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

佐々 真志¹・山崎 浩之²・林 健太郎³・吉岡 保弘⁴

¹ 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)

E-mail: sassa@ipc.pari.go.jp

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 特別研究主幹

E-mail: yamazaki@pari.go.jp

³ 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: kentaro.hayashi@mail.penta-ocean.co.jp

⁴ 五洋建設株式会社 技術研究所

E-mail: Yasuhiro.Yoshioka@mail.penta-ocean.co.jp

本研究では、人工排水材（ドレーン）を用いた新たな液状化被害抑止工法の開発に資することを目的として、液状化伝播並びにボイリング被害抑止工法に関する一連の実験と解析を行った。その結果、ドレーンの敷設により、液状化の発生は許容しつつも、ドレーン下端上方において液状化域の進展・伝播を抑制することによって、地盤内の流動を防ぎ、ひいては、ボイリングの発生を有効に抑制しうることを初めて明らかにした。今後は、本工法の設計法を構築・確立していくことが期待される。

Key Words : *boiling, drain, liquefaction*

1. はじめに

現在日本国内では、各種の原理に基づく液状化対策工法が開発されているが、殆どの工法が液状化の発生を防ぐことにより液状化の被害を低減させるものであり、いずれの方法も高価である場合が多い。本研究は、人工排水材を用い、地震後に液状化が発生したとしても港湾・空港・海岸等施設の立地する道路面ならびに地盤の変状が、緊急車両が通行可能な程度に収まるような対策方法を検討するものである。具体的には、液状化の発生を許しながらも、変状を防ぐことで、コスト面で有利な液状化被害抑止工法の開発に資する検討を行うことを目的としている。

液状化に伴う道路面や地表の大きな変状・凸凹は、ボイリングによってもたらされる場合が多い。ボイリング（噴砂）は、液状化による地盤内の流動が地表に露出し土砂が噴き出したもので、一般に粘土・シルトのような不透水層の存在と密接に関係していると考えられている^{1)~4)}。一方、液状化対策工法の主要な対策原理は、締固め、固結、排水などが挙げられる。いずれの対策も液状化の抑止・軽減に有効であり、本研究で着目する排水（ドレ

ーン）工法も、過剰間隙水圧を低減する効果が広く認められている^{5)~8)}。東日本大震災や熊本地震のような大規模で継続時間の長い地震動並びに連続した地震動は、液状化の発生及び進展に大きく影響することが明らかとなっており^{9)~12)}、上述のような地盤変状を抑えるコスト面で有利な液状化被害抑止工法を開発する意義は大きい。

本論文では、先ず東日本大震災において確認されたドレーン（過剰間隙水圧消散）工法の効果について述べる。そして、人工排水材を用いて実施した一連の実験および解析について記述し考察する。最後に、本研究で得られた知見をまとめる。

2. 東日本大震災でのドレーン工法の効果

東日本大震災で液状化による被害は多くの施設で発生したが、同時に液状化対策が機能した事例も多く確認されている。以下では、東日本大震災で確認されたドレーン（過剰間隙水圧消散）工法の事例について述べる。

本事例は^{13),14)}、東京港木材埠頭で施工されたもので、人工材を用いた DEPP 工法（ドレーン工法）によるもの

図-1 東京港木材埠頭におけるドレーン工法の対策断面

写真-1 ドレーン打設状況

写真-2 東北地方太平洋沖地震後の岸壁背後の状況

である。図-1 に代表的な対策断面、写真-1 にドレーン打設状況を示す。岸壁は控え杭式矢板構造で前面水深は-12mとなっている。ドレーン材には、グリッドドレーンとスパイラルドレーンが用いられ、打設間隔 45～65cm (以下の写真-2 の区域は打設間隔 55cm) で設置された。地震後の岸壁背後の状況を、写真-2 に示す。同写真の右側が施工箇所、左側が未施工箇所である。施工箇所では液状化の発生はなく、舗装等は健全であったが、未施工箇所では液状化により被災し、大きな凸凹・亀裂が発生し、舗装に顕著な被害が生じていることがわかる。

3. 人工排水材を用いた液状化伝播・ボイリング被害抑止実験及び解析

先述のとおり、液状化に伴う地盤の大きな変状・凸凹は、ボイリング(噴砂)が原因である場合が多い。ボイリ

ングは、地盤内の流動が地表へ達し顕れたものであり、当該流動経路で液状化が伝播した事象により生じるという概念および考えの下、人工排水材(ドレーン)を用いた液状化伝播・ボイリング被害抑止工法に関する一連の実験及び解析を行った。実際、液状化の伝播は、地盤の大規模な流動と密接に関わっていることが明らかとなっている¹⁾。本研究で行った実験ケース一覧を表-1に、実験断面図および当該平面図を図-2, 3にまとめている。この際、図中のCHは間隙水圧計を表している。地表に不透過層を有する砂層地盤を模擬する為に、ベントナイト層を地表にその下に細砂層(珪砂7号)+基盤層(粗砂)を敷設した上で、地盤底部より水压を加圧することにより液状化を誘起し、ドレーンの有無及びドレーン本数(1本, 4本)と先端深さ(浅, 中, 深)を変化させた土槽実験を実施した。又、不透水層がない場合の実験も合わせて実施した(表-1)。この際、ドレーンは、直径約10mmのス

表-1 人工排水材を用いた液状化伝播・ボイリング被害抑止実験：実験ケース一覧

実験ケース No.	粘土層	ドレーン	液状化	ボイリング		浮上がり
				载荷中	载荷後	
1	有り	無し	○	○		
2	有り	1本	○	○		
3	有り	4本, 深い				○
4	有り	4本, 中	○			○
5	有り	4本, 浅い	○		○	○
6	無し	無し	○	○		
7	無し	4本, 中	○			○
8	無し	4本, 浅い	○		○	○

(a) ケース 1

(b) ケース 2

(c) ケース 3

(d) ケース 4

(e) ケース 5

(f) ケース 6

図-2 人工排水材を用いた液状化伝播・ボイリング被害抑止実験：断面図

単位: mm

図-2 人工排水材を用いた液状化伝播・ボイリング被害抑止実験：断面図

図-3 人工排水材を用いた液状化伝播・ボイリング被害抑止実験：平面図 (a) ケース 2 (b) ケース 3, 4, 5, 7, 8

プリングを化繊平織りの目の細かい布袋 (糸のピッチ: 40 本/10mm, 糸径 0.1mm) に入れたものを用いた. 又, 各実験ケースでは, 液状化に伴う地盤内流動の様子を捉えるために, ドレーン及び間隙水圧センサの各深さを基準として赤色砂線を入れている (図-2).

表-1 には, 上述の実験条件と共に, それぞれの実験で生じた各現象の有無も合せて示している. 本結果については, 以下で詳しく記述・考察する. 尚, 液状化は, 地中の鉛直有効応力 $\sigma_v = \sigma_{v0} - u_e$ がゼロになった際に,

液状化発生と定義している. ここに, σ_{v0} は初期鉛直有効応力, u_e は過剰間隙水圧である.

4. 実験・解析結果と考察

上述の実験結果の概要を表-1 にまとめている. ドレーンの有無による鉛直有効応力—時間関係に関する代表的な実験結果を図-4 に示す. ドレーン無しの場合 (図-4a) には, 地盤底部より液状化が発生し, 地盤深部, 中

図-4 ドレーンの有無による鉛直有効応力—時間関係の実験結果 : (a) ケース 1, 図-2a (b) ケース 4, 図-2d に対応

図-5 地盤内流動・ボイリングの発生状況：(a) ケース1, 図-2a (b) ケース6, 図-2f (c) ケース4, 図-2d に対応

部・浅部へと順に液状化した。実際、図-4a より、地盤内の鉛直有効応力が全層でゼロ以下となったことがわかる。図-5 に地盤内流動・ボイリングの発生状況を示す。液状化域の伝播に伴って、図-5a に示すかたちで、地盤内の流動が大きく顕著になり、粘土層下に水膜が生成されると共に、ボイリングが複数箇所で発生した。この際、図-4a の有効応力の一部回復過程は、地盤底部でボイリング発生後に生じたものである。ドレーンを地盤中央に一本入れた場合(図-2b)には、ドレーンから水平方向に離れた領域で、液状化しボイリングが発生した。これに対し、ドレーンを密に深く入れた場合(図-2c)には、砂層全体にわたる排水効果により、全層で液状化の発生を抑止した。

一方、ドレーンを地盤中部に敷設した場合(図-2d)には、ドレーン下部で液状化が発生し、ドレーン下端上方に位置する地盤浅部・中部では液状化しなかった。実際、図-4b より、地盤深部のみ有効応力が負となっていることがわかる。この際、同一深度の水平方向(CH6, 7, 8)の有効応力がほぼ同程度となっている理由について、ドレーンの有無による3次元浸透解析結果(図-6, 7)に基づき、以

下に述べる。ドレーン周りでは間隙水の移動が早くなる(図-7)一方、このドレーン効果は、ドレーン中央断面(図-6c)のみでなく、間隙水圧を計測した土槽前面又は背面(図-6b)で水平方向に平滑化されたかたちで発現し、ドレーン無しの場合(図-6a)に比べて、全水頭分布を大きく抑制した。以上の結果、液状化は発生しつつも、地盤内流動は全く生じず、ボイリングを防いだ(図-5c)。その後、加圧続けたことに伴い地盤が剛体として持ち上がった結果、底部に亀裂が生じた(表-1の浮上がりに対応)。実際の地震作用時には、強制加圧は作用しないことから、上記結果は、ドレーンの敷設により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。また地震時の繰返しせん断作用下では一般に液状化に伴う沈下が増大するが、液状化伝播の抑止は当該沈下の抑制に対しても有効に作用すると考えられる。

上述の液状化・ボイリング挙動は、不透水層がない場合でも同様の結果であった(表-1)。即ち、ドレーン無しの場合(図-2f)には、液状化が地盤全体に及び、ボイリングが生じた(図-5b)。一方、ドレーン有りの場合(図-2g)には、ドレーン下部で液状化が発生するも、液状化の伝播を抑制

図-6 ドレーンの有無による間隙水圧全水頭分布(m)の3次元解析結果：(a) 図-2aの前面 (b) 図-2dの前面 (c) 図-2dの中央断面

図-7 間隙水の流速分布(m/s)・ベクトルの解析結果：ケース5

した結果、地盤内流動は生じず、ボイリングを抑止した。ドレーン長が短い場合(図-2e, h)にも、不透水層の有無に依らず、载荷中は同様の特性を示したが、载荷後にボイリングに至った。これらの事実は、ボイリングを抑止する上での液状化継続時間の影響や最適なドレーン長の存在を示唆しており、これらの解明は今後の課題である。又、ボイリングの抑止が構造物支持力に及ぼす影響については、実大応力を再現した実験による検証が望まれる。

5. 結論

人工排水材(ドレーン)を用いた新たな液状化被害抑止工法の開発に資することを目的として、液状化伝播およびボイリング被害抑止工法に関する一連の実験と解析を行った。その結果、不透水層の有無に依らず、ドレーンの敷設により、液状化の発生は許容しつつも、ドレーン下端上方において液状化域の進展・伝播を抑制することによって、地盤内の流動を防ぎ、ひいては、ボイリングの発生を有効に抑制しうることを初めて明らかにした。今後は、液状化継続時間の影響や最適なドレーン敷設条件等を含め、本工法の設計法について構築・確立していくことが期待される。

参考文献

- 1) Housner, G. W.: The mechanism of sandblows. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 48, pp. 155-161. 1958.
- 2) Ambraseys, N. and Sarma, S.: Liquefaction of soils induced by earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59(2), pp. 651-664. 1969.
- 3) Fiegel, G. and Kutter, B. L.: Liquefaction mechanism for layered soils. *J. Geotech. Eng.*, 120(4), pp. 737-755, 1994.
- 4) Kokusho, T.: Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 125(10), pp. 817-826, 1999.
- 5) Seed, H. B. and Booker, J. R.: Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains. *J. Geotech. Eng. Div.*, 103(7), pp. 757-768, 1977.
- 6) Boulanger, R. W., Idriss, I. M., Stewart, D. P., Hashash, Y. and Schmidt, B.: Drainage capacity of stone columns or gravel drains for mitigating liquefaction. *ASCE Geotech. Spec. Pub.*, 75, pp. 678-690. 1998.
- 7) Brennan, A. J. and Madabhushi, S. P. G.: Effectiveness of vertical drains in mitigation of liquefaction. *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 22(9-12), pp. 1059-1065.
- 8) Brennan, A. J. and Madabhushi, S. P. G.: Liquefaction and drainage in stratified soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(7), pp. 876-885, 2005.
- 9) 佐々真志・山崎浩之・後藤佑介・深津圭佑・菊池喜昭・野津厚：地震動の連成による砂質地盤の液状化機構と予測・対策の安定性, 土木学会論文集 B3, Vol. 70, No.2, pp. 912-917. 2014.
- 10) 佐々真志・後藤佑介・深津圭佑・菊池喜昭・山崎浩之：互層地盤の液状化特性とSCP対策効果, 土木学会論文集 B3, Vol. 70, No.2, pp. 918-923. 2014.
- 11) 小林孝彰・佐々真志・渡辺啓太・山崎浩之：連続した地震動作用下の地盤液状化に関する実験と解析, 土木学会論文集 B3, Vol. 71, No.2, pp. 1101-1106. 2015.
- 12) Sassa, S. and Yamazaki, H.: Simplified Liquefaction Prediction and Assessment Method Considering Waveforms and Durations of Earthquakes. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 143(2), doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001597, 04016091. 2016.
- 13) DEPP 工法研究会：DEPP 工法技術資料, 2011.
- 14) 宮島ら：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による港湾施設等被害報告, 港湾空港技術研究所資料 1291. 2015.
- 15) Sassa, S., Sekiguchi, H. and Miyamoto, J.: Analysis of progressive liquefaction as a moving boundary problem. *Geotechnique*, 51(10), pp. 847-857. 2001.

(2017.2.2 受付)

PREVENTION OF PROPAGATION OF LIQUEFACTION, SAND BOILS AND SURFACE DEFORMATIONS BY DRAIN METHOD

Shinji SASSA, Hiroyuki YAMAZAKI, Kentaro HAYASHI and Yasuhiro YOSHIOKA

The present study aimed at developing a new concept of countermeasure against liquefaction-induced damage by utilizing artificial drain materials. A series of model tests and 3D seepage analyses were performed to investigate the spread of liquefaction and associated sand boils. The results demonstrate that the drain method is capable of suppressing the spread and propagation of liquefaction, while allowing the occurrence of liquefaction underneath the bottom of the drain installed. This resulted in preventing flows in and boiling above the ground effectively, giving rise to no significant surface deformations. It is a subject for future study to establish a design of this countermeasure against liquefaction-induced damages.