

# パイルド・ラフト基礎に関する大型模型実験

## その1 相互作用効果に関する実験



金子 治\*

伊勢本昇昭\*  
保井 美敏\*  
佐野 大作\*

### 概 要

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くなってきている。そこで、パイルド・ラフト基礎の相互作用効果を評価するため、2種類の大型土槽に乾燥砂および飽和粘性土地盤を作成し、それぞれ杭およびラフトを設置して、鉛直、水平載荷試験を行い、杭-杭間、杭-ラフト間の相互作用について検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 鉛直載荷による相互作用効果は、ほぼ近傍の地盤に限定され、その影響は地中部で最大となるが、その分布は、加力杭の荷重-変形関係の影響を受け、地盤種別により異なる。
- 2) 杭の水平載荷による相互作用効果は、加力杭からの距離により異なるが、連続した杭の相互作用効果が累積していくのではないかと考えられる。
- 3) ラフトによる相互作用効果は、鉛直、水平とも地盤種別により異なるが、ポアソン比や地盤剛性など、各種の要因が複合的に関与していると考えられる。

### Large Scale Model Tests of Piled Raft Foundations

#### Part 1 Experiments on Interaction Effects of Piled Raft Foundations

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

Piled raft foundations have been applied as an economical foundation system, and it is common for the design of piled raft foundations to estimate interaction effects based on theoretical solutions. It has been few studies to prove interaction effects directly by experimental procedures. A series of experiments to obtain the data about interaction effects for the design of piled raft foundations were conducted using large test boxes with man-made dry sand or saturated silt.

The results show the interaction effects from the vertical loading piles are vary depended on both soil classifications and the load-displacement relationship of the loading piles, and interaction from the lateral loading pile extend deeper level as the distance between the piles becomes longer, and it is more remarkable on the pile-to-pile interaction than that of raft-to-pile.

\* 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1 相互作用効果に関する実験

金子 治\*  
 伊勢本昇昭\*  
 保井 美敏\*  
 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<sup>1)</sup>。沈下抑止効果については、解析的な検証の他に模型実験<sup>2)</sup>や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が<sup>3-5)</sup>、杭-地盤-ラフト間の相互作用効果を確認した実験はほとんど報告されていない。

そこで、本報では、パイルド・ラフト基礎の相互作用効果を評価するため、2種類の大型土槽に乾燥砂および飽和粘性土地盤を作成し、それぞれ杭およびラフトを設置して、鉛直、水平載荷試験を行い、杭-杭間、杭-ラフト間の相互作用による変形、応力を直接測定した実験結果について示す。

### 2. 試験概要

今回、パイルド・ラフト基礎の挙動を把握するために実施した実験<sup>6)</sup>の一覧を表-1に示す。本報で示すのは、杭を載荷した場合の杭-杭間、杭-ラフト間、あるいはラフトを載荷した場合のラフト-杭間の相互作用効果を

直接確認するための「相互作用」実験であるが、その他にも直接基礎とパイルド・ラフト基礎の「比較」実験<sup>7,8)</sup>も実施しており、それぞれ鉛直荷重と水平荷重を載荷した。また、比較実験としては、砂質土地盤においては他の実験終了後に振動実験<sup>9)</sup>も追加実施し、振動載荷時の特性を静的載荷時と比較・検討している。さらに粘性土地盤では、圧密沈下を対象として約1ヵ月間長期載荷した場合の挙動についても確認<sup>10)</sup>した。

表-1 実験ケース一覧

地盤	載荷方向	実験種類	載荷対象
砂質土	鉛直	相互作用	杭
	鉛直	相互作用・比較	ラフト
	水平	相互作用	杭
	水平	相互作用・比較	ラフト
	鉛直	比較	パイルド・ラフト
	水平	比較	パイルド・ラフト
粘性土	鉛直	相互作用	杭
	鉛直	相互作用・比較[長期]	ラフト
	水平	相互作用	杭
	水平	相互作用・比較	ラフト
	鉛直	比較[長期]	パイルド・ラフト
			杭, ラフト, パイルド・ラフト

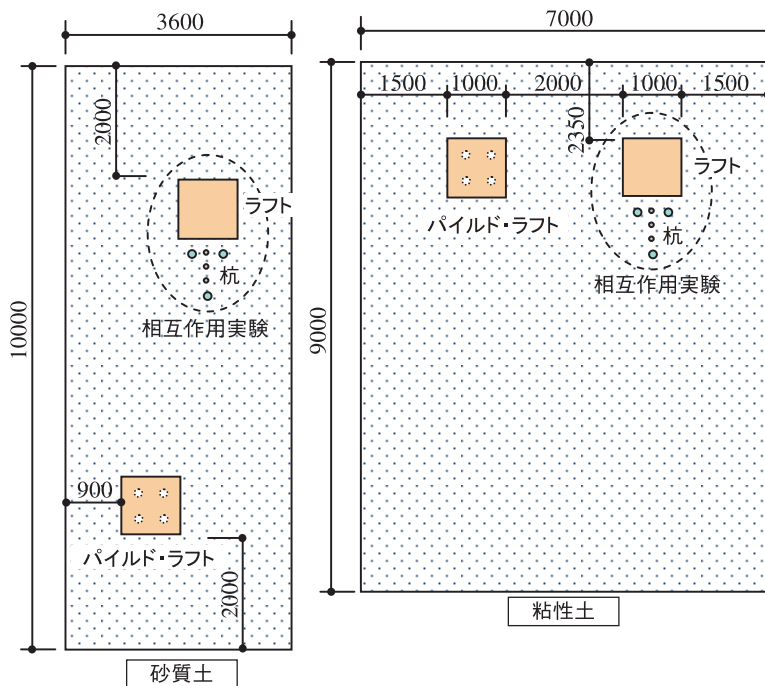


図-1 実験土槽

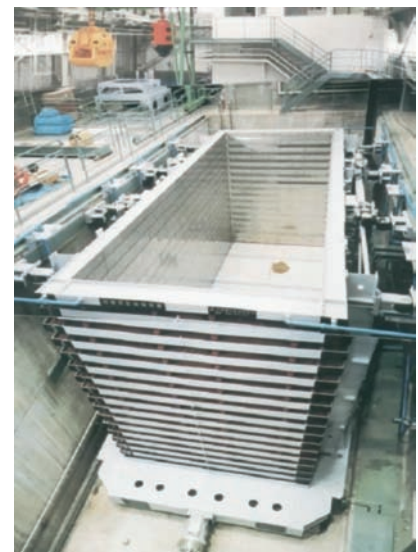


写真-1 実験土槽 (砂質土用)

\* 戸田建設(株) 技術研究所

なお、これらの一連の実験は、筆者らが開発したパイロッド・ラフト基礎の設計用解析プログラムの検証が第一目的であるが、このプログラムを用いたシミュレーション結果<sup>11)</sup>については別途まとめて報告する予定である。

### 3. 実験装置

一連の実験は、図-1、写真-1に示す独立行政法人建築研究所の建築基礎・地盤実験棟の実験土槽を用いて行った。土槽諸元は以下である。

砂質土用：深さ 5m × 幅 3.6m × 長さ 10m  
(せん断土槽)

粘性土用：深さ 6m × 幅 6m × 長さ 7m

砂質土地盤には6号硅砂を使用し、相対密度30%を目標に厚さ25cmごとに所定量を投入、転圧により均質な地盤を作成した。地盤作成時に、深度ごとに土槽内9ヵ所で急速平板載荷試験を実施し、変形係数 $E_{vd}$ の平均値：19.7MN/m<sup>2</sup>、変動係数：18%と、ほぼ均質とみなせることを確認した。

粘性土地盤には、液性限界が41.6%、塑性指数14.5%の低塑性の砂質シルトを使用し、スラリー状態にして攪拌、自重圧密させた後、40kN/m<sup>2</sup>の上載圧を載荷した。

図-2にそれぞれの土槽において実施したスウェーデン式サウンディング試験結果から換算したN値分布の代表例を示すが、いずれもN値1-9の軟弱な地盤で、深さ方向に漸増していることを確認した。ただし、粘性土

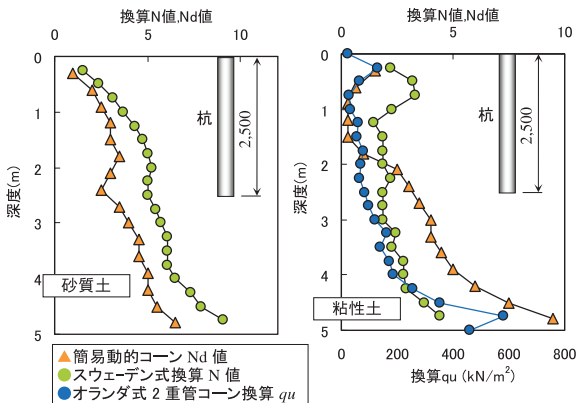


図-2 地盤調査結果



写真-2 ラフトおよび杭

地盤の表層部付近は、ややN値が大きくなっていたが、乾燥による脱水の影響によるものと思われる。また、平面的なばらつきも小さく、ほぼ均質な地盤であった。実験終了後に粘性土地盤から採取した不攪乱試料による圧密試験結果によると、明確な圧密降伏応力は得られなかったものの多少過圧密状態であると思われる。

杭は径76.3mm、肉厚2.8mm、長さ2700mmの閉端鋼管杭であり、頭部200mmが地表面より露出している。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製し、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。ラフトはRC製で1.0m角、厚さは220mmである(写真-2)。

図-3、写真-3に相互作用実験の杭およびラフトの配置を示す。杭の鉛直荷重は桁を介して2本の杭(P1、P2：加力杭)をジャッキで同時に載荷し、加力杭からの距離が異なる計測杭(P3～P6)の変形、杭体のひずみを計測した。杭の水平荷重は、P1、P2と反対側の杭(P6)をジャッキで計測杭側へ載荷した。ラフトの荷重は、鉛直荷重は実荷重(重り)で行い、水平荷重の場合はラフト側面中央部をジャッキで杭側に載荷した(写真-4)。載荷は、鉛直荷重は荷重制御、水平荷重は変位制御とし、荷重保持時間は原則として砂質土地盤では15分、粘性土地盤の場合は30分とした。計測は変位計により杭頭の変位および地盤表面の変位を、ひずみゲージにより杭体のひずみを計測した。ひずみゲージの貼付位置を図-4に示す。

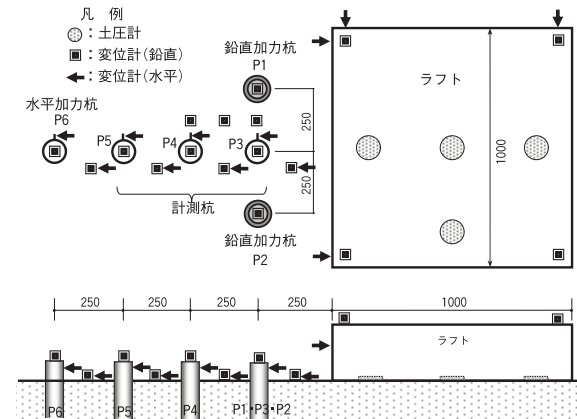


図-3 杭、ラフトの配置



写真-3 杭、ラフトの配置

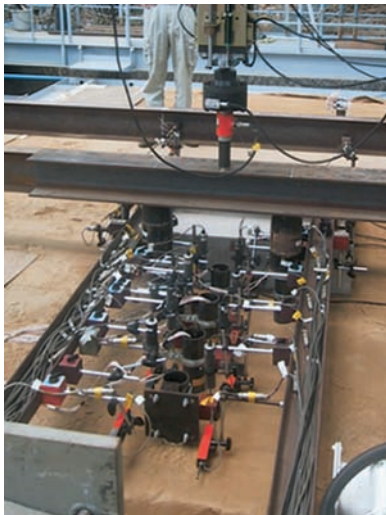


写真-4 荷重状況 (杭鉛直荷重)

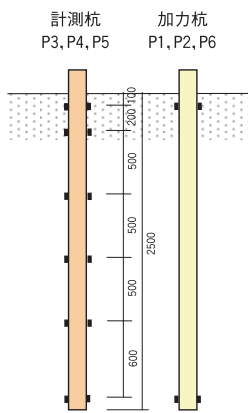


図-4 杭のひずみ計測位置

#### 4. 鉛直荷荷による相互作用効果

加力杭の鉛直荷荷にともなう相互作用による計測杭とラフトの沈下分布およびラフト荷荷による計測杭の沈下分布を、砂質土地盤の場合を図-5に、粘性土地盤の場合を図-6に示す。ここで、鉛直荷荷にともなう相互作用による沈下量、加力杭やラフトとの距離が250mmと最も近いP3杭であっても非常に小さく、加力杭が極限荷重に達しても、砂質土地盤で0.3mm弱、粘性土地盤で0.7mm弱に過ぎない。また、P3杭より離れた杭に関しては、砂質土地盤では加力杭との距離と対応して小さくなっている=相互作用は加力杭からの距離に応じた効果となっているのに対し、粘性土地盤ではP3杭に沈下が集中し、P4より離れている杭には相互作用はほとんど及んでおらず、地盤種別により相互作用効果の違いがみられた。この要因は、ポアソン比の違い(砂>粘土)の影響が考えられるが、定量的な検討は今後の課題である。

加力杭の荷重 $P$ -沈下 $S$ 関係を図-7、8に示す。ここで、加力杭の第1限界抵抗力は $\log P - \log S$ より推定し、第2限界抵抗力は杭径の10%沈下量に相当する荷重とした。

さらに、加力杭の荷重と計測杭の沈下量の関係および加力杭の沈下と計測杭の沈下量の関係を図-9、10に示す。ここで、計測杭の沈下は荷重初期では加力杭の荷重、沈下に応じて増加するが、第2限界抵抗力を超えると増分が小さくなっていく、つまり、加力杭の荷重-沈下関係と相互作用効果がリンクしていることがわかる。また、図-5、6と同様に、砂地盤ではすべての計測杭の相互作用効果が相似形であるのに対し、粘性土地盤では直近のP3杭以外は相互作用効果がほとんどみられない。

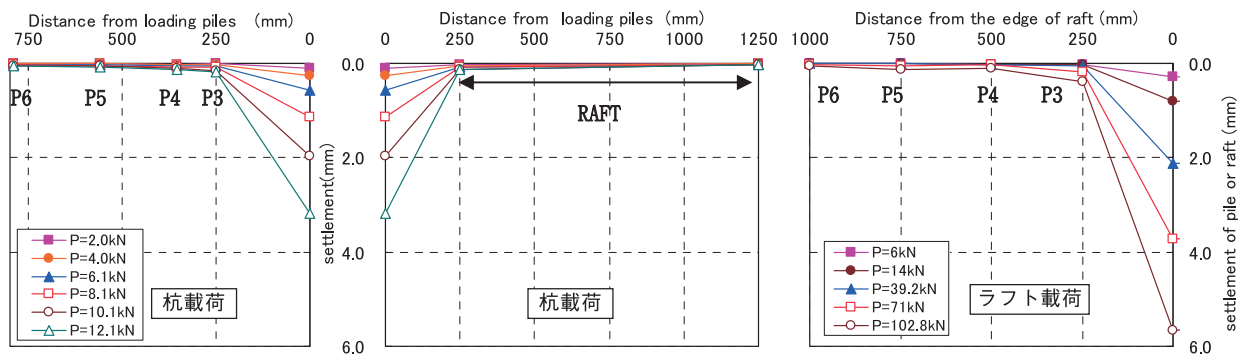


図-5 杭、ラフトの沈下分布 (砂質土地盤)

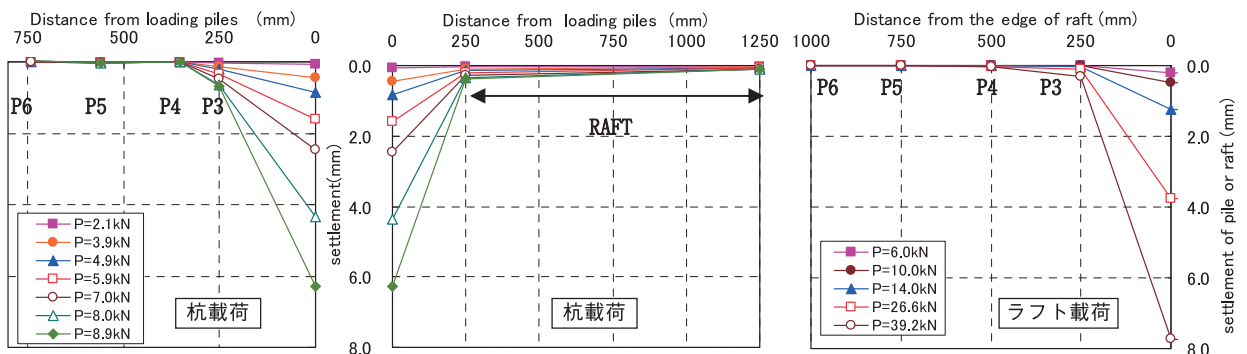


図-6 杭、ラフトの沈下分布 (粘性土地盤)

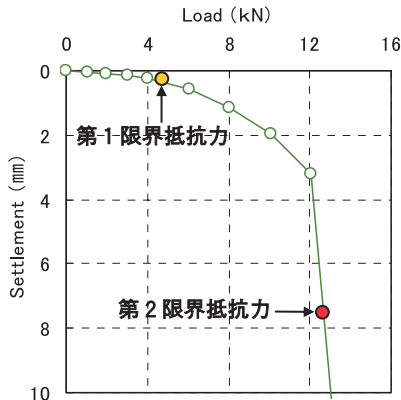


図-7 加力杭の荷重-変位関係 (砂質土地盤)

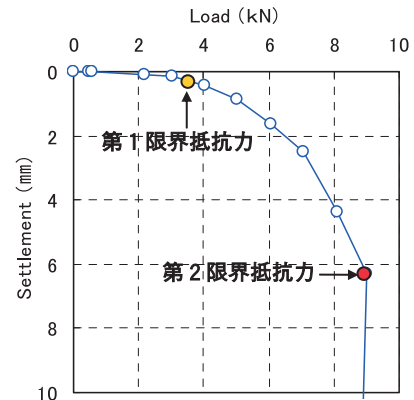


図-8 加力杭の荷重-変位関係 (粘性土地盤)

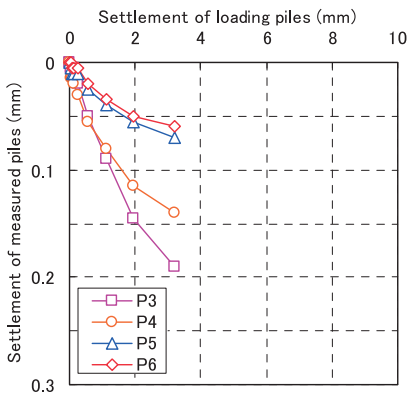
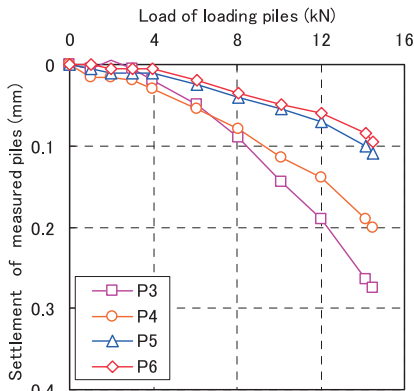


図-9 加力杭の荷重、沈下と計測杭の沈下の関係 (砂質土地盤)

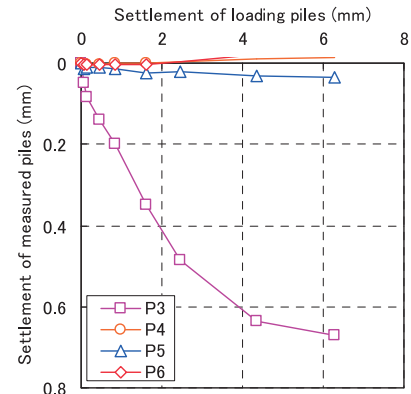
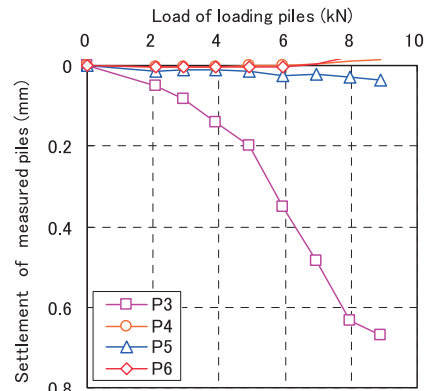


図-10 加力杭の荷重、沈下と計測杭の沈下の関係 (粘性土地盤)

図-11 に加力杭の鉛直荷重にともなう相互作用効果により、加力杭からの距離 250mm の計測杭：P3 杭に生じた軸力分布を示す。載荷荷重が小さいうちは、砂地盤では杭中間部で圧縮力が生じているが、先端部はほぼ 0、粘性土では全体が引っ張り側である。載荷荷重が大きくなると、砂地盤では引っ張り側へ移行するが、変動量は先端部が大きく、杭頭部はほとんど変動しない。粘性土では逆に圧縮側に移行し、変動量は中間部、杭頭部が大きい。これはいずれの地盤も先端支持力が小さいため、加力杭からの相互作用による荷重、計測杭の抵抗力いずれも中間部の周面抵抗の影響が大きく、砂地盤と粘性土地盤の周面抵抗 ( $\infty N$  値、 $q_u$ ：砂地盤では深さ方向に漸増、粘性土では杭頭部>杭先端部) の分布の違いが顕著にあらわれていると考えられる。

図-12 にラフト載荷による計測杭：P3 杭の軸力分布を示す。載荷荷重が小さいうちはいずれの地盤でも全長

圧縮軸力であるが、荷重に応じて砂質土地盤では地中部で圧縮側の軸力が増加していき、最大値は深さ 1.5-2.0m 付近で生じる。これに対して、粘性土地盤では、載荷荷重が大きくなると杭上部で引っ張り側に移行する。これは、計測杭の周面抵抗の違いに加えて、砂質土と粘性土のポアソン比の違い、接地圧分布の違い、ラフト直下の地盤剛性の違い (粘性土>砂) などが複合的に影響していると考えられる。

### 5. 水平載荷による相互作用効果

杭の水平載荷にともなう相互作用により生じた計測杭の曲げモーメント分布のうち、砂質土地盤の場合を図-13 に、粘性土地盤の場合を図-14 に、加力杭のモーメントとあわせて示す。なお、加力杭の測定点は最上部、最下部のみである。

ここで、相互作用により生じる曲げモーメントの最

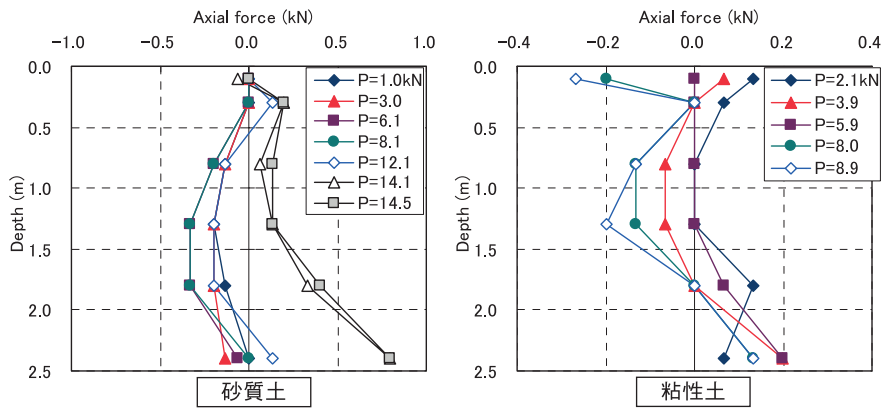


図-11 杭載荷時の計測杭：P3の軸力分布

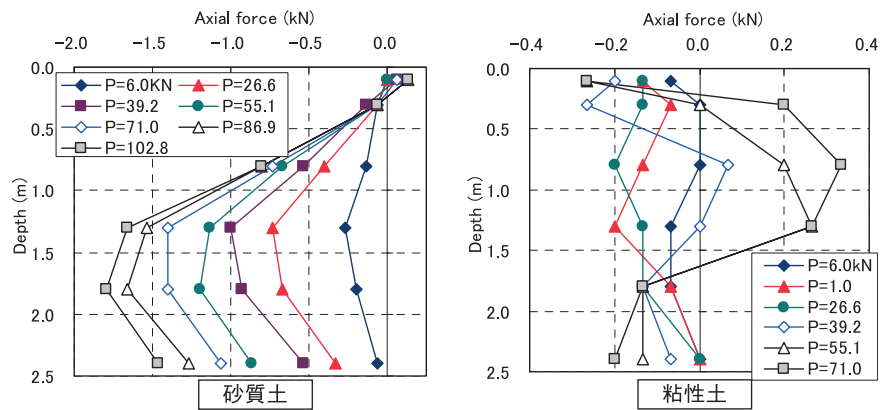


図-12 ラフト載荷時の計測杭：P3の軸力分布

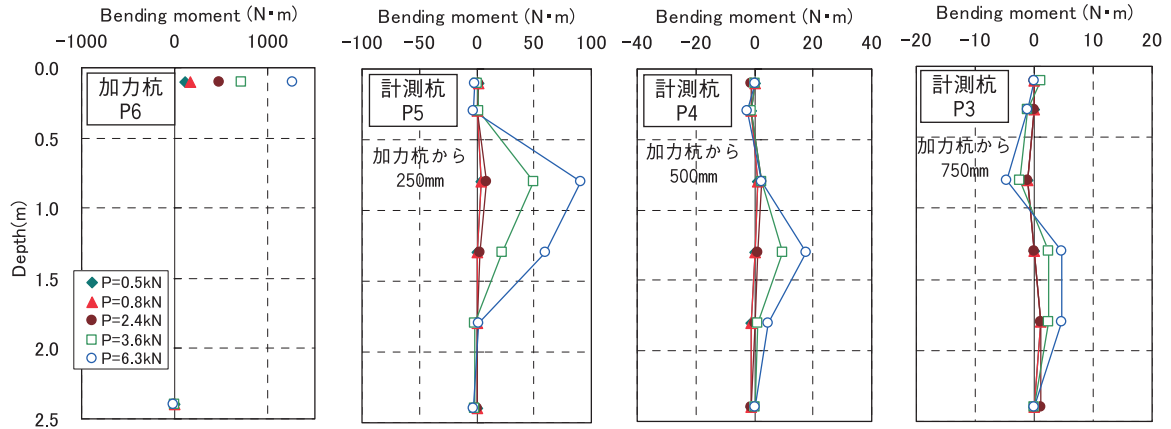


図-13 杭水平載荷時の曲げモーメント分布(砂地盤)

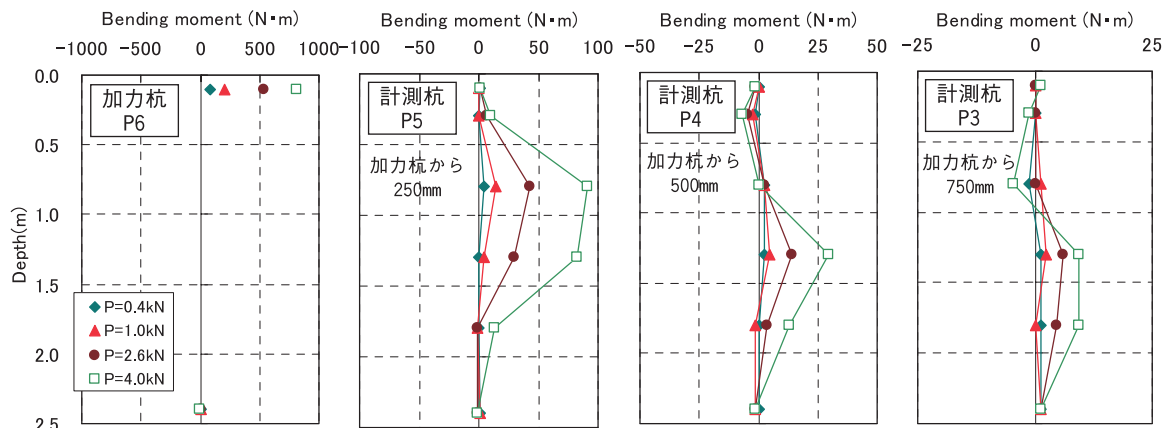


図-14 杭水平載荷時の曲げモーメント分布(粘性土地盤)

大値は、予測される通り、加力杭より離れるほど小さくなり、砂質土地盤では、加力杭の杭頭曲げモーメント  $1.3\text{kN}\cdot\text{m}$  に対して、最も近い (250mm) 杭であっても  $91\text{N}\cdot\text{m}$  程度である。さらに 250mm ずつ離れると  $18\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $5\text{N}\cdot\text{m}$  と小さくなっていく。粘性土地盤でも加力杭頭で  $0.81\text{kN}\cdot\text{m}$  に対して、 $91\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $30\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $9\text{N}\cdot\text{m}$  と、やや大きな値となっているが傾向は同様である。

また、曲げモーメントは、いずれの地盤でも、加力杭からの距離が離れるにしたがって小さくなるとともに、最大値の発生深度が深くなっている。さらに、加力杭から離れていくと、杭上部で逆に曲げられる S 字状となる。

計測杭に加わる加力杭からの相互作用による力は、地盤が均質であれば加力杭からの距離に比例すると予測されるが、この分布形状からは、現象としては加力杭から離れると加力杭の地中部の曲げ変形による相互作用効果の方が相対的に大きくあらわれていると思われる。さらに相互作用による直近の計測杭の地中部の曲げ変形が次の杭へ影響を与えて、相互作用が累積していった可能性もある。

一方、ラフトの水平荷重にともなう相互作用により生じる杭の曲げモーメント分布を、砂質土地盤の場合を図-15に、粘性土地盤の場合を図-16に示す。ここで、曲げモーメントの最大値は、杭載荷の場合と同様

に、ラフトから離れるにしたがって小さくなるが、砂質土地盤で  $89\text{N}\cdot\text{m}$  (ラフト端部からの距離 250mm)、 $43\text{N}\cdot\text{m}$  (500mm)、 $18\text{N}\cdot\text{m}$  (750mm)、粘性土地盤では  $97\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $54\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $39\text{N}\cdot\text{m}$  と、杭載荷と比べてラフトからの離れによる減少の割合は小さい。また、分布形状としては、いずれの地盤においても杭載荷の時のような、最大値の深度が下がる現象や、S 字状になる現象は顕著にはあらわれず、杭載荷による相互作用効果との違いがみられた。

また、水平荷重にともなうラフトの回転 (ロッキング) 変形角は、砂質土地盤では  $0.7 \times 10^{-3}$  程度と非常に小さな値に過ぎなかったが、粘性土地盤では最大  $4.1 \times 10^{-3}$  に至っており、相互作用効果に影響を与えた可能性がある。

以上から、砂質土地盤と粘性土地盤では水平荷重による相互作用効果に違いが生じたが、その要因としては、鉛直荷重と同様な要因 (ポアソン比の違い、ラフト直下の地盤剛性の違い) に加え、ラフトのロッキング変形、ラフト底面での摩擦力-変位関係の違い、の影響もあると考えられる。

## 6. 結論

パイルド・ラフト基礎の相互作用効果を直接測定し、評価するための大型土槽を用いた荷重試験の結果、以下

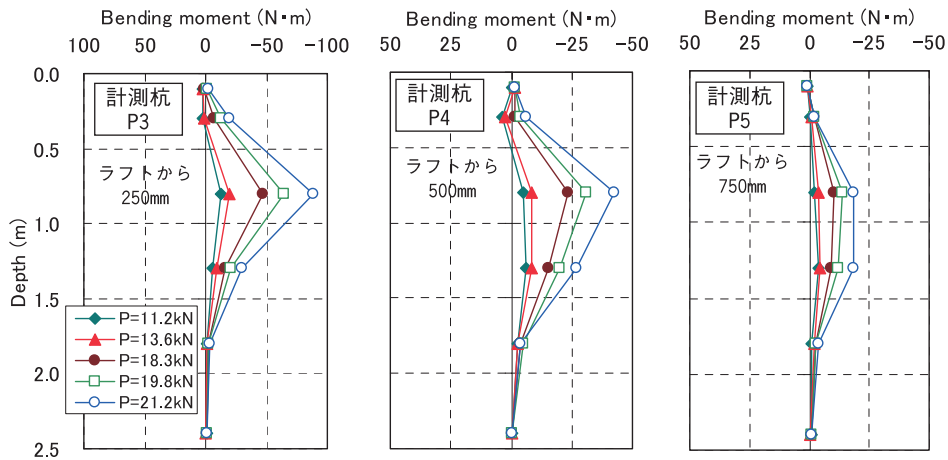


図-15 ラフト水平荷重時の曲げモーメント分布 (砂地盤)

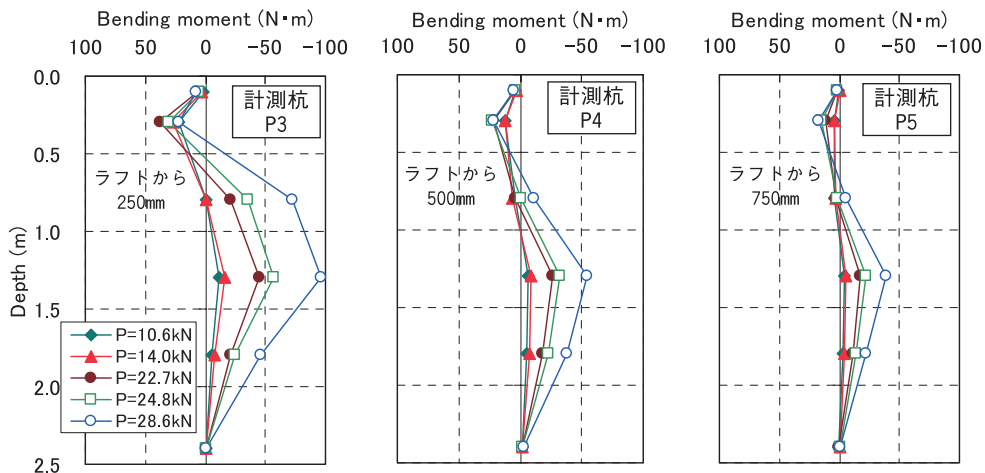


図-16 ラフト水平荷重時の曲げモーメント分布 (粘性土地盤)

の結論が得られた。

- 1) 鉛直載荷による相互作用効果は、ほぼ近傍の地盤に限定され、その影響は地中部で最大となるが、その分布は、加力杭の荷重-変形関係の影響などを受け、地盤種別により異なる。
- 2) 杭の水平載荷による相互作用効果は、加力杭からの距離が離れるにしたがって小さくなるとともに、最大値の発生深度が深くなっている。これは、加力杭（あるいは計測杭同士の）杭地中部の曲げ変形による相互作用効果があらわれていると考えられる。
- 3) ラフトによる相互作用効果は、鉛直、水平とも地盤種別により異なるが、ポアソン比や地盤剛性など、各種の要因が複合的に関与していると考えられる。

今後は、筆者らの開発したパイルド・ラフト基礎の設計用解析プログラムを用いてシミュレーション解析を行い、この解析プログラムで採用した相互作用効果の評価方法の妥当性を検証していく予定である。

## 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、飛島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) Poulos, H.G.: Piled raft foundations: design and applications, Geotechnique, 51, No.2, pp95-113, 2001
- 2) Kitiyodom P. et al: Analyses of vertical and horizontal load tests on piled raft models in dry sand, Proc. 16th ICSMGE, Osaka, pp.2005-2008, 2005
- 3) 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、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、2005
- 4) 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1-5）、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、2005
- 5) 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1-5）、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、2005
- 6) 伊勢本昇昭他：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、2）、第41回地盤工学研究発表会、2006
- 7) 佐野大作他：パイルド・ラフト基礎と直接基礎の比較実験（その1-3）、第41回地盤工学研究発表会、2006
- 8) 佐野大作他：パイルド・ラフト基礎に関する大型模型実験（その5、6）、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、2006
- 9) 保井美敏他：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、2006
- 10) 伊勢本昇昭他：パイルド・ラフト基礎に関する大型模型実験（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、2006
- 11) 内山不二男他：パイルド・ラフト基礎に関する大型模型実験（その8）、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、2006