

液状化による側方流動対策のための 効果的な改良杭配置に関する遠心模型実験

Centrifugal model test on optimized configuration of cement-treated soil columns against liquefied ground flow

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI
 土木設計部 津田 和夏希 WAKAKI TSUDA
 土木設計部 奥野 夏樹 NATSUKI OKUNO

筆者らは、深層混合処理工法による改良杭の新たな配置方法である流動閉塞杭配置を提案し、その液状化時の地盤側方流動抑制効果について検討を行っている。本配置方法は、液状化による側方流動を阻害するように改良杭を配置するものである。本文は、側方流動が生じる際の改良杭間の土砂のすり抜け量の影響に関し、遠心模型実験で検討したものである。流動閉塞杭配置は杭間のすり抜けを抑制し、整列配置よりも側方流動抑制効果が高いことを示した。

キーワード：側方流動，深層混合処理工法，遠心模型実験

The authors proposed a new configuration of cement-treated soil columns, which is called irregular configuration. The presented configuration is considered to reduce amount of subsoil that passes through in-between gap of columns comparing with square configuration. The effects of cement-treated soil columns to reducing lateral flow have been investigated by centrifugal model tests. The test results demonstrated that the irregular configuration reduced the amount of subsoil passing between columns and restrained the lateral flow more effective than square configuration.

Key Words: Lateral flow, Deep mixing method, Centrifugal model test

1. 目的

我が国における大都市圏の沿岸部には 1964 年新潟地震以前に造成された古い埋立地が広く存在する。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、液状化に伴う側方流動（以後、側方流動とする）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が、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る。

このため、側方流動を抑制するための合理的な対策工法が必要であると考えられる。

そこで、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っている。また、対策効果の最大化を目指して、図-1 に示す流動閉塞杭配置を対象として杭配置についても検討を深めてきた¹⁾。この工法の原理は、流動化する地盤を完全にせき止めるのではな

く、改良杭に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

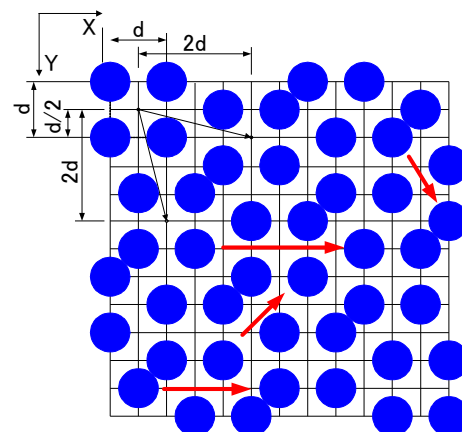


図-1 流動閉塞杭配置の概要

方流動対策として適用可能であると考え。なお、本工法では杭間隔が杭径と同程度になる改良率 20%程度を適用改良率として想定している。

本文は、側方流動が生じる際のメカニズムについて、改良杭間の砂のすり抜け量の影響を明確にするために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、その結果を報告するものである。

2. 遠心模型実験

(1) 実験方法および実験条件

実験は港湾空港技術研究所所有の遠心模型実験装置²⁾を用いて実施した。加振時の遠心加速度は 50G とし、実物との縮尺比は 1/50 とした。本実験における相似則の一覧を表-1 に示す。なお、本実験では、Takahashi et al³⁾の実験手法を参考として、液状化した地盤の流動化をモデル化した。すなわち、砂地盤に細粒分を混合して排水を遅らせ、流動性を高めるために間隙水として水を用いた。これにより地盤の流動性を高めて改良杭間のすり抜けを起こりやすくした。

図-2 は模型の概略と計器配置を示したものである。

一度に二つの模型を加振できるように、実験には幅 200mm の中間を厚さ 2mm 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 40mm で相対密度 90% の非液状化層と相対密度 50%の液状化層の 2 層構造とし、空中落下法により作製した。改良範囲となる中央部の地表面勾配は 10%であり、駆動力を高めて側方流動を生じ易くするためにその上流および下流側の地表面勾配は 36%とした。非液状化層は飯豊珪砂 7号 ($G_s=2.658$, $e_{min}=0.633$, $e_{max}=0.996$) を用いて作製し、液状化層には相馬珪砂 5号にシリカパウダーを重量比で 7:3 となるように混合させたもの ($G_s=2.65$, $e_{min}=0.475$, $e_{max}=1.012$) を用いた。

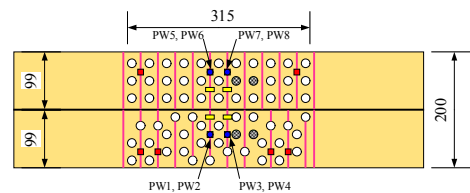
遠心加速度が 50G の場合、透水を遅らせるために間隙流体として水の 50 倍の粘性を有する溶液を用いることが多いが、本実験では地盤の流動性を高めるために脱気水を用いた。その代わりとして上記のように細粒分を混入させた。模型地盤は 30G の遠心力場で下端からの脱気水の浸透により水浸させ、加振時の水位は斜面頂部に合わせた。

改良杭模型 (以後、杭模型とする) には外径 15mm、内径 13mm のアルミパイプを用いることとした。杭模型の直径を実物に換算すると 750mm となる。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 20mm のアクリル板に埋め込むことにより固定条件とし、上端

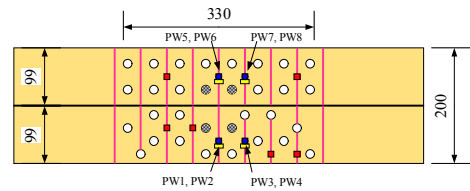
表-1 遠心模型実験の相似則

物理量	単位	遠心場模型 (λG)
長さ	m	$1/\lambda$
密度	t/m^3	1
応力	Pa	1
ひずみ	$\times 10^{-6}$	1
曲げ剛性	$N \cdot m^2$	$1/\lambda^4$
加速度	m/s^2	λ
振動数	Hz	λ
時間 (動的)	s	$1/\lambda$
時間 (拡散)	s	$1/\lambda^2$

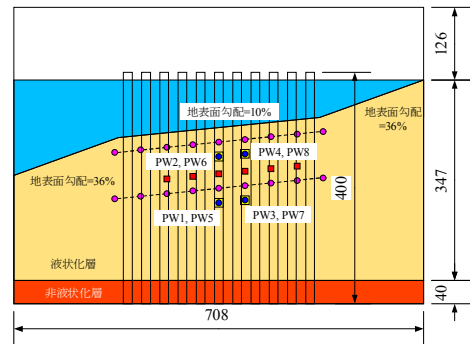
■: 加速度計 □: 土圧計 ●: 間隙水圧計 ○: 色砂



(a) 平面図 (CASE1, CASE2)



(b) 平面図 (CASE3)



(c) 側面図 (mm)

図-2 実験模型と計器配置

表-2 実験ケース

ケース名	杭間隔	改良率 (%)	最大加速度振幅 (cm/sec ²)
CASE1	1D	19.6	160
CASE2	1D	19.6	325
CASE3	2D	8.7	138

D: 杭模型の直径

の境界条件は自由とした。

地盤内には加速度計、土圧計および間隙水圧計を埋設し、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曲げひずみを計測した。

表-2 に実験ケースを示す。CASE1 と CASE2 は杭間隔を $1D$ (D : 杭模型の直径) として入力加速度振幅を変えた実験であり、CASE3 は杭間隔を $2D$ にした実験である。本実験は側方流動に対する変位低減効果を検討することに主眼をおいているので、入力波には周波数特性が明確な正弦波を用いることとした。CASE1 および CASE3 の入力波は、目標加速度振幅 200cm/s^2 、周波数 2 Hz および継続時間 25 秒 (いずれも重力場換算) である。これらの実験では側方流動を持続させるために、その後振幅を最大値の $1/3$ にして 25 秒 間加振を継続した。CASE2 の入力波は、重力場換算で目標加速度振幅 300cm/s^2 、周波数 2 Hz および継続時間 50 秒 とした。なお、実際の最大加速度振幅は振動台の調子によって表-2 に示す通り目標値に対して CASE1 で 20% 、CASE3 で 30% 程度小さい値となった。

(2) 実験結果と考察

過剰間隙水圧の発生特性と模型地盤の流動特性について考察する。以降の図は、重力場換算で示す。

a) 過剰間隙水圧の発生特性

図-3 は、模型地盤中央付近に設置した間隙水圧計 PW1 (流動閉塞杭配置) または PW5 (整列配置) で計測された間隙水圧から求めた過剰間隙水圧比の時刻歴を示したものである。図には移動平均により平滑化した結果も示している。なお、有効拘束圧は液状化に伴って生じる間隙水圧計と地表面の沈下を考慮して算出している。

CASE1 および CASE2 の最大値は 1.0 に達していることから、模型地盤は液状化したことが分かる。また、最大加速度振幅が小さい CASE3 の過剰間隙水圧比は他のケースよりも若干低い値となっているが、最大値は 0.95 に達していることから、模型地盤はほぼ液状化していると言える。CASE1 および CASE3 の過剰間隙水圧比は、加速度振幅が最大値の $1/3$ となる $25\sim 50\text{ 秒}$ 間においてもほぼ一定値となっていることから、この間においても地盤の流動が生じていたものと思われる。

b) 模型地盤の流動特性

図-4 は、模型地盤の流動状況を $GL-1.25\text{m}$ に設置した色砂をトレースして示したものである。杭間隔 $1D$ の CASE1 と CASE2 の流動状況を見ると、CASE1 整列配置では流動方向に連続して杭間にすり抜けが生じており、加速度振幅の大きい CASE2 整列配置ではそれが顕著となっている。一方、流動閉塞杭配置では CASE2 で杭間のすり抜けが生じているものの、その程度は整列配置よりも相対的に小さいことが認められる。このことから、流れを阻害するように杭を配置する流動閉塞杭配置は、整列配置よりも杭間のすり抜けを抑制する効果が高いこ

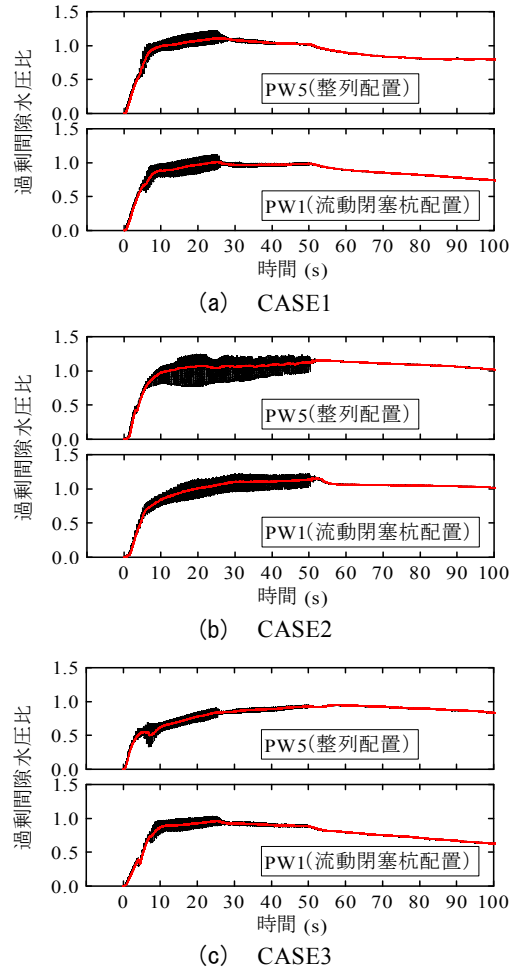


図-3 過剰間隙水圧比の時刻歴

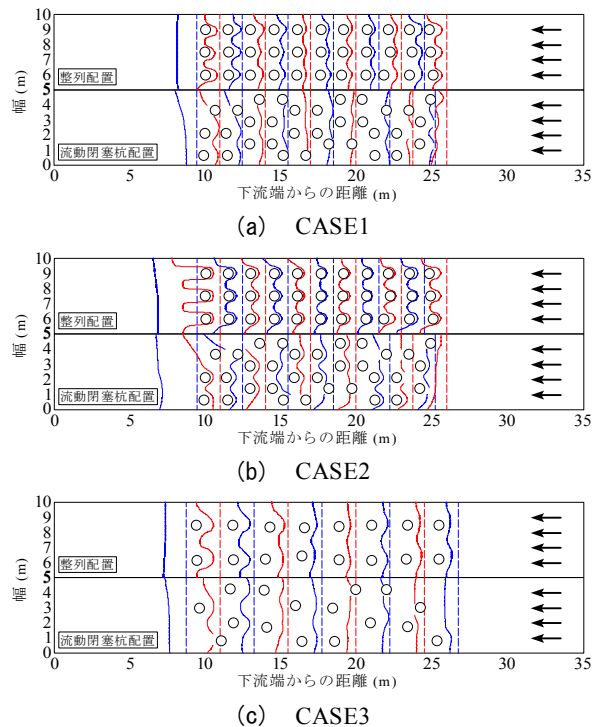


図-4 模型地盤の流動状況

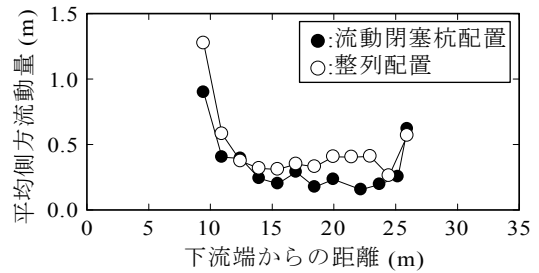
とが確認できる。杭間隔 $2D$ の CASE3 における地盤の流動状況を流動閉塞杭配置と整列配置と比較すると、杭間のすり抜け挙動に明確な違いが認められない。杭間隔が広くなると流動を阻害する杭配置の効果が小さくなるものと考えられる。

図-5 は、図-4 に示した色砂の移動量から求めた平均側方流動量を示したものである。ここでは、下流端から 10m~25m における結果について考察する。CASE1 と CASE2 の結果について、流動閉塞杭配置の平均側方流動量は、CASE1 で 0.16m~0.41m に、CASE2 で 0.44m~1.10m に分布している。一方、整列配置のそれは、CASE1 で 0.27m~0.58m となり、CASE2 で 0.75m~1.50m であった。平均側方流動量は、加速度振幅の大きい CASE2 の方が CASE1 よりも 2~3 倍程度大きな値となっている。また、流動閉塞杭配置の方が整列配置よりも流動が抑制されていることが分かる。下流端からの距離が同じ位置で比較した場合、流動閉塞杭配置の平均側方流動量は、整列配置に対して CASE1 で最大 38% に、CASE3 で最大 75% に低減されている。これらのことから、杭間のすり抜けを抑制する杭配置にすることが、側方流動量の低減に効果的であることは明らかである。杭間のすり抜け挙動に明確な差が認められない杭間隔 $2D$ の CASE3 について、流動閉塞杭配置の平均側方流動量は 0.37m~0.69 m に、整列配置のそれは 0.34m~0.92m に分布しており、両者は同程度となっている。なお、土槽幅 4.5m として CASE1 と同じ条件で実施した無対策の平均側方流動量は 3m~3.5m 程度であった。先に示した CASE1 の平均側方流動量はこれに対して十分に小さい値であることから、整列配置であっても側方流動対策として効果があり、流動閉塞杭配置はさらにその効果を大きくするものであることが分かる。

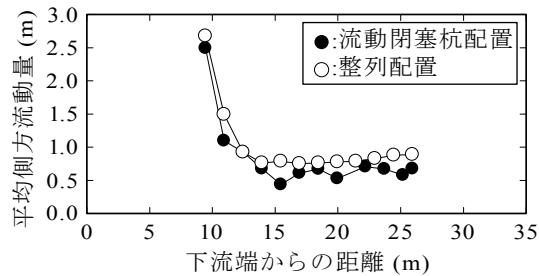
3. まとめ

本研究では、遠心模型実験により流動閉塞杭配置の側方流動抑制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。

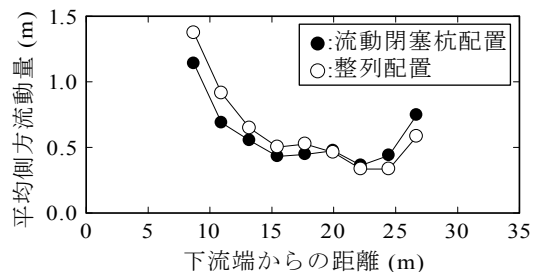
- ① 整列配置では未改良領域が連続するため杭間の砂のすり抜け量が多くなる。一方、流動を阻害するように杭を配置した流動閉塞杭配置は杭間の砂のすり抜け量を低減することができる。
- ② 杭間隔が広くなると流動を阻害する杭配置の効果が小さくなる。
- ③ 側方流動量の大小は杭間の砂のすり抜け量に依存し、流動閉塞杭配置は側方流動抑制効果が整列配置よりも大きい。



(a) CASE1



(b) CASE2



(c) CASE3

図-5 平均側方流動量

謝辞：本研究は、港湾空港技術研究所・東京大学・三井住友建設の共同研究として実施しました。ご協力をいただいたメンバーの方々に感謝の意を表します。

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, *Proc. of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, pp.1623-1624, 2013.
- 2) 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.
- 3) Takahashi, N., Sassa, S. and Morikawa, Y.: Centrifuge modelling of earthquake induced submarine landslide and its gravity flow transition, *Proc. of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, Perth, pp. 1009-1015, 2014.