

コンピュータジャンボと画像解析を利用した トンネル周辺の地質評価技術

宮嶋 保幸¹・白鷺 卓²・戸邊 勇人³・山本 拓治⁴
犬塚 隆明⁵・松下 智昭⁶

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: shirasag@kajima.com

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 (〒107-8348 東京都港区赤坂六丁目5-11)
E-mail: yamataku@kajima.com

⁵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: inuzukat@kajima.com

⁶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: mattomoa@kajima.com

山岳トンネルでは、地質不良部での過大な変状や切羽崩落などの地質トラブルは、ひとたび発生すると安全や工程遅延へ大きな影響を与える。そのため、切羽前方探査や切羽評価手法について、様々な技術の開発が進められている。筆者らは、近年導入が進められているコンピュータジャンボを地山評価に積極的に活用し、また、画像解析技術も利用しながら、リアルタイムに地山を評価する技術の開発に取り組んでいる。これにより、地質不良部では迅速な対策や適切な支保選定による地質トラブルを抑制し、地質が良好な箇所では余掘りを低減して高速かつ経済的な掘削の実現を期待できる。本報文では、これらの地質評価システムの概要と適用事例を報告する。

Key Words : tunnel face evaluation, drilling data, weathering evaluation

1. 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进行评估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

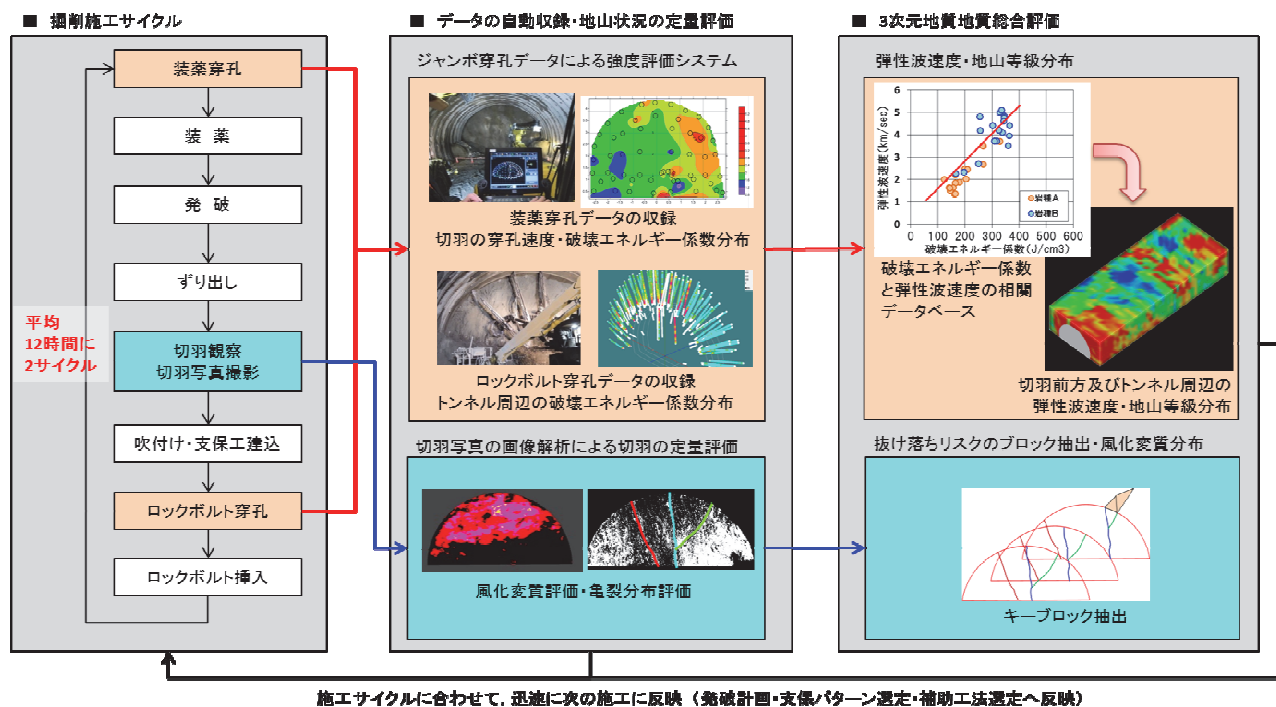


図-1 リアルタイム切羽評価システムの概要

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¹⁾。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いことや、切羽での測定に時間を要するために施工サイクルの負担となり、日常の施工サイクルで利用するには非現実的であった。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。

2. 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図-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を評価することができる。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に対してロックボルトの穿孔データで取得できることや、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ている断層に対し、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。

本報文では、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。

3. ジャンボ穿孔データによる強度評価技術

(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、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として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穿孔データを利用し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開発²⁾

図-2にシステムのフローを示す。切羽の強度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とリアルタイムに情報を共有できるようにした。切羽の強度評価は、装薬穿孔全てのデータを用い、切羽全面の硬軟分布評価として、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、図-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。写真-1は図-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、図-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、通常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。

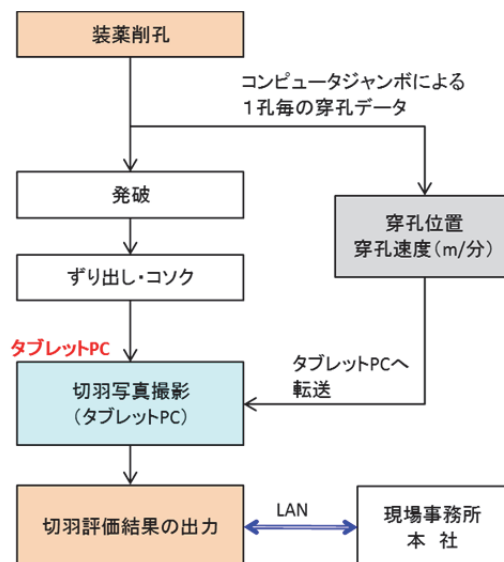


図-2 切羽評価のシステムフロー

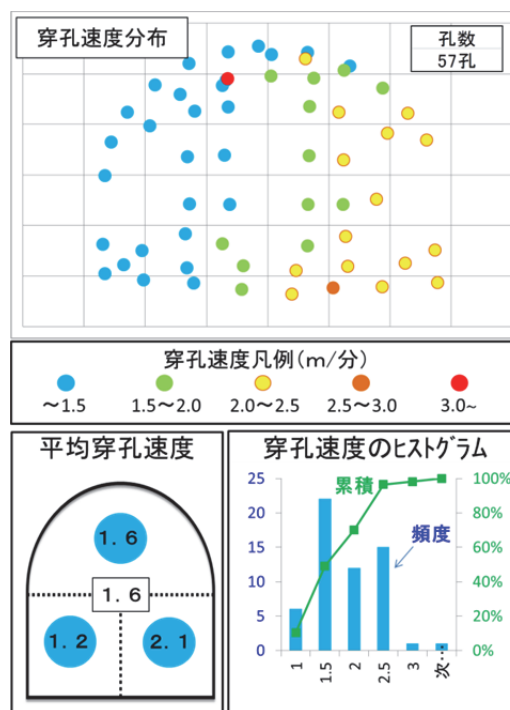


図-3 穿孔速度分布データの評価結果

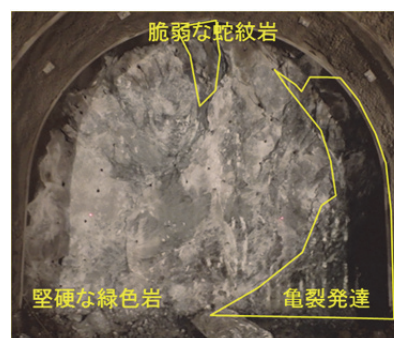


写真-1 切羽状況 (図-3の切羽)

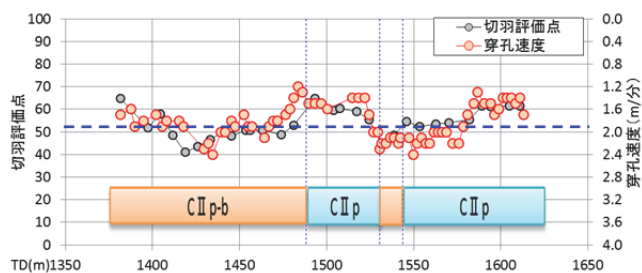


図4 切羽評価点と穿孔速度の分布

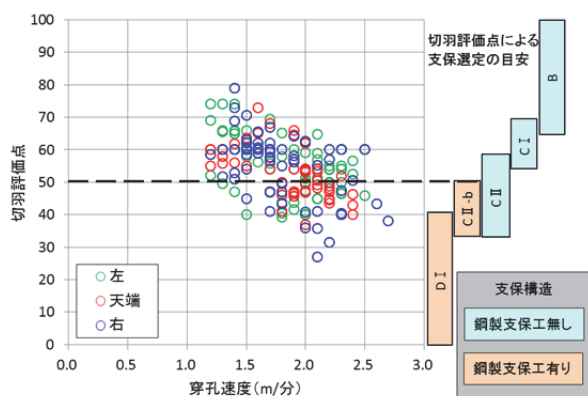


図5 切羽評価点と穿孔速度の相関

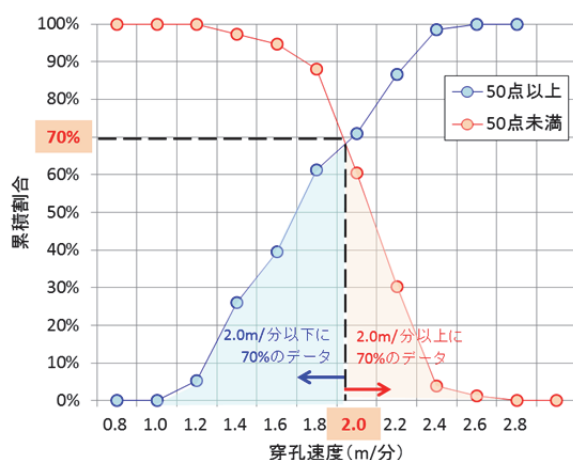


図6 穿孔速度による切羽評価点 50 点の超過判定

今回、システムの検証を行った距離程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CIIp-bと鋼製支保工を用いないCIIpである。掘削時の地山状況として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）の推移を図-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図-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CIIp-bとCIIp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図-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、この後の掘削においては、穿孔速度2m/分をCIIp-bとCIIp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CIIp施工時には穿孔速度が2m/分を越えるような場合には、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。

4. 風化変質判定システムの適用

(1) Aトンネルにおける風化程度の評価

Aトンネルは、坑口部から300m程度掘削が進んだ箇所においても亀裂沿いに茶褐色化した風化岩盤が出現しており、その分布状況によって切羽の安定性が異なっていた。そこで、既開発の風化変質判定システム³⁾により、風化の度合いを定量的に評価しながら掘削を行った。風化変質判定システムは、一般に岩石が風化すると赤や黄色に変色することを利用するもので、切羽写真の色調によって風化変質度を判定するものである。カメラ付きタブレットPCを利用することで、切羽で即時に風化変質度を解析して判定ができる（図-7）。

(2) 風化変質判定システムによる地山評価例

風化変質判定システムによる地山評価として、TD330～390m付近で適用した事例を図-8及び表-1に示す。図-8は、天端部の切羽評価点及び風化変質の判定結果として、切羽天端部に占める風化度の面積比を示した。また、表-1には典型的な切羽状況と風化変質の解析結果を示した（グラフに黒矢印で示した箇所）。

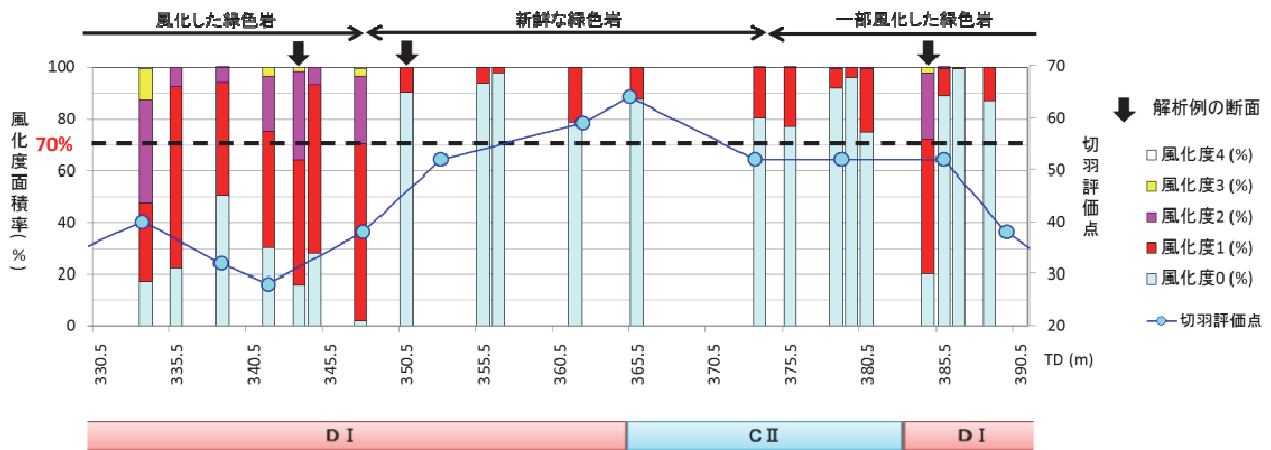


図-8 風化度の評価結果と切羽状況及び適用支保パターン (TD330～390m)

当該区間では、表-1に示すように風化程度の変化が著しく、それによって切羽状況、切羽評価点も変化した。

実施支保パターンは、当初D Iパターンを施工していた区間で18mだけC II_pパターンを施工したが、再び風化の程度が大きくなったため、D Iパターンに戻すこととなった。ここで、D IからC II_pへの変更は地質状況の良好な区間の連続性を見極めながら判断を行うため、切羽評価点や風化変質度の変化からやや遅れてC II_pへの変更となっている。その他、当区間で発破後の肌落ち状況や坑壁の自立状況と比較を行った結果、風化度0%（棒グラフの水色部分）の面積率が70%を超えると切羽は安定していることが分かったため、C II_pパターンへの変更の目安として利用することができた。

5. おわりに

本報文では、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。

装薬施工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、評価結果を穿孔完了とともにリアルタイムに切羽だけではなく現場事務所と共有することで、実際の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、切羽で撮影し、その場で定量的な評価が可能となる。さらに、切羽写真を撮影していれば全切羽を定量的に評価することが可能である。

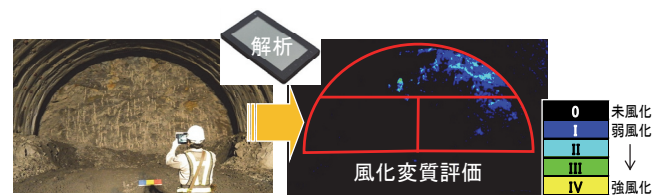


図-7 風化変質判定システムの概要

表-1 風化変質判定システムの解析結果

TD.	切羽写真	解析結果
343.5		
350.5		
384.5		
風化変質凡例 新鮮 → 変質		

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, 1-16, pp.1-9, 2015.11.
- 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, pp.217-221, 2016.
- 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ー切羽観察での適用例ー, 土木学会第69回年次学術講演会(平成26年9月), VI-043, pp.85-86, 2014.

(2016.8.5 受付)

DEVELOPMENT OF THE GEOLOGICAL CONDITION EVALUATION SYSTEM AROUND THE TUNNEL USING COMPUTER JUMBO AND IMAGE ANALYSIS

Yasuyuki MIYAJIMA, Suguru SHIRASAGI, Hayato TOBE, Takuji YAMAMOTO
Takaaki INUZUKA and Tomoaki MATUSHITA

In tunnel excavation construction, the geological troubles such as excessive large displacements or face collapse in the poor geological condition brings a big influence to security and a process delay. Therefore, face front exploration and face evaluation technique, the development of various techniques is pushed forward. The writers utilize for the development of the technique to evaluate geological condition in real time while in late years utilizing the computer jumbo, and using the image analysis technology. 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.