

1

写真測量技術を活用したトンネル切羽面の3次元化に関する取組み

舟橋 孝仁*1・高橋 幹夫*2・植村 義幸*3

概 要

デジタルカメラを用いた写真測量技術を活用し、トンネル切羽面の3次元化を行った。また、本技術の現場適用や切羽面の3次元データの活用方法について検討を行った。

得られた知見として、切羽写真の撮影作業は施工サイクルに影響を与えないことや、切羽面の3次元データ化により、切羽面の凹凸形状や地質の変化点等を机上でも概ね再現できることを確認した。また、切羽面の3次元データの活用として、切羽面に顕在化した節理面や縦断方向に変化する地質構造（断層面、地層面等）の走向、傾斜の把握、それらを用いた切羽前方地山の予測が可能であることを示した。

キーワード：トンネル切羽、写真測量、3次元化、切羽面形状、前方予測

APPROACH TO 3D IMAGING OF TUNNEL FACE SURFACES USING
PHOTOGRAMMETRY

Takahito FUNAHASHI *1, Mikio TAKAHASHI *2, Yoshiyuki UEMURA *3

Abstract

We have utilized photogrammetry employing a digital camera to make 3D images of tunnel face surfaces. We have also studied how this technology can be applied to actual sites and how 3D data of tunnel face surfaces can be utilized.

It has been confirmed that photographing of tunnel faces does not affect the construction cycle and that 3D imaging of tunnel face surfaces allows uneven shapes of surfaces and points of geological variation to be approximately reproduced on the desktop. We have shown that it is possible to utilize 3D data of tunnel face surfaces to grasp the strikes and inclinations of joint planes exposed on face surfaces and geological structures (such as fault planes and bedding planes) changing in the longitudinal direction and using this data to predict the ground ahead of the tunneling face.

Keywords: tunnel face, photogrammetry, 3D imaging, tunnel face surface shape, forward prediction

*1 Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

*2 Oosaka Branch

*3 Manager, Tunnel Group, Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

写真測量技術を活用したトンネル切羽面の3次元化に関する取組み

舟橋 孝仁*1・高橋 幹夫*2・植村 義幸*3

1. はじめに

山岳トンネル現場における日常的な施工管理の1つとして切羽観察がある。施工段階で行う切羽観察は、日々変化する切羽の状況(例えば、地質、切羽の状態、素掘り面の状態、強度、風化状況、割れ目の状態、湧水の状況等)を目視やスケッチ、写真撮影等によりありのままを観察し記録に残す(図-1参照)。そして、施工時の安全確保、切羽地質の把握、地山の評価、支保パターン選定や施工方法の検討、さらには切羽前方地質の予測等に活用される。一方、切羽観察記録の活用は、施工段階のみならず、計画・設計段階においては、例えば、Ⅱ期線トンネルが計画される場合には、支保パターンや補助工法等の設計において重要な資料となり、トンネルの維持管理段階においては、供用中のトンネルに変状が発生した場合には、変状原因の究明等に利活用されたりするなど、さまざまな段階で重要な役割を果たしている。そのような観点から、切羽の状況をより詳細かつ正確に記録し保管することは非常に重要である。

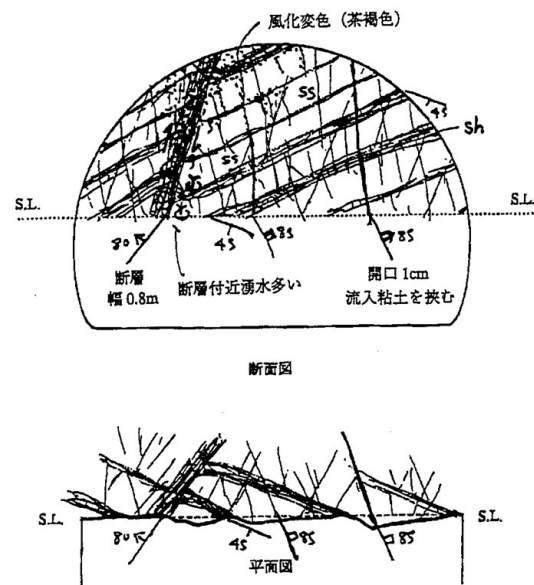
切羽の評価を行う上で把握すべき情報として、切羽面に出現した節理面、層理面、断層等の面構造がある。これらの調査にはクリノメーター等を用いて、切羽面において直接的な測定を行うことが多い。しかしながら、掘削直後の素掘り状態の切羽面に最接近することは、肌落ち災害の危険もあり安全上の問題がある。

一方、施工中のみならず施工後、供用後において、切羽状況を振り返る場合には、切羽観察記録(とくに、切羽スケッチや写真)等に頼ることが多い。しかしながら、記録されたスケッ

チ図や写真画像として得られた切羽面は2次元の情報であり、この2次元画像のみでは切羽面の形状や面構造等の把握が困難であり、施工後において詳細な切羽の情報を得ることは困難である。また、複雑な地質構造や地質の変化に富むトンネルでは、切羽観察記録のみで切羽状況を把握しその先を予測することは非常に難しい。

そこで、より安全で容易な方法で、切羽面の形状が再現でき、施工後においても地質構造等の情報を得ることができる3次元データを取得し活用することができれば、これまでの切羽観察に加え、より詳細かつ正確な記録が蓄積できるものと考えられる。

本検討では、写真測量技術を活用し切羽面の3次元化を試みた。また、得られた3次元データの活用方法や現場での適用性について検討を行った。

図-1 切羽スケッチの例¹⁾

*1 土木本部 トンネル技術部

*2 大阪支店

*3 土木本部 トンネル技術部 トンネルグループ グループリーダー

2. 切羽面の3次元化

2.1 3次元化の方法について

近年、構造物の出来形や形状等を3次元化する測量技術として、例えば、3D スキャナー測量や写真測量、トータルステーションを用いた測量等がある。これらの技術を活用しトンネルの切羽面を3次元化することを考えた場合、その適用性（作業時間、手間、精度等）には一長一短あり、3次元化する方法を選定するにあたっては、その扱いが容易で日常的かつ継続的に実施が可能であることが必要である。本検討においては、それらを考慮し、デジタルカメラを用いた写真測量（ステレオ写真測量）により切羽面を3次元化する方法を選定した。

写真測量は、対象物を2箇所以上の場所から撮影し、得られた写真画像から対象物の形状を3次元情報（3次元座標）として得ることができる（図-2参照）。その技術は、地形の調査や遺跡の調査等、さまざまな分野で利用されている。

切羽面の3次元データの取得には、「三次元写真応用計測システム Kuraves MD」²⁾を用いた。

2.2 切羽写真の撮影方法の検討

ここでは、切羽面を3次元化するのに適した画像を得るため、写真の撮り方について検討を行った。主な検討項目は、最適な撮影位置（カメラ位置）、撮影範囲、方向や長さ等の基準となりうるもの、また、撮影に必要な時間等である。なお、切羽写真の撮影は、トンネル断面形状がそれぞれ異なる現場において実施した。

(1) 撮影位置

切羽面の3次元化処理を行うにあたっては、2箇所以上から撮影した写真画像が必要である。トンネル内は空間的な制限があることや、撮影対象とする切羽面、その他の被写体を画角内に入れることを考えると、必然的に撮影位置も限られる。本検討においては、図-3に示すとおり、縦断方向の撮影距離 L を切羽面から約20m、横断方向の撮影位置をトンネル中心より左右に

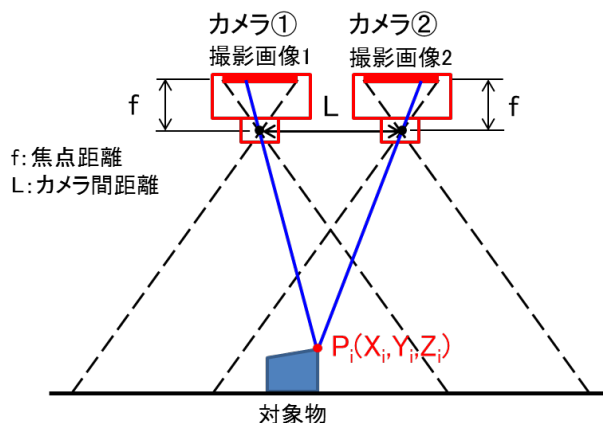


図-2 写真測量の概要

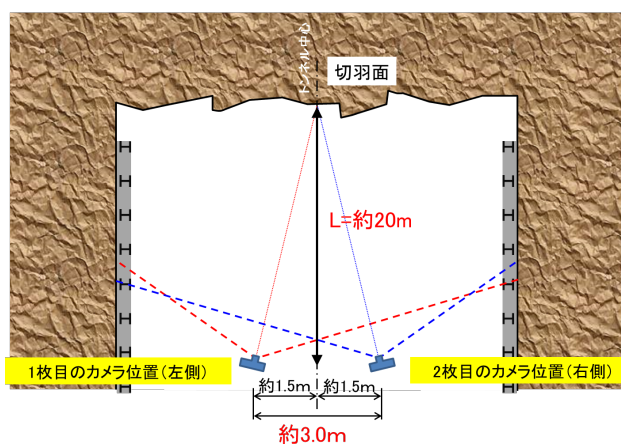


図-3 撮影位置

約1.5mとし、撮影間距離を約3mとした（撮影間距離は、撮影距離 L に対し15%程度を確保することを基本とした）。また、撮影間距離を大きくしすぎると、切羽面の凹凸箇所が隠れて見えない部分や3次元化処理を行う際に必要な点を確保できないこともわかった。

(2) 撮影範囲

撮影範囲は、3次元化する切羽面の範囲、同時に写す他の被写体、3次元化処理を行う際に必要な点等が十分に写真画像に納まるように決定した。とくに、トンネルは切羽面より手前（写真撮影側）には施工済みのロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工等が存在するため、これらが十分に写るよう配慮した（図-4参照）。また、3次元化処理作業を少しでも容易にするため、図-5に示すような黒地に白丸のターゲットを設置した。

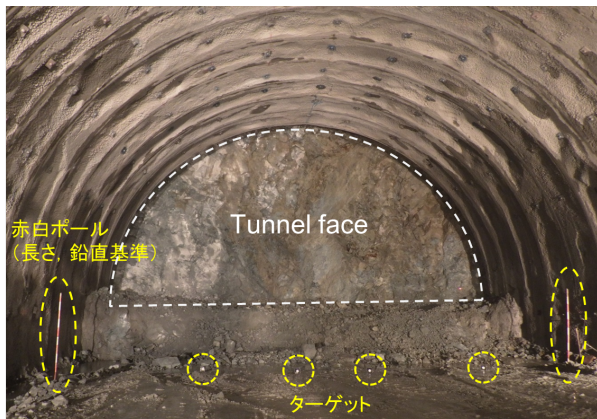


図-4 撮影範囲



写真-1 切羽撮影状況

(3) 基準

撮影された切羽写真を用いて3次元化はできるものの、空間上に存在する切羽面の3次元データは実際とは異なる長さ、向き、座標系であるため、相対的な扱いとなり正確さに欠ける。そこで、3次元化処理を行う際にこれらの定義付けが必要となることから、撮影する際には、切羽面の手前に長さおよび方向または座標点等を示すものを配置した。配置するものは、現場で容易に準備できるものを使用することとし、長さを示すものとして赤白ポール（20cm ごとに赤と白が入れ替わるもの）をトンネルの両サイドに切羽面から4～5m程度離れた位置に設置した（図-4参照）。また、方向を示すものとして、両サイドに設置した赤白ポールのうち、片側のポールを水準器等により鉛直に設置した。

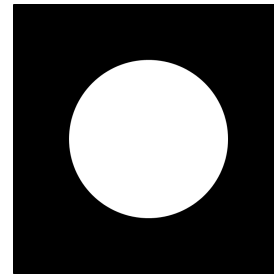


図-5 ターゲット

座標点に関しては、トンネルの坑内変位計測を行うために設置された計測ピン（測量点）を利用した。座標点を用いて3次元空間を定義付けることができれば、3次元データを絶対座標で扱うことができるようになるため、実物にあった絶対量や方位を把握することが容易になると考えられる。

(4) 撮影に必要な時間

通常、切羽観察は掘削完了後の素掘りの状態でスケッチまたは写真撮影を行うが、切羽面の不安定化や素掘り面の状態で放置されることによる地山の緩みの拡大を防止するため、早期に次工程に移る。そのため、切羽観察に費やせる時間は、概ね5～15分程度であり、ごく限られた時間内で撮影準備から写真撮影を行う必要がある。検証の結果、ターゲットおよび赤白ポールの設置、2枚の切羽写真の撮影にかかる時間は5分程度であり、施工サイクルに全く影響を与えずに作業が行えることがわかった。したがって、本技術を現場で適用する場合においても、日常的に行う切羽観察と同様に実施可能であることがわかった。写真-1に切羽撮影状況を示す。

2.3 3次元データの取得

図-6に3次元化処理の流れを示す。3次元化処理を行う前には、カメラのレンズ歪みの補正を行い、切羽写真のオルソ画像を取得した。レンズ歪みの補正に当たっては、使用するカメラのキャリブレーションを行い予めカメラ個体の補正パラメータを取得した。

(1) 撮影位置の決定と基準の定義

撮影位置の計算は、図-7に示すように、2枚の切羽写真に写る同じ点を約20点指定することにより求めた。このとき指定する点は、予め設置したターゲット、赤白ポール、ロックボルトの頭部等とし、可能な限り上下、左右、前後が散らばるように点を選定した。長さや鉛直方向の基準は、トンネルの両サイドに設置した赤白ポールの色境界を2点指定することにより、長さや鉛直の定義付けを行った。このとき、ポールの2点間の長さは、1.4m~1.8mとなるようにした。これらの処理により、撮影位置の3

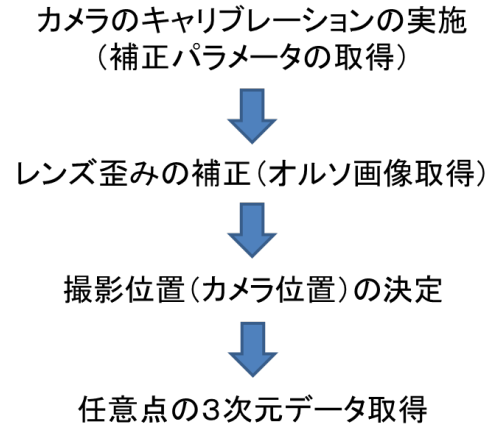


図-6 3次元化処理の流れ

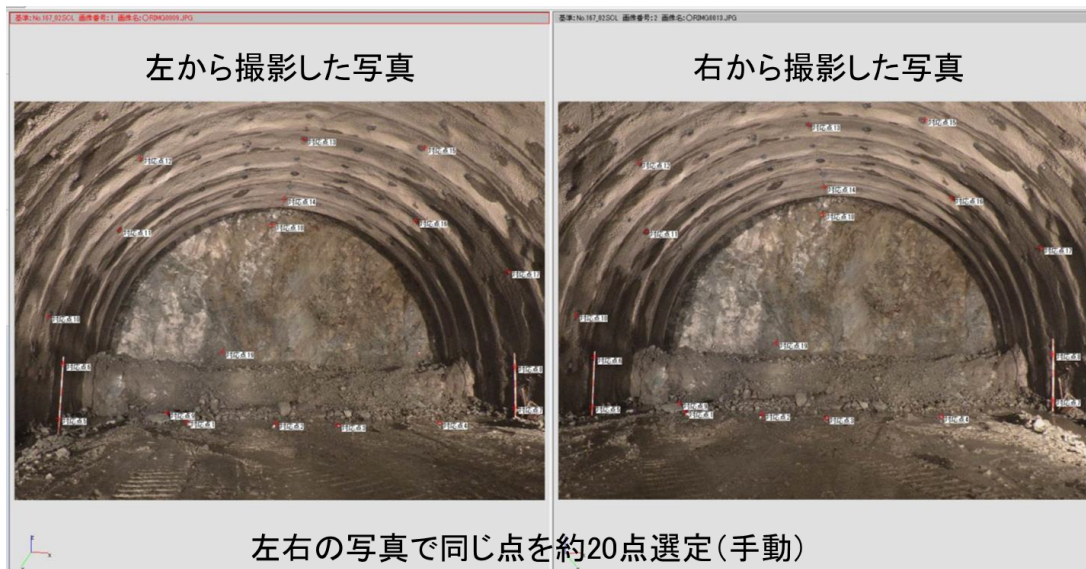


図-7 撮影位置を計算に必要な対応点の指定

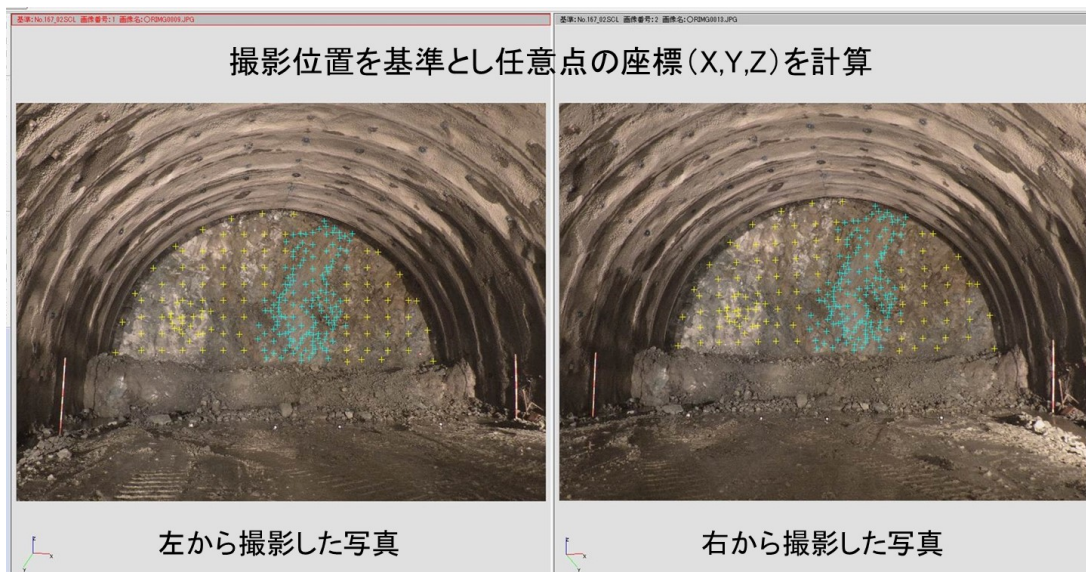


図-8 任意点の指定

次元座標が確定され、3次元空間が作成される。

(2) 任意点の計算

撮影位置が確定した後、3次元化したい任意箇所を指定する。本検討では、3次元化する任意の点を、切羽面に顕在化する地質の変化箇所や凹凸のエッジ等とした(図-8に示す黄色と水色の点)。任意点の計算は、撮影位置を基準として求める。その原理は、図-9に示すように、三角形の原理(三角形の一辺とその両端角が分かれば三角形が確定する)を利用することにより計算される。図-7に示した2枚の切羽写真を用いて3次元化した切羽面を図-10に示す。切羽面の凹凸が概ね表現できていることがわかる。さらに、3次元化された任意点を用いることにより、切羽面に顕在化した節理面を抽出できることがわかった。このことから、写真測量技術を活用した切羽面の3次元化により、切羽に出現する岩盤の凹凸形状、地質の変化点、節理面等の切羽状況をパソコン上においても概ね再現でき、3次元化されたデータ(3次元座標)を用いることにより、机上においても面構造の方向や地質境界の位置等を正確に把

握することができると考えられる。

3. 現場への適用と切羽の3次元データの活用

本技術の現場での適用性、3次元データの活用について検討するため、施工中のトンネル現場において、本技術を用いた取組みを試行的に行った。

切羽写真の撮影方法は、前章で示した方法とし、撮影頻度は1日1切羽とした。今回は、試行的な取組みであったため、切羽写真の撮影は現場職員で行い、3次元化処理は本社技術部職員が実施した。

三角形の原理

「三角形の一辺とその両端角が分かれば三角形が確定する」

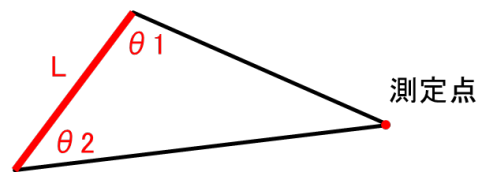


図-9 三角形の原理

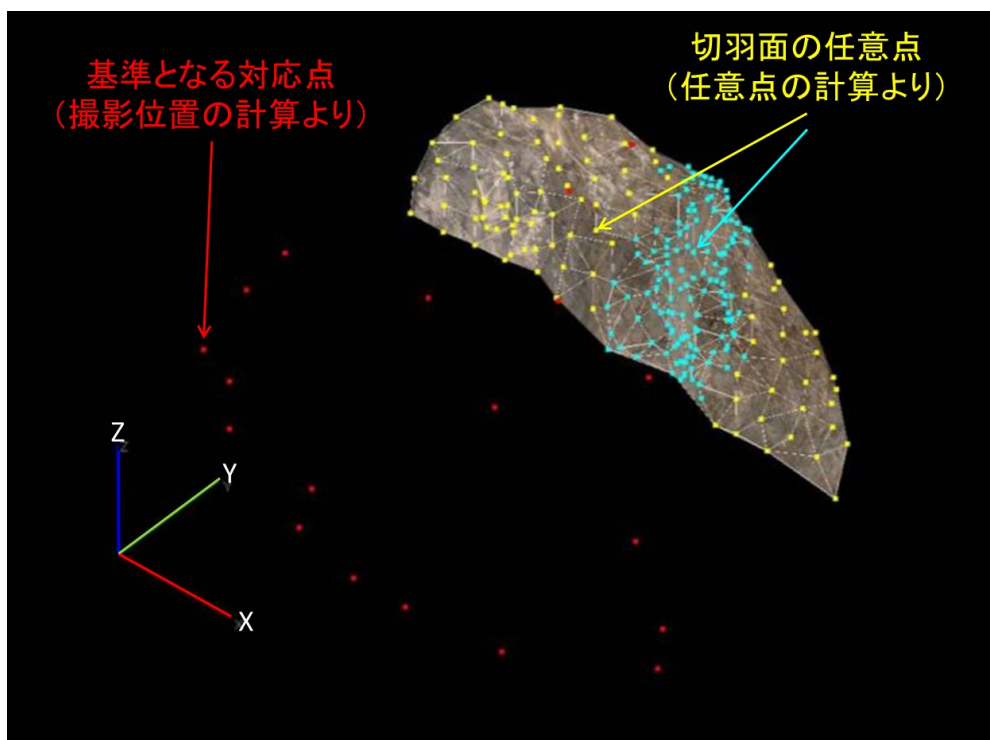


図-10 3次元化した切羽面

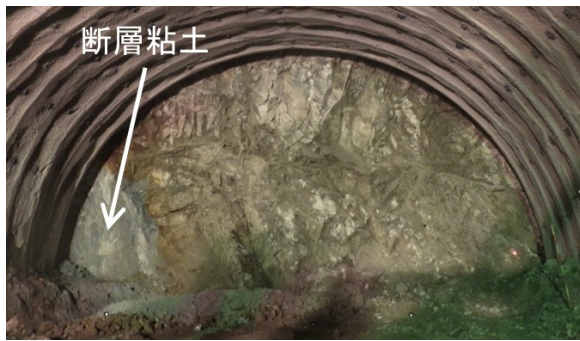


写真-2 切羽に出現した断層粘土



写真-3 断層粘土の状況

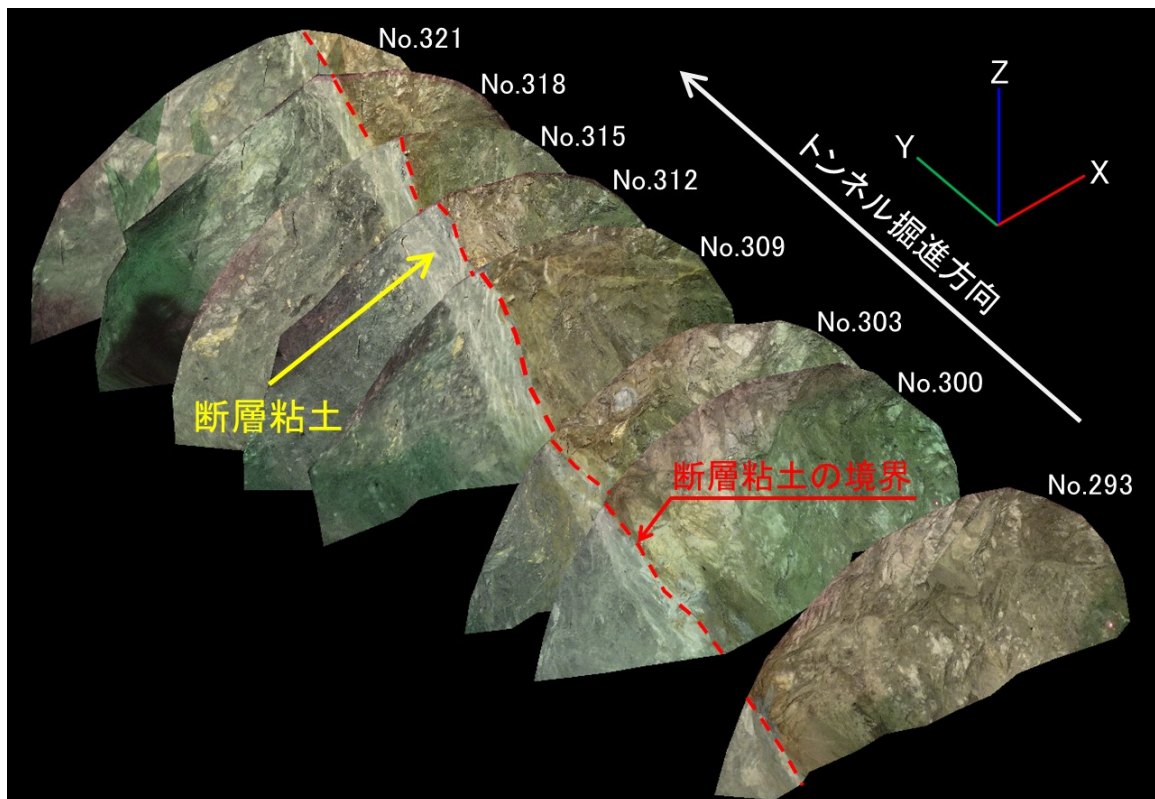


図-11 切羽 3次元データの連続表示

3.1 現場適用性

現場で本技術を適用するにおいては、撮影に費やす時間は従来の切羽観察に要する時間と大きく変わらないことから、日常的な施工サイクルの中で実施可能であることが確認できた。しかしながら、3次元化処理に関しては、現場の職員が行うことを考えると、業務負担の懸念もあり今後の課題と考える。ここで、1つの切羽面を3次元化するのに要する時間は、写真画像の良し悪しや処理ソフトの熟練により差はあるが、図-10に示した程度の仕上がりであれば、

概ね15～20分程度である。

3.2 切羽の3次元データの活用

トンネル掘削中に、写真-2に示すような想定外の断層粘土が上半左脚部より出現し、今後のトンネル掘削における切羽面の不安定化が懸念された。断層粘土は、ロックピックハンマーが容易に突き刺さる状態であった(写真-3参照)。そこで、断層粘土の境界を3次元データとして取得し、切羽面に現れた断層粘土の変化状況を追跡することとした。

図-11に個々の切羽面の3次元データをトン

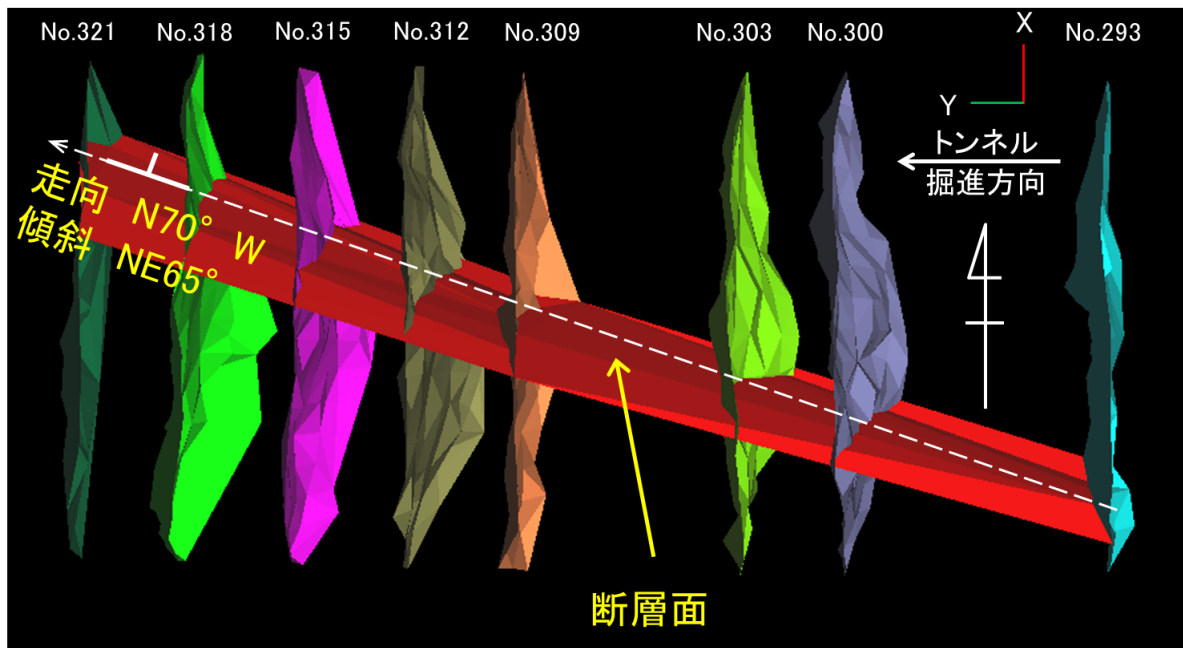


図-12 断層面の表示（平面投影画像）

ネル縦断方向に連続表示させ、切羽の写真画像を表示させたものを示す。3次元化した切羽の縦断方向への連続表示は、前後の切羽写真に写る同じ点（例えば、ロックボルト頭部や計測ピン等の点）を利用し、それぞれの切羽3次元データを関連付けることにより接続した。そのため、縦断方向に並ぶ切羽面の位置は実施工での位置関係とほとんど同じである。図-11からも分かる通り、断層粘土が縦断方向に変化する様子を立体的に可視化でき、その状況をより理解しやすく表現できていることがわかる。次に、図-11を平面的にみた場合の平行投影（オルソ）画像を図-12に示す。図中赤色で表示された面は、それぞれの切羽における断層粘土の境界（図-11に示す赤点線）を縦断方向につなぎ、面的に表現したものである。本検討ではこの面を断層面とした。この図より、トンネル掘進方向（Y軸方向）と断層面の方向との関係を把握することができる。ここで、図のX軸を北とすれば、断層面の走向、傾斜はN70°W、NE65°と表すことができる。したがって、トンネル縦断方向に変化する地質構造（主に面構造）の走向、傾斜を早い段階で把握することができれば、ある程度の切羽前方の地山状況の変化予測は可

能であり、これらを利用することで、対策工や施工方法等の検討に有効活用できると考えられる。また、1つの切羽面に対しても、節理面の走向、傾斜や割れ目間隔等の把握は可能であり、机上でも切羽評価を行う上で把握すべき情報の一部を取得できる。これらのことから、本技術は、地質構造の解釈や日常的な切羽観察（切羽スケッチ）の補助ツールとしての利用が可能であると考えられる。

4. まとめ

本検討では、デジタルカメラを用いた写真測量技術を活用し、トンネル切羽面の3次元化を行った。また、現場における適用性と切羽面の3次元データの活用方法について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 切羽における写真撮影作業は、施工サイクルに影響を与えることなく、日常的に実施することが可能である。
- (2) デジタルカメラを用いた写真測量は、切羽面の凹凸形状、地質の変化点等を概ね再現でき、それらを3次元データとして取得することができる。また、3次元データを利用し節理面等の面構造を抽出することができる。

- (3) 3次元化した複数の切羽面を連続的に表示することにより、切羽状況の変化を立体的に可視化でき、トンネル掘進方向と地質構造の方向性との関係を把握することができる。
- (4) 複数の切羽面を連続的に表示したものをを用いることにより、縦断方向に変化する地質構造（断層面、地層面等）の走向、傾斜を把握することができる。それらを用いることにより、切羽前方近傍の地質状況の予測が可能であり、それを踏まえた対策工や施工方法の検討に活用できると考えられる。
- (5) 本技術は、地質構造等の解釈や日常的に行う切羽観察の補助ツールとしての活用が考えられる。

5. おわりに

本技術の今後の運用については、現場技術者が地質の専門技術者や熟練トンネル技術者と切羽面の3次元データを共有できる体制を整え、現場に対して地質的、土木的観点から技術的な支援が行えるよう努める方針である。また、切羽観察の補助ツールの他、蓄積した切羽の3次元データは、若手技術者に対する切羽観察の教育ツールや、施工時の地山状況の再現ツールとしての活用も有効と考えられる。

参考文献

- 1) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：
トンネル施工管理要領（計測工編），p.8，
2015.7
- 2) 「Kuraves MD」ホームページ：http://www.kurabo.co.jp/e/3d/kuraves_md_01.html，2016.12