

山岳トンネル工事の情報化施工における写真測量技術の活用事例

清水建設（株） 正会員 ○邊見 涼 清水建設（株） 正会員 谷村 浩輔
清水建設（株） 正会員 末田 将大 清水建設（株） 正会員 淡路 動太

1. はじめに

山岳トンネル工事において、トンネル掘削断面である切羽は、トンネル支保工の妥当性の検討や出来形の確認、天端の抜け落ちや突発湧水などの危険個所の評価を行う重要な場所である。従来、切羽作業における施工管理は、目視による切羽観察や計測、現場技術者や現場作業員の経験による管理に大きく依存してきた。しかし、人手不足や高齢化により経験豊富な人材の不足が指摘されるようになり、短時間でより個人差の少ない切羽管理技術の確立が求められている。

近年の探査・測量技術の進歩により、山岳トンネル工事でも三次元データを活用する情報化施工の開発が進められている。その中でも写真測量技術は、対象物に対して撮影位置を変えた複数の写真を用いて解析を行うことにより三次元点群データを取得する方法であり、特別な機器や設備を必要とせず、現場への適用が容易であることが特徴として挙げられる。切羽では、切羽観察等のために、長時間切羽作業を中断することは、施工サイクルや安全性に大きな影響を与えるため、施工サイクルの合間の非常に限られた時間で、より多くの情報を得る必要がある。そのため、切羽形状や安全性を簡易に評価できる手法として写真測量技術の切羽管理への活用が期待されている。本稿では、写真測量技術により得られる切羽の三次元点群データ（三次元切羽形態データ）の測量精度、データ取得の簡易性およびデータ活用の応用性について検討を行い、実現場での活用事例について報告する。

2. 写真測量技術の概要

（1）測定原理

写真測量では、ある特定の対象物に対し複数の観測点から撮影した写真を用いて、それぞれに写る共通点を識別し、三角測量法により視差情報を解析することで、相対座標および色情報をもった三次元点群データを取得する（図-1）。また、点群データの中から既知の座標を持つ複数の参照点を設定することにより、三次元点群データに絶対座標を持たせることができる。

（2）三次元切羽形態データの取得

切羽写真の撮影には一般的なコンパクトデジタルカメラおよび iPad のカメラを使用した（図-2）。また、解析には写真測量ソフト「Agisoft Photoscan」（Agisoft 社製）を使用した。解析時間は 30 分から 1 時間ほどである。参照点の基準座標は、天端と SL 高の左右の鋼製支保工のつなぎ目とした。

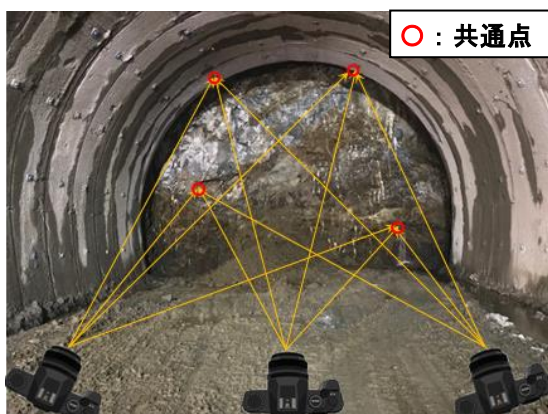


図-1 写真測量の原理



図-2 写真撮影風景

キーワード 写真測量技術、山岳トンネル、CIM、切羽観察、三次元地質モデル、余掘り評価

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2 丁目 16-1 清水建設(株) 地下空間統括部 TEL03-3561-3887

3. 三次元切羽形態データの切羽評価への適用

(1) 三次元切羽形態データによる切羽観察

写真測量により取得した典型的な三次元切羽形態データ（三次元点群データ、以下形態データと呼ぶ）とテクスチャマッピングにより作成した3Dモデルを示す（図-3、図-4）。テクスチャマッピングでは、形態データから作成した3Dモデルに再度画像を重ね合わせ、物体としての質感が表現できる。

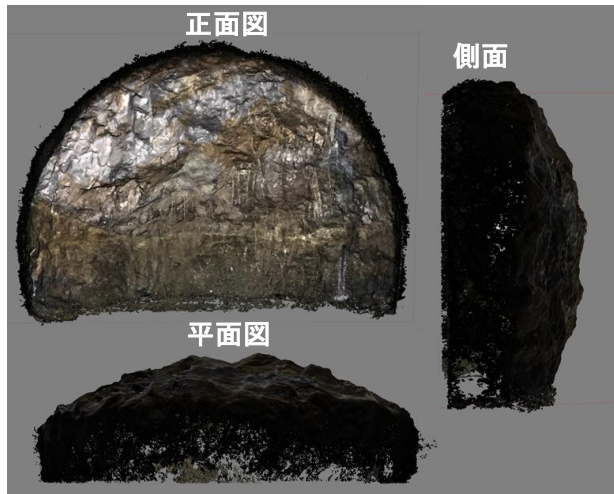


図-3 三次元切羽形態データ（点群データ）

本切羽は、火山性の碎屑岩から構成されており、上半部、特に左肩部で新鮮な塊状岩が卓越するのに対し、下半部は水の影響から変質している様子が観察された（図-5）。また、岩盤の亀裂には岩脈が入っていて、下半部にはボーリング孔跡があり、そこから出水していた。図-3からは全体的な岩盤の凹凸や色が立体的に表現されていることが確認できる。また、切羽形状から球面上に掘削した様子も把握することができる。

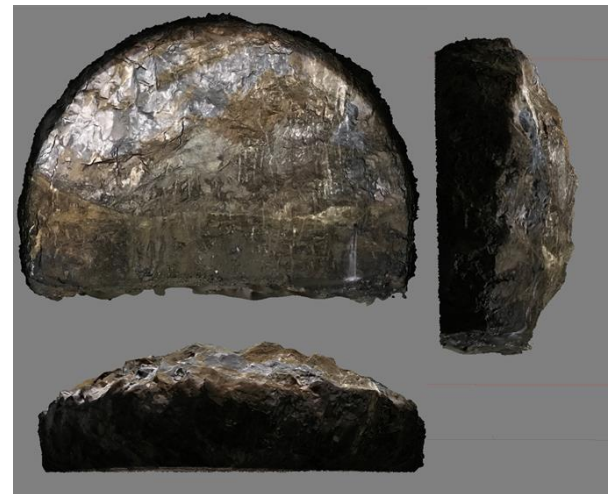


図-4 テクスチャマッピングによる3Dモデル

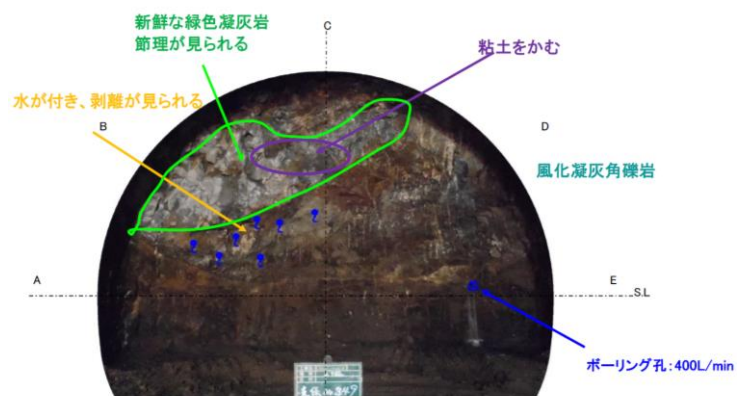


図-5 切羽観察簿

図-4 のモデルを拡大する。視点を変えることで、観察記録では把握しきれなかった岩盤の細かい亀裂や岩脈等が確認できる（図-6a）。また、違う視点からは、節理面の流れ目・差し目の評価や優位な節理の走向傾斜を直観的に把握できる（図-6b）。さらに、点群はそれぞれ座標値を持っているので、割れ目の間隔等を座標値から計算できる。以上のことから、写真測量技術は切羽観察簿の補完ツールとして非常に有用だといえる。

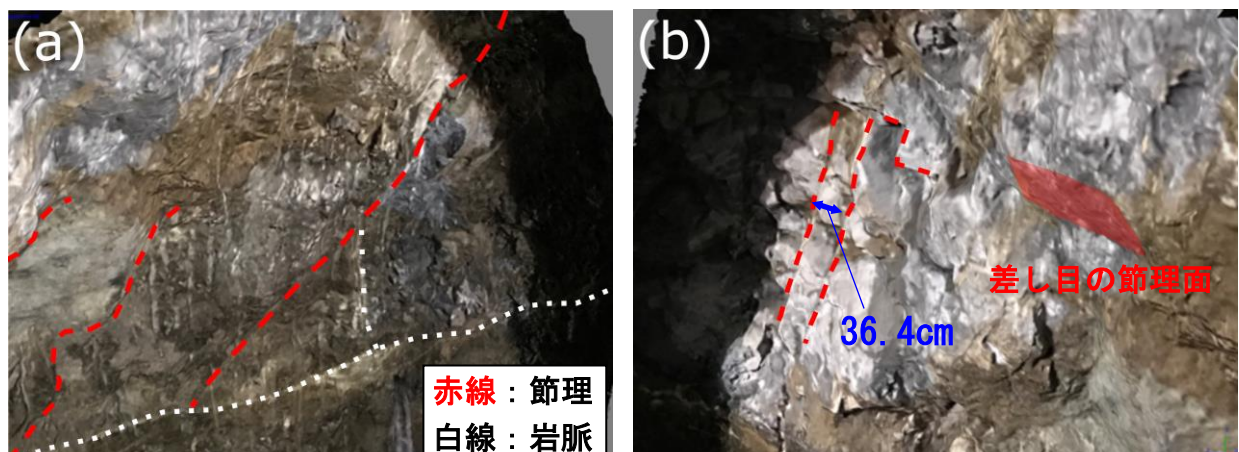


図-6 3Dモデルの拡大図

(a: 左上から見た右肩部の拡大図, b: 右側から見た左肩部の拡大図)

（２） CIM ソフトへの統合と断面の作成

形態データはすべてが座標をもった点群からなるため、CIM ソフトに取り込むことで、任意の断面において点群データを切断・抽出できる（図 7）．使用した CIM ソフトは「Geographia」（（株）地層科学研究所）である．切断面からは掘削形状と地山性状を示す色情報がわかることから、余掘り等の出来形管理や地質境界面の推定に活用できる．また、CAD に出力可能なため、縦断面図や平面図等への三次元データから二次元データへの展開も容易に実施できる（図-8）．

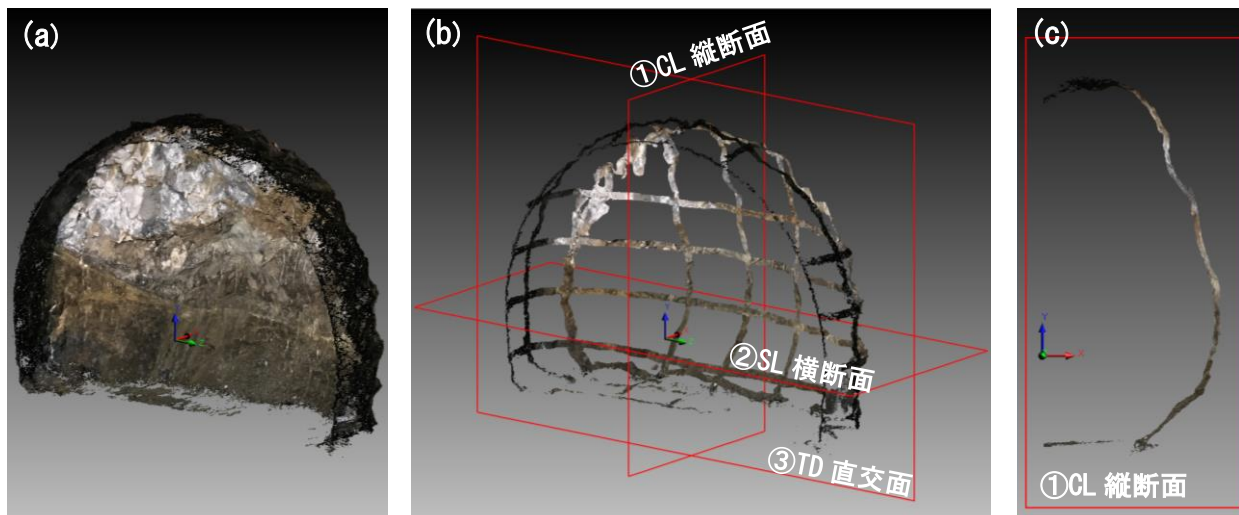


図-7 CIM ソフトへの統合

（a：形態データ，b：切断された形態データ，c：CL 縦断での切断面

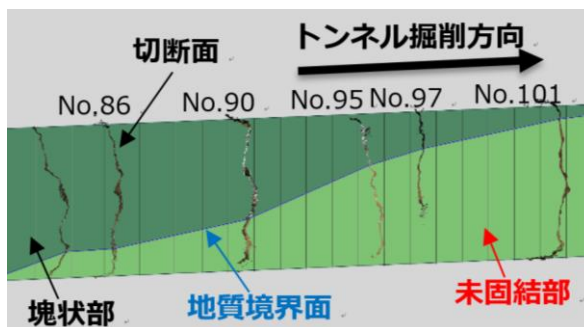


図-8 切断面から作成した縦断面図の例

4. 写真測量技術の測定精度の検証

（１）検証手法

写真測量によって得られた形態データの座標値と簡易 3D スキャナーによる計測結果の比較を行い、写真測量の精度を検証した．また、切羽観察精度への影響を考慮するために、撮影枚数に応じた形態データの精細度についても検証した．検証は 3 つの切羽面にて、以下の要領で実施した．

使用した簡易 3D スキャナーは測定可能距離約 20m、精度約 5cm の小型スキャナーである．測定は、切羽から安全が担保できる距離（10m 程度）に三脚を据え、その上にスキャナーを水平に置いて行った．

検証に使用した写真は切羽から約 8m 離れた位置から切羽と平行に 5 地点、上下高さを変えた 2 列の計 10 枚を基本とした（図-9）．撮影枚数ごとの精度を比較するために、表-1 に従い 3 つのデータ処理ケースに分けて解析を行った．撮影はカメラの角度を変えず、常に切羽面に正対して行った．

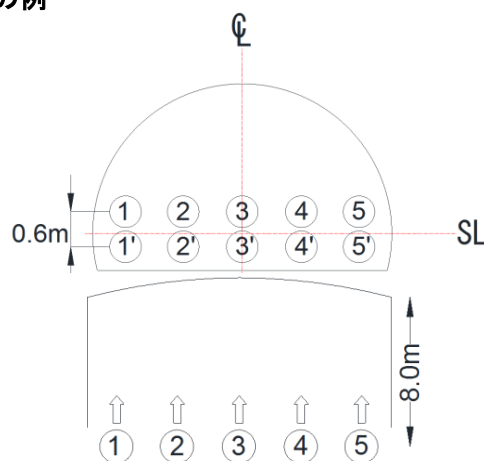


図-9 撮影位置

表-1 データ処理ケース分類

	撮影箇所	枚数
case1	①～⑤、①'～⑤'	10
case2	①～⑤	5
case3	②、④	2

解析により得られた形態データを比較するために、それぞれトンネルの CL、SL の 2 断面に切断し、これを切羽面ごとに重ね合わせて精度の検証を実施した。

(2) 検証結果

いずれの切羽も、簡易 3D スキャナーの点群データと写真測量により得られた形態データの凹凸の傾向が概ね一致していることが確認できた (図-10)。解析に使用した写真の枚数が少ない場合でも、点群間のばらつきは相対的に大きくなったが、撮影中心部から離れても平均座標の傾向に大きな違いは見られなかった。したがって、切羽の大まかな形状の推定は、撮影枚数が少なくとも可能なことがわかった。

一方、形態データの精細度については、撮影枚数が 10 枚と 2 枚のデータには大きな違いが見られ、10 枚の方が切羽表面の亀裂や節理のエッジ等がより詳細にはっきりと表現されていた (図-11)。また、2 枚の場合ではデータが欠損している箇所が多く認められた。これは撮影枚数が少ない場合、切羽の形状や撮影位置、明るさなどによって死角が生じやすいためと考えられる。撮影枚数に応じて切羽面が子細に表現されるため、切羽の凹凸が顕著な場合や切羽性状の評価等の詳細な情報が必要な場合は、撮影枚数を増やす必要がある。

以上のことから、本稿では少なくとも 10 枚程度の写真からモデルを作成することにより、実用性を確保できると判断した。

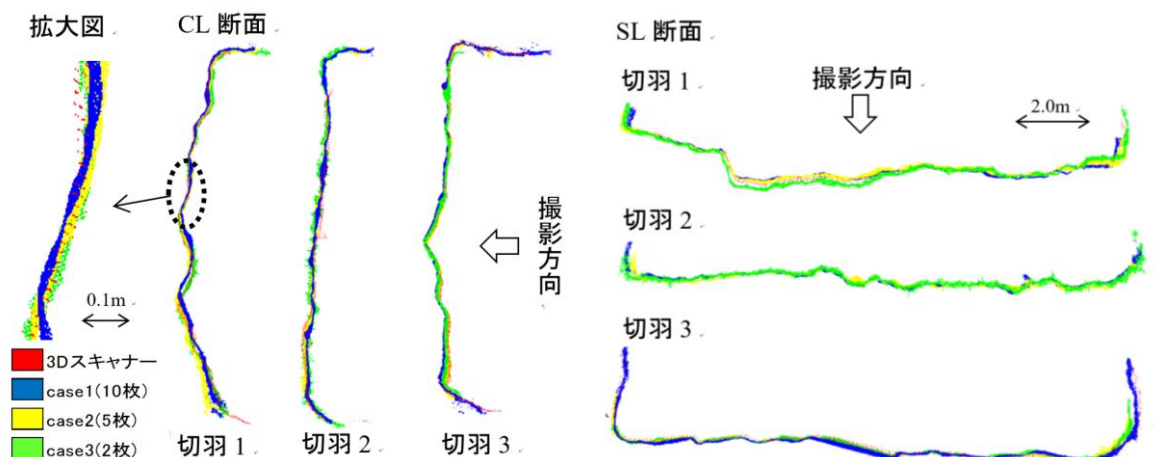


図-10 写真測量と簡易 3D スキャナーの精度比較

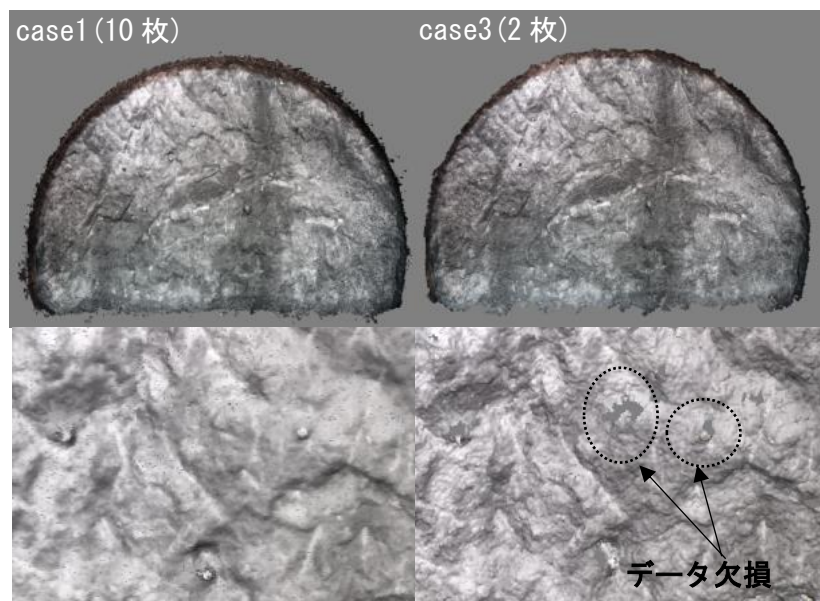


図-11 異なる撮影枚数の形態データの比較

5. 活用事例1（双設トンネルにおける地質評価）

（1）事例の概要

双設トンネルの一方の坑道Aでは、暗灰色の塊状の火山岩から赤褐色を呈する未固結の火山砕屑物へ変化する様子が確認された（図-12）。坑道Aでは切羽の写真測量を実施し、取得した形態データをCIMソフト上で連続して並べ、複数の切断面から得られる境界面をつなぐことで地質境界面の推定を行った（図-13）。そして、この地質境界面を坑道Aと平行する他方の坑道B側に延長して、坑道B側での地質境界面の予測結果と比較した。

（2）地質評価手法の検証

推定した地質モデルの妥当性を検証するため、図-13の地質モデルと坑道Bの掘削実績（地質展開図）を比較した結果を示す（図-14）。坑道Bでは、切羽観察により未固結部から塊状部への地質の変化がサイクルNo.130から見受けられた。一方で、地質モデルからは、坑道BのサイクルNo.135から地質が変化することが予想された。一般的に火山岩層は堆積岩層と異なり、境界面がはっきりしておらず走向傾斜のばらつきも大きいいため境界面の延長の推定が難しいが、本手法では、ずれが5m程度であり、概ね一致していたと評価できる。

また、坑道Aではコンピュータジャンボを用いてロックボルト穿孔探査を実施しており、背面地山6mの範囲の穿孔エネルギーを得ている。図-14に示した通り、推定した境界面を境に未固結部と塊状部で穿孔エネルギー値の大小がわかれており、地質モデルは穿孔探査の結果とも整合性があることが確認された。

以上のことから、3Dスキャナーを用いず、切羽写真のみから構築した3Dモデルにより三次元地質分布を推定する手法の有効性を確認できた。

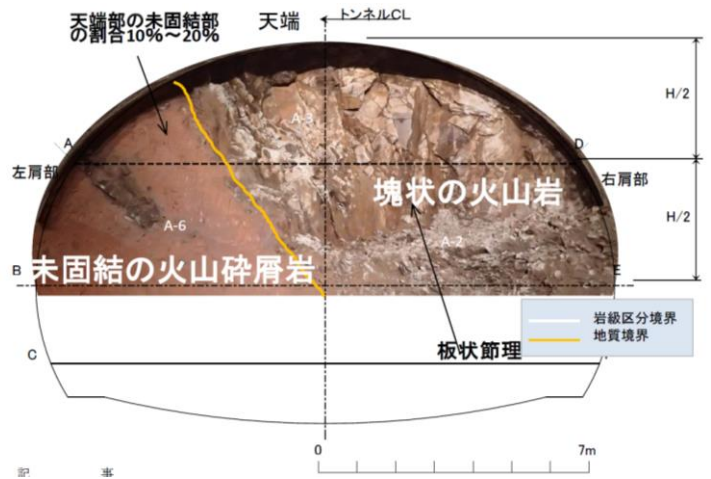


図-12 切羽観察簿

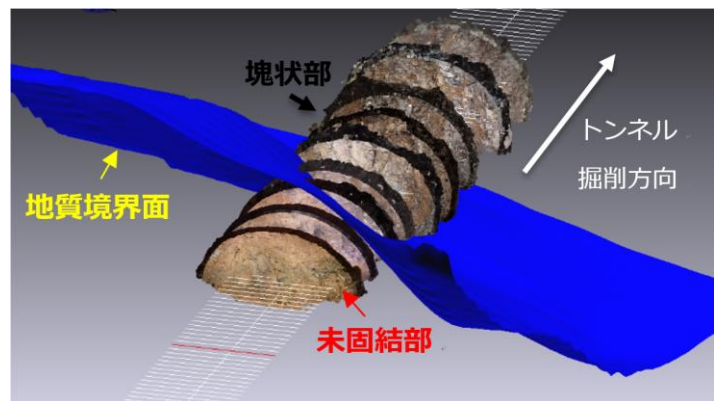


図-13 推定した地質境界面

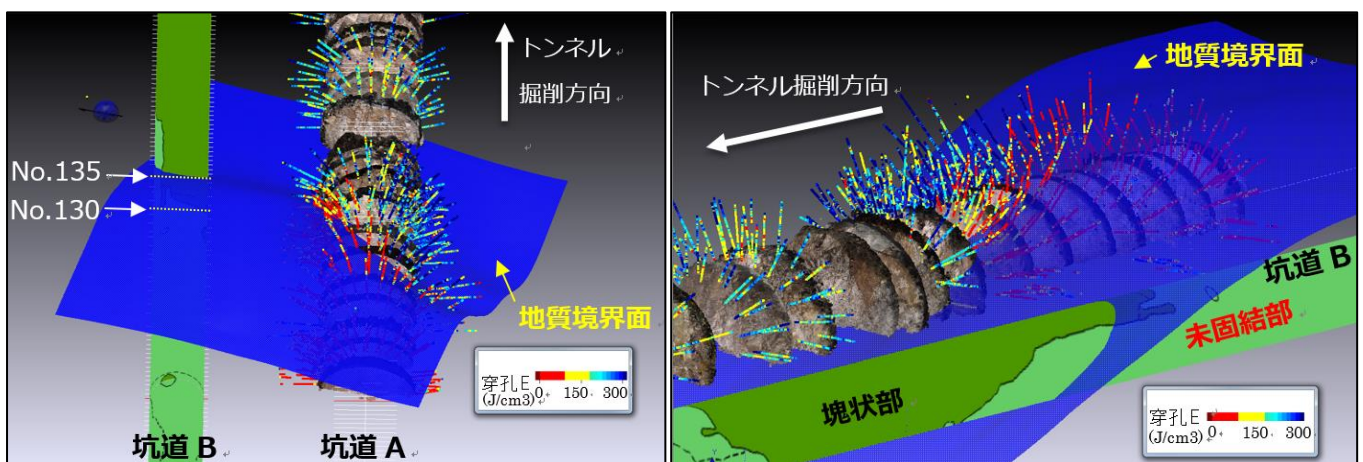


図-14 現場実績との比較（CIMモデル）

6. 活用事例2（余掘り評価）

（1）事例の概要

形態データを用いて切羽掘削時の余掘り（掘削目標に対する実際の掘削断面の大きさ）評価を行った。通常の切羽照明の場合、掘削断面の側壁部は影になることが多く、写真測量の精度が確保できない。そのため、余掘り評価用の写真を撮影する際には、切羽から1D（10m程度）離れた箇所に吹付け機を配置し、その照明によって、影が生じない工夫を行った（図-15）。作成した形態データからは、多少データが欠損している箇所があるが、側壁部の形態を十分に表現されていることが確認できた（図-16）。



図-15 余掘り評価用の写真撮影風景

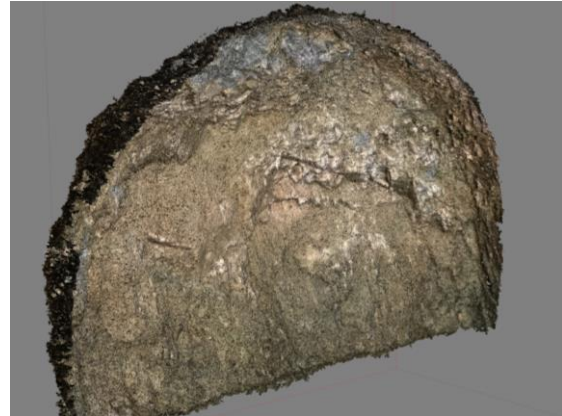


図-16 余掘り評価用の形態データ

（2）余掘りの評価

余掘り評価では、影になりやすい側壁部を評価するため、はじめに鋼製支保工加工図と写真測量による鋼製支保工内側の点群データを比較し精度検証を行った（図-17）。その結果、加工図の線上に、点群が誤差5cm以下で集中して分布したことから、写真の撮影方法を工夫することで側壁部においても十分な精度を持った写真測量を実施できることが確かめられた。

余掘り量は、基準点（当該切羽のひとつ前の鋼製支保工の位置）から0.9m奥のトンネル線形と直行する切断面の測定値と掘削目標値をCAD上で比較し評価した（図-18）。点群が大きくばらつくことや、掘削目標の線から大きく外れることはなく、場所ごとの余掘り量の違いを5cm程度の誤差で識別できることが確かめられた。余掘り形状の把握に十分な精度を持つことで、こそく作業の効率化や発破掘削における発破孔の差し角管理への適用が可能である。

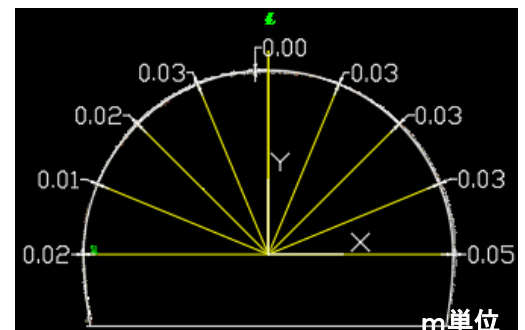


図-17 鋼製支保工内空との比較検証

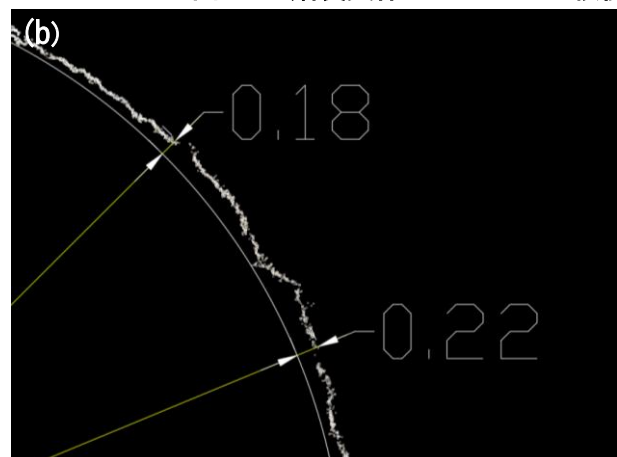
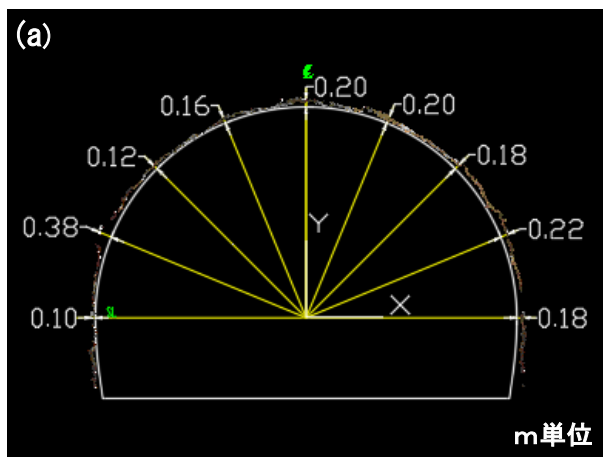


図-18 余掘り量の評価
(a：全体図，b：拡大図)

7. 写真測量技術の適用範囲と今後の展開

写真測量の精度は、基準点の座標精度、写真枚数、照度、カメラの性能によって変化する。ミリメートル単位の精度の確保のためには、多くの枚数の写真と TS 等によってあらかじめ高精度に求められた基準点座標が必要であるため、高精度の 3D スキャナー等を使用する必要がある。しかしながら、写真測量技術の最大の利点は、一般的に実施されている写真撮影だけでデータ取得可能であるという現場への適用の簡易性であり、数センチ単位の精度で十分であれば、適用範囲は広いと考えられる。特に今回報告した事例で使用した写真は、特別な機器は必要とせず、日常管理の範囲で撮影されたものを用いており、得られるデータの応用性の高さから、山岳トンネルだけではなく、広い工種において写真測量技術の情報化施工に対する寄与は大きくなると考えられる。

今後は、形態データの欠損やばらつきを抑制する撮影方法や枚数等の条件整理を進め、写真測量技術の様々な工種における要求性能に応じたデータ取得方法をまとめていく予定である。また、形態データの機械学習への適用を図り、各種の評価手法の自動化に繋げていきたいと考えている。

8. まとめ

山岳トンネル工事の情報化施工における写真測量技術の適用性を検討した結果、得られた知見は以下の通りである。

- 写真測量によって取得した三次元切羽形態データにより、切羽の岩盤の凹凸や節理の走向傾斜などの詳細な情報が得られ、切羽観察では把握しきれなかった細かい亀裂や岩脈等も把握できることから、切羽観察簿の補完ツールとしての有用性の高さが認められた。
- 写真測量により得られる形態データの切羽形状の計測精度は 5cm 程度であり、少ない撮影枚数でも切羽形状を大まかに把握できるが、切羽性状の評価等の詳細な情報が必要な場合には、撮影枚数を 10 枚程度に増やす必要があることがわかった。
- 掘削実績との比較により、形態データから推定した地質境界面をもとに、地山の三次元地質分布を推定する手法の有効性が確認された。
- 写真測量により得られる形態データは、数センチ程度の精度で余掘り量を評価できることが確認され、こそく作業の効率化や発破孔の差し角管理等への適用性が確認された。
- 写真測量技術は、数センチ単位の測量精度で十分であれば、現場への適用が簡易であり、また得られるデータの応用性が高いことから、山岳トンネル工事やほかの工種における情報化施工への寄与は今後大きくなると考えられる。