

AI 技術を活用したトンネル切羽評価システムの開発

Development of Tunnel Face Evaluation System by Artificial Intelligence

長沼 諭 ^{*1}	若林 宏彰 ^{*2}	高馬 崇 ^{*3}
Satoshi Naganuma	Hiroaki Wakabayashi	Takashi Koma
原田 建志 ^{*4}	小林 亘 ^{*4}	坂口 雄大 ^{*4}
Kenji Harada	Wataru Kobayashi	Yudai Sakaguchi

要旨

様々な分野で活用が進められている人工知能（AI）は、顔認証や悪性腫瘍の検出など画像認識や分類を得意とする技術である。一方、山岳トンネルの施工において、切羽の評価は地山の状態に応じた最適な支保工を選定し、安全にトンネルを掘削するうえで非常に重要な指標である。切羽の評価は、現場職員が切羽の状態を目視で確認しながら観察項目の評価点をつけるが、評価の判定基準には定性的なものも多く、評価者によって評価にばらつきが生じやすい。

そこで、若手職員やトンネル工事の経験が少ない職員の切羽評価業務の支援、評価の均質化を図ることを目的として、AI が切羽画像から切羽の状態を適切に評価する AI 切羽評価システムを開発した。

本報告では、AI 切羽評価システムの開発と現場実証により得られた知見を述べるとともに、今後 AI 切羽評価システムの活用を拡大するための課題について報告する。

キーワード：人工知能 AI トンネル 切羽評価

1. はじめに

近年、人工知能（AI）の活用は様々な分野で広がりを見せている。国土交通省では建設現場の生産性向上を図るために「i-Construction」の取り組みとして、技術の進展が著しい AI 技術の活用を推進している¹⁾。総合評価方式においては、「新技術導入促進Ⅱ型」の試行初年度である平成 30 年度（2018 年）にトンネル工事で「AI 等を活用したトンネル等の地山判定手法について」がテーマに設定された。

山岳トンネル施工における切羽評価は、地山の状態を切羽評価点として点数化し、地山状態に応じた適切な施工支保パターンを選定するための指標であり、安全かつ経済的にトンネル施工を進めるうえで重要な管理項目である。切羽評価を現場の若手職員やトンネル工事の経験が少ない職員が担当する場合、地質に対する知識も少なく、正しく切羽の評価を行うことが難しい。また、現在の切羽評価の判定基準は定性的なものも多く、評価者によって評価にばらつきが生じるという問題もある。このため、切羽評価を行う際に、評価の目安を示すことで切羽評価の支援や業務の効率化を図り、評価のばらつきを抑え正しく評価ができるよう AI による切羽評価システムの開発に着手した。

本報告では、AI による切羽評価システムの開発と実工事現場での検証により得られた知見を述べるとともに、今後 AI 切羽評価システムの活用を拡大するための課題について報告する。

2. AI 切羽評価システムの開発

2.1 AI モデル

今回開発した AI 切羽評価システムは、切羽画像から切羽観察項目の評価区分を AI により判定するものである。判定を行う AI モデルには CNN (Convolutional Neural Network : 畳み込みニューラルネットワーク) モデルを使用した。CNN モデルは画像分類に適したモデルであり、基本的に教師あり学習である。次項の図 1 に教師あり学習モデルの概念図を示す。教師あり学習とは、画像と画像が示す答えとをセットにした教師データをネットワークに与えることで、入力した画像が正しい答えにたどり着くようにノードを連結するエッジと重みを繰り返し自動調整してネットワークを形成する学習方法である。

AI の学習には膨大な数の教師データが必要であり、たとえば顔認識 AI では 45 万枚、悪性腫瘍の検出を行う AI では 36 万枚の教師データが用いられている。しかし、今回の開発では収集できる切羽写真の枚数は限られており、少ない教師データで学習を行う必要があった。このため、ImageNet²⁾ という 1,400 万枚以上の大量の画像と答えのデータセットで事前に学習を行い、その重みを用いることで、教師データが少なくても画像の特徴を効率的に捉えることが可能な「InceptionV3」という転移学習モデル（図 2）を採用した。

*1 技術本部 技術企画部 *2 技術本部 土木技術部 *3 技術研究所 *4 大阪本店 土木部

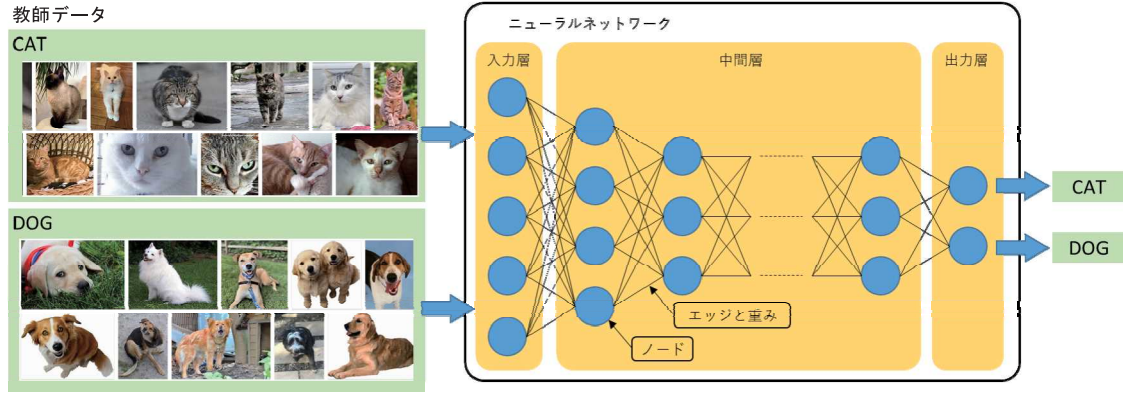


図1 教師あり学習モデルの概念図

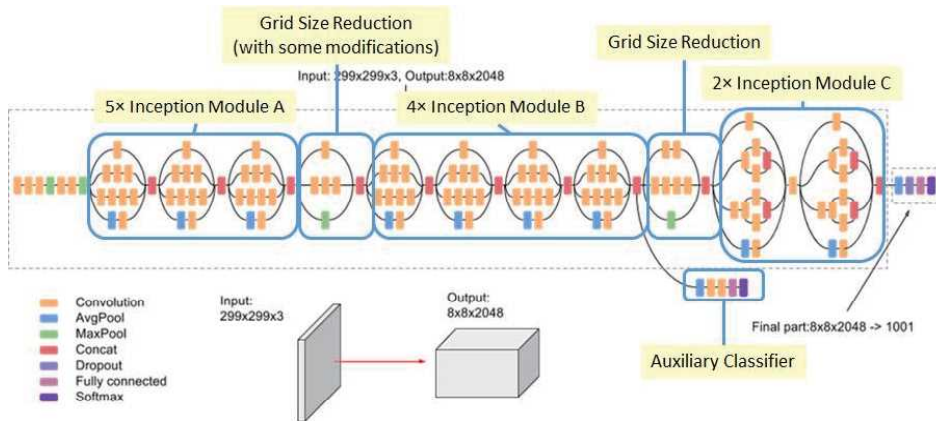


図2 InceptionV3 (159層) ネットワーク³⁾

2.2 切羽評価手法とAIでの評価項目

山岳トンネルの切羽評価手法は発注機関により異なっている。今回の開発では道路トンネルの施工における切羽評価を対象とし、NEXCOと国土交通省（以降、国交省）の切羽評価手法に対してAIの導入を検討する。NEXCOと国交省の切羽評価における観察項目および評価区分をそれぞれ次項の表1、表2に示す。

AIにより評価を行う観察項目は、両評価手法に共通する「圧縮強度」、「風化変質」、「割れ目の間隔」、「割れ目の状態」の4項目とした。

2.3 切羽画像の収集とカメラの設定

教師データとする切羽画像について、開発の前段階で当社が社内で保有している過去に施工したトンネルの切羽画像の使用を検討した。しかし、画像のサイズや解像度、切羽照明の種類や明るさなど、画像品質や撮影条件が統一されておらず、教師データの作成が困難であった。たとえば、解像度の違いは1px（ピクセル）が何cmに相当するかの違いであり、割れ目間隔の判定に差が生じる。また、切羽照明の違いにより岩の色味が違って映るが、これは風化や圧縮強度の判定に影響が生じると考えられた。このため、新

たに教師データ用の切羽画像を収集することとし、収集を行う現場は、福井県大野市にて施工中であった大野油坂道路川合トンネルとした。川合トンネルは国土交通省近畿地方整備局発注の道路トンネルで、トンネル全長2,550mのうち福井側1,592mを施工する工事である。地質は主に中世代白亜紀前期～ジュラ紀中期の砂岩、砂岩泥岩互層が分布している。

川合トンネルでは坑口から400mまでの区間で切羽写真の収集を行った。切羽画像の品質を確保するため、画像サイズ、画質、ホワイトバランス、ISO感度等のカメラ設定や切羽からの撮影距離などを定め（表3）、切羽の写真撮影、画像データの収集を行った。

表3 川合トンネルにおける切羽撮影時カメラ設定




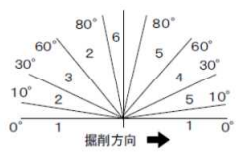
機種	OLYMPUS TG-5K
画像サイズ	4000px×3000px
画質	S.ファイン
撮影モード	プログラムモード
ホワイトバランス	蛍光灯
感度(ISO)	800
フラッシュ	発光禁止
セルフタイマー	2秒
撮影距離	切羽から14m(1px : 3.6mm)

表 1 NEXCO の観察項目および評価区分⁴⁾

観察項目		評価区分					
A 圧縮強度 (N/mm ²)	一軸圧縮強度	100 以上	100~50	50~25	25~10	10~3	3 以下
	ポルトランド	4 以上	4~2	2~1	1~0.4	0.4 以下	
	ハンマーの打撃による強度の計算	岩片を地面に置きハンマーで強打しても割れにくい	岩片を地面に置きハンマーで強打すれば割れる	岩片を手を持ってハンマーでたたいて割ることができる	岩片どうしをたたき合わせて割ることができる	両手で岩片を部分的にでも割ることができる	力を込めれば、小さな岩片を指先で潰すことができる
	評価区分	1	2	3	4	5	6
B 風化変質	風化の目安	概ね新鮮		割れ目沿いの風化変質	岩芯まで風化変質	土砂状風化、未固結土砂	
	熱水変質などの目安	変質は見られない		変質により割れ目に粘土を挟む	変質により岩芯まで強度低下	著しい変質により全体が土砂状、粘土化	
	評価区分	1		2	3	4	
C 割れ目の間隔	割れ目の間隔	d ≥ 1m	1m > d ≥ 50cm	50cm > d ≥ 20cm	20cm > d ≥ 5cm	5cm > d	
	ROD	80 以上	80~50	60~30	40~10	20 以下	
	評価区分	1	2	3	4	5	
D 割れ目の状態	割れ目の開口度	割目密着している	割目の一部が開口している(幅<1mm)	割目の多くが開口している(幅<1mm)	割目が開口している(幅1~5mm)	割目が開口し5mm以上の幅がある	
	割れ目の狭在物	なし	なし	なし	薄い粘土を挟む(5mm以下)	厚い粘土を挟む(5mm以上)	
	割れ目の粗度鏡肌	粗い	割目が平滑	一部に鏡肌	よく磨かれた鏡肌		
	評価区分	1	2	3	4	5	
F 湧水量	状態	なし、滲水 1ℓ/分以下	滴水程度 1~20ℓ/分	集中湧水 20~100ℓ/分	全面湧水 100ℓ/分以上		
	評価区分	1	2	3	4		
G 劣化	水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	流出		
	評価区分	1	2	3	4		

※湧水量と劣化の観察項目は、切羽評価点に補正を与える項目として位置付けている。

表 2 国土交通省の観察項目および評価区分⁵⁾

評価区分(掘削地点の地山の状況と挙動)						
(A)	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	5. その他
(B)	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	5. その他
(C)	圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 100 \text{ MPa}$	2. $100 \text{ MPa} > \sigma_c \geq 20 \text{ MPa}$ ハンマー打撃で砕ける	3. $20 \text{ MPa} > \sigma_c \geq 5 \text{ MPa}$ 軽い打撃で砕ける	4. $5 \text{ MPa} > \sigma_c$ ハンマー刃先食い込む	5. その他
(D)	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、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、破碎、当初より未固結	5. その他
(E)	割れ目の頻度	1. 間隔d ≥ 1m 割れ目なし	2. $1 \text{ m} > d \geq 20 \text{ cm}$	3. $20 \text{ cm} > d \geq 5 \text{ cm}$	4. $5 \text{ cm} > d$ 破碎、当初より未固結	5. その他
(F)	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	5. その他
(G)	割れ目の形態	1. ランダム方形 	2. 柱状 	3. 層状、片状、板状 	4. 土砂状、細片状、当初より未固結	5. その他
(H)	湧水	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
(I)	水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊、流出	5. その他
る割れ目の方向性(卓越する不連続面のあ)	縦断方向(切羽をみて)	1. 水平 ($10^\circ > \theta \geq 0^\circ$) 2. さし目 ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ 、 $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 3. さし目 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 4. 流れ目 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 5. 流れ目 ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ 、 $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 6. 垂直 ($\theta \geq 80^\circ$)				
	横断方向(切羽をみて)	1. 水平 ($10^\circ > \theta \geq 0^\circ$) 2. 右から左へ ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ 、 $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 3. 右から左へ ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 4. 左から右へ ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 5. 左から右へ ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ 、 $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 6. ($\theta \geq 80^\circ$) (切羽面のみかけの傾斜角をとる)				

2.4 教師データの作成と学習結果

川合トンネルで撮影された切羽写真から教師データの作成を行った。通常、切羽の評価は、切羽面を天端部、右肩部、左肩部の3つのブロックに分けて行う。しかしながら、地質分布や亀裂の状態などは各ブロック内でも均一ではない。このため、ブロックをより細かい区画に分割して評価を行い、その評価区分がブロックに占める割合でブロック全体の評価区分を決定する。評価手法には評価区分がより細かく設定されているNEXCO方式を採用し、トンネル工事の経験豊富な土木技術者、本社トンネル技術部門の技術者、地質技術者の3人で画像の評価付けを行った。

教師データは、坑口から400mまでの区間で収集した切羽画像から作成されているため、脆弱な地山区間の割合が多く、評価区分1や2の硬質な地山のデータが少なくなっている。偏った教師データで学習したAIモデルは、判定にも偏りが出てしまうことから、データ数が少ない評価区分では、学習の際に画像に回転や反転、コントラスト・明るさのランダム変更などの処理を加えてデータ数を増加させ、データ数の偏りを減じている。

AIモデルの正答率の目標は、切羽評価手法の判定基準が定性的であり、評価区分の境界が曖昧であることを考慮し、7割以上を目標とした。

2.4.1 教師データ（1回目）と正答率

最初に作成した教師データは、40枚の切羽画像を100px×100pxのサイズで分割した約3,500枚の画像を、3人の評価者が3分の1ずつ分担して評価付けを行い、教師データとした。この教師データで学習したAIモデルの正答率を表4に示す。正答率は「圧縮強度」が42.7%、「風化変質」が66.1%、「割れ目間隔」が61.3%、「割れ目状態」が52.9%と、いずれの項目においても低い結果となった。

表4 教師データ(1回目)によるAIモデルの正答率

圧縮強度評価A 正答率: 42.7%		風化変質評価A 正答率: 66.1%					
予測		予測					
	1 2 3 4 5 6		1 2 3 4				
正解	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	204	50	13	0
	4	0	0	177	51	4	0
	5	0	0	73	15	5	0
	6	0	0	4	14	2	2

割れ目間隔評価A 正答率: 61.3%		割れ目状態評価A 正答率: 52.9%				
予測		予測				
	1 2 3 4 5		1 2 3 4 5			
正解	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	3	155	0
	4	0	0	0	337	6
	5	0	0	0	63	14

2.4.2 教師データ（2回目）と正答率

1回目の教師データによる正答率が低かったことから、教師データの見直しを行った。画像の分割サイズは割れ目間隔の判定基準と画像の判別のしやすさを考慮し、切羽面において1辺が約1mとなる300px×300pxに変更した。また、3人の評価者の評価のばらつきを小さくするため、3人の評価者が全画像を評価し、3人の評価が一致した画像のみを抽出して教師データとした。113切羽の分割画像約2,400枚の評価のうち3人の評価が一致した画像は20%以下と少なく、経験豊富な技術者でも評価にばらつきが生じることが改めて確認された。

2回目に作成された教師データで学習したAIモデルの正答率を表5に示す。正答率は「圧縮強度」が73.2%、「風化変質」が84.0%、「割れ目間隔」が72.7%、「割れ目状態」が87.7%となり、1回目の教師データによるAIモデルに比べて正答率を11%~30%向上することができた。

表5 教師データ(2回目)によるAIモデルの正答率

圧縮強度評価A 正答率: 73.2%		風化変質評価A 正答率: 84.0%					
予測		予測					
	1 2 3 4 5 6		1 2 3 4				
正解	1	3	0	2	0	0	0
	2	1	7	9	0	1	0
	3	0	1	59	0	1	1
	4	0	0	6	7	2	0
	5	0	1	3	1	2	0
	6	0	0	0	0	1	4

割れ目間隔評価A 正答率: 72.7%		割れ目状態評価A 正答率: 87.7%				
予測		予測				
	1 2 3 4 5		1 2 3 4 5			
正解	1	0	1	0	0	0
	2	0	1	0	2	0
	3	0	1	5	19	0
	4	0	1	1	92	4
	5	0	0	0	16	22

予測		予測			
	1 2 3 4		1 2 3 4 5		
正解	1	17	0	1	0
	2	3	31	12	0
	3	2	4	81	0
	4	0	0	3	2

2.3 AIモデルのシステム化

2回目の教師データにより学習したAIモデルで7割以上の正答率が得られたことから、このAIモデルによって切羽評価システムを開発した。なお、岩判定などの際にインターネット環境のないトンネル坑内でも評価を行えるよう、パソコン単体でソフトが動作するシステムとした。

開発したAI切羽評価システムは、①評価したい切羽画像をドラッグアンドドロップで入力し、②画面上で切羽の位置合わせを行い、③判定開始ボタンで各観察項目の評価区分判定が行われ、④評価結果が図と表で表示される(図3)。

また、今回開発したAIモデルはNEXCO方式の評価区分で結果が出力されるが、国交省方式での切羽評価にも対応できるようにNEXCO方式の出力結果を国交省評価方式の評価区分に変換できるようにしている。両評価手法の評価基準は類似しているため、図4のように評価区分の変換を行い、

AI 切羽評価ソフト上で評価結果の表示を切り替えられるようにした。

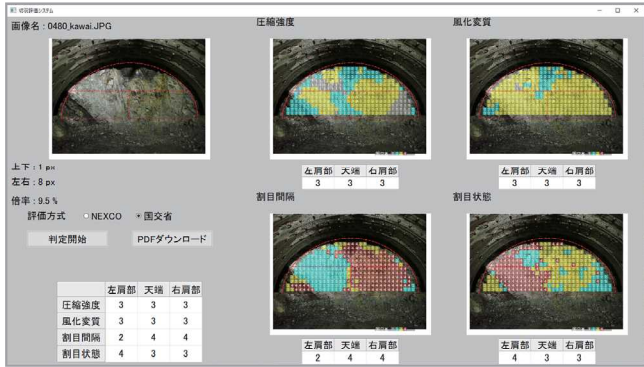


図3 AI 切羽評価ソフトによる評価結果の表示例



図4 評価区分の変換

3. AI 切羽評価システムの現場検証

3.1 実際の切羽状況と AI 切羽評価

川合トンネルの坑口から 1,380m までの 290 切羽、870 ブロックに対して AI 切羽評価システムにより国交省方式で切羽評価を行い、評価結果と実際の地山状況との比較検証を行った。AI 評価結果の評価区分の度数分布を現場での切羽評価の度数分布とともに図 5 に示す。

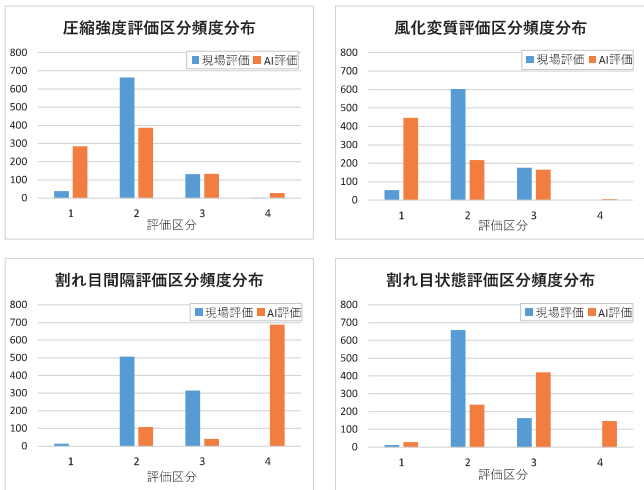


図5 観察項目ごとの評価区分度数分布

AI 評価では、「圧縮強度」で「1」評価が 36%、「風化変質」で「1」評価が 52%と高い割合を占めている。一方、川合トンネルで実際に分布していた砂岩、砂岩泥岩互層などの岩層は、一部の区間で非常に新鮮で硬質な岩の分布が見られ

たものの、多くの区間では風化変質が見られ、圧縮強度もハンマーの強打で割れることを確認している。このことから、AI 評価による「圧縮強度」と「風化変質」の判定は、実際の地山状態に比べて「1」評価が多い結果となった。

また、「割れ目間隔」では、AI 評価で「4」評価が 81%を占めたが、「4」評価とは割れ目間隔 5cm 以下、破碎もしくは未固結という区分であり、実際の切羽で観察された割れ目間隔はそこまで悪い状況ではなかった。「割れ目状態」についても、AI 評価は実際よりも悪い状態であると評価している結果となった。

3.2 AI 切羽評価の考察

実際の切羽状況と AI 評価の相違は、教師データの数が十分でなかったために、AI の評価区分の境界が正しく設定されず、ずれが生じていることが原因と考えられた。川合トンネルにおいては、掘削進行に合わせ教師データをさらに増やし再学習していくことで、徐々に精度の高い評価を行えるようになるものと思われるが、それまでは、実際の地山状況に一致するよう、評価区分の調整が必要となる。

なお、NEXCO 評価方式から国交省評価方式へ変換する際の評価区分の境界を図 6 のように変更すると、現場評価と AI 評価の一致率は「圧縮強度」で 43%から 72%に、「風化変質」で 30%から 71%に、「割れ目間隔」で 11%から 61%に、「割れ目状態」で 37%から 72%になった (図 7)。

評価区分を調整することにより、実際の切羽状況や現場評価に近い評価を得ることも可能であることが示された。



図6 評価区分の変換 (評価区分調整後)

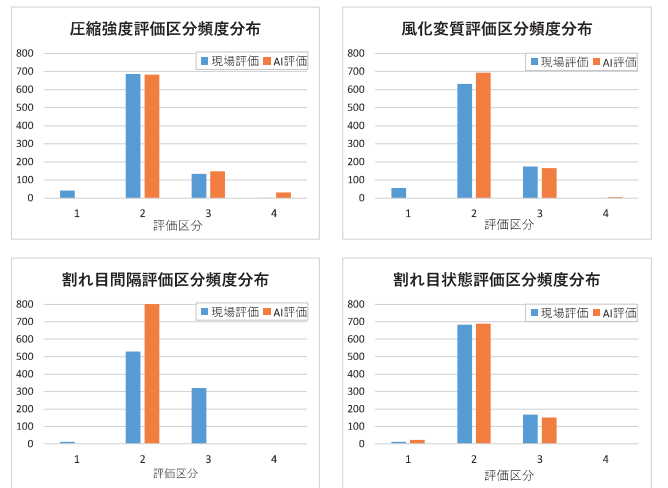


図7 各観察項目の評価区分度数分布 (評価区分調整後)

4. AI 切羽評価システムの今後の課題

今回、切羽評価において評価の目安を示すことができる AI 切羽評価システムを構築できた。ただし、現段階では川合トンネルにのみ適用できる AI モデルとなっており、また実際の切羽状況と合わせるために評価区分の境界を調整する必要があるなど課題も多い。今後、システムの活用を進めていくための課題について以下に示す。

4.1 正確な教師データの作成と正答率向上

AI モデルの精度は教師データに大きく影響される。このため正確な教師データの作成が重要になる。今回、教師データ作成では、3 人の評価者の評価のばらつきが問題となった。原因として、観察項目の判定を画像のみから行うことが非常に難しかったことと、判定基準が定性的であることが挙げられる。正確な教師データを作成するためには数値等により明確に区分を判定できる定量的な判定基準が必要である。

川合トンネルの AI 評価では圧縮強度が「4」で「非常に脆い」との評価に対し、風化変質が「1」で「風化はなく新鮮」と評価されるなど、矛盾した評価結果もみられた。実際に人が評価する場合には、岩が新鮮で風化していなければ「硬く、割れ目は少なく、密着している」と評価し、逆に風化が著しければ「岩は脆弱で、割れ目は多く、土砂化や粘土の狭帯がある」というように、観察項目間にある程度の相関を持たせて評価する。今回のシステムでは各観察項目で独立した AI モデルにより評価を行っているため、このような矛盾した評価になったと考えられ、観察項目間の関係性を併せて学習させることも正答率を向上する方法の一つであると考えられる。

また、正答率を上げるためには画像のみから判定を行うのではなく、他の情報も取り入れる必要があると考えられる。現場では、評価者は切羽の視覚情報だけでなく、火薬装薬穿孔のノミ下がり速度や発破後の岩塊の大きさや形状、コソク時のブレイカ掘削の音や岩の破碎状況、前後の切羽状況など多くの情報を意識下もしくは無意識下に考慮して評価を行っている。このため、より正確な切羽評価を行うためには、掘削中の穿孔データや動画、音など多くの補完情報も取り入れる必要がある。

4.2 ソフトの汎用性とデータ収集

今回開発した AI 切羽評価システムで使用している AI モデルは、川合トンネルの切羽画像のみを教師データとして学習を行っているため、他のトンネルへ汎用的に適用できない。しかし、日本の地質や岩種は多岐にわたるだけでな

く、地質構造などの様相も複雑なため、これらの各種条件を一度に網羅できるような AI モデルの構築は現段階では困難であると思われる。まず岩種ごとの AI モデルを作成する必要があると考えている。

しかしながら、建設会社が単独で汎用性のある AI モデルを構築するための十分な量の教師データを集めるのには限界があり、より多くのデータを効率的に収集できる業界全体での枠組みが必要であると考えられる。また、発注機関が連携し、切羽評価の基準制定や様式などを統一したデータ収集のシステムの開発と運用が望まれる。データ収集システムにおいては、写真の撮影条件や設定、穿孔データなどの補完情報、それら情報の判定基準の制定などが課題となると考えられる。

5. おわりに

今回、AI 切羽評価システムの開発に取り組む過程で、AI は何でもできる万能なものではなく、AI に適した問題や事象があり、教師データの収集や作成が容易であるか、ブラックボックスと呼ばれる AI の判定の過程が説明不能な結果を受け入れられるかなどを十分に検討する必要があることを理解した。また、切羽評価への活用には大量のデータ収集の方法や教師データ作成に必要な画像品質の確保、AI 活用実績の蓄積など多くの課題があることも判明した。

一方で、AI は非常に優れた分析、分類能力を持つことも改めて認識できた。様々なデータから相関関係を見つけ出す能力は、AI は人間よりもはるかに優れている。今後は、画像だけでなく、掘削時の削岩機のデータを入力データに加えるなど、さらなる正答率の向上に向けて取り組み、より精度の高い切羽評価支援や業務の効率化、省力化に寄与していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省建設技術研究開発評価委員会（平成 29 年 7 月 25 日開催）：資料 4、AI を活用した建設生産システムの高度化に関する研究、https://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/kaihatu/pdf/h29/170725_06jizen.pdf（2021 年 4 月閲覧）
- 2) Stanford Vision Lab, Stanford University, Princeton University, <https://image-net.org>（2021 年 4 月閲覧）
- 3) Google Cloud、Cloud TPU における Inception v3 の詳細ガイド <https://cloud.google.com/tpu/docs/inception-v3-advanced>（2021 年 4 月閲覧）
- 4) 高速道路総合技術研究所：トンネル施工管理要領、2020. 7
- 5) 近畿地方整備局道路部道路工事課：トンネル地山等級判定マニュアル（試行案）、2016. 7