

# トンネル出来形管理の ICT 化

## ー山岳トンネル出来形の MMS 計測ー

### ICT in Management of Finished Tunnel Shape

#### - MMS Measurement in Mountain Tunnel -

高尾篤志\* 倉田桂政\*\* 宮田岩往\*

#### 要 旨

国土交通省が策定した CIM 導入ガイドライン（案）に関連した「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）」において、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。また、新しい試みとして、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。出来形計測時の情報を CIM モデルに登録することで、維持管理段階において施工履歴を確認できるとともに、不可視部分の情報も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。

キーワード：CIM、3 次元点群、トンネル出来形管理、MMS

#### 1. まえがき

国土交通省により CIM 導入ガイドライン（案）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おり、3 次元データの活用として、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）<sup>2)</sup>」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、出来形断面管理の迅速化、安全性向上に寄与すると考えられている。

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 3 次元の点群で表現された面的なデータが取得できる。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。

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 MMS は、車両を走行しながら周辺の形状を面的に取得し、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、計測データの比較により、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の 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。

\* 土木本部土木部 \*\* 広島支店土木部

## 2. 3次元データ

### 2.1 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。主な計測手法として、LSや写真測量におけるSfM解析が挙げられる。SfMとは、対象物の複数方向から撮影した画像から、特徴点を抽出し、同一箇所の特徴点を重ね合わせることで3次元座標を取得し、2次元画像から物体の3次元構造を復元する技術である。

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に示すような色付き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の表現が可能である。一方、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。

### 2.2 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・地質縦断面図の2次元図面を組み合わせることで、図-3に示すような3次元モデルとした。

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情報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。



図-1 色付き3次元点群

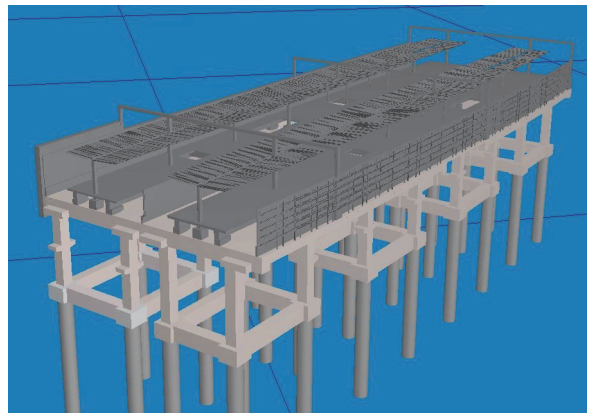


図-2 3次元モデル

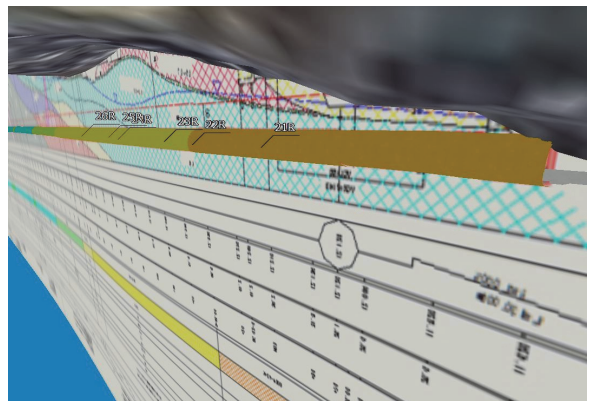


図-3 山岳トンネルCIMモデル

トンネル CIM モデルを構築するにあたり、航空測量などによって取得される大量の点群データを統合表示でき、大量データの高速処理が可能で高いレスポンスを持つパソコ社保有の 3 次元基本ソフトウェア「PADMS」をベースとして、それを山岳トンネル CIM モデル用にカスタマイズし運用し、LS 計測によるトンネル出来形情報を登録した。

### 3. MMS 計測精度検証

#### 3.1 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 のバイパス道路のうち約 1.7km が休山トンネル（掘削断面積 64.0~68.1m<sup>2</sup>、内空断面積 56.0m<sup>2</sup>）である。休山トンネルの呉市街側、698m にあたる休山トンネル長迫工事において、吹付けコンクリート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 導入ガイドライン（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・移動を繰り返すことになり、計測に時間を要する。そこで、今回の計測では、より効率的な計測を目指し、MMS による計測も同時に行い、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<sup>2</sup> 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。

#### 3.2 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<sup>3)</sup>。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。その結果、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。



図-4 TLS、MMS の計測状況

表-1 MMS 機器仕様・計測諸元

項目		内容
走行速度		10km/h
レーザースキャナ	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)

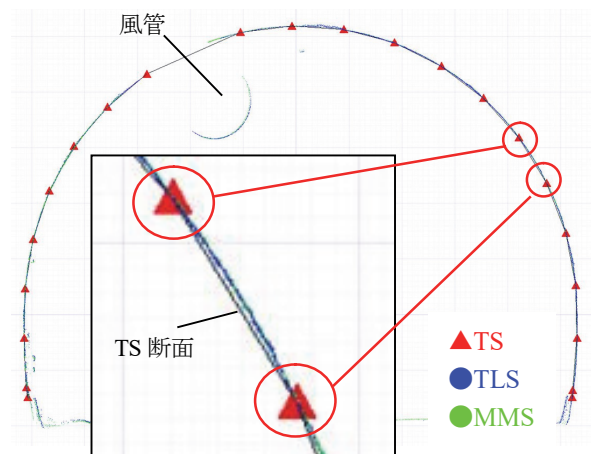


図-5 断面形状

#### 3.3 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、連続的な断面形状の抽出が可能である。また、TLS と MMS の断面を比較すると、較差が 1mm 程度であった。したがって、TLS と MMS では同等の断面形状が取得できていることが分かる。

#### 3.4 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作業時間を表-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。

#### 4. 3次元点群を用いたトンネル出来形計測

##### 4.1 トンネル内空の計測

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、計測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。また、図-6に示すように、断面モデル内にC.L.とS.L.を表示させることで、モデル内における内空高・内空幅の確認を容易にする。

##### 4.2 3次元点群ヒートマップ表示

3次元点群は特定の条件の下で解析を行い、ヒートマップ表示を行うことができる。図-7は吹付けコンクリート完了時点において計測した3次元点群データを50cm×50cmのメッシュでヒートマップ表示したものである。解析の条件として、掘削の設計形状と3次元点群の座標値の差分を参照している。適正に施工が行われていると赤く表示され、設計形状を侵す場合は青く表示される。今回の解析結果では、図-7に示すように青く表示される箇所が発生したが、風管・照明・配線等の障害物により、吹付面の計測が不十分な箇所であった。その他の箇所は全て赤く表示され、トンネル内空の掘削が適正に行われていることが確認できた。

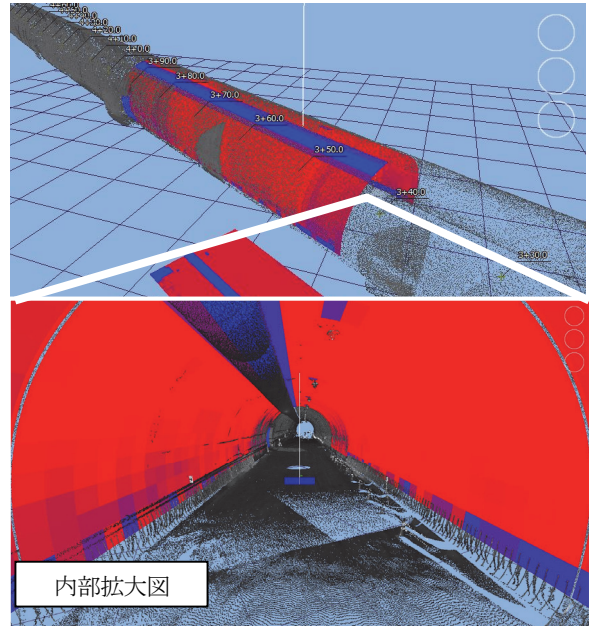


図-7 ヒートマップ表示



図-8 トンネル内部状況

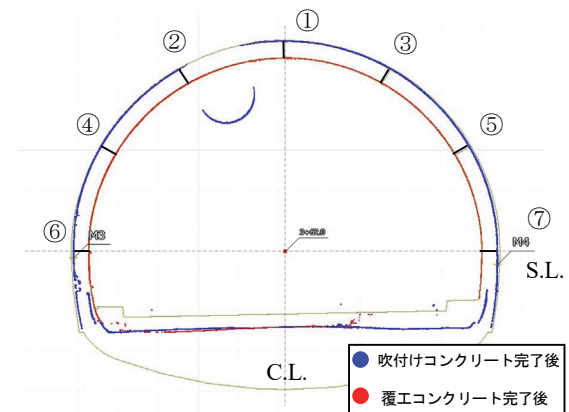


図-9 覆工厚計測断面

表-2 坑口から300m区間の計測作業時間

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

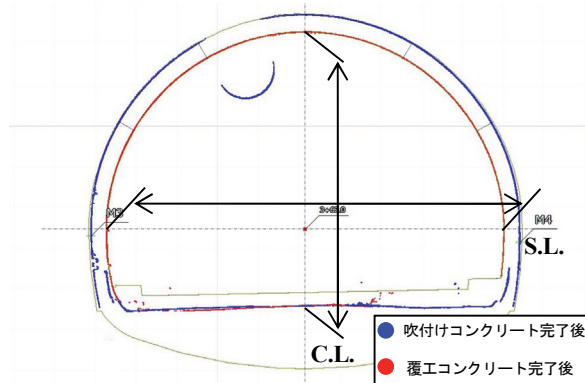


図-6 抽出断面

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
	MMS計測値(mm)	414	405	407	401	398	391	359
	現行法計測値(mm)	410	400	410	400	400	380	365
140m地点	設計(mm)	350	350	350	350	350	350	350
	MMS計測値(mm)	407	402	411	390	406	420	413
	現行法計測値(mm)	420	400	400	395	400	430	400
280m地点	設計(mm)	300	300	300	300	300	300	300
	MMS計測値(mm)	335	352	340	344	336	309	320
	現行法計測値(mm)	330	345	335	340	335	300	310

### 4.3 トンネル覆工厚の計測

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。計測時点のトンネル内部の状況を図-8に示す。計測区間のうち、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箇所の覆工厚を計測した。図-9は吹付けコンクリート完了後と覆工コンクリート完了後の2時期の3次元点群モデルを重ね合わせ、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。現行法（テープ、標尺を用いた計測）とMMS計測により算出した覆工厚を比較すると、最大で13mmの誤差が発生した。

## 5. CIMモデルにおける3次元点群データの活用

### 5.1 反射強度表示点群の活用

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。吹付けコンクリート完了後に計測した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-10）。3次元点群データを反射強度で表示することで、トンネル内部のような点群の識別が困難な暗所において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。

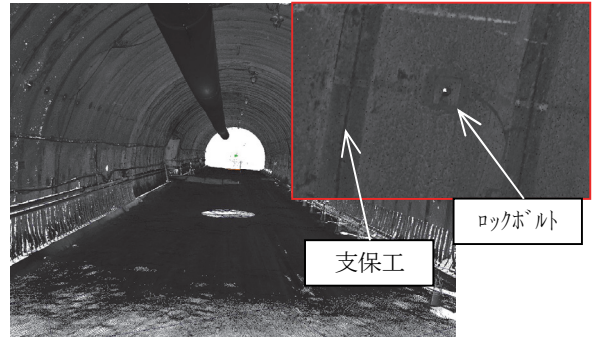


図-10 3次元点群（反射強度）

### 5.2 CIMモデルへの3次元点群の登録

図-11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、地質縦断面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。

帳票だけでは施工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、任意の箇所で見える化

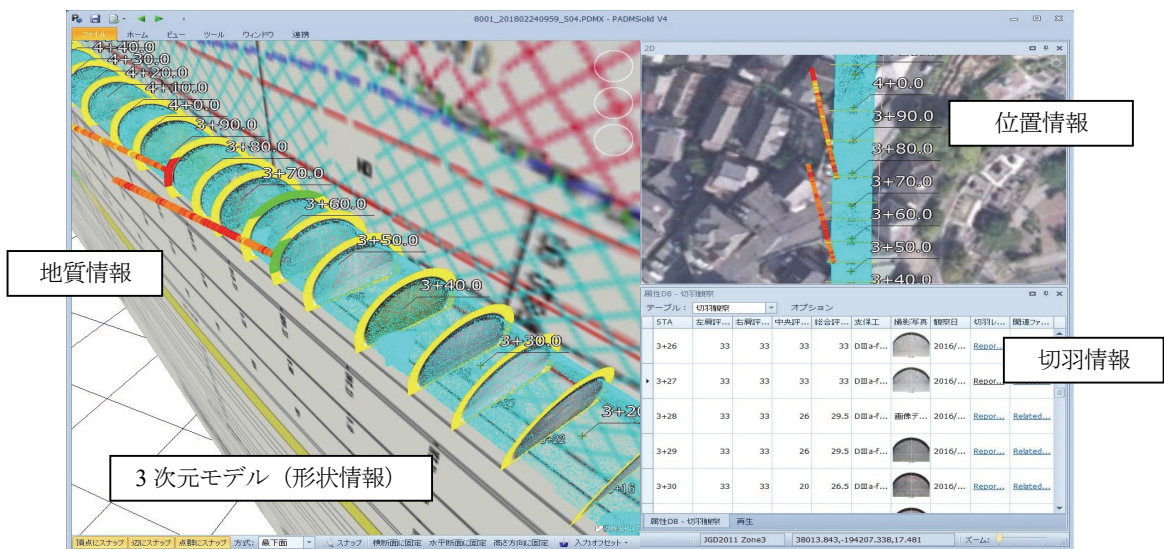


図-11 施工情報の見える化

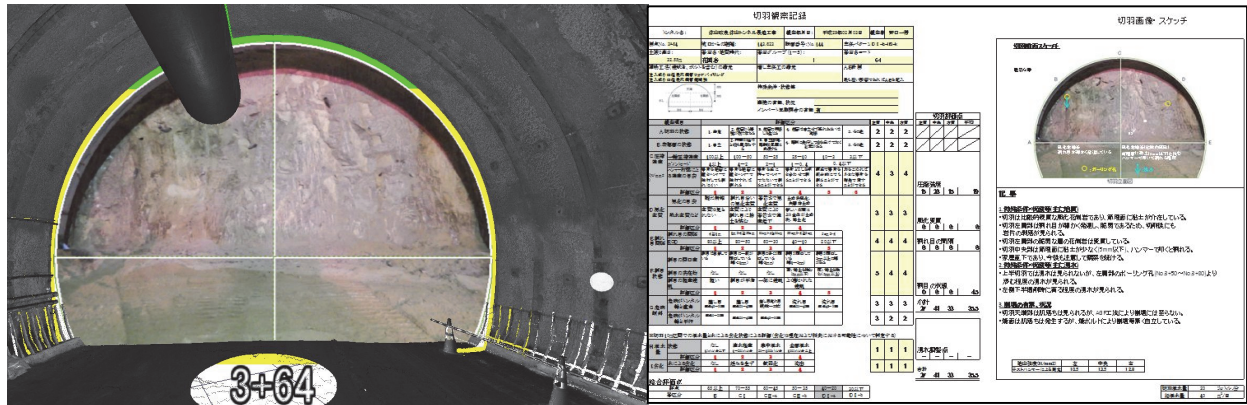


図-12 切羽モデルと点群及び切羽観察記録

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-12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、切羽観察記録のほか、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、TLS、MMS計測を実施し、TSによる計測結果と併せて比較を行った。その結果、以下の結論を得た。

- i. TLSとMMSの計測断面形状の較差は1mm程度であり、MMSがTLSと同等の出来形計測ができることを確認できた。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。トンネル坑外にある工事基準点をトンネル坑内に事前に設置できれば、調整点の設置等の計測準備時間を大幅に短縮できると考える。
- ii. トンネル出来形管理において、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。吹付コンクリート完了後と覆工コンクリート完了後の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が確認でき、3次元点群データのヒートマップ表示により、面的かつ視覚的に出来形を確

認できる。しかし、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。

- iii. 形状情報、位置情報、切羽情報、地質情報等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、施工情報の見える化を実施した。登録された3次元点群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、「2017. 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