

# パイルド・ラフト設計システムの開発

## — その1 大型模型を用いた相互作用実験 —

矢島 淳二\* 沼上 清\* 古垣内 靖\*\*

**要約：** 直接基礎に沈下低減杭を併用するパイルド・ラフト基礎は、長尺な支持杭に頼らない合理的な基礎工法として、建物基礎に採用できるようになってきた。しかし、具体的な設計手法が確立されていないため、実際の建物基礎として採用するためには、実証実験の結果に裏付けられた設計システムの確立が必要である。筆者らは、平成 16 年度よりパイルド・ラフト基礎の設計システムの開発を目的とした共同研究開発を開始し、大型土槽における一連の大型模型実験を実施してきた。

本報告では、杭ーラフト間の相互作用効果を載荷実験によって直接確認するために実施した相互作用実験（鉛直載荷実験および水平載荷実験）の概要と結果について報告する。

実験の結果、杭またはラフト載荷に伴う周辺杭の挙動が明らかとなり、パイルド・ラフト基礎設計システムの実証データが収集できた。

**キーワード：** パイルド・ラフト, 杭, 直接基礎, 模型実験, 載荷実験, 沈下

- 目次：**
- 1. はじめに
  - 2. 実験概要
  - 3. 鉛直載荷試験結果
  - 4. 水平載荷試験結果
  - 5. おわりに

### 1. はじめに

直接基礎に沈下低減杭を併用するパイルド・ラフト基礎は、日本建築学会の建築基礎構造設計指針(2001)<sup>1)</sup>において「併用基礎」の一つとして取り上げられ、長尺な支持杭に頼らない合理的な基礎工法として、建物基礎に採用できるようになってきた。しかし、具体的な設計手法が確立されていないため、実際の設計に用いるためには、実証実験の結果に裏付けられた設計システムの確立が必要である。筆者らは、平成 16 年度よりパイルド・ラフト基礎の設計システムの開発を目的とした共同研究開発を開始し、大型土槽において砂質地盤および粘性土地盤を再現した一連の大型模型実験（相互作用実験、パイルド・ラフト基礎の鉛直・水平載荷実験、振動実験など）を実施してきた。<sup>2),3)</sup>

パイルド・ラフト基礎の載荷実験については、既にいくつかの事例<sup>4)~6)</sup>が報告されているが、設計システムを開発する上で基本的な根拠となる杭ーラフト間の相互作用効果を載荷実験によって直接確認した事例は報告されていない。本報告では、一連の大型模型実験のうち相互作用実験の概要と結果について報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 実験ケース

表 1 に相互作用実験の実験ケース一覧を示す。実験地盤は砂質土および粘性土を対象とし、それぞれ別の大型土槽を使用して実施した。（砂質土：奥行 10m×幅 3.6

表 1 実験ケース一覧（相互作用実験）

対象地盤	実験記号	載荷方向	載荷対象
砂質土	SVIP	鉛直	杭
	SVIF	鉛直	ラフト
	SHIP	水平	杭
	SHIF	水平	ラフト
粘性土	CVIP	鉛直	杭
	CVIF	鉛直	ラフト
	CHIP	水平	杭
	CHIF	水平	ラフト

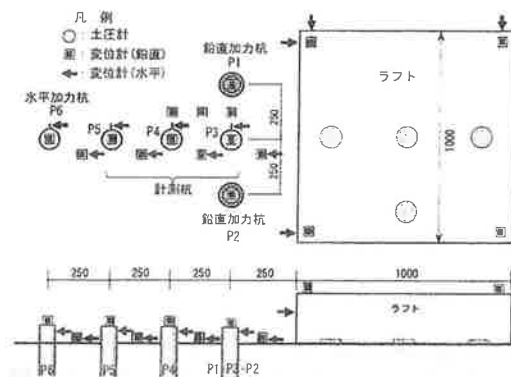


図 1 試験体配置および計測器位置

m×高さ 5m のせん断土槽，粘性土：奥行 9m×幅 7m×高さ 6m) 実験の種類は，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実験をそれぞれ鉛直載荷および水平載荷について実施した。

## 2.2 地盤

砂質土地盤は，6号珪砂を用いて相対密度 30%を目標に厚さ 25cm ごとに転圧して作成した。粘性土地盤は，スラリー状態に攪拌した砂質シルトを自重圧密させて脱水した後， $40\text{kN/m}^2$  の上載圧を載荷して作成した。地盤作成後に標準貫入試験を実施しており，砂質土地盤の N 値は深度に伴って漸増し GL-5m で 9 程度，粘性土地盤の N 値は，深度によらず N 値 2～4 程度でほぼ一定値となった<sup>2),3)</sup>。地盤調査については，他に急速平板載荷試験等の原位置試験や乱さない試料を用いた各種の土質試験を実施した。

## 2.3 試験体

図 1 に試験体配置および計測位置を，写真 1 にその概観を示す。杭は全て径 76.3mm，肉厚 2.8mm，長さ 2700mm の閉端鋼管杭で，頭部 200mm が地表面より突出している。砂質土地盤に杭を設置する際には，地盤作成時に所定の位置に杭をあらかじめセットした後に周辺地盤を締め固めた。一方，粘性土地盤では地盤作成後に杭を圧入してセットした。ラフトについては，工場作製された RC 模型を地盤作成後に所定の位置にセットした。

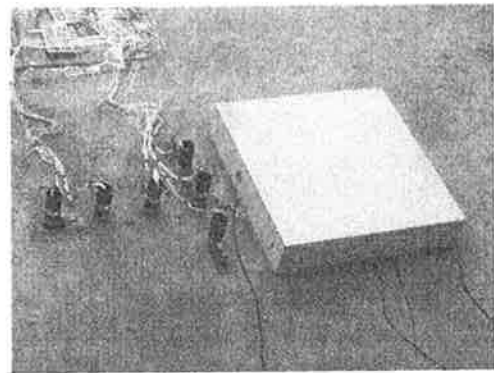
杭を載荷する場合，相互作用の影響を明確にするために，鉛直荷重は T 字型に配置した両端部の杭 (P1, P2) をジャッキで同時に載荷し，計測杭 (P3～P5) への影響を計測した。水平荷重は，ラフトと反対側の杭 (P6) をジャッキでラフト側へ載荷した。ラフトを載荷する場合は，鉛直荷重は実荷重 (鉄板) で，水平荷重はラフト中央部を杭側に載荷した。鉛直載荷試験と水平載荷試験は砂質土地盤および粘性土地盤においてそれぞれ同一の試験体に対して実施しており，一連の鉛直載荷試験を終了した後に水平載荷試験を実施した。

計測項目は，杭頭荷重，変位，ひずみ，ラフトの土圧を計測している。ひずみについては，加力杭に 2 深度，計測杭に 6 深度のひずみゲージをあらかじめ貼付し，軸ひずみおよび曲げひずみを評価した。載荷方法は，鉛直荷重に対しては荷重制御，水平荷重に対しては変位制御とし，荷重保持時間は原則として砂質土地盤では 15 分，粘性土地盤では 30 分とした。

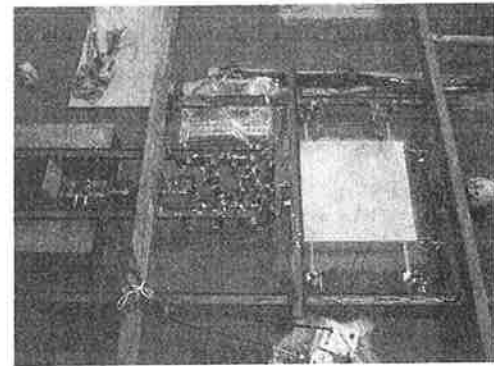
## 3. 鉛直載荷試験結果

### 3.1 鉛直荷重－沈下量関係

図 2 には，砂質土地盤における相互作用実験の結果として，(a)加力杭の鉛直荷重－沈下量関係(SHIP)，(b)ラフトの鉛直荷重－沈下量関係(SHIF)を示す。第 1 限界抵抗力は  $\log P - \log S$  関係より，第 2 限界抵抗力は杭径の

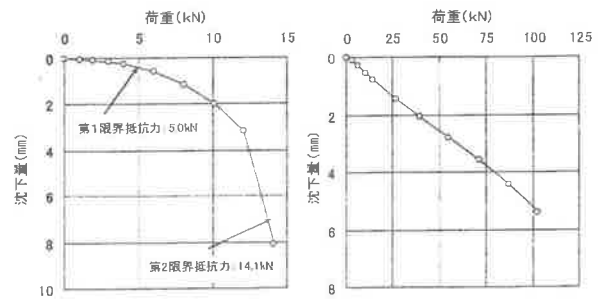


(a) 試験体設置状況 (砂質土地盤)



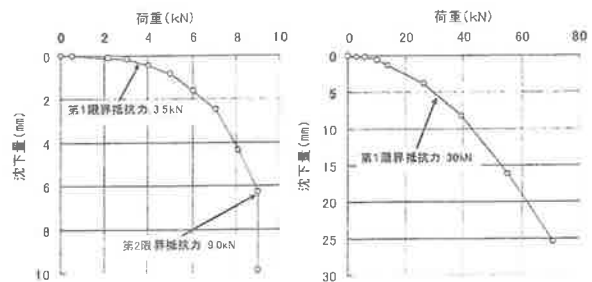
(b) 計測器，水平加力ジャッキ設置 (粘性土地盤)

写真 1 試験体概観



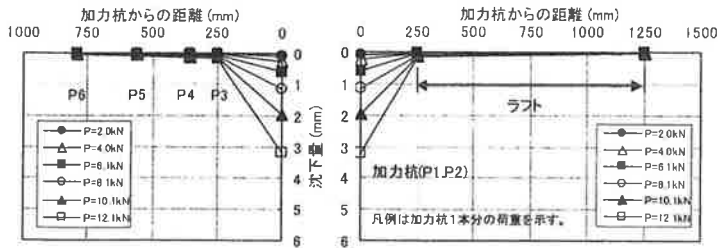
(a) 杭 (SVIP) (b) ラフト (SVIF)

図 2 鉛直荷重－沈下量関係 (砂質土地盤)



(a) 杭 (CVIP) (b) ラフト (CVIF)

図 3 鉛直荷重－沈下量関係 (粘性土地盤)



(a) 計測杭 (b) ラフト  
図4 杭載荷による相互作用効果 (SVIP)

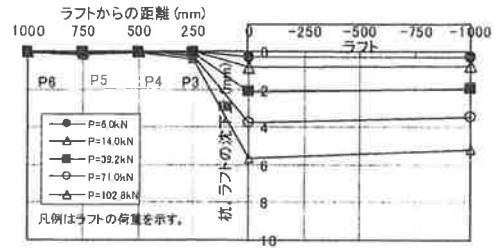
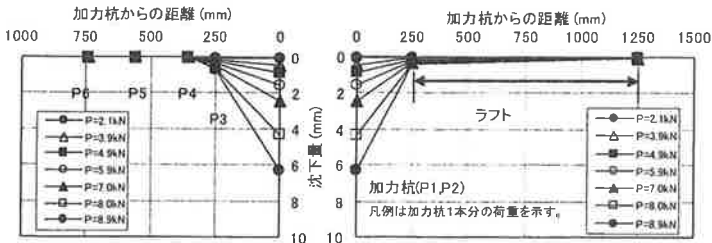


図5 ラフト載荷による相互作用効果 (SVIF)



(a) 計測杭 (b) ラフト  
図6 杭載荷による相互作用効果 (CVIP)

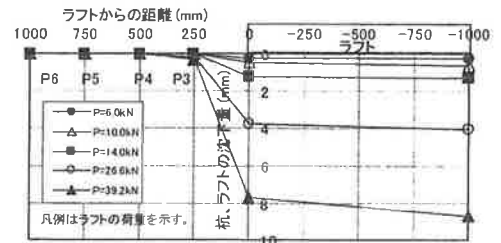


図7 ラフト載荷による相互作用効果 (CVIF)

10%に相当する荷重より算定した。ラフトについては、 $100\text{kN/m}^2$  まで載荷したところで計測器の障害により載荷を中止したが、この範囲ではほぼ弾性的な挙動を示している。図3には、同様に粘性土地盤における相互作用実験の結果を示す。杭については、砂質土地盤では  $14.1\text{kN}$ 、粘性土地盤では  $9.0\text{kN}$  の荷重で完全な極限状態に達している。

### 3.2 鉛直載荷時の相互作用効果

図4には、砂質土地盤における杭の相互作用実験 (SVIP) に伴う計測杭ならびにラフトの沈下分布を、図5にはラフトの相互作用実験 (SVIF) に伴う計測杭の沈下分布を示す。また、図6および図7には、粘性土地盤における相互作用実験 (CVIP, CVIF) の結果を示す。なお、図4～図7は、加力杭またはラフトの沈下量が  $10\text{mm}$  以下の場合の沈下量分布を示している。

砂質土地盤における杭載荷に伴う計測杭の沈下量は、粘性土地盤と比較して小さく、CVIP による最も近接した P3 の沈下量は  $0.7\text{mm}$  以下 (加力杭沈下量の 30% 程度以下) なのに対して、SVIP による P3 の沈下量は  $0.2\text{mm}$  以下 (加力杭沈下量の 9% 以下) である。また、砂質土地盤、粘性土地盤ともに、次に近接した P4 の沈下量は  $0.1\text{mm}$  以下に減少している。一方、ラフト載荷に伴う計測杭の沈下量では、SVIF および CVIF による最も近接した P3 の沈下量はともに  $0.4\text{mm}$  以下 (微小変位時を除いてラフト沈下量の 19% 以下) である。

図8には、SVIP における加力杭荷重—各計測杭沈下量関係を示す。各計測杭の沈下量は、加力杭荷重に応じ

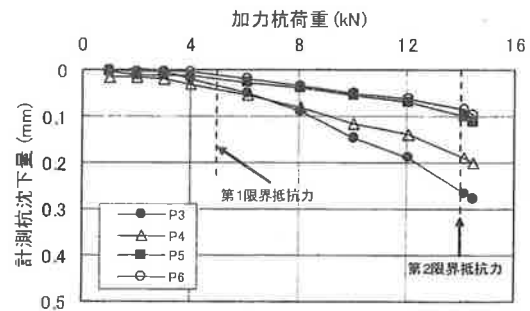


図8 加力杭荷重—計測杭沈下量関係 (SVIP)

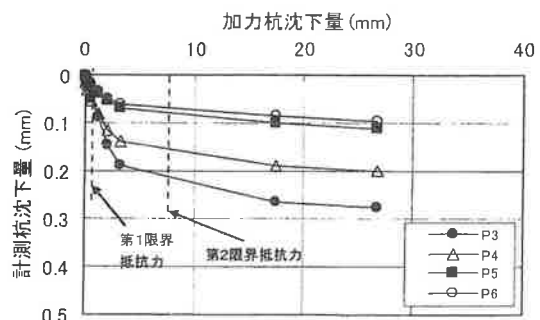


図9 加力杭沈下量—計測杭沈下量関係 (SVIP)

て増加するが、第1限界抵抗力および第2限界抵抗力付近で僅かに折れ曲がっている。

図9には、SVIPにおける加力杭沈下量—各計測杭沈下量関係を示す。各計測杭沈下量は、加力杭沈下量との関係では、第2限界抵抗力付近で明確な折れ曲がりを生じている。これらは、加力杭周辺で滑りが生じると、加力杭の沈下が進行しても計測杭の沈下がほとんど進行していないことを示している。

#### 4. 水平載荷試験結果

##### 4.1 水平荷重—変位量関係

図10には、砂質土地盤における相互作用実験の結果として、(a)加力杭の水平荷重—変位量関係(SHIP), (b)ラフトの水平荷重—変位量関係(SHIF)を示す。図11には、同様に粘性土地盤における相互作用実験の結果を示す。ラフトの相互作用実験における鉛直荷重は表2の通りである。

杭の相互作用実験では、変位とともに荷重も漸増して最大荷重に至るが、ラフトの相互作用実験では変位量5mm程度までにラフト—地盤間に滑りが生じ、CHIFでは僅かに荷重が漸増するもののSHIFではほぼ一定値に至る。各試験における第1限界抵抗力と第2限界抵抗力を図中に示す。杭の相互作用実験では、両対数座標で表示した荷重—変位量関係からは明確な降伏は認められなかった。

##### 4.2 水平載荷時の相互作用効果

図12には、砂質土地盤における杭の相互作用実験(SHIP)に伴う(a)各計測杭の水平変位分布、(b)曲げひずみ分布を示す。図13には、同様に粘性土地盤における相互作用実験(CHIP)の結果を示す。ここで、計測杭の曲げひずみは、杭の各深度に貼付したひずみゲージのうち、加力前面側より後面側を減じた値を1/2にして算出している。なお、図12および図13には、加力杭の変位量が10mm以下の場合の値を示している。

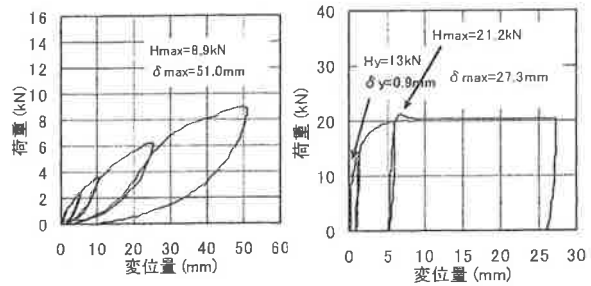
各計測杭の水平変位分布は、SHIP, CHIPともに、加力杭が10mmまで変位すると最も近接したP5で変位1.6mm以下(微小変位時を除いて加力杭変位の20%以下)である。また、次に近接したP4では、砂質土地盤、粘性土地盤ともに1.0mm以下に減少するが、鉛直載荷時と比較すると比較的大きな値となり、杭載荷の影響範囲が広いことがわかる。

一方、各計測杭の曲げひずみ分布は、SHIP, CHIPともに、加力杭が10mmまで変位すると最も近接したP5で最大40 $\mu$ 程度の曲げひずみが生じる。また、最大曲げひずみは、加力杭からの距離が離れるに従って小さくなるとともに、その発生深度が深くなっている。さらに、最も加力杭から離れたP3では、曲げひずみの分布がS字状となる。計測杭の曲げひずみは、加力杭によって生じる地盤の水平変位によって生じると考えられるが、加

表2 ラフト水平載荷時の鉛直荷重

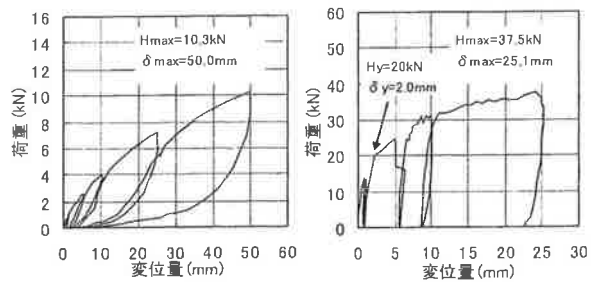
	自重 ①	上載荷重 ②	鉛直荷重 ①+②
砂質土 (SHIF)	5.1	26.6	31.7
粘性土 (CHIF)	5.1	55.1	60.2

(単位:kN)



(a) 杭 (SHIP) (b) ラフト (SHIF)

図10 水平荷重—変位量関係 (砂質土地盤)



(a) 杭 (CHIP) (b) ラフト (CHIF)

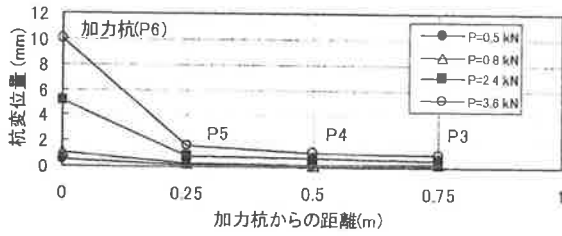
図11 水平荷重—変位量関係 (粘性土地盤)

力杭から離れるに従い、地盤の水平変位が深度深くまで生じていることを示唆している。

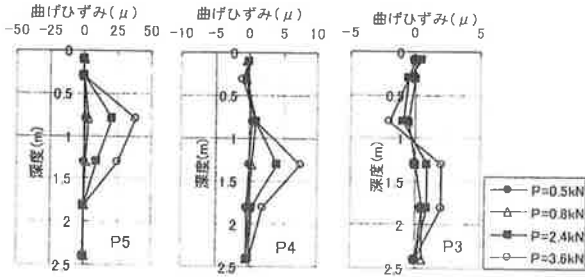
図14には、砂質土地盤におけるラフトの相互作用実験(SHIF)に伴う(a)各計測杭の水平変位分布、(b)曲げひずみ分布を示す。図15には、同様に粘性土地盤における相互作用実験(CHIF)の結果を示す。なお、図14および図15には、ラフトの変位量が10mm以下の場合の値を示している。

各計測杭の水平変位分布は、SHIF, CHIFともに、ラフト変位が8mmに至ると最も近接したP3で変位1.8mm以下(微小変位時を除いてラフト変位の23%以下)となる。

一方、各計測杭の曲げひずみ分布は、SHIF, CHIFともに、ラフト変位が8mmに至ると最も近接したP3で

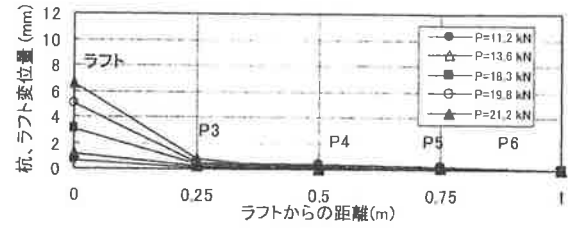


(a) 水平変位分布

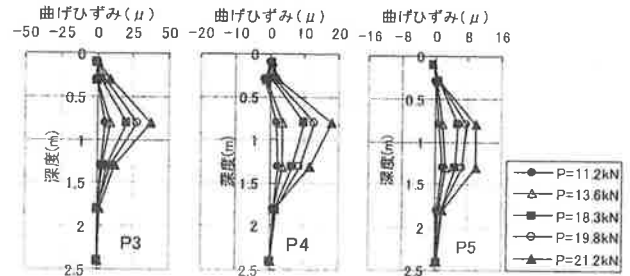


(b) 曲げひずみ分布

図 12 杭载荷による相互作用効果 (SHIP)

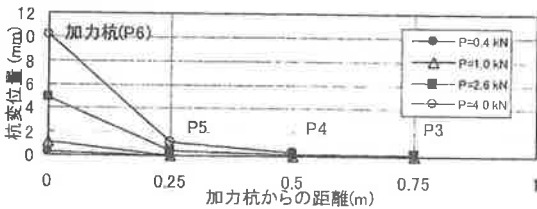


(a) 水平変位分布

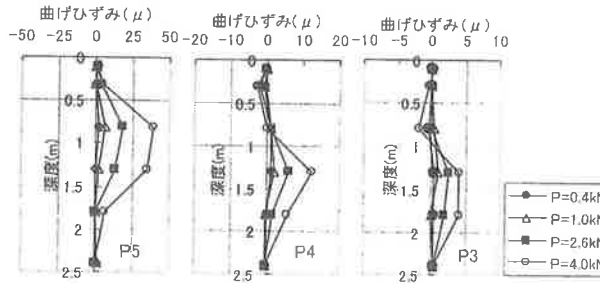


(b) 曲げひずみ分布

図 14 ラフト载荷による相互作用効果 (SHIF)

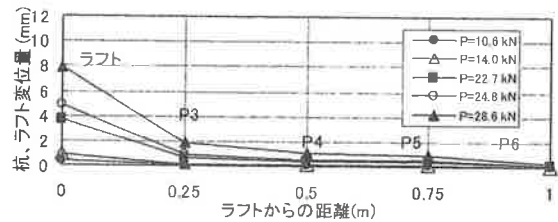


(a) 水平変位分布

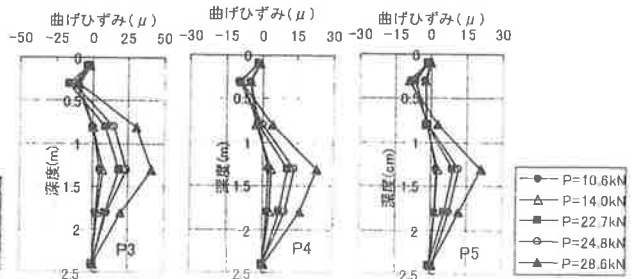


(b) 曲げひずみ分布

図 13 杭载荷による相互作用効果 (CHIP)



(a) 水平変位分布



(b) 曲げひずみ分布

図 15 ラフト载荷による相互作用効果 (CHIF)

最大 40 μ 程度の曲げひずみが生じている。また、最大曲げひずみの値は、距離が離れるに従って小さくなる傾向となるが、その割合は SHIF の方が大きい。また、最大曲げひずみの発生深度は、杭の相互作用実験と比べて分布性状が異なり SHIF, CHIF ごとにほぼ一定であるが、最大曲げひずみの発生深度は CHIF の方がやや深い。これらラフトの相互作用実験における曲げひずみの分布性状は、杭载荷と比べてラフト载荷の方が地盤との接触面積が大きく地盤に一樣な水平荷重が加わること、CHIF

の方が地盤の水平変位が深くまで生じていることなどに起因するものと推察される。

### 5. おわりに

大型土槽において砂質地盤および粘性土地盤を再現し、杭-ラフト間の相互作用効果を载荷実験によって直接確認するため、一連の相互作用実験を実施した。杭またはラフトの载荷に伴う周辺杭の沈下分布、変位分布および曲げひずみ分布等を計測した結果、以下の性状が明らか

となった。

- 1) 杭またはラフトの鉛直載荷に伴う周辺計測杭の沈下量は、最も近接する杭を除いて微小であるが、加力杭荷重（または加力杭変位）の増加に伴って周辺計測杭の沈下量も増加し、第1限界抵抗力および第2限界抵抗力の前後で沈下量の増加傾向に変化が生じている。
- 2) 杭またはラフトの水平載荷に伴う周辺計測杭の水

平変位量も、鉛直載荷時と同様に最も近接する杭を除いて微小であるが、変位の生じる範囲は鉛直載荷時よりも広範に及んでいる。

- 3) 杭またはラフトの水平載荷に伴う周辺計測杭の曲げひずみ分布は、水平載荷によって生じる地盤の水平変位の影響を受けた分布性状を呈する。

これらの実験結果は、開発中のパイルド・ラフト設計システムの検証データとする予定である。

#### 謝 辞

本実験は、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、および戸田建設、構造計画研究所、五洋建設、鉄建建設、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。関係各位に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会編：建築基礎構造設計指針，第7章 併用基礎，第7.3節 パイルド・ラフト基礎，pp.339-348，2001
- 2) 矢島淳二・伊勢本昇昭他9名：パイルドラフト基礎の相互作用に関する実験（その1・その2），地盤工学研究発表会梗概集，pp.1403-1404,1409-1410，2006
- 3) 矢島淳二・沼上清他17名：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），構造I，pp.371-386，2006
- 4) 渡邊徹・長尾俊昌他1名：沈下低減杭を併用した直接基礎の鉛直載荷実験（その1，その2），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），構造I，pp.657-660，2005
- 5) 萩原幸男・秦雅史他7名：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），構造I，pp.661-670，2005
- 6) 新井寿昭・武内義夫他12名：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），構造I，pp.675-684，2005

## DEVELOPMENT OF DESIGN SYSTEM FOR THE PILED RAFT FOUNDATION

### — 1. INTERACTION EFFECT TESTS USING LARGE SIZE MODELS —

J.Yajima, K.Numakami, and Y.Furugaichi

Piled raft foundation, which is a raft foundation with short piles for decreasing settlement, is a rational foundation without long piles, and is adopted as the foundation of the building recently. But, design method for the piled raft foundation is not established, therefore design system based on results of the loading tests should be developed.

Authors performed a series of large size model tests for the piled raft foundation using the large test box in sand or clay. Interaction effect tests, ones of a series of model tests, are consisted of vertical loading tests and horizontal loading tests of a pile or a raft, in order to clear the interaction effects between loading a pile (or a raft) and a influenced pile.

As the results of these tests, behavior of settlement or displacement of a influenced pile is cleared, the test data can be used for development of the design system for the piled raft foundation.