

パイルド・ラフト基礎工法の開発

Development of the Piled Raft Foundation Method

新井 寿昭* 武内 義夫*
 Toshiaki Arai Yoshio Takeuchi
 鹿籠 泰幸**
 Yasuyuki Shikamori

要 約

パイルド・ラフト基礎は直接基礎と杭基礎の併用基礎であり、十分な検討を実施した設計のもとでは、直接基礎に対しては不同沈下量の低減など、杭基礎に対しては地震時の水平変位を抑制できる効果のほかに杭長や杭本数の低減が可能な工法である。しかし、現状ではパイルド・ラフト基礎の設計法について確立されたものはない。

本開発では、パイルド・ラフト基礎の合理的な設計と解析技術の確立を目指して、模型基礎の鉛直載荷実験と地震時の等価水平力に対する挙動を把握するための水平載荷実験を実施した。実験結果から、パイルド・ラフト基礎は直接基礎および杭基礎と異なる挙動を示すこと、また、直接基礎および杭基礎に対するパイルド・ラフト基礎の有効性を示すことができた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. パイルド・ラフト基礎の模型実験
- § 3. シミュレーション解析
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

従来から建築基礎は、基本的に直接基礎あるいは杭基礎のどちらかで設計されている。しかし、近年では性能設計の導入や解析・実験技術の向上、また環境的な配慮などから、パイルド・ラフト基礎の研究・開発が数多く実施されており、既に実物件に適用されている^{例え(注1)}。

パイルド・ラフト基礎は、直接基礎と杭基礎を併用した基礎形式であり、荷重に対して直接基礎と杭基礎が複合して抵抗するものである。パイルド・ラフト基礎の考え方については文献²⁾などに示されているが、具体的な設計方法は示されていない。

本開発では、パイルド・ラフト基礎の合理的な設計・解析技術の確立を目指して模型実験および解析的検討を実施した。本報では、模型実験の概要と結果、シミュレーション解析結果について報告する。

§ 2. パイルド・ラフト基礎の模型実験

模型実験では、鉛直載荷実験と地震時の等価水平力に対する挙動を把握するための水平載荷実験を行った。特に、杭頭部とラフト接合部の固定条件の違いによる影響に着目し、種々の固定条件を設定した実験を計画した。

2-1 実験概要

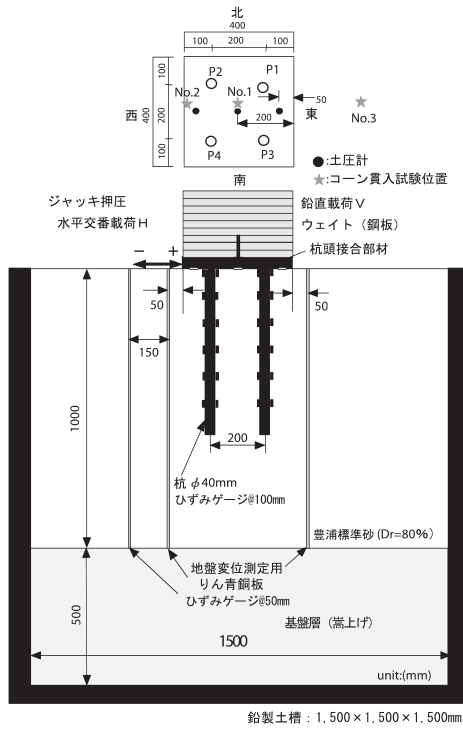
(1) 模型基礎と模型地盤

パイルド・ラフト基礎の模型概要を図-1に示す。模型基礎では、正方形(400×400 mm, t=40 mm)の剛なステンレス板をラフトとして用いた。模型杭には、外径d=40 mm, 肉厚t=2 mm, 杭長L=600 mmのアルミ製のパイプ(先端は閉端)を4本用い、ラフトに等間隔に配置した(杭間隔200 mm, 5.0D, D:杭径)。なお、杭の周面摩擦を増加させるために杭表面に模型砂を貼り付けた。

杭とラフトの接合部については後述する各実験ケース(表-2)の条件に応じたモデル化を行った。半剛接合の各実験ケースでは、予備解析結果に基づいて設定した模型部材条件に整合する細径に断面縮小した円柱部材を介して杭とラフトを接合した。なお、半剛接合ケースにおける固定度とは本地盤条件において、杭頭が完全剛接合の場合の杭頭曲げモーメント値を基準(1.0)とした場合の杭頭部曲げモーメント比率を意味する。

* 技術研究所技術研究部建築技術研究課

**技術研究所技術研究部



図一 実験模型概要

表一 豊浦砂の物理特性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.637
平均粒径 D_{50} (mm)	0.17
均等係数 U_c	1.44
最大間隙比 e_{max}	0.986
最小間隙比 e_{min}	0.627
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.621
最小乾燥密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.328
内部摩擦角 ϕ' (deg.)	39.8

模型地盤材料には気乾状態の豊浦標準砂(表一)を用い、銅製土槽(B 1500×L 1500×H 1500 mm)の上部1000 mmの範囲に、空中落下法により100 mm毎の薄層で投入し、敷き均しを行い、相対密度Dr=80%を目標値としてバイブレータで締め固めた。地盤への基礎の設置は、先ず模型杭を所定の配置に仮固定した状態で、周囲の地盤を順次締め固めて作製し、杭の天端と地表面レベルが同一となるように表面を平坦に均した。なお、杭頭にはラフト側に埋め込まれる所定の固定度をもった接合部があらかじめ取り付けられている。続いて、自重によって地表面に接するようにラフトを杭頭部にかぶせ、杭頭とラフトをボルトで固定し一体化を図った。パイルド・ラフトの場合には、ラフト底面位置に設置した土圧計によりラフトと地盤の接地を確認した。

(2) 実験方法・手順と実験ケース

一連の実験における載荷は、先ず所定の鉛直載荷($p_v = 21$ kPa)を行い、鉛直荷重を保持したまま、引き続き多サイクルの水平交番載荷(荷重制御方式)を行っ

表二 実験ケース一覧

実験ケース	基礎条件	杭頭接合条件
Case 1	ラフトのみ (べた基礎)	—
Case 2	杭のみ (4本杭基礎)	剛接合
Case 3		ピン接合
Case 4	パイルド・ラフト	剛接合
Case 5		半剛接合 (固定度 0.5)
Case 6		半剛接合 (固定度 0.25)
Case 7		ピン接合

た。鉛直載荷はラフト上に鋼板ウェイト(9枚)を順次重ね、水平載荷については油圧ジャッキ2台を用いて行っている。

計測は、鉛直載荷時には各載荷段階の計9段階で、水平載荷時には連続的に計測を行った。計測項目は、ジャッキ荷重、ラフトの鉛直・水平変位のほかラフト底面の接地圧(土圧計3点)、杭体のひずみ(4本)、基礎周辺地盤の地中変位分布(ひずみゲージ付きりん青銅板3測線)などである。

実験ケースの一覧を表二に示す。実験は、抵抗機構を比較するために、パイルド・ラフト基礎のほかにラフトのみ、杭のみの3種類の模型に対して実施した。また、杭頭接合条件の影響を検討するために、杭のみの場合には剛接合とピン接合の2ケースを、パイルド・ラフトの場合には剛接合とピン接合に加えて半剛接合の固定度0.5および0.25の4ケースを実施した。

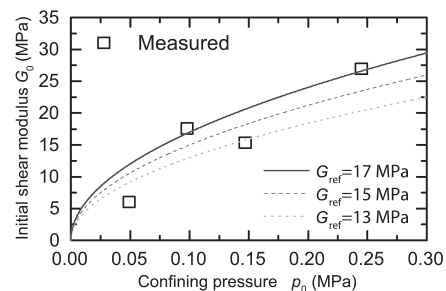
(3) 模型地盤に用いた砂の三軸試験

模型地盤の力学特性を把握するために、実験に用いた豊浦砂の三軸圧密排水せん断試験(CD試験)を行った。試験は、初期拘束圧 p_0 を4段階(49~245 kPa)に変化させて実施した。

三軸圧縮試験から得られた結果を表一に示す。豊浦砂の内部摩擦角 ϕ' は39.8 deg.であった。また初期せん断弾性係数 G_0 は、図二に示すように初期拘束圧 p_0 の増加に伴い増加した。なお、ポアソン比 ν は、拘束圧によらずほぼ一定値となった。

(4) 模型地盤の三成分コーン貫入試験

深度方向の連続的な地盤性状分布を把握するために、



図二 拘束圧とせん断剛性の関係

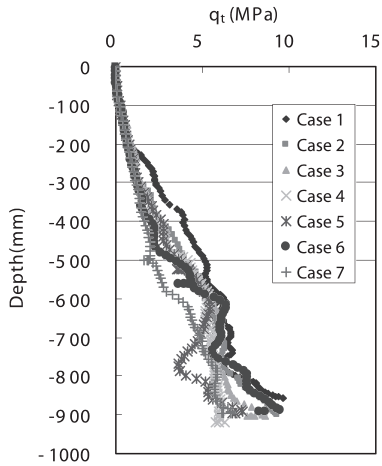


図-3 コーン貫入試験結果 (計測点 No. 1)

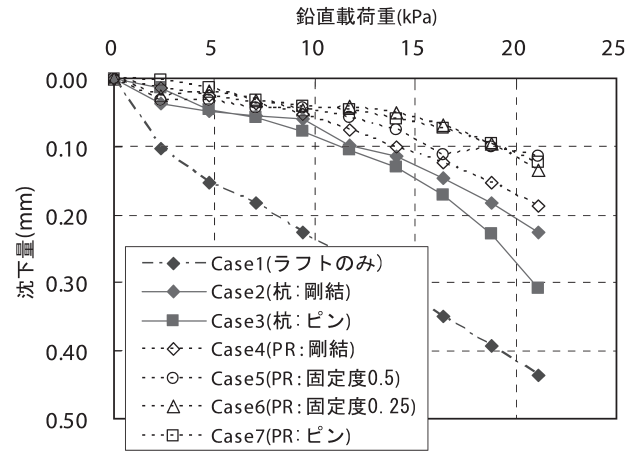


図-4 鉛直荷重一沈下関係

各載荷実験終了後に図-1に示す3地点において三成分コーン貫入試験を行った。各実験ケースで比較した代表的な1地点 (No. 1) のコーン先端抵抗 (q_t) の深度分布を図-3に示す。コーン先端抵抗は深さ方向に伴って増大する傾向を示しており、実験ケース間の比較では概ね同様の値を示している。このことから、各実験ケースは概ね同一の地盤条件下で実施できたものと考えられる。

2-2 鉛直載荷実験結果

(1) 荷重一沈下関係

鉛直載荷時の荷重一沈下関係を図-4に示す。基礎形式に着目した場合、ラフト基礎 (Case 1) の沈下量が最も大きく、杭基礎 (Case 2, 3)、パイルド・ラフト基礎 (Case 4~7) の順に沈下量が抑制されていることがわかる。杭基礎とパイルド・ラフト基礎それぞれの杭頭接合部回転剛性の違いに着目した場合には、ともに有意な差異は認められない。

次に、荷重一沈下関係から求めた沈下剛性 (接線剛性) と荷重の関係を図-5に示す。ラフト基礎の沈下剛性は、今回の実験範囲では載荷重が大きくなって低減することなく、概ね一定の値を示している。一方、杭基礎の場合には初期の沈下剛性はラフト基礎よりも大きく、鉛直荷重 2 kN 付近で沈下剛性が低下し、最終載荷段階ではラフト基礎に比べて小さくなっている。パイルド・ラフトの沈下剛性は、実験ケースによりばらつきが認められるが、概ね載荷初期ではラフト基礎、杭基礎よりも大きく、杭基礎と同様に鉛直荷重 2 kN 付近から沈下剛性が低下し始め、最終載荷段階ではラフト基礎の沈下剛性に近づくことがわかる。また、パイルド・ラフトの沈下剛性は、ラフト基礎と杭基礎それぞれの単純和ではなく、特に載荷初期の段階では複雑な挙動をしている。

(2) ラフトと杭の鉛直荷重分担率

鉛直荷重に対するラフトの荷重分担率を図-6に示す。ここで、ラフトの荷重分担率は、杭に設置しているひずみゲージから算定した各杭の杭頭軸力を鉛直荷重から差し引き、さらに鉛直荷重で除すことにより求めた。実験

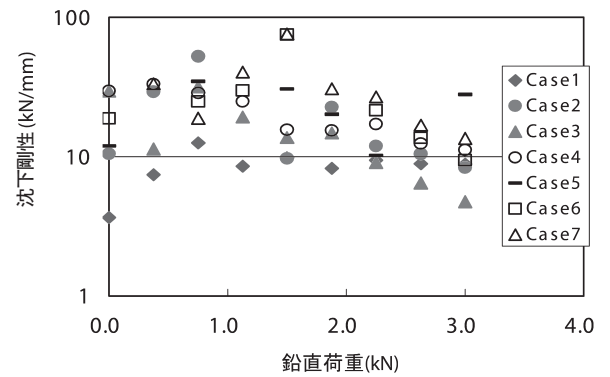


図-5 沈下剛性一鉛直荷重関係

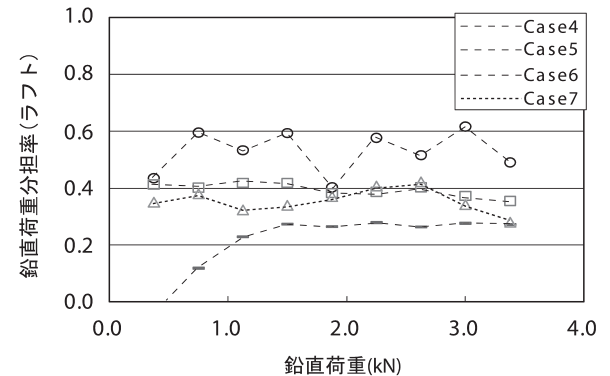
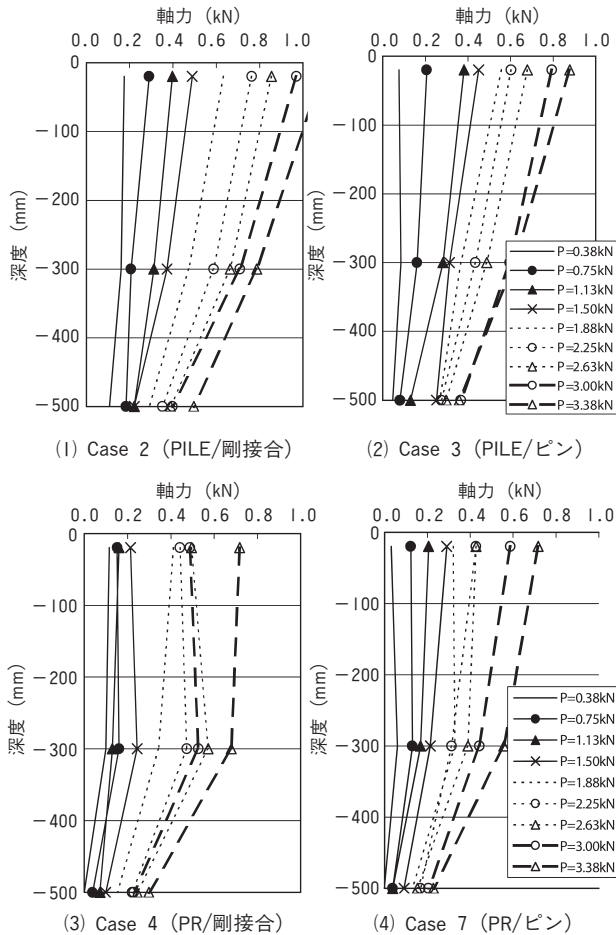


図-6 ラフトの鉛直荷重分担率

ケースにより多少のばらつきが認められるが、各実験で鉛直荷重に関わらず、鉛直荷重分担率は概ね一定であり、Case 4では0.6前後、Case 5では0.3程度、Case 6とCase 7では0.4程度の分担率となっている。なお、杭頭接合部の回転剛性の違いによる有意な差異は認められない。

(3) 杭の軸力および周面摩擦応力度

杭基礎およびパイルド・ラフト基礎 (それぞれ杭頭剛接合、ピン接合) の杭軸力分布を図-7に、周面摩擦応力度と鉛直荷重の関係を図-8に示す。なお、軸力分布は4本杭中の1本を代表して示し、摩擦応力度と鉛直荷重の関係は杭4本分の平均値を示す。また、各杭ともに深さ方向に6点のひずみ計測を行っているが、ここでは

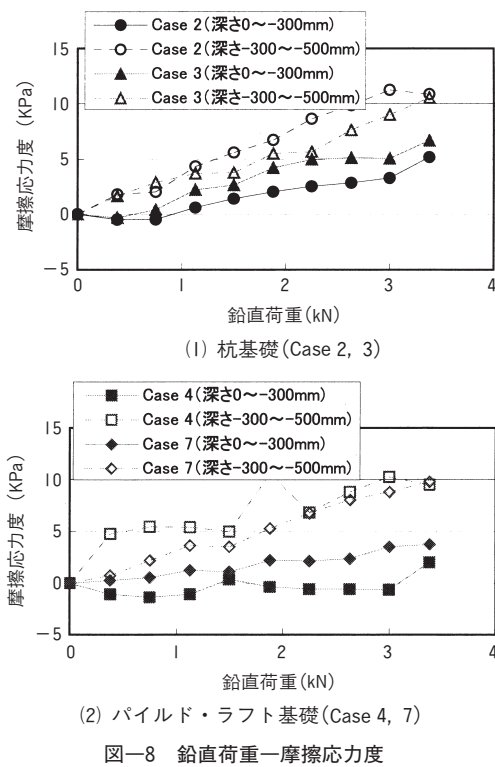


図一七 杭の軸力分布

代表的な3点(深度0, -300, -500mm)の結果から区間摩擦応力度を求めた。

全ての実験ケースで、鉛直荷重の増大に伴い杭の軸力は増加しており、最終載荷段階で比較した場合、杭頭接合部の回転剛性に関わらず杭基礎の杭頭軸力がパイルド・ラフト基礎に比べて大きく、剛接合では1.5倍(Case 2/Case 4)、ピン接合では1.2倍(Case 3/Case 7)となっている。また、杭先端の軸力も同様の傾向を示しており、杭基礎はパイルド・ラフトよりも1.5倍程度大きな値を示している。

次に図一八から、杭基礎(Case 2とCase 3)では、杭上部区間(深さ0~-300mm)に比べて杭下部区間(深さ-300~-500mm)の摩擦応力度がやや大きく、鉛直荷重の増加に伴い杭全長にわたって摩擦応力度が上昇していることがわかる。一方、パイルド・ラフト(Case 4とCase 7)では、杭上部区間の摩擦応力度は鉛直載荷後半で載荷重の増加に伴い上昇しているが、杭基礎ほど顕著な摩擦応力度の上昇は認められない。これは、パイルド・ラフトの場合には、ラフトから地盤への応力伝達が杭上部の挙動に影響を及ぼしているためと考えられる。なお、杭下部区間では、杭基礎と概ね同程度の摩擦応力度となっている。



図一八 鉛直荷重一摩擦応力度

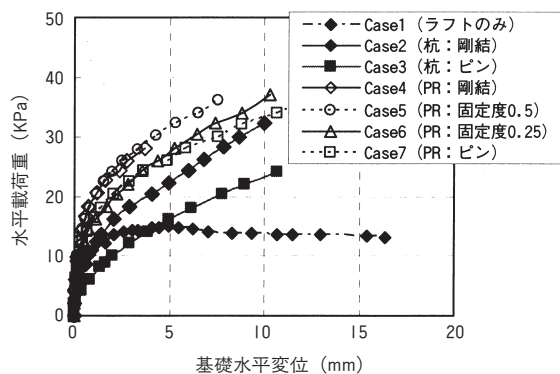
2-3 水平載荷実験結果

(1) 水平荷重一基礎水平変位関係

パイルド・ラフト基礎の各実験ケースにおける各載荷サイクルピーク水平荷重(正方向)と水平変位の関係を図一九に示す。同図中には、比較のためにラフトのみ(Case 1)、杭のみ(Case 2, Case 3)の結果も併記している。パイルド・ラフト基礎の各ケースでは、ラフトのみおよび杭のみのケースに比べて水平剛性が載荷初期の段階から大きい。パイルド・ラフト基礎の各ケースにおいて杭頭固定度による差異に着目すれば、固定度が高いCase 4(杭頭剛接合)、Case 5(固定度0.5)が固定度の小さいCase 6(固定度0.25)、Case 7(杭頭ピン接合)に比べて載荷初期の段階から水平剛性が大きいことがわかる。

(2) ラフトと杭の水平荷重分担

杭頭で測定したせん断ひずみから、水平交番載荷時の杭の水平分担荷重を求めた。一例として、杭頭接合部回



図一九 水平荷重一水平変位関係

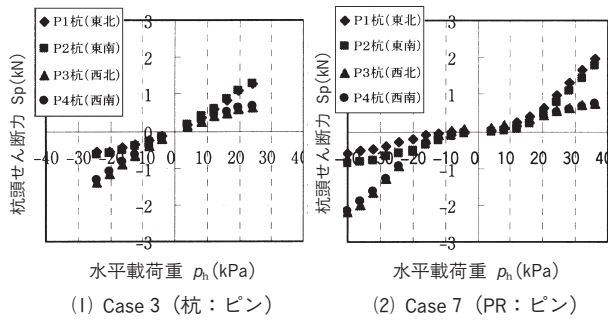


図-10 杭頭せん断力

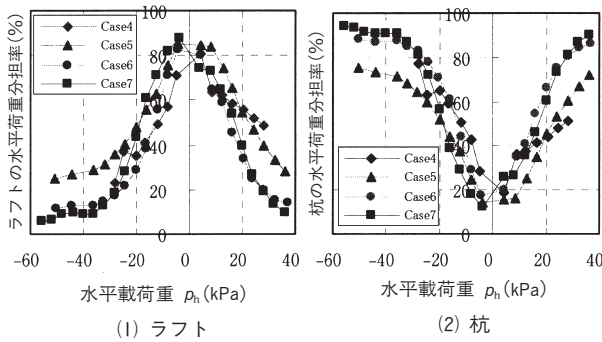


図-11 水平荷重分担率

転剛性がピンの条件の場合について、杭のみの場合 (Case 3) およびパイルド・ラフト基礎の場合 (Case 7) を図-10に示す。両ケースの結果において、荷重が大きくなると、荷重方向に対して前方側の杭列 (西側から東側に向かった荷重の場合では東側にある杭列) の水平荷重分担が後方側の杭列に対して大きな分担となっている。一方、杭のみ (Case 3) の場合とパイルド・ラフト (Case 7) を比較すると、東側と西側の杭列の水平荷重分担に差異が生じる水平荷重段階は、パイルド・ラフトの方が大きくなっている。

各実験ケースの水平荷重段階における、ラフトの水平荷重分担率 (ラフト分担荷重/水平荷重) および杭の水平荷重分担率 (杭分担荷重/水平荷重) の関係を図-11に示す。各ケースにおいて、ラフトの水平荷重分担率は、荷重の初期においては80%程度の大きな値となるが、水平荷重の増加とともに低下する。これに応じて、杭の水平荷重分担率は各ケースで当初20%程度であったものが、水平荷重の増加とともに増加している。杭頭接合部回転剛性の違いによる荷重分担率の差異に着目すると、回転剛性の低いCase 6 (固定度0.25)、Case 7 (ピン接合) などでは、荷重の終盤にかけて、杭の水平荷重分担率が回転剛性の高いケースに比べて20%程度大きくなっている。

(3) 杭体曲げモーメント

杭に設置したひずみゲージから求めた、水平荷重段階が $p_h = 12 \text{ kPa}$ および $p_h = 24 \text{ kPa}$ 時点の各実験ケースにおける東北側位置杭の曲げモーメント分布を図-12に示す。各実験ケースで設定した杭頭接合部回転剛性に対応した、杭頭部と地中部での比率を持つ曲げモーメン

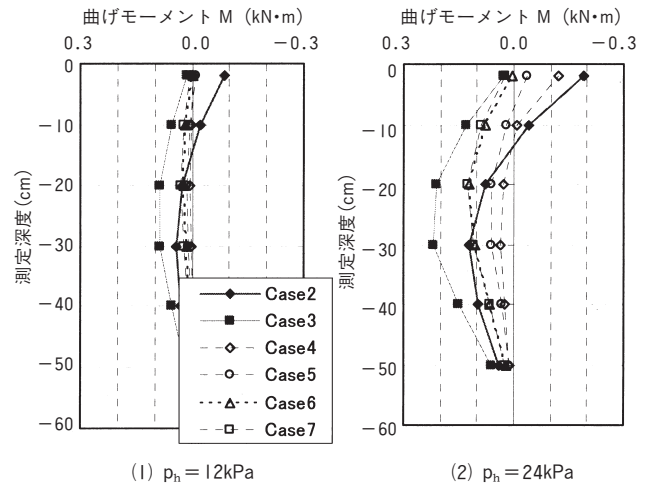


図-12 杭の曲げモーメント分布

ト分布形状を示している。荷重が $p_h = 12 \text{ kPa}$ の段階では、杭のみのケース (Case 2, Case 3) に比べて、パイルド・ラフト (Case 4~Case 7) では、曲げモーメントの絶対値が極めて小さく、杭の水平荷重分担がこの段階では非常に少ないことを示している。さらに $p_h = 24 \text{ kPa}$ の時点においても、パイルド・ラフトのケースが、杭のみの場合と比べて曲げモーメントの絶対値が約50%程度に減少している。

§ 3. シミュレーション解析

ここでは、杭と地盤とラフトの相互作用を考慮することができる三次元簡易変形解析プログラム PRAB^(例えは3)を用いて、模型実験のシミュレーション解析を実施した。

3-1 解析方法および解析条件

PRABによるパイルド・ラフト基礎のモデル化の概要を図-13に示す。ラフトは薄板要素、杭は梁要素、地盤はラフト節点あるいは杭節点に連結された3本のばね (水平2方向、鉛直1方向) で表現する。相互作用はMindlinの解に基づいて求められる。解析は、弾・完全塑性解析による検討を行った。

地盤特性は表-1に示した通りである。地盤モデルは15分割の有限多層地盤とした。

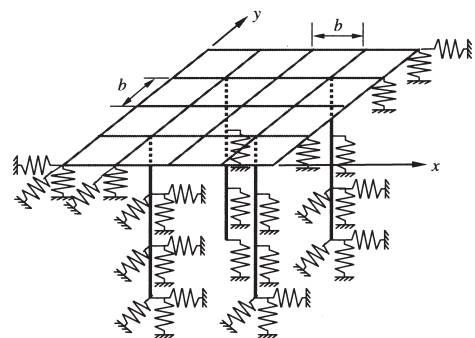
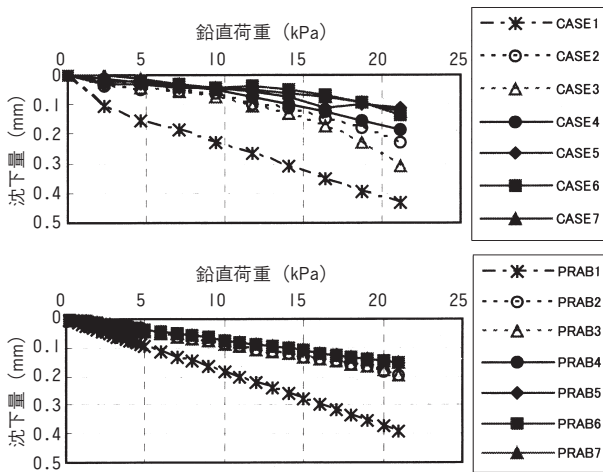
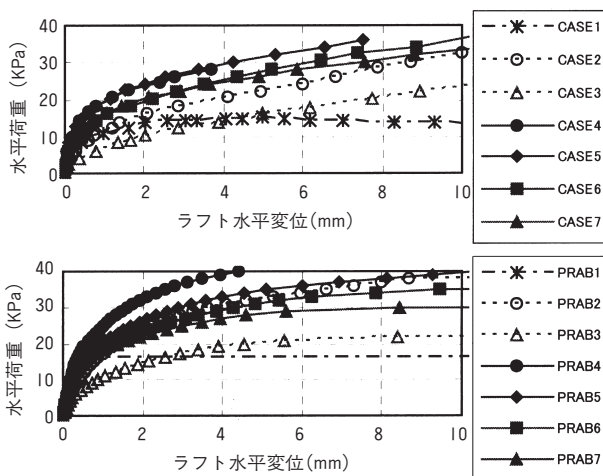


図-13 解析モデルの概要



図一四 鉛直荷重—沈下関係 (上段：実験，下段：解析)



図一五 水平荷重—変位関係 (上段：実験，下段：解析)

3-2 実験結果と解析結果の比較

(1) 鉛直荷重—沈下関係

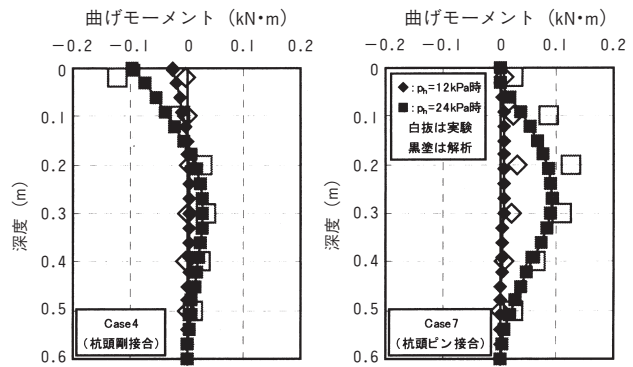
鉛直荷重時の鉛直荷重—沈下関係について、実験結果と比較した解析結果を図一14に示す。各ケースともに解析結果は、実験結果と比較的良好な対応を示している。2-2でも述べたように解析結果でも基礎形式の違いによる沈下性状の差異は確認できたが、実験結果と同様に4本杭基礎とパイルド・ラフト基礎それぞれの杭頭接合部回転剛性の違いによる有意な差異は認められなかった。

(2) 水平荷重—水平変位関係

水平荷重時の水平荷重—水平変位関係について、実験結果と比較した解析結果を図一15に示す。実験結果では荷重初期から非線形挙動を示しているが、解析結果でも同様な性状を示しており、各ケースともに概ね良好な対応を示している。2-3でも述べたように、解析結果でも杭頭固定度が高いほど、荷重初期段階の水平剛性が大きくなる傾向を示した。

(3) 杭の曲げモーメント分布

パイルド・ラフト基礎のCase 4 (杭頭剛接合) と



図一六 杭の曲げモーメント分布 (左：Case4【PR：剛結】，右：Case7【PR：ピン】)

Case 7 (杭頭ピン接合) の東北位置杭の曲げモーメント分布を図一16に示す。各ケースともに実験結果と解析結果は良好な対応を示しており、杭頭接合部回転剛性の違いによる杭の曲げモーメント分布の差異が確認できた。

§ 4. おわりに

本開発で実施した模型基礎の鉛直荷重実験および水平荷重実験ならびにシミュレーション解析結果から、以下のことが明らかとなった。

- ① パイルド・ラフト基礎は、ラフト基礎および同じ杭仕様の杭基礎に比べて沈下が顕著に抑制される。
- ② パイルド・ラフト基礎の沈下剛性は、ラフト基礎や杭基礎よりも大きく、鉛直荷重の増加にともないラフト基礎の沈下剛性に近づく傾向を示す。
- ③ パイルド・ラフト基礎の水平剛性は、ラフトの水平抵抗により杭基礎の水平剛性よりも大きくなる。
- ④ 水平荷重が作用した場合のパイルド・ラフト基礎の杭に生じる曲げモーメントは、杭基礎に比べて大きく減少する。
- ⑤ 三次元変形解析プログラムPRABは、実験結果と良好な対応を示すことがわかった。

本報告は、安藤建設、間組、西松建設、三井住友建設および金沢大学松本研究室による共同開発として実施された成果の一部をとりまとめたものである。

参考文献

- 1) 加倉井ほか：パイルド・ラフト基礎 (直接基礎と摩擦杭併用基礎) の設計法，基礎工，Vol. 5，pp. 44-48，1998。
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001。
- 3) Kitiyodom & Matsumoto: A Simplified method for piled raft and pile group foundation with batter piles, Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 26, 1349-1369, 2002。