

プレキャスト化による栈橋施工の生産性向上

五洋建設(株) 正会員 ○池野 勝哉, 伊野 同

東京工業大学 正会員 岩波 光保

海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 正会員 川端雄一郎

海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 正会員 加藤 絵万

1. はじめに

近年, 建設現場の生産性を向上するため, プレキャスト施工が有効な手段として期待されている. 港湾の栈橋上部工は, 潮位や波浪等の海象条件の影響を受けながら, 足場・型枠支保・鉄筋・コンクリート打設といった一連の作業を繰り返し構築される. このため, 上部工をプレキャスト化することで, 海上作業の大幅な省力化が図れ, 品質向上や安全性確保の他, 急速施工が可能になるなど多くのメリットが期待できる. 一方, 栈橋上部工のプレキャスト化に関しては, 鋼管杭と上部工の接合方法が技術的課題として挙げられる. これは, 現行の港湾基準¹⁾において, 鋼管杭と上部工は剛結条件として設計されるためであり, プレキャスト施工のメリットを損なわずに剛結条件を満足し得る接合構造が望ましいと言える. そこで, 著者らは鋼管杭とプレキャスト化した上部工を鞘管方式で接合する構造を提案している. 鞘管方式による杭頭接合は, プレキャスト化する上部工に鋼管杭よりも径の大きな鞘管を埋設し, 鞘管内に鋼管杭を所定の長さ差し込み, その間隙をモルタル等で充填して一体化する方法である. 本稿では, 鞘管方式が高い杭頭固定度を維持すること, 優れたエネルギー吸収性能を有していることを示し^{2),3)}, 鞘管方式を採用した栈橋のプレキャスト施工例を紹介する.

2. 栈橋上部工のプレキャスト構造形式

栈橋上部工のプレキャスト構造形式は, 設計的要素の他に, 使用する起重機船の吊り能力が大きく関係する. 図-1 は起重機船の作業半径と吊り能力の関係を示したものである. 一般的な横栈橋を想定した場合, 片側(海側)からの架設を行うためには安全上, 栈橋本体との離隔(約5m)を考慮して, 作業半径20~30mを必要とする. 例えば, 600t吊級の旋回式起重機船を使用する場合には, 図-1よりプレキャスト部材の重量が200~400t以下に制限されるため, 上部工の分割によってはプレキャスト部材同士の連結が必要となる(図-2).

栈橋の代表的なプレキャスト構造形式を表-1に示す.

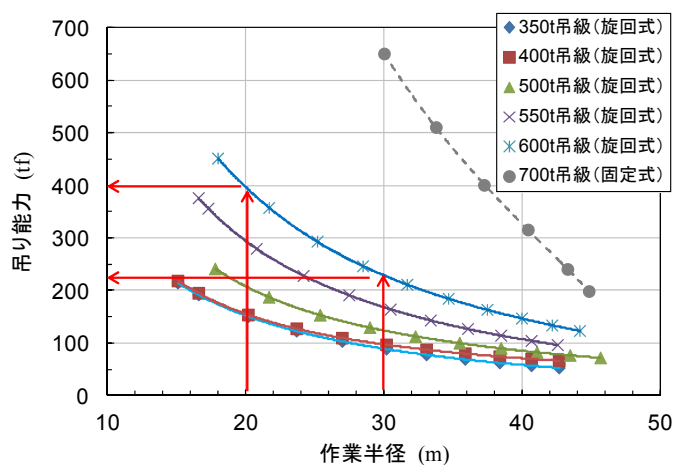


図-1 起重機船の作業半径と吊り能力



図-2 栈橋のプレキャスト施工イメージ

キーワード 栈橋プレキャスト, 杭頭接合, 鞘管方式, 生産性向上

連絡先 〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1 五洋建設(株)技術研究所 土木技術開発部 TEL 0287-39-2109

(1) パイルキャップ形式

鋼管杭の頭部にパイルキャップを設置したのち、その上に梁部材を架設して、杭頭部を含む接合箇所を現場打ちコンクリートで一体化する形式である。本形式では部材重量が比較的軽量なため、300t 吊級以下の起重機船で施工が可能である。しかし、栈橋構造で最も大きな外力モーメントが作用する杭頭部で全て接合することになるため、主として海外の非地震国で採用される場合が多い。

(2) 梁ブロック形式

上部工を複数の梁ブロックに分割し、鋼管杭に架設したのち、梁ブロックと杭頭部を一体化するものである。この形式ではプレキャスト部材同士の連結も必要となり、部材同士から張り出す鉄筋の定着長を確保し、接続部を現場打ちコンクリートで一体化する。1 ブロック当たり 100～200t 程度の重量になることから、作業半径にもよるが概ね 400t 吊級の起重機船が必要となる。梁ブロック間の離隔は、重ね継手による鉄筋定着を考慮すると 1.5～2.0m 程度必要であり、連結の箇所数だけ型枠支保工の設置・撤去を要する。

(3) 一方向スラブ形式

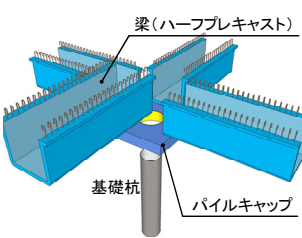
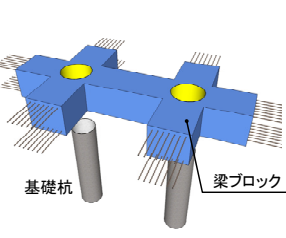
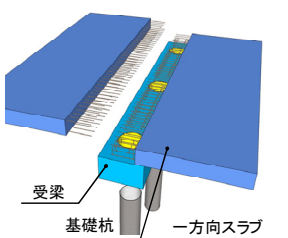
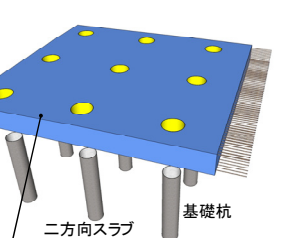
主として、栈橋幅方向の受梁を複数の鋼管杭に架設し、受梁と杭頭部を固定する。次に、受梁上に一方向スラブを架設し、現場打ちコンクリートで一体化する形式である。なお、スラブは剛性を負担する設計となるため、通常の床版厚（350mm 程度）とは異なり、800～1000mm 程度の床版厚となる場合が多い。受梁は 100～200t 程度、スラブは 300～400t 程度の重量となるため、700t 吊級の起重機船が必要となる。本形式は梁ブロック形式とは異なり、受梁がスラブ架設時の足場および現場打ちコンクリート打設時の底型枠代わりになるため、端部以外は特別な型枠支保工の設置・撤去を必要としない特徴がある。

(4) 二方向スラブ形式

栈橋上部工を二方向スラブとして分割し、大型の起重機船で一括架設する形式である。本形式のスラブ厚も上述と同様に、剛性を負担する設計となるため、800～1000mm 程度の版厚となる。スラブ同士の連結は杭頭部ではなく杭間部となる場合が多く、連結の箇所数だけ型枠支保工の設置・撤去が必要となる。

以上、4 つの構造形式について概説したが、共通する技術的課題として杭頭部の接合構造が挙げられる。これは、国内の栈橋設計において変動状態の杭頭モーメントが最も大きな設計外力となるためである。次章では表-1 のいずれにも適用可能な杭頭接合方法として「鞘管方式」を紹介する。

表-1 栈橋のプレキャスト構造形式

	パイルキャップ形式	梁ブロック形式	一方向スラブ形式	二方向スラブ形式
概要図				
接合	杭頭部	杭頭部、杭間梁部	杭頭スラブ部	杭頭部、杭間スラブ部
技術課題	基礎杭と梁部材を一体化する接合構造	基礎杭と梁の一体化を図る接合構造 梁同士の一体化を図る接合構造	基礎杭と受梁の一体化を図る接合構造 受梁とスラブの一体化を図る接合構造	基礎杭とスラブの一体化を図る接合構造 スラブ同士の一体化を図る接合構造
起重機船	300t吊級 700t吊級			
解説	基礎杭にパイルキャップを設置した後、パイルキャップ上に梁部材を架設して、杭頭部を含む接合箇所を現場打ちコンクリートで一体化する。主に、海外の非地震国で採用されるケースが多い。なお、概要図では梁部材をハーフプレキャストにすることで軽量化を図っている。	上部工を複数の梁ブロックに分割し、基礎杭に架設した後、ブロックと杭頭部の間隙にモルタル等を充填する。ブロック同士から張り出す鉄筋の定着を確保し、接続部を現場打ちコンクリートで一体化する。	受梁を複数の基礎杭に架設し、受梁と杭頭部の間隙にモルタル等を充填する。受梁上に一方向スラブを架設し、現場打ちコンクリートで一体化する。なお、本形式のスラブは剛性を負担するため、スラブ版厚は通常よりも厚い。	スラブを複数の基礎杭に架設し、杭頭部の間隙にモルタル等を充填する。スラブ同士の接続は、杭間部とする場合が多い。なお、本形式のスラブは剛性を負担するため、スラブ版厚は通常よりも厚い。

3. 鞘管方式による杭頭接合部の構造性能

(1) 鞘管方式の概要

鞘管方式は、栈橋上部工のプレキャスト製作時にあらかじめ鋼管杭よりも径の大きな鞘管を埋設し、溶接プレートを介して梁主筋が鋼管杭に接続されている。図-3 に鞘管方式による杭頭接合の概要図を示す。鞘管の直径は鋼管杭の平面的な打設精度 $\pm 100\text{mm}$ を考慮して、鋼管杭よりも200～300mm程度大きいものを選定し、鋼管杭との間隙に無収縮グラウトを充填して杭頭部の一体化を図る。図-4 に(a)従来方式（現場打ち）と(b)鞘管方式（プレキャスト）による杭頭接合の違いについて示す。両者の構造上の相違点は、特にRC梁への力の伝達機構である。前者では主に鋼管杭と接続された下主筋に力が伝達するのに対して、後者では鋼管杭から偶力として支圧力が鞘管に作用し、鞘管と接続された上下の主筋に力が伝達する。

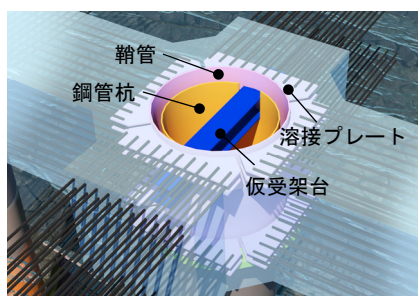
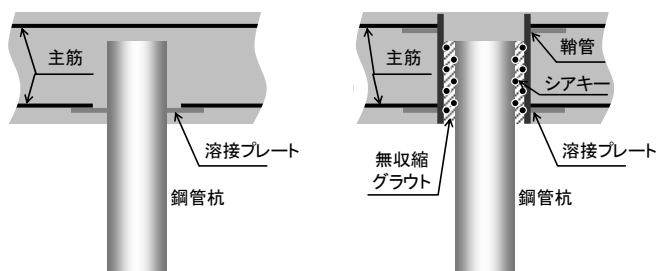


図-3 鞘管方式による杭頭接合



(a)従来方式（現場打ち） (b)鞘管方式（プレキャスト）

図-4 杭頭接合の違い

(2) 杭頭接合部の構造性能

杭頭接合の構造性能を比較するため、実栈橋の鋼管杭（ $D=1.4\text{m}$ ）を含むRC梁（ $B=1.4\text{m}$, $H=1.8\text{m}$ ）の1スパン（ $a=5.0\text{m}$ ）を概ね縮尺比1/6としてモデル化し、天地を反転した逆T形試験体の正負水平交番载荷実験を実施した（写真-1）²⁾。実験ケースのうち、本稿では図-4に対応した(a)従来方式と(b)鞘管方式の2ケースについて、载荷点における荷重 P -変位 δ 関係を図-5に示す。なお、図中には、実験で使用したSTK400材の設計引張降伏応力度を $f_{yd}=235\text{N/mm}^2$ とした時の設計降伏荷重および全塑性荷重を示している。図中より、従来方式は明確な逆S字形状を示すのに対し、鞘管方式は紡錘形の履歴ループを示しており、エネルギー吸収性能の違いが確認できる。両ケースともに設計荷重を満足し、 $3\delta_y \sim 4\delta_y$ の変位ステップで最大荷重を迎えたあと、 $5\delta_y$ にかけて徐々に剛性が低下している。このように、鞘管方式による杭頭接合は、従来方式と比較しても同等以上の耐荷力を発揮しており、優れたエネルギー吸収性能を有していることが分かる。

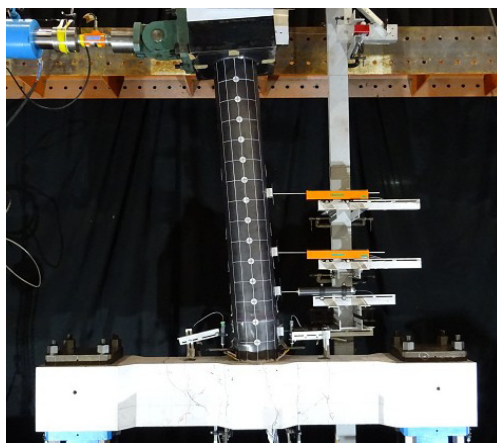


写真-1 交番载荷実験の様子

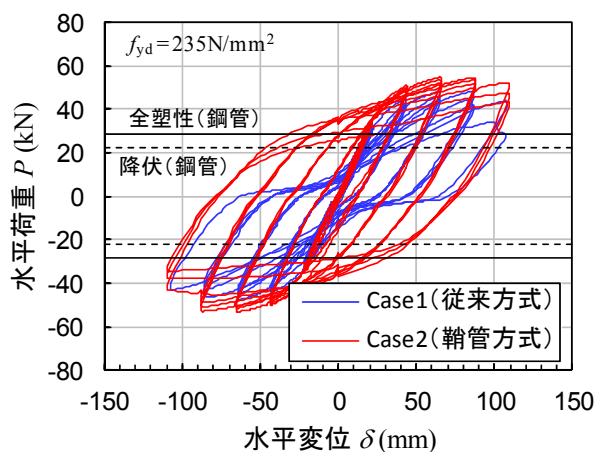


図-5 荷重-変位関係の比較

実験で計測した杭頭回転角から変位ステップ毎の杭頭固定度 α を図-6に示す。ここで、縦軸の杭頭固定度 α は式(1)で定義され²⁾、横軸は交番載荷実験における降伏変位 δy の整数倍であり、塑性率と捉えても差し支えない。従来方式は、変位ステップが進むに伴い $3\delta y$ から $5\delta y$ にかけて顕著に杭頭固定度 α が低下しているのに対して、鞘管方式では、 $\alpha=0.95$ 以上の高い杭頭固定度を維持しており、剛結条件に近い挙動を示している。

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{EI\beta}{(1 + \beta h)K_0'}} = \frac{1}{1 + \frac{EI\theta'}{2Ph^2}} \quad (1)$$

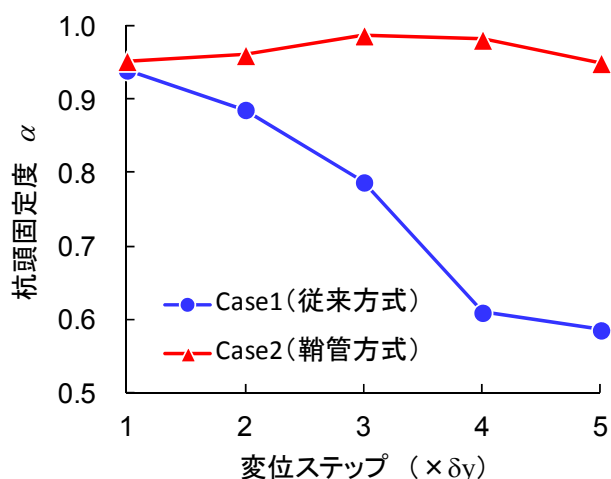


図-6 杭頭固定度の変化

ここで、 P : 水平荷重、 h : アーム長、 β : 杭の特性値、 K_0' : 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

(3) 鞘管方式の耐荷機構

逆 T 形模型を対象にした三次元非線形 FEM 解析を実施し、鞘管方式の耐荷機構について考察する。解析モデルの詳細は文献 3)を参照されたい。解析結果の一例として、任意ステップ ($\delta=72\text{mm}$)における応力コンターを図-7に示す。ここで、主筋以外は Mises 応力であり、赤色コンターが各材料試験による降伏値以上を表している。応力コンターより、従来方式では RC 梁内の鋼管杭にも降伏値を超える応力集中が見られるのに対して、鞘管方式では RC 梁外の鋼管杭に集中していることが分かる。これは、変位の進行に伴い RC 梁部が損傷し、両者の杭頭固定度に違いが生じているためである。主筋に目を向けると、従来方式では溶接プレートと模型の上主筋が降伏しているが、下側主筋は降伏しておらず上下の主筋で挙動が異なる。一方、鞘管方式では上下の主筋ともに弾性範囲内であり、コンターから同程度の応力が確認できる。このことは、先述した交番載荷実験でも確認されており、鞘管方式は鞘管の鋼管杭を拘束する効果と、上下の主筋を介してバランス良く RC 梁杭頭部に力が伝達される機構を有し、杭頭固定度が低下しにくい接合構造であると言える。

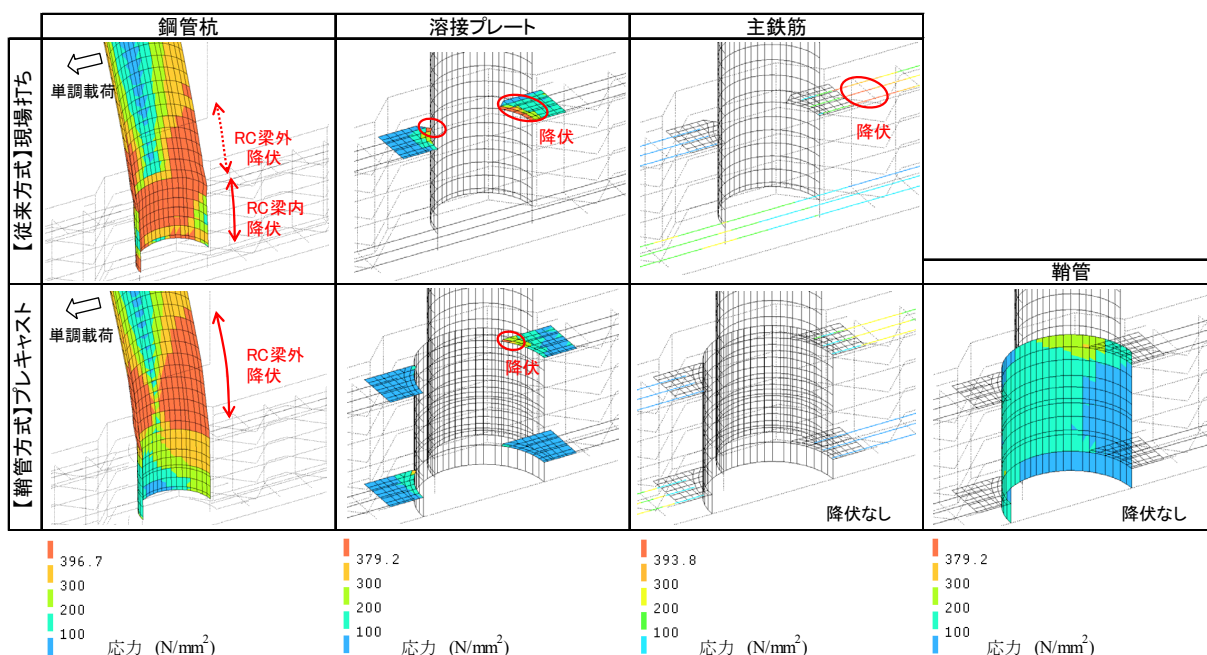


図-7 応力コンター ($\delta=72\text{mm}$)

4. プレキャスト化による栈橋の急速施工

(1) 工事概要

本工事は、写真-2 に示すように既設ドックの両渠壁に設置している 300t 吊りクレーン基礎（西軌道・東軌道）を直杭式栈橋で沖側に 50m 延伸するものである。図-8 にクレーン基礎延伸部の平面図を示す。延伸工事により、台船運搬した大型船体ブロックをゲート前面からドック内に搬入でき、新造船の建造能力を飛躍的に向上させることができる。本工事は、高稼働率のドックを供用しながらの延伸であり、ドック内への資機材搬入など建造船作業との輻輳を回避するため海上作業の短縮が求められた。そこで、栈橋の上部工を 200～300t 程度の大型プレキャスト部材に分割した一方向スラブ形式を採用し、700t 吊り起重機船で架設を行う急速施工を行った。プレキャスト施工によって、部材製作や架設に高い施工精度が必要となるが、従来の現場打ちコンクリート施工と比較して海上作業の日数を約半分に短縮することができる。

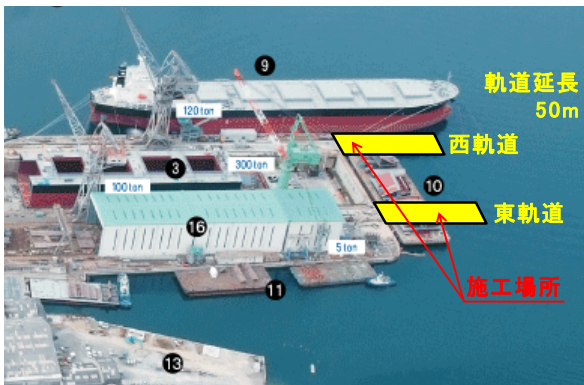


写真-2 工事概要

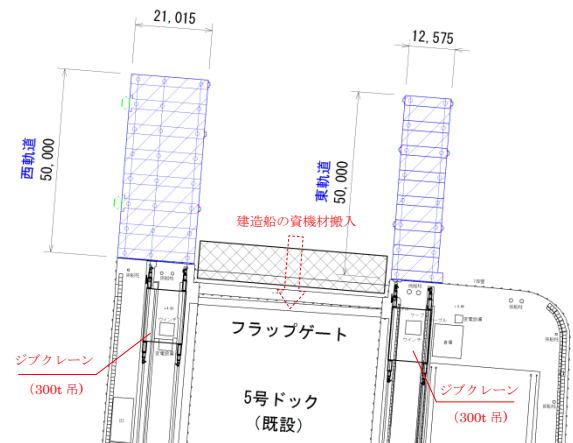


図-8 クレーン基礎延伸平面図

(2) クレーン基礎延伸部の栈橋構造

クレーン基礎延伸部（西軌道）の直杭式栈橋構造を図-9 に示す。鋼管杭（ $\phi 1100$, SKK490）を 3 本 $\times$ 8 列とした幅 21m $\times$ 延長 50m の一方向スラブ形式の栈橋である。前章で示した鞘管方式による杭頭接合を採用し（図-10）、プレキャスト受梁（約 200t/基）と鋼管杭を連結する。鞘管と鋼管杭との間隙には無収縮モルタルを充填して杭頭部を固定したのち、受梁上に一方向スラブ（約 300t/基）を架設し、現場打ちコンクリートで上部工の一体化を図った。

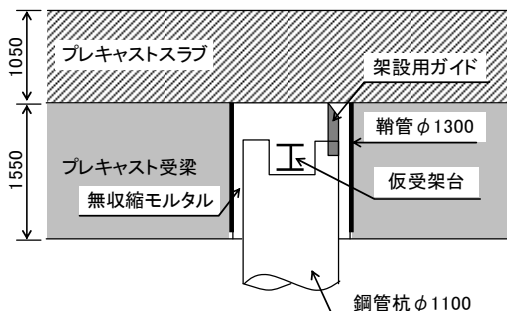


図-10 杭頭部の構造

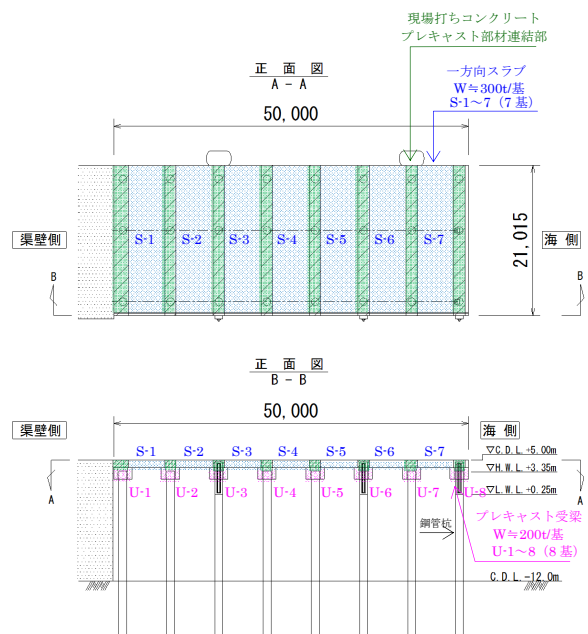


図-9 クレーン基礎延伸部の栈橋構造

(3) プレキャスト施工のフロー

施工フローを図-11 に示す。フロー図で示す通り、海上作業の鋼管杭打設工～中詰めコンクリート工と陸上作業のプレキャスト部材製作工は同時並行で作業を行うことができる。

a) 鋼管杭の打設精度と鞘管径

鋼管杭の平面的な管理基準±100mm より、プレキャスト受梁の架設に支障がないよう鞘管と鋼管杭のクリアランスを片側 150mm ずつ確保し、鞘管径をφ1400mm とした。一方、杭天端高の管理基準は±50mm であるが、プレキャスト施工の場合、打設精度が直接的に上部工天端高に影響してしまうため、スラブ上に設置するクレーンレールの鉛直精度が確保できない可能性があった。そこで、余長をとった鋼管杭を打設し、杭頭を切断することで mm 単位の杭天端高を管理した。

b) プレキャスト部材の製作

プレキャスト部材の製作ヤードは、施工現場から海上運搬距離で約 15km 離れた護岸背後地を選定した。受梁に埋設する鞘管は、仮受架台と溶接プレートをあらかじめ工場で加工してからヤードに搬入した（写真-3）。鋼材の溶接加工は屋内工場で実施するため、雨風等の天候の影響を受けずに作業できるメリットがある。陸上ヤードで鉄筋、型枠組立後にコンクリート打設し、一連のプレキャスト部材（受梁、スラブ）を製作した（写真-4）。

栈橋上部工を海象条件の影響がない陸上作業で製作できるため、コンクリート構造物の品質を向上させるとともに、海上作業特有の稼働率低下および足場の悪い箇所での墜落・転落等の危険リスクを回避することができる。

c) プレキャスト部材の架設と一体化

陸上ヤードで製作したプレキャスト部材は、700t 吊り起重機船で 3000t 台船に積み込み、施工場所に運搬した。プレキャスト受梁を鋼管杭に架設したのち、鞘管と鋼管杭との間隙に無収縮モルタルを充填して杭頭部を固定し、続けて受梁上にプレキャストスラブを架設した（写真-5）。プレキャストスラブの架設後、連結部の鉄筋組立を行い、現場打ちコンクリートを打設した（写真-6）。なお、本工事で採用した一方向スラブ形式は、プレキャスト受梁がスラブ架設時の足場および現場打ちコンクリート打設時の底型枠代わりになるため、海上作業での型枠支保工を省力化できるなど施工性および安全性に優れた構造形式と言える。

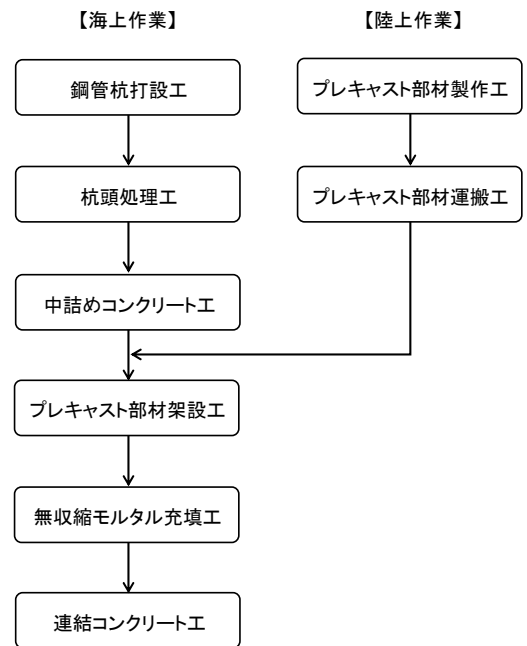


図-11 プレキャスト施工のフロー

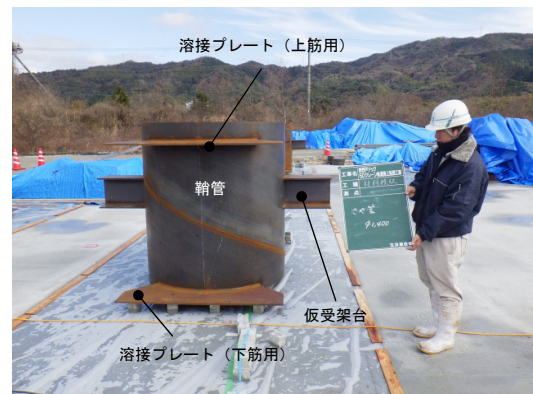


写真-3 鞘管の搬入



写真-4 プレキャスト部材全景



写真-5 プレキャスト部材の架設

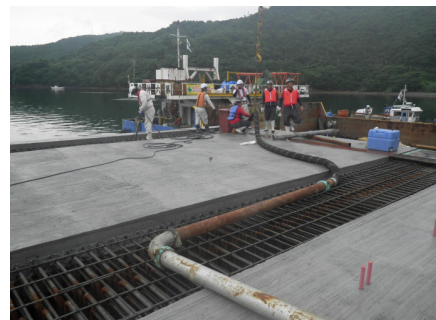


写真-6 現場打ちコンクリート打設

(4) プレキャスト施工による工期短縮効果

本工事におけるプレキャスト施工と現場打ち施工の工期比較を図-12に示す。従来の現場打ち施工では、全て海上作業で約8ヶ月の期間を必要とするのに対して、プレキャスト施工では、陸上作業と海上作業を同時並行で行うことができ、プレキャスト部材の架設により上部工を構築できるため、海上作業が開始してからわずか4ヶ月で施設を完成させた(写真-7)。このように、プレキャスト施工により従来の現場打ち施工よりも約半分の工期で栈橋を急速施工することができた。

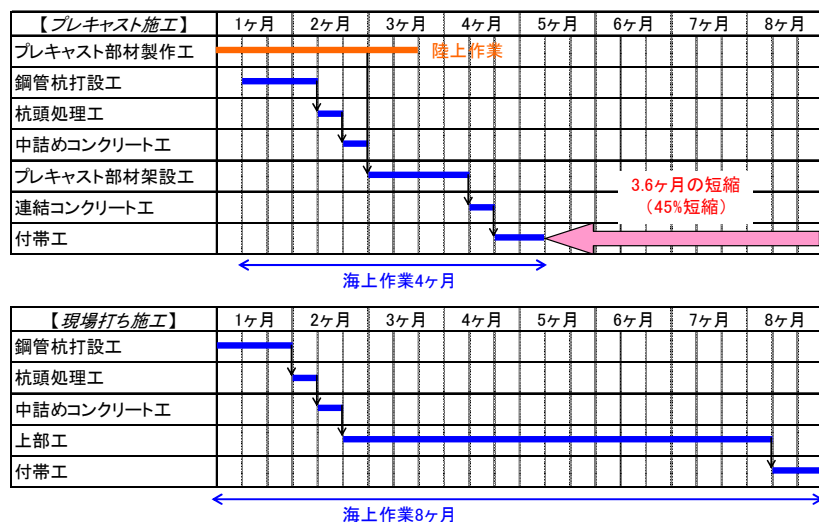


図-12 工程短縮



写真-7 完成写真（西軌道）

5. おわりに

本稿では、栈橋のプレキャスト構造形式を整理し、共通の技術的課題となる杭頭接合に対して鞘管方式を紹介した。鞘管方式による杭頭接合は、従来の現場打ちよりも固定度が高く、また優れたエネルギー吸収性能を有していることから、急速施工を求められた栈橋工事に適用した。プレキャスト施工による海上作業の短縮と同時に、熟練工を要する海上作業（特に足場工・型枠支保工）を省略できるため施工性と安全性が向上し、高品質のコンクリート構造物を提供することができたと考えている。本稿を通じて、栈橋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。

6. 参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018.
- 2) 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.
- 3) 池野勝哉，岩波光保，川端雄一郎：非線形有限要素解析による鞘管方式の栈橋杭頭接合部に関する構造的評価，土木学会論文集 B3（海洋開発）Vol.74，No.2，2018.