

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

宮嶋 保幸¹・岩熊 真一²・戸邊 勇人³・白鷺 卓⁴・岩村 武史⁵
白松 久茂⁶・渥美 博行⁷

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1）
E-mail:miyaj@kajima.com

²非会員 国土交通省 九州地方整備局 大隈河川国道事務所（〒893-1207 鹿児島県肝属郡肝付町新富1013-1）
E-mail:iwakuma-s8910@qsr.mlit.go.jp

³正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1）
E-mail:tobeh@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部（〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1）
E-mail:shirasag@kajima.com

⁵正会員 鹿島建設株式会社 横浜支店 エクシブ湯河原工事事務所
(〒259-0314 神奈川県足柄下郡湯河原町宮上631-1)
E-mail:iwamurat@kajima.com

⁶正会員 鹿島建設株式会社 九州支店 土木部（〒812-8513 福岡市博多区博多駅前三丁目-12-10）
E-mail:shiramah@kajima.com

⁷正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1）
E-mail:atsumih@kajima.com

山岳トンネル工事で高品質なトンネルを合理的に構築するためには、地山状況に応じた支保パターンを選定することが重要である。そのため、従来から切羽前方探査技術や切羽評価技術が開発されている。今回、地山の弾性波速度と地山等級の関係に着目し、現在最も活用されている削孔検層によって切羽前方地山の弾性波速度を評価することで、直接的に支保パターンの選定に寄与する手法を開発した。また、切羽の風化変質を客観的に評価するため切羽写真を利用した手法を新たに開発し、これらの技術を『宮崎218号 南久保山トンネル新設工事』において適用し、その有効性を確認した。また、ロックボルトの削孔データを地球統計学を用いて処理することで、目視では確認できないトンネル背面の地山状況を三次元的に評価するシステムを開発した。

Key Words : drill logging, P-wave velocity, support patterns, weathering, geostatistics

1. はじめに

山岳トンネルにおける事前調査は地表からの弾性波探査を主としており、設計段階における支保パターンは主として弾性波速度から決定されている。しかしながら、地表からの探査ではトンネル掘削箇所の弾性波速度を正確に評価することが困難なため、事前調査を補う調査として切羽前方探査が実施される。一般に実施が容易なドリルジャンボを用いた削孔検層による破壊エネルギー係数を指標として前方予測に活用されている。一方、直接的に切羽前方の弾性波速度分布を得られる速度検層は、

事前地質調査の設計と同じ考え方で地山を評価することができるものの、削孔検層などで穿孔された孔に測定器を挿入して測定するため、さらに数時間要し、日常的に適用することは困難であった。今回は、客観的に支保パターンの選定に直結する手法を開発すべく、削孔検層と速度検層の相関を掘削初期に得ることで、日常的には削孔検層を実施するだけで切羽前方の弾性波速度を予測し、地山等級として評価できる手法を開発した。また、支保パターンの選定は、最終的には切羽観察による地山評価に基づいている。その中で、風化変質程度は定性的で個人差が出やすい項目である。そこで、風化変質によ

って岩石の色調が赤や黄色に変色することに着目し、切羽の写真を画像解析することによって客観的かつ迅速に風化変質を判定するシステムを開発した。

また、トンネル施工中の地山トラブルは切羽前方の地質不良部に起因するものだけではなく、トンネルに並行する断層では、トンネル坑壁の背面に隠れているため目視による把握が困難であり、突然に坑壁の変状や崩壊が発生することがある。そこで、ロックボルト打設時の削孔データを削孔検層によって処理し、地球統計学を活用することで、トンネル背面の地質不良部を客観的に把握することができる手法を開発した。

2. 工事概要および地質概要

(1) 工事概要

宮崎218号南久保山トンネル新設工事は、北方延岡道路のうち、宮崎県延岡市に建設する掘削延長381mの道路トンネルである。工事概要を以下に示す。

工事名：宮崎218号南久保山トンネル新設工事

発注者：国土交通省 九州地方整備局

施工者：鹿島建設株式会社

工事場所：宮崎県延岡市北方町南久保山地先

工 期：2013年2月13日～2014年5月30日

(2) 地質概要

地質は、新生代古第三紀中期始新世～前期漸新世に形成された、日向層群の砂岩頁岩互層を主体としている。日向層群の上位は、新生代第四紀の火碎流堆積物および未固結堆積物によって数m～10数m程度で覆われている。

日向層群は、上部四万十累帯に属し、プレート境界の沈み込み部で形成された「付加体」からなる。そのため、砂岩と頁岩の互層の内部に、砂岩のブロックが不連続に点在している（メランジュ）。

本工事において主体となる砂岩頁岩互層は、その地質的特徴から、形成時ないし形成後に変形を受けたと予想される。そのため、層理面や、砂岩ブロックとの境界附近において、一部の頁岩で脆性的な変形を起こしており、剥離しやすい性質を示している。実際に、掘削時の切羽観察には、頁岩に剥離しやすい鏡肌を確認した。砂岩頁岩互層の層理は概ね切羽と同方向に発達しており、剥離しやすい。そのため、切羽では層が剥離とともに滑り落ちやすい地質構造となっている。

本工事周辺の砂岩頁岩互層は、灰白色の砂岩ブロックを除き、主に暗灰～黒灰色を示し、風化にともない茶褐色に変色する性質を示す。この地層の風化は、地表から一様ではなく、地質構造に沿う形で進行していることが、切羽観察や地表踏査で確認された。

本工事では、坑口から約80mの所から土被り1m未満の小土被り部があり、長尺フォアペイリングと保護モルタル打設が計画されていた。また、到達側坑口部では、地表の火碎流堆積物が天端部に出現し、これらを対象として長尺フォアペイリングが計画されていた。

3. 風化変質判定システムの開発

(1) 開発の背景

山岳トンネルでは、日常管理として1日に1回以上の頻度で切羽観察を行っており、支保パターンは切羽観察を主な判断材料として選定を行っている。現在の道路トンネル工事で最も活用されている切羽評価手法では、圧縮強度、風化変質、割目間隔、割目状態を主な評価項目として切羽を点数化し、総合点の大きさに従って支保パターンを選定している。以上の評価項目のうち、風化変質は、圧縮強度、割目間隔、割目状態に比べて、客観的な指標に乏しく、目視による定性的な評価にならざるを得ない。

そこで、今回開発した風化変質判定システムは、写真的画像解析技術を用いることで、風化変質の程度を、現場で迅速・簡便に、客観的に評価することを目的としたものである。

(2) 岩の風化変質とその評価方法

岩盤の風化変質過程には、物理的風化と化学的風化の二つの作用がある。風化と変質は、本質的に同義であるため、下記では「風化」に統一する。

風化のうち、物理的風化は、岩盤中の微小亀裂の伸長や拡大に由来するため、岩の強度が指標となる。そこで一般的に活用されている点載荷試験器などを用いることで、簡易に定量的な評価を行うことができる。

一方、化学的風化は、岩盤からのイオン溶脱と粘土鉱物生成の過程を経ており、定量的な評価にはX線回折分析のような室内試験が必要である。この分析法は、1試料の測定に一週間程度を要するため、トンネル現場の切羽観察で利用することは極めて難しい。

そこで本システムでは、岩盤が、化学的風化に伴って、色調変化を起こすことに着目した。すなわち、岩盤が風化すると、それに伴い、多くの場合、粘土鉱物の生成や酸化に伴い茶褐色化の色調変化が発生する。一般的に、同種の岩石であれば、化学的風化の程度は、色調変化的度合いとして現れる。この性質から、トンネルの切羽の色調を定量的に評価することにより、化学的風化程度が定量化できると考えた。なお、熱水変質等に伴う、緑色や黒色の色調変化も、変質前の岩とのコントラストが明瞭であれば色調判別可能である。

(3) 岩の色調の定量的評価法

- 本システムの特徴は以下の3点である
- ・ 風化の既存知見を活用している
 - ・ 計測を安全に行うことができる
 - ・ 切羽で即時に解析して結果を取得できる

岩石の風化を定量的に評価するための方法としては、『L*a*b*系』によって数字で比較する方法が知られている。L*a*b*系では、L*値は色の明るさを示し、a*値は赤色に近いほど大きく、緑色に近いほど小さくなり、b*値は黄色に近いほど大きく、青色に近いほど小さくなる

(図-1参照)。従って、L*a*b*系では正負が、補色の関係であり人間の感覚に近いため、L*a*b*系は、風化と色調の関連性に関して、地質学的研究で一般的に利用されている。

実際に利用される場合には、周囲の光源などの影響を排除して測定するため、分光測色計が一般に用いられている(写真-1参照)。しかしながら、分光測色計は測定物へ直接接触させて計測する必要があり、切羽の岩盤の色調を測定するには、測定箇所に接近して測定器を切羽に押し当てるところとなり、非常に大きな危険を伴うため現実的な手法ではない。そこで、本システムでは、分光測色計の代わりにデジタルカメラ内蔵のタブレットPCを用いることにした。まず、デジタルカメラ機能により安全に切羽から離れてデジタル画像を取得する。この時点では、デジタル画像は光の三原色の輝度からなるRGB値で構成されている。そこで次に、タブレットPCにあらかじめ搭載したプログラムによってRGB値をL*a*b*値へ変換することで、その場ですぐに切羽の岩盤のL*a*b*値の分布を把握し、従来の地質学の知見に基づいて、風化の程度を評価することができる。

以上のプログラムや手順をシステム化し、切羽をタブレットPCの内蔵カメラで撮影するだけで、原位置で色調分析から風化変質の評価までを自動的に行うシステムを開発した。

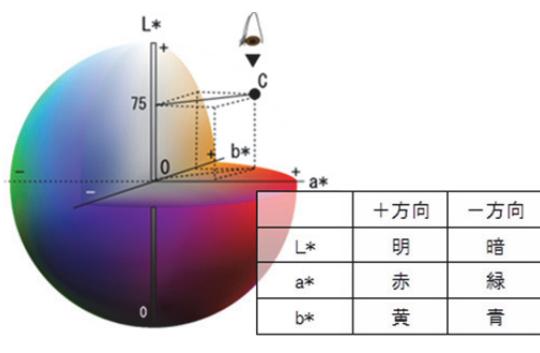


図-1 L*a*b*a*系

(4) 風化変質判定システムの開発

a) 風化変質の指標の検討

切羽への適用に先立ち、当トンネルの岩盤の風化に伴う色調の変化を明らかにした。はじめに、トンネルの坑口付近の露頭から、風化度の異なる試料を採取し、それらの色調を分光測色計によって測定するとともに、X線回折分析し、化学的風化の進行程度を確認した。

写真-2は、未風化・強風化のそれぞれの試料と、分光測色計により測定した色調値を示している。また、図-2は、これらのサンプルのX線回折解析による粘土鉱物の検出結果である。以上より、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、含有する鉱物も粘土鉱物(カオリナイト)を多く含有していることが分かった。従って、切羽写真の画像をもとに、a*とb*値を指標にした画像解析を実施すれば、風化程度を定量的に評価できると考えた。



写真-1 分光測色計による色調の測定

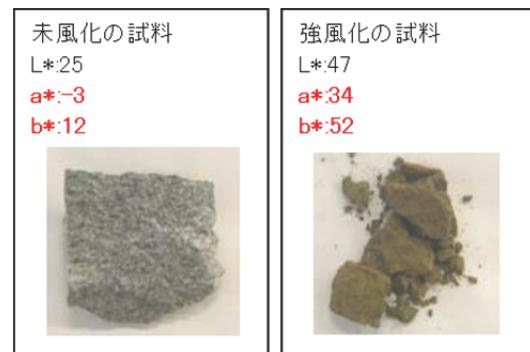


写真-2 風化変質の基準試料

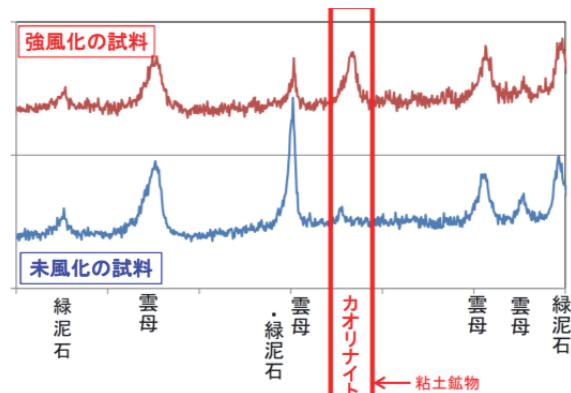


図-2 X線回折による粘土鉱物の検出

風化程度を数値化するために、風化度Wと変換式を定義した。まず、写真-2に示す未風化の試料を風化度0定義して、そのa*値およびb*値をa*0, b*0とし、次に強風化の試料を風化度100と定義し、そのa*値およびb*値をa*1, b*1とした。以上から、任意の試料xの風化度Wxは、この2試料の間の値をとるため、試料xのa*, b*値 (a*x, b*x) をもとに、下式で算出・定義することとした。

$$W_x = \sqrt{\frac{(a*_x - a*_0) \times (b*_x - b*_0)}{(a*_1 - a*_0) \times (b*_1 - b*_0)}} \times 100$$

b) トンネル内の照明

トンネル内では照明の環境が安定しない。画像の色調は照明に影響されるため、風化の解析結果も安定した正確な結果を得ることができない。これを回避するため、切羽の撮影時には、同一の色見本を常に同時に撮影し、解析時に色調の補正を行うこととした。

c) 切羽観察における風化変質評価

切羽の風化変質は、一般的に、切羽全体で均質ではなく、部位によって風化程度に差異を示すことが多い。日常の切羽観察では、切羽を天端部・左端・右端の3つに分割して評価しているため、本システムでも同じ3分割で評価することとした。そこで、切羽画像をピクセルデータ毎に評価した色調に対し、切羽を3分割して評価するために以下の処理を行った。

① RGB→L*a*b*→風化度 Wへの変換

切羽写真的RGB値をピクセルごとに解析し、L*a*b*値のピクセルデータに変換する。さらに、風化に関連性の強いa*値とb*値をもとに、前述の式で風化度Wを算出する。

② 風化度のコンター図作成

風化度を5段階に色分けし、切羽全体の風化程度を示すコンター図を作成する(図-3参照)。

③ 風化部の面積比算出

作成した風化程度のコンター図から、天端・左端・右端各部位を抽出し、部位ごとに風化部の占める面積比を算出し、風化程度を評価する。

南久保山トンネルにおいては、試験区間として、小土被り部で切羽の写真撮影を行うとともに、全切羽に対して観察評価を実施し、当システムと切羽観察による評価について比較試験を行った。その結果、後述するように、一定の風化度以上のピクセルの面積比から、部位全体の風化変質の程度を判定できることを確認できた。

以上の処理をタブレットPC上で行うことにより、数回の画面タップと、約3分程度の所要時間で、撮影から風化程度の評価までを実施することができた。

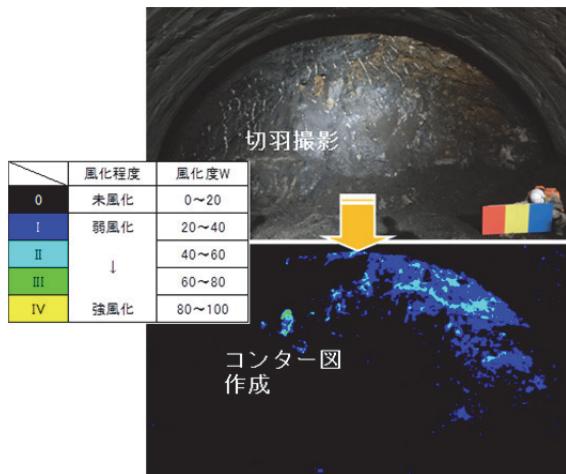


図-3 風化程度のコンター図の作成

表-1 小土被り部の風化変質判定結果

切羽No.	風化部の面積比			点載荷			システムの評価			目視観察結果		
	左端	天端	右端	左端	天端	右端	左端	天端	右端	左端	天端	右端
83	3.7	4.7	1.1	10	10	10	2	2	2	2	2	2
84	0.0	1.0	0.6	10	1	4	2	3	3	2	3	3
87	1.7	15.3	4.7	4	1	4	3	4	3	3	4	3
88	0.4	18.6	3.4	5	1	1	2	4	3	2	4	3
89	0.6	26.0	9.4	10	1	10	2	4	3	2	3	2
90	2.0	27.8	11.4	5	2	5	2	4	3	2	4	3
91	0.3	24.6	16.0	12	1	23	2	4	2	2	4	2
92	15.3	19.4	7.3	23	1	34	2	4	2	2	4	2
93	10.1	23.0	5.2	8	3	8	3	4	3	2	4	2
97	0.5	15.3	3.9	11	1	11	2	4	2	2	4	2
98	0.7	17.3	3.2	12	2	12	2	4	2	2	4	2
99	2.6	10.3	0.1	16	3	16	2	4	2	2	4	2
100	0.1	4.6	0.1	8	3	8	2	3	2	2	4	2
101	0	0.8	0	12	4	12	2	3	2	2	4	2
102	0	0.1	0	12	2	8	2	3	2	2	3	2
103	0	0.2	0.1	18	2	13	2	3	2	2	3	2
104	0	0.2	0	10	6	9	2	2	2	2	3	2
105	0.1	0.2	0.6	8	3	5	2	3	2	2	2	2
106	0	0.9	0	12	5	11	2	2	2	2	2	2
108	0	1.1	0.1	10	3	9	2	3	2	2	2	2
109	0	0.1	0.2	8	3	5	2	3	2	2	2	2
110	0	0	0.3	4	1	2	3	3	3	3	3	3

■システムのほうが強風化と判断
■目視のほうが強風化と判断

(5) 南久保山トンネルにおける適用試験

本システムを坑口から80mでの小土被り部において(切羽No.83～110)、本システムを適用し、目視による判定結果と比較したところ、両者は、おおむね同等の判定結果を示した(表-1参照)。

また、到達側坑口部の結果を表-2に示した。その結果、本システムの方が目視による判定に比べて風化が強いと判定する所が多く見られた。特に左右の端部においてその傾向が目立っている。これは、坑口に近づくにつれ、天端部から切羽全体に強風化部分が広がっていく過程で、一般に天端部に比べると左右部に対しては心理的に安心感が強いため、上記のような傾向が見られたと考えられる。

表-2 到達側坑口部の風化変質判定結果

切羽No.	風化部の面積比			点載荷			システムの評価			目視観察結果		
	左端	天端	右端	左端	天端	右端	左端	天端	右端	左端	天端	右端
325	1.4	22.1	23.8	2	5	5	3	3	3	3	3	3
329	22.7	49.5	18.0	5	5	5	3	4	3	3	4	3
334	18.5	45.1	19.7	5	5	5	3	4	3	3	3	3
337	14.1	62.9	17.8	5	2	5	3	4	3	3	4	3
340	49.7	42.9	29.4	5	2	5	4	4	4	3	4	3
343	78.8	76.9	30.4	5	2	5	4	4	4	3	4	3
347	46.9	73.4	56.0	5	5	5	4	4	4	3	4	3
350	29.6	57.5	48.9	2	2	2	4	4	4	3	4	4
352	89.8	98.2	86.5	2	2	2	4	4	4	3	4	4
356	95.8	98.5	92.2	2	2	2	4	4	4	4	4	4

■システムのほうが強風化と判断
■目視のほうが強風化と判断

目視による判定は、経験や前後の関係など、多くの情報を加味した上で行われるため、一概に不正確なものと判断するべきではない。しかし、風化程度の変化する区間において、切羽を一定の基準で判定するための補助として本システムは、非常に有用なツールである。

4. 切羽前方の地山等級の予測手法の開発

(1) 開発の背景

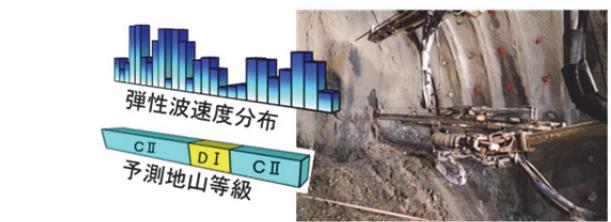
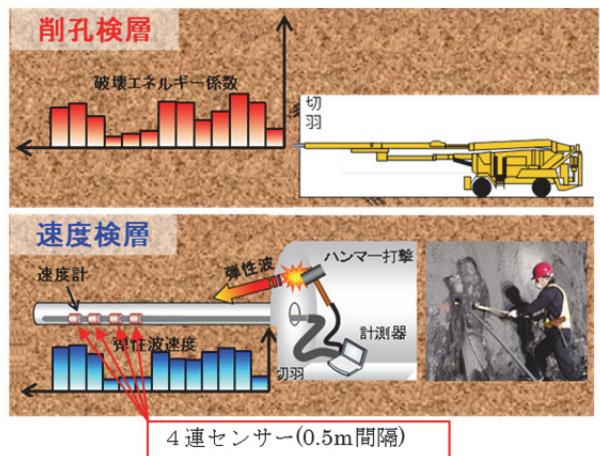
トンネルの地質トラブルを回避するためには、切羽前方の地質状況の把握が重要であり、そのため切羽前方探査技術の開発が進められている。しかし、これまででは地質リスクの回避に主眼を置かれ、支保パターン選定への結びつけが十分ではなかった。また、支保パターンとの関連について、例えは削孔検層結果と実施支保パターンとの比較、相関が実施されることが多いが、支保パターンは人為的に選定した結果であり、客観的な評価として比較する対象として、十分ではないと考えられる。

設計時において、標準支保パターンは、主に地山の弾性波速度により、地山等級に分類された上で選定されている。今回、このことに着目し、前方探査によって切羽前方の弾性波速度を把握できれば、地山等級に基づいた切羽前方の支保パターンの予測が可能と考えた。以上のことから、既存の手法である「削孔検層システム」と「速度検層システム」を活用し、切羽前方の弾性波速度分布を容易に把握するための手法について検討を行った。この手法は、設計時と同じ考え方、指標によって切羽前方の地山を評価できることが特徴である。

(2) 本手法の概要

本手法の概要を図-4に示す。

削孔検層は、油圧ドリルを用いて岩盤を削孔する際に得られるデータを利用し、切羽前方の地質状況を探査するシステムである。トンネル掘削に通常使用するドリルジャンボに搭載可能なので、施工への負担も小さく、多



削孔検層により切羽前方の弾性波速度分布を把握・地山等級を予測

図-4 削孔検層による地山等級の予測

くのトンネル工事で活用されている。削孔検層では、地質状況は破壊エネルギー係数を算出して評価する。破壊エネルギー係数は、岩盤の削孔に要した油圧ドリルの仕事量に相当し、硬岩は大きく、軟岩は小さくなる。しかし、破壊エネルギー係数だけでは、岩盤の硬軟の指標になるものの、地山を評価する一般的な物性値として評価するまでには至っていないのが現状であった。

一方、速度検層は先進ボーリング孔に速度計を挿入し、切羽をハンマーで打撃して発生させた弾性波を取得・解析することで、前方の弾性波速度分布を把握するシステムである。したがって、直接的に地山等級として評価し、支保パターン選定に結びつけることができる。しかしながら、速度検層は切羽での占有作業となるため施工を中断して実施する必要があった。そこで、事前に「削孔検層」と「速度検層」を実施し、あらかじめ破壊エネルギー係数と弾性波速度の相関関係を得ることにより、削孔検層のみで弾性波速度が得られるシステムを開発した。

(3) 速度検層の特徴

適用した速度検層は、精度の良い探査を簡易に実施するために、これまでに様々な改良を行っている。以下に速度検層の特徴を示す。

a) ジャンボによる掘削孔を利用可能

通常、現場で使用しているジャンボによる削孔孔を利用できるので、別途、ボーリングマシンを用いる必要がない。

b) 4連センサーによる測定の迅速・高精度化

4つの速度計を0.5mピッチの一体型とすることにより、1.5mごとの発振でも0.5mの細かい区間速度を取得でき、迅速な測定が可能である。また、一度の発振を4つのセンサーが同時に測定するため、発振（トリガー信号）のブレがなく、高精度の測定が可能である。

c) センサーの圧着

センサーを坑壁に圧着する機能を持つため、精度の良い測定が可能である。

(4) 南久保山トンネルにおける適用試験

試験は大きく分けて3つの区間で実施した（図-5）。はじめに小土被り部において、岩種と破壊エネルギー係数の相関関係を得るために、削孔検層を実施した（試験施工区間①）。次にトンネルの中央部で、破壊エネルギー係数と弾性波速度の相関を得るために、削孔検層と速度検層を行った（試験施工区間②）。最後にこれらの試験施工から得られた相関関係に基づき、到達側坑口部の地質状況を確認しながら、貫通掘削の管理を行った（到達側坑口部前方探査）。

a) 小土被り部における削孔検層の適用

本トンネルにおいて、地質・地形的に重要な区間のひとつである小土被り部を、試験施工区間①と位置付けた。試験区間の長さは30mであり、掘削長30mの削孔検層を、切羽に対して天端と左右土平の計3箇所に実施した。掘削した結果、この区間における地質状況の特徴は以下の通りであることが分かった。

- ① 1つの切羽の中に、砂岩と頁岩が複雑に混在
- ② 砂岩は堅硬で、頁岩は脆弱である。
- ③ 頁岩部では一部で鏡肌が発達、剥落が見られる
- ④ 切羽に占める頁岩の面積が大きくなると切羽評価点は低くなり、砂岩が大きくなると高くなる
- ⑤ 前方探査において砂岩と頁岩の判別ができれば切羽の評価に活用できる

以上のことから、3本実施した削孔検層箇所付近の岩種を詳細に砂岩と頁岩に分類し、砂岩および頁岩ごとの削孔検層結果（破壊エネルギー係数）を分析した。分析結果を図-6に示す。図は、砂岩・頁岩それぞれの破壊エネルギー係数の累積度数分布図を示しており、砂岩と頁岩の累積する方向を逆にすることで、判別点的中率を示したものである。これより破壊エネルギー係数150を閾値にすると、砂岩と頁岩の区別が、70%の確率で可能との結果になった。

また、今回、同時に開発を進めていた、風化変質判定システムを小土被り部の全切羽に適用した結果、風化の顕著な箇所では、破壊エネルギー係数が連続的に75程度を示しており、このような箇所では、長尺先受け工法などの補助工法が必要であると判断できた。

b) 削孔検層と速度検層の相関分析試験

破壊エネルギー係数と弾性波速度との相関について、トンネルの中央部において試験施工を実施した（試験施工区間②）。その結果、両者は、強い相関にあることが

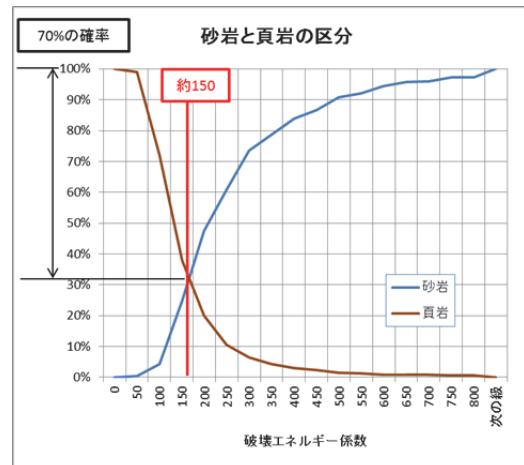


図-6 破壊エネルギー係数による岩種判別

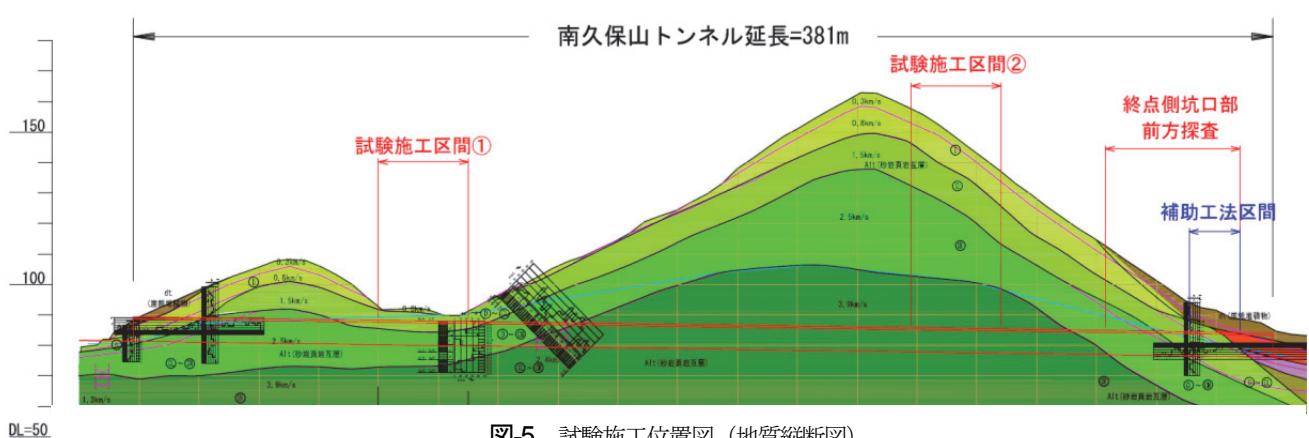


図-5 試験施工位置図（地質縦断図）

分かった（図-7）。弾性波速度は地山の評価に直接的に利用できる数値であるため、この結果から、破壊エネルギー係数からも、比較的高い精度で地山評価可能であることが明らかになった。

さらに、前述の試験施工区間①で補助工法の要否の判定に有効であると考えられる『破壊エネルギー係数75』を図-7で得られたグラフ（相関式）を適用すると、弾性波速度0.8km/secと推定され、この値は、当トンネルの事前地質調査において、到達側坑口部付近に確認されていた、脆弱地質区間の弾性波速度と一致していることが分かった。

c) 到達側坑口部における削孔検層の適用

終点側坑口では、削孔検層のみを実施し、試験施工区間②で得られた相関関係を利用して弾性波速度分布を推定した（図-8）。グラフには予測弾性波速度を赤線で示し、切羽観察による切羽評価点を灰色丸で示し、風化変質判定システムによる評価結果をグラフ下の『掘削時

の切羽状況』に示した。その結果、削孔検層と弾性波速度はよい相関を示し、また、AGF工法（長尺先受け工）の適用範囲も的確に把握できていることが分かる。

5. 地球統計学によるトンネル周辺地質の評価

これまで述べたように、山岳トンネル工事では、切羽前方探査や切羽観察によって地山を評価し、断層などの地質リスクを想定しながら掘削することで安全の確保に努めている。しかしながら、地山の変化や断層などがトンネルの坑壁背面に並行して分布する場合には、その分布を把握することが難しく、結果的に補強や対策が手遅れとなり、大きな変状や坑壁の崩落に至る恐れがある。このような断層を把握するためには、坑壁弾性波の適用が考えられるが、日常的に適用することは現実的ではない。

今回、日常の施工で実施するロックボルトの削孔データを利用してトンネル周辺の破壊エネルギー係数の分布を取得し、これらのデータを地球統計学によって処理することで、トンネル周辺の地質状況を三次元的に評価するシステムを開発した。

(1) 南久保山トンネルにおける適用結果

当システムを坑口から80mの小土被り区間に適用した。延長66m区間に渡り、1断面10本のロックボルトをトンネル延長方向には1m間隔、トンネル周方向には1m間隔で打設したロックボルトの削孔データを用いて、削孔検層システム及び地球統計学手法によりデータの処理を行った。本システムの特徴を以下に示す。

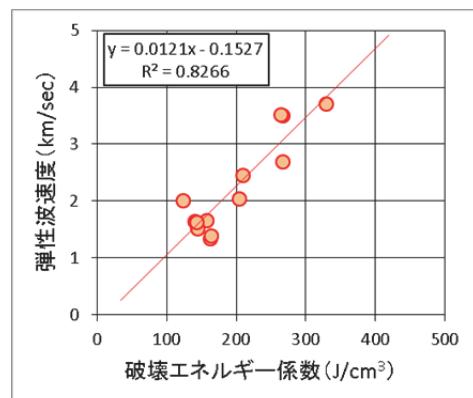


図-7 破壊エネルギー係数と弾性波速度の関係

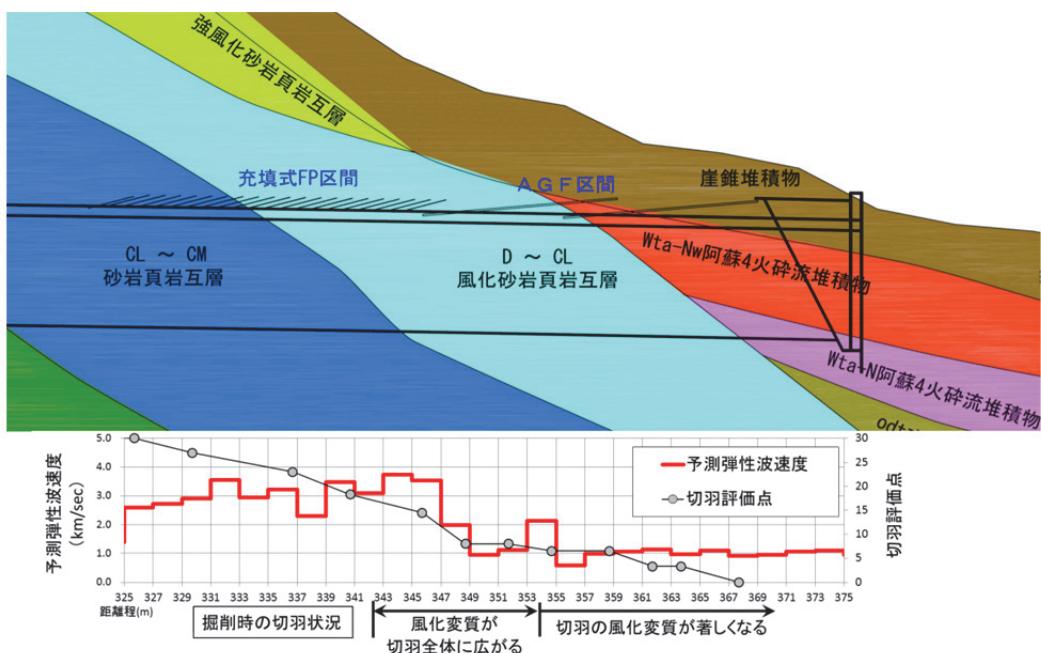


図-8 到達側坑口部における適用事例

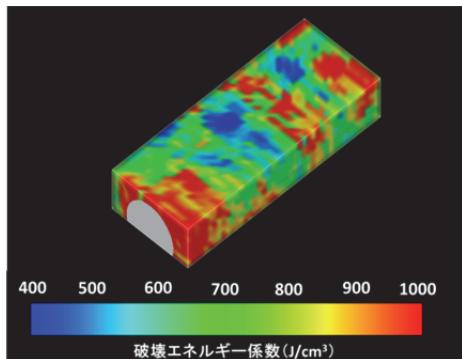


図-9 トンネル周辺の破壊エネルギー係数分布

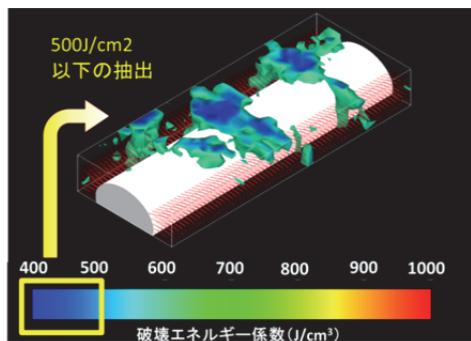


図-10 地質リスク箇所の抽出

- ① 特別な調査が不要。
- ② 地球統計学により、データの無い箇所の地質状況を高精度に推定することができ、周辺の地質状況を連続的かつ三次元的に把握できる。
- ③ 切羽観察では得られないトンネル周辺の地質状況まで把握できるので、対策の要否を迅速に判断し、想定外の過大な変位や崩落などを防止することができる。
- ④ 三次元的に評価された地質状況は、破壊エネルギー係数分布の鳥瞰図や断面図として出力できる。
- ⑤ 破壊エネルギー係数が $500\text{J}/\text{cm}^3$ 以下などと値を特定すれば、特に悪い地山の分布を任意の方向や断面で示し、地質リスク箇所を容易に抽出できる。

図-9に小土被り部の破壊エネルギー係数の三次元分布図を鳥瞰図に示し、図-10に破壊エネルギー係数が $500\text{J}/\text{cm}^3$ 以下の箇所を抽出した鳥瞰図を示す。

図-10では、区間の中央付近に濃い青が集中するリスクの高い箇所が抽出されている。当該箇所では、写真-3の切羽写真に示すように、天端部に脆弱層を確認した。また、前方探査を目的として実施した削孔検層においても当該区間で、弱層が予測されていた。このように、これらの手法を組み合わせることで、より正確にトンネル周辺の地質まで包含して評価することができる。



写真-3 切羽状況（右肩に風化部を確認）

6. おわりに

宮崎218号南久保山トンネル新設工事を実証現場として、トンネル切羽の前方探査から切羽の評価を通じて、適切な支保パターンの適用に資することができる技術の開発を行った。

切羽前方探査については、工程への負担が少ない削孔検層を実施するだけで、地山の弾性波速度を予測する手法の有効性を確認することができた。これは、削孔検層による破壊エネルギー係数と速度検層による弾性波速度から直接的に相関関係を得るものであるとともに、結果は地山等級として評価できるため、信頼性が高く、評価も容易に行うことができる。今後、多様な地質・岩種に対して相関関係を蓄積し、より汎用性の高い手法として確立を図っていきたい。

また、切羽評価の定量化を目指して、切羽写真を利用した風化変質判定システムを開発し、その有効性を確認した。当システムについても、多様な地質・岩種に対して相関関係を蓄積し、より汎用性の高い手法として確立を図っていきたい。

また、地球統計学を用いたトンネル周辺の地質状況を評価するシステムは、施工時に活用できるだけではなく、トンネル全線のデータを取得することで、共用後の変状発生に対する対策範囲の特定など、維持管理に活用が期待できるとともに、CIM(Construction Information Modeling)への展開も期待できると考えている。

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、岩熊真一：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-, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, pp.85-86, 2014.
- 2) 宮嶋保幸、岩村武史、白鷺卓、戸邊勇人、岩熊真一：ドリルジャンボ削孔データによるトンネル切羽前方の地山等級予測技術の開発, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, pp.87-88, 2014.

(2015.8.7受付)

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF EVALUATION TECHNIQUE OF THE GEOLOGICAL CONDITION FOR THE ELECTION OF THE SUPPORT PATTERN

Yasuyuki MIYAJIMA, Shinichi IWAKUMA, Hayato TOBE, Suguru SHIRASAGI
Takeshi IWAMURA, Hisashige SHIRAMATU and Hiroyuki ATUMI

To rationally construct a high-quality tunnel, it is important to eelect a support-pattern suitable for the ground conditions. Therefore, face forward exploration techniques and face evaluation techniques have been developed conventionally. This time, focusing on the relationship between the P-wave velocity and the natural ground grade. And by evaluating the P-wave velocity by drilling logging that is currently the most utilized, We have developed a technique of the election of the support-pattern. Moreover, the weathering of the tunnel face is newly developed a method using photos to objectively evaluate and apply these techniques in a "Miyazaki 218 Minamikuboyama tunnel new construction", and confirmed its effectiveness. Furthermore, the drilling data for the rock bolts and by treatment with geostatistics, and have developed a system for evaluating a three-dimensionally the geological condition of the tunnel back which can not be confirmed visually.