トンネル出来形の MMS 計測および計測点群データの CIM への活用

高尾　篤志[1]・宮田　岩往[2]・八山　義弘[3]・松下　将光[4]

[1]正会員　株式会社　奥村組　i-Construction 推進グループ（〒108-8381 東京都港区芝五丁目 6-1）
E-mail: atsushi.takao@okumuragumi.jp

[2]正会員　株式会社　奥村組　i-Construction 推進グループ（〒108-8381 東京都港区芝五丁目 6-1）
E-mail:iwao.miyata@okumuragumi.jp

[3]非会員　国土交通省中国地方整備局　広島国道事務所工務課（〒734-0022 広島市南区東雲 2 丁目 13-28）
E-mail: hachiyama-y87mg@mlit.go.jp

[4]非会員　青森県西北地域県民局地域農林水産部　農道ほ場整備課
（〒037-0003 五所川原市大字吹畑字藤巻 24-12）E-mail:masamitsu_matsushita@pref.aomori.lg.jp

現行のトンネル出来形断面管理における，テープ，標尺，高所作業車等を用いた計測方法からレーザースキャナー（LS）による計測に変更することで，出来形断面管理の迅速化，安全性向上が期待されている．LS 計測を行うことで，3 次元の点群で表現された面的なデータが取得でき，取得した 3 次元点群と 3 次元設計データの比較により，面的な出来形確認，出来高数量の算出が可能になる．モービルマッピングシステム（MMS）を用い，トンネル出来形の 3 次元点計測を行った．さらに，計測により取得した 3 次元点群データとトンネルの CIM モデルを重ね合わせることで，施工情報の見える化を行った．本稿では，トンネル出来形の MMS 計測手法および計測 3 次元点群データと CIM モデルの組合せによるデータ活用について述べる．

Key Words: *tunnel construction management, MMS, 3D point cloud, CIM*

1. はじめに

国土交通省により CIM 導入ガイドライン（案）[1]が策定され，調査・測量から設計・施工・維持管理までのあらゆるプロセスで ICT 等を活用して建設現場の生産性向上を図る施策「i-Construction」が推進されている．そのような情勢の中，建設業界において，ICT の導入や 3 次元データ，CIM モデルの活用に関して様々な取り組みが行われている．3 次元データの活用として，レーザースキャナー（LS）等により取得される 3 次元点群の利用検討が行われている．

「レーザースキャナーを用いた出来形管理の試行要領（案）（トンネル編）[2]」では，地上レーザースキャナー（TLS）計測によるトンネル出来形管理の効率化が期待されている．現行の出来形断面管理における，テープ，標尺，高所作業車等を用いた計測方法から TLS による計測に変更することで，出来形管理の迅速化，安全性向上に寄与すると考える．

従来手法の出来形計測では，管理断面のみ計測を行うため，断面間の情報が取得できず，面的な出来形・出来高の把握は困難である．出来形の計測において LS 計測を行うことで，計測箇所の全区間において面的な 3 次元点群データが取得できる．3 次元点群と 3 次元設計データの比較により，面的な出来形確認，出来高数量の算出が可能になる．

しかし，TLS 計測は，一定区間ごとに機器の設置・計測・移動を繰り返すため，計測に時間と手間を要する．一方で，車載型レーザースキャナーであるモービルマッピングシステム（MMS）は，車両を走行しながら周辺の形状を計測するため，計測機器の設置作業を少なくできることから，現地作業の効率化が期待される．そこで，本稿では，MMS によるトンネルの出来形管理への適用実験を実施して，TLS と同等の計測精度を得られるかを検証した．また，吹付けコンクリート施工後，覆工コンクリート施工後の 2 時期に計測を行い，計測データの比較より，覆工厚の算出を行った．

TLS，MMS 計測で取得した 3 次元点群データと設計図書より作成した 3 次元モデルに地盤情報等の属性情報を組み込んだトンネル CIM データを重ね合わせることで，トンネル施工時の管理情報の見える化を行った．CIM モ

デルに出来形計測時のデータを組み込むことで，工事履歴等の施工時点の情報を保存でき，維持管理段階においても CIM モデルが活用できる．本稿では，実際の工事現場において，TLS，MMS での計測結果を用いた出来形の確認，3次元点群の活用方法について述べる．

2. 3次元データ

(1) 3次元点群

3 次元点群とは，LS 計測等により取得される x，y，z の座標などの属性情報を持つ点の集合である． LS 計測の場合，レーザーを照射し，その反射から 3 次元空間の座標を取得する．また，同時にカメラ撮影を行うことで，色情報を取得する．計測された，座標と色情報を組み合わせることで，**図-1** に示すような3次元点群データが取得される．

点群の表現方法として，色付き点群表示，反射強度表示がある．色付き点群表示では，対象物の形状および，色彩が表現されているため，視覚的に把握しやすい．しかし，対象の色情報はカメラの撮影画像に依存するため，暗所等撮影が困難な場所や鮮明な画像が取得できない箇所では，色付き点群を取得することができない．

対して反射強度表示の場合，レーザーが照射された箇所の形状が表示されるのでトンネル内等の暗所の形状を表現可能である．モノトーンカラーで表示されるため，色付き点群に比べ，点群の判別が難しい．また，水面や水で濡れている箇所等のレーザーが反射しにくい箇所のデータは取得できないため，モデル上に空白部分が発生してしまうという問題がある．

(2) CIM モデル

CIM モデルとは，3次元 CAD 等により作成される 3 次元モデルに様々な属性情報を加えたものである．例えば，構造物の CIM モデルの場合，**図-2** に示されるような3次元モデルを，柱や梁といった部材ごとに分割し，各部材に形状情報や材質等の属性情報を関連付けることで CIM モデルとして成立する．属性情報を付与することにより，数量の算出や履歴の確認といった，施工や維持管理の段階においてモデルの運用が可能となる．

山岳トンネル工事において CIM モデルを構築するにあたり，基本となる 3 次元モデルは，国土地理院から公開されている基盤地図情報，およびトンネル線形情報の 3 次元データと，地質平面図・地質縦断図の 2 次元図面を組み合わせて表示させることで，**図-3** に示すような 3 次元モデルを構築した．

また，属性情報として，日々の掘削管理に使用している測量・計測システムなどで得られる切羽情報（切羽の写真・切羽観察記録・地山評価点），支保工パターン，削孔検層システムなどによる切羽前方探査情報，ボーリングデータ，施工後の計測データなどの情報を 3 次元モデルに取り込んで連携させる．これにより，山岳トンネル工事に関する施工情報を可視化・一元管理できるトンネル CIM モデルを構築した．

このトンネル CIM モデルは，切羽ごとの切羽観察記録がデータベース化されており，切羽ごとの切羽写真や切羽断面の地山評価点を確認できる．また，**図-3** に示すように地山等級に合わせて実際に設置された実施支保工パターンがパターンごとに色分けされて表示される．この CIM モデルには，他にもボーリングデータや削孔検層システムデータなどの切羽前方探査データを統合して表示させることができ，モデルから削孔検層システム

図-1 3次元点群

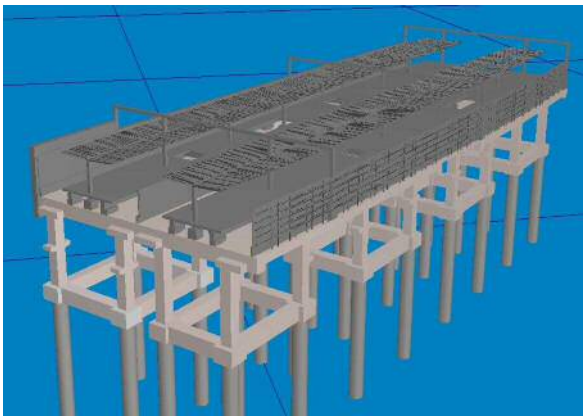


図-2 3次元モデル

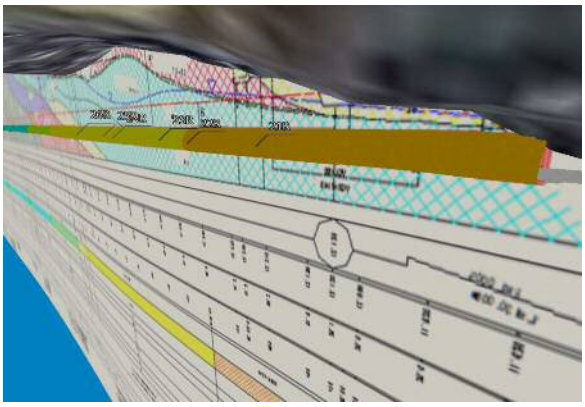


図-3 山岳トンネル CIM モデル

による削孔エネルギー値グラフを参照することもできる．

3. MMS 精度検証

(1) 計測諸元

広島県呉市にある呉市市街と阿賀・広方面を結ぶ約 2.6km のバイパス道路の休山トンネル工事において吹付コンクリート工完了後と覆工コンクリートの打設完了後に計測を実施した．計測範囲として，坑口から約 300m までの区間を対象とし，その中で管理断面を 3 箇所設定した．

TLS は，CIM ガイドライン(案)において，面的な計測を行い，トンネル覆工コンクリートの出来形計測・出来形管理方法が示されている．ただし，TLS 計測では，機器の設置・計測・移動を繰返すことになり，時間を要する．そこで，今回の計測では，より効率的な計測を目指し，MMS での計測も同時に行い，トータルステーション（TS），TLS 計測との比較を行った．その計測状況を**図-4** に示す．

また，各手法で取得したデータを工事で管理している座標へ位置補正を行うための調整点と，位置精度の確認をするための検証点を設置した．そして，それらの位置座標を TS で取得した．

MMS の機器仕様と計測諸元を**表-1** に示す．「レーザースキャナーを用いた出来形管理の試行要領（案）（トンネル編）」では，計測密度を 5000 点/m^2 以上に保つことが規定されており，MMS 計測では，この計測密度を確保する計測諸元を設定した．

(2) MMS の位置補正

MMS は，搭載された GNSS，IMU などを用いて自己位置を測定するため，GNSS の衛星情報が不可視となるトンネルでは，MMS で取得される点群（MMS 点群）の位置精度が低下する．位置精度の低下を防ぐため，調整点を用いた位置補正を実施した [3]．位置補正は，調整点と MMS 点群の三軸方向の較差を補正量とし，調整点間の補正量は前後の調整点と MMS 点群の較差から線形補間により求めた．調整点の設置間隔は，トンネル出来形管理における一般的な管理断面の間隔である 40m ごとに設定した．MMS の位置補正により，最大 1.5m 程度あった検証点の位置座標との較差が 0.05m 以下に改善された．

(3) LS 計測による断面形状の取得

TLS や MMS のような LS 計測では，形状の確認は任意の断面を抽出し，設計断面形状との比較により計測を行う．本計測により取得した，TLS および MMS の断面形状，同一地点における TS 測点を結んだ断面形状を**図-5** に示す．TS 断面に対して，面的な計測が可能な LS 計測では，詳細な断面形状の抽出が可能である．また，**図-5** に示すように，TLS と MMS の断面を比較すると，同等の断面形状が取得できていることが分かる．

(4) 計測時間の比較

TS，TLS，MMS の坑口から 300m 区間の計測に要した時間を**表-2** に示す．この作業時間は，計測前のターゲット設置等の準備時間を除いた計測のみに要した時間である．TS の作業時間が 60 分，TLS が 120 分であったのに対し，MMS は 6 分で計測作業が終了しており，MMS の適用は施工への影響が少ないと考えられる．

図-4 TLS，MMS の計測状況

表-1 MMS 計測諸元

項目		内容
走行速度		10km/h
レーザスキャナ	台数	1台 RIEGL社VQ-450
	照射数	550,000発／秒
	スキャン数	200回転／秒
	照射角度	360°
	計測精度	0.008m（50m先）
計測点間隔	進行方向	0.014m
	横断方向	0.014m（6m先）

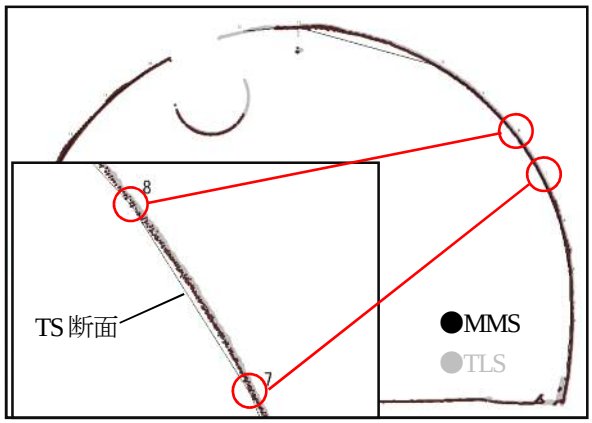


図-5 断面形状

表-2 計測作業時間

作業項目	作業時間	内訳
TS	60分	設置・計測・移動×3断面
TLS	120分	設置・計測・移動×6回
MMS	6分※	移動計測×1往復

※別途トンネル外での計測準備に50分要する

4. 3次元点群を用いたトンネル出来形計測

(1) トンネル内空・覆工厚の計測

3 次元点群データを用いたトンネルの出来形管理では，LS計測により作成した3次元点群モデルより，出来形計測を行う管理断面を抽出し，断面形状と設計断面形状の比較や，モデル上での内空高や内空幅の計測により出来形の確認を行う．トンネル出来形管理において，一般に内空高と内空幅は，センターライン（C.L.）とスプリングライン（S.L.）において計測されるため，モデル上で計測を行う際は，計測の高さまたは位置を固定し，同一断面上の，C.L.およびS.L.での計測を行う．

3 次元点群データを用いた出来形管理を行うにあたり，吹付けコンクリート完了時点と覆工コンクリート完了時点の 2 時期において，トンネル坑口から 300m の区間の MMS 計測を実施した．計測区間の内，坑口から 50m 地点，140m地点，280m 地点の 3 箇所を評価断面とし，各断面 7 か所の覆工厚を計測した．

コンクリートの覆工厚は，吹付コンクリート施工後と，覆工コンクリート施工後の 2 時期の計測点群データを重ね合わせ，差分より確認することができる．MMS を用いたトンネル覆工厚の計測結果を**図-6**，**表-3** に示す．**図-6** は重ね合わせた 2 時期の 3 次元点群モデルの任意断面を抽出したものである．図中の青の点群が吹付けコンクリート完了時点のものであり，赤の点群が覆工コンクリート完了時点での計測結果である．また，覆工厚の計測を行った 7 点は，現行の計測点と同等の位置である．**表-3** に示された 3 次元点群より計測した覆工厚の計測結果より，すべての測点において覆工厚が十分確保されていることがわかる．

(2) 3次元点群のヒートマップ表示

青森県西津軽郡鰺ヶ沢町におけるトンネル工事（深浦トンネル）において，吹付けコンクリート施工後および覆工コンクリート施工後に MMS 計測を行い，各施工面の 3 次元点群データを比較することで覆工厚のヒートマップを作成した．作成したヒートマップを**図-7** に示す．**図-7** は吹付けコンクリート完了時と覆工コンクリート完了時の点群データをそれぞれ 50cm×50cm のメッシュ化し，格子毎の格差をヒートマップ表示したものである．覆工厚により格子の表示色を変更する．覆工厚が設計値未満の場合は Red，設計値＋5cm 未満であれば Lime，設計値＋5cm 以上の場合は Blue，風管や配管等の死角により計測エラーが発生した箇所は Black とした．適正に施工が行われている場合は，Lime もしくは Blue で表示され，覆工厚が不足する場合は Red 表示となる．今回の解析結果では，**図-7** に示すように Red 表示の箇所はなく，トンネル内空の掘削が十分なことが確認できた．

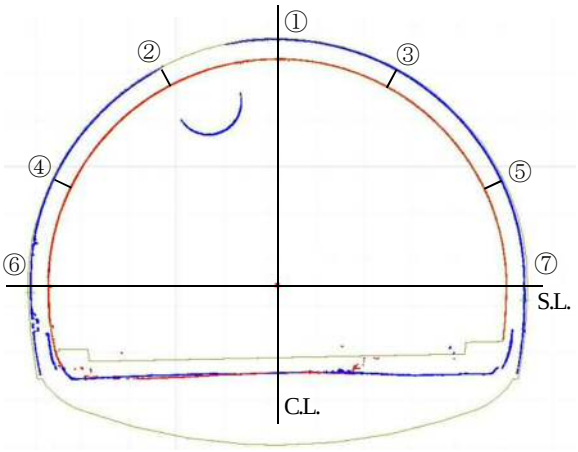
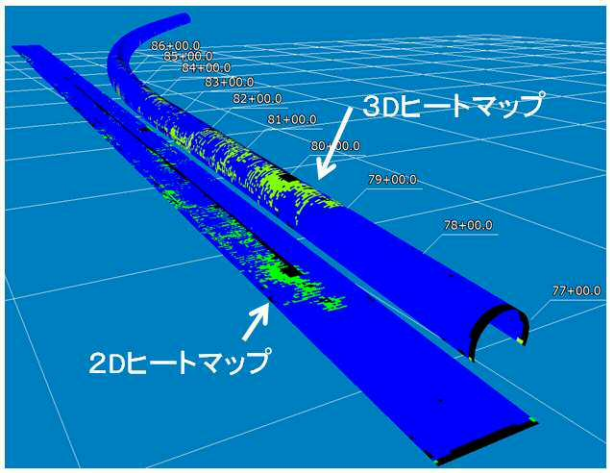


図-6 覆工厚計測断面

表-3 覆工厚計測結果

測点		計測箇所						
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
50m地点	設計(mm)	350	350	350	350	350	350	350
	計測値(mm)	414	405	407	420	398	400	359
140m地点	設計(mm)	350	350	350	350	350	350	350
	計測値(mm)	403	413	430	415	406	396	370
280m地点	設計(mm)	300	300	300	300	300	300	300
	計測値(mm)	349	368	340	369	336	365	320



項目名	指定色
覆工厚30cm未満	Red
覆工厚30~35cm	Lime
覆工厚35cm以上	Blue
対象外(送風管、配管等によるエラー箇所)	Black

図-7 ヒートマップ表示

また，吹付けコンクリート完了時点の点群データと設計の 3 次元モデルを比較することで，覆工コンクリート施工前に覆工厚の確認をすることが可能なため，施工不良箇所発生の防止，必要コンクリート数量の早期の把握が可能となる．

5. CIM モデルにおける 3 次元点群データの活用

(1) 反射強度表示の点群の活用

CIM において活用される 3 次元モデルとして，3 次元点群データを利用する．吹付コンクリート施工後に計測した 3 次元点群データを，照射したレーザーの跳ね返りの強さを示す反射強度の属性情報で表示する（図-8）．3 次元点群データを反射強度で表示することで，トンネル内部の形状を鮮明に表現でき，支保工，ロックボルトの位置の状況等を確認できる．反射強度で表示したモデルを用いることで，覆工コンクリート施工後に不可視部分となる支保工やロックボルトの位置確認が可能となる．

図-8　3 次元点群（反射強度）

(2) CIM モデルへの 3 次元点群の登録

図-9 に示すように，CIM モデルには 3 次元モデルにより表現される形状情報の他に，位置情報，切羽観察記録等の切羽情報，地質縦断図や削孔検層により取得されるデータ等の地質情報等の設計・施工時の情報が連携して表示されている．日々の施工情報や維持管理情報をモデルに追加，更新を行うことで，CIM モデルを有効に活用することができる．

CIM モデルに登録する施工情報として，出来形管理の情報が挙げられる．通常，モデルに登録する出来形管理情報は，出来形帳票である．帳票を登録することで，検査時の情報を参照することができ，施設管理において有効である．この上で，CIM モデルに出来形計測時に取得する 3 次元点群データの関連付けを行う．施工時の切羽

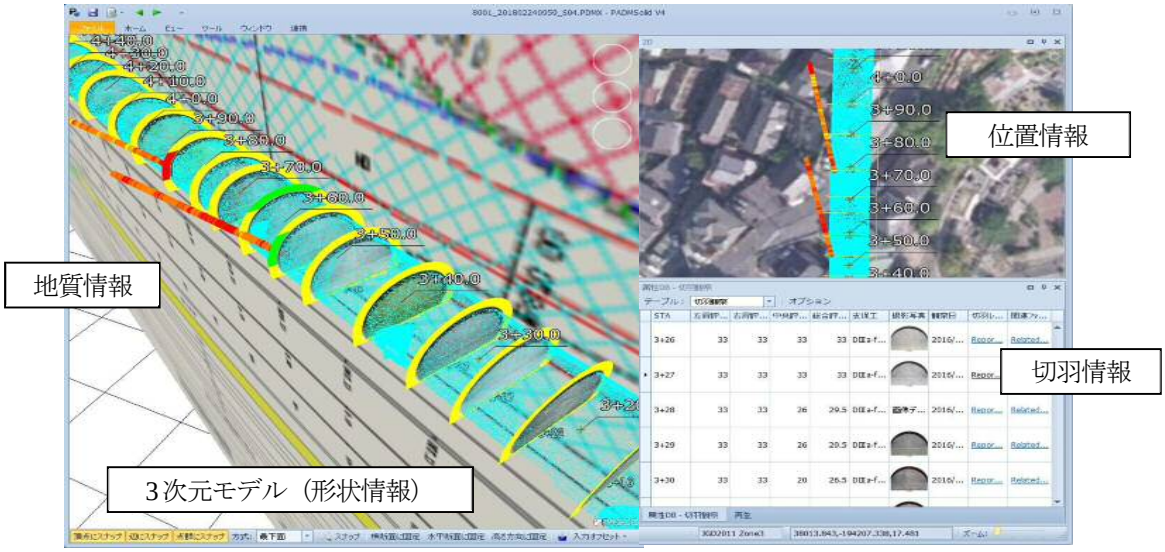


図-9　施工情報の見える化

図-10　切羽モデルと点群及び切羽観察記録

や支保工パターン等の情報を登録した CIM モデルに計測した 3 次元点群データを取り込むことで，施工情報の見える化を実現した．

帳票だけでは当時の情報を詳細に確認することが困難である．しかし，3 次元点群を登録することによって，視覚的に履歴を確認することができる．また，CIM モデルに登録される 3 次元点群は全ての点が座標値として数値を持っているため，改めて，任意の箇所で数値を確認することも可能である．

3 次元点群データを登録することで，通常の 3 次元モデルと属性情報の表示だけでなく，点群により構成された 3 次元モデルと属性情報を連携させて表示できる．図-10 は 3 次元点群と切羽情報を連携させて表示させたものである．これにより施工後や維持管理段階において，切羽観察記録の他，支保工の状況等の施工時の情報を確認できる．

6. まとめ

本稿では，3 次元点群を用いたトンネル出来形管理の適用検証を実際の工事現場で実施した．3 次元点群を取得する手法として，TS，TLS，MMS 計測を実施し，精度の比較を行った．その結果，吹付けコンクリート完了後及び覆工コンクリート打設後において，MMS が TLS と同等の出来形計測ができることを確認した．また，MMS による計測は，TS や TLS を用いた手法に比べ，現場での計測作業時間を削減できた．よって，MMS はトンネル出来形管理へ適用可能であり，TS や TLS に比べ作業の効率化に寄与できると考える．さらに，吹付けコンクリート完了後や覆工コンクリート打設後に，トンネル坑外にある工事基準点をトンネル坑内にも設置できれば，調整点の設置時間を大幅に短縮できると考える．

トンネル出来形管理において，LS 計測として MMS による出来形計測を行った．すでに出来形管理要領が存在する TLS 計測を同時に行うことで，MMS による出来形計測が可能であることを確認した．トンネル出来形管理への適用として，吹付コンクリート施工後と覆工コンクリート施工後の 2 時期の 3 次元点群データより，覆工厚の算出が容易に行えることが分かった．3 次元モデルを用いた出来形管理では，管理断面以外の任意の箇所での出来形の確認が可能となる．また，計測した 3 次元点群データの解析を行い，ヒートマップ表示を行うことで，面的かつ視覚的に出来形を確認することができる．しかし，LS 計測の課題となる仮設物の存在により死角がある場合，ヒートマップ表示で異常値が出てしまうなど課題が残った．

形状情報，位置情報，切羽情報，地質情報等情報が属性情報として登録された CIM モデルに出来形計測時の 3 次元点群データの関連付けを行った．これにより，施工情報の見える化を実施した．登録された 3 次元点群計測データを反射強度表示することで，支保工やアンカー位置を確認することができる．そのため，覆工完了後に不可視部分となる吹付面の状況等の施工履歴をモデル内で確認することができる．また，切羽情報や支保工パターン等の情報を組み込んだモデルであるため，データベースとしての活用や維持管理段階での活用が期待できる．

参考文献

1) 国土交通省：CIM 導入ガイドライン（案）平成 30 年 3 月
2) 国土交通省：レーザースキャナーを用いた出来形管理の試行要領（案）（トンネル編）平成 29 年 3 月
3) 井関禎之，其阿彌 大祐，五十嵐 善一，浅井 亮治，間野耕司，西村 修，倉田 桂政：MMS によるトンネル出来形管理への適用検証，日本写真測量学会平成 29 年度秋季学術講演会発表論文集，pp.93-96, 2017

TUNNEL SHAPE MMS MEASUREMENT AND APPLICATION OF POINT CLOUD TO CIM

Atsushi TAKAO, Iwao MIYATA, Yoshihiro HACHIYAMA and Masamitsu MATSUSHITA

By changing from the measurement method using the tape, the gauge, and the aerial work vehicle in the current tunnel shape measurement to the measurement by the laser scanner, it is expected to speed up and improve the safety. Surface 3D point cloud data is obtained by LS measurement. By comparing the 3D point cloud and 3D design data, it is possible to check the surface shape and calculate the quantity. Using MMS, 3D point measurement of the tunnel shape was performed. In addition, the construction information was visualized by superimposing the 3D point cloud data and the CIM model of the tunnel. In this paper, we will describe the MMS measurement method of tunnel shape and the utilization of data by the combination of 3D point cloud data and CIM.