

図5 水平荷重—水平変位関係

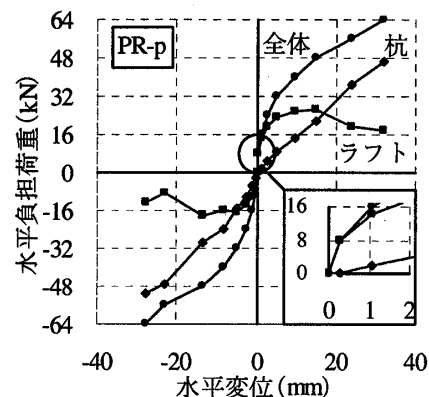
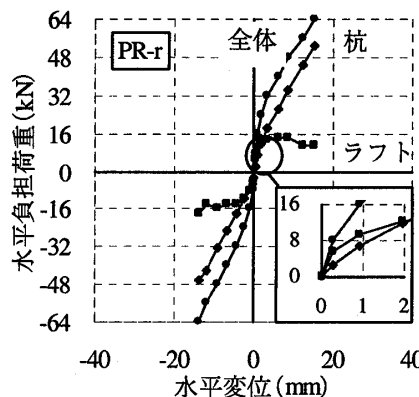


図6 水平負担荷重

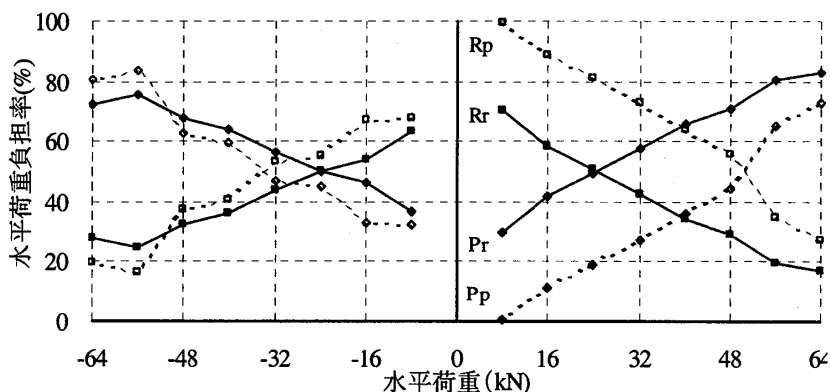


図7 水平荷重負担率

この荷重度は多翼鋼管杭の極限支持力²⁾の約 2/3 を杭が負担し、その場合の杭とスラブの鉛直荷重分担率が概ね 50:50 となるように設定したものである。

2.2 荷重方法および測定位置

パイルド・ラフトの荷重試験は、多サイクルの正負交番水平荷重で実施した。加力は、図2のように油圧ジャッキを設置（ジャッキ押側を正加力方向）し、相互の試験体を反力抵抗体とした。荷重位置はラフト下面から +0.1m 深度である。1 サイクル目の最大荷重は 16kN であり、水平震度 $H/V=0.27$ (H : 水平荷重, V : 鉛直荷重) に相当する。この整数倍を 2 サイクル目以降の最大荷重とし、約 60mm 水平変位させた。なお、単杭の水平荷重試験は、杭頭部の拘束条件を自由とし、多サイクル・多段階の一方荷重（1 段階 2kN）で実施した。この場合の荷重位置は掘削面（ラフト下面と同じレベル）から +0.05m の深度である。いずれの試験も学会基準³⁾に準拠して荷重速度や測定間隔を定めた。

測定項目は水平荷重と杭体応力（ひずみゲージ位置は図4参照）の他に、ラフト変位を杭中心とラフト縁の中間位置で計測した。なお、変位測定数は、各試験体につき加力方向水平変位 1 ケ所、加力直角方向水平変位および鉛直変位 2 ケ所である。

3. パイルド・ラフトの水平荷重実験結果

図5は、ラフトの水平荷重—水平変位関係である。原

点を中心にほぼ正負対称の履歴曲線となっている。本実験の荷重範囲内では明確な極限荷重は見られなかったが、水平荷重 32kN 付近で曲線の曲率が大きくなり、杭頭ピン接合の試験体が剛接合よりも大きく変位していく。杭体は両試験体共に 72kN（5 サイクル目）で曲げ降伏に達したが、その後も水平荷重は緩やかに増大している。

図6は、杭頭部とラフトの水平負担荷重の推移をプロットしたものである。ここで、杭の負担力は試験杭 2 本の杭頭せん断力の和を、ラフト負担力は荷重（ジャッキ荷重）から杭負担力を差し引いた値とした。ラフト抵抗力は、パイルド・ラフト全体の水平荷重が 32kN 付近（水平変位で 4mm 程度）に達するとほぼ停滞してくる。ピン接合においては、杭頭ピン装置のクリアランス（ボルト—治具間の鉛直方向の隙間）の影響もあってラフトから杭に伝わる鉛直荷重が小さかった。その結果、ピン接合における試験開始時のラフト接地圧（図8参照）が剛接合よりも増大して、ラフト抵抗力が正加力時に剛接合の場合よりも大きくなったと考えている。

図7は、図6を荷重負担率で整理したものである。荷重初期のラフト負担率は、剛接合で約 70%、ピン接合でほぼ 100%に近い。荷重の増加に伴いラフトの負担率が減少するが、水平震度 0.27 に相当する水平荷重 16kN 作用時で、ラフト部の負担率は剛接合モデルで 50~60%、ピン接合モデルで 70~90%である。

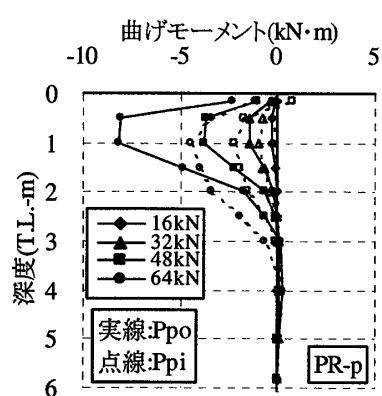
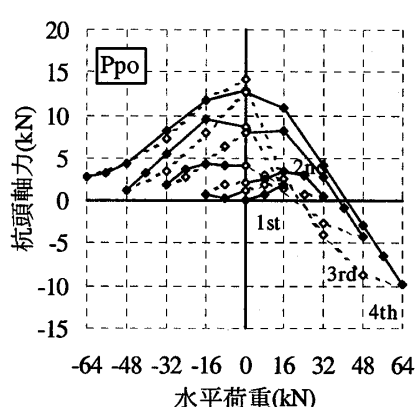
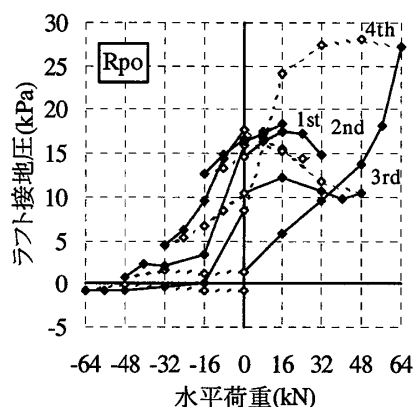
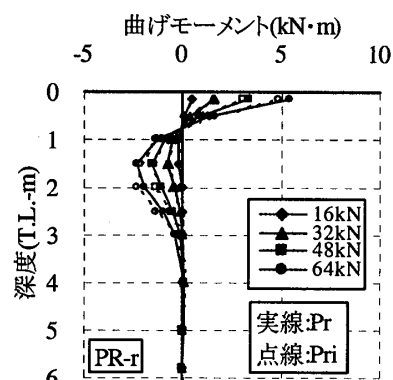
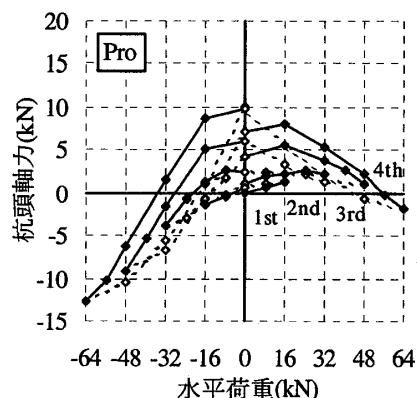
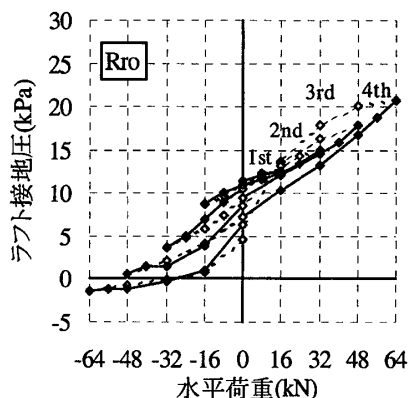


図8 ラフト接地圧

図9 杭頭軸力

図10 杭の曲げモーメント分布

※図8～図9 (実線：載荷，点線：除荷，1st～4th：載荷サイクル)

図8に外側ラフトの接地圧 (R_{ro} , R_{po}) の推移を示した。正加力時では増大し，負加力時では減少する。なお，内側ラフトの接地圧ではそれが概ね逆になる傾向であった。一方，外側杭 (P_{ro} , P_{po}) の杭頭軸力を示した図9によると，正負加力に関わらず載荷重の増大に伴い減少している。この傾向は内側杭においても同様であった。これは，水平載荷に伴うラフトのロッキング現象とは異なる結果であり，長尾等⁴⁾が指摘したと同様のラフト面直下に敷いた砂の正のダイレイタンス（体積膨張）によって，加力前面においても杭に引き抜き力が作用したもののと思われる。次に，0 載荷時の残留値に着目すると，繰返しサイクルの増大に伴って，ラフト接地圧が低下して杭の軸力が増加する現象が確認された。正負の繰返し載荷によって，除荷時には地盤が収縮して杭が抜け上がる状態に近づくためと推察される。それにより，ラフトから直接地盤に伝達する荷重が減少し，杭が負担する荷重が増大したと考えている。

図10は，正加力時における杭体の曲げモーメント分布であり，曲げモーメントが微小となる深度6mまでを表示した。最大曲げモーメントは，剛接合の試験体では杭頭部，ピン接合の試験体では地中部 (T.L.-1.0m～2.0m) において最大値を示しており，ラフト外側にある杭体の方が内側に配置された杭よりも幾分か大きい傾向があった。この理由として，ラフトの回転に伴い加力前面の砂層地

盤の剛性増が生ずる現象の他に，本実験では相互のパイルド・ラフト試験体を反力として載荷したことの影響も含まれているものと推察される。また，地中部で最大値を示す深度は，水平荷重の増加に伴い僅かに深くなっていく傾向がみられるのは，隣接杭やスラブ底面から伝達された荷重が重なるためと思われる。

4. 考察

4.1 単杭との比較

図11は，杭頭の水平荷重－水平変位関係を単杭と比較したものである。ここで剛接合の単杭については，単杭（杭頭自由）の載荷試験による水平変位を1/2にしてプロットした。1サイクル目を拡大した載荷初期を見ると，剛接合の場合には単杭とほぼ等しいことから，ラフトや杭同士の相互作用の影響が小さいと言える。しかし，載荷が進むにつれて，同一荷重時の変位量は単杭よりもパイルド・ラフトの杭の方が小さくなる傾向がある。この傾向は一般に言われている群杭効果（水平剛性の低下）とは逆である。これは，砂層地盤の拘束圧が上昇して地盤剛性が増大する現象を反映したものと考えられる。ピン接合の場合でも，初期の水平剛性が小さいことを除けば，載荷に伴って単杭よりも水平剛性が増大する現象が生じていると考えられる。

図12は，杭体深度毎の水平地盤反力と水平変位の関係である。地表面付近のG1をみると，ピン接合および

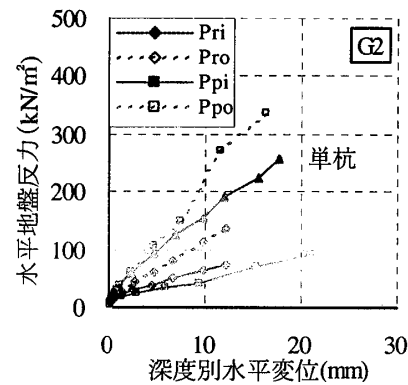
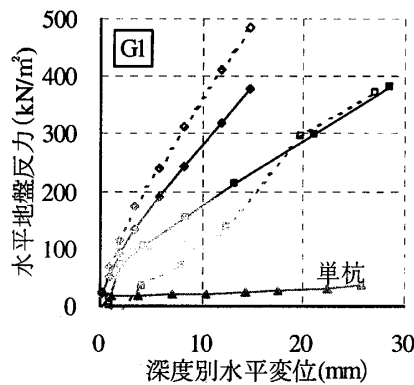
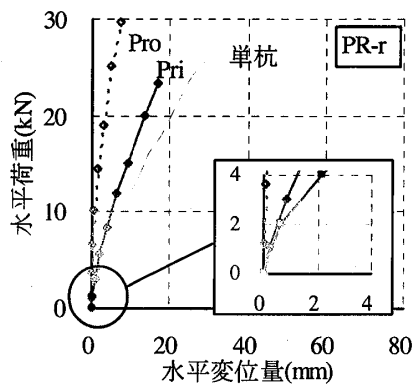


図 12 水平地盤反力の比較

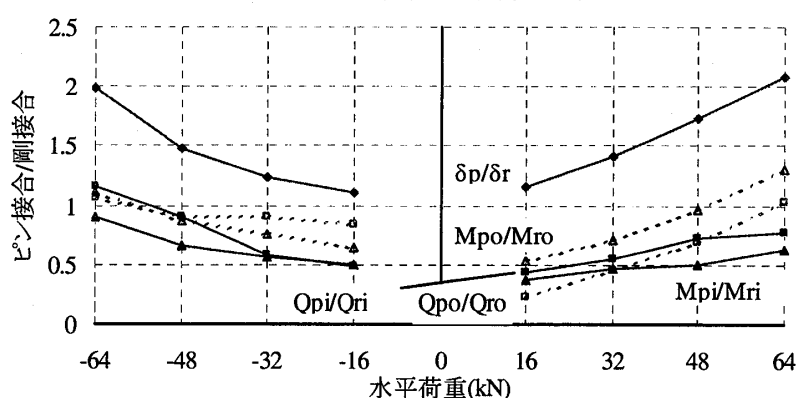
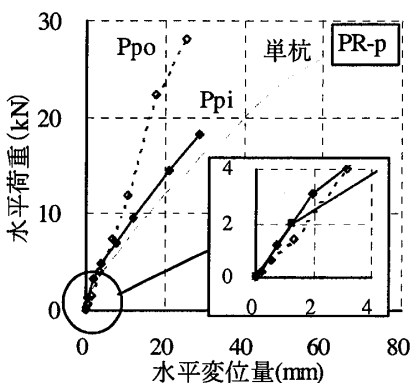


図 13 杭頭接合条件の影響

図 11 水平荷重—水平変位関係の比較

剛接合のパイルド・ラフトでは、それぞれ単杭(杭頭自由)の5~6倍および16~20倍にもなり、塑性化の傾向も見られない。一方、G2以深では、パイルド・ラフトは単杭の0.5~2倍の範囲にばらつくが、平均値は概ね単杭の値に近似している。パイルド・ラフトでは、ラフトから直接地盤に伝達される荷重があり、地表面付近の砂層では拘束圧依存性によって地盤剛性や塑性水平地盤反力が単杭の場合よりも大きくなったと推察される。

4.2 杭頭接合条件の影響

図13は、ラフトの水平変位、杭頭せん断力および最大曲げモーメントについて、剛接合モデルのこれらの値に対するピン接合モデルの値の比を示したものである。水平変位の比 δ_p/δ_r は、載荷重の増加に伴い増大する傾向が見られ、杭体が降伏する直前の64kNでは約2倍になっている。このことから、スラブ水平抵抗の降伏に伴い杭負担率の方が大きくなると、杭頭接合条件の違いによる影響が顕著に現れることが分かる。しかし、 $H=16\text{kN}$ では正負加力方向に関わらず両者の比は1.1程度である。この値は通常の短期荷重程度であることから、一般の構造設計ではパイルド・ラフトの水平変位に対する杭頭接合条件の影響は小さいと考えても良からう。一方、杭頭せん断力の比 Q_p/Q_r および最大曲げモーメントの比 M_p/M_r は、水平荷重が増大すると徐々に増大して、杭頭

条件の影響が徐々に小さくなる傾向がある。しかし、第1サイクルでの Q_p/Q_r および M_p/M_r は共に0.5程度であり、短期荷重に対する構造設計では、パイルド・ラフトに杭頭ピン条件の杭を配することによって、杭体応力を大幅に低下させることが可能であると言える。

5. まとめ

本実験から得られた主な知見は以下の通りである。

- ① 低荷重時ではラフトの水平力分担が大きいですが、載荷重の増大に伴って徐々に杭の水平力分担が増加する。
- ② パイルド・ラフトでは、ラフト底面付近の水平地盤反力や剛性が単杭に比べて大きく、ラフトによる接地効果を確認した。
- ③ 載荷重が大きくなると、杭頭接合条件による変位差が増大するが、杭体応力の差は減少する傾向がある。
- ④ 水平力が短期荷重程度の場合、杭頭接合条件を剛接合からピン接合にすることで、水平変位をそれ程増加させずに杭体応力の低減が可能である。

参考文献

- 1) 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研究, 構造工学論文集, Vol.48B, pp.343-350, 2002.3
- 2) 土屋 勉, 吉田勝之, 大杉富美一: 多翼部を有する小径鋼管杭工法の開発, 日本建築学会技術報告集, 第10号, pp.57-60, 2000.6
- 3) 土質工学会: 杭の水平載荷試験方法・同解説, 1983.10
- 4) 長尾俊昌, 桑原文夫他: 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, 2002.9

*1 室蘭工業大学大学院博士前期課程

*2 室蘭工業大学大学院博士後期課程・修士(工学)

*3 室蘭工業大学教授・工博

Graduate School, Muroran Inst. of Tech.

Graduate School, Muroran Inst. of Tech., M.Eng.

Professor, Muroran Inst. of Tech., Dr.Eng.