

杭頭接合条件の異なるパイルド・ラフト基礎の模型水平載荷実験

Horizontal Load Tests of Model Piled Rafts with Different Pile Head Connection Conditions

三上 博 HIROSHI MIKAMI

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI

建築技術部 西村 憲義 NORIYOSHI NISHIMURA

設計センター 長谷井 秀昭 HIDEAKI HASEI

杭頭接合部の回転剛性が水平荷重を受けた際のパイルド・ラフト基礎に与える影響の把握を目的として、乾燥砂地盤中に作製した群杭およびパイルド・ラフト基礎の模型に対する一連の水平繰返し載荷実験を行った。実験結果から、水平荷重一変位関係、ラフトと杭の荷重分担率および模型基礎周辺地盤の地中水平変位分布などの水平載荷時挙動に対して、杭頭接合条件が与える影響を明らかにした。

キーワード：パイルド・ラフト，模型実験，杭頭接合条件，水平載荷

A series of cyclic horizontal load tests of model pile groups and model piled rafts in dry sand were carried out. In these tests, the influence of rotational rigidity at the pile head connection on the behaviours of horizontally loaded model foundations was investigated. Tests results clearly showed the influence of pile head connection condition and the effect of raft-pile interaction on behaviours of the pile groups and the piled rafts such as horizontal load-displacement relation, load proportions carried by the raft and the horizontal displacement distribution of the soil around the model foundation.

Key Words: Piled Raft, Model Test, Pile Head Connection Condition, Lateral Loading

1. はじめに

筆者らは、パイルド・ラフト基礎の合理的な性能設計手法確立のために種々の検討を行っている。特に地震荷重等によって水平力が基礎に作用した場合の挙動については、未だ十分に明らかにされていない点が残されているため、模型実験および解析検討によってその解明を試みている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

今回、杭頭における杭とラフトの接合部の回転剛性がパイルド・ラフト基礎の挙動に与える影響を把握するため、乾燥砂地盤上に作製した各種条件模型基礎に対する鉛直および水平交番載荷実験を行った。本報では、鉛直載荷後に実施した水平交番載荷実験の概要および実験結果を報告する。

2. 実験概要

(1) 模型基礎および模型地盤

実験模型の概要を図-1に示す。一連の実験では、模型地盤材料として乾燥した豊浦砂を用いた。その物理特性

を表-1に示す。鋼製土槽（B1,500×L1,500×H1,500mm）の上部1,000mmの範囲に空中落下法により砂を投入し、100mmごとの薄層で敷き均しを行い、相対密度 $Dr=80\%$ を目標として、パイプレータで締固めた。土槽の下部500mmは固定層としてコンクリートブロックを詰めた。

表-1 豊浦砂の物理特性

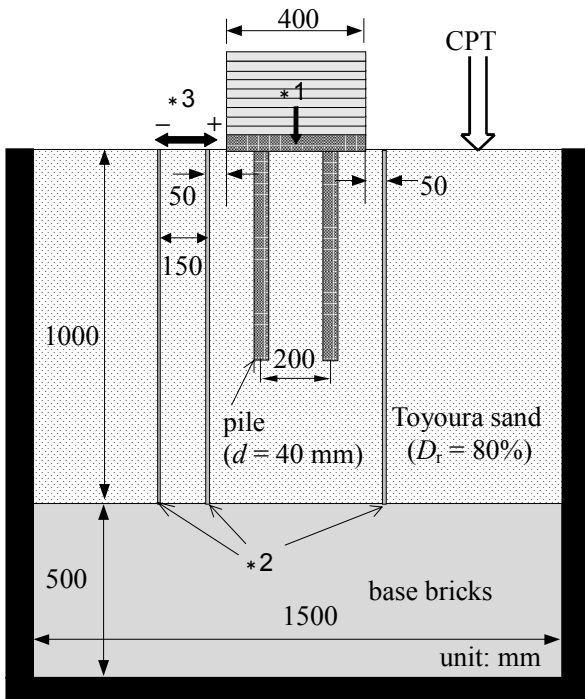
特性	値
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (t/m^3)	1.621
最小乾燥密度 ρ_{dmin} (t/m^3)	1.328
土粒子密度 ρ_s (t/m^3)	2.637
平均粒径 D_{50} (mm)	0.17
内部摩擦角 ϕ' (degree)	39.8

図-2および図-3にそれぞれ模型ラフトおよび模型杭の配置と形状寸法を示す。模型ラフトは正方形（400mm角）の平面形状で、厚さが40mmのステンレス板を用いており、剛基礎とみなすことができる条件である。ラフト底面には、あらかじめ豊浦砂を接着しており、地盤面との間の摩擦抵抗の増加を図った。模型杭には、外径 ϕ 40mm、肉厚 $t=2$ mm、杭長 $L=600$ mmのアルミ製パイプ

(閉端)を4本用い、等間隔(200mm)で配置した。模型杭の表面には、周面摩擦抵抗を増加させるために、豊浦砂を接着した。模型杭の諸特性を表-2に示す。

一連の実験では、4種類の異なる杭頭接合条件のモデル化を行った。杭頭接合部で所定の回転剛性を設定するために、ラフトに埋め込まれる天端板(Top steel plate)と杭頭キャップ板(Top steel cap)間の5mm区間を各条件に応じた円形断面の接続棒でつないだ。図-3に示すように、その直径はそれぞれ30.5mm(Rigid:剛接合), 13mm(Semi-rigid:半剛接合), 10mm

(Semi-hinged:半ヒンジ接合)とした。各接合方法での回転剛性 $E_b I_b$ はそれぞれ2.974, 0.098, 0.034kNm²であった。さらにこれらに加えてピン接合(hinged)のケースを設けた。

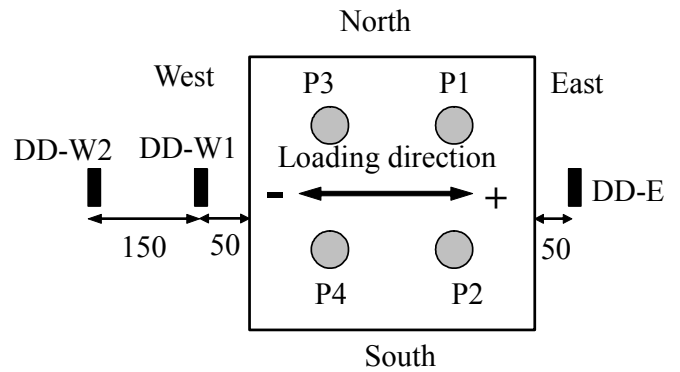


*1 鋼板による鉛直載荷 *2 地中変位測定用りん青銅板
*3 油圧ジャッキによる水平交番載荷

図-1 実験模型概要

表-2 模型杭の諸特性

特性	値
外径 d (mm)	40
肉厚 t_w (mm)	2
杭長 L (mm)	600
断面積 A_p (mm ²)	239
ヤング係数 E_p (kPa)	7.0×10^7
ポアソン比 ν_p	0.3
軸剛性 $E_p A_p$ (kN)	1.67×10^4
曲げ剛性 $E_p I_p$ (kNm ²)	3.03



*DD-W, DD-E: 地中変位計

図-2 模型ラフト平面図

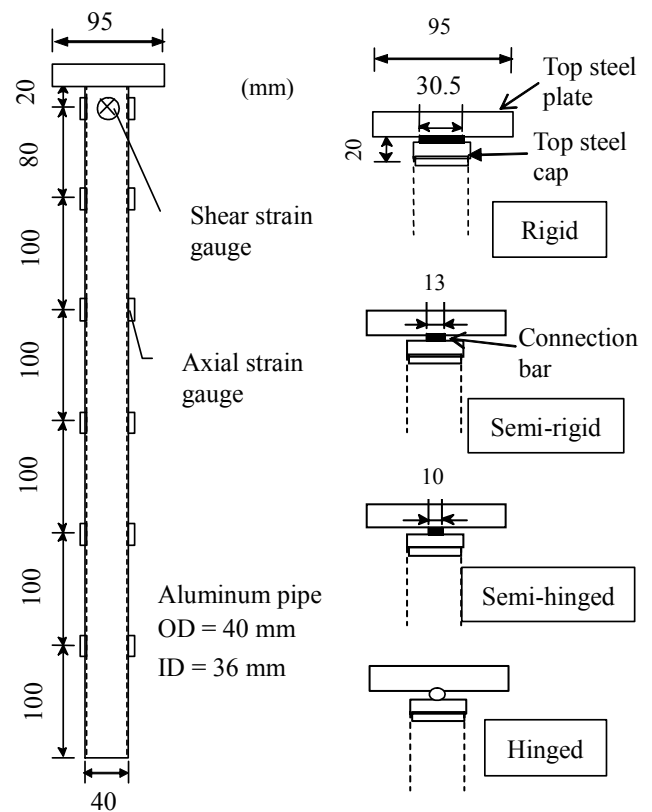


図-3 模型杭および杭頭接合部概要

(2) 実験ケースと手順

模型地盤への模型パイルド・ラフト基礎の設置にあたっては、まず模型杭を所定の中心間隔(200×200mm)で空の土槽中に治具で仮固定を行った。その状態で空中落下法により砂を土槽に投入し、100mmごとに敷き均しを行い、相対密度 $D_r=80\%$ を目標にバイブレータで締固めた。この作業の繰返しによって、厚さ1,000mmの模型地盤を造成した。次に仮固定治具を撤去し、模型ラフトを模型杭の上に設置し、自重によって地表面にラフトが接する状態で、杭の天端板とボルトで接合し一体化を行った。

今回の一連の実験では、表-3に示す7ケースを実施した。Case 1はラフト単体，Case 2および3は，それぞれ杭頭剛接合およびヒンジ接合の群杭（4本），Case 4からCase 7はそれぞれ杭頭接合条件の異なるパイルド・ラフト基礎である。

なお，群杭の実験ケースにおいては，載荷実験前にラフトと地盤の間に5mmのすき間を設けた状態で実験を開始した。一方，パイルド・ラフトの各実験ケースでは，載荷実験開始時にラフト底面が地表面に密着する状態で実験を開始した。

表-3 実験ケースと条件

実験ケース	基礎形式	杭頭接合条件
Case 1: Raft	ラフト単体	—
Case 2: PG-R	群杭	剛
Case 3: PG-H	群杭	ヒンジ
Case 4: PR-R	パイルド・ラフト	剛
Case 5: PR-SR	パイルド・ラフト	半剛
Case 6: PR-SH	パイルド・ラフト	半ヒンジ
Case 7: PR-H	パイルド・ラフト	ヒンジ

PG: Pile Group PR: Piled Raft
 R: Rigid connection SR: Semi-rigid connection
 H: Hinged connection SH: Semi-hinged connection



写真-1 載荷実験状況

載荷実験の状況を写真-1に示す。模型基礎に対する載荷過程は，鉛直載荷および水平載荷の2段階で構成される。まず鉛直載荷段階では，一枚あたり0.376kNの重さの鋼板を順次9枚かさね，最終的に鉛直載荷重として3.384kNの載荷を行った。この時のラフト単体での平均接地圧は21.2kPaであった。続く水平載荷段階では，鉛直載荷重を保持したまま，基礎の東側および西側（図-2参照）に設けた2台の油圧ジャッキで正負の繰返し水平載

荷を行った。なお，本報では，東側に向かう水平荷重および水平変位を正方向として表示するものとする。

載荷中には，水平載荷重，ラフトの鉛直および水平変位，ラフト傾斜角，各杭の杭体軸力，杭頭せん断力，杭体曲げモーメントの測定を実施した。

さらに，今回の実験では試みとして水平載荷中の基礎周辺地盤の地中水平変位分布の測定を行った。測定は図-4に示すような，りん青銅薄板（長さ1,000mm，幅30mm，厚さ0.3mm，ヤング係数 $1.10 \times 10^8 \text{kPa}$ ，曲げ剛性 $7.43 \times 10^6 \text{kNm}^2$ ）を模型地盤中にあらかじめ埋設して行った。薄板の下端は，土槽下部の固定面に剛結した（図-1参照）。3枚の薄板（DD-E，DD-W1, DD-W2）の平面配置は

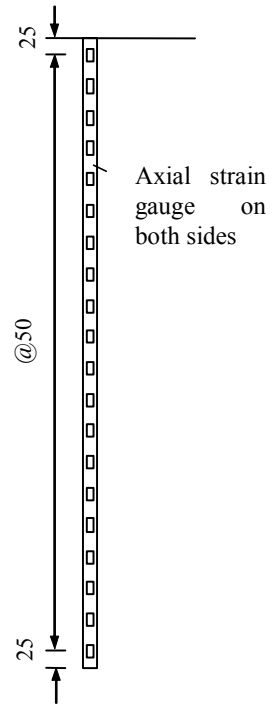


図-4 りん青銅板を用いた地中変位計

図-2に示すとおりである。薄板は周辺地盤の変形に容易に追従するので，薄板の両面に50mm間隔で貼付したひずみゲージで曲げひずみ値を測定し，薄板を弾性理論による片持ち梁として深度方向に2回積分することにより，各深度における水平載荷方向の地中変位量とした。

3. 水平交番載荷実験結果

(1) 水平載荷前の鉛直荷重分担率

各実験ケースにおいて，水平載荷前に一定の鉛直荷重（3.384kN）の載荷を行った。パイルド・ラフト基礎では，ラフトおよび杭（4本）の両方で鉛直荷重を分担する。表-4にこの時点でのラフトの鉛直荷重分担率を示す。パイルド・ラフトの実験ケース（Case 4～7）では，ラフトの鉛直荷重分担率はCase 4（杭頭剛）で若干大きめの値となっているが，おおむね各ケースで同等程度の範囲にあり，有意な差は見られない。

(2) 水平載荷サイクル

図-5に水平載荷サイクルの一例として，Case 6:PR-SHにおける実験時の水平載荷重と経過時間の関係を示す。ここで東方向への水平載荷を正荷重としている。他の各実験ケースでも模型基礎への水平載荷はおおむね同様の

サイクルにて行った。

表-4 水平載荷前のラフト鉛直荷重分担率

実験ケース	基礎形式	ラフト鉛直荷重分担率 (%)
Case 1: Raft	ラフト単体	100
Case 2: PG-R	群杭	0
Case 3: PG-H	群杭	0
Case 4: PR-R	パイルド・ラフト	49
Case 5: PR-SR	パイルド・ラフト	27
Case 6: PR-SH	パイルド・ラフト	35
Case 7: PR-H	パイルド・ラフト	28

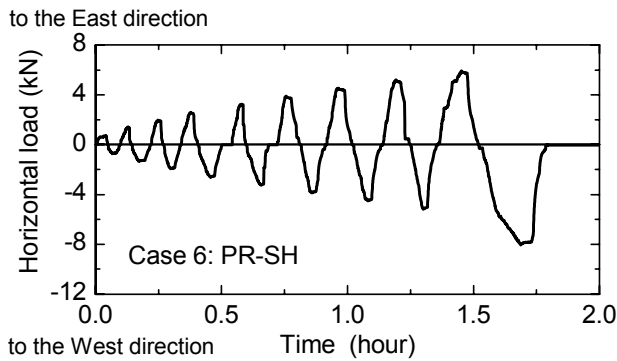


図-5 水平載荷サイクルの一例

(3) 水平載荷重と基礎の水平変位

図-6に載荷実験より得られた各実験ケースにおける水平荷重Hとラフト水平変位uの関係を示す。Case 1: Raftでは、水平変位が 5mm 程度で水平荷重がピークとなり、その後徐々に水平荷重は低下し、水平変位が 10mm 程度で一定の残留荷重状態に至った。

群杭およびパイルド・ラフトの各実験ケースでは、杭頭部接合条件の影響が水平荷重と基礎水平変位の関係に現れていた。その影響による差異を明瞭に比較するために、各実験ケースの正方向水平載荷サイクルの最大荷重時における水平荷重と基礎水平変位の関係を求め、図-7に示した。

水平荷重が小さい範囲においては、ラフト単体 (Case 1: Raft) の水平剛性は杭頭ヒンジの群杭 (Case 3: PG-H) よりも大きく、杭頭剛の群杭 (Case 2: PG-R) にはほぼ等しい値であるが、水平変位が大きくなると群杭 (PG-R, PG-H) の水平抵抗がラフト単体を上回るような結果となった。

パイルド・ラフト基礎の水平剛性は、すべてのケースにおいて群杭に比べて大きな値となった。Case 6: PR-SH (杭頭半ヒンジ) の水平剛性は、Case 7: PR-H (杭頭ヒンジ) に比べ、若干大きな値となった。Case 5: PR-SR (杭頭半剛) と Case 4: PR-R (杭頭剛) は、ほぼ同等の水平剛性であり、Case 6: PR-SHおよび Case 7: PR-H の場合を上回るものであった。

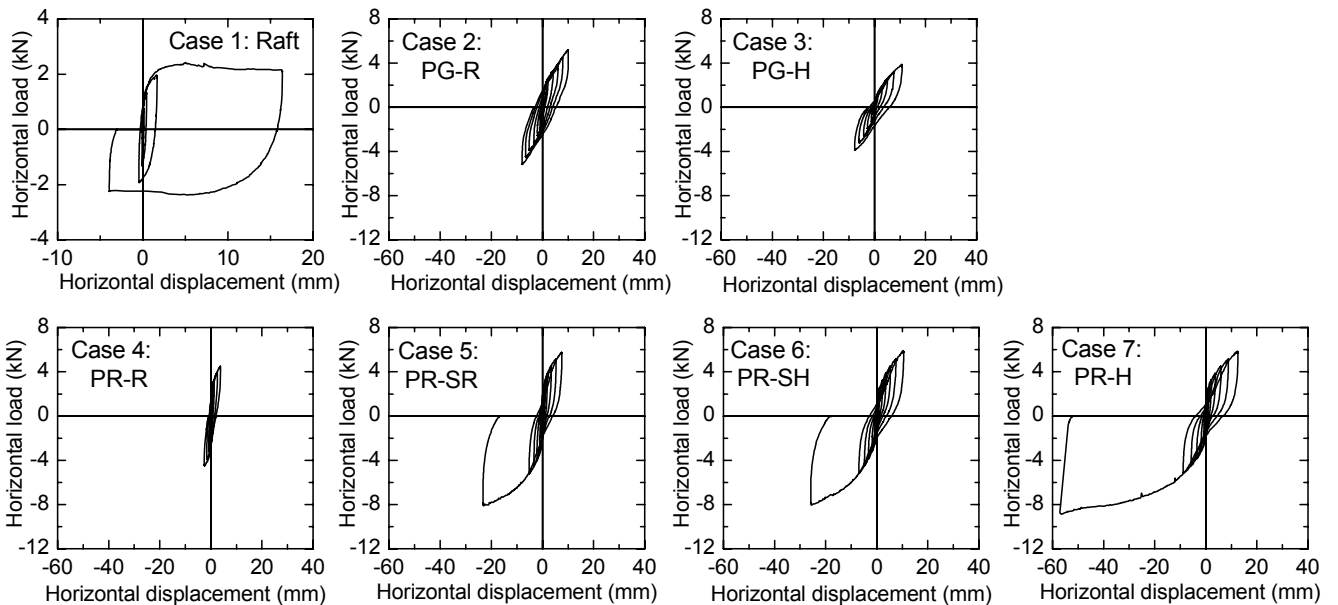


図-6 水平荷重とラフト水平変位の関係

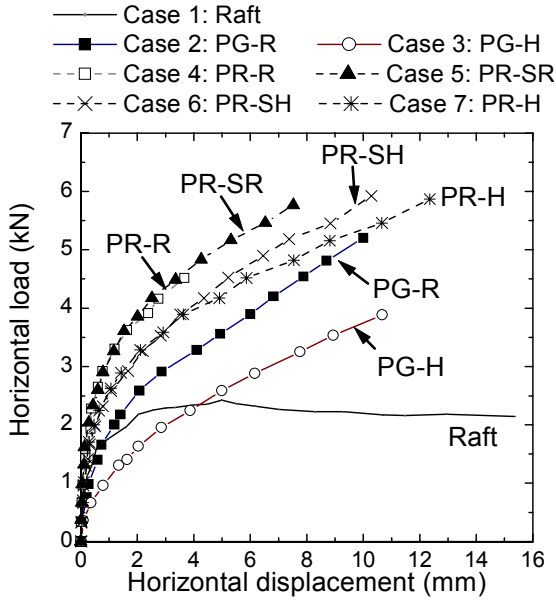


図-7 正方向ピーク荷重とラフト水平変位の関係

(4) ラフトの傾斜

ラフトの傾斜と水平変位の関係を図-8に示す。杭頭接合部の回転剛性が増すにつれて、基礎の傾斜が増加していることが分かる。杭頭がヒンジの場合（Case 7: PR-H）には傾斜は極めて小さい。この結果より、杭頭接合部の回転剛性を低下させることによって、ある与えられた水平変位条件下での、パイルド・ラフト基礎の傾斜を抑制することが可能と判断される。その一方で、回転剛性の低下によって、同一の水平荷重に対してはより大きな基礎の水平変位を生じさせることになり、水平剛性が低下していることが分かる。

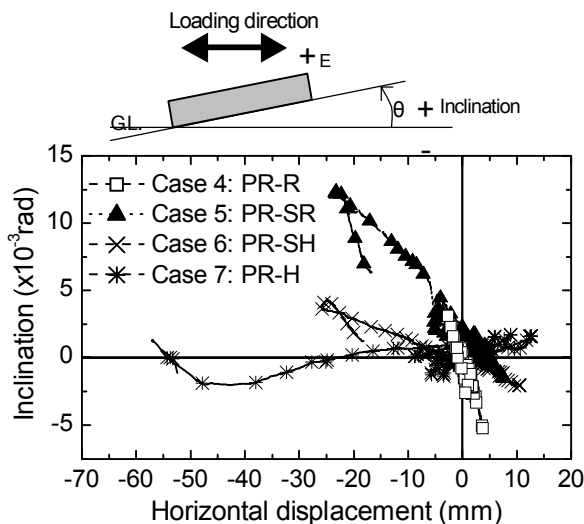


図-8 ラフトの傾斜と水平変位の関係

(5) ラフトと杭の水平荷重分担率

図-9は、ラフトの水平分担荷重と水平変位の関係を示したものである。図-10には同様に、杭の水平分担荷重

との関係を示した。図-9より、杭頭回転剛性が小さくなるに従って、変位の増大とともにラフトの水平荷重分担が小さくなる傾向が見られた。図-10において、パイルド・ラフトの各ケースにおける杭の水平荷重分担と変位の関係は、杭頭剛およびヒンジの群杭（PG-R および PG-H）の荷重～変位関係の中間に位置した。ある同一の基礎水平変位量において、パイルド・ラフトの杭の水平荷重分担が杭頭ヒンジの群杭（PG-H）に比べて大きくなる理由としては、ラフトの接地圧が杭周辺地盤に伝達することによって拘束圧が増し、地盤の強度や剛性が増加することなどが推察される。

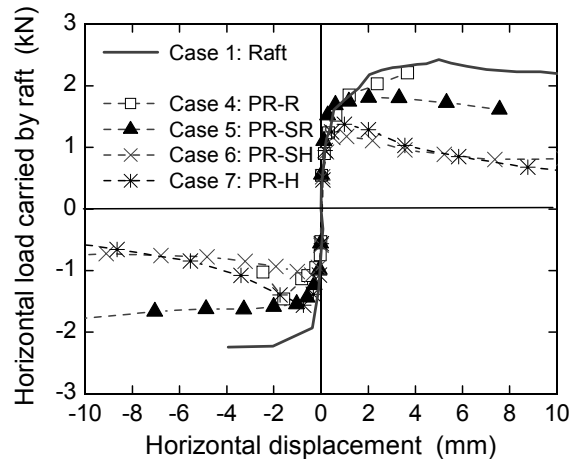


図-9 ラフトの水平荷重分担と水平変位の関係

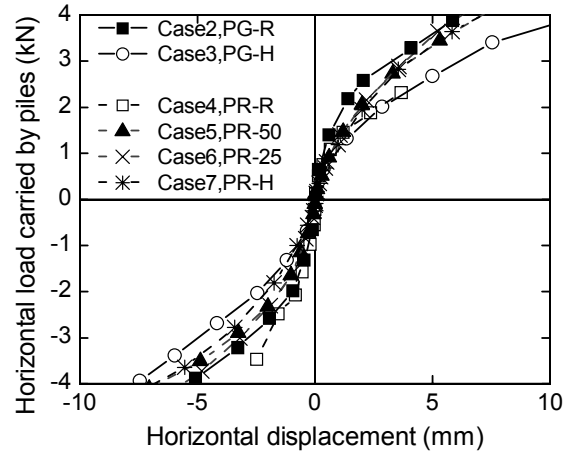


図-10 杭の水平荷重分担と水平変位の関係

(6) 杭の曲げモーメント

図-11は、P1 杭における杭体曲げモーメント分布を水平載荷荷重が3.84kNの時点で描いたものである。パイルド・ラフトの各ケース（Case 4～Case 7）と群杭（Case 2, Case 3）を比べると、前者の方が曲げモーメントが小さくなる結果が得られた。パイルド・ラフト形式が杭の曲げ破壊の可能性低下に対して優位性があることを示唆している。

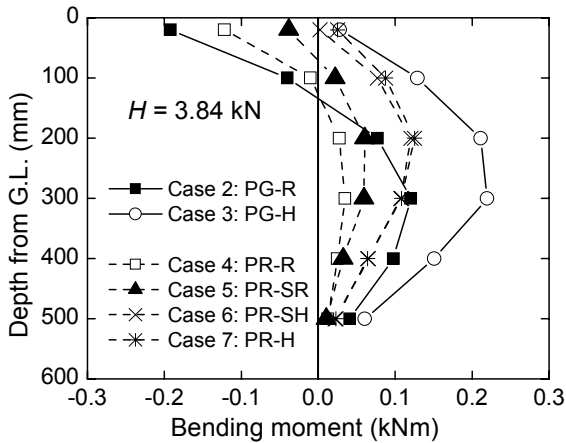


図-11 P1杭の曲げモーメント分布 ($P_H=3.84\text{kN}$ 時)

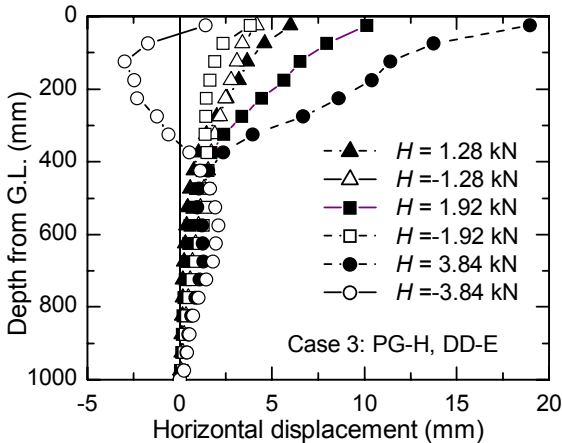


図-12 地中水平変位 (Case 3: PGH, DD-E)

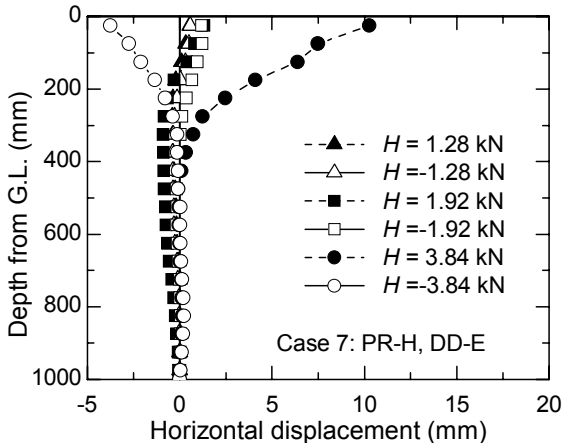


図-13 地中水平変位 (Case 7: PR-H, DD-E)

(7) 地中変位

図-12および図-13は、ラフト東側端より50mm外側の位置(DD-E)で測定された地中変位の一例であり、それぞれCase 3: PG-HおよびCase 7: PR-Hにおける測定結果である。群杭のCase 3では、比較的大きな地盤変位が生じている区間が地表より500mmから600mmまでの深さであるのに対して、パイルド・ラフトのCase 7ではその深さは300mmから350mm程度となっている。群杭における杭があたかも剛な短杭のような変位性状を示すのに

対して、パイルド・ラフトでは、よりフレキシブルな杭の変位性状に見受けられることは興味深い。

4. まとめ

杭頭接合部の回転剛性の異なる群杭およびパイルド・ラフト基礎の模型水平載荷実験を実施し、得られた主な知見を以下に示す。

- ① パイルド・ラフト基礎の水平剛性は、同一の基礎形状を有する群杭基礎に比べて大きい。ラフト底面の地盤への接地が水平変位減少に寄与していることによる
- ② パイルド・ラフト基礎の杭の曲げモーメントは、同一条件の群杭基礎に比べて低減される。
- ③ パイルド・ラフト基礎の杭頭回転剛性を低下させることによって、基礎の傾斜は減少する。その一方で水平剛性は低下する。
- ④ ラフトの水平荷重分担は、杭頭の回転剛性が低下するに従って小さくなる。
- ⑤ 杭の水平荷重分担は、杭頭回転剛性にあまり影響を受けないが、ラフトの水平荷重分担は杭頭回転剛性の影響を受ける。

謝辞：本報は、パイルド・ラフト基礎工法共同研究会(安藤建設(株), 西松建設(株), (株)間組, 三井住友建設(株))と金沢大学工学部(松本樹典教授)が共同で実施した研究成果の一部を取りまとめたものです。ここに関係各位に深く謝意を表します。

参考文献：

- 1) 堀井ほか：各種杭頭接合条件におけるパイルド・ラフト基礎の模型水平載荷実験(その1), (その2), 第40回地盤工学研究発表会, pp1637-1640, 2005.7
- 2) 新井ほか：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, 構造I, pp675-684, 2005.9
- 3) Nemoto, H., Yaegashi, K., Takeuchi, Y., Nishimura, N., Matsumoto, T. and Kitiyodom.: Vertical load tests of model piled rafts with different pile head connection condition, *Proc. Int. Conf. on Physical Modelling in Geotechnics*, Hong Kong, 2006.8 (投稿中)
- 4) Mikami, H., Sakihama, H., Horii, H., Arai, T., Fujita, M., Arai, T., Matsumoto, T. & Kitiyodo: Horizontal load tests of model piled rafts with different pile head connection conditions.. *Proc. Int. Conf. on Physical Modelling in Geotechnics*, Hong Kong, 2006.8 (投稿中)