

パイルド・ラフト基礎の実験的研究

—その2 実験結果と解析結果との比較—

Experimental Study of Piled Raft Foundation

- Part 2 Comparison with Loading Test to Simplified Analysis -

秦 雅史*

要旨

原位置の関東ローム地盤において模型試験体の鉛直および水平載荷試験を実施して基礎データを得た。パイルド・ラフト基礎の実用的な解析法の妥当性を検証するため、実験結果との比較検討を行った。解析には主に地盤ばねと杭の非線形性を考慮した格子梁法を用いた。その結果、実用解析法により求めた沈下特性、水平抵抗、荷重分担率の解析精度が確認できた。

キーワード：パイルド・ラフト基礎、原位置試験、格子梁法、ハイブリッド法、相互作用

1. まえがき

従来、軟弱地盤上で建物を設計する場合、支持杭基礎に頼ってきたが、近年になって摩擦杭で沈下を制御する合理的な基礎工法としてパイルド・ラフト基礎が着目されている。この基礎は直接基礎の支持力としては十分であるが、沈下あるいは不同沈下が過大となる比較的硬質な粘性土あるいはN値の大きな砂質土の場合や、直接基礎としての支持力が不足している場合などへの適用が有効である。パイルド・ラフト基礎は直接基礎と摩擦杭基礎の両方で支持されるため、基礎構造を一体とした構造物と地盤との相互作用を考慮した解析により沈下・水平挙動を把握して基礎の断面、杭の直径、配置、長さを決定することが必要となる。

平成16年度に関東ローム層での原位置において直接基礎、摩擦杭基礎およびパイルド・ラフト基礎について鉛直荷重、水平荷重に対する載荷実験を行い、荷重と変形関係、耐力分担についての諸特性が得られた¹⁾。

地盤を非線形弾性体としてFEMにより解析する場合、地盤の諸定数の設定法が標準化されていないため、実際の検討に用いられる事例が少ない。本報では実用解析法として提案されている格子梁法、ハイブリッド法の妥当性を検証するため実験結果との比較検討を行った結果を述べる。解析は主に地盤ばねと杭の非線形性を考慮した格子梁法を用い、鉛直載荷では構造物と地盤間の相互作用を考慮したハイブリッド法、水平載荷では格子梁法に相互作用を考慮した方法による検討を行った。

2. 試験体と土質特性

原位置試験体の平面配置を図-1に示す。鉛直、水平

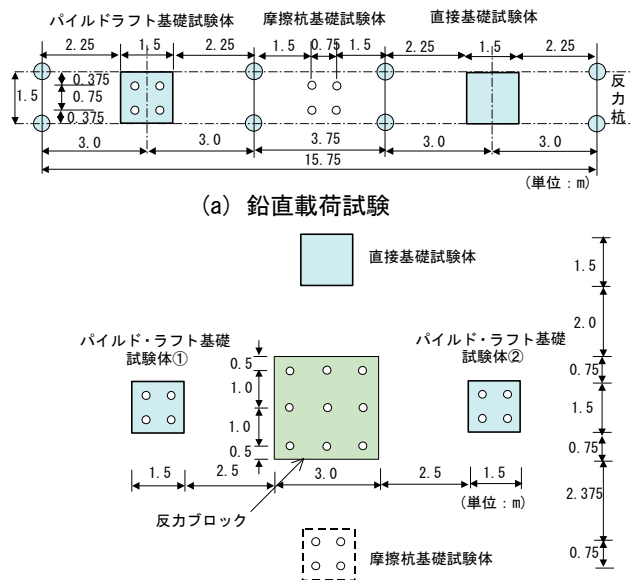


図-1 試験体平面配置

載荷共に直接基礎、摩擦杭基礎およびパイルド・ラフト基礎について行った。パイルド・ラフト試験体は杭間隔7.5d (d: 杭径) と仮定した1/5モデルであり、杭は一般構造用炭素鋼管 STK400、φ101.6mm、t4.2mm (実測3.9mm)、杭長3mを用い、圧入工法により設置した。また、ラフト部は1.5m×1.5m、厚さ0.5mのRC造である。パイルド・ラフト基礎の水平載荷については杭の摩擦力の発現程度をラフトに載せる重錘重量で調節することにより、長期および短期状態の2ケースについて行った。ボーリング調査により得られた地盤構成を図-2に示す。また、室内土質試験結果を表-1、PS検層から求めた微小歪での地盤剛性を表-2に示す。GL-2.9mのローム層における中空ねじりせん断試験から得られた歪依存性

*技術研究所

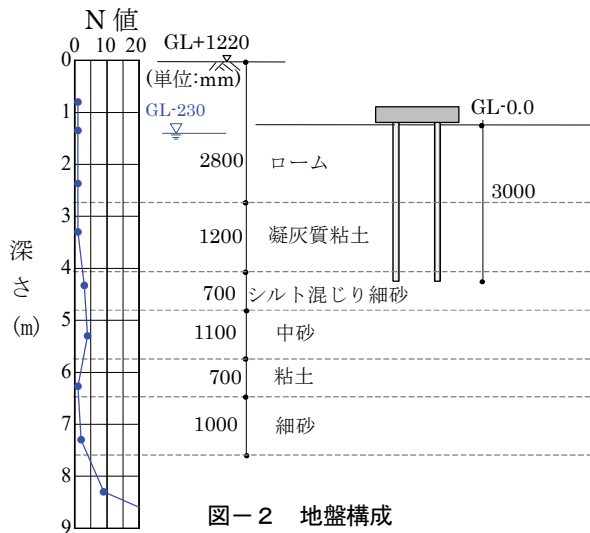


図-2 地盤構成

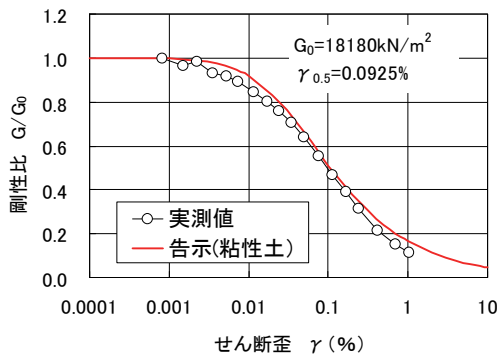


図-3 ローム層の歪依存性

と国土交通省告示第 1457 号の粘性土の提案値を図-3 に比較している。両者は1%程度の歪レベルまではほぼ一致しており、沈下解析における初期地盤剛性 G_0 はPS 検層から求めた剛性を、歪依存性は告示設定値を用いた。

3. 解析法

パイルド・ラフト基礎試験体の鉛直・水平荷重時の挙動を解析によりシミュレートした。なお、実験は短期

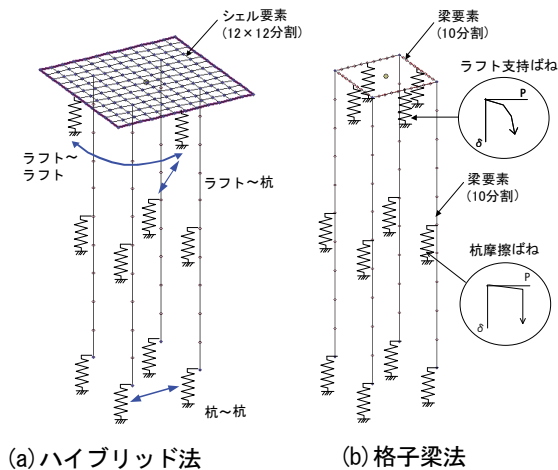


図-4 解析モデル

表-1 室内土質試験結果

土質名	深度 (m)	含水比 W_n (%)	間隙比 e	圧密試験		3軸UU試験		
				C_c	P_c (kN/m ²)	C_u (kN/m ²)	ϕ (度)	E_{50} (kN/m ²)
埋土	1.1							
ローム	1.7	156.2	4.262	1.89	217.3	50.6	5.7	5940
ローム質シルト	2.8	139.3	3.730	1.62	120.6	36.9	0	8880
凝灰質粘土	4	76.8	2.027	0.98	114.9	67.4	1.2	10700
シルト混じり細砂	4.7	49.3	1.387	0.39	328.2	54.9	2.1	-
中砂	5.8	28	1.332	-	-	8.64	26.9	-
粘土	6.5	61.4	1.620	0.38	158.7	20.8	4.3	2290

表-2 PS検層による地盤剛性

土質名	PS検層		湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	せん断剛性 G (kN/m ²)	弾性係数 E (kN/m ²)
	V_s (m/sec)	V_p (m/sec)			
埋土	70	1200	1.40		
ローム					
ローム質シルト	105	1350	1.32	14850	44460
凝灰質粘土	105	1350	1.53	17210	51530
シルト混じり細砂					
中砂	180	1470	1.7	56200	167700
粘土	130	1520	1.63	28110	84120
細砂	220	1550	1.80	88900	264900

間で載荷しているため圧密現象は考慮せずに即時沈下のみを対象とした。ハイブリッド法は図-4に示すようにラフトと杭および地盤間の相互作用による変位の影響を弾性理論解により定式化して、有限要素法の解析コードに組み込んだものである。格子梁法は相互作用を含まない一般的な解法である。地盤抵抗としてラフト面については鉛直支持ばねと水平摩擦ばね、杭については鉛直摩擦ばねと水平ばねを考慮した。

4. 鉛直載荷実験結果と解析結果の比較

4.1 ラフトの支持ばねのモデル化

ラフトの支持ばねのモデル化は直接基礎の実験結果との比較により精度を検討した。ばねを沈下解析により設定する場合、鉛直方向に半無限の1層地盤における長方形荷重に対する自由地表面の沈下量はSteinbrennerの近似解を多層地盤系に拡張し、歪依存性を考慮することにより求めた。ラフト支持ばねはラフト剛性が無限大の場合の地盤ばねを与えた。直接基礎の実験結果と歪依存性を考慮した沈下解析結果の比較を図-5に示す。

沈下量が大きくなるに伴い実験値と解析結果は大きく

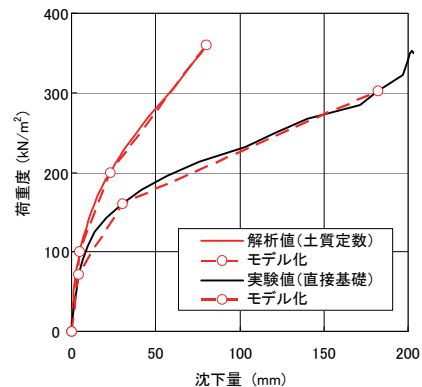
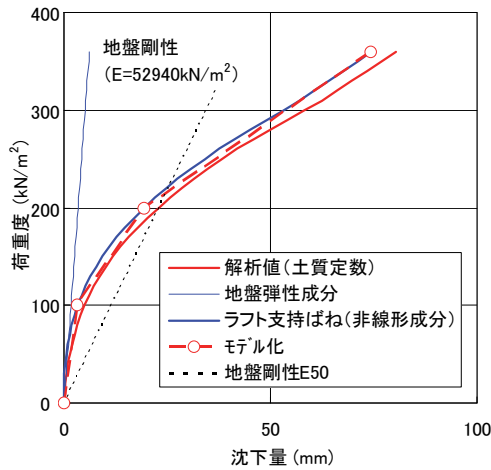
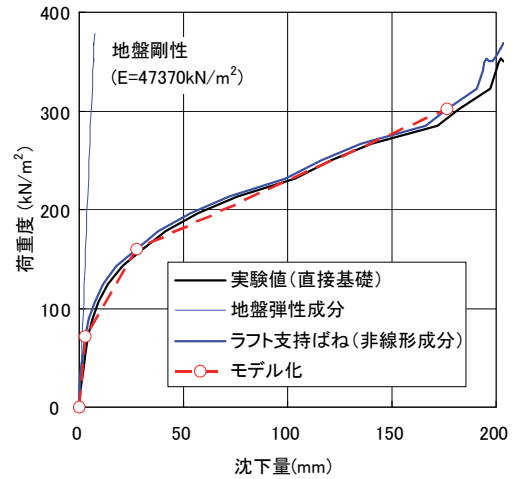


図-5 ラフト支持ばねのモデル化 (格子梁法)



(a) 土質定数による沈下解析から設定



(b) 直接基礎実験値から設定

図-6 ラフト支持ばねのモデル化 (ハイブリッド法)

異なってくる。そのためラフトの支持ばねを直接基礎の実験結果から設定した場合についての解析も行った。格子梁法に用いた支持ばねは図中に示すように Tri-linear にモデル化した。

ハイブリッド法では構造物と半無限弾性地盤とを地盤ばねを介して接合している。そこで半無限弾性地盤に支持ばねの弾性分を与え、ラフト支持ばねには全沈下量から弾性成分を差し引いた非線形成分を与えた。ハイブリッド法のラフト支持ばねを歪依存性を考慮した沈下解析から設定する場合を図-6 (a) に示す。室内土質試験による耐力時の50%歪時の剛性 E_{50} を用いた場合は初期剛性が小さくなり、杭とラフトの荷重分担の適正な評価が難しくなると考えられる。そのため、図-6 (b) に示すように沈下解析によらず直接基礎の実験結果から設定した場合についても解析した。

4.2 杭の摩擦ばねのモデル化

杭の摩擦ばねについてはラフトの支持ばねと同様、沈下剛性を解析によらず、摩擦杭基礎試験体の実験結果から直接設定した。杭1本当たりのばね特性を図-7 に示す Tri-linear にモデル化した。

4.3 パイルド・ラフト試験体の解析

パイルド・ラフト試験体の荷重と鉛直沈下量の全体関係について実験結果と解析値との比較を図-8 に示す。格子梁法はハイブリッド法より沈下量が小さくなったが、本実験の杭間隔は杭径の 7.5d 程度であり相互作用の影響が小さいため解析法の差は小さかった。

土質試験データを用いた解析によって長期支持力までの沈下量をほぼ追跡でき、短期支持力までの沈下量を土質試験データから予測する場合は初期剛性を 0.8 倍程度に調整する必要がある。

実験結果からラフトばねを設定すると、両解析法とも鉛直荷重と沈下量の関係を追跡できるが、格子梁法よりハイブリッド法の精度が高い。荷重分担率の推移について実験結果からラフト支持ばねを設定した結果を図-9

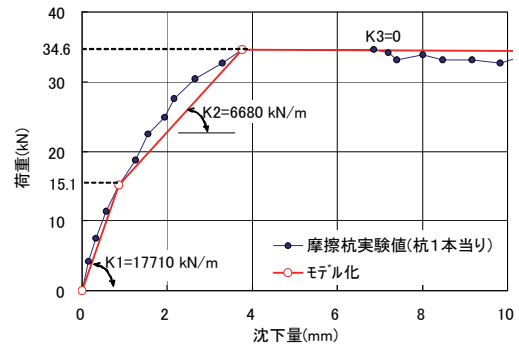


図-7 杭の摩擦ばねのモデル化

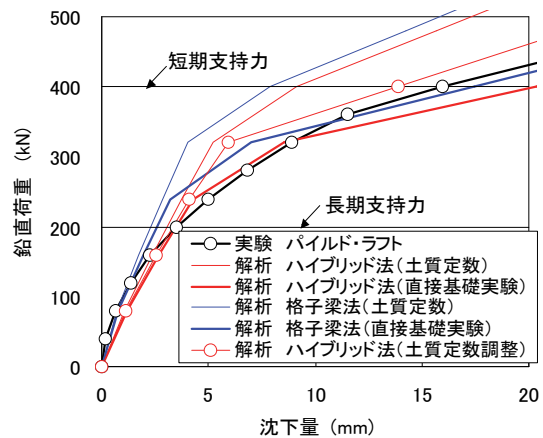


図-8 実験結果と解析値の比較

に示す。土質試験からラフト支持ばねを設定すると初期段階の剛性が大きく評価されるため、実験から設定した場合よりもラフトの分担が増す。長期支持力までは実験結果よりもラフトの荷重分担が大きくなり、ばね設定の改良が必要となるが、それ以上の荷重段階ではほぼ一致している。

5. 水平載荷実験結果と解析結果の比較

5.1 摩擦杭基礎の杭頭固定度

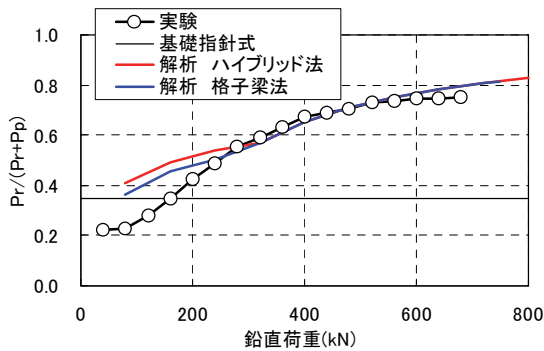


図-9 ラフト負担率の推移
(ラフト支持ばねを直接基礎実験から設定)

水平地盤反力係数 K_h が一様な地盤中の長い杭において、杭頭固定度を α とした場合、杭頭変位 y 、杭頭回転角 θ_p 、杭頭曲げモーメント M_p はそれぞれ(1)式~(3)式で算定できる。

$$\text{杭頭変位 } y = \frac{Q_p}{4EI\beta^3}(2-\alpha) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{杭頭回転角 } \theta_p = \frac{Q_p}{2EI\beta^2}(1-\alpha) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{杭頭曲げモーメント } M_p = \frac{Q_p}{2\beta}\alpha \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 Q_p : 杭頭せん断力 (kN)

$$\beta : \text{杭の特性値 } \beta = 4\sqrt{\frac{K_h \cdot B}{4EI}} \quad (1/m)$$

$$K_h : \text{水平地盤反力係数} \quad (kN/m^3)$$

$$B : \text{杭径 (m)}$$

$$E : \text{杭体のヤング係数 (kN/m}^2\text{)}$$

$$I : \text{杭体の断面二次モーメント (m}^4\text{)}$$

(1)式に摩擦杭基礎の杭頭せん断力と水平変位の実験値を代入することにより、杭頭固定度 α を逆算して求めた。なお、地盤反力は基礎構造設計指針²⁾に準じて(4)式に示すように低減した。逆算した杭頭固定度および杭頭曲げモーメントを表-3に示す。逆算した杭頭固定度での杭頭曲げモーメントは実験値より小さく評価される。実験では杭頭は未降伏であり、杭頭固定度は変動しないものと仮定し、固定度は0.63で一定とした。

$$\text{水平方向地盤反力 } P=K_h \cdot B \cdot y \quad (4)$$

$$y < 0.1 \text{ (cm) の時: } K_h = 3.16 \cdot K_{ho} \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$y \geq 0.1 \text{ (cm) の時: } K_h = K_{ho} \cdot y^{-0.5} \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$K_{ho} = 80B^{3/4}E_{\sigma} = 36100kN/m^2 \text{ (} E_{\sigma} = 2570kN/m^2 \text{: LLT 試験値)}$$

表-3 逆算した杭頭固定度と杭頭曲げモーメント

Qp (kN)	δ_{exp} (cm)	Kh ($10^4 kN/m^3$)	β (m^{-1})	固定度 α	M0 (kN·m)
15.0	0.079	11.42	1.7327	0.627	0.692
30.0	0.204	8.01	1.5857	0.635	1.533
45.0	0.355	6.06	1.4792	0.712	2.763
60.0	0.574	4.77	1.3929	0.695	3.820
75.0	0.878	3.86	1.3209	0.639	4.628
90.0	1.340	3.12	1.2529	0.523	4.793
105.0	2.215	2.43	1.1766	0.267	3.034

杭頭半固定の梁モデルにより、地盤の塑性化を考慮して解析した。なお、杭先端は自由とし、塑性水平地盤反力 P_y の上限値を深さ Z によって(5)式により与えた。

$$P = K_h \cdot B \cdot y \leq P_y \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

$$Z/B \leq 2.5 : P_y = 2(1 + \mu Z/B) C_u, \mu = 1.4 \dots\dots (6)$$

$$Z/B > 2.5 : P_y = \lambda C_u, \lambda = 9 \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{粘着力 } C_u = 38 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

摩擦杭基礎試験体の杭頭荷重と変位の関係について実験結果と解析結果の比較を図-10に示す。杭頭固定度を0.63とし、地盤反力の塑性化を考慮した解析結果は実験値と良い対応が得られた。解析による杭頭モーメントと回転角の関係は図-11に示す tri-linear にモデル化した。杭頭固定度は一定としたが、地盤反力の塑性化により杭頭回転ばねは非線形性を示している。梁モデルの解析を汎用ソフトで行う場合の要素分割を図-12に示す。曲げモーメント分布を図-13に示す。

5.2 ラフト底面の水平摩擦ばね

底面摩擦ばねについてはラフトの支持ばねと同様、水平荷重解析によらずパイルドラフト基礎試験体①の接地

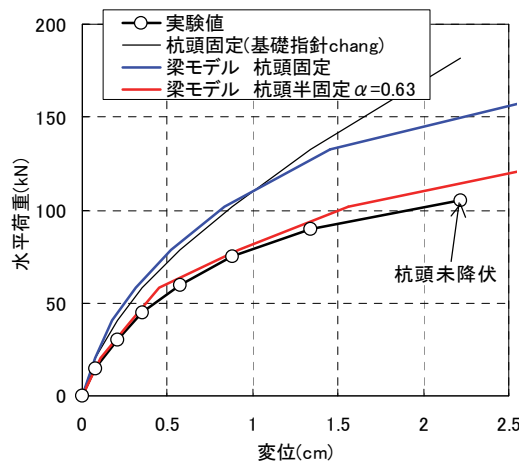


図-10 実験結果と梁モデル解析値との比較

	Mp (kN)	θ_p (rad)	K (kN·m/rad)
K1	0.936	9.87E-04	948
K2	5.151	7.391E-03	658
K3	11.471	2.104E-02	463

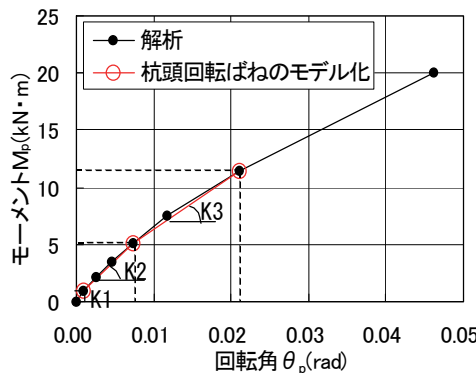


図-11 杭頭モーメントと回転角の関係

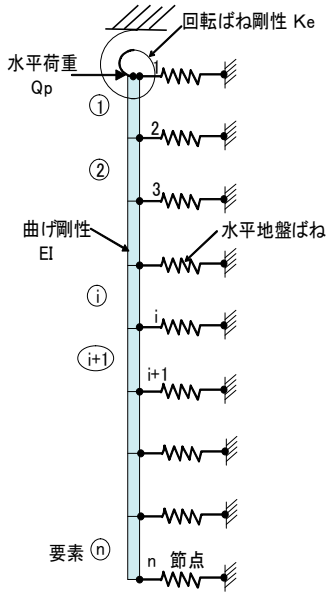


図-12 梁モデルの要素分割

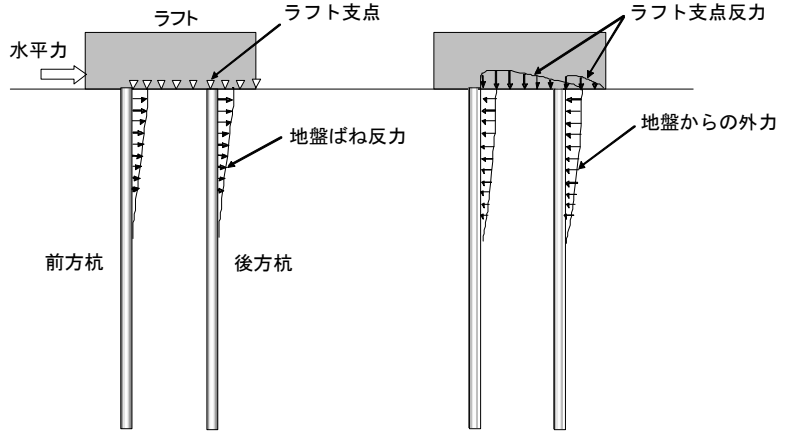


図-15 ラフトの押さえ効果

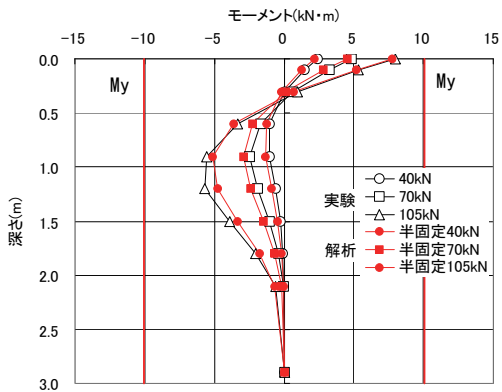


図-13 杭曲げモーメント分布

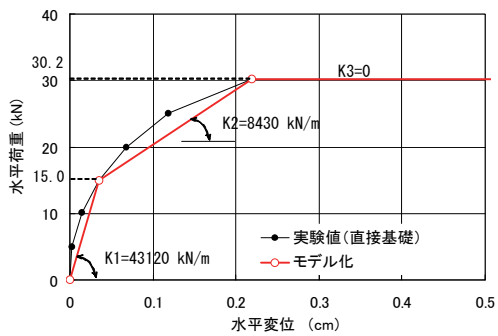


図-14 ラフト底面の水平摩擦ばね

圧を与えた直接基礎試験体の実験結果から図-14 に示す Tri-linear にモデル化した。

5.3 パイルド・ラフト基礎の解析

パイルド・ラフト基礎が水平力を受けた場合、図-15 に示すように杭の変位により地盤が強制変位を受け、ラフトが接地する地盤が盛り上がりそうとする。しかし、ラフトが地盤を押すことから、杭へ再び外力が作用することによって水平耐力がラフトの無い場合より増加する。

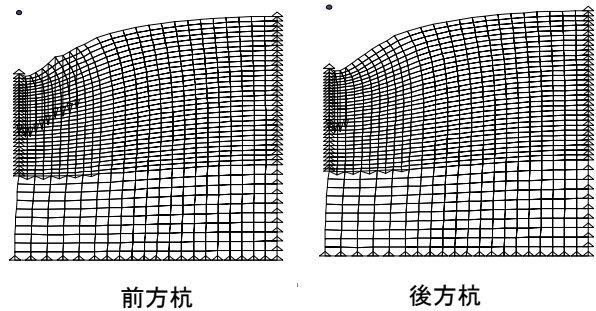


図-16 FEM 解析によるラフトの押さえ効果

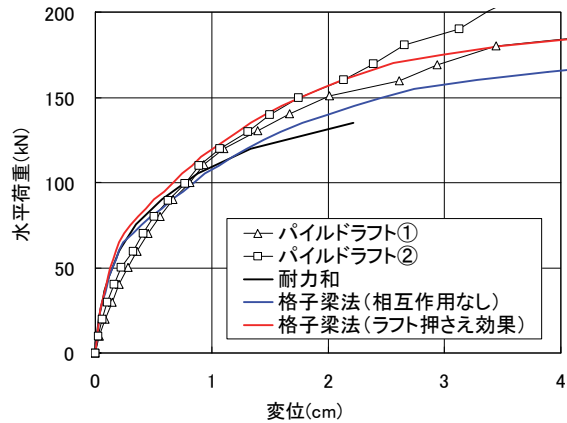


図-17 水平荷重と水平変位の関係

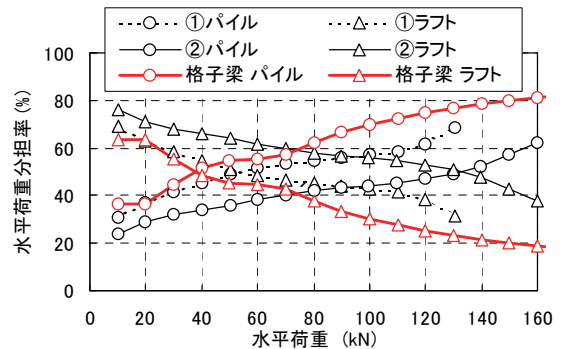


図-18 水平荷重と荷重分担率の推移

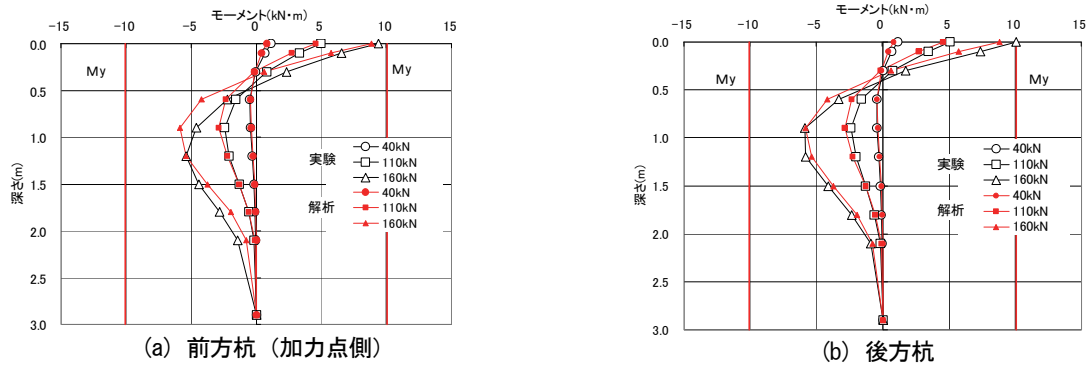


図-19 パイルド・ラフト基礎の杭の曲げモーメント (パイルド・ラフト試験体①)

ラフトの押さえ効果の有無の影響を以下の手順により解析的に評価した。

- ① 4本杭基礎の格子梁モデルで水平荷重時の杭の地盤ばね反力を求める
- ② 地盤ばねの水平地盤反力を地盤に与えて、ラフトの支点反力を前方杭、後方杭について求める
- ③ ラフト反力を地盤に加力して、杭の支点反力を求める。図-16に加力点側の前方杭、後方杭からのラフト反力を与えた場合の地盤の変形状況を示す
- ④ 4本杭基礎の格子梁モデルに水平荷重と③で求めた杭の支点反力を同時に加える

杭頭とラフト間に摩擦杭基礎の検討で求めた杭頭回転ばね特性を評価し、格子梁法によりラフトからの押さえ効果を考慮した解析を行った。水平荷重と水平変位の関係を図-17に示す。格子梁法で相互作用を考慮しない場合は直接基礎と摩擦杭の単純和の耐力、剛性にほぼ等しい結果となっている。水平変位1cm未達の初期段階では相互作用の影響により単純和よりも実験値が小さくなった。それ以降は両者の関係は逆転し、単純和を実験値が上回った。この現象は文献³⁾では杭のアンカー効果と説明されているが、ラフトの押さえ効果に起因していると考えられる。この現象を解析的に考慮することにより実験結果を大変位まで追跡できることが分かる。

水平荷重とラフト(接地面)とパイル(杭)の水平力分担率の推移を図-18に示す。実験では初期は杭が30~40%負担し、最終的には杭が60~70%を負担する。解析では初期はパイルド・ラフト試験体①の傾向に近いが、荷重が増えると実験値よりも杭の負担が増している。杭の曲げモーメント分布を図-19に示す。実験値と解析結果は杭全長で比較的良く一致しており、杭応力は十分な精度で求められた。

6. まとめ

実用的解析法による解析結果と実験結果との比較検討により以下のことがわかった。

(1) 鉛直載荷実験

- i 杭間隔 7.5d の場合、相互作用の影響が小さいため格子梁法とハイブリッド法の差は見られない
- ii 土質試験データを用いた解析によって長期支持力までの沈下量をほぼ追跡でき、短期支持力までの沈下量を土質試験データから予測する場合は初期剛性を0.8倍程度に調整する必要がある
- iii 実験結果からラフトばねを決定すると、鉛直荷重と沈下量の関係を精度良く追跡できる
- iv 長期支持力までのラフトの荷重分担が大きく評価されるため、ばねの設定法の改良が必要である

(2) 水平載荷実験

- i 摩擦杭実験結果から杭頭の固定度を逆算すると0.63であり、汎用ソフトによる格子梁法では杭頭固定度を杭頭回転ばねで評価する必要がある
- ii 水平耐力は初期段階では相互作用のため格子梁モデルの解析値より小さくなる
- iii 水平耐力は変位が大きくなるとラフトの押さえ効果に起因してパイルとラフトの単純和耐力を上回るため、この現象を考慮して解析することにより大変位まで追跡できる

7. あとがき

今後、実規模建物の沈下計測による実測データの蓄積と解析法の精度向上を目指していく予定である。

【参考文献】

- 1) 秦、舟木、「パイルド・ラフト基礎の実験的研究 その1 原位置載荷試験結果」、奥村組技術研究年報 No. 32, pp. 49-54, 2006. 7
- 2) (社)日本建築学会、「建築基礎構造設計指針」、2001. 10
- 3) 長尾、桑原、小林、渡邊、「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, No. 559, pp. 121-127, 2002. 9.