

# 変質安山岩の経年劣化と鉱物学的特徴 に関する考察

岡崎 健治<sup>1\*</sup>・丹羽 廣海<sup>2</sup>・村山 秀幸<sup>2</sup>・伊東 佳彦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸一条三丁目1-34）

<sup>2</sup>株式会社フジタ技術センター（〒243-0125神奈川県厚木市小野2025-1）

\*E-mail: 90185@ceri.go.jp

支保構造の完成後に盤ぶくれが発生し、縫い返しを実施したトンネルにおいて、その施工記録や地質調査結果をもとに、変状発生に関する地質状況と鉱物学的特徴を分析した。トンネルの主な地質は、熱水変質作用を受けた自破砕部を含むデイサイト、安山岩溶岩および火砕岩からなる。調査の結果、変状の発生区間では、比較的硬質な岩石であっても、時間の経過に応じて劣化や膨張が進行した。コアの経年観察の結果、比較的早期にコアを再観察することで、中長期的に劣化する範囲を特定できる場合のあることが示唆された。また、鉱物学的試験の結果、岩石の劣化や膨張の予測においては、従来の膨張性の判定とあわせて、岩石に含まれる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。

**Key Words :** tunnel, rock property, time-dependent behavior, mineralogical characteristics

## 1. はじめに

完成または供用開始から数年～数十年経過後のトンネルにおいて、盤ぶくれや側壁の押し出し等の変状が生じた事例が多数報告されている<sup>1)5)</sup>。このような変状が生じたトンネルでは、従来の膨張性の判定<sup>6)</sup>や掘削に伴う変位量の増加等の問題がなく施工されていても、時間依存性を有するような変状が生じる場合があり、その発生をトンネルの施工時や維持管理における早い段階で評価予測するための方法の構築が急務となっている。

従来このような変状の再現性や進展予測に関しては、内空変位量等の長期計測データに基づく地山の劣化モデルの作成や数値解析によって、対策効果等の検討が行われている<sup>7)</sup>。一方、時間依存性を有する変状の発生に対する地質的な素因や誘因についての検討事例は多くない。

これまで筆者らは、完成または供用開始後のトンネルで発生した変状の事例を収集し、その実態を整理した。その結果、時間依存性を有する変状の発生は、火山岩を地山とするトンネルで多いことを確認した<sup>8)9)</sup>。

時間依存性を有する変状のひとつの原因として、トンネル掘削に伴い現れる新鮮な岩盤は、応力解放、空気や地下水との接触により、酸化と飽和度の変化が繰り返し作用されることで、岩盤の潜在亀裂の顕在化、細片化および粉状化により強度低下が生じる。また、岩石に含ま

れる鉱物の組み合わせによっては、水酸化鉄や石膏の析出等の様々な現象<sup>10)12)</sup>が生じることで、劣化が進行、または、膨張する場合があります、これらが変状発生の誘因になることも考えられる。

本報告では、熱水変質を受けた安山岩質の地山で建設された北海道の道路トンネルの事例において、支保構造の完成後に変状が生じた区間を対象に、その施工時の計測データ、ならびに先進ボーリング調査<sup>13)</sup>の結果を整理するとともに、岩石コアを試料とした力学試験ならびに鉱物学的試験の結果から、時間依存性を有する変状との関係について考察した結果を述べる。

## 2. 調査概要

### (1) トンネルの地質と変状

#### a) トンネルの地質

本調査は、北海道の国道トンネル（延長3.0km）を対象とした。本トンネルの主な地質は、自破砕部を含むデイサイト、安山岩溶岩および火砕岩からなる（図-1）。

#### b) トンネルの変状

本トンネルでは、貫通直後に、貫通点近くの土被り厚が大きい2つの区間（図-1の黒枠部）で盤ぶくれが発生し、縫返しが行われた。変状の発生区間の地山は、とも

に熱水変質作用を受けており、多量のスメクタイトが確認されている。なお、変状の原因は、掘削に伴う周辺の緩みと粘土鉱物の膨張圧が複合的に作用したことによるものと整理されている。

## (2) トンネルの施工記録の整理

### a) 施工時の計測データ

トンネル施工時の計測データである掘削変位量、切羽観察記録、湧水量を基に、変状が生じた区間における施工時の情報を再度見直すことで、施工時に着目すべき点の抽出を試みた<sup>14)</sup>。

### b) 先進ボーリング調査の結果

先進ボーリング調査による地山分類の項目であるRQD(5)、準岩盤圧縮強度、地山強度比、地山弾性波速度(速度検層による値)、変形係数(孔内水平載荷試験による値)、亀裂係数、ならびにコアの状態および湧水量の項目を整理した。先進ボーリング調査は、施工時に切羽前方の地質の確認などを目的に実施され、トンネル施工の地質リスクの低減に寄与するとともに、掘削直前の岩石コアを試料とした力学試験の結果をもとに、再度、地山分類を行うことで、適切な支保の選定に活用されている。本調査では、先進ボーリング調査による変状発生兆候に関する情報の抽出を試みた。

## (3) 岩石の力学試験

### a) 岩石別の物理強度特性の整理

トンネル全線の先進ボーリングコアにおける超音波伝

播速度と一軸圧縮強さを岩種別に整理した<sup>15)</sup>。

### b) 一定時間経過後の岩石試験

変状の発生後、変状の原因究明のためにトンネル事業者が変状区間で実施したボーリングコアについて、変状区間と同種の岩石を対象に、ボーリングの掘削から587～699日経過した後(以下、経年後)におけるコアを試料として、超音波伝播速度、圧縮強度を測定し、掘削直後(掘削から9～10日後)の試験結果と比較することで、岩石の劣化の傾向について調べた。ここで、圧縮強度は、掘削直後の値が一軸圧縮試験による一軸圧縮強さ、経年後の値は点載荷試験による換算圧縮強度<sup>16)</sup>である。なお、経年後の岩石コアは、試験直前までブルーシートで覆い屋外で保管していた。

## (4) 岩石の鉱物学的試験

### a) コアの経年観察

変状の発生後、変状区間で実施されたボーリングコアについて、掘削直後からの経年的な状態の変化を観察し、岩石の劣化状況やその範囲の変化について分析した。

### b) 岩石の吸水膨張試験

変状区間で実施されたボーリング調査のコアについて、ハンマーで割れる比較的硬質なコアと、ボーリングの掘削から1週間後に劣化が進行してハンマーでボロボロに砕ける比較的軟質なコアを採取し、吸水膨張試験<sup>17)</sup>を行った。また、吸水膨張率を測定するとともに、X線回折試験によってスメクタイトの含有量を求めた。さらに、最大膨張応力と最大膨張応力に至るまでの日数の関係を

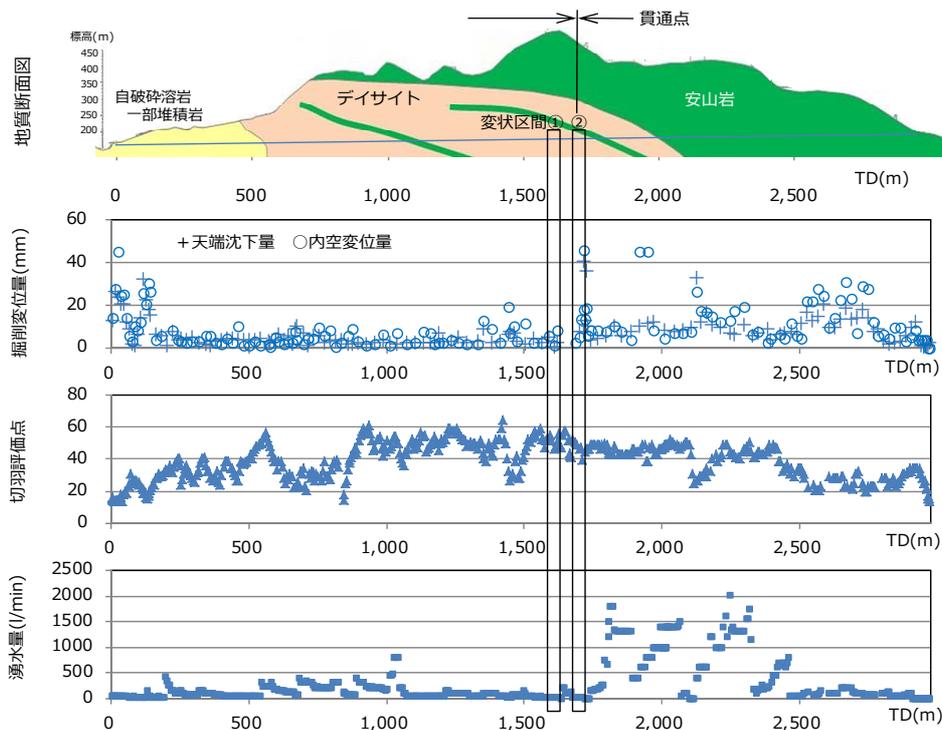


図-1 トンネルの地質断面図と施工時の計測データ<sup>14)</sup>

整理した。なお、岩石の一軸圧縮強さは、硬質で1～30MPa、軟質で1MPa程度である。

### c) X線回折試験

変状の発生区間を含む範囲で実施された先進ボーリングコアについて、膨張または非膨張の区分ごとに試料を採取し、X線回折試験を実施した。また、含有する鉱物を同定するとともに、石英とスメクタイトの回折ピークから強度比を求め、その強度比と同定した鉱物の組み合わせについて分析した。

## 3. 調査結果

### (1) トンネルの施工記録

#### a) 施工計測データ

図-1にトンネルの地質断面図、掘削変位量（上半最終内空変位量と最終天端沈下量）、切羽評価点および湧水量を示す。

掘削変位量は、トンネル全体の内空変位量が天端沈下量より大きい傾向にある。また、TD0～200とTD2,500～2,800で20～30mmを示すが、概ね10mm以下である。

変状区間における変状前の値は、変状区間②で40mmを超過するが、その前後の値と比べて大きな違いはみられない。また、切羽評価点は、変状区間の前後の値と比べて大きな違いはみられないことから、本トンネルの地質では、掘削変位量と切羽評価点によって、施工時に時間依存性を有する変状の発生を評価することは難しく、別の指標による評価法についての検討が必要といえる。

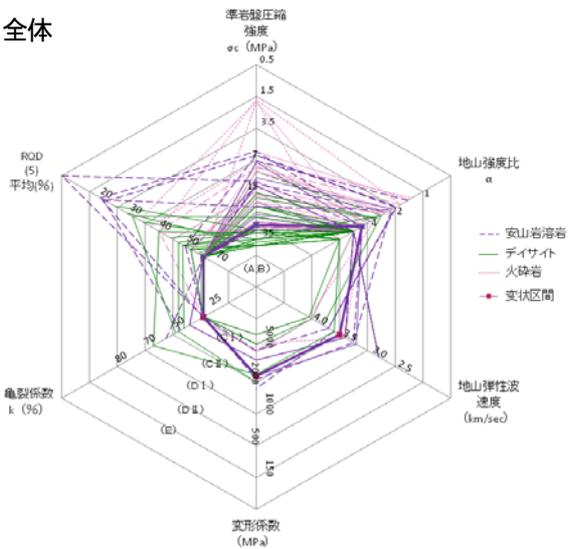
次に、切羽での湧水量は、デイサイトと安山岩の境界部周辺のTD1,800～2,300で1,500 (L/min) 以上が確認されているがTD1,800付近で低下した。また、同箇所周辺では、先進ボーリング調査でも2,000 (L/min) 以上の湧水が確認されている(図-2(c))。この箇所は、変状区間②の近くであり、デイサイトと安山岩溶岩の境界付近であり、変状の発生に湧水の存在が関与していると考えられる。

#### b) 先進ボーリング調査の結果

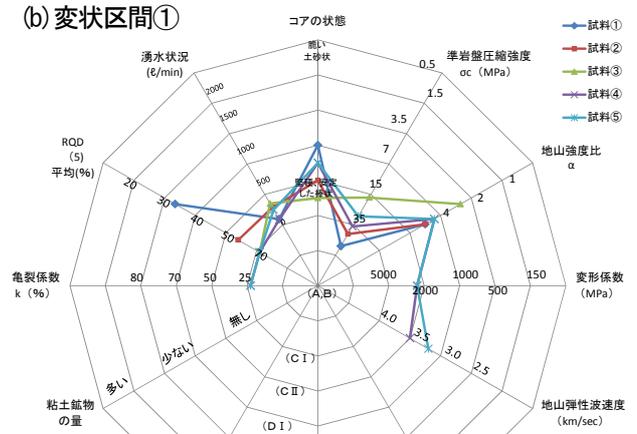
図-2(a)、(b)および(c)に施工時の先進ボーリング調査による地山分類の項目であるRQD(5)、準岩盤圧縮強度、地山強度比、地山弾性波速度、変形係数および亀裂係数の関係、また、上記6項目にコアの状態、湧水量を追加した変状区間①と②の結果を試料別に示す。

地山分類の結果、(a)全体(上記6項目)では、安山岩溶岩でRQD(5)、地山強度比が小さく、火砕岩で準岩盤圧縮強度が小さい。一方、デイサイト(図中の太線)は、レーダー図の比較的中央側にプロットされており、他の岩種と比べても良好な地山として評価される。このことは、現在の先進ボーリング調査による地山分類の項目では、時間依存性を有する変状の発生を予測評価すること

#### (a) 全体



#### (b) 変状区間①



#### (c) 変状区間②

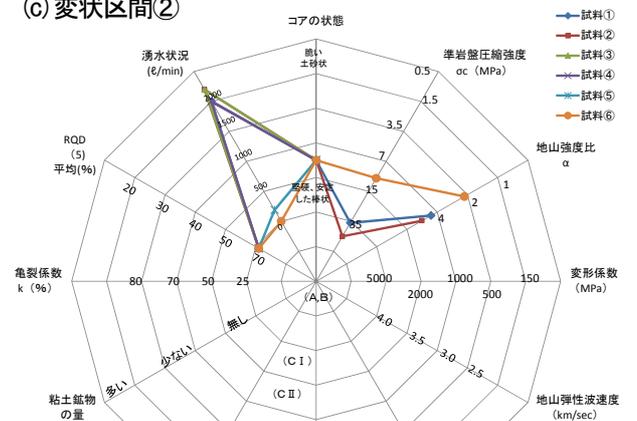


図-2 先進ボーリング調査による地山分類

は容易でなく、現状の項目以外の指標の適用に関する検討が必要といえる。

次に、(b)変状区間①と(c)変状区間②において、コアの状態(脆い土砂状～堅硬、安定した棒状)と湧水量の項目を追加して整理した。変状区間①では、変状を生じていない区間の評価と比べて大きな違いはみられない。また、変状区間②では、同様に変状を生じていない区間の評価と比べて大きな違いはみられないが、湧水量が

2,000 (L/min) を超過している。両区間での地山分類の項目に対する結果は異なるが、本調査の事例では少なくとも湧水量に着目することが、変状の発生防止の検討に向けた情報となることがわかった。

## (2) 岩石の力学試験

### a) 岩石別の物理強度特性の整理

図-3に岩石別の超音波伝播速度と一軸圧縮強さの関係を示す。デイサイトと火砕岩の超音波伝播速度は1.5～4.2km/s、一軸圧縮強さは0.5～100MPaである。一方、安山岩溶岩の超音波伝播速度は4.0～5.5km/s、一軸圧縮強さは50～210MPaであり、デイサイトと火砕岩よりも高い傾向にあり、同じ熱水変質を受けた安山岩質の地山でも岩種によっては、異なる強度特性を有することを確認した。また、変状区間のデイサイト（図中の□印の値）の超音波伝播速度は3.2～3.8km/s、一軸圧縮強さは30.9～46.3MPaであり、変状前の評価ではC I 相当に該当する。このように、施工時の岩石試験の結果が良好な場合、時間依存性を有する変状の発生を評価予測することは容易でないことがわかった。

### b) 一定時間経過後のコアの岩石試験

図-4に非変状区間と変状区間における掘削直後と経年後の超音波伝播速度と一軸圧縮強さの関係を示す。

変状区間における掘削直後と経年後の超音波伝播速度の平均値は3.4km/sと2.8km/sであり、概ね80%に減少した。また、一軸圧縮強さの平均値は40.3MPaと4.5MPaであり、概ね10%に減少した。ただし、経年後の試験試料は屋外で、温度や湿度が管理された状態で保管されていないが、周辺環境の変化等の劣化促進要素が加味されることで物理強度特性が低下したと考えられる。また、熱水変質作用を受けた程度や状態によっては、時間の経過とともに岩石は脆弱化し、乾燥収縮等による亀裂の発生や粉状化等の劣化を生じていた。このため、通常の岩石試験に向けた供試体を作成できない状態である場合には、従来の膨張性を判定する指標や浸水崩壊度試験による評価の他に、経年的な岩石の状態や変化を観察する方法も場合によって有効といえる。

## (3) 岩石の鉱物学的試験

### a) コアの経年観察

写真-1に変状の発生後に実施されたボーリングコアの掘削直後と、その経年的なコアの状態の変化を示す。

コア観察の結果、コアは変状箇所から採取されたことから、掘削直後にはすでに劣化が進行している箇所が存在した。また、1週間後の再観察時には劣化の範囲が拡大している。それから586日後には、亀裂沿いや掘削から1週間後に劣化が認められた箇所とその周辺で劣化の範囲が進行している。ただし、この範囲は、概ね1週間

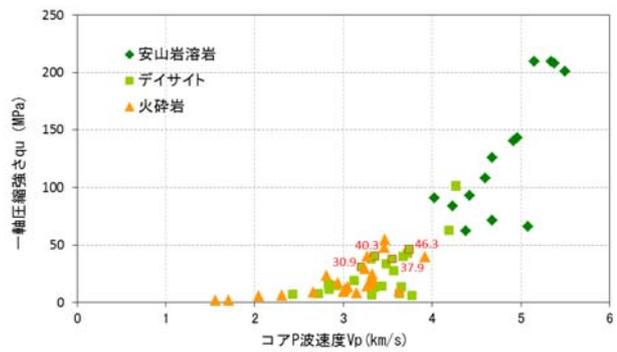


図-3 岩石別の超音波伝播速度と一軸圧縮強さ

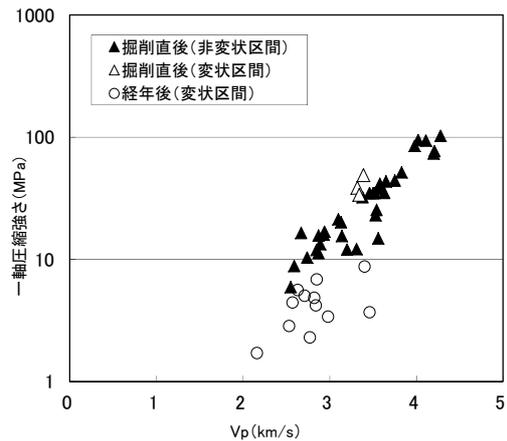


図-4 掘削直後と経年後の岩石試験結果



写真-1 ボーリングコアの掘削直後とその経年変化  
(写真上：掘削1週間後、写真下：掘削から586日後)

後に劣化を確認した範囲と同程度であったことから、比較的早期にコアを再観察することで、中長期的に劣化する範囲を特定できる場合のあることが示唆された。

### b) 岩石の吸水膨張とスメクタイト含有量

表-1, 2に岩石の吸水膨張試験の結果、スメクタイト

表-1 岩石の吸水膨張試験の結果

岩石の状態	最大膨張応力 (KN/m <sup>2</sup> )	最大膨張応力に至るまでの日数	日数/応力 × 100
軟質	294	3	1
	464	115	25
	176	50	28
	14	3	21
	40	3	8
	44	3	7
	16	5	31
平均値	150	26	17
硬質	205	26	13
	239	135	56
	259	30	12
	531	70	13
	4	3	75
	5	3	60
	194	30	15
	12	5	42
	6	5	83
	3	3	100
平均値	146	31	47

表-2 スメクタイト含有量と膨張率

岩石	スメクタイト含有量 (wt/%)				膨張率 (%)	
	非変状区間		変状区間			
デイサイト	20	(平均値)	31	(平均値)	10.4	(平均値)
	21		37		-	
	15		32		10.6	
	-	19	23	26	6.4	8.3
	-		31		18.3	
	-		16		3.6	
	-		13		0.6	
火砕岩	8~22	13(7)	-	-	-	-
安山岩溶岩	4~13	6(7)	-	-	-	-

( )内の数字は試料数

含有量 (以下, Sm) と膨張率を示す。

吸水膨張試験の結果, 試験に供した試料については, 岩石の硬軟の状態に関わらず, 膨張した。最大膨張応力と最大膨張応力に至る日数を比べると, 軟質と硬質では大きな差はみられないが, 日数/応力の値は, 硬質で47, 軟質で17と異なる。このことから, 変状の発生区間における比較的硬質な岩石は劣化や膨張は進行するが, 一定の応力状態に至るまでの時間は比較的長く要する。

次に, 非変状区間における岩石別のSm含有量を整理した。また, 非変状区間と変状区間の試験結果の対応, ならびに変状区間における膨張率についても整理した。

非変状区間における岩石別のSm含有量は, デイサイト>火砕岩>安山岩溶岩の順がみられ, いずれも現状の膨張性判定の指標に示される値である20wt%未満である。一方, 変状区間におけるデイサイトのSm含有量の平均値は26wt%を示す。また, 膨張率はSm含有量が30wt%を超える場合, 10%を超える値を示す。ただし, Sm含有量は, 非変状区間の岩石でも20wt%を超えているが, Sm含有量が高くても変状の発生に至らない場合があり, Sm以外の何らかの要因が変状発生に寄与している可能性がある。

#### c) X線回折試験

図-5に変状区間の岩石のX線回折試験結果を示す。

X線回折試験で同定した鉱物は, Cb:炭酸塩鉱物 (Cal:方解石, Dol:ドロマイト, Sid:菱鉄鉱), Si:珪酸塩鉱物 (Q:石英, Tri:トリデマイト, Cri:クリストバライト),

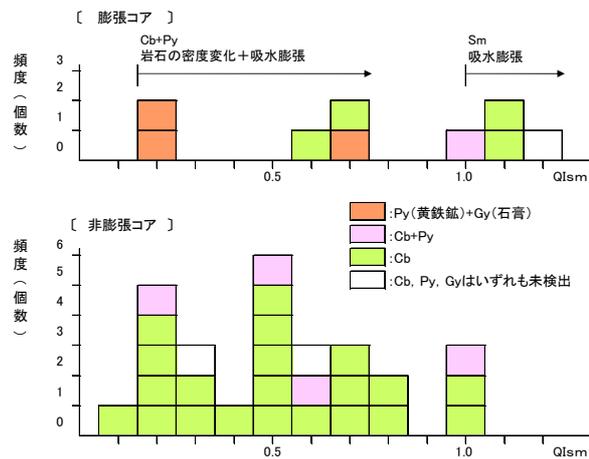


図-5 変状区間の岩石のX線回折試験結果

Sf:硫化鉱物 (Py:黄鉄鉱), Su:硫酸塩鉱物 (Gy:石膏, Roz:ローゼン石) およびCl:粘土鉱物 (Sm:スメクタイト) である。このうち石英のX線回折ピークを100とした場合のSmのピークを強度比 (Qism) として求めた。Qismは0.1~1.2の範囲である。試料は先進ボーリングコアから膨張コア9試料, 非膨張コア27試料を採取した。

同定した鉱物は, 従来の研究<sup>10-12)</sup>で示されているPy, CbおよびGyに着目し, その組み合わせ, コアの膨張の有無, Qismの関係について整理した。その結果, 非膨張コアは, CbとPyがともに確認されてもQismが1.0以下である。一方, 膨張コアは, Qismが1.0未満でもPyとGyが確認される試料では膨張していることがわかる。このことは, 岩石にPyとCbが含まれる場合, 掘削等による環境変化等に伴い, 元素の溶脱や本調査では二次的にGyが生成されていることで, 岩石自体の密度が変化することで劣化し, 物理強度特性が低下することで, Sm含有量が少なくても膨張に至ることが推測される。

#### 4. まとめ

本調査の結果をまとめると次のとおりである。

- 1) 本トンネルでは, 掘削変位量と切羽評価点によって, 時間依存性を有する変状の発生を施工時に評価予測することは容易でなく, 新たな評価指標についての検討が必要である。
- 2) なお, 先進ボーリングによる地山分類では, 時間依存性を有する変状に対して, 湧水の状況に着目することが有効な場合がある。
- 3) また, 変状の発生区間では, 比較的硬質な岩石であっても, 時間の経過に応じて劣化や膨張が進行した。
- 4) コアの経年観察の結果, 比較的早期にコアを再観察することで, 中長期的に劣化する範囲を特定できる

場合のあることが示唆された。

- 5) 鉱物学的試験の結果、岩石の劣化や膨張の予測においては、従来の膨張性の判定とあわせて、岩石に含まれる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。

## 5. おわりに

本調査では、支保構造の完成後に変状が生じたトンネルにおいて、その施工記録や地質調査結果をもとに、変状発生に関する地質状況と鉱物学的な特徴を整理した。

本トンネルは地質状況に応じて適切に建設されたが盤ぶくれが生じた。盤ぶくれは、掘削に伴う周辺地山の緩みと粘土鉱物の膨張性が複合的に作用したことで生じており、施工時に変状発生の予測や評価するための新たな指標について検討が必要といえる。

今後、このような事例や変状を未然に防止するため、劣化の状況を短期、長期的に予測するための試験や分析、評価方法に関する検討をさらに進めていきたい。

**謝辞：**本研究成果の取りまとめにあたっては「トンネルの変状調査計測技術に関する検討委員会」（委員長：北海道大学大学院児玉淳一准教授）から多くの貴重なご意見を賜りました。また、現地調査にあたり、国土交通省北海道開発局の関係各位に多大なるご協力を賜りました。ここに深謝致します。なお、本研究は、国土交通省建設技術研究開発助成制度における「変状を伴う老朽化トンネルの地質評価・診断技術の開発」の補助金で実施した。

## 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) 土木学会：山岳トンネルのインバート，トンネルライブラリー第25号，2013.

- 3) 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.
- 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) 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.
- 6) 土木学会：トンネル標準示方書山岳工法，2006.
- 7) 松長 剛，野城一栄，朝倉俊弘：地山劣化モデルによるトンネル変状の進展予測に関する研究，土木学会論文集C，Vol.65，No.2，pp.467-479，2009.
- 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，第23回トンネル工学研究発表会報告集，pp.23-31，2011.
- 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論文集，pp.565-570，2013.
- 10) 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，pp.19-25，1985.
- 11) 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，pp.261-272，1998.
- 12) 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，pp.134-142，2002.
- 13) 北海道開発局：道路設計要領第4集トンネル，2014.
- 14) 岡崎健治，大日向昭彦，伊東佳彦，丹羽廣海，村山秀幸：建設後に変状を生じたトンネルにおける施工時の計測データに関する考察，平成26年日本応用地質学会研究発表会論文集，pp.101-102，2014.
- 15) 岡崎健治，大日向昭彦，伊東佳彦，丹羽廣海，村山秀幸：熱水変質作用を受けた岩石コアにおける物理強度特性の変化に関する検討，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，pp.419-420，2014.
- 16) 河野勝宣：熱水変質岩の点載荷強さ試験に基づく一軸圧縮強さの推定，北見工業大学，2012.
- 17) 地盤工学会（JSG2121）：岩石の吸水膨張試験.

## CONSIDERATION OF THE MINERALOGICAL CHARACTERISTICS AND TIME-DEPENDENCE BEHAVIOR OF THE HYDROTHERMAL ALTERATED ANDESITE

Kenji OKAZAKI, Hiroumi NIWA, Hideyuki MURAYAMA and Yoshihiko ITO

Characteristics of minerals and the geology of the tunnel are investigated. Because of the heaving as a tunnel deformation was occurred after completion of tunnel support structure. The mainly geology of this tunnel is dacite, pyroclastic rock and andesite lava. These rocks have been altered by hydrothermal alteration. As a result of the boring core observation of long-term, degradation has progressed over time even in hard rock. Several observation of the boring core of short-term was effective to identify a section of the core is deteriorated. As a result of mineralogical test, the information of the combination of minerals is effective for the prediction of swelling and the deterioration of the rock has been indicated.