

液状化による地盤変状抑制のための杭式改良に関する遠心模型実験

Centrifuge Model Tests on Mitigation against Liquefied-Soil Deformation by Pile Type Improvement

技術研究所 瀧山 美怜 FUCHIYAMA MISATO

技術研究所 高橋 直樹 TAKAHASHI NAOKI

技術研究所 戸村 豪治 TOMURA GOJI

土木設計部 津田 和夏希 TSUDA WAKAKI

液状化に伴う側方流動を抑制する対策として、筆者らは低改良率の杭式改良の配置方法を工夫することにより、未改良部の液状化は許容しつつも側方流動を抑制する合理的な対策に関する検討を行い、流動閉塞杭と称する配置方法とその対策に関する構造設計法を提案した。今回、液状化により自立式矢板護岸に変状が生じた際の背後地盤を対策対象とし、地盤変状に対する流動閉塞杭の対策効果や改良体の地震応答特性について遠心模型実験により検討した。その結果、対策により地盤変状が抑制され、杭模型に生じる曲げモーメントは筆者らの提案式よりも小さいことを確認した。また、提案した構造設計法に基づき算出した強度を有する固化改良杭と表層改良層は実験後も健全であり、本構造設計法の妥当性が示された。

キーワード：液状化，側方流動，深層混合処理工法，遠心模型実験

The authors proposed the irregular placement method of the deep mixing piles, or DM piles, to prevent lateral flow in various directions and the design method for that structure was established. In the present study, centrifuge model tests were conducted to clarify the improving effect of the DM piles against the deformation of ground due to liquefaction. The results showed that the improvement by the DM piles made the ground deformation dramatically reduced. There was no damage to the cement treated piles and the shallow mixing layer, which were designed by using the proposed design method, after the excitation.

Key Words: Liquefaction, Lateral Flow, Deep Mixing Method, Centrifuge Model Test

1. はじめに

過去の大規模地震において、液状化に伴う側方流動(以下、側方流動)が発生して甚大な被害をもたらした。側方流動を防止する根本的な方法は液状化の発生を防止することであるが、対策範囲が広域に及ぶ場合にはその対策に大きな費用が必要となるため、筆者らは側方流動を抑制する合理的な対策方法が必要と考えている。

このような対策方法として、筆者らは低改良率の杭式改良の配置方法を工夫することにより、未改良部の液状化は許容しつつも側方流動を抑制する合理的な対策に関する検討を進めてきた¹⁾³⁾。流動閉塞杭(図-1)と称する本手法は、どの方向から見ても存在するように配置した改良杭と表層改良で構成される構造体により地盤流動を抑制することを目的としたものである。構造的には、改良杭下端を非液状化層に杭径程度以上根入れさせ、杭頭部は表層改良と一体化させることでその回転を拘束し、

水平力に抵抗する機構を採用している。これまでに、傾斜地盤を対象とした遠心模型実験を実施して側方流動に対する抑制効果を検証するとともに、その構造設計法の提案ならびに施工性の確認を行った⁴⁾。

前述したように、流動閉塞杭は液状化を許容しつつ側方流動を抑制することを目的としている。したがって、港湾地域を対象する場合、改良の対象は護岸自体ではなくその背後地盤である。すなわち、対策の目的は、改良域の側方流動や沈下量を低減することにより、背後地の地盤変状を抑制することにある。

本研究では、自立式矢板護岸の背後地を対象とし、遠心模型実験により流動閉塞杭の対策効果を検討した。本文では、対策の有無による地盤の変状を示し、流動閉塞杭の抑制効果について述べる。また、杭模型に生じた曲げモーメントの結果から、提案した構造設計法の妥当性について検討する。さらに、本構造設計法に基づき設計強度を算出して作製した固化改良杭と表層改良層を用

いた実験を実施し、加振後のそれらの健全性を検討した。

2. 遠心模型実験の概要と模型地盤および模型杭作製方法

(1) 実験概要

実験は港湾空港技術研究所所有の遠心模型実験装置を用いて実施した。加振時の遠心加速度は 50 g とし、実物との縮尺比は 1/50 とした。

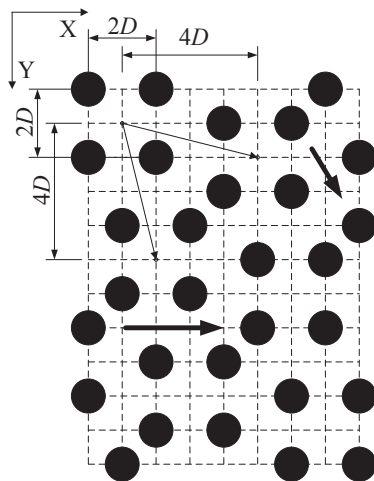


図-1 流動閉塞杭配置

表-1 実験ケース(Prototype scale)

実験ケース	杭配置	杭間隔	最大加速度	最大加速度の継続時間
UN	無し		200 Gal	25 sec
I2d-a	流動閉塞杭配置 アクリルパイプ	4 m (2D)	180 Gal	25 sec
I2d-c	流動閉塞杭配置 固化改良杭	4 m (2D)	190 Gal	25 sec

a) 実験ケース

実験ケースを表-1 に示す。本文では無改良の実験(以下、UN と略す)と、アクリルパイプで杭模型を作製し流動閉塞杭配置とした実験(以下、I2d-a と略す)、セメント固化処理土で杭を作製し流動閉塞杭配置とした実験(以下、I2d-c と略す)の3ケースについて述べる。

b) 模型地盤の作製方法

I2d-a, I2d-c の計器配置を含む模型概略図を図-2 に示す。模型地盤は所定の密度となるよう空中落下法により作製した。模型地盤の下層には厚さ 85 mm の非液状化層を設け、試料として飯豊珪砂 7号(平均粒径 $D_{50}=0.174$ mm, 均等係数 $U_c=1.5$)を用い、相対密度は $D_r=90$ % とし

た。鋼矢板はステンレス板にて模擬し、土層下端まで根入れさせた。鋼矢板の陸側については、非液状化層の上部に厚さ 195 mm の液状化層を設けた。液状化層の試料には、相馬珪砂 5号(平均粒径 $D_{50}=0.35$ mm, 均等係数 $U_c=1.6$)を用い、相対密度 $D_r=50$ % となるように作製した。なお、液状化層作製時には鋼矢板の天端に土槽から固定用治具を設けて転倒を防止し、遠心加速度作用前にこれを撤去した。

通常、遠心模型実験では透水係数に関する相似則を満

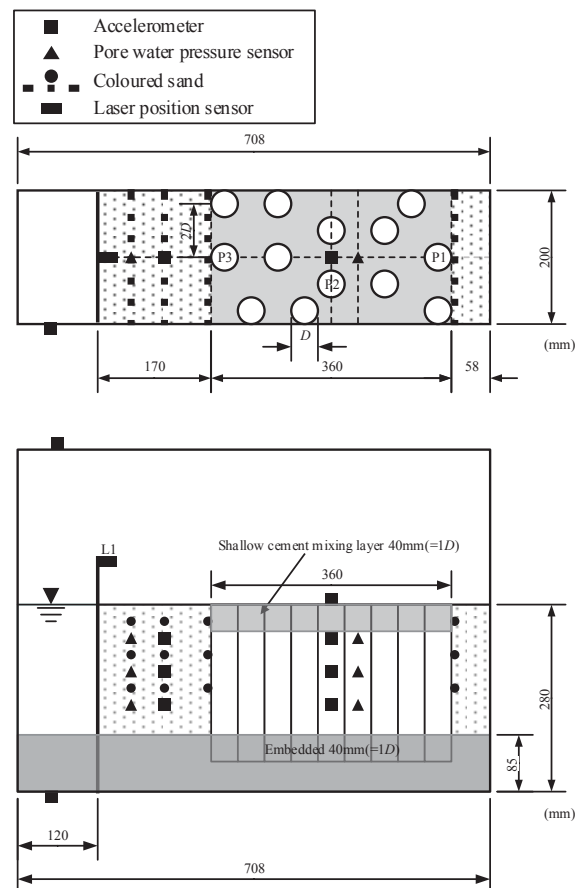


図-2 模型概略図 (Model scale)

たすために間隙流体に所定の粘性を有する溶液を用いることが多く、本実験では、非液状化層および液状化層の両方の間隙流体として、脱気水に水溶性セルロースエーテルを添加して所定の粘度とした溶液を用いた。

全ての実験において、模型地盤は 30g の遠心力場で下端からの浸透により、陸側・海側とも液状化層天端高さまで飽和させた。

c) 改良杭模型と計測項目

改良杭には実物で直径 2 m のものを想定し、I2d-a におけるその模型には、外径 40 mm, 内径 28 mm のアクリルパイプを用いた。密度の調整は、セメント固化処理土と同じになるようパイプの内部に丸鋼を配し、空際に

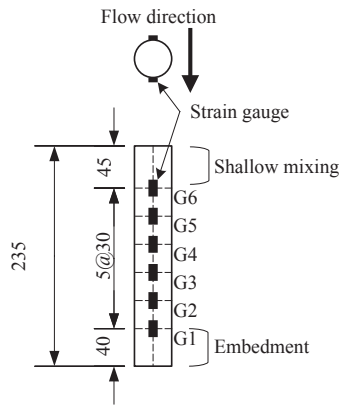
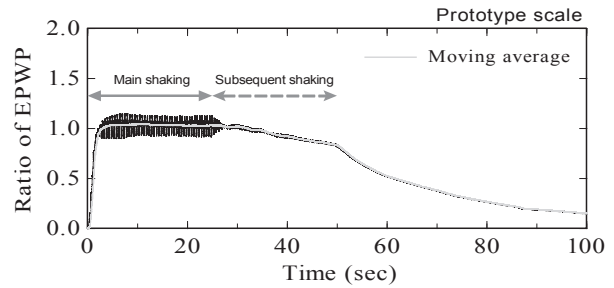


図-3 杭模型

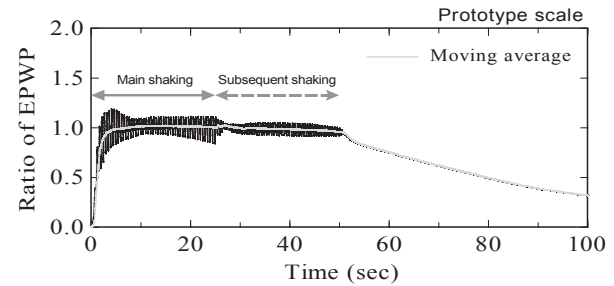


写真-1 杭および表層改良層の模型(12d-c)

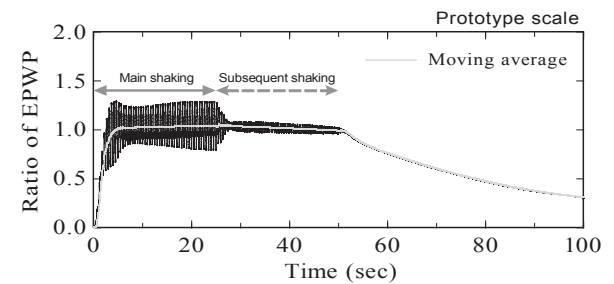
シリコンを充填することにより行った。杭模型の下端は非液状化層に杭径分根入れさせ、上端は表層改良層模型と接着剤で固定した。表層改良層模型はステンレス板とアクリル板を積層してエポキシ樹脂で一体化させたものであり、その密度は杭模型と同様に地盤と同じにした。12d-c においては、セメント固化処理土で作製した外径 40 mm の固化改良杭を用いた。12d-c の杭模型も下端は非液状化層に杭径分根入れさせ、上端は同様にセメント固化処理土で作製した表層改良層に固定した。セメント固化処理土で作製した杭模型と表層改良層のそれぞれの設計一軸圧縮強度は、実験ケース 12d-a において図-3 に示すように杭模型にひずみゲージを貼りつけ、計測された曲げひずみから曲げモーメントを算出し、筆者らの提案した構造設計法⁴⁾に基づいて必要強度に設定した。本研究では、12d-a では改良杭に発生する曲げモーメントを計測するためにアクリルパイプを用い、12d-c は改良杭の健全度確認のため、計測された曲げモーメントから筆者らが提案した構造設計⁴⁾に基づいて強度を設定した固化体を用いた。表層改良層の厚さは 12d-a、12d-c ともに杭径と同じ 40 mm である。写真-1 は、杭および表層改良層の模型を土槽内に設置した状況を示す。表層改良層はあらかじめ所定の位置に直径 50 mm の穴を設けて



(a) UN



(b) I2d-a



(c) I2d-c

図-4 過剰間隙水圧比の時刻歴

製作し、その中央に直径 40 mm の固化改良杭模型を配置した。両者の隙間にはエポキシ樹脂を充填して杭頭を固定した。なお、固化改良杭模型には直径 3 mm の炭素棒を全長に渡ってその中央に埋込み、加振中の通電を計測することによりその健全性を評価した。地盤内には加速度計および間隙水圧計を埋設し、アクリルパイプを用いた 12d-a では図-2 中 P1、P2 および P3 で示す改良杭模型の側面にひずみゲージを貼りつけて曲げひずみを測定した。地盤の変位は地盤内に埋め込んだ色砂により計測した。

d) 加振方法

入力波は実物換算で周波数 2 Hz の正弦波とし、目標加速度 200 Gal で 25 秒間加振した後に、側方流動を持続させるために振幅を 1/3 にしてさらに 25 秒加振を続けた。表-1 中の最大加速度は実測値であるため、各実験ケースでの最大加速度の値が異なっているが、全ての実験ケースにおいて目標加速度は 200 Gal として加振した。

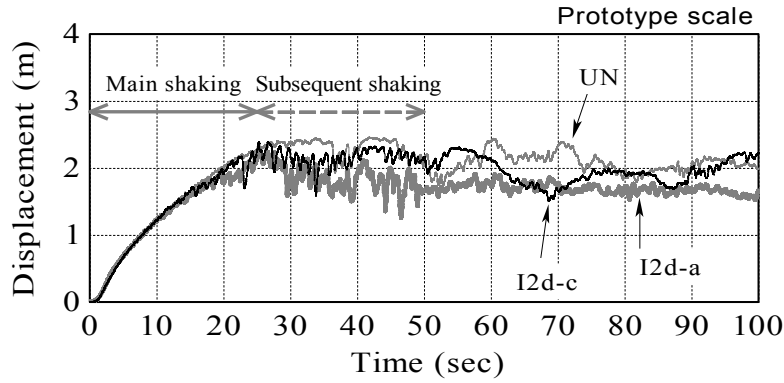


図-5 矢板模型天端変位の時刻歴

なお、前述したように、本実験では、護岸に変状が生じた際の背後地盤に対する流動閉塞杭の地盤変状に対する抑制効果を検討することに主眼を置いた。そこで、改良杭とその頭部を固定する表層改良層で構成される改良体模型は、矢板護岸背後の主働崩壊面にかからぬよう隔離を設けて設置した。

3. 遠心模型実験の結果と考察

この章では、遠心模型実験の結果について述べる。まず、振動中の間隙水圧の上昇により、地盤が完全に液状化に至っていることを確認する必要がある。図-4に示すPW4で測定された過剰間隙水圧比の時刻歴に基づき、過剰間隙水圧比が約1.0に達し、地盤中が完全に液状化していることを確認した。

(1) 側方流動抑制効果に関する結果と考察

図-5は矢板護岸模型天端の移動量の時刻歴変化を実物換算で示したものである。矢板護岸模型天端の移動量は、その背後に主働崩壊部分が存在しているため、対策の有無に関わらず同程度であることがわかる。これより、主働崩壊部分よりも背後の地盤変状は、護岸変位にほとんど影響を与えていないといえる。図-6に実物スケールでGL-1.25mに配置した色砂移動量から算出した平均側方流動量を、図-7に地表面で計測した沈下量を実物スケールで示す。I2d-aに関しては平均側方流動量の計測を行っていない。流動閉塞杭の平均側方流動量は、改良範囲の下流側の15m付近において無改良の約23%に低減されており、改良範囲の沈下量は、無改良では約0.4m生じているのに対して流動閉塞杭ではほとんど認められない。これより、仮に流動量が大きくなり未改良部に沈下が発生したとしても、表層改良層は固化杭に支えられ、表層改良層は沈下しないと考えられる。なお、

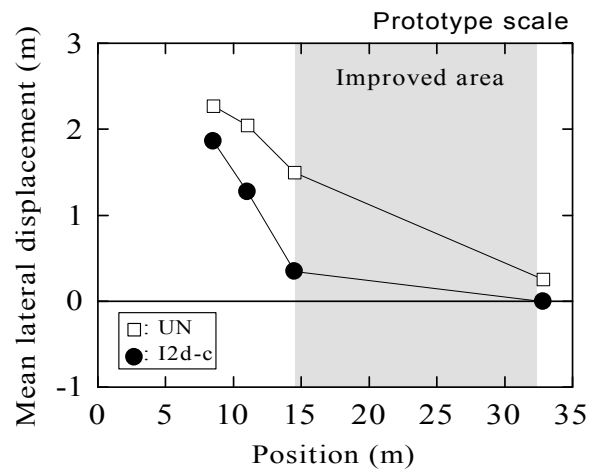


図-6 平均側方流動量の分布

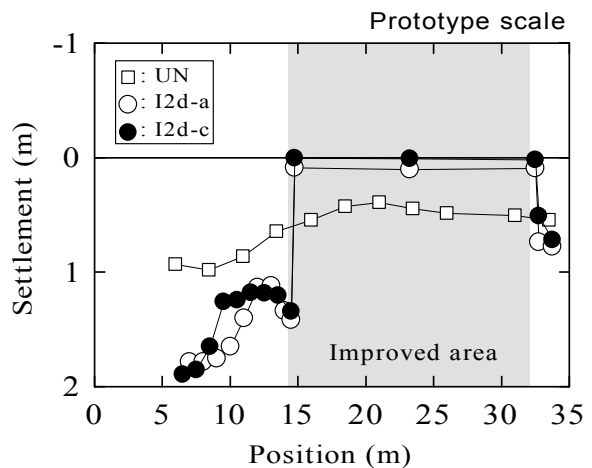


図-7 沈下量の分布

表層改良層の下流側を掘削して観察した結果、その直下に隙間は認められなかった。約5m~15mの範囲で流動閉塞杭の沈下量が無改良のそれよりも大きくなっているのは、上流からの土の流入が堰き止められたことに起因するものと考えられる。

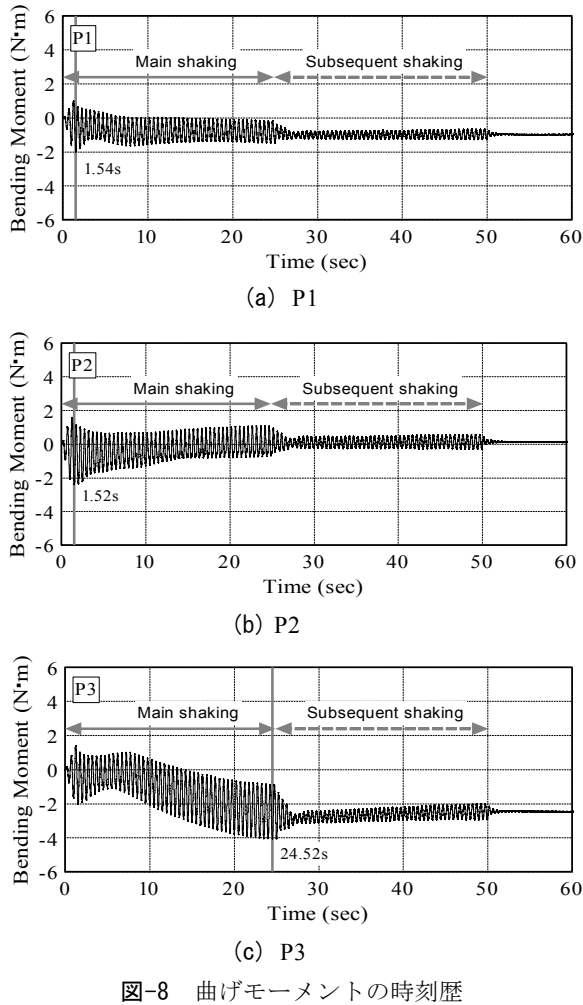
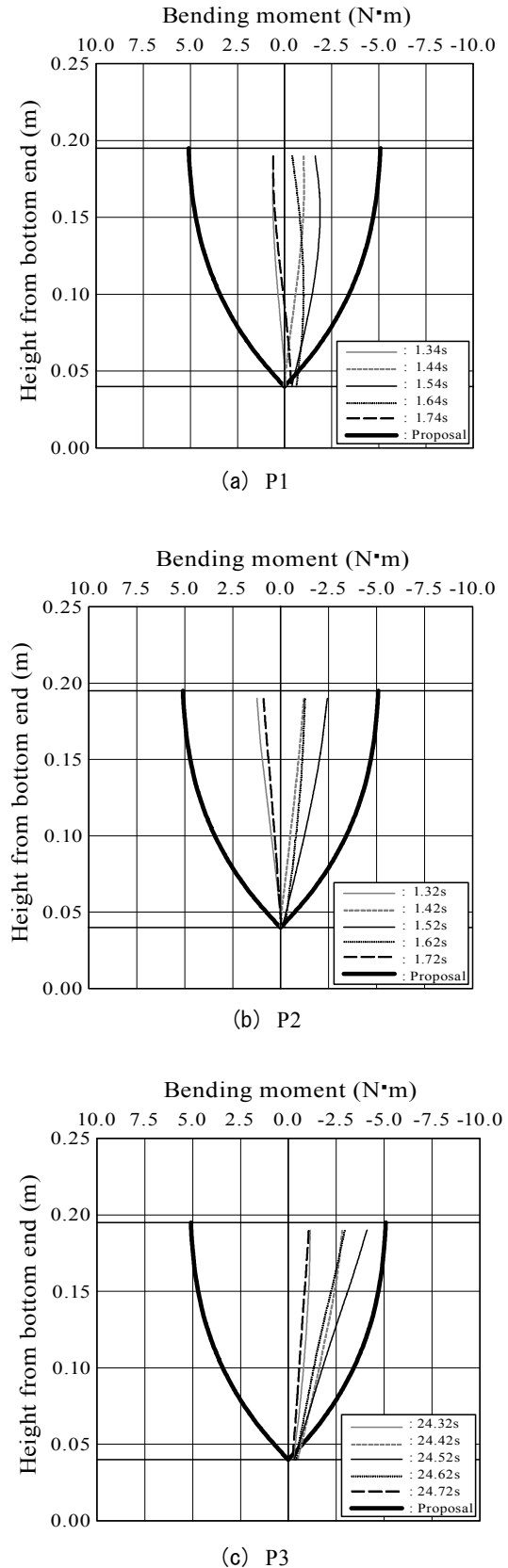


表-2 曲げモーメントの最大値と杭模型の必要強度

着目杭	着目時刻 t (s)	最大モーメント M_{max} (N · m)	必要改良強度 q_u (MPa)
P1	1.54	2.036	3.22
P2	1.52	2.471	3.91
P3	24.52	4.226	6.70

(2) 改良杭に作用する流動力の評価

以降の実験結果の数値は、時間のみ実物スケールとし、それ以外は模型スケールで示す。図-8 は、実験ケース I2d-a での各杭模型において最大曲げひずみが計測された位置での曲げモーメントの時刻歴を示したものである。表-2 は、各杭模型の曲げモーメントが最大になった時刻と最大曲げモーメントの値、および前述した改良杭に必要なとされる設計一軸圧縮強度を示したものである。ここで、それぞれの必要改良強度は、最大曲げモーメントの値から杭に発生する応力度を算出し、その値と提案す



る構造設計法での許容応力度が等しくなる時の一軸圧縮強度として算出した。加振開始から 10 秒までに着目

すると、いずれの杭模型においても下流側引張の曲げモーメントが生じている。これは杭模型の上端が回転固定、下端がピンという境界条件で発生する曲げモーメントの向と、いずれの杭模型においても下流側引張の曲げモーメントが生じている。これは杭模型の上端が回転固定、下端がピンという境界条件で発生する曲げモーメントの向きに一致するものである。上流の P1 杭と中流の P2 杭ではこの時間中に曲げモーメントが最大となっている。一方、下流の P3 杭では下流側引張の曲げモーメントが 10 秒以降も増大し、その値が最大となるのは主たる加振が終わる 24.52 秒であった。矢板護岸模型天端の変位が最大となるのは 25 秒付近であることから、それまでの間、その背後の地盤の側方流動量も増加していたと考えられる。P1 杭と P2 杭の最大曲げモーメントが加振初期に生じたのは、実験土槽の境界条件の影響で上流側からの流動土砂の供給が続かなかったためと考えられる。

各杭模型の最大曲げモーメント発生時刻前後の曲げモーメントの深度分布を図-9 に示す。曲げモーメントはひずみから求めた値を 3 次の平滑化スプライン関数にて評価したもので、上流側が引張となる場合を正とした。図には全上載圧の 30%の流動力が作用するものとした筆者らの提案式⁴⁾により算出した流動力を、上端回転固定および下端ピンの境界条件をもつモデルに作用させた場合の曲げモーメント分布も示している。杭模型には流動力だけでなく慣性力も作用しているが、全ての杭の実験値が筆者らの提案式⁴⁾による流動力を用いた計算値よりも小さくなった。ただし、慣性力については応答特性の違いによりその大きさが変化すると考えられるため、定量的な評価を行うには、さらなる検討が必要と考える。

I2d-c における固化改良杭の設計一軸圧縮強度は、表-2 に示す中で最大値となる P3 杭の値を採用して 6.7MPa とし、そのときの表層改良層の必要強度は 2.0MPa と計算された。実験時の一軸圧縮強度は、それぞれ固化改良杭が 6.1MPa、浅層改良が 2.0MPa と、必要強度と同じか同程度であった。実験の結果、両者に破壊は生じていなかったことから、提案した構造設計法における強度設定の妥当性が確認できたと考える。

4. まとめ

① 自立式矢板護岸の後背地盤を対象とした遠心模型

実験結果から、流動閉塞杭により側方流動量が抑制され、また地表面沈下量も大きく低減できることを確認した。

- ② 流動力および慣性力によって杭模型に生じる曲げモーメントは、全上載圧の 30%の流動力が作用するものとした筆者らの提案式から計算される曲げモーメントよりも小さくなった。
- ③ 提案した構造設計法に基づく強度を有する固化改良杭と表層改良層は、実験後も健全であった。これにより、本構造設計法の妥当性が検証された。

謝辞：本研究は、平成 27 年から実施中の（国研）港湾空港技術研究所と三井住友建設（株）による共同研究として実施しました。研究を進めるにあたり、東京大学名誉教授東畑郁生先生には多くのご助言を戴くとともに、細部にわたりご指導戴きました。共同研究者のみならず、多くの関係各位にご助力頂きましたことを深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Takahashi, N., Derakhshani, A., Rasouli, R., Towhata, I. and Yamada, S. : Shaking model tests on mitigation of liquefaction-induced ground flow by new configuration of embedded columns, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, pp.1623-1626, 2013.
- 2) Morikawa, Y., Takahashi, N., Tsuda, W., Towhata, I., Takahashi, H., Sassa, S., and Kohama, E. : Dynamic centrifuge test on the reduction of lateral flow of liquefied ground by column type stabilization, *Proceedings of International Conference on Piling & Deep Foundations, Stockholm*, pp.203-712, 2014.
- 3) Takahashi, H., Takahashi, N., Morikawa, Y., Towhata, I. and Takano, D. : Efficacy of pile-type improvement against lateral flow of liquefied ground, *Geotechnique*, Vol. 66, Issue 8, pp. 617-626, 2016.
- 4) 森川嘉之, 高橋英紀, 津田和夏希, 高橋直樹, 戸村豪治, 東畑郁生, 杭式改良体による液状化地盤の側方流動抑制工法の開発, 港湾空港技術研究所資料, No.1326, 2016.