

地盤改良複合杭基礎工法

～ 杭と地盤改良体がひとつになって地震に強い基礎をつくります～

市川 晃央

(株)竹中土木 技術・生産本部 技術部



地盤改良複合杭基礎は、地盤改良体と杭からなる複合基礎形式である。本基礎形式は、軟弱地盤において、杭が水平抵抗に関与する深さまで地盤改良体が存在し、従来の杭基礎に比べて、大きな水平抵抗を期待できる。よって、杭径の縮小化や杭本数の削減等により、排土量や使用材料を抑制できる基礎形式である。室内における大型模型を用いた水平載荷試験と解析を実施した。その結果、杭基礎に比べ水平支持力が2倍以上得られることや解析モデルの設計への適用性が確認された。また、コスト比較の結果から本基礎形式が杭基礎より15%程度コスト削減が可能である。

キーワード：複合基礎，地盤改良体，水平載荷試験，梁ばねモデル

1. はじめに

東日本大震災など災害の多い我が国では、防災・減災への技術開発が建設会社において優先的課題である。一方で、社会設備におけるコスト縮減や環境負荷低減は避けられない状況である。竹中土木はコスト縮減や環境負荷低減が可能な耐震工法、「地盤改良複合杭基礎工法」を開発した。

地盤改良複合杭基礎は、地盤改良体と杭からなる新しい複合基礎形式である。本基礎形式は、軟弱地盤において、杭が水平抵抗に関与する深さまで地盤改良体が存在し、従来の杭基礎に比べて、大きな水平抵抗を期待することができる。したがって、杭径の縮小化や杭本数の削減、原位置攪拌混合による地盤改良体を構造体とすること等により、建設に伴う排土量や使用材料を抑えることができ、環境負荷低減に繋がる基礎形式と考えられる。

本基礎形式の技術的特徴は、図-1 に示すように地盤改良体と杭を一体化し複合構造体としたものである。

また、図-2 は従来の杭基礎と地盤改良杭の水平支持力機構を比較したものであるが地盤改良複合杭は、地盤改良による抵抗面積の増加と杭と地盤改良の合成構造による剛性向上等により杭基礎単独に比べ水平支持力の向上が図られる。

この基礎の適用を図るために、室内や原位置において杭基礎の支持力特性に関しての幾つかの載荷試験および、数値解析を実施している^{1), 2), 3)}。

本報文は、地盤改良複合杭基礎に関する載荷試験結果と設計解析モデルによる解析結果の比較から設計方法の妥当性を示すとともに施工方法やコストについても紹介する。

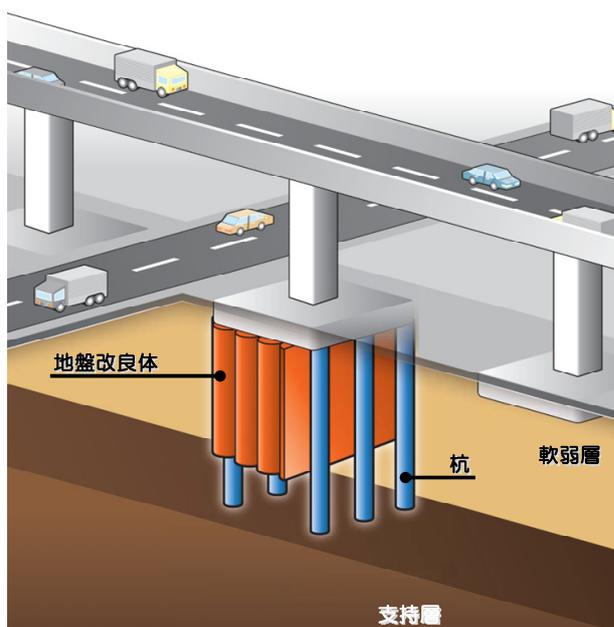


図-1 地盤改良複合杭基礎の概要図

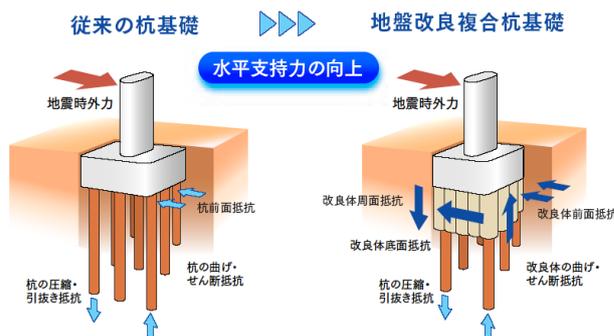


図-2 水平支持力向上の概念

2. 載荷試験による水平支持性能評価

地盤改良複合杭基礎の水平載荷試験は、以下の2例が実施されている。

- ① 大型模型を用いた室内載荷試験^{1), 2), 3)}
- ② 原位置における載荷試験¹⁾

上記の載荷試験の概要を表-1に示す。それぞれ、杭頭固定条件や杭本数、地盤の異なる条件で実施している。本章では、これらの実験結果に基づく地盤改良複合杭基礎の水平支持性能について述べる。

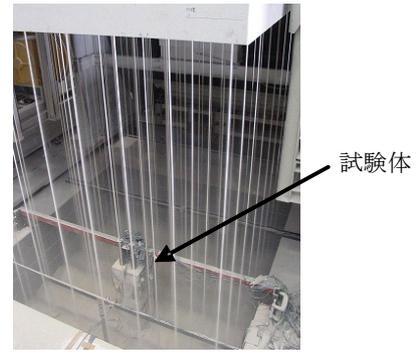


写真-1 地盤製作状況

(1) 大型模型を用いた室内載荷試験

a) 室内載荷試験概要

大型土槽（深さ 8m、内寸 2.5m）内に設置した鋼管杭（φ50.8mm、t=3.2mm）4本の周りに地盤改良体を作製し、杭頭部に打設したコンクリート製フーチングを1台の100kNのジャッキを用いて水平載荷する試験を行った。試験方法は、地盤工学会基準「杭の水平載荷試験方法・同解説」に準拠した一方多サイクル方式にて、荷重制御で実施した。

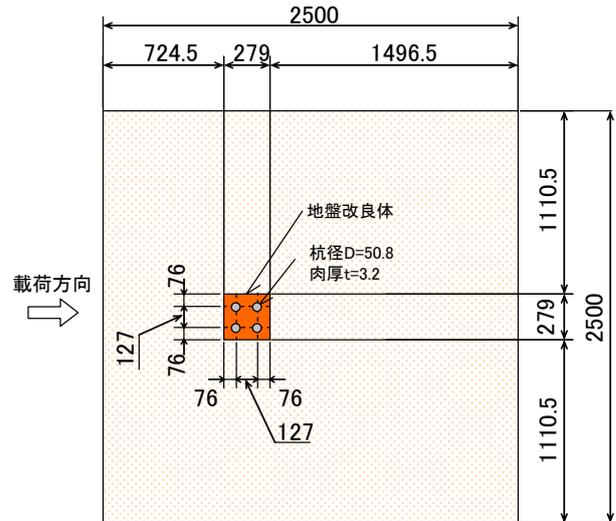
試験地盤は、鋼管杭を設置した後、自由落下により作製し、落下高さを調節することで表層部の軟弱な地盤の状態を再現させた（写真-1参照）。

試験体の概要を図-3に示す。地盤改良体は深さ1,200mm、平面形状は□279mm×279mmであり、杭は長さ4.7m、直径50.8mm、肉厚3.2mm、降伏点215N/mm²（公称値）の鋼管を用いた。地盤改良体の平面形状は、杭径Dが50.8mmより、5.5D（279mm）とした。これは、杭間隔が2.5D、杭中心と改良体縁端距離を1.5Dと設定したことによる。また、地盤改良深さは、(1)式により $a = \pi/2$ と設定して算出した。

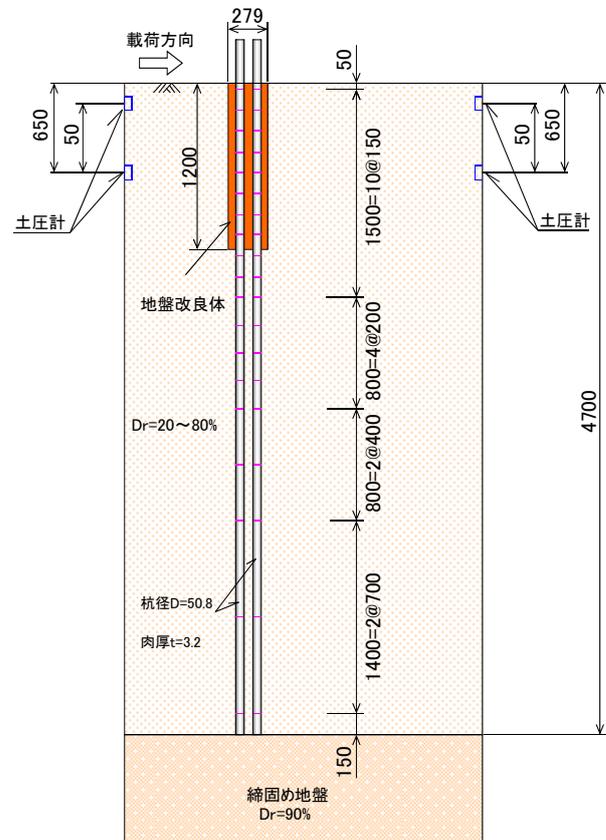
$$L_1 = a / \beta \quad (= \pi/2 \beta = 1.2m) \quad (1)$$

ここに、 L_1 は地盤改良深さ、 a は係数（ $1 \leq a \leq \pi/2$ ）、 β は杭の特性値である。

地盤改良体の製作は、GL-1.5m程度まで地盤を作製後、改良体部に型枠を組み、ソイルセメントを型枠内に打設する方法で行った。脱型は打設から15日後に行った。



(i) 平面図(単位: mm)



(ii) 断面図(単位: mm)

図-3 試験体概要(室内試験)

表-1 載荷試験概要

	①大型模型を用いた 室内載荷試験	②原位置における 載荷試験
杭頭固定条件	固定	自由
地盤条件	砂質地盤(飯豊硅砂 6号)	軟弱粘性土地盤
杭種	鋼管杭	鋼管ソイルセメント 杭(合成鋼管杭)
杭本数	4本(2本×2本)	2本
地盤改良体の施 工	室内配合による型枠 内への打設	深層混合処理工による 原位置攪拌混合
地盤改良体の一 軸圧縮強さ q_u	2.4MPa	8.6MPa
地盤改良体の変 形係数 E_{50}	2.4×10^3 MPa	4.0×10^3 MPa

b) 室内載荷試験結果

室内試験は、杭基礎と地盤改良複合杭基礎の2ケース行った。図-4に載荷試験の結果を示す。

地盤改良複合杭基礎の試験結果は、3.2%B 変位程度(9.12mm)まで増荷時の荷重保持時間内にクリープ変形が殆ど無い挙動を示しており、載荷荷重16.75kN、水平変位9.12mm時(6サイクル目の最大荷重時：改良体破壊時)に荷重保持が困難となっていることが分かる(Bは改良体幅279mm)。しかしながら、7サイクル以降も急激な耐力の低下は生ずることがなく、水平抵抗は増加の傾向にある。

また、基礎の水平変位が1%B時、地盤改良複合杭基礎の耐力は7.75kNであり、杭基礎の耐力は3.03kNである。すなわち、両基礎形式が同様な杭配置と杭本数であるとき、地盤改良複合杭基礎が杭基礎の約2.5倍の水平耐力を有していることが分かる。

(2) 原位置における載荷試験

a) 原位置載荷試験概要

試験位置は、TP-40m以浅の地盤はN値が0~10程度のシルト細砂と砂質シルトの沖積層であり、良好な支持層はTP-47m以深にある。載荷試験における試験体概要、配置を図-5、図-6に示す。

改良体はソイルセメント径800mm、深さ8.4m、計8本のコラムでラップさせ、1.4m×3.2m×8.4mのブロック状の改良体を作成した。その後、鋼管ソイルセメント杭(鋼管径600mm)を2本建て込み、試験体を作成した。載荷方向が強軸と弱軸の2ケースを実施するため2つの試験体を作成した。試験の目的が水平支持力特性の確認であるため、杭の根入れが改良深さの3倍程度あれば、杭先端が不動点であると考えられ、杭長を30.0mとした。試験体の頭部には、コンクリートフーチングを打設し、その上に水平および鉛直荷重を載荷した。

載荷方法は、2台のジャッキを用いて1000kNの鉛直荷重を保持した状態で水平荷重を載荷した。試験方法は、一方多サイクル方式にて、変位制御で実施した。

b) 原位置載荷試験結果

図-7の強軸方向載荷試験結果より、水平変位1.5%B(20mm)程度まではほぼ弾性的な挙動を示すが、水平変位2.1%B(30mm)において明確な変曲点が生じる。これは、地盤改良体側面にクラックが発生していることを確認していることから、改良体の破壊により生じたものと推定できる。これは、室内載荷試験における変曲点の発生原因と同じであり、地盤改良複合杭基礎の降伏は、地盤改良体の破壊時と定義することができる。

また、基礎の水平変位が1%B(強軸：32mm、弱軸14mm)時、地盤改良複合杭基礎の耐力は強軸方向で1,773kN、弱軸方向で947kNであり、杭基礎の耐力は強軸で780kN、弱軸で450kNである。すなわち、両基礎形式が同様な杭配置と杭本数であるとき、地盤改良複合杭基礎が杭基礎の2倍以上の水平耐力を有していることが分かる。

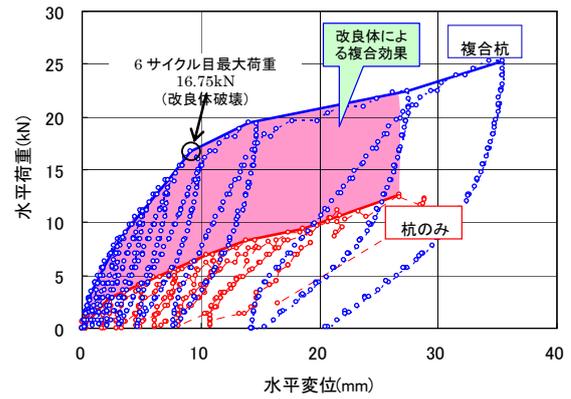


図-4 荷重～変位関係

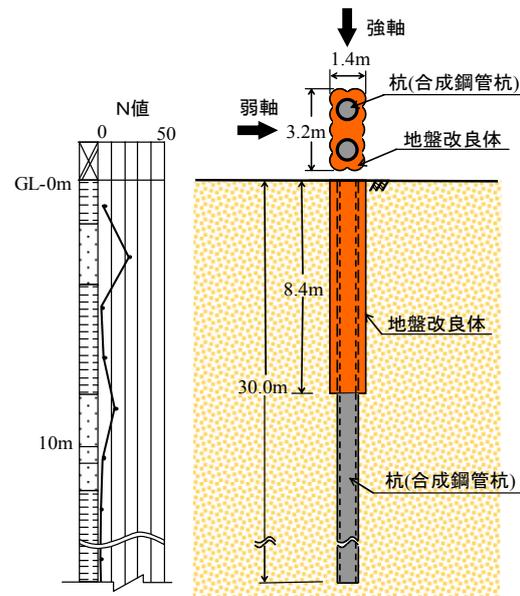


図-5 試験体概要(原位置試験)

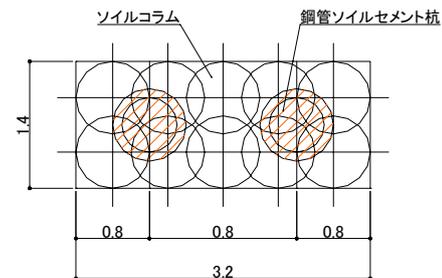


図-6 試験体配置図(原位置試験)

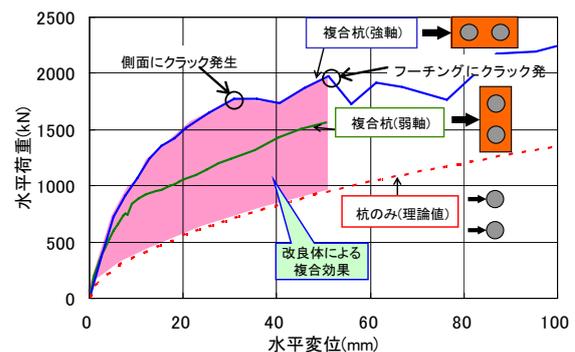


図-7 荷重～変位関係(原位置試験)

図-8 に対数表示した載荷荷重～水平変位曲線を示す。載荷荷重 16.75kN、水平変位 9.12mm 時 (6 サイクル目の最大荷重時) に変曲点がみられ、変位が進行していることが分かる。この載荷荷重～水平変位曲線上の折れ点を地盤改良複合杭基礎の降伏点 (弾性限界) と考えることができる。

3. 設計手法

水平載荷試験結果を基に、杭基礎の一般的な設計手法と同様の梁ばねモデルによる設計手法の適用性の検討を行った。設計モデルは、図-9 に示すような上部の改良体と杭の複合部をケーソンとみなし、下部の杭部を通常の杭基礎とする梁ばねモデルとした。

2章で述べた2例の載荷試験に梁ばねモデルを適用した結果を表-3 に示す。解析において、地盤ばねをバイリニア型で定義し、地盤改良体のモデル化は、室内試験結果への適用は、線形弾性として考慮しており、原位置試験結果への適用は、非線形として改良体破壊後の剛性低下を考慮している。なお、詳細な地盤定数については、文献 1) を参照されたい。

表-2 より、表-1 に示したように条件の異なる2例の水平載荷試験において、それぞれ挙動を再現可能であり、杭の各断面力の深度分布に関しても概ね評価可能である。また、地盤改良体破壊後の大変形挙動について、室内試験結果は、地盤改良体を弾性としてモデル化していることから、改良体破壊後の挙動を再現しきれていないが、原位置試験への適用結果より、地盤改良体の剛性低下を考慮することにより、再現可能であることが分かる。

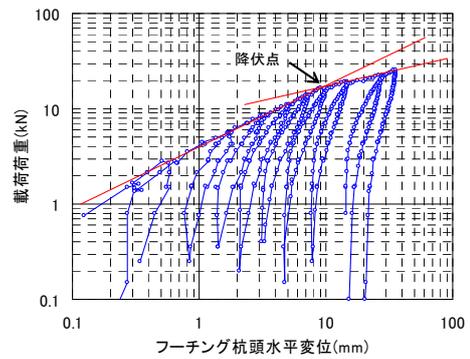
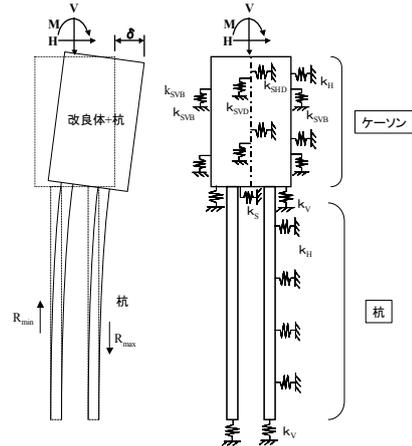


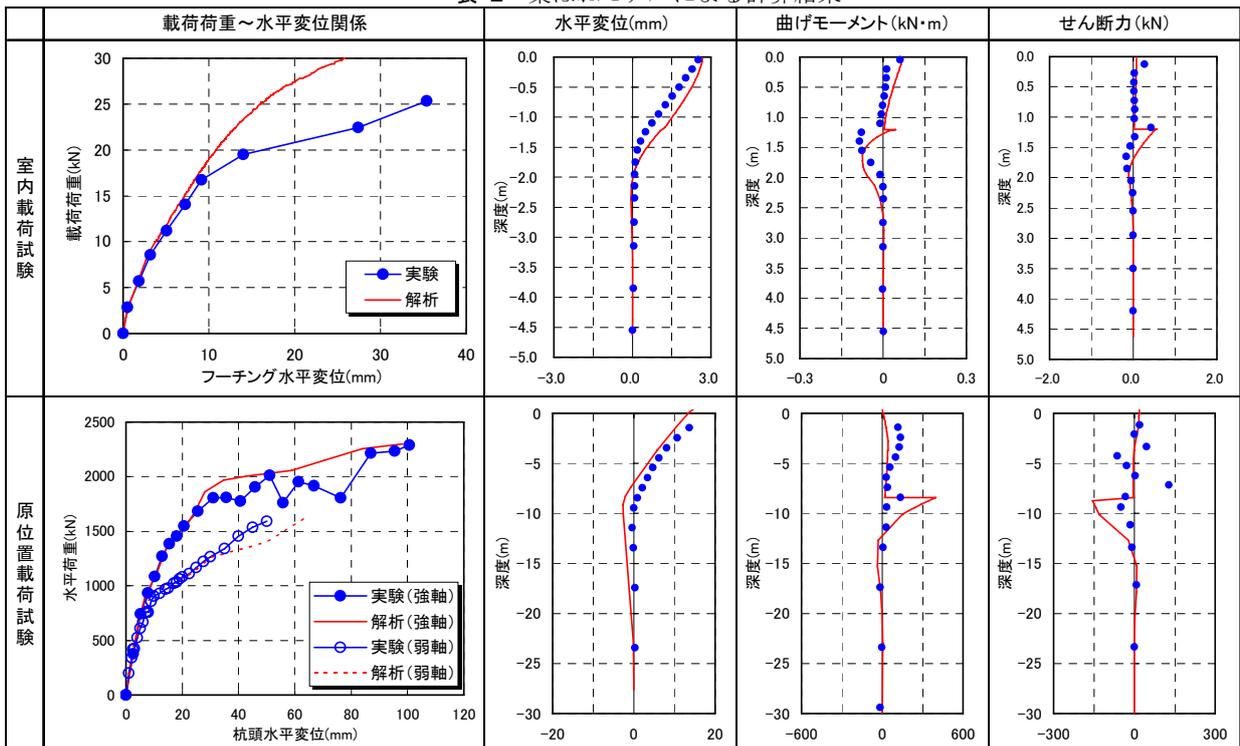
図-8 載荷荷重～水平変位関係



- k_H : 前面の水平方向地盤反力係数
- k_V : 底面地盤反力係数
- k_S : 底面の水平方向せん断地盤反力係数
- k_{SVB} : 前背面の鉛直方向せん断地盤反力係数
- k_{SVD} : 側面の鉛直方向せん断地盤反力係数
- k_{SHD} : 側面の水平方向せん断地盤反力係数
- V, H, M : 作用力

図-9 設計に用いる梁ばねモデル

表-2 梁ばねモデルによる計算結果



4. 施工方法

地盤改良複合杭の施工方法を表-3 に示す。施工方法は、地盤改良を先行させる方法と杭施工を先行させる方法がある。また、地盤改良を先行させる方法としては杭施工前に地盤改良を削孔する方法と地盤改良の上から直接杭施工するものに分類される²⁾。

5. コスト比較

表-4 にφ1500mm の場所打杭による杭基礎の場合と同一の杭基礎による複合杭基礎の場合のコスト比較を示す。表-4 のように杭基礎の場合 9 本必要な杭が地盤改良複合杭の場合は 6 本となり、地盤改良を含めてコストを約 15%低減することが可能である。

6. まとめ

以上、地盤改良複合杭基礎工法に関して設計や施工、コストについて概説した。本論文においては主として新設を対象として述べたが、既設構造物においても、噴射攪拌工法などにより既設杭周辺の地盤改良が可能な場合においては本工法が適用可能である。また、液状化対策の TOFT 工法など地盤改良工法との組み合わせにより、より高付加価値かつトータルコストの低減も可能となると考えられる。今後施工をより合理化できるよう努力し社会資本の安全・安心に少しでも寄与できるよう努力する所存である。

参考文献

- 1) 前田良刀, 市川晃央, 鶴窪誠司, 斎藤雄也, 広瀬剛, 坂手道明: 地盤改良複合杭基礎の支持力特性と実務への適用性の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 3, No. 1, pp37-54.
- 2) 市川晃央, 前田良刀, 坂手道明: 地盤改良複合杭基礎の水平支持力特性とその評価法, 基礎工, 2008, Vol. 36, No. 1, pp70~73.
- 3) 地盤改良体を用いた複合基礎構造, 複合構造技術の最先端-その方法と土木分野への適用, 土木学会, pp127~132.

表-3 施工方法

施工法 No.	施工順序	施工方法概要	改良体強度	適応杭種
1	地盤改良 ↓ 杭	全旋回等のオーケーシング工法により地盤改良部を掘削し、杭を施工。	弱～強	場所打杭 鋼管ソイルメント杭
2		杭施工部を箱抜きし、CDM工法等により地盤改良を施工。その後、箱抜き部を掘削し、杭を施工。 ※既製杭の場合、一体化するためセメントミルクの注入が必要となる。	弱～強	場所打杭 鋼管ソイルメント杭 既製杭※
3		杭施工部の地盤改良のセメントミルクに遅延材を添加し改良体造成後、杭を施工。	中～強	鋼管ソイルメント杭 場所打杭 鋼管杭
4		ロックオガーにより地盤改良体を先行削孔し杭を施工。 ※既製杭の場合、一体化するためセメントミルクの注入が必要となる。	中～強	場所打杭 鋼管ソイルメント杭 既製杭※
5		杭施工後、高圧噴射攪拌工法により杭周辺部の地盤改良を施工。	弱～強	場所打杭 既製コンクリート杭 鋼管杭

表-4 コスト比較表

