

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15086

研究課題名（和文）既設構造物対応の経済的なハイブリッド型液状化対策（地中連続壁・排水工法）の開発

研究課題名（英文）Development of economic hybrid type liquefaction countermeasure for existing structure by combining pore water pressure dissipation method with continuous underground wall

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では戸建て住宅などの既設小規模構造物にも経済的に適用可能な液状化対策として、浮き型格子状地盤改良工法に間隙水圧消散工法を組み合わせたハイブリッド型液状化対策について検討を行った。検討の結果、格子間隔が構造物幅の1.2倍～1.4倍、改良深度が構造物幅の2倍程度の浮き型格子状地盤改良で構造物を囲うことにより、液状化による構造物の沈下被害を低減できることが分かった。また、一般的な地盤改良工法を想定した不透水性改良体を用いた浮き型格子状地盤改良では構造物の傾斜被害を低減することは困難であるものの、排水性改良体を用いることで構造物の沈下被害および傾斜被害の両方を低減できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、浮き型格子状地盤改良に間隙水圧消散工法を組み合わせたハイブリッド型液状化対策は既設構造物の沈下被害と傾斜被害の両方を低減できることが明らかとなり、傾斜被害の抑制には排水性改良体が重要であることも明らかとなった。従来の地盤改良工法では経済的に住宅などの既設構造物を液状化被害から守ることは困難であったが、本研究結果はその可能性を示し、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 we investigated the economic hybrid type liquefaction countermeasure for existing structure that combines a floating grid type improvement method and the pore water pressure dissipation method. As a result of the study, it was found that the settlement damage of the structure due to liquefaction can be suppressed by the floating grid type improvement with a grid spacing of 1.2 to 1.4 times the width of the structure and an improvement depth of about twice the width of the structure. In addition, it was found that the floating grid type improvement with impermeable improvement body assuming general ground improvement could not reduce the inclination damage of structure, but the floating grid type improvement with drainage improvement body could reduce both settlement damage and tilt damage of structure.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化対策 液状化 格子状地盤改良 間隙水圧消散工法 戸建て住宅 既設小規模構造物 模型実験

### 1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震(2011年)など、近年世界中で戸建て住宅の深刻な液状化被害が発生している。そのため、液状化から人々の生活、財産を守るためにも戸建て住宅などの既設小規模構造物にも比較的容易に適用可能であり、再液状化に対してもねばり強く持続性も長い、経済的で効果的な液状化対策の開発が急務となっている。ここで、我が国においてもセメント系固化材などを用いた原位置攪拌工法や動的・静的な密度増大工法(締固め工法)、地下水位低下工法、間隙水圧消散工法、地中連続壁を用いたせん断変形抑制工法、など様々な液状化対策工法が研究、実用化されてきた。しかし、これらの従来工法を住宅などの既設小規模構造物に適用する場合には以下の問題が考えられる。

- ① 液状化の発生そのものを防止することを目的としているため、高い改良率や深い改良深度が必要となり、施工価格が高額になりやすい。
- ② 施工面積が大きく原地盤を対象とした工法は比較的安価な傾向にあるが、施工面積が小さく既設構造物を対象とした工法は特殊な施工機械や施工方法となるため、極端に高額になる。
- ③ 従来の地盤改良工法は広大な地域を迅速に、かつ経済的に開発することを目的、前提としているため、大型の施工機械を必要とする場合が多い。そのため、狭隘な施工空間や施工面積が小さな既設小規模構造物にはそもそも適用不可能な工法が多い。

以上より、既設小規模構造物にも適用可能な経済的で効果的な液状化対策についてはあまり検討されていないのが現状である。そこで、本研究ではこれまで地盤改良工法が苦手としてきた既設小規模構造物にも経済的に適用可能な液状化対策工法として、浮き型格子状地盤改良工法に間隙水圧消散工法を組み合わせた「ハイブリッド型液状化対策」を新たに考案し検討を行った。

### 2. 研究の目的

近年、多発する大地震により戸建て住宅など既設小規模構造物の液状化被害は深刻なものになっている。そこで、本研究では既設小規模構造物にも適用可能な経済的な液状化対策として、浮き型格子状地盤改良と間隙水圧消散工法を組み合わせたハイブリッド型液状化対策を考案し、その液状化対策効果、およびメカニズムの解明について検討を行う。ここで、本研究が提案する液状化対策では液状化の発生自体は許容することで対策の規模を小規模化して経済性を高め、構造物が沈み込む際に発生する液状化地盤の側方流動を抑制することで被害の低減を試みる。また、間隙水圧消散工法の併用することで液状化地盤の流動性を抑制し、浮き型格子状地盤改良による側方流動抑制効果を増大させることを試みる。そのため、本研究では構造物と液状化地盤の相互作用を解明することや、浮き型格子状地盤改良の格子間隔や改良深度を最適化すること、間隙水圧消散工法を併用した場合の影響やメカニズムの解明などを主な目的としている。

### 3. 研究の方法

#### (1) 構造物と液状化地盤の相互作用

本検討では幅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次元振動台模型実験を行った。ここで、以降に示す全ての検討において、模型地盤には珪砂7号(平均粒径:0.153mm)を使用し、加振条件は周波数が17Hzで最大加速度が約2.0m/s<sup>2</sup>の正弦波としている。また、模型縮尺は1/30とし、構造物に傾斜被害が発生しにくい条件での検討には、図-1(a)に示す接地圧が0.66kPa(二階建ての住宅:接地圧20kPaを想定)となる幅80mm×奥行80mm×高さ25mmの平坦で接地圧が偏心していないアルミニウムブロックを模型構造物として使用し、一方で傾斜被害が発生しやすい条件では、接地圧は0.66kPaのまま接地圧が偏心するように基礎幅に対する偏心比が1/20となる幅80mm×奥行80mm×平均高さ25mmの階段状のアルミニウム製ブロックを用いた。また、模型地盤は一定間隔ごとに着色することで、液状化中における構造物と液状化地盤との相互作用を正面から観察した。

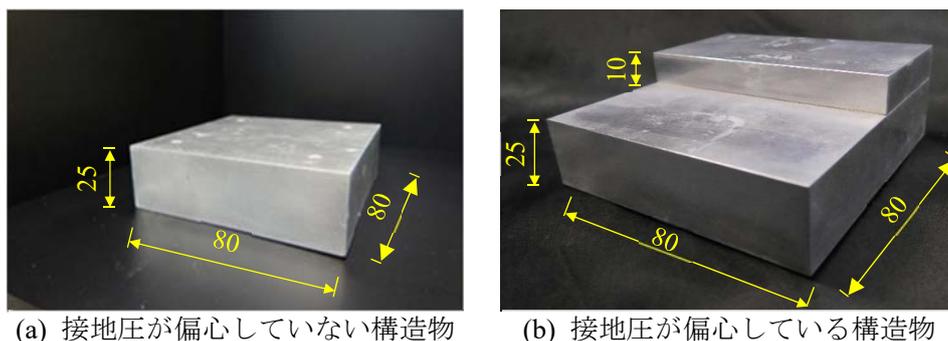


図-1 模型構造物

## (2) 浮き型格子状地盤改良の格子間隔や改良深度を最適化

本検討では、「(1) 構造物と液状化地盤の相互作用」で得られた結果を参考にし、一般的な地盤改良を想定した不透水性の改良体（アクリル製）を用いて、図-2 に示す浮き型格子状地盤改良の格子間隔  $L$  や改良深度  $H$  が液状化対策効果に及ぼす影響について、前述した平面ひずみ条件を仮定した2次元振動台模型実験によって検討を行った。さらに、構造物・改良体・液状化地盤の相互作用を観察することにより、液状化対策効果のメカニズムについても検討を行った。

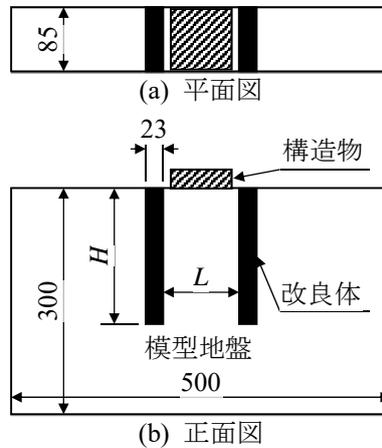


図-2 実験概要図

## (3) 間隙水圧消散工法を併用した場合の液状化対策効果

本検討では、「(1) 構造物と液状化地盤の相互作用」や「(2) 浮き型格子状地盤改良の格子間隔や改良深度を最適化」で得られた結果なども参考に、浮き型格子状地盤改良に間隙水圧消散工法を併用した場合における液状化対策効果、およびそのメカニズムについて検討を行った。ここで、本実験では、一般的な地盤改良工法を想定した不透水性の改良体ではなく、剛性に加え排水性も高い排水性改良体を用いることで、浮き型格子状地盤改良と間隙水圧消散工法の併用を試みた。本検討が期待しているのは、間隙水圧消散工法による地表付近における支持力の確保や液状化地盤の低流動化、そして不透水性改良体を用いた場合においても効果が確認されている浮き型格子状地盤改良による効率的な側方流動の抑制であり、浮き型格子状地盤改良と間隙水圧消散工法の相乗効果で経済性を確保したまま、高い液状化対策効果を得ることである。

## 4. 研究成果

### (1) 構造物と液状化地盤の相互作用

図-3(a)に接地圧が偏心していない平坦な模型構造物が液状化によって 20mm 沈下した場合の地盤内変位（ベクトル長は変位量の等倍）を示す。液状化地盤内において、基礎幅の約 1.4 倍の範囲まで大きな地盤内変位が発生し、その中でも構造物の直下では基礎幅の約 2 倍の深度まで鉛直変位が卓越している。一方で、構造物の直下ではなく基礎幅の 1.2 倍以上外側では側方流動が発生していることが分かる。従って、液状化が発生しても側方流動を抑制することで、小規模な浮き型格子状地盤改良でも経済的に沈下被害を抑制可能であると言える。

図-3(b)に接地圧が偏心した模型構造物の左下端部にヒンジを設けて回転中心とし、構造物の傾斜角が 100/1000（全壊判定の倍）に達した時の地盤内変位を示す。構造物が回転（傾斜被害）した場合には、構造物の外側へ広がる側方流動はほとんど発生せず、地盤内変位は構造物端部付近の浅い部分に僅かな変位が局所的に発生するのみであり、変位量も全体的な変位領域も沈下した場合に比べて非常に小さいことがわかる。

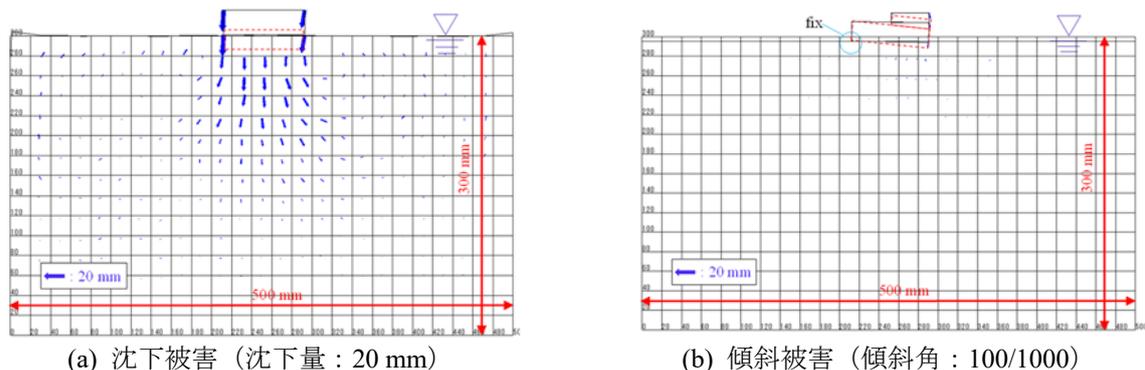


図-3 地盤内の変位状況

(2) 浮き型格子状地盤改良の格子間隔や改良深度を最適化

本検討ではまず最も基本的なケースとして、接地圧が偏心していない模型構造物と不透水性改良体を用いて検討を行った。浮き型格子状地盤改良の格子間隔  $L$  と模型構造物の基礎幅  $B$  の比は  $L/B=1.20, 1.40, 1.60, 1.80$  の4種類、改良深度  $H$  と基礎幅  $B$  の比は  $H/B=0.75, 1.50, 2.25$  の3種類である。ここで、模型地盤の相対密度は  $D_r=37\%$ 、模型構造物の接地圧は  $0.67\text{ kPa}$ 、高さは  $25\text{ mm}$  であり、模型構造物は加振後2秒以内に完全に埋没する。そのため、未改良地盤において構造物の沈下量が  $s_0=20\text{ mm}$  に達した時の加振時間 ( $t_0=0.998\text{ sec}$ ) における各ケースの沈下量  $s$  を未改良地盤の沈下量  $s_0$  で正規化した沈下量比  $s/s_0$  で対策効果の評価を行う。図-4(a)に格子間隔が基礎幅の1.20倍のケースにおける沈下量を示し、図-4(b)に全ケースにおける沈下量比を示す。実験結果から、格子間隔が狭いほど、改良深度が深いほど沈下被害の抑制効果が高い傾向にあり、特に格子間隔が  $L/B=1.20\sim 1.40$  以内、改良深度が  $H/B=1.50$  以上で高い沈下抑制効果を示した。これは、図-3に示すように、構造物が沈下する際に発生する側方流動の範囲と概ね一致する。

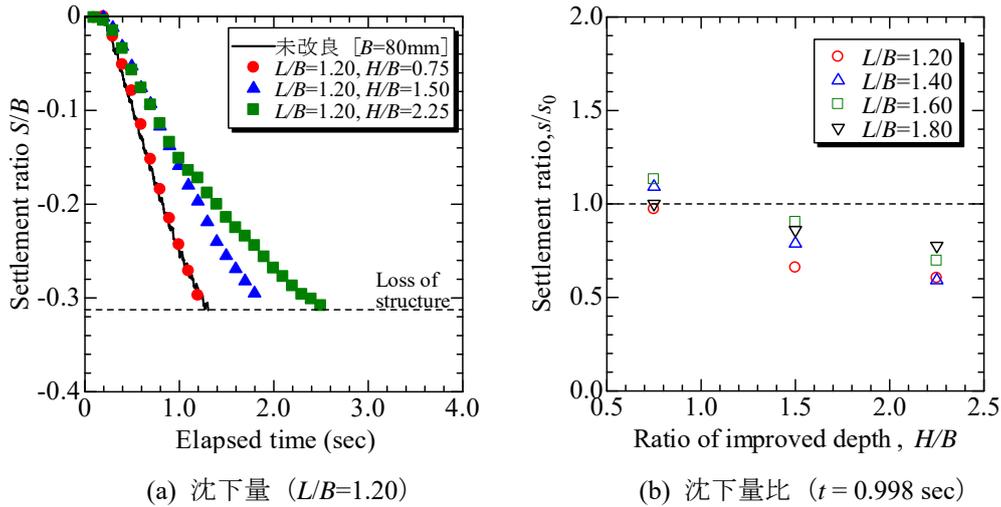


図-4 偏心していない模型構造物の沈下量 (相対密度: 37%)

次に接地圧が偏心している模型構造物を用いて同様の検討を行った。ここで、本検討における模型地盤の相対密度は  $D_r=50\%$  である。図-5に構造物の沈下量、および傾斜角を示す。前述した接地圧が偏心していない模型構造物を用いた検討において、比較的大きな沈下被害抑制効果が確認できている  $(L/B, H/B)=(1.20, 1.50), (1.20, 2.25), (1.40, 2.25)$  のケースにおいて、接地圧が偏心している構造物を用いた本検討においても大きな沈下被害の抑制効果が確認できた。ところが、浮き型格子状地盤改良による傾斜被害の抑制効果は、沈下被害の抑制効果に比べると小さいと言える。これは、図-3に示したように構造物が傾斜する際には側方流動がほとんど発生しないためだと考えられる。従って、液状化地盤の側方流動を抑制することを目的とした浮き型格子状地盤改良のみの場合、側方流動の発生を伴う構造物の沈下被害を抑制することは可能であるが、側方流動がほとんど発生しない傾斜被害を抑制することは困難であり、間隙水圧消散工法との併用などが望ましいことが確認できた。

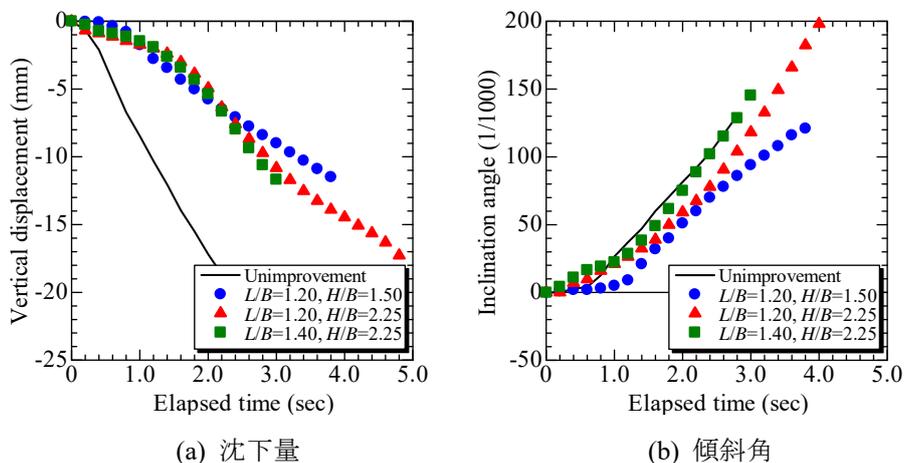


図-5 偏心している模型構造物の沈下量と傾斜量 (不透水性改良体)

(3) 間隙水圧消散工法を併用した場合の液状化対策効果

図-6 に土槽左端に排水性改良体を設置した場合の過剰間隙水圧比を示す。間隙水圧計の深度は  $z=200\text{mm}$ 、改良体から間隙水圧計までの距離は  $d_w=0\text{mm}\sim 200\text{mm}$ 、加振時間は 10 秒間である。改良体までの距離が  $d_w/z=0.50$  以内では加振直後から間隙水圧が下がり特に高い排水効果を示し、少し離れた  $d_w/z=1.00$  付近においても未改良地盤より間隙水圧の消散が早いことが確認できる。

図-7 に構造物が 20mm 沈下した場合における地盤内変位を示す。土槽左端に排水性改良体を設置したケースでは、排水性改良体からの距離  $d_w$  と深度  $z$  との比が  $d_w/z \leq 0.5$  程度の範囲内において地盤内変位が小さいことが分かる。これは、前述した間隙水圧の検討と同様の傾向である。

図-8 に接地圧が偏心している模型構造物と排水性改良体を用いて場合における模型構造物の沈下量、および傾斜量を示す。不透水性改良体を用いたケース (図-5) に比べ、排水性改良体を用いたケースでは沈下量の抑制効果が大幅に向上し、さらに不透水性改良体では抑制することが困難であった傾斜量についても大幅に低減していることが分かる。

以上より、限定的な条件ではあるが、排水性改良体までの距離が  $d_w/z \leq 0.5$  の範囲では特に高い排水効果が得られ、浮き型格子状地盤改良に間隙水圧消散工法を併用することにより、構造物の沈下被害および傾斜被害の両方を大きく抑制できることが明らかとなった。

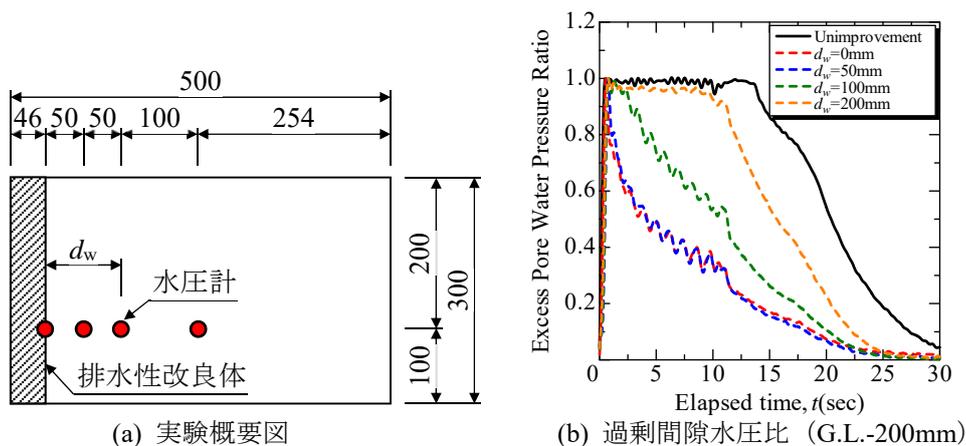


図-6 過剰間隙水圧比

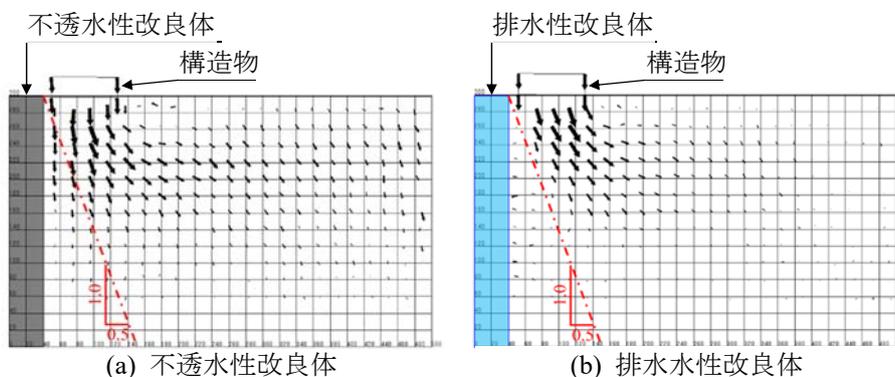


図-7 地盤内の変位状況

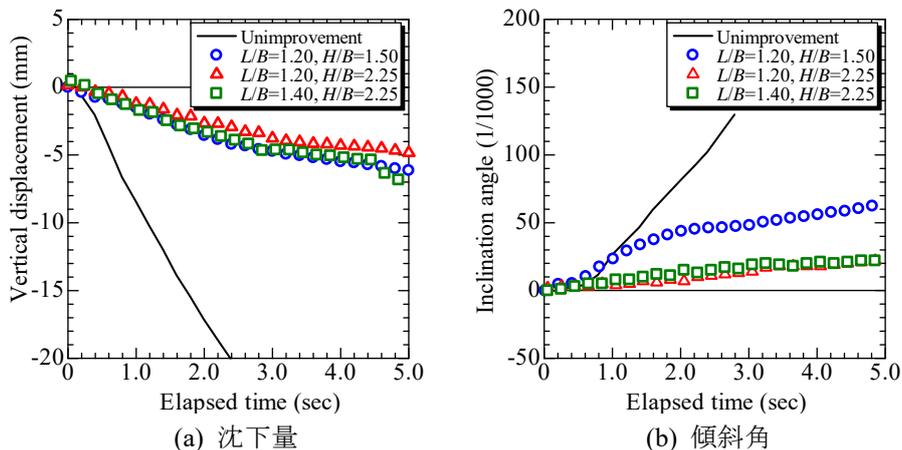


図-8 偏心している模型構造物の沈下量と傾斜量 (排水性改良体)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 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	4. 巻 Vol. 75, No. 2
2. 論文標題 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化化被害の低減効果	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集 A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_329 ~ I_339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_I_329	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 中谷一貴, 森河由紀弘, 中井健太郎, 前田健一, 野田利弘	4. 巻 Vol. 76, No. 2
2. 論文標題 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化化被害抑制効果	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集 A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_279-I_288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_I_279	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10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 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
2. 発表標題 小規模な格子状地盤改良による液化化被害の低減効果
3. 学会等名 第22回土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中谷一貴, 武田祐輔, 森河由紀弘, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 既設小規模構造物を対象とした格子状改良の最適な改良間隔・改良深度の検討
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中谷一貴, 森河由紀弘, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 既設小規模構造物を対象とした排水性格子状改良の液状化対策効果
3. 学会等名 第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中谷一貴, 森河由紀弘, 中井健太郎, 前田健一, 野田利弘
2. 発表標題 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時傾斜被害の抑制効果
3. 学会等名 第23 回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中谷一貴, 高木要, 森河由紀弘, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 既設小規模構造物を対象とした浮き型格子状地盤改良の傾斜被害抑制効果
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 中谷一貴, 森河由紀弘, 高木要, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 液状化に伴う構造物の傾斜被害に着目した浮き型格子状地盤改良の対策効果
3. 学会等名 第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中谷一貴, 森河由紀弘, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第32回中部地盤工学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中谷一貴, 森河由紀弘, 前田健一, 高木要, 佐藤智範
2. 発表標題 既設小規模構造物を対象とした排水性浮き型格子状地盤改良による液状化時の傾斜被害抑制効果
3. 学会等名 第14回地盤改良シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 花田響, 森河由紀弘, 中谷一貴, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 花田響, 森河由紀弘, 中谷一貴, 前田健一, 佐藤智範
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第76回年次学術講演会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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