

維持管理を考慮したトンネル構造に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 2

担当チーム：トンネルチーム

研究担当者：日下敦、菊地浩貴、佐々木亨、
長谷川慶彦

【要旨】

山岳トンネルにおける変状の原因は様々なものがあるが、なかでも外力に起因する変状はトンネルの構造安定性の低下につながり、維持管理上も多大な影響を与えるリスクを包含していることから、設計・施工時に変状リスクを考慮して予め対策を行うことが重要である。本研究では、施工時データや維持管理データから地山評価と変状リスクの相関性等を分析し、維持管理を考慮した地山評価手法について検討した。その結果、地山評価および地山評価に画像解析を活用する際の留意事項を整理するとともに維持管理段階へ引き継ぐべき情報（案）を提案した。また、通常的设计では見込まれていない過大な外力による変状リスクに対して、覆工の単鉄筋補強による覆工崩落塊の落下抑制の対策工の有効性を明らかにし、耐震対策の考え方（案）を提案した。

キーワード：地山評価、切羽観察、AI、耐震対策の考え方

1. はじめに

山岳トンネルの変状の原因は様々なものがあるが、なかでも外力に起因する変状は、トンネルの構造安定性の低下に影響を与えるリスクを内含しており、変状が顕在化した場合は管理面で大きな障害になることが懸念される。外力性の変状は、強大な地震力、膨張性土圧、水圧等により引き起こされる。これによりトンネル構造の安定性が失われる場合があり、トンネルの設計時や施工時の地山評価結果を踏まえ、適切に支保構造を増強するなど予めリスクを見込んだ構造にしておくことが重要である。

本研究では、維持管理段階で顕在化するおそれのある変状リスクを、設計・施工の段階で低減することを目的に、施工時記録および維持管理データの相関性分析や地山評価への AI 等の情報化技術の適用性の評価を行うことで、設計・施工時に留意すべき事項等の提案を行うものである。また、設計・施工の段階では十分に評価しきれない地震力による外力性の変状リスクに対して、覆工コンクリート塊の落下を抑制する対策工の検討および耐震対策の考え方の検討を行うものである。

2. 合理的な地山評価の検討

トンネルは地中に構築する構造物としての特殊性から、事前に得られる地山の情報が十分であるとはいいがたく、計画・設計段階に掘削時のトンネル周辺地山の挙動と支保効果を正確に予測することは困難である。

そのため、施工段階で実際の地質状況を観察し、掘削にともなう地山の挙動および支保の効果を計測により確かめながら、実際の地山条件に適合した設計・施工法に修正することが、施工の安全性と経済性および構造の安定性を確保する上で非常に重要とされている¹⁾。

トンネルチームでは各地方整備局と連携し、山岳トンネル工法（いわゆる NATM）による道路トンネルの切羽観察記録や変位計測データ等を収集し、切羽情報等と支保変状の相関性、施工時記録と維持管理段階の変状の相関性等を把握し、地山評価にあたっての留意点、維持管理へ引き継ぐべき情報等を提案することを試みた。

2. 1 分析対象と数量

道路トンネル観察・計測指針¹⁾に準拠した表-2.1.1の9項目の切羽観察様式で記録されており、道路トンネル技術基準（構造編）・同解説²⁾に示された表-2.1.2の岩質分類に該当する切羽を対象とした。これ以外にも表-2.1.1のA、B、Gの項目を評価対象から省略した様式があるが、分析対象外とした。また、記録内容に入力不備があるもの、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。本条件を満たすものは23,683断面あり、これらを対象に整理・分析を行った。地山等級および岩質別に断面数を整理した結果を表-2.1.3、図-2.1.1に示す。

表-2.1.1 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	

表-2.1.2 岩質分類

岩質分類	対象とする岩種
硬質岩	はんれい岩、かんらん岩、閃緑岩、花崗閃緑岩、花崗岩、石英斑岩、輝緑岩、花崗斑岩、ホルンフェルス、角閃岩、中・古生層砂岩、石灰岩、チャート(珪岩)、片麻岩
中硬質・軟質岩(塊状)	安山岩、玄武岩、輝緑凝灰岩、石英安山岩、流紋岩、ひん岩、第三紀層砂岩、礫岩、蛇紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩
中硬質岩(層状)	粘板岩、中・古生層頁岩
軟質岩(層状)	千枚岩、黒色片岩、石墨片岩、緑色片岩、第三紀層泥岩

表-2.1.3 分析対象断面数の内訳

岩質区分	地山等級					計
	B	C I	C II	D I	D II	
硬質岩(塊状)	175	1,500	4,486	2,013	224	8,398
中硬質・軟質岩(塊状)	7	476	3,670	4,376	1,318	9,847
中硬質岩(層状)	0	43	1,294	1,041	1,012	3,390
軟質岩(層状)	0	107	628	1,014	299	2,048
計	182	2,126	10,078	8,444	2,853	23,683

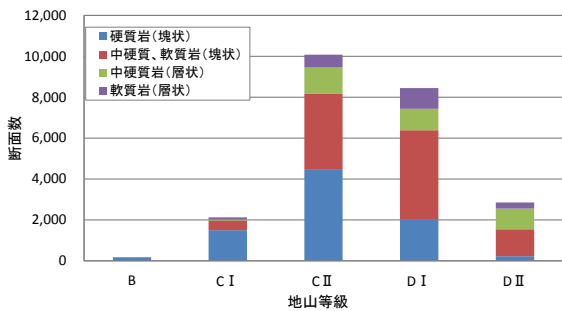


図-2.1.1 分析対象断面数

2.2 地域による分類

断面を地域ごとに分類した結果を図-2.2.1に示す。地域により岩質分布に偏りが確認された。北海道と近畿の断面数が多いが、これはトンネル数や延長の違いのほか、表-2.1.1の切羽観察様式の使用の有無が主要因である。

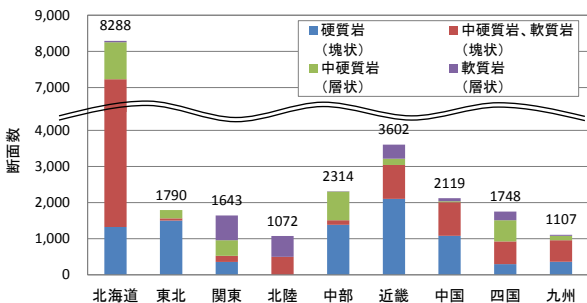


図-2.2.1 地域ごとの断面数

2.3 重み付き切羽評価点の算出

参考文献³⁾で算出された重み係数を用いて、次式に基づき、今回の分析対象断面の各観察項目の評価点(1

~4)に乘じた総和を100で除することで重み付き切羽評価点(以下、評価点)を算出する。

$$G = \frac{\sum_{i=1}^9 B_i X_i}{100}$$

ただし、 B_i は岩質毎に定められた*i*番目の観察項目の重み係数、 X_i は*i*番目の観察項目の評価点

評価点は1.0~4.0で求められ、1が良好な地山、4が不良な地山であることを表している。全国、地域ごとに評価点を算出し、地山等級ごとに箱髭グラフを作成した。結果を図-2.3.1、2.3.2に示す。グラフ中の黒点は、評価点の平均値、箱部分は平均値±標準偏差、直線の端部は最大値、最小値を表している。

全国版では、岩質によらず評価点が高くなるにつれ、地山等級が悪くなる傾向が確認されたが、全断面を一律で集計したことで、岩種の混在等により分離性が悪いことが分かる。地域別版の一部では、良好な分離性を示す結果が得られ、地域特性が反映されたものと考えられる。ただし、地山等級ごとに評価点を完全に分離することは困難であり、次項以降に示す計測変位の傾向等を総合的に判断し、地山等級を決定する必要がある。また、地域特性は、地質等の相違によるものか施工にあたっての考え方の相違等によるものか明確な傾向は確認できなかった。

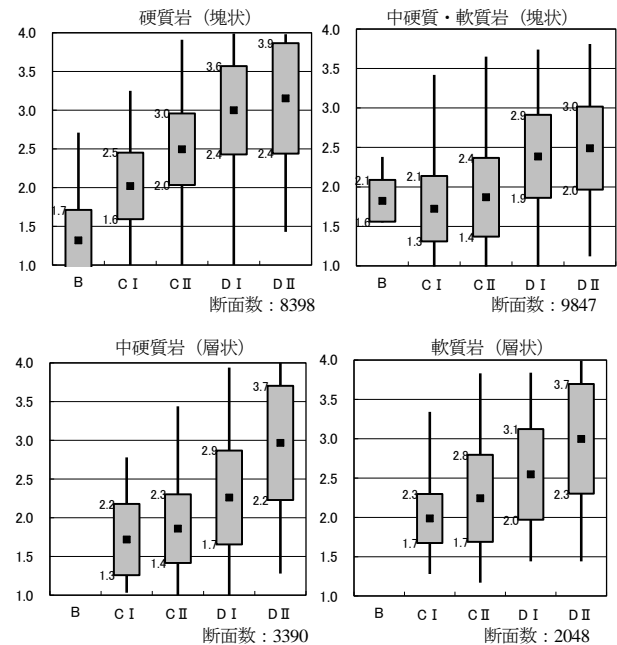


図-2.3.1 重み付き切羽評価点(全国)

(横軸: 地山等級 縦軸: 重み付き切羽評価点)

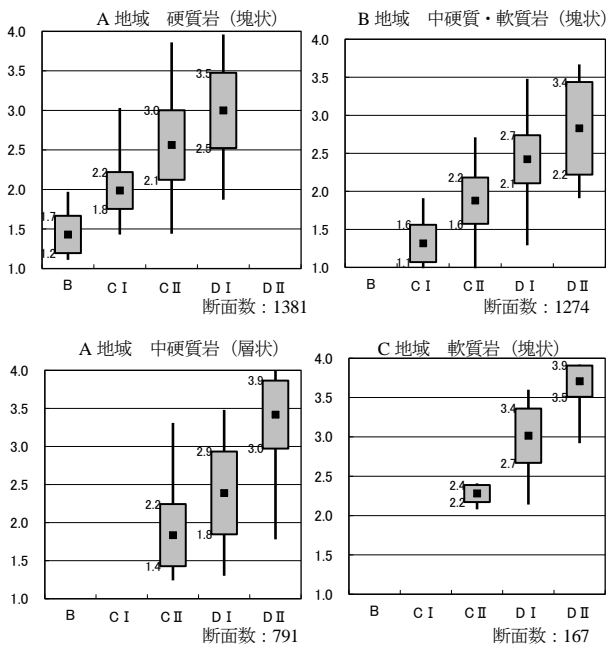


図-2.3.2 重み付き切羽評価点 (地域) (一部)

(横軸：地山等級 縦軸：重み付き切羽評価点)

2. 4 施工時の変位量に関する整理・分析

ここでは、最終天端沈下量と最終上半水平内空変位量の実績を整理・分析し、過去の実績に基づく変位の傾向を把握することを試みた。これらの計測変位は、掘削直後の切羽近傍で多く計測され、掘削から計測開始までの切羽離れおよび時間が大きな影響を及ぼすことから、計測開始時の切羽離れが5m以下の計測断面を対象とした。変位量と頻度の関係を図-2.4.1に示す。

地山等級B、C I、C IIでは0~5mm程度を中心に概ね正規分布を示した。一方、D Iは概ね10~25mm、D IIは最終天端沈下量が約30mm、最終上半水平内空変位が約70mmに多く分布するが、ばらつきが大きく、100mm以上の変位を示す断面が多く確認された。また、地山等級によらず、概ね天端沈下：内空変位が1:1または1:2の範囲を中心に分布しており、天端沈下量の増加に伴い内空変位量も増加する傾向が確認された。

これらより、地山等級C IIとD Iを境に、変位の傾向に差異が生じていることが分かった。地山等級D Iについて、近年の変位量の実績は、参考文献²⁾に示される内空変位量の実績(30~60mm)と比較し、小さい傾向が確認された。また、D IIでは変形余裕量として100mm程度見込んで設計するのが通例とされており²⁾、近年のD IIの変位量の実績はこの範囲内に多く分布することから、施工時に地山等級や変形余裕量を適切に見直すことで、さらなる施工の合理化に資するものと考えられる。図-2.4.1の実績を目安に計測された変位量を考慮し、各現場で地山評価の妥当性を検証するこ

とが重要である。

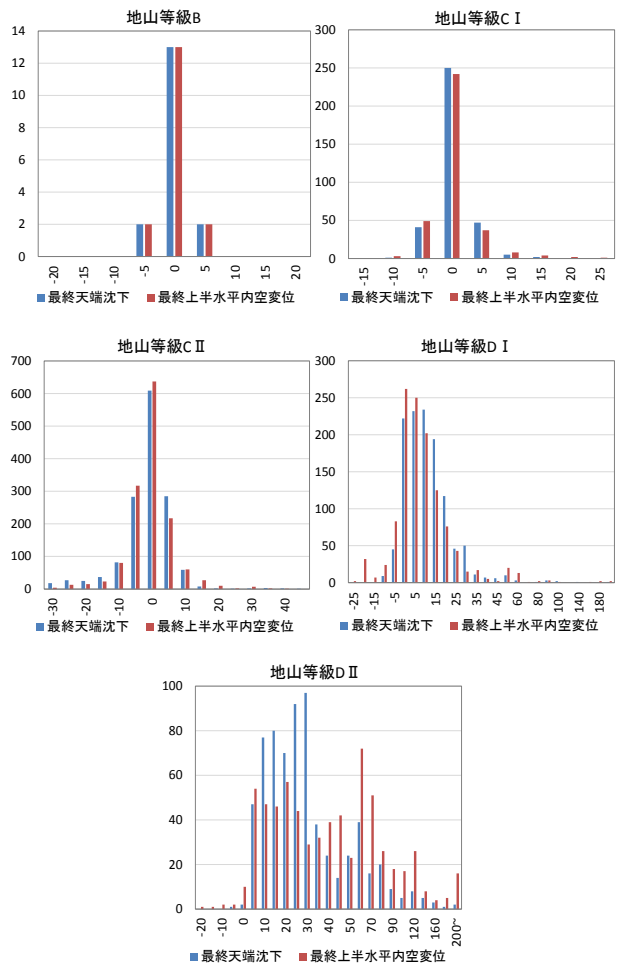


図-2.4.1 施工時変位量と頻度の関係

(横軸：変位量 (mm) 縦軸：頻度)

2. 5 変位量と支保工に生じる変状の相関性分析

施工中の支保工に変状が確認された断面について、その断面の計測値と変状の相関を把握することを試みた。変状は、切羽の不安定化により生じる切羽掘削面崩落、支保工や地山の変形により生じる吹付けコンクリートクラック、ロックボルト変状、鋼アーチ支保工変状に分類した。図-2.5.1に最終天端沈下量について、全計測断面と変状が確認された断面の数量と変状発生割合を示す。図-2.5.2に変状の内訳を示す。内訳の整理にあたっては、切羽の不安定化に起因する変状として切羽掘削面崩落のみ、支保工や地山の変形に起因する変状として吹付けコンクリートクラック、ロックボルト変状、鋼アーチ支保工変状、切羽の不安定化および変形に起因する変状として吹付けコンクリートクラックと切羽掘削面崩落、ロックボルト変状の切羽掘削面崩落が生じた断面に分類した。変形に起因する変状の分類で複数の変状が同時に確認されたものについては、それぞれ数量を計上している。

図-2.5.1より、変位量の増加に伴い、変状の発生割合も増加する傾向が確認された。変位量が60～80mmで変状発生割合が約50%まで増加した後、80～100mmでやや減少し、100mm以上の変位でさらに増加した。図-2.5.2より、内訳は切羽掘削面崩落のみ→切羽掘削面崩落と吹付コンクリートクラックまたはロックボルト変状→吹付けコンクリートクラック・ロックボルト変状→鋼アーチ支保工の順で、変状の割合が増加する傾向がみられた。切羽の不安定化に起因する変状については、最終変位量によらず小さな変位でも発生することが分かる。変形に起因する支保構造の変状については、最終変位量に応じて発生割合が増加し、特に80mm以降は鋼アーチ支保工変状およびロックボルト変状が増加する傾向がみられた。

以上より、切羽の不安定化による変状は最終変位量の大小にかかわらず発生することから、最終変位量が小さい場合であっても変状に留意する必要がある。支保工・地山の变形による支保構造の変状は、60～80mmの変位を境に構造部材の変状が増加することから、これらの変位量を目安として変状に留意する必要があることが示唆された。

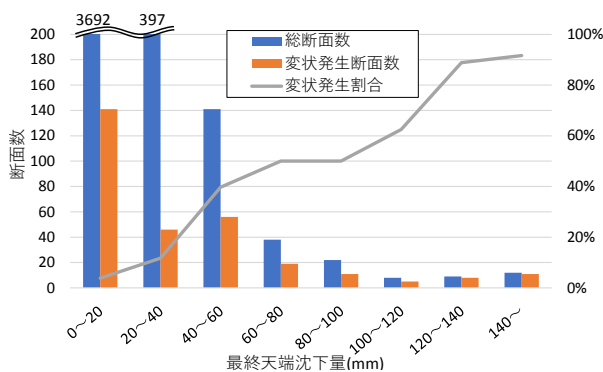


図-2.5.1 断面数および変状発生割合

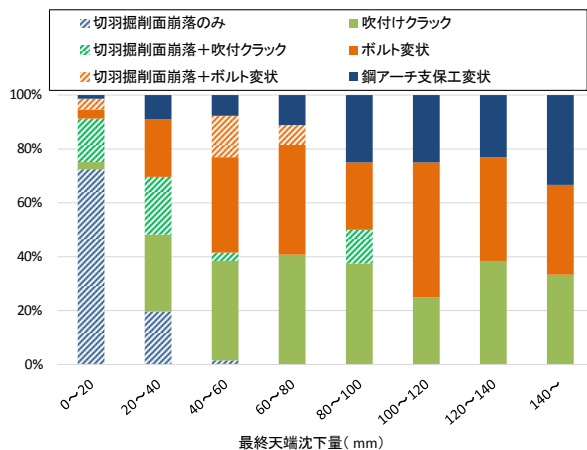


図-2.5.2 変状種別の割合

2.6 変位量と重み付き切羽評価点の相関性分析

ここでは評価点、実施支保パターン、変位量について、相関性の把握を試みた。2.2項で地域ごとに岩質分布の偏りが確認されたことから、地域ごとに分析を行った。図-2.6.1に示す、地山等級ごとの変位量の累積分布曲線の変曲点となる90%の値を参考に、CIは15mm、CIIは25mm、DIは60mm、DIIは100mmを基準とし、これ以上の変位量が生じた断面に着目した。代表的な結果を図-2.6.2に示す。

図-2.6.2より変位量と評価点の傾向は2つのパターンに分類できる。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。これは、算出された評価点に対して、結果的に過小な地山等級・支保パターンを採用したことにより、過大な変位が生じたものと考えられる。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DIIの大部分が該当する。これは、評価点上は、妥当な地山等級が選定されたにも関わらず、結果として過大な変位が生じたものである。主にDI、DIIで多く確認された。

パターン1について、Aトンネルの施工時記録を図-2.6.3に示す。切羽評価点については、300～320m付近で1点程度評価点が下がるが、それ以降は再び3.8～3.9点に悪化している。一方、変位については、350m付近にかけて減少しているものの、400m前後の支保のランクダウンがなされた区間で、再び変位量が増加していることが分かる。これより、変位が減少しているにもかかわらず切羽評価点が悪い場合、ランクダウンを検討する際には慎重な検討が必要であり、削孔検層等により取得した切羽前方の地質に関するエネルギー等の情報を十分考慮するなど、地山の不確実性を考慮した地山等級、支保パターンの選定が重要である。図の事例のほか、本来は天端の安定対策を目的に施工される先受け工などの補助工法を、本来の目的ではない地耐力向上を目的に使用された断面で、想定以上の変位が発生するケースがみられた。そのため、補助工法の効果や適用範囲等を適切に見極め使用する必要がある。

パターン2について、Bトンネルの施工時記録を図-2.6.4に示す。本トンネルでは、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、かつ非常に大きな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である。施工中は、多量湧水や切羽崩落、支保変状が確認された。図の区間では、切羽評価点は2～3.5までばらつきがあり、地山等級・支保パターンはDIIで施工されているものの、天端沈下・

内空変位とも 100mm を超える変位が確認された。また、計約 140m³ の切羽崩落が生じ、トンネル上部では直径 8m、深さ約 2.5m の地表面陥没が確認された。これより、高土被り、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、評価点のみでは適切に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。このほか、支保パターンのランクアップ時の移行区間で過大な変位が生じるケースがみられた。以上より、特殊な地山特性を有する場合や支保のランクアップ区間においては、計測頻度や計測項目を追加することや、変位や支保変状のリスクを考慮し支保パターンを選定することが重要である。

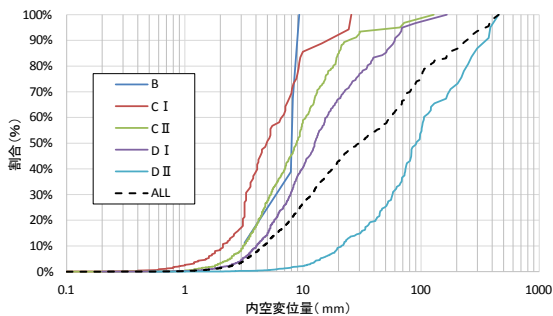
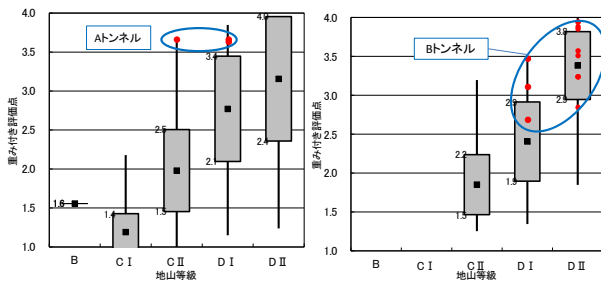


図-2.6.1 施工時変位の累積分布曲線



A 地域・硬質岩(塊状) B 地域・中硬質岩(層状)

図-2.6.2 過大变位断面の重み付き切羽評価点

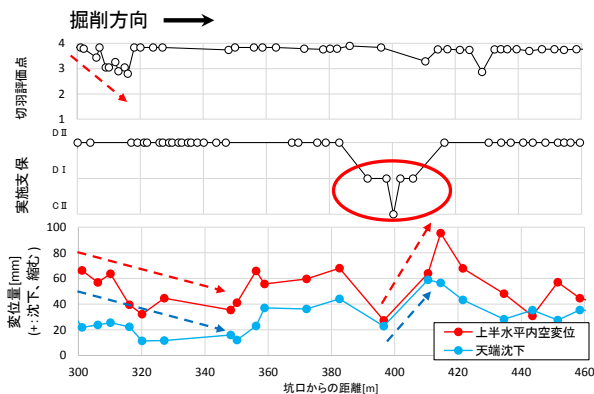


図-2.6.3 パターン1の施工時記録の一例

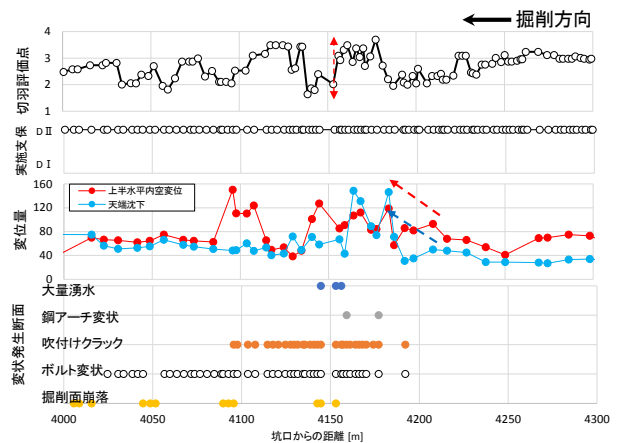


図-2.6.4 パターン2の施工時記録の一例

2.7 施工時記録と点検データの相関性分析

ここでは、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、覆工表面のにじみや滴下など利用者への影響がほとんどないものでも構造上は不具合が生じていると考え、対策区分の判定が I 以上のスパンを抽出した。ただし、漏水がなく I 判定としているものは除いた。これらの変状を有しかつ施工時記録が残存する 1 トンネルを対象とした。

図-2.7.1 に対象トンネルを所管する地域の評価点に、変状断面における施工時の評価点をプロットした結果を示す。また、施工時記録および点検データを図-2.7.2 に示す。図-2.7.2 に示す区間は、砂岩、粘板岩、石灰岩、頁岩、チャートなどからなり、岩相変化が著しく、レンズ状に他の地質に挟在する複雑な地層(メランジュ層)と記録があり、特に粘板岩優勢層では、切羽崩落・異常出水が生じた記録がある。

(1) 供用後に外力性の変状が確認されたスパン

図-2.7.1 より、外力性と疑われる変状が確認された箇所付近の断面は、前項のパターン1に該当し、支保耐力不足の可能性が示唆された。図-2.7.2 より、変状スパンは、施工時に岩相変化が著しい区間で、かつ支保パターンのランクアップ時に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分かった。

以上より、岩相変化が著しく切羽評価結果にばらつきがある区間や地山等級・実施支保パターンの移行区間、変位の収束が緩慢で長期的に変位が継続している可能性がある区間、施工時に過大变位や支保変状などの不具合が発生した区間においては、維持管理上の変状につながる可能性があることから、外力性の変状リ

スクを有している区間といえる。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。さらに、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、外力性の変状リスクを踏まえた対応が重要である。

(2) 供用後に漏水による変状が確認されたスパン

図-2.7.1より漏水が生じたスパン中の断面は、評価点に明確な傾向は見られなかった。図-2.7.2より、変状スパンは、施工時に岩相変化が著しい区間と一致するスパンで確認されており、さらに対策区分Ⅱaと判定された850m付近の断面は、施工時に天端素掘面から120L/分、ロックボルト孔より80L/分、サイクル終了後に左右足下より計1800L/分の大量湧水が確認された切羽であり、観察項目のうちH湧水は4判定の区間であった。本断面では、施工時に水抜き孔が実施されているが、排水工の規格を変更した記載は無く、設計どおりφ300mmのまま施工されたものと思われる。施工時に本断面付近にさしかかり、湧水の増加が確認されていたが、地質等に大きな変化はないことから支保の安定が保たれていると判断し、支保パターンはD Iで実施されていた。

このように、施工時に大量湧水が発生するなどのトラブルが確認された区間については、維持管理段階における漏水による変状リスクを有している区間と考えられる。加えて、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言える。なお、施工時に大量湧水が確認された区間と供用後に漏水による変状が生じる区間は上述のとおり必ずしも一致しない場合がある。これは、施工から時間が経過して水みちが変化することや、経年劣化等により排水工や防水工の機能が局部的に低下する箇所が湧水箇所とは必ずしも一致しないことに起因すると考えられる。

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く大きいことから困難であり、設計・施工段階でこれらのリスクを最小限にしておくことが重要である。設計・施工時において、将来の流量を想定し排水工の規格を上げることやメンテナンスしやすい構造にしておくなど、予め十分な対策を行っておくことが重要である。

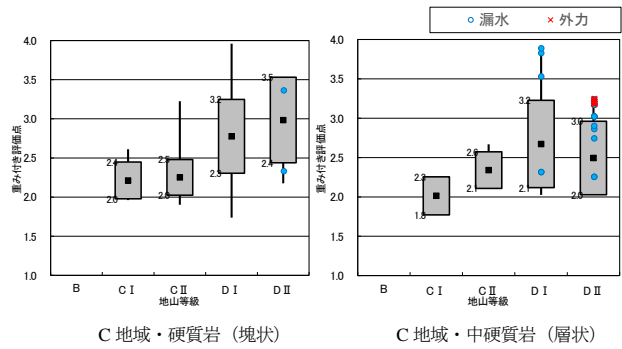


図-2.7.1 変状発生断面の重み付き切羽評価点

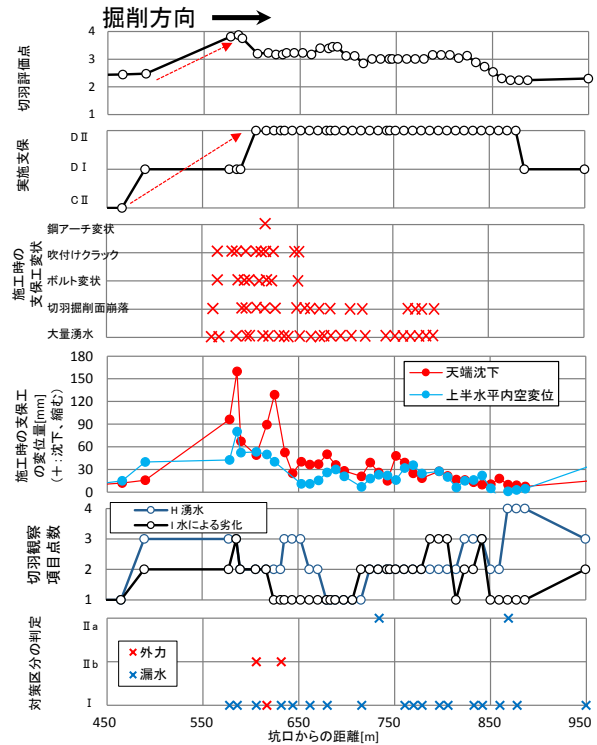


図-2.7.2 施工時記録および点検データ

2.8 維持管理段階へ引き継ぐべき情報(案)の提案

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、施工時データは供用後に発生した変状のメカニズムの推定に加えて、供用後に変状発生リスクを有する箇所として点検時の留意点を明らかにすることに活用できると考えられる。このように、維持管理段階でリスクが変状として顕在化した場合、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。

維持管理段階に引き継がれた情報の活用目的としては、構造諸元等の基礎情報の取得、変状の把握、変状原因の推定、変状の進行性評価が挙げられる⁴⁾。外力性の変状の場合、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。

引き継ぐべきデータのなかには、現状で施工時に取得されているものの、納品が義務付けられておらず提出されていないものや、近年点検等で簡易かつ効率的に取得できるようになった覆工の画像データや点群データなどがある。前項までの結果から、過大な変位が生じる断面や変位の収束が緩慢で長期的に変位が進行する断面では、覆工の変形として外力性の変位が顕在化する傾向があることから、覆工の変位を継続的に把握することが望ましい。この方法として、画像データや点群データの活用が期待され、これらのデータは維持管理段階に引き継ぎ、さらに維持管理段階で取得されたデータも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

山岳トンネルでは、日々の切羽観察により適切な支保パターンや補助工法の採用等を決定しているが、切羽観察は技術者の経験により判断が異なる場合が多い。また、近年のトンネル技術者の減少や技術の進歩により、切羽観察や岩判定に AI（画像解析技術等）を利用する取り組みが多くみられる。しかし、画像解析などの AI を用いた地山評価手法には確立されたものではなく、その信頼性や適用条件等は不明確な点が多い。また、分析に使用する切羽画像の撮影条件等により、判定結果に大きく影響が生じることが懸念されるが、現状では切羽を撮影する際の統一された条件はない。そこで画像解析を用いた切羽評価の検証と切羽写真撮影条件に関する検証を行い、画像解析の切羽評価への適用性評価と画像解析等の AI を用いた切羽分析に向けた切羽写真撮影方法（案）を作成することを試みた。

3. 1 CNN による分析

分析には画像解析に一般に用いられている CNN（畳み込みニューラルネットワーク）を用いた。284 枚の切羽写真のうち 85%を学習用、15%を評価用として無作為に抽出し、切羽観察結果を教師データとして深層学習を実施した。学習時にデータのランダム変化、水増し処理を実施した。さらに、CNN の判断過程を把握することを目的に、Grad-CAM^①（重み付きクラス活性化マップ）を用いることで、判定結果に対して影響を与

えている領域を赤で着色し、ヒートマップとして出力することで、どのような特徴量をもとに判別しているのか視覚的に把握することを試みた。

分析にあたっては、延長 2,000m 以上、9 項目 4 段階の切羽観察様式を使用、切羽写真が JPEG 形式で残存している国交省施工の道路トンネル 1 箇所を対象とした。分析ケースを表-3.1.1 に示す。分析対象は採用支保パターン、切羽観察様式において視覚的要素を含む D 風化変質、E 割れ目の間隔とした。

事前処理として、全画像を同サイズにリサイズ処理を実施し、ケース 1 は背景を残した上半全体、ケース 2~4 は上半切羽面のみを半円状に切り抜き加工、さらにケース 3、4 は天端・両肩に 3 分割した。（図-3.1.1）

表-3.1.1 分析条件・ケース

ケース	事前処理条件	評価対象
1	上半	採用支保パターン
2	上半切羽面のみ切り抜き	採用支保パターン
3	上半切羽面のみ切り抜き 3分割	D 風化変質
4	上半切羽面のみ切り抜き 3分割	E 割れ目の間隔

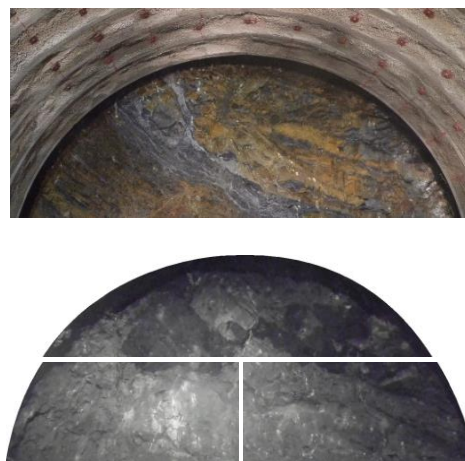


図-3.1.1 加工後の切羽画像
（上：ケース 1、下：ケース 3、4）

3. 2 CNN による分析結果

学習の結果、正答率はケース 1 が 94%、ケース 2 が 76%、ケース 3 が 75%、ケース 4 が 61%であった。最も正答率が高かったケース 1 の結果を図-3.2.1 に示す。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ことが分かる。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支保パターンを正答しているものと考えられる。2 番目に正答率が高かったケース 2 の結果を図-3.2.2 に示す。一定の正答率は得られたものの、支保工の影や測量の

レーザーポインタなど地山評価とは無関係なものの特徴量として抽出したものが多く結果となった。ケース3、4のうち良好な結果が得られたものを図-3.2.3、3.2.4に示す。風化変質は切羽観察時に切羽面の色差等で判断することが多いことから、図-3.2.3では茶褐色の面を風化変質の特徴としての的確に抽出できたと思われる。割れ目の間隔についても影により色差として表れやすいことから、図-3.2.4のように概ね割れ目に沿った部分を特徴量として抽出した結果が得られた。一方で、ケース3、4のうち意図しない特徴量をとらえた結果を図-3.2.5、3.2.6に示す。図-3.2.5では風化変質とは関係ない箇所を特徴量として抽出しており、全体としてはこのような出力結果が多かった。この断面では、明確な変色は見られないものの天端から左肩にかけて風化しており、色差として現れない断面では特徴量の抽出が困難であると考えられる。また、割れ目の間隔についても同様の傾向が見られ、多くは図-3.2.6のようにポストコーン等の障害物や関係ない部分の特徴量と抽出するなど、割れ目以外を特徴量として抽出する結果となった。

以上より、AIによる切羽評価を実施する場合は、正答率だけでなく、判断過程で抽出された特徴量や教師データの質、切羽写真の色彩や解像度等の撮影条件など、学習モデルや判断過程を含め、技術者が総合的に画像解析や機械学習の特性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、地山評価に関係のない部分の特徴量として抽出してしまうなど、学習モデルの作成にあたっては写真の質が大きく影響することが分かり、撮影手法や画質等の工夫・画一化や、事前処理として、障害物を分析対象から外す切り抜き加工やマスク処理の検討が必要不可欠である。実際の切羽観察においては目視観察だけではなく、ズリの状態や経時変化、変位計測等、様々な情報を総合的に判断する必要があるため、これらの情報を付加して学習することで、より技術者の判断に則した学習モデルの検討が可能であると考えられる。

3.3 切羽写真撮影条件の検討

切羽写真に画像解析を適用する際に、トンネル坑内という暗く、自然光が入らない特殊な環境下において、検討に有効と考えられる実際の色彩により近く、ノイズが現れにくい有効な写真を撮影するためのカメラ設定等の条件について検討した。

表-3.3.1に示すカメラ設定と撮影環境の組み合わせを変えて切羽写真を撮影し、各画像の解像度を確認する。ここで解像度は、切羽写真に写り込ませた図-

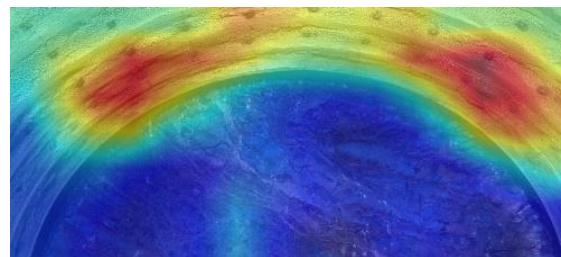


図-3.2.1 支保パターンの判定の特徴量 (不良)

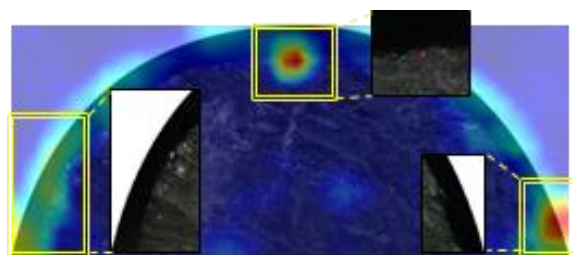


図-3.2.2 支保パターンの判定の特徴量 (不良)

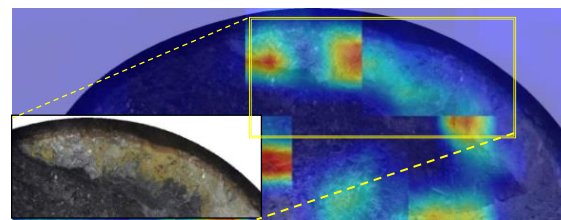


図-3.2.3 風化変質の判定の特徴量 (良好)

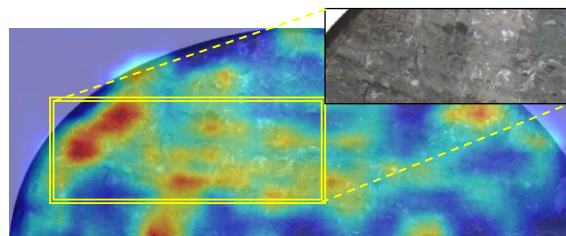


図-3.2.4 割れ目の間隔の判定の特徴量 (良好)

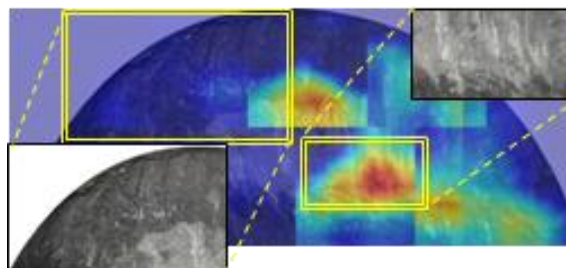


図-3.2.5 風化変質の判定の特徴量 (不良)

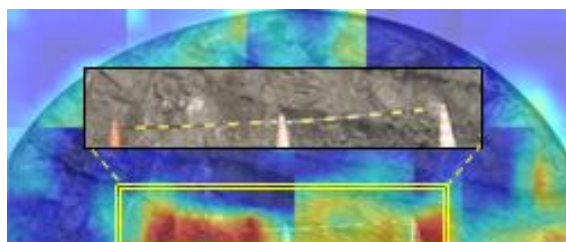


図-3.2.6 割れ目の間隔の判定の特徴量 (不良)

3.3.1 に示す解像度チャートを拡大し、模様がどこまで読み取れるかを、併記されるメモリ 1~5 の数値を点数として評価する。画像が明るすぎまたは暗すぎて解像度チャートが読み取れないものについては、「白飛び」「黒つぶれ」として評価した。切羽面が比較的明瞭に撮影できている解像度 4 点以上の画像を取得できる撮影条件を検討する。なお、切羽写真を撮影する際には、**図-3.3.1** の解像度チャートを切羽面 1m 手前の位置に設置し、上半切羽と解像度チャートが写るように撮影し、ズーム等の補正は行わないこととした。

表-3.3.1 カメラの撮影条件一覧

検討項目		カメラA	カメラB
カメラの設定	画素数 (万画素)	1200, 768, 128	1800, 1100, 300
	F値 (絞り値)	2.0, 2.8, 8.0	1.8, 2.8, 8.0, 11.0
	ISO感度	100~1600	125~6400
	シャッタースピード (s値)	1/160~4	1/100~1/5
撮影環境	切羽面の照度 (ルクス)	150, 250	
	切羽面からの距離 (m)	7.5, 16	

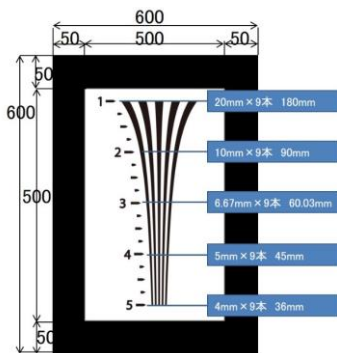


図-3.3.1 解像度チャート

3.4 画像解析に向けた切羽写真撮影条件の提案

(1) 撮影環境による影響

今回分析した 2282 枚の画像のうち、解像度が 4、5 点の画像は 922 枚、1~3 点の画像は 1360 枚であった。また、そのうち白飛びした画像は 37 枚、黒つぶれした画像は 295 枚であった。**図-3.4.1** は切羽からの距離および切羽面の照度ごとの解像度の割合を示している。切羽からの距離に着目すると、切羽からの距離が 16m の場合は解像度が 4、5 点の画像は 8~14% であった。一方、切羽からの距離が 7.5m の場合、解像度 4、5 点の画像を 62~69% 撮影できており、切羽に近いほうが、解像度が向上する結果となった。次に、切羽面の照度に着目すると、切羽までの距離が 7.5m、16m どちらの場合も、解像度が 4、5 点の画像を取得できる割合は切羽面の照度が 150 ルクスと 250 ルクスでほぼ変わらない結果となった。切羽面の照度が 150 ルクス~250 ルクスの範囲であれば、照度が画像の解像度と与える影響は切羽面の距離による影響に比べ軽微であり、

照度は解像度にほぼ影響しないことが考えられる。

(2) カメラ設定値について

カメラの設定値については、まず、F 値、S 値および ISO 感度と解像度の関係について検討した。F 値は大きいほど暗い画像に、小さいほど明るい画像になる設定値である。S 値および ISO 感度は遅い(大きい)ほど明るい画像に、早い(小さい)ほど暗い画像になる設定値であり、同時に画質にも影響を与える。広範囲を撮影する必要がある切羽写真においては、F 値が小さいほどピンボケしやすくなり、S 値および ISO 感度は遅い・大きいほど手振れやノイズの増加により画質が低下する。以上のことから、**式(1)**によりカメラ設定の評価点①を算出し、解像度との関係を検討した。評価点①は上述のカメラ設定の性質により、値が小さいほど明るくかつ画質が悪くなると考えられる。

カメラ設定の評価点① = F 値 / (S 値 × ISO 感度)

・・・(1)

図-3.4.2 は各解像度について、**式(1)** で算出したカメラ設定の評価点①の発生割合を示したものである。白飛びは全て評価点①が 0.1 以下の場合に発生していることがわかる。また、黒つぶれは評価点①が増加するほど発生しやすくなり、その多くは 0.5 以上で発生する結果となった。このことから、評価点①が 0.1~0.5 の範囲であれば、少なくとも白飛び、黒つぶれを概ね避けることができると考えられる。

次に、画素数も考慮した指標として、**式(2)** で求めた評価点②により検討した。ここでは、白飛び・黒つぶれが発生しづらい評価点①が 0.1~0.5 の画像に限定して検討を行った。

カメラ設定の評価点② = 評価点① × 画素数

・・・(2)

図-3.4.3 に**式(2)** で求めた評価点②と画像の解像度の関係を示す。縦軸は各区間にそれぞれの解像度が占める割合を示す。評価点②が 100 以下では解像度 4、5 点の画像が 30%程度であるのに対し、100 より大きい場合は 50%以上の割合で解像度 4、5 点の画像を取得できている。ただし、500 点以上の画像を確認すると、全体的に暗くなる傾向があり、画像解析への適用には不適切な画像であると考えられる。

(3) 切羽写真撮影条件(案)の提案

トンネル切羽を撮影する際に白飛びや黒つぶれが発生しにくく、AI 適用に必要な解像度を確保できる撮影条件として、**式(1)** の評価点①が 0.1~0.5 の範囲内になるように設定すること、**式(2)** の評価点②が 100~500 の範囲に収まることを 1 つの目安であ

ると考えられる。本条件を満たした切羽写真を写真-3.4.1に示す。目視上も非常に高精細であることが分かる。今後、実検証を行い、条件式の見直しや留意点の追加等を行う必要がある。

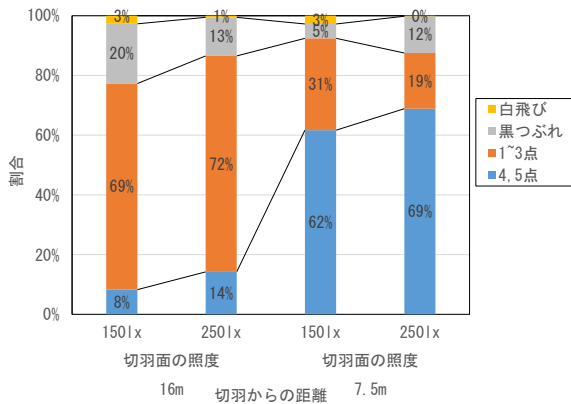


図 3.4.1 切羽距離・照度と解像度の関係

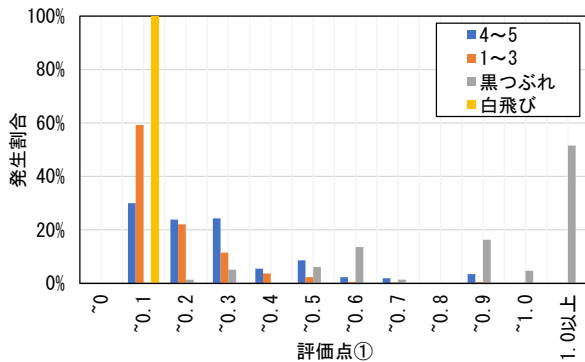


図-3.4.2 評価点①と解像度の発生割合

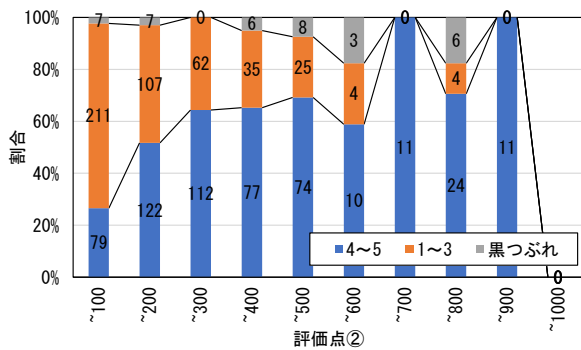


図-3.4.3 評価点②と解像度の発生割合



写真-3.4.1 評価式を満たした切羽写真

4. 耐震対策の考え方に関する検討

地震力により覆工コンクリートの崩落、盤ぶくれ、

せん断ひび割れ等の変状が発生した事例として、平成16年新潟中越地震による国道17号和南津トンネルや平成28年熊本地震による熊本県道28号俵山トンネル等がある。いずれの事例においても、地震の影響による地山の変形に対して覆工が追従できず、覆工の崩落等に至ったと想定される。(写真-4.1、4.2) これらの事例を踏まえ、地震被害を受けやすい条件および耐震対策の選定に関する考え方(案)の提案を試みた。



写真-4.1 和南津トンネルの地震被害



写真-4.2 俵山トンネルの地震被害

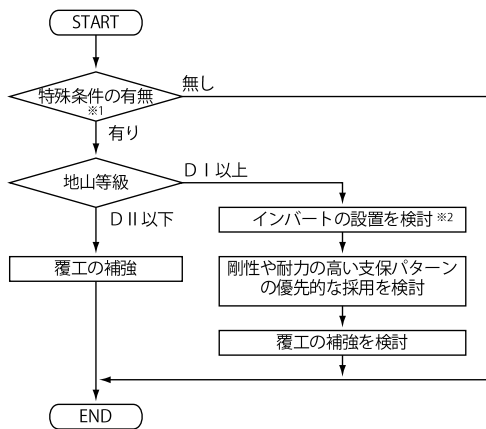
4.1 地震被害を受けやすい特殊条件の提案

道路トンネルにおける過去の地震被害の分析⁶⁾により、覆工の崩落をともなうような比較的規模の大きな被害は、地震により活動した活断層の近傍の比較的狭い範囲に限定的に発生することが明らかになった。一方で、被害の程度は地山条件が関係し、被害の大きい箇所においては、特殊な地山条件が内在していたと考えられる。地震による影響を受けやすいと考えられるトンネルの特殊条件を以下に示す。

- ①突発的な大量の湧水により施工を長期間中断した箇所、またはこれに準ずる箇所
- ②切羽の著しい崩落により施工を長期間中断した箇所
- ③地山の不安定性に起因して大規模な補助工法を使用した箇所
- ④地質が急変して2パターン以上の支保パターンの変更を伴った箇所(ただし、坑口部支保パターンとの接続部を除く)
- ⑤縦断的・横断的に地質の剛性が大きく変化する箇所
- ⑥極端な偏圧を受ける箇所
- ⑦極端に土被りが小さい箇所

⑧地山等級DⅡおよびそれよりも不良と評価される箇所（断層・破碎帯等を含む）

なお、①～⑦のいずれかに該当する区間においては、地山等級DⅡあるいはそれよりも不良と評価される場合が多いと考えられる、地山等級がDⅠあるいはそれよりも良好な区間において①～⑦のいずれかに該当する場合でも、必要に応じて耐震対策の実施を検討することが望ましいと考えられる。新設の山岳トンネルで耐震対策を行う場合の検討の考え方（案）を図4.1.1に示す。



※1 地震による影響を受けやすいと考えられる特殊条件とは、上記の①～⑧のいずれかに該当する区間を示す。

※2 地山等級DⅠにおいては原則としてインバートを設置する（「道路トンネル技術基準（構造編）・同解説」²⁾を参照）。

図4.1.1 新設の山岳トンネルにおいて耐震対策を行う場合の検討の考え方（案）

4.2 単鉄筋補強による耐震対策工法の検討

トンネルに作用する可能性がある地震力に対して、トンネル構造の不安定化を抑制または制御するような実務的な耐震設計を行うことは困難であると考えられる。ここでは、地震力により覆工コンクリートがブロック化した場合に、コンクリート塊の落下を防止することを目的に、対策工の検討を実施した。トンネル坑口部等に一般的に適用される単鉄筋覆工コンクリートについて、覆工崩落塊を鉄筋のせん断抵抗力により支持することが可能であるか検討を行った結果を示す。

(1) 想定する覆工コンクリート塊の条件

検討にあたって想定した覆工コンクリート塊の規模は、既往の崩落事例を踏まえ、トンネル半断面で1スパン分の崩落とした。図-4.2.1に崩落規模の概略図を示す。ただし、トンネル内径幅D=10m、スパン長L=10m、覆工設計厚t=0.6m、単位体積重量 $\gamma=23\text{kN/m}^3$ とした。覆工コンクリート塊の概算重量Wは次式で算出し、検討にあたっては1,149kNを用いることとした。

$$W = \frac{\pi}{4} \left\{ \left(\frac{D}{2} + t \right)^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right\} \times L \times \gamma$$

(2) 対策工法検討条件

支持方法の検討にあたっては、鉄筋の種類はSD345（基準強度345N/mm²）、鉄筋径はD19（断面積287mm²）とした。また、一般的な覆工の単鉄筋補強の場合には、20cmピッチで主鉄筋が配置されるため、本検討では、図-4.2.2のとおり1スパン長を10mとし、1スパン当たり50本の主鉄筋が配置されていると仮定した。

(3) 鉄筋のせん断照査

鉄筋一本当たりのせん断強度Sは、コンクリート標準示方書における鋼材のせん断降伏強度の考え方⁷⁾を参考に、次式で表されるものと仮定し、本検討では57kN/本を用いる。

$$S = \frac{F \times A}{\sqrt{3}}$$

ただし、F:鉄筋の引張基準強度、A:鉄筋の断面積

せん断耐力の照査は、次式により行う。大規模な覆工の崩落を防止することを基準とし、本検討では所要安全率Fsは、1.0とした。

$$F_s = \frac{S \times n}{W} > 1.0$$

ただし、S:鉄筋一本当たりのせん断抵抗力、n:鉄筋の本数、

W:落下する覆工コンクリート塊の重量

照査結果は以下のとおりとなる。

$$F_s = \frac{57 \times 50}{1149} = 2.5 > 1.0$$

以上より、単鉄筋補強覆工コンクリートは、本検討で想定した覆工崩落塊を支持することが可能であると考えられる。ただし、本検討では安全率Fsを1.0としたが、それぞれの検討条件によって適切に設定する必要がある。なお、かぶりコンクリートのはく落は防止することができないため留意が必要である。

(4) 既往の覆工載荷実験結果⁸⁾

写真-4.2.1に、外径9.7m、厚さ30cmの半円形で、単鉄筋補強コンクリートで製作した覆工供試体による載荷実験の写真を示す。図-4.2.3に示すように全周から均等に荷重を作用させると、覆工は全圧縮状態となり、肩部から脚部の間でせん断破壊が生じることが分かっている。その際、せん断破壊面においてコンクリート片のはく落が見られるとともに供試体にずれが生じたが、鉄筋は破断せず、供試体の分離は抑制される結果となった。

(5) 要素実験結果⁹⁾

写真-4.2.2、図-4.2.4に鉄筋コンクリート、鋼繊維補強コンクリートの変形に対する追随性を明らかにすることを目的に実施した、過大な変形による覆工コンクリートの破壊過程を模擬した要素実験の写真および荷重変位グラフを示す。覆工を模擬した長さ80cm、厚さ35cmの直線形上の供試体に対し、鉛直下方へ強制変位させた。鋼繊維補強コンクリートの場合、最大荷重約1,220kNに達したのち、片側端部にせん断破壊が生じ荷重が低下した。最終的には約90mmの変位で両端部にせん断破壊が発生し抜け落ちが確認された。一方、鉄筋コンクリートの場合、最大荷重約1,935kNに達したのち、片側端部でせん断破壊が生じ荷重が低下したが、最終的に約200mmの変位に達しても鉄筋によりつり下げられ、抜け落ちが生じなかった。

これらの結果は、外力により覆工に大きな変形が発生したとしても、単鉄筋を設置することにより大規模な覆工コンクリート塊の落下を抑制できる可能性があることを示唆していると考えられる。

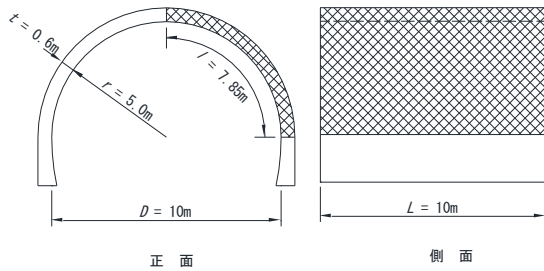


図-4.2.1 崩落規模概略図

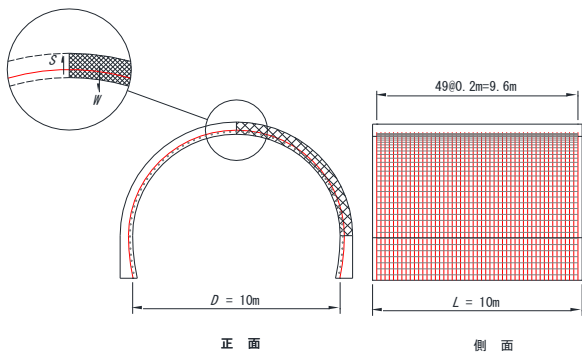


図-4.2.2 対策工法検討概略図

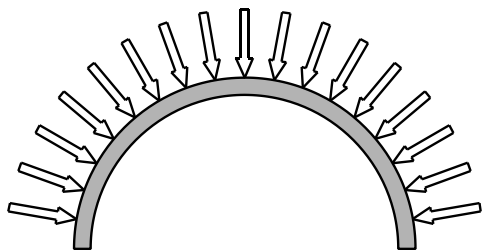


図-4.2.3 実験概略図

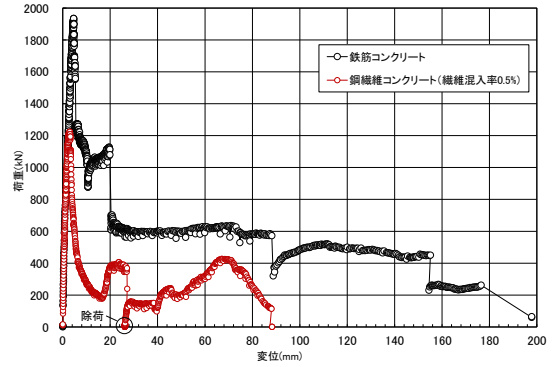


図-4.2.4 荷重変位関係



写真-4.2.1 覆工載荷実験



写真-4.2.2 要素実験 (左: 鋼繊維補強 右: 鉄筋補強)

5. まとめ

(1) 合理的な地山評価手法に関する検討について

NATMの道路トンネルを対象に、維持管理段階の変状リスク等を考慮した地山評価にあたっての留意事項、維持管理段階へ引き継ぐべき情報を提案することを試みた。その結果を下記に示す。

- 1) 地域ごとに統計処理した評価点分布を活用することで、地域の特性に応じた地山評価が可能となることが示唆された。なお、評価点分布の活用にあたり、計測変位の傾向や前後の地山状況、支保工の変状など、施工実績等も加味して総合的に判断し、地山等級を決定することが重要である。
- 2) 支保工の変状は、切羽の不安定化によるものと地山、支保工の変形によるものに分類される。切羽の不安定化に起因する切羽掘削面崩落は最終変位量が小さい場合にも発生することから、変状に留意する必要がある。変形に起因する支保部材の変状は、最終変位量の増加に伴い増加し、60～80mm程度の変位を境に鋼アーチ支保工等の変状が増加する傾向が確認され、この変位量を支保部材の変状の目安の1つとして留意する必要がある。
- 3) 維持管理段階における外力に起因する変状リスクを有する地山条件、施工条件等について提案した。また、維持管理段階に向け、各段階で引き継ぐべき情報を提案した。

(2) 地山評価への画像解析の適用について

CNNを用いた地山評価を実施し画像解析等のAI技術の適用性評価を実施した。さらにAIを用いた切羽分析に向けた切羽撮影条件を検討した。その結果を下記に示す。

- 1) CNNを用いた地山評価にあたっては、最終的な正答率だけでなく、使用する写真の解像度や色彩等の質・撮影条件、学習モデルの妥当性、さらに判断過程で抽出された特徴量に留意が必要であることが明らかにした。
- 2) 切羽写真の解像度等の条件について、AIを活用した分析に有利な切羽写真を取得できる撮影条件を提案した。

(3) 耐震対策の考え方(案)について

地震被害を受けやすい特殊条件および耐震対策の選定に関する考え方(案)の提案を試みた。その結果を下記に示す。

- 1) 地震被害が顕在化しやすいと考えられる8つの特殊な地山条件を提案するとともに、耐震対策を行う場合の検討の考え方(案)を提案した。

- 2) 地震力による覆工崩落塊の支持方法として単鉄筋補強による対策工の有効性を明らかにした。

より合理的な地山評価の確立に向けた課題として、施工時データのうち特に切羽観察結果には、技術者の経験等に基づく主観性が含まれており、統一的な評価が困難であることや、地山評価の結果採用された支保パターンの妥当性の評価、発生した変位量の評価が困難であることが挙げられる。今後は、本研究での検討結果および上記の課題等を踏まえ、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、より合理的な地山評価に資する提案につながる検討を続けていきたいと考えている。

参考文献

- 1) (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
- 2) (公社) 日本道路協会：道路トンネル技術基準(構造編)・同解説、2009
- 3) 真下秀人、水川雅之、日下敦、砂金伸治、木谷努、遠藤拓雄：山岳トンネルにおける施工時観察・計測データの評価手法に関する研究報告書、土木研究所資料、第4099号、2008
- 4) 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
- 5) Selvaraju, R.R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D. & Batra, D.: Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization, ICCV, pp.618-626, 2017
- 6) 砂金伸治、小出孝明、日下敦、吉岡知哉、岸田展明：山岳トンネルの地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書、土木研究所資料、第4358号、2017
- 7) (公社) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]、2012年制定、pp.45-46、2013
- 8) 真下英人、日下敦、砂金伸治、木谷努、海瀬忍：トンネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する実験的研究、土木学会論文集F, Vol.64, No.3, pp.311-326、2008
- 9) 小出孝明、砂金伸治、日下敦：覆工コンクリートの破壊過程に関する実験的考察、トンネル工学報告集 Vol.27、I-18、2017

A STUDY ON TUNNEL STRUCTURE CONSIDERING THE MAINTENANCE

Research Period : FY2016-2020

Research Team : Road Technology

Research Group (Tunnel)

Author : KUSAKA Atsushi

KIKUCHI Koki

SASAKI Toru

HASEGAWA Yoshihiko

Abstract :

Defects of mountain tunnels caused by external force carry risks of reducing the structural stability of the tunnel. It is important to consider maintenance in the design and construction phases. In this study, we analyzed the correlation between the construction records and the risks of deformation. As a result, we revealed the points to be considered for ground assessment and suggested the information that should be taken over to the maintenance phase. In addition, we revealed the effectiveness of the reinforcing the lining with single reinforcing bar to prevent the lining from falling for earthquake. And we suggested the concept of seismic countermeasures.

Key words : ground assessment , observation of face , AI , Countermeasure against earthquake