

複合基礎建物の施工時沈下挙動

－実測結果と解析結果の比較－

Subsiding Behavior of a Composite-Foundation Building During Construction

- Comparison Between Measurement and Analysis Results -

舟木秀尊* 武田彰文** 茂木正史*

要 旨

低層棟と高層棟とが一体となった高層建物に、直接基礎とパイルド・ラフト基礎を併用した複合基礎方式を適用し、工事開始から完成までの計測から、基礎の沈下や杭とラフトの荷重分担など、施工時における基礎の沈下挙動を把握した。さらに、解析で予測した沈下挙動と実測結果を比較し、解析方法が妥当であることを検証した。これらの成果により複合基礎設計法の信頼性を高めることができた。

キーワード：複合基礎、不同沈下、パイルド・ラフト

1. まえがき

近年の基礎方式では、直接基礎や杭基礎を単独に用いるのではなく、直接基礎と杭基礎を併用するパイルド・ラフト基礎や、支持する上部構造に合わせて直接基礎、杭基礎あるいはパイルド・ラフト基礎を一棟の建物で組み合わせる複合基礎が採用されるようになった。このような基礎方式の採用により、杭の省略、杭の長さを短くするなど合理的な基礎設計が可能になった。しかしながら、異なる基礎を併用する影響として、基礎の不同沈下や傾斜などの発生が懸念されるので、構造安全性を評価するために建物荷重による地盤変形を予測する方法等が必要となっている¹⁾。

そこで、パイルド・ラフト基礎などの併用基礎の合理的な設計を速やかにできる併用基礎設計支援システム(HYFEST²⁾)を開発し、実建物で施工時の沈下挙動の実測値と予測値との比較を行い、併用基礎設計支援システムの妥当性を検証した²⁾。

本研究では、さらに、異なる地盤においても併用基礎設計支援システムが妥当であることを検証するために、洪積砂層と粘土層の互層地盤において、直接基礎とパイルド・ラフト基礎で支持させた複合基礎建物について、工事開始から完成までの基礎の不同沈下、杭とラフトの荷重分担などの施工時沈下挙動を実測した。実測値と併用基礎設計支援システムによる予測値の比較から、複合基礎の設計方法の妥当性を確認したので報告する。

2. 建物と地盤の概要

対象建物の平面概要を図-1に、断面概要を図-2に示す。建物は地下2階、地上24階の鉄筋コンクリート構造であり、1、2階は飲食・物販、3階以上は住宅に供せられる。建物の平面は東西33m×南北18mの高層棟の西側に西側低層棟、北側に北側低層棟が連なっている。各棟の地階部の境界には漏水防止のためにエキスパンションジョイントを設けていない。

建設地点の地層構成を図-3に示す。合わせて杭の測定点も同図に示している。GL -27mまでが上部洪積層で、その下に大阪層群が連なっている。下部大阪層群と上部洪積層ともに砂層、粘土層が交互に重なる構成となっている。

基礎の計画は、図-1、図-2に示すように西側低層棟を直接基礎で支持し、中央高層棟および北側低層棟は

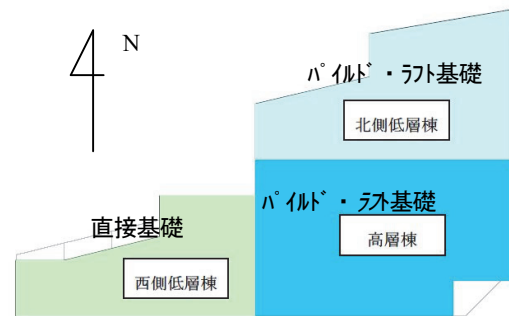


図-1 平面概要

*技術研究所 **西日本支社建築設計部

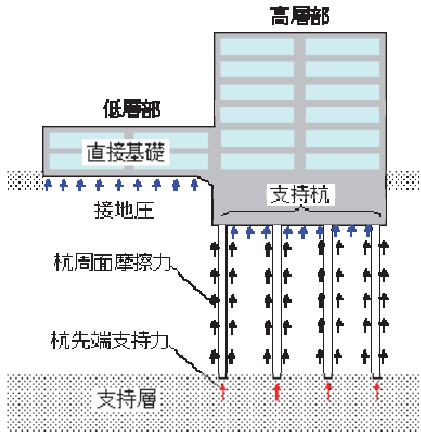


図-2 断面概要

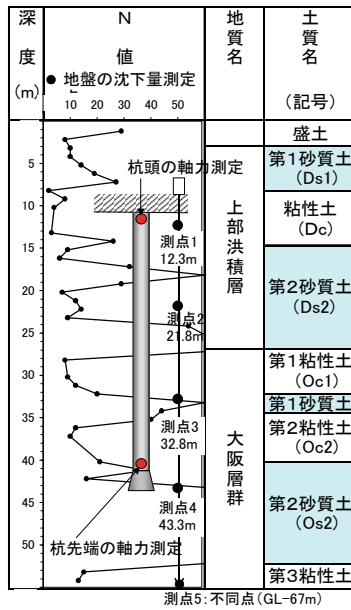


図-3 地層構成と杭測定点

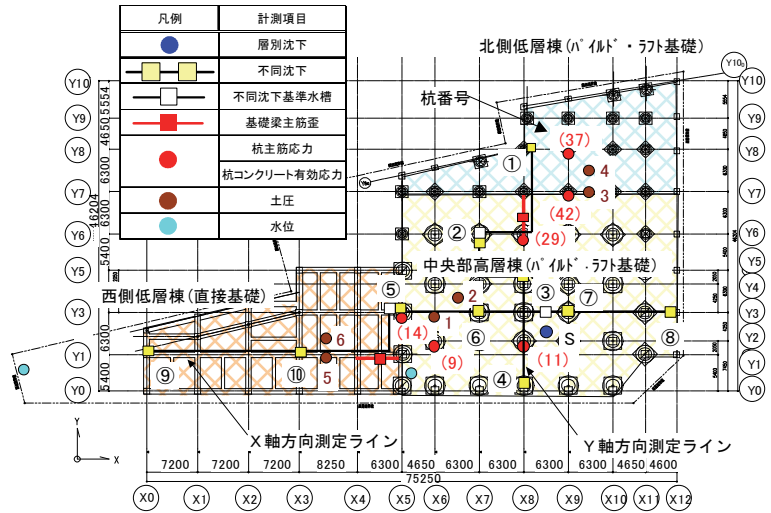


図-5 計測器配置図

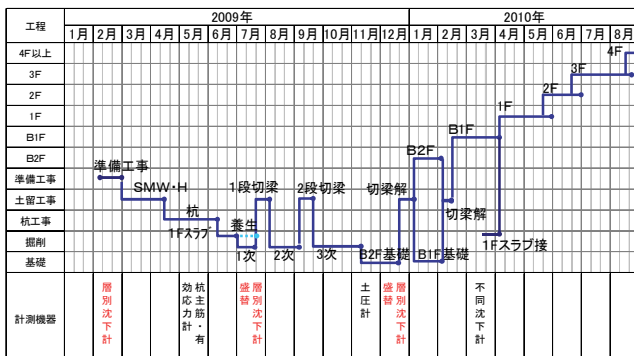
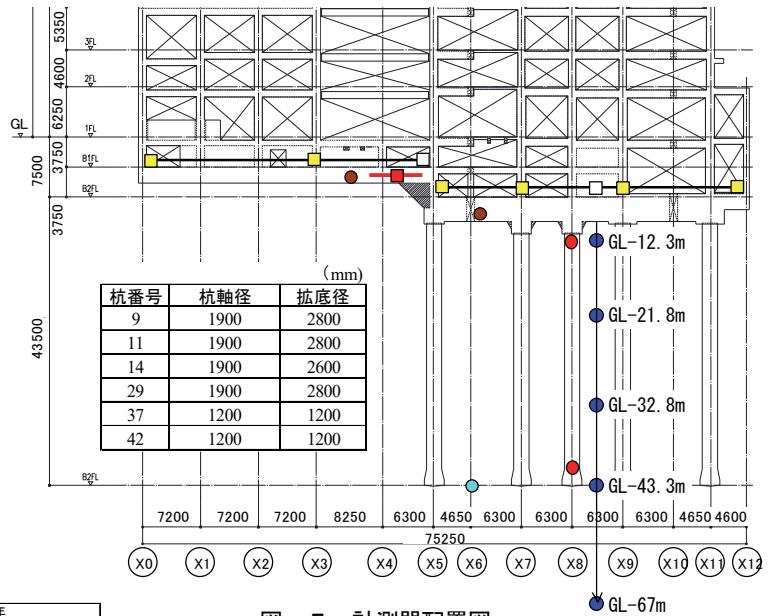


図-4 建設工程と計測機器設置時期

GL-40.9m 以深の砂層を支持層とする杭基礎で支持する異種基礎方式とした。なお、杭基礎は建物重量の一部を基礎スラブ直下の地盤に負担させるパイルド・ラフト基礎で設計している。直接基礎は第1砂質土を支持層とした。建設工程と計測機器設置時期を図-4に示す。

3. 沈下挙動の観測

3.1 計測概要

a. 計測項目

計測は以下の項目について行った。

- i. 高層棟直下の地盤の層別沈下量
- ii. 基礎耐圧盤の土圧、建物内部・外部の地下水圧
- iii. 杭主筋の歪、杭体コンクリートの有効応力
- iv. 杭頭、杭先端の軸力
- v. 杭とラフトの鉛直荷重分担
- vi. 基礎の沈下量 (不同沈下量と傾斜角)

その他、コンクリート強度、基礎梁主筋の歪、杭体の歪、基礎と基礎の相対沈下量を測定した。

b. 計測機の配置と各種値の算定方法

計測機の配置を図-5に示す。測定対象の杭を括弧付

き番号で示している。層別沈下計を高層棟直下に 5 点配置し、洪積粘性土、洪積砂質土から構成される五層地盤について各層の沈下量を測定した。不同沈下は X 軸、Y 軸各方向の基礎の相対沈下量を連通管式沈下計で測定して求めた。また、鉄筋計およびコンクリート有効応力計により杭頭軸力、杭先端軸力を算出し、杭が負担する鉛直荷重、周面地盤の摩擦力、杭先端の支持力を求めた。さらに、高層棟、西側低層部および北側低層部の基礎梁直下と耐圧盤スラブ中央部の土圧を測定し、ラフトが負担する鉛直荷重算出の参考にした。

c. 工事中仮設杭

工期を短縮するために高層棟 1 階 PCa スラブを構台として利用した。構台は、本設杭の周りに打設した仮設杭 (H 型鋼) により支持されているが、その支持荷重が地盤の沈下量に影響した。仮設杭の設置状況を図-6 に示す。

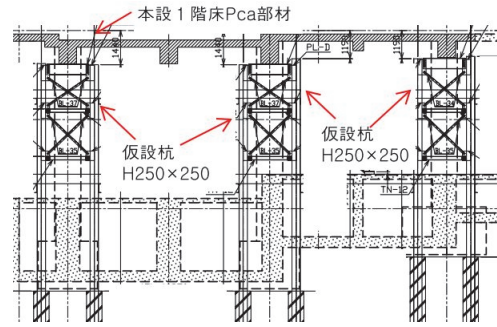


図-6 仮設杭設置状況

3.2 計測結果

a. 基礎直下の地盤の層別沈下量

建設工事の進捗に伴う施工荷重の増加と各測定点の沈下量の推移を図-7 に示す。凡例中に高層棟の掘削深さも併せて示す。掘削工事中に、スラブや重機の重量により床レベル (基礎底面) は 9mm 沈下した。構台の沈下は仮設杭の先端深さ GL-22m にある支持層と仮設杭の周面摩擦力によって抑えられているものと考えられる。その後、高層棟の床付け深さ GL-10.8m までの掘削により、土の重量が開放されたため、リバウンドにより基礎底面の沈下量は初期レベルに回復した。構台として用いた 1 階 PCa スラブと地下階の柱は、建物地下部の完成後に一体化させた。その後、下階から順次施工が進んでも高層棟の 6 階を施工するまで沈下は殆んど進行せず、6 階の施工以後、上層階の施工に伴って徐々に高層棟下部の沈下が進行し、躯体完成時の沈下量は 10mm 程度であった。

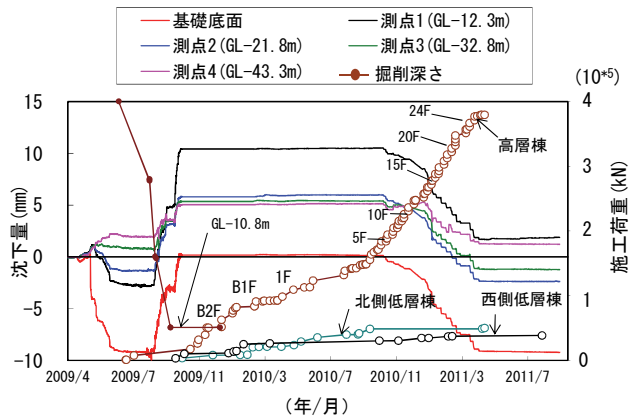


図-7 施工荷重の増加と各測定点の沈下量の推移

b. 測定点間の層間変位量

各測定点間の変位量の推移を図-8 に示す。図-7 に示した時期と合致するので、掘削に伴うリバウンド大部分は測定点 1 と測定点 2 の区間 (GL-12.3m~21.8m) の伸長に対応して発生したと想定できる。また、上層階の施工に伴う沈下は、主に、場所打ちコンクリート杭先端の測定点 4 (GL-43.3m) から不同点 (GL-67m) までの地層の圧縮変位が支配的であった。これは、杭先端部の硬質層より以深にある軟弱層の影響と考えられる。

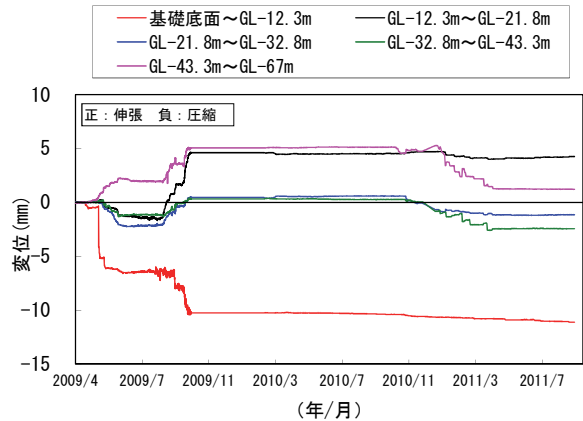


図-8 各測定点間の変位量の推移

c. 土圧の変化

図-9 に土圧の変化を示す。中央部高層棟 (1、2: 図-5 中の茶の測定点番号)、北側低層棟 (3、4)、西側低層棟 (5、6) の順に高い。

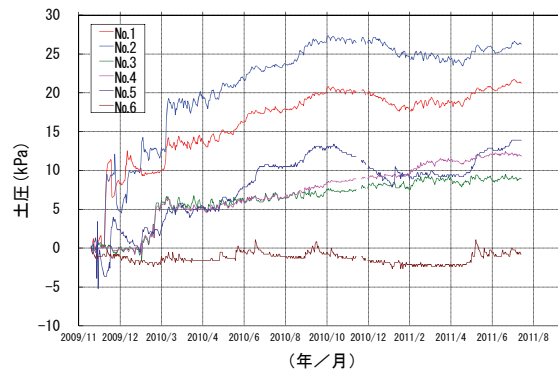


図-9 土圧の変化

d. 基礎の不同沈下

低層棟を含めた X 軸、Y 軸方向の不同沈下量 (沈下量分布) の変化を図-10 に示す。図中の数字は、図-4

に示した不同沈下測定点、Sは断面図中の青の層別沈下測定点を示す。2F 施工時は上部構築階数が等しいので、西側低層棟と中央高層棟で沈下量の差は少ない。その後、高層棟のみの上階の施工が進むにしたがって、高層棟の沈下量が低層棟を上回る。施工躯体完成時の最大変形角はX軸方向で $0.32 \times 10^{-3} \text{rad}(1/3100)$ 、Y軸方向で $0.45 \times 10^{-3} \text{rad}(1/2200)$ 、建物全体の最大傾斜角は $0.145 \times 10^{-3} \text{rad}(1/6900)$ であり、設計で設定したクライテリア 1/1000 を下回った。

e. 杭頭、杭先端の軸力

杭軸力は、下式(1)に示すように主筋とコンクリート負担分の和により算定した。杭頭、杭先端の軸力の推移を図-11、図-12 に示す。高層部の沈下が始まった2010年8月以降、高層部の杭(杭番号9、11、14、29)の杭頭軸力(鉛直方向応力)は顕著に増加した。ただし、杭先端軸力についてはNo.11を除いて、顕著な増加は見られなかった。躯体完成時における杭頭、杭先端の軸力を図-13 に示す。杭先端の軸力は杭頭より小さい。これは、杭の周面摩擦力により杭頭から伝達される軸力が杭先端では小さくなるからである。

$$N = \sigma_s \cdot A_s + \sigma_c \cdot A_c \quad (1)$$

ここに、N：杭軸力(kN)

σ_s ：鉄筋応力(kN/cm²)

A_s ：鉄筋の断面積 (cm²)

σ_c ：コンクリートの有効応力(kN/cm²)

A_c ：コンクリートの断面積 (cm²)

f. 杭とラフトの鉛直荷重分担

建物竣工時における各杭の上載荷重、杭荷重およびラフトの荷重分担を表-1に、杭とラフトの荷重分担率を図-14に示す。ラフト荷重は、杭上部のコンクリート等の躯体重量から求めた上載荷重から杭荷重を減じたものである。基礎梁直下とスラブ直下で観測された土圧値より求めたラフト相当荷重をラフト荷重と比較した結果、最大12%の差があった。杭とラフトの鉛直荷重負担率は中央部高層棟(No.9~No.29杭)は44~78%を杭が負担し、56~22%をラフトが負担している。北側低層棟(No.37、No.42杭)は60~66%を杭が負担し、40~34%をラフトが負担している。このように、杭とラフトの鉛直荷重分担を明らかにすることができた。

表-1 上載荷重、杭荷重およびラフトの荷重分担

位置	杭番号	上載荷重 (kN)	杭荷重 (kN)	ラフト荷重 (kN)
中央部高層棟	No.9	15945	7045	8900
	No.11	15033	11576	3457
	No.14	10545	8174	2371
	No.29	12965	7250	5715
北側低層棟	No.37	2715	1632	1083
	No.42	3087	2023	1064

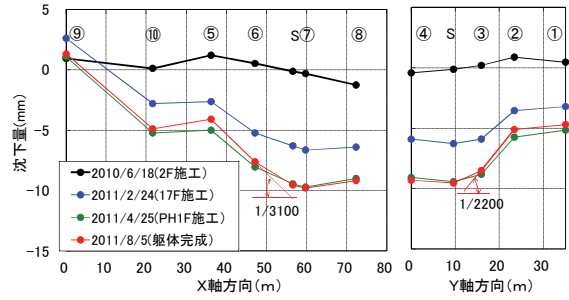


図-10 基礎の沈下量分布の変化

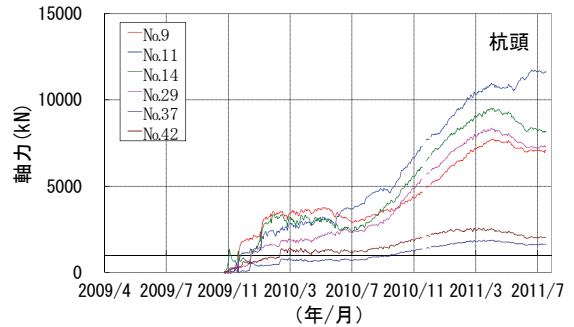


図-11 杭頭軸力の推移

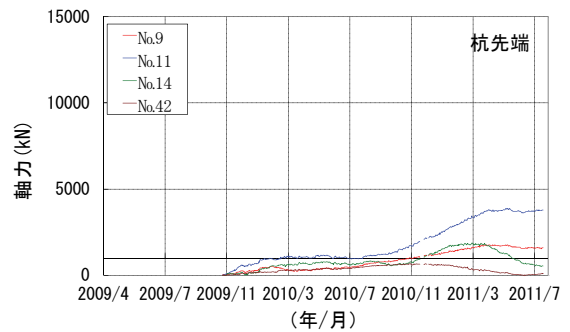


図-12 杭先端軸力の推移

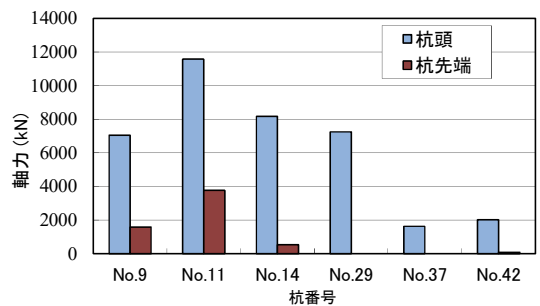


図-13 杭頭、杭先端軸力(躯体完成時)

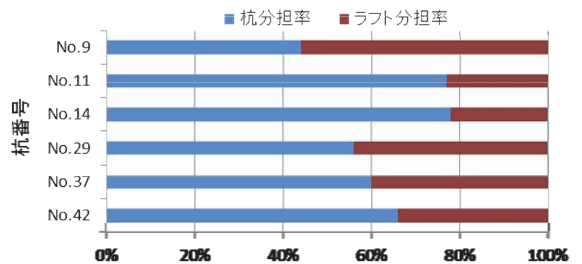


図-14 杭とラフトの鉛直荷重分担率

4. 解析結果および実測結果との比較

4.1 解析概要

解析には、併用基礎設計支援システム(HYFEST)²⁾を用いた。この解析システムは、構造物系(柱、梁、基礎 etc.)を有限要素法で評価し、杭・ラフト・地盤間の相互作用をばねで評価するハイブリッド解析法を用いている。

a. 解析モデル

解析モデルを図-15に示す。基礎梁、杭は梁要素に、ラフトは板要素にモデル化した。ラフト面下の地盤は支持ばねとしてモデル化し、杭周面はバイリニア型ばね、杭先端はトリリニア型ばねでモデル化した²⁾。

b. 地盤および各種解析条件

ボーリングデータの土質構成から決定した初期地盤定数を表-2に示す。地盤と構造物間の相互作用ばね、および、ラフト支持ばねは地表面に鉛直荷重が作用した場合のSteinbrennerの近似解³⁾を多層地盤系に適用し、非線形解析により求めた。この際、国土交通省告示に示された歪依存特性を考慮した⁴⁾。地盤の荷重と沈下量の関係を、図-16に示すように地盤弾性成分と非線形成分に分離し、地盤弾性成分を地盤と構造物間の相互作用ばね、非線形成分をラフト支持ばねに集約してモデル化した²⁾。

上部構造物の荷重が建物位置で異なるため、基礎底面を3区画にゾーン分けして単位面積当たりの荷重を計算して、各ラフト面ごとにラフト支持ばねを求めた²⁾。

杭先端、周面摩擦ばねは建築基礎構造設計指針⁵⁾に準じて設定した。杭の周面摩擦ばねは極限周面摩擦力(表-2参照)を仮定し、建築構造設計指針⁵⁾を参考に降伏変位を砂質土:20mm、粘性土:10mmのバイリニア型とした。解析に用いた高層棟の拡底杭の沈下特性を図-17に示す

4.2 解析結果と測定結果の比較

a. 不同沈下

竣工時の荷重による沈下量の実測値と解析値を比較して図-18に示す。実測による躯体完成時の基礎の最大沈下量は9.80mmであり、解析値の13.51mmよりも小さかった。この原因のひとつとして、解析では施工時荷重のみを考慮し、掘削による排土重量を考慮していないことが考えられる。また、基礎全体の不同沈下として、X軸方向の建物西側端部と最も沈下が大きな高層部との差は実測では11mm程度で、解析では9.5mmであり、沈下量の分布傾向は良く一致している。なお、最大変形角は実測が1/3000、解析が1/2600であった。

b. 杭の軸力

杭頭と杭先端軸力の実測値と解析値との比較を図-19、図-20に示す。実測値と解析値は概ね良い対応が見られた。なお、杭先端軸力は、実測結果からも相互作用に

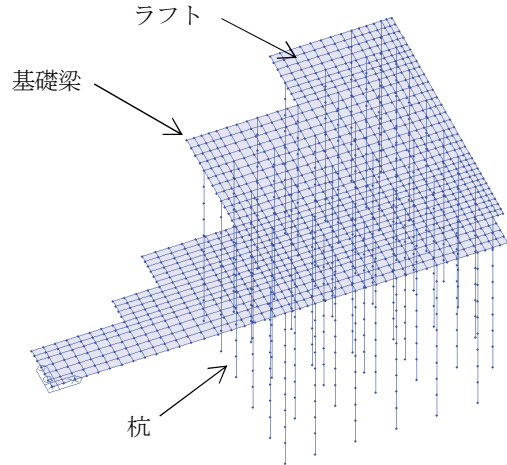


図-15 解析モデル

表-2 地盤条件

深さ (m)	土質	N値	密度 (kN/m ³)	剛性率G (kN/m ²)	ヤング率E (kN/m ²)	* アソビ比	極限周面摩擦力*1 (kN/m ²)
3	粘土	4	18	75600	225000	0.490	300
6.4	シルト	7.5	18	152000	451000	0.482	300
8.85	砂	39.5	18	211000	624000	0.479	391
12.7	粘土	10.5	18	191000	565000	0.479	300
16.8	砂	50	18	202000	598000	0.480	495
20.4	粘土	8	18	158000	468000	0.482	300
26.2	砂	33	18	242000	713000	0.474	327
32.25	粘土	21	18	172000	509000	0.479	300
41.6	砂	100	18	335000	986000	0.472	495

*1: 基礎構造設計指針による値[砂質土3.3N、粘性土Cu(max:100)]の3倍とした

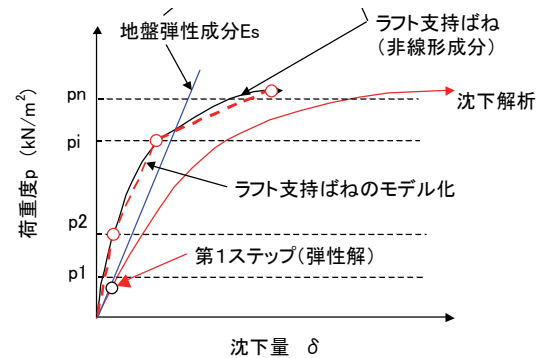


図-16 地盤の弾性成分と非線形成分の分離

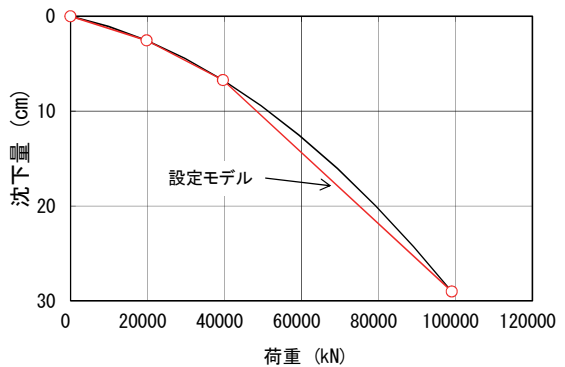


図-17 杭の沈下特性モデル

より杭先端の周辺地盤が沈下するため、沈下量に応じた抵抗力が発揮されていないと考えられる。

c. 杭とラフトの鉛直荷重分担

各ラフト面について求めた鉛直荷重に関する杭とラフトの分担率を表-3に示す。杭の分担率は、杭頭軸力と節点荷重の比率であり、ラフト分担率は全体から杭の分担率を差し引いた値とした。高層棟のラフトの鉛直荷重分担率は実測値が0.22~0.56で、解析値は0.28であった。

5. まとめ

高層部を杭基礎、低層部を直接基礎とする複合基礎を適用した建物の施工過程の沈下挙動を観測し、パイルド・ラフト基礎の安全性を確認した。さらに、躯体完成時に実測値と解析値との比較を行い、提案した解析方法の妥当性を確認し、パイルド・ラフト基礎構法の普及に繋げることができる成果が得られた。主な結果を以下に示す。

- i. 地盤が仮設工事荷重によって沈下した後、掘削によって土による荷重が除去されるとリバウンドする状況を把握した
- ii. パイルドラフト基礎を適用した中央高層棟において、層としての収縮変位が最も大きかったのは杭先端より下部の層であり、杭先端部の硬質層より以深に軟弱層を含む場合のモデル化が必要である
- iii. 基礎の不同沈下による基礎の最大変形角は1/2200であり、設計で安全基準として設定したクライテリア1/1000を下回り安全が確認された
- iv. 予測沈下量は、実測値に比べて大きな値となったが、各基礎間の不同沈下量については予測結果と実測結果とは良く対応している
- v. 杭頭軸力の予測結果と実測結果とは概ね良い対応が得られた
- vi. 高層棟における杭とラフトの鉛直荷重分担率の実測値と解析値は概ね良い対応が見られた

6. あとがき

実建物を対象とした、併用基礎設計システムの妥当性を実証し、その信頼性を高めることができた。しかし、種々の地盤に対応するためには、実測に基づいたデータ整備を継続し、さらに高精度の設計・施工支援システムとして改良していく必要があり、以下の課題が挙げられる。

- i. 掘削によるリバウンドの影響を評価できる機能の追加
- ii. 杭先端部の硬質層より以深に軟弱層がある場合の評価方法の改良

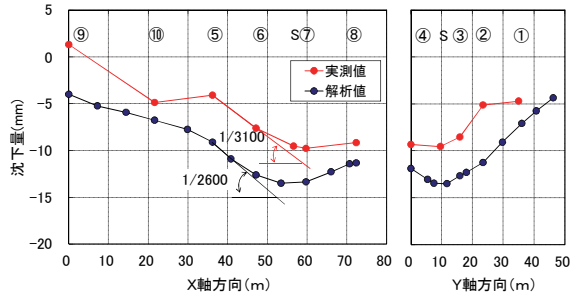


図-18 沈下量分布実測値と解析値の比較

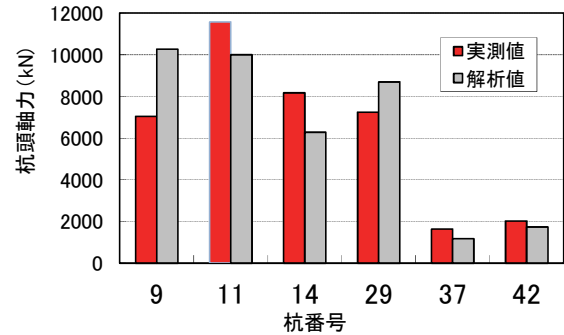


図-19 杭頭軸力の実績値と解析値の比較

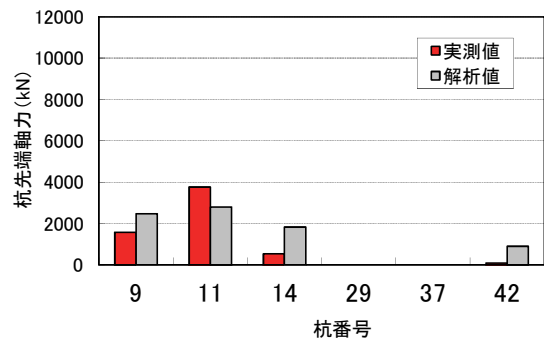


図-20 杭先端軸力の実測値と解析値の比較

表-3 鉛直荷重の分担

分担率位置	実測値		解析値	
	杭	ラフト	杭	ラフト
西側低層棟	-	1.00	-	1.00
北側低層棟	0.60~0.66	0.34~0.40	0.47	0.53
中央部高層棟	0.44~0.78	0.22~0.56	0.72	0.28

【参考文献】

- 1) 金田他、「既存地中構造物に近接する異種基礎の検討と沈下計測 その1 建物概要と沈下予測」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2010.9
- 2) 秦 雅史、舟木秀尊、武田彰文、宮澤憲一、「併用基礎設計支援システムの開発」、奥村組技術研究年報、No.36、pp.47-52、2010.7
- 3) Terzaghi K、「Theoretical Soil Mechanics」、Johnwiley & Sons、1943
- 4) 国土交通省旧告示 1467 号、「建築基準法施行令第136条の2の9第一号ロ等の国土交通大臣の指定する構造方法を定める件」、平成12年5月31日
- 5) 日本建築学会、「建築基礎構造設計指針」、2001.10