

トンネルの地質性状に起因する変状と その現象解明に向けた検討事例

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム ○岡崎 健治
(株) フジタ 技術センター 丹羽 廣海
札幌開発建設部 滝川道路事務所 計画課 安藤 彰

支保構造の完成後に盤ぶくれが発生したトンネルにおいて、その施工計測データや地質調査結果をもとに、変状区間における地質状況と岩石に含有する鉱物の特徴を分析した。

調査分析の結果、変状区間では、比較的硬質な岩石であっても、時間の経過に応じて劣化が進行した。また、ボーリング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可能性を示した。その他、岩石の劣化の予測においては、従来の膨張性地山の判定とあわせて、岩石に含有する鉱物の組み合わせを加味することが有効となる場合があることを示した。

キーワード：トンネル、地質、熱水変質、変状、時間依存性

1. はじめに

供用中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場合、その補修や対策に多大な費用や労力を要する。このような時間依存性を有する変状は、従来の膨張性地山の判定¹⁾や掘削に伴う変位量増加の問題が特にならない場合でも発生しており^{2~6)}、トンネルの施工時ならびに供用中の維持管理における早い段階でその発生を評価、予測するための方法の構築が急務となっている。

そこで本調査では、施工時に盤ぶくれが生じた北海道の国道トンネルの事例において、施工時の計測データおよび先進ボーリング調査⁷⁾の結果を岩種別に再整理するとともに、一定時間経過後のボーリングコアの観察、岩石試験ならびに鉱物分析を実施した。それらの施工時の調査結果とを比較し、時間依存性を有する変状の発生を予測するための着目すべき点を考察した。

2. 調査方法

(1) トンネルの地質と変状

本トンネルの主な地質は、自破碎部を含むデイサイト、安山岩溶岩および火砕岩である。

本トンネルでは、支保構造の完成から1~2カ月後に、貫通点周辺の2区間（後述する図-1(a)の①：起点側のTD1, 588~1, 617m区間と②：終点側のTD1, 702~1, 730m区

間で盤ぶくれが生じ、インバートが計測開始から37日間で101mm隆起した。この変状は、中~アルカリ性の熱水変質を受けたデイサイトの分布区間で発生した。変状は、掘削に伴う周辺地山の緩みと粘土鉱物による吸水膨張圧が複合的に作用したことが発生原因と報告されている⁸⁾。一方で、一般に岩石に黄鉄鉱や方解石等の炭酸塩鉱物が含まれる場合、トンネルの掘削に伴う地山内の環境変化等によって元素の溶脱や二次的に石膏等の硫酸塩鉱物が生成されることで、岩石自体の密度変化や劣化が生じ、物理強度値が低下が生じることが報告^{9)~11)}されているが、時間依存性を有する変状の発生原因との関係は明らかにされていない。

(2) トンネル施工時の計測データ整理

本報告では、はじめにトンネル全体（延長2,995m）の計測データのうち、施工時の支保パターン、掘削時の変位量（最終天端沈下量と最終内空変位量）、切羽評価点および湧水量の関係を比較した。

次に、切羽前方の地質の確認と地山分類を目的に実施した先進ボーリング調査の結果に基づく支保パターン、RQD(5)、地山強度比、コアの一軸圧縮強さおよび湧水量の関係を比較した。これらの計測データをもとに変状の発生に関わる情報や施工時に着目すべき点を抽出した。

(3) ボーリングコアの観察と分析

a) コア観察

変状区間におけるボーリングコアの劣化状況やその範囲を明らかにするため、掘削直後（掘削から9~10日後）とコアの掘削から一定時間が経過した後（以下、経

年後：掘削から587～699日後）の変化を観察した。なお、経年後のコアは、観察直前までブルーシートで覆い屋外で保管していた。コアの産状を観察して、硬質な棒状（ハンマーで金属音）、中硬質（ハンマーで容易に割れる）、軟質（ハンマーでポロポロに砕ける）および粘土状まで4段階に劣化程度を区分した。そのうち、軟質～粘土状に区分できるものを劣化が進行した区間とした。

b) 物理強度試験

非変状区間と変状区間における経年後のコアの圧縮強さ、超音波伝播速度および吸水率を測定し、掘削直後の試験結果と比較した。それをもとに岩石の状態の変化や劣化の割合について調べた。なお、圧縮強さは、掘削直後のコアでは一軸圧縮試験による値であるが、経年後のコアは劣化により試料整形が難しいことから点載荷試験による換算圧縮強度²⁾とした。

c) 鉱物分析

非変状区間と変状区間における経年後のコアを試料として、X線回折試験ならびにスレーキング試験を実施した。X線回折試験では含有鉱物を同定するとともに、スメクタイト含有量を内部標準法により定量した。あわせて、石英の回折ピークに対するスメクタイトの回折ピークの比率（石英指数：QISm）を求め、劣化の有無と鉱物との関係について分析した。石英指数（QISm）は、多くの岩石に普遍的に含まれる石英を標準として、その他の鉱物含有量の程度の目安を示す指標であり、スメクタイトの石英指数（QISm）は石英に対してスメクタイトがどの程度含まれているかの目安を示す指標となる。なお、石英指数（QISm）は石英のピーク強度100に対する値として示している。また、変状区間のデイサイトについて、コアの吸水膨張試験を行い、吸水膨張率、吸水膨張応力および吸水膨張応力の増加が収束するまでの日数との関係を分析した。

3. 調査結果

(1) トンネルの施工計測データ

図-1(a)～(j)にトンネルの地質断面図、施工時の支保パターン、先進ボーリング調査による支保パターン、掘削変位量、切羽評価点、切羽湧水量、RQD(5)、地山強度比、コアの一軸圧縮強さおよび先進ボーリング調査での湧水量を示す。

まず、設計時と施工時ならびに先進ボーリングによる支保パターンを比べると、安山岩の分布区間では、設計時よりも構造的に上位の支保パターンで施工されている。このことは、自破碎溶岩（一部堆積岩）やデイサイトの分布区間より、掘削変位量が大きいこと、また、RQD(5)

が小さいことが理由と考えられ、変状は発生しておらず地山の評価は妥当であったといえる。一方、デイサイトの分布区間では、起点側では構造的な上位に変更され、概ね先進ボーリングの評価に基づいて施工された。

図-1(a)の①と②の2箇所の変状区間は当初CIIで施工されたが、盤ぶくれが生じ、インバートが37日間で101mm隆起した。インバート半径の縮小と縫い返しを実施された。このため、従来の地山評価では、短期に変状に至る岩石の評価は可能であるが、時間依存性を有する変状に対する評価は十分ではないと考えられる。

次に、非変状区間と変状箇所における、RQD(5)、切羽評価点、一軸圧縮強さ、地山強度比を比べると、特に大きな違いは見当たらなかった。

変状区間②では先進ボーリング時の湧水量が多かったが、施工時の湧水は周囲と比較してもそれほど多くはなかった。また、先進ボーリングコアの観察においても、前後と較べて特に目立った変化は認められなかった。一方、掘削時の変位量は、トンネル全体では、内空変位量が天端沈下量より大きい傾向にある。TD0～200m区間とTD2, 500～2, 800m区間で20～30mmを示すが、概ね10mm以下である。変状区間（変状前）の値は、変状区間②で40mmを超過する断面はあるが、その前後の値と比べて大きな違いはみられなかった。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かった。

以上のことから、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のは難しく、時間の経過に応じて変化を有する状況を把握できる新たな指標が必要である。

(2) コアの経年変化

写真-1に変状の発生後に実施したボーリングコアの掘削直後とその経年後のコアを示す。採取した掘削時のコアには、すでに劣化していた箇所が認められた。さらに、掘削から1週間後の再観察時には、劣化の範囲が拡大していた。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た。ただし、この範囲は、概ね1週間後に劣化を確認した範囲と同程度であった。このため、1週間程度を目途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可能性がある。

(3) 物理強度特性の変化

図-2、表-1にデイサイトの分布区間における非変状区間と変状区間の掘削直後と経年後の一軸圧縮強さ、弾性波速度および吸水率、各試験結果の平均値を示す。なお、経年後の結果は、試験用に試料整形が可能であった比較的良好なコアの値である。

まず、各試験結果を平均値によって比較すると、非変状区間の掘削直後と経年後の圧縮強さは34.8MPaから13.1MPaに変化し、掘削直後から概ね60%減少した。一

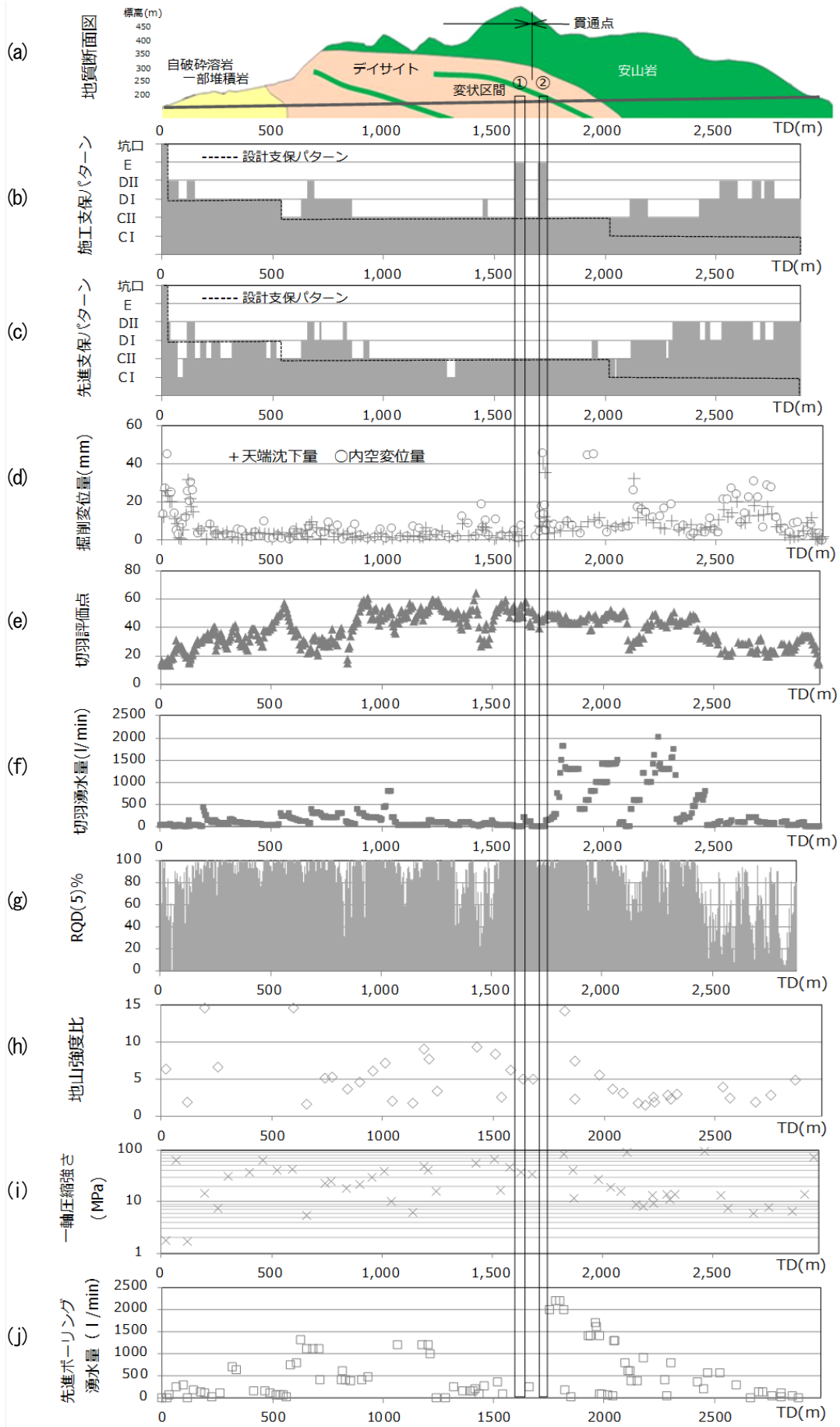


図-1 トンネルの施工計測データ^{13)~14)}



写真-1 ポ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)

方、変状区間では40.3MPaから4.5MPaに変化し、掘削直後から概ね90%減少した。

次に、非変状区間の掘削直後と経年後の吸水率は9.6%から7.9%に変化し、掘削直後から概ね20%減少した。変状区間では9.0%から9.8%に変化し、掘削直後から概ね10%増加した。

最後に、非変状区間の掘削直後と経年後の弾性波速度は3.4km/sから3.1km/sに変化し、掘削直後から概ね10%減少した。変状区間では3.4km/sから2.8km/sに変化し、掘削直後から概ね20%減少した。

以上のように、時間の経過に応じた物性値の変化と変化の割合は、非変状区間よりも変状区間で大きいことがわかった。ただし、経年後の試料は屋外で保管されており、気温や湿度等の劣化促進要素が加味されたことで物理強度特性が低下したとも考えられる。さらに、試料採取箇所の土被り厚さは200~330mであり、応力開放の影響を受けていることが予測される。また、熱水変質作用を受けた程度によって、時間の経過とともに岩石は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て供試体を作成できない場合も多く、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、経時的な岩石の状態や変化を観察することも有効である。

(4) コアのス멕タイト含有量と吸水膨張率

図-3 に変状発生後における変状区間のデイサイトの

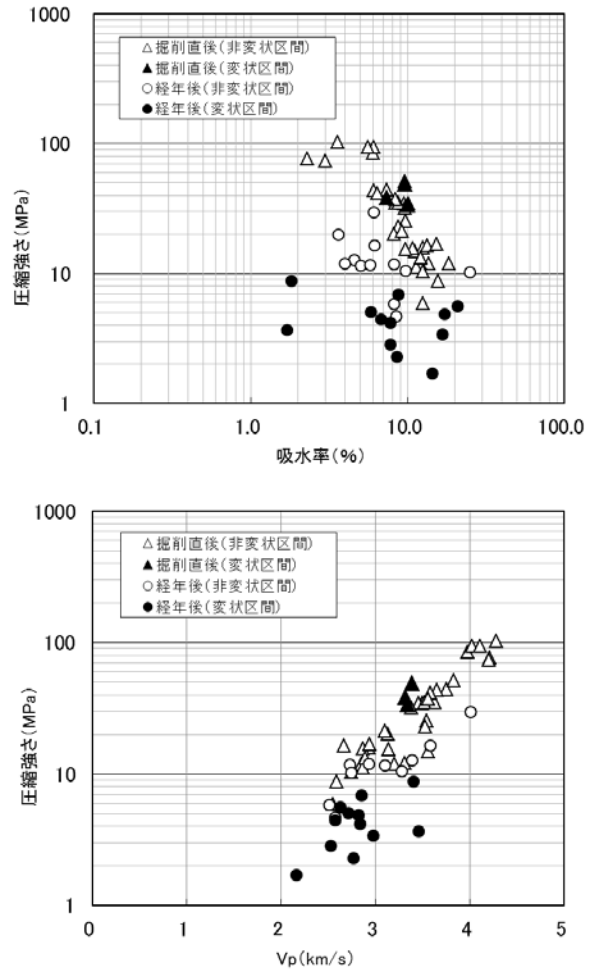


図-2 掘削直後と経年後の岩石試験結果

表-1 掘削直後と経年後の岩石試験結果の平均値

試験項目	非変状区間		変状区間	
	掘削直後(34)	経年後(12)	掘削直後(3)	経年後(12)
吸水率(%)	9.6	7.9	9.0	9.8
弾性波速度Vp(km/s)	3.40	3.10	3.40	2.80
圧縮強さ(MPa)*	34.8	13.1	40.3	4.5

*経年後は点載荷試験による値

()内は供試体数

X線回折試験で同定した鉱物のうち、Cb:炭酸塩鉱物 (Cal:方解石、Dol:ドロマイト、Sid:菱鉄鉱)、Py:黄鉄鉱および Gy:石膏の存在の有無と石英指数(QISm)との関係をコアの膨張の有無別に示す。

分析の結果、石英指数(QISm)は0.1~1.2の範囲である。劣化コアにおいては、ス멕タイトの石英指数(QISm)が1.0以上を示すものが9試料中4試料と比較的多い傾向にある。劣化コアのなかで石英指数(QISm)が1.0未満の試料はス멕タイトが比較的少ないにもかかわらず劣化を生じていることになるが、5試料中3試料にCb+Pyが検出されている。Pyは化学変化によりGyに交代することがあり、その際に密度変化、すなわち体積の膨張を伴うことが知られている^{9)~11)}。こうした密度変化はコアの劣化に寄与している可能性がある。一方

で、非劣化コアでもPyがいくつか検出されているが、同時にアルカリ性のCbを含むためにPyからGyへの化学変化が進みにくく、その結果として体積変化が抑制されている可能性がある。

表-2 にトンネルの非変状区間と変状区間から採取したコアのX線回折試験によるスメクタイト含有量、吸水膨張試験およびスレーキング試験の結果を示す。

非変状区間のスメクタイト含有量は、デイサイト変状区間>デイサイト非変状区間>自破碎溶岩>安山岩溶岩の順であり、安山岩溶岩以外は、いずれも膨張性判定の指標に示される 20wt%を超えるものが多い。また、変状区間におけるデイサイトのスメクタイト含有量の平均値は 30wt%を超える場合がある。

吸水膨張率の測定は、変状区間で実施した。スメクタイト含有量が少ない場合、吸水膨張率は小さい傾向にあるが、スレーキング区分が 4（全体が泥状化）となる場合が多い。ただし、スメクタイト含有量は、現状の膨張性判定の指標に示される 20wt%を超えるが、非変状区間における岩石でも 20wt%を超える値を確認できることから、スメクタイト含有量が高くても変状の発生に至らない場合がある。すなわち、変状の発生にはスメクタイト含有量だけではなく、その他の要因が複合的に寄与していることが推察される。

(5) 吸水膨張応力と発現時間

図-4に非変状区間のデイサイトの吸水膨張試験による最大膨張応力と膨張応力の増加が収束するまでの日数の関係を示す。

最大膨張応力と日数の関係には、①最大膨張応力が小さく日数が少ないケース、②最大膨張応力が大きく日数も多いケースおよび③その中間を示すケースに区分できる。ケース①は膨張応力が少なく短期に収束するが、ケース②と③では、長期に膨張応力が作用することになる。そのため、トンネル掘削直後に問題がなくても、時間の経過に応じて変状に至る可能性が考えられる。

以上のことから、時間の経過に応じて変化する岩石の特徴を評価するための指標の構築が必要である。

4. まとめと今後の課題

本報告では、支保構造の完成後に、時間依存性を有する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把握するための調査分析を行い、以下の知見を得た。

- 1) 本トンネルの変状の発生区間における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、新たな評価指標が必要である。

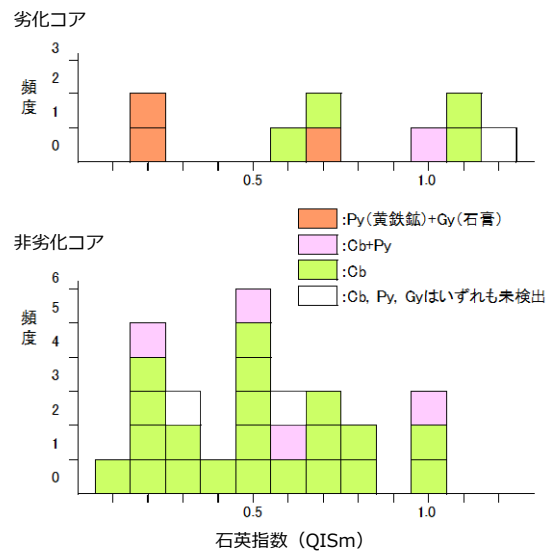


図-3 変状区間の岩石のX線回折試験結果

表-2 鉱物分析の結果

地質	TD(m)	非変状/変状	スメクタイト含有量 (wt%)	膨張率 (%) 【-:未実施】	スレーキング区分
自破碎溶岩	603	非変状	20	—	2
	614	非変状	21	—	2
	1,100	非変状	15	—	0
デイサイト	900	非変状	13	—	0
	950	非変状	12	—	0
	1,000	非変状	11	—	1
	1,050	非変状	10	—	0
	1,150	非変状	12	—	0
	1,200	非変状	22	—	0
	1,250	非変状	8	—	0
	1,606	変状	31	10.4	4
	1,606	変状	23	6.4	4
	1,606	変状	37	—	4
安山岩溶岩	1,606	変状	31	18.3	4
	1,711	変状	32	10.6	4
	1,711	変状	16	3.6	4
	1,711	変状	13	0.6	1
	1,300	非変状	4	—	0
	1,350	非変状	4	—	0
	2,190	非変状	4	—	0
	2,230	非変状	13	—	0
2,280	非変状	8	—	0	
2,330	非変状	5	—	0	
2,400	非変状	4	—	0	

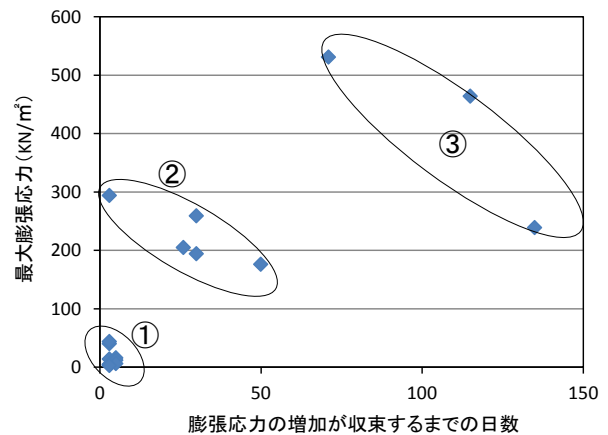


図-4 岩石の吸水膨張試験の結果

- 2) 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。ゆえに、先進ボーリングによる地山分類により、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、時間の経過に応じて変化する岩石の特徴を評価するための指標の構築が必要である。
- 3) コアの経年観察の結果、1週間程度を目途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可能性がある。
- 4) 鉱物分析の結果、岩石の劣化や膨張の予測において、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であることがある。今後は、時間依存性を有する変状を未然に防止するため、岩石の劣化を短期または中長期的に予測する試験や評価方法の構築に向けて検討を進めていきたい。

謝辞：本調査のとりまとめにあたり「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。ここに記して深謝致します。

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：トンネル標準示方書山岳工法，2006.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 北海道開発局：道路設計要領第4集トンネル，2014.4.
- 8) 佐々木隆，宇治川徳夫，石黒聡（2013）：熱水変質軟弱層による施工中の盤膨れを縫返し工で克服，トンネルと地下，Vol.44，No.11，pp.7-15.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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，2012.
- 13) 伊東佳彦，岡崎健治，大日向昭彦，村山秀幸，丹羽廣海：先進ボーリングコア情報によるトンネルの時間遅れ変状機構に関する考察，平成26年日本応用地質学会研究発表会論文集，pp.99-100，2014.
- 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.