明日を築く

寄 稿

港湾分野における性能設計・設計課題・鋼部材の活用方策の現状

国土技術政策総合研究所　港湾研究部　港湾施設研究室長
（京都大学 経営管理大学院 港湾物流高度化講座 客員教授）
宮田正史

未来 FRONT

Part 1

100年先を見越した首都高速の更新に多種多様な杭工法で貢献

高速1号羽田線（東品川桟橋・鮫洲埋立部）更新工事

Part 2

次の災害に備える治水工事から応急堤の築造まで幅広いニーズに応える鋼矢板

岡山県／高梁川・小田川の堤防機能強化から緊急対策工まで
河川の総合的な治水対策に鋼矢板が大規模採用

TECHNICAL NOTES

バイブロハンマ工法を用いた杭の支持力特性の評価

88

一般社団法人
鋼管杭・鋼矢板技術協会

ホームページ　http://www.jaspp.com/

（上）高速1号羽田線　鋼管杭打設状況
（下）小田川・川辺地区　鋼矢板の圧入状況

寄稿

港湾分野における性能設計・設計課題・鋼部材の活用方策の現状

国土技術政策総合研究所　港湾研究部　港湾施設研究室長
（京都大学 経営管理大学院 港湾物流高度化講座 客員教授）
宮田正史

1 はじめに

本稿は、港湾分野における性能設計の導入効果、国内における近年の港湾構造物に係る設計課題、港湾・海岸分野における鋼部材の新しい活用方策について、鋼部材（鋼管杭、鋼矢板等）に期待されることなどに触れつつ、情報提供や著者が日頃考えていることを私見として紹介するものである。

2 港湾分野における性能設計の導入効果

港湾施設の設計に関する技術基準（「港湾の施設の技術上の基準」）は、2007年に性能規定化され、それ以降発行された解説図書「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（2007年版及び2018年版[1)]）」も性能規定型の設計基準へと移行した。以下、港湾分野での性能設計の導入が設計実務に及ぼした影響やその効果について述べる。

■性能設計の導入効果[2)]

性能設計の枠組みでは、設計者（施設の発注者や管理者等を含む広義の概念）が施設の目的、要求性能、性能規定や維持管理方針等を明確に設定することが鍵となる。しかしながら、性能規定化以前の設計実務ではそれらの事項が必ずしも明確に設定されていない場合もあった。性能設計の導入により、「施設の目的は何であり、その施設に対してどのような性能を求め、その性能を満たすための性能規定は具体的にどのような指標・許容値で規定し、どのような照査方法で確認すべきか。」という、本質的に重要な内容について十分に議論・整理してから設計を進めることの重要性が、あらためて強く認識されるようになったことが設計実務に及ぼした最大の効果であると考えている。

■性能設計の導入効果の事例～耐震性能の追求～

例えば、耐震強化岸壁については、地震直後（レベル2地震動）にどのような性能を求めるかを設定する必要があるとともに、復旧に必要な施工計画・工程などの検討も必要となり、従前に比較すると、より綿密な検討が実施される傾向にある（例えば文献3））。また、従前は係留施設とコンテナクレーンは個別に耐震設計が行われていたが、両者の耐震性能が同時に確保されてはじめて荷役機能を維持することができるため、両者の耐震設計は一体として行われるようになった。図1に、桟橋とクレーンを一体として地震応答解析を行っている事例を示す[4)]。

同様の理由により、レベル1地震動に対する設計においても、従前はクレーン本体についてはクレーン構造規格（労働省告示）に定められている水平震度0.2を満足するだけでよかったが、現在は港湾ごとに定められているサイト特性を考慮した地震動（時刻歴波形）に対する照査も義務付けられている。この義務付けは、性能設計の導入後の技術基準改正（2010年）で盛り込まれたが、性能設計導入の一つの効果（性能に着目することにより、従前見落とされていた照査を浮き彫りにし、改善を図ることができる。）であると考えられる。

3 国内における近年の港湾構造物に係る設計課題

次に、国内における港湾構造物の設計課題について、以下の3項目を紹介したい。

■改良設計

近年、港湾分野では既存施設を対象とした利用転換、耐震化、船舶大型化への係留施設の増深などの改良事業が増加している。しかしながら、新規施設の設計と比較すると、既存施設を利活用した改良設計は非常に難しく、課題も多い。

事例として、経過年数50年を迎える矢板式岸壁に対して、さらに50年間の供用期間延長を目的として改良するとした場合に、想定される課題を図2に網羅的に示す[5)]。本施設は、当初、矢板壁本体（鋼部材）は腐食代による設計であったが、供用期間中の電気防食の施工により矢板の耐力には十分な余裕があり、延命化は可能であるとする。しかしながら、実際には様々な設計上の課題がある。例示すると、中規模地震の作用による残留応力が発生している可能性がある。また、矢板を支えるタイ材は土中にあり、全数調査が困難であるため、変状の発生の有無が確認できず、今後50年間に亘ってタイ材が性能確保できるか不明である。さらに、建設時点から50年間の時間経過のなかで、設計条件、設計法や新規施設に要求される安全性水準の変化により、改良時点の新しい設計法等を適用すると、大規模

な断面補強等の実施が必要となり、優良なストックを最大限に活用できなくなることも考えられる。さらには、施設を供用しながらの改良が要請される場合には、改良工法が極めて限定される。

このように、改良設計では、多くの制約条件が課される中で、個別事情に応じた丁寧な設計条件の設定および構造設計が求められる。性能設計を重視する立場からは、個別施設に求められる性能に着目し、丁寧に改良設計を実施すること自体は評価されるものの、一方では改良案件ごとに発注者と設計コンサルタントが試行錯誤しながら、場合によっては大きな手戻りも起こしながら設計を進めており、これを改善していくことも重要である。今後は、多数の改良設計事例の蓄積結果に基づき、性能設計と設計効率化のバランスを図れるように、改良設計の類型化・標準化を図っていく必要があると考えられる。

■重力式岸壁の増深ニーズへの対応

改良設計に関わる課題の一部ではあるが、重力式岸壁の増深に対するニーズは高いものの、直ぐに適用できる実績のある工法がないことも課題である。現在、有力な工法として[6]、図3に示す2つの工法がある。左図は、重力式岸壁の前面に鋼管矢板（または鋼矢板）を打設し、矢板前面を掘削することにより増深を図る工法である。右図は、基礎マウンドの一部に可塑性グラウトを注入してマウンドを固化し、岸壁前面の捨石の一部を掘削することにより増深を図る工法である[7]。いずれの工法も、静的な力の釣り合いに基づく設計法も検討されており、施工方法の確実性もあるが、地震時の破壊モード（脆性的な破壊の有無）や地震後の点検方法・復旧方法など、より現実的な耐震性能に着目すると検証が難しいこともあり、現時点では採用には至っていない。これら2工法を含め、重力式岸壁の増深ニーズに対応できる工法の確立、現地適用が大いに期待される状況にある。

■大規模地震・津波に対する設計技術の高度化

1995年兵庫県南部地震によって神戸港の係留施設は甚大な被害を受けた。その後、耐震強化岸壁については、レベル2地震動に対する変形量照査（2次元地震応答解析）が導入され、耐震設計は高度化した。視点を変えれば、地震動に対して粘り強さを考慮できる設計体系へと移行したといえる。さらに、2018年の基準・同解説の改訂時には、鋼管部材の曲げモーメントと曲率との関係において、鋼管部材の粘り強さを考慮できる構成則の見直しが図られた。具体的には、近年採用されることの多い薄肉の大口径（径厚比D/t=100程度）の鋼管杭は全塑性モーメントに到達する相当前に局部座屈してしまうが、D/tの小さな（肉厚の大きい）

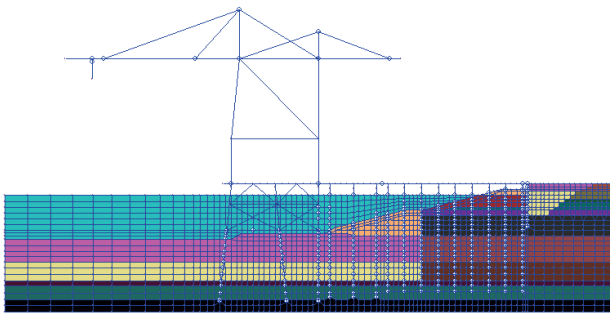


図1　桟橋とクレーンの地震応答解析の事例[4]

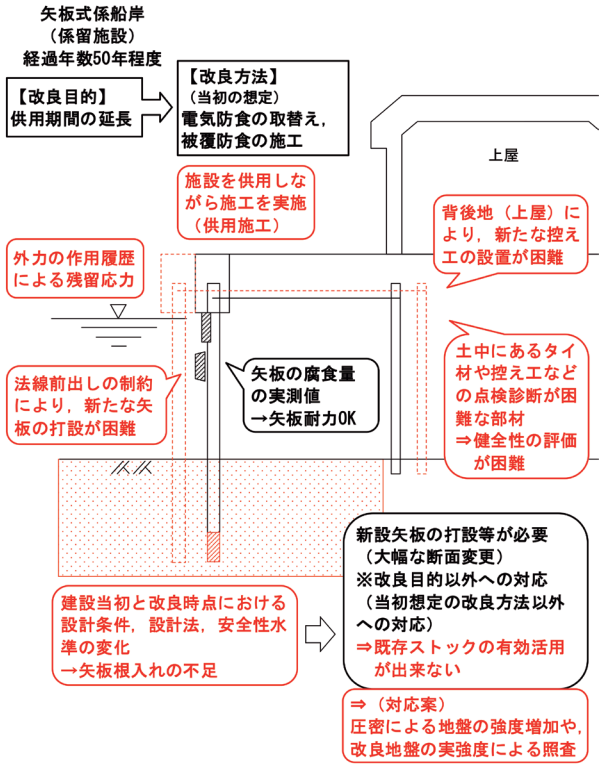
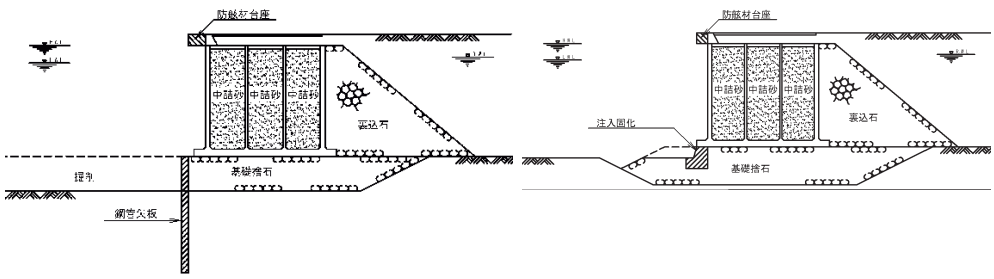


図2　改良設計を進める上での各種課題（控え矢板式岸壁を事例として）[5]



(a) 自立鋼管矢板を用いた工法　　(b) 可塑性グラウトを用いた工法

図3　重力式岸壁の増深改良工法の概念図[6]

鋼管杭では耐力低下が起こりにくく変形が進んでも耐力を保ち続ける効果が構成則に反映された[8]。今後は、ピーク耐力以降の耐力低下特性についてもモデル化が期待される。

一方、津波防護施設（防波堤や防潮堤）の耐津波設計については、2018年の基準・同解説[1]の改訂時に、「粘り強い構造」の概念が導入された。しかしながら、実際の構造設計において「粘り強さ」をどう評価し、具現化するかについては設計案件ごとに試行錯誤が続いている状況にある。さらに、これらの施設については、津波に先行する地震動の作用後、津波が来襲するという状況下での性能確保が求められるが、現時点では地震動と津波の重畳作用に対する照査も手探りで実施している状況にある。なお、昨今の台風によるコンテナターミナルの被害も、本来、暴風と高潮（場合によっては波浪も）の重畳を考慮した評価が必要であることから、複数の作用が同時または連続的に作用する場合に対応できる設計技術の確立が急務である。

4 港湾・海岸分野における鋼部材の新しい活用方策

次に、著者が設計に関与した案件のなかで、国内外を見渡し、港湾・海岸分野において鋼部材を利用した比較的新しいと思われる活用方策を2事例紹介し、国内外での新技術の活用の方向性を述べたい。

■櫛形鋼矢板工法（国内事例）[9]

高度経済成長期に整備された多くの民有護岸等は、整備後40 年以上経過して老朽化が進む一方、南海トラフ地震や首都直下地震等の地震が切迫しており、損壊のリスクが高まっている箇所も多い。耐震性が不足するものについては耐震改良を進める必要があるが、その技術的な難しさや費用負担等から耐震性調査や耐震改良は進んでいない。このため、港湾内の民有護岸等を耐震改良する際の支援制度（法人税特例措置や無利子貸付制度等）が創設され、耐震改良の技術的支援のためのガイドライン[10]が発行されている。このガイドラインで紹介されている新工法の一つである「櫛形鋼矢板工法」が大分港海岸で事業化[9]され、現在施工中であるため、以下に紹介する。

大分港海岸では、南海トラフ地震・津波及び台風時の高潮等に対応した護岸改良が求められている。当海岸は、液状化しやすい埋立地に立地しているが、背後には民間企業の施設が近接しており、大規模な液状化対策のための地盤改良は困難である。これに対応するために、当該事業では、液状化現象が発生した場合でも所定の護岸機能が確保できる「櫛形鋼矢板工法」が採用された。櫛形鋼矢板工法は、図4に示すとおり非液状化層まで根入れした長尺矢板と液状化層に根入れした短尺矢板を櫛状に組合せる工法である。鋼矢板を櫛状に組合わせることで、地震による液状化が発生しても長尺部分で液状化土圧を逃がすことができる。また、既設護岸が大きく変位した場合においても長尺矢板が沈下抑制の機能を担い、新設矢板の鉛直変位を許容範囲内に抑えることが可能となる。従来であれば、レベル1地震動で液状化が予測される場合には、地盤改良の実施が原則とされているなか、津波来襲時に所定の護岸高さを維持し、護岸としての構造安定性を確保するという性能に着目し、数値解析等を利用して丁寧な照査を行うことで、性能を確保しつつ大幅なコスト縮減にも成功している。本事業は、性能設計の枠組みを活用した好事例であると言えよう。

■回転圧入工法を用いた控え矢板式岸壁（海外事例）[11,12]

次は、日本のODA無償案件であるアフリカ・セネガル国ダカール港第三埠頭改修事業[11]を紹介したい。本事業は、延長約360m の老朽化した重力式（コンクリートブロック式）の既存岸壁の改修を行うものである（現在、施工中）。構造形式は、既存岸壁前面の岩盤（泥岩）に鋼管を打設し、控え工も鋼管とした鋼管矢板控え杭式岸壁である（図5）。現水深は－10m であるが、鋼管矢板の前面を浚渫することにより水深は－12m となる。

国内では岩盤上に矢板式岸壁を構築した施工事例はなく、設計法も確立されていなかったが、その一方で日本の新しい技術（回転圧入工法）を適用することにより鋼管杭を岩盤に打設することは技術的に可能であった（オール

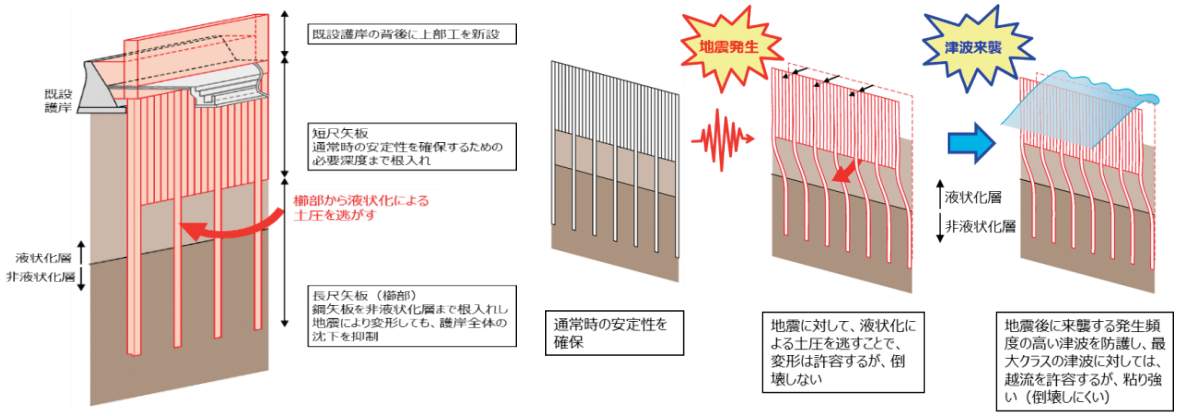


図4　櫛形鋼矢板工法の概要[10]

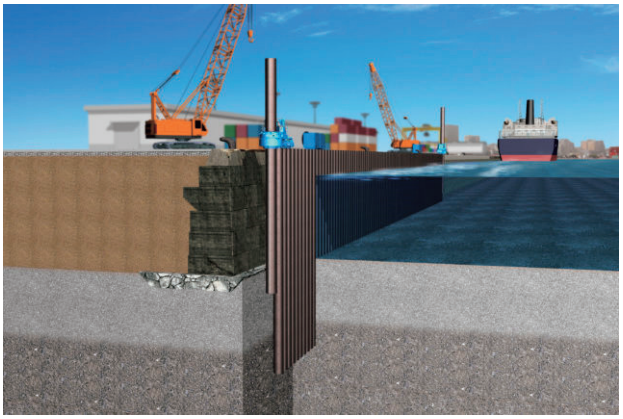


図5　回転圧入工法を利用した鋼管矢板控え式岸壁の築造イメージ[12)]

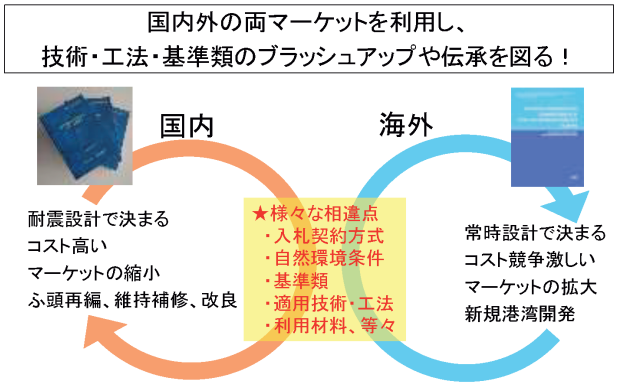


図6　国内外の両マーケットを利用した技術等の継続的な改善イメージ

ケーシング工法などの従来工法も適用可能)。このため、本事業では数値解析を利用した構造設計を行うとともに、現地の施工条件（岩盤強度や海上施工）と類似した条件下での施工実績から確実に施工ができるとの判断に至り、本構造形式と当該技術の採用が決まった。本事業では、日本の新しい技術を適用することにより、結果的に本邦企業の海外マーケットへの進出支援となった事例である[12)]。

■国内外の両マーケットを活用した技術等の改善[13)]

セネガルの事例は、日本国内では採用事例がないものの、海外マーケットのニーズに応じて日本の最先端の技術を適用し、新しい工法を適用したという点において注目すべきと考えられる。本事業のような無償ODA プロジェクトでの日本の新技術の活用は、当該技術の海外マーケット進出の基点（本邦企業の支援）となり得るとともに、日本の港湾分野の技術力を全体的に押し上げる効果もあるためである。日本国内でも、岩盤に矢板式岸壁を築造するニーズが今後発生する場合もあり、そのような場合には海外で適用した技術・工法を日本に即座に還流することができる。逆に、現在、日本で苦労しながら設計・施工を進めている既存岸壁の老朽化対策や増深改良などは、今後、東南アジア諸国等の港湾でのニーズが高まると考えられるため、今から国内で今後の海外マーケットの動向を見つつ準備を進めることも重要であろう。

以上のことから、国際市場における国家間・企業間の競争が激化するなかにあっては、海外と国内の相違点や技術動向・ニーズを俯瞰し、両マーケットを上手に活用して技術・工法・基準を改善・伝承し、人材も育成していく、という時代に突入しているのかもしれない（図6)。国内の港湾技術政策（基準も含む）も、この視点に重きを置く必要があると考えられる。

[参考文献]

1）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，（公社）日本港湾協会，2018.
2）宮田正史，中野敏彦：港湾分野における性能設計，2013年度日本建築学会大会（北海道）研究集会 建築学会構造部門（荷重）－パネルディスカッション「建築物の性能設計・再考～想定外事象も踏まえて～」.
3）諸星一信，渡部昌治，清宮 理，宮田正史，北澤壯介，伊庭智生：新港湾基準に準拠した大水深耐震強化岸壁の性能設計，海洋開発論文集，Vol.24，pp.177-182，2008.
4）宮田正史，吉川慎一，竹信正寛，菅野高弘，小濱英司，久保哲也：耐震強化施設としてのコンテナクレーンの耐震性能照査手法に関する研究（その3)，国総研資料No.563，2010.
5）高野向後，宮田正史，藤井 敦，井山 繁，加藤絵万，山路 徹，岩波光保，横田弘：事例分析に基づく既存港湾施設の改良設計の現状と課題，土木学会論文集 B3（海洋開発)，73（2)，I_426-I_431，2017.
6）田端優憲，宮田正史，水谷崇亮，松村 聡，鍵本慎太郎：重力式係船岸の増深改良を事例とした改良工法検討の検証（その1)，国総研資料No. 1021，2018.
7）水谷崇亮，森川嘉之，渡部要一，菊池喜昭，合田和哉，加藤繁幸，小笠原哲也：重力式係船岸の新しい増深工法の開発，港湾空港技術研究所資料，No.1277，2013.
8）大矢陽介，塩崎禎郎，小濱英司，川端雄一郎：耐震性能照査における鋼管部材のモデル化法の提案，港湾空港技術研究所報告，第56巻第2号，pp.3-33，2017.
9）平間 仁，福島純平，石田毅史：大分港海岸における櫛形鋼矢板工法の導入について－液状化を許容した新形式護岸の設計－，平成30年度「九州国土交通研究会」論文（http://www.qsr.mlit.go.jp/useful/n-shiryo/kikaku/kenkyu/h30/04/4_13（68）.pdf).
10）国土交通省港湾局：港湾における護岸等の耐震性調査・耐震改良のためのガイドライン（平成30年6月）（http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr7_000087.html).
11）下平剛之：セネガル国ダカール港第三埠頭改修計画に係る岸壁構造形式変更の事例紹介，第1 回土木技術者実践論文集研究発表会 発表論文集，pp.53～54，2019 年6 月.
12）（株）技研製作所：セネガル共和国ダカール港の岸壁改修工事で「ジャイロプレス工法®」がODA案件として採用（https://www.giken.com/ja/news/release/gknl9nw009ja/).
13）宮田正史，菅原法城：港湾分野における日本の技術・基準類の国際展開，情報誌「港湾」(2019年12月号)，(公社)日本港湾協会.

未来 FRONT

Part 1

100年先を見越した首都高速の更新に多種多様な杭工法で貢献

高速1号羽田線（東品川桟橋・鮫洲埋立部）更新工事

1950年代後半からの高度成長に伴い、モータリゼーションの急激な進展から建設された首都高速道路。1962年に京橋～芝浦間で開通した1号線から年々ネットワークを広げ、現在の総延長は300km以上にもなり首都圏の交通と流通の大動脈として経済的にも重要な役割を果たしている。しかし、初期に建設された路線は供用からすでに50年以上が経過し、老朽化が進む首都高速道路の大規模な更新・修繕が求められるようになってきた。今回は、首都高速道路の大規模更新の第1弾として着工された「高速1号羽田線」の迂回路から更新線の、長期にわたる更新工事を支える鋼管杭・鋼管矢板基礎の役割についてレポートする。

空頭制限下にあるP27橋脚での鋼管杭打設状況

半世紀が経過し、老朽化した首都高速の再生事業

首都高速道路のうち供用開始から50年を超える路線は、2024年には全体の約3割に達するとされており、首都高速道路では、きめ細やかな点検と補修が日夜行われているが、老朽化と過酷な使用状況から、これまでの点検と補修では対応が困難な箇所が浮き彫りになった。こうした状況を受け、首都高速道路では2013年12月に合計延長63kmを対象とする大規模更新・修繕計画を発表。既存の構造を維持したまま補修・修繕が必要な路線は約55kmで、橋梁の架替えや床版の取替えによる更新が必要な路線は約8kmと選定した。東品川桟橋・鮫洲埋立部は、上記約8kmのうち約1.9kmに該当する区間である。

■首都高速道路　大規模更新実施区間

腐食環境著しい立地にメンテナンス困難な構造

1963年に供用された「高速1号羽田線（東品川桟橋・鮫洲埋立部）」は、老朽化に加え、立地環境による塩害と維持管理が困難な構造等により、著しく腐食劣化が進み、2016年2月から更新作業が進められている。

更新延長約1.9kmの同区間は、建設時に京浜運河沿いのスペースを活用したため、海水による塩害の影響を受けやすい。同区間のうち桟橋構造となっている約1.3kmの「東品川桟橋部」では、橋桁と海水面との空間が3m程度しかなく満潮時にはその距離が狭くなり、高波の影響などを含めて点検、補修にあてられるタイミングが限られるため、維持管理が非常に困難な状況にある。そのため供用から50年以上を経て、激しい腐食環境によりコンクリート剥離や鉄筋腐食等の重大な損傷が多数発生している。そのため、「東品川桟橋部」では長期的な安全性を確保する観点から構造物の更新が必要となった。

更新に際しては、並行する東京モノレールから一定の距離を確保し、海水面との桁下余裕高が極めて狭い現道の構造から12～20mの桁下余裕高をとる。これにより、更新後の点検や補修を容易にし、海水の飛沫や塩害環境の影響も最小限になるため高速道路の長期耐久性と維持管理を向上させる。

東品川桟橋部の南の「鮫洲埋立部」約0.6kmは、海水面に鋼矢板護岸で土留めした盛土にグラウンドアンカーを設置して路体を保持しており、現代では仮設に近い構造である。長期間海水にさらされた影響で鋼矢板護岸やグラウンドアンカー等も腐食が進行し、路面陥没等の重大な損傷が発生しているため、この区間は、地盤改良とプレキャストU型ボックスによる路面嵩上げ工事を行うことが決定された。

■大規模更新（橋梁架替え・床版取替え）実施区間

路線	対象箇所	当初開通年度	事業年度	延長
1号羽田線	東品川桟橋・鮫洲埋立部	1963年度	2014～2026年度	1.9km
	高速大師橋	1968年度	2015～2023年度	0.3km
3号渋谷線	池尻・三軒茶屋出入口付近	1971年度	2015～2027年度	1.5km
都心環状線	竹橋・江戸橋JCT付近	1964年度	2015～2028年度	2.9km
	銀座・京橋出入口付近	1962年度	2015～2028年度	1.5km
小計				8km

■海水面に近いため日常の維持管理が困難であり、コンクリート剥離から鉄筋露出などの損傷が発生

■高速1号羽田線（東品川桟橋・鮫洲埋立部）更新区間平面図

■路面ひび割れなど損傷が発生する鮫洲埋立部

未来 FRONT

現場特性に応じた、最適かつ多種多様な杭工法が採用される

既存道路の交通機能を維持しながら進められる建設工事

「高速1号羽田線（東品川桟橋・鮫洲埋立部）」更新工事は、2016年2月に着工され、2026年度末の完了を見込んでいる。わずか2km足らずの区間に10年以上もの期間を費やすのは、この路線がもつ社会的、経済的な影響の大きさが理由となっている。

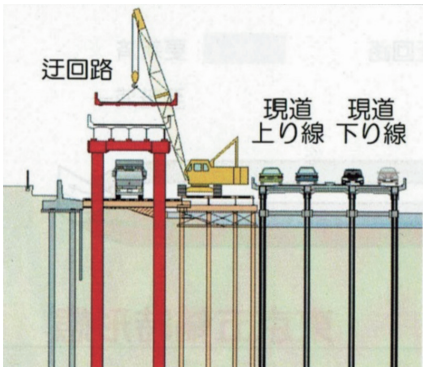
同区間は羽田空港へアクセスするための主要路線であり、沿線には物流施設も数多く立地しているため、産業上重要な役割を果たしている。通行量は1日7万台にものぼり、更新工事に際して通行止めにすることは、社会的にも経済的にも損失が大きいため避けなければいけない。そのため、工事を進めるにあたっては暫定的な迂回路を用意して、工事期間中の同路線の円滑な通行を確保しなければいけない。迂回路の設置工事と更新路線の新設、そしてその間に切り替わる迂回路の供用は複雑なステップを踏み、工期の長期化はやむを得ない難工事となっている。その上、工区全般がマンション等の住戸に隣接するため、作業時間は8時～17時の昼間に限定されるなど制約が厳しい現場である。

着工開始から更新完了までの大まかな施工ステップは以下、図に示すとおりである。暫定上り線となる迂回路を施工して供用後（STEP①）、更新上り線となる半断面（Ⅰ期）を施工し、暫定下り線として東京五輪開幕までに供用する（STEP②）。その後、更新下り線となる半断面（Ⅱ期）を施工し（STEP③）、完成後は暫定下り線だった半断面（Ⅰ期）を更新上り線とし、迂回路を撤去して更新工事が完了する（STEP④）。

［迂回路］低騒音・低振動の回転杭で周辺環境に配慮

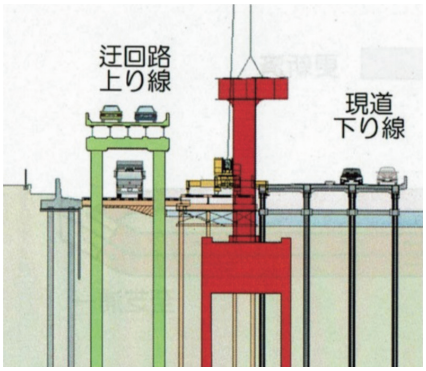
最終的に更新路線として供用する道路の建設だけではなく、その間、暫定的

STEP ①迂回路（上り線）施工
2016年2月～2017年9月



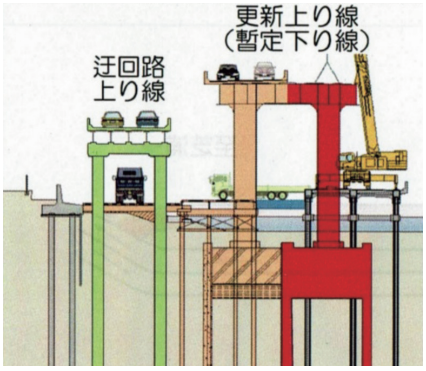
■工事用道路設置後に迂回路（上り線）を施工

STEP ②更新線半断面（Ⅰ期）施工
2017年9月～2020年夏頃



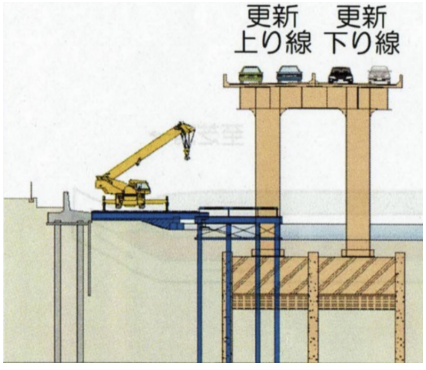
■迂回路を上り線として供用し、更新上り線となる半断面（Ⅰ期）を施工、暫定下り線として供用する

STEP ③更新線半断面（Ⅱ期）施工
2020年夏頃～2023年頃



■更新線半断面（Ⅱ期）を施工

STEP ④更新線（上下線）供用
2023年頃～



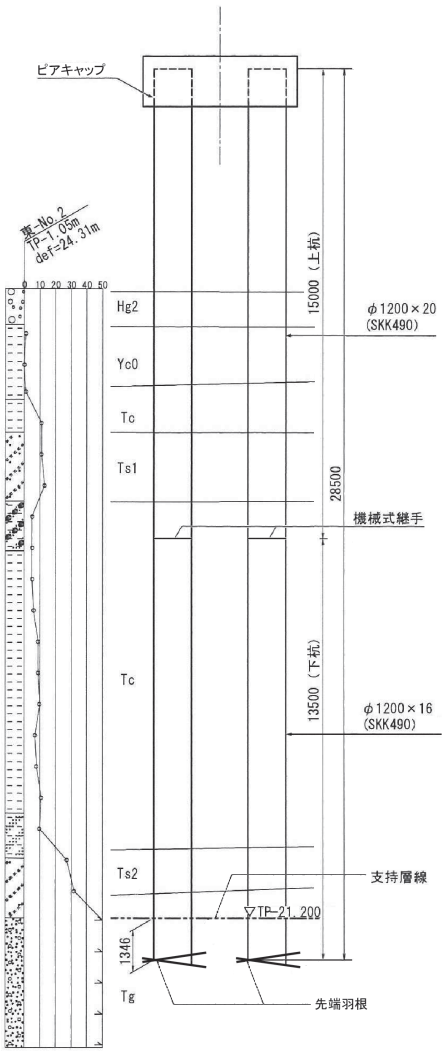
■更新線（上下線）を供用し、迂回路を撤去

とはいえ長期間にわたって使用される迂回路まで、「高速1号羽田線（東品川桟橋・鮫洲埋立部）」更新工事には、さまざまな種類の橋脚が用いられ、その結果多種多様な基礎工法が採用されている。

迂回路の構造では、打設した鋼管杭をそのまま橋脚とするパイルベント橋脚が採用され、迅速な施工に貢献している。鋼管杭は先端に羽根を有する回転杭が採用された。この橋脚基礎に回転杭が採用された理由としては、低騒音・低振動な施工が可能であるため周辺環境に配慮した工法であることに加えて、迂回路は供用が終わると撤去されるため、逆回転で鋼管杭の引抜きが可能であることも考慮されている。鋼管杭の接合方法は、現場での継手溶接が不要な機械式継手が採用され、施工時の工期短縮を実現している。

また、鋼管杭を打設した後に工場製作のピアキャップを、外面リブ付きの杭頭に間詰めコンクリートを用いて設置し、橋脚として一体化。そこに上部工である鋼鈑桁を施工するため、工期がさらに大幅短縮となり、杭本数の削減から周辺環境への圧迫感も低減。スッキリと見通しのよい景観に貢献している。狭隘地でも桁下空間が大きく確保できるため、工事・点検用道路として有効活用され、橋梁そのものの維持管理にも寄与するなどメリットが大きい工法となっている。

■回転杭の建込み状況



■迂回路 DP20 橋脚（正面図）

■回転杭を用いて施工された迂回路の桁下空間は長期間の工事用道路としても活用されている

［更新線］水中での施工実績豊富な鋼管矢板基礎が採用される

更新線の施工については現場工程の短縮が最優先で図られているのが特徴だ。そのため、橋脚は場所打ちRC橋脚ではなく工場製作の鋼製橋脚を採用し、上部工や床版についても工場製作の鋼桁やプレキャストPC床版を採用している。

橋脚基礎についても工期短縮に主眼がおかれていることから、全長約22～38mとなる鋼管矢板基礎が採用された。鋼管矢板基礎は水中での施工実績が豊富で、仮締切り兼用とすることができる。そのため、締切り後はドライ環境の中ですみやかに頂版コンクリートから鋼製橋脚、床版等を立上げていくことができる。

狭隘な施工現場であることや隣地に住宅が接することなどから、低騒音・低振動でありながら迅速な施工性の鋼

■鋼管矢板基礎 締切り状況

■橋脚一般部の床版・桁架設状況

■東品川桟橋部、迂回路と更新Ⅰ期線の現況

未来 FRONT

安全性を担保し、工期短縮を実現する鋼管矢板基礎

管パイラーを用いた圧入工法が採用された。

更新線半断面（Ⅰ期線）の基礎工は、2018年4月に施工が終了し、その後、急ピッチで進められた上部工も2019年度末で完成間近となっている。更新線完成後に上り線となるⅠ期施工は、現在、上り線として供用されている迂回路と併せて2020年夏頃には暫定下り線として供用され、この形で東京オリンピックを迎える予定である。

■鋼管矢板基礎 圧入状況

■鋼管杭・鋼管矢板工事数量

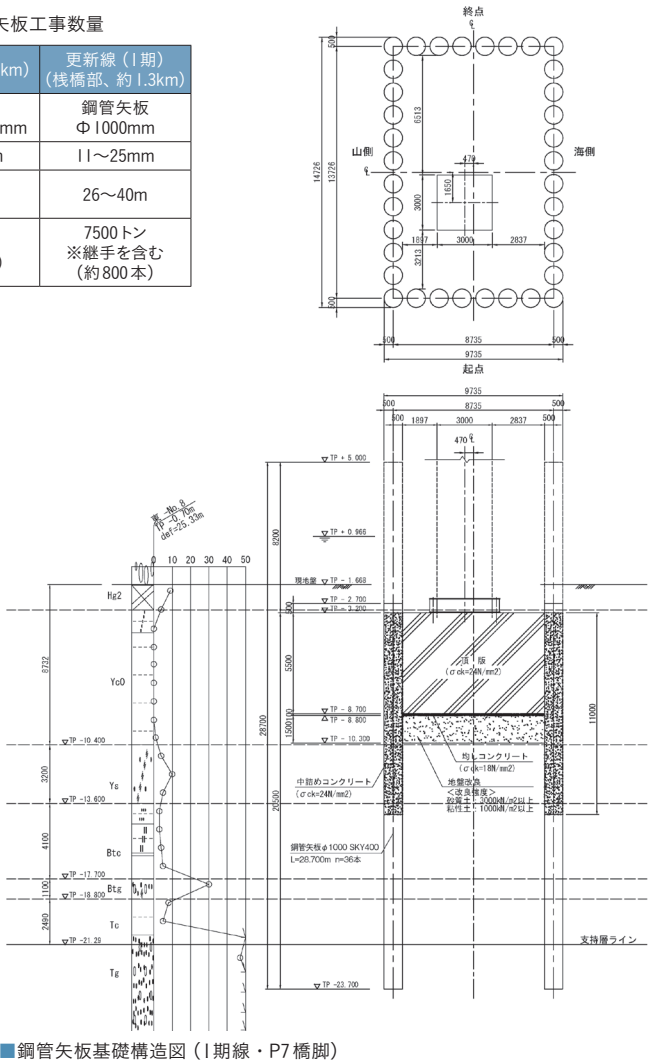
	迂回路（約1.9km）	更新線（Ⅰ期）（桟橋部、約1.3km）
杭径	鋼管杭 Φ1000、1200mm	鋼管矢板 Φ1000mm
肉厚	11～24mm	11～25mm
鋼管1本あたり長さ	22～35m	26～40m
鋼管　合計	4300トン（約300本）	7500トン ※継手を含む（約800本）

厳しい空頭制限下でも安全性を確保し、迅速な施工が可能

迂回路および更新線では、それぞれ異なる施工条件下で、最適な工法による施工が行われている。特にP26、P27橋脚では、既設の高速1号線に近接し空頭制限下での施工が求められたため、P26橋脚では低空頭対応の圧入工法が、P27橋脚では低空頭対応の中掘り杭工法がそれぞれ採用された。

P26橋脚は支持層まで約20mでP27橋脚は約14mだが、現地盤面と既設構造物の有効空間高が7m程度しかない。そのため、もっとも厳しい空頭制限下では2～3m程度の短尺の鋼管矢板または鋼管杭をP26橋脚では9本、P27橋脚では6本継ぎとする低空頭施工が計画されていた。

短尺の鋼管となる低空頭施工では、基礎杭1本あたりの継手箇所数も多く



■鋼管矢板基礎構造図（Ⅰ期線・P7橋脚）

なる。そのため、現場溶接継手よりも短時間で接合可能な機械式継手を採用。既設構造物の空頭制限下であるとともに、供用済みの迂回路や運行中の東京モノレールなど安全への配慮が求められるシビアな施工現場で、溶接不要な無火気施工が安全性を高めながらスピーディーな施工を実現している。

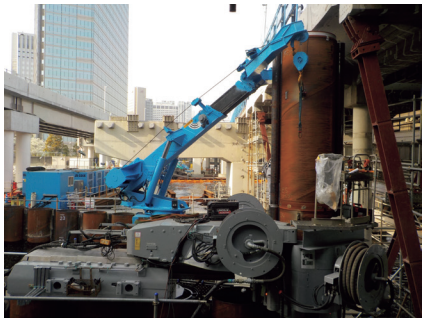
さまざまな施工条件に応え、工期短縮に貢献した鋼管杭

過酷な自然環境で50年以上にもおよぶ供用に耐え、著しい老朽化から大規模更新に踏み切った高速1号羽田線（東品川桟橋・鮫洲埋立部）は、この夏の五輪前にはすでに供用されている迂回路とともに更新半断面（Ⅰ期線）が暫定下り線として使用される。その後、更新半断面（Ⅱ期線）の工事が着手され、この完成を2023年頃に目指す。迂回路の撤去は、更新線上下線の供用開始後から進められ、これら事業すべての完了を2026年度中と見込んでいる。

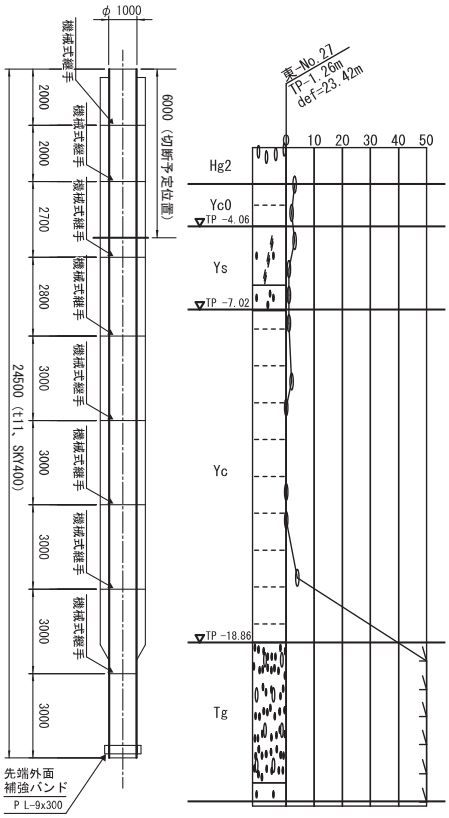
100年の耐久性とともに維持・管理も行いやすいよう各所に新工法、新技術が導入されながら建設される高速1号羽田線（東品川桟橋・鮫洲埋立部）。その基礎工事では、さまざまな鋼管杭・鋼管矢板基礎工法が低騒音・低振動や景観への配慮、狭隘な工事スペースなど、施工環境による厳しい要求をクリアして工期短縮と安全性の確保に貢献している。

■鋼管杭の圧入状況（Ⅰ期線・P27橋脚）

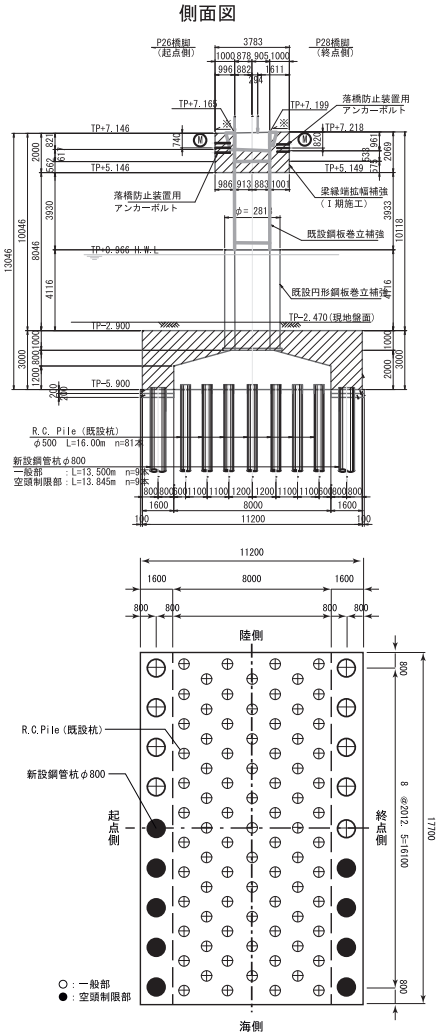
■機械式継手の嵌合状況



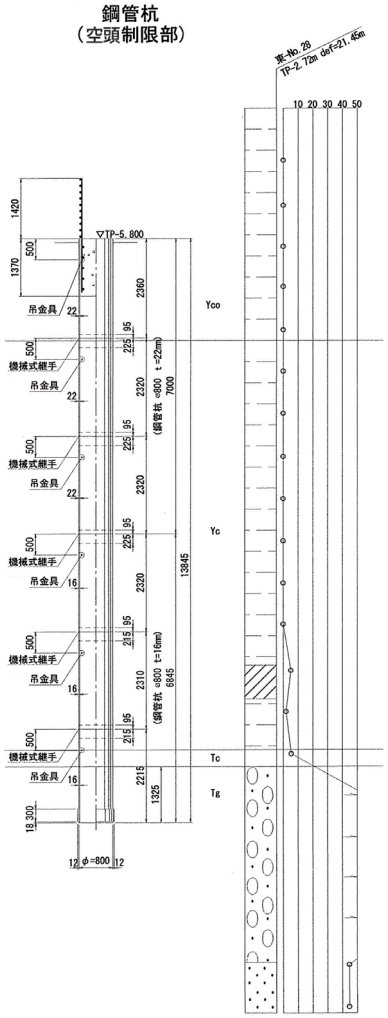
■鋼管矢板の建込み状況（Ⅰ期線・P26橋脚）



■鋼管矢板概要図（Ⅰ期線・P26橋脚）

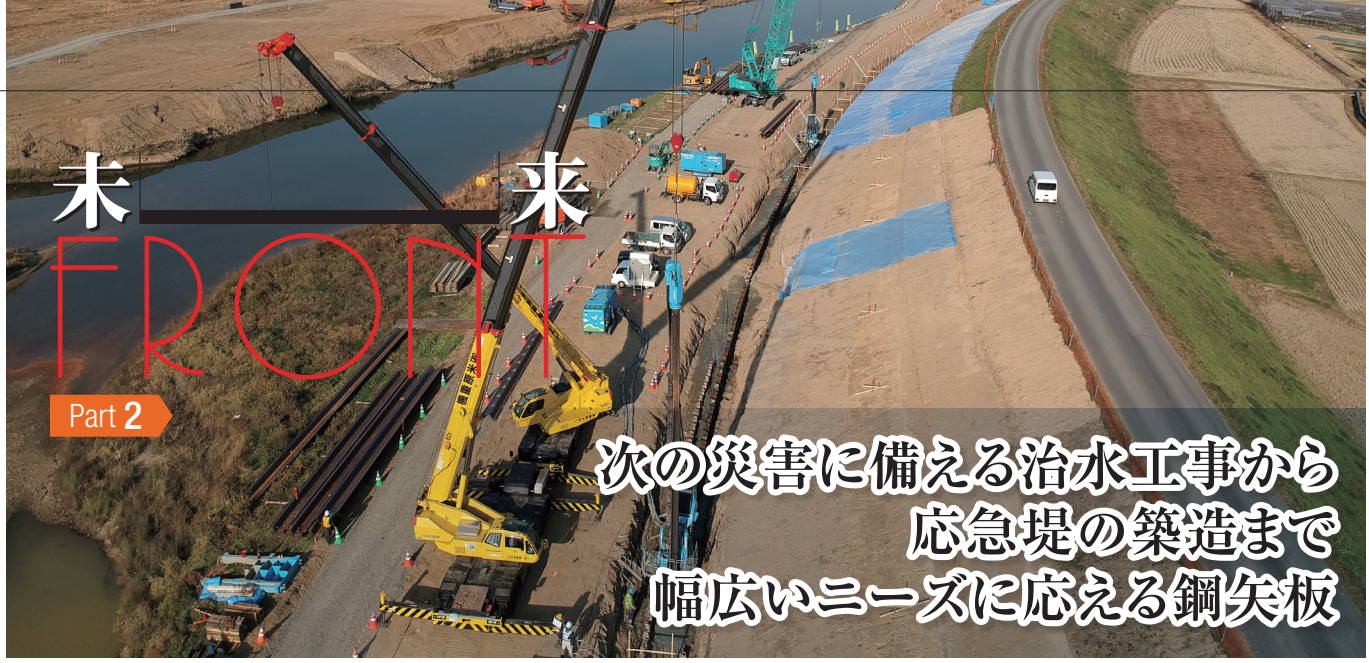


■鋼管杭基礎側面図・杭配置図（Ⅰ期線・P27橋脚）



■鋼管杭詳細図（Ⅰ期線・P27橋脚）

取材協力：首都高速道路株式会社



未来FRONT

Part 2

次の災害に備える治水工事から応急堤の築造まで幅広いニーズに応える鋼矢板

2018年の西日本豪雨で甚大な被害を受けた岡山県倉敷市真備町川辺地区で遮水矢板を用いた堤防強化が実施されている

岡山県／高梁川・小田川の堤防機能強化から緊急対策工まで河川の総合的な治水対策に鋼矢板が大規模採用

河川の増水からその後背地を守る河川堤防では、鋼矢板が幅広く採用されている。その強靭な特性から耐震性を期待した堤防補強、河川の流れに対する侵食対策、浸透水に起因する堤防法尻からの崩壊抑止等、様々な堤防機能強化に活用されている。たびたび大規模な河川氾濫が発生する高梁川と小田川では、これらの堤防機能強化の目的に加えて、西日本豪雨による大規模水害からの復旧事業推進のために、鋼矢板が大規模採用されているのが特徴となっている。

堤防決壊により県内最大の浸水被害が発生した倉敷市真備町

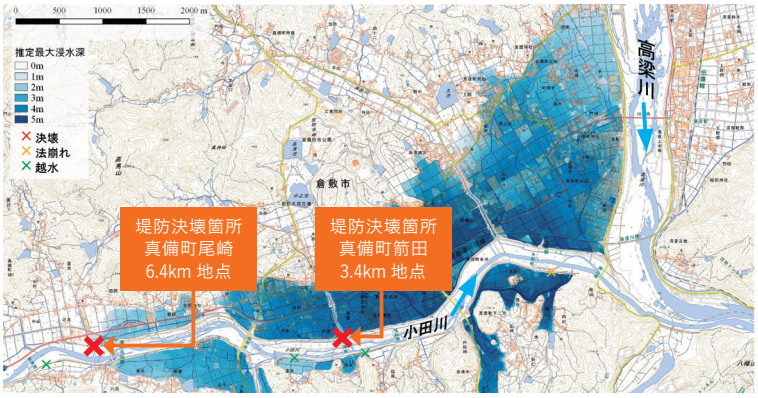
高梁川は、岡山県西部を流れる延長約111kmの一級河川で、流域面積2670km^{2}は県下最大である。主な支流のひとつである小田川は、広島県の神石高原を水源とし、真備高原を南東に流れながら岡山県井原市で東流に転じ、倉敷市真備町と総社市の境界付近で高梁川に合流する。流量の多い高梁川との合流点では、洪水時に本流への流入阻害を起こすバックウォーター現象が発生し、たびたび氾濫を起こしてきた。

平成30年7月豪雨(通称：西日本豪雨)では、2018年7月5～7日にかけて本州付近に停滞した梅雨前線と、前線に流れ込んだ暖かく湿った空気の影響で西日本各地ではこれまでにない降雨を記録。これに伴い、河川氾濫や浸水害、土砂災害が広範囲で発生し、死者行方不明者が200人を超える平成最悪の水害となった。

岡山県の死者行方不明者は64人で広島県の114人に次ぐ被害となり、小田川の堤防2か所が決壊したことにより約12万km^{2}が冠水した真備町では、最大浸水深が約5mにも達し、51人の

■高梁川水系流域図

■高梁川、小田川河川図



■倉敷市真備町における浸水範囲と小田川の堤防決壊箇所　※国土地理院公表資料を基に作成

■倉敷市真備町における浸水状況（7月7日　左岸1.2km付近）

死者を出す惨事となった。

高梁川水系には2010年に、おおむね30年間を目標に策定された河川整備計画があった。小田川では特に、高梁川への合流点の付替えを10年間で計画しており、2018年に仮設工が着手されたばかりのタイミングで西日本豪雨の被害を受けた。

災害復旧を後述の方法で迅速に完了させることに加え、「真備緊急治水対策プロジェクト」と呼ばれる前述の合流点付替え等のハード対策を5年間前倒しした計画が推進される他、堤防の基盤漏水対策を目的とした遮水矢板の施工が、西日本豪雨で甚大な被害を受けた岡山県倉敷市真備町川辺地区で実施されている。

堤防の基盤漏水対策に止水壁として適用される鋼矢板

小田川では西日本豪雨の際、越水による法面崩壊などの顕著な堤防決壊事例以外にも、堤内地に噴砂孔が散見された。この現象は「パイピング」と呼ばれ、河川水位の上昇から動水勾配が大きくなると、堤防基礎地盤の透水層（砂や礫）の浸透水の圧力が上昇し、堤内側の相対的に弱い箇所から漏水が発生することをいう。水みちの進行で、堤体が不安定となり決壊に至るおそれがある。こうしたパイピング破壊を防ぐため、堤防の堤外側法尻に止水壁として鋼矢板を打設する基盤漏水対策が行われている。

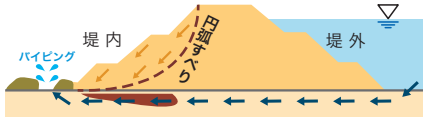
現在、鋼矢板が施工されているのは小田川右岸の矢形橋から二万橋までの川辺地区約1.4km。

この区間では、現在の堤防が旧河道に設置されている。旧河道は基礎地盤の透水性が高く、パイピングが発生しやすい。そのため、堤防の断面拡幅や断面に遮水シートを施すとともに、水みちを遮断するため対象区間において連続して鋼矢板を施工する。

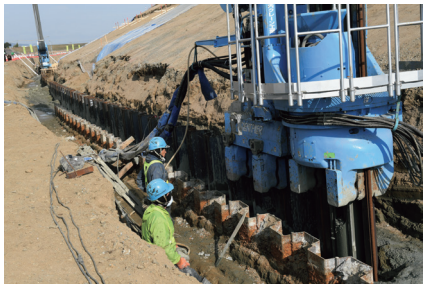
この区間は2019年度末までを目標に対策が進められており、これまで打設された鋼矢板は、ハット形鋼矢板25H L=18.5m 757枚、L=15.0m 392枚で総計2246トンにのぼる。鋼矢板長はパイピング対策を念頭に各断面で浸透流解析を実施し、決定された。当初は経済性の観点からハット形鋼矢板10Hで設計されたが、比較的長尺でN値50以上の地盤に約1m根入れして打ち止めとするため、打設時の鋼矢板への施工負荷を考慮してハット形鋼矢板の型式を上げ、25Hを採用することにした。打設方法は、設計段階ではウォータージェット併用バイブロハンマ工法だったが、試験施工で最大粒径φ80程度の礫・玉石などが存在す

■小田川・川辺地区　鋼矢板の圧入状況

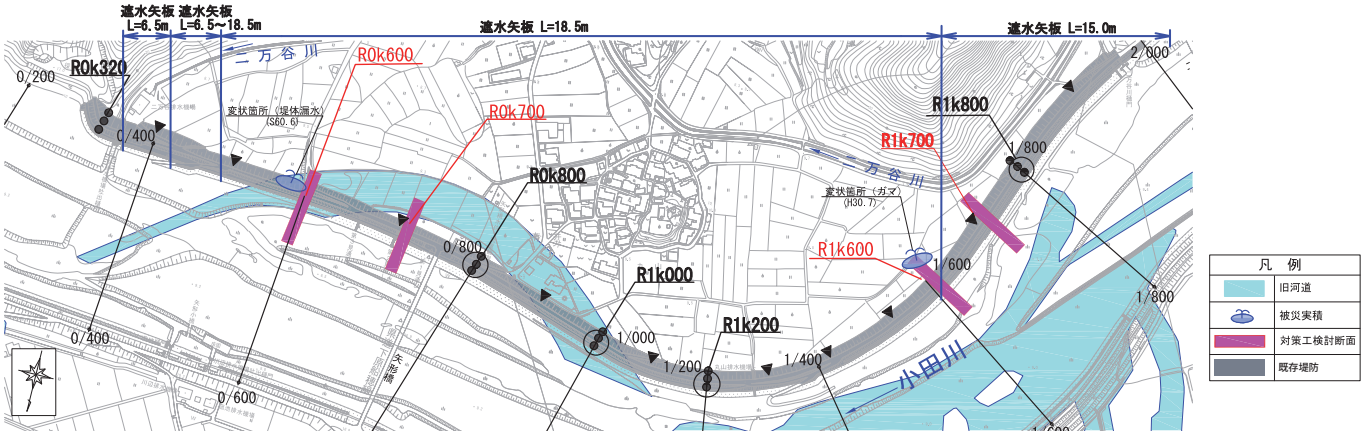
■小田川右岸 l.6km 付近　噴砂の状況



■パイピング現象による堤防破壊イメージ図



■硬質地盤クリア工法による圧入状況



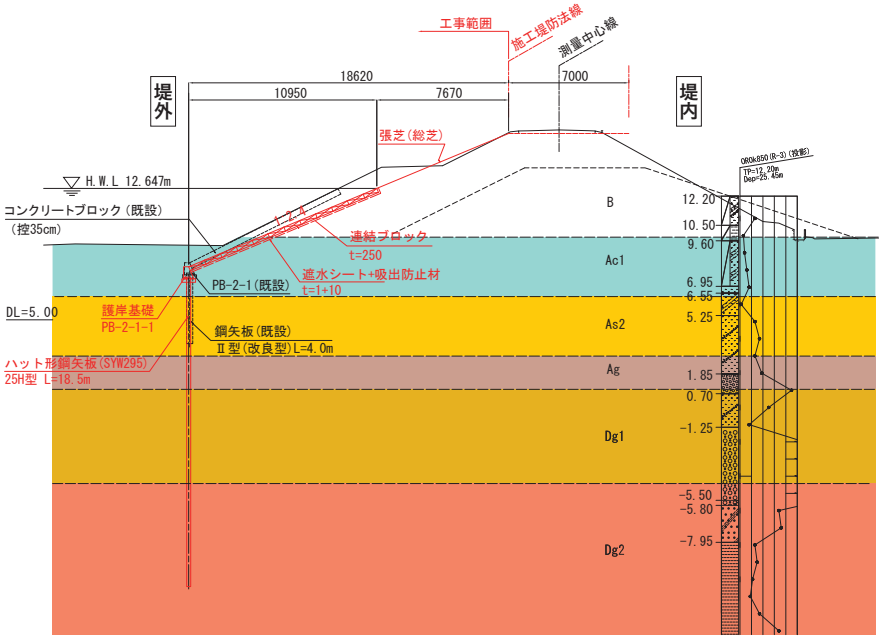
■小田川・川辺地区　旧河道と遮水矢板計画図

るため所定の根入れ長の確保が困難なことが判明した。そこで、硬質地盤にも鋼矢板の圧入が可能となるパイルオーガと圧入機が一体型の複合式圧入機（硬質地盤クリア工法）を用いた施工に変更し、これに対応した。日当たり施工枚数は、地盤条件によって左右されるが、25H　L=18.5mは約5枚／日、25H　L=15.0mは約7枚／日であった。

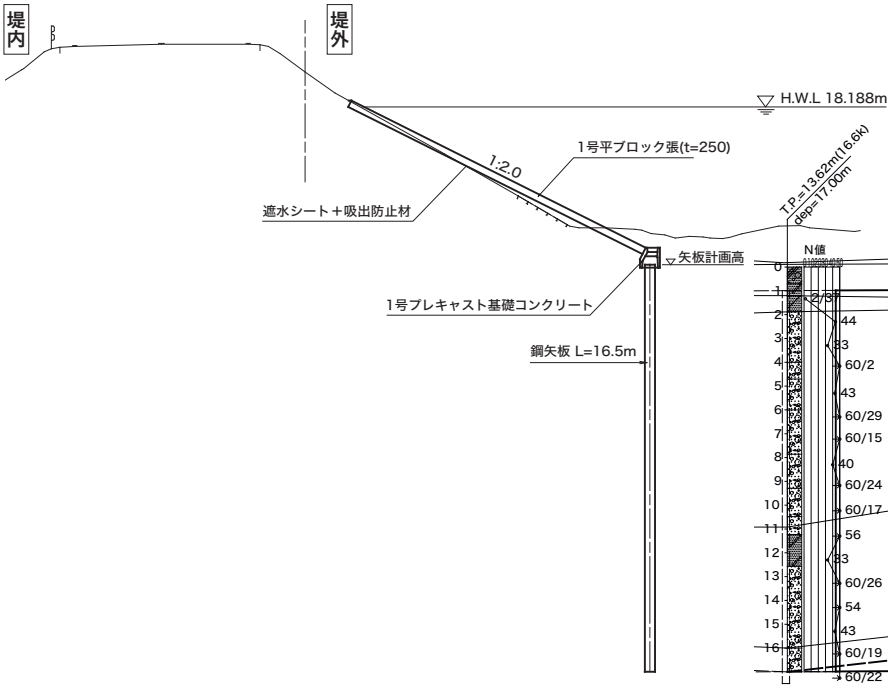
鋼矢板の迅速な施工性で非出水期限定の長大工区を対策

本流である高梁川左岸の、総社市清音・中原地区でも西日本豪雨時に多数の噴砂が発生し、小田川・川辺地区と同様の基盤漏水対策を目的とした遮水矢板の打設が行われた。同地区周辺では噴砂による堤防への影響は見受けられなかったが、今後の出水に伴い、堤防基盤の砂や礫の流出による堤防の沈下等が発生しないようにすることで、再度災害の防止を図ったものである。

対策区間はL=3405mあり、堤外側



■小田川・川辺地区　標準断面図



■高梁川・中原地区　標準断面図

■高梁川　清音・中原地区　浸透対策施工区間

■高梁川左岸16.5km付近　噴砂の状況

■高梁川・中原地区　硬質地盤クリア工法による圧入状況

の堤防法尻に鋼矢板を打設する工事は次の出水期が訪れる6月ごろまでに完了させる必要があった。そのため工事区間を11工区に分割し、各工区にクレーンと複合式圧入機（硬質地盤クリア工法）を配置して、L=10.5～16.5mの鋼矢板約5000トンを一斉に圧入したのが特徴である。

遮水矢板の全長については、透水性のあるAg層（沖積礫質土層）を遮断することを設計思想としており、ボーリング試験で確認したN値50以上のDg層（洪積礫質土層）に約1mの根入れを確保することを基本としつつ、最終的には浸透流解析の結果から適切に設定されている。

強靭な特性と迅速な施工性で決壊後の緊急対策工に貢献

2018年7月の西日本豪雨の際、高梁川水系では降り始めからの累加雨量が400mmを超え、各水位観測所で観測史上最高水位を記録し、7日朝までに小田川の左岸3.4kmで長さ約100m、左岸6.4kmで長さ50mと2か所で堤防が決壊した。決壊の要因は、記録的な雨量と高梁川本流からのバックウォーター現象により水位が上昇し、堤防を越水。堤内側の堤防法尻から洗掘が生じ、決壊したと推定されている。

緊急対策工事は早期復旧に向けて土日も含む24時間体制で実施され、決壊した2か所については、災害発生日の7日22時には緊急対策工事が着手された。まず、土のうやシートで覆うことで決壊前の断面形状や所定の高さを確保することで、堤防が流出した箇所の荒締切は15日23時に完了。ただし、この荒締切盛土だけでは次の出水時に耐えられる堤防機能は確保されていないため、水害により決壊した堤防を本復旧までの比較的長時間の安全性を確保するべく、その背面に鋼矢板二重締切（以下、二重締切）を築造した。

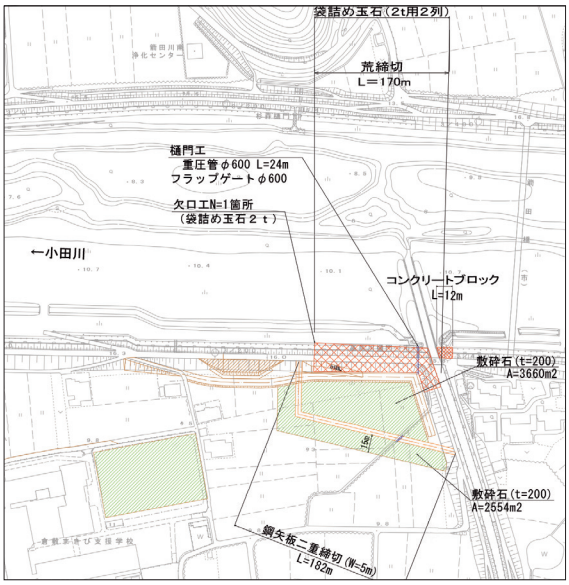
この二重締切は、平成27年台風18号の豪雨で約200mにわたり決壊した茨城県常総市の鬼怒川堤防の応急復旧等でも実績がある。

バイブロハンマを用いた鋼矢板の打設は、二列ある鋼矢板壁の外側から先行して行われ、鋼矢板壁の内側を打設後、順次タイ材や中詰土工を設置し、21日10時には二重締切が完成。計14日間で緊急対策工事を完了した。

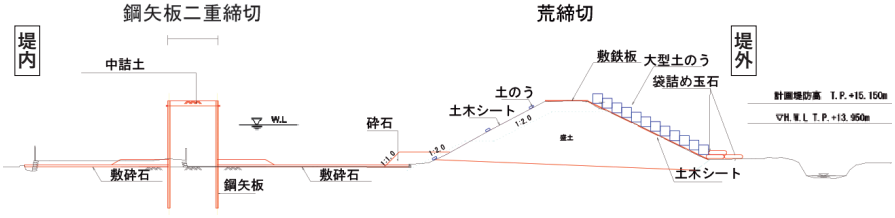
この二重締切に使用された鋼矢板は、Ⅲ型　L=11.0～12.0m　936枚（約620トン）である。決壊箇所を2週間以内にふさぐ緊急対策工事であったため、中古材も含めてその当時製造済みであった資材を集約して現地に適用することが最優先された。

この小田川で用いられた二重締切も、鋼矢板の特徴である迅速な施工性と強靱な特性から、極めて緊急性の高い災害復旧を目的とした仮設堤防の築造に貢献している。

■小田川左岸3.4kmの被害状況（2018年7月7日）



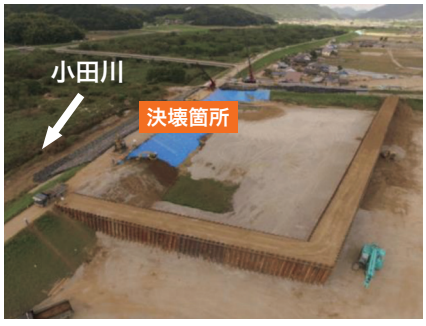
■鋼矢板二重締切　平面図



■鋼矢板二重締切　断面図

■鋼矢板二重締切の打設状況

■鋼矢板二重締切後の中詰土、作業状況



■完成した鋼矢板二重締切（左岸3.4km）

取材協力：国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所、高梁川・小田川緊急治水対策河川事務所

TECHNICAL NOTES

バイブロハンマ工法を用いた杭の支持力特性の評価

バイブロハンマ工法技術研究会、鋼管杭・鋼矢板技術協会

1. はじめに

バイブロハンマ工法は、バイブロハンマとクレーンからなるシンプルな重機構成で、高い鉛直精度を確保しながら杭を施工できることや、杭とバイブロハンマをクレーンで吊下げる施工方法のためロングスパンでの手延べ施工ができること、また、打撃工法に比べて騒音が小さいことなど他工法にはない特長を有している。このことから、港湾の桟橋や河川内の橋梁の基礎杭等では、施工機械が配置される水面上と水中の地盤面との間に距離があるため、杭の建ちが安定するまで、手延べ施工で鉛直精度を維持できるバイブロハンマ工法が用いられている。また、鋼管矢板基礎においては、鋼管矢板の継手を嵌合しつつ閉合する必要があり、高い施工精度が求められるため、打込み杭工法による場合は、建込み時の精度確保と打設中の精度維持が可能なバイブロハンマ工法が不可欠な施工技術として用いられている。

一方、H14年道路橋示方書において、バイブロハンマ工法は「打撃工法と同じ打込み杭工法の一つ」として区分されてきたが、H29年度の改定にあたり、バイブロハンマ工法は道路橋示方書で扱われている他の工法と比較して支持力に関する統計量の分析に必要となる載荷試験数が限られていたことや、油圧ハンマによる打撃工法の支持力特性と異なる傾向が見られたこと（後掲の図11, 14, 17参照）などの理由から、支持力推定式の記載が見送られた[1)]。

しかしながら、バイブロハンマ工法は、上記の通り他工法にはない特長を有しており実工事において欠くことのできない技術であることから、バイブロハンマ工法技術研究会と鋼管杭・鋼矢板技術協会は、2018年に新たに3件の載荷試験を実施し、既往の試験と併せた12件の試験結果をもとにバイブロハンマ工法で施工した杭（以下、バイブロハンマ打込み杭と略称）の支持力特性を再整理した。本報では、今般実施した載荷試験と支持力特性の整理結果について報告する。

表1　2018年度押込み試験の鋼管杭諸元一覧

	試験杭A	試験杭B	試験杭C
①直径（mm）	1,000	500	500
②板厚（mm）	14	10	10
③杭長（m）	15.0	14.0	14.0
④根入れ長（m）	14.3	13.3	13.3
⑤支持層への根入れ長（m）	2.0	1.0	1.0
根入れ比（⑤／①）	2.0	2.0	2.0
断面積（cm^2）	433.7	153.9	153.9
規　格	SKK490	SKK490	SKK490
耐　力（kN）	13,660	4,850	4,850

表2　鋼管杭の打込みに供したバイブロハンマの諸元

	試験杭A	試験杭B	試験杭C
モータ出力※（kW）	180	139	142
起振力（kN）	1,116	767	929
偏心モーメント（kg・m）	160	10	30
振動周波数（Hz）	13.3	45	28

※）バイブロハンマの動力源は試験杭Aが電動式、試験杭 B、Cが油圧式

2. 載荷試験

2.1　試験方法

載荷試験は静的な押込み試験によって行い、東播建機（株）のヤード（兵庫県加古郡播磨町新島17-1）で2018年5月に実施した。載荷の対象とした鋼管杭の諸元を表1に、鋼管杭の打込みに供したバイブロハンマの諸元を表2に、試験地盤の条件を図1に示す。なお、表-2中のモータ出力Pw（kW）は、バイブロハンマの動力源に応じて、下式で求めた値である[2)]。

・電動式バイブロハンマ

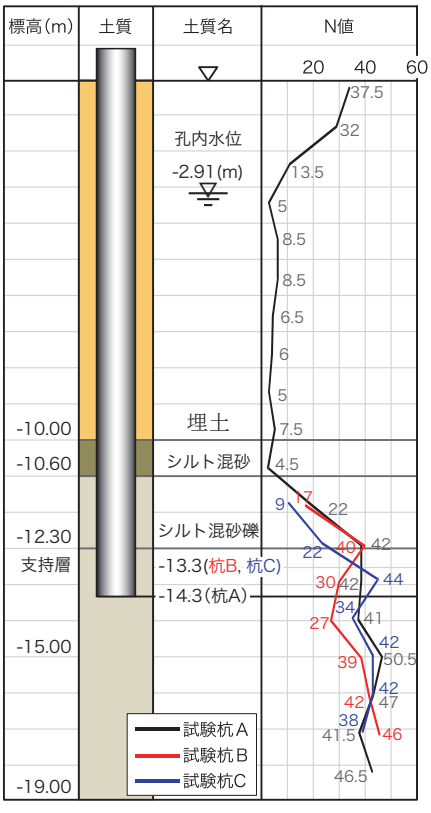


図1　2018年押込み試験における地盤条件

：$Pw \fallingdotseq 1.3 \times I_A \times E \times 10^{-3}$

ここに、I_A：定格電流値（A）

E：定格電圧値（V）

・油圧式バイブロハンマ

：$Pw = \delta \times P - \beta$

ここに、P：モータ圧力（MPa）

δ：圧力換算係数

（kW／MPa＝ℓ／sec）

β：圧力変換係数（kW）

また、試験地盤のうち－12.3m以深の支持層は洪積層、その上は沖積層または埋土である。

載荷は、杭打ち込みから約1ヶ月（28～32日後）養生した後、「杭の鉛直載荷試験方法・同解説　第一回改訂版」（地盤工学会）[3]に基づき、多サイクル方式により行った。載荷装置は、荷重を載荷する油圧ジャッキ、反力を反力杭に伝える載荷桁および反力杭から成る構成とした。杭の打設状況を写真1に、載荷試験状況を写真2に示す。また、杭およびボーリング孔の配置を図2に、ひずみゲージ等の計器取付け位置を図3に示す。

試験杭は、実工事における杭の支持力特性を忠実に再現できるように、一般的な工事に倣い杭基礎施工便覧（平成27年3月、日本道路協会）に掲載される既製杭の管理基準の例に準拠し、管理基準を十分に満足する精度で施工した。

写真1　杭打設状況（試験杭A）

写真2　載荷試験状況（桁組と杭頭載荷状況）

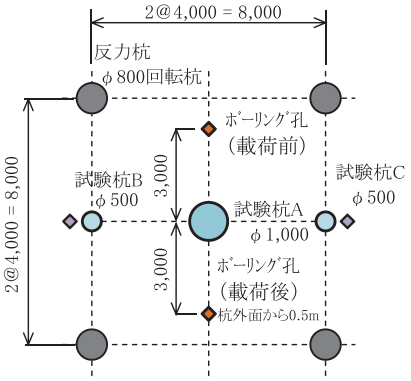


図2　杭とボーリング孔の配置

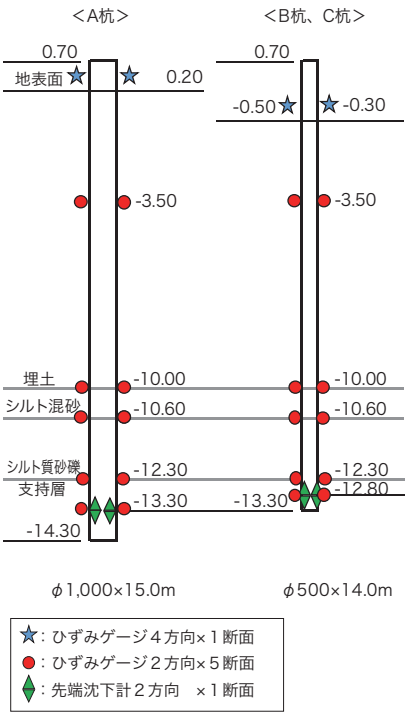


図3　ひずみゲージ等計器取付け位置

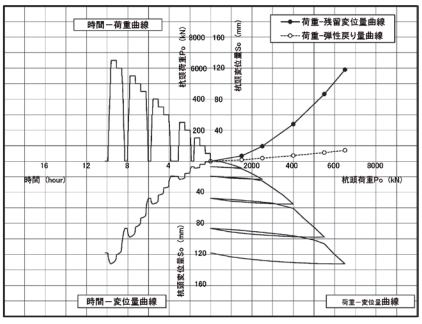
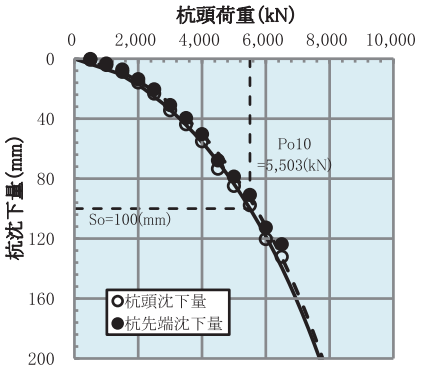


図4　試験結果総合図（試験杭A）

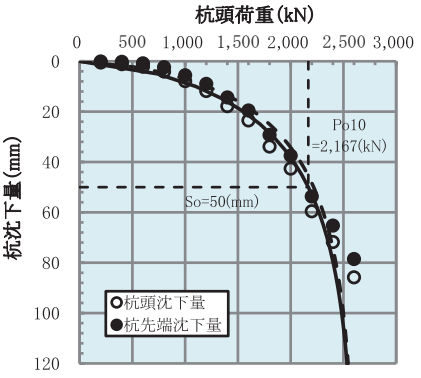
2.2　試験結果

代表的な試験結果を図4～8に示す。図-5～7には、土木研究所資料第4374



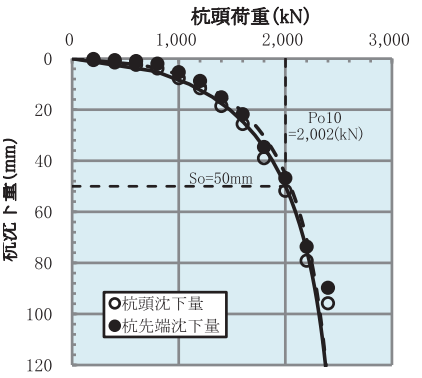
項目		値
杭頭における極限持続力	Pou（kN）	13,942
変位指数	m	0.675
杭頭変位の特性値	Sos（mm）	277.57

図5　杭頭荷重と杭沈下量（試験杭A）



項目		値
杭頭における極限持続力	Pou（kN）	2,637
変位指数	m	0.721
杭頭変位の特性値	Sos（mm）	23.49

図6　杭頭荷重と杭沈下量（試験杭B）



項目		値
杭頭における極限持続力	Pou（kN）	2,567
変位指数	m	0.619
杭頭変位の特性値	Sos（mm）	25.60

図7　杭頭荷重と杭沈下量（試験杭C）

号[4]（以下「土木研究所資料」）に基づき設定したWeibull分布近似曲線と、同曲線から求めた杭頭沈下量が杭径の10％に達したときの杭頭荷重；Po10を併せて示している。

3. 支持力特性の整理

3.1 対象とする載荷試験

支持力特性は、上記3件の載荷試験、およびこれまでに実施された9件の載荷試験結果を整理した。試験に用いた鋼管杭とバイブロハンマの諸元、杭打設から載荷までの経過時間を表3に示す。バイブロハンマの振動周波数は6.7～45Hzであり、低周波～高周波域に至る広範な周波数帯を対象にしている。試験の対象とした杭径は500mm～1,016mmである。また、杭打設から載荷までの養生期間は、記録が残っているものについては概ね1ヶ月弱以上である。

3.2 支持力特性の整理条件

支持力特性は、土木研究所資料の手法に準拠し整理した。したがって、極限支持力時の沈下量は杭頭が杭径の10％に達したときを採用しており、「港湾の施設の技術上の基準」[5]（以下「港湾基準」）で採用している杭先端が杭径の10％に達したときとは異なる。しかしながら、対象とした12件の試験についてみると、図9に示す通り、港湾基準に準拠の杭先端沈下量が杭径の10％に達した時の杭頭荷重は、土木研究所資料に準拠した時の荷重より約7%大きく、両者の相関も相関係数0.999と高いことから、本報の検討結果は、港湾構造物の設計にも安全側の評価として参考とすることができる。

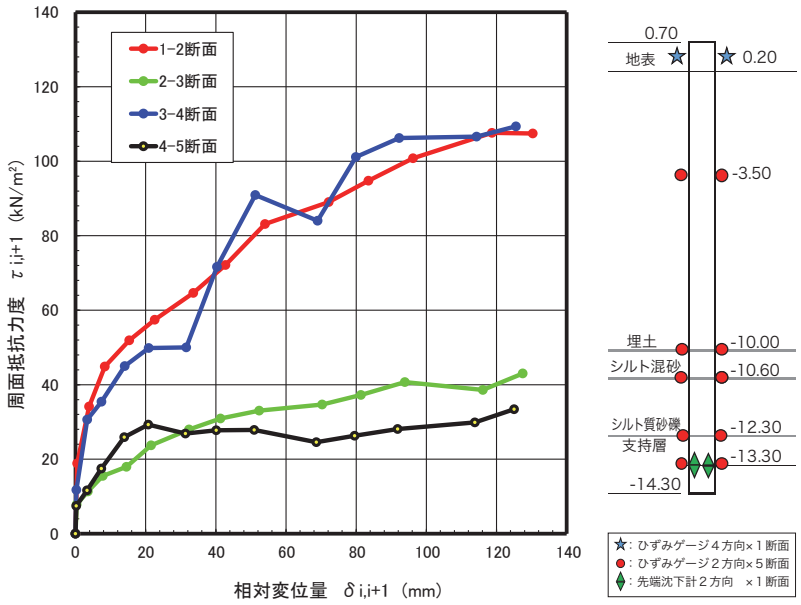


図8 周面抵抗力度と相対変位量（試験杭A）

表3 鋼管杭およびバイブロハンマ

	試験No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
鋼管杭	①直径(mm)	800	600	800	1000	600	610	600	660	1016	1000	500	500
	板厚(mm)	16	12	14	14	14	17.4	14	10.3	10.3	14	10	10
	杭長(m)	16.1	12.1	49.3	60.0	28.0	32.4	15.5	20.0	20.0	15.0	14.0	14.0
	根入れ長(m)	15.2	11.2	48.3	58.7	27.0	31.4	14.5	19.4	19.4	14.3	13.3	13.3
	②支持層への根入(m)	4.0	3.0	2.3	1.7	3.0	1.8	1.5	1.9	1.9	2.0	1.0	1.0
	根入れ比(②／①)	5.0	5.0	2.9	1.7	5.0	2.95	2.5	2.9	1.9	2.0	2.0	2.0
バイブロハンマ	モータ出力(kW)	120 150	120	200 240	240	200	240	150	75	120	180	139	142
	起振力(kN)	748 627	632	1330 1830	1830	1330	1830	1050	491	687	1116	767	929
	偏心ﾓｰﾒﾝﾄ(kg･m)	71 150	62.5	280 360	360	280	360	150	223	390	160	10	30
	振動周波数(Hz)	16 10.3	16	11 11.3	11.3	11	11.3	13.3	7.5	6.7	13.3	45	28
杭打設から載荷までの経過時間		1～2ヶ月	1ヶ月弱	2～3ヶ月	不明	1～2ヶ月	25日	23日	不明	不明	28日	31日	32日

※1. 2018年度押込み試験：試験No.10～12（No.10：試験杭A，No.11：試験杭B，No.12：試験杭C）
※2. 試験No.1では深度12.2mでバイブロを交換（上段→下段）、試験No.3では深度40.5mでバイブロを交換（上段→下段）
※3. バイブロハンマの動力源は、試験1～10が電動式、試験11、12が油圧式

3.2.1 周面抵抗力度

(1) 砂質土

砂質土について試験結果を表4に、推定式の強度変化点の算定図を図10に示す。図10より、近似曲線の交点の傾きy／x＝2.01とy座標＝53.14の端数を切り捨てると、砂質土の周面抵抗力度の推定式は f＝2N（≦50）kN／m^2 で表わせる。

以上で得られた推定式について、試験値との対比を図11に、推定精度の評価を表5に示す。なお、参考として、図11には打撃杭の試験値と推定式を併せて掲載している。また、推定精度について、土木研究所資料から抜粋して他工法により施工された杭との比較を図12に示す。

これらの図表より、N値の高い領域で試験値が推定式より大き目の値にばらついているものの、バイブロハンマ打込み杭の砂質土における推定比（試験値／推定式による計算値）は平均（幾何平均）で1.083となり、ここで採用した推定式によると平均的特性をよく表しているといえる。また、推定式のばらつきを表す変動係数についてみ

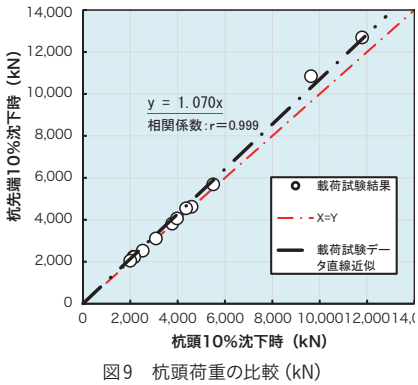


図9 杭頭荷重の比較（kN）

ると、図12よりバイブロハンマ打込み杭の砂質土における値は0.712であり、他工法と同等または比較的高い精度を有する結果であった。

(2) 粘性土

粘性土について試験結果を表6に、推定式の強度変化点の算定図を図13に示す。図13より、近似曲線の交点の傾きy／x＝1.01とy座標＝30.19の端数を切り捨てると、粘性土の周面抵抗力度の推定式はf＝c（≦30）kN／m^2で表わせる。

以上で得られた推定式について、試験値との対比を図14に、推定精度の評価を表7に、土木研究所資料から抜粋して他工法により施工された杭との推定精度の比較を図15に示す。なお、参考として、図14には打撃杭の試験値と推定式を併せて掲載している。

図15より、バイブロハンマ打込み杭の粘性土における推定式は推定比が平均(幾何平均)で0.982、変動係数が0.341であり、他工法と同程度の精度であることがわかる。なお、図14に示されるとおり、バイブロハンマ打込み杭の推定式は打撃杭と同じ傾きになるが、粘着力の比較的小さな地盤に試験が限られていたため、最大値は30kN／m^2と試験で確認できた範囲に留めている。ただし、図14においてバイブロハンマ打込み杭の試験結果は打撃杭の推定式に比較的よく沿っており、試験結果も類似した傾向を示す。しかしながら、粘性土における既往の載荷試験データ数が限られていることから、現時点では推定式f＝c（≦30）kN／m^2を提案し、今後のデータの蓄積を待ちたい。

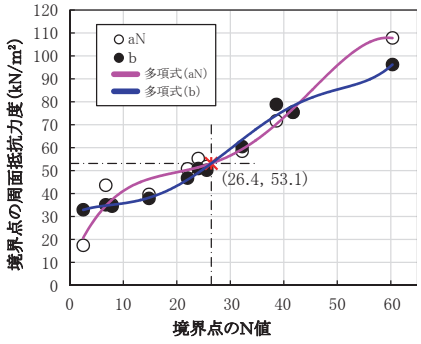


図10　強度変化点判定図（砂質土）

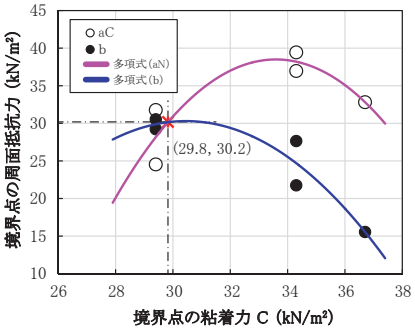


図13　強度変化点判定図(粘性土)

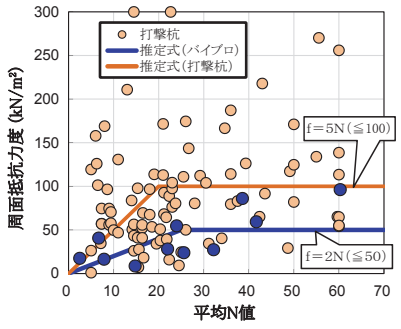


図11　周面抵抗力度の試験値と推定式（砂質土）

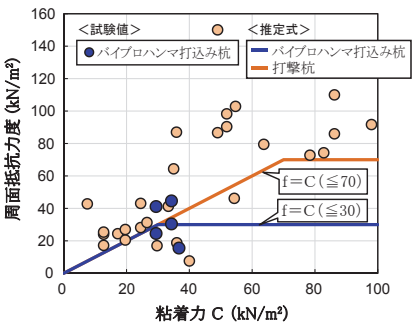


図14　周面抵抗力度の試験値と推定式（粘性土）

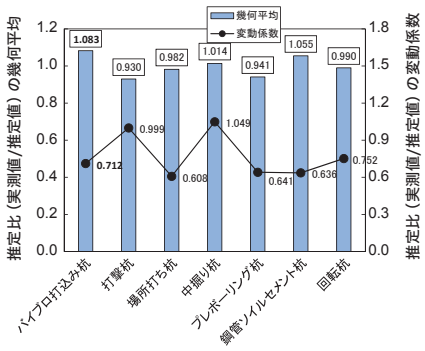


図12　周面抵抗力度推定式（砂質土）の精度

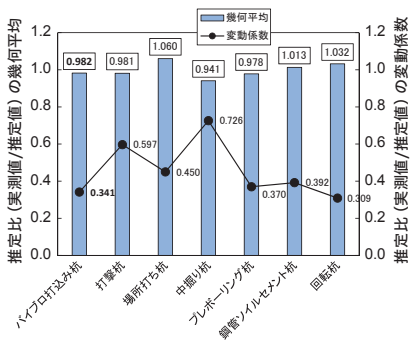


図15　周面抵抗力度推定式（粘性土（C値））の精度

3.2.2　先端抵抗力度

先端支持力度の整理は、載荷試験データが得られている砂および砂れき地盤について行った。試験結果を表8

表4　試験結果一覧（砂質土）

試験No.	深度（m） 上面	深度（m） 下面	平均N値	周面抵抗力度 f（kN／m^2）	傾きa（f／N）	土　質
3	-0.2	8.8	2.5	17.4	6.98	細砂
4	43.7	50.7	32.2	27.3	0.85	細砂
5	15.8	18.5	14.8	8.7	0.59	礫混り砂
	18.5	22	41.7	59.3	1.42	砂礫
6	0	10.3	7.9	16.4	0.92	粘土質砂
	13.3	25.4	25.6	23.9	0.93	砂～砂礫
7	3.5	6.5	24.0	54.6	2.28	砂礫
	6.5	11.5	38.6	86.1	2.23	細砂
	11.5	13.5	60.3	96.2	1.60	細砂
10	3.5	10	6.7	40.7	6.06	礫質土
	10.6	12.3	22.0	28.1	1.28	シルト質砂礫

表5　バイブロハンマ打込み杭の周面抵抗力度推定式の精度（砂質土）

試験No.	平均N値	周面抵抗力度：f（kN／m^2） 試験値	周面抵抗力度：f（kN／m^2） 推定式	推定比（試験値／推定値）	土質
3	2.5	17.4	5.0	3.490	細砂
4	32.2	27.3	50.0	0.546	細砂
5	14.8	8.7	29.6	0.294	礫混り砂
	41.7	59.3	50.0	1.186	砂礫
6	7.9	16.4	15.8	1.038	粘土質砂
	25.6	23.9	50.0	0.477	砂～砂礫
7	24.0	54.6	48.0	1.138	砂礫
	38.6	86.1	50.0	1.721	細砂
	60.3	96.2	50.0	1.925	細砂
10	6.7	40.7	13.4	3.031	礫質土
	22.0	28.1	44.0	0.638	シルト質砂礫
		幾何平均：GM		1.083	
		標準偏差：σ		1.002	
		変動係数：CV		0.712	

表6　試験結果一覧（粘性土）

試験No.	深度（m） 上面	深度（m） 下面	平均N値	粘着力 c（kN/m^2）	周面抵抗力度 f（kN／m^2）	傾きa（f／N）
5	0	18	0.4	36.7	15.6	0.42
8	0.9	4.1	2.9	29.4	41.1	1.40
	7.3	13.2	1.4	34.3	44.6	1.30
9	0.9	3.9	2.9	29.4	24.5	0.83
	6.9	12.9	1.3	34.3	30.4	0.89

表7　バイブロハンマ打込み杭の周面抵抗力度推定式の精度評価（粘性土）

試験No.	粘着力 c（kN/m^2）	周面抵抗力度：f（kN／m^2） 試験値	周面抵抗力度：f（kN／m^2） 推定式	推定比（試験値／推定値）
5	36.7	15.6	30.0	0.518
8	29.4	41.1	29.4	1.399
	34.3	44.6	30.0	1.488
9	29.4	24.5	29.4	0.835
	34.3	30.4	30.0	1.015
		幾何平均：GM		0.982
		標準偏差：σ		0.359
		変動係数：CV		0.341

に、推定式の強度変化点算定図を図16に示す。図16より、近似曲線の交点の傾きy／x=130.08の端数を切り捨て、y座標＝56.8より境界点のN値に計測上の上限値50を採用すると、推定式はqu＝130N（≦6500）kN／m^{2}で表わせる。

以上で得られた推定式について、試験値との対比を図17に、推定精度の評価を表9に示す。なお、参考として、図17には打撃杭の試験値と推定式を併せて掲載している。また、土木研究所資料から抜粋して、他工法により施工された杭との推定精度の比較を図-18、19に示す。図18は砂地盤における先端抵抗力度推定式の精度であり、図19は砂れき地盤における推定式の精度であるが、バイブロハンマ打込み杭は試験データ数が少ないため両者共通の値としている。

表9より、試験値と推定式による計算値の比である推定比は平均（幾何平均）で1.069となり、推定式によると平均的特性をよく表していることがわかる。また、図18、19より、バイブロハンマ打込み杭の変動係数は0.318であり、他工法と同等の精度を有していることがわかる。

表8　試験結果一覧（先端支持力度（砂・砂れき））

試験No.	支持層の平均N値	極限支持力 Po_{10} (kN)	極限支持力時の杭先端抵抗力と抵抗力度		傾き a qp_{10}／N	支持層の土質
			杭先端抵抗力 Pp_{10} (kN)	抵抗力度 qp_{10} (kN/m^2)		
1	141.0	4,591	3,609	7,179	50.9	細砂
2	87.2	2,136	1,866	6,601	75.7	粘土質砂礫
3	89.1	9,634	3,409	6,783	76.1	礫混じり細砂
4	53.0	11,793	3,946	5,024	94.8	礫混じり粗砂
5	56.3	3,772	2,768	9,788	173.9	砂礫
6	48.3	4,359	3,512	12,034	249.1	砂礫
7	63.8	3,975	2,343	8,285	129.9	細砂
10	46.3	5,503	3,351	4,267	92.2	シルト混り砂礫
11	29.0	2,167	835	4,253	146.6	シルト混り砂礫
12	38.0	2,002	707	3,601	94.8	シルト混り砂礫

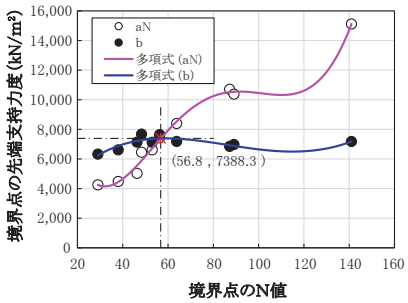


図16　強度変化点判定図（砂・砂れき）

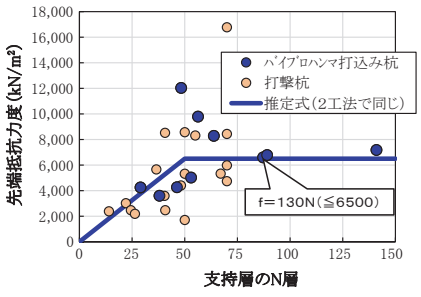


図17　先端抵抗力度の試験値と推定式（砂・砂れき）

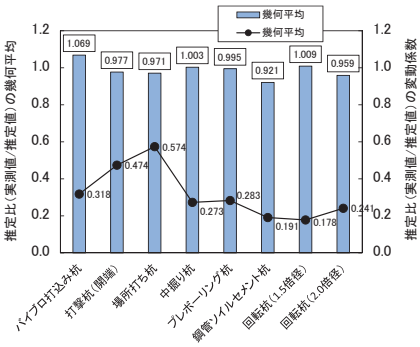


図18　先端抵抗力度推定式（砂地盤）の精度

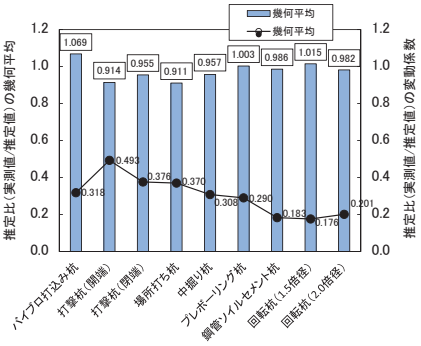


図19　先端抵抗力度推定式（砂れき地盤）の精度

4. まとめ

バイブロハンマ打込み杭について、既往の試験に追加して3件の載荷試験（押込み試験）を実施した。これにより12件となった押込み試験結果に基づき、バイブロハンマ打込み杭の鉛直支持力特性を整理した。その結果、砂質土および粘性土の周面抵抗力度と砂・砂れき地盤の先端抵抗力度について推定式を得た。

しかしながら、今回の検討は限られた試験データ数に基づく整理であること、特にバイブロハンマ工法で施工した杭支持力の回復特性（セットアップ率）については、未解明な部分が多いため、今後さらに試験データの蓄積と支持力発現のメカニズムの解明を図るとともに、バイブロハンマ工法を支持杭として用いたときの打ち止め管理手法の確立等に向けて、引き続き取り組んでいきたい。

表9　バイブロハンマ打込み杭の先端抵抗力度推定式の精度（砂・砂れき）

試験No.	支持層のN値	先端抵抗力度：qu (kN／m^2)		推定比（試験値／推定値）
		試験値	推定式	
1	141	7,179	6,500	1.104
2	87.2	6,601	6,500	1.016
3	89.1	6,783	6,500	1.044
4	53	5,024	6,500	0.773
5	56.3	9,788	6,500	1.506
6	48.3	12,034	6,279	1.917
7	63.8	8,285	6,500	1.275
10	46.3	4,267	6,019	0.709
11	29	4,253	3,770	1.128
12	38	3,601	4,940	0.729
		幾何平均：GM		1.069
		標準偏差：σ		0.356
		変動係数：CV		0.318

【参考文献】

1) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説　Ⅳ下部構造編，改訂版第1刷，平成29年11月
2) バイブロハンマ工法技術研究会：バイブロハンマ設計施工便覧，平成27年10月
3) 地盤工学会：地盤工学会基準　杭の鉛直載荷試験方法・同解説，第一回改訂版，2002.5.
4) 七澤利明,河野哲也,宮原清,大城一徳：杭の軸方向の支持力及びばね定数推定式の見直しと推定精度に関する研究，土木研究所資料，第4374号，2018.3.
5) 国土交通省港湾局監修，公益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，2018.7

<参考資料>

実工事におけるバイブロハンマ併用打撃工法の採用事例

主に港湾桟橋施設や臨港道路の鋼管杭・鋼管矢板基礎の整備では、特に表層～中層の軟弱地盤における杭の打設精度を確保するためバイブロハンマを用いて杭の建て込みを行った後、油圧ハンマにより打撃し打ち止め管理を行う「バイブロハンマ併用打撃工法」が用いられることが多い。

ここでは至近の実工事においてバイブロハンマ併用打撃工法が採用された事例について紹介する[6-8)]。

「東京国際クルーズターミナルの整備」での工事事例

(1) 整備概要

東京都では、港湾機能と都市機能が有機的に統合した「世界に誇る都市型総合港湾・東京港」の創造を目指し港湾施設の整備に取り組んでいる。

近年、世界のクルーズ市場は、客船の大型化とクルーズの大衆化により急成長しており、世界のクルーズ人口は2,000万人を超え、10年前の2倍程度に増加している。特にアジアではクルーズ人口の急増が見込まれており、我が国でも、2017年の訪日クルーズ旅客数は前年比27.0%増の252.9万人、我が国港湾への寄港回数は前年比37.0%増の2,764回となり、過去最高となっている（国土交通省資料）。また、政府は2020年の訪日クルーズ旅客数の目標値を100万人から500万人に引き上げるなど、さらなる増加が見込まれている。

現在、東京港では、晴海客船ふ頭でクルーズ客船を受け入れているが、同ふ頭はレインボーブリッジの内側に位置しているため、利用できるのは桁下（海面より52m）を通過できるおおむね7万総トン級までのクルーズ客船に限られている。

写真3　鋼管杭打設状況

表10　ジャケット諸元一覧表

ジャケット	高さ (m)	面積 (m^2)	重量 (t)
A	48.0	1,968	538
B	70.0	2,870	1,340
C	72.0	2,952	1,343
D	60.0	2,460	1,150
計	250.0	10,250	4,371

このため、レインボーブリッジ外側の臨海副都心地域に、世界最大級のクルーズ客船が利用できるよう、東京2020年オリンピック・パラリンピック競技大会開催までに、新たな客船ふ頭である「東京国際クルーズターミナル」(図20) を整備する。

(2) 東京国際クルーズターミナルの主要スペック

ターミナル基礎は、鋼管杭84本（南北方向に21本×4本)、鋼製のジャケット4基（表10参照）からなる全長252m、幅41mの桟橋構造であり、新築のターミナルビルは、ジャケットB、C上に建設され、ターミナル基礎と一体構造となる。鋼管杭はターミナルビルの建築柱と一体化構造とし、4階建てのビルの荷重を支えるため大口径鋼管杭（直径2,000mm）を採用している。

(3) 杭施工方法

鋼管杭は、1,600t吊旋回式起重機船（写真3）を使用してバイブロハンマ（ZERO-320MR）による1次打設、油圧ハンマ（最大打撃エネルギー280kNm）による2次打設で施工した（図21参照)。油圧ハンマには吸遮音材を、ヤットコ内には反響防止材を設置して周囲への騒音低減対策を行った。

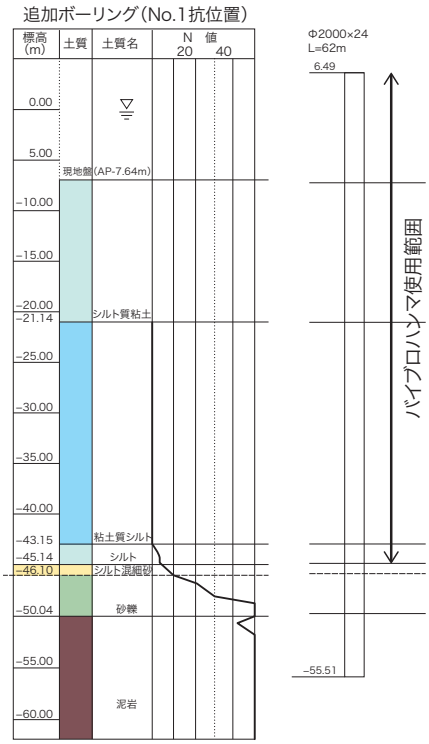


図21 鋼管杭打設方法と深度の関係

鋼管杭はジャケット据付前の先行杭（ジャケットB、Cで8本／基）と後行杭（ジャケットB、Cで16本／基）に分けて打設した。

【参考文献】

6）一般社団法人経済調査会：東京国際クルーズターミナルの整備状況について，けんせつPlaza（http://www.kensetsu-plaza.com/kiji/post/25518）

7）森野亮吾、黒米郁、宮司剛志、山下晃三、水谷崇亮、山下久男：東京港新客船ふ頭における大口径鋼管杭の載荷試験（その1）、第53回地盤工学研究発表会、2018.7

8）長山英樹、宮司剛志、亀井秀一、小林剛：東京港新客船ふ頭の大口径鋼管杭の載荷試験、基礎工、Vol.47、No.8、P28～31、2019.8.

図20　完成予想図

1 鋼管杭施工管理士資格制度のうごき

2017年 8月　(一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会、(一社) 全国基礎工事業団体連合会、(一社) 全国圧入協会の3協会が鋼管杭施工管理士資格制度を創設
2018年11月　鋼管杭施工管理士検定試験 (第1回) を全国4会場 (仙台、東京、大阪、福岡) で実施
2019年11月　鋼管杭施工管理士検定試験 (第2回) を全国4会場 (仙台、東京、大阪、福岡) で実施
2020年 1月　鋼管杭施工管理士検定試験 (第2回) の合格者発表
2020年11月　鋼管杭施工管理士検定試験 (第3回) を全国4会場 (仙台、東京、大阪、福岡) で実施予定

2 技術講習会・説明会開催実績

(1) 鋼管杭施工管理技術者育成講習会 (共催)

・主　　催：(一社) 全国基礎工事業団体連合会
・開 催 日：①大阪会場：2019年7月28日　大阪科学技術センター
　　②札幌会場：2019年8月 4日　TKP札幌ビジネスセンター
　　③東京会場：2019年9月15日　連合会館
・内　　容：テキスト「鋼管杭ー施工と施工管理ー」

(2) その他 (講師参加)

①茨城県建設コンサルタンツ協会講習会
・主　　催：(一社) 茨城県建設コンサルタンツ協会
・開 催 日：2019年6月7日　茨城産業会館ビル
・内　　容：H29道路橋示方書による鋼管杭基礎の設計　ー概要と留意点ー

②2019年度　鋼構造技術者育成講習会
・主　　催：(一社) 日本鋼構造協会
・開 催 日：2019年6月13日　BMT貸会議室
・発表内容：鋼製基礎・鋼管杭について

③TBS工法協会研修会
・主　　催：TBS工法協会
・開 催 日：2019年6月14日　パレスホテル大宮
・発表内容：(一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会の最近の取り組みについて

④地盤技術フォーラム2019
・主　　催：フジサンケイ ビジネスアイ (日本工業新聞社)
・開 催 日：2019年9月12日　東京ビッグサイト
・発表内容：鋼管矢板基礎の設計・施工のポイントと事例紹介

⑤建設コンサルタンツ協会講習会
・主　　催：(一社) 建設コンサルタンツ協会　関東支部
・開 催 日：2019年10月11日　江戸東京博物館
・内　　容：鋼管杭・鋼矢板を用いた耐震補方法の紹介～設計・施工の留意点～

⑥2019年度　鋼構造技術者育成講習会 (関西地区)
・主　　催：(一社) 日本鋼構造協会
・開 催 日：2019年10月21日　大阪市立大学文化交流センター
・発表内容：鋼製基礎・鋼管杭について

3 協会発行の新出版物のご案内

●重防食鋼管杭・鋼管矢板製品仕様書　2019年2月
●重防食鋼矢板製品仕様書改訂8版　2019年2月
●鋼管杭ー施工と施工管理ー 改訂2版　2019年6月
●鋼管杭の打撃工法施工管理要領 Edition 1.0　2019年7月
●鋼管杭・鋼管矢板標準製作仕様書 (第7版)　2019年7月

4 各種技術活動に参画

(1) 外部委員会活動

◇ (公社) 日本道路協会
- 下部構造小委員会
- 杭基礎便覧WG
- 鋼管矢板基礎設計施工便覧改定WG

◇ (一社) 日本建築学会
- 基礎構造部材の強度と変形性能小委員会　鋼管杭性能検討WG
- 杭鉛直挙動検討小委員会　杭鉛直WG
- 杭耐震設計小委員会　鋼管杭性能評価WG
- 建築基礎構造設計指針改定小委員会　施工管理WG
- 建築基礎構造設計指針　設計例改定小委員会
- 建築工事標準仕様書 JASS 3・4 改定小委員会

◇ (一社) 公共建築協会　平成31年版建築工事監理指針改訂委員会
◇ (公社) 地盤工学会　杭の鉛直載荷試験基準改訂WG
◇ 国際圧入学会　PFS工法の適用条件の拡大と地震時挙動評価に関する技術委員会
◇ 東京都　東京港腐食対策技術検討会
◇ (一財) 沿岸技術センター　根入れ式鋼板セル工法および鋼矢板セル工法技術マニュアル改訂委員会

(2) 共同研究

・「波崎海洋研究施設における鋼管杭の防食法に関する長期暴露試験に関する研究」(港空研ほか)

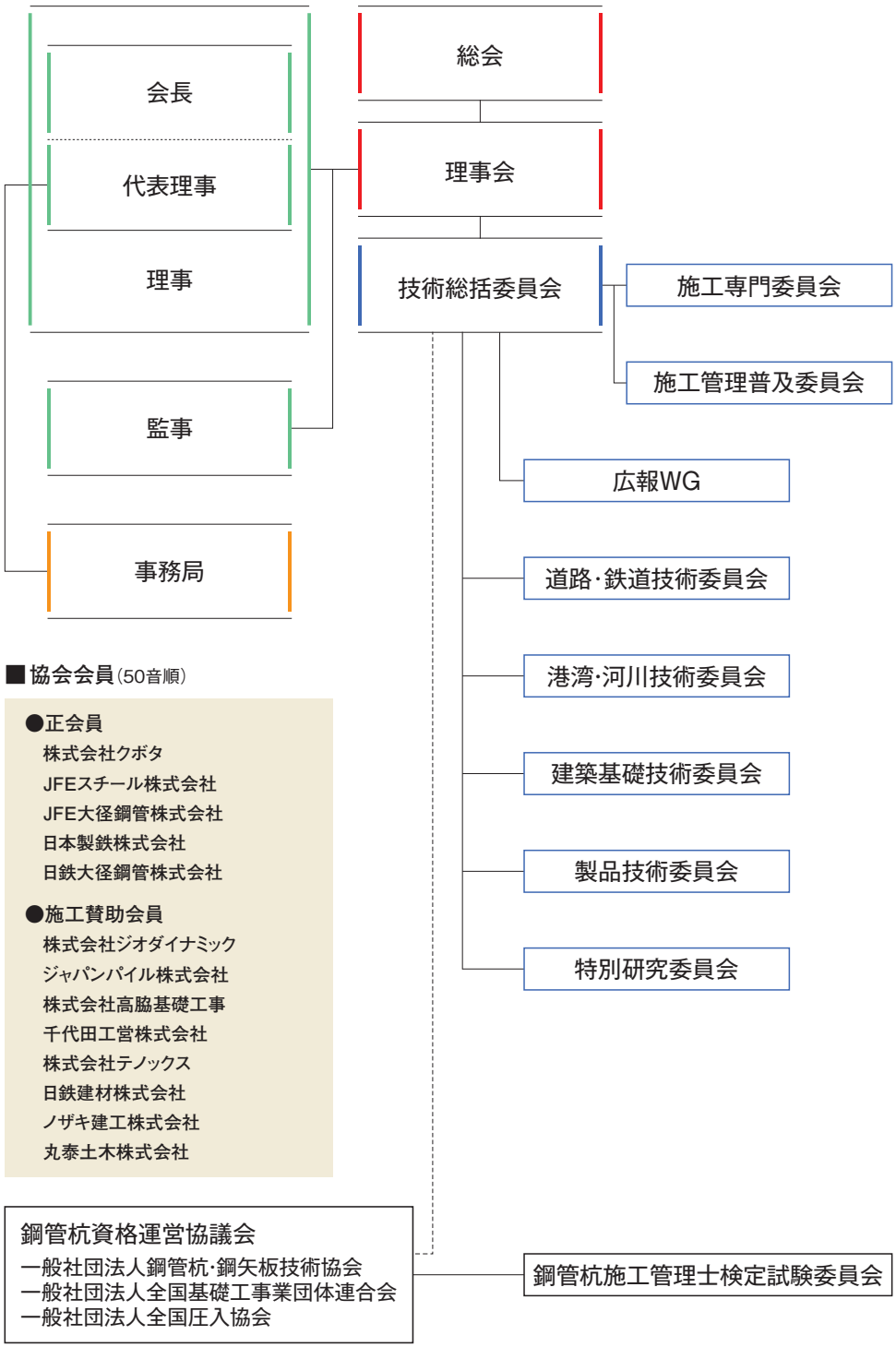
5 技術論文・報文の発表

❶芥川博昭・西山輝樹 著：国土強靭化に資する鋼矢板：ふぇらむVol.24,No.4
❷北村卓也・高橋洋敬・辰見夕一・相和明男 著 著：バイブロハンマ打込み杭の支持力特性に関する検討：第54回地盤工学研究発表会
❸齋藤智哉・佐藤睦月・的場萌子・木村祥裕・廣瀬智治 著：引張軸力を受ける杭頭部コンクリート充填鋼管杭の正負交番載荷実験：第54回地盤工学研究発表会
❹北村卓也・高橋洋敬・相和明男・辰見夕一 著：バイブロハンマ打込み杭の押込み試験と支持力特性に関する検討：基礎工2019年8月号Vol.47,No.8
❺塩崎禎郎・永尾直也・相和明男 著：桟橋鋼管杭のレベル2地震動対応断面の探索方法について：2019年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会
❻堤杏紗・小濱英司・塩崎禎郎 著：増深改良した矢板式係船岸における既設構造物の取扱いに関する地震応答解析：2019年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会
❼及川森・辰見夕一・相和明男・小濱英司 著：矢板式係船岸を既設前面に新設する場合の設計方法に関する考察：2019年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会
❽廣瀬智治・佐藤睦月・古川幸・木村祥裕 著：ずれ止め付きコンクリート充填鋼管杭頭部の終局軸圧縮耐力その 1　数値解析による応力伝達機構の解明：2019年度日本建築学会大会 (北陸)
❾佐藤睦月・廣瀬智治・古川幸・木村祥裕 著：ずれ止め付きコンクリート充填鋼管杭頭部の終局軸圧縮耐力その 2　鋼管杭頭部の終局軸圧縮耐力：2019年度日本建築学会大会 (北陸)
❿柳悦孝・市川和臣・廣瀬智治・高野公寿・内藤彩乃・宮北啓伍・齋藤智哉・木村祥裕 著：一定引張軸力と繰返し水平力を受ける鋼管杭頭部の弾塑性座屈性状その1 実験概要：2019年度日本建築学会大会 (北陸)
⓫市川和臣・柳悦孝・廣瀬智治・高野公寿・内藤彩乃・宮北啓伍・齋藤智哉・木村祥裕 著：一定引張軸力と繰返し水平力を受ける鋼管杭頭部の弾塑性座屈性状その2 実験結果：2019年度日本建築学会大会 (北陸)
⓬廣瀬智治・柳悦孝・市川和臣・高野公寿・内藤彩乃・宮北啓伍・齋藤智哉・木村祥裕 著：一定引張軸力と繰返し水平力を受ける鋼管杭頭部の弾塑性座屈性状その3 有限要素解析による鋼管杭と充填コンクリートの応力伝達機構の解明：2019年度日本建築学会大会 (北陸)
⓭木村祥裕・廣瀬智治著：鋼管杭の保有性能：基礎工2020年2月号Vol.48,No.2

明日を築く No.88

一般社団法人

鋼管杭・鋼矢板技術協会組織図（2020年3月）



■協会会員（50音順）

●正会員
- 株式会社クボタ
- JFEスチール株式会社
- JFE大径鋼管株式会社
- 日本製鉄株式会社
- 日鉄大径鋼管株式会社

●施工賛助会員
- 株式会社ジオダイナミック
- ジャパンパイル株式会社
- 株式会社高脇基礎工事
- 千代田工営株式会社
- 株式会社テノックス
- 日鉄建材株式会社
- ノザキ建工株式会社
- 丸泰土木株式会社

2020年3月31日発行　禁転載

発行 | 一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会
〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10（鉄鋼会館6階）　(03) 3669-2437

制作 | 株式会社トライ
〒113-0021 東京都文京区本駒込3-9-3　(03) 3824-7230