

# パイルド・ラフト基礎に関する大型模型実験

## その2 パイルド・ラフト基礎と直接基礎の比較実験



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。ここでは、同一試験体を用い、鉛直と水平について、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、粘性土地盤を対象に行い、沈下抑止効果と水平載荷時挙動について検討した。その結果以下のような結論が得られた。

1. 鉛直載荷実験のパイルド・ラフト基礎杭鉛直荷重分担率は、砂質土地盤の場合は最大荷重時で40%弱、粘性土地盤の場合は30%程度であった。
2. 鉛直載荷実験では、砂質土地盤では荷重の増加にともない軸力、杭周面摩擦力とも増加するが、粘性土地盤では荷重が大きくなると増分がみられなくなった。
3. 長期鉛直載荷実験では、即時沈下はもちろん、圧密沈下に対してもパイルド・ラフト基礎による沈下抑止効果を確認することができた。
4. 水平載荷実験では、粘性土地盤で変位1.3mm、砂質土地盤で変位1.6mm付近においてパイルド・ラフト基礎のラフトと杭の分担率が逆転しており、大きな変位では杭の分担率が大きくなっていった。
5. 振動台実験では、応答水平加速度のフーリエスペクトル比により比較すると、パイルド・ラフト基礎と直接基礎は、振動数範囲(10Hzまで)の挙動がほぼ同等になっていた。

## Large Scale Model Tests of Piled Raft Foundations

### Part 2 Comparison of Piled Raft and Raft Foundations

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 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. The tests were vertical loading tests, horizontal loading tests and shaking table tests. The results are summarized as follows;

1. The vertical load proportions carried by piles on vertical loading tests were less 40% for sand and less 30% for silt at maximum loads.
2. The axial loads and skin frictions of piles for sand increased by loads of tests, but those for silt were constant at large loads.
3. The piled raft foundations were effective for settlement due to consolidation.
4. The horizontal load proportions carried by piles on horizontal loading tests were 50% at 1.3mm of lateral displacement for silt and 1.6mm of lateral displacement for sand.
5. Fourier spectrum ratios to table lateral acceleration of two foundations were nearly equal values range from 0.5Hz to 10Hz.

\* 戸田建設(株) 技術研究所

\* Technical Research Institute, Toda Corp.

# パイルド・ラフト基礎に関する大型模型実験

## その2 パイルド・ラフト基礎と直接基礎の比較実験

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、杭の沈下抑止効果を期待した合理的な基礎工法として、主として支持層の深い中低層建物で採用されることが多い。パイルド・ラフト基礎に関する実験的研究に関しては、これまで直接基礎との比較実験によって沈下抑止効果を検証した事例が多数報告されている<sup>1-3)</sup>。さらに、地震時の挙動を把握するため、静的な水平載荷実験<sup>2-5)</sup>、1g場<sup>6)</sup>および遠心場<sup>7)</sup>での振動台実験と水平荷重に対する解析方法<sup>8)</sup>の提案がなされつつある。

ここでは、同一試験体を用いて、鉛直、水平のパイルド・ラフト基礎と直接基礎の比較実験を、砂質土地盤、粘性土地盤の両地盤を対象に行い、沈下抑止効果と水平載荷時挙動について検討した。粘性土地盤では長期鉛直載荷実験、砂質土地盤では振動台水平加振実験も実施した。

### 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、試験体概要はその1<sup>9)</sup>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。鉛直荷重は実荷重、水平荷重

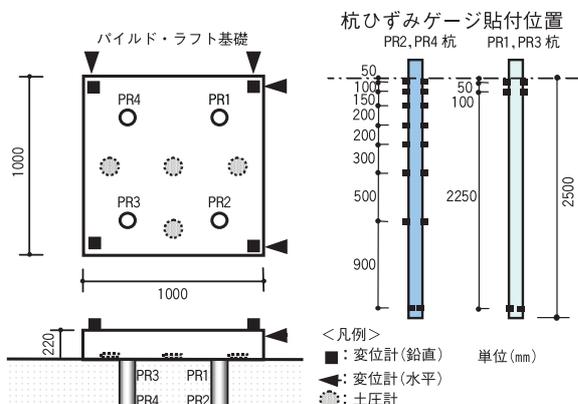


図-1 実験模型概要と計測器配置

はジャッキを使用し変位制御とした。鉛直載荷実験および水平載荷実験をそれぞれ砂質土地盤と粘性土地盤で行った。水平載荷実験時の上載荷重は直接基礎と同様である。

#### 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)。

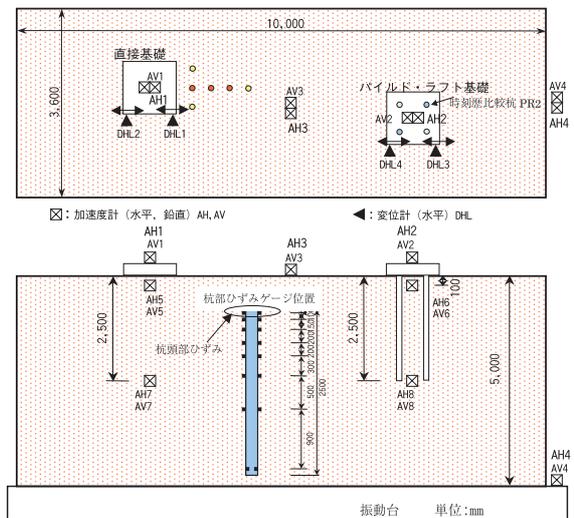


図-2 振動台実験装置概要と計測器配置概要

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 (kN)	入力最大加速度 (cm/s/s)*	パイルド・ラフト基礎 最大加速度 (cm/s/s)
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

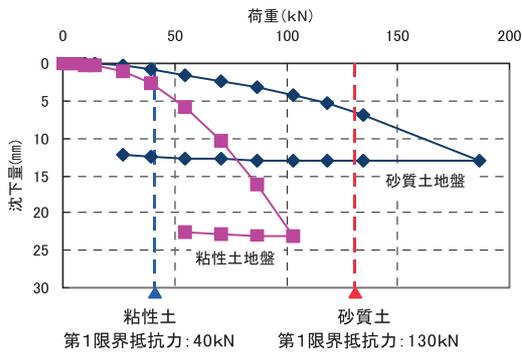
\*: ここでの入力最大加速度は振動台で計測した最大加速度  
 \*\*: スウィープ実験はSine波のピークを30~40cm/s/sで設定した。  
 \*\*\*: ( )の数字は最大値の調整割合, ( )無は原波形のまま

\* 戸田建設(株) 技術研究所

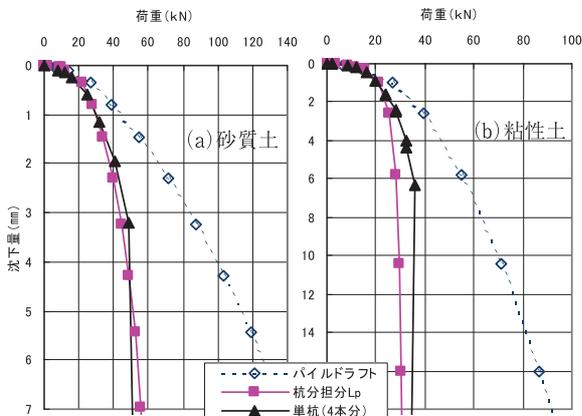
### 3. 鉛直載荷実験結果

#### 3.1 荷重－沈下関係

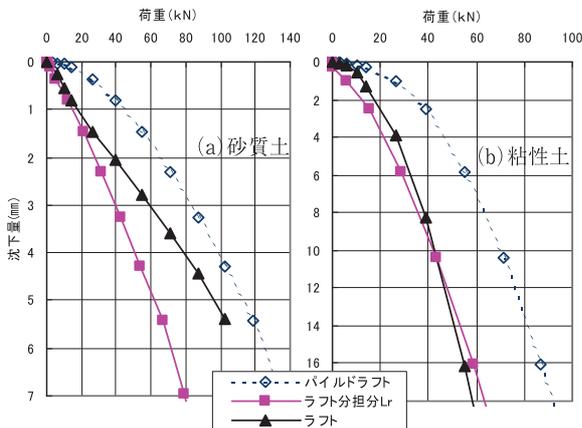
図－3にそれぞれの地盤で得られたパイルド・ラフト基礎の荷重－沈下関係を示す。鉛直載荷実験終了後にいう水平載荷実験を考慮して最大沈下量が約20mm（ラフト高さの約10%）となるよう荷重を設定した。同図より、砂質土地盤は186.2kN 載荷したところで所定荷重保持時間内<sup>2)</sup>（砂質土：15分）での沈下増分が急増した。粘性土地盤の場合は、載荷荷重が39.2kNを超えると保持時間内（粘性土：30分）での沈下増分が大きくなり始め、103kN 載荷したところで最大沈下量が23mmに達した。また、LogP-LogS 関係より、第1 限界抵抗力は砂質土地盤で130kN、粘性土地盤で40kNであった。



図－3 パイルド・ラフト基礎荷重－沈下関係



図－4 杭の分担荷重による荷重－沈下関係



図－5 ラフトの分担荷重による荷重－沈下関係

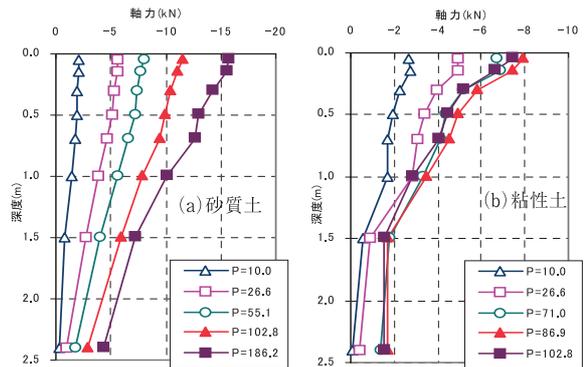
図－4、5にそれぞれ、相互作用実験の単杭（4本分）<sup>9)</sup>とパイルド・ラフト基礎の杭分担荷重  $L_p$  の比較、相互作用実験の直接基礎<sup>9)</sup>とパイルド・ラフト基礎のラフト分担荷重  $L_r$  との比較図を示す。

図－4より、杭分担分  $L_p$  と単杭は、載荷初期段階ではほぼ同様の挙動を示している。しかし、砂質土地盤の場合は、荷重増加後も杭分担分  $L_p$  と単杭がほぼ同様の挙動を示すのに対して、粘性土地盤の場合は、載荷荷重が25kN付近を超えると、杭分担分  $L_p$  が単杭よりも小さくなった。また、図－5(a)より、砂質土地盤の場合は、ラフト分担分  $L_r$  よりも直接基礎のほうが常に高い沈下剛性を示している。しかし、同図 (b) より、粘性土地盤の場合は、ラフト分担分  $L_r$  とラフトはほぼ同様の挙動を示しており、杭分担分  $L_p$  と単杭の関係と比較して逆の傾向となった。

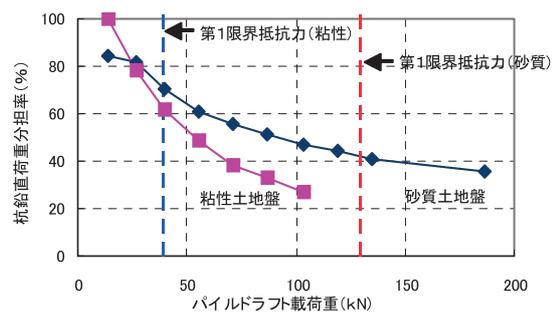
#### 3.2 杭の軸力と周面摩擦力分布

図－6にパイルド・ラフト基礎の杭の軸力分布図を示す。なお、各杭とも同様の軸力分布を示したことから、4本杭のうちPR4 杭を代表して示したが、軸力が、ラフト底面から300mm深度まで幾分増大する杭もみられた。同図より、砂質土地盤では鉛直荷重の増大にともない杭の軸力も増加している。しかし、粘性土地盤では鉛直荷重  $P=71\text{kN}$  までは軸力も増加するものの、それ以降はほとんど軸力増分がみられず、軸力の変動が小さくなった。

図－7は、杭頭部で測定したひずみより軸力を算出し、載荷荷重に対する杭負担荷重の比を杭鉛直荷重分担率として示したものである。同図より、両地盤とも載荷荷重の増加とともに分担率が減少しているのがわかる。最大荷重時では、砂質土地盤の場合は40%弱、粘性土地盤の場合は30%程度のだん率となった。



図－6 杭の軸力分布図 (PR4)



図－7 パイルド・ラフト基礎杭軸力分担率

次に、ひずみ測定点での軸力の差より杭周面の摩擦力を算出し、図-8に杭周面摩擦力分布として示す。同図をみると、軸力分布と同様、砂質土地盤では鉛直荷重の増加にともない杭周面摩擦力が増加するが、粘性土地盤では次第に摩擦力の増分が少なくなっている。これは、沈下にともない、周辺地盤からの拘束効果が大きくなる砂質土地盤と、拘束圧に依存しない粘性土地盤との土質性状の違いによるものと考えられる。また、砂質土地盤では直接基礎の負担荷重による拘束圧の影響で、土被り圧の小さい表層部付近で、むしろ大きな摩擦抵抗が発揮されている。

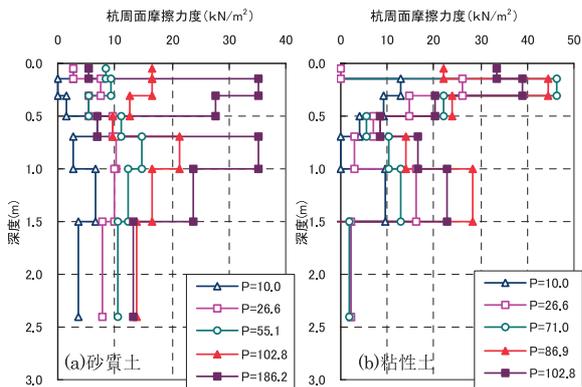


図-8 杭周面摩擦力分布図 (PR4)

### 3.3 長期載荷実験結果

図-9に、長期載荷実験による直接基礎、パイルド・ラフト基礎、両者の中間地盤における圧密沈下量と経過時間の関係を比較して示す。また図-10には経過時間ごとの試験体間の圧密沈下分布を示す。載荷荷重はいずれも  $80\text{kN/m}^2$  であり、圧密沈下は実荷重を載荷した直後 (約 30 分間) に発生した即時沈下を除外した値である。

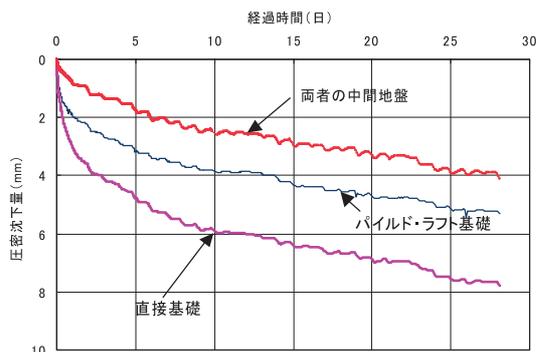


図-9 圧密沈下量の経時変化

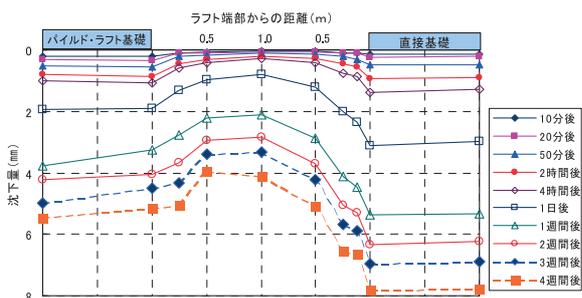


図-10 試験体間地盤の圧密沈下分布

る。即時沈下量は、直接基礎、パイルド・ラフト基礎、中間地盤でそれぞれ  $3.2\text{mm}$ 、 $2.5\text{mm}$ 、 $0.3\text{mm}$  であった。この結果より、即時沈下はもちろん、圧密沈下に対してもパイルド・ラフト基礎による沈下抑止効果を確認することができた。これは、杭に荷重を分担させることにより、等価荷重載荷面が下がったことによるものと思われる。

図-11は、圧密期間中におけるパイルド・ラフト基礎の杭鉛直荷重分担率の経時変化を示す。圧密期間中に、杭鉛直荷重分担率は若干の増加 ( $37\% \Rightarrow 45\%$ ) が認められるが、これは圧密沈下に対してもラフトと比較して杭の沈下剛性が大きいことによるものと思われる。

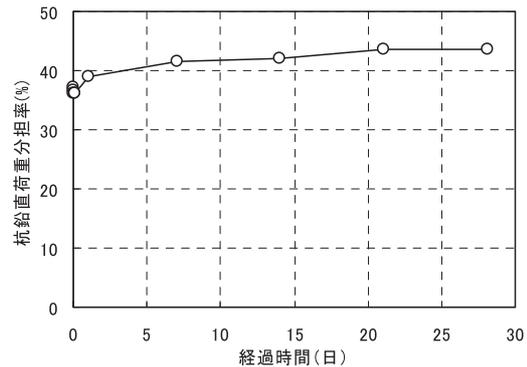


図-11 杭荷重分担率の経時変化

## 4. 水平載荷実験結果

### 4.1 荷重-変位関係

図-12に水平載荷時のパイルド・ラフト基礎と直接基礎の荷重-変位量の関係を地盤ごとに示す。砂質土地盤の場合、直接基礎では、 $20\text{kN}$  前後で摩擦が切れた状態になるのに比べ、パイルド・ラフト基礎では、 $20\text{kN}$  以降も変位の増加にしたがい荷重が漸増していることがわかる。また、粘性土地盤の場合、直接基礎、パイルド・ラフト基礎ともに、 $20\text{kN}$  前後以降も変位に依存した荷重の増加傾向がみられ、パイルド・ラフト基礎は直接基礎に比べ、漸増傾向が大きいことがわかる。

パイルド・ラフト基礎のラフト分担分 ( $PR_r$ ) と直接基礎 ( $R_r$ ) の水平荷重と変位量の関係と比較して図-13に示す。パイルド・ラフト基礎のラフト分担分 ( $PR_r$ ) は、水平載荷荷重と杭頭せん断力との差分から算出した値で、直接基礎は水平載荷荷重値である。図中の縦軸は、対象地盤により異なる上載荷重の影響を考慮して、水平荷重を鉛直荷重で除した値 ( $H/V$ ) に基準化してある。

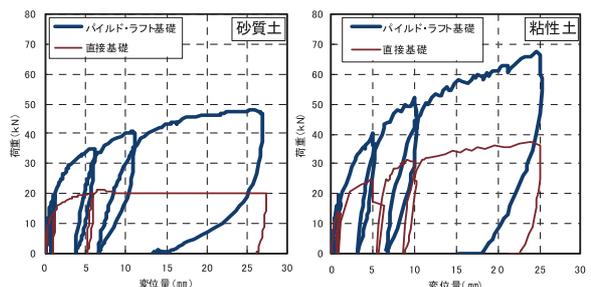


図-12 荷重-変位量関係

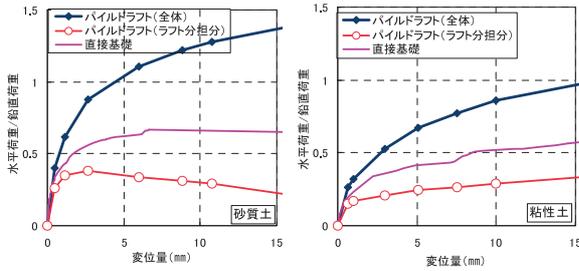


図-13 荷重-変位量関係 (ラフト分担分)

載荷初期の水平変位 0.5mm 時は、パイルド・ラフト基礎のラフト分担分 (PRr) が直接基礎 (Rr) の 70 ~ 80% 程度であるのに対して、水平変位 5.0mm 時では、パイルド・ラフト基礎のラフト分担分 (PRr) が直接基礎 (Rr) の 55% 程度とその比率は小さくなっている。さらに変位が進むと、比率 (PRr) / (Rr) は、砂質土地盤では、ラフトのロッキングの影響からその比率は小さくなるが、粘性土地盤では、57% 程度の一定の値で推移している。

### 4.2 杭の曲げモーメントと荷重分担率

パイルド・ラフト基礎の曲げモーメント分布を載荷方向前方杭 (PR2 杭) および後方杭 (PR4 杭) について、図-14 に示す。載荷初期の段階では、曲げモーメント分布の形状は、すべての杭で、ほぼ同様な傾向を示しているが、載荷が進んだ段階での杭頭部付近の最大曲げモーメントは、砂質土地盤では、載荷方向に対して前方の PR2 杭が後方の PR4 杭より大きく、粘性土地盤では PR2 杭、PR4 杭ともに、ほぼ等しい値を示している。

パイルド・ラフト基礎のラフトと杭の水平荷重分担率を図-15 に示す。杭水平荷重分担率はラフト直下の杭頭部の曲げモーメントの差から、せん断力を算出して、水平載荷荷重に対する全杭のせん断力の比から算出した。粘性土地盤で変位 1.3mm、砂質土地盤で変位 1.6mm 付近においてラフトと杭の水平荷重分担率が逆転しており、大きな変位では杭の水平荷重分担率が大きくなっていった。また、変位 3.0mm 程度までは、ラフトと杭の水平荷重分

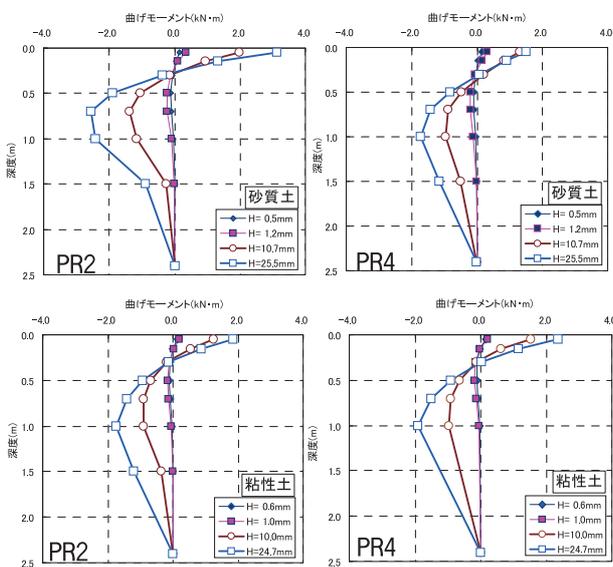


図-14 杭の曲げモーメント分布

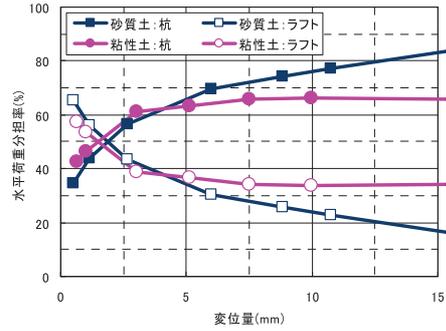


図-15 パイルド・ラフト基礎の水平荷重分担率

担率の増加傾向に、砂質土地盤と粘性土地盤の違いによる顕著な差は、今回の実験からは認められなかった。

### 4.3 ラフトの挙動

両地盤での、直接基礎およびパイルド・ラフト基礎の水平変位量とロッキングの状況を図-16 に示す。ロッキング量を表すラフト回転角は、ラフト四隅に設置した変位計から、載荷方向前方と後方の平均鉛直変位の差分を測定間距離で除した値とした。直接基礎のロッキングは、砂質土地盤ではわずかであったが、粘性土地盤では変位 10mm で 1/500 程度発生していた。パイルド・ラフト基礎のロッキングは、砂質土地盤、粘性土地盤ともに、変位 10mm で 1/280 程度発生している。なお、ラフトのねじれ (水平方向の回転) も確認されたが、いずれの地盤でも顕著ではなかった。

水平載荷時の杭軸力とラフトの回転について、GL-0.15m 位置における杭の平均軸力とラフト回転角の関係を図-17 に示す。ラフト回転角は、載荷方向直行軸に対して時計まわりを正としている。また、杭の平均軸力は水平載荷開始時点をもとに載荷以降の変化を表し、圧縮力を負としている。砂質土地盤に関しては、前方側の杭頭部の一部に、載荷が進むと引張力が発生する現象も見受けられたが、当該箇所における平均軸力は、前方側では圧縮力が、後方側では引張力が卓越していた。ラフトの回転角に応じて、前方側と後方側では、軸力の

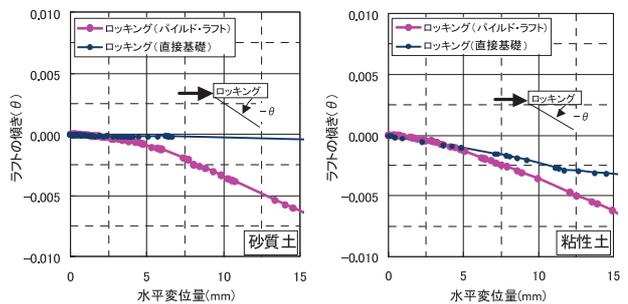


図-16 ラフト部分のロッキング

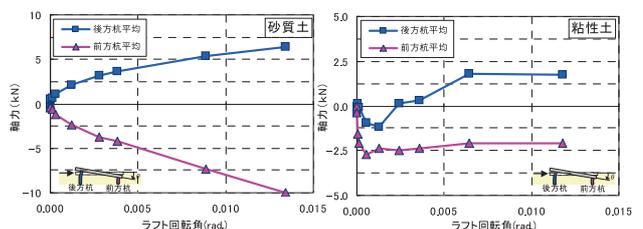


図-17 杭軸力-ラフト回転角の関係

絶対値に差が生じており、前方側の杭では拘束圧の影響などから、軸力が大きくなっていた可能性がある。粘性土地盤では、ラフト回転角が0.006 (rad.) を超えると軸力の増加はみられず前方側、後方側ともに、ほぼ同様な一定の値となっていた。

### 5. 振動台実験結果

振動台底面 (AH4) に対するパイルド・ラフト基礎 (AH2) および直接基礎 (AH1) の水平加速度フーリエスペクトル比を、No.1 (Sine 波入力、上載荷重 33.6kN) と No.9 (EL CENTRO NS 入力、上載荷重: 5.1kN) について図-18 に示す。いずれの実験ケースも、パイルド・ラフト基礎と直接基礎は振動数 10Hz までほぼ同様なフーリエスペクトル比であり、同様な挙動をしていることがわかる。

No.9 でのパイルド・ラフト基礎の水平加速度 (AH2) 時刻歴波形と杭頭部曲げひずみの時刻歴波形を、両者の最大値が含まれる 10 秒～15 秒を選択して図-19 に示す。パイルド・ラフト基礎の最大水平加速度と杭頭部最大曲げひずみが生じる時刻は一致しておらず、振動台実験時のパイルド・ラフト基礎の杭応力は、ラフト慣性力だけでなく地盤変位の影響も受けている可能性がある。

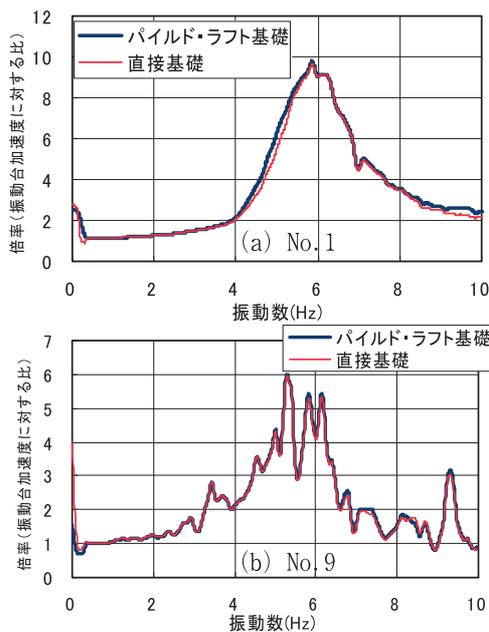


図-18 フーリエスペクトル比

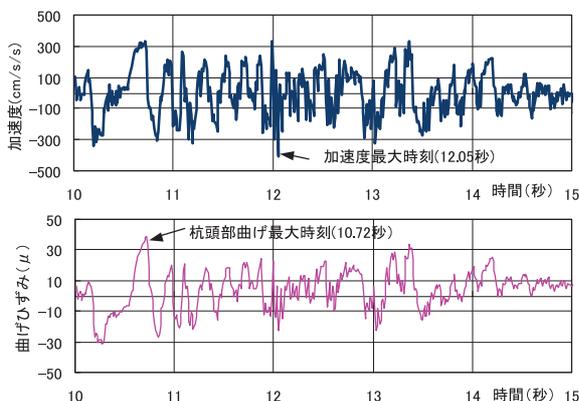


図-19 加速度及び杭頭曲げひずみ時刻歴波形 (No.9)

### 6. まとめ

一連の載荷実験結果から以下の結論が得られた。

- ①鉛直載荷実験のパイルド・ラフト基礎杭鉛直荷重分担率は、砂質土地盤の場合は最大荷重時で40%弱、粘性土地盤の場合は30%程度であった。
- ②鉛直載荷実験では、砂質土地盤では荷重の増加にともない軸力、杭周面摩擦力とも増加するが、粘性土地盤では荷重が大きくなると増分がみられなくなった。
- ③長期鉛直載荷実験では、即時沈下はもちろん、圧密沈下に対してもパイルド・ラフト基礎による沈下抑止効果を確認することができた。
- ④水平載荷実験では、粘性土地盤で変位1.3mm、砂質土地盤で変位1.6mm付近において、パイルド・ラフト基礎のラフトと杭の水平荷重分担率が逆転しており、大きな変位では杭の水平荷重分担率が大きくなっていた。
- ⑤振動台実験では、応答水平加速度のフーリエスペクトル比により比較すると、パイルド・ラフト基礎と直接基礎は、振動数範囲(10Hzまで)の挙動がほぼ同等になっていた。

### 謝辞

本研究は、室蘭工業大学建設システム工学科・土屋勉教授のご指導のもと、同大学、および構造計画研究所、五洋建設、鉄建建設、東急建設、飛鳥建設との共同研究として実施したものである。また、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)の一部として独立行政法人建築研究所と共同で実施した。

### 【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) 永井宏他: 杭頭拘束条件に着目したパイルド・ラフトの原位置試験、日本建築学会構造系論文集、第579号、pp.47-53、2004.
- 5) 長尾俊昌他: 小型基礎の原位置実験より得られたパイルド・ラフト基礎の水平挙動、日本建築学会構造系論文集、第559号、pp.121-127、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) 藤田豊他: 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) 土屋勉他: 水平力を受けるパイルドラフトの変形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.
- 9) 金子治他: パイルド・ラフト基礎に関する大型模型実験(その1)、戸田建設技術研究所報告、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