

(図 4,図 5,図 6,図 7)。また、これらの変状の健全度判定に対して維持管理標準に細かな記載がないことや、剥離・剥落の進行が早く、発生主義的な対策を行っていたため変状を正確に把握しているとは言い難い状況であった。さらに、これまで変状原因としては漏水や凍結融解などが想定され、これを踏まえた対策を行ってきたが対策工に変状が発生している。このことから、これまでの想定されていた変状原因に加えて他の変状原因が予想され、変状原因の解明を行う必要があった。



Fig.4 harmful alteration of steel deck



Fig.5 harmful alteration of liner plate



Fig.6 harmful alteration of brick



Fig.7 harmful alteration of GFRM

3. 変状の把握

3.1 健全度判定基準の策定

検査者による判定のばらつきを無くし、より正確に変状を把握するために、下記の変状について覆工材料毎に過去の検査結果や維持管理標準などを参考に健全度判定基準を作成した。

- ①材質劣化：覆工材料劣化に対する判定基準（表 3）
- ②剥離・剥落：覆工材料が剥落する危険性に対する判定基準（表 4）

3.2 健全度判定

トンネルをより精度の良く効率的に健全度判定を行うために、JR 東日本で採用しているトンネル覆工表面撮影車による覆工表面画像を用いた。机上にて策定した健全度判定例を基に 1 次判定を行うことで変状の概要や要注

Table4 criterion of falling of tunnel lining1

健全度	キーストンプレート	吹付けモルタル	レンガ
A	・キーストンプレートが腐食し充填コンクリートも欠損があり、固結度が低い。	・ひび割れや膨らみ	・1つあるいは複数の母材の周囲4片で奥行き50mm程度以上の欠損 ・ブロックの抜けだし、はらみ ・母材が土砂化、軟質化している
B	・キーストンプレートが腐食し充填コンクリートが剥き出し、充填コンクリートに浮きやひび	・大断面に不整形の吹付けコンクリートの剥き落とし箇所	・1つあるいは複数の母材の周囲4片で奥行き13mmで奥行き30mm程度以上の欠損 ・目地の食い違いや乱れ
S	・上記以外	・上記以外	・上記以外

※ライナープレートは剥落する危険性がないため除く
意箇所を把握し、その後軌陸車により打音・目視点検を行うことで最終的な健全度判定を行った。また、これまで約 2.7km の冠着トンネルを一律的に判定していたが、より詳細に把握し、実態に即した維持管理計画を策定するためにトンネルを概ね 10m 毎及び覆工材料が変化する箇所等で区分して 311 ブロックとし、ブロック毎に健全度を評価した。これにより冠着トンネルの覆工とその変状の実態を正確に把握することができた（表 5）。

Table5 judgment result of integrity degree

覆工状態	ブロック数	材質劣化				剥離・剥落		
		Aブロック	Bブロック	Cブロック	Sブロック	aブロック	bブロック	cブロック
キーストンプレート	3	2	2	1	0	0	0	1
ライナープレート	60	3	14	13	30			
吹付けモルタル (GFRM)	103	1	85	17	0	0	59	11
吹付けモルタル (GFRM 以外)	63	1	11	31	0	0	15	18
レンガ	65	1	7	31	0	0	7	57
その他(コンクリートブロック・PC板)	16	0	11	2	0	0	0	11
合計	311	8	130	135	38	0	90	161

4. 変状原因の推定

4.1 これまで想定していた変状原因

4.1.1 煤煙による劣化

冠着トンネルは縦断勾配が 25/1,000 ときつく、延長も長いことから、SL の排煙が坑外に抜けにくいトンネルであると考えられる。実際に冠着トンネルの覆工には現在でも煤煙が認められ、レンガをハツリ落としてみると表面だけでなく目地深部にも煤煙が残留していることが確認された。煤煙には亜硫酸ガスや窒素酸化物が含まれており、これらが漏水と接触することにより硫酸や生成し、目地を劣化させ、さらに、この劣化した目地から煤煙が侵入することにより深部まで目地切れが進行すると想定される。

4.1.2 漏水・凍結融解作用

冠着トンネルが存在する麻績村は寒暖の差が激しく、冬季においてはトンネル坑内につららが発生する(図 8)。

Table3 criterion of lining deterioration

覆工材料 健全度	キーストンプレート	ライナープレート	吹付けモルタル	レンガ
A	・充填コンクリートの欠損が1箇所以上	・ライナープレートの一部に欠損	・ひび割れや膨らみ	・1つあるいは複数の母材の周囲4片で奥行き50mm程度以上の欠損 ・ブロックの抜けだし、はらみ ・母材が土砂化、軟質化している
B	・キーストンプレートが腐食し充填コンクリートが剥き出しの状態	・鉄骨やライナープレート、ボルトに腐食	・不整形の吹付けコンクリートの剥き落とし箇所	・1つあるいは複数の母材の周囲4片で奥行き13mmで奥行き30mm程度以上の欠損 ・目地の食い違いや乱れ
C	・キーストンプレートが腐食し充填コンクリートが局所的(500mm×500mm程度以下)に剥き出しの状態	・鉄骨やライナープレートに局所的(500×500mm程度以下)な腐食または変色	・汚れ(白い生成物)が付着	・GFRMの剥き落とし箇所等で表面の目地は石膏で詰まっている ・目地に乱れ ・煤煙等の付着がある
S	・上記以外	・上記以外	・上記以外	・上記以外

また、冠着トンネルの周辺地には河床堆積物や土石流堆積物などの透水性の高い地層に被覆され、集水地形を呈していることから坑内に漏水が多く見られる。そのため、漏水による乾湿の繰返しや凍結融解作用によりキーストンプレートやライナープレートの腐食やレンガの材質劣化が進行することが予想される。

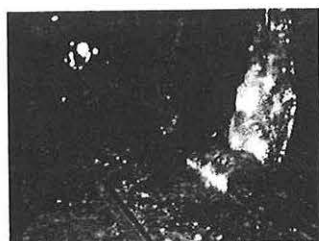


Fig.8 generated icicle in Kamuriki tunnel

4.1.3 施工不良

吹付けモルタルを施工する際に、下地処理として覆工面に付着している汚れや煤煙をウォータージェットにより洗浄している。しかし、100 年を越えるトンネルの汚れは頑固であり洗浄では十分に除去しきれない箇所もある。また、短い施工間合いや工期及び洗浄員の熟練度の要因などによっても十分な除去が行えないことも想定される。そのため、除去が不十分なまま吹付けることにより、レンガ覆工とモルタルとの密着性が十分に保てずに剥離・剥落するものと想定される。

GFRM は当初使用していた急結材がアルカリ性であったために作業員が怪我をする事象が発生したため、作業員の安全のためにアルカリフリー急結材を使用している。しかし、このアルカリフリー急結材には硫酸イオンが含まれている。そのため、詳細は後述するが、硫酸イオンとモルタルが反応し膨張性物質であるエトリンガイトが生成され、剥離・剥落したと想定される。

4.2 調査により新たに判明した変状原因

4.2.1 変状調査概要

変状対策工であるライナープレートの腐食や GFRM などの変状原因を調査するために平成 18 年度から 20 年度の 3 年にわたり冠着トンネルの変状調査を行った。主な調査内容は以下の通りである。

- ① 覆工の外観目視検査
- ② 水文調査
- ③ 水質分析
- ④ 地表地質踏査
- ⑤ X線回折試験

4.2.2 酸性水による劣化

浮きが認められる GFRM とレンガの境界面には白い生成物が確認され、レンガ表面には白い結晶が認められた。これらの生成物を特定するために X 線回折試験を行った結果、以下のことが判明した。

- ・レンガ部の白い結晶：石膏
 - ・GFRM 背面の白い生成物：エトリンガイト
- 一般にエトリンガイトや石膏の生成メカニズムは
- ① 覆工に硫酸イオンが供給される
 - ② 硫酸イオンが目地やモルタルに含まれるカルシウムやアルミニウムと反応してエトリンガイトが生成される(図 9)
 - ③ さらにエトリンガイトに硝酸や硫酸などの酸が作用すると石膏が生成される

以上のことから、吹付けモルタルに硫酸イオン(酸性水)が供給されることにより吹付けモルタルとレンガの境界

面に膨張性物質であるエトリンガイトが生成される。この膨張圧により剥離・剥落が発生していると推測される。また硫酸イオンの存在はライナープレート部においても酸性水による裏込めモルタルの溶出・ライナープレートの腐食原因となることが推定される。

4.2.3 酸性水の供給源

4.2.3.1 水質分析結果

酸性水の供給源を調べるために地山周辺を調査し、地山にある沢と坑内の漏水箇所から採取した試料の水質分析を行い、以下に示すようなヘキサダイアグラムが得られた。なお、ヘキサダイアグラムとは水質を分類する手法で、グラフの形状で水質を区分し、グラフの大きさで溶存成分の濃度を示すものである。坑内や周辺地山で酸性を示す沢は全て図 10 に示すような形状であり、硫酸イオンの溶存濃度が他のイオンに比べて大きいことがわかる。図 11 に示すように坑内で中性箇所においても、同様の形状を示す箇所があった。これは硫酸イオンに対してモルタルや目地

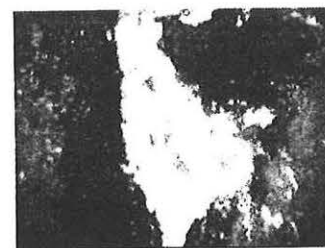


Fig.9 generated ettringite

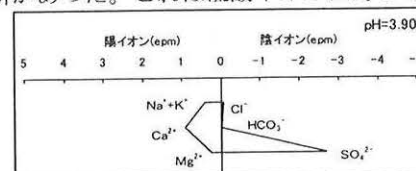


Fig.10 Hexa diagram of ground surface water

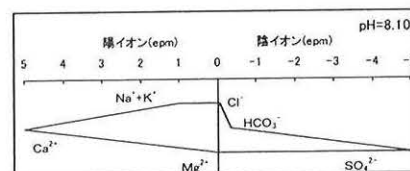


Fig.11 Hexa diagram of water in tunnel

に含まれるカルシウムイオンで中和しているため中性を示すと考えられる。このため、このような箇所でも覆工背面には酸性水が供給されていると推定される。以上のように地山と坑内では同様の水質をしめすことから、地山の酸性水とトンネル内の酸性水には関係があると考えられる。

4.2.3.2 水文調査・地表地質踏査・X線回折試験結果

地山の酸性水がどこから供給されているのかを調査するために水文調査・地表地質踏査を行った結果、以下のことが判明した。

- ・周辺地山に黄色～白色の変質した地層が存在する
- ・変質部は pH2 程度の強い酸性を示す
- ・変質部を通る沢は酸性を示す

また、この変質部の X 線回折試験を行った結果、変質部からは酸性水を発生させる黄鉄鉱が検出されたことからこの変質部から酸性水が供給されていると考えられる。さらに、変質部にはカオリナイトやディッカイトなどの高温の酸性水により生成される変質鉱物が検出され、この変質部は熱水により変質したと想定される。熱水は節理や断層等の亀裂に沿って移動することから、この変質部と節理の関係は一致すると予想し、過去の文献や空中写真により判定した節理と、変質部及び坑内酸性水箇所をプロットした結果を図 12 に示す。その結果、節理と酸性水は密接な関係があることがわかり、節理と接触しているトンネル覆工には酸性水が供給されている可能性

が高く、今後も変状が進行することが予想される。

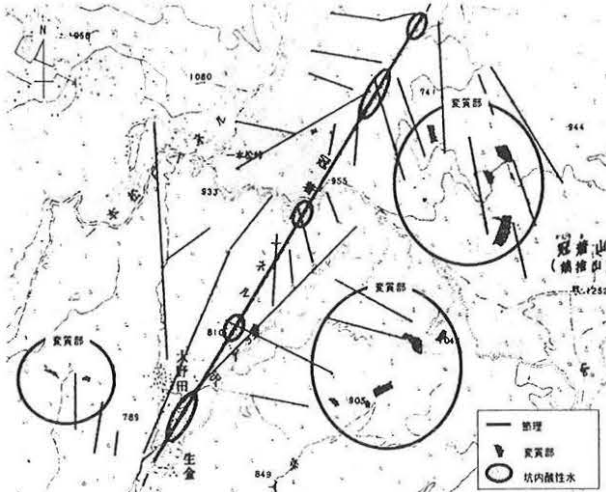


Fig.12 relation between joint and acid water

5. 維持管理計画

5.1 対策箇所の選定

以上のように冠着トンネルについて、ブロック毎の変状把握により詳細な健全度の把握ができ、変状原因の推定により、これまで想定していた変状原因に加えて、地山からの酸性水により今後も高い可能性で変状は進行することが予想される。そこで過去の健全度履歴より、覆工材料毎に劣化予測を行い現在Bランクの箇所についてAランクになるまでの残年数を想定した(図-13,表6)。同様に剥離・剥落の箇所についても今後10年以内にはAランクまたはαランクになることが予想され、運転保安を脅かす恐れが高い。そこで、対策範囲についてはAランク箇所と以下の箇所を加えた範囲とし、トンネルの約25%を対策することとした。内訳としては主に吹きつけモルタル箇所とキーストンプレート・ライナープレート箇所について対策を行うこととした(表7)。

- ・キーストンプレート
Bランク箇所およびβランク箇所
- ・ライナープレート
Bランク箇所
- ・吹きつけモルタル(GFRM含む)
Bランクかつβランク箇所

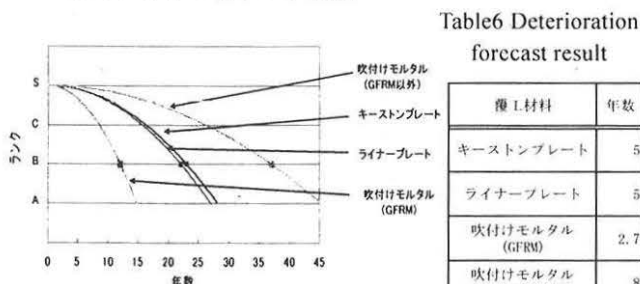


Fig.13 Deterioration forecast result

Table6 Deterioration forecast result

覆工材料	年数
キーストンプレート	5
ライナープレート	5
吹きつけモルタル (GFRM以外)	2.7
吹きつけモルタル (GFRM)	8

Table7 Range of measures

覆工材料	キーストンプレート	ライナープレート	吹きつけモルタル (GFRM)	吹きつけモルタル (GFRM以外)	レンガ	その他 (コンクリートブロック (RC版等))	合計
延長 (m)	34	145	452	78	10	0	719

5.2 対策工の選定方針

5.2.1 吹きつけモルタル部

外力の影響のないトンネルでは剥離・剥落に対する補修工を行うのが一般的であり、吹きつけモルタルの剥離・剥落に対してははつり落としや樹脂ネットによる対策などが通常行われる。しかし、はつり落としは吹きつけモルタルをはつり落とした後の覆工レンガの材質劣化や漏水などの変状が顕在化する恐れがあり、これに対する対策をさらに行う必要があり適していない。樹脂ネットについても施工性は良いが背面レンガの目地切れや酸性水に対してアンカーが適していないことから不向きである。以上のことから、冠着トンネルにおいては、樹脂ネットなどの補修工ではなく、剥落防止・材質劣化対策として恒久的な補強を得ることができる内巻補強工を選定する。また、酸性水に対しても耐酸性の防水シートの使用や、耐酸性モルタルを使用することにより恒久的な対策となり得る。

内巻工法にはプレキャストコンクリート版や鋼材(鋼製支保工,ライナープレート)及び鋼板補強工などがある(図14)。これらの選定に当たっては、冠着トンネルを施工する際の安全性や施工性を十分に検討し最適なものを選定する必要がある。具体的には冠着トンネルは建築限界との離隔が少ないため吹きつけモルタルやレンガのはつり落としが前提となること、また、トンネルを供用しながらの施工や短い施工間合いでの作業などである。そのため、内巻材料の建込みや施工中のレンガの剥落に対する安全の確保などに対して各種対策工の施工性や安全性を十分に考慮する必要がある。



Fig.14 example of reinforcement work

5.2.2 キーストンプレート・ライナープレート部

キーストンプレート・ライナープレートの腐食箇所については、構造体としての連続性をなどを考慮し防水シートや耐酸性モルタルを使用したライナープレートの取替えを行う。内巻補強工と同様に取替えに当たっては時間的制約や空間的制約を考慮し、ライナープレートの取外し方法や裏込モルタル注入方法など十分に検討する必要がある。

6. おわりに

健全度判定例を作成しブロック毎に評価することで冠着トンネル変状を詳細に把握し、よりの確な対策工の範囲を決定できた。また、変状の原因を明らかにすることで、この変状原因を踏まえた対策工方針を定めることができ、維持管理計画の方針を策定できた。今後も適切な検査を行いながら、実際の施工に当たっての課題を解決し歴史的建造物といってもよい冠着トンネルの機能性回復と耐久性向上を図っていきたい。

参考文献

- (財)鉄道総合技術研究所：トンネル補強・補修マニュアル,2007
- (社)土木学会：トンネルの維持管理,2005
- (社)土木学会：山岳トンネル覆工の現状と対策,2005