

山岳トンネルのリアルタイム切羽評価システムの開発

Development of a Real-Time Evaluation System for Tunnel Faces

宮嶋保幸 白鷺卓 戸邊勇人
山本拓治¹⁾ 犬塚隆明 松下智昭

要 約

山岳トンネルの掘削工事では、地山状況を精度良く予測・評価することが、安全で合理的な施工のために重要であり、筆者らは削孔検層や弾性波探査を応用した切羽前方探査技術の開発に取り組んできた。一方、実際の施工時で最終的に支保パターンや補助工法を選定する際には切羽の目視観察によりその判断を行っているが、一般に1日に4回程度行われる掘削の中で切羽観察は1日1回の頻度であり、特に断層などの弱層がトンネル坑壁背面に隠れているような場合には目視だけでは地質状況を把握できないために、変状や崩落に至るケースが見られる。また、地質状況が良好な切羽では、高速掘進を目的として長孔発破を適用する場合があるが、安全な長孔発破を継続的に行うためには一発破毎に迅速に切羽状況を評価してその可否を判定することが必要となる。そこで、筆者らは地山の評価結果を迅速に施工にフィードバックすることができる、リアルタイムで定量的な切羽評価技術の開発を進めている。これまでに、装薬穿孔データを利用した切羽の強度評価技術と切羽写真を利用した画像解析による切羽の風化変質評価技術を開発し、実際のトンネル掘削に適用した結果、支保パターン変更の判断に活用するなど、その有効性を確認することができた。

目 次

- I. はじめに
- II. リアルタイム切羽評価システムの概要
- III. ジャンボ穿孔データによる強度評価技術
- IV. 風化変質判定システム
- V. おわりに

I. はじめに

山岳トンネルの掘削工事では、地山状況を精度良く予測・評価することは、安全で合理的な施工のために重要である。このため、筆者らは削孔検層や弾性波探査を応用した切羽前方探査技術の開発を行ってきた。これらの技術は多くのトンネル工事において活用されており、断層などの地質不良部を事前に把握することで甚大な地質トラブルを回避することや、前方の地質状況を加味しながら適切な支保パターンを選定するためなど、有効に活用されている。

しかしながら現在も、予期せぬ断層による切羽近傍の崩落や大変状の根絶には至っていない。これは、前方探査が必ずしも全線で実施されるものではないことや精度に限界のあることなどの理由によって、断層を完全に把握することが困難なためである。このことは、地中に構築する線形構造物のトンネルにおいて避けることができないものであり、山岳トンネルでは、①地表からの事前地質調査、②

切羽前方探査に続き、③切羽観察による掘削箇所（切羽）の地質状況の確認を通じて、段階を追って情報の確度を高くしながら地山状況を判定して適切な施工方法を選択することが重要である。特に、切羽は前方地山の直近の状況を評価できる最終段階であるため、可能な限り多くの正確な情報によって、適切に地質状況を判定する必要がある。

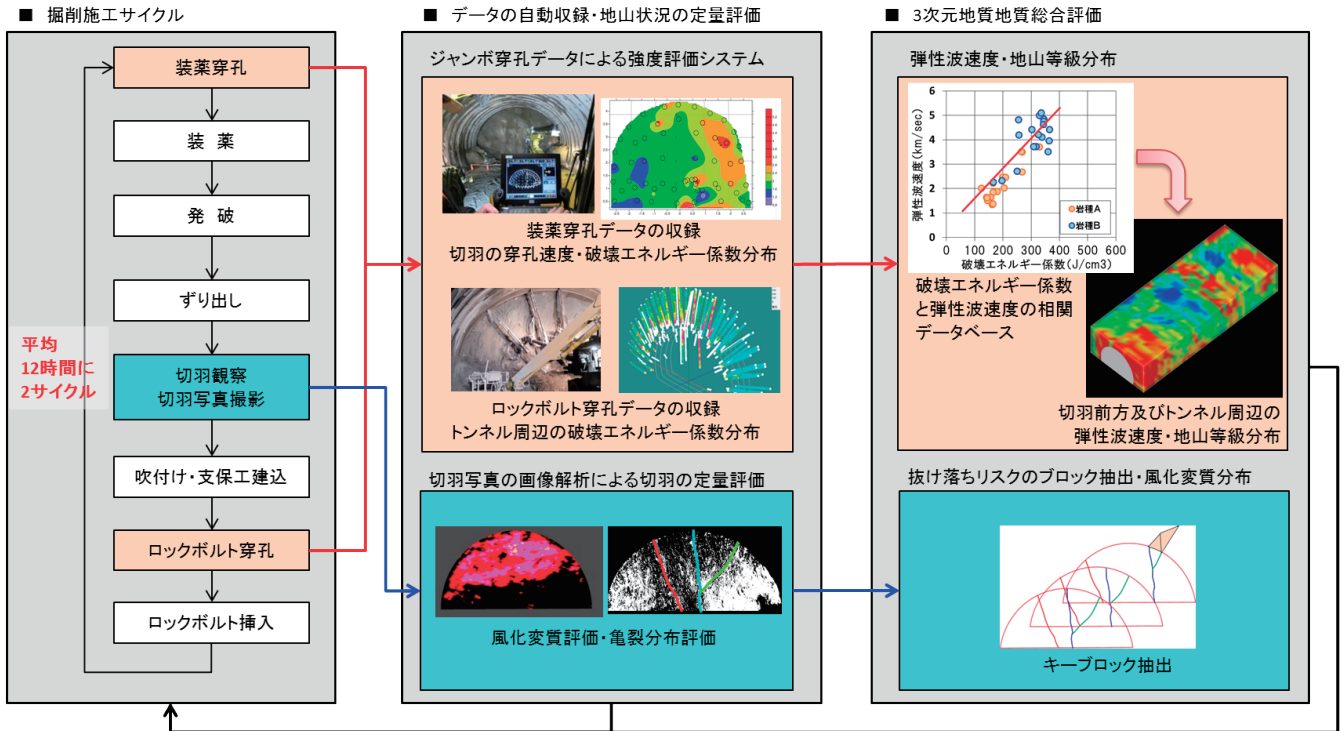
一方、掘削作業は通常昼夜作業で行われており、その間一般的に4回の掘削サイクルによって5~6m程度進捗するが、切羽観察は1日1回の頻度であり、地質の変化を十分に把握できない場合がある。また、断層がトンネル坑壁の背面に隠れている場合には、目視だけでは確認することができないため、結果的に変状や崩落に至るケースが見られる。

このため筆者らは、切羽近傍5m以内の地質状況を定量的に把握する手法の開発に取り組んできた。これは、切羽やトンネル周辺の地山状況を定量的かつ高密度に把握することを目的として、毎サイクル施工されるロックボルトの穿孔データを利用してトンネル周辺の地質状況把握に供する手法である。しかしながら、解析に時間がかかるために評価結果を施工に反映することができなかった。現在筆者らが進める開発は、通常の施工サイクルの中で切羽及びトンネル周辺の地山状況を高密度かつ高精度に評価し、その結果を迅速に施工に反映することができるリアルタイム性を追求するものであ

1) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード: NATM, 切羽評価, 穿孔データ, 風化変質評価, 亀裂評価, 画像処理

Keywords: NATM, tunnel face evaluation, drilling data, weathering evaluation, crack evaluation, image processing



施工サイクルに合わせて、迅速に次の施工に反映（発破計画・支保パターン選定・補助工法選定へ反映）

Fig.1 リアルタイム切羽評価システムの概要

(Outline of the Real-time Evaluation for Tunnel Face System)

る。このうち、これら装薬穿孔データを用いた切羽の硬軟評価技術と切羽写真を用いた風化変質判定システムについて、実施工で有効性を確認することができたので、結果を報告する。

II. リアルタイム切羽評価システムの概要

現在、開発に取り組んでいるリアルタイム切羽評価システムの概要を Fig.1 に示す。これは、装薬やロックボルトの穿孔データと切羽写真といった施工の中で取得できる情報を最大限に利用して、リアルタイムに地質を評価することで地質評価結果を次の施工に迅速に反映できるシステムである。

データ収集から結果出力までを自動化するシステムを構築することで、特別な調査や解析を実施せずに地質状況进行评估することができる。さらに、これまで把握することができなかったトンネル周辺の地山情報をロックボルトの穿孔データから取得できることや、切羽の地質状況を画像解析によって定量的に評価できるとともに、施工データや全切羽の写真を利用することによって、地山情報の密度が格段に高くなる。これによって、地山状況に応じた支保パターンを的確に選定でき、多くのトンネルで崩落や変状の原因となっているトンネル背面に隠れた断層に対し、事前に迅速な対策が可能となるなど地質トラブルの防止に寄与することができる。さらに、リアルタイムな地山情報は、発破時の薬量設定や孔間隔など適切な発破実施にあたって有効に活用することが期待できる。

本論文では、リアルタイム切羽評価システムのうち、ジャンボ穿孔データによる強度評価システムと切羽写真の画像解析による切羽の定量評価システムについて、その概要と実施工における適用について報告するものである。

III. ジャンボ穿孔データによる強度評価技術²⁾

1. ジャンボ穿孔データによる強度評価技術の現状

従来、発破のための装薬やロックボルトの穿孔データは切羽及びトンネル周辺の地山状況を推測するために有効と考えられているが、日常の掘削サイクルの中で穿孔データの収集と穿孔位置の記録が困難であることから、具体的なデータを用いた定量的な評価に利用できていない。また、収集データの分析結果を地質評価に利用する取り組み事例もあるが、日々収集される数多くの穿孔データから破壊エネルギー係数などの地山評価指標を算出し、さらに図化するには1週間程度の時間と大きな労力を必要とするため、その結果を実際の施工に反映することは現実的ではなかった。一方、1990年代より鉱山開発が盛んな北欧のメーカーがコンピュータ制御によるジャンボを開発しており、その機能はアンチジャミングシステムによる穿孔作業の補助から、穿孔データの記録、さらに近年では発破計画に基づいた穿孔位置や角度の自動誘導とともに、穿孔自体も自動で行える全自動型のジャンボが現れている。しかしながら、これらのジャンボは地質が均質な欧米を主体に開発されてきたため、主に穿孔位置と角度の精度向上や穿孔速度向上による作業の効率化が主目的であり、これまでに地山評価に適用した事例はほとんどなく、実用的に地質を評価するためのシステムは存在していないのが現状である。

そこで筆者らは、日常の施工サイクルの中で装薬及びロックボルトの全穿孔データを自動で収集し、その分析結果を次のサイクルの施工方法に反映することができる、迅速性を持った地山評価システムの開発に取り組んでいる。

2. ジャンボ穿孔データによる強度評価システムの開発

Fig.2 にシステムのフローを示す。切羽の地山評価結果を即時に現場で確認できるようにタブレット PC を利用し、さらに LAN を介して現場事務所や本社などでリアルタイムに情報を共有できるようにした。切羽の地山評価は、装薬穿孔全てのデータを用い、切羽全面の硬軟分布評価には、岩盤が硬ければ穿孔速度が遅くなり、軟らかい場合には速くなる現象を利用した。評価結果は、切羽で即時に判断できるように、Fig.3 に示す穿孔速度の切羽分布状況を図示し、孔毎の穿孔速度と切羽を 3 分割した場合の穿孔速度の平均値、ヒストグラムを表示した。

3. 穿孔速度による地山評価

開発した装薬穿孔データによる切羽評価システムを、堅硬な緑色岩と亀裂が発達した粘板岩、脆弱な蛇紋岩が複雑に混在しているトンネルに現場適用した。Photo 1 は Fig.3 に示した切羽の写真である。ここでは、左側の堅硬な緑色岩、右側の亀裂の発達した粘板岩、天端の脆弱な蛇紋岩の分布が、Fig.3 の穿孔速度の分布状況と良く整合していることが分かる。このような結果を全ての切羽に対してリアルタイムに取得することができるため、従来の 1 日 1 回の切羽観察に対し、1 日 4 回程度の頻度で切羽観察を補うとともに、地質変化の連続性を把握するための情報を取得することができる。

今回、システムの検証を行った距離 TD.1380~1620m では、地山状況に応じて 2 種類の支保パターンを適用した。鋼製支保工を用いる CII-b パターンと鋼製支保工を用いない CII パターンである。

掘削時の切羽観察による切羽評価点と、今回開発したシステムによる地山評価としての穿孔速度(軸を反転)の推移を Fig.4 に示す。この図によれば両者は同じ傾向を示しており、穿孔速度から切羽全体の切羽評価点を予測できることが分かる。また、切羽評価点と穿孔速度の相関を示す Fig.5 から、負の相関性を確認することができる。ここに、グラフの右に道路トンネルでの一般的な切羽観察要領に定められている切羽評価点に基づく支保選定の目安を示した。これによると、切羽評価点 50 点を境界として CII-b と CII を判別することとなっているので、今回の穿孔速度について、切羽評価点が 50 点未満の箇所のグループと 50 点以上のグループに区別して統計分析を行った。50 点未満のグループを赤で示し 50 点以上のグループを青で示した Fig.6 はそれぞれのデータの累積度数(割合)を示しており、評価点が 50 点未満のグループ(赤)については、穿孔速度の大きい側から累積したグラフを描き、評価点が 50 点以上のグループ(青)については、通常の累積度数分布のように穿孔速度の小さい側から累積したグラフを描いている。ここで求められる交点からは、切羽評価点 50 点を境界とした場合の穿孔速度の判別を求めることができる。すなわち、交点の X 軸である穿孔速度 2m/分を境界として、穿孔速度が遅い場合には、切羽評価点は 50 点以上となり、交点の Y 軸からその判別確率は 70%と高い確率で判別できることが分かる。

以上を踏まえて、この後の掘削では、穿孔速度 2m/分を CII-b と CII の適用判定における基準的な目安とし、また、鋼製支保工を用いない CII 施工時では、穿孔速度が 2m/分を越える場合にトンネルの安定や掘削の安全を確保するためには、鋼製支保工が必要である可能性を示す注意喚起のためのツールとして日常の施工管理に利用している。

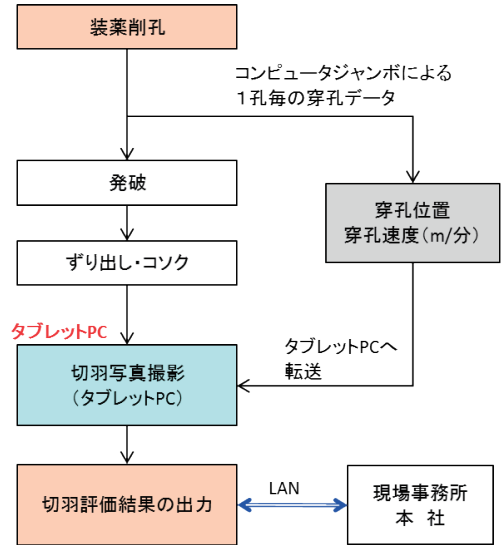


Fig.2 切羽評価のシステムフロー (Flow Chart of the Evaluation System)

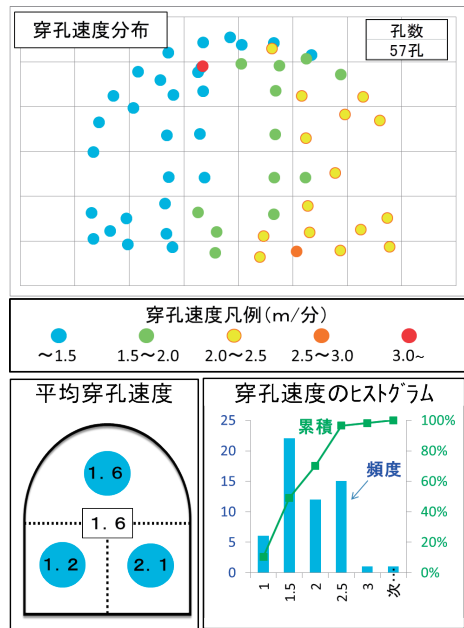


Fig.3 穿孔速度分布データの評価結果 (Result of Penetration Rates on a Tunnel Face)

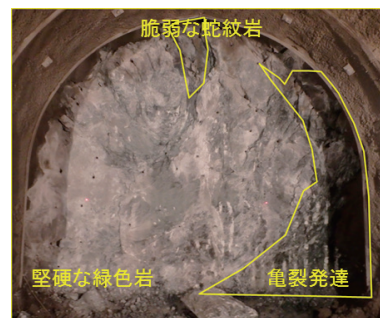


Photo 1 切羽状況 (Fig.3 の切羽) (Situation of a Tunnel Face(same as Fig.3))

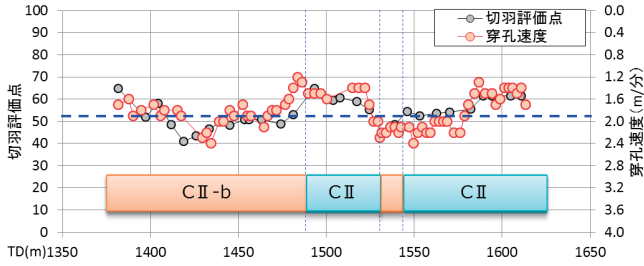


Fig.4 切羽評価点と穿孔速度の分布
(Comparison of Face Classification and Penetration Rate)

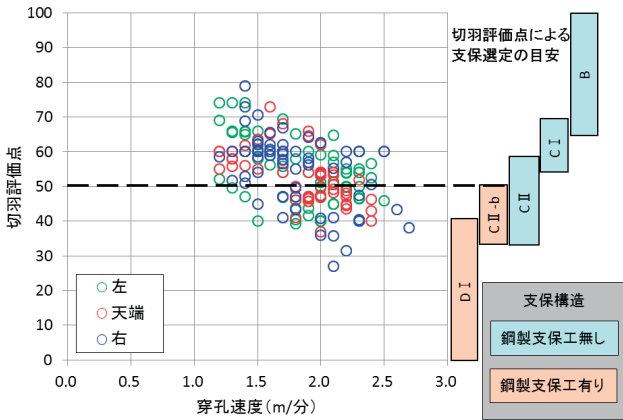


Fig.5 切羽評価点と穿孔速度の相関
(Correlation of Face Classification and Penetration Rate)

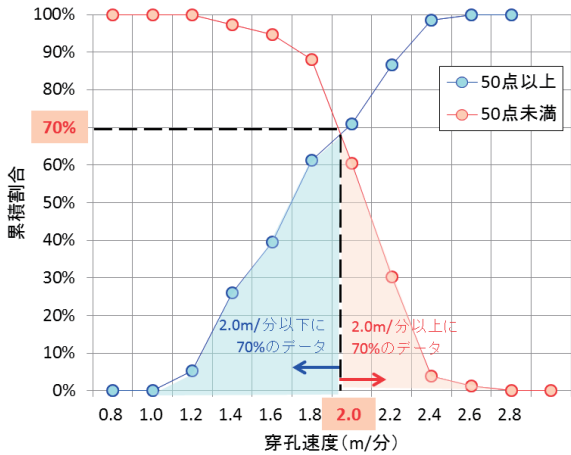


Fig.6 穿孔速度による切羽評価点 50 点の超過判定
(The Criteria that Face Classification exceed 50 by Penetration Rate)

IV. 風化変質判定システム³⁾

1. 岩の風化変質と色調による定量的評価

切羽の評価では、風化変質も重要な評価項目となるが、風化の程度を定量的に評価することは難しく、個人差が発生しやすい項目である。また、切羽観察の頻度は1日1回であるため、連続的な変化を把握することが難しい場合がある。

一方、地質学的に、色調変化の度合いで風化を定量的に評価できることが知られており、岩石を対象として分光測色計によって

『L*a*b*系』と呼ばれる色調を測定する定量的な評価手法が活用されている。しかしながら、分光測色計は測定対象に直接接触し、数 cm の範囲しか測定されないものであり、トンネル切羽など岩盤掘削面への適用に対して、危険を伴い局所部分の評価しかできないため、実用的に利用することができなかった。そこで、筆者らはトンネル切羽のデジタルカメラによる画像データを利用し、切羽面の風化度を評価するシステムを開発した。

2. 岩石試料による風化の指標の決定

トンネル切羽への適用に先立ち、坑口付近の露頭から掘削対象となる岩種のうち新鮮な試料と完全に土砂化した強風化の試料を採取し、岩盤の風化に伴う色調の変化を明らかにすることを目的に分光測色計によって色調を測定するとともに (Photo 2), X線回折分析によって化学的風化の進行程度を確認した。Photo 3 に分光測色計により測定した色調値を示している。また、Fig.7 には X線回折分析による粘土鉱物の検出結果を示した。これらの結果から、強風化の試料は未風化のものに比べて、特徴的に大きな a*値と b*値を示し、また、含有する鉱物はカオリナイトを多く含有していることが分かった。以上より、未風化の試料を風化度 0 と定義し、強風化の試料を風化度 100 と定義し、新たに測定した岩石の色調の a*及び b*値の大きさによって風化度を決定することとした。



Photo 2 分光測色計による色調の測定
(Colorimetric Measurement by a Spectrophotometer)

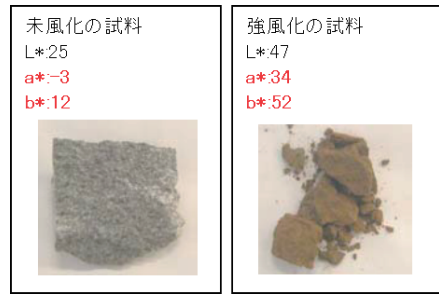


Photo 3 風化変質の基準試料
(Samples for Classifying Weathering Grade)

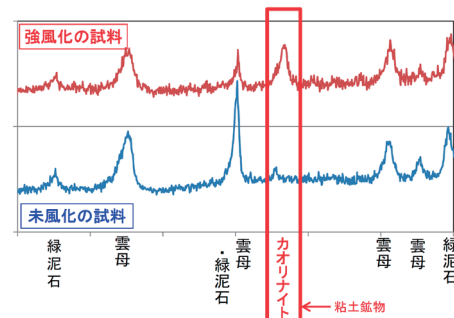


Fig.7 X線回折分析による粘土鉱物の検出
(Detection of Clay Minerals by X-ray)

3. 切羽写真を用いた風化の評価

当システムでは、日常の切羽観察と同様、切羽を天端、左端、右端の3分割で評価する。切羽画像から風化度を評価する手順は以下のとおりである。

- ① 切羽写真のRGBの値をピクセル毎に測定し、それをL*a*b*値に変換する。
- ② 風化に関連性の強いa*値とb*値から前述の試料を基準として風化度を算出する。
- ③ 風化度を5段階に色分けした切羽全体のコンター図を出力する。
- ④ 出力した風化度のコンター図より、天端・左端・右端の部位毎にその面積比を算出し、風化程度を評価する。

以上の手順はパソコンにプログラム化されており、簡単な操作で解析結果を数分間で取得できる。また、切羽写真をカメラ付きタブレットPCで撮影すれば、その場で簡単な操作により、数分間で結果を取得することができる。

4. 低土被り部での適用事例

風化変質判定システムをトンネルが到達する坑口付近の小土被り部で適用した結果をTable 1に示す。その結果、当システムの方が目視判定に比べて風化度が強いと判定する箇所が見られた。特に、左端、右端で顕著である。この違いは、坑口に近づくに従い、強風化部分が天端部から切羽全体に広がっていく状況を観察する過程で、一般に天端部に比べると左端と右端の方が心理的に安心感が強いいため、実際には風化度が進んでいる場合でも、目視では左端と右端の風化度を低く判定する傾向があることが原因と考えられる。目視による判定が一概に不正確と判断することはできないが、風化の程度が変化するような区間では、一定の基準により定量評価することができる当システムは有用なツールといえる。

V. おわりに

本論文では、現在開発を進めている山岳トンネルのリアルタイム切羽評価システムのうち、既に現場で実適用を始めている装薬穿孔データを利用した切羽の評価システムと切羽写真を利用した風化変質判定システムについて報告した。

装薬穿孔データによる切羽評価システムでは、装薬穿孔の速度によって、支保パターンの選定を定量的に判定できることが分かった。また、穿孔完了直後、リアルタイムで切羽、現場事務所、本社が評価結果を共有することで、実工事における施工サイクルでの意思決定に利用できるシステムを構築することができた。

風化変質判定システムでは、日常の施工管理の中で撮影している切羽写真を画像解析することで、定量的な評価が難しく個人差が発生しやすい風化変質を定量的に評価するシステムを開発した。また、カメラ付きタブレットPCを利用することで、撮影したその場で定量的な評価が可能となる。また、1日1回の切羽観察に対し、全切羽の評価が可能となり、より確実な地質変化の把握が可能となる。

以上のように、施工データや切羽写真を利用することで、切羽及びトンネル周辺の地山情報を迅速かつ高密度に収集し、定量的かつリアルタイムで施工に反映できる地質評価システムの構築を進めている。今後さらにこれらの結果を有機的に統合し、より確実に地質評価結果を施工に反映できる三次元地質評価システムとして開発を進める予定である。この成果は、今後報告する所存である。

参考文献

- 1) 宮嶋保幸, 岩熊真一, 戸邊勇人, 白鷺卓, 岩村武史, 白松久茂, 渥美博之; 支保パターン選定に寄与する地山評価技術の開発と適用実績, トンネル工学報告集, 第25巻, I-16, 2015.11, pp.1-9.
- 2) 松下智昭, 宮嶋保幸, 犬塚隆明, 手塚康成; トンネル切羽の定量評価による掘削の合理化, 第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2016, pp.217-221.
- 3) 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一切羽観察での適用例一, 土木学会第69回年次学術講演会(平成26年9月), VI-043, 2014, pp.85-86.
- 4) 社団法人 日本道路協会; 道路トンネル技術基準(構造編)・同解説, 2003, pp.78-79.

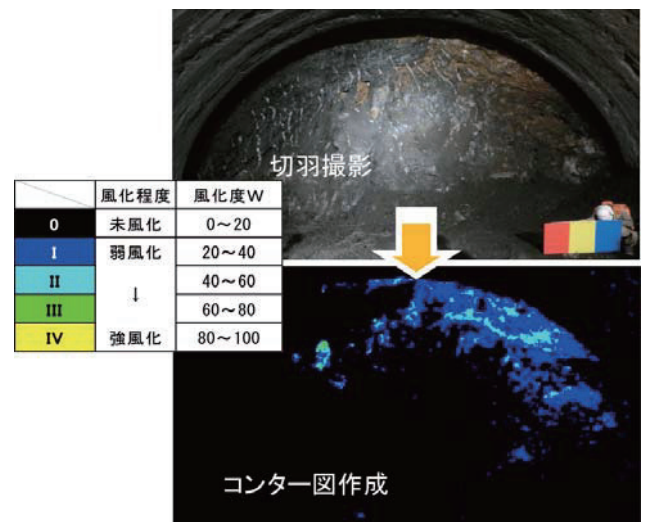


Fig.8 風化程度のコンター図出力 (Mapping of the Weathering Grade)

Table 1 低土被り部の風化判定結果 (Result of Weathering Classification at the Thin Overburden)

切羽No.	当システムの評価			目視切羽観察		
	左端	天端	右端	左端	天端	右端
325	3	3	3	3	3	3
329	3	4	3	3	4	3
334	3	4	3	3	3	3
337	3	4	3	3	4	3
340	4	4	4	3	4	3
343	4	4	4	3	4	3
347	4	4	4	3	4	3
350	4	4	4	3	4	4
352	4	4	4	3	4	4
356	4	4	4	4	4	4

■ : 当システムの方が強風化と判定

風化程度の目安

- 1 概ね新鮮
- 2 割れ目沿いの風化変質
- 3 岩芯まで風化変質
- 4 土砂状風化, 未固結土砂

Development of a Real-Time Evaluation System for Tunnel Faces

*Yasuyuki Miyajima, Suguru Shirasagi, Hayato Tobe,
Takuji Yamamoto¹⁾, Takaaki Inuzuka and Tomoaki Matsushita*

To ensure safe, rational excavation of a tunnel, it is important to evaluate the geological conditions around the tunnel. Therefore, the authors have been working on the development of techniques to predict geological conditions ahead of the tunnel face by applying drill logging and seismic survey methods. Although visual inspection is used to determine which support pattern and auxiliary techniques are to be used at the tunnel face, such inspections are carried out only once a day. Since tunnel excavation work is generally conducted around the clock, faults and other weak layers are sometimes hidden at the back of the tunnel and are not picked up by visual inspection, and consequently collapses or large displacements often occur. Furthermore, although a longer-cycle blast method could be used where the geological conditions are good, a detailed evaluation of the geological conditions is necessary at every blasting if this method is to be applied safely. Therefore, the authors have developed a real-time evaluation system for tunnel faces which is capable of rapidly feeding back the evaluation results to the excavation method. To date, they have developed a technique to evaluate the hardness of the rock using drill penetration and a technique to evaluate weather grade using image analysis of tunnel face photographs. The application of this technique in actual tunnel excavations has provided geological evaluation results that confirm its effectiveness in determining particularly which support pattern or blasting method is to be used.