

# AIを活用したトンネル切羽の地質評価と 肌落ち予測支援に関する研究開発

吉川 正<sup>1</sup>・山本 拓治<sup>1</sup>・橋立 健司<sup>1</sup>

<sup>1</sup>一般財団法人 先端建設技術センター (〒112-0012 東京都文京区大塚2丁目15番6号)

山岳トンネルの切羽評価と肌落ち予測においては、切羽の地質観察が極めて重要です。切羽地質観察は技術者の能力によって異なる判断が下される場合があります。そのため、定性的な地質判断を均一化し、経験の浅い技術者を支援するためのAIによる画像解析システムの開発が求められています。本報告では、AIを活用した山岳トンネルの切羽地質評価支援システムと肌落ち予測支援システムの概要、精度、および主に北陸地方整備局管内のトンネルに適用した事例を紹介します。

キーワード AI, トンネル, 切羽観察, 肌落ち

## 1. はじめに

国土交通省では、建設現場におけるイノベーションの推進、生産性の向上等を図るため、新技術情報提供システム (NETIS) 登録技術等の新技術の現場での活用 (新技術導入促進1型) や、研究開発段階にありながら当該事業において工事品質向上等の効果が高いと期待される技術について、現場での技術提案 (新技術導入促進2型) を求める入札契約方式を平成29年度より実施している。平成30年度新技術導入促進2型のトンネルテーマとして、「AI等を活用したトンネル切羽等の地山判定手法」が出題された。令和元年度には、「ICT等を活用したトンネル掘削時における安全監視の効率化手法」が出題され、AI技術の活用や切羽の安全確保に関する技術開発の促進の必要性が示された。

弊センターでは、令和元年度と令和2年度に、国土交通省建設技術研究開発助成制度の補助金により、AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測支援による災害防止に関する研究開発を(株)安藤・間、鹿島建設(株)、清水建設(株)、戸田建設(株)、NSW(株)、(株)基礎地盤コンサルタンツ、(株)想画と共同で実施した。

令和3年度からは、自主研究として本共同研究を継続し、令和5年度からは、民間会社26社と共に、「トンネル情報活用研究会」を組織し、本研究成果の普及及び改良を行っている。本報告は、AIを活用したトンネル切羽の地質評価支援システムと肌落ち予測支援システムの概要と精度、及び北陸地方整備局管内のトンネル等に適用した事例を紹介するものである。

## 2. 切羽地質評価支援システム

### (1) 開発の目的

山岳トンネルの施工では、一般的に表-1に示す「切羽地質観察評価表」により地質の良否を点数化し、合計点により支保パターンの目安を決めているが、地質観察は技術者の技量により判断が異なる場合がある。このような、技量の差による定性的な地質判断に対して、AIによる画像解析技術を活用した切羽地質評価システムの開発が各社で進められているが、個別の組織ではデータ数が限られており、岩石分類に偏りがある等の理由で、高い精度

表-1 切羽地質観察評価表<sup>1)</sup>

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
素掘面の状態	1. 自立(普請不要)	2. 時間がたつと緩み肌落ちする(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
圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 100 \sigma_{MPa}$	2. $100 MPa > \sigma_c \geq 20 MPa$ ハンマー打撃で砕ける	3. $20 MPa > \sigma_c \geq 5 MPa$ 軽い打撃で砕ける	4. $5 MPa > \sigma_c$ ハンマー刃先食い込む
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. 全体的に変色、強度相当地に低下	4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結
割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1m$ 割れ目なし	2. $1m > d \geq 20cm$	3. $20cm > d \geq 5cm$	4. $5cm > d$ 破砕、当初より未固結
割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土挟む、当初より未固結
割れ目の形態	1. ランダム形状	2. 柱状	3. 層状、片状、打 <sup>1)</sup>	4. 土砂状、細片状、当初より未固結
湧水	1. なし・滲水程度	2. 滴水程度	3. 集中湧水	4. 全面湧水
水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊、流出

が得られないことや切羽画像だけでは予測の正答率が高くない評価項目があることも分かってきた。画像の色で判断できる風化変質や画像で確認できる割れ目の頻度や割れ目の形態は、画像解析だけでもある程度の正答率が得られている。しかし、その他の切羽の状態、素掘り面の状態、圧縮強度、割れ目の状態、湧水、水による劣化は、切羽画像だけでは正答率が高くないことが分かった。さらに、トンネルの地質は、急変する場合もあるが、連続性がある場合が多いこともわかった。

そこで、AIによる地質評価区分の予測正答率をさらに高めるための第一として、我々は各地方整備局の現場事務所と共同研究先の建設会社に依頼し、より多くのデータを収集し、そのデータを岩石名ごとに分類し教師データを増やした。次に、画像データによる予測結果を関連する地質評価項目で補正し、正答率を向上させるために、切羽観察データベースを作成し統計分析を行った。収集したトンネル数は39トンネルであり、切羽観察記録簿は13650枚である。そのデータを近畿地方整備局で先進的に定められているデータベース様式に整理した。なお、これらのデータは共同研究開発メンバーで守秘義務契約を結び情報漏洩の無いように管理している。図-1に収集したトンネルの位置図を示す。



図-1 収集したトンネルの位置図

収集したデータを分析した結果、切羽観察項目同士には関連の高い項目があり、その説明変数を使用した回帰予測の精度が比較的高いことが分かった。そのため、画像データに統計データ処理を加え補正するプログラムを構築することで、正答率を向上できる可能性が高いと考えた。また、評価対象切羽の前切羽やさらにその前の切羽のデータとの連続性を考慮したAIモデルが構築できれば、予測精度がさらに向上すると考え、新たなシステムを構築した。

## (2) システムの概要

切羽評価システムは、表-1に示す観察項目の評点を画像と切羽観察簿を利用し、AIにより自動選定するものである。図-1にアプリを使った解析結果の一部を示す。現場で撮影された切羽画像には、切羽以外の部分が含まれているため、切羽の画像だけに自動的にカットしたのち、色補正を行い、地質区分図を作成する。同時に、割れ目

の検出を行い、割れ目頻度を算出する。図-1や表-1に示す風化変質など他の観察項目も同様に天端、右肩、左肩にわけて評価区分（評価点）別の分布マップを作成し、表-2に示すように評価区分の面積の最も多い評点を代表評価区分としている。

このシステムには、画像だけの評価モデルに統計データを加えた「複合評価モデル」とそれにさらに時系列データを加えた「複合解析モデル」を使用する方法がある。

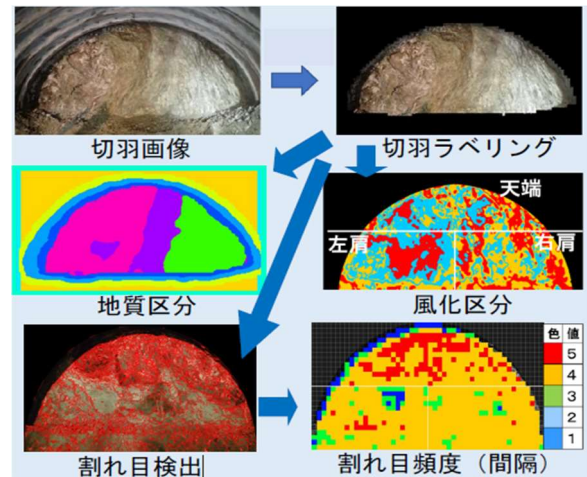


図-1 切羽観察支援システムの概要<sup>2)</sup>

表-2 評価区分の判定例

風化変質：評価点			
評価点	左肩	天端	右肩
1	0%	0%	0%
2	45%	68%	35%
3	20%	12%	39%
4	35%	20%	26%
結果	2	2	3

図-2に切羽観察支援システムの解析フローを示す。ステージ1（画像モデル）では画像のみを使用し深層学習により各切羽観察の評価項目の評価区分を予測する。従来の研究では、ステージ1のみの支援システムが多いと思われる。次に、ステージ2（複合予測モデル）では、岩石グループ毎に分類した相関分析、回帰予測に基づくモデルにより評価区分を補正する。さらに、ステージ3（複合解析モデル）では、掘削中の評価対象切羽の前の切羽とさらにその前の切羽について、技術者が評価した正解の評価区分を加えて補正する。なお、このシステムでは、ステージ2までの結果を出力するか、ステージ3までを出力するか選択できるようにしている。

複合予測モデルは、図-2に示すように画像モデルで得られた評価結果を回帰予測に基づき補正し、ステージ2から推論した結果を入力データとし、学習済みモデルにより評価区分の再予測を行うモデルである。

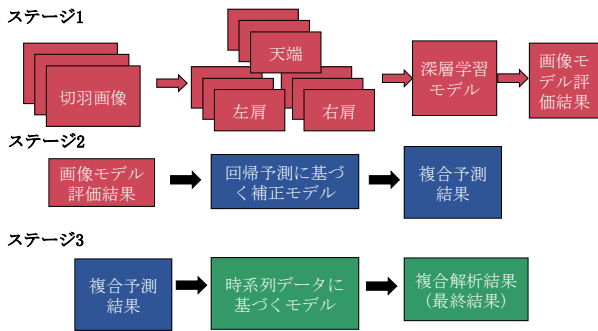


図2 切羽観察支援システムの解析フロー<sup>3)</sup>

複合解析モデルは、図-3に示すように、n地点の切羽画像とn-1地点とn-2地点の評価区分（ソフトから出力した計算結果か、結果を修正入力した結果）を入力データとして機械学習により評価区分の再評価を行うものである。評価対象項目は、相関分析や回帰分析などの事前解析から関係性が把握されている項目である。

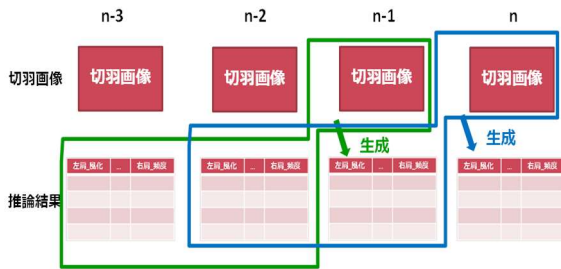
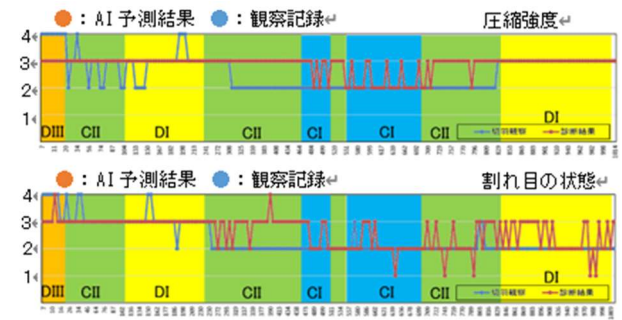


図-3 複合解析モデル<sup>3)</sup>

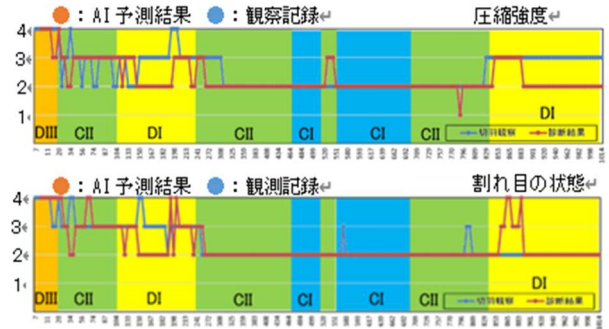
### (3) 適用結果と精度

適用したトンネルは、硬質塊状岩のAトンネル（発破掘削，197切羽）と、中硬質・軟質塊状岩のBトンネル（機械掘削，153切羽）である。両トンネルとも国交省が定めている様式で切羽観察が実施された。図-4に、Aトンネルの天端における評価項目のうち、圧縮強度と割れ目の状態について、トンネルに沿った実際の観察結果による評価区分と支援システムAIによる評価区分を示す。また、表-3と表-4に、AトンネルとBトンネルの天端における各観察項目の正答率を示す。なお、正答率は実際に切羽を観察した記録を正答とした割合である。

Aトンネルの切羽観察結果（図-4青色）とAI予測結果（図-4橙色）を比較すると、複合解析モデルの予測結果は、画像モデルに比較して観察結果と予測結果が一致している箇所が多い。Bトンネルについても、複合解析モデルの予測結果は画像モデルより精度が高い結果となっている。Aトンネルの正答率は画像モデルの場合、0.19から0.65であり、教師データとした観察結果にも人による評価のバラツキがあることを考慮し、観察結果と予測結果の評価に1ランクの差を許容すると、正答率は多くの観察項目で0.9以上である。複合解析モデルの正



(a) 画像モデル



(b) 複合解析モデル

図-4 トンネルに沿った予測結果と観察結果の比較<sup>4)</sup>

表-3 Aトンネル（硬質塊状岩）の正答率<sup>4)</sup>

観察項目	画像モデル	複合解析モデル
切羽の状態	0.55 (0.93)	0.88 (0.99)
素掘り面の状態	0.39 (0.94)	0.75 (1.00)
圧縮強度	0.56 (1.00)	0.64 (0.99)
風化変質	0.39 (0.90)	0.51 (0.98)
割れ目の頻度	0.65 (0.94)	0.40 (0.96)
割れ目の状態	0.59 (0.99)	0.83 (0.96)
割れ目の形態	0.60 (—)	0.46 (—)
湧水	0.19 (0.96)	0.53 (0.99)
水による劣化	0.19 (0.81)	0.58 (0.96)

( )は±1ランクの誤差を許容した場合の正答率

表-4 Bトンネル（中硬質・軟質塊状岩）の正答率<sup>4)</sup>

観察項目	画像モデル	複合解析モデル
切羽の状態	0.23 (0.87)	0.36 (0.93)
素掘り面の状態	0.24 (0.90)	0.70 (0.99)
圧縮強度	0.41 (1.00)	0.62 (0.97)
風化変質	0.50 (0.75)	0.60 (0.99)
割れ目の頻度	0.33 (0.69)	0.49 (0.84)
割れ目の状態	0.20 (0.73)	0.60 (0.98)
割れ目の形態	0.19 (—)	0.95 (—)
湧水	0.22 (0.67)	0.32 (0.84)
水による劣化	0.31 (1.00)	0.25 (0.64)

( )は±1ランクの誤差を許容した場合の正答率

答率は0.4から0.88であり、同様に予測結果の評価に1ランクの差を許容すると、正答率は0.95を超している。画像モデルでは観察項目の湧水と水による劣化が、複合解析モデルでは風化変質と割れ目の頻度が、低い正答率を

示している。

B トンネルの正答率は、画像モデルの場合、0.19 から0.5 であり、観察結果と予測結果の誤差を1 ランク許容すると、正答率は0.67 以上の値となる。複合解析モデルでは、0.25 から0.95 の正答率を示し、予測結果の誤差を1 ランク許容すると0.64 以上となり、観察項目の湧水と水による劣化を除くと、0.84 以上の正答率となる。画像モデルでは多くの観察項目で0.2 から0.3 の低い正答率であったが、複合解析モデルでは正答率0.3 以下となる観察項目は水による劣化のみである。水に関連する項目の正答率が低い理由は、湧水が発生していた教師データが少なかったことと、静止画では湧水の画像が明確に確認できない場合が多いことに起因すると思われる。

画像モデルの正答率が複合解析モデルより高い場合もあるが、一般的に複合解析モデルの正答率が高く、複合解析モデルの効果が得られたといえる。一方、岩石の違いにより、複合解析モデルの正答率が向上する観察項目や程度が異なること、正答率がばらつくことが示された。教師データを増やして岩石によるばらつきを改善することが今後の課題となる。

### 3. 肌落ち予測支援システム

#### (1) 開発の目的

掘削後のコソク作業は、切羽作業の安全性確保のため重要であるが、現場作業員により経験的に行われてきた。肌落ち災害防止のためのコソク作業完了確認も、浮石などの切羽地質状況を切羽監視責任者が判断しているため、技量の差により肌落ち災害が発生している場合がある。図-5は、既存資料等より収集した休業1日以上での肌落ち災害事例135件を年ごとに集計した結果である。4社の件数は、前述の共同研究を行っているゼネコンの社内実績である。アンケート結果には国内すべての事例が含まれていないが、2013年以降は工事量の増加に伴い災害件数が増加している。しかし、2016年12月に厚生労働省より肌落ち防止ガイドラインが提示されて以降、切羽への立ち入り禁止の徹底や切羽監視責任者の専任、鏡吹付けコンクリートの徹底等の影響により災害は激減している。ただし、ゼロにはなっていない。

そのため、さらなる安全性確保、コソク作業の自動化に際して、新技術の開発が望まれている。その一つの技術として、AIによる肌落ち危険箇所の自動予測技術がある。しかし、肌落ちデータは、事故が発生した場合だけしか記録されておらず、教師データの不足のために、これまで、AI技術を活用できなかった。

そこで、我々は、切羽写真や画像を活用して、事前にコソクが不十分な箇所を予測する技術の開発に取り組んだ。その第1歩とし、AIの教師データとして技術者が予測した肌落ち予測箇所の妥当性を確認するため、切羽

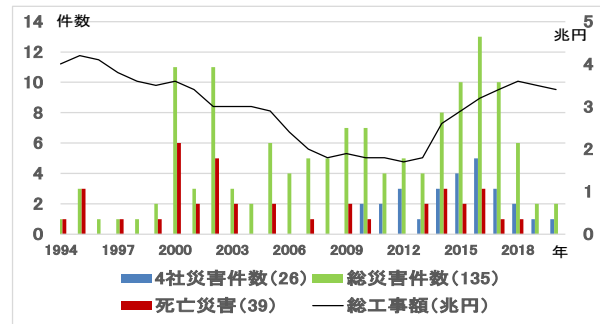


図-5 肌落ち災害事例<sup>6)</sup>

写真から地質技術者が指摘した肌落ち予測箇所と実際に発生した肌落ち箇所の比較検証を行った。図-6の上段の図は、延長2kmのトンネルにおいて、ジャンボにビデオカメラを設置し、常時肌落ちを監視した結果の一例である。つまり、これは、実際に肌落ちが発生した箇所の切羽写真である。本トンネルでは、35切羽で、吹付けの剥離肌落ちが発生した。図-6の下段の図は、2名の技術者に、肌落ち箇所を教えずに、肌落ちの可能性のある箇所を予測させたものである。実際の肌落ち箇所と予測箇所の比較を行った結果、技術者の予測の箇所にバラツキはあるものの、技術者は安全側に予測を行っていることがわかり、教師データとして活用できることがわかった。

表-5は、地質技術者が肌落ちの危険性があると判断する目安である。

#### ● 吹付剥落箇所の把握



#### ● 教師データとの比較

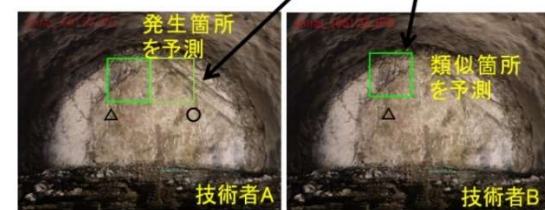


図-6 実際の肌落ち箇所と予測箇所の比較例<sup>6)</sup>

表-5 技術者による危険箇所抽出の目安<sup>6)</sup>

パターン
トンネル外周部
岩塊の抜け落ち跡
割れ目に沿って切羽凸凹
割れ目細かく入る
割れ目に粘土・介在物
周囲より風化・変色、風化・変色著しい
破碎帯、破碎状、土砂化
滲水、湧水あり
その他

写真-1は、地質専門技術者がコソクの不十分な肌落ち危険箇所として選定した画像であり、写真-2は、安定箇所として選定した画像である。教師データは、39のトンネル切羽データ約1.3万画像から、約1万画像の危険箇所と約3千画像の安定箇所を選定した。



写真-1 危険箇所の例

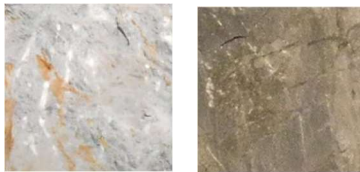


写真-2 安定箇所の例

## (2) システムの概要

本システムは、現場における切羽画像の撮影や通信機器として汎用的に使用されているスマートフォンを活用している。写真-3に示すように、現場の技術者は、スマートフォンで切羽の画像を撮影した後、肌落ち予測アプリケーションを起動するだけで、瞬時に肌落ちの危険性がある箇所を危険度大から小までヒートマップで確認できるシステムとなっている。暖色が危険度大で、寒色が危険度小である。また、図-7に示すように、現場で判断した正しい教師データを四角の枠で囲って、クラウド上で随時更新し、再度機械学習を行うことにより精度向上を図っている。



写真-3 肌落ち予測画像の例<sup>7)</sup>



図-7 システムの概要<sup>7)</sup>

## (3) 適用結果と精度

図-8に示すように、あるトンネルのデータ1,256画像のうち70%(879画像)を教師データに用いて機械学習を行い、20%(251画像)を検証データで機械学習したモデルを検証し、残りの10%(126画像)に対して、肌落ち予測を実施した。写真-4に技術者の予測箇所とアプリの予測箇所を比較した例を示す。



図-8 検証方法<sup>7)</sup>

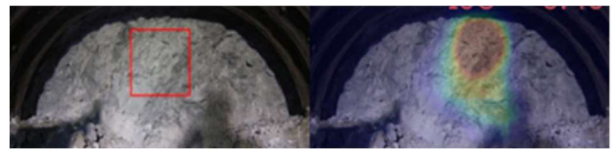


写真-4 技術者の予測 (左) とアプリの予測 (右) <sup>7)</sup>

テストデータに対する予測の精度を式(1a)と図-9に示すIoU (Intersection over Union)を用いて評価した結果、平均の精度が81.85%と良好な結果が得られた。なお、予測箇所と正解箇所の領域の縦横の大きさは50~100cm程度である。また、データを変えて交差検証した結果を図-10に示す。全データを5分割して検証した結果、モデルごとの精度は、72.7~82.6%、平均値は、79.2%の精度が得られた。

$$IoU = \frac{\text{予測箇所と正解箇所が重なった部分のピクセル}}{\text{予測箇所と正解箇所のピクセルの合計}} \quad (1a)$$



$$\text{精度} = \frac{\text{IoU} > 0 \text{ を満たす画像枚数}}{\text{テスト画像全体}}$$

図-9 精度検証の方法<sup>7)</sup>

K = 5 (全体のデータを5分割)		精度
モデル1	テストデータ 学習データ	79.3%
モデル2		80.2%
モデル3		82.6%
モデル4		72.7%
モデル5		81.0%

図-10 交差検証の結果<sup>7)</sup>

写真-4に示すように、地質の専門技術者が、切羽画像と切羽観察記録を見て、肌落ちの危険性が高いと評価した四角の赤枠と肌落ち予測のヒートマップの予測箇所の合致状況について、図-11に示すような定性的な評価で、岩石グループごとに比較した評価結果の一覧を表-5

に示す。主に発破掘削が用いられて凹凸あるいは割れ目などが顕著な中硬質の岩石グループは、正答率が90%以上と高く、機械掘削が用いられる傾向にある軟質の岩石グループは、正答率は75%程度である。今回、地質の専門技術者は、現場の切羽そのものを見ないで教師データの作成並びに肌落ちの評価を実施しており、評価精度のさらなる向上には実現場での肌落ち発生あるいはその予兆が見られる切羽画像に肌落ち箇所を正しく記載したデータの作成と収集が必要である。

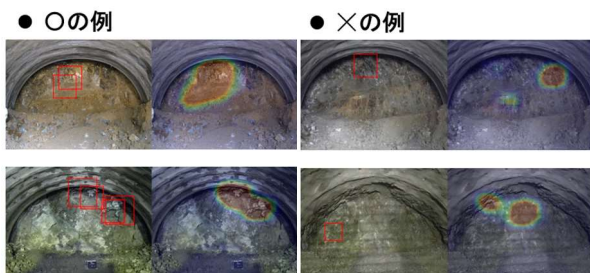


図-11 定性的評価基準の例<sup>7)</sup>

表-5 肌落ち予測結果の比較<sup>7)</sup>

地質の専門家の評価と AI による肌落ち 岩石グループ	アプリの予測の一致と不一致の切羽数			正答率 (%) (O+△)/全数
	○ほぼ一致	△一部一致	不一致	
硬質塊状	141	30	16	91
中硬質塊状	198	38	26	90
中硬質層状	30	6	0	100
軟質塊状	29	1	10	75
軟質層状	193	70	98	73

切羽画像の撮影からAIによる肌落ち予測までの時間は、5秒程度と短く、現場の関係者に運用面で過大なストレスを与えないレベルである。

今後、現場での教師データ作成、伝送及び再学習の実施によるアプリケーションの予測精度の向上、現場事務所の大型モニター、プロジェクター、重機（バックホウ）のモニター等で肌落ち予測結果をリアルタイムに確認できるシステムの構築に努めていきたい。

#### 4. おわりに

本論文では、切羽地質評価支援システムと肌落ち予測支援システムの概要と適用結果及び現時点での予測精度を紹介した。まだまだ、精度の点では十分ではない場合もあるが、経験の少ない技術者の支援ツールとしては有効なものとなっていると思われる。

AIを活用した画像による地質判断では、画像の品質が最も重要である。トンネル内での撮影は、照度や粉塵、撮影時間の短さ等のため、解析に必要な十分な品質の画像が得られていない場合がある。不十分な画質とは、ピントが不十分、坑内照明の違いで色がぼけている、影が写っている、暗い、手振れがある等である。

また、国土交通省では、データ保存容量の関係で、カメラの画質をおとしたCALS納品を推奨しているので、今

回使用した画像の半数が200万画素程度の画像である。5 cm以下の割れ目の間隔や細かい浮石の状態を評価するには、最低1200万画素程度の画像が必要である。切羽の照度も70ルクス以上は必要であり、150ルクス程度の明るさが望まれる。今後、撮影基準の改定や納品画像品質の向上が図られれば、AIによる評価システムの精度は大幅に向上できると思われる。

あくまで AI は、切羽判定の支援ツールであり、切羽の地質評価や肌落ち予測の責任は担当技術者にある。本システムを活用して、現場の技術者が自分で切羽を観察した上でAIによる点数が妥当かどうかを判断して、切羽判定表を仕上げる方法は、評価のばらつきを小さくして透明性を高める効果があるのではないかとと思われる。

切羽関連データは、トンネルの建設や維持管理の安全性や生産性の向上を図る上で、我が国全体の財産である。施工だけでなく維持管理も含めたトータルな視点でデータベース化を図る必要があり、BIM/CIMシステムの属性データとして取り込まれるべきと思われる。国土交通データプラットフォームとの連携など今後の展開に期待したい。

**謝辞：**本報告は、国土交通省建設技術研究開発助成制度（JPJ000094）並びに（一財）先端建設技術センター自主研究開発成果である。大西京都大学名誉教授、砂金東京都立大学教授他ご指導いただいた皆様に感謝申し上げます。また、共同研究者の（株）安藤・間、（株）鹿島建設、清水建設（株）、戸田建設（株）、NSW（株）、（株）基礎地盤コンサルタンツ、（株）想画の皆様に感謝申し上げます。さらに、貴重なデータを提供いただいた国土交通省の各整備局各工事事務所の皆様に深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 社)日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針
- 2) 吉川正ら：AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測支援による災害防止に関する研究開発①—研究開発項目と実施概要—、令和3年度土木学会学術講演会、CS14-25、
- 3) 野村貴律ら：AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測に関する研究開発③—AIを活用した複合解析モデルについて—、令和4年度土木学会学術講演会、CS14-31、2022。
- 4) 三木茂ら：AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測に関する研究開発①—複合解析モデルの適用例（その2）—令和5年度土木学会学術講演会 投稿中
- 5) 山本拓治ら：AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測支援による災害防止に関する研究開発⑧—肌落ち災害と対策工の実態分析及び AI による肌落ち予測への活用について—令和3年度土木学会学術講演会、CS-31、2021
- 6) 三木茂ら：AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測支援による災害防止に関する研究開発⑤—切羽画像から肌落ち予測の教師データについて—令和3年度土木学会学術講演会、CS-28、2021
- 7) 吉川正ら：AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測に関する研究開発②—機械学習モデルによる肌落ち予測アプリケーションの実用化—令和5年度土木学会学術講演会 投稿中。