

## 時間遅れを伴う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に向け、モデル地での調査・試験を実施し、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検討を行った。その結果、トンネル施工時の掘削に伴う変位量の収束は、岩石に応じて時間依存性を有することがわかった。また、岩石に含まれる特定の鉱物の組み合わせが、長期的な岩石の劣化予測における、ひとつの指標になることが示唆された。あわせて、完成したトンネルの地質データベースを構築するとともに、完成したトンネルの合理的な点検手法の構築に向けて検討を行った。その結果、施工時の計測データを地質別に分析することが、地山評価の精度向上に寄与すること、また、施工時の情報と点検結果の総合化が、トンネル覆工背面の地質性状を考慮した点検結果の合理的な判定に有効であることを確認した。

キーワード：トンネル，時間依存性，地山評価

### 1. はじめに

完成したトンネルにおいて外力，環境，材料，設計，施工等に起因して覆工や坑門等に変形，ひびわれ，はく離，漏水などが生じ，トンネルの構造的安定性や要求される機能が阻害されている，あるいは，放置すればその恐れがある状態がトンネルの変状と定義されている<sup>1)</sup>。

このような変状のうち，とくに外力（覆工背面における地質性状の経時的な劣化や変化）に起因する変状は，トンネルの施工中に予測や対応が難しいこと，またその補修や対策では，通行止めなどの規制をとまなうことから，地域社会の便益を減ずるとともに安全・安心な社会を維持する上で大きな課題となっている。

本研究では，トンネルの調査，施工および完成時に，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，また，変状を未然に防止するための点検法の確立を目標として，平成 24 年度は，トンネルの時間依存性を有する変状要因の解明に向けて，モデル地での調査・試験や完成トンネルの地質データベースを構築するとともに，調査・評価システムや点検システムの構築に向けた検討を行った。以下に，本研究の成果を報告する。

## 2. 研究方法

### 2.1 モデル地における調査・試験

火山岩の地山で建設したトンネル（供用開始後に実際に変状が発生したトンネル）をモデル地として，その施

工時の記録を整理するとともに，変状の補修対策時に地山から直接採取した岩石（採取直後と採取から 1 年経過後の試料）の試験結果をもとに，変状の発生要因を地質との関連性から検討<sup>2)3)</sup>した。試料とした岩石は，火山角礫岩の中の礫（安山岩）である。

### 2.2 完成トンネルの地質データベースの構築と分析

国土交通省北海道開発局が昭和 60 年から NATM で建設した道路トンネル（118 トンネル，総延長 134.3km）における事前調査ならびに施工時の記録や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<sup>4)</sup>と連携して蓄積した。これらのデータから，27 の道路トンネルで実施した先進ボーリング調査<sup>5)</sup>の 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）の関係を岩種別に整理し，地山分類表<sup>6)</sup>における適用範囲の妥当性について検討した。

### 2.3 トンネル施工時の調査・評価手法の検討

モデル地における調査・試験の結果をふまえて，北海道日本海沿岸の火山岩の地山で建設したトンネルの先進ボーリングコア（掘削直後と数年間保管後）を試料として，岩種や変質作用の程度と種類に応じた容姿や形状の変化ならびに含有する鉱物の違いについて分析した。また，それらの結果をもとに，岩石の経年的な劣化機構について検討するとともに，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・湧水の排水条件との関連性について考察した。

## 2. 4 完成トンネルの点検手法の検討

完成トンネルの地質データベースをもとに、これまで国土交通省北海道開発局が建設した 57 の道路トンネルについて、地質状況、最終上半内空変位量と最終天端沈下量（以下、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（切羽崩壊と盤膨れ）の関係について整理した。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の情報提供を目的として、上記の各資料を統合した台帳を作成した。

## 3. 研究結果

### 3. 1 モデル地における調査・試験

#### 3. 1. 1 トンネルの地質と変状

本調査は、北海道日本海沿岸に建設した延長 2.1km の国道トンネルで実施した。トンネルの掘削で判明した地質は、中新世の安山岩 (An) が 50%、火山角礫岩 (Vb) が 15% および凝灰角礫岩 (Tb) が 35% である。

本トンネルでは、供用開始後、変状（盤膨れ：路面部の隆起）が 3 箇所が発生したことから補修対策を行った。表-1 にトンネルの変状箇所の地山状況を示す。

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、補修対策を実施した。また、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を実施した。

区間 c の設計（事前の地山評価）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 (Tb と自破砕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、本トンネルの変状発生の主な要因は、トンネル掘削に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、あわせて、路盤下部に存在した粘土化した変質部の膨張も、その原因であることを整理している。

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。

#### 3. 1. 2 トンネル施工記録の整理

本トンネルの掘削変位量は概ね 1 : 1 であり、掘削変位量がともに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が小さい Tb の分布と地層境界部が存在する箇所である<sup>3)</sup>。このような地質が悪く、掘削変位量が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（図-1）。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。

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、同じパターンで比較検討した。

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 An と Vb は、同程度の収束日数であるのに対し、Tb の収束日数は An と Vb より少ない。

表-1 トンネルの変状箇所における地山状況<sup>3)</sup>

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)

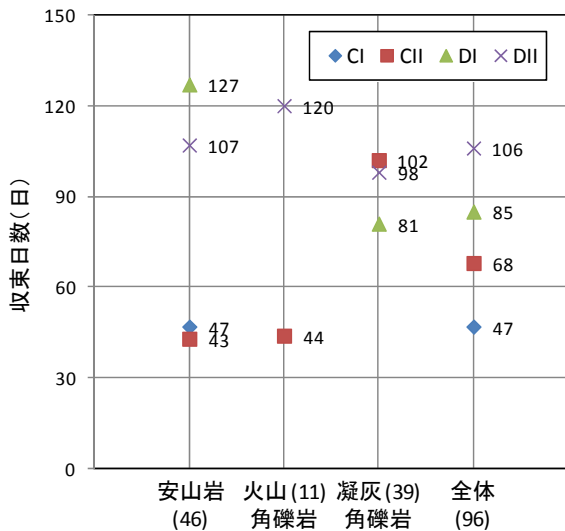


図-1 岩種別の天端沈下量の収束日数<sup>3)</sup>

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、Tbの収束日数はAnとVb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Tbは、AnやVbと比較すると、Dパターンでの施工では収束が早く、Cパターンで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、岩石に応じて時間依存性を有することがわかった。

### 3. 1. 3 変状区間の岩石の試験

本トンネルの補修対策の路盤掘削時に、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整理した。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、炉乾燥ではなく、24時間室温で乾燥させた後、表乾状態で2回目の試験を行った。

表-2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の1年経過後の試料とした。ここで、試料は①<②<③の順に劣化している。

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。

次に、試料①と④を比較すると、試料④では方解石が

表-2 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:クリストパライト 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

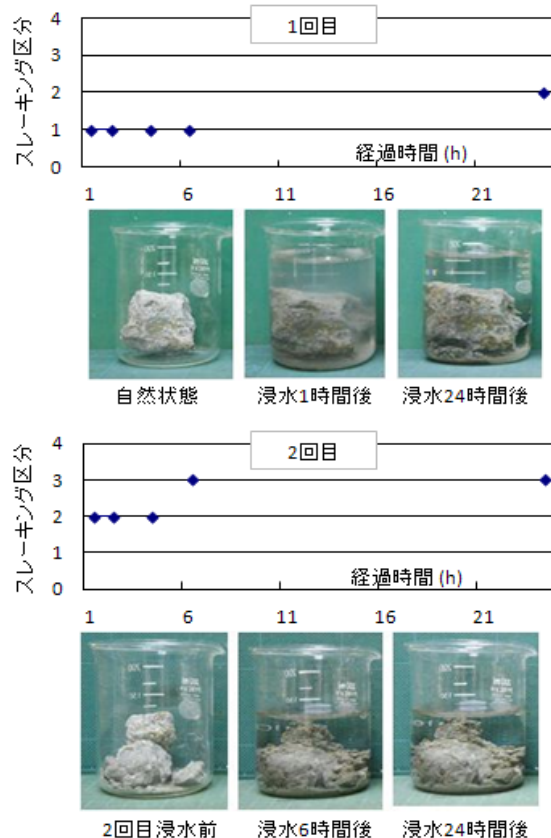


図-2 乾湿繰り返し後のスレーキング試験の結果

消失し、硫酸塩鉱物である石膏を確認できる。このことは、黄鉄鉱の酸化と分解にともなう硫黄と炭酸塩鉱物が反応した結果であると考えられる。このように、岩石の鉱物の組み合わせによる反応によって、化学的な変化が促進されることで、溶脱と体積変化が生じ、膨張圧としてトンネルに作用することが想定できる。また、岩石の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-2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」<sup>6)</sup>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。ここで、トンネルの掘削にともない出現れる岩盤の実際の水分状況に近い状態を想定し、試料を著しく乾燥させない状態で、2回目の試験を実施した。

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。

### 3. 2 完成トンネルの地質データベースの構築と分析

#### 3. 2. 1 トンネルと地質

構築した完成トンネルの地質データベースから、先進ボーリング調査結果のうち、地山分類の指標であるRQDと孔内弾性波速度の関係を岩種別に整理した。ここで岩種は、ボーリング柱状図の記載をもとに、地山分類表<sup>5)</sup>における以下の4つの区分に対応させた。

岩種 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%）

岩種 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%）

岩種 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%）

岩種 4：蛇紋岩などの特殊な岩石類（全体の5%）

#### 3. 2. 2 地山分類における地質データの分析

図-3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、特定の範囲を設定し、その平均値で検討した。

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と考えられることから、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

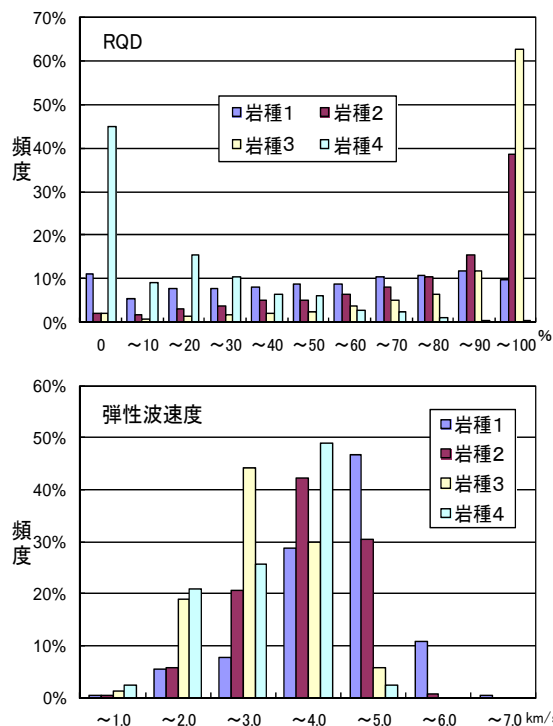


図-3 RQDと孔内弾性波速度の頻度分布

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。

#### 3. 2. 3 地質別の地山分類指標

図-4にRQDと孔内弾性波速度の関係を岩種別に示す。RQDは、孔内弾性波速度が同一な区間の平均値である。

岩種1, 3および4（岩種4はデータが少ない）では、比較的よい正の相関が読み取れる。岩種2は、孔内弾性波速度が3km/s程度と一定でRQDが変化しても、孔内弾性波速度に明瞭な差は生じない。このことは、岩種2は、亀裂が発達することが少なく、孔内弾性波速度はRQDよりも他の要因（例えば、岩石自体の弾性波速度）の影響をより強く受けやすいと考えられる。

図-5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の違うことが確認できる。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

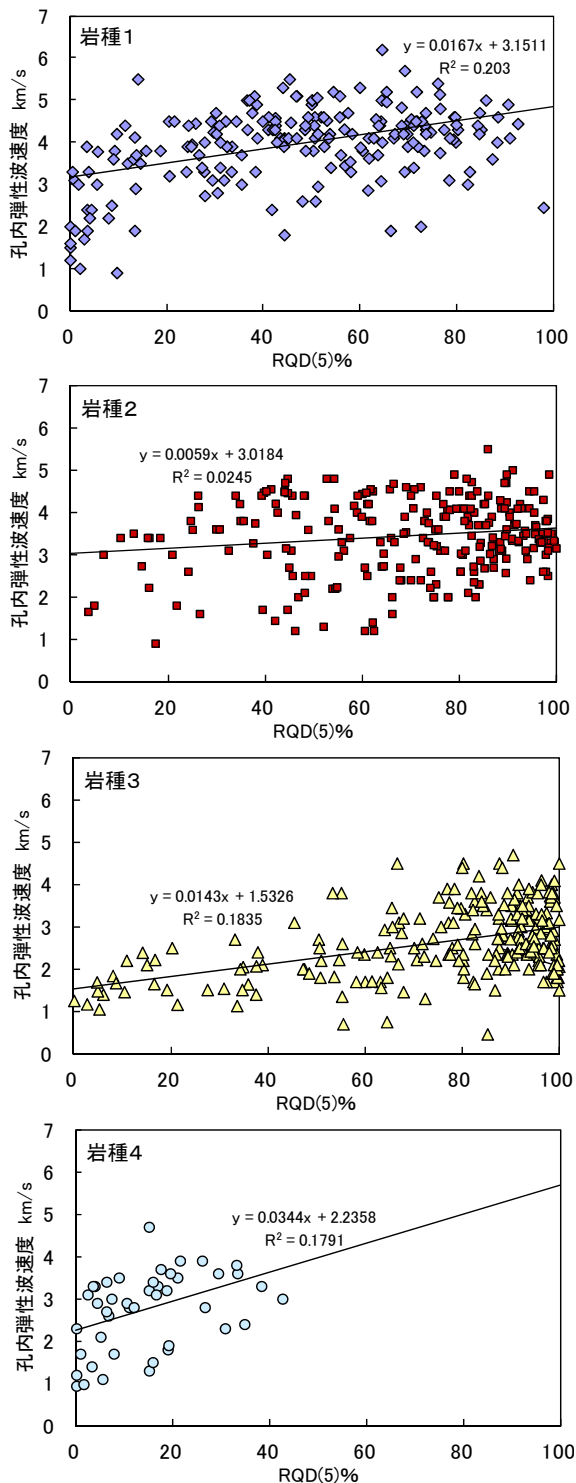


図-4 岩種別のRQDと孔内弾性波速度

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

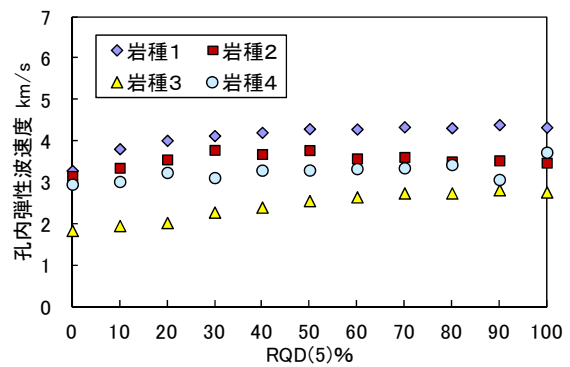


図-5 RQDの割合別の孔内弾性波速度

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といえる。

### 3.3 トンネル施工時の調査・評価手法の検討

#### 3.3.1 トンネルの地質と変質区分

本トンネル箇所の地質は、新第三紀の自破碎溶岩および凝灰角礫岩である。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ボーリングコア（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<sup>7)</sup>を受けている。本調査では、以下の変質区分<sup>9)</sup>に従い試料を区分した。また、一部に酸性変質の一種である珪化変質を確認<sup>10)</sup>した。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。

弱変質：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。

中変質：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。

強変質：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。

#### 3.3.2 岩石の経年劣化

写真-1に、代表例として、B孔について、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。

採取深度126.0～130.0mは弱変質と評価されたが、掘削直後と4年7ヶ月後の比較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ヶ月後で明確になり、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。4年7ヶ月

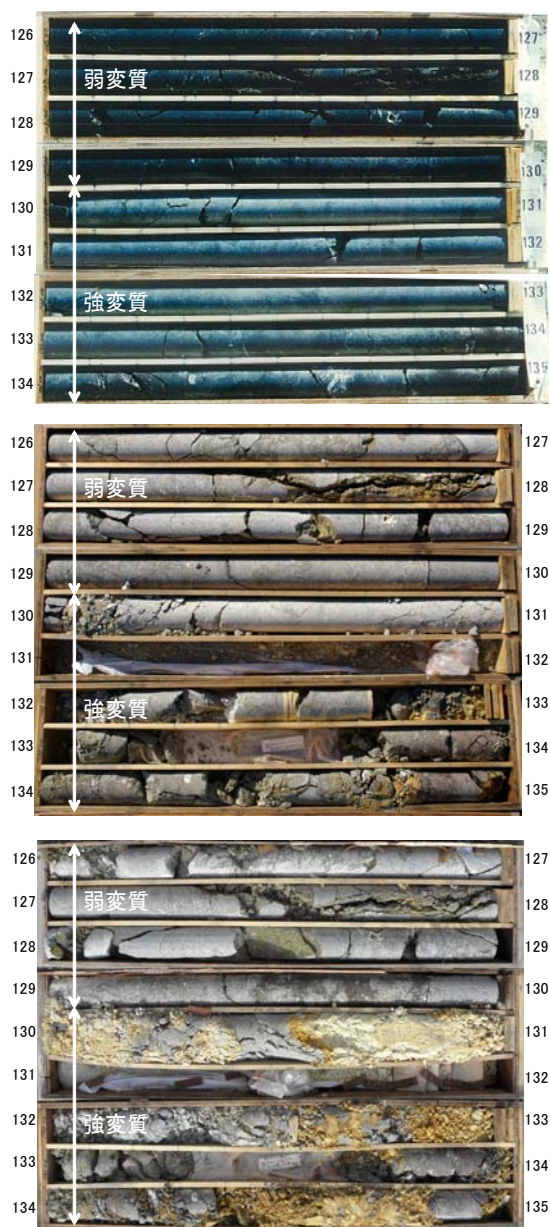


写真-1 岩石の経年変化の状況<sup>10)</sup>

(上：掘削直後，中：4年7ヶ月後，下：6年5ヶ月後)

後のコアでは亀裂に沿って褐色化しており，割れや破碎が随所で見られ，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ている。

### 3. 3. 3 変質の程度と経年劣化の関係

表-3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）のほうが，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. 3. 4 X線回折試験による評価

表-3にX線回折試験の結果を示す。同試験における鉱物同定量は，X線回折強度の相対的な違いをもとに判定した。X線回折強度は，鉱物の結晶構造，結晶度，形状や大きさなどの要素に依存しており，評価は定性的であるが，今回調査では同一地区，同岩種の試料を用いており，同条件での試験結果として整理した。

#### (1) A孔の変質帯区分

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メク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。

#### (2) A孔の鉱物組成の経年変化

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～十少量であったのが，後者では△中量～未検出と少なくなっている。また，スメク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産生し，炭酸塩鉱物である方解石を溶解<sup>11)12)</sup>させたと考えられる。また，緑泥石やスメクタイトについても，硫酸により溶解したと考えられる。

#### (3) B孔の変質帯区分

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メクタイトや方解石，アルカリ性変質



鉄が多量傾向にある。4年7ヶ月後との比較では、黄鉄鉄の同定量は+少量が目立ち、掘削直後よりも減少しており、同時に石膏が産生<sup>13)</sup> するようになり、黄鉄鉄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ばらしている。

以上のことから、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鉄が空気中の水分と接触するようになり、硫酸を産生して方解石を消費したと考えられる。

### 3.3.5 黄鉄鉄の多寡と経年劣化

#### (1) A孔

掘削直後のA孔の凝灰角礫岩コアについて、掘削時の黄鉄鉄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、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、黄鉄鉄の多寡とコアの劣化程度が対応している。A孔の自破碎溶岩のコアは、掘削直後のX線回折強度データは黄鉄鉄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い。

前述の黄鉄鉄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、黄鉄鉄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。

#### (2) B孔

掘削直後のB孔の自破碎溶岩コアについて、掘削時の黄鉄鉄の同定量と保管後の劣化状況を比較すると、劣化している部分7箇所は○多量～△中量、劣化していない部分1箇所では未検出となっている。B孔においてもA孔と同様、黄鉄鉄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。

以上の結果より、同地区の岩盤は、岩種や熱水変質の種類に関係なく、黄鉄鉄の多寡が経年劣化を規制していると考えられるが、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。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鉄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については、より慎重に行うことが望ましいといえる。

### 3.3.6 トンネルの排水構造と地山の関係

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連性について以下に考察した。

図-6にトンネル排水の標準断面を示す。トンネルの支保構造にインバートがある場合、岩盤とトンネル内部はインバートにより分離されているため、地山からの湧水、地下水および道路表面からの浸透水は、路盤下部の岩盤に接することなく中央排水部に到達する。しかし、インバートがない場合、地山からの湧水・地下水、道路表面からの浸透水、トンネル坑内からの空気および温度の影響を、より受けやすく、直接岩盤に接する環境にあるため、岩盤の経年劣化を引き起こす可能性がある。このため、インバートがない場合、路盤下部の地山岩盤に今回の調査地区のように熱水変質作用を受けた火砕岩類からなる岩盤が存在する場合、トンネルの経年的な変状に対して一層の注意が必要といえる。

### 3.4 完成トンネルの点検手法の検討

完成トンネルの地質データベースをもとに、57トンネルの施工記録や地質情報を整理し、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ための情報提供を目的として台帳を作成した。

図-7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、地質縦断面図<sup>14)</sup>、土被り厚さの他、トンネル施工時の主な情報として、掘削変位量、補助工法、支保パターン、変状(切羽崩壊と盤割れ)および湧水である。

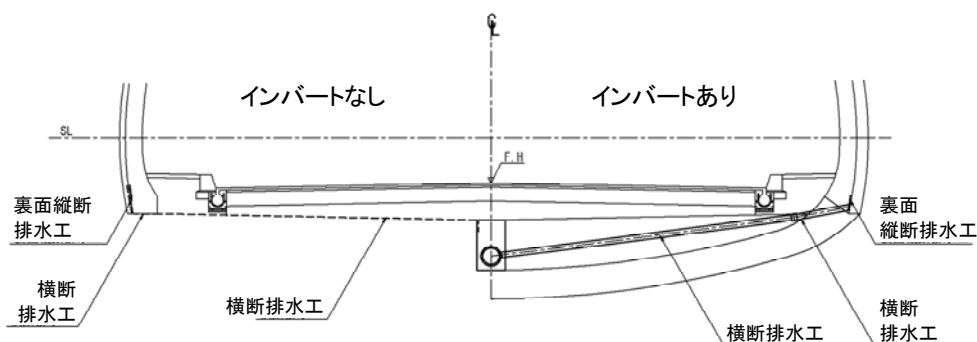


図-6 トンネル排水の標準断面<sup>5)</sup>



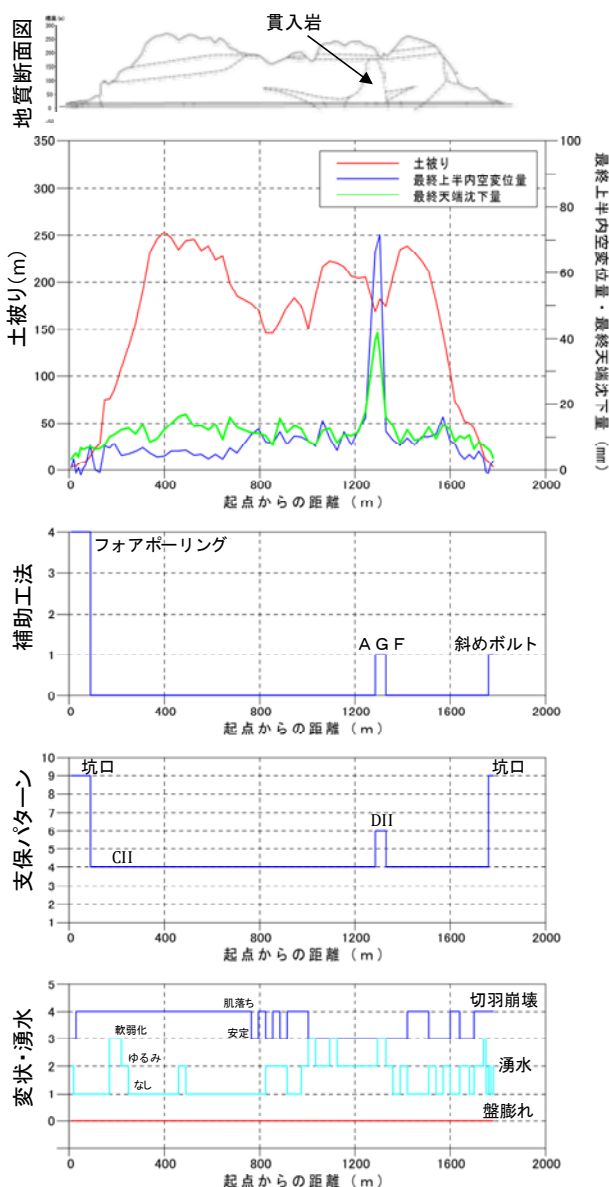


図-7 完成トンネルの地質情報を含めた点検台帳の例

図-7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においては、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、着目ができるといえる。また、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。

現状のトンネル点検<sup>15~19)</sup>においては、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。

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、早期に異常を検出し、対応できることが重要であるが、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ため、複数の情報をもとに、点検することが必要といえる。

今後は、作成した台帳をもとに、各トンネルの点検結果、例えば、覆工クラックのひび割れ発生率の経年変化や施工時の地質との対応などについて整理を進める予定である。

#### 4. まとめ

本研究で明らかになった知見は以下のとおりである。

- 1) 完成後に変状を生じたトンネルをモデル地として、その施工記録と地質状況の関係を整理した結果、天端沈下量の収束日数は、岩種の違いによって差のあることを確認した。
- 2) また、X線回折試験の結果、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<sup>20)</sup>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、トンネル施工時の地質調査で実施する先進ボーリング結果でのRQDと孔内弾性波速度は、現在の地山分類表<sup>2)</sup>における適用範囲が、地山評価の精度向上に向けて検討の余地のあることを確認した。なお、トンネル建設後にその事業における地質情報や施工記録を蓄積、再整理することは、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。
- 4) モデル地における調査・試験の結果をふまえて、北海道日本海沿岸の火山岩の地山で建設したトンネルの先進ボーリングコアについて、経年的な岩石の変化を分析した結果、岩盤の経年劣化を評価する場合、岩種

や変質作用の種類と程度を考慮する必要があることが示唆された。

- 5) また、黄鉄鉱の多寡がコアの劣化程度に対応していたことから、本調査地区のような地質地域では、黄鉄鉱の多寡でコアの経年劣化をある程度評価できると考えられる。
- 6) トンネルの支保構造にインバートのない場合、路盤下部の地山岩盤部は、坑内からの空気、地下水・湧水および温度の影響を、より受けやすい環境にある。このため、岩石の経年的な劣化についても配慮が必要な区間といえる。

## 5. おわりに

本調査では、トンネルの完成または供用後に生じる岩石の劣化の予測に向けた指標を明らかにするため、岩石の経年的な劣化機構について検討した。あわせて、このような時間依存性を有する劣化や変化を生じやすい岩石の分布と現状におけるトンネルの標準構造自体やその周辺環境との関連性について考察した。また、トンネル供用後に生じる岩盤の経年劣化を概略的に予測するには、従来の評価指標とあわせて、変質の種類・程度やX線回折試験で同時に確認できる鉱物の組み合わせを加味することが、有効な場合があることが示唆された。

今後は、トンネル施工時の調査・評価手法の構築に向けた検討を進めるとともに、完成トンネルにおける合理的な点検手法の構築に向けて研究を進めたい。最後に、本研究の実施にあたり、ご協力いただいた国土交通省北海道開発局の関係者に、記して厚くお礼申し上げます。

## 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），pp214-269，2003.
- 2) 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，pp183-188，2011.
- 3) 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，pp565-570，2013.
- 4) 北海道土木技術会トンネル研究委員会 NATM 分科会：<http://www.ejsd.net/tunnel/>
- 5) 国土交通省北海道開発局：道路設計要領，トンネル，2012.
- 6) 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.
- 7) 立見辰雄：鉱床母岩の変質作用，東京大学出版会，1977.
- 8) 吉村尚久：粘土鉱物と変質作用，地学団体研究会，2001.
- 9) 地質・土質調査成果電子納品要領（案），国土交通省，2008.
- 10) 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，pp17-22，2013.
- 11) 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，第26巻3号，pp19-25，1985.
- 12) 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，第39巻3号，pp261-272，1998.
- 13) 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，第43巻3号，pp134-142，2002.
- 14) 北海道土木技術会：北海道の道路トンネル第1～4集.
- 15) 日本道路協会：トンネル維持管理便覧，1993.
- 16) 国土交通省道路局国道課：道路トンネル定期点検要領（案）・同参考資料，2002.
- 17) 土木研究所トンネルチーム：道路トンネル変状対策工マニュアル（案），土木研究所資料第3877号，2003.
- 18) 建設コンサルタント協会近畿支部：公共土木施設の維持管理に関する研究委員会報告書，2012.
- 19) 国土交通省道路局：総点検実施要領（案）道路トンネル編・同参考資料，2013.
- 20) 例えば，土木学会：トンネル標準方書山岳工法，2006.

## 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)  
**Author** : ITO Yoshihiko  
KURAHASHI Toshiyuki  
OKAZAKI Kenji  
OBINATA Akihiko

**Abstract**: In FY2012, we performed our examinations of rocks and rock minerals on the test site of tunnel which caused time dependence deformation, and built a tunnel database to clarify factors of time dependence deformation. As a result of this study, analyzing the measurement data at the time of the construction depending on a geological feature contributes to the precision improvement of the tunnel evaluation, and the information at the time of the construction and the comprehensivization of the safety inspections of tunnel in consideration of a geological feature property of behind of tunnel lining are effective for the rational judgment of its inspections.

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