

# トンネル工事岩判定へのDX化に向けた 取り組み

野口 将志<sup>1</sup>・岩井 耀平<sup>2</sup>

<sup>1</sup>株式会社オリエンタルコンサルタンツ関東支社 地下構造部  
(〒151-0071東京都渋谷区本町3-12-1住友不動産西新宿ビル6号館)

<sup>2</sup>株式会社オリエンタルコンサルタンツ関西支社 地下構造部  
(〒530-0005大阪府大阪市北区中之島3-2-18住友中之島ビル)。

山岳トンネルの施工の際には、トンネル切羽に岩判定の判定員が参集して切羽の地山評価を行い、設計支保パターンの変更を行うトンネル切羽岩判定が実施されている。しかしながら、熟練した岩判定技術者の減少、若手技術者の経験機会の不足および山岳トンネル現場へのアクセスが困難という課題がある。解決策として「施工記録を活用した判定の自動化」、「通信技術を用いた判定の支援」、「人材育成」の3つの観点より岩判定のDX化に向けて取り組んだ。トンネル岩判定の高度化におけるAI、遠隔臨場、VRおよびアイトラッキングなど複数の検討・試行について報告を行う。

キーワード 岩判定、山岳トンネル、AI、VR、遠隔臨場

## 1. はじめに

山岳トンネル工事の施工にあたっては、切羽の観察・計測により地山等級の判定（以下、岩判定）を行い、安全性及び経済性を確保した合理的な施工を行う必要がある。岩判定は、トンネル工学および地質学に関する技術と経験が求められ、土木分野の中でも難易度が高い判定のひとつである。

近畿地方整備局においては、平成18年度に「トンネル地山等級判定マニュアル（試行案）」<sup>1)</sup>を発刊し、判定指標や様式、判定の手順、データ蓄積の統一化をはかり、さらに平成28年度までに得られた近畿地方整備局管内におけるトンネル施工記録を元に、判定指標や判定時の留意事項を補完し、改訂をおこなっている<sup>2)</sup>。

一方で、岩判定を実施する熟練技術者は減少傾向にあるとともに、実際の切羽で経験を積む機会が限られており、若手技術者への技術伝承が行われにくい現状にある。この課題に対し、平成28年度から令和5年度の7年間にトンネル工事地山等級判定とりまとめ業務で取り組んだ、「施工記録を活用した判定の自動化」、「通信技術を用いた判定の支援」、「人材育成」の3つの観点から、トンネル工事岩判定（地山等級判定）のDX化（高度化）について報告する。

## 2. 施工記録を活用した判定の自動化

岩判定では、経験豊富な熟練技術者の減少などにより、判定員（近畿地方整備局では3名が標準）が揃わない状

況が生じつつある。このため、過去の切羽評価結果や、切羽写真、センサー等のデータを有効活用した判定の自動化を目指す取り組みが求められている。これらの背景から、令和3年度より、岩判定へのAIの活用、また、施工時に計測されている、もしくは簡易に計測可能であるが収集されていないデータの岩判定への活用について検討を進めた。

本論では、「岩判定へのAI試行」に加え「こそく音」と「赤外線サーモグラフィ画像」データに着目し、岩判定への活用について報告する。

### (1) 岩判定へのAI試行

#### a) AIによる切羽評価

岩判定AIの構築においては、手振れ等の不良データを削除した4394枚の切羽画像を用いて、各切羽で判定された支保パターン、および9項目の評価区分を教師データとした。支保パターンを対象としたAIによる切羽評価の結果を表-1に示す。

表-1 AIの切羽評価結果

判定員の 岩判定	画像数	AIの回答（画像数）					判定員とAIの比較	
		C I	C II	D I	D II	D III	一致	1パターン 誤差
C I	62	30	23	2	0	7	48.39%	88.71%
C II	421	5	341	57	1	17	81.00%	95.72%
D I	261	3	79	132	17	30	50.57%	87.36%
D II	20	0	3	6	11	0	55.00%	85.00%

AIが判定員と同じ支保パターンを出した割合は、データ数の多いCIIでは81%となるが、その他の支保パターンについては50%前後に留まる結果となった。ただし、判定員が判定する際にも3名の判定員が同一の判定結果とならない、あるいは判定員自身が2つの支保パターンのいずれにするか悩むことは多い。このため、AIが判定員と同じ支保パターンもしくは一つずれた支保パターンを選定した割合を確認した結果、一致率は90%前後となった。この結果からAIが判定した一致率の高い2つの支保パターン、および2つの支保パターンの一致率を踏まえて判定の参考にするという利用法であれば、現場での活用も視野に入れることが考えられた。

ただし、判定員は岩判定をする際、9項目の評価区分に対して4段階の評価を行い、その結果より算出される切羽総合点と過去の実績を比較して支保パターンを設定する。対して、本AIは切羽写真から直接支保パターンを判定するため、判定員の評価と対比することができない。このため、9項目4段階の各評価区分を判定するAIを作成した。この結果、データ数が豊富な項目は判定員とAIの一致率が60%以上あるが、データ数が10枚程度の場合一致率が20%と低い結果となった（(H)湧水、(I)水による劣化はデータ数が少ない）。

**b) 判定の妥当性検証**

9項目の各評価項目における判定では、「評価項目にのみ着目して判定する」という条件をAIに与えていないため、AIが判定の際に各項目のみに着目し判定しているか疑問視された。このため、AIが判定する際の着目点を可視化し、判定員の着目箇所と比較することで判定の妥当性を検証した。検証の対象は、9項目の判定項目の内、判定員とAIの判定結果が一致した割合が高い(A)切羽の状態：50断面、(E)割れ目の頻度：50断面の計100断面とした。検証方法は、切羽観察記録（切羽スケッチ）と可視化データを比較することで妥当性を確認した（図-1）。

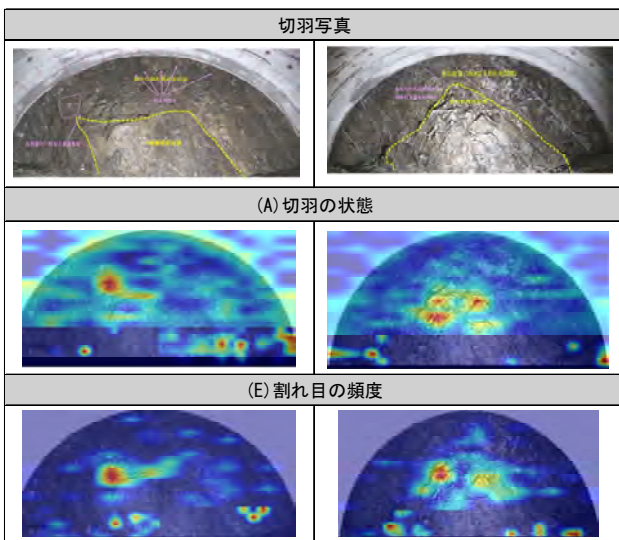


図-1 判定員とAIの着目点

判定員とAIの着目点の整合性は5段階で評価し、各断面

ごとに評価コメントを取りまとめ、判定員の見落としの可能性有無についても精査した。AIモデルは「天端」「右肩」「左肩」の3部位ごとに構築し、可視化した結果を1つの切羽として統合した。AIが切羽写真の背面に着目することを避けるため、背景をランダムパターン化し、切羽外に着目が及ぶことないよう配慮した。2項目(A・E)による妥当性評価の結果、(A) 6~8割以上の一致率：34%、(E) 6~8割以上の一致率：14%となり、8割以上は0%という結果となった（表-2）。いずれの結果でも判定員とAIの着目点の一致率は低い結果となった。

表-2 判定員とAIの着目点と一致率

評価（一致率）	各50断面	
	(A) 切羽の状態	(E) 割れ目の頻度
①8割以上（一致）	0%	0%
②6~8割程度	34%	14%
③4~6割程度	44%	56%
④2~4割程度	20%	30%
⑤1割以下（不一致）	2%	0%

**(2) こそく音**

こそくは、切羽判定前に必ず実施する浮石落としの作業であり（図-2）、こそく音を即時分析して切羽面の強度等に評価化することで、判定指標の一部を自動化できる可能性がある。また、現場作業員やサイクルへの負担をかけずに情報の取得が可能であるため活用を検討した。



図-2 こそく音の撮影データ

**a) データの取得**

データの取得方法を表-3に示す。こそく音データは10断面を受領した。

表-3 データの取得方法（こそく音）

撮影	<ul style="list-style-type: none"> <li>こそく実施時</li> <li>1日1回以上を目安に撮影</li> <li>トンネル一般部を対象（坑口部は除く）</li> <li>こそく開始後の落下しやすい岩塊撤去後</li> </ul>
作業内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>撮影方法：天端、左肩、右肩の3箇所ごとに10秒ずつ動画撮影（天端、左肩、右方の3箇所を加重平均し、圧縮強度を評価しているため）</li> <li>撮影位置：切羽から15m程度</li> <li>撮影順序：天端・左肩、右肩の順序固定orファイル名に追記（ファイル名の例：天左右など）</li> </ul>
機材	<ul style="list-style-type: none"> <li>デジカメ、iPhone等（岩判定業務受注者所有）</li> </ul>
受領データ	<ul style="list-style-type: none"> <li>-施工者より受領-</li> <li>撮影データ</li> <li>切羽観察簿</li> </ul>

b) 分析結果

こそく作業時の周波数域を図-3に示す。取得したデータは、約30Hz付近から400Hz付近にブレイカーのエンジン動作音が強く存在し、この範囲の音圧レベルが全体の大部分を占める。さらに3,000Hz付近にかけて一定レベルの動作音が続く傾向にあり、こそく音の集音に課題があることが判明した。動作音の軽減には、マイクロホンと切羽を一定距離にすること、直進性の高い高周波数の音を正確に捉えるため、音響分析方法の検討を行う必要がある。また、マイクロホンで捉える可聴域音、非可聴域音以外に、映像情報、必要に応じ、その他重機に取り付け可能なセンサ類などの利用も今後検討する。

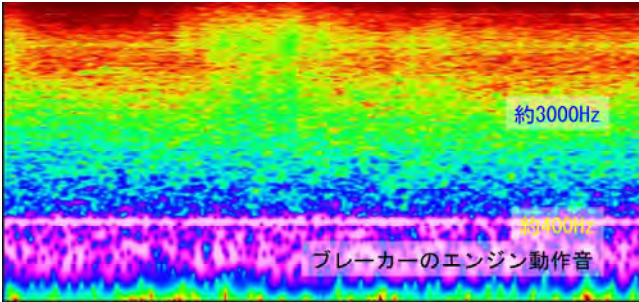


図-3 トンネル工事の周波数域（こそく作業）

上記に述べた通り、集音に関する課題はあるが、今回取得した周波数帯が似ているデータをとりまとめ、周波数帯の傾向を以下の3パターンに整理した（図-4）。

- Type1：健全な切羽：高周波数帯にピークが多い
- Type2：中間の切羽：高周波数帯ピークがやや少ない
- Type3：脆い切羽：高周波数帯ピークが明確でない

分析の結果、こそく音は、切羽の状況と相関性が高い可能性が確認できた。

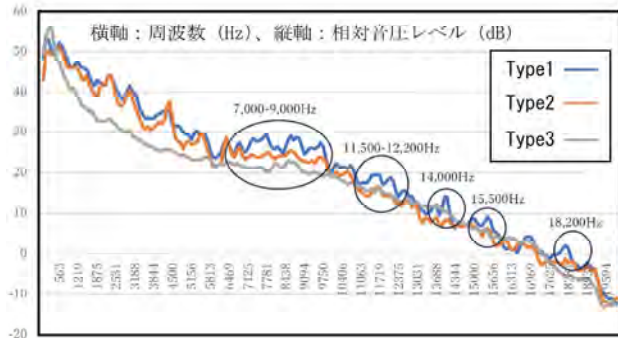


図-4 こそく作業音の周波数傾向

(3) 赤外線サーモグラフィ画像

赤外線サーモグラフィ画像は、主に温度の差を表すことから、切羽表面の湧水を捉えることが可能であるか検討した。また、水による影響以外についても画像と切羽観察簿のコメントを対比し、トンネル切羽評価に役立てることができるか確認した。切羽観察簿との対比作業は、トンネル工事経験者が実施した。

a) データ取得

データの取得方法を表-4に示す。赤外線サーモグラフィ画像は計13断面を受領した。

表-4 データ取得方法（赤外線サーモグラフィ画像）

撮影	<ul style="list-style-type: none"> <li>・岩判定時</li> <li>・1日1回以上を目安に撮影</li> <li>・トンネル一般部を対象（坑口部は除く）</li> </ul>	
作業内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・撮影方法：                             <ul style="list-style-type: none"> <li>①撮影前にスマホアプリ起動、簡易な撮影設定【20秒程度】</li> <li>②切羽を1枚撮影【10秒程度】</li> <li>③デジカメ等で切羽を撮影【10秒程度】</li> </ul> </li> <li>・撮影位置：上半切羽全体が映り込むように撮影（切羽から15m程度）</li> <li>・切羽スケッチ：切羽の湧水箇所をスケッチ</li> </ul>	
撮影機材	<ul style="list-style-type: none"> <li>・デジカメ、iPhone等（岩判定業務受注者所有）</li> <li>・赤外線サーモグラフィ付き</li> <li>・アタッチメント（岩判定業務受注者所有）</li> </ul>	
受領データ	<ul style="list-style-type: none"> <li>-施工者より受領-</li> <li>・切羽写真（通常カメラ） ※データ形式：JPG</li> <li>・切羽写真（赤外線カメラ） ※データ形式：JPG</li> <li>・切羽観察簿（湧水位置が明記されている資料）</li> </ul>	

b) 分析結果

本分析では、赤外線サーモグラフィ画像と施工者が湧水位置を記載した切羽写真を比較した。この結果、赤外線サーモグラフィ画像は、一部切羽湧水と一致する箇所があるものの、大部分で乾湿状況を捉えていると言い難い結果であった（図-5）。

一方、赤外線サーモグラフィ画像は、亀裂や層理、褶曲等を可視化しているようにも見受けられる。

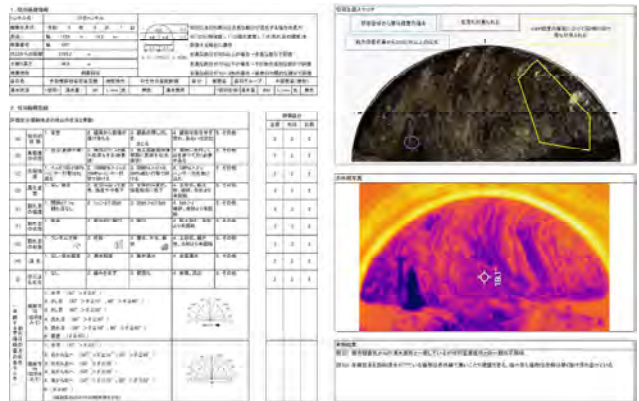


図-5 切羽観察簿と赤外線サーモグラフィ画像

3. 通信技術を用いた判定の支援

山岳トンネルは、発注者事務所から離れた遠方の山岳地に計画されることが多く、また岩判定の開始時間はトンネルの施工進捗により影響を受ける。さらに熟練の判定員が不足することから、現場で岩判定に参加することが困難な場合がある。このため、通信技術を用いた遠隔臨場による岩判定を試行した。

(1) 遠隔臨場の試行

遠隔臨場の試行は、令和3年から取り組み、計9現場にて実施した。令和3年にトンネル掘削現場と遠隔地（発注者事務所等）を無線通信等で接続させる遠隔臨場の検討、R4年度までに坑内・坑外にWi-Fi環境が確保されている現場での試行を完了した<sup>3)</sup>。

遠隔臨場の試行現場を表-5に示す。

表-5 遠隔臨場試行現場

施行日	発注事務所	トンネル名	遠隔臨場実施延長
2021/9/14	国土技術政策総合研究所	実大トンネル	300m
2021/12/18	紀南河川国道事務所	江住第二トンネル	370m
2022/4/26	紀南河川国道事務所	高富トンネル	100m
2022/6/9	紀南河川国道事務所	興瀨道路2号トンネル	240m
2022/9/30	紀南河川国道事務所	興瀨道路2号トンネル	350m
2023/1/20	和歌山河川国道事務所	有田海南道路5号トンネル	765.5m
2023/6/2	紀南河川国道事務所	興瀨道路2号トンネル	1140m
2024/2/28	福井河川国道事務所	川合トンネル	2500m
2024/3/6	兵庫国道事務所	炬口トンネル	900m

a) 遠隔臨場システムの選定

使用機器については、令和3年から令和4年において現場試行を通してトンネル切羽における岩判定に最適な機器選定をおこなった<sup>3)</sup>(表-6、図-6)。機器の選定にあたっては、現場でおこなわれる岩判定の質を落とさないよう現場での作業が再現されるよう配慮した。

表-6 使用機器 (遠隔臨場)

機材名	機器写真	サイズ	数量	仕様・特徴
PTZカメラ		30cm×30cm×30cm程度	1	・webカメラ ・フルHD ・ズーム倍率：30倍 ・低被写体照度(0.05lux)対応
ウェアラブルカメラ		10cm×5cm×3cm程度	1	・ウェアラブルカメラ(判定員が所持) ・フルHD ・ズーム倍率：2~4倍
骨伝導イヤホン・マイク		26g	1	・ノイズキャンセリングマイクイヤホン
坑内通信(無線通信)		16.5cm×16.5cm×10cm 1.8kg	4	・ミリ波通信、電波法の規制対象外 ・最大通信速度：1Gbps ※購入金額：120万円程度(1対向) レンタル費はメーカーによって異なる
坑外通信(starlink)		57.5cm×51.1cm 約20kg	1	・低軌道衛星通信 ・上り速度：25Mbps 下り速度：150Mbps

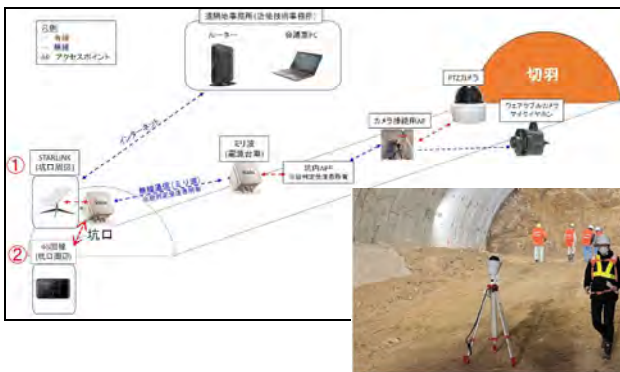


図-6 遠隔臨場システムの配置例

① PTZカメラ, ウェラブルカメラ

現場における岩判定では、判定員は自身で確認が必要と判断した箇所を自由に確認する。遠隔臨場に際しても切羽全体を遠隔者が拡大、上下、左右に自由に遠隔操作できるPTZカメラを採用した。また、PTZカメラだけでは側方や足元のざり等の確認ができないため、ウェアラブルカメラを岩判定支援者が持つことにより、補完するものとした。なお、PTZカメラ、

ウェアラブルカメラの画質については、現場での試行結果より、9項目の評価を画面上でおこなえる必要があるため、FHD以上、かつ暗所、及び切羽面での照度のばらつきへの追従性から低被写体照度を0.05lux以上を推奨スペックとした。

② 骨伝導イヤホン・マイク

現場での岩判定における判定員は、岩判定補助員に専門的な質問を行い、助言のもと判定を実施する。同じ環境を確保するため、骨導イヤホン・マイクにより騒音下でも明瞭に現場と遠隔地でリアルタイムでのやりとりできる環境を確保した。

③ 坑内外通信

山岳トンネルは、4G、5G等のWi-Fi不感地帯に計画されることも多い。また、延長が300m程度の場合、トンネル内にWi-Fiが設置されないこともある。このような環境下でも通信できる手段として、トンネル内についてはミリ波通信、LED通信の通信試験を実施した。結果、目視で投光部から受光部が確認できれば、発信機・受信機を数百m離してFHD配線に必要な通信量を確保可能であることを確認した。また、トンネル外通信については低軌道衛星通信(starlink)の施行を行い、衛星方向に支障物が無い環境であれば、FHDに必要な通信量が十分確保されることを確認した。

④ 遠隔地のモニター

50インチ、32インチ、24インチ、13インチ(ノートパソコン)について、複数の岩判定経験者で判定を試行した結果、24インチ以上が切羽の臨場感、切羽全体のひびわれや風化を確認する上で良好という結果となった。ただし、大型ディスプレイの場合、画質が粗くなる傾向にあるため、画素数に応じた選択が必要となる。また、PTZカメラとウェアラブルの2画面構成が確認しやすく推奨される。

b) 現場臨場と遠隔臨場における判定のばらつき

トンネル切羽前における現場臨場および遠隔臨場の結果を切羽判定集計表に整理した(表-7)。

表-7 切羽判定集計表による判定のばらつき

項目	調査者		総合評価		設計コンサルタント等(企業)											
	調査		総合		調査		調査		調査		調査		調査			
	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右		
切羽の状況	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
圧縮状況	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
風化状況	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
新元部の状態	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
新元部の状態	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
湧水	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
その他	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
位置別集計	2.2		2.2		2.2		2.2		2.2		2.2		2.2		2.2	
位置別集計	2.2		2.2		2.2		2.2		2.2		2.2		2.2		2.2	
位置別集計	2.2		2.2		2.2		2.2		2.2		2.2		2.2		2.2	

遠隔地の判定員は、本現場での切羽観察経験者であり、切羽状況を把握した者が担当した。現場臨場と遠隔臨場

の判定結果は、概ね一致している。遠隔地の判定員に対する聞き取りにおいても、切羽確認は、PTZカメラを操作することで容易であり、現場臨場では確認できない粘土の介在状況をはっきりと確認することが可能という回答であった。ただし、(C)圧縮強度の判定は、現場でのマイクによる集音、遠隔地でのスピーカーの性能にも起因し、打撃感も得難いため、遠隔での判定をどのように行うかが課題として再認識された。

#### 4. 人材の育成

トンネル工事岩判定は、トンネル工事に関する経験者・技術者が減少する中で、技術伝承を通じた人材の育成が求められる。したがって、本論では、現場以外でも切羽の確認が可能なVR活用、熟練の判定員の着目点可視化を目的としたアイトラッキングについて検討した。



##### (1) 切羽VR検討

VR（仮想現実）は、限りなく実体験に近い体験をすることができ、施工現場以外の場所で切羽観察が可能となる。このため、切羽がVRの活用により、亀裂や凹凸が再現され実体験と同様なレベルで再現され、人材育成への利用が可能か検討した。

##### a) VRのデータ作成

トンネル切羽VRを作成は、Matterportを利用した（表-8）。トンネル切羽をMatterportで撮影し、VR視聴した場合、岩判定に必要とされる3次元的な判断要素を補完することが可能であるかを検証した。

表-8 使用機材 (VR)

製品仕様	
Matterport Pro2 3Dカメラ製品仕様 (抜粋)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・サイズ (mm) : 111(奥行) × 260 (幅) × 229 (高さ)</li> <li>・重量 : 3.4kg</li> <li>・画像解像度 (メガピクセル) : 134メガピクセル</li> <li>・レンズ : 4Kフルガラス</li> <li>・正確さ : 範囲内で99%</li> <li>・最大距離 : 4.5 m</li> <li>・視野 : 360° (左右) × 300° (垂直)</li> </ul>	
Meta Quest 3製品仕様 (抜粋)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・サイズ (mm) : 140 (奥行) × 184 (幅) × 94 (高さ)</li> <li>・重量 : 515g</li> <li>・パフォーマンス : Qualcomm Snapdragon XR2 Gen 2</li> <li>・DRAM : 8GB</li> <li>・ストレージ容量 : 512GB</li> <li>・ディスプレイ : 2064x2208ピクセルInfinite Display (片目につき)</li> </ul>	

##### a) 実施結果

VRデータ撮影時は、切羽面と撮影位置の距離が7m程度あると、切羽面の点群を十分に撮影できないことが判明した。切羽に近づくことで点群撮影が可能となり、ビューワー内で割れ目の間隔を計測することができるが、画像取得者の安全確保が必要課題となる。

撮影したデータを基に、VRを視聴した結果、亀裂や凹凸の確認が可能であり、VRにて切羽評価を行える精度であることを確認した。また、切羽観察は、VRの活用により時間制限なく行うことができることがメリットである。

図-7は、本業務で取得したVR空間に、複数者が同時にVR内に入り、模擬岩判定と勉強会を実施した際の例である。



図-7 VRデータ構築したトンネル切羽周辺のVR空間


##### (2) アイトラッキング

アイトラッキングは、視線を可視化する技術である。このアイトラッキングの試行によって、熟練の判定員が無意識に着目している点を可視化することが可能となることから、人材育成への活用を検討した。

##### a) データ収集

アイトラッキング機器は、トビーテクノロジー社のアイトラッカーを利用した（表-9）。データ収集は、岩判定時に熟練の判定員がアイトラッカーを着用して、切羽観察を実施した。

表-9 使用機材 (アイトラッキング)

製品仕様	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・アイトラッキング技術 : 角膜反射、暗所瞳孔、ステレオ画像法</li> <li>・サンプリングレート : 50Hzまたは100Hz</li> <li>・視差補正 : 自動</li> <li>・瞳孔径出力 : あり 単位 (mm)</li> <li>・両眼でのトラッキング : ○</li> <li>・ガラスズレ補正 : 有、3Dアイモデル</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・キャリブレーションポイント : 1点</li> <li>・正確度 : 0.6°</li> </ul>

##### b) 実施結果

アイトラッキングは、装着者の着目箇所のヒートマップ化、着目する順序や時間の記録が可能である。熟練の判定員による切羽観察を行う際の着目点を可視化したものを図-8、図-9に示す。

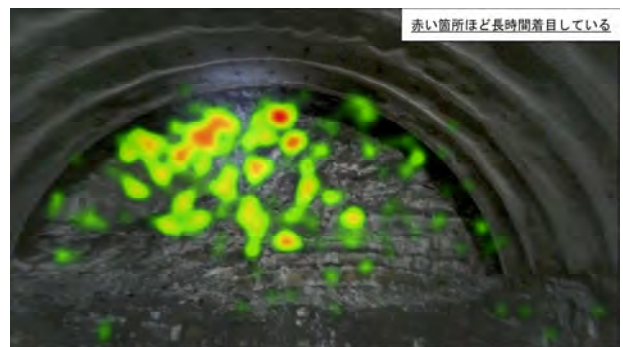


図-8 切羽着目点のヒートマップ

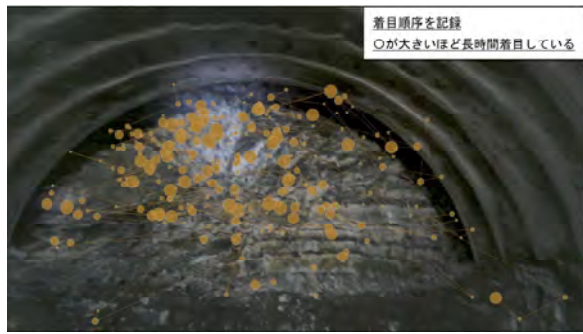


図-9 切羽着目位置および着目時間

このようなアイトラッキングは、熟練の判定員の解説を合わせるにより学習教材として利用可能である。また、岩判定における切羽説明として、実際に観察した流れや気になる点を注視できるといった岩判定の高度化にも有効であると想定される。

## 5. まとめ

### (1) 岩判定のAI試行

AIによる切羽評価は、AIが判定員と同じ支保パターンもしくは一つずれた支保パターンを選定した割合が、85%以上となった。判定員による判定は、1択の判定となることは少なく、AIと同様に1パターン程度の誤差を持った判定となる。このため、AIによる岩判定は、現場での活用が可能な段階であると判断できる。一方で、判定の妥当性は、9項目4段階による判定において、判定員とAIの着目点の一致率が少ない結果となった。ただし、切羽画像から支保パターンを選定するAIの場合には、判定者とAIの着目点が一致する可能性があるため、今後の検討で検証を進める予定である。

### (2) こそく音

こそく音は、トンネル工事環境より集音に課題があるものの、切羽の状況と相関性が高いことが想定された。このため、今後データを追加し、岩判定の判定指標となるか検証していく必要がある。

### (3) 赤外線サーモグラフィ画像

切羽の赤外線サーモグラフィ画像のみでは、湧水状況を捉えられない結果となった。一方、この画像は、湧水の他に、亀裂や割れ目と一致している可能性があり、データ数を増やし、他の評価項目への活用を検討予定である。

### (4) 遠隔臨場の試行

令和3年より施行していた遠隔臨場は、現場臨場と遠隔臨場の判定結果が概ね一致しており、岩判定に活用可

能であることが確認できた。今後、岩判定の遠隔臨場は、本格運用に向けて、運用基準を作成する予定である。

### (5) 切羽VR検討

切羽のVRは、亀裂や凹凸の確認が可能であり、切羽評価を行える精度である。トンネル工事に関する経験者・技術者が減少する中で、このVR技術を活用することにより、切羽観察を時間制限なく行うことができる。今後、社内の若手人材、あるいは大学等のタイアップにより学生を対象に教育効果に対する検証を進めていきたい。

### (6) アイトラッキング

アイトラッキングは、熟練の判定員の解説を合わせるにより、若手技術者の学習教材として利用可能である。また、岩判定の高度化として、観察した流れや気になる点を注視できる切羽説明として有効である。取得も比較的容易であることから、「(5)切羽VR検討」とあわせて、教育分野への応用について検討を深めていきたい。

## 6. おわりに

トンネル工事岩判定とりまとめ業務では、本報告の他、前方探査、先進ボーリング、コンピュータージャンボ等の先進データの活用、画像解析、切羽の3次元点群活用等にも取り組んでいる。今後、トンネル施工においてもDX化が求められる。本報告がその一助となれば幸いである。

**謝辞：**当検討の実施に際しては、ご指導、ご助言いただいた近畿地方整備局のトンネルアドバイザーの大西有三、京都大学名誉教授、神戸大学芥川真一名誉教授、関西大学小山倫史教授、また、トンネル工事岩判定業務において現場試行の調整をいただいた近畿技術事務所、近畿地方整備局道路工事課、及び現場の提供をいただいた安藤ハザマ、前田建設工業、熊谷組、清水建設、青木あすなる建設の皆様には改めてお礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 近畿地方整備局道路工事課：「トンネル地山等級判定マニュアル（試行案）」、2006
- 2) 近畿地方整備局道路工事課：「トンネル地山等級判定マニュアル（試行案）（平成18年9月試行案の改訂版）」、2016
- 3) 山田・西尾：「トンネル岩判定における遠隔臨場の適用について」、2022

### 関連論文

- 山田・西尾：「トンネル岩判定における遠隔臨場の適用について」、2022