

山岳トンネルにおける AI による肌落ち予測に向けた熟練作業員の知見について ー肌落ちにおける熟練作業員の気付きと知見及びその予知方法ー

(一財) 先端建設技術センター 正会員 ○杉本 翔平 (株)安藤・間 フェロー 鈴木 雅行
(一財) 先端建設技術センター 正会員 村井 和彦 鹿島建設(株) フェロー 山本 拓治
(一財) 先端建設技術センター 正会員 吉川 正 清水建設(株) 正会員 江戸川 修一
東洋大学 正会員 曾根 真理 戸田建設(株) フェロー 高橋 浩

1. はじめに

近年、建設分野では熟練作業員（坑夫等）が減少し、若手の入職者も減少していることから人材確保が課題となっている。これらの課題解決の一方策として、経験の浅い若手職員または作業員の判断・予測を AI 技術を用いて支援することが有益である。しかし、判断や予測に必要な情報は、熟練作業員の知見や経験によって得られた情報に依存している部分が多いため、これらを機械学習で支援できるように関連づける必要がある。本稿では、山岳トンネルにおける肌落ち予測に着目し AI 技術を用いた支援システムの構築を目的として、肌落ち予測に関する知見を熟練作業員にヒアリングを行い、得られた知見をセンサリングする方法について考察した。

2. 熟練作業員へのヒアリングに至った経緯

山岳トンネルの現場では、現在、各工事発注者の切羽観察評価をもとに、現場での目視及び切羽画像から切羽の状態を判断している。しかしながら、これらの判断には、切羽画像から得られる情報以外に熟練作業員の知見や経験が含まれている。AI 技術などで肌落ち予測の判断を支援する場合、熟練作業員の知見や感覚をシステムに組み込む必要がある。そのために、次の 2 点の課題がある。①肌落ち発生の予兆を判断する際、熟練作業員の着目点は経験的あるいは感覚的に各々が個別に持っていること、②熟練作業員が肌落ち発生の予兆を判断する要素を知識として結び付ける必要がある。以上の 2 点の検討を行うため、現場に従事している熟練作業員にヒアリングを行い、情報をセンサリングする技術との対応について検討を行った。検討フローを図-1 に示す。

3. 熟練作業員へのヒアリングについて

肌落ち発生の予兆を判断する切羽の現象を把握するため、3 現場において熟練作業員にヒアリングを行い計 15 名にヒアリングを実施した。ヒアリング対象者の情報を表-1 に示す。ヒアリングの質問事項はトンネル掘削時から支保工施工完了時までとし、各作業項目及び自然現象に分類したものに加えて、ヒアリング対象者の過去の肌落ち発生時の現象やその時感じた予兆などを質問した。その結果、作業段階ごとに判断要素が多くあり、湧水または岩質といった視覚的情報、音などの聴覚的情報など、熟練作業員は五感を働かせて切羽の状況を把握していることが分かった。これに基づき、その回答が地盤工学上の現象とどのような関係が存在するかを検討した。ヒアリング結果と検討結果を表-2 に示す。

肌落ち予兆の把握について特にヒアリング結果で多かった回答は、切羽をこそく作業する段階である。こそ

キーワード 山岳トンネル、機械学習、肌落ち、AI 技術

連絡先 〒112-0012 東京都文京区大塚 2-15-6 (一財) 先端建設技術センター TEL 03-3942-3991

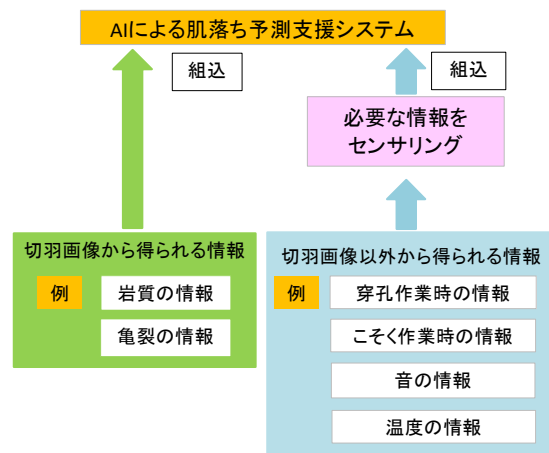


図-1 検討フロー

表-1 ヒアリング対象者

作業所名	年齢	経験年数	これまでの 主な業務・職種
Aトンネル	40	20年	職長
	33	11年	職長
	43	18年	坑夫長
	50	18年	坑夫
	36	7年	坑夫
	35	3年	坑夫
Bトンネル	40	5年	坑夫
	42	19年	職長
	50	27年	切羽監視員
Cトンネル	43	22年	職長・坑内夫
	44	20年	坑夫
	48	21年	坑夫
	41	19年	坑夫
	44	23年	坑夫
	49	27年	坑夫

くを行っても切羽が不安定で落石が止まらない場合や、浮石が多くありこそく作業を終了できない場合は危険であると判断している。更に、ブレーカーの打撃音が低い場合は岩質が軟らかく危険であると判断をしている。ブレーカーによる打撃音の高低には熟練作業員の個人差はあるものの、予測判断には重要な情報であると考え。

4. 現場情報の抽出方法の検討

熟練作業員にヒアリングを行い得られた知見をもとに、作業段階ごとに感覚的情報をセンシングする技術と結び付けた結果を表-3に示す。これより切羽での判断は、静的な視覚情報だけでなく、動的な視覚的情報に加え、音、振動などといった切羽画像以外の情報が多数含まれていることが分かる。現在、これらの情報を取得する方法として、まず音声を含む動画の評価が有益であると考え、実際にこそく作業中を撮影した動画を入手し、情報の抽出の可否及び情報の精度を検討している。

また、現在でも使用されている穿孔時の穿孔エネルギーといった機械でしか取得できない情報や赤外線画像を用いることで切羽の温度分布の把握による湧水の有無などとの組み合わせが有益な情報になる可能性がある。今後の検討において、経験的情報、感覚的情報を数値などの情報で捉えデジタルデータとして分析していく予定である。

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- ・肌落ち発生の予兆に関する情報について、現場の熟練作業員にヒアリングを行い、その経験的情報、感覚的情報と地盤工学上の現象との関係性について示した。
- ・肌落ちの発生の予測においては、動画や音声など多くの入力情報を組み合わせて分析をすることが、肌落ち発生の予測に関する情報が有益になる可能性がある。

6. おわりに

以上より、熟練作業員に肌落ち発生の予兆に関するヒアリングを行うことで現場作業時の感覚的、経験的な判断要素が多く存在することが示唆された。このような経験的、感覚的情報には個人差が必ず存在するため、抽出した情報を基に段階的な判断基準の作成が必要になってくる。また、判断項目ごとに重要度の設定をすることで、熟練作業員による判断により近い評価が可能になると考えられる。これらの課題を解決していくことで、最終的には、AI 技術を活用した肌落ち予測支援システムを構築していきたいと考える。なお、本研究は国土交通省建設技術研究開発助成制度の成果と（一財）先端建設技術センター自主研究の成果の一部である。

表-2 熟練作業員の五感（ヒアリング内容）と地盤工学上の現象との結び付け

工程	No	熟練作業員の五感						地盤工学上の現象
		ヒアリング結果(熟練作業員の着目点)	振	触	聴	味	他	
こそく作業時	1	石の落ち方	○				○	肌落ち・切羽崩落の予兆
	2	亀裂の目	○					同左による切羽鏡面崩壊(すべり)
	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	ボソボソとしている	○	○			○	浮き石の存在、周辺地山の緩み、肌落ち・切羽崩落予兆
	6	ブレーカーの音		○				○ 浮石の存在、岩質の硬軟の混在
	7	ブレーカーのノミで一通り切羽を触ってみて確認	○	○	○			○ 浮石の存在、岩質の硬軟の混在
	8	バックホウで浮石を探る	○	○	○			○ 浮石の存在、岩質の硬軟の混在
	9	互層状態(挟む粘土)	○					同左による切羽鏡面崩壊(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)	○		○			○ 同左による切羽鏡面崩壊(すべり)
	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、粘土層、玉石層等	○					○ 同左による肌落ち・切羽崩落
吹付け	15	吹付けまで素掘り状態で切羽が自立しない						肌落ち・切羽崩壊予兆、周辺地山ゆるみ、地山強度低下
	16	吹付け面の色の変化	○					吹付け面の強度低下、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)
	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			○			○ 切羽面強度低下、泥岩スレーキング、膨張性地山緩み
	20	穿孔水を出すところが詰まる	○		○			○ 粘土層の高い確率での存在
	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	○					○ 肌落ち、切羽崩落の誘発
	24	穿孔しているときの硬軟			○			○ 切羽面の強度差による肌落ち・切羽崩落
	25	穿孔水の状況の変化	○					○ 微粒分の流出による肌落ち・切羽崩落
	26	穿孔時のフィード圧や穿孔時間等の	○		○			○ 切羽面の強度差による肌落ち・切羽崩落
	27	吹付け面のクラック進展	○					○ 切羽面の押出、すべり、切羽崩壊の予兆
	28	吹付け面の裏の水	○					○ 湧水、吹付け背面水位上昇・切羽不安定化、切羽崩落
他その	29	ロックボルト座金の変状	○					変位増大、周辺地山緩み、地圧増加、塑性地山、肌落ち
	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

※他は、第六感、長年の経験による直感や勘など

表-3 切羽画像以外から得られる情報（動画・音・機器類のエネルギー等）を定量的に再現する方法

作業段階	対象情報	対象情報の定量的収集・再現手法(赤字)及び得られる情報
前段階	地盤調査・機器類のデータ等	・先行地盤調査 ・地山の地質区分・強さ分布・緩み状況・湧水の有無と等 例：ボーリング、弾性波探査、電磁波探査、電磁レーダー探査 発破/ロックボルト/探り穿孔 穿孔エネルギーの計測 穿孔時のエネルギーで背面地山の硬軟
	作業挙動・機器類のデータ	・穿孔作業動画 ・穿孔密度のバラツキから地山の硬軟の分布 ・機器類のエネルギー他、動画 ・掘削順序から地山の安定度 ・穿孔時間(穿孔スピード)で地山の硬軟を把握
穿孔(発破)	音	・穿孔音楽音 ・穿孔音で地山の硬軟を把握
	水の動き	・穿孔中、穿孔水の状況を把握 例：戻らないあるいは別の孔からの戻り→弱層や開口割れ目の存在
	臭気	匂いセンサー 例：腐敗臭(有機物、鉱物(黄鉄鉱/硫鉄鉱) 硫酸臭、泥岩粘土臭等)
	振動	振動センサー (一般に) 機械や設備の状態保全
	挙動	こそく作業動画 浮石の存在、地山のゆるみ(表層部)の把握
こそく作業	音 大きさ(音圧) 高さ(周波数) 音色(波形)	・切羽環境音 ・(大崩落の予兆となる)小崩落を把握 例：バラバラと落ちる小石や吹付けコンクリート小片 こそく音 ・背面の空腔をブレーカー打撃音で把握 ・鏡吹付けに生じたクラックを打撃音で把握
	温度 水の動き (流り、色、量の変化)	・赤外線切羽画像 ・温度差から湧水有無、含水率の大きさを判断 ・赤外線切羽画像 赤外線サーモグラフィ ・切羽の温度分布から湧水状況を把握 例：切羽からの流水・噴水の有無・量の変化 ・切羽の進行に伴う温度変化から地山の湿潤状態を把握
		・切羽動画 ・湧水の清濁の状態を把握
	臭気	匂いセンサー 例：腐敗臭(有機物、鉱物(黄鉄鉱/硫鉄鉱) 硫酸臭、泥岩粘土臭等)
	振動	振動センサー (一般に) 機械や設備の状態保全
吹付けコンクリート～支保工設置	作業挙動・機器類のデータ	・鏡吹付け作業動画 ・吹付けコンクリート施工中の付着状態(切羽の崩れ易さ・湧水状態)把握 ・崩落の予兆としてのクラック発生(鏡吹付けコンクリート等)把握 ・崩落の予兆としての支保工の変位変形(ロックボルト)を把握

山岳トンネルにおける機械学習用切羽写真について ー現状の写真と撮影環境および撮影方法の提案ー

(一財) 先端建設技術センター 正会員 ○木山 智裕 (株) 安藤・間 フェロー 鈴木 雅行
(一財) 先端建設技術センター 正会員 吉川 正 鹿島建設(株) フェロー 山本 拓治
(一財) 先端建設技術センター 正会員 橋立 健司 清水建設(株) 正会員 小島 英郷
東洋大学 正会員 曾根 真理 戸田建設(株) フェロー 高橋 浩

1. はじめに

近年, 様々な業種において機械学習による省力化・高度化が進められており, 山岳トンネルの分野でも機械学習による切羽評価システムの開発が進められている. しかし, 多くの研究で教師データの少なさが問題となっている. 本稿では山岳トンネル現場で機械学習に使用可能な切羽写真の画像データを収集するための撮影仕様を検討した結果を示す.

2. 切羽観察写真を機械学習写真に使用する場合の課題

山岳トンネルの現場では, 1 日 1 回以上切羽観察が行われており, その際切羽観察写真が撮影されている. 9 現場から施工時の切羽観察写真を計 3679 枚入手し, 現状撮影されている切羽観察写真を機械学習に使用する際の課題を抽出した. 入手した切羽観察写真の例を写真-1 に示す. その結果, 次の 5 点が課題となった. 1) 写真のコントラストや色調の変化, 2) 切羽鏡面に焦点が合っていない, 3) 手振れにより切羽が鮮明な画像になっていない, 4) 写真の画素数が小さい, 5) 影・黒板等の人工物が写り込んでいる. これらが発生する原因は次のような理由が考えられる. 1) 同一現場であっても照明設備や撮影時の照明仕様が一定でないことがあり, カメラのホワイトバランスを調整して撮影したため, コントラストや色調が変化してしまった. 2) 黒板等他の場所に焦点をあわせて撮影したため, 切羽鏡面に焦点が合わなかった. 3) シャッタースピードが遅くなり, 手振れが発生した. 4) 電子納品の基準にあわせて CALS モードで撮影した. 5) 人工物がある状態で撮影した. このうち, 5) を除く 4 つの課題について, 切羽観察写真を機械学習写真に使用できる撮影仕様を検討した.

3. 撮影実験の実施

撮影仕様の検討にあたり, 3 現場において撮影実験を行った. 撮影実験を行った各現場における切羽照明仕様を表-1 に示す. 撮影実験を行った 3 現場だけを見ても, 各現場で切羽撮影時の照明仕様が大きく異なり, 切羽鏡面の照度も 70Lx~340Lx とバラツキが大きかった. 今回の撮影実験では, 各現場での照度の違いに対し, 後から色補正を行うことができるよう, 切羽に色見本(図-1 参照)を設置して撮影を行った. また, 撮影時に手振れ

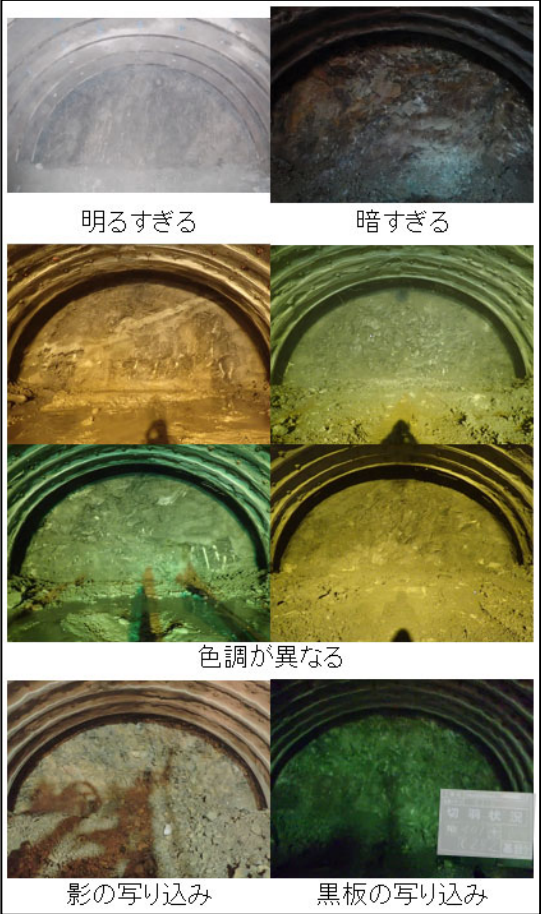


写真-1 現状の切羽観察写真の例

表-1 撮影実験時の切羽照明仕様

	現場イ	現場ロ	現場ハ
天端照明	— (120m)	○ 1基(50m)	○ 2基ずつ (25m,35m,45m)
側壁照明	—	—	○ 1基×2箇所 (15m)
ジャンボ照明	○ (20m)	○ (30m)	—
写真撮影用照明	○ (15m)	—	—
切羽照度	70Lx	90Lx	340Lx

※()内は切羽鏡面からの距離

キーワード 山岳トンネル, 切羽写真, 撮影要領(案), 機械学習, AI 解析

連絡先 〒112-0012 東京都文京区大塚 2-15-6 (一財) 先端建設技術センター TEL 03-3942-3991

を軽減するために三脚を使用した。

撮影した3現場の写真例を写真-2に示す。撮影実験は安全を考慮し、吹付け後に撮影したため、切羽の割れ目は確認できなかったが、切羽の凹凸が写真から確認でき、機械学習写真としても使用可能と考えられる。なお、現場ハは色見本の黄色と黄緑の部分が白くなり色の判別が出来なくなっている。これは、切羽付近の照度が高かったためと考えられ、照度の設定に上限を設ける必要があると考えられる。

4. 色補正の実施

現場イの同一切羽でホワイトバランスを変えて撮影した写真および色補正後の写真を写真-3に示す。撮影後色見本を使用して補正した写真は、右の補正前写真にあった青みが消え、基準写真に近い色合いに補正できており、色見本によって色補正を行うことは可能であるといえる。

5. 撮影要領の提案

撮影実験により得られた結果から、山岳トンネル切羽写真撮影要領を図-2に案としてとりまとめた。なお、切羽撮影に三脚を使用した場合でも、シャッターボタンを押すことにより手振れが生じる場合がある。足場が悪い場合にはレリーズやセルフタイマーを使用して対策する必要がある。切羽の照度については今回の撮影時の実績から適切な範囲を設定した。

6. おわりに

以上より、切羽写真の撮影仕様を定めることで、機械学習写真に使用できる切羽写真の取得および教師データの増加が可能と考えられる。

今後の課題として、岩種、劣化度、割れ目の状態等の異なる条件下で今回の撮影実験と同様の結果が得られるか確認する必要がある。また、色見本の規格についての検討および、切羽撮影用照明設備を含めた撮影時照度の適切な範囲についてのさらなる検討が必要であると考えられる。なお、本報告は国土交通省の建設技術研究開発助成制度の成果および（一財）先端建設技術センターの自主研究の一部である。

参考資料：トンネル地山等級判定マニュアル（試行案），平成28年7月，国土交通省近畿地方整備局



	黒	青	シアン	緑	白	黄	マゼンタ	赤
R	0	0	0	146	255	255	204	255
G	0	112	176	208	255	255	0	0
B	0	192	240	80	255	0	153	0

図-1 色見本(例)

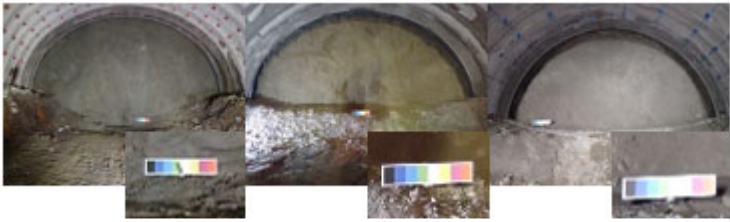


写真-2 撮影実験結果
(左：現場イ 中央：現場口 右：現場ハ)

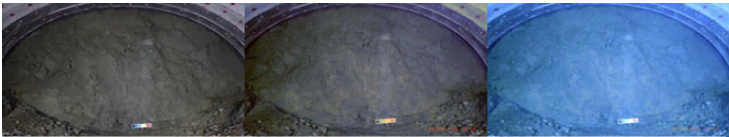


写真-3 色補正結果
(左：基準写真 中央：補正後 右：補正前)

山岳トンネル切羽写真撮影要領(案)

1. 撮影準備

①撮影は最低でも1200万画素以上の画素数で撮影する。

②三脚を利用して手振れを防ぐ。

③撮影はAUTOモードに設定することとする。

④データ形式はJPEGとする。

⑤色見本を切羽から5m程度離して設置する。

2. 撮影時の留意点

①切羽正面および左右の支保工付近から切羽の全体が入るように撮影する。

②切羽の天端、左右の肩を撮影する。

③ズームは原則使用しない。
ただし、ズーム撮影した場合でも1200万画素を確保できる場合を除く。

④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。

⑤フラッシュは使用しないものとする。

⑥切羽鏡面に焦点をあわせる。

図-2 撮影要領(案)の提案

山岳トンネルの切羽観察・評価に向けた赤外線サーモグラフィの活用について ー発破・こそく・鏡吹付けコンクリートの各段階の切羽面や漏水等の温度測定例ー

(一財) 先端建設技術センター 正会員 ○吉川 正 (株)安藤・間 フェロー 鈴木 雅行
(一財) 先端建設技術センター 正会員 橋立 健司 鹿島建設(株) フェロー 山本 拓治
(一財) 先端建設技術センター 正会員 木山 智裕 清水建設(株) 正会員 江戸川 修一
東洋大学 正会員 曽根 真理 戸田建設(株) フェロー 高橋 浩

1. はじめに

山岳トンネル工事における切羽では、発破、こそく、鏡吹付けコンクリート（以後、鏡吹付けと称する）等の作業中に、発破、鏡吹付け、湧水・漏水、換気等により各部位で温度差や経時変化が生じている。一方、支保パターンを決める切羽観察の評価項目の一つに湧水と水による劣化があるが、例えば前者の区分は、定性的な5段階の（1. なし・滲水程度、2. 滴水程度、3. 集中湧水、4. 全面湧水、5. その他）となっており、その評価は、個々人の判断に委ねられている。今回、2現場において、赤外線サーモグラフィ（使用カメラ FLIR C2）による各施工段階（発破、こそく、鏡吹付け）の切羽及び施工後日数の経過した天井や側部の二次吹付けコンクリート（以後、二次吹付けと称する）の漏水部分の温度測定を実施して、諸現象との関連付けを試みた。

2. 山岳トンネルの切羽等の各部位に対する温度測定結果

(1) 発破掘削方式による各作業段階の切羽

N現場の発破、こそく、鏡吹付け施工後の切羽の写真と温度測定の結果から得られた知見を以下に示す。

1) 発破後

写真-1、2及び表-1より、切羽面の地山部は、デジタル写真（RGB）と比較して赤外線画像では、孔尻（発破位置）部分の温度が周辺より高温の橙色で円状に明確に写っている。

図-1の発破計画図と比較することで、穿孔精度の確認が可能となる。ずりについては、紫色の温度が低い部分と切羽から離れた部分（写真手前部）に孔尻程度の温度領域（橙色）が見られ、発破ずりの飛散状況・範囲の推定にも活用可能と考える。

2) こそく後

写真-3及び表-2より、地山については、発破で残った部分をブレイカで撤去することで、奥の高温部が表面に出てきて、地山全体がほぼ均質に18~20℃程度の橙色の部分広がっている。下部は、ずりの撤去で孔尻が気中に見えてきている（橙色の円形部）。発破後に20℃前後であったずりは、坑内換気に触れて全体的に冷えてきている。

3) 鏡吹付け施工後

写真-4、5、表-3は、鏡吹付け施工後の切羽写真と温度分布である。鏡吹付けの配合は、表-4であり、設計厚さは、30mm、練り混ぜ温度は19℃、リバウンド率は、天端・側壁部平均：9.0%（2019年12月26日試験値）である。鏡吹付けは、21℃程度の高温域（橙色）と18℃程度の低温域（薄紫色）が混在している。吹付け厚が薄く、こそく後の切羽温度に依存している可能性がある。発破で生じたずり部は、19℃程度の高温域と16℃程度の低温域が混在しており、高温域には、リバウンドした吹付けコンクリートが混在している可能性が考えられる。



写真-1 発破後の切羽

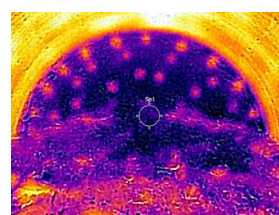


写真-2 発破後の切羽 (赤外線画像)

表-1 発破後の切羽温度測定結果

測定対象	温度℃		
切羽(地山)	14.1	14.0	13.9
切羽(孔尻)	20.5	18.1	18.0
ずり(高温部)	22.1	19.3	17.2
ずり(低温部)	16.1	14.0	13.8

測定日時: 2020. 1. 17 8:29

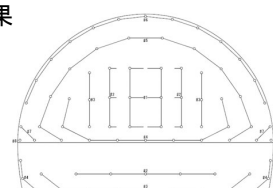


図-1 発破計画図

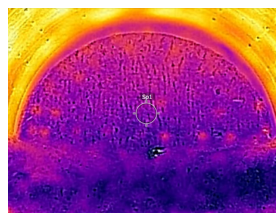


写真-3 こそく後の切羽 (赤外線画像)

表-2 こそく後の切羽温度測定結果

測定対象	温度℃		
切羽(地山:薄紫色)	18.5	18.3	17.9
切羽(孔尻:橙色)	20.0	19.0	18.9
ずり(高温部:橙色)	16.0	16.0	15.9
ずり(低温部:紫色)	14.7	14.5	14.3

測定日時: 2020. 1. 17 9:52

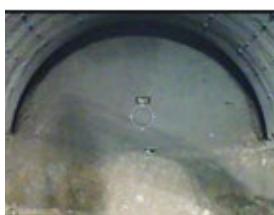


写真-4 鏡吹付け施工後の切羽

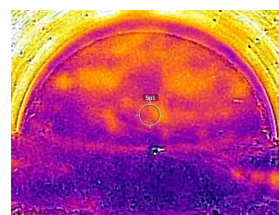


写真-5 鏡吹付け施工後の切羽 (赤外線画像)

表-3 鏡吹付け後の温度測定結果

測定対象	温度℃		
二次吹付け(施工済み:薄橙色)	27.5	27.1	26.2
鏡吹付け(高温部:橙色)	21.8	21.3	20.9
鏡吹付け(低温部:薄紫色)	18.1	17.8	17.3
ずり(高温部:橙色)	19.7	18.9	18.0
ずり(低温部:紫色)	16.5	16.4	16.4

2020. 1. 17 10:06

(2) 二次吹付け（施工済み）の漏水部

N 現場及び A 現場のトンネル坑内の施工済みの鋼製支保工、二次吹付け及び漏水箇所の写真及び温度分布を写真-6, 7, 表-5 に示す。

N 現場の温度測定値については、施工済みの二次吹付けの乾燥部（薄橙色）が 19℃程度、同鋼製支保工が 18.5℃程度、漏水（紫色）が 15℃程度、同しみ（薄紫色）が 15.5℃程度となり、漏水の量が多くなるほど、温度が低下する傾向がみられる。その下方の仮排水路の流水（暗紫色）の水温は、13℃程度と低い値である。

A 現場の施工済みの二次吹付けの漏水部（暗紫色：写真-8、表-5 参照）の温度は、12～13.5℃程度と流下に伴って段階的に上昇している。同しみ（薄紫色）も 12.5～14℃程度と上昇傾向がみられる。なお、仮排水路の流水部（写真-9 参照）は、13.5℃程度である。

上記から施工済みの二次吹付けでは、湧水や漏水の量が多くなれば、温度低下量も多くなり、地下水温に近づく傾向にあり、二次吹付けの温度変化の傾向と漏水量と流下距離による水の温度低下量の関係を整理できれば、二次吹付けの漏水部の測温で概ねの漏水範囲と漏水量の把握も可能と考える。

(3) 鏡吹付け作業エリア

写真-10, 11, 図-2 に N 現場の切羽における鏡吹付け作業時の切羽付近の状況、各部位の温度分布を示す。施工済みの二次吹付け（薄橙色）は、30℃程度、施工中の鏡吹付け（橙色）は、21℃程度、切羽面（鏡吹付け前：薄紫色）は 18℃程度、発破ずり（鏡吹付けのリバウンド混じり：紫色）は、16.5℃程度、作業盤（紫色）は、16.5℃程度、コンクリート吹付け機高温部（白黄色）は 36℃程度である。

以上、赤外線サーモグラフィカメラ (RGB 併用) の静止画像について考察したが、赤外線動画の適用で湧水の評価、切羽の鏡吹付けの仕上がり状況や施工手順の把握と最適化への展開も可能と考える。

3. まとめ

山岳トンネル切羽における現象把握への赤外線サーモグラフィの適用性について得られた知見と今後の適用展開について以下に示す。

- ・切羽における発破、こそく、鏡吹付けの各施工段階における温度分布から、発破位置の特定、発破によるずりの飛散状況、鏡吹付けの施工状況のリアルタイムでの把握が可能となる。
- ・施工済み二次吹付けのしみ・漏水の範囲及び流下距離と温度の低下傾向の可視化、更に経時の温度測定から、同場所や切羽面での湧水・漏水・しみの場所とそれらの量の推定が可能となる。
- ・鏡吹付けの仕上がり状況やずり上の鏡吹付けのリバウンドの範囲と量の推定が可能となる。

今後、赤外線サーモグラフィの画像及び同動画の活用検討により、例えば、切羽における湧水や水による劣化等種々の現象に対しての定量的な評価手法の提案、同手法への機械学習の活用による、若手技術者等の切羽観察の業務支援等に結び付けて行きたいと考える。

なお、本報告は、国土交通省建設技術研究開発助成並びに（一財）先端建設技術センター自主研究開発の成果の一部である。

表-4 吹付けコンクリート配合表

目標 スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						
			W	C	S	G	減水剤	助剤	急結助剤
24±2	41.0	65.0	184	450	1115	581	3.825	1.35	4.5

※ 空気量の目標：3.0% 練り混ぜ温度：19℃



写真-6 二次吹付けの漏水・しみ

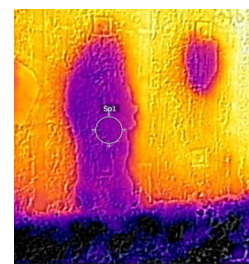


写真-7 二次吹付けの漏水・しみ(赤外線画像)

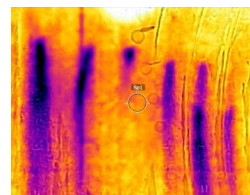


写真-8 二次吹付けの漏水(赤外線画像)

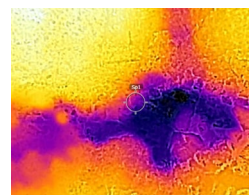


写真-9 写真-8 下方仮排水路の流水(赤外線画像)

表-5 二次吹付けと漏水等の温度分布

測定対象(N 現場:2020.1.17)	温度℃		
二次吹付け(施工済み:薄橙色)	19.8	18.8	18.6
鋼製支保工(施工済み:薄橙色)	18.6	18.5	18.4
漏水(紫色)	15.2	15.1	15.0
しみ(薄紫色)	15.9	15.6	15.6
仮排水路の流水(暗紫色)	13.3	13.1	13.1
測定対象(A 現場:2019.10.25)	温度℃		
漏水(暗紫色:上中下を測温)	11.8	12.5	13.4
しみ(紫色:上中下を測温)	12.5	13.0	14.1
下方部の流水(暗紫色)	13.2	13.5	13.6



写真-10 鏡吹付け施工状況

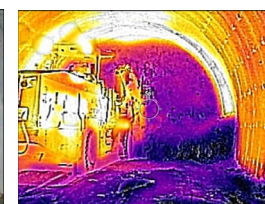


写真-11 鏡吹付け施工状況(赤外線画像)

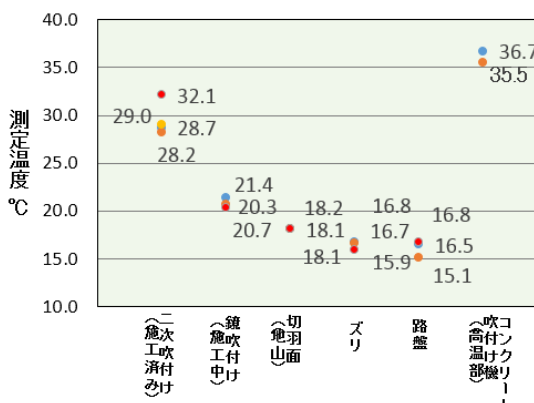


図-2 鏡吹付け施工時の各部温度分布