土木学会論文集, Vol. 81, No. 18, 25-18036, 2025.

中空構造の超大型プレキャスト部材を用いた桟橋の急速化施工

池野　勝哉[1]・大本　武[2]・佐々木　慎[2]・伊野　同[3]・
川端　雄一郎[4]・加藤　絵万[4]・岩波　光保[5]

[1] 正会員　五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: katsuya.ikeno@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)
[2] 正会員　五洋建設（株）中国支店土木営業部（〒730-8542 広島県広島市中区八丁堀 4-1）
[3] 正会員　五洋建設（株）土木部門土木設計部（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
[4] 正会員　海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1）
[5] 正会員　東京科学大学　環境・社会理工学院（〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

近年, 建設現場における省人化や働き方改革の推進を背景に, 港湾工事における桟橋上部工のプレキャスト技術が注目されている．このような背景のもと，著者らは国内最大級の原塩ターミナルを対象に，フルプレキャストによる桟橋の急速施工を行った．一般にプレキャスト施工は，工期短縮や品質確保および安全性向上の観点でメリットが得られるものの，従来の現場打ちコンクリートと比較してコスト高となるため，これらの両立が課題である．そこで，中空フラットスラブ構造で軽量化した超大型プレキャスト部材を採用し，著者らが開発したプレキャスト部材の接合技術によって桟橋全長にわたる上部工の一体化を図り，工期短縮とコスト縮減の両立を実現した．本稿では，当プロジェクトで直面した種々の技術的課題とその解決を図った技術について示す．

Key Words : *super-large precast, pile connection, concrete member joint, rapid pier construction*

1.　はじめに

近年，建設現場における省人化や働き方改革の推進を背景にプレキャスト技術が注目されており，港湾工事においては同技術の導入促進に向け，評価手法に関するマニュアル[注1)]が整備されている．また，桟橋上部工については，様々なプレキャスト技術[注2)]がカタログとして取りまとめられている．このような背景のもと，著者らは国内最大級の原塩ターミナルを対象に，フルプレキャストによる桟橋の急速化施工を実施する機会を得た．

施工対象である原塩ターミナルを**写真-1**に示す．第一桟橋（入荷）と第二桟橋（出荷）が供用されており，第一桟橋は建設後60 年が経過するなどの老朽化が進行し，既存施設の代替施設となる第三桟橋の建設が計画された．第三桟橋は，瀬戸内海の航行限界となる20万DWT級貨物船（瀬戸内マックス船型）を対象とした延長240 m×幅30 m，水深18 mの大規模桟橋である．本工事では，与条件である工期が約2 年と短いことに加え，隣接する第二桟橋の荷役作業への影響を最小限に抑えられる施工方法が求められた．桟橋上部工を従来の現場打ちコンクリートで計画すると，約2 年の工期を大きく超過することが予想されたためプレキャスト施工を採用した．しかし，一般にプレキャスト施工は，従来施工よりもコスト高となる傾向にあるため，工期短縮とコスト縮減の両立が課題であった．本稿では，当プロジェクトで直面した種々の技術的課題とその解決を図った技術について示す．



写真-1　国内最大級の原塩ターミナル

2.　プレキャスト部材の最適化技術

本工事におけるプレキャスト部材の架設には，現場近傍に基地港を有する最大吊能力2,200 tの大型起重機船を選定した．また，プレキャスト部材を製作する広大な陸

上製作ヤード（約7,000 m^2）を新たに整備し，現場から概ね10 km圏内に起重機船の基地港と陸上製作ヤードおよび施工場所を集約した．以下では，本工事のプレキャスト部材の最適化に関わる工夫について述べる．

(1)　中空構造によるプレキャスト部材の軽量化

一般に桟橋上部工は梁－スラブ構造が採用されるが，梁－スラブ構造のプレキャスト部材の製作では，底型枠と支保工の設置･撤去作業が煩雑となる事が予想された．そこで，陸上製作ヤードでの製作サイクルを短縮するため，フラットスラブ構造を採用した．フラットスラブ構造は部材厚が一定であり，底型枠と支保工が省略できるため，本工事では従来の梁－スラブ構造と比較して，製作サイクルが約30％短縮できた．フラットスラブ構造の製作イメージを**図-1**に示す．一方，フラットスラブ構造は，部材厚に応じた上部工自重の増加により，下部工である鋼管杭のスペックが大きくなる懸念があった．そこで，**写真-2** に示すように上部工の部材内部に発泡スチロールを内包し，約20％の軽量化を図った．これにより，1基当たりのプレキャスト部材の超大型化（延長20 m×幅30 m×厚さ1.55 m，約1,600 t/基）が可能となった．陸上製作ヤードにおける発泡スチロールの設置手順を**図-2**および**写真-3**に示す．1ユニット（幅0.5 m×長さ2.0 m×高さ1.0 m）の発泡スチロールを図中に示す固定金物で固定し，コンクリート打設に伴う横ズレや浮力に抵抗した．打設は3回に分けて行い，一次打設では遅延剤塗布およびハイウォッシャーによる打継処理，二次打設では打継処理剤を塗布することで一体化を図った．なお，鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋，固定金物等の鋼材は亜鉛メッキによる防食対策を講じた．

(2)　上部工一体化による下部工の合理化

通常，現場打ちコンクリートで構築される桟橋上部工は，海上でのコンクリート打設能力の制約から長手方向に約 20 m 毎に目地を設けた分割構造が採用される．一方，本工事のプレキャスト施工では，後述する部材間の接合技術により個々のプレキャスト部材を一体化できるため，桟橋全長にわたる上部工の一体構造が形成される．**図-3**に従来の上部工分割モデルと上部工一体モデルの模

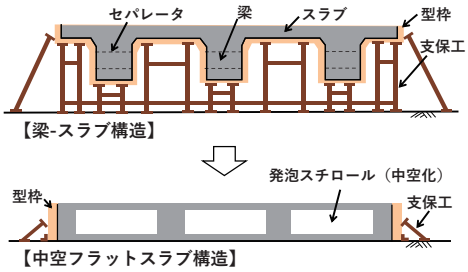


図-1　フラットスラブ構造の製作イメージ

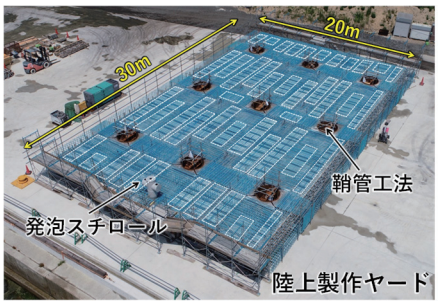


写真-2　陸上製作ヤードの状況

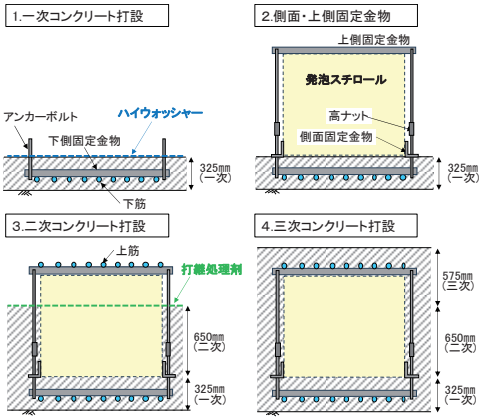


図-2　発泡スチロールの設置手順



写真-3　発泡スチロールの設置状況

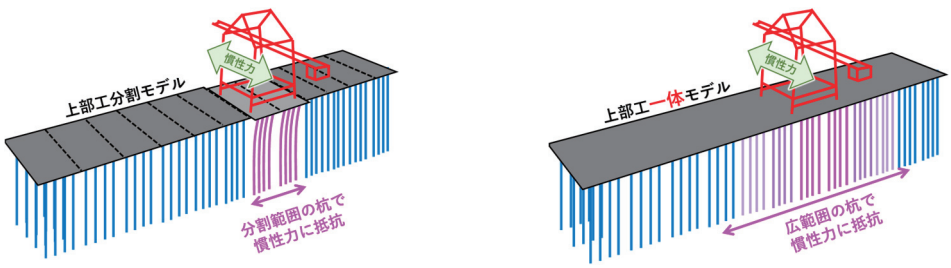


図-3　上部工分割モデルと上部工一体モデルの模式図

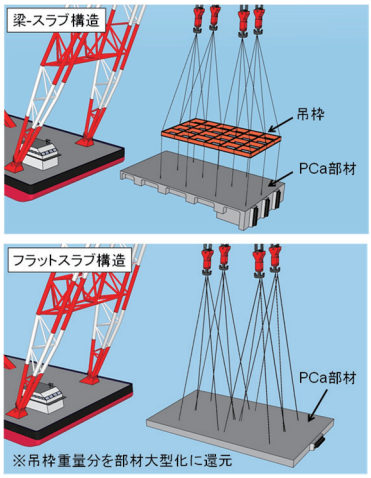


図-4　吊枠を省略した架設イメージ

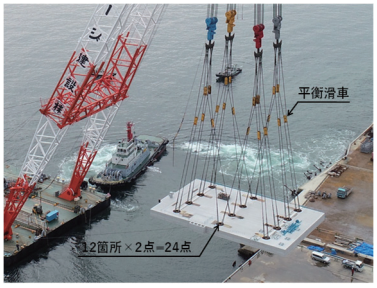


写真-4　平衡滑車を使用したワイヤリング



写真-5　超大型プレキャスト部材（12 基）

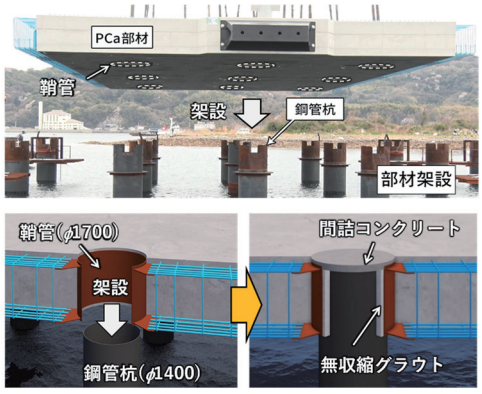


図-5　鞘管工法による杭頭接合技術

式図を示す．上部工一体モデルでは，地震慣性力に対して広範囲の杭が抵抗し，杭 1 本当たりの応力負担が軽減されるため，下部工の合理化を図ることが可能である．

(3)　吊枠を省略した部材架設による省力化

起重機船による部材架設では，吊上げ時の水平性を保つため吊枠が使用されるのが一般的である．しかし，今回採用したフラットスラブ構造は部材厚が一定であり，吊上げ時の部材偏心が小さいため，重心と吊心を概ね一致させることができる．そのメリットを生かし，本工事では吊枠を省略した架設を計画し，吊枠を介したワイヤリングの作業手間を短縮した．吊枠を省略した架設イメージを**図-4** に示す．起重機船による吊荷検討により，プレキャスト部材は 24 点吊とした．**写真-4** に平衡滑車を使用した吊上げ状況を示す．先述したように，本工事では吊上げ時に吊枠を使用しないため，24 本のワイヤに不均等な張力が生じないよう，平衡滑車を使用したワイヤリング方法を採用し，ワイヤ張力を均等化する対策を講じた．

3.　杭頭部および部材間の接合技術

本工事の桟橋（全長 240 m）は，**写真-5** に示すように，超大型プレキャスト部材（延長 20 m×幅 30 m×厚さ 1.55 m，約 1,600 t/基）全 12 基で構成した．2,200 t 吊の大型起重機船でプレキャスト部材を鋼管杭に架設したのち，杭頭部および部材間の接合技術により一体化を図った．以下では，それぞれの接合技術について概説する．

(1)　鞘管工法

プレキャスト部材の鋼管杭への架設作業においては，鋼管杭の打設精度±100 mm を吸収できる杭頭接合構造が望ましい．そのため，プレキャスト部材の製作時に予め鞘管を埋設しておき，架設した後に鋼管杭と鞘管との空隙に無収縮グラウトを充填して一体化を図る鞘管工法を採用した．鞘管工法による杭頭接合を**図-5** に示す．鞘管は，鋼管杭の直径よりも 300 mm 大きな外径を選定することで，鋼管杭の平面的な打設精度±100 mm を許容することが可能である．本工事では，プレキャスト部材 1 基当たり鋼管杭 9 本（端ブロックは 12 本）を同時に鞘管内へ挿入する必要があったが，実績として鋼管杭の打設精度±80 mm，部材の架設精度±15 mm であり，12 基とも支障なく架設が完了した．

鞘管工法による構造性能は，縮尺比 1/6 の逆 T 形試験体による正負交番載荷試験 [1]により確認した．載荷では降伏変位δ_yの整数倍をそれぞれ 3 サイクル繰り返した．載荷実験では，杭頭部の曲げ耐力および式(1)で定義した

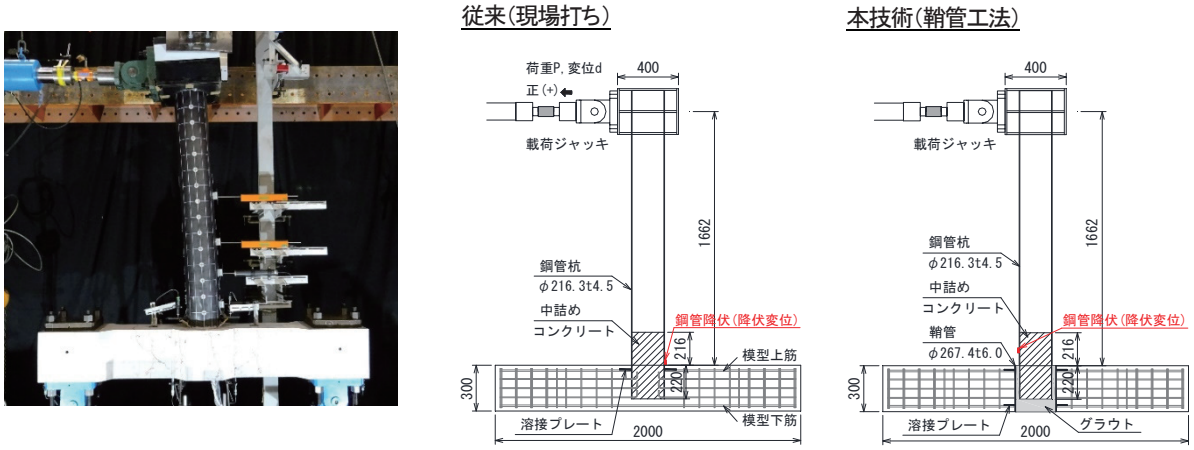


図-6　交番載荷実験の概要[1)に加筆] [単位：mm]

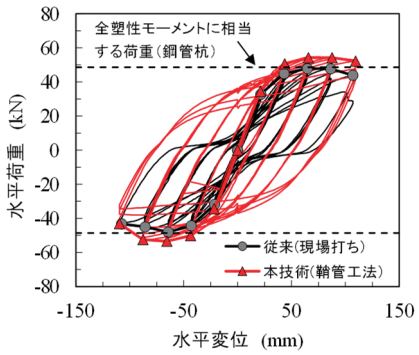


図-7　荷重－変位関係[1)に加筆]

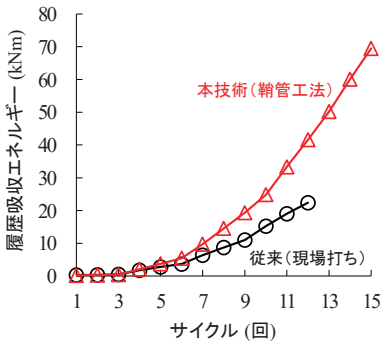


図-8　履歴吸収エネルギー

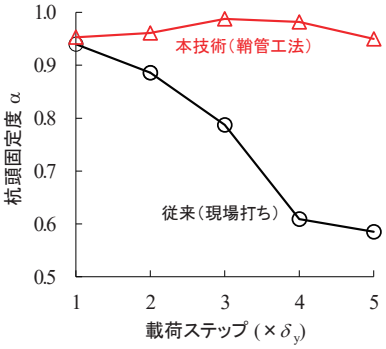


図-9　杭頭固定度の推移[1)に加筆]

杭頭固定度αに着目して実施した．**図-6** に実験状況および試験体概要を示す．ここで，杭頭固定度は杭頭部の回転に対する拘束程度を表すパラメータ（$0.0<\alpha<1.0$）であり，$\alpha \fallingdotseq 1.0$ が剛結合に相当する．

$$\alpha = \frac{1}{1+\dfrac{EI\beta}{(1+\beta h)K_\theta'}} = \frac{1}{1+\dfrac{EI\theta'}{2Ph^2}} \tag{1}$$

ここで，

α　：杭頭固定度（$0 \leqq \alpha \leqq 1.0$）
P　：水平荷重
h　：アーム長
β　：杭の特性値
K_θ'：実験における杭頭回転ばね
θ'：実験における杭頭回転角
EI　：杭体の曲げ剛性

実験で得られた荷重－変位関係を**図-7**，履歴吸収エネルギーを**図-8** に示す．図中より，従来の「現場打ち」は明確な逆 S 字形状を示すのに対して，「鞘管工法」は紡錘型の履歴ループを描いており，エネルギー吸収性能に優れた構造であることが分かる．実験で計測した杭頭回転角から式(1)で評価した杭頭固定度の推移を**図-9** に示す．従来の「現場打ち」は，載荷ステップの増加に伴い杭頭固定度が低下する傾向がある一方，「鞘管工法」は載荷ステップ後半でも杭頭固定度α=0.8～0.95 を保持しており，桟橋設計[2)]で想定される剛結合を実現している．

(2)　ダブルスクエア継手

部材間の接合に従来の重ね継手を用いる場合，架設時に部材端から突出した鉄筋同士が接触して損傷するリスクが懸念される．また，海上施工を極力省略する観点から，接合のための現場打ちコンクリート幅は狭い方が望

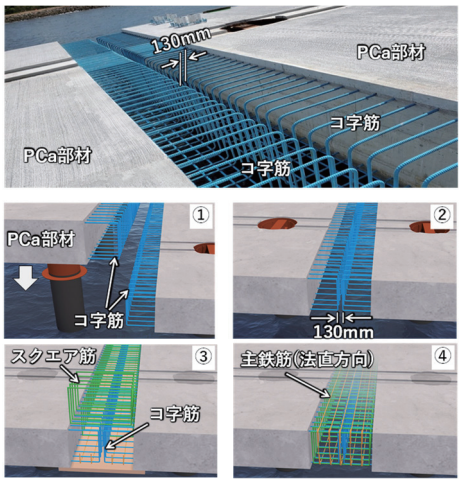


図-10　ダブルスクエア継手による部材接合

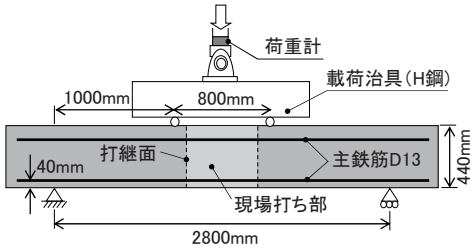


図-11　曲げ載荷試験の概要 3)に加筆

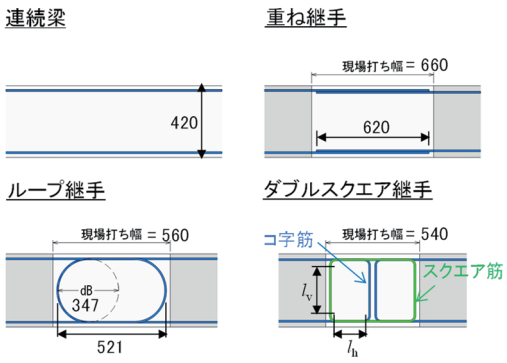


図-12　曲げ載荷試験ケース [単位：mm]

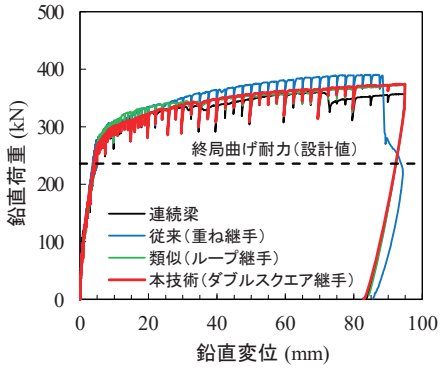


図-13　荷重ー変位関係 3)に加筆

表-1　ダブルスクエア継手の評価結果 4) に加筆

	ケース名※	曲げ剛性	曲げ耐荷力	ひび割れ性状	評価結果【凡例】
断面S	DS-S1	○	○	○	●
	DS-S2	△	○	○	▲
	DS-S3	×	○	△	×
断面M	DS-M1	○	○	○	●
	DS-M2	△	○	○	▲
	DS-M3	×	○	△	×
断面L	DS-L1	○	○	○	●
	DS-L2	○	○	○	●
	DS-L3	△	○	△	▲

※ケース名の解説：DS-(断面の大きさ)(水平重ね長/鉛直筋長)
【断面の大きさ】S：小、M：中、L：大　【水平重ね長/鉛直筋長】1：大、2：中、3：小

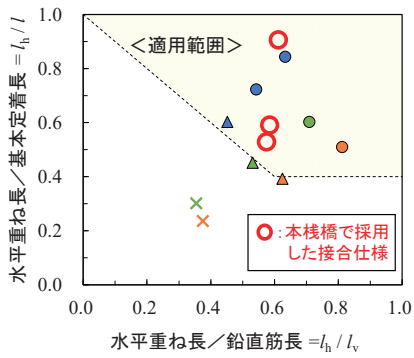


図-14　ダブルスクエア継手の適用範囲 4)に加筆

ましい．そこで，部材端から突出する鉄筋をコ字形状（以下，コ字筋）とし，架設後にスクエア形状の鉄筋（以下，スクエア筋）を上から挿入・配置するダブルスクエア継手 3)を実装した．ダブルスクエア継手による部材接合を**図-10** に示す．本継手は，鉄筋が相互に重なり合う重ね継手とは異なり，架設時に対面するコ字筋間に 130 mm の離隔を確保しているため，鉄筋同士の接触リスクが回避される．

ダブルスクエア継手の構造性能は，**図-11** に示す 4 点曲げ載荷試験より確認した．実験では，**図-12** に示すように継手のない連続梁，重ね継手およびループ継手を比較ケースとした．その結果，**図-13** に示す荷重ー変位関係が得られ，本継手が他の比較ケースと同等の曲げ耐力を有するとともに，RC 断面計算による設計耐力が安全側の評価であることを確認した．次に，本継手の適用範囲を確認する目的で，梁の断面寸法や縦横比（水平重ね長 l_h /鉛直筋長 l_v）をパラメータとした複数ケースの実験を実施した 4)．実験では，**表-1** に示す曲げ剛性，曲げ耐力，ひび割れ性状等に着目し，継手の無い連続梁と比較して同程度以上：○，やや劣る：△，劣る：×と 3 段階で定性的に評価した．

本継手の適用範囲を示したグラフを**図-14** に示す．閉合域の縦横比（l_h / l_v）を横軸，基本定着長 l に対する水平重ね長 l_h の比を縦軸にとり，**表-1** の評価結果をプロットした．**図-14** の破線の右上領域（ハッチング）にプロットされる DS 継手の形状が，本継手の適用範囲となる．図中には本工事で採用した接合仕様をプロットした．

4. 本工法の効果

従来の現場打ち工法と比較した本工法の工程を**図-15**，建設コストや全体工程，作業人工およびCO_2排出量について比較したものを**図-16** に示す．比較対象とした工種は，ヤード整備を含む準備工，下部工，上部工（製作，架設），電気防食や防舷材およびクレーンレール等の付帯工である．なお，**図-15** では陸上作業と海上作業を区別して示した．

本工事では，上部工一体化により下部工が合理化（168本⇒120 本）されていること，下部工の打設と上部工の製作が並行作業できること，全長 240 m の桟橋上部工を 12 基のプレキャスト部材で構成したこと等の効果により，56 %の工期短縮および作業人工の 27 %削減，そして建設コストを 11%削減することができた．CO_2 排出量については，**表-2** に示す検討品目に対して産業連関法[注3)]により排出原単位を作成し，材料由来の間接排出および燃料消費に伴う直接排出を算定した．具体的な排出原単位の作成および算定方法については文献 5), 6)を参照されたい．算定の結果，プレキャスト部材の大型化に伴う工期短縮によって，起重機船や杭打ち船の燃料消費に伴う直接的なCO_2排出量を 41 %削減し，上部工の軽量化および一体化に伴う下部工の合理化によって鋼管杭・鉄筋・コンクリート等の資材生産に伴う間接的なCO_2排出量を 18 %削減した．これにより，全体で 23 %のCO_2排出量の削減効果があった．なお，上記の効果は，瀬戸内の静穏な海象条件や現場近隣に確保できた基地港の地理的条件などの恩恵により，起重機船の回航費および海上運搬等のコストおよびCO_2排出量の削減効果も含まれることを付記する．

5. おわりに

本工事で完成した第三桟橋の全景を**写真-6** に示す．実施工を通じて，提案する接合技術がプレキャスト施工に有用であること，中空フラットスラブ構造によるプレキャスト部材の軽量化，工期短縮とコスト縮減の両立を実現することができた．しかし，本来，プレキャスト施工はコスト以外の要素をも取り入れた VFM [注1)]の観点から多角的にメリットを議論する必要がある．そのため，本工法の効果で示した項目以外にも，出来形品質管理の容易性や維持管理のしやすさ，第 3 者への影響など比較すべき要素がある．本稿を通じて，桟橋上部工のプレキャスト施工が普及し，港湾工事の生産性向上の一助になれば幸いである．

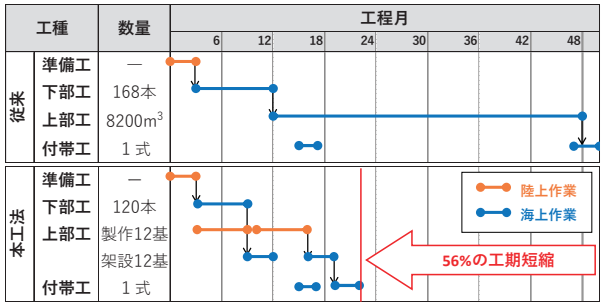


図-15 工程比較

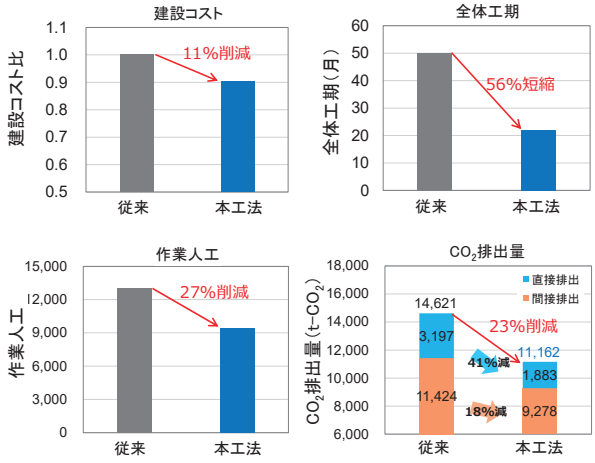


図-16 本工法の効果

表-2 検討品目

種 別		品 目
資材		鋼材（鋼管杭，異形棒鋼）
		コンクリート
建設機械	作業船舶	杭打ち船（油圧ハンマ），起重機船
		フェリーバージ，曳船，潜水士船，警戒船等
	陸上機械	ラフタークレーン，クローラークレーン
		ポンプ車等
燃料		軽油，A重油



写真-6 第三桟橋の完成全景

謝辞：三ツ子島埠頭株式会社をはじめ，関係者の皆様には多大なるご支援を頂きました．ここに記して謝意を表します．

NOTES

注1) 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），35p.，2023.

注2) 国土交通省港湾局，国土交通省国土技術政策総合研究所：港湾工事における”新技術カタログ”～設計段階からの新技術導入検討のために～（テーマ 1：桟橋上部工の施工作業効率化）【令和 6 年 3 月版】（令和 6 年 7 月 1 日更新），2024.

注3) 南斉規介：産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID), 国立研究開発法人国立環境研究所, http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/index.html , 2019.

REFERENCES

1) 池野勝哉，岩波光保，川端雄一郎：鞘管方式による桟橋鋼管杭の杭頭接合に関する交番載荷実験，構造工学論文集，Vol. 64A, pp. 724-733, 2018. [Ikeno, K., Iwanami, M. and Kawabata, Y.: Cyclic loading experiment on steel pipe connection by sleeve tube type for port pier, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 64A, pp. 724-733, 2018.]

2) 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（中巻），日本港湾協会，pp.1217-1218，2018. [Supervised by Ports and Harbours Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Ports and Harbours Association of Japan, *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities*, pp.1217-1218, 2018.]

3) 池野勝哉，岩波光保，川端雄一郎，加藤絵万：ダブルスクエア継手を有する PCa 梁の曲げ耐荷特性に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 65A, pp. 40-51, 2019. [Ikeno, K., Iwanami, M., Kawabata, Y. and Kato, E.: Study on flexural capacity of precast beams connected with double-square shaped bar joints, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 65A, pp. 40-51, 2019.]

4) 池野勝哉，齋藤創太，川端雄一郎，加藤絵万，岩波光保：ダブルスクエア継手を有する PCa 梁の曲げ載荷実験および適用範囲の提案，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol. 76, No. 2, pp. I_402-I_407, 2020. [Ikeno, K., Saito, S., Kawabata, Y., Kato, E. and Iwanami, M.: Bending load test of precast beams connected with DS joints and proposal for its scope of applications, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, *Series B3*, Vol. 76, No. 2, pp. I_402-I_407, 2020.]

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．[Nakamura, S., Kawabata, Y. and Tatsumi, D.: Fundamental Study on the calculation of CO_2 emissions from construction of port structures -Investigation on the pre-estimation method and trial calculation of CO_2 emissions from construction of port structures-, *Technical note of the Port and Airport Research Institute*, No.1399, 2022.]

6) 池野勝哉，中村菫，川端雄一郎，金枝俊輔，岩波光保：プレキャスト桟橋工法の建設時における CO_2 排出量の比較検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 78, No. 2, pp. I_301-I_306, 2022. [Ikeno, K., Nakamura, S., Kawabata, Y., Kanaeda, S. and Iwanami, M.: Comparative study of CO_2 emissions for precast port pier construction method, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, *Series B3*, Vol. 78, No. 2, pp. I_301-I_306, 2022.]

(Received February 4, 2025)
(Accepted May 15, 2025)

RAPID CONSTRUCTION OF A PORT PIER USING SUPER-LARGE PRECAST MEMBERS WITH HOLLOW STRUCTURE

Katsuya IKENO, Takeshi OOMOTO, Makoto SASAKI, Hitoshi INO, Yuichiro KAWABATA, Ema KATO and Mitsuyasu IWANAMI

The authors rapidly constructed a fully precast port pier for one of the largest salt terminals in Japan. Generally, the precast construction method offers advantages in terms of shortening the construction period, ensuring quality, and improving safety. However, it is more expensive than the conventional cast-in-place concrete method. To address this issue, the authors adopted super-large precast members with a hollow flat slab structure to reduce the weight. They also integrated the superstructure over the entire length of the port pier using a precast member joining technique developed by the authors to balance shortening the construction period and reducing costs. This paper describes the various technical challenges encountered in this project and the techniques used to overcome them.