

杭・地盤系の動的挙動に関する研究

飛田哲男・井合進・仲山賢司*・原哲郎*

*京都大学大学院

要 旨

杭・地盤系の動的挙動の検討に当たり、遠心場で単杭、群杭の静的および振動水平載荷実験を行った。杭径30cm、杭長10mの鋼管杭を、静的載荷実験では縮尺1/20、振動載荷実験では1/40でモデル化した。杭頭は自由端、杭間隔は杭径の3倍で3x3に配置された群杭の乾燥砂及び飽和砂地盤中における水平力載荷時の挙動を調べた。乾燥砂を用いた振動実験では、静的実験とは異なり、最大荷重と最大変位の発生時刻が一致せずその履歴曲線は丸みを帯びたものになった。これは地盤と杭の挙動における位相差または地盤の非線形性によるものと推察される。一方、飽和砂を用いた実験では、液状化地盤中においても群杭効果と推察される結果が得られた

キーワード：群杭，遠心力模型実験，液状化，杭の水平抵抗

1. はじめに

水平力を受ける群杭基礎の挙動に関してはこれまでに多くの研究がなされている(例えば, Scott et al., 1982, Crouse et al., 1993), しかし、大地震時の飽和砂地盤における群杭基礎の挙動については未だ研究途上にある。

杭基礎の被害要因としては、上部構造物に作用する過大な慣性力によって基礎が大きく変位した場合、および杭体に地盤から想定した以上の水平荷重が作用した場合の2つが考えられる。現行の耐震設計法では、杭基礎に対する杭頭水平載荷実験から得られる地盤反力係数を元に設計がなされているが、これは上で述べた被害要因のうち上部構造物に作用する慣性力を考慮したものである。ところが、杭頭水平載荷実験から得られる地盤反力と、地震時のように地盤と杭が一体となった場合の地盤反力との間には大きな違いがあることが報告されている(Rollins et al., 1998)。このことは杭基礎の耐震設計においては、上部構造物の慣性力だけでなく、地盤の慣性力をも考慮する必要があることを示唆しているが、地盤と杭の卓越周期の違いが杭の挙動に与える影響、液状化地盤中の地盤反力など、未解明の問題がある。

一般に杭基礎を対象とした実大実験では、杭頭に

静的および動的に荷重を作用させる実験が行われている。しかし、実大実験では、地盤振動による荷重載荷を再現することは極めて難しいため、本研究では遠心模型実験を試みた。実験を行うにあたり、静的載荷実験と振動載荷実験の両者を行い結果を比較した。

本研究の目的は、水平力載荷時の1)単杭と群杭の挙動を比較し群杭効果をみること、2)遠心模型実験の適用性を検討するため米国ブリガムヤング大学で行われた「実物大群杭基礎の原位置載荷実験」(Rollins et al., 1998)との比較を行うこと、3)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ること、4)杭・地盤系について、地盤の固有振動数(f_g)と杭・地盤系の固有周期(f_s)との関係に着目し、それらの相対的な関係が地盤と杭の挙動に与える影響を観察することである。その際、乾燥砂地盤と飽和砂地盤での杭の挙動についても考察する。本文中の単位系は実物換算とする。

2. 実験設備

2.1 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。遠心ブラットホ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。静的載荷の場合、モーターの動力を用い、杭頭に1mm/minでゆっくりと荷重を加えた。振動実験の場合には杭頭に付加したおもりの慣性力と、地盤から受ける力の二つの水平力が杭体に作用することになる。

2.2 砂および間隙流体

実験に用いた砂は、平均粒径 $D_{50}=0.13\text{mm}$ の珪砂7号である。Table 1にその諸元を示す。静的載荷実験では乾燥砂を、振動実験では乾燥砂と飽和砂の両者を用いた。群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スから成る粘性流体を用いて飽和した。この流体は廃液として環境に負荷がかからない利点はあるが温度に敏感であるため、実験前に室温で所定の粘性（動粘性係数40cst）が得られているかどうか、粘性測定器で調べた。既往の研究から、このような粘性の高い流体が地盤の動的な挙動に及ぼす影響は、小さいことが報告されている(Dewoolkar et al., 1999)。

乾燥砂を用いた実験では、気中落下により相対密度約70%の地盤を作製した。飽和砂を用いた実験では、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。

2.3 杭のモデル化

杭のモデルには、真鍮パイプを用いた。Table 2(a)には静的載荷実験、同表(b)には振動載荷実験で用いた真鍮パイプの諸元値をモデルスケール、およびプロトタイプスケールとして示す。静的実験では縮尺

Table 1 Physical properties of Silica sand #7

Max. dry unit weight $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$	14.0
Maximum void ratio	1.20
Minimum void ratio	0.70
Average diameter $D_{50}(\text{mm})$	0.13
Coefficient of uniformity U_c	1.9
Friction angle (degree) at $Dr=60\%$	36.0

Table 2 Dimensions of pile modeling

(a) Static tests				
	Brass tube		Prototype	
	Model scale	Prototype scale	Target	Unit
Length	0.5	10	10	m
Outer diameter	15	300	305	mm
Wall thickness	1	20	9.5	mm
Young's modulus (E)	100.5	100.5	200	Gpa
2nd moment of area (I)	1083	1.73×10^8	9.64×10^7	mm^4
Bending stiffness (EI)	108.9	1.74×10^7	1.93×10^7	MN-mm^2

(b) Dynamic tests				
	Brass tube		Prototype	
	Model scale	Prototype scale	Target	Units
Length	0.25	10	10	m
Outer diameter	7	280	305	mm
Wall thickness	0.9	36	9.5	mm
Young's modulus (E)	101	101	200	GPa
2nd moment of area (I)	82	2.1×10^8	9.64×10^7	mm^4
Bending stiffness (EI)	8.2	2.11×10^7	1.93×10^7	MN-mm^2

1/20、振動実験では縮尺1/40のモデルを用い、それぞれ20g、40gの遠心場で実験を行った。また同表において、ターゲットとは、米国ブリガムヤング大学で行われた実大実験で用いられた杭のことである(Rollins et al., 1998)。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、水平力載荷時の挙動を再現するため、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、及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排除した。

本実験では、単杭及び群杭について実験を行なった。群杭基礎は杭径の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、杭底部は土槽に固定した。すべてのケースにおいて杭頭は自由端とし、杭の底部は固定端とした。

静的実験では、単杭、群杭ともにFig. 1(a)及びPhoto 1に示すように、載荷フレームに吊り下げ治具(Hanging jig)を取り付け、そこから井桁の移動範囲で自由に動く4本の棒を介して井桁を吊り下げた。その井桁に取付けたステンレスの小片(Knife-edge bits)を介して、載荷重を杭の所定の高さ(地上0.4 m)に加えた。また、その小片は杭に対して前後に移動させることが可能であり、実験前にはすべての小片が杭と接するようにした。また載荷フレームと吊り下げ治具の相対変位に伴う摩擦を潤滑油などで減らし、吊り下げ治具から水平荷重が井桁に伝わらないように注意した。すなわち、載荷重はロードフレームに固定された荷重計のみを介して井桁に与えられるものとした。

振動実験では、Fig. 1(b)に示すように、杭を通すための穴の開いた板状のおもりを杭頭に取り付けた。

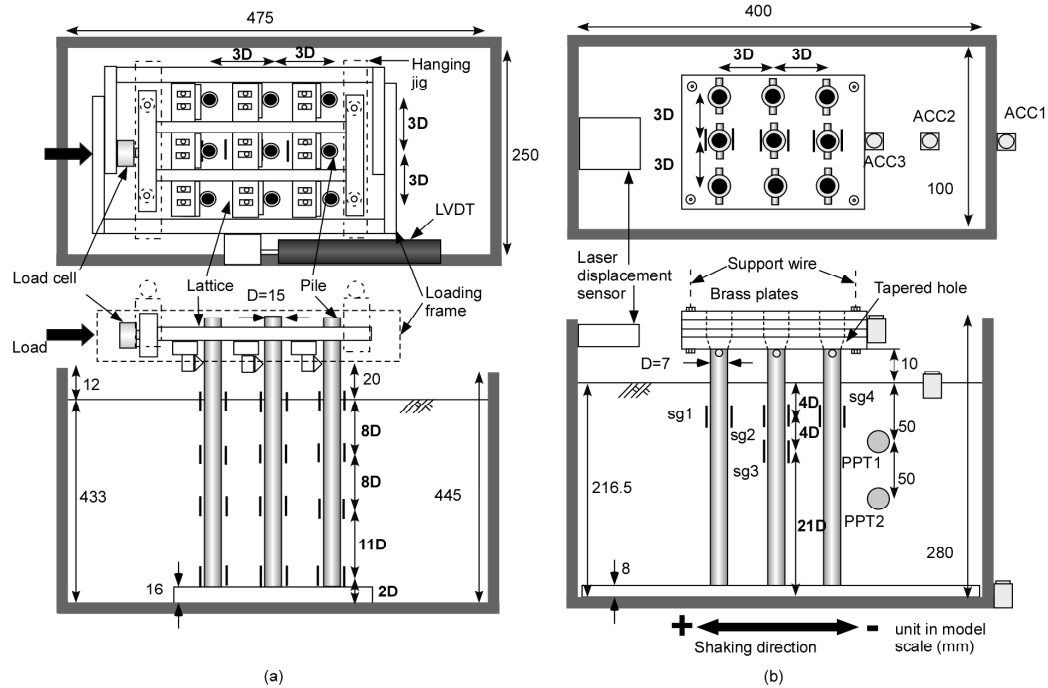


Fig. 1 Illustration of model setup for (a) static loading test (No. 2) and (b) dynamic test (No. 6).

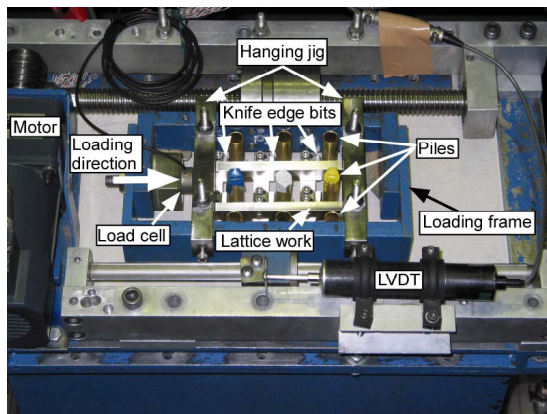


Photo 1 Model setup for Test No. 2.

また杭の荷重載荷点には横棒を入れ、おもりを支えるものとした。おもりとなる板に開けた穴の荷重載荷点の直径は杭の外径とほぼ同じで、それよりも上部の穴の直径は杭径よりも大きくとった。こうすることで荷重載荷点に集中荷重を与えることができる。単杭の場合には、中心に穴が1つ開いた板1枚を用い、それを土槽上部に渡した板からワイヤーでバランスをとりながら吊り下げた。群杭の場合には、9個穴の開いた4枚の板をボルトで固定し一体とし、杭頭に取り付けた。

2.4 実験ケース

本研究で行った実験ケースをTable 3に示す。実験は計6ケース行い、杭頭に対して1方向に静的に載荷・除荷を行う「静的繰返し載荷実験」を2ケース

Table 3 Test cases

Test No.	Loading	Pile setup	Soil	g	Dr (%)
1	Static	Single	Dry	20	70
2	Static	Group	Dry	20	65
3	Dynamic	Single	Dry	40	68
4	Dynamic	Single	Sat	40	40
5	Dynamic	Group	Dry	40	83
6	Dynamic	Group	Sat	40	37

(No. 1と2)、杭頭におもりを付加し土槽ごと振動させたときのおもりの慣性力で杭頭に荷重を加える「振動実験」を4ケース (No. 3から6) 行った。

No. 1とNo. 2は乾燥砂を用いた静的載荷実験であり、それぞれ単杭と群杭を用いた実験である。単杭実験、群杭実験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、荷重がほぼゼロになるまで除荷を行った。

No. 3とNo. 4は単杭の振動実験であり、それぞれ乾燥砂と飽和砂を用いた実験である。No. 5とNo. 6はNo. 3とNo. 4の単杭を群杭に変えたものである。これも同様にNo. 5が乾燥砂で、No. 6が飽和砂である。No. 3とNo. 5の実験は、それぞれNo. 1とNo. 2の振動実験に対応する。

2.5 測定機器

測定項目は、静的実験の場合、1)杭頭荷重、2)荷重

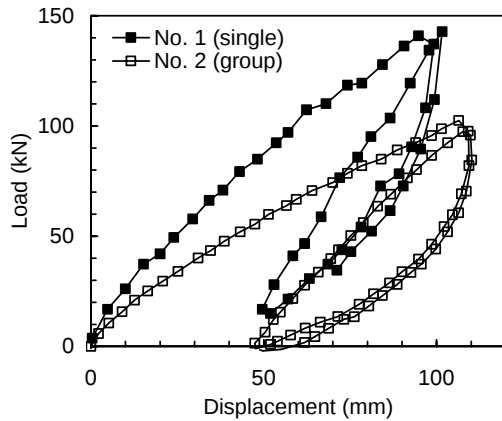


Fig. 2 Load – displacement curve for static tests: single (No. 1) and group piles (No. 2).

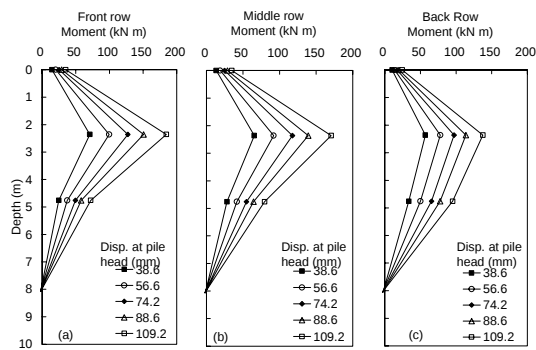


Fig. 3 Moment – depth diagram: (a) single pile (No. 1), (b) front, (c) middle, (d) back rows of group pile (No. 2).

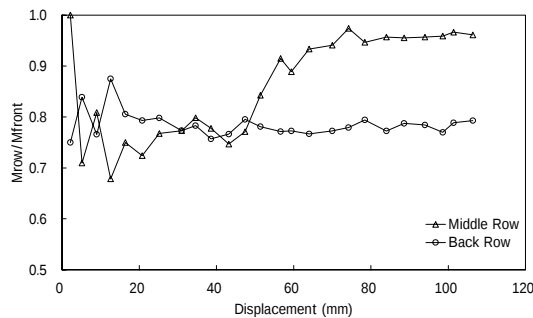


Fig. 4 Maximum moment distribution of middle and back rows normalized by that of front row.

載荷点の変位, 3)杭体のひずみである。振動実験の場合, 1)加速度 (入力, 地表面, おもり), 2)杭頭の変位, 3)杭体のひずみ, および飽和地盤の場合のみ, 4)間隙水圧である。

静的実験では, 多数のひずみゲージの計測を可能にするために遠心アーム上に取り付けられた30チャンネルの静ひずみ測定器を使用した。データはスイッチボックス内のアンプで増幅され, スリップリングを介して観測室に転送される。そのデータをA/D

変換し, パーソナルコンピュータのモニターを見ながら載荷および除荷を行った。

一方, 振動実験で用いた振動計測システムでは, 使用できるチャンネル数が10チャンネルと制限があるため, ひずみゲージは1チャンネルで曲げ成分だけを算出した。すべてのデータは遠心アーム下部に設置された動ひずみ測定器でチャンネル毎に増幅され, スリップリングを介して制御装置室内のパーソナルコンピュータに記録された。

3. 静的水平載荷試験

3.1 静的載荷実験結果

Fig. 2は単杭および群杭実験の荷重載荷点での荷重-変位関係を示す。同図において, 群杭の場合には, 荷重計で計測された全荷重を杭の本数で平均したものを示す。同図より, 変位が等しい時に, 群杭1本あたりが支持する荷重は, 単杭の約70%となっており, 群杭効果が見受けられる。この効果は, Fig. 3(a)~(c)に示す曲げモーメント深さ関係にも見受けられる。同図(a)(b)(c)はそれぞれ, 先行杭, 中間杭, 後方杭の, 図中に示した杭頭変位での曲げモーメントを深さ方向に図示したものである。同図より最大曲げモーメントの発生する深さは約2.3m付近と推察できるが, その位置は後方杭ほど深くなっている。これは先行杭の変位により, 杭間の地盤がゆるくなっているためであると考えられる。すなわち, ある深さで後続杭が受ける地盤反力が, 先行杭が受けるそれよりも小さくなっているため, より深部で大きな曲げモーメントが発生しているものと推察される。

Fig. 4は, 各杭列の地表面におけるモーメント分担率-変位関係を示す。計測チャンネル数の制限から, 各杭に荷重計をつけることができなかったため, 地表面高さの杭のひずみから計算された曲げモーメントで分担率を考えることとする。同図においてモーメント分担率は, 先行杭のモーメントにより正規化されている。ここで, 荷重載荷点から地表面までは地盤の影響がないため, モーメント分担率は荷重分担率に一致するものと考えられる。Fig. 4より, 変位が小さい時には中間杭の分担率が後方杭よりもわずかに小さいが, 変位が杭径の13%, 40mm付近から, 中間杭の分担率が増加し, 先行杭の分担率に漸近している。これは, 変位の増加とともに土の塑性的挙動が卓越するようになった結果, 先行杭と中間杭に作用する地盤反力に差がなくなったためであると考えられる。

3.2 実大実験との比較

米国ブリガムヤング大学(BYU)で行われた実大杭の原位置水平載荷試験結果(Rollins et al., 1998)を、本研究で実施された遠心模型実験結果と比較する。Fig. 5に原位置試験における地盤条件を示す。同図より、粘土地盤が卓越していることがわかる。

Fig. 6(a) (単杭) と(b) (群杭) に、遠心実験と原位置実験とで得られた荷重-変位曲線を示す。単杭、群杭とも、遠心力場での実験 (No. 1, 2) では、原位置実大実験(BYU)より、同一変位に対する荷重は小さかった。杭の荷重-変位関係は杭および地盤の諸元により影響されるが、このうち杭の幾何形状および曲げ剛性(EI)については、Table 2に示したとおり、遠心力場と原位置場間で相似則をほぼ満足している。したがって、両者が異なる要因は地盤材料の相違にあると考えられる。杭の荷重-変位関係に影響を与える地盤材料の力学的特性は、主に微小ひずみ時の挙動を支配するせん断弾性係数および大ひずみ時の挙動を支配するせん断強度で定まる。試みに、原位置の深さ3mの粘土層の平均的非排水強度 $S_u = 50\text{kPa}$ (Fig. 5) と、遠心力場の7号珪砂模型地盤の深さ3mの有効拘束圧力 ($K_0=0.5$ と仮定)、内部摩擦角 43° から求めたせん断強度 21kPa との相違を考慮して、遠心力場での実験結果の荷重を $50/21=2.3$ 倍したところ、Fig. 6(a), (b): No. 1, 2-adjustedに示すように、原位置実大実験結果とよく一致する結果が得られた。このことから、ただちに、遠心力場における模型実験の適用性が原位置実験結果により確認されたと結論づけることはできず、微小ひずみ時の挙動を支配するせん断弾性係数の影響の検討が残されたままとなっている。また、Fig. 5に示すとおり、原位置における地盤条件もかなり複雑であり、一様な粘土地盤とみなしてよいか否かについても、ある程度詳細な解析を行って確認する必要があるであろう。これらの点で、現在のところ、いささか不十分な点を残す検討にとどまっている。今後の課題としたい。

4. 振動載荷実験

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 1Hz , 20波, 約 2m/s^2 の加速度振幅とした。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、杭頭に付加したおもりの重量を算定したため、杭の固有周期は地盤のそれに近いものとなった。

1g場で地盤を作製したあと、40g場で5分間 (プロ

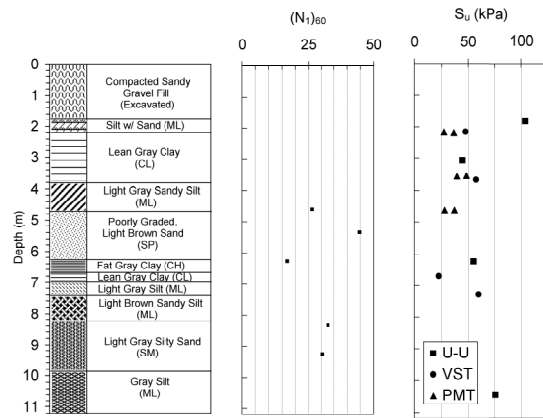


Fig. 5 Site condition of real scale tests (Rollins et al., 1998)

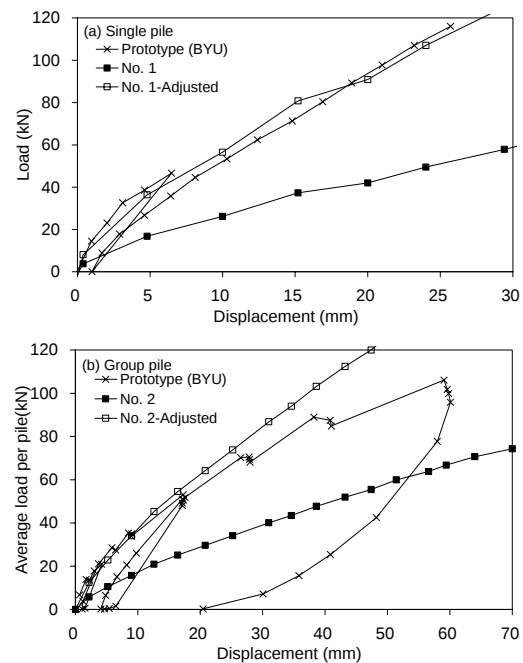


Fig. 6 Comparison of load-displacement curve between the centrifuge and real scale tests: (a) single, (b) group piles

トタイプスケールで200分間) 圧密し、地表面高さを計測した。その結果得られた相対密度をTable 3に示す。ここで、No. 3とNo. 5の相対密度 (それぞれ68%と83%) に差が見られる。これは、給砂中に杭が移動するのを防ぐため杭頭におもりをつけておく必要があったため、おもり直下に砂が側方からすべるように供給された結果、地盤を水平にならす必要が生じ、その過程で密度の相違が生じたものと思われる。

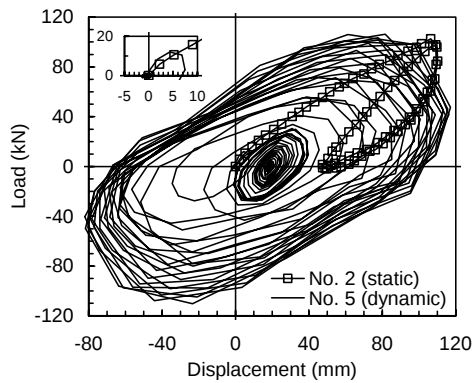


Fig. 7 Comparison of load – displacement curve of group pile for dry deposits: static (No. 2) and dynamic (No. 5).

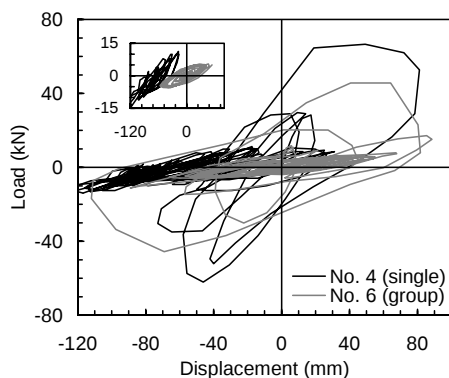


Fig. 8 Comparison of load – displacement curve of dynamic tests for saturated deposits: single (No. 4) and group piles (No. 6).

4.1 静的载荷実験との比較

Fig. 7に示すように、乾燥砂を用いた群杭の振動载荷実験 (No. 5) と静的载荷実験 (No. 2) から得られた、荷重-変位曲線の比較を行った。同図において、荷重は杭1本あたりの平均である。同図中に示す原点付近の拡大図より、相対密度の差 (No. 2: 65%, No. 5: 83%) はあるものの、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。しかし、繰り返し荷重を加えるにつれ、静的载荷とは異なる傾向が見受けられる。すなわち、最大荷重と最大振幅が同時に発生しておらず、履歴曲線が丸みを帯びている。このことは、杭頭荷重と地盤変位との間に位相差が生じている事を示すものであるが、これについては、4.3節以降で詳述する。

4.2 液状化地盤中の群杭の挙動

飽和砂を用いた単杭と群杭の振動実験 (No. 4と6) により得られた荷重変位曲線をFig. 8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

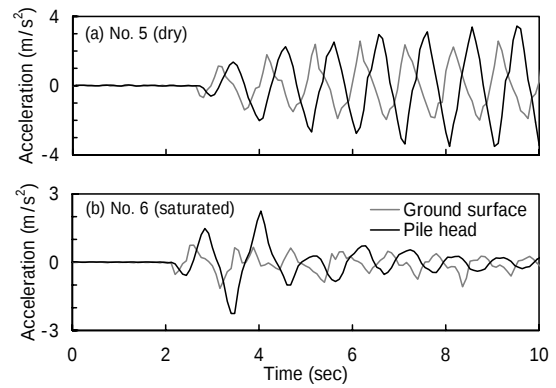


Fig. 9 Acceleration time history of dynamic tests for group pile: (a) dry (No. 5), (b) saturated (No. 6).

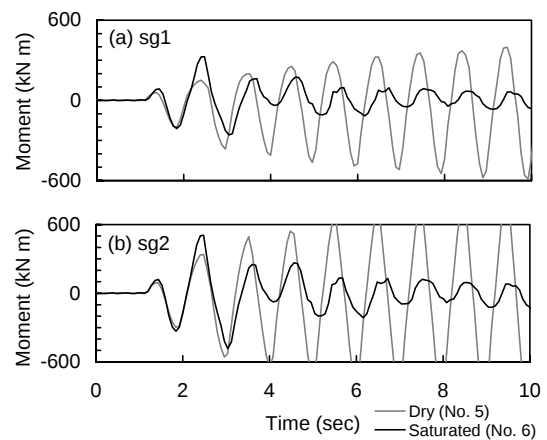


Fig. 10 Time history of bending moment for group pile: (a) dry (No. 5), (b) saturated (No. 6).

に曲線の傾きが小さくなっている。ここで、同図中に示す液状化以後の拡大図より、両者の荷重変位曲線を比較すると、液状化以後も曲線の傾きは群杭の方が小さく、液状化地盤中でも群杭効果があると推察される結果が得られた (小谷ら, 2002)。

Fig. 9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を示す。加速度の正の向きはFig. 1(b)に示すとおりである。乾燥砂地盤では、入力加速度振幅が $2 m/s^2$ に対し、杭頭の加速度は徐々に増加し約 $5 m/s^2$ 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 $3 \sim 4 m/s^2$ 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2.5秒以降小さくなっている。Fig. 9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。

Fig. 10に乾燥砂 (No. 5) および飽和砂地盤 (No. 6) の

曲げモーメントの時刻歴を示す。計測断面はFig. 1(b)に示す中間の杭に取り付けたひずみゲージ高さ（sg2とsg3）である。同図より液状化で地盤の抵抗力が減少したため1.5波目に乾燥砂実験よりも大きな曲げモーメントが発生していることがわかる。その後、液状化が進展するにつれて曲げモーメントは小さくなっている。

4.3 杭・地盤系の位相差に与える入力振動数が与える影響

杭・地盤系の動的応答の位相関係については、室野・西村(2000)により一連の研究がなされ、その結果は、地盤と構造物の固有周期の比に関連づけて整理されている。しかし、この問題を一般化した形で捉えようとする、(1)入力地震動の卓越振動数が位相関係に与える影響、(2)地盤・構造物変位振幅の大小関係が位相関係に与える影響など、固有周期の比のみでは整理しきれない課題を明らかにする必要があるように思われる。

今、単純化のため、ひとまず(2)の課題を無視し、地盤および杭構造物をそれぞれ独立した線形1自由度一質点系と見なして(1)の課題を考えてみたい(Fig. 11)。地盤の固有振動数 f_g が杭構造物の固有振動数 f_s よりも低い場合(Fig. 12(a)), 地盤変位よりも杭頭慣性力の位相は先行する(Fig. 12(b))。逆に、 $f_g > f_s$ の場合には、同図(a)で θ_g と θ_s の曲線を入替えば理解されたとおり、地盤変位に対して杭頭慣性力の位相は遅れる。これらの位相差の絶対値（位相のずれ）が最大となるのは、 f_g と f_s の大小関係に関わらず、入力振動数が f_s と f_g の中間に位置する場合である。その他の場合には位相のずれは小さくなる傾向にある。

4.4 遠心模型実験による位相差

遠心模型実験により得られた結果の例を、Fig. 13(a), (b)に示す。そのうち、Fig. 13(a)に示す結果は、単杭、乾燥砂地盤、上部工に相当する杭頭質量を付与したケース（Case 1）であり、微小振幅のインパルス応答から測定した実大換算の固有振動数は、地盤で $f_g = 5.5\text{Hz}$ 、杭構造物で $f_s = 1.2\text{Hz}$ であった。Fig. 13(b)に示す結果は、同じく単杭、乾燥砂地盤であるが、上部工に相当する杭頭質量を付与しないケース（Case 2）であり、実大換算固有振動数は、それぞれ $f_g = 5.5\text{Hz}$ 、 $f_s = 7.1\text{Hz}$ であった。正弦波加振の結果は、Case 1では杭頭慣性力が地盤変位（地表面相対変位）より位相が遅れるが、Case 2では位相関係が逆転するものとなっている。

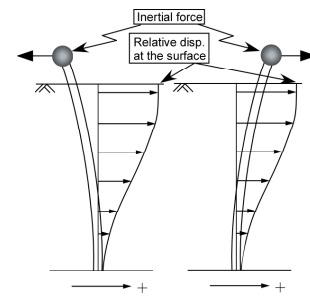


Fig. 11 Illustration of relative motions of pile and the ground

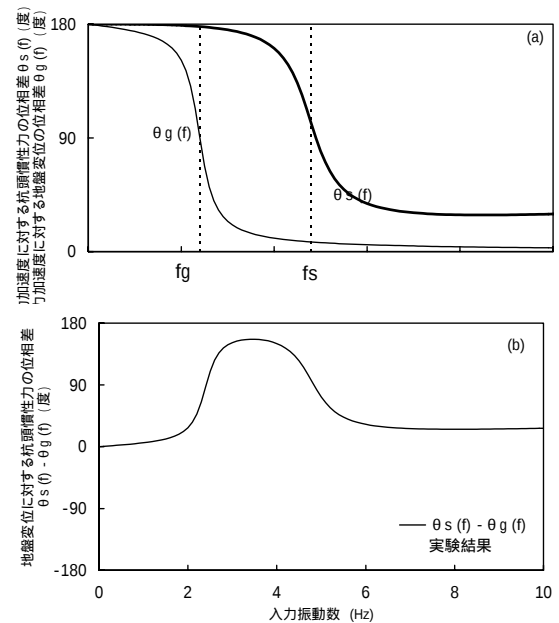


Fig. 12 Diagram for relation between phase difference and frequency: (a) phase difference vs. natural frequency of one degree of freedom system, (b) Phase delay of inertial force at the pile head to the ground displacement vs. input frequency.

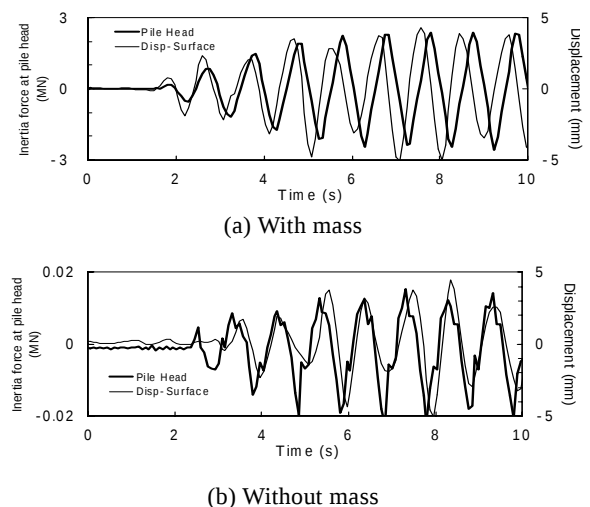


Fig. 13 Time histories of inertial force and the ground displacement.

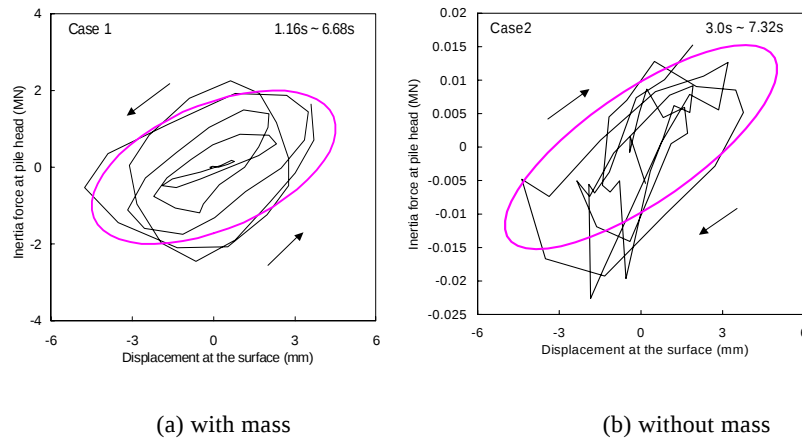


Fig. 14 Trace of inertial force at pile head and the ground surface displacement.

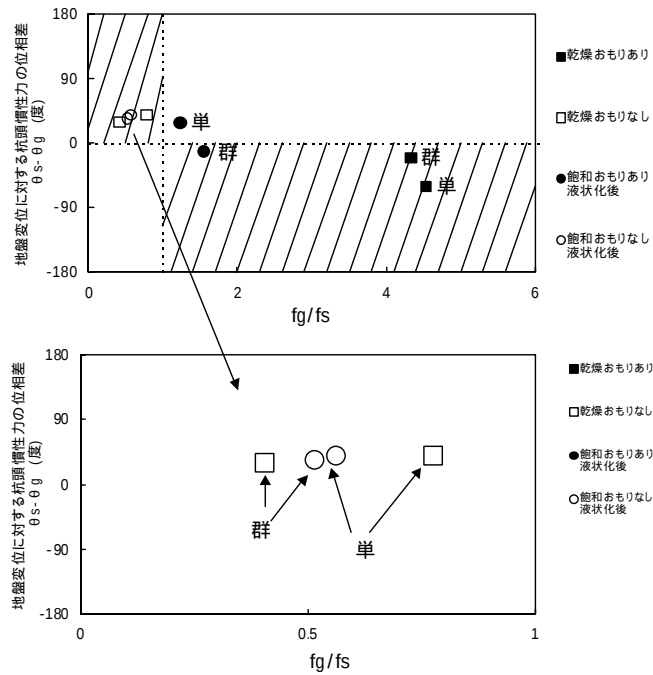


Fig. 15 Phase delay/advance of inertial force to the ground surface displacement for given natural frequency ratios.

これらの結果を全ケースについてとりまとめるため、Fig. 14に示すように地盤変位と杭頭慣性力の軌跡を描き、その形状と回転方向から位相差を求めた。その結果、地盤変位に対する杭頭慣性力の位相は、Case 1で-60度（負号は遅れを表す）、Case 2で40度となった。このような方法により求めた位相差を、室野・西村(2000)にならって、 f_g/f_s をパラメタとしてとりまとめたものが、Fig. 15である。同図には、先に述べた1質点系の応答の考察に基づいて、位相が取りえる範囲をハッチで示している。実験結果は、概ねハッチの範囲内に含まれているが、全体として位相差が ± 60 度以内の範囲の値をとる結果となっている。これは、今回の模型振動実験において、入力振動数が、地盤および杭構造物の固有振動数のい

れかと同程度かそれ以下の条件であったことが関係しているものと思われる。

この点について、今後、入力振動数を変化させた実験を通じた検討を予定している。

5. 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載荷実験を行い基礎的なデータを得た。単杭および群杭を用いた遠心模型実験を通じて、群杭効果を再現することができた。また、実大実験結果との比較により、遠心模型実験の適用性を検討した。また、同一のプロトタイプに対して、静的載荷実験と振動載荷実験を行い、以下の結論を得た。

静的載荷実験結果と比較すると、振動載荷実験では杭頭最大荷重と杭頭最大変位の発生時刻にずれが見受けられた。この原因として、杭の振動と地盤振動とが位相差をもって振動していること、また地盤の非線形性により地盤反力が減少したことの影響などが挙げられる。この点について、杭・地盤系をそれぞれ線形1自由度一質点系とみなし、入力振動数と杭頭慣性力と地表面変位の位相差との関係について考察した。その結果今回の実験条件では、両者の位相差は $\pm 60^\circ$ 以内となっており、入力振動数が、地盤および杭構造物の固有振動数のいずれかと同程度かそれ以下の条件であったことが示された。

液状化地盤においては、液状化の影響が地表面よりやや遅れて杭の挙動に現れ、液状化にいたる段階で乾燥砂の振動実験よりも大きな曲げモーメントが発生したことが観察された。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べる必要がある。

謝 辞

本研究は、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、都市地震災害の軽減に関する日米共同研究の一環として、米国ブリガムヤング大学のK. M. Rollins教授に原位置実大実験におけるデータを提供していただいた。最後に、本研究を遂行するにあたり、京都大学防災研究所遠心力載荷装置運営委員会にご協力いただいた。末筆ながら謝意を表します。

参考文献

- 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.
- Crouse, C.B., Kramer, S.L., Michell, R. and Hushmand, B. (1993): Dynamic test of piles in saturated peat, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, pp.1550-1567.
- Dewoolkar, M. M., Ko, H.-Y., Stadler, A. T., and Astaneh, S. M. F. (1999): A substitute pore fluid for seismic centrifuge modeling, Geotechnical Testing Journal, ASTM, 22(3), 196-210.
- Murono, Y., and Nishimura, A. (2000): Evaluation of seismic force of pile foundation induced by inertial and kinematic interaction, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper 1496.
- Rollins, K. M., Peterson, K. T., and Weaver, T. J. (1998): Lateral load behavior of full-scale pile group in clay, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 468-478.
- Scott, R. F., Tsai, C. F., Steussy, D., and Ting, J. M. (1982): Full-scale dynamic lateral pile tests, Proceedings, 14th Annual Offshore Technology Conference, OTC 4203, Houston, TX, (May).

Dynamic behavior of soil-pile systems

Tetsuo TOBITA, Susumu IAI, Kenji NAKAYAMA*, Tetsuro HARA*

*Graduate school of engineering, Kyoto University

Synopsis

Centrifuge experiments of static and dynamic lateral loading of pile group are carried out. A steel pipe whose diameter is 30 cm and length 10 m is scaled down to 1/20 for static tests, and 1/40 for dynamic tests. It is experimentally shown that in the dynamic tests the hysteresis loop of inertial force and displacement at the pile head becomes elliptical due to the phase difference between pile and the ground, and/or the nonlinear property of sands. Even in the case of dynamic tests under saturated condition, group pile behavior may be observed.

Keywords: Group pile, Centrifuge testing, Liquefaction, Lateral resistance force