

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

Liquefaction damage suppression effects of existing small scale structure
using floating grid-type improvement

中谷一貴¹, 森河由紀弘², 前田健一², 佐藤智範³

1 名古屋工業大学・大学院・社会工学専攻・31415060@stn.nitech.co.jp

2 名古屋工業大学・大学院・社会工学専攻

3 名古屋工業大学・技術部

概 要

近年、多発している大規模な地震に伴う液状化によって多くの戸建住宅で深刻な被害が発生している。ここで、構造物の傾斜時には構造物自体に重大な損傷が発生するため、構造物の液状化被害は沈下被害の時よりも深刻になる。そこで、本稿では設置圧が偏心し、傾斜被害が発生しやすい模型構造物を対象にした重力場での二次元模型実験によって、不透水性の改良体に加え排水性の高い改良体を用いて浮き型格子状地盤改良による液状化被害の抑制効果について検討を行った。検討の結果、側方流動を抑制することを目的とした不透水性の浮き型格子状地盤改良では傾斜被害の抑制効果は沈下被害の抑制効果に比べて大きくはないことが確認された。一方、排水性の高い改良体を用いた排水性浮き型格子状地盤改良は構造物の沈下被害および傾斜被害の抑制効果に効果的であることが確認された。

キーワード：液状化対策，振動台実験，格子状地盤改良

1. はじめに

近年、世界中で大地震が頻繁に発生しており、我が国においても東北地方太平洋沖地震^{1),2)}など度重なる大地震により、数多くの戸建て住宅が深刻な液状化被害を受けた。さらには、近い将来にはより大きく長時間にも及ぶ複数回の巨大地震が発生することも危惧されており、戸建て住宅などの既設小規模構造物にも適用できる施工性、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。そこで、本研究では既設小規模構造物にも適用可能な液状化対策として、改良深度を液状化層の浅い部分に留めた「浮き形」の格子状地盤改良に着目した。ここで、従来の格子状地盤改良は高い剛性を持つ地中連続壁により地盤内を格子状に改良することで、格子内地盤のせん断変形を壁体で抑制して液状化の発生自体を防止する工法であり、今日までに格子間隔が過剰間隙水圧や沈下量に及ぼす影響^{3)~8)}や最適な格子間隔の算定方法^{9),10)}などが検討されてきた。

一方、著者らはこの従来の格子状地盤改良とは異なり、改良深度を液状化層の浅い部分に留めた経済的な浮き型格子状地盤改良によって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を提案し、これまで構造物の設置圧が偏心しておらず傾斜被害が発生しにくい条件において対策効果の検討^{11),12)}を行ってきた。しかし、住家の損傷は沈下被害や傾斜被害に応じて大きくなるため^{13),14)}、住家の液状化対策は沈下被害だけではなく、傾斜被害についても検討を行う必要がある。

そこで、本稿では浮き形格子状地盤改良および排水性浮き型格子状地盤改良による構造物の沈下被害および傾斜被害の抑制効果について、設置圧が偏心しており液状化時に傾斜被害が発生しやすい模型構造物を用いた重力場での二次元模型実験による検討結果を報告する。

表1 地震による被災度判定 (木造, プレハブ)¹³⁾

四隅の柱の傾斜角	判定
1/20 以上	住家の損害割合を50%以上とし、全壊とする
1/60 以上 1/20 未満	傾斜による損害割合を15%とし、部位による判定を行う
1/100 以上 1/60 未満	傾斜による判定は行わず、部位による判定を行う

2. 実験装置と実験概要

2.1 実験装置

図1に簡易振動台実験装置を示す。本研究で用いた実験装置は既往研究^{11),12)}と同様のものであり、振動モーターの周波数と電源供給時間(タイマー)のみが制御されている。また、振動モーターへの電源供給が停止した後もモーターは急には停止せず、加速度や周波数は徐々に低下しながらやがて完全に静止する。そのため、後述するように実際の加振時間はモーターへの電源供給時間とは異なる。



図1 簡易振動台実験装置^{11),12)}

2.2 実験概要

図2に実験概要図を示し、図3に設置圧が偏心しており傾斜被害が発生しやすい模型構造物を示す。模型地盤には珪砂7号($D_{50}=0.15\text{ mm}$)を使用し、相対密度が約50%、層厚が300mmの中密な飽和地盤とした。液状化時の構造物や地盤内の挙動を観察するため、幅500mm×奥行85mm×高さ500mmの透明なアクリル製土槽を用いて、地盤内には20mm間隔で着色砂を設置した。また、平面ひずみ条件を満足するように、構造物は幅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た。模型構造物の設置圧は2階建ての住宅に相当する0.67kPa(実物で20kPa)であり、偏心量 e を基礎幅 B で正規化した偏心比は $e/B=1/20$ である。

模型改良体には一般的な地盤改良体を想定した不透水性改良体(アクリル製)および珪砂2号($D_{50}=3.04\text{ mm}$)を透水性は保持したまま固化した排水性改良体(図4)を用いた。改良体の寸法は幅23mm×奥行80mmであり、その剛性は液状化地盤に比べて十分に高い。また、一般的な格子状地盤改良と同様に壁体同士はそれぞれ連結され、加振中において改良体の間隔が変化しないことを想定し、本検討では模型改良体を土槽に固定した条件で加振実験を行った。ここで、排水性改良体である珪砂2号の透水係数は $k=2.2\times 10^{-2}\text{ m/s}$ であり、模型地盤である珪砂7号の透水係数($k=6.5\times 10^{-5}\text{ m/s}$)に比べて十分に高い。

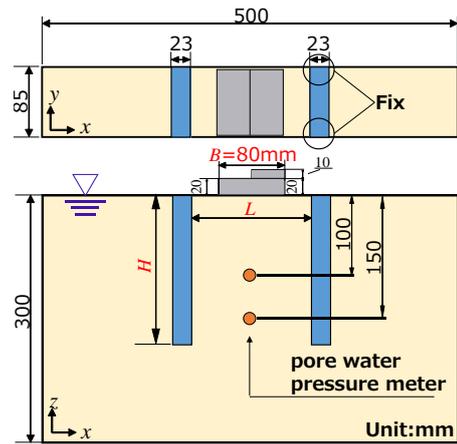


図2 実験概要図

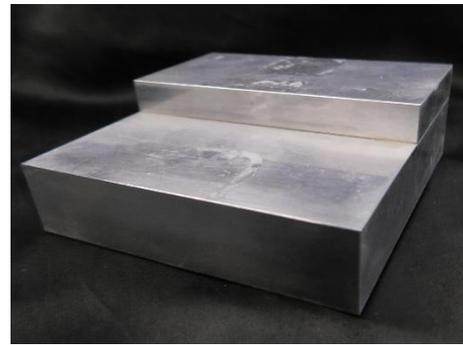


図3 設置荷重の偏心した模型構造物



図4 排水性改良体

表2に本検討の実験ケースを示す。既往研究の設置圧が偏心していない模型構造物を対象とした模型実験や解析結果¹¹⁾から改良間隔が狭く、改良深度が深いケースにおいて液状化対策効果が大きく、改良深度より改良間隔のほうが支配的であることがわかっている。そのため、設置圧が偏心した模型構造物を対象とした本検討では、未改良地盤(Case 0)と改良間隔 L と改良深度 H を構造物の基礎幅 B (80mm)で正規化した $(L/B, H/B)=(1.20, 2.25), (1.40, 2.25), (1.20, 1.50)$ の3種類の改良仕様に対して、不透水性改良体(U)および排水性改良体(D)を含めた全7ケースについて検討を行った。

表2 実験ケース

Case	L / B	H / B	Drain condition
0 (Unimprovement)	—	—	—
1.20-1.50 U or D	1.20	1.50	Undrain (U) Drain (D)
1.20-2.25 U or D		2.25	
1.40-2.25 U or D	1.40		

本検討は1G場における模型実験であるため、香川¹⁵⁾や井合¹⁶⁾の相似則(表3)によると、模型縮尺(λ)が1/30の場合には地盤の透水係数を $1/30^{0.75}$ にする必要がある。しかし、本実験では水道水を用いており、地盤材料も実物と同様の材料を用いているため、模型地盤の透水性は実物よりも高くなり、透水係数の相似則を十分に満足できない。そのため、本検討では最終沈下量や最終傾斜量のように、過剰間隙水圧の消散過程を含めた評価ではなく、液状化中(加振中)における浮き型格子状地盤改良による液状化地盤の側方流動抑制効果に着目して評価を行う。

表3 1G場における模型実験の相似則

項目	模型/実物
長さ	$1/\lambda$
飽和地盤の単位体積重量	1
地盤のひずみ	$1/\lambda^{0.50}$
時間	$1/\lambda^{0.75}$
地盤の応力	$1/\lambda$
地盤の変位	$1/\lambda^{1.50}$
地盤の剛性	$1/\lambda^{0.50}$
構造物や地盤の加速度	1
透水係数	$1/\lambda^{0.75}$

図5に本実験で用いた入力波を示す。本研究が提案している液状化対策は、経済的な浮き形格子状地盤改良により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抑制する方法であるため、加振中の液状化地盤内の挙動を観察する必要がある。したがって、加振時において振幅は小さく、且つ模型地盤が十分に液状化する程度には大きい加速度が必要となる。そこで、本実験では周波数が17 Hz、最大加速度が約 2 m/s^2 の正弦波を用いた。ここで、前述したように本検討で用いた実験装置は振動モーターによる簡易的な振動台実験装置であり、加振方向は三次元となる。また、タイマーを用いてモーターへの電源供給は3秒間としているものの、モーターへの電源供給が停止した後も振動は急に止まるのではなく、徐々に周波数は低く、振幅は小さくなり、振動が完全に停止するまでに約10秒かかる。そのため、加振開始から完全に停止するまでの合計加振時間は約13秒となる。

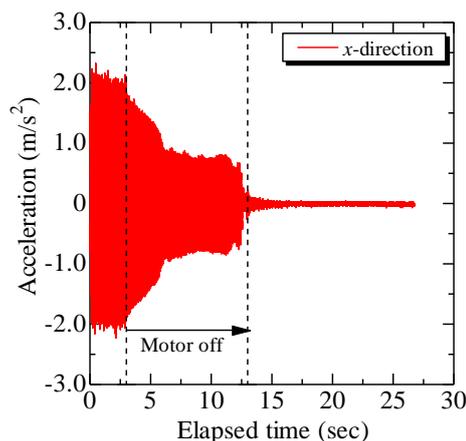


図5 入力加速度

3. 実験結果および考察

3.1 構造物の沈下および回転に対する地盤内変位

図6に設置圧が偏心している模型構造物を対象とした未改良地盤における実験状況を示す。前述したように、地盤内に縦横20 mm毎で色砂を設置することで、加振中における地盤内の変位状況を正面から観察している。図7に既往研究で行われた設置圧が偏心していない模型構造物^{11),12)}と本検討で行われた偏心している模型構造物が20 mm沈下した時の地盤内変位を示す。ここで、変位ベクトルの大きさは変位量と等倍である。偏心していない模型構造物には構造物に回転モーメントが作用しないため、加振直後に模型地盤が液状化するに伴い構造物には傾斜被害はほとんど発生せず沈下している。その結果、構造物の中心付近の地盤では鉛直変位が卓越するものの、構造物の端部付近から外側に向けて水平変位、すなわち側方流動が左右対称に発生するため、この側方流動を抑制するように浮き型格子状地盤改良を行うことで、構造物の沈下被害が低減できることが確認されている¹¹⁾。

一方、偏心している構造物には常に回転モーメントが作用するため、構造物は傾斜被害を伴いながら沈下するが、この場合においても地盤内変位は偏心していない構造物が沈下した場合とほぼ同様であり、地盤内変位には構造物の回転によりも沈下が与える影響が支配的であり、傾斜の影響が見えにくいことが分かった。そこで、構造物の回転運動が地盤内変位に与える影響を明瞭にするため、構造物の左端をヒンジ付きの沈下制御ロッドで固定することで、構造物の左端を回転中心となる条件の下で同様の検討を行った。図8に構造物の傾斜角が100/1000に達したときの地盤内変位を示す。住家の被災度判定(表1)において、住宅等の傾斜角が50/1000に達すると全壊判定となるが、本実験では傾斜角がその倍となる100/1000に達しても、液状化地盤内の変位は構造物の右端(回転部分)付近の浅層部に局所的にわずかに発生するのみであり、変位量や変位領域は沈下挙動を伴う場合に比べ非常に小さいことが分かった。

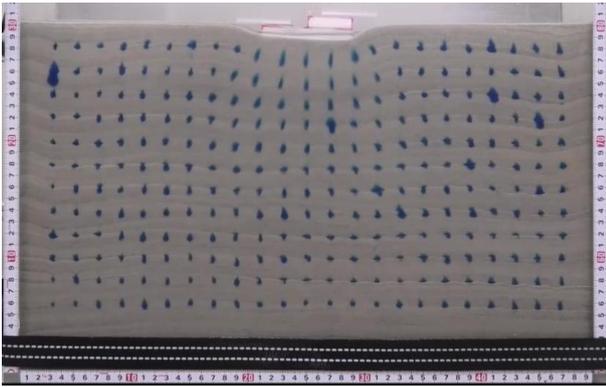
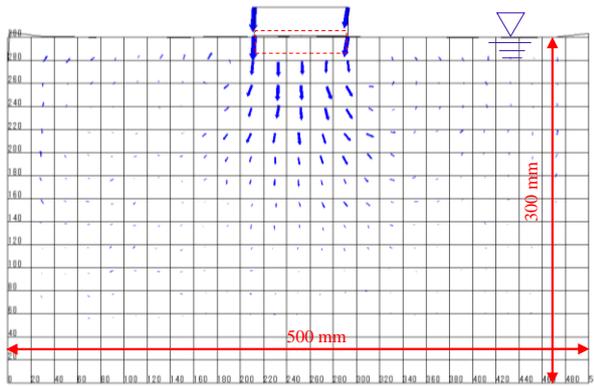
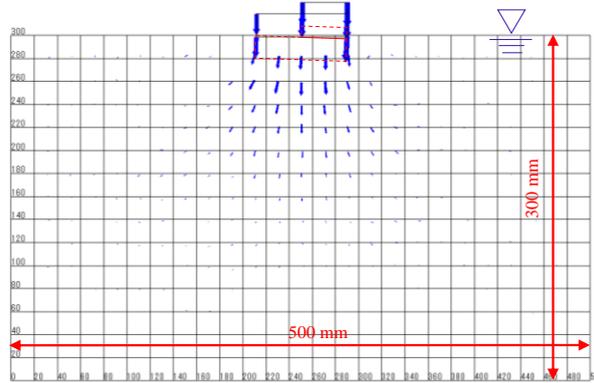


図6 未改良地盤における実験状況（沈下量：20 mm）



(a) 設置圧が偏心していない構造物



(b) 設置圧が偏心している構造物

図7 構造物が沈下した際の地盤内変位（沈下量：20 mm）

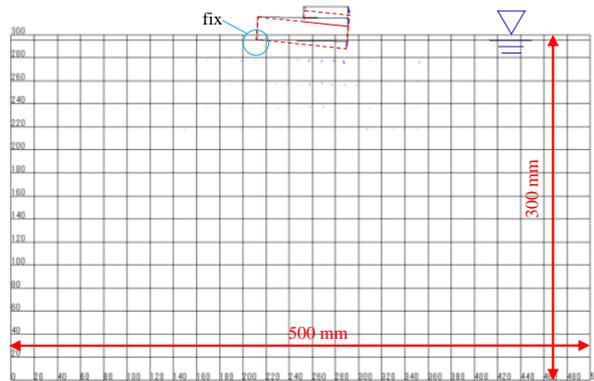
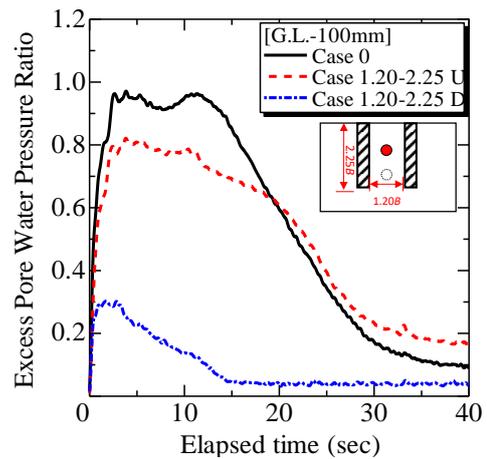


図8 構造物が傾斜した際の地盤内変位（傾斜角：100/1000）

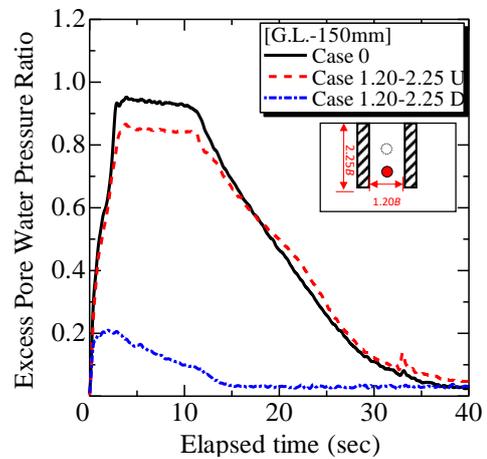
3.2 格子内における過剰間隙水圧比

図9に未改良地盤であるCase 0と最も改良効果が高いと考えられるCase 1.20-2.25（不透水性改良体：U，排水性改良体：D）における過剰間隙水圧比を示す。間隙水圧計は格子内中央部の深度G.L. -100 mmおよびG.L. -150 mmの位置に設置した。なお、構造物が初期有効応力に与える影響や沈下時の上載圧の変化を正確に求めることは困難であるため、計測は構造物を設置していない状態で行った。計測結果より、Case 0は過剰間隙水圧が0.95程度まで上昇し、地盤はほぼ完全に液状化していることが分かる。また、不透水性改良体を用いたCase 1.20-2.25 Uにおいて過剰間隙水圧比は0.8~0.9程度まで上昇し、地盤の剛性は大きく低下し、ほぼ液状化に至っている。一方、排水性改良体を用いたCase 1.20-2.25 Dにおいて最大過剰間隙水圧比が0.2~0.3程度に収まっており、改良体の排水性により過剰間隙水圧は大きく抑制されている。

したがって、以降に示す不透水性浮き型格子状地盤改良による対策効果は液状化地盤の側方流動を抑制した効果であり、排水性浮き型格子状地盤改良による対策効果は側方流動の抑制効果と過剰間隙水圧の抑制効果の相乗効果によるものだと考えられる。



(a) G.L.-100 mm

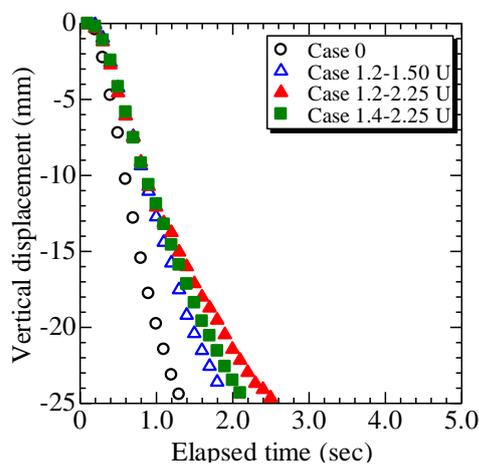


(b) G.L.-150 mm

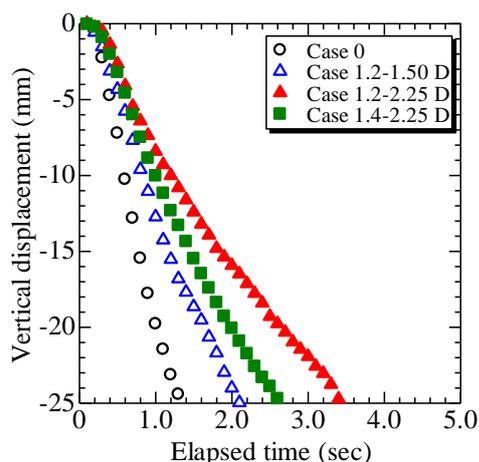
図9 過剰間隙水圧比（Case 0, Case 1.20-2.25）

3.3 浮き型格子状地盤改良の対策効果

図 10 に既往研究における設置圧が偏心していない模型構造物を対象とした構造物の沈下量^{11),12)}の時刻歴を示し、図 11~12 に偏心している模型構造物を対象とした構造物の沈下量および傾斜角の時刻歴を示す。ここで、構造物の傾斜角とは構造物の不同沈下量をその計測距離で正規化した傾斜量である。偏心していない構造物を対象とした検討では、模型地盤の相対密度は $D_r=36.8\%$ であり、偏心している構造物を対象とした本検討の地盤条件 ($D_r=50\%$) とは異なる。そのため、偏心している構造物の沈下速度は偏心していない構造物よりも遅い傾向にあるものの、両者共に不透水性の浮き型格子状地盤改良を用いて液状化地盤の側方流動を抑制することで、構造物の沈下被害は構造物に作用する偏心荷重の有無に関わらず抑制できているといえる。また、改良体を不透水性の壁体ではなく排水性の壁体にする事で、浮き型格子状地盤改良による構造物の沈下被害抑制効果が大幅に増加することが確認できた。



(a) 不透水性格子状地盤改良



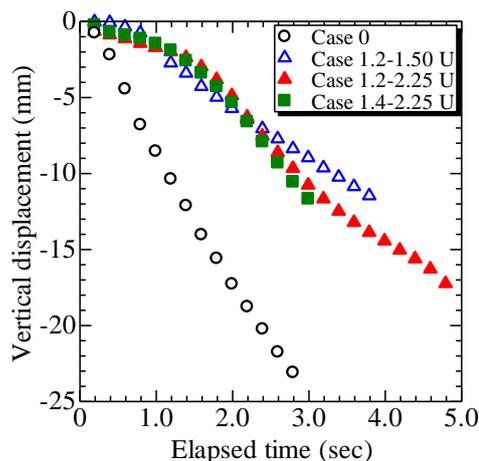
(b) 排水性格子状地盤改良

図 10 浮き型格子状地盤改良の対策効果 (構造物：偏心なし)

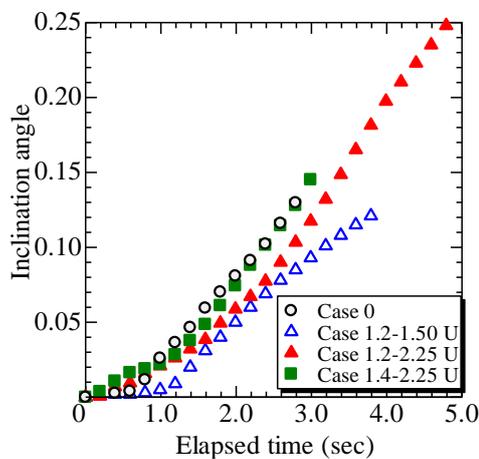
次に住家の損害に大きな影響を与えるもう一つの要因である構造物の傾斜被害に着目すると、不透水性格子状地盤改良による傾斜被害の抑制効果は、沈下被害の抑制効果

ほど大きくないことがわかる。これは、構造物に回転運動、すなわち傾斜被害のみが発生する場合における地盤内の変位は構造物端部付近の地盤浅層部で局所的に、且つわずかに発生するのみであり (図 7~8 参照)、構造物の沈下等に伴う液状化地盤の側方流動を抑制するために設置した浮き型格子状地盤改良では効果的に被害を抑制しきれなかったためだと考えられる。ところが、排水性の改良体を用いた浮き型格子状地盤改良による傾斜被害の抑制効果は不透水性の改良体を用いた場合に比べて大幅に増加していることが分かる。これは、剛性と排水性が高い改良体を用いることで、浮き型格子状地盤改良が持つ側方変位の抑制効果により沈下被害を低減させることに加え、排水性改良体付近における過剰間隙水圧を抑制することにより構造物直下付近の地盤支持力がある程度保つことができ、構造物の傾斜被害を抑制したと考えられる。

以上より、浮き型格子状地盤改良により液状化に伴う構造物の沈下被害と傾斜被害を経済的に抑制するためには、沈下時に発生する側方流動を壁体で抑制しつつ、さらには構造物が傾斜しないように局所的に間隙水圧消散工法の併用を行い、地盤支持力を確保することが効果的であると考えられる。

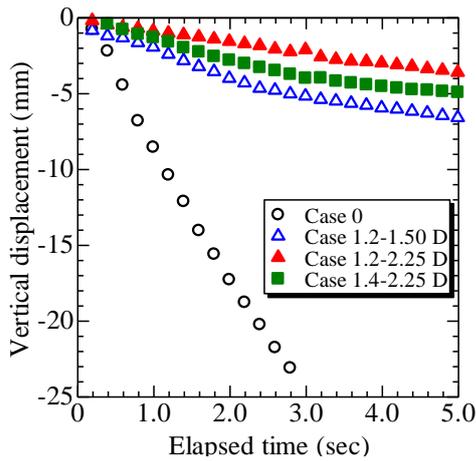


(a) 構造物の沈下量

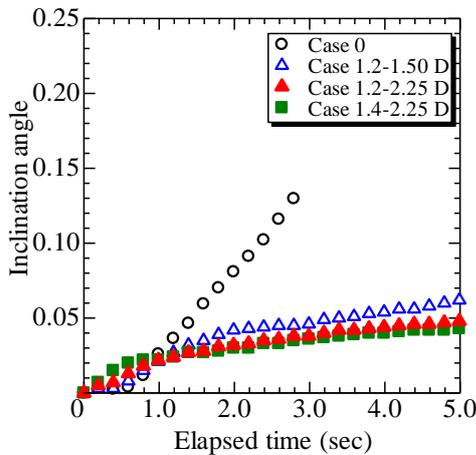


(b) 構造物の傾斜角

図 11 不透水性格子状地盤改良の対策効果 (構造物：偏心有)



(a) 構造物の沈下量



(b) 構造物の傾斜角

図 12 排水性格子状地盤改良の対策効果 (構造物：偏心有)

4. 結論

本研究では住宅などの小規模な既設構造物を対象にした浮き型格子状地盤改良による液状化時に伴う構造物の沈下被害抑制効果や傾斜被害抑制効果について、設置圧が偏心した模型構造物を用いた重力場での二次元模型実験による検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 浮き型格子状地盤改良により側方流動を抑制することで、構造物の回転運動に関わらず、液状化時に伴う沈下被害を低減できる。
- 2) 構造物が回転運動（傾斜被害）する場合における地盤内変位は構造物が沈下する場合に比べて小さいため、側方流動の抑制を期待している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て小さい。
- 3) 浮き型格子状地盤改良に一般的な地盤改良のような不透水性の改良体ではなく、排水性の高い改良体を用いることで、地盤の側方流動と過剰間隙水圧の上昇を抑制することが可能となり、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。

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，吉田信之，甲斐誠士，飛田哲男，肥後陽介，鳥居宣之，鏡原聖史，中西典明，木元小百合，山川優樹，東瀬康孝，渦岡良介，京谷孝史：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) 東祥二，原田健二，仁田尾洋，橋本則之，鈴木亮彦，初山幸治，館下和行，菅野高弘，中澤博志：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.
- 4) 津國正一，内田明彦，本多剛，小西一生：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.
- 5) 津國正一，小西一生，内田明彦：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.
- 6) 金田一広，津國正一，本多剛，内田明彦：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.
- 7) 高橋英紀，森川嘉之，吉田誠，川崎廣貴，田口博文，丸山憲治：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.I_450-I_455, 2012.
- 8) 高橋英紀，森川嘉之，津國正一，福武毅芳，鈴木亘，竹花和浩：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.I_432-I_437, 2012.
- 9) 田屋裕司，内田明彦，吉澤睦博，鬼丸貞友，山下清，津國正一：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.
- 10) 内田明彦，田屋裕司，本多剛，津國正一，小西一生：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.
- 11) 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液状化被害の低減効果，土木学会論文集 A2, Vol. 75, No. 2, pp. I_329-I_339, 2019
- 12) 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排水性格子状改良の液状化対策効果，第74回土木学会年次学術講演会，pp. III_47- III_48, 2018.
- 13) 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.5-6, 2013
- 14) 橋本隆雄，安田進，山口亮：東北地方太平洋沖地震による液状化被災地区における住宅の傾斜とめりこみ沈下量の関係，第47回地盤工学会研究発表，pp.1487-1488, 2012
- 15) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文報告集，第275号，pp.69-77, 1978.
- 16) 井合進：1G場での地盤・構造物系の模型振動実験の相似則について，第19回地震工学研究発表会講演概要集，pp.341-344, 1987