

工場製作部材を用いたユニット式プレキャスト 栈橋工法の開発

PC-Unit 栈橋工法[®]

池野 勝哉

栈橋工事において、PCa 施工は生産性向上の有効な手段として期待されている。これまで、現地で PCa 部材を製作するサイト PCa 栈橋工法は実用化されているものの、比較的大きな陸上ヤードが必要となることや、起重機船の調達性やそれに伴うコスト増加など適用には制約も多い。そこで著者らは、全て工場製作した PCa 部材を現地でプレストレスにより組み立てる PC-Unit 栈橋工法[®]を開発した。本稿では、本工法の概要および技術課題の取組内容について紹介するとともに、建設時の推計 CO₂ 排出量の観点からも優れた PCa 工法であることを示す。

キーワード：栈橋上部工，プレキャスト，工場製作，ユニット式，プレストレス，CO₂ 排出量

1. はじめに

近年、建設現場の生産性向上を目的として、プレキャスト（以下、PCa）部材を活用した省人化技術が求められている。一般に、栈橋上部工の PCa 施工は、下部工である鋼管杭の打設と並行して、現場内あるいは近隣ヤードにおいて PCa 部材を製作し、大型の起重機船で架設するサイト PCa 栈橋工法¹⁾（以下、サイト PCa）が用いられている。しかし、サイト PCa は比較的大きな陸上ヤードが必要であり、起重機船の調達性やそれに伴うコスト増加など適用には制約も多い。そこで、ユニット化した栈橋上部工を全て工場製作し、現地へ陸上運搬したのち、プレストレスにより組み立てる PC-Unit 栈橋工法[®]（以下、本工法）を開発

した²⁾。本工法は、サイト PCa と比較して更なる省人化や工期短縮が期待できるとともに、プレストレスコンクリート構造とすることで、上部工の軽量化が図れるため、地震時慣性力の軽減など合理的な設計が可能となるものである。

一方、世界的に脱炭素化に向けた取り組みが活発化する中、我が国においても建設時における低炭素化の重要性がますます高まっており、施工者自らの直接排出のみならず特に排出割合が多いとされる材料に由来する上流側の間接排出を考慮したサプライチェーン排出量の評価が重要である。本稿では、本工法の概要および技術課題に対する取組内容について紹介するとともに、図-1 に示す工法の推計 CO₂ 排出量を比較した結果について示す。



図-1 栈橋工法の一覧

2. 本工法の概要

(1) 本工法の構成ユニット

本工法の栈橋上部工は、2種類のPCa部材（杭頭部材、梁部材）で構成され、陸上運搬が可能なユニットとして工場製作される。鋼管杭と杭頭部材との接続は、鋼管杭への架設後、鞘管と鋼管杭との隙間に無収縮モルタルを充填する鞘管方式³⁾を採用している（図一2(a)参照）。梁部材は合理化した逆U字形断面(RC構造と比べて約30%の軽量化を実現)とするとともに、杭頭部材の梁受け材に梁部材を嵌め込むように架設することで、施工時の安全性を向上している（図一2(b)参照）。その後、PC鋼より線をPCa部材のシース内に挿入し、所定のプレストレスを導入することで、全てのPCa部材を圧着接合する。

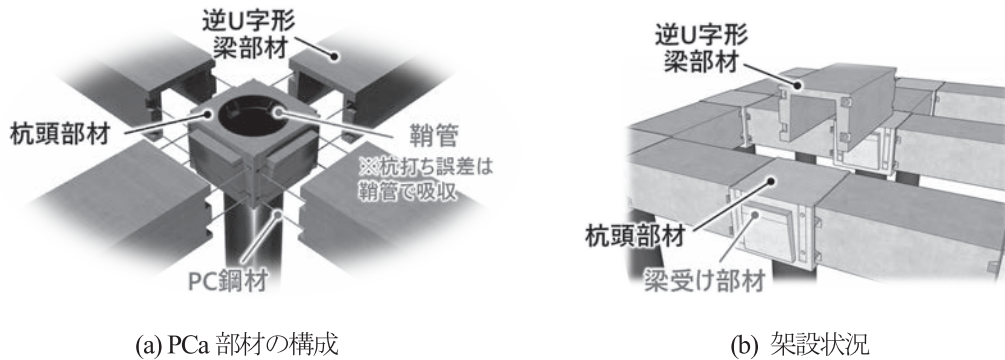
(2) 施工フロー

本工法には、「単独架設タイプ」と「プレ連結架設タイプ」の2種類の施工方法がある。図一3にそれ

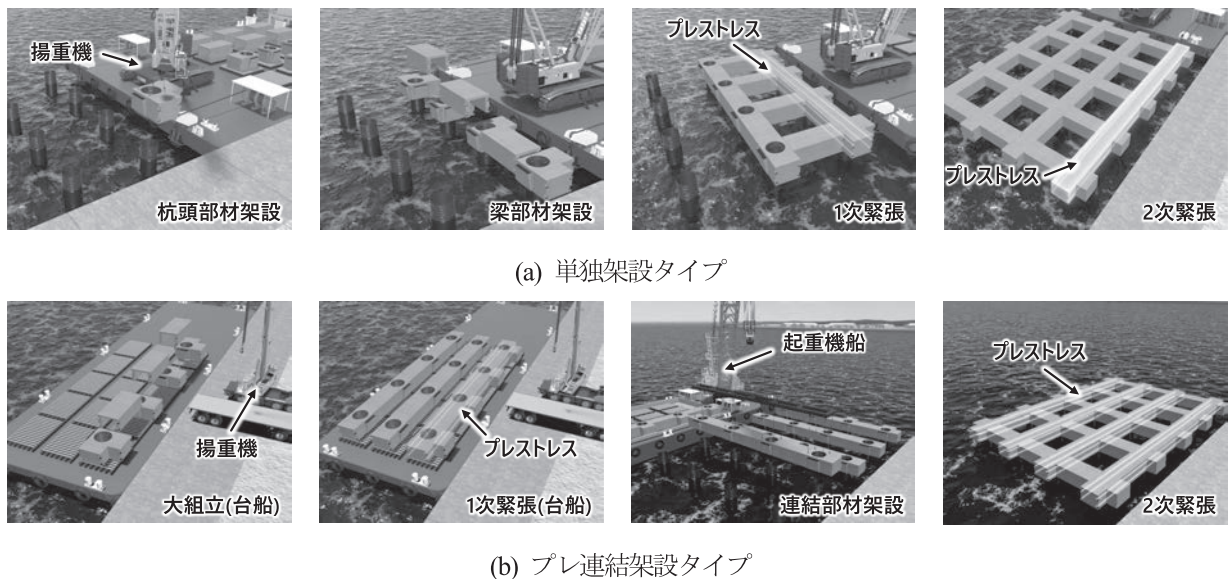
ぞれの施工フローを示す。単独架設タイプは搬入したPCa部材をそれぞれ単独に架設する方法であり、搬入車両から揚重機により直接架設できるが、1次緊張が完了するまで部材同士は一体化されないため、静穏な港内での作業に適している。一方、プレ連結架設タイプは現地に搬入したPCa部材をあらかじめ陸上ヤードあるいは台船上で大組み立てし、一方向の1次緊張によって連結部材を形成する。この連結部材を鋼管杭に架設し、1次緊張と直交する残りの梁部材を架設した後、2次緊張により一体化を図るものである。単独架設タイプと比べて起重機船による架設が必要となるため、大規模な栈橋工事に適している。

(3) 本工法の技術課題

栈橋は鋼管杭と上部工が剛結合された多径間ラーメン構造として設計されるため、杭頭部に最も大きな断面力が作用する。本工法で採用している圧着接合は建築分野で適用事例があるが、栈橋の鋼管杭が直接的に高重量の上部工を支持している点や、厳しい塩害環境



図一2 本工法の概要



図一3 施工フロー

に曝されている点で建築構造物とは異なる状況下にあると言える。そのため、図-4に示す①曲げモーメントに対する杭頭接合部の曲げ耐荷性能、②せん断力に対する部材接合部の一体性、③PCa部材の架設精度、④圧着接合部における塩化物の浸透抵抗性、について確認する必要があった。

3. 取組内容

(1) 杭頭接合部の曲げ耐荷性能

杭頭接合部を模した逆T形模型（縮尺比1/4）を用いて交番載荷実験を実施した。実験概要を図-5に示す。実験ケースは、試験体の設計曲げ耐力が同程度となるような従来の現場打ちによる「RC構造」、本工法の「PC圧着構造」の2ケースである。交番載荷は、鋼管杭基部の外縁が降伏した時の水平変位 δ_y を整数倍し、 $\pm 1\delta_y \dots \pm 5\delta_y$ の各ステップを3回ずつ繰り返した。実験結果として、 $3\delta_y$ 時の損傷状況を図-6に示す。「RC構造」は杭頭部の広範囲にひび割れが

発生し、杭頭部のひび割れが梁部へ進展・拡大している。一方で、「PC圧着構造」は杭頭部材の側面に微細なひび割れが生じたが、除荷に伴いひび割れが閉合する傾向が確認された。また、杭頭部材と梁部材の接合境界面では、弾性的な開閉挙動が見られ、梁部材へのひび割れ進展は限定的であった。実験で得られた荷重-変位関係を図-7に示す。「RC構造」では、杭頭部のひび割れ損傷が梁部へ進展・拡大し、載荷ステップの後半において荷重ゼロ付近で変位が進行するスリップ現象が見られた。一方、「PC圧着構造」はプレストレスによる杭頭接合部の拘束によって、杭頭部材や梁部材のひび割れが抑制されるためスリップ現象は生じず、残留変位の少ない紡錘形状を示していた。以上より、本工法の「PC圧着構造」は従来の「RC構造」と同等以上の曲げ耐荷性能を有し、ひび割れ損

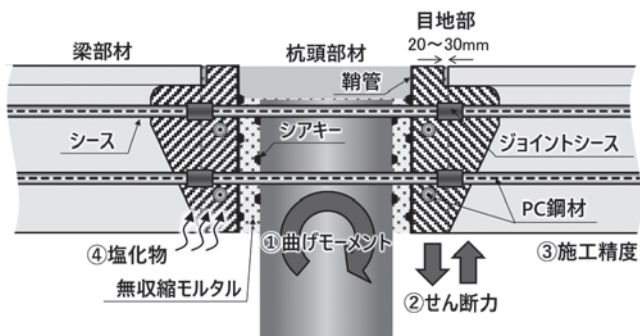
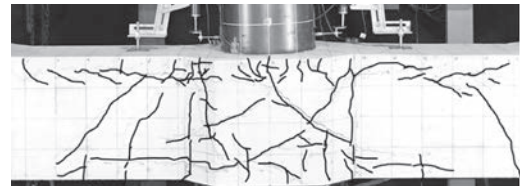
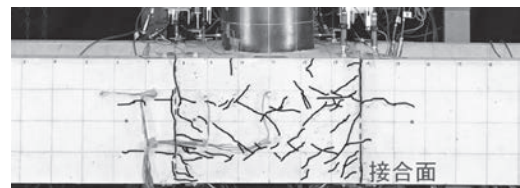


図-4 本工法の技術課題



(a) RC構造



(b) PC圧着構造

図-6 試験体側面の損傷状況

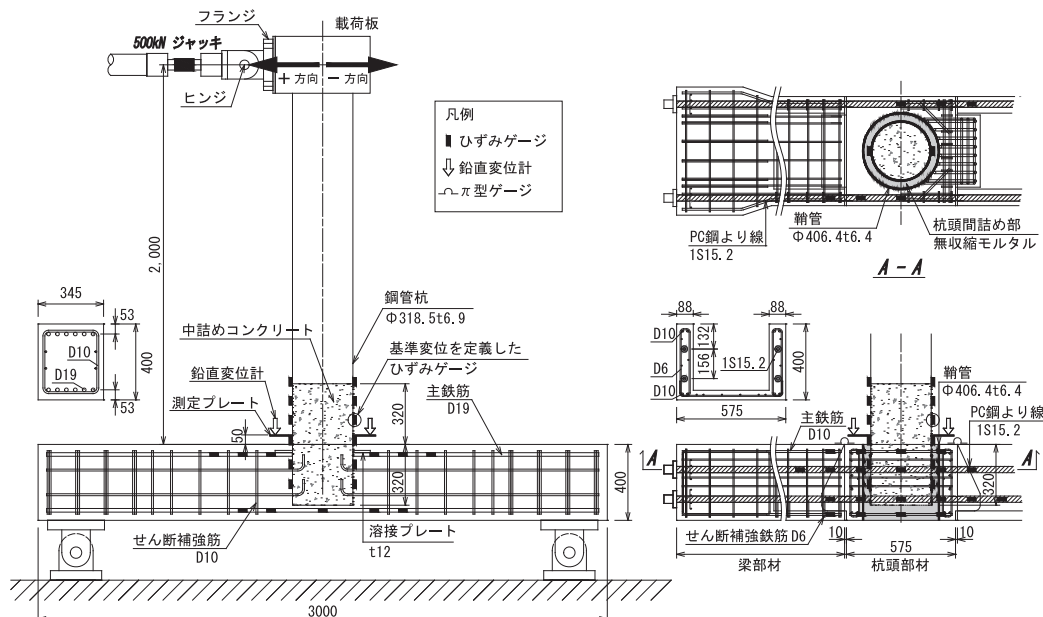
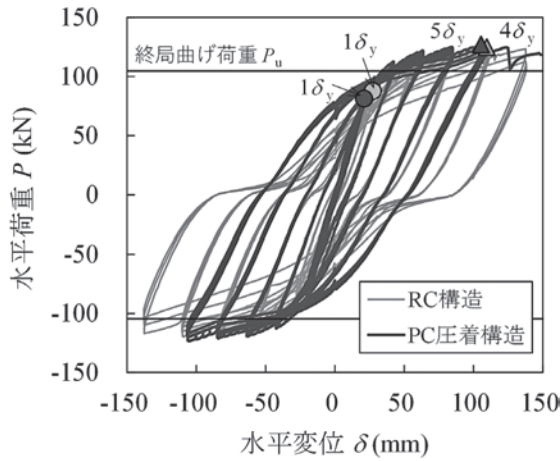


図-5 交番載荷実験の概要（左：RC構造，右：PC圧着構造）

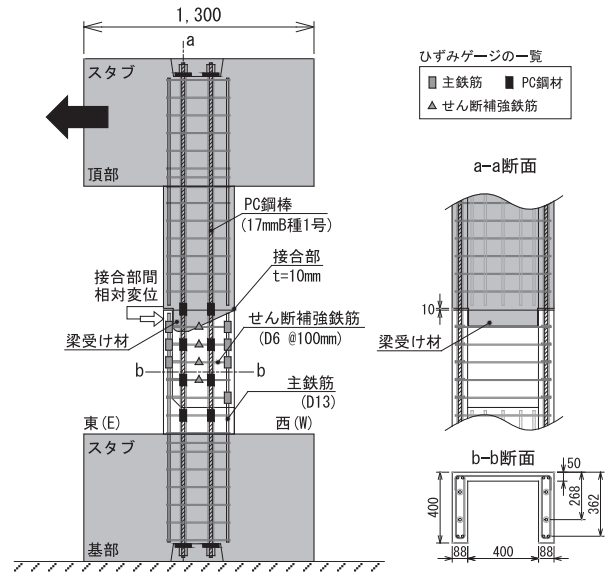


図一七 荷重-変位関係

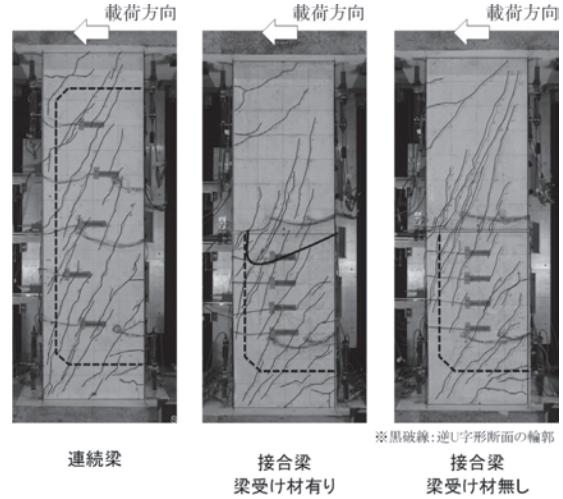
傷が少ない杭頭接合方法であることを確認した。

(2) 部材接合部の一体性

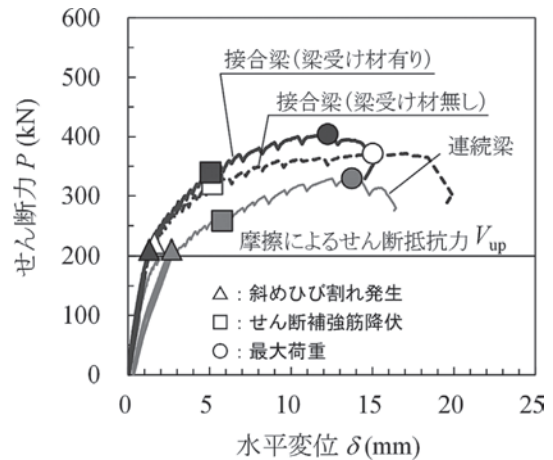
本工法の杭頭部材と梁部材はプレストレスで圧着接合されるため、部材接合部には摩擦によるせん断抵抗力が発揮される。ここでは、部材接合部に一様なせん断力を作用させたせん断耐力実験について示す。実験の概要を図一八に示す。実験は連続梁と試験体中央で接続した接合梁（梁受け材有り、梁受け材無し）の3ケースを実施した。本工法では、せん断力の作用方向によって、梁受け材がせん断耐力に及ぼす影響を明らかにするため、接合梁は梁受け材の有無を試験因子にしている。各ケースの最大荷重時におけるひび割れ性状を図一九に示す。全てのケースにおいて、試験体中央付近で斜めひび割れが発生し、せん断補強筋が降伏した後、ひび割れが右斜め上方に進展して荷重低下に至った。なお、連続梁および接合梁ともに破壊形態は斜め引張破壊となり、接合梁の接合境界面に沿ったひび割れの貫通は確認されていない。実験で得られた荷重-変位関係を図一十に示す。接合梁は、接合部の摩擦によるせん断抵抗力 V_{up} の繰返し荷重に対しても弾性的に挙動し、梁受け材有りは荷重 404 kN (V_{up} の2倍)、梁受け材無しは荷重 372 kN (V_{up} の1.9倍)で斜め引張破壊により荷重低下した。また、これら接合梁は破壊に至るまでの間、接合境界面にズレは生じていなかった。このように本工法の接合梁は、設計せん断抵抗力 V_{up} の範囲において、連続梁と同様に一体的に挙動することを確認した。



図一八 せん断耐力実験の概要



図一九 最大荷重時の正面ひび割れ性状



図一十 荷重-変位関係

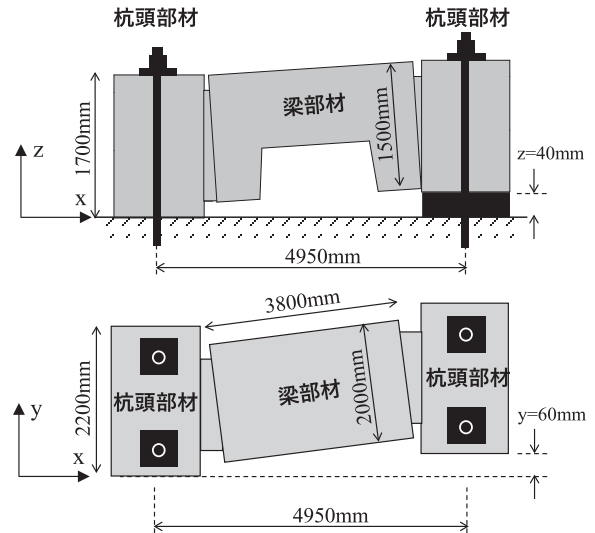
(3) PCa 部材の架設精度に関する施工性確認実験

本工法は、鋼管杭に杭頭部材を架設し、杭頭部材の梁受け材に逆U字形断面の梁部材を上方から嵌め込み、ジョイントシースを接続する。その後、連続した

シーズ内にPC鋼材を挿入し、所定のプレストレスを導入する。このような施工工程において、先行して設置された杭頭部材に生じた架設誤差は、(a) 梁部材の

架設，(b) ジョイントシース接続およびPC 鋼材の挿入，(c) 部材目地間への無収縮モルタル充填，の3つの後続工程に影響を与えることが想定される（図—11）。そこで，杭頭部材に架設誤差を与えた上で，上記(a)から(c)に至る工程の施工性について，実物大試験体を用いた施工性確認実験を行った。

実験状況を図—12に示す。施工時において架設する梁に対して，直交する梁部材は架設済みであると見做し，架設誤差として杭頭部材間に相対的なズレを与えた。ここで，港湾工事共通仕様書に示された栈橋上部工の出来形管理基準は，法線に対する出入りとして±30 mm，鉛直方向±20 mmであることから，相対的なズレとして各方向にそれぞれ60 mm，40 mmを与えた（図—13）。杭頭部材に誤差を与えた状況下において梁部材を架設した結果，杭頭部材との接触や干渉が生じることなく架設できることが確認された。また，接続したジョイントシース内に無収縮モルタルの流入は認められなかった。続いて，シース内にはプランジャーと呼ばれる直径約60 mmの模擬PC鋼棒を挿入し，誤差が生じた条件下においても，杭頭部材の外端部から梁部材，対向するもう一つの杭頭部材の外端部にわたるまで，問題なく通過することが確認された。部材接合部の目地部への無収縮モルタル充填は，部材上方からの自然流下により行った。このような工

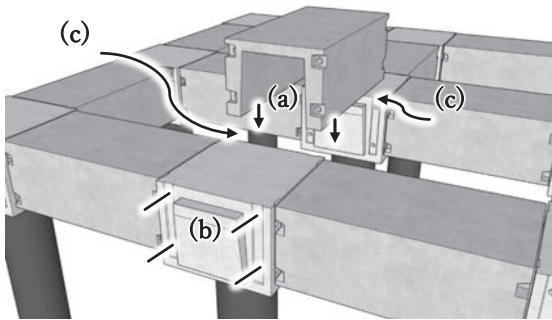


図—13 架設誤差の与え方

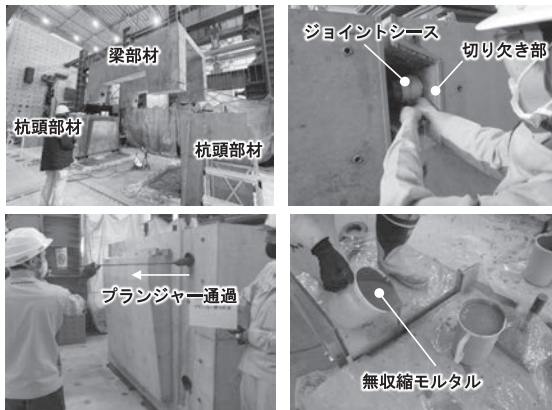
程を3回繰り返して実施したが，側面および底面の型枠からモルタルの漏出は認められなかった。

(4) 圧着接合部の塩化物浸透抵抗性

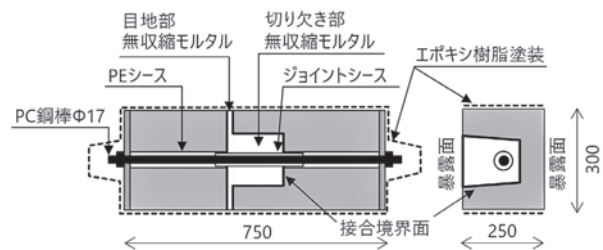
本工法では部材接合部の目地部に無収縮モルタルを充填するため，その接合境界面から塩化物が浸透する場合，鋼材腐食等に影響を与える恐れがある。そこで，接合部を模した試験体を製作し，劣化促進試験を実施した。劣化促進試験は，約45度に温めた海水（久里浜港）を用いて，3.5日浸漬，3.5日乾燥となる乾湿繰返し条件下で行った。試験体の概要図を図—14に示す。本試験体では接合部を模擬するため，切り欠き部（図—12の右上写真）を有する一対のコンクリートブロックにシース管の接続およびPC鋼材の挿入を行い，目地部および切り欠き部に無収縮モルタルを充填して作製した（図—14）。実栈橋での塩化物浸透面を考慮し，図中のように2面を暴露面，その他の4面はエポキシ樹脂で被膜した。ここでは，接合境界面の目荒しの有無を試験因子とした試験結果を示す。2年間の劣化促進試験後，図—15で示す箇所にてコア採取（φ100 mm×250 mm）を行い，電子プローブマイクロアナライザー（以下，EPMA）によるCl元素分析を行った。元素分析は，試験体長手方向の界面（コ



図—11 杭頭部材の架設誤差が与える影響



図—12 施工性確認実験の状況



図—14 試験体の概要 [単位：mm]

ア①) および短手方向の界面 (コア②) とし、幅 80 mm×深さ 80 mm を EPMA の対象範囲とした。

EPMA による Cl 元素分析結果を図-16 に示す。目荒し無しではコア②のみ接合境界面に塩化物の浸透が確認された。コア①の接合境界面はプレストレスの導入方向と直交した面であるため、接合同士が圧着することで塩化物浸透が抑制されたものと考えられる。一方、目荒し有りでは、両コアとも接合境界面に沿った塩化物浸透は確認されていない。本工法の接合境界面は目荒し有りを標準仕様としており、目荒しによる塩分浸透抑制効果について確認することができた。本試験については、今後も継続して長期モニタリングを実施する予定である。

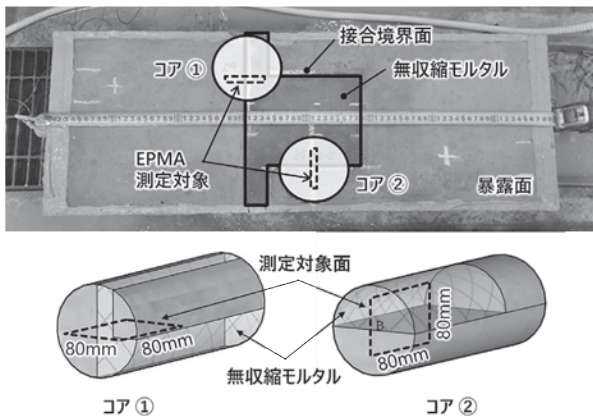


図-15 EPMA の採取位置

4. 建設時における推計 CO₂ 排出量の比較

検討に用いた栈橋モデルは、幅 33 m×長さ 25 m の直杭式栈橋であり、鋼管杭は 1 ブロック当たり 5×6 本 (5 ブロックで計 150 本) である。本工法は、工場製作した PCa 部材をトレーラーで陸上運搬 (300 km と仮定) し、現地の陸上ヤードで連結部材を組み立てる「プレ連結架設タイプ」と仮定した。本工法は上部工がプレストレスコンクリート構造となるため、梁部材の軽量化が可能であり、下部工の再設計により鋼管杭は 4×5 本 (5 ブロックで計 100 本) となる。栈橋モデルを図-17 に示す。

本検討では、上流側 (資材生産、燃料・電力の採掘、輸送配送) の間接排出から自社の直接排出までの建設時におけるサプライチェーン排出に着目して推計する。5 ブロック当たりの CO₂ 排出量の推計結果を図-18 に示す。図中より、本工法の CO₂ 排出量は従来の現場打ちに対して約 25% 削減されていることが分かる。ただし、同図の内訳を見れば分かるように、CO₂ 排出量の約 95% は資材生産に伴う間接排出であり、その多くは鋼管杭や鉄筋等の鋼材が占めている。そのため、現場打ちと同杭数であるサイト PCa は、鞘管の分だけ資材生産に伴う CO₂ 排出量が増えている。本工法は、上部工軽量化によるセメント量および杭本数の削減により、資材生産に伴う CO₂ 排出量を抑えている。燃料消費による自社の直接排出を見ると、サ

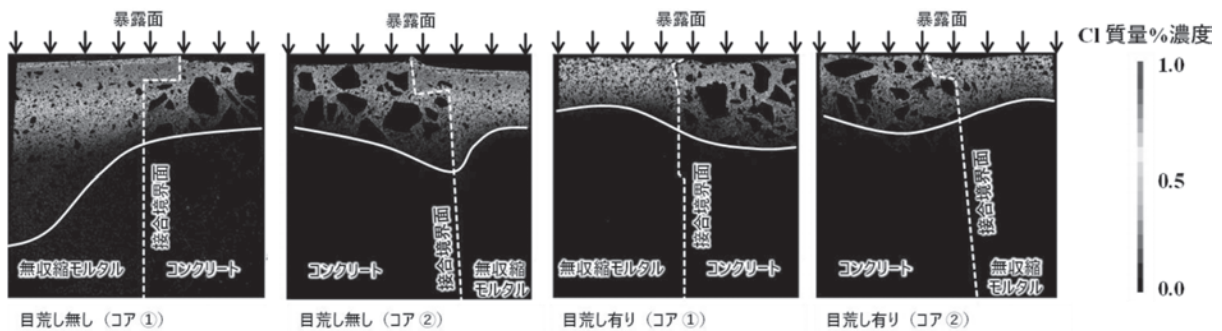


図-16 EPMA の分析結果

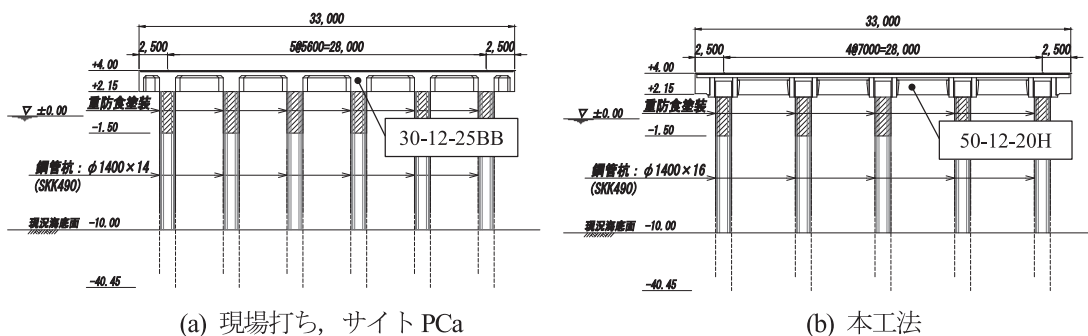
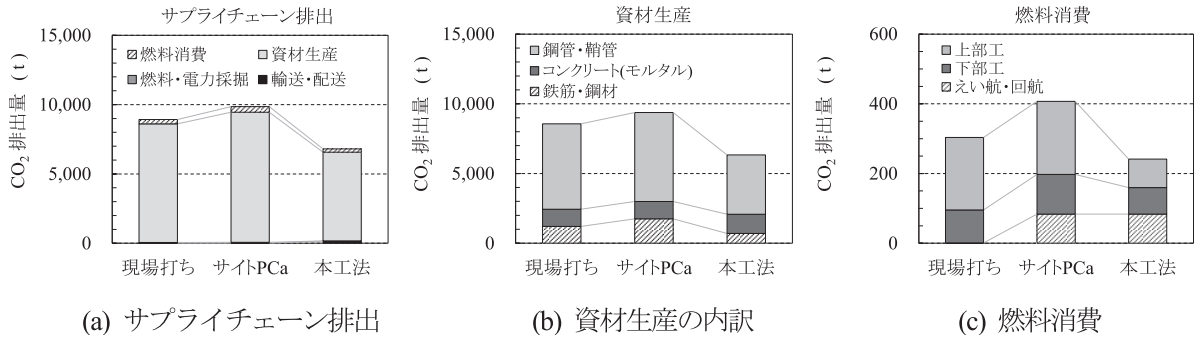


図-17 栈橋モデル



図一 18 CO₂ 排出量の推計結果

イト PCa および本工法は、現場打ちに比べて作業船舶のえい航・回航に伴う分だけ CO₂ 排出量が多い。しかし、本工法は工場製作による上部工の排出量減、杭本数の削減による下部工の排出量減により、現場打ちの燃料消費よりも直接排出が少ない。このように、本工法は、CO₂ 排出量の観点からも優れた PCa 工法であることが分かる。

5. おわりに

本稿では、PC-Unit[®] 栈橋工法の概要および技術課題への取組内容について紹介した。また、栈橋の検討モデルを用いた CO₂ 排出量の比較を行い、従来の現場打ちおよびサイト PCa と比べて、低炭素な PCa 施工方法であることを示した。本稿を通じて、栈橋の PCa 施工が普及し、港湾工事の安全性およびコンクリート品質の向上、生産性向上の一助になれば幸いである。

本工法は、このたび (一財) 沿岸技術研究センターの港湾関連民間技術の確認審査・評価証 (第 22003 号)

を取得した。共同研究 (日本ピーエス、海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所、東京工業大学) の関係者、評価委員会委員および事務局の方々にこの場を借りて謝意を表す。

JCMMA

《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 Voice21, Vol.302, pp.12 ~ 15, 2018.
- 2) 田中豊, 池野勝哉, 石塚新太, 田中智宏, 金枝俊輔, 栗原勇樹, 前嘉昭, 天谷公彦, 中村 壘, 川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保：PC 圧着構造を用いたユニット式プレキャスト栈橋の開発－工場製作部材による省力化施工－, 港湾空港技術研究所報告, Vol.61, No.1, 2022.
- 3) 池野勝哉, 伊野同：プレキャストを利用した老朽化栈橋のリニューアル技術－栈橋工事の生産性向上を目指して－, 建設機械施工, Vol.70, No.9, pp.85-90, 2018.

【筆者紹介】

池野 勝哉 (いけの かつや)
 五洋建設株式会社
 技術研究所 土木技術開発部
 専門部長

