

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04253

研究課題名（和文）住宅にも経済的に適用可能な複合型改良体による機能性ハイブリッド型液状化対策の開発

研究課題名（英文）Development of functional hybrid liquefaction countermeasure using composite improvement body that can be economically applied to existing house

研究代表者

森河 由紀弘（Morikawa, Yukihiro）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：20710239

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では既設住宅などにも経済的、効果的な液状化対策として、不透水性改良体の上部に排水性改良体を組合わせた複合型改良体による浮き型格子状地盤改良に関する検討を行った。検討の結果、排水ドレーンを設置した地盤において、ドレーンから一定の範囲（ドレーンから深度に対して半分程度の距離）では液状化中でも地盤せん断強さがある程度保持できることや、加振の度に液状化強度が著しく増大することが明らかとなった。また、浮き型格子状地盤改良に複合型改良体を用いることで液状化対策効果が増大すること、浅層のみを排水性改良体に置き換えた場合でも加振履歴により著しい対策効果が得られることなどが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、排水ドレーンを設置した地盤では加振履歴に応じて地盤強度が飛躍的に上昇したり、ドレーンの有効範囲が上昇したりするなど、これまで見過ごされてきた排水ドレーンの新たな効果が明らかとなった。さらに、本研究が提案している従来の地盤改良工法を想定した不透水性改良体の上部に排水性改良体を組合わせた複合型改良体、そしてそれを用いて既設住宅の周囲を囲う浮き型格子状地盤改良は、液状化時における住宅の沈下被害に加え、傾斜被害までも大きく抑制できることが明らかとなった。従って、本研究成果は既設住宅にも経済的に適用可能な液状化対策の可能性を示し、国土強靱化に大きく貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, floating grid type improvement method with a functional hybrid liquefaction countermeasure using composite improvement body with drainage improvement on top of an impermeable improvement was investigated as an economical and effective liquefaction countermeasure for existing houses. As a result of the study, it was found that the shear strength of the soil with drainage drains was maintained during liquefaction at a certain distance from the drain (about half the distance from the drain to the depth), and that the liquefaction strength increased significantly with each vibration. It was also found that the use of composite type improvements in floating grid type improvement increases the effectiveness of liquefaction countermeasure, and that even when only shallow parts of the wall are replaced with drainage improvements, significant countermeasure effects can be obtained depending on the shaking history.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化対策 浮き型格子状地盤改良 排水性改良体 複合型改良体 過剰間隙水圧消散工法 排水ドレーン 既設構造物 戸建て住宅

1. 研究開始当初の背景

既設住宅にも経済的に適用できる液状化被害を低減可能な液状化対策の開発は急務である。そのような中、申請者らは小規模な浮き型格子状地盤改良を用いて構造物の周囲を囲み液状化地盤の側方流動を抑制することにより構造物の沈下被害を低減させることに成功したが、傾斜被害も抑制するためには過剰間隙水圧消散工法などを併用する必要があることも明らかにした (JSPS 科研費 JP19K15086)。しかし、一般的な地盤改良体は不透水性であるため、申請者らは不透水性改良体の一部に排水性改良体を組合わせた複合型改良体を考案した。複合型改良体を用いた浮き型格子状地盤改良は、改良体全てを排水性にするのに比べ経済的、かつ現実的である。しかし、複合型改良体を用いた検討はほとんど行われておらず、未解明な部分が多い。

2. 研究の目的

本研究では、既設住宅の周囲を囲った浮き型格子状地盤改良により液状化地盤の側方流動を抑制しながら、複合型改良体の排水効果で支持力を確保することにより、住宅の沈下被害に加え傾斜被害までも経済的に低減させることを目的としている。そのため、本研究では排水ドレーンによる過剰間隙水圧の抑制効果や地盤せん断強さへの影響、その有効範囲などを明らかにするとともに、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低減メカニズムを解明するため、複数回の加振も含めた種々の実験的検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 排水ドレーンの過剰間隙水圧抑制効果

本検討では排水ドレーンの有効範囲・深度を明らかにするため、先行研究 (JSPS 科研費 JP19K15086) と同様に、幅 500mm×奥行 85mm×高さ 500mm の透明なアクリル土槽を用いて、平面ひずみ条件を仮定した 2 次元振動台実験を行った。図-1 に実験概要図を示す。以降に示す全ての検討において、地盤条件や加振条件は先行研究と同様であり、模型縮尺は 1/30 とした。模型地盤は珪砂 7 号による相対密度 50%、層厚 300mm の飽和地盤とし、入力波は周波数が 17Hz、最大加速度が約 2.5 m/s^2 の正弦波を用いた。土槽左端には、幅 50 mm×奥行 85 mm×高さ 100 mm のステンレスメッシュケースの中に、模型地盤 ($k_{15} = 6.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) よりも透水性が十分に高い珪砂 2 号 ($k_{15} = 2.2 \times 10^{-2} \text{ m/s}$) を投入し、それを 3 段縦に積み重ね固定した排水ドレーンを設置した。排水ドレーンは液状化地盤に比べて十分に剛性が高い。間隙水圧計の設置深度は $z = 100 \text{ mm}$, 150 mm , 200 mm の 3 深度、排水ドレーンから間隙水圧計までの距離は $d_w = 0 \text{ mm}$, 50 mm , 100 mm , 200 mm の 4 か所とした。ここで、模型構造物を設置した場合、過剰間隙水圧が構造物の影響を受けてしまうため、本実験においては構造物を設置しない条件で検討を行った。

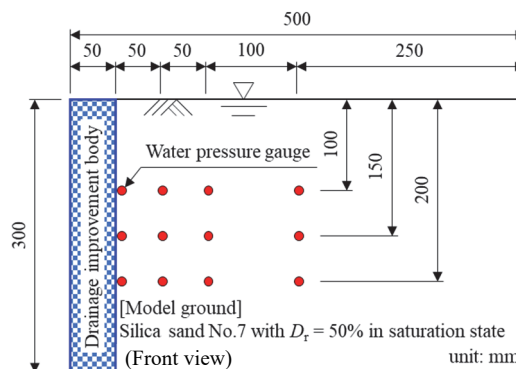


図-1 排水ドレーンの過剰間隙水圧抑制効果

(2) 排水ドレーンが地盤せん断強さに及ぼす影響

本検討では排水ドレーンによる排水効果が液状化中、および液状化後における地盤のせん断強さに与える影響を評価することを目的としている。図-2 に実験概要図を示す。地盤のせん断強さは、様々な排水ドレーンからの距離 d_w 、深度 z において、本検討用に制作した小型ベーン試験機 (幅 10 mm×高さ 20 mm, 幅 20 mm×高さ 30 mm) とトルクドライバーにより計測した。前述の通り、地盤条件や加振条件は全ての検討を通じて先行研究と同様であり、入力波の主要動は 10 秒間とした。計測対象は加振中 (液状化中)、および過剰間隙水圧が完全に消散した液状化後の地盤である。ここで、模型地盤のせん断強さの初期値は概ね深度に比例することが確認されたため、本検討では計測によって得られた加振中、あるいは液状化後における地盤のせん断強さを各深度の初期せん断強さで正規化した「せん断強さ比」により排水ドレーンの影響を評価した。ただし、加振中のせん断強さは排水ドレーンの影響を受けるため、本検討では加振中のせん断強さについて加振直後から主要動 (10 秒間) が終了するまでゆっくり回転させた最大値により評価した。

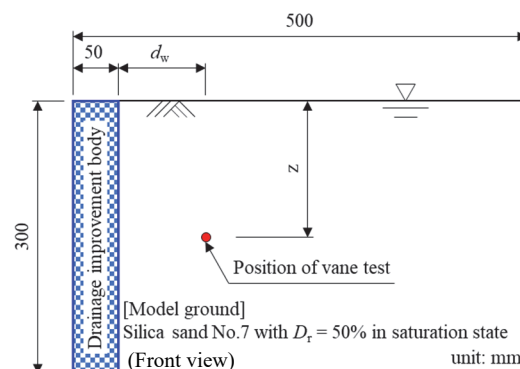


図-2 排水ドレーンが地盤強度に与える影響

(3) 複合型改良体を用いた浮き型格子状地盤改良の液状化対策効果

本検討では複合型改良体を用いた浮き型格子状地盤改良による構造物の液状化被害低減効果を評価することを目的としている。図-3 に実験概要図を示す。ここでも地盤条件や加振条件は先行研究と同様であり、主要動は3秒間とした。液状化に伴う傾斜被害が発生しやすいように、模型構造物には接地圧が二階建て住宅相当の0.66 kPa、基礎幅に対する偏心比が1/20となるように、幅80 mm×奥行80 mm×高さ20~30 mm (平均25 mm) の階段型アルミニウムブロックを用いた。基礎幅 B に対する改良間隔 L や改良深度 H はそれぞれ先行研究において改良効果が高かった $L/B=1.20$, $H/B=2.25$ とした。そして、改良間隔 L/B や改良深度 H/B は固定した条件で、複合型改良体の全改良深度 H に対する排水性改良体長 H_d の比率「排水改良比 H_d/H 」が、浮き型格子状地盤改良の液状化被害抑制効果に与える影響を検討した。ここで、模型地盤の正面を一定間隔で点状に着色することで、構造物と液状化地盤との相互作用を正面から観察した。

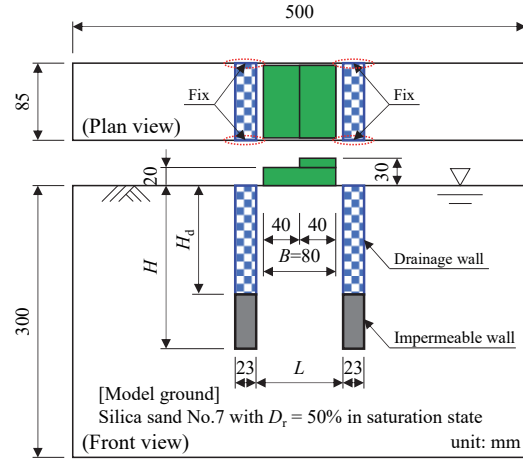


図-3 液状化対策効果の検討

4. 研究成果

(1) 排水ドレーンの過剰間隙水圧抑制効果

図-4 に土層の中心深度である G.L.-150 mm における過剰間隙水圧比を示す。本検討で用いた実験装置は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ため、振動モーターへの電源供給停止後も実験機は直ぐには停止せず、周波数が低下しながら約10秒後に完全停止する。従って、電源が供給されている10秒間の振動を主要動 (principal motion) とした。

排水ドレーンを土槽左端に設置した場合、ドレーンまでの距離が $d_w=0$ mm、および50 mm の位置においては特に排水効果が高く、加振開始直後は過剰間隙水圧比が大きく上昇しているが、その後において主要動中 (10秒間) においても水圧は低下傾向を示している。 $d_w=100$ mm では、 $d_w \leq 50$ mm の位置で確認された水圧抑制効果は確認できないが、未改良地盤に比べて水圧の消散が早いことが分かる。ここで、G.L. -150 mm の深度でも $d_w \leq 50$ mm までは排水効果が特に高く、 $d_w=100$ mm では水圧の消散が早いことが確認され、G.L. -200 mm では $d_w \leq 100$ mm までは排水効果が高い上に、 $d_w=200$ mm においても水圧の消散が早いことが確認された。

以上より、限定的な条件ではあるが排水ドレーンの効果はドレーンまでの距離や深度に応じて異なるが、多少のばらつきがある中でも本検討で行った中では全深度において概ね $d_w/z \leq 0.5$ では高い過剰間隙水圧の抑制効果が期待できる上に、 $0.5 < d_w/z \leq 1.0$ 程度の範囲においても過剰間隙水圧の早期消散効果が期待できることが分かった。

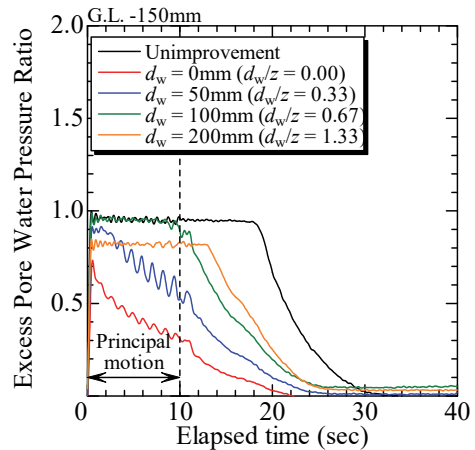


図-4 過剰間隙水圧比

次に複数回の地震動に対する排水ドレーンの効果を検討するため、G.L.-150 mm に間隙水圧計を設置し、同様の検討を行った。排水ドレーンから間隙水圧計までの距離は $d_w=0$ mm, 50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 225mm の6か所とした。地盤条件や入力波は前述の検討と同様であるが、本検討における主要動は3秒間のみとした。図-5 に未改良地盤、および排水ドレーンを設置したケースにおける3加振目の過剰間隙水圧比を示す。ここで、図中左上には、加振直前における模型地盤の相対密度も示している。本検討では、各加振後において過剰間隙水圧が0に戻ってから次の加振を行うため、加振毎に地盤の相対密度は圧密に伴い大きくなる。そのため、未改良地盤においても加振回数に応じて過剰間隙水圧の消散は早くなる。しかし、排水ドレーンを設置したケースでは、未改良地盤に比べると相対密度がやや小さいのにも拘らず、加振の度に明らかに地盤が液状化しにくくなり、3加振目になると図-4 (1加振目) では主要動中に液状化していた $d_w/z > 0.67$ の位置においても過剰間隙水圧は大きく抑制され、液状化していないことが分かる。さらに、4加振目には3加振目からほとんど相対密度が増加しないままで、ほとんど液状化しなくなることも確認された。従って、前述の通り1加振目では排水ドレーンからの距離が概ね $d_w/z \leq 0.5$ の範囲では特に排水効果が高かったが、加振履歴に応じて排水ドレーンの有効範囲が広がったと言える。

以上より、これまで排水ドレーンには本震のみに対する過剰間隙水圧の抑制効果や早期消散効果しか期待していなかったが、本研究により複数回加振を受けた場合には地盤の密実化以外の効果により、地盤の液状化強度が高くなることが新たに判明した。

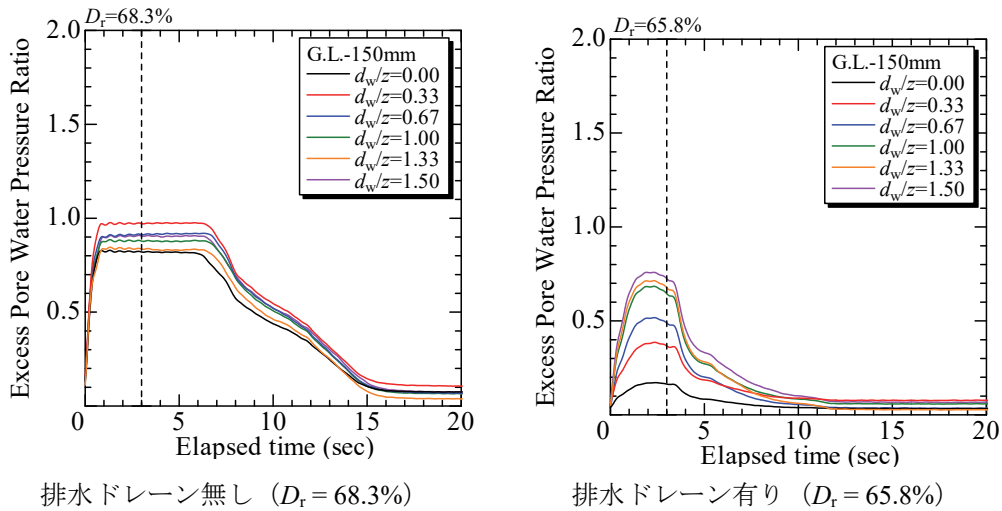


図-5 過剰間隙水圧比 (3加振目)

(2) 排水ドレーンが地盤せん断強さに及ぼす影響

図-6 に加振中 (液状化中), および加振後における模型地盤のせん断強さ比を示す. ここで, 図中の横軸は深度 z で正規化した排水性改良体までの距離 d_w/z , 縦軸は前述の通り各深度の初期せん断強さ τ_0 で正規化した地盤のせん断強さ比 τ/τ_0 である. また, 加振中のせん断強さは主要動である加振 10 秒間内の最大せん断強さを用いており, 加振後のせん断強さは過剰間隙水圧比が $u_e = 0 \text{ kPa}$ になった後で計測したせん断強さを用いている. 加振中における地盤のせん断強さは, 概ね $d_w/z = 0.5$ までは排水ドレーンに近いほど高くなる傾向が得られた. これは, 排水ドレーンによる過剰間隙水圧の抑制効果が高かった範囲と概ね同様である. また, 加振後のせん断強さもばらつきはあるが, 概ね排水ドレーンにより過剰間隙水圧の早期消散効果が得られた $d_w/z \leq 1.0$ の範囲までは排水ドレーンに近いほど高くなる傾向が確認できる. この現象は, 排水ドレーンによる過剰間隙水圧の抑制効果や消散効果, 排水ドレーンに向かう透水力の影響などによるものと考えられる. また, 加振後の地盤においては排水ドレーンから離れた地点においても, 加振前に比べ同等以上のせん断強さが得られている. これは, 図-5 に示した加振回数に応じて排水ドレーンの効果により液状化強度が著しく増加したことにも関係していると考えられるが, 加振に伴い相対密度が増大した効果以上に, 加振に伴い地盤の骨格構造が大きく変化するなど別の要因による効果が大いと考えられるが, 今後更なる検討が必要である.

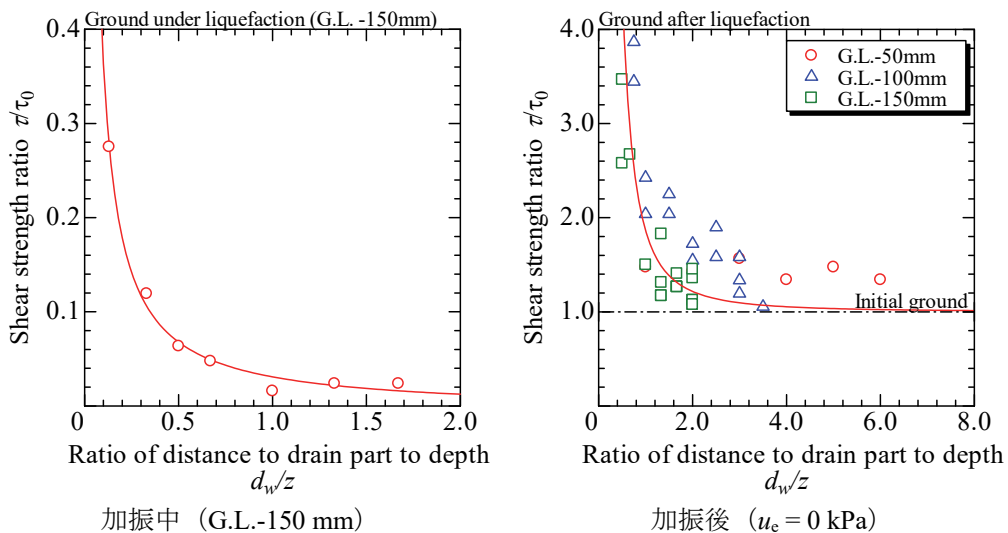


図-6 地盤のせん断強さ比 (小型ベーン試験)

(3) 複合型改良体を用いた浮き型格子状地盤改良の液状化対策効果

前述の通り, 本検討では基礎幅 B に対する改良間隔 L や改良深度 H はそれぞれ, 先行研究において改良効果が高かった $L/B = 1.20$, $H/B = 2.25$ とし, 複合型改良体の全改良深度 H に対する排水性改良体長 H_d の比である排水改良比 H_d/H が浮き型格子状地盤改良による液状化被害抑制効果に与える影響を検討した. 表-1 に実験ケースを示す. 排水改良比は $H_d/H = 0/3$ (不透水), $1/3$, $2/3$, $3/3$ (完全排水) の 4 ケースとした.

図-7に模型構造物の平均沈下量, および傾斜角を示す. ここで, 図中の横軸は相似則を適用し実スケールに変換した経過時間, 縦軸は実スケールに換算した沈下量, 傾斜量を示す. 先行研究と同様, 構造物の沈下被害は全深度が不透水性改良体である Case 1.20-2.25-0/3 でも未改良地盤に比べて大きく抑制されているが, 不透水性改良体の一部に排水性改良体を組合わせた複合型改良体を用いることで, 浮き型格子状地盤改良による沈下被害の抑制効果はさらに増大していることが分かる. その上で, 不透水性改良体では抑制効果が得られなかった構造物の傾斜被害は, 複合型改良体を用いることで抑制できていることが分かる.

次に, 模型構造物を設置していない状態で本震と同じ前震を2回与え, その後3加振目の直前になってから模型構造物を設置した場合の液状化被害に関する検討を行った. ここで, 各加振が終了した後, 過剰間隙水圧が $u_e = 0 \text{ kPa}$ に戻ってから次の加振を行っている. 図-8に3加振目における構造物の平均沈下量, および傾斜量を示す. 図-8も図-7の結果と同様に沈下量と傾斜量には相似則を適用し, 実スケールに換算している. 加振履歴により, 複合型改良体のケースでは模型地盤の液状化強度が著しく増大したため, 全深度が排水性改良体である Case 1.20-2.25-3/3 や排水改良比が高い Case 1.20-2.25-2/3 に加え, 排水改良比が低い Case 1.20-2.25-1/3 においても, 模型構造物にはほとんど液状化被害が発生していないことが分かる.

以上より, 本検討では今まで見過ごされてきた排水ドレーンによる加振履歴に応じた地盤の液状化強度増加効果や, 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低減効果などを明らかにし, 本研究が既設住宅への液状化対策として期待できることを示した.

表-1 実験ケース

Case	改良間隔 (H/B)	改良深度 (H/B)	排水改良比 (H_d/H)
0	未改良地盤		
1.20-2.25-0/3	1.20	2.25	0/3 (不透水)
1.20-2.25-1/3			1/3
1.20-2.25-2/3			2/3
1.20-2.25-3/3			3/3 (完全排水)

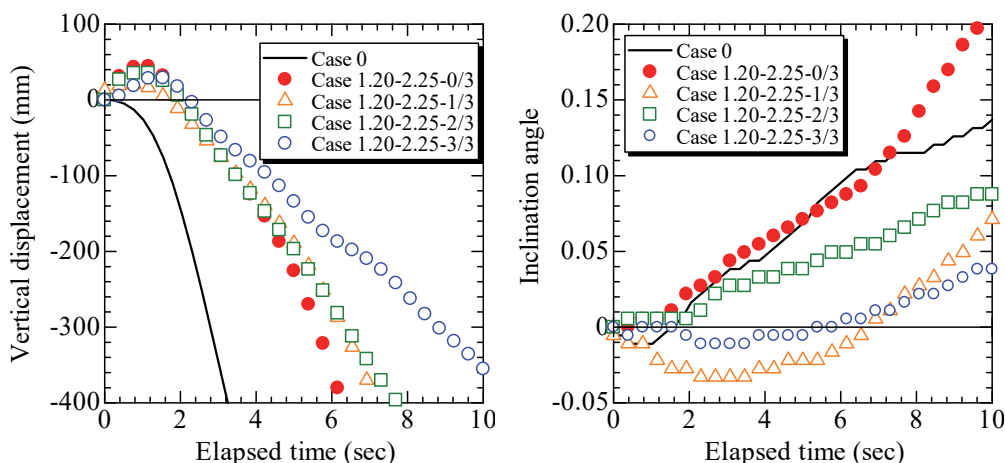


図-7 構造物の液状化被害 (左: 沈下量, 右: 傾斜量)

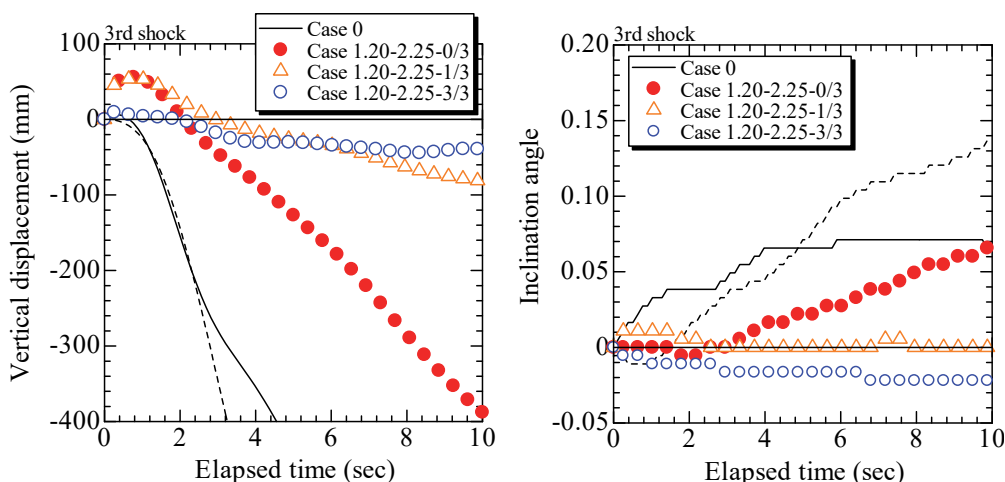


図-8 3加振目における構造物の液状化被害 (左: 沈下量, 右: 傾斜量)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡崎昂奈, 森河由紀弘, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 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
3. 学会等名 地盤工学会 第35回中部地盤工学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡崎昂奈, 森河由紀弘, 花田響, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡崎昂奈, 森河由紀弘, 花田響, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 繰返し地震動に対する排水性浮き型格子状地盤改良の液状化対策効果
3. 学会等名 地盤工学会 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 花田響, 森河由紀弘, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 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
3. 学会等名 地盤工学会 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 花田響, 森河由紀弘, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会 第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋工業大学 研究者データベースシステム
https://researcher.nitech.ac.jp/html/100000306_ja.html?msclkid=2f3f3ad2cf7b11ecbc4ddf3636eaaad

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

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