

報文

締固め工法とパイルド・ラフト基礎を併用した低層建物

船原 英樹*／真島 正人**

1. はじめに

液状化の可能性のある地盤にパイルド・ラフト基礎を採用する場合には、地震時においても直接基礎としての支持力確保および沈下抑止杭の周面摩擦力確保が必要であり、そのためには液状化防止対策が不可欠である。

一方、液状化対策工法として知られる締固め砂杭工法は地盤を締固めるため、パイルド・ラフト基礎と併用することにより、液状化防止効果以外にも以下の構造安全性能向上が期待できる。

- ・ラフト（直接基礎部）下部地盤の直接基礎としての鉛直支持力向上
- ・杭の周面摩擦耐力の向上→沈下抑止性能向上
- ・杭の水平抵抗の向上→基礎の耐震性能向上

本事例では上記の効果を期待し、締固め砂杭工法で地盤改良することにより、液状化防止と支持力増加を図った後、パイルド・ラフト基礎を採用した。

〈建物概要〉

用途：食品加工施設
 建築面積：810m²
 延べ面積：2,400m²
 最高高さ：16.5m
 基礎深さ：1.5m
 階数：地上3階、地下なし
 上部構造：鉄骨造ラーメン構造
 基礎構造：パイルド・ラフト基礎
 杭種：ソイルセメント併用式H型鋼杭

2. 地盤概要

2.1 地盤調査概要と土層構成

当敷地では、原位置地盤調査として深さ50mまでの標準貫入試験（地盤改良前後）、PS検層、平板载荷試験（地盤改良後）、土質試験として上部砂層の粒度試験（地盤改良後）、沖積シルト層の一軸圧縮試験、圧密試験、物理試験を実施した。

図-1に土質柱状図を示すが、N値のほかS波速度、一軸圧縮強さおよび液状化判定結果も示してある。地盤は、表層埋土層の下部に厚さ12mの沖積砂層、厚さ20mの沖積粘性土層、厚さ8mの洪積粘性土層が堆積し、N値50以上となる堅固な層はGL-44m付近まで出現しない。

2.2 沖積砂質土層の特性

中間部のシルト層を除くと、N値5～15、S波速度 V_s は110～160m/sと緩い状態にある。また、細粒土含有率 F_c は15～30%である。一方、N値と F_c を使用し、建築学会基礎構造設計指針の方法に準じて、 $\alpha_{max}=200gal$ 、 $M=7.5$ に対する液状化判定結果を図-1に示してあるが、GL-3m～12mの間で $F_L \leq 1.0$ となり、液状化の可能性がある。

2.3 沖積粘性土層の特性

N値0～3、 $V_s=130m/s$ 前後、一軸圧縮強さ $q_u=100kN/m^2$ 前後とかなり軟弱であるが、圧密降伏応力（ $p_c=220\sim250kN/m^2$ ）と有効土被り圧 p_o を比較すると、50kN/m²程度過圧密状態にある。

3. 基礎の設計

3.1 基礎設計の考え方

建物の短辺方向断面図を図-2に示す。当施設は鉄骨造3階建て、平均荷重度は約60kN/m²の比較的軽量の建物である。基礎形式としては、液状化の可能性のある緩

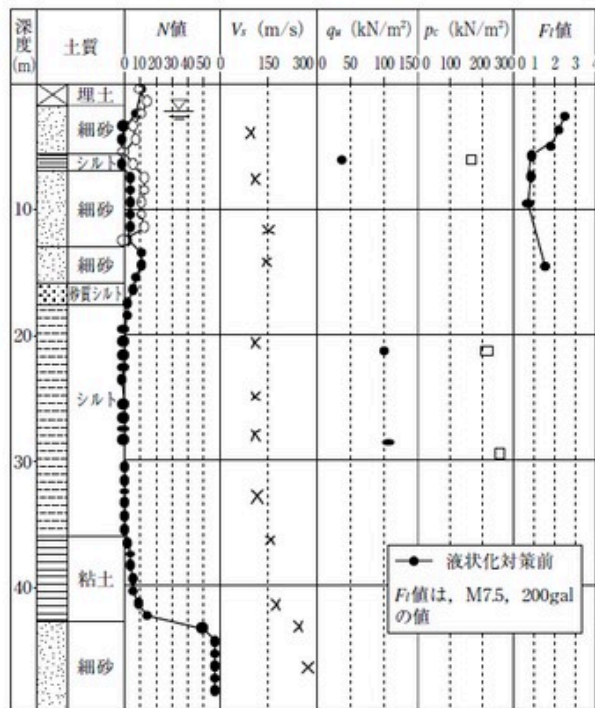


図-1 地盤概要

* FUNAHARA Hideki 大成建設 技術センター、博士（工学） 横浜市戸塚区名瀬町344-1
 ** MAJIMA Masato 株式会社ソイル 取締役社長、博士（工学） 東京都中央区日本橋3-9-12 第六中央ビル7F

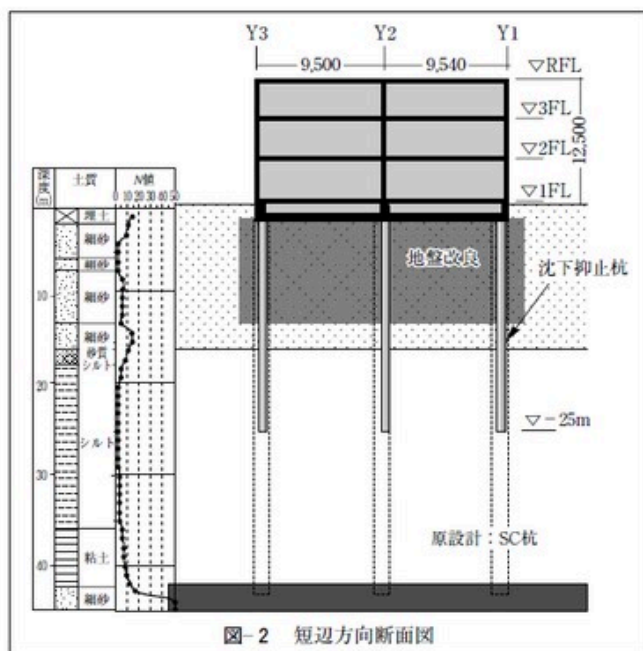


図-2 短辺方向断面図

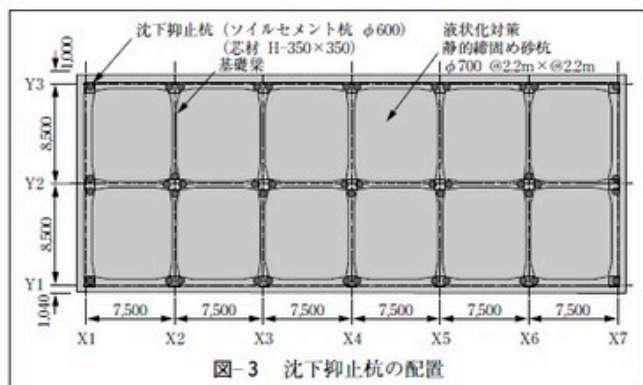


図-3 沈下抑止杭の配置

い砂層と軟弱な粘性土層が厚く堆積した地盤に建つ建物であるため、当初、杭基礎で計画されていたが、地盤調査の結果に基づいて各種の解析的検討を行なった後、地盤改良による液状化防止、直接基礎としての支持力向上、杭の周面摩擦力と水平抵抗の向上などの構造安全性能向上効果を期待してパイルド・ラフト基礎を採用した。

3.2 パイルド・ラフト基礎の設計

3.2.1 地盤の鉛直支持力度

改良後の目標 N 値を10に設定し、 $\phi = \sqrt{(20N)} + 15 = 32^\circ$ より、べた基礎としての長期鉛直支持力度は 60kN/m^2 を十分上回ると算定された。

なお後述するように、地盤改良後の平板載荷試験によれば、長期許容支持力度は 220kN/m^2 以上であり、建物平均荷重度 60kN/m^2 に対して十分な余裕度を有していた。

3.2.2 圧密沈下の可能性

シルト層は 50kN/m^2 以上過圧密状態にあり、排土重量(約 30kN/m^2)を考慮すると、建物建設後の地中応力が圧密降伏応力を上回ることとはないと判断された。

3.2.3 即時沈下に対する杭の設計

建物全体をモデル化した沈下解析により、即時沈下に対する杭の設計を行なった。

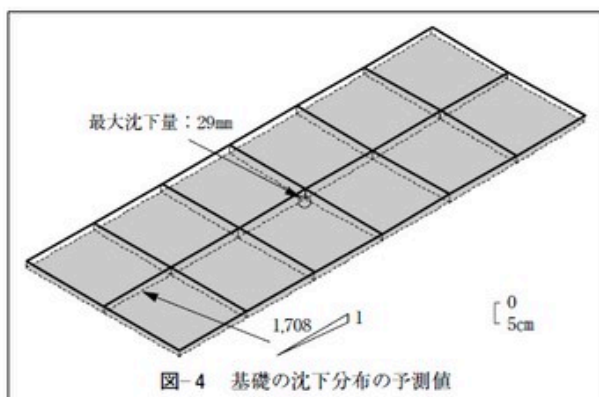


図-4 基礎の沈下分布の予測値

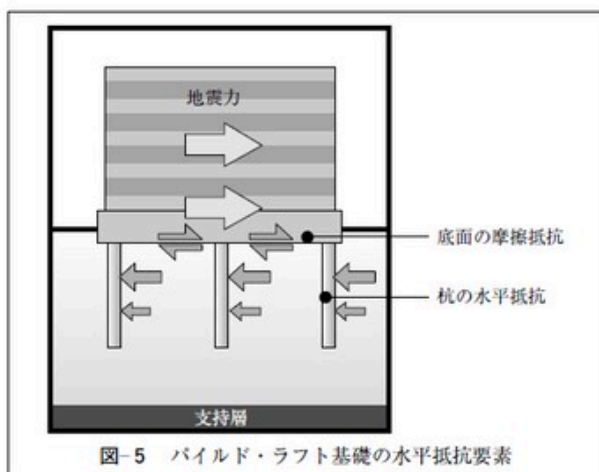


図-5 パイルド・ラフト基礎の水平抵抗要素

沈下解析には、弾性論の解(Steinbrennerの変位解およびmindlinの第1解)と有限要素法を組合わせた手法²⁾を用いた。地盤の変形 E は、まず、PS検層によって得られた各土層の微小ひずみのヤング率 E_0 にひずみ依存性を考慮してSteinbrennerの変位解より多層地盤としての沈下量を求め、これと等価な沈下量となる一様地盤のヤング率を求める方法により決定した。ただし、PS検層は地盤改良前の値であり、改良効果を期待していない。これに対して、杭の周面摩擦耐力の算定には、締固め砂杭打設による N 値の増加を考慮している。

図-3に沈下抑止杭の配置を示す。杭先端位置は地盤調査結果より $GL-25\text{m}$ (シルト層のほぼ中央)とし、各柱位置の杭本数および径は沈下量が設計クライテリア(最大沈下量 50mm 以下、基礎梁の部材角 $1/1500$ 以下)を満足するとともに、杭の負担する長期鉛直荷重が極限支持力のほぼ $1/2$ となるように決定した。

杭には $\phi 600$ のソイルセメント杭を採用し、芯材として $H-350 \times 350 \times 12 \times 19$ を用いた。最終的な仕様による基礎の沈下予測結果は、図-4に示すように最大沈下量約 30mm 、基礎梁の部材角約 $1/1700$ となった。

3.2.4 地震時水平荷重に対する杭の設計

パイルド・ラフト基礎の水平抵抗要素としては、杭の水平抵抗のほかにラフトと地盤との摩擦抵抗があると考えられる(図-5参照)。ただし、基礎全体の水平抵抗は各々の単純な足し合わせではなく、ラフトと地盤の摩擦抵抗と杭の水平抵抗の相互作用が基礎全体の水平抵抗に

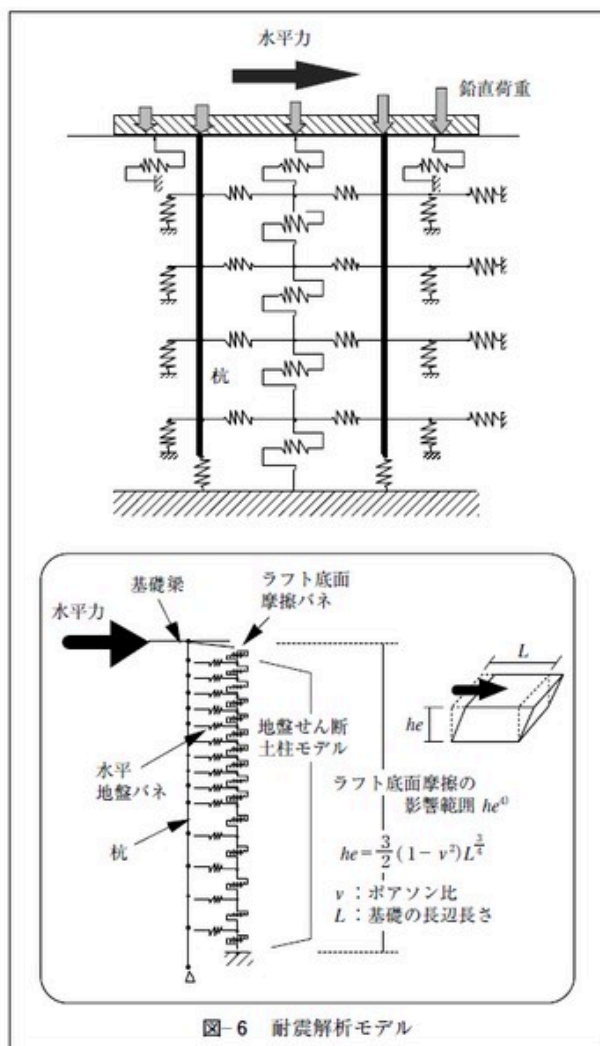


図-6 耐震解析モデル

大きく影響する³⁾。このため、本建物の基礎の耐震設計では、図-6に示すようなラフトと地盤の摩擦抵抗と杭の水平抵抗の相互作用を考慮できる解析モデルを用いた⁴⁾。これは、通常杭の耐震設計に用いられているウィンクラーパネモデルに、ラフトと地盤の摩擦抵抗をモデル化したせん断土柱モデルを組み合わせ、ラフトの底面摩擦により生じる地盤の変形が杭の水平抵抗に与える影響を考慮したものである。

杭の水平地盤パネの E_0 は N 値より求めたが、締固め砂杭の打設による N 値の増加を考慮している。また、せん断土柱モデルの厚さ h_e の算定には、図-6中に示す長尾らの提案式⁵⁾を用いた。

設計では、杭の曲げ応力に対してはH型钢(写真-1)で、せん断応力に対してはソイルセメントおよびH型钢で抵抗するものとして、杭の断面検討を行なった。

4. 地盤改良

4.1 地盤改良の基本方針と工法の選定

既に述べたように、当建物の基礎はパイルド・ラフト基礎として設計されており、地盤改良の目的は液状化を防止することによって、地震時においても直接基礎とし



写真-1 沈下抑止杭の施工

での鉛直支持力を確保し、かつ杭周面摩擦力を確保することにある。

液状化防止対策としては各種の地盤改良工法があるが、改良による N 値の増加、つまり支持力、杭周面摩擦力、水平地盤反力の増加および沈下低減などの二次的な効果を期待できる締固め工法を採用することとした。締固め工法としては、パイロハンマーによる振動衝撃エネルギーを利用したサンドコンパクションパイル工法が一般的であるが、当建物は、敷地境界から2m程度に位置し、また周辺には公共道路や建物が存在することから、周辺環境への影響に配慮して低振動・低騒音で施工可能な静的締固め砂杭工法を採用した。

4.2 地盤改良の設計

4.2.1 砂杭の打設間隔

地盤改良の設計は、レベル1相当の地震動($M7.5$, $\alpha_{max}=200gal$)に対し、砂杭中間の N 値を用いた液状化判定において、 $F_1>1.0$ を確保できるように行なった。以下に打設間隔の決定手順を示す。

- ① 原地盤の調査結果に基づく N 値、 F_c などを用いて液状化判定を行ない、 $F_1>1.0$ を満たす必要 N_1 値を求める。
- ② F_c を用い、下式(水野・平間の方法)により e_{max} 、 e_{min} を求める。

$$e_{max} = 0.02F_c + 1.0$$

$$e_{min} = 0.008F_c + 0.6$$

- ③ F_c による N 値の補正増分 ΔN_f を表-1より求める。

 表-1 F_c による N 値の補正増分 ΔN_f の求め方

$F_c(\%)$	ΔN_f
0~5	0
5~10	$1.2F_c - 5$
10~20	$6 + 0.2(F_c - 10)$
20~	$8 + 0.1(F_c - 20)$

- ④ 原地盤 N 値(N_0)と有効土被り圧 σ'_v (kg/cm^2)を用い、時松・吉見の方法により相対密度 D_{ro} および e_0 を求める。

$$D_{ro} = 21 \sqrt{\frac{N}{0.7 + \sigma'_v} + \frac{\Delta N_f}{1.7}}$$

$$e_0 = e_{max} - D_{ro}/100(e_{max} - e_{min})$$

- ⑤ 同様に、改良目標 N 値(N_1)に対する相対密度 D_1 と間隙比 e_1 を求める。

- ⑥ F_c による有効締固め係数 R_c を求める。

$$R_c = 1.05 - 0.46 \log F_c$$

- ⑦ e_1 に対応する改良率 a_s を下式より求める。

$$a_s = (e_0 - e_1)/R_c(1 + e_0)$$

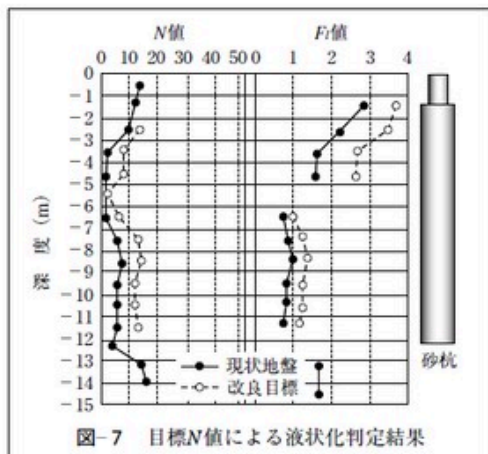


図-7 目標N値による液状化判定結果

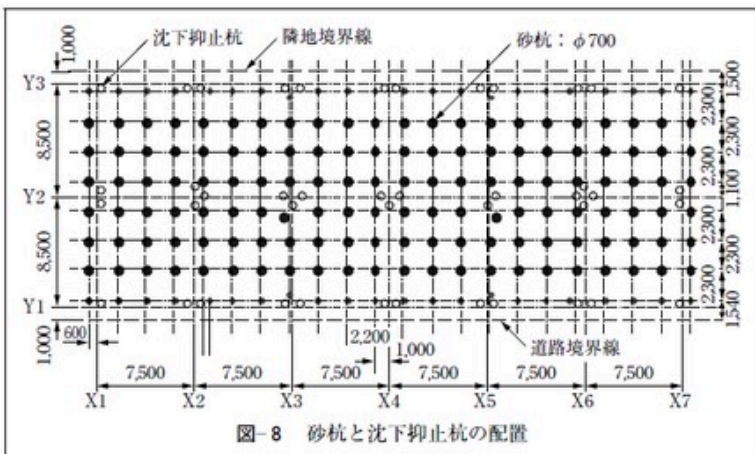


図-8 砂杭と沈下抑止杭の配置

- ⑧ 砂杭断面積 A 、正方形配置として打設間隔 X を下式より求める。

$$D_{ro} = 21 \sqrt{\frac{N}{0.7 + \sigma'_v} + \frac{\Delta N_f}{1.7}}$$

上記計算結果に基づき、砂杭径 $\phi 70\text{cm}$ を 2.2m 間隔で打設することとした。図-7に原地盤および改良後の想定 N 値に対する液状化判定結果 (F_i) の深度方向分布を示す。

4.2.2 改良深度および範囲

改良深度は液状化判定結果に基づき、 $\text{GL}-12\text{m}$ までとした。ただし、地表面から基礎底までの範囲は改良対象外として、 $\phi 40\text{cm}$ のサンドドレーンとした。一方、改良範囲については、前述のように建物と敷地境界までの距離がきわめて短く、建築基礎構造設計指針で提案されているように改良深さの $1/4 \sim 1/2$ を確保することは不可能であり、隣接地の地盤や構造物への影響も懸念された。そこで、改良範囲は建物直下のみとした。図-8に砂杭および沈下抑止杭の配置を示す。

4.3 地盤改良の施工

既に述べたように、周辺環境に配慮して静的締固め砂杭工法を採用したが、建物から隣地境界までの距離がきわめて近いこと、通常の方法で砂杭を施工すると、地盤の側方変位によって隣地の構造物を変位させることが懸念された。そこで、以下の手順によって地盤改良工事を行なうとともに、隣地建物の基礎の鉛直および水平変位をモニタリングしながら工事を行なった。その結果、隣地建物の変位量は鉛直水平ともに 2mm 以下の微小なものであった。

〈施工手順〉

- ① 東西側最外端の砂杭打設位置を変位吸収溝として幅 1m 、深さ 50cm の範囲で掘削する。
- ② 東側の変位吸収溝内の砂杭打設位置を直径 40cm のオーガーにより $\text{GL}-10\text{m}$ まで掘削し、変位吸収孔とする。
- ③ 東側より直径 70cm の砂杭を所定の位置・深度に順次3列打設する。
- ④ 西側の変位吸収溝内の砂杭打設位置に変位吸収孔を設ける。

- ⑤ 西側より直径 70cm の砂杭を所定の位置・深度に順次3列打設する。

- ⑥ 東西の変位吸収孔の位置に、砂杭を所定の深度まで打設する。

4.4 改良効果の確認

地盤改良工事の終了2週間後に砂杭間地盤において標準貫入試験を実施し、目標どおりの N 値と F 値を確認できた。

一方、掘削工事終了後、床付け面の砂杭間地盤において平板載荷試験を実施した。試験方法はJISSに準じた。設計荷重時 60kN/m^2 の沈下量は約 3mm 、長期許容支持力度約 220kN/m^2 となっており、支持力に対して十分安全であることが確認できた。

5. ま と め

本件のように液状化の危惧される軟弱地盤において、締固め砂杭工法とバイルド・ラフト基礎を併用する基礎工法は合理的であり、多くの構造物で適用できると考えられる。

直接基礎やバイルド・ラフト基礎のように建物荷重のすべてまたは一部を改良地盤に負担させる設計を行なう場合には、基礎の沈下量を予測するうえで、改良地盤の変形係数(ヤング率)の評価が重要な意味を持つ。改良地盤上での平板載荷試験データや建物の沈下観測データの蓄積により、変形係数の評価法の高精度化も望まれている。

参考文献

- 1) 小林治男ほか：液状化対策工を併用したバイルド・ラフト基礎の低層建物への適用、第36回地盤工学研究発表会、pp. 713~720, 2001.
- 2) 長尾俊昌ほか：バイルド・ラフト基礎の沈下挙動に関する研究、日本建築学会大会、pp. 809~810, 1998.
- 3) 小林治男ほか：バイルド・ラフト基礎の原位置水平載荷実験その1~3、日本建築学会大会、pp. 613~618, 2000.
- 4) 長尾俊昌ほか：バイルド・ラフト基礎の原位置水平載荷実験その4、日本建築学会大会、pp. 421~422, 2001.
- 5) 長尾俊昌ほか：地下壁に作用する摩擦に関する基礎的研究 摩擦モデルの提案、大成建設技術研究所報、第31号、pp. 183~186, 1998.