

切羽地質情報取得システムの開発

鶴田 亮介¹・谷口 翔²

¹ 正会員 株式会社安藤・間 建設本部先端技術開発部（〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20）

E-mail: tsuruta.ryosuke@ad-hzm.co.jp

² 正会員 株式会社安藤・間 建設本部先端技術開発部（〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20）

E-mail: taniguchi.sho@ad-hzm.co.jp

山岳トンネルにおける切羽の情報を短時間で高精度にセンシングする切羽情報取得システムを開発した。計測機器を搭載した専用車両を開発し、データの取得から評価結果の出力までを自動化することで、短時間で同時に、簡易な操作でトンネル切羽を評価することを可能とした。本報では、本システムの概要について報告する。

Key Words: sensing, tunnel face, artificial intelligence, hyperspectral imaging, photogrammetry

1. はじめに

近年、建設工事では労働生産性の向上が求められ、ICTなどを活用した施工の省力化や効率化が進められている¹⁾。このような背景のもと、山岳トンネル工事における生産性の向上を目的として、トンネル切羽の情報を短時間で簡易な操作で高精度にセンシングする切羽情報取得システムを開発した。

山岳トンネルは、地中深くに構築されることから、事前の設計段階の調査で、正確な地質状況を正確に把握するのは難しい。そこで、施工中に、トンネル切羽を直接観察して地質を確認・再評価し、切羽の状況に応じた最終的な支保パターンを確定する作業が行われる²⁾。このように、切羽での地質評価は重要なものであるが、実際の施工現場では、トンネルの掘削作業の合間を縫った短い時間で、目視観察を中心とした地質評価が行われており、評価の精度や定量化に課題がある。

切羽地質情報取得システムは、このような課題を解決するために開発したシステムで、トンネル切羽における地質評価項目のうちの主要な評価項目を自動でセンシングして、取得したデータを専用のシステムで処理し、定量的に評価する。

2. システム概要

表-1にトンネル切羽における地質評価項目を、国土交通省近畿地方整備局の様式記載した、当社施工工事での切羽観察シートの例を示す。

切羽地質情報取得システムは、トンネル切羽の地質評価項目のうち、3つの主要な評価項目である「A：圧縮強度，B：風化度，C：割れ目の間隔」を自動でセンシングし、定量的に評価する。

図-1に3項目のセンシングおよび評価手法の概念図を示す。

3項目のうち、「A：圧縮強度」はマシンガイダンス機能を有するドリルジャンボを用い、「B：風化度」と「C：割れ目の間隔」は写真-1の車両に搭載した計測機器を用いてセンシングを行う。次項から、3項目のセンシングおよび評価手法の詳細を示す。

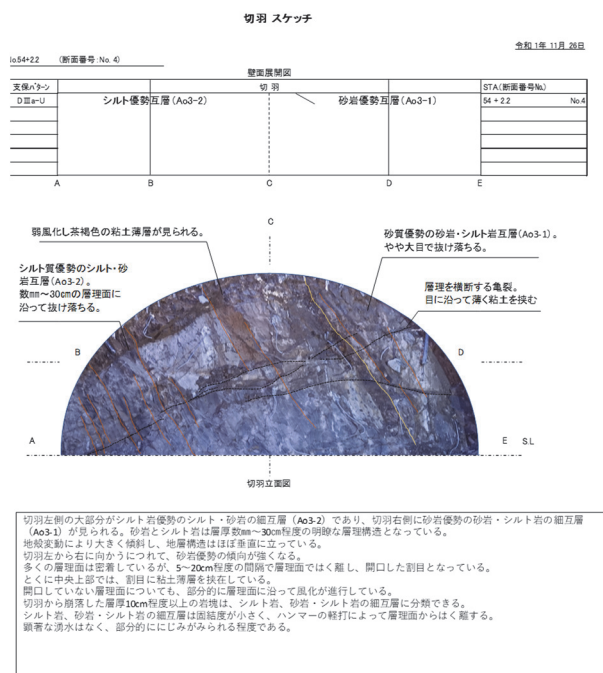
3. 圧縮強度の評価アルゴリズム

(1) 概要

圧縮強度は、ドリルジャンボの穿孔データ（穿孔速度，打撃圧，回転圧，フェード圧）を用いて、AI

AI による回帰分析では，穿孔データを説明変数とし，圧縮強度を目的変数とした．

表-1 切羽観察シートの例



切羽観測データシート						観測年月日：令和1年11月28日	
トンネル名 山崎隧道トンネル工事		坑口からの距離 4.0m		断面番号 No.4		変位m/N・mm D型=U	
A軸寸法 0m		新石名・地質時代 シェルス層・砂岩互層 新第三紀		岩石グループ(1~6)：4		新石名→No.30	
補助工法(増設きり込みを含む)の種類				増しシールドの状況 なし		A計測箇所：なし	
継接合 950mm  <td colspan="2">特殊条件・状態等 なし</td> <td colspan="2"></td>				特殊条件・状態等 なし			
腐蝕の有無状況 なし				C/N→早期閉鎖の有無 なし			
観察項目		評価区分				評価点(評価区分)	
		左翼		中央		右翼	
A.圧縮強度 (N/mm2)	一般圧縮強度 100以上	100~50	50~25	25~10	10~3	3以下	
	6イノコド ^① 4以上	4~2	2	1~0.4	0.4以下		
	ハンマーの打撃に よる強度的目録を 作成する	岩石を地面に突き 貫かせることで 硬さを調べる。	岩石片を手で持つ 程度で叩いて 硬さを調べる。	岩石片を指先で たたき合わせる ことができる。	両手4指を用いて 分段的にも断る。 小さな岩石片を 指先ですらすらと こがらせる。	力を加えれば 小さな岩石片を 指先ですらすらと こがらせる。	18 12 18
	評価区分	1	2	3	4	5	
B.変位 変異	膨化の目安	観る形跡		断面より膨化変異		表面粗さ	
	膨化変異などの 目安	変異は見られない		変異により露出に 粘土を含む		土砂の変異、未固結 土質、硬質であり 全体が均状粘土地	
	評価区分	1	2	3	4		
	7	7	7				
C.割目 開陥	割れ目の開陥 RQD 60以上	<25mm	25~50mm	50~75mm	75~100mm	>100mm	
	評価区分	1	2	3	4	5	
	割れ目の開口度 割目は 密着している。	割目の一部が 開陥している。	割目の多さが 開陥している。 (幅1~5mm)	割目が 開口して5mm 以上の隙がある。	割目の開口は5mm 以上の隙がある。		
	評価区分	1	2	3	4	5	
D.割目 状態	割目の存在物	なし	なし	なし	薄粘土を含む (5mm以下)	厚粘土を含む (5mm以上)	
	割目の経路傾向	縦い	斜めが平浅	一部に横状	よく横れた横状		
	評価区分	1	2	3	4	5	
	13	13	13				
E.走向傾斜	走向が±5°以内 垂直	1度以上 傾斜角<90°	2度以上 傾斜角20~45°	3度以上 傾斜角40~70°	4度以上 傾斜角70~90°	5度以上 傾斜角45~90°	
	評価区分	1	2	3	4	5	
	走向が±5°以内 垂直	1度以上 傾斜角<90°	2度以上 傾斜角20~45°	3度以上 傾斜角40~70°	4度以上 傾斜角70~90°	5度以上 傾斜角45~90°	
	13	13	13				

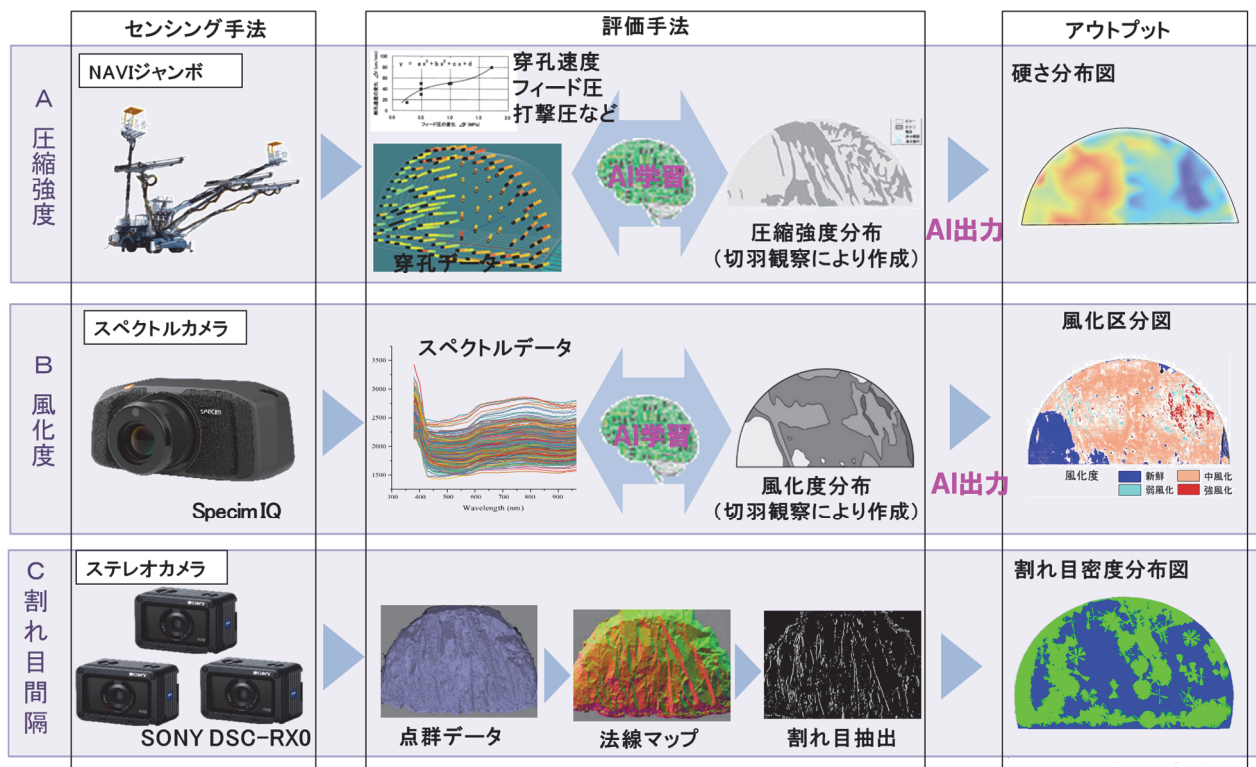


図-1 切羽地質情報取得システム概要図

表-2 穿孔データ（説明変数）

穿孔データ	単位	概 要
穿孔速度	cm/s	単位時間当りのフィード前進長
打撃圧	MPa	打撃の作動圧力
回転圧	MPa	ドリフタ油圧モータの作動圧力
フィード圧	MPa	通常油圧シリンダの作動圧力

表-3 圧縮強度区分（目的変数）

評価区分	圧縮強度区分
評価区分1	$\sigma_c \geq 100\text{MPa}$
評価区分2	$100\text{MPa} > \sigma_c \geq 20\text{MPa}$
評価区分3	$20\text{MPa} > \sigma_c \geq 5\text{MPa}$
評価区分4	$5\text{MPa} > \sigma_c$

(2) データの取得

a) 教師データ（説明変数）の取得

説明変数として表-2に示す穿孔データを取得する。穿孔データは、マシンガイダンス機能を有するドリルジャンボにより自動で取得し、全ての発破孔で記録する。

b) 教師データ（目的変数）の作成

目的変数は、岩質部の圧縮強度とする。本来、圧縮強度は、低い圧縮強度から高い圧縮強度まで連続的に並ぶ連続型データであるが、1本ごとの穿孔データに個別の圧縮強度を教師データとして与えるのは困難であることから、切羽観察シート（表-1参照）の“圧縮強度”に示される評価区分で区切って離散化したデータとした（表-3）。

切羽から代表的な風化度の試料を採取し、風化度別にポイントロード試験を行った。試験結果と目視での風化度分布から圧縮強度分布図（図-2）を作成した。圧縮強度分布図中に穿孔位置を落とし込むことで、穿孔孔毎に圧縮強度を割り当てた。

(3) AI による回帰分析

AIによる回帰分析を以下の理由で採用した。

- ・説明変数が4次元と低いことから、回帰式から圧縮強度の期待値を算出できる。
- ・一般的な回帰分析では、目的変数が連続型データとなるものを対象とする。今回の目的変数は、離散型データであるものの、本来なら連続的に並ぶ圧縮強度データに人為的に閾値を設け、離散化処理したものであることから、回帰分析が可能である。

これまでに、花崗岩などの100切羽の教師データを用いてAIによる回帰分析を行い、アルゴリズムを構築した³⁾。現在、岩種、教師データを増やして学習させ、正解率の向上を図っている。

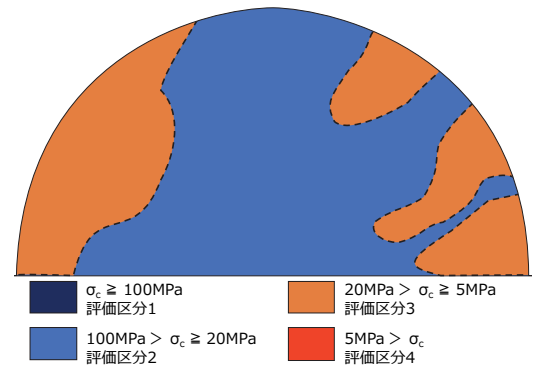


図-2 圧縮強度分布図の例

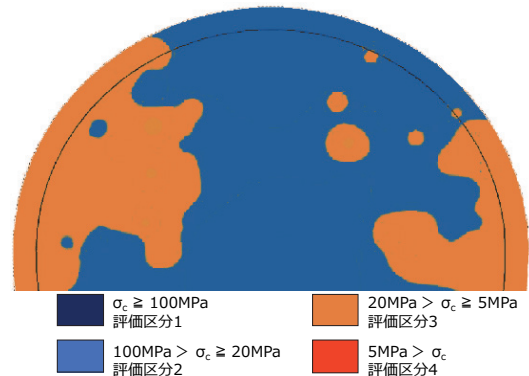


図-3 圧縮強度の評価結果

(4) コンター図の作成

AIの回帰分析により、穿孔位置の圧縮強度が算出される。孔間の圧縮強度については、近傍孔のデータから補完し、コンター図で表示する（図-3）。推定手法にはバイリニア補完手法を用いる。推定箇所と近傍4孔との距離に基づいて4孔の圧縮強度を加重平均し、補完する。

4. 風化度の評価アルゴリズム

(1) 概要

風化度の評価には、専用のマルチスペクトルカメラで撮影した切羽のマルチスペクトル画像を利用する。マルチスペクトル画像と風化度の関係をAIが分析し、マルチスペクトル画像から風化度分布を自動で出力する。AIアルゴリズムの開発はmicrosoft社のcustom vision serviceおよびLuxFlux社製ソフトウェアfluxTrainerを用いた⁴⁾。

(2) マルチスペクトルカメラ画像の適用

通常のカメラでは、物体が反射する電磁波の強度を赤、緑、青の3波長帯に分けて記録するのに対して、マルチスペクトルカメラは、電磁波の強度をよ

り細かい波長帯に分けたマルチスペクトル画像として記録する。本システムでは、380-1000 nm の範囲の波長の電磁波を、200 の波長帯に区分したマルチスペクトル画像を用いている。

図-4 にマルチスペクトル画像の概念図を示す。マルチスペクトル画像の一定の領域に着目して、各波長帯におけるスペクトル反射強度をスペクトル反射率に補正し、波長帯とスペクトル反射率の関係をグラフ化したものをスペクトル反射率曲線という。図-5 にスペクトル反射率曲線の例を示す。グラフの横軸は波長帯、縦軸はその波長帯でのスペクトル反射率を示す。

花崗岩が分布する切羽（写真-1；通常の RGB カメラで撮影）で撮影したマルチスペクトル画像から、スペクトル反射率曲線を抽出した例を図-6 に示す。グラフ内のそれぞれのスペクトル反射率曲線は、切羽の一定の領域ごとに作図し、中風化部と強風化部に分けて示している。

図-6 から、中風化部と強風化部の代表的なスペクトル反射率曲線を選び、重ね合わせたものを図-7 に示す。

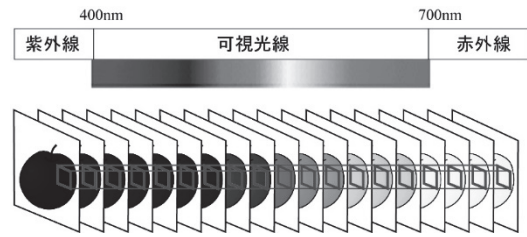


図-4 マルチスペクトル画像の概念図

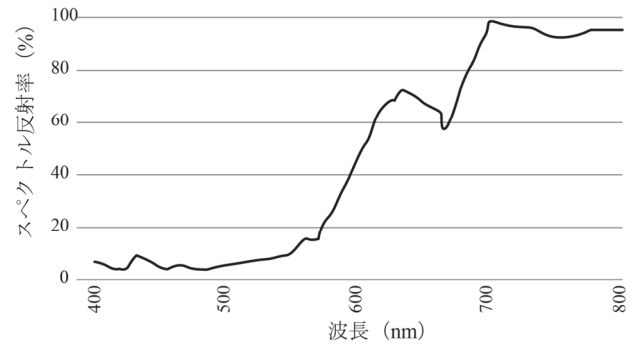


図-5 スペクトル反射率曲線（リンゴの例）

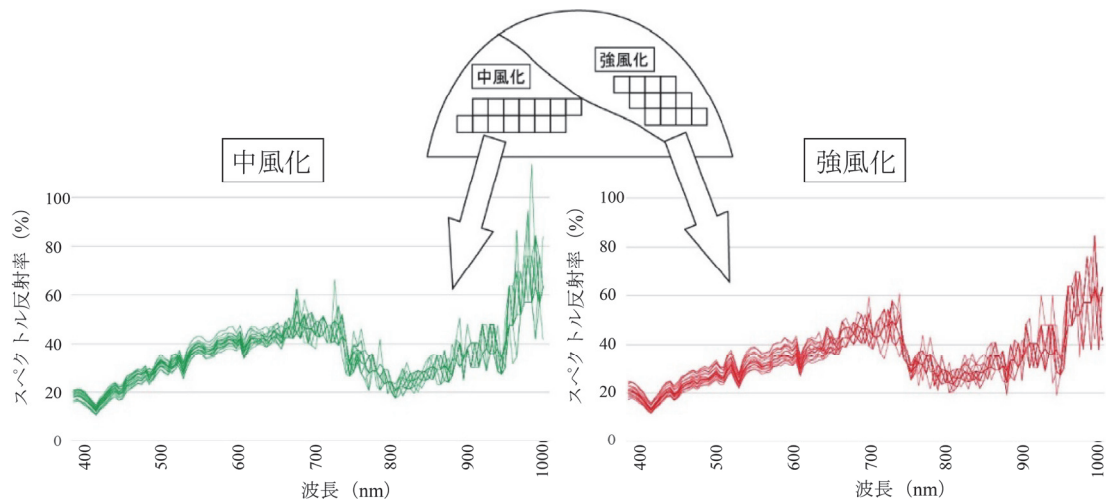


図-6 中風化部・強風化部のスペクトル反射率曲線（花崗岩）

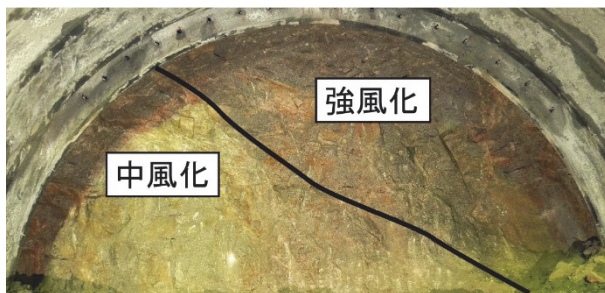


写真-1 マルチスペクトル画像を撮影した切羽



図-7 中風化部と強風化部の
スペクトル反射率曲線の比較（花崗岩）

同じ花崗岩であることから、両者のスペクトル反射率曲線は比較的似た形状をしているものの、たとえば波長 500-700 nm 付近の反射率の差が大きいことなどが確認できる。

このような両グラフの違いに着目して、AI による風化度の評価を行う。

(3) AI を用いた風化度評価

a) 教師データの取得

AI 学習に用いる教師データは、領域ごとの「スペクトル反射率曲線」と「風化度」である。「スペクトル反射率曲線」のデータの取得方法は前述の通りである。「風化度」のデータは、目視による切羽観察により、「①新鮮、②弱風化、③中風化、④強風化」の4つに区分して取得する。

b) AI 学習によるアルゴリズムの構築

「スペクトル反射率曲線」を説明変数とし、「風化度」を目的変数として、岩種ごとに 5000 領域程度の関係を AI 学習し、風化度判定のアルゴリズムを構築した(図-8)。

c) AI による評価

図-9 に AI による風化度評価の概要を示す。学習済みの AI に切羽のマルチスペクトル画像を入力すると、スペクトル反射率曲線が①新鮮～④強風化のいずれの風化度に相当するかを自動で評価する。

写真-2 の切羽(通常の RGB カメラで撮影)を、本システムを用いて評価し、図化した結果を図-10 に示す。同じ切羽を現地で地質技術者が目視観察により評価した結果を図-11 に示す。本システムの評価結果は、技術者の判断と同様に、切羽右側から中央にかけて、中風化した花崗岩が分布し、左側に比較的新鮮な花崗岩が分布している状況を精度よく判断している。また、中風化部の中に点在する弱風化部と強風化部の判別も正確に行っている。

本事例は花崗岩のものであるが、安山岩、凝灰岩のトンネル切羽についても AI 学習を実施し、岩盤の風化度を同様の精度で評価できることを確認している。

5. 割れ目の評価

(1) 概要

既往研究による割れ目の評価方法は、割れ目を自動的に抽出するアルゴリズムを使用する方法⁵⁾と、3次元モデルから目視で割れ目を抽出する方法⁶⁾に大別される。本システムは割れ目を自動的に抽出す

ることが目的であるため、前者の方法を採用する。

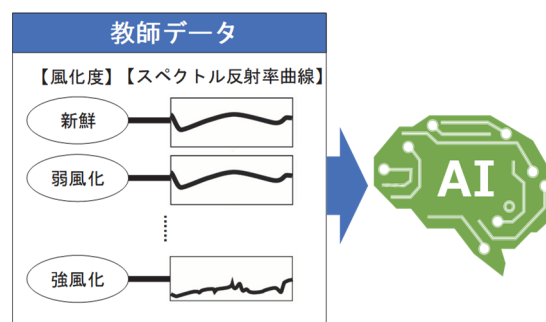


図-8 AI学習の概要（風化度）



図-9 AIによる風化度評価の概要



写真-2 風化度評価を行った切羽（可視光線）

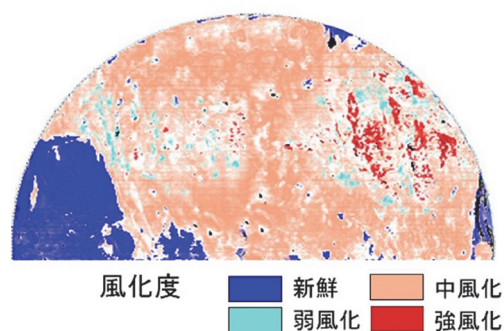


図-10 本システムによる風化度評価結果分布図

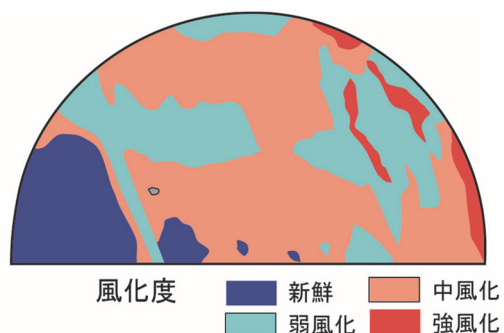


図-11 目視による風化度評価結果分布図

割れ目の評価は、ステレオカメラで撮影した画像から切羽面の三次元形状を取得し、形状の変化点から割れ目を抽出して行う。

割れ目は以下の2種類に分けられる。

- ・通常目視観察で判別できる割れ目
- ・近接目視によってようやく判別できる程度の細かい割れ目、または潜在的な割れ目

一般的な切羽観察では、トンネル掘削によって切羽に凹凸を作るような明確なものを割れ目として判別しており、潜在的な節理等の割れ目などは含まない⁷⁾。本システムでも、切羽の凹凸部、すなわち切羽岩盤で面の向きが不連続な箇所を割れ目と捉え評価する。

(2) 切羽の三次元形状データの取得

デジタルカメラを3台用いたステレオカメラ装置を用いて、切羽画像を取得する。対象物を複数の異なる方向から同時に撮影することにより、カメラの画素の位置情報から、奥行き方向の情報を計測する。

写真-3 にステレオカメラ装置を用いて撮影した3枚の切羽画像の例を示す。3枚の切羽画像から、三次元形状の点群データを作成する。作成は、三次元モデリングソフト Agisoft Metashape を用いて行う。図-12 に作成した切羽の点群データを示す。



写真-3 ステレオカメラ装置で撮影した切羽画像

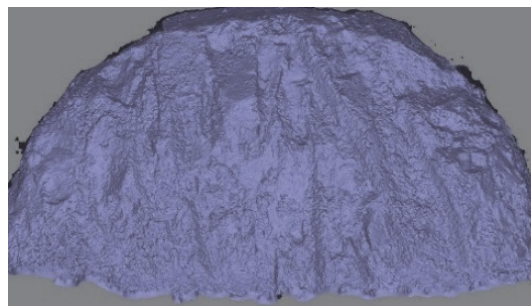


図-12 切羽点群データ

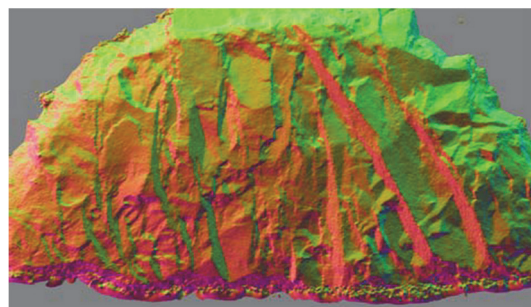


図-13 法線マッピング処理画像



図-14 割れ目抽出画像



■ 評価区分2 ■ 評価区分3

図-15 割れ目密度分布図

(3) 割れ目の抽出

取得した点群を小領域の平面の集合体であるメッシュデータに変換する。メッシュデータにおいて、2つの隣接する平面が交差する箇所のうち、面の交差角度が一定値以上となるものを割れ目として評価し、抽出する。

メッシュ画像は非常に細かい領域の集合体であるため、視覚的に割れ目を認識することは難しいが、法線マッピング処理を施して平面が向いている方向に応じた着色を行うことで、面の向きを視覚的に表現することができる。図-13 に法線マッピング処理後の画像を示す。

法線マッピング処理画像から、一定以上の色の变化点を面の交差点として抽出する。色の变化点の抽出には、代表的な画像エッジ抽出手法である Canny フィルタおよび Laplacian フィルタを用いる。図-14 に抽出した割れ目を画像化したものを示す。

割れ目抽出画像において、割れ目と隣接する割れ目の鉛直距離を計算し、これを割れ目の間隔と見なす。割れ目間隔の評価区分ごとに色分けを行い、図-15 のように、切羽における割れ目密度分布を作成する。

6. データ取得・処理システム

(1) データ取得システム

スペクトルカメラやステレオカメラによるデータ取得およびデータ取得後の解析には、手間と時間を要する。写真-4に切羽にてマルチスペクトルカメラ画像の取得している状況、写真-5に同じくステレオカメラ画像を取得している状況を示す。このような手間と時間を要するデータ取得・処理を容易にするシステムを開発した。

スペクトルカメラは、通常のカメラと異なり、撮影に約3分の時間を要する。また、物体の反射特性は、入力波の種類や強度にも影響されるため、できるだけ一定の条件で撮影するように環境を整える必要がある。また、ステレオカメラ画像は、異なる方向から複数の画像を取得する必要があるため、撮影に時間を要する。

本システムでは、1台の計測車両にマルチスペクトルカメラとステレオカメラ、ハロゲン照明などを搭載し(写真-6)、切羽でのデータ取得を短時間かつ効率的に実施する。計測機器は車載のPCで制御され、車載PCはタブレット端末(iPad)と無線で通信する。

(2) データ処理システム

計測からデータ取得、分析、出力の一連の作業は、専用の計測・評価プログラムにより操作する。プログラムは、車載のPCとタブレット端末に搭載されており、タブレット端末を操作することで、自動で計測と行われる(写真-7)。計測結果を事務所PCに転送し、演算処理を行う。写真-8に切羽における計測車両を用いたデータの取得状況を示す。

ドリルジャンボで取得した穿孔データも事務所PCに転送され、別途演算処理が行われる。

処理の完了後、評価結果は事務所PC上で確認できる。図-16にデータ取得およびデータ分析フローを示す。また、図-17に評価結果の出力例を示す。

7. まとめ

本システムの開発により、切羽の地質情報を簡易な操作により短時間で取得できるようになった。従来の目視を中心とした切羽観察と比べて、切羽観察と観察シート作成にかかる時間を、およそ半分程度に短縮することができた。

評価精度については、地質技術者が行った観察結



写真-4 マルチスペクトル画像撮影状況 (手動撮影)

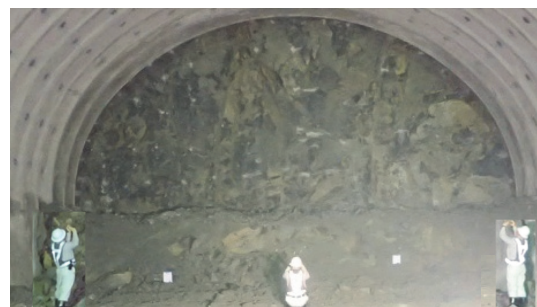


写真-5 ステレオカメラ画像撮影状況 (手動撮影)

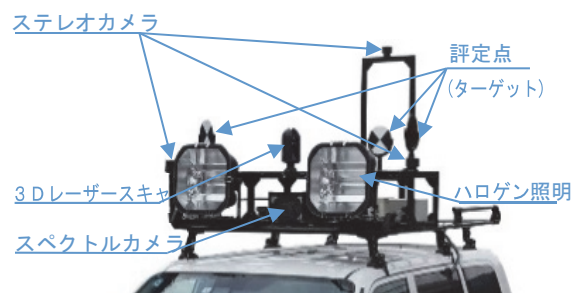


写真-6 計測車両への架装状況



写真-7 タブレット端末操作状況



写真-8 計測車両を用いたデータ取得状況

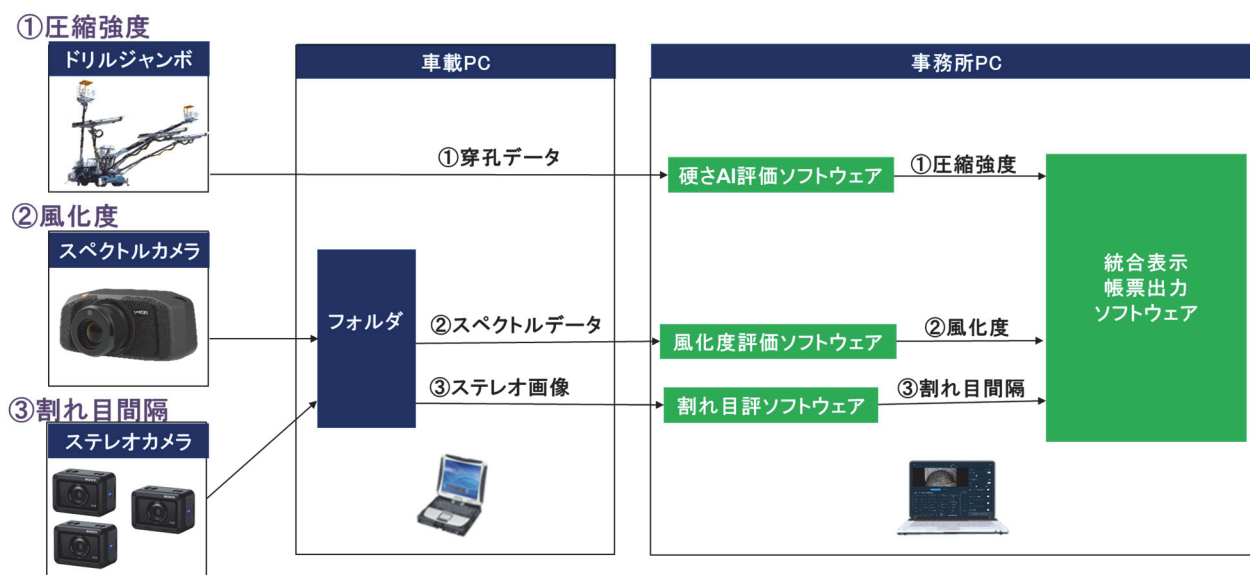


図-16 データ取得・データ分析フロー図



図-17 評価結果の出力例（風化度）

果と比較して、圧縮強度と風化度で9割以上、割れ目間隔では7割程度の評価精度を確保できている。切羽地質情報取得システムを導入することで、技術者の力量によらず定量的な地質情報を取得することができる。

本システムは、現在2現場で運用中であり、今後、新規トンネル現場に導入していく予定である。

参考文献

- 1) 宇津木慎司, 中谷匠志, 佐々木昭夫: 地質情報 CIM 管理システムの構築および施工現場への適用, 土木学会論文集 F3, 72 巻, 1 号, pp.24-31, 2016.
- 2) 日本道路公団: 設計要領第 3 集, トンネル, pp.86-89, 1997.
- 3) 山本健太郎, 藤後廉, 小川貴弘, 長谷山美紀: 穿孔データを用いたオンライン学習に基づく岩盤の圧縮強度指数推定に関する検討, 映像情報メディア学会技術報告, vol.44, no.6, pp.57-60, 2020.
- 4) 中村吉男, 山本義幸, 宇津木慎司: AI とハイパースペクトルカメラを活用した建設材料性状の自動評価システムの構築, 愛知工業大学総合技術研究所研究報告, no.20, pp.26-28, 2018.
- 5) M. Lato, M. S. Diederichs, D. J. Hutchinson and R. Harap: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.46, pp.194-199, 2009.
- 6) S. Fekete, M. Diederichs and M. Lato: *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.25, pp.614-628, 2010.
- 7) 国土交通省近畿地方整備局: トンネル地山等級判定マニュアル, pp.31-32, 2016.

(2020.8.7 受付)

DEVELOPMENT OF A GEOLOGICAL INFORMATION ACQUISITION SYSTEM FOR THE TUNNEL FACE

Ryosuke TSURUTA and Sho TANIGUCHI

We have developed a face information acquisition system for sensing face information in mountain tunnels with high accuracy in a short time. We have developed a dedicated vehicle equipped with measurement equipment to evaluate the tunnel face in a short time by automating the process from data acquisition to output of the evaluation results. In this report, we report on the outline of our system.