

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 〇杉本 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 曽根 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。

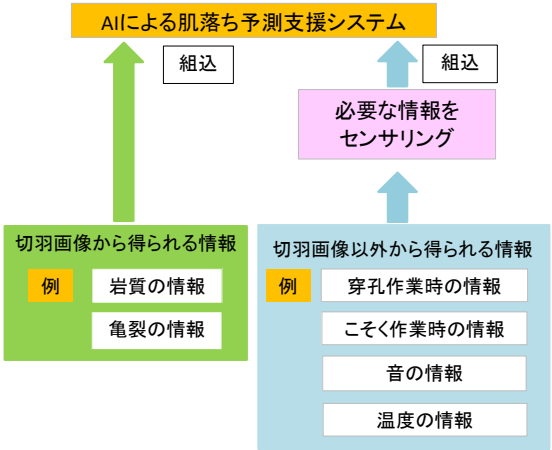


図-1 検討フロー

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

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 TEL03-3942-3991

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)	視	聴	触	嗅	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
すき切羽時	9	互層状態(挟在粘土)	○						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	切羽面が濡れていると要注意	○		○			○	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
吹コン付け	15	吹付けまで素掘り状態で切羽が自立しない							肌落ち・切羽崩落予兆、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
穿孔および装束時	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	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/掘り穿孔 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
	穿孔(発破)	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 音 ・穿孔音で地山の硬軟を把握 水の動き ・穿孔作業動画撮影 ・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) 硫黄臭、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
こそく作業	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 音 ・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(濁り、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・湧水の有無・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) 硫黄臭、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	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

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る。

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。