

パイルド・ラフト基礎の大型模型実験に関するシミュレーション解析 (水平載荷実験と振動台実験)



保井 美敏*

伊勢本昇昭*
金子 治*
佐野 大作*

概 要

パイルド・ラフト基礎は、杭の沈下抑止効果を期待した合理的な基礎工法として、主として中低層建物で使用実績を増やしている。パイルド・ラフト基礎を軟弱な地盤における合理的な基礎として普及させるためには、耐震設計法の確立が重要である。ここでは、静的水平載荷によるパイルド・ラフト基礎と直接基礎の比較実験と振動台水平加振実験結果について3次元FEMを用いたシミュレーション解析を行った。その結果以下のような結論が得られた。

1. 静的水平載荷実験のシミュレーション解析では、変位量の小さい弾性域を対象としており、パイルド・ラフト水平載荷時の荷重－水平変位関係については、砂質土地盤の場合は解析と実験で同様な関係が得られたが、粘性土地盤の場合では解析は実験に対し多少大きな変位を与えていた。杭の曲げモーメント分布については、砂質土地盤では地中部の最大モーメントの大きさを除き良く一致しており、粘性土地盤では解析値が実験値よりやや大きくなっていた。
2. 振動台実験のシミュレーション解析では、パイルド・ラフト基礎と直接基礎は、実験と同じく両者で同様な挙動をしていた。また、全体的な応答は良い対応を示したが、位相特性を含めた詳細な比較では短周期成分が再現できていなかった。
3. 振動台実験のシミュレーション解析での杭頭部最大曲げモーメント時、ラフト部最大加速度時の曲げモーメント分布の比較では、発生時刻が実験と解析で相違していたが、ラフト部最大加速度時の曲げモーメント分布は、杭頭部のモーメントの大きさや分布形状など比較的良く対応していた。

SIMULATION ANALYSIS OF PILED RAFT FOUNDATIONS ON LARGE SCALE MODEL TESTS –Horizontal Loading Tests and Shaking Table Tests -

Mitoshi YASUI* Noriaki ISEMOTO*
Osamu KANEKO* Daisaku SANO*

Piled raft foundations have been applied as an economical foundation system, for low-to-mid-rise buildings need to decrease settlements. It is important to establish seismic design for the spreads of piled raft foundations with deeply depth of bearing stratum. Comparative tests were performed on models of piled raft with four piles and the plain raft for dry sand and saturated low liquidity silt. Simulation analyses were performed on the results of horizontal loading tests and shaking table tests with 3 dimensional FEM. The results are summarized as follows;

1. The simulation results of load-displacement relations with the small displacements for horizontal loading tests were agreement with tests results on sandy ground. Those of bending moment distributions for sandy condition were fitted to test results except maximum bending moment in the ground.
2. The simulation results of foundation behaviors for the shaking table tests were good agreements with test results, but those of the phase characteristics were little different from test results.
3. The simulation results of bending moment distribution and pile head moment for the shaking table tests were agreement with test results relatively at a maximum acceleration time on the foundation.

*戸田建設(株) 技術研究所

* Technical Research Institute, Toda Corp.

パイルド・ラフト基礎の大型模型実験に関するシミュレーション解析 （水平載荷実験と振動台実験）

保井 美敏* 伊勢本昇昭*
金子 治* 佐野 大作*

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎は、支持層の深い中低層建物などにおいて、杭の沈下抑止効果を期待した合理的な基礎工法として採用されることが多い。パイルド・ラフト基礎を軟弱な地盤における合理的な基礎として普及させるためには、耐震設計法の確立が重要である。静的な水平抵抗機構については、原位置試験^{1, 2)}や室内模型実験³⁾および解析的研究^{4, 5)}など多くの研究により解明されつつある。また、地震時の動的な挙動については、比較的小さな模型実験⁶⁾や遠心載荷実験⁷⁾が行なわれ、振動実験時の杭の応力や水平荷重分担率が検討されており、地盤変位を考慮した簡便な解析法⁸⁾も提案されている。

しかし、振動実現象の把握という観点からは、大型模型による振動台実験が有効であり、静的実験と振動台実験を比較検討することは耐震設計法上重要である。筆者らは、このような観点より砂質土地盤において1m×1mのラフトと4本杭からなる大型のパイルド・ラフト基礎模型を用いて地震時の動的な特性を静的な実験結果と比較検討してきた⁹⁾。また、静的水平載荷実験については砂質土地盤、粘性土地盤について直接基礎との比較実験結果について報告してきた¹⁰⁻¹³⁾。

本報告では、静的水平載荷によるパイルド・ラフト基礎と直接基礎の比較実験を砂質土地盤、粘性土地盤で実施した結果および砂質土地盤での振動台水平加振実験結果について3次元有限要素法（3次元FEM）による弾性解析を用いてシミュレーション解析を行い、実験結果と解析結果の比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 静的載荷実験概要

図-1にパイルド・ラフト基礎の実験模型概要と計測器配置図を示す。実験は砂質土地盤と粘性土地盤の2種類の地盤で実施した。実験土槽、地盤概要、試験体概要は文献12に示した通りである。また、模型杭には同図中に示した位置にひずみゲージを貼付している。杭の設置は、砂質土地盤ではあらかじめ治具で杭を固定して地盤を作成し、粘性土地盤では上載荷重による圧密終了後にジャッキによって静的に圧入した。パイルド・ラフト基礎は、4本の鋼管杭を併用しており、杭を先行して設置した後に、箱抜きして製作したラフトを杭に被せ、さらにボルトで固定した後に無収縮モルタルを打設して杭とラフトを一体化した。

静的な水平荷重はジャッキを使用し変位制御とした。水平載荷実験は砂質土地盤と粘性土地盤で、パイルド・ラフト基礎および直接基礎で行った。水平載荷実験時の上載荷重は直接基礎と同様である。

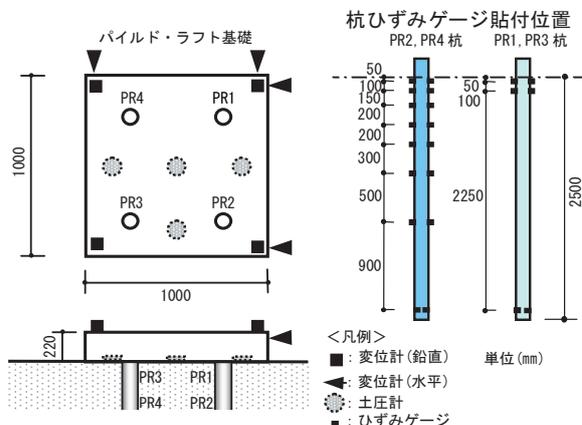


図-1 実験模型概要と計測器配置

2.2 振動台実験概要

図-2に振動台実験の実験装置および計測器配置概要を示す。パイルド・ラフト基礎および直接基礎が静的載荷実験時と同様に図-2に示すように設置されている。計測項目はラフト部の変位、加速度、杭のひずみ、地盤加速度、枠の変位などである。

実験ケースを一覧して表-1に示す。実験は、上載荷重が33.6kN（重り28.5kN+ラフト自重5.1kN）で4ケース、5.1kN（ラフト自重のみ）で5ケースの合計9ケースである（上載荷重は両基礎とも同じ条件）。振動台への入力波形は、スイープ実験のための振動数を0.5～20Hzで連続的に変化させるSine波形と最大値を調整した地震動波形の2種類である（表-1参照）。

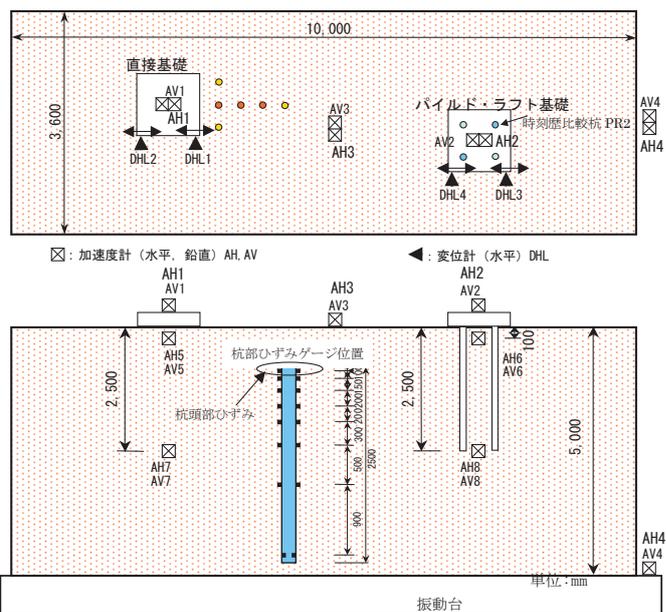


図-2 振動台実験装置概要と計測概要

* 戸田建設(株) 技術研究所

表-1 振動台実験ケース一覧

ケース No.	入力波形名称	上載荷重 (k N)	入力最大加速度 (cm/s ²)*	パイルド・ラフト基礎最大加速度 (cm/s ²)
1	Sine波	33.6	93**	290
2	TAFT EW(50%)*	33.6	98	182
3	BCJ L2(25%)	33.6	58	164
4	BCJ L2(50%)	33.6	110	241
5	Sine波	5.1	83**	237
6	BCJ L2(25%)	5.1	58	164
7	BCJ L2(50%)	5.1	104	243
8	TAFT EW	5.1	173	284
9	EL CENTRO NS	5.1	416	405

*: ここでの入力最大加速度は振動台で計測した最大加速度
 **: Sine波を用いたスイープ実験はピークを30~40cm/s²で設定した。
 ***: ()の数字は最大値の調整割合, ()無は原波形のまま

3. 静的水平載荷実験シミュレーション解析

3.1 解析モデルと地盤定数

パイルド・ラフト基礎静的水平載荷実験の3次元解析モデルを図-3に示す。モデルは対称条件を用い1/2断面としている。地盤およびラフトはソリッド要素、杭は梁要素とし、各要素の節点は共有している。FEM解析は弾性解析とし、荷重はラフト側面に集中荷重として与えた。地盤の境界条件は側面、加力方向前面側はローラー境界、加力方向背面側は自由境界とし、底面は深さ5mの位置で固定した。

解析に用いた地盤の変形係数を表-2に示す。砂質土地盤の変形係数は地盤作成時各深度(深さ0.25mピッチで平面上9点実施)で測定した急速平板載荷試験による変形係数に上載圧を考慮した値とした。粘性土の変形係数は三軸試験結果(3%ひずみ時の弾性係数)と急速平板試験による変形係数(深さ1.5mまで掘削し0.25mピッチで実施)を考慮して設定した。

直接基礎の解析モデルはパイルド・ラフト基礎解析モデルから杭要素を取り除き、その他の条件はすべて同じとした。また、実験時に載荷した上載荷重については、弾性解析のため考慮していない。

表-2 地盤定数一覧

深さ(m)	変形係数(MN/m ²)	
	砂質土	粘性土
0.0		5.2
10.9		4.5
1.0	14.7	3.0
2.0		4.2
3.0	17.2	5.6
4.0	18.5	7.5
5.0	19.9	10.0

ポアソン比 0.30 (砂質土) / 0.45 (粘性土)

3.2 解析結果

実験結果と解析結果の比較として、図-4にパイルド・ラフト基礎と直接基礎の荷重-変位関係を示す。同図中の実線がパイルド・ラフト基礎と直接基礎の実験結果で、点線がそれぞれ解析結果をあらわす。両図より、比較的小さい変位領域では実験結果と解析結果はパイルド・ラフト基礎、直接基礎ともおおむね一致している。同図b)より、粘性土地盤の場合は両者とも同一荷重値に対して解析結果の変位量が少し大きな値を示しているが、これは粘性土地盤の場合に表層部地盤の乾燥の影響などもあり、地盤定数を過小評価していたものと考えられる。したがって、地盤調査結果を適切に評価した地盤定数を用いれば、小さな変形域(弾性範囲)では実験結果と解析結果は比較的良く対応するようになると思われる。

図-5にパイルド・ラフト基礎の杭の水平荷重分担率を示す。解析値は図-4中の比較点(砂質土地盤: 19.61kN、粘性土地盤: 19.42kN)でそれぞれ算出した。同図より、荷重分担率は砂質土地盤、粘性土地盤共に解

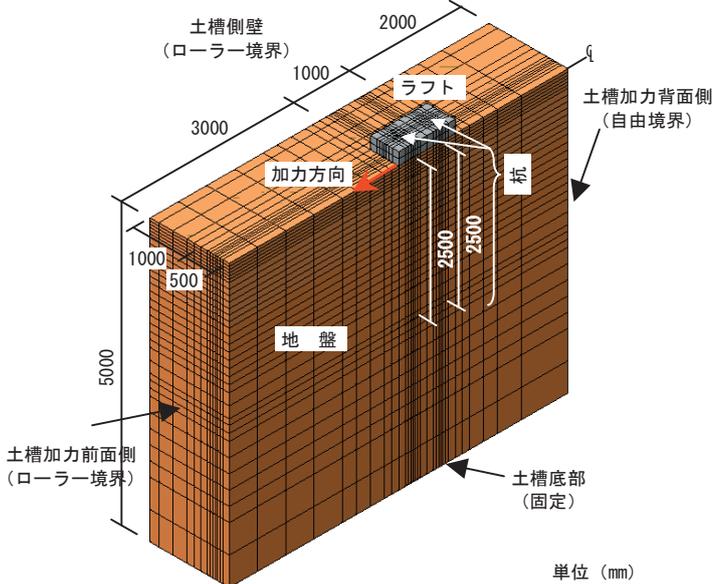


図-3 パイルド・ラフト基礎解析モデル

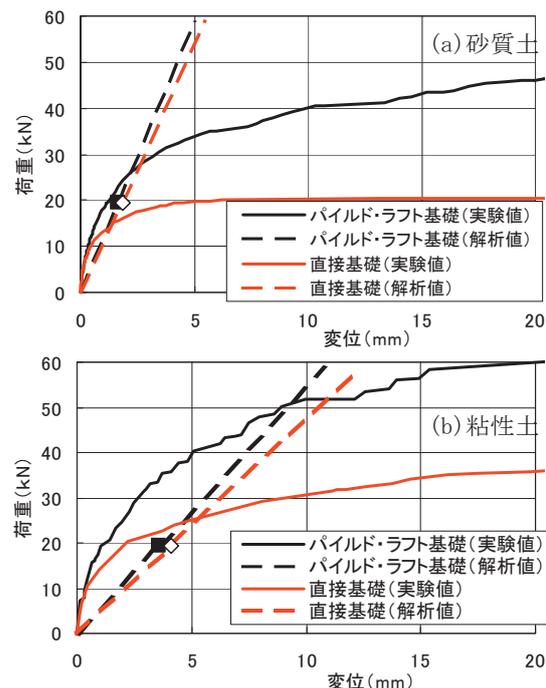


図-4 荷重-変位関係の比較

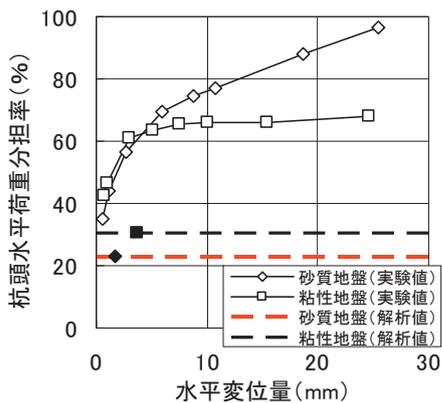


図-5 水平荷重分担率の比較

析値が実験値よりも小さい結果となった。

図-6にパイルド・ラフト基礎の杭の曲げモーメント分布を示す。同図中のPR2、PR4はそれぞれ加力前方杭、加力後方杭を示し、図-4中の比較点で算出した。同図より、杭頭モーメントに関しては、砂質土地盤の場合は解析値と実験値がおおむね一致しているが、粘性土地盤の場合は解析値の方が大きい。これは、図-4でもみられたように粘性土地盤の地盤定数の影響、特に実験時に乾燥硬化の影響を受けた表層地盤の影響であると思われる。また、地中部の最大モーメントの大きさに違いがみられるが、今回は変形量の小さい領域を対象とした弾性解析であったことを考えるとおおむね一致した結果が得られているといえる。

図-7にパイルド・ラフト基礎と直接基礎のロッキングによるラフト部分の傾斜と水平変位の関係を示す。砂質土地盤ではパイルド・ラフト基礎、直接基礎とも解析値が実験値より大きくなっている。一方粘性土地盤では

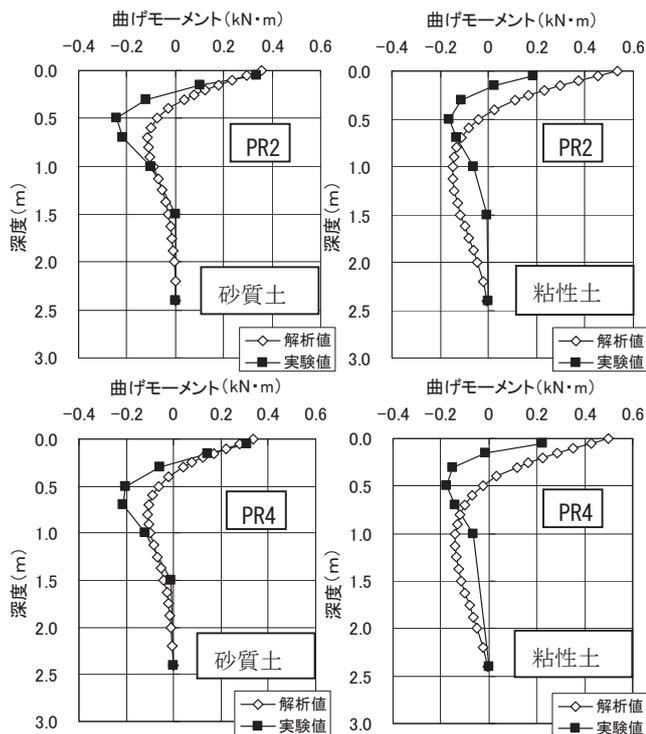


図-6 杭の曲げモーメント分布

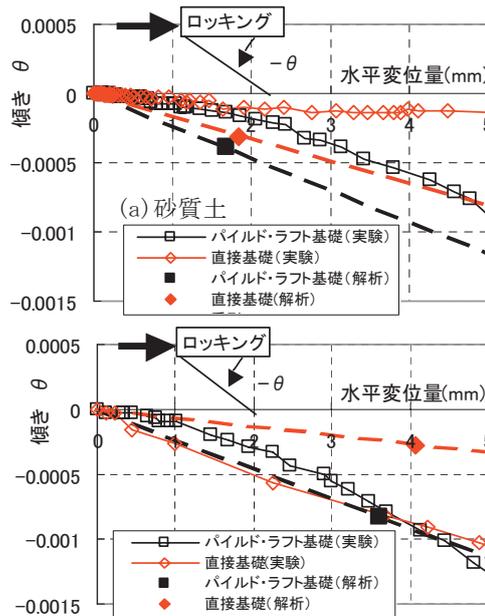


図-7 ラフト部分の傾斜と水平変位の関係

パイルド・ラフト基礎は解析値と実験値で比較的良く対応しているが、直接基礎では解析値が実験値より小さくなっている。

4. 振動台実験シミュレーション解析

4.1 解析モデルと地盤定数

振動台実験の解析モデルは、図-8に示すような境界条件を用い、対称条件を考慮した1/4断面モデルである。加振方向の側面境界は鉛直固定ローラーとなっている。静的解析と同様に杭は梁要素に置換している。地盤定数は実験ケースNo.1のフーリエスペクトル比（地盤地表面(AH3)/振動台、地中GL-2.5m(AH7)/振動台）と解析モデルでの地表面、地中GL-2.5mの伝達関数のピークが一致するように（図-9参照）静的解析に用い

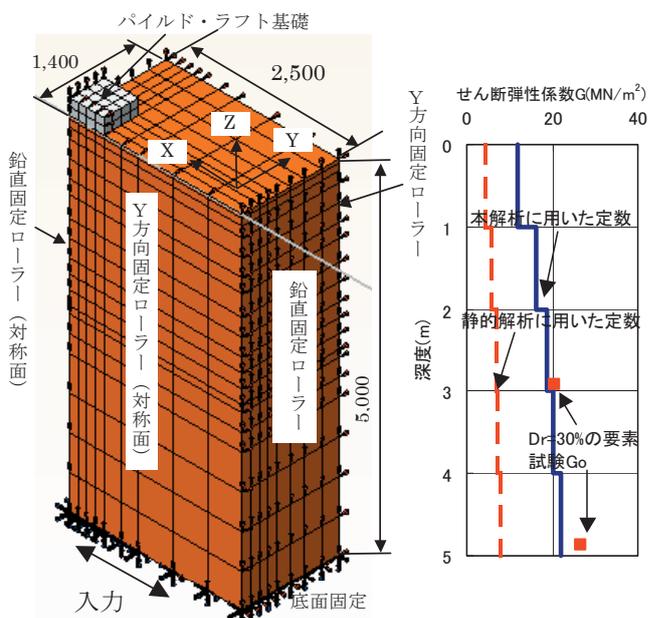


図-8 解析モデルと地盤定数

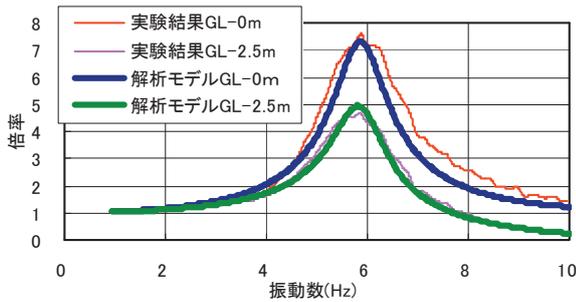


図-9 地盤応答のスペクトル比と伝達関数 (No.1)

たせん断弾性係数を全層一律に増大させた。解析で用いたせん断弾性係数を静的に用いた値と共に図-8に示す。図中にはDr=30% (実験地盤はDr=33%程度)での要素試験のGo ($\gamma=10^{-5}$)も併記している。減衰は全層一律9%を設定した。解析は入力地震動が最も大きいNo.9のEL CENTRO NSのケースについて実施した。

4.2 解析結果

応答水平加速度波形についてパイルド・ラフト基礎の解析結果と実験結果および直接基礎の解析結果を図-10に、擬似速度応答スペクトル(h=5%)について解析と実験の比較およびパイルド・ラフト基礎と直接基礎の比較を図-11に示す。

解析と実験の比較では応答波形は両者で全体的に類似した形状をしており、入力波形に対し同様な応答をしていることがわかる。応答スペクトルについてもほぼ同等の形状をしており、解析結果は実験結果と良い対応を示す。

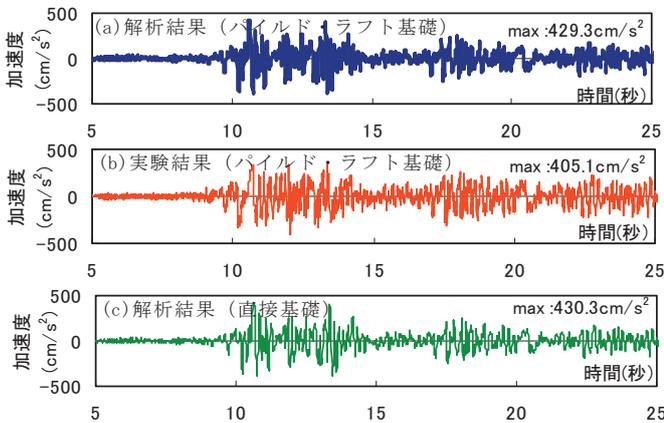


図-10 パイルド・ラフト基礎応答加速度比較 (No.9)

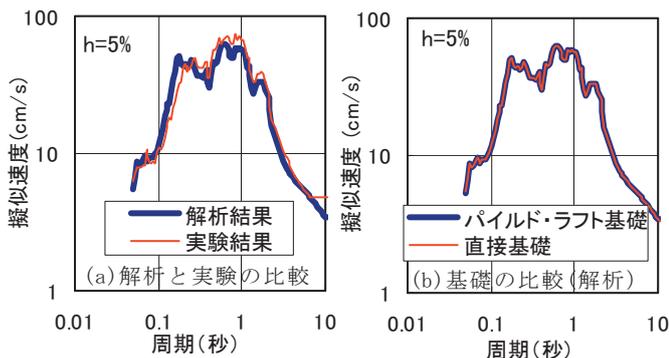


図-11 擬似速度応答スペクトル比較 (No.9)

パイルド・ラフト基礎と直接基礎の解析結果の比較では、応答波形の形状および最大値、応答スペクトルの形状ともほぼ一致している。基礎のみの振動台実験では、実験結果同様⁹⁾、パイルド・ラフト基礎と直接基礎は同様な応答をすることが解析的にも明らかになった。

パイルド・ラフト基礎の応答水平加速度時刻歴と杭頭部曲げモーメント時刻歴の詳細な比較を、両者の最大値が含まれる10秒~13秒を選択して図-12に示す。

応答加速度の比較では、解析と実験は位相特性も含め比較的良い対応を示すが、最大値の発生時刻が異なっている。実験の最大値はパルスのな波により発生するが、解析ではこの現象を再現できていない。

杭頭部曲げモーメントの比較では、応答加速度に比較すると大きさなどの差が多少みられるが、概略対応して

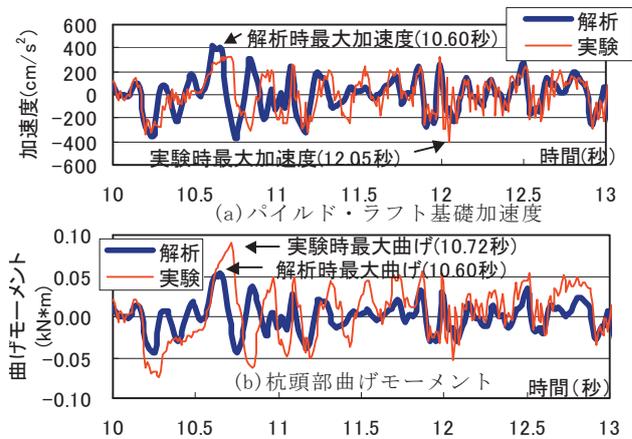


図-12 加速度および曲げモーメント時刻歴 (No.9)

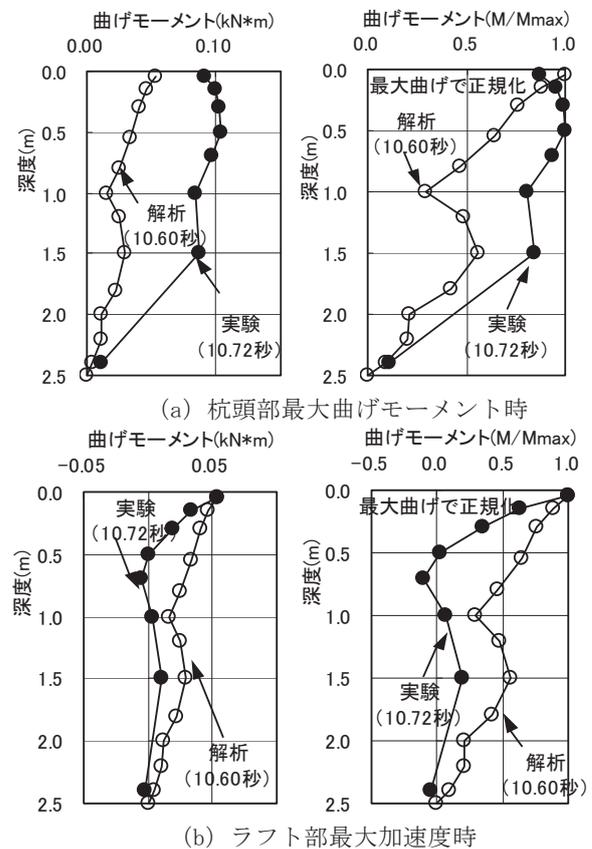


図-13 曲げモーメント分布比数歴 (No.9)

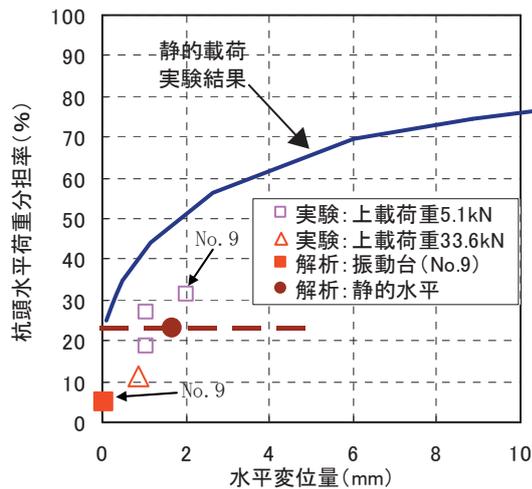


図-14 杭の水平荷重分担率

いるといえる。曲げモーメントにおいても、応答加速同様短周期の特性が十分表現できていない。また、解析の最大値の発生時刻は、実験とは異なりパイルド・ラフト基礎の最大応答加速度が生じる時刻と一致している。

杭頭部曲げモーメントが最大になる時刻（解析（10.60秒）と実験（10.72秒））およびラフト部の加速度が最大になる時刻（解析（10.60秒）と実験（12.05秒））の曲げモーメント分布を解析と実験で比較して図-13に示す。同図には最大曲げモーメントで正規化した分布も示す。

両時刻とも比較時刻が異なっているが、ラフト部最大加速度時は、杭頭部曲げモーメントの大きさおよび分布形状とも比較的良く対応しているといえる。また、分布形状からは静的な分布形状とは異なっており、地盤変位の影響が示唆される。

図-14にラフト部最大加速度時の杭頭部の水平荷重分担率（以降「分担率」と称す。）とラフト部水平変位量（振動台実験は地盤とラフトの相対変位量）の関係を示す。同図には静的水平載荷実験およびその解析値（No.9）を併記している。振動台実験の解析値（No.9）は相対変位が小さいこともあり実験値（No.9）より小さな分担率となっており、静的水平載荷実験の解析値と同様な傾向を示した。

5. まとめ

一連の実験結果に対するシミュレーション解析結果より以下の結論が得られた。

- ① 静的水平載荷実験のシミュレーション解析では、変位量の小さい弾性域を対象としており、パイルド・ラフト水平載荷時の荷重-水平変位関係については、砂質土地盤の場合は解析と実験で同様な関係が得られたが、粘性土地盤の場合では解析は実験に対し多少大きな変位を与えていた。杭の曲げモーメント分布については、砂質土地盤では地中部の最大モーメントの大きさを除き良く一致しており、粘性土地盤では解析値が実験値よりやや大きくなっていた。
- ② 振動台実験のシミュレーション解析では、パイルド・ラフト基礎と直接基礎は、実験と同じく両者で同様な挙動をしていた。また、全体的な応答は良い

対応を示したが、位相特性を含めた詳細な比較では短周期成分が再現できていなかった。

- ③ 振動台実験のシミュレーション解析での杭頭部最大曲げモーメント時、ラフト部最大加速度時の曲げモーメント分布の比較では、発生時刻が実験と解析で相違していたが、ラフト部最大加速度時の曲げモーメント分布は、杭頭部のモーメントの大きさや分布形状など比較的良く対応していた。

【謝辞】

本実験は、「鋼管杭を併用する直接基礎（パイルド・ラフト基礎）工法の設計用支持力に関する共同研究」（建築研究振興協会/参加会社：構造計画研究所、五洋建設、鉄建建設、戸田建設、東急建設、飛鳥建設）の一部として建築研究所と共同で実施したものである。一連の研究は室蘭工業大学建設システム工学科 土屋勉教授と共同で実施し、ご指導頂きました。記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 渡邊徹他：沈下低減杭を併用した直接基礎の鉛直載荷試験（その1、その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、2005
- 2) 萩原幸男他：パイルド・ラフト基礎の原位置鉛直・水平載荷試験（その1～その5）、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、2005
- 3) 新井寿昭他：パイルド・ラフト基礎の杭頭接合部回転剛性に着目した模型載荷実験（その1～その5）、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、2005
- 4) 土屋勉、木田和宣、大築和夫：水平力を受けるパイルドラフトの変形性状および水平変位の略算法、第22回情報システム利用技術シンポジウム、pp.49-53、1999.
- 5) 土屋勉、永井宏、池田篤則：地震力を受けるパイルドラフトの挙動に関する解析的検討、構造工学論文集、Vol.48B、pp.343-350、2002.
- 6) 大野愛他：1g場における模型パイルド・ラフトの振動実験（その5）、第38回地盤工学研究発表会、pp.1557-1558、2003.
- 7) 藤田豊、社本康広、田村正、土方勝一郎、杉山達也、石田智昭、小林和禎：パイルド・ラフト基礎の常時及び地震時の沈下・変形（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol.B-1、pp.655-656、2005.
- 8) 真野英之、中井正一：パイルド・ラフト基礎の地震時杭応力、第41回地盤工学研究発表会、pp.1421-1422、2006.
- 9) 保井他：振動台を用いたパイルド・ラフト基礎に関する大型模型実験、第12回日本地震工学シンポジウム、pp.614-617、2006
- 10) 伊勢本他：パイルドラフト基礎の相互作用効果に関する実験（その1、その2）、第41回地盤工学研究発表会、2006
- 11) 佐野他：パイルドラフト基礎と直接基礎の比較実験（その1～その3）、第41回地盤工学研究発表会、2006
- 12) 伊勢本他：パイルド・ラフト基礎に関する大型模型実験（その1～その8）、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、2006
- 13) 矢島他：パイルド・ラフト基礎の大型模型実験に関するシミュレーション解析（その1～その3）、第42回地盤工学研究発表会、2007