

山岳トンネル切羽の剥落危険度評価システムの 開発と現場への適用

戸邊 勇人^{1*}・宮嶋 保幸¹・白鷺 卓¹・山本 拓治¹

¹鹿島建設株式会社 技術研究所（〒187-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1）
*E-mail: tobek @kajima.com

山岳トンネル工事では切羽の周辺に作業が集中しており、切羽周辺には切羽からの岩塊の剥落リスクが存在している。そのため、山岳トンネル工事において施工の安全を確保するためには、切羽の剥落の危険性を適切に判断することが重要である。現在、この危険性の判断は、熟練作業員や地質技術者の目視によって行われているため、個人差を生じやすい。さらに、判断精度の向上が個人の技量の鍛錬に依存している。これらの課題を解決するため、本研究では、切羽の剥落危険度を画像解析により定量評価するシステムを開発した。このシステムは、風化と割目の発達程度を4つのレベルに定量的に分類し、各レベルにおける剥落の発生確率を切羽の剥落履歴に基づいて迅速に通知可能なことを特徴とする。

Key Words : tunnel face, rock fall, image analysis, weathering, crack

1. はじめに

山岳トンネルの工事では、掘削直後の不安定な切羽に作業者が集中するため、切羽からの岩塊の剥落の発生が重大な災害につながる危険性を有している。そのため、切羽作業に先立って切羽観察を行い、切羽状況を確認した上で、適切な対策を施すことにより、作業上の安全を確保する必要がある。

しかしながら、現状の切羽観察は、切羽作業の担当者による目視判断に依存しているため、個人差が生じたり、見落としが生じることがある。切羽の安全性を向上するには、判断の個人差をなくし、定量的な判断手法を確立していくことが重要である。

切羽観察において技術者が着目する項目には、風化程度（変質も含む）、割目の発達程度、湧水量、岩盤強度などの性状が挙げられる。これらのうち、湧水量や岩盤強度は定量的な評価が可能であるが、風化程度や割目の発達程度を定量的に評価するための方法は、まだ十分に確立されていなかった。そのため、これらの定量評価手法が確立できれば、切羽の安全性に対する判断の個人差が低減されると考えられる。

筆者らは、これまで画像解析技術を応用し、切羽の風化程度と割目の分布を定量評価する技術を開発し、現場に適用してきた¹⁾。そこで、これらの技術を応用し、切羽の風化程度と割目の発達程度を定量的に判定した上で、

実際の切羽において発生した装薬穿孔時の剥離の実績とを関連付けることにより、切羽の剥落の発生確率を数値的に予測できるシステムを構築することができたので、その概要について説明する。

2. 切羽の風化程度・割目の発達程度の定量化手法

(1) 風化程度の定量評価法

岩盤において風化が進行すると、物理的な風化によって岩片の力学的強度が低下するだけでなく、化学的な風化によって生成した粘土鉱物により岩片間の摩擦力が低下する。そのため、切羽の剥落は未風化の領域より風化の進んだ領域において発生しやすい。このことから、物理的・化学的に風化した領域の割合が大きい切羽ほど、剥落の発生する可能性が高くなると考えられる。したがって、風化の進んだ領域を検出し、切羽全体に占める割合を定量評価する技術があれば、剥落の予測に寄与できると考えられる。

一般的に化学的風化は、物理的風化の後に進行するため、化学的風化が進行している部分を特定することにより、物理的・化学的両方の風化が進んだ領域を評価することができる。化学的風化は、岩石中のイオンの溶脱と、残留物質からの粘土鉱物生成の過程を経る。粘土鉱物の定量評価を行うためにはX線回折分析が最適であるが²⁾、

この分析は数日程度の時間を要するため、迅速性を必須の条件とする切羽の剥離の判定に用いるのは実用的でない。そのため筆者らは、風化を受けた岩盤が、粘土鉱物の生成とイオンの溶脱または吸着により風化前と異なる色調を示す点に着目し⁴⁾、切羽の色調を画像解析することにより、風化変質程度を定量評価する手法を開発したり。

風化程度と色調変化を関連付けるためには、事前に施工箇所の代表的な岩盤から、強風化部分の試料と未風化部分の試料を採取し、分光測色計によって色調を計測するとともに、X線回折分析によって測定された粘土鉱物の含有量に関連付ける。これにより、色調を基準とした切羽の風化程度の評価が可能になる。

岩石の色調の測定には、周囲環境（光量など）の影響を受けない分光測色計が適している。分光測色計で得られる結果は、明度 L^* 、赤度 a^* 、黄度 b^* の数値であるため、風化部分と未風化部分の色調が定量的に比較できる。 $L^*a^*b^*$ の表色系を図-1に示す。

強風化部分および未風化部分より採取した試料をもとに、風化程度と色調を関連付ける方法について、図-2、図-3を例として以下に記す。この例に採り上げた岩種では、強く風化した試料は、未風化の試料に比べて高い a^*b^* 値を示し（図-2）、粘土鉱物の一種であるカオリナイトを多く含んでいた。そのため、この例では a^*b^* 値の値を基準にして、切羽の化学的風化程度の評価ができる。

分光測色計は、色調分析に最適だが、切羽への接近を要し危険なことから、測定範囲の狭小（数cm四方）なことから、切羽全体の風化部分の面積率を測定する今回の開発の目的には適していない。そのため、本システムで

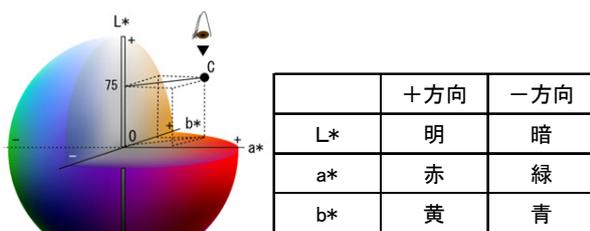


図-1 $L^*a^*b^*$ 表示系⁹⁾

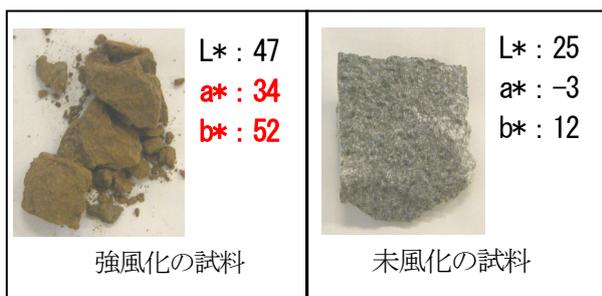


図-2 分光測色計による強風化・未風化試料の色調分析

は、デジタルカメラを用い、切羽から離れた位置での色調測定を可能にした。

色調の正確な評価のためには、画像を $L^*a^*b^*$ 値に変換する必要がある。このため本システムは、RGB値を $L^*a^*b^*$ 値に変換し、未風化側に近いものと強風化側に近い画素を判別するとともに、その近さの度合いを「風化度」と定義した（未風化側を風化度1、強風化側を風化度5とし、中間も含めた5段階を風化度と定義した）。その風化度のコンター図を図-3に示す。このコンター図のうち、風化度3以上となる部分を「風化領域」と定義して、その切羽全体に占める面積の割合を算出し、その割合を切羽全体の風化程度とした。

(2) 割目の発達程度の定量的評価法

岩盤には力学的な弱面となる割目が内在しており、トンネル掘削時にはこの割目に沿って岩盤が分離、剥落しやすい。そのため、割目の集中する箇所ほど、剥落が発生しやすいと考えられる。

割目は、切羽では凹凸を有する筋として現れやすく、凹部と凸部では照明の反射率に差が生じやすい。そのため切羽画像中において、割目は輝度の差の大きい部分として発現しやすい。この性質を利用し、切羽写真中で大きく輝度の変化する部分を白点、それ以外を黒点として描画すると、切羽表面の割目を白い画素として検出することができる（図-4）。

剥落は、一般的に割目の集中している箇所において発生するが、同一方向に割目の発達している箇所より、異なる方向の割目の交差しあう箇所（割目交差箇所）において、多く発生しやすいと考えられる。この割目交差箇所の抽出は下記の方法で行った。

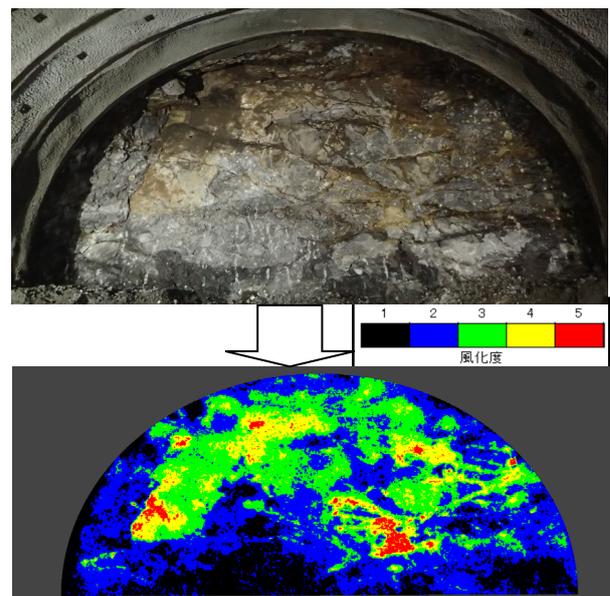


図-3 風化変質判定の例

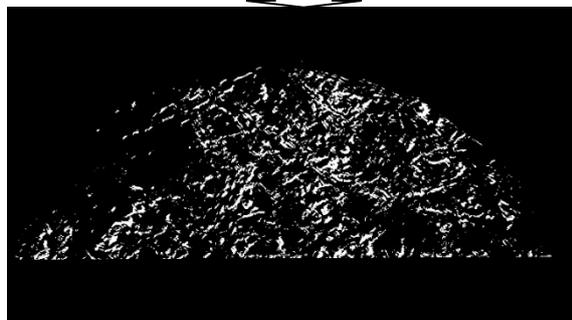


図-4 切羽写真から割目を抽出

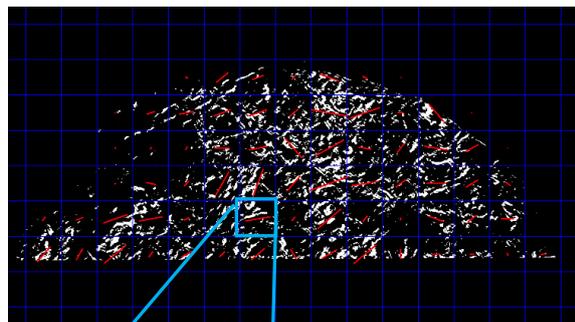


図-5 割目卓越方向の検出（左下）と、検出範囲と同位置の切羽写真（右下）の比較

まず、割目抽出画像をメッシュに分割し、メッシュの中で最も卓越する割目の方向を検出した（図-5）。この図に示すとおり、画像処理による割目の抽出は、写真を目視確認する場合と比べて遜色ない結果となっている。

次に、メッシュ内の割目卓越方向を、最も卓越する方向（第1成分）だけでなく、2番目に卓越する方向（第2成分）も検出する（図-6）。そして、隣接するメッシュ間で、この第1成分と第2成分を比較し、類似する方向をもつメッシュ間を線で連結する（図-7の緑線）、この連結線が交わるメッシュを「割目交差箇所」とみなすことにする。

割目交差箇所には、交差しあう連結線の数（分岐数）によって交差の重みの差があると考えられる。すなわち、

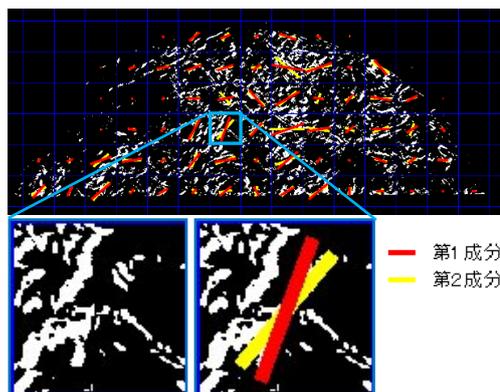


図-6 メッシュ内の主要割目2成分方向の検出

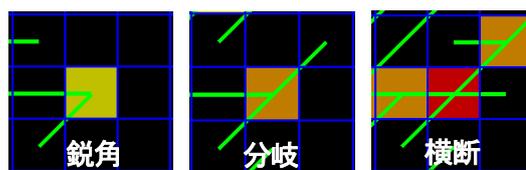


図-7 割目交差箇所の検出

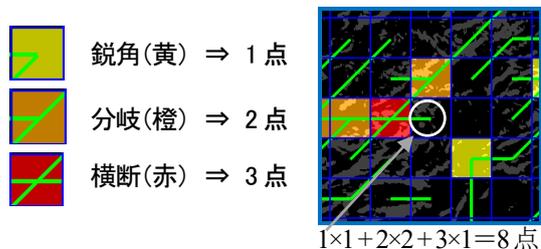


図-8 割目交差密度の算出方法

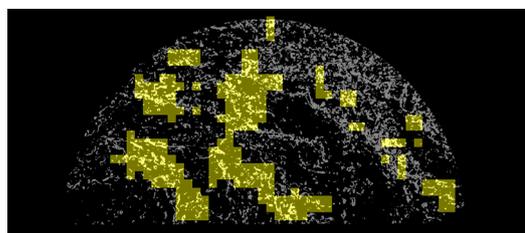


図-9 割目交差集中域の検出（黄色が集中域）

別の1方向に屈曲するような形態を示す割目交差箇所を「鋭角」、1つの連結線から2方向に分岐するような形態をもつものを「分岐」、1つの連結線から3方向に分岐しており、いわば1つの線を別の線が横断しているように見えるものを「横断」とここでは仮に呼ぶ（図-7）。この場合、鋭角に比べて、分岐や横断が示されたメッシュでは、割目の交差の程度が大きい（重みが大い）と考えられる。また、仮に鋭角ばかりであったとしても、鋭角が特定の領域に集中している場合には、疎らな領域に比べて割目の交差の密度が高いと考えられる。

こうした割目交差箇所の重みや密度を反映するため、本システムでは下記の手順で割目交差箇所をカウンター図化する。まず、割目交差箇所の重要性を点数によって重

み付けする(図-8の左)。この点数は、連結線からの分岐の数を点数化したものである。次に、密度を反映するために割目交差箇所を一定の範囲で合計する(図-8の右)。すなわち図-8の例では、鋭角1点×1箇所+分岐2点×2箇所+交差3点×1箇所=8点の剥落リスクが、この領域にあると定義する。

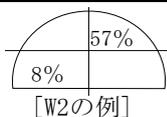
本システムでは、図-8に示すように割目交差箇所の合計点を算出する範囲を5×5のメッシュとしている。この大きにした理由は、重大な災害を引き起こす剥落岩塊の大きさを約1mと想定したためである。本システムの1メッシュは約20cmに相当するため、1mの幅は5メッシュであり、1m四方の範囲を解析するには5×5メッシュの範囲が適していることになる。本システムのメッシュの幅を20cmとした理由は、画像解析によって切羽写真から割目を検出する際の適切なメッシュ幅が20～25cmであることによる²⁾。以後、この5×5メッシュの割目交差箇所の合計点を「割目交差密度」と呼ぶ。

この割目交差密度が高い領域は、異なる方向の割目が集中している場所であり、剥落が発生しやすい箇所でもあると考えられる。そして、この剥落しやすい箇所が、切羽に対して多くの割合を占めているほど、その切羽では剥落が発生しやすいと考えられる。

割目交差密度の高い領域を定義するには、高い領域と

表-1 風化のカテゴリ区分

風化性状のカテゴリ	風化領域の面積率	風化領域の偏り
W1	60%以上	---
W2	10～60%	あり
W3		なし
W4	10%以下	---

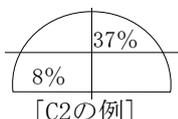


偏りとは、切羽の4分割のうち風化部40%以上の区画があり、かつ10%未満がある場合を指す

[W2の例]

表-2 割目のカテゴリ区分

割目性状のカテゴリ	割目交差集中領域の面積率	割目交差集中領域の偏り
W1	40%以上	---
W2	10～40%	あり
W3		なし
W4	10%以下	---



偏りとは、切羽の4分割のうち割目集中領域が30%以上の区画があり、かつ10%未満がある場合を指す

[C2の例]

低い領域とを区別するための閾値を設定する必要がある。この閾値は、地質技術者の判断によって設定した。すなわち、地質技術者が切羽および切羽写真を確認して、剥落の発生の可能性があるとして判断した箇所の割目交差密度のうち、最小の値を閾値とすることにした。本システムでは、この方法によって、割目交差密度6を閾値に設定した。この割目交差密度6以上となるメッシュを「割目交差集中域」と呼ぶ(図-9)。

3. 風化・割目のカテゴリ分類

切羽における風化と割目の発達程度を、定量的に比較・分類するため、表-1、表-2に示す基準でカテゴリ分けを行った。

これらの基準は、地質技術者の判定に基づいて作成した。まず、全国9箇所のトンネル現場から307箇所の切羽の観察記録と写真を収集した。次に、307の切羽写真から風化性状を2章で示した手法で解析し、その結果を分類した。

風化性状の分類は、場当たりのではなく網羅的である必要があるため、以下の考えに基づいて4つのカテゴリに区分した。すなわち、全体に風化領域が広がっている切羽(強風化)、ほとんど風化領域が認められない切羽(弱風化)、これらの中間的な切羽(中風化)の3つにまず分類した。そして、実際の切羽を確認すると、中風化の切羽には、一部に風化領域が偏って集中しているもの(偏りあり)と、切羽全体に散在しているもの(偏りなし)の2つの種類が認められたため、中風化を2つに区分し、4つのカテゴリとした。

この考え方に基づいて切羽を分類したあと、風化領域の切羽全体に占める割合を調べたところ、「強風化」の切羽では風化領域の割合が60%以上を示し、「弱風化」の切羽では風化領域の割合が10%以下を示すことがわかった。そして、「中風化」の切羽では、切羽を4つに分割し、その区画内での風化領域を調べたところ、偏りありの切羽は、1区画の風化領域が40%以上、別の1区画の風化領域が10%未満となることが見出された。そのため、この結果をもとに、カテゴリによる区分を定量的に再定義した(表-1)。こうして定義された4つのカテゴリは、以降、W1～W4の名称で呼ぶものとする。

また、割目性状についても、風化性状と同様の方法によってC1～C4のカテゴリに分類できた(表-2)。こうして、風化性状と割目性状を組合せて4×4=16のカテゴリに307箇所の切羽を当てはめると、表-3のように、各々の切羽の風化と割目の発達程度を、個人差なく定量的に分類することができた。

4. 剥落発生確率の算出

切羽における剥落の発生は、頻繁に発生するものではないため、その発生を確率的に算出することは困難である。そこで、本研究では、実際には剥落に至っていないけれども、剥落に発展する可能性のある小規模な「剥離」に注目した。具体的には、装薬穿孔時の掘削孔の周囲の「剥離」の有無を確認した(図-10)。こうした剥離を発生する切羽は、剥離を発生しない切羽に比べると、剥落に発展する可能性が高い切羽であると予想される。

そこで、本研究では、装薬穿孔時に剥離を生じた切羽については、すべて「剥落した切羽」とみなし、その切羽を前述のカテゴリにもとづいて分類した(表-4)。さらに、各カテゴリに分類された切羽の剥落の発生確率の算出を試みた。すなわち、各カテゴリに分類された総切羽数(表-3の値)を分母、同カテゴリ内で剥落を発生させた切羽数(表-4の値)を分子としたとき、その値は各カテゴリにおける「切羽の剥落の発生確率」と解釈することができる(表-5)。

表-3 切羽を風化・割目のカテゴリに区分(数字:切羽数)

		割目性状 Crack				合計
		C1	C2	C3	C4	
風化性状 Weathering	W1	9	17	53	17	96
	W2	1	13	18	16	48
	W3	5	6	36	30	77
	W4	8	10	38	30	86
合計		23	46	145	93	307

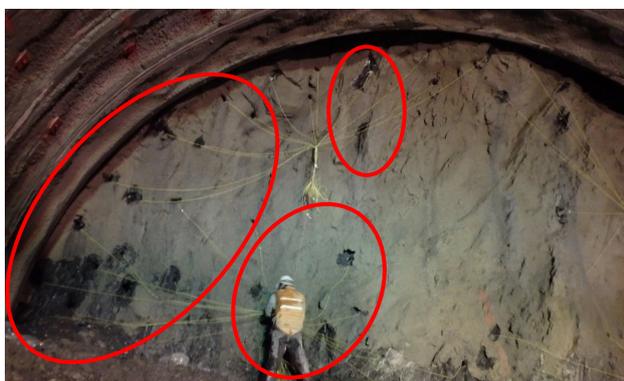


図-10 装薬穿孔時に生じた切羽面の剥離
(赤丸で示した部分)

このようにして切羽の剥落発生確率の傾向をみると、左上のカテゴリほど風化・割目の発達程度が高く、また、剥離発生確率も高いことがわかった。これは、言い換えれば、風化の進んだ切羽ほど剥落しやすく、割目の発達している切羽ほど剥落しやすいことを示しており、地質学的にも妥当な結果である。

この切羽の剥落の発生確率は、将来的には切羽の剥落予測に用いることができると考えられる。すなわち、ある切羽を解析した結果、その風化・割目性状が、表-5の領域1のカテゴリに当たると判定された場合には、その切羽の剥落の可能性は75%以上と予測できる。一方、領域3では0%に近い剥落率と予測できる。

5. 現場での運用

これまでに示した方法にもとづき、切羽周辺において切羽の剥落危険度を迅速に判定可能なシステムを構築し、現場に適用した(図-11)。このシステムは、切羽の撮

表-4 「剥落した切羽」を風化・割目のカテゴリに区分
(数字:切羽数)

		割目性状 Crack				合計
		C1	C2	C3	C4	
風化性状 Weathering	W1	9	14	42	14	79
	W2	1	10	7	9	27
	W3	5	5	19	17	46
	W4	8	5	18	0	31
合計		23	34	86	40	183

表-5 カテゴリ別の剥落発生確率

		割目性状 Crack				凡例
		C1	C2	C3	C4	
風化性状 Weathering	W1	100%	82%	79%	82%	領域1
	W2	100%	77%	39%	56%	領域2
	W3	100%	83%	53%	57%	領域3
	W4	100%	50%	47%	0%	

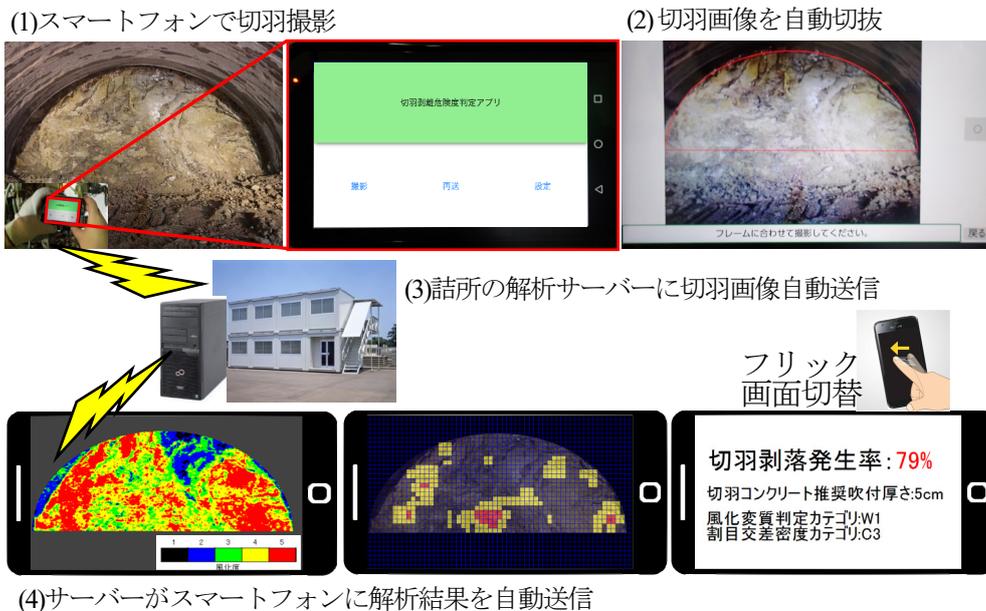


図-11 現場におけるシステムの運用

影を行うスマートフォンのアプリケーションと、切羽の風化性状・割目性状の解析を行うサーバー上のプログラムから構成される。スマートフォン側では、切羽の撮影、切羽画像の切り抜き、解析サーバーへの画像転送を行う。解析サーバー側では、スマートフォンからの画像の転送を受けると、解析プログラムを自動起動し、解析後にその結果をスマートフォンに自動転送する。

この解析に要する時間は10秒程度であるため、切羽作業の担当者は、スマートフォンを数回タップするだけで、切羽評価が迅速に行えることを確認した。

6. まとめ

今回、切羽の風化程度と割目の発達程度を定量的に評価可能なシステムを開発することができた。そして、このシステムの解析結果と、過去の切羽の剥落履歴を関連付けることにより、将来的には、切羽の剥落を定量的に予測できる可能性が考えられた。今後は、風化と割目以

外の評価項目を追加していくとともに、より多くの現場でシステムを検証し、剥落の予測の精度を高めていく必要がある。

参考文献

- 1) 戸邊勇人,宮嶋保幸,山本拓治,白松久茂,岩村武史,中村祐：山岳トンネル切羽の風化変質判定システムの開発—切羽観察での適用例—, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM),Vol.69,2014,pp.VI-043.
- 2) 戸邊勇人,宮嶋保幸,白鷺卓,山本拓治,川端淳一：画像解析によるトンネル切羽の定量評価システムの開発, 岩盤力学に関するシンポジウム講演集(CD-ROM),Vol.45, 2018.
- 3) 千木良雅弘：災害地質学入門, 近未来社, p.206, 1998.
- 4) 中島悟：地球色変化 鉄とウランの地球科学, 近未来社, p.292, 1994.
- 5) 西山賢一,木村隆行,磯野陽子：風化による岩石物性変化の指標としての色彩測定法(予報), 日本応用地質学会中国四国支部平成 19 年度研究発表会発表論文集,p41-46,2007.
- 6) Color Dream Net の web サイト (<http://www.colordream.net/>)

DEVELOPMENT OF PREDICTION SYSTEM OF ROCK FALL FROM TUNNEL FACES

Hayato TOBE, Yasuyuki MIYAJIMA, Suguru SHIRASAGI and Takuji YAMAMOTO

In a tunnel construction, many works are concentrated around the face, for that reason, the risk of rock fall is present around the face. Therefore, in order to secure the safety of construction, it is important to judge the risk appropriately. Currently, the risk is judged by observation of geological engineers, thus individual differences are often occurred. In addition, progress of the judgment skill depends on training. In order to solve those problems, we developed a new system to evaluate the geological characteristics of the face by image analysis. The system classifies the degree of weathering and crack distribution into four levels and can notify the probability of rock falls, based on the past record of tunnel faces.