

高摩擦材料を用いた地中連続排水壁による液状化対策効果の検討

Effect of countermeasure against liquefaction with drainage diaphragm wall using high friction material

田中雄也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・27418536@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

高い透水性と摩擦性を有する材料を用いた地中連続排水壁を構造物周辺に設置することにより，液状化時の構造物の沈下被害を抑制可能であることが既往研究^{1)~5)}によりわかっている．しかし，地中連続壁の改良形式やその材料特性が対策効果に及ぼす影響については十分に検討が行われていない．そこで，本研究では地中連続壁にアクリル製の壁状改良体および柱状改良体を用いた簡易振動台実験を行い，改良形式が対策効果に及ぼす影響を検討した．また，地中連続壁に透水性はほぼ同様でありながら摩擦性の大きく異なる粒状体材料に用いることにより，材料の摩擦性が対策効果に及ぼす影響についても検討を行った．検討の結果，地中連続壁は壁状改良の方が柱状改良よりも対策効果が高く，また，壁体に粒状体材料を用いる場合は材料の摩擦性が高いほど対策効果が高いことを確認した．

キーワード：液状化対策，振動台実験，排水工法，地中連続壁

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は日本周辺における観測史上最大の地震であり，津波や液状化など様々な被害が報告^{6)~8)}されている．観測史上最大規模であった液状化による被害においては，内部に空洞があるなどして見かけの比重が地盤より軽いマンホールなどの地中埋設物は浮上り被害が発生し，比重の重い住宅などの地上構造物は傾斜や沈下被害などが多数発生した．また，近い将来に高確率で来襲すると言われている南海トラフ巨大地震においても広範囲にわたり液状化被害が危惧されており，液状化に伴う落橋や構造物の沈下被害，パイプラインの損傷，それらに伴う2次的被害については軽視できない．特に今まで液状化対策があまり行われてこなかったライフラインや戸建住宅などの液状化対策は急務となっているが，戸建住宅などを対象とした液状化対策は施工条件やコストの面で制約が厳しいため，一般的な土木構造物などに比べて十分な検討が行われているとは言い難い．

このような背景の中，本研究では既設小規模構造物などにも適用性が高いと考えられる過剰間隙水圧消散工法とせん断変形抑制工法に着目し，地中連続壁に地震時にお

ける地盤のせん断変形抑制と地盤が液状化したときの流動抑制，さらには過剰間隙水圧の早期消散を期待した対策効果の高い液状化対策方法の検討を行っている．しかし，一般的な地中連続壁は主にセメントなどの固化材を用いた原位置攪拌による改良土によってその壁体は形成されており，高強度ではあるものの透水性は周囲の地盤に比べて著しく低い．また，機械攪拌工法や高圧噴射攪拌工法などの一般的な地盤改良工法やバーチカルドレーン工法などは柱状の改良体あるいは排水層を組み合わせた改良形式が多く，液状化した地盤に対して柱状改良形式がどの程度有効なのかはあまり検討が行われていない．

そこで，本研究では難透水性ではあるが液状化地盤よりも十分剛性が高い一般的な改良土を想定したアクリル製改良体を用いて，柱状の改良体と壁状の改良体による地中連続壁で対策した場合における改良効果を簡易振動台実験により比較し，改良形式が対策効果に及ぼす影響を検討した．また，壁状の改良体による地中連続壁を対象に，ほぼ同じ透水係数でありながら摩擦性が高い破碎瓦と摩擦性が低いガラスビーズによる地中連続壁における改良効果を比較し，地中連続壁に排水性の高い粒状体材料を用いる場合に材料特性が対策効果に及ぼす影響を検討した．

2. 実験装置と実験概要

2.1 実験装置

図1に本研究で用いた簡易振動台実験装置を示す。本装置はインバーター・タイマー付き電源に接続された遠心モーターによる簡易型の振動台実験装置であり、振動の制御は遠心モーターの周波数と電源の ON・OFF のみである。土槽には幅 500mm×奥行 500mm×高さ 500mm の剛土槽を用いた。本研究で行った実験では模型地盤には珪砂 7 号を使用しており、珪砂 7 号の最大粒径は 0.425mm、平均粒径は $U_{50}=0.153\text{mm}$ 、均等係数は $U_c=1.9$ 、透水係数は $k=6.48\times 10^{-5}\text{m/s}$ である。模型縮尺は 1/30 程度であり、模型構造物は幅 140mm×奥行 140mm×高さ 25mm のアルミニウム製で、質量は 1.3kg、接地圧は 0.66kN/m^2 である。また、加振中の模型構造物の変位を計測するために、模型構造物上部にレーザー変位計を 2 箇所設置している。

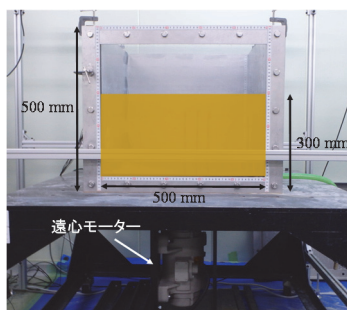


図1 簡易振動台実験装置

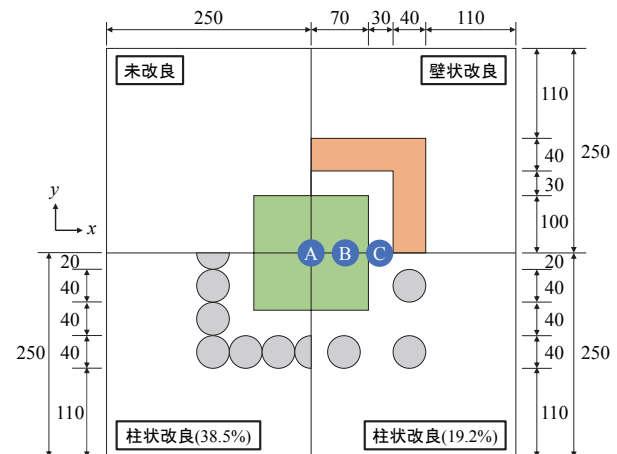
2.2 実験概要

2.2.1 改良形式が対策効果に及ぼす影響の検討

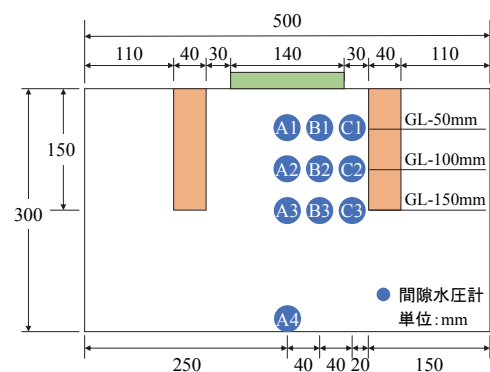
実験ケースおよび実験概要図を表1、図2に示す。また、本実験で使用した改良体を図3に示す。本実験では地中連続壁に一般的な改良土を想定した難透水性で十分に剛性が高いアクリル製改良体を使用しており、アクリル板の厚さは 2mm で中詰め材には珪砂 3 号を使用し、改良体の比重は 1.5 程度に調整している。また、アクリル板表面には地盤材料と同じ珪砂 7 号を塗布することにより、地盤と改良体との摩擦性を確保している。本検討では未改良である Case 0、改良厚さ 40mm で外寸法 280mm×280mm、内寸法 200mm×200mm、高さ 150mm の等厚連続壁とした Case A1、直径 40mm で高さ 150mm の柱状改良体を改良体間隔 0mm（接円形式）で格子状に配置した Case A2、Case A2 と同様の改良体を用いて改良体間隔を改良体 1 本分である 40mm とした低改良型の Case A3 について検討を行った。全ケース共に改良深度は地表面から 150mm で構造物から改良体までの間隔は 30mm である。模型地盤には珪砂 7 号を用いて、締め固めを伴わない水中落下法による緩い飽和地盤を作成した。模型地盤の層厚は 300mm であり、間隙水圧計は図2に示す A～C の 3 地点×3 深度、底板部（A4）の計 10 か所に設置した。

表1 実験ケース（改良形式の検討）

実験ケース	改良形式	改良体	改良率(%)
Case 0	未改良	—	—
Case A1	壁状改良	アクリル製 (難透水)	49.0
Case A2	接円型柱状改良		38.5
Case A3	低改良型柱状改良		19.2



(a) 平面図



(b) 断面図

図2 実験概要図



(a) 壁状の改良体 (b) 柱状の改良体

図3 アクリルと珪砂3号を用いた改良体

図4に入力加速度を示す。入力波は最大加速度が 2m/s^2 程度で周波数が約 20Hz の正弦波であり、遠心モーターの駆動時間（10 秒間）はタイマーで制御されているが、モーターへの電力供給が停止した後も数秒間は振動が続いている。また、振動の終盤で入力加速度が一時的に増加しているのは、実験機の固有周期による影響である。

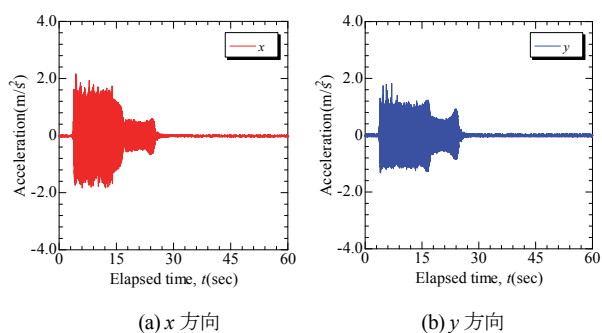


図4 入力加速度

2.2.2 材料特性が対策効果に及ぼす影響の検討

実験ケースを表2に示す。ここで、本検討では改良形式は図2に示す壁状改良体のみとし、壁体の材料には固化材などを用いた一般的な剛性の高い難透水性の改良土ではなく、透水性の高い未固化の粒状体材料を用いた。実験ケースは未改良であるCase 0、壁体材料に摩擦性の高い破碎瓦を用いたCase B1、壁体材料にCase B1と同様の透水性となるように粒度調整を行った摩擦性の低いガラスビーズを用いたCase B2について検討を行った。本検討ではCase B1とCase B2を比較することにより、壁体材料の摩擦性が対策効果に及ぼす影響について検討を行った。

表2 実験ケース（材料特性の検討）

実験ケース	改良形式	改良体	改良率(%)
Case 0	未改良	—	—
Case B1	壁状改良	破碎瓦 (高摩擦性)	49.0
Case B2		ガラスビーズ (低摩擦性)	49.0

ここで、破碎瓦とは規格外瓦を粉碎したリサイクル材料であり、図5や図6に示す走査型電子顕微鏡写真（愛知県陶器瓦工業組合提供・あいち産業科学技術総合センター撮影）が示すように粒子寸法を問わず微小な粒子を含めた全ての粒子が非常に角張った形状をしていることがわかる。また、破碎瓦のベースとなっている粘土瓦は自然粘土を高温焼成して製造されるため、図7に示すように粒子内部において微細な空洞が多い多孔質な粒子であり、土粒子密度は 2.555g/cm^3 と軽い地盤材料である。



図5 破碎瓦微粒子の形状

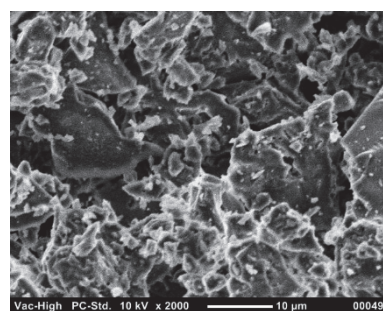


図6 破碎瓦微粒子の形状

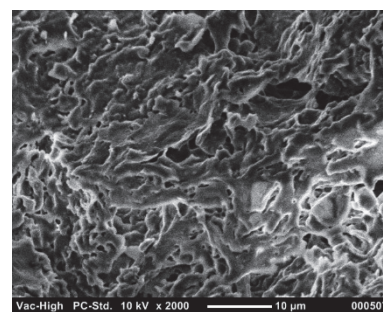


図7 陶器瓦の破断面

図8に破碎瓦とガラスビーズの粒度試験および排水三軸圧縮試験の結果を示す。ここで、本実験では一度水洗いした破碎瓦（0-5mm）を用いている。図8(a)に示す粒度試験結果より、水洗い前の破碎瓦の均等係数は $U_c=10$ を超えており、比較的粒度の良い材料であることが分かる。また、実験に用いた水洗いした破碎瓦の最大粒径は9.5mm、均等係数は $U_c=6.0$ 、曲率係数は $U_c=0.8$ であった。ここで、ガラスビーズは破碎瓦とほぼ同等の粒度分布、透水係数に調整しており、破碎瓦とガラスビーズの透水係数はそれぞれ、 $k=3.26 \times 10^{-4}\text{m/s}$ 、 $k=2.61 \times 10^{-4}\text{m/s}$ であり、破碎瓦は模型地盤である珪砂7号に比べ50倍程度透水係数が高い。図8(b)に示す排水三軸圧縮試験結果より、中密な破碎瓦の内部摩擦角は $\phi=44.02^\circ$ であり、一般的な砂材料に比べ破碎瓦の摩擦性は非常に優れていることが分かる。一方で、中密なガラスビーズの内部摩擦角は $\phi=33.44^\circ$ であり、両者はほぼ同等の透水性を持ちながら、摩擦性は大きく異なっていることが分かる。また、破碎瓦の安息角は 41° 、ガラスビーズの安息角は 23° であった。

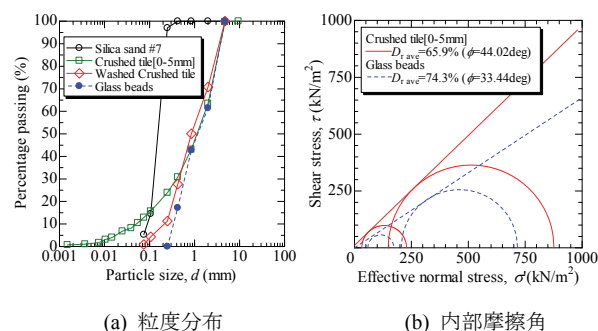


図8 破碎瓦とガラスビーズの比較

3. 実験結果および考察

3.1 改良形式が対策効果に及ぼす影響

図9～12に全ケースにおける地点A～Cの過剰間隙水圧比を示し、図13に入力加速度と構造物中心における鉛直変位量を示す。全ケースにおいて加振開始直後に液化化に至っており、加振終了後も一定時間は高い過剰間隙水圧を保持したままであり、加振終了後も構造物の沈下が進行していることが分かる。しかし、全ケースにおいて液化化は発生しているものの構造物の沈下挙動には大きな差が生じており、加振開始から沈下が始まるまでの時間は未改良のCase 0で約2.6秒、壁状改良のCase A1で約7.4秒、接円型柱状改良のCase A2で約6.8秒、低改良型柱状改良のCase A3で約5.8秒であり、Case A1は特に他のケースに比べ沈下が始まるまでの時間が長いことが分かる。また、構造物の最終沈下量は未改良のCase 0では約20.5mmであったのに対し、壁状改良のCase A1では約12.6mm、接円型柱状改良のCase A2では約17.1mm、低改良型柱状改良のCase A3では約17.5mmであり、未改良であるCase 0に比べ、Case A1では39%、Case A2では17%、Case A3では14%の沈下量を抑制できた。これは、構造物下部地盤を剛性の高い改良体で拘束することにより、液化化時における構造物の沈下に伴う地盤変形や側方流動を抑制することによる効果であると考えられる。

ここで、格子状改良の中でも壁状改良のCase A1と接円型柱状改良のCase A2では、Case A1の方がCase A2よりも改良効果が高いことが分かる。これは、図14に示すように壁状改良であるCase A1では液化化した地盤の側方流動を壁全体で拘束しているのに対し、接円型柱状改良であるCase A2では図15に示すように改良体周囲の地盤が液化化することによって改良体同士の隙間が開き、そこから地中連続壁の外側へ側方流動が生じてしまったためだと考えられる。また、図16に示す低改良型柱状改良においても同様の現象が起きていることが確認できる。

以上より、液化化対策としての地中連続壁には壁式改良の方が接円形式の柱状改良よりも対策効果が高いことが確認できた。また、次項に示す地中連続壁の材料に一般的な難透水性の改良土ではなく高い摩擦性と排水性をもつ粒状体材料を使う場合においても、改良形式は柱状改良ではなく壁状改良の方が有利だと考えられる。

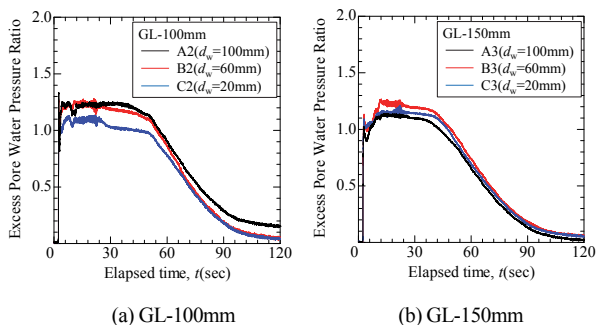


図9 過剰間隙水圧比 (Case 0: 未改良)

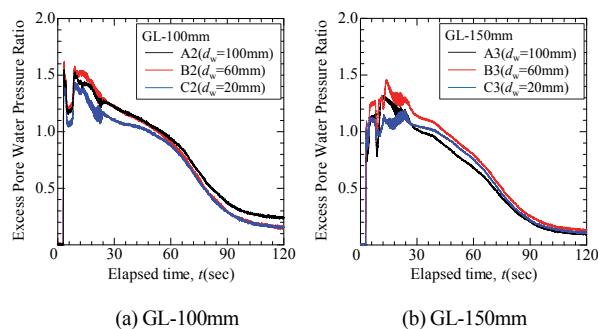


図10 過剰間隙水圧比 (Case A1: 壁状改良)

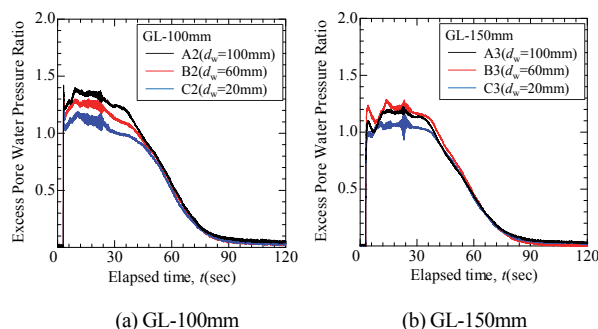


図11 過剰間隙水圧比 (Case A2: 接円型柱状改良)

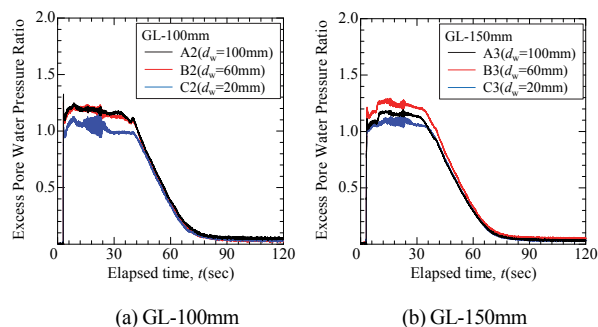


図12 過剰間隙水圧比 (Case A3: 低改良型柱状改良)

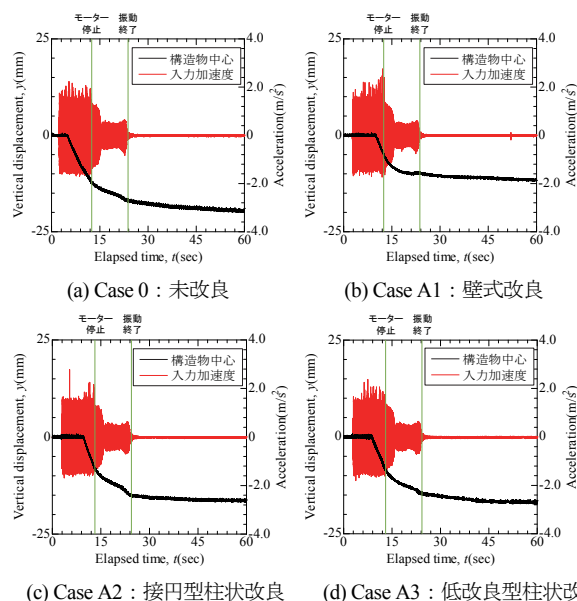
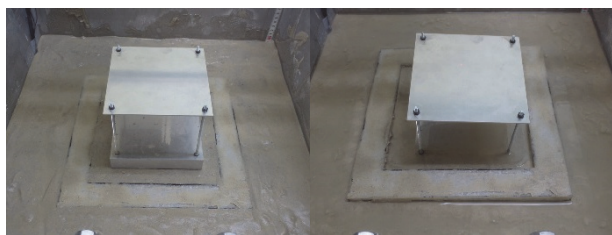


図13 入力加速度と構造物の鉛直変位



(a) 加振前 (b) 加振後
図14 実験状況 (Case A1: 壁状改良)



(a) 加振前 (b) 加振後
図15 実験状況 (Case A2: 接円型柱状改良)



(a) 加振前 (b) 加振後
図16 実験状況 (Case A3: 低改良型柱状改良)

3.2 材料特性が対策効果に及ぼす影響

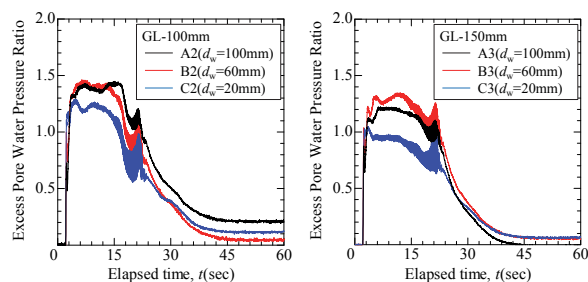
図 17 に実験状況を示し、図 18～19 に Case B1 および Case B2 における地点 A～C の過剰間隙水圧比を示す。ここで、図中の d_w は排水壁から間隙水圧計までの水平距離を示す。両ケースともに図 9 に示す未改良地盤と同様に加振開始直後に全深度で過剰間隙水圧比が上昇しており、液状化に至っていることが分かる。しかし、未改良地盤が加振終了後においても一定時間は高い過剰間隙水圧を保持したままであったのに対し、排水性材料で液状化対策を行った Case B2 および Case B3 においては加振終了後すぐに過剰間隙水圧の消散が始まっており、特に排水壁近傍である地点 C2 や地点 C3 では加振中においても過剰間隙水圧の消散が始まっており、同一深度においても壁体近傍の方が過剰間隙水圧が小さいことから、壁体に向かって水平方向に水の流れが生じていることが確認できる。

図 20 に入力加速度と構造物中心の鉛直変位量を示す。構造物の最終沈下量は未改良である Case 0 では前述したように約 20.5mm であったのに対し、地中連続排水壁に摩擦性の高い破碎瓦を用いた Case B1 では約 14.9mm、摩擦性の低いガラスビーズを用いた Case B2 では約 18.9mm であり、構造物周辺を排水性材料で対策を行うことにより、

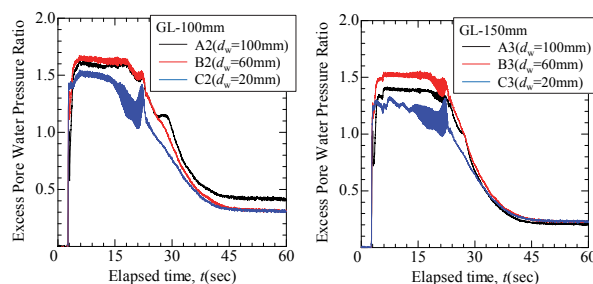
Case B1 で約 27%、Case B2 で約 8%の沈下量を抑制できた。また、加振開始から沈下が始まるまでの時間は Case 0 では約 2.6 秒、Case B1 で約 4.5 秒、Case B2 で約 3.8 秒であった。また、排水性材料で対策を行った Case B1 や Case B2 では沈下している時間が未改良地盤に比べて 1/5 程度と非常に短いことが分かる。これは、排水性地中連続壁により構造物下部あるいは周囲の地盤の過剰間隙水圧を早期に消散させた効果であると考えられる。



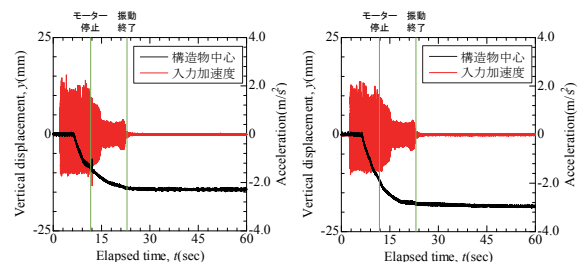
(a) Case B1: 破碎瓦 (b) Case B2: ガラスビーズ
図17 実験状況



(a) GL-100mm (b) GL-150mm
図18 過剰間隙水圧比 (Case B1: 破碎瓦)



(a) GL-100mm (b) GL-150mm
図19 過剰間隙水圧比 (Case B2: ガラスビーズ)



(a) Case B1: 破碎瓦 (b) Case B2: ガラスビーズ
図20 入力加速度と構造物の鉛直変位

図 21 に加振終了後における地盤内の状況を示す。構造物を設置しない実験では液状化した地盤内の変状は沈下以外に見られなかったが、図 21(a)に示す未改良地盤に構造物を設置した実験では構造物の沈下に伴い構造物下部地盤は側方向に大きく変状していることが分かる。一方で、図 21(c)に示す摩擦性と透水性の高い破碎瓦を用いた地中連続壁で対策を行ったケースでは、未改良地盤に比べて側方流動を抑制していることが分かる。しかし、図 21(e)に示す破碎瓦と同様の透水性でありながら摩擦性の低いガラスビーズを用いた地中連続壁で対策を行ったケースでは、構造物下部地盤の側方流動をあまり抑制できていない。側方流動の程度は未改良である Case 0、摩擦性の低いガラスビーズを用いた Case B2、摩擦性の高い破碎瓦を用いた Case B1 の順に小さくなっており、これは構造物の沈下量にも対応している。よって、地中連続壁に粒状体材料を用いる場合には、側方流動を抑制するために透水性に加え摩擦性も高い材料を用いる必要があると考えられる。

ここで、加振中においては壁体周囲の地盤が完全に液状化しており、粒状体からなる地中連続壁はある程度崩壊することも考えられたが、構造物の沈下に伴い排水壁には変形が生じているものの、崩壊には至っていないことが確認できる。これは、壁体自身やその周辺地盤における過剰間隙水圧の消散と剛性回復、さらに排水壁に向かう透水力による効果であり、排水性材料は液状化地盤内においても崩壊しにくいと考えられる。



(a) Case 0 : 構造物有り



(b) Case B1 : 構造物無し

(c) Case B1 : 構造物有り



(d) Case B2 : 構造物無し

(e) Case B2 : 構造物有り

図21 加振終了後における地盤内の状況

4. 結論

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過剰間隙水圧消散工法とせん断変形抑制工法に着目し、地中連続壁の改良形式や材料特性が対策効果に及ぼす影響について簡易振動台実験装置を用いて検討を行った。以下に検討によって得られた知見を示す。

- 1) 構造物の周囲から地中連続壁による液状化対策を行う場合、柱状改良よりも壁状改良の方が効果的である。
- 2) 地中連続壁に高い排水性を与えた場合、壁体や壁体周辺地盤の過剰間隙水圧を早期に消散可能であり、沈下している時間を大幅に低減可能である。
- 3) 地中連続壁に粒状体材料を用いる場合、側方流動に伴う沈下量を抑制するため壁体材料には排水性に加え高い摩擦性を有する材料を用いる必要がある。
- 4) 排水性材料からなるパーチカルドレーンなどは過剰間隙水圧消散効果と自身に向かう透水力の効果によって、液状化地盤内においても崩壊しにくい。

参考文献

- 1) Y. Morikawa, K. Maeda and F. Zhang: Countermeasure due to liquefaction using crushed tile, Geotechnical Special Publication of American Society of Civil Engineers (ASCE) on Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering, June, vol. 240, pp.208-218, 2014.
- 2) Y. Morikawa, K. Maeda and F. Zhang: EFFECTIVENESS OF CRASHED TILE IN COUNTERMEASURE AGAINST LIQUEFACTION, International Journal of GEOMATE, Vol.7, No.1, pp.1003-1008, 2014.
- 3) 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.I_437-I-448, 2015.
- 4) 森河由紀弘, 田中雄也, 前田健一, 張鋒, 佐藤智範: 排水性材料による地上構造物の液状化対策, 第 50 回地盤工学研究発表会, pp.1809-1810, 2015.
- 5) 田中雄也, 森河由紀弘, 前田健一, 張鋒, 佐藤智範: 排水性材料による埋設構造物の液状化対策, 第 50 回地盤工学研究発表会, pp.1811-1812, 2015.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 安田進・原田健二・石川敬祐: 東北地方太平洋沖地震による千葉県の被害, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.103-115, 2012