

# ICT を活用した山岳トンネルの地質評価技術（スマート切羽ウォッチャー）の開発

## ICT for Geological Evaluation on Rock Tunnelling - Smart Face Watcher -

白 鷺 卓 戸 邊 勇 人 福 島 大 介  
宮 嶋 保 幸 西 澤 勇 祐

### 要 約

山岳トンネルの掘削では、予期せぬ断層の出現など急激な地質変化に起因する大変状や切羽崩落事故が根絶されていない。一方、近年ではコンピュータジャンボやスマートデバイスを利用した ICT 技術によってトンネル切羽周辺の詳細な地山状況の把握が可能となり、肌落ちや変状による災害防止への寄与が期待されている。スマート切羽ウォッチャーは、コンピュータジャンボの穿孔データを利用した 3 次元リアルタイム地質予測システム、切羽写真の画像解析による切羽剥落危険度評価システム、これらの評価結果を関係者とリアルタイムに共有するシステムからなる。3 次元リアルタイム地質予測システムはコンピュータジャンボを導入する全現場に、切羽剥落危険度評価システムは全現場に導入されており、地質に起因する事故の防止に活用されている。また、蓄積されるデータは剥落危険度評価精度を向上させるための分析に活用されている。

### 目 次

- I. はじめに
- II. スマート切羽ウォッチャーの概要
- III. 3次元リアルタイム地質予測システム
- IV. 切羽剥落危険度評価システム
- V. おわりに

#### I. はじめに

山岳トンネルの掘削では、予期せぬ断層の出現など急激な地質変化に起因する大変状や切羽崩落事故が根絶されていない。前方探査を行ったり、経験的かつ定性的な切羽観察や切羽点検により地山の状況や変化を評価しながら、補助工法や鏡吹付けコンクリートなどの対策を実施することで、トンネル工事の安全性は向上しているが、工事災害ゼロには至っていないのが現状である。一方、近年ではコンピュータジャンボやスマートデバイスを利用した ICT 技術によってトンネル切羽周辺数 m の詳細な地山状況の把握が可能となり、肌落ちや変状による災害防止への寄与が期待されている。開発したスマート切羽ウォッチャーは、全切羽で最適な対策を実施して切羽の崩落事故を防止することを目的として、近年の発達が著しい ICT 技術を活用し、定量的かつ高精度な地山状況を切羽でリアルタイムに評価、確認できるシステムである。

#### II. スマート切羽ウォッチャーの概要

スマート切羽ウォッチャーは、コンピュータジャンボによる施工時の穿孔データを利用した 3 次元リアルタイム地質予測システムと切羽写真の画像解析による切羽剥落危険度評価システム、これらのシステムによる地山の評価結果を、ネットワークを通じ現場事務所や本社とリアルタイムに共有するシステムからなる (Fig.1)。

#### III. 3次元リアルタイム地質予測システム

##### 1. コンピュータジャンボの基本的な機能

近年、トンネル掘削にコンピュータジャンボの導入が進められている。コンピュータジャンボは、事前に計画した穿孔パターンに応じて発破孔を正確な位置、角度、深さで穿孔するものであり、掘削作業の効率化に有効である。また、発破孔やロックボルトの穿孔作業と同時に穿孔データを自動的に収集する機能を有している。取得したデータは即座に詰所の PC に転送され、Fig.2 に示すような出力図によって、地山の硬軟を破壊エネルギー係数の分布として確認することができる。今回、これらのデータを利用して切羽周辺数 m の地質状況を 3 次元的に予測するシステムを開発した。

##### 2. クリギング（地球統計学）を利用した地山予測評価

コンピュータジャンボにより取得した穿孔データは、Fig.2

**キーワード:** 山岳トンネル, 肌落ち, コンピュータジャンボ, ICT, 地球統計学, 画像解析

**Keywords:** rock tunnelling, rock falling, auto-controlled face drilling rigs, ICT, geostatistics, image analysis



Fig.1 スマート切羽ウォッチャーの概要  
(Schema of Smart Face Watcher)

に示すようにサイクル毎に図化し、地山状況を知ることができるが、切羽の安定性や支保パターンの選定を適切に行うためには、地質の変化や分布状況を連続的に評価することが必要である。そのため、サイクル毎に取得するコンピュータジャンボからの穿孔データを自動的に統合して連続的な破壊エネルギー係数分布図を出力する機能を開発するとともに、統合した穿孔データをクリギングという地球統計学的処

理をすることで、3次元的な地質分布を予測評価し、任意の位置の地質平面図や縦断面図、断面図を出力する3次元リアルタイム地質予測システムを開発した。クリギングでは、パリオグラムという空間的な特徴量を適切に設定することで、切羽前方5mまでの地質状況を精度良く予測できることを確認している。

解析は詰所のパソコンでデータ取得から1分程度で完了し、坑内のネットワーク回線を通じて、切羽で即時に確認できるため、支保パターンの選定や補助工法の要否判定などに利用が可能である。Fig.3に、補助工法としてAGF工法を適用した箇所における穿孔データを統合した破壊エネルギー係数の3次元分布図とクリギングによる地質分布の解析結果を示す<sup>1)</sup>。

### 3. 適用事例

今回開発した3次元リアルタイム地質予測システムを利用して、補助工法を詳細に決定した事例をFig.4に示す。当該箇所は、粘板岩区間において広く破砕帯が分布しており、長尺先受け工と長尺鏡ボルトを連続的に5シフト施工してきている箇所である。

Fig.4の写真は、5シフト目の補助工法を施工後、1m掘削

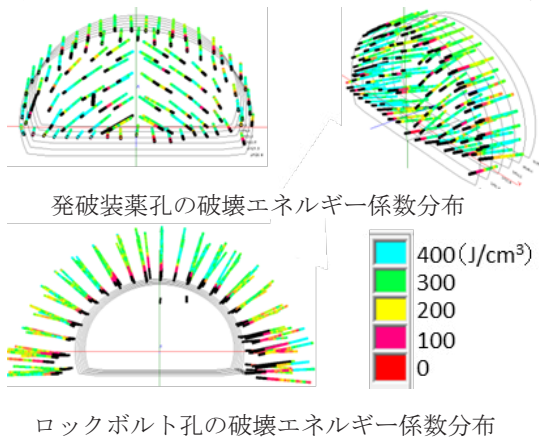
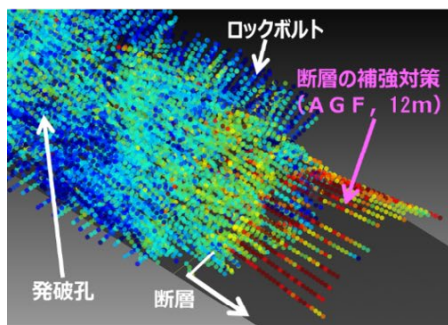
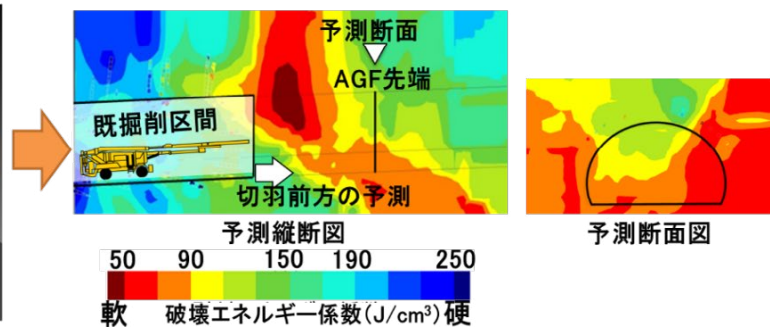


Fig.2 穿孔データの出力例  
(Example of Output of Drilling Energy)



穿孔データ (破壊エネルギー係数) の  
3次元分布図

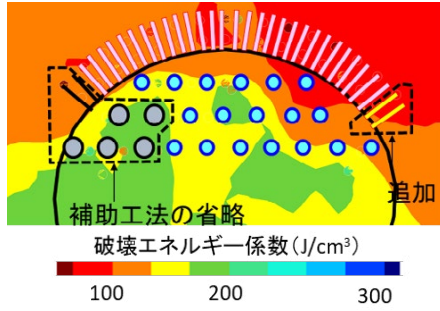


クリギング解析結果

Fig.3 断層部における切羽前方地山予測 (AGF 適用区間)  
(Geological Evaluation Results at a Fault Zone Where Forepoling were Applied Later)



破碎帯部で左側から比較的安定してきている  
(5シフト施工切羽から1m前方の切羽)



切羽前方の地質状況と補助工法の決定  
(例：5シフト施工切羽から6m前方の予測断面図)

Fig.4 切羽前方地山予測に基づく補助工法の決定  
(Decision on Auxiliary Measures Based on Geological Evaluation)

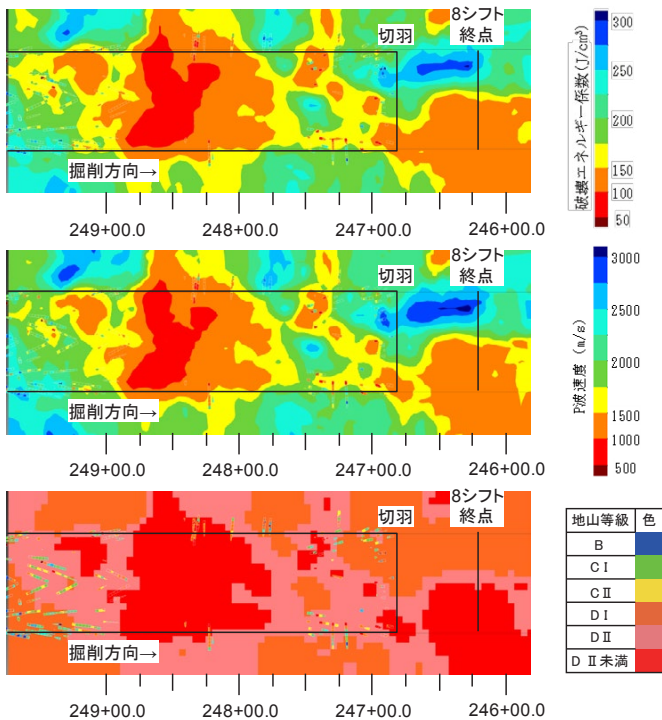


Fig.5 穿孔データ、P波速度及び地山等級の予測結果  
(SL平面図)

(Geological Evaluation Results at a Fault Zone in Plan View)

が進捗した切羽である。切羽中央部から右側には依然として非常に脆弱な鏡肌が見られたが、左側から比較的安定した岩盤が出現しており、この後、掘削に伴って良好な地質が連続

するならば、部分的に補助工法を省略できると思われた。

そこで、3次元リアルタイム地質予測システムを利用して、Fig.4に示すような前方の地質状況を確認した。その結果、前方に良好な地質が出現することが分かったため、安全かつ合理的に補助工法の省略の判断を行うことができた<sup>2)</sup>。

#### 4. P波速度及び地山等級評価

筆者らはこれまでに前方探査として多くの実績のある削孔検層によって得られる切羽前方の破壊エネルギー係数と岩盤のP波速度との相関についてデータベースを蓄積しているため、これによるP波速度分布への変換機能を当システムに備えた。さらに、道路トンネルの設計段階で利用されているP波速度と地山等級の関連を利用し、地山等級分布として表示することも可能である。Fig.5は、破碎帯を伴い、長尺先受け工などの補助工法を適用した粘板岩区間における評価結果を示している。ここでは、実施工でもDIIパターンが適用されており、予測結果は妥当であると考えられる。

### IV. 切羽剥落危険度評価システム

#### 1. 風化変質と割れ目の定量化によるカテゴリ評価

トンネルの掘削作業では、切羽の肌落ち災害が大きくなりリスクとなっている。このような災害を防止するため、鏡吹付けコンクリートなどの対策が取られているが、地山状況に応じた対策工の選定は、ベテランのトンネル技術者や地質技術者の技能を必要とするため、容易ではない。

そこで切羽写真を画像解析することで、切羽からの岩塊の剥落に関連性が高いと考えられる風化変質と割れ目の分布状況を定量化し、これらの結果から剥落の危険度を定量化する切羽剥落危険度評価システムを開発した。

##### (1) 風化変質の定量化評価

切羽からの岩塊の剥落は、未風化部分より風化の進行した部分で発生しやすい。岩盤が風化すると、粘土鉱物の生成や金属イオンの溶脱及び酸化物の生成によって色調が変化する点に着目し、切羽写真データから色調によって風化変質の程度や面積を定量化する手法を開発した。

Fig.6は、同じ露頭から採取した風化度の異なる粘板岩を分光測色計で測定した結果である。ここで示すように、風化の程度はa\*及びb\*を指標にすることで、風化の程度を評価できることが分かる。一方、分光測色計は、机上で数cm四方の範囲を測定する測定器であるため、切羽を対象として色調を測定するには適していない。そのため、本システムではデジタルカメラで撮影した画像データの画素から色調を算出し、色調に応じて、風化度を定量化する手法を開発した(Fig.7)。

##### (2) 割れ目の定量化評価

切羽からの岩塊の剥落は、力学的な弱面となる割れ目に沿って発生しやすい。特に割れ目が交差する程度が重要であ

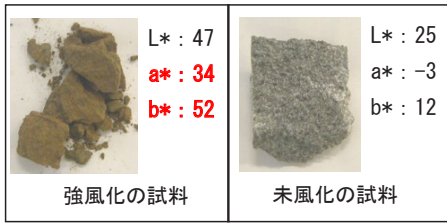


Fig.6 分光測色計による試料の色調分析  
(Color Analysis by Spectrophotometric Colorimeter)

Table 1 風化と割れ目のグレード  
(Grade of Weathering and Fracturing)

風化性状	風化領域の面積率	偏り	割目性状	割目交差集中領域の面積率	偏り
W1	60%以上	---	C1	40%以上	---
W2	10~60%	あり	C2	10~40%	あり
W3		なし	C3		なし
W4	10%以下	---	C4	10%以下	---

Table 2 カテゴリ別の剥落発生確率  
(Rock Falling Probability by Category Classification)

		割目性状 Cross			
		悪 ← C1	C2	C3	良 → C4
風化性状 Weathering	悪 ↑ W1	100%	82%	79%	82%
	W2	100%	77%	39%	56%
	W3	100%	83%	53%	57%
	良 ↓ W4	100%	50%	47%	0%

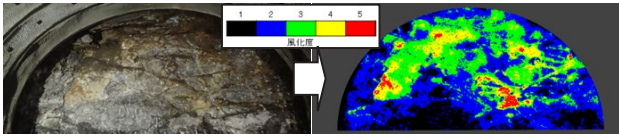


Fig.7 風化変質判定の例  
(Example of Weathering Evaluation)

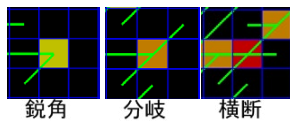
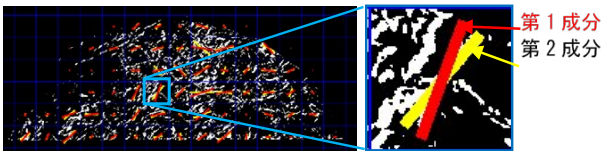


Fig.8 割れ目の交差箇所の検出方法  
(Method to Detect Fracture Intersection Point)

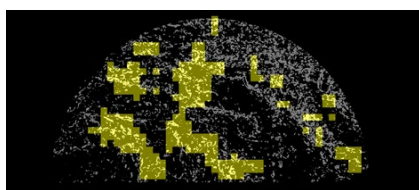


Fig.9 割れ目の交差密度の分布図 (黄色が集中域)  
(Distribution of Fracture Intersection Density)

ると考えられる。そこで、切羽写真データから、割れ目を輝度の変化箇所として抽出し、さらに切羽をメッシュに分割し、メッシュ内の主要な卓越方向を2成分まで検出し、隣接するメッシュで卓越方向を比較することで、割れ目の交差する程度を定量評価する手法を開発した<sup>3)</sup>。Fig.8に割れ目の交差箇所の検出方法を示し、Fig.9に割れ目交差密度の集中域の分布図を示す。

(3) 剥落危険度の定量評価

切羽写真の画像解析から得られる風化変質と割れ目の評

価結果を Table 1 に示すように、それぞれ4つのグレードに分類した。ここで、風化、割れ目ともに、グレード1が最も剥落が発生しやすく、グレード4は安定側である。

筆者らは、掘削中のトンネルから307切羽のデータを収集し、全ての切羽について風化変質と割れ目を Table 1 に基づいて評価し、Table 2 の16のカテゴリに分類した。切羽の剥落情報は、発破孔穿孔後の切羽状況から判断し、それぞれのカテゴリで剥落が発生した切羽数を整理した。それをもとに剥落確率を Table 2 のように整理した。その結果、Table 2 に示す領域①の風化や割れ目が著しい範囲で剥落の発生確率が高く、領域③の風化と割れ目の発達が見られない範囲では剥落の発生は見られなかった。また、その中間程度の領域②では、中程度の剥落発生確率となった。

今回開発した切羽剥落危険度評価システムは、切羽写真を画像解析する部分と画像解析結果から Table 2 のカテゴリ表を参照し、切羽の剥落危険度を定量評価する部分から構成されている (Fig.10)。

現場では、スマートフォンで切羽を撮影して解析開始のボタンをタッチすれば解析が開始され、約10秒後には手元のスマートフォンに危険度評価結果が表示されるので、適切な鏡吹付けコンクリートの施工ができるようになり、切羽の安全作業に貢献することが期待できる。

2. マルチモーダル深層学習による剥落危険度評価の試行

切羽の剥落危険度は、Table 2 に示すカテゴリ表により、剥落発生確率が高い順に領域①~③に大きく分けられたが、マトリックス内を詳細に見ると、風化性状や割目性状と剥落発生確率が必ずしも正比例しない。これは風化性状や割目性状

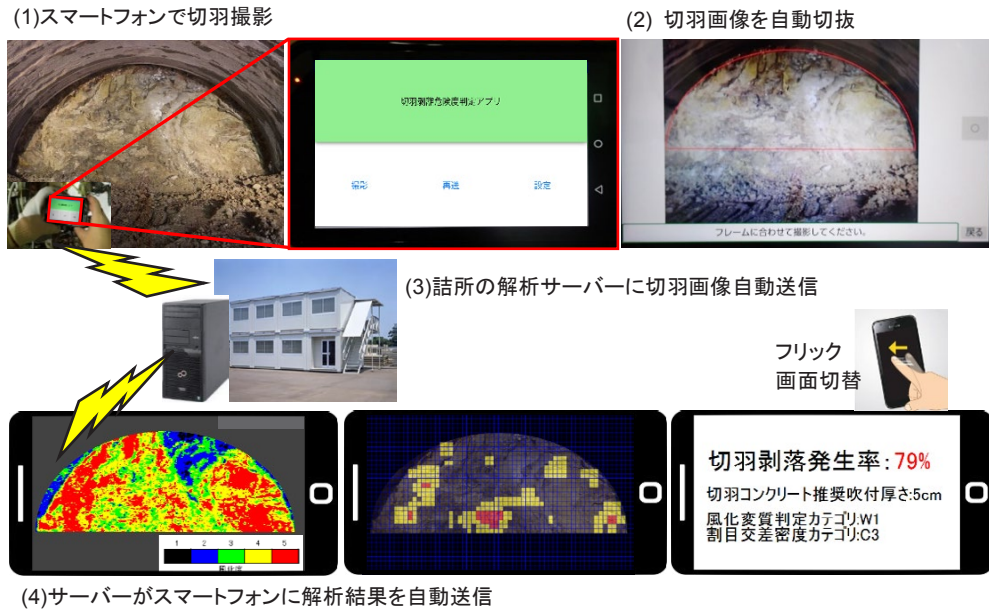


Fig.10 切羽剥落危険度評価システムの概要  
(Schema of Rock Falling Evaluation System)

以外の要素が剥落発生に関与しているためと考えられる。そこで、切羽剥落危険度評価システムで定量化（数値化）できる風化変質度と割れ目交差密度以外の剥落発生に関与する要素を含むと仮定できる切羽画像そのものを入力値とすることで、剥落発生有無の判別精度が向上するか否かを確認することにした。

最近提案されているマルチモーダル深層学習は、複数種類のデータ（数値データと画像データなどの異なる種類のデータ）を統合して学習することで判別精度の向上を図ることができるものである。

ここでは、ある1現場の切羽画像（写真）と、風化変質及び割れ目交差密度のデータ（数値及び画像）に対し、この手法を用いることで予測精度の向上が期待できると考え試行した。

(1) モデル作成

入力データの組合せによる精度比較のため、Fig.11のような4パターンのモデルを作成した。切羽画像、風化変質度及び割れ目交差密度の分布画像の入力は300×300ピクセルでRGBの3チャンネルとした。これらの特徴抽出には事前学習済みのResNet-50（ImageNetデータベース<sup>4</sup>）の100万枚を超えるイメージで学習済みの畳み込みニューラルネットワークを使用し、出力は2048次元の特徴ベクトルとなるようにした。風化変質度及び割れ目交差密度の数値はそれ自身が特徴量であるためそのまま使用した。特徴合成部では得られた特徴量を一つのベクトルに連結し、学習データ全体で平均0、分散1となるように正規化したほか、ベクトルのノルムが1になるように標準化した。判別部では3層の全結合ニューラルネットワーク（FC）により剥落の有無を判別した。

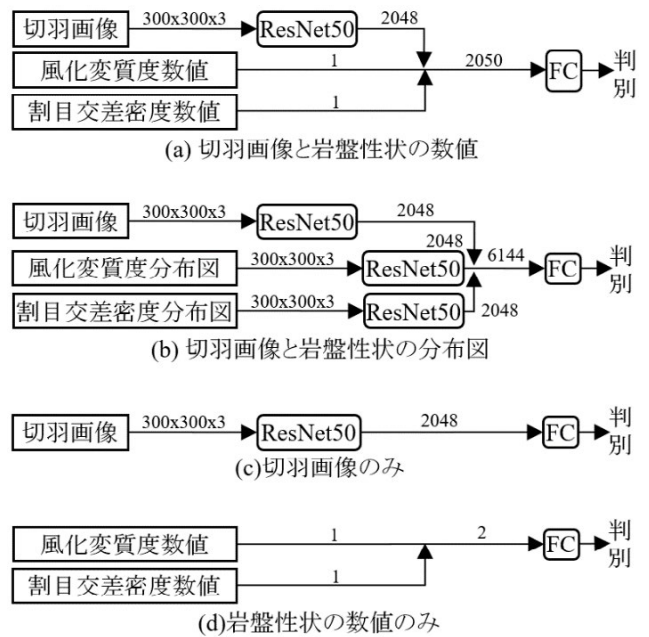


Fig.11 4パターンのモデル構成  
(Schema of Models for 4 Patterns)

(2) 解析結果

データセットを4分割してクロスバリデーションを行った。クロスバリデーションでは4分割したデータセットのうち、3つを学習用データ、1つを検証用データとして取り扱い、各回で学習用、検証用のデータセットを変更して正解率を算出した。得られた平均正解率をTable 3に示す。切羽画像と風化変質度及び割れ目交差密度の数値を入力としたモデル(a)がもっとも高い値を示したが、これより、数値として明示的に与えた風化変質度及び割れ目交差密度以外に、切

Table 3 各パターンの平均正解率  
(Average Accuracy Rate of Each Model)

入力	平均正解率 (%)
(a) 切羽画像と岩盤性状の数値	98.5
(b) 切羽画像と岩盤性状の分布図	92.5
(c) 切羽画像のみ	95.5
(d) 岩盤性状の数値のみ	94.8

羽画像から剥落に関与する別の特徴を抽出していると考えられる。

実施したすべてのパターンで平均正解率が 90%を上回ったことについては、使用するデータを特定の現場で剥落の有無がわかりやすいものに限定したため、判別が比較的容易であったためと思われる。

一方で、モデルの汎化性能を確認するために、各パターンにおいてクロスバリデーションで作成された各モデルの中で最も高い正解率を示したモデルを用いて他現場のデータを判別したところ、正解率は 80%以下に減少する場面があることを確認している。つまり、現場（地質）に応じた最適なモデルが存在すると考えられ、多様なデータの取得が引き続き必要であると言える。

## V. おわりに

トンネル掘削における切羽事故の防止を目的として開発したスマート切羽ウォッチャーを紹介した。3次元リアルタ

イム地質予測システムはコンピュータジャンボを導入している全現場に、切羽剥落危険度評価システムは全ての現場に導入され、切羽の安全を確保するため活用されている。また、ネットワークを利用することで、本社などの拠点とも切羽の状況を共有し、全社的な先手管理を進めている。

今後、導入した全現場から多様なデータを蓄積し、さらなる精度向上に向けて検討、分析を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 宮嶋保幸, 岩野圭太, 白鷺卓, 犬塚隆明, 川野広道, 栗山和之, 池田廉, 井上勇太; 山岳トンネルのコンピュータジャンボの穿孔データに基づく情報化施工—国道 106 号 宮古盛岡横断道路 新区界トンネル工事—, 土木建設技術発表会 2017 概要集, 2017, pp.153-159.
- 2) 白鷺卓, 宮嶋保幸, 山本拓治, 西川幸一, 福田博之; トンネルの施工穿孔データを利用したオンタイム切羽評価と前方予測, トンネル工学報告集, 第 27 巻, I-19, 2017, pp.1-5.
- 3) 戸邊勇人, 宮嶋保幸, 白鷺卓, 山本拓治; 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, 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2019, pp.81-86.
- 4) ImageNet. <http://www.image-net.org>

## ICT for Geological Evaluation on Rock Tunneling – Smart Face Watcher –

*Suguru Shirasagi, Hayato Tobe, Daisuke Fukushima,  
Yasuyuki Miyajima and Yusuke Nishizawa*

For rock tunneling projects, it is difficult to predict the geological conditions in an excavation cycle, which often causes serious accidents such as face collapse. Furthermore, only observation of the face allows the geological conditions to be confirmed directly during tunnel excavation; it is difficult to completely grasp the conditions without observing the face conditions, causing the risk of a rock-fall disaster. To prevent such geological problems, we developed a system, Smart Face Watcher, that evaluates and visualizes the geological conditions in real time on site. This system consists of two analysis methods: a 3D real-time geology forecasting system by drilling data, and a rock-fall risk assessment system by image analysis. The system makes it possible to choose an appropriate auxiliary method depending on the geological conditions in front of the face and around the tunnel and to quickly determine the face shotcrete thickness based on the risk of rock-fall from the face. In addition, by using a cloud server, it is possible to share ground evaluation results in real time with the headquarters, which enables geologists to support sites nationwide.