

パイルド・ラフト基礎を採用した建物における杭の動的載荷試験

小川 敦* 森 利弘* 渡辺則雄* 増子 寛** 杉 勝博***

高層棟と低層棟を有する建物の基礎形式として、荷重が大きい高層棟を支持杭基礎とし、低層棟には直接基礎（べた基礎）に沈下抑止を目的とした摩擦杭を配置するパイルド・ラフト基礎を採用した。このような異種基礎の採用に当たっては、不同沈下を設計クライテリア内に収めることが重要であり、沈下抑止杭の支持性能が問われる。本報では、性能設計の観点から、杭頭での沈下剛性を代表値に、杭の動的載荷試験を通して基礎の性能について検証を行ったので報告する。

キーワード：パイルド・ラフト基礎，異種基礎，動的載荷試験

1. はじめに

高層棟と低層棟を有する建物において、荷重が大きい高層棟を支持杭基礎とし、低層棟には直接基礎（べた基礎）に沈下抑止を目的とした摩擦杭を配置するパイルド・ラフト基礎を採用した。このような異種基礎の採用に当たり、支持形式の違いによる不同沈下等の障害が起きないように、高層棟および低層棟を含めた建物全体での基礎の沈下・応力解析を実施し、杭およびべた基礎（マットスラブ）の仕様を決定している。設計時に検討した基礎の性能について検証するために、施工時には、杭の動的載荷試験、基礎スラブの沈下計測、鉄筋のひずみ計測を実施している。

本報では、設計時に実施したハイブリッド法による基礎全体の沈下解析¹⁾に対して、杭施工後に杭の動的載荷試験を実施して、杭頭での沈下剛性等に関する比較を行い、基礎の性能の検証を行なった。

2. 設計概要

2. 1 建物概要

本工事は、地下 1 階、地上 15 階建て、高さ 56.5m の総合病院を建設するものである。Table1 に建物概要、Fig.1 に建物平面図、Fig.2 に建物断面図、Table2 に基礎仕様の一覧を示す。Fig.1 には、動的載荷試験を実施した杭（P1～P5）の位置を示した。

建物は免震棟と低層棟と付属棟から構成されている。免震棟は、5 階建て部分と 15 階の高層部があり、地下 1 階床、梁下と基礎の間に免震装置を設置している。免震

装置には高減衰積層ゴム支承およびオイルダンパーを使用している。付属棟は、平面が三角形の地上 3 階建ての建物で、低層棟は地下階のみのコの字形状をしている。構造形式は高層棟、低層棟、付属棟ともに鉄筋コン

Table 1 建物概要

建物用途	病院
構造規模	RC 造，地下 1 階，地上 15 階
基礎	既製コンクリート杭 (拡大根固め工法)
建築面積	約 7200m ²

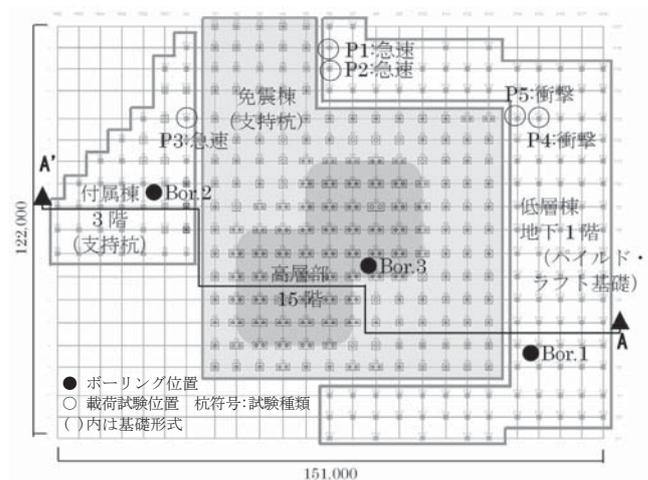


Fig. 1 建物平面図

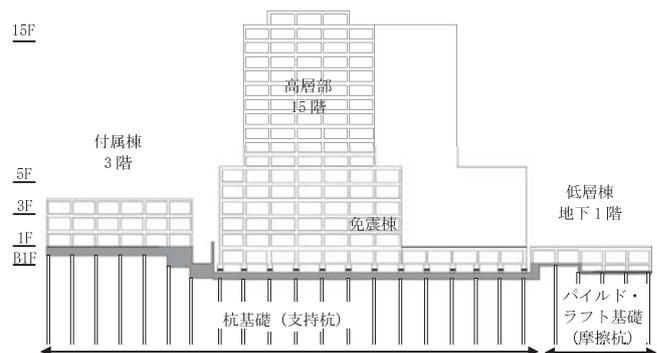


Fig. 2 建物断面図 (A'-A 断面)

* 技術研究所 地盤基礎研究グループ
** 首都圏支店 構造設計部
*** 首都圏支店 湘南鎌倉作業所

Table 2 基礎仕様の一覧

棟名称	杭仕様 (最大径)	スラブ仕様
免震棟 (支持杭)	$\phi = 8 + 8 + 8 \text{ m}$ CPRC 杭 II 種 1000+PHC 杭 A 種 1000 +節杭 A 種特厚(1100-900-1000)	スラブ厚 $t=100\sim150\text{mm}$
付属棟 (支持杭)	$\phi = 5 + 13 + 13$ CPRC 杭 II 種 900+PHC 杭 A 種 900 +節杭 A 種特厚(1000-800-900)	スラブ厚 $t=50\sim135$
低層棟 (パイルド・ラフト)	$\phi = 5 + 13 \text{ m}$ CPRC 杭 I 種 600+節杭 C 種(600-450-600)	スラブ厚 $t=50\sim100$

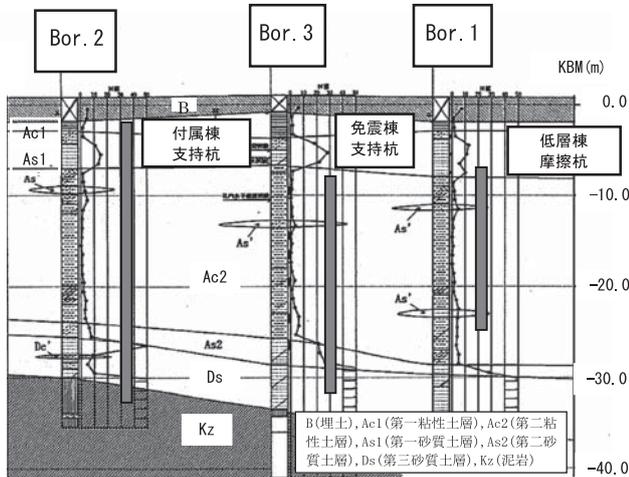


Fig. 3 推定土層断面と杭の深度

クリート造のラーメン構造である。基礎は、マットスラブで、高層棟、低層棟、付属棟が一体となっており、基本的には上部構造の柱位置で杭に支持されている。

基礎形式は、免震棟は、既製コンクリート杭の拡大根固め工法（高支持力杭）による杭基礎とした。3階建ての付属棟も同様に支持杭とした。地下階のみの低層棟は、パイルド・ラフト基礎で、支持力は直接基礎（べた基礎）で確保し、沈下抑止を目的とした摩擦杭を併用する。摩擦杭は支持杭と同じ工法としている。

2. 2 地盤概要

対象建物の地盤は、地表から G.L.-2~-3m の範囲で不均質な埋土で覆われ、以深は沖積層が層厚 24~28m 程度、相模層群が層厚 5~6m 程度、上総層群がおよそ層厚 1~5m ほど堆積している。沖積層は、泥炭を伴う第一粘性土層、第一砂質土層、第二粘性土層、第二砂質土層からなる。そして、相模層群は、局部的に粘性土の薄層を挟む砂質土層で構成され、上総層群は、軽石の薄層を挟む暗灰色の泥岩からなる。Fig.3 に推定土層断面と杭の深度を示す。図中の杭は代表的なもののみを示している。

支持杭の支持層は、N 値が 50 を超えるおよそ G.L.-30m の相模層群の砂質土層あるいは上総層群の泥岩とした。また、パイルド・ラフト基礎の摩擦杭の先端は N 値が 5 程度の第二粘性土にある。

2. 3 沈下・応力解析

本物件では、支持杭基礎部と摩擦杭を配したパイルド・ラフト基礎部に、支持形式の違いによる不同沈下が発

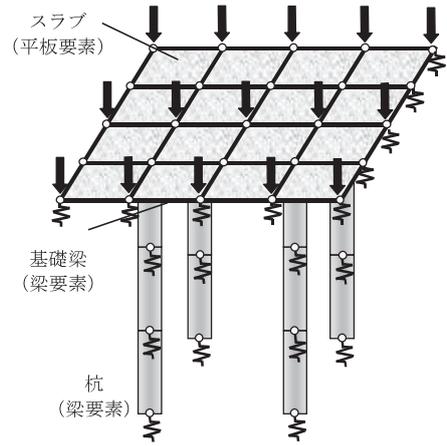


Fig. 4 解析モデルの概念図

Table 3 沈下解析に用いた土質定数

深度 (SGL-(m))	土質名	平均 N 値	一軸圧縮強度 (kN/m ²)	変形係数* (kN/m ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
0~2.0	埋土	2	—	2800	15.7
2.0~4.9	粘土	2	25	2800	15.4
4.9~7.9	細砂	8	—	22400	17.6
7.9~14.7	シルト	1	104	9050	17.3
14.7~19.1	シルト	1	124	9120	15.5
19.1~26.9	砂混りシルト	3	194	14100	16.1
26.9~29.8	シルト混り細砂	23	—	128000	17.9
29.8~	中砂	60	—	336000	19.1

*SGL-7.9~26.9mの粘性土は一軸圧縮強度試験の E_{50} 、その他は基礎指針²⁾の砂地盤の E_s と N 値の関係を参考に、SGL-4.9mまでは 1400N(kN/m²)、SGL-4.9~7.9m の範囲は 2800N(kN/m²)、SGL-26.9m 以深は 5600N(kN/m²) で算出した。

生しないように、沈下・応力解析を行って杭やマットスラブの設計を行った。ここでは、その沈下・応力解析の概要について説明する。

沈下解析は、支持杭基礎部とパイルド・ラフト基礎部の全体を対象とし、パイルド・ラフト基礎用に開発した解析手法 (ktt-piled-v)¹⁾ を用いて行った。Fig.4 に解析モデルの概念図を示す。解析方法は、ハイブリッド法を用いている。杭および基礎スラブは有限要素法、地盤は弾性論の解を用いてモデル化を行う。基礎スラブは形状を反映した平板要素、基礎梁および杭は形状を反映した梁要素としている。深度方向に分割された杭の各要素の負担する摩擦力は、極限摩擦抵抗以上にならないようにモデル化をしている。沈下解析に用いた土質定数を Table3 に示す。

解析結果を Fig.5 に示す。図に示すように、パイルド・ラフト基礎部分における沈下量は最大で 1.58cm、スパン間における最大変形角は 1/1110(rad) ともに値は小さい。沈下は、パイルド・ラフト基礎部である低層棟の短辺方向中央位置で大きくなっている。低層棟部分と免震棟部分の境界においても沈下差はほとんど生じておらず、パイルド・ラフト基礎に用いた摩擦杭の仕様に問題はないと判断した。なお、パイルド・ラフト基礎部分における杭と直接基礎のそれぞれの荷重分担率は、杭が 0.71、直接基礎が 0.29 であり、荷重の約 7 割は杭で負担する結果となっている。

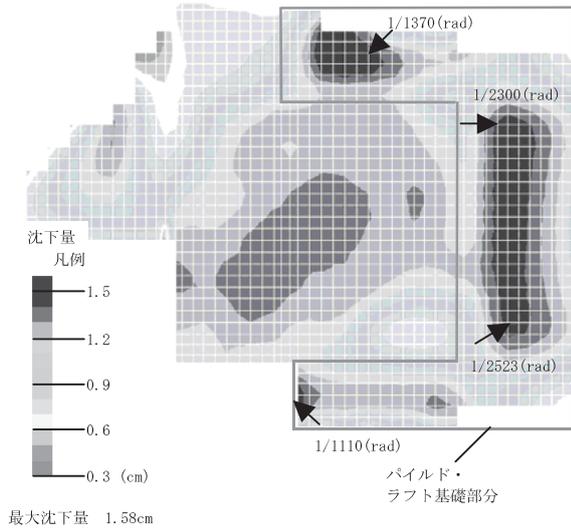


Fig. 5 沈下解析結果

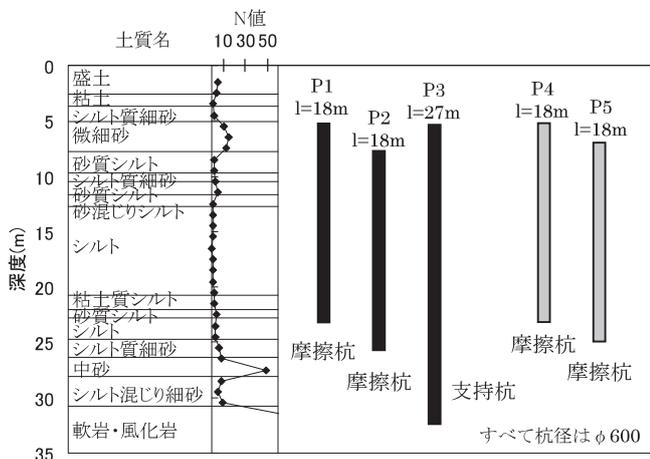


Fig. 6 杭の設置深度 (土質は Bor. 2)

基礎スラブや基礎梁のサイズおよび配筋は、沈下解析によって求まる Fig. 5 の沈下分布を使って、別途応力解析を実施し設計した。

3. 杭の動的載荷試験

3. 1 目的

パイルド・ラフト基礎に用いた摩擦杭の杭単体での沈下剛性を検証するために杭の動的載荷試験の一つである急速載荷試験を実施した。摩擦杭との比較用として支持杭についても実施することとした。

また、摩擦杭で支持した低層棟では、施工時にクローラクレーンによる施工荷重が発生するため、杭の衝撃載荷試験を実施し、施工荷重に対する検証を行った。

Fig.6 に試験対象とする杭の設置深度を示す。急速載荷試験を、P1～P3 で実施し、衝撃載荷試験は、P4 と P5 で実施した。P3 のみ N 値が 50 を超える地盤に支持されている支持杭であり、それ以外はパイルド・ラフト基礎に用いた摩擦杭である。摩擦杭は N 値が 0 から 5 程度のシ

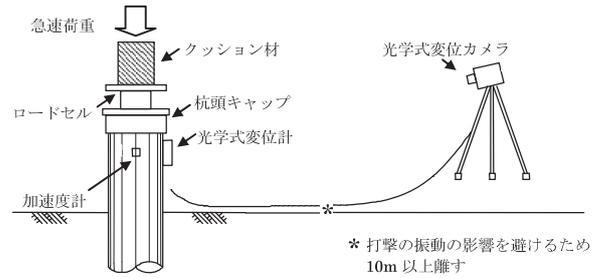


Fig. 7 急速載荷試験の試験概要

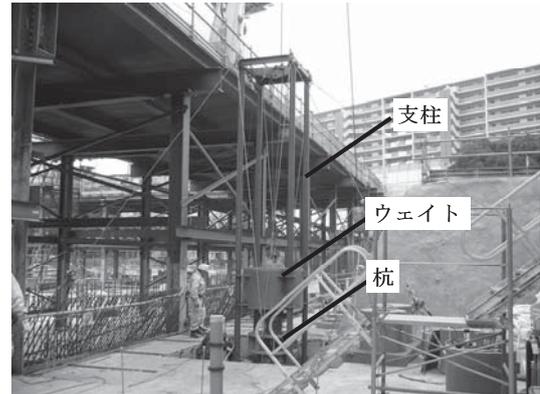


Photo. 1 急速載荷試験の状況

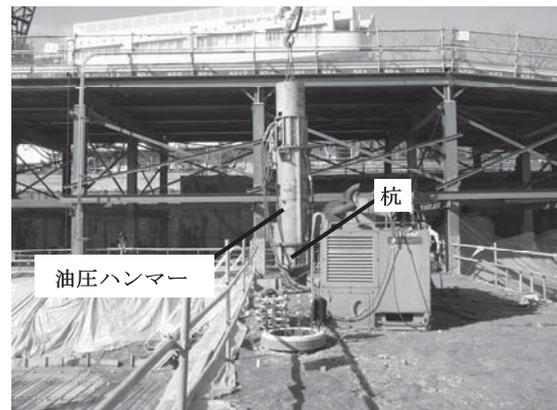


Photo. 2 衝撃載荷試験の状況

ルトを中心とした粘性土地盤に支持している。

3. 2 試験方法

杭の動的載荷試験には本施工の杭を用いることとしたので、試験荷重は杭体強度（短期許容応力度）以下となるように設定した。

1)急速載荷試験の方法

重錘（5.0ton）を所定の高さから自由落下させ、杭頭部を打撃することにより載荷する。杭頭部の荷重、変位、加速度の測定を行い、杭頭での荷重変位を算定する。このとき、地盤工学会基準³⁾で急速載荷試験として求められている載荷継続時間（約 0.1sec）を確保するために試験杭頭部にクッション材として発砲ウレタンを用いた。Fig.7 に試験概要を、Photo.1 に急速載荷試験の試験状況を示す。

計測値による杭頭での荷重変位関係は動的な値であり、静的な荷重変位関係は、除荷点法³⁾を用いて算出する。載荷荷重は杭の長期支持力程度に設定した。

2) 衝撃載荷試験の方法

油圧ハンマー（ラム質量 4.0ton）の打撃によって杭に力を作用させる。載荷時間は、地盤工学会基準³⁾では、0.01~0.02sec とされている。

杭の静的な荷重変位関係は、杭頭における加速度とひずみを計測し、その値から波形マッチング解析法³⁾により、杭の地盤との周面摩擦抵抗と杭先端の抵抗力を解析的に求め、荷重伝達法³⁾により算出した。

載荷荷重は、長期杭頭荷重に施工時荷重を加算した 1224kN とした。

Photo.2 に衝撃載荷試験の試験状況を示す。

3. 3 試験結果

1) 各試験の測定値

Fig.8~10 に急速載荷試験を実施した P1~P3 について、左側にロードセルで測定した杭頭荷重の時刻歴と、右側に杭頭変位の時刻歴を示す。Fig.11,12 に衝撃載荷試験を実施した P4 と P5 について、左側に杭頭加速度の時刻歴、右側に杭頭ひずみの時刻歴を示す。これらは、急速載荷試験および衝撃載荷試験で直接計測した測定値であり、以降の荷重変位関係を算定するための基となる。

2) 急速載荷試験の荷重変位関係

Fig.13~15 に急速載荷試験における各杭の荷重 P-変位 S 関係を示す。図中には、実測値による杭頭荷重と変位の関係と、実測値から杭体の慣性力（杭体の質量×杭体の加速度）を除いた地盤の抵抗力（静的抵抗成分+動的抵抗成分）と変位の関係を補正值として示す。さらに、図中には静的な荷重変位関係と等価と考えられる除荷点の荷重と変位の関係を示す。

静的な荷重と変位の関係は、どの杭についても、荷重の増加とともに変位は増加し、荷重が大きくなるほど変位の増分が大きくなっている。摩擦杭 P1 と P2 は、杭長や地盤の条件等が変わらないためその性状はほとんど同じである。支持杭 P3 は摩擦杭 P1 と P2 に比べて同一荷重に対する変位が小さく、支持杭としての特性が見られる。

なお、急速載荷試験を実施した P1~P3 は、後述する Fig.17 の両対数軸での荷重変位関係において、急折点は見られず、載荷試験の最大荷重である長期支持力の 1.2~1.3 倍程度では降伏していない。

3) 衝撃載荷試験の荷重変位関係

Fig.16 に摩擦杭 P4 と P5 の衝撃載荷試験の結果から波形マッチング法により同定した杭の周面摩擦応力度分布を示す。図中には 2.3 の沈下解析で用いた極限周面摩擦応力度を併記した。

Fig.17 に衝撃載荷試験を含む各杭の LogP-LogS 曲線を示す。衝撃載荷試験の結果である P4 と P5 は、Fig.16 で示した周面摩擦応力度に対応するパラメータから、荷重

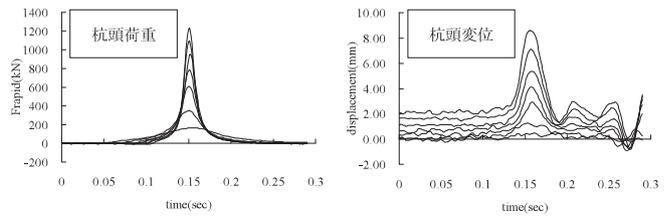


Fig. 8 P1の試験データ

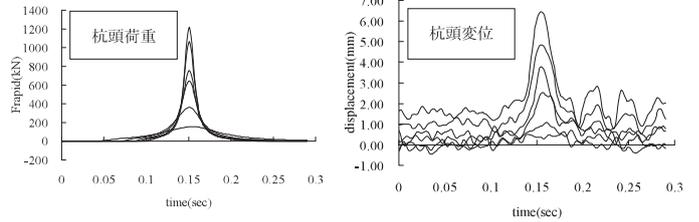


Fig. 9 P2の試験データ

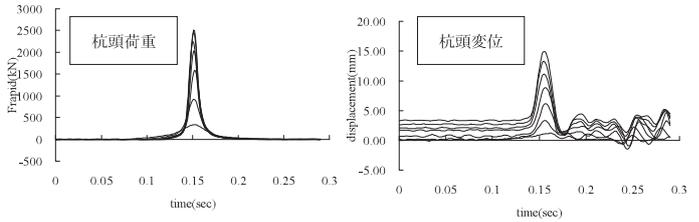


Fig. 10 P3の試験データ

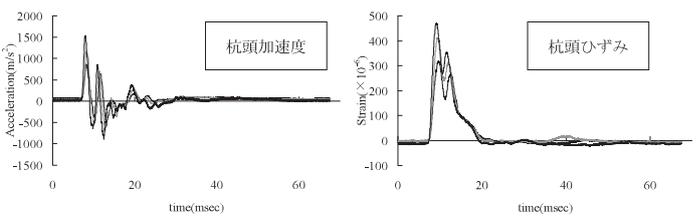


Fig. 11 P4の試験データ

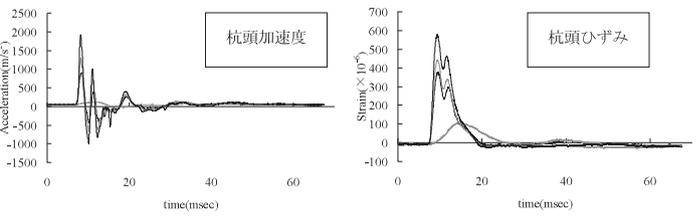


Fig. 12 P5の試験データ

伝達法により計算したものである。

摩擦杭 P4 と P5 の周面摩擦応力度は、地盤条件がほぼ同じであるため、Fig.16 のように値や分布形状に大きな差はなかった。ここでは示していないが、杭周面の摩擦抵抗力と杭先端の抵抗力は、杭周面の摩擦抵抗が支配的な結果となり、杭先端まで荷重はほとんど到達していなかった。

摩擦杭 P4 と P5 の荷重変位関係は、Fig.17 に示すように、杭頭深度が多少異なるものの杭や地盤条件が同じであるため、Fig.16 と同様に大きな差はない。摩擦杭 P4 と P5 は、試験の最大荷重が長期支持力の 2.8 あるいは 3.5 倍程度であるが、荷重変位関係において急折点は見られず、降伏していない。

急速と衝撃載荷試験の荷重変位関係について比較すると、同一荷重に対する変位は衝撃載荷試験の方が急速載

荷試験よりも小さい結果となっている。

4)設計値との比較

Table4 に沈下剛性と支持力に関する設計値と実測値について一覧を示す。表中の設計値の沈下剛性 K_v は、ラフト部分を除いた杭単体でのばね値を表している。計測値の沈下剛性 K_v は、試験の荷重変位関係における長期支持力までの割線剛性である。

許容支持力 $R'a$ は仮設時の許容支持力であり次のように決めた。摩擦杭 P4 と P5 とともに、載荷試験の最大荷重に対して荷重変位関係が降伏していないことから、試験における最大荷重を短期相当の支持力とみなし、その 1/2

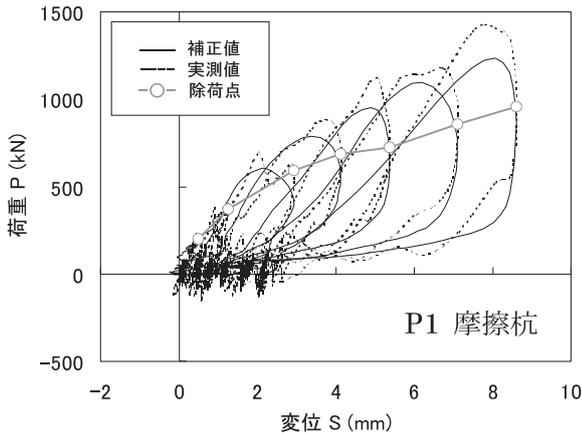


Fig. 13 P1の荷重P-変位S関係 (急速載荷試験)

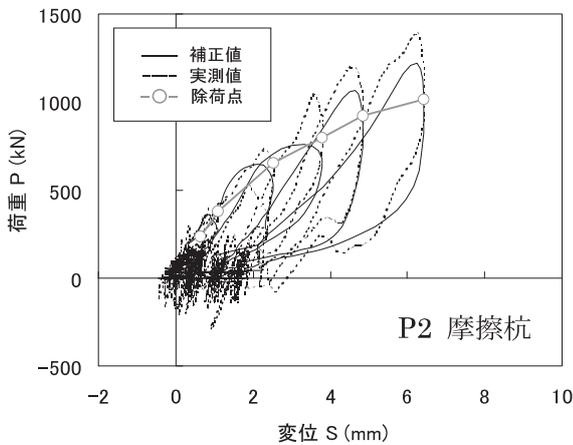


Fig. 14 P2の荷重P-変位S関係 (急速載荷試験)

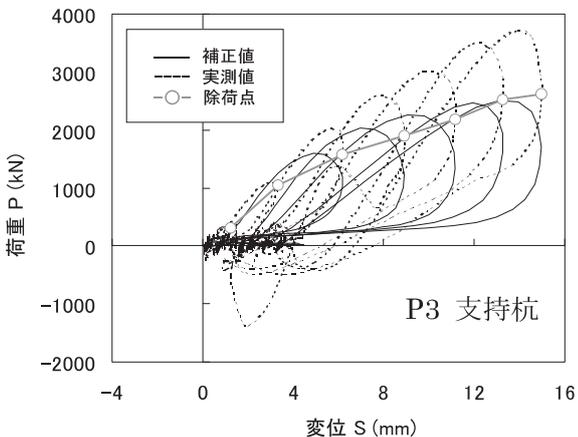


Fig. 15 P3の荷重P-変位S関係 (急速載荷試験)

の値を長期支持力とし、長期と短期の平均値を仮設時の許容支持力として位置づけた。

摩擦杭 P1 と摩擦杭 P2 の沈下剛性 K_v は、ともに実測値が設計値の 1.1 倍を超えた値を示し、沈下解析で得られた沈下剛性に比べ、実測値は少なくとも一割程度の余裕を持った値であった。

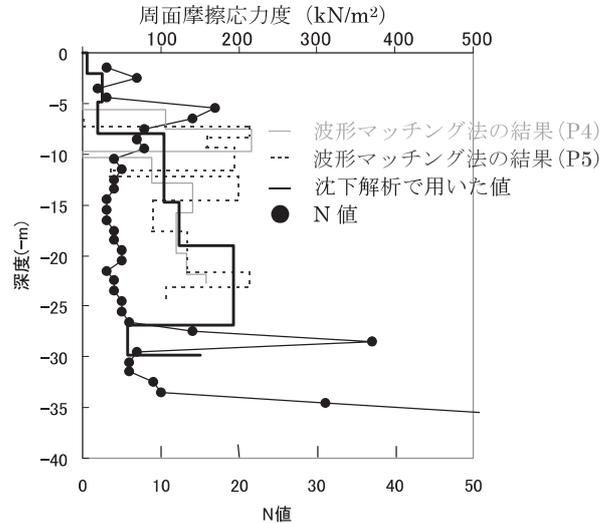


Fig. 16 波形マッチング法により決定した各層の周面摩擦応力度 (衝撃載荷試験)

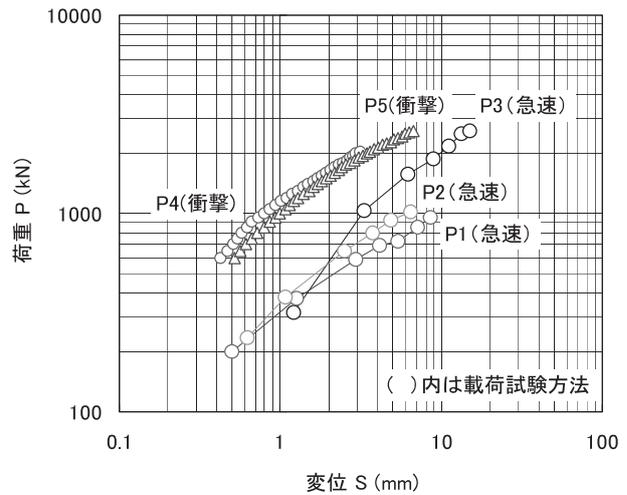


Fig. 17 各杭の logP-logS 関係

Table 4 試験杭の特性

杭符号	P1 (摩擦杭)	P2 (摩擦杭)	P3 (支持杭)	P4 (摩擦杭)	P5 (摩擦杭)
載荷方法	急速	急速	急速	衝撃	衝撃
試験最大荷重 (kN)	957	1014	2610	2100	2620
設計値	K_v (kN/cm)	1113	-	-	-
	R' (kN)	-	-	-	1224
実測値	K_v (kN/cm)	1310	1950	10000	11350
	$R'a$ (kN)	-	-	-	1575

K_v :長期支持力までの沈下剛性 R' :仮設荷重 $R'a$:仮設時の許容支持力

また、摩擦杭 P4 と P5 の仮設荷重に対する支持力は、仮設時の許容支持力 $R'a$ が仮設荷重 R' の 1.2 倍を上回っており、施工時のクレーン荷重等の仮設荷重に対しては、摩擦杭の支持力が設計値に対して二割程度の余裕を持っていることが確認できた。

ここで、沈下剛性について、支持形式の違いに着目して比較すると、摩擦杭 P1 と P2 の平均値が 1755kN/cm に対して、支持杭 P3 が 1950kN/cm であり、摩擦杭よりも支持杭の方がやや大きい値となった。また、摩擦杭について、急速載荷試験の P1 と P2 および衝撃載荷試験の P4 と P5 で比較すると、急速載荷試験が平均値で 1760kN/cm であるのに対して、衝撃載荷試験は約 6 倍の 10680kN/cm で非常に大きな値であった。

4. まとめ

支持杭とパイルド・ラフト基礎を採用した異種基礎建物における基礎の設計値と杭の動的載荷試験の結果を報告した。

杭の動的載荷試験は、静的載荷試験に比べ、試験のばらつきは大きいとされているが、急速載荷試験による摩擦杭の杭頭での沈下剛性は、設計に用いた値に比べ、少なくとも一割程度の余裕があることを確認した。また、衝撃載荷試験による仮設荷重に対する支持力は設計に対して二割程度の余裕を確認できた。

今後は建物全体の沈下状況と基礎スラブの応力状況等も合わせた検討を行い、別途報告する予定である。

謝辞

試験のデータ整理に際してご協力いただきましたシステム計測の藤澤秀樹、ジャパンパイルの山本辰徳、各氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤木：直接基礎と摩擦杭で支持されたパイルドラフト基礎の解析手法，熊谷組技術研究報告，No59，2000.12
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.10
- 3) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，平成14年5月

Dynamic loading tests on piles in piled raft foundation

Atsushi OGAWA, Toshihiro MORI, Norio WATANABE, Hiroshi MASHIKO and Katsuhiko SUGI

Abstract

We designed foundations of the building that consisted of high-rise part and low-rise part as composite foundations. We adopted pile foundations for high-rise part and piled raft foundations for low-rise part. It is important to avoid differential settlement, and the performance of supporting the building by piles of piled raft foundation is required.

In this report, we verify the performance of the foundation from the viewpoint of performance based design through dynamic loading tests on piles, using pile head stiffness as a representative of the performance of the foundation.

Keywords : Piled raft foundation, Composite foundation, Dynamic load test
