

# AIを活用した山岳トンネル地山評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金  
研究期間：令3～令5  
担当チーム：トンネルチーム  
研究担当者：日下敦、菊地浩貴、  
佐々木亨

## 【要旨】

山岳トンネルでは、事前の調査で周辺地山の挙動等を正確に評価することは困難であり、施工時の切羽観察や計測結果を評価し、掘削方法や支保パターン等を適切なものに修正する必要がある。これらの評価は定量的根拠をもとに行うのが理想であるが、技術者の知見や経験等の主観的要因が介在し、技術者によって判断が異なる等の課題も生じている。AI等を活用する試みもみられるが、教師データ自体に主観を含むといった課題も指摘されている。本研究では、可能な限り客観的な施工時情報をもとに、過大変位やトラブル事象等のリスクを事前に予測するために有効な指標等の検討や、画像解析技術等の活用に向けた切羽写真の撮影条件等の検討を行った。

キーワード：山岳トンネル、切羽観察、地山評価、AI、切羽写真

## 1. はじめに

近年、山岳トンネルは都市部への適用事例の増加や不良地山、大量湧水帯の掘削など難しい条件での適用事例が増加しており、今後益々高い地質・地盤リスクの下で施工が求められる。このような高い地質・地盤リスク下では、地山等の不確実性を考慮したうえで定量的根拠をもって地山評価を行い、支保工や補助工法等の適否を決めることが、構造安定性や施工の安全性上、重要であるが、現在の地山評価は現場技術者の知見や経験等、主観的要素に依るところが大きく、技術者により判断が異なるといった課題も散見されている。また、過去の施工時に得られたデータや知見については、他の現場で共有するには限界があり、類似工事に効率的にフィードバックできていないのが現状である。これに対して、近年、AIや画像解析技術を用いて切羽を定量評価する試みを見られるが、教師データや入力データ自体に技術者の主観が含まれていることや、データの統一性の確保が難しいなど、データの品質上の課題も指摘されている。このような状況下では、地山の見誤りや不合理な設計・施工によるコスト増加、場合によっては重大な事故や維持管理段階での不具合に繋がる可能性が懸念される。このようなことから、現在まで蓄積してきた設計時・施工時の情報を有効に活用し、経験的指標を用いた地山評価手法から、客観的な情報から得られる合理的な指標を用いた評価手法へシフトを図り、技術者の技量にかかわらず最適な施工を行える体系づくりが必要であると考えられる。

本研究では、主観的判断の影響を軽減した地山評価支援システムの開発に向けた基礎検討として、施工時に得られるデータから主観性を排除した可能な限り客観的なデータをもとに、過大変位やトラブル事象のリスクを事前に予測するために有効と考えられる指標等の検討を行った。また、AIや画像解析技術の活用にあたって、切羽写真に求められると考えられる撮影条件等について検討を行った。

## 2. 客観的なデータを用いた地山評価指標の検討

### 2.1 地山評価の流れについて

山岳トンネル施工時の地山評価の流れを再整理するとともに、近年、AI等を活用した地山評価がどこに位置するのかを整理した。山岳トンネル施工時の地山評価の流れを模式的に表したものを図-1に示す。山岳ト

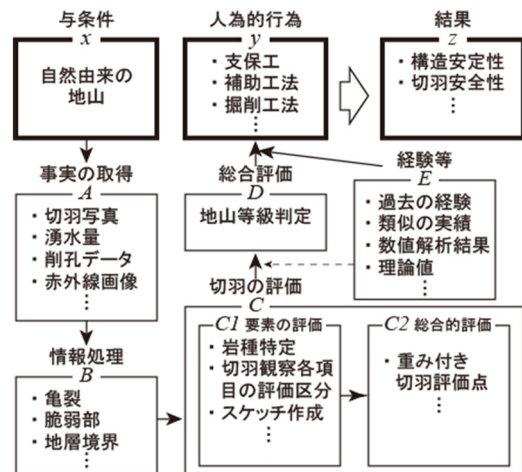


図-1 山岳トンネルにおける地山評価の流れ<sup>2)</sup>

ンネルにおいては、自然由来の地山 (x) に対し、技術者がその地山の状況を見極めて、最終的にトンネルの構造安定性や切羽安定性 (z) が得られるように、掘削工法や支保工の選定等の人為的行為 (y) を行うことが一般的である。トンネル施工時の切羽において地山の状態を見極めるためには、通常、切羽写真や湧水量、削孔データ等の事実を取得し (A)、それらの事実から情報処理を行い必要な情報を抽出する (B)。抽出された各要素を、切羽観察記録簿 (図-2) を用いて評価・記録し (C1)、それらの結果から統計的手法等を活用することで切羽としての評価を行う (C2)。切羽評価結果をもとに総合的に地山等級を判定する (D) という過程を経ることが多い。さらに、最終的には過去の経験等 (E) も考慮して支保工や補助工法等の仕様を決定する。

上記をふまえると、山岳トンネル施工時の地山評価は次式の関数で表現されると考えられる<sup>4)</sup>。

$$z = f(x, y) \quad (1)$$

ここに、

- x : 自然由来の地山の特徴を表すパラメータ。与条件として不変の条件
- y : 掘削方法や支保工、補助工法等の人為的行為に関する特徴を表すパラメータを示し、任意に変更が可能
- z : 構造安定性や切羽安全性等を表すパラメータを示す。切羽崩落の有無、支保工の変位や変状、供用開始後の覆工の変状等が含まれる

## 2.2 地山評価指標の検討

### 2.2.1 施工時データを用いた分析の概要

現在実施されている地山評価では、図-1におけるCを統計的に処理した結果から地山等級を判定(D)し、支保工や補助工法の適否を判断する(y)場合が多い。この統計処理においては、 $D = g(C)$ の関数を用いているといえる。ただし、Cは技術者の知見や経験をもとにした主観的判断を一定以上含んでいること、Dについても、切羽評価結果と地山等級の関係は過去の施工実績等をもとに統計的に算出されたものであり、主観的判断が含まれるとともに、妥当性が十分に精査されていないデータも含まれる場合もある。このことから、最終的な支保工や補助工法等の選定の判断には、類似の施工実績や数値解析結果等(E)も重視される。また、近年の地山評価に関するAIの活用事例<sup>(例えば5), 6)</sup>では、 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 、 $A \rightarrow C$ 、 $A \rightarrow D$  (場合によっては、 $A \rightarrow y$ ) などのプロセスの自動化を試みるものが多い。しかし、同様に教師データとして活用する切羽評価結果や地山評価結果の算出根拠となっている切羽観察結果 (C1)

に主観的判断が含まれるため、質の高い教師データを多量に確保することに課題が残る。

ここでは、最終的な判断 (y) は技術者が行うことを前提に、技術者の判断の一材料としてなるべく客観的な情報にもとづく評価指標の検討を行った。具体的には与条件 x として、本来であれば図-1のAを入力することが最も客観性に優れると考えられるが、統一的なデータが極めて限られているため、ここでは重み付き切羽評価点<sup>7)</sup> (C2) を用いることとした。重み付き切羽評価点は、既往の施工実績から統計的に算出された各観察項目の重み係数を考慮して算出することから、主観的判断が一定程度含まれるものの、統一的な傾向が反映された指標であると考えられる。人為的行為 y としては、適用した支保パターンと補助工法の有無、結果 z としては、最終変位量、支保工変状、切羽崩壊の有無を用いた。すなわち、 $z = f(C2, y)$  の関係式で類似実績 (E) における計測結果の出力を試みた。出力されるデータは、実現場では過去の経験 (E) 相当として活用することで、技術者の判断を補助することを想定する。

### 2.2.2 分析方法

国土省が NATM で施工した道路トンネルのうち、9項目4段階の切羽観察記録簿 (図-2) および同一の重み係数が使用された約 1.4 万断面を分析対象とした。図-3 に支保パターン別に数量を整理したグラフを示す。なお、DIII 等の特殊な支保パターンは除いた。

土 被 り	m 総合判断				地山区分あるいはパターン区分の判定
岩 種	a. b. c. d. e	岩 質 石 名 代			
特 殊 条 件 状	膨圧・偏圧・流動性・土被り小 ( ) m・重要構造物近接・谷の直下 (その他)				
掘削地点の地山の状態と挙動					
A 切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押し出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩れあるいは流出	5. その他
B 素掘面の状態	1. 自立 (管涌不要)	2. 時間がたつと崩れ肌落ちする (後普請)	3. 自立困難、掘削後早期に支保する (先普請)	4. 掘削に先行して山を受けておく必要がある	5. その他
C 圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 100 \text{ N/mm}^2$ はね返る	2. $100 > \sigma_c \geq 20$ ハンマー打撃でくだける	3. $20 > \sigma_c \geq 5$ 軽い打撃でくだける	4. $5 > \sigma_c$ ハンマー打撃先食いこむ	5. その他
D 風化変質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色、強度やや低下	3. 全体に変色、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結	5. その他
E 割れ目の開隔	1. 開隔 $d \geq 1 \text{ m}$ 割れ目なし	2. $1 \text{ m} > d \geq 20 \text{ cm}$	3. $20 \text{ cm} > d \geq 5 \text{ cm}$	4. $5 \text{ cm} > d$ 破砕、当初より未固結	5. その他
F 割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土をはきむ、当初より未固結	5. その他
G 割れ目の形態	1. ランダム	2. 柱状	3. 層状、片状、板状	4. 土砂状、細片状、当初より未固結	5. その他
H 湧水量	1. なし、湧水程度	2. 湧水程度	3. 集中湧水	4. 全面湧水	5. その他
I 水による劣化	1. なし	2. ゆるみを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出	5. その他
掘削面の方向 (切羽をみて) のなる方向と向成し性 (概大傾斜角をとる)	縦断面 1. 水平 ( $10^\circ > \theta > 0^\circ$ ) 2. さし目 ( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 3. さし目 ( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 4. 流れ目 ( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 5. 流れ目 ( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 6. 垂直 ( $\theta \approx 80^\circ$ ) 横断面 1. 水平 ( $10^\circ > \theta > 0^\circ$ ) 2. 右から左へ ( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 3. 右から左へ ( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 4. 左から右へ ( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 5. 左から右へ ( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 6. 垂直 ( $\theta \approx 80^\circ$ ) (切羽をみて) (切羽面のみかけの傾斜角をとる)				
記事					

図-2 切羽観察記録簿の一例<sup>3)</sup>

### (1) 将来変位推定に関する分析

過去の施工実績から、重み付き切羽評価点と実施支保パターン、変位量の関係を整理した。分析は、鏡吹き及び核残し除く補助工法が採用された断面を除く、約1万断面を対象とした。岩質別に、一定の重み付き切羽評価点の範囲を対象に、実施支保パターンの違いによる変位の発生傾向を算出することで、特に重み付き切羽評価点から支保パターンが1つに定まらないラップ区間等での支保パターン選定の一助として活用可能か検討した。

### (2) 補助工法の必要性の有無の推定に関する分析

ここでは、補助工法のうち先受工の有無と切羽崩落の頻度の関係を整理した。分析は、図-3の全断面を対象とした。岩質別に、一定の重み付き切羽評価点の範囲を対象に、先受工の有無と切羽崩落の有無の関連、切羽観察の各項目の評価結果を整理することで、切羽崩落に対して先受工の必要性の判断の一助となる指標を検討した。

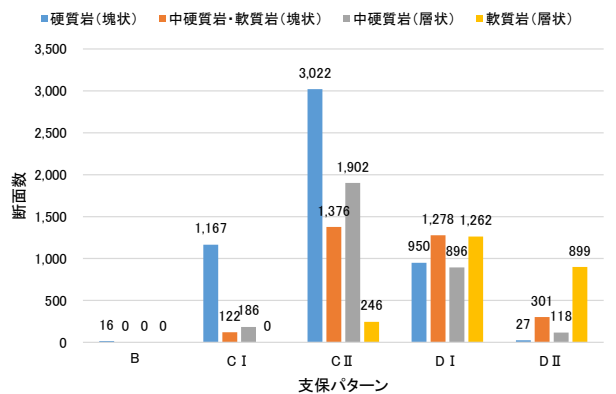


図-3 対象断面数量

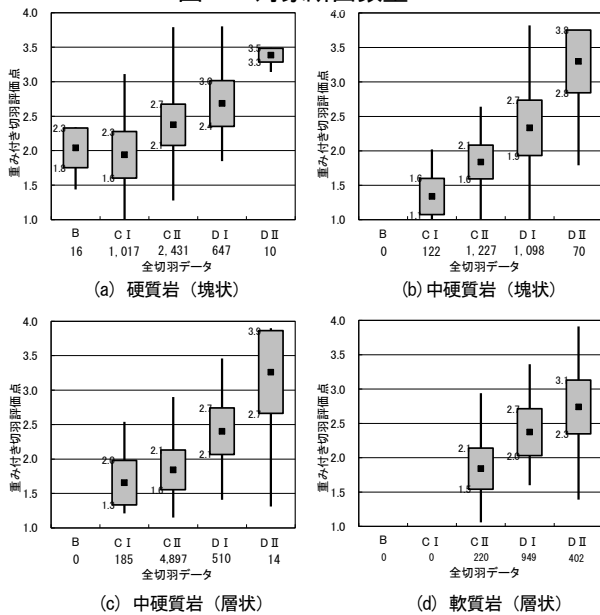


図-4 重み付き切羽評価点と支保パターンの関係

### 2.2.3 将来変位推定に関する分析結果

分析対象断面について、重み付き切羽評価点と実施支保パターンの関係を表した箱ひげ図を図-4に示す。箱ひげ図は、中央のプロットが平均値、箱部分の上下端が平均値±標準偏差、直線部の上下端が最大・最小値を示している。

比較的ラップ区間が大きく、また発生変位量が大きく構造安定性状のリスクが高いと考えられる層状の岩質を対象とした分析結果の一例を示す。与条件(x)として、図-4の(d)軟質岩(層状)の断面における重み付き切羽評価点2.0~2.5、2.5~3.0の範囲を与え、人為的行動(y)として、支保パターンCII、DI、DIIを適用した場合の最終発生変位量のヒストグラム(z)を図-5に示す。同等の重み付き切羽評価点の範囲では、支保パターンが重いほど、最終変位量は小さいことが分かる。これは、算出された重み付き切羽評価点(C2)に対して、より剛性の高い支保パターンを採用(y)することで、最終変位(z)が抑制されることを意味する。重み付き切羽評価点から支保パターンが1つに定まらない場合等には、支保パターンに応じた変位量の実績を1つの目安として活用できると考えられる。

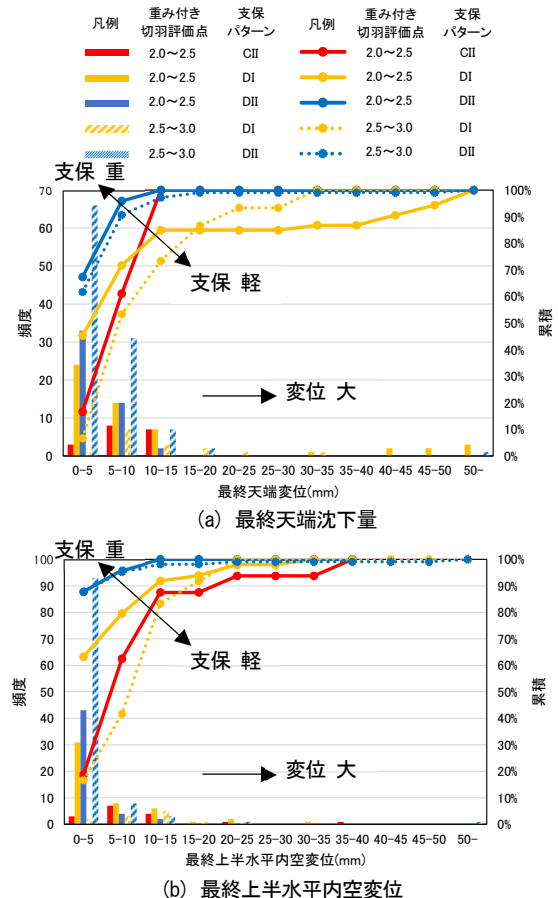


図-5 変位の発生傾向

## 2.2.4 補助工法の必要性の有無の推定に関する分析結果

分析対象断面について、支保パターン別に、補助工法として先受工の実施の有無と、施工時の切羽崩落の有無について整理した結果を図-6に示す。切羽崩落は、その規模によらず、切羽観察記録簿に記録があった断面数を計上した。切羽崩落は中硬質岩（層状）、軟質岩（層状）のDI程度の地山条件での発生が多いことが分かる。このことから、条件(x)として、中硬質岩（層状）および軟質岩（層状）にて、図-4をもとにDIに相当する重み付き切羽評価点の範囲を与え、先受工の有無(y)と切羽崩落の有無(z)の関係を整理した結果を表-1に示す。

表-1より、切羽崩落の記録がある断面は全体としては多くないものの、その内訳として、先受工が実施されている場合でも、一定数の切羽崩落が生じていることが分かる。特に「先受工なし・切羽崩落あり」に位置する断面は、切羽評価時に崩落のリスクを見誤った断面と解釈することもできる。適切にリスクに対処した過去の類似の施工実績として「先受工あり・切羽崩落なし」へ移行させることが重要であると考えられる。(a)と(b)に対して(c)と(d)は、重み付き切羽評価点が高い（地山が悪い）が、相対的に「先受工あり・切羽崩落なし」の割合が大きいことから、一定のリスクを踏まえた施工が行われていると考えられる。

これらを踏まえ、特にリスクが見逃される可能性の高い条件として、重み付き切羽評価点が高い断面を対象とし、比較的データ数の多い、中硬質岩（層状）、重

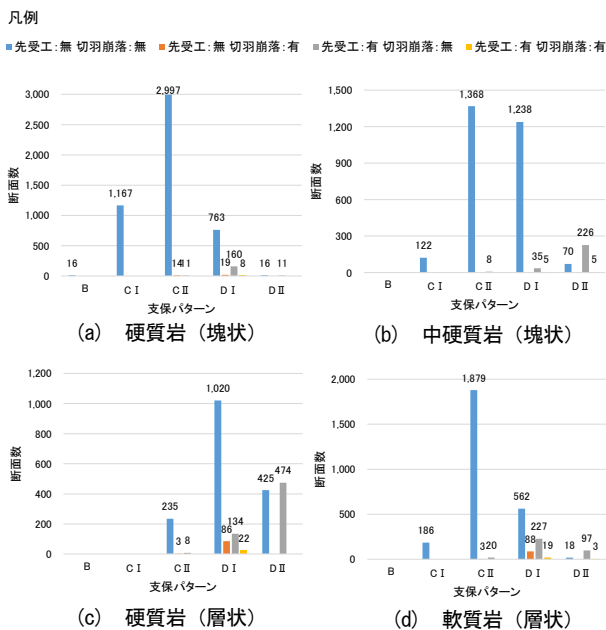


図-6 先受工の有無と切羽崩落の有無の数量

み付き切羽評価点 2.0~2.5 に着目し、切羽観察の各評価項目の評価区分の内訳を図-7に示す。図中の A~I

表-1 先受工の有無と切羽崩落の有無の数量

(a) 中硬質岩（層状）・切羽評価点 2.0~2.5

中硬質岩（層状） 重み付き切羽評価点2.0~2.5	切羽面崩落の有無		計	
	あり	なし	あり	なし
先受工の有無	2	0%	153	12%
	23	2%	1091	86%
計	25	2%	1244	98%
			1269	100%

(b) 軟質岩（層状）・切羽評価点 2.0~2.5

軟質岩（層状） 重み付き切羽評価点2.0~2.5	切羽面崩落の有無		計	
	あり	なし	あり	なし
先受工の有無	3	0%	178	18%
	38	4%	791	78%
計	41	4%	969	96%
			1010	100%

(c) 中硬質岩（層状）・切羽評価点 2.5~3.0

中硬質岩（層状） 重み付き切羽評価点2.5~3.0	切羽面崩落の有無		計	
	あり	なし	あり	なし
先受工の有無	14	6%	74	32%
	46	20%	99	42%
計	60	26%	173	74%
			233	100%

(d) 軟質岩（層状）・切羽評価点 2.5~3.0

軟質岩（層状） 重み付き切羽評価点2.5~3.0	切羽面崩落の有無		計	
	あり	なし	あり	なし
先受工の有無	1	0%	201	31%
	44	7%	405	62%
計	45	7%	606	93%
			651	100%

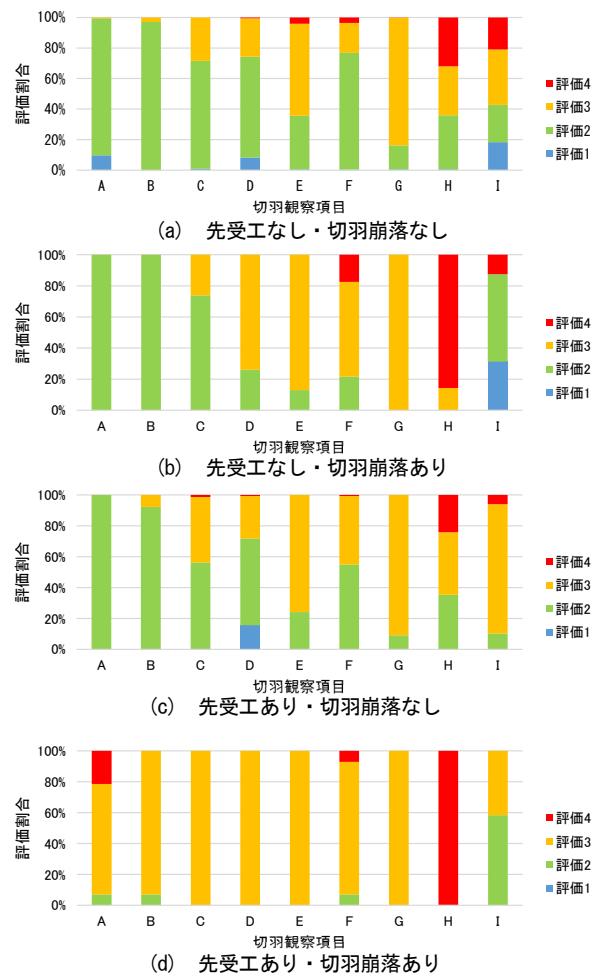


図-7 切羽観察項目の評価の内訳



いて、F 値別の解像度および黒つぶれの頻度を整理した結果を図-9 に示す。画像解析への活用には適さないと考えられる黒つぶれの画像の多くは F 値が 11 で撮影された画像であり、F 値 8 以下の画像には少ないことが分かる。次に、F 値が 8 より大きい画像を除いた 896 枚の切羽写真について、画素数ごとに解像度および黒つぶれの頻度を整理した結果を図-10 に示す。画素数 128 万画素のすべての画像が解像度 3 点以下であった一方で、300 万画素以上の画像では、解像度 4 点以上が過半数を占め、従前の写真評価式の基準を満たすものとなった。

以上から、新たな写真評価式（以下、「新写真評価式（案）」と称する。）を以下に示す。

$$\text{評価点①} = \frac{F \text{ 値}}{S \text{ 値} \times \text{ISO 感度}} \quad (1)$$

ただし、

- ・ 評価点①が 0.1~0.5 に収まる範囲に設定する
- ・ F 値の設定値は 8 以下とする

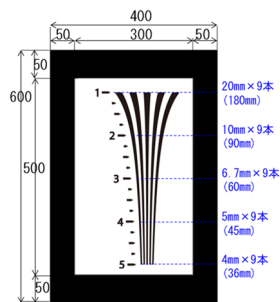


図-8 解像度チャート

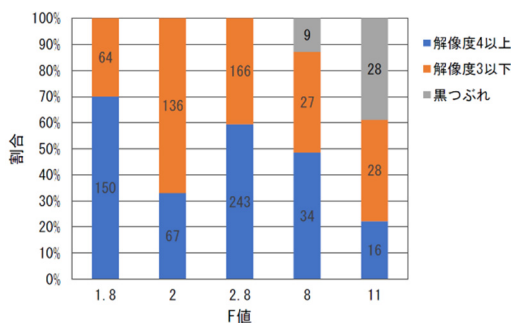


図-9 F 値別の解像度、黒つぶれの頻度

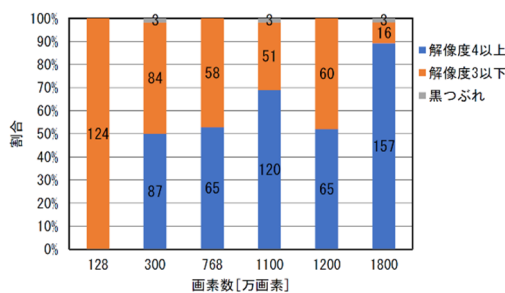


図-10 画素数別の解像度、黒つぶれの頻度

- ・ 画素数は 300 万画素以上とする。

### 3.3 色調に関する検討

#### 3.3.1 検討方法

ここでは、新写真評価式（案）の画像解析への適用性について色調の観点から検証した。色の数値化については、CIE L\*a\*b\*色空間<sup>10)</sup>（以下、L\*a\*b\*とする）が規格化され一般に用いられている。L\*は明度、a\*およびb\*は色相と彩度を示す色度を表し、a\*の+方向が赤、-方向が緑、b\*の+方向が黄色、-方向が青を示す。2つの色の違いを色差 $\Delta E^*$ として、次式により求めることができ、この値が小さいほど同色に近い色として人間の目に認識される。

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ はそれぞれ、比較する2つの色のL\*、a\*、b\*の差を示す。なお、色差が示す値について、許容色差の分類<sup>11)</sup>は表-3の通りであり、色差が20を超えると色名レベルの色の管理が適用される目安とされている。切羽写真の色調を検証するにあたり、切羽写真撮影時に画角に納まるよう切羽手前1mの位置に図-11に示すグレーチャートを設置し、色の基準とした。設置されたグレーチャートのL\*a\*b\*の測定値は、L\* : 48.79、a\* : 0.76、b\* : 0.39であった。次に、切羽写真に写ったグレーチャート部のL\*a\*b\*を画像編集ソフトで求め、実際のグレーチャートの測定値との色差により色調を検証した。すなわち、算出された色差が小さいほど目視に近い色調の写真が撮影できていると評価した。

表-3 許容色差の分類

色差の大きさ	名称	摘要
0.2以下	測色不可能領域	
0.3	識別色差	同一物体の測色再現精度
0.6	1級(厳格色差)	各種の誤差要因を考えた場合の実用的な許容差の限界
1.2	2級(実用色差a)	並べて判定した場合に、ほとんどの人が容易に色差を認めることができる
2.5	3級(実用色差b)	離間して判定した場合に、ほぼ同一と認めることができる
5.0	4級	経時比較した場合に、ほぼ同一と認める事ができる
10.0	5級	
20.0	6級	色名レベルの色の管理

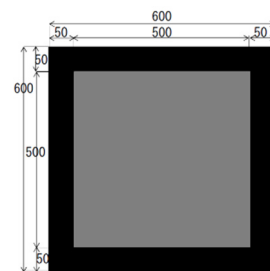


図-11 グレーチャート

### 3.3.2 検討結果

A トンネルの切羽写真を対象に算出した色差の分布を図-12の箱ひげ図に示す。箱の下端は第1四分位数、上端は第3四分位数、中央の線は中央値を示す。軸上の×印は平均値を示し、ひげの下端、上端はそれぞれ色差の最小値、最大値を示す。対象切羽写真全体の色差は3.0～51.2の幅広い範囲に分布しており、平均値は29.4であった。平均値は、「色名レベルの色の管理」が適用される20に比べて大きい値であるが、切羽付近は自然光が入らない特殊な環境であり、限られた光源をもとに撮影したことが、全体的に色差が大きくなった原因のひとつであると考えられる。新写真評価式(案)を満たす画像と満たさない画像の色差の平均値を比較すると、前者が25.3、後者が31.5であり、前者の画像の色差の平均が小さい結果であった。また、四分位範囲を比較すると、満たす画像は26.7(17.4～44.1)であるのに対し、満たさない画像は15.3(16.0～31.3)であり、前者はばらつきが小さく、色差が比較的小さい範囲に集中している。これらより、新写真評価式(案)を満たすことで、色調のばらつきが小さく、比較的目視に近い色調の写真が撮影できることが示唆された。これらの画像を用いることで、画像解析への適用性の向上が期待できる結果となった。

## 3.4 画像解析技術への適用性検証

### 3.4.1 検討方法

ここでは、新写真評価式(案)の画像解析技術への適用性を検証するため、筆者らが試作した「切羽写真トリミングシステム」および「類似切羽検索 AI」に、道路トンネル(以下、Bトンネルとする)施工時に取得した切羽写真を入力し、その出力結果と新写真評価式(案)との関係を分析した。なお、Bトンネルは中生代白亜紀の花崗斑岩または花崗閃緑岩を主体とする切羽であった。

対象とした切羽写真撮影時に用いたカメラと撮影時の設定値は表-4のとおりである。デジタルカメラ2機

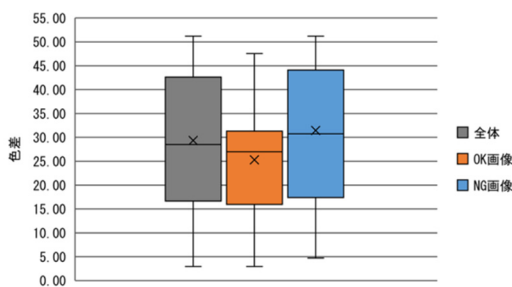


図-12 切羽写真の色差のばらつき

種とスマートフォンの標準カメラアプリおよび工事写真管理アプリを用いて撮影された切羽写真を利用した。なお、工事写真管理アプリは、管理用に最適化された形式で保存されるため、F値、S値、ISO感度などのExif情報が記録されておらず不明である。

取得した切羽写真の内訳と新写真評価式(案)での評価結果を表-5に示す。対象とした切羽写真は514枚であり、166断面の切羽で撮影されたものである。内訳はデジタルカメラの写真が209枚、スマートフォンの標準カメラアプリの写真が49枚、工事写真管理アプリの写真が256枚であった。新写真評価式(案)を適用した場合、評価式を満たす画像(以下、「OK画像」とする)は55枚であり、そのうち26枚がカメラCで撮影された写真、29枚がスマートフォンの標準カメラアプリで撮影された写真であった。評価式を満たさない画像(以下、「NG画像」とする)は、459枚であった。

### 3.4.2 「切羽写真トリミングシステム」を用いた検証

#### (1) 検証方法

「切羽写真トリミングシステム」は、入力したトンネル切羽の全景写真から切羽観察に活用する上半切羽面領域のみを認識・抽出し、出力するものである(表-6参照)。本システムは、セマンティックセグメンテーションと呼ばれるタスクを用いた機械学習モデルであり、人間の手により上半切羽面領域をラベル付けした複数のトンネルの切羽写真720枚を教師データとして学習させて作成した。

本検討では、Bトンネルから取得した切羽写真514枚を対象としてシステムに入力し、出力された画像を目視で確認のうえ、表-6に示す3段階で切り抜き加工の状態を評価した。

表-4 Bトンネルにおけるカメラの設定値一覧

項目	デジタルカメラ		スマートフォン	
	カメラC	カメラD	標準カメラアプリ	工事写真管理アプリ
画素数[万画素]	123, 315	1593	1200	123
F値	3.5	3.9~4.1	1.8	不明
ISO感度	160 ~ 6400	400 ~ 800	32 ~ 100	不明
S値[秒]	1/125 ~ 1/5	1/4 ~ 1/10	1/30 ~ 1/6	不明

表-5 Bトンネルで取得した切羽写真の内訳

	デジタルカメラ		スマートフォン		計
	カメラC	カメラD	標準カメラアプリ	工事写真管理アプリ	
OK画像	26	0	29	0	55
NG画像	158	25	20	256	459
計	184	25	49	256	514

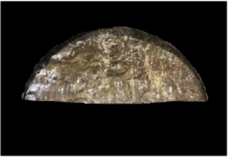
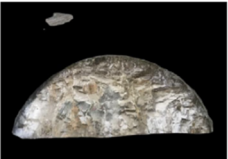
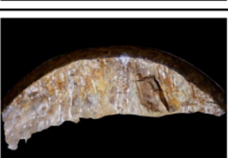
## (2) 検証結果

表-7 に切羽写真トリミングシステムの出力画像の評価結果を示す。OK 画像の 55 枚については、すべてが評価：1 であり、切羽写真トリミングシステムが適切に機能することを確認した。しかし、NG 画像の多くもトリミングシステムが適切に機能していることが確認でき、カメラ設定に関わらずトリミングシステムが適切に機能する可能性が考えられる。そこで、トリミングシステムが適切に機能しない、評価：2 または評価：3 となった計 70 枚の切羽写真を確認した。その結果、23 枚が上半切羽面の一部が見切れている写真、32 枚が黒板やチャート、人物などの障害物が上半切羽範囲に映り込んでいる写真、5 枚がブレやピンボケした写真、5 枚が拡幅部付近の特殊な断面の写真であり、切羽が適切に映っている写真は 5 枚と限られた数であった。これより、評価：2 や評価：3 となった写真の多くは、カメラ設定の影響ではなく、その他の要因によりトリミングシステムが適切に機能しなかったと考えられる。

以上より、トリミングシステムを適正に機能させるためには、カメラ設定の影響はあまり大きくなく、以下の点に留意が必要であると考えられる。

- ・ 上半切羽面全体が写る角度で撮影すること。
- ・ 上半切羽面部分に黒板やチャート、人物などの障害物が映り込まないようにすること。
- ・ 三脚等を用いてブレがないように撮影すること。また、切羽面にピントを合わせて撮影すること。

表-6 トリミングシステム出力画像の評価基準

評価		トリミング画像例
1	切羽上半面を比較的正確に切り抜き加工できている	
2	切羽上半面を切り抜き加工できているが、境界線が不安定、もしくは余計な部分も切り抜かれている	
3	切羽上半面を切り抜き加工できておらず境界を確認できない	

## 3.4.3 類似切羽検索 AI を用いた検証

### (1) 検証方法

「類似切羽検索 AI」は、畳み込みニューラルネットワーク (CNN : Convolutional Neural Network) により切羽写真の特徴量を抽出し、特徴ベクトルをもとに類似切羽をランキング形式で出力する教師なし学習 AI である。類似度にはコサイン類似度を用いており、事前に学習させた切羽写真から抽出した CNN の各層における特徴ベクトルと入力した切羽写真の特徴ベクトルより算出される。複数のトンネルの切羽写真約 1000 枚を用いた AI の精度検証では、入力した切羽写真と同じ切羽を撮影した別の写真を類似度ランキングの上位として出力することを確認している。

本検討では、前節でトリミング処理した B トンネルの上半切羽部の画像を検索対象とし、入力画像に類似する切羽画像をランキング形式で出力した。さらに、出力結果の上位 10 枚の切羽写真について、切羽観察記録簿を確認することで切羽の類似性を分析した。

入力した画像の撮影条件および新写真評価式 (案) による評価結果は表-8 のとおりである。切羽 a の OK 画像は、スマートフォンの標準カメラアプリで撮影されたものであり、比較的大きい画素数で撮影された写真である。NG 画像は、カメラ C により撮影されたもので、評価点①の条件は満たすものの、画素数が 300 万画素を下回り、総合評価が NG となった画像である。切羽 b の OK 画像は、カメラ C により撮影された画素数 315 万画素の写真で、OK 画像の中では比較的画素数が小さい画像である。NG 画像は、315 万画素であり OK 画像と同じ画素数であるが、評価点①の条件を満

表-7 トリミングシステム出力画像の評価結果

	計	新写真評価式 (案)	
		評価式を満たす	評価式を満たさない
評価：1	444	55	389
評価：2	58	0	58
評価：3	12	0	12
計	514	55	459

表-8 入力対象画像の撮影条件および写真評価結果

	切羽a		切羽b	
	OK画像	NG画像	OK画像	NG画像
使用カメラ	スマートフォン (標準カメラアプリ)	カメラC	カメラC	カメラC
F値	1.8	3.5	3.5	3.5
S値[秒]	1/15	1/60	1/60	1/60
ISO感度	64	1600	2000	2500
画素数[万画素]	1219	123	315	315
評価点①	0.338	0.131	0.105	0.084
評価点①判定	0.1<評価点①<0.5	○	○	×
F値判定	F値≤8	○	○	○
画素数判定	画素数>300	○	×	○
新写真評価式 (案) 評価	OK	NG	OK	NG



たさず、総合評価がNGとなった写真である。

## (2) 検証結果

各画像の類似切羽検索 AI への適用性について、現場で技術者が切羽を観察して評価した9項目4段階の切羽観察評価区分との整合性の観点から検証した結果を図-13に示す。ここでは、切羽観察項目のうち、比較的視覚による判断が可能であり、画像解析の活用に関与性が高いと考えられるD:風化変質、E:割目の間隔、F:割目の状態、G:割目の形態の結果を示している。図中の赤の横棒は、入力画像の切羽における技術者による各観察項目の評価区分を示す。ここで、評価区分は、上半切羽面を天端部、右肩部、左肩部の3つ評価結果の平均値を示している。図中の丸印は、OK 画像またはNG 画像を入力した際の出力結果における、上位10切羽の評価区分の平均値を示し、ひげの部分は、その標準偏差を示す。図-12中の標準偏差に関しては次のことがいえる。①出力結果における上位10切羽の標準偏差が著しく大きい場合、その出力結果は、ばらつきが大きく、精度が低いと考えられる。②各観察項目において、入力画像がOK 画像の場合とNG 画像の場合を比較して、出力結果の標準偏差が同程度の場合、出力結果の評価区分の平均値が入力画像の評価区分に近いほど、精度が高いと考えられる。

切羽 a について、F:割目の状態のNG 画像の結果は上記の①に当てはまり、出力結果のばらつきが大きく、精度が低いといえる。残りのD:風化変質、E:割目の間隔、G:割目の形態については、②により、OK 画像を入力した場合の方が、精度が高いといえる。これらより、新写真評価式(案)を満たすことで、より類似性の高い切羽を出力可能であると考えられる。

切羽 b について、E:割目の間隔については、OK 画像を入力した場合とNG 画像を入力した場合で同程度の結果であったが、その他のD:風化変質、F:割目の状態、G:割目の形態については、結果の差に大小はあるものの、OK 画像を入力の方がNG 画像を入力し

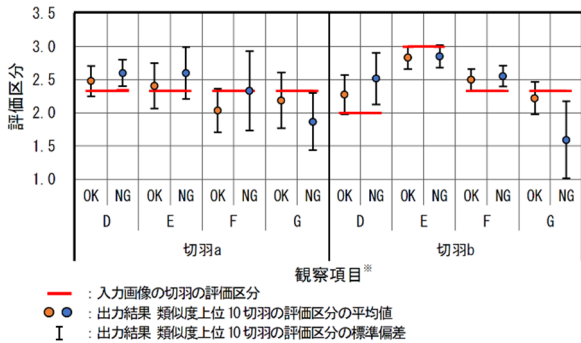


図-13 類似切羽検索 AI を用いた検証結果

た場合に比べて精度が高い出力結果となった。これより、比較的画素数が小さい写真についても、新写真評価式(案)を満たすことで、より類似性の高い切羽を出力可能であると考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、主観的判断の影響を軽減した地山評価支援システムの開発に向けた基礎検討として、施工時に得られるデータから主観性を排除し、可能な限り客観的なデータをもとに、過大变位やトラブル事象のリスクを事前に予測するために有効と考えられる指標等の検討を行った。また、AI や画像解析技術の活用にあたって、切羽写真に求められると考えられる撮影条件等について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 山岳トンネルの施工時における地山評価のプロセスを再整理するとともに、近年の AI 等を活用した地山評価の位置付け、課題等を整理した。
- 2) 重み付き切羽評価点から支保パターンが1つに定まらない場合等に、支保パターンに応じた変位量の実績を1つの目安として支保選定に活用することで、より客観的な指標に基づく支保選定が可能になると考えられる。
- 3) 岩質と切羽観察項目の各評価結果から、切羽崩落に対して、先受工の必要性の判断の一助となる可能性のある指標を示した。
- 4) 画像解析技術を用いて切羽写真から切羽評価、地山評価を行う技術の適用に向け、切羽写真の品質に関する新写真評価式(案)、撮影時の留意点を提案した。
- 5) 画像解析技術や AI 技術を用いたシステムで一定の評価精度を得るためには、新写真評価式(案)を満たす写真であること、画角等の撮影条件を満たすことが有効であることを示した。

今後、より合理的な地山評価の確立に向けた課題として、施工時情報自体のデータの統一性の確保が挙げられる。例えば、過大变位が生じている断面や変位が極端に小さい断面などは、統計分析上、その特異なデータとして選定・除外するなど、取り扱いに留意する必要があると考えられる。また、本研究で提案する新写真評価式(案)や撮影条件については、特定の現場条件のもと分析を行なったものであり、あらゆる現場条件に適するわけではないことに留意が必要である。しかしながら、これらの留意点を念頭に切羽写真を取得することで、より適切な画像解析技術等の運用につながると思われる。

## 参考文献

- 1) 岩盤力学小委員会 岩盤力学における DX 活用検討小委員会 : AI を活用したトンネル切羽評価の実用化検討、2023.12.
- 2) 田村賢人、佐々木亨、日下敦、菊地浩貴 : 主観的判断の影響を低減した地山評価支援システム構築の試み、令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会、III-206、2023.8
- 3) 日本道路協会 : 道路トンネル観察・計測指針 平成 21 年改訂版、p.24、2009.2
- 4) 内田誠一 : AI とは何か? -入門編-、土木学会誌、Vol.106、No.1、pp.12-15、2021.1
- 5) 菊地浩貴・日下敦・小出孝明・巽義知・長谷川慶彦 : AI を用いた山岳トンネルの切羽評価に関する一考察、令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会、VI-736、2019.8
- 6) 黒田晴、石川大輔、梅田克史、瀨瀬善孝 : トンネルにおける AI を用いた地山等級推定の基礎的検討、トンネルと地下、Vol.52、No.11、pp.937-945、2021.8
- 7) 真下英人、水川雅之、日下敦、砂金伸治、木谷努、遠藤拓雄 : 山岳トンネルにおける施工時観察・計測データの評価手法に関する研究報告書、土木研究所資料、第 4099 号、pp.6-13、2008.3
- 8) 田村賢人、佐々木亨、菊地浩貴、日下敦 : 画像解析技術活用に向けた切羽写真撮影条件に関する一考察、第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.330-335、2023.1
- 9) 佐々木亨、長谷川慶彦、菊地浩貴、日下敦、巽義知 : 切羽観察への画像解析技術活用に向けた切羽写真撮影条件に関する基礎的検討、土木学会第 75 回年次学術講演会、VI-676、2020. 8
- 10) 日本工業規格 : JIS Z 8781-4:2013、2013.
- 11) 日本色彩学会編 : 色彩科学ハンドブック 第 3 版、東京大学出版会、p.593、2011.4

# STUDY ON GROUND EVALUATION OF MOUNTAIN TUNNELS USING AI

Research Period: FY2021-2023

Research Team: Tunnel Research Team, Road  
Technology Research Group

Author: KUSAKA Atsushi

KIKUCHI Koki

SASAKI Toru

**Abstract:** In mountain tunnel construction, accurate evaluation of surrounding ground condition behavior is challenging. Evaluation during construction through face assessment and measurements is necessary to adjust excavation methods and support patterns. Ideally, this should be based on quantitative and objective data, but subjective factors like engineer experience gets mixed with and causes variability. This study explores indices as possible as objective to predict risks like excessive displacement and troubles, and examines conditions for face photography for image analysis.

**Keywords:** Face assessment, Construction data, AI, Tunnel face photo