

技術論文

港湾施設向け低振動・高支持力杭工法 (RSプラス®工法) の開発

Development of New-type Steel-pile Method for Port Facilities

森安俊介* Shunsuke MORIYASU	久保田一男 Kazuo KUBOTA	石濱吉郎 Yoshiro ISHIHAMA	田中隆太 Ryuta TANAKA
武野正和 Masakazu TAKENO	西海健二 Kenji NISHIUMI	妙中真治 Shinji TAENAKA	原田典佳 Noriyoshi HARATA

抄 録

港湾施設の建設における杭施工において、打撃工法の振動、騒音が問題になるケースが増加しており、低騒音、低振動で施工できる工法が求められている。また、国主導のバルク港湾戦略により、大型船に対応するために岸壁の大水深化が進むとともに、構造合理化を目的とした杭本数の削減のため、杭に求められる支持力が大きくなっている。このようなニーズに対応するため、パイプロハンマ工法をベースに、セメントミルクジェットを用いて杭先端に拡大根固め部を築造することを特徴とする“RSプラス®工法”を開発した。本工法の施工方法を確立するとともに支持力性能を検証し、最大径1600mmまでの適用を可能にした。

Abstract

A pile driving method with small noise and small ground vibration is needed in port area, because the noise and ground vibration caused by the hammer are problematic for neighboring industrial plants and residential area. In addition, there is a tendency that the scale of port structures is bigger, the water depth of quays is deeper and the structure system is getting rationalized. Because of these situations, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation has developed on the vibratory pile driving with water and cement milk jetting. This “RS plus™” method can reduce the ground vibration and noise, and has possibility to get large bearing capacity. This paper shows the construction process of this method, the evaluation of the bearing capacity in the range of maximum 1600 mm diameter piles.

1. 緒 言

近年、臨海部の再開発が進み、居住域や工場が港湾施設に近接するようになってきている。そのため、港湾における鋼管杭の施工では、騒音、振動の問題から、従来の打撃工法が適用できないケースが増えている。また、港湾の国際競争力強化を目的にしたバルク戦略港湾等をはじめとして岸壁の大水深化、施設の大型化が進むとともに、経済性の観点から構造の合理化も求められている。そのため、鋼管杭1本当たり求められる支持力が大きくなり、杭が大径化する傾向にある。

このような背景のもと、新日鉄住金(株)は、(国研)港湾空港技術研究所、調和工業(株)と共同で“RSプラス®工法”を開発した^{1,2)}。本工法は、ウォータージェット(以下、WJ)及びセメントミルクジェット(以下、CJ)を併用した

パイプロハンマによって、ソイルセメントによる根固めを築造する鋼管杭工法である。パイプロハンマを用いることで打撃工法よりも振動、騒音を抑制し、根固めを築造することで高い支持力が得られる。RSプラス工法は、2009年に鋼管径1000mm程度までを適用杭径として市場に投入し、2014年には最大1600mmに拡大している。

本工法では根固めを確実に築造する技術がポイントとなる。従来、ジェットを併用したパイプロハンマ工法では地盤を緩めるため、支持力を得にくいことが報告されている中³⁾、高支持力を実現するために強固な根固めを築造する必要がある。そのため、開発においては、ジェットによる根固め築造現象の解明と得られる支持力の評価を重視した。本報では、工法概要を説明し、技術背景となる開発成果を示したのち、適用事例を紹介する。

* 鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主任研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

2. 工法概要

2.1 施工方法

本工法の施工手順を図1に示す。まず、WJを併用したパイプロハンマによって、杭径 D の3倍程度の深さまで支持層に杭を貫入させ（図1①～③）、杭先端付近の地盤を十分に切削する。その後、WJをCJに切り替え、パイプロハンマで杭を振動させながら、杭先端が支持層上面に達するまで杭を上昇させ（図1④～⑤）、再び支持層上面から $2D$ の深さまで沈設する（図1⑥）。このようにCJを併用して杭を上下動することで、地盤とセメントミルクが攪拌、混合され、根固めが築造される。周面抵抗力が必要な場合は、ジェット管を引抜きながら、鋼管の周面にセメントミルクを充填する（図1⑦）。

本工法の施工設備は、図2に示すように、杭を打設するパイプロハンマとクレーンのほか、WJとCJのための水セメントミルク送出装置やミキシングプラント等から構成される。なお、図2は台船を用いた海上施工の概略図であるが、岸壁沿いの陸地から施工することも当然可能である。

地盤とセメントミルクによるソイルセメントを均質に造成するために、セメントミルクの圧送流量、圧送圧力、WJとCJの切り替えのタイミングを制御して、鋼管杭の径に応じて注入するセメントミルク量を規定している。また、パイプロハンマにレーザー距離計を付設して、杭の打設深度と速度を管理する。

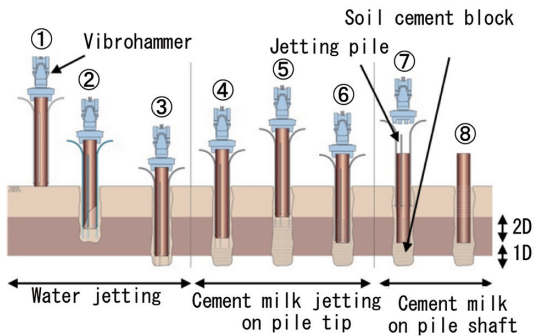


図1 施工手順
Construction process

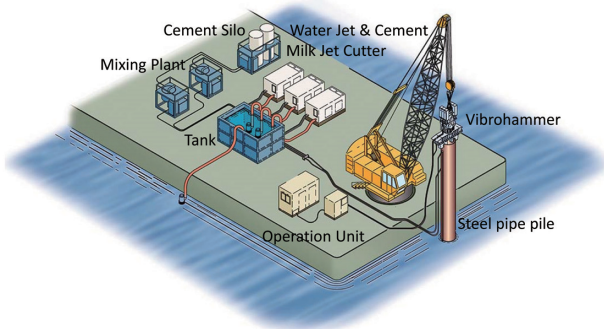


図2 施工設備
Construction facilities

2.2 杭構造

杭先端部の構造には、適用条件に応じて次の2種類がある。

(1) 鋼管外周リブプレート方式

図3に示すように、鋼管の外周面にリブプレートを放射線状に付設し、WJ及びCJのノズルを鋼管先端部の周面に配置する（以下、外リブ方式）。この方式は鋼管径1000mm以下の中小径に適しており、リブプレートの水平方向の長さは、根固めの底面積が鋼管自体の閉塞面積の2倍程度になるように設定する。鋼管径に比して大きな根固めを築造することで支持力を確保できる。

(2) 鋼管内面リブプレート方式

図4に示すように、鋼管の内面を分割するようにリブプレートを付設し、ノズルは鋼管周面及びリブプレートに配置する（以下、内リブ方式）。この方式は、鋼管径1000mmを超える大径杭であっても確実に根固めを築造するために、リブプレート上のノズルによるWJ、CJで杭中央部

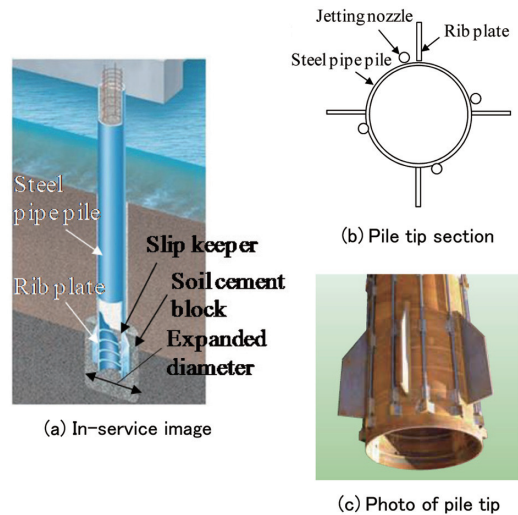


図3 鋼管外周リブプレート方式（外リブ方式）
Outer rib plate type

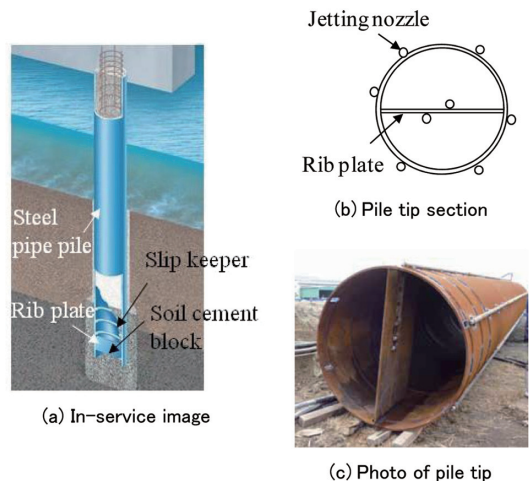


図4 鋼管内面リブプレート方式（内リブ方式）
Inner rib plate type

の地盤を直接的に切削、攪拌する。

なお、いずれの方式においても、鋼管とソイルセメントがより確実に一体化するように、鋼管先端の内周面に複数段のずれ止め筋を設けている。

3. 開 発

根固めを確実に築造するには、鋼管径や地盤条件に応じてジェットの噴射圧や流量を適切に設定する必要がある。そのためには、まずジェットが地盤を切削する現象を明らかにしなければならない。そこで、(1) 模型実験でこの現象を把握したうえで、(2) 実大試験で実スケールにおける根固めの築造性を検証することとした。加えて、(3) 載荷試験によって支持力性能を明らかにした。(1)～(3)の各々について、以下に詳述する。

(1) ウォータージェットによる地盤切削範囲の明確化

模型実験は、単一ノズルの WJ による地盤切削の基礎実験と、複数ノズルと鋼管を用いて本工法を模擬した実験の 2 種類とした⁹⁾。まず、単一ノズルの実験では、遠心載荷装置に設置した土槽内に飽和砂地盤を作製し、土槽側面のアクリル壁に沿って図 5 (a) のようなノズルを配置した。遠心加速度 (1～40G) によって表 1 の Case 1～4 に示す土被り圧をそれぞれ作用させて、土被り圧と切削範囲の関係を観察した。実験結果の一例を写真 1 に示す。WJ による切削範囲は、ノズル孔下方の白っぽい滴状の範囲である。ここで、既往の知見⁹⁾では、砂質土の場合、WJ によって

大きなエネルギーが付加されると、過剰間隙水圧が上昇して有効応力が減少するので、土粒子間の結合が弱まり、切削が進行するとされている。また、その原理に基づいて、切削距離 R は、噴射圧 P や流量 (ノズル径 d_0) と、全応力 σ_z やせん断抵抗角 ϕ' といった地盤抵抗及び流体の損失係数 Λ から求まる。

この知見を参考に、各パラメータからなる無次元量で本実験結果を整理すると、図 6 の Case 1～4 のプロットになる。これらのプロットは直線上に位置しており、本実験の範囲においてこの知見の適用性は高いといえる。なお、既往の知見⁹⁾は深度 8m 以浅 (土被り圧 150kPa 程度) の範囲について現場実験で検証されているが、本実験ではより大きな土被り圧 213kPa においても適用性があることを遠心場で示した。また、写真 1 に示す最大切削幅は、いずれの Case も切削距離の約 0.6 倍で、切削範囲は滴状になることが確認された。従って、切削距離 R がわかれば、切削範囲が得られることになる。

次に、本工法を模擬した実験では、1G 場の飽和砂地盤の土槽内で、WJ によって根固め域を形成するのに十分な切削範囲が得られるか検討した。表 1 の Case 5～8 の試験杭は、図 5 (b) に示すように外リブ方式を模擬して鋼管先端の両端にノズルを付けた。比較的小径の Case 5～7 では、図 7 (a) に示すように鋼管杭の両端からの WJ による切削範囲が重なり合い、鋼管杭下方の地盤が全体的に切削された。

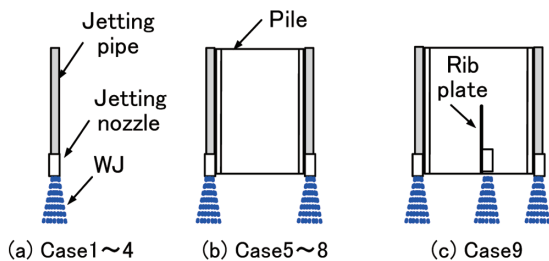


図 5 各 Case の WJ 概略図
WJ position of the experiment

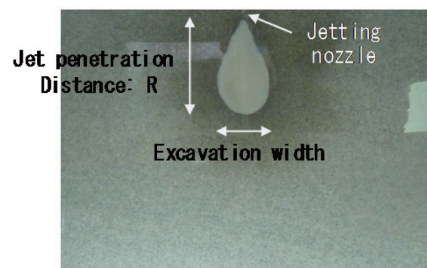


写真 1 実験結果例 (Case 3 の予備実験)
Sample of the centrifuge jetting experiment

表 1 実験ケース
Cases of water jetting experiment

		Pile diameter (mm)	Nozzle diameter (mm)	Injection pressure (MPa)	Soil total stress (kPa)
Centrifuge (1-40G)	Case1	-	1.0	0.69	1.2
	Case2	-	2.0	0.45	45.9
	Case3	-	2.0	0.56	103.1
	Case4	-	2.0	0.85	213.4
Sand box (1G)	Case5	101.6	1.0	1.0-2.5	10.1
	Case6	101.6	1.3	1.0-3.0	10.1
	Case7	216.3	1.0	1.5-3.0	10.1
	Case8	318.5	2.0	0.3-1.5	10.1
	Case9	318.5	2.0	0.3-2.0	10.1
	Case10	318.5	2.5	0.3-1.8	10.1

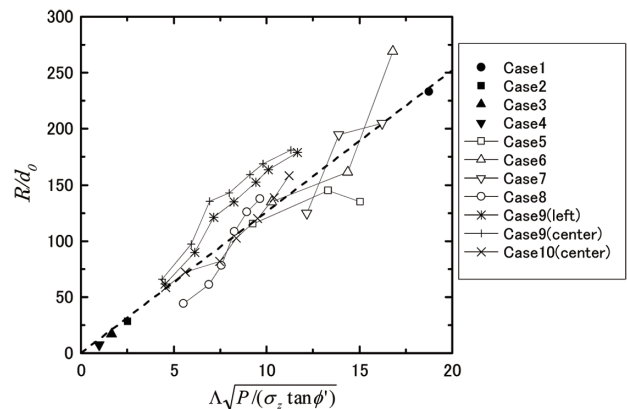


図 6 WJ 能力及び地盤抵抗と切削距離の関係
Relationship among the WJ specification, soil resistance and jet penetration distance

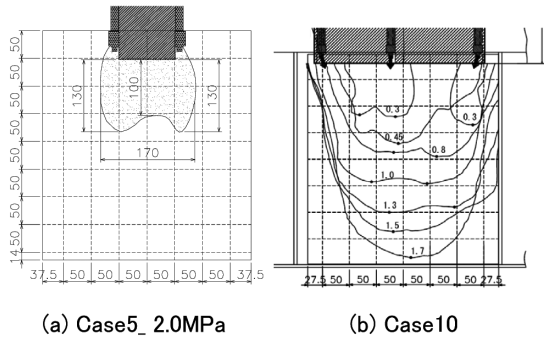


図7 実験結果例
Sample of the sand box jetting experiment

一方、大径の Case 8 では切削対象の地盤が広く、十分な切削範囲は得られなかった。そこで、Case 9 では内リブ方式を模擬して、図5(c)に示すように鋼管両端に加えて杭中心線上にもノズルを配置し、三連のWJとした。さらに Case 10 では、Case 9 の両端のWJの噴射方向を斜め内向きに変更して、中央部に向かうようにした。

その結果、これらの Case では各ノズルのWJによる切削範囲が重なり合い、図7(b)に示すように十分な切削範囲が得られた。図6には Case 5～10の結果もプロットしており、縦軸と横軸の指標に対して比例関係にあることから、前述の知見の適用性は高いと考えられる。また、同 Case 中でも噴射圧が高くなると、Case 1～4による点線に対して高位に移行する Case が多い。これは地盤やWJの条件に比して切削距離が長いことを意味している。このことから、隣り合う切削範囲が近付くとそれらの中間部の地盤抵抗が低減して、切削が促進される可能性が推測される。

以上より、模型実験の範囲で、既往の知見の適用性が高いこと、杭が大径の場合は内リブ方式が適していることがわかった。こうした知見を実施工に展開するため、次に実大の根固め築造試験を実施した。

(2) 実大試験による根固め築造性の確認

根固めの築造方法を確立するため、(i) 施工プロセスの検討、(ii) 根固めの出来形の確認、(iii) 支持層における根固めの確認を行っている。

(i) 施工プロセスの検討

新日鐵住金八幡製鉄所構内においてN値50未満の中間層で施工プロセスを検討したり。実験場所の地盤は礫や硬質な鉍滓を含み、比較的施工が困難な条件である。径800mmの外リブ方式の鋼管杭で、リブプレートの外径は1200mm(1.5D)である。本実験で検討した主な項目を結果とともに記す。

- 先端掘削の有無：図1③で貫入深度を短くして鋼管先端が定着深度に達したのち、1D深く貫入せずに、図1④の工程に移る場合、根固めは十分にできなかった。この場合、所定の支持力が発揮されない懸念がある。従って定着深度より1D深く貫入し、計画される根固めの下端から直

接的にセメントミルクを充填することが重要である。

- CJの上下回数：セメントミルクの注入量は同じで、図1④～⑥の上下動を2回に増やしたが、1回の場合と比べて根固めに顕著な違いがみられなかったため、CJの上下回数は1回でよい。
- ノズル配置と管内水平噴射：外リブ方式において、リブプレートの近くにノズルを配置すると、セメントミルクがリブプレートに沿って広がり、根固めが拡径されやすくなる。また、鉛直方向のWJとは別に、鋼管内に水平方向に吹き込むようにWJを施すと、管内の切削、攪拌が進み、以降のCJ工程においてソイルセメントで管内を閉塞させやすくなる。

(ii) 根固めの出来形の確認

次に、鋼管径が大きくなる場合、それに応じた根固めが築造可能か、鋼管径1000mm及び1600mmの杭を用いて検証した。いずれも新日鐵住金技術開発本部構内(千葉県富津市)の中間層地盤で実施している。地盤は図8に示すように砂質土主体で、比較的施工しやすい条件である。外リブ方式の鋼管径1000mmの杭では、写真2に示す通り鋼管外側のリブプレートを覆うように根固めが築造されていること、内リブ方式の鋼管径1600mmの杭では鋼管内がソイルセメントで置換され、閉塞状況が良好であること²⁾を確認した。

(iii) 支持層における根固めの確認

最後に、支持層まで打設した杭については、掘り起こす

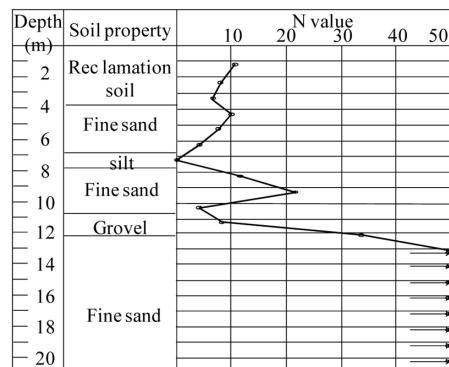


図8 土質柱状図
Soil condition



写真2 掘り起こした杭の根固め(鋼管径1000mm)
Photo of turned pile (D: 1000mm)

代わりに、鋼管内部をボーリングして根固め長さやソイルセメントの均質性等を調べている⁴⁾。一例として、鋼管径1300mmの杭について紹介する。実験場所は前述の技術開発本部構内である。杭構造は内リブ方式であり、ノズルの配置や孔径は図9に示すように設定している。図中のハッチングは、前節の知見に基づいて検討したWJによる切削範囲の予測である。施工後に鋼管内部をボーリングした結果、鋼管先端から1.5D深い位置まで、写真3に示すようなコアが採取されており、根固め長さは所定値1.0Dを満足していた。コア断面をX線CT装置で観察すると写真4に示すように、密度のばらつきが小さく、全体的に均質性が高いことが確認された。

以上より実大スケールで根固めが築造できることが確認され、前節の模型実験で得られた知見の展開や施工プロセスは妥当であることも示された。

(3) 支持力性能の評価

支持力性能は静的載荷試験で評価した⁶⁾うえで設計式を提案している。実験ケースを表2に示す。実施場所は前述の技術開発本部構内及び近隣地の2地点である。2地点の支持層(図8の深度12.3m以深)は同じ特性と判断し、同

じ地盤での比較とみなす。本工法 (Case A~C) のほか、比較対象として打撃工法で打設した杭⁷⁾ (Case D) も扱う。

(i) 先端抵抗力

杭先端における荷重沈下関係を図10に示す。ここで、Case A~Cの先端抵抗力は鋼管先端から2D上方(根固め上端)に貼り付けたひずみゲージから算出した軸力とし、Case Dの先端抵抗力は杭先端から5D上方(支持層上端)の軸力とした。図10から、Case A~Cでは杭径が大きくなるに従って先端抵抗力は大きくなること、同径のCase BとCase Dを比べると本工法で打設した杭の先端抵抗力は打撃工法よりも明らかに大きいことがわかる。

次に、極限状態における破壊形態が、地盤の破壊か、根固めの破壊のいずれであったかを推定する。ここでは、杭先端変位が0.1Dに達したときの杭先端荷重(第二限界荷重)を極限状態とする⁸⁾。表2に各Caseの第二限界荷重を示す。内リブ方式につき拡径効果の無いCase Cについて、第二限界荷重10992kNを鋼管閉塞面積で除すと8.2MPaになり、根固めから採取したソイルセメント供試体の一軸圧縮強度13.2~30.7MPaのほうが高い。従って、根固めは破壊されていないと考えられる。また、杭先端部の構造実

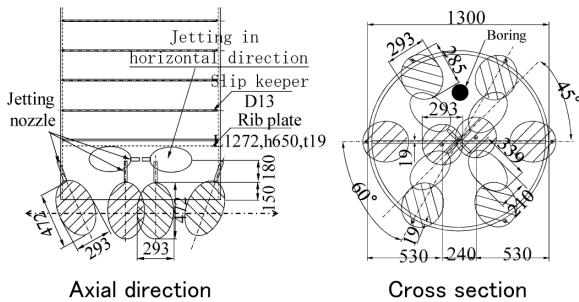


図9 WJ兼CJノズルの配置及び想定切削範囲
Position of jetting nozzle and supposed excavation area



写真3 鋼管内から採取されたコア
Soil-cement core bored from pile

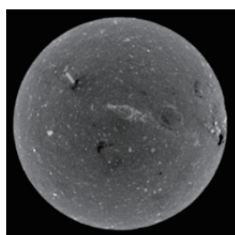


写真4 X線CT画像
X-ray-CT result of the core

表2 静的載荷実験ケース及び主要な結果
Test condition and main result of the static load test

Case	Case A	Case B	Case C	Case D	
D (mm)	600	800	1300	800	
Driving method	RS plus	RS plus	RS plus	Impact hammer	
Pile type	Outer rib	Outer rib	Inner rib	-	
Pile edge depth	G.L. -18.0m	G.L. -18.0m	G.L. -16.0m	G.L. -15.2m	
Pile end	Second limit resistance (kN)	6199	8767	10992	3700
	Coefficient of resistance	438	349	166	147
	Design value of coefficient of resistance	300	300	150	-

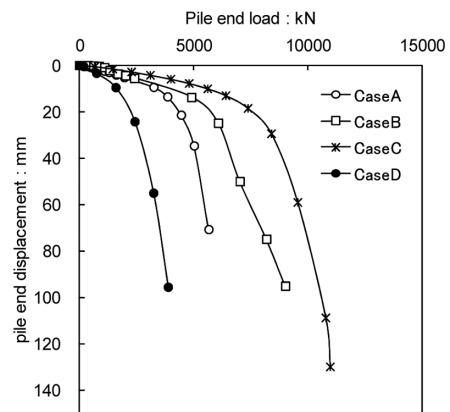


図10 杭先端の荷重沈下関係
Pile end load and pile end displacement

験りに基づき、ずれ止め筋の支圧耐力 R_i は (1) 式で設計している。

$$R_i = (D - 2 \times t - d_i) \times \pi \times d_i \times \sigma_p \times a \times n \times d_i \quad (1)$$

ここに本実験の数値である D : 鋼管径 (=1300mm), t : 板厚 (=25mm), d_i : 鉄筋径 (=13mm), σ_p : ソイルセメントの一軸圧縮強度 (=13.2MPa), a : 支圧倍率 (=4), n : ずれ止め段数 (=7) を代入すると、ずれ止め筋の支圧耐力 R_i は 18672kN となり、第二限界荷重 10992kN を大きく上回る。この点も根固めは破壊されていないことを示唆する。すなわち、第二限界荷重は地盤の破壊で決定されているとみられ、より硬い地盤ではさらに大きな支持力が得られる可能性がある。

(ii) 周面抵抗力

周面抵抗力度は、N 値 50 未満の各地層の区間周面抵抗力度を周面積で除して算出した。その結果、砂質土における周面抵抗力度は、図 11 に示すように N 値に比例する傾向がある。比較として図中には道路橋示方書⁹⁾に定められる場所打ち杭の設計ライン (砂・礫質土: 5N, $N \leq 40$) も示しており、各 Case の周面抵抗力度はそれを上回っていることがわかる。

また、粘性土における周面抵抗力度は、Case B で 41.3kN/m² (N 値で割戻すと 82.6N), 別途実施した試験¹⁾で 170.7kN/m² (同 50.2N) の全 2 個のデータしかないが、道路橋示方書に定められる場所打ち杭の設計値 10N をはるかに上回る。

(iii) 設計式

以上の試験結果を踏まえ、外リブ及び内リブ方式を包括した設計式として、(2) 式を提案している²⁾。

$$R = 300 \alpha N \beta A_p + \sum (r_{fki} A_{si}) \quad (2)$$

ここに、 R : 杭の支持力 (kN), N : 杭先端地盤の N 値 (≤ 50), A_p : 鋼管先端閉塞断面積, r_{fki} : i 層の杭周面抵抗力度 (kN/m²) [砂質土: 5N (上限 200kN/m²), 粘性土: c または 10N (上限 150kN/m²)], A_{si} : i 層において地盤と接している鋼管周面積 (m²) である。また α は同じ地盤であっても施工方法によって発現する抵抗力度が異なることを表現する係数であり、打撃工法を 1.0 とした場合、RS プラス工法では 0.5 に設定している。これは RS プラス工法の場合、

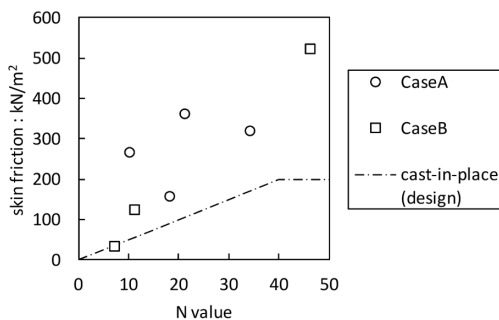


図 11 各砂質土層の地盤 N 値と周面抵抗力度の関係
Relationship between SPT-N and skin friction on sand

打撃工法のような管内閉塞に伴う排土効果を見込みにくい
ため、地盤強さを低減することを意味する。また β は杭先端形状による補正係数であり、外リブ方式では根固め底面積が鋼管閉塞面積の 2 倍に拡張される効果を見込んで $\beta=2.0$, 内リブ方式では拡張効果が見込まれないため $\beta=1.0$ とする。

先端抵抗力の支持力係数について、試験値と設計式の対比を表 2 に示す。表 2 の下から二段目の支持力係数 (試験値) は、第二限界荷重を鋼管閉塞面積と N 値 50 で除しており、表 2 最下段の設計値は (2) 式の $300\alpha\beta$ から求めた。この結果より、設計値は試験値より小さく安全側であり、外リブ及び内リブ方式の両者に対応していることがわかる。また、打撃工法との比較において、注目すべきは Case C と Case D の支持力係数が同等である点である。打撃工法の場合、杭径が大きくなるほど管内閉塞が生じにくくなり、先端抵抗力を得にくくなる⁸⁾。従って、この地盤で仮に打撃工法で径 1300mm の杭を打設する場合、得られる支持力係数は Case C の 166 より小さくなる可能性が高い。加えて、周面抵抗力度については、前述した本工法の設計値は、打撃工法の設計値^{8,9)} [砂質土: 2N (上限 100kN/m²), 粘性土: c または 10N (上限 150kN/m²)] と同等以上である。以上より、本工法で打設した杭の支持力性能は、打撃工法を上回る高支持力といえる。

4. 適用事例

4.1 唐津港東港地区岸壁 (-9m)

唐津港東港地区岸壁では、増大する内貿一般貨物の輸送効率化、大型旅客船の需要、震災時の輸送機能維持に対応するための複合一貫輸送ターミナル整備事業のひとつとして、老朽化した既存岸壁 (築 40 年) を耐震強化岸壁に改良している。

岸壁の鋼管杭には大きな押し込み抵抗力度が求められ、打撃工法の場合、風化岩 (風化花崗岩) からなる支持層に相当量の根入れを要するため、施工面の困難が予想された。この課題に対して、本工法は WJ を併用したバイプロハンマで支持層への打設が可能であること、CJ による根固めで大きな抵抗力度が得られるので打撃工法より根入れを短くできることから採用に至った。鋼管仕様は SKK490, 1300mm 径×22mm 厚、長さ 16.5~20.5m で、2010 年から 2014 年にかけて合計 62 本が施工された。施工状況を写真 5 に示す。なお、岸壁の耐震性向上のため、写真 6 に示すように水中ストラットと併用されていることも特徴である。

4.2 小名浜港東港地区岸壁 (-18m)

小名浜港は東日本のエネルギー (石炭) 供給を支える国際バルク戦略港湾であり、さらに安価で安定したエネルギー供給を実現するため、ケープサイズ船の満載入港を可能とする整備が進められている。その一環として、東港 (人



写真5 唐津港でのRS プラス工法施工状況
Construction of RS plus method on the Karatsu Port



写真7 小名浜港（東港地区）でのRS プラス工法施工状況
Construction of RS plus method on the Onahama Port



写真6 唐津港での水中ストラット据付状況
Installation of submerged strut members on the Karatsu Port

工島）地区に2020年度までに-18m水深の耐震強化岸壁を整備し、さらに将来的には-20m水深とする計画である。

東海岸壁の構造形式は、大径（1400mm、1500mm）の鋼管杭を3列に配置した栈橋形式で、鋼管杭には押し込み抵抗に加え、大きな引抜き抵抗が必要であった。RS プラス工法は先端抵抗に加え、周面抵抗も打撃工法より大きく取れるので引抜きに対して効果的であり、採用されることとなった。杭施工は2014年度から始まり、2015年5月で全10ブロックのうち2ブロック分の42本（1500mm径）の施工が完了した。写真7に施工状況を示す。2015年度はさらに5ブロック分105本分の施工が見込まれている。

5. 結 言

港湾域における低騒音・低振動工法や、港湾構造物の合理化に資する大径・高支持力化に応えるべく開発したRS プラス工法は、港湾プロジェクトにおいて着実に採用を増やしている。そのなかで、施工をより効率的かつ確実にを行うための改良点も明らかになっており、逐次、工夫を重ねている。今後も改良に努め、より一層、合理的、経済的な工法を提供する所存である。

謝 辞

本工法の開発においては、共同開発パートナーをはじめ、関係者の皆様に多大なるご協力を頂いた。特に、実大実験は非常に規模が大きいものであり、多くの方々にご尽力頂き、完遂することができた。ここに謝意を表する。

参照文献

- 1) 菊池喜昭 ほか：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) 水谷崇亮 ほか：ウォータージェットとセメントミルクジェットを併用したパイプロハンマ工法の大径鋼管杭への適用。港湾空港技術研究所報告。53 (3), (2014)
- 3) 上蘭晃 ほか：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。54 (700), 15-29 (2002)
- 4) 森川嘉之 ほか：複数の高圧噴射ノズルによる地盤の掘削・攪拌性能評価。港湾空港技術研究所資料。No.1293, 2014
- 5) Modoni et al.: Theoretical Modelling of Jet Grouting. Géotechnique. 56, 335-347 (2006)
- 6) 森安俊介 ほか：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。2013, p.13-18
- 7) 高橋健二 ほか：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。1999, p.1437-1438
- 8) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説。2007, p.584-605
- 9) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説。2007, p.377-402



森安俊介 Shunsuke MORIYASU
鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



武野正和 Masakazu TAKENO
建材事業部 建材開発技術部
土木基礎建材技術第二室 主査
(一般財団法人国土技術研究センター出向中)



久保田一男 Kazuo KUBOTA
建材事業部 建材開発技術部
土木基礎建材技術第二室 主幹



西海健二 Kenji NISHIUMI
大阪支社 部長



石濱吉郎 Yoshiro ISHIHAMA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主幹研究員



妙中真治 Shinji TAENAKA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主幹研究員
Ph.D.



田中隆太 Ryuta TANAKA
建材事業部 建材開発技術部
土木基礎建材技術第二室 主査
(一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会出向中)



原田典佳 Noriyoshi HARATA
建材事業部 建材開発技術部
土木基礎建材技術第二室長