

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 Mechanisms of effectiveness of countermeasure against liquefaction by floating grid type improvement with high drainage

花田響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・工学専攻社会工学系プログラム・h.hanada.636@nitech.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

住宅などの小規模な既設構造物にも適用可能な液状化対策の開発は急務である。本研究では浮き型格子状地盤改良に着目しこれまで様々な検討を行い、格子壁体に一般的な地盤改良を想定した不透水性改良体を用いた場合には構造物の傾斜被害に対する抑制効果が期待できないことや、排水性改良体を用いた場合には沈下被害および傾斜被害の抑制効果が増大することを確認した。そこで、本検討では排水性改良体の効果的な深度やその対策効果のメカニズムを明らかにするため、不透水性改良体の一部に排水性改良体を組み合わせた複合型改良体を新たに考案した。振動台実験による検討の結果、複合型改良体の全改良長に対する排水性改良体の比率が大きくなるほど改良効果が増大し、排水性改良体の設置深度は構造物の影響が大きい浅層部付近が効果的であり、浮き型格子状地盤改良に複合型改良体を用いることで高い対策効果が期待できることが分かった。

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

これまで東北地方太平洋沖地震¹⁾²⁾などの度重なる大地震により、多くの戸建て住宅が深刻な液状化被害を受けてきた。近い将来、より大規模な地震の発生も危惧されており、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急務である。

そのような中、本研究では、戸建て住宅など既設小規模構造物にも適用可能な液状化対策工法として、改良深度を液状化層の浅い部分に留めた「浮き型格子状地盤改良」に着目した。ここで、一般的な格子状地盤改良は、高い剛性を持つ地中連続壁により、液状化層の下端まで狭い間隔で格子状に改良することで、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。そのため、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)}、最適格子間隔の算定方法^{9)~10)}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を

提案し、これまで格子間隔や改良深度が構造物の沈下被害に及ぼす影響¹¹⁾などについて検討を行ってきた。しかし、住家の損傷は沈下量のみならず、傾斜量によっても大きくなるため^{12), 13)}、住家などの液状化対策を考える場合には沈下被害に加え、傾斜被害についても考慮する必要がある。

図1に接地圧が偏心した模型構造物が20 mm沈下した時の地盤内変位を示し、図2に構造物の左下端部をヒンジ付きロッドで固定し、構造物の左下端部を回転中心として回転させた場合の地盤内変位を示す。液状化により構造物が沈下する際には、構造物の端部付近から外側に側方流動が発生するため、この側方流動を抑制することで構造物の沈下被害を低減可能¹⁴⁾である。一方で、構造物が沈下せずに傾斜した場合、傾斜角が全壊として判定される基準値¹²⁾の4倍となる200/1000に達しても地盤内の変位量や変位領域は構造物が沈下する場合に比べてわずかであるため、構造物の傾斜被害を抑制するためには、過剰間隙水圧消散工法などを併用することが効果的であることも既往研究¹⁴⁾により明らかとなっている。しかし、すべての改良体を排水性改良体にするには、経済性や施工性の観点からも困難であり、現実的であるとは言い難い。

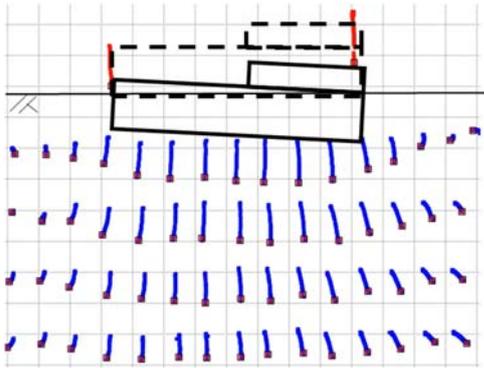


図1 構造物が沈下した際の地盤内変位（沈下量：20 mm）

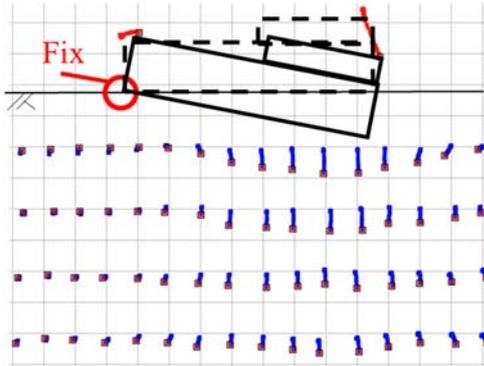


図2 構造物が傾斜した際の地盤内変位（傾斜角：200/1000）

そこで、著者らは改良深度全体ではなく改良体の一部に排水性改良体を用いた「複合型改良体」を新たに考案し、この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、およびメカニズムの検討を行った。本稿では、2次元振動台実験により排水性の高い改良体が液状化地盤の変形挙動や過剰間隙水圧の抑制・消散効果に与える影響、そして浮き型格子状地盤改良に複合型改良体を用いた場合の液状化対策効果や、排水性改良体の効果的な深度についての検討結果を報告する。

2. 排水性改良体による液状化抑制メカニズム

2.1. 実験概要

排水ドレーンによる間隙水圧の抑制・消散効果についてはこれまで多く研究されてきたが、液状化地盤の剛性や地盤内変位などに与える影響については研究が進んでいない。そこで本検討では小型の簡易ベーン試験機を用いて、加振中における液状化地盤のせん断強さの計測を行った。

図3に本研究で用いた簡易振動台実験装置を示す。実験装置は既往研究¹¹⁾¹⁴⁾と同様であり、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。ここで、モーターへの電源供給を停止した後、振動は徐々に弱まり約10秒後に完全に静止するため、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。また、本実験では加振中における液状化地盤の挙動を観察するため、未改良の地盤は完全に液状化する程度を入力波を用いる必要がある。そのため、本実験で用いた入力波は図4に示すように周波数が約17Hz、最大加速度が約2.5 m/s²の3次元的正弦波とした。

図5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内の挙動を観察するため、幅500 mm×奥行85 mm×高さ500 mm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 ($D_{50}=0.15$ mm) を層厚が300 mm、相対密度が50%程度の中密な飽和地盤となるように作成した。また、液状化に伴う構造物の変位や地盤内の変位状況を観察する場合には、地盤内を20 mm間隔で着色した。排水性改良体は珪砂2号を金属製メッシュの容器に入れて作成し、土層左端に設置した。ここで、模型改良体の剛性は液状化地盤に比べて十分に高く、珪砂2号による排水性改良体の透水性は約 $k=2.2 \times 10^{-2}$ m/s であり、模型地盤 ($k=6.5 \times 10^{-5}$ m/s) に比べて十分に高い。



図3 簡易振動台実験装置

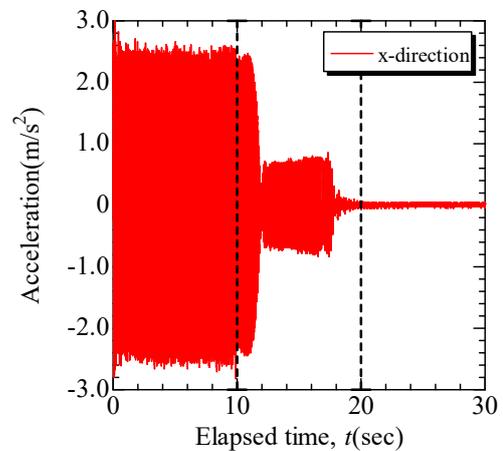


図4 入力加速度（主要動10秒）

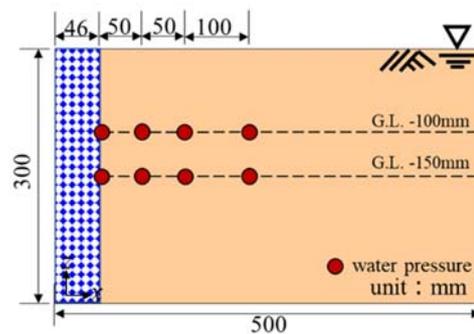
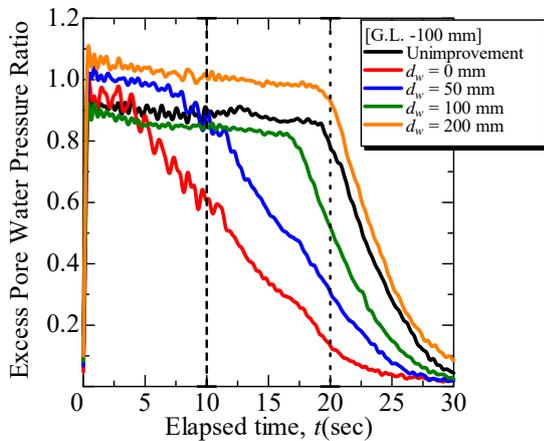


図5 実験概要図

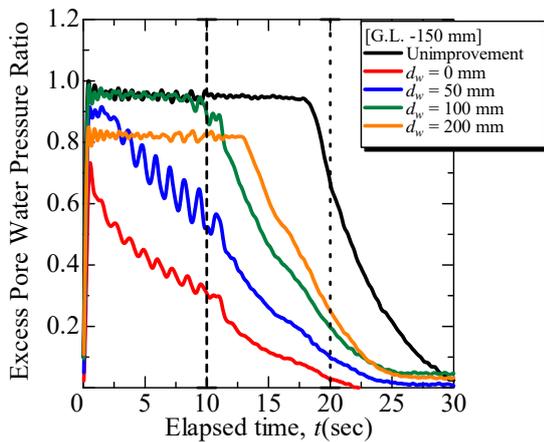
2.2. 排水性改良体による過剰間隙水圧比の抑制効果

本試験では、排水性改良体の排水効果を検討するため、間隙水圧計を G.L.-100mm, および G.L.-150mm の深度で、排水性改良体からの距離 $d_w=0$ mm, 50 mm, 100 mm, 200 mm の位置に設置し、過剰間隙水圧を計測した。なお、本試験では模型構造物は設置せず、主要動は 10 秒間とした。

図 6 に過剰間隙水圧比を示す。G.L.-100mm, G.L.-150mm 共に、排水性改良体に近いほど過剰間隙水圧の抑制効果や早期消散効果が高く表れ、特に深度 z で正規化した排水性改良体までの距離 d_w が $d_w/z \leq 0.5$ 程度の範囲では、加振直後に過剰間隙水圧が 1.0 に到達し液状化したとしても、主要動中(加振開始から 10 秒間)でも水圧が低下し始める。一方で、排水性改良体から遠くなるほど排水効果は徐々に弱くなる傾向にあるが、 $d_w/z < 2.0$ の範囲内であれば未改良地盤よりも過剰間隙水圧の消散が早いことが分かる。



(a) G.L.-100 mm



(b) G.L.-150 mm

図 6 過剰間隙水圧比

2.3. 排水性改良体が液状化地盤の剛性に与える影響

前述したように、排水性改良体に近いほど過剰間隙水圧の抑制効果などが高いことが分かった。しかし、本検討においては排水性改良体を設置した場合においても、地盤内の過剰間隙水圧比はある程度上昇していることが分かる。そこで、本検討では主要動を 10 秒間とし、排水性改良体が液状化地盤の剛性に与える影響について検討を行った。

図 7 に G.L.-150mm における排水性改良体からの距離と液状化地盤のせん断剛性との関係を示す。ここで、本試験では幅 20 mm×高さ 30 mm の小型ベーン試験機を用いて加振中における液状化地盤のせん断強さを計測しており、図の縦軸は未改良地盤の同深度における加振前のせん断強さで正規化した液状化地盤のせん断強さであり、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 である。ここで、前述の通り、液状化地盤の過剰間隙水圧は排水性改良体の効果により加振中においても変化する。そのため、本試験では加振直後から主要動が終了するまでベーンを回転させ、主要動である 10 秒間の中での最大値によってせん断強さを評価した。

排水性改良体の排水効果により、 $d_w/z \leq 0.5$ の範囲では、液状化中においても排水性改良体に近くなるほど急激に地盤剛性が高くなる傾向にあることが確認できる、一方で $d_w/z \geq 1.0$ の範囲では距離に関わらずせん断剛性は同程度の値となり、未改良地盤における加振前の剛性とほぼ同等となった。これは、排水性改良体に近いほど高い排水効果が得られるため、排水性改良体に向かう透水力や地盤密度の増大による効果だと考えられる。また、過剰間隙水圧の計測結果と併せて考えると、 $d_w/z \geq 1.0$ の範囲では排水性改良体によって過剰間隙水圧の消散効果は得られるものの、地盤剛性の増大効果はあまり大きくないと考えられる。

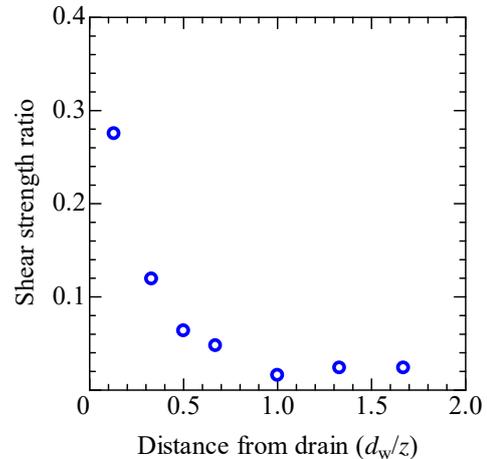


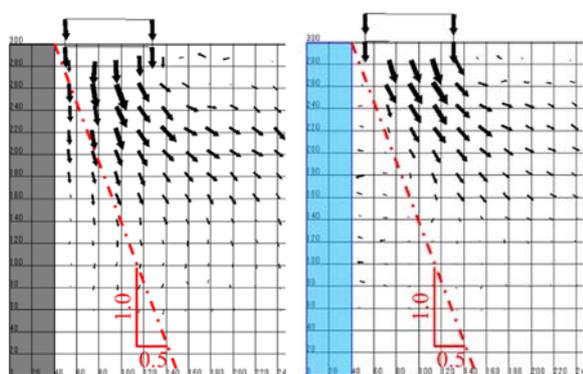
図 7 加振前の未改良地盤に対する加振中のせん断強さ比

2.4. 排水性改良体による地盤内変位の抑制効果

本検討では、地盤内の変位を観察しやすくするために、相対密度が約 35% の緩い飽和地盤を対象に、排水性改良体が液状化地盤の変位抑制効果に与える影響について検討を行った。図 8 に土槽の左端に排水性改良体を設置し、その近傍で液状化により構造物が 20 mm 沈下した時点における地盤内変位を示す。模型構造物には、2 階建ての住宅を想定した平坦なアルミニウム製ブロックを用いており、接地圧は 0.67 kPa である。不透水性改良体を設置した場合は、改良体近傍で下向きの変位のみが発生し、構造物の端部から外側に向け側方流動が発生しているのが確認できる。これは、構造物に近接した不透水性改良体による格子壁の内側では、鉛直変位のみが発生することを意味する。

一方で、排水性改良体を設置したケースでは、 $d_w/z \leq 0.5$ の範囲において地盤内変位が大きく抑制された低流動化領域が形成され、その領域内では排水性改良体に向かったわずかな水平変位のみが発生していることが確認できる。これは、排水性改良体の効果により、排水性改良体に近いほど過剰間隙水圧が抑制され、また改良体に向かう透水力や排水に伴う密度増大効果などにより改良体近傍ではせん断剛性が高いためだと考えられる。

以上より、排水性改良体もたらす過剰間隙水圧の抑制効果が高い領域（図6）や、加振により液状化していてもある程度の地盤剛性が得られる低流動化領域（図7, 図8）などは概ね一致しており、排水性改良体には過剰間隙水圧の抑制効果や早期消散効果、液状化地盤内における低流動化領域の形成等が期待できると考えられる。



(a) 排水ドレーン無し (b) 排水ドレーン有り
図8 地盤内変位（構造物の沈下量：20 mm）

3. 複合型改良体による浮き型格子状地盤改良

3.1. 排水性改良体の深度が対策効果に与える影響

既往研究¹⁴⁾より、構造物の傾斜被害を低減させるには、過剰間隙水圧消散工法を併用するなどして、地盤支持力を確保することが重要であることが明らかとなった。そこで、本研究では不透水性改良体の一部に排水性改良体を組み合わせた「複合型改良体」による浮き型格子状地盤改良を考案した。しかし、効果的な排水性改良体の深度や排水層の比率などは明らかとなっていない。そこで、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、排水性改良体の深度が構造物の液状化対策効果に与える影響について検討を行った。

図9に実験概要図を示し、図10に本検討で用いた接地圧が偏心した模型構造物を示す。ここで、実験土槽や地盤条件、加振条件などは前述した検討と同様である。本実験で用いた模型構造物は平面ひずみ条件を満足するように幅80 mm×奥行80 mm×高さ20 mmのアルミニウム製ブロックの片側に、幅40 mm×奥行80 mm×高さ10 mmのアルミニウム製ブロックを重ねており、接地圧は2階建ての住宅に相当する0.67 kPa（実物で20 kPa）とし、偏心量 e を基礎幅 B で除した偏心比は $e/B = 1/20$ である。また、模型改良体にはアクリル製の不透水性改良体と金属製の

メッシュ、および珪砂2号による排水性改良体を用いた。

ここで、不透水性改良体下部に排水性改良体を配置する場合、不透水性改良体内に鉛直方向の排水孔を複数設けて排水性改良体から地表面へ排水できるようにした。また、一般的な格子状地盤改良のように格子壁体が連結された地中連続壁を想定し、加振中に改良体の間隔が変化しないように改良体を土槽に固定した条件で検討を行った。また、本実験では主要動が3秒間であり、振動が完全に停止するまでは約13秒となる。また既往研究¹¹⁾から、改良間隔 L 、および改良深度 H は効果的な改良効果が得られるように、基礎幅 B に対して $L/B = 1.20$ 、 $H/B = 2.25$ とした。本実験では、未改良地盤（Unimproved）、不透水性改良体だけのケース（Impermeable）、上部排水（Upper drainage）、および下部排水（Lower drainage）の複合型改良体を用いたケースの4ケースとした。

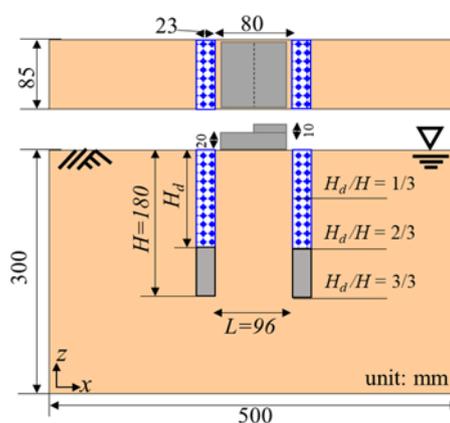


図9 実験概要図（浮き型格子状地盤改良）

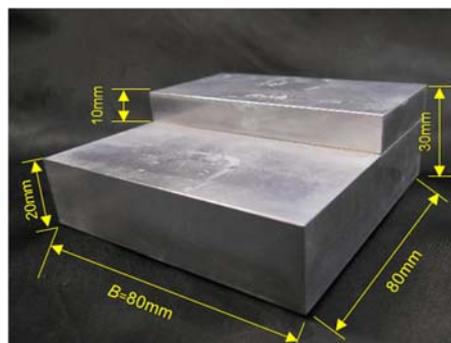


図10 偏心模型構造物

図11に平坦な模型構造物を設置し、排水改良比が1/3となる上部排水と下部排水の複合型改良体を用いた場合の加振3秒後における地盤内の変位を示す。上部排水では、浅層部で若干液状化地盤が変位しているが、中層部以深においては変位が非常に小さいことが分かる。一方で、下部排水では上部排水に比べて地盤全体で変位が大きいたことが分かる。これは、排水層に近いほど排水効果は高くなり、上部排水の場合は構造物の影響を受けやすい地表面付近で高い排水効果が得られるため、構造物の沈下に伴う影響が浅層部ではほぼ収束され、中層部以深への影響が減少したためだと考えられる。

一方で、下部排水の場合は地表面から全改良長の 2/3 の深度までは排水効果が得られないことから、構造物の影響を受けやすい浅層部において地盤の剛性が回復している上部排水に比べて、剛性が低下したままである下部排水の地盤は変位しやすいと考えられる。さらに、下部排水では、深層部へ上部の液状化地盤が流れ込み、改良下端部からの流動を含め全体での変位が大きくなったと考えられる。

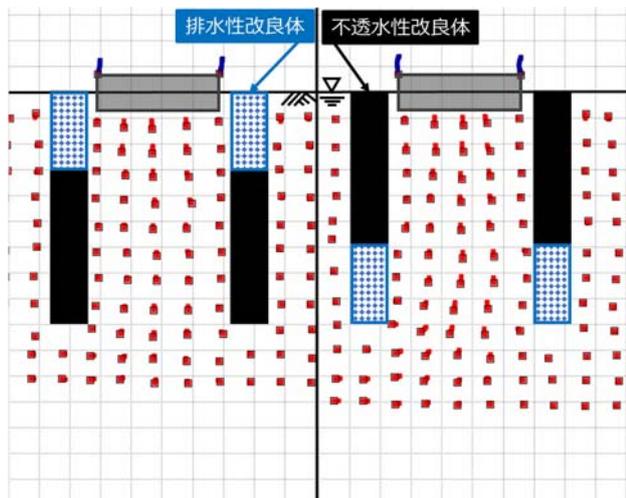
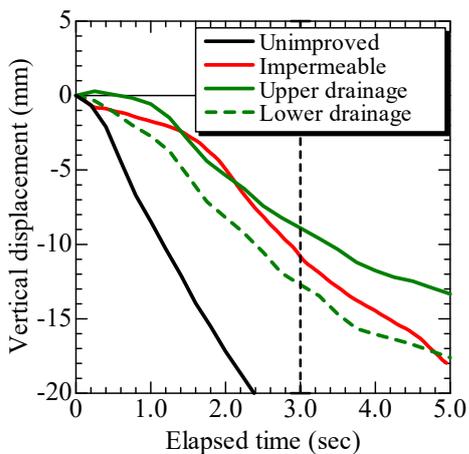
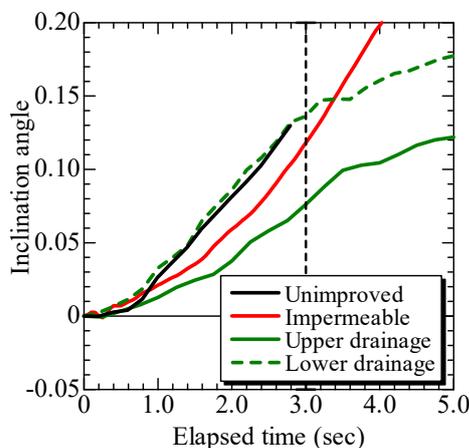


図 11 加振 3 秒後における地盤内変位
(左：上部排水，右：下部排水)



(a) 構造物の沈下量



(b) 構造物の傾斜角

図 12 構造物の平均沈下量および傾斜角（排水深度の影響）

図 12 に未改良，不透水性改良体，上部排水・下部排水の複合型改良体を用いた模型構造物の平均沈下量および傾斜角を示す。不透水性改良体と比べると改良間隔や改良深度が同じであっても，複合型改良体を用いた上部排水や下部排水のケースは排水効果が得られることから，主要動が終了するとすぐに構造物の沈下速度，および傾斜速度が減少していることが分かる。ここで，下部排水のケースは，上部排水のケースよりも沈下被害の抑制効果も傾斜被害の抑制効果も共に小さいことが分かる。これは，前述したように，上部排水では浅層部付近で排水効果が得られることから，構造物の影響を受けやすい表層部付近である程度の支持力が確保され，構造物の回転や沈下に対する抵抗力が得られたためだと考えられる。

以上より，複合型改良体を用いる場合においては，上部に排水性改良体を設置することが望ましいと考えられる。

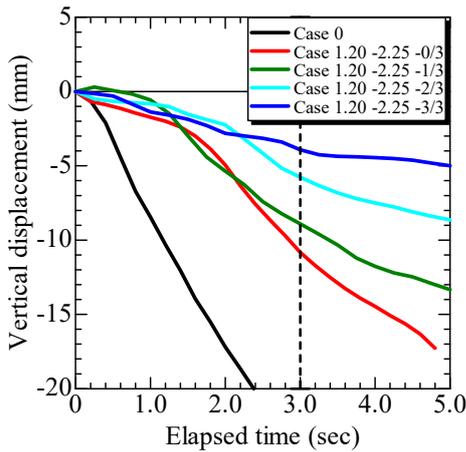
3.2. 排水性改良体の比率が対策効果に与える影響

前述した検討より，複合型改良体を用いた浮き型格子状地盤改良では，排水性改良体を上部に設置したほうが下部に設置するよりも高い液状化対策効果が得られることが明らかとなった。そこで本検討では上部排水型の複合型改良体について，全改良長 H における排水性改良体長 H_a の比率が対策効果に与える影響を検討した。ここで，前述の検討と同様に改良間隔や改良深度は $L/B=1.20$ ， $H/B=2.25$ とし，排水性改良体の割合を $H_a/H=0$ （不透水性改良体）， $1/3$ ， $2/3$ ， $3/3$ （完全な排水性改良体）に未改良地盤である Case0 を加えた 5 ケースとした（表 1）。

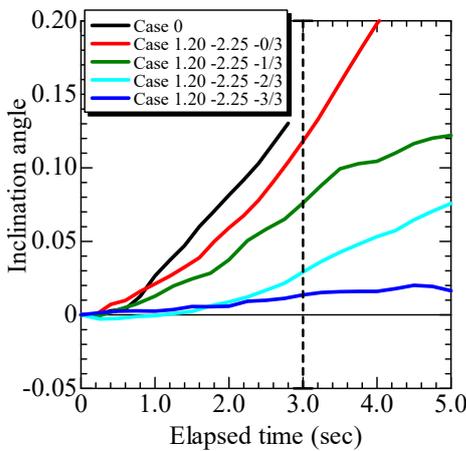
表 1 実験ケース

Case	排水改良比 H_a/H
0	(未改良)
1.20-2.25-0/3	0.00 (不透水性改良体)
1.20-2.25-1/3	0.33 (上部 1/3 が排水性)
1.20-2.25-2/3	0.66 (上部 2/3 が排水性)
1.20-2.25-3/3	1.00 (完全排水性改良体)

図 13 に上部排水の複合型改良体を用いた模型構造物の平均沈下量および傾斜角を示す。図 2 でも示したように，不透水性改良体を用いた Case1.20-2.25-0/3 では側方流動の抑制に伴う沈下被害の抑制効果ほど傾斜被害の抑制効果は得られていない。一方で，改良体の上部に排水性改良体を設置した複合型改良体を用いたケースでは，全ケースで主要動が終了するとすぐに構造物の沈下速度や傾斜速度が減少し，沈下被害や傾斜被害の抑制効果は排水改良比が高くなるにつれて増大する傾向が確認できる。この結果は，図 7，図 8 で示した通り，排水性改良体により形成される剛性の高い低流動化領域は深度が深くなるほど広がるため，排水改良比が高くなるほど低流動化領域の重なりが大きくなったことや，図 11 に示した通り構造物の影響が大きい浅層部付近において高い排水効果が得られ，地盤の支持力が確保されたためだと考えられる。



(a) 構造物の沈下量



(b) 構造物の傾斜角

図 13 構造物の平均沈下量および傾斜角（排水改良比の影響）

4. 結論

本検討では複合型改良体による浮き型格子状地盤改良を対象に、効果的な排水性改良体の設置位置や排水改良比、対策効果のメカニズムを明らかにするため、振動台実験による検討を行った。以下に検討結果を示す。

- 1) 排水性改良体を用いることで、過剰間隙水圧の抑制効果や早期消散効果が得られ、排水性改良体に近いほどその排水効果は高い。
- 2) 排水層の近傍では特に排水効果が高いため、排水層までの距離に応じて加振中においても地盤剛性の回復、また液状化地盤の低流動化領域の形成が期待できる。
- 3) 浮き型格子状地盤改良に複合型改良体を用いる場合において、排水性改良体は深層部ではなく、表層部に設置する方が高い液状化対策効果が期待できる。
- 4) 浮き型格子状地盤改良に複合型改良体を用いる場合において、全改良長に対する排水性改良体の比率が大きくなるほど液状化対策効果は向上する。

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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.I_450-I_455，2012.
- 8) 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.I_432-I_437，2012.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 森河由紀弘ら：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) 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
- 13) 橋本隆雄ら：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
- 14) 中谷一貴ら：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.I_279-I_288，2021