

建物の沈下低減のための静的締固め固化杭工法の開発

崎浜 博史* 根本 恒*

Development of Hardening Compaction Pile to Decrease Settlement of Buildings

by Hirofumi SAKIHAMA and Hisashi NEMOTO

Abstract

In planning of the buildings with spread foundation on the liquefiable site, there is a need to increase the subgrade bearing capacity by ground improvement. The hardening compaction pile method can be used to construct hardening compaction piles as well as sand compaction piles, by the use of same construction machinery and this can also conduct a stabilization of the soft ground. Additionally, hardening compaction piles have a prescribed quality, which contribute to reducing settlement of the buildings. An adequate mix of the hardening and sand compaction piles makes the piled raft foundation an applicable method for the foundations of buildings. This paper describes a general description of this method and presents mainly the various test results.

要 旨

液状化の発生が予想される地盤上に直接基礎の建物を計画する場合、地盤改良によって地盤強度の増加を図る必要がある。静的締固め砂杭工法は地盤中に砂杭を造成して地盤を締固め、液状化の発生を抑える地盤改良工法であり、建築工事において多くの実績を持つ。この静的締固め砂杭工法と同じ施工機械を用いながら、材料をコンクリートとする柱状改良体を地盤中に造成できるのが静的締固め固化杭工法である。コンクリートの柱状改良体は建物の沈下低減に寄与可能な品質を有しており、砂杭による改良地盤と組み合わせることでパイルド・ラフト基礎とできる。本稿ではこの工法の概要と開発時に実施した各種試験の結果について述べる。

キーワード：沈下／締固め／パイルド・ラフト基礎／液状化／地盤改良

1. はじめに

地震時に生じる地盤の液状化現象は、建築基礎構造に対しても有害な沈下や傾斜など、過去に多くの被害をもたらしてきた。一般に、液状化対策には“液状化の発生そのものを防止または軽減する対策”と、“液状化の発生は許すが構造物の被害を防止または軽減する対策”に分類される。静的締固め砂杭工法[1]は前者にあたるもので、想定する地震動に対する改良目標が明確で、かつ、その目標を達成するための設計手法が確立されている。この工法による改良では地盤の密度増大効果および造成した改良体の強度によって地盤強度が増加し、液状化

の発生を防止できることから、建物を直接基礎とすることが可能となる。

今般、開発した静的締固め固化杭工法は、液状化対策のための改良体と、建物の沈下低減を目的に造成するコンクリートの改良体を、同じ静的締固め砂杭工法の機械で施工できる工法である。この2種類の改良体を基礎下に適切に配置することにより、近年、採用実績を増やしつつあるパイルド・ラフト基礎とすることができる。

本稿の2章では工法の適用範囲や施工方法等について、3章では工法の品質や性能を確認する目的で実施した施工試験の結果について述べる。

* 技術研究所振動基礎研究室

2. 工法概要

静的締固め固化杭工法「HCP 工法(Hardening Compaction Pile)」は、図 1 に示すように、静的締固め砂杭工法の施工機械で施工した砂、碎石等を材料とする改良体（以下、「砂杭」という）間に、同じ施工機械を用いてコンクリートの柱状改良体（以下、「固化杭」という）を造成して周辺地盤の密度を増大させ、静的に締固める工法である。このように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。また、本工法で施工された固化杭は、建築物の沈下低減に寄与可能な品質を有している。

固化杭の材料には、普通コンクリート、あるいは骨材として再生碎石やスラグなどのリサイクル材料を使用した再生コンクリートのいずれを用いても、締固め効果の確保、および建築物の沈下低減に寄与可能な品質の確保が可能である。

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。

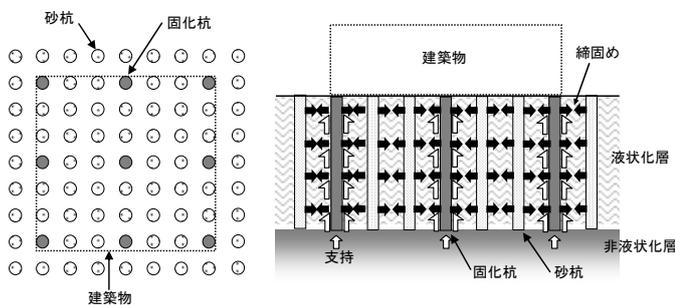


図 1 HCP 工法の概要

2.1 適用範囲

HCP 工法の適用範囲を以下に示す。

[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)
- ・ 砂杭 拡径管理値：700 mm

[施工深さ]

- ・ 固化杭の実績 16.5 m
- ・ 砂杭の実績 23 m
(施工機械の施工可能深さ 25 m)

[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)

[使用材料]

- ・ 固化杭：普通コンクリート

(JIS A 5308 レディ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、スランプは 8 cm とする)

：再生コンクリート

(骨材として、JIS A 5001 再生碎石、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、スランプは 2.5～14.5 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、碎石または再生碎石、スラグ

[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)

[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

2.2 施工方法

HCP 工法の施工では図 2 に示すような構成の施工機械を用いる。以下に示す施工手順は、砂杭、固化杭共通である（図 3 参照）。

- 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もしくは碎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、設計深度で深に材料を押し込み、締固める。

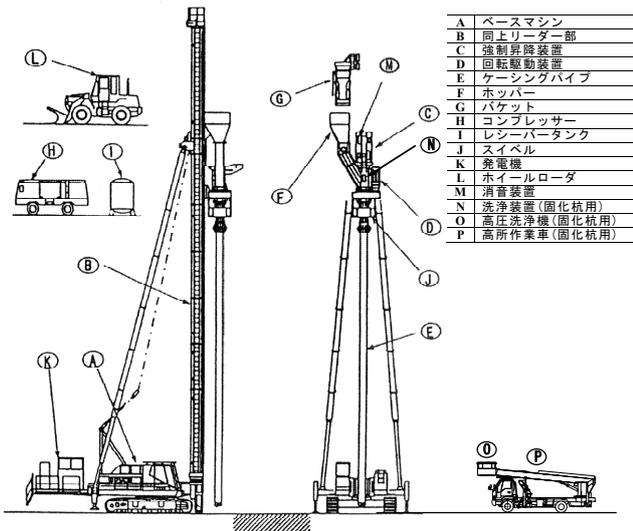


図2 施工機械の構成

- ⑤ 砂杭または固化杭の材料をケーシング内に投入する。
- ⑥ ケーシングを所定長（通常約 50 cm）引抜きながら、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長（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固めるとともに周囲の地盤も締固める。
- ⑧ ⑥⑦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（固化杭のみ）
- ⑪ 施工機移動

③ケーシングパイプの貫入 ⑥ケーシングパイプの引抜き ⑦打戻し ⑧⑥⑦の繰り返し(ウェーブ施工)

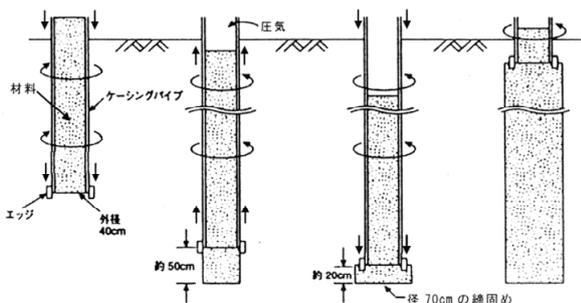


図3 施工手順

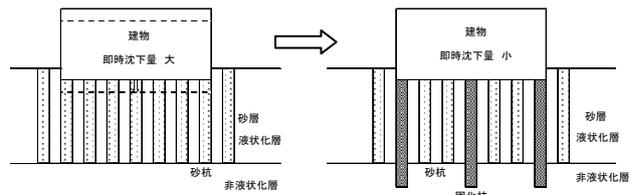


図4 過大な即時沈下を抑制する適用方法

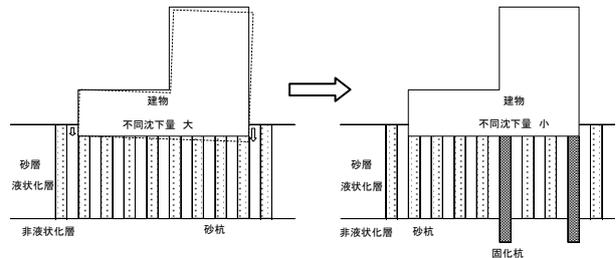


図5 過大な不同沈下を抑制する適用方法

2.3 適用方法

地盤条件が主として緩い砂質土地盤等で、液状化判定の結果、対策が必要と判断され、かつ沈下を抑制したい場合に HCP 工法を適用する。HCP 工法の適用例を図 4、図 5 に示す。適用例では、即時沈下が大きくなる場合、建物規模や用途、立面・平面形状によって不同沈下が大きくなる場合に適用する例を示している。固化杭の長さは、設計条件や要求性能などにより砂杭と異なる場合もある。

2.4 設計上の扱い

本工法の目的の一つは、液状化対策により増加した基礎スラブ直下の地盤の支持力を有効に使うことである。すなわち、砂杭により増加した複合地盤の支持力で建物荷重を支持できるが、沈下量が過大となるために直接基礎の採用が難しい場合に、沈下抑制を目的として適用することから、主としてパイルド・ラフト基礎として設計することになる。

上に述べたパイルド・ラフト基礎のほかに、建物荷重が大きい場合の不同沈下対策として異種基礎で設計することも考えられる。

HCP 工法の設計上の取扱いは、以下に示す通りである。

- 1) パイルド・ラフト基礎【図 6】
- 2) 杭基礎との異種基礎【図 7】

なお、上記 2) の場合、杭基礎の部分の設計は「地盤改良指針案」[2]に準拠する。

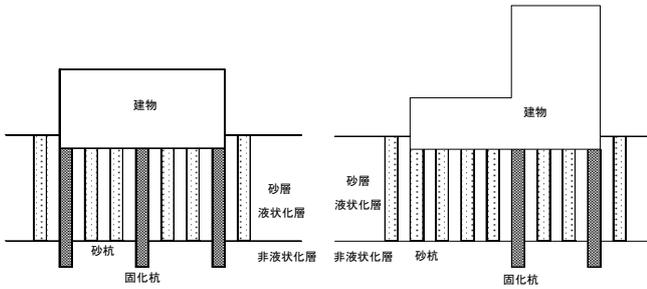


図6 パイルド・ラフト基礎

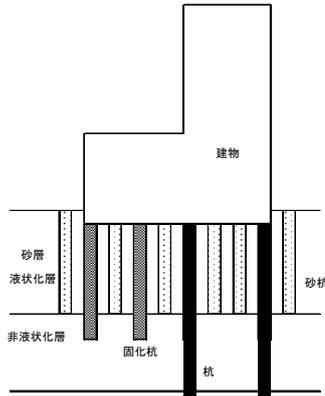


図7 異種基礎

3. 工法の品質および性能評価

本工法で造成した固化杭の品質として、コンクリートの圧縮強度と変形係数、骨材の分離性、固化杭の出来形と連続性、支持性能を確認した。また、砂杭と固化杭で改良した地盤の締固め効果についても確認した。ここに示す各種試験結果は既報[3]において詳しく述べられている。

3.1 試験概要

試験地は茨城県古河市の試験場で、図8の土質柱状図に示すように表層から約4mまではロームおよび凝灰質粘土が堆積している。それ以下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。

固化杭の諸元を表1に示す。固化杭No.①~⑥は普通コンクリート、No.⑦~⑩は再生砕石または高炉スラグを粗骨材とした再生コンクリートを使用している。コンクリートのスランプはHCP工法で固化杭を造成する際に重要な管理項目となるもので、この値が小さすぎるとアジテータ車からの荷卸しに支障を来すだけでなく、施工機械のバケットやケーシング内に材料が詰まる要因となることがある。逆にスランプが大きすぎると、材料が軟らかいために

拡径に支障を来す恐れがある。施工性を確保しつつ所定の杭径を得るためのスランプとして、事前の試験結果を基に8cmを設定した。固化杭は先端深度GL-10m、-16.5m、-5mに達する3種類であるが、杭上部の1mを余長としているため、杭長はそれぞれL=9m、15.5m、4mとなる。

砂杭と固化杭の平面配置を図9に示す。改良ピッチは2m(改良率 $\alpha=9.6\%$)を基本としているが、固化杭⑤、⑥およびこれに近接する砂杭は1.4mピッチとしている。砂杭を造成した後、固化杭を造成した。ボーリング調査は改良前の原地盤に対して2箇所(Bor. a, b)、改良後の地盤に対して6箇所(Bor.1~6)実施した。

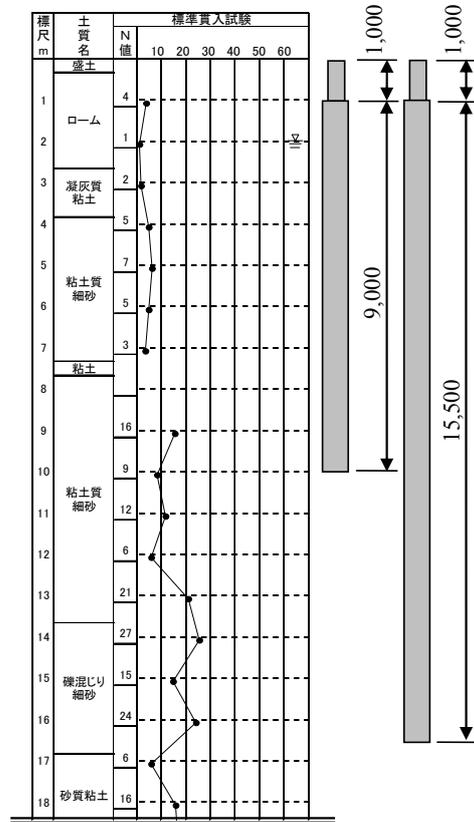


図8 試験地盤の土質柱状図と固化杭断面

表1 固化杭の諸元

コンクリート種別	杭No.	主な確認項目	配合強度 F (N/mm ²)	スランプ	骨材種別	設計深度 GL- (m)	備考
普通 コンクリート	①	支持性能	15.0	8 cm	砂利+砂	10.0	載荷試験
	②	締固め効果				16.5	
	③	拡径状況				10.0	掘出し調査
	④	支持性能				16.5	載荷試験
	⑤	締固め効果				10.0	
	⑥	締固め効果				16.5	
再生 コンクリート	⑦	締固め効果	10.7	8 cm	再生砕石 (RC40) +洗い砂	10.0	
	⑧					16.5	
	⑨					5.0	
	⑩	施工性			高炉スラグ +洗い砂	5.0	

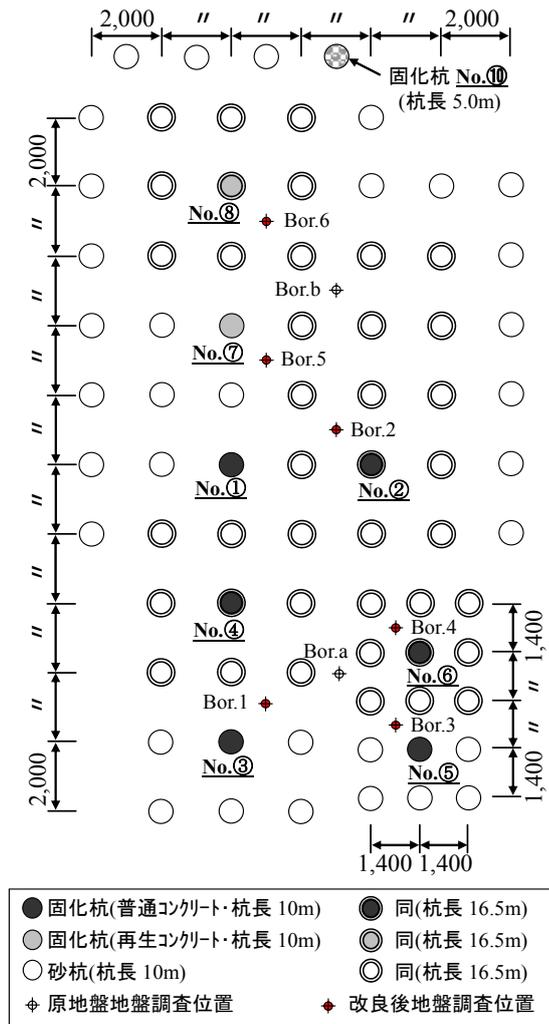


図9 砂杭と固化杭の平面配置

3.2 配合計画

HCP 工法では、砂杭による改良地盤を複合地盤と見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。ここで、締固め改良地盤における固化杭周面部の平均 N 値を 8~15、固化杭先端部の N 値を 8~20 とし、固化杭の長さを 4~15 m の間でパラメトリックに変化させて、以下の式によって地盤の極限支持力 R_u を算定した。

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

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

$$R_f = 3.3 \cdot N \cdot L \cdot \phi \quad (\text{kN}) \quad (3)$$

ここに、 R_p ：極限先端支持力、 R_f ：極限周面摩擦力、 A_p ：杭先端の断面積、 L ：杭長、 ϕ ：杭の周長である。得られた $R_u = 450 \sim 2250 \text{ kN}$ の 1.2 倍を固化杭の必要強度として設定し、設計径 0.7 m とした固

化杭の断面積で除すことで必要な圧縮強度(=設計基準強度 F_c)が得られる。この圧縮強度を 6 N/mm^2 とすれば、ほぼすべてのケースで固化杭の強度が地盤で決まる極限支持力を上回る。そこで、この圧縮強度を固化杭の強度として設定した。

固化杭の材料となる再生コンクリートについて、複数の材料の組合せについて試し練りを行って圧縮強度とスランプを確認した。その結果から、比較的安定した性質が得られた 2 種類の組合せを選定し、本施工試験で造成する固化杭のための再生コンクリートとして表 2 の配合を決定した。これらはいずれも $F_c = 6 \text{ N/mm}^2$ を満足するように設定した配合で、圧縮強度のばらつきおよび室内強度と現場強度の相違を考慮して定めた。配合強度 F は深層混合処理工法における現場目標強度 q_{ur} の設定方法[2]に準じ、圧縮強度の変動係数 $V = 0.25$ と仮定し、(室内強度)/(現場強度)=1.2 として式(4)のように設定した。

$$F = 1.2 \cdot F_c / (1 - 1.3 V) = 10.7 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (4)$$

用いた再生砕石(RC-40)および高炉スラグ(2005)の諸元を表 3 に、粒径加積曲線を図 10 に示す。本試験サイトにおける再生コンクリートは、特殊加工を施して攪拌効率を高めた特殊アジテータ車による現場練りにて供給した。

表 2 再生コンクリートの計画配合

固化杭⑦, ⑧, ⑨ (粗骨材: 再生砕石) (kg/m ³)					
練り水	固化材	粗骨材	細骨材	混和材	γ (参考値)
188	200	1259.5	659.1	—	2424.1
固化材: 高炉セメントB種			細骨材: 洗砂		
粗骨材: コンクリート再生砕石 (RC-40)			水セメント比: 94%		
固化杭⑩ (粗骨材: コンクリート用高炉スラグ) (kg/m ³)					
練り水	固化材	粗骨材	細骨材	混和材	γ (参考値)
141.1	225	1015	1043	—	2306.6
固化材: 高炉セメントB種			細骨材: 洗砂		
粗骨材: コンクリート用高炉スラグ (2005)			水セメント比: 63%		

表 3 再生砕石および高炉スラグの諸元

材料名	絶対乾密度 (g/cm ³)	単位体積質量 (g/cm ³)	吸水率 (%)
再生砕石 (RC-40)	2.43	—	3.62
コンクリート用高炉スラグ (2005)	2.61	1.56	2.65

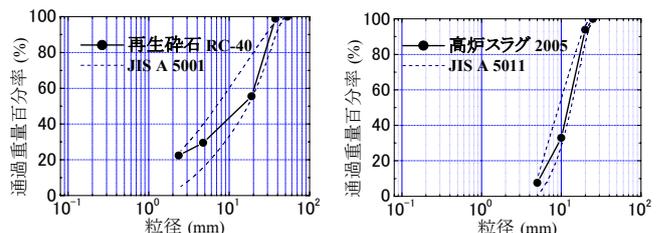


図 10 再生砕石および高炉スラグの粒径加積曲線

普通コンクリートは本試験サイト近くの生コンプラントより供給し、その配合は表4に示す通りである。ここでは、プラントの実績から安定した品質で供給できる最低値である呼び強度の強度値 $F_N' = 15 \text{ N/mm}^2$ を採用した。

再生コンクリート、普通コンクリートともに、固化材は高炉セメント B 種とした。

表4 普通コンクリートの配合

水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤
156	204	1010	905	2.183

水セメント比：76.5% 細骨材率：47.5% (kg/m³)
セメント：高炉セメントB種

3.3 フレッシュコンクリートの性状

表5に固化杭①～⑥に用いた普通コンクリートの、表6に固化杭⑦、⑧、⑩に用いた再生コンクリートのフレッシュ性状を示す。普通コンクリートの受入時のスランプは6.5～9.0 cm の間で安定した値を示している。一方、現場練り再生コンクリートの練り混ぜ直後のスランプは固化杭⑧の1バッチ目を除き、3.5～5.0 cm と小さめとなった。再生コンクリートの材料となる粗骨材の特性は購入先によって異なるので、実施物件に適用する際には実際に使用する材料を用いた室内配合試験や実機練り試験をその都度行って、その特性を十分把握しておく必要があると考えられる。

なお、試験サイトに搬入された再生砕石が予定量より少なかったために固化杭⑨の造成を断念した。同様の理由により固化杭⑦はGL-2 m までの造成にとどまった。

表5 普通コンクリートのフレッシュ性状

項目	時期	① L=9 m		② L=15 m		③ L=9 m		④ L=15 m		⑤ L=9 m		⑥ L=15 m	
		1台目	2台目	1台目	2台目	1台目	2台目	1台目	2台目	1台目	2台目	1台目	2台目
スランプ (cm)	受入時	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	6.5	7.5	6.5	7.5	6.5	7.5
	杭頭余盛部	5.0	—	—	8.0	—	—	—	—	—	—	—	—
空気量 (%)	受入時	3.2	3.0	3.8	3.3	3.3	3.7	3.7	3.0	3.5	—	—	—
	杭頭余盛部	2.9	—	—	2.2	—	—	—	—	—	—	—	—
温度 (°C)	受入時	12.0	13.0	13.0	13.0	11.5	12.0	13.0	14.0	14.0	—	—	—
	(外気温)	4.0	8.0	8.0	14.0	6.0	7.0	12.0	11.0	10.0	—	—	—
	杭頭余盛部	11.0	—	—	13.0	—	—	—	—	—	—	—	—
	(外気温)	5.0	—	—	11.0	—	—	—	—	—	—	—	—

表6 再生コンクリートのフレッシュ性状

項目	時期	⑦ L=9 m	⑧ L=15 m		⑩ L=4 m
			1バッチ	2バッチ	
スランプ (cm)	練り混ぜ直後	4.5	19.0→14.5	3.5	5.0
	最終受入時	4.5	2.5	2.5	3.5
	杭頭余盛部	—	—	—	4.0
空気量 (%)	練り混ぜ直後	3.5	1.7	2.7	1.9
温度 (°C)	練り混ぜ直後	10.5	12.0	12.5	10.0
	(外気温)	5.0	10.5	11.0	4.0

3.4 固化杭の材料特性

普通コンクリート、再生コンクリートともに荷卸し時に採取した供試体、および造成された固化杭の頭部および全深度からコアボーリングによって採取した供試体によって圧縮強度を確認した。

普通コンクリートの荷卸し時の供試体およびコア供試体による強度は、ともに呼び強度を上回る結果となった (表7参照)。図11に示すように、コア強度はGL-8 m 程度までは固化杭の深度とともに漸増する傾向があり、頭部コア供試体の強度を確認することにより、深い部分の強度特性が保証されることを示唆している。一方、再生コンクリートの強度は深度方向にほぼ一定値であった。

再生コンクリートの強度は文献[2]に準じて評価した。表8に示す供試体の数に応じた合格判定係数 k と測定値の標準偏差 σ 、再生コンクリートの設計基準強度 F_c (6 N/mm²) から算定した合格判定値 X_L ($=F_c + k \cdot \sigma$) との比較を表9に示すが、平均圧縮強度はすべて合格判定値 X_L を上回っていることが確認された。

配合強度 F (10.7 N/mm²) と固化杭 No.⑦、⑧の頭部コア供試体および全深度コア供試体の強度との比は、それぞれ 1.20 および 1.21 であり、試し練り時に想定した 1.2 とほぼ同じ値となっていることが確認された。また、変動係数 V は 0.10, 0.16 となっており、想定した変動係数よりも小さな値であった。さらに、荷卸し時供試体の平均強度は調査強度とほぼ同じか、上回る値となった。

高炉スラグを骨材として用いた No.⑩では、いずれも調査強度を上回っていること、変動係数が 0.2 以下であることを確認した。

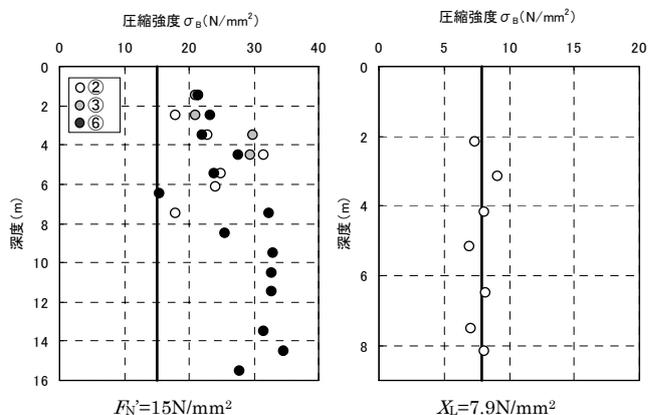


図11 圧縮強度の分布 (左：普通コンクリート、右：再生コンクリート)

表 7 普通コンクリートの圧縮試験結果

杭 No.	頭部		全深度		荷卸し		頭部コアとの比
	平均強度 (N/mm ²)	設計基準強度との比	平均強度 (N/mm ²)	設計基準強度との比	平均強度 (N/mm ²)	設計基準強度との比	
①	—	—	—	—	26.9	1.79	—
②	18.7	1.25	21.6	1.44	25.0	1.67	1.33
③	21.9	1.46	26.5	1.77	27.2	1.81	1.24
④	—	—	—	—	26.4	1.76	—
⑤	16.2	1.08	—	—	26.1	1.74	1.61
⑥	17.0	1.13	26.5	1.77	26.5	1.77	1.56
平均	18.6	1.24	24.8	1.65	26.2	1.75	1.41

表 8 合格判定係数

供試体個数	3	~6	~9	~18	~24	27~
合格判定係数 <i>k</i>	1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3

表 9 再生コンクリートの圧縮試験結果

杭 No.	頭部 ^{**}	供試体個数	標準偏差 ^{**}	変動係数	合格判定値 ^{**}
⑦	8.0	4	0.67	0.08	7.2
⑧	8.2	3	0.91	0.11	7.7
平均	8.1	7	0.79	0.10	7.3
⑩	14.7	4	0.68	0.05	7.2

杭 No.	全深度 ^{**}	供試体個数	標準偏差 ^{**}	変動係数	合格判定値 ^{**}
⑦	7.9	18	1.26	0.16	7.9
⑧	8.2	3	0.91	0.11	7.7
平均	8.0	21	1.22	0.15	7.7
⑩	—	—	—	—	—

杭 No.	荷卸し ^{**}	供試体個数	標準偏差 ^{**}	変動係数	合格判定値 ^{**}
⑦	9.5	3	0.62	0.07	7.1
⑧	11.1	6	0.91	0.08	7.2
平均	10.3	9	1.14	0.11	7.2
⑩	21.7	3	0.73	0.03	7.4

※単位：N/mm²

コア供試体の圧縮強度 σ_B とヤング率 E の関係を図12および図13に、割裂強度 σ_{st} との関係を図14に示す。ヤング率 E および割裂強度 σ_{st} はそれぞれ以下の式で表すことができる (γ : コンクリートの単位体積重量)。

$$E = 3.35 \times 10^4 \times (\gamma/24)^2 \times (\sigma_B/60)^{1/3} \quad (F_c \geq 15 \text{ N/mm}^2) \quad (5)$$

$$E = 950 \sigma_B \quad (F_c < 15 \text{ N/mm}^2) \quad (6)$$

$$\sigma_{st} = \sigma_B / (50/3) \quad (7)$$

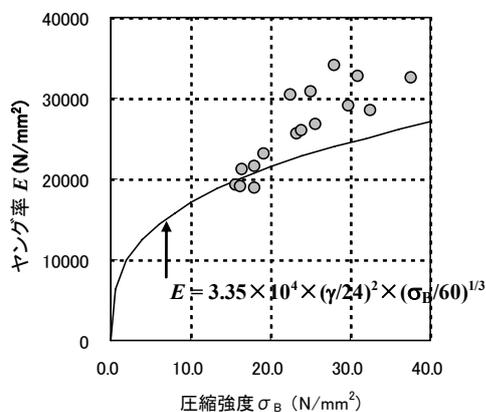


図 12 圧縮強度とヤング率の関係 (1)

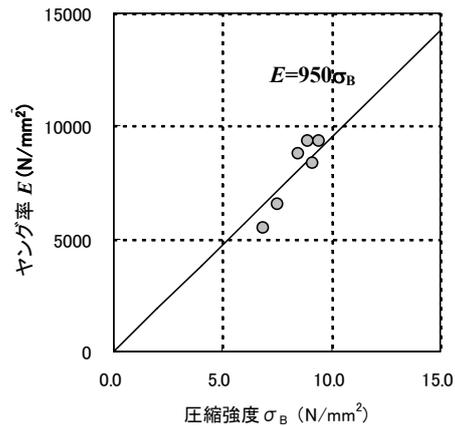


図 13 圧縮強度とヤング率の関係 (2)

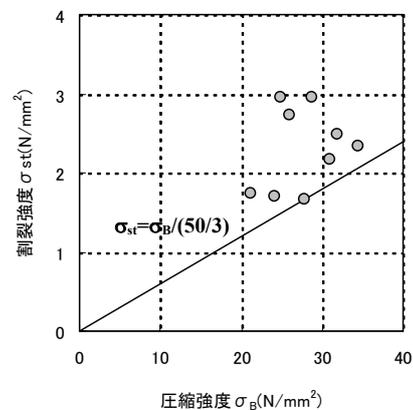
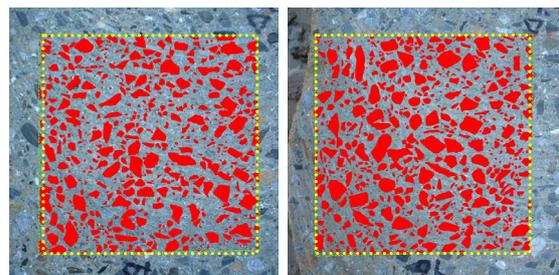


図 14 圧縮強度と割裂強度の関係

固化杭の施工では、施工機械のケーシングパイプの中をコンクリートが落下するため、骨材の分離が懸念された。骨材の分離性状を確認するため、GL-5 m まで掘り出した杭 No.③を縦方向に切断し、切断面を 20 cm のブロックに分けて撮影した画像を解析してブロックごとの粗骨材面積率(各ブロックの面積に対する粗骨材の面積の割合)を求めた。写真 1 に結果の一例を示す。深さ方向における粗骨材面積率の平均値との最大差は、固化杭外周部、中心部ともに+ 6.0 %といずれも深い位置の方が若干大き



(GL-3.2~3.4m・外側) (GL-4.2~4.4m・外側)

写真 1 粗骨材面積率の調査例

い値であった。しかし、全体の平均粗骨材面積率の33.9%に対しては、最小値のGL-2.6~2.8 mの外周部で-3.0%、最大値のGL-4.6~4.8 mの中央部で+3.8%と全体の平均粗骨材面積率の1割程度の差であった。また、同深度での外周部と中央部の粗骨材面積率の差も-3.0~+4.3%であった。これらから、コンクリートの落下による粗骨材の分離はないと判断できる。

3.5 固化杭の出来形

固化杭の出来形調査として、固化杭 No.③はGL-5 mまで、その他の固化杭はGL-1~2 mまで杭頭部を掘り出して直交する2方向の杭径を測定した。図15に示す杭径測定結果によると、杭頭部GL-1~2 mのN値4のローム層で平均587 mmであるものの、固化杭の材料、打設ピッチによらず、GL-2 m以深では平均600 mm以上の直径が確保されていることが確認された。また、杭頭部1 mにおける普通コンクリート杭の平均径は612 mm、再生コンクリート杭は672 mmで、再生コンクリート杭のほうが普通コンクリート杭より大きく拡張されていた。

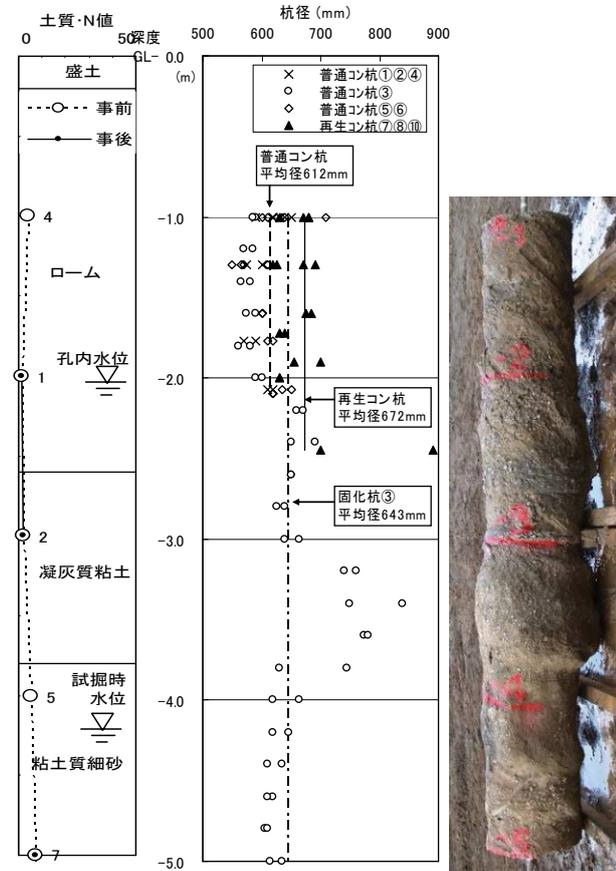


図15 固化杭の出来形（杭径）測定結果

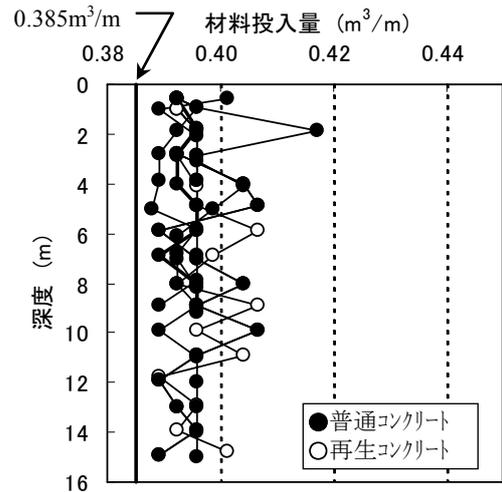


図16 材料投入量測定結果

図16に施工中に約1 mピッチで測定したケーシング内の材料天端レベルから算定した1 mあたりの材料投入量を示す。これより、固化杭の材料（普通コンクリート、再生コンクリート）によらず、直径700 mmに相当する0.385 m³/m以上の固化杭材料が投入されていることを確認した。

固化杭の連続性の確認のために、弾性波を用いた非破壊試験であるインテグリティ試験を全固化杭に対して実施した。図17は弾性波速度をコンクリートの一般的な値である3800 m/sと仮定したときの代表的な測定結果である。これより、施工長とほぼ対応する位置に明瞭な先端反射が測定されていることから、杭を横断するひび割れや断面欠損が生じていないものと判断できる。同時に、インテグリティ試験を固化杭の連続性確認のための品質管理手法として適用可能であることが確認された。

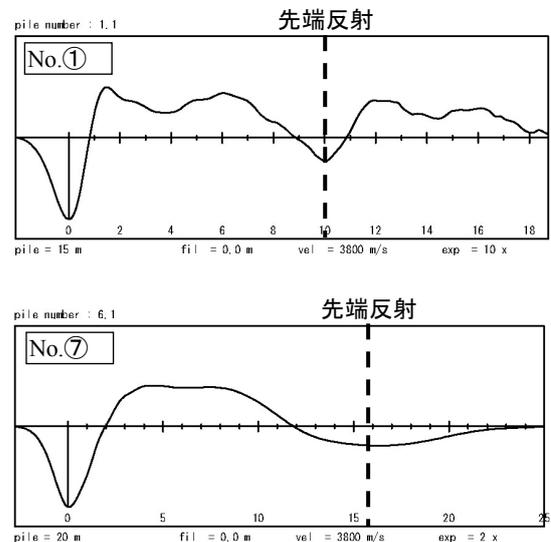


図17 インテグリティ試験結果の一例

3.6 締固め効果

図 18 に改良前後の N 値の深度分布を示す。改良対象とした GL-3.8~13 m の粘土質細砂層の細粒分含有率は 12.4~86.9 % とばらつきが多く、平均値も約 30 % と大きめであった。この地盤の不均一性の影響を受けて、改良後の 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 値は増加している。

図 19 は横軸を原地盤 N 値、縦軸を改良後 N 値として比較したものである。白プロットは改良ピッチ 2 m の、黒プロットは改良ピッチ 1.4 m の固化杭近傍における N 値を表している。粘土質細砂層の原地盤 N 値が 3~12 であるのに対し、改良後の N 値は 2.6~16 の間に分布している。一部、原地盤 N 値を下回っている箇所も見られるが、改良後の N 値は概ね増加している。改良ピッチを 1.4 m とした固化杭近傍の N 値は 2 m ピッチの場合とあまり有意差が見られないが、ボーリング箇所近傍の 1.4 m ピッチで打設された砂杭の本数が少ないことなどが要因として考えられる。また、図 19 には、GL-3.8~

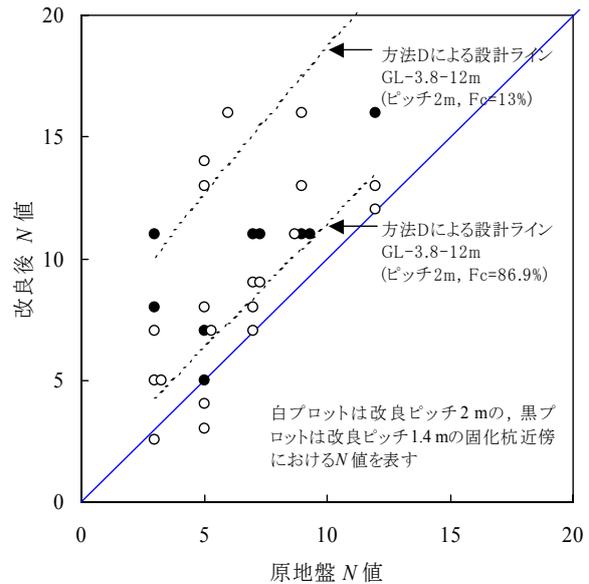


図 19 改良前後の N 値の比較

12 m の範囲内における細粒分含有率の最小値 ($F_c=13\%$)、最大値 ($F_c=86.9\%$) について、改良ピッチ 2 m の条件で、「地盤改良指針」[4]の方法 D を用いて算出した改良後 N 値の設計ラインを併せて示す。実測 N 値は概ね設計ラインの範囲にプロットされており、文献[4]の方法 D による評価法が HCP 工法にも適用できることが明らかとなった。

3.7 固化杭の支持力

固化杭の圧縮強度および連続性を確認するために、普通コンクリートを材料とした杭 No.① (杭長 $L=9.0$ m) および No.④ (杭長 $L=15.5$ m) に対して急速載荷試験を実施した。試験は、固化杭の杭頭部に設置したクッション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、地盤工学会の基準[5]に準じて行った。重錘重量は固化杭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行う多サイクル方式 (No.①で 0.1~2.8 m、No.④で 0.2~1.5 m) で実施し、静的な荷重-変位関係は除荷点法を用いて算定した。実施した急速載荷試験の載荷時間は約 0.1 秒であり、上述の基準の適用条件を満足するものであった。

載荷試験 (除荷点法) により得られた荷重-変位関係を図 20 に示す。

試験で得られた極限支持力(第 2 限界抵抗力)および既出の支持力式(1)、(2)および式(8)により算定された支持力の比較を表 10 に示す。式中の記号は、 N_s : 杭周囲の砂質土の N 値、 L_s : 砂質土部分の長さ、 q_u : 粘性土の一軸圧縮強さ、 L_c : 粘性土部分の長さ、

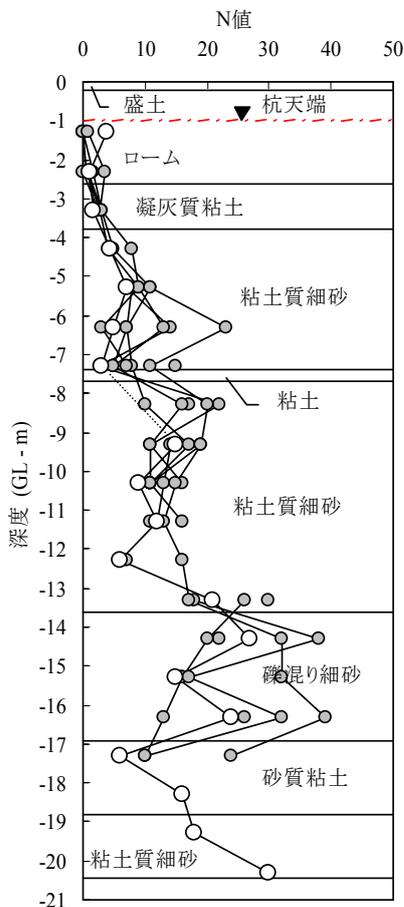


図 18 改良前後の N 値の深度分布

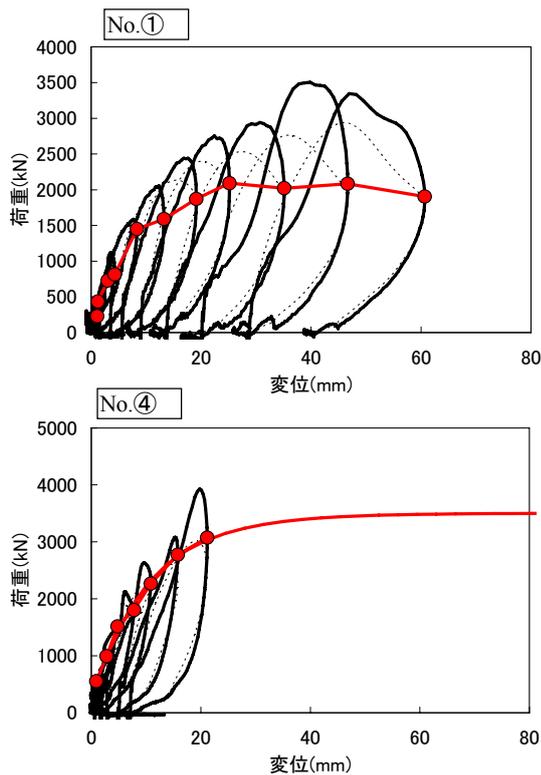


図 20 急速載荷試験で得られた荷重－変位関係

である。算定にあたって、杭径は 600 mm，地盤データは Bor. 2 の調査結果を用いた。また，固化杭④の第 2 限界抵抗力は宇都ら[6]の極限荷重の推定方法によって推定した。

試験値は支持力式による値を上回っており，本工法の固化杭の圧縮強度が確保されていること，および杭の連続性が確認された。

$$R_f = (10/3 \cdot N_s \cdot L_s + q_u/2 \cdot L_c) \phi \quad (8)$$

表 10 載荷試験結果一覧 (単位:kN)

杭 No.	杭長	極限支持力 (試験値)	支持力式 (1), (2), (8)		
			合計	先端 R_p	周面 R_f
①	9.0 m	2,000	1,195	380	815
④	15.5 m	3,500	2,459	651	1,808

4. おわりに

近年，建築物の基礎とすることを念頭においた改良地盤の設計法や品質管理に関する指針が整備され，締固め系の地盤改良工法も一段と使いやすい環境となってきた。このような中で開発した HCP 工法は，液状化対策としての地盤改良工法である静的締固め砂杭工法を発展させ，地盤改良のための砂杭

のみでなく，建物の沈下低減に寄与する固化杭の施工も可能とした。基本的には液状化の危険のある地盤上に計画される物件への適用が前提となるが，固化杭を沈下抑制に用いるパイルド・ラフト基礎とすることで建物の付加価値を高めるとともに，コスト低減を図ることが可能である。今後は本工法の水平展開を図っていく予定である。

HCP 工法は，戸田建設，鉄建建設，東急建設，西松建設，間組，不動テトラ，三井住友建設との共同開発工法である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 日本建築センター：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，2001.
- [3] 伊勢本昇昭ほか：沈下低減のための締固め固化杭工法の開発（その 1）～（その 6），2007 年度日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.423-434，2007.
- [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.
- [5] 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，2002.
- [6] 宇都一馬，冬木衛，桜井学：杭の載荷試験結果の整理方法，基礎工，pp.21-30，1982.