

パイルド・ラフト基礎の地震時挙動に関する 基本実験

堀越研一¹・松本樹典²・福山英樹³・渡邊徹⁴

¹正会員 PhD 大成建設(株) 土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 工博 金沢大学 工学部土木工学科 (〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)

³正会員 工修 三重県 (元金沢大学大学院生) (〒514-8570 津市広明町13番地)

⁴工修 大成建設(株) 東京支店 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

パイルド・ラフト基礎は、直接基礎と杭基礎との併用基礎として位置付けられ、両者の寄与を設計段階から積極的に活用する基礎形式である。この基礎形式は、その経済性から近年、脚光をあびており、実際の建築物基礎としての適用事例もいくつか報告されている。著者らは、水平荷重を受けるパイルド・ラフト基礎の挙動を把握する目的で、一連の遠心載荷模型実験を実施したので、本論文でその結果を報告するものである。実験では、パイルド・ラフトおよびその構成要素である単杭、ラフト（直接基礎）単体に対する静的鉛直載荷試験、水平載荷試験を実施した後、パイルド・ラフト基礎に対する振動実験を実施している。本論文は、特に後者に着目してその結果をまとめたものである。

Key Words: Piled raft, Pile group, Raft, Centrifuge test, Shaking table test, Sand

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎は、直接基礎（ラフト）と杭基礎との併用基礎として、我が国でも注目されている基礎形式のひとつである。その基本思想に、構造物の沈下をある程度の範囲内に抑えるために摩擦杭を用いる“沈下抑止杭”の発想がある。沈下抑止杭の発想は、新しいものではなく、海外、特に欧州ではその適用事例が多々報告されている。我が国でも、建築の分野では、この基礎形式の採用が増えつつあり、既にいくつかの報告もなされている¹⁾。

沈下抑止杭を採用することに端を発し、パイル

ド・ラフト基礎が鉛直荷重を受けた際の沈下解析手法や杭と直接基礎（ラフト）との荷重分担性状に関する研究は、既に多く進められてきている。

しかしながら、パイルド・ラフト基礎が水平力を受けた場合、とりわけ地震時にどのような挙動を呈するかを扱った研究は限られており²⁾⁵⁾、その耐震性能を明確にするためにも、この分野への取り組みが重要である。著者らは、上記観点から、パイルド・ラフト基礎に関する一連の遠心載荷模型実験を実施している。実験では、パイルド・ラフトの構成要素である単杭、ラフト単体およびパイルド・ラフトの静的な鉛直・水平載荷試験を実施し、さらに振動実験を実施した。実験における主たる着目点は以下のとおりである。

- 単杭やラフト単体といった構成要素の挙動から、パイルド・ラフトシステムとしての挙動予測の可能性。
- ラフト単体や従来の群杭との水平耐力の相違。
- 地震の最中およびその後における、杭とラフト間との鉛直荷重分担率。
- 振動の最中における、杭とラフト底面との水平荷重分担。

なお、遠心載荷模型実験は、1/50の縮小モデルに50 gの遠心加速度を作用させて実施している。以下の実験結果は、特記しない限り、モデルスケールで記載されている。

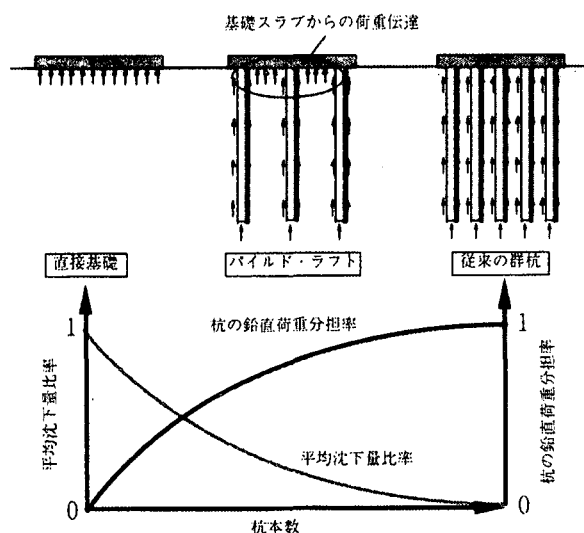


図-1 パイルド・ラフト基礎の概念

2. 実験モデルの概要

本研究では、表-1に示した一連の模型実験を実施している。

表-1 模型実験実施項目

	鉛直荷重	水平荷重	振動実験
単杭	$L_p=120-200$ mm	$L_p=170$ mm	-
ラフト単体	$B=80, 120$ mm	$B=80, 120$ mm	-
パイルド・ラフト	$B=120, 80$ mm, $L_p=170$ mm	$B=80$ mm, $L_p=170$ mm	$B=80$ mm, $L_p=170$ mm

L_p : 杭長, B : 正方形ラフトの辺長, 網掛け部が本論文記載項目

表-1中、本論文では、パイルド・ラフトの振動実験結果について報告する。同じモデルを用いた静的水平荷重試験結果については、参考文献6) 7)を参照されたい。

実験で用いたパイルド・ラフト模型を図-2に示す。幅56 cm, 奥行き21 cm, 高さ40 cmのせん断土槽中に厚さ32 cmの地盤モデルを作製し、その上にパイルド・ラフト模型を設置した。

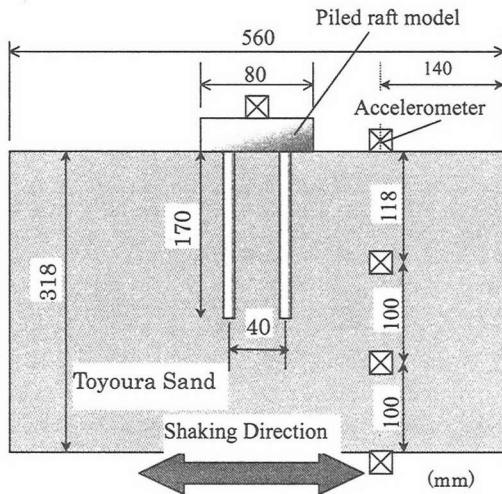


図-2 パイルド・ラフトの振動実験モデル

模型地盤として乾燥豊浦砂を用いており、50 gの遠心加速度場での相対密度が約 70%となるように設定し、地盤中には、加速度計をいくつか配置した。また、図-2には描かれていないが、パイルド・ラフト模型の水平、鉛直変位や地表面沈下も併せて計測した。

実験で用いた模型杭の詳細を図-3に示す。パイルド・ラフト基礎の杭は、まず鉛直荷重を受けて沈下し、その状態で水平荷重を受けることになるので、軸剛性に関する相似率と曲げ剛性に関する相似率の両者に留意しながら、模型杭材質を選定する必要がある。本実験では、直径10 mm, 肉厚1 mmのアルミニウム製パイプを使用することとした。別途実施した材料試験によれば、この材料の降伏、破断応力度は、それぞれ149 MPa, 243 MPaであった。

表-2は、模型杭から相似率を介しての実換算杭を示しているが、本実験の場合、直径50 cmの中実コンクリート杭に相当する曲げ剛性を有している。表

中、弾性係数の実物換算値は、杭の曲げ剛性から換算されたものである。また、模型杭には、軸力と曲げモーメント分布、杭頭部のせん断力を計測するためのひずみゲージを貼り付けている(図-2参照)。

表-2 模型杭に関する相似率

	模型	実物換算
材質	アルミニウム	コンクリート
直径	10 mm	500 mm
肉厚	1 mm	中実杭を想定
杭長, L_p	170 mm	8.5 m
弾性係数, E_p	71 GPa	40 GPa

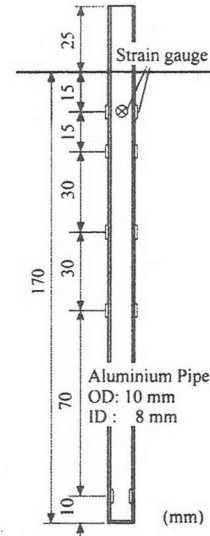


図-3 模型杭の詳細

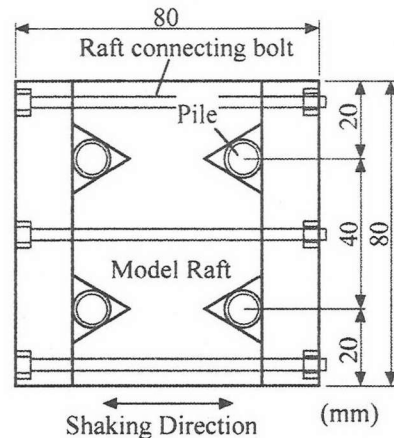


図-4 ラフト平面図(地表面と接する部分)

図-4は、ラフトの平面図を示したものである。地表面と接する部分は、硬質アルミ製で、その上に荷重調整のための鋼板を載せる構造とした。ラフトが平面的に3つの部品からなり、これをボルトで締め付ける構造としたのは、後述するように、遠心加速度場における地盤沈下を起こさせた後にラフトを設置することが可能な構造としたためである。ラフト幅80 mmに対し、杭間隔40 mmとし、ラフトの全質量を4.7 kgとした。この場合、50 gの遠心加速度場

では、約2300 Nの自重による鉛直荷重が、ラフト底面と杭とから地中に伝達されることになる。全鉛直荷重をラフト平面積で除した平均接地圧は360 kPa程度となる。また、コンクリートと地盤との摩擦を想定し、ラフト底面を粗くすることにより、地盤との摩擦係数の増加を図っている。ラフト単体の水平載荷試験より得られた底面の摩擦係数はピーク荷重に対して $\mu = 0.62$ (摩擦角 32°)であった。

実験では、まず、杭と地盤のみとからなるモデルに50 gの遠心加速度場を作用させて、自重による地盤の沈下をさせた後、装置を停止し、4本の杭の上にラフトを地表面に接するように設置し、再度、遠心加速度を作用させて振動実験を行った。本来ならば、遠心加速度場における高い地中拘束圧条件下にて、モデルに鉛直載荷を行い、この状態から、振動実験を行うのが好ましい。しかしながら、この場合、モデルや載荷装置が複雑になることから、ラフト自重を利用してパイルド・ラフトに鉛直荷重を作用させることとした。すなわち、遠心加速度を増加するにつれて、作用鉛直荷重も増加することになる。本論文で報告する実験では、50 gの遠心加速度を作用させた際の(振動実験を行う前の)杭の鉛直方向荷重分担率は約43%であった。

3. 実験結果

(1) 荷重～変位関係

図-5に入力加速度波形を示す。振幅 100 gal(実物換算値)、周波数50 Hz(実物換算 1 Hz)の正弦波を20 波入力した。なお、事前に測定したパイルド・ラフトモデルの固有振動数は約140 Hz(実物換算 2.8 Hz)であった。

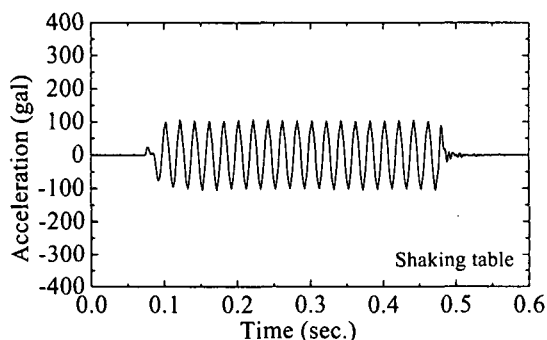


図-5 入力加速度波形

図-6(a)は、加振中のモデルの沈下挙動を示したものである。加振中にパイルド・ラフトと地表面との間の相対沈下が増加しており、模型が徐々に地中に貫入していく状況が示されている。パイルド・ラフトの最終相対沈下量は、約2.3 mm(実物換算で115 mm)であった。図-6(b)は、初期の沈下挙動を拡大したものである。加振直後に地盤が先に沈下し、相対沈下量が負になっている。このような現象は、同じモデルの静的水平載荷試験では見られず、杭の鉛直荷重分担率を一瞬増大させる可能性がある。

図-7は、地表面およびパイルド・ラフトの加速度

応答を示したものである。パイルド・ラフトでは、加振初期で300 gal程度、後半で200 gal程度で振動しており、加振が進むにつれて応答が小さくなる傾向が見られる。これは、加振中のモデルの相対沈下(図-6)、振動による体積収縮に基づく地盤の剛性増加などに起因しているものと考えられる。

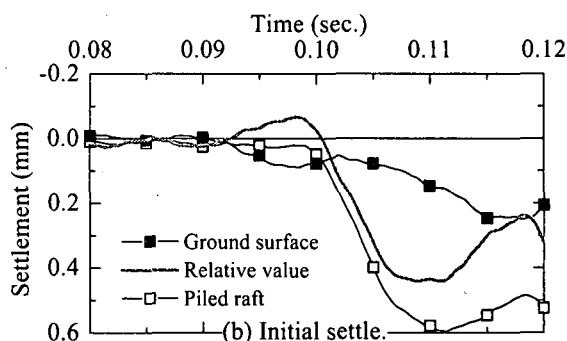
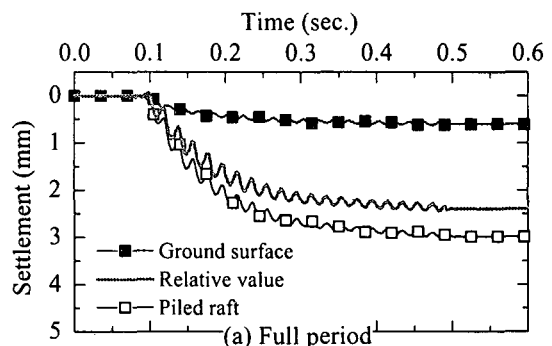


図-6 加振中の沈下性状

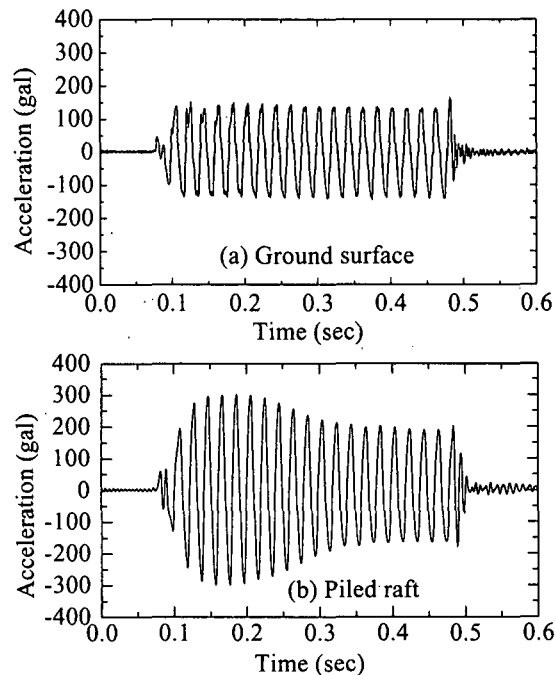


図-7 地表面とパイルド・ラフトの加速度応答性状

また、図-8は、レーザー式変位で計測した、パイルド・ラフトの水平変位を示したものである。残留変位が約0.7 mm(実物換算で35 mm)生じているが、加振の進行に伴い、加速度応答と同様、変位振幅も徐々に小さくなっている。変位振幅は、片振り以最

大0.3-0.4 mm程度であり、参考文献(6)7)で報告している静的実験で扱った水平変位(片振りで約10 mm)と比較すると小さい。

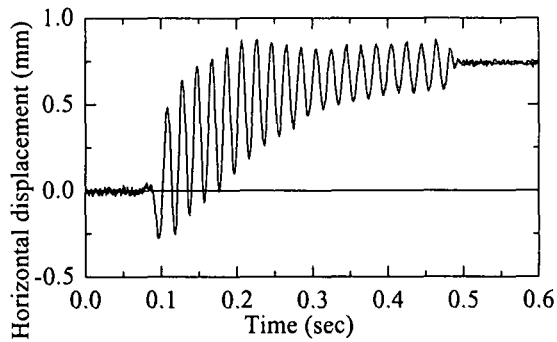


図-8 パイルド・ラフトの水平変位

図-9は、パイルド・ラフトに作用する水平荷重と水平変位との関係を別途実施した静的実験結果(最大水平変位10 mm)とともに示したものである。振動実験における全水平荷重は、パイルド・ラフトの加速度計測値をもとにラフト部分の慣性力から算定している。この図によれば、静的実験と振動実験で得られた変位剛性はほぼ類似している。なお、振動実験では、図-8に示したように残留水平変位が生じた関係で履歴曲線が除々に右側にシフトしている。

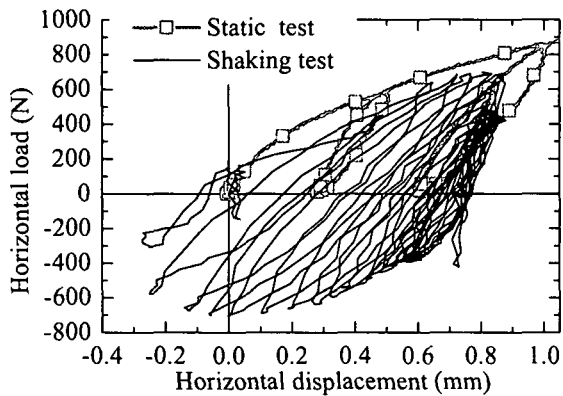


図-9 水平荷重～水平変位関係

図-10は、加振中の杭の鉛直荷重分担率推移を示したものである。パイルド・ラフトは、約2.3 mm地中に入り込む形で沈下しているが、加振前後での杭の鉛直荷重分担率は大きく変化していない。この点に関しては、文献8)にて阪神大震災の前後での実測事例として同様な傾向が示されていることは興味深い。図-10では、加振のごく初期の段階で分担率が増加する傾向が見られるが、図-6に示した、地表面の先行沈下の影響が考えられる。静的水平載荷実験によれば、水平変位の小さい段階では、分担率はほとんど変化しないが、変位の増大につれてラフトの鉛直荷重分担率が大きくなっている。今回の振動実験では、この状態に至るまでの十分な水平変位を与えておらず、この意味で、さらに大きな地震力を受けた際の荷重分担性状の変化を把握する必要がある。

図-11は、杭の水平荷重分担率の推移を示したものである。杭に作用する荷重は、杭頭のせん断力ゲ

ージの総和から算出した。この図によれば、加振のごく初期の段階では、ラフトが大部分の荷重を受け持つため、杭の分担率が少ないが、その後すぐに急増し、加振の継続につれて、ラフトと地表面との接地状況が回復するにつれて、杭の分担率が再度減少に転じている。

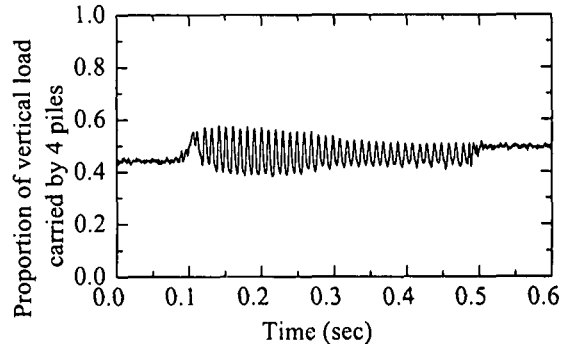


図-10 鉛直方向荷重分担率の推移

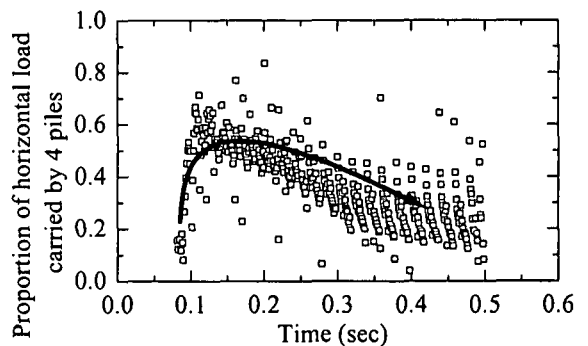


図-11 水平方向荷重分担率の推移

(2) 杭の断面力変化

以下では、加振中の1サイクルに着目して、杭の断面力の変化を検討する。着目したのは、図-7(b)に示したパイルド・ラフトの加速度応答のうち、図-12に示す0.161秒～0.181秒までの1周期の挙動である。

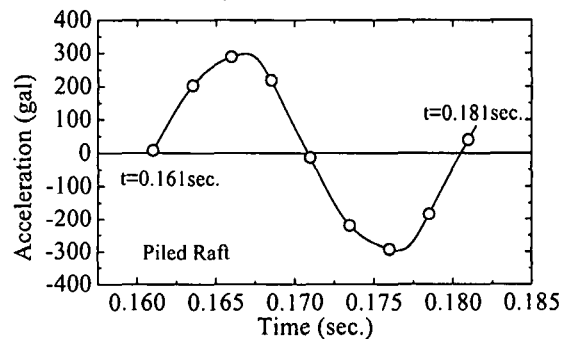


図-12 パイルド・ラフトの加速度応答

(○印の時点での断面力をプロットした時点)

加振加速度周期が0.02秒であるので、図-12に示した0.0025秒毎の9ポイントについて杭の断面力変化を分析した。なお、実際の計測は、この1/5の時間間隔、すなわち2 kHzで行っている。

図-12に示した時刻におけるパイルド・ラフト基礎の水平荷重～水平変位関係を、それぞれの分担荷

重とともに図-13 に示した。また、図-14 は、水平荷重の分担率推移を示したものである。これらの図によれば、図-11 に示した様に大局的には、水平荷重分担率は変化しているものの、1 周期に着目してみた場合、大きな変化を呈していないことがわかる。なお、図-13 では、水平荷重がゼロとなっている時点で、分担率が発散する傾向になっている。

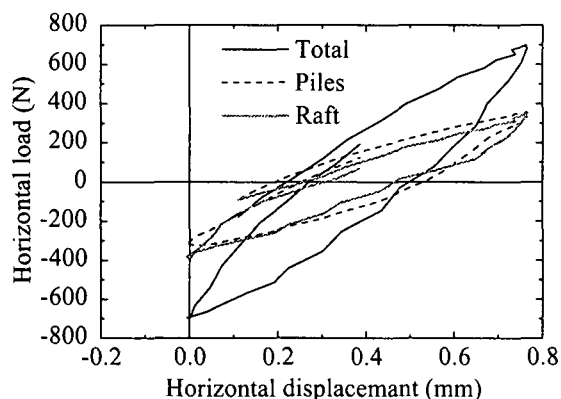


図-13 1 サイクル中の水平荷重～水平変位関係

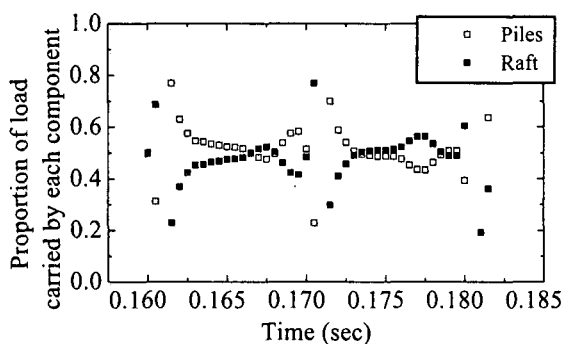


図-14 1 サイクル中の水平荷重分担率の推移

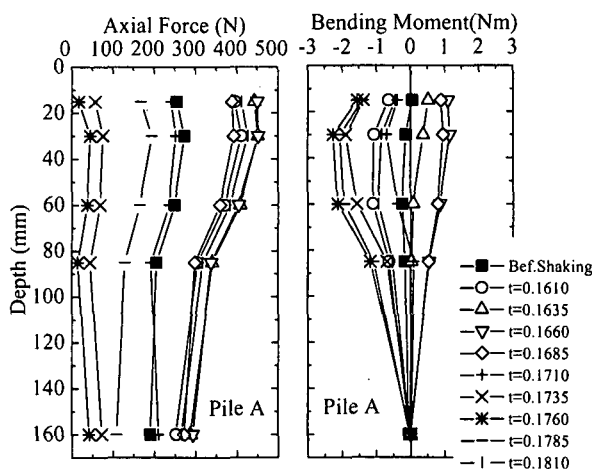
図-15 は、振動方向に配した 2 本の杭 (A, A') に対して、1 サイクル中の杭の軸力、曲げモーメントの推移を示したものである。Pile A' の先端のゲージが正常に作動しなかったため、この点における軸力が欠損している。曲げモーメントについては、この地点の値ゼロとして (Pile A からの類推) 便宜的にプロットした。図-15 の曲げモーメント分布によれば、2 本の杭には、加振を行う前に、ある程度の曲げモーメントが発生していることがわかる。杭のたわみは、パイルド・ラフトの中心から外側に向かう方向であり、パイルド・ラフト直下の地盤が杭周面を外側に向かって押している現象が現れているものと考えられる。

振動中の曲げモーメント分布に着目した場合、杭頭の固定度が完全ではない影響が現れ、どちらかといえば、地中部で最大曲げモーメントが発生する結果となった。

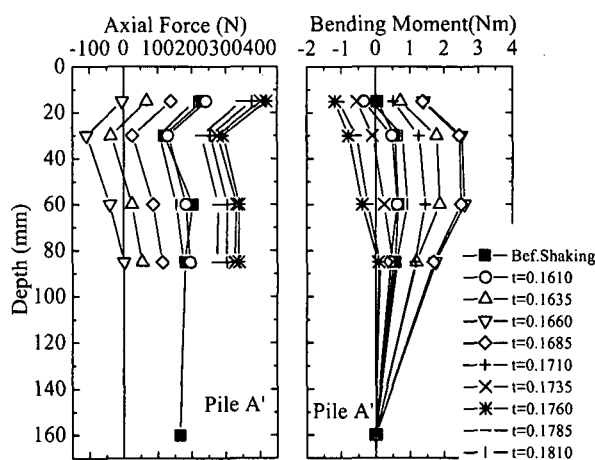
軸力に着目した場合、加振の進行につれて、軸力がゼロに近くなる現象が生じており、2 本の杭で位相が 180 度ずれている。静的水平載荷試験の報告⁶⁾⁷⁾でも記載しているが、砂地盤中に模型杭を設置した場合、深度方向に増加する拘束圧の影響を受け

て、杭先端での荷重分担が杭周面と比較して大きくなる傾向にある。

なお、杭に発生している応力度は、加振振幅が小さいため、弾性範囲内である。すなわち、実験で得られたパイルド・ラフトの荷重～変位関係の非線形性は、地盤の応答特性の非線形性、ラフト底面のせん断抵抗の非線形性に起因しているものと考えられる。



(a) Pile A



(b) Pile A'

図-15 杭の軸力、曲げモーメント分布の推移

なお、本論文では、詳述していないが、パイルド・ラフト中の杭の水平抵抗は、単杭の静的水平載荷試験で得られたものと比較して大きくなる傾向にある。これは、ラフト底面から地盤に伝達される荷重が、杭周辺地盤の剛性、強度を高める影響があるためであると考えられる。

5. まとめ

水平荷重を受けるパイルド・ラフトに関する一連の遠心載荷模型実験のうち、特に模型振動実験結果に関して報告した。本研究は、現在も進行中であるが、現段階までに得られた知見を以下にまとめる。

(1) パイルド・ラフトの振動実験で得られた水平

荷重～水平変位関係について、別途実施した静的水平載荷試験と同様な傾向を得た。

- (2) 振動によって、体積変化を呈する地盤では、パイルド・ラフトを構成する要素（杭，ラフト）間の荷重分担率に与える影響に留意する必要がある。
- (3) 本実験条件では、加振の前後で、杭とラフト間の鉛直方向荷重分担率に大きな変化は見られなかった。静的水平載荷実験によれば、水平変位の小さい段階では、分担率はほとんど変化しないが、変位の増大につれてラフトの鉛直荷重分担率が大きくなっている。今回の振動実験では、この状態に至るまでの十分な変位を与えておらず、この意味で、さらに大きな地震力を受けた際の荷重分担性状の変化を、把握する必要がある。換言すれば、杭の水平荷重分担率は、パイルド・ラフトの水平変位に依存している。
- (4) 水平荷重の分担率に着目した場合、本実験で実施した条件では、加振のごく初期の段階では、ラフトが大部分の荷重を受け持つため、杭の分担率が少ないが、その後すぐに急増し、加振の継続につれて、ラフトと地表面との接地状況が回復するにつれて、杭の分担率が再度減少に転じている。

パイルド・ラフトの振動実験事例は少ない。今後、大きな加振レベルでの振動実験、ならびに、同じ上載荷重をもつ群杭の振動実験を行い、本報告で示した結果と比較検証する方針である。さらに杭頭固定度がパイルド・ラフトの挙動に及ぼす影響も検討したい。

謝辞：本実験を実施するに際し、大成サービス(株)の半田佳正氏の協力を得ております。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山下清，堀越研一：杭基礎の鉛直荷重～変位特性の評価法入門，4. 解析による群杭およびパイルド・ラフトの荷重～変位特性の評価方法（その1～3），土と基礎，講座，1999年12月号～2000年2月号。
- 2) 渡邊徹，小林治男，長尾俊昌，長瀧慶明，真島正人，桑原文夫：パイルド・ラフト基礎の原位置水平載荷実験，大成建設技術研究所報，第33号，pp. 125-128，2000。
- 3) 橋爪芳徳，松本樹典，K. Pastsakorn，福山英樹：砂地盤における模型パイルド・ラフトの水平載荷実験（その5），第36回地盤工学研究発表会，pp. 1677- 1678，2001。
- 4) Pastsakorn, K., Matsumoto, T., Takahara, T., Todo, H. A simplified analytical method for deformation analysis of piled raft foundations with batter piles, Proc. 5th Int. Conference “Deep Foundation Practice incorporating Piletalk International 2001”, Singapore, pp. 319 - 326, 2000.
- 5) 福山英樹：遠心実験によるパイルド・ラフト基礎の水平抵抗特性に関する研究，平成12年度金沢大学学位修士論文，2001。
- 6) Watanabe, T., Fukuyama, H., Horikoshi, K. and Matsumoto, T.: Centrifuge Modeling of Piled Raft Foundations subjected to Horizontal Loads, Proc. 5th Int. Conference “Deep Foundation Practice incorporating Piletalk International 2001”, Singapore, pp. 371-378, 2001.
- 7) 堀越研一，松本樹典，福山英樹，渡辺徹：水平荷重を受けるパイルド・ラフト基礎の挙動，第46回地盤工学シンポジウム（投稿中），2001。
- 8) Yamada, T., Yamashita, K., Kakurai, M. and Tsukatani, H.: Long-term Behavior of Tall Building on Raft Foundation Constructed by Top-down Method, Proc. 5th Int. Conference “Deep Foundation Practice incorporating Piletalk International 2001”, pp. 411-418, 2001.

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC BEHAVIOR OF PILED RAFT FOUNDATIONS

Kenichi HORIKOSHI, Tatsunori MATSUMOTO, Hideki FUKUYAMA,
and Toru WATANABE

Piled raft foundations are treated as combined foundation of raft and pile foundations, and becoming very popular as one of the most economical foundations. The authors have conducted a series of centrifuge model tests which include static vertical and horizontal-loading tests of piled raft foundations and their components, and the shaking table tests of piled rafts. This paper mainly presents the results from the latter tests. The results show that the load carried by each component is highly dependent on the induced horizontal displacement of the piled raft. The volume change just beneath the raft during the loading test also influences the piled raft behavior.