実大施工試験によるウォータージェット併用 バイブロハンマ工法で打設した 先端根固め杭の性能検証

高橋 健二¹・菊池 喜昭²・水谷 崇亮³・森川 嘉之⁴
横山 博康⁵・森安 俊介⁶・武野 正和⁷

¹正会員 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)
E-mail: takahashi@chowa.co.jp

²フェロー会員 東京理科大学教授 土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail: kikuchi_y@rs.tus.ac.jp

³ 港湾空港技術研究所 地盤研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail: mizutani-t@pari.go.jp

⁴正会員 港湾空港技術研究所 地盤研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail: morikawa@pari.go.jp

⁵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)
E-mail: yokoyama@chowa.co.jp

⁶正会員 新日鐵住金株式会社 鋼構造研究部 (〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)
E-mail: moriyasu.45e.shunsuke@jp.nssmc.com

⁷正会員 新日鐵住金株式会社 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区丸の内2-6-1)
E-mail: takeno.t3s.masakazu@jp.nssmc.com

港湾構造物の大水深化・構造合理化に伴い、基礎杭に求められる軸方向抵抗力が増大し、鋼管径が大口径化する傾向にある。一方、従来の打撃工法では大口径化に伴って閉塞率が低下することや、セメントミルクジェット併用バイブロハンマ工法では先端抵抗力が増大できない問題点がある。また著者らがこれまで鋼管径1000 mmの範囲で性能を確認していたウォータージェット併用工法で打設した根固め杭では、十分に攪拌されたソイルセメントを杭内部に築造することが可能である。しかし、それ以上の大口径杭に対してこれまでの方法を適用することは難しかった。そこで、大口径に適した方法を提案するため、セメントミルクジェットによる根固めの築造を中心に研究開発に取り組んだ。その結果、均質な根固めが築造できる方法を見出した。また、その強度が抵抗力の発現に十分な水準であることが、実大試験で実証された。

Key Words : *vibratory pile driving with waterjet, soil cement block, axial bearing capacity, unconfined compression stress, x-ray computed tomography*

1. はじめに

我が国では、港湾の国際競争力を強化することを目的に、大型船舶に対応した岸壁の大水深化が進展している。加えて、経済性を追求するなかで、栈橋の杭間距離を長くする等、構造的な合理化が図られている。その結果、基礎杭一本あたりに求められる軸方向抵抗力が増加し、杭径が大きくなる傾向にある。

一方、港湾において主に用いられる打撃工法は、大口径になるほど杭先端の閉塞率が低下し、軸方向抵抗力を

得にくくなる。また、騒音・振動の環境問題があり、打撃工法が適用できないケースもある。騒音・振動に対応した工法として、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）があるが、その軸方向抵抗力は小さい。このような背景のもと、JV工法の低騒音・低振動性能を有し、セメントミルクジェット（以下、CMI）によって杭先端に根固めを築造することで大きな軸方向抵抗力を得ることが可能な鋼管杭工法（以下、本工法）が開発されている¹⁾。開発当時は鋼管径1000 mmまでの範囲で、軸方向抵抗力が確認されていた。しかし

ながら、本工法で鋼管径1000 mmを超える大口径杭を施工する場合、ウォータージェット（以下、WJ）及びCMJによる掘削が必要な範囲が大きくなり掘削効率が低下するとともに、原地盤とセメントミルクの攪拌が不十分になり根固めが築造できないことや品質の劣化が起こることが懸念される。そこで、本工法を大口径杭に適用するためのWJ及びCMJの条件を検討し、実地盤に対して大口径杭の試験施工と載荷試験を行い、大口径杭に本工法を適用した場合の根固め部の品質を検証した。

2. 大口径杭における従来工法の問題点

(1) 打撃工法

打撃工法では、杭径が大きくなるほど閉塞率が低下することが知られている²⁾。例えば、鋼管径600 mmの杭の閉塞率が1.0であっても、鋼管径1000 mmでは0.6、鋼管径1500 mmでは0.3程度まで減少する。つまり、大口径になるほど単位面積当たりの先端抵抗力は減少する。この対策として、杭先端に十字リブを付設し、閉塞率を高める方法があるが、この方法では打設時の貫入抵抗が増大し、施工負荷が高くなる³⁾。また、杭径が大きくなるほど、重機も大きくなり、騒音や振動も増大する。このように、打撃工法の場合、大口径になるほど施工性や環境性能が低下し、単位面積当たりの先端抵抗力も得にくくなる。

(2) セメントミルクジェット併用バイプロハンマ工法

上菌ら⁴⁾は伏木富山港の栈橋における鋼管杭の施工で、セメントミルクジェット併用バイプロハンマ工法（以下、CJV工法）で打設した鋼管径1200 mm・杭長47 mの杭の軸方向抵抗力について報告している。これによれば、当初、JV工法で施工したものの設計支持力を満足しなかったため、CJV工法を新しく採用し、所要の設計支持力を得ている。両者の周面抵抗力を比較すると、CJV工法で打設した杭ではセメントミルクによる改良効果が発揮され、JV工法の約6倍の周面抵抗力が得られている。一方、両者の先端抵抗力はほとんど同じで、改良効果はみられなかった。このことは、鋼管径1200 mm程度の杭に対して、先端部をセメントミルクジェットで改良し、先端抵抗力を高めることの難しさを示唆している。

(3) 本工法(従来仕様)

本工法は、杭先端にソイルセメントの根固めを築造することで、先端抵抗力の増大を図っている。施工手順は図-1に示すように、支持層までJV工法で打設後、根固めを築造する範囲をWJで乱したのち、CMJに切り替え、鋼管杭を上下動させながらセメントミルクを充填して根固めを築造するものである。なお、周面抵抗力が必要な

場合には、ジェット管を杭先端から引き抜きながら、鋼管の周面にセメントミルクを充填する。

鋼管の先端部には図-2に示すように、外周面に複数のリブプレートと水及びセメントミルクを噴射するノズルを付設（以下、従来仕様）している。このリブプレートは、根固めを拡張し、先端抵抗力を増大する狙いがある。しかしながら、鋼管径1000 mmの施工試験では、リブプレートが打設時の抵抗になり施工性が悪くなるため、バイプロハンマを通常杭の打設に比べてサイズアップする必要がある¹⁾。このことから、より大きな径の杭では、この抵抗が顕著になり、施工性がますます悪化することが類推される。従来仕様のノズルは、図-3に示すように、鉛直方向と水平内側方向に水及びセメントミルクを噴射するようになっている。鉛直方向の噴射は打設と根固めの築造を目的とし、水平内側方向の噴射は鋼管内部を洗浄して鋼管とソイルセメントの付着力を高めることを目的としている。鋼管径が小さい場合、十分な根固めが築造されるが、鋼管径が大きくなると、中央部まで掘削できず、十分な根固めが築造できない。筆者らはこのことを模型実験で確認している⁵⁾。以上のことから、従来仕様のノズルのままでは大口径杭に適用することは困難であり、新しい方法が求められる。

①～②バイプロハンマ及びウォータージェットにより杭を打設
②～③支持層に3D貫入後、セメントミルク噴射（D：鋼管径）
③～⑤セメントミルクを高圧噴射しながら、杭を引抜く
⑤～⑥支持層上端から2Dの深度まで再度沈設
⑥～⑦ジェット用ホースを巻き上げ、杭周面にセメントミルクを充填

図-1 根固め築造過程

図-2 従来仕様の鋼管先端部及び根固めの拡張

図-3 大口径杭における従来仕様の掘削範囲イメージ

3. 大口径杭に適した杭先端の仕様の検討

筆者らは、模型実験により、WJによる掘削範囲を観察し、また、小規模な根固めの築造実験を実施して大口径杭に適すると考えられる杭先端のノズルの仕様を見出している⁹⁾。具体的には、図-4に示すように、水及びセメントミルクの噴射方向を鋼管の外周面から斜め内向きにするとともに、中央部に設置したリブプレートにノズルを配して、中央部の掘削性を高めた仕様（以下、大口径仕様）である。この仕様で大口径杭に対応できるか、実大スケールで検証するため、鋼管径1300 mm及び1600 mmの杭を用いた実大試験を実施した。ここでは、これらの杭のサイズに応じた、ノズルの配置や流量、噴射圧の設定方法を述べる。

個々のノズルによる掘削範囲をModoniら⁹⁾の知見によって推定した。Modoniらは砂質土においては、噴射流体の初速やノズル径と、全応力やせん断抵抗角といった地盤抵抗および流体の損失係数の関係で、掘削距離が決定されるという式を提案している。筆者らは模型実験の範囲でこの式の妥当性を検証し、式変換によって式(1)を導出した⁹⁾。

$$\frac{x}{d_0} = A\Lambda \sqrt{\frac{P}{\sigma_z \tan \phi'}} \quad (1)$$

ここで、 x は掘削距離、 d_0 はノズル径、 P は噴射圧、 ϕ' は有効応力基準に基づくせん断抵抗角、 σ_z は全応力、 Λ はノズル形状などによる流速低下の損失係数（経験的に16が提案されている）、 A は式(2)に示すように流体内の抵抗による速度減少比率 C （水では0.92程度）、流体の粘性に伴う比率 N （水を10とし、グラウトでは4.6程度）、エネルギー逸散や噴射流体の逸散に伴う係数 Ω_s （砂では0.2程度）をまとめたものである。なお、模型実験の結果、 A は1237、損失係数 Λ は0.76とすればよいことが分かった。また、掘削距離は掘削距離の0.62倍とすればよいことが分かった⁹⁾。

$$A = 2C \times \sqrt{\frac{2}{\Omega_s \times N}} \quad (2)$$

ここでは、式(1)を用いてノズル径64 mm、89 mm、124 mmにおける掘削範囲を求めた。根固めを築造する深度を約20 mに設定し、単位体積重量を17 kN/m³と仮定して全応力 σ_z を340 kPaとした。地下水の深度約14 mを考慮し、

図-4 大口径仕様

有効上載圧 σ_v' 157 kPaからせん断抵抗角 ϕ' を式(3)で推定し、42.8°とした。また、噴射圧 P を10 MPaとしている。

$$\phi' = 28 + 0.15 \times 21 \times ((100 N / (70 + \sigma_v'))^{0.5} \quad (3)$$

このようにして推定した掘削範囲から、鋼管径1300 mm及び1600 mmに対するノズルの配置を決定した。その結果を表-1に示す。表-1に示す個々の楕円は各ノズルによって掘削される領域の投影面積を示したものである。また、斜線を引いたものは斜めもしくは鉛直にセットしたノズルの掘削領域を表しており、斜線の無い楕円は、水平にセットしたノズルの掘削範囲を表したものである。

ここでは、鋼管断面上での掘削範囲の投影面積の鋼管断面積に占める割合は、鋼管径1300 mm、1600 mmともに0.50となるようにした。模型実験ではこの割合が0.12であつても十分に掘削が可能であつたので、表-1に示すノズル配置は十分に安全側の設定であると考えられる。ただし、WJのあとにCMIを用いるような粘性の異なる流体を二段階で噴射する場合の掘削状況が十分に解明されていないこと、実大試験では流体経路が長くなり圧力損失も大きくなることなどを考慮して、大きめの値とした。なお、表-1のノズルの配置では、上に示したように鋼管杭内のすべての断面を掘削できるという設定とはなっていない。これは、先の模型実験の結果⁹⁾から、鋼管断面内の地盤の全てが直接的に掘削される必要は無く、その一定の部分が掘削されれば、個々の掘削範囲の間の地盤強度も低下して、全体的に攪拌され、十分な根固めが築造されることがわかったためである。

表-1 試験杭の想定掘削範囲

4. 実大施工試験による根固めの品質検証

(1) 検証要領

新しく設定した大口径仕様のノズル配置で実際に、大口径杭の根固めが適切に施工でき、期待される支持力特性を発揮するかどうかを検証した。この検証では、根固めの築造状況の把握、根固め部のソイルモルタルの一軸圧縮強度の確認、ソイルモルタルの深度方向の均質性の確認、ソイルモルタルが均質に混合されているかの確認、先端支持力の確認を行った。

用いた杭は鋼管径1300 mm及び1600 mmの杭である。各試験杭の諸元を表-2に示す。この施工試験では工期の都合上、早強セメントか高炉セメントB種のいずれかを用了。表中では早強セメントを「早強」と、高炉セメントB種を「高炉」として示している。施工手順は図-1に示した本工法の要領に従った。セメントミルクの水セメント比は、CJV工法や鋼管ソイルセメント杭工法など既存工法を参考に、杭先端の根固めで65%、杭周面で150%とした。ただし、載荷杭のφ1300Cでは、先端抵抗力の把握を主目的としたため、周面にはセメントミルクを注入していない。試験杭の一例として、鋼管径1300 mmの杭先端部および水の噴射状況を図-5に示す。地盤の柱状図および杭の打設深度を図-6に示す。

(2) 根固めの築造状況の把握

杭内部をコアボーリングすることによって根固めが目標の深度まで築造されているか確認した。ボーリングの箇所は、表-1に示す●印の地点である。ボーリング地点は、各ノズルから遠く比較的掘削されにくい部分の根固め築造状況を確認することを考えて、鋼管の半円の中心部に設定した。なお、コアボーリングは、反力杭3本と載荷杭1本に対して行った。ボーリングで確認された、ソイルセメントが築造されていた深度を図-7に示す。

表-2 試験杭の諸元

	位置 付け	鋼管径 (mm)	杭長 (m)	セメント	周面 注入
φ1300A	反力杭	1300	19.8	早強	有
φ1300B	反力杭	1300	19.8	高炉	有
φ1300C	載荷杭	1300	18.0	高炉	無
φ1600A	反力杭	1600	19.8	早強	有

図-5 試験杭先端（左）および水の噴射状況（右）

図-7には鋼管先端の深度、根固めの目標深度である鋼管の先端から1D（Dは鋼管径）の深さも併記している。いずれの試験杭もソイルセメントの深度は目標深度に到達しており、根固めが築造されることが確認された。

(3) 一軸圧縮強度の確認

コアボーリングで採取したコアのうち、鋼管先端から0.5 m上方の範囲内の深度から供試体を切り出し、一軸圧縮試験を実施した。試験結果を図-8に示す。セメントの種類及び材齢が異なっているため、図中にはそれらを併記した。またミキシングプラントから採取したテストピースの一軸圧縮強度は「テスト」と明記して示した。

図-6 地盤柱状図及び杭打設図

図-7 目標の根固め築造深度とコアボーリング結果

図-8 サンプリングしたコア試料（鋼管先端より上方 0.5m）とプラントから採取した試料の一軸圧縮強度の比較

図-8 ではセメントの種類が等しく養生日数が対応しているテストピースとサンプリング試料の一軸圧縮試験結果を比較した。サンプリング試料では養生条件が実験室とは異なること、原地盤の土との混合、地下水や WJ の水による希釈の可能性があるため、ミキシングプラントから得られたテストピースよりもサンプリング試料の強度が低くなるのは当然であるが、テストピースに対するサンプリング試料の一軸圧縮強度の比率は概ね 40～70 %であった。そこで、原地盤の土との混合の程度や水による希釈の程度を確認してソイルセメントの構成成分をより詳細に調べるため、セメント量分析を実施した。

(4) セメント量分析による深度方向の均質性の確認

セメント量分析⁸⁾では、 $\phi 1300\text{B}$ から採取したコアを絶乾状態にして塩酸で処理して析出される酸化カルシウムから、セメント量を算出した。また、土砂量は、全絶乾量からセメント量を引いて求めた。その結果得られた各試料のセメント量、土砂量、水分量の割合を図-9に示す。なお、図-9の横軸に示した深度は、試験をした長さ 30cm の試料の中央の深度を示したものである。また、求められたセメント量と水分量から、水セメント比を求め、図-9に併記している。原地盤の土の元の密度、含水比がわからないため、原地盤の土との混合の程度や周辺水をどの程度混入したのかはわからないが、原地盤とはほぼ一定の割合で混合されていると考えられる。特に、深度 13.7～19.7 m の試料では、水分量、土砂量、セメント量がほぼ一定の比率となっているうえ、水セメント比も一定であることから、この区間のソイルセメントが均質にできていたと思われる。このことは、根固めが十分に攪拌されて築造されていることを示したものであると考えられる。ただし、根固めの先端である深度 20.4 m では、土砂量が増え、水セメント比が急減している。このように根固め先端付近では、ある種の分離が生じていたものと考えられる。ただし、この部分の一軸圧縮強度は 43.1MPa であることが確認できており、より強度の高いセメントモルタルが作られていたものと考えられる。

図-9 $\phi 1300\text{B}$ 杭のセメント量分析結果

(5) X線CT試験によるソイルセメントの均質性の確認

次に、ソイルセメントの均質性を調べるため、港湾空港技術研究所所有のマイクロフォーカスX線CTスキャナを用いて、供試体を観察した。CT画像の一例を図-10に示す。CT画像の観察により、密度のばらつきが小さく、全体的に均質性が高いソイルモルタルができていることが確認できた。

(6) 鉛直載荷試験による先端抵抗力の検証

筆者らは載荷杭 $\phi 1300\text{C}$ の鉛直載荷試験を実施し、ソイルセメントの強度や鋼管の応力状態から、いわゆる極限状態と考えられる第二限界荷重⁷⁾発現時には根固め自体は破壊しておらず、支持地盤の支持力特性によって第二限界荷重が決まったという推定結果を得ている⁹⁾。

また、同じ試験場で打撃工法で施工した既往の鋼管径 800 mm の鉛直載荷試験¹⁰⁾と比較した結果を表-3に示す。表-3に示した支持力係数は先端抵抗力を $300 \times N \times A_p$ (N 値 50, A_p は鋼管断面積) で除したものである。なお、本工法では、杭の外側にもある程度のソイルモルタルがあるものと考えられるが、その分の面積はこの計算では考慮していない。表-3の比較から、本ケースの支持力係数は杭径の小さい打撃工法のそれとほぼ同等であった。

2. (1) 節で述べたように、一般的に打撃工法では杭径が大きくなるほど閉塞率が低下するので、鋼管径が 800 mm から 1300 mm まで大きくなると閉塞率が低下し、支持力係数はさらに小さくなると推定される。表-3の支持力係数の比較結果は、本工法の支持力係数が打撃工法のそれより大きくなる可能性が高いことを示している。

図-10 X線CT試験結果例 ($\phi 1300\text{B}$ 鋼管先端)

表-3 先端抵抗力の比較

ケース	本ケース	打撃工法
鋼管径	1300mm	800mm
第二限界荷重	10992kN	3700kN
支持力係数	166	147

5. おわりに

鋼管径1300 mm, 1600 mmの大口径に対して, 本工法で根固めが築造可能かを検証した. その結果, コアボーリングによって根固めが築造できていること, セメント量分析によって原地盤がソイルセメントに深度方向に均質に置換されていること, X線CT試験によって均質性が高いことがわかった. このような根固めが築造された結果, 打撃工法を上回る先端抵抗力発揮すると判断できる載荷試験結果が得られた. これらより, この工法が大口径杭の先端抵抗力を増大する工法であると判断できる.

ただし, WJのあとにCMJを用いるような二段階の噴射を前提とした場合の地盤の掘削状況などには未だ解明できていない現象がある. また, いくつかの異なった地盤条件における施工と載荷試験を行い, 本工法の施工の確実性を把握することが必要であると考えている. また, 根固めの有する本来の耐力性能が確認できるように, 根固めの破壊が先行して生じるような硬質地盤でも載荷試験を実施することが必要であると考えている.

謝辞: 本研究は(独)港湾空港技術研究所, 調和工業(株), 新日鉄住金(株)の共同研究による成果の一部である. ご尽力頂いた方々に深く感謝申し上げます.

参考文献

- 1) 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パイプロハンマ工法の開発, 港湾空港技術研究所資料, No.1196, 2009.
- 2) 菊池 喜昭, 水谷崇亮, 森川嘉之: 開端杭の支持力推定式の評価, 第 65 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.601-602, 2010.
- 3) 齊藤竜司, 日下部治, 菊池 喜昭, 福井次郎, 下司弘之, 佐々木宏, 吉澤幸仁, 才村幸生: 東京港臨海道路における先端補強金物を施した鋼管杭の支持力, 第 40 回地盤工学研究発表会, No.841, pp.1681-1682, 2005.
- 4) 上菌晃, 竹澤一彦, 滝口要之助, 高橋邦夫, 山下久男, 西村真二: ジェットパイプロ工法で施工した栈橋鋼管杭の支持力とその増大工法について, 土木学会論文集, No.700, Vol.54, pp.15-29, 2002.
- 5) 森安俊介, 菊池 喜昭, 森川嘉之, 水谷崇亮, 武野正和, 高橋健二, 横山博康: ウォータージェット併用パイプロハンマ工法で打設した杭の根固め築造過程に関する模型実験, 第 39 回海洋開発シンポジウム (投稿中), 2014
- 6) G. Modoni, P. CROCE, L. MONGIOVI: Theoretical modelling of jet grouting, *Géotechnique*, Vol.56, pp.335-347, 2006.
- 7) 社団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.321, pp.584, 2007.
- 8) 社団法人セメント協会: 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告, 1967.
- 9) 森安俊介・菊池 喜昭, 水谷崇亮, 森川嘉之, 武野正和, 横山博康: ウォータージェット併用パイプロハンマ工法で施工した先端根固め鋼管杭の軸方向抵抗力の評価, 第 58 回地盤工学シンポジウム, pp.13-18, 2013.
- 10) 高橋健二, 赤司有三, 齊藤勲, 土屋正幸, 塩津紀男, 亀山彰久: パイプロ施工鋼管杭の支持力式の提案, 第34回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1437-1438, 1999.

PERFORMANCE VERIFICATION IN ACTUAL SIZE ABOUT THE PILE WHICH HAS SOIL CEMENT BLOCK ON THE TIP DRIVEN BY VIBRATORY PILE DRIVING WITH WATER JETTING

Kenji TAKAHASHI, Yoshiaki KIKUCHI, Takaaki MIZUTANI,
Yoshiyuki MORIKAWA, Hiroyasu YOKOYAWA, Shunsuke MORIYASU,
and Masakazu TAKENO

Recently, there is a tendency that piles diameters of the foundation for the port structure is getting larger, because the scale of the port structures is bigger, the water depth of quays is deeper, and the structure system is getting rationalized. On the other hand, the large diameter pile which is driven by the traditional impact hammer or vibratory pile driving with cement milk jetting is difficult to perform high bearing capacity. In addition, the vibratory pile driving with water jetting and constructed soil cement block on the pile tip, which the authors have confirmed the performance in smaller than 1000 mm diameter, has not been confirmed that it is possible to construct the soil cement plug for the large diameter pipe piles. In this situation, the authors have studied the constructing process of soil cement block by water and cement milk jetting, and developed the more suitable method for large diameter pipe piles. In this paper, the validation test for the piles driven by this method is shown. Its test is consisted of boring, unconfined test and X-ray computed tomography test for the soil cement block. As a result, it is confirmed that this method is effective for the large diameter pipe piles.