

東京国際空港 D 滑走路建設工事における 鋼管矢板打設工事への機械式継手の適用

高木優任¹，井口公一²，新原雄二³，永谷達也⁴，野口孝俊⁵

¹正会員 博士(工学) 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)

²正会員 新日本製鐵株式会社 建材開発技術部(〒100-8071 東京都千代田区丸の内 2-6-1)

³正会員 鹿島建設株式会社 東京土木支店 羽田総合事務所(〒135-0064 東京都江東区青海 2 丁目地先)

⁴正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部(〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11)

⁵正会員 国土交通省 関東地方整備局 東京空港整備事務所(〒144-0041 東京都大田区羽田空港 3-5-7)

埋立／栈橋ハイブリッド構造の東京国際空港 D 滑走路建設工事において、埋立部と栈橋部との接続部に適用される鋼管矢板の接合に機械式継手が採用された。この機械式継手を対象に、事前に実施工と同規模での機械式継手付鋼管杭の打撃施工を実施し、打撃施工後も機械式継手が所要の性能を発揮することを再確認した。施工・急速載荷試験の終了後、機械式継手を含む鋼管を回収して曲げ試験を行い、所要の設計耐力を確認するとともに、終局状態において継手の一部に応力集中が確認されたため、これを緩和する形状改良を実施し、さらなる安全性の確保を図った。以上の確認試験を実施した後、機械式継手を実工事の施工へ適用し、その施工性・接合時間などが所要の性能を発揮することを現地にて検証・確認した。

キーワード： 機械式継手，鋼管，打撃施工

1. はじめに

埋立／栈橋ハイブリッド構造の東京国際空港 D 滑走路建設工事(以下、「本工事」と称する)において、埋立部と栈橋部との接続部に長さ 74.5m、直径 1,600mm の鋼管矢板 641 本で構成される井筒式の護岸構造(図-1)が採用された¹⁾。この鋼管矢板の施工では、その施工場所が現空港の航空機進入路の直下で高さ制限(約 AP+32m 以下に制限)を受けるため、航空機が離着陸しない夜間時間帯のみでの施工が必要となった。そのため、時間制約で施工が中断し、鋼管矢板が海上に残置されても航空機の運行に支障をきたさないよう、鋼管矢板 1 本を 2 分割(約 48.5m+約 26.0m)し、現場で接続する計画が立てられた。これに伴い、基準杭として先行打設する井筒護岸格点部の鋼管矢板 50 本については、正確な位置決め作業が必要になる等の理由で、溶接接合では所定時間・工期内での施工が困難となった。この問題を解決するため、1 箇所あたり 15 分程度での接合が可能となる、図-2 に示す機械式継手(ラクニカンジョイント)の適用が計画された。この機械式継手は、鋼管径最大 1,600mm、板厚最大 30mm までのサイ

ズ及び振動・打撃を含む各種施工法への適用が可能なものである^{2),3)}。しかし一方で、本工事で適用が予定される径 1,600mm、板厚 24mm という最大クラスの機械式継手については、このサイズに適用する最大打撃能力を有する杭打機を使用した施工実績がなかった⁴⁾。そこで、本工事の重要性に鑑み、事前に実施工と同規模での機械式継手付鋼管杭の打撃施工を実施し、打撃施工後も機械式継手が所要の性能を発揮することを再確認した上で本工事への適用を図ることとした。

本論文では、上記の目的で実施した各種確認試験の結果、ならびにそれを受けての本工事の実施工における機械式継手付鋼管矢板の施工結果について報告する。

2. 検討方法

本検討の目的は、これまでに経験のない大規模な実構造物に機械式継手を適用するにあたり、最大打撃能力を有する杭打機での打撃施工が機械式継手に変形、強度低下等の悪影響を与えることがないかどうかを確認することにある。

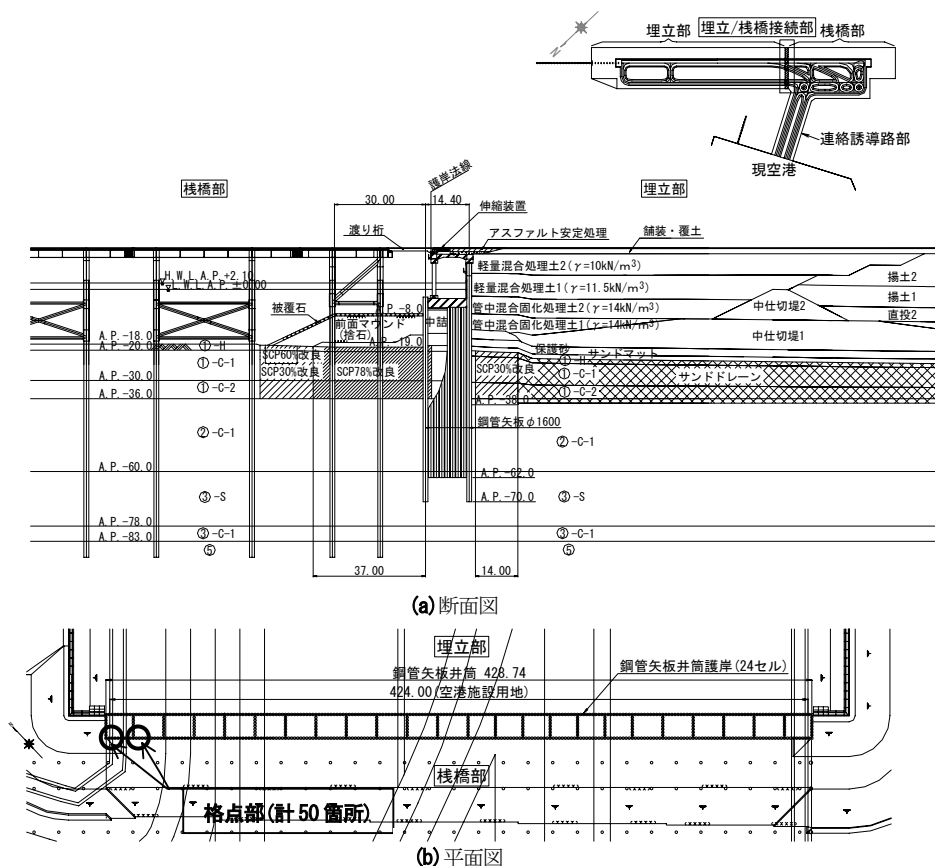


図-1 鋼管矢板井筒護岸構造

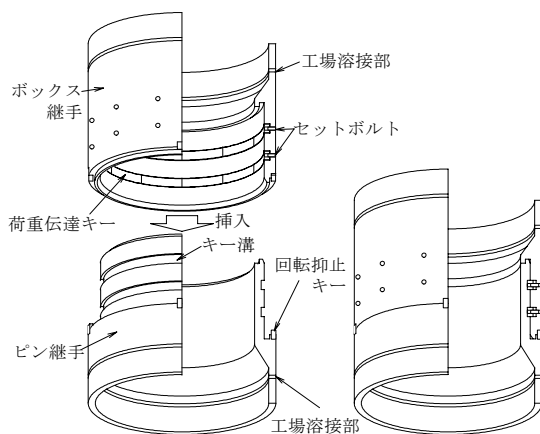


図-2 機械式継手

そこで、本工事に際して事前に実施された栈橋部の基礎杭の載荷試験^{5),6)}を利用し、施工される載荷試験杭に機械式継手を組み込み、油圧ハンマによる打撃施工履歴を与え、その影響の有無を確認した。

機械式継手を含む載荷試験杭の概要を図-3に示す。本載荷試験杭は、打撃によりAP-69.5m以深の支持層に3D(D:杭径)根入れし、急速載荷試験、ならびに水平載荷試験を行うものである。機械式継手は海底面より上部、かつ水平載荷試験の載荷点よりも上部にくる

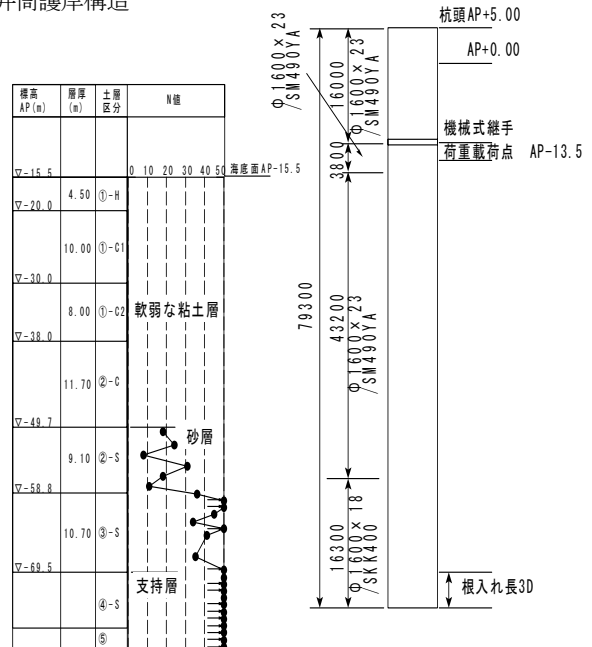


図-3 載荷試験杭の概要

ように配置し、一連の試験完了後、機械式継手を含む載荷試験杭を水中切断して回収することとした。回収後、外観の観察を行うとともに曲げ載荷試験を実施して耐力の確認を行い、最後に機械式継手を解体して継手の状態を観察した。

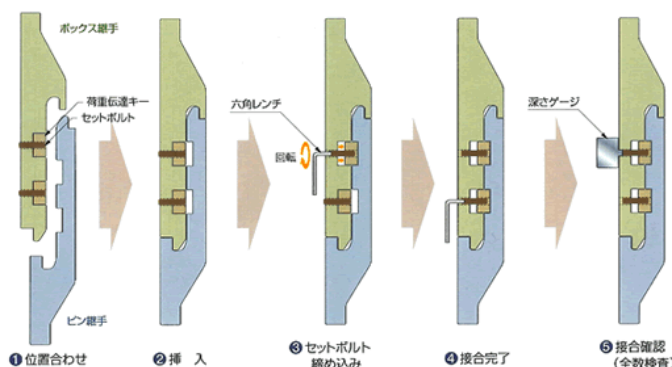


図-4 機械式継手の接合手順

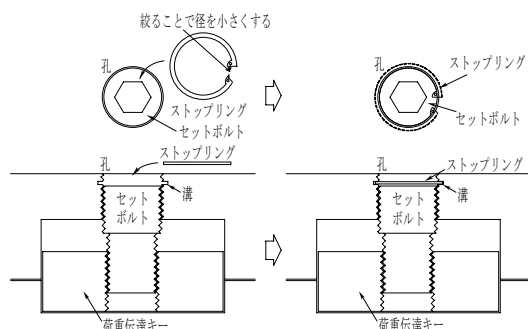


図-5 ストップリング

以上の確認試験を実施し、本工事への機械式継手の適用に問題が無いことを確認した後、機械式継手を実施工へ適用し、その施工性・接合時間などが所要の性能を発揮することを現地にて検証した。

以下、各項目の詳細について述べる。

3. 打撃施工・急速載荷試験による検証

(1) 打撃施工における観察項目

本工事に適用する機械式継手は、セットボルトにより荷重伝達キーを押し込み、この荷重伝達キーがせん断キーとなって引張力に抵抗する構造になっている(図-4)。打撃によりセットボルトが緩むと、荷重伝達キーが抜け出し、引張力が伝達できなくなる恐れがある。そこで、継手を打撃施工に適用する際には、過去の実績に基づいた対策として、図-5に示すストップリングと呼ぶセットボルトの緩み止めを装着することを標準にしている。このストップリングはセットボルト頭部のネジ溝に嵌め込まれ、セットボルトのネジ溝上の抜け上がりを防止する構造となっている。

打撃施工ならびに急速載荷試験の前後で計測と観察を行った項目を表-1に示す。ここでは、打撃、および急速載荷により継手に明らかな変状が現れていないかどうかを確認するために、外形寸法の変化、割れ、継手の外れなどを確認するとともに、継手の強度を確保する上で重要な、セットボルトの緩みによる荷重伝達キーの抜けが生じていないかを確認した。

表-1 機械式継手の接合完了時

及び打撃試験終了時の検査項目

部位	計測・確認項目	確認方法
継手、母材	- 継手部に变形、亀裂などはないか。 - 嵌合状態が保たれているか。ガタが大きくなっていないか。	目視、写真
継手部の周長	継手部の周長を測定する	メジャー等
ボルト	- セットボルトに変状、変形はないか。 - セットボルトの破断はないか。 - セットボルトの緩みはないか。 - ストップリングに変状、脱落はないか。	目視、写真 ボルトの締込み深さ(限界ゲージ、ノギス) ボルトの緩みの確認(六角レンチ)



(a) 全景



(b) 機械式継手付近

写真-1 打撃施工状況

(2) 施工の経過

機械式継手を含む全長79.3mの試験杭を1本もの(継手は工場で接合)で工場にて製作後、海上輸送で現場に搬入し、クレーン船にて吊り上げて移動、位置決めを行った後、自重で自沈させ、沈下が停止してから打撃を開始した。打撃施工の様子を写真-1に示す。打撃に使用したのは、表-2に示す能力を有するフライン

表－２ 打撃ハンマの性能

型式	IHC-S280
最大打撃エネルギー	280kN・m
最小打撃エネルギー	10kN・m
最大打撃エネルギーでの打撃回数	45 回/分
ラム質量	13.6t
本体質量	29.0t
外径	915mm
長さ	10190mm

グハンマ (IHC-S280) である。

施工の際、約 3,000 回の打撃を行った。打ち止め域ではハンマ打撃による衝撃载荷試験も行ったが、杭の挙動に異常は認められず、所定の深度まで問題なく打ち込むことができた^{5),6)}。打撃施工後、急速载荷試験(スタナミック試験)が実施された^{5),6)}。この試験では杭頭部で 39,000kN の動的荷重が作用した。この荷重は鋼管(φ 1600,t=23mm,SM490Y)の応力度で 342N/mm²に相当し、鋼管の保証降伏点(355N/mm²)に近い荷重が作用したことになる。

一連の载荷が終了した後、試験杭を水中切断して継手を含む鋼管を回収し、詳細調査を行った。

(3) 外観調査

回収後の継手部の外観を写真－２に示す。打設から回収まで海中に約 2 ヶ月間(2007. 4～6 月)設置されていたため、表面には海洋生物の付着や軽微な錆が見られるが、継手部での異常は認められなかった。また、継手部に設置されているストップリングの脱落、ならびにセットボルトの打撃による緩み・外観上の変状等がないことを全数 32 箇所について確認した。

また、セットボルト位置での継手の周長も計測したが、施工の前後で 1mm の単位まで全く同じ数値で変化は認められず、座屈などによる周長の変化は生じていないことが確認された。

(4) 嵌合面の調査

次章で述べる曲げ载荷試験の終了後、機械式継手を解体し嵌合面の観察を行った。解体は、継手と鋼管の溶接部分をガス切断で輪切りにし、継手を幅 40cm 程度の短冊状に鋸断して、継手相互を円周方向にスライドさせて外した。写真－３に、嵌合面および荷重伝達キーの状態の様子を示す。

鋸断後の継手のスライドは全数スムーズに可能であり、嵌合面での固着は見られなかった。また、荷重伝達キーは全数、確実にピン継手のキー溝に嵌り込んでおり、嵌合状態は良好であった。写真－３に示すように、嵌合面内部の錆の発生状況も外面より軽微であった⁷⁾。なお、嵌合面を仔細に観察したが、打撃施工による変状(当てキズ・擦りキズ・へこみ等)は見られず、打撃施工が継手に影響を及ぼしていないことを確認した。



(a) 継手付近全景



(b) セットボルト部拡大

写真－２ 引抜後の継手



写真－３ 嵌合面の状況

(5) 打撃の影響のまとめ

以上に述べた調査結果から、打撃が機械式継手に損傷・変形等の影響を与えた形跡は見られず、打撃の影響はないことが確認された。

４． 継手の曲げ試験による耐力の確認

(1) 試験方法

外観観察の後、現地より切断・回収した施工試験杭の頭部に载荷点、支点などの補強加工を行い、写真－４に示すように４点曲げ载荷試験を実施した。試験体

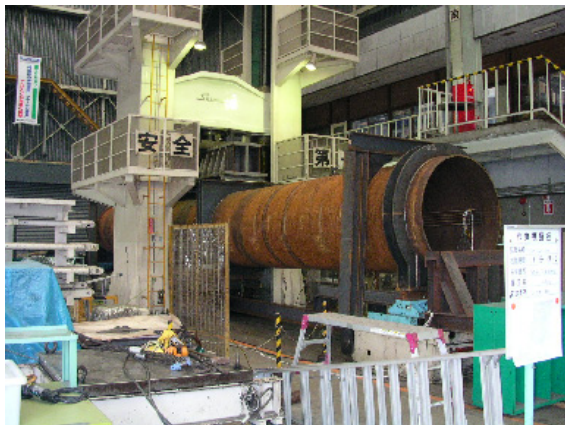
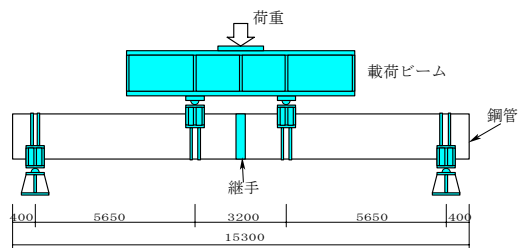


写真-4 曲げ試験状況

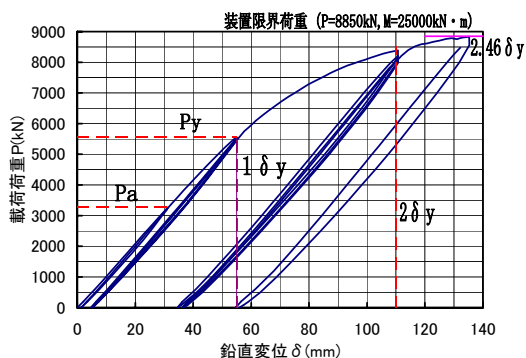


図-6 荷重-たわみ関係

表-3 各種荷重との比較

	載荷荷重 (kN)	曲げ モーメント (kN・m)	
実験時最大荷重	8850	25,000	①
設計(鋼管許容)荷重	3272	9,240	②
鋼管降伏荷重	5563	15,700	③
鋼管全塑性荷重	7176	20,300	④
実験時 最大荷重 との比較	①/②	2.70	
	①/③	1.59	
	①/④	1.23	

*材料強度の規格値で評価した値

の支間は14.5m, 等曲げ区間を3.2mとし, 機械式継手を支間中央に配置した。

(2) 試験結果

試験時に計測した載荷荷重と支間中央部のたわみの関係を図-6に, 各種計算荷重との比較を表-3にそれぞれ示す。

設計荷重に相当する鋼管許容荷重, 鋼管降伏荷重レ

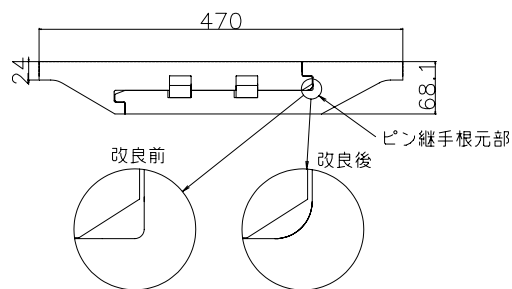


図-7 ピン継手根元部

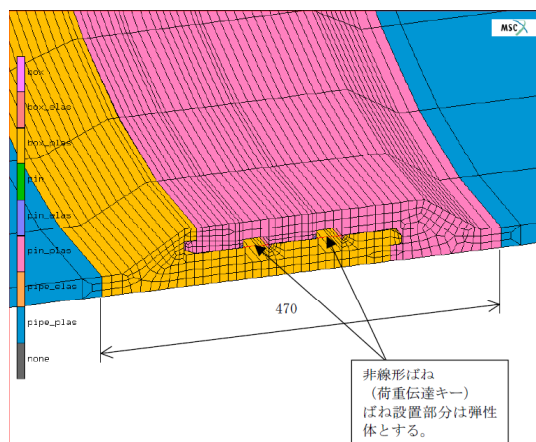


図-8 FEM 解析モデル

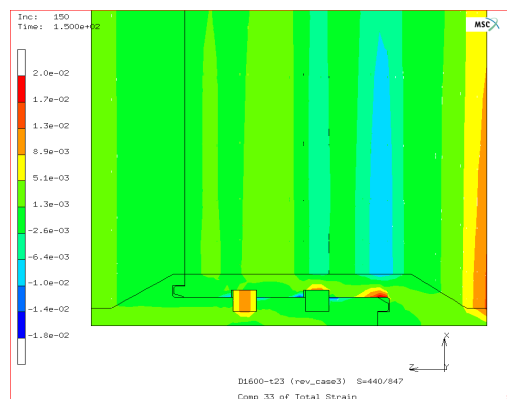


図-9 FEM 解析コンター図(形状改良前)

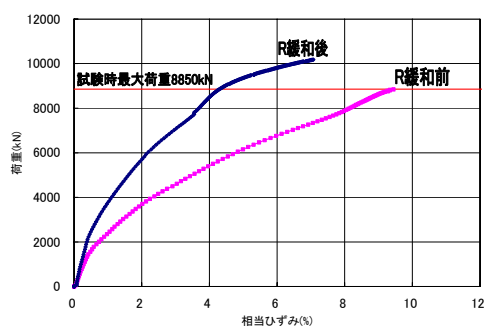


図-10 ピン継手根元部の相当ひずみ

ベルではたわみは線形に推移し、弾性挙動を示した。その後も、鋼管の実降伏強度が高かったため、鋼管降伏荷重を過ぎて荷重は上昇を続け、試験機的能力最大点(曲げで 25000kN・m)にまで達した。このときの荷重(8850kN)は、鋼管降伏荷重を 1.59 倍、鋼管全塑性荷重を 1.23 倍上回るものであり、継手部分は所要の耐力を有することを確認した。

一方、試験は、ピン継手の根元部(図-7)に亀裂が生じた時点で終了した。継手は所要の耐力を発揮したが、更なる耐力および安全性の向上を図るべく、この終局の荷重状態下でもより安定的な耐力を発揮するよう FEM 解析を基に根元部の形状改良を図ることとした。

(3)FEM 解析による検討

解析検討は、弾塑性有限変位 FEM 解析(解析コード MARC2005)で行った。

継手付近の解析モデルを図-8に、解析の結果得られた、最大荷重付近での継手引張縁の相当ひずみのコンター図を図-9に示す。

図-9からわかるように、ピン継手の根元にひずみの集中が見られ、実験においても終局の状態での部分において亀裂が発生したことから、この部分のひずみの集中を改善することとした。

(4)継手形状の改良

実施した形状改良の概要を図-7に示す。ひずみの集中場所がコーナー部であったことから、ひずみの集中を緩和するため、コーナー部のRを現行より緩くすることとした。

その効果を確認するため、コーナー部を細かくメッシュ分割した弾塑性有限変位 FEM 解析を実施した。解析の結果得られた、ピン継手根元部の相当ひずみの履歴を図-10に示す。解析の結果、この形状改良により、今回の試験での最大荷重(8850kN)時における最大ひずみは約 65%低減し、ひずみ集中の大幅な改善が図られることを確認した。以上の結果より、実工事においてはピン継手のコーナー部のRを緩くすることとした。

5. 実施工での検証

(1)施工の概要

本工事における鋼管矢板井筒の格点部の施工イメージを図-11に示す。図に示すように、SEP 台船にリーダーを取り付けて位置決めを行い、鋼管矢板をクレーン船で吊り込んでセットし、施工した。作業中のクレーン船は高さ制限を越えるため、その使用は航空制限が解除される午後 8:45-午前 7:30 に限定された。この時間内で所定の本数の杭を施工するためには、機械式継手の接合は 15 分程度で実施する必要があった。

鋼管矢板の施工は、約 48.5m の下側鋼管矢板(重量約 50 トン)を 240kw の電動バイプロハンマで鋼管矢板先端部が AP-45.0m 付近に達するまで打設し(写真-5)、長さ約 26.0m の上側鋼管矢板をクレーン船で吊り込んで機械式継手で接続させた後、最大打撃エネルギー 280kN・m のフライングハンマ(IHC-S280)で所定の深度(AP-70.0m)まで打撃することで行われた(写真-6)。

なお、下杭の施工時には継手が上端にきた状態で施工することとなるため、そのままではバイプロハンマ

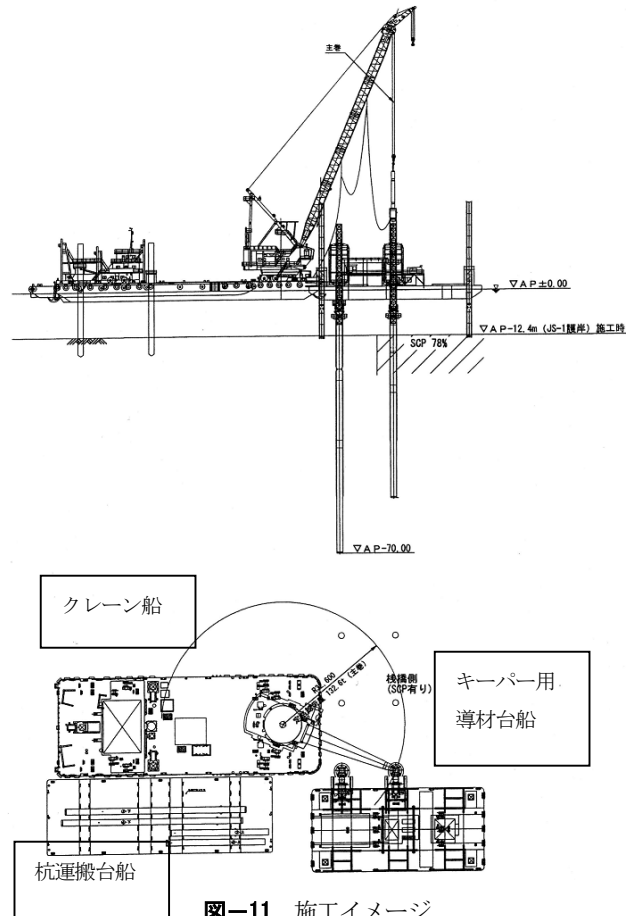


図-11 施工イメージ

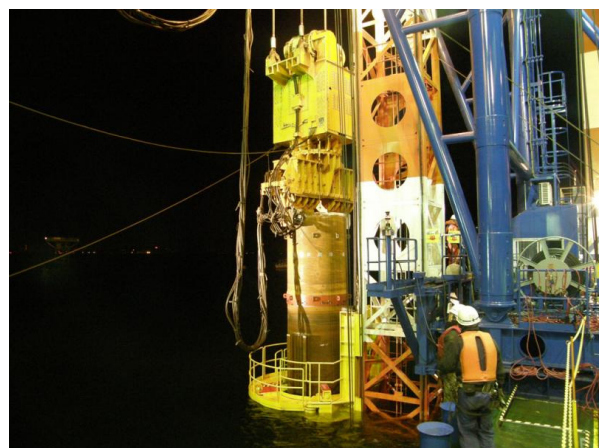


写真-5 バイプロハンマ施工



写真-6 打撃施工

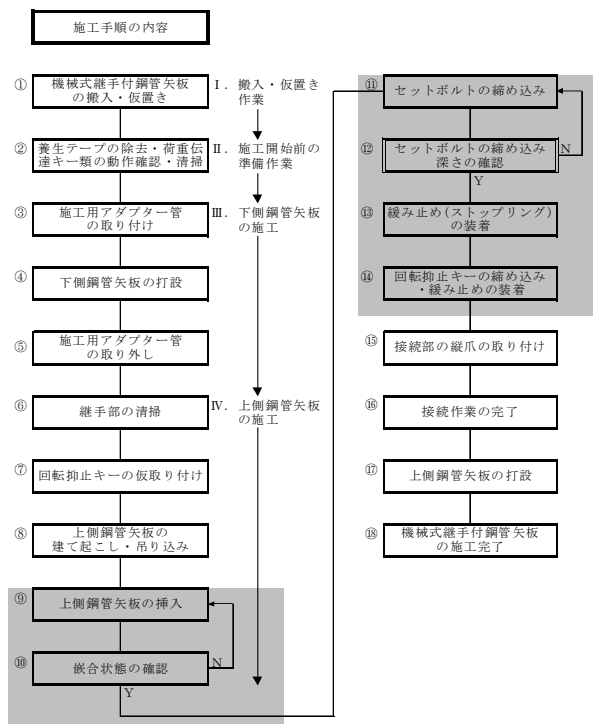


図-13 機械式継手付き鋼管矢板の施工フロー

で継手を直接把持(油圧クランプによるチャッキング)することになる。しかし、施工時に継手を直接把持すると機械式継手（ピン継手側）が変形するなどして嵌合不良などの不具合が生じる恐れがあるため、下側鋼管を施工する際には、ピン継手を保護するアダプター管(図-12)を被せ、この端部を把持して施工を行った。

(2) 継手の施工状況

まず、パイプロハンマ施工の後、施工用のアダプター管を外し、ピン継手の状態の確認を行った。写真-7に振動施工後のピン継手の状況の代表例を示す。写真からも確認できるように、ピン継手の表面に当て傷や擦り傷などの外傷はなく、振動施工による損傷は認

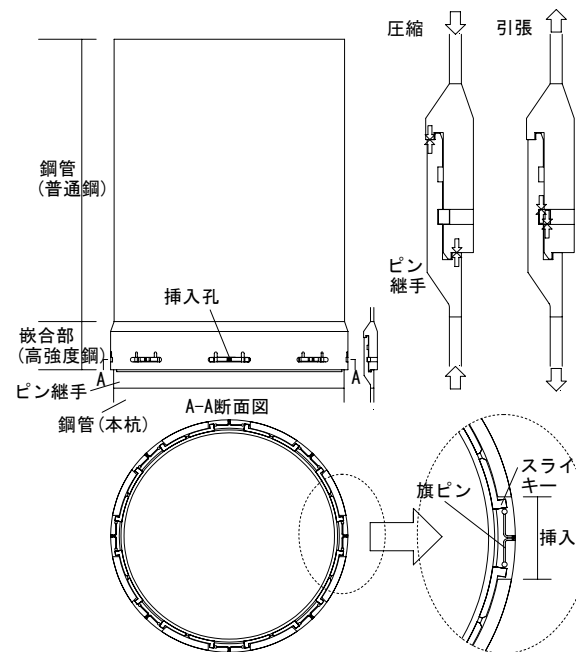


図-12 アダプター管



写真-7 振動施工後のピン継手



写真-8 機械式継手の嵌合作業状況

められなかった。

機械式継手の接続手順のフローを図-13に、継手の接合作業の状況を写真-8、9にそれぞれ示す。嵌合作業は問題なく完了し、その後のセットボルトの締め



写真-9 継手接合後の状況



写真-10 格点部鋼管矢板施工完了後の状況

込み、ストップリングの装着も滞りなく行うことができた。継手の嵌合～ストップリング装着までの接合作業(図-13の網かけ部分)は1箇所15分程度で順調に完了した。この良好な施工性および振動施工に伴う継手の変形などの異常の発生がないことが、全施工数50本において確認された。施工精度(打ち込み長さ、鉛直度、芯ずれ等)も、設定した施工目標値内に収まった。格点部の鋼管矢板打設完了後の状況を写真-10に示す。格点部全体の工事期間も、計画日数の50日(2008.2.25～4.14)に対して、悪天候による作業中止の影響などはあったものの55日(2008.2.29～4.23)とほぼ計画と同等の日数となり、全体工程にも支障なく施工を完了した。

6. まとめ

(1)最大打撃エネルギー $280\text{kN}\cdot\text{m}$ のフライングハンマ(IHC-S280)で3,000回以上の打撃を行ったが、杭体の損傷を示す変状は認められなかった。併せて、急速載荷試験でも十分な支持力性能を示した。また、その後の曲げ載荷試験において所要の設計耐力を有することを確認するとともに、終局の状態において継手の一部に応力集中が確認されたため、これを緩和する形状改良を実施し、さらなる耐力の向上を図った。

(2)最大能力を有する施工機械による打撃施工を行っても、継手部に設置されているネジの緩み・外観上の変状等がないことを確認した。また、機械式継手を解体し継手の嵌合面を観察した結果、打撃施工による変状(当てキズ・擦りキズ・へこみ等)は見られず、打撃施工が継手に損傷を与えていないことを確認した。

(3)約48.5mの下側鋼管矢板(重量約50トン)を240kwの電動パイロハンマで打設し、約26.0mの上側鋼管矢板を機械式継手で接合した後、最大打撃エネルギー $280\text{kN}\cdot\text{m}$ のフライングハンマ(IHC-S280)で所定の深度

まで打撃施工した。パイロハンマ施工の後、嵌合前の継手の状況を観察したが、加振による継手の変状は確認されなかった。また、継手の変形などによる嵌合異常などのトラブルもなく、継手は1箇所15分程度で順調に接合した。この良好な施工性および施工に対する耐久性は全施工数50本において確認された。

参考文献

- 1) 新原雄二, 相河清実, 加藤浩司, 坂梨利男, 浅沼丈夫, 風野裕明: 埋立部と栈橋部を接続する鋼管矢板井筒護岸の設計, 橋梁と基礎, Vol. 43, No. 1, pp. 40-44, 2009. 1
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター: 鋼管杭, 鋼管矢板の機械式継手 ラクニカンジョイント, 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書, 第03002号, 平成16年4月.
- 3) (財)土木研究センター: 鋼管杭・鋼管矢板の機械式継手 ラクニカンジョイント, 建設技術審査証明報告書, 建技審証第0115号, 平成18年9月(内容変更).
- 4) 高木優任, 岡扶樹, 江口宏幸, 森隆, 永見晃一, 佐藤光一, 大黒俊一: 港湾工事に適用する鋼管杭機械式継手の振動・打撃施工試験, 第49回地盤工学シンポジウム 平成16年度論文集, pp. 181-188, 2004. 11
- 5) 永谷達也, 近藤隆道, 保坂行輝, 森山信: 羽田再拡張D滑走路建設工事における基礎杭載荷試験, 第43回地盤工学研究発表会, pp. 7-8, 2008. 7.
- 6) 永谷達也, 新原雄二, 森山信, 佐藤純哉, 水野立, 風野裕明: D滑走路における杭の支持力試験について, 関東地方整備局東京空港整備事務所 東京国際空港技術報告会(第4回)技術報告集, pp. 5-1～5-12, 2007. 12.
- 7) 高木優任, 江口宏幸, 相和明男, 井口公一: 鋼管杭・鋼管矢板に適用する機械式継手の耐食性に関する実験的研究, 鋼構造論文集, Vol. 14, No. 56, pp. 17-30, 2007. 12.