

4

補助工法が不要な杭の開発

沼田 佳久*1・齋藤 雅春*2・竹田 茂嗣*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、基礎杭の施工条件は、線路の間・架空線やホーム屋根の下など、狭隘で低空頭な線間作業となる。このような条件下でも施工可能な工法として深礎杭や TBH 杭などの在来工法が挙げられるが、これらの工法は、掘削の際に孔壁防護用として地盤改良等の補助工法が必要となり、これがコストアップや工期の長期化の原因になっている。このような背景から、補助工法を不要にして施工費を抑え、工期を短縮するため、 $\phi 700\text{mm}$ の鋼管杭を地盤に直接圧入する工法を開発した。ここでは、機械の打設性能、および打設された杭の鉛直支持力を検証した結果を報告する。なお、本工法は、地盤改良(薬液注入)を補助工法として用いる深礎杭工法に対して、20%のコストダウンを見込んでいる。

キーワード：鋼管杭，先端根固め，鉛直載荷試験

Development of a piling method that does not require auxiliary methods

Yoshihisa NUMATA*1 Masaharu SAITOH*2 Shigetsugu TAKEDA*3

Abstract

In a construction project for a structure such as artificial ground over a railway track, foundation piles have to be constructed in a narrow space with a low free height, between rails and below overhead wires or a platform roof. Therefore, with the conventional work methods such as pier foundation and TBH piling, are qualified to above-mentioned condition, but an auxiliary work method, e.g., ground improvement for protecting the borehole wall, is necessary. This increases the project cost and time required to complete the project. To provide a solution for this problem, a technique was developed, necessitating less cost and less time. This new method consists of directly pressing-in of steel tube piles 700 mm in diameter. This paper reports the results of validation of the driving performance of the machinery and the vertical bearing capacity of the driven piles. We expect to reduce costs by 20% using this method compared with the pier foundation with soil improvement (chemical grouting) method.

Keywords: steel pipe pile, foot protection, static axial compressive load test

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

*2 General Manager, Technology Planning Department, Management Strategy Division

*3 Planning Group, Civil Engineering Technology Department, Engineering Division

補助工法が不要な杭の開発

沼田 佳久*1・齋藤 雅春*2・竹田 茂嗣*3

1. はじめに

線路上空に人工地盤等の基礎杭を構築する際、その施工条件は駅構内の線路間、あるいは架空線・ホーム屋根の下など、狭隘で低空頭な線間作業となる。このような条件下で基礎杭を構築する場合、低空頭で施工可能な深礎杭工法やTBH杭工法が挙げられるが、これらの工法は掘削の際、孔壁崩壊による軌道への影響を防止するために地盤改良などの補助工法を併用することが必要となる。このため、施工条件に制約がない場合に比べ工事費が高くなり、工期も長くなることが解決すべき課題となっている。

このような背景から、線路上空人工地盤・自由通路・乗換ご線橋等の土木工作物の杭基礎として、線間においても補助工法を使わず短期間で構築が可能な鋼管杭の施工方法を開発するとともに、本設利用PC工事桁とのパッケージ化を図るものである。なお、本工法は、東日本旅客鉄道(株)との共同開発により進めている。

2. 補助工法が不要な杭打ち工法

2. 1 工法概要

本工法は、低空頭回転圧入機を用いて、先端にビットを取り付けた鋼管を、削孔水を噴射しながら回転させることで地山を削孔するとともに鋼管を圧入し、所定の深度において杭先端部を根固めすることにより杭基礎を構築するものであり、 $\phi 600\text{mm}$ の仮設用鋼管杭の施工実績がある。低空頭下($H=4.0\text{m}$)での施工を想定しているため、鋼管杭は2.5m程度に分割されており、それらを連続して建て込み、接続することで所定の杭長となる。また、掘削土はサンドポンプおよびバキュームポンプを介して原水槽に回収した後、バキューム車で搬出する。

2. 2 施工機械

(1) 回転圧入機(TK-1)

施工機械であるTK-1を図-1に示す。本機は、 0.45m^3 級バックホウの旋回部分をベース機械として使用し、パワーユニット・アウトリ

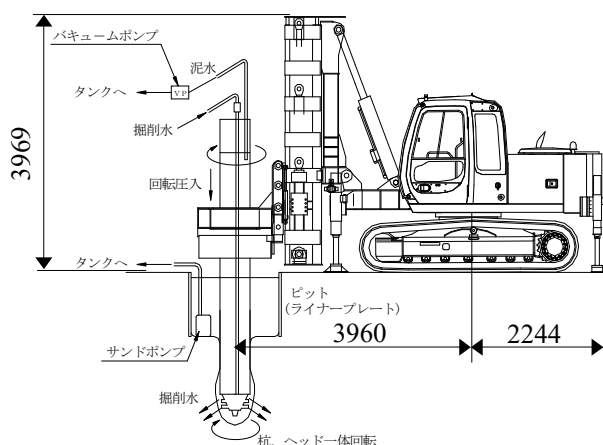


図-1 低空頭回転圧入機(TK-1)

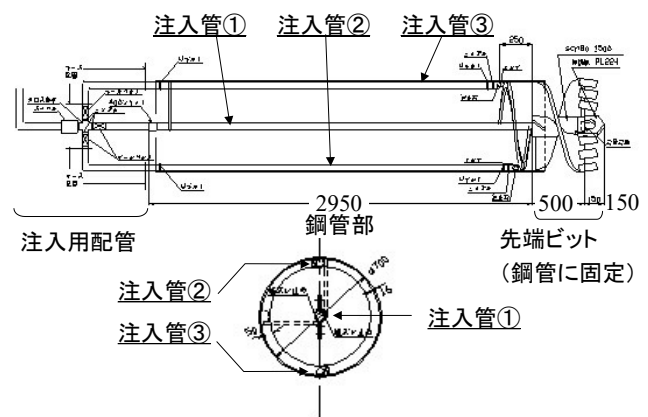


図-2 鋼管杭(先端部)

* 1 エンジニアリング本部 技術センター 地盤グループ

* 2 経営戦略本部 技術企画部 部長

* 3 エンジニアリング本部 土木技術部 土木計画グループ

ガー・ウェイトなどの変更を加え、さらにリーダに回転圧入部を特殊装着した杭打ち専用機である。なお、今回は $\phi 700\text{mm}$ の鋼管杭が打設可能となるように、回転圧入装置の寸法、回転数、トルクなどの仕様を変更した。

(2) $\phi 700\text{mm}$ 鋼管杭

鋼管杭先端部の構造図を図-2に示す。鋼管には、地山を削孔するための先端ビットと、削孔時の先端部への送水、および先端根固め時の先端部と鋼管内部へのセメントミルクの注入のために、管の中央と両側面に計3本の注入管が設置されている。また、各管は杭上部にスィベルを介して接続され、スィベルよりプラント側は回転しない構造となっているため、鋼管を回転させながら水やセメントミルクを注入することが可能となる。

2. 3 施工手順

杭の打設順序を図-3に示す。①～②が準備、③～⑥が削孔・圧入、⑦～⑧が先端根固めの各過程を示している。

①泥水ピットの造成：杭打設位置周辺を掘削し、泥水ピットを造成する。

- ②杭芯確認、機械セット：杭打機(TK-1)を杭芯にあわせ、位置決めを行う。
- ③杭上部配管：杭上部にスィベルを接続し、送水管を接続する。
- ④回転により削孔、および圧入を行う。
- ⑤送水管切り離し、継杭建て込み、接続。
- ⑥所定の深度まで③～⑤の工程を繰り返す。
- ⑦杭上部配管：杭上部にスィベルを接続し、送水管・注入管を接続する。
- ⑧先端根固め
- ⑨施工完了

3. 打設性能および杭の支持力確認試験

3. 1 試験概要

(1) 試験目的、試験条件

$\phi 700\text{mm}$ の鋼管杭圧入の施工性、および構築された杭の支持機構を検証するために、実大規模の試験施工、および鉛直載荷試験を実施した。鋼管杭の仕様を表-1に示す。SKK400、外径700mm、肉厚16mmのスパイラル鋼管を、 $3.0\text{m} \times 5$ 本と $2.5\text{m} \times 1$ 本の計6本(全長17.5m、打設長16.5m)に分割し、所定の深度に達する

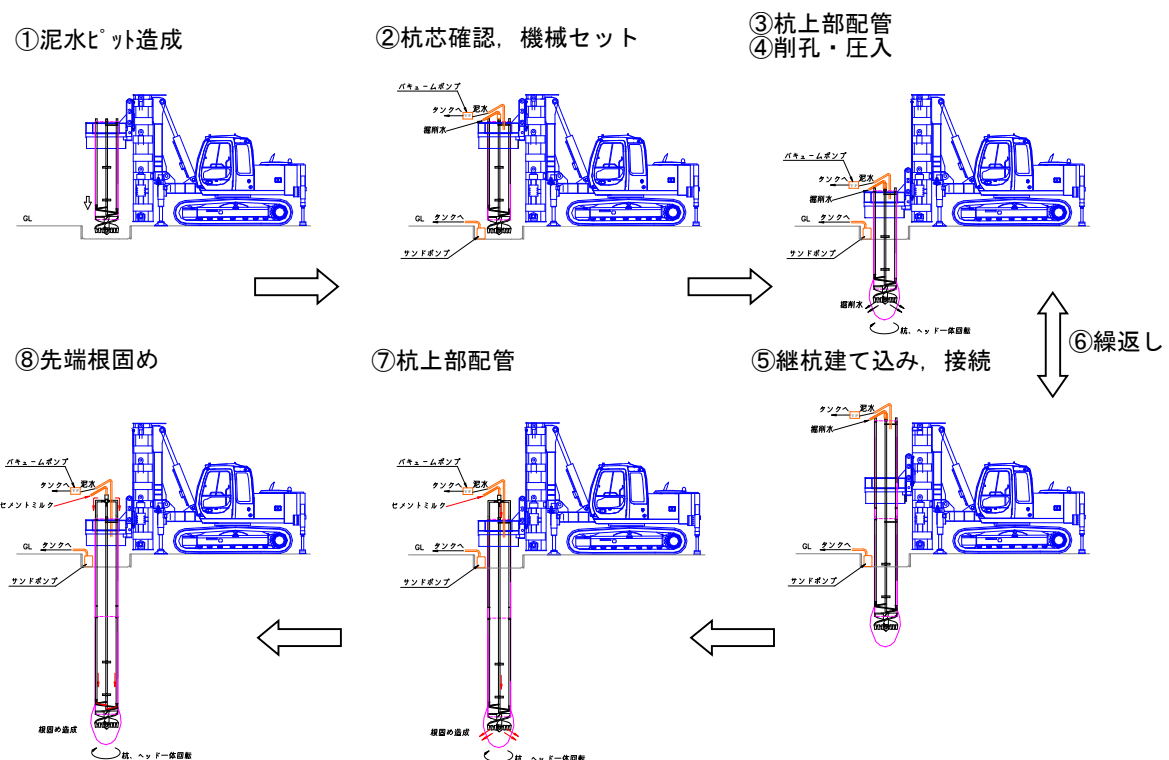


図-3 杭の施工順序

まで接続・圧入を繰り返した。また、鋼管の接続に際しては、材料費の低減を狙って、仮設用鋼管杭の施工時に使用したネジ継手に替えて、半自動溶接により接続することとした。次に、対象と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程度の粘性土層であり、それ以深はN値5以上の砂質土層である。また、N値≧30となる深度15m付近を支持層と判断し、杭の打設長は支持層への根入れを考慮し、L=16.5mとした。なお、削孔・圧入範囲

は地表面から深度15.0mまで、先端根固め範囲は深度15.0～16.5mとした。

(2) 使用機械

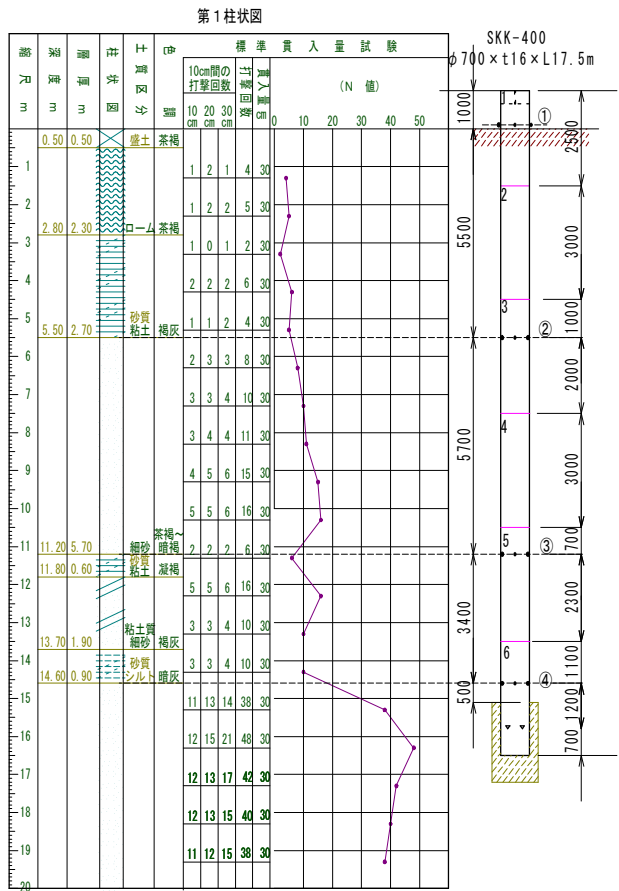
使用機械、および各機械の配置をそれぞれ表－２、図－５に示す。低空頭回転式圧入機(TK-1)以外は、全て汎用型の建設機械である。また、試験ヤードの広さは約37m×26mであったが、配置状況から25m×15m程度の広さがあれば、施工は可能であると思われる。

表－１ 鋼管杭の仕様

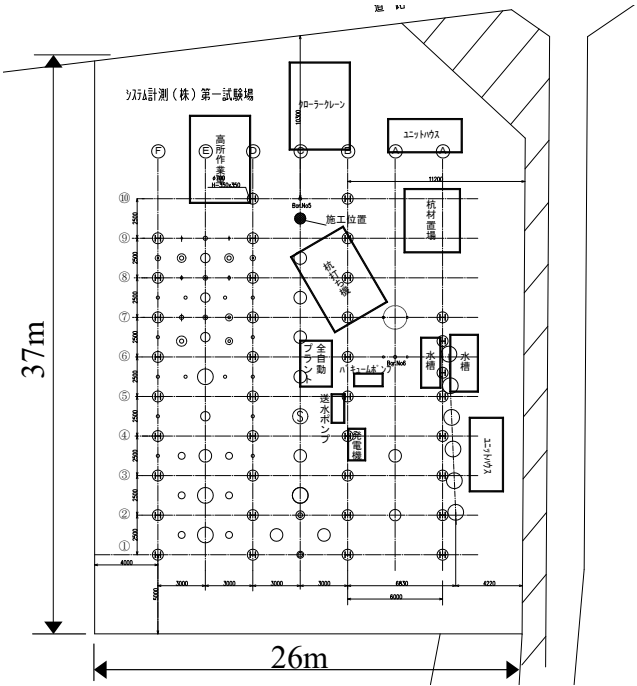
杭 種 類	SKK 400
杭 外 径	700 mm
杭 肉 厚	16 mm
鋼管断面積	343.8 cm ²
杭 長 (打設長：16.5m)	17.5 m (3.0m×5本+2.5m×1本)
杭閉塞断面積	0.3848 m ²

表－２ 使用機械

機械名称	形式・規格	台数
低空頭式回転圧入機	SPD-20 TK-1	1
8.0t吊テレスコピック クローラークレーン	ZX160LCT 8.0tf吊	1
0.25m3バックホウ	PC60	1
全自動ブランチ	YM1500型	1
送水ポンプ	MG-15 (150l/min)	1
バキュームポンプ	EV-15WA	1
コンプレッサー	35HP PDS-125S	1
2ペン式印字式マルチ流量計	EK-28-2S (低圧・分離型ハンディタイプ)	1
ビット内排泥用ポンプ	4吋3.7KW、縦型 G-9802	1
水中ポンプ	HS2.48-51	1
発電機125KVA	DCA-125SPM	1
水槽 (原水槽・循環槽)	10m ³	1
水槽 (清水用)	5m ³	1
半自動溶接機	500A抵抗器	2
高所作業車 (計測コート・配線用)	トラック架設 12mブーム	1
ユニットハウス	3坪タイプ	2



図－４ 土質柱状図



図－５ 機械配置図

(3) セメントミルク配合

先端根固めに使用するセメントミルクの配合を表－3に示す。セメントミルクには、強度の発現はもちろん、セメントミルクをプラントから杭先端部まで圧送するための流動性が確保されていること、施工途中に材料分離が起こらないこと、および地下水により逸散しない程度の粘性を有することが求められる。ここでは、混和剤にノンブリーディング型で流動性も確保できるポゾリスGF1700を用いた。

(4) 鋼管の継手

管の突き当て部には裏当てと開先加工を施し、半自動溶接により接続した。

(5) 鉛直載荷試験

試験は、「(社)地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説¹⁾」に準拠して実施した。荷重サイクル図、および測定時間を図－6に示す。荷重は、段階荷重方式・多サイクルで行い、荷重段階数を10段階、サイクル数を5サイクルとした。また、新規荷重は490kNで、各新規荷重へ到達後30分間の荷重保持時間を設け、最大4900kNまで載荷した。計測項目は、表－4



写真－1 φ700mm 鋼管

表－3 セメントミルク配合

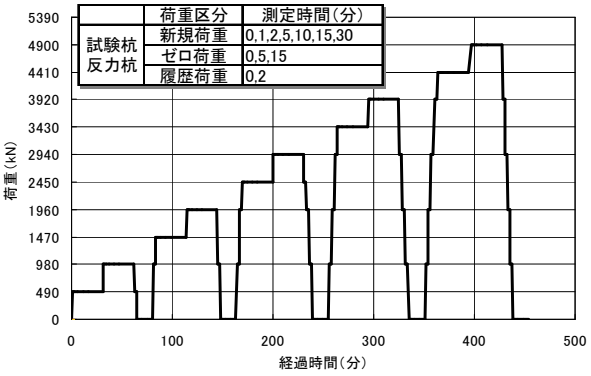
水 セメント比 W/C (%)	水 W (kg)	結合材		
		セメント C (kg)	混和剤 GF1700 C*1%(kg)	計 P (kg)
45	587	1305	13.1	1318

に示すとおり、杭頭部の鉛直・水平変位量、杭先端部の鉛直変位量、杭体のひずみ量、杭体内の温度を計測した。なお、杭体のひずみ量は、図－4に示すように地層が変化する4断面を選び、各断面につき4点ずつ計測した。また、杭の変位量を正確に把握するため、反力杭の浮き上がり量を計測した。

3. 2 試験結果

(1) 削孔・圧入

深度と回転トルクの関係を表した施工記録を図－7に示す。削孔・圧入では、削孔水を100～110ℓ/minで噴射しながら行った。削孔中のトルクは、7.8kN・m～34kN・m程度、圧入力は9.8kN～49kN程度で推移した。深度8m付近から回転トルクが一時的に増大し、回転圧入機のチャックに滑りが生じた。これは、スパイラル部分の突起によりチャックと鋼管との接触面積が小さくなるためと考えられ、突起部の削り落とし、突起の少ないUOE管の使用、あるいは、チャック部の改良など、より安定した施工性を得るための対処が必要である。全体でみると平均63mm/min程度の速度で削孔・圧入でき



図－6 荷重サイクル図

表－4 計測項目

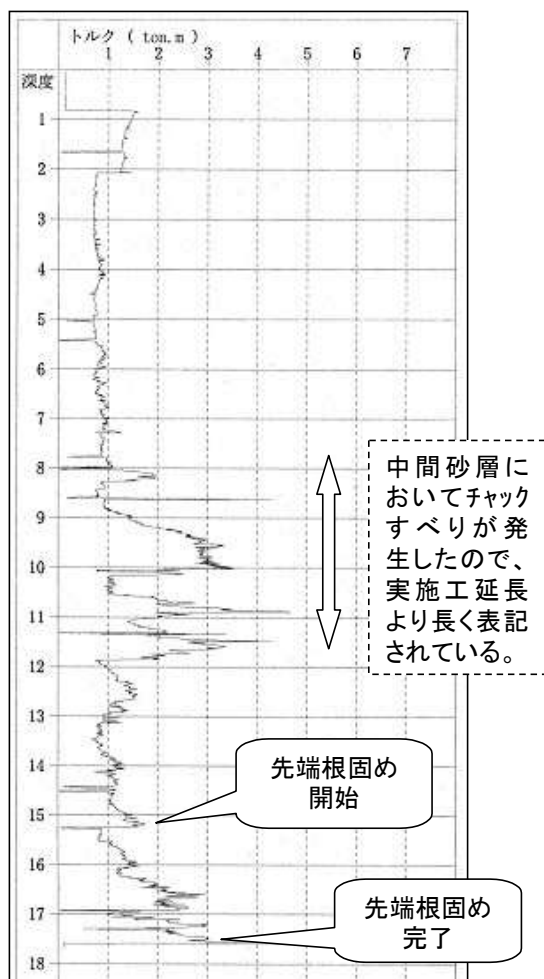
項 目	点数	備 考
試験杭杭頭変位量	4	ひずみ型変位計
試験杭杭先端変位量	2	PC棒鋼を杭頭より突き出るように設置し、ひずみ型変位計にて計測
試験杭水平移動量	2	ひずみ型変位計
反力杭浮き上がり量	4	ひずみ型変位計
杭体ひずみ量 (図－4 参照)	16	歪みゲージ (①断面～④断面)×4方向
試験杭体内温度	1	

たことから、削孔・圧入性能は良好であったといえる。施工状況を写真－2に示す。

(2) 先端根固め

本試験施工では、杭先端1.5m(深度15.0m～16.5m)の範囲を先端根固め範囲として施工した。本実験では、施工時間の短縮を図るため、削孔水の代わりにセメントミルクを用いて、削孔・圧入と同時に先端根固めも行う方法を試みた。結果、深度約16mまでは、セメントミルクを噴射しながら削孔・圧入することができた。しかし、深度約16m以深のN値が大きくなるあたりから、圧入力が急増するとともに圧入速度が6mm/minまで低下し、施工が困難となった。これには、以下の2つの原因が考えられる。

- ① 地質が硬質なものに変化したため、ビットが削り取る土量が減少し、圧入抵抗力が上がった。



図－7 施工記録

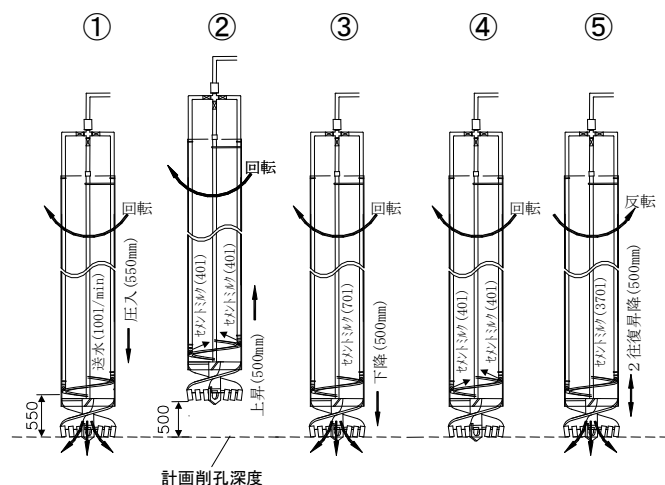
- ② 削孔・圧入での送水量は100ℓ/minであったのに対して、先端根固めでのセメントミルク注入量は約30ℓ/minであったため排泥能力が低下し、圧入力が杭先端まで伝達できず、削孔速度が低下した。

このまま削孔を継続すると、削孔時間が長くなり過ぎセメントミルクが大量に必要となること、また、途中で施工を中止することが出来なくなる懸念されたため、削孔水を清水に切り替え、図－8に示す①～⑤の手順にて先端根固めを行い鋼管杭の打設を終了した。

- ① 送水しながら、所定位置まで鋼管を圧入。
- ② 鋼管を打ち止まり位置より500mm上昇させ、その位置で鋼管を回転させながら内部へセメントミルクを注入。
- ③ 鋼管を降下させながらビット先端部からセメントミルクを注入。



写真－2 施工状況



図－8 先端根固め手順

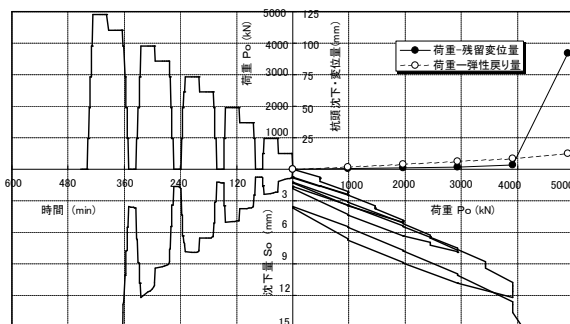
- ④ 深度を変えずに鋼管を回転させながら内部へセメントミルクを注入。
- ⑤ 500mmの範囲を2往復昇降・回転させながらビット先端部からセメントミルクを注入。

(3) 鉛直載荷試験

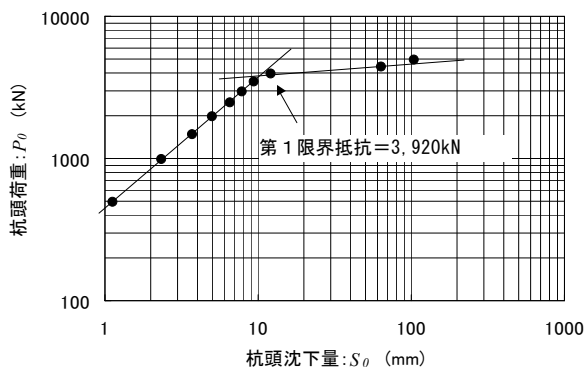
主な試験結果を表－5に、杭頭部の試験結果総合図を図－9に示す。載荷初期から3920kNまでの間は、載荷重の増加とともに杭頭の残留変位量が徐々に蓄積される傾向を示し

表－5 試験結果

設計極限支持力	先端支持力	2375kN
	周面抵抗力	939kN
	合計	3314kN
試験最大荷重		4900kN
第1限界抵抗力	先端支持力	1579kN
	周面抵抗力	2341kN
	合計	3920kN
第2限界抵抗力	先端支持力	2422kN
	周面抵抗力	1988kN
	合計	4410kN

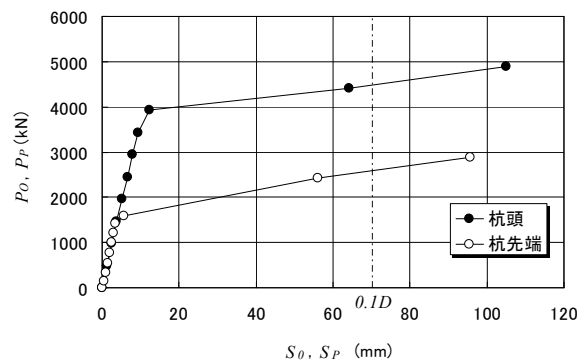


図－9 試験結果総合図(杭頭)

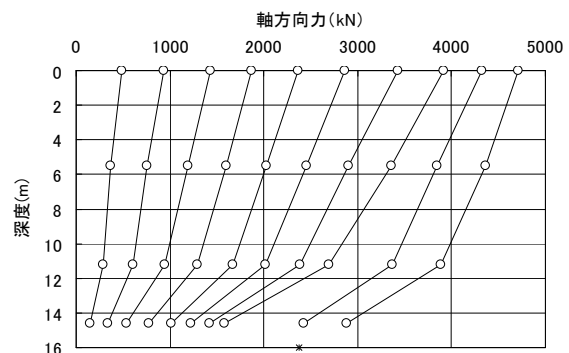


図－10 $\log P_0 \sim \log S_0$ 曲線

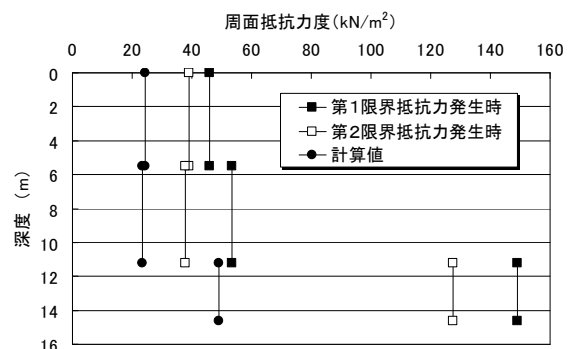
た。杭頭荷重が3920kNになった段階で、杭頭荷重(P_0)と杭頭沈下量(S_0)の関係を示す $\log P_0 \sim \log S_0$ 曲線(図－10)の勾配に折れ点が明瞭に表れたことから、3920kNを第1限界抵抗力と判断した。その後も杭頭荷重は上昇し、荷重が4410kNとなるまでに変位は相当に進んだが、30分間の荷重保持ができた。次の荷重段階である4900kNでは杭の沈下速度が大きくなり、なかなか所定荷重に達せず、ジャッキ操作で何とか30分間の荷重保持ができる状態となった。



図－11 $P_0 \sim S_0$ 曲線



図－12 軸方向力分布図



図－13 周面抵抗力度分布図

この間、杭先端荷重(P_d)～杭先端沈下量(S_d)関係(図-1 1)にピークは認められなかったので、杭先端沈下量が杭径の10%に到達した時を極限状態とみなし、その時の杭頭荷重である4,410kNを第2限界抵抗力と判断した。

次に、軸方向力分布図を図-1 2に示す。図から、杭頭に加えられた荷重は、杭先端に至るまでに周面抵抗力として周辺地盤に伝達されていることがわかる。また、周面抵抗力度分布図を図-1 3に示す。図中、比較のために、文献²⁾に基づく計算値をプロットしているが、杭先端部において周面抵抗力度が計算値を大きく上回っていることがわかる。これは、計算では考慮していない先端根固めミルクが鋼管と地盤の間に充填されたことで、周面抵抗力が増したためと考えられる。

4. まとめ

低空頭回転圧入機による鋼管杭の施工試験と鉛直載荷試験を実施した結果、以下のことがわかった。

- ① 約100 $\frac{\text{kg}}{\text{min}}$ の送水を行うことによって、 ϕ 700鋼管杭の打設は可能である。
- ② 本工法による鋼管杭の打設は、約100 $\frac{\text{kg}}{\text{min}}$ の送水掘りにより所定の支持層まで削孔・圧入した後に、先端根固めを行うことにより、確実なものとなる。
- ③ 試験施工で対象とした地盤条件において、鋼管杭の第2限界抵抗力は、文献²⁾に基づく極限支持力を上回る良好な結果を示した。
- ④ 第2限界抵抗力において、先端支持力は計算

値に見合った結果となり、周面抵抗力は計算値を上回る結果となったことから、単杭の基準先端支持力、および最大周面支持力の計算モデル²⁾において、安全側に評価できるといえる。

- ⑤ 第1、第2限界抵抗力における周面抵抗力度は、杭先端付近において計算値の約5倍に達している。これは、先端部に注入したセメントミルクが鋼管と地盤の間に充填されたことで、周面抵抗力が増したためであると考えられる。
- ⑥ 載荷開始から最大荷重載荷までの間、杭体には異常な変形は生じないことを確認した。

なお、日暮里駅改良工事において、砂礫層を対象とした打設性能確認試験を行った結果、通常の圧入力、および回転トルクで施工可能であることが確認できた。

今後、本工法の採用機会を拡大するため、鋼管接続における自動溶接の採用と、杭の周面抵抗力の向上を行い、更なる工期短縮・コストダウンによる商品力の強化を、鋭意進めているところである。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，2002.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物・抗土圧構造)，1997.