

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—

秦 雅史* 舟木秀尊*

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎とは、一般に布基礎やべた基礎などの直接基礎と杭基礎を併用した基礎形式であり、図-1に示すように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をいう。従来、建築基準法では異種基礎の併用は禁止されていた。しかし、近年になって性能設計への移行に伴う除外規定が制定され、構造計算で確認すれば併用ができることになった。

杭基礎の設計では基礎スラブ底面の地盤の抵抗力を無視するのが原則であるが、パイルド・ラフト基礎では、ある程度の沈下を許容したときに基礎底面における地盤の抵抗力が期待できる場合について、この抵抗力を積極的に利用して基礎の合理化を図ることができる。支持地盤が深くなるにつれて、支持杭基礎は高価なものとなるが、直接基礎と杭を併用して建物荷重を支持することによって、コストパフォーマンスに優れた基礎構法となる。

ただし、本構法は直接基礎と同様にある程度の沈下を許容して地盤となじませる基礎形式であるため、過大な沈下を起こさず鉛直荷重および水平荷重に対する目標性能を確認する詳細な検討が必要となり、適切な杭径、杭長、杭配置を設定することが要求される¹⁾。

解析法の妥当性の検証に用いる基礎データ（杭—地盤—ラフト間での相互作用・荷重分担率などの特性）を取得することを目的とし、パイルド・ラフト基礎、摩擦杭基礎および直接基礎試験体について原位置において押込み、水平載荷試験を実施した。本報では載荷試験の概要と結果について述べる。

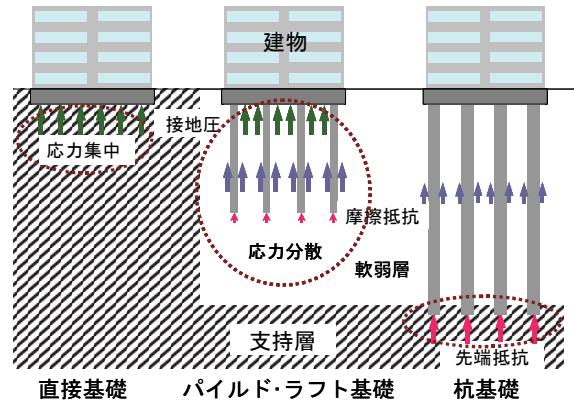


図-1 パイルド・ラフト基礎の支持機構

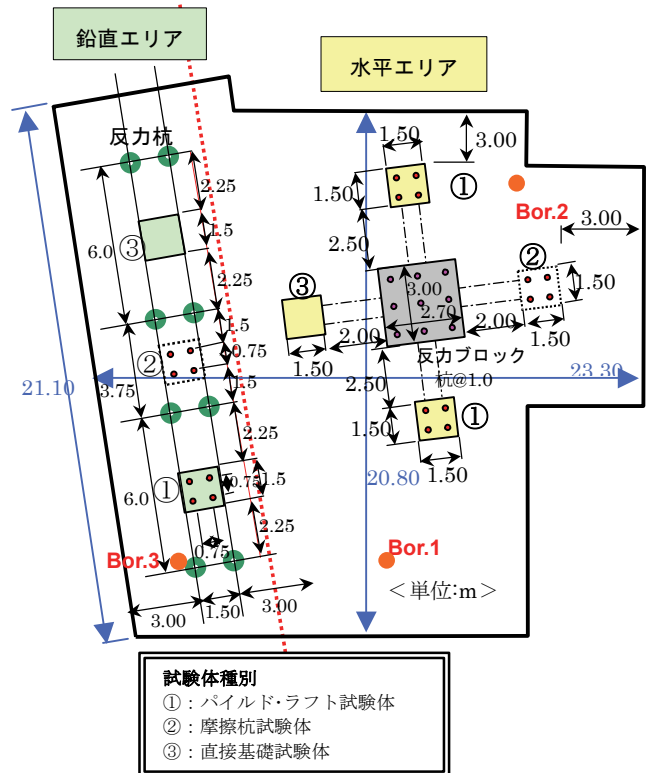


図-2 試験体配置図

より埋土、ローム、凝灰質粘土、砂、粘土、砂で構成されている。しかし、埋土層は腐植物や植物根などが混入しており、含水状態も異なっているため性状が非

2. 試験概要

試験地は茨城県南西部であり、「常総台地」に位置している。試験体の配置を図-2に示す。地盤は上層

*技術研究所

常に不均質である。そのため、試験範囲の埋土を掘削除去しローム層を表出させてから試験体を製作した。掘削にあたり地下水位が床付け面以下となるように注意して行った。試験体と各土層との位置関係、層別沈下量、間隙水圧の測定位置等について図-3に示す。

室内土質試験から求めた土質定数を表-1に、PS検層で測定されたせん断波速度から算定した初期地盤弾性係数を表-2に示す。N値は杭の全長にわたって概ね1~2程度であるが、深度2.8mまでの地層は間隙比および圧密降伏応力度 P_c が大きく典型的な関東ロームである。

中空ねじりせん断試験によりローム質シルト層の動的特性の歪依存性を求めた。建築基準法の新告示では、表層地盤の増幅率を求める際、地盤の歪レベルに対応した剛性低下特性が粘性土と砂質土についてそれぞれ設定されている。告示の粘性土の剛性低下特性と試験結果を比較して図-4に示す。両者は1%程度の歪レベルまでほぼ一致している。

試験体はパイルド・ラフト基礎を用いた実建物の杭径 D を $\phi 500\text{mm}$ 、杭長 15m 、杭間隔を $7.5D$ と仮定した $1/5$ 縮尺モデルである。鉛直試験体、水平試験体の断面をそれぞれ図-5、図-6に示す。杭は、一般構造用炭素鋼管 STK400、径 $\phi 101.6\text{mm}$ 、肉厚 $t=4.2\text{mm}$ (公称)、杭長 $L=3.0\text{m}$ を 0.75m 間隔で圧入により打設した。基礎スラブはRC造として、底面に6号珪砂を 30mm 敷き、その上に幅 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 、高さ 0.5m の形状に製作した。なお、載荷試験は杭設置から3週間以上経過後に実施した。載荷方法は地盤工学会の試験法²⁾に準拠して行い、試験体毎の荷重増減速度が同程度になるようにした。載荷試験状況を写真-1に示す。

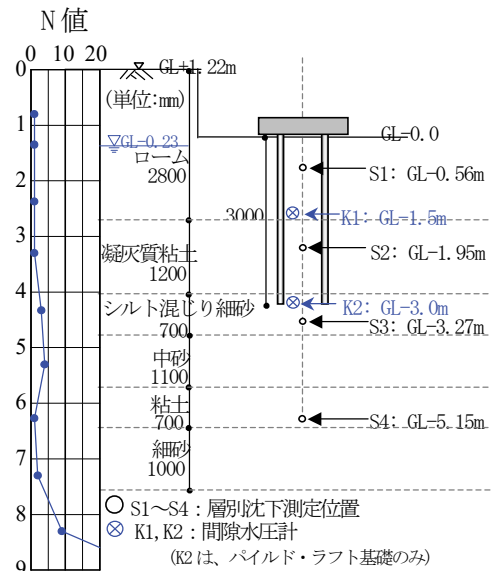


図-3 層別沈下、間隙水圧計設置位置図

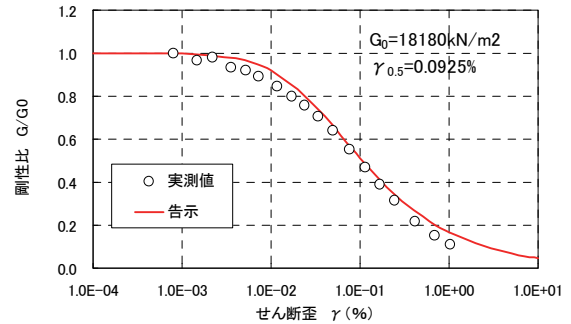


図-4 中空ねじりせん断試験結果

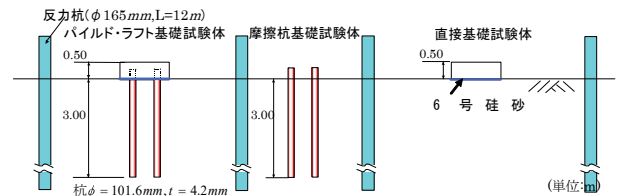


図-5 鉛直試験体断面

表-1 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検層結果と地盤弾性係数

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	105	1350	1.32	14850	44460
ローム質シルト	105	1350	1.53	17210	51530
凝灰質粘土	105	1350	1.53	17210	51530
シルト混じり細砂	180	1470	1.7	56200	167700
中砂	180	1470	1.7	56200	167700
粘土	130	1520	1.63	28110	84120
細砂	220	1550	1.80	88900	264900

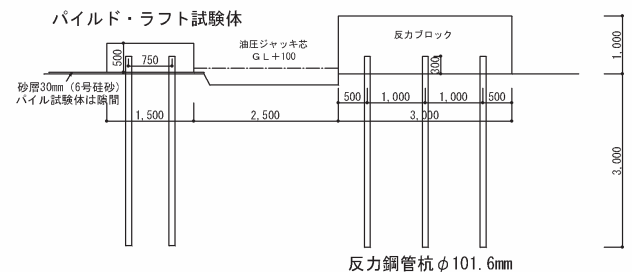


図-6 水平試験体断面

3. 鉛直試験結果

各試験体の荷重と沈下量関係を図-7に示し、パイ

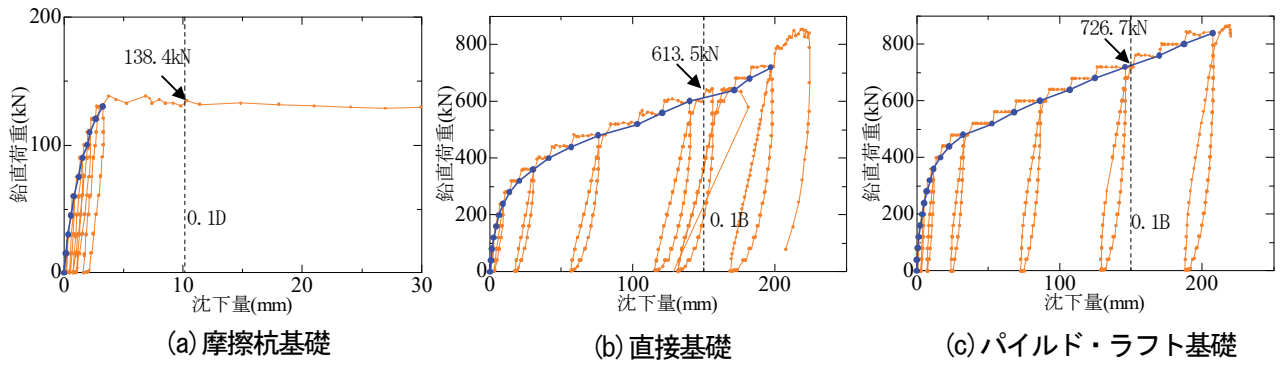


図-7 荷重-沈下量関係



写真-1 載荷試験状況

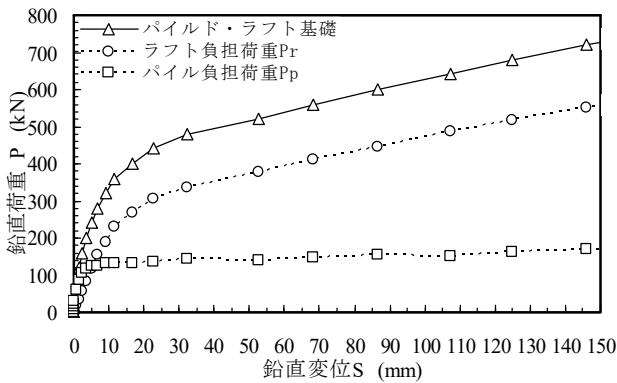


図-8 鉛直荷重-沈下量関係

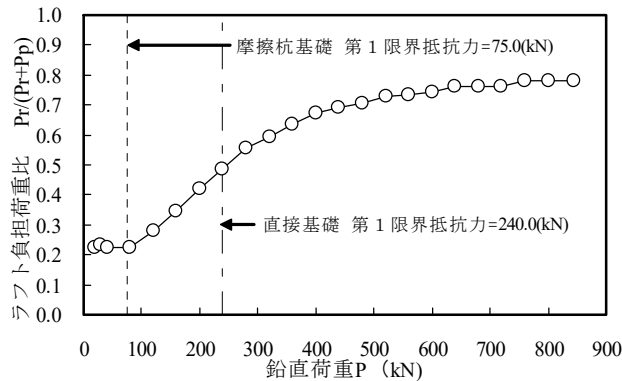


図-9 ラフト負担荷重比

ラフト基礎における鉛直荷重 P とパイル負担荷重 Pp、ラフト負担荷重 Pr (Pr=P-Pp) 関係を図-8に、

鉛直荷重に対するラフトの負担荷重比 $Pr/(Pr+Pp)$ を図-9に示す。パイル負担荷重 Pp は杭頭部に取付けた歪みゲージからの算定値である。

表-3に各試験体での第1限界抵抗力と第2限界抵抗力を示す。表中、第2限界抵抗力は単杭と摩擦杭基礎では沈下量 0.1D における荷重とした。直接基礎、パイルド・ラフト基礎では沈下量の増加に伴い荷重が漸増するため、沈下量 0.1B(B:基礎幅=1.5m) 時の値を採用した。

ラフトの負担荷重比は初期に0.2であり、摩擦杭基礎の第1限界抵抗力75.0(kN) 以降ではラフト負担が増加し、最終的には直接基礎と摩擦杭基礎の第2限界抵抗力の総和に対する直接基礎の抵抗力の比 $613.5\text{kN}/(138.4\text{kN}+613.5\text{kN})=0.82$ の支持力分担比に近づき一定値に収束する。パイルド・ラフト基礎におけるラフトと杭の各負担荷重 Pr、Pp と直接基礎、摩擦杭基礎の関係を比較して図-10(a)、(b)に示す。

ラフト負担分 Pr の沈下剛性は直接基礎より初期から最終に至るまで小さい。また、パイル負担分 Pp の沈下剛性は摩擦杭基礎とほぼ同じであった。本試験ではラフトからパイルに与える影響よりも、パイルからラフトへ与える影響の方が大きかったと考えられる。

パイルド・ラフト基礎下部の層別沈下測定結果を図-11に示す。鉛直荷重と層内平均ひずみ度の関係では、直接基礎の第1限界抵抗力=240(kN) までは、0.00m~3.27m 層は同程度で、それ以降においても、0.00m~1.95m までは同値であるが、杭先端 (GL-3.0m) 付近の計測値 1.95m~3.27m では違いが見られ

表-3 各試験体での限界抵抗力

試験体名	第1限界抵抗力(kN)	第2限界抵抗力(kN)
単杭	22.5	36.2
摩擦杭基礎	75.0	138.4
直接基礎	240.0	613.5
パイルド・ラフト基礎	400.0	726.7

る。杭先端付近を除き、パイルド・ラフト基礎直下の杭に囲まれた地盤では、直接基礎の第1限界抵抗力まで平均的なひずみ度を示すことから、鉛直荷重が杭長の範囲まで有効に伝達されていると考えられる。

4. 水平試験結果

水平荷重は表-4に示すように重錘重量により試験体の総重量を変えたパイルド・ラフト基礎試験体2体、直接基礎試験体および摩擦杭基礎試験体の計4体について実施した。

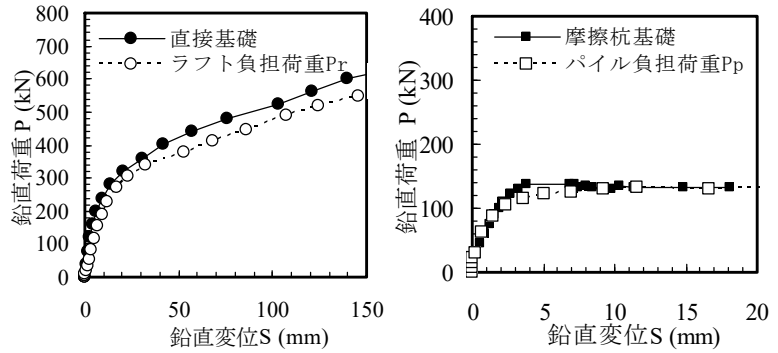
直接基礎およびパイルド・ラフト基礎では、ラフト底面の摩擦抵抗を調整するために6号硅砂を貼り付けている。試験時と同程度の相対密度において、事前に硅砂の定圧一面せん断試験を実施し、ラフト部底面と硅砂の摩擦係数が0.7であることを確認した。試験終了後、敷設した硅砂を取り出して含水比を計測したところ平均約3%であった。摩擦杭基礎では、ラフトと地盤の間に30mmの隙間を設けた。

試験体の重量はパイルド・ラフト基礎試験体①(重量 $W_1=80\text{kN}$) ではパイル負担重量が極限周面摩擦に対する長期許容荷重(約 50kN) に、パイルド・ラフト基礎試験体②(重量 $W_2=145\text{kN}$) では短期許容荷重(約 100kN) になるようにそれぞれ設定した。なお、パイルとラフトの分担率は①で $72\%:28\%$ 、②で $80\%:20\%$ であった。直接基礎の重量はパイルド・ラフト基礎②のラフト負担重量になるように設定し、摩擦杭基礎の重量については重量の影響がほぼ無いと考えられるので、試験体の早期ロッキングを防止するために重量を調整せずにラフト部の重量 27kN とした。水平荷重方法は文献³⁾に準拠し、段階荷重方式の一方方向多サイクルとした。

各試験体の荷重-水平変位関係を図-12に示す。直接基礎試験体は滑動開始前は弾塑性的な挙動を示している。ラフト滑動直後(30.2kN)に載荷荷重を完全に除荷した後、再載荷を行い水平変位量が 80mm に達するまで載荷したが、ロッキングは発生しなかった。

摩擦杭基礎載荷試験では $H_0=120\text{kN}$ でロッキング挙動が卓越して、水平荷重を増加しても変位が増加しなくなった。

摩擦杭基礎試験体の杭体曲げモーメント分布を図-



(a) 直接基礎とラフト負担荷重 Pr (b) 摩擦杭基礎とパイル負担荷重 Pp

図-10 直接基礎、摩擦杭基礎と Pp、Pr の比較

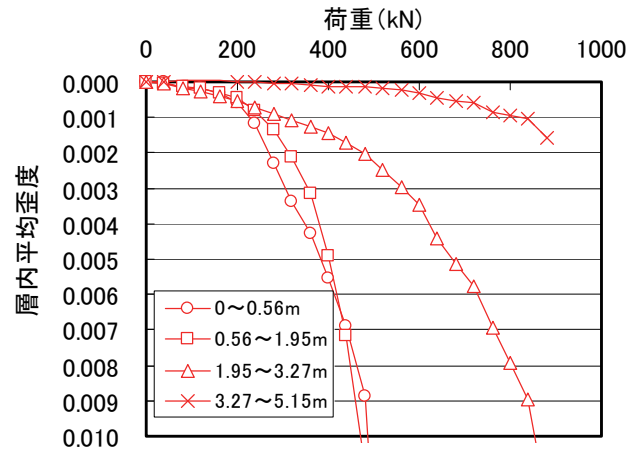


図-11 層別歪

表-4 水平試験体の概要

	直接基礎	摩擦杭基礎	パイルド・ラフト基礎	単杭
ラフト仕様	幅1.5m×長さ1.5m×高さ0.5m			
パイル仕様	φ101.6mm(t=3.9mm) : 実測値 杭長3m (根入れ長さ3m、ラフト埋込み長さ0.3m) 4本 (単杭は1本)			
最大載荷荷重	$H_{max}=30.2\text{kN}$ (重量: 31kN)	$H_{max}=120.6\text{kN}$ (重量: 27kN)	①: $H_{max}=210.7\text{kN}$ (重量: 80kN) $W_p: W_r=72\%:28\%$ ②: $H_{max}=240.7\text{kN}$ (重量: 145kN) $W_p: W_r=80\%:20\%$	$H_{max}=36.8\text{kN}$
載荷方法	2サイクル6段階	7サイクル21段階	①: 7サイクル21段階 ②: 8サイクル24段階	4サイクル8段階

※①: 杭周面摩擦抵抗が長期許容荷重、②: 杭周面摩擦抵抗が短期許容荷重
鉛直荷重分担率: W_p -パイル分、 W_r -ラフト分

13に示す。P1とP2(後方杭:加力点側)およびP3とP4(前方杭)はそれぞれほぼ同様の挙動であったので、代表してP1とP3のみを示した。各杭共通で最大モーメントは杭頭部で発生した。このモーメント分布は一樣地盤での杭頭固定度は0.7程度に相当する。なお、いずれの杭も鋼材試験結果から求めた降伏曲げモーメント $M_y=10.1\text{kNm}$ には達していなかった。摩擦杭基礎試験体の変動軸力分布を図-14に示す。P1杭

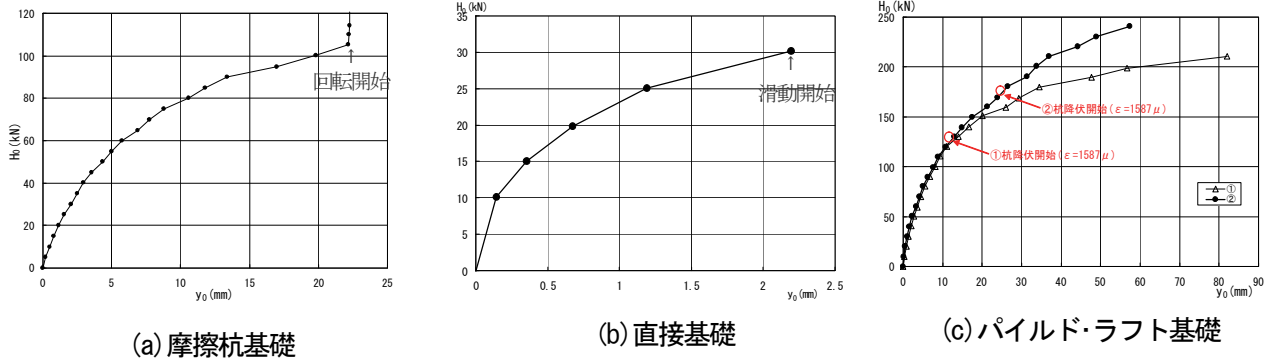


図-12 荷重-水平変位関係

には水平力の増加に伴い引張力が、P3 杭には圧縮力が作用している。このため摩擦杭基礎試験体では摩擦力が限界に達してロッキングが発生したと考えられる。

パイルド・ラフト基礎試験体①、②の杭体モーメント分布を図-15 に示す。なお、モーメント分布は降伏モーメントで頭打ちにして表した。試験体①と②において、同一荷重時では①の方が全体的にモーメントは大きい。また、①は地中部においても M_y に達していた。地中部モーメントの第1ゼロ点深さおよび地中部最大モーメント深さは、①と②でほぼ同じであった。

パイルド・ラフト基礎試験体①および②の変動軸力分布を図-16 に示す。①および②共に P1 では引張力が作用し、P3 側では小さかった。これは P3 側が試験体のロッキングによる押し込み挙動となり、ラフト底面

も杭と共にロッキングに抵抗するためと考えられる。

図-17 に水平荷重分担率を示す。試験体①および②共に載荷初期ではラフトの負担が杭に比べて大きく、後に杭の負担が増加して逆転する。なお、杭の摩擦力を長期状態とした①の方が早期に分担率が逆転した。

パイルド・ラフト基礎におけるラフトと杭の各負担荷重と直接基礎、摩擦杭基礎の関係を比較して図-18(a)、(b)に示す。パイルド・ラフト基礎試験体②のラフト負担分の剛性は接地圧を等しくした直接基礎試験体と同程度で、パイルド・ラフト基礎試験体①よりも大きくなっている。ラフト下部の珪砂の剛性に依存していると考えられる。直接基礎試験体の耐力は滑動で決定されているが、パイルド・ラフト試験体では直接基礎の滑動耐力をかなり上回る。これはラフトの接地

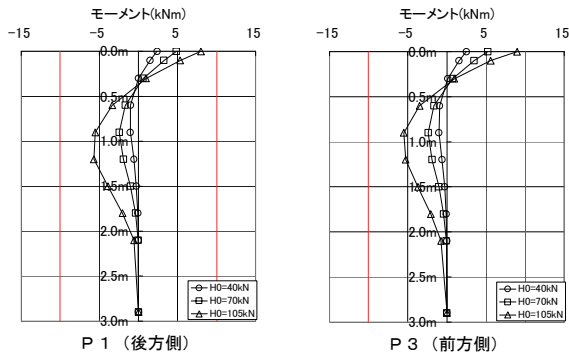


図-13 曲げモーメント分布 (摩擦杭基礎)

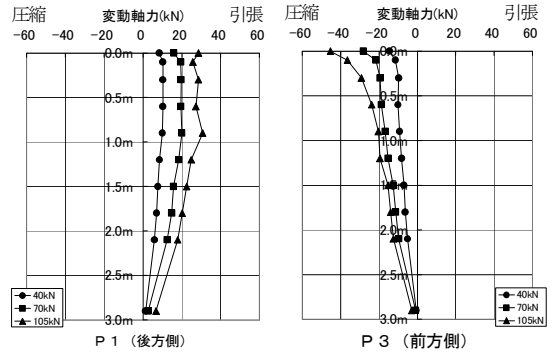


図-14 軸力分布 (摩擦杭基礎)

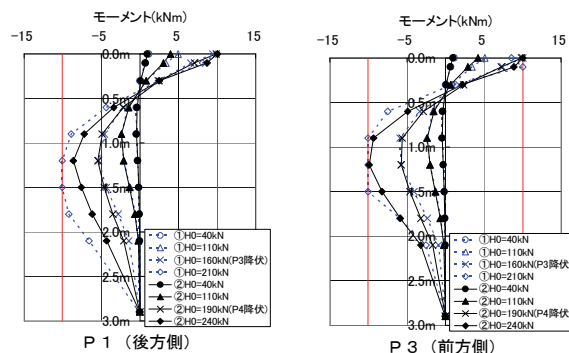


図-15 曲げモーメント分布 (パイルド・ラフト基礎)

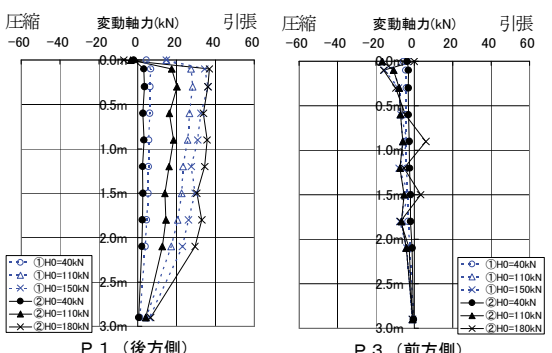


図-16 軸力分布 (パイルド・ラフト基礎)

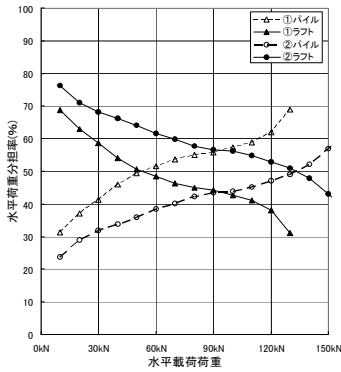
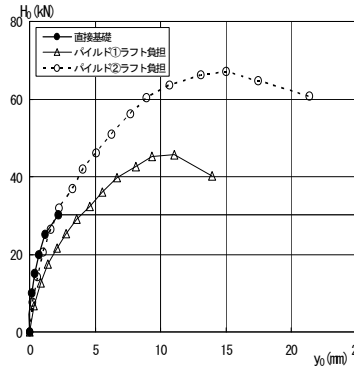
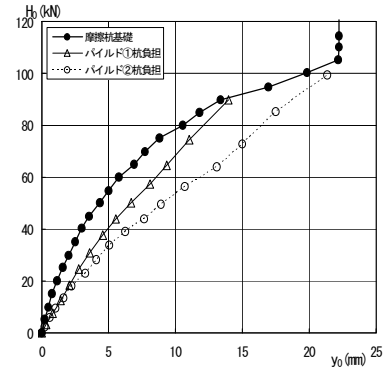


図-17 水平荷重分担率



(a) 直接基礎とラフト負担荷重



(b) 摩擦杭基礎とパイル負担荷重

図-18 直接基礎、摩擦杭基礎と負担荷重の比較

圧が影響していると考えられる。

杭負担分の剛性は摩擦杭基礎試験体>パイルド・ラフト基礎試験体①>パイルド・ラフト基礎試験体②となった。これは、試験体重量が軽いほど接地圧が小さくなり、これに伴ってラフト底面摩擦が減り、杭の負担が増加するためと考えられる。

各試験体の荷重～水平変位関係と直接基礎と摩擦杭基礎の単純和により得られた関係を比較して図-19に示す。初期ではパイルド・ラフト基礎より単純和の耐力が大きい、水平変位が8mm以上では逆転する。同様の傾向が文献⁴⁾でも報告されている。これは、パイルド・ラフト基礎のラフトが負担する耐力が直接基礎よりも大きくなるためと考えられる。

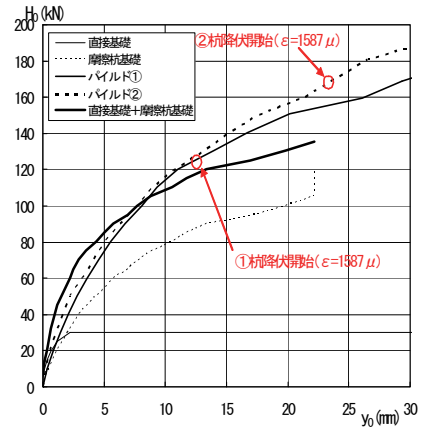


図-19 荷重の重ね合わせ

型試験体の原位置載荷試験を実施し、解析法の妥当性の検証に用いる基礎データとして杭-地盤-ラフト間の相互作用、荷重分担率などの特性が得られた。なお、本研究は浅沼組、銭高組、前田建設工業、松村組との共同研究で行った。

【参考文献】

- 1) (社)日本建築学会、「建築基礎構造設計指針」、2001
- 2) (社)地盤工学会、「杭の鉛直載荷試験方法・同解説第一回改訂版」、2002
- 3) (社)地盤工学会、「杭の水平載荷試験方法・同解説」、1983
- 4) 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.

5. まとめ

今回の試験の結果、パイルド・ラフト基礎の鉛直・水平挙動に関して、以下のことが確認された。

- i. 鉛直荷重の分担は初期段階では杭が80%程度を負担するが、最終段階では杭とラフトの耐力比に応じて分配される
- ii. 水平挙動に関してパイルド・ラフト基礎のラフトが負担する耐力が直接基礎より大きくなるため、パイルとラフト耐力の単純和よりも大きくなる
- iii. パイルとラフトの水平荷重分担率は、ラフト底面接地圧が大きい程、ラフトの負担率が大きくなる

6. おわりに

関東ローム地盤においてパイルド・ラフト基礎模