

プレキャスト棧橋工法の建設時における CO₂排出量の比較検討

池野 勝哉¹・中村 堇²・川端 雄一郎²・金枝 俊輔³・岩波 光保⁴

¹正会員 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2752 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 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)
³(株)日本ピーエス 技術本部(〒914-0027 福井県敦賀市若泉町3)

⁴正会員 東京工業大学 環境・社会理工学院(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

プレキャスト(PCa)棧橋工法は、不安定な海上作業を極力、陸上作業に置き換えることで、工期短縮や生産性の向上が図れるため、今後、更なる適用拡大が予測される。一方、世界的に脱炭素化に向けた動きが活発化する中、我が国の港湾分野においても建設時における低炭素化の重要性が高まっており、施工者自らの直接排出のみならず、間接排出を含むサプライチェーン全体のCO₂排出量を把握することが求められている。そこで本研究では、棧橋工事の低炭素化に向けた基礎的検討として、PCa棧橋工法の建設時におけるCO₂排出量を比較検討した。その結果、PCa棧橋工法の低炭素化には、工期短縮や生産性向上のみならず、鋼管杭や鉄筋等の鋼材の資材数量を削減できる工場PCaが優位な工法であることを確認した。

Key Words : precast port pier, productivity, construction, CO₂ emissions, low-carbonization

1. はじめに

近年、棧橋工事における生産性向上を目的として、プレキャスト(以降、PCa)施工が行われている。従来工法での棧橋上部工は、鋼管杭の打設後に足場、型枠支保、鉄筋組立、コンクリート打設の海上作業を繰り返して構築される。一方、PCa棧橋工法は一般にサイトPCa¹⁾が用いられており、陸上ヤードにおいてPCa部材を製作し、起重機船により鋼管杭に架設される。これに対して、工場PCa²⁾はPCa部材を全て工場製作し、トレーラーで陸上運搬した後にプレストレスにより、鋼管杭と部材同士を圧着接合される。PCa棧橋工法は、不安定な海上作業を極力、陸上作業に置き換えることにより、工期短縮や生産性の向上が図れるため、今後の適用拡大が予測される。

一方、世界的に脱炭素化に向けた動きが活発化する中、我が国においても建設時における低炭素化の重要性が高まっている。低炭素化を効率的に進めるためには、施工者自らの直接排出だけではなく事業全体のサプライチェーンを把握し、特に排出割合が多いとされる材料に起因する上流側の間接排出を考慮することが重要と考えられる。そこで、本研究ではPCa棧橋工法の低炭素化における基礎的検討として、建設時のCO₂排出量を比較検討したので報告する。

2. PCa 棧橋工法の概要

(1) PCa 棧橋工法

従来工法およびPCa棧橋工法の概要を表-1に示す。サイトPCa¹⁾は、現地の陸上ヤードにおいて重量100~200t程度の部材を製作し、鋼管杭打設後に起重機船によって架設した後、部材と鋼管杭との間に無収縮モルタル等を充填して一体化するものである。従来工法の現場打ちと比較して、作業性の良い陸上ヤードで部材製作が行えるため、海上作業に伴う潜在的な危険リスクの回避、コンクリート構造物の品質確保、工期短縮などのメリットがある。しかし、岸壁際でのヤード確保が前提条件であり、起重機船の調達や入港時の地形的制約、それに伴うコスト高の可能性などサイトPCaの適用には制約も多い。

一方、工場PCa²⁾は、全ての部材を陸上運搬が可能なサイズで工場製作し、現地に運搬した後、プレストレスにより鋼管杭および部材同士を圧着接合する。プレストレスの導入により上部工の軽量化が可能となり、梁部材の断面は逆U字形状であるのが特徴的である。工場PCaは工場内の品質管理下で部材製作できるため、環境負荷の少ない混和材の使用や現地労働者の省人化が容易といったメリットを有している。また、地震時慣性力が断面設計の支配的な外力となる場合、上部工の軽量化は下部工

の長スパン化（鋼管杭の本数削減）に繋がり、より合理的な設計が可能となる。

(2) 栈橋モデル

栈橋モデルを図-1 および表-1 の下段に示す。本検討では、1ブロック当たり幅33m×長さ25mの直杭式栈橋(水深-10m)を対象とした。

現場打ちおよびサイト PCa の鋼管杭 (φ1400×t14, SKK490) は5×6本である。サイト PCa はPCa 部材を60~80t/個として陸上ヤードで製作し、起重機船(非航400t吊, 回航332漕)で架設した後、部材間2.0mを現場打ちでコンクリート打設すると仮定した。工場 PCa は、工場製作した部材をトレーラーで輸送(距離300km)し、現地ヤードで一方向の梁を大組立した後、同起重機船で架設するとした。なお、工場 PCa は上部工が軽量化されるため、鋼管杭 (φ1400×t16, SKK490) は4×5本である。本検討では、港湾ランク1、コンクリートの設計基準強度として現場打ちおよびサイト PCa は30N/mm², 工場 PCa は50N/mm² と仮定した。

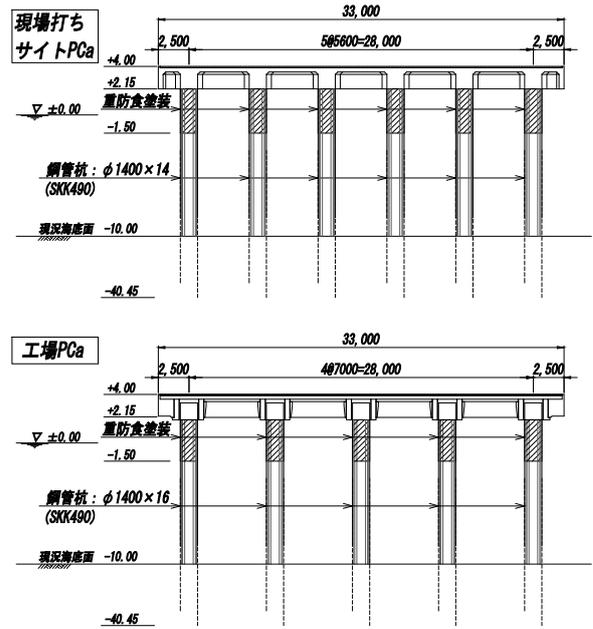


図-1 検討対象の栈橋モデル

表-1 従来工法とPCa 栈橋工法

	従来工法	PCa栈橋工法	
	現場打ち	サイトPCa	工場PCa
杭頭接合			
施工イメージ			
平面図			
	コンクリート配合: 30-12-25BB		コンクリート配合: 50-12-20H

(3) コスト・工程・労働者数の概略比較

5 ブロック当たりのコスト、工程および労働者数の比較を図-2に示す。ここで、仮設工は現地の陸上ヤード整備に係る工種であり、間接費は積み上げ分として、杭打ち船のえい航費(12 湊)、起重機船の回航費(332 湊)、クローラークレーンの組立解体および輸送費、ヤード借地料を計上している。なお、労働者数はメーカーヒヤリングにより、工場内での労働者数を含めている。

図中より、サイトPCaは現場打ちよりも1~2%コスト高であるが、ほぼ同程度のコストであった。工場PCaは、部材の工場製作費(輸送費込み)および緊張工により上部工はコスト高となるが、杭本数が少ない分、全体コストは現場打ちよりも6%低く見積もられている。ただし、栈橋設計の決定要因が、地震力ではなく接岸力あるいは牽引力となる場合には、杭本数が削減できないため、全体コストは増加するものと考えられる。本検討条件において、工場PCaは現場打ちに対して、約50%の工期短縮、労働者数は約40%に省人化されるため、生産性の高い栈橋構築方法であると言える。

3. CO₂ 排出量の推計方法

(1) 本検討におけるサプライチェーン

サプライチェーン排出量⁴⁾とは、原材料の調達から製造、物流、供用、解体などの一連の流れから発生する温室効果ガス排出量を指している。

本検討では、図-3に示すように、上流側から自社までの建設時におけるサプライチェーンに着目して推計している。上流側とは鋼管杭やコンクリート等の資材生産、軽油や重油等の燃料・電力の採掘、生コンやPCa部材の輸送・配送に関わる間接排出、自社とは建設機械(作業船舶を含む)の稼働に伴う燃料消費や船舶のえい航・回航に伴う直接排出を指している。

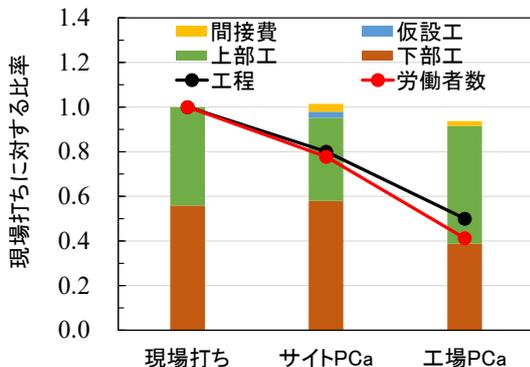


図-2 コスト・工程・労働者数の比較

(2) CO₂ 排出原単位の作成方法⁵⁾

CO₂ 排出原単位の作成方法は、各段階における実際の排出量データを積み上げて算定する「積み上げ法」と、国内全体の生産・販売活動の流れに基づき環境負荷量を算定する「産業連関法」によるものがある。

「積み上げ法」は実態に即した排出量の評価が可能であるが、各単位プロセスの環境負荷データを積み上げるためには網羅的なデータ収集が必要であり、推計者によって排出原単位が異なる可能性がある。一方、「産業連関法」は総務省が公開する一定期間(通常は1年)に行われた財・サービスの産業間取引を行列形式で示した産業連関表を用いる方法であり、国立環境研究所が作成している産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)⁶⁾を用いて排出原単位を算定することができる。3EIDは原単位の推計過程が公開された透明性の高いデータであり、各部門の単位生産活動(百万円相当の生産)に伴い発生する環境負荷量が示されている。産業連関表に付帯の部門別品目別国内生産額表を併用することにより、単位あたりのCO₂ 排出原単位(t-CO₂/unit)を求めることができる。なお、「産業連関表」は経済的な取引に基づく同一条件のもと、直接的および間接的な環境負荷量を網羅的に把握することができるが、コンクリート配合の違いなど、詳細な技術的評価への適応性が低いことが課題として指摘されている。

本検討では表-2に示す対象品目に対して、主として「産業連関法」による方法を適用し、コンクリート配合による違いは、別途「積み上げ法」で算定することとした。資材(鋼管杭、コンクリート、エネルギー燃料等)の生産に伴うCO₂ 排出原単位の作成方法を図-4に示す。資材単位(*)あたりの生産額(百万円)に3EIDの原単位(t-CO₂/百万円)を乗じて、CO₂ 排出原単位(t-CO₂/*)を算



※PCa工場での燃料・電力消費含む

図-3 本検討で定義したサプライチェーン

表-2 本検討の対象品目

種別	品目	
資材	鋼材	鋼管杭, 異形棒鋼, 鋼板, H形鋼, PC鋼より線
	コンクリート	ポルトランドセメント, 混和材, 細骨材, 粗骨材 無収縮モルタル, PCa部材
	その他	基礎砕石
建設機械	作業船舶	非航杭打船(油圧ハンマ式), 非航起重機船 揚錨船, 引船, クレーン付台船, 潜水土船
	陸上機械	クローラークレーン, ラフタークレーン, ポンプ車, バックホウ 発電機, ダンプトラック
	輸送・配送	アンジェーター, トレーラー
燃料・電力	軽油, A重油, PCa工場での燃料・電力	

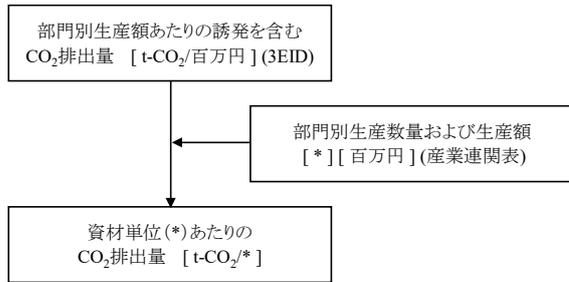


図4 資材の生産に伴うCO₂排出原単位の作成方法

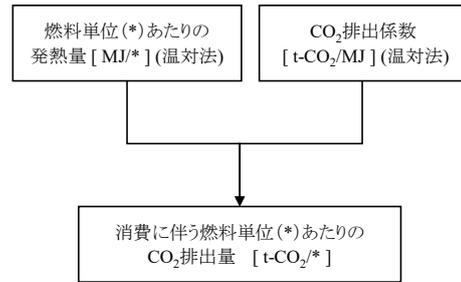


図5 エネルギー燃料の消費に伴うCO₂排出原単位の作成方法

定する。エネルギー燃料（軽油、A重油等）は生産と消費のそれぞれにおいてCO₂排出原単位を求め、消費に伴う排出原単位は図-5に示すように、地球温暖化対策の推進に関する法律施行令第三条の発熱量(MJ/*)およびCO₂排出係数(t-CO₂/MJ)を用いて算定する。なお、生産に伴うCO₂排出原単位は図-4と同様の方法で作成した。

(3) CO₂排出原単位の一覧

本検討で用いるCO₂排出原単位の一覧として、資材の生産に伴うものを表-3、エネルギー燃料の生産および消費に伴うものを表-4に示す。ここで、電力の生産に伴う排出原単位は、環境省が公表している「サプライチェーンを通じた温室効果ガス排出等のための排出原単位データベース Ver.3.1(2021.3)」、消費に伴う排出原単位は環境省・経済産業省公表の「電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)」の代替値を用いた。

陸上輸送に伴うCO₂排出量は、積載率別の燃料使用量に輸送トンキロ(貨物重量(t)×輸送距離(km))を乗じて算定するトンキロ法⁴⁾により燃料消費を求め、燃料別のCO₂排出原単位を乗じて算定した。

表-3 資材の生産に伴う排出原単位

	単位	資材単位あたりのCO ₂ 排出量 [t-CO ₂ /*]
鋼管杭	産 t	1.923
鋼板	産 t	1.825
H形鋼	産 t	1.845
異形棒鋼	産 t	1.454
PC鋼より線	産 t	4.258
コンクリート(50-12-20H)	積 m ³	0.426
コンクリート(30-12-25BB)	積 m ³	0.257
ポルトランドセメント	産 t	0.776
ポルトランドセメント(早強)	産 t	0.950
高炉セメント	産 t	0.759
砂利, 砂	産 千t	8.176
碎石	産 千t	8.023

産:産業連関表, 積:積み上げ法

表-4 エネルギー燃料の生産・消費に伴う排出原単位

	単位	生産に伴う燃料単位あたりのCO ₂ 排出量 [t-CO ₂ /*]	消費に伴う燃料単位あたりのCO ₂ 排出量 [t-CO ₂ /*]
A重油	kl	0.321	2.710
軽油 免税	kl	0.325	2.585
軽油 JIS2号	kl	0.514	2.585
電力	百万kWh	68.2	488.0

4. PCa 栈橋工法のCO₂排出量の推計

(1) 施工フローおよび推計対象

栈橋工事の現場打ちによる施工フローを図-6に示す。図中には、各工種の横側から矢印で主要な資材の流れを表しており、矢印の上段には資材生産、下段には資材輸送に伴うCO₂排出量について考慮している場合は○、考慮していない場合は×で明示した。なお、本検討において、鋼管杭や鉄筋等の鋼材は、積算数量から生産時のCO₂排出量が把握できるが、それらの輸送経路や手段については仮定が難しいため考慮できていない。生コンについては、現場から半径10km近郊から供給されるものとして、アジテーター車による輸送を考慮している。また、栈橋工事には係船柱や防舷材などの付属工や舗装工があるが、本検討においては各ケースで共通する工種であるため(厳密には鋼管杭の仕様や本数が異なれば、アルミニウム陽極や被覆防食に由来するCO₂排出量が異なる)、

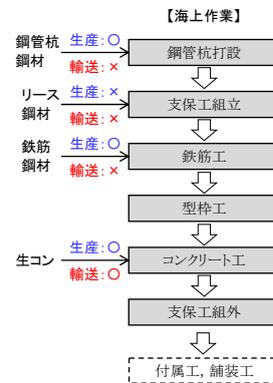


図-6 現場打ちの施工フロー

CO₂排出量の推計対象から除外している。PCa 栈橋工法(サイトPCa, 工場PCa)の施工フローを図-7に示す。

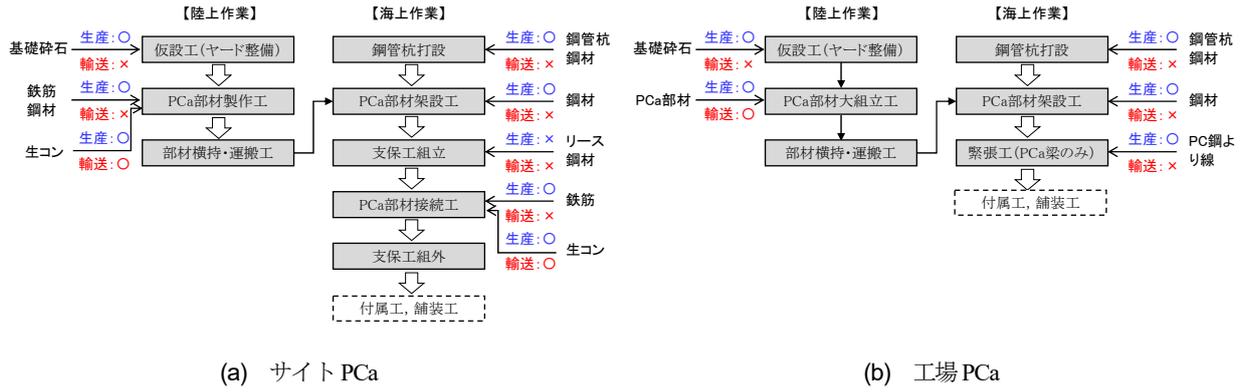


図-7 PCa 栈橋工法の施工フロー

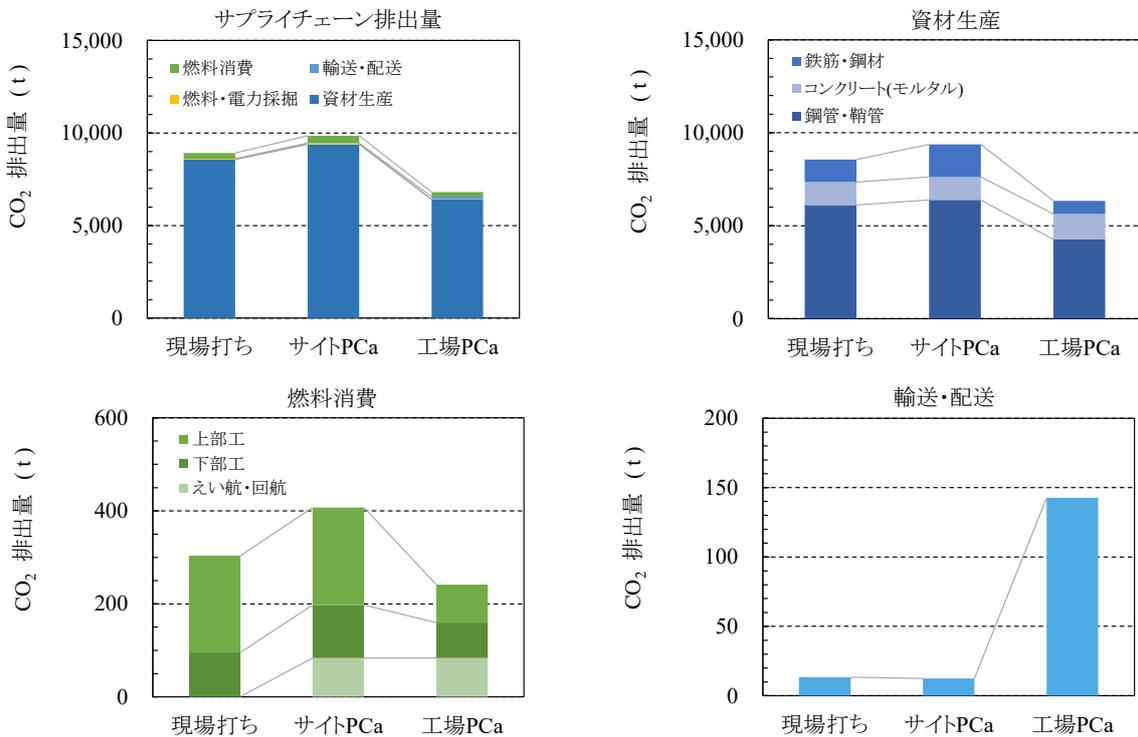


図-8 CO₂排出量の推計結果

(2) CO₂排出量の推計結果

5ブロック当たりのCO₂排出量の推計結果を図-8に示す。本検討におけるサプライチェーン排出量は、現場打ちに対してサイトPCaが1.1倍、工場PCaが0.75倍であった。内訳を見ると、サプライチェーン排出量の約95%が資材生産に伴う間接排出であり、鋼管杭や鉄筋等の鋼材系が占める割合が多いことが分かる。図-9に示すように資材生産に伴うCO₂排出量のうち、78~87%が鋼管杭や鉄筋等の鋼材系であり、とりわけ栈橋工の低炭素化において、下部工(鋼管杭)の削減が最も効果的であることを示唆している。

燃料消費による直接排出は、サプライチェーン排出量

の約4%に満たないが、サイトPCaは現場打ちに比べておよそ作業船舶の回航に伴うCO₂排出量が多く、工場PCaは上部工の軽量化および下部工の数量減により、燃料消費に伴うCO₂排出量が最も少ない結果となっている。

サプライチェーン排出量の約2%以下である輸送・配送は、PCa部材の陸上輸送を伴う工場PCaが最も多いが、一般に工場からの輸送距離が約100km(メーカヒヤリングより)であることを考えれば、本検討条件の輸送距離300kmはやや過大に評価しているものと考えられる。なお、本検討では、鋼管杭や鉄筋等の資材輸送を考慮できておらず、図-8の輸送・配送は生コンおよびPCa部材を対象とした推計となっている。

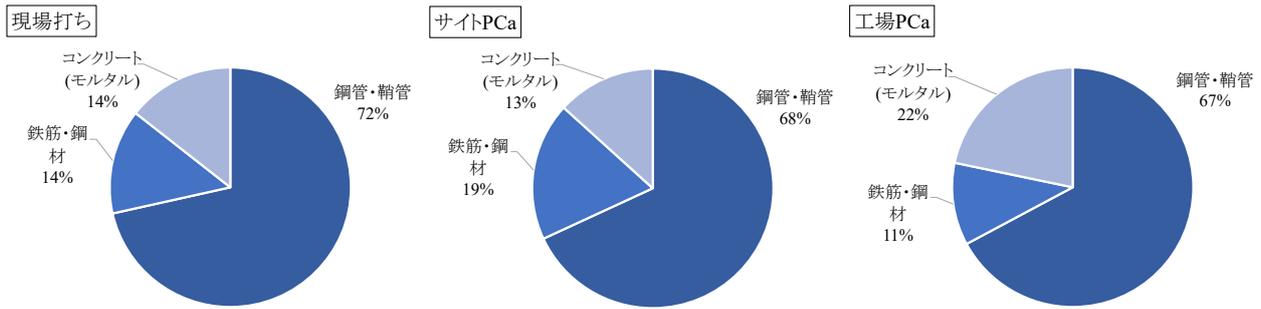


図-9 各工法の資材生産に伴う CO₂ 排出量の内訳

5. おわりに

本研究では、今後の適用拡大が予測される PCa 栈橋工法について、サプライチェーン排出量の観点から CO₂ 排出量の比較検討を行った。その結果、工場 PCa の CO₂ 排出量が最も低く推計され、現場打ちに対して約 25% 減であった。また、資材生産に伴う CO₂ 排出量がサプライチェーン排出量の約 95% を占めており、栈橋工事の低炭素化には、鋼管杭や鉄筋等の資材数量を減らすことが最も効果的であることが分かった。工場 PCa は上部工にプレストレスを導入することで、鋼管杭やコンクリート等の主要な資材数量を抑えられるため、工程短縮や生産性向上のみならず、サプライチェーン排出量の観点からも優位な栈橋構築方法であると言える。

CO₂ 排出量の推計においては、一定のルールの中で対象品目や施工フローを明確にし、算定境界を明らかにすることが重要である。本検討では、モデル栈橋において仮定が困難であった鋼管杭や鉄筋等の資材輸送を対象外としたが、実工事における CO₂ 排出量の推計では、詳細な輸送段階についての検討を加味することで、より実態に即した比較検討が可能となる。

参考文献

- 1) 川俣奨：栈橋上部工受梁のプレキャスト化施工について，*Marine Voice*21, Vol.302, pp.12-15, 2018.
- 2) 池野勝哉，伊野同，岩波光保，川端雄一郎，加藤絵万：プレキャスト化による栈橋施工の生産性向上，土木学会建設技術発表会 2018 概要集，pp.79-85, 2019.
- 3) 石塚新太，天谷公彦，加藤絵万，岩波光保：オール工場製作による組立式 PCa 栈橋の提案—PC 圧着構造の耐荷性能に関する検討—，*プレストレストコンクリート学会誌*，Vol.64, No.1, pp.37-44, 2022.
- 4) 環境省 経済産業省：サプライチェーンを通じた温室効果ガス排出量算定に関する基本ガイドライン ver.2.3, 2017.
- 5) 中村董，川端雄一郎，辰巳大介：港湾構造物の建設時における CO₂ 排出量算定に関する基礎的検討 - 工事実施前での CO₂ 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.
- 6) 南斉規介：産業連関表による環境負荷原単位データベース (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.
- 7) Keisuke Nansai, Jacob Fry, Arunima Malik, Naoki Kondo, Carbon footprint of Japanese health care services from 2011 to 2015, *Resources, Conservation & Recycling*, 152, 104525, 2020.

(Received February 3, 2022)

(Accepted May 9, 2022)

COMPARATIVE STUDY OF CO₂ EMISSIONS FOR PRECAST PORT PIER CONSTRUCTION METHODS

Katsuya IKENO, Sumire NAKAMURA, Yuichiro KAWABATA, Shunsuke KANAEDA and Mitsuyasu IWANAMI

As the global movement toward decarbonization is gaining momentum, the importance of low-carbon construction is becoming increasingly important for port construction in Japan. In this study, as a fundamental study for low-carbon port pier construction, CO₂ emissions during construction were compared between conventional in-situ casting and PCa pier construction methods. As a result, the most effective method for low-carbon pier construction was to reduce the quantity of steel materials such as steel pipe piles and rebar. It was confirmed that factory PCa is a superior construction method not only in terms of process shortening and productivity improvement, but also in terms of supply chain for port pier construction.