

AI を活用した山岳トンネルの切羽評価 と肌落ち予測の研究開発と展開 ～トンネル情報活用研究会の活動と協調領域の研究開発の推進～

一般財団法人先端建設技術センター 審議役 博士(工学) ^{よしかわ ただし} 吉川 正
 審議役 博士(工学) ^{やまもと たくじ} 山本 拓治, 企画部 グループマネージャー ^{はしだて けんじ} 橋立 健司

1. はじめに

建設分野では、熟練者が減少し続け、その後継者である若手の入職者も同様である。その対応策として、熟練者の知識、経験、判断力を持たない若手の技術者や作業員をAI（人工知能）やロボット技術で支援しようとする動きが、橋梁・トンネル等のインフラ点検の分野から始まり、実用化されつつある。

一方、建設業安全衛生年鑑によると、建設業における災害は多い順から、①建設機械によるもの、②落盤によるもの、③墜落と続く。②は、トンネル工事特有の災害であり、「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン 平成28年12月26日」によると、ほとんどが小規模の岩塊、土砂等の落下による肌落ちが原因で、場所は切羽が93%を占める。

トンネル工事の中でも災害が多い山岳トンネルの切羽の評価については、今まで熟練工や経験豊富な専門技術者の知見・経験や学会等における知見に依存してきた。そこで、目視による切羽面の観察、切羽状況の把握、肌落ちの発生の兆候と発災防止の判断について、ICTの活用による画像、削孔機器等のデータの迅速な取得・伝送・処理、仕様の共通化によるデータの有効活用、機械

学習（ニューラルネットワーク等）による迅速な現象把握と評価を行うことで、未熟練者でも熟練者と同等に、トンネル切羽の地質評価、肌落ち予測を行えるように支援することが有効かつ期待されるところである（図-1）。

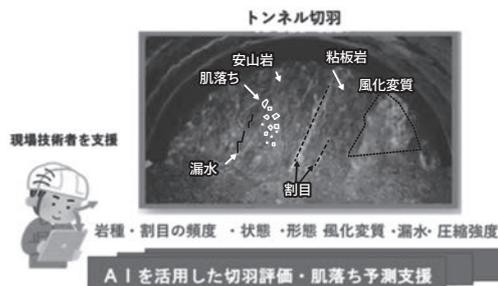


図-1 トンネルの切羽評価と肌落ち予測の支援のイメージ

一般財団法人先端建設技術センターは、平成30年6月から自主研究として「山岳トンネルへのAI適用のための研究」を開始した。その後、株式会社安藤・間、鹿島建設株式会社、清水建設株式会社及び戸田建設株式会社、さらに令和2年度から基礎地盤コンサルタンツ株式会社、NSW株式会社及び株式会社想画が参画して「AIを活用した山岳トンネルの切羽評価と肌落ち予測の研究開発」を共同で実施してきた。

その成果として、切羽画像を用いたトンネル切羽の地質評価、肌落ち予測について、令和2年度にAIを活用したプログラムのプロトタイプを構築した。さらに令和3年度には、教師データの充

実、アルゴリズムの最適化、機械学習の正答率の向上を図って研究参加メンバーの現場で試適用した。令和4年度からは、共同研究に参加した会社の現場で実用化を進めた。また、収集した切羽画像、観察記録等のデータについては、建設業者、地質に関する専門業者等が広く活用できるようにシステム化を図った。

なお、令和元年度から2年間は、国土交通省の建設技術研究開発助成を受けて、現場でサーモカメラによる赤外線画像、ドローン画像、動画の音声等のデータ取得及び分析等、最新技術の適用性について検討した。得られた知見の活用、実用化については今後の研究対象である（図-3、8）。

2. トンネル情報活用研究会

一般財団法人先端建設技術センターは令和5年4月28日、建設業者21社、地質及びIoTやAI分野の専門業者5社の計27社と、トンネル情報活用研究会を設立した。

本研究会の設立の目的は、山岳トンネルの切羽画像、切羽観察のデータ等を一括管理し、開発済みのAIを活用した切羽評価と肌落ち予測を可能とするシステム並びに施工業者が保有しているトンネル基本情報、切羽画像、切羽観察のデータ等

について、トンネル関係者で共有することによりシステムの普及及び改良を行うことである。事業活動内容は、次のとおりである。

- ①地質の専門家がトンネル基本情報とリンクしない切羽画像から肌落ち危険箇所を教師データとして抽出し、機械学習を行って作成した「iPhoneによる肌落ち予測アプリ」（写真-1）の活用、
- ②トンネル基本情報、切羽画像、切羽観察のデータ等の共有に向けた関係機関等への働きかけ、
- ③統一的な切羽撮影要領の制定と普及に向けた関係機関等への働きかけ、
- ④「トンネル基本情報、切羽画像、切羽観察のデータ等の共有」に向けた「切羽評価データ集計システム」の共通化と普及に向けた関係機関等への働きかけ、
- ⑤会員の「AIを活用した切羽評価支援システム」の活用促進、
- ⑥①～⑤の活動に関連した会員相互の意見交換、新たな研究開発テーマの発掘及び研究開発の実施。



写真-1 AIを活用したiPhoneによる肌落ち予測アプリ

研究会の会長には、一般財団法人先端建設技術センターの理事長 佐藤直良が就任した。技術顧

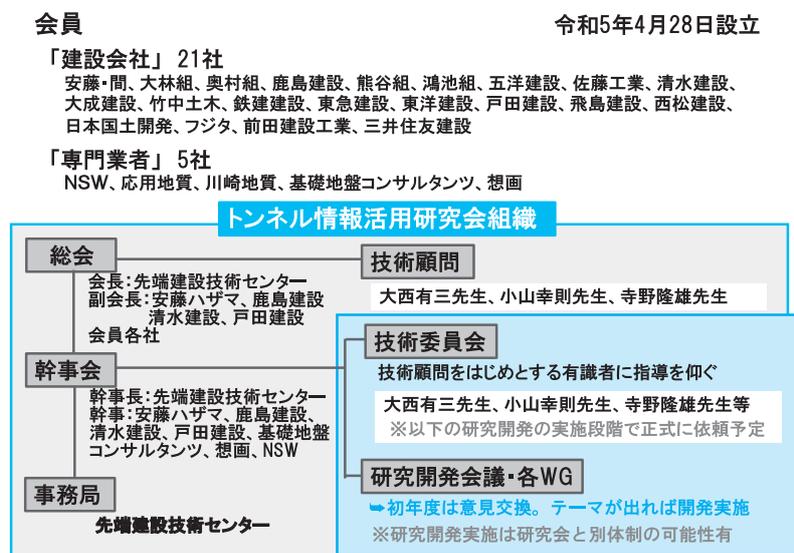


図-2 トンネル情報活用研究会構成

問として、大西有三 京都大学名誉教授、小山幸則 立命館大学総合科学技術研究機構 上席研究員及び寺野隆雄 東京工業大学名誉教授を迎えた。

設立総会の冒頭で、会長は、「切羽関連データは、我が国全体の財産であり、施工だけでなく維持管理も含めたトータルな視点での共有を目指し、インフラ管理者、関係機関に働きかけてデータの共有のルールを変えるきっかけにするとともに、トンネル工事の安全性確保など、共通の目的に向けた協調路線を歩む第一歩である」と述べた。

新たな研究開発については、会員が相互に意見交換を行い、図-2の研究開発会議で技術顧問等の指導の下に実施していく予定である。

3. 熟練者のノウハウを AI に置き換えた iPhone による肌落ち予測アプリ

AI を活用した肌落ち予測の支援の研究開発フローを図-3に示す。肌落ちの危険箇所をどう捉

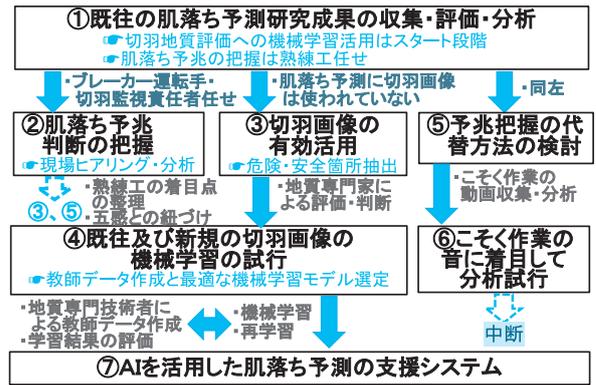


図-3 AI を活用した肌落ち予測の支援システムの研究開発フロー

えるかについては、既往の研究成果を収集・評価・分析した結果、熟練工の判断に任せている状況と認識された。

そこで3現場で15人の切羽作業に関わる熟練者に直接ヒアリングした結果を表-1のように整理した。熟練工が肌落ち危険箇所と判断する際の着目点を切羽の作業内容ごとに五感と関係付けた結果、目視によるものが多く、ブレーカによる探

表-1 切羽作業の熟練工への肌落ちに関するヒアリング結果

工程	No.	切羽作業の熟練工の着目点の五感との関連付け(○関連あり)					熟練工の着目点に対応する地盤工学的な現象と対象等	
		熟練工が着目する現象と対象等						
		視	聴	触	嗅	味	六感	
コック作業時	1	石の落ち方	○				○	肌落ち、切羽崩落の予兆
	2	亀裂の目	○				○	同左
	3	岩の割れ方	○				○	肌落ち、切羽崩落の予兆
	4	バラバラと不安定で止まらない	○				○	肌落ち、切羽崩落の予兆
	5	ボンボンとしている	○		○		○	浮き石の存在、周辺地山の緩み、肌落ち、切羽崩落の予兆
	6	ブレーカの音	○	○			○	浮石の存在や岩質の硬軟
	7	ブレーカのノミで一通り切羽を触ってみて確認	○	○	○		○	浮石の存在や岩質の硬軟
	8	バックホウで浮石を探る	○	○	○		○	浮石の存在や岩質の硬軟
ズリだし観察時	9	互層状態(挟在粘土)	○				○	同左、切羽鏡面崩壊(すべり)
	10	亀裂の方向、幅、交叉、目、ブロック形状などの変化	○				○	肌落ち、切羽崩落の予兆
	11	層の変わり目(特に硬質から軟質)	○		○		○	同左
	12	切羽面が湿っていると要注意	○		○		○	突発湧水、切羽の滑り
	13	水の濁り	○		○		○	微粒分の流出
	14	変化点、すべり目、さし目、油目、泥岩、粘土層、玉石層	○				○	同左
吹付け作業時	15	吹付けまで素掘り状態で切羽が自立しない					○	肌落ち、切羽崩壊の予兆、周辺地山のゆるみ、地山の強度低下
	16	吹付面の色が変わる	○				○	吹付面の強度低下、湧水の存在
	17	吹付けがつかない	○				○	地山強度低下、湧水、均等係数低下(砂質土)
穿孔および装薬時	18	穿孔時に地山を緩める	○	○	○		○	地山強度低下(風化、土砂化)
	19	穿孔水が悪影響を及ぼす			○		○	切羽面の強度低下、スレーキング質泥岩、膨張性地山
	20	穿孔水を出すとところが詰まる	○		○		○	粘土層がある可能性が高い
	21	穿孔水が別のところから出てくる	○	○	○		○	亀裂の存在、地山の緩み
	22	穿孔箇所とは別の箇所が崩れてくる	○				○	肌落ち、切羽崩落の誘発、地山強度低下、地山の緩み
	23	時間が経過すると、穿孔時に浮いたところが落ちる	○				○	肌落ち、切羽崩落の誘発
	24	穿孔しているときの硬軟			○		○	切羽面の強度
	25	穿孔水の状況の変化	○				○	微粒分の流出
	26	穿孔時のフィード圧や穿孔時間等のデータ	○		○		○	切羽面の強度
	27	吹付面のクラック進展	○				○	切羽面の押出、すべり、切羽崩壊の予兆
その他	28	吹付面の裏の水	○				○	湧水、吹付け背面水位の上昇による切羽の不安定化、切羽崩落の予兆
	29	ロックボルト座金の変状	○				○	変位増大、周辺地山の緩み、地圧増加、塑性地山、肌落ちの予兆
	30	インバートストラットの押上げ	○				○	膨張性地山、盤膨れ、トンネル断面の変形

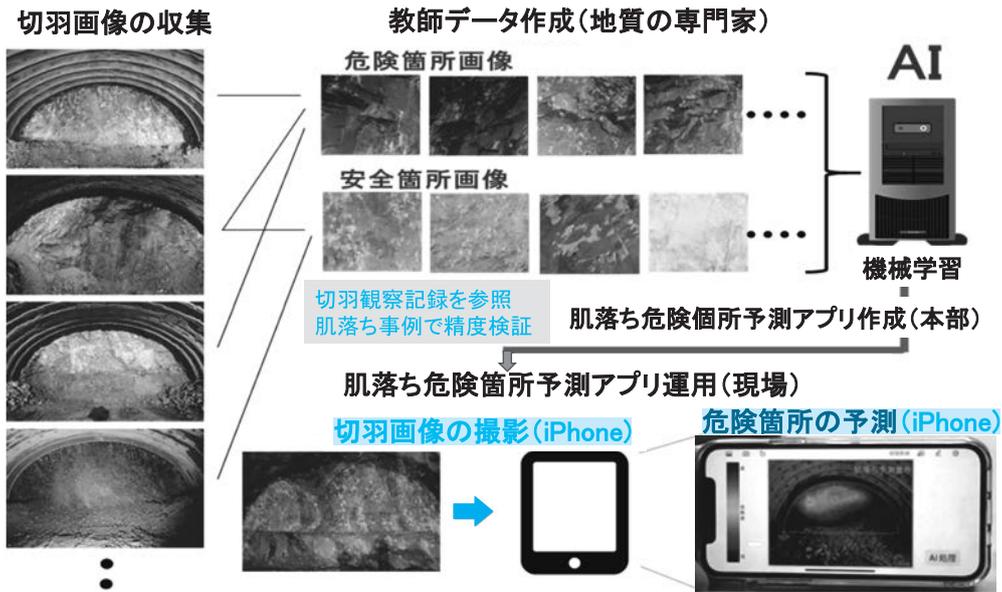


図-4 AIを活用した肌落ち予測の支援システムの作成・運用

りや音でそれを補完し、さらに経験や知見を加えた第六感を組み合わせて、肌落ちの危険箇所と判断していると思われた。

そこで、切羽画像を撮影し、AIを活用して人の目による肌落ち現象の予測を支援することにした。その手順を図-4に示すが、地質の専門家が岩の種類、肌落ちの要因パターン別に肌落ち危険箇所と安全箇所を画像から抽出し、それらを教師データとして機械学習して肌落ち危険箇所を予測し、モニターに表示する。

まず Windows 版のプロトタイプを作成して試行し、次に切羽画像の撮影に多用されている「iPhone」を用いて撮影と肌落ち危険箇所の予測



写真-2 iPhoneの肌落ち予測画像

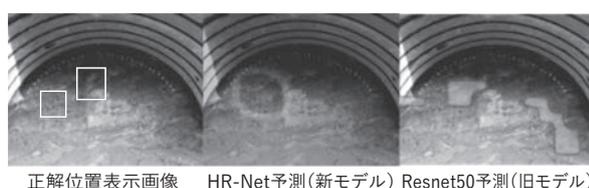


図-5 iPhoneの肌落ち予測画像

を数十秒という短時間で行い、危険度をヒートマップ表示するように改良した(写真-2)。当初、ニューラルネットワークのモデル「Resnet 50」を用いたが、過学習による発散現象が生じたので、最新バージョンでは「HR-Net」を用いて肌落ち危険箇所をヒートマップ表示するようにした(図-5)。

過学習を防ぎ、汎化性能を向上させる目的で使われる交差検証で全データを5分割して評価した結果、精度は72.7～82.6%の範囲に分布し、精度の平均値は79.2%と良好な結果となった(図-6)。現場の担当者が撮影した切羽画像に肌落ち危険箇所を「矩形描画」した教師データをAWSのホルダーに送信・蓄積する手法を新たに導入している(図-7)。地質の専門家による机上での教師データ作成に対して実現象の反映、作業の効率化を目指すものである。

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-6 HR-Netモデルの予測の交差検証結果

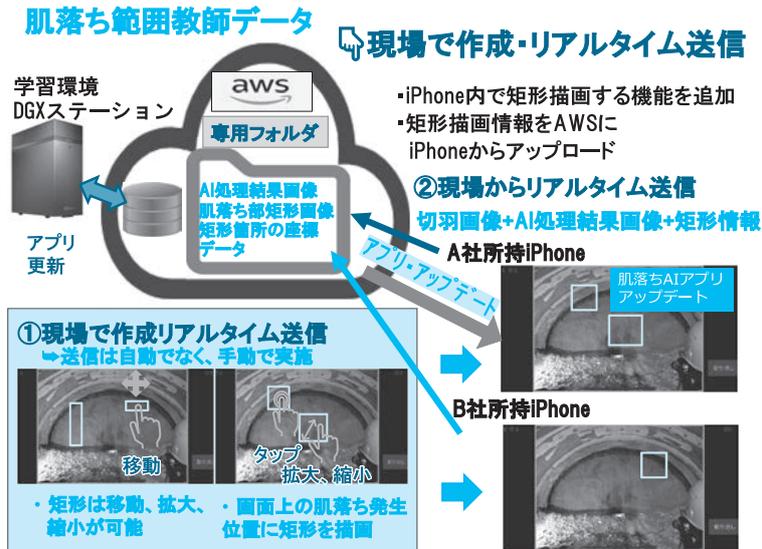


図-7 iPhone画面上での肌落ち教師データの作成及び肌落ち予測アプリのアップデートのイメージ

今後、トンネル情報活用研究会の建設会社21社の協力を得て所定の数量の教師データが蓄積された段階で、定期的に再学習して肌落ち予測精度の向上を図る。

なお、熟練工がこそく作業時に着目している音についても動画撮影、スペクトル分析等で肌落ち予測への活用を試みたが、実用化は難しいと判断した。今後の関連技術の進歩に期待したい。

4. AIを活用した切羽評価の支援システム

研究開発の実施フローを図-8に示す。研究開発の開始段階（平成30年6月）において、切羽評価に機械学習がどのように使われているかを文献で調査した結果、切羽評価についてはいくつかの取り組みが報告されていたが、研究開発のスタート段階であると思われた。

また、4地方整備局、9現場の切羽画像を収集して機械学習への適用性を検討した結果、写真-3に示すように、機械学習用の画像としては、不適切なものが見られた。共同研究会社の切羽画像の撮影状況について調査・評価した結果、照明施設は、天井照明、補助照明、重機類の照明等が使用され、各現場で異なり、照度の測定結果も70～200lxとばらついた。そこで、切羽画像の撮影方法の最適化を図るべく、図-9に示すようにAI活用のための山岳トンネル切羽の撮影要領

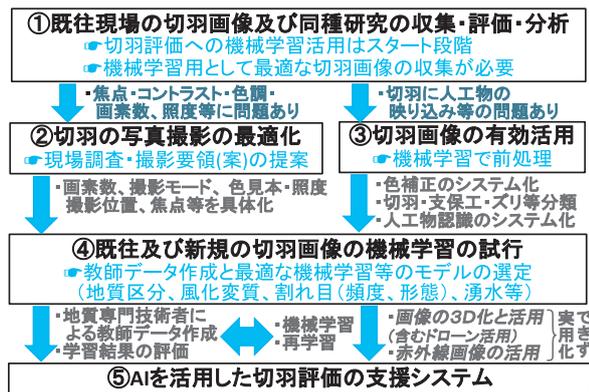


図-8 AIを活用した切羽評価の支援システムの研究開発フロー

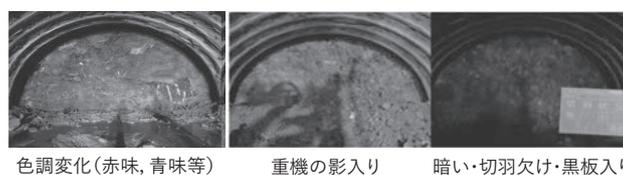


写真-3 機械学習用としては不適切な既往現場の切羽画像の例

- 「撮影準備」
- ① 画素数は1,200万以上で撮影する。
 - ② 撮影モードはAUTOに設定する。
 - ③ データ形式はJPEGとする。
 - ④ 色見本は白黒とし、切羽から10m程度離れた位置に設置する。
 ▶色見本の設置は岩盤判定会議及び発注者立会い時とする。
 - ⑤ 撮影時の照度が不十分で手振れが生じる場合、三脚で手振れを防ぐ。
- 「撮影時の留意点」
- ① 投光器等により切羽を照らす。撮影時の照度は、70～150lxとする。
 - ② 切羽全体が収まるように切羽から離れ、トンネル中心部から正面画像を撮影する。
 - ③ ズームは原則使用しない。
 - ④ フラッシュは使用しない。
 - ⑤ 切羽面に焦点を合わせる。
 - ⑥ 画像の切羽部分に黒板や人工物の影が入らないようにする。



岩石グループ	トンネル数	切羽写真観察記録枚数
硬質塊状	5	1,149
中硬質塊状	5	953
軟質塊状	8	3,712
中硬質層状	8	2,616
軟質層状	13	5,220
合計	39	13,650

図-10 切羽画像及び観察記録の収集状況

図-9 AI活用のための山岳トンネル切羽の撮影要領(案)

(案)を土木学会年次学術講演会などで提案した。

令和5年5月現在で全国の39現場、13,650の切羽の写真と観察記録のデータを共同研究開発メンバーで秘密保持を結んだ上で収集し(図-10)、トンネル基本情報・切羽観察項目ごとの評価点等を近畿地方整備局仕様にした切羽評価データ集計システムで一元管理している(表-2)。

AIを活用した切羽評価の支援システムについては、国土交通省の切羽判定では、表-3に示す評価項目について点数を付けるが、教師データを必要としない機械学習等のモデルと教師データを必要とする機械学習等のモデルを使い分けて区分と評価点の算定を行う。なお、撮影時の照明等の

表-3 評価項目ごとの機械学習等のモデルと教師データの有無

評価項目	機械学習等のモデル	教師データ
地質区分	IIC	無
A.切羽の状態 B.素掘面の状態 C.圧縮強度	ECA-NFNet-L0	有
D.風化変質	K-means法	無
E.割れ目の頻度	Canny法	無
F.割れ目の状態 G.割れ目の形態 H.湧水 I.水による劣化	ECA-NFNet-L0	有

影響による色調の変化について、切羽手前に白黒の色見本を設置し、画像に映った色見本の白と黒の部分のRGBをそれぞれ255と000に戻すことで自然光下の色調に合わせる前処理もプログラムに組み込んでいる(図-11)。

表-2 切羽評価データ集計システム

基本情報											切羽観察項目																									
日時	測点No	T.D (m)	土盛り (m)	地表面形	地質年代	切羽湧水量	切羽色	切羽全体湧水量	切羽全体色	実施支保	岩石グループ	岩石名	発破薬量	A.切羽の状態			B.素掘面の状態			C.圧縮強度			D.風化変質			E.割れ目の頻度										
														左	天端	右	左	天端	右	左	天端	右	左	天端	右	左	天端	右	左	天端	右					
2018/7/23	409+5.8	409.8	113.8	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	5	2	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
2018/7/24	409+9.8	413.8	116.1	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	2	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
2018/7/25	409+13.8	417.8	120	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
2018/7/26	409+18.8	422.8	121.8	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2018/7/27	410+1.8	425.8	124	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2018/7/30	410+5.8	429.8	126.8	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2018/7/31	410+9.8	433.8	129.4	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2018/8/1	410+12.2	436.2	131	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2018/8/2	410+19.4	443.4	138	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2018/8/3	411+6.8	450.6	143	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2018/8/8	411+13.8	457.8	153.9	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2018/8/7	412+1	465	159.9	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	3	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2018/8/8	412+5.8	0	162.5	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	無色	0	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	3	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2018/8/20	412+10.6	474.6	164.9	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	0	0	0	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	3	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	
2018/8/21	412+15.4	479.4	166.1	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	0	0	5	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	
2018/8/22	413+2.6	486.6	167.8	偏圧地形	新生代第4紀～更新世	湧水	0	0	5	無色	D I	中硬質岩・軟質岩(塊状)	安山岩質凝灰岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

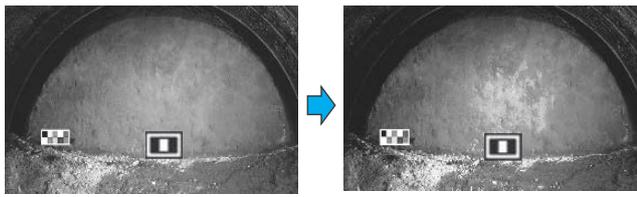


図-11 白黒色見本による切羽画像の色調修正
(左のカラー色見本は参考として設置)

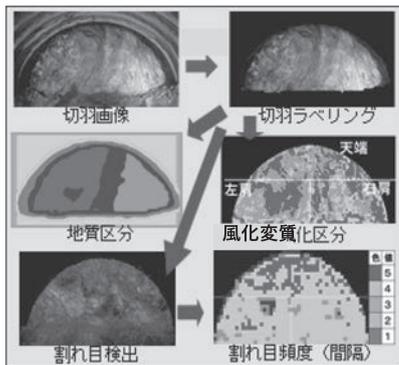


図-12 評価項目ごとの出力例

評価モデルごとの出力例を図-12に、AIを活用した国土交通省仕様の切羽判定表を図-13に示す。それを参考に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、最終的な切羽判定表を仕上げる。あくまで AI は、切羽判定の支援ツールであり、切羽の評価判定の責任は担当技術者にある。なお、NEXCO 仕様の切羽判定表も出力可能である。

5. おわりに

繰り返しになるが、切羽関連データは、トンネルの建設や維持管理の安全性、生産性の向上を図る上で、我が国全体の財産であり、施工だけでなく維持管理も含めたトータルな視点で共有を図るべきものであり、トンネル情報活用研究会の主体活動として発注者をはじめインフラ管理者等の関係機関に働きかけていきたい。協調領域の新たな研究開発テーマについては、研究会メンバーが共同での研究開発の実施が望まれるものを発掘すべく議論を行っている(図-14)。

さらに、切羽関連データが建設分野の関係者の

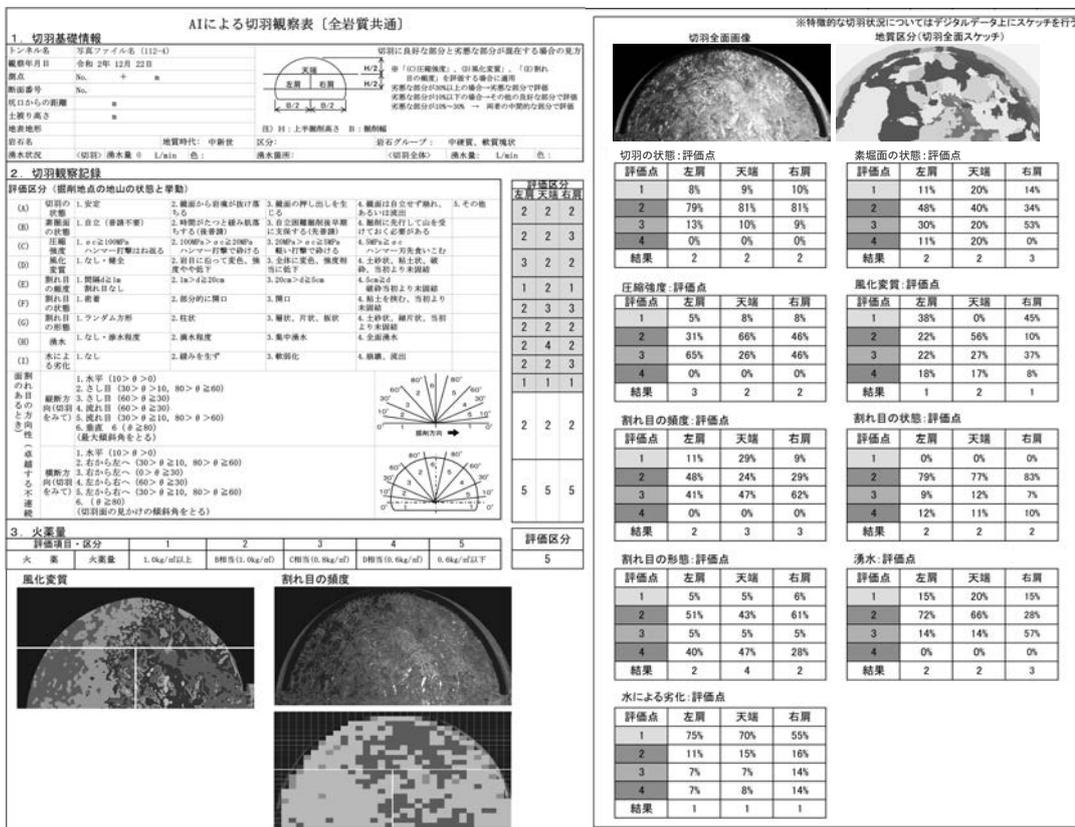


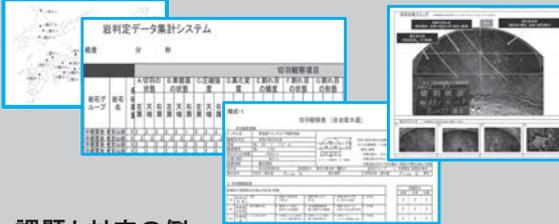
図-13 AI を活用して作成した切羽判定表 (国土交通省仕様)

AIによる切羽評価の結果は、あくまで支援材料
最終の切羽判定は技術者が責任を持って行う。

【切羽評価データ集計システム】

- ・トンネル基本情報・切羽観察記録・切羽画像
- ・変位計測記録etc

→建設関係者でデータを共有(施工業者⇨クラウド登録)



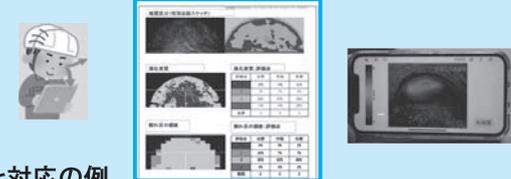
課題と対応の例

- ①切羽画像の撮影方法や提出データ仕様等の不統一
 - 切羽画像方法の明確化と適用の義務付け
 - 切羽観察記録の仕様※、集計フォーマット※の統一
 - ※共通仕様書の改定通達による業務内容明確化
- ②切羽評価情報等のデータが一括管理されていない
 - 切羽評価データ集計システムへの入力義務付け※
 - ※データ入力、運用等の費用の積算制定

【AIを活用した切羽評価及び肌落ち予測の支援システム】

- ・教師データ・AIを活用した切羽評価の支援システム
- ・AIを活用した肌落ち予測の支援システム→継続的な運用

→切羽関連データの活用による新たな研究開発の推進も可能



課題と対応の例

- ①教師データ作成及びソフトウェアの改良の継続
 - 以下のアップデートを活用技術協会等で実施
 - ・切羽評価データシステムに入力されたデータから教師データの作成、AI学習・ソフトウェアの最適化
 - ・肌落ち予測のソフトウェアの最適化
- ②運営費の継続的な確保と種々の活用
 - トンネル情報活用研究会等による会費、工事使用料等
 - ・トンネルの維持管理における変状発生時の原因究明と対策のために点検データと連動して活用
 - ・トラブル・災害防止を含む施工シミュレータへの活用等

図-14 切羽評価データ集計システム，AIを活用した切羽評価及び肌落ち予測の支援システムの運用上の課題と対応のイメージ

間で広く共有されれば、競争領域においても大学や研究機関、民間企業あるいは異業種との連携による新たな研究開発が生まれる可能性がある。研究会の活動が建設業のみならず我が国の経済・社会全体の活性化につながることを期待する。末尾になるが、研究開発助成をいただいた国土交通省 大臣官房 技術調査課をはじめとする発注機関、共同研究会社及びトンネル情報活用研究会に参画いただいた関係各位に感謝申し上げるとともに、引き続きのご支援・ご指導をお願いしたい。

- 1) 山岳トンネルへのAI(人工知能)活用に関する研究開発
https://www.actec.or.jp/joint_research/index.html
- 2) 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(R4セミナー)
<https://www.youtube.com/watch?v=iTdthwBhnps>
- 3) トンネル情報活用研究会
https://www.actec.or.jp/TN_katsuyoukenkyuukai/