

CIM・ICT・AI を活用したデジタル橋梁建設システムの構築

Digital Bridge Construction System Using CIM, ICT and AI

中野 隆 NAKANO Takashi JFE エンジニアリング 社会インフラ本部 橋梁事業部 技術部 技術室長
柿市 拓巳 KAKIICHI Takumi JFE エンジニアリング 社会インフラ本部 橋梁事業部 技術部 開発室
松岡 芳宜 MATSUOKA Yoshiki JFE エンジニアリング 社会インフラ本部 橋梁事業部 技術部 技術室

要旨

新型コロナウイルスの感染拡大によりリモートワークや遠隔臨場が普及し、建設業界でも急速にデジタル化が進みつつある。国土交通省はデジタル化の核となる BIM/CIM の原則化を当初予定していた 2025 年度から 2023 年度に前倒すことを決定した。JFE エンジニアリングでは、国の方針に先立ち 2020 年度から自社の橋梁工事で原則 BIM/CIM の適用を始めるとともに、建設現場の生産性を向上するための各種 ICT 技術の開発に取り組んでいる。本稿では、JFE エンジニアリングが構築を進めている BIM/CIM と ICT, AI 技術を連携したデジタル橋梁建設システムについて概説する。

Abstract:

The spread of new coronavirus has led to the widespread use of remote work and remote inspections, and the construction industry is rapidly becoming more digitalized. The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) has decided to bring forward the adoption of BIM/CIM, the core of digitalization, from the originally planned FY 2025 to FY 2023. JFE Engineering is also working on the development of various ICT technologies to improve the productivity of construction sites. This paper outlines the digital bridge construction system that JFE Engineering currently develops, which links BIM/CIM, ICT, and AI technologies.

1. はじめに

建設業界では少子高齢化に伴う担い手不足が深刻化しており、業界全体で生産性向上が急務となっている。担い手不足解消のため、国土交通省は平成 28 年より建設現場の生産性を向上させる i-Construction の取り組みを推進している。測量から設計、施工、検査、維持管理に至るすべての事業プロセスで、ICT や BIM/CIM を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目指している。

AI や IoT などデジタル技術の進歩や、コロナ禍におけるリモートワークの普及による働き方の変化など、社会を取り巻く環境はこの数年で様変わりした。2020 年 4 月に国土交通省は、「2023 年までに小規模工事を除くすべての公共事業に BIM/CIM を原則適用」を決定した。これは、それまでに目標としていた 2025 年度までの原則適用よりも 2 年前倒す計画となる。BIM/CIM や ICT などのデジタル技術の活用は建設現場で急速に進んでおり、業界を挙げて DX (デジタルトランスフォーメーション) に取り組んでいる。

建設業界の DX の難しさは、不確定要素の多い現場にデジタル技術を適用するところにある。1 つとして同じ物のない受注生産品であり多種多様な工種があること、および天

気、天候、砂塵等の影響を受けることはロボットや AI による自動化を難しくする。国土交通省はこうした建設業界特有の課題に対し、異業種と連携した解決を促進するため、2018 年より「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」を推進し、異業種連携による革新的技術の開発を後押ししてきた。

JFE エンジニアリングは、こうした国の方針や業界内の動きに先駆けて 2020 年度より自社の橋梁工事で原則 BIM/CIM (以下、本論文では CIM と呼称) を取り入れる方針に舵を切り、ソフト・ハードの整備やエンジニアの教育および社外との連携により実施体制を強化してきた。さらに前述の革新的技術の導入・活用プロジェクトには 2019 年度より連続 4 期参画し、AI, ICT, ロボティクス技術を活用したさまざまなデジタル技術を開発し、現場で実証試験を行ってきた。開発したデジタル技術は、CIM モデルとデータ連携させることで、『デジタル橋梁建設システム』として構築を進めている。

本稿では、JFE エンジニアリングのデジタル橋梁建設システムについて概説し、実際の橋梁建設現場で行った各種実証試験の結果として、システムの精度、生産性向上効果の検証結果および今後の課題について論述する。

2. デジタル橋梁建設システムの構築

CIMモデル、およびICTやAIは単独で活用しても効果は限定的である。効果を最大化するためにはシステム全体として相互に連携し、相乗効果を発揮する必要がある。

当社は、CIMモデルを核に各種ICT、AI技術と連携させ、橋梁工事の生産性を向上させるデジタル橋梁建設システムの構築を進めている。システムの概要を図1に示す。各技術はクラウドを介してCIMモデルとデータ連携し、計測や施工管理に用いる管理値をCIMモデルから取得し、計測結果や出来形管理値はCIMモデルに紐づけて格納することで、施工管理や検査の生産性向上を目指している。

このデジタル橋梁建設システムは、橋梁工事の現場で実証試験を行いながら機能の拡充・改良を図っている。次章では、本システムのうち、自動配筋検査AIシステム、壁高欄測定ロボット、ARシステム（Augmented Reality: 拡張現実）の3つの技術について機能を概説し、実際の橋梁工事を対象とした実証試験の内容を述べる。

3. システムの実証試験

3.1 画像認識AI技術を用いたコンクリート構造物の配筋検査高度化

3.1.1 技術の概要

橋梁工事における鉄筋コンクリート構造物の配筋検査は、従来、テープメジャーにより間隔を1本ずつ計測し、目視により本数を確認する方法で行ってきた。複数人の作業員で計測した結果を出来形帳票に手書きで記録し、それをPCに転記する作業は非常に労力がかかり、転記時のヒューマンエラーが起きやすい作業であった。

土木工事施工管理基準及び規格値（案）¹⁾では、床版の鉄筋間隔の検査基準は、手計測を前提とした抜き取り検査となっている。規格値は設計値に対する誤差が±20mm以内、測定基準は1径間当たり3か所（両端および中央）で、橋軸方向の鉄筋は全数、橋軸直角方向の鉄筋は加工形状ごとに2mの範囲を測定することとなっている。抜き取り検査のため測定点以外の検査記録が残らないことも品質管理上の課題であった。

上述の課題を解決するため、コンクリート構造物の自動配筋検査AIシステム²⁾を開発した。技術の概要を図2に示す。新たに開発した自動配筋検査AIシステムは、UAV等を用いて撮影したデジタルカメラの撮影画像に基づき配筋検査を自動で実施するものである。AIアルゴリズムはディープラーニングによる物体検出を核としており、鉄筋同士が交差する交点の特徴を学習させることにより鉄筋の配置を認識させる。システムの検査結果はCIMモデルに属性情報として紐づけることで鉄筋間隔の誤差を色分け表示可能とし、また撮影画像上には鉄筋間隔の計測結果、鉄筋の本数を自

動で表示できる。

3.1.2 現場実証試験

実証試験は、中部横断塩之沢川橋上部工事（山梨県南巨摩郡身延町）で行った。対象構造物はJFEエンジニアリング製の鋼コンクリート合成床版「リバーデッキ」とし、床版の配筋完了後に現場でドローンにより撮影、計測した。図3に対象橋梁の全景（床版施工後）と合成床版の模式図を示す。

3.1.3 実証試験結果

鉄筋間隔の計測精度は、従来手法による実測値とシステ

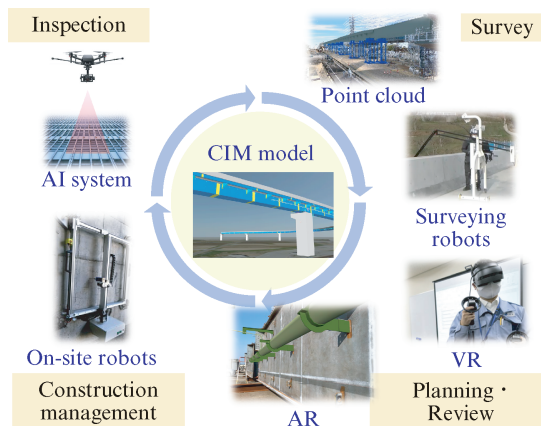


図1 デジタル橋梁建設システム

Fig. 1 Digital Bridge Construction System

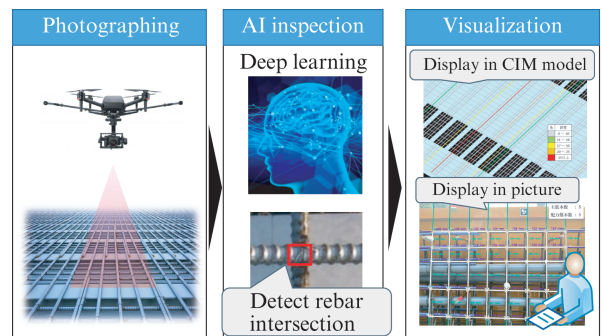


図2 自動配筋検査AIシステムの概要

Fig. 2 Overview of AI-based inspection system for rebars

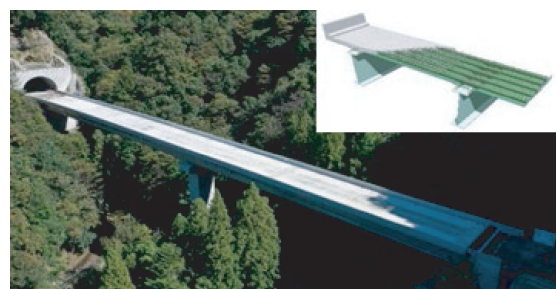


図3 対象橋梁の全景と合成床版の模式図

Fig. 3 Target bridge and schematic diagram of composite slab

ムで計測した値の誤差の比較で検証した(図4)。誤差の絶対値平均は3.7 mm, 誤差の符号を考慮した平均値では-2.5 mmであり, 実用上の目標精度としていた5 mm以内の誤差に収まっている。

誤差の傾向にはばらつきがあり一部に10 mm以上の比較的大きな誤差が生じた。これは鉄筋の重ね継手部周辺など配筋がイレギュラーとなる箇所で見られた。重ね継手は一般部に比べて学習データが不足していること, 重ね継手では鉄筋の交点が密集して検出されるため鉄筋配置の推論で隣接する鉄筋と誤認識しやすいことが原因と考えられる。引き続き学習データを増強するとともに, システム全体の改良を進めている。

従来の手作業による配筋検査と, 配筋AIシステムによる検査の生産性向上効果を比較した結果を図5に示す。本手法では, ドローンからデータをクラウドに移動する時間, データ解析に要する時間が追加となるものの, 計測時間は大幅に短縮し, 全体としては65%省力化できた。

3.2 出来形計測ロボットを用いたコンクリート製剛性防護柵の施工管理の効率化

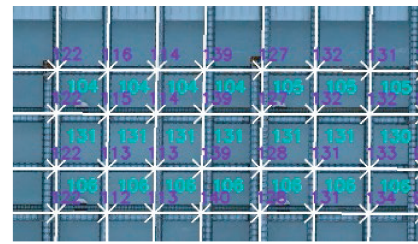
3.2.1 技術の概要

橋梁工事を含むコンクリート構造物の施工管理では, 従来はテープメジャーなどの測量機器を用いて複数人で出来形を計測し, 目視によりコンクリートのひび割れを調査してきた。計測・調査した結果に基づき作業者がPCなどを用いて手作業で出来形帳票を作成していたが, これは多大な労力を伴う非生産的な作業であった。

橋梁上部工事のコンクリート製剛性防護柵(以下, 壁高欄と呼ぶ)の施工管理では, 出来形計測とひび割れ調査に多大な労力を要している。土木工事施工管理基準及び規格値(案)に基づき, 壁高欄の出来形計測は径間ごとに片側3箇所, ひび割れ調査は全長にわたり実施することとなっている。出来形計測は, テープメジャー・水平器を用いて複数人で実施しているが, 計測値の再現性に課題があった。また, ひび割れ調査では壁高欄の前面と背面の両面を調査する必要があり労力がかかること, ひび割れの記録間違い・漏れなどのヒューマンエラーが発生すること, および検査を完了するまでは次工程に進められないなど工程上の制約となることが課題であった。

これらの課題解決のため, 図6に示す壁高欄の出来形計測とひび割れ調査を同時に実施できる測定ロボット(以下, 壁高欄測定ロボットと呼ぶ)を開発した。

出来形計測については, 橋面上からワンマンで作業し, 出来形帳票を自動作成できるようにした。具体的な計測手法としては, 壁高欄測定ロボットに取り付けた2台のワイヤエンコーダによりワイヤの引出長から壁高欄の各点の相対座標を取得し, 数値計算により壁高欄の幅, 高さの出来形値を計測するものとした。



(Image of inspection output in picture)

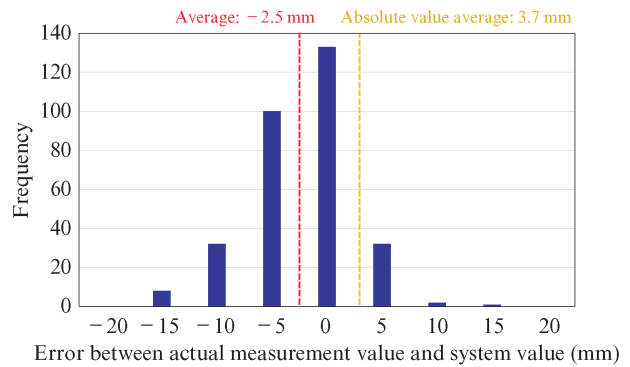


図4 鉄筋間隔の計測精度

Fig. 4 Measurement accuracy of rebar spacing

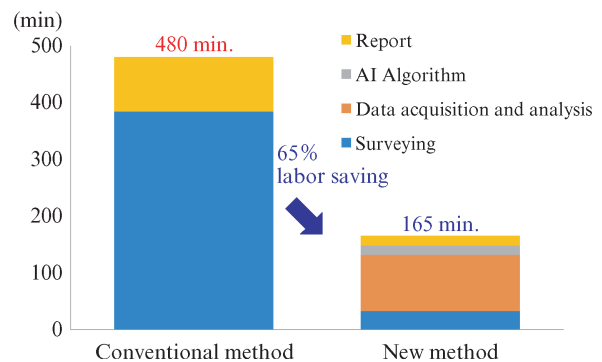


図5 生産性向上効果

Fig. 5 Effect of productivity improvement

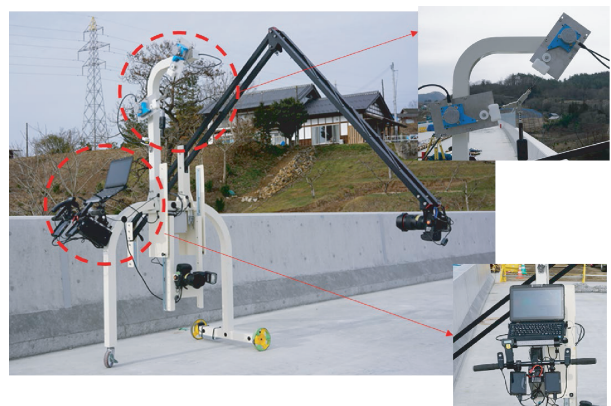


図6 壁高欄測定ロボット

Fig. 6 Surveying robot for concrete barrier

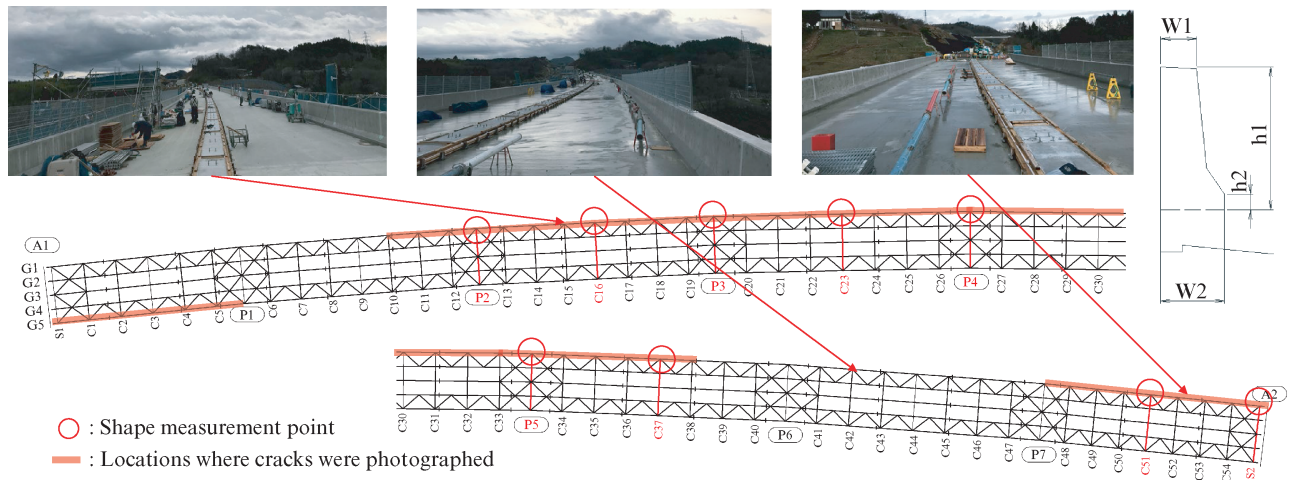


図7 計測箇所
Fig. 7 Surveying points

コンクリートのひび割れ調査システムは、足場なしでかつ効率的に調査できるものを目指した。具体的には、既存の画像認識AI技術によるひび割れ検出システム³⁾を用いて、壁高欄の前面・背面を同時に撮影できるシステムとした。開発した壁高欄測定ロボットを用いて、実橋梁で実証実験を行い、十分な施工管理機能を有していることを確認した。

3.2.2 現場実証試験

実証試験は、古川橋上部工工事（福島県伊達市）の現場で行った。実証実験の範囲は土木工事出来形管理基準及び規格値（案）と現地の施工状況から、出来形計測を9箇所、ひび割れ調査を257.2mとした。壁高欄の画像を連続的に撮影しながら、出来形計測対象箇所で計測を実施する一連の流れで実施した。計測箇所を図7に示す。

3.2.3 実証試験結果

壁高欄測定ロボットにより測定した出来形計測値と従来手法の計測値の比較結果を図8に示す。従来手法と比較して、平均誤差3mm以内で計測可能であり、出来形計測として利用可能な精度であることを確認した。

一部の計測値で5mm以上の誤差が生じている箇所があった。これは壁高欄背面側の座標は壁面の出来形の角度から回転補正により算出した値であり、壁高欄の仕上がり面の状態に依存するため誤差が生じたと考えられる。この問題については現在システムの改良を進めている。

壁高欄測定ロボットにより撮影した画像からシステムによりひび割れを検出した例を図9に示す。AIにより検出したひび割れは前面・背面ともに図中の赤丸で示した範囲にある緑色のラインであり、目視と同一の箇所、同一のひび割れ幅で検出できることを確認した。検出箇所数は、管理値の0.2mm以上のひび割れは、AI・目視ともに1箇所であったが、0.2mm未満の比較的小さなひび割れはAI検出が10箇所、目視検出が12箇所とAI検出が若干少ない結果となった。0.2mm未満の検出精度については、学習データの増

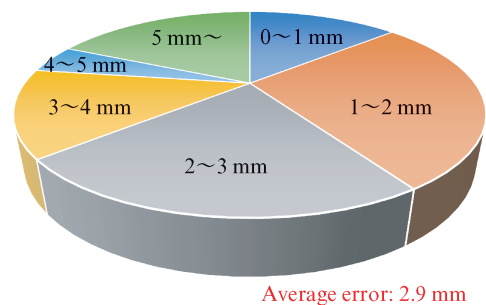


図8 出来形計測値比較結果
Fig. 8 Error comparison result between conventional method and new method

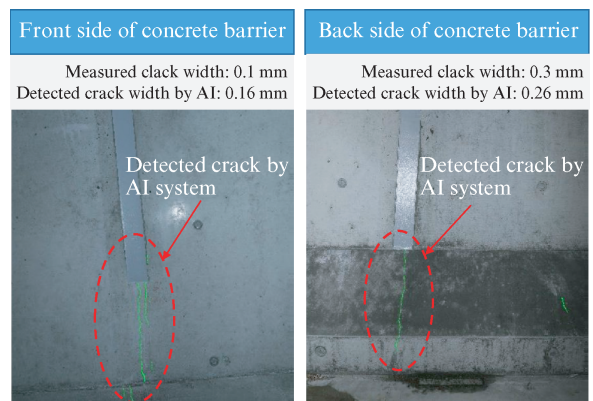


図9 AIによるひび割れ検出結果の例
Fig. 9 Example of crack detection result by AI

強、撮影方法の検討により改善できると考えている。生産性向上効果としては、図10に示すとおり、施工管理の作業時間を50%程度削減できた。また、従来は複数人で実施していた計測作業を1名で実施できるようになり、省人化効果も確認できた。

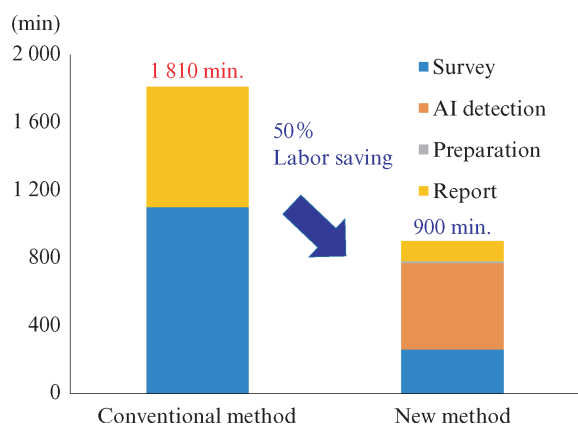


図 10 生産性向上効果

Fig. 10 Productivity improvement effect

3.3 拡張現実 (AR) を用いた鋼橋付属物の主桁付き部材取付け状況の確認

3.3.1 技術の概要

鋼橋には、主構造のほかに排水支持金具や足場用吊金具、検査路受台など様々な付属物が取り付けられる。これらの付属物の取付け位置を確認する方法として、従来はテープメジャーを用いて複数人で計測し、図面に記載されている寸法と実構造物の寸法が整合しているか1箇所ずつ確認していた。しかし従来方法は、計測作業と記録作業で複数人以上の人工を必要とし、また図面の読み取り場所と計測箇所を間違えやすく、さらには高所のブロック確認時には高所からの墜落等の労働災害リスクが高まるといった課題があった。

上記の課題を解決するために、図 11 のように現実空間にデジタル情報を重ね合わせる拡張現実 (AR) により、製作した部材に CIM モデルを重ね合わせることで、付属物の取付け位置の確認を行うこととした。本手法を用いて付属物の取付け位置を確認することで、従来手法と比べて少ない作業人員・作業時間で対応でき生産性が向上するとともに、高所作業を減らすことで安全性の向上にも繋がった。

3.3.2 現場実証試験

実証試験は、大和御所道路榎原高田 IC・D ランプ橋他上部工事 (奈良県橿原市) で、工場製作済みの主桁を用いて行った。今回対象とする付属物は、主桁本体付きの排水金具のみとし、合計 5 ブロックの取付け位置を確認した。

事前準備として、設計段階で作成した CIM モデルを、実構造物との位置合わせが可能となるように、座標を調整した。モデリングには Autodesk 社の AutoCAD を使用し、システムで対応しているファイル形式の FBX ファイルへ変換した。

対象物には、図 12 に示すようにモデルと対応した場所に位置合わせ用のマーカーを設置した。マーカーは主桁ブロックの両端周辺のウェブ面に貼り付け、AR で投影する際

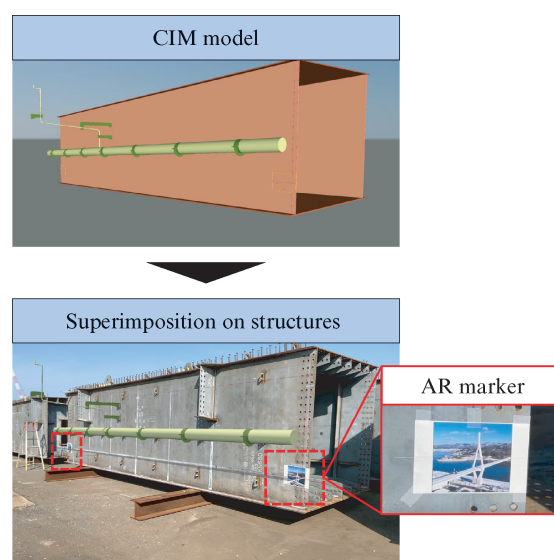


図 11 AR による CIM モデルの投影イメージ

Fig. 11 Projected image of CIM model using AR

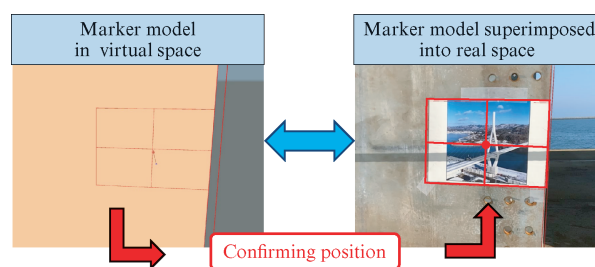


図 12 マーカーによる位置合わせのイメージ

Fig. 12 Image of positioning with markers

は、この 2 つのマーカーを使用して橋軸方向を判別した。また、マーカーの画像は、システムで事前にデータを保存しておくことで任意の画像に対応することができるため、マーカーを設置した後タブレット端末を用いて 2 つのマーカーを読み込み、そのマーカー位置を基準にして CIM モデルをタブレット画面上に投影した。最後に、モデルを重ねた画面を通して取付け金具の位置を確認した。

3.3.3 実証試験結果

CIM モデルをタブレット画面上で重ね合わせ、排水金具の取付け位置を確認している状況を図 13 に示す。このように AR 技術で実際に CIM モデルを重畳して表示することで、視覚的に排水金具の位置を確認できる。投影誤差は全体を通して数 mm ~ 数十 mm 程度であった。誤差にばらつきが生じた原因は、作業者がタブレットを保持して移動する際に、タブレット内の加速度センサーや空間情報を把握する LiDAR センサーの誤差が蓄積していくためと考えられる。この問題は、一定間隔にマーカーを配置し、都度マーカーを読み込みなおすことで蓄積している誤差をリセットするシステムを導入することで改善を図る予定である。



図 13 排水金具の取付け位置の確認

Fig. 13 Checking scene of installation position of drainage fittings

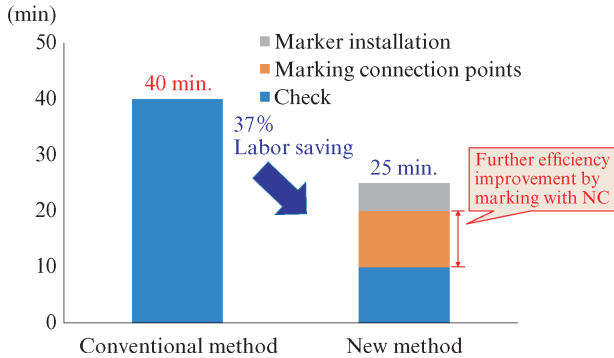


図 14 生産性向上効果

Fig. 14 Productivity improvement effect

また、本システムによる生産性向上効果を図 14 に示す。従来方法では 1 ブロックあたりの作業時間が 2 人作業で 40 分のところを、AR による手法では 1 人作業で 25 分で確認でき、作業時間の短縮とともに省人化の効果も確認できた。AR による手法では、マーカー貼り付け位置の罫書作業の作業時間が大きなウェイトを占めているが、この作業はマーカー貼り付け位置を橋梁製作工場の NC マーキング機械であらかじめ部材にマーキングしておくなど、工場内の製作フローに組み込むことでさらなる省力化が見込めるものと考えられる。

4. おわりに

JFE エンジニアリングでは CIM・ICT・AI を活用したデ

ジタル橋梁建設システムの構築を進めている。システムの機能として、自動配筋検査 AI システム、壁高欄測定ロボット、AR システムを開発し、実際の橋梁工事を対象に実証試験を行った。今後これらの技術を実工事で適用しながらさらに改良を加えるとともに、機能の拡張を図っていく予定である。

謝辞

自動配筋検査 AI システムは国土交通省「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」(PRISM) の 2019 年公募、および 2019 年追加公募に採択され実施したものである。壁高欄測定ロボットは同プロジェクトの 2020 年公募に採択され実施したものである。プロジェクトの関係各位に御礼申し上げる。

また、共同で開発した株式会社 ACES (自動配筋検査 AI システム)、株式会社イクシス (壁高欄測定ロボット)、株式会社ポケットクエリーズ (AR システム) の関係各位に御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 国土交通省. 土木工事施工管理基準及び規格値 (案)
- 2) 中野隆ほか. 画像認識 AI 技術を用いたコンクリート構造物の配筋検査高度化. 土木学会第 2 回 AI・データサイエンスシンポジウム, 2019, 1-9.
- 3) 柿市拓巳ほか. 出来形計測ロボットを用いたコンクリート製剛性防護柵の施工管理の効率化. 土木学会第 2 回 AI・データサイエンスシンポジウム, 2021, 1-7.



中野 隆



柿市 拓巳



松岡 芳直