

特集 「数値解析技術」

変動軸力の大きな超高層建物を支持する パイルド・ラフト基礎の挙動予測

鈴木直子 関 崇 夫
茶谷文雄 田中 耕太郎
(本店工事監理部)

Prediction Analysis of a Piled Raft Foundation Supporting a High-Rise Building under an Earthquake-Induced Overturning Moment

Naoko Suzuki Takao Seki
Fumio Chatani Kotaro Tanaka

Abstract

This paper describes a piled raft foundation supported with a thin cement-treated soil layer below the raft and various lengths of friction piles. A particular feature of this piled raft foundation is that part of the raft may possibly rise to the surface when subjected to the overturning moment exerted by a tall building during a powerful earthquake. The authors present a design outline for the foundation, comparative studies between the estimated and measured values of the settlement, and results obtained from an analysis of the lateral resistance of the foundation that takes into consideration the rising zone of the raft from the surface.

概 要

超高層建物の基礎形式として、杭と基礎スラブ直下の地盤で荷重を支持するパイルド・ラフト基礎を採用した。ここで採用したパイルド・ラフト基礎の特徴は、大地震時に大きな変動軸力によって浮上りが生じる高層建物に適用したこと、長期荷重時の荷重分布と地震時の変動軸力を考慮してパイルド・ラフト基礎の杭長を一定とせず、建物の隅角、辺、内部で異なる長さの杭を用いたことである。この基礎の実施にあたり、既往の解析手法に加えて、非線形FEMを用いた基礎の浮上りを考慮した挙動予測解析および基礎の耐震設計を行った。さらに、施工中に現場実測を行い、長期荷重時の沈下挙動の予測解析と実測との対応が良好であることを確認した。これらの成果により、パイルド・ラフト基礎の挙動予測解析の高度化および適用範囲の拡大につながった。

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎は、荷重を杭と基礎スラブ直下の地盤で支持する基礎形式であり、杭基礎と直接基礎の中間的な基礎として位置づけられる。その沈下および地震時挙動の予測には、杭・ラフト・地盤の相互作用効果およびラフト剛性による接地圧の再配分効果を考慮した評価法を用いる必要があり、既に模型実験や実施物件の現場計測に基づく解析手法が示されている^{1) 2)}。さらに、超高層建物に適用した事例³⁾など、多くの適用事例も報告されている。

これに対し、本報告で示すパイルド・ラフト基礎は、これまでの適用事例には無い以下の特徴を有している。

- 1) 高層であるにもかかわらず地下階がなく、上部構造の保有耐力時に大きな変動軸力によって浮上りが生じる建物に適用した。
- 2) 長期荷重時の荷重分布と大きな変動軸力に対応して杭長を一定とせず、建物の隅角、辺、内部で異なる長さの杭を用いた。

この基礎の実施にあたっては、既往の解析手法に加え

て、新たに非線形FEMによる挙動予測解析および設計の考え方を取り入れた。

以下に、この新しいタイプのパイルド・ラフト基礎について、基礎構造の計画、長期荷重時の沈下予測解析と実測結果との比較、浮上りを考慮した基礎の地震時挙動予測および耐震設計の考え方を報告する。

2. 建物・地盤概要と基礎構造の計画

Fig. 1に建物の断面図、Fig. 2に建物の平面形状、杭配置、計器配置を示す。建物は、地上24階、塔屋2階の鉄筋コンクリート造の高層集合住宅である。建物の平面は概略22×22mの正方形で、軒高が76m、塔状比が3.4とやや大きい。Fig. 3に接地圧分布を示す。各柱位置に作用する長期荷重をその支配面積で除した荷重度は、建物の中央部、辺部、隅角部の順に大きく、柱位置によって大きく異なっている (Fig. 3a)。

Fig. 4に地層構成、地盤定数、計器の埋設深度を示す。地表面から深さ5mまでは砂質土系の埋戻し土であり、それ以深は砂礫、粘性土、砂質土の互層からなる洪積層が

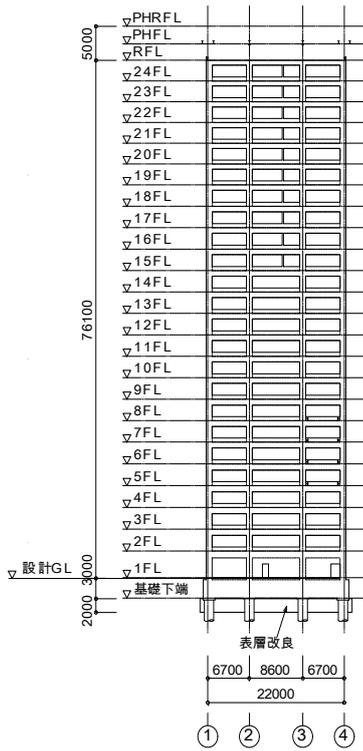


Fig. 1 建物の断面図
Sectional Elevation of Building

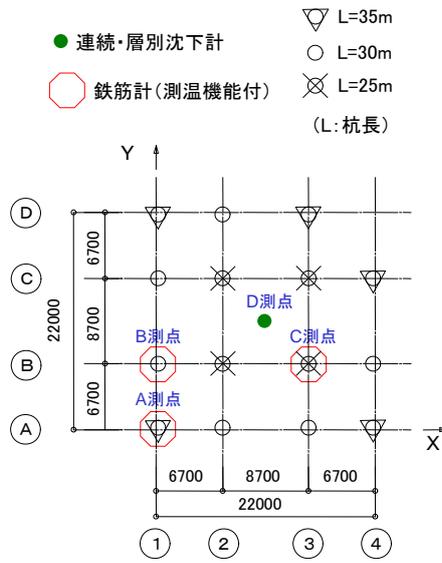


Fig. 2 建物の平面形状、杭配置、計器配置
Plan of Building, Pile Arrangement and
Location of Instrumentation

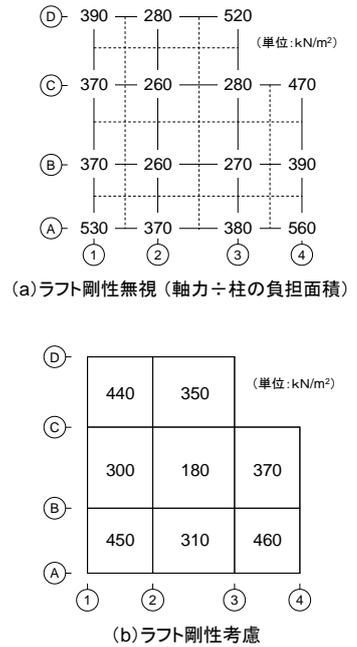


Fig. 3 ラフトの接地圧
Contact Pressure of Raft

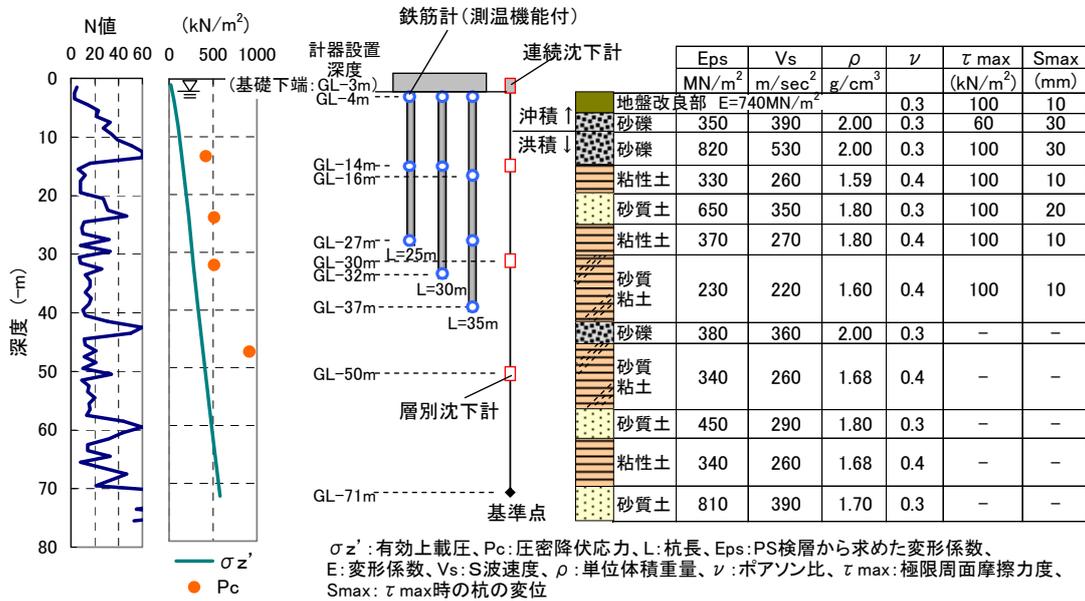


Fig. 4 地層構成、地盤定数、計器の埋設深度
Soil Profile, Soil Properties and Installed Depth of Instrumentation

厚く堆積するものの、 N 値が50以上の明確な支持層は深さ約70m以深にある。

パイルド・ラフト基礎の採用経緯を以下に示す。

まず、べた基礎の可能性について、基礎梁せいを3mとする二重スラブ（以下、ラフトと呼称）の採用と、ラフト下の層厚約2mの埋戻し土部分を簡易な流動化処理土工法で地盤改良するとの前提で検討した。

建物の平均接地圧は350kN/m²であるが、ラフトの剛性による荷重再配分効果を考慮して算定した接地圧は180~460 kN/m²である（Fig. 3b）。一方、深さ15m付近の粘性土層の一軸圧縮強さは210 kN/m²で、この粘性土層から決まる層状地盤としての長期許容支持力度は476 kN/m²と、最大接地圧を上回る。

また、べた基礎としたときの最大即時沈下量は27mm、

ラフト下の各粘性土層は、建物建設に伴う荷重増に対して十分過圧密であり、有害な圧密沈下が生じる可能性はない。

以上より、地盤改良の採用によって長期荷重に対してべた基礎による支持が可能と判断されたが、下記の理由により杭を併用したパイルド・ラフト基礎を採用する方針とした。

- 1) 建物の重要性を考慮し、地盤改良だけに頼らず、杭の併用によって支持力に関する安全性を高めるとともに沈下量を低減する。
- 2) 杭の併用によって大地震時の軸力変動に伴う浮上り量と沈下量の低減を図る。

Table 1に建物の荷重条件と基礎各部の設計方針を示す。地盤定数の評価を含むFEMによるパイルド・ラフト基礎の解析精度がラフトと杭の荷重分担に与える影響を考慮し、各荷重条件に対してラフト下の地盤の支持力、各部材断面の強度等は、各部の解析上の負担荷重に対して20%の余裕度を確保することとした。

杭は直径1.5mの場所打ちコンクリート杭による摩擦杭、杭長はFig. 2に示すように、隅角部、辺部、中央部の各杭の地震時負担軸力の大きさを考慮して、それぞれ3,5,30,25mとした。また、大きな引抜き力・押し込み力と水平力が作用する隅角部の杭は、上部5mを鋼管巻きとした。

3. 長期荷重時の検討

3.1 沈下予測解析

3.1.1 解析条件 長期荷重に対する基礎の即時沈下と圧密沈下の検討は、汎用FEM解析ソフトABAQUSを用いて、三次元非線形FEMによって行った。解析モデルをFig. 5に示す。地盤は非線形ソリッド要素で、初期変形係数はPS検層から求めた微小ひずみレベルにおける変形係数 E_{ps} とし、地盤のひずみ依存性は、告示1457号で示されたFig. 6の粘性土と砂質土の $G/G_0 \sim \gamma$ 関係⁴⁾を用いた。地盤改良部は弾性ソリッド要素で、変形係数は改良土の一軸圧縮強度 q_u と E_{50} (一軸圧縮試験から求まる変形係数) の関係式である $E_{50} = 180 q_u$ から設定した⁵⁾。改良土の q_u は、設計用の q_u から推定した現場コア強度

とした。ラフトと杭は弾性ソリッド要素、杭周面摩擦はバイリニア型のインターフェース要素でモデル化した。ラフトと地盤の間にはバネ要素を設け、地震時の解析でスラブの浮上りも考慮できるようにした。

3.1.2 解析結果 予測解析で得た即時沈下量分布図をFig. 7、増加地中応力コンターをFig. 8に示す。即時沈下量は最大14mm、最大変形角は1/1000と設計上のクライテリアを満足した。

変形角については、当初の概略検討において、全ての杭長を一定とした場合に許容範囲内となる計算結果を得ていた⁶⁾。よって、詳細設計において、Fig. 2のように

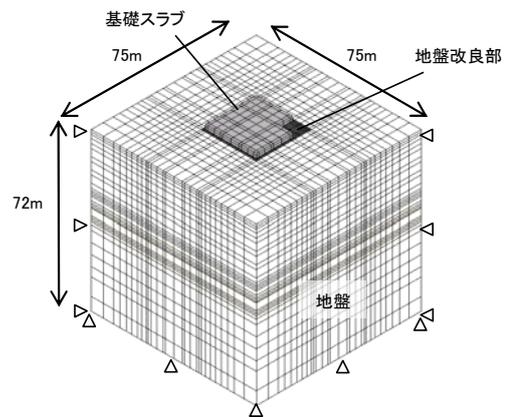


Fig. 5 FEM解析モデル
FEM Analysis Model

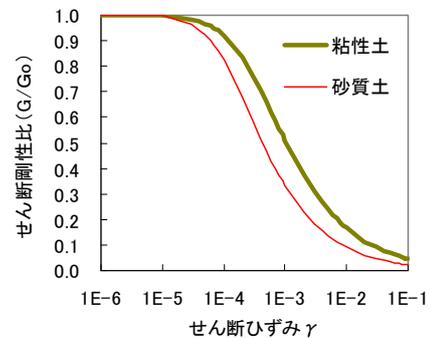


Fig. 6 地盤のひずみ依存性⁴⁾
Shear Modulus-Strain Behaviour

Table 1 荷重条件と基礎各部の設計方針
Load Condition and Design Policy of Foundation

荷重条件	ラフト下の地盤の支持力	ラフトの滑動抵抗	杭の支持力および引抜き抵抗力	部材の断面設計
長期荷重時	杭の存在を無視したべた基礎としての最大接地圧 < 長期許容支持力度		パイルド・ラフト基礎としての沈下の検討で代替	ラフト・基礎梁 杭の存在を無視したべた基礎として長期許容応力度で設計 杭 負担軸力*に対して長期許容応力度で設計
設計用地震荷重時	ラフトが負担する斜め荷重* < 短期許容支持力度	・基礎スラブに浮上りが生じない ・ラフトの負担水平力* < ラフトの最大摩擦抵抗	杭の負担荷重 < 短期許容支持力	ラフト・基礎梁 杭 各部の負担荷重*に対して短期許容応力度で設計
上部構造の保有耐力時	ラフトが負担する斜め荷重* < 極限支持力度	・基礎スラブの浮上りを許容 ・ラフトの負担水平力 < ラフトの接地部分の最大摩擦抵抗	杭の負担荷重 < 極限支持力または極限引抜き抵抗力	ラフト・基礎梁 杭 各部の負担荷重*に対して終局強度で設計

*解析から得られる負担荷重を20%割増した値を採用し、余裕度を確保

耐震設計上必要とされる外周部ほど長い杭配置に変更すると、杭長が全て一定の場合に比べて外周部の沈下量が小さくなるため、変形角が許容値を超える懸念があった。しかし、本建物の荷重は内部より外周部で大きく、ラフトと基礎梁の剛性も剛であることから、予測解析で得た接地圧はFig. 8のように外周部ほど大きくなる分布形状となった。このような接地圧分布は建物の不同沈下の低減に有利であり、ほぼフラットな沈下量分布が得られた。

また、FEMで得た増加地中応力に基づき圧密沈下量について検討したところ、深さ15~50mの各粘性土層において、建物建設後の地中応力は過圧密比が1.5程度の過圧密領域にとどまり、有害な圧密沈下は生じないことが明らかになった。

この杭配置の長期荷重時におけるラフトの荷重分担率は66%、杭の安全率は負担荷重に対して3.0~3.2となった。

3.2 沈下予測解析と実測との比較

ラフトの施工開始から竣工時までの期間において、沈下量を連続沈下計と層別沈下計、杭軸力を測温機能付き鉄筋計によって現場計測を行った。沈下量は最も沈下量が大きいと思われる建物中央部で、杭軸力は3種類の杭長毎に1本ずつの合計3本で計測した (Fig. 2)。

3.2.1 沈下量 ラフト直下における沈下量の経時変化および沈下量の深度分布をそれぞれFig. 9, 10に示す。いずれも予測解析値と実測値はよく対応している。本建物は地下階のない順打ち施工で、建物の増加荷重は躯体完了までほぼ等間隔であり、Fig. 9の実測値もこれに対応した経時変化を示している。また、躯体工事完了後に若干の荷重増とクリープによると考えられる約1.5mmの沈下が生じているが、竣工時までにはほぼ収束しており、建物に有害な沈下が生じていないことを確認できた。

3.2.2 軸力分布 竣工時における軸力深度分布をFig. 11に示す。地中部の鉄筋計温度はほぼ一定であるが、杭頭部では外気温の寒暖の影響を受けており、竣工時の鉄筋計温度の実測値はラフト打設時よりも13℃低下した。そこで計測期間中の荷重一定期間の実測値を吟味すると1℃の低下で4μ程度の引張り歪みを生じており、軸力評

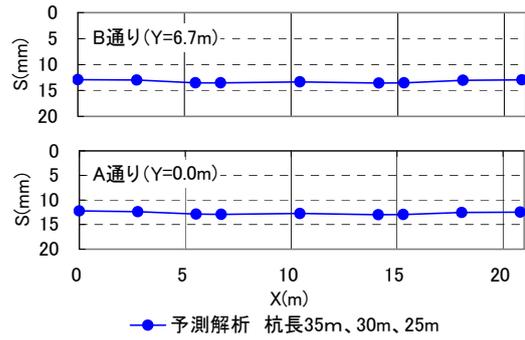


Fig. 7 ラフト上の沈下分布図 (長期荷重時)
Distribution of Raft Settlements (Sustained Loading)

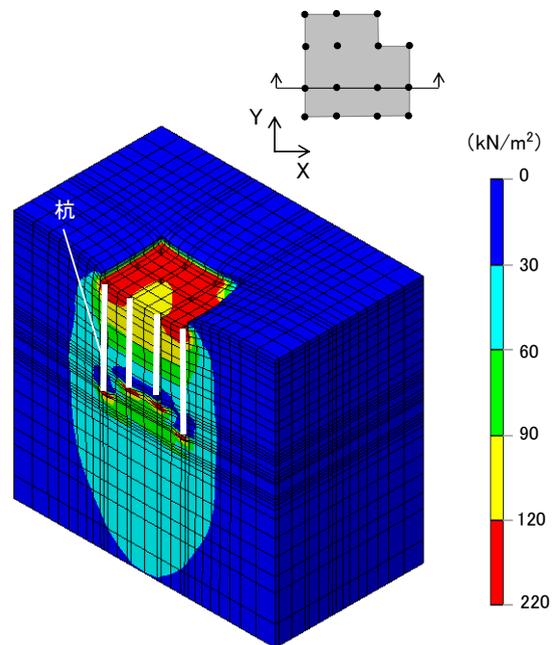


Fig. 8 増加地中応力コンター (長期荷重時)
Contour Chart of Increase Stresses in the Ground (Sustained Loading)

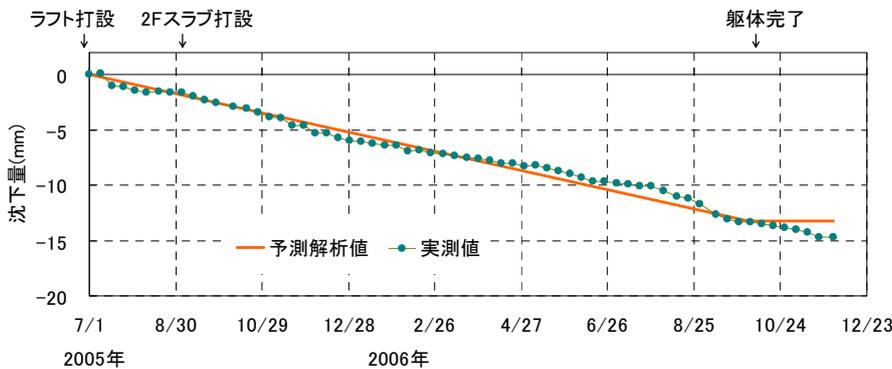


Fig. 9 基礎スラブ直下における沈下量経時グラフ (長期荷重時)
Measured and Predicted Time-Dependent Settlement Behaviour (Sustained Loading)

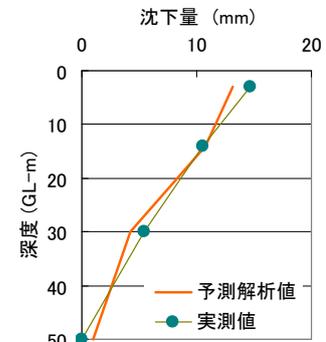


Fig. 10 沈下量の深度分布図 (長期荷重時)
Measured and Predicted Settlement Distributions with Depth (Sustained Loading)

価において無視できない程度であったので、この1°C当たりの歪みの変化量を用いて杭頭のみ温度補正を行った。Fig. 11では、予測解析値と実測値のいずれも地表面近くで杭周面摩擦力が発揮されにくい傾向にある。これは、ラフト下の地盤が荷重を負担することによって沈下し、ラフト直下の地盤と杭が共下がりするので、杭と地盤の相対変位が生じにくいとと考えられる。このような杭と地盤が一体となって挙動する状況は、Fig. 8の増加地中応力コンターにおいても、ラフト下の増加地中応力の高い領域でうかがえる。また、杭先端軸力の実測値が予測解析値に比べて小さくなった原因は、実測の極限周面摩擦力度 τ_{max} が予測解析で仮定した値より大きく、また、実測の τ_{max} 到達時の杭の変位が予測より小さかったことなどが推察される。

3.2.3 杭とラフトの荷重分担率 実測値に基づく建物全体における地盤と杭の荷重分担率は、各杭の予測杭頭軸力から次の手順で推定した。

- 1) 同一の杭長であっても、杭の位置に応じて予測杭頭軸力が異なるため、計測の対象とする杭を基準として各杭の予測杭頭軸力比 α_i を設定する。
- 2) 各杭の推定実測杭頭軸力 N_i は、同じ杭長の実測杭頭軸力 N_k に1)で求めた各杭の α_i を乗じた値とする ($N_i = \alpha_i \times N_k$)。
- 3) 杭の全分担荷重 P_p は、2)で求めた N_i の和とする。
- 4) 地盤の全分担荷重は、設計用の建物全体荷重から P_p を差し引いた値とする。

その結果、建物全体における長期荷重時の荷重分担率は、予測解析のラフト：杭=66%：36%に対して60%：40%であった。杭の負担割合が設計値よりも10%程度大きかったが、杭の設計は20%の余裕を見ているため問題なかった。

4. 地震時の検討

地震時の転倒モーメントによるラフトの浮上りを考慮に入れて、水平力に対するパイルド・ラフト基礎の検討を行った。ここでは、実務設計上、地震時の鉛直および水平荷重によって基礎に発生する応力をそれぞれ別途求

めて、部材の断面設計を行う方針とした。

4.1 地震時鉛直荷重に対する検討

4.1.1 検討手順 ラフトの浮上りを考慮したパイルド・ラフト基礎の地震時鉛直荷重に対する検討は、次の手順で行う。

- 1) ラフト、杭、地盤系のFEMモデルに地震時の柱軸力を作用させ、ラフトの浮上りゾーンを把握する。
- 2) ラフトの最大接地圧、杭が負担する押込み荷重、引抜き荷重等を求める。
- 3) 杭の押込み荷重、引抜き荷重に対して、鉛直支持力、引抜き抵抗力、杭体の断面設計を行う。
- 4) ラフトの負担接地圧に対してラフトの断面設計を行う。

以下に、杭体およびラフトの断面設計に用いるラフトの浮上りゾーン、杭とラフトの荷重分担率を得るための解析方法および解析結果を示す。

4.1.2 解析方法 3. 節の長期荷重時と同様、汎用FEM解析ソフトABAQUSを使用した。ラフトと地盤はばね要素で連結し、Fig. 12に示す非線形ばね特性を与えることによりラフトの浮上りを考慮した。なお、地盤定数および基礎スラブ、杭の諸定数は、長期荷重時の沈下解

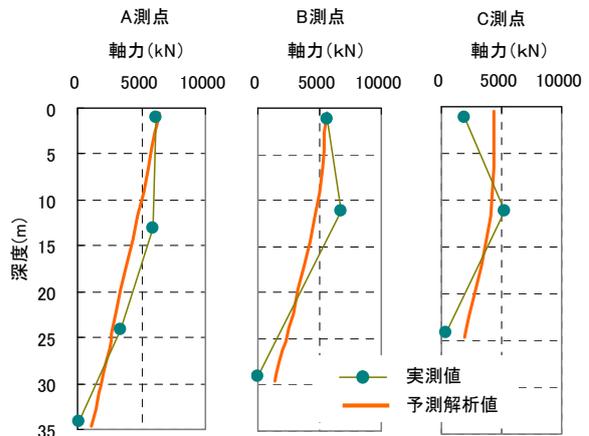


Fig. 11 軸力深度分布図 (長期荷重時)
Measured and Predicted Distributions of Axial Force of Pile with Depth

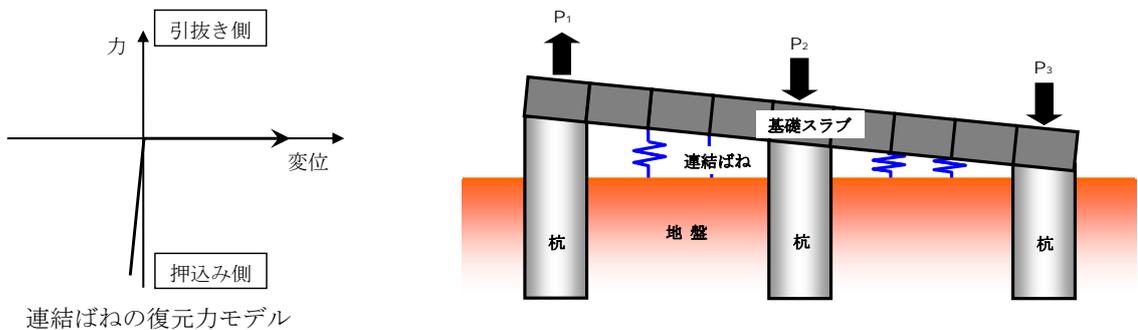


Fig. 12 基礎スラブと地盤の連結ばね
Connected Spring of Slab and Subsoil

析で用いた値と同一とした。

解析ケースは設計用地震荷重時と保有耐力時の2ケースで、載荷方向は各ケースともにX方向、Y方向、45度方向とした。

4.1.3 解析結果 各解析ケースの結果において、設計用地震荷重時はラフトに浮上りは生じず、保有耐力時はラフトに浮上りが生じて、隅角部の杭およびそれに隣接する辺部の杭は引抜き力を受けた。浮上りは、載荷方向に応じてラフト全平面の約18～32%の範囲で生じた。浮上り量、沈下量は45度方向加力時に最大となり、最大浮上り量は1.1cm、最大沈下量は4.0cmであった。解析結果の代表例として、保有耐力時のX方向および45度方向載荷時の増加地中応力コンターをFig. 13, 14に示す。図中右上の平面図の白色部分が浮上りの範囲である。いずれのコンター図もラフト直下と杭周面および杭先端から増加地中応力の応力球根が形成され、特に、押し込み側のラフト直下の地盤と杭先端で大きな増加地中応力が生じていることがわかる。このとき、杭の引抜き荷重および押し込み荷重は、それぞれ杭の極限引抜き抵抗力、極限支持力を下回ることを確認した。また、ラフトの接地部分について地震時の鉛直荷重の分担率を求めると、浮上りのない設計用地震荷重時で64～67%と長期荷重時と同程度、浮上りが生じる保有耐力時でも64～70%と両者に大きな変化はなかった。

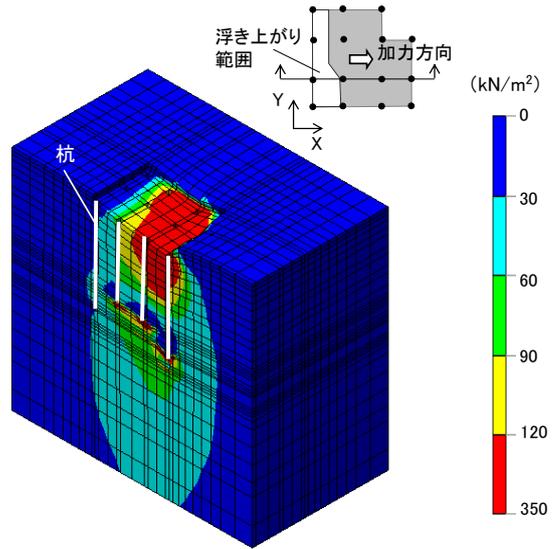


Fig. 13 増加地中応力コンター (X方向載荷時)
Contour Chart of Increase Stresses in the Ground
(Earthquake Loading, X Axis Direction)

4.2 地震時水平荷重に対する検討

4.2.1 検討手順 ラフトの浮上りを考慮したパイルド・ラフト基礎の地震時水平荷重に対する検討は、次の手順で行う。

- 1) 杭とラフトの荷重分担を、基礎に地震時の水平力が作用するときのラフトの接地ゾーンを考慮して求める。
- 2) ラフトの負担水平力がラフトの接地ゾーンの最大摩擦抵抗力を上回らないことを確認する。
- 3) 杭の負担水平力に対して杭体の断面設計を行う。

パイルド・ラフト基礎の水平挙動解析も鉛直挙動と同様、厳密には地盤を介した杭とラフトの相互作用を考慮する必要がある。しかし、ここでは略算法として、負担荷重に応じたラフトの変位に伴う地盤変位の影響と、地震時におけるラフト周辺の地盤変位による影響を応答変位法により評価することにした。この方法は、パイルド・ラフト基礎の模型水平載荷試験結果をほぼ良好にシミュレートできることを確認している⁷⁾。

4.2.2 ラフトの変位に伴う地盤変位 ラフト直下の地盤変位は、Fig. 15に示すコーンモデル⁸⁾に基づき、(1)式を用いてラフトの荷重～変位関係 (Fig. 17中の曲線(1)) および各荷重レベルでの地中の地盤変位分布 $\delta(z)$ を算定した。多層系地盤においては、各層の変位を重ね合わせて全体系の地盤変位分布とした。地盤のせん断剛性は、Fig. 6に基づき地盤のひずみレベルを考慮して評価

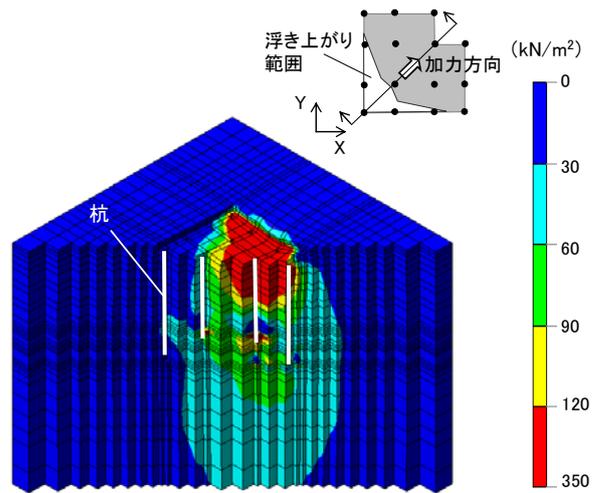


Fig. 14 増加地中応力コンター (45度方向載荷時)
Contour Chart of Increase Stresses in the Ground
(Earthquake Loading, Direction of 45 Degrees to X Axis)

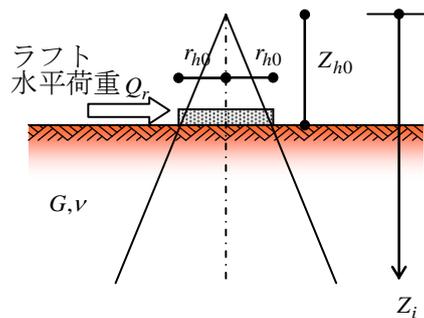


Fig. 15 コーンモデル
Corn Model

した。また、ラフトに浮上りが生じる場合、ラフトの接地ゾーンを等価な円形基礎に置換して評価した。

$$\delta_0 = \frac{Q_r}{K_{hb}}, \quad \delta(z) = \delta_0 \frac{Z_{h0}}{Z} \tag{1}$$

$$K_{hb} = \pi G \frac{r_{h0}^2}{Z_{h0}}, \quad Z_{h0} = \pi r_{h0} \frac{2-\nu}{8}$$

ここに、 δ_0 ：ラフトの水平変位、 Q_r ：ラフトの負担水平力、 K_{hb} ：基礎の水平地盤ばね、 Z_{h0} ：コーン頂点からの地表面までの距離、 Z ：コーン頂点からの距離、 G ：地盤のせん断剛性、 r_{h0} ：水平地盤ばね算定用の等価基礎半径、 ν ：底面直下のポアソン比

4.2.3 地震時の地盤変位の算定 地震時の地盤変位は、等価線形化手法であるSHAKEを用いて算定した。地盤定数はFig. 4に示すPS検層結果より求めた E_{ps} とした。工学的基礎はGL-71.8mの砂質土層上面に設定し、地盤の非線形性はFig. 6を与えた。また、入力地震波は平成12年建設省告示1461号第四号イに定められた解放工学的基礎における加速度応答スペクトルに適合した地震波を用い、入力地震動のレベルは極めて稀に発生する地震動レベルとした。Fig. 16に各杭の杭先端からの相対変位を示す。杭頭から10m程度の深度では、地盤変位はほぼ一定で大きな増幅はない。

4.2.4 杭の負担水平力～水平変位の関係 ラフトに水平力 Q_r と地震時の地盤変位が同時に作用してラフトが δ_0 変位した場合の、杭の負担水平力および応力と変位を、応答変位法を用いて算定した。すなわちFig. 17に示すように、4.2.2、4.2.3で算定した地盤変位を地盤ばねを介して杭に作用させるとともに、杭頭に水平力を作用させて、杭頭変位がラフト変位(δ_0)と等しくなる杭頭水平力 Q_p を求める。この手順を繰り返して、杭の負担水平力～水平変位の関係を求める (Fig. 18中の曲線(2))。

なお、解析に用いた地盤ばねは、砂質土は N 値から、粘性土は一軸圧縮試験結果から求めた変形係数 E_{50} を用

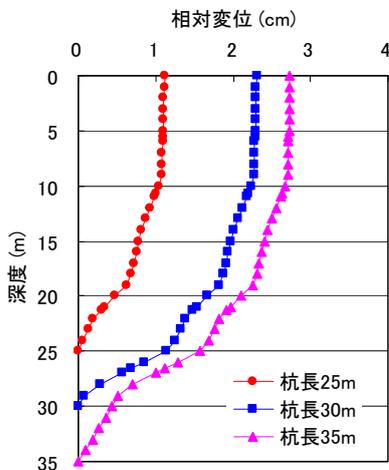


Fig. 16 地盤変位深度分布 (杭先端深度に対する相対変位) Distribution of Soil Displacements

いて算定し、地盤ばねは非線形性は、変位の0.5乗に基づき低減させて考慮した。

ラフトに作用させる水平力 Q_r は、設計用地震荷重時、保有耐力時の1階の層せん断力と、基礎重量にそれぞれ水平震度0.1、0.2を乗じて算定した水平力の和とした。

4.2.5 杭とラフトの荷重分担率 まず、想定する水平変位に対応するラフトの負担水平力 Q_r と全杭の負担水平力 ΣQ_p とを足し合わせるによって、パイルド・ラフト基礎に作用する全水平力 Q_{tot} を算定し、パイルド・ラフト基礎全体の荷重～水平変位の関係を求めた (Fig. 18中の曲線(3))。次に、Fig. 18において、パイルド・ラフト基礎全体に作用する設計用水平荷重から杭とラフトの荷重分担率を評価した (Fig. 18中の点A)。

また、下記の2種類の組み合わせについて、杭の曲げモーメント分布を求めた。

- 1) 杭頭水平力+ラフトの変位に伴う地盤変位
- 2) 杭頭水平力+ラフトの変位に伴う地盤変位+地震時地盤変位

これらの比較をFig. 19に示す。曲げモーメント分布はいずれも、Fig. 19の太線で示す全水平力を杭で負担させた場合の杭頭曲げモーメントの値で規準化している。この図から、この建物の基礎としてパイルド・ラフト基礎を採用すると、杭基礎と比較して杭頭の負担応力を6割程度に低減できることがわかる。また、本検討条件では、

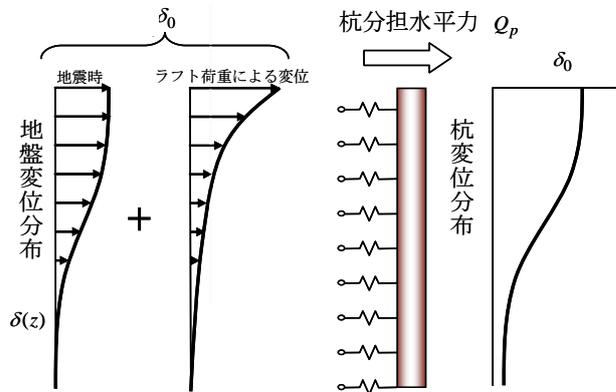


Fig. 17 杭負担水平力の算定法 Evaluation Method of Sharing Pile Load

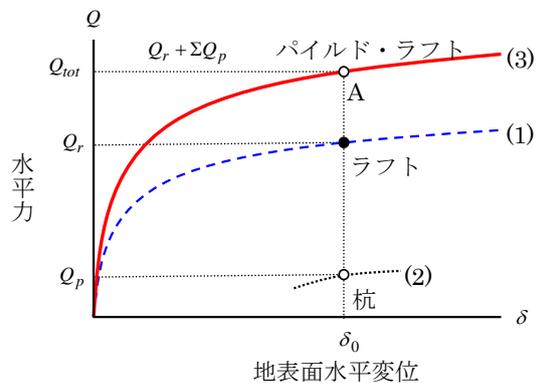


Fig. 18 パイルド・ラフト基礎の負担水平力の算定法 Evaluation Method of Load Sharing Raft and Piles

総じて地震時の地盤変位の影響は小さい。

ラフトの水平変位は、設計用地震荷重時、保有耐力時でそれぞれ約3mm、約8mmとなった。水平変位が小さい理由は、ラフト直下に N 値が20~50の締まった砂礫層が堆積しているためと考えられる。また、ラフトの水平力の分担率は、設計用地震荷重時、保有耐力時で、それぞれ64%、49%となった。保有耐力時の分担率が設計用地震荷重時よりも減少した原因は、保有耐力時にはスラブに浮上りが生じて接地面積が減少したため、ラフトの負担が低下したものと考えられる。

5. まとめ

大地震時に浮上りを生じる高層建物の基礎として、地震時軸力の大きさに応じて長さの異なる摩擦杭を配置したパイルド・ラフト基礎を採用した。以下に、本報の成果を示す。

- 1) 長期荷重時の沈下挙動に関して、FEMによる予測解析と実測結果との対応が良好であることを確認した。また、実測との比較で得た知見は、パイルド・ラフト基礎の沈下挙動予測の高度化につながった。
- 2) 大地震時における浮上りを許容した基礎の耐震設計手法として、上部構造の転倒モーメントによるラフトの浮上りゾーンをFEMによって求め、この浮上りゾーンを考慮した基礎の静的耐震設計手法を示した。
- 3) パイルド・ラフト基礎を大地震時に浮上りを生じる建物の基礎として採用した先例は報告されておらず、本実施例によりパイルド・ラフト基礎の適用範囲の拡大につながった。

参考文献

- 1) 佐原，他：パイルド・ラフト基礎に関する研究（その1）－実用的沈下予測解析法と実設計への適用例－，大林組技術研究所報，No. 67，（2003）
- 2) 藤森，他：パイルド・ラフト基礎に関する研究（そ

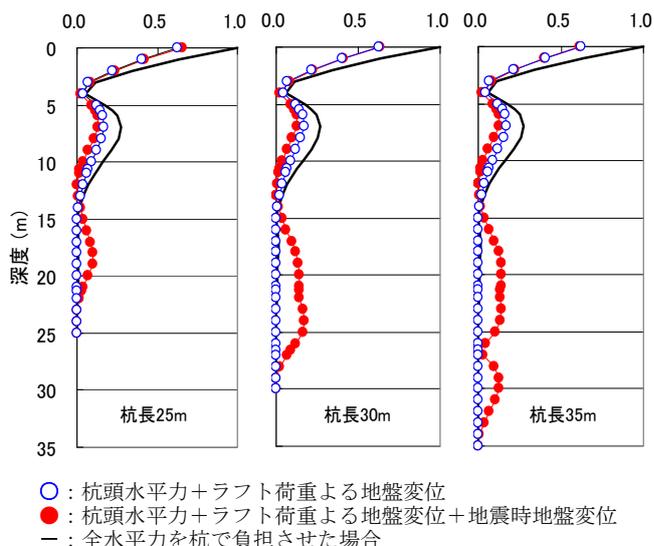


Fig. 19 曲げモーメント分布の比較
Comparison of Bending Moments

- の2)－大型遠心せん断土槽実験による地震時挙動評価と実用的設計法－，大林組技術研究所報，No. 67，（2003）
- 3) 柴田，他：逆打ちで構築したパイルド・ラフト基礎を採用した超高層建物の沈下挙動，日本建築学会大会学術講演梗概集B-1，pp. 699~670，（2005）
- 4) 平成12年建設省告示第1457号，別表第一
- 5) 日本建築センター編：改訂版建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針第1版，（2002）
- 6) 鈴木，他：超高層建物を支持する杭長の異なるパイルド・ラフト基礎，基礎工，Vol. 33，No. 12，pp. 79~81，（2005. 12）
- 7) 石井，他：大型せん断土槽実験によるパイルド・ラフト基礎の地震時簡易評価（その3）簡易設計法の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集B-1，pp. 491~492，（2003）
- 8) 国土交通省建築研究所編：改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景，ぎょうせい
- 9) 鈴木，他：地震時変動軸力の大きな高層建物を支持するパイルド・ラフト基礎，日本建築学会技術報告集，Vol. 15，No. 29，pp. 89~94，（2009）