

論文・報告

中国自動車道 横坂高架橋の大規模修繕工事

～PC 連続合成桁橋の床版打換と外ケーブル補強工事～

Replacement of Concrete Floor Slab and External Cable Reinforcement for PC Composite Continuous Girder Bridges

岡本 直樹 *1

OKAMOTO Naoki

横田 昇吾 *2

YOKOTA Shogo

高岡 努 *3

TAKAOKA Tsutomu

藤原 敏晃 *4

FUJIWARA Toshiaki

藤井 理加 *5

FUJII Rika

大久保 孝 *6

OKUBO Takashi

本橋は、山口県美祢市に建設された中国自動車道（下り線）美祢 IC～美祢西 IC 間に位置する供用されてから 50 年が経過した PC3 径間連続合成桁橋である。本橋は山間部積雪寒冷地に位置し、冬季には凍結防止剤の散布が行われる。過年度の点検において、塩害、グラウトの充填不良等の影響により、中間支点上の一次床版ケーブルの破断損傷が確認されたため、本工事において一次床版の打換え再構築を行った。対面通行規制期間が 65 日と短く、厳しい制約条件の中、確実な工程進捗が課題となった。

本稿では、健全度評価で実施した調査結果、グラウト充填調査とウォータージェット機械はつりの機材及び設備計画、外ケーブルの配置に際して用いた DX 技術の活用などのほか、外ケーブルの緊張による応力計測結果についても報告する。

キーワード：一次床版打換え、ウォータージェット機械はつり、外ケーブル補強、中空 PC 鋼棒、点群データ

1. はじめに

中国自動車道横坂高架橋は、供用後約 50 年が経過する高架橋で、3 連の PC3 径間連続合成桁から成る。本橋は山口県美祢市の山間部積雪寒冷地に位置（図 1）し、冬季には凍結防止剤の散布が行われる。過年度の点検において、P3～P6 径間の中間支点上の一次床版ケーブルの破断損傷が確認されたため、本工事において一次床版の打換え再構築を行った。対面通行規制期間が 65 日と短く厳しい制約条件の中、確実な工程進捗が課題となった。

本稿では、4 台同時施工となるウォータージェット機械はつりの機材及び設備計画、補強外ケーブルの配置に際して用いた DX 技術の活用など、工程短縮を目的に実施した工夫点を紹介する。



図 1 橋梁位置図

2. 橋梁諸元および補修諸元

本工事の橋梁諸元を表 1 に示す。

表 1 橋梁諸元

橋 長	: 75.0 m
支 間 割	: 24.55 m + 25.00 m + 24.55 m
有効幅員	: 10.25 m ～ 10.30 m
平面線形	: R=600 m
縦断勾配	: i=5.0 %
横断勾配	: i=2.0 % ～ 5.0 % (片勾配)
活 荷 重	: TL-20

補修諸元を以下に記す（図 2、図 3、図 4）。

(1) 補修及び補強方法

一次床版の撤去・再構築（打換え）、一次床版再構築に伴う PC ケーブルの設置

(2) 橋体補修使用材料

一次床版打換えコンクリート（ $\sigma_{ck}=50 \text{ N/mm}^2$ ）、鉄筋（SD345）、主方向 PC 鋼材（内ケーブル：中空 PC 鋼棒 NAPP 30T、外ケーブル：SWPR7AL 7S15.2）定着突起緊結 PC 鋼材（中空 PC 鋼棒 NAPP 40T）

(3) 補修・補強レベル

建設時と同じ TL-20 とする（建設時耐力までの回復に留める補修を基本）

*1 川田建設㈱大阪支店工事事務課

*2 川田建設㈱九州支店工事事務課

*3 川田建設㈱大阪支店工事事務課 担当工事長

*4 川田建設㈱大阪支店技術部技術課 課長

*5 川田建設㈱大阪支店技術部技術課

*6 川田建設㈱大阪支店 技術部長

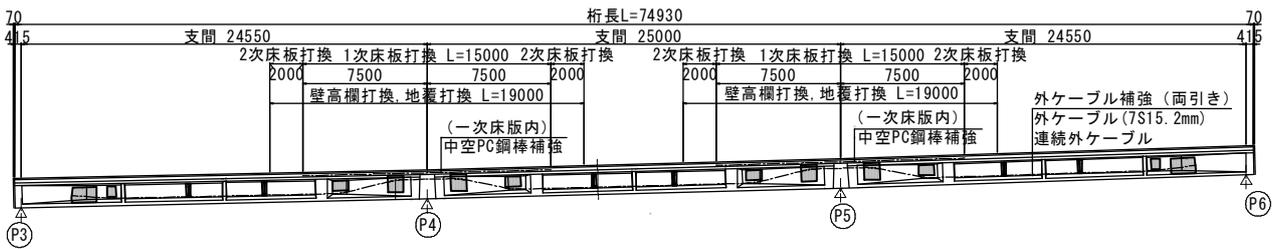


図2 側面図（補修後）

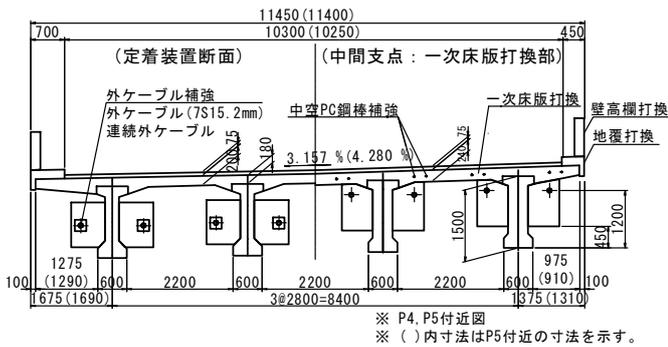


図3 断面図（補修後）

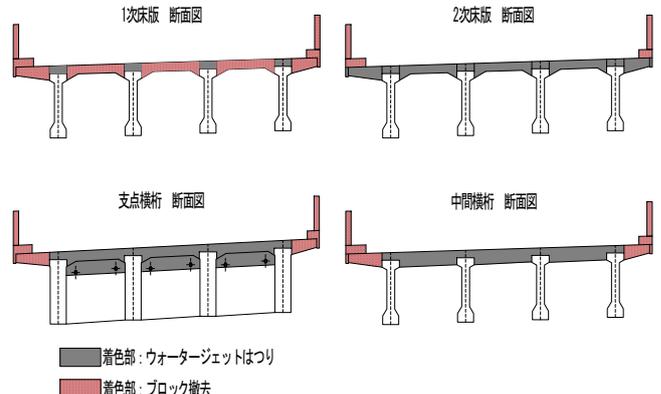


図4 補修・撤去範囲位置（断面）

3. 劣化・損傷の内容と原因及び健全度調査

(1) 劣化・損傷の内容

本橋のP4, P5 中間支点上の一次床版部（図5 青囲い部）において、広範囲に浮きが見られた。脆弱部を除去したところ、一次床版ケーブルの破断損傷が確認された（写真1）。特に、G3-G4 桁間の一次床版ケーブルは、シーズ単位でほぼ全数に破断、もしくは残存プレストレスが期待できない腐食が見られた。

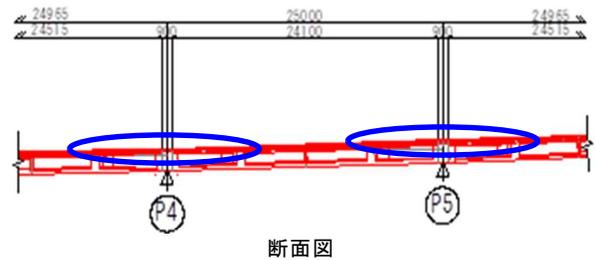
(2) 劣化・損傷の原因

破断損傷の原因としては、グラウト充填不足と山間部積雪地域における凍結防止剤の散布による鋼材腐食と塩害によるものと推察する。コア採取による塩分含有量試験からは、床版の鋼材位置で鋼材腐食発生限界値（1.75 kg/m³）以上の塩化物イオン量を検出した。

(3) コンクリートの健全度調査結果（表2）

圧縮強度試験の結果、主桁は 35.3～58.0 N/mm²、床版は 44.7～49.8 N/mm²であった。設計基準強度を十分満たしている数値が得られた。

中性化試験の結果、主桁の中性化深さは 10.8～11.4 mm、



断面図

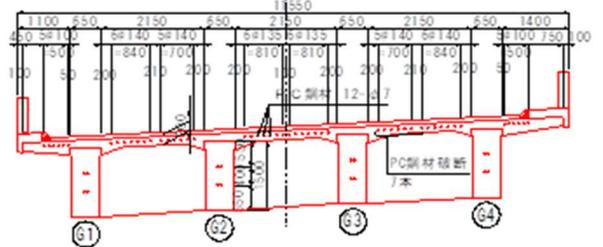


図5 一次床版ケーブル破損位置

床版は 20.3～23.5 mm であった。√t 則による劣化予測の結果、主桁は鋼材腐食開始まで相当年数（74～87 年）を要するが、床版では鋼材位置までの中性化進行が認められ、腐食開始までの残り年数は 0 年であった。



写真1 一次床版ケーブル破損状況

表 2 実施した健全度調査

調査項目	調査・試験方法	部 位	数 量	備 考
コンクリート健全度調査 (コア採取)	圧縮強度試験	主桁	8	主桁:3本 床版:5本
	中性化試験	床版	8	主桁:3本 床版:5本
	塩含有量試験		40	5/深度/本
PCグラウト 充填度調査	鋼材探査 (SIR-EZ-GP8100)	主桁	176	(22ケーブル)×4主桁×起終点
		床版	208	(52ケーブル)×2箇所×起終点
		連結ケーブル	17	-
	超音波パルスエコー法 (PD8050)	主桁	176	同上
		床版	208	
削孔・CCD調査	削孔・CCD調査	主桁	176	※床版は過密配筋のため、削孔調査を実施したが208箇所中65箇所が未検出
		床版	208	(65)※
	連結ケーブル	14	PD8050にて未充填判定のみ実施	
空隙量調査	ワイヤー法	主桁	34	主桁:32箇所 連結ケーブル2箇所
	真空法	連結ケーブル	26	主桁:25箇所 連結ケーブル1箇所

設計当時のコンクリートの仕様が不明であったため、W/C=55%、普通ポルトランドセメントの仕様と仮定し、土木学会の2018年制定コンクリート標準示方書に基づき鋼材腐食発生限界値を1.75 kg/m³と推定した。主桁の鋼材位置の塩化物イオン量は鋼材腐食発生限界値以下であったが、床版では最大で2.28 kg/m³を検出し、鋼材腐食発生限界値を超えていた。

(4) グラウト充填調査

グラウト充填調査は、超音波パルスエコー法とドリル削孔 CCD カメラによる調査を併用して行った。超音波法の結果、本橋梁では充填されているケーブルであっても、未充填と評価される結果が多数生じた。この要因としては、PCケーブルと水平方向鉄筋は端部付近で並行していること、さらに、床版では過密配筋が影響し、判定精度が落ちたと考えられる。そこで本調査では、調査精度確認のため、全箇所においてドリル削孔調査を行った。

削孔調査の結果、全333箇所(主桁176箇所、連結ケーブル14箇所、一次床版ケーブル143箇所)中、60箇所でグラウト充填不足を確認した。

4. 床版打換工事のDX技術の活用

床版撤去・橋梁全体の補強(外ケーブル設置)を行うために、中間横桁の位置・主桁のそりなど、既設構造物の正確な位置・寸法を知る必要があった。建設当時の座標を現物に照らし合わせたが整合性が取れず、建設当時の測量データを使用できないことが判明した。また、緊



写真2 点群データ取得



写真3 点群データ映像化

急工事であることから短期間での測量と簡易的で正確な測量データが必要なため、当現場では3次元測量機(イメージングスキャナー)(写真2)を使用した。

3次元測量機から点群データを抽出し(写真3)、3DCAD化(写真4)することにより主桁・横桁の位置や現状の主桁横そりを把握できた。

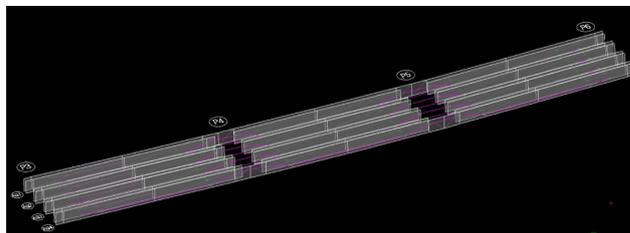


写真4 外ケーブル長測定 3DCAD図

外ケーブルの製作には、通常であればスチールテープを使用し、ケーブル形状に合わせた測量を行うが、それには定着・偏向突起の施工を完了する必要がある。しかし、突起等の施工完了後の製作開始だと規制期間の現場工程に沿った納品が困難であった。そのため、点群データ測量のデジタル技術を駆使し、工期短縮を図った。具体的には、3DCAD上に、外ケーブル配置を再現しケーブル長を測定した。

その他、床版撤去のカッター切断を行う際、主桁上フランジ側面近傍を切断するが、橋面上への位置出しを、主桁上フランジ測線に取り付けたターゲットの座標を点群データより抽出し、橋面上に杭ナビを使用して記した。この結果、主桁を損傷することなく、規制期間内である65日間の内、1日でカッター切断の位置出し・測量を完結することができた(図6)。

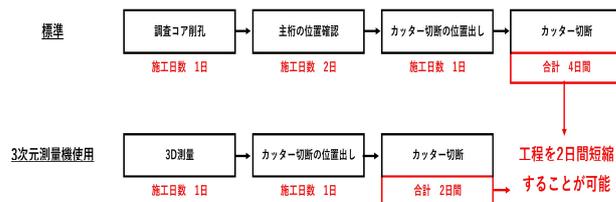


図6 施工フローと施工日数の比較

このようなデジタル技術の積極活用は、工程短縮・納品時期を決定付ける重要なトリガーになった。

5. はつりの計画

(1) ウォータージェット機材計画

対面通行規制期間の65日間で床版打換えを完了させるために、表3の工程表で一次床版打換の工程計画を行った。

P5支点部の一次床版部の床版撤去工を先行して行い、直ちに床版打換えを行う計画とした。ウォータージェット機械はつりは、全体で50㎡をはつる必要がある。実

働 13 日で完了させる工程計画の結果、ウォータージェット機械の 1 日あたりの施工量 4 m³ を目標とし、機材計画については最高圧力 245 MPa、使用水量 90 L/min でコンクリートをはつることができるジェットマスター（自走式）を 4 台使用し、現場環境を考慮して 1 日 10 時間の昼間作業とした。

表 3 工程表

詳細設計・材料手配・施工計画	令和5年					
	5月	6月	7月	8月	9月	10月
交通規制	対面通行規制期間 (65日)					
外ケーブル補強工 (コックリト突起・連続外ケーブル #緊張)	<定着部> コックリト突起緊結用PC鋼棒 X線探査、主桁コア削孔	中間支点部WJ削孔	中空PC鋼棒 型枠鉄筋コックリト打設	<中間支点部> コックリト突起 型枠鉄筋コックリト打設 (実原工費去) 外ケーブル挿入緊張		
床版打換工 (ワイヤーロープ撤去・WJはつり・ 床版打換え・防水舗装)	既設床版受け支保工		ワイヤーロープ ブロック撤去	WJはつり	型枠鉄筋PC	1次床版壁高欄コックリト打設 防水舗装

(2) 橋面機材計画

ジェットマスターを 4 機同時稼働することから、給水・濁水処理の方法が課題となった。給水については 1 日あたりの使用水量は約 100 m³ になる。そこで、橋面上に清水を常備するため、上水用鋼製タンク 4 台 (合計 80 m³) を配置した。高速道路事故等による運搬経路の不通といった不測の事態を想定して、常にタンクが満水になるように 4 t 積散水車 6 台で現場周辺から給水し、10 t 積バキューム車 8 台で、はつり殻、汚濁水の吸引、回収を行いタンクに集積した。橋面機材配置図を図 7、写真 5、写真 6 に示す。



写真 5 橋面機材配置 1

写真 6 橋面機材配置 2

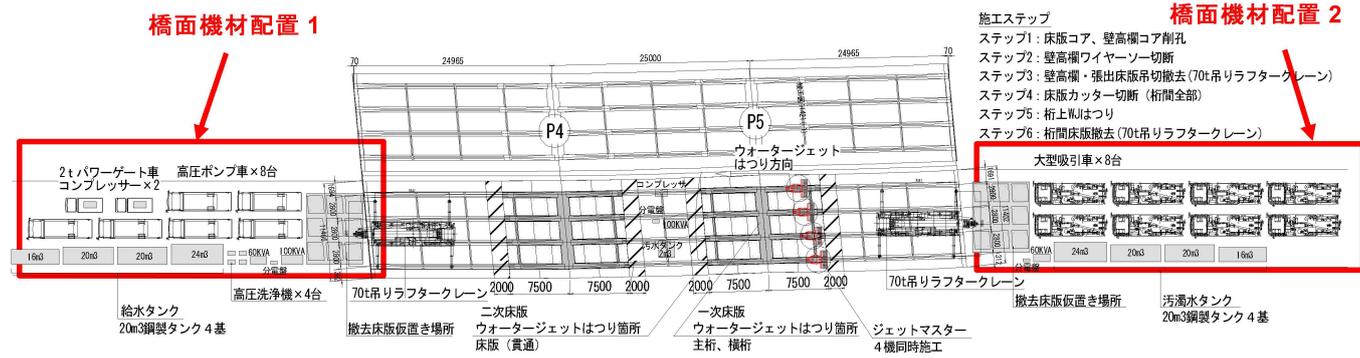


図 7 橋面機材配置図

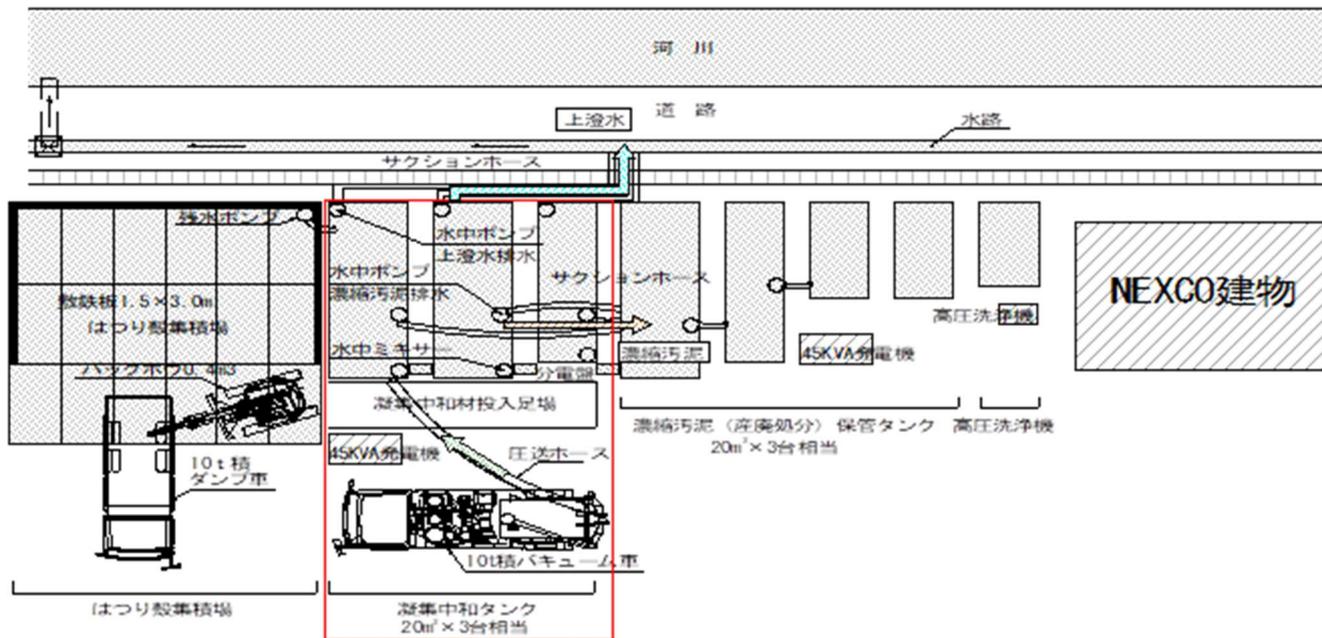


図 8 プラント設備計画図

(3) 汚濁水処理計画

ウォータージェットはつりで発生する汚濁水を処理するために、15分程離れたインターチェンジの料金所内のスペースに汚濁水処理設備を設置した。設備計画図を図8に示す。橋面上に配置した10t積バキューム車8台で濁水を運搬し、鋼製タンクに集積した。濁水処理は、凝集中和材を鋼製タンクに投与し、水中ミキサーにより攪拌を行い、汚泥と中和水に分離した(写真7)。濁度・pH測定を行い、基準値であることを確認した後、上澄水は一般河川へ放水し、濃縮汚泥は別の10tバキューム車で産廃処分を行った。はつり殻は別集積場にバキュームタンクから荷下ろし水切りを行い、バックホウにて10t積ダンプ車に積込み産廃処分した。



写真7 汚濁水処理施設

6. 床版打換工・外ケーブル補強の工程短縮

(1) 主桁ハンチ鉄筋の樹脂アンカー施工

床版ブロック撤去後に、主桁上フランジ側面にハンチ鉄筋(D19, D13)計1200本を、後施工にて設置する必要がある。構造取合いより、ハンチ鉄筋施工後に、偏向部突起の鉄筋型枠、床版型枠の施工を行うため、主桁ハンチ筋構築の工程短縮が課題であった。標準施工方法としては、主桁上フランジ側面から100mm離してカッターを入れ、床版ブロック撤去後、ハンチ鉄筋を残してコンクリートをはつり出し、エンクローズ溶接にて接続する。しかし、コンクリートのはつり出し作業に日数がかかり、打撃はつりの場合は既設鉄筋にも損傷が生じる。そこで本工事では、主桁上フランジ側面ラインでカッター切断を行い、樹脂アンカー鉄筋を施工した(図9)。



写真8 定着部施工状況

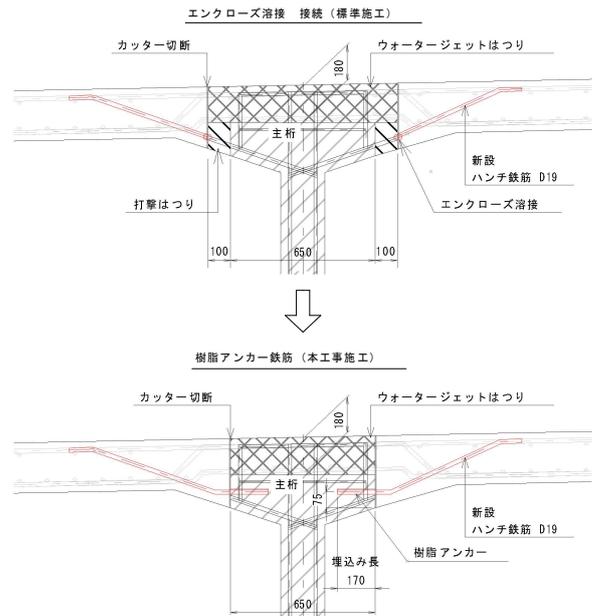


図9 主桁ハンチ筋の工夫

これにより、コンクリートはつり作業と溶接作業を削減でき、作業調整手待ちも無く工程短縮ができた。

(2) 外ケーブル定着突起・偏向突起の工夫

外ケーブル補強工として3径間連続外ケーブル7S15.2(SWPR7AL) L=68.6mを主桁の左右に2本、計8本を配置した。定着部・偏向部はコンクリート突起とし、緊結用緊張材として、中空PC鋼棒(SBPR 930/1180 Φ40mm)内ネジタイプ(図10)を適用した。

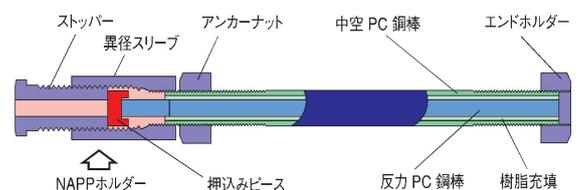


図10 中空PC鋼棒の概要図

緊結用緊張材を配置するための主桁削孔位置は、X線撮影・電磁波レーダーによる鋼材探査を行い、主桁のPC鋼材や鉄筋などの既設鋼材を損傷させないように配置を決定した。しかし、支点付近にある偏向部(図11)については、部材厚の影響により正確な鋼材探査が困難であり、既設鋼材を損傷させてしまう可能性があった。部材形状も異なるため、鋼材損傷の可能性のある箇所につい

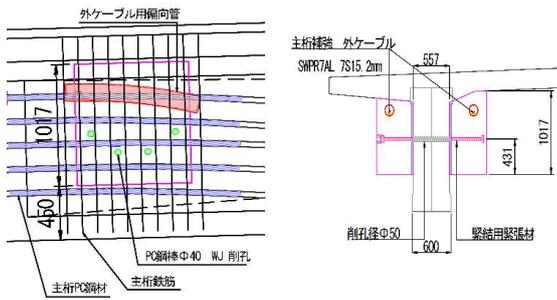


図 11 偏向部

ではウォータージェット削孔を行い、それ以外はコア削孔とした（写真 8）。

既設鋼材の配置などを考慮し、コア削孔径はΦ50と設定した。コア削孔 160 箇所・ウォータージェット削孔 64 箇所の合計 224 箇所を行い、既設鋼材に損傷を与えることなく、削孔作業を完了した。

コンクリート配合は、一次床版打換，コンクリート突起とともに 50-16-20H（膨張材 25 kg/m³）とし、中間支点部偏向突起は一次床版と一体化させた。工程短縮対策として、主桁削孔位置探査から中空 PC 鋼棒配置，二次床版区間の定着突起等を，対面通行規制期間前に先行して行った。一次床版打換区間の偏向突起は，底板型枠および鉄筋組立を先行施工することで規制期間中の作業を削減し，既設床版撤去後に側枠を組立て，打設を行った。

7. 外ケーブル緊張による挙動計測

本工事では、支点上の既設一次床版を撤去・再構築するため、既設一次床版ケーブルを撤去した後、再構築する床版内部に中空 PC 鋼棒，全体系に外ケーブルを配置し、当初設計荷重に対する補修を行った。補修工事におけるプレストレス導入は、格子構造を成す全体系で行われるため、各桁に適切にプレストレス力が導入されることの妥当性を判断するため、ひずみ計測を行った。その結果、プレストレス導入順序によるひずみ変化は、部材評価法を用いて解析した設計値と同様の挙動と値を示していることが確認できた（図 12）。よって、本工事のプレストレスは適切に導入されたと判断した。

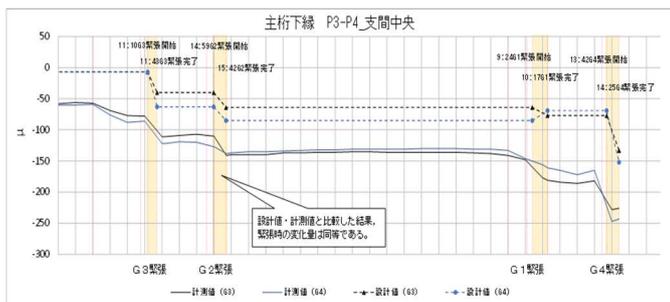


図 12 外ケーブル緊張順序による主桁のひずみ計測結果

8. おわりに

床版打換工の完了後，橋梁付属物工・床版防水工・舗装工などを対面通行規制期間内に実施し，2023 年 11 月に交通規制が解除された。

PC 連続合成桁の床版打換え工事という，施工事例が少なく，短期集中型の工事に対し，発注者である西日本高速道路株式会社をはじめ大阪支店・各協力業者のご支援を頂き，2024 年 5 月に竣功を迎えた（写真 9，写真 10）。

親身なご指導と多大なご協力を賜りました関係者各位に対し，深く感謝の意を表し結びとする。



写真 9 完成（高架下より）



写真 10 完成（橋面より）