鉄骨差込み接合方式を用いた杭式構造物の上部工構築と残置型底型枠の適用

東亜建設工業(株)　　正会員　○濱田　洋志　　水上　雄介
吉原　凌希　　柏木　亮太
加藤　大　　田中　亮一
若松　宏知　　網野　貴彦

１．はじめに

港湾工事では，近年，海上作業の省人化・省力化および工程短縮等を目的にプレキャスト施工の適用が促進されている．桟橋やドルフィンといった杭式構造物の上部工をプレキャスト化するにあたっては，海上打込みにおける施工誤差（出来形管理基準：杭頭中心距離 10cm 以内，杭天端高±5cm，直杭の傾斜 2 度以下 [1)]）が大きい鋼管杭上に上部工を容易に設置できる杭頭接合構造が望まれるが，これまで多く採用されてきた鞘管方式の杭頭接合では鞘管内側と鋼管杭外側の離隔が重要となるため，誤差吸収において課題が残されている．また，**図-1** に示すように，鋼管杭とプレキャスト上部工を接合するためには，底型枠を海上作業（船上作業や潜水作業）にて設置し，接合部にコンクリート等を打ち込む必要があるが，気象・海象の変化や潮位変動の影響を受けやすい．

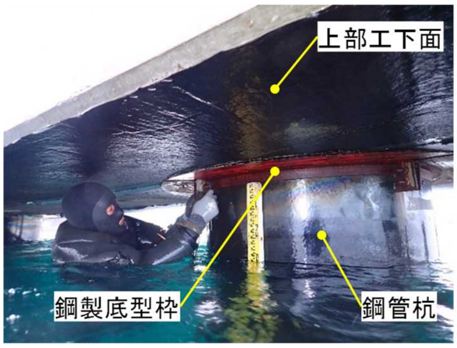


図-1　潜水士による底型枠設置状況

そこで筆者らは，鋼管杭の施工誤差に対して柔軟な設計や施工を可能とした鉄骨差込み接合方式による杭頭接合工法（以下，本工法）を開発し，現場に適用した．また，海上作業の更なる省人化および時間短縮を可能とする残置型底型枠を開発した．本稿では，9 基の海上ドルフィンで構成される荷役桟橋に本工法を適用した事例を紹介するとともに，プレキャスト施工の適用性について，VfM（Value for Money）の概念 [2)]に基づき場所打ち施工と比較した結果を示す．また，残置型底型枠の開発の概要および現場への適用事例について報告する．

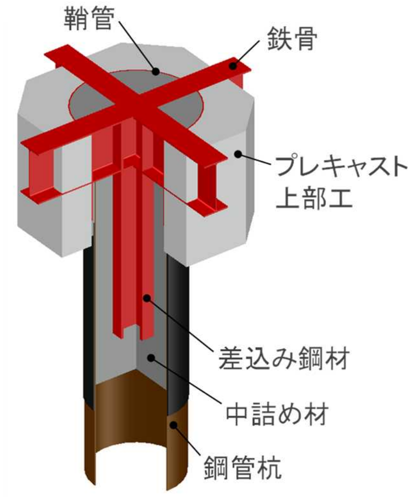


図-2　杭頭接合部の構造

２．鉄骨差込み接合方式による杭頭接合工法の適用事例

2.1 鉄骨差込み接合方式による杭頭接合工法の概要

図-2 に本工法を適用した杭頭接合部の構造を示す．本工法は，プレキャスト上部工から下方に突出させた差込み鋼材を鋼管杭内部に挿入した後，コンクリート等の中詰め材を打ち込むことで上部工と鋼管杭の一体化を図るものである [3)]．なお，**図-3** に示すように，鋼管杭の施工誤差を考慮し，差込み鋼材と鋼管杭内面の離隔を確保した設計を事前に行うことで，鞘管や上部工の鉄筋等の配置を調整することなく，上部工を製作・構築できることが大きな特長である．

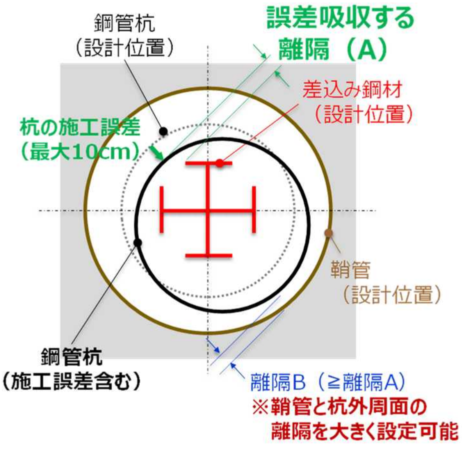


図-3　鋼管杭の施工誤差吸収の概念

2.2 海上ドルフィンへの適用事例

図-4，**図-5** に本工法を適用した，完成後の荷役桟橋および上部工設置後の全景を示す．この荷役桟橋は，ベルトコンベヤやローダーの基

キーワード　杭式構造物，プレキャスト上部工，省人化，工程短縮，底型枠
連絡先　〒230-0035　神奈川県横浜市鶴見区安善町１丁目３　東亜建設工業 技術研究開発センター　ＴＥＬ045-503-3741

礎および船舶の係留設備として 9 基の海上ドルフィンで構成される．これらの施設の建設にあたっては，施設の供用開始時期等の制約により工期が短いことが課題であった．そこで，上部工をプレキャスト化し，上部工の構築（陸上作業）と鋼管杭の打込み（海上作業）を同時に進行することで工期短縮を図ることとした．また，鋼管杭の打込み後，すぐに上部工の据付けを行えるように，鋼管杭の施工誤差による鞘管や鉄筋等の再配置が不要な本工法を採用することとした．

表-1 に 9 基のドルフィンのうち代表的な 4 基に関する差込み鋼材の構造検討結果を示す．**図-5** に示す WP および LP はベルトコンベヤやローダー等の鉛直荷重が支配的かつ変位の制限があることから鋼管杭の諸元は変位にて決定されるため，鋼管杭の発生応力度は限界値に対して比較的余裕があった．これにより，差込み鋼材は鋼管杭内径に対して十分な離隔を確保できた．一方，BD および MD は接岸力や牽引力といった水平荷重が支配的となり，鋼管杭の諸元が応力により決定されるため，差込み鋼材の形状も大きくする必要があった．そこで，離隔の確保を目的に，差込み鋼材には中幅や細幅の H 型鋼を採用した．

また本工法は，施工条件に応じて差込み鋼材の設置のタイミングを任意に設定することも可能である．**表-2** に，本事例にて適用した差込み鋼材の設置のタイミングおよび特徴を示す．鋼管杭内径と差込み鋼材の離隔が大きい WP および LP に対しては，起重機船等の拘束日数を最小限にできる方法 A を採用した．それ以外のドルフィンは，離隔が小さく，プレキャスト上部工の据付け作業が困難となる可能性が考えられたため，据付け前に差込み鋼材を所定の位置に設置できる方法 B を採用した．これより，プレキャスト上部工 1 基の設置作業は，方法 A では約 30 分，事前に差込み鋼材 4 本分の設置が必要な方法 B においても差込み鋼材の設置･固定作業を含めて約 100 分で完了できた．以上のことから，本工法の採用により，差込み鋼材の構造に応じた最適な施工方法を選定したことで作業効率性の向上に寄与できたと考えられる．

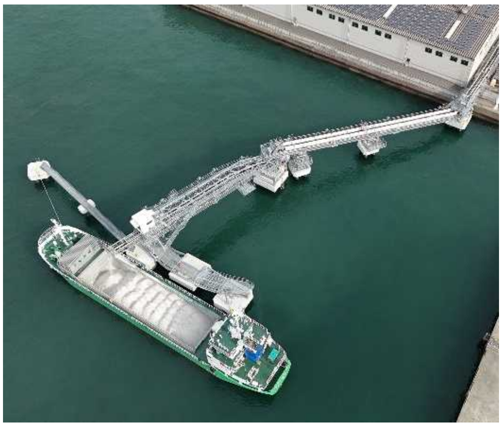


図-4　荷役桟橋の全景

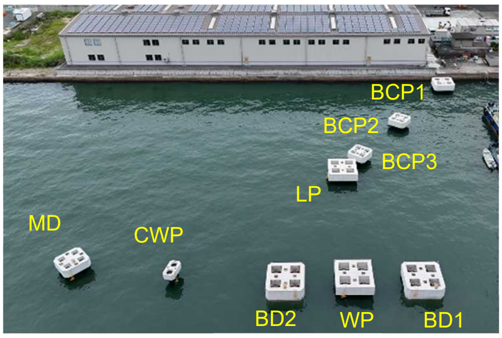


図-5　上部工設置後の全景

表-1　差込み鋼材の構造検討結果

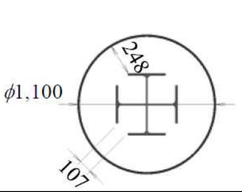
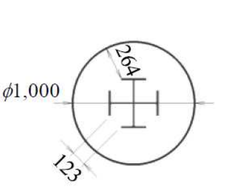
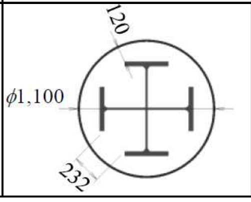
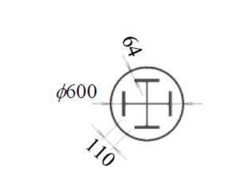
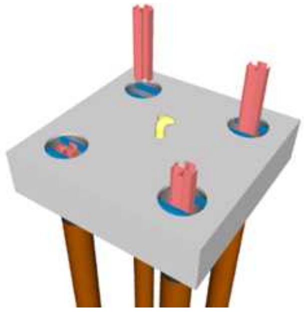
項目	ワーキング プラットホーム WP	ローダー基礎 LP	接岸ドルフィン BD	係留ドルフィン MD
杭_鋼種	SKK400	SKK400	SKK490	SKK400
杭_直径 D (mm)	1,100	1,000	1,100	600
杭_板厚 t (mm)	16	12	16	12
杭仕様の決定要素	変位	変位	応力	応力
設計曲げモーメント Md (kN・m)	707.2	249.4	3,546.8	501.8
差込み鋼材_鋼種	SS400	SS400	SM490	SM490
差込み鋼材_仕様	H-488×300×11×18	H-400×200×8×13	H-750×350×16×36	H-400×200×9×22
鉄骨差込み接合部 設計曲げ耐力 Mud (kN・m)	1,183.9	877.0	3,702.1	621.4
判定 Md/Mud	0.60 OK	0.28 OK	0.96 OK	0.81 OK
断面図				

表-2　差込み鋼材の設置のタイミングおよび特徴

【方法A】上部工据付けと同時	【方法B】上部工据付け前	【方法C】上部工据付け後
		
差込み鋼材が設計（杭頭中心位置）に対して偏心する． 起重機船等の拘束日数を最小限にできる．	鋼管杭の施工誤差によらず，差込み鋼材を杭頭中心位置に設置できる． 上部工据付け前に起重機船等の拘束日数が増える可能性がある．	鋼管杭の施工誤差によらず，差込み鋼材を杭頭中心位置に設置できる． 上部工据付け後に起重機船等の拘束日数が増える可能性がある．
適用したドルフィン WP，LP	適用したドルフィン MD，BD，BCP，CWP	—

2.3 VfMによるプレキャスト施工の評価

VfM（Value for Money）の概念[2)]に基づき，本稿で紹介した事例のWPを対象に，費用，工期，省人化，環境への影響の4項目について場所打ち施工と比較した結果およびVfM方式により算出した評価点を**表-3**に示す．本事例では，海上作業日数および全体を通しての労務を削減でき，起重機船の稼働時間の短縮によりScope1およびScope3を合わせた二酸化炭素排出量を低減できたことを確認した．また，プレキャスト施工は，費用以外の視点を勘案することで高い評価点となった．

表-3　各項目の比較結果およびVfM方式による評価点

項目		場所打ち施工	プレキャスト施工
直接工事費　［千円］（比率）		7,000（1.00）	8,300（1.19）
作業日数［日］	陸上作業	—	11
	海上作業	13	6
労務［人・日］	陸上作業	—	45
	海上作業（比率）	114（1.00）	50（0.44）
	合計（比率）	114（1.00）	95（0.83）
二酸化炭素排出量［t-CO2］※	Scope1（比率）	18.139（1.00）	9.940（0.55）
	Scope3（比率）	9.935（1.00）	12.978（1.31）
	合計（比率）	28.074（1.00）	22.918（0.82）
VfM評価点	費用	50.0	40.7
	費用以外	5.8	37.0
	合計	55.8	77.7

※二酸化炭素排出量は文献4)に基づき算出，原単位は文献5)を参照
Scope1：機械稼働による排出量，Scope3：材料の製造による排出量

3．残置型底型枠の開発と適用

3.1 残置型底型枠の概要

一般に，底型枠には鋼材が用いられることが多く，コンクリート硬化後には撤去を行う．それに対し，筆者らが開発した残置型底型枠は，撤去に伴う海上作業を省略するため，防食性の高いFRP材を型枠材として採用し，残置する方法とした．また，**図-6**，**図-7**に示すように，プレキャスト上部工を据え付ける前に，吊り作業にて鋼管杭上方より本底型枠を設置することを想定して，型枠材を円周方向に分割し，引きバネを用いて円環径を広げる細工を施すことで一時的に本底型枠の内径を大きくできるようにした．さらに，**図-7**，**図-8**に示すように，上方より引きバネ固定治具を取り外すことにより，分割した型枠材を引き寄せる機構を設けた．これにより，上部工下方の狭隘な空間での底型枠の設置作業を省略できる．一方，底型枠を固定するためのセパレーターの上端は鋼管杭の表面や上部工の鋼材部に溶接する必要があるため，狭い空間での溶接作業に多大な時間を要する．また，溶接時の火玉が底型枠上に落下して損傷を与える可能性も考えられる．そこで，本底型枠では，**図-9**に示すようなセパレーター固定治具を考案し，底型枠の設置作業の効率化を図った．なお，セパレーター端部にねじ切り加工を施すことで，一般的な電動工具を用いて本底型枠を所定の位置に設置することを可能とした．

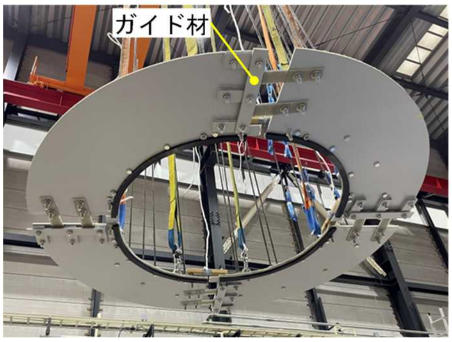


図-6　本底型枠の吊り上げ状況

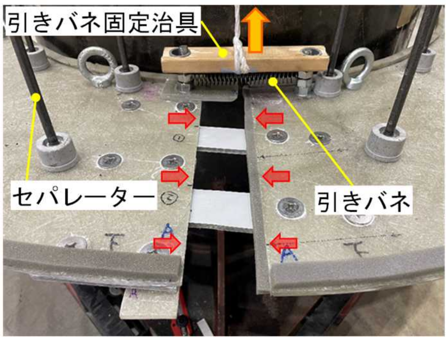


図-7　離隔保持の解除方法

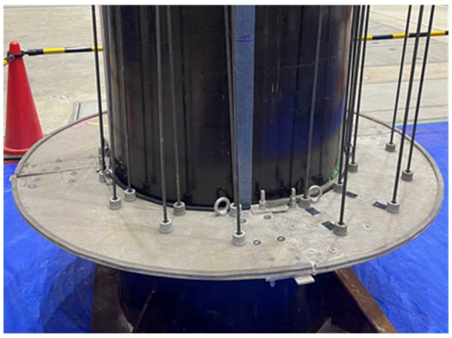


図-8　離隔保持解除後

図-9　セパレーター固定治具

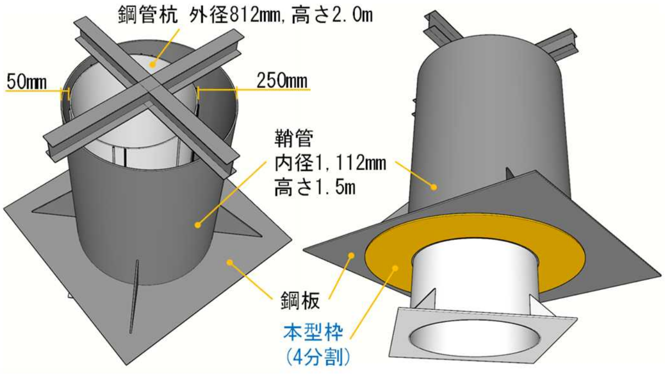


図-10　充填試験の概要

表-4　FRP 板の物性値

板厚 （mm）	5.4
曲げ強さ （MPa）	240.6
曲げ弾性率 （GPa）	10.2

3.2 室内試験による検証

実施工を模擬した本底型枠を用いたモルタル充填試験を行った．**図-10** に充填試験の概要を示す．本試験では，鋼管杭（外径 812mm，高さ 2m）および鋼管杭上端に上載できるように加工した鞘管（内径 1,112mm，高さ 1.5m）を用いて，高さ 1.5m の接合部を模擬した．また，鞘管の下端には上部工の下面を模擬した鋼板を配置した．接合部における鋼管杭と鞘管の離隔はモルタルの充填性および鋼管杭の水平施工誤差±100mm 以内 [1]を考慮して 150mm とし，本試験では鋼管杭が 100mm 偏心した場合を想定した離隔（最大 250mm，最小 50mm）とした．型枠材は，円環状（内径 823mm，外径 1,423mm）の**表-4** に示す FRP 板を適用した．また，4 分割した型枠材の端部，鋼管杭と接する面，鋼板と底型枠の接触部には，漏れ防止対策として止水材を設置した．セパレーター（φ9mm）は，下端を型枠上の**図-11**（離隔 250mm 部）に示す位置に，上端を**図-9** に示すセパレーター固定治具にて鋼管杭および鞘管の上端に固定した．本試験では，充填完了まで本底型枠に液圧と同程度の圧力を作用させるため，モルタル（W/C=0.67，S/C=3.30，フロー値 221mm）を使用し，バケットにて打ち込んだ．また，**図-11** に示す位置に圧力計および変位計を設置し，本底型枠に作用する圧力と本底型枠の鉛直変位を確認した．

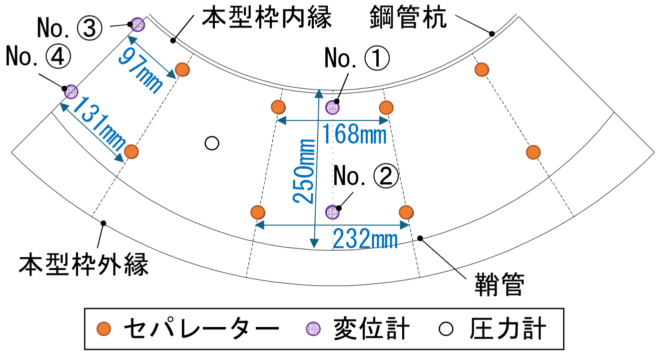


図-11　セパレーターおよび計測位置図

図-12 に示すように，本底型枠に作用した圧力は，打込み高さが 1.5m に到達するまで液圧相当であった．**表-5** に本底型枠の最大鉛直変位（プラスが下向き）を示す．最大荷重時（打込み高さ 1.5m）において，鉛直変位は最大で 2.9mm（No.④）となり，セパレーター間の中央部（No.①，No.②）よりも型枠材の端部（No.③，No.④）が大きくなった．また，鉛直変位（実測値）を**表-4** に示す曲げ弾性率より算出した鉛直変位（計算値）

と比較した．ここで，鉛直変位を計算する際の支持条件は，セパレーター位置を支持点として No.①，No.②は両端固定，No.③は片持ちとした．No.④は，**図-6** に示すガイド材を介して隣接する型枠材が荷重を分担することから，両端固定条件を適用し，スパン長を 262mm と仮定した．これより，実測値と計算値は概ね一致した．なお，この時点で鋼管杭および鋼板との接触面，分割した型枠材の継ぎ目においてモルタルの漏れや流出は見られなかった．以上の結果を踏まえ，実施工を想定し，コンクリートの比重 24.5kN/m^3 を用いて打込み高さと最大セパレーター間隔の関係を試算した（**図-13**）．ここで，最大セパレーター間隔は，各支持条件（両端固定，片持ち）と**表-4** に示す FRP 板の物性値を用いて計算できる鉛直変位が実測値と同じになるセパレーター間隔である．これにより，現場条件に応じてセパレーター間隔を設計できるようにした．

3.3 海上ドルフィンへの適用事例

図-5 に示す海上ドルフィン LP の鋼管杭 2 本において，本底型枠を適用した．**図-14** に現場打ちコンクリートの打込み範囲および打込みに必要な底型枠の設置位置を示す．間詰め部の幅は，充填試験における鋼管杭と鞘管の離隔と同様に 150mm とし，型枠幅は鋼管杭の偏心を考慮して 300mm とした．なお，本事例では，鋼管杭の水平施工誤差は最大で 40mm であった．また，充填試験で得た知見をもとに，型枠材 1 枚に対して 10 本のセパレーターを配置し，外側の 5 本は**図-14** に示す鞘管，内側の 5 本は鋼管杭に**図-9** に示すセパレーター固定治具を用いて支持をとる形とした．

図-15 に本底型枠または従来の鋼製底型枠を適用する際の上部工設置における施工フローを，**図-16** に本底型枠の設置状況を示す．なお，本底型枠の設置前には，鋼管杭の出来形測量の結果をもとにセパレーターの割付けを行った．最初に，本底型枠 1 枚につきセパレーター1 本を取り付け，上部工を据え付ける前に，セパレーター固定治具を用いて上部工の設計下端高さより 200mm 程度低い位置に仮置きした．これにより，上部工を据え付ける際，上部工と本底型枠が接触することを回避した．なお，型枠材が軽量であること，広い空間での作業が可能であることから，短時間で作業を完了できた．上部工据

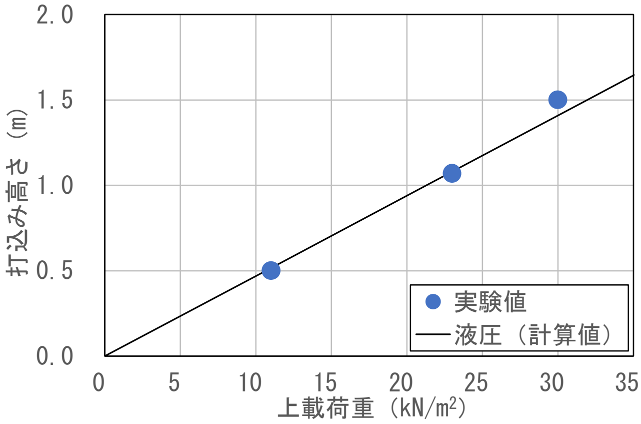


図-12　上載荷重と打込み高さの関係

表-5　最大鉛直変位の実測値および計算値（mm）

	No.①	No.②	No.③	No.④
実測値	0.5	1.9	2.3	2.9
計算値	0.5	1.7	2.4	2.7

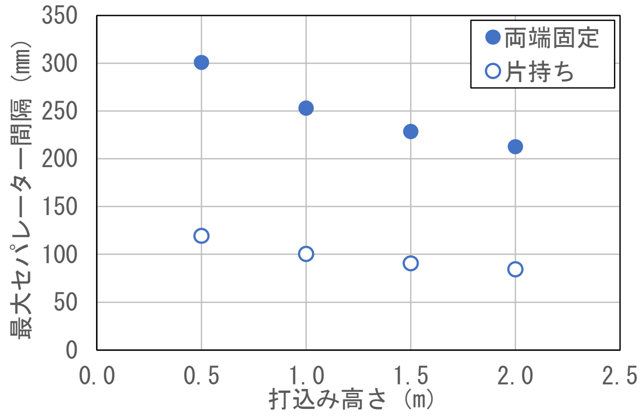


図-13　打込み高さとセパレーター間隔の関係

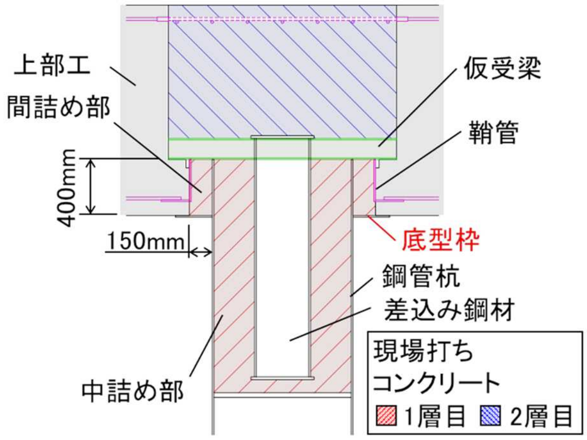


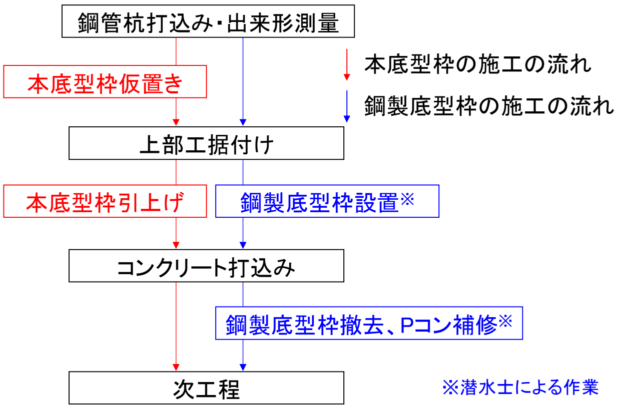
図-14　現場打ちコンクリートの打込み範囲および底型枠の設置位置

付け後は，上部工の上方より本底型枠を引き上げ，全てのセパレーターを取り付けて固定した．これにより，上部工下方の狭隘な空間での作業を行うことなく本底型枠を設置できた．型枠材の撤去が不要であることも踏まえ，工程短縮および省人化に寄与できたと考えられる．

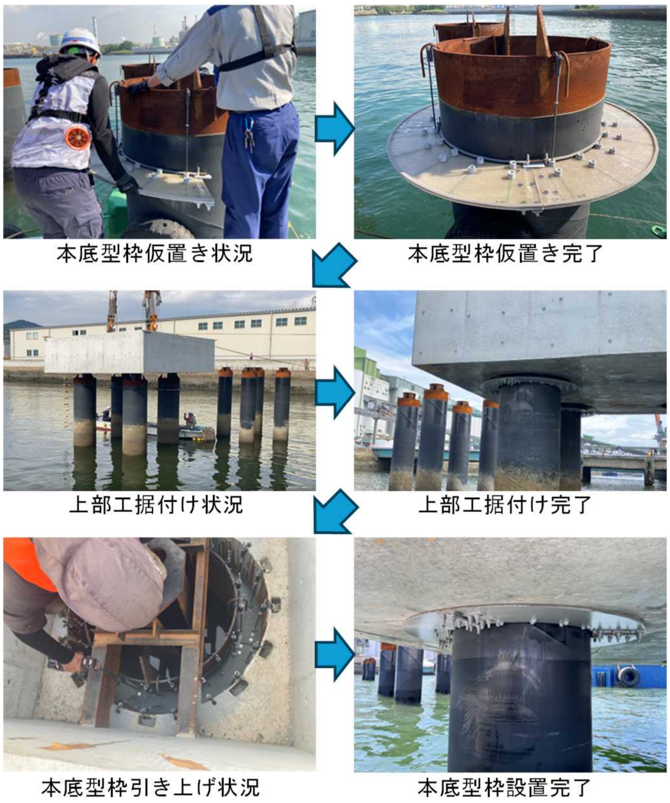
表−6 に本底型枠の適用効果を示す．ここでは，本事例での歩掛りをもとに鋼管杭 30 本分の施工を想定して，海上作業日数，作業員数および直接人件費を算出し，鋼製底型枠を適用した場合の標準的な歩掛りと比較した．各項目において 64%〜76%程度の削減効果がみられた．この要因として，本底型枠の設置作業の簡略化および撤去作業の省略が挙げられる．また，直接人件費においては，溶接工や潜水士，潜水連絡員等の作業を無くし，普通作業員での施工が可能となったことが結果に反映された．加えて，海上にて上部工と鋼管杭の接合部にコンクリートを打ち込む際に適用した残置型底型枠は，プレキャスト上部工を据え付けた同日に設置を完了できることから，翌日のコンクリート打込みも可能となる．これは，起重機船の連続稼働が可能となることを示しており，船舶関連作業の効率化や曳航回数の減少による燃料消費量の減少などの環境負荷低減にも貢献できる可能性を有すると考えられる．

4．まとめ

本稿では，鉄骨差込み接合方式による杭頭接合工法を海上ドルフィン上部工のプレキャスト施工に採用し，海上作業の省人化，時間短縮に寄与できる残置型底型枠を適用した事例を紹介した．本稿が今後のプレキャスト施工の適用促進の一助となれば幸いである．



図−15　上部工設置における施工フロー



図−16　本底型枠の設置状況

表−6　本底型枠の適用効果

項目	本底型枠	鋼製底型枠	適用効果
海上作業日数	4 日	12 日	66.7%削減
作業員数	29 人	81 人	64.2%削減
直接人件費	75 万円	317 万円	76.3%削減

参考文献

1) 公益社団法人日本港湾協会：港湾工事共通仕様書，pp.3-24，2021
2) 国土交通省港湾局：港湾工事におけるプレキャスト工法導入検討マニュアル（試行版），2023
3) 小林雄一，田中亮一，網野貴彦，若松宏知：鉄骨差込み接合方式による桟橋杭頭接合部の耐力評価実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.2，2021
4) 港湾工事における二酸化炭素排出量削減に向けた検討 WG：港湾工事における二酸化炭素排出量算定ガイドライン（発注段階編），2022
5) 中村菫，川端雄一郎，辰巳大介：港湾構造物の建設時における CO_2 排出量算定に関する基礎的検討－工事実施前での CO_2 排出量推定のための手法の整理と試算－，港湾空港技術研究所資料，No.1399，2022