

改良ジェットバイブロ工法で根固め部を築造した杭の 支持力特性に関する実験的検討

Experimental study on bearing capacity of steel pipe pile with foot protection constructed
by the improved jet-vibro pile driving method

石濱吉郎*, 菊池喜昭**, 高橋健二***, 田中隆太****
Yoshiroh Ishihama, Yoshiaki Kikuchi, Kenji Takahashi, Ryuta Tanaka

*工修, 新日本製鐵株式会社, 鋼構造研究開発センター (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

** 工博, 港湾空港技術研究所, 地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

*** 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)

****工修, 新日本製鐵株式会社, 大阪支店 (〒541-0042 大阪府大阪市中央区今橋 4--1-1)

The hammer pile driving method is popular for installing steel pipe piles in port and harbor areas. It is, however, getting harder to apply this method, because of noise and vibration problems to surrounding areas. Therefore a new pile driving method such as to perform high bearing capacity with low noise and low vibration when installing piles was studied. In this method, a pile is penetrated into the ground with water jetting and vibration hammer to reduce noise and vibration. And soil cement block is constructed at around pile tip with cement milk during installation for performing high bearing capacity. In this method, noise and vibration will be decreased when installing piles, and high bearing capacity of piles will be performed. A series of model pile loading experiments was conducted in the laboratory to investigate the axial resistance of the pile tip. Three cases of full-scale pile installations and static loading tests were conducted to verify the performance of the piles installed in this method. Depending on these research works, design method and installation procedure of new method were proposed.

Key Words: vibration hammer driving, foot protection, vertical loading test

キーワード: バイブロハンマ工法, 拡大根固め部, 鉛直載荷試験

1. はじめに

従来, 港湾地域での鋼管杭施工は, 経済性・効率性に優れるなどの理由により, 振動・打撃工法によるものが主流であった。しかしながら最近では, 港湾地域近傍にある住居や工場等に対する騒音・振動が問題となったり, 既設構造物近傍での施工の際の振動が問題となったりすることから, 振動・打撃工法が適用できないケースが増加している。

この対応策として, 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, 杭施工時の騒音・振動の低減が図られてきた。しかしながらこの工法は, ウォータージェットを使用することから, 地盤を緩める可能性があり, 打撃工法より支持力が小さくなる傾向に

ある。また, 支持力に関して押し込み試験等による性能確認がほとんど実施されていないため, 支持力特性が明らかでないという問題がある。

一般的に, 港湾地域のような軟弱地盤では, 従来から鋼管杭が多く採用されてきているが, 周辺への振動問題のために振動・打撃工法が適用できなかつたり, 支持力の不足といった理由により JV 工法が適用できなかつたりする場合が出てきている。

そこで, 筆者らは騒音・振動対策が必要な工事であっても, 大きな支持力を期待できる鋼管杭工法の開発に取り組んだ¹⁾。提案する工法(以下, 本工法)の概要を図-1に示す。本工法は, JV 工法と同様にジェットバイブロで鋼管杭を打設するが, 先端抵抗力を向上させるため, 先端部にセメントミルクを注入してソイルセメント根固め

部を築造し、同時に周面抵抗力を向上させるため、杭周面にもセメントミルクを注入したものである。構造上の特徴としては、杭先端部に、長方形の鋼板（以下、リブプレート）が鋼管外周に放射状に4～8枚配置されており、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させる効果を狙っている。また、杭先端部の内面にはずれ止め用の鉄筋（以下、ずれ止め）を配置し、鋼管杭とソイルセメントの一体化を高めることとしている。

本研究では、本工法によって築造される杭において、先端抵抗力を確実に発揮できる鋼管杭の先端部の仕様を提案するとともに、要素載荷試験により、強度を推定する設計式を導いた。また、提案した設計・施工法で杭の挙動を十分に評価できているかどうかを確認するため、実物大の施工・載荷試験を行った。本文では、これらの結果について述べる。

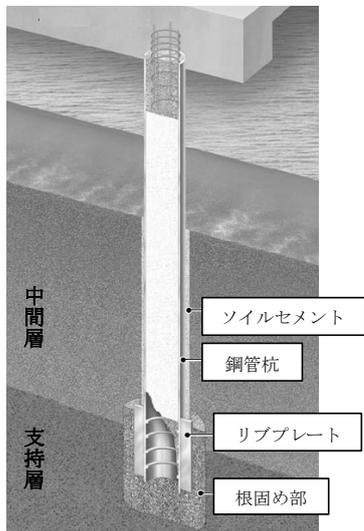


図-1 杭構造図

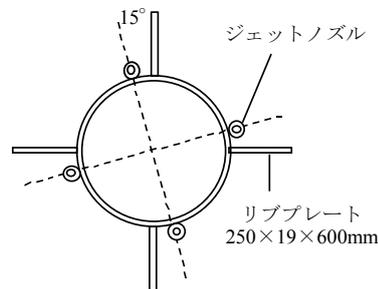


図-3 ジェットノズル

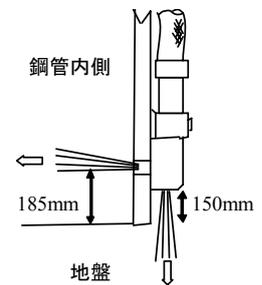


図-4 ジェット噴射方向

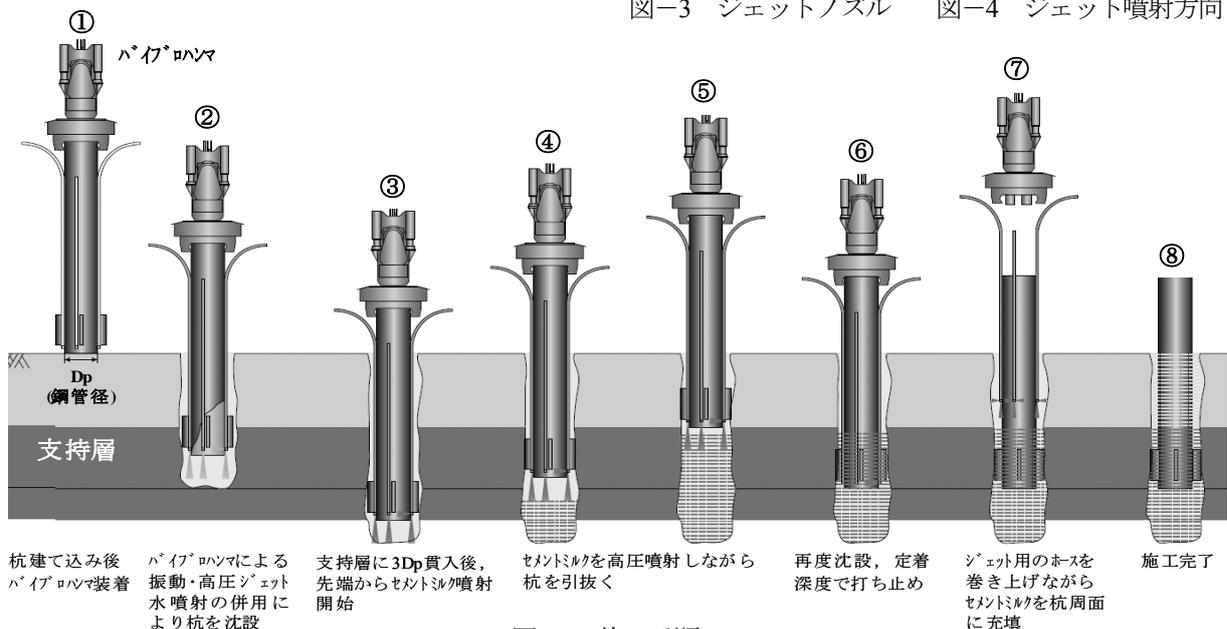


図-2 施工手順

2. 提案する工法の概要

本工法の施工手順を図-2 に示す。リブプレート付きの開端鋼管杭の先端部を、ジェットノズルからウォータージェットを噴射することで掘削しながらバイブロハンマの振動力を併用して杭を所定の深度まで沈設する(①～③)。支持層に鋼管径の3倍程度の深さまで貫入した後(③)、ウォータージェットからセメントミルクの高圧噴射に切り替え、バイブロハンマを振動させながら杭を上下させ、セメントミルクと地盤を攪拌混合して根固め部を築造する(④～⑥)。ウォータージェットによる周辺地盤の緩みを回復させるために、ウォータージェットのホースを回収する際に杭周面部にもセメントミルクを注入充填する(⑦、⑧)。以上のように、先端根固めを確実に築造し、さらに杭周面にモルタルを充填することにより確実な支持力を有する杭を築造する。また、本工法では、図-3 に示すようにリブプレートの近辺にジェットノズルを配置している。これは、リブプレートに沿ってウォータージェットやセメントミルクを噴射してリブプレートの周囲を中心に根固め部を築造することで確実な根固め部築造範囲を確保しようとするものである。さらに、図-4 に示すように、鉛直下方向きの噴射と同時に、鋼管内側に向けてウォータージェットやセ

メントミルクを噴射可能な構造を用いているため、ずれ止め部を構成する鉄筋の周囲を洗浄可能であるとともに、鋼管内側の閉塞性を確保することも意図している。

3. 提案する工法の課題

提案する工法について以下の点を確認することが必要である。

- ・杭先端の根固め部が確実に築造できること
- ・先端抵抗力が所定の値以上確保できること
- ・周面抵抗力が所定の値以上確保できること

これらのうち、杭先端の根固め部については、実大杭を用いた根固め部築造試験により確認し(図-5)、施工方法およびその管理手法を提案した¹⁾。

杭先端の抵抗力は、支持層でのウォータージェットによる掘削の後に杭先端部に根固めを造成し、さらに鋼管の開端部を確実に閉塞することで所定の先端抵抗力が発揮されることが期待される。ここで、先端抵抗力が発揮されるためには、根固め部と鋼管が一体化することが求められる。それには適切な鋼管先端の仕様の設定が必須である。そこで鋼管先端の抵抗挙動把握のために、根固め部と鋼管の接続部を模擬した模型を用いて押込み試験を実施した。さらに、実大の杭においても先端抵抗力が確実に発揮可能であることを検討した。

周面抵抗力については、実大杭を用いた載荷試験を実施した際に、抵抗性能について検証した。

4. 杭先端部の構造仕様の検討

本工法は杭先端部を、内側に向けて噴射させたセメントミルクで閉塞させることに加え、ウォータージェットで掘削した地盤にセメントミルクを注入して固化させることで、打撃杭相当の先端抵抗力の発現を期待している。現行の基準では打撃杭の先端抵抗力はN値と関連付けられている。完全閉塞杭の場合、先端抵抗力は次式で現される。

$$P_u = 300NA_p \text{ (kN)} \quad (1)$$

ここに、Nは杭先端の平均N値で $N \leq 50$ 、 A_p は鋼管先端閉塞断面積(m^2)である。

ここでは、式(1)を適用する場合に想定されている最大抵抗力(N値が50の時に式(1)から計算される $15,000A_p$ (kN))を発揮するときでも杭の先端根固め部分が破壊や大変形が生じないように杭の先端構造を構築するにはどのようにすべきか模型実験により検討した。

なお、本工法の根固め部では、杭内部にずれ止めを配置し、杭の外側にリブプレートを設置する仕様とする。本実験では、これらの抵抗力を定量的に評価することを目的とする。

4.1 試験体と実験の概要

図-6に実験の概略を示す。試験体は、ずれ止め、リブプレートを備えた直径318.5mmの鋼管を、根固め部を想定した型枠用鋼管内の所定の位置に仮止めし、鋼管内外にモルタルを充填して作製した。型枠の内径は鋼管径の1.5倍(鋼管断面積の2.25倍)の477.8mmとした。ここでは、リブプレートの枚数、リブプレート表面形状、根固め部モルタル強度を変化させて根固め部の試験体を作製した。各実験ケースの仕様を表-1に示す。また、各実験ケースでの試験体概要を図-7(a)~(e)に示す。

Case4ではリブプレートを片側表面に平均高さが1.3mm突起を有するチェッカープレートを使用している。ずれ止めはいずれのケースも等しく径が5mmの鉄筋を、鋼管下端から60mmの位置から100mmピッチで3段取付けた。



図-5 築造した根固め部状況

表-1 押込み試験ケース

Case	根固め部モルタル 圧縮強度 σ_c (N/mm^2)	ずれ止め		リブプレート				
		径 (mm)	段数	板厚 (mm)	幅 (mm)	高さ (mm)	枚数	表面の仕様
1	15	5	3	—	—	—	0	通常
2				6	75	200	4	通常
3							8	通常
4				4	チェッカープレート (片面突起有)			
5	10					4	通常	

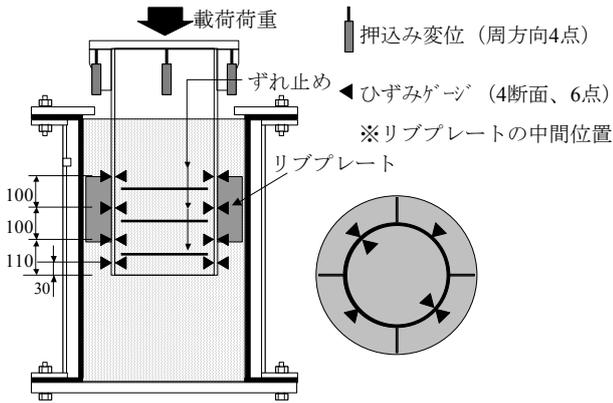


図-6 試験体概要

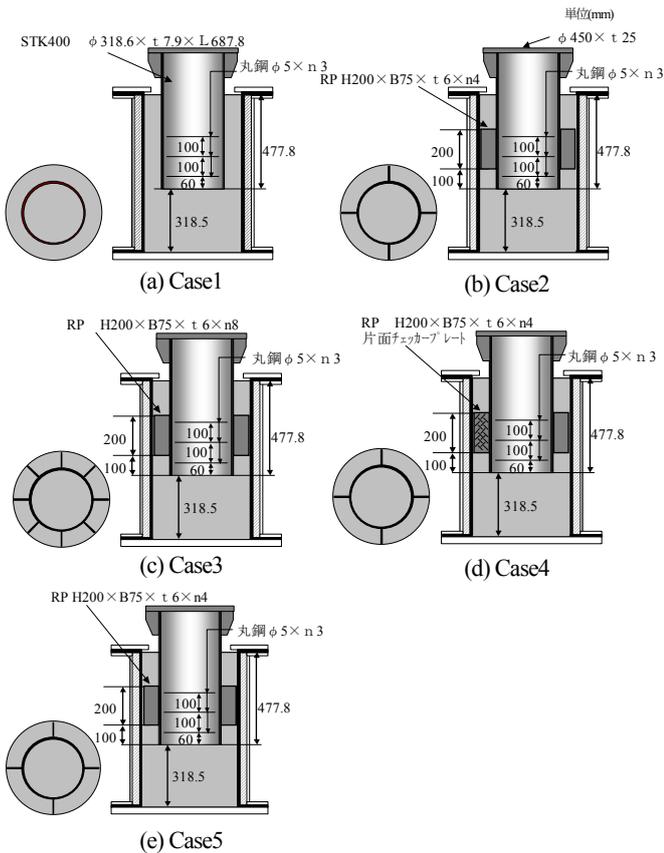


図-7 各実験ケースでの実験概要図

4.2 試験結果

各供試体の杭頭荷重-変位関係を図-8 に示す。いずれのケースでも荷重初期の立ち上がり勾配は急であり、一度荷重が少し落ちる400kN付近まではほとんど変位が観察されない。このことからすると、400kN付近で生じる変化は、モルタルと杭との剥離によるものと思われる。この時点よりずれ止め等が働き始める荷重であると思われる。その後は荷重の増加勾配がそれまでに比べると少し緩くなるものの直線的に荷重が増加する傾向にある。その後、4~5mmほど変位したあたりから荷重-変位曲線が曲がり、7mm程度の変位以降は荷重の増加がいずれも小さくなり、ほぼ最大荷重となり、一定値を維持するようになる。

4.3 根固め部耐力

降伏荷重 P_y は、荷重-変位関係を図-9 のように両対数でプロットして、変位が急増する荷重として求めた。杭とモルタルの付着切れと考えられる500kN付近での変化は、実験結果からもわかるように、支持力に影響するような挙動ではないと考えることができるため、降伏点は上記のように定義した。さらに、降伏荷重 P_y のときの変位を図-8 の荷重-変位関係から求め降伏点とした。また、原点と降伏点を結ぶ直線の傾きを初期剛性とした。図-8 中には、降伏点を●印で示してある。各実験条件での最大耐力 P_{max} 、降伏耐力 P_y 、初期剛性をまとめたものを表-2 に示す。

図-8 と表-2 によると、モルタル強度の低い Case5 が際立って最大耐力、初期剛性が小さく、他のケースでは、最大耐力にはあまり大きな違いが見られなかった。このことより、根固め部の降伏耐力や最大耐力に与える影響は、モルタル強度が最も支配的で重要だと考えられる。また、Case4 は他の Case1~3 と比べて初期剛性が大きい傾向が見られた。これは、Case4 はリブプレートにチェッカープレートを用いているため、荷重初期にチェッカープレートの突起とモルタルの間に付着力が発揮されたためと考えられる。しかし、図-10 に示すように、試験後の観察では、モルタル部にリブプレートに沿ってクラックが発生し、チェッカープレート面とモルタルの間に空隙が生じていた。そのため、突起の付着効果が低減し、最大耐力への影響は小さかったと考えられる。

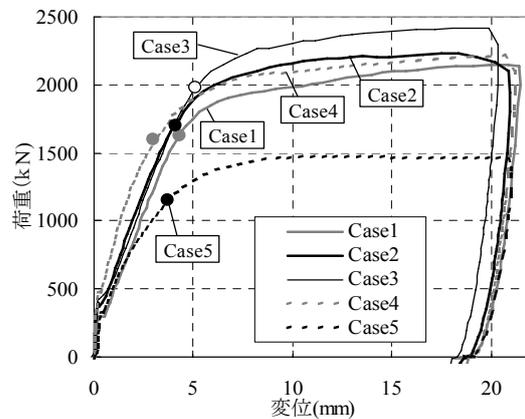


図-8 押込み試験荷重-変位関係

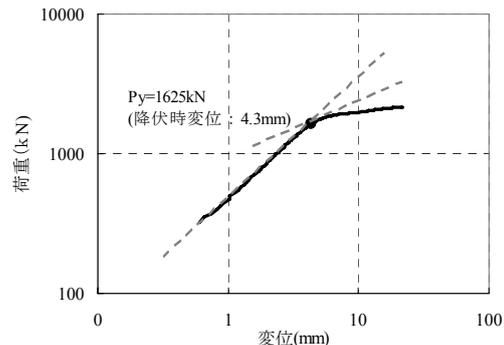
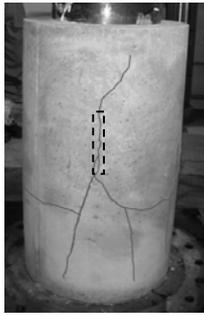


図-9 降伏点判定例(Case1)



リブプレート位置

図-10 試験後のクラック発生状況(Case4)

表-2 押し込み実験結果まとめ

Case	P_{max} (kN)	P_y (kN)	初期剛性 (kN/mm)
1	2,146	1,625	278
2	2,229	1,700	415
3	2,417	1,975	387
4	2,167	1,600	533
5	1,470	1,150	311

表-3 各実験条件による耐力の違い

(a) リブプレートの枚数の影響

Case	Case1との差 (kN) (降伏耐力)	Case1との差 (kN) (最大耐力)	リブプレート 枚数
1	-	-	0
2	+75	+83	4
3	+350	+271	8

(b) リブプレートの枚数以外の影響

Case	Case2との差 (kN) (降伏耐力)	Case2との差 (kN) (最大耐力)	相違点
4	-100	-62	リブプレートに チェッカープレートを使用
5	-652	-759	σ_c 15→10kN/m ²

表-3に各実験条件による耐力の違いを示す。この実験では、リブプレートの枚数、材質や根固め部のモルタルの圧縮強度を変化させて実験を行ったが、条件を変えた場合の個々の荷重成分を直接計ることが難しかったため、便宜的にひとつだけ条件の異なるケースごとの最大耐力の差分を取り、変えた条件の部分の抵抗力であると仮定して表-3に整理した。つまり、Case2, 3ではCase1との差分をリブプレートの枚数による違いと考えた。また、Case4, 5ではCase2との差分を取っており、それぞれCase4ではチェッカープレートの影響、Case5は根固め部モルタルの圧縮強度の影響と考えて整理している。

表-3(a)より、リブプレートは、枚数が増えるほど降伏耐力、最大耐力が上昇することが確認できた。枚数によって、効果の度合いが異なり、最大耐力では4枚では83kN、8枚では271kN最大耐力が増加した。この耐力の増加分は最大耐力のそれぞれ4~11%程度である。

リブプレートにチェッカープレートを用いたCase4は

Case2と比較して同一荷重に対して変形量が少なかった。これは、チェッカープレートの縞模様により付着力が増加し、これが初期剛性を1.3倍程度に高める効果に貢献することが確認できた。しかし、最大耐力の差は少なく、降伏後の耐力への寄与は小さいことが確認された。

表-3(b)のCase2, 5の比較より、モルタル強度による影響は、モルタル強度比が60%であるのに対し、 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。このことは、根固め部強度が、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。

4.3 ずれ止めおよび杭先端部の効果

ずれ止めおよび鋼管先端部で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-6に示すずれ止めの上下(上から1, 2, 3段目)の断面に添付したひずみゲージの出力から軸力を求め、各区間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。この際、鋼管およびリブプレートの外周面で摩擦力や付着力が働き、軸力の差分にはそれらの影響が加味されている可能性がある。しかし、別途、最上段の鉄筋より上部の鋼管とモルタルとの付着力を計測した結果、降伏荷重以降では付着力がほぼ0になっていた。そこで、鋼材とモルタルの付着による摩擦力については無視して考えている。また、3段目鉄筋の下部に発生した軸力を鋼管先端部で生じる抵抗力とした。

代表例としてCase2, 5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載荷荷重の関係を図-11(a), (b)に示す。ずれ止めは、設計では取付け本数が均等に分担するものとして扱うことから図-12に各ケースのずれ止めの支圧倍率の平均値と載荷荷重を降伏荷重で除したものの関係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(2)の考え方によっている。

$$\sigma = P_d / A_s \quad (2)$$

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)

である。

降伏後の荷重増加は比較的小さいため、安全をみて、降伏荷重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、鋼管先端部の支圧倍率も、図-11をみると、降伏荷重時ではずれ止めと同等以上の値を示しており、同程度の効果が発揮されていることが判る。なお、ずれ止めの抵抗力に関してはここでは平均のみを示したが、上部のずれ止めから先に抵抗が発揮される傾向にあることを確認している。

鋼管先端ではずれ止めと比較して支圧力の発揮が遅い傾向があるが、これは載荷点からの距離が遠いため、軸力が上部のずれ止めから徐々に発揮されていくため

であると考えられる。降伏耐力時に 2, 3 段目のずれ止めでは 1 段目と比較して、それぞれ 80%, 60% 程度の抵抗が発揮された。本研究ではずれ止めの効果を平均値で考えているが、段数が極端に増加した場合にはずれ止め位置ごとで、その効果を検討するべきだと考えられる。

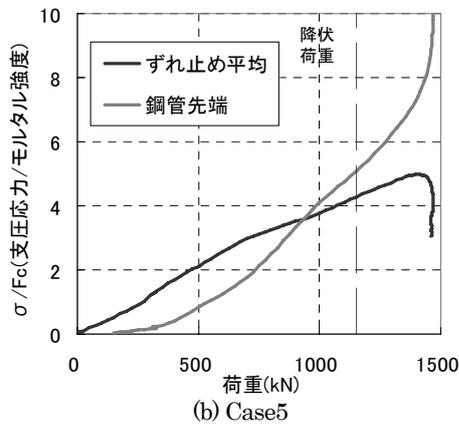
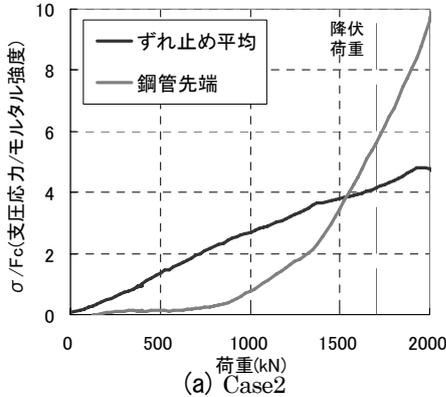


図-11 載荷荷重-支圧倍率関係

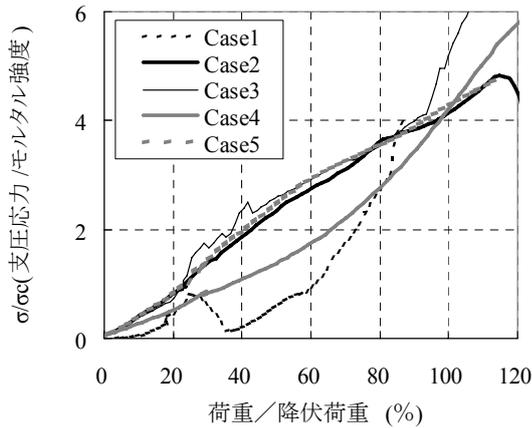


図-12 荷重/降伏荷重-ずれ止め支圧倍率関係

4.4 リブプレートの効果

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、ずれ止めのように断面荷重で評価することが困難である。そこで、Case1 を基準とした耐力の差分を求め、それをリブプレートで発揮される支圧力として考え、支圧倍率を式(2)の考え方に沿って求めた結果を表-4 に示す。支圧倍率は Case1 との降伏耐力および最大耐力の差から求めた支圧倍率の両方を示してある。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 $2.2\sigma_c \sim 5.0\sigma_c$ といずれのケースでも $2.0\sigma_c$ 以上であった。

4.5 根固め部押込み試験のまとめ

本結果より、根固め部の抵抗力として見込まれるずれ止め、リブプレート、杭先端部(鋼管純断面積部)の効果について以下のことが言える。

- ① ずれ止めでは、4.0 以上の支圧倍率が期待できる。また、鋼管先端部でも同等の効果が期待できるという結果が得られた。
- ② リブプレートでは、枚数が多いほど耐力増加効果が高いが、その影響を定量的に評価できるまでには至っていない。今回、実験を行った条件では、4 枚用いた場合を下限と考えると、2.0 以上の支圧倍率が期待できる。
- ③ リブプレートにチェッカープレートを採用したものについては、剛性の上昇は期待できるが、耐力の向上効果はほとんどない。

押込み試験から設定した支圧倍率を表-5 に示す。

表-4 リブプレートの効果

Case	Case 2	Case 3
リブプレート枚数 N	4枚	8枚
支圧倍率 ($P_{rp}/(N \cdot \sigma_c \cdot A_{rp})$)	2.4(最大耐力) 2.2(降伏耐力)	3.9(最大耐力) 5.0(降伏耐力)

表-5 耐力設定用支圧倍率

	支圧倍率
ずれ止め	4.0
鋼管先端部	4.0
リブプレート	2.0

表-6 提案する鋼管先端仕様

鋼管		ずれ止め		リブプレート			根固め部 圧縮強度 (N/mm^2)	支圧倍率		計算耐力				目標 耐力	余裕度
径 (mm)	板厚 (mm)	径 (mm)	段数 (段)	板厚 (mm)	幅 (mm)	枚数 (枚)		ずれ止め 鋼管先端	リブ プレート	ずれ止め (kN)	鋼管先端 (kN)	リブ プレート (kN)	合計 Pa (kN)	Pb (kN)	
600	6	13	3	19	250	4	15	4	2	4,227	672	570	5,469	4,241	1.3
800	8	13	4	19	300	4		4	2	7,557	1,194	684	9,435	7,540	1.3
1,000	10	13	4	22	300	6		4	2	9,478	1,866	1,188	12,532	11,781	1.1

4.6 先端仕様の提案

根固め部の押込み耐力 R は式(3)によって求めることができる。このとき、杭先端各部の耐力の評価式を式(4)～(6)のように提案する。

$$R = R_i + R_o + R_t \quad (3)$$

R_i : ずれ止め耐力;

$$R_i = (D_p - 2t - d_i) \times \pi \times d_i \times \sigma_c \times a \times n \quad (4)$$

ここで、 D_p : 鋼管径, t : 板厚, d_i : ずれ止め幅, σ_c : 根固め部圧縮強度, a : ずれ止めの支圧倍率(=4.0), n : ずれ止めの段数である。

R_o : リブプレート耐力;

$$R_o = t_r \times B \times \sigma_c \times b \times N \quad (5)$$

ここで、 t_r : リブプレート板厚, B : リブプレート幅, b : リブプレートの支圧倍率(=2.0), N : リブプレートの枚数である。

R_t : 鋼管先端部耐力;

$$R_t = (D_p - t) \times \pi \times t \times \sigma_c \times c \quad (6)$$

ここで、 c : 鋼管先端の支圧倍率(=4.0)である。

図-13 に表-5 の支圧倍率を用いて算出した根固め部の押込み耐力の推定値と実験値の比較を示す。全てのケースで安全側に最大耐力を推定できていることがわかる。

本実験から求まる設計定数を用いて、実大杭で目標としている先端根固め部の耐力(最大で $15,000 \cdot A_p$ (kN))を確保するような根固め部を築造するのに必要なずれ止めとリブプレートの仕様を設定すると表-6 のようになる。リブプレートの効果については、4, 8 枚の比較では枚数の増加に伴い耐力が増加することが分かったが、それ範囲以外の部分については評価できていないため 4～8 枚の範囲での設定を検討した。

模型実験の結果では鋼管径サイズの影響や、ずれ止めの段数による影響などを十分には考慮できていないが、根固め部強度を 15N/mm^2 以上確保したうえで、表-6 のような仕様を用意することで目標とする先端抵抗力に対して十分な耐力を持つ根固め部を築造することが可

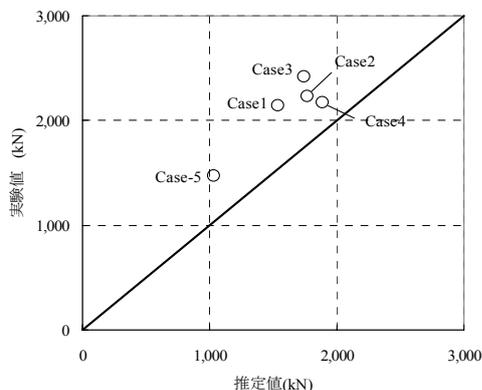


図-13 実験値と推定値の比較

能であると考えられる。「5. 鉛直載荷試験による支持力の検証」での載荷試験杭では表-6 のずれ止めとリブプレート仕様を適用している。ずれ止め、鋼管の肉厚、リブプレートの組み合わせは任意ではあるが、現実性のある組み合わせを表-6 にしている。これを踏まえてこの計算結果を評価すると、ずれ止め、鋼管先端部、リブプレートの計算耐力は、合計の計算耐力 P_a に対してそれぞれ 70～80%, 12～15%, 4～11%程度である。

5. 鉛直載荷試験による支持力の検証

押込み試験では施工のバラツキや地盤の影響などがない、理想状態での根固め部に対する試験であり、実際の地盤で造成した根固め部に対する耐力を明らかにしたものではない。また、本工法は、従来のジェット併用工法や場所打ち杭工法と異なり、ウォータージェットを噴射し続け、その後セメントミルクを注入する工法であり、地盤の乱れ方は場所打ち杭や JV 工法と大きく異なる。そこで、押込み試験結果を元に提案した杭先端仕様で、目標とする先端荷重に対して根固め部の健全性が確保されること、およびウォータージェットの噴射による地盤の乱れがセメントミルクを充填することにより回復することを確認するため、鋼管径 600mm, 800mm, 1,000mm の 3 種類の径について押込み載荷試験を実施した。

5.1 載荷試験概要

載荷試験は地盤工学会基準²⁾に準じて計画・実施した。試験杭打設位置でのボーリング結果及びひずみゲージの貼付位置、先端変位計の取付け位置は図-14～16 に示すとおりである。いずれのケースにおいても杭先端伝達荷重が設計上の最大荷重となる $15,000\text{kN/m}^2$ (300N, 杭先端の平均 N 値の最大値を 50 と考えた場合) 以上の荷重になった時でも地盤が先に破壊しないように、杭先端の平均 N 値が 50 以上期待できる層を支持層として選定した。杭径が $\phi 600, 800\text{mm}$ の 2 ケースについては支持層地盤が砂地盤であり、杭径が $\phi 1,000\text{mm}$ のケースでは支持層が礫地盤である。

各地層での周面抵抗力 τ (kN/m^2) を求めるためには、各地層上端下端面でのひずみ量を計測することが必要となる。そこで、ひずみ計は各地層の境界面に取付けた。

5.2 試験諸元

試験に用いた杭の諸元を表-7 に示す。杭径は 600～1,000mm, 杭長は 19～21.5m, リブプレートは 4, 8 枚で、ノズル孔数はリブプレートと同数の 4, 8 個である。杭径 1,000mm の杭では、施工対象とする地盤強度が高かったため、ノズル孔数(リブプレート枚数)を 6 から 8 個に増やして実験を実施した。板厚については、想定される杭頭載荷荷重に耐え得る板厚を設定した。

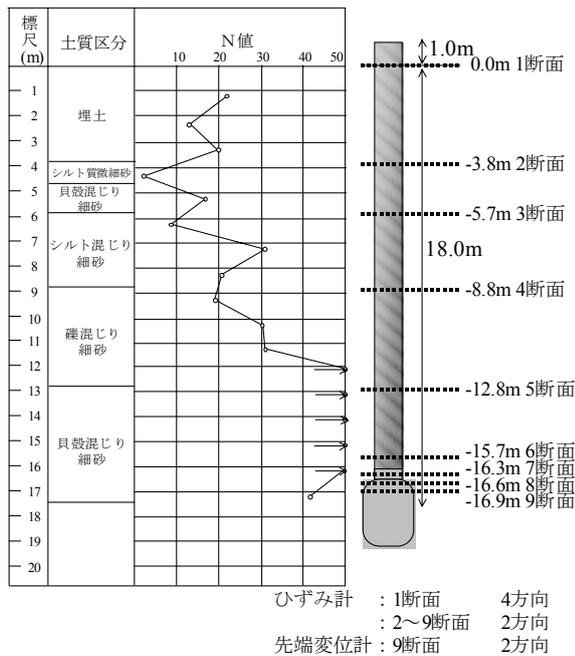


図-14 ひずみゲージ取付け位置(φ600mm)

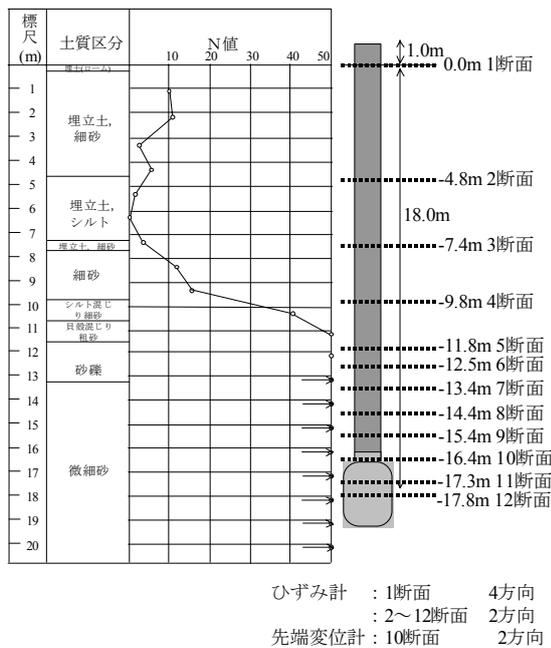


図-15 ひずみゲージ取付け位置(φ800mm)

表-7 杭諸元

鋼管		ずれ止め			リブプレート			ノズル 孔数
径 (mm)	板厚 (mm)	径 (mm)	段数 (段)	取付け ヒッチ(mm)	板厚 (mm)	幅 (mm)	枚数 (枚)	
600	19	13	3	250	19	250	4	4
800	16	13	4	250	19	300	4	4
1,000	21	13	4	250	22	300	8	8

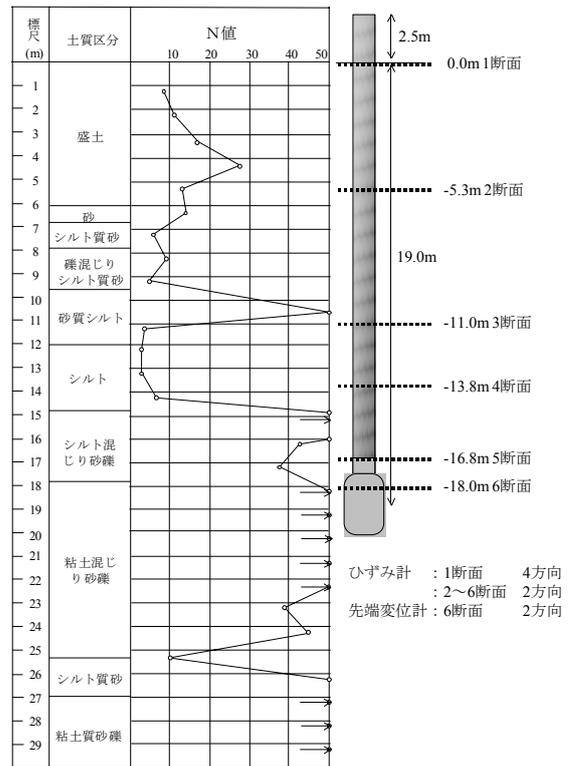


図-16 ひずみゲージ取付け位置(φ1,000mm)

5.3 根固め部のコア抜き調査

地中部に築造した根固め部の状態を評価する目的で、φ600mmの荷重試験の反力杭を用いて根固め部のボーリング調査を実施した。調査は荷重試験の影響を避けるため、荷重試験杭と同時期に同工法で施工した反力杭を用いた。ボーリング調査は鋼管のほぼ中央部をGL-21mまで行い、その一部のコアサンプリングを実施した。また、荷重試験は杭施工後28日の養生期間の後に実施したが、本ボーリング調査は杭施工後17ヶ月間経過した後に実施している。両方で材齢に大きな差があるが、一般的に材齢が28日を越えてからのモルタルの強度上昇は比較的小さいことから、今回のサンプリングの結果を用いて荷重試験杭の根固め部の状態を推定した。

図-17にサンプリングした位置を、図-18にサンプリングしたコアから作製した一軸圧縮試験体の切断面を示す。鋼管中心部分で、コアサンプリングができたことから、鋼管内がソイルセメントで閉塞状態にあったことが確認できた。また、供試体の切断面を見ると、均一にセメントミルクが充填されている様子が確認でき、管内へのセメントミルクの噴射が十分であったことが伺える。また、根固め部の一軸圧縮強度は19.1N/mm²と、目標としている強度の15N/mm²を上回る結果であった。

5.4 荷重試験結果

荷重試験結果例として、図-19にφ600mmの杭の試験結果総合図を示す。また、各荷重荷重時のひずみ計測結果から求めた軸力分布を図-20に示す。

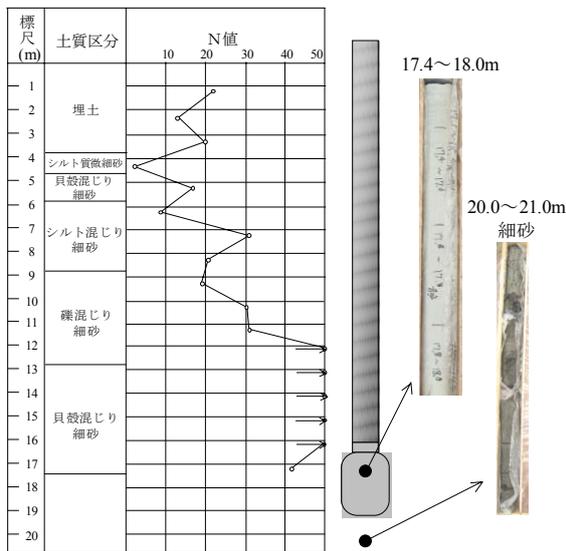


図-17 コアサンプリング採取位置



図-18 供試体断面(GL-17.6~17.8m)

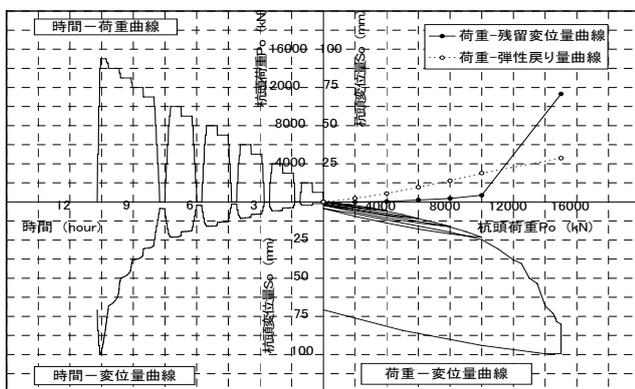


図-19 載荷試験総合結果(φ600mm)

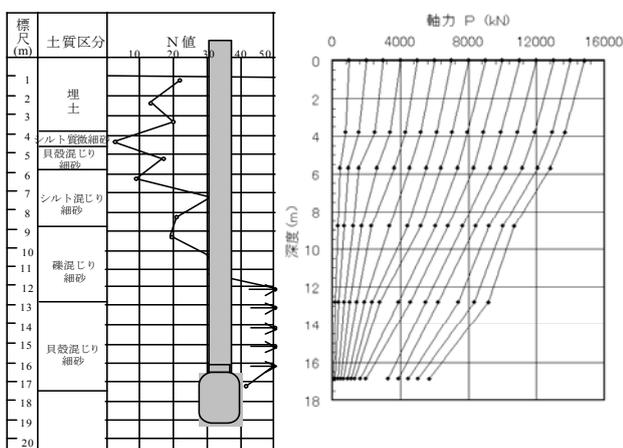


図-20 軸力分布(φ600mm)

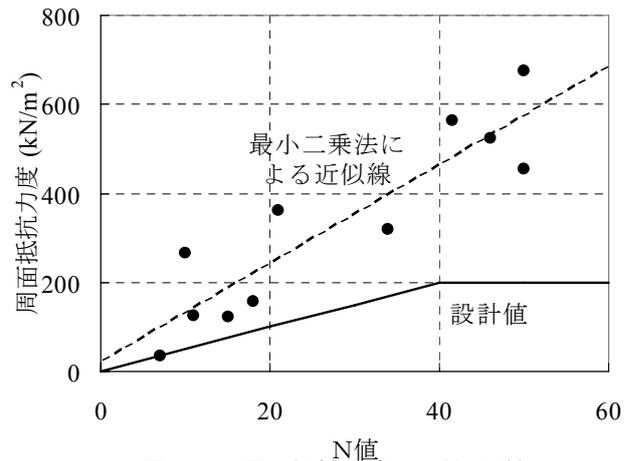


図-21 周面抵抗力度-N 値(砂質土)

5.5 周面抵抗力度評価

本工法で施工した3例の杭の載荷試験から得られた周面抵抗力度の全結果を表-8にまとめる。また、図-21にN値と周面抵抗力度の関係を示す。これは図中に設計値として示した道路橋示方書等で用いられる場所打ち杭の周面抵抗力度の $5N(\text{kN/m}^2)$ 、N：周面抵抗力度を考慮する砂層の平均N値で最大で40)といった値と比べて高い値であった。本工法では杭周面にセメントミルクを高圧で噴射させていることに起因すると考えられる。周面抵抗はモルタルを噴射して造成される固化体と地盤との間で発揮されると考えられるが、高圧噴射により鋼管周辺地盤の広い範囲で固化体が形成されるため、周面抵抗が鋼管周面積で発揮される場合と比較して高い摩擦力を発揮していると予想される。しかし、ジェットノズルの配置は、所定の間隔を持って離隔しているため、どこまでの範囲が周面摩擦に有効な範囲かを確定することは困難である。そこで、データの拡充が図られるまでは、本工法の周面抵抗力度としては安全側を見て、道路橋示方書に示される場所打ち杭の周面抵抗と同等の値である砂質土では $5N$ 、粘性土では $10N$ 程度を想定することが妥当だと考えられる。

5.6 先端抵抗力度評価

本工法で施工した3例の杭の載荷試験から得られた先端抵抗力度の全結果を表-9に示す。また、先端抵抗力度から先端抵抗力度係数についてまとめたものを表-10に示す。

3例の載荷試験ではいずれも、支持層の地盤の平均N値が50を越えるような地盤であった。杭先端伝達荷重で設計上の最大荷重となる $15,000\text{kN/m}^2$ を大きく上回る荷重を載荷できており、その荷重に対して先端沈下量が第2限界抵抗力度を示す変位である $0.1D$ 以下に抑えられていたことから、想定した荷重に対して根固め部の健全性は十分に保持され、根固め部と鋼管が一体化していたといえる。

5.7 鉛直載荷試験のまとめ

本工法の支持力に関する結果をまとめる。

鋼管径 600mm, 800mm, 1000mm の鋼管杭にリブプレートとずれ止めを設置し、深度約 20m の砂・礫の支持層まで杭を打設した後、押し込み試験を実施して杭の支持力特性を把握した。

その結果、いずれの杭においても、杭先端部に 15000・Ap(kN)以上の軸力が作用しても根固め部の破壊が生じたと考えられるような大きな沈下が生じないことから、当初想定していた耐力を有する根固め部を構築できていると考えられる。根固め部と鋼管との間で、設計上の最大荷重となる杭先端伝達荷重(15,000kN/m²)に対して一体性を担保できることが確認された。

また、周面抵抗力については、砂・礫層では単位面積当りの周面抵抗力度が 5N(N:周面抵抗力が期待できる砂・礫層の平均N値)以上発揮されること、粘性土層では、データ数は少ないものの、単位面積当りの周面抵抗力度が 10N(N:周面抵抗力が期待できる粘性土層の平均N値)以上発揮されることが期待できることが確認された。

表-8 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)

表-9 載荷試験の先端抵抗力の結果

鋼管径(mm)	600	800	1000
杭長(m)	19.0	19.0	21.5
先端地盤種別	砂層 N \geq 50	砂層 N \geq 50	礫層 N \geq 50
最大杭頭荷重(kN)	15,000	13,124	22,000
最大荷重時杭頭沈下量(mm)	99.5	107.3	71.8
最大杭先端伝達荷重(kN)	6,199	8,767	13,306
最大荷重時杭先端沈下量(mm)	60.0	80.0	41.9
杭径比(鋼管径 D)	0.1D	0.1D	0.04D

表-10 先端抵抗力度および先端抵抗力係数

鋼管径(mm)	600	800	1000
鋼管杭先端閉塞面積 (m ²)	0.283	0.502	0.785
最大 or0.1D 沈下時 先端荷重 (kN)	6,199	8,767	13,306
先端抵抗力度(kN/m ²)	21,920	17,460	16,950
先端抵抗力係数 α	490	349	339

6. 結論

本報告で述べた各種検討から、以下の知見が得られた。

- 鋼管先端の内側に取付けたずれ止めについて、模型

試験で確認されたずれ止めの支圧倍率は、4.0 以上が期待できる。また、鋼管の先端部分でも同等の効果が期待できる。

- 鋼管先端の外側に取付けたリブプレートについて、模型試験で確認したその効果は、リブプレートの枚数によって異なり、枚数が多いほど高い効果がみられるが、根固め部の耐力上昇の効果は相対的に小さい。今回の条件では、4枚配置した場合で、2.0 以上の支圧倍率が期待できる。
- 根固め部のモルタルの圧縮強度について、模型試験の結果より、根固め部の降伏耐力や最大耐力には、根固め部のモルタルの圧縮強度が最も支配的であり、本試験で実施したモルタルの圧縮強度 (10~15N/mm²) の範囲では、圧縮強度とほぼ比例する根固め部の耐力が発揮された。
- リブプレートの表面付着力を向上させるためにチェッカープレートを用いた検討も行ったが、剛性の上昇は期待できるものの耐力の向上効果はほとんどないことを確認した。
- 実大杭施工後の杭内部のポーリングおよびコアサンプリングの結果から、根固め部築造の際に鋼管先端部で内側にセメントミルクを噴射することで鋼管先端内部を強固に固めることができることを確認した。
- 模型試験結果より設定した先端仕様を備えた鋼管先端に、ウォータージェット及びセメントミルク噴射を併用したバイブロハンマ工法によって根固め部を築造することで、ウォータージェットの噴射による地盤の緩みをセメントミルクの充填により回復させ、所定の圧縮強度を満足する根固め部を築造することができ、目標とする 15000・Ap(kN)の先端荷重に対し鋼管と根固め部の一体性が十分保たれることを確認した。また、周面抵抗力についてもセメントミルク充填により高い抵抗力が発揮できることを確認した。

なお、本工法で実施された鉛直載荷試験は現在のところ 3 例と少ないため、今後、試験データを積み重ねていくことで、先端抵抗力特性および周面抵抗力特性についてさらに明らかにしていきたいと考える。

参考文献

- 菊池喜昭, 山下久男, 西海健二, 石濱吉郎, 田中隆太, 鈴木勇吉, 横山博康, 高橋健二: 鋼管杭における水とセメントミルクジェット併用バイブロハンマ工法の開発, 港湾空港技術研究所資料, 2009.
- 地盤工学会編: 杭の鉛直押し込み試験方法・同解説, 2002.

(2009年9月24日受付)