

新たな改良杭配置（流動閉塞杭）による 側方流動低減効果に関する遠心力模型実験

Centrifugal model test on mitigation of liquefaction-induced ground flow
by new configuration of embedded columns

	高橋 直樹	NAOKI TAKAHASHI
	須川 智久	TOMOHISA SUGAWA
	黒川 幸彦	YUKIHIKO KUROKAWA
土木技術部	川島 真澄	MASUMI KAWASHIMA
土木設計部	村尾 光則	MITSUNORI MURAO
土木設計部	津田 和夏希	WAKAKI TSUDA

本研究は、深層混合処理工法による新たな改良杭配置方法である流動閉塞杭配置の液状化に伴う側方流動低減効果について検討するものである。流動閉塞杭配置と整列配置を対象とした遠心模型実験を実施し、側方流動低減効果に与える影響について考察した。実験結果から、側方流動量は流動閉塞杭配置のほうが整列配置よりも低減されていることを示した。

キーワード：側方流動，深層混合処理工法，遠心力模型実験

The present study addresses installation of stable cement-mixed soil columns in liquefaction-prone subsoil so that ground deformation may be constrained during earthquakes and lateral flow of liquefied sand may be reduced. For its validation, shaking-table model tests under the condition of two types of configuration of columns have been conducted in centrifugal environments. The irregular configuration mitigated the lateral displacement more efficiently than the square configuration.

Key Words: lateral flow, deep mixing method, centrifugal model test

1. 目的

筆者らは、深層混合処理工法における新たな改良杭配置方法である流動閉塞杭配置¹⁾を考案し、1G場（Gは重力加速度）の模型振動実験^{2)~4)}を実施して流動閉塞杭配置の側方流動低減効果について検討してきた。この改良杭配置方法は、図-1に示すように間隔dで正方形に配置された改良杭4本を一つのグループとし、その中心をX方向およびY方向に2dまたはd/2の距離でずらしながら改良杭を配置するものである。本改良杭配置方法の特徴としては、改良杭がどの方向から見ても地盤中に存在し、また連続する未改良領域が既往の配置方法である整列配置や千鳥配置と比較して小さいという点が挙げられる。

これまでに実施した模型振動実験の結果から、液状

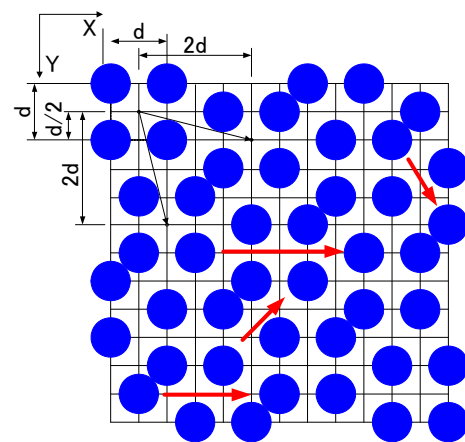


図-1 流動閉塞杭配置の概要

化に伴う側方流動に対する低減効果は流動閉塞杭配置のほうが既往の配置方法と比較して高いことを確認した。

しかしながら、これらの実験は 1G 場という低拘束圧下の条件で実施したため、その評価は定性的なものに留まると考えられる。そこで、実施工に対応した定量的な低減効果の評価を目的として、遠心力模型実験を実施した。

本稿は、傾斜地盤において側方流動を生じさせる遠心模型実験結果から、流動閉塞杭配置の側方流動低減効果について検討したものである。実験は、改良杭の配置方法およびその上端の境界条件を種々変えて実施した。

なお、本研究は、東京大学および港湾空港技術研究所との共同研究の一環（平成 24 年から開始）として実施したものであり、遠心力荷重実験は港湾空港技術研究所の装置を用いて実施した。

2. 遠心力模型実験の概要

遠心力模型実験に用いた装置⁵⁾は、最大加速度が 113G、最大積載質量が 2,760kg で、最大容量は 300G・ton である。プラットフォームサイズは 1,600×1,600mm であり、有効回転半径は 3.8m である。主要な諸元を表-1 に示す。表-2 は動的試験に関する性能についての諸元をまとめて示したものである。

実験に使用した固定土槽の内寸法は、幅 708mm×奥行き 200mm×高さ 512mm である。

本実験における相似則の一覧を表-3 に示す。実物との縮尺比は 1/50 を想定している。透水性の相似則を満足させるため、間隙流体には水の 50 倍の粘性となる水溶性セルロースエーテル溶液を用いた。

図-2 は模型概略図を示したものである。模型地盤は、厚さ 40mm で相対密度 90%の非液化化層とその上の相対密度 40%の液化化層の 2 層構造とし、空中落下法により作製した。地表面の勾配は 10%である。実験に用いた試料は、相馬硅砂 5 号 ($G_s=2.65$, $e_{min}=0.71$, $e_{max}=1.115$) である。模型地盤は 30G の遠心力場で下端からの浸透により飽和させた。加振時の水位は 1G の実験同様、斜面頂部と同一の高さとした。

改良杭は実物で直径 2m のものを想定した。側方流動が改良杭の曲げモーメントに与える影響を評価する場合、その模型化に当たっては、曲げ剛性、降伏および破壊の曲げモーメントの相似則を満足させることが望まれる。

しかしながら、改良杭の降伏や破壊までを実験パラメータとして考慮した場合、結果の評価が複雑となるため、本実験では杭模型にアクリルパイプ（外径 40mm、内径 28mm）を用いることとした。密度の調整はパイプ内部に丸鋼を配し、空隙にシリコンを充填することにより行った。杭模型は、まず所定の位置に直径 44mm の

表-1 遠心力模型実験装置諸元

項目	単位	内容
最大遠心加速度	G	113
最大搭載質量	kg	2760
回転半径	m	3.8
加減速時間	min	15
最大回転数	rpm	163
回転数制御範囲	rpm	0.1-163.0
主モータ	kW	DC450

表-2 動的試験に関する性能

項目	単位	内容
加振実験の最大遠心加速度	G	50
加振最大加速度	G	25
加振振動数	Hz	10-250
最大加振質量	kg	500

表-3 遠心力模型実験の相似則

項目	単位	縮尺比
長さ	m	1/λ
密度	t/m ³	1
力	N	1/λ ²
応力	kPa	1
ひずみ	×10 ⁻⁶	1
変位	m	1/λ
曲げ剛性	MN・m ²	1/λ ⁴
周波数	Hz	λ
加速度	Gal	λ
時間（動的）	sec	1/λ
時間（浸透）	sec	1/λ

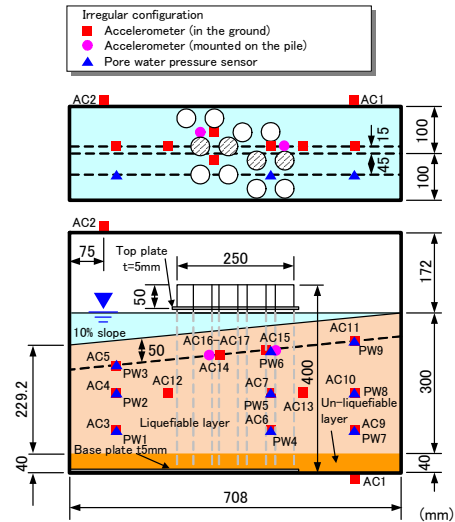


図-2 実験模型と計測器配置 (CASE2)

穴を開けた厚さ 5mm のアクリルプレートを土槽底部に固定し、次にその穴の中心と杭模型の中心が一致するように設置した。この状態において杭模型の周囲とプレートとの間には 2mm の隙間が存在することになる。これにより、杭模型の下端は自由に回転することが可能であり、最大 2mm までの滑動を許容することができる。なお、模型地盤作製時に試料砂がこの隙間に充填されてし

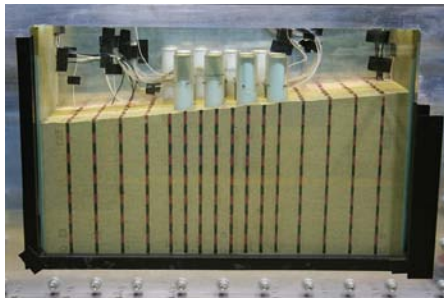


図-3 模型地盤

表-4 加振条件

	単位	Prototype	Model
遠心加速度	G	1	50
模型縮尺		1/1	1/50
入力加速度波形の種類		Sin wave 正弦波, 50waves 波	
振動時間	sec	25	0.5
振動周波数	Hz	2	100
目標最大加速度	m/sec ²	2 (200Gal)	100

表-5 実験ケース

実験ケース	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6
改良形式		流動閉塞杭配置				整列配置
改良率 (%)	0	35				
改良杭上端の境界条件		ピン結合	自由	プレートで固定	浅層混合処理層で固定	ピン結合

まうことを防止するため、あらかじめシリコングリスを充填した。一方、上端側には寸法が 270mm×198mm で下端側プレートと同様の穴が開いたプレートを杭模型上端部から 50mm 下がった位置に設置した。

計測器配置を図-2 に示す。地盤内には加速度計を設置するとともに、間隙水圧計を埋設した。模型地盤変位は、図-3 に示すように相馬珪砂を着色した色砂を用いて側面および地表面に所定の間隔で地盤変位計測用の直線を描き、これの移動量によって計測した。また、図-2 上段の平面図中にハッチングした杭模型の外周面にひずみゲージを貼付けてひずみ量を計測した。

入力波は実地盤換算で 2 Hz の正弦波である。加振条件を表-4 に示す。本実験は液状化に伴う側方流動に対する変位低減効果を検討することを主眼においているので、周波数特性が明確な正弦波を用いることとした。

表-5 に実験ケースを示す。改良率は 35%であり、改良杭の配置方法とその上端側の境界条件を変えて実験を実施した。CASE2 および CASE6 のプレートは杭模型の円周方向三箇所にした突起に載せただけなので、下端側と同様に回転を許容するピン結合になる。CASE3 では杭模型上端側の境界条件を自由とするため、上部の亚克力プレートは設置していない。CASE4 では 1 辺 10mm の立方体亚克力ブロックを用いてプレートと杭模型を相互に接着して固定した。

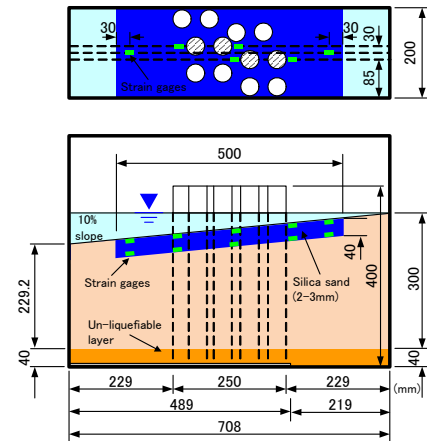


図-4 実験模型 (CASE5)

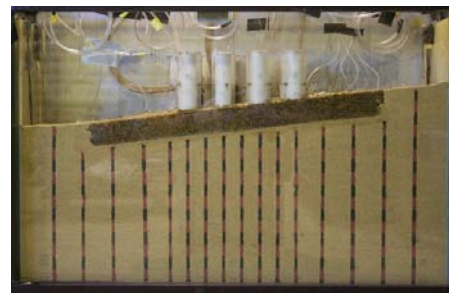


図-5 模型地盤 (CASE5)

ここで、浅層改良を設けた CASE5 について概要を述べる。図-4 および図-5 は、CASE5 の実験模型を示したものである。浅層改良層の流動方向の長さは、CASE1 (改良杭無し) において側方流動が大きく生じた範囲に相当する 500mm とした。その厚みは、実地盤換算 2m を想定して 40mm である。

浅層改良層模型は、粒径 2~3mm の碎石をエポキシ接着剤で固めて作製した。その作製手順は次のとおりである。まず、10%勾配で作製した液状化層の上に浅層改良層模型に用いる材料で作った型枠を改良範囲の周囲に配置した。土槽壁面と型枠との間にはシリコングリスを塗布し、両者間に生じる摩擦の影響を極力小さくするようにした。次に、型枠の中に液状のエポキシ接着剤に浸した碎石をさじによって静置する作業を繰り返して厚さ 40mm の改良板を作製し、24 時間気中で養生した後実験を行った。浅層改良層模型の乾燥密度は 1.271g/cm³ であり、周囲の液状化層のそれ 1.358g/cm³ よりも若干小さい値である。亚克力パイプ製の改良杭模型と浅層改良層模型は、互いに接着されている。

浅層改良層模型内には図-4 において四角形の記号で示す位置にひずみゲージを埋設し、改良層模型の曲げひずみを計測した。

CASE5 の入力波の最大加速度について、一回目加振時のそれはアクチュエーターの調子によって目標値 200

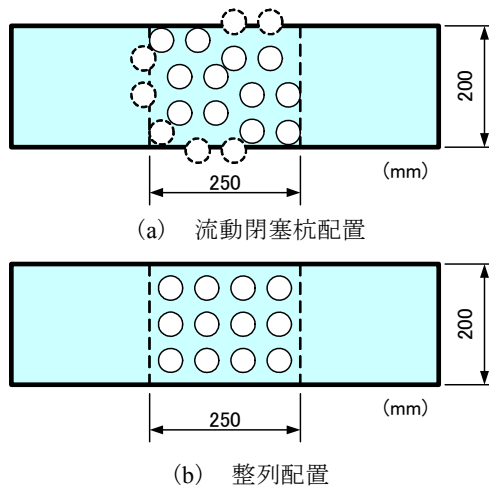


図-6 改良杭の配置

Gal に対して約 144Gal と 3 割程度小さな値であった。

そこで、遠心加速度 50G の状態を保持しながら過剰間隙水圧が完全に消散したのを確認した後、そのままの状態から再度加振を行った。その結果、二回目の入力加速度の最大値は約 188Gal となった。

図-6 は、流動閉塞杭配置 (CASE2~ CASE5) および整列配置 (CASE6) における改良率 35%での杭模型配置状況を示したものである。流動閉塞杭配置では、改良範囲端部や土槽壁面を跨いでその周囲に改良杭が存在する。これらの改良範囲内にある部分を模型化することは困難であり、模型化しても結果の評価が複雑となる。さらに、整列配置における改良杭の全本数が 12 本であることを勘案し、流動閉塞杭配置における図中点線で示した改良杭は除外した。

3. 実験結果および考察

まず、改良杭の配置方法が側方流動対策効果に与える影響に着目し、CASE1 (改良杭無し)、杭模型上端がピン結合の CASE2 (流動閉塞杭配置) および CASE6 (整列配置) における側方流動量の結果に関して考察する。次に、流動閉塞杭配置における改良杭上端の境界条件の違いが側方流動低減効果に与える影響について明らかにすることを目的とし、CASE2 (ピン結合)、CASE3 (自由)、CASE4 (プレート固定) および CASE5 (浅層改良層固定) の結果について詳述する。

(1) 改良杭の配置形状が対策効果に与える影響

図-7~図-9 は、土槽側面に配置した色砂をトレースして示した模型地盤の変形状況である。図-7 に示す CASE1 (改良杭無し) の変形状況から、液状化した模型地盤は遠心加速度の影響により斜面下方向に向かって

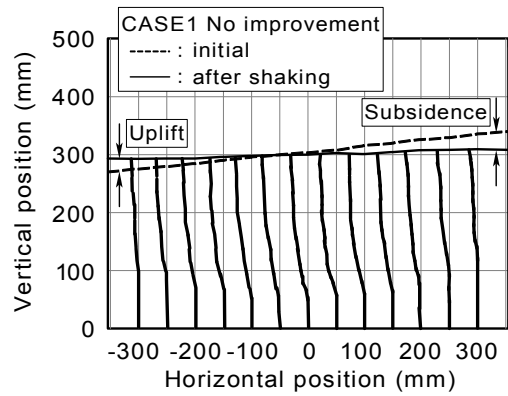


図-7 模型地盤の変形状況 (CASE1)

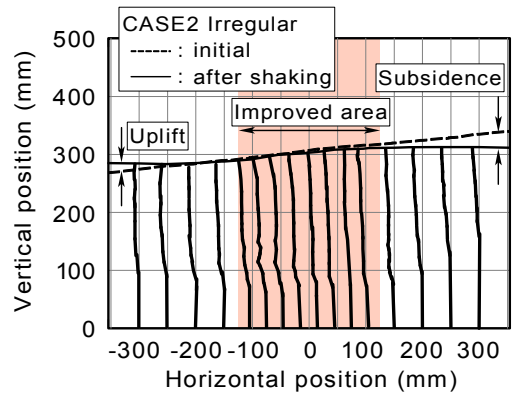


図-8 模型地盤の変形状況 (CASE2)

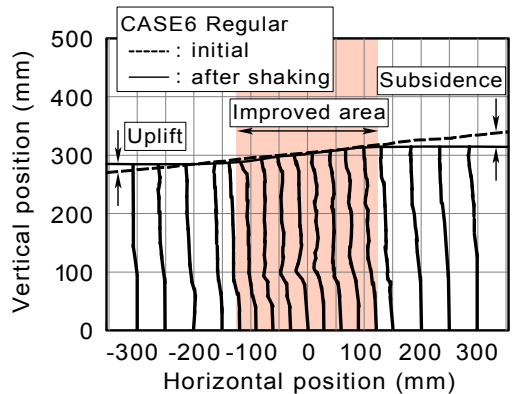


図-9 模型地盤の変形状況 (CASE6)

移動していることが分かる。水平変位は地表面で最大となり、土層底部ではほとんど生じていない。加振後の地表面は、斜面の高い側が沈下し、斜面の低い側では隆起して水平に近い状態になっている。

図-8 に示す流動閉塞杭配置 CASE2 (ピン結合) における模型地盤の変形状況について、加振後の地表面は改良範囲の背後および前方ともにほぼ水平になっている。

一方、改良範囲の地表面勾配は加振前と同等に保たれていることが改良杭無しの挙動とは異なる点である。

改良範囲における深度方向の変形状況に着目すると、杭模型が壁面近傍に存在する水平位置 0~+125mm 間の変位分布は斜面下方向に向かって直線的に傾斜しているの

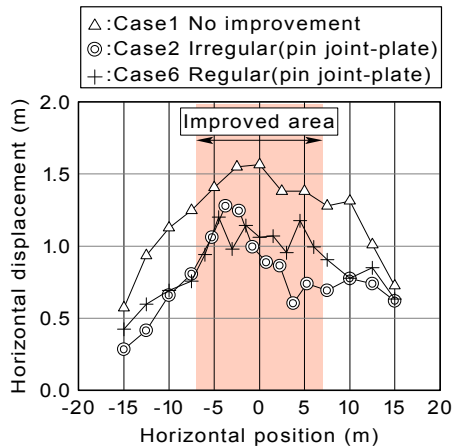


図-10 地表面の水平変位

に対して、未改良部分が連続する 0～-125mm 間のそれは深部で局所的に変形が大きく生じる形状となっている。

図-9 に示す整列配置 CASE6（ピン結合）について、地表面の変形状況は前述した流動閉塞杭配置のそれと同様である。改良範囲における地盤の変形状況に着目すると、局所的に深部で変位が大きく生じている箇所が認められる。これは、整列配置では土槽側面に沿って未改良部分が連続していることに起因するものと推察する。

側方流動量を評価する一つの指標として、実地盤に換算した地表面の水平変位を図-10 に示す。ここで示した水平変位は、図-7～図-9 で示した色砂の地表面位置における水平方向の変位量である。改良杭無しにおける水平変位は斜面の上下端部で小さく中央付近で最大となっている。一方、流動閉塞杭配置ならびに整列配置の水平変位は改良杭無しのそれと比較していずれも小さく、それぞれに水平変位低減効果が認められる。流動閉塞杭配置と整列配置の比較から、水平変位は前者のほうが後者よりも小さく、特に水平位置 0m～+10m 間で明確な差が認められる。なお、水平位置-2m～-5m 間において流動閉塞杭配置の水平変位が局所的に大きくなっているのは、壁面側に連続した未改良部分が存在することに起因するものと考えられる。

（2）改良杭頭の境界条件が対策効果に与える影響

図-11～図-13 は、CASE3～CASE5 における模型地盤の変形状況を図-7～図-9 と同様に示したものである。なお、図-13 に示す CASE5（浅層改良層固定）の結果は、二回目加振後の模型地盤の変形状況である。

図-11 に示した CASE3（自由）での模型地盤の変形状況について、加振後の地表面は CASE2 のそれと同様、改良範囲の勾配が加振前と同等に保たれ、その背後および前方ではともにほぼ水平になっている。改良範囲にお

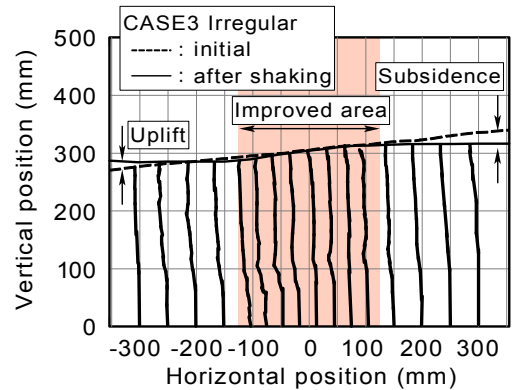


図-11 模型地盤の変形状況（CASE3）

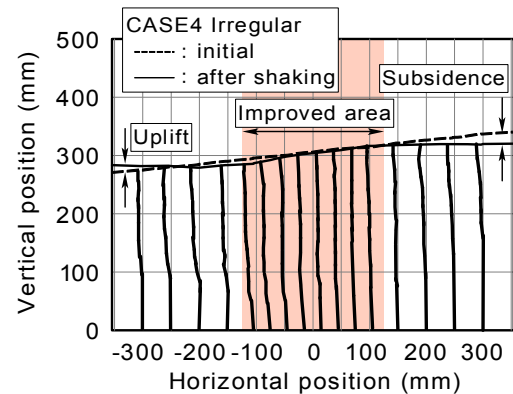


図-12 模型地盤の変形状況（CASE4）

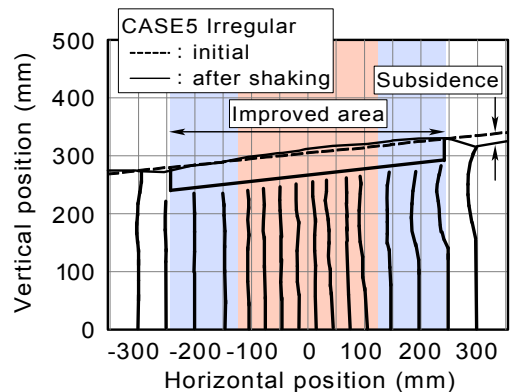


図-13 模型地盤の変形状況（CASE5）

ける深度方向の変形状況も、CASE2 のそれと類似しており、両者には大きな違いが認められない。CASE3 における実験後の模型の観察から、一部を除き杭模型は加振前の相対的な位置関係を大きく変えず、CASE2 と同様に流動方向に一樣に傾斜していることが確認された。

これについては、加振時間や一方向加振であることが関係している可能性があり、今後も検討が必要であるが、流動閉塞杭配置が保持されたことが両者の地盤変形に明確な差異が認められなかった要因の一つと考える。

次に、図-12 に示す CASE4（プレート固定）の模型地盤の変形状況を CASE3 と比較すると、改良範囲背後の地表面沈下量および改良範囲内の側方流動量が相対的

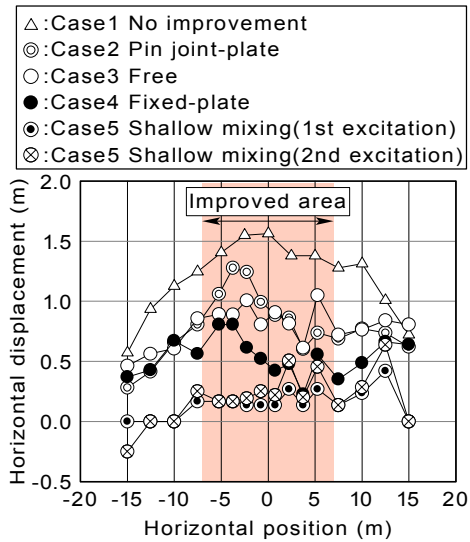


図-14 地表面の水平変位

に小さくなっていることが分かる。さらに、図-13 に示す CASE5（浅層改良層固定）における模型地盤の変形状況は他のケースと明確に異なり、改良範囲の背後側において地表面沈下と斜面下側への地盤変位が生じていることを除き、その変形は全体的に小さい。改良範囲の斜面上側のみならず、他の実験ケースでは比較的変形が大きく生じた斜面下側でもそれが抑制されている。

前項と同様、実地盤に換算した地表面の水平変位を図-14 に示す。なお、CASE5 の結果は二回の載荷で生じた水平変位をそれぞれ示した。本来の水平変位は両者の間にあると考えられる。まず、CASE2 と CASE3 の水平変位を比較すると、局所的な大小の違いはあるが、両者の水平変位には明確な差異が認められない。CASE4 の水平変位は CASE2 や CASE3 よりも小さく、側方流動量は最大で約 50%程度に低減されており、その低減効果は特に改良範囲とその背後側で高いことが分かる。

これは、杭模型の上端を固定して杭頭の回転を抑制したため、流動閉塞杭配置が効果的に側方流動をせき止めたことによるものと考えられる。次に、CASE5 の水平変位は CASE4 よりもさらに小さく、改良杭無しと比較して最大で 15%程度に低減されている。特に改良範囲よりも斜面下側の側方流動量が小さいことが特徴的である。

ここで過剰間隙水圧比に関して、CASE5 を除いた改良範囲のそれはほぼ 1 に達しており、その領域の模型地盤は完全液状化に至ったといえる。一方、CASE5 の過剰間隙水圧比は下層で 0.5、上層で 0.9 程度であり、模型地盤は完全液状化には至っていない。CASE5 で側方流動量が小さくなったのは、改良杭頭を浅層改良層で固定することにより拘束効果が高まり、地盤のせん断変形

が抑制されたことによるものと考えられる。

4. まとめ

杭式深層混合処理工法における新たな改良杭配置方法である流動閉塞杭配置について、遠心模型実験を実施してその側方流動低減効果について検討した。

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- ① 未改良部分が連続すると側方流動に伴う地盤変形が深部にまで及び、側方流動量が大きくなった。
- ② 側方流動量は流動閉塞杭配置のほうが整列配置よりも低減されていることを確認した。
- ③ 側方流動量は改良杭の上端を固定したほうが回転を許容するピン結合よりも小さく、浅層改良層を設けて改良杭頭を固定すると、より側方流動量が低減される。

今後は、実施工に対応し、浅層改良層と改良杭模型に固相改良土を用いた実験を行って設計法確立に向けた検討を実施する予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、東京大学東畑教授、および港湾空港技術研究所共同研究者の皆様にご指導いただきました。記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋直樹, Amin Bahmanpour, 東畑郁生, 山田卓, 山本陽一：杭式深層混合処理工法における新たな改良杭配置方法の提案, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集 (第 I 部門), pp.107-108, 2010.
- 2) Towhata, I, Takahashi, N, Bahmanpour, A, Yamada, S and Liu, B.A.: Shaking model tests on mitigation of liquefaction-induced ground flow by underground columns, International Symposium on Recent and Future Technologies in Coastal Development, Yokohama, 2010.
- 3) Ali Derakhshani, Naoki Takahashi, Amin Bahmanpour, Suguru Yamada and Ikuo Towhata :Experimental study on effects of underground columnar improvement on seismic behaviour of quay wall subjected to liquefaction, Proc. of the 2011PanAm CGS Conference, 2011.
- 4) 高橋直樹, Ali Derakhshani, Rouzbeh Rasouli, 東畑郁生, 森川嘉之, 山本陽一：深層混合処理工法の新たな改良杭配置による側方流動低減効果について, 第 47 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1425-1426, 2012.
- 5) 北詰昌樹：新遠心装置の開発と研究への適用, 港湾技研資料, No.812, pp.1-35, 1995.