

論文・報告

支間長 150m を有する鋼床版複合ラーメン箱桁橋（広島はつかいち大橋）の設計・製作・施工

Design and Manufacture and Construction of composite rigid-frame box girder bridge with steel deck (Hiroshima Hatsukaichi Bridge) of the span length 150m

田中 雄人 ^{*1}
TANAKA Yuto

大城 泰樹 ^{*2}
OSHIRO Taiki

石川 一成 ^{*3}
ISHIKAWA Kazunari

徳原 博允 ^{*4}
TOKUHARA Hiromitsu

中川 翔太 ^{*5}
NAKAGAWA Syota

水野 浩 ^{*6}
MIZUNO Hiroshi

本橋は、広島湾岸を結ぶ広島南道路の一部である臨港道路廿日市草津線の4車線化を目的として、2000年に完工した広島はつかいち大橋に隣接して架橋される橋梁である。橋長は660mで、橋梁形式は6径間連続鋼床版複合ラーメン箱桁橋である。最大支間長は第4径間部の150mであり、上部構造と下部構造を剛結合する複合ラーメン橋としては国内で2番目の規模となっている。架設方法は2200t吊起重機船（駿河）を用いた大ブロック架設である。本論文では、長大スパンを有する複合ラーメン橋を大ブロック架設する際の設計、製作、施工時における留意事項、その対策や工夫について記述する。

キーワード：複合ラーメン、FC、大ブロック架設、鋼桁の変位拘束、マスコンクリート（海上部橋脚）

1. はじめに

延長約2.9kmにわたる臨港道路廿日市草津線は、広島湾岸を結ぶ広島南道路を構成する道路の一部として、広島西部都市圏の都市機能改善や地域発展に寄与し、国際拠点港湾広島港五日市地区と廿日市地区を主とした港湾物流の効率化に重要な役割を有している。広島はつかいち大橋は、図1に示すように臨港道路廿日市草津線の4車線化を目的として、2000年に完工した広島はつかいち大橋に隣接して架橋される6径間連続鋼床版複合ラーメン箱桁橋である。以下に工事概要、図2、3に一般図・断面図を示す。なお、JV各社の製作範囲についても図2に示す。

工事名 国際拠点港湾 広島港 臨港道路廿日市草津線 広島はつかいち大橋 海上部上部工事（11工区）

橋長 660.0m

支間長 93.85m+95.00m+95.00m
+150.00m+112.50m+111.35m

幅員 8.00m（有効幅員） 9.20m（全幅員）

構造形式 鋼6径間連続鋼床版複合ラーメン箱桁橋

主要鋼材 SM570 SM490Y SM400 S10T F10T

鋼桁重量 3 600 t
架設工法 FCによる大ブロック架設
発注者 広島県 広島港湾振興事務所
設計 株式会社 長大
施工会社 川田・横河・三井住友建設鉄構 広島港広島はつかいち大橋海上部上部工工事(11工区)
共同企業体
工期 2022年10月1日～2025年10月14日

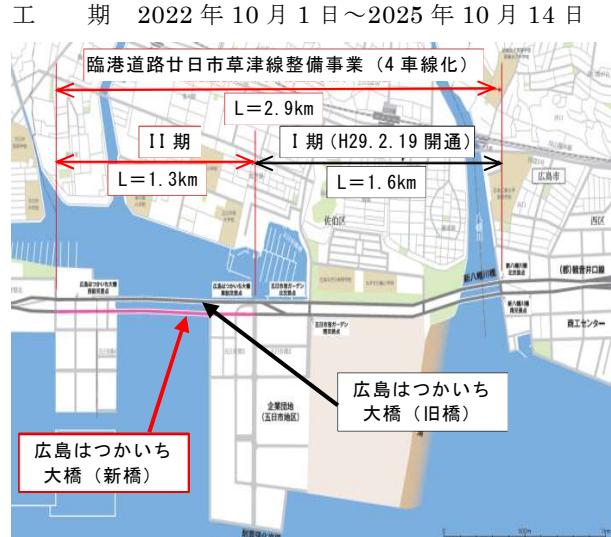


図1 位置図

*1 川田工業株橋梁事業部技術統括部大阪技術部大阪技術課

*2 川田工業株橋梁事業部工事統括部大阪工事部大阪工事課

*3 川田工業株橋梁事業部生産統括部生産技術部橋梁技術課 係長

*4 川田工業株橋梁事業部工事統括部大阪工事部大阪工事課 工事長

*5 川田工業株橋梁事業部技術統括部大阪技術部大阪技術課 係長

*6 川田工業株橋梁事業部技術統括部大阪技術部 担当部長

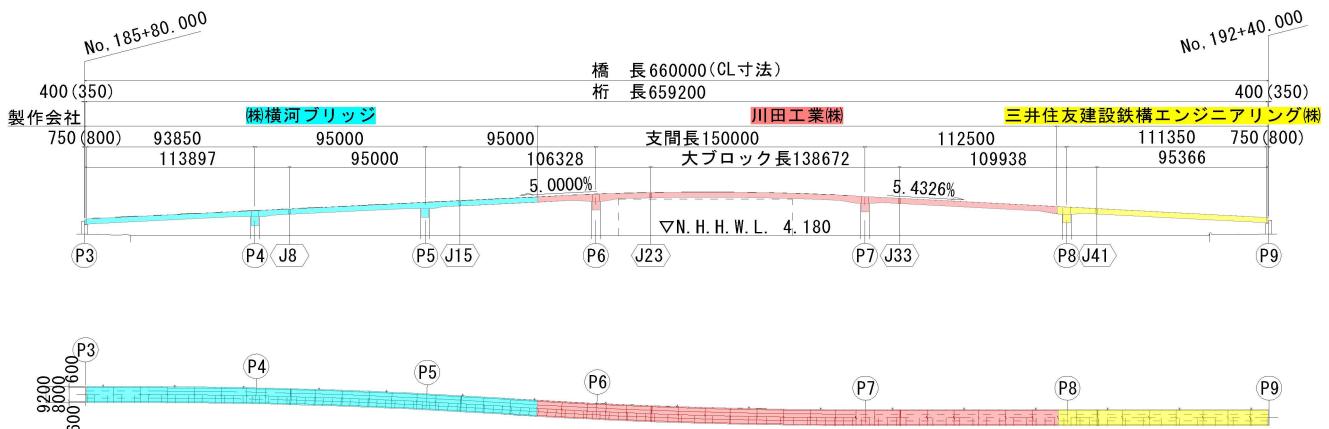


図 2 側面図, 平面図

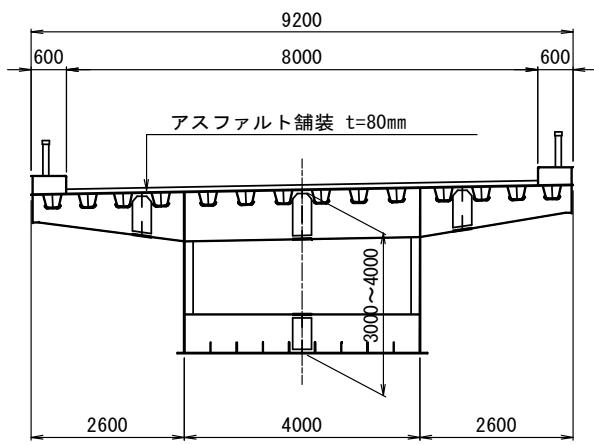


図 3 断面形状

本橋梁は、上部構造と下部構造を剛結合した複合ラーメン橋である。最大支間長は第4径間部の150mであり、複合ラーメン橋としては国内で2番目（日本橋梁建設協会 橋梁年鑑データベース¹⁾より）の規模の橋梁である。また、架設方法は2200t 吊起重機船の駿河（以下、FCと略す）を用いた大ブロック架設である。本論文では、長大スパンを有する複合ラーメン橋を大ブロック架設する際の設計、製作、施工時における留意事項、その対策や工夫について記述する。

2. 設計時の留意点

本工事はコンサルタントで詳細設計を行い、受注業者で設計照査を行う到來物件である。鋼床版複合ラーメン橋の大ブロック架設に伴い、受注業者で行った設計検討内容について、以下に記述する。

2.1 剛結部の設計

上部構造と下部構造の剛結部は、鋼柱をRC橋脚に埋め込むアンカービーム形式である。II期工事で先行施工して完成した既設下部工から柱状に立ち上がっているD51の太径鉄筋内に鋼柱を落とし込み、コンクリート打設から硬化までの間、既設下部工上に設置した仮支承で支持する構造である。鋼柱の外側には孔あき鋼板ジベル

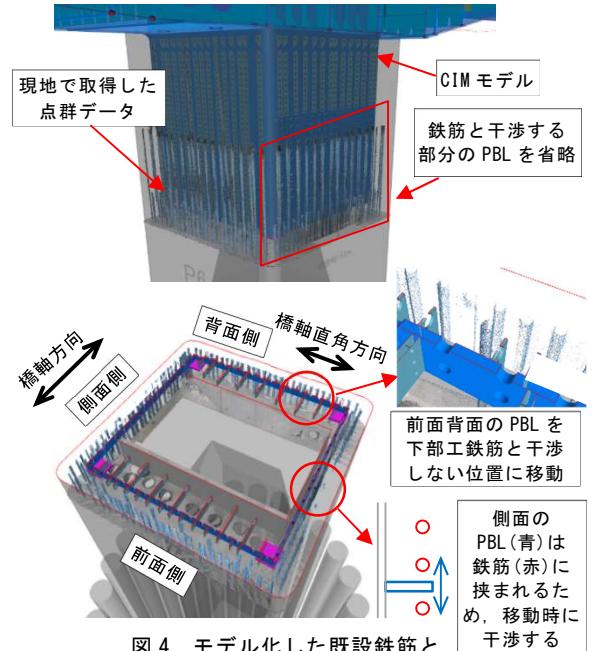


図 4 モデル化した既設鉄筋と CIM モデルの重ね合わせによる干渉確認状況

（以下、PBLと略す）が設置されており、温度変化による桁の伸縮や大ブロック架設時の鋼柱の倒れによって鉄筋とPBLが干渉する恐れがあった。そこで、鉄筋の位置をレーザースキャナーにて計測した点群データを鋼柱のCIMモデルと重ね合わせることで干渉の確認を行った。モデル化した既設鉄筋とCIMモデルの重ね合わせによる干渉確認状況を図4に示す。鋼柱の前面および背面に位置するPBLは、取り付け位置を鉄筋の合間に移動させることで鉄筋との干渉を回避できたが、鋼柱の側面に取り付くPBLは、鉄筋に挟まれるよう位置するため、桁の橋軸方向の移動や、鋼柱の倒れによって鉄筋と干渉することが避けられなかった。そこで、側面に取り付くPBLを省略し、L字のD16鉄筋を鋼柱側面の孔に貫通させ、省略したPBLのせん断強度を、貫通鉄筋で補う構造に変更した。貫通鉄筋を図5に示す。

2.2 キャンバーの精度向上

長大橋梁の出来形精度を確保するため、以下の内容を

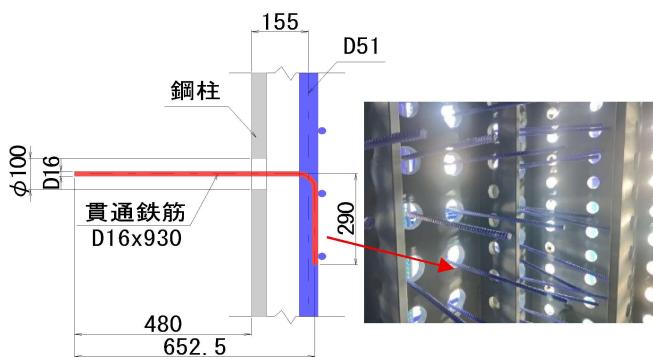


図 5 鋼柱側面の孔に差し込むように配置した鉄筋

検討し、キャンバーの設定に反映した。

(1) セッティングビームのモデル化

本橋の架設はセッティングビームを用いた大ブロック架設である。セッティングビームを用いることで、架設ブロックの支持点が連結位置ではなくなることから、架設時の支間長が大きくなり、設計値との誤差が生じると考えられた。この誤差を解消するため、セッティングビームをモデル化し、骨組み解析へ反映した。大ブロックジョイント位置における、変更前後のモデルの概要図を図 6 に示す。また、骨組み解析時に載荷する鋼重は、ブロック毎に算出することとし、主桁の仮定剛度は実剛度を骨組み解析に反映することで解析の精度を確保した。

(2) ねじりキャンバーの付与

本橋は曲率半径 $R=2978\sim3022\text{m}$ の曲線橋であり、ねじりに伴う回転変位が発生する。そのため、モデルは図 6 に示すような箱幅を考慮したフィッシュボーンモデルとして骨組み解析を行い、ねじりキャンバーの設定を行った。

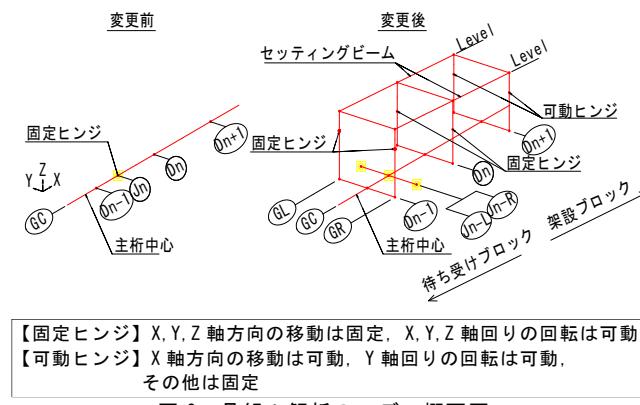


図 6 骨組み解析のモデル概要図

(3) 水平キャンバーの付与

本橋の鉛直キャンバーは最大約 940mm と大きいため、図 7 に示すように、無応力時の中立軸の弧長（赤線）と完成形状（青線）を比較すると最大で 14mm 支間長が変動する。この差が完成時の支間長に影響すると考えられたため、橋軸方向の水平キャンバーとして製作寸法に反映した。

3. 工場製作時の留意点

3.1 狹隘部の製作性

上部構造と下部構造の剛結部である鋼柱は、狭隘な箇所が多く、製作性に留意する必要があった。そこで、CIM モデルと MR 技術を活用し、狭隘部の溶接作業空間や組立手順の確認を行った。CIM モデルと MR 技術による狭隘部の確認状況を図 8 に示す。

3.2 CIM モデルを活用した架設ブロックの重心位置の算出

浜出し時に吊り上げる大ブロックは、鋼柱が架設ブロックの端部に位置するため、偏った重心位置となる。吊上げ位置が重心からずれると、吊ワイヤーにかかる荷重が偏ってワイヤーが破断することや、部材が振れてペントに接触し、ペントが崩壊することが懸念された。そこで、CIM モデルを活用し、精度の高い重心位置を算出

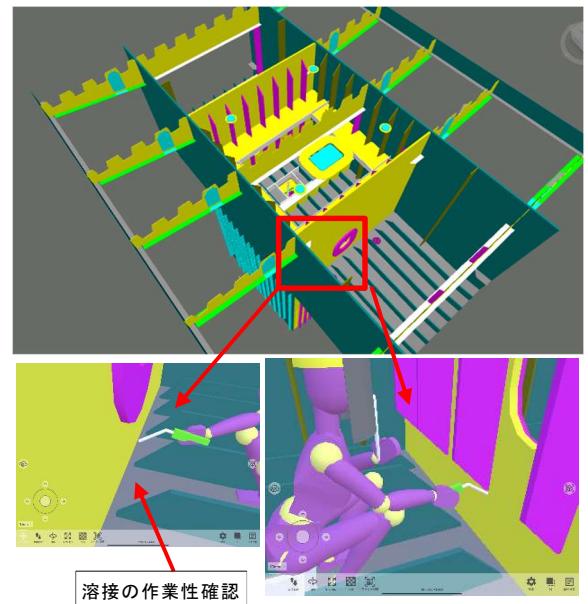


図 8 CIM モデルと MR 技術による狭隘部の確認状況

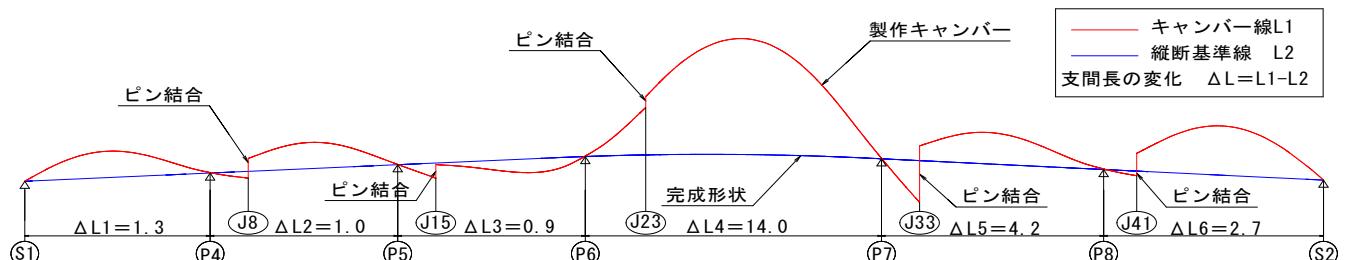


図 7 製作キャンバー形状および弧長による支間長の差異

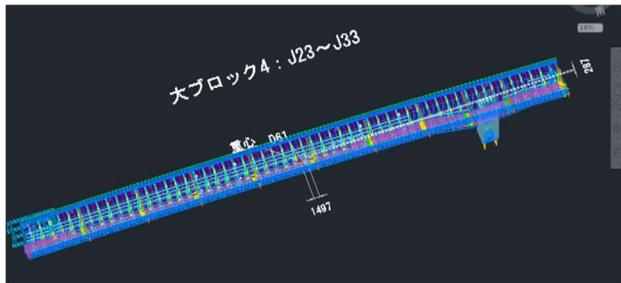


図 9 CIM モデルによる重心算出状況



写真 1 浜出し状況

して吊上げ位置を決定した。その結果、吊上げ位置と実際の重心位置がずれることなく大ブロック吊上げを行うことができた。CIM モデルによる重心算出状況を図 9 に、浜出し状況を写真 1 に示す。

3.3 鋼柱の分割

工場製作は、品質確保のため、溶接は下向きで行う必要があるが、上部構造と下部構造の剛結部である鋼柱を含むブロックは高さが約 9m あり、工場建屋内で部材を回転させながら溶接できる形状ではなかった。そのため、主桁の下フランジから下側へ 500mm の位置で桁と鋼柱を分割し、部材を回転できる大きさとして下向き溶接が可能となるようにした。そして、分割した部材を工場ヤード内で地組立、溶接を行った。また、鋼柱の内外には PBL が取り付くため、PBL のせん断耐力を担保した上でジベル孔の配置を見直すことで、鋼柱とともに PBL も分割した。桁と鋼柱の溶接時に溶接トーチと干渉することから、桁側に取り付く PBL は鋼柱の溶接後に取り付けを行った。分割した鋼柱を図 10 に示す。

3.4 調整ブロックと調整ジョイント

上部構造と下部構造を一体とせず、支承を通じて荷重を伝達する橋梁では、下部構造の出来形誤差を支承の据付位置で調整する。一方、本橋は剛結構であり、既設の RC 橋脚の位置に合わせて桁を製作する必要があるため、以下の方法により、支間長の管理を行った。まず、既設の RC 橋脚の出来形誤差を吸収するため、支間ごとに「調整ブロック」を設け、現地計測した支間長に合うようにブロック長を設定した。

また、本橋の大ブロックは、6~10 ブロックの部材を

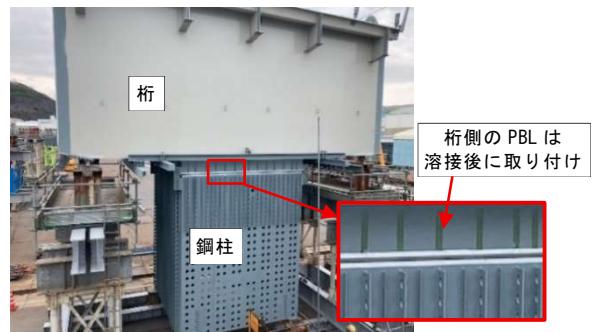


図 10 分割した鋼柱

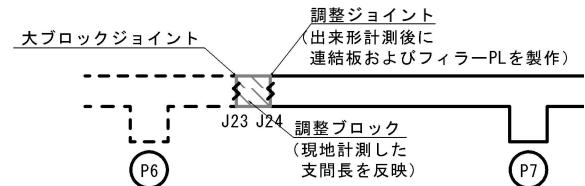


図 11 調整ブロックと調整ジョイント

工場ヤード内の溶接によって地組立を行うため、溶接収縮によるブロック長への影響が大きい。そのため、地組立が完了し、出来形を計測した後に連結板およびフィラー PL を製作する「調整ジョイント」を支間ごとに設けた。調整ブロックと調整ジョイントの位置関係を図 11 に示す。

4. 現場施工時の留意点

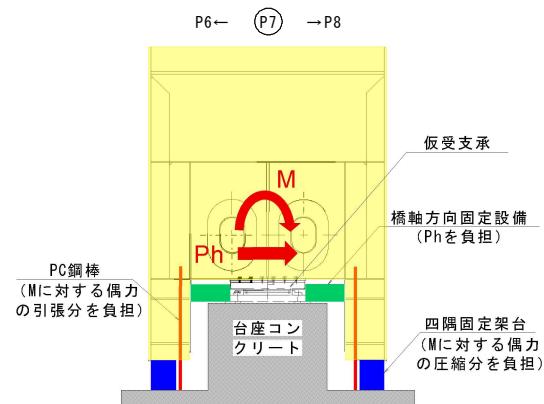
4.1 FC による大ブロック架設

架設は 6 ブロックすべて FC を用いた大ブロック架設であり、起点側から片押しで行った。架設状況を写真 2 に示す。架設ブロックは約 150m と長大であり、吊上げから荷重開放に至るまでの過程で主桁形状が大きく変化する。その結果、継手位置で回転変形が生じ、連結時の調整が困難となることが予想された。そこで、架設時にはセッティングビームの荷重受け点部に全方向可動受け台を設置した。また、最終ブロックの架設では、大ブロックが陸上と海上を跨ぐ位置への架設となり、FC と大ブロック桁を直角に配置しての架設が不可能であった。そこで、架設可能となる平面的な吊角度を確保するために吊上げワイヤーの張力を算出し、荷重調整により大ブロックを平面的に回転させて、架設を行った。

4.2 温度変化に伴う鋼桁挙動対策

剛結部コンクリートの施工前は、中間支点は仮支承（可動支承）で支持され、日々の温度変化によって水平・回転変位が生じる。コンクリート施工時や初期硬化段階の鋼柱挙動は、コンクリートのひび割れの起因となるばかりでなく型枠崩壊することが危惧された。そのため、既設橋脚と鋼柱を仮剛結状態とし、橋脚全体で挙動させることにより、水平・回転変位の発生を防止する必要があった。

仮剛結状態とするため、図 12 に示すように、橋軸方向



の変位を拘束し、曲げに伴う圧縮力および引張力に抵抗する固定設備を設置した。このようにして、主桁の温度変化に伴う変位を拘束すると、固定設備に大きな荷重が加わることとなり、骨組み解析結果より、仮剛結時の桁温度から 18°C以上変化すると設備耐力を超過する荷重が加わることが明らかとなった。このことから、主桁温度変化量の抑制と管理についての対策が必要であった。加えて、本橋は鋼床版を有する橋梁となっており、直射日光で橋面温度が上昇しやすく、下フランジとの温度差により生じる上部工の変形に伴い、中間支点部に回転変位を発生させ、コンクリートのひび割れを誘発することが懸念された。その対策として図13に示すように、遮光機能付き保水養生シートと散水設備を橋面全長の 660m の範囲に配置し、桁の温度の上昇および鋼床版と下フランジの温度差の発生を抑制した。

4.3 狹隘部のコンクリート施工対策

(1) 高流動コンクリートの採用

剛結部は鉄筋径 D51 の主鉄筋と D29, D32 の帶鉄筋が高密度に配筋されている。加えて圧接継手部や機械継

手部が多数存在することから、コンクリートの充填性が著しく制限される狭隘部が多い構造となっている。そのため、コンクリートの充填不足となる箇所が発生する可能性が懸念された。さらに、主桁下フランジ、鋼柱ダイヤフラム下面などは、バイブレーターによる締固めが困難であり、スランプ 12cm の普通コンクリートでは施工が困難であった。これらの課題解決のため、本工事では締固めを必要としない自己充填性を有する高流動コンクリートを採用し、剛結部コンクリートの品質確保に努めた。

(2) 施工上の工夫・対策

剛結部は狭隘部が多数存在しており（図4, 図12）、コンクリート打設中に内部の状況を目視で確認できない箇所が存在した。このような状況下で打継ぎを設けると、継ぎ目処理が困難となり、不連続なコンクリートとなることが危惧された。そのため、本施工では打継ぎを設けず、最大で 120m³となる 1 橋脚のコンクリート全量を 1 回で打設する計画とした。その結果、コンクリート打設時の型枠へ作用する側圧が大きくなることが想定されたため、型枠設計においてはセパレーターのピッチや本数の決定について十分な検討を行った。また、狭隘部かつ充填の目視確認が困難な箇所には、部分的に透明型枠を採用することで、型枠外から充填状況の確認を行った。図14に型枠支保工の組立状況を示す。

4.4 温度ひび割れ対策

剛結部コンクリートに使用した配合を表1に示す。本工事は、マスコンクリート（5 000×5 000×5 500）施工であり、水和熱に起因するひび割れ発生のリスクが大きい。そのため、高流動コンクリートについては粉体量を抑え、発熱の抑制を目的とした増粘剤系を採用した。配合選定



にあたっては、普通（N）、中庸熱（M）、低熱（L）の3種類のセメントを対象に、3次元FEM温度解析プログラム「ASTEA-MACS」を用い、剛結部1/4モデルによる温度ひび割れ解析を実施した。図15に示す通り、一部ひび割れ指数が1.0以下となる箇所が確認されたが、鉄筋照査により有害なひび割れの発生に十分抵抗できる鉄筋量となっていることを確認した。セメント種類の比較検討は、初期強度発現性能、海上構造物としての耐久性、さらに増粘剤系高流動コンクリート特有の材料分離傾向を考慮した試験練りによって行った。その結果、海上構造物として耐久性が高く、強度発現性能がN（普通セメント）とL（低熱セメント）の中間値を示し、鋼桁挙動とマスコンクリート対策の両立が可能であるM（中庸熱セメント）を採用した。

なお、試験練りのみでは打設高さの影響が評価できなかったため、施工現場において試験体（500×500×3 000）による打設試験（写真3）を実施した。その結果、材料分離に伴う表面気泡が確認されたため、実施工では透水性型枠を使用し、ブリーディング水および気泡を排出することで、耐久性に影響を及ぼす表層の初期欠陥を防止し、品質を確保した。また、コンクリート流動性については、狭隘部や干渉物の多い箇所ではスランプフローが60cmを超えると材料分離が顕著となり、ブリーディング水の上昇も著しい状況が確認された。このため、生コンプレント製造責任者と協議のうえ、スランプフロー55cm以下を目標に管理し、実施工を行った。

表1 使用したコンクリートの配合

呼び名	水結合材比（%）	細骨材率（%）	単位重量（kg/m ³ ）				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
30-60-20-M (膨張材)	45.0	50.5	170	380 (20)	897	895	3.8

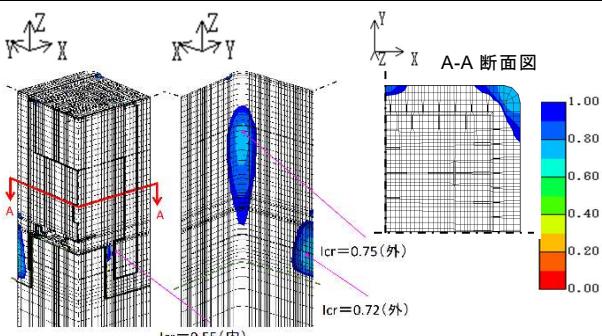


図15 中庸熱セメントのひび割れ指数のコンター図



写真3 試験打設状況（左）と試験体（右）



写真4 レーザー変位計（左）とGNSS変位計測器（右）

4.5 主桁変形のモニタリング管理

前項の記述の通り、本橋は主桁架設後に剛結部コンクリートの施工順序となるため、主桁変形の把握と管理が非常に重要な項目となる。設計計算や骨組み解析で算出した変形挙動と整合し、かけ離れがないことを確認することがコンクリートの品質確保に欠かせないと考えられた。

當時、主桁の変形を把握するため以下に示す手法で計測、モニタリング管理を実施した。

- ① 熱電対による主桁温度管理
- ② 傾斜計による中間支点橋脚の倒れ量
- ③ レーザー変位計による端支点部遊間量（写真4）
- ④ GNSS変位モニタリングシステム²⁾を使用した中間支点部の変位量（写真4）

これらのモニタリング管理計測により、主桁温度の変化に伴う主桁変形性状を捉えることで、剛結部コンクリート施工時の異常検知、早期対応に努め、品質確保に繋げた。

5. おわりに

本報告に記載した内容以外にも、設計・製作・施工に関して多岐にわたる検討を実施した。その結果、出来形および品質の両面において良好な成果が得られた。出来形は規格値に収まり、コンクリート部にはひび割れ等の変状も認められず、総じて良質な構造物を完成させることができた。本工事で得られた成果は、今後の類似工事における施工計画の立案や品質管理の高度化に活用できるものと考える。

本工事の遂行にあたり、発注者である広島県広島港湾振興事務所をはじめ、協力会社を含む多くの関係者の皆様に多大なるご指導・ご協力を賜った。ここに記して深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本橋梁建設協会：橋梁年鑑データベース「<https://www.jasbc.or.jp/kyoryodbd/>」
- 2) 有井、田中、佐藤、福場、江川、清水：GNSSを用いた鋼連続曲線箱桁橋の変位モニタリング、橋梁と基礎（2025-1），pp.47-52,2025.1.