

低空頭先端強化型鋼管杭工法の支持力特性

竹田 茂嗣*1・沼田 佳久*2・齋藤 雅春*3

概 要

鉄道の線路上空に人工地盤等の構造物を構築する際、基礎杭の施工は線路の間や架空線またはホーム屋根の下など、狭隘で低空頭な作業空間で行われる。このような施工条件の下、孔壁防護等の補助工法を必要とせず、杭先端部の根固め改良を行える鋼管杭の施工方法（低空頭先端強化型鋼管杭工法）を東日本旅客鉄道株式会社と共同開発し、鉛直載荷試験によりその支持力特性を検証した。

本報告は、その結果について報告するものである。

キーワード：鋼管杭，低空頭，周面支持力，設計地盤反力係数

BEARING PROPERTY OF THE SMALL-OVERHEAD-CLEARANCE FOOT-REINFORCED
STEEL PILING METHOD

Shigetsugu TAKEDA*1, Yoshihisa NUMATA*2, Masaharu SAITO*3

Abstract

In construction of artificial ground and other structures above railway tracks, foundation piles are placed in narrow spaces with small overhead clearance, that is, between tracks, below catenaries or under platform roofs. Aimed at providing an effective solution for such work, Tekken Corporation and East Japan Railway Company jointly developed a technique not needing auxiliary work such as hole wall protection, which employs steel pipe piling capable of reinforcing the pile leg (small-overhead-clearance foot-reinforced steel piling method), and validated its support properties by means of vertical loading tests.

This paper reports the study results.

Keywords: steel pipe pile, small overhead clearance, skin bearing capacity, design subgrade reaction coefficient

*1 Geotechnical Engineering Group, Construction Technology Center, Engineering Division

*2 Jingumae Project Office, Tokyo Branch

*3 General Manager, Construction Technology Center, Engineering Division

低空頭先端強化型鋼管杭工法の支持力特性

竹田 茂嗣*1・沼田 佳久*2・齋藤 雅春*3

1. はじめに

基礎杭の施工方法は、打ち込み杭、中掘り先端根固め杭、場所打ち杭および深礎杭に分類され¹⁾、何れの施工方法を採用するかは、支持する構造物の規模、施工条件、経済性などに基づいて判断される。例えば、鉄道の線路上空に人工地盤等の構造物を構築する際、基礎杭の作業条件は、線路の間や架空線またはホーム屋根の下など、狭隘で低空頭(H=4m以下)な空間となり、このような作業条件下で基礎杭を施工するには、比較的小型の機械を使用するTBH杭などの場所打ち杭工法や深礎杭工法が用いられてきた。しかしながら、これらの工法は、施工時の孔壁崩壊による軌道への影響が懸念され、事前に地盤改良などによる補助工法を必要とするため、工期の長期化およびコストアップをもたらしてきた。

このような背景から、施工機械が小型であること、孔壁を防護するための補助工法が不要なことを前提条件として、従来、仮設構造物の基礎杭として小口径の鋼管杭(φ600mm以下)を線間施工する際に使用してきた鋼管杭工法²⁾を基本技術とし、鋼管杭の先端部における根固め方法の効率化と小型の杭打ち機(以下、小型杭打ち機)の機能向上を図ることで、低空頭先端強化型鋼管杭工法を開発し、本設構造物の基礎杭への適用性を検討した。

2. 工法および開発の概要

鋼管杭については、掘削用の先端ビットを強化するとともに、鋼管先端部の周囲と内部

にそれぞれ専用の注入管を設けて先端根固めの効率化を図った。また、小型杭打ち機については、装備する回転圧入機の鋼管把持機構の改良と回転トルクの増幅を図り、対象とする鋼管杭の最大径をφ700mmに拡大した。

施工方法は、先端部に地山切削用の強化ビットを装着した短尺(3.0m以下)の鋼管杭を回転圧入機で回転させながら地山を切削し、鋼管を順次連結して所定の深度まで到達した後に、ビットの先端より噴射するセメントミルクで先端地山を攪拌混合して先端根固めを施すもので、施工方法としては中掘り先端根固め杭に分類される¹⁾。

本工法の支持力特性について、2回の試験を通じて検証した。通常タイプと称する先端杭を有する試験杭を打設した後、鉛直載荷試験を実施した。得られた鉛直支持力について、鉄道構造物等設計標準¹⁾(以下、構造物標準)における中掘り先端根固め杭の算定式に基づき検証した(通常タイプの検証)。次に鉛直支持力の増加を図るため、杭先端から上2.0mの範囲までの鋼管周面にセメントミルクを充填し、周面支持力の向上を図った。得られた鉛直支持力から、セメントミルクを周面に充填しない場合と比較し、周面支持力の改良効果を検証した(支持力向上タイプの検証)。

3. 施工機械および施工方法

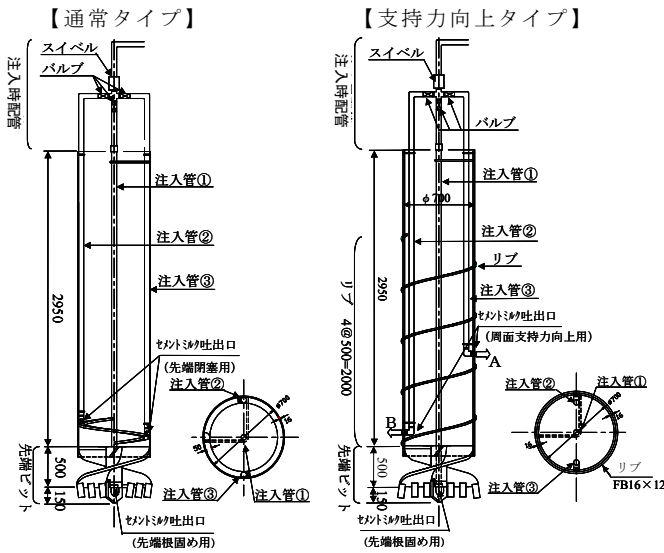
3.1 鋼管杭の概要

図-1に示すように、先端杭による根固めの方法には、鋼管の周面支持力を中掘り先端

*1 エンジニアリング本部 建設技術総合センター 研究開発部 地盤グループ

*2 東京支店 地下鉄明治神宮前作業所

*3 エンジニアリング本部 建設技術総合センター 所長



杭種類	SKK400	杭肉厚	16 mm
杭外径	700 mm	鋼管断面積	343.8 cm ²

図-1 先端杭の構造図および仕様

根固め杭として評価する通常タイプと場所打ち杭として評価する支持力向上タイプの2種類があり、用途に応じて先端杭を使い分ける。各先端杭は、それぞれ以下の機能を有する。
通常タイプ：杭先端部の閉塞および先端ビット周りの攪拌固化を行うもので、各注入管は以下の役割を持つ。

- ・ 注入管①：ビット先端中央部の吐出口に繋がっており、削孔・圧入時には削孔水を、先端根固め時にはセメントミルクを噴射する。
- ・ 注入管②、③：先端根固め時に吐出口 A、B より鋼管内部へセメントミルクを噴射して鋼管杭先端を閉塞。

支持力向上タイプ：先端ビット周りを固化するとともに、杭先端部の外周面にセメントミルクを充填し、リブを設けた外周面と一体化させて周面支持力を確保し、高い鉛直支持力を期待するものである。

- ・ 注入管①：通常タイプと同じ。
- ・ 注入管②、③：先端根固め時に吐出口 A、B より鋼管杭の外周面へセメントミルクを噴射する。

両タイプとも先端には、地山を回転切削する

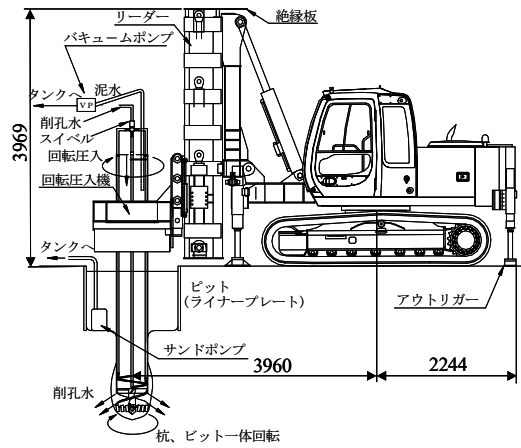


図-2 施工機械

表-1 セメントミルクの配合

水 セメント比 W/C (%)	水 W (kg)	結合材		
		セメント C (kg)	混和剤 C*1%(kg)	計 P (kg)
45	587	1305	13.1	1318

ビットを装着し、施工後はビットを残置する構造である。また、鋼管杭は、低空頭下での施工条件に対応するため、長さ 3.0m 以下の鋼管を溶接継手や機械継手などにより順次接続しながら所定の杭長とするものである。

先端根固め用セメントミルクの配合を表-1に示す。セメントミルクには、プラントから杭先端部まで圧送できる流動性、注入時の材料の分離抵抗性、および地下水中に逸散しない程度の粘性が求められるため、ノンブリーディング型の混和剤を添加している。

3.2 施工機械の概要

本工法に用いる施工機械を図-2に示す。杭打ち機は、0.45m³級バックホウの旋回部分をベース機械として、パワーユニット、アウトリガー、ウェイトなどを加えたものに短尺のリーダーを装着し、リーダーに中空タイプの回転圧入機（回転トルク 20.97～104.85kN・m、回転数 2.0～5.2rpm）を取り付けた小型の機械である。動力は車載エンジンにより駆動し、他の動力源を必要としない。最大高さは 3,969mm であり、空頭制限の 4,000mm 以内に収まる。また、安全対策として旋回時の接触防止に旋回リミッターを、架

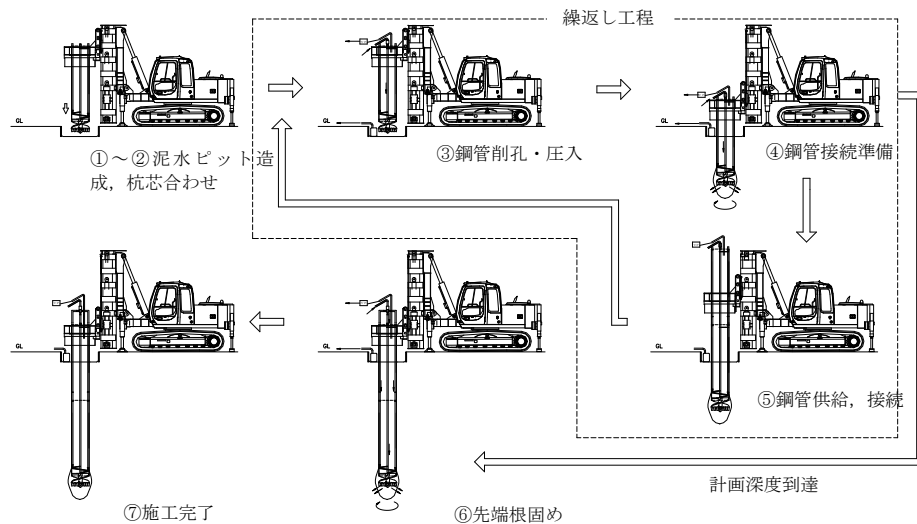


図-3 施工手順図

線防護としてリーダー上部に絶縁板を取り付けている。さらにエンジン故障時には、別途のパワーユニットとモーターユニットにより構成される緊急脱出装置を接続することで、線路外まで自ら移動できる構造となっている。

3.3 施工手順

標準的な施工は、図-3および以下に示す

- ①～⑦の手順に沿って実施する。
 - ① 泥水ピットの造成：杭施工位置周辺を掘削し、泥水ピットを造成する。
 - ② 杭芯合わせ：杭打ち機を杭芯にあわせてセットし、位置決めを行う。
 - ③ 鋼管削孔・圧入：注入管①（削孔水用）にスイベルを取り付け、接続する。接続完了後、鋼管の回転を開始し、送水状況を確認してから、削孔・圧入を開始する。削孔・圧入時には、先端ビットの中央より削孔水を噴射しながら削孔していく。
 - ④ 鋼管接続準備：継ぎ杭1本分を削孔・圧入した後、注入管①を切り離して、スイベルを撤去する。
 - ⑤ 鋼管杭供給・接続：鋼管杭を供給して接続する。
- 以上の③～⑤を分割した本数分だけ繰り返す。
- ⑥ 先端根固め：計画深度まで鋼管を圧入した後、セメントミルクに切り替え、鋼管を回転させながら500mmのストローク

で上下させ杭先端ビットを含めた先端部の根固めを行う。その後、注入管①を閉じて注入管②，③を開放，同じ動作を行いながら杭先端部内部または外周面に向けてセメントミルクを噴射し、杭先端内部の閉塞または周面支持力の確保を行う。

- ⑦ 施工完了：杭先端の閉塞および根固めを終了した後、注入用配管を切り離してスイベルを撤去する。

4. 通常タイプの検証

鋼管の周面支持力を中掘り先端根固め杭として評価する通常タイプを先端杭とした試験杭1を打設し、鉛直支持力特性を検証した。

4.1 試験杭の施工方法

試験杭1を施工した地盤の土質柱状図を図-4に示す。地表から5.4mまではN値5前後の粘性土層，14.6mまではN値5～15程度の砂質土層である。支持層は、N値が30以上となる深度15m付近の細砂層とし、施工長は根入れ長1.5mを含めL=16.5mとした。

実際の施工条件（空頭制限： $H \leq 4.0\text{m}$ ）を想定し、図-1に示す仕様の鋼管杭を、 $3.0\text{m} \times 5$ 本と $2.5\text{m} \times 1$ 本の計6本（施工長：16.5m，継手：5ヶ所）による継ぎ杭とした。鋼管杭の接続は溶接継手とし、所定の深度に達するまで削孔・圧入および接続を繰り返して施工

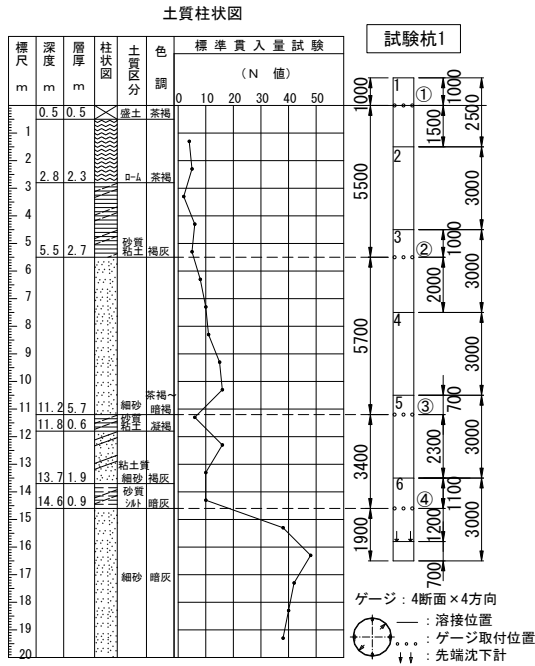


図-4 土質柱状図 (試験杭1)

した。削孔・圧入時は、先端ビットより削孔水を 100 ㄩ/min で噴射して杭先端部の地山を緩めながら行い、所定の深度まで鋼管杭を建て込んだ。その後、注入管①よりセメントミルクを 30 ㄩ/min で噴射し、杭を回転させながら 500mm のストロークで上下させ、先端ビットを含む地山の攪拌(2往復)を行い、先端根固めを完了させた。

セメントミルクの設計注入量は、杭先端部の閉塞区間(500mm)、先端ビットの設置区間(500mm)、をセメントミルクで全て置換える量と仮定し、さらに削孔時における孔壁形状の乱れを考慮して、それぞれに割増係数を乗じて、以下の通り求めた。

- 杭先端部閉塞部

$$V_1 = \pi (D/2)^2 \times L_1 \times \alpha_1 = 0.25 \text{ m}^3$$

- ビット周辺部

$$V_2 = \pi (D/2)^2 \times L_2 \times \alpha_2 = 0.38 \text{ m}^3$$

- 総注入量： $V = V_1 + V_2 = 0.63 \text{ m}^3$

ここに、D: 杭径(=0.7m), L_1 : 閉塞長(=0.5m), L_2 : ビット長(=0.5m), α_1 : 割増係数(=1.3), α_2 : 割増係数(=2.0)

4. 2 鉛直載荷試験方法

鋼管杭施工後、1ヶ月の養生期間を設け

「(社)地盤工学会：杭の押込み試験方法³⁾」に準拠して鉛直支持力を確認した。設計鉛直支持力は、構造物標準¹⁾における中掘り先端根固め杭の算定式を用いて、式(1)~(3)により求めた。本標準の支持力式は、杭の鉛直載荷試験データから統計的に定められたものであり、杭径の10%の変位における支持力を基準支持力として採用している。

- 単杭の設計鉛直支持力

$$R_{vd} = f_{rf} \cdot R_f + f_{rp} \cdot R_p \quad (1)$$

ここに、 R_{vd} : 設計鉛直支持力 (kN)

R_f : 最大周面支持力 (kN)

R_p : 基準先端支持力 (kN)

f_{rf} : 周面支持力に対する
地盤抵抗係数

f_{rp} : 先端支持力に対する
地盤抵抗係数

- 単杭の最大周面支持力

$$R_f = U \sum r_i \cdot l_i \quad (2)$$

ここに、 R_f : 最大周面支持力 (kN)

U : 杭の周長 (m)

r_i : 各土層の杭の最大周面支持力度 (kN/m²)

砂質土： $r_i = 2.0N \leq 50.0$ (kN/m²)

粘性土： $r_i = 5.0N \leq 50.0$ (kN/m²)

l_i : 各土層の厚さ (m)

- 単杭の基準先端支持力

$$R_p = q_p \cdot A_p \quad (3)$$

ここに、 R_p : 基準先端支持力 (kN)

q_p : 基準先端支持力度 (kN/m²)

砂質土： $q_p = 150N \leq 7500$ (kN/m²)

(N : 杭先端より $3D$ の範囲の平均値)

A_p : 杭の先端面積 (m²)

設計鉛直支持力の計算結果を表-2に示す。これより、載荷試験の計画最大荷重は、設計鉛直支持力(3314kN)の約1.5倍に相当する4900kNとした。載荷方法は段階載荷方式・多サイクルで行い、サイクル数は5サイクルで荷重ピッチは10段階、各荷重段階で新規に加える荷重は490kNとした。また、

各新規荷重へ到達後 30 分間の荷重保持時間を設けた。計測項目は、杭頭・杭先端変位量、杭頭水平変位、杭体ひずみ量とし、杭体ひずみ量の計測位置は図-4の通り土質の変化する4断面とし、各断面につき4点ずつ計測した。

4.3 鉛直載荷試験結果

杭頭部の試験結果の総合図を図-5に示す。載荷初期から3920kNまでの間は、荷重の増加とともに杭頭の残留変位量は徐々に蓄積していく。第1限界抵抗力は、図-6に示す杭頭荷重(P_0)と杭頭変位量(S_0)の関係より、 $\log P_0 \sim \log S_0$ 曲線の勾配の折れ点が明瞭に現れる杭頭荷重 $P_0=3920\text{kN}$ と判定できる。最終的に杭頭荷重は4900kNまで載荷し試験を終了した。この間、図-7に示す杭頭荷重(P_0)～杭先端変位量(各荷重ステップにおける最大値： S_0)の関係より、杭先端荷重に明瞭なピークが現れないままに、杭頭変位量が杭径の10%(0.1D)を上回ったため、0.1Dに対応する杭頭荷重(4410kN)を第2限界抵抗力と判定した。また、図-8は、載荷過程における杭の軸方向力の分布図を示したものである。周面支持力は、載荷の初期段階より杭の全長に亘って発揮され、各載荷段階で杭先端に向かい滑らかに減少する分布形を示している。また、杭先端荷重は、第1限界抵抗力に到達した後から第2限界抵抗力にかけて急速に上昇しており、周面支持力の変化に応じて杭頭荷重を負担する挙動が窺える。

表-3は、各状態の支持力値を一覧に示したものである。試験杭1の第2限界抵抗力は、当初の設計鉛直支持力を上回り、特に周面支持力は大きく向上する結果となった。

図-9は、第1限界抵抗力と第2限界抵抗力に到達した時点の各深度区間における周面支持力の変化および、中掘り先端根固め杭による設計値を示している。これより、周面支持力のピークは、各深度区間とも第1限界抵抗力に到達した時に現れ、第2限界抵抗力

表-2 設計鉛直支持力の算定結果

設計鉛直支持力	基準先端支持力	2375 kN
	最大周面支持力	939 kN
	合計	3314 kN
計画最大荷重 (設計鉛直支持力×1.5)		4900 kN

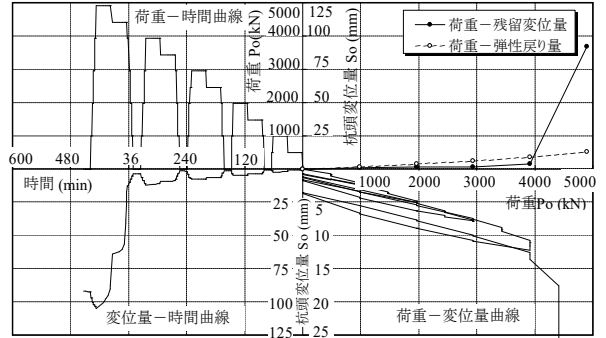


図-5 試験結果総合図 (杭頭)

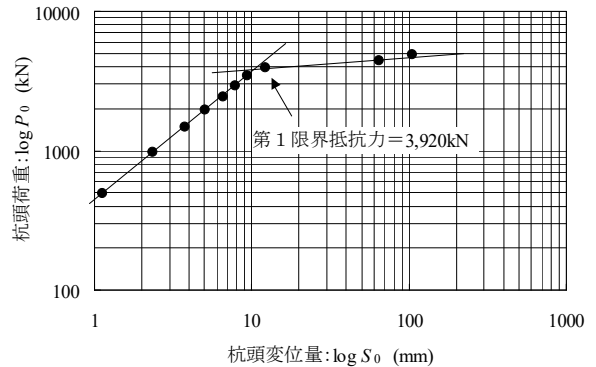


図-6 杭頭荷重と杭頭変位量の関係

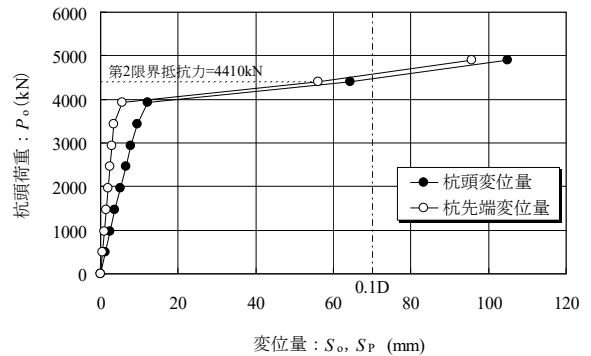


図-7 杭頭荷重と変位量の関係

に向かう過程では減少に転じており、この減少を補うように先端荷重が上昇して杭頭荷重を支持することがわかる。また、各深度区間とも発揮された周面支持力度は設計値を大きく上回り、特に杭先端付近(深度11.2m～14.6m)の周面支持力度は7倍以上の周面支持力度を示している。これは、注入した先端

根固め用セメントミルクの余剰分が鋼管杭の外周面と地山との間隙を上昇し、計画以上の範囲までセメントミルクが充填されたことにより周面支持力度が向上したものと思われ、本鋼管杭の周面支持力を改善できる対策手段と見なせる。

以上から、本工法により施工された鋼管杭は、構造物標準における中掘り先端根固め杭の設計法を適用できるものと思われる。

5. 支持力向上タイプの検証

前述の通り、試験杭1の鉛直載荷試験では、先端根固めに用いたセメントミルクが、鋼管杭の外周面にも充填され、周面支持力度が向上したと思われる。これより、鋼管杭の外周面にセメントミルクを確実に充填できれば、向上した周面支持力を設計においても評価できるものと考え、先端杭の構造を図-1に示す支持力向上タイプに変更し、同一の地盤にて支持層の異なる鉛直載荷試験を2本実施し、周面支持力の向上効果について検証することとした。

5.1 鋼管杭の周面支持力の向上対策

鋼管杭の先端部の構造は、図-1の支持力向上タイプに示したとおり、先端ビット中央部に根固め用セメントミルクの吐出口を、鋼管側面の2箇所周面支持力向上用の吐出口(A, B)を設け、さらに鋼管杭外周面に充填されたセメントミルクと鋼管杭との付着力を増すためのリブ(FB16×12)を螺旋状に設置した。リブの設置位置は、回転圧入機が鋼管を把持するのに支障とならない杭先端部から2.0mの範囲とし、周面支持力の向上用の吐出口もこの範囲に設けることとした。施工方法を以下の①～③に示す。

- ① 2.3①～⑤の通り、杭先端部が所定の深度に達するまで鋼管の削孔・圧入を行う。
- ② 注入管①の流路をセメントミルクに切り替え、杭先端より噴射し、鋼管を回転させながら先端根固めを行う。

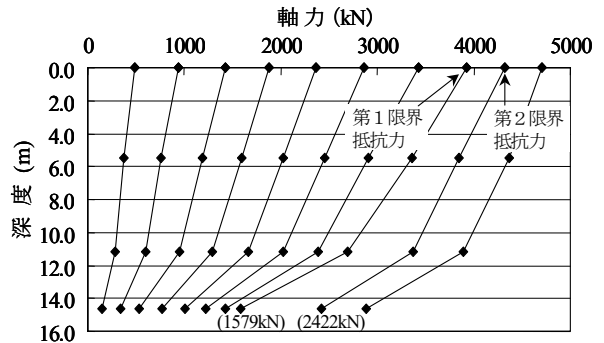


図-8 軸方向力分布図

表-3 試験結果

設計鉛直支持力	基準先端支持力	2375kN
	最大周面支持力	939kN
	合計	3314kN
第1限界抵抗力	先端支持力	1579kN
	周面支持力	2341kN
	合計	3920kN
第2限界抵抗力	先端支持力	2422kN
	周面支持力	1988kN
	合計	4410kN

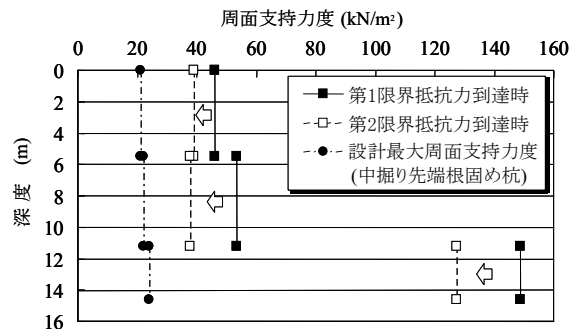


図-9 周面支持力度分布図

- ③ 注入管②, ③のバルブを開放し、鋼管を回転させながら吐出口A, Bよりセメントミルクを鋼管の外周面に噴射・充填する。なお、設計注入量は、試験杭1の注入範囲に杭の外周面への注入量を加算して求めた。

- ・ 杭先端部閉塞部
- ・ $V_1 = \pi (D/2)^2 \times L_1 \times \alpha_1 = 0.25 \text{ m}^3$
- ・ ビット周辺部
- ・ $V_2 = \pi (D/2)^2 \times L_2 \times \alpha_2 = 0.38 \text{ m}^3$ 杭外周部
- ・ $V_3 = \pi \{[(D+2d)/2]^2 - (D/2)^2\} \times L_3 \times \alpha_2 = 0.47 \text{ m}^3$
- ・ 総注入量

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = 1.10 \text{ m}^3$$

ここに、D: 杭径(=0.7m), L₁: 閉塞長(=0.5m),

L_2 : ビット長(=0.5m), L_3 : 充填長(=2.0m),
 d : 余掘り幅(=0.05m), α_1 : 割増係数(=1.3), α_2 : 割増係数(=2.0)

5. 2 試験条件

試験杭 2, 3 を施工した地点の土質柱状図および鋼管杭の寸法形状を図-10に示す。土質は地表から深度 7.5m までは N 値 1~2 の粘性土層, 7.5m~15m は N 値 9~31 の粘土質細砂層, 15m~24m は N 値 22~50 以上の細砂層で構成されている。土質性状の異なる地層での周面支持力の向上効果を検証するため, 試験杭 2 は N 値 55 となる深度 20.0m の細砂層を, 試験杭 3 は N 値 20 となる深度 13.8m の粘土質細砂層を支持層とし, 杭長は試験杭 2 が 20.0m, 試験杭 3 が 14.0m とした。

5. 3 鉛直載荷試験方法

各杭の鉛直支持力の確認試験は, 3.2 と同様に「(社)地盤工学会: 杭の押し込み試験方法」に準拠して実施した。なお, 杭体のひずみ量は, 図-10 に示すように土質特性の変化する断面(試験杭 2: 6 断面, 試験杭 3: 4 断面)について, 各断面につき 4 点ずつ計測した。設計鉛直支持力は, 基準先端支持力については中掘り先端根固め杭の算定式を, 最大周面支持力については周面支持力向上措置を施した範囲に場所打ち杭の算定式を, その他の範囲には中掘り先端根固め杭の算定式をそれぞれ適用して算出した。計画最大荷重は, 設計鉛直支持力の 1.5 倍に相当する荷重とした。

5. 4 鉛直載荷試験結果

試験杭 2, 3 の第 1 限界抵抗力は, 各々図-11 に示す $\text{Log } P_0 \sim \text{Log } S_0$ 曲線において, 曲線の勾配が変化する時の杭頭荷重とした。第 2 限界抵抗力は図-12 に示す杭頭荷重~杭先端変位量の関係より, 試験杭 2 では杭頭荷重のピークが認められないため, 杭の先端変位量が杭径の 10% (0.1D:70mm) に到達した時とし, 試験杭 3 では杭頭荷重が当初の計画最大荷重を超えても杭先端変位量は 14mm 程度となり 0.1D を超えることなく, 反力杭

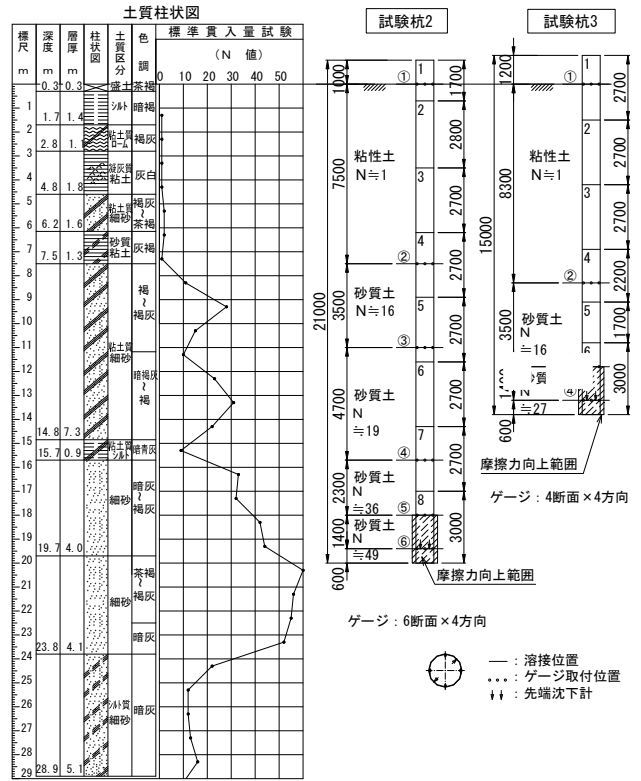


図-10 土質柱状図 (試験杭 2, 3)

表-4 設計鉛直支持力の算定結果

杭番号		試験杭2	試験杭3
設計鉛直支持力	基準先端支持力	2886 kN	1154 kN
	最大周面支持力	1946 kN	935 kN
	合計	4832 kN	2089 kN
計画最大荷重 (設計極限支持力×1.5)		7200 kN	3000 kN

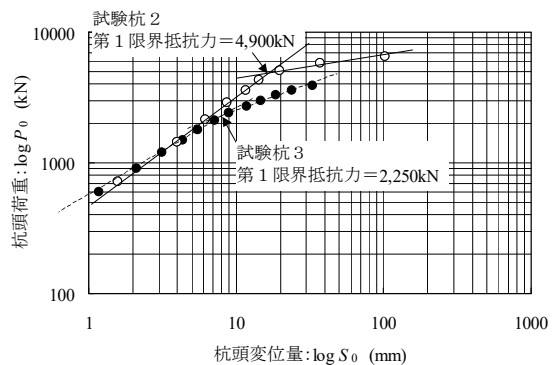


図-11 杭頭荷重と杭頭変位量の関係

の引抜き耐力を考慮して 3900kN まで載荷した時点で試験を終了することとした。このため, 試験杭 3 の第 2 限界抵抗力は, 図-12 に示す杭頭荷重~杭先端変位量の関係が高い相関性を示すことから, 載荷試験終了

から 0.1D までの範囲を外挿して求め、同様に第 2 限界抵抗力における先端支持力は図-1.3 に示す杭頭荷重～杭先端荷重の関係より外挿して求めた。

図-1.4 は、載荷過程における軸方向力の分布図を示したものである。試験杭 2 は第 2 限界抵抗力に至るまで、試験杭 3 は試験終了に至るまでの推移を示している。これより、周面支持力は、試験杭 2 では深度 8.0m より深い区間、試験杭 3 では全長に亘って発揮されている。これは、試験杭 3 に注入したセメントミルクは、僅かながらも地表に溢れ出したことから、杭の外周部は全長に亘って充填された状態にあり、試験杭 2 についても同量のセメントミルクを注入したため、試験杭 3 の杭長と同等の範囲にまで外周部にはセメントミルクが充填された状態にあると思われる、ここでの結果に現れたものと思われる。以上より、現状でのセメントミルクの設計注入量の算出はかなりの余裕があり、割増係数などの修正を要するものの、鋼管杭の外周部へのセメントミルクの注入は、周面支持力の向上に寄与することを改めて確認できた。

表-5 は、各状態での支持力値の一覧を示したものである。これより、各試験杭の第 2 限界抵抗力は、何れも当初の設計鉛直支持力を上回り、特に周面支持力は試験杭 1 と同様に大きく向上する結果となった。

5. 5 周面支持力向上効果の検証

図-1.5 は、発揮された周面支持力度 r を各地層毎の平均 N 値との関係で示したもので、試験杭 2 は第 2 限界抵抗力時、試験杭 3 は試験終了時の値、また設計における最大周面支持力度として鉄道構造物設計標準における場所打ち杭および中掘り先端根固め杭の値を併記している。試験杭 2, 3 の周面支持力度は、全ての区間において設計周面支持力度を上回り、特に周面支持力向上措置を施した杭先端部では、平均 N 値の 5.5 倍および 8.3 倍の周面支持力度が得られ、これは砂質土の

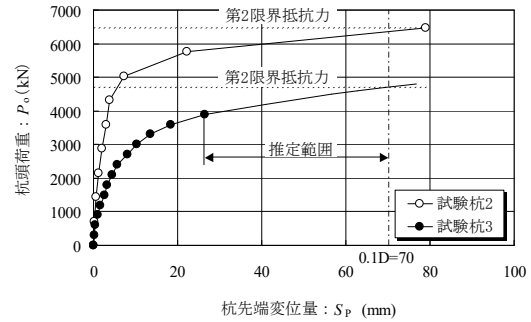


図-1.2 杭頭荷重と杭先端変位量の関係

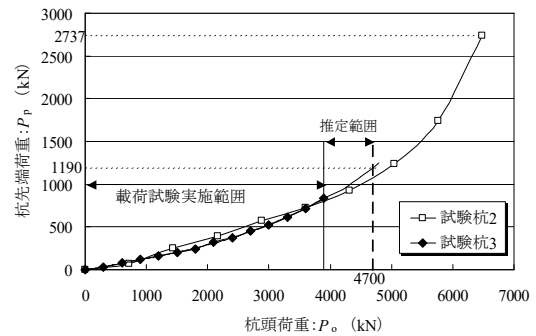


図-1.3 試験杭 3 の極限先端支持力の推定

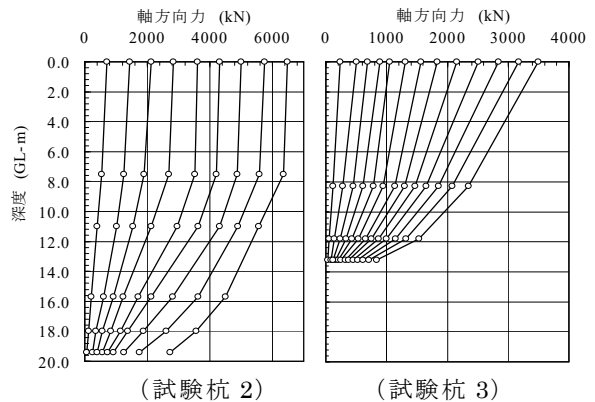


図-1.4 軸方向力分布図

場合における場所打ち杭の最大周面支持力度の算定式(4)による値を上回る結果である。

砂質土： $r = 5.0 N \leq 200 \text{ kN/m}^2$ (4)

※ ベントナイト泥水を使用しない場合
これより、今回の地盤条件では鋼管杭の外周面へのセメントミルク充填は、周面支持力の向上を期待できる効果的な処置であり、その周面支持力度は中掘り先端根固め杭の算定式(2)より大きな周面支持力係数を持つ場所打ち杭の算定式(4)を適用できると思われる。

表-5 試験結果

杭番号		試験杭2	試験杭3
第1限界抵抗力	先端支持力	1178 kN	346 kN
	周面支持力	3722 kN	1904 kN
	合計	4900 kN	2250 kN
第2限界抵抗力	先端支持力	2737 kN	1190 kN
	周面支持力	3743 kN	3510 kN
	合計	6480 kN	4700 kN

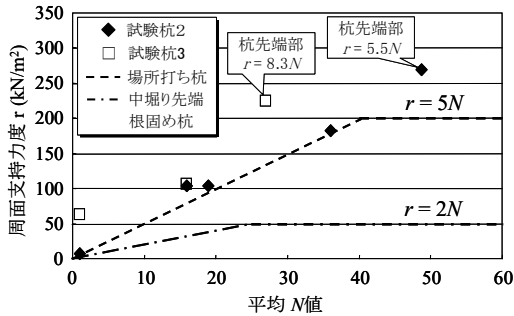


図-15 周面支持力度分布図

図-16は、第2限界抵抗力まで載荷できた試験杭2について、杭頭荷重の増加に伴う各深度範囲①～⑤の周面支持力度の推移を示したものである。これより、周面支持力度のピークは深度の浅い順に現れ、大部分は第1限界抵抗力の前後でピークを迎え、第2限界抵抗力に至る間に減少する傾向にある。その減少量は深度が深い程少なく、周面支持力の向上処置を施した杭先端部の深度範囲⑤における減少量は僅かである。また、周面支持力度の上昇勾配は、各深度範囲とも第1限界抵抗力付近までは概ね等しいことから、同じ粗度を持つ面上で摩擦抵抗が発揮されており、各深度間の地盤材料が異なることを考慮すると、鋼管杭とセメントミルクとの境界面が摩擦抵抗面になると思われる。なお、杭先端部では、それ以降は更に急な勾配へと移行しており、異なる粗度を持つ面で摩擦抵抗が発揮された状況が窺える⁴⁾。これは、杭の先端部に設けたリブの設置間隔が50cmと広く摩擦抵抗の発揮に遅れを生じているためと思われる。

図-17は、試験杭1, 2について、杭頭荷重に対する杭先端部における周面支持力度の推移を示したものである。これより、鋼管

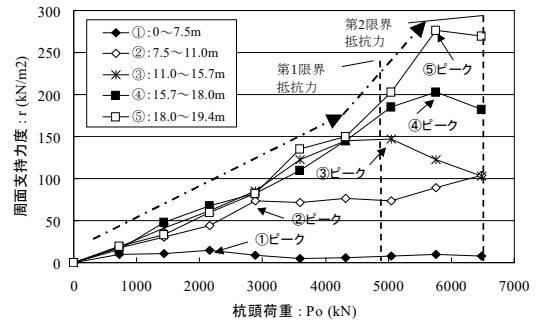


図-16 各深度の周面支持力度と杭頭荷重

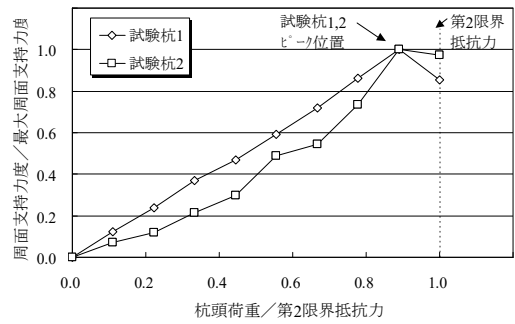


図-17 杭先端部の周面支持力度と杭頭荷重

杭の外周面にセメントミルクを充填することにより、周面支持力は共に第2限界抵抗力に到達する手前でピークを迎え、その後は減少する傾向にあるものの、試験杭2では概ねピーク値を保持するのに対し、試験杭1では1割程度の減少を示した。この試験杭2の推移傾向は、摩擦杭における砂質土系地盤での場所打ち杭の周面支持力度の挙動と似通っており⁵⁾、今回の鋼管杭に対する周面支持力の向上処置の有効性を示すものと思われる。

6. 地盤反力係数と鋼管杭の変形挙動

6.1 鉛直地盤反力係数 kv

1) 杭頭の地盤反力係数

載荷過程における杭頭の鉛直地盤反力係数 kv と繰返し載荷による kvr の推移を図-18に示す。両者は、載荷の初期段階より概ね一定の値と比率で推移し、第1限界抵抗力を越えると kv は徐々に減少し kvr と隔たる結果となる。これより本鋼管杭が弾性的な挙動を示すのは、第1限界抵抗力に至るまでであることが確認でき、以降の設計地盤反力係数もこの範囲で評価する。

2) 杭先端の地盤反力係数

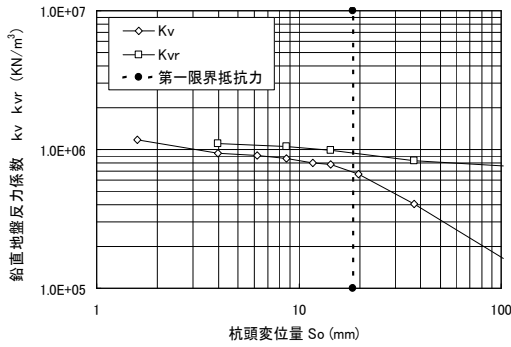


図-18 杭頭の地盤反力係数の推移

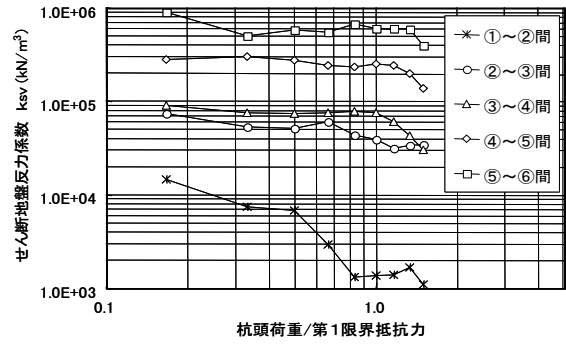


図-20 せん断地盤反力係数の推移

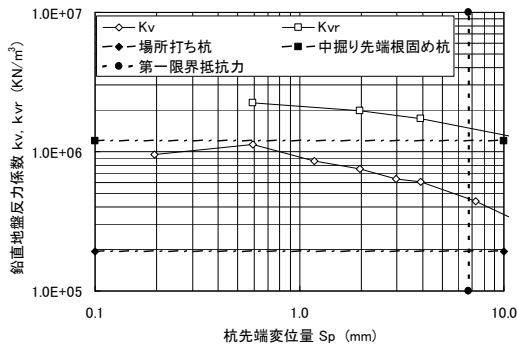


図-19 杭先端の地盤反力係数

図-19は、第1限界抵抗力に至るまでの杭先端の鉛直地盤反力係数 k_v と繰返し載荷による k_{vr} の推移、および設計地盤反力係数として中掘り先端根固め杭と場所打ち杭の値を併記したものである。 k_v と k_{vr} は、緩やかに減少しながら概ね一定の比率を保ちながら推移することがわかる。また、載荷の初期段階では、設計の中掘り先端根固め杭に相当する地盤反力値を持つものの、第1限界抵抗力に至るまでに減少することから、本鋼管杭の変形挙動等の事前予測に用いる鉛直地盤反力係数としては、現行の場所打ち杭による設計地盤反力値が適用ができると思われる。

6.2 せん断地盤反力係数 k_{sv}

図-20は、図-10試験杭2に示すように地盤条件の異なる位置を深度方向に①~⑥地点に分け、各区間の載荷過程において杭周面に発揮されたせん断地盤反力係数 k_{sv} の推移を示したものである。これより、 k_{sv} も鉛直地盤反力係数と同様に、第1限界抵抗力までは概ね一定の値で推移するものの、その後は減少する傾向にある。特に、周面支持力の向

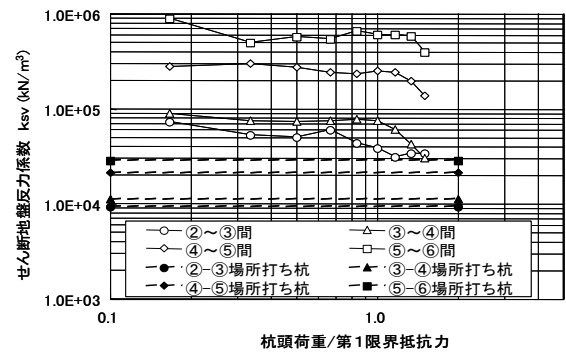


図-21 せん断地盤反力係数と設計値

上対策が及ばなかった①~②区間の範囲では、載荷の初期段階より k_{sv} は低減する傾向を示すことから、本鋼管杭の周面支持力は対策を施すことによって発揮される抵抗力であることがわかる。図-21は、載荷過程における k_{sv} と設計せん断地盤反力係数として場所打ち杭による値を併記したものである。載荷過程における k_{sv} は、第1限界抵抗力に至るまで全ての区間で場所打ち杭の設計値を上回っており、周面支持力の向上対策を施した鋼管杭の周面の設計せん断地盤反力係数としては、現行の場所打ち杭としての評価が相当であると思われる。

6.3 鋼管杭の変形挙動

周面支持力の向上対策を施した鋼管杭の k_v および k_{sv} として現行の場所打ち杭の設計値を適用したバイリニア型モデルを用いて、押込み試験結果における杭頭と杭先端との荷重と沈下量の関係および杭の軸力分布について、実測値との適合性を検証したのが図-22, 23である。これより前述の通り、場所打ち杭の設計バネ値は押込み試験の結果を下

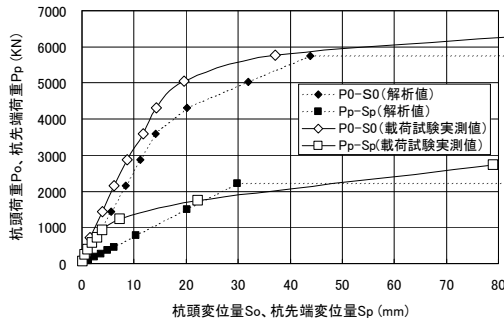


図-2-2 荷重と沈下量の関係

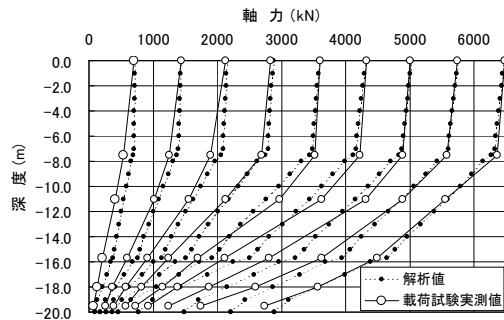


図-2-3 軸力分布の推移

回るため、結果として変形量は全体に大きく、発生する軸力はばらつくものの、載荷荷重に対する変位の進展や軸力の分布形状の推移については概ね良好な対応を示すことから、周面支持力の向上対策を施した鋼管杭の変形挙動について、設計過程における事前予測としては、相当に評価できるものと思われる。

7. まとめ

狭隘かつ低空頭での施工条件に対応できる鋼管杭工法の開発にあたり、2種類の根固め方法を適用し、支持力特性を検証し、以下の結果が得られた。

- (1) 先端根固めした鋼管杭の先端支持力は、先端ビットおよびその周囲に形成された固化体が一体となって荷重を受けることにより発揮され、その基準先端支持力および周面支持力は、構造物標準の中掘り先端根固め杭の算定式適用が可能。
- (2) 先端根固めに加えて、鋼管杭外周面にセメントミルクを充填することは周面支持力向上の効果的な手段であり、その周面支持力は構造物標準の場所打ち杭の算

定式（砂質土： $r = 5N$ ）の適用が可能。

- (3) 周面支持力の向上措置を施した鋼管杭は、リブによる摩擦粗度の変化により周面支持力度は向上するとともに、ピーク後の減少は少なく、杭の耐力向上に寄与すると思われる。
- (4) 杭先端の鉛直地盤反力係数 k_v および杭周面のせん断地盤反力係数 k_{sv} については、構造物標準の場所打ち杭の設計地盤反力値の適用が相当である。
- (5) 鋼管杭の変形挙動は、現行の場所打ち杭の設計地盤反力値を用いたバイリニア型モデルにより、設計過程における事前予測として評価できる。

今後は、これら得られた知見をもとに技術マニュアルを整備し、本工法が広く採用されるよう水平展開を図っていきたい。

参考文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎・抗土圧構造物），1997.
- 2) 清水満，藤本英己，村木康行：J R 営業線の空頭制限下での鋼管杭打設，基礎工，Vol.29，No.10，2001.10.
- 3) (社) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，2002.
- 4) 森山陽一，前田良刀，古川克三，柴田厚志，林正宏：鋼管ソイルセメント杭の原位置載荷試験とその支持力特性，土木学会論文集 No.637/VI-45，115-124，1999.12.
- 5) 佐原守，西山高士，茶谷文雄：摩擦杭の鉛直載荷試験結果に基づく周面摩擦力と杭の変位の関係について，第34回地盤工学研究発表会講演集，pp.1421-1422，1999.
- 6) 沼田ら：低空頭条件下における鋼管杭工法の施工確認試験，第61回土木学会年次学術講演会概要集，2006.9.
- 7) 鈴木ら：周面支持力を向上させた鋼管杭の鉛直支持力の評価，第61回土木学会年次学術講演会概要集，2006.9