

維持管理を考慮した山岳トンネルの 地山評価と施工時記録の活用

菊地浩貴・日下 敦・佐々木亨

1. はじめに

山岳トンネルは地中に構築される構造物であるが故に、参考文献1)で述べられているとおり、調査・設計段階で残された地質の不確実性に対して、施工段階で対応がなされている。それでもなお、土圧や水圧、地震力等、供用後に発生する荷重の変化により構造安定性の低下を引き起こす場合があるなど、施工完了までに不確実性を完全に取り除くことは困難であるのが現状である。そのため、施工段階までに得られた情報を維持管理段階へ適切に引き継ぎ、さらに蓄積することで段階的に不確実性の低減を図り、構造安定性を確保するとともに合理的な維持管理につなげるのが望ましい。

本報告では、山岳トンネルの施工時記録および維持管理情報の相関性分析を行い、設計・施工段階で留意すべき事項、維持管理段階へ引き継ぐべき情報の提案を試みた。また、施工段階での地山評価にあたり、評価する技術者の個人差の解消や今後の熟練技術者の減少への対応を目的としてAI（画像解析）を用いた地山評価も行われるようになってきたが、その信頼性等を明らかにすることを目的に適用性評価を行った結果を報告する。

2. 施工時および維持管理情報の相関性分析 および引き継ぐべき情報の提案

2.1 分析対象と数量

山岳トンネル工法（いわゆるNATM）で施工されたトンネルのうち、道路トンネル観察・計測指針²⁾に準拠した表-1の9項目の切羽観察項目で記録された23,683断面を分析対象とした。ただし、記録内容に不備があるもの、地山等級DⅢaや特殊パターン、特殊断面、補助工法採用断面（鏡吹き、核残し除く）は除外した。

2.2 変位量と切羽評価点の相関性分析

切羽評価点、実施支保パターン、計測変位量について相関性の把握を試みた。切羽評価点は、切

羽観察結果を定量的に評価するために数量化したものであり、点数が低いほど良好な地山であることを示している。切羽評価点およびその他の条件等を考慮して選定された支保構造の組み合わせを支保パターンといい、Bが軽く、DⅡがより重い支保構造となる。ここでは、分析対象断面において、支保パターンごとに整理した変位量分布の90パーセンタイル値を参考にCⅡは25mm、DⅠは60mm、DⅡは100mm以上の変位を過大変位と仮定した。岩質ごとに算出した切羽評価点分布に該当断面の評価点をプロットし分析を行った。ここで、切羽評価点分布は箱髭グラフとして整理し、中央のプロットが平均値、箱部分が平均値±標準偏差、直線端部は最大値、最小値を示している。

変位量と切羽評価点の関係は、図-1に示す2つのパターンに大別されることが明らかになった。パターン1が、箱髭グラフの平均+標準偏差以上にプロットされる場合で、Aトンネルが該当する。算出された切羽評価点に対して、結果的に過小な支保パターンが採用されたことで過大な変位が生じたものと考えられる。Aトンネルの施工時記録を図-2に示す。変位は350m付近にかけて減少するものの、400m付近で支保のランクダウンがなされた区間で急激に増加している。これより、変

表-1 切羽観察表の観察項目

面としての情報	A 切羽の状態	B 素掘り面の状態	
岩石の情報	C 風化変質	D 岩の強度	
割目の情報	E 割目の間隔	F 割目の状態	G 割目の形態
水の情報	H 湧水	I 水による劣化	

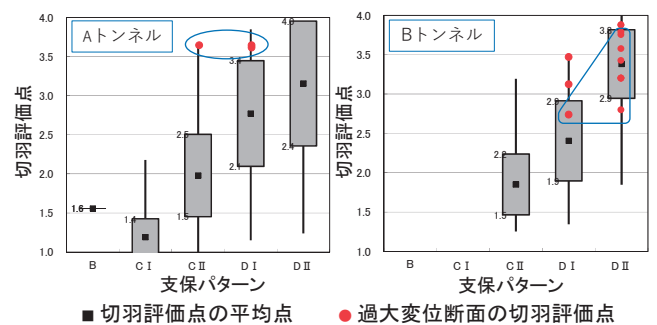


図-1 過大変位断面の切羽評価点分布の一例

位が減少傾向にあっても切羽評価点が悪い場合、支保のランクダウンを行う際には、地質の変化点や脆弱部の存在等の前方地山の性状についての慎重な検討が重要である。

パターン2が、箱髭グラフの平均+標準偏差以下にプロットされる場合で、Bトンネルの一部が該当する。切羽評価点に準じた支保パターンが選定されたにも関わらず、結果的に過大な変位が生じたものである。Bトンネルの施工時記録を図-3に示す。本トンネルは、最大土被りが約650m、地質はジュラ紀付加体のメランジュ層で、断層の破碎の影響を受けている泥質粘板岩を主体とする脆弱な地質を有している。切羽評価点は2～3.5までばらつきがあり、支保パターンはDⅡで施工されているものの100mmを超える変位が計測され、大量湧水や切羽崩落、支保変状が多発した。これより、大土被り、断層破碎帯、不連続な地質や大量湧水などの特殊な地山特性を有する場合、切羽評価点だけでは適切に地山を評価できず過大な変位が生じる可能性があると考えられる。計測頻度や項目の追加や、変位や支保変状のリスクを考慮した支保パターンを選定することが重要である。

2.3 施工時記録と点検データの相関性分析

維持管理段階で外力性が疑われる変状および漏水が確認されたスパンについて、施工時記録との相関性の把握を試みた。外力性の変状は、ひび割れの形態等から外力性と疑われるものを抽出した。漏水については、NATMは本来坑内に漏水が生じる構造ではないことから覆工表面のしみ等についても構造上の不具合と考え、対策区分の判定がⅠ以上のスパンを抽出した。これらの変状が確認されかつ施工時記録が残存する2車線道路トンネルであるCトンネルの分析結果を図-4に示す。

坑口から1,000m付近を境に切羽評価点が増加し、地山が急激に軟質化していることが分かる。これに伴い、当初設計のCⅡからDⅠ、DⅡに変更されたが、変位量の増加や支保変状が多発したことが分かる。外力性が疑われる変状が確認された区間は、岩相変化が著しい区間や過大な変位や支保変状が確認された区間と概ね一致していることが明らかになった。漏水は上記に加え、対策区分がⅡaと判定されたスパン付近では、施工時に天端素掘面やロックボルト孔より200L/分以上の大量湧水が確認されるなど大量湧水が生じた区間

と概ね一致していることが明らかになった。

以上より、次に該当する区間については、外力性または漏水による変状リスク等を有している区間と考えられる。また、地下水位の変化や排水機能の低下等が生じれば覆工に水圧が作用する懸念がある箇所とも考えられる。

1)岩相変化が著しく切羽評価結果にばらつきを有する区間 2)施工時に過大变位や支保変状の不具合が発生した区間 3)大量湧水が発生した区間 (ただし水みちの変化等により必ずしも施工時の

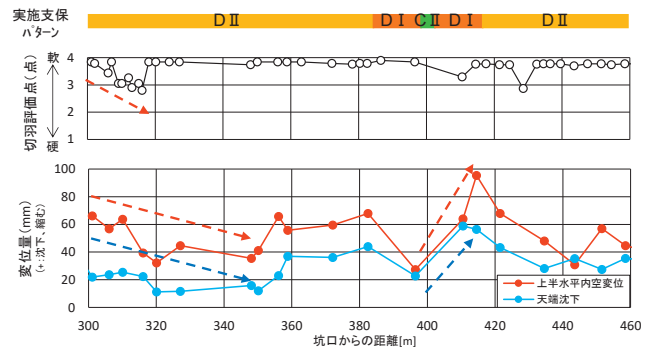


図-2 施工時記録の相関分析 (Aトンネル)

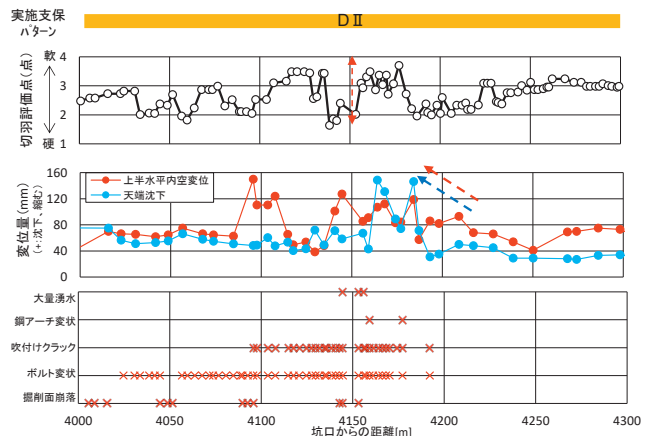


図-3 施工時記録の相関分析 (Bトンネル)

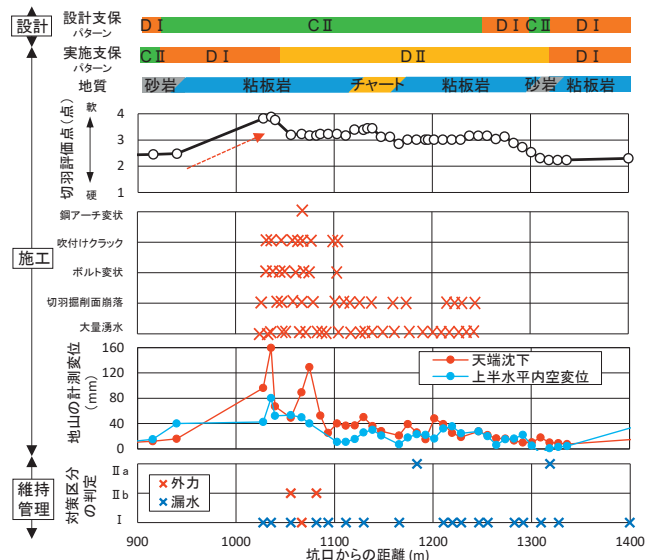


図-4 施工時記録と維持管理情報の相関分析(Cトンネル)

湧水箇所と供用後の漏水等による変状区間は一致しない場合がある）この他、紙面の都合上、割愛したが、地質の急変等による支保パターンの急激な移行区間、変位の収束が緩慢で長期的に継続する区間においても留意が必要である。

設計・施工段階においては、数値解析や過去の施工実績を基に適切な支保構造を選定するほか、密な計測管理等により地山の挙動を把握することが重要である。併せて維持管理段階においても覆工の変位計測を実施するなど、変状リスクを踏まえた対応が重要である。また、維持管理段階で水圧による変状や漏水が発生した場合、水みちの特定や抜本的な対策工の実施は容易ではなく、特に中央排水や横断排水の清掃・改修は、交通への影響等が著しいことから困難である。そのため、設計・施工時に将来の流量を想定し排水工の規格を上げることや管理しやすい構造にしておくなど、予め十分な対策を行うことが重要である。

2.4 維持管理段階へ引き継ぐべき情報

前項のとおり外力性の変状は施工時の変状と関連性を有している場合があり、施工時の記録は供用後に発生した変状のメカニズムの推定、変状の進行性評価のほか、供用後に変状が発生する可能性の高い箇所として点検時の留意点を明らかにすることや構造諸元等の基礎情報の取得にも活用できると考えられる³⁾。このように、維持管理段階で変状が顕在化した場合、変状の原因推定や対策工の検討等には、施工時の切羽観察記録や変位計測の記録、過去の点検記録や修繕に関する記録など、各段階で取得したデータを総合的に活用することが重要であることから、これらの情報は確実に維持管理段階へ引き継ぐ必要がある。

外力性の変状の場合、メカニズムを特定するためには地山の情報が不可欠であり、診断時にその変状が外力性を伴う変状か否か判断するために、施工時の地山の状態や支保パターン、支保変状、変位の傾向等を把握することが重要である。漏水による変状も同様に、施工時の湧水の程度や排水工の施工情報等を把握することで、点検の質の向上が期待される。対策工の検討にあたっては、地形や地質情報、変状の進行性等の情報を活用することで確実な対策が実施できると考えられる。

加えて、外力性の変状は覆工等のひび割れの進展や変形の進行となって顕在化することが多いこ

とから、合理的な点検・診断にあたっては、特にひび割れに対しては画像データ、変形に対しては点群データの活用が有効と考えられる。近年取得が容易になりつつあるこれらのデータは、設計・施工時から引き継がれたデータとともに維持管理段階で確実に蓄積していくことが望ましい。

3. AIを活用した地山評価に関する検討

2.4で示した引き継ぐべき情報のうち、地山評価で得られる切羽面の情報等については、技術者の経験や主観により評価が異なることが多く、このような課題に対して、AI（画像解析等）を活用する取り組みが多くみられる。しかし、結果の信頼性や適用条件等は不明確な点が多いのが現状である。そこで、画像解析に一般に用いられるCNN（畳み込みニューラルネットワーク）を用いた切羽評価を行い、地山評価への適用性の評価および適用にあたっての留意事項の提案を試みた。

3.1 分析方法

表-1に示した切羽観察様式を使用している国交省施工の2車線道路トンネル1箇所を対象とし、本トンネルの約300断面における切羽写真および切羽観察結果のうち、85%を学習用、15%を評価用として無作為に抽出した。このとき切羽写真は、全画像を同サイズにリサイズ処理を実施し、同一断面で上半切羽面を半円状に切り抜き3分割加工したものと未加工のものをそれぞれ作成した（写真-1）。これらを用いて深層学習を行い、2種類の学習モデルを作成した。さらに、Grad-CAM⁴⁾を用いて、判定の根拠となる特徴量をヒートマップとして出力した。学習モデルによる判定結果が技術者による判定結果と一致した断面数の割合を正答率として算出し、特徴量の適否は切羽観察結果におけるスケッチ等と照合することで評価した。判定対象は、実施支保パターン、風化変質とした。

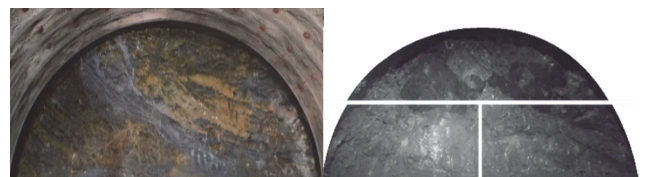


写真-1 分析対象の切羽写真

3.2 分析結果

AIによる判定結果は、支保パターン、風化変質の判定ともにおよそ8～9割の正答率が得られた。ただし、切り抜き加工無しで支保パターンを

判定したケースでは、既施工区間の鋼アーチ支保工やロックボルトを特徴量として捉えている結果が多かった（図-5）。これは支保パターンに応じて鋼アーチ支保工の建込間隔や、ロックボルトの施工間隔が異なることから、それらの特徴量として判定しているものと考えられる。この他、切羽面に移りこんだ支保工の影や測量用のレーザーポインタなど、地山評価とは無関係なものを特徴量として抽出したものが多い結果となった。風化変質については、明確に色差として現れる部分では概ね適切な特徴量を捉えることが出来る一方で、そうでない部分については、意図しない部分の特徴量と捉えているものが多かった（図-6）。

以上より、AIによる切羽評価は正答率だけでなく、その判断過程や学習モデルの特性等を理解したうえで地山評価に活用することが重要である。また、教師データの質がモデルの精度等に大きく影響することから、切羽写真の撮影条件の統一や障害物のマスク処理等の事前処理の検討が必要である。実際の切羽観察では目視観察だけでなく、ブリの状態や変位計測、切羽前後の縦断的な情報等を総合的に判断しており、写真だけで判断できるものではないことが従前から認識されていることから、1枚の切羽写真のみに基づいたAIによる切羽評価結果の解釈には留意が必要である。

4. まとめ

山岳トンネルにおける施工時記録および維持管理情報の相関性分析を行い、維持管理段階で外力に起因する変状が発生する可能性が比較的高い地山条件、施工条件等の提案を行った。さらに、予め設計・施工段階で維持管理段階の変状を回避するための留意事項および供用後の合理的な点検・診断等に向けて維持管理段階に引き継ぐべき情報を提案した。また、AIを活用した地山評価においては一定の適用性が確認されたものの、正答率

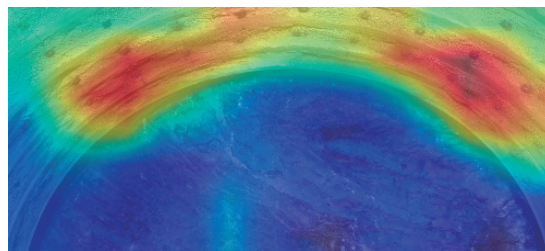


図-5 支保パターンの判定結果の一例

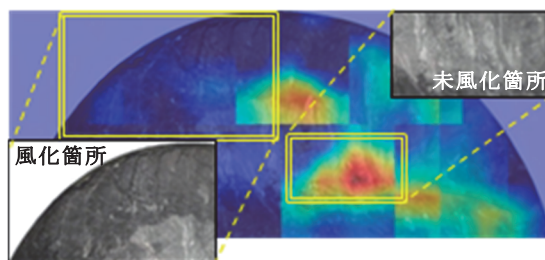


図-6 風化変質の判定結果の一例

だけでなく判断根拠や学習モデルの特性を理解し、評価結果を解釈することが重要である。

山岳トンネルは調査・設計から維持管理まで段階的に不確実性を低減することが望ましく、各種情報を適切に将来に引き継ぐことが重要である。一方で、切羽観察結果等の情報には技術者の経験等に基づく主観が含まれており、客観的かつ定量的な評価が困難であることや、採用された支保パターンの妥当性や発生する変位量の評価が切羽観察時点では困難である等の課題がある。今後は、より客観的な情報を活用した分析や実現場における検証等を引き続き検討する予定である。

参考文献

- 1) 佐々木亨、松山彰宏、日下敦：トンネル工事における補助工法の効果に関する不確実性の評価、土木技術資料、第64巻、第6号、pp.18～21、2022
- 2) （公社）日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針 平成21年改訂版、2003
- 3) 国土交通省道路技術小委員会：第12回道路技術小委員会、2020
- 4) Selvaraju, R.R. ら: Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization, ICCV, pp.618-626, 2017

菊地浩貴



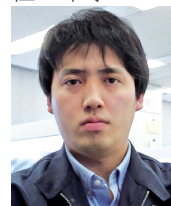
土木研究所道路技術研究グループ
トンネルチーム 研究員
KIKUCHI Koki

日下 敦



土木研究所道路技術研究グループ
トンネルチーム 上席研究員
KUSAKA Atsushi

佐々木亨



土木研究所道路技術研究グループ
トンネルチーム 研究員
SASAKI Toru