

3. PC 圧着接合によるプレキャスト栈橋工法の開発

ー工場製作部材を活用したフルプレキャスト施工ー

五洋建設(株) 技術研究所 ○ 池野 勝哉
五洋建設(株) 技術研究所 田中 智宏
(株)日本ピーエス 工事本部 天谷 公彦

1. はじめに

近年、建設現場の担い手不足を背景に、プレキャスト部材を活用した現場施工の省力化技術が求められている。とりわけ、港湾工事における栈橋上部工のプレキャスト施工は、海上作業を大幅に省略できるため、工期短縮や省人化はもとより、安全性の向上やコンクリート構造物の品質確保などの効果が期待できる。そこで、栈橋上部工を構成する部材を全て工場で製作し、現地へ陸上運搬した後、ポストテンション方式のプレストレスにより組み立てるプレキャスト栈橋工法（以下、本工法）を開発した。本工法は、従来の現場打ちによる工法と比較して上述した種々の効果が期待できるとともに、プレストレストコンクリート（以下、PC）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による合理的な設計が可能となる。

本論文では、本工法の構造および施工方法について説明し、設計法の概要について述べる。さらに、本工法の実物大模型を用いた施工性確認実験を示し、最後に現場適用事例を紹介する。

2. 本工法の構造および施工方法

2.1 構造概要

本工法の概要を図-1 に示す。本構造は2種類のプレキャスト部材（杭頭部材、梁部材）で構成されており、それぞれ陸上運搬が可能なサイズ（幅2.5m、長さ12m、高さ2.3m、重量20t以下）で工場製作する。杭頭部材と鋼管杭との連結には鞘管方式¹⁾を採用し、鋼管杭の打設後に杭頭部材を架設し、鞘管と鋼管杭の隙間に無収縮モルタルを充填

することで一体化を図る。ここで、鞘管は鋼管杭の平面的な打設精度（管理基準 ± 100 mm）を考慮し、鋼管杭の直径よりも+200~300 mm 程度大きいものを選定することで、鋼管杭の打設誤差を吸収可能としている。梁部材は、陸上運搬を前提として軽量化と施工性に配慮した逆U字形断面を採用している。両部材のシースを接続し、幅20~30 mm程度の目地部に無収縮モルタルを充填する。その後、現地でポストテンション方式のプレストレスを導入することで、プレキャスト部材同士が圧着接合される。杭頭部材には梁受け材を設けることで、逆U字形断面の梁部材を上方からはめ込むように架設できるため、施工時における波浪や潮流の影響に対する安定性を向上している。

2.2 施工方法

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。ここでは、紙面の都合上、単独架設タイプの施工フローを図-2 に示す。単独架設タイプは搬入した部材をそれぞれ単独に架設する方法であり、搬入車両から部材を直

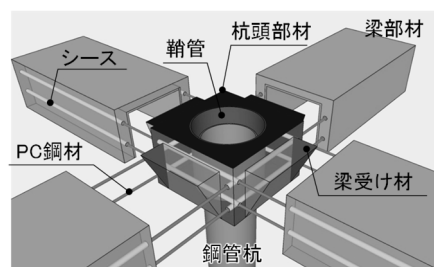


図-1 本工法の概要

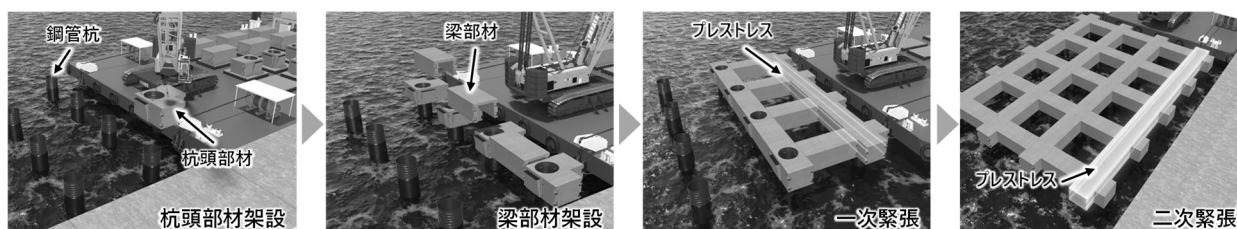


図-2 施工フロー（単独架設タイプ）

接架設できるため、陸上ヤードの広さが限られる場合においても適用が可能である。他方、プレ連結架設タイプは現地搬入した数点の部材を予め陸上ヤードで組み立てを行い、一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、一次緊張と直交する方向の梁部材を架設した後、二次緊張によって一体化を図るものである。

3. 設計法の概要

3.1 梁部材および杭頭部材の終局曲げ耐力

杭頭接合部には、地震時に外力として正負曲げモーメントが作用するため、それぞれの方角に対して断面照査を行う。プレストレスを導入した逆U字形梁部材の終局曲げモーメントは、図-3に示す平面保持を仮定したひずみ-応力分布の力の釣り合い式から求める。

そこで、本工法の終局曲げ耐力や設計法の妥当性を確認するため、鋼管杭と上部工の一部を逆T形試験体とした正負交番載荷実験²⁾(写真-1)を実施した。従来の現場打ちによる「RC構造」と本工法の「PC圧着接合」の2ケースについて、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、 $\pm 1\delta_y \sim \pm 5\delta_y$ の各ステップを3サイクルずつ繰り返した。実験で得られた荷重-変位関係を図-4に示す。図中より、「RC構造」の履歴ループはくびれた紡錘形状を示し、変位ステップ後半では水平荷重ゼロ付近で変位が進行するスリップ現象が明確に確認できる。一方、「PC圧着構造」はスリップ現象は見られず、残留変位の少ない紡錘形状を示した。一例として、 $+3\delta_y$ 時における試験体側面の損傷状況を図-5に示す。「RC構造」は杭頭部のひび割れ損傷の拡大・進展に伴い曲げモーメントを負担できなくなるのに対し、「PC圧着構造」は、接合面の弾性的な開閉挙動によって変形を吸収するため、梁部材へのひび割れ進展は限定的である。表-1に終局曲げ耐力の比較(実験値、設計値)を示す。ここで、設計値とは材料試験値を物性値として求めた終局曲げ耐力である。設計値に対する実験値の比は1.2~1.5であり、安全側に終局曲げ耐力を評価できることを確認した。



写真-1 交番載荷実験の状況

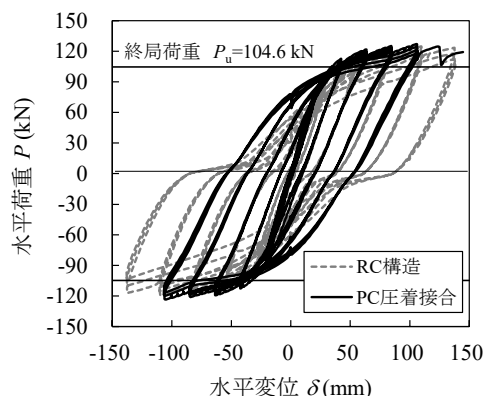
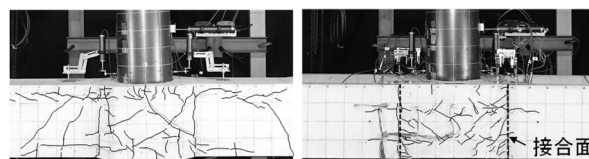


図-4 荷重-変位関係 (交番載荷実験)



(a) RC 構造 (b) PC 圧着接合

図-5 試験体側面の損傷状況 ($+3\delta_y$ 時)

表-1 終局曲げ耐力の比較

実験ケース	終局曲げ耐力			実験値 設計値
	設計値(鋼管杭) P_p (kN)	設計値(梁部) P_u (kN)	実験値 P_{max} (kN)	$\frac{P_{max}}{\min(P_p, P_u)}$
RC構造 正負曲げ	127.6	105.7	124.8	1.2
PC圧着接合	127.6	104.6	127.0	1.2
	127.6	87.3		1.5

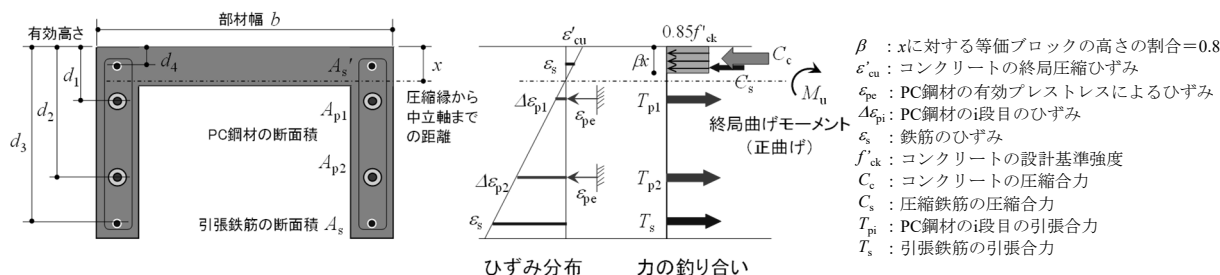


図-3 逆U字形梁部材のひずみ-応力分布 (正曲げの場合)

3.2 梁部材および接合部のせん断耐力

プレストレスを導入した梁部材のせん断耐力は、修正トラス理論に基づきコンクリートが負担するせん断耐力と、鉄筋が負担するせん断耐力の累加により評価する³⁾。接合部のせん断耐力は、主としてプレストレスによる摩擦力に期待し、せん断抵抗係数 μ を0.3とした式(1)により評価する。

$$V_{pf} = \mu P_e \cos \theta_p \cdots \cdots (1)$$

V_{pf} : 摩擦力が受け持つせん断耐力
 μ : せん断抵抗係数 (0.3)
 P_e : PC 鋼材による有効プレストレス
 θ_p : 有効プレストレスが接合面となす角度



写真-2 せん断実験の状況

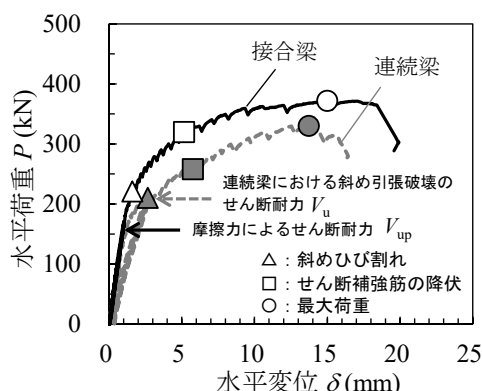
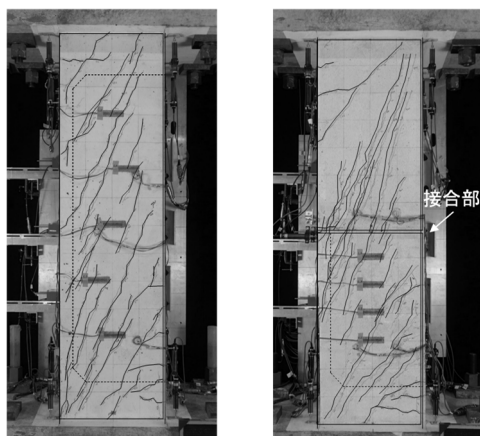


図-6 荷重－変位関係（せん断実験）



(a) 連続梁 (b) 接合梁

図-7 最大荷重時のひび割れ性状

ここで、せん断抵抗係数 μ の妥当性を確認するため、写真-2 に示すせん断実験⁴⁾を実施した。試験体のスタブ下端を反力床、スタブ上端を回転拘束した門形治具により固定し、水平ジャッキで門形治具を水平にスライドさせることで、模型の接合部に一様なせん断力を作用させ、接合部のせん断耐力や部材の一体性について確認した。実験は、連続梁および試験体中央で接続した接合梁の2ケース実施した。接合梁では逆U字形断面の梁部材端部を梁中央部で目地幅10mmで突合せ、隙間に無収縮モルタルを充填した。その後、ポストテンション方式でプレストレスを導入し、スタブと梁部材を一体化した。実験で得られた荷重－変位関係を図-6、せん断耐力の比較（実験値、設計値）を表-2にそれぞれ示す。設計値は材料試験値を用いて求めた。連続梁は、斜めひび割れが生じた後、斜め引張破壊による設計せん断耐力 $V_u=242$ kN時には剛性が低下した。一方、接合梁は接合部の摩擦力（せん断抵抗係数 $\mu=0.3$ ）による設計せん断耐力 $V_{up}=200$ kNにおいて線形的に振る舞い、梁部材の斜め引張破壊によって荷重が低下した。最大荷重時におけるひび割れ性状を図-7に示す。実験では2ケースともスタブ基部付近に曲げひび割れが生じた後、試験体中央付近から斜めひび割れが発生した。その後、せん断補強筋が降伏し、斜めひび割れが試験体の右斜め上方あるいは左斜め下方に進展して荷重低下に至っている。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、接合梁では接合部に沿ったひび割れの貫通は確認されていない。以上より、接合部に作用する摩擦力（せん断抵抗係数 $\mu=0.3$ ）によって、接合梁の一体性が確保されるとともに、安全側にせん断耐力を評価できることを確認した。

表-2 せん断耐力の比較

実験ケース	連続梁	接合梁
① 斜め引張破壊に対する設計せん断耐力 V_u (kN)	242	343
② 接合部の摩擦力による設計せん断耐力 V_{up} (kN)	—	200
③ 実験値 V_{max} (kN)	330	372
実験値 / 設計値	V_{max} / V_u	1.4
	V_{max} / V_{up}	1.9

4. 施工性確認実験

本工法の施工は、鋼管杭に杭頭部材（あるいは連結部材）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はめ込み、両者のシースを接続する。その後、目地部に無収縮モルタルを充填したうえで、連続したシース内に PC 鋼材を挿入し、所定のプレストレスを導入するという工程となる。杭頭部材架設に伴い生じる杭頭部材間の相対ずれは、後続の施工工程に影響を与える。そこで、杭頭部材間に任意の相対ずれを与えた条件下において、梁部材の実物大模型による架設実験を行い、各工程の施工性を確認した。

4.1 実験概要

実験は実物大模型を用いて、杭頭部材間に想定される最大の相対ずれを与えた。試験体概要図を図-8 に示す。相対ずれは、港湾工事共通仕様書⁵⁾の出来形管理基準を参考に、栈橋上部工の法線に対する出入 ± 30 mm、天端高 ± 20 mm のそれぞれを 2 倍し、平面ずれ 60 mm (y 方向)、鉛直ずれ 40 mm (z 方向) とした。杭頭部材と梁部材間における目地幅の設計値は 30 mm と設定し、杭頭中心間距離は栈橋における一般的な距離と同程度の 4,950 mm とした。また、目地部にモルタルを充填する際の型枠工程を簡略化するため、予め杭頭部材の梁受け

材側面にシール材を設置することで内型枠の代替とする工夫を試行した。その他、直径約 60 mm の模擬 PC 鋼材を用い、シースの連続性および PC 鋼材の挿入可否を確認した。モルタルの充填では、梁外面および底面型枠、梁内面シール材からの漏出の有無について確認した。

4.2 施工性の評価

実験状況を写真-3 に示す。杭頭部材間に想定される最大の相対ずれを与えた条件下において、梁部材は杭頭部材との接触や干渉が生じることなく架設可能であった。杭頭部材と梁部材間の設計目地幅値 30 mm に対し、架設完了時に最も狭い箇所でも 12 mm、最も広い箇所でも 51 mm であり、モルタル充填のための隙間を確保できていた。このことから、杭頭部材と梁部材間の設計目地幅は 30 mm を確保すればよいと判断した。また、シース内に挿入した模擬 PC 鋼材は支障なく通過し、PC 鋼材の挿入が可能ことが確認された。目地部へのモルタル充填では、試行 3 回のいずれにおいても、梁外面および底面型枠、また内面シール材からモルタルの漏出は認められず、実験終了後に梁部材を撤去したところ、目地部に未充填の箇所は見受けられなかった。本実験を通じ、これら一連の工程が確実に施工できることを確認した。

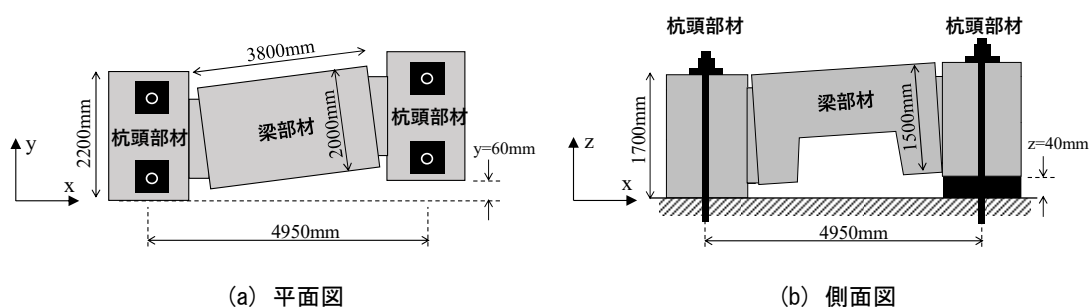


図-8 試験体概要図



写真-3 実験状況

5. 現場適用事例

5.1 工事概要

民間発電施設の建設にあたり、専用栈橋の構築が計画された。本工事において、工期短縮と品質向上を目的として、専用栈橋の上部工にプレテンション方式中空ホロー桁を用いたPC栈橋、栈橋形式の連絡橋の上部工には本工法、護岸渡橋部にポストテンション方式中空ホロー桁が採用された。専用栈橋および連絡橋の平面図を図-9に示す。本工法を適用した連絡橋は、延長53.6m×幅員9.2m、鋼管杭 $\phi 800\text{mm} \times 19$ 本、上部工は杭頭・梁連結部材 $\times 8$ 基、梁部材 $\times 16$ 基、橋台部材 $\times 3$ 基および床版部材 $\times 32$ 基のフルプレキャスト施工である。連絡橋の一般図を図-10に示す。ここで、本連絡橋の幅員が9.2mと比較的狭いことから、図-11に示すように幅員方向の杭頭部材および梁部材は、工場にて製作・一体化した連結部材を陸上運搬した。また、護岸渡橋部の主桁は桁長が26.0mと長く、連絡橋の端部に設置されるため、陸側端部の杭に大きな支点反力が作用する。この反力に対応するため、陸側端部のみ鋼管杭を3本の配置に変更した。また、支承部となる本工法の張出部の部材は図-11の右側に示すよう、橋台部材として大型化することにより耐力を確保し、陸上運搬を考慮して3分割構

成とした。これらにより、架設作業、目地部のモルタル充填、シースの接続作業、および一次緊張といった、現場における作業数を大幅に削減した。

5.2 施工状況

重量の大きな杭頭・梁連結部材および橋台部材の架設には500t吊の起重機船を用い、梁部材および床版部材は100t吊のクレーン付き台船を用いた。橋台部材および杭頭・梁連結部材の架設では、鋼管杭と鞘管との相対ずれが最大73mm生じたが、予め両者の間に設けたクリアランスにより吸収されたため、部材は特段の支障を生じることなく、設計位置に架設することができた。続いて、橋軸方向

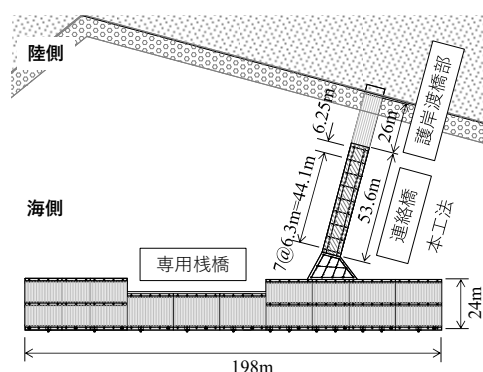


図-9 専用栈橋および連絡橋の平面図

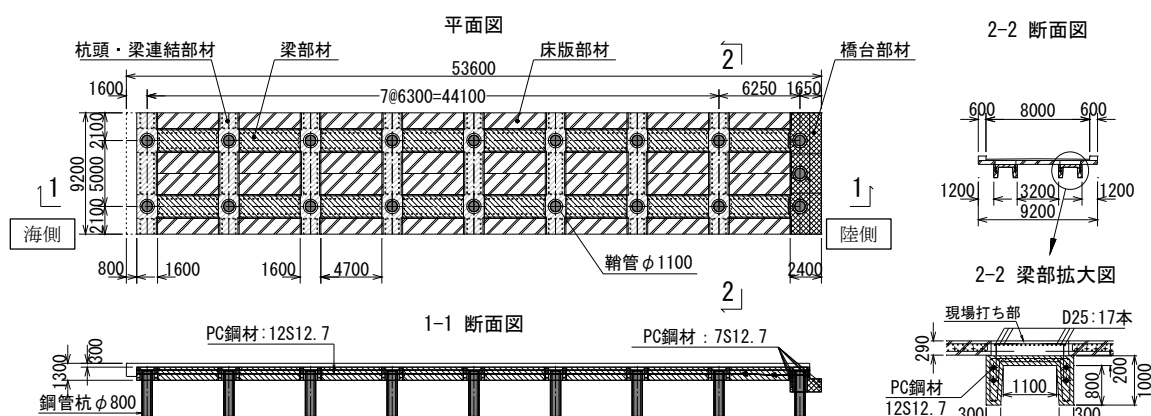


図-10 連絡橋一般図 [単位: mm]

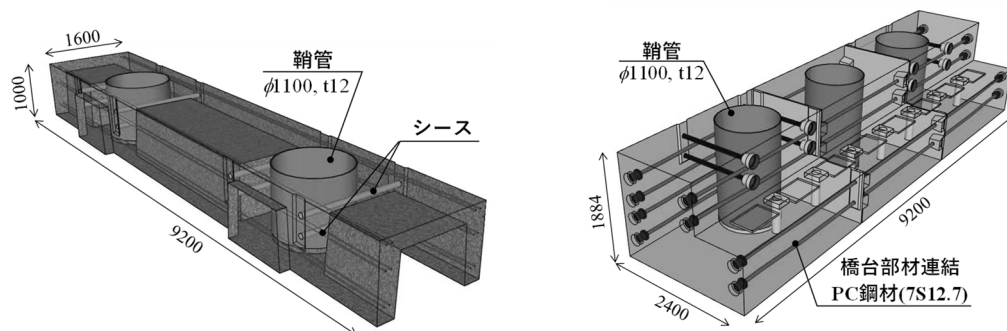


図-11 杭頭・梁連結部材 (左図: 一般部, 右図: 橋台部材) [単位: mm]

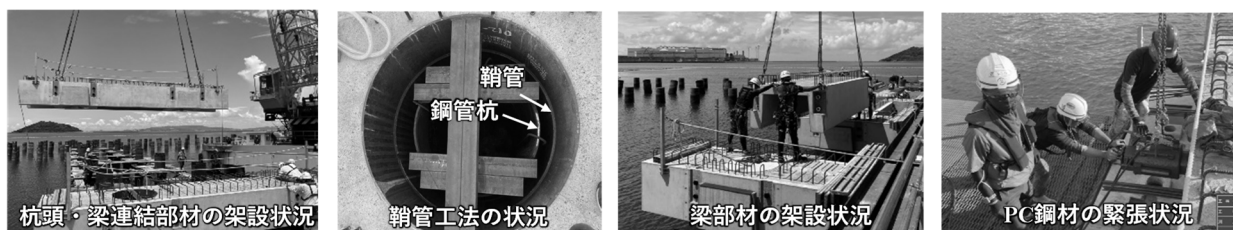


写真-4 施工状況

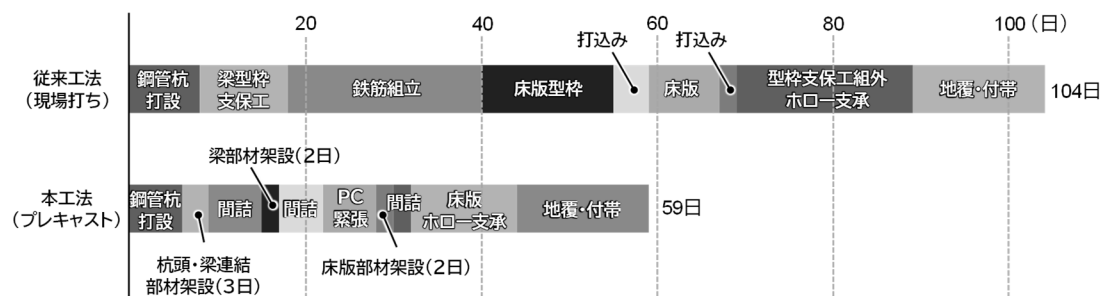


図-12 工期短縮効果

の梁部材を架設後、設計幅 30 mm の目地部に無収縮モルタルを充填した。その後、1つの梁部材あたり 4 本の PC 鋼材 (12S12.7) を用い、緊張ジャッキで二次緊張し圧着接合した。そして、床版部材を架設し、各床版間に現場打ちコンクリートの打込みを行った。工事の施工状況を写真-4 に示す。なお、本工法の延長における部材の架設精度は+6 mm (管理基準: 0~+規定しない) であった。

5.3 本工法が生み出す効果

本工事における従来工法の現場打ちコンクリートとの比較を図-12 に示す。従来工法では、型枠・支保工組立や鉄筋組立、コンクリート打込み、型枠・支保工組外やホロー支承および地覆・付帯まで 104 日の計画であったが、本工法によって連絡橋を構成する全てのプレキャスト部材をわずか 7 日間で架設し、他工種を含めて計 59 日となり、約 40 % の工期短縮を実現した。当該工事の完成写真を写真-5 に示す。

なお、定量的に示すことは難しいが、工場製作による高品質のプレキャスト部材を用いることにより、従来よりもコンクリート構造物の品質が向上すること、不安定な海上作業を大幅に省略できるため災害リスクが低下し、安全性が向上するなどの副次的な効果も期待される。

6. おわりに

本論文では、PC 圧着接合を用いたプレキャスト栈橋工法について、その構造概要から施工方法、設計法の妥当性を示す実験的検討、そして現場実装に至るまでの一連を概説した。また、現場適用事例を通して、本工法の施工性および工期短縮効果に

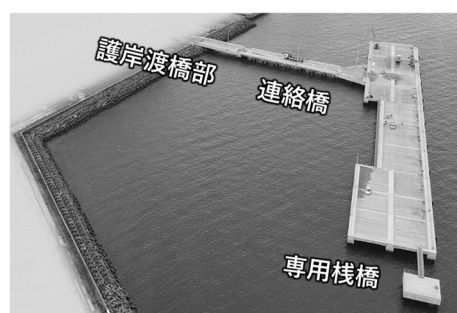


写真-5 完成写真

ついて示した。本論文が港湾工事におけるプレキャスト工法導入の更なる促進の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 池野勝哉, 岩波光保, 川端雄一郎: 鞘管方式による栈橋鋼管杭の杭頭接合部に関する交番載荷実験, 構造工学論文集, Vol. 64A, pp. 724-733, 2018.
- 2) 池野勝哉, 石塚新太, 天谷公彦, 前嘉昭, 川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保: PC圧着した栈橋杭頭接合部の力学的挙動に関する実験および解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 67A, pp. 605-618, 2021.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IIIコンクリート橋・コンクリート部材編, pp. 149-173, 2017.
- 4) 石塚新太, 池野勝哉, 天谷公彦, 前嘉昭, 川端雄一郎, 加藤絵万, 岩波光保: プレストレスにより圧着した栈橋プレキャスト接合部のせん断耐力評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 77, No. 2, pp. I_385-I_390, 2021.
- 5) 国土交通省港湾局: 港湾工事共通仕様書, 2021.