T-CIM/Bridge システムを用いた橋梁張出架設の情報化施工

大成建設(株)　正会員　○大島　邦裕　正会員　中田　清博
大成建設(株)　正会員　大平　成泰　正会員　熊谷　徹
大成建設(株)　正会員　岩下　英幸　正会員　宮地　飛馬

1．目的

近年の建設業は，新たな交通網の整備，防災・減災対策，そして，老朽化したインフラ施設の更新など，社会的使命を果たすために繁忙度が高い状況にある．一方で，技能労働者の減少や働き方改革の推進といった社会情勢が急速に変化しており，建設現場では，限られた労働力で効率的に工事を進めるために，生産性の向上が不可欠となっている．国土交通省は，情報化施工や CIM を取り入れた建設現場の生産性の向上を目指す「i-Construction」という取組みを推進しており，各種分野の土木工事では，作業の効率化を図るための技術が積極的に開発され，現場に適用されている．このような背景から，張出し架設工法により施工する橋梁上部工工事においても，自動化システムや情報通信技術などを活用して生産性の向上を図る施工管理システム「T-CIM/Bridge システム」（以降，T-CIM/Bridge）を開発して，現場への適用を行った．本稿では，本システムの紹介と現場適用の事例を示す．

2．システムの概要

張出架設工法で施工する橋梁工事では，コンクリートの品質管理に加えて，**図-1** に示すように，移動作業車の管理，施工時の橋面高さに係る上げ越しの管理（高さ管理），プレストレスの管理，そして，桁断面形状の出来形管理が必要である．これらの管理は，1 ブロックの張出し施工のたびに繰返し行う必要がある．従来は，現地でしか施工状況を把握することができないため，技術者が現場に常駐してこれらの管理を行う必要があること，また，管理項目が多岐にわたり，かつ連携が必要になることから，施工管理に多くの時間と労力が費やされていた．

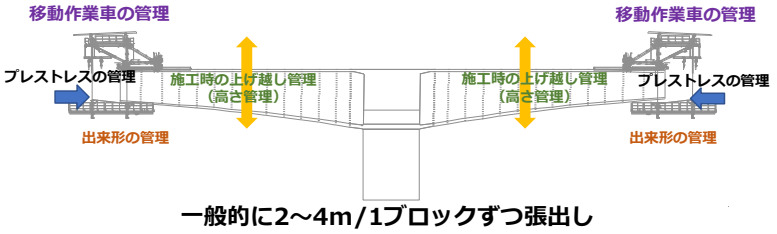


図-1　張出架設工法による橋梁工事の主な管理項目

T-CIM/Bridge は，張出架設工法の管理で必要となるこれらの管理を効率化できる 4 つのシステムから構成されている．また，各システムで取得されたデータはクラウドで一元管理されるため，**図-2** に示すように，遠隔地から端末機器やパソコンによる現場管理や施工状況の確認を行うことが可能である．これにより，現場の管理状況を発注者も含めた工事関係者間で見える化と共有化することも可能になる．

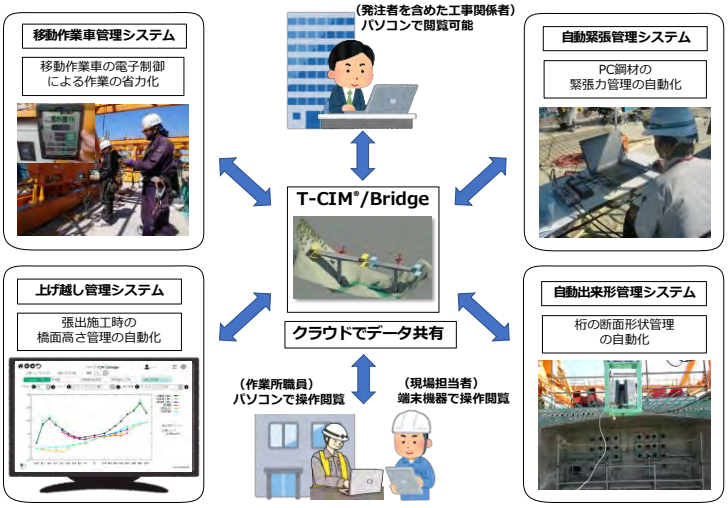


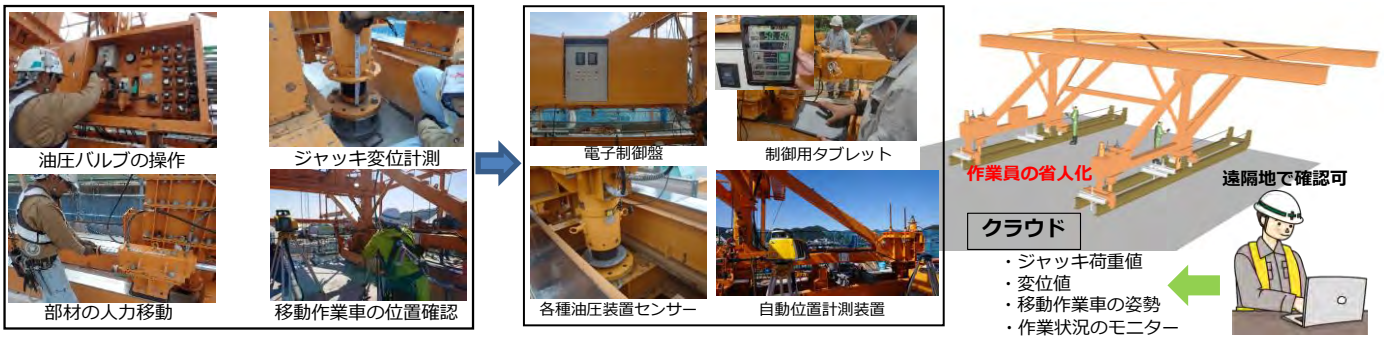
図-2　各システムで取得されたデータの共有

以降に，これらのシステムの機能について説明する．

キーワード　橋梁，張出施工，情報化施工，省力化，生産性向上
連絡先　〒163-0606　東京都新宿区西新宿 1-25-1　大成建設（株）土木本部　土木技術部　ＴＥＬ03-5381-5079

(1) 移動作業車管理システム

従来の張出し架設における移動作業車の移動・設置では，**図-3** に示すように，油圧バルブの調整，ジャッキの変位測定，移動作業車の位置確認に複数の作業員が人力で対応していた．移動作業車管理システムでは，油圧バルブを全て電磁化し，油圧バルブの操作や変位情報は，センサーを介して制御用タブレットで全て管理できるため，管理の効率化と作業の省力化を図ることができる．また，作業車の固定時における PC 鋼棒の緊張力や変位はデータで記録され，クラウドに保存されるため，遠隔地でも作業の安全管理ができる．



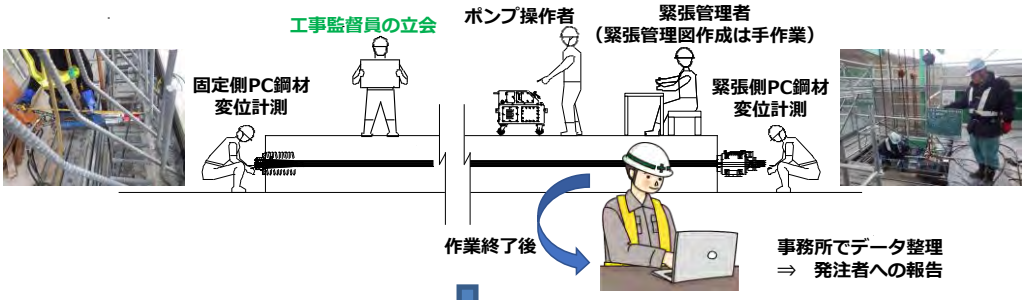
【従来の方式】　　【移動作業車管理システム】

図-3　移動作業車管理システム

(2) 自動緊張管理システム

従来の PC 鋼材の緊張作業は，ジャッキの圧力や PC 鋼材の伸び量を人力で計測し，緊張管理者が数値の報告を受けて緊張管理図を手作業で作成していた．自動緊張管理システムでは，ジャッキ圧力や PC 鋼材の伸び量をセンサーで自動計測し，管理用パソコンに転送して緊張管理図を自動作成することができる（**図-4**）．なお，センサーと管理用パソコンは無線方式で接続され，橋面上に計測ケーブルの配線は不要である．これにより，作業の省力化とともに，緊張時にジャッキ近傍に作業員を配置する必要がないため安全性も向上させることができる．作業後，緊張管理データはクラウドに保存され，遠隔地からも確認が可能である．また，クラウド上でグループ管理の自動計算が行えるため，作業後の緊張データの管理を省力化することができる．

【従来の方法】



【自動緊張管理システム】

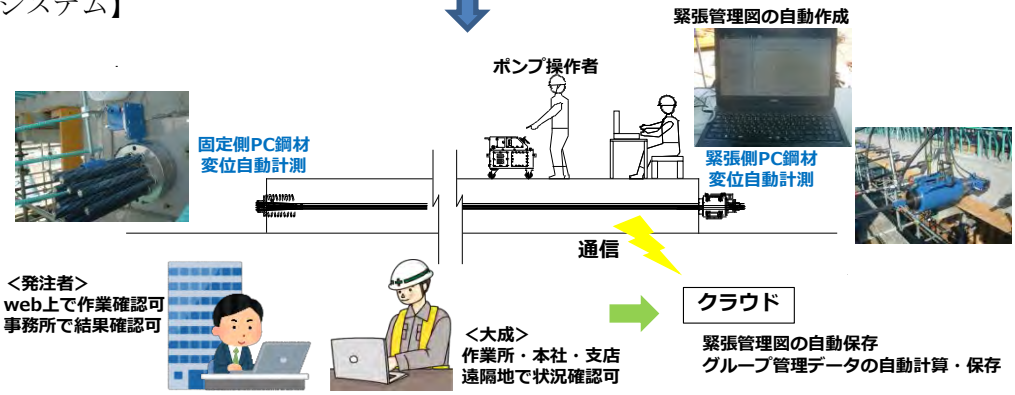


図-4　自動緊張管理システム

(3) 上げ越し管理システム

従来の上げ越し管理では，現場職員や計測員が現場で橋面高さの測量と温度計測を行い，計測データの整理，補正計算を経て上げ越し値の評価を手作業で行っていた．その作業は，コンクリート打設などの施工段階のたびに行う必要があること，状況に応じて上げ越し状況を発注者に報告するなどの労力を要していた．

上げ越し管理システムでは，**図-5** に示すように，橋面高さと温度を自動計測し，データがクラウドに転送されるため，遠隔地でも上げ越しの評価を行うことができる．管理データはクラウドに保存されるため，発注者も含めた工事関係者が遠隔地で上げ越し状況を確認でき，作業の効率化と省力化を図ることができる．

また，上げ越し管理システムは，設計と実際の材料定数が異なる場合，補正計算により現状の高さが妥当かを判断することができる．例えば，実際のコンクリートの弾性係数が設計値と異なる場合，クラウド上の管理データを設計担当と共有して協議し，上げ越し値を適宜補正することも可能である．

【従来の方法】

【上げ越し管理システム】

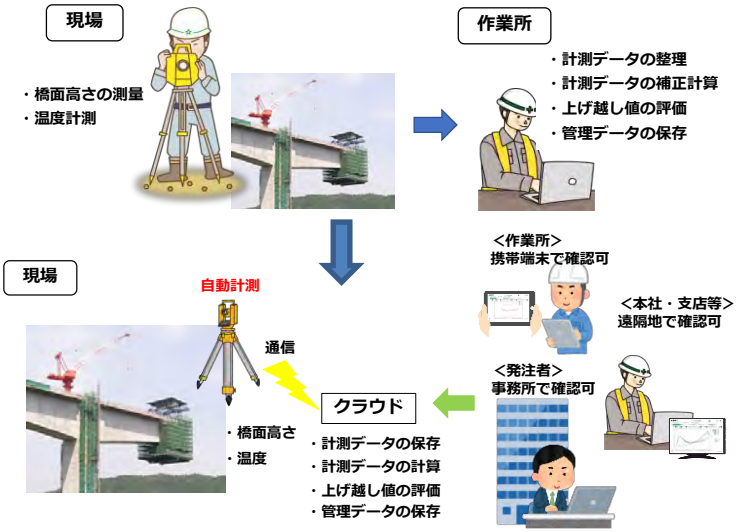


図-5　上げ越し管理システム

(4) 自動出来形管理システム

張出架設工法の橋梁における桁断面の出来形調書は，従来は図面情報から手作業で作成するが，施工ブロックごとに桁形状が異なるため，調書作成に労力を要していた．自動出来形管理システムでは，**図-6** に示すような 3D モデルからブロック毎の出来形調書を自動作成することができ，作業の効率化を図ることができる．

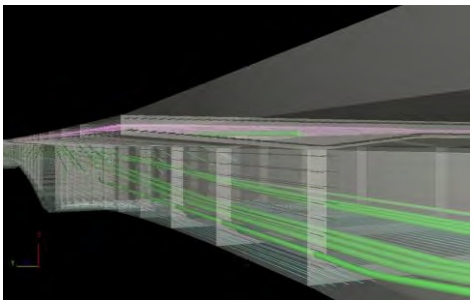


図-6　橋梁の 3D モデル

桁断面の計測は，ブロック施工毎に３～４人の計測員で計測を行い，調書を作成するのが従来の方法であった．自動出来形管理システムでは，現場で取得した 3 次元点群データから桁断面を自動採寸することができる．3 次元点群データは，撮影時に固定が必要な 3D スキャナーの場合，移動作業車の足場の揺れが計測精度に影響するため，本システムでは，市販の一眼カメラを用いて，**図-7** に示すような計測断面に対して，任意座標系内で取得した複数の画像データを SfM 解析（Structure of Motion 解析：多視点の複数画像から対象物を 3 次元点群データとして再現する解析）により隣接画像の対応関係を解析して 3 次元点群データを取得するものである．この方法により，足場の揺れや風の影響をなくし，高精度の 3 次元点群データを取得することができる．自動出来形管理システムは，出来形調書の自動作成，桁断面の自動採寸により，作業の省力化を図ることが可能である．

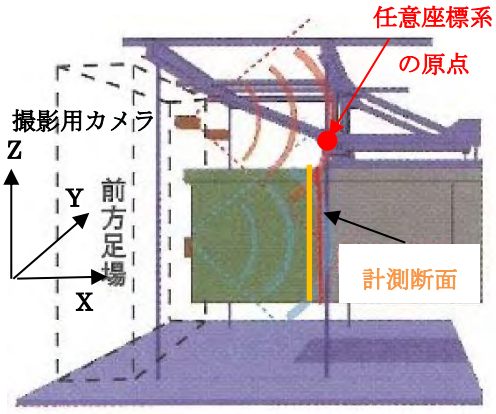


図-7　任意座標系でのデータ取得

３．橋梁工事への適用

都市計画道路盛岡駅本宮線杜の大橋上部工工事（岩手県発注，以降，杜の大橋）に T-CIM/Bridge を適用して施工を行った．杜の大橋は，盛岡駅西口から市南部エリアを結ぶ路線にあり，1 級河川の雫石川を渡る橋梁である．平成 18 年度から第I期事業によって上り線側の橋梁が暫定供用されており，本工事は，第II期事業として下り線側の橋梁上部工を構築するものである．本橋は，**図-8** に示すように，桁長 493.2m，幅員 11.75m の 7 径間連続 PC 箱桁橋であり，架設方法として，P2，P3 および P4 を起点とする張出し架設工法，A1～P1 と P2 の中間部および A2～P4 と P5 の中間部は，固定支保工架設工法としている．また，本工事は，河川内工事であることから，非出水期（10 月 1 日～6 月 30 日）に施工を行うものとしている．

T-CIM/Bridge は，本工事のうち，P2，P3 および P4 を起点とする 3 箇所の張出し架設工法に適用した．

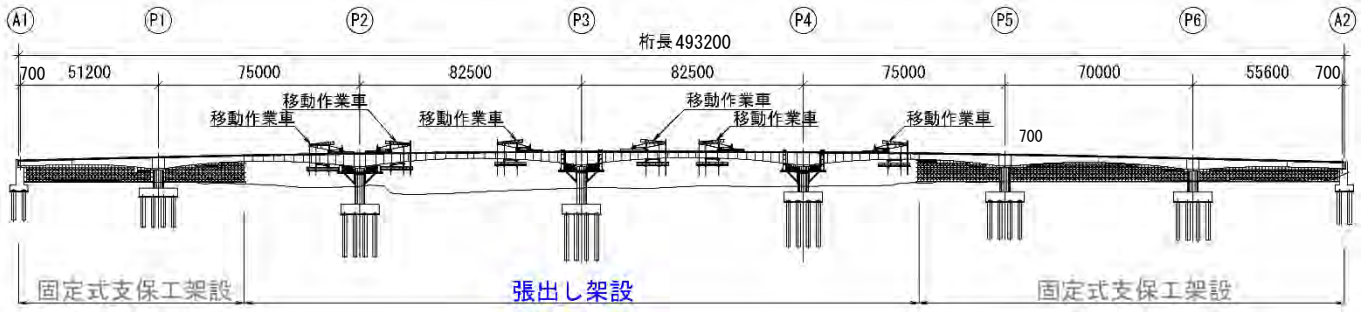


図-8　杜の大橋の橋梁一般図

４．各システムの適用と効果

(1) 移動作業車管理システム

非出水期内に張出し施工を完了させるため，P2，P3 および P4 を同時に張出し架設する計画とし，6 箇所に移動作業車管理システムを適用した．「**2. システムの概要**」で示すように，移動作業車の油圧系統は，**写真-2** のとおり全て電子化にし，**写真-4** に示すタブレットを用いて少し離れた位置から移動作業車の状態を確認しながら 1 張出しずつ操作した．なお，操作は，1 主構に対して 1 台のタブレットで操作するため，1 張出しで 2 台のタブレットを使用した．自動計測されたジャッキの油圧および変位量をタブレットで確認しながら，1 人で移動作業車を操作できるため，従来の移動作業では，指揮者 1 人，油圧操作 1 人，変位計測 2 人，作業補助 2 人の計 6 人の作業者のところを，移動作業車システムの適用により，指揮者 1 人，油圧操作 1 人，作業補助 2 人の計 4 人で作業できた．移動作業車の移動後，ジャッキ圧力と変位データはクラウドに保存され，**図-10** に示す形式によりパソコン上で確認できた．

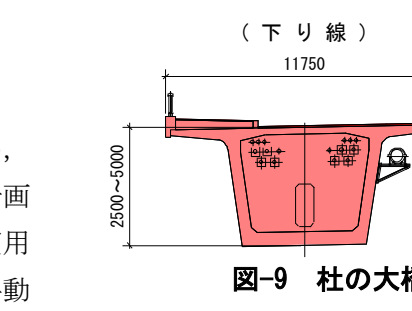


図-9　杜の大橋の上部工断面図



写真-1　移動作業車全景



写真-2　油圧装置



写真-3　変位計測装置



写真-4　操作用タブレット

P4_5号機(起4BL～5BL)	管理位置	台番	変位
左	後方車輪用	31 kN	368.30 mm
	後方支点用	468 kN	380.90 mm
	前方支点用	4 kN	382.30 mm
右	後方車輪用	41 kN	374.10 mm
	後方支点用	468 kN	381.10 mm
	前方支点用	9 kN	383.10 mm

図-10　クラウド上の移動作業車データ

(2) 自動緊張管理システム

自動緊張管理システムは，張出しケーブル（12S12.7mm）および床版横締めケーブル（1S28.6mm）の緊張作業に適用した．**写真-5** と**写真-6** のとおり，緊張ジャッキに圧力計と変位計を設置し，各種データを自動計測した．計測されたデータは，無線方式（現場内の Wi-Fi 網を使用）で管理用パソコンに転送され，**写真-7** にように緊張管理図を自動で作成した．緊張管理者は，緊張作業中にパソコン上の緊張管理図を確認しながら管理を行った．ジャッキ近傍に計測員が配置されずに緊張作業ができるため，安全性が向上するとともに，緊張作業の省力化が可能になった．

具体的には，床版横締めケーブルの緊張作業では，従来は，緊張管理者 1 人，ポンプ操作者 1 人，変位計測およびジャッキ盛替え 2 人の計 4 人のところを，緊張管理者 1 人，ポンプ操作者 1 人，ジャッキや計測機器の盛替え補助 1 人の計 3 人で作業ができた．張出しケーブルの緊張作業では，片引きケーブルの場合は，床版横締めケーブルと同じ人数配置で作業ができた．両引きケーブルの場合，変位計測は必要ないが，緊張端と固定端が離れているため，緊張管理者 1 人，ポンプ操作者 2 人，ジャッキや計測機器の盛替え補助 2 人の計 5 人で，従来と同じ人数配置となった．計測作業と緊張管理図の作図時間が省略され，緊張作業時間は短縮されたが，計器の盛替え作業等の準備作業に関しては，更なる改良の余地がある．現場での緊張管理が完了後，**図-12** に示すように，クラウドにデータを保存するとともに，便覧方式[1)]で，緊張管理者が管理範囲を設定すれば，クラウド上でデータのグループ管理が自動で計算される（**図-11**）．これにより，緊張管理者は PC 鋼材の 1 本毎の管理だけでなく，グループ管理の作業も省力化することができた．また，整理された緊張管理データは，クラウド上で保存と管理されるため，工事関係者間でデータの共有が可能になった．

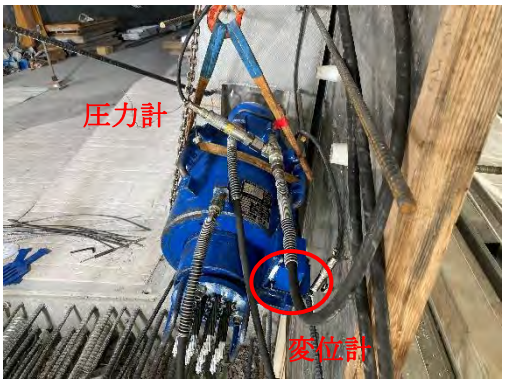


写真-5　張出しケーブルジャッキ

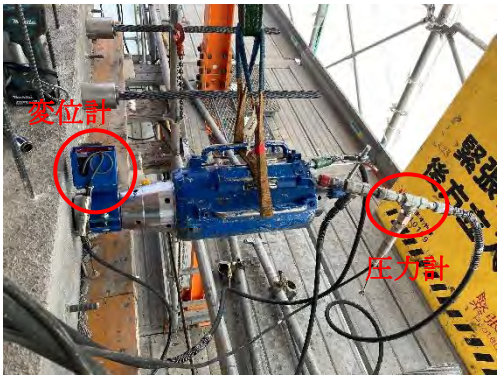


写真-6　床版横締めケーブルジャッキ

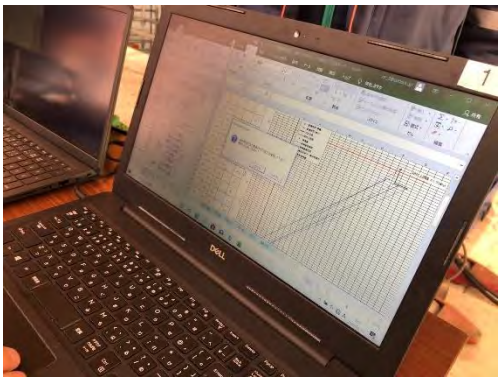


写真-7　管理用パソコンでの緊張管理図

緊張箇所		P3 1BL				P3 2BL			
緊張年月日		23/1/19				23/1/31			
緊張順序		1	2	3	4	5	6	7	8
ケーブル番号		311	311	302	302	303	303	318	318
実測	最終緊張力	54	55	55	55	57	57	55	55
	補正全伸び量	122	123	121	120	164	161	162	161
	μ	0.09	0.35	0.15	0.27	0.21	0.20	0.14	0.17
	$\Sigma\mu$	1.580							
	$\bar{\mu} = \Sigma\mu / n$	0.197							

（張出しケーブル）

緊張順序	PC鋼材 No.	測定伸び [mm]	計算伸び [mm]	1 差 [%]	測定圧力 [MPa]	計算圧力 [MPa]	2 差 [%]	8+1-2 [%]
1	1S-4	75.6	74.5	1.5%	56.0	55.4	1.1%	0.3%
2	1S-4	76.4	75.2	1.5%	56.0	55.4	1.1%	0.4%
3	1S-4	78.4	75.2	4.2%	56.0	55.4	1.1%	3.0%
4	1S-4	77.4	75.2	2.8%	56.0	55.4	1.1%	1.7%
5	1S-4	78.3	75.2	4.1%	56.0	55.4	1.1%	3.0%
6	1S-4	78.3	75.2	4.1%	56.0	55.4	1.1%	3.0%
7	1S-4	76.5	74.5	2.7%	56.0	55.4	1.1%	1.6%
8	1S-4	77.5	75.2	3.0%	56.0	55.4	1.1%	1.9%
9	1S-4	78.0	75.2	3.6%	56.0	55.4	1.1%	2.5%
10	1S-4	73.7	75.2	-2.0%	56.0	55.4	1.1%	-3.1%
11	1S-4	76.8	75.2	2.1%	56.0	55.4	1.1%	1.0%
12	1S-4	76.2	75.2	1.3%	56.0	55.4	1.1%	0.1%

（床版横締めケーブル）

図-12　クラウドに保存されたデーター覧

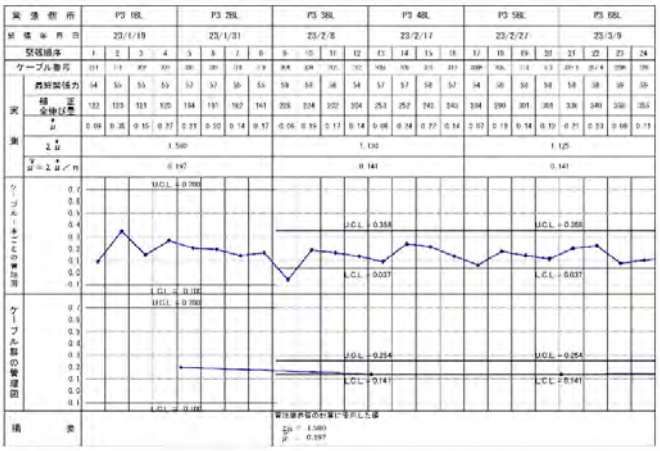


図-11　張出しケーブルのグループ管理結果の例

(3) 上げ越し管理システム

P2，P3，P4 の張出し架設部では，上げ越し管理システムによる橋面高さと床版温度の自動計測，および，これらの計測値を解析した上げ越しの評価を行った．橋面高さの自動計測は，**写真-8** と**写真-9** のように，柱頭部にトータルステーションを設置し，各ブロックの計測位置に設置したターゲットプリズムを測量して行った（**写真-10**）．トータルステーションとターゲットプリズムは，橋面上の作業動線と重ならないように，張出し床版上の地覆付近のラインに設置した．自動計測に必要となる後方交会用の基準点は，柱頭部の仮固定ケーブル用の定着ブロックに 2 箇所設置した．床版温度の計測は，上床版と下床版に熱電対を設置して行った．

計測した各種データは，自動でクラウドに保存がされる（**図-13** が橋面高さ，**図-14** が床版温度）．クラウドに保存されたデータは，床版温度差による高さ変化を補正した橋面高さに解析され，これを各施工イベントと紐づけすることで，**図-15** に示すような施工時における計画高さに対する現状高さを比較することができる．また，**図-16** に示すように完成予想に対する各施工時点での完成予想高さが解析される．施工管理者はこれらの数値から，張出し施工時の計画に対する高さ誤差を考慮して，次のブロックの型枠設置高さを設定することができた．従来では，現状高さを施工イベント毎あるいは日常管理において，計測員が現地で高さの測量と温度計測を行い，データを整理して考察する方法であったが，各作業の自動化により省力化が図ることができた．



写真-8　計測状況（全景）



写真-9　トータルステーション



写真-10　ターゲットプリズム

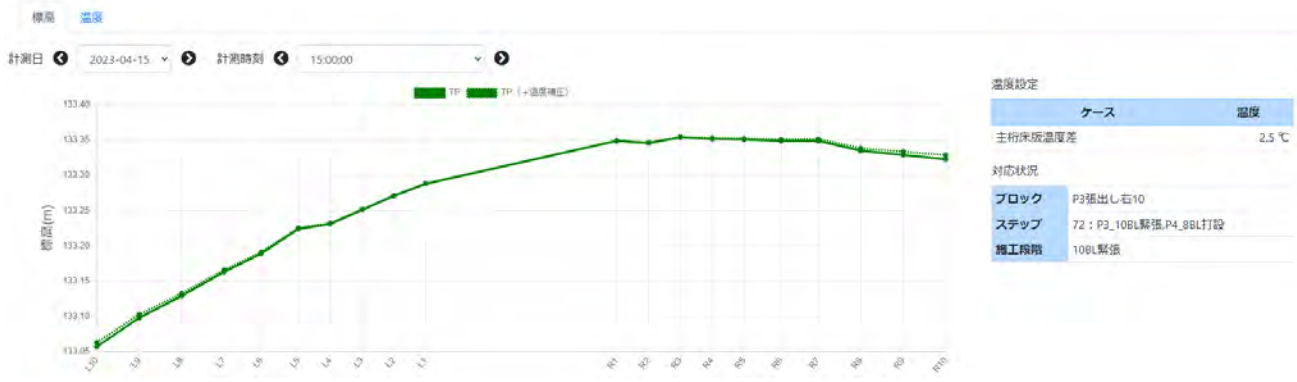


図-13　橋面高さ（標高表示）



図-14　床版温度の履歴（1 日単位）

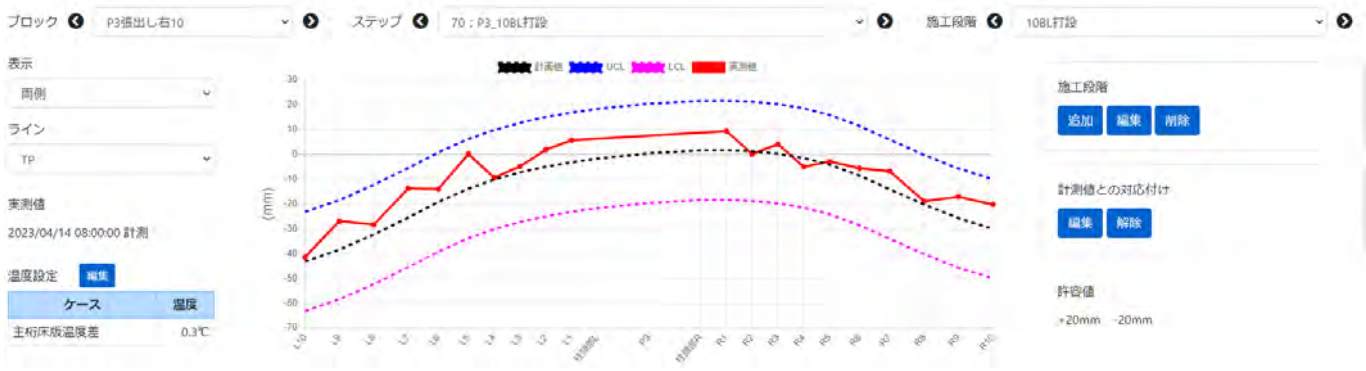


図-15　施工時の計画高さに対する現状高さの比較（P3 の 10BL 打設後の例）

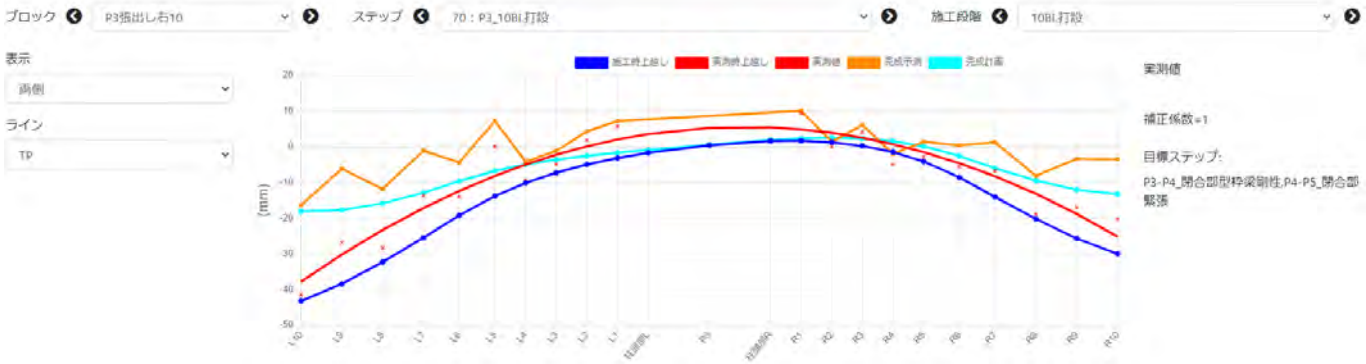


図-16　上げ越し状況図と完成時の予想高さ（P3 の 10BL 打設後の例）

なお，**図-13～図-16** の情報は，工事関係者がパソコンや携帯端末から確認することができ，各施工段階での橋面高さの状況を共有することができた．

（4）自動出来形管理システム

杜の大橋における P2，P3，P4 の張出し施工部では，**図-17** に示すように，出来形調書自動作成ツールを用いて出来形調書を作成した．「**2. システムの概要**」に示したように，杜の大橋では，自動で調書が作成できるため，大幅に作業の省力化を図ることができた．なお，出来形調書の作成に際し，**図-18** に示すように対象部位を選択することができるため，発注者の指定に対応した出来形調書の作成が可能である．

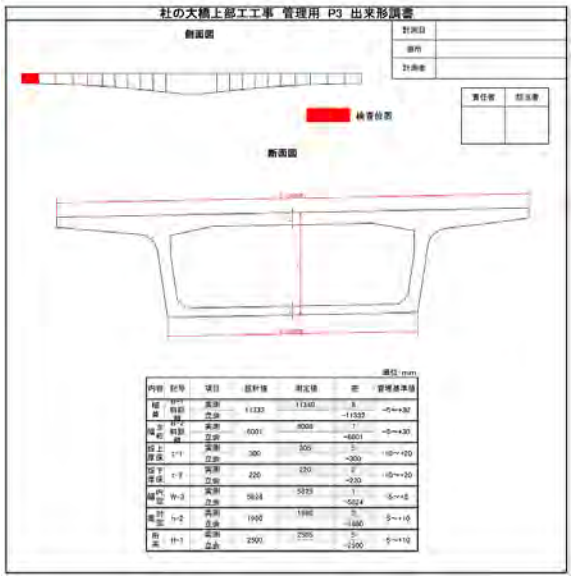


図-17　杜の大橋の出来形調書

選択	測定箇所	管理基準値(mm)
☑	幅員	-5 ～ +30
☑	主桁幅	-5 ～ +30
☑	床版幅	
☑	ウェブ幅	
☑	ハンチ部	
☑	主桁長	
☑	張出床版先端厚	
☑	張出床版付根厚	
☑	上床版付根厚	
☑	上床版厚	-10 ～ +20
☑	上床版ハンチ厚	
☑	下床版厚（ハンチ付根）	
☑	下床版厚（中央）	-10 ～ +20
☑	桁高	-5 ～ +10

図-18　出来形調書の書式作成時における対象部位選択

桁断面の形状計測は，市販カメラで撮影データから 3 次元点群モデルを作成し，これを自動採寸することで行った．桁断面の撮影は，**写真-11** に示すように，型枠脱型後，移動作業車が前方に移動した直後に前方足場上から桁断面に正対して行った．撮影に際し，任意の空間座標系を構築するために，上床版に基準点となる専用のターゲットマーカーを設置した．桁断面の 3 次元点群データの作成には複数数の写真が必要である．杜の大橋では，焦点距離 50mm のレンズを装着したカメラで，1 断面の計測用に約 200～300 枚の撮影を行った．3 次元点群データの作成に複数枚の写真が必要になるのは，SfM 解析処理により隣接画像との共通の特徴点から対応関係を解析して立体形状を求めるため，隣接関係の写真において，写真をラップさせるための共通位置の画像を撮影するためである．1 断面の撮影時間は，1 名で約 30 分であった．撮影後，写真データを処理して 3 次元点群データを作成し（**図-19**），**図-20** に示すように解析によって桁断面を自動採寸して出来形調書に記入した．

表-1 に計測精度を示す．全幅員以外は，人力計測の結果との比較でほぼ近似しており，計測精度が高いことが分かった．全幅員のみ精度が小さめに低くなったのは，前方足場の構造上，桁断面を正対して他位置と同距離で撮影ができなかったこと，レンズの歪曲収差の影響が原因で，**図-21** に示すように，張出し床版先端部で 3 次元点群データに微小な歪みが生じたためと考えられる．一部の計測位置で精度が劣ったものの，従来では出来形計測に 3～4 名の計測員が必要であるが，1 名での対応が可能で，また，写真データの解析を本支店等の別担当者が行えるため，現場作業の省力化を図れるものと考えられる．

表-1　自動計測の精度確認

項　目	設計値 (mm)	①自動計測 (mm)	②人力計測 (mm)	差異(mm) ①-②
上床版幅	11,332	11,285	11,343	-58
下床版幅	5,993	5,999	6,003	-4
上床版厚	300	301	305	-4
下床版厚	220	220	225	-5
桁高	2,528	2,533	2,534	-1
内空高	2,008	2,008	2,004	4
内空幅	5,815	5,813	5,816	-3



写真-11　桁断面の撮影状況

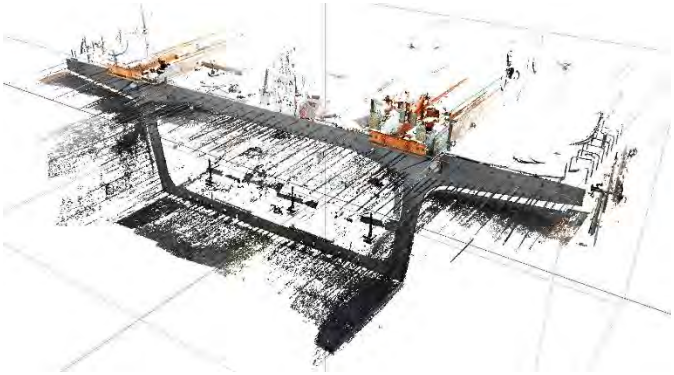


図-19　写真から変換した 3 次元点群データ



図-20　桁断面の自動採寸の例

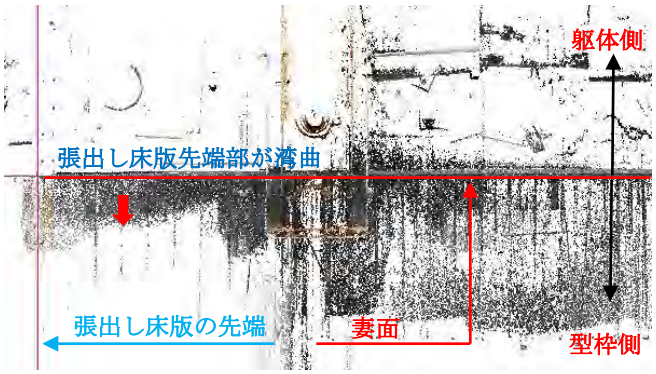


図-21　張出し床版部の点群データ湾曲（平面）

5．まとめ

開発した T-CIM/Bridge システムを杜の大橋に適用し，張出し施工における橋梁の各作業の省力化と安全性向上を図れた．また，管理データを工事関係者間で共有することができた．運用方法や機能の一部に課題が残ったが，これらを継続して改善し，弊社の張出し施工における標準ツールとして運用していく予定である．

参考文献 1) 日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧，平成 2 年 9 月．