

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：倉橋稔幸、岡崎健治、山崎秀策

【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、トンネルの調査・施工時における変状の調査・評価法、および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を目的として、平成 23～26 年度にかけて、変状の要因分析、モデル地における調査・試験、完成トンネルの地質データベースの構築、トンネルの調査・施工時における変状の調査・評価法の構築に向けた分析を行い、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、完成したトンネルの合理的な点検手法の構築に向けた分析を行い、従来のトンネル点検において、クラック密度が小さく良好と判定されても、覆工背部の地山分類が比較的不良な状態を抽出できる評価方法を提案した。それらの成果を「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）」ならびに「完成トンネルの地山変状点検マニュアル（案）」としてまとめた。

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など、地質工学的課題を有する岩盤に建設されたトンネルでは、完成後に変状の発生した事例が多数報告されている。完成後の主な変状は、盤ぶくれ（路面の隆起）や覆工の押し出し等である。これらの変状は、トンネルの掘削に伴う応力解放、空気や地下水との接触などの環境や状態の変化を受けて、経時的に地質性状に変化が生じることに起因する、いわゆる時間依存性を有する変状である。このような変状は、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。このため、トンネルの調査・施工時に時間依存性を有する変状を正確に予測するための調査・評価法や完成トンネルにおいてトンネル変状を未然に防止するための点検手法を確立する必要がある。

そこで、本研究では、トンネルの時間依存性を有する変状の発生要因の解明を目的に、時間依存性を有する変状が生じたトンネルの要因分析、モデル地における調査・試験および完成トンネルの地質データベースを構築した。また、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に、変状を生じたトンネルの施工記録の分析と補修対策時に地山から採取した岩石試料の試験を行うとともに、それらの成果を「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。さらに、完成したトンネルの覆工背面の地質を考慮した点検法の構築を目的に、完成後に変状が生じたトンネルにおいて、施工時の記録を完成後の変状の有無に応じて分析するとともに、覆工背面の地質を考慮したトンネル台帳の作成および覆工のクラック密度、トンネルの工法、点検結果の相関を分析し、覆工背面の地山分類が比較的不良な状態を抽出できる評価方法を提案した。また、それらの成果を「完成トンネルの地山変状点検マニュアル（案）」としてまとめた。以下に、本研究の成果を報告する。

2. 研究方法

2.1 時間依存性を有するトンネル変状の要因分析

まず、変状の実態を把握するため、公表されているトンネルの完成または供用後に変状が発生した事例^{1)~15)}から、完成～変状発生までの年数、主な変状の内容および地質について分析した¹⁶⁾。

次に、変状をタイプ I～IV に区分し（表-1）、変状の発

生時期から時間依存性を有する地質別の要因について分析した。なお、表-1 中の○は変状が発生した場合、×は変状が発生しなかった場合を示す。

2.2 モデル地における調査・試験

2.2.1 ボーリングコアの長期劣化観察と試験・分析

火山岩の地山で建設されたトンネルをモデル地とした。本トンネルでは、供用後に盤ぶくれが3箇所が発生したことから補修対策が行われた。本トンネルの掘削で判明した地質は、中新世の安山岩、火山角礫岩および凝灰角礫岩である。試験では、施工時に掘削された先進ボーリング調査¹⁷⁾のコアを用いた。コアは屋外(コア箱に収納)で4年6ヶ月間暴露後の状態とその初期状態との相違を観察した。また、暴露後のコアを試料として、X線回折試験ならびにpH試験を実施し、岩石の経年的な変化を調査した¹⁸⁾。

2.2.2 変状を生じたトンネルの施工記録の分析と補修対策時に地山から採取した試料の試験・分析

(1) トンネルの施工記録と変状

変状が生じた箇所における施工記録を分析¹⁹⁾した。図-1、表-2にトンネルの施工記録(地質断面図、支保パターン(設計と施工)、変位量および収束日数)ならびにトンネルの変状箇所における地山状況を示す。

変状の発生した補修区間 a と b では、長期的に変状が継続し、建築限界を侵すことが予測されたことから、補

修対策が行われた。また、補修区間 c では、補修後、その周辺部でさらに変状が生じたことから追加して補修対策が行われた。区間 c の設計時の地山分類は CI の判定であり、トンネル施工時の先進ボーリングの調査では、やや軟質であるがコアの力学特性をもとに CII と判定した。また、施工では硬質と軟質の岩石が不均質に混在した状態であったが、掘削変位量の計測結果を踏まえて CII で施工した(凝灰角礫岩と自破碎状安山岩の境界部で粘土化した変質部の現れた区間は DII で施工)が、本トンネルでの変状は、構造的に弱い箇所(インバートの未設置区間)に大きな変化として現れた。なお、本トン

表-1 変状の発生時期と対応

タイプ	発生時期		対応
	供用後	施工時	
I	○	○	施工時にも変更が発生して補修・対策を実施
II	○	×	供用後に変状が発生してから補修・対策を実施
III	×	○	施工時の変状発生箇所を台帳化し、重点管理で対応
IV	×	×	通常の維持管理・定期点検で対応

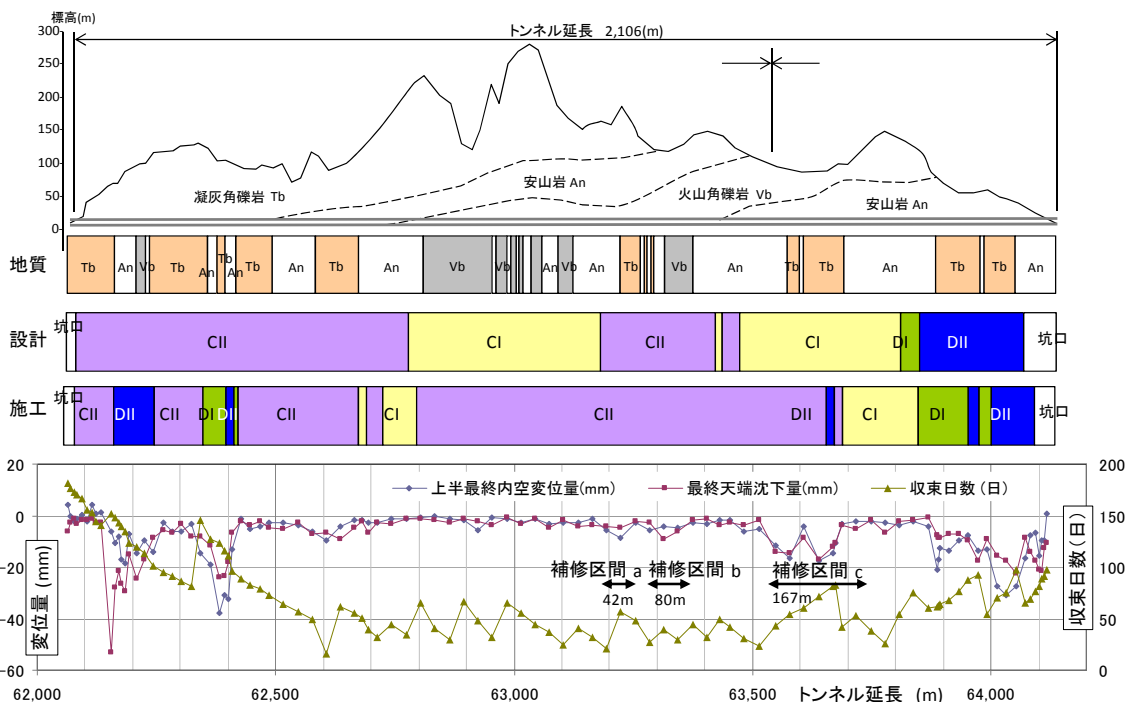


図-1 調査トンネルの施工記録(地質断面図、支保パターン(設計と施工)、変位量および収束日数)¹⁹⁾

表-2 トンネルの変状箇所における地山状況¹⁹⁾

区間	a	b	c
延長	42m	80m	167m
主な岩石	凝灰角礫岩	火山角礫岩	凝灰角礫岩
地質状況	亀裂が少ないが軟質	軟質で部分的に亀裂	軟質と硬質が存在、部分的に亀裂
一軸圧縮強度 (MPa)	14.9~22.9 (平均19.7)	10.8~15.7 (平均13.4)	0.7~126.2 (平均26.6)
弾性波速度 (km/s)	2.7~3.4 (平均3.0)	2.8~4.0 (平均3.6)	1.8~5.0 (平均3.6)
準岩盤圧縮強度 (MPa)	14.8~21.4 (平均17.2)	10.8~14.4 (平均11.9)	1.0~62.6 (平均15.5)
地山強度比	4.9~6.5 (平均5.5)	3.9~5.6 (平均4.7)	0.5~29 (平均8.0)
変形係数 (MPa)	3,000~5,200 (平均4,100)	3,800~7,200 (平均4,800)	40~11,000 (平均3,600)
X線回折試験	スメクタイト多量	スメクタイト少量	スメクタイト少量
総合判定	CII	CII	CII~DII
路面隆起量 (mm)	83	121	120/72
観測日数 (日)	2,072 (5.7年)	2,072 (5.7年)	51 (1.7ヶ月) / 360 (12ヶ月)

ネルの変状発生の主な要因は、トンネル掘削こともなう応力解放や含水状態の変化と推定されるが、道路管理者による調査では、路盤下部に存在した粘土化した変質部の膨張も、その原因であるとされている。

次に、掘削変位量大きい箇所での時間的な挙動を確認するため、岩種別、支保パターン別の収束日数を整理した。本トンネルの掘削変位量が比較的大きい箇所は、一軸圧縮強度、弾性波速度および変形係数の小さい凝灰角礫岩が分布、地層境界部に相当する¹⁹⁾。なお、収束日数は、施工時の計測で、掘削変位量が1mm/週以下となることを2回確認するまでの日数とした。

(2) 補修対策時に地山から採取した試料の試験・分析

本トンネルの補修対策における路盤掘削時に、地山から岩石を直接採取し、X線回折試験および乾湿繰り返し後のスレーキング試験を行い、変状に関わる岩石の鉱物的な特徴を分析した^{16),19)}。試料は火山角礫岩の礫(安山岩)であり、採取直後と採取から1年経過後の試料で試験を実施した。ここで、乾湿繰り返し後のスレーキング試験では、1回目の試料の含水状態を極端に変化させないようにトンネルの掘削こともない出現する岩盤の実際の水分状況に近い状態を想定して、炉乾燥ではなく24時間室温で乾燥後、表乾状態で2回目の試験を行った。

2.3 完成トンネルの地質データベース構築

2.3.1 トンネル施工計測データの分析

国土交通省北海道開発局が NATM で建設した道路トンネル (118 トンネル、総延長 134.3km) における事前調査、施工記録および計測データを北海道土木技術会トンネル研究委員会 NATM 分科会と連携して収集し、完成トンネルの地質データベースを構築した。これらのデータから 57 トンネル、総延長 70.7km について、岩種別に変位量を整理するとともに、トンネル支保部材に

表-3 岩種の区分

岩種	区分内容 ²²⁾
1	面構造が発達した泥質または砂岩・泥岩互層の中〜古生層および潜在亀裂が発達した付加体のような剥離性に富む岩種 (全体の 28%)
2	面構造が乏しい砂岩・礫岩などの中〜古生層、第三紀の火山岩類および硬質な溶結凝灰岩のような剥離性に富まない岩種 (全体の 34%)
3	第三紀の堆積岩類、火砕岩類および一部軟質な泥質の中生層を含む堆積岩類 (全体の 33%)
4	蛇紋岩などの特殊な岩石類 (全体の 5%)

生じた変状と変位量の関係を分析した²⁰⁾。

分析に用いた変状データは、岩種区分²¹⁾、土被り厚さ (m)、最終上半内空変位量 (mm ; 以下、変位量)、上半内空初期変位速度 (mm/日 : 計測開始〜10 日間での日最大変位量 ; 以下、変位速度) および施工時に生じた支保部材の変状 (ロックボルトの頭部・プレートの変形、吹付けコンクリートの脱落・クラック発生) である。

2.3.2 先進ボーリングによる地山分類の分析方法

完成トンネルの地質データベースから、27 トンネルで実施した先進ボーリング調査 246 孔 (延長 19,423m) について、地山分類の指標である RQD (計測寸法 5cm) と速度検層による孔内弾性波速度 (切羽前方の地山) の関係を岩種別に分析し、地山分類表²²⁾における適用範囲の妥当性を考察した。なお、本分析での岩種は、ボーリング柱状図の記載をもとに、地山分類表における 4 つの区分に対応させた (表-3)。

2.4 トンネル施工時の調査・評価手法の検討

2.4.1 岩石の経年的な劣化機構の検討

本トンネルの主な地質は、新第三紀の自破碎溶岩および凝灰角礫岩である。なお、本調査区間の支保構造は全てインバートを有しており、現段階で変状は発生していない。試料は国土交通省北海道開発局がトンネル施工時に実施した先進ボーリング調査のコア（A 孔 100.0m と B 孔 83.0m）である。採取箇所の土被り厚さは 50m 程度で地表からの風化の影響は比較的少ないが、弱～強の熱水変質作用^{23),24)}を受けている。本調査では、以下の変質区分²⁵⁾に従い試料を区分した（表-4）。また、一部に酸性変質の一種である珪化変質を確認した²⁶⁾。

前述の変質区分を受けて、劣化や変化を生じやすい岩石の分布と現状のトンネル自体の標準構造やその周辺環境、とくに地山の地下水や湧水の排水条件との関係について考察し、劣化機構を考察した。

2.4.2 変状が生じたトンネルの施工記録の見直し

調査対象としたトンネルは NATM で施工された延長 2.1km の道路トンネルである。本トンネルでは、供用後すぐに、盤ぶくれが生じたことから、2 度の補修対策が実施されている。なお、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。また自破碎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碎状を示す。また、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。本トンネルの地山は熱水変質作用を受けており、局所的に粘土化し、硬質と軟質の岩石が不均質に混在した状態を確認している。

これらの地質を掘削した際に 99 断面で、地質、支保パターン、天端沈下量と内空変位量（以下、掘削変位量）、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、完成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、完成後に

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、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。とくに支保パターンは、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。

また、トンネルの支保パターン、地質、変状の有無ごとに掘削変位量との相関を分析した。掘削変位量は、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。

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-5 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り、観察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。

2.5 完成トンネルの点検手法の検討

2.5.1 トンネル施工記録の台帳化

完成トンネルの地質データベースから、57 トンネルの地質、掘削変位量、土被り厚さ、補助工法、支保パターン、湧水および施工時の変状（切羽崩壊と盤ぶくれ）の関係について分析した。また、完成トンネルにおいて、地質に起因して生じる変状をトンネル点検時に早期に見つけ出すため、上記の各情報を統合した台帳を作成した。

2.5.2 地質情報を加味した点検手法の検討

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から、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、主に火砕岩類を地山とするトンネルについて、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ラック密度の経年変化を比較した。本研究では供用開始から 5 年目を初回として、その後 2 年ごとの 7 年目と 9 年目に実施された上記の点検データを用いて分析した。ここで、トンネル覆工コンク

表-4 変質区分²⁵⁾

変質	区分内容
弱	原岩組織を完全に残し、変質程度（脱色）が低い、あるいは非変質部の割合が高いもの
中	肉眼で変質が進んでいると判定できるが、原岩組織を明らかに残し、原岩判定が容易なもの、または、非変質部を残すものおよび網状変質部
強	構成鉱物、岩片などが変質鉱物で完全置換され、原岩組織を全く～ほとんど残さないもの

表-5 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	鏡面は自立せずに崩れる	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 しておく必要がある	その他
圧縮強度	ハンマー打撃で跳ね返る	$100 > \sigma_c \geq 20\text{MPa}$ ハンマー打撃で碎ける	$20 > \sigma_c \geq 5\text{MPa}$ 軽い打撃で碎ける	$5 > \sigma_c \geq 1\text{MPa}$ 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%以下)	滴水程度 (1~20%/min)	集中湧水 (20~100%/min)	全面湧水 (100%/min以上)	その他 (1000%/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

リートのスパン (約 189m²/スパン) ごとのクラックの延長をクラック密度として集計し、覆工背面の地質に起因して生じる変状との関連性を分析した。

また、従来のトンネル点検の結果に、トンネル覆工背面の地質情報を加味するとともに、変状のリスクを点数化することで、早期に変状の発生を検出する方法について考察した。この検討では、延長 3,560m (351 スパン) の道路トンネルを対象とし、トンネルの工法、トンネル点検の判定結果、坑壁のひび割れ密度および地山分類に着目して分析した。まず、トンネルの工法は、矢板工法と NATM 工法の 2 区分とした。トンネルの工法の違いは、覆工背面との密着性に差があると考えたことから指標とした。次に、トンネル点検の判定結果を A、B および S の 3 区分とした。トンネル点検の判定結果は、覆工の総合的な健全性を示す指標であることから指標とした。また、坑壁のひび割れ密度²⁷⁾は、0.5m/m²以上、0.5~0.2m/m²および 0.2m/m²以下の 3 区分とした。ひび割れ密度が 1.0~2.0km/s、2.0~4.5km/s および 4.5km/s 以上の区分に対応させた。弾性波速度は、トンネルの設計~施工時の評価に用いられる値であり、地山の地質状態を反映した値であることから指標とした。これらの各区分に評点を付すことで、評価や実施すべき項目を従来のトンネル点検と整合させて設定した。

表-6 点検での評価と実施すべき項目

評価	実施すべき項目
I	経過観察 (次回の点検で観察)
II	監視 (2 年毎に点検)
III	標準調査 (2 年毎に点検+トンネル断面の測定)
IV	詳細調査 (2 年毎に点検+断面形状の変化調査)

3. 研究結果

3.1 時間遅れを伴うトンネル変状の要因分析の結果

3.1.1 時間遅れを伴うトンネル変状の実態

文献調査の結果から、供用開始後に変状が発生した 20 事例 (表-7) を地域別にみると、北海道が 7 例と最も多く、東北地方が 3 例、関東地方が 1 例、中部地方が 6 例、近畿地方・九州地方が 3 例であった。また、トンネル完成から変状発生までの年数は、5 年以内のものが 10 件と半数を占めるが、中には 20 年後に顕在化したものもある。各トンネルで発生した主な変状は、盤ぶくれや覆工の押し出しであり、内空断面の減少に伴い、車両の通行や安全性への影響、または維持管理上の問題が生じたことから対策が行われた。

これらの事例におけるトンネル箇所の子な地質は、火山岩・火砕岩類 (安山岩・凝灰角礫岩類) を主体とするものが 14 例、花崗岩が 3 例、堆積岩類が 2 例、蛇紋岩・黒色片岩が 1 例となっており、火山岩・火砕岩類がとくに注意を要する地質である。

表-7 供用後に変状が発生した事例^{1)~15)}

トンネル（地域）	種別	完成～ 変状発生 までの年数	施工中 の変状	工法	主な地質	主な変状
朝日（新潟）	一般国道7号	1	あり	NATM	破砕質凝灰岩類	盤ぶくれ
関（三重）	一般国道25号	0.5	—	—	花崗岩・礫岩	盤ぶくれ、覆工ひび割れ
礼文華（北海道）	一般国道37号	0.5	あり	—	角礫凝灰岩、安山岩	覆工の押し出し、盤ぶくれ
仙岩（秋田・岩手）	一般国道46号	20	—	—	変質凝灰岩	盤ぶくれ
送毛（北海道）	一般国道231号	3	あり	—	角閃石安山質溶岩	覆工の押し出し、盤ぶくれ
黒岩（北海道）	一般国道231号	2	—	—	火山角礫岩、凝灰角礫岩	盤ぶくれ、覆工ひび割れ
三国（北海道）	一般国道273号	15	—	—	凝灰角礫岩、変朽安山岩	路盤の隆起（風化岩盤の凍上）
四ツ峰（北海道）	道道	24	あり	—	破砕質泥岩、角礫岩	覆工・インバート部のひび割れ
小山田（岩手）	県道	0.5	—	NATM	花崗岩・流紋岩	盤ぶくれ
忒山（山形）	山形自動車道	17	—	—	変質凝灰岩	盤ぶくれ
風波（新潟）	北陸自動車道	20	あり	—	凝灰角礫岩	覆工・インバート部のひび割れ
浅間山（群馬）	上信越自動車道	1	—	NATM	安山岩・凝灰角礫岩	盤ぶくれ
恵那山（長野・岐阜）	中央自動車道	14	—	—	花崗岩・溶結凝灰岩	覆工ひび割れ
嬉野（佐賀）	長崎自動車道	0	あり	NATM	凝灰角礫岩・安山岩	盤ぶくれ、覆工ひび割れ
俵坂（長崎・佐賀）	長崎自動車道	1	あり	NATM	凝灰角礫岩・安山岩	盤ぶくれ
神居（北海道）	鉄道	18	あり	—	蛇紋岩、黒色片岩	覆工の押し出し、盤ぶくれ
礼文浜（北海道）	鉄道	6	—	—	安山岩質凝灰岩、変朽安山岩	盤ぶくれ
一ノ瀬（長野）	鉄道	11	あり	NATM	凝灰角礫岩・凝灰岩	インバート破損
碓氷峠（長野）	鉄道	9	—	NATM	安山岩溶岩・火山角礫岩	盤ぶくれ
塚山（新潟）	鉄道	0.5	あり	—	砂岩泥岩・砂質頁岩	覆工の押し出し、ひび割れ

トンネルの工法は、主に矢板工法であるが、NATM工法により建設されたトンネルでも変状が発生した。また、施工中に変状が発生して対策を実施したトンネルでも再び変状が発生している事例があった。発生時期（供用後と施工時）に応じた補修・対策時や維持管理段階での対応をタイプⅠ～Ⅳに区分（表-1）し、以下のように対応方法について考察した。なお、ここで施工時の変状とは、縫い返しやその補修を要した掘削変位量の増加、支保部材の変形や破損などをいう。

以上から、変状の発生時期とその対応について区分すると、以下の4つの区分に分けた。まず、タイプⅠは、供用後と施工中に変状が発生した場合である。結果的には、施工中の対策が不十分であった箇所といえ、施工中にどのような調査・評価を行えば適切な対策が行えるかが課題である。

次に、タイプⅡは、施工中に問題はないが、供用後に変状を生じた場合である。事前や施工時の調査精度を向上させて、将来的な変状の発生を予測するための方法を確立する必要がある。

また、タイプⅢは、供用後に変状は発生していないが、施工中に変状が生じている場合であり、タイプⅠの要因を分析し、タイプⅢの状況と比較することで、今後、供用後の変状に至るリスクが高い箇所を抽出できる可能性がある。また、当該箇所の点検頻度を高めることで、変状の早期検出が可能といえる。

その他、タイプⅣは、通常の維持管理や定期点検で対

応可能といえるが、タイプⅡへ移行する可能性もあることから、トンネル施工時における地質情報や施工記録の整備や保管とその体系化が必要といえる。

3.1.2 時間依存性を有する変状の地質別の要因

これまでの変状の実態調査²⁾によると、膨張性土圧による変状は、主に第三紀層の泥岩・頁岩の堆積岩類、蛇紋岩および温泉余土の地質で発生しやすいことが示されている。しかし、今回収集した供用後の変状事例では、火山岩類の地山での事例が多いことが特徴的である。また、このような変状は、表-1のタイプⅠとⅡのように、中長期的に継続して生じることから、その補修や対策に苦慮しているのが現状である。

火山岩・火砕岩類地域では、硬いが亀裂に富む火山岩類と軟岩に属する火砕岩類が複雑に分布しており、一般に岩相変化が激しい。また、熱水変質作用を被っている場合も多い。このため、掘削時に良好な岩盤を確認していても、その背後に異なる岩相が分布している場合がある。また、掘削後の地下水の変化や掘削に伴う緩み、あるいは熱水変質作用により生成した粘土鉱物の吸水膨張変化などにより、トンネル支保構造に塑性圧が時間遅れとして作用することが想定される。

一方、花崗岩の地山では、地山自体の膨張圧の影響は少なく、風化作用の影響を受けた岩層がマサ化することで緩み、覆工に土圧として作用し、変状が生じると想定される。また、蛇紋岩や泥岩等の堆積岩類の地山では、施工中から変位量が増加する場合が多く、地山の緩み対

策や支保構造の早期閉合などの対応が施工中になされる。このため、表-1のタイプⅢのように火山岩・火砕岩類の地山と比べると供用後の変状が生じることは少ないといえる。そのため、タイプⅠとⅢでは、施工中に発生した変状箇所の台帳化を図り、他の区間よりも点検の頻度を高めることで、完成または供用後の変状発生に対する予防的な保全は可能であるが、タイプⅡに対しては、変状の発生予測に関する施工中の地質評価法の確立が必要といえる。以上のことから、トンネル建設後に、事業における地質情報や施工記録を蓄積、再整理して台帳化することは、その後の維持管理やトンネル点検、地質性状に起因する変状の発生を予測検討するために不可欠である。

3.2 モデル地における調査・試験結果

3.2.1 コアの長期劣化観察と試験・分析の結果

図-2にコアの掘削直後ならびに暴露後の様子を示す。コアは、掘削直後は硬質であるが、暴露後、割れや破碎および膨れ上がりなど、その状態が変化している様子が伺える。なお、本調査では、暴露後の岩石試料の力学的試験は実施していないが、その劣化状態から力学的強度が低いことは明らかである。

また、X線回折試験の結果によると(表-8)、掘削直後に確認されていた鉱物(クリストバライト、石英、黄鉄鉱および沸石類)は、暴露後に減少または消失していた。また、石膏が二次的に生成していることが確認された。その他、pH試験の結果、pHはアルカリ性(7.9~8.7)から酸性(2.4~6.8)に変化した。ここで、暴露後の試料①のpHは6.8で中性を示したが、ジャロサイトが確認される試料②ではpHがとくに低い値を示した。このことは、掘削直後に黄鉄鉱の風化は進んでいないが、暴露環境において、酸化や雨水との反応が黄鉄鉱の分解を

進め、石膏やジャロサイト(ともに硫酸塩鉱物)の二次鉱物の生成がpHを低下させたと考えられる。このことは、岩石の特定鉱物の存在に着目することが、岩石の劣化を評価するための有効な指標になり得ると考えられる。

仮にこのような状態がトンネルの地山内で生じた場合、土木構造物に土圧が作用するなど、その影響が想定される。このため、今後はトンネル施工時の評価においては、

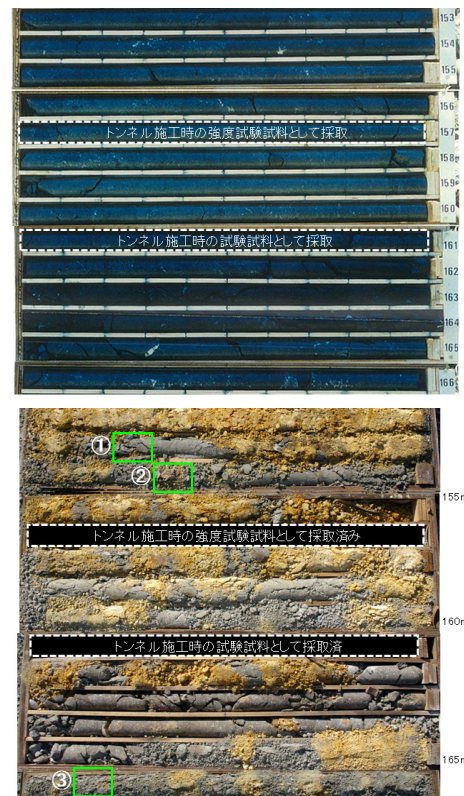


図-2 岩石コアの劣化の事例
(上：掘削直後 下：4年6ヶ月後)

表-8 X線回折試験とpH試験の結果

採取時期と試料番号		①		②		③	
		A	B	A	B	A	B
深度 (m)		150.0~ 151.0	153.3	160.0~ 161.0	155.4	168.0~ 169.0	165.2
X線 回折	クリストバライト	○		◎	△	◎	
	石英	◎		○		△	
	黄鉄鉱	△	+	△		○	+
	スメクタイト	◎	○	◎	△	◎	○
	方解石	◎	○	○		○	△
	濁沸石	△		+		+	
	斜ブチロル沸石	+		+		+	
	ジャロサイト 石膏		○		△ ○		+
pH		8.4	6.8	8.7	2.6	7.9	-

採取時期 A：掘削直後 B：4年6ヶ月後

X線回折試験結果 ◎極多量 ○多量 △中量 +少量 -微量

中長期的な劣化を考慮した評価や試験方法に関する検討が必要である。そのためには、鉱物の量比や組み合わせ、二次鉱物の生成に伴う密度変化に関する検討を進めることが必要である。

3.2.2 変状を生じたトンネルの施工記録の整理と補修対策時に地山から採取した試料の試験・分析結果

(1) トンネルの施工記録と変状

本トンネルの変状箇所(表-2)では、トンネル施工時の先進ボーリング調査による地山分類は、施工時の地質状況(硬質と軟質の岩石が不均質に混在)や掘削変位量の計測結果を踏まえて最終的な地山分類が決定された。しかし、路盤部にあたる地山では、その後の路面隆起の計測結果から、トンネル掘削にともなう応力解放や含水状態の変化によって、路盤下部に存在した岩石の状態も変化したことが原因のひとつと考えられる。すなわち、施工時の評価時点から時間の経過に応じて、劣化が進行することに注意が必要であることがわかった。このため、現状の施工時の地質調査では、このような路盤下部の地質状況を見逃す場合もあることから、今後、類似した地質の地山では、その確認を行うことが、将来的な変状の発生を予防するために必要といえる。

図-3に岩種別、支保パターン別の収束日数を示す。岩種全体の収束日数は47~106日であり、支保パターンが構造的上位となるに従い日数は増加する。ここで、収束日数は、基本的に掘削工法やインバートの有無に応じて異なることから、同じ支保パターンで比較した。

DI~DIIパターンで施工の場合、収束日数は81~127日である。このうち安山岩と火山角礫岩は、同程度の収束日数であるのに対し、凝灰角礫岩の収束日数は安山岩と火山角礫岩より少ない。このことは、岩石試験で力学特性が低くても比較的短期に収束する場合のあることを示している。次に、CI~CIIパターンで施工の場合、収束日数は43~102日であり、凝灰角礫岩の収束日数は安山岩と火山角礫岩より多い。

以上のことから、本トンネルの事例では、力学特性の低い凝灰角礫岩は、安山岩や火山角礫岩と比較するとDパターンの施工では収束が早く、Cパターンの施工では収束が遅い傾向があり、インバートによって閉合構造を有する場合、変位の継続は収まるが、無い場合では、収束が長期化することが予想される。また、掘削変位量の収束は岩種に応じて時間依存性を有することがわかった。

(2) 地山から採取した試料の試験・分析結果

表-9にX線回折試験の結果を示す。試料①~③は掘削直後、試料④を試料①の1年経過後の試料である。ここ

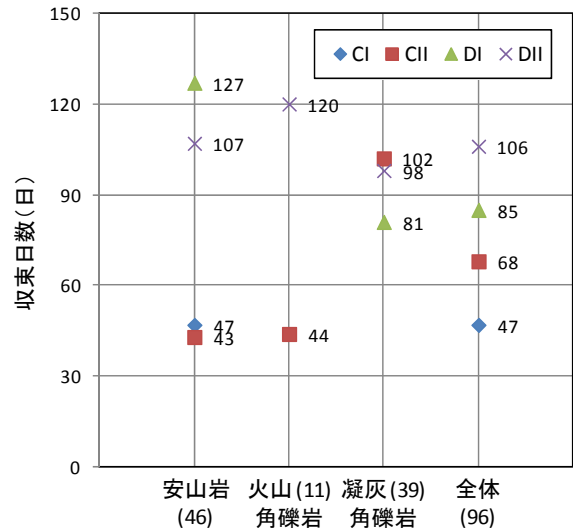


図-3 岩種別、支保パターン別の収束日数

表-9 X線回折試験の結果

分析コア		同定鉱物					
試料		Pl	Cri	Cal	Py	Gy	Sm
①	地山から採取 劣化①<②<③	○	○	◎	-		△
②		○	○	△	+		○
③		○	○	△	+		○
④	試料①の1年後	◎	◎		+	-	△

鉱物名>Pl:斜長石 Cri:クリストバライト Cal:方解石 Py:黄鉄鉱
Gy:石膏 Sm:スメクタイト
鉱物同定量>◎極多量 ○多量 △中量 +少量 -微量

で、試料は①<②<③の順に劣化した。また、X線回折試験の結果、炭酸塩鉱物である方解石は、試料②と③では試料①よりも少なく、劣化にともない溶脱していることが推定される。また、試料②と③は、試料①よりもスメクタイトの含有が多く、劣化の進行によって生成したことも考えられる。その他、試料①と④を比較すると試料④では方解石が劣化が地山の内部で進むことで、トンネルへの塑性圧として作用することも予想できる。

次に、図-4に乾湿繰り返し後のスレーキング試験の結果を示す。なお、スレーキングの区分の判定は、地盤工学会「岩石のスレーキング試験」²⁸⁾に準じた。

乾湿繰り返し後のスレーキング試験の結果、1回目の試験の結果、浸水から1時間後に区分1となった。その後、劣化は進行しなかったが24時間後に区分2となった。

2回目の試験の結果、浸水6時間目以降、区分3となり劣化したことを確認した。このように水分状態の変化

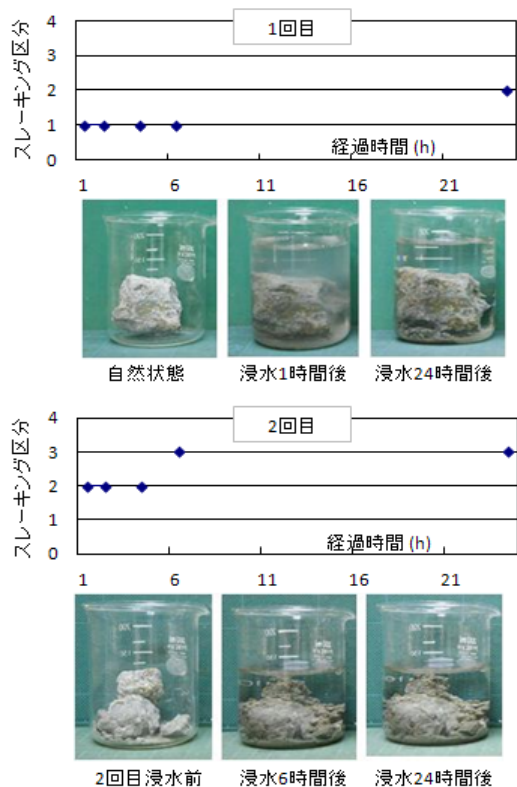
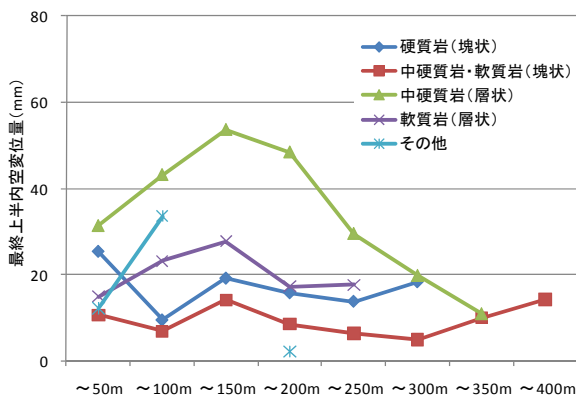


図-4 乾湿繰り返し後のスレーキング試験の結果



計測断面数	~50m	100m	150m	200m	250m	300m	350m	400m
硬質岩(塊状)	72	128	131	41	8	1	-	-
中硬質岩・軟質岩(塊状)	480	352	270	94	62	19	29	5
中硬質岩(層状)	105	126	87	68	42	43	8	-
軟質岩(層状)	88	83	24	11	2	-	-	-
その他	148	18	-	1	-	-	-	-

図-5 岩種別の変位量と土被り厚さ

を比較的少ない状況で行った試験でも、岩石によっては水分状態の違いや履歴が、劣化に影響する場合のあることを確認した。

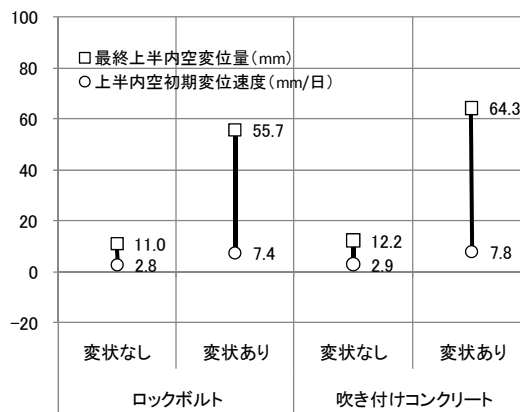


図-6 支保部材の変状と掘削変位量の関係

3.3 完成トンネルの地質データベース構築とその分析

3.3.1 トンネル施工計測データの分析

図-5に変位量(平均値)と土被り厚さの関係を示す。岩種別の変位量は、中硬質岩(層状) > 軟質岩(層状) > 硬質岩(塊状) > 中硬質岩・軟質岩(塊状)の順に大きい傾向が確認できる。

土被り厚さ別には、いずれの岩種でも100~150mで変位量が多い。このような土被り厚さを有する区間の掘削時には、変位量の増加に留意が必要といえる。

塊状岩と層状岩を比較すると、後者で変位量が多い。これは後者が、岩盤の性状把握の精度が低いことを示唆している。また、中硬質岩(層状)と軟質岩(層状)を比較すると相対的に岩質が良好であるはずの前者で変位量が多い。これは、後者が岩盤の性状を的確に把握できているのに対し、前者では岩盤の性状把握の精度が低いことを示唆している。すなわち、トンネルの施工で、より慎重な評価が求められるのは、中硬質岩(層状)であることが、今回の分析で判明した。

図-6にトンネル施工時に生じた支保部材の変状と変位量の関係を示す。支保部材はロックボルト(77例)と吹き付けコンクリート(19例)に着目し、変状の有無と変位量の対応を整理した。ここで、支保部材の変状は、ロックボルトでは、プレートの変形や頭部の破断、吹き付けコンクリートでは、クラックの発生や剥がれ落ちである。

これらの変状は、支保工の建て込み初期の段階で生じる変状であり、より大きな変状へ移行する前の予兆として捉えることができる。ここで、変位速度は、掘削に伴う内空断面の変化を計測の初期段階に捉えることができ、地山の再評価、支保構造を再検討する指標のひとつと考えられる。

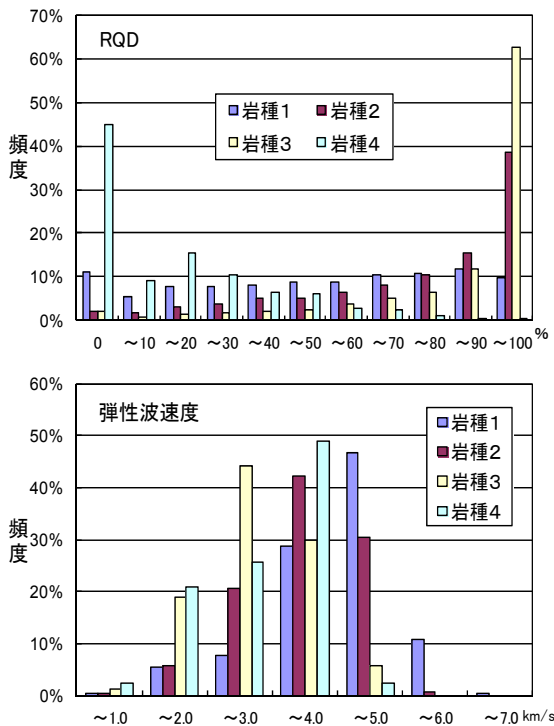


図-7 RQD と孔内弾性波速度の頻度分布

分析の結果、変位量は、ロックボルトの場合、「変状なし」で11.0mm、「変状あり」で55.7mmと5倍程度の違いが認められる。吹き付けコンクリートの場合、「変状なし」で12.2mm、「変状あり」で64.3mmと同様に5倍程度の違いがあり、変状を伴う場合、変位量が大きくなることを確認した。

一方、変位速度は、ロックボルトの場合、「変状なし」で2.8mm、「変状あり」で7.4mmと2.5倍程度の違いである。吹き付けコンクリートの場合、「変状なし」で2.9mm、「変状あり」で7.8mmと同様に2.5倍程度の違いを確認した。以上のように、初期値や計測値の変化傾向を支保部材の変状との対応として整理することで、最終的に変位量が大きくなることや施工時に発生するトラブルについて、予察的な検討が可能といえる。

3.3.2 先進ボーリングによる地山分類の分析

図-7にRQDと孔内弾性波速度の頻度分布を示す。なお、RQDと孔内弾性波速度は、1m毎の値で整理するとともに、平均値を求めて分析した。

RQDは、岩種1で割れ目の頻度にバラツキが大きい(その範囲に偏りが少ない)。そのため、岩盤には、不規則に亀裂が発生するなど、その影響を受けやすいと考えられる。岩種2と3は、ほぼ100に近いことから、割れ目が少なく、岩盤は岩石自体の強度の影響を受けやすい

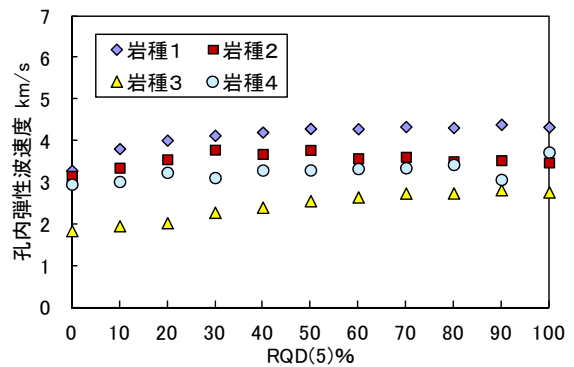


図-8 RQDの割合別の孔内弾性波速度

と考えられる。そのため、これらの岩種では、RQDによる区分は有効でない場合があるといえる。岩種4は、0または20未満となることが多く、極めて亀裂質であり、潜在的な亀裂も多いと考えられることから、これらの岩種についてもRQDによる評価は容易でないといえる。

次に、孔内弾性波速度は、岩種1で4~5km/s(最大6.2 km/s)、岩種2と4は3~4km/sが多いが、岩種4では1~3km/sでも多く、これらは亀裂の発達区間に対応すると考えられる。岩種3は2~3km/sが多く、亀裂は少ないが、本来の地山や岩石自体の弾性波速度が低い特徴が現れているといえる。

図-8にRQDの割合別の孔内弾性波速度の平均値を示す。岩種1は3~4.5km/s、岩種2と4は3~3.5km/s、岩種3は2~2.5km/sと岩種に応じて孔内弾性波速度が違うことを確認できる。岩種2と4は、岩種1と3の中間的な値を示し、RQDの変化に応じた孔内弾性波速度の変化は少ない。また、全岩種においても、概ねRQDが60%以上となる範囲では、孔内弾性波速度の変化は少ない。このことは、比較的RQDと孔内弾性波速度が低い場合、評価のための情報の取得は可能であるが、高い場合では難しく、他の指標を含めて評価することが効果的といえる。

以上のことから、現在の地山分類表の適用範囲が、地山評価の精度向上に向けて検討の余地のあることがわかった。今後は、地山分類の結果とトンネルの掘削変位量の対応を検証するなど、実態に即した評価に向けた情報の整理が必要である。

3.4 トンネル施工時の調査・評価手法の検討

3.4.1 岩石の経年的な劣化機構

(1) 岩石の経年劣化

図-9に、B孔のコアの掘削直後、4年7ヶ月後および6年5ヶ月後の状況を示す。掘削直後において、採取深

(2) 変質の程度と経年劣化の関係

表-10 に岩種、変質区分、保管場所、4年7ヶ月あるいは6年5ヶ月後のコアの劣化状況、珪化変質の区分およびX線回折試験による鉱物の同定結果を示す。

A孔では、自破碎溶岩の弱変質部は、コアの経年劣化は進んでいなかったが、凝灰角礫岩の弱変質部は、中～強変質部より、劣化が進んでいた。これに対し、B孔の自破碎溶岩の強変質部は、弱変質部より劣化が進んでいた。これは、A孔では酸性変質の一種である珪化変質により硬化したためと考えられる。A孔のコアは酸性～中性の変質作用を被っており、B孔のコアは中性～アルカリ性の変質作用を被っている。岩種、変質の程度および変質作用の種類を考えあわせると、自破碎溶岩は、酸性～中性～アルカリ性の全ての熱水変質に対し、弱変質部までは経年劣化を引き起こさないが、凝灰角礫岩では、酸性～中性の変質作用を強く受けている部分（中～強変質部）の方が、弱変質部より経年劣化を引き起こさないという結論となる。このため、岩盤の経年劣化を評価する場合、岩種および変質作用の種類と程度を整理するのが望ましいといえる。

(3) X線回折試験による評価

X線回折試験の結果（表-10）、まず、A孔の岩種は、自破碎溶岩と凝灰角礫岩である。掘削直後のA孔のX線回折試験の結果、酸性変質に特徴的なカオリナイト、また、中性変質に特徴的なス멕タイトや方解石などの鉱物が認められることから、A孔の岩石は酸～中性の変質帯に属すると評価される。A孔の凝灰角礫岩（中変質）の掘削直後と4年7ヶ月後の鉱物組成を比較すると、前者の大部分では方解石、緑泥石が認められたが、後者の大部分では認められなかった。また、黄鉄鉱の同定量が、前者では○多量～+少量であったのが、後者では△中量～未検出と少なくなっている。また、ス멕タイトも掘削直後は、◎極多量や○多量が目立つのに対し、4年7ヶ月後のコアでは△中量や未検出が目立ち減少している。以上のことから、ボーリング掘削によってコアに含まれていた黄鉄鉱が空気中の水分を吸収して硫酸を生成し、炭酸塩鉱物である方解石を溶解^{29,30}させたと考えられる。また、緑泥石やス멕タイトについても、硫酸により溶解したと考えられる。

次に、B孔の岩種は、全て自破碎溶岩である。掘削直後のB孔のX線回折試験の結果をみると、中～強変質部は中性変質に特徴的なス멕タイトや方解石、アルカリ性変質（または続成変質）に特徴的なフェリエ沸石や斜プチロル沸石などの沸石類が認められることから、B孔

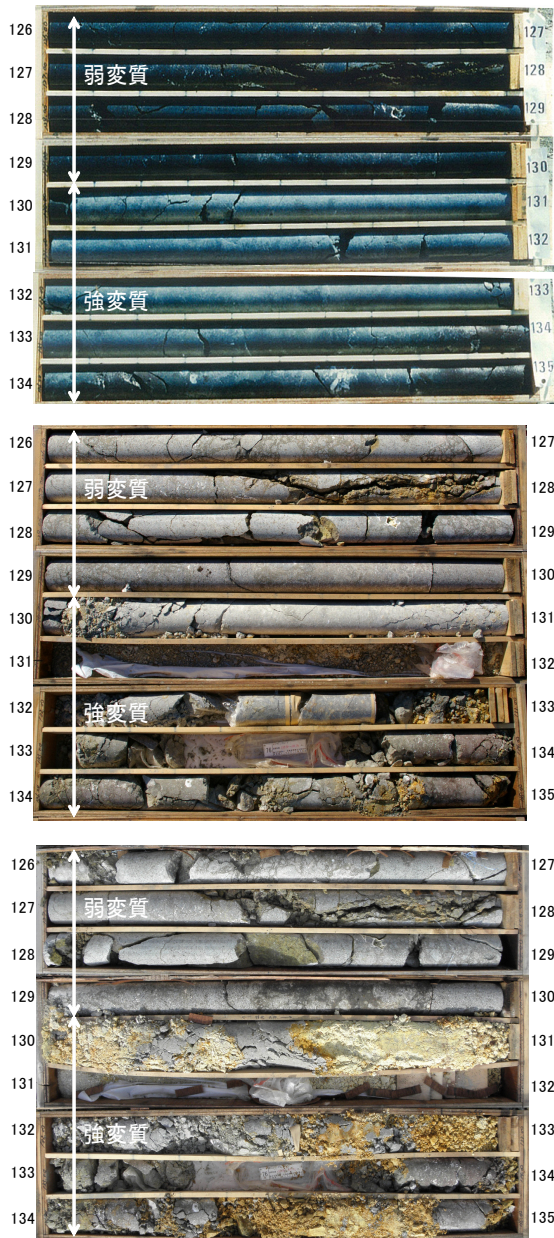


図-9 先進ボーリングコアの経年変化の状況²⁶⁾
(上：掘削直後，中：4年7ヶ月後，下：6年5ヶ月後)

度 126.0～130.0m では弱変質と評価されたが、4年7ヶ月後では自破碎溶岩の基部と岩塊の境界部で少し亀裂が顕在化し、その傾向は6年5ヶ月後で明確となり、さらに亀裂が明瞭となっている。

採取深度 130.0～135.0m は強変質と評価されたが、掘削直後のコアは割れ目が少なく堅硬であったが、4年7ヶ月後のコアでは、亀裂に沿って褐色化しており、割れや破碎が随所に進み、6年5ヶ月後では大部分が黄白～褐色に変色して粉末状になった。

の岩石は中性～アルカリ性の変質帯に属すると評価される。B孔の自破碎溶岩の掘削直後の分析の結果、データは少ないが、弱変質では黄鉄鉱が認められず、中変質では○多量が1例、△中量が3例、強変質では○多量が2例、△中量が1例となっており、変質の程度が高いほど

黄鉄鉱が多い傾向にある。4年7ヶ月後との比較では、黄鉄鉱の同定量は+少量が目立ち、掘削直後よりも減少しており、同時に石膏が生成³⁾されるようになり、黄鉄鉱と方解石が反応した結果であると考えられる。ただし、方解石の同定量はややばらついている。ゆえに、以上の

表-10 岩種、変質区分、試験時期、保管場所、劣化状況、珪化変質の区分およびX線回折試験の鉱物同定結果²⁶⁾

孔名	採取深度(m)	岩種	変質区分	試験時期	保管場所	劣化状況 ×劣化あり ○劣化なし	珪化変質区分	同定鉱物																		
								珪酸塩鉱物			硫酸塩鉱物			沸石類		カオリナイト										
								石英	トリデマイト	クリストバライト	斜長石	カリ長石	磁鉄鉱	方解石	石膏		ジャロサイト	明礬石	黄鉄鉱	フェリエ沸石	斜ブチロール沸石	緑泥石	スメクタイト			
A 26 試料	191.00~192.00	自破碎溶岩	弱	掘削直後		○	弱珪化		○	+	△													○		
	183.70			4年7ヶ月後	屋外	×	弱珪化	△	○		△			+	△	+				-	-				+	
	197.80			4年7ヶ月後	屋外	○			△	◎			+	○												△
	186.00~186.65			6年5ヶ月後	屋外	○	弱珪化		○		◎															△
	188.50~189.20			6年5ヶ月後	屋内	○	弱珪化		○		◎															△
	131.00~132.00			掘削直後		×			○		○								△						△	○
	141.00~142.00	掘削直後		×	弱珪化		○		△		△					○							△	◎		
	129.40~129.90	4年7ヶ月後	屋外	×			◎		○	△		+				+							-	+		
	101.00~102.00	掘削直後		×			○		○							○							-	◎		
	111.00~112.00	掘削直後		×			○		△							△							△	○		
	121.00~122.00	掘削直後		×	弱珪化		○		○							△							+	◎		
	161.00~162.00	掘削直後		○	珪化		◎									△	△							○		
	171.00~172.00	掘削直後		○	弱珪化		○		○			+				+							△	○		
	181.00~182.00	掘削直後		○	弱珪化		△		○			+				+							△	○		
	105.50~107.50	4年7ヶ月後	屋外	×	弱珪化		◎		+	+						+							-	○		
	113.90	4年7ヶ月後	屋外	×	珪化		◎		+				△	+										△		
	119.80	4年7ヶ月後	屋外	×	弱珪化		○		△				+	+										△		
	147.60	4年7ヶ月後	屋外	○	弱珪化		◎								○	+								+		
	148.00~148.40	4年7ヶ月後	屋外	○	弱珪化		◎									+								○		
	162.80	4年7ヶ月後	屋外	○	珪化		◎								△	△								△		
	167.60	4年7ヶ月後	屋外	○	珪化		◎		△	+		○				+								○		
	173.20~173.80	4年7ヶ月後	屋外	○	弱珪化		◎		○	△		+				+							-	+		
	174.60	4年7ヶ月後	屋外	○	弱珪化		◎		○	+		+				+							-	△		
	146.00~147.00	6年5ヶ月後	屋外	○	弱珪化		◎									△								○		
	150.00~151.00	掘削直後		○	珪化		◎				-					△								○		
	151.10	4年7ヶ月後	屋外	○	珪化		◎									+								△		
	B 23 試料	120.00~121.00	自破碎溶岩	弱	掘削直後		○				△	◎													◎	
		127.00~127.40			6年5ヶ月後	屋外	○			○																△
129.85~130.00		6年5ヶ月後			屋外	○			△	○		◎		+												△
150.00~151.00		掘削直後				×		+	△		○		+					△	+							◎
160.00~161.00		掘削直後				×		-			○		+					△	-							◎
168.00~169.00		掘削直後				×				◎		+						○	-							◎
180.00~181.00		掘削直後		×			-	○		○		+				△	+							◎		
153.30		4年7ヶ月後	屋外	×				△		△		○				+								○		
155.40		4年7ヶ月後	屋外	×				△		○			○	△										△		
156.00~156.90		4年7ヶ月後	屋外	×				△		○		+	-			+	-							○		
165.20		4年7ヶ月後	屋外	×						○		△	+			+								○		
181.50		4年7ヶ月後	屋外	×						◎		+	△	△		+								△		
195.50		4年7ヶ月後	屋外	×						◎		+											△	○		
196.10~196.90		4年7ヶ月後	屋外	○					○	△		◎				+								△		
131.00~132.00		掘削直後		×			+	○		○		+				○	+							◎		
140.00~141.00		掘削直後		×			+	△		◎		+				○	+							◎		
190.00~191.00		掘削直後		×			-	○		△		+				△	+							◎		
130.90		4年7ヶ月後	屋外	×			△	◎		△		+	+			+	△	+						○		
133.30~133.70		4年7ヶ月後	屋外	×			△			○		◎	-			+	-							△		
175.60~178.00		4年7ヶ月後	屋外	×			+			◎		+	-			△	-							△		
187.60		4年7ヶ月後	屋外	×				○		○			○	△										△		
130.45~130.53		6年5ヶ月後	屋外	×			+	○		○		+				+	-							△		
130.55~130.60		6年5ヶ月後	屋外	×				○		△				○	+		-							△		

鉱物同定量: ◎極多量 ○多量 △中量 +少量 -微量

ことから、B孔についてもA孔と同様に、ボーリング掘削によって、コアに含まれる黄鉄鉱が空気中の水分と接触するようになり、硫酸を生成して方解石を消費したと考えられる。

(4) 黄鉄鉱の多寡と経年劣化

掘削直後のA孔の凝灰角礫岩コアについて、掘削時の黄鉄鉱の同定量と保管後の劣化状況を比較すると、破碎～粉末状に劣化している部分は○多量～△中量である。また、亀裂は生じているがそれほど劣化していない部分は△中量～△少量であり、黄鉄鉱の多寡とコアの劣化程度が対応している。一方、A孔の自破碎溶岩のコアでは、掘削直後のX線回折強度データは黄鉄鉱が確認されていない部分の1箇所しかないが、保管後のコア劣化も発生していなかった。

前述の黄鉄鉱と方解石の反応によるコアの劣化を考えあわせると、A孔では岩種にかかわらず、黄鉄鉱の多寡がコアの経年劣化をある程度規制していると考えられる。

その他、掘削直後のB孔の自破碎溶岩コアについて、掘削時の黄鉄鉱の同定量と保管後の劣化状況を比較すると、劣化している7箇所部分は○多量～△中量で、劣化していない部分では未検出となっている。ゆえに、B孔においてもA孔と同様に、黄鉄鉱の多寡がコアの経年劣化をある程度規制していると考えられる。

以上の結果から、同地区の岩盤は、岩種や熱水変質の種類に関係なく、黄鉄鉱の多寡が経年劣化を規制していると考えられる。ただし、今回の調査地区と類似した地質地域において岩盤の経年劣化を評価する場合、岩種、変質作用の程度および種類を検討することが望ましい。

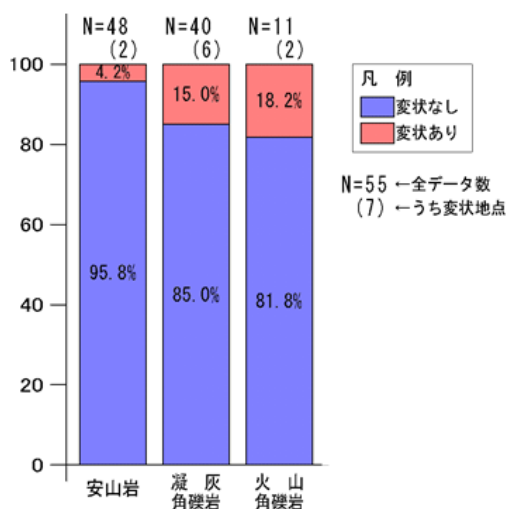


図-10 地質と変状の関係

また、このような地域におけるX線回折試験によって黄鉄鉱が比較的多く同定される場合は、岩盤の経年劣化が考えられるため、トンネルの支保構造の選定を、より慎重に行うことが望ましい。

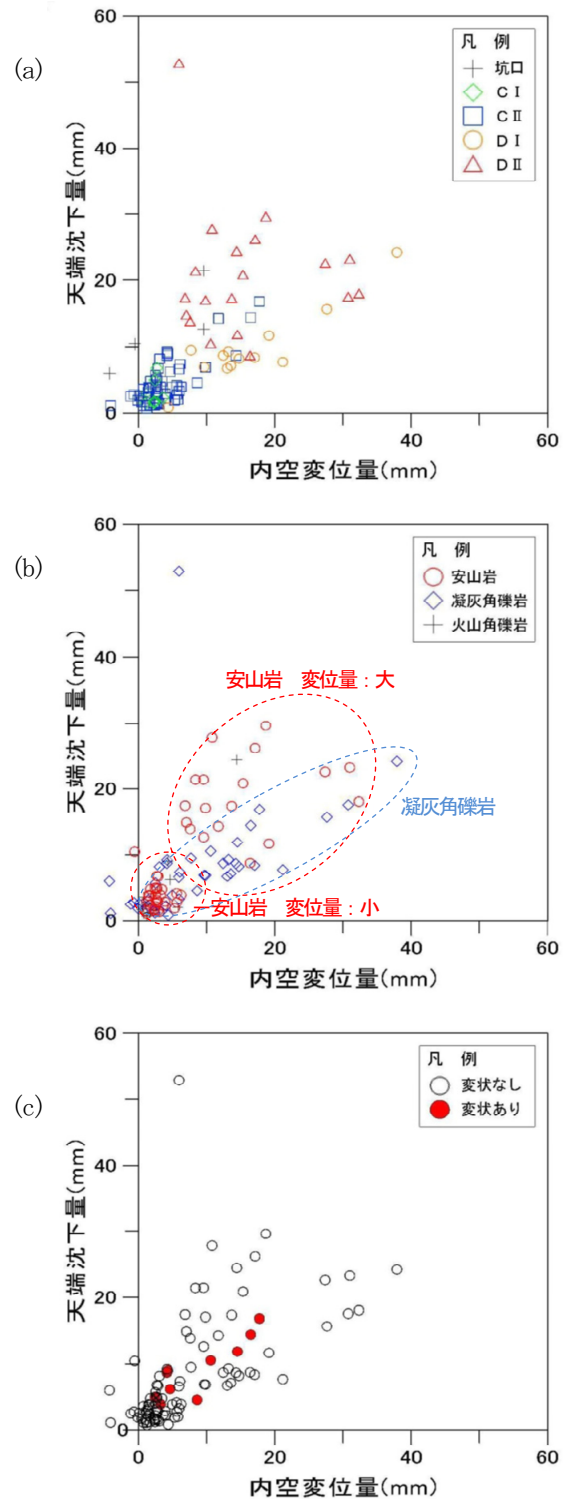


図-11 支保パターン、地質、変状の有無と掘削変位量

3.4.2 変状が生じたトンネルの施工記録の見直し

(1) 変状区間と非変状区間の施工記録の対比

図-10 にトンネルの地質と変状の関係を示す。地質別に
変状の発生件数をみると、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¹⁷⁾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こ

とが必要である。

(2) 内空変位量と天端沈下量との対比

図-11 にトンネルの支保パターン、地質、変状ごとの
掘削変量の関係を示す。まず、図-11(a) に示すように、
内空変位量と天端沈下量は、ともに 30mm 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。
また、支保パターン別にみると、概ね CI~CII では
10mm 以下であるが、DI~DII では 10mm 以上を示す
場合が多い。

次に、図-11(b)に示すように、地質別には、安山岩で
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。

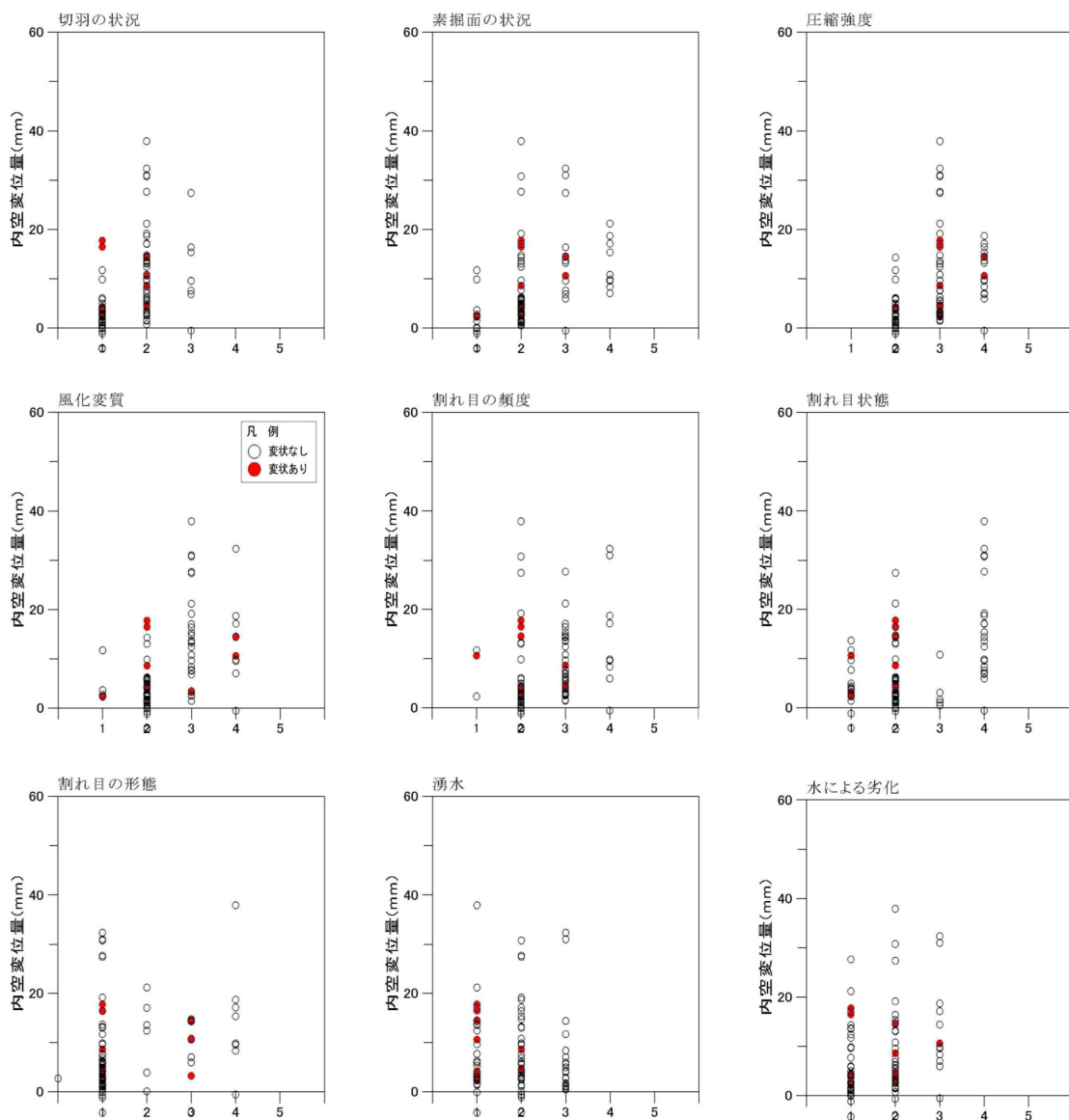


図-12 切羽観察項目と内空変位量の関係 (○変状なし、●変状あり)

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^{32),33)}であるが、図-11(c)に示すように、内空変位量と天端沈下量との比は概ね 1:1 である。また、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。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。以上のことから、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。したがって、本トンネルのような変質作用を受けた地山では、変質程度の違いなど、他の指標を組み合わせて評価することが必要である。

(3) 切羽観察記録と変状

図-12 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。

3.5 トンネルの時間依存性を有する変状に対する調査・施工時における留意点について

トンネルの時間依存性を有する変状発生の要因分析ならびにトンネルの調査・施工時における変状の調査・評価法の構築に向けて変状の事例を分析した結果、以下の点に留意が必要であることがわかった。

- 1) 施工時の地質調査では、路盤下部の地質状況を見逃す場合があるため、とくに変質を受けた地山では、その状態を確認することが、将来的な変状の発生を予防するために必要である。
- 2) また、施工時の掘削変位量の初期値や計測値の変化傾向を支保部材の変状との対応として整理することで、最終的に変位量が大きくなることや施工時に発生するトラブルについて、予察的な検討が可能といえる。ただし、本トンネルの事例では、施工時の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く、本トンネルのような変質作用を受けた地山では、変質程度の違いなど、他の指標を組み合わせて評価することが必要である。

3) 施工時の先進ボーリング調査による地山分類は、現行の地山分類表の適用範囲に対し、精度向上に向けて検討の余地のあることがわかった。そのため、地山分類の結果とトンネルの掘削変位量の対応を検証するなど、実態に即した評価に向けた情報の整理が必要である。

4) 本研究で対象としたトンネルと類似した岩種は、変質作用の種類と程度を整理するのが望ましいといえる。また、黄鉄鉱の多寡が経年劣化を規制することもあることから、X線回折試験によって黄鉄鉱が比較的多く同定される場合、岩盤の経年劣化が考えられるため、トンネルの支保構造の選定を、より慎重に行うことが望ましい。

以上の留意点や分析結果をもとに「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)」としてとりまとめた。本マニュアル(案)の目次構成は、第1章に「適用範囲」、第2章に「現状の評価方法」、第3章に「施工時の留意点」および第4章に「事例分析」とした。

3.6 完成トンネルの点検手法の検討結果

3.6.1 トンネル施工記録の台帳化

図-13 に完成トンネルの地質情報を含めた点検台帳の例を示す。台帳に整理した情報は、地質断面図、土被り厚さ、トンネル施工記録である掘削変位量、補助工法、支保パターン、変状(切羽崩壊と盤膨れ)および湧水である。図-13 に示すトンネルの事例では、最終上半内空変位量が 70mm 程度、最終天端沈下量が 40mm 程度であった。この付近は、堆積岩と火山岩の境界部であり、補助工法(AGF と鏡ボルト)とあわせて、支保パターンも DII とインバートを有する構造で施工されている。

前述したモデル地での事例(図-1)においても、支保構造の異なる箇所に変状が生じていることから、このような区間は、一般の区間と異なることに留意が必要である。また、このような施工時の情報を集積してトンネル点検時に活用することで、他の区間とは変状が生じやすい区間として区別でき着目できるといえる。あわせて、変状の早期検出やその対応についての検討が可能になると考えられる。

3.6.2 地質情報を加味した点検手法の検討結果

図-14 に変質安山岩の地山を例として、トンネルの点検結果であるクラック密度と地質断面図および施工時の支保パターンを示す。

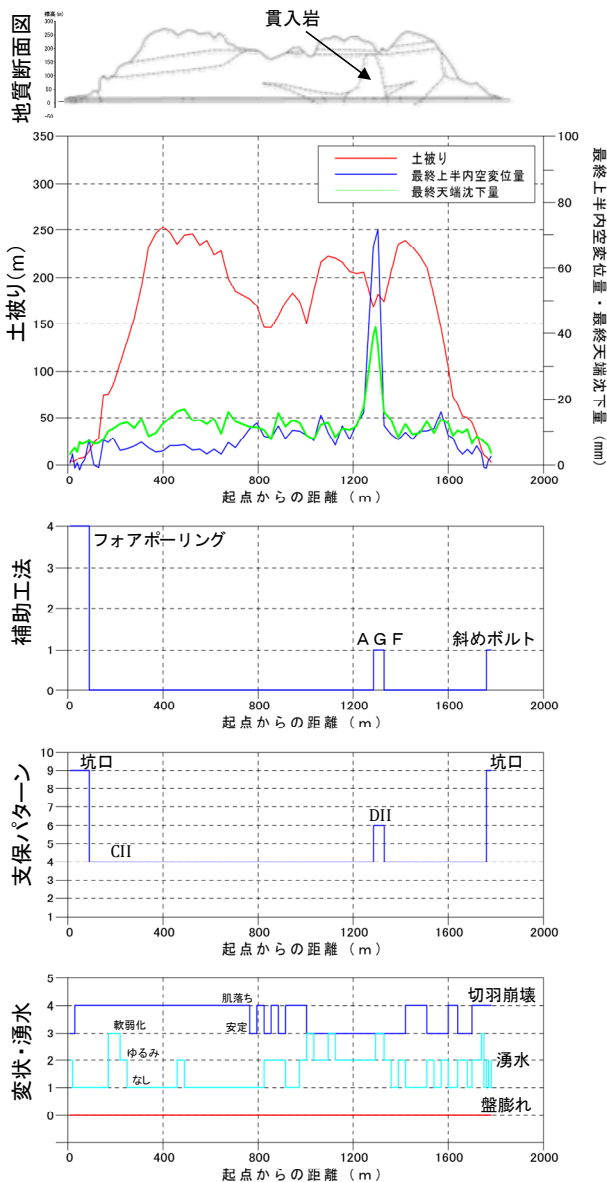


図-13 完成トンネルの地質情報を含めた点検台帳例

クラック密度は、概ね $0.1\sim 0.7\text{m}^2/\text{m}^2$ 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。したがって、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。次に、地山分類が異なる 3 スパン（ $E > DII > CII$ と比較的不良な状態から良好な状態に対応）における工法、トンネルの点検結果およびクラック密度を分析した（表-11）。ここで、指標別の評点のうち、トンネルの工法はすべて同じであり、地山分類、点検結果およびクラック密度は異なるが合計評点と評価は同じである。

まず、スパン S279 と S339 を比べると、S339 の地山分類は上位であるが、クラック密度が小さいことから、S279 と同じ合計評点となっている。また、スパン S1 と S279 を比べると、スパン S1 では、クラック密度は小さいが、地山分類が重視されていることから同じ合計評点となっている。その他、スパン S1 と S339 を比べると、クラック密度は同程度であるが、S1 の地山分類が構造的上位かつ点検結果が重視されていることから同じ合計評点となっている。以上のことから、従来のトンネル点検において、クラック密度が小さく良好と判定されても、覆工背面の地山分類が比較的不良な場合、その状態を抽出できることがわかった。

3.7 完成したトンネルの点検における留意点について

完成トンネルにおいて、地質に起因して生じる変状をトンネル点検時に早期に見つけ出すため、変状の事例を分析した結果、以下の点に留意が必要であることがわかった。

- 1) トンネル建設後、施工記録や地質情報は、再整理するとともに台帳化し、その後の維持管理やトンネル点検、地質性状に起因する変状の発生を予測検討するための資料として有効活用することが不可欠である。
- 2) 本トンネルの事例において、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示唆された。したがって、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。
- 3) さらに、クラック密度が小さく良好と判定されても、覆工背面の地山分類が比較的不良な場合、その状態も把握しておくことが必要である。
- 4) 現状のトンネル点検では、第 3 者被害の防止を最優先に、覆工や付属物など、主に落下被害に着目した点検

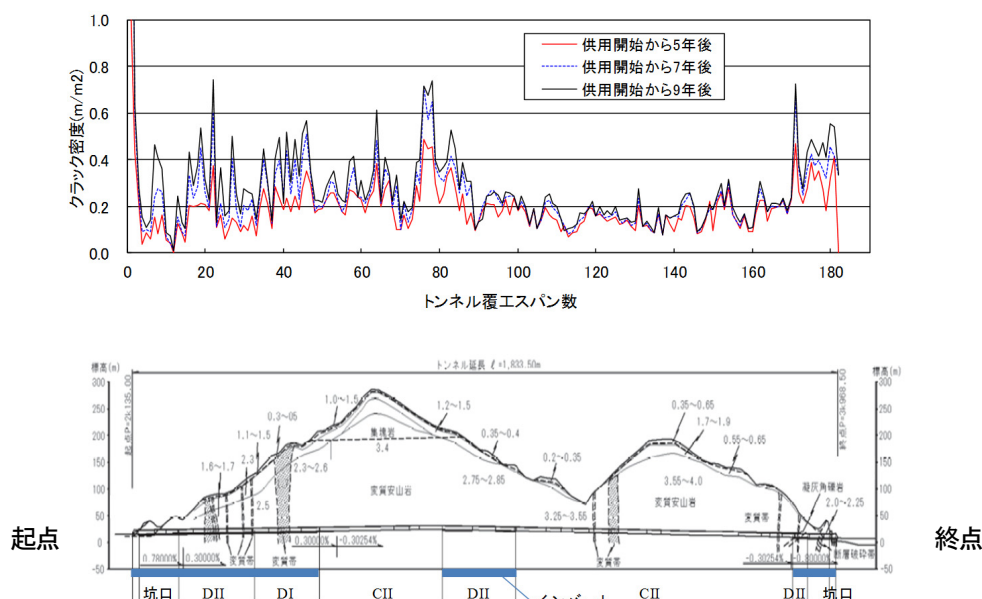


図-14 トンネルのクラック密度、地質断面図および施工時の支保パターンの関係

表-11 地質情報を加味したトンネルスパンの評価事例

		スパン番号	S1	S279	S339
指標	地山分類		E	C II	D II
	工法		NATM	NATM	NATM
	変状	点検結果	-	B	B
		ひび割れ密度 (m/m²)	0.203	0.591	0.205
評点	地山分類		8	4	6
	工法		1	1	1
	変状	点検結果	0	2	2
		ひび割れ密度	4	6	4
合計評点			13	13	13
評価			II	II	II

が行われている。一方、路面や路肩など、側方および下方からの応力の影響による段差、ひび割れ、変形による交通への支障に関しても着目する必要がある。

5) このような変状については、トンネル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、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、早期に異常を検出し、対応できることが重要である。

以上の留意点や分析結果をもとに「完成トンネルの地山変状点検マニュアル(案)」としてとりまとめた。本マニュアル(案)の目次構成は、第1章に「適用範囲」、第2章に「点検方法」、第3章に「完成後のトンネルの変

状」、第4章に「地質の性状に起因する変状の評価」、第5章に「既存資料の台帳化」および第6章に「リスクを考慮した管理方法」とした。

4. まとめと今後の課題

本研究の結果、以下の知見を得た。

- 1) トンネルの完成または供用開始後に発生した変状の事例を収集整理した結果、施工中に変状対策を講じたトンネルでも、供用開始後に再び発生した事例やNATMによるトンネルでも変状が発生していることを確認した。変状発生までの年数は0~24年であり、中長期的に継続して生じる変状の事例は、火山岩を地山とするトンネルにおいて多い傾向を示した。
- 2) 火山岩の地山におけるトンネル施工時の先進ボーリングコアを試料とした鉱物学的試験の結果、経時的な岩石の劣化に伴い含有鉱物に変化することを確認した。岩石の劣化や膨張の有無をより適切に予測するには、従来の膨張性の判定とあわせて、変質や劣化の程度、含有鉱物の組み合わせを加味することが有効になる場合のあることが示唆された。
- 3) 完成トンネルの地質データベースを構築するとともに、その蓄積したデータを分析した結果、地質の違いに応じて変位量が異なること、施工時に発生しうるトラブルの予察的な検討などに十分活用が可能であることが判明した。
- 4) 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。

- 5) また、トンネルのスパンごとに、地山分類、工法、点検の判定結果および覆工のクラック密度との相関を分析した結果、クラック密度が小さく良好と判定されても、覆工背面の地山分類が比較的不良な場合、その状態を抽出できる評価方法を構築した。

今後は、供用中のトンネルの維持管理において、地山の地質状況やその変化によっては、変状が生じる場合もあることから、覆工背面の地質状態を調査するための手法や経時変化を評価する方法など、トンネル構造に及ぼす影響などを解明するための研究を進めていきたい。

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) 市原健五・下畑明夫・青沼克貴：送毛トンネル補強対策について，第34回（平成2年度）北海道開発局技術発表会講演集，pp.73-78，1991.
- 3) 今村 仁・藤田圭一：恵那山トンネルの補強対策，第18回日本道路会議論文集，pp.292-293，1989.
- 4) 片寄紀雄・興石逸樹・松本武海：緩やかな膨張現象と付き合って30年・JR信越本線塚山トンネル，トンネルと地下，Vol.28，No.3，pp.7-15，1997.
- 5) 小林弘元・白濱 龍・畠田篤志・柴田勝博・永渕 洋・山本拓治：塑性圧によるトンネルの変状と対策事例について（その1調査および設計）土木学会第64回年次学術講演会論文集，pp.631-632，2009.
- 6) 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—山形自動車道益山トンネル上り線—，第44回地盤工学会講演集，pp.1271-1272，2009.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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，No.4，pp.7-14，2000.
- 10) 二瓶益臣・中曾根茂樹・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.
- 11) 林 幸一・御堂島章一・山中博之：変状トンネルの改築(1)・国道25号線関トンネル，トンネルと地下，Vol.8，No.3，pp.22-27，1977.
- 12) 平井公康・鈴木照行・秋月 亨・八重樫 栄：供用中のNATMトンネルの盤ぶくれ・一般県道宮古港線小山田トンネル，トンネルと地下，Vol.26，No.12，pp.19-25，1995.
- 13) 松尾茂生・滝沢俊次・大谷政敬：ロックボルトを利用した盤ぶくれ対策・国道7号朝日トンネル，トンネルと地下，Vol.11，No.11，pp.19-29，1980.
- 14) 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，No.9，pp.7-16，2007.
- 15) 北海道開発局石狩川開発建設部豊平川ダム統合管理事務所：定山溪ダム工事記録，pp.862-865，1992.
- 16) 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.
- 17) 国土交通省北海道開発局：道路設計要領，第4集トンネル，第11章，pp.4-6，2014.
- 18) 岡崎健治・伊東佳彦：岩石の暴露にともなう岩相の変化—火山岩における検討事例—，第48回環境工学研究フォーラム講演集，土木学会環境工学委員会，pp.173-174，2011.
- 19) 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.
- 20) 岡崎健治・伊東佳彦・佐々木博一：トンネルの地質調査・施工計測データの情報資源化に向けた検討例，平成23年度全国大会第66回年次学術講演会講演概要集，土木学会，CS11-005，pp.9-10，2011.
- 21) 日本道路協会：トンネル維持管理便覧，pp.59-74，1993.
- 22) 国土交通省北海道開発局：道路設計要領，第4集トンネル，第2章，pp.22-29，2014.
- 23) 立見辰雄：鉍床母岩の変質作用，東京大学出版会，pp.145-159，1977.
- 24) 吉村尚久：粘土鉍物と変質作用，地学団体研究会，pp.202-240，2001.
- 25) 地質・土質調査成果電子納品要領（案），国土交通省，附属資料5，p.61，2008.
- 26) 岡崎健治・伊東佳彦：トンネル地山岩盤の経年劣化の判別方法に関する検討例，寒地土木研究所月報，No.718，pp.17-22，2013.
- 27) 伊藤幸恒・伊藤哲男・原 晶信・吉武 勇・中川浩二：トンネル覆工コンクリートのひび割れ変状とその点検評価，土木学会論文集，No.714/VI-56，pp.233-238，2002.

- 28) 岩石のスレーキング試験：地盤材料試験の方法と解説，地盤工学会，pp.285-308，2009.
- 29) 田中芳則：方解石の溶出にともなう組織と物性の変化，応用地質，Vol.26, No.3, pp.19-25, 1985.
- 30) 大山隆弘・千木良雅弘・大村直也・渡部良朋：泥岩の化学的風化による住宅基礎の盤膨れ，応用地質，Vol.39, No.3, pp.261-272, 1998.
- 31) 鹿園直建・木村進一・岩井修平：化学的風化作用に伴う石膏の生成と源岩鉱物組成との関係，応用地質，Vol.43, No.3, pp.134-142, 2002.
- 32) 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.
- 33) 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，pp.214-269, 2013.

RESEARCH ON MECHANISM OF TIME DEPENDENCE DEFORMATION OF TUNNELS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2014

Research Team : Cold Region Construction Engineering
Research Group (Geological Hazards
Research Team)

Author : KURAHASHI Toshiyuki
OKAZAKI Kenji
YAMAZAKI Shusaku

Abstract : From FY2011 to FY2014, we reviewed papers on cases of time dependence deformation at tunnels in Japan, analyzed rock minerals, and made the geological features database of tunnels. We also compared time dependence deformation with tunnel construction records such as crown settlement, convergence, tunnel support, geological properties and tunnel inspection data. As a result of study, we compiled a manual of the investigation and estimation of the time dependence deformation in the tunnel construction stage, and a manual of the tunnel ground deformation of the inspection.

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