

# ハイブリッド PC 斜張橋 “なぎさ・ブリッジ” の設計・施工

佐藤 譲\*1・野口 和雄\*2・鈴木 和雄\*3・諸橋 克敏\*4・中井 聖棋\*5

## 1. はじめに

なぎさ・ブリッジは、青森県鯉ヶ沢町に計画されている“鯉ヶ沢の海園”の利用促進を図る目的で、公園内を流れる中村川の河口に架けられた人道橋である。本橋は、中村川における魚類の遡上を妨げとなる河川内の橋脚や主塔の設置の必要が無く、町を代表する公園内におけるランドマークとしての景観を有する、単径間ハイブリッド PC 斜張橋として建設された。

本橋は、以下に示す特徴を有している。

- ① 斜張構造と吊構造を組み合わせ、コンクリートと鋼を組み合わせた主桁の採用により、PC 桁を用いた斜張橋の長大化を可能とする世界初となる構造系形式
- ② 高さの異なる主塔とケーブルにより生み出される独創的な景観
- ③ 従来の PC 橋に比べて耐久性を向上させた橋梁

本橋梁の設計・施工は、「鯉ヶ沢人道橋（仮称）技術検討会」（委員長 名古屋大学 田邊教授）の委員の方々による、技術的な指導を受けて行われた。

ここでは、本橋梁の設計・施工について報告する。

## 2. 橋梁概要

本橋梁の橋梁諸元と橋梁各部の図を図-1~3に、および完成写真を写真-1に示す。

- ・工事名：鯉ヶ沢漁港海岸環境整備工事



写真-1 完成写真

表-1 主要材料表

コンクリートの設計基準強度	主塔： $\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$
	アンカレイジ： $\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$
	主桁： $\sigma_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$
鋼主桁	SM400A, SM490YB
PC鋼材（主桁ケーブル）	PC鋼より線（1S19.3, 1S28.6）
	PC鋼棒（ $\phi 23, \phi 32$ ）
斜材	SEEE工法/F-PH型
吊り材（主ケーブル）	ロックコイルロープ；E型 $\phi 80$
	ハンガーロープ；ST1570

- ・施工主：青森県西地方農林水産事務所 西北地方漁港漁場整備事務所
- ・設計：ユニコン・エンジニアリング(株)
- ・施工：(株)ピーエス三菱・三井造船(株) 特定建設工事共同企業体
- ・種別：単径間ハイブリッド PC 斜張橋（歩道橋）
- ・工事場所：青森県西津軽郡鯉ヶ沢町
- ・工期：平成13年10月～平成14年12月
- ・橋長：112 300 m
- ・PC桁部：44 400 m + 24 450 m
- ・鋼桁部：39 150 m
- ・接合桁部：2 × 2 100 m
- ・主塔間隔：110 150 m
- ・全幅員：7.0 m
- ・有効幅員：4.0 m
- ・製作工法：ロングラインマッチキャスト方式によるプレキャストセグメント工法
- ・架設工法：PC桁 クローラークレーンを使用した張出し架設  
：鋼桁 クローラークレーンを使用した直吊り架設
- ・活荷重：群集荷重

## 3. ハイブリッド PC 斜張橋の特徴

ハイブリッド PC 斜張橋は、主塔付近の主桁は斜張ケーブルによって支持された PC 桁で、径間中央の主桁は主ケーブルとハンガーケーブルにより支持された鋼桁で構成された、主桁の軽量化を可能にする橋梁である。すなわち、斜張構造部には、斜材張力による圧縮力に対し有利なコン

\*1 Yuzuru SATO：青森県西地方農林水産事務所 西北地方漁港漁場整備事務所

\*2 Kazuo NOGUCHI：ユニコン・エンジニアリング(株)

\*3 Kazuo SUZUKI：(株)ピーエス三菱・三井造船(株) 特定建設工事共同企業体

\*4 Katsutoshi MOROHASHI：(株)ピーエス三菱 東北支店 PC事業部

\*5 Seiki NAKAI：(株)ピーエス三菱 技術本部

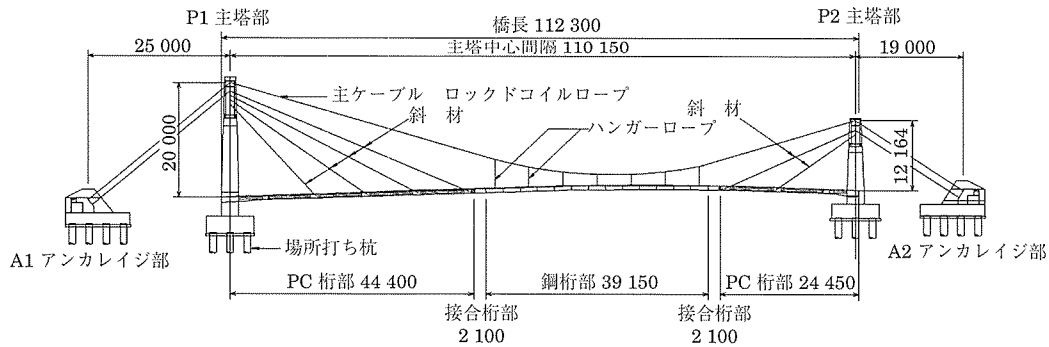


図 - 1 側面図

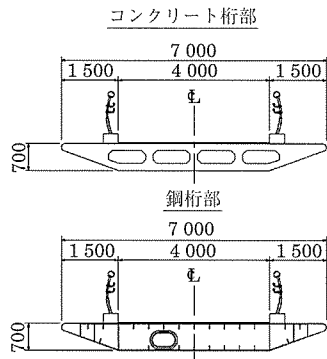


図 - 2 主桁断面図

クリート部材を採用し、また吊り構造部には軽量で引張力に対し有利な鋼部材を採用している。図 - 4 にハイブリッド PC 斜張橋と鋼吊橋および PC 斜張橋の概念的な比較図を示す。本構造は、斜張橋および吊橋に対して、以下にあげる長所を有している。

斜張橋に比べて

- ① 斜材が少ないため、主桁軸力が減少し座屈安定性が向上する。

- ② 上記理由によりスパンの長大化が可能となる。
- ③ 斜材ケーブル長が短くなるため、ケーブルの架設や振動に対し有利である。
- ④ 斜材ケーブルが少ないため、主塔高を抑えることができる。

吊橋に比べて

- ① 斜材ケーブルがあるため、たわみ剛性が大きくなり耐風安定性が向上する。
- ② 主ケーブルの張力が減少する。
- ③ ケーブル総重量が減少する。
- ④ アンカレイジを小規模とすることができる。

ただし、今回の橋梁は側径間を有していないため、残念ながら、アンカレイジを小規模とする利点を生かすことができなかった。

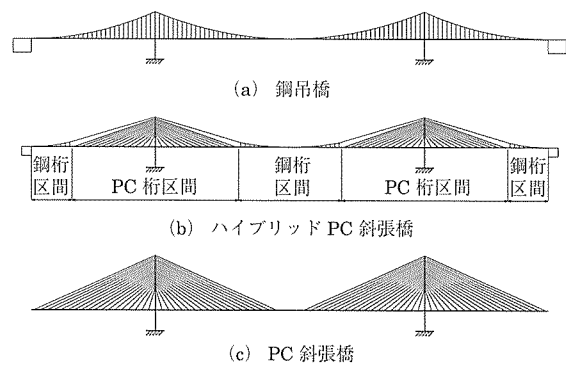


図 - 4 各構造形式の比較

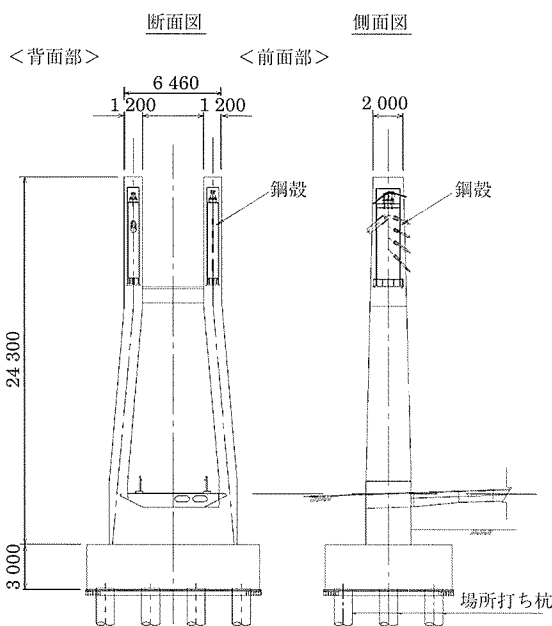


図 - 3 主塔形状図

## 4. 計画概要

### 4.1 主塔およびアンカレイジの配置の決定

主塔の配置は、既設の突堤等を避ける必要性から、その間隔を 110.15 m とした。また、高さの異なる主塔とすることで、公園内に建設される人道橋として地域のシンボル性を強調させた。

アンカレイジの位置は、斜材および主ケーブルバックステティの配置や公園内のバランスを考慮し決定した。

### 4.2 主桁形状の決定

桁高は、側面からの景観に軽快感のあるシャープな印象を与え、かつ斜材による複数点支持により桁高を低くすることを可能とする斜張橋の特性をいかすため、鋼桁の製作可能な最小高さ  $H=70\text{ cm}$  とした (桁高：主塔間隔 = 1:157)。

本橋の架橋地点は飛沫帯であり、冬期間には強風地域となるため、塩害対策として耐風安定性に対して有利な4室箱桁断面構造を採用した。また、フェアリング形状は3次元風洞試験の結果と景観性を考慮し決定した。

主塔付け根部には、斜材張力による比較的大きな軸力が生じる。また、主桁張出し架設時の斜材調整等により正負の断面力が繰り返し作用する。さらに、桁端部には架設時のPC鋼材の他に連続ケーブルが配置されるため定着スペースの確保が必要となる。このため、支点部付近の桁高を90 cmとした。

4.3 斜材の配置

斜材には、耐久性の観点から工場製作されるプレファブケーブルを採用した、加えて、施工時の張力調整が容易なねじ式定着であることを考慮して、SEEE F-PH型ケーブルを使用した。

斜材配置は、景観性・経済性および施工性を考慮し9.0 m間隔(4セグメントごと)とした。P1側で4段、P2側で2段配置とした。

バックスティ部は、アンカレイジ部に定着されることから施工性・経済性を考慮しマルチタイプ斜材を使用し各1段配置とした。

主塔部の斜材定着部は、形状を小さく、かつ維持管理のための点検を容易なものとし、取替え可能な構造とするために鋼殻を設ける構造とした。なお、斜材の調整は、主桁部とアンカレイジ部で行った。

4.4 主ケーブルの配置

景観および構造上の理由により、主ケーブルは、主塔頂部をサドル構造としA1アンカレイジ部からA2アンカレイジ部まで張り渡す構造とした。

主ケーブルには、サドル部やハンガークランプ部の構造がシンプルで吊橋のケーブルとして実績が多く、施工性・耐久性そして経済性を考慮してロックドコイルロープE型を採用した。計画段階で、軽量で高耐久性かつ温度変化の影響を受けないCFRP材の採用も検討したが、施工性や経済性等の理由から採用に至らなかった。

4.5 接合部の構造の決定

応力伝達状態、鋼桁の製作性、コンクリートの施工性そしてプレキャストセグメントとしての特性を生かすために、揖斐川・木曾川橋等の道路橋で採用実績のある前後プレート方式を採用した(図-5参照)。

なお、方式の選定において、本橋の低い桁高を考慮し、接合部の施工性が、とくに重要視された。比較対象として、採用実績の多い後面プレート方式も検討されたが、コンクリートの充填性の確認等、施工管理上不利であったため、採用はされなかった。

4.6 耐久性向上の対策

技術検討会においては、橋梁の耐久性の向上が、もっとも重要な課題とされた。そのため、本橋梁では以下に述べる対策を行い、耐久性の向上を図った。

a) 主桁部にプレキャストセグメント工法の採用

施工時にコンクリート桁内への外来塩分の侵入を防ぐため、現場施工範囲を少なくする工法を採用した。

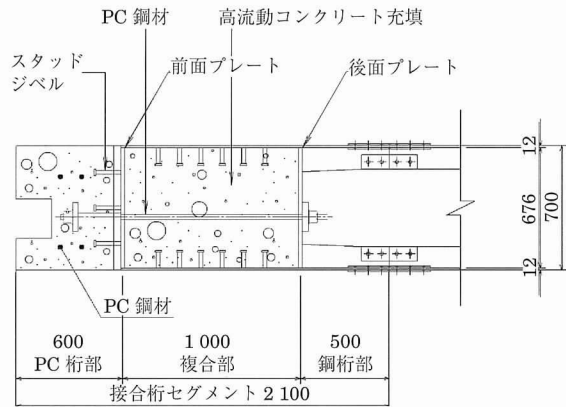


図-5 接合桁詳細図

b) 鉄筋の純かぶり厚の規定

セグメント部のかぶり厚を50 mm、場所打ち部のかぶり厚を70 mmとした(図-6参照)。

また、セグメント桁部は、工場製作されるため最外縁とそれに接する鉄筋に、場所打ち部はすべての鉄筋にエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した。

c) コンクリートおよび鋼桁表面にC種の塗装

鋼桁には、C種の塗装を採用した。また、耐久性向上を目的とし、かつ景観上の観点からコンクリート部材に対しても鋼桁と同様の塗装を施した。塗装は、あらかじめ工場で行い現場での作業は最小限の限られた範囲のみとした。

4.7 架設工法の検討について

架設工法の選定においては、河川内作業を行わないことが条件となった。そこで、ケーブルクレーンによる架設も検討されたが、経済および施工時の管理が容易となる、クローラークレーン架設工法を最終的に採用した。

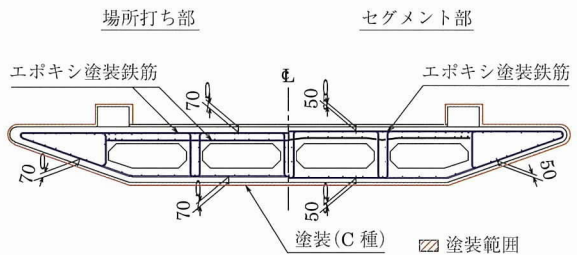


図-6 主桁断面詳細図

5. 設計

5.1 主桁の設計

a) 断面力の算出

断面力の算出には、平面骨組モデルを用いた。PC桁部は架設時には純粋な斜張構造であり、鋼桁の架設以降は斜張構造と吊構造が合成された構造となる。また、クリープ部材と非クリープ部材が混在している。そのため、有限変形理論と微小変形理論を用いて、架設ステップに応じた断面力の算出を行った。有限変形理論を用いた理由として、鋼桁架設時では主桁変位が大きく微小変形理論を適用することが困難であったこと、また主桁閉合後の橋面荷重による主桁変位について、微小変形理論と有限変形理論と

による計算結果の間に、施工管理上無視できない差が生じていたことがあげられる。

主要部材の主方向断面力算出フローを図-7に示す。

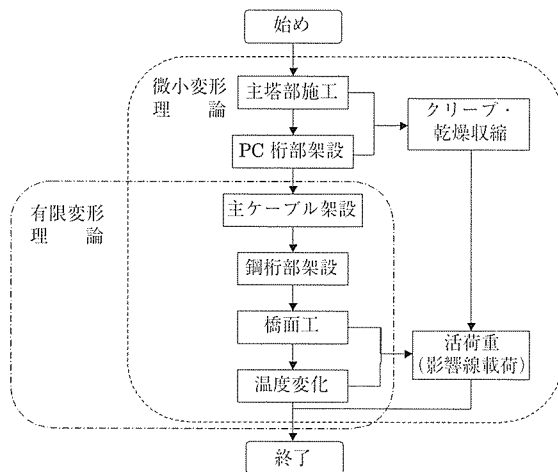


図-7 主方向断面力算出フロー

b) 支承条件の決定

全体モデルとしての支承条件の検討を行い、主塔高さの低いP2の主桁と主塔の接合方式を可動支承とする構造とした。決定にあたっては、剛結、ピン、可動とした場合の3ケースについて検討・比較を行った。

検討の結果、剛結またはピン構造とした場合、構造系完成後の温度変化による軸力の変動が大きくなる(約-170~+120 kN)のために、主桁に生じる応力変動を許容値内とすることが困難であった。そこで、その影響が小さい可動支承を採用した。なお、PC桁架設時は、橋脚とPC鋼棒により仮固定を行った。

c) 斜張構造部架設時の検討

本橋のPC斜張構造部の架設時においては、以下に示す、いくつかの解決すべき課題があった。

- ・構造系完成後の断面力に対する斜材配置計画による、架設時における斜材の不足
- ・低桁高 70 cm (桁高:主塔間隔 = 1:157) による配置可能PC鋼材の制限
- ・プレキャストセグメント方式の主桁の採用による、架設時の主桁応力の制限値

このため、主桁張出し時に仮斜材を併用し、PC桁の架設は、1日2セグメントすることで、架設時の主桁の応力を $-1.0 \text{ N/mm}^2$ に制限した。これは架設されたセグメント目地部の接着剤引張り付着強度の3倍の安全率を考慮した値である。なお、完成後の設計荷重時にはフルプレストレス状態としている。

仮斜材には、シングルストランド $\phi 28.6$ を使用し初期張力を300 kN/本、架設時の最大鋼材応力を $0.6 P_u$ とした。仮斜材は、主塔横梁部と主桁横桁部に設置された装置により定着する計画とした。

PC桁架設時の斜材張力導入および張力調整作業は2セグメント架設ごとに行う計画としたため、本橋のPC桁架設時における斜材張力導入および調整作業はP1とP2で計12

回となった。

d) PC鋼材配置および鋼板厚の決定

PC部は、設計荷重時においてフルプレストレスとした。PC鋼材の配置は、その大半が張出し架設時に決定された。鋼桁部は、床版、ウェブ共に最小部材厚で決定された。

e) 主塔部等のRC部材の設計

ひび割れ幅を制御するため、鉄筋応力度が $150 \text{ N/mm}^2$ 以下(アンカレイジに対しては $160 \text{ N/mm}^2$ 以下)となる鉄筋配置とした。

f) 接合桁の設計

設計荷重時に接合部に生じる引張応力に対しては、PC鋼材によるプレストレスにより引張力が発生しない状態とした。曲げモーメントおよび軸方向力による圧縮力に対しては、接合部ずれ止めのせん断と前後プレート支圧力により伝達させ、鋼とコンクリート間の摩擦による力の伝達は考慮しないこととした。ずれ止めと支圧との力の分担率は、ずれ止めが配置された面での付着を考慮したモデルと考慮しないモデルについて3次元FEM解析を行い、両計算結果の比較により決定を行った。せん断力とねじりモーメントに対しては前面プレートのずれ止めのみで伝達することとし、鋼とコンクリート間の摩擦による力の伝達は考慮しないこととした。接合セグメント製作時には、打設時の温度応力により発生する引張力に対しプレストレスを導入した。

g) 鋼殻部の設計

斜材定着部鋼殻の設計は、鋼殻内作業スペース確保のため、無補強板で断面を構成する必要があった(図-8参照)。検討にあたっては、道示の規定に従い、局部座屈を生じない範囲で部材寸法を決定した。鋼殻の発生応力は、3次元FEM解析を行い確認した。その結果、斜材定着部材と鋼殻ウェブの接続部に発生する応力集中のために、鋼殻の材質をSM490Yとする必要があった。

また、鋼殻に巻き立てられたコンクリートは、地震時についてのみ考慮した。その他の荷重状態では、鋼殻断面の

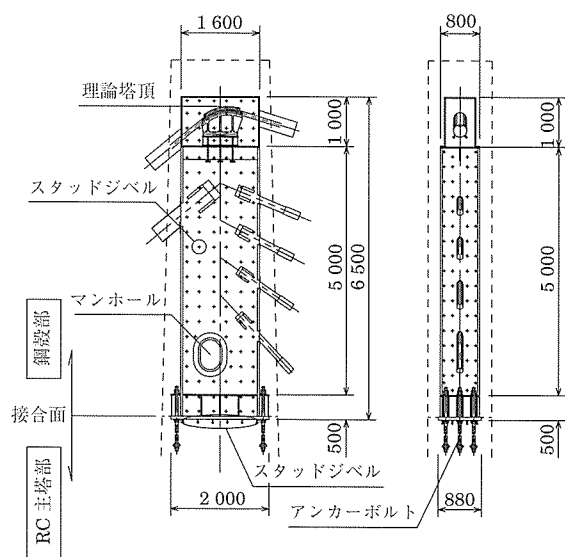


図-8 鋼殻部詳細図

みで荷重に対して抵抗するとして取り扱った。

h) 風洞試験

本橋梁は、冬期間日本海からの季節風により強風を受ける。そのため耐風設計便覧に従い耐風安定性の照査を行った。その結果、たわみ発散振動の照査において〔発現風速<照査風速〕であったので、3次元風洞試験を行い安全性の確認を行う必要があった。なお、風洞試験では、耐風安定上、もっとも不利となる吊り構造部の鋼桁部分を考慮し、モデル化を行った(写真-2参照)。

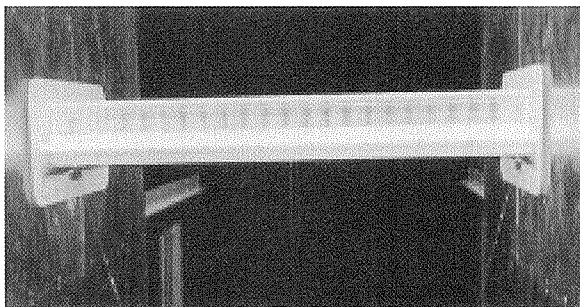


写真-2 風洞実験状況

風洞試験により安全性が確認され、フェアリングの形状が決定された。

6. 施 工

6.1 架設方法

本橋は、図-9に示す架設ステップに沿って、施工された。初めに、主塔およびアンカレイジ部の構築を行い、主塔に鋼殻を設置した(STEP-1)。次に、P1主塔側からのセグメントの張出し架設を行なった(STEP-2, 写真-3)。主桁(PC桁, 鋼桁)は、工場製作され、現場に搬入された。斜材の配置が4セグメントごととなるため、2ブロックごとに斜材→仮斜材→斜材を設け、応力の改善を図った(STEP-3)。斜材の張力導入は主桁およびアンカレイジ側で行った。P1側張出し終了後、450t吊りクローラークレーンをP2側に移動し、P1側と同様にP2側張出し架設を行った(STEP-4)。主ケーブルの張り渡し、ハンガーケーブルの設置後、鋼桁の架設を行った(STEP-5, 写真-4)。鋼桁の架設後、P2側仮固定の開放、および橋面の施工を行った(STEP-6)。

6.2 主桁製作

等高区間のPC桁および鋼桁は工場において製作され、

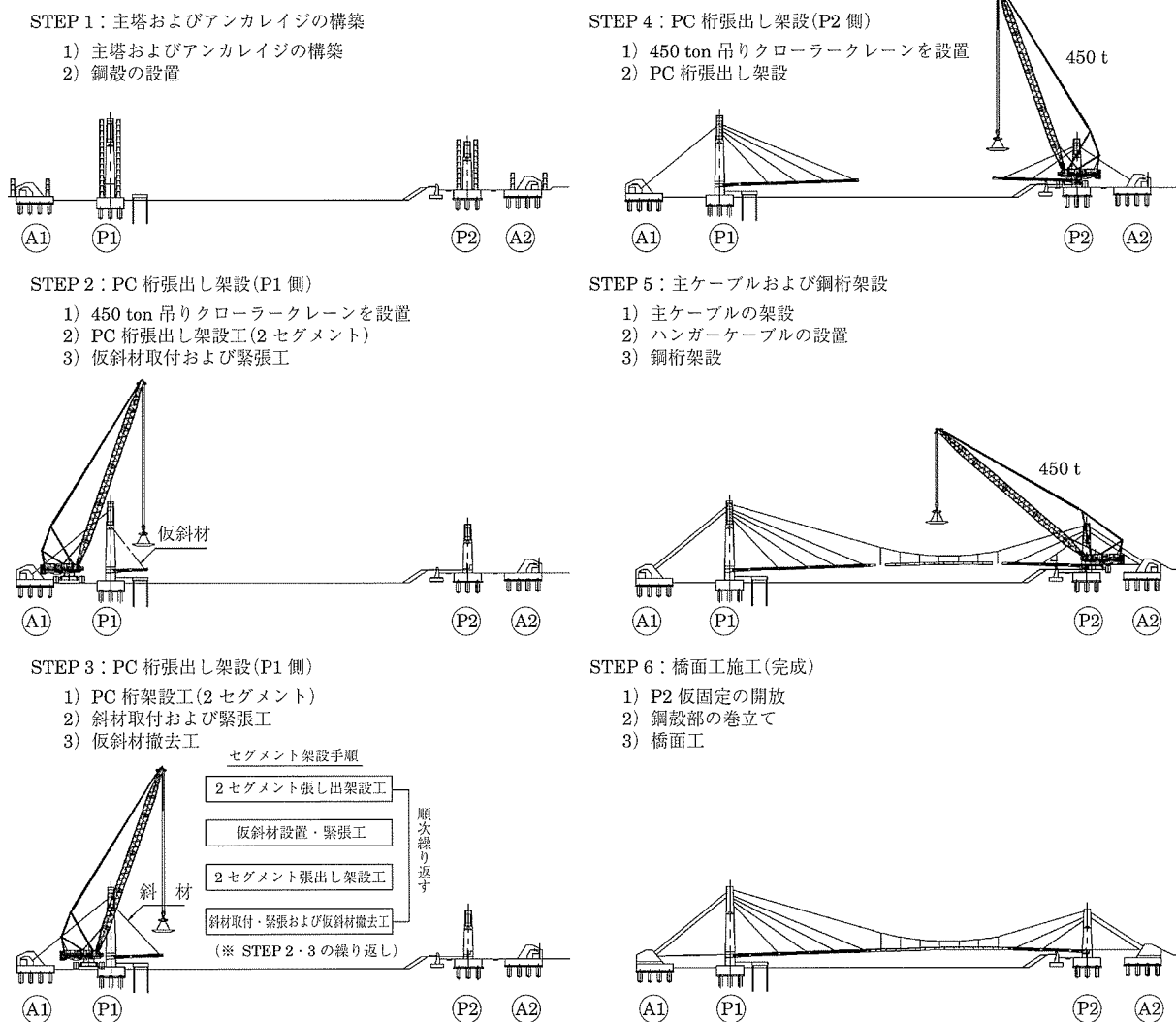


図-9 施工ステップ図

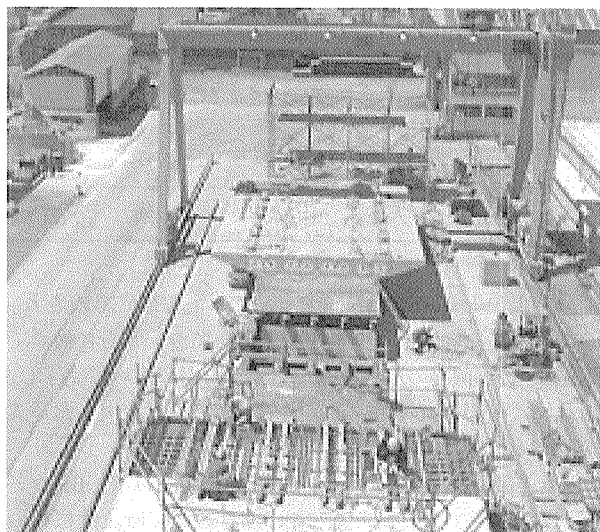


写真-3 主桁製作状況

現場に搬入された（写真-3参照）。

PC桁セグメントの製作は、架設時の形状管理を容易にするため、側型枠および端枠のみを転用するロングラインマッチキャスト方式を採用した。鉄筋は、あらかじめ組み立てられたユニット化した鉄筋とすることで、製作台上での作業を軽減させ、工程の短縮を図った。また、桁高が70cmと低く、施工上の理由から埋設型枠を使用したため、下床版部まで充填可能な高流動コンクリート（スランプフロー55cm）を用いる必要があった。

鋼主桁および鋼床版は、箱形状形成後の溶接作業・品質管理の難易度が高いことが予想される扁平な箱断面であった。そのため、その製作にパネル状態で組立て・溶接を行うパネル工法を採用することで、溶接作業性および溶接品質の向上を図った（写真-4参照）。

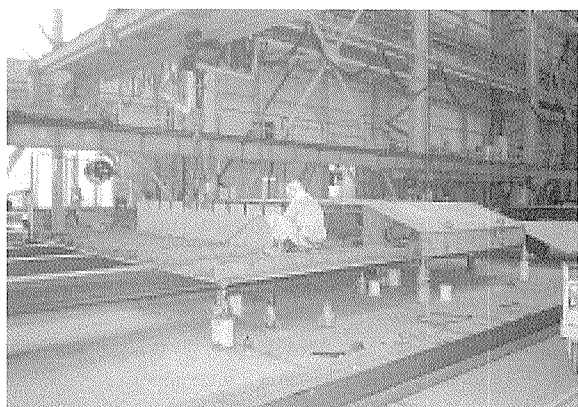


写真-4 鋼桁パネル組立て・溶接

### 6.3 施工管理

PC桁部のセグメント架設では、たわみ管理が重要な項目となった。そのため、主桁の変位を常時計測し、計測値との照合を行い、施工を進めた。また、計測は温度差の影響の少ない早朝に行った。

斜材張力の計測は、アンカレッジ部では電子油圧計（ひ

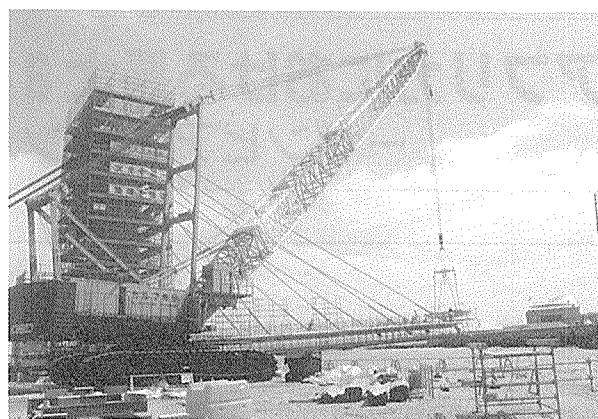


写真-5 P1張出し架設状況

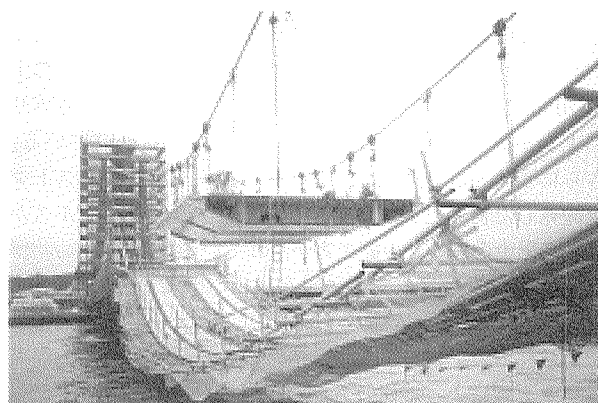


写真-6 鋼桁部架設状況

ずみゲージを用いた圧力変換器）およびロードセルを、主桁側ではジャッキ設置時には電子油圧計を、ジャッキ取外後は加速度計による振動法を用いて行った。

斜材張力調整では、主桁・主塔変位を目標値とする張力を決定し、そのときの張力が目標管理値以内とする管理を行った。主桁応力についても、同時に確認を行った。

鋼桁部の架設では、バックステイの張力調整を行うことで、主塔の変位を目標値内とすることができた。

## 7. あとがき

本橋梁は、PC斜張構造と鋼吊り構造を組み合わせた橋梁として、世界で初めての試みとなった。そのため、設計・施工において、数多くの課題が存在した。決して洗練された手法ではないが、それらの課題を解決し、平成14年12月に本橋梁は完成した。

最後に、本橋の設計・施工にあたり、ご指導をいただいた「鯉ヶ沢人道橋（仮称）技術検討会」の委員の方々、およびご尽力いただいた方々に、この場を借りてお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 諸橋, 中井, 大浦, 田辺: 吊り区間を含む人道橋（ハイブリッドPC斜張橋）の検討, 土木学会第57回年次学術講演会概要集

【2003年2月26日受付】