

静的締固め固化改良工法（HCP 工法）による パイルド・ラフト基礎の物流倉庫への適用

尻無濱昭三*¹・伊藤 晋広*²・須崎 英晶*³

概 要

パイルド・ラフト基礎（併用基礎）工法の液状化地盤への適用拡大を目的に、静的締固め固化改良工法（HCP 工法）を開発し、2007 年に日本建築センターの技術審査証明を取得した。HCP 工法は、液状化対策として、都市部の建築工事において採用実績の多い、静的締固め砂杭工法の施工機械を用い、砂杭打設と同様な手順で、材料を砂から低強度・低スランプのコンクリートに置き換えて固化杭を構築し、施工の合理化を図る工法である。本稿は、大型倉庫への HCP 工法適用に際して実施した設計・解析等について報告する。

キーワード：パイルド・ラフト，締固め，沈下低減，液状化，大型倉庫

APPLICATION OF A PILED RAFT FOUNDATION TO THE CONSTRUCTION OF A LOGISTICS WAREHOUSE BY THE USE OF THE HCP METHOD

Shozo SHIRINASHIHAMA *¹, Kunihiro ITOH *², Hideaki SUZAKI *³

Abstract

With the purpose of expanding the use of a piled raft foundation method (common use foundation) into the improvement of liquefaction ground, we developed a Hardening Compaction Pile of static consolidation (HCP) which was awarded a certificate of technical review from the Building Center of Japan. Depending upon a construction machine for static consolidation sand pile method which has been used many times in construction in urban areas, the HCP method is an approach of streamlining construction by changing the material from sand to concrete of low strength and low slump, following the procedure similar to the sand pile placement.

This paper reports on the design and analysis, which have been implemented for a project applying the HCP method to a large-scale warehouse.

Keywords: Piled raft, Compaction, Settlement reduction, Liquefaction, Large-scale logistics warehouse

*1 Manager, Architectural Department, Architectural Division

*2 Manager, Architectural Design Department, Architectural Division

*3 Project Manager, Tokyo Branch

静的締固め固化改良工法（HCP工法）による パイルド・ラフト基礎の物流倉庫への適用

尻無濱昭三*1・伊藤晋広*2・須崎英晶*3

1. はじめに

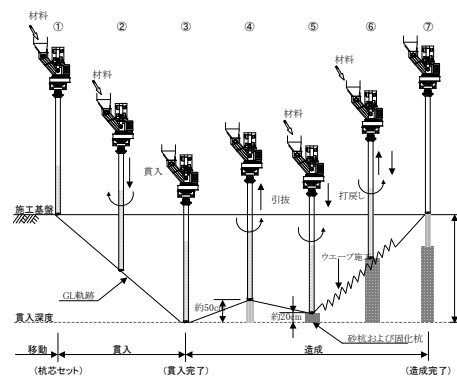
パイルド・ラフト基礎(併用基礎)は、杭とラフト(直接基礎)を併用した基礎であり、主として軟弱地盤に建設される中低層建物用の合理的な基礎工法として、急速に採用実績を増やしつつある。ただし、杭は沈下低減の目的で使用される場合が多いため、鉛直支持力は、全てラフトで確保されていることが必要となる。したがって、地震時に液状化の可能性がある地盤では、何らかの対策を施して被害につながるような液状化の発生を許容しないことが、パイルド・ラフト基礎採用の条件となる。一方、液状化対策工法には、各種の工法が実用化されているが、都市部の建築工事においては、特に振動・騒音に関する環境条件が厳しいこともあって、サンドコンパクションパイル(SCP)工法の一つである静的締固め工法が採用されることが多い。そのような背景のもと、静的締固め砂杭工法の施工機械で、砂杭打設と同様な手順で、材料を砂から、コンクリートに置き換えて、施工の合理化を図る静的締固め固化改良工法(HCP工法)を開発し、2007年に日本建築センターの技術審査証明²⁾を取得している。今回、大型倉庫へHCP工法が採用され、パイルド・ラフト基礎として、当社初の設計施工物件となった。本稿では、HCP工法と適用建物の概要およびHCP工法適用に際して実施した設計・解析ならびに施工について報告する。

2. 静的締固め固化改良工法の概要

静的締固め固化改良工法[HCP(Hardening



写真-1 HCP工法の施工状況



- ①ケーシングのセット、材料投入。
- ②ケーシングを回転および強制昇降装置で圧入力を加え、ケーシングを貫入。
- ③所定深度まで貫入
- ④ケーシングを所定深度(50cm)引抜きながら、材料を地中に排出。(ケーシング内を圧気)
- ⑤所定の杭径を得るため打ち戻す(30cm)
- ⑥④、⑤を繰り返す(ウェーブ施工)、材料の補充
- ⑦造成完了

図-1 施工サイクル模式図
(砂杭, 固化杭)

Compaction Pile)工法]は、液状化地盤に適用するパイルド・ラフト基礎工法であり、静的締固め砂杭工法により液状化を防止すると共に、同じ施工機械(写真-1参照)で固化杭を施工することにより、沈下低減のための合理的な杭と

*1 建築本部 建築部 建築技術グループ

*2 建築本部 設計部

*3 東京支店 作業所長

して利用する。固化杭は、砂杭工法における材料を砂から、低強度・低スランプのコンクリートに置換したもので、図-1に示す施工工程も、砂杭構築時と同様な手順で実施し、砂杭と同程度の締固め効果を有するほか、沈下低減のためラフトと分担して建物荷重を支持する。固化杭の支持性能については、ラフトとの沈下剛性比によるが、基本的には同等の断面と長さを有する深層混合処理工法による改良体並みの支持力を期待している。固化杭の材料は、レディーミクストコンクリートのほか、環境負荷低減の目的で再生砕石あるいは高炉スラグ等のリサイクル材料を骨材とするコンクリートを使用することもできる。コンクリートの配合強度は、負担する支持力と経済性を考慮して、10~15N/mm²に設定し、スランプについては、固化杭を砂杭と同等に拡張する際の施工性等を考慮して8cmを基本としている²⁾。

3. 適用建物の概要

3.1 基礎構造の設計方針

本建物の敷地は、既存建物(S62年)の基礎として、GL-32mの砂層を支持層とする杭径φ=500mmおよびφ=600mmの既製コンクリート杭(杭先端=GL-33m)が196本配置されており、新設建物の75%の範囲において、既存建物と平面的に重なっている。当該敷地は地震時に液状化の発生が懸念される地盤であり、敷地全体をサンドコンパクションパイル工法(SCP工法)による液状化対策を施し、75%の重なり部分では、既存杭を残置させ、残りの25%部分は、HCP工法による固化杭に荷重を負担させる方針とした。基礎形式は、設計上、SCP工法による地盤改良効果も考慮して、表層地盤の地耐力により建物荷重を支える直接基礎(べた基礎)とした。建物基礎の概要を図-2に示す。

3.2 建物概要

建物の概要を表-1に示す。対象建物は、鉄骨造、地上2階建て、主要用途は倉庫および事務所である。

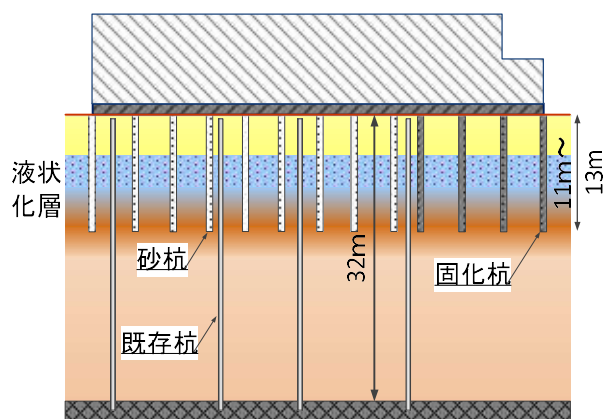


図-2 建物基礎の概要

表-1 建物の概要

建設場所	埼玉県越谷市
主要用途	倉庫および事務所
構造種別	鉄骨造
階数	地上2階建て
最高高さ	11.326m
建築面積	4543.19m ²
延べ面積	8372.68m ²
主な仕上	屋根:ダブル折板H=160 外壁:サンドイッチパネルt=35 床:2階合成デッキ床 :1階コンクリート床

建物の平面形状は、長手(X)方向10スパン、短手(Y)方向6スパンの整形な形状で、架構は8.65m×8.65mを基本グリッドとした純ラーメン架構である。柱は角形鋼管を使用し、柱脚に半固定露出型柱脚工法を採用している。

3.3 地盤概要

本建物の建設地は、埼玉県の南東部に広がる「中川低地」と呼ばれる低地で、元荒川の右岸に位置し、液状化の発生が懸念される場所で、市の液状化危険度マップ³⁾においても液状化危険度は高いとされる地域である。地形区分としては、後背湿地に当たる。当該地の地質は、沖積層の有楽町層上部、有楽町層下部、洪積層の東京層から構成され、軟弱な層相を示す沖積層がやや薄くなっている地域である。図-3に地盤柱状図と基礎の関係を示す。地表面に厚さ1.4m~2.2mの埋土が分布し、続いて厚さ9.0m~10.60mの有楽町層が分布している。有楽町層上部は、表層部が0.8m~1.5mの粘土層、続く

てN値0~17 (平均N値4.3) の砂質土層が厚さ2.5m~3.5m程度で分布している。その下部の有楽町層は、N値0~2(平均N値0.8)のシルト層(厚さ2.4m~3.0m)およびN値3~9の砂質土層(厚さ1.7m~4.8m)が分布している。これ以下は、シルト層および砂層の互層で、東京層と呼ばれる洪積層で、GL-30m以深の細砂層およびシルト層が比較的N値も安定しており、杭基礎の場合の支持地盤となっている。地下水位はGL-0.95m~-1.55mにあり、表層の埋土における平板載荷試験からは、長期許容支持力度として140kN/m²の結果が得られているが、敷地造成時の浅層地盤改良土である可能性も唆されている。有楽町層のシルト等の粘性土地盤(GL-12m~13mまで)は、建物荷重による上載圧が加わると圧密降伏応力を超える可能性もあり、液状化防止と沈下抑止を兼ねたHCP工法を提案し、直接基礎で設計することとした。

4. 地盤改良(HCP)の設計

4.1 液状化対策の検討

HCP工法では、砂杭(SCP)による改良地盤を複合地盤とみなして建物を直接支持するとともに、固化杭には主に周面摩擦を見込んだ摩擦杭として建物の沈下低減の役割を担わせる。本敷地の液状化に対する目標性能は、文献⁴⁾を参考に表-2とした。この目標性能を満足する改良仕様を文献⁴⁾の方法Dに準じて算定した。粒度試験は、全深度で実施していないことから、実施していない箇所細粒分含有率Fcは、地層および土質区分とN値を考慮して、実施箇所のFcより推定した。砂杭の配置は、既存および新規ボーリング毎に算定した改良仕様から、改良長Lは11.6m, 12.6m, 13.6mの3タイプに、改良間隔はφ700mmの砂杭の正方形配置を基本とし、

2.3m×2.3m (改良率As=7.2%),

1.95m×1.95m (As=10.1%),

1.95m×1.5m (As=13.2%),

1.55m×1.73m (As=14.4%)の4タイプとした。

液状化抵抗比には、割り増し係数C=1.2を考慮し、固化杭の極限支持力Ruは、以下の式によって算定した。

$$R_u = R_p + R_f \text{ (kN)} \quad (1)$$

$$R_p = 75 \cdot N \cdot A_p \text{ (kN)} \quad (2)$$

$$R_f = \sum (\phi \cdot \tau_i \cdot L) \text{ (kN)} \quad (3)$$

$$R_u = 2/3(R_p + R_f) = 2/3(382 + 345) = 484.7 \text{ (kN)}$$

ここに、Rp: 極限先端支持力, Rf: 極限周面摩擦力, Ap: 杭先端の断面積, τi: 杭の周面摩擦力度, L: 杭長, φ: 杭の周長である。

また、固化杭の荷重分担率を70%としている。

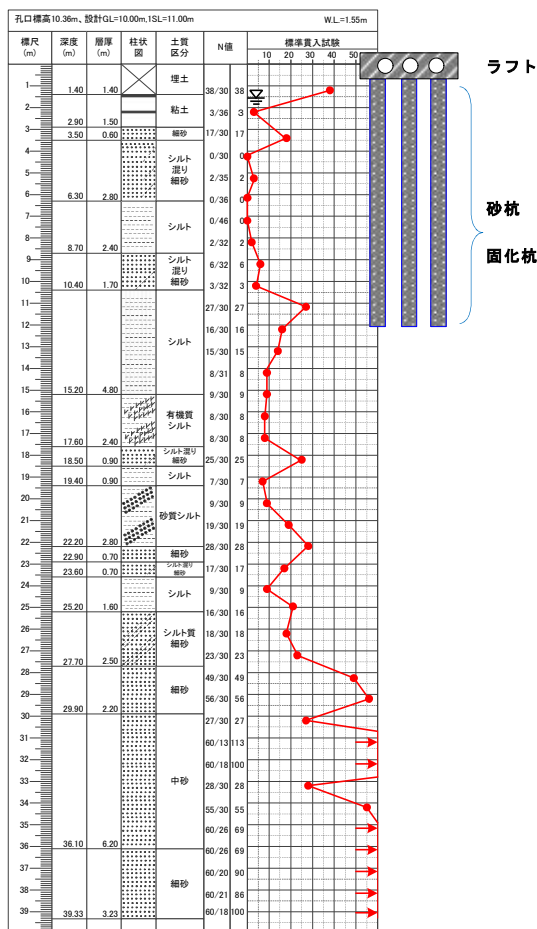


図-3 地盤柱状図と基礎の関係

表-2 改良地盤の目標性能

限界状態	地表面最大加速度	目標性能
損傷	200cm/s ²	液状化安全率 FL ≥ 1.0
終局	350cm/s ²	地表面動的変位 D _{cy} ≤ 5cm または 液状化指数 PL ≤ 5

4. 2 沈下の検討

沈下の検討は、3次元FEM（図-4参照）による弾性解析で行った。解析は、地盤をソリッド要素、ラフトをシェル要素、固化杭および既存PC杭をビーム要素でモデル化し、杭とラフトと地盤は、節点共有とした。また、境界条件は、地盤側面を鉛直方向自由のローラー条件、底面を固定条件とした。杭とラフトの節点は、鉛直方向の軸力を伝達するようにした。解析に用いた地盤定数を表-3に示す。表層地盤の地盤定数の設定は、砂杭による改良効果を見込んだ改良後N値を参考に、 $E=2800N$ の経験式と表層地盤の平板載荷試験結果および孔内水平載荷試験結果の比較から、さらに、表層部分の粘性土系地盤では、改良後N値の増大が差ほど見込めないことから、地盤変形を考慮した値としている。

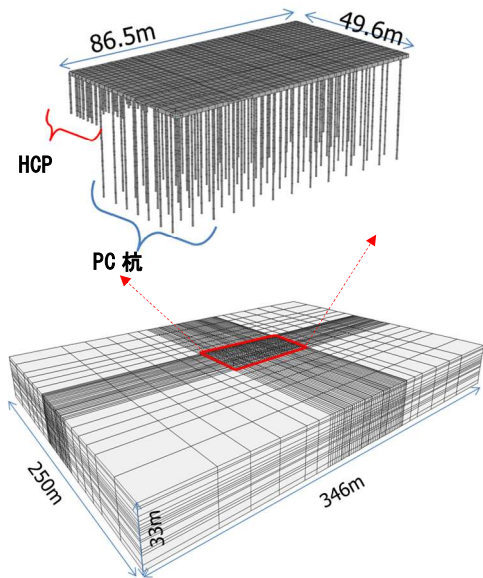


図-4 FEMモデル

表-3 解析に用いた地盤定数（基本モデル）

複合地盤	地質記号	土質	深度 (m)	層厚 (m)	変形係数 E_s (MN/m ²)	ポアソン比	湿潤密度 (kN/m ³)	
埋土	B	粘性土	1	2.0	2.0	7.47	0.45	16.0
有楽町層上部	Yuc	粘性土	2	3.0	1.0	7.56	0.45	17.0
	Yus	シルト質中砂	3	6.3	3.3	5.60	0.40	18.0
有楽町層下部	Ylc	シルト	4	8.7	2.4	2.80	0.45	16.0
	Yls	シルト混り細砂	5	10.4	1.7	16.8	0.40	18.0
東京層	Dc1	シルト	6	12.0	1.6	44.8	0.40	17.0
		シルト	7	13.0	1.0	44.8	0.40	17.0
		シルト	7	14.0	1.0	44.8	0.40	17.0
		シルト	8	15.2	1.2	44.8	0.40	17.0
	Dc2	有機質シルト	9	17.6	2.4	19.6	0.45	15.0
	Ds2	シルト混り細砂	10	18.5	0.9	64.4	0.35	18.0
	Dc3	砂質シルト	11	22.2	3.7	39.2	0.40	17.0
	Ds3	細砂	12	23.6	1.4	61.6	0.35	18.0
	Dc4	シルト	13	25.2	1.6	50.4	0.35	17.0
	Ds4	細砂	14	29.9	4.7	86.8	0.30	19.0
Ds5	細砂	15	33.0	3.1	168.0	0.25	20.0	

また、固化杭のヤング係数は本工法の実績から $E_p=950F_c$ とした。ラフトは、構造的には、スラブ厚1.2mで、内部に $\phi=700$ mのボイドを設置した中空マットスラブとなっており、解析上は、ボイドを考慮したスラブ剛性としている。地盤および固化杭に作用する荷重は、マットスラブ重量の他に、1階床に作用する積載荷重と1階柱脚に作用する鉛直荷重とした。設計上の積載荷重を表-4に示す。図-5に、最終的な砂杭固化杭の配置図を示す。外周部には砂杭と固化杭打設による地盤の変形を吸収する変位緩衝孔を事前に削孔している。

表-4 設計上の積載荷重

	床の設計に用いる積載荷重
2階	20kN/m ² (約 2.0t/m ²)
1階	30kN/m ² (約 3.0t/m ²)

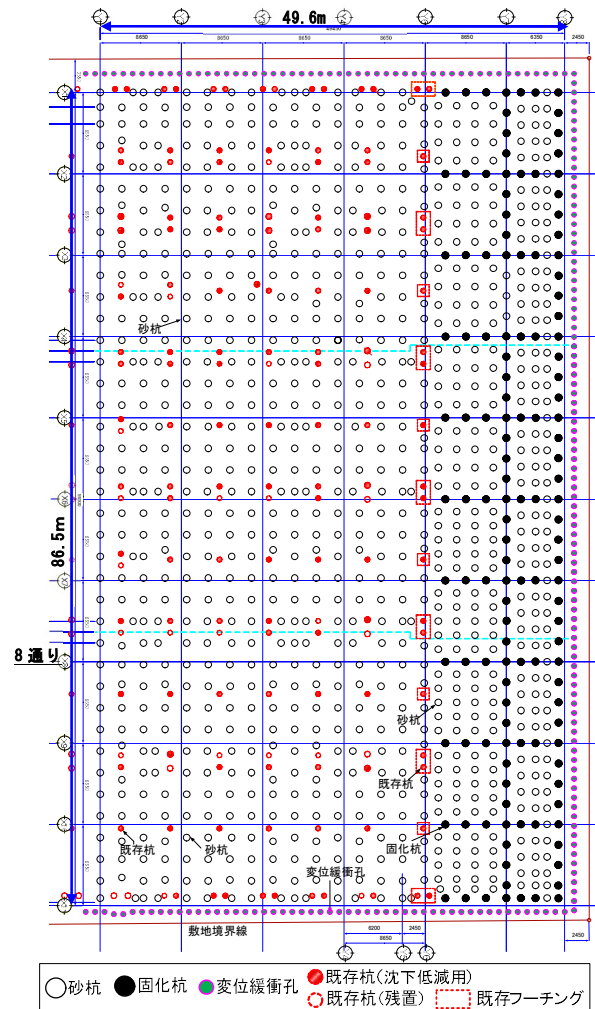


図-5 地盤改良図

沈下解析結果の一例として、短辺方向8通り(図-5参照)の値を計測値と併せて図-6に示す。計測は、竣工前の最終スラブのコンクリート打設直後で、積載荷重が無い状態である。沈下状況は、局所的には解析値と異なるが、全体的な傾向は概ね合っている。また、全ての積載荷重が載った状態は、現状の2倍程度(30mm前後)の沈下量が予測される。

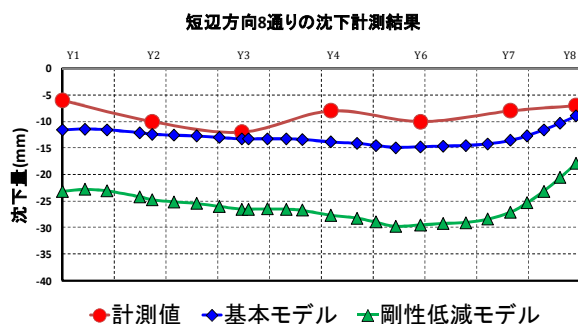


図-6 解析結果

5. 施工

施工は、緩衝孔を施工本数195本、総貫入長2464.5m、静的締固め砂杭は施工本数934本、改良長(φ700)は11260m、使用砕石量は5700m³で、既存建物の解体ガラを利用した再生砕石の使用は約3000m³であった。固化杭は、施工本数137本、改良長(φ700)で1660m、使用生コン量約650m³であった。また、使用した普通コンクリートは設計基準強度 $F_c=18\text{N/mm}^2$ 、スランプ8cmである。出来形としては、杭径、杭間隔、杭芯ズレも規格値以内に収まっていた。砂杭間隔の管理例を写真-2に示す。固化杭の出来形(杭径)状況を写真-3に示す。

既存PC杭の残置された部分の施工では、砂杭の施工により既存杭にダメージを与えないような施工順序とすること等の配慮をしている。既存PC杭とラフトの接合は、既存フーチングが新設ラフトに支障する箇所は、既存フーチングを撤去して杭頭補強後、厚さ200mmの砕石を転圧して、ラフトを構築している。

施工後の改良効果の確認のために、砂杭で1箇所、固化杭近傍で2箇所の地盤ボーリングを実施して改良効果を確認した。結果、3箇所のいずれの地点においても、地表面加速度200gal時の目標値 $FL > 1.0$ を満足していた(FLの最小値は1.16~1.93であった)。また、地表面加速度350gal時の目標値 $D_{cy} \leq 5\text{cm}$ または $PL \leq 5$ に対して、PL値は0~7.59であったが、 D_{cy} が0cm~4.49cmと目標性能を満足していた。さらに、粘性土地盤のN値増加が見込めないことから、改良地盤を複合地盤として評価した場合の支持



写真-2 砂杭の杭間隔



写真-3 固化杭の出来形(杭径)

力は、設計接地圧 80kN/m^2 を満足していた。

6. まとめ

HCP工法適用に際して実施した設計・解析ならびに、施工について報告した。沈下状況に関しては、今後も継続してデータの収集を行う予定である。

謝辞

HCP 工法は、(株)安藤・間、東急建設(株)、戸田建設(株)、西松建設(株)、(株)不動テトラ、三井住友建設(株)との共同開発工法である。HCP 工法の適用にあたり東京支店（関越支店）の各位に、施工に際しては、(株)不動テトラの協力を得た。記して謝意を示す次第である。

参考文献

1)伊勢本ほか：沈下低減のための締固め固化杭工法の開発（その 1～5），2007 年度日本建築

学会大会梗概集（九州），B-1，pp.423-434，2007.8

2)建設技術審査証明（建築技術）報告書,BCJ-審査証明-135，静的締固め固化改良工法「HCP 工法(Hardening Compaction Pile)」，財団法人日本建築センター，2007.11

3)埼玉県越谷市地震ハザードマップ，http://www.city.koshigaya.saitama.jp/map/jhazard/img/hzm_ks01.pdf（2013.10 現在）

4)日本建築学会：建築基礎のための地盤改良設計指針案，2006.11