

BIM/CIM を活用した橋梁工事における 生産性の向上・品質管理の高度化

BIM/CIM-Based Bridge Construction Productivity Improvement and Quality Control Enhancement

若林 良幸 株式会社 IHI インフラ建設 開発部開発グループ 課長
赤松 輝雄 株式会社 IHI インフラ建設 開発部 部長

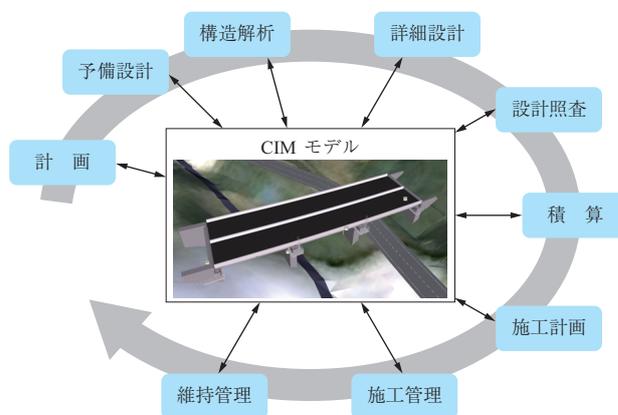
近年、BIM/CIM は建設現場の生産性向上や品質管理の高度化などを目的として、導入が推進されている。BIM/CIM は、属性情報を含む 3D モデルのデジタル表現であり、時間軸を加えた施工計画や工程進捗管理など事前シミュレーションも可能である。BIM/CIM モデルと情報通信技術を組み合わせることにより、現場作業の品質支援・遠隔管理の試行も報告されている。今回、複合現実、トータルステーション測量、画像解析の各技術活用により現場で効果の確認を行った。本稿ではその内容について報告する。

In recent years, the introduction of BIM/CIM (Building Information Modeling/Construction Information Modeling) has been promoted for the purpose of improving productivity at construction sites and improving quality control. BIM/CIM is a digital representation of a 3D model that includes attribute information, and it is also possible to carry out pre-simulations such as construction plans with time axis and process progress management. A trial of quality support and remote management of field work has been reported that combines a BIM/CIM model and Information Communication Technology. This time, the effects were confirmed on-site by using mixed reality, total station surveying, and image analysis technologies. In this paper, we report the details.

1. 緒 言

我が国においては、建設現場の熟練技術者減少や高齢化、若手労働者の減少による将来の担い手不足の問題など、現場力が低下することが喫緊の課題となっている。現在、国土交通省では、ICT (Information and Communication Technology, 情報通信技術) を活用した施策を建設現場に導入することにより、建設生産システム全体の生産性向上を図り、魅力ある建設現場を目指す i-Construction⁽¹⁾ が推進されている。近年、建設現場の生産性が上がらない理由の一つとして、建設全体のプロセスの効率化の遅れや労働環境が悪く、作業が思うように進まないことなどの問題も存在する。これらの問題を解決する必要があることから、建設現場には CIM (Construction Information Modeling) を導入し、計画・予備設計・設計・施工から維持管理に至るまでの統一したモデルを相互運用して、生産性向上や品質管理の高度化に取り組んでいる。CIM モデルの相互運用システムの例⁽²⁾ を第 1 図に示す。

今後は、プロジェクト実施において ICT を活用するなど、最新の技術を導入し、さらなる効率性を上げることも必要である。そこで、本稿では、湖陵多伎道路多伎 PC 上



第 1 図 CIM モデルの相互運用システムの例⁽²⁾
Fig. 1 Example of CIM model interoperability system⁽²⁾

部工事 (島根県) および大野油坂道路「九頭竜川橋」上部工事 (福井県) において、BIM/CIM (Building Information Modeling/Construction Information Modeling) と ICT を活用した取組みについて報告する。

2. 多伎 PC 上部工事における生産性向上技術への取組み

2.1 CIM を用いたフロントローディング

フロントローディングとは、初期の工程に時間を掛け事

前に集中して検討を行うことで、後工程で生じそうな手戻りを未然に防ぎ工程の短縮などを図ることである。以下に、本工事で CIM を用いて実施したフロントローディングについて説明する。

2.1.1 CIM モデルの作成および干渉チェック

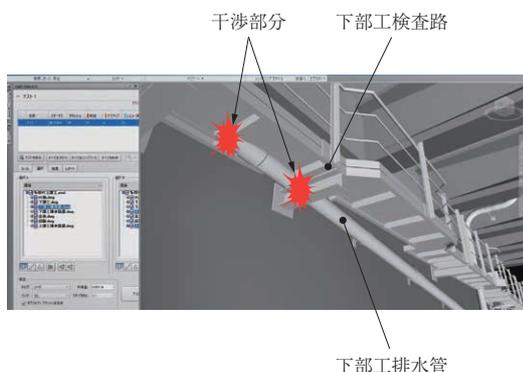
第 2 図に 3D モデルに変換した画像を示す。CIM の専用ソフトウェアを利用して、発注時の二次元図面から構造物の 3D モデルに変換した。この 3D モデルに施工工程（時間軸）、橋体および付属物の属性情報を付与して、4DCIM モデルを作成した。4DCIM モデルは、各工種における組立や解体などの順序を同時に確認できることから、このモデルを使って橋体および付属物モデルの干渉チェックを実施した。第 3 図は、排水管と検査路が干渉している事例⁽³⁾を示したものである。このように、設計照査時における図面間の不整合の確認や設計の見直しなどによる時間的・経済的ロスの発生を防止でき、現場作業の中断もなく施工の効率化が図れた。なお、CIM モデルは視覚的に分かりやすくイメージが理解できることで、協議、打合せ時間の短縮も可能となった。

2.1.2 4DCIM モデルを使用した施工計画

施工計画における工期設定は、工期内に適切な日数およ



第 2 図 3D モデル変換の様子
Fig. 2 3D model conversion



第 3 図 付属物の干渉チェックの事例⁽³⁾
Fig. 3 Interference check of accessories⁽³⁾

び進度で、安全・品質・原価を管理しながら適切に施工するためのものである。従来の表計算ソフトウェアを使用した工程図表などは、全体の大まかな施工手順は確認できたが、計画どおりに作業できるかは不明であった。そこで、施工シミュレーションにより、設計段階から施工条件も踏まえて可視化することで、建設現場の生産性向上に効果があることから、以下の内容について実施した。CIM モデルは、橋体の構造物モデルと周辺地形モデルを重ね合わせて作成した。また、架設工程をシミュレーションするため揚重機や架設機材の 3D モデルを別途作成し、このモデルに施工工程を付与して、4DCIM モデルとした。第 4 図に 4DCIM による架設工程シミュレーション⁽²⁾、⁽³⁾を示す。また、第 5 図に、この 4DCIM モデルを工事関係者や現場作業員との打合せに使用している様子を示す。事前に作業内容を可視化することで、作業の効率化につながり、全体施工日数を約 12% 短縮できた。また、揚重機スペースの確保、架設術と車道の離隔確認などにも活用し、安全性を確保することができた。さらに、周辺住民の工事説明会に使用することで、参加者の工事への理解度を深める効果が確認された。

2.1.3 4DCIM モデルによる進捗管理

施工管理では、日々の作業時間短縮が課題であり、現場での手戻りは工程遅れの要因となる。特に、夜間作業の遅



第 4 図 4DCIM による架設工程シミュレーション⁽²⁾、⁽³⁾
Fig. 4 4DCIM construction process simulation⁽²⁾、⁽³⁾



第 5 図 4DCIM による関係者間打合せの様子
Fig. 5 Meetings between the parties using 4DCIM

これは周辺住民や関係者に大きな影響を与えるため、確実な施工が重要である。そこで、日々の工程管理に対する機能をもたせ、進捗状況をグラフ化し、工事の進捗をこの4DCIMにより管理した。また、定期的にドローンを使用して空撮し、工事区域全体について計画工程と実工程のずれを把握し、進捗が遅れている項目は作業員や機械などリソースを再配置することで、作業の遅れを取り戻すことができた。第6図に4DCIMによる工程管理^{(2),(3)}を示す。

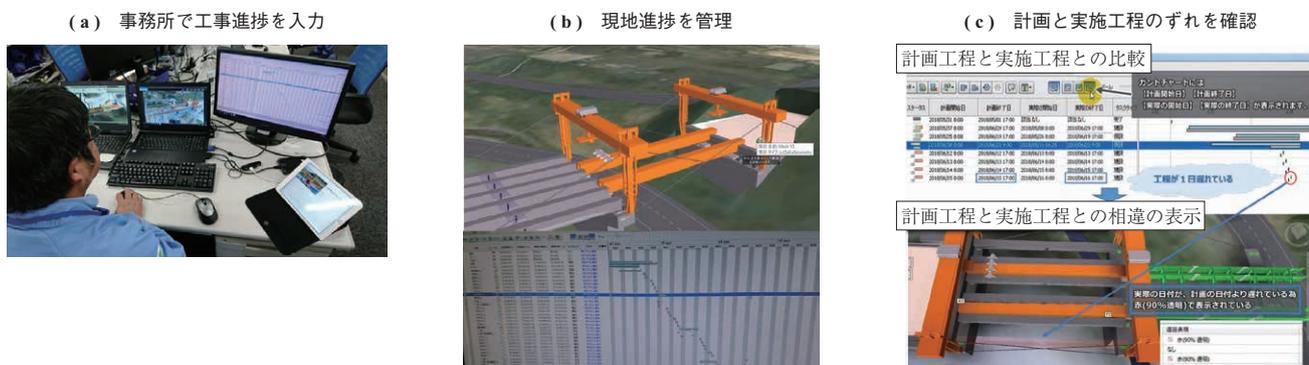
2.2 CIMの現場活用

2.2.1 CIMとMR技術による生産性向上への取り組み

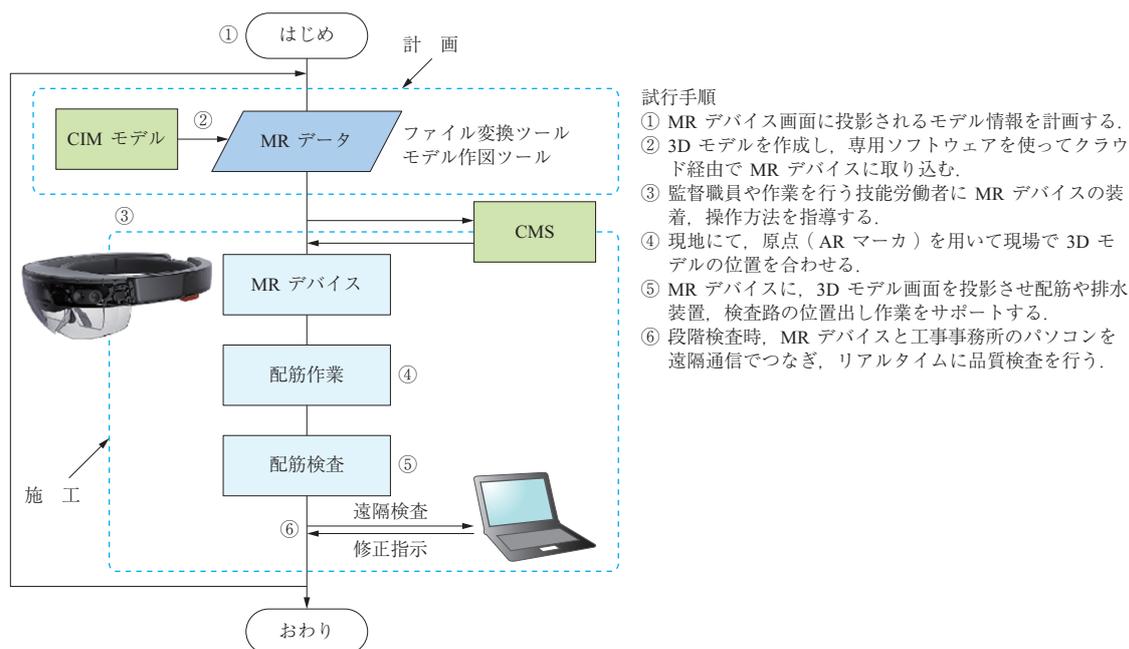
CIMモデルと複合現実(Mixed Reality: MR)技術を連携させることで、生産性向上に取り組んだ。MR技術とは、バーチャルモデルと現実空間などを重ね合わせ、現実世界と仮想モデルを同一空間上に表現する技術である。

この試行に当たっては、省人化や作業時間短縮による効率化をどこまでできるかが課題であった。また、現場での3Dモデルと作業空間を重畳させる方法、段階(配筋)検査時の遠隔管理方法について現場で試行した。

MR技術の導入は、Windowsで動作するグラフィックコンピュータであるMRデバイスを使用した。場所の位置や視野の向きは、MRデバイスに搭載されたデプスセンサという赤外線を利用し、作業場所をリアルタイムに3Dスキャナで割り出す仕組みである。今回、専用のソフトウェアを使いCIMのモデルデータを位置や縮尺を合わせて現実空間に投影した。遠隔で3Dデータを共有するため、クラウド上で管理できるコンテンツマネジメントシステム(Content Management System: CMS)を利用した。第7図にMR技術試行フローを示す。



第6図 現場での4DCIMによる工程管理^{(2),(3)}
Fig. 6 Process management using 4DCIM in the field^{(2),(3)}



第7図 MR技術試行フロー
Fig. 7 MR technology trial flow

第 8 図に、MR デバイスを使用した配筋作業のサポート状況⁽³⁾を示す。現地での作業時間を計測した結果、従来のマーキングする作業と比較して、配筋、橋梁付属物のアンカーの位置出しの作業時間を約 20%縮減できた。第 9 図に配筋遠隔管理⁽³⁾を示す。段階検査時に図面の配筋間隔や本数を可視化させ、デバイスをとおして現地の状況をリアルタイムに工事事務所と共有することで、監督職員、品質証明員による検査時間の短縮ができた。

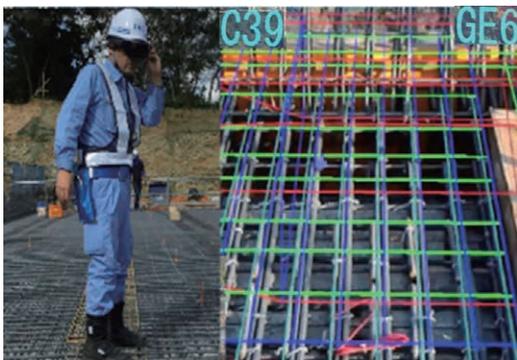
2.2.2 CIM と TS 測量技術による生産性向上への取り組み

トータルステーション（以下、TS）測量技術の活用にあたっては、TS とタブレット端末とを連携させたシステムとした。第 10 図に試行フローを示す。また、第 11 図に測量技術システムの概要を示す。レーザー光でプリズム XYZ 標点を自動で追尾しながらリアルタイムに座標を計測する。そのデータは無線 LAN 経由で、毎秒 20 回の頻度でタブレットに取得データを送る。この位置出しシステムは、CIM モデルに直接測点ポイントを指定でき、CIM モデルと TS とのデータを統合して表示させることができる。CIM モデル上のプリズム標点の位置を確認しながら、

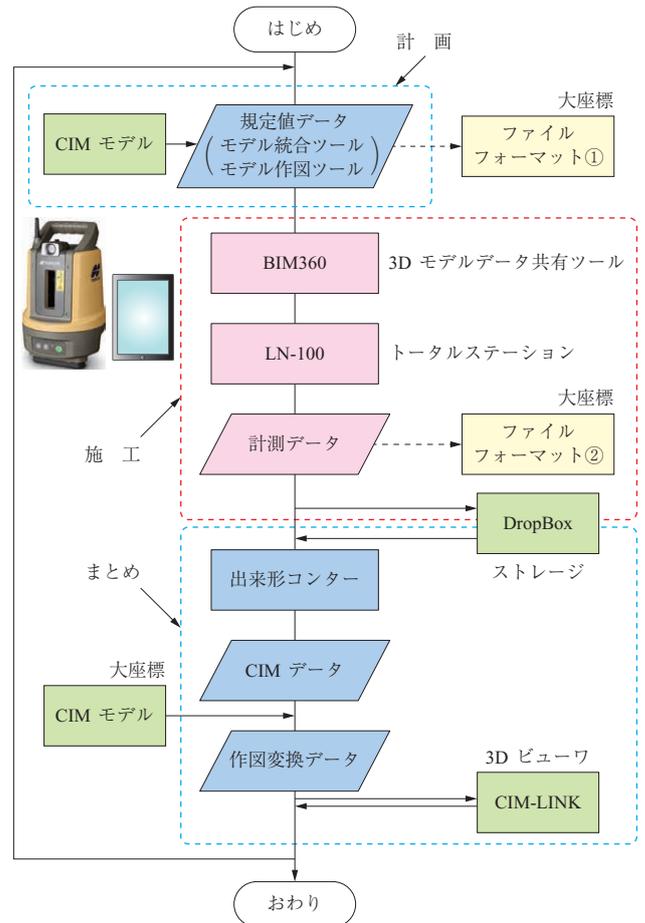


第 8 図 配筋作業のサポートの状況⁽³⁾
Fig. 8 Support for bar arrangement work⁽³⁾

(a) MR デバイスを使用した配筋検査の状況



第 9 図 現場と事務所の配筋遠隔管理システム⁽³⁾
Fig. 9 Remote management of reinforcement in field and office⁽³⁾



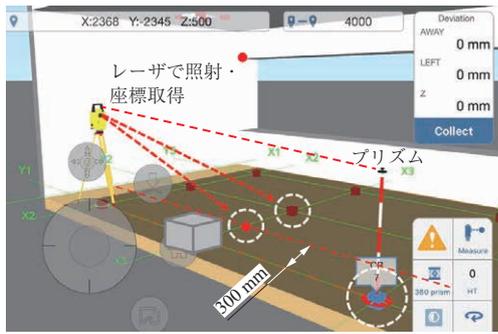
第 10 図 TS 測量技術試行フロー
Fig. 10 Flow of TS surveying technology trial

計測者を次の測点までスムーズに XYZ 座標で案内する。第 12 図に現場での TS 測量の様子を示す。このシステムを使用することで、現地で位置出し作業をなくすことができ、従来の 2 人から 1 人での計測作業が可能となった。今回の試行において、次の効果を確認できた。

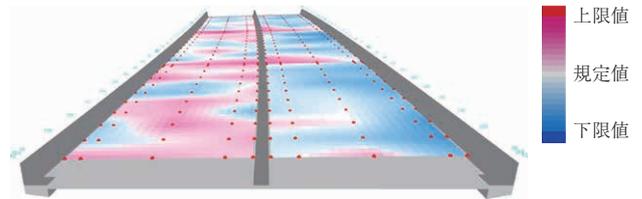
(1) 従来の TS 測量技術と比較した結果、計測作業を人・作業時間について約 60%縮減できた。

(b) 工事事務所での遠隔管理の状況





第 11 図 TS 測量技術システム概要
Fig. 11 TS surveying technology system



第 13 図 床版仕上がり出来形コンター
Fig. 13 Contours of finished flooring

- (2) 計測精度についても従来とほぼ変わらぬ誤差であり、省人化、作業時間短縮と精度維持を実現できた。
- (3) 橋面の出来形を管理するために、出来形コンターソフトを使用し、設計値からの誤差を色分け表示し、橋面出来形高さが規格値内であることが確認できた。

第 13 図に出来形コンターの例を示す。

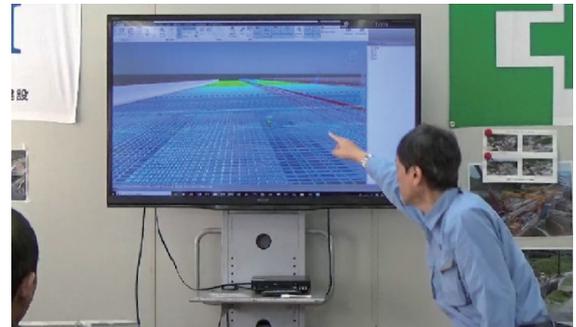
2.3 CIM を活用した品質管理の高度化技術への取組み

2.3.1 CIM モデルを使用した作業計画

配筋の 3D モデルを作成し、現場作業員との組立作業の打合せに使用した様子を第 14 図に示す。立体的にあらゆる角度から事前に作業内容を可視化することで、鉄筋組立順序や鉄筋干渉位置などが事前に把握でき、組立への理解度を高めて手戻りもなく配筋精度や鉄筋かぶりの確保などができたことで、作業の効率化につながる事が確認された。今回は、比較的熟練作業員を必要としない配筋作業に用いたが、複雑な構造物や過密鉄筋となる構造物では、さらなる効果があると考えられる。

2.3.2 CIM と TS 測量技術による品質管理の高度化

コンクリート構造物の品質確保のためには、打設中の打重ね部は所定の時間内に打込みを行う必要がある。また、橋梁は床版出来形の良否によって、将来の耐久性に大きく影響を受けることがある。第 15 図に TS による床版品質管



第 14 図 現地での品質 CIM 活用
Fig. 14 Utilization of local quality CIM



第 15 図 TS による床版品質管理^{(2),(3)}
Fig. 15 Floor slab quality control using TS^{(2),(3)}

理^{(2),(3)}を示す。今回の工事では、4DCIM モデルと打設時の測量データを連携させることで、これらの課題への対策を試みた。また、打設時は作業員が混雑するため直接プリズムの視準が困難であり、プリズムを必要としない(ノンプリズム)TSを採用した。具体的には以下の管理を行った。

(a) 壁高欄型枠 TS 測量



(b) 床版出来形 TS 測量



(c) タブレット端末末位位置情報表示例



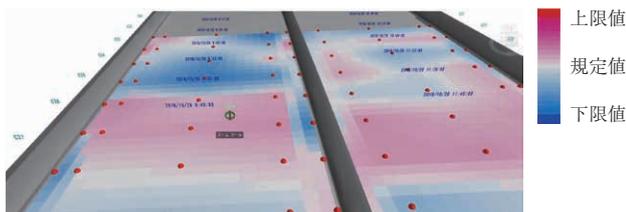
第 12 図 現場での TS 測量の様子
Fig. 12 On-site TS surveying technology

- ① ノンプリズムの自動追尾 TS により、打設中の床版出来形は線形ラインごとに打重ね時間は定めた区画ごとに計測し記録する。
- ② リアルタイムに床版面の高さと打重ね時間の結果を、計測技術者がもつタブレット端末に送信する。
- ③ 打設時から完了までの計画値と実測値との差を確認しながら、コンクリート打設作業を進める。なお、仕上がり高さが計測中に大きく外れる箇所は作業員に再仕上げを指示する。

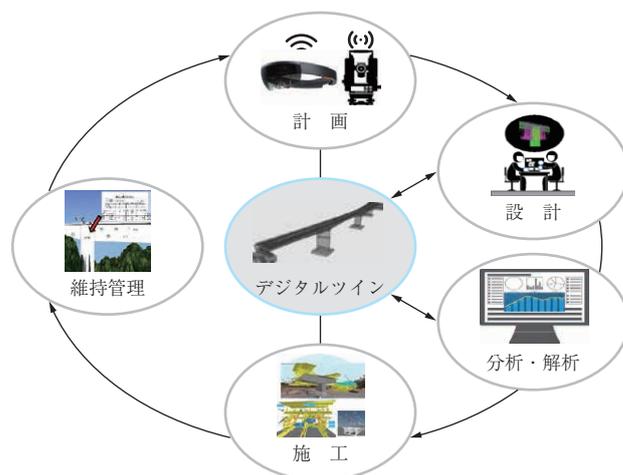
第 16 図に、床版の仕上がり高さと計画値との差および打設時間を CIM モデル上に表示させた結果⁽²⁾、⁽³⁾を示す。床版の設計高さに対して、+ 側の差を赤色で、- 側を青色のコンターで示し、床版の打重ね時間を表示した。打設中に、床版の出来形および打重ね間隔（時間）をリアルタイムで管理することにより、床版の仕上がり高さと打重ね時間を満足することができた。

3. 「九頭竜川橋」上部工事における生産性向上技術への取組み

デジタルツインとはデジタルの双子を意味し、フィジカル空間（現実）の情報を IoT などを活用してリアルタイムにサイバー空間（仮想）に送り、サイバー空間内にフィジカル空間の現場や建物など構造物の環境を、そっくり再現することである。このサイバー空間上に物理世界の情報をすべて再現することから、ツインと表現されている。このように、デジタルツインは、取得したデータをパソコン上に再現し、計画、設計、分析・解析などを行いながら施工から維持管理まで、さまざまなシーンで活用できる。第 17 図にそのワークフローを示す。現在、このデジタルツインが注目されるようになったのは、IoT の普及により、データを自動的にリアルタイムに取得し続けることが可能で、デジタルツインはサイバー空間上に実際の作業や施工工程などを再現したシステムといえる。従来の静的なシミュレーションにとどまらず、各工程がリアルタイムに連動されることで、もう一つの現実をコンピュータ上に作



第 16 図 リアルタイム管理出来形コンター⁽²⁾、⁽³⁾
Fig. 16 Real-time management of finished contours⁽²⁾、⁽³⁾



第 17 図 デジタルツインワークフロー
Fig. 17 Digital twin workflow

り出すことができる。また、従来のシミュレーションのシステムとの違いは、デジタルデータをリアルタイムに取得でき、将来の施工自動化を見据えた人工知能（AI）の構築などに与える教師データを集積できることである。以下に、本工事で実施したデジタルツインの活用について説明する。

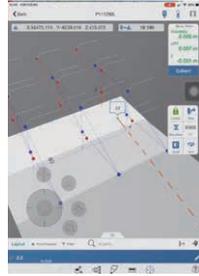
3.1 建設機械の 4D 省力化技術への取組み

建設機械の移動・設置作業の労働生産性向上を目的として、次の内容を試みた。第 18 図に TS 技術による機械の管理を示す。最初に、移動作業車を 3D モデルで作成し、レーザ光でプリズム XYZ 標点を自動で追尾する TS 計測器と連動させ、機械の位置や動きの情報をクラウド経由でタブレット端末に読み込んだ。次に、TS が自動追尾するプリズムを作業車に設置し、移動距離や高さの動きを高精度に取得し管理した。第 19 図に安全監視の方法を示す。現地にデジタルカメラを設置し、AI 技術で人を認識する立入禁止措置や、画像解析技術（座標）を用いて、作業車に設置したマーカから移動中の変位をリアルタイムに取得した。これらにより、墜落・転落、関係者以外の立ち入りなどの異常を監視し、設定した制限値を超えた場合は音や発光して回転するシステム（パトライト）などの警報装置を構築した。第 20 図に各警報装置を示す。従来の技術は、移動位置の墨出しやレベルによる高さ計測、見張り員が必要であったが、このシステムは移動作業車の位置や動きを mm 単位で自動的に取得することができ、複数人による墨出し作業や高さ計測作業などをなくすことができた。また、目視であった移動中の作業車の変位をパソコン上で確認でき、異常の早期発見や省人化が可能となった。さらに、その取得したデータは安全管理や仮想現実や拡張現実による教育、さらに主桁たわみデータを取得し、

(a) 位置情報取得機器を設置



(b) 3D モデルの位置情報



(c) タブレット端末の位置情報から移動作業車を設置



TS 設置



プリズム設置

第 18 図 TS 技術による機械の管理
Fig. 18 Machine management using TS technology

(a) デジタルカメラ・警報装置を設置



(b) 変位情報座標を取得



デジタルカメラ



警報装置



警報装置

立入禁止ライン表示

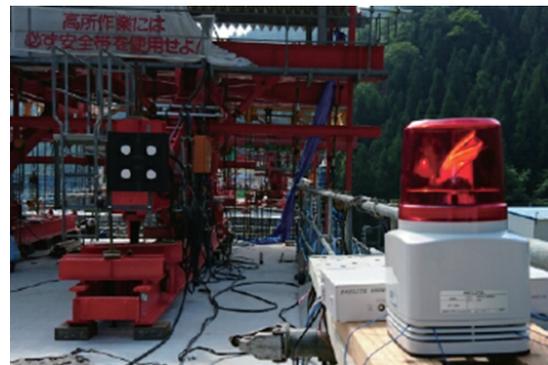
マーカ

第 19 図 AI、画像解析技術による安全監視の方法
Fig. 19 Safety monitoring using AI and image analysis technology

(a) 作業中の移動監視用パトライト



(b) 作業中の立入禁止用パトライト



第 20 図 各警報装置
Fig. 20 Warning devices

AI のディープラーニングに使う教師データとして活用できると考える。

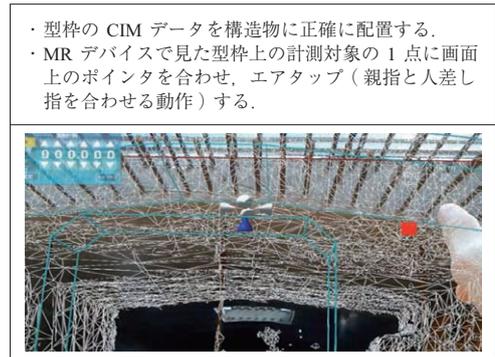
3.2 MR 技術による検査省力化への取組み

型枠組立検査および出来形管理の労働生産性向上を目的として、次の内容を試みた。CIM モデル（型枠・出来形 3D モデル）をクラウド経由で MR デバイスに取り込み、その画面上で寸法を計測した。この計測は、MR デバイスが映像から周囲の空間を 3D 形状として、認識するために備えている「空間マッピング」という機能を使った。現場で取り込んだ映像を MR デバイスの内部で、リアルタイムに赤外線センサから 3D メッシュデータを作成できることから、空間上での寸法計測が可能となった。第 21 図に、この MR デバイスの動きを TS と連携させ自動追尾させた計測を示す。また、第 22 図に計測の試行手順例を示す。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の寸法計測作業に時間を費やし、安全に配慮して計測を行う必要があった。今回はこのように、型枠の寸法や橋桁断面の寸法を CIM データ上に配置したことで、MR デバイスを用いて、型枠や出来形の 1 人計測作業が可能となった。さらに、次の課題も解決することができた。これまで夏場の計測は、暑さにより、MR デバイスが高温になり、システムがダウンすることが多かったが、今回は超小型電動ポンプで樹脂製のパイプ内を循環させる水冷装置を用いたことで、ダウンすることなく連続で計測できた。

4. 維持管理への CIM 適用

CIM モデルは、維持管理で長期にわたり活用していくことから、異なる会社・組織・関係機関の間で CIM モデルを受け渡し、利活用していくことが予想される。そこで、実現可能な維持管理の高度化を図るためには、品質情

(a) ポインタを合わせエアタップ



(b) 2 点間の距離を自動計測



(c) 計測結果の帳票自動連動



第 22 図 計測の試行手順例
 Fig. 22 Example procedure of measurement trial

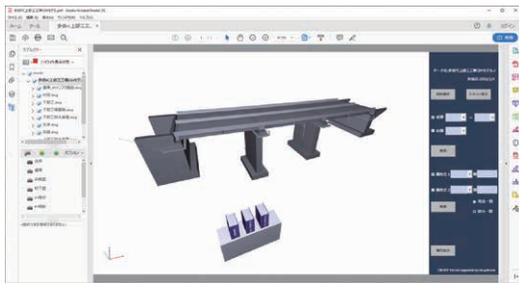
(a) MR デバイスと TS 計測器



(b) プリズム



第 21 図 MR と TS の連携による計測
 Fig. 21 Measurement using MR-TS integration



第 23 図 CIM モデル管理システム
Fig. 23 CIM model management system

報を将来活用し効率化を図る必要がある。第 23 図に CIM モデル管理システムを示す。このシステムを使用し、3D モデルに施工時の出来形や品質管理記録などの属性情報を付与して納品した。

5. 考 察

湖陵多伎道路多伎 PC 上部工事において、CIM を活用し現場における生産性向上や品質管理の高度化を試みた。特に MR 技術に着目し、現実空間と CIM モデルを重ね合わせる実験を実施した結果、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 3D モデルと作業空間の重畳は、原点 (AR マーカー) から計測距離が離れるにつれ、誤差が大きくなる。
- (2) 遠隔管理では、3D モデルはデータが多いと画像の鮮明さに欠け、計測場所や配筋状態が確認できない。

計測結果の安定性や精度保持について、MR デバイスと TS の連携によるシステムの研究を現在行っている。遠隔管理は、現在の通信速度 4G から 5G に進化するまでの間、3D データと通信環境などのマッチングについて試行し、データを集積しながら検証していく必要があると考える。

6. 結 言

CIM を活用したフロントローディングを実施した結果、工期の短縮につながる事が現場で確認された。さらに、TS 測量技術との連携は従来技術とはほぼ同様な計測精度であり、省人化および作業時間短縮が可能であることも確認できた。CIM の活用は、少子高齢化社会を迎える熟練土木技術者の減少という課題に対し、おおいに期待されている。CIM の試行事例はまだまだ少なく、CIM を使いこなす技術者の不足など課題も残されている。現在、第 24 図に示す大野油坂道路「九頭竜川橋」上部工事で試行内容を検証中である。今後、専門技術者を必要としない ICT と



第 24 図 「九頭竜川橋」上部工事の現状 (2019 年 12 月)
Fig. 24 Photo of current "Kuzuryu Bridge"



第 25 図 多伎 PC 上部工事の完成⁽²⁾
Fig. 25 Photo of completion of construction Taki PC upper bridge⁽²⁾

組み合わせた CIM ソフトウェアの開発が求められる。

湖陵多伎道路多伎 PC 上部工事は、予定どおり 2019 年 1 月に完成した。第 25 図に完成時の状態⁽²⁾を示す。本研究は、国土交通省「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」で助成を受けた試行業務である。

— 謝 辞 —

本試行の実施に当たり、ご指導、ご協力をいただいた中国地方整備局および近畿地方整備局の関係者の方々に、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省：「i-Construction」推進コンソーシアム、<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>、(参照 2019. 12. 03)
- (2) 新枝秀樹, 山下恭平, 渡辺 誠, 若林良幸：橋梁上部工事の 4DCIM 活用, 品質管理への取組み：湖陵・多伎道路多伎 PC 上部工事, 土木施工, Vol. 60, No. 5, 2019 年 5 月, pp. 67 - 70
- (3) 若林良幸, 中村定明, 保田敬一, 平原幸男, 新枝秀樹：CIM を活用した橋梁上部工事における施工の効率化について, 土木学会年次学術講演会, No. 74, VI -933, 2019 年 9 月