

拡大根固め部を有するウォータージェット併用 バイブロハンマ工法の開発

IMPROVEMENT OF VIBRO HAMMER METHOD
FOR DRIVING STEEL PIPE PILES USING WATER JETTING
BY MAKING SOIL CEMENT BLOCK AT AROUND PILE TIP

菊池喜昭¹・石濱吉郎²・田中隆太³・鈴木勇吉⁴・横山博康⁵・高橋健二⁶

Yoshiaki KIKUCHI, Yoshiro ISHIHAMA, Ryuta TANAKA,
Yukichi SUZUKI, Hiroyasu Yokoyama, Kenji TAKAHASHI

¹正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 部長
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²新日本製鐵株式會社 技術開発本部 (〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)

³新日本製鐵株式會社 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町2-6-3)

⁴正会員 調和工業株式会社 技術開発部 (〒141-0032 東京都品川区大崎1-6-4)

⁵調和工業株式会社 技術開発部 (〒141-0032 東京都品川区大崎1-6-4)

⁶調和工業株式会社 工法技術部 (〒141-0032 東京都品川区大崎1-6-4)

It is getting harder to apply hammer pile driving method, because of noise and vibration problems. Vibro hammer method with water jetting 'JV method' has been used to avoid the noise and the vibration problems. But for using steel pipe piles as bearing piles, the bearing capacity of steel pipe piles installed by JV Method is not so high as that of installed by hammer pile driving method, because water jetting tend to disarrange supporting layer. Therefore a new pile driving method such as to perform high bearing capacity with low noise and low vibration when installing piles is developed.

This method is an improvement method of the JV Method. When penetrating piles into ground, water jetting and vibration hammer are used to reduce noise and vibration. And assured soil cement block is constructed at around pile tip with cement milk. In this method, noise and vibration will be decreased when installing piles, and high bearing capacity of piles will be performed.

Key Words : Countermeasure for noise and vibration, soil cement mixture, shaft resistance, end-bearing resistance

1. はじめに

近年、港湾地域でも騒音・振動が問題となり、鋼管杭の一般的な工法として用いられている打撃工法が適用できないケースが増加している。対策工法として、ウォータージェット併用バイブロハンマ工法（以下、JV工法）が採用されてきた。鋼管杭を支持杭として用いる場合、JV工法ではジェット噴射で地盤を乱すおそれがある。このため、JV工法による支持杭の施工が敬遠されている。そこで、JV工法の掘削性能に併せて、先端にソイルセメント根固め部を築造し、かつ杭周面にセメントミルクを注入することで、周面抵抗力と先端抵抗力を確保する工法の開発に取り組んだ。本工法により、騒音・振動問題を回避した支持力の大きな鋼管杭の施工が可能となる。

2. 本工法の概要

(1) 工法概要

本工法は、JV工法の掘削性能と騒音・振動対策効果を持たせながら、杭先端にソイルセメントで根固め部を築造することで、大きな軸方向抵抗力性能を発揮させる工法である。

まずウォータージェットによって支持層の杭外面と杭内面を乱すとともに、杭内面はウォータージェットにより確実に洗浄させる。そこへセメントミルクを注入することで杭先端にソイルセメントの根固め部を築造する。

杭先端部には、鋼管外周に放射状に長方形の鋼板（以後、リブプレート）4～8枚を配置し、リブプ

レートに沿ってセメントミルクを噴射することで根固め部を拡大化させる。また、杭先端は鋼管杭とソイルセメントのずれ止め用の鉄筋（以下、ずれ止め）を用いて杭と根固め部を一体化させることを狙っている。その上で、支持層以外の杭外周面にもセメントミルクを注入することで、周面抵抗力の増大を図っている。

本工法の杭構造図を図-1に示す。

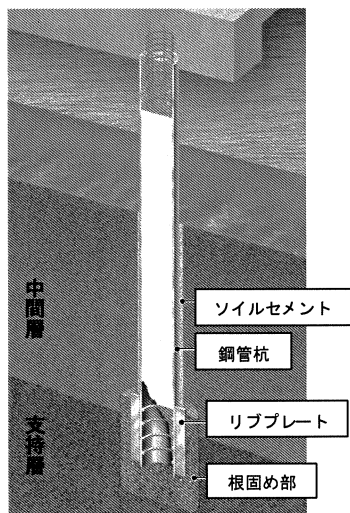


図-1 杭構造図

(2) 施工方法

施工は図-2に示す手順に従って行う。本工法では、杭先端で鋼管内を閉塞させるとともに拡大根固め部を築造することが重要であり、そのためには、根固め部に注入するセメントミルク量を鋼管径毎に詳細に規定したうえで管理することが必要である。その方法として打設速度、打設深度、打設流量、圧送圧力、ウォータージェットとセメントミルクの切り替

えのタイミングをリアルタイムで管理するため、クレーンオペレーターおよびジェット装置の操作者が、施工状況を管理する管理プログラムを用いて杭の深度、水やセメントミルクの噴射を制御することで、ばらつきのない根固め部が築造できるようにしている。この管理プログラムによる管理方法については、5. 施工性の検討で示す。

3. 本開発における検討内容

本開発では、①根固め部の軸方向抵抗力メカニズムの解明、②施工法の確立、③軸方向抵抗特性の把握の3点を主に検討した。具体的には以下のとおりである。

(1) 根固め部の軸方向抵抗力メカニズムの解明

根固め部のずれ止めの効果による杭内部抵抗力と杭先端部での抵抗力、リブプレート部の抵抗力の分担割合を把握することを目的として、室内模型を用いた根固め部押込み実験を実施した。

(2) 施工性の検討

(3) 押込み試験に使用する実大の試験杭、反力杭の施工時に施工性を確認し、標準的な施工方法を検討した。

(3) 押込み試験

軸方向抵抗力の特性を確認するため、鋼管径、地盤が異なる3例の実地盤での押込み試験を実施した。

以上の結果から、設計の考え方と標準的な施工法の提案を行った。

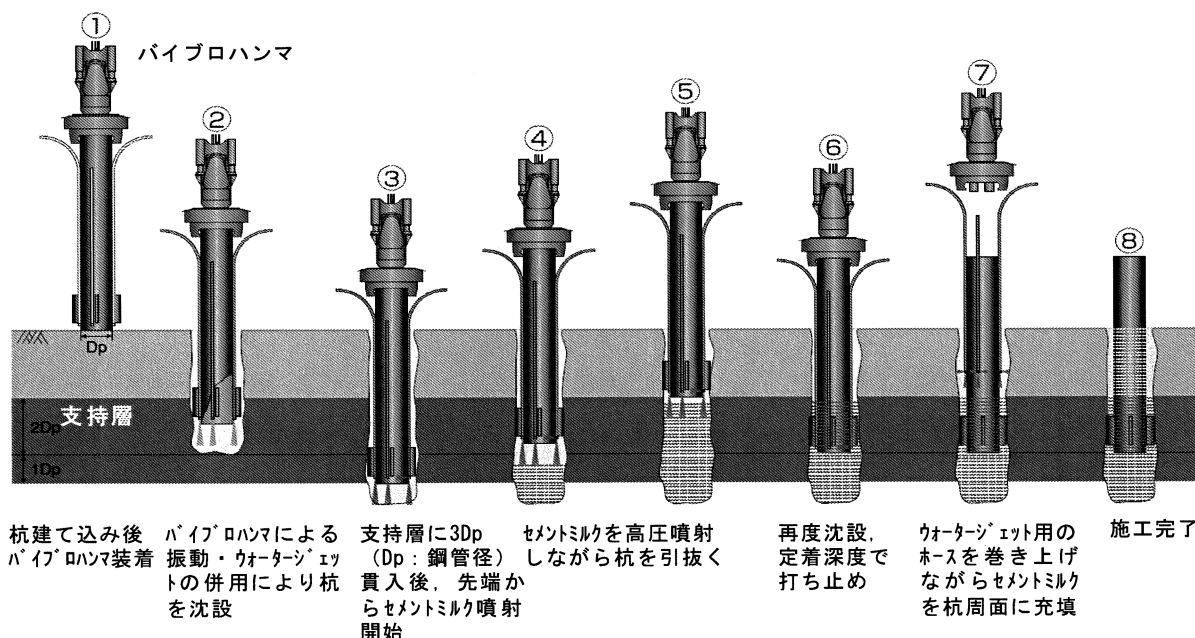


図-2 施工手順

4. 根固め部の軸方向抵抗メカニズムの解明

根固め部のずれ止めの効果による杭内部抵抗力と杭先端部での抵抗力、そしてリブプレート部の抵抗力を把握することを目的として、室内模型を用いた根固め部押込み実験を実施した。

(1) 実験概要

図-3に実験模型の概略を示す。本試験では、リブプレートの枚数、根固め部強度を変化させた根固め部の供試体を作製した。各実験ケースの仕様を表-1にまとめた。

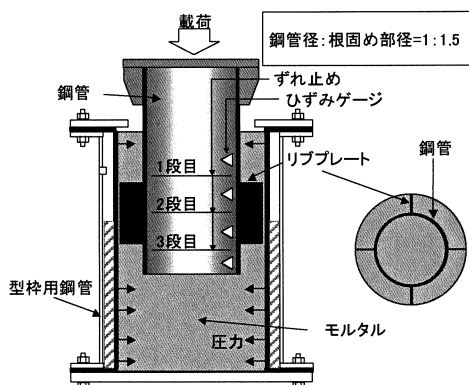


図-3 実験模型概略図

(2) 実験結果

a) 根固め部耐力

各供試体の杭頭荷重－変位関係を図-4に示す。この図によるとCase4のみ最大耐力が低く、他のケースではほぼ同じ最大耐力を示した。Case4は根固め部のモルタル強度を低く設定したケースであり、根固め部のモルタル強度が杭の支持力特性に大きく影響することが分かる。Case2とCase4を比較すると P_{max} が66%, P_y で58%と概ね比例関係にあることが確認された。このとき、モルタルの強度比は、60%である。このことは、根固め部モルタル強度に比例した耐力を発揮することを意味している。また、それ以外のケースでは、リブプレートの枚数によって最大耐力に変化を生じた。変位勾配が変化する荷重を降伏耐力と定義すると、降伏耐力は、いずれのケースにおいても変位量が5mm前後と判断できる。

表-2にリブプレートの枚数の違いをみるため、変位量が5mmでの耐力差を示す。

表から、リブプレートの枚数が増えるほど耐力が上昇することがわかる。この実験の範囲では、根固め部耐力に及ぼすリブプレートの効果は、4～11%程度であった。

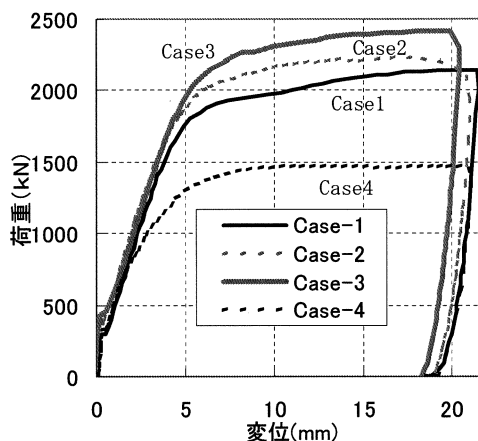


図-4 杭頭荷重－変位関係

表-2 リブプレート枚数の違いによる耐力差

Case	リブプレート枚数	5mm時耐力 (kN)	Case1との差 (kN)	支圧倍率
1	0	1751	—	—
2	4	1874	+123	3.2
3	8	1950	+199	2.7

b) ずれ止めおよび鋼管先端部の支圧倍率

ずれ止めおよび鋼管先端部に負担している荷重を、直接的に計測することは困難であるため、図-3に示すずれ止めの上下(上から1, 2, 3段目)の断面での軸力の差分をずれ止めで負担する軸力として用いた。また、鋼管先端部については3段目鉄筋の下部に発生した軸力を用いた。ここで、軸力は鋼管に貼付したひずみゲージの値から算出している。代表例としてCase2の、ずれ止め等が負担している軸力から求めた支圧倍率と変位の関係を図-5(a)に示す。ずれ止めは、設計では取り付け本数が均等に分担するものとして扱うことから図-5(b)に各ケースのずれ止めの平均値をまとめたものを併せて示した。ここで、支圧倍率とは、支圧応力をモルタル強度で除したものである。支圧応力は式(1)の考え方によっている。

表-1 各供試体の仕様

Case	鋼管径	板厚	根固め部		ずれ止め		リブプレート				備考
	D	t	モルタル強度	鉄筋径	段数	板厚	幅	高さ	枚数		
	(mm)	(mm)	(N/mm ²)	(mm)	(段)	(mm)	(mm)	(mm)	(枚)		
1	318.5	7.9	15	5	3	—	—	—	0	リブプレート無	
2								4	標準ケース		
3								8	リブプレート8枚		
4							4	モルタル強度低い			
			10								

$$\sigma = P_d / A_s \quad (1)$$

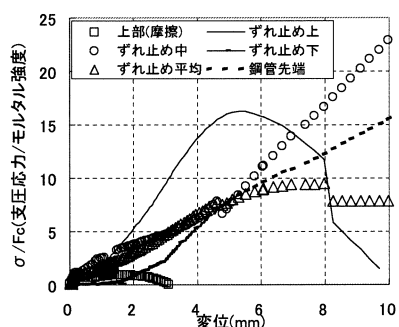
ここで

σ : 支圧応力 (N/mm²)

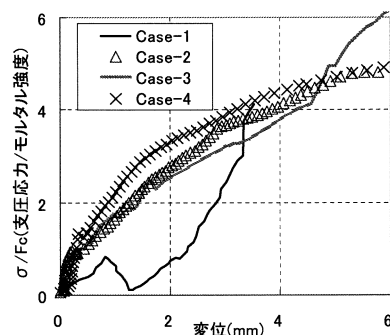
P_d : 押抜き荷重 (N)

A_s : ずれ止め投影面積 (mm²)

降伏後の荷重増加は比較的小さいため、安全をみて、変位量5mm前後の降伏耐力での支圧倍率をみると、いずれのケースにおいても4.0~6.0程度あることがわかる。また、先端部の支圧倍率も、図-5(a)をみると、ずれ止めと同様の値を示しており、同程度の効果が発揮されていることが判る。



(a) Case 2



(b) ずれ止めの平均値

図-5 支圧倍率-変位関係

c) リブプレートの支圧倍率

リブプレートは鋼管周方向に離散的に配置しており、直接的に抵抗力を評価することや、ずれ止めの断面荷重で評価することが困難であるため、変位量が5mmでのCase1を基準とした耐力の差分から式(1)と同様にリブプレートの支圧倍率を求めた結果を表-2に示す。この表が示すようにリブプレートの支圧倍率は、枚数が多い方が大きい傾向にあった。これを支圧強度で示すと $2.7\sigma_c \sim 3.2\sigma_c$ であった。

d) 実験結果のまとめ

- ① ずれ止め効果は、既往の知見と同様の4.0以上の支圧倍率が期待できる。また鋼管先端部でも同程度の効果が期待できる。
- ② リブプレートの効果は2.0以上の支圧倍率が期待できる。

③ ずれ止めを適切に配置することで、鋼管と根固め部の一体化を図ることができ、その一体化の度合は根固め部の一軸圧縮強度の影響を大きく受ける。

本工法では、根固め部押込み試験結果をもとに、ずれ止め等の仕様を決定した。

5. 施工性の検討

杭径600mm, 800mm, 1,000mmの3種類を用いて、本工法の実施工を想定した根入れ深度約20mの施工性を確認した。ここでは、代表例として600mmについて述べる。

(1) 地盤条件

施工地点でのボーリング結果を図-6に示す。当該地盤は、砂質土主体の地盤であり、深度12.8mから $N \geq 50$ の支持層になりえる砂質土層が存在する。この現場では、このような硬質砂質土層の施工可否も確認するため、この層の深度17.6mまで打設した。

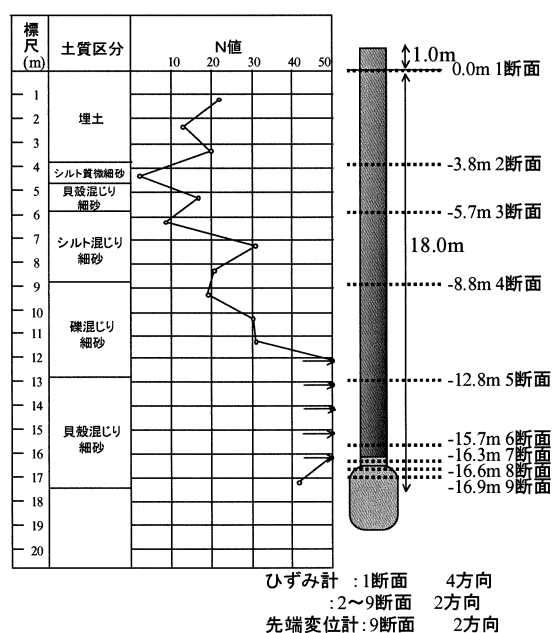


図-6 柱状図およびひずみ計取り付け位置

(2) 杭諸元

試験杭として、鋼管径600mm×板厚19mm×長さ19.0m(規格:SKK490)の鋼管杭を1本、反力杭として、鋼管径600mm×板厚12mm×長さ19.0m(規格:SKK400)の鋼管杭を4本打設した。

鋼管杭の先端にはリブプレートを4枚(高さ600mm×幅250mm×板厚19mm)およびずれ止めを3段(D13(径), SD295A(材質))を取り付けてある。ジェットホースもリブプレートと同数の4本使用した。図-7に杭の先端形状を示す。また、図-8に鉛直方向と内側方向に同時噴射できるジェットノズルの仕様を示す。

(3) 根固め部築造工程

図-9に根固め部の築造工程の管理計画を示す。根固め部の施工管理はこれに従って行う。また、図-10に代表として試験杭の施工結果を示す。

この図に示すように、セメントミルク注入工程は計画に従った施工ができており、本工法の良好な施工性が確認できた。

(4) まとめ

本工法により硬質砂質土主体の地盤で鋼管径600mmの杭の施工を実施した。その結果、打設、根固め部築造工程とも施工可能であることを確認した。

鋼管径800mmの杭については同様に良好な施工性が確認できているが、礫質土の支持層を対象に施工した鋼管径1,000mmの杭については、粘性土層も存在しており、施工時にリブプレートが抵抗になり、計画通りの施工ができない不具合が生じた。そこで、1段階規格の大きなバイブロハンマを用いて打設性能を上げることや、リブプレートの上部を斜めに30°～45°の角度を持って切り落とし施工抵抗を低減する等の工夫により、計画に従った施工を完了させた。

以上より、砂質土、礫質土、粘性土において本工法による施工が可能であることを確認した。

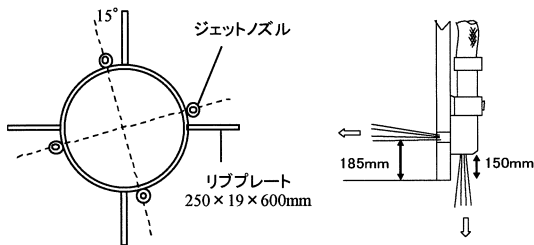
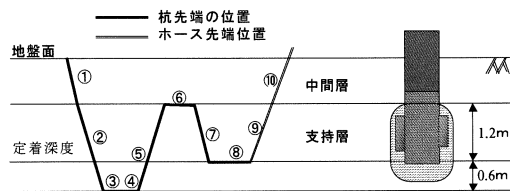


図-7 杭先端形状

図-8 噴射方向（鉛直および水平）



	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
工程	ウォータージェット掘削			先端ミルク注入					ホース引き上げ	周面ミルク注入
時間(秒)	30	540	10	30	40	10	35	180	60	19
圧力(Mpa)	15		3		15			3	3	3
注入量(m³)	8.1	19.2	0.025	0.30	0.40	0.10	0.35	0.42	0.13	4.6
W/C										

図-9 根固め部築造工程計画

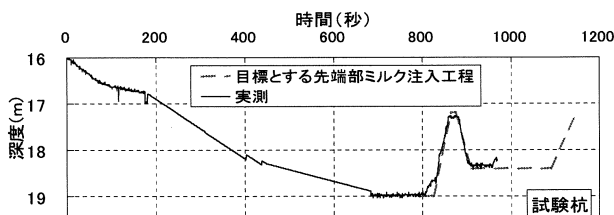


図-10 根固め部築造工程（杭先端深度の推移）

6. 軸方向抵抗力性能の確認

(1) 押込み試験

本工法の開発では、軸方向抵抗力特性を確認するため、これまでに鋼管径 600mm, 800mm, 1,000mm の3種類の径について押込み試験を実施した。ここでは、代表例として鋼管径 600mm の押込み試験について述べる。

a) 試験概要

試験杭打設位置でのボーリング結果およびひずみゲージ貼付位置、先端変位計取り付け位置は図-6に示すとおりである。各地層での周面抵抗力度 τ (kN/m²) を求めるために、ひずみ計は各地層の境界面に取り付けた。

地盤条件、杭諸元および施工法等の試験条件の詳細は、5. 施工性の検討に示してある。

b) 押込み試験結果

図-11に荷重-沈下曲線を示す。

また、各載荷荷重時のひずみ計測結果から求めた軸力分布図を図-12に示す。

この軸力分布から求めた各層の周面抵抗力度を表-3に示す。なお、表中の周面抵抗力度の試験結果は、試験中の最大値を示してある。この表に示すように、本工法の砂質土における周面抵抗力度は、全層において8.8N (N:M値) 以上の抵抗力度を示すことが分かった。

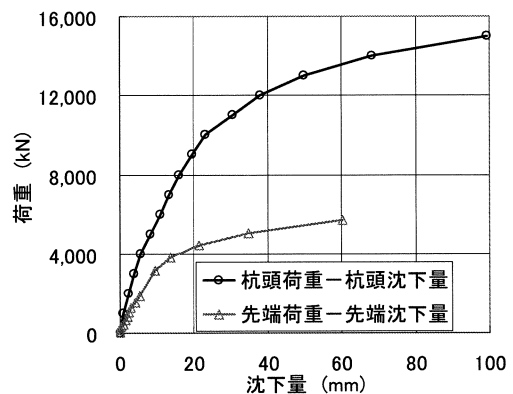


図-11 荷重-沈下曲線

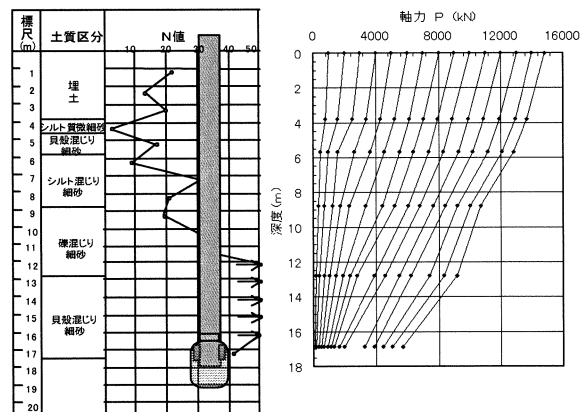


図-12 軸力分布図

表-3 杭の周面抵抗力度結果

断面	深度	層厚	土質	M値	周面抵抗 力度 (kN/m ²)	周面抵抗力 度／N値
	(m)	(m)				
1-2	0.0～3.8	3.8	埋土(砂)	18	157.9	8.8
2-3	3.8～5.7	1.9	細砂	10	266.8	26.7
3-4	5.7～8.8	3.1	細砂	21	362.2	17.2
4-5	8.8～12.8	4	細砂	34	320	9.4
5-9	12.8～16.9	4.08	細砂	50	455	9.1

杭先端抵抗力は、鋼管先端より2D上方部分までの根固め部を一体として評価することとした。

押込み試験結果から、式(2)、(3)に基づき杭の先端抵抗力(q_d)、先端抵抗力係数(α)を求めた。

$$q_d = P_p / A_p \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (2)$$

$$\alpha = q_d / N \quad (3)$$

ここに、 q_d ：杭の先端抵抗力 (kN/m²)、 P_p ：先端極限抵抗力、 A_p ：鋼管杭の閉塞断面積 (m²)、 α ：先端抵抗力係数、 N ：杭先端地盤のM値

杭先端沈下量が鋼管径の10%の第二限界抵抗力のときに、根固め部上端(杭先端より2D上方)での荷重は6,199kNであった。このときの先端抵抗力 q_d は以下ようになる。

$$q_d = P_p / A_p = 6,199 / 0.2828 = 21,920 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

(2) 試験結果の考察

今回示した鋼管径600mm(砂質土主体の地盤)での押込み試験結果と、鋼管径800mm(砂質土主体の地盤)、1,000mm(粘性土層、礫質土層を含む地盤)での押込み試験結果をまとめて評価する。

a) 先端抵抗力度の評価

図-13に各径での先端抵抗力度－先端沈下量/杭径の関係を示す。この図から、第二限界抵抗力度および最大荷重から先端抵抗力係数 α を求めた結果を表-4に示す。この表が示すように先端抵抗力係数 α は、実M値 ≥ 50 の場合は、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾(以下、港湾基準)の打撃工法の $\alpha = 300$ 下回る。しかし、港湾基準に沿って上限値を $50 \geq N$ とした時は、いずれのケースでも300より大きな先端抵抗力係数を示している。

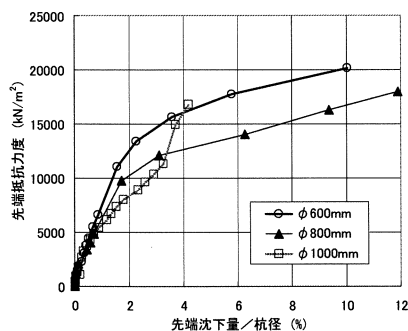


図-13 先端抵抗力度－沈下量関係図

表-4 先端抵抗力係数 α のまとめ

鋼管径(mm)	600	800	1,000
先端沈下量0.1D時の先端抵抗力度 q_d	21,920	17,440	16,942
実M値	43	68	82
実M値を使用したときの α	510	265	207
$N \geq 50$ のとき $N=50$ としたときの α	-	349	339

b) 周面抵抗力度の評価

表-5に試験より得られた周面抵抗力度をまとめたものを示す。砂質土地盤の周面抵抗力度については道路橋示方書³⁾に示されている場所打ち杭の周面抵抗力度5Nを大幅に上回る平均12.7Nの値が得られた。

粘性土地盤の周面抵抗力度についても、データ数が少ないものの、最大周面抵抗力度については10Nを大きく上回る平均66.4Nの抵抗力度が確認できた。

表-5 周面抵抗力度まとめ

	データ数	周面抵抗力度
砂・礫質土	11	4.9～26.7N (平均12.7N)
粘性土	2	50.2, 82.6N (平均66.4N)

7. 結論

本工法の軸方向抵抗力メカニズムの解明のために実施した根固め部の押込み試験により、ずれ止めやリブプレートの分担割合や効果を把握した。これらを適切に配置することで、杭先端抵抗力を発現させるために必要な鋼管と根固め部の一体化を図ることができ、その度合は根固め部の一軸圧縮強度の影響を大きく受けることを把握した。

実地盤で実施した20m程度の鋼管杭を用いた施工性確認実験により施工法を確認した。

押込み試験では、本工法の支持層における先端抵抗力は、鋼管杭先端部でのM値の上限を50としたときは港湾基準に示される打撃工法以上、周面抵抗力度は道路橋示方書³⁾に示されている場所打ち杭の抵抗力度以上発揮されることを確認した。

謝辞：本開発の実施に当たり、多くの関連各位の御協力を頂きました。この場を借りて御協力いただいた各位に感謝いたします。特に、駒井鉄工の関係の皆様には、載荷試験場所を提供いただき深く感謝申し上げます。

参考文献

- 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説(下)、日本港湾協会、pp. 588-589, 2007.
- 地盤工学会編：杭の鉛直押込み試験方法・同解説、pp. 19-59, 2002.
- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 IV 下部構造編、pp. 353-363, 2002.