

AIを活用したトンネル切羽評価の実用化検討

⑤実用化に向けた課題と解決策

委員会報告書4章

岩盤力学におけるDX活用検討小委員会
大成建設(株) 坂井一雄

検討概要

- AIを活用した切羽評価を実用化するための課題とそれに向けた解決策に関する検討を実施

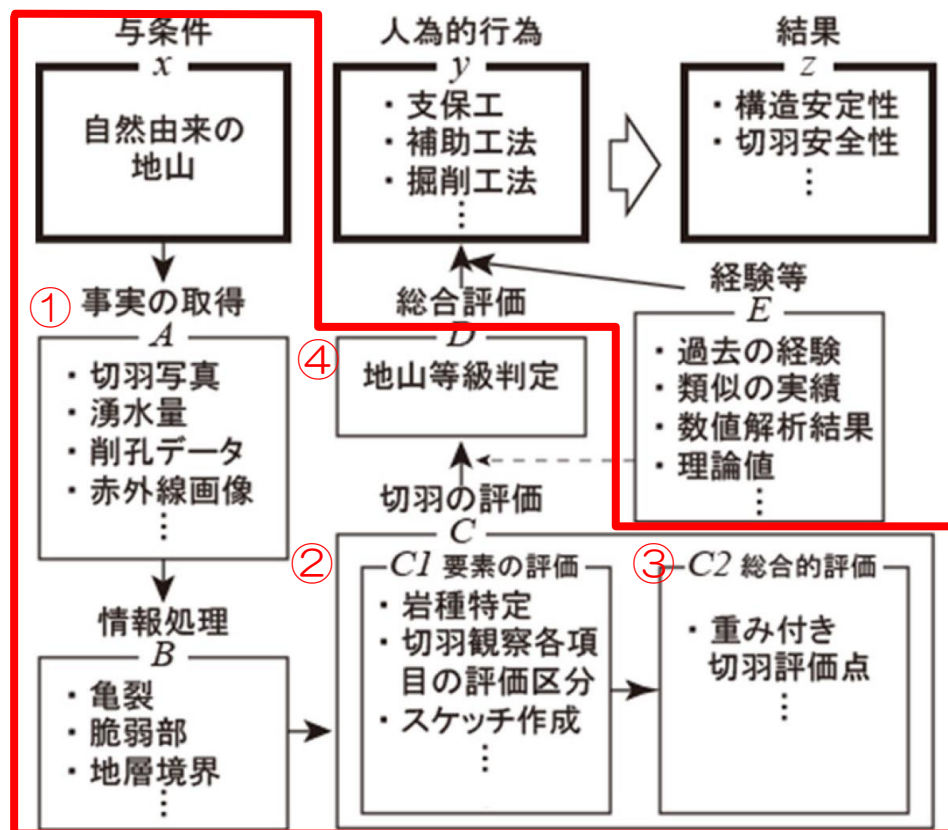


図-1 山岳トンネルにおける地山評価

【切羽評価】

- ①掘削対象となる地山状況を切羽で観察、または必要な計測データを取得
- ②地山強度や亀裂頻度等の項目で岩盤性状の評価
- ③切羽評価点の算出
- ④地山等級判定

【AI切羽評価】

- ①⇒② or ③ or ④

田村他: 主観的判断の影響を低減した地山評価支援システム構築の試み, 第78回土木年講, III-206, 2023 (追記)

AIを活用した切羽評価を実用化するための課題

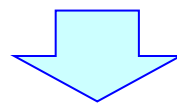
1. 評価手法の信頼性向上
2. 教師データの品質
3. AI評価システムの適用範囲
4. ブラックボックス化への対応
5. AI切羽評価の有効性の証明
6. 必要なシステム・デバイス
7. 切羽データの共有化・オープン化
8. 技術力低下への懸念
9. AI活用の人材育成
10. その他

1. 評価手法の信頼性向上

4.2

【課題】

AIによる切羽評価を実用化するためには、その手法が実用化に耐えうるだけの**信頼性を確保**していなければならない。



【解決策①】

信頼性の閾値設定

- 技術者が判定するレベルと同等以上の信頼性が必要とされる(定性的)
- 信頼性評価に使われる指標(正解率・適合率・再現率・F値)における閾値の設定と関係者間での合意が必要

表 4.2-1 クラス分類における混同行列

	実際は A	実際は B	実際は C
予測が A	True A	False A(B)	False A(C)
予測が B	False B(A)	True B	False B(C)
予測が C	False C(A)	False C(B)	True C

表 4.2-2 信頼性評価指標の算定式

指標	意味	算定式
A の正解率	全クラスでの正解率	$Accuracy = \frac{TrueA + TrueB + TrueC}{Total}$
A の適合率	A 予測の正答率	$Precision = \frac{TrueA}{TrueA + FalseA(B,C)}$
A の再現率	A に対する正答率	$Recall = \frac{TrueA}{TrueA + FalseBC(A)}$
A の F 値	A 適合率と再現率の調和平均	$F - measure = \frac{2 \times PrecisionA \times RecallA}{PrecisionA + RecallA}$

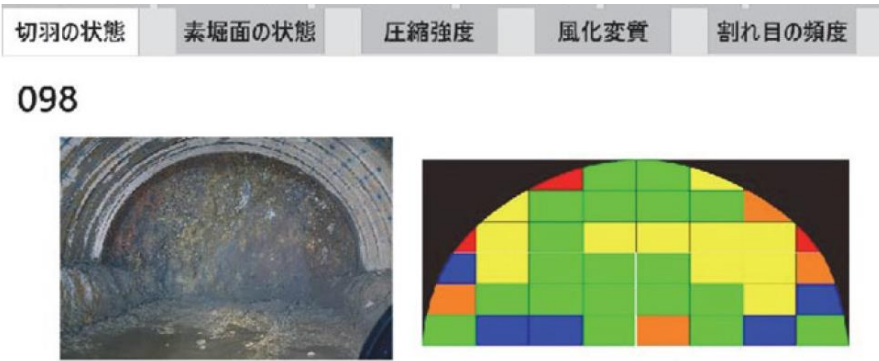
1. 評価手法の信頼性向上

【解決策②】

評価理由やプロセスの説明性

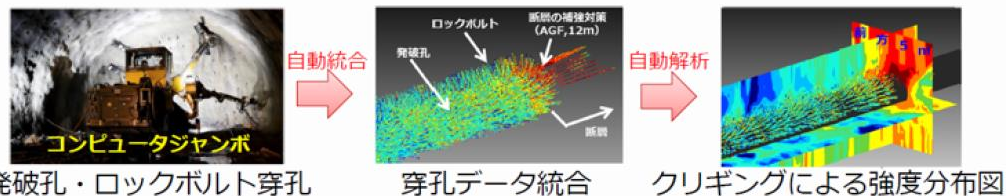
- ブラックボックス化の回避として、着目点を抽出するヒートマップ化
- 切羽画像 + α
⇒ 生成AIによる記事作成
で評価理由の説明ができないか？

【ヒートマップ化例】(鶴田他, トンエ, 2022)



【穿孔データの活用例】(鹿島建設)

② ジャンボ穿孔データによるトンネル周辺の強度評価システム



【解決策③】

- 継続的な再学習の実施
- 誤判定のフィードバック
- 探査・計測データの活用
- 複数手法の統合

【物理探査結果の活用例】(北岡他, 地盤工学ジャーナル, 2021)

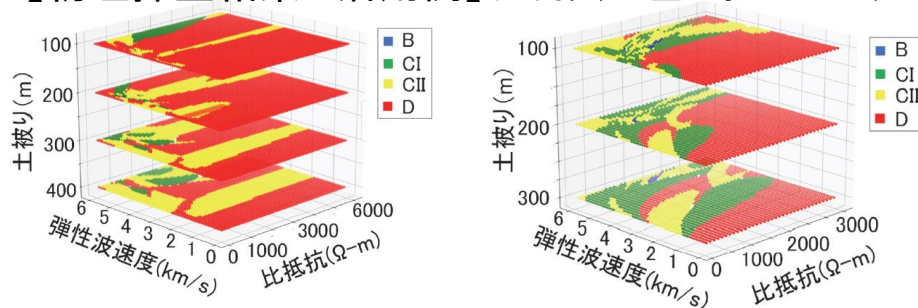


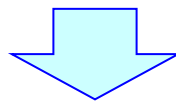
図4 ANN出力結果(堆積岩)

図5 ANN出力結果(火成岩)

2. 教師データの品質

【課題】

切羽評価AIの多くは教師有り学習により構築されたアルゴリズムであるため、そのアルゴリズムは、**正しい切羽画像(入力データ)**を**正しく切羽評価された(正解データ)**である必要がある。しかし、実際には教師データの中には実工事における、不鮮明な切羽画像、恣意的な判断が入った誤判定や誤記が含まれる場合がある。



【解決策①】

切羽画像の品質向上

- 画像への影響要因
- 画像の評価式(案)

次の話題提供にて検討事例を紹介

【解決策②】

切羽評価の品質向上

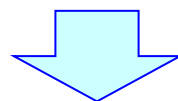
- スクリーニング(取捨選択)や複数人における再評価の実施・合意
- 開発されたアルゴリズムを検証するための良質な切羽写真と良質な切羽評価結果からなるデータセットの整備と共有
(≡検証用の教師データの整備)

3. AI評価システムの適用範囲（拡大）

4.4

【課題】

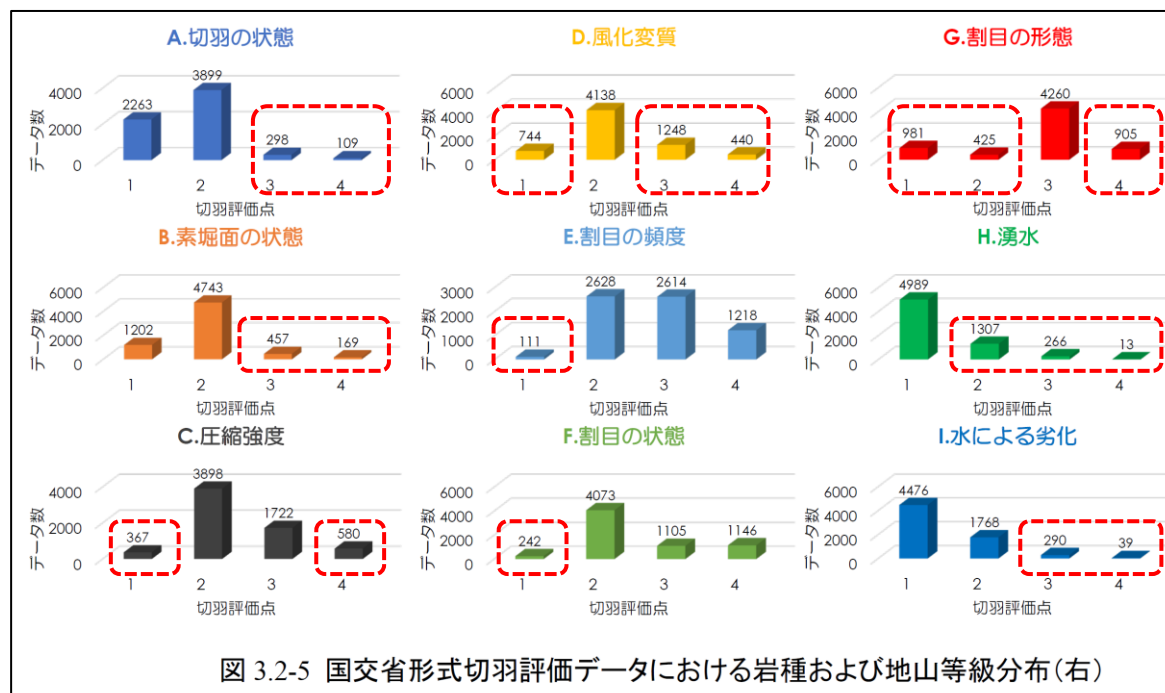
教師データの正解データとなる岩種に偏りが生じたり、十分な数を準備することができない場合があり、**岩種によっては、正答率が著しく低下**する場合がある。



【解決策①】

偏りを解消する目的での希少な
施工事例の共有化

国土交通省形式の切羽評価が行われた10トンネル1,952切羽における評価結果の頻度分布



3. AI評価システムの適用範囲

【解決策②】

切羽評価項目と評価基準の
共通化または統合化

【9項目4段階(+その他)】

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 $d \geq 1 \text{m}$ 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. ランダム形状	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・浸水程度	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
割れ目の方向性(卓越する不連続面のあるとき)	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)

図 3.2-1 国交省形式の切羽評価区分

写真・評価結果を相互に活用できるようになれば、
教師データを大幅に増加させることが可能。

【8項目4～6段階】

観察項目	評価区分						
	一軸圧縮強度	100以上	100~50	50~25	25~10	10~3	3以下
ポイトロド	4以上	4~2	2~1	1~0.4	0.4以下		
A. 圧縮強度 (N/mm ²)	ハンマーの打撃による強度の目安	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叩いて割ることができる。	岩片どお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つぶすことができる。
	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. 割目間隔	割れ目の間隔	$d \geq 1 \text{m}$	$1 \text{m} > d \geq 50 \text{cm}$	$50 > d \geq 20 \text{cm}$	$20 > d \geq 5 \text{cm}$	$5 \text{cm} > d$	
	RQD	80以上	80~50	60~30	40~10	20以下	
評価区分	1	2	3	4	5		
D. 割目状態	割目の開口度	割目は密着している。	割目の一部が開口している。	割目の多くが開口している。	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。	
	割目の挟込物	なし	なし	なし	薄粘土を挟む(5mm以下)	厚粘土を挟む(5mm以上)	
	割目の粗度鏡肌	粗い	割目が平滑	一部に鏡肌	よく磨れた鏡肌		
評価区分	1	2	3	4	5		
E. 走向傾斜	走向がトソ軸と直角	1. 差し目傾斜 $45 \sim 90^\circ$	2. 差し目傾斜 $20 \sim 45^\circ$	3. 差し目流れ目傾斜 $0 \sim 20^\circ$	4. 流れ目傾斜 $20 \sim 45^\circ$	5. 流れ目傾斜 $45 \sim 90^\circ$	
	トソ軸と平行			1. 傾斜 $0 \sim 20^\circ$	2. 傾斜 $20 \sim 45^\circ$	3. 傾斜 $45 \sim 90^\circ$	
F. 湧水量	状態	なし	滴水程度	集中湧水	全面湧水		
	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		

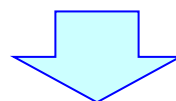
図 3.2-2 NEXCO 形式の切羽評価区分

4. ブラックボックス化への対応

4.5

【課題】

切羽評価AIで、しばしば使われる深層学習では、データの処理プロセスが膨大であるため、最終的に「AIがなぜその答えを導き出したか不明である」という**ブラックボックス化**に直面する。



【解決策①】

CAM(Class Activation Mapping)の利用による特徴量のヒートマップ化

【切羽を正しく着目した例】

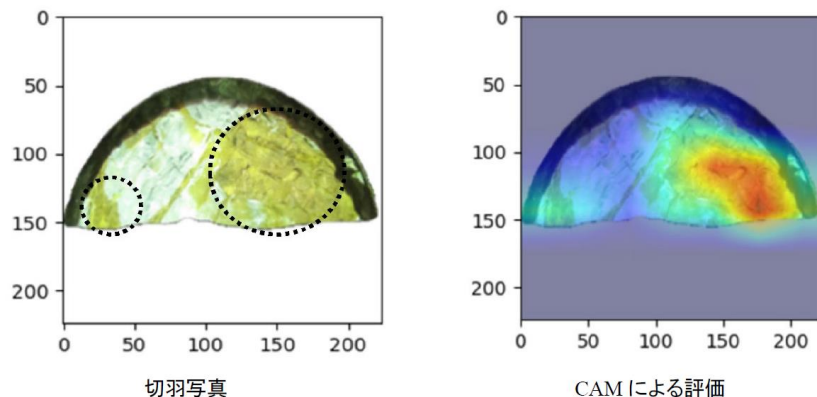


図 4.5-1 CAMによる特徴表示の例(変質部への着目例)

【切羽以外にも着目した例】

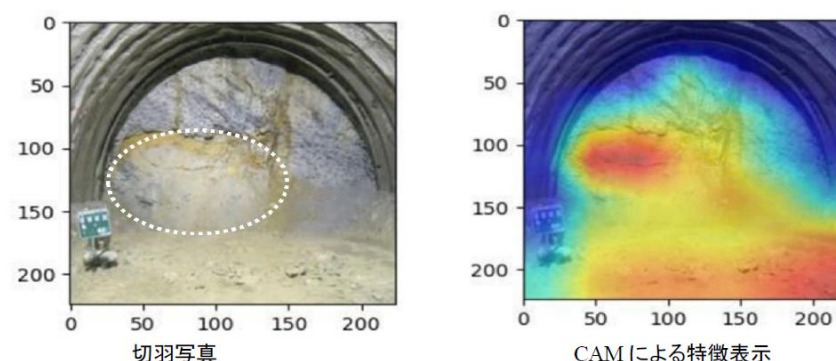


図 4.5-2 CAMによる特徴表示の例(判定に不要な要素への着目例)

5. AI切羽評価の有効性の証明

4.6

【課題】

AI切羽評価は、現状では開発会社によって正答率による評価が試行的に実施されている。実用化段階では、手法の**客観的な有効性の証明**が必要であると考えられる。

【解決策①】

検証システムの構築と性能証明

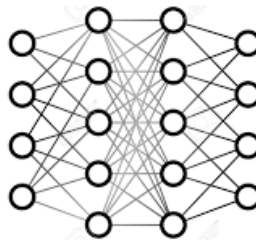
【イメージ】

検証切羽写真

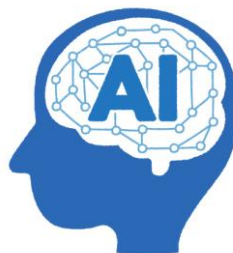


学会等でストック

検証システム



新規開発モデル



学会等が提供する誰でも使用可能なAIアルゴリズム

対象岩種: 中硬質岩層状・第三紀層

信頼性評価指標	検証システム		新規開発モデル	
正解率	85%	<	90%	合格
適合率	78%	<	80%	合格
再現率	90%	<	90%	合格
F値	85%	<	88%	合格

検証システム以上の信頼性を有することを証明(学会等認証)

6. 必要なシステム・デバイス

4.7

【課題】

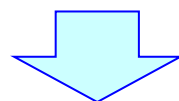
デジタルカメラだけでなく、可搬性やクラウドへのアクセス性に優れたタブレットやスマートフォンといったデバイスを用いた切羽撮影も増加している。

また、マルチスペクトル画像や穿孔エネルギー等も活用した切羽評価も提案されつつある。

これら、AI切羽評価に必要な **システム・デバイスの仕様選定や取得労力**が課題。

【解決策①】

自動化によるリアルタイム化



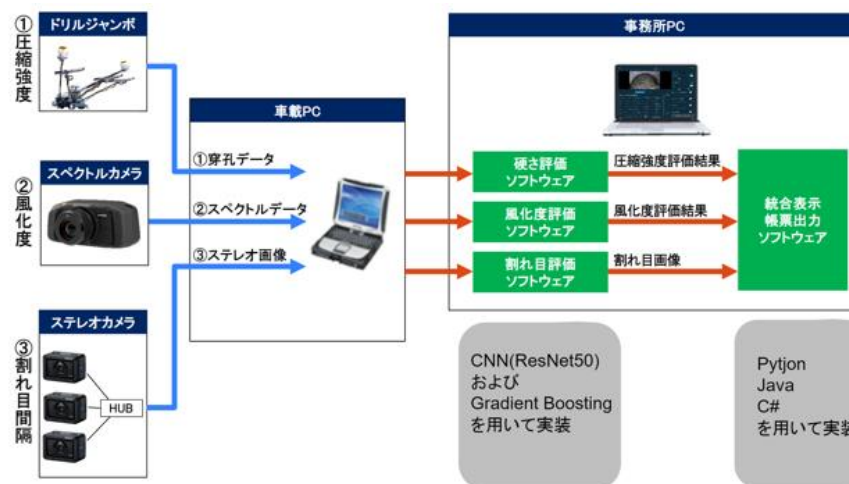
【計測車両を用いた省力化例】(安藤ハザマ)



切羽写真



写真1：データ取得用の計測車両

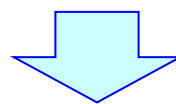


7. 切羽データの共有化・オープン化

4.8

【課題】

AI切羽評価の適用範囲拡大や正答率向上には、多様な岩種や施工条件の切羽画像と正解データを教師データとすることが望ましい。各事業主体、施工者が個別に収集できる教師データには限りがあるため、**教師データの共有化**が効果的であると考えられるが、公正かつ信頼性の高い管理・運用方法が課題である。



【解決策①】

切羽観察データベースの構築

- 現状では、切羽評価結果を含む工事記録情報は個々の工事報告として施工者が発注者に提出し個々の工事情報として記録されている。
- 工事記録情報を公的なデータベースに登録される仕組みがあれば、教師データとして使える切羽情報を共有しうる環境につながる。
- 教師データとして利用するためには、評価結果の信頼性確保が重要（再評価や取捨選択もあり）

【参考例】トンネル工学委員会の取り組み(2007～)

- シールドトンネルの設計・施工技術の伝承、維持管理の効率化を目的として、「どんな地盤に、どのような構造物を、どうやって造ったか」という情報をデータベース化したシールドトンネルデータベースを構築。

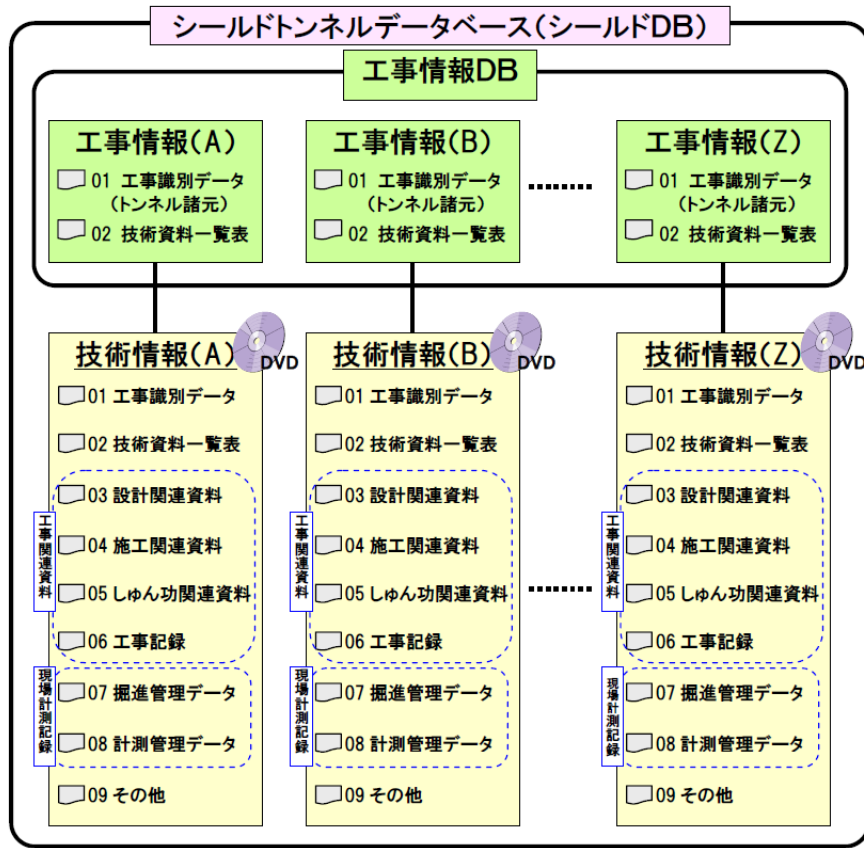


図 1.3.1 シールドDBの構成

シールドDBのステップアップ

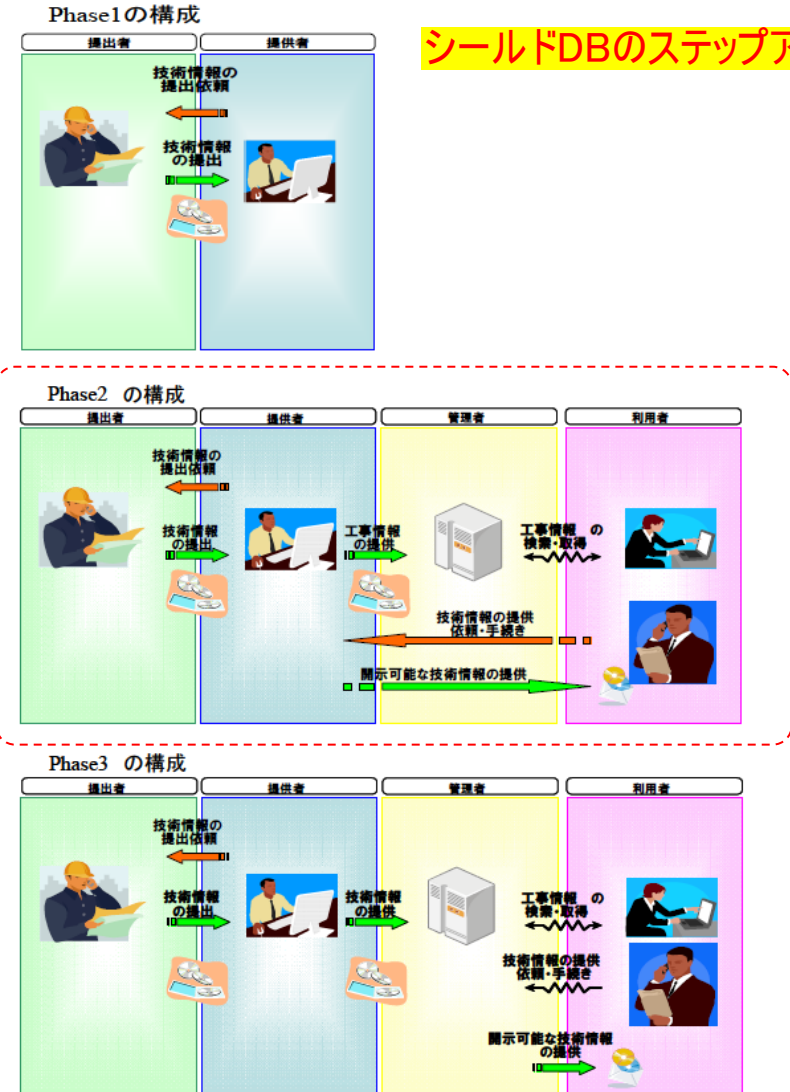


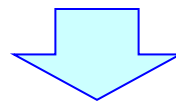
図 2.4.1 シールドDBシステムの構築に向けた3つのPhase

8. 技術力の低下への懸念

4.9

【課題】

AI切羽評価が一般化すると、現場技術者や地質技術者が切羽評価を実施する機会が減少し、**技術者の能力低下**につながる懸念がある。



【解決策①】

トレーニング(OJT)機会の確保

- AIモデル更新や乖離原因の分析などは継続的に実施する必要がある。
- AI切羽評価が仮に「普通」の業務になっても、切羽評価やスケッチを行うトレーニング機会を設ける。

【解決策②】

教師データの作成・評価

- 信頼性の高い学習モデルの構築には、品質の高い教師データが必要。
- 高品質な教師データを継続的に蓄積する必要性が将来的にも重要。

9. AI活用の人材育成

4.10

【課題】

AI切羽評価の普及に伴い、岩盤工学に精通するだけでなく、デジタルツールやAIといった情報通信技術に関する知見が技術者に必要とされるようになる。現時点でも、少なくともDX支援技術者と協働できるように相応の知見を身に着ける必要性がある。

【解決策①】

コミュニケーションの促進

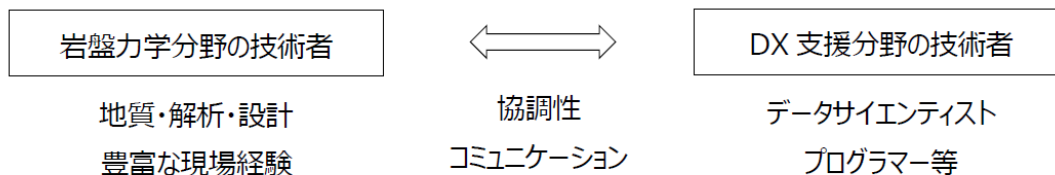


図 4.10-1 岩盤力学分野の技術者とDX支援分野技術者による協調

【解決策②】

関係機関の連携の促進

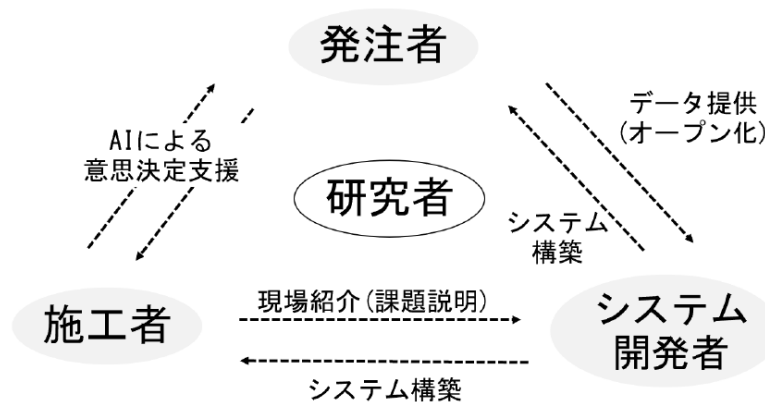


図 4.10-2 AI技術の実用化に向けた関係者の連携

10. その他

4.11

【課題と展望】

・経済性

AI切羽評価を実施するために、写真撮影以外の定量データ取得が必要な場合、取得に費用と労力がかかっている。遠隔化・自動化による**省力化への取り組みと、費用対効果の証明**が重要。

・基準改定

AIや計測データの活用により、従来基準よりも細やかな評価ができる可能性がある。**切羽観察要領もICT技術の進展に合わせてアップデート。**

・汎用化

AI切羽評価手法の信頼性向上とともに、**誰でも活用できる環境整備**が必要。
Ex. オープンソース形態の評価システムの公開。

・山岳トンネル以外への適用

地下空洞・立坑・岩盤基礎・岩盤斜面への適用。

まとめ

➤ AIを活用した切羽評価を実用化するための課題とそれに向けた解決策に関する検討を実施。今後の産官学の取り組み方針の参考。

1. 評価手法の信頼性向上
2. 教師データの品質
3. AI評価システムの適用範囲
4. ブラックボックス化への対応
5. AI切羽評価の有効性の証明
6. 必要なシステム・デバイス
7. 切羽データの共有化・オープン化
8. 技術力低下への懸念
9. AI活用の人材育成
10. その他

ご清聴いただき、ありがとうございました。