

供用中の既設橋梁 3次元出来形計測

— 把持式ロボットと3Dレーザースキャナの適用 —

近藤 岳史*1・山口 貴志*2・青木 峻二*3・山崎 文敬*4

日本全国には約70万もの橋梁があり、2021年現在でそのうち約40%が供用開始後50年を経過したといわれている。これらの高度経済成長期に整備された橋梁の多くは、大型車両の交通量増大および経年劣化などによるコンクリート床版の損傷が著しく、早急に当該部分を取り替える必要があることから、全国各地で床版取替え工事が行われている。床版取替え工事では供用中の橋梁の出来形寸法を精度良く把握する必要があることから、一般に3次元レーザースキャナ（以下LSとする）を用いた計測を行うが、路上・路下ともに後述するとおり課題がある。本報告ではこのうち路下について、把持式ロボットと3次元レーザースキャナを用いたこれまでにない新しい課題解決の方法について述べる。

キーワード：把持式ロボット、3次元レーザースキャナ、床版取替え工事、出来形計測

1. はじめに

標準的な床版取替え工事は図-1のフローに沿って行われる。床版取替え工事の対象となる供用開始後50年を経過した橋梁については紙媒体の竣工図のみが保管されていることが多く、床版取替え工事の設計および施工計画に活用するには3次元座標情報が不足しているか、経時的な変形などにより正確でないことがある。そこで供用中の既設橋梁の出来形寸法を精度良く計測する必要がある（図-1の白抜き部分）。

同出来形寸法の計測においては、一般に路上の一部で交通規制を行いLSを用いて計測作業を行うことが多い。しかしこの方法は道路利用者への不便とともに規制帯の設置・撤去などの危険作業が伴う。

一方路下については、橋脚高が高い場合、地表面からLSで計測しても得られる点群密度が小さくなるため、設計や施工計画に必要な精度で橋梁の3次元形状を取得できない。また路下に河川が流れている場合は地上にLS自体を設置できない。そこで施工用足場を設置してからLSを用いて路下の計測を行う方法もあるが、この場合は設計業務に必要な時間を確保できない、もしくは設計業務のスケジュールが逼迫するといった課題がある。

2. 橋梁概要

前述の課題のうち路下について、新しく開発した課題解決方法である把持式ロボットとLSを用いた3次元出来形計測方法について、実橋梁を対象とした実証実験を行った。対象橋梁は、宮城県白石市の東北自動車道国見ICおよび白石ICの間に位置する斉川橋の上り線である。構造形式は鋼単純合成鈹桁橋で橋長38.3m、支間長37.3m、有効幅員は10.0mである。図-2に同橋の紙媒体竣工図およ

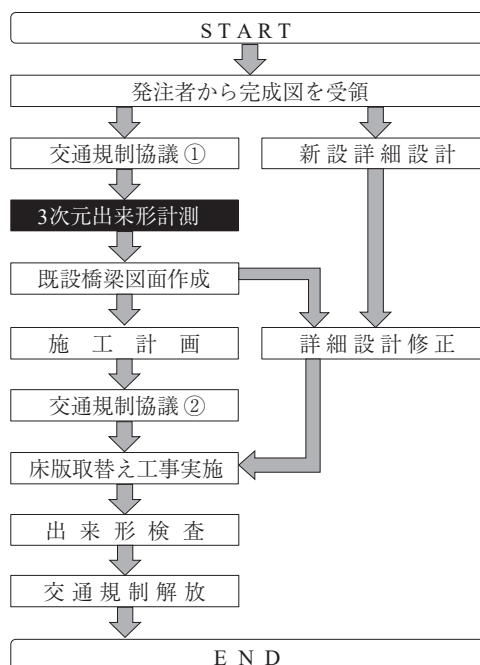


図-1 床版取替え工事の標準的的施工フロー

び今回の計測対象箇所を示す。また写真-1には斉川橋の全景および路下の状況を示す。

3. 把持式ロボットの概要

把持式ロボット（以下Turretsとする）は老朽化した橋梁路下の点検用に開発され実績を重ねてきたものである。ロボット本体は部材ごとに分割され、ワンボックスカー1台に積載可能な大きさで、各部材は人力で持ち運び可能である。計測箇所近傍まで車両で接近し、荷下ろし後は橋脚に付加されている検査路上で荷揚げ、組立て、および解体

*1 Takeshi KONDO：(株)大林組 土木本部生産技術本部先端技術企画部

*2 Takashi YAMAGUCHI：(株)大林組 土木本部生産技術本部先端技術企画部

*3 Shunji AOKI：(株)大林組 生産技術本部 リニューアル技術部

*4 Fuminori YAMASAKI：(株)イクシス

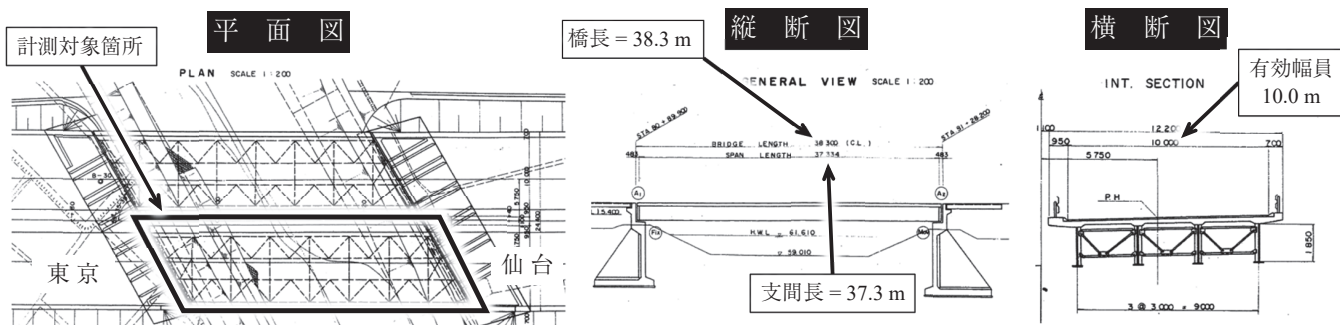


図 - 2 紙媒体の齊川橋竣工図



(a) 全景



(b) 路下状況

写真 - 1 齊川橋の全景および路下状況

微妙に調整したマニュアル撮影が可能

なお Turrets ではカメラに替えて小型の LS (Leica の BLK360) を搭載することが可能で、主桁に沿って走行とスキャンを交互に繰り返すことで路下の点群が取得可能である。しかしながら、文献 1) で述べたように過去に別の既設橋梁を対象として計測を実施した結果、得られた点群の密度および精度は、床版取替え工事の設計および施工計画に利用できるものではなかった。そこで搭載する LS をより高精度に点群取得が可能で、取得点群の密度も大きい Leica の RTC360 に変更した (以下新 Turrets とする)。新 Turrets を写真 - 2 に示す。操縦者はタブレット端末と LS を WiFi 接続し、離れた位置からでも取得した点群を確認しながら作業を行えるため、計測もれによる点群の欠損を未然に防止できる。

今回のように床版取替え工事の対象となる高速道路の橋梁は曲げモーメントに応じて主桁下フランジの幅が変化する設計となっていることが多い。また添接板で連結されている箇所はフランジの厚みが添接板の分だけ厚くなっている。従来の Turrets も把持するフランジの幅や厚みの変化に対応可能な機構を有していたが、フランジ幅の変化量が 250 mm 以上となる場合には走行ユニットの可動域が狭いため把持できなかった。そこで新 Turrets では把持できるフランジ幅の変化量を最大 400 mm まで拡大している。また搭載する LS の重量増加に伴い各種部材の補強も行った。

4. 実験方法

供用中の齊川橋路下において、新 Turrets による点群計測を実施した。図 - 3 に示す位置および順序で点群を計測した。計測箇所はおおむね 5 m スパンである。同図の○印で示した箇所は本来であれば点群を取得することが望ましいと考えていた箇所であるが、同図の★印箇所において路上の雨水用縦排水管が主桁下フランジに密接しており、新 Turrets の走行ユニットが干渉し、下フランジを把持できず点群取得ができなかった。しかしほかの箇所では計測した点群によって当該部分の点群は十分補間されており、点群が大きく欠損することはなかった。なお、LS は HIGH モードで計測を行い、移動を含めた計測時間は 1 箇所あたり約 10 分、計 14 箇所の測定で全体としては 140 分であった。

上記新 Turrets の計測値に対する真値として従来行われている方法である、地上部に LS を据え付ける方法による

が可能のため汎用性が高い。

Turrets は橋梁の主桁下フランジを挟むかたちで左右の走行ユニットを配置し、その走行ユニット同士を 2 本のカーボンレールで連結、レールの上に配置された昇降機能付き観測装置に搭載したカメラによって床版や上横構・ガセットなどの連結部点検が足場なしで実施できるものであり、以下の特徴を有する。

- ・ノート PC とゲームパッドから直感的に移動、観測装置上の雲台操作、および写真撮影が可能
- ・ノート PC には雲台部に搭載しているミラーレスカメラからのライブ映像がリアルタイムに送られ、撮影対象を

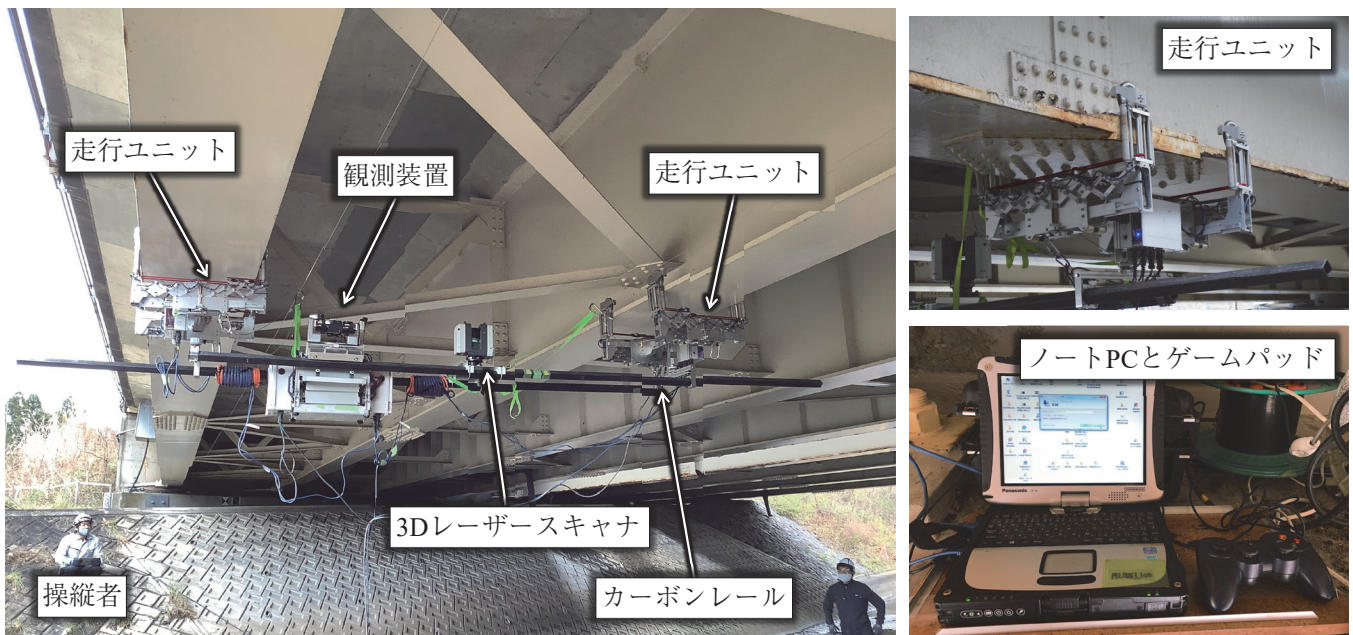


写真 - 2 新 Turrets

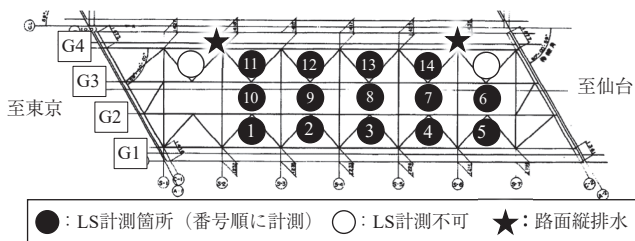


図 - 3 新 Turrets による点群取得箇所および順序

計測値を採用した（以下従来方法とする）。計測に用いたLSはLeicaのP40である。P40による計測の点群密度は2mm@10m（10m先で2mm間隔で点群を取得）とし、新Turretsに搭載したRTC360の3mm@10m(HIGHモード)よりも高い密度設定とした。LSの機種および点群密度の差異から、従来方法の移動を含めた計測時間は1箇所あたり約20分で計17箇所の測定で全体としては340分であった。写真-3にP40による計測状況を示す。なお、路下には写真-4に示す標定点を東京側、仙台側ともに4箇所ずつ設置し、その中心部の座標（ローカル座標系）を事前にトータルステーションとオートレベルで計測し、点群データを取得・合成後、上記標定点座標を基に3Dヘルマート変換を行うことで同一座標系で評価を行った。



写真 - 3 従来方法による真値計測状況

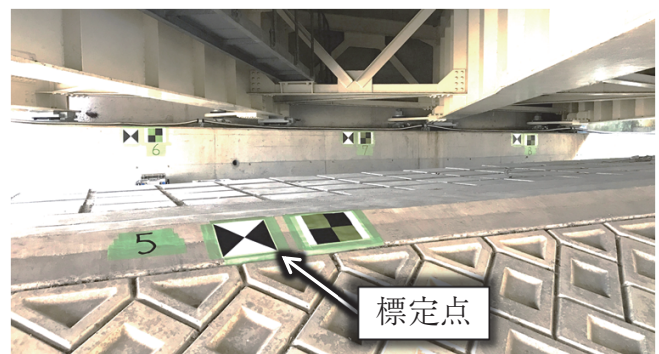


写真 - 4 標定点設置状況（東京側）

5. 計測結果

5.1 得られた点群の概要および密度

4. で述べた方法により計測した点群を図-4および図-5に示す。また表-1には使用した各LSの仕様を示す。両図を比較すると新Turretsにより得られた点群は従来方法により得られた点群と比べて死角が少ないことが分かる。これは新Turretsが計測対象物である主桁や床版に近接した位置で計測できるためである。今回のケースでは新TurretsのLSの位置は主桁下約20cmであったのに対し、

従来方法は約2mである。前述のとおり、点群密度の設定は従来方法の方が新Turretsよりも大きかったが、計測対象物までの距離は新Turretsの方が短い。図-6には得られた双方の点群密度を床版下面の同一箇所について比較した結果を示す。同図に示すとおり点群密度は新Turretsが約96.1万点/m²であるのに対し、従来方法は約62.8万点/m²と新Turretsの方が約1.5倍大きかった。更に、表-1に示す各LSの仕様からも計測対象物までの距離が短いため得られる点群の3D座標精度に対しても有利である。

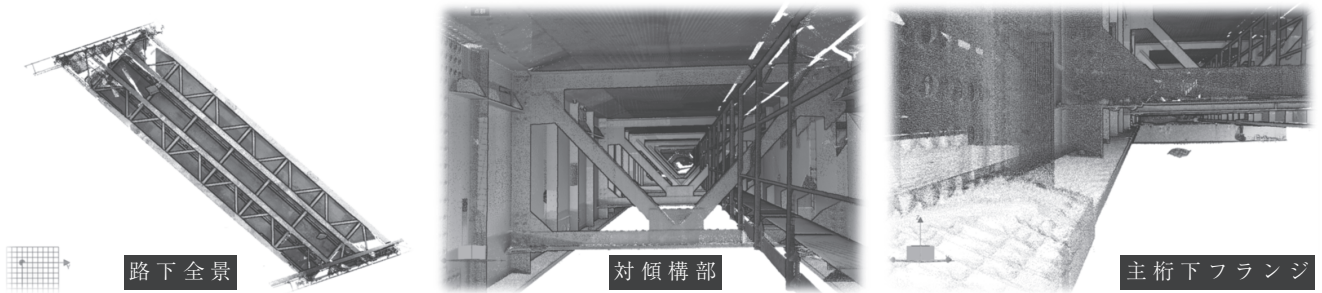


図 - 4 新 Turrets により取得した点群

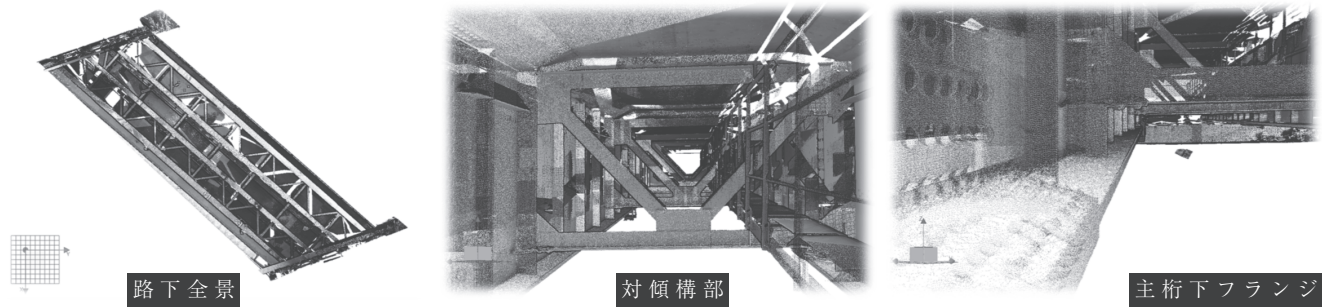


図 - 5 従来方法により取得した点群

表 - 1 各 LS の主な仕様 (※一部カタログ値から推定)

項目	仕様	
計測方法	新 Turrets による	従来方法による
LS 機種	Leica RTC360	Leica P40
水平スキャン範囲	360°	
鉛直スキャン範囲	300°	270°
測定範囲	0.5 ~ 130 m	0.4 ~ 270 m
スキャン速度	最大 2 000 000 点/秒	最大 1 000 000 点/秒
スキャン密度	HIGH : 3 mm@10 m MIDDLE : 6 mm@10 m LOW : 12 mm@10 m	任意に設定可能
測角精度	18"	8"
距離精度	1.0 mm + 10 ppm	1.2 mm + 10 ppm
3D 座標精度	2.9 mm@20 m、5.3 mm@40m ※ 1.2 mm@20 m、※ 2.4 mm@40 0 m	
レンジノイズ	0.4 mm@10 m、0.5 mm@20 m	

また冒頭に述べたとおり、床版取替え工事で対象としている橋梁は供用中の道路橋である。今回の齊川橋も供用中であり、新 Turrets の計測作業中にも大型車両が路上を通行する際には、LS は主桁の鉛直方向振動 (数 cm) を感知して警告を発することがあった。あとで当該箇所(point cloud)を確認すると主桁の上下動に伴って得られた点群が波打つように計測されていることが判明した。しかしながら新 Turrets による計測では図 - 3 に示したとおり、比較的近傍の複数箇所(point cloud)で点群を計測し、計測後に各点群を 3 次元点群処理ソフトウェアにて合成処理している。したがってある箇所の計測時に振動による波打が生じて、ほかの計測箇所(point cloud)で振動が生じていなければ、当該部分を点群合成時に不良箇所として排除することができ、実形状を反映した点群を認識することができた。

以上のように死角の少ない高密度な点群を取得できるこ

とは有用であるが、一方で課題もある。

点群密度の向上に伴い、点群データの容量も膨大となる。今回の橋梁規模は長さ約 40 m、幅約 10 m であったが、新 Turrets によって計測した点群全体の容量は 50 GB を超えるものとなった。このデータ量をストレスなく扱うにはハイスペックな PC が必要となる。またデータの受け渡しについてもクラウドストレージを介して行ったが、データのアップロードおよびダウンロードに多くの時間を要した。PC やクラウドなどのハード環境は日進月歩ではあるが、今回のケースを実務として考えた場合、路上のデータも追加が必要になることおよび対象橋梁の規模も大きくなりうることからハード面に加

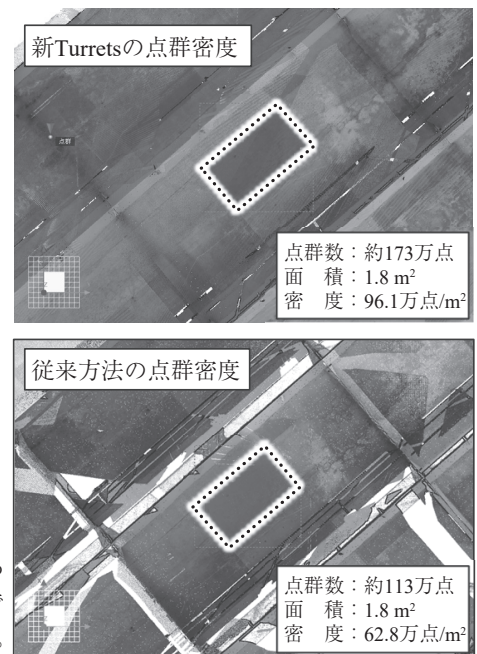


図 - 6 点群密度の比較

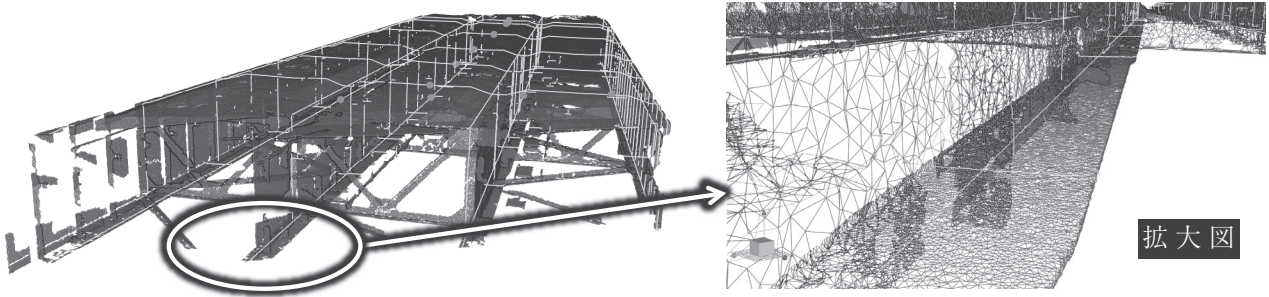


図 - 7 点群データから作成した3次元メッシュ

えソフト面（点群データをストレスなく扱う方法など）の工夫や開発も喫緊の課題と考えている。

5.2 得られた点群の精度

新 Turrets で得た点群の精度検証を従来方法で得た点群を真値として行った。手順は以下のとおりである。

- a) 3次元点群処理ソフトウェアを用いて各点群データから3次元メッシュを作成（図 - 7）
- b) a) で得た3次元メッシュについて、3次元点群処理ソフトウェアによって同じ位置の縦断面および横断面を抽出（図 - 8 の①～④および⑤～⑩）
- c) 切り出した縦断面および横断面図を CAD データとして出力し、新 Turrets と従来方法の CAD データを重ね合わせることで、床版下面および下フランジ下面の Z 座標真値に対する差分を算出（図 - 8 の A～J および a～g）

1. で『供用中の既設橋梁の出来形寸法を精度良く計測する』と述べたが、当社ではこれまでの床版取替え工事の実績からこの基準を絶対位置精度 $\pm 10 \text{ mm}$ 未満（以下目標精度とする）としている。同精度は図 - 9 に示す床版取替え工事の標準的断面図において、主桁フランジ上の調整モルタルの出来形寸法を満足するために、既設橋梁の3次元出来形計測の段階で許容できる上下限值として当社が設定したものである。なお今回従来方法によって得た点群（真値）の絶対位置精度は表 - 1 に示した3D座標精度(1.2 mm@10 m)からを $\pm 2 \text{ mm}$ とした。したがって新 Turrets による計測値と真値の差分が $\pm 8 \text{ mm}$ 未満（目標精度担保基準）であれば絶対位置精度 $\pm 10 \text{ mm}$ を担保できるとした。

表 - 2、図 - 10 および図 - 11 に c) で算出した Z 座標の差分を示す。今回は縦断方向について 40 箇所、横断方向について 42 箇所の点で検証を行ったが、すべての点に

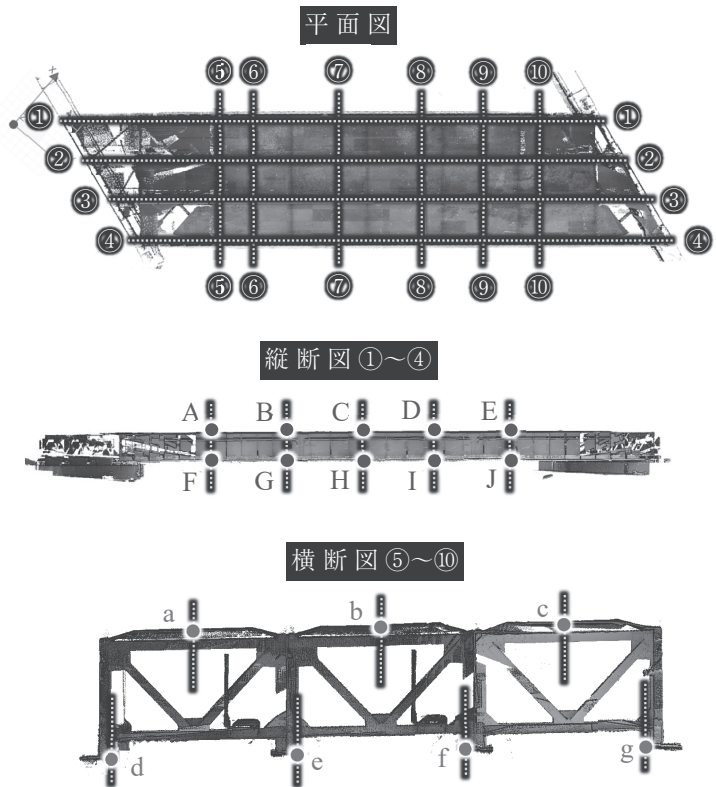


図 - 8 3次元メッシュの断面位置および比較座標位置

表 - 2 新 Turrets により計測した Z 座標差分まとめ

床版下面の Z 座標差分まとめ (mm)			
断面位置	計測箇所数	標準偏差	平均値
① ② ③ ④	20 箇所	2.0	-2.7
⑤ ⑥ ⑦	9 箇所	1.9	-3.6
⑧ ⑨ ⑩	9 箇所	1.4	-3.1

下フランジの Z 座標差分まとめ (mm)			
断面位置	計測箇所数	標準偏差	平均値
① ② ③ ④	20 箇所	2.1	-3.2
⑤ ⑥ ⑦	12 箇所	1.7	-3.6
⑧ ⑨ ⑩	12 箇所	1.9	-2.3

※計測値全体の標準偏差は 2.0 mm、平均値は -3.0 mm

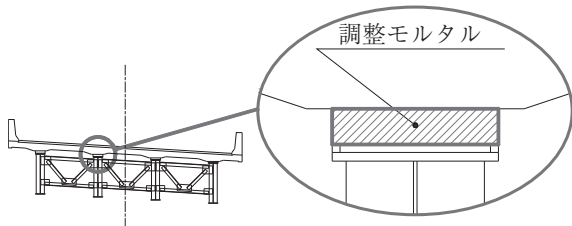


図 - 9 床版取替工事の標準的断面図

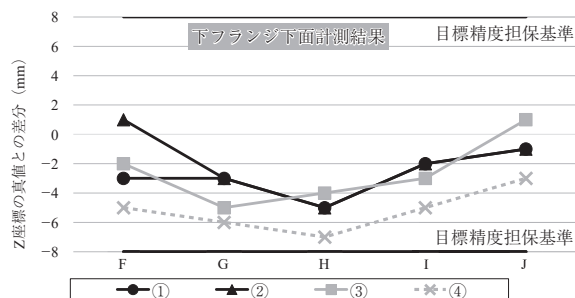
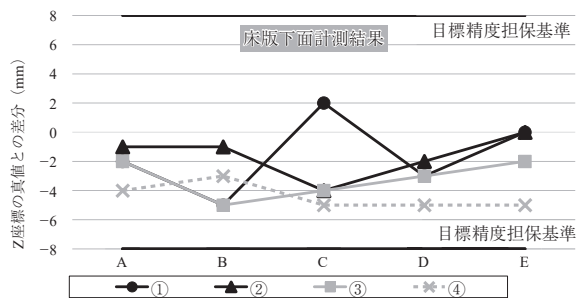


図 - 10 新 Turrets により取得した点群の計測精度 (縦断方向)

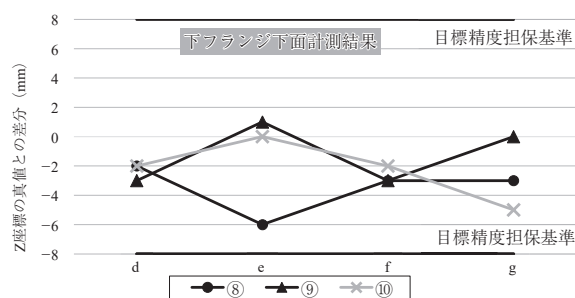
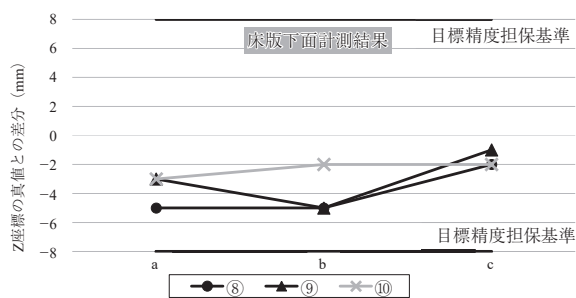
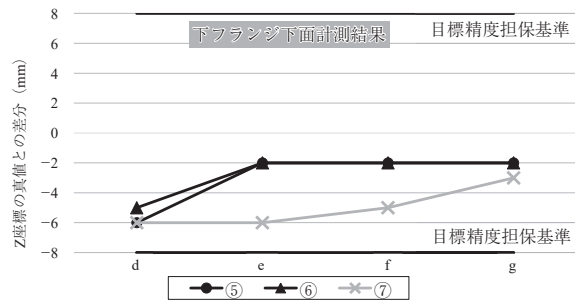
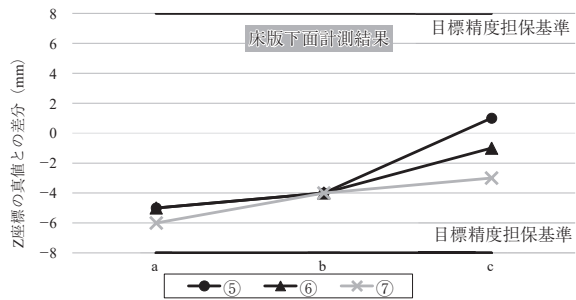


図 - 11 新 Turrets により取得した点群の計測精度 (横断方向)

において目標精度 (目標精度担保基準) を満足した。したがって、新 Turrets によって取得した計測結果は床版取替え工事の設計および施工計画に利用することが可能といえる。また表 - 2 に示すとおり 82 箇所全体としての標準偏差は 2.0 mm、差分平均値は -3.0 mm であり、点群全体として高精度かつ均一な点群が取得できたと言える。また文献 1) で課題としてあげていた橋梁路下全体の点群をほぼもれなく面的に取得できたことも大きな成果と考えている。

6. おわりに

床版取替え工事における供用中の既設橋梁 3 次元出来形計測について、新 Turrets (把持式ロボットと LS) を用いた新しい計測方法について実証実験を行った。新 Turrets により約 5 m のスパンで 3 mm@10 m の点群密度で LS 計測を繰り返し、真値として別途計測した地上 LS の点群と比較したところ、床版取替え工事の設計および施工計画に利用するための目標である絶対位置精度 ± 10 mm 未満を満足した。

また筆者らは文献 1) および文献 2) で述べているように路上については UAV と高画素カメラを用いた SfM による出来形計測方法により、路上の交通規制をすることなく

今回と同様に目標精度を満足し、路上および路下の点群は標定点を介して合成できることも確認している。以上から路上を交通規制することなく、路下については作業用足場を設置する前に床版取替え工事の設計および施工計画に利用可能な精度で供用中の既設橋梁における 3 次元出来形計測が実施可能な手法を確立した。本手法によって図 - 1 の交通規制協議 ① が省略されるとともに、詳細設計やその修正作業に多くの時間を割くことで、プロジェクト全体の省力化および設計・施工の精度向上に寄与できる。今後は本技術を全国の床版取替え工事の現場で数多く適用し、実績を重ねることで更なる技術発展とともに社会的ニーズへの貢献を図っていく所存である。

参考文献

- 1) 近藤岳史, 山口貴志, 青木峻二, 山崎文敬: 供用中の高速道路橋における 3 次元出来形計測について, 第 29 回プレストレストコンクリート発展に関するシンポジウム, 2020.10
- 2) 近藤岳史, 青木峻二, 雨谷周也, 渡辺一生: UAV と高画素カメラを用いた供用中の道路橋 3 次元計測, 土木建設技術発表会 2020, 2021.2

【2021 年 4 月 5 日受付】