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杭の根固め築造過程に関する模型実験

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

¹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

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

⁴ 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

⁵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

⁶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

⁷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

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根固め杭は、港湾域において騒音・振動を抑制し、高い支持力が得られることがすでに示されている。しかし、この工法の根固め築造過程は十分に研究されていない。そこで、遠心模型実験および模型土槽実験を通じて、現象解明を試みた。その結果、ジェットグラウト工法に関する知見を展開することで、ウォータージェットの地盤掘削を定量的に整理できることを示した。さらに複数のウォータージェットで掘削する場合、掘削が促進される可能性が推測された。また、鋼管径が大きい場合に適応したウォータージェットのノズルの配置やノズル径の仕様を見出し、小規模な現場根固め築造実験によって、根固めが築造できることが確認された。

Key Words : vibratory pile driving with waterjet, soil cement block, steel pipe pile, model experiment

1. はじめに

近年、港湾地域における都市化の進展に伴って、騒音・振動が問題になり、鋼管杭の一般的な工法である打撃工法が適用できないケースが増加してきている。その対策としてウォータージェット併用バイブロハンマ工法があるが、ウォータージェット（以下、WJ）で地盤を乱して施工することから支持力性能が低下する。このような背景のもと、WJの掘削性能を活かしながら、先端にソイルセメントの根固めを築造し、かつ杭周面にセメントミルクを注入することで、騒音・振動問題を回避すると同時に周面抵抗力和先端抵抗力の大きな先端根固め鋼管杭工法（以下、本工法）が開発されている¹⁾。根固

めの築造過程は、図-1に示すように、根固めを築造する範囲の地盤をWJで乱したのち、セメントミルクジェッ

- ①～② バイブ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

ト(以下, CMI)に切り替え, ソイルセメントの根固めを造成するものである. 杭の先端部には, 図-2に示すように, 鋼管の外周面に噴射ノズルとリブプレートが取り付けられている(以下, 従来仕様). この噴射ノズルから水及びセメントミルクを噴射して根固めを築造し, リブプレートによって根固めを拡張している. 本工法で打設された杭が支持杭として機能を果たすには, 鋼管内部をソイルセメントで充填して閉塞させ, 強固な根固めを築造することが重要である. しかしながら, これまでに鋼管径1000 mmまでの範囲で現場試験によって施工性や支持力が確認されているものの, 根固めの築造過程は十分に研究されていない. また鋼管径が1000 mmを超える大口径については, 従来仕様で根固めが築造できるかは不明である. そこで, 筆者らは根固めの築造過程を解明し, さらに大口径に対する従来仕様の適用性の把握及び, より適した仕様の検討を目的に, 模型実験を行った.

2. ジェットグラウト工法に関する既往の研究

対象となる工法は異なるが, 地盤改良の一種であるジェットグラウト工法に関して, Modoniらは砂, 粘土, 礫それぞれの地質に対して, 地盤掘削の原理を整理している²⁾. このうち, 本稿で研究対象としている砂質土について述べると, ジェットグラウトによって大きなエネルギーが付加されれば, 過剰間隙水圧が上昇して有効応力が減少するので, 粒子間の結合が弱まり, 掘削されるというものである. この原理に基づき, 式(1)が提案されている. これは, 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ものである.

$$x = \frac{2\Lambda d_0 C v_0}{\sqrt{\frac{\Omega_s g N}{\gamma_f} \frac{c + \sigma_z \tan \phi'}{1 + \Omega_s [\tan(\phi')/2]}}} \quad (1)$$

ここで, x は掘削距離, d_0 はノズル径, v_0 は噴射流体の初速, c は粘着力, ϕ' は有効応力基準に基づくせん断抵抗角, σ_z は全応力, γ_f は噴射流体の重量密度, 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), C は流体内の抵抗による速度減少比率(水では0.92程度), N は流体の粘性に伴う比率(水を10とし

図-2 杭先端部の外観写真およびノズル配置

グラウトでは46程度), Ω_s はエネルギー逸散や噴射流体の逸散に伴う係数(砂では0.2程度), P は噴射圧である.

本稿で取り扱う実験の条件を考慮して, 式(1)を次のように変換した. 初速 v_0 は式(2)の関係³⁾を用いて噴射圧 P に置き換え, C , Ω_s , N は式(3)のようにまとめた. 式(1)の右辺分母内の $1 + \Omega_s [\tan(\phi')/2]$ の平方根は最大でも約1.04 ($\phi = 45^\circ$ のとき)で $\Omega_s [\tan(\phi')/2]$ の影響は小さいので無視し, ここでは1.0とみなした. また, 砂質土なので粘着力 c は無視した. この結果, 式(4)が得られた(以下, 掘削式). 掘削式の妥当性を検証するため, WJによる地盤掘削の実験を実施したので, 次章に述べる.

$$v_0 = \sqrt{\frac{2Pg}{\gamma_f}} \quad (2)$$

$$A = 2C \times \sqrt{\frac{2}{\Omega_s \times N}} \quad (3)$$

$$\frac{x}{d_0} = A\Lambda \sqrt{\frac{P}{\sigma_z \tan \phi'}} \quad (4)$$

3. 単数のノズルによる地盤掘削実験

(1) 実験方法

本工法の従来仕様では鋼管の先端に複数のノズルがあるため, その掘削現象は複雑であると考え, まず単数のノズルのみによる地盤の掘削状況を観察した. 掘削式に全応力が含まれていることから, 実験には港湾空港技術研究所所有の遠心模型実験装置を用いて, 地盤の拘束圧の影響を検討した. 実験土槽の概要図を図-3に示す. 土槽(内寸高さ600 mm, 幅1200 mm, 奥行き200 mm)を3つに仕切り, あらかじめ, 各仕切り内に水を噴射するジェット管と間隙水圧計を1つずつ, 中央の仕切り内には土圧計を深度方向3か所に配置したうえで, 地盤を作製した. 地盤材料には飯豊珪砂7号を用いて相対密度90%を目安に空中落下

図-3 実験土槽の概要図

法で地盤を作製後、1 G場で間隙の空気を炭酸ガスに置換し、間隙流体として脱気水を土槽下部から注水して飽和状態とした。土槽の側面はアクリル板になっており、ジェット管をアクリル板に沿って設置することで、掘削状況を観察可能である。

WJは、別室のタンクに貯めた水をコンプレッサーで圧送した。つまり本実験では、遠心加速度によって拘束圧を変化させた地盤に対して、水を噴射し、掘削範囲がどのように変化するかを検討することになる。なお、噴射圧は土槽天端位置の圧力計で測定し、流量は貯水タンクの水位変化から算出した。

(2) 実験結果

実験ケース及び結果を表-1に示す。全4ケース行っており、ケースC1を実施後、地盤を再度作製しケースC2～C4を同じ土槽で実施した。掘削状況の1例として、図-4に、ケースC3の噴射終了直前における掘削状況を示す。土槽のアクリル板に結露が生じたため、写真はぼやけているが、ノズル孔からのWJによって、地盤が掘削される様子が観察された。ここでは、目視で掘削されたことが識別できる範囲を掘削範囲とみなし、その範囲内でノズル孔と最も遠い地点との距離を掘削距離、最も幅の広い部分の水平距離を最大掘削幅と定義する。各ケースの掘削距離と最大掘削幅は表-1に示す通りであり、いずれも噴射終了時点の値である。

表-1 実験ケース及び結果

ケース 項目	C1	C2	C3	C4
ノズル径(mm)	1.0	2.0	2.0	2.0
遠心加速度(G)	1	10	20	40
ノズル孔位置の 全応力(kPa)	1.2	45.9	103.1	213.4
噴射圧(kPa)	691	448	555	853
流量(cm ³ /s)	21.6	71.1	70.6	60.4
ノズルの損失係数	0.74	0.76	0.67	0.47
掘削距離 (mm)	233 以上	56	34	15
最大掘削幅 (mm)	121 以上	30	18	12

図-4 ケースC3の掘削状況（噴射終了直前）

噴射状況はモニターで監視し、掘削範囲が徐々に拡大した後、拡大が収まり掘削範囲が一定になったことを確認して、噴射を終了している。遠心加速度によって全応力の大きいケースほど、掘削距離が短くなる結果となった。なお、ノズル孔位置の全応力お深度で測定した土圧から線形近似で算出し、ノズルの損失係数は式(5)より求めた⁴⁾。

$$Q = n \times A_n \times \sqrt{2Pg / \gamma_f} \times 10^{-3} \quad (5)$$

ここで、 Q は流量、 n はノズルの損失係数、 A_n はノズルの断面積である。

(3) 掘削式の妥当性の検証

掘削式において、全応力をノズル孔位置の土圧から求め、せん断抵抗角を式(6)⁵⁾により、相対密度 $Dr=90\%$ という条件より算出した結果、図-5 のようになった。

$$Dr = 28.0 + 0.15\phi' \quad (6)$$

各データが直線状に位置していることから、ケース間の全応力の違いを掘削式で考慮できていると考えられる。なお、ケースC1の遠心加速度は1Gで土圧が小さく、土槽の下端まで掘削されており、土槽が深ければ233 mm以上掘削された可能性がある。その場合、このプロットは図-5中
で上方に移動することも考えられる。

4. 複数のノズルによる地盤掘削実験と大口径に適したノズル配置の検討

(1) 実験方法

次に、鋼管杭の先端に複数のノズルがある場合について、WJによる地盤の掘削状況を調べた。実験は、土槽（奥行き 700mm、幅 1500mm、高さ 1000mm）に砂地盤を作製し、軸方向に半割り状にした鋼管を、土槽側面のアクリル板に沿って深度 0.5m まで WJ 併用パイプロハンマで打設後、定位置で噴射した WJ の掘削状況を観察するものである。ノズルは、アクリル板に接する部分の両側に各 1 本

図-5 掘削式による実験結果の整理

ずつ設置してある。地盤材料には鹿島珪砂5号を用いて水締めしており、相対密度は約54%である。この実験方法や地盤材料は、既往の研究成果との比較ができるように、筆者らが実施した既往の実験⁹⁾と同じにした。表-2には、鋼管径とノズル径、噴射圧について既往の実験ケースと今回の実験ケースの条件を示した。ケースHA1~HA3, HB1は従来仕様を模擬して、鋼管の外周面のノズルから鉛直方向に水を噴射するケースである。なお、水平内側噴射のノズルは鋼管内部を洗浄し、ソイルセメントと鋼管の付着力を高めることを目的としているので、ここでは省略している。ケースHC1, HC2は、より大口径に適した仕様を検討するケースである。HC1ではノズルを鋼管内側向きに18度傾けており、HC2ではHC1に対して鋼管中央にもノズルを追加した。

(2) 実験結果

実験では噴射圧を段階的に増加させ、各噴射圧で約2分間保持して掘削の広がり収まった時点で、掘削範囲をスケッチした。掘削状況の一例を図-6に示す。ここで、掘削範囲の線上の数値は、噴射圧である。ケースHA1では、WJによって鋼管下方が全体的に掘削されていることがわかる。一方、鋼管径を318 mmに拡大したケースHB1では、2つのノズルのWJによる掘削範囲は重なり合わず、鋼管下方全体は掘削されていない。このため、大口径では根固めが築造できない可能性がある。

次に、鋼管外周面のノズルの噴射方向を斜め内向きにして中央部の掘削性を高めることを狙ったケースHC1では、図-7(a)に示すように、掘削範囲が重なり合わないという問

題は解消したが、掘削範囲が下方に進むにつれて狭くなり、十分な深さまで杭径範囲を掘削できない状況であった。そこで、中央部にノズルを追加し、ノズル径を20mmから25mmに拡大したケースHC2を行った。その結果、図-7(b)に示すように、小さい噴射圧0.45 MPaで掘削範囲が重なり合い、中央部まで全体的に掘削された。このように掘削形状が良好であることから、ケースHC2が大口径に適していると判断される。すなわち、大口径杭の場合には、杭の中心部分からも水を噴射することが必要であると考えられる。

(3) 掘削式を用いた分析

掘削式において、全応力は地盤の飽和単位体積重量より10.1 kPa、せん断抵抗角は式(4)より 36.2° 、損失係数は式(5)より、それぞれ求めた結果、各ケースは図-8のように整理された。なお、前節のケースHC1については、個々のノズルのWJによる掘削距離が明確な0.25 MPaと0.5 MPaのみ扱い、ケースHC2については個々の掘削距離の判別が付きにくいので、除外している。図中には3章のデータ及びその線形近似直線も示している。図-8より3章の遠心模型実験と本章の実験結果の相関性は高く、全応力やせん断抵抗角といった地盤条件や、ノズル径や噴射圧といった噴射条件の違いを、掘削式で考慮可能といえる。線形近似直線の勾配より、式(4)のAは12.37が目安とみられ、算定過程より損失係数はおよそ0.76である。また、線形近似直線に対してケースHA2やHA3はやや高位に位置し、ケースHB1も噴射圧が高くなると勾配が急

表-2 実験ケース

ケース	鋼管径 (mm)	ノズル径 (mm)	噴射圧 (MPa)	備考
HA1	102	1.0	1.0~3.0	既往の実験
HA2	102	1.3	1.0~3.0	〃
HA3	102	2.0	0.5~2.0	〃
HB1	318	2.0	0.3~1.6	今回の実験
HC1	318	2.0	0.25~2.0	〃
HC2	318	2.5	0.3~1.7	〃

(a) ケース HA1 (噴射圧 3MPa) (b) ケース HB1 (数値は噴射圧)

図-6 実験結果例 (掘削状況)

(a) ケースHC1 (数値は噴射圧) (b) ケースHC2 (数値は噴射圧)

図-7 大口径に適したノズル配置検討の掘削結果

図-8 掘削式を用いた掘削距離の整理

になり高位に移行している．これは地盤条件やWJの条件に比して，掘削距離が長いことを意味している．このことから，複数のノズルがある場合，隣り合う掘削範囲が近付くと，それらの中間部の地盤抵抗が低減し効率的に掘削される可能性が推測される．次に掘削距離と最大掘削幅の関係を図-9に示す．3章の遠心模型実験と本章のケースHB1の相関が高いことから，掘削距離に応じて最大掘削幅が決定され，地盤やWJの条件の影響は小さいとみられる．図中には，ケースHB1の線形近似直線を一点鎖線で示しており，その勾配は点線で示した3章のデータの線形近似直線より大きい．これは前述同様，隣り合う掘削範囲が近付くと，それらの中間部の地盤抵抗が低減することで，最大掘削幅が長くなっている可能性を示唆していると考えられる．

5. 根固め築造実験

(1) 実験方法

前章まではWJのみの実験であったが，本章ではセメントミルクも噴射し，大口径仕様案による根固め築造可否を検討することを目的に，現地盤で小規模な根固め築造実験を実施した．現地盤はN値10前後の砂質土である．実施工では鋼管径1600 mmを適用することを想定し，約1/5スケールの鋼管径318 mmを用いた．相似則は掘削式を用いて，実大と本実験で鋼管径に対する掘削距離の比率を一致させることを重視し，根固めを築造する深度やWJ及びCMJの噴射圧，ノズル径を表-3のように設定す

図-9 掘削距離と最大掘削幅の関係

表-3 相似則

	実大	本試験	本実験／実大
鋼管径	1600 mm	318.5 mm	0.2
掘削深度	20 m	3.8 m	0.19
噴射圧	10 MPa	2 MPa	0.2
ノズル径	10 mm	2 mm	0.2
掘削距離比	1.0	0.2	0.2

ることで，本実験の掘削距離比が実大の約0.2 倍となることを狙った．なお，せん断抵抗角の相違については考慮していない．

試験ケースは，図-10に示すように，従来仕様を模擬したケースF1と，大口径仕様を模擬したケースF2の2ケースである．前章では水平内側噴射のノズルを省略していたが，本実験ではソイルセメントと鋼管の付着力を高めるため，管内洗浄用に水平内側噴射のノズルも取り付けしている．

施工プロセスは図-11に示した本工法の工程に準じ，WJを併用してパイプロハンマで深度38 mまで鋼管杭を打設後，CMJに切り替えて3D分引抜き（Dは鋼管径），その後2D分沈設して打ち止めた（深度約35 m）．セメントミルクは水セメント比200 %とし，その流体の粘性は水と同等とみなした．また，鋼管周面にはセメントミルクを注入していない．

(2) 実験結果

打設後に約40日間養生し，杭を掘り起こした．根固めの外観写真を図-11に示す．ケースF1では鋼管端面が露出しており，根固めが確認できなかった．一方，ケースF2では鋼管先端から1Dの深さまで根固めが築造できており，大口径に対して有効である可能性が示された．

(3) 根固めの築造に関する考察

掘削式及び図-9に示した掘削距離と最大掘削幅の係数に基づいて，ケースF2の個々のノズルのWJによる掘削範囲を推定すると，図-12のようになる．ここで，鋼管内側の断面積に対する掘削投影面積の割合を算出すると，約 12%となった．この割合は非常に小さいと考えるが，それにも関わらず，根固めが築造されている．このことから，4章で推察したように，隣り合う掘削範囲の中間の地盤抵抗も低減し，全体的に攪拌されることで，根固めが築造されると推定される．また，ノズルの配置も重要であり，鋼管外周面だけ

図-10 各ケースのノズル配置

図-11 掘り起こした根固め

図-12 個々のWJによる掘削の推定範囲

でなく、中央部にも配置し中央部の掘削性を高めることが、根固めの築造に寄与すると推察される。

6. おわりに

WJ併用バイプロハンマ工法で打設した杭の根固め築造過程を解明するため、模型実験に取り組んだ結果、ジェットグラウト工法に関する既往の知見を活用することで、WJによる地盤掘削を定量的に整理できることが示された。その上で、複数のノズルがある場合、隣り合う掘削範囲の間の地盤抵抗が低減し効率的に掘削されることや、それに伴って全体的に攪拌され根固めが築造されることが推察された。また、鋼管径が大きい場合、より大口径に適した仕様案を見出し、模型スケールで有効性を確認した。

筆者らは、大口径仕様案を用いて、鋼管径1300 mm及び1600 mmの確認試験を実施し、根固めが築造できることを確認している⁶⁾。また、その先端抵抗力は打撃工法のそれを上回る可能性が示唆されている⁷⁾。本論文の知見に基づき、強固な根固めが築造できることが実証されており、今後、先

の推察を深めることや、異なる地質等の施工データの拡充に取り組んでいきたい。

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バ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) G Modoni, P. CROCE, L. MONGIOVI : Theoretical modelling of jet grouting, pp.335-347, Géotechnique, Vol56, 2006.
- 3) 八尋暉夫, 吉田宏, 西謙治：ウォータージェットを利用した地下工法, pp.1, 鹿島出版会, 1983.
- 4) 安藤常世：工学基礎流体の力学, pp.62-70, 培風館, 1984.
- 5) 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, 2007.
- 6) 高橋健二, 菊池 喜昭, 水谷崇亮, 森川嘉之, 横山博康, 森安俊介, 武野正和：実大施工試験によるウォータージェット併用バイプロハンマ工法で打設した先端根固め杭の性能検証, 第39回海洋開発シンポジウム, 2014 (投稿中)
- 7) 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バ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, pp.13-18, 第58回地盤工学シンポジウム, 2013.

MODEL EXPERIMENT ON THE CONSTRUCTING PROCESS OF SOIL CEMENT BLOCK WHICH WAS POSITIONED ON THE TIP OF THE PILE DRIVEN BY VIVRATORY PILE DRIVING WITH WATER JETTING

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

It has been shown already that the pile driven by the vibratory pile driving with water jetting and constructed soil cement block on the tip can reduce sound and ground vibration, and perform high bearing capacity. However, the construction process of the soil cement block on the pile tip hasn't been relieved. Because of this situation, the authors have tried to clarify the mechanism of that by the centrifuge model test and model tank test. As a result, it is shown that the length which water jet excavates can be analyzed quantitatively by the previous research about jet grouting. And, in the case of multiple water jet, it is presumed that the soil strength of the gap between the excavation area decrease and the excavation progresses more efficiently. Finally, the authors have made a design about the suitable specification for the large diameter pipe pile, and confirmed that this can construct the soil cement block for the large diameter pipe pile by the model field test.