

3 眼カメラによる配筋検査システムの開発と社会実装

吉武 謙二 藤井 彰 吉田 直樹 松永 英哲 松尾 勝司
(技術研究所) (東北支店) (東北支店) (東北支店) (北海道支店)

Development and Societal Implementation of Automatic Rebar Arrangement Inspection System Using Stereo Camera

Kenji Yoshitake, Akira Fujii, Naoki Yoshida, Hideaki Matsunaga and Katsuji Matsuo

配筋検査の精度維持と省人化・省力化という課題解決のため、3眼カメラ配筋検査システムを開発した。日射や天候、配筋仕様の異なる25現場での50回以上の試行や、二色トンネルでは遠隔臨場との組合せも試行した。また、国土交通省の「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」の試行現場である東根川橋上部工工事では段階確認に初めて適用された。取組みの結果、平均間隔の規格値を判定するために十分な計測精度を有していること、橋梁上下部工工事において検査時間を1/3程度に削減できること、高所作業時間削減や省人化効果による新型コロナウイルス感染対策など安全性向上にも貢献できることが明らかになった。

An automatic inspection system for rebar arrangements using a stereo camera has been developed as a solution for maintaining the inspection accuracy while saving manpower. Over 50 trials were conducted at 25 sites under different conditions of illumination and weather as well as with different rebar arrangement specifications. An additional trial of the proposed inspection system in combination with telepresence technology was conducted at a tunnel construction site. Further, the inspection system was applied for the first time to confirmation of actual construction at a bridge superstructure work site that is a trial location for a Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism project. The new system was found to offer measurement accuracy to judge compliance with specified rebar spacings, reduce inspection time to about one third, and minimize time spent on high-elevation work. In this way it can contribute to improved safety by reducing high-elevation work and preventing the spread of Covid infection by reducing labor requirements.

1. はじめに

配筋検査は、検査帳票作成や検査用具準備、自主検査および段階確認など複数人で多くの時間を要するため、検査の精度維持と省人化・省力化の両立が長年

の課題であった(写真-1)。課題解決のため、従来から配筋検査に関する開発が進められているが¹⁾³⁾、計測精度、計測時間やシステムの大きさ・重量などの使い勝手の要因から実用化には至っていなかったため、3眼カメラを用いた配筋システムを開発した⁴⁾。本技術

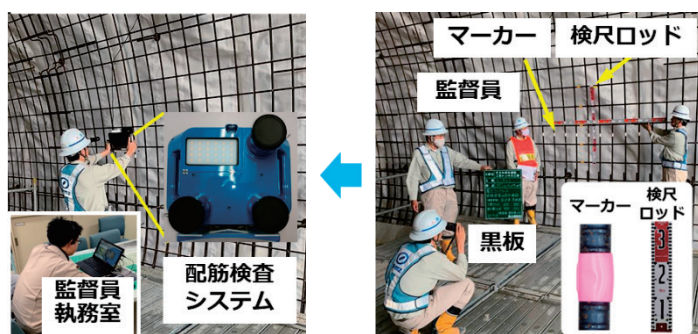


写真-1 配筋検査(左:システム利用した遠隔臨場、右:従来)

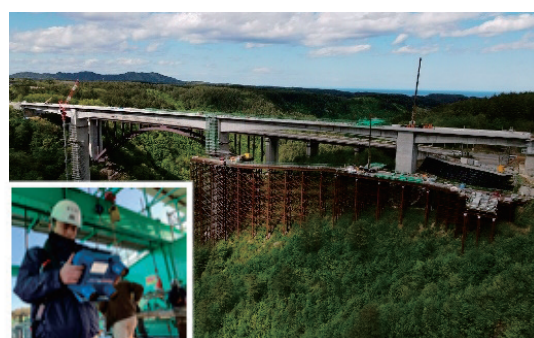


写真-2 検査状況(新思惟大橋上部工工事)

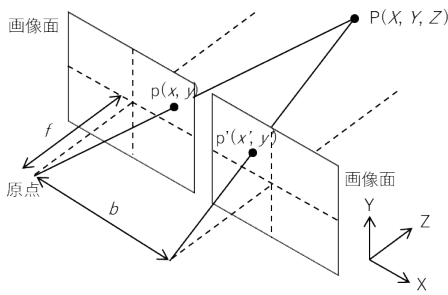


図-1 ステレオカメラの撮影モデル

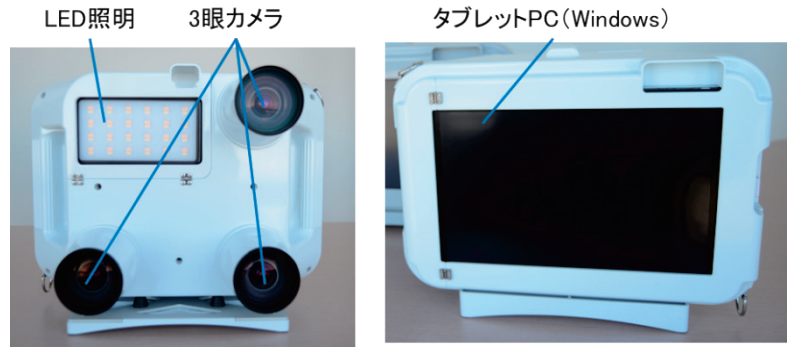


写真-4 システム外観

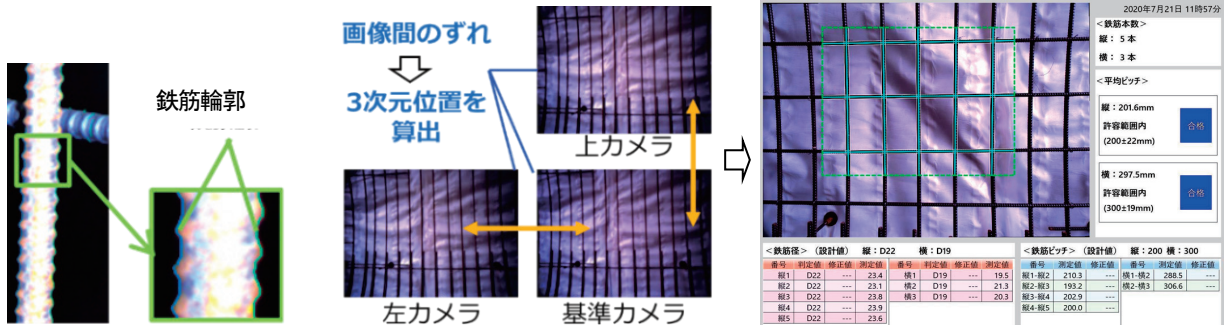


写真-3 鉄筋輪郭状況

写真-5 3枚の撮影画像と検査結果の例

| 鉄筋径 | | 設計値 | | 測定値 | | 誤差 | |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|
| 番号 | 判定値 | 修正値 | 測定値 | 番号 | 判定値 | 修正値 | 測定値 |
| 観1 | D22 | ... | 23.4 | 観1 | D19 | ... | 19.5 |
| 観2 | D22 | ... | 23.1 | 観2 | D19 | ... | 21.3 |
| 観3 | D22 | ... | 23.8 | 観3 | D19 | ... | 20.3 |
| 観4 | D22 | ... | 23.9 | 観4 | D22 | ... | 23.9 |
| 観5 | D22 | ... | 23.6 | 観5 | D22 | ... | 23.6 |

は、国土交通省の「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」⁵⁾に2度採択され、両者でA(試行は十分な成果があり、技術の導入効果や社会実装の実現性について高く評価できる)と評価された。

令和元年度の試行現場である妙高大橋架替下部その4工事や川崎港臨港道路東扇島水江町線主橋梁部(MP5・6)橋梁下部工事では自主検査に適用した。さらに、令和元年度の追加公募の試行現場である東根川橋上部工工事では、本システムが規格値(案)⁶⁾を判定可能な精度を有することが認められ、発注者監督員の段階確認に全ての工種を通じて国内で初めて適用された。新思惟大橋上部工工事では半年以上にわたり日常的に使用し躯体完成に至った(写真-2)。

長期使用を通じて配筋検査システムの課題や要望を抽出し、改ざん防止などの機能改善や、検査結果の配筋図への関連付けなどのGUI関連、電子検尺ロッド表示、スペーサー数算定などの機能拡張を実施した。また、近年積極的に取り組まれている遠隔臨場⁷⁾と配筋検査システムを組合せた場合の機器構成の簡易化も図った。

本報では、システムの原理、現状でのシステムの機能、妙高大橋下部工事と東根川橋上部工工事を例として橋梁の上下部工における生産性や新型コロナウイルス感染症対策を含む安全性に及ぼす効果について記す。

2. 配筋検査システムの原理と機能

撮影モデルを図-1に示す。平行配置された2台のカメラで同一の被写体を撮影した場合、画像内における被写体の位置が異なる。このずれ量を視差 $D(m)$ と呼び、カメラ間距離である基線長 $b(m)$ と、被写体の距離 $Z(m)$ と、カメラの焦点距離 $f(m)$ には式(1)の関係があり、点 $P(X, Y, Z)$ が画像上の点 $p(x, y)$ 、 $p'(x', y')$ として撮影される。2つのカメラの焦点距離 f は共通であるため、式(1)のように撮影された画像から視差 D を算出することで、三次元座標を算出することができる。視差は2台のカメラの画像を用いたステレオマッチングにより算定する。この原理を応用し、鉄筋の輪郭および位置を検出することで、鉄筋径、間隔、本数が算定可能となる(写真-3)。

$$D = f \frac{b}{Z} \quad (1)$$

本システムでは、写真-4のようにカメラを1台増加し、3台のカメラを用いて計測精度の向上を図っている。検査結果は3枚の元画像を用いた算定値であるため、元画像を変更すると検査結果も異なる。3枚の元画像を改ざんして任意の検査結果を得ることは極めて困難なため、改ざん防止が図れ、高い信憑性を有する(写真-5)。

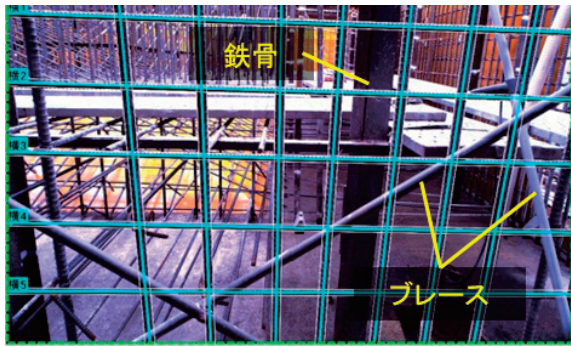


写真-6 鉄骨やブレースの除去状況

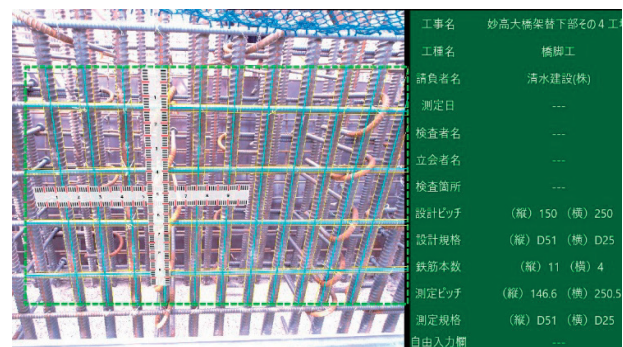


写真-7 電子黒板やロッド表示

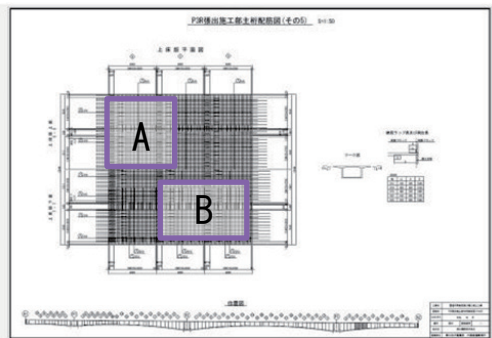
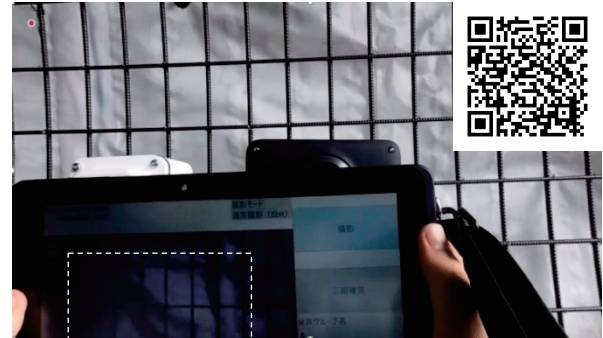


図-2 検査位置指定の例



【動画】 <https://www.shimztechnonews.com/hotTopics/news/2021/2021-03.html>

写真-8 撮影と計算範囲指定の例



写真-9 重ね継手長計測の表示例



写真-10 かぶり計測の表示例

配筋検査システムは、写真-4のように3つのカメラとタブレットPCの他に、暗所での撮影を可能とするLED照明を備えている。3つのカメラで同時撮影するため、各カメラは専用のケーブルで相互に接続している。システムは現場での足場昇降を考慮し、肩幅より狭い横幅300mm程度とした。重量は3kg程度で、防水・防塵機能を有する。撮影ソフトを起動後、カメラを稼働させた状態において3時間20分程度動作する。長時間使用する場合は、モバイルバッテリーを交換することで対応可能である。タブレットPCで計算するため、インターネット環境のない場所でも使用することができる。

写真-6のように足場からの撮影時に支障となるブレースやセパレータなどの鉄筋以外の異物は自動で除去できる。自動除去できない段取り鉄筋などはタブ

レット上で選択することで除去できる。計測結果への3次元位置情報を考慮した電子検尺ロッドの重畳や電子黒板表示も可能である(写真-7)。

システムの使用方法は以下の通りである。

- ① 図面データの登録と電子黒板の記入
- ② 登録した図面データ内の配筋検査位置をタブレット画面で写真中のA、Bのように指定(図-2)
- ③ 撮影ボタンを押し、撮影された画像内の検査範囲を左上と右下2点で設定し、計測処理を実行(写真-8)
- ④ 検査結果の確認。撮影データは検査位置と関連付けて自動保存
- ⑤ 必要により、電子検尺ロッドや電子黒板などとの結果の保存

このように、撮影ボタンを押し計測範囲を設定するという簡単な作業で、上下2段の縦・横方向配筋、合

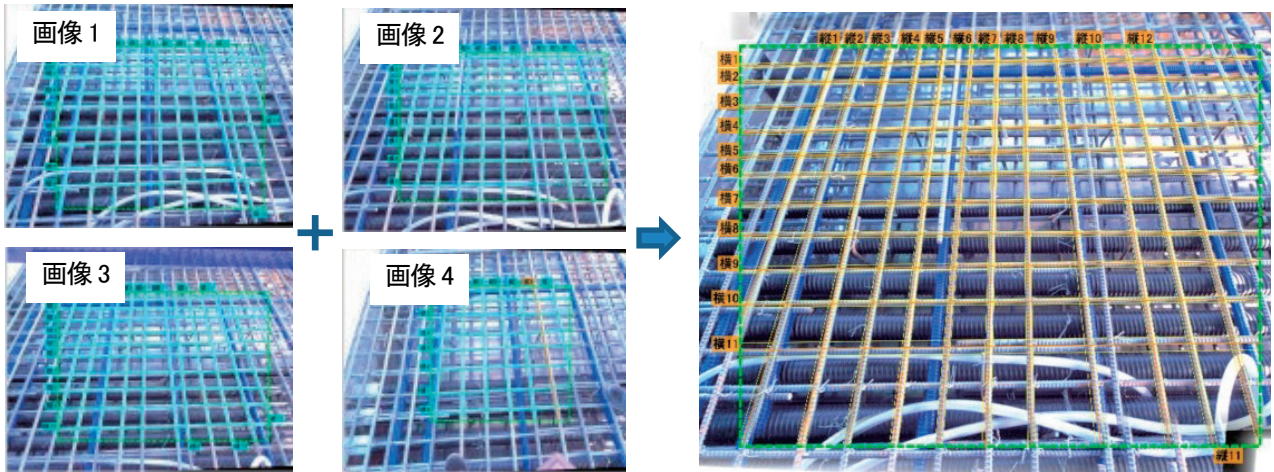


写真-11 4枚の画像を統合した計測結果例(左:個別結果、右:統合結果)

計4段の同時計測が可能であり、検査帳票が鉄筋の層毎に表示される。また、3枚の元画像と検査結果は関連付けられて保存されているため、再計算も可能である。

画像内の任意の2点間距離が計測できるため、写真-9のように重ね継手長やかぶりを計測できる。また、写真-10のように型枠平面と鉄筋との垂直距離を計測することで、より正確にかぶりを計測できる。

広範囲の検査が必要な場合は、写真-11のように複数枚の画像間の鉄筋の特徴点を対応付けることにより、自動的に統合できる。2段目鉄筋の検査が必要な場合は、同様な処理機能を用いることで、1段目の鉄筋により遮蔽されている2段目の鉄筋がある場合にも、遮蔽されている鉄筋が見える異なる角度から撮影した画像を統合することにより対応可能である。タブレットPC画面をタップすることで、せん断補強筋、スペーサー、結束線の位置を画像上にマーキングし、数も算定可能である(写真-12)。

従来、遠隔臨場時には動画撮影用のウェアラブルカメラを用いていたが、システムのカメラとWeb会議システムを利用して遠隔臨場が可能であり、機器構成の簡易化を図れることを確認した(写真-1)。このため、遠隔地との情報共有ができ、監督員の検査場所への移動時間の低減や、複数人でのリアルタイムな検査情報確認による配筋ミスの防止に貢献できる。

3. システムの現場適用性評価

日射や天候、配筋仕様などの条件の異なる25現場以上の現場実証や新思惟大橋上部工工事での半年以上の連続使用により抽出した課題や要望により、2章に記載した配筋検査システムの機能を実装した。このシステムを用いた現場適用の結果、撮影から現場での

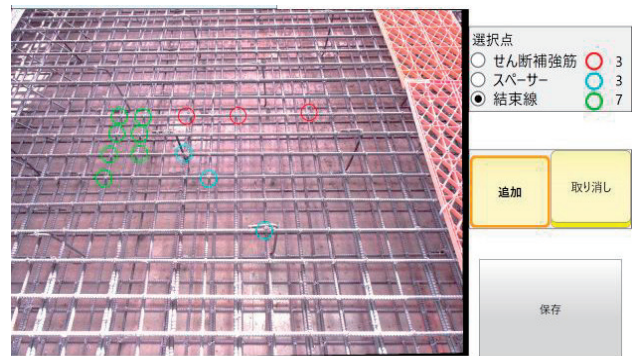


写真-12 部材カウントの表示例

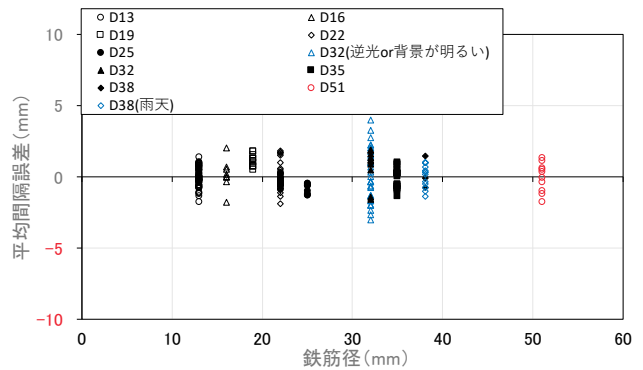


図-3 鉄筋径毎の平均間隔誤差

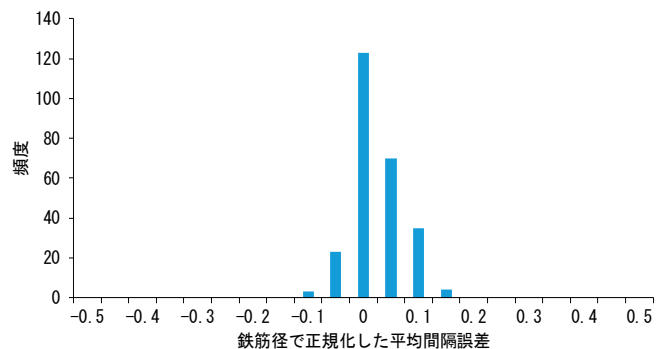


図-4 鉄筋間隔誤差のヒストグラム



写真-13 検査状況(妙高大橋下部工工事)

表-1 生産性評価(妙高大橋下部工工事)

| 配筋箇所 | 作業場所 | 従来検査 | | | | システム検査 | |
|---|------|------|----|-------|---------------|--------|-------|
| | | 作業時間 | 人工 | 人工・時間 | 作業内容 | 人工 | 人工・時間 |
| 橋梁下部工 (中空橋脚 1ロット4.5m 内側面 4カ所) | 事務所 | 1:00 | 1 | 1:00 | ・配筋調書ひな型作成 | 1 | 1:00 |
| | 現場 | 4:00 | 2 | 8:00 | ・自主配筋検査 | 1 | 1:30 |
| | 事務所 | 1:30 | 1 | 1:30 | ・自主検査調書記入 | 1 | 1:00 |
| | 現場 | 2:00 | 2 | 4:00 | ・検尺ロッド設置、黒板記入 | 1 | 0:00 |
| | 現場 | 1:00 | 3 | 3:00 | ・立会検査、写真、片付け | 1 | 1:40 |
| | 小計 | | | | 17:30 | | 5:10 |
| 削減率(%) | | 70 | | | | | |



写真-14 検査状況(東根川橋上部工工事)

表-2 生産性評価(東根川橋上部工工事)

| 配筋箇所 | 作業場所 | 従来検査 | | | | システム検査 | |
|--|------|------|----|-------|------------------------------|--------|-------|
| | | 作業時間 | 人工 | 人工・時間 | 作業内容 | 人工 | 人工・時間 |
| 橋梁上部工 (上床版4カ所、 下床版4カ所、 側壁2カ所) | 事務所 | 2:00 | 1 | 2:00 | ・配筋調書ひな型作成 | 1 | 1:00 |
| | 現場 | 5:00 | 2 | 10:00 | ・配筋自主検査 | 1 | 2:00 |
| | 事務所 | 2:00 | 1 | 2:00 | ・配筋調書記入 (自主検査用) | 1 | 1:00 |
| | 現場 | 2:00 | 3 | 6:00 | ・段階確認 (配筋検査、写真撮影、 片付け) | 1 | 1:00 |
| | 小計 | | | | 20:00 | | 5:00 |
| 削減率(%) | | 75 | | | | | |



写真-15 検査状況(左:川崎臨港下部、中央:船谷川橋、右:音中トンネル)

帳票作成まで7秒程度であった。従来の計測方法であるスケールとシステムを用いた平均間隔の誤差と鉄筋径との関係を図-3に、鉄筋径で正規化した平均間隔の誤差と頻度の関係を図-4に示す。平均間隔誤差は鉄筋径によらず5mm程度で、国土交通省の鉄筋の平均間隔の規格値 $\phi \pm \phi$ (ϕ は鉄筋径)を判定可能であることを確認した。

妙高大橋では配筋検査システムをRC橋脚部(幅8.0m×奥行き8.0m×高さ42.0m)で用いた。妙高大橋における検査状況と従来検査とシステム検査による検査時間の比較を写真-13、表-1に示す。

従来は自主検査の際に、配筋調書のひな型を事務所で作成し、検尺ロッドやマグネット、黒板などを準備し、現場でスケールを用いて計測し、黒板に計測結果を記入し、写真撮影をして、事務所に戻って帳票を整理していた。自主検査は計測やマグネットの取付けの必要があるため2名で、立会検査は3名で実施していたが、本システムを使用することにより、1名で対応

可能であることを確認した。1ロット4.5mのRC橋脚中空部の内側面にシステムを用いることにより、現場および事務所での作業時間が17時間30分から5時間10分と70%削減できる見込みとなった。従来の配筋検査で柱を検査する際は、マグネットなどの取付けのために鉄筋に触れる必要がありブラケット足場を解体できなかった。本システムでは離れた位置からの検査が可能のため、鉄筋組立後、すぐに足場解体ができ、工程短縮にも寄与できる可能性がある。

生産性の向上により高所作業時間は、妙高大橋では15時間を3時間10分に大幅に削減できた。さらに、写真-13のように足場など鉄筋から離れた安全な位置からの検査が可能になること、マグネットや検尺ロッドなどの設置の必要がないため、それらの落下の危険性が除去でき、安全性の向上にも寄与することも確認した。床版配筋では、マグネットや検尺ロッドは中腰での設置となるため、システムを利用することにより、腰への負担軽減も期待できる。

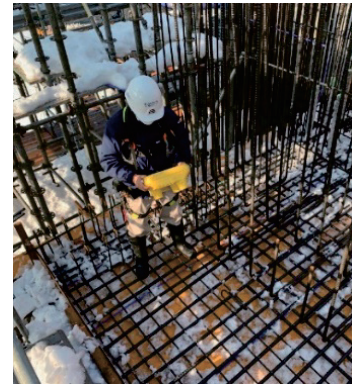


写真-16 使用状況(左:雨天時、中央:暗所部、右:降雪時)

東根川橋上部工工事の配筋検査状況を写真-14 に、生産性評価結果を表-2に示す。東根川橋は橋長 236m の 3 径間連続 PC ラーメン箱桁橋である。配筋検査は張出し架設の 1 ブロックで、張出し両側で上床版 4 回、下床版 4 回、側壁 2 回の計 10 回実施した。妙高大橋下部工事と同様に自主検査は計測やマグネットの取付けの必要があるため 2 名で、立会検査は 3 名で実施していたが、本システムを使用することにより、1 名で対応可能であることを確認した。表-2 に示すように、従来は 3 名で合計 20 時間かかっていたが、本システムでは 1 名により 5 時間で実施でき、作業時間の 75% を削減でき、生産性向上効果を有することを確認した。

本システムにより、現場での作業時間が大幅に削減すること、さらに、非接触での検査が可能になること、省人化により新型コロナウイルス感染症対策にも有効であることを確認した。この中には遠隔臨場による発注者や品質管理者の時間短縮効果は含まれていないため、遠隔臨場と組合せた場合は、さらに大きい生産性向上効果が期待できる。

写真-15 に川崎臨港下部、船谷川橋、音中トンネルでの使用状況を示すが、トンネルの覆工鉄筋のような曲面形状鉄筋にも適用可能であり、同様の生産性・安全性向上効果が確認できた。写真-16 のように、雨天時や暗所、降雪時などでもシステムを使用可能であることも確認した。

4. まとめ

3 眼カメラを用いた配筋検査システムを現場で長期運用し、システムに必要な機能や使い勝手に関する課題や要望を抽出し、機能改善を実施し、妙高大橋下部工工事および東根川橋上部工工事で生産性評価を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- ①配筋検査システムは簡単な操作で 7 秒程度で現場で帳票作成が可能で、寒冷地や雨天時などでも、現場での使用に支障はないこと
- ②スケールとシステムを用いた平均間隔の誤差は 5mm 程度で、平均間隔の規格値 $\pm\Phi$ を計測するために十分な精度を有すること
- ③橋梁の上部工、下部工ともに、自主 2 名、立会 3 名の検査員数を 1 名に省人化できるため、配筋検査時間を 1/3 程度に大幅に削減可能であること
- ④現場作業時間が大幅な削減や非接触・非対面での検査が可能となり、新型コロナウイルス感染症対策を含む安全性向上に貢献できること

謝辞：本研究の一部は、国土交通省の「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」の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 竹内啓五, 太田達見: 鉄筋観測のための小型形状スキャナの適用性評価, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), 材料施工, pp.193-194, 2012
- 2) 蔡成浩, 中村隆寛: 配筋検査システム, コンクリート工学, Vol.55, No.9, pp.840-843, 2017
- 3) 森本直樹, 後閑淳司, 酒匂智彦, 早川 博久, 平陽兵, 吉田裕亮, 桑島奨: ステレオカメラを活用した自動配筋検査システムの実証, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, VI-1102, 2019
- 4) 吉武謙二, 中野貴公, 井手章人, 藤井彰, 有田真一: 3 眼カメラによる配筋検査システムの現場適用性に関する研究, 土木情報学シンポジウム講演集, vol.45, pp.129-132, 2020
- 5) 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, https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000062.html (閲覧日 2021.11.02)
- 6) 国土交通省: 土木工事共通仕様書(案), 2018
国土交通省: 建設現場の遠隔臨場に関する監督・検査試行要領(案), <https://www.mlit.go.jp/tec/content/001397222.pdf> (閲覧日 2021.11.02)