

時間依存性を有するトンネル変状の評価法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（防災地質）

研究担当者：伊東佳彦、倉橋稔幸、岡崎健治、大日向昭彦

【要旨】

本研究では、トンネルの時間依存性を有する変状発生の要因の解明と、トンネルの調査・施工時における変状の調査・評価法の構築を目的として、平成 25 年度は、建設後に変状が生じたトンネルをモデルに施工時の記録を供用後の変状の有無に応じて分析した。また、トンネル覆工背面の地質を考慮したトンネル点検法の構築に向けて、覆工背面の地質に起因して生じる変状との関連性や変状の早期検出方法について分析した。その結果、トンネルの変状が多く発生していた区間では変質粘土が多く認められた。施工時の地質調査では従来の掘削変位量の指標だけではなく、変質程度についても着目して観察し評価することが必要であることを明らかにした。さらに、これまでの成果を「時間依存性を有する変状のトンネル施工時における調査・評価マニュアル（案）」としてまとめた。また、トンネル点検で得られるクラック密度の経年変化は、インバートの設置を要した地山で増加している傾向を見いだした。クラック密度に着目することで、変状を早期に検出できる可能性を示した。

キーワード：トンネル、時間依存性、地山評価

1. はじめに

熱水変質作用を受けた火山砕屑岩類や堆積軟岩の分布する地域で建設されたトンネルでは、建設後に盤ぶくれや覆工の押し出し等の変状が発生する事例が、これまで報告¹⁾⁷⁾されている。このような変状は、トンネル地山が、掘削に伴う応力解放、空気や地下水との接触等の環境や状態の変化を受けて、中～長期的に劣化が進行することで生じる場合がある。また、この変状に伴うトンネルの補修や対策では、地域社会や道路利用者の安全安心、利便性、経済性等の観点から、通行規制や工事費を伴うことが、大きな課題となっている。

本研究は、トンネルの施工時に、時間依存性を有する変状を適切に予測するための調査・評価法のほか、変状による通行障害を未然に防止するための点検法を確立することを目標としている。平成 25 年度には、建設後に変状が生じたトンネルを対象に、その施工時の記録を建設後の変状の有無に応じて分析した。その他、トンネル覆工背面の地質を考慮したトンネル点検法の構築に向けて、トンネル点検の実施年度ごとに、点検結果の差や変化を分析した。

2. 研究方法

2. 1 トンネル施工時の評価項目に関する検討

2.1.1 施工記録との対比

これまでの調査⁸⁾⁹⁾では、建設後のトンネルで発生した変状の実態を収集し、時間依存性を有する変状が火山岩を地山とするトンネルで多いことを明らかにしてきた。そこで本報告においては、火山岩を地山として建設後に変状を生じたトンネルを対象に分析した。

本トンネルは NATM で施工された延長 2.1 km の道路トンネルである。本トンネルの地質は中新世の安山岩、凝灰角礫岩、火山角礫岩から構成される。安山岩は、比較的硬質で部分的に亀裂が発達するが、弱い熱水変質作用を受けた部分が存在した。また自破砕状部は比較的軟質で亀裂部が繰り返して出現した。凝灰角礫岩は、主に塊状であるが軟質で脆く部分的に破砕状を示す。火山角礫岩は、全体的に弱い熱水変質作用を受けて軟質である。また、本トンネルの地山は熱水変質作用を受けており、局部的に粘土化し、硬質と軟質の岩石を不均質に混在させた状態（写真-1）となっている。

トンネル施工時に 99 断面で、地質、支保パターン、掘削変位量（天端沈下量と内空変位量）、切羽観察記録等の施工時の地質に関する情報が記録された。このうち建設後に変状を生じた区間の地質記録を掘削変位量と対比し、

相関を分析することで、建設後に生じる変状を予測するための指標としての有効性を考察できるはずである。

そこで、まずこれらの地質記録を変状区間と非変状区間に区分し、変状と、支保パターンや掘削変位量との相関を分析した。特に支保パターンは、トンネル事業者が施工時の地質状況、掘削変位量、岩石試験の結果等を総合的に検討して決定されたものであるため、掘削変位量と相関が良いことが予想される。

2.1.2 内空変位量と天端沈下量との対比

次に、トンネルの支保パターン、地質、変状の有無ごとに内空変位量と天端沈下量との相関を分析した。内空変位量と天端沈下量は、トンネル掘削に伴う応力解放や緩み領域の拡大等による地山の変形を計測することで、トンネル構造が継続的に保持できるか、また妥当な地山分類であるのかを判断するために実施するものであり、支保パターンや地質と相関が良いことが予想される。

2.1.3 切羽観察記録との対比

さらに、切羽観察項目と変状の有無との相関を分析した。表-1 に本トンネルでの切羽観察の項目と評価点を示す。切羽を9項目、5段階で評価した。点数が高い場合に地質は不良で、低い場合は良好となる。ただし、切羽観察項目が未記入の場合、0とした。地山の地質状況を掘削ごとに直接確認できるという点で、切羽観察は施工時の地質状況を反映する有効な情報である。切羽観察の項目は施工時に現れた掘削変位量と相関が良いと予想される。

2.2 トンネル覆工背面の地質を考慮した点検法に関する検討

時間依存性を有するトンネルの変状は、その覆工背面の地質に起因することが少なくない。しかし、地山の地質状況は不均質なことで、環境の変化によって経年的に劣化すること、一度、変状が発生すると、その対応に苦慮することからも、覆工表面のクラック等の異常を早期に検出し、対応できることが重要である。

そこで、これまで国土交通省北海道開発局が実施した道路トンネルの点検結果のうち、主に火山砕屑岩類を地山とするトンネルとして7事例を抽出した。それらの施工時の支保パターンと覆工コンクリート表面におけるク



写真-1 トンネル補修時の路床部の岩盤の状況

表-1 切羽観察の項目と評価点

	1	2	3	4	5
切羽の状況	安定	鏡面から小岩塊	鏡面の押し出しを生じる	鏡面は自立せず崩れる	鏡面が流出
素掘面の状況	自立(普請不要) $\sigma_c \geq 100\text{Mpa}$	時間がたつと緩み肌落ちする(後普請)	自立困難、掘削後早期に支保する(先普請)	掘削に先行して山を受けておく必要がある	その他
圧縮強度	ハンマー打撃で跳ね返る	$100 > \sigma_c \geq 20\text{Mpa}$ ハンマー打撃で砕ける	$20 > \sigma_c \geq 5\text{MPa}$ 軽い打撃で砕ける	$5 > \sigma_c \geq 1\text{MPa}$ ハンマー刃先が食い込む	$1\text{MPa} > \sigma_c$ 指先で潰せる
風化変質	無し・健全	岩目に沿って変色、強度やや低下	全体に変色、強度相当に低下	土砂状、粘土状、礫状、当初より未固結	その他
割れ目の頻度	間隔 $d \geq 1\text{m}$ 割れ目なし	$1\text{m} > d \geq 50\text{cm}$	$50\text{cm} > d \geq 20\text{cm}$	$20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	$5\text{cm} > d$ 破砕 当初より未固結
割れ目状態	密着	部分的に開口	全体に開口 油目を有する	鏡肌を有する。 未固結な砂、砂礫	厚い(5mm以上)粘土を挟む、 鏡肌が発達、土砂状の砂、砂礫
割れ目の形態	ランダム方形 間隔 $d \geq 1\text{m}$	方状、塊状	層状、片状、板状	土砂状、細片状。 当初より未固結	破砕
湧水	なし、滲水程度 ($1\text{リットル}/\text{min}$ 以下)	滴水程度 ($1 \sim 20\text{リットル}/\text{min}$)	集中湧水 ($20 \sim 100\text{リットル}/\text{min}$)	全面湧水 ($100\text{リットル}/\text{min}$ 以上)	その他 ($1000\text{リットル}/\text{min}$ 以上)
水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	崩壊・流出	その他

ラック密度の経年変化を比較した。トンネル点検の結果

は、供用開始から5年目を初回として、その後2年ごと

の7年目と9年目の結果である。ここで、クラック密度は、トンネル覆工コンクリートのスパン（約189 m²/スパン）ごとのクラックの延長として集計した。これらの結果をもとに、覆工背面の地質に起因して生じる変状との関連性や変状の早期検出方法について分析した。

3. 研究結果

3.1 施工時の評価項目

3.1.1 支保パターン

図-1 にトンネルの地質、支保パターン、変状の関係を示す。本トンネルの地質は、安山岩が50%、凝灰角礫岩が35%、火山角礫岩が15%の割合である。

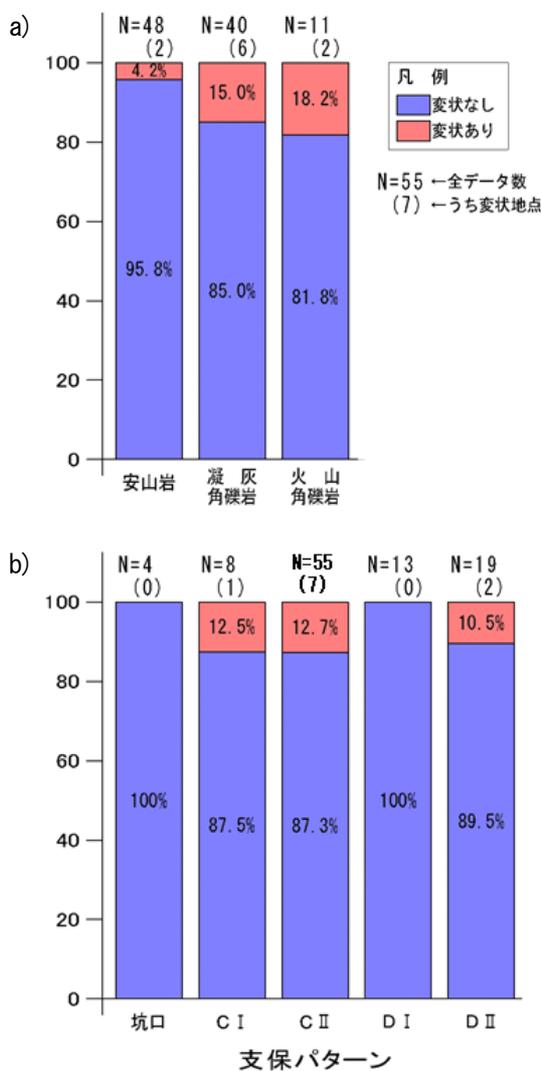


図-1 地質、支保パターンと変状の関係

まず、図-1(a)に示すように、地質別に変状の発生件数を見ると、安山岩、凝灰角礫岩および火山角礫岩、いず

れの地質でも変状が発生しているが、凝灰角礫岩と火山

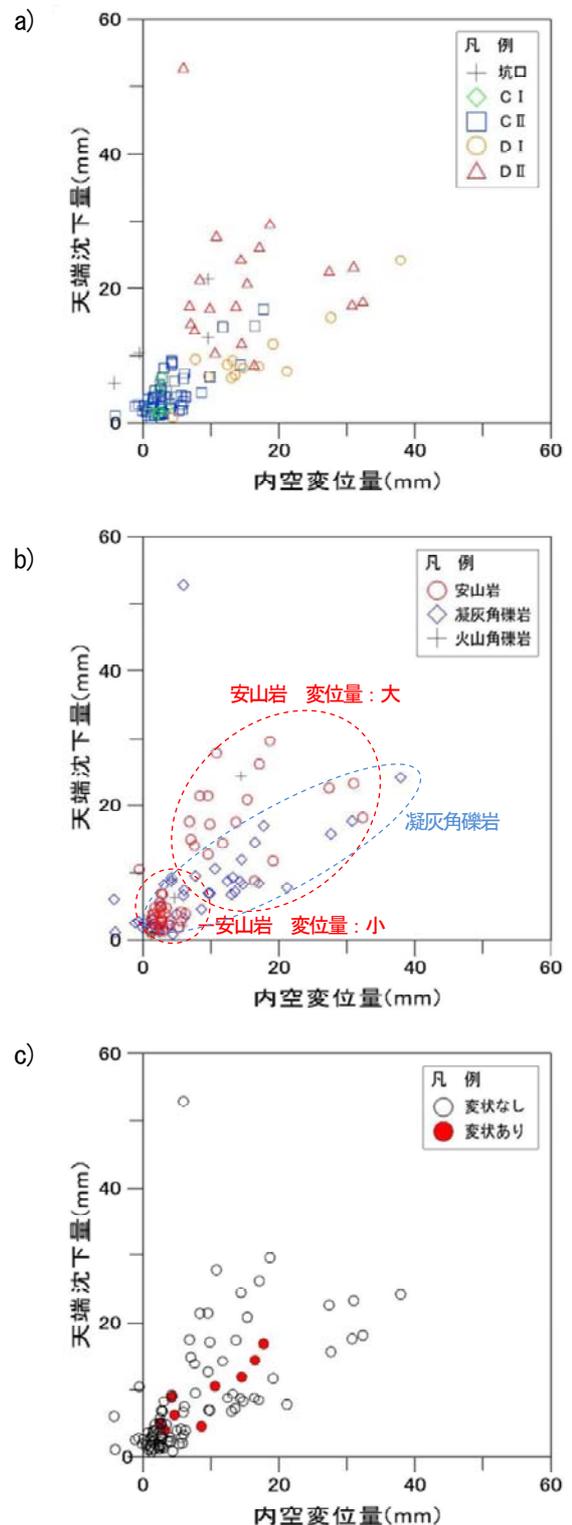


図-2 支保パターン、地質、変状の有無と掘削変位量の関係

角礫岩でやや多い傾向にある。また変状区間におけるボーリングコアは著しく粘土化し変質していた。このため

変状は変質との関係が強いと推定される。ただし、変質の程度は先進ボーリング調査¹⁰⁾に統一的な指標として区分されておらず、変状との関連性は不明である。今後は、岩石に含まれる粘土鉱物を分析するなどして、変質程度と変状との関連性を明らかにする予定である。

次に、図-1(b)に示すように、支保パターン別に変状の発生件数をみると、変状はCI、CIIおよびDIIの施工区間で発生した。一方、坑口部とDIの施工区間では認められなかった。このうち、CIとCIIの施工区間で発生した変状は、インバートが未設置の構造的に弱い施工区間に大きな変化として現れたと考えられる。

またDIIの施工区間では、インバートを設置しているにもかかわらず変状が発生した。道路管理者の調査によると、路床部に存在した変質した粘土部が応力解放や含水状態の変化等により膨張したことが盤ぶくれの原因とされている。ゆえに、施工時の地質調査では、路床部における粘土化した変質部の存在等、地質状況についても、随時、その確認を行うことが必要である。

3.1.2 内空変位量と天端沈下量

図-2にトンネルの支保パターン、地質、変状ごとに内空変位量と天端沈下量との関係を示す。まず、図-2(a)に示すように、内空変位量と天端沈下量は、ともに30mm

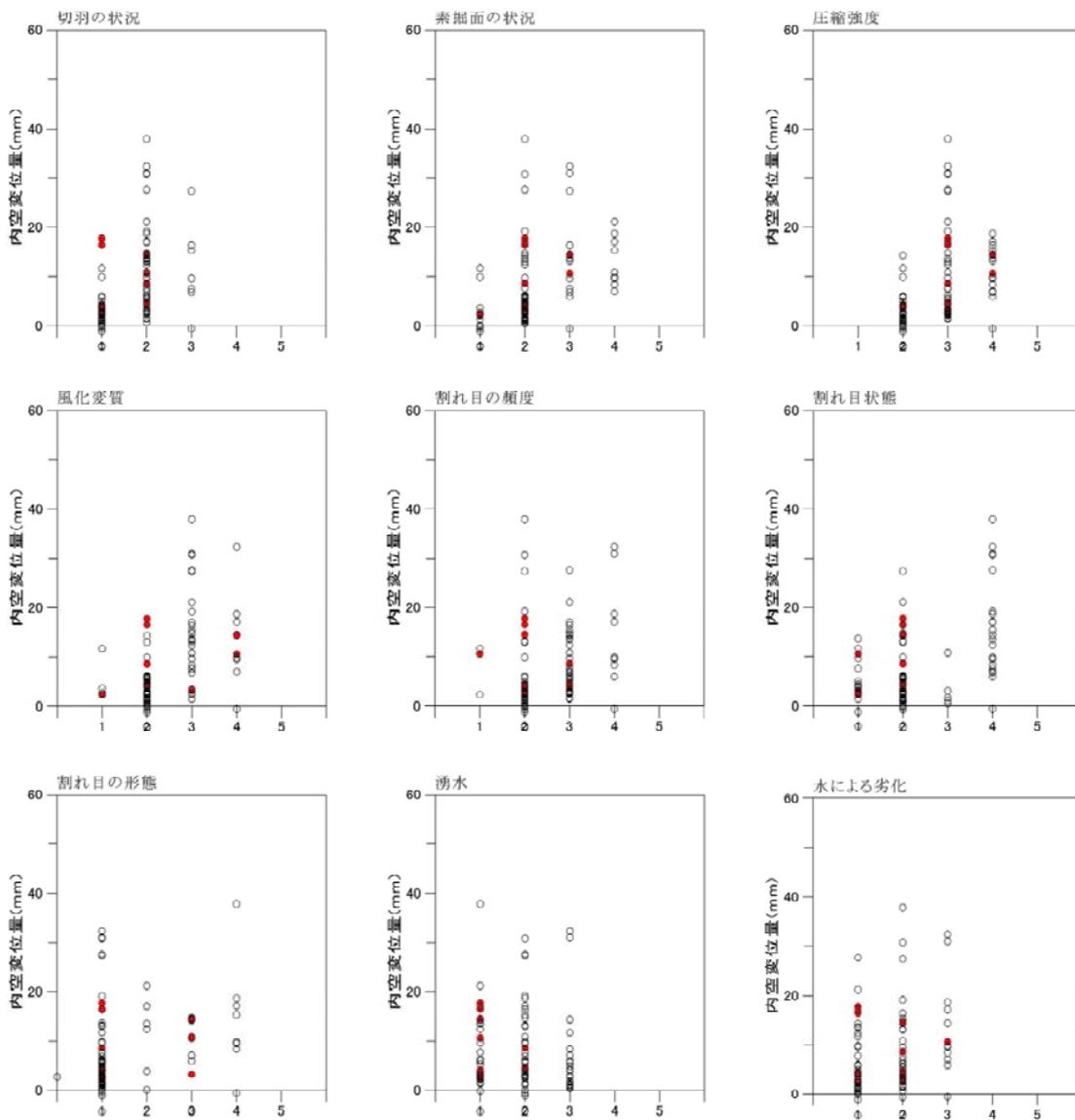


図-3 切羽観察項目と内空変位量の関係 (○変状なし、●変状あり)

以内であり、内空変位量と天端沈下量に概ね正の相関が認められる。特にDI以上で10mm以上を示す場合が多い。

次に、地質別には図-2(b)に示すように、安山岩で掘削変位量が大きい集団と小さい集団に分けられる。前者は概ね10mm以下であり、後者は概ね10mm以上である。また、凝灰角礫岩では、10mm以上を示す場合が多く、内空変位量が天端沈下量より大きい傾向が認められる。ここで、「内空変位量>天端沈下量」の傾向は、施工時の掘削変位量に基づく盤ぶくれの判定指標¹¹⁾であるが、図-2(c)の変状の有無と掘削変位量の間をみると、供用後に変状が生じた施工区間の掘削変位量は20mm以内である。また、内空変位量と天端沈下量との比は概ね1:1である。このため、本トンネルの事例では、掘削変位量を盤ぶくれの指標として用いることができず、建設後に変状が生じていない区間との明確な違いは判明しなかった。ゆえに、掘削変位量の情報だけで変状の発生を評価することは難しいことがわかった。この掘削に伴う応力解放や塑性領域の拡大によって変状が掘削後早期に出現しないことは、掘削に伴う地山内の環境条件の変化が、地山の劣化を緩慢に進行させることが理由として考えられる。このため、本トンネルのような変質作用を受けた地山では、掘削変位量による計測管理だけでは、変状の発生を評価することは難しい。したがって、粘土の変質程度の違い等の指標を組み合わせ評価することが必要である。

3.1.3 切羽観察記録と変状

図-3に切羽観察項目と内空変位量の関係を示す。切羽観察項目のうち「圧縮強度」と「風化変質」は評価点が高い側で内空変位量が大きく、変状を生じている傾向が見られる。一方、これらの評価項目以外では、相関性は不明瞭である。ゆえに、本トンネルでは、切羽の状態をもとに将来的な変状の有無を評価する場合には、「圧縮強度」と「風化変質」のうち変質の情報を加味することが有効であることがわかった。

最後に、これらの分析した成果をとりまとめ、「時間依存性を有する変状のトンネル施工時における調査・評価マニュアル(案)」を作成した。本マニュアル(案)は、第1章「適用範囲」、第2章「現状の評価方法」、第3章「施工時の留意点」および第4章「事例分析」から構成させた。

3.2 トンネル点検法と地質

図-4に変質安山岩を地山とするトンネルにおける点検結果であるクラック密度、地質断面図¹³⁾および施工時の支保パターンを示す。

クラック密度は概ね0.1~0.7m/m²の範囲にあり、両坑口部で高い値を示す。また、全体的に起点側(スパン番

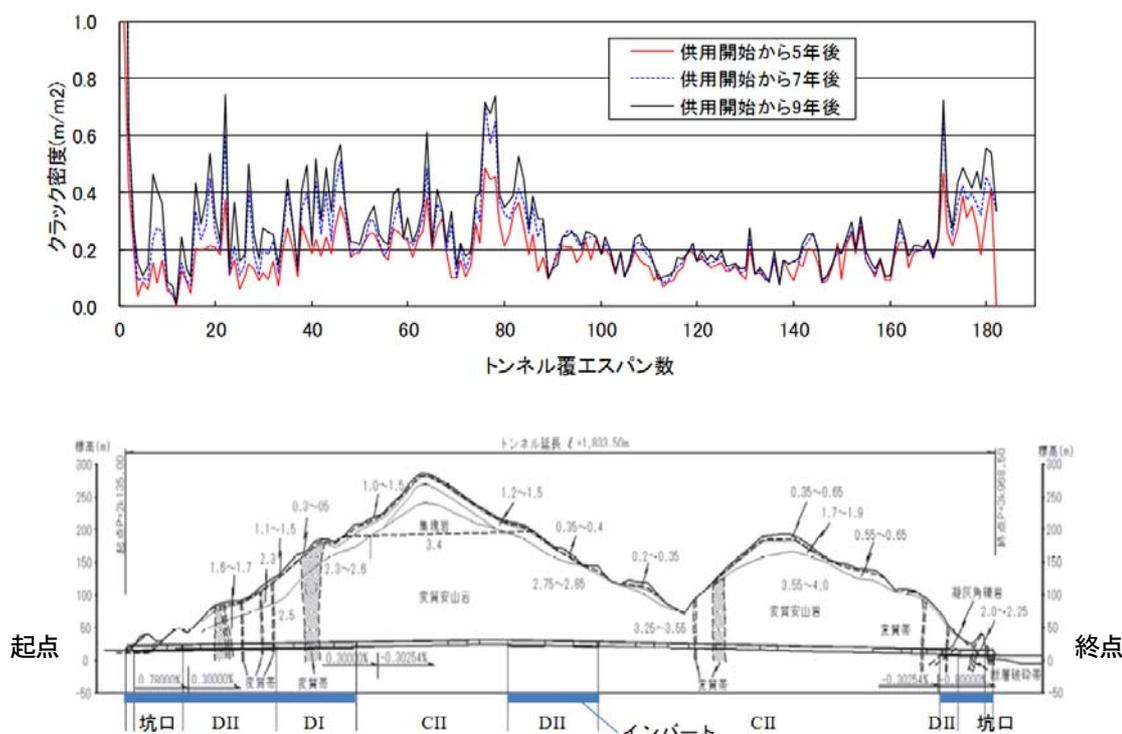


図-4 トンネルのクラック密度、地質断面図および施工時の支保パターンとの関係

号0~90)が終点側(同90~185)より大きい傾向がある。一方、施工時の支保パターンをみると、トンネル中

央から起点側でインバート設置区間が多く、施工時には終点側よりも地質が良くない状況であったことが推定される。その他、スパン番号 50～80 では、インバート未設置の CII パターンが採用され、クラック密度の経年変化も、終点側で CII パターンを採用した区間より大きい傾向が認められる。特に、スパン番号 70～80 では、経年的なクラック密度の増加が大きい傾向が認められる。

以上のことから、本トンネルの事例では、クラック密度の変化の大きい箇所は、施工時の地質が比較的良くない状況であった箇所に対応していることが想定できる。そのため、スパン番号 50～80 では、特にクラック密度や覆工の状態の変化等を継続的に着目することが必要である。また、インバート設置区間では、地質が比較的良くない状況であることが推定されるが、その状態が、インバートの未設置側に拡大する可能性がある⁸⁾ことから、地山評価にあたっては、現状の評価方法に加え、新たな評価指標を構築する必要がある。

また、この区間は、インバートの設置区間と未設置区間の境界部に該当する。インバート等の剛性の高い支保が施工された区間は、特に施工時の地質状況、掘削変位量、岩石試験の結果等を総合的に考慮して施工されている。現状では、完成後のトンネルにおいて、地山の状況を直接把握するための手法がないことから、トンネル点検時には、クラック密度に変化が生じている箇所とあわせて、施工時の情報を加味することで、経年的な変状を早期に検出できる可能性がある。

4. まとめと今後の課題

本報告の結果を以下に示す。

- 1) 変状が多く発生した区間では、施工時の地質調査では従来の掘削変位量の指標だけではなく、岩石の変質程度にも着目して観察し、評価することが必要である。
- 2) これまでの成果を「時間依存性を有する変状のトンネル施工時における調査・評価マニュアル(案)」としてまとめた。
- 3) トンネル点検で得られるクラック密度の経年変化は、インバートの設置区間と未設置区間の境界部で増加している傾向を見いだした。クラック密度に着目することで、変状を早期に検出できる可能性を示した。今後は、これまで作成した完成トンネルの地質データベースをもとに、施工記録や地質情報を分析し、トンネル完成後の点検時に、地質に起因して生じる変状を早期に見つけ出すことを目的とした「完成トンネルの

点検マニュアル(案)」を作成する予定である。

最後に、本調査研究の実施にあたり、国土交通省北海道開発局の関係者には、資料の提供ならびに現地調査にご協力いただいた、ここに記して厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会：トンネルの変状メカニズム(変状事例集)，pp.214-269, 2003.
- 2) 佐久間 智, 菅原徳夫, 多田 誠：供用トンネルに発生したインバート隆起(最大 95cm)とその復旧対策について—山形自動車道盃山トンネル上り線—, 第 44 回地盤工学会講演集, pp.1271-1272, 2009.
- 3) 下川多米男, 喜多孝次, 岩尾哲也：うれしの・俵坂トンネルの盤ぶくれ対策工事, ハイウェイ技術, No.9, pp.149-155, 1997.
- 4) 渡邊康夫, 監郷一博, 鈴木 尊：供用中の新幹線トンネルで発生した路盤隆起の原因とその対策, トンネルと地下, vol.38, 9, pp.7-16, 2007.
- 5) 鈴木哲也, 岩渕 武, 林 満, 森田英俊：変質した地山中のトンネルにおける変状調査と対策, 開発土木研究所月報, No.449, pp.2-9, 1990.
- 6) 中田正夫, 伊藤 洋：供用中トンネルにおける変状と対策・上信越自動車道路浅間山トンネル, トンネルと地下, vol.31, 4, pp.7-14, 2000.
- 7) 二瓶益臣, 中曽根茂樹, 生杉嘉良：トンネル覆工と路面変状の保全対策検討事例(一般国道 46 号仙岩トンネル), 土木学会土木技術者実践論文集, Vol.1, pp.23-31, 2010.
- 8) 岡崎健治, 伊東佳彦：トンネルの供用開始後に生じる変状と経時変化に関する考察, トンネル工学報告集, 土木学会トンネル工学委員会, Vol.21, pp.183-188, 2011.
- 9) 岡崎健治, 伊東佳彦：トンネルの完成後に生じた変状の要因と岩石性状に関する検討事例, 第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 岩の力学連合会, pp.565-570, 2013.
- 10) 国土交通省北海道開発局：道路設計要領トンネル, 2013.
- 11) 大嶋健二, 城間博通, 伊藤哲男, 村地栄次, 久保田龍郎：変状トンネルの要因分析に基づいたインバート設置基準の提案について, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 岩の力学連合会, E15, 2002.
- 12) 土木学会：山岳トンネルのインバート—設計・施工から維持管理まで—, トンネルライブラリー第 25 号, 2013.
- 13) 北海道の道路トンネル第 3 集編集委員会：北海道の道路トンネル第 3 集(1993～2002), 北海道土木技術会トンネル研究委員会, pp.58-59, 2005.

RESEARCH ON MECHANISM OF TIME DEPENDENCE DEFORMATION OF TUNNELS

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2014

Research Team : Cold Region Construction Engineering

Research Group (Geological Hazards

Research Team)

Author : ITO Yoshihiko

KURAHASHI Toshiyuki

OKAZAKI Kenji

OBINATA Akihiko

Abstract : In FY2013, we compared time dependence deformation with tunnel face observation data such as crown settlement, convergence, tunnel support, geological properties on the test site of tunnel, and so on. And we also analyzed the trend of aging of crack density as aging of tunnel lining. As a result of this study, "alteration" and "compressive strength" of tunnel face observation were suggested to be the most suitable indexes for the estimation of the time dependence deformation of the tunnel. And crack density on tunnel lining was confirmed to be information to detect section with time dependence deformation.

Key words : tunnel, time dependence deformation, estimation of geological properties on tunnel ground

別紙様式

原稿承認 平成 年 月 日 <p style="text-align: center;">重点的研究開発課題報告書原稿承認伺</p> (平成25年度)			
1 チーム名等	防災地質チーム		
2 プロジェクト研究 (総括) 課題名	—		
3 重点研究課題名	・時間依存性を有するトンネル変状の評価法に関する研究		
4 原稿枚数	全 7 枚	4 原稿受理	平成 年 月 日
上記のとおり 重点的研究開発課題報告書原稿の承認を伺います。 平成26年 5月9日 土木研究所理事長 殿			
		グループ長	主席・上席研究員等