

論文・報告

省力化を目的としたPC単純Uコンボ橋の構造検討およびICT技術の活用

～東海北陸自動車道 北谷橋上部工工事～

Structural study of PC simple U composite bridge for labor saving and utilization of ICT technology

松岡 勝彦 *1
MATSUOKA Katsuhiko

岩上 雄飛 *2
IWAKAMI Yuuhi

福原 恵子 *3
HUKUHARA Keiko

澤 めぐみ *4
SAWA Megumi

菊池 亜希子 *5
KIKUCHI Akiko

山田 翔太 *6
YAMADA Shota

本橋は、東海北陸自動車道 白川郷 IC～五箇山 IC 間に計画される橋梁である。当該箇所は対面の暫定 2 車線供用区間であり、安全性やネットワーク信頼性の向上、機能強化による災害時のリダンダンシーの確保を目指し複線 4 車線化が進められている。トンネル坑口に位置する北谷川を渡河し、支保工の設置や現地での主桁製作ヤードの確保が困難であることから、プレキャストセグメント工法による PC 単純 U コンボ橋で計画された。

PCU コンボ橋は、主桁の架設後に桁間と桁内に工場製作の PC 板を敷設し、現場にて場所打ち床版を打込みする合成構造であり、部材のプレキャスト化により現場施工の省力化が図られた構造形式である。しかし、本橋の架橋位置は積雪により冬季の施工が困難であることから、現場作業のさらなる省力化が求められた。

本稿では、省力化を目的とした構造検討ならびに詳細設計とプレキャスト桁製作で実施した ICT 技術の活用事例について報告する。

キーワード：U コンボ橋、省力化施工、中間横桁支間、H29 道路橋示方書、ICT 技術

1. はじめに

東海北陸自動車道北谷橋は、名神高速道路と分岐する一宮 JCT を起点とし、北陸自動車道小矢部砺波 JCT に接続する岐阜県を南北に貫く総延長 185 km の高速自動車道のうち、白川郷 IC～五箇山 IC 間に計画された橋梁である。当該箇所は対面の暫定 2 車線で供用中であり、安全性やネットワーク信頼性の向上、機能強化による災害時のリダンダンシーの確保を目指し複線 4 車線化が進められている（図 1）。

本橋は、トンネル坑口に位置する北谷川を渡河し、支保工の設置や現地での主桁製作ヤードの確保が困難であることから、プレキャストセグメント工法による PC 単純 U コンボ橋（以下、PCU コンボ橋）で計画された（図 2）。

PCU コンボ橋は、主桁の架設後に桁間と桁内（ウェブ間）に工場製作の PC 板を敷設し、現場にて場所打ち床版を打設する合成構造であり、部材のプレキャスト化により現場施工の省力化が図られた構造形式である。しかし、本橋の架橋位置は積雪により冬季の施工が困難であることから、現場作業のさらなる省力化が求められた。

また、本橋は、2017 年（平成 29 年）道路橋示方書（以

下、H29 道路橋示方書）規定の、高速道路橋では初めての PCU コンボ橋の詳細設計であり、コンクリート部材の接合部の要求性能を満足させる必要があった。

本稿では、H29 道路橋示方書規定に対する PCU コンボ橋の断面検討と省力化を目的とした構造検討、詳細設計およびプレキャストセグメント桁製作で実施した ICT 技術の活用事例について報告する。



図 1 架橋位置

*1 川田建設㈱北陸支店工事部 担当部長

*2 川田建設㈱北陸支店工事部工事課

*3 川田建設㈱DX 推進室 担当部長

*4 川田建設㈱DX 推進室

*5 川田建設㈱東京支店技術部技術課 主幹

*6 川田建設㈱北陸支店技術部技術課 主任

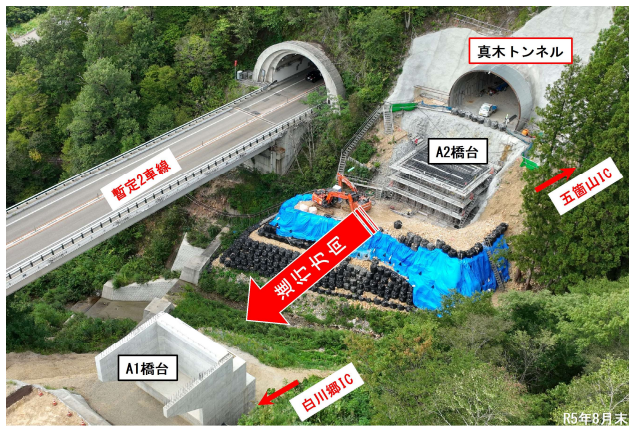


図2 現場状況

2. 工事概要

工 事 名：東海北陸自動車 北谷橋（PC 上部工）工事
 工事箇所：富山県南砺市楮
 発 注 者：中日本高速道路株式会社 金沢支社
 構造形式：PC 単純 U コンボ橋
 床 版：PC 合成床版
 橋 長：50.800 m
 支 間 長：48.300 m
 設計基準：道路橋示方書・同解説 H29.11

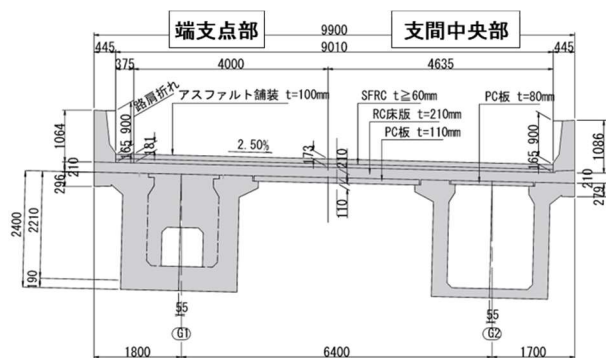


図3 断面図

3. H29 年度道路橋示方書規定に対する検討

本橋は、H29 道路橋示方書規定の初めての PCU コンボ橋の詳細設計であった。同示方書では、昨今のプレキャスト化の流れを受け、コンクリート部材の接合部の要求性能が明確にされた。

(1) 合成桁の接合部の設計

H29道路橋示方書の規定では、プレキャストセグメント桁と場所打ち床版の接合面に発生するせん断応力度の制限値が従来の約70%に低減されたため（道示Ⅲ11.3.2），標準の断面形状では設計が成立しなかった。プレキャストセグメント桁と場所打ち床版の接合面に発生するせん断応力度の低減方法としては、桁高増加・多主桁化・上

フランジ幅の拡幅が考えられる。本設計では上フランジ幅を拡幅し制限値を満足させる断面形状とした。詳細な断面計画を「4. 省力化を目的とした構造検討」にて示す。

(2) プレキャストセグメント桁の接合部の設計

H29 道路橋示方書では、プレキャストセグメント桁の接合部に発生するせん断力に対し、プレストレスによる摩擦抵抗を見込まない規定となったため（道示Ⅲ16.4.1），せん断力の大きい桁端部付近は接合キーの必要個数が最大 10 個と多く、位置合わせの精度が求められた。そこで、セグメント製作は、すでに製作されたセグメントのコンクリート端面を型枠として隣接したセグメントを製作するマッチキャスト方式で行った（写真 1）。この製作方法により、現場での主桁接合を円滑に行うことができた。

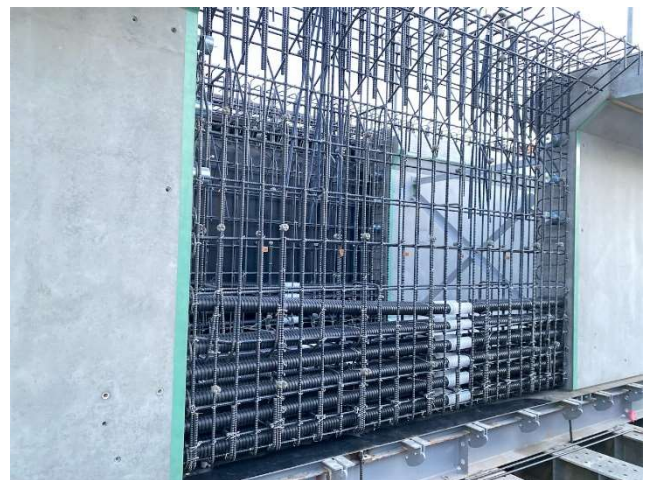


写真1 プレキャスト桁製作状況

4. 省力化を目的とした構造検討

本橋は、プレキャストセグメント桁を架設後、床版と横桁を現場施工で行う必要があるため、作業足場の設置から型枠・鉄筋等の組立、コンクリート打込みの作業に多くの日数を要する。このため、床版と横桁の現場作業にかかる作業の省力化を目的として、以下の構造検討を実施した。

(1) 張出床版と水切り部のプレキャスト化

張出床版長さが変化する場合、プレキャストセグメント桁の断面形状を一定とし場所打ち床版長さを変化させて調整するのが一般的であるが、幅員変化部は型枠や鉄筋組立の施工が複雑となり、多くの作業工数を要する。そこで、張出床版と水切り部をプレキャストセグメント桁と一体として工場にて先行打設することで、プレキャストセグメント桁と場所打ち床版の接合面に発生するせん断応力度を低減するとともに、場所打ち床版と壁高欄を施工する際の底版型枠を不要とした現場施工の省力化を図った（写真2）。



写真2 張出床版と水切り部の一体化

プレキャストセグメント桁は、製作場所から架橋場所までの運搬ルートや運搬車両の条件により寸法と重量が制限されるため、運搬可能な複数のセグメントに分割する必要がある。張出床版と水切り部のプレキャスト化によるセグメント重量が増加することから、主桁間の中間床版支間を基本設計の3.6 mから道路橋示方書で規定される適用支間の最大値である4.0 mに変更することでセグメント重量の低減を図った。

また、外ケーブル配置を考慮した主桁幅とし、ケーブルの偏心量を確保するとともに、外ケーブル配置を考慮した主桁幅とすることでケーブルの偏心量を確保するとともに、ウェブを標準の斜ウェブ形状から垂直ウェブ形状とすることで非対称断面である主桁の安定性の向上とウェブコンクリートの施工性の向上を図った（図4）。

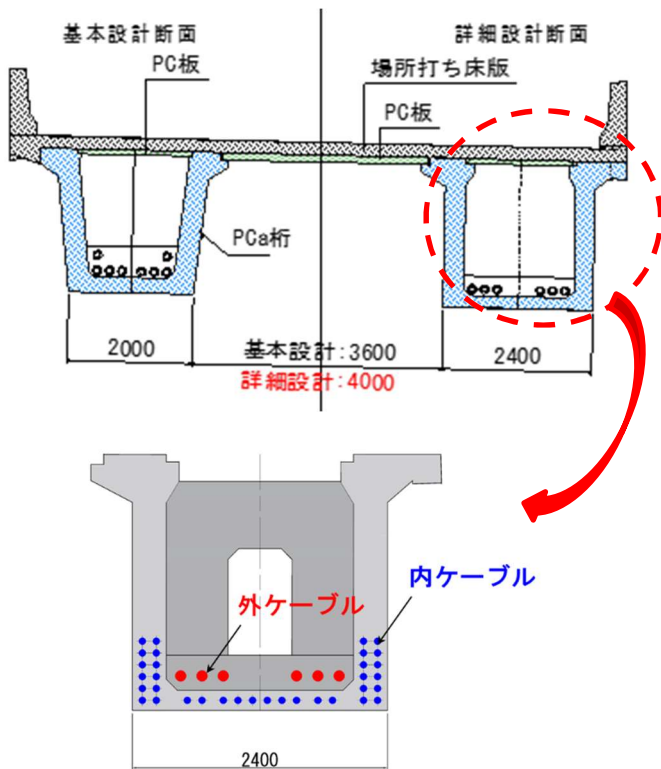


図4 基本設計と詳細設計の断面計画

上記検討した主桁断面幅は最大3.4 mとなるため、図5に示すとおりセグメント積載方向を車両進行方向とする計画とし、セグメント長は車幅制限より2.9 mを基本とした。これらの検討により、寸法・重量ともに運搬可能な制限内におさめることができ、張出床版と水切り部の一体製作を可能にした。

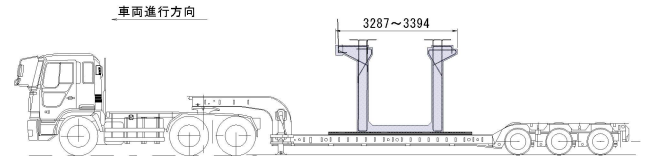


図5 セグメント運搬荷姿

(2) 中間横桁の省略

主桁間の荷重分配機能を担う中間横桁は、張出床版と同様に架設後のプレキャストセグメント桁間での現場作業を要するため、本橋では中間横桁を省略し荷重分配機能をPC合成床版で負担する構造とした。

1) 検討方法

中間横桁を省略することで床版に生じる桁のたわみ差等による付加応力に対する床版の疲労耐久性性能照査を実施した。検討方法は、中間横桁を省略した平面格子解析モデルに対しL荷重偏載荷により床版に発生する付加曲げモーメントを算出し、PC合成床版の設計に考慮した。着目位置は、最も断面力の大きい支間中央とした（図6）。

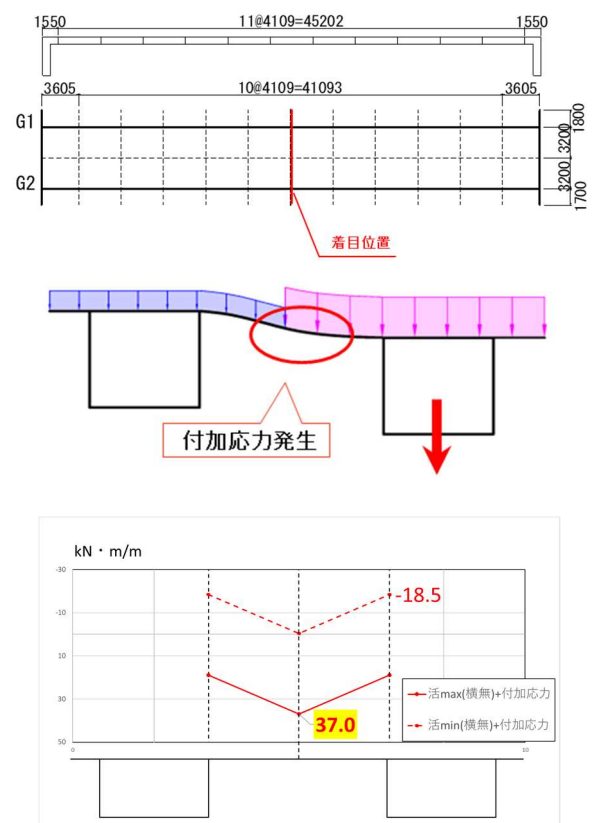


図6 解析モデルと付加曲げモーメント

PC 合成床版の検討では、合成床版厚を道路橋示方書で規定される床版厚を満足する値とし、場所打ち床版のコンクリート設計基準強度、場所打ち床版厚、PC 板厚をパラメータとして表 1 に示すケース 1～3 について床版の疲労耐久性照査を実施した。

ここで、床版の最小全厚は床版支間より $do=230\text{ mm}$ であるが、 15 m を超える間隔で中間横桁を設ける場合は床版の最小全厚を 10% 増加する必要があるため $do=253\text{ mm}$ になる。また、大型車の計画交通量の割増より PC 合成床版厚は $do=320\text{ mm}$ となる。

検討の結果、床版下縁のコンクリート応力度が制限値を満足するケース 2 を選定した。

表 1 検討ケース

合成床版厚：320mm

| | 単位 | ケース 1 | ケース 2 | ケース 3 |
|--------------|-------------------|-------|-------|-------|
| 場所打ち床版Con強度 | N/mm ² | 30 | 36 | 36 |
| 場所打ち床版厚 | mm | 210 | 210 | 220 |
| PC板厚 | mm | 110 | 110 | 100 |
| 合成床版下縁Con応力度 | N/mm ² | -0.03 | 0.17 | -0.31 |
| 制限値 | N/mm ² | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 判定 | | NG | OK | NG |

2) Uコンボ橋に対する中間横桁省略の適用性の検証

道路橋示方書では、中間横桁を省略させた場合の最大支間について T 桁橋が規定されているが、コンボ橋については規定がない。そこで、中間横桁の減少・省略に関する過去の研究成果より本橋の構造成立性を検証した。

PCT 桁橋の中間桁減少・省略に関する研究¹⁾では、支間 35 m の PCT 桁橋と鋼プレートガーダー橋をモデル化した立体 FEM 解析を実施し、輪荷重による中間横桁の有無による影響と PCT 桁橋と鋼橋との床版変形を比較している。比較の結果、中間横桁を省略した PCT 桁橋の床版変形は中間横桁を設置した鋼橋の床版変形よりも小さい結果を示している。

また、PC コンボ橋を対象とした中間横桁の減少化による合成床版への影響に対する安全性の研究²⁾では、支間 45 m のコンボ橋をモデル化した立体 FEM 解析を実施し、輪荷重により PC 合成床版下縁に発生する橋軸直角方向の引張応力度と道路橋示方書で規定されている床版曲げモーメントの設計値を比較している。その結果、中間横桁を 1 本配置したケース（支間 22.5 m ）は解析値/設計値が 71.7% 、中間横桁を省略したケース（支間 45 m ）は解析値/設計値が 75.8% となり十分余裕がある結果を示している。同研究の解析値と設計値の比率を用いて支間 48.3 m の本橋における設計値に対する比率を表 2 に示す。この結果より、支間 48.3 m 規模の解析値は設計値の 76.5% 程度であることと考えられる。本橋において中間横桁を省略した構造は十分安全であることを確認した。

表 2 解析値と設計値の比率

| | 単位 | PC建協研究成果 | | 北谷橋 |
|---------|----|----------|------|------|
| 支間 | m | 22.5 | 45.0 | 48.3 |
| 解析値/設計値 | % | 71.7 | 75.8 | 76.5 |

4. ICT 技術の活用

本工事は、契約当初はICT活用工事の対象ではなかったが、詳細設計のなかで発注者と協議を行い、ICT活用工事として施工を行うこととなった。ICT活用工事とは、ICTの全面的活用を図るため、起工測量、設計図書の照査、施工、出来形管理、検査および工事完成図や施工管理の記録と関係書類について3次元データを活用する工事を指す。

ICT活用工事として、本工事では詳細設計時、プレキャストセグメント桁製作時と施工時にICT技術を活用した取組みを行った。それぞれの活用事例を以下に示す。

(1) 詳細設計における3次元モデルの活用

詳細設計において、各構造物の形状・仕様が決定した後に、作成した図面データを基に橋梁全体の3次元モデルを作成した。モデルは主桁や床版、壁高欄、橋台等の主構造物に加え、主桁内の外ケーブルや排水管、検査路、落橋防止装置等の付属物もあわせて作成した（図7、図8）。



図 7 3次元モデル（A1 橋台間間）

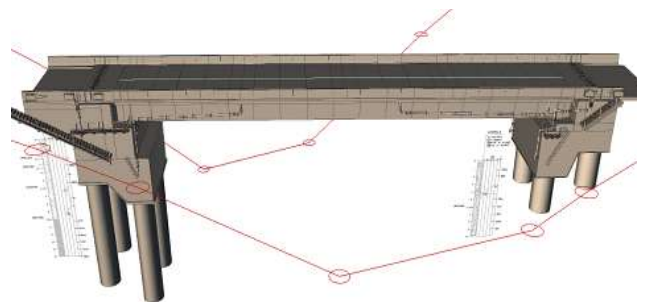


図 8 3次元モデル（全景）

橋梁全体の完成形3次元モデルを作成することにより、複数の2次元図面を重ね合わせた一般的なチェックでは見落としやすい、主構造物と付属物との取り合いや干渉確認を行うことができた。事前に3次元モデルを用いて検査路動線を確認することで、検査路と落橋防止構造が近接し、移動が困難となる箇所を図面修正することができた。

また、3次元モデルを発注者や社内関係者との打合せ時に活用することで、打合せ参加者の中で橋梁全体の具体的なイメージ共有ができ、円滑な合意形成を図ることができた。

(2) 桁製作におけるAR技術活用

プレキャストセグメント桁の製作に先立ち、建設現場向けに開発された専用ARアプリを用い、詳細設計図の情報よりセグメント内の鋼材組立て完了後のCGモデルを作成した(図9)。作成したCGモデルは、市販されているタブレット端末を用いて容易に現実空間に投影することが可能であり、タブレット上でCGモデルを鋼材組立中の主桁に投影し、配置を確認することができる。セグメント製作工場検査の発注者立会の際には、専用ARアプリを使用することで、発注者に視覚的に図面どおりの配置であることを分かりやすく伝えることができた(写真3)。

プレキャストセグメント桁の鉄筋・PC鋼材の組立てにあたっては、CGモデルを用いて作業員への作業手順を説明するとともに、完成形イメージの共有化を図った。

また、鉄筋・PC鋼材の組立て完了後は、実配置状況とCGモデルを重ね合わせて組立て位置のずれや配置漏れの有無を見える化し、リモートにて実施した配筋検査における検査官への説明性を向上でき、円滑な検査の進行に活用できた(写真4)。



図9 セグメント内鋼材組立完了後 CG モデル



写真3 CG モデル投影状況



写真4 鋼材実配置状況と CG モデル重ね合わせ

(3) 主桁架設ステップ動画の作成

本橋のプレキャストセグメント桁架設について、ダブルガーダーによる架設桁架設を採用した(写真5)。施工計画を行うにあたり、施工ヤードや搬入経路の位置関係、機材やセグメントブロックの搬入方法など、考慮すべきことは多岐にわたる。従来は施工ステップごとの2次元図面を用いて打合せを行っていたが、本工事では架設工法決定後に3次元モデルを用いて、架設桁の組立から主桁架設までの流れを表した主桁架設ステップ動画を作成した(図10)。作成した動画は、現場乗り込み前施工会議資料で共有し、架設桁組立・主桁架設にあたって機材の搬入計画や施工上懸念点の洗い出しを行った。組立完了までに想定される課題について、時系列ごとに確認を行ったので、認識の齟齬なくそれぞれの対応を整理してまとめることができた。

主桁動画は施工前周知会でも活用し、実作業を行う作業員と職員との間で施工方法・工程の確認や調整を行った。結果として、組立完了まで滞りなく安全に作業を完了することができた。



写真 5 架設桁架設状況

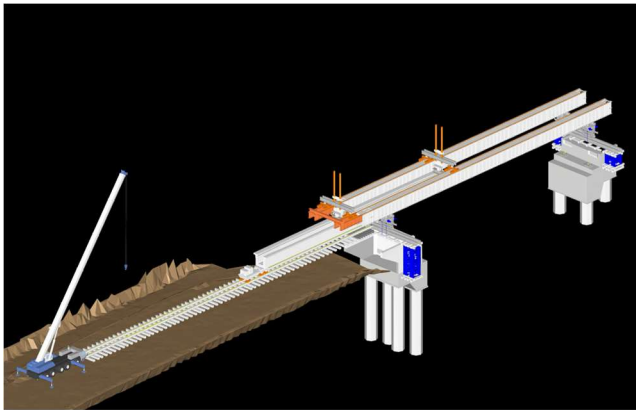


図 10 主桁架設ステップ動画

(4) 点群測量結果を活用した盛土施工

本工事では、追加工事としてA1橋台側面部法面階段設置箇所の盛土施工を行うことになった。施工に先立ち、レーザースキャナーを用いて取得した点群データから作成した現地地盤3次元モデルと、完成形盛土形状データを重ね合わせたデータを作成した（図11）。

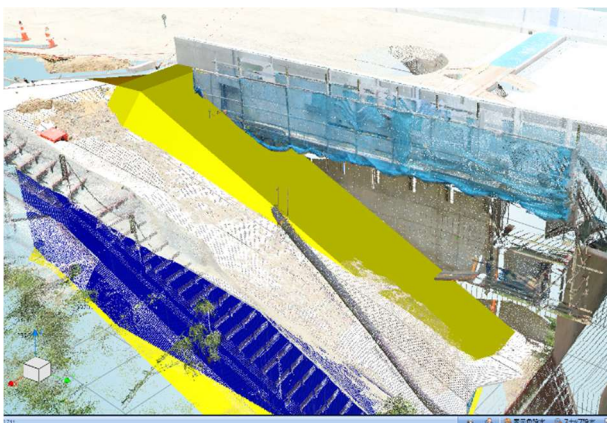


図 11 現地地盤と完成形盛土形状の重ね合わせ

作成した3次元データからは必要盛土量を算出することができるため、過不足ない材料手配を行い、不要な土の搬出入を削減することができた。また、発注者・作業

員との施工前打合せでも3次元モデルを用いることで、情報共有の円滑化による関係者間の合意形成を迅速化することができた。

当社施工期間の期限が迫る中、当初計画に無い作業となったが、ICT技術の活用により、遅滞なく正確な施工を行うことができた。

5. おわりに

本工事で実施した構造検討により、現場作業の省力化を図れたため、下部工施工業者からの引き渡し時期の遅れ等による大きな影響もなく工事を進めることができた。また、ICT技術については、今後の社会の労働人口減少に対してインフラネットワークの維持更新のために必要な技術だと感じた。今後の工事でも、生産性向上に向けてICT技術導入の推進と更なるアップデートを図っていくべきだと感じた。

最後に、本橋の計画・施工にあたり、ご指導・ご支援をいただきました関係各位に本誌面をお借りし感謝の意を表します。本報告が他物件施工の参考になれば幸いです。



写真 6 橋梁全景（完成）

参考文献

- 1) 建設省土木研究所・(社)プレストレストコンクリート建設業協会：コンクリート橋の設計・施工の省力化に関する共同研究報告書（Ⅱ），1996.11.
- 2) プレストレストコンクリート建設業協会：PCコンボ橋における中間横桁の少数化が合成床版に与える影響の検討（案），2008.4.