

# 複数の分析技術を組合せた 切羽評価システムの開発について

翟 思敏<sup>1</sup>・大森 禎敏<sup>2</sup>・石田 仁<sup>3</sup>・野村 貴律<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 五洋建設株式会社 土木本部土木技術部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

E-mail: shibin.taku@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup>正会員 五洋建設株式会社 土木本部土木技術部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

E-mail: sadatoshi.oomori@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup>正会員 五洋建設株式会社 ICT 推進室 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

E-mail: hitoshi.ishida@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>4</sup>非会員 日本システムウェア株式会社 プロダクトソリューション事業本部

(〒112-8576 東京都渋谷区桜丘町 31-11)

E-mail: tnomural@gw.nsw.co.jp

山岳トンネル工事では掘削時の切羽観察や計測結果を用いて、その後の支保設計を見直す必要がある。しかし、観察での切羽評価は、技術者の知識や経験によって異なることが多く、技術者の知識や経験によらない評価技術が求められている。本開発では、施工時に得られる削孔検層や RGB 画像に加えて、ステレオカメラを用いて、それぞれに対する分析技術を適用した切羽観察システムを構築した。さらには、ハイパースペクトルカメラを用いた岩種や湧水状況の把握を試みた。本稿では、開発した切羽評価システムの概要と実証試験の結果について報告する。

**Key Words:** rock mass classification, deeplearning, observation of face, face assessment scores

## 1. はじめに

山岳トンネル工事では技術的また経済的な理由により、計画時の地質調査が十分に行えないことが多い。このため、施工段階で実施する切羽観察や計測等の結果に基づいて、当初設計を適宜修正することが求められる。当初設計で想定されていた地山状況と施工中に確認された地山状況が異なることも多く、切羽観察や計測等の結果に基づき地山等級を見直すとともに支保パターンを変更したり、補助工法の可否を判断するのが一般的である。このうち切羽観察は、現場の技術者によって切羽に出現した地山状況を直接目視したり、簡易試験を実施するなどして岩種、岩塊の硬さ、岩盤の亀裂特性や風化度などを発注機関の評価基準に基づいて評価することが多い。しかしながら、これらの結果については技術者の知識や経験によって評価が異なることも多い。このことから、技術者の知識や経験によらず、客観的に切羽での地山状況の評価する技術が求められていると考えられる。

情報通信技術の急速な発展に伴い、IoT 技術、AI 技術についても建設現場に導入され実証されるようになって

いる。このうち AI 技術については、画像認識技術と併せることでデジタル写真から切羽の岩盤特性などを評価する技術が既に開発されている<sup>1)2)</sup>。また、その他にも発破作業ともなうドリルジャンボの削孔エネルギーをもとに切羽前方の地山特性を AI 技術を用いて評価する技術も開発されている<sup>3)</sup>。しかしながら、AI 技術による画像認識技術では特徴量となる工学的根拠がブラックボックスになっており、判定結果の信頼性が不明確である。他の分野では XAI (説明可能な AI) の取組みも始まっているが、実用上の課題も多く施工現場への適用については難しいのが現状である。とくに、切羽観察では目視だけでなく、岩片へのハンマー打撃など視覚以外の様々な情報を総合的に評価する必要があり、通常の切羽写真のような RGB 画像など、単一のデータだけで切羽観察における多様な評価項目を適切に判定することは難しいと考えられる。

本開発では、施工時に得られるさまざまなデータについて、それぞれ特性を生かした分析技術を適用することで、地山性状を評価するうえでの工学的な裏付けが得られる評価システムの構築を目標とした。具体的には、削

孔検層データをもとに地山強度、切羽の RGB 画像をもとに風化変質、割目状態および割目間隔、ステレオカメラデータから割目の走向傾斜を評価するものとした。また、通常の RGB データでは認識できない特徴量から岩種や湧水の状態を評価するためにハイパースペクトルカメラの現場適用性についても検証した。本稿では、評価システムおよび各種データの処理技術の概要と実現場における実証結果について報告するものである。

## 2. 切羽評価システムの技術概要

### (1) システム構成

本切羽評価システムの検知から評価に至るまでの機器構成とそれらから得られたデータの流れを図-1に示す。

切羽において地質情報を得る手法としては、ドリルジャンボによる削孔検層、デジタルカメラから取得した RGB 画像、ステレオカメラによるステレオ画像、ハイパースペクトルカメラで得られたスペクトルデータである。これらのデータについては正規化するなどして扱いやすい形式に変換したうえで DeepLearning<sup>4)</sup>などの技術を利用して特徴量を抽出して、切羽評価項目<sup>5)</sup>ごとの評価と関連付けするものとした。

### (2) 判定に用いるデータと処理技術

切羽評価に用いる各データの収集から処理に至るまでの技術概要を以下に示す。

#### a) 削孔検層データ

削孔検層(DRISS)<sup>6)</sup>は、ドリルジャンボを用いて実施される切羽前方探査技術で穿孔時に得られる穿孔速度、回転圧およびフィード圧などから穿孔エネルギーを求め、地山等級を判定するものである。本開発では、削孔検層で得られる穿孔データのうち、回転圧、フィード圧を説明変数にして、技術者によって判定された圧縮強度の評価点を目的変数として使用した。

切羽観察は、施工日ごとに1回の割合で実施されるのが一般的である。このため切羽観察で得られる圧縮強度の評価は、1日当たりの掘進区間を代表する切羽1断面について得られるものと考えられる。一方、穿孔データは、トンネルの掘削に従って連続的に得られる。本技術では、掘削済みの区間で得られた切羽観察結果での圧縮強度評価と該当区間で得られた穿孔データの平均値について線形回帰モデルを構築した。使用した線形回帰モデルのモデル式を式(1)に示す。ここで、 $Y$ は出力値となる切羽評価点、 $X_1$ は削孔検層で得られたフィード圧の平均値、 $X_2$ は回転圧の平均値である。また、 $\alpha, \beta$ は説明変数の係数であり、 $\varepsilon$ は散乱項である。

$$Y = \alpha \cdot X_1 + \beta \cdot X_2 + \varepsilon \quad (1)$$

モデル式を用いて予測した圧縮強度の評価結果と技術者による評価結果を比較して図-2に示す。この図から線形回帰モデルを用いて予測した圧縮強度の評価値は、技術者が評価するものと高い相関性があるモデルとすることができた。

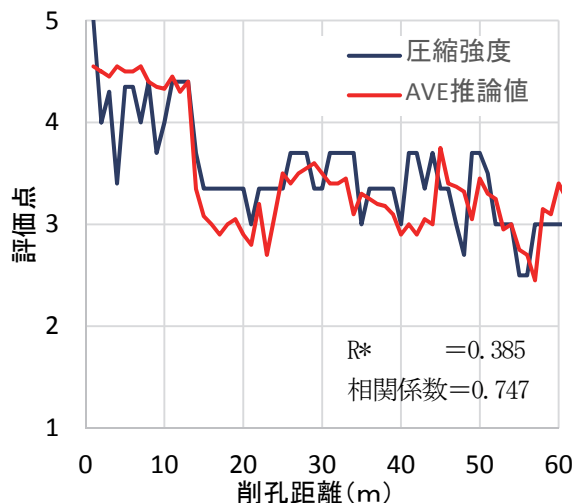


図-2 圧縮強度における線形回帰モデルでの予測結果

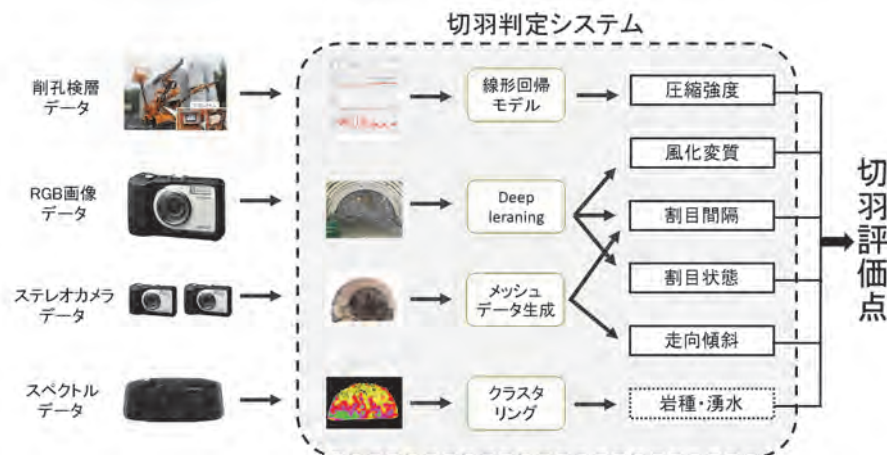


図-1 切羽判定システム

## b) RGB 画像

RGB 画像を用いて切羽評価項目のうち、風化変質、割目間隔および割目状態を評価する技術の概要を以下に示す。

写真-1 は、切羽で撮影され得られた RGB 画像である。この画像をもとに風化変質、割目間隔および割目状態を評価するまでの課程を図-3 の(a)~(c)に示す。写真-1 に示した切羽の RGB 画像を、図-3(a)に示すように評価対象となる切羽鏡面だけを取り出した画像を作成する。作成した画像を、(b)に示すように縦横共に 256 pix の大きさを有する領域に細分化し、学習用とテスト用のデータに分割する。その後、畳み込みニューラルネットワークである ResNet50 モデル<sup>7)</sup>を用いて、学習用データである切羽観察記録での左肩、天端および右肩の3区分の評価点を正解ラベルとして学習させた。学習後のパラメータを用いて、テスト用のデータを入力して評価点を推論するものとした。

その後、切羽評価における左肩、天端および右肩の3区分ごとに、細分化した領域で得られた評価のうち、最も多かった評価点を、該当域の評価点として可視化した。その結果が図-3(c)となる。

## c) ステレオカメラ画像

ステレオカメラ画像は、複数の2次元 RGB 画像を使用して得られる。本開発では、一般的な2台のデジタルカメラから得られる2次元の RGB 画像から特徴点を抽出して点群(ポイントクラウド)データを生成した。生成したデータから抽出した点同士を繋げてメッシュデータを構築して、メッシュデータの表面に再び RGB 画像を張り付けて図-4 に示す3次元(3D)データを作成した。

また、構築したメッシュデータをもとに岩盤の走向傾斜方向を求めた。具体的には、切羽部分のメッシュデータを利用して、層理面の法線の向きを幾何学的に算出し岩盤の走向傾斜として評価した。図-5 は、算出した法線をベクトル表示したものである。切羽評価では左肩、天端および右肩の3領域ごとに、得られたベクトルとトンネル軸線の関係から走向傾斜を評価するものとした。

## d) スペクトルデータ

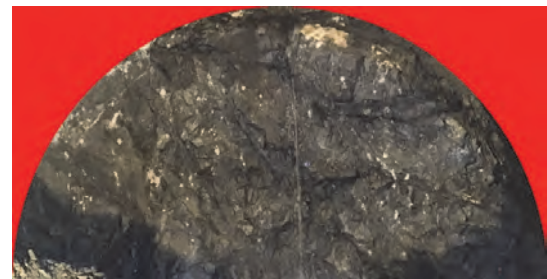
ハイパースペクトルカメラは軍事技術から発生し、現在では工業や農業など様々な分野で活用されている。

ハイパースペクトルカメラで切羽を撮影するとことで、明暗の差をより強調できる hdr (High Dynamic Range)形式の画像データ(以下、hdr ファイル)が得られる。通常の RGB 画像データは 1 pix 当たり 3チャンネル分の情報を持っているに対して、hdr ファイルでは図-6 に示すように 1 pix につき 204チャンネル分の情報量を持っている。

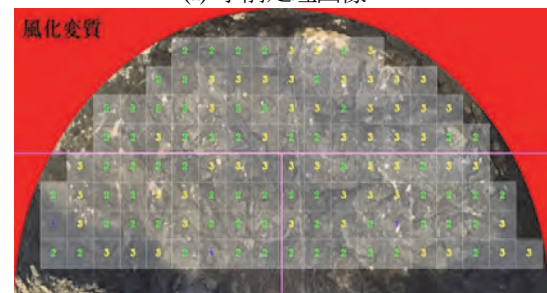
本開発では、ハイパースペクトルカメラで得られた hdr ファイルについて、多変量解析の一手法である PCA(Principal Component Analysis)<sup>8)</sup>による次元圧縮を行った。



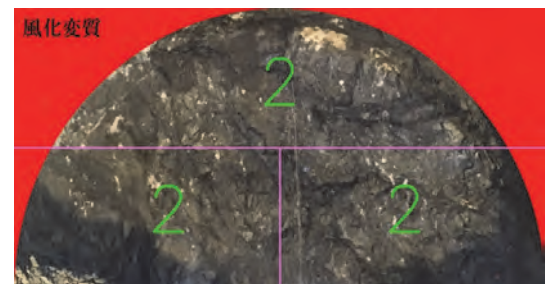
写真-1 切羽のRGB画像



(a) 事前処理画像



(b) 細分化した領域での評価結果



(c) 最終評価結果

図-3 RGB画像を用いた風化変質の評価処理

PCA は相関のある多数の変数から全体のばらつきを最もよく表す少数の変数を生成する手法で、hdr ファイルの 204チャンネルのデータを3チャンネルまで圧縮した。

その次元圧縮したデータに対して、KMeans法<sup>9)</sup>を用いたクラスタリングを行った。KMeans法は非階層型のクラスタリングのアルゴリズムであり、データを任意のクラスタ数に分類することができる。これによりハイパースペクトルカメラで得られたhdrファイルを用いることで、切羽表面で類似したクラスタを複数生成し、クラスタリングを実現した。



図-4 ステレオカメラのデータ作成した 3D 画像

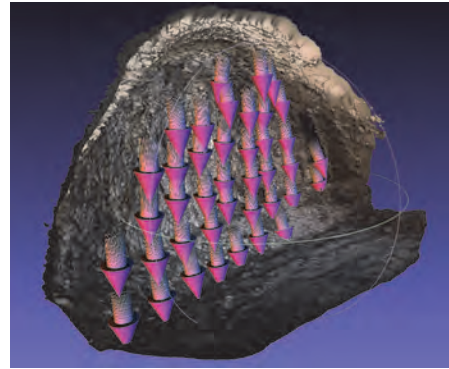


図-5 岩盤の走向傾斜判定例

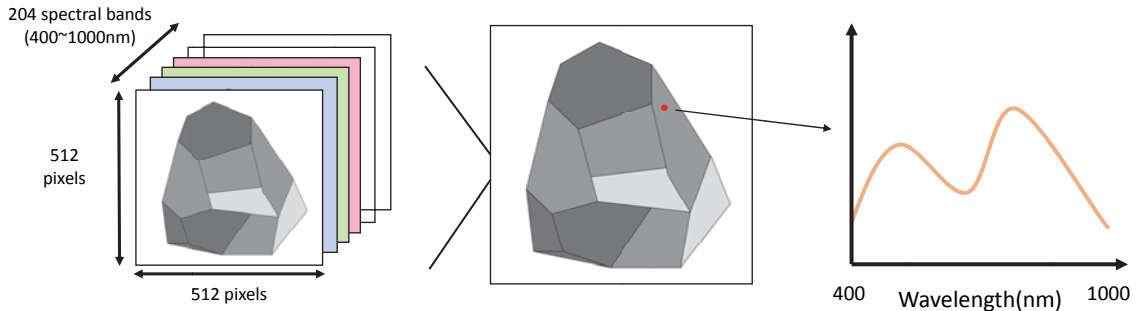


図-6 スペクトルカメラから得られる hdr ファイルデータの概要

この技術を用いることによって、岩種の判別や湧水状況の評価などへの適用を試みた。

### (3) データの取得と処理

現場での切羽評価は、その後の支保パターンを選定したり、補助工法の要否を判断するために速やかに行われなければならない。しかしながら、上述した機器により得られたデータを現場事務所だけで処理するのは、現状では難しい。そのため本開発においては、自社開発の BIM/CIM システム「i-PentaCOL/3D」を用いて、切羽でのデータ取得から処理までを一連の流れで処理することとした。「i-PentaCOL/3D」はクラウド運用できる BIM/CIM であり、本開発ではデータを現場からアップロードするだけで一連の評価処理を円滑に進められるようにした。

「i-PentaCOL/3D」によるデータのアップロードから、切羽評価結果の出力までの流れを図-7 に示す。この図から、現場でアップロードされた切羽からのデータはクラウドを経由して評価するものとし、専門家による評価の確認が行えるものとした。

## 3. 実現場における実証結果

本切羽評価システムについては、国土交通省の令和元年度「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト (PRISM)」に採択された東北地方整備局発注の国道 106 号与部沢 (よべさわ) トンネル工事で実証試験を行った。

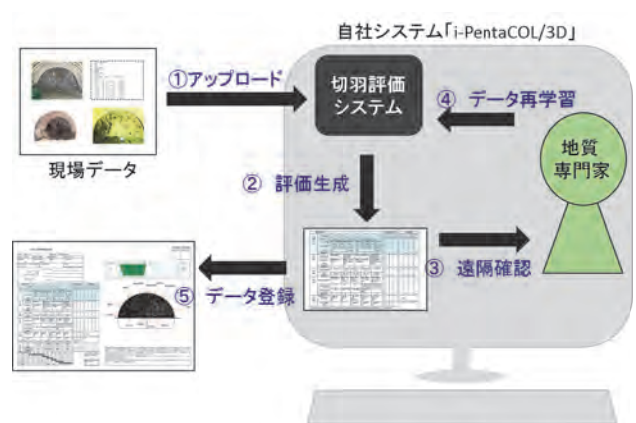


図-7 データ取得から切羽評価までの流れ

### (1) 実証現場の概要

表-1 に与部沢トンネル工事の概要を、図-8 に施工位置を示す。与部沢トンネルは、宮古盛岡横断道路のうち平津戸・岩井～松草間 (延長 7km) に計画された延長 1,039m の二車線道路トンネルである。

図-9 に与部沢トンネルの地質縦断面図を示す。トンネル計画域には、粘盤岩優勢混在岩を主体とする付加堆積物が分布している。主な構成岩種は、粘板岩、砂岩、チャート、凝灰岩などで切羽は粘板岩優勢の混在岩がほとんどであった。地山等級<sup>10)</sup>としては、局所的に亀裂が多い DI 相当の区間もあったが、大半が CII～CI の良好な地山状況であった。このため坑口部を除いて大がかりな補助工法を適用することもなかった。

表-1 与部沢トンネル工事の工事概要

工事名	国道106号 与部沢トンネル工事
発注機関	国土交通省 東北地方整備局 岩手河川国道事務所
施工者	五洋建設株式会社 東北支店
工事場所	岩手県宮古市平津戸
トンネル延長	1,039m
掘削断面積	118.6m <sup>2</sup> (完成内空断面積 93.9m <sup>2</sup> )
工期	平成30年1月24日～令和2年8月7日
施工方法	山岳工法 (上半先進ベンチカット工法)
掘削方式	発破 (ずり出し：タイヤ方式)

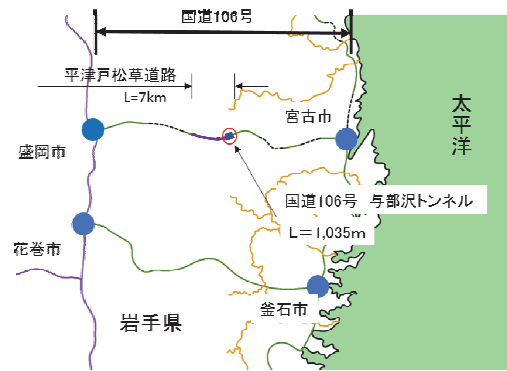


図-8 与部沢トンネルの工事位置

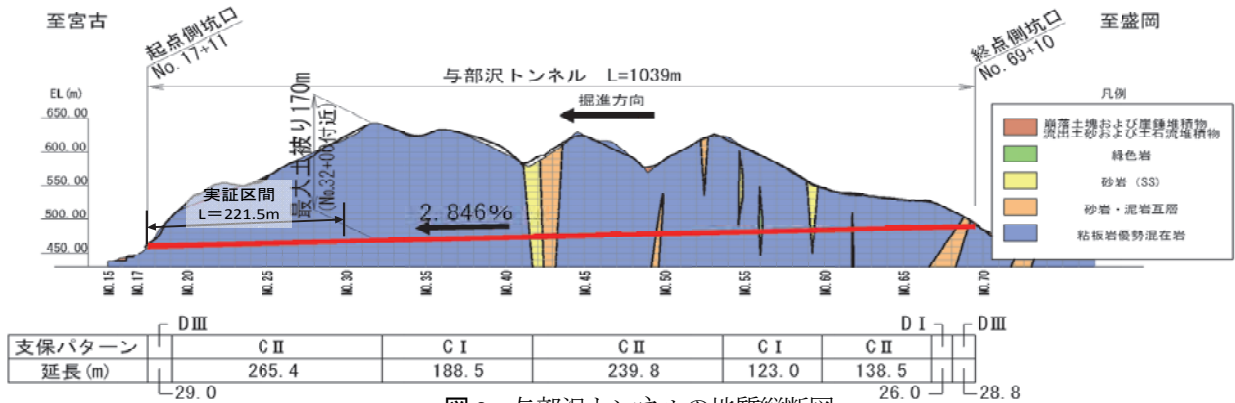


図-9 与部沢トンネルの地質縦断面図

トンネル掘削は、終点側に該当する盛岡側の坑口から約 2.8% の下り勾配で掘削した。掘削工法は到達側となる宮古側坑口区間では、近接する JR 山田線への影響などを勘案して頂設導坑先進工法を適用したものの、標準部については補助ベンチ付きベンチカット工法としている。掘削方式は発破で、掘削土の搬出は大型ダンプトラックを使用したタイヤ方式とした。

本切羽評価システムの開発にあたっては、掘削起点となる盛岡側坑口から約 750m の区間で得られた各種データを教師データとした。その後の約 221.5m 区間で実証を行い、評価性能について検証した。

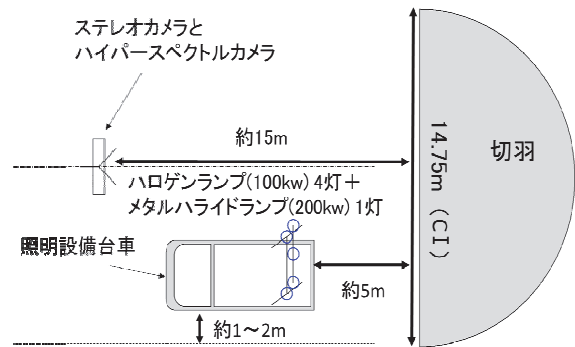


図-10 切羽でのカメラ，照明の配置状況

(2) 切羽データの取得状況

図-10 に切羽観察時のカメラと照明の位置を模式的に示す。また、写真-2 に使用したステレオカメラとハイパースペクトルカメラの概要を示す。

ここで、本開発では、リコーイメージング社製のデジタルカメラ G800 を 2 台組合せてステレオカメラとした。また、ハイパースペクトルカメラは、デルフトハイテック社製の SPECIMIQ を使用した。ハイパースペクトルカメラを適用するにあたって、撮影時の切羽照明にはハロゲンランプ(100kw) 4 灯とメタルハライドランプ(200kw) 1 灯をもちいた。これらの照明機器は、写真-3 に示すように 2t ダンプトラックに発電機とともに搭載して使用した。



写真-2 使用したカメラと撮影状況

### (3) 実証結果と考察

本評価システム構築段階で使用した各データ数および検証時検証したデータ数を表-2に示す。

#### a) 切羽評価結果

図-11に本評価システムを用いた切羽評価点と技術者によるものを比較して示す。図の横軸は支保工番号、第一縦軸には切羽評価点、第二縦軸には本切羽評価システムでの切羽評価点と技術者によるものとの差を100分率で示してある。実証区間の延長は、測点 No.19+5.5～30+7.0の221.5m区間で、切羽状況としては写真-4に示すように頁岩優勢の混在層であり、適用した支保パターンはCIIであった。

ここで切羽評価点は、各データを用いて得られた天端、右肩、左肩での評価点を切羽評価点方法<sup>1)</sup>に従い重み付けして、評価断面での切羽評価点とした。この図から本システムと技術者との評価点の差は平均で10%であり、本システムのほうが評価結果としては地山性状を不良と判断したことがわかる。

また、評価点の差が10%以上となった断面数は実証区間の3割程度でみられた。このことから、各評価項目について本システムと技術者の評価結果の違いについて考察する。

#### b) 各評価技術ごとの実証結果

表-2に本評価システム構築時に用いた項目ごとのデータ数を示す。また、図-12の箱ひげ図は切羽評価点と評価項目ごとの本システムと技術者による評価結果の差である。図では技術者の評価結果を基準にして、本システムの判定結果と技術者の結果が一致する場合は0であり、正の場合はシステムが良い評価を与え、負の場合には不良と評価したことを示す。図中の箱部は、データの50%の領域を示す。

削孔検層データから評価した圧縮強度の差を見ると、-1と2であり、データの50%は-1から0の間にあることが分かる。このことから削孔検層データを用いた本システムのほうが圧縮強度としては小さく評価する傾向があったことが分かる。



写真3 撮影時に使用した照明設備



写真4 実証区間で確認した切羽状況 (665基)

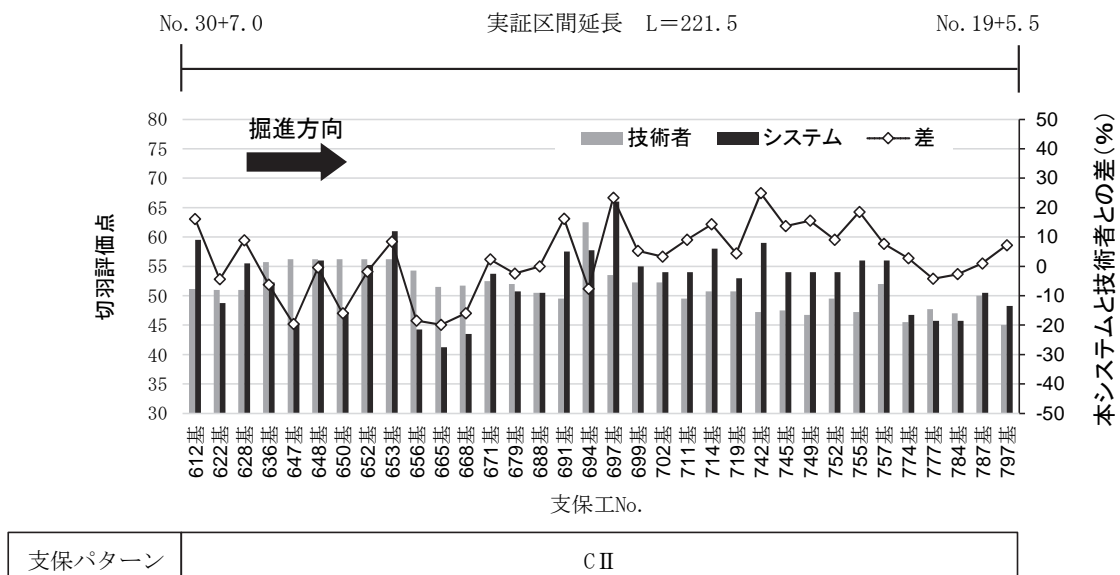


図-11 本システムでの切羽評価点と技術者との差

RGB 写真およびスペクトルデータから評価した風化変質については、データの50%が0から1の間にあり、本システムが技術者よりも良質と判断する傾向があった。また、RGB 写真だけで評価した割目間隔については、外れ値はあるものの技術者の評価と概ね一致する結果が得られた。同じく RGB 写真だけで評価した割目状態については、データの50%が0から1の間にあり、本システムの評価結果は技術者よりも良好と判断する傾向があった。

ステレオカメラ画像から評価した走向傾斜については、技術者による評価結果と一致する結果が得られた。

### c) 考察

本システムを開発するに当たり教師データが少ないことは否めない。今後、継続的に教師データの蓄積ができれば技術者の評価との差は小さくなると考えられる。その上で、各評価項目で技術者が実施した結果と差が現れた理由を考察する。

岩片へのハンマー打撃や点载荷試験などによって評価される圧縮強度について、本システムでは切羽の天端、右肩、左肩3箇所で行った削孔検層の結果を用いて評価している。ハンマー打撃や点载荷試験などは、岩片などの地山としては比較的良質な部位を対象として実施されるのに対して削孔検層ではトンネル軸線方向の平均的な硬度を評価したと考えられた。当該地山は、比較的硬質な岩盤が連続するものの部分的には弱層もあることから、削孔検層結果を平均化する過程で不良側に評価する傾向が得られたものと推察される。

目視観察が主となる風化変質、割目間隔について RGB 写真で評価した結果、本システムのほうが良好と判断する傾向が見られた。この理由としては、本システムと技術者が着目する特徴点に違いがあったと考えられる。すなわち技術者は、切羽鏡面でより不良と考えられる部位に着目するものの、本システムでは教師データが少ないために把握できなかったと考えられた。

また、同様に RGB 写真で評価した割目間隔については、外れ値も見られるが本システムと技術者の評価結果については概ね一致した。本システムと技術者が評価する特徴点が一致したとも考えられるが、データ数が少ないことと外れ値が見られることなどから、今後の検証課題としたい。

走向傾斜についても技術者の評価結果と差が現れなかった。本システムについては画像処理に基づいた評価結果であり、今後なんらかの検証は必要となるものの、機械的に得られた評価結果であることから客観性は確保できるものと考えている。

表-2 構築および検証でのデータ数

評価項目	判定に用いるデータ	構築データ数	検証データ数
圧縮強度	削孔検層データ	48本	21本
風化変質	RGB画像	220枚	36枚
	スペクトルデータ	36枚	
割目間隔	RGB画像	36枚	
割目状態	RGB画像	220枚	36枚
走向傾斜	ステレオカメラ画像	36×2枚	
岩種の判定	スペクトルデータ	36枚	

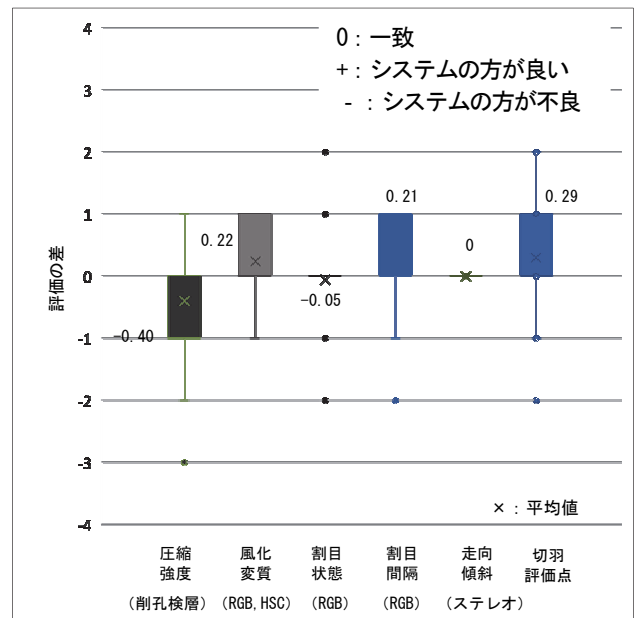


図-12 各項目評価の差

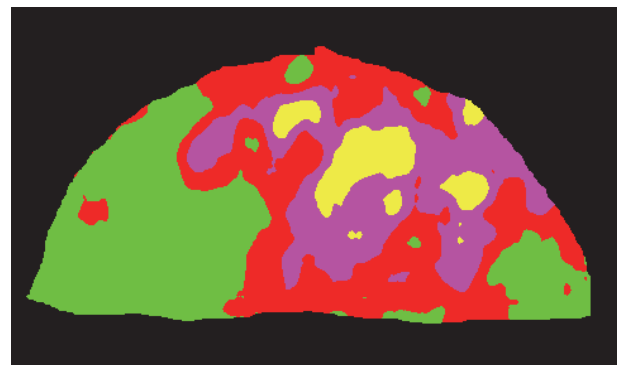


図-13 ハイパースペクトルカメラによるクラスタリング結果の一例

本実証では、ハイパースペクトルカメラを用いて風化変質の評価に加えて、得られるスペクトルデータの活用方法について検証した。スペクトルカメラで得られたデータについて、同じ特徴量でクラスタリングした例を図-13に示す。

スペクトルデータと岩盤の風化変質など工学的な特徴量との関連性などについては、今後の検討課題としたい。また、切羽照明など撮影条件によっても得られるデータが異なるなど、トンネル現場における照明運用上の課題についても、改善したいと考えている。

#### 4. おわりに

本開発では、現場で一般的に得られる削孔検層やRGB写真データに加えてステレオカメラやハイパースペクトルカメラから得られるデータをもとにDeep learning技術などを利用した切羽評価技術に取り組んだ。また、実証の結果、評価精度については技術者が行った結果と若干の相違はあるものの、教師データの蓄積によって改善できると考えられた。

今後は、データ蓄積による評価精度向上に加えて、データ処理などを完全に自動化するなど、さらなる効率化と省力化が図れるよう改善を行う予定である。また、ハイパースペクトルカメラの適用にあたっては、スペクトルデータと工学的な特徴量の関連付けや切羽照明について検討を加えて、切羽評価に反映する所存である。

#### 参考文献

- 1) 宇津木慎司, 中谷匡志, 鶴田亮介: AI, CIM, 画像処理技術を活用した建設現場地質情報 ICT 管理システムの構築, 応用地質, 第 58 巻, 第 6 号, pp.408-415, 2018.
- 2) 鈴木亮汰, 松田浩朗, 兼松 亮: 畳み込みニューラルネットワークを用いた切羽性状の評価に関する検討, 土木学会第 74 回年次講演会 (CD-ROM), CS10-25.
- 3) 山邊恵太, 垣見康介, 福田 毅: ドリルジャンボの機械データを活用した新しい切羽評価点方法の提案, 土木学会第 74 回年次講演会 (CD-ROM), VI-460.
- 4) Deng, L.; Yu, D. Deep Learning: Methods and Applications. Foundations and Trends in Signal Processing. 2014,
- 5) 日本道路協会 道路トンネル観察・計測指針, p.25. 2009.
- 6) 木村 哲, 大西有三, 西山 哲, 石山宏二: 穿孔データを指標としたトンネル切羽前方の地山評価システムの研究, 情報地質, 第 16 巻, 第 3 号, pp.191-198, 2005.
- 7) Yu, Jiahui; Yang, Linjie; Xu, Ning; Yang, Jianchao; Huang, Thomas: Slimmable Neural Networks. In ICLR, 2019.
- 8) SvanteWold; KimEsbensen; PaulGeladi Principal component analysis, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Volume 2, Issues 1-3, August 1987, Pages 37-52
- 9) Lloyd, S. P. Least square quantization in PCM. Bell Telephone Laboratories Paper. 1957. Published in journal much later: Lloyd., S. P. Least squares quantization in PCM (PDF). IEEE Transactions on Information Theory. 1982, 28 (2): 129-137.
- 10) 日本道路協会 道路トンネル技術基準 (構造編)・同解説, p.76. 2003.
- 11) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: トンネル施工管理要領 参考資料-1 切羽評価点方法, 2015.

(2020.8.7 受付)

## DEVELOPMENT OF ROCK MASS CLASSIFICATION SYSTEM AT TUNNEL FACE COMBINING MULTIPLE ANALYTICAL TECHNIQUES

Simin ZHAI, Sadatoshi OHMORI, Hitoshi ISHIDA and Takanori NOMURA

In mountain tunnel construction, it is necessary to review the support design after receiving the observation of the tunnel face and measurement results during excavation. However, the face evaluation by naked-eye observation often differs depending on the knowledge and experience of the engineer. Therefore, an evaluation technique that does not depend on the knowledge and experience of the engineer is required. In this technique, a facial observation system was established through different analysis techniques by processing data from the drilling records, RGB images obtained during the construction process, and images obtained through stereo cameras. Furthermore, the hyperspectral camera is used to classify the rock type and understand the spring water condition. In this paper, the outline of the developed face evaluation system, and the results of the verification test is reported.