

群杭の地震時挙動に関する遠心模型実験

飛田哲男¹・井合進²・原哲郎³

¹京都大学 防災研究所助手 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: tobita @geotech.dpr.kyoto-u.ac.jp

²京都大学 防災研究所教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: iai @geotech.dpri.kyoto-u.ac.jp

³京都大学大学院 工学研究科学生 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

杭基礎を対象として、群杭効果、静的載荷時と地震時の相異、液状化の影響等、その挙動を調べるため遠心実験を実施した。実験は単杭と群杭の双方に対し、静的載荷（乾燥砂のみ）、振動載荷（乾燥砂及び飽和砂）の条件のもとで行った。群杭は3×3で杭間隔は杭径の3倍、杭頭は自由端とした。静的載荷・振動載荷のいずれにおいても、群杭効果による支持力の減少が見受けられた。振動実験では、静的水平載荷時と比較して、地盤の抵抗力が著しく減少することがわかった。また異なる入力振動数に対する杭の挙動を観察した。さらに、飽和砂地盤では、液状化の影響による加速度振幅の減少が地表面よりやや遅れて杭の挙動に現れることが観察された。

Key Words : *Pile group, liquefaction, soil-structure interaction, centrifuge testing*

1. はじめに

本研究では、静的載荷および振動載荷による杭-土-杭間の相互作用を観察することを目的として、遠心模型実験を試みた。まず水平力載荷時の群杭効果について観察し、次に水平荷重を静的に載荷した場合と地盤を振動させることにより載荷した場合とで杭の挙動の違いを見た。第2章では実験装置及び用いた砂について説明する。第3章は実験結果について考察する。第4章は結論である。本文中の単位系は実大スケールとする。

2. 実験設備

(1) 遠心力載荷装置、土槽、振動台

本研究では、京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用いた。有効半径は2.5m、容量は24g・tonである。ここでgは重力加速度である。遠心プラットフォーム上に設置した振動台の容量は最大荷重14.7kN、最大加速度10g、最大振幅±2.5mmである。静的載荷の場合にはモデル縮尺1/20、振動載荷の場合には、振動台の容量から土槽重量に制約を受けるため、モデル縮尺を1/40とした。したがって、加えた遠心力はそれぞれ、20gおよび40gである。土槽の大きさは静的載荷実験の場合0.48x0.25x0.45m (LxDxH)、振動実験の場合0.4x0.1x0.28m (LxDxH)である。図-

1(a)に示すように、静的載荷の場合、モーターの動力を用い、杭頭に1mm/minの変位を与え載荷した。この場合、単杭、群杭のいずれにおいても、杭頭変位が杭径の30%になるまで載荷し、荷重がゼロになるまで除荷を行った。振動実験の場合には、図-1(b)に示すように、杭頭に付加したおもりの慣性力と、土の慣性力による二つの水平力が杭体に作用することになる。

静的載荷実験結果との比較を行い、液状化地盤中での群杭の挙動を調べるために、振動載荷実験を実施した。入力加速度は正弦波を用い20波、実大スケールで約0.2gの加速度振幅とした。入力振動数は1Hzとしたが、単杭で乾燥砂地盤の場合のみ0.5Hzと2Hzの場合についても実験を行った。杭頭に付加したおもりは、入力振動数1Hzで静的載荷実験で与えた杭頭最大変位（杭径の30%）と同程度の変位が得られるよう重量を算定した。

(2) 砂および間隙流体

実験に用いた砂は珪砂7号である。表-1にその諸元を示す。表-2に示すように、静的載荷実験では乾燥砂(Case 1, 2)、振動実験では乾燥砂(Case 3, 5)と飽和砂(Case 4, 6)の両者を用いた。

表-2より、Case 3とCase 5の相対密度(68%と83%)に差が見られるが、これはホッパーによる給砂に先立ち杭頭におもりをつけておく必要があったため、おもりの直下に砂が側方からすべるように供給さ

表-1 遠心実験での地盤材料諸元

最大間隙比, e_{max}	1.2
最小間隙比, e_{min}	0.70
平均粒径, D_{50} (mm)	0.13
均等係数, U_c	1.9

表-2 実験ケース

Test	载荷	杭	地盤	Dr (%)	G
Case 1	静的	単	乾燥	70	20g
Case 2	静的	群	乾燥	65	20g
Case 3	振動	単	乾燥	68	40g
Case 4	振動	単	飽和	40	40g
Case 5	振動	群	乾燥	83	40g
Case 6	振動	群	飽和	37	40g

れ、結果的に密度が増加したものと思われる。しかし、実験結果の精度に対する影響は小さいものと考えられる。

乾燥砂を用いた振動実験では、気中落下により相対密度約 70%の地盤を作製した。杭基礎の液状化地盤内での挙動をみるため、地盤は水溶性のセルローズから成る粘性流体（40cst）を用いて飽和した。この場合、粘性流体を脱気槽で約 3 時間脱気後、液中落下により相対密度約 40%の地盤を作製した。

(3) 杭のモデル化

杭のモデルには、真鍮パイプを用いた。表-3(a)には静的载荷実験、表-3(b)には振動载荷実験で用いた真鍮パイプの諸元値をモデルスケールとして、

表-3(a) 静的载荷実験における杭の諸元

	真鍮パイプ		実大杭	単位
	モデルスケール	プロトタイプスケール		
杭長	0.5	10	10	m
外径	15	300	305	mm
肉厚	1	20	9.5	mm
ヤング率 (E)	100.5	100.5	200	Gpa
断面2次モーメント(I)	1083	1.73E+08	9.64E+07	mm ⁴
曲げ剛性(EI)	108.9	1.74E+07	1.93E+07	MN·mm

表-3(b) 振動载荷実験における杭の諸元

	真鍮パイプ		実大杭	単位
	モデルスケール	プロトタイプスケール		
杭長	0.25	10	10	m
外径	7	280	305	mm
肉厚	0.9	36	9.5	mm
ヤング率(E)	101	101	200	Gpa
断面2次モーメント(I)	82	2.10E+08	9.64E+07	mm ⁴
曲げ剛性(EI)	8.2	2.11E+07	1.93E+07	MN·mm ²

またプロトタイプスケールに換算した値を示す。また同表において、ターゲットとは、米国プリガムヤング大学で行われた実大実験で用いられた杭である¹⁾。先に述べたように、静的実験と振動実験ではモデルの縮尺が異なるが、杭のモデル化にあたっては、曲げ剛性 EI の値をほぼ等しく取った。したがって、杭の肉厚、および実大杭に用いられている中詰めコンクリートの影響は小さいものと考えた。本実験では、群杭基礎として杭径の 3 倍の間隔で 3x3 に配置された 9 本の杭を用いた。単杭、群杭ともに杭頭は自由端、杭下端は土槽に固定した。

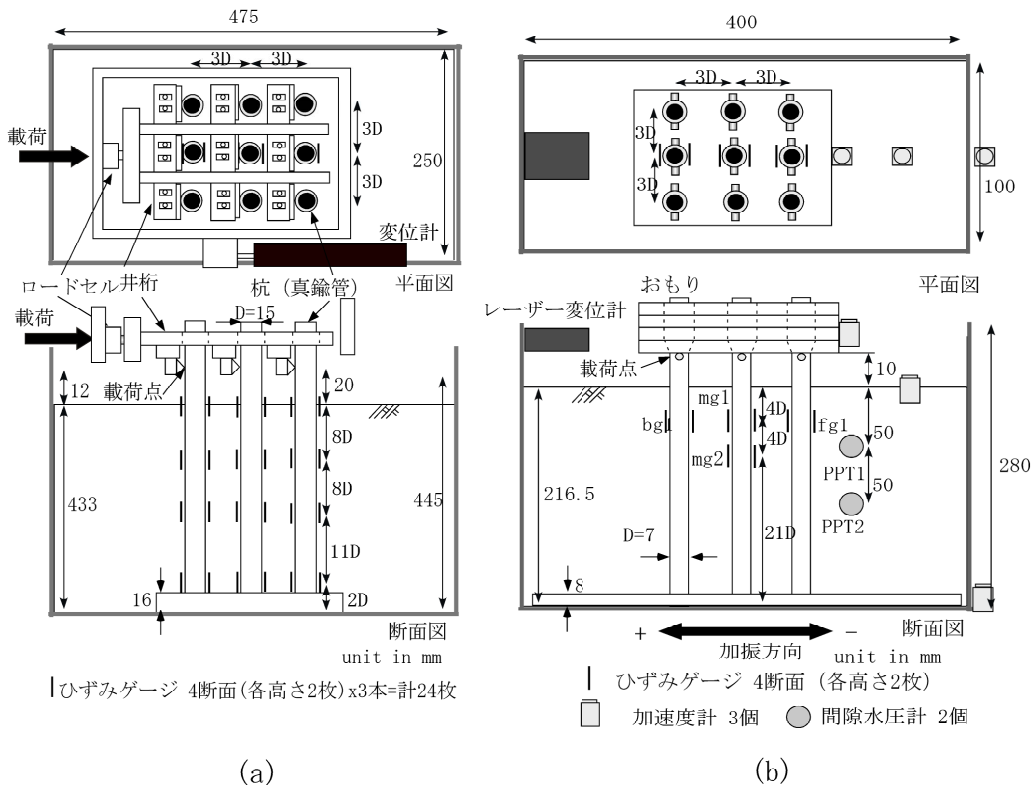


図-1(a) 静的载荷実験装置の概略図 (Case 2), (b) 振動载荷実験装置の概略図 (Case 6)

3. 実験結果

(1) 静的荷重及び振動荷重実験結果

図-2 に乾燥砂を用いた群杭の振動荷重実験 (Case 5) と、静的荷重実験 (Case 2) から得られた荷重-変位曲線の比較を示す。荷重は杭 1 本あたりの平均である。同図より、曲線の立ち上がり付近では、両者の傾きはほぼ一致しているが、変位が大きくなるにつれ、同一変位での荷重は、静的荷重と比較して、20%程度小さくなっていることがわかる。このことから、振動により地盤反力が大きく低下していることが考えられる。

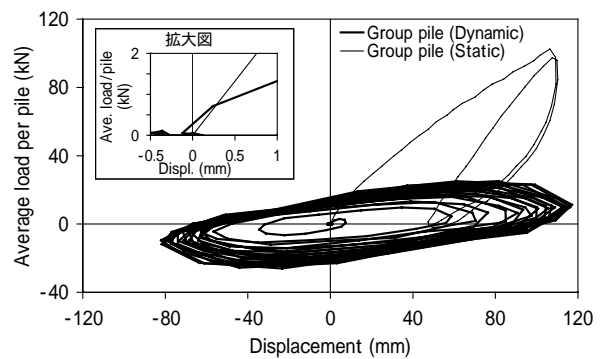


図 - 2 静的荷重・振動荷重 (1Hz) における荷重 - 変位曲線

(2) 単杭に対する入力振動数の影響

図 - 3(a)-(c) に入力振動数 0.5Hz, 図 - 3(d)-(f) に同 2Hz の場合の単杭の杭頭加速度, 地表面加速度, 入力加速度の時刻歴を示す。入力加速度振幅は同図(c)では約 1m/s^2 に対して, 同図(f)では約 2m/s^2 となっている。同図(b)と(e)より, 地表面加速度はいずれの振動数においてもやや増幅傾向にある。ところが同図(a)と(d)に示す杭頭では入力振動数 0.5Hz の場合には増幅, 2Hz の場合には減衰する傾向が見受けられる。このことから前節で見た地盤反力は振動数に依存するものであると推察される。

図-5 に乾燥砂と飽和砂地盤における地表面および杭頭の加速度時刻歴の, 振動開始から約 10 秒までを示す。入力加速度の振動数は 1Hz である。乾燥砂地盤では, 入力加速度振幅が 2m/s^2 に対し, 杭頭の加速度は徐々に増加し約 5m/s^2 まで増幅している (振動後 20 秒以降)。一方, 地表面加速度の最大値は $3\sim 4\text{m/s}^2$ であった。飽和砂地盤では, 杭頭の加速度振幅は 3 秒付近まで乾燥砂地盤と同程度で推移し, 以後液状化の影響で小さくなっている。一方, 地表面加速度は 2 秒以降小さくなっている。図-5 より乾燥砂, 飽和砂地盤共に, 地表面と杭頭の加速度に位相差が見受けられ, 地表面加速度のピークが杭頭の加速度よりもやや早めに現れていることがわかる。

(3) 液状化地盤中の杭基礎の挙動

飽和砂を用いた単杭と群杭の振動実験 (Case 4 と 6) により得られた荷重変位曲線を図-4 に示す。大きなループは液状化前のものであり, 液状化の進展と共に曲線の傾きが小さくなっている。ここで, 両者の荷重変位曲線を比較すると, 液状化以後も同一荷重に対する変位は群杭の方が大きく, 液状化地盤中でも群杭効果と推察される結果が得られた²⁾。

静的実験と比較して本振動実験では見かけの地盤反力が減少していることから, 杭と地盤が位相差を伴って動いている可能性や, 振動による地盤の非線形性による振動時の地盤反力係数の低下などが考えられる。今後, 入力振動数および液状化の進展が杭-地盤相互作用系に与える影響について詳しく調

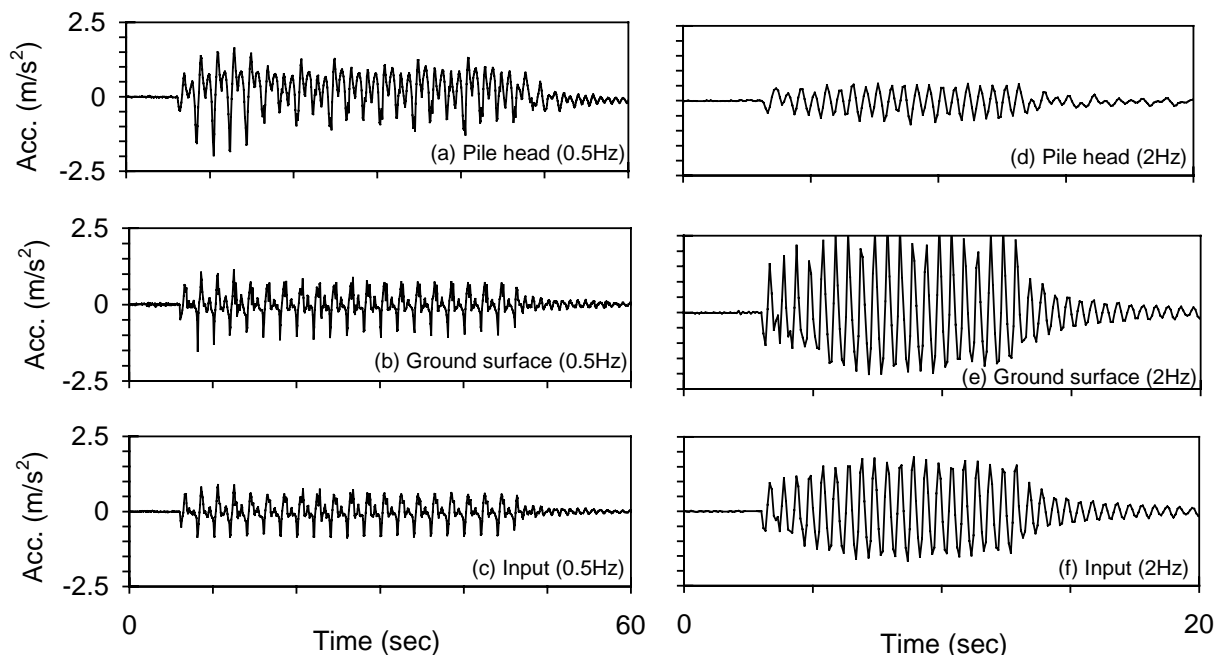


図 - 3 単杭の杭頭および地表面加速度振幅に対する入力加速度振動数の影響 (乾燥砂)

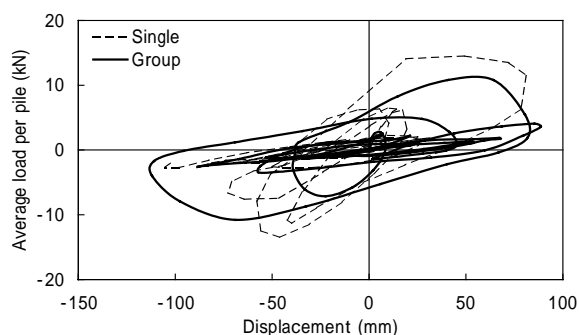


図-4 飽和砂地盤における単杭・群杭の荷重 - 変位曲線

べる必要がある。

4. 結論

大地震時における群杭の挙動を明らかにするために遠心場で水平荷重実験を行い基礎的なデータを得た。静的荷重実験結果と比較すると、振動荷重実験では静的な荷重の約10～20%の荷重で同程度の変位を得、その挙動が大きく異なることが実験的に明らかとなった。この原因として、本実験では杭の振動と地盤振動の位相差が小さいことや振動に伴う地盤の非線形性により地盤反力が減少したことが挙げられる。しかし、入力振動数を変化させた実験結果より、地盤反力の減少の程度は入力振動数と杭 - 地盤系の固有振動数に大きく依存するものと推察される。また飽和砂地盤を用いた振動実験では、液状化の影響による加速度振幅の減少が地表面よりやや遅れて杭の挙動に現れることが観察された。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、国土交通省近畿地方整備局神戸空港技術調査事務所より受託研究として助成頂いた。また京都大学防災研究所遠心力荷重装置運営委員会、技術室技官清水博樹氏にご協力いただいた。

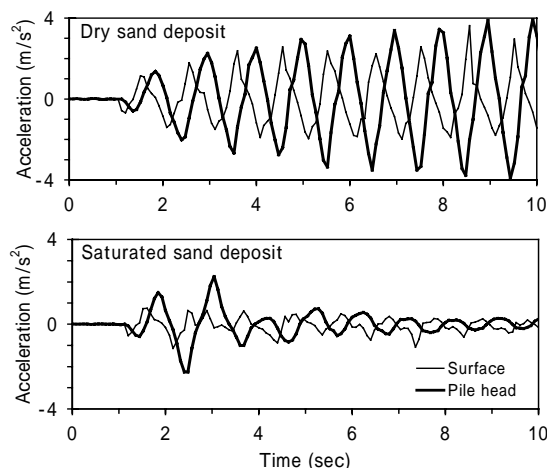


図-5 乾燥砂及び飽和砂地盤における地表面と杭の加速度時刻歴の比較 (Case 5 と 6)

参考文献

- 1) Rollins, K. M., Peterson, K. T. and Weaver, T. J.: Lateral load behavior of full-scale pile group in clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 468-478, 1998.
- 2) 小谷 直也・石原 研而・今村 眞一郎・萩原 敏行・塚本 良道, (2002): 側方流動地盤における杭の群杭効果に関する遠心模型振動実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, 57, 1243-1244.

(2003. 10. 10 受付)

CENTRIFUGE EXPERIMENTS ON THE GROUP PILE FOUNDATIONS UNDER STRONG SHAKING

Tetsuo Tobita, DPRI, Kyoto University
 Susumu Iai, DPRI, Kyoto University
 Tetsuro Hara, Kyoto University

Centrifuge experiments of static and dynamic lateral loading of pile group are carried out to study the group pile behavior under strong shaking. For all the test cases pile head is free and bottom of piles are fixed. An array (3 x 3) of nine piles with the interval of three times a pile diameter is used as a group pile foundation. Static loading tests are conducted with both single and group piles under dry condition, and dynamic tests are also conducted with single and group piles under both dry and saturated condition. It is experimentally shown that in the dynamic tests displacement at the pile head became much larger than that of static loading under the same level of loading. The effects of the frequency of incident waves are investigated. Group pile behavior may be observed, even in the case of dynamic tests under saturated condition.