山岳トンネルにおける支保工建込みの半自動化施工の現場検証

清水建設(株)　正会員　○灰谷　有紗　エフティ―エス(株)　正会員　四塚　勝久
清水建設(株)　正会員　白井　隆裕　戸田建設(株)　正会員　若竹　亮
西松建設(株)　正会員　日比　康貴

１．はじめに

山岳トンネル工事における掘削の最前線である，「切羽」は掘削に伴い岩盤が露出するため，落石等による肌落ち災害が発生する恐れがある．特に鋼製支保工（以下，支保工）の建込み作業においては，掘削直後の切羽直下に立ち入り作業を行う必要があり，肌落ち災害のリスクを伴う危険作業である．山岳トンネル工事の分野においては，「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止に係るガイドライン」の改正，国土交通省 i-Construction2.0(施工のオートメーション化)の取組を推進するため，山岳トンネルの省人化施工に関する試行工事が開始されるなど，自動施工技術等(遠隔施工技術も含む)の導入が求められている．そこで筆者らはエレクター一体型吹付け機（以下，本機）をベースとして，吹付けから支保工建込みの一連作業を自動化する技術開発を進めてきた．本稿では，模擬トンネル内で行ったモーションキャプチャカメラ（以下，MCC）を用いた支保工建込み精度検証結果に加えて，実施工現場に適用した検証結果について報告する．

２．技術概要

本技術は，機体後方に設置した 3 点のプリズム（**写真 1**）を坑内のトータルステーション（以下，TS）で測量することで，機体および MCC の現在位置を高精度に特定する．本システムの特長は，この座標情報を基準とし，エレクタブームや支保工に取り付けた複数のマーカをリアルタイムで計測・剛体モデル化することで，ブームの撓みを補正した正確な支保工位置の把握を可能とした点にある．マーカには視認性に優れた自発光式 LED マーカ（**写真 2**）や球座式反射マーカ（**写真 3**）を採用しており，MCC の視野内であれば連続的な計測が可能である．常に設計値と実測値の差分をリアルタイムに算出して支保工を目標位置へ誘導できるため，従来必要であった TS による誘導や切羽直下での作業員による微調整作業が不要となった．本機は，開発済みのコンクリート自動吹付けシステムと本支保工建込み技術を組み合わせることで，吹付けから支保工建込みまでの一連作業において，オペレータ 1 名による半自動化施工を実現する．

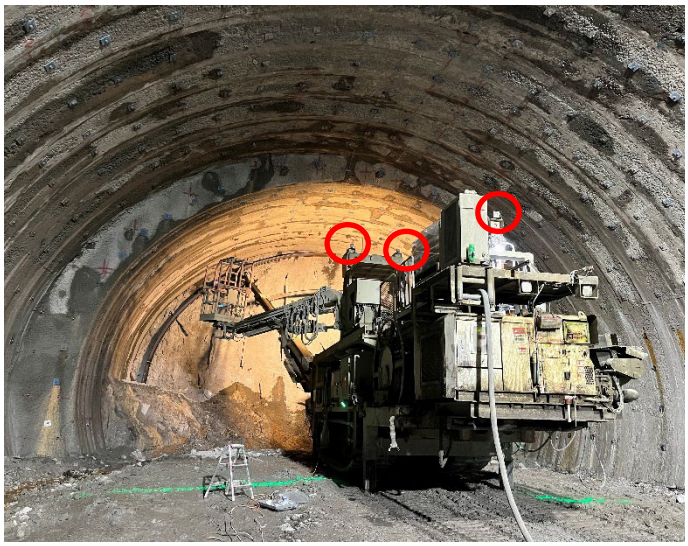


写真 1　本機後方に設置した 3 点のプリズム



写真 2　自発光式 LED マーカ



写真 3　球座式反射マーカ

キーワード　山岳トンネル，鋼製支保工，モーションキャプチャカメラ，自動化，i-Construction2．0
連絡先　〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部

３．模擬トンネル検証結果

エフティ―エス株式会社那須塩原テクニカルセンター模擬トンネル内にて，2 つの手法で精度検証を実施した（**写真 4**）．

1 つ目は，支保工両端に設置したマーカを MCC と TS で測量し，2 点間距離の比較を 3 回行った．結果を**表 1** に示す．MCC と TS との測量差は，最大-12.0mm，最小-10.0mm，平均-11.3mm であった．

2 つ目は，目標位置へ支保工を移動させ，移動後に天端部，左右根足部に事前設置したプリズムとマーカについてそれぞれ MCC と TS にて測量を行う（**図 1**）．これを初期値として，一度支保工を建込み前の位置に戻し，再度建込み作業を行う．この建込み作業の際，MCC によるリアルタイムでの計測結果を参考に行う．2 度目の建込み作業を完了後，MCC と TS にて測量を行い，初期値との差について，天端部，根足部における進行方向・水平方向・高さ方向に関しての比較を 3 回行った．

検証結果を**表 2** に示す．天端部において，最大 5.4mm，最小 0.1mm，各方向における平均値は-1.7～3.2mm であり，根足部において，最大 4.4mm，最小 0.2mm，各方向における平均値は-1.3～4.3mm であることを確認した．

以上のことから，MCC による測量精度は実用レベルであり，繰り返し計測誤差の少ない安定した計測が可能であることを確認できた．



写真 4　マーカおよびプリズム設置位置

表 1　MCC と TS による 2 点間距離の差

	1回目	2回目	3回目
TS	5683.1	5685.0	5683.0
MCC	5695	5695.0	5695
差（mm）	-11.9	-10	-12
平均（mm）	-11.3		

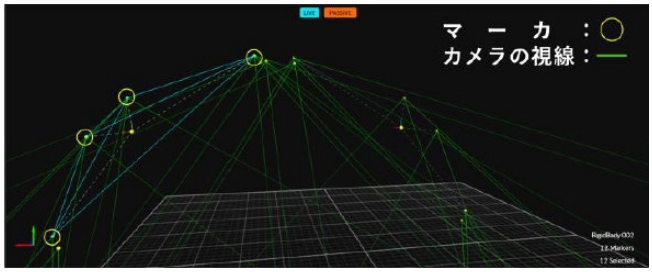


図 1　MCC による測量の様子

表 2　MCC と TS による初期値との差分量の差

	天端部マーカ（mm）			根脚部マーカ（mm）		
	進行方向	水平方向	高さ方向	進行方向	水平方向	高さ方向
1回目	0.1	-0.2	1.9	-1.3	0.3	4.1
2回目	-3.3	0.5	2.2	-0.7	0.2	4.4
3回目	-1.9	2.6	5.4	-1.9	-0.6	4.4
平均	-1.7	1.0	3.2	-1.3	0.0	4.3

４．現場検証

一般国道 55 号桑野道路長生・明谷トンネル工事に本技術を適用し，実施工切羽において検証を行った．本機は，既に自動吹付け用の MCC を 7 台設置していたことから，本仕様のまま 20 基分の支保工建込み作業を行う検証区間と定義した．

検証中の MCC 測量において，(1)マーカの消失，(2)マーカ認識の不安定化，(3)剛体の誤認識といった課題が見られた．そこで，各課題に対する改善策を実施するとともに，(4)施工性の向上を図った．以下に取組状況を示す．

(1) マーカ消失

坑内特有の低照度・死角といった影響により，マーカが消失する事象が確認された．そこで，**写真 5** に示すように，根足部用の MCC2 台を追加し，計 9 台の構成とした．これにより，複数カメラでの冗長撮影が可能となり，個別マーカの欠落や誤認識を改善した．また，個別マーカを常時 MCC3 台以上で捉えることで計測精度（角度・回転感度）の向上を図った．さらに，本現場の標準的なトンネル掘削断面積(約 109m^2)に対応するため，3D シミュレーションで各建込み施工ステップを検証し，MCC の死角がない配置と視野角を決定した．

(2) マーカ認識の不安定化

坑内環境では，最適露光の違いによる，マーカ認識の不安定化が見られた．そこで，球座式反射マーカを照射する赤外線 LED を高照度タイプへ変更す

るとともに，配置角度や設置数を最適化することで，安定したマーカ認識を可能とした．

また，当初のマーカ取付位置は，エレクタブームおよび別途溶接した鋼材であったが，支保工建込み時に切羽の凹凸に接触することでマーカが認識できないという事象が発生した（**写真　6**）．これを解消するため，鋼材を撤去し，マーカを支保工へ直接取り付けることとした．

(3) 剛体の誤認識

当初は左右対称のマーカ配置により剛体を形成していたが，左右対称形状であることに起因して剛体の誤認識が発生していた(**図　2**)．そこで，左右の剛体を非対称な形状に変更した．その結果，安定したマーカ認識および剛体形成が可能となり，剛体の誤認識を改善することができた．

(4) 施工性の向上

剛体の並進・回転（6 自由度 : XYZ＋RxRyRz）を考慮できる MCC 建込み用タブレット画面を示す．オペレータ 1 人は，本タブレットに表示される矢印に基づき建込みを行う．この表示は，本機の操作レバーをどの方向に動かせば良いかが直感的に分かる仕様になっており，現場実装を通して改良を加えている（**写真　7**）．また，建込み施工ステップとして，立ち角度（回転角，上下振り角度，左右振り角度）を決めてから微調整を行ったことで，積算サイクルタイムよりも短い 10 分程度で支保工を目標位置へ誘導できた．(**写真　8**)

また，支保工建込み作業時の切羽直下への立ち入りを無くすため，天端部の締結はクイックジョイント(マシノ社製)，スタットバーを使用した吹付け固定を採用した．

５．現場再検証

本技術を使用した 20 基分の支保工建込み後に，従来の TS 測量で支保工検測を実施したところ，水平方向と鉛直方向は安定して±30mm 以内で建込めることが確認できた．一方で，MCC が複数台の光学カメラで被検体に付与したマーカを撮影し画像座標から三次元位置を再構成する技術に対して，線状構造物であるトンネル坑内での支保工建込み作業に応用したことで，進行方向の精度が安定しない事象も一部で見られた．

そこで，検証区間後の施工サイクルにおいて，本技術による支保工建込み精度の向上と安定した建込み方法の確立に向けて，更なる改善を図った．

(1) キャビン昇降に起因する計測誤差

これまでの支保工建込み作業は，オペレータが操作室となるキャビンを上昇させた状態で実施していたが，キャビン昇降時の各油圧系統のわずかな上昇量の差異が MCC による支保工計測時に誤差が発生する要因となっていた．そのため，キャビンを上げない状態でも建込み作業が可能となるよう，MCC の配置角度や向きを見直すとともに，本トンネルにおける最大断面積となる非常駐車帯（約 127m^2）でも対応可能な基本配置とした．また，支保工建込み精度の向上に向けて，キャリブレーションの方法の見直しも図った．

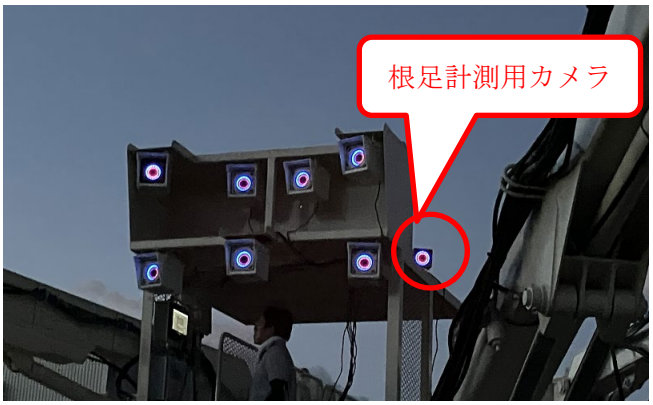


写真 5　根足計測用カメラ



写真 6　鋼材に設置したエレクタブーム

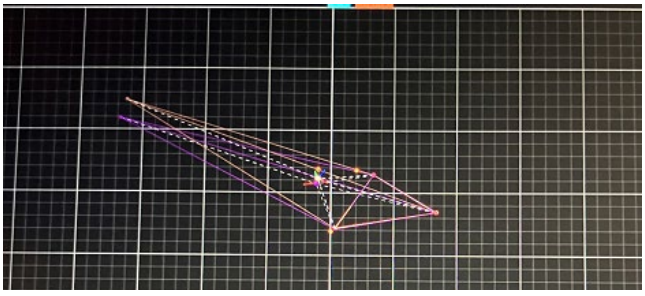


図 2　MCC 測量での左右誤認識

(2) 現場適用性の拡大

MCC による計測では，本機および支保工に取り付けたマーカから位置を把握するため，両者を一体の剛体として認識させる必要がある．従来は本機に自発光式 LED マーカを設置していたが，この方法では支保工置き場において，事前に支保工を把持する際に，決められた位置で把持する必要がある．そのため，毎サイクルの支保工建込み前の準備で時間を要していたこと，事前に精度よく把持しないと実施工時に剛体が崩れて認識できない等の事象が確認された．そこで，技術的な観点での現場適用性や更なる施工性向上を目的として，自発光式 LED マーカを廃止して支保工側に球座式反射マーカを設置する方式へ変更した．この結果，MCC による剛体認識の安定性が向上して剛体が形成されたことで，効率的な支保工建込みが可能となった（**図 3**）．追加改良後の MCC と TS による測量結果を**表 3** に，支保工建込み状況を**写真 9** に示す．追加改良後，本技術を用いて 10 基の鋼製支保工建込を実施した．その結果，進行方向，水平方向および高さ方向のいずれにおいても安定した精度が確認され，進行方向についても 30mm 程度の精度を確保できた．（許容値：±50mm）

本検証により，補正値に依存することなく高い計測精度を確保できることを確認した．

６．まとめ

模擬トンネルで実証済みの MCC による支保工建込み技術を長生・明谷トンネルに適用し現場検証と繰り返し改良を加えた結果，オペレータ 1 人でも効率的に安定した施工が実現し，現場適用性の拡大も図れた．筆者らは，今後も更なるブラッシュアップを目指して，現場適用を進めるとともに，将来的に吹付けから支保工建込みまでの一連作業を完全自動化とするべく取り組みを加速させていく考えである．

７．参考文献

1) 西松建設(株) 日比康貴ほか：山岳トンネルにおけるモーションキャプチャカメラ技術を用いた支保工建込の検証，土木学会 第 80 回年次学術講演会，VI-1194，2025

2) 清水建設(株) 白井隆裕ほか: 山岳トンネルにおけるモーションキャプチャカメラを用いた鋼製支保工建込み技術の現場検証，土木学会 第 81 回年次学術講演会， VI-929，2026

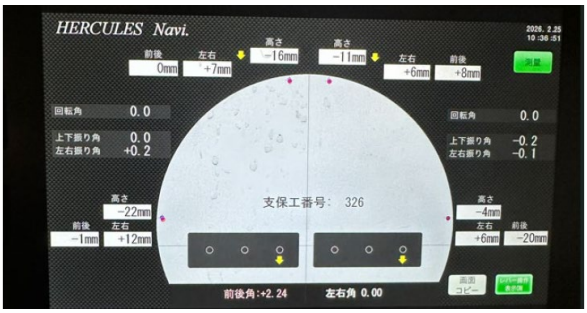


写真 7　MCC 建込み用タブレット画面



写真 8　MCC による鋼製支保工建込み状況

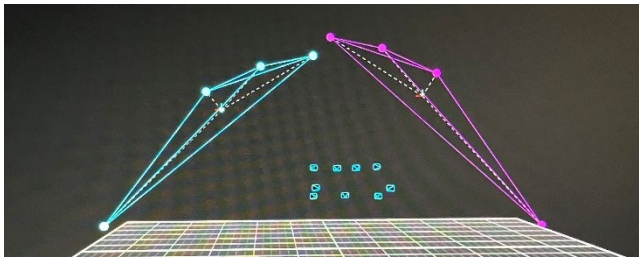


図 3　追加改良後 MCC 測量の様子

表 3　追加改良後の MCC と TS による測量結果

	進行方向	水平方向	高さ方向
天端（左）（mm）	6.8	33.3	-17.4
天端（右）（mm）	0.8	18.3	-25.4
根足（左）（mm）	-30	22.1	0
根足（右）（mm）	5.4	31.2	20.5

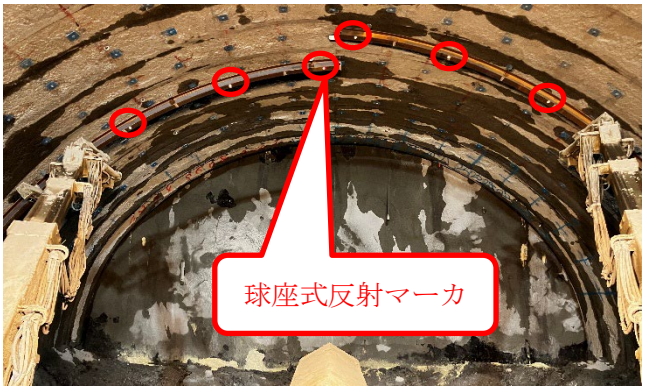


写真 9 追加改良後の建込み状況