

液状化地盤で適用可能なパイルド・ラフト基礎工法の開発 － HCP (Hardening Compaction Pile) 工法－



伊勢本昇昭*

保井 美敏* 金子 治*
佐野 大作*

概 要

パイルド・ラフト基礎は、支持力を直接基礎で確保し、杭には沈下抑止効果を期待しており、主として中低層建物を対象にした合理的な基礎工法として、採用実績を伸ばしている。ただし、直接基礎により支持力が確保されていることが前提であることから、地震時に液状化の可能性のある地盤での採用は、基本的に不可とされている。本報では、このような液状化地盤でも適用が可能なパイルド・ラフト基礎を実現するために実施した一連の施工試験の結果について報告する。

液状化対策工法として建築工事で実績の多い静的締固め砂杭工法に用いる機械で施工した固化杭について、その性能・品質、施工性などについて調査した。その結果、砂杭と同等の締固め効果の他、沈下抑止の目的で分担して支持する荷重に対して、十分な支持性能、材料強度および品質を確認することができた。

Development of Piled Raft Foundation which is applicable in Liquefied Ground －HCP (Hardening Compaction Pile) Method－

Noriaki ISEMOTO*
Mitoshi YASUI*
Osamu KANEKO*
Daisaku SANO*

On the piled raft foundation, bearing capacity is secured with raft foundation, and piles are needed to decrease settlements of building. It has been applied as a rational foundation system for low-to-mid-rise buildings. But the piled raft foundation can not be used in the liquefied ground, because it is necessary that the bearing capacity is secured with raft foundation. On this paper, it is reported about the results of an execution experiment enforced to develop the piled raft foundation which is applicable in liquefied ground.

Save Composer method is often adopted as a liquefaction countermeasure method by the construction work. It was investigated about the performance, the quality and the execution of hardening compaction piles constructed with that machine. Effect of compaction, bearing capacity, material strength and quality of hardening compaction piles could be confirmed as the results.

* 戸田建設(株) 技術研究所

* Technical Research Institute, Toda Corp.

液状化地盤で適用可能なパイルド・ラフト基礎工法の開発 - HCP (Hardening Compaction Pile) 工法 -

伊勢本昇昭* 保井 美敏*
金子 治* 佐野 大作*

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎は、図-1に示すように、直接基礎と杭基礎の中間に位置し、両者を併用した基礎形式である¹⁾。支持力は直接基礎で確保し、杭には沈下抑止効果を期待しており、主として中低層建物を対象にした合理的な基礎工法として、採用実績を伸ばしている。杭基礎と比較して、一般的には直接基礎のほうが、コスト小、工期短、環境負荷小となるが、沈下に関する構造性能は杭基礎の方が優れている。このため、Burland等²⁾が提唱しているように、杭を建物の荷重を負担する部材としてよりも、沈下を低減するための部材 (settlement reducer) とみなす考え方に基づいている。

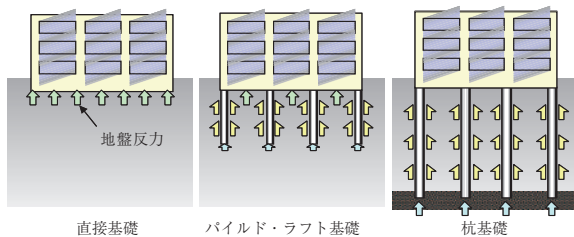


図-1 基礎形式の分類

図-2は、パイルド・ラフト基礎の適用範囲を模式的に示したものである。砂地盤における直接基礎の支持力は基礎幅に伴って大きくなり、同図中の右上がりの直線は、支持力で決まる直接基礎の荷重度を表している。一方、沈下量から決まる荷重度は、同図中の右下がりの曲線のように基礎幅にもなって小さくなる。したがって、一般的に直接基礎で支持可能な荷重度は、両者を満足する範囲に限定される。これに対して、パイルド・ラフト基礎の適用範囲は、同図中に斜線で示した範囲である。すなわち、支持力に関しては安定しているが、沈下量が過大となるため、従来であれば直接基礎での設計が不可とされていたものを、沈下低減用の杭を併用することで可能としている。

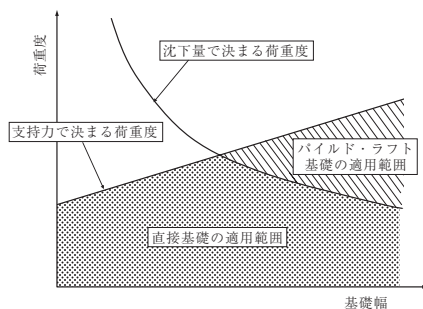


図-2 パイルド・ラフト基礎の適用範囲¹⁾に加筆

ただし、直接基礎により支持力が確保されていることが前提であることから、地震時に液状化の可能性のある地盤での採用は、基本的に不可とされている¹⁾。一方でパイルド・ラフト基礎がコストメリットを發揮するような支持層の深い軟弱地盤地帯では、表層部に液状化の可能性のある緩い砂地盤が堆積している場合が多い。本報は、このような液状化地盤でも適用可能なパイルド・ラフト基礎を実現するために実施した一連の施工試験の結果について報告する。

2. 工法の概要

2.1 工法概要および適用範囲

パイルド・ラフト基礎は、直接基礎で支持力を担保しているため、液状化地盤では対策を実施して液状化を許容しないことが、採用の必要条件となる。液状化対策工法としては、対策原理に基づいた各種の工法が実用化されているが、建築工事では施工時の振動・騒音の少ない静的締固め砂杭工法が採用されることが多い。本工法においても、液状化対策に静的締固め砂杭工法を採用し、材料を砂からコンクリートに替えて沈下抑止のための固化杭を施工する。すなわち、液状化対策のための砂杭と沈下抑止のための固化杭を同じ機械・手順で施工可能な点が大きな特長である。その結果、液状化地盤で適用可能な合理的なパイルド・ラフト基礎工法〔工法名：HCP (Hardening Compaction Pile) 工法〕の開発・実用化を目指している。

図-3に、HCP工法の概要を示す。液状化対策工法として建築工事で実績の多い静的締固め砂杭工法の施工機械で施工した砂杭間に、建物の沈下を抑止するための固化杭を同じ機械により施工する。固化杭は、砂杭の材料を低強度・低スランプのコンクリートに置き換えたもので、施工はまったく同じ方法・手順で行う。砂杭と同程度の締固め効果の他、深層混合処理工法による改良体と同程度以上の支持力を有している³⁾。最初に建物直下および外周部に砂杭を所定のピッチで施工し、その後建物の柱下などに固化杭を同じ機械で施工する。

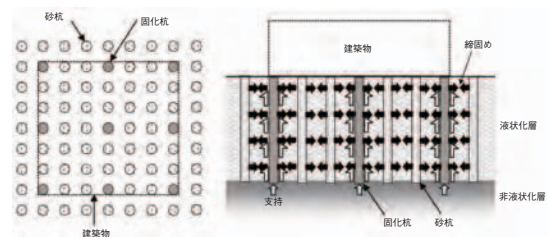


図-3 HCP工法の概要

* 戸田建設(株) 技術研究所

固化杭の材料には、レディーミクストコンクリートの他、再生砕石や高炉スラグなどのリサイクル材料を骨材としたコンクリートを使用することもできる。普通コンクリートの配合強度は、負担荷重と経済性を考慮して10～15N/mm²に設定し、砂杭と同程度に拡張する際の施工性を考慮して、スランプ8cmを基本としている。

対象地盤は、液状化の発生が懸念される緩い砂質土地盤を基本とするが、粘性土との互層地盤にも適用可能である。

2.2 施工方法

図-4および図-5には、それぞれHCP工法に使用する施工機械および施工手順を示す。施工機本体および以下に示す施工手順は、砂杭と固化杭に共通である。

- ①ケーシングを所定の位置に鉛直にセットした後、材料をケーシング内に投入する。
- ②強制昇降装置により圧力を加えながら正回転でケーシングを貫入する。
- ③所定の深度までケーシングを貫入する。
- ④ケーシング内を圧気しながら逆回転で引き抜き、材料を地盤中に押し出す。
- ⑤ケーシングを所定長（約50cm）引き抜いた後、拡張するために所定長（約30cm）打ち戻す。

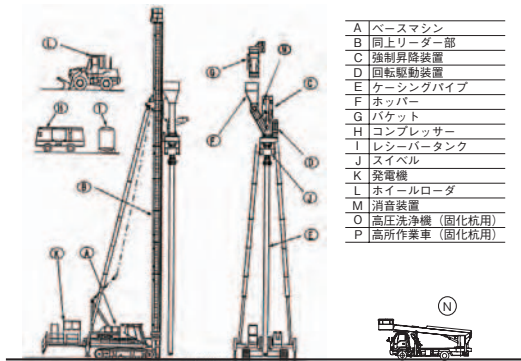


図-4 HCP工法の施工機械

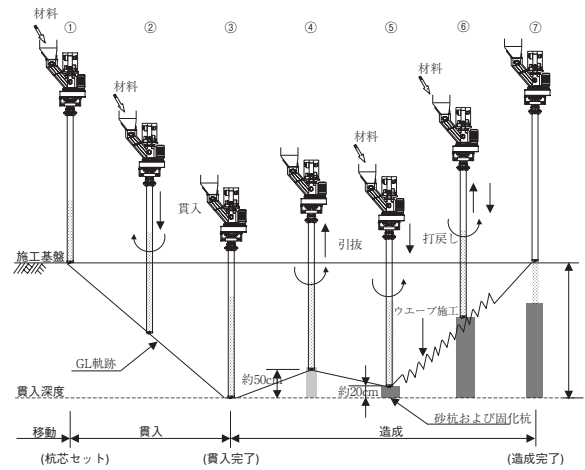


図-5 HCP工法の施工手順

- ⑥④および⑤の操作を繰り返すことにより、砂杭もしくは固化杭を造成する。この間、必要に応じてケーシング内に材料を補給する。
- ⑦基礎底深度に達したら、拡張操作を終了してケーシングを引き抜き、造成作業を終了する。ケーシングの引き抜きおよび打ち戻し中は、常にケーシング内の材料天端位置および深度を確認し、所定量の材料が投入されていることをチェックする。

3. 施工試験

3.1 施工試験の概要

液状化の可能性のある地盤に砂杭と固化杭を併用して施工し、砂杭の一部を固化杭に置き換えた場合の締固め効果、固化杭の支持性能、圧縮強度、出来形などを確認する目的で、一連の施工試験を実施した。

図-6は、砂杭および固化杭の配置を示す。固化杭の周囲に砂杭を配置し、合計78本の杭（砂杭68本、固化杭10本）を施工した。杭ピッチは2.0mの正方形配置を標準とし、1.4mピッチの狭い場合についても調査した。

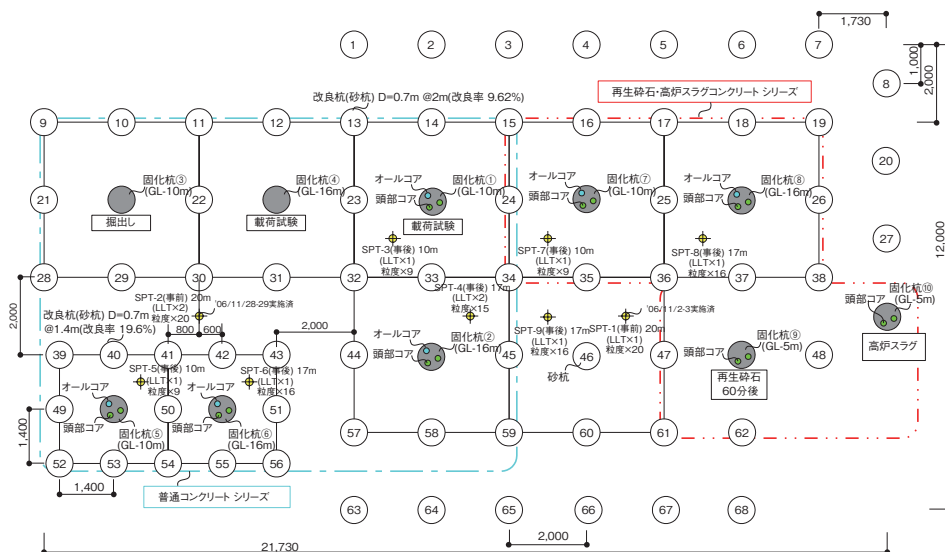


図-6 砂杭および固化杭の配置

図-7は、試験サイトの土質柱状図、N値分布および固化杭の断面を示す。GL-4~7m付近に堆積する粘土質細砂層が液状化の対象層である。固化杭の長さは10mを標準として、適用深度の確認を目的とした16m、および骨材分離の有無や圧縮強度の調査を目的とした5mの3種類となっている。ただし、いずれの固化杭も表層部1mは拡径のための余長としており、拡径していない。

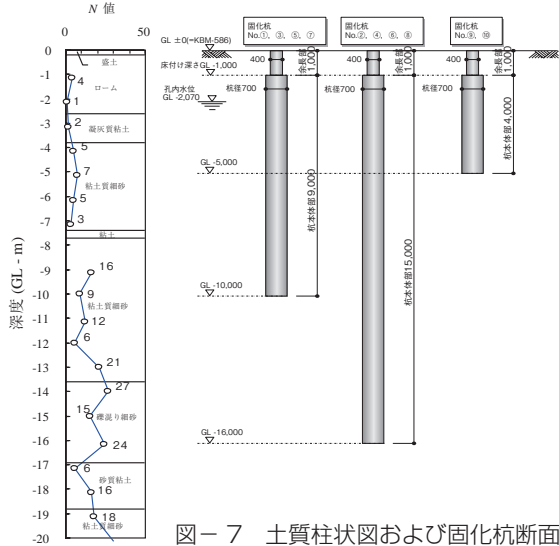


図-7 土質柱状図および固化杭断面

表-1 固化杭の諸元

コンクリート種類	杭No.	主な確認項目	配合強度	スランプ	骨材種類	先端深度GL-	備考
普通コンクリート	①	支持性能	15.0N/mm ²	8cm	砂利+砂	10m	載荷試験
	②	締固め効果				16m	
	③	拡径状況				10m	掘出し調査
	④	支持性能				16m	載荷試験
	⑤	締固め効果				10m	
	⑥	締固め効果				16m	
再生コンクリート	⑦	締固め効果	9.7N/mm ²	8cm	再生砕石(RC40)+洗い砂	10m	
	⑧	締固め効果			16m		
	⑨				5m		
	⑩	施工性			高炉スラグ+洗い砂	5m	

表-2 試験項目一覧

試験項目	数量	確認項目	対象	
標準貫入試験	事前	20m×2本	締固め効果	
	事後	10m×3本		
	事前	3点	締固め効果	
	事後	7点		
フレッシュコンクリート	スランプ試験	14バッチ	全ての固化杭	
	空気量試験	14バッチ	全ての固化杭	
	圧縮強度	14バッチ×3=42本	全ての固化杭	
非破壊試験	インテグリティ試験	10回	杭長、健全性	全ての固化杭
コアサンプルの圧縮強度	オールコア	195本	強度	固化杭②、③、⑥、⑦、⑧、⑩
	頭部コア	33本	強度	固化杭②、③、⑥、⑦、⑧、⑩
鉛直載荷試験	急速載荷試験	2本	支持性能	固化杭①、④
掘出し試験	出来形調査	0.2m毎		固化杭③
	頭部杭径調査	頭部	出来形(杭径)、骨材分離の有無	全ての固化杭
	骨材分離試験	9断面(縦5、横4)		固化杭③

施工した10本の固化杭の諸元を一覧して表-1に示す。内訳は、普通コンクリート6本、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4本となっている。

表-2は、実施した試験項目、数量等を一覧して示す。地盤に関しては、砂杭と同様に材料圧入による締固め効果を確認するためのN値、簡易粒度試験等を実施し、固化杭に関しては、コンクリートの圧縮強度

試験、載荷試験、出来形や骨材の分離の有無を調査するための掘り出し試験、健全性を確認するための非破壊試験を実施した。

3.2 固化杭コンクリートの圧縮強度

沈下抑止効果を期待した固化杭の主たる品質管理項目として、一軸圧縮強度とスランプを規定した。一軸圧縮強度については、普通コンクリートの場合には、プラントの実績から安定した品質で供給可能な最低強度および固化杭に期待する支持力より、予備強度15N/mm²を採用し、表-3に示す配合とした。再生コンクリートについては、固化杭の支持力が材料強度から決まらないように余裕を持たせた値としてFc=6N/mm²に設定し、文献³⁾に準拠して試し練りにより配合を決定した。実際の物件に適用する際も、基本的には使用する再生骨材ごとに試し練りを行って配合を決定する。

表-4は、普通コンクリートについて荷重卸し時に採取した供試体および固化杭からコアボーリングによって採取した供試体(頭部および全深度)で確認した圧縮強度を示す。すべて呼び強度を上回る強度が発現されていることがわかる。また図-8には、普通コンクリートおよび再生コンクリートの圧縮強度の深度分布を示す。普通コンクリートについては、コア強度がGL-8m付近まで深度と共に漸増する傾向を示しており、強度に関する品質管理としては頭部強度の確認が安全側の評価となる。

表-3 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	2.18
水セメント比: 76.5%		細骨材率: 47.5%		(kg/m ³)
セメント: 高炉セメントB種				

表-4 普通コンクリートの圧縮試験結果

杭No.	頭部		全深度		荷重卸し	
	σ_B	F_N との比	σ_B	F_N との比	σ_B	F_N との比
①	-	-	-	-	26.9	1.79
②	18.7	1.25	21.6	1.44	25.0	1.67
③	21.9	1.46	26.5	1.77	27.2	1.81
④	-	-	-	-	26.4	1.76
⑤	16.2	1.08	-	-	26.1	1.74
⑥	17.0	1.13	26.5	1.77	26.5	1.77
平均	18.6	1.24	24.8	1.65	26.2	1.75

σ_B : 平均圧縮強度、 F_N : 呼び強度の強度値 ※単位: N/mm²

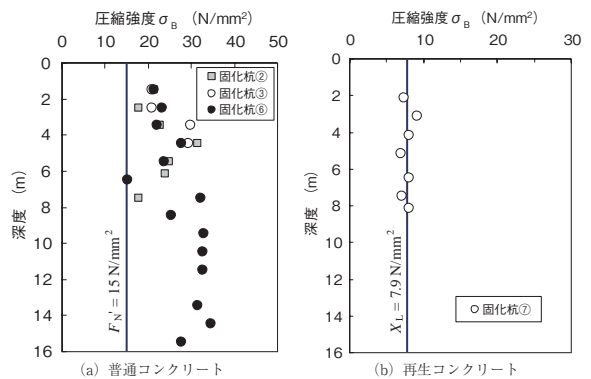


図-8 圧縮強度の深度分布

再生コンクリートについては、試料数が少ないこともあるが、深度方向にはほぼ一定値であった。文献³⁾に準じて強度に関する合否判定を行った結果、供試体数に応じた判定係数および標準偏差から算定した合格判定値を上回る圧縮強度であることが確認されている。

3.3 固化杭骨材の分離性

固化杭の施工では、施工機械の頭部から投入したコンクリート材料がケーシング内を落下するため、骨材の分離が懸念された。そこで、出来形調査のために掘り出した固化杭を図-9に示すように切断し、1mごとに1辺20cmの正方形ブロック(5×3)に区分し、その内の4ブロック(上部、下部、中央部、外周部)の骨材面積率を調査した。図-9の右側に着色して示した部分が、画像解析処理による骨材部分を表わしている。

調査結果によると、全体の平均骨材面積率33.9%に対して、深さ方向には中央部、外周部とも深い位置で若干大きめの値(GL-2.6~-2.8mで-3.0%、GL-4.6~-4.8mで+3.8%)であった。また、同一深度における外周部と中央部の差は-3.0~+4.3%で、特に有意な傾向は認められなかった。これらの結果より、骨材面積率の違いは全体の平均値に対して最大で5%以下であることから、材料がケーシング内を落下したことによる骨材分離の影響は、特に問題ないと判断した。

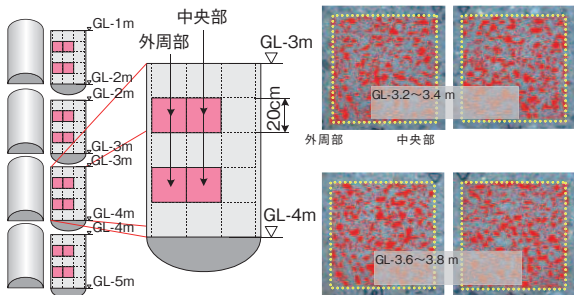


図-9 画像解析処理による骨材面積調査結果

3.4 固化杭の出来形

固化杭は、700mmに拡径するために必要なコンクリートの投入量(0.385m³/m)を常に管理しながら施工している。このようにして施工した固化杭が、所定の形状を確保していることを確認する目的で、出来形について調査した。固化杭③についてはGL-1~-5m、その他についてはGL-1~-2m程度まで掘出し、直交する2方向の杭径を測定した。ただし、GL-1m以浅は締固めのための余長であり、拡径されていない。

図-10に固化杭径の深度分布を、写真-1に掘出した固化杭③の出来形を示す。固化杭③の頭部4mにおける平均径は643mm、固化杭③を除いた杭頭部1mの平均径は、普通コンクリートで612mm、再生コンクリートで672mmであり、比較的硬質のローム層でも平均で600mm以上に拡径されていることが確認された。再生コンクリートの杭径が普通コンクリートと比較して大きくなったことについては、スランプの違い

(普通コン:6.5~9.0cm、再生コン:2.5~5.0cm)によるものと思われる。

写真-1によると、GL-3.5m付近に、瘤状に杭径の大きな部分が認められる。その原因は不明であるが、地層の境界部における地盤剛性の変化や地下水の有無などが影響したものと思われる。

写真-2は、杭頭付近が浚渫シルトによる埋立て地盤で施工された実施物件において、設計杭頭レベルでの出来形を示す。地盤が比較的軟弱なこともあって、すべての杭で700mm以上の杭径を確認することができた。

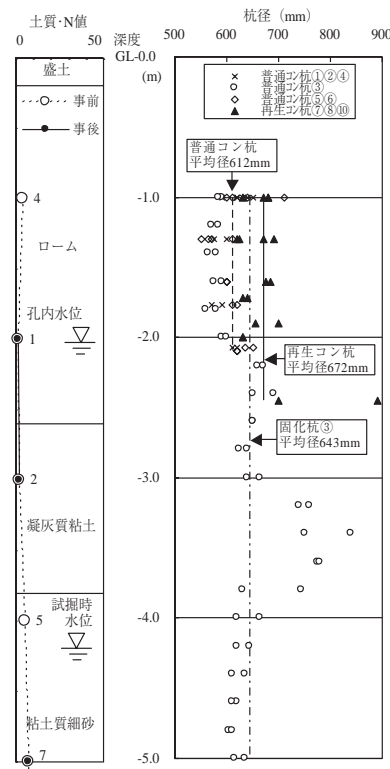


図-10 固化杭径の深度分布



写真-1 固化杭の出来形

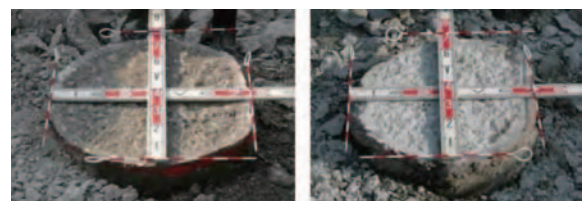


写真-2 固化杭頭部の出来形

3.5 固化杭の健全性調査

固化杭の連続性や土塊の混入による断面欠損の有無などの健全性を調査する目的で、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実施した。

図-11は、固化杭①、③、④で実施した試験結果を示す。固化杭①および④については、施工長と対応する深度で明瞭な先端反射が認められており、杭を横断するようなひび割れや断面欠損がないことが確認された。掘り出し調査を実施した固化杭③については、GL-3.5m付近で反射波が認められるが、これは写真-1で確認された瘤状の断面面積の変化によるものと思われる。

3.6 締固め効果

固化杭の締固め効果を確認する目的で、改良前2箇所 (No.1, 2)、改良後7箇所 (No.3~9) において、標準貫入試験および簡易粒度試験を実施した。改良後の調査のうちNo.9は4本の砂杭間中央地盤 (砂杭近傍)、No.3~8は4本の砂杭のうち1本を固化杭に置き換えた杭間地盤中央 (固化杭近傍) で実施している。

図-12は、改良前N値と固化杭近傍での改良後N値を同深度で比較したものである。GL-4~13mの粘土質細砂層は、細粒分含有率Fcの平均値が約30%でばらつきも大きい。改良後のN値もばらつきが大きい結果となっている。全般的には図-12に示すとおりN値が増加する傾向を示しており、増加N値の平均は4程度であった。また、砂杭近傍と固化杭近傍で、増加傾向に有意な差は認められなかった。

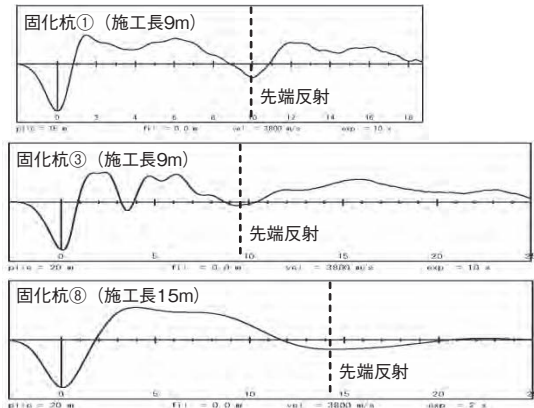


図-11 インテグリティ試験結果

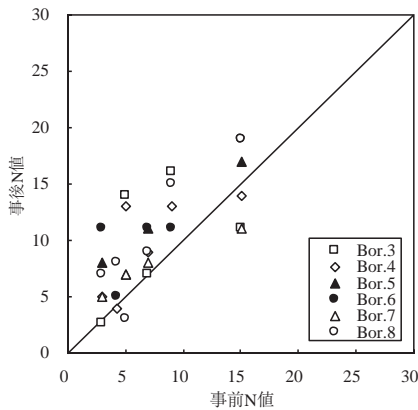


図-12 改良前後のN値の比較

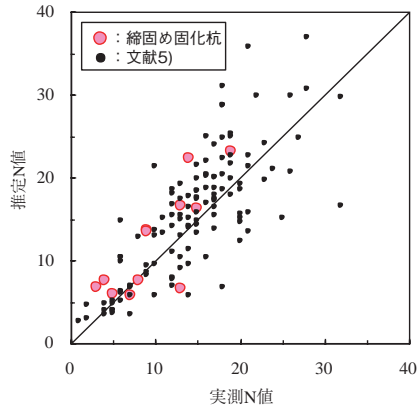


図-13 推定N値と実測N値の関係

本工法について、現行の最新の設計法 (方法D⁴⁾) による推定N値と実測N値を比較し、締固め効果の検証を行った。算定条件は、杭径700mm、杭間隔2mの正方形配置 (改良率 $a_s = 9.6\%$) とした。

図-13に、方法Dによる推定N値と実測N値の関係について、既往のサンドコンパクションパイル工法および静的締固め砂杭工法による推定N値と実測N値の関係⁵⁾とあわせて示す。実測N値と推定N値の関係は、おおむね既往のばらつきの範囲内に収まっている。したがって、砂杭の一部を固化杭で置き換えた本工法の場合は、砂杭だけの場合とほぼ同等の締固め効果を期待することができ、その評価も現行の設計法で可能であると考えられる。

3.7 固化杭の支持性能

固化杭の鉛直支持性能を確認する目的で、長さの異なる2種類の杭 (固化杭①:9m、固化杭④:15m) に対して急速載荷試験を実施した。写真-3に、載荷試験の状況を示す。試験方法は、段階的に重錘 (147~231kN) の落下高さを変化させる多サイクル方式を採用し、除荷点法により支持力を推定した。ただし、固化杭④では最大荷重で極限状態に達しなかったため、宇都等の方法⁶⁾により第2限界抵抗力を推定した。



写真-3 急速載荷試験の状況

図-14は、急速載荷試験における載荷重Pと杭頭沈下量Sの関係を示す。また、図-15は第1限界抵抗力を判定するための $\log P - \log S$ 関係を示す。表-5は、載荷試験結果を一覧して、建築基礎構造設計指針¹⁾による場所打ち杭の支持方式と比較して示したものである。支持力評価にあたって、周面摩擦力を算定する際の固化杭径については、表層部付近の洪積粘性土層で一部所定の径まで拡張されていないことが判明したため (掘出し調査結果による頭部4mの平均径は643mm)、杭径が0.6mと0.7mの2ケースとした。

表-5によると、学会式と比較して1.7~2.5倍の第2限界抵抗力が得られていることがわかる。学会式

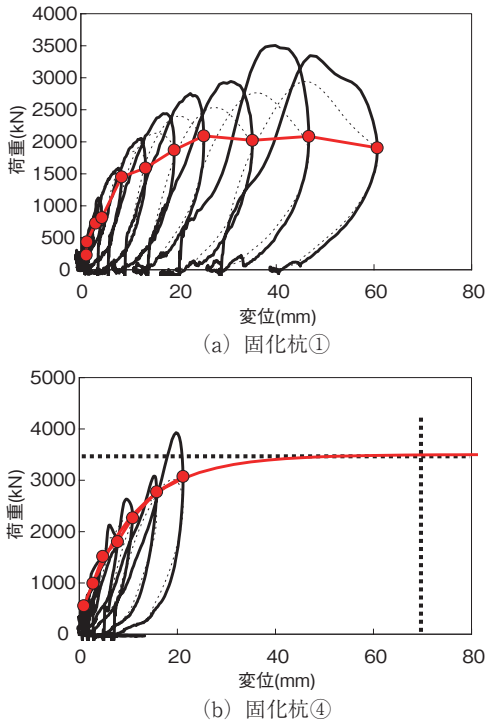


図-14 載荷重と杭頭沈下量の関係

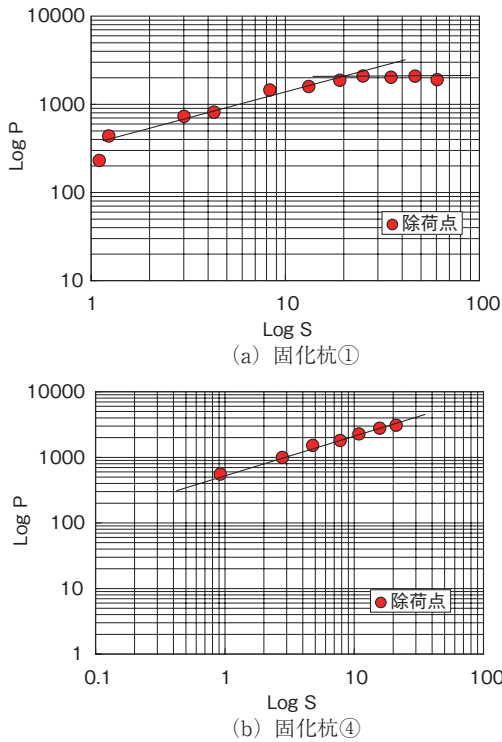


図-15 Log P - Log S 関係

表-5 載荷試験結果の一覧

		固化工杭①	固化工杭④
第2限界抵抗力	試験値	2000kN	3500kN
	学会式	802 ~ 1005kN*	1730 ~ 2101kN*
	余裕度	2.49 ~ 1.99*	2.02 ~ 1.67*
第1限界抵抗力		2000kN	3000kN以上
長期許容支持力		667kN	1167kN

* (左: φ 600mm) ~ (右: φ 700mm)

が設計で推奨すべき安全側の評価式であることや、先端平均N値が通常の支持杭と比較して小さい(固化工杭①:10.8、固化工杭④:19.3)ことを考慮しても、学会式を大幅に上回る支持性能を有していることが確認された。

4. おわりに

液状化地盤でも適用可能な合理的なパイルド・ラフト基礎工法を開発する目的で、一連の大規模な施工試験を実施した。液状化対策工法として建築工事で実績の多い静的締固め砂杭工法に用いる機械で施工した固化工杭について、その性能・品質、施工性などを調査した。その結果、砂杭と同等の締固め効果の他、沈下抑止の目的でラフトと分担して支持する荷重に対して、十分な支持性能、材料強度および品質を確認することができた。

なお、HCP工法は、戸田建設、安藤建設、鉄建建設、東急建設、西松建設、間組、不動テトラ、三井住友建設の8社による共同開発工法である。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001
- 2) Burland, J. B. Broms, B. B. and de Mello, V.F.B. : Behaviour of foundations and structures, Proc. 9th ICSMFC, Vol.2, 1977
- 3) 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
- 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) 山本実他：締固め工法を用いた緩い砂質地盤の液状化対策の新しい設計法，土と基礎，Vol.48, No.11, 2000
- 6) 宇都一馬他：杭の載荷試験結果の整理方法，基礎工，1982.7

