

静的締固め固化改良工法（HCP 工法）の開発 Development of Hardening Compaction Pile Method

新井 寿昭*

Toshiaki Arai

鹿籠 泰幸**

Yasuyuki Shikamori

武内 義夫*

Yoshio Takeuchi

要 約

主に軟弱地盤に建設される中低層建物を対象とした合理的な基礎工法としてパイルド・ラフト基礎工法がある。パイルド・ラフト基礎の杭は、沈下低減の目的で使用される場合が多いため、基本的に支持力はラフト部で確保されている必要がある。したがって、地震時に液状化するような地盤の場合には、対策を実施して液状化の発生を防止する必要がある。

今回、液状化対策工法の一つである静的締固め砂杭工法に、建物の沈下低減を目的としたコンクリートを材料とする柱状改良体も造成可能とした静的締固め固化改良工法を8社共同で開発した。本報では、開発した静的締固め固化改良工法の概要と、コンクリートを材料とする柱状改良体の施工性および品質や性能を確認することを目的として実施した施工性試験の概要と結果について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. HCP 工法の概要
- § 3. 施工性、性能・品質確認試験
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

近年では、軟弱地盤に建設される中低層建物を中心に、支持杭に代わる合理的な基礎工法としてパイルド・ラフト基礎の採用が増加している¹⁾。パイルド・ラフト基礎は、直接基礎と杭基礎を併用した基礎形式であり、荷重に対して直接基礎と杭基礎が複合して抵抗するものである²⁾。パイルド・ラフト基礎は、通常は直接基礎として取り扱われることから、既製杭等を用いるものの杭は沈下低減としての役割でしかない。したがって、地震時に液状化の可能性のある地盤では、対策を実施して液状化の発生を防止する必要がある。

液状化対策工法には種々の工法が開発・採用されているが、都市部での工事では特に振動や騒音が問題となることから、静的締固め砂杭工法の採用が多い。

今回開発した静的締固め固化改良工法（以降、HCP工法と称す。HCP：Hardening Compaction Pile）は、液状

化地盤に適用可能なパイルド・ラフト基礎工法であり、液状化対策のための砂、碎石等を材料とする柱状改良体（以降、砂杭と称する）を施工する静的締固め砂杭工法³⁾に、建物の沈下低減のためのコンクリートを材料とする柱状改良体（以降、固化杭と称する）も造成可能とした工法である。

HCP工法の開発にあたって、施工性試験等を実施して施工システムを確立し、2007年11月に財団法人日本建築センターの建設技術審査証明（建築技術）（BCJ—審査証明—135）を取得した。

§ 2. HCP 工法の概要⁴⁾

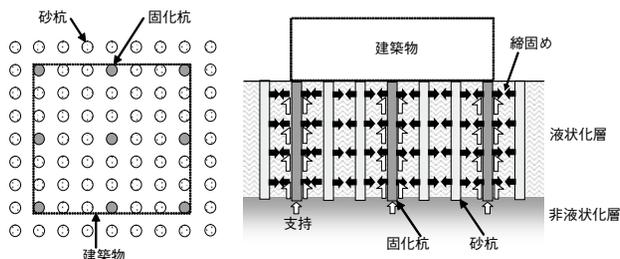
2-1 工法概要

HCP工法の概要を図-1に示す。HCP工法は、静的締固め砂杭工法による砂杭間に、コンクリートを柱状に地盤に排出、拡径して地盤を静的に締め固め、周辺地盤の密度を増大させる液状化対策工法である。また、本工法で施工されたコンクリートを材料とする固化杭は、建築物の沈下低減に寄与可能な品質を有している。静的締固め砂杭工法で使用する施工機械を用いて、同じ手順によりコンクリートを排出、拡径して固化杭も造成できるよう改良したもので、本工法により砂杭間に固化杭を配置した場合も、砂杭のみの場合と同等の締固め効果（密度増大効果）の評価が可能である。

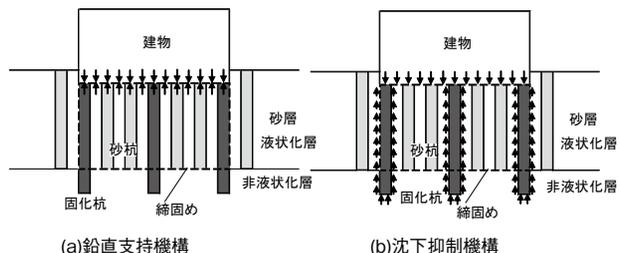
なお、本工法は、砂質地盤において液状化対策のため

* 技術研究所技術研究部

**技術研究所



図一 HCP工法の概要



図二 鉛直支持・沈下抑制機構

の締固め効果と沈下低減効果を同時に実現することを主目的に開発された工法であるが、粘性土地盤との互層の場合も所定の形状、品質で施工が可能である。

固化杭は、基本的には砂杭の材料を低強度・低スランブのコンクリートに置き換えたもので、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1本当たりの施工に要する時間は、材料投入回数の増加、ケーシングの洗浄等で、砂杭の1.5倍程度である。

固化杭の支持性能については、ラフト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10~15 N/mm²に設定し、スランブについては、固化杭を砂杭と同等に拡径する際の施工性等を考慮して8 cmを基本としている。

HCP工法では、上部構造物および基礎からの鉛直荷重は、図一2 (a) に示すように砂杭の打設により支持力(N値)が増加した砂杭間地盤と砂杭による複合地盤で支持される。

建物に生じる有害な沈下に対しては、図一2 (b) に示すように固化杭と地盤間の周面摩擦力と固化杭の先端支持力で抵抗することによる沈下抑制効果を考慮する。

2-2 適用範囲

HCP工法の適用範囲を以下に示す。ここで示した適用範囲は、実施した各種試験および実現場における試験施工実績、静的締固め砂杭工法の使用実績から設定した。

① 施工径

- ・固化杭：拡径管理値 700 mm
(固化杭耐力検討時の設計値 600 mm, ただし粘性土地盤で拡径を行う場合の軸断面積の設計値は15%低減する)

- ・砂杭：拡径管理値 700 mm

② 施工深さ

- ・固化杭：16.5 m (実績)
- ・砂杭：23.0 m (実績)
(施工機械の施工可能深さ：25.0 m)

③ 施工ピッチ

- 1.1 m~2.7 m
(正方形配置の場合の改良率：0.32~0.05)

④ 使用材料

- ・固化杭：
普通コンクリート (JIS A 5308 レディーミクストコンクリートまたは JIS 表示許可工場で製造した JIS 規格外品で実績のある強度のもので、スランブは8 cm とする)

再生コンクリート (骨材として、JIS A 5001 再生砕石, JIS A 5011 コンクリート用スラグ骨材等のリサイクル材またはその同等品を用いて現場練りまたはコンクリート工場で製造したもので、スランブ値は2.5 cm~14.5 cm とする)

セメント：高炉セメント B 種, または普通ポルトランドセメント

- ・砂杭：砂, 砕石または再生砕石, スラグ

⑤ 対象地盤

- 砂質土・砂礫
砂質土・砂礫と粘性土の互層
(貫入可能地盤：砂質土・砂礫は N 値 30 以下, 粘性土は N 値 15 以下)

⑥ 対象建物

- ・基礎形式：パイルド・ラフト基礎
(ラフト部はべた基礎, 布基礎)
杭基礎との異種基礎
(杭基礎部以外はべた基礎, 布基礎)
- ・上部構造：特に制限はない

2-3 施工方法

固化杭の施工方法を図一3 および以下に示す。

- ① ケーシングを所定位置にセットした後、周辺土の逆流防止材として砂または砕石をケーシング内に投入する。
- ② 回転駆動装置によってケーシングを回転させるとともに、強制昇降装置によってケーシングに圧入力を加えながらケーシングを貫入する。
- ③ 所定深度までケーシングを貫入する。
- ④ 逆流防止材を排出し、設計深度以深に材料を押し込み、締固める。
- ⑤ コンクリートをケーシング内に投入する。

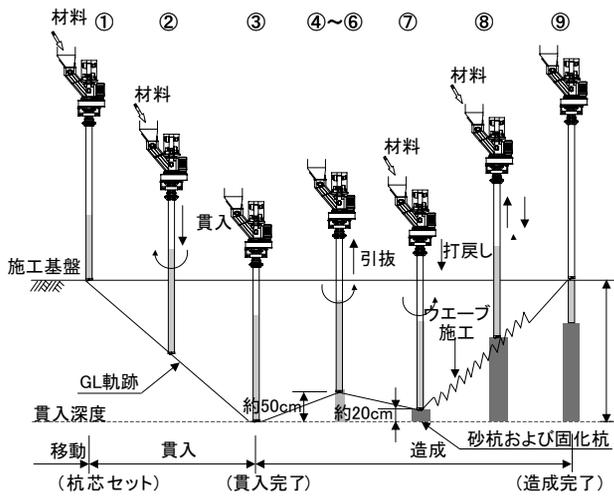


図-3 施工サイクル模式図

- ⑥ ケーシングを所定長（通常約 50 cm）引き抜きながら、ケーシング内の材料を地中に排出する。この時には材料排出補助のためケーシング内に圧縮空気を充填する。
- ⑦ 上記⑥の材料排出量に対応し、かつ所要の杭径を得るために必要な打戻し量（通常約 30 cm）を打戻すことにより、排出した材料を拡径して締めめるとともに周囲の地盤も締め固める。
- ⑧ ⑥、⑦の操作を繰り返すウェーブ施工により固化杭を造成する。造成中には、必要に応じて材料をケーシング内に補給する。
- ⑨ 造成完了
- ⑩ ケーシング内、ホッパーおよびバケットの洗浄
- ⑪ 施工機械移動



写真-1 ケーシングセット 写真-2 ケーシング貫入



写真-3 コンクリート搬入 写真-4 コンクリート投入



写真-5 ウェーブ施工 写真-6 施工直後の固化杭

§3. 施工性、性能・品質確認試験

HCP工法による固化杭の施工性、施工後の締め固め効果、強度や出来形、支持性能等について調査することを目的として、種々の試験を実施した。

施工性試験時の砂杭および固化杭の配置を図-4に、固化杭の諸元を表-1に示す。

固化杭には、普通コンクリートおよび再生砕石や高炉スラグを粗骨材とした再生コンクリートを使用した。杭ピッチは2.0mの正方形配置を標準とし、1.4mの狭い場

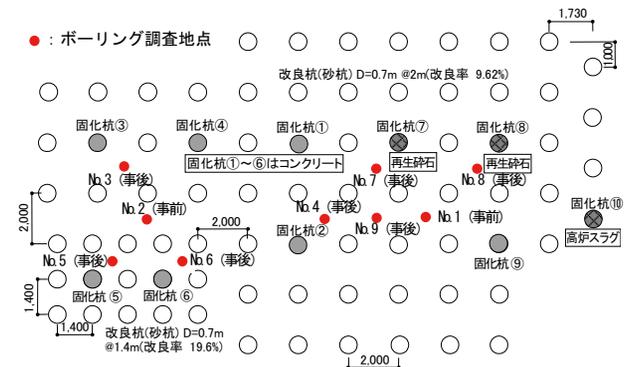
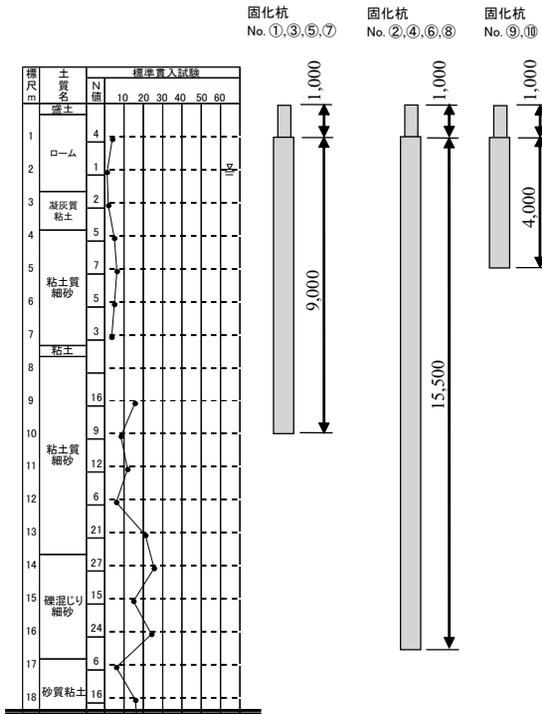


図-4 施工性試験の砂杭および固化杭の配置

表-1 固化杭の諸元

コンクリート	固化杭 No.	確認項目	配合強度 (N/mm ²)	スランブ	骨材種別	先端深度 (GL-m)	備考
普通 コンクリート	①	支持性能	15.0	8.0	砂利+砂	10.0	載荷試験
	②	締め固め効果				16.0	
	③	拡径状況				10.0	掘出し調査
	④	支持性能				16.0	載荷試験
	⑤	締め固め効果				10.0	
	⑥	締め固め効果				16.0	
再生 コンクリート	⑦	締め固め効果	10.7	8.0	再生砕石 (RC40) + 洗い砂	10.0	
	⑧					16.0	
	⑨	施工性			高炉スラグ + 洗い砂	5.0	
	⑩					5.0	



図一五 土質柱状図および固化杭断面

合についても設計径の確保や締固め効果について調査した。固化杭長は、図一五に示すとおり液状化層を対象とした10mを標準とし、適用深度の確認を目的とした16m、および骨材の分離の有無や強度確認を目的とした5mの3種類とした。ただし、表層部1mは拡径のための余長としている。

施工性試験時の主な試験項目は、地盤に対する試験と固化杭に対する試験に分けられる。前者は、砂杭と同様に地盤中への材料圧入による締固め効果を確認するためのN値、細粒分含有率、孔内水平載荷試験等であり、後者は、コンクリート強度（フレッシュコンクリート、コアサンプル）、支持性能確認のための載荷試験、健全性試験のための非破壊試験（インテグリティ試験等）、掘出し試験（出来形調査、頭部杭径調査、骨材の分離性調査等）である。その他、施工能率の調査等についても実施した。

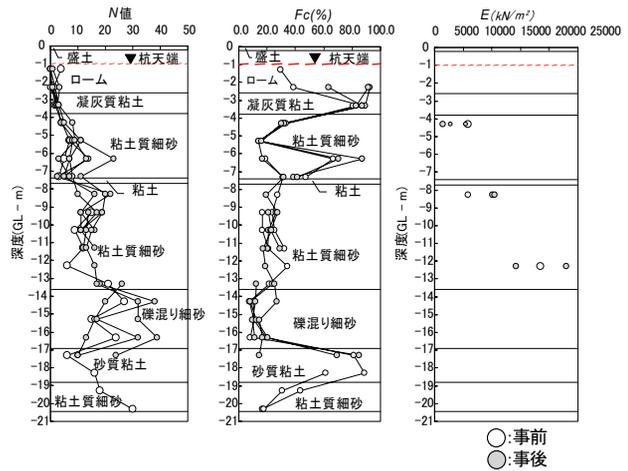
本報では、施工後の締固め効果と固化杭のコンクリート（圧縮）強度、掘出し試験、載荷試験結果について報告する。

3-1 地盤概要

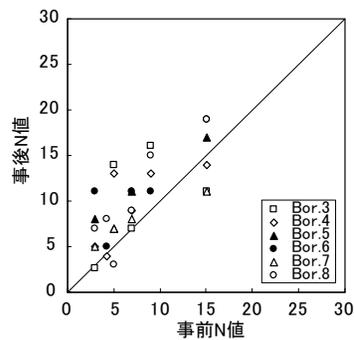
試験サイトの土質柱状図およびN値を図一五中に示す。表層から約4mまではロームおよび凝灰質粘土が堆積し、それ以深では粘土の薄層を挟在して上下にそれぞれN値3~7および6~21の粘土質細砂が約14mまで堆積している。地下水位はGL-2.1mにあり、これらの粘土質細砂が液状化の対象層である。

3-2 締固め効果の確認

施工性試験の前後で実施した標準貫入試験によるN



図一六 試験結果の深度分布



図一七 事前および事後のN値の比較

値、細粒分含有率 Fc、孔内水平載荷試験による変形係数 E の深度分布を図一六に示す。細粒分含有率に着目すると、GL-4m~13mの粘土質細砂層の Fc は、12.4~86.9%とばらつきが多く、平均値も約30%と大きめである。この地盤の不均一性の影響を受けて、事後のN値もばらつきが大きい結果となっているが、全般的にN値は増加しており、固化杭近傍と砂杭近傍における有意な差は認められなかった。

変形係数 E については、GL-8m および GL-12m の一部で増加しており、締固め効果が認められる。一方、GL-4m では、細粒分の多さおよび地盤の平面的なばらつきの影響のためか、明確な締固め効果を確認することはできなかった。

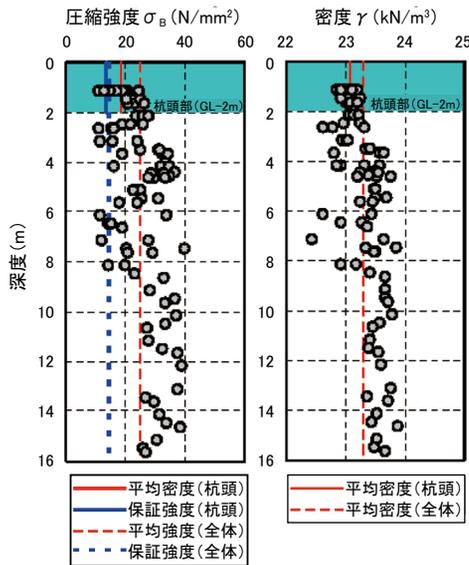
本試験における標準的な杭長である GL-10m までを締固め効果を評価する上での有効な対象深度と考え、Bor. No. 1 による事前 N 値（横軸）と固化杭近傍での事後 N 値（縦軸）を同深度で比較したものを図一七に示す。事後 N 値は事前 N 値に対して増加しており、増加 N 値の平均は4程度である。事後 N 値が事前 N 値を下回っている点は、地盤の不均一性が要因として考えられる。

3-3 固化杭の圧縮強度

固化杭（普通コンクリート）の荷卸し時のモールド供

表一 荷卸し時の圧縮強度試験結果 (材齢 28 日)

固化杭 No.	圧縮強度 (N/mm ²)			平均	杭毎の平均	全体の平均	標準偏差	全体偏差	変動係数
①	26.7	27.4	26.5	26.9	26.2	26.2	0.39	0.88	0.03
②	26.4	24.7	25.8	25.0			0.70		
	24.1	24.7	24.4				24.4		
③	27.6	26.6	27.4	27.2			0.41		
④	24.1	26.7	26.4	26.4			1.16		
	27.2	27.5	26.2				27.0		
⑤	25.5	26.7	26.1	26.1	0.49				
⑥	25.8	25.5	25.8	26.4	0.24				
	27.1	26.0	28.4		27.2	0.98			



図一 固化杭の圧縮強度と密度の深度分布

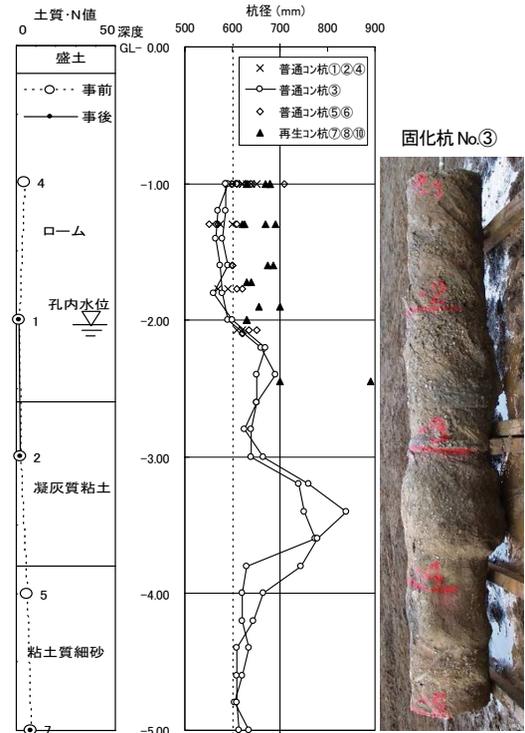
試体の圧縮強度試験結果を表一に示す。圧縮強度は標準水中養生による材齢 28 日のものである。平均強度 $\sigma_{ave} = 26.2 \text{ N/mm}^2$ 、変動係数 0.03 であり、圧縮強度のばらつきは小さい。

固化杭のコア供試体は、ボーリングマシンによりオールコアのほかハンドコアにより頭部コアも採取した。コア供試体による普通コンクリートの圧縮強度と密度の深度分布を、試験を実施した固化杭全てについて重ねて図一に示す。普通コンクリートでは GL-8 m 辺りまで圧縮強度が深さ方向に漸増する傾向が認められる。GL-8 m 以深ではばらつきは見られるものの概ね一定の値を示している。密度も同様の傾向を示している。なお、図中には平均強度と深層混合処理工法の考え方に準拠した保証強度⁵⁾を杭頭部で評価した場合と杭全体で評価した場合を比較して示している。ここに保証強度は不良率 10%として下式により算定したものである。

$$F_q = (1 - 1.3V) \times \sigma_{ave}$$

V: 変動係数

σ_{ave} : コア供試体平均強度



図一 固化杭径の深度分布と出来形

固化杭の平均強度、保証強度を杭頭部で評価した場合と固化杭全体で評価した場合を比較して図一に示す。杭頭部で評価した場合、保証強度は $F_q = 13.4 \text{ N/mm}^2$ であり、固化杭全体で評価した場合の $F_q = 14.6 \text{ N/mm}^2$ より小さい。また、変動係数も杭頭部では $V = 0.21$ 、固化杭全体で $V = 0.32$ であり、杭頭部のばらつきが小さい。そこで、固化杭の保証強度として、固化杭頭部で評価したものを採用することとした。本実験で想定した設計基準強度は、 $F_c = 6 \text{ N/mm}^2$ である。普通コンクリートの固化杭の保証強度は、設計基準強度を上回っている。また、再生コンクリートの保証強度も設計基準強度を上回っていることから、固化杭が健全に施工できることが確認できた。

3-4 出来形 (杭径) 調査

固化杭の出来形調査として、固化杭③は GL-5 m まで、その他の固化杭は GL-1~2 m まで固化杭頭部を掘出し、直交する 2 方向の杭径を測定した。GL-1 m までは余盛りであり、拡径していない。計測した杭径の深度分布と固化杭③の頭部の出来形を図一に示す。

固化杭頭部 1 m における普通コンクリートの平均径は 612 mm、再生コンクリートは 672 mm であった。固化杭③の頭部 4 m における平均径は 643 mm であった。固化杭頭部付近はロームや凝灰質粘土といった比較的強度の大きい地盤であるが、平均径で 600 mm 以上まで拡径されていることが確認できた。また、再生コンクリートの方が普通コンクリートよりも大きく拡径されている。材料受入時のスランプは、普通コンクリートが 6.5~

9.0 cm, 再生コンクリートが3.5~5.0 cm であり, スランブが小さいほど拡径効果は大きいと考えられる。

固化杭③の GL-3 m~4 m 区間では杭径が700 mm 以上と他の部分より大きく, 拡径時に材料が下から回りこむか, 上部から過度に押し込まれた可能性が考えられる。

3-5 急速載荷試験による支持力評価

(1) 急速載荷試験結果

固化杭の支持力を評価することを目的として, 固化杭① (固化杭長 L=9.0 m), ④ (固化杭長 L=15.0 m) の2種類の長さの異なる固化杭に対して, 急速載荷試験を実施した。

試験時には, GL-1 m 位置まで掘削し, 固化杭頭部を鋼管とモルタルで補強した。急速載荷試験は, 固化杭の頭部に設置したクッション材 (チェラスト材) を介して重錘を自由落下させる軟クッション重錘落下方式を採用した。試験方法は, 地盤工学会の基準⁶⁾ に準じ, 重錘重量を固化杭①で147 kN, 固化杭④で231 kN として, 落下高さを段階的に高くして (固化杭①: 0.1~2.8 m, 固化杭④: 0.2~1.5 m) 行う多サイクル方式で実施し, 静的な支持力は除荷点法を用いて算定した。

試験結果として, 荷重-変位の関係を図-10 に示す。また, 急速載荷試験から得られた荷重と, 長期許容支持力を算定した結果を表-3 に示す。なお, 長期許容支持力は下式によって算定した。

$$P_a = \min(P_y/2, P_u/3)$$

- P_y : 第1限界抵抗力 (比例限界点の荷重) (kN)
- P_u : 第2限界抵抗力 (固化杭径の10%に相当する変位時の荷重) (kN)
- P_a : 長期許容支持力 (kN)

固化杭①は, 第1限界抵抗力 P_y として2,000 kN が検出されたが, 固化杭④は P_y が検出されず, 宇都らの極限荷重の推定法⁷⁾ により第2限界抵抗力 P_u を推定した。

(2) 鉛直支持力

急速載荷試験結果から得られた鉛直支持力とセンター指針⁵⁾ に示された以下の深層混合処理工法の支持力式とを比較した結果を表-4 に示す。

$$R_u = R_p + R_f$$

$$R_p = 75 \cdot N \cdot A_p$$

$$R_f = (10/3 \cdot N_s \cdot L_s + q_u/2 \cdot L_c) \phi$$

- R_p : 改良体先端部における極限鉛直支持力 (kN)
- R_f : 改良体の極限周面摩擦力 (kN)
- N : 改良体先端から下に1 d, 上に1 d の範囲の平均 N 値
- A_p : 改良体の先端有効断面積 (m^2)
- N_s : 砂質土の N 値
- L_s : 砂質土部分の長さ (m)
- q_u : 粘性土の一軸圧縮強さ (kN/m^2)

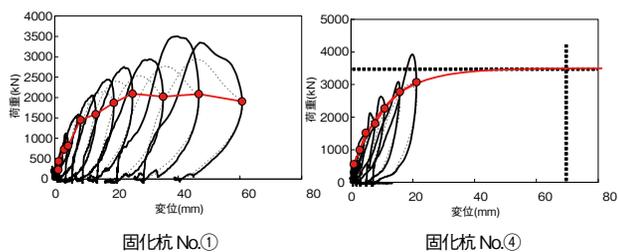


図-10 荷重と変位の関係

表-3 載荷試験結果一覧

固化杭 No.	第1限界抵抗力 P_y (kN)	第2限界抵抗力 P_u (kN)	許容支持力 P_a (kN)
①	2,000	2,000	667
④	—	3,500	1,167

表-4 載荷試験結果と支持力算定式の比較

固化杭 No.	試験結果 (第2限界抵抗力)	支持力式 (センター指針 ⁵⁾)		
		先端支持 R_p	周面摩擦 R_f	R_u
①	2,000	380	815	1,195
④	3,500	651	1,808	2,459

L_c : 粘性土部分の長さ (m)

以上から, 本工法では固化杭の鉛直支持力として「センター指針」に示された支持力式を用いて安全側に評価できることを確認した。

§4. おわりに

本報では, HCP 工法の概要と開発時に実施した施工性試験の概要と結果について述べた。一連の施工性試験結果から, 以下のことを確認することができた。

(1) 固化杭の材料として普通コンクリート, あるいは再生砕石, スラグ等のリサイクル材を骨材とする再生コンクリートを用いて, 静的締固め砂杭工法の施工機械により, 砂を材料として用いた場合と同様に拡径された固化杭を造成し, 地盤を締め固めることができた。

(2) 静的締固め砂杭工法の施工機械を用いた施工により, 普通コンクリートまたは再生コンクリートを材料とした固化杭の良好な品質が確保できた。

HCP 工法は, 液状化対策と建物の沈下低減効果が期待でき, 特に, 軟弱地盤に建設される中低層建物に対して, 合理的な基礎工法となり得る工法である。試算では, 液状化対策を実施して液状化を許容しない条件の場合, 支持杭基礎に比べて基礎工事の20~35%のコストダウンが, 通常のパイルド・ラフト基礎に比べて10%程度のコストダウンと工期短縮が可能になる。

HCP 工法は, 西松建設, 安藤建設, 鉄建建設, 東急建設, 戸田建設, 間組, 不動テトラ, 三井住友建設による共同開発工法であり, 財団法人日本建築センターより建設技術審査証明 (建築技術) (BCJ-審査証明-135) を取

得している。

参考文献

- 1) 加登, 田代, 多賀, 山崎, 大戸: 静的締固め砂杭工法により改良された地盤に建つパイルド・ラフト基礎建屋の挙動 (その1: 建築概要および基礎設計概要), 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 435~436, 2007. 8.
- 2) 加倉井ほか: パイルド・ラフト基礎 (直接基礎と摩擦杭併用基礎) の設計法, 基礎工, Vol. 5, pp. 44~48, 1998.
- 3) 不動建設, フドウ技研: SAVE コンポーザー (低振動・低騒音の静的締固め工法) 建設技術審査証明報告書, (財)国土技術研究センター, 2002.
- 4) 伊勢本, 大西, 武内, 山崎: 沈下低減のための締固め固化杭工法の開発 (その1: 施工試験の概要), 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 423~424, 2007. 8.
- 5) 日本建築センター: 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針, 2002.
- 6) 地盤工学会: 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 2002. 5.
- 7) 宇都ほか: 杭の載荷試験結果の整理方法, 基礎工, 1992.