

液状化流動が杭式改良体に及ぼす流動力の評価に関する実験的研究

Study on Lateral Loads Applied to Piles by Lateral Flow of Liquefied Ground

	高橋 直樹	NAOKI TAKAHASHI
	戸村 豪治	GOJI TOMURA
土木設計部	津田 和夏希	WAKAKI TSUDA
土木技術部	草竹 真也	SHINYA KUSATAKE
土木設計部	高田 昌典	MASANORI TAKADA

液状化による側方流動を防止する根本的な方法は液状化を生じさせないことであるが、対策範囲が広域に及ぶ場合には莫大な費用が必要となるため、合理的な側方流動対策が必要であると考えられる。筆者らは、低改良率の杭式改良による側方流動対策に関する検討を行い、効果の最大化を目指してその配置についても検討を深めてきた。本研究では、地表面を傾斜させて側方流動を生じさせる遠心模型実験を行い、改良杭の配置形状の違いが側方流動抑制効果に与える影響と改良杭に作用する流動力について検討した。本稿では改良杭に作用する流動力に関して整理を行い、流動力の評価式を提案した。

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 characteristics of soil have to be changed in order to prevent the lateral flow of liquefied soil. However, their construction cost is high and impracticable when the target area spreads widely. The improvement method should be more feasible. The authors are investigating the most effective arrangement of DM (Deep Mixing) piles to optimize cost-effectiveness. It is proposed to irregularly displace the DM piles to prevent lateral flow in various directions. In the present study, centrifuge model tests were conducted to clarify the improved effect of the DM piles against the lateral flow and its arrangement in detail. The lateral load acting on the DM pile from liquefied ground, which is required for determining design strength of the DM pile, was investigated.

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

1. まえがき

既往の大地震において、液状化に伴う側方流動（以後、側方流動と略す）が傾斜地や沿岸部埋立地の広い領域で生じた例が報告されている。例えば、1995年兵庫県南部地震では神戸市などの臨海埋立地が液状化して、護岸の水平移動に伴いその全域において海方向への大きな水平変位が発生した¹⁾。側方流動が生じる範囲は数百メートル四方にわたるため²⁾、護岸のみならず広い範囲で各種構造物基礎や埋設管などが甚大な被害を受けた。我が国の臨海埋立地には、海中に土砂を投入して造成された緩い地盤が多く存在する。将来これらの地域を襲う可能性のある大規模地震に対して、側方流動から各種構造物基礎や埋設管などを守るために対策が必要とされて

いる。しかしながら、広範囲にわたる地盤改良の施工には大きな費用がかかるため、対策が進んでいないのが現状であり、側方流動対策を比較的安価に行える工法が求められている。

そこで、筆者らは低改良率の杭式改良を用いて、未改良部の液状化は許容しつつも側方流動を抑制する対策に関する検討を行っている。また、杭式深層混合処理工法に適用可能な改良杭配置である流動閉塞杭（図-1）を提案し、対策効果の最大化を目指して様々な検討を進めている³⁾⁻⁵⁾。流動閉塞杭はどの方向から見ても改良杭が存在して地盤中で流動を阻害するため、様々な方向に流動する側方流動に対して対策効果が高まるものと考えられる。なお、杭式改良による工法の原理は、流動化する液状化地盤を完全にせき止めるのではなく、改良杭に

表-2 実験ケース

実験ケース	杭配置	杭直径 D (mm)	杭間隔 (mm)	杭の拘束条件		最大加速度 (m/s^2)	全体 (s)	前半 (s)	後半 (s)	
				下部	上部					
M1：杭頭の拘束条件の違いが流動抑制効果に与える影響	M1-UN	無し	-	-	-	-	2.4 * 50	0.5	-	-
	M1-I15D-p	流動閉塞杭	40	60 (1.5D)	1D 根入	ピン	2.3 * 50	0.5	-	-
	M1-I15D-f	流動閉塞杭	40	60 (1.5D)	1D 根入	自由	2.3 * 50	0.5	-	-
	M1-I15D-fp	流動閉塞杭	40	60 (1.5D)	1D 根入	プレート固定	1.9 * 50	0.5	-	-
	M1-R15D-p	整列	40	60 (1.5D)	1D 根入	ピン	2.3 * 50	0.5	-	-
M2：流動閉塞杭の流動抑制効果の確認	M2-UN	無し	-	-	-	-	4.0 * 50	1	-	-
	M2-R20D-s	整列	15	30 (2D)	固定	自由	1.6 * 50	1	0.5	0.5
	M2-I20D-s	流動閉塞杭								
	M2-R20D-l	整列	15	30 (2D)	固定	自由	3.3 * 50	1	-	-
	M2-I20D-l	流動閉塞杭								
	M2-R30D	整列	15	45 (3D)	固定	自由	2.4 * 50	1	0.5	0.5
M2-I30D	流動閉塞杭									

*実験ケース名の末尾の数字は、同一条件で実施した実験の区別を表す。
*ハッチングの有無は、同一の土槽を用いた実験の区別を表す。

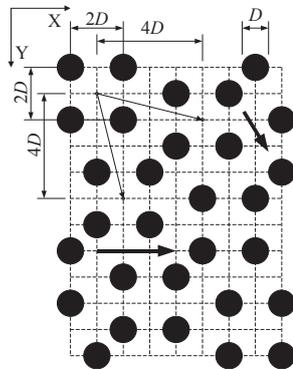


図-1 流動閉塞杭配置の概要 (D ：杭径)

表-1 遠心模型実験の相似則

物理量	実物	模型
密度, ρ	1	1
応力, σ	1	1
長さ, L	1	1/N
時間, t	1	1/N
加速度, α	1	N
速度, U	1	1
せん断ひずみ速度, $\dot{\gamma}$	1	N
液状化した土の粘性係数, μ	1	1/N
水の粘性係数, μ_w	1	1

よって地盤の流動を阻害し、流動量を減らすことにある。本工法は低改良率による施工のため対策費用を小さくすることが可能となり、広範囲にわたる側方流動対策として適用可能である。

本研究では、地表面を傾斜させて側方流動を生じさせる遠心模型実験を行い、改良杭の配置形状の違いが側方流動抑制効果に与える影響と改良杭に作用する流動力について検討した。本稿では改良杭に作用する流動力に関して整理を行い、流動力の評価式を提案した。

2. 遠心模型実験

(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 Mark II (最大加速度 113g, 最大積載量 = 2760kg) ⁶⁾を用いて行った。本実験における相似則の一覧を表-1 に示す。

a) 実験ケース

表-2 に実験ケースを示す。表には模型杭の概要とその境界条件および入力加速度に関しても示してある。なお、杭模型の概要は c) 実験模型と計測項目で、入力加速度については d) 入力波において後述する。M1 シリーズ (以後、M1 と略す) は杭の配置形状と杭頭の拘束条件の違いが側方流動抑制効果に与える影響について着目した実験である。M2 シリーズ (以後、M2 と略す) は、土質試料と間隙流体を変えて改良杭間の地盤のすり抜けが起こりやすとした条件において流動閉塞杭の側方流動抑制効果を整列配置と比較して検討したものである。

b) 模型地盤の作製方法と使用材料

模型地盤は所定の密度となるよう空中落下法によって作製した。非液状化層の目標相対密度は 90 % であり、用いた試料は相馬珪砂 5 号 (平均粒径 $D_{50}=0.35$ mm, 均等係数 $U_c=1.6$) または飯豊珪砂 7 号 (平均粒径 $D_{50}=0.174$ mm, 均等係数 $U_c=1.5$) である。一方、液状化層には相馬珪砂 5 号、またはこれに非塑性のシリカパウダー ($D_{50}=0.05$ mm, 砂：シルト=22%：78%) を重量比で 7：3 となるように混ぜた混合試料を用いた。相馬珪砂 5 号を用いたときの目標相対密度は 40 % であり、混合試料を用いた際の目標相対密度は 50 % とした。

通常、遠心模型実験では透水を遅らせる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い。非

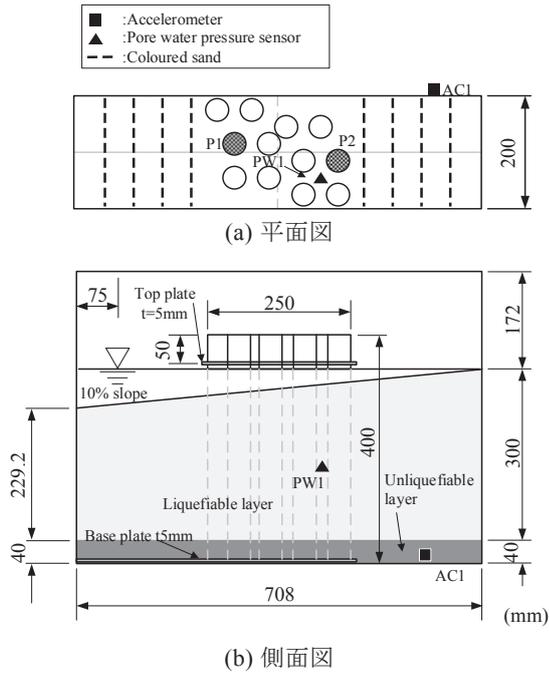


図-2 実験模型と計測器配置 (M1, M1-I15D-p, M1-I15D-fp)

液状化層および液状化層の両方に相馬珪砂 5 号を用いた M1 では、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間隙流体として用いた。しかしながら、粘性流体は流動性を低下させるという報告がある⁷⁾。そこで、地盤の流動性を高めるために M2 では間隙流体に脱気水を用いた。なお、これらの実験では Takahashi et al⁸⁾の方法を参考にして前述した細粒分としてシリカパウダーを混ぜて透水性を下げ、水圧の消散を遅らせることとした。これにより透水係数は細粒分を混ぜないものよりも 1/24~1/30 程度に小さくなった。

全ての実験において、模型地盤は 30 g の遠心力場から下端からの浸透により斜面頂部まで飽和させ、加振時の遠心加速度は 50 g とした。

c) 実験模型と計測項目

M1 の実験模型と計測器配置を図-2 に示す。前述したように、M1 では非液状化層および液状化層に相馬珪砂 5 号を用いた。地表面の勾配は斜面の全てで 10% である。改良杭は実物で直径 2 m のものを想定し、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、先ず所定の位置に直径 44 mm の穴を開けた厚さ 5 mm のアクリルプレートに土槽底部に固定し、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。プレートと杭模型周囲に隙間があるため、その下端は自由に回転する

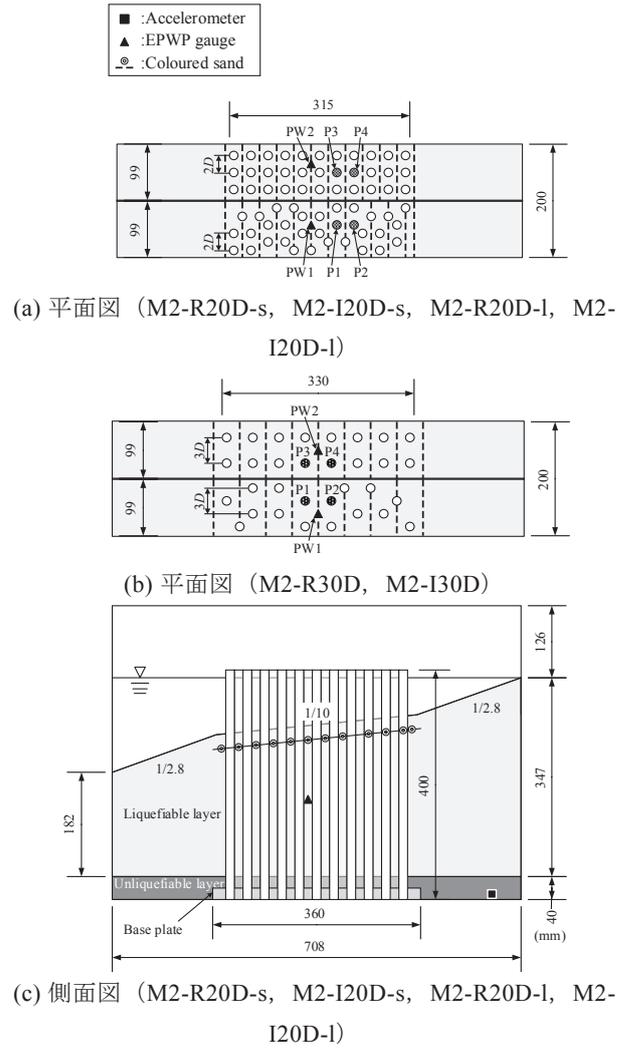


図-3 実験模型と計測器配置 (M2)

ことが可能であり、最大 2 mm までの滑動を許容することができる。M1-I15D-p, M1-I15D-fp および M1-R15D-p では図-2 (b)に示すよう杭模型の上端側に寸法が 270 mm×198 mm で下端側プレートと同じ穴の空いたプレートを、杭模型上端部から 50 mm 下がった位置に設置した。さらに M1-I15D-fp では、このプレートと杭模型とを接着剤で固定した。固定には一辺 10 mm の立方体の一面を杭模型の曲率に合わせたアクリル製の駒を利用し、これを杭模型の周囲 4 方向に配置して杭模型とプレートとを接着し、両者の固定度を高めるように努めた。図-2 (a)に色付きの P1 と P2 で示す杭模型の外周面にはひずみゲージを貼り付けて曲げひずみを計測した。

一方、図-3 に示す M2 の実験には、一度に 2 つの模型を加振できるよう幅 200 mm の中間を厚さ 2 mm のステンレス板で仕切った土槽を用いた。模型地盤は、厚さ 40 mm の非液状化層と混合砂を用いて作製した液状化層の二層構造とした。斜面中央部の地表面勾配は 1/10

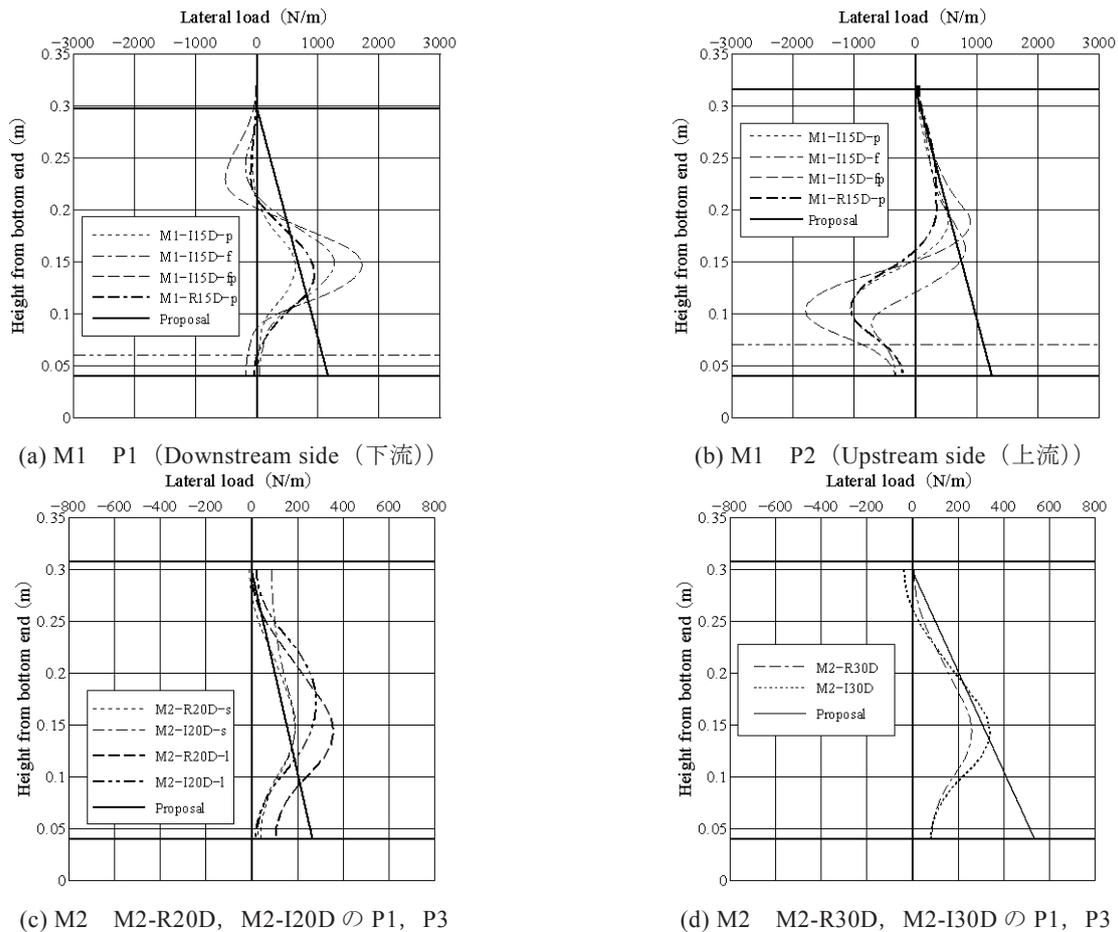


図-4 杭模型に作用する荷重の分布

であり、その上流および下流側には勾配が 1/2.8 の領域を設けた。これは駆動力を高めて側方流動を生じ易くするためである。M2 では、改良杭の配置形状の違いが流動抑制効果に与える影響を明確にすることに主眼を置いた。そこで、多くの杭を配置するよう検討した結果、杭模型には外径 15 mm、内径 13 mm のアルミパイプを用いることにした。パイプ内部には液状化層に用いた試料を充填しただけであり、密度の調整は行っていない。杭模型の下端は厚さ 20 mm のアクリル板に埋め込むことにより固定条件とし、上端の境界条件は自由とした。図-3 (a)および(b)に色付きの P1~P4 で示す杭模型の外周面にひずみゲージを貼付けて曲げひずみを計測した。

d) 入力波

入力波には周波数 100 Hz (実物スケールで 2 Hz) の正弦波を用いた。M1 の加振時間は 0.5 秒であり、M2 では最大加速度の継続時間を 0.5 秒と 1 秒の二つとし、前者についてはその後に側方流動を持続させるために加速度の振幅を最大値の 1/3 にしてさらに 0.5 秒間加振を継続させた。各実験における実測最大加速度を表-2 に示す。

(2) 流動力に関する実験結果と考察

ここでは、杭模型に作用する流動力について考察する。なお、数値は模型スケールでの値とする。

図-4 に杭模型に作用する荷重分布を示す。荷重分布は、ひずみから求めた曲げモーメント分布を微分して得られるせん断力分布を、再度 3 次の平滑化スプライン関数で評価した後に微分したもので、上流側から作用する場合を正とした。M1 については、無改良での実験後の観察から側方流動が発生したと考えられる深さを二点鎖線で示した。M1 および M2 とともに上部では上流側から深度方向に漸増する荷重が作用するが、下部ではその荷重が減少していることがわかる。これは、流動量の分布が土槽の境界条件の影響を受けたためと考えられる。すなわち、M2 では液状化層下端まで側方流動が生じたが下方の流動量は上方のそれより小さかったため流動力が減少し、M1 では液状化層深部において側方流動が生じなかったため下方では逆向きの荷重が作用する結果となったものと思われる。

図-4 には、式(1)に示す杭模型に作用する流動力の提案式より算出される流動力分布も示した。

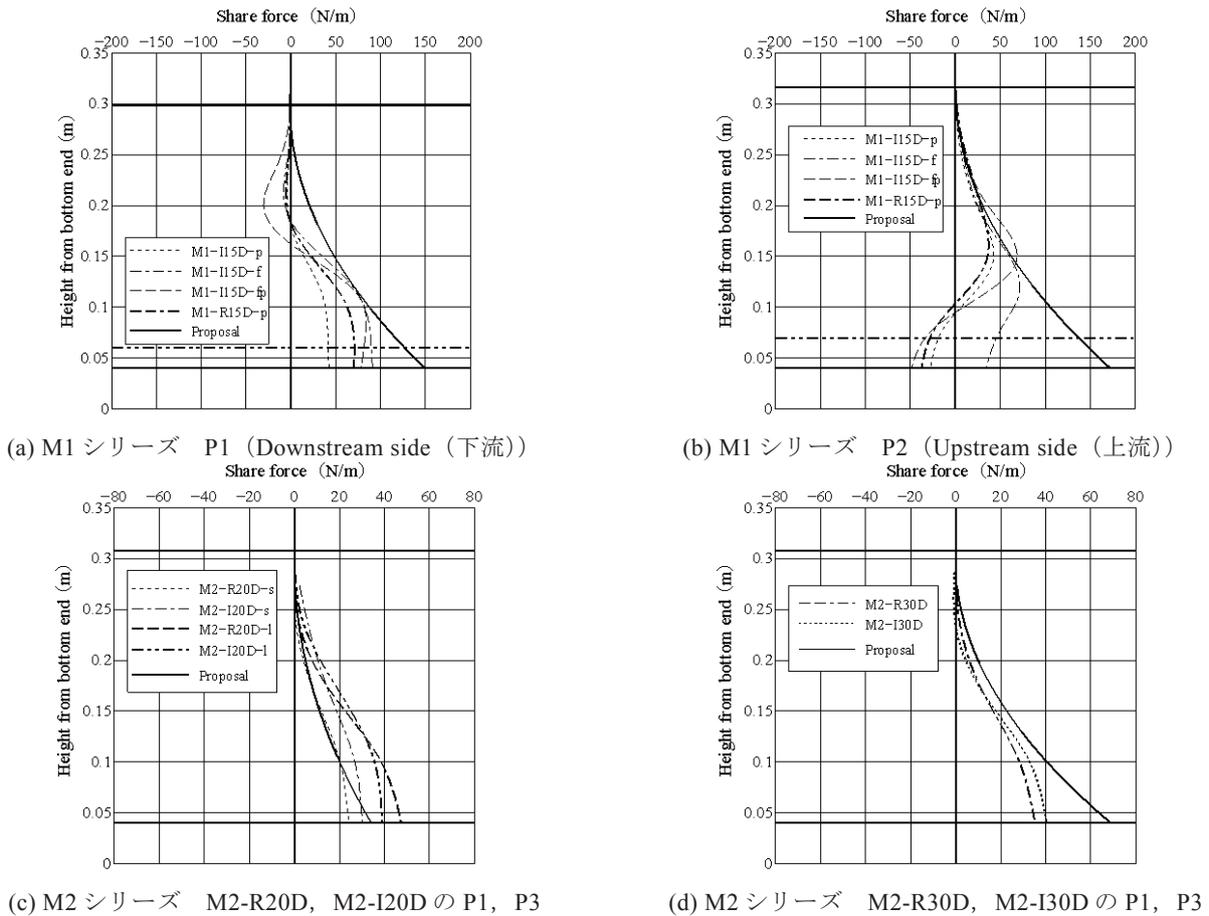


図-5 杭模型に作用するせん断力

$$q_L = 0.3\gamma_L \cdot x \quad (1)$$

式中の各パラメータは、

- q_L : 液状化層中にある部材に作用する深さ x (m) の位置の単位面積当りの流動力 (kN/m²) ,
- γ_L : 液状化層の平均単位体積重量 (kN/m³) ,
- x : 地表面からの深さ (m) ,

である。

式(1)は、液状化層中の改良杭模型に全上載圧の 30 % の流動力が作用すると考えたものである。その際、流動力は各杭で均等に分担されるものとした。式(1)は、1995 年に発生した兵庫県南部地震の際に橋梁基礎杭に生じた被害と整合するように逆解析により導かれた道路橋示方書 V 耐震設計編⁹⁾に示される流動力式を参考に設定したものである。式(1)では流動力は三角形分布荷重となるが、杭模型上部では実験値と式(1)での荷重分布形状は類似している。局部的に式(1)より大きな荷重が作用するケースもあるが、入力波の加速度が特に大きい M2-R20D-I および M2-I20D-I を除く全てのケースで概ね同式以下の荷重となった。また、荷重分布形状が類似す

る上部においては、入力波の大小に関わらず杭間隔が大きくなるほど流動力が式(1)よりも小さくなる傾向が見られた。これは杭間隔が広いほど杭模型間の地盤のすり抜けが大きくなり、改良杭に作用する荷重が低減されるためと思われる。

改良杭上部の拘束条件を変化させた M1 の結果によると、M1-I15D-f→M1-I15D-p→M1-I15D-fp の順で拘束が大きくなるほど上流と下流との分布形状の差が大きくなった。これは、改良杭上部を繋ぐ版を介して、上流と下流の改良杭が荷重を伝達しあつたためと考えられる。

図-5 は杭模型に作用する荷重を杭の上端から積分して求めた荷重の合力を示したものである。M1 については、側方流動が発生した深さを二点鎖線で示した。杭模型上部においては式(1)を上回るケースもあるが、流動を生じた深度での値は入力波の加速度が特に大きい M2-R20D-I および M2-I20D-I を除く全てのケースで式(1)以下となった。したがって、地震波の加速度が特に大きい場合を除いて、側方流動を生じると想定される土層全てに対して式(1)による流動力を見込むことで、改良杭の構造設計が可能と考えられる。なお、地震波の加速度が

特に大きい場合に改良杭の動的な応答が大きくなることについては、今後検討の余地がある。

同一条件で流動閉塞杭と整列配置を比較した M2 の結果によると、同じ改良率では杭模型の曲げモーメント分布および杭模型に作用する流動力に有意な差は見られなかった。一方、流動経路が長くなる流動閉塞の側方流動量が整列配置のそれよりも小さくなることは観測されている¹⁰⁾。杭模型に作用する流動力に杭配置の違いによる影響が明確に認められなかったのは、その大小には液状化地盤の流速や粘性などの要因が複雑に関係しているため、本実験条件下では有意な差として表れなかった可能性が考えられる。

3. まとめ

本研究では、遠心模型実験により改良杭の配置形状の違いが側方流動抑制効果に与える影響と改良杭に作用する流動力について検討した。その結果、改良杭に作用する流動力に関して得られた結論は以下のとおりである。

- ① 側方流動抑制対策としての改良杭について、全上載圧の30%の流動力が作用するものとした提案式により設計ができる可能性を示した。
- ② 改良率が小さいほど、提案式の流動力に対する改良杭に作用する荷重の比率は小さくなった。

本提案式による構造設計法の案は森川らの論文¹¹⁾を参照願いたい。なお、側方流動の低減量を定量的に評価するには至っていないため、今後は改良率や杭の配置形状に応じた側方流動の低減量を評価するための研究を進めていくことが重要である。

謝辞：本研究は、(国研)港湾空港技術研究所と東京大学、三井住友建設(株)の共同研究として実施しました。本共同研究においては、共同研究三者のみならず、多くの関係各位のご助力を頂きました。深謝申し上げます。

参考文献

- 1) Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K. : The 1995 Hyogoken-nanbu (Kobe) earthquake liquefaction ground displacement and soil condition in Hanshin Area, 地震予知総合研究振興会, 1995.
- 2) 安田進, 石原研而, 原田健二 : 液状化にともなう護岸背後地盤の流動範囲に影響を与える要因, 第 2 回土木学会阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.113-120, 1997.
- 3) 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.

- 4) 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.703-712, 2014.
- 5) Takahashi, H., Takahashi, N., Morikawa, Y., Towhata, I. and Takano, D. : Efficacy of pile-type improvement against lateral flow of liquefied ground, *Geotechnique*, DOI:http://dx.doi.org/10.1680/jgeot.14.P.238, 2016.
- 6) 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.
- 7) Arulanandan, K., Yogachandran, C., Muraleetharan, K.K., Kutter, B.L., and Chang, G.S. : Seismically induced flow slide on centrifuge, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 114, No. 12, pp.1442-1449, 1988.
- 8) Takahashi, H., Sassa, S. and Morikawa, Y. : Centrifuge modelling of earthquake-induced submarine landslide and its gravity flow transition, *Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Perth*, pp.1009-1015, 2014.
- 9) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 (V耐震設計編), 平成 24 年 3 月.
- 10) 津田和夏希, 高橋直樹, 須川智久, 森川嘉之, 高橋英紀, 東畑郁生 : 杭式深層混合処理工法の液状化に伴う側方流動対策効果に関する遠心模型実験 その 2 : 配置形状が対策効果に与える影響について, 第 49 回地盤工学研究発表会, pp.1267-1268, 2014.
- 11) 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, 港湾空港技術研究資料 (投稿中).