

# 人工排水材による液状化時のボイリング被害 抑止工法の解析と実験

Binh NGUYEN<sup>1</sup>・佐々 真志<sup>2</sup>・山崎 浩之<sup>3</sup>・上野 一彦<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: tangthanhbinh.nguyen@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup> 正会員 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技研究所 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)  
E-mail: sassa@pari.go.jp

<sup>3</sup> 正会員 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技研究所 特別研究主幹  
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)  
E-mail: yamazaki@pari.go.jp

<sup>4</sup> 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: kazuhiko.ueno@mail.penta-ocean.co.jp

筆者らは、人工排水材(プラスチックドレーン)による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。本研究では、既報の1G場模型実験に引き続き、本工法の設計法確立を目的として浸透流解析および遠心模型実験を実施した。その結果、地盤表層から3.0mの浅層部に打設間隔1.2mでドレーンを敷設することで、液状化の発生は許容するものの、地盤表層に液状化は伝播せず、ボイリングによる噴砂も抑制できることが確認された。液状化の発生自体を抑止する従来のドレーン工法と比較すると仕様は大幅に減るため、工期やコストの削減にも大きく寄与することが期待される。

**Key Words :** sand boil, vertical drain, liquefaction, seepage analysis, centrifuge model test

## 1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震により、東京湾岸エリアでは液状化現象が発生し、至る所でボイリングによる噴砂が生じてライフラインに甚大な被害を与えたことは記憶に新しい<sup>1)</sup>。今後も南海トラフ地震や首都直下地震等、震度6弱から震度7の強い揺れを伴う地震が発生した場合、沿岸部の埋立地等では大規模な液状化被害が懸念されるため、国や地方自治体により防災対策が進められているが、財政が逼迫する中、多額の費用を必要とする従来型の人命や建物等の資産保全を最優先とする防災整備事業には限界がある。そのため、災害に対してある程度の被災は許容しつつ、社会経済活動の持続性確保や早期復旧再開を目的としたBCP(事業継続計画)が注目されている。

この様な背景の中、筆者らはBCP防災技術に資するものとして人工排水材(プラスチックドレーン。以下、ドレーンとする)による液状化時のボイリング被害防止工法の開発に取り組んでいる<sup>2)</sup>。ところで、液状化対策と

してのドレーン工法は、間隙水圧消散工法の一つとして既に確立、実用化されている<sup>3)</sup>。これは、地盤にドレーンを打設し、地盤全体としての透水性を高め、地震時の繰返しせん断により生じる過剰間隙水圧を速やかに消散させる効果を期待した工法である。したがって、改良対象とする地盤全域にドレーンを打設する必要がある。一方、筆者らが取り組んでいる本工法は地盤浅層部のみにドレーンの打設を留めて施工コストを抑え、未改良部分については液状化の発生を許すものの、液状化の伝播やボイリングによる噴砂を抑止することで、地盤表層の変状を極力抑えることを期待した工法である。そのため、変形が許されない重要構造物に対する液状化対策工としては不向きではあるが、緊急車両が通行しうる道路全般や港湾あるいは民間工場のヤードなど、緊急時や復旧時のBCP活動において必要最低限の作業性が確保されていれば良い施設に対しては有用な対策工といえる。

筆者らは、既報<sup>2)</sup>において1G場の模型実験と浸透流解析によりドレーンによるボイリング抑止効果を定性的に確認している。本研究では、設計法を確立することを目的に、ドレーンの効果を定量的に評価することを目指し

た。まず、浸透流解析によりドレーン仕様（打設深度と打設間隔）について感度分析を行い、続いて感度分析の結果を基に、ボーリング抑止効果が期待できるドレーン仕様について、実物と同等の応力状態を再現できる遠心模型実験によりドレーンの効果を評価した。

## 2. 浸透流解析

### (1) 解析条件

地震時のボーリングは地震により発生した過剰間隙水圧が地盤上方へ伝播することによって生じるが、本研究では既報<sup>2)</sup>と同様に、地盤下端から上向き浸透圧を与えることでボーリング現象をモデル化した。図-1に代表的な解析モデルを示す。層厚 5.0 m 相当の緩い飽和砂地盤 ( $D_r=40\%$ ) を想定し、その下に層厚 1.0 m の礫層を設けた。ドレーンによるボーリング抑止効果、すなわち、過剰間隙水圧の伝播に伴う地盤上層の間隙水圧の抑制効果について感度分析することを目的に、ドレーンの打設長を 1.0~3.0 m、打設間隔を 0.5~3.5 m の範囲とし、打設長と打設間隔の組み合わせで表-1 に示すような解析ケースを設定した。なお、モデル寸法と地盤材料の物性値は後述する遠心模型実験と条件を合わせている。ドレーンの透水係数は間隙水圧消散工法で使われる一般的なドレーンを想定し、DEPP 工法技術資料<sup>5)</sup>を参考にして設定した。また、既往の研究<sup>6)</sup>によると限界動水勾配  $i_c$  の 1.5~3.5 倍の動水勾配を与えるとボーリングが確認されている。既報<sup>2)</sup>においても  $2.0i_c$  でボーリングが発生したことから、本解析でも動水勾配は  $2.0i_c$  とし、 $2.0i_c$  に相当す

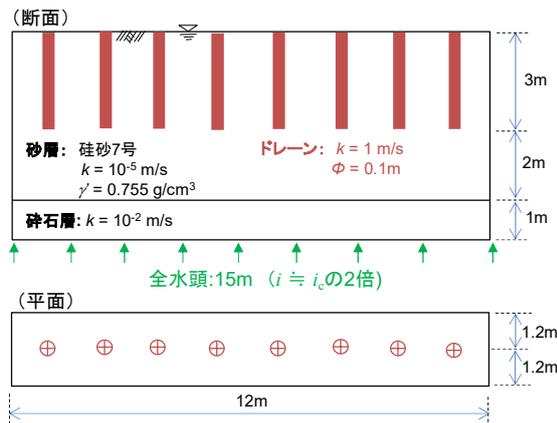


図-1 解析モデル断面図・平面図

表-1 解析ケース一覧

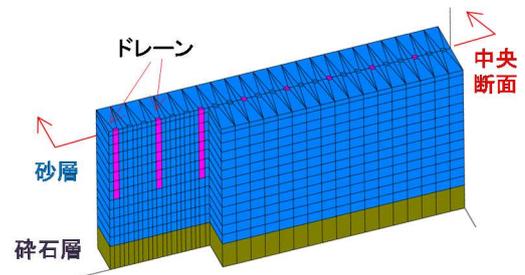
打設深度 (m)	ドレーン打設間隔 (m)				
	未改良	0.5	1.2	2.4	3.5
未改良	○	-	-	-	-
1.0	-	○	○	○	○
2.2	-	○	○	○	○
3.0	-	○	○	○	○

る 15 m の全水頭を砂礫層下端に与えて定常解析（解析コード：Unsaf）を実施した。

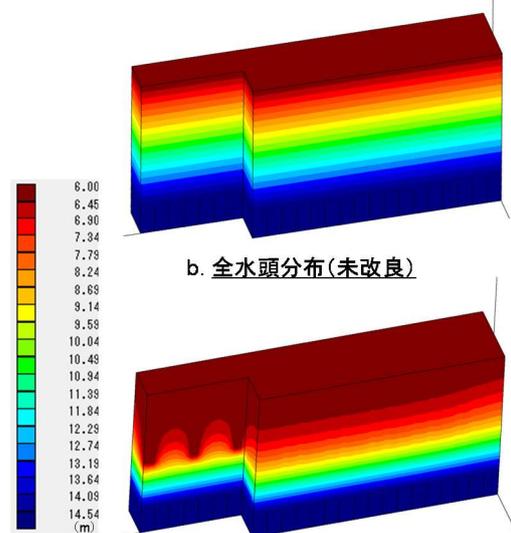
### (2) 解析結果

図-2(a)に解析モデルのメッシュ図、図-2(b), (c)には、解析結果のうち、一例としてドレーン無し（未改良）ケースとドレーン有りケースについて、全水頭のコンター図を示す。図-2(b)と(c)を比較すると、ドレーンを設けたケースのほうがモデル全域において全水頭は相対的に低い。また、ドレーンを設けたケースにおいてもドレーン周辺が最も全水頭が低く、ドレーンから離れるに従い全水頭の値は上昇している。当然の結果といえるが、透水性が高いドレーンを敷設することで、地盤内の間隙水圧の上昇を抑制する効果が確認できる。

図-3には打設深度が 1.0 m と 3.0 m、打設間隔が 1.2 m と 2.4 m のケースについて、中央断面（ドレーン杭芯を



a. 地盤モデル



b. 全水頭分布(未改良)

c. 全水頭分布(ドレーン有)

図-2 解析モデルメッシュ図および解析結果一例

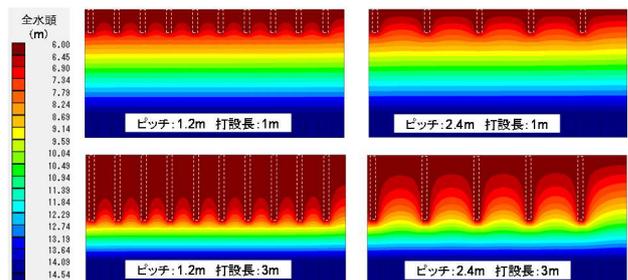


図-3 全水頭コンター図

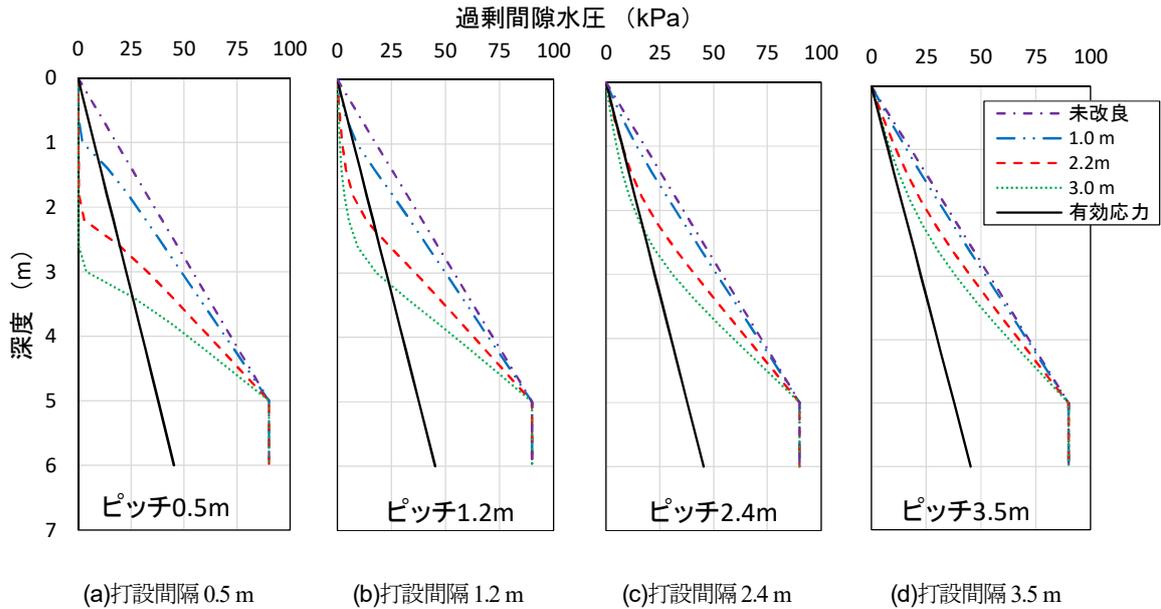


図4 過剰間隙水圧の深度分布

切る断面)における全水頭分布のコンター図を示す。まず、ドレーン打設長が1.0 mの場合について、ドレーンの打設間隔に着目すると、ドレーン打設間隔が広がるほど、ドレーンとドレーン間の全水頭の値は相対的に上昇している。また、打設長が1.0 mと短いこともあって、打設間隔によらず、全水頭上昇の影響は地表面近くまで及ぶ結果となっている。打設長が3.0 mのケースにおいても同様の傾向が見て取れる。ただし、打設長1.0 mのケースと比較すると、鉛直方向への影響範囲は打設長3.0 mのケースのほうが大きい。すなわち、ドレーンの打設長が長いほど、また、打設間隔が短いほど、地盤上層の間隙水圧の上昇が抑えられる効果が高いといえる。

ここで、このような過剰間隙水圧の伝播に伴う地盤上層の間隙水圧の上昇を抑えるための効率的なドレーン打設長および打設間隔について考察する。各解析ケースの計算結果において、ドレーン打設間隔の中間点における間隙水圧の値から静水圧を引いた値を過剰間隙水圧とし、図-4に過剰間隙水圧の深度分布図として示す。なお、図中には初期有効応力の深度分布も併記した。この図において、過剰間隙水圧が初期有効応力を上回るか否かでドレーンの有効性を判断した。まず、ドレーン打設間隔が0.5 mのグラフを見ると、各ドレーン打設長ともに、打設深度内においては過剰間隙水圧を概ねゼロに抑えることができているが、ドレーン打設下端からは深度が深くなるに連れて過剰間隙水圧が大きくなる結果となっている。続いて打設間隔1.2 mのグラフを見ると、いずれのドレーン打設長も過剰間隙水圧の値は大きくなっている。初期有効応力分布を下回るのは打設長2.2 mと3.0 mである。打設間隔2.4 mでは打設長3.0 mが初期有効間隙水圧分布と同等か若干下回る程度で、他の打設長については、

いずれの深度でも上回った。打設間隔3.5 mでは、すべての打設長で初期有効応力分布を上回った。

本工法の目的である「地表面変状をBCP活動に支障を来たさない程度に抑える」には、地表面に作用する荷重を考慮した支持力検討が別途必要になる。ここでは、仮に一般的な車両荷重として10 kN/m<sup>2</sup>程度を想定し、幅2.438 mの浅い基礎(港湾基準によりコンテナの標準規格)として支持力検討をすると、すべり線は地表からおおよそ2.0~3.0 m程度の深さに生じると推測される。したがって、少なくとも表層から深さ3.0 m程度の範囲の過剰間隙水圧の上昇、伝播を防ぐことが求められる。よって、今回の解析結果のうち、上記の趣旨に合致し、最も効率的なドレーン仕様は打設間隔が1.2 m、打設深度が3.0 mのケースといえる。なお、打設間隔については後述の遠心模型実験と整合性を持たせており、断面奥行き方向は考慮しない2次元断面としての評価となる。

### 3. 遠心模型実験

#### (1) 実験条件

浸透流解析と同様に、地盤下方から上向き浸透圧を与えることでボイリング現象を再現した。図-5にモデル地盤の断面図および平面図を示す。モデルの縮尺は1/20であり、実物換算したモデルスケールは浸透流解析モデルと合わせている。底版に通水経路を備えた剛土槽内に、まず、透水層として礫層( $D_{50}=15$  mm)を設け、その上に液状化層として砂地盤(7号珪砂,  $\rho_{sat}=1.925$  g/cm<sup>3</sup>,  $D_r=40$ %)を気中落下法により作成した。なお、地盤中には5.0 cm層厚毎に色砂を薄く撒き出し、土槽側面から地盤の変形状況を確認しやすくした。地盤作成後に底版

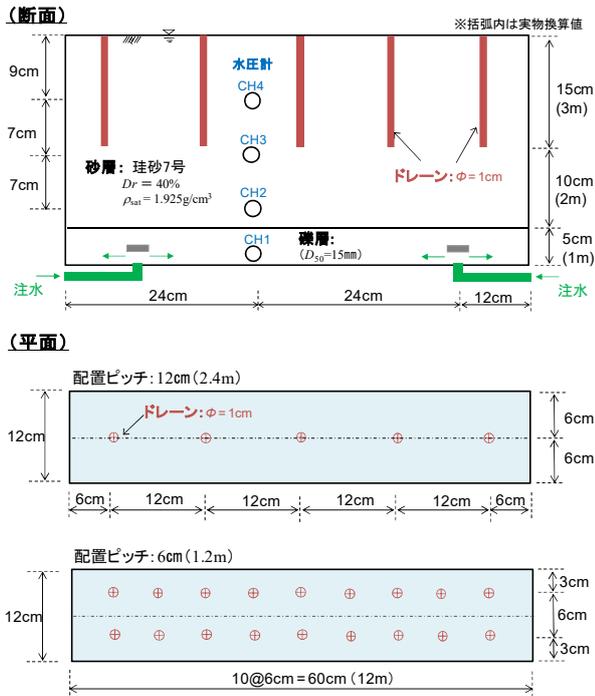


図-5 遠心模型地盤断面図・平面図

の通水経路から脱気したグリセリン水溶液を浸透させて地盤を飽和させている。ドレーンは既往の研究<sup>28)</sup>を参考に、レース素材でφ10mm程度の筒状布袋の中に、針金をスプリング状に加工したものを芯材として入れて使用した。なお、ドレーンの透水係数は $k=1\text{ m/s}$ である。図-6にドレーンの写真を示す。ドレーンは地盤作成前に土槽内の所定の位置に糸で吊って固定し、砂を気中落下させながら埋設している。表-2に実験ケースを示す。各ケースは浸透流解析結果を反映してドレーンの打設長と打設間隔を決めている。ただし、ドレーン打設間隔については土槽寸法との兼ね合いから水平方向に排水距離が等しくなるような配置を優先させた。実験は図-7に示すようにグリセリン水溶液を入れたタンクを土槽の上端部に設置し、タンクと土槽底版の通水経路を接続した上で、20Gの遠心力場に到達後、タンクの弁を開放し、水頭差を利用してグリセリン水溶液を土槽底版から注水、地盤内上向きに浸透させた。なお、この時の初期動水勾配 $i$ は1.5であり砂質土層の限界動水勾配 $i_c$ の2.3倍に相当する。実験中の計測項目は、図-5に示す位置に設置した間隙水圧計とグリセリン水溶液の注水経路に設置した圧力計および流量計、土槽側面と上面からの動画撮影である。

(2) 実験結果

図-8には撮影した動画から地盤内の流動状況やボイリングの発生状況を切り出した静止画を示す。case1(未改良ケース)では、グリセリン水溶液注水開始後、砂地盤下層部に流動が発生し、その流動は徐々に地盤上層に伝播していき、地盤表層に近づくると地表面が盛り上がり、



図-6 模型ドレーン

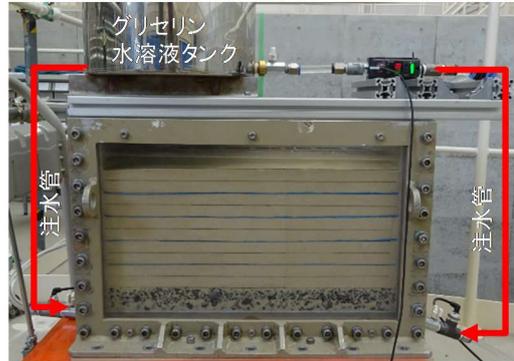


図-7 遠心模実験模型および実験装置

表-2 実験ケース一覧

Case	ドレーン	ピッチ	打設長
1	無	—	—
2	有	6.0 cm (1.2 m)	15.0 cm (3.0 m)
3	有	12.0 cm (2.4 m)	15.0 cm (3.0 m)
4	有	6.0 cm (1.2 m)	7.5 cm (1.5 m)

※括弧内は実物換算値

最終的には噴砂が確認された。この一連の現象は、注水を開始してから止めるまでの間、複数個所で複数回発生した。case3 および case4 においても case1 と同様の現象が確認されている。

一方、case2 では図-8(b)に示すように注水開始後に砂地盤下層部にレンズ状の水塊が生じた。水塊は上部の地盤を持ち上げながらある程度の大きさに発達すると、ドレーンを通じて地盤表面に排水すると同時に水塊が急速に消滅した。水塊が発生して消滅するまでの間、色砂層は乱れておらず、他のケースで生じたような地盤の流動およびその伝播や噴砂の形跡は確認されなかった。これは、砂地盤下層部では過剰間隙水圧が生じるものの、ドレーンが排水層として有効に機能し、ドレーン改良層に過剰間隙水圧が伝播するのを防ぎ、剛性が保たれていたためといえる。

図-9には間隙水圧計の時刻歴と有効応力(初期全応力の計算値から間隙水圧計の計測値を引いたもの)の時刻歴を示す。なお、図中には注水開始と停止のタイミングを赤い矢印で記してある。まず、図中、送水管内圧力(CH09 黒線)の注水後の値は、case2の初期状態を除くと、いずれのケースでも150 kPa程度の値となっており、所定の動水勾配が作用していたと判断できる。次に地盤中に設置した間隙水圧計の挙動に着目する。case1では注

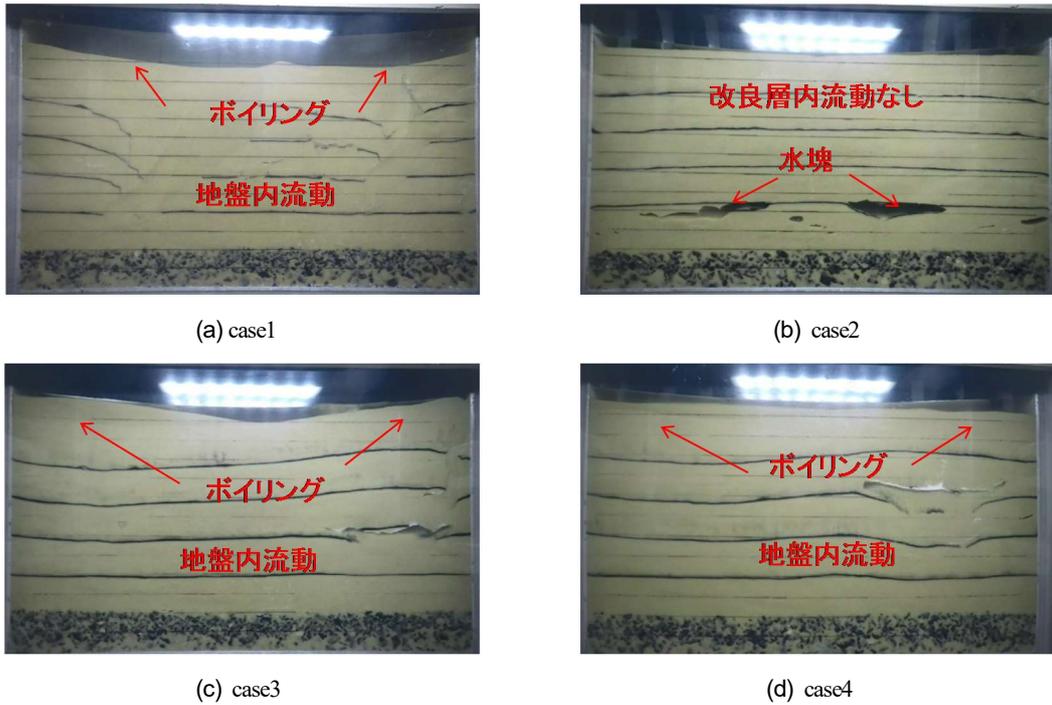


図-8 地盤内の流動およびボイリング発生状況

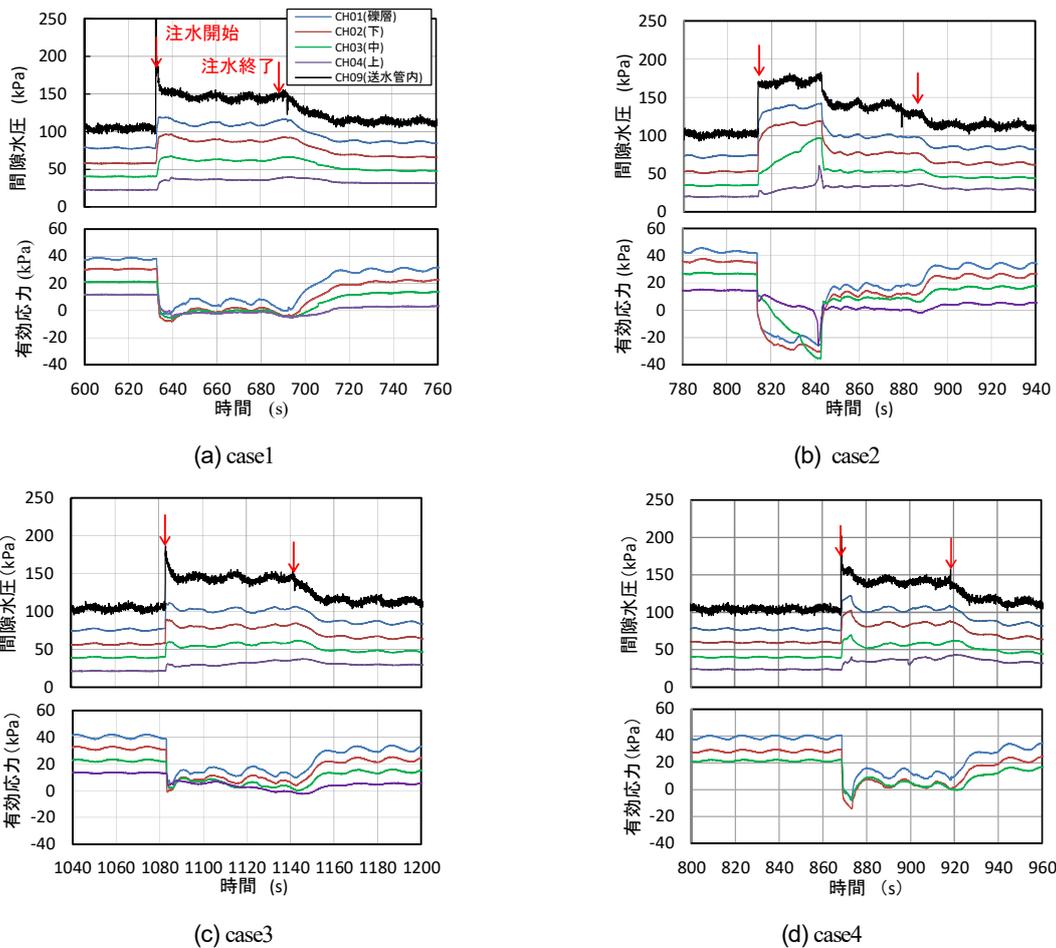


図-9 間隙水圧および有効応力の時刻歴

水開始と同時に間隙水圧が上昇、有効応力は砂地盤の全深度でほぼゼロとなり、注水中はこの状態が持続し、注水を停止すると間隙水圧も消散を始め、有効応力が徐々に回復していく様子が確認できる。case3 と case4 も同様の傾向にある。ただし、注水後の有効応力は 0~10 kPa 程度にあり、所々、多少の剛性は残していると推測する

に回復していく様子が確認できる。case3 と case4 も同様の傾向にある。ただし、注水後の有効応力は 0~10 kPa 程度にあり、所々、多少の剛性は残していると推測する

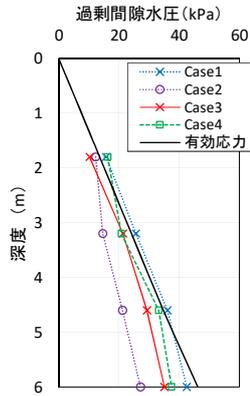


図-10 過剰間隙水圧の深度分布

が、図-8 で明らかなように、流動やボイリングを抑止することはできなかった。

case2 も注水直後に間隙水圧が上昇しているが、その値は case1, case3 および case4 と比べても大きい。この理由は上述した水塊の影響と考える。過剰間隙水圧が地盤上層に伝播せずに加圧した浸透水が水塊として蓄積されていき、ある段階でドレーンを通じて表層に排水されたと考えられる。間隙水圧の上昇の度合いを地盤下層と上層で比べると下層のほうが大きく、840 秒付近で地盤上層(CH4)の間隙水圧が瞬間的に大きくなる一方、他の間隙水圧は急激に下がっていることは、上述の水塊の発生から消滅に至る現象と一致する。なお、この水塊はボイリング抑止過程で浸透圧を加圧し続けたことに伴い地盤が剛体として持ち上がった結果生じたものである。実際の地震作用時には、強制加圧は作用せず地盤が持ち上がることもない為、上記結果は、表層ドレーンの打設によって液状化伝播並びにボイリングの発生を有効に抑止できることを示している。

図-10 には各ケースについて、注水開始後 40 秒程度経過した時点における過剰間隙水圧の深度分布を示す。図中には図-4 と同様に、初期有効応力の深度分布も併記している。case2 は他のケースと比べると、明確に初期有効応力を下回っていることが確認できる。

## 4. 結論

人工排水材による液状化時のボイリング被害抑止効果法を定量的に評価することを目指して浸透流解析および遠心模型実験を実施した。その結果、打設深度を 3.0 m、打設間隔を 1.2 m とすることで、必要十分なボイリング抑止効果を有することが確認された。液状化の発生自体を抑止する従来のドレーン工法に対して、本工法の仕様は大幅に減ることから、工期やコストも大きく削減されることが期待される。今後は現場条件に応じて最適なドレーン仕様を決定できるよう設計法の整備に取り組んでいく所存である。なお、本研究は港湾空港技術研究所と DEPP 工法研究会 6 社による共同研究成果の一部である。

## 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. I\_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・ボイ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.I\_276-I\_281, 2017.
- 3) 田中幸久: ドレーンによる液状化対策工法, 技術手帳, 土と基礎, Vol.37, No.4, pp.94-95, 1989.
- 4) 地盤工学会: 地盤工学実務シリーズ 18 液状化対策工法, pp.363-410, 2004.
- 5) DEPP 研究会: DEPP 工法技術資料, p.15, 2011.
- 6) 宝福拓, 大良慎平, 桑野二郎, 桑野玲子: 液状化に起因する舗装亀裂からの噴砂発生メカニズム, 第 49 回地盤工学研究発表会, No.826, pp.1651-1652, 2014.
- 7) 堀内佑樹, 桑野玲子: 液状化による道路路面への噴砂に関する検討, 生産研究, 68 巻, 4 号, p. 307-310, 2016.
- 8) 海野寿康, 林健太郎, 大野康年, 浅沼丈夫, 仙頭紀明, 渦岡良介: 設計許容値以上の過剰間隙水圧が発生した場合におけるドレーン改良地盤の動的せん断挙動, 土木学会論文集 C, Vol.70, No.1, pp.67-82, 2014.

(2019.2.7 受付)

(2019.4.24 受理)

## ANALYSIS AND CENTRIFUGE EXPERIMENT ON THE APPLICATION OF SHALLOW VERTICAL DRAIN TO PREVENT SAND BOILS INDUCED BY LIQUEFACTION

Binh NGUYEN, Shinji SASSA, Hiroyuki YAMAZAKI and Kazuhiko UENO

Authors are developing a countermeasure to prevent the destruction of sand boil induced by liquefaction by using shallow vertical drain (PVD). Along with the 1G model test in previous study, a seepage analysis and centrifuge model tests are conducted to establish a design method considering real application in this study. With the PVD spacing of 1.2 m and length of 3 m, the transmission of liquefaction to ground surface is prevented while allowing liquefaction to occur in deeper portion. Consequently, sand boil and its destruction are also prevented by the use of PVD. In comparison to the current application of PVD on preventing liquefaction, a much-lower construction cost is expected with the less use of PVD.