

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

井上豊基，大日向昭彦

【要旨】

本研究では、トンネルの時間遅れを伴う変状の要因の解明に向け、変状の要因調査、モデル地での調査・試験を実施した。変状事例を分析した結果、施工中に変状対策を講じたトンネルにおいて、再び変状が発生したケースが存在した。変状発生までの年数は0～24年であり、中長期的に変状が生じるのは火山岩・火砕岩を地山とするトンネルで多かった。火山岩を試料とした鉱物学的試験の結果、経時的な岩石劣化に伴い含有鉱物に変化することを確認した。また、完成トンネルの地質データベースを構築し、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活用可能であることが判明した。

キーワード：トンネル，時間遅れを伴う変状，地山評価

1. はじめに

北海道をはじめとする東北日本には、熱水変質作用を受けた火山砕屑岩類や堆積軟岩が広く分布する。そして、このような地質の分布地域で建設されたトンネルで、完成後に変状（路面の盤ぶくれや覆工の押し出し等）が発生する事例が多数報告されている。このようなトンネル完成後の変状は、建設時に対応できないこと、またその補修・対策では通行規制を伴うことから、地域社会の安全・安心、利便性および対策コストなどの観点から大きな課題となっている。

そこで、本研究では、トンネルの調査や施工時ににおいて、時間遅れを伴う変状を正確に予測するための調査・評価法や完成後のトンネルにおいて、時間遅れを伴う変状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、平成 23 年度は、時間遅れを伴うトンネル変状の要因調査、モデル地における調査・試験を行うとともに、完成トンネルの地質データベースを構築した。以下に、本研究の成果を報告する。

2. 研究方法

2.1 時間遅れを伴うトンネル変状の要因調査

公表されているトンネルの変状事例に関する文献・資料を収集し、トンネルの完成または供用開始後に変状が発生した 20 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整理した¹⁶⁾。

2.2 モデル地における調査・試験

火山岩の地山で建設されたトンネルをモデル地として、施工時の先進ボーリング¹⁷⁾掘削後の新鮮な岩石を屋外（コア箱に収納）に4年6ヶ月間暴露し、初期状態との相違を観察するとともに、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整理した¹⁸⁾。試料とした岩石は、熱水変質を受けた新第三紀火山岩・火砕岩類（安山岩，デイサイト，水冷破碎岩，火山礫凝灰岩，凝灰角礫岩）である。

2.3 完成トンネルの地質データベース構築

完成トンネルの地質データベースを構築し、国土交通省北海道開発局が建設した道路トンネル事業（57 トンネル，総延長 70.7km，計測断面数 2,674）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蓄積した。これらのデータから、岩種別に変位量の実態を整理するとともに、トンネル支保部材に生じた変状と変位量の関係について分析した¹⁹⁾。

分析に使用したデータや情報は、岩種区分²⁰⁾，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。

3. 研究結果

3.1 時間遅れを伴うトンネル変状の要因調査

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-1)の地域別には、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例と、東北～中部地方で多い傾向にある。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、なかには20年以上経って顕在化するものもある。

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ている。

これらの事例におけるトンネル箇所の主な地質は、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・火砕岩類が特に注意を要する地質であると想定される。

トンネルの建設工法は主に在来工法であるが、NATMにより建設されたトンネルでも変状が発生している。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もあった。なお、ここで施工中の変状とは、縫い返しやその補修を要した内空変位量の増加、支保部材の変形や破損などを示す。このため、次項では、発生時期(供用後と施工中)に応じた補修・対策ならびに維持管理段階での対応を区分した。

3. 1. 2 変状の発生時期とその対応の区分

供用後の変状発生の有無と、施工中の変状発生の有無から、表-2のように変状のタイプを区分した。表の中で○は変状発生ありを、×は変状発生なしを示す。

タイプIは、施工中・供用後とも変状が発生した箇所である。結果的には施工中の対策が不十分であった箇所と言え、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。

タイプIIIは供用後の変状は発生していないが、施工中に変状が生じている箇所であり、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。

表-1 供用開始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
盃山(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

表-2 変状の発生時期と補修・対策ならびに維持管理段階での対応の区分

タイプ	供用後	施工中	対応など
I	○	○	施工中にも変状が発生して補修・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	×	○	施工中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

また、当該箇所点検頻度を高めることで、変状の早期検出が可能となる。

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箇所である。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。

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、トンネル施工時の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. 3 時間遅れを伴うトンネル変状の地質別の要因

これまでの変状の実態調査²⁰⁾によると、膨張性土圧による変状は、主に新第三紀層の泥岩・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-2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、背後に異なる岩相が分布しており、時間遅れを伴う変状に至る可能性がある。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も想定される。

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ケースが多く、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、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(表-2のタイプⅢ)。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、完成または供用開始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

写真-1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、大部分が黄褐色に変色して土砂化している。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。

まず、X線回折試験の結果、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を確認した(表-3)。

次に、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

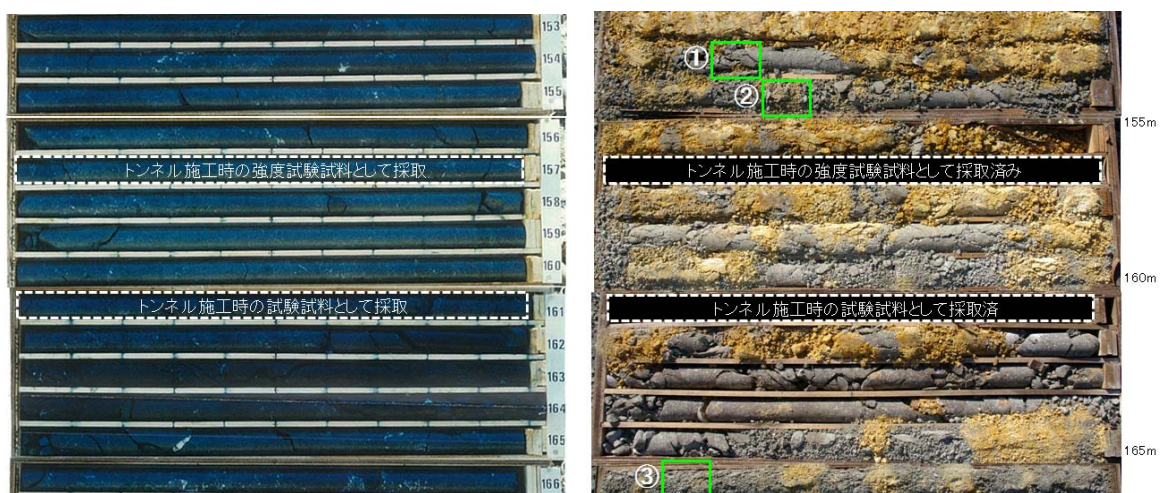


写真-1 岩石コア(左:掘削直後 右:4年6ヶ月後)

表-3 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	△		+		+	
	斜プロチロ沸石	+		+		+	
	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

認められる試料②ではpHが特に低い値を示した。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、岩石中の特定鉱物の存在に着目することも、有効な指標になり得ることが示唆された。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。そのため、今後は、トンネル施工時の評価では、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。

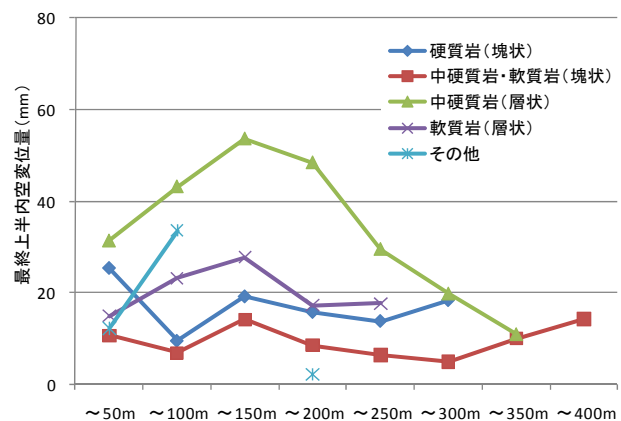
3.3 完成トンネルの地質データベース構築とその分析

完成トンネルの地質データベースを構築し、これまで国土交通省北海道開発局が建設した道路トンネル事業での地質調査成果ならびに施工時の計測データを蓄積した。これらのデータから、岩種別の内空変位と土被り厚さの関係を整理するとともに、トンネル支保部材に生じた変状と変位量と変位速度の関係について分析した¹⁹⁾。

図-1に変位量（平均値）と土被り厚さの関係を岩種別に示す。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）の傾向が確認できた。また、特に中硬質岩（層状）の変位量が大きいことが確認された。

土被り厚さ別には、多くの岩種で100~200mで変位量が大きい傾向にある。このような土被り厚さを有する区間での掘削時に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、後者で変位量が大きい。これは、後者の方が岩盤の性状把握の精度が低い（難し



岩種	土被り厚さ (m)						
	~50	~100	~150	~200	~250	~300	~350 ~400
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
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-1 岩種別の変位量と土被り厚さ

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大きい。これは、後者の方が岩盤の性状を的確に把握できているのに対して、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）という傾向であることが判明した。

図-2にトンネル施工時に生じた支保部材の変状と内空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と変位速度の関係について整理した。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

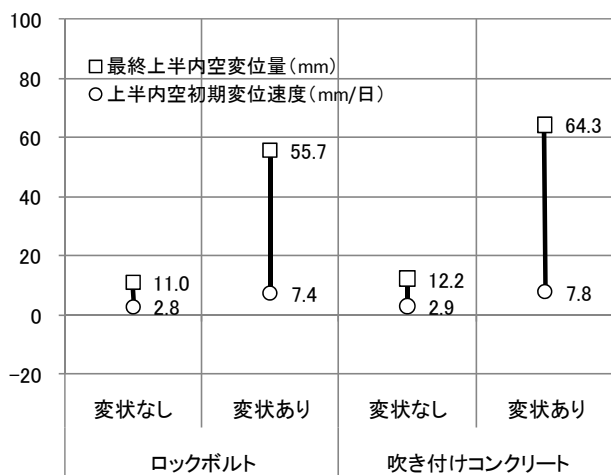


図-2 蓄積データの活用事例
(支保部材の変状と内空変位の関係)

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。

分析の結果、変位量については、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倍程度の違いを確認した。吹き付けコンクリートでは、「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倍程度の違いを確認した。吹き付けコンクリートでは、「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。このように、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。

4. まとめと今後の課題

本研究で明らかになった知見は以下のとおりである。

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・火砕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。トンネル施工時の評価では、中長期的な劣化を考慮した試験・評価方法として、岩石中の特定鉱物の存在に着目することが、ひとつの指標になり得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活用が可能であることが判明した。

4) トンネルの設計から施工の経験的な指標^{21)~22)}を用いた判定や施工手段を経て完成したトンネルでも変状が発生している。今後は、事前調査や施工時の調査により、時間遅れを伴うトンネル変状を適切に評価する方法の確立が必要である。

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），pp214-269，平成15年9月
- 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）北海道開発局技術研究発表会講演集，pp73-78，平成3年2月
- 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，pp292-293，平成元年10月
- 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, 3, pp7-15，平成9年3月
- 5) 小林弘元・白濱 龍・畝田篤志・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，pp631-632，平成21年9月
- 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—山形自動車道盃山トンネル上り線—，第44回地盤工学会講演集，pp1271-1272，平成21年8月
- 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，pp149-155，平成9年12月
- 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, pp2-9, 平成2年10月
- 9) 中田正夫・伊藤 洋：供用中トンネルにおける変状と対策・上信越自動車道浅間山トンネル, トンネルと地下, vol.31, 4, pp7-14, 平成12年4月
 - 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, pp23-31, 平成22年3月
 - 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, 3, pp22-27, 昭和52年3月
 - 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, 12, pp19-25, 平成7年12月
 - 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, 11, pp19-29, 昭和55年11月
 - 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, 9, pp7-16, 平成19年9月
 - 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, pp862-865, 平成4年3月
 - 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, pp183-188, 平成23年11月
 - 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, 平成23年4月
 - 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, pp173-174, 平成23年11月
 - 19) 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, pp9-10, 平成23年9月
 - 20) 日本道路協会：トンネル維持管理便覧, 平成5年11月
 - 21) 土木学会：トンネル標準示方書山岳工法, 平成18年7月
 - 22) 土木学会：トンネルライブラリー第12号, 山岳トンネル覆工の現状と対策, 平成14年9月

RESEARCH ON MECHANISM OF TIME DELAY 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

INOUE Toyoki

OBINATA Akihiko

Abstract : In FY2011, we reviewed papers on cases of time delay deformation at tunnels in Japan, analyzed rock minerals, and built a tunnel database to clarify factors of time delay deformation. As a result of review, a number of time delay deformation cases of tunnel excavated in volcanic rock area were the most abundant. Sulfur minerals generated secondarily deteriorated rock caused by decline over time was confirmed to change to the other rock minerals. The database can help us to predict geotechnical troubles in tunnel construction.

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