

くり粉の画像解析によるトンネル切羽前方の地山評価

ー削孔エネルギーおよび切羽評価点と比較してー

Evaluation of Geological Conditions Ahead of the Tunnel Face Using Image Analysis of Drill Cuttings - Comparison with Drilling Energy and Tunnel Face Evaluation Scores -

塚本耕治* 山田昂平**

要 旨

山岳トンネルの工事では、切羽前方の地山性状を事前に把握することが安全性、施工性の面から重要である。その調査法の一つにドリルジャンボを用いた削孔検層法がある。これはドリルジャンボの油圧式削岩機が地山を削孔する際に計測した削孔速度および各種油圧などの削孔データを解析し、切羽前方の地山性状を探索する方法である。削孔検層法による地山性状の評価は、削孔データのほかに、削孔水とともに排出されるくり粉の目視観察や湧水量の測定結果から総合的に行われる。このうち、くり粉の評価では目視や指触による方法が主体であり、観察者の主観的な評価になりがちであった。そこで、削孔データから求めた削孔エネルギーの結果に加えて、削孔中に採取したくり粉の画像解析から求めた粒径や色に関する測定を行い、地山の定量的な評価を行った。さらに、これらの削孔検層による結果と日常の切羽の観察調査から得られる切羽評価点の結果を比較することにより、くり粉の画像解析による地山評価の有用性を確認した。

キーワード：削孔検層、くり粉、画像解析

1. まえがき

トンネル切羽から行う削孔検層法は、油圧式削岩機等を用いて切羽前方に 30m 程度の地山を削孔し、削孔速度および各種の油圧データ（以下、削孔データ）や削孔水とともに排出される削孔による岩片（以下、くり粉）の状況から削孔位置の地山性状を定量的に評価する調査法¹⁾である。この削孔検層法における削孔データの計測・解析には、一般的に削孔検層システムが用いられる。具体的には油圧式削岩機の打撃圧、回転圧およびフィード圧は圧力センサを用い、削孔長や削孔速度は油量センサを用いて計測する。計測した削孔データから地山の硬軟を評価するための重要な指標である、単位掘削体積あたりの削孔エネルギー（以下、削孔エネルギー）を求める。そのほか、くり粉の状態の目視観察や湧水量の測定などから切羽前方の地山状態の総合的な評価を行う。

著者らは、これまでに 2kHz～5kHz の高周波サンプリングにより、削孔エネルギーの値だけでなく削孔エネルギーが増減する変動幅や変動方向から地山の硬軟や亀裂の位置など地山状況をより詳細に把握できる削孔検層システム²⁾を開発し、30 件近い山岳トンネル現場に導入している。近年は、ドリルジャンボに取り付けた Web カメラおよび無線装置により、切羽や削孔時の計測状況

のモニタリング、計測データの回収などの計測管理を遠隔から行うことが可能な管理システム（以下、削孔検層遠隔モニタリングシステム）にしている。一方、削孔検層で採取されるくり粉の評価は岩石を直接的かつ簡便に把握できることから、切羽前方の地山状況を推定する上で重要である。採取したくり粉の色や鉱物の構成などを目視により観察し、岩種や風化・変質の影響を受けているかなどを判定する。ただし、この判定法は、豊富な知識と経験が必要とされ、個人差が生じやすい。このようなことから経験だけに頼らない客観的かつ定量的な評価法の確立が望まれている。

このため、削孔検層時に採取したくり粉をデジタルカメラにより撮影し、そのデジタル画像から、くり粉の色、面積、粒径を求めて分析を行い、知識と経験が少ない場合でも地山の性状を定量的に評価する方法を検討した³⁾。本稿では、最初に削孔検層に用いた削孔検層遠隔モニタリングシステムおよび日常の切羽観察から得られる切羽評価点の概要を示し、削孔検層時におけるくり粉の採取方法と画像解析の概要を示す。次に、奈良県内のトンネル現場において削孔検層時に採取したくり粉の画像解析結果を、削孔データから求めた削孔エネルギーの結果や現場で実施した切羽観察による切羽評価点と比較することにより、くり粉の画像解析の有用性について検証した。

*技術本部技術研究所土木研究グループ **西日本支社関西土木第3部

2. 削孔検層遠隔モニタリングシステムの概要

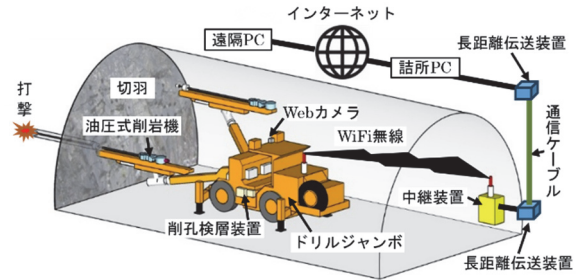
削孔検層遠隔モニタリングシステム（以下、本システム）の概要を図－1に示す。また、設置状況を写真－1に示す。本システムは、ドリルジャンボに搭載したWebカメラおよび削孔検層装置、坑内中継装置、長距離伝送装置、各所PC等から構成される。切羽の削孔状況や削孔データの計測状況、および削孔エネルギーから判定した地山等級の結果を遠隔から確認できること、さらに計測・保存した削孔データを遠隔から回収できることが特徴である。

本システムの主要な機器である削孔検層装置は、ドリルジャンボの各ブームに設置された削岩機に取り付けられた各種センサで、打撃圧、回転圧、フィード圧、削孔速度および削孔長などの削孔データを装置内の計測用PCにより2kHz～5kHzの高周波サンプリングで計測・保存する。削孔長5mm間隔ごとに削孔データや削孔エネルギーの平均値を求め、削孔長に対する変化を画面に表示する（写真－1(a)）。削孔後には、削孔1本あたりの平均削孔エネルギーを計算し、予め地山等級ごとに設定した削孔エネルギーの閾値に基づいて推定される地山等級を表示する（写真－1(b)）。装薬孔の削孔時や削孔検層時には、削孔の開始と終了、ロッドの継ぎ足しの状態を削孔データから自動判別し、計測から地山等級の評価までの処理を自動化している。

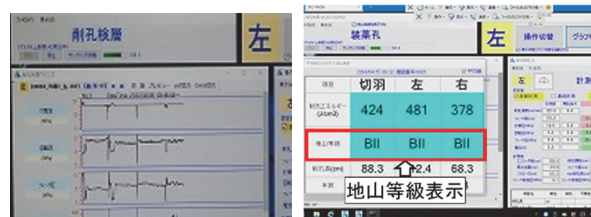
本システムを導入することにより、遠隔にいる専門技術者も削孔データおよび削孔状況から地山状況を確認することが可能になり、より精度の高い地山評価ができる。

3. 切羽評価点と評価項目

切羽評価点は、切羽で観察される地山性状を点数化し、支保パターンの選定や地山等級の見直しに使用するための評価指標である。対象としたトンネル⁴⁾では、「トンネル地山等級判定マニュアル（試行案）⁵⁾」による切羽観察を1日1回実施し、切羽評価点を算出している。切羽評価点算出方法の概要を図－2に示す。切羽評価点の算出では、トンネル上半切羽を天端・右肩・左肩に3分割し（図－2(a)）、各部についてトンネル技術者が目視観察を行って「切羽の状態」、「風化変質」などの評価項目10項目（図－2(b)）に対して1～4点の評価区分の点数（1＝良好、4＝悪い）を付ける。図中の式（1）を用いて、評価項目ごとの評価区分の点数に岩質に応じた重み係数を掛け合わせ、これを合計して各部の評価点を算出する。さらに、各部の評価点から式（2）を用いて、切羽全体の評価点（切羽評価点）を求める（図－2(c)）。なお、この切羽評価点が高いほど地山状態は悪く、より上位の支保パターンに変更する傾向がある。



図－1 削孔検層遠隔モニタリングシステムの概要



(a) 削孔検層装置の画面

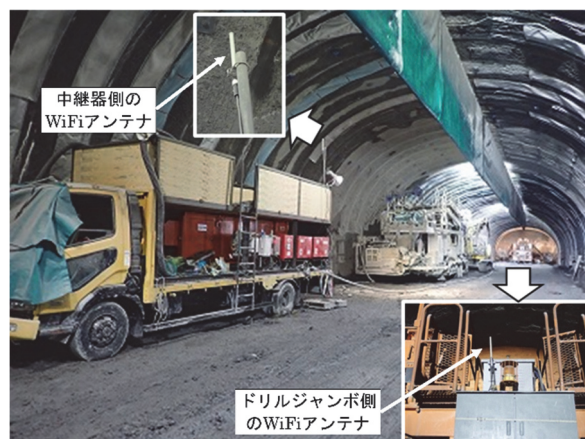
(b) 地山等級表示



(c) Webカメラの設置状況



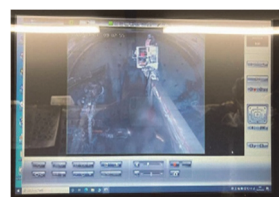
(d) 中継装置の設置状況



(e) WiFi無線アンテナの設置状況

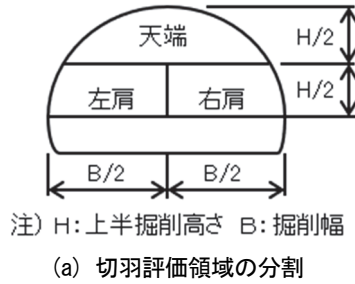


(f) 詰所PC



(g) 遠隔PC画面の表示例

写真－1 削孔検層遠隔モニタリングシステムの設置状況



n	評価項目	重み係数*
1	切羽の状態	9
2	素堀面の状態	36
3	圧縮強度	9
4	風化変質	5
5	割れ目の頻度	7
6	割れ目の状態	10
7	割れ目の形態	14
8	湧水	5
9	水による劣化	5
10	割れ目の方向性	—

*岩質が中硬質岩（層状）の重み係数値を示す

(b) 評価項目と重み係数

$$\text{各部の評価点} = \sum_{n=1}^{10} ([\text{評価区分}]_n \times [\text{重み係数}]_n) / 100 \quad \text{式(1)}$$

$$\text{切羽評価点} = (\text{右肩部評価点} + \text{左肩部評価点} + \text{天端部評価点} \times 2) / 4 \quad \text{式(2)}$$

(c) 切羽評価点の計算式

図-2 切羽評価点算出方法の概要

4. くり粉の採取と画像解析

4.1 くり粉の採取

削岩機の削孔水は、削孔時のビットの冷却、粉じんの発生低減、くり粉を孔内から排出するため、ビット先端へ送り込む水である。削孔水はロッド内を通りビット先端の水孔から噴射され、削岩したくり粉と一緒に孔口から排出される。削孔検層では、1本の長さが3.05mのロッド10本を継ぎ足しながら30m程度の削孔を行う。そのため、ロッド1本あたり1回の頻度で、くり粉を含む削孔水を柄杓やバケツで採取し、削孔水の中から300g程度のくり粉を採取して画像解析に用いた。

4.2 くり粉の画像解析

くり粉の画像解析には、図-3に示す手順を用いた。その概要を以下に示す。

①くり粉のふり分け

削孔したくり粉には多くの微粒子が含まれ、すべてのくり粉について画像解析を行うことは難しい。そのため、表乾状態のくり粉を目開きが1.18mmのふるいで微粒分を除去する。

②くり粉の撮影

カメラによる撮影では、カメラの性能や撮影する際の

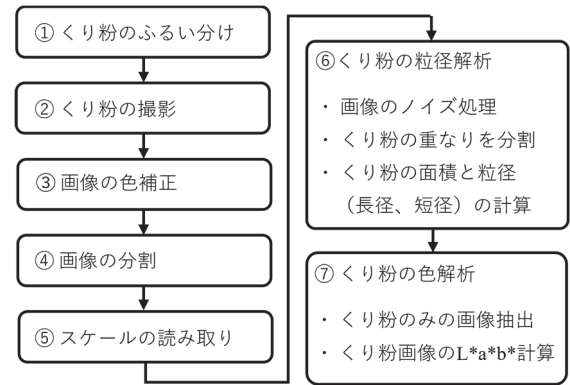


図-3 くり粉の画像解析手順



写真-2 カラーチャートとくり粉撮影画像

光の影響を受けるため、再現性に問題がある。そのため、再現性を得る撮影方法として、写真-2のようにカラーチャート（色見本）をくり粉と一緒に撮影し、画像解析の段階で色補正する。カメラスタンドを用いて高さ90cmの位置に汎用のデジタルカメラを固定し、記録画素数5,184×3,888で撮影する。なお、くり粉を採取した場所が分かるよう、画像ファイル名に削孔位置（右側はR、左側はL）と距離程を付して保存する。

③画像の色補正

カラーチャート（24色のカラーパッチ）と測定した色の違いをもとに色補正用のプロファイル（変換データ）を生成し、くり粉の画像に適用して正確な色に補正する。

④画像の分割

カラーチャートの画像とくり粉のみの画像に分割する。

⑤スケールの読み取り

カラーチャートのスケール読み取り方法を写真-3に示す。マウスを用いてカラーチャート画像の目盛の両端（0mmと50mm）上にライン（青）の端点（2カ所）を合わせる。この操作から長さ50mmに相当するピクセル数が分かり、この換算係数を用いて、くり粉の粒径（面積、長径、短径）などを把握できる。

⑥くり粉の粒径解析

くり粉の粒径解析の経過を示す画像のうち、主な画像

例を写真－4に示す。色補正したくり粉画像のノイズを除去したのち、くり粉の重なる領域を分割し、くり粉を認識し、その面積と粒径を求める。

(a) ノイズの除去

撮影した画像にはノイズが入り込んでいる場合があり、二値化処理した画像に対して画像の穴埋め（モルフォロジー処理）⁶⁾や一定以下の面積を占める領域の削除により画像のノイズを除去する。

(b) くり粉の重なる領域を分割

くり粉が重なり一塊になっていると、粒径などの長さを正しく計測できない。そのため、くり粉の重なる領域をそれぞれのくり粉の画像に分割するウォーターシェッド変換（くり粉の中心と周辺の明度の違いからくり粉の境界を検出する）で分割し、各くり粉を識別する（写真－4 (a)、写真－4 (b)）。ウォーターシェッド変換の模式図を図－4に示す。ウォーターシェッド変換は、画像を地形図に見立て、画像の輝度値を標高として扱う画像処理で明るい部分を山、暗い部分を谷とし、隣接するくり粉との境界を求める。

(c) くり粉粒子の面積と粒径

二値化した画像から、くり粉別に面積と粒径を楕円体近似して長径と短径を求める。

⑦くり粉の色解析

二値化によるくり粉の背景からマスク⁶⁾を作成し（写真－4 (c)）、色補正した画像に重ね合わせることで、くり粉のみの画像を抽出する（写真－4 (d)）。

抽出したくり粉画像の色情報から図－5に示す $L^*a^*b^*$ の色空間に基づいて L^* （明度）、 a^* （緑～赤軸の色度）、 b^* （青～黄軸の色度）を計算する。

1回の削孔検層で撮影した複数の画像ファイルについて、上記の③～⑦の一連の解析を連続して行い、解析結果をトンネル距離程順に整理して出力する。

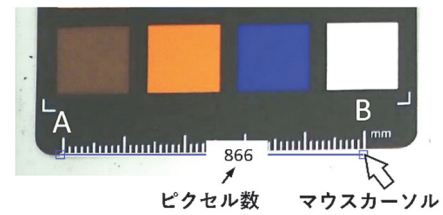
5. 現場適用による検討

5.1 適用現場と適用区間

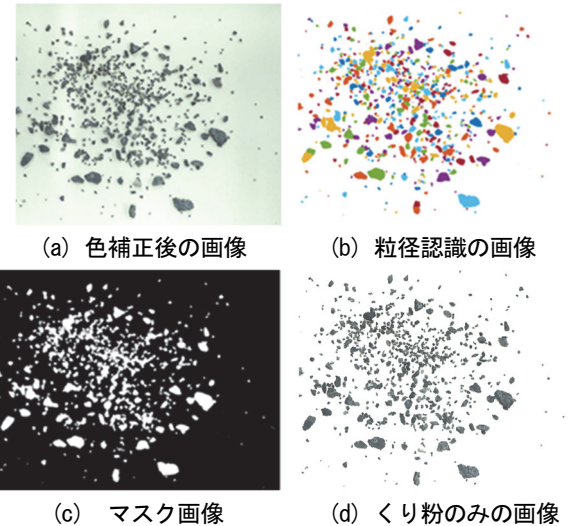
適用現場の阪本トンネル⁴⁾は奈良県五條市の山間部に位置し、周辺の地質が付加体特有の砂岩、泥岩の互層から構成されている。削孔検層は、概ねトンネル全線にわたり30回実施し、1回あたりトンネル切羽下半盤の側壁に近い左右2か所から切羽前方にそれぞれ30m程度の削孔を行った。写真－5は、トンネル切羽下半盤の左側から削孔検層を行っている状況を示す。なお、削孔検層を実施したトンネル距離程がTD600m～TD890mの範囲で3m（1本のロッド長）ごとに採取したくり粉を用いて画像解析を行った。

5.2 適用結果

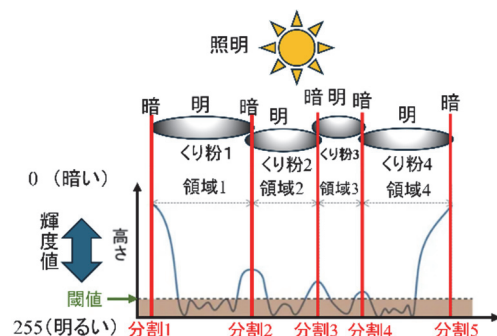
画像解析から求めたくり粉の長径の平均値（長径の合計を個数で除した値）と色解析で求めたくり粉の L^* 、 a^* 、



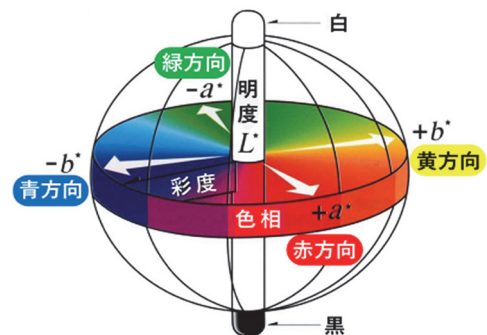
写真－3 カラーチャートのスケール読み取り



写真－4 くり粉の画像抽出



図－4 ウォーターシェッド変換の模式図



図－5 $L^*a^*b^*$ の色空間⁷⁾

b^* の平均値を削孔検層時の削孔エネルギーおよび切羽観察による切羽評価点と比較した。切羽左側の削孔検層による削孔エネルギーと採取したくり粉の画像解析結果を

左肩部の切羽評価点と比較した図を図-6に示す。

地山が軟質化する TD715m 付近は珪質泥岩から細粒砂岩が混在する地山に変化する付近であり、削孔エネルギー（図-6(e)）の 1m 区間の平均値は TD700m～TD701m の $234\text{J}/\text{cm}^3$ から TD736m～TD737m の $106\text{J}/\text{cm}^3$ に減少し、切羽評価点（図-6(a)）は 1.8 から 2.1 に大きくなっている。これは地山が劣化した状態に変化したことを表しており、両者は比較的よく対応している。

また、図-6において、削孔エネルギーが $100\text{J}/\text{cm}^3$ 以下となる TD800m～TD810m 区間と TD880m～TD890m 区間の結果をハッチング（赤色）して比較すると、切羽

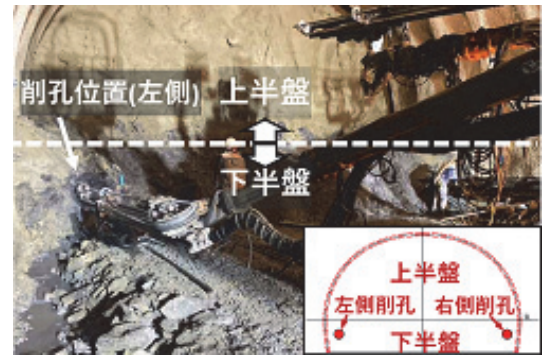


写真-5 トンネル切羽下半盤左側の削孔検層状況

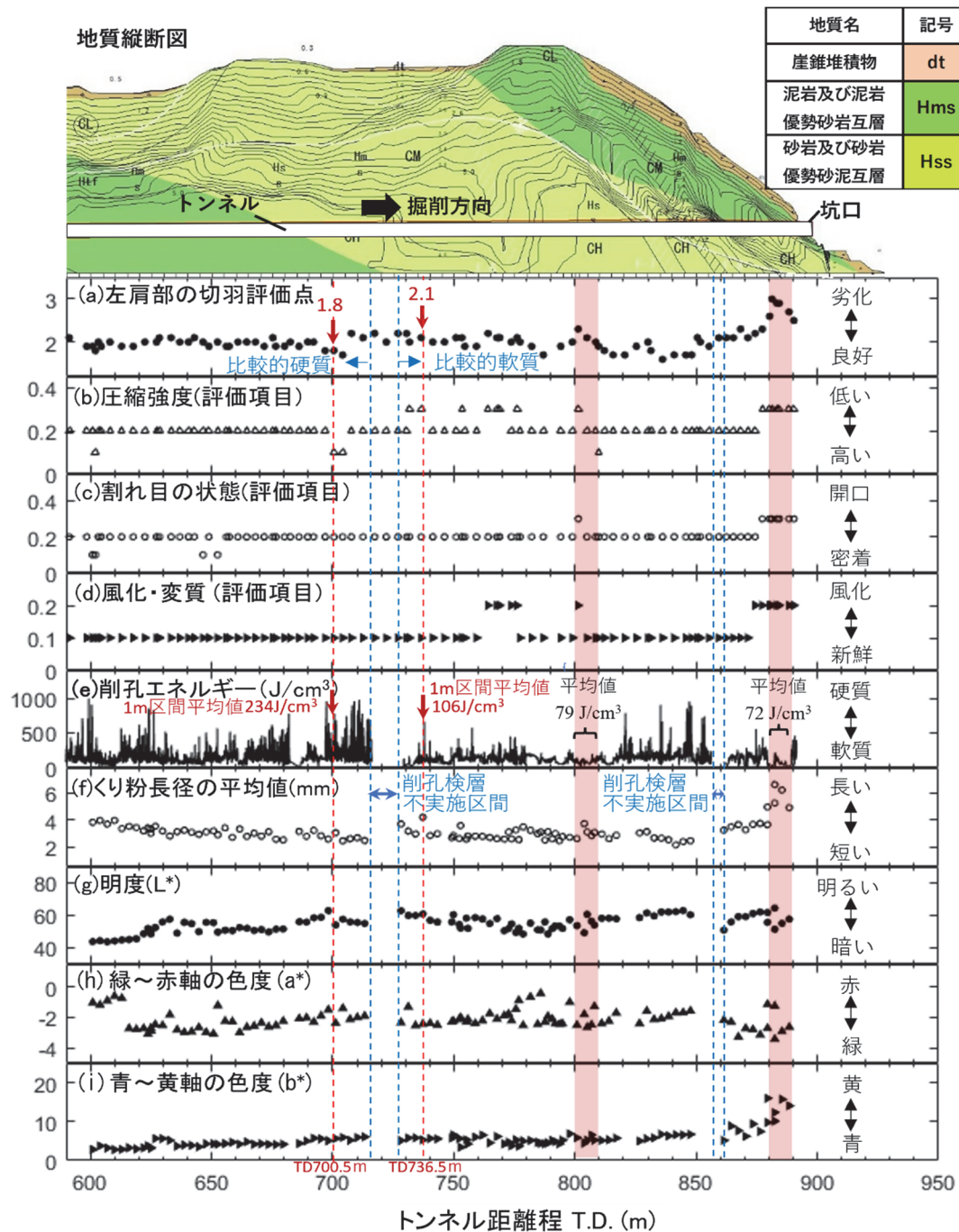
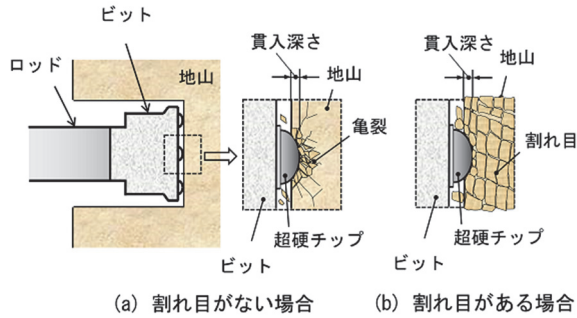


図-6 切羽評価点・削孔エネルギー・くり粉の画像解析結果の比較（トンネル切羽の左側）



図ー7 割れ目の有無によるくり粉サイズの違い

評価点は、TD800m～TD810m 区間の約 2.0 に対して、坑口付近 TD880m～TD890m 区間では約 3.0 と高い評価になり、切羽観察の結果は脆弱な地山状態であると判定された。TD880m～TD890m は、地質縦断面図から坑口近くの崖錐堆積物等の風化の影響を受けた地山区間であることが分かる。一方、削孔エネルギーの平均値は、坑口付近 TD880m～TD890m 区間で 72 J/cm^3 、TD800m～TD810m 区間で 79 J/cm^3 と同程度であり、大きな違いが見られない。この要因は、切羽評価点の評価項目である「割れ目の状態」(図ー6(c))の評価点が 0.2 から 0.3 に変化し、より割れ目の状態が開口・劣化していると評価したこと、「風化変質」(図ー6(d))の評価点が 0.1 から 0.2 に変化し、地山の性状がより風化していると評価したことが考えられる。

くり粉の画像解析によると、TD880m～TD890m 区間におけるくり粉の長径の平均値(図ー6(f))は 3mm から 6mm 程度まで大きくなり、粒径の大きいくり粉が増えたことが確認できる。この区間が亀裂性の地山であることを示すと考えられる。くり粉の粒径が地山の亀裂性と相関する理由を以下のように推察する。

図ー7に、割れ目の有無による地山破碎時のくり粉サイズの違いを示す。削孔する際のビットが地山に押し当てられた状態において、先端の超硬チップ付近の地山に割れ目がない場合は、チップ周辺に破碎によって微細な亀裂が生成され、くり粉が小さくなるのに対し、潜在的な割れ目がある場合は、割れ目で剥がれ比較的大きなくり粉になったと考える。

また、 b^* の平均値(図ー6(i))が 5 から 14 付近まで大きくなっていることから、風化を受けて褐色や黄色を呈するくり粉が増えており、この区間で「風化変質」が高く評価された要因と考えられる。

6. まとめ

くり粉の画像解析結果を削孔エネルギーおよび切羽評価点と比較することで、トンネル切羽前方の地山評価の妥当性を検証し、以下の知見が得られた。

- i. 切羽評価点と削孔エネルギーは比較的良好に整合し、

特に、削孔エネルギーの変動幅でも 1m 区間の平均値が 234 J/cm^3 の場合は変動幅が大きく、1m 区間の平均値が 106 J/cm^3 の場合は変動幅が小さく、地山の変化を明瞭に識別できる

- ii. 切羽評価項目のうち、割れ目の状態や風化変質は、削孔エネルギーによる評価では判別が難しいが、このような場合において、くり粉の画像解析から求めたくり粉の大きさと関係する長径平均値は割れ目の状態と相関性が高く、色の指標である $L^*a^*b^*$ のうち、特に b^* は風化変質との相関が高かった
- iii. くり粉の画像から求めたくり粉の大きさや色の指標は、削孔エネルギーによる評価が難しい割れ目の状態や風化変質といった評価に有用性が高いことを確認した

7. あとがき

切羽観察項目のうち、割れ目の頻度や風化による変色などをくり粉の画像解析から定量的に評価することが可能であり、切羽前方の地山性状を評価する上で有益な情報を得られることが分かった。今後、異なる岩種への適用を検討するとともに、削孔検層遠隔モニタリングシステムと組み合わせることで、切羽前方地山評価手法の高度化を図りたい。

【参考文献】

- 1) 社団法人日本道路協会、「道路トンネル観察・計測指針(H21 改訂版)」、丸善出版、pp.23-24、2009.2
- 2) 塚本耕治、今泉和俊、「高周波サンプリング削孔検層システムを用いたトンネル切羽前方探査」、土木学会第 66 回年次学術講演会、VI-409、pp.817-818、2011.8
- 3) 塚本耕治、山田昂平、「削孔時に採取したくり粉の画像を用いたトンネル切羽前方地質評価の検討」、地盤工学会第 58 回地盤工学研究発表会、2023.7
- 4) 岡本真輝、「(仮称) 阪本トンネルの掘削時における支保パターンの決定について」、令和 5 年度近畿地方整備局研究発表会論文集、2023.9
- 5) 国土交通省近畿地方整備局道路部道路工事課、「トンネル地山等級判定マニュアル(試行案)(平成 18 年 9 月試行案の改訂版)」、2016.7
- 6) 小枝正直、上田悦子、中村恭之、「OpenCV による画像処理入門 3 版」、講談社、pp.149-174、2022.12
- 7) 日本電色工業株式会社、「色と光・色の数値化」、https://nippondenshoku.co.jp/web/japanese/color/color_story