

関東ローム地盤におけるパイルド・ラフト基礎の原位置載荷試験

In-situ Loading Tests of Piled Raft Foundation on Kanto-loam-ground

高稲 敏浩* 萩原 幸男*²

要 旨

関東ローム地盤の原位置において、パイルド・ラフト基礎の地盤－杭－ラフト間の相互作用などの力学的特性を把握するために、鉛直および水平載荷試験を行った。パイルド・ラフト基礎、直接基礎および摩擦杭基礎について載荷試験を実施し、その結果から限界荷重、沈下量／水平変位、荷重負担率などについて比較検討を行い、パイルド・ラフト基礎の鉛直および水平挙動に関して考察した結果について述べる。

キーワード：パイルド・ラフト基礎／関東ローム／原位置試験／鉛直荷重／水平荷重

1. はじめに

関東ローム地盤においてパイルド・ラフト基礎の挙動特性を把握するために原位置鉛直・水平載荷試験を行った。関東ローム¹⁾は、1) 不飽和である、2) 剛性・強度がかなり大きい、3) 浅いところでポアソン比が小さい という特徴があることが知られている。そのため、かなりの荷重を支持できることから、力学的性質を理解すれば、パイルド・ラフト基礎の適用性が高い地盤と考えられる。そこで、パイルド・ラフト基礎、摩擦杭基礎および直接基礎について、鉛直・水平載荷試験を実施し、パイルド・ラフト基礎の地盤－杭－ラフト間での相互作

用・荷重分担率などその力学的特性を把握するためのデータを取得した。

本報では、まず、地盤構成および土質試験結果などの試験地盤の土質性状を述べ、次に、鉛直載荷試験の試験条件、各基礎の荷重～沈下関係、鉛直支持力の特性値などについて述べ、パイルド・ラフト基礎の載荷試験におけるパイルとラフトの荷重負担率、層別沈下計測、間隙水圧計測結果などについて報告する。続いて、水平載荷試験についても同様に報告する。

2. 土質性状

試験地は茨城県南西部であり、「常総台地」に位置している。ボーリング調査による土質構成とN値を図－1



図－1 土質構成とN値分布

表－1 土質試験結果

土 質 名	深度 (m)	含水比 Wn (%)	間隙比 e	圧密試験		3 軸UU試験		
				Cc	Pc (kN/m ²)	Cu (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)
	Vs(m/sec)	Vp(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	1.7	56200	167700
シルト混じり細砂	180	1470	1.63	28110	84120
中砂	130	1520	1.80	88900	264900
粘土	130	1520			
細砂	220	1550			

*土木研究グループ *²東京本店 建築品質管理室

に示す。また、室内土質試験から求めた土質定数（図－2、Bor.1）を表－1に、P S 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。試験地盤は上層より、埋土、ローム、凝灰質粘土、砂、粘土、砂で構成されている。

N 値は深さ4m~5m付近でやや大きくなっているが、深さ7.0m付近まで概ね1~2程度である。しかし、深さ3m付近までのローム層では、先行圧密荷重（Pc）および非排水強度（Cu）が大きく、また、間隙比ならびに含水比が大きく典型的な関東ロームの性状を示している。なお、平板載荷試験および中空ねじりせん断試験も実施しており、それらの結果については文献2）を参照されたい。

3. 試験体概要

最上層の埋土は掘削除去してローム層を表出させ、ローム層を載荷面とした（写真－1 参照）。本試験の試験体の平面配置を図－2に示す。試験体は鉛直載荷3体、水平載荷4体である。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φ500、杭長15m、杭間隔を群杭の影響を無視できるように7.5dと仮定した1/5モデルで、杭は一般構造用炭素鋼管STK400、φ101.6mm、t4.2mm（実測3.9mm）、杭長を3mとして、圧入工法により設置した。なお、各土層との位置関係については図－5に示す。また、ラフト部は、大きさを1.5m×1.5m×0.5m（厚さ）とし、6号珪砂を30mm敷いた上にR C造で作成した。

4. 鉛直載荷試験

4.1 鉛直載荷試験概要

載荷方法、測定項目、計測時期などは、「杭の鉛直載荷試験方法」³⁾に準拠した。以下に概要を示す。

(1) 載荷および測定方法

段階載荷多サイクル方式により載荷を行い、表－3、4に荷重段階数、載荷速度および荷重保持時間を示す。また、表－5に測定項目の測定時期を示す。

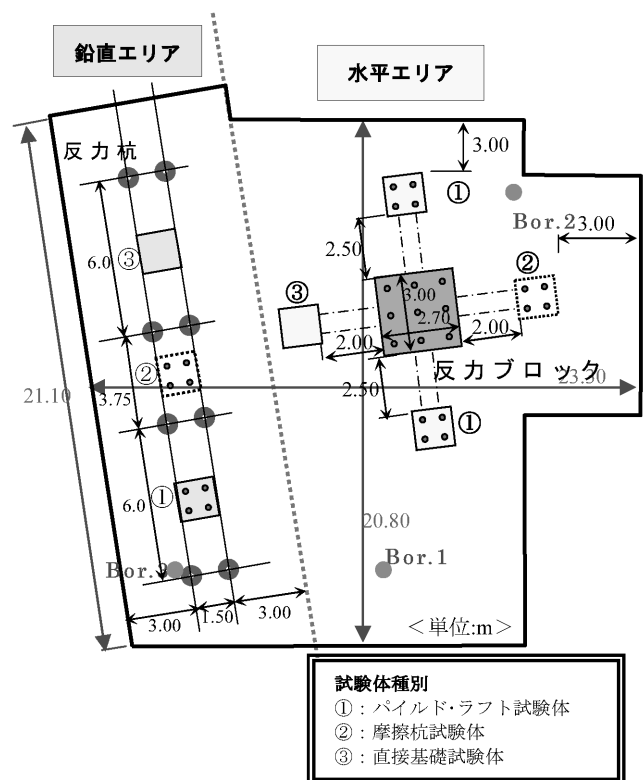
(2) 試験体および計測機器

鉛直載荷試験体の配置の詳細を図－3に示す。

基礎鉛直変位、基礎水平変位、地表面鉛直変位、土圧、間隙水圧、層別沈下を図－4



写真－1 試験地全景



図－2 試験体配置図

表－3 荷重の増減速度

試験体	計画最大荷重 P(kN)	荷重段階数 N(回)	増荷重時 載荷速度S1 (kN/min)	減荷重時 載荷速度S2 (kN/min)
摩擦杭基礎	150.0	10	15.0	30.0
直接基礎	720.0	18	40.0	80.0
パイルド・ラフト基礎	840.0	21	40.0	80.0

* 増荷重時載荷速度S1 (kN/min) = 計画最大荷重P(kN) / 荷重段階数N(回)
 * 減荷重時載荷速度S2 (kN/min) = 増荷重時速度S1 (kN/min) × 2 倍

表－4 荷重保持時間

荷重	荷重保持時間
新規荷重	30分間保持し、次の荷重に移行
履歴内荷重	2分間保持し、次の荷重に移行
ゼロ荷重	15分間解放し、次の荷重に移行

表－5 測定時期

新規荷重	履歴内荷重	ゼロ荷重
0、1、2、5、10、15、30分	0、1、2分	0、1、2、5、10、15分

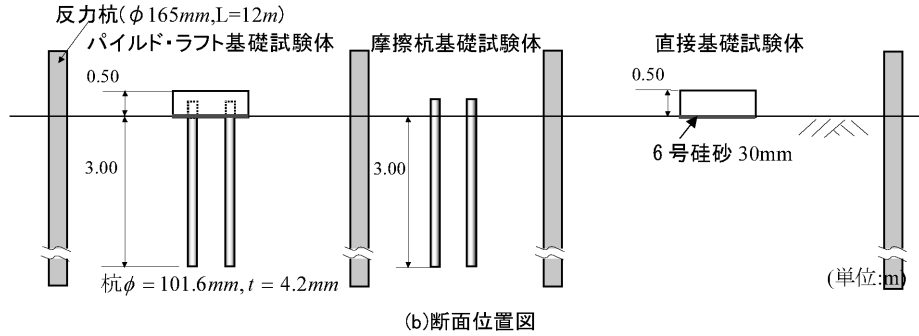
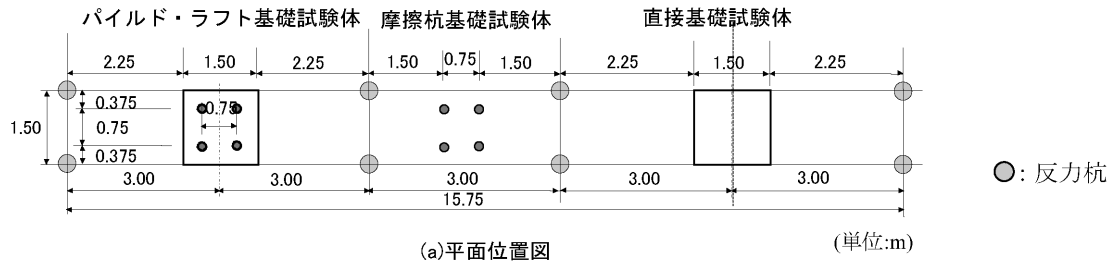


図-3 鉛直載荷試験詳細配置

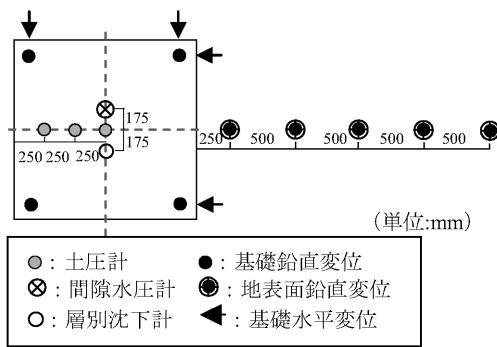


図-4 計測機器配置図

に示す平面位置に計器を設置して測定し、間隙水圧および層別沈下については、図-5に示す深さでそれぞれの計測を行った。土圧計および間隙水圧計は、直接基礎およびパイル・ラフト基礎に、層別沈下計はパイル・ラフト基礎において設置した。杭には、軸力測定のためのひずみゲージを図-6に示す位置に貼付している。なお、載荷試験は、杭設置から3週間以上経過後実施している。

4.2 試験結果

(1) 荷重-沈下量関係

図-7に荷重-沈下量関係を示す。また、表-6には $\log P$ - $\log S$ 関係から求めた第1限界抵抗力および第2限界抵抗力を示す。なお、第2限界抵抗力は、直接基礎およびパイル・ラフト基礎での鉛直荷重が沈下量の増加に伴い大きくなるため、沈下量が、杭基礎の場合は杭径Dの10%、直接基礎およびパイル・ラフト基礎の場合は基礎幅Bの10%以下の範囲における最大荷重としている。

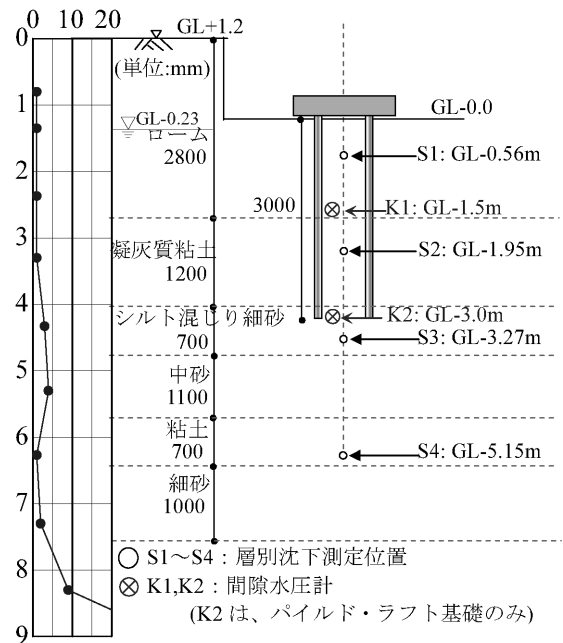


図-5 層別沈下、間隙水圧計設置位置図

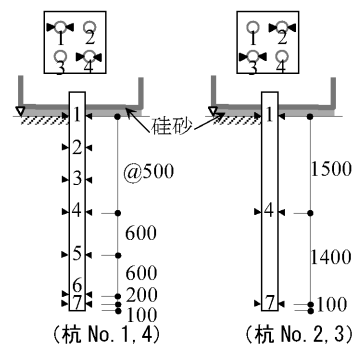
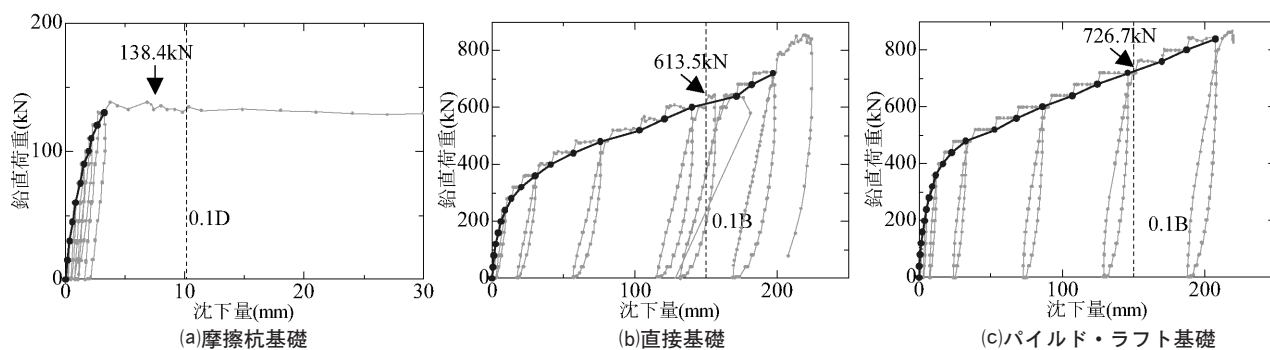


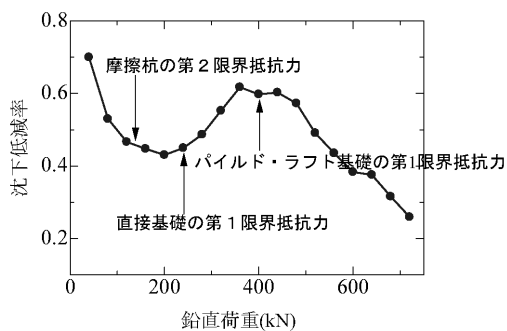
図-6 ひずみゲージ貼付位置



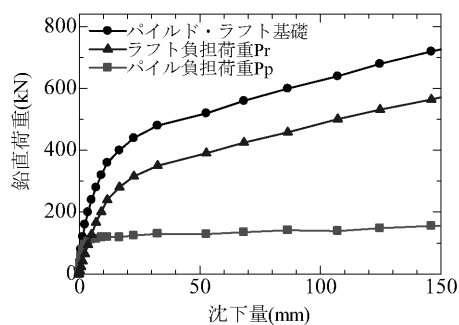
図－7 荷重～沈下量関係

表－6 限界抵抗力

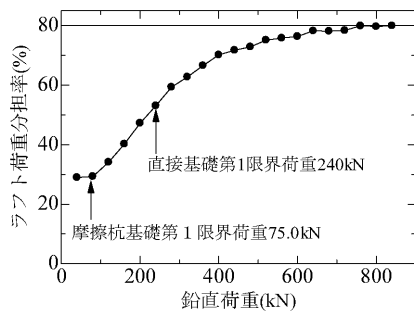
	第1限界抵抗力	直接基礎の第1限界抵抗力に対する比	第2限界抵抗力	直接基礎の第2限界抵抗力に対する比
摩擦杭基礎	75.0	0.31	138.4	0.23
直接基礎	240.0	1.0	613.5	1.0
パイルド・ラフト基礎	400.0	1.67	726.7	1.18



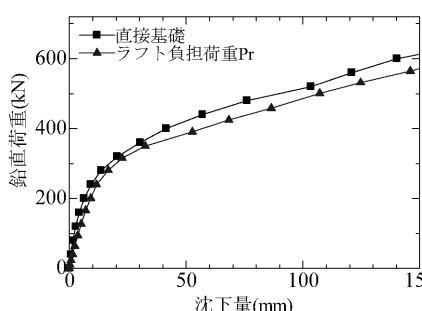
図－8 沈下低減率～荷重



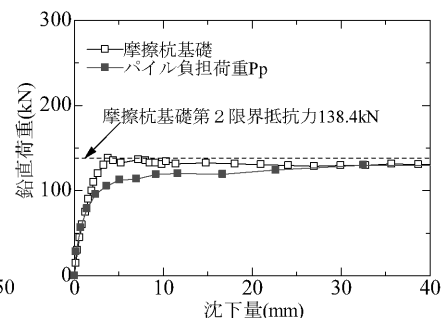
図－9 鉛直負担荷重－沈下



図－10 ラフトの荷重負担



(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－11 負担荷重比較

る。表－6には、直接基礎の限界抵抗力に対するパイルド・ラフト基礎の限界抵抗力比を示しており、第1限界抵抗力では1.67倍、第2限界抵抗力では1.18倍となっている。

図－8には、パイルド・ラフト基礎の沈下低減効果を直接基礎の沈下量 S_r とパイルド・ラフト基礎の沈下量 S_{pr} の比 $(S_r - S_{pr})/S_r$ で示している。比が1.0に近いほど低減効果が大きいのだが、直接基礎の第1限界抵抗力までは、

沈下低減効果は減少し、それ以降は、再び低減効果が大きくなり、パイルド・ラフト基礎の第1限界抵抗力を超えた付近から低減効果は徐々に小さくなっていることが分かる。すなわち、直接基礎の第1限界抵抗力を超える付近では、摩擦杭は既に第2限界抵抗力を超えているにもかかわらず、低減効果が上がっており、パイルド・ラフト基礎の杭による地盤の拘束効果が発揮されているためと考えられる。

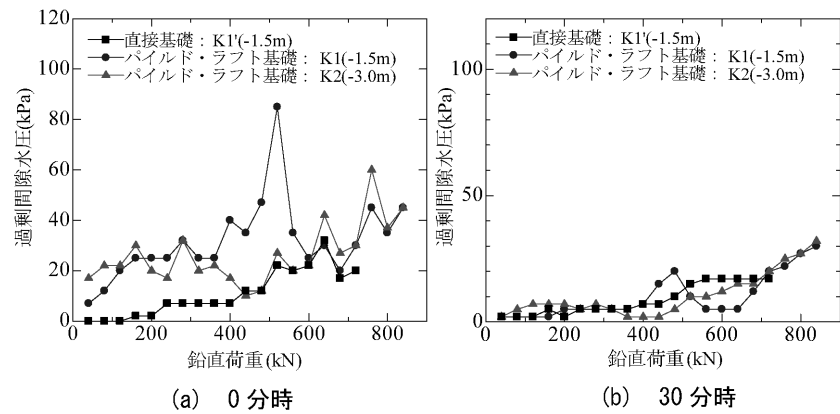


図-12 過剰間隙水圧

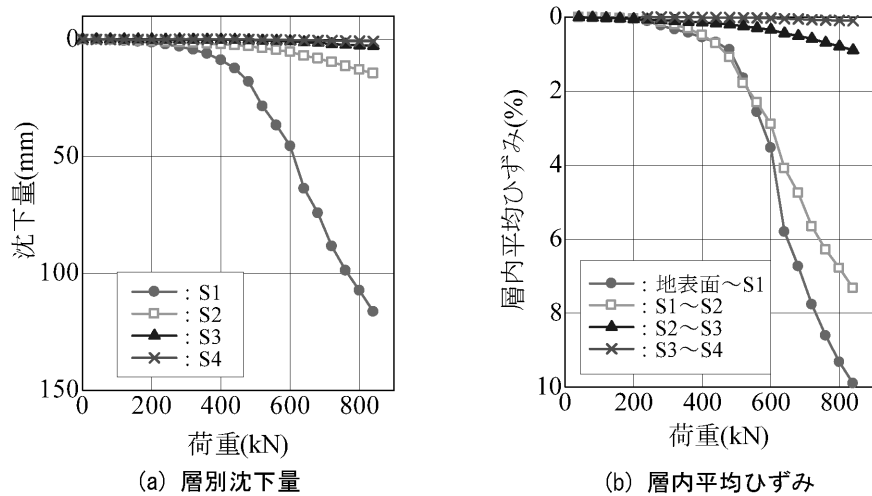


図-13 層別沈下計測結果

(2) 荷重負担

図-9にパイルド・ラフト基礎での鉛直荷重 P とパイル負担荷重 P_p 、ラフト負担荷重 P_r ($P_r = P - P_p$) 関係、図-10にラフトの荷重負担率 $P_r / (P_r + P_p)$ を示す。パイル負担荷重 P_p は杭頭部に取付けた歪みゲージからの算定値である。

図-10のラフトの荷重負担率は初期に30%、摩擦杭基礎の第1限界抵抗力75.0kN以降ではラフト負担荷重比が増加し、最終的には直接基礎と摩擦杭基礎の第2限界抵抗力の累計に対する直接基礎の比613.5kN / (138.4kN + 613.5kN) $\times 100 = 82\%$ の支持力分担率に近づき一定値に収束する。

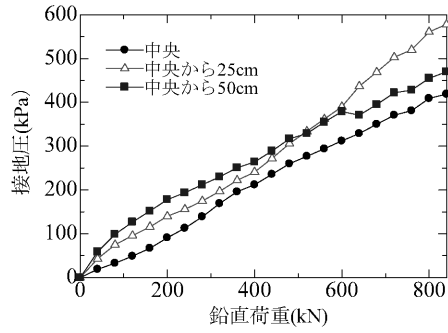
図-11は直接基礎、摩擦杭基礎とパイルド・ラフト基礎での各負担荷重 P_r 、 P_p に対する荷重沈下関係の比較を示す。同図(a)より、ラフト負担分 P_r の沈下剛性は直接基礎より初期から最終に至るまで小さい。また、(b)よりパイル負担分 P_p の沈下剛性は摩擦杭基礎と同じであることから本試験ではラフトからパイルに与える影響(相互作用)よりも、パイルからラフトへ与える影響の方が大

きかったと考えられる。

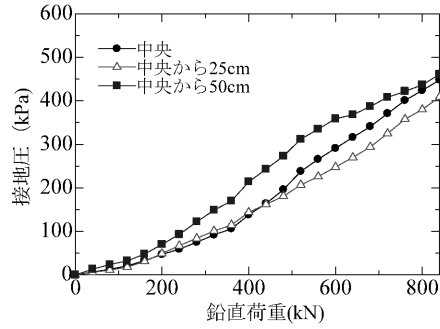
(3) 間隙水圧と層別沈下測定結果

図-5で示したようにパイルド・ラフト基礎下端から-1.5m、-3.0m位置(計測点: K1, K2)、直接基礎下端から-1.5m位置(計測点: K1')の各深度における間隙水圧測定とパイルド・ラフト基礎下端から-0.56m, -1.95m, -3.27m, -5.15m位置(計測点: S1, S2, S3, S4)での層別沈下測定を実施した。図-12には新規荷重段階の荷重保持時間0分、30分時の過剰間隙水圧を、図-13には層別沈下計測定結果による各層の絶対沈下量および層内平均歪み($S_{i+1} - S_i$ / 測定間距離)を示す。

0分時の過剰間隙水圧は鉛直荷重増加に伴い両試験体において増加を示す。直接基礎では0分、30分時とも同じ過剰間隙水圧であり残留するが、パイルド・ラフト基礎では同試験体の第2限界抵抗力=726.1(kN)以下の鉛直荷重時には消散する。第2限界抵抗力以降の鉛直荷重時には両試験体とも過剰間隙水圧が残留する傾向を示している。0分時のパイルド・ラフト基礎のみに着目すると初期荷重時にはパイル先端位置(K2)の過剰間



(a) 直接基礎



(b) パイルド・ラフト基礎

図-14 接地圧計測結果

隙水圧が若干大きい、同試験体の第1限界抵抗力=400 (kN) より小さい鉛直荷重まではK1、K2値に違いは無く、計測深度による差が見られない。それ以降、600kNまでは $K1 > K2$ となり、K2に関しては直接基礎の計測値 $K1'$ と同様となる。600kN以降では再びK1とK2では、ほぼ等しい値となる。

パイルド・ラフト基礎下部の層別沈下測定結果の図-13 (b)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、0.00m~S3 (-3.27m) は同じで、それ以降においても、0.00m~S2 (-1.95m) までは同値であるが、杭先端 (GL-3.0m) 付近の計測値S2~S3 (-1.95m~-3.27m) では違いが見られる。杭先端付近を除き、パイルド・ラフト基礎直下の0 m~S1、S1~S2の杭に囲まれた地盤では、600kN程度の荷重まで同様なひずみを示すことから有効に鉛直荷重を伝達する特性を有していると考えられる。

(4) 接地圧測定結果

図-14は直接基礎とパイルド・ラフト基礎に設置した、土圧計による接地圧計測結果を示す。直接基礎の接地圧は基礎中心から離れるほど大きく、その性状は剛な基礎を粘性土地盤上で地表面载荷した場合の接地圧分布となるが、パイルド・ラフト基礎では同基礎の第1限界抵抗力以下で基礎中心からの距離に拘わらず同じ接地圧となり、パイル (摩擦杭) を配置したことによる、不同沈下抑制の効果と見ることができる。

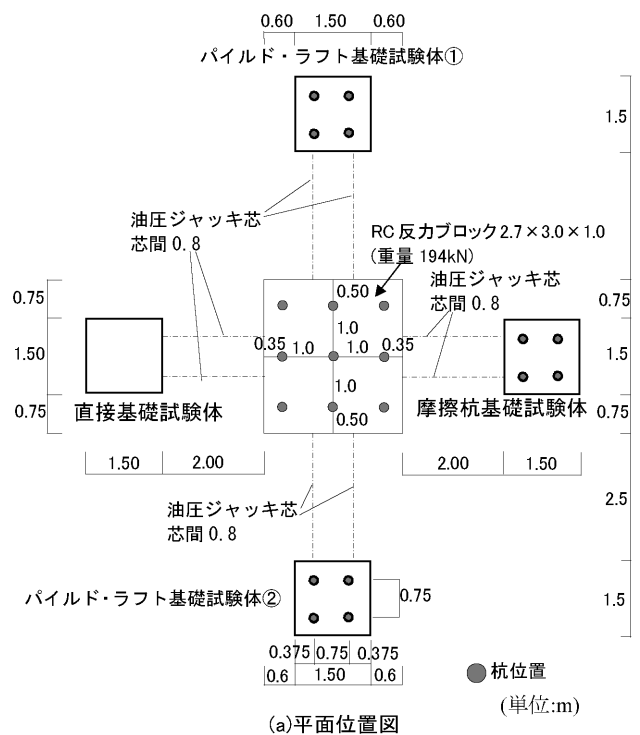
5. 水平载荷試験

5.1 水平試験概要

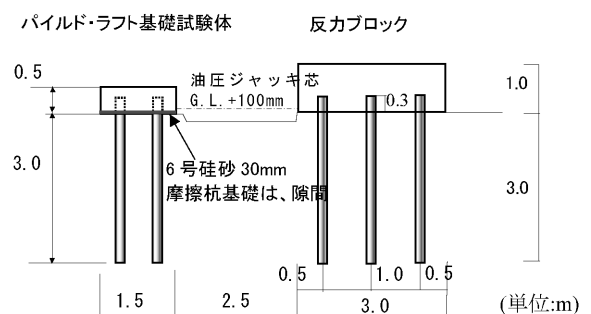
载荷方法、測定項目、計測時期などは、「杭の水平载荷試験方法」⁴⁾に準拠した。以下に概要を示す。

(1) 試験体および計測機器

水平载荷試験体の配置の詳細を図-15に示す。試験体形状などは、鉛直载荷試験の場合と同様である。水平載



(a) 平面位置図



(b) 断面位置図

図-15 水平载荷試験詳細配置図

荷試験としては、重錘積載により試験体重量を変えた2体のパイルド・ラフト基礎試験体、直接基礎試験体および摩擦杭基礎試験体 (4本杭) の計4体について実施した。

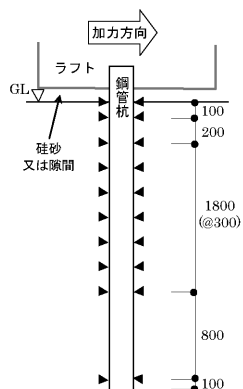


図-16 ひずみゲージ貼付位置

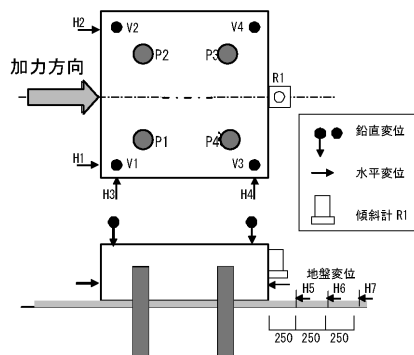


図-17 変位計設置位置

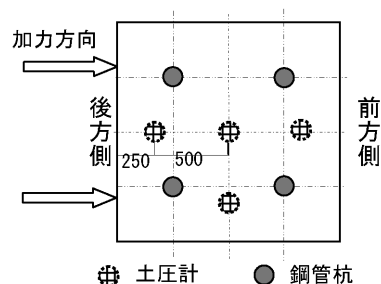


図-18 土圧計設置位置

表-7 荷重の増減速度

試験体	計画最大荷重 P(kN)	荷重段階数 N(回)	増荷時時荷重速度 (kN/min)	減荷時時荷重速度 (kN/min)
直接基礎	75.0	15	5.0	10.0
摩擦杭基礎	120.0	24	5.0	10.0
パイルド・ラフト基礎 1	210.0	21	10.0	20.0
パイルド・ラフト基礎 2	240.0	24	10.0	20.0

表-8 荷重保持時間

荷重	荷重保持時間
新規荷重 履歴内荷重	3分
ゼロ荷重	15分

表-9 測定時期

増荷時	新規荷重 履歴内荷重	0分、2分
減荷時	ゼロ荷重	0、2、4、8、14分

試験体の重量は、パイルド・ラフト基礎①は、総重量 $W1=80\text{kN}$ とし、パイル負担重量が周面摩擦抵抗の長期許容荷重（約 50kN ）に、パイルド・ラフト基礎②では、総重量 $W2=145\text{kN}$ として短期許容荷重（約 100kN ）になるようにそれぞれ設定した。それぞれの鉛直荷重負担率はパイルド・ラフト基礎①で（パイル負担率 Wp ）：（ラフト負担率 Wr ） $=72\%:28\%$ 、パイルド・ラフト基礎②で $Wp:Wr=80\%:20\%$ 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、摩擦杭基礎のラフトについては、その重量の影響がほとんど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重量（ 27kN ）とした。

また、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 号珪砂を貼り付け、ラフトと地盤の間に気乾状態の 6 号珪砂を 30mm の厚さで締固めて敷設した。なお、事前に試験時と同程度の相対密度の珪砂の定圧一面せん断試験を実施し、ラフト部底面と珪砂の摩擦係数が 0.7 であることを確認した。載荷試験終了後、敷設した珪砂を取り出して含水比を計

測したところ平均約 3% だった。摩擦杭基礎では、ラフトと地盤の間に 30mm の隙間を設けた。なお、載荷点高さは全試験体共通で $GL+100$ とした。

試験体の鋼管杭には、ひずみゲージを図-16のように貼付した。変位計および傾斜計の配置を図-17、土圧計の配置を図-18にそれぞれ示す。

(2) 載荷および測定方法

水平載荷方法は文献 4) に準拠し、段階載荷多サイクル方式により一方向載荷を行い、表-7、8 に荷重段階数、載荷速度、荷重保持時間を示す。また、表-9 に測定項目の測定時期を示す。

5.2 試験結果

(1) 直接基礎試験結果

直接基礎試験の水平載荷荷重 $H0$ - 杭頭水平変位量 $y0$ 関係を図-19にラフト滑動直前まで示す。

直接基礎試験体はほとんどロッキングしなかった。図-19より、滑動以前であっても $H0-y0$ は弾塑性的な挙動を示している。

(2) 摩擦杭基礎試験結果

摩擦杭基礎載荷試験の水平載荷荷重 $H0$ - 杭頭水平変

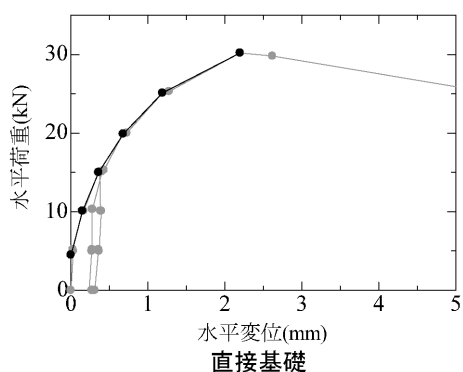


図-19 水平荷重～水平変位量関係

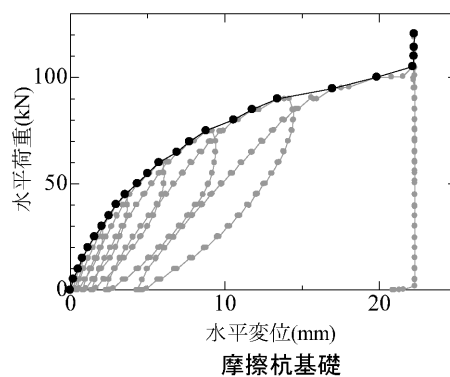


図-20 水平荷重～水平変位量関係

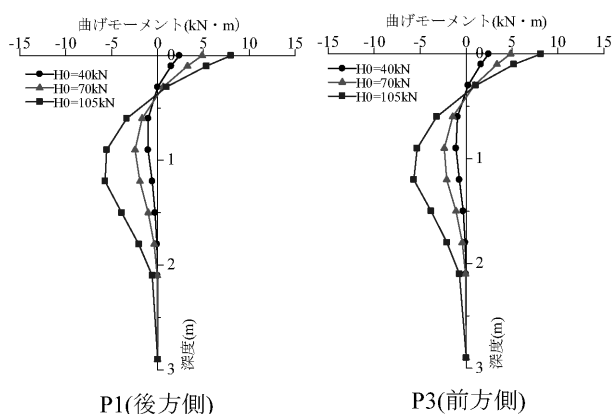


図-21 杭体曲げモーメント分布（摩擦杭基礎）

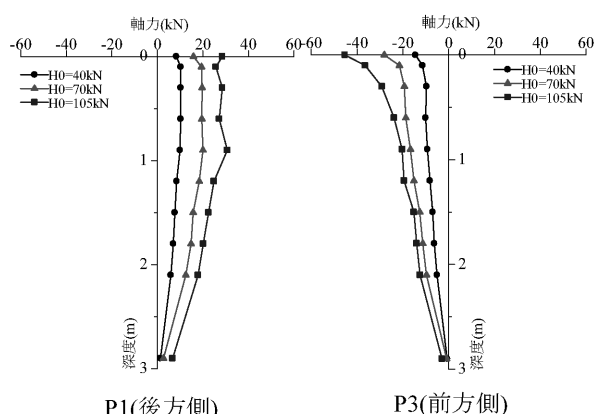
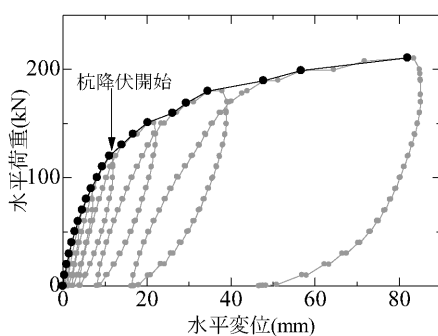
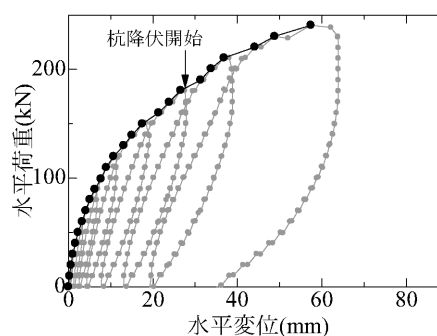


図-22 杭体軸力分布（摩擦杭基礎）



(a) パイル・ラフト基礎①



(b) パイル・ラフト基礎②

図-23 水平荷重～水平変位量関係

位置 y_0 関係を図-20に示す。 $H_0=120\text{kN}$ でロッキング挙動が卓越して y_0 が増加していない。

摩擦杭基礎試験体の各杭体曲げモーメント分布を図-21に示す。P1とP2（後方杭）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、P1とP3のみを示す。図-21より、各杭共通で最大曲げモーメントは杭頭部で発生していて、その大きさはほぼ等しい。地中部曲げモーメント第1ゼロ点位置は各杭共通で深さ0.3m～0.4mあたりに見られ、载荷による変化はほとんど無い。地中部最大曲げモーメントはP1では深さ1.2m、P3

では0.9mあたりにそれぞれ見られる。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各杭体変動軸力分布を引張りを正として図-22に示す。図-21と同様にP1とP3のみを示している。P1は軸力Nが正の値となり、水平载荷の増加に伴い引張力が作用していることを示している。また、P3は負の値となり圧縮力が作用していることを示している。

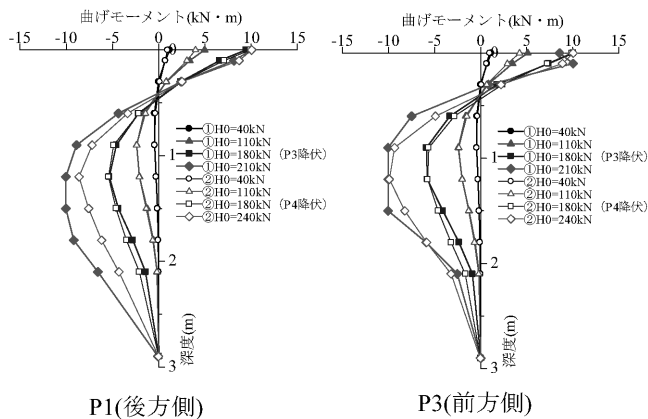


図-24 杭体曲げモーメント分布
(パイルド・ラフト基礎)

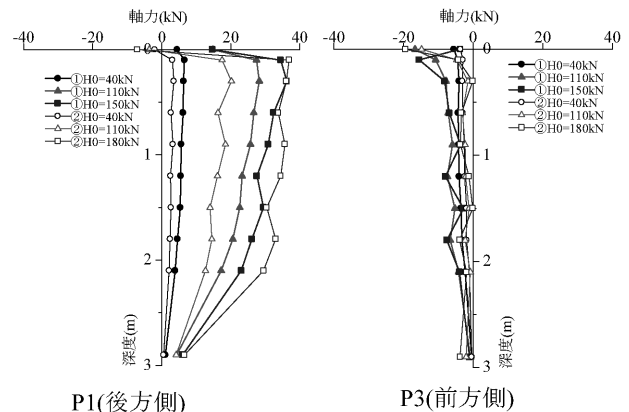


図-25 杭体軸力分布(パイルド・ラフト基礎)

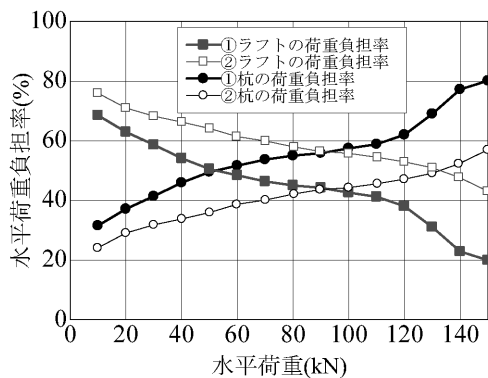


図-26 パイルド・ラフト基礎①②の荷重負担の変化

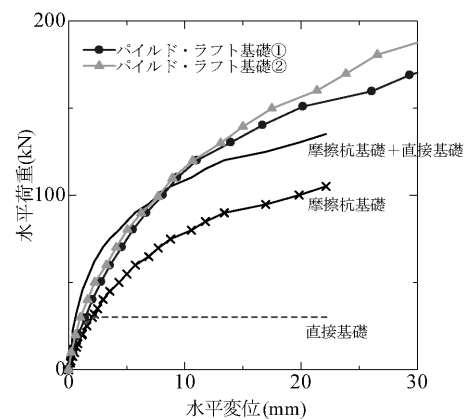


図-27 水平荷重～水平変位量

(3) パイルド・ラフト基礎試験結果

パイルド・ラフト基礎載荷試験体①および②の水平載荷荷重 H_0 －杭頭水平変位量 y_0 関係を図-23に示す。試験体①と②では初期の H_0 － y_0 関係には、違いがほぼ見られず弾塑性的な挙動を示し、 $y_0=14\text{mm}$ あたりから試験体②の方が剛性が大きくなる。これは図中に示すように、鋼管杭の降伏が影響していると考えられる。

試験体①および②の杭体曲げモーメント分布を図-24に、軸力分布を図-25にP1とP3について示す。なお、曲げモーメント分布については降伏曲げモーメント $M_y=10.1\text{kNm}$ で頭打ちにして、軸力分布については M_y に達する前の荷重ステップを表示している。試験体①と②において同一荷重時では①の方が全体的に曲げモーメントが大きく、①は地中部においても降伏曲げモーメント M_y に達していた。地中部曲げモーメント第1ゼロ点深さおよび地中部最大曲げモーメント深さは、①と②でほぼ等しい。軸力については、①および②共にP1では引張力が作用し、P3側では軸力の変動は小さかった。P3側

は押し込み挙動となり、ラフト部底面が抵抗するためと考えられる。

図-26に水平荷重分担率を示す。試験体①および②共にラフト負担の分担率は載荷初期では大きく、後に逆転する。また、①の方が早期に分担率が逆転した。図-27に各試験体と(直接基礎+摩擦杭基礎)との比較を示す。図より、載荷初期はパイルド・ラフト基礎より(直接基礎+摩擦杭基礎)の剛性のほうが大きい、 $y_0=8\text{mm}$ で逆転する。

6. おわりに

原位置鉛直および水平載荷試験を実施しパイルド・ラフト基礎の挙動に関して、パイルとラフトの荷重分担率、支持力特性ならびに地盤内応力性状など、基本的な特性について把握できた。今後、パイルド・ラフト基礎の挙動解析を実施した結果について報告する予定である。

最後に、本実験は、(株)奥村組、(株)銭高組、前田建設工業(株)、(株)松村組との5社共同で実施したものである。

[参考文献]

- 1) 吉見吉昭：関東ローム地山の力学的性質、土と基礎、VOL.53.NO.1Ser.No.564、pp.63-65、2005.
- 2) 秦雅史、高稲敏浩、峯近仁、山下俊英、佐藤武：関東ローム地盤におけるパイルド・ラフト基礎の原位置鉛直載荷試験その1：第40回地盤工学研究発表会、pp.1645-1646、2005.
- 3) 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.
- 4) 地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説、1983.