

人工排水材による液状化時のボイリング被害 抑止工法の地表面変状抑制効果の検証

Binh NGUYEN¹・佐々 真志²・上野 一彦³・浅田 英幸⁴・田代 聡一⁵

¹正会員 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: tangthanbinh.nguyen@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 動土質研究グループ長
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

³正会員 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

⁴正会員 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター(〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町 1-3)

⁵正会員 東亜建設工業(株) 土木事業本部設計部(〒163-1031 東京都新宿区西新宿 3-7-1)

本工法は地震時の液状化に伴うボイリング発生を抑制し、地表面の大きな変状や起伏が生じるのを防ぐことで、被災救助の緊急車両や復旧工事車両等の通行を可能にすることを目的としている。既報では遠心模型実験と浸透流解析により、人工排水材の打設間隔 1.2m、打設長 3.0m の条件で、液状化層から上層への水圧の伝播を防ぎボイリングを抑制可能なことを確認し、液状化の発生自体を抑止する従来型の排水工法に対し、改良仕様を大幅に低減できることを示した。本研究ではボイリングの被害、即ち、地表変状をどの程度抑制しうるかを定量的に評価検証した結果、最大不陸量は 1 割以下に留まり、人工排水材を用いた本工法の適用により、ボイリングによる地表面変状を 9 割抑制しうることを実証した。

Key Words : sand boil, vertical drain, liquefaction, surface deformation, centrifuge model test

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震の地震後調査では、液状化時のボイリング被害として噴砂の堆砂厚さは30 cm程度、地盤の沈下量は30~50 cm程度生じたことが報告されている¹⁾。このような地盤変状に伴い道路が大きく起伏して車両の通行ができなくなり、被災救助または復旧活動に支障をきたすことが考えられる。ひいては、人命救助活動が遅滞し、社会経済活動の継続性を確保できないことで、地震による被害の拡大が懸念される。

上記を背景として、筆者らは2017年より人工排水材(プラスチックドレーン。以下、ドレーンとする)を用いた液状化時のボイリング被害抑止工法の開発に取り組んでいる²⁾。液状化時のボイリング現象のメカニズムとして、地震動により中深部の地盤が液状化し、上昇した間隙水圧が地表面へ伝播していくことにより噴砂・噴泥が発生することが知られている。本工法では人工排水材を地盤表層部に打設することで表層地盤の透水性を高め、中深層地盤で上昇した間隙水圧を速やかに地表面へ消散させ、改良層内の水圧を一定程度低減させることでボイリングを抑止する。本工法では液状化の発生を許容しつつ、ボイリング現象を抑止することで地表面変状を抑制し、巨

大地震時に緊急車両等の通行を確保することを目指している。液状化発生により沈下等の被害が生じるため、許容変位・沈下が厳しい構造物は適用外となるが、ある程度の変位・沈下を許容しうる場所、例えば、道路全般、駐車場、港湾の荷さばき地、工場内の作業ヤード・資材ヤード等は本工法の適用対象となる。

既往研究³⁾では人工排水材の打設間隔1.2 m、打設長3.0mの条件で、液状化層から上層への水圧の伝播を防ぎボイリングを抑止可能なことを定性的に確認している。本研究では、本工法の有効性についてさらに確かめるため、地表面変状抑制効果に焦点を当てた一連の遠心模型実験を実施しており、以下では、地表面変状抑制の定量的な評価検証結果について記述・考察している。

2. 実験条件

ボイリングに関する模型実験では、地震動を模擬する動的模型実験で液状化時のボイリング現象を再現する研究が数多く実施されたが⁴⁾、実際のような地表面への噴砂現象とその被害を再現するには至っていない。液状化時のボイリング現象は地盤の粒径特性、不均質性などに依存することが要因であると考えられる。代替案として、

水頭差を利用して上向き浸透流でボーリング現象を再現することが多い¹⁾。筆者らは当該研究でボーリング現象の再現とドレーン材設置の有効性の検証に際し、遠心力場において、動的实验²⁾と上向き浸透流実験を実施した。既往研究と同様に動的实验では地震後地表面への水圧伝播を再現できたものの、噴砂に伴う地表面の変状の再現までは至らなかった。一方、浸透流実験³⁾では噴砂現象と共にボーリング被害の特徴である地表の盛り上がりや亀裂を再現している。本実験ではボーリングによる地表面変状抑制を評価する目的で、既報²⁾と同様に上向き浸透流によりボーリング実験を実施し詳しく検証した。

(1) 実験装置

図-1に遠心実験模型と実験装置を示す。図-2に遠心模型実験で使用した剛土槽の断面図と平面図を示す。図-1に示すように土槽上部の注水タンクから、模型地盤底面の2箇所より注水し、水頭差で上向き浸透流を与えた。注水口は模型地盤の左右側面から12cm(模型寸法)離れた場所に設置した(図-2)。注水タンクからの水流が地盤に直接作用しないように透水層として礫層(D₅₀=15mm)を設け、注水口にはアクリル板を設置して減勢させている。注水により水面が上昇し、所定の高さを超えると水が越流槽(図-2)に流れ、一定の水面(地表面の2.5cm上)

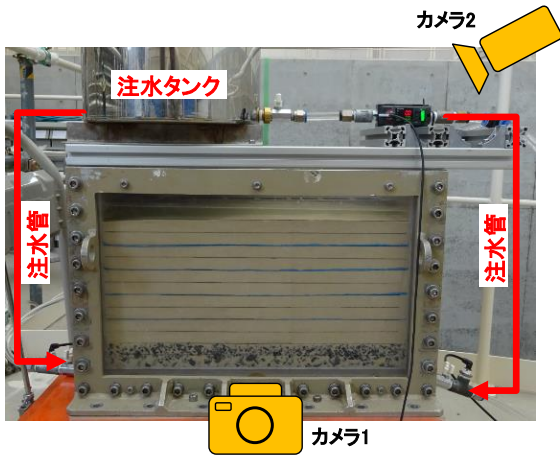


図-1 遠心実験模型と実験装置

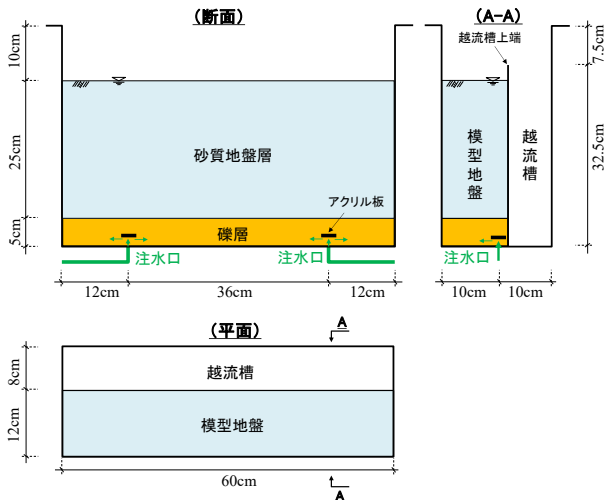


図-2 遠心模型実験の土槽の断面図と平面図 (模型寸法)

を保つようにした。この越流層内の水が溢れるまで約300秒間注水した。遠心力場20gの実験中の模型地盤の挙動とボーリング発生状況を観察するため、模型地盤の正面と上面にカメラを設置した(図-1)。

(2) 模型地盤

図-3に模型地盤の代表的な断面図と平面図を示す。遠心模型実験は遠心力場20gで行い、図-3に示す寸法は実物換算値である。既報³⁾と同様に、層厚5mの緩詰め砂質地盤層として、気中落下方式により相対密度D_r=40%(ρ_{sat}=1.925g/cm³)の模型地盤を東北珪砂7号で作成した。ボーリングによる地盤内の変動を土槽正面のカメラ1で

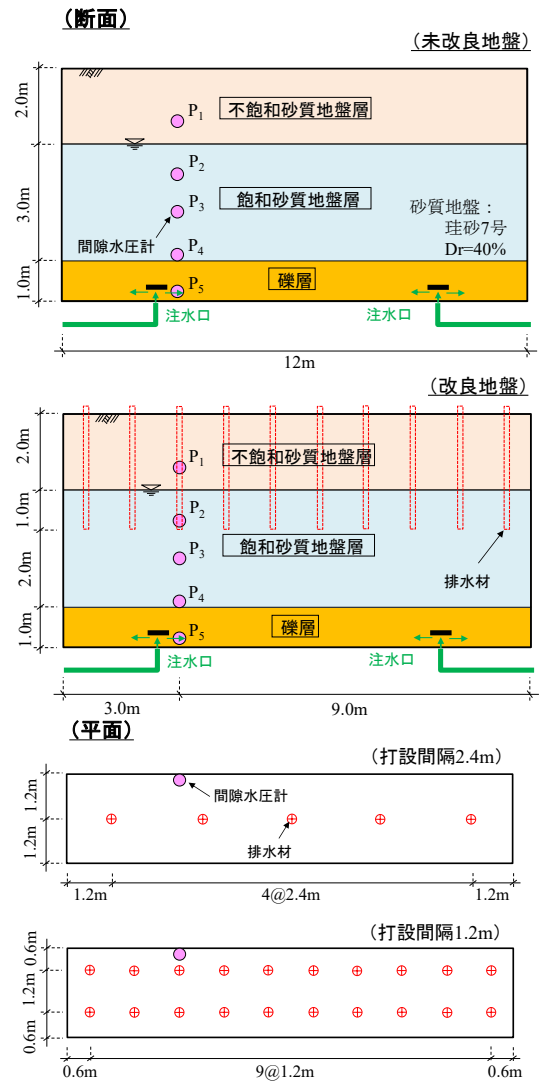
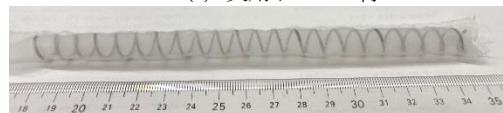


図-3 遠心模型地盤の断面図と平面図 (実物換算値)



(a) 実用ドレーン材



(b) 模型ドレーン材

図-4 人工排水材 (実用と模型)

識別できるように地盤内に間隔 50 cm (模型寸法: 2.5 cm) 毎に薄い色砂層を水平に撒き出した。また、同カメラで撮影した動画を用いて、ボイリングによる地盤変形挙動を PIV 解析で評価した。間隙水は、相似則を踏まえ水の 20 倍の粘性に調整したグリセリン水溶液を使用した。

ボイリング被害抑止工法で実用するドレーン材⁶⁾ (内径 100 mm、透水係数 $k=4$ m/s) を図-4(a)に示す。既往実験^{2,3)}で使用した模型ドレーン材 ($\phi 10$ mm、透水係数 $k=1$ m/s) を図-4(b)に示す。既往実験でボイリング抑止には透水係数 1 m/s のドレーン材 (地盤の透水係数: 0.0001~0.01 m/s の場合) が十分に機能することが確認されている。一方、ドレーン内径の影響に関しては、浸透流解析で内径を 100~200 mm の間で変化させて、地盤内の水圧分布を分析した結果、ドレーン内径に関わらず地盤内の水圧分布はほぼ一定であったことから、上記の範囲内ではドレーン内径の影響が小さいことが分かった。よって、本実験では既往実験と同様の模型ドレーンを用いた。

地盤内の水圧挙動を把握するため、図-3 に示すように深度方向 5 個所に間隙水圧計を設置した。これらの水圧計がボイリングによる地盤変形と共に動いてしまうことを防ぐため、水圧計を土層側面に固定した(図-3)。また、注水状況を確認するため注水経路に流量計を設置した。

模型地盤はまず 1 g 場で気中落下により作成し、遠心力場 (20 g) で注水タンクから地盤底面に繋がった通路を通してグリセリン水溶液の注水を行い、所定の高さまで地盤を飽和させた。次に、遠心加速度を一旦 1 g 場に下げた後、レーザー変位計により地表面の高さを測定した。そして、遠心加速度を再び上げ、20 g の遠心力場に到達後、注水タンクの弁を開き、水頭差による地盤底面に所定の動水勾配で上向き浸透流を与えた。この際の初期動水勾配 i は 1.5~1.8 であり、砂質地盤の限界動水勾配 i_c ($=0.66$) の 2.3~2.7 倍に相当した。注水終了後、注水タンクの弁を閉じ、遠心加速度を 1 g 場に下げた後、表面水を排水させ、実験後の地表面の高さをレーザー変位計で測定した。

実験ケースを表-1 に示す。事前検討として、注水条件 (動水勾配と注水速度) を Case 1 と Case 2 で検討した。既往実験³⁾ではボイリングを抑止できた際に、改良層直下にレンズ状の水塊が生じ、改良地盤層がある程度浮き上がった後、水塊内の水が消散することにより地表面が大きく変状した。これはドレーンの排水性を注水速度 (流量: 10~12 L/min) が上回り、この強制注水による改良地盤層の浮き上がりを発生させたことが要因である。実際の地震作用では地盤層が強制的に浮き上がることはないといえるが、本研究の実験目的であるボイリング抑止による地表面変状抑制効果を正しく評価するため、このような水塊が生じない適切な注水条件について検討した。そして、ボイリング被害に関する地下水面の影響につい

て Case 3 (不飽和層厚 1 m) と Case 4 (不飽和層厚 2 m) で確認している。Case 4~7 では排水材の改良仕様をパラメータとして、地表面変状抑制効果を評価した。なお、Case 5, 6, 7 の改良仕様は既往実験の結果³⁾を参考にして、用いたドレーン材の配置を図-3 に示す。

3. 実験結果

(1) 予備検討

Case 1 と Case 2 では完全飽和地盤において一定の初期動水勾配 ($i=1.5$) で注水流量を 0.3~12 L/min の範囲内で変化させ、Case 1 はボイリングの発生、Case 2 はボイリングを抑止できる一方水塊が生じない条件で、適切な注水条件を探った。その結果、ドレーンの透水性に相当する注水流量 3 L/min 程度と初期動水勾配 $i=1.5$ とすることで上記の条件を満たすことが分かった。従って、Case 3~7 の実験はこの一定の注水条件で実施した。

Case 3 と Case 4 の実験結果を図-5~図-7 に示す。図-5 にカメラ 1 で撮影した実験前と実験中の地盤の様子を示す。Case 3 では既往実験³⁾と同様に注水により地盤の流動化およびボイリングの発生を確認できた。一方、Case 4 ではボイリングが土槽正面付近に発生せず、カメラ 1 では確認できなかったが、カメラ 2 (図-5) から複数回のボイリングの発生が確かめられた。実験中に測定した間隙水圧の経時変化を図-6 に示す。同図に注水開始、注水完了および初回のボイリング発生のタイミングも記載している。注水開始とともに地盤全体の水圧が上昇して、最初のボイリングが生じた直後、水圧が地表面付近で消散し、水圧がある程度減少した。この初回ボイリングの発生タイミングについて Case 3 は 350 秒 (注水 20 秒間)、Case 4 は 400 秒 (注水 70 秒間) の時点であり、いずれのケースでも水圧の伝播によって表層地盤が飽和する過程でボイリングが発生した。即ち、不飽和層全体が完全に飽和してからボイリングが生じるのではなく、表層が完全に飽和しなくても局所的な水圧伝播でボイリングの発生が確認された。レーザー変位計により測定した実験前後の地表面高から、実験後の地表面変状 (実験前後の地表面高の差) を算定した結果 (実物換算値) を図-7 に示す。レーザー測定は土槽奥行方向の 3 測線で計測した。それぞれの測線での変位量は異なるが、変状傾向はほぼ同様である。Case 3 ではボイリングが地盤正面右側に発生したため地表面も同サイドだけが大きく変状した一方、Case 4 では複数個所でボイリングしたため地表面が全体的に変状した。変位量は Case 3 で最大の沈下量 -0.20 m、隆起量 +0.20 m、Case 4 で最大の沈下量 -0.29 m、隆起量 +0.16 m と大きく生じた。過去の地震後の調査結果⁷⁾では液状化時に伴う噴砂により最大の隆起量は 0.3 m 程度、

最大の沈下量は0.3~0.5 m程度と報告されており、本実験の結果と同様のオーダーである。本検討では上向き浸透流によりボイリング現象を誘起したが、以上から地震時のボイリングによる被害を概ね再現できたといえる。

(2) 地表面変状の評価実験

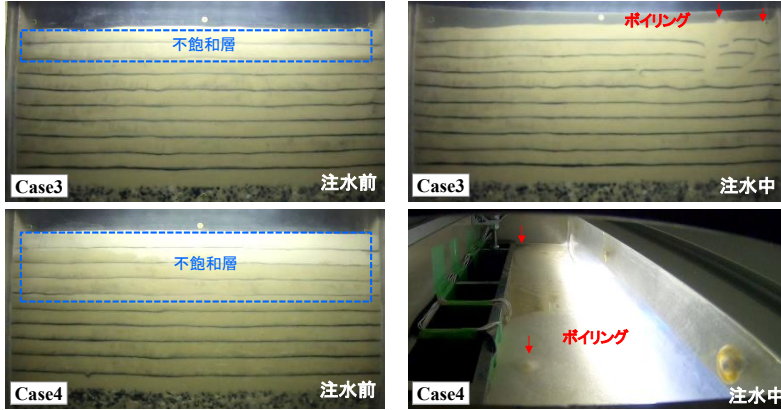


図-5 実験前と実験中の地盤の様子(Case 3, 4)

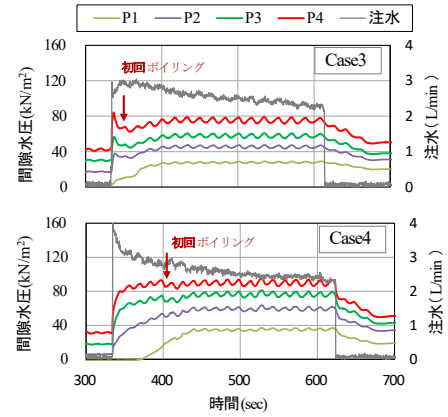


図-6 間隙水圧の時刻歴(Case 3, 4)

表-1 遠心模型実験のケース一覧 (実物換算値)

| Case | 地盤条件 | 排水材 | 打設 間隔 | 打設長 | ボイリング 発生の有無 |
|--------|----------|-----|----------|-------|----------------|
| 1 (予備) | 完全飽和 | 無 | 未改良 | | - |
| 2 (予備) | 完全飽和 | 有 | 1.2 m | 3.0 m | - |
| 3 (予備) | 不飽和 : 1m | 無 | 未改良 | | 有 |
| 4 | 不飽和 : 2m | 無 | 未改良 | | 有 |
| 5 | 不飽和 : 2m | 有 | 1.2 m | 3.0 m | 無 |
| 6 | 不飽和 : 2m | 有 | 2.4 m | 3.0 m | 有 |
| 7 | 不飽和 : 2m | 有 | 1.2 m | 1.5 m | 有 |

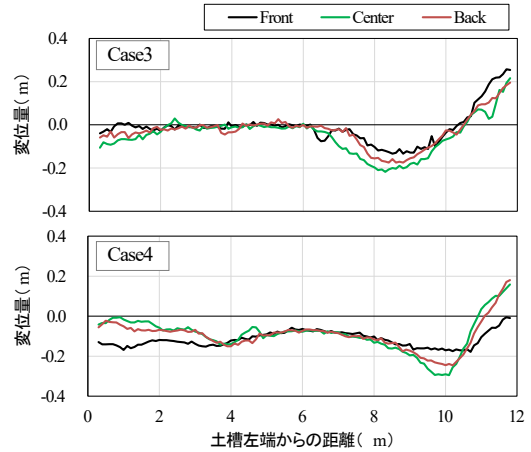


図-7 実験後の地表面の変位量(Case 3, 4)

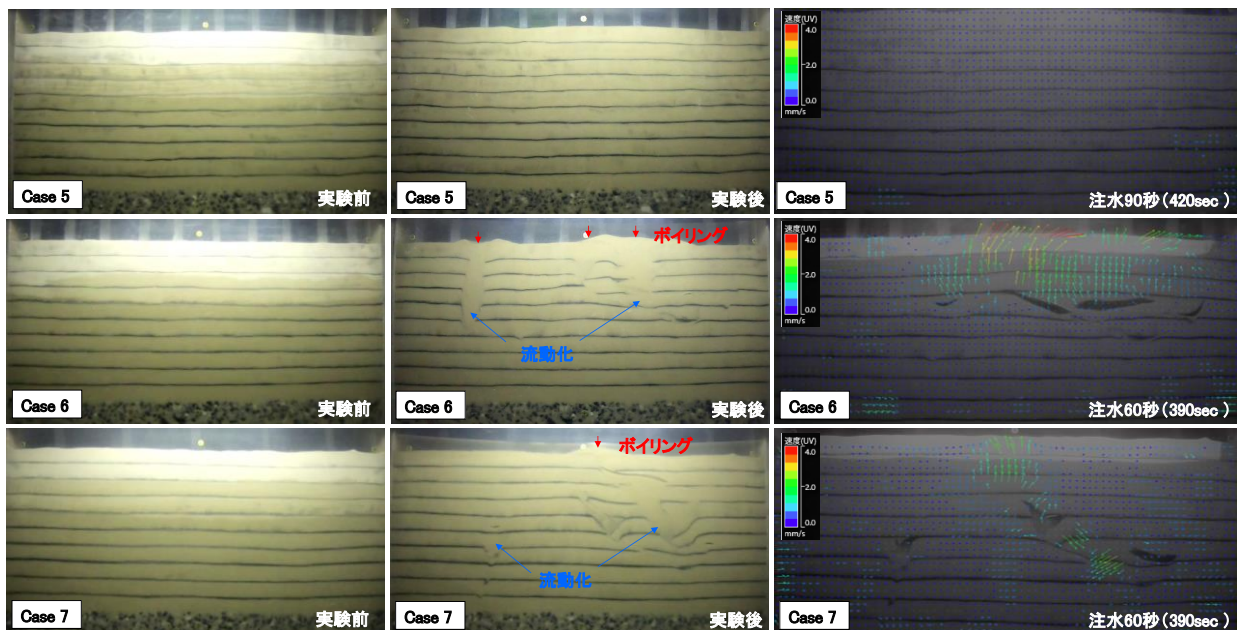


図-8 実験前後の地盤の様子と PIV 解析結果

複数個所で発生したことが確認された。図-8に示すように Case 6 と Case 7 では地盤内の流動化により水平色砂層が広い範囲で乱れた。また、地盤流動に伴う地盤内変状を PIV 解析で評価し確かめている。地盤内が流動する前後の PIV 解析結果 (図-8) から、Case 5 と比較して、Case 6 と Case 7 (注水 60 秒) では地盤流動により地盤内が大きく変状したことが分かる。

計測した間隙水圧の経時変化を図-9に示す。まず、ボーリングを抑制した Case 5 に着目すると、ドレーンを打設した改良層は排水層として有効に機能することで浅層地盤内の水圧 (水圧計 P1) は他のケースより小さいことが分かる。改良層の排水効果は改良下端まで (水圧計 P2) 影響するが、水圧の減少は P1 より小さい。水圧計 P2 で計測した間隙水圧から静水圧を除いた過剰間隙水圧と初期鉛直有効応力を図-10に示す。Case 5 では初期鉛直有効応力 (ボーリングに対する抵抗力) に相当する過剰間隙水圧が発生し、他のケースではボーリングの影響によりこれを上回る過剰間隙水圧が発生している。未改良地盤部の水圧 (P3 と P4) は逆の挙動が生じている。即ち、ボーリングが発生したケース (Case 4, 6, 7) よりボーリングが発生しなかった Case 5 の水圧がやや高い (図-9を参照)。これは、ドレーンにより改良層内の間隙水圧の低減で、改良地盤の剛性および有効応力が保たれることで、改良層の自重が有効上載圧として作用するため、その分深層部の水圧が大きくなったことが考えられる。よって、ボーリングを抑制したケースの未改良中深部の水圧特性は、改良層の排水機能が有効にしていることを示しているといえる。また、ボーリングが発生したケース (Case 4, 6, 7) では前述のように注水により水圧が上昇して、ボーリングが発生した直後、水圧が減少することを水圧計 P3 と P4 で確認した。一方、未改良 Case 4 と異なり Case 6 と Case 7 では注水当初の水圧 (P4) は Case 5 と近いレベルで発生し、ドレーンの排水効果が一定程度機能したが、これらの改良仕様では水圧上昇の抑制機能が十分に有効ではないため、ボーリング抑制効果は期待できない。

実験後の地表面変状を図-11に示す。土槽中心の測線のみを代表として、同図に Case 4, 5, 6, 7 の地表面変状の比較を示した。また、それぞれのケースの沈下量、隆起量および不陸量の最大値 (隆起と沈下の最大値の差) を

表-2に示す。ボーリングが発生した Case 4, 6, 7 では地表面が大きく変状したのに対して、ボーリングを抑制した Case 5 では概ね一様の沈下が生じており、その量も僅かである。不陸量について未改良 (Case 4) は 0.45 m であるのに対してボーリング被害抑制工法による改良仕様の Case 5 は 0.03 m であり、最大不陸量を 9 割以上抑制した

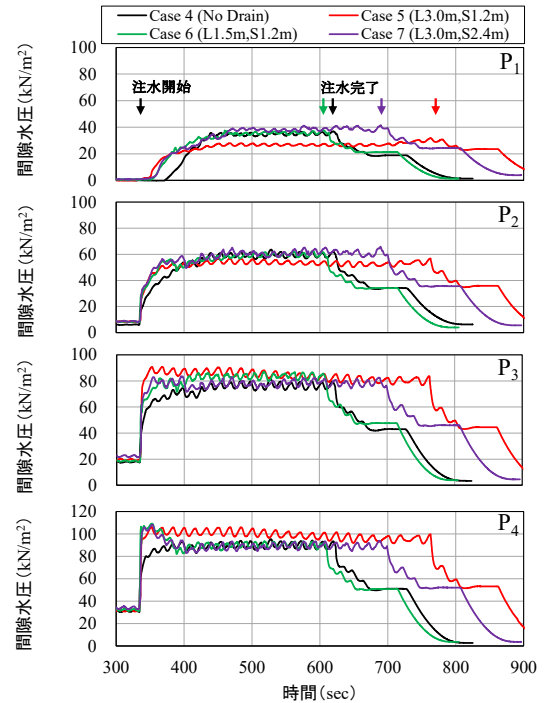


図-9 間隙水圧の時刻歴 (Case 5, 6, 7)

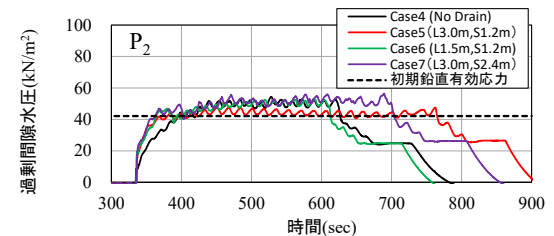


図-10 過剰間隙水圧比の時刻歴 (P2)

表-2 地表面の最大不陸量 (実物換算値)

| Case | 地表面の鉛直変位 (m) (「-」: 沈下, 「+」: 隆起) | | 地表面の最大不陸量 (m) |
|------|------------------------------------|-------|------------------|
| | 最大値 | 最小値 | |
| 3 | 0.22 | -0.22 | 0.44 |
| 4 | 0.16 | -0.29 | 0.45 |
| 5 | 0.00 | -0.03 | 0.03 |
| 6 | 0.10 | -0.29 | 0.39 |
| 7 | 0.09 | -0.24 | 0.33 |

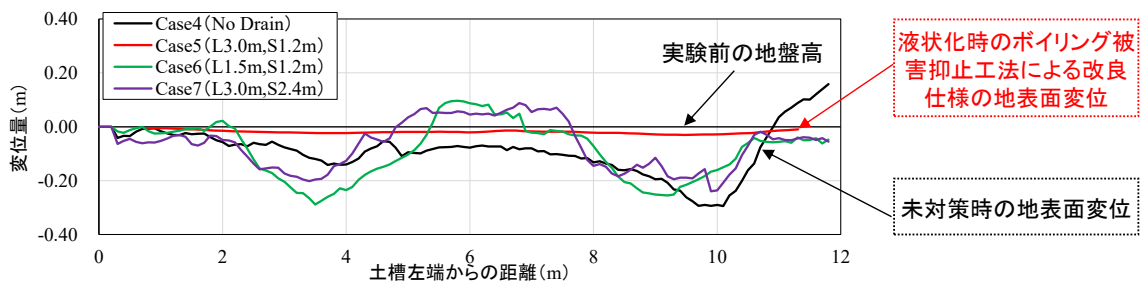


図-11 実験後の地表面変位 (Case 4, 5, 6, 7 の土槽中心測線)

ことが確認された。Case 5 の沈下量は、改良層直下の未改良部（層厚 2 m）が注水により液状化した後の排水に伴う沈下量（層厚の 1.5%）である。液状化による排水に伴う地盤の体積ひずみが一般的に 3%程度（対象地盤層が全体液状化する場合）生じることが知られている⁷⁾が、地盤表層に非液状化層（厚さ 3 m 以上）が存在する場合、液状化による被害が小さいことが過去の地震後調査結果から分かっている⁸⁾。本実験ではドレーンによる表層改良層が液状化の伝播を抑制した非液状化層となり、結果として体積ひずみが 1.5%程度に留まったといえる。また、地盤条件に応じて未改良部が厚いほど沈下量が大きくなるが、これは一様の沈下であり車両の通行には影響が小さいと考えられる。本工法の目的は、液状化による沈下はある程度許しつつ車両通行可能なレベルに地表面変状・凸凹を抑えることであり、上述の実験結果からドレーン材を用いた本工法により、最大不陸量を未改良地盤の場合の 1 割以下に抑えられ、緊急車両などの通行性および作業性を十分に確保できることといえる。

4. 結論

人工排水材を用いた液状化時のボーリング被害抑止工法の有効性を検証するため、地表面変状の抑制を定量的に評価することを目標に一連の遠心模型実験を実施した。未改良地盤の最大不陸量 0.45 m に対して、ボーリングを抑制した改良地盤（改良仕様：打設深度 3.0 m，打設間隔 1.2 m）では数 cm レベルの沈下が生じたものの、地表面の不陸量は 9 割程度抑制できることが実証された。したがって、本工法はボーリングによる表面変状を大きく抑制することで被災後の災害救助車両や復旧工事車両の通行性を確保可能であり、従来の液状化対策工法と比べ、大幅にコストと工期を削減できることから、BCP 防災に

有効な工法といえる。今後、本工法を実務に適用するためこれまでの検討結果を踏まえ設計方法を確立していく。

謝辞：本研究は、港湾空港技術研究所とDEPP研究会の共同研究の枠組みで実施したものである。同研究会所属の各機関から多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 石川敬祐, 安田進: 東北地方太平洋沖地震による東京湾岸エリアの噴砂特性に関する考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 68 巻, 4 号, p.1_274-I_281, 2012.
- 2) 佐々真志, 山崎浩之, 林健太郎, 吉岡保弘: 人工排水材を用いた液状化伝播・ボーリング被害抑止工法の研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.73, No.2, pp.1_276-I_281, 2017.
- 3) Nguyen Binh, 佐々真志, 山崎浩之, 上野一彦: 人工排水材による液状化時のボーリング被害抑止工法の解析と実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No.2, pp.1_235-I_240, 2019.
- 4) 山口晶, 吉田望, 飛田善雄: 液状化に伴う噴砂と液状化層厚の関係, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.79-89, 2008.
- 5) Nuradi, A.P., Sassa, S., Nguyen, B., Ueno, K.: Dynamic centrifuge model tests on the application of drain method to prevent sand boil due to liquefaction, JSCE 2020 Annual meeting, No.III-120, 2020.
- 6) Nuradi, A.P., Nguyen, B., Ueno, K., Asada, H., Yamauchi, Y., Suzuki, T.: Permeability behavior of drain materials used for preventing sand-boil due to liquefaction, JSCE 2021 Annual meeting, CS2-07, 2021.
- 7) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of settlement in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soil and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992.
- 8) Ishihara, K.: Stability of natural deposits during earthquakes, 11th Int. Conf. on S.M.F.E, Vol.1, pp.321-376, 1985.

(Received February 3, 2022)

(Accepted May 9, 2022)

EVALUATION OF THE REDUCTION IN THE GROUND SURFACE DEFORMATION BY APPLYING THE SHALLOW VERTICAL DRAIN TO PREVENT SAND BOILS INDUCED BY LIQUEFACTION

Binh NGUYEN, Shinji SASSA, Kazuhiko UENO,
Hideyuki ASADA, Soichi TASHIRO

Authors have been developing a countermeasure using shallow vertical drain (PVD) to prevent destruction owing to sand boils induced by liquefaction. This method aims to protect the ground surface from large deformation or unevenness induced by sand boils, in order to ensure the transportability of vehicle used for human rescue and post-earthquake recovery activities. In our previous studies, the application of the vertical drain (spacing of 1.2m; length of 3.0m) showed a sufficient effect on preventing sand boils caused by the upward propagation of pore water pressure. Since the vertical drain is only applied in the shallow soil layer in this method, in contrast to the conventional countermeasure against liquefaction, the less use of PVD would result in a lower construction cost. The effect of the method on reducing the ground surface deformation/unevenness by 90% has been demonstrated in this study.