

併用基礎設計支援システムの開発

Development of a Hybrid Foundation Design Support System

秦 雅史* 舟木秀尊* 武田彰文** 宮澤憲一***

要旨

複数の基礎形式（直接基礎と杭基礎）を建物の平面位置でそれぞれ別々に用いた併用基礎（異種基礎やパイル・ラフト基礎など）で支持された建物が、複雑・軟弱な地盤条件下においても建設されるようになってきた。このような基礎では、建物荷重による地盤変形を考慮した検討が不可欠であり、建物の沈下を高精度に予測することにより、その一部を省略したり、杭の長さを短くできるなど合理的な基礎設計を行うことができる。そこで、本研究では併用基礎の設計を速やかに行うための設計支援システム（HYFEST）を開発した。また、沖積砂地盤で杭の先端がN値30程度の中間砂層で支持された高層免震建物の施工時沈下挙動を観測した。さらに、沈下観測データとシステムによる予測値との比較を行い、システムの妥当性を検証し、実建物へ適用できることを確認した。

キーワード：併用基礎、異種基礎、パイル・ラフト基礎、沈下観測、相互作用

1. まえがき

近年、直接基礎や杭基礎など単独の基礎形式でなく、併用基礎を適用した建物が増えてきた。併用基礎には図-1に示すような直接基礎（ラフト）と杭（パイル）基礎を平面的に分けて用いた異種基礎や、両者を複合して用いるパイル・ラフト基礎などがある。

このような基礎では、建物荷重による地盤変形を考慮した検討が不可欠であり、建物の沈下を高精度に予測することにより、その一部を省略したり、杭の長さを短くできるなど、合理的な基礎設計を行うことができる。

従来は、地盤を含めた3次元FEM解析で検討していたが、実務設計には不向きであった。そこで、著者らは実用的な沈下予測技術としてハイブリッド解析法を用いたソフトを開発し、関東ローム層において原位置地盤での1/5模型試験体による鉛直載荷試験結果¹⁾²⁾との比較により検証を行ってきた。しかし、解析処理に手間を要し、メモリー容量の制限で大規模モデルの解析ができないなど、実務面での問題が明らかになったため、併用基礎の設計を速やかに行うための設計支援システム

（HYFEST）を開発した。また、沖積砂地盤で、杭の先端がN値30程度の中間砂層に位置する摩擦杭基礎で支持された高層免震建物の施工時沈下挙動を観測し、実測値とシステムによる予測値との比較を行い、システムの適用性を検証した。

2. 設計支援システムについて

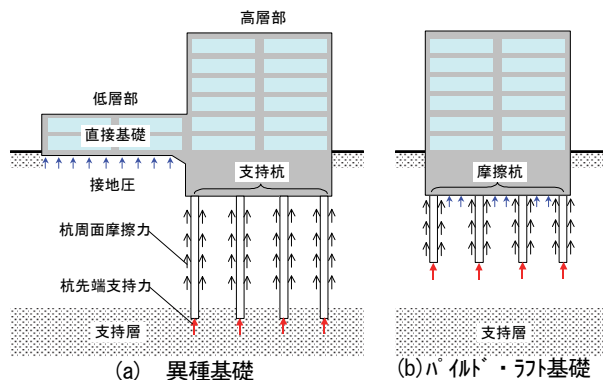


図-1 併用基礎形式

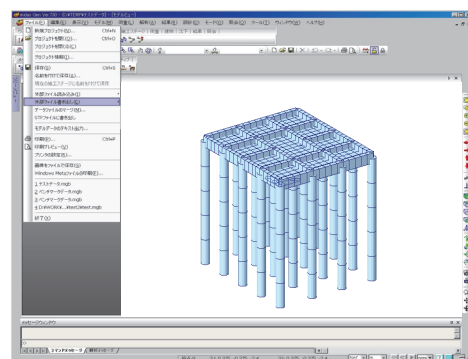


図-2 構造モデル作成 (Midas)

本システムは、構造物系を有限要素法、杭・ラフト・地盤間の相互作用を弾性理論に基づいて直接評価するハイブリッド解析法を用いている。構造物のデータ作成および解析結果の図化処理には、図-2に示す汎用構造解析ソフトMidasを用いている。本システムは構造

*技術研究所 **西日本支社建築設計部 ***東日本支社建築設計部

解析研究所の保有する解析ソルバーに相互作用を組み込んだものであり、構造物や地盤定数などのデータ入力を実設計者が容易に行うための画面入力機能、杭先端支持ばねや周面摩擦ばねなどの自動配置機能などにより操作性を向上させた。

2.1 地盤ばねの算定方法

地盤ばねは、鉛直・水平方向について構造物と地盤間に配置する。地盤ばねは、ラフトを支持する鉛直・水平ばね、杭の鉛直・水平支持ばねおよび地盤と構造物間の相互作用ばねから構成される。

a. ラフト支持ばね

鉛直荷重や水平荷重が地盤に作用した場合の非線形解析による荷重と沈下量関係を、図-3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で表現する。残りの非線形成分をラフト支持ばねに集約してモデル化する。ラフト面は、荷重の大きさによりグループに区分けして定義する。

鉛直方向について、節点荷重あるいは要素圧力からグループごとにラフト面全体の平均鉛直圧力を計算し、矩形のラフト面の荷重度を算出する。

また、対象節点によりラフト面を分割して分割面の荷重度による Steinbrenner の近似解を多層地盤系に適用して沈下量を求める。各層の歪は初期の等価剛性から各層の歪を求め、さらに、その歪における剛性低下率を求め、歪が一定値に収束するまで行う。

各節点の鉛直ばねは、支配面積による荷重と分割面の沈下量の和の関係から算定する。

ラフト支持ばねは、図-4に示すエネルギー等価なトリリニア型にモデル化する。定義した弾性歪レベルに到達した点を第1折れ点とし、第1折れ点と最終荷重ステップ間をエネルギー等価な2折れ線で結ぶ。

水平方向については、地表面上に水平方向の集中荷重が作用した場合の Cerruti の理論解を、多層地盤に適用して鉛直方向と同様にグループごとのラフト面について求める。水平方向には、剛床仮定によりラフト中央での水平変位を計算して求める。

b. 杭の支持ばね

杭周面の摩擦ばねは図-5に示すようにバイリニア型にモデル化する。建築基礎構造指針³⁾に示されている杭基礎の極限周面摩擦力度等を参考に、土質定数として極限摩擦力度および降伏変位を設定する。

杭の先端ばねは、同指針に示されている杭基礎の極限先端支持力と沈下関係等を参考に、トリリニア型にモデル化する。

c. 杭の水平ばね

杭の水平地盤ばねは、水平地盤反力係数と杭水平変位量の関係より設定する。水平変位の増大による水平地盤反力の低減を基にして、ばね値(地盤反力)の低減を行う。

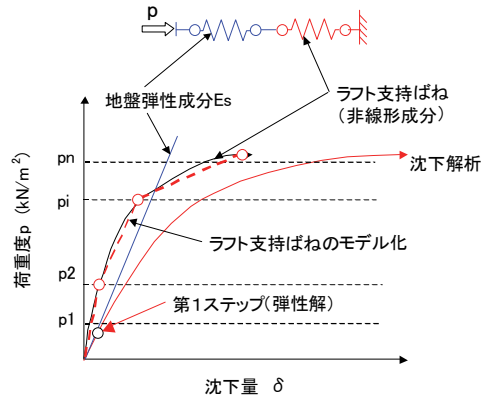


図-3 地盤弾性成分と非線形成分の分離

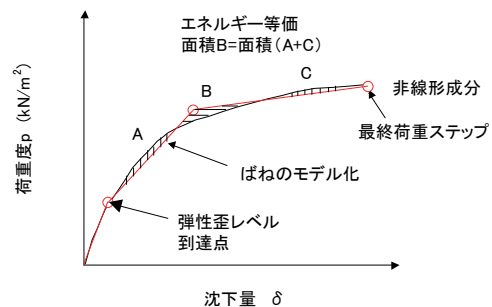


図-4 ラフト支持ばねのモデル化

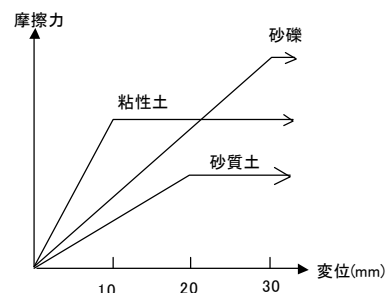


図-5 杭周面摩擦ばね

多層地盤で地盤の剛性低下を考慮する場合の水平方向地盤反力係数 k_h は以下の式より算定する。

$$0.0 \leq y \leq 0.1 : k_h = 3.16 \cdot k_{h0}$$

$$0.1 < y : k_h = k_{h0} \cdot y^{-0.5}$$

ここに、

y : 水平変位量を cm 単位で表した無次元量

k_h : 水平方向地盤反力係数 (kN/m^3)

k_{h0} : 基準水平地盤反力係数 (水平変位量 y が 1 の時の水平地盤反力係数)

$$k_{h0} = \alpha \cdot B^{-3/4} \cdot E_0 \quad (\text{kN/m}^3)$$

E_0 : 地盤変形係数 (kN/m^3)

B : 無次元化杭径 (杭径を cm で表した無次元数値)

α : 評価法によって決まる定数

d. 相互作用ばね

図-6に示す相互作用ばねは以下の弾性解⁴⁾に基づいて評価する。

i. 加力点自体

鉛直分布荷重①: Mindlin-I解の積分

水平分布荷重②: Cerruti解の積分

鉛直荷重③: Mindlin解と相反作用の定理による

Mindlin-I解の積分

水平荷重④: Mindlin-II解の積分

ii. 加力点から他の評価点への影響

水平・鉛直荷重①: Mindlin-I解、II解

水平・鉛直荷重②: Mindlin-I解、II解

水平・鉛直荷重③: Mindlin-I解、II解

鉛直荷重④: 相反作用の定理

2.2 静的非線形解析

本システムは、荷重増分法により静的非線形解析を行う。使用要素は、梁要素(基礎梁、杭)、板要素(ラフト)、各種ばね要素(ラフト支持ばね、杭摩擦ばね、杭先端ばね、相互作用ばね)である。

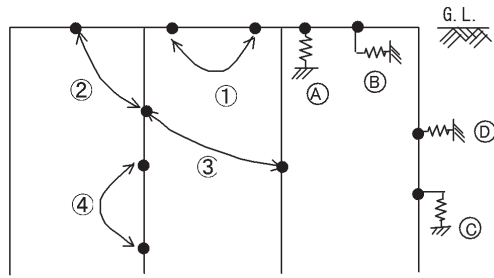


図-6 相互作用ばね

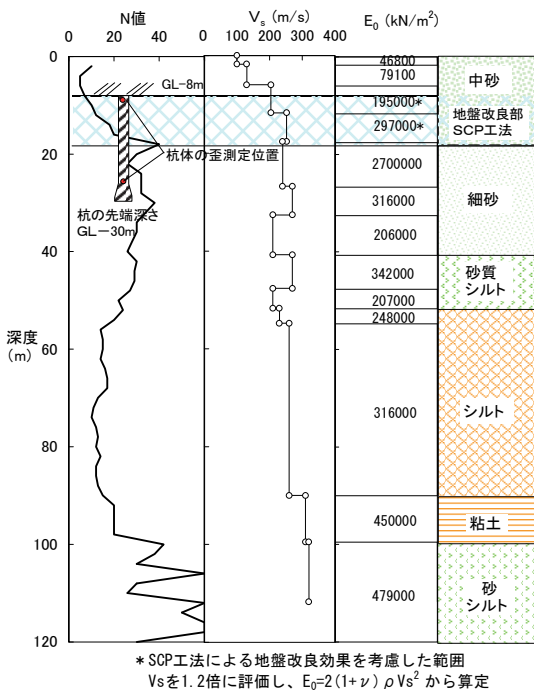


図-7 地盤構成と初期剛性

3. 施工時沈下挙動

場所打ちコンクリート摩擦杭基礎により支持された高層建物について、施工時の沈下量、基礎スラブに作用する土圧、杭の軸力などを測定した。建物建設時の荷重の増加に伴う沈下量の推移、および杭とラフトの鉛直荷重の分担を求めた。

3.1 地盤構成と建物条件

建設地の地盤構成と地盤の初期剛性を図-7に示す。建物は、新潟市の信濃川の河口付近に建設した24階建てRC高層免震建物である。地表から沖積砂地盤が60m程度の深さまで堆積している。その下層は100mまでシルト層と粘土層であり、110m程度でN値50以上の支持層が出現する。耐圧盤下のGL-8m~18mの地盤はサンドコンパクション(SCP)工法により地盤改良されている。杭はアースドリル工法で築造された場所打ちコンクリート拡底杭であり、杭先端位置はGL-30mのN値30程度の中間砂層である。

3.2 測定の概要

本建物の基礎伏図と測定位置を図-8に示す。基礎梁断面は1.2m×2.0m、スラブ厚40cmである。2007年

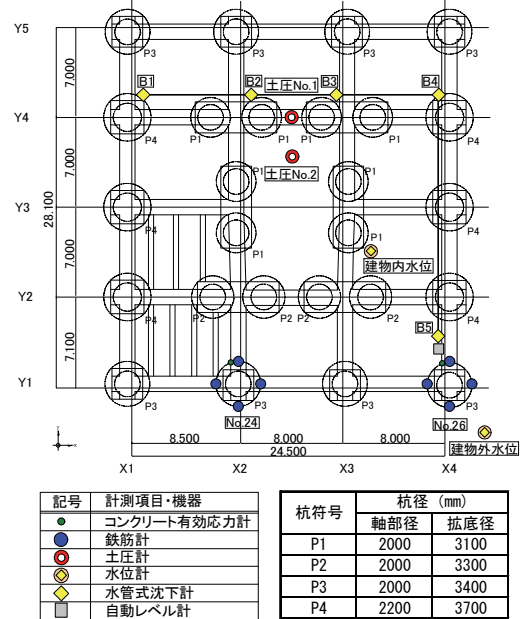


図-8 基礎伏図と測定位置



図-9 建設工程

5 月に工事が開始して以降の作業工程と計測時期を重ねて図-9 に示す。初期の基礎の絶対変位は揚水用のディープウェル管で測定していたが、2008 年 4 月以降は、免震基礎の擁壁側面にデジタルスタッフを設置して、建物近傍から自動レベル計により測定した。また、Y4 軸の基礎の相対沈下を水管式沈下計で測定し、絶対変位に相対沈下量を加えて各点の絶対沈下量を求めた。土圧は、基礎梁直下部とスラブ中央において、水位は建物内部と外部において測定した。また、杭体の歪は、杭頭および杭先端の 1 断面 4 箇所測定した。これらの測定間隔はデータロガーを用いて 1 回/hr とした。

3.3 測定結果

a. 沈下と傾斜角

図-10 に Y4 通りの沈下量、図-11 に傾斜角の推移を示す。構造躯体の打設に伴い、沈下と傾斜が漸増し、2008 年 12 月に最上層に達して以降はほぼ一定となった。沈下量の最大値は X3 軸で 19mm 程度、傾斜角の最大値は X3-X4 間で 4/10000rad 程度であった。

b. 接地圧

図-12 に土圧計で測定した耐圧盤の接地圧の推移を示す。ディープウェルによる建物内部の揚水は 2008 年 1 月 26 日まで継続しており、地下水位は GL-16.5m で一定である。揚水を停止すると、数日間で GL-16.5m から GL-1.5m に回復した。そのため、接地圧が耐圧盤との水頭差 (0.065Mpa) に相当する水圧分増加した。また、基礎梁直下の土圧がスラブ中央部の土圧より大きくなっている。これは基礎梁の剛性が大きいためと考えられる。

c. 杭の主筋歪

杭体の歪は細径の鉄筋計を主筋に沿わせて 1 断面につき 4 点配置し、その平均値を軸歪とした。図-13(a)、(b) に建物周辺杭 No.24 の杭頭部の主筋歪、隅杭 No.26 の杭先端部の主筋歪の推移を示す。歪には、鉄筋計とコンクリートの線膨張係数の差による歪補正⁹⁾を行った。すなわち、鉄筋計はコンクリート内部に埋設して拘束されており、杭体と鉄筋計の線膨張係数の差のために温度変化により見掛けの歪が出力される。鉄筋計の線膨張係数 C_β はメーカーカタログによる値 $12.0 \mu / ^\circ C$ 、コンクリートの線膨張係数 γ は杭のコンクリート打設時に $\phi 200 \times 400$ のテストピースを作成し、温度履歴を与えて求めた実験値 $12.0 \mu / ^\circ C$ とし、温度 T による歪を次式で求めた。

$$\varepsilon = -(C_\beta - \gamma)T = -3.56T \quad (1)$$

温度補正前後の歪を比較して図-14 に示す。

d. ラフトと杭の負担荷重

図-15 に構造躯体荷重に対するラフトと杭の負担荷重の推移を示す。ラフト負担荷重の実測値は基礎梁直下とスラブ中央部で観測された土圧値にそれぞれ基礎梁直下の面積、スラブ面積を乗じて求め、杭負担は上載荷重とラフト負担荷重との差分から求めた。

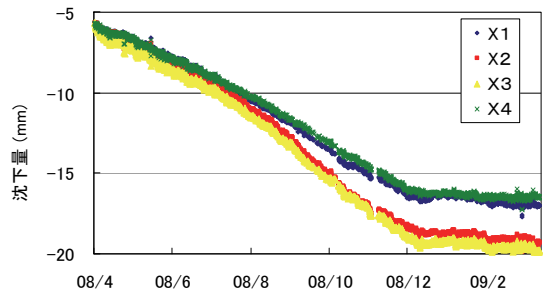


図-10 基礎の沈下量の推移

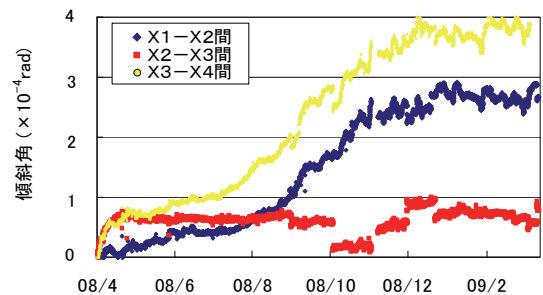


図-11 基礎の傾斜角の推移

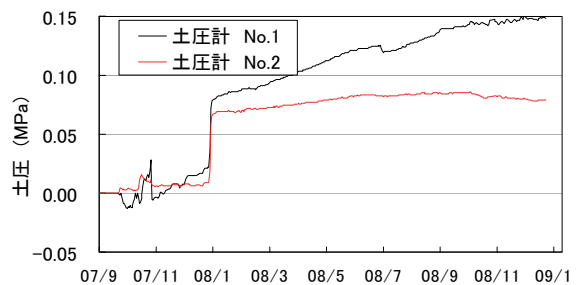
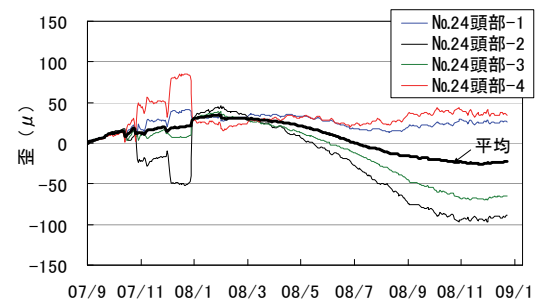
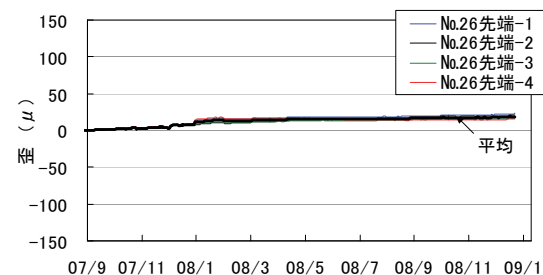


図-12 土圧の推移



(a) 杭頭部の主筋歪 (周辺杭)



(b) 杭先端部の主筋歪 (隅杭)

図-13 杭主筋歪の変化

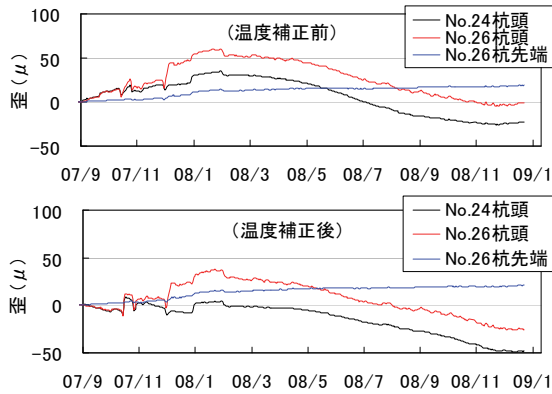


図-14 杭の軸歪

4. 設計支援システムの検証解析と実測値の比較

地盤との相互作用を Mindlin の弾性解に基づいて直接評価するハイブリッド解析法を用いた設計支援システムによる沈下解析結果と実測値との比較を行った。

4.1 解析モデル

図-16 に、構造物の解析モデルを示す。ラフト支持ばねと杭の周面摩擦ばね、および先端ばねの非線形性を考慮した。ラフト支持ばねは、図-17 に示す 3 軸試験により求めた各深さにおけるせん断剛性の歪依存特性を用いて、地盤の非線形沈下解析結果により求めた。図-18 のような荷重度と沈下量の関係の非線形成分をトリリニア型にモデル化した。

a. 杭の支持ばね

杭先端、摩擦ばねは建築基礎構造設計指針に準じて設定した。表-1 に杭周面摩擦ばねを示す。杭先端ばね特性は次式から求めた。

$$S_p/d_p/0.1=0.3(R_p/A_p)/(R_p/A_p)_u+0.7\{(R_p/A_p)/(R_p/A_p)_u\}^2 \text{-----}(2)$$

- ここに、 S_p : 杭先端沈下量(m)
- d_p : 杭先端直径(m)
- R_p : 杭先端荷重(kN)
- A_p : 杭先端断面積(m²)
- $(R_p/A_p)_u$: 極限先端支持力度(kN/m²)

4.2 沈下解析結果と実測値の比較

地下部分の完成後、揚水停止直前に測定された杭体の歪を初期値として、解析では水圧と建物上載荷重を順次与

表-1 杭の周面摩擦ばね

土質	深度(m)	N値	極限摩擦力度(kN/m ²)	極限摩擦力(kN)	
				φ 2000	φ 2200
細砂	1.75	4	13.2	-	-
中砂	9.80	6	19.8	223.8	246.5
中砂	11.70	10.5	34.7	413.4	454.8
細砂	17.60	17.2	56.7	2099.0	2308.9
細砂	26.75	31.4	103.8	5962.6	6558.9
細砂	30.00	35.6	117.6	2399.5	2639.4

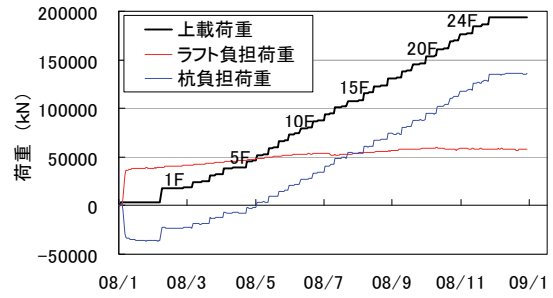


図-15 ラフトと杭の負担荷重

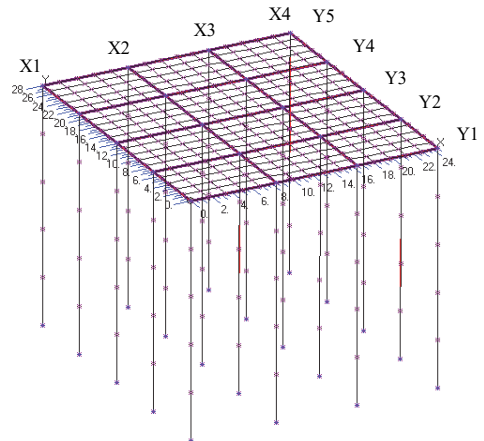


図-16 構造モデル

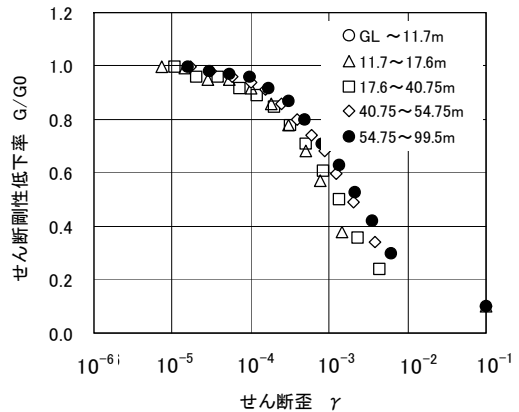


図-17 地盤の非線形性

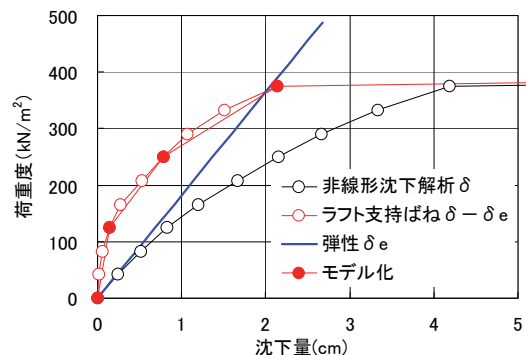


図-18 ラフトの支持ばね

えて、周辺杭 No.24、隅杭 No.26 の軸歪を求めた。図-19 に杭体の歪の経時変化について実測値と解析結果を比較して示す。杭頭部の歪の解析値は、耐圧盤に水圧が作用して杭に引張歪が生じた後、建物荷重が増加するに従い圧縮側に増加し、建物の構造躯体が完成した 2008 年 12 月末まで良く追跡できている。杭先端の歪は、杭周囲の摩擦力を小さく評価しているため実測値との差が大きい。杭頭の歪は実測結果と整合がとれていたため、解析における杭の負担荷重は杭頭軸力和として求めた。

図-20 に Y4 軸の沈下量分布について実測値と解析値の比較を示す。解析では、水圧により基礎が浮き上がるため、躯体がほぼ完成した時点では実測値より沈下量が小さくなった。

また、揚水停止前（2008 年 1 月 21 日）を初期値として、ラフトと杭の負担荷重を求めて実測結果との比較を行った。図-21 に荷重分担率を示す。実測と解析結果はほぼ良い対応が得られており、躯体完成時でのラフトと杭の分担率は実測では 30:70 であり、解析では 39:61 であった。

5. まとめ

汎用構造解析 Midas をプリポストに用い、構造解析研究所の保有する解析ソルバーに相互作用を組み込んだ併用基礎設計支援システム「HYFEST」を開発した。実建物の沈下挙動の観測および観測データと、このシステムに基づいた予測値との比較によりシステムの検証を行い、以下の知見が得られた。

- i. 施工段階解析機能および地盤ばねの自動計算、自動配置機能を追加し、操作性を向上できた
- ii. 沖積砂地盤において、杭の先端が N 値 30 程度の中間砂層に位置する摩擦杭基礎に支持された高層免震建物の施工時の躯体荷重の増加に伴う沈下や荷重分担についての実測の結果、構造躯体の打設に伴って沈下と傾斜が漸増し、沈下量は X3 軸で 19mm 程度、傾斜角は X3-X4 間で 4/1000rad 程度で最大となり、それ以降は収束した
- iii. 躯体完成時でのラフトと杭の荷重分担率は 30:70 であり、パイルド・ラフト基礎として機能した
- iv. 設計支援システムにより施工時沈下挙動の解析を行い、杭・ラフトの地盤ばねの非線形特性を適正に設定することにより、杭とラフトの負担の推移と沈下傾向を追跡できることが判った

6. あとがき

現在、洪積砂層と粘性層との互層地盤における杭基礎と直接基礎を併用した建物について施工開始時点から完成までの長期間にわたる基礎躯体各部の健全性を確認す

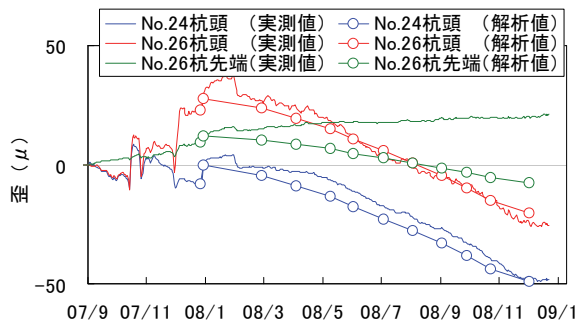


図-19 杭の軸歪（実測値と解析値の比較）

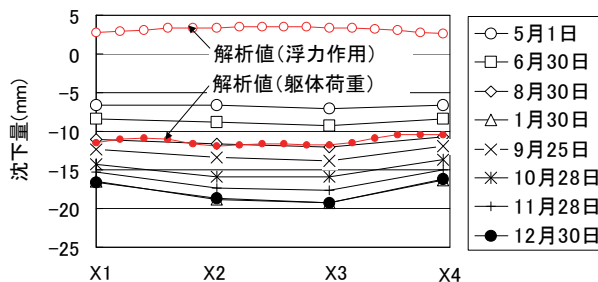


図-20 沈下量分布の推移（Y4 軸）

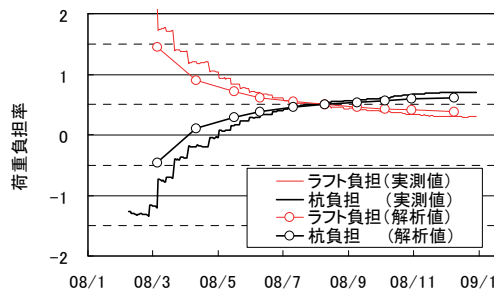


図-21 荷重分担率（実測値と解析値の比較）

るために挙動観測を行っている。設計時に予測した沈下挙動との比較を行い、沈下予測解析技術の精度を向上し、地盤物性の評価データベースを構築・整備し、さらに高精度の設計・施工支援システムとしていく予定である。

【参考文献】

- 1) 秦 雅史、舟木秀尊、「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) 秦 雅史、「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」、奥村組技術研究年報 No.33、pp.107-112、2007.7
- 3) 日本建築学会、「建築基礎構造設計指針」、2000.10
- 4) 大崎順彦、「建築基礎構造」、技報堂出版、1991
- 5) 青木雄二郎、芝崎富士夫、「杭の長期軸力測定に関する諸問題と対応」、第 22 回土質工学研究発表会、1987.6