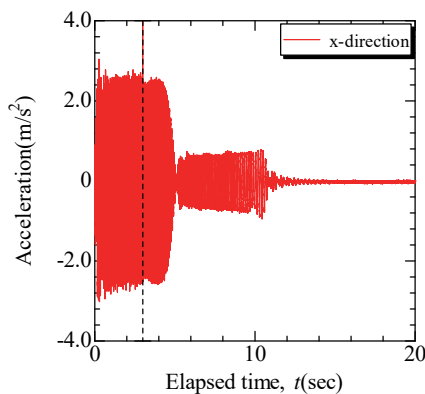


図1 入力加速度

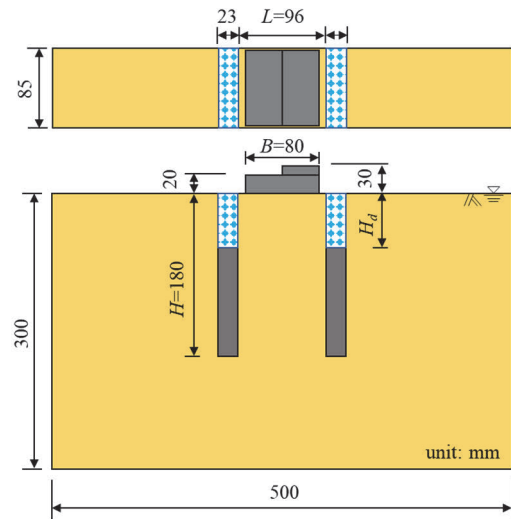


図2 実験概要図

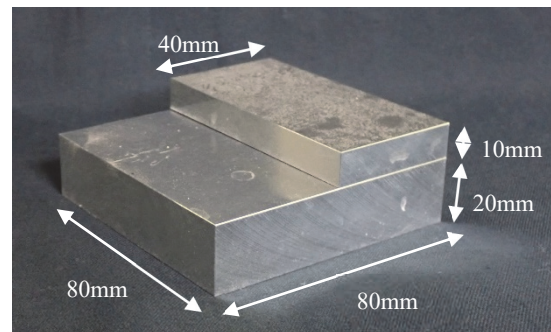


図3 模型構造物

2.2 繰返し地震動に対する液状化対策効果

本実験では、浮き型格子状地盤改良に不透水性改良体、排水性改良体、格子壁全体の改良長 H と排水性改良体長 H_d との比率（排水改良比）が $H_d/H=1/3$ の複合型改良体、未改良地盤の4ケースについて、構造物を設置していない地盤を対象に繰返し加振を行い、その後模型構造物を設置して模型構造物の沈下量と傾斜角を測定した。

図4、5に1加振目および3加振目における模型構造物の沈下量と傾斜角を示す。ここで、これらの測定値は最後の加振を与える直前に構造物を設置し測定した値である。1加振目の場合では、浮き型格子状地盤改良を行った全てのケースにおいて未改良地盤より沈下量が抑制されており、その中でも排水性改良体を用いたケースが最も沈下被害を抑制できている。一方、傾斜角を見ると複合型改良体と不透水性改良体を用いたケースでは、傾斜被害の抑制効果が小さい結果となった。これは、不透水性改良体のケースでは、格子壁体の内側に沿って間隙水が比較的早く地表面に向かって流れることで、この間隙水の流れが壁体周辺の砂も連行しながら格子壁外側に溢れ出るように流出したためだと考えられる。また、複合型改良体を用いたケースにおいても、排水改良比が小さいため過剰間隙水圧の消散効果やそれに伴う液状化地盤の低流動化が十分ではなく、不透水性改良体と同様の現象が発生したと考えられる。

次に、3加振目の場合では、浮き型格子状地盤改良を行った全てのケースで1加振目に比べ沈下被害、および傾斜被害の両方を大きく抑制できており、特に1加振目でも対策効果が高かった排水性改良体を用いたケースに加え、排水改良比が $H_d/H=1/3$ の経済的な複合型改良体のケースにおいてもほとんど液状化被害が発生していないことが分かる。これは、排水性改良体がある場合において、過剰間隙水圧が大きくなり液状化が発生し地盤が大きく乱されるたびに土の骨格構造が大きく発達するなどして、排水層周囲のみ液状化強度が高くなったためだと考えられるが今後も詳細な検討が必要である。また、全てのケースにおいて、加振を繰り返すたびに地盤密度は高くなり、1加振目よりも3加振目の方が液状化被害は抑制されている。ここで、3加振目の場合では、各ケースの平均相対密度は未改良地盤が62.8%、不透水性改良体が63.0%、複合型改良体が62.0%、排水性改良体では58.6%、であり、大きな差は確認できなかった。そのため、液状化被害を大きく抑制していた排水性改良体や複合型改良体のケースでは、前述したように地盤密度以外にも土の骨格構造の発達など、液状化被害の抑制効果に関する何か別の要因があると考えられる。ここで、本実験で測定した平均相対密度は、土層の質量と地盤層厚から計算した地盤全体における平均値である。次章では、排水性改良体による過剰間隙水圧の抑制効果を調べ、繰り返し地震動を受けた地盤の液状化被害抑制メカニズムについて検討する。

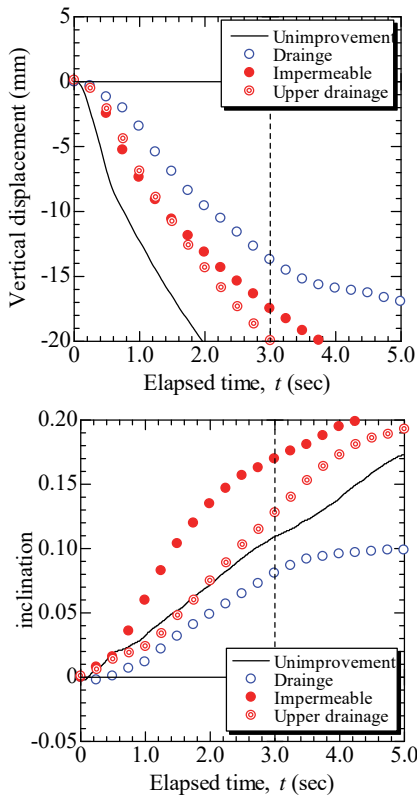


図4 1加振目における模型構造物の液状化被害 (上：沈下被害，下：傾斜被害)

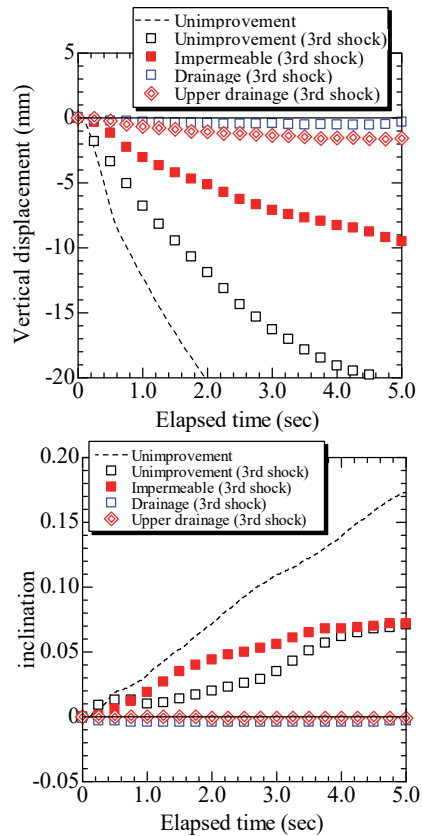


図5 3加振目における模型構造物の液状化被害 (上：沈下被害，下：傾斜被害)

3. 繰り返し地震動を受けた地盤の液状化被害抑制メカニズム

3.1 実験概要および実験方法

本実験では、排水性改良体を設置した地盤内の過剰間隙水圧を調べることで、繰り返し地震動を受けた地盤の液状化被害抑制メカニズムについて検討する。

図6に実験概要図を示す。土層や地盤条件、入力加速度は前章と同様である。前章で用いた、排水性改良体と排水改良比が1/3となる複合型改良体を用いたケースにおいて、間隙水圧計をG.L.-50mm、-150mmの深度で、改良体からの距離が $d_w=0\text{mm}$ 、 25mm 、 50mm の位置に設置し、複数回加振させた場合における過剰間隙水圧を計測した。

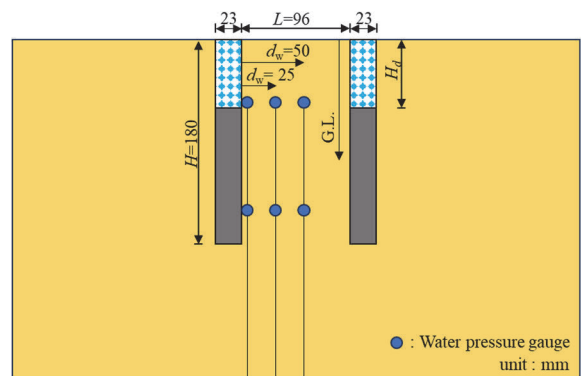


図6 実験概要図

3.2 過剰間隙水圧比の変化

図7, 8に格子壁全体の改良長 H と排水性改良体長 H_d との比率(排水改良比)が $H_d/H=1/3$ となる複合型改良体を用いた浮き型格子状地盤改良内地盤におけるG.L.-50mm, G.L.-150mmでの1加振目, 2加振目, 4加振目の過剰間隙水圧比の変化を示す。ここで, G.L.-50mmは排水性改良体下端部(G.L.-60mm)とほぼ同様の深度であり, G.L.-150mmは不透水性改良体の範囲となる。また, 図9, 10に排水性改良体を用いた浮き型格子状地盤改良内の地盤において, 複合型改良体を用いたケースと同一条件で加振した場合の過剰間隙水圧比を示す。両ケース共に過剰間隙水圧比は計測した過剰間隙水圧を加振直前の土層高さを用いた有効上載圧で除すことで求め, 改良体からの距離は $d_w=0\text{mm}$, 25mm, 50mmとした。

複合型改良体, 排水性改良体のどちらのケースも深度が深くなるほど, また加振回数が増加するほど過剰間隙水圧の抑制効果は大きくなり, 消散時間も早くなることが確認できる。また, 本検討において壁体からの距離が $d_w=0\text{mm}$, 25mm, 50mmの全ての位置において, 各深度 z との比は $d_w/z \leq 1.0$ となる。そのため, 排水性改良体の排水効果による過剰間隙水圧の抑制効果や消散効果は比較的高いと考えられ, 特に排水性改良体に近い $d_w \leq 25\text{mm}$ の位置では排水効果が高くなる傾向にある。

複合型改良体を用いた地盤において, G.L.-150mmでは4加振目で過剰間隙水圧の上昇が大きく抑えられているが, G.L.-50mmではG.L.-150mmに比べて過剰間隙水圧が高い結果となった。これは, 不透水性改良体の範囲となる深部から上部に向けて水圧が伝播した結果だと考えられる。

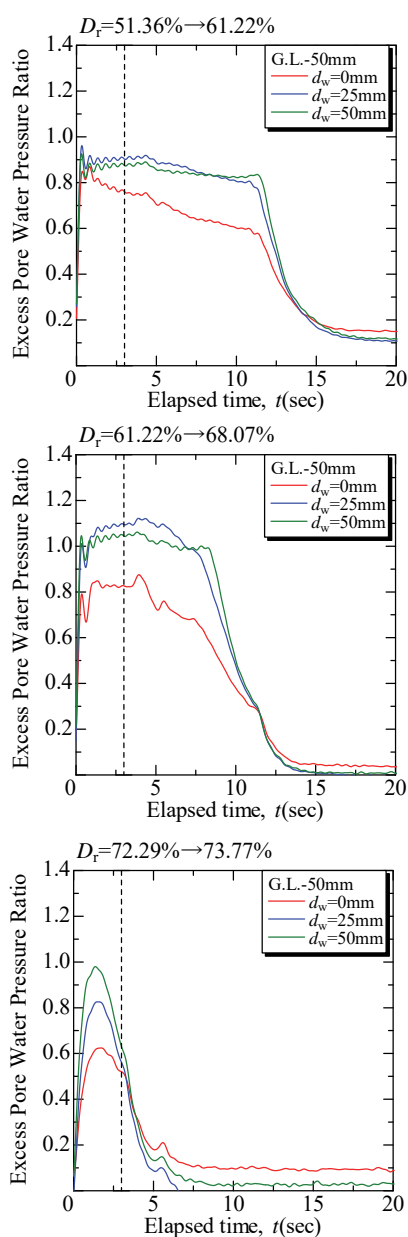


図7 複合型改良体でのG.L.-50mmの過剰間隙水圧比
(上から1加振目, 2加振目, 4加振目)

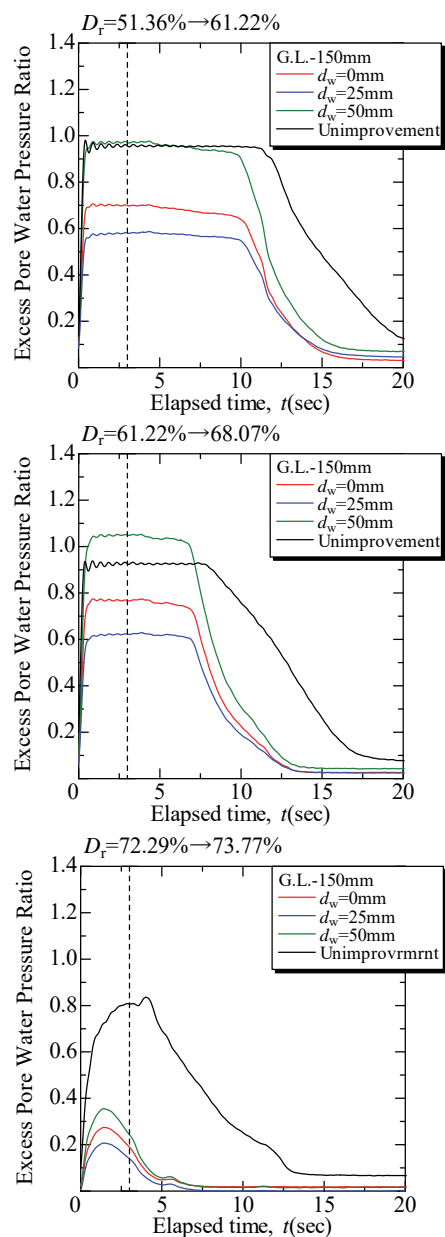


図8 複合型改良体でのG.L.-150mmの過剰間隙水圧比
(上から1加振目, 2加振目, 4加振目)

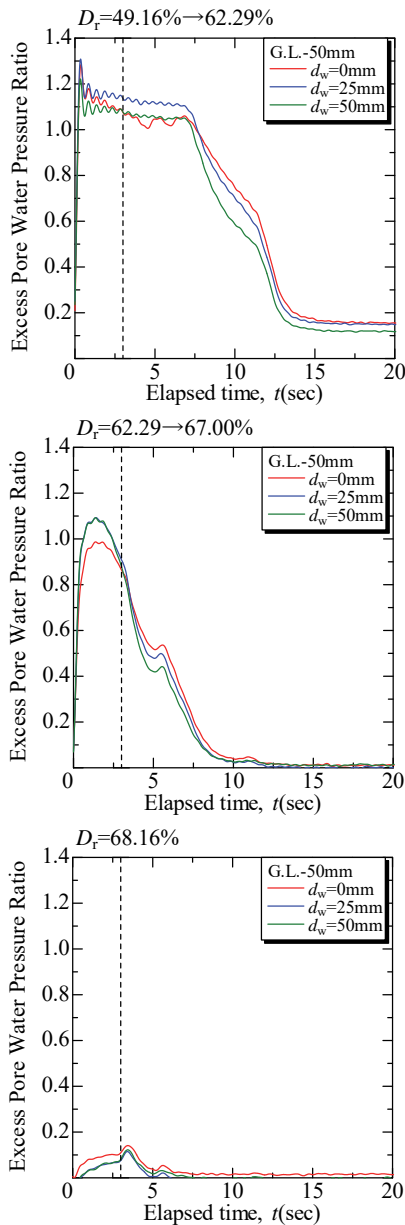


図9 排水性改良体でのG.L.-50mmの過剰間隙水圧比
(上から1加振目, 2加振目, 4加振目)

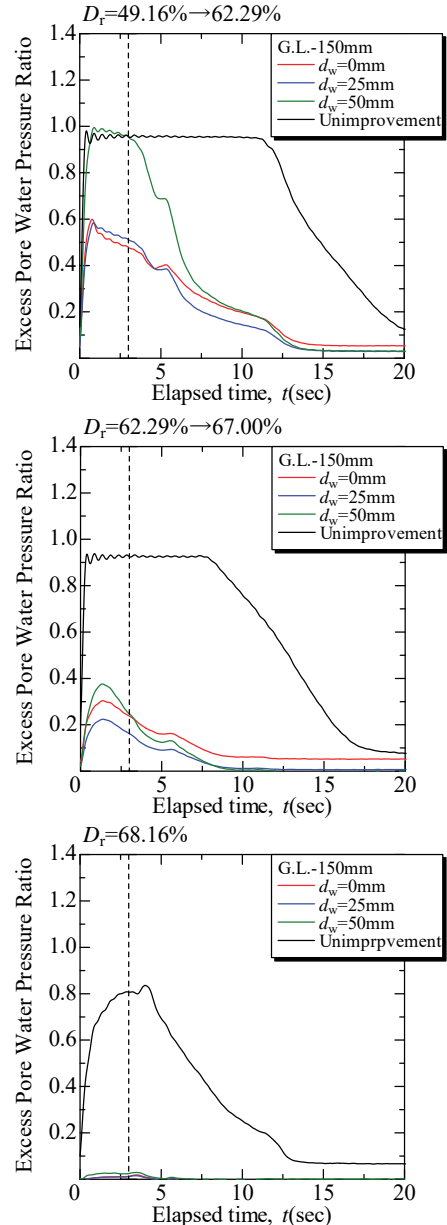


図10 排水性改良体でのG.L.-150mmの過剰間隙水圧比
(上から1加振目, 2加振目, 4加振目)

一方、排水性改良体ではG.L.-150mmにおいて2加振目から過剰間隙水圧の上昇が大きく抑制されており、複合型改良体よりも過剰間隙水圧が小さい結果となった。また、G.L.-50mmにおいてもG.L.-150mmよりは過剰間隙水圧が若干高い傾向にあるが、0.15程度までしか上昇していないことから、排水性改良体内の地盤では全域で液状化強度が大幅に上昇していると考えられる。ここで、複合型改良体と排水性改良体を比較すると、排水性改良体を用いた地盤の方が過剰間隙水圧の抑制効果が高く、消散も早いことが分かる。そのため、排水性改良体を用いた地盤では複合型改良体を用いた地盤に比べ、少ない加振回数で液状化強度が大幅に高くなると考えられる。しかし、表1に示す平均相対密度を見ると、排水性改良体を用いた地盤は3加振目以降の平均相対密度はほとんど大きくないことが分かる。

また、複合型改良体よりも排水性改良体を用いた地盤の方が平均相対密度は小さいのにも関わらず、過剰間隙水圧の抑制効果は高く、消散も早いことから、前述したように排水ドレーンを設置した地盤においては、土の骨格構造の発達など地盤の密度増加による効果以外の何か別の要因が液状化強度に大きく影響していると考えられる。

表1 加振回数に対する平均相対密度

	複合型改良体	排水性改良体
1加振目	51.36%	49.16%
2加振目	61.22%	62.29%
3加振目	68.07%	67.00%
4加振目	72.29%	68.16%
5加振目	73.77%	68.16%

4. 結論

本検討では一般的な地盤改良工法を想定した不透水性改良体、排水効果の得られる排水性改良体、経済的に排水効果が得られる複合型改良体を用いた浮き型格子状地盤改良による液状化被害の抑制効果、および過剰間隙水圧の抑制効果・消散効果について検討を行った。

以下に得られた知見を示す。

- 1) 浮き型格子状地盤改良に排水性改良体を用いた場合、1加振目でも構造物の沈下被害、および傾斜被害に対する抑制効果は高い。
- 2) 排水性改良体、および複合型改良体を用いた浮き型格子状地盤改良では、構造物設置前の加振回数に伴い液状化被害の抑制効果が大幅に増加する。
- 3) 地盤表層部の液状化強度が高くなることで、液状化に伴う構造物の傾斜被害を大幅に抑制できる。
- 4) 複合型改良体について、排水改良比が大きいほど、排水効果や液状化被害の抑制効果が期待できる。
- 5) 複合型改良体を用いた場合、排水性改良体が表層部にあっても深層部から水圧が伝播することにより、過剰間隙水圧は比較的高くなる。
- 6) 排水性改良体を用いた場合、少ない加振回数で地盤の液状化強度は大幅に増加し、過剰間隙水圧の抑制効果は飛躍的に増加する。
- 7) 地盤の液状化強度は、加振の度に地盤が密実化することにより高くなる傾向にあるが、排水効果のある改良体を用いた場合、土の骨格構造の発達など土の密度以外にも別の要因が影響すると考えられる。

謝辞

本研究はJSPS科学研究費(21K04253)の助成を受けたものである。末筆ながら深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 風間基樹：2011年東北地方太平洋沖地震被害の概要と地盤工学的課題，地盤工学ジャーナル，Vol.7，No.1，pp.1-11，2012。
- 2) 岡二三生ら：東北地方太平洋沖地震被害調査報告—宮城県北部—，地盤工学ジャーナル，Vol.7，No.1，pp.37-55，2012。
- 3) 内閣府(防災担当)：災害に係る住家の被害認定基準運用指針，pp.5-7，2021.03
- 4) 東祥二ら：実大実験における格子状固化改良の液状化対策効果に関する研究，材料，Vol.59，No.1，pp.14-19，2010。
- 5) 津國正一ら：格子状地盤改良による住宅沈下量抑制効果に着目した遠心模型振動実験，地盤工学ジャーナル，Vol.9，No.4，pp.767-771，2014。
- 6) 津國正一ら：格子状地盤改良内で発生する沈下量に着目した遠心模型振動実験，土木学会論文集 C，Vol.70，No.3，pp.301-312，2014。
- 7) 金田一広ら：格子状地盤改良の格子間隔に対する地震時の沈下解析，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.706，pp.1817-1824，2014。
- 8) 高橋英紀ら：液状化対策のための浮き型格子状固化処理工法の岸壁への適用性に関する検討，土木学会論文集 B3，Vol.68，No.2，pp.432-I_437，2012。
- 9) 高橋英紀ら：浮き型格子状固化処理工法の液状化地盤への適用性に関する実験的検討，土木学会論文集 B3，Vol.68，No.2，pp.432-I_437，2012。
- 10) 田屋裕司ら：格子状地盤改良における格子間隔の簡易設定法，地盤工学ジャーナル，地盤工学ジャーナル，Vol.3，No.3，pp.203-212，2018。
- 11) 内田明彦ら：格子状地盤改良工法における格子間隔簡易設定法の適用性，地盤工学ジャーナル，Vol.11，No.3，pp.259-267，2016。
- 12) 森河由紀弘，田中雄也，前田健一，張鋒：水圧消散効果に着目した地中連続排水壁による液状化対策，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.71，No.2(応用力学論文集 Vol.18)，pp.437-I_448，2015。
- 13) 森河由紀弘，中井健太郎，中谷一貴，武田祐輔，前田健一，野田利弘：小規模な浮き型格子状地盤改良による既設小規模構造物の液状化被害の低減効果，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.75，No.2(応用力学論文集 Vol.22)，pp.329-I_339，2019。
- 14) 中谷一貴，森河由紀弘，前田健一，佐藤智範：既設小規模構造物を対象とした浮き型格子状地盤改良による液状化対策効果，第32回中部地盤工学シンポジウム，pp.41-46，2020。
- 15) 中谷一貴，森河由紀弘，中井健太郎，前田健一，野田利弘：浮き型格子状地盤改良による偏心荷重が作用した既設小規模構造物の液状化被害抑制効果，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.76，No.2(応用力学論文集 Vol.23)，pp.279-I_288，2021。
- 16) 花田響，森河由紀弘，中谷一貴，前田健一，佐藤智範：排水改良体を用いた浮き型格子状地盤改良による過剰間隙水圧と地盤変位の抑制効果，第56回地盤工学研究発表会，pp.12-9-4-08，2021。
- 17) 花田響，森河由紀弘，中谷一貴，前田健一，佐藤智範：不透水性改良体に排水性改良体を組み合わせた浮き型格子状地盤改良による液状化対策，令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会，III-100，2021。
- 18) 花田響，森河由紀弘，前田健一，佐藤智範：排水性の高い浮き型格子状地盤改良による液状化対策効果とそのメカニズム，第34回中部地盤工学シンポジウム，pp.1-6，2022。
- 19) 花田響，森河由紀弘，前田健一，佐藤智範：排水ドレーンが液状化における過剰間隙水圧の抑制や地盤剛性に与える影響，第57回地盤工学研究発表会，pp.21-11-3-08，2022。
- 20) 花田響，森河由紀弘，前田健一，佐藤智範：排水性改良体の深度が浮き型格子状地盤改良の液状化対策効果に与える影響，令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会，III-101，2022。
- 21) 岡崎昂奈，森河由紀弘，花田響，前田健一，佐藤智範：排水性浮き型格子状地盤改良による再液状化被害への対策効果，令和4年度土木学会中部支部発表会，III-45，2023。