

山岳トンネル石積覆工の劣化調査及び対策工の検討

東日本旅客鉄道（株） 正会員 ○稲津 貴和子
 東日本旅客鉄道（株） 正会員 浅田 章一
 東日本旅客鉄道（株） 伊藤 吉行

1. はじめに

鉄道トンネルの覆工材料は、明治時代には主にレンガや石材が使用され、時代の変遷とともにコンクリートブロック、コンクリートへと変化していった。当社では、コンクリートが一般的となった現代においても、多くのレンガや石材の構造物を維持管理している。その中で、側壁に石材を使用したトンネルは各地に存在するものの、アーチ部に石材を使用したトンネルは少ない。当該線の一部のトンネルでこのような構造が存在しており、覆工の石ブロックが劣化し、断面が減少しているのがみられる。しかし、石ブロックの劣化の原因や進行性について明らかになっておらず、維持管理上の課題となっている。

本稿では、石積覆工の劣化原因の調査および対策工の内容について報告する。

2. トンネルの概要

当該トンネルの周辺地質は、第四紀火山岩類の安山岩が主として構成されている。覆工材料である石ブロックは、地山の状態に合わせて、覆工厚（石積厚）を変えて施工されている。当該トンネルは経年 100 年を越えているが、地圧の影響と思われる変状等は確認されていない。トンネルの概要を表-1 に示す。

3. 石積覆工の劣化状況

覆工に使用されている石ブロックの表面が 1mm 程度の薄い層状に剥離しており、最大で 50mm 程度断面が減少している箇所もみられる（図-1）。変状が発生している箇所には、以下の 4 点のような特徴がある。

- 1) 剥離の形態がトンネル周辺で採掘される安山岩の節理構造の特徴と類似している
- 2) 表面に白い析出物がみられる
- 3) 湧水により石ブロックの表面が湿っており、特に乾湿を繰り返している箇所が多くみられる
- 4) トンネルの中央付近に集中している

表-1 トンネル概要

しゅん功	1922年
工法	山岳工法
延長	L=294.61m
断面	複線型（曲）（R=4,343）インバート無し
材質	アーチ部：石ブロック 側壁部：コンクリート
覆工	520～1140mm（5～10枚巻）
土被り	最大50m



(1) 覆工面 (2) 剥離片

図-1 劣化部の状況

表-2 水質成分分析結果（抜粋）（単位：mg/L）

対象	pH	電気伝導率	Mg	Ca	Na	K	SO ₄	HCO ₃	Cl
湧水	7.7	21.6	4.8	25.1	8.7	1.1	28.3	39.9	8.2
源泉①	7.7	—	4.06	14.13	437.5	13.9	347.9	61.93	438.7
源泉②	8.04	—	6.95	5.39	113	8.03	76.1	68.1	123.2

4. 試験方法

石ブロックの劣化状況より、劣化には湧水や石の特性が影響している可能性がある。そのため、劣化が生じている箇所及び健全な箇所について、ボーリングによる石ブロックのコア、剥離片、表面の白色析出物、トンネル内の湧水を採取し、それぞれ室内試験を実施した。

5. 試験結果

5. 1 水質試験

トンネル中央部で採取した湧水は硫酸イオンを含む弱アルカリ性の水質である（表-2）。当該トンネルの北、約 3km の位置に温泉の源泉が 2 箇所あり²⁾、その温泉に含まれる成分が湧水にも含まれていることから、トンネル内に温泉水が流れ込んでいると想定される。

5. 2 コア観察

採取した石ブロックのコアを肉眼にて、外観観察を行った。劣化は石ブロックの表面のみで発生しており、健全部、劣化部ともに、奥行き方向にひび割れや風化を示すような変色や脆弱部は確認されなかった。

キーワード トンネル、石積覆工、温泉水、芒硝石、マイクロクラック

連絡先 〒221-0044 神奈川県横浜市東神奈川 1-29-56 横浜土木技術センター TEL 045-565-5262

5. 3 圧縮強度試験

健全部及び劣化部が覆工材料としての強度を有しているか確認するために、一軸圧縮試験を実施した。健全部は平均 145N/mm²、劣化部は平均 153N/mm²であり、劣化の有無による強度の大きな差はみられなかった。

5. 4 偏光顕微鏡による剥離片観察

偏光顕微鏡を使用し、剥離片の鉱物特定および肉眼では確認できない石ブロックのミクロな構造の確認を行った。剥離片にはマイクロクラックが多数確認され、特性上、剥離しやすい石材であることが確認された(図-2)。また、図-3より、シリカ鉱物に沿ってマイクロクラックの発生がみられた。剥離片の分離面側(地山側)、の表面には芒硝石の析出している。

5. 5 成分分析(蛍光X線分析(XRF)、粉末X線回折(XRD)、主成分組成分析(含有量))

各分析装置を用いて、劣化部の表面に生じている白色析出物と剥離片の成分分析を行った。白色析出物と剥離片に芒硝石(Na₂SO₄)が生じている(表-3)。

6. 試験結果からの考察

当該トンネルは、溶岩流地形がつくる地下水流動系の末端にあり、深層地下水が流れ込む地形に位置する。水質試験の結果からも温泉水が一部流れ込んでいると想定される。各試験結果より、石ブロックの劣化は、石材が潜在的に持つマイクロクラックに、湧水からNa、SO₄が供給され、石ブロック表面で乾湿を繰り返すことで、芒硝石を生成し、それに伴う膨張圧でマイクロクラックの開口が促進されることが主な原因であると推察される。

また、土被りが小さく、雨水等の影響を受けやすい坑口付近には劣化があまりみられないことから、トンネル内で水質が異なる可能性が考えられる(図-4)。

7. 対策工の検討

石ブロックの劣化は、覆工表面の湧水が乾湿を繰り返すことで促進するため、対策工は①石ブロック内部に湧水を浸透させないよう石ブロックの表面を保護する(表面含浸工法)、②導水と剥落対策を行う(導水板工法)、③覆工目地の水の流れ等を止める(止水注入工法)という3つの観点から検討を行っている。表面含浸工法は劣化部に含浸材を浸透させ、石ブロックの表面を緻密化することで劣化因子の侵入を防ぐ工法である。導水板工法はFRP波板を覆工に設置し、導水と同時に剥落対策も兼ねる工法であり、現在、鉄道トンネルの漏

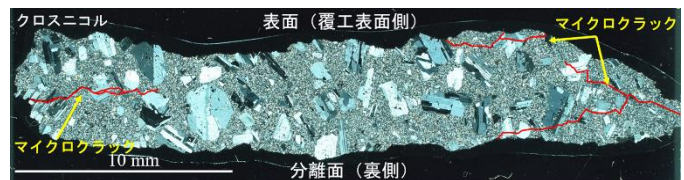


図-2 顕微鏡観察(剥片全体)

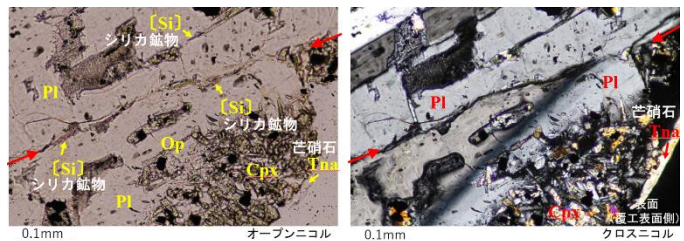


図-3 顕微鏡観察(詳細)

表-3 成分分析結果(抜粋)

項目	白色析出物		剥離片(微粉碎)	
	XRF (%)	含有量 (%)	XRF (%)	含有量 (%)
Na ₂ O/Na	—	8.85	—	1.26
K ₂ O/K	0.22	0.10	3.90	0.16
CaO/Ca	6.94	4.60	8.04	4.88
MgO/Mg	—	0.05	—	0.10
SO ₄	16.83	12.70	0.01%未満	0.13
XRD	クリスタライト(極多量:石材由来)		クリスタライト(極多量)	
構成鉱物	芒硝石(中量)		芒硝石(中量)	



図-4 土被りと劣化発生箇所の関係

水剥落対策として導入されている³⁾。止水注入工法は水みちとなるひび割れ等を埋めることで止水を行う工法である。

8. おわりに

石積覆工の劣化原因を特定し、対策工の検討を行った。鉄道工事における石積覆工の劣化対策事例が少ないことから、今後は目視検査による劣化の進行状況を引き続き調査、分析するとともに、変状の状況に応じた対策工の選定、施工を計画している。

参考文献

- 1) 野城一栄, 岡野法之, 小島芳之: 覆工材料に着目した山岳トンネルの変形破壊挙動に評価, 鉄道総研報告, Vol.30, No.12, pp.11-16, 2016.12.
- 2) 平野富雄, 栗屋徹, 大木靖衛: 小田原市の温泉, 神奈川温泉地学研究所報告, Vol.13, No.5, pp.75-82, 1982.
- 3) 浅田章一, 古川武英, 齊藤裕之, 栗林健一, 齊藤誠: 導水機能付きトンネルの剥落対策工法の検討(その2), 土木学会年次講演会, 2015.9.