

# 九頭竜川橋の施工

## — BIM/CIM および ICT を活用した PC 箱桁施工 —

友成 弘樹\*1・三谷 健太郎\*2・若林 良幸\*3・島野 孝則\*4

中部縦貫自動車道に位置する九頭竜川橋は、張出し架設と固定支保工架設で施工された PC4 径間連続箱桁橋である。本工事の施工計画立案の際、張出し架設中の移動作業車とその下の栈橋上を通行する工事車両が接触する懸念があった。また、固定支保工架設で用いるトラス式支保工と周辺施設との干渉ならびにトラス式支保工下を通行する車両の走行時の視認性の低下が懸念された。これらの懸念事項に対して、本工事では BIM/CIM を活用した検討を実施した。また、ICT を活用した省力化・省人化施工として、本工事では移動作業車の移動・設置作業および上げ越し管理に用いる高さ計測の半自動化施工を試行した。さらに、品質管理における省力化・省人化として、複合現実技術 (Mixed Reality technology, 以下 MR 技術) を用いた型枠出来形検査および無人飛行機 (Unmanned Aerial Vehicle 以下, UAV) を用いた配筋検査を試行した。本報告では、これらの検討や試行結果について報告する。

キーワード：張出し架設, BIM/CIM 活用, ICT を活用した省力化・省人化施工, MR 技術

### 1. はじめに

わが国において、建設現場の熟練技術者減少や高齢化および若手労働者の減少による担い手不足の中、国土の持続的なインフラ整備を進め、利用者の安全・安心を確保する必要があることから、建設プロセスにおける省力化・省人化が課題となっている。

この課題を解決するため、国土交通省では情報通信技術 (以下, ICT) を活用した施策「i-Construction」を推進し、建設プロセスの省力化・省人化を図ることで、建設現場の生産性向上に取り組んでいる。

九頭竜川橋は中部縦貫自動車道に位置する、張出し架設と固定支保工架設で施工された PC 4 径間連続箱桁橋である (図 - 1)。本工事では、施工計画の立案時に生じた移動作業車の干渉や国道上の走行車両の走行性に関する懸念事項に対して、BIM/CIM を活用した検討を行った。また ICT を活用した省力化・省人化施工ならびに品質管理における省力化・省人化を目的に、移動作業車の移動・設置作業および上げ越し管理における高さ計測の半自動化や MR

技術・UAV を用いた型枠出来形検査や配筋検査を試行した。

### 2. 工事概要

九頭竜川橋の橋梁諸元を表 - 1、断面図を図 - 2 に橋梁一般図を図 - 3 に示す。

表 - 1 橋梁諸元

|       |                         |
|-------|-------------------------|
| 工事名：  | 九頭竜川橋上部工工事              |
| 構造形式： | PC 4 径間連続箱桁橋            |
| 橋長：   | 273.000m                |
| 支間長：  | 58.6m+86.0m+65.0m+60.3m |
| 総幅員：  | 12.870m ~ 28.394m       |
| 平面曲線： | R=2300m ~ A=400m        |
| 縦断勾配： | 2.000% ~ 4.000%         |
| 横断勾配： | 2.00%                   |
| 架設工法： | 張出し架設 + 固定支保工架設         |



図 - 1 九頭竜川橋 位置図

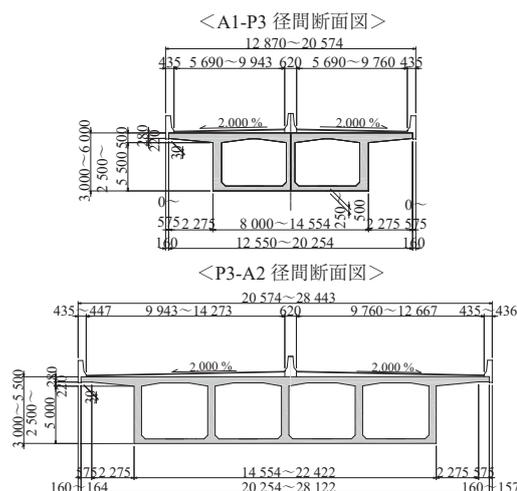


図 - 2 断面図

\*1 Hiroki TOMONARI : (株) IHI インフラ建設 橋梁事業部 技術部 PC 技術グループ  
 \*2 Kentaro MITANI : 国土交通省 近畿地方整備局 福井河川国道事務所  
 \*3 Yoshiyuki WAKABAYASHI : (株) IHI インフラ建設 開発部 開発グループ  
 \*4 Takanori SHIMANO : (株) IHI インフラ建設 橋梁事業部 技術部 PC 技術グループ

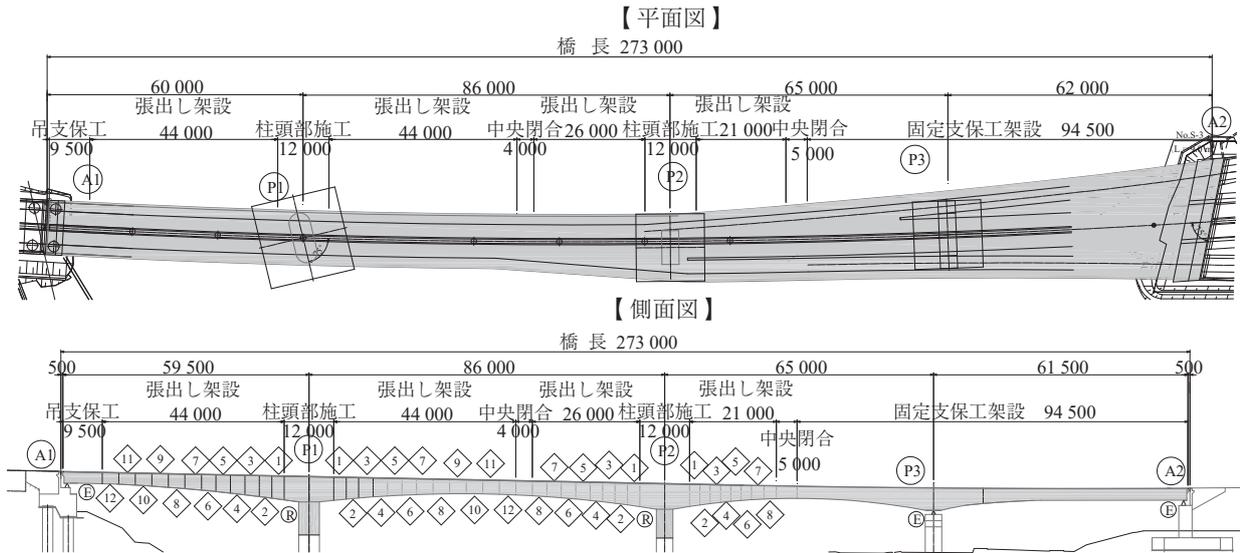


図 - 3 橋梁一般図

九頭竜川橋は PC 4 径間連続箱桁橋である。図 - 3 に示すように、A1 ～ P2-P3 径間を張出し架設、P2-P3 ～ A2 径間を固定支保工架設で施工した。張出し架設のブロック数は P1 橋脚において 12 ブロック、P2 橋脚において 8 ブロックである。また幅員の変化に伴い P3 橋脚から断面が 2 室箱桁から 4 室箱桁へ変化する構造である。P1 橋脚および P2 橋脚はラーメン構造で、P3 橋脚は耐震設計による下部工構造の合理化から、支承構造となっている。

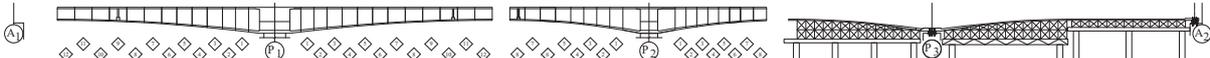
### 3. 施工概要

本工事の施工ステップを図 - 4 に示す。P1 橋脚・P2 橋脚の張出し架設を進めながら、固定支保工区間の施工を行った。固定支保工区間を 3 つの施工区間に分けることで、P2-P3 径間の中央閉合から固定支保工区間の施工完了までの工期短縮を図った。

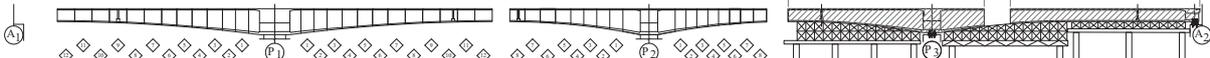
P1 橋脚・P2 橋脚 張出し架設開始



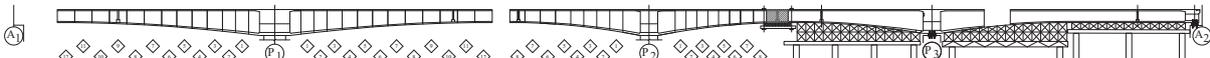
P1 橋脚・P2 橋脚 張出し架設完了、固定支保工区間組立て



固定支保工区間 一次・二次施工区間 施工



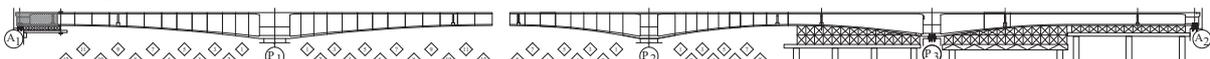
P2-P3 径間 中央併合



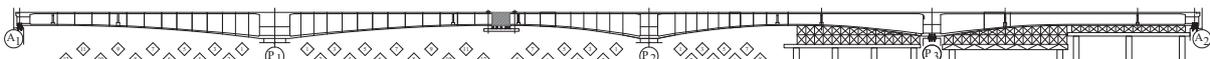
固定支保工区間 三次施工区間 施工



A1 側径間 施工



P1-P2 径間 中央併合



固定支保工区間 支保工解体 構造系完成

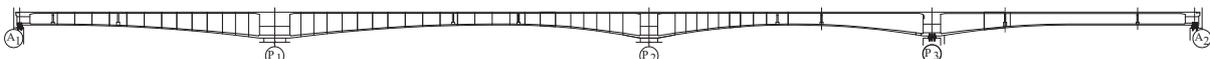


図 - 4 施工ステップ図

## 4. BIM/CIM を活用した施工計画

### 4.1 移動作業車の接触確認および仕様の決定

本工事では、隣接工区においてトンネル施工を行っており、工事車両が上部工近傍に設置された仮栈橋を通過する。A1-P1 径間において、上部工の下に仮栈橋が位置しており、P1 橋脚の張出し架設中に移動作業車（標準型）と仮栈橋を通過する工事車両が接触する懸念が生じた。そこで、現地状況を点群データとして取得し、仮栈橋を含む周辺環境を BIM/CIM を用いてモデル化した。作成したモデル内に上部工と移動作業車の 3D モデルを作成し、図 - 5 に示すように仮栈橋と移動作業車の離隔を確認した。工事用車両として、高さ 3.520 m のアジテータ車を想定して取合いの検討を行った。検討ケースは標準型の移動作業車の作業床を張出し架設が進むにつれて上げていく（クライミング作業）ケースと、低床型の移動作業車でクライミング作業を行う 2 ケースについて実施した。検討結果を図 - 6 に示す。

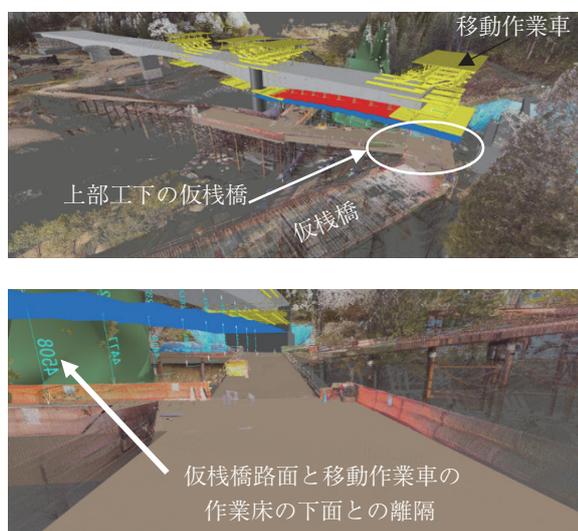


図 - 5 3D モデルで作成した仮栈橋と移動作業車の離隔

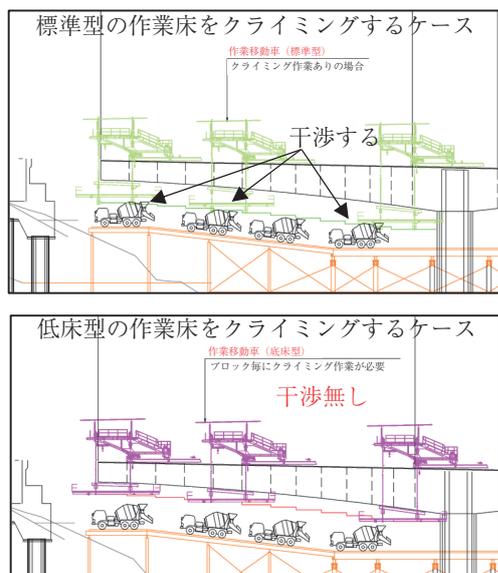


図 - 6 工事車両と移動作業車の取合い検討結果

図 - 6 に示される検討結果より、本工事では低床型の移動作業車をブロックごとにクライミング作業を行うことで施工計画を立案した。

### 4.2 固定支保工区間の支保工構造の検討

本橋梁の P3-A2 径間は固定支保工を用いて施工する。P3-A2 径間は国道を跨いでおり、その国道に対して、上部工は斜角を有する構造であった。当初は、図 - 7 に示すように国道の両側に支柱を立てて、トラス梁を 2.500 m 間隔で配置した支保工で計画していた。しかし、支保工設置範囲に電柱が存在しており、移設に時間を要することで施工工程に影響があることが判明した。また、当初計画では支保工設置区間が長いので、国道を走行する車両の走行性に関する懸念が生じた。そこで、図 - 8 のように橋軸方向のトラス式支保工に変更することを計画した。

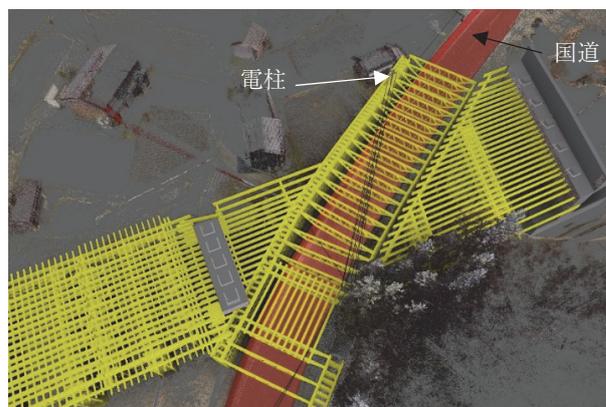


図 - 7 当初計画時の固定支保工平面図

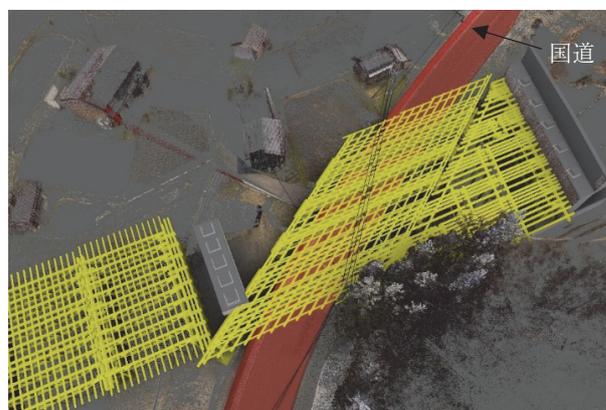


図 - 8 変更した固定支保工平面図

図 - 9 は固定支保工区間を通行する走行車両の視点を示している。BIM/CIM 内で車両を通行させ、その車両からの視点の動画を作成することにより、施主や近隣住民への説明の際に、視認性の違いや運転者が受ける圧迫感の違いを見える化して提示することができ、BIM/CIM を有効に活用することができた。

### 4.3 トラス式支保工区間の出来形精度の向上対策

橋軸方向の支間長 30 m のトラス式支保工を用いて固定支保工区間を施工する計画としたことで、トラス式支保工区間のたわみが大きくなり、上部工の出来形精度の低下が



図 - 9 支保工構造の違いによる走行車両の視認性の確認

懸念された。固定支保工区間の施工は3章の施工概要でも述べたが、一次施工区間から三次施工区間の3区間に分けて施工を計画した。これは一次施工区間の終点側には主方向PC鋼材のカップラー接続箇所が存在しており、三次施工区間を設けることで一次施工区間の緊張作業完了を待つことなく二次施工区間の施工を行い、全体工程を短縮するためである。トラス式支保工区間の施工継目を図 - 10, 11 に示す。鉛直方向に箱桁断面を2つに分けて施工したので、本工事では最大打込み間隔を20日とした合計6分割にて、トラス式支保工区間のコンクリート打込みを計画した。

ここで、分割施工を行うことにより施工済の硬化コンクリートが、あと施工のコンクリート打込み時に抵抗することから、一括施工時のトラス式支保工のたわみ量と異なることが予想された。このことから本橋の固定支保工区間において、各施工段階のたわみを考慮した支保工区間の上げ

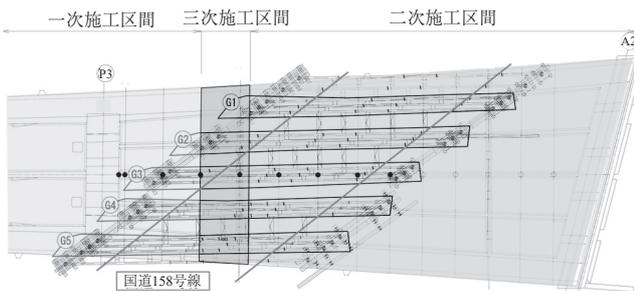


図 - 10 トラス式支保工区間の施工継目 (平面図)

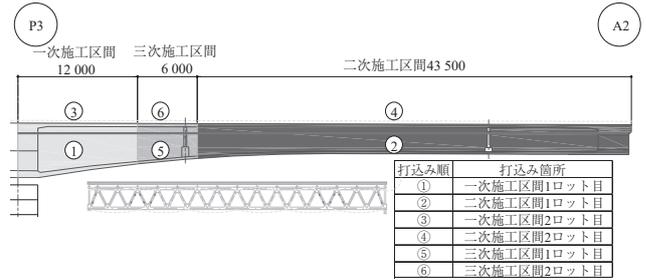


図 - 11 トラス式支保工区間の施工継目 (側面図)

越し量算出が課題であった。図 - 12 にたわみ量算出に用いた骨組解析モデルを示す。トラス式支保工を梁部材としてモデル化し、現場条件と同じ斜角配置とした。硬化コンクリートとトラス式支保工の間には型枠材が存置され一体化していないことから、あと施工のコンクリート死荷重を受ける硬化コンクリートとトラス式支保工は合成梁ではなく重ね梁として挙動すると考えた。

図 - 13 に施工時の解析モデルを示す。図より、2ロット目の打込みでは、コンクリートの曲げ剛性をトラス式支保工の曲げ剛性に加えて施工段階別に支保工のたわみ量を計算した。また、くさび式支保工の変形は微小なため固定条件とした。

計算したたわみ量の妥当性を確認するため、現地において支保工のたわみ計測を行った。表 - 2 にトラス式支保工中央 (図 - 12 矢印部) の二次施工区間における計算値と実測値を示す。表より計算値と計測値に大きな乖離がないことを確認し、出来形精度を向上することができた。

## 5. ICT を活用した省力化・省人化施工

### 5.1 デジタルツインを用いた省力化・省人化施工の試行

デジタルツインとはデジタルの双子を意味し、現実空間の情報を IoT (Internet of Things) などを利用してリアルタイムに仮想空間に送り、現実空間の現場や構造物の状況を

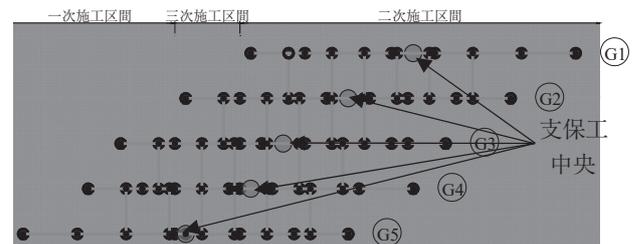


図 - 12 骨組解析モデル

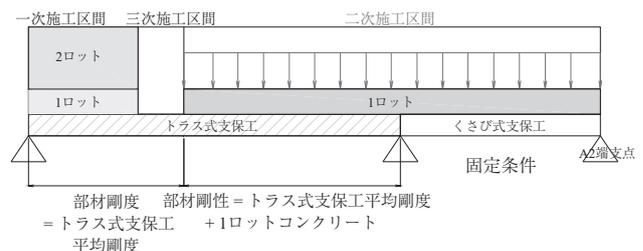


図 - 13 施工時の解析モデル (二次施工2ロット目)

表 - 2 計算値および計測結果

| 測点(桁) | 二次施工1ロット目 |         | 二次施工2ロット目 |         | 合計      |         |
|-------|-----------|---------|-----------|---------|---------|---------|
|       | 計算値(mm)   | 計測値(mm) | 計算値(mm)   | 計測値(mm) | 計算値(mm) | 計測値(mm) |
| G1    | 22.9      | 20.0    | 6.5       | 12.0    | 29.4    | 32.0    |
| G2    | 29.4      | 24.0    | 5.4       | 13.0    | 34.8    | 37.0    |
| G3    | 22.3      | 16.0    | 4.0       | 11.0    | 26.3    | 27.0    |
| G4    | 17.5      | 8.0     | 2.4       | 9.0     | 19.9    | 17.0    |
| G5    | 7.3       | 3.0     | 1.9       | 4.0     | 9.2     | 7.0     |

仮想空間上で再現することである。現場のデータをリアルタイムに取得できることから、仮想空間上で実際の作業や施工工程を再現することができる。

従来の3Dモデルを用いた施工シミュレーションとの違いは、現実空間のデータをリアルタイムに取得し反映できること、その反映されたモデルを用いてシミュレーションを行うことで、現実空間で生じる事象を予測できることである。

5.2 移動作業車の移動・設置における省人化施工

A1～P2-P3 径間では移動作業車を用い張出し架設を行った。従来であれば、移動作業車を移動させる際に移動位置の墨出しやレベルを用いた高さ計測、安全確認のための見張り員と多くの人員が必要であった。本工事では、移動作業車移動時の計測および安全管理の省力・省人化を目的として、P1 橋脚の張出し架設においてデジタルツインの活用を試行した。

(1) トータルステーションを用いた座標管理システム

はじめに、図 - 14 に示すように移動作業車を3Dモデルで作成し、移動作業車に設置したプリズムを自動で追尾するトータルステーション(以下、TS)と連動させ、現実空間の移動作業車の位置や動きを仮想空間上で再現した。次に、現在の位置情報と移動先の位置情報を作業主任者が携帯しているタブレットに表示し、作業主任者は表示された情報に基づいて移動作業車を移動・設置した。写真 - 1 に座標管理システムの試行状況を示す。

(2) 画像認識・画像解析技術を用いた安全管理システム

現地に設置したカメラ画像から画像認識技術(AI認識)を用いて、仮想空間上で作業者を認識し作業者立入認識ラインを越える場合、移動作業車の作業中であると判定し、周知する警報装置が作動するシステムを構築した。また、画像解析技術(座標)を用いて、移動作業車のフレームに設置した基準マーカプレートの変位を仮想空間上に取得す

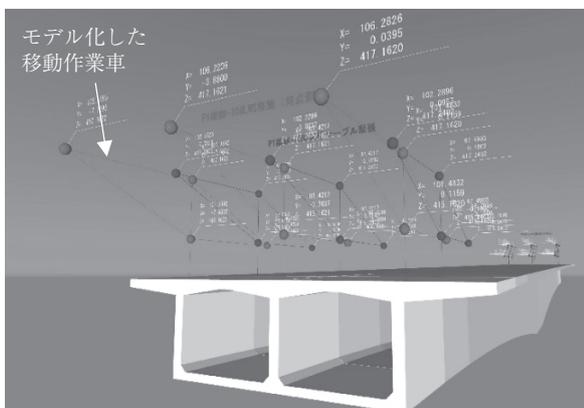


図 - 14 仮想空間でモデル化した移動作業車図

ることで(写真 - 2)、移動作業車の傾きや倒れの変位をリアルタイムに監視し、移動作業車の異常な変位の検知を知らせる警報装置と連動する安全管理システムを構築した。

これらのシステムにより、移動作業車の移動・設置作業における位置管理および安全性の確保を、省力化・省人化施工にて行うことが可能であることを確認した。図 - 15 に張出し架設1回あたりの所要時間の比較図を示す。計測作業や安全管理も含め人数および作業時間を22%(192/245分)縮減することができた。

5.3 上げ越し管理における省力化・省人化計測

張出し架設における上げ越し管理は、出来形品質の良し悪しを左右する重要な業務である。上げ越し管理に用いる高さ計測は、移動作業車の移動後、張出しブロックのコンクリート打込み後およびPCケーブル緊張後のタイミングで、各張出しブロックの先端位置で行う。張出し架設が進



写真 - 1 座標管理システム試行状況

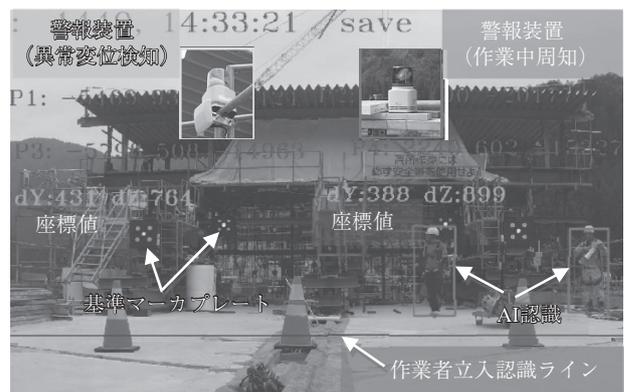


写真 - 2 画像認識・解析例

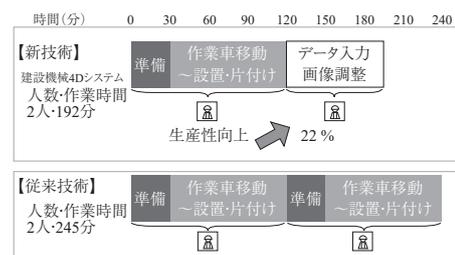


図 - 15 移動作業車の省力・省人化施工の比較図

むにつれて計測箇所数は増えるので、計測には人数・時間を要する。高さ計測の自動化は省力・省人化に繋がることに加え、計測したデータをデジタルツインで活用することで、移動作業車の移動、移動後の高さ調整、主桁天端面の最終高さ調整など、張出し架設の一部作業の自動化を実現できる可能性を有している。本工事では従来のレベルを用いた計測と自動視準トータルステーション（以下、自動視準 TS）を実施することで、高さ計測の自動化の精度を検証した。図 - 16 に本工事での高さ計測位置を示す。

レベルを用いた計測では各ブロックにおいてコンクリート打込み後、PC ケーブル緊張後、移動作業車移動後の施工段階で高さを計測した。自動視準 TS を用いた計測では、A1 側山間部に設置した自動視準 TS より各ブロックの張出し床版に設置したプリズムを視準し、各ブロックのコンクリート打込み以降 1 時間毎に高さを計測した（図 - 17）。

図 - 18 に P1 橋脚のレベルと自動視準 TS による計測結果を示す。縦軸は各ブロックの打込み後から最終ブロック緊張後までのたわみ量を示し、横軸はブロック位置を示す。いずれの結果も計算値に対して現場で設定した管理値  $\pm 16 \text{ mm}$  (国交省規格値  $\pm 20 \text{ mm} \times 80\%$ ) に収まっているが、5BL 以降自動視準 TS の計測結果はレベルおよび計算値とは異なる結果となった。これはレベルと自動視準 TS の計測位置が幅員方向に異なること、P1 橋脚が斜角を有していることなどが要因であると考えられるが、本施工で得ら

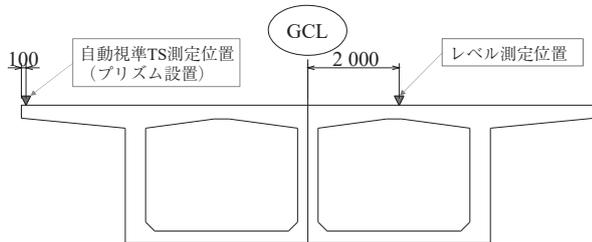


図 - 16 レベル計測と自動視準 TS での計測位置

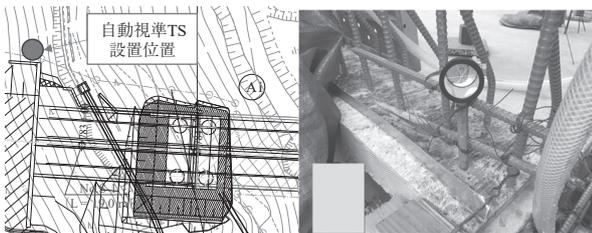


図 - 17 自動視準 TS 設置位置およびプリズム設置状況

れたデータでは、明確な要因を特定できなかった。本工事では、自動視準 TS に計測位置の制約があり、断面中央付近の計測を行うことができなかった。今後の施工では、断面中央位置にて計測し、比較検証する予定である。

5.4 品質管理における省力化・省人化の試行

(1) MR 技術を用いた型枠出来形検査

型枠出来形検査の省力化を目的として、MR デバイスを用いた型枠出来形寸法の計測を試行した（写真 - 3）。この計測は、型枠出来形の 3D モデルの情報（写真 - 3 中の黒点線）と連動し、MR デバイスが映像から構造物を 3D 形状として認識して 3D メッシュデータ（写真 - 3 中の白線）を作成する機能を活用して計測した。現地でもリアルタイムに得られる映像から、MR デバイス内で現実空間に仮想の 3D メッシュを作成し、メッシュによって生成されるエッジ間の距離を自動計測することで、現実空間の型枠寸法計測が可能となった。計測時にエッジと黒点線が合致することを確かめることで、計測位置と計測断面が同じであることを確認した。以前試行した MR 技術では、MR デバイスの位置情報の読み込みを 1 カ所の基準で行っていたので、基準から 30 m 離れると現実空間と MR デバイスの表示に 50 mm ほどの誤差が生じるという課題があった。今回 MR デバイスにプリズムを設置し、TS と連動させることで、MR デバイスの位置情報を随時更新する手法を用いた。その結果、30 m 離れても誤差を 5 mm 以下に抑えることができた。

従来の検査では、巻尺やスケールを使用して複数人で計測し、高所など不安定な場所で寸法計測を行っていた。今回の試行では、MR デバイスを装着した職員が 1 人で計測作業を行い、高所などの不安定な場所に移動することなく、計測を完了することができた。また、今回の試行での計測



写真 - 3 MR 技術を用いた型枠・出来形検査状況

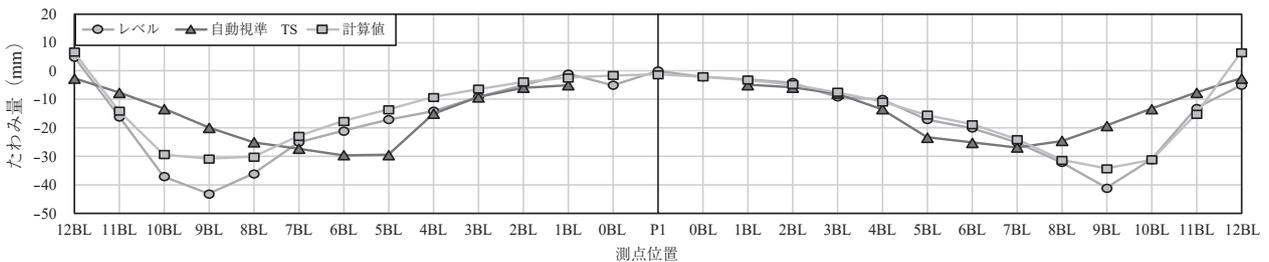


図 - 18 レベルと自動視準 TS による計測結果 (P1 橋脚最終ブロック緊張後)

箇所はTSから13mほど離れた場所で行っており、誤差1mm程度と高精度の計測結果が得られた。図-19に従来の検査と今回の試行での人数・作業時間の比較図を示す。準備から検査当日・検査帳票の自動作成までを含めて、従来方法から人数・作業時間を約26% (53/72分) 縮減できた。また、省力化・省人化の効果に加えて、計測精度の向上および作業安全性の向上も確認できた。

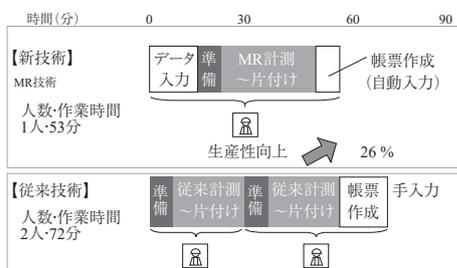


図-19 型枠検査における省力化・省人化結果比較図

### (2) UAVを用いたカメラ撮影による配筋検査

従来、配筋検査は現地において複数人で手計測にて行っているため、検査には多くの人数と時間を費やしていた。本工事では、配筋検査の省力・省人化を図るため、UAVに搭載したデジタルカメラによって撮影したデータを用いて、配筋検査を試行した。試行対象は、側径間の上床版の鉄筋とし、橋軸方向10m×橋軸直角方向13mの範囲で配筋の撮影を行った。UAVの撮影高度は、撮影画素と撮影面積の相互関係から、高さ10mで撮影することとした。写真-4にUAVを用いた配筋撮影状況を示す。撮影精度を向上するために、計測範囲に12個の基準マーカと1枚の校正プレートを設置し、実際の撮影高度から基準マーカと校正プレートを撮影して、位置座標の基準データを作成した。撮影した画像から立体形状を復元するソフトウェアを利用して、位置情報をもたせた3Dモデルを作成した。これを、あらかじめ作成した配筋3Dモデルと重ね合わせることで、図面と実配置での鉄筋配置間隔や本数の差異を確認した。

図-20に本工事で試行したカメラ撮影画像による配筋検査と従来の手計測での配筋検査での作業人数・作業時間の比較結果を示す。事前準備から検査帳票の作成までの作業において、従来の配筋検査の方法より作業時間を約29% (217/306分) 縮減できる結果となった。基準マーカ

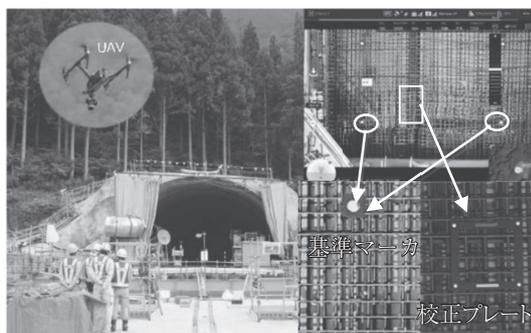


写真-4 UAVを用いた配筋撮影状況

と校正プレートを用いることで撮影精度は向上し、今回の試行では撮影画像の配筋と実際の配筋では誤差は1mm以下と高精度の計測結果を確認できた。現時点では平面限定に対応している手法であり、鉄筋かぶりや断面方向の計測にも対応させることが、今後の課題である。

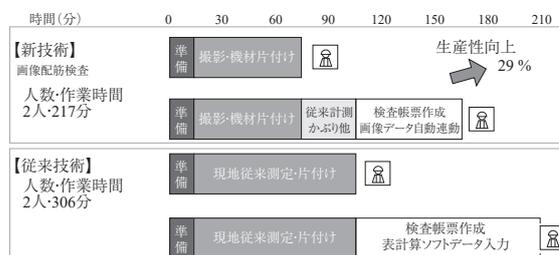


図-20 配筋検査における省力化・省人化結果比較図

## 6. おわりに

本稿ではPC箱桁施工において、BIM/CIMを用いた検討およびICTを活用した施工計画ならびに省力化・省人化施工について報告した。これから建設業界は人材不足に陥ることが予想されることから、現場作業の省力化・省人化が喫緊の課題である。この課題に対して、デジタルツイン、MR技術、UAVによるカメラ撮影を取り上げ、省力化・省人化の効果を確認した。

一方で、今回試行した内容は使用機材の専門技術者を配置することで実現しており、現場従事者だけで容易に扱えるようなシステムの構築が今後の課題として考えられる。

最後に、本工事は、予定どおり令和元年12月に完成することができた(写真-5)。本試行の実施にあたり、ご指導、ご協力をいただいた関係各位に、深く感謝の意を表します。



写真-5 九頭竜川橋 完成写真

### 参考文献

- 1) 若林, 三谷, 赤松, 保田: BIM/CIMを活用したPC箱桁橋梁における労働生産性の向上について, 第29回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.481-484, 2020
- 2) 島野, 三谷, 友成, 富田: 中部縦貫自動車道 九頭竜川橋の施工報告, 第29回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.607-610, 2020

【2020年11月19日受付】