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

PILED RAFT FOUNDATION SUPPORTING HIGH BUILDING UNDER OVER-TURNING MOMENT DUE TO EARTHQUAKE

鈴木直子 — * 1 関 崇夫 — * 2
茶谷文雄 — * 3 佐俣紀一郎 — * 4
田中耕太郎 — * 5

Naoko SUZUKI — * 1 Takao SEKI — * 2
Fumio CHATANI — * 3 Kiichiro SAMATA — * 4
Kotaro TANAKA — * 5

キーワード：
高層建物, パイルド・ラフト基礎, 沈下, 水平抵抗

Keywords：
High building, Piled raft foundation, Settlement, Lateral resistance

In this paper, the piled raft foundation is supported with thin cement treated soil layer below the raft and various length of friction piles. The part of this raft has a possibility of rising to the surface by over-turning moment of the tall building during a big earthquake. The authors present the outline of designing the foundation, the comparative studies on estimated settlements and measured results, and the analysis results of the lateral resistance of the piled raft which considered the rising zone of the raft from the surface.

1. はじめに

超高層建物を支持するパイルド・ラフト基礎に関しては既に多くの事例報告がなされている¹⁾。ここでは、下記のような特徴がある高層建物を支持するパイルド・ラフト基礎の計画、沈下予測解析と実測結果との比較、浮上がりを考慮した基礎の耐震設計の考え方等について報告する。

長期荷重時において、建物の外周部の荷重が内部よりかなり大きい。また、高層建物であるにもかかわらず、地下室がなく上部構造の保有耐力時には浮上が生じる。このような長期および大地震時の荷重条件を考慮し、パイルド・ラフト基礎の杭長は一定ではなく、建物の隅角、辺、内部で異なる長さの杭を採用している。

2. 建物・地盤概要と基礎構造の計画

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、軒高は 76m、塔状比は 3.4 とやや大きい (図 1, 2)。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 (図 3a)。

建設地は福島盆地の中央部にあり、阿武隈川の支流によって形成された段丘上にある。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 (図 4)。

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、べた基礎の可能性を検討した。

建物の平均接地圧は 350kN/m² であるが、建物外周部が内部より大きな柱軸力分布と、ラフトの剛性による荷重再配分効果を考慮した接地圧は 180~460 kN/m² となる (図 3b)。

一方、深さ 15m 付近の粘性土層の一軸圧縮強さは 210 kN/m² であり、層状地盤としての長期許容支持力度は粘性土層で決まり、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約 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、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。杭は直径 1.5m の場所打ちコンクリート杭による摩擦杭とし、杭長は、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、それぞれ 35, 30, 25m とする。また、大きな引抜き力・押込み力と水平力が作用する隅角部の杭は上部 5m を鋼管巻きとする。

また、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

*1 (株)大林組技術研究所地盤技術研究部 副主査
(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

*2 (株)大林組技術研究所地盤技術研究部 主任研究員・博士(工学)

*3 (株)大林組技術研究所地盤技術研究部 博士(工学)

*4 (株)大林組名古屋支店建築設計部 副主査

*5 (株)大林組本店設計品質管理部 部長

*1 Deputy Manager, Geotechnical Engineering Department, Technical Research Institute, Obayashi Corporation

*2 Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Department, Technical Research Institute, Obayashi Corporation, Dr. Eng.

*3 Geotechnical Engineering Department, Technical Research Institute, Obayashi Corporation, Dr. Eng.

*4 Deputy Manager, Nagoya Branch, Architectural & Engineering Department, Obayashi Corporation

*5 General Manager, Main Office, Quality Control Department, Obayashi Corporation

表 1 荷重条件と基礎各部の設計方針

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	・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	パイルド・ラフト基礎としての沈下の検討で代替する	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
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		杭の負担荷重 ＜短期許容支持力	杭 負担軸力*に対して長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する ・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*に対して短期許容応力度で設計 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

図 1 建物の断面図

図 2 建物の平面形状、杭配置、計器配置

(a) ラフト剛性無視 (軸力÷柱の負担面積)

(b) ラフト剛性考慮

図 3 ラフトの接地圧

σ_z' : 有効軸圧, P_c : 圧密降伏応力, L : 杭長, E_p : PS 検層から求めた変形係数, E : 変形係数, ν : ポアソン比, τ_{max} : 極限周面摩擦強度, S_{max} : τ_{max} 時の杭の変位

図 4 地層構成、地盤定数、計器の埋設深度

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 (表 1)。

3. 長期荷重に対する基礎の沈下予測解析と実測結果との比較

(1) 沈下予測解析

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。解析モデルを図 5 に示した。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_0 とし、地盤のひずみ依存性は $G/G_0 \sim \gamma$ 関係²⁾ (図 6) 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) の関係式から設定した³⁾。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。

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

当初、全ての杭の長さを一定としたパイルド・ラフト基礎に関して概略検討を実施し、変形角が許容範囲内となる計算結果を得ていた⁴⁾。しかし、地震時の変動軸力に対する杭の負担軸力は隅角部が最大で、耐震設計上、必要とされる杭長は、図 2 のように、隅角部 35m、辺部 30m、中央部 25m であった。杭長が全て一定の杭基礎では、沈下量は建物中央部、辺部、隅角部の順に小さくなる傾向を示す。したがって、隅角部、辺部の杭長が長いと、外周部の沈下量が小さくなりすぎて、変形角が許容値を超えることが懸念された。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かなり剛であることから、接地圧も外周部ほど大きくなる分布形状を示す(図 8)。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、予測解析でもほぼフラットな沈下量分布が得られた。

また、圧密沈下量についても、FEM で得た増加地中応力によると、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留まる。したがって、有害な圧密沈下が生じることはなく、図 2 の杭配置で差し支えないと判断した。

この杭配置では、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。

(2) 予測解析と実測との比較

本建物では、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多いと思われる建物中央部において、また、杭軸力は 3 種類の杭長毎に 1 本ずつ、合計 3 本計測した(図 2)。

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図 9、10 に示した。いずれについても予測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、沈下量の実測値もこれに対応した経時変化を示している。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ものの、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。

竣工時における軸力深度分布を図 11 に示した。予測値と実測値のいずれについても、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考えられる。図 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は杭と地盤が一体となって挙動する状況がうかがえる。また、杭先端軸力の実測値が予測値に比べて小さくなった原因として、予測解析で仮定した極限周面摩擦力 τ_{max} が実測より小さく、また、仮定した τ_{max} 到達時の杭の変位が実測より大きかったことなどが推察される。なお、場所打ち杭先端部のスライム処理など、杭の施工管理に問題は生じなかった。また、地中部の鉄筋計温度はほぼ一定であるが、杭頭部

図 5 FEM解析モデル

図 6 地盤のひずみ依存性²⁾

図 7 ラフト上の沈下分布図(長期荷重時)

図 8 増加地中応力コンター(長期荷重時)

図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）

図10 沈下量の深度分布図（長期荷重時）

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、軸力評価において無視できない程度であったので、この1℃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。

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%であり、設計時に考慮した余裕度の範囲であることを確認した。

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。なお、本報告で採用したFEMモデルの要素分割と地盤定数の設定法は、建物の実測沈下挙動をほぼ良好にシミュレートできることが、過去の多くの実績から明らかになっている。しかし、同一のFEMモデルで地震時の鉛直および水平荷重を同時に受ける基礎の複雑な挙動をシミュレート可能であるとの検証は行っていない。したがって、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

(1) 検討手順

- 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と接地ゾーンを把握する。
- ②基礎スラブの最大接地圧、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、杭体断面の検討を行う。
- 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。

図11 軸力深度分布図（長期荷重時）

(2) 検討方法および検討結果

(1)①の解析には3.節と同様に、汎用非線形FEMソフトABAQUSを使用した。ラフトと地盤はばね要素で連結し、図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、長期の沈下解析に使用した値と同一とした。

検討は、設計用地震荷重時、保有耐力時の2ステップについて行った。検討結果によると、設計用地震荷重時にはラフトに浮上りは生じない。保有耐力時には、ラフトに浮上りが生じ、隅角部の杭およびそれに隣接する辺部の杭が引抜き力を受ける。浮上りは、載荷方向に応じてラフト全平面の約18～32%の範囲に生じた。浮上り量、沈下量は45度方向加力時に最大となり、最大浮上り量は約1.1cm、最大沈下量は約4.0cmであった。代表例として、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図13、14に示した。各図において、図中右上の平面図の白色部分が浮上りの範囲を示している。ラフト直下と杭周囲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、押込み側のラフト直下の地盤と杭先端に増加地中応力の大きい部分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込み荷重は、それぞれ地盤による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%と大きな変化はなかった。

4.2 地震時水平荷重に対する検討

(1) 検討手順

- ①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

考慮に入れたラフトと杭との荷重分担を求める。

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・ラフト基礎の水平抵抗の検討に際しては、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⁵⁾。

(2) ラフトの負担水平力～変位の関係、およびラフトの変位に伴う地盤変位の深度分布の算定

ラフト直下の地盤変位は、図 15 に示すコーンモデル⁶⁾を用いて、ラフトの荷重～変位関係(図 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(1)式を用いて算定した。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する。その際、地盤の非線形性を考慮する。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。

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

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

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

(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。表 2 に PS 検層結果より求めた地盤定数を示した。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、図 6 に示す告示 1457 号で示された粘性土、砂質土の非線形特性を与えた。また、入力地震波として、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。図 18 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) 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、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。すなわち図 16 に示すように、(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。この手順を繰返し、杭の負担水平力～水平変位の関係を求める(図 17 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} を用いて算定した。また、

図 12 基礎スラブと地盤の連結ばね

図 13 増加地中応力 (X方向载荷時)

図 14 増加地中応力 (45度方向载荷時)

図 15 コーンモデル

図 16 杭分担水平力の算定法

図 17 パイルド・ラフト基礎の水平抵抗

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 階層せん断力に、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。

(5) パイルド・ラフト基礎の荷重～水平変位の関係およびラフトと杭の荷重分担

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 (図 17 中の曲線 (3))。図 17 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 (図 17 中の点 A)。

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、それらの比較を図 19 に示した。

- 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
- 曲げモーメント分布はいずれも、図 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、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。水平変位が小さいのは、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。これは、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

高層建物を支持する基礎として、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・ラフト基礎を計画・立案した。この基礎の沈下予測解析結果と実測結果は良好な対応を示した。また、大地震時の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の概要を示した。地震時に浮上りを生じるようなパイルド・ラフト基礎の挙動については、動的解析や遠心模型実験などによる検討が望ましいと考えられるが、今後の課題としたい。

表 2 地盤定数

深度 (m)	地質	層厚 (m)	S波速度 (m/s ²)	密度 (g/cm ³)
0.0	Ag	5.0	390	2.00
5.0	Ag	5.3	390	2.00
10.3	Dg	4.4	530	2.00
14.7	Dc	5.0	260	1.59
19.7	Ds	4.1	350	1.80
23.8	Ds	5.4	270	1.70
29.2	Dc	1.0	270	1.80
30.2	Dc	4.6	220	1.60
34.8	Dg	2.9	360	2.00
37.7	Dc	8.0	260	1.68
45.7	Dc	7.8	260	1.70
53.5	Dc	5.6	290	1.68
59.1	Dg	3.2	290	1.80
62.3	Dc	9.5	260	1.68
71.8	Ds		390	1.70

図 18 地盤変位深度分布
(杭先端深度に対する相対変位)

- : 杭頭水平力+ラフト荷重による地盤変位
- : 杭頭水平力+ラフト荷重による地盤変位+地震時地盤変位
- : 全水平力を杭で負担させた場合

図 19 曲げモーメント分布の比較

参考文献

- 1) 柴田, 山下, 濱田, 室屋: 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. 9
- 2) 平成 12 年建設省告示第 1457 号, 別表第一
- 3) 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. 11
- 4) 鈴木, 関, 茶谷, 佐保, 田中: 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, pp79~81, 2005. 12
- 5) 石井, 関, 西山, 藤森: 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. 9
- 6) 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

[2008年 6 月20日原稿受理 2008年 8 月 4 日採用決定]