

単線トンネルの側壁コンクリートに生じた劣化原因に関する一考察

東日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○今野 恵子
東日本旅客鉄道株式会社 酒井 景祐

JR 東日本コンサルタンツ株式会社 正会員 三上 淳

1. はじめに

大正初期(1916年)に完成した単線山岳トンネルで、側壁コンクリートのセメント分が軟化し、表面の剥落が生じている。その変状はトンネル左側壁のみであり、右側壁にはみられない。また、左側壁でも劣化程度にばらつきがある。本報告では、変状原因推定のために実施した各種調査結果についてまとめた。

2. トンネル概要

当該トンネルは上下線別の単線トンネルであり、変状が確認されている上線は1916年に供用を開始した延長444.0mの山岳トンネルである。変状が確認されていない下線は1890年に完成している。上下線ともに構造はアーチ部がレンガ、側壁部が無筋コンクリートで構成されている(写真-1、図-1)。下線は、電化に伴い側壁の打ち替えを行っているが、当該の上線はしゅん功時より側壁は無筋コンクリート造である。

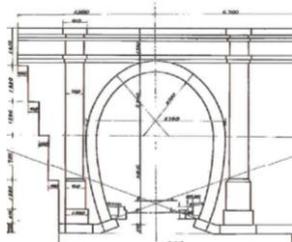


図-1 正面図(坑口)



写真-1 坑口(当該右)

3. 変状概要

当該変状は、側壁無筋コンクリートの劣化による表面の剥落である(写真-2)。コンクリート中のセメント分が軟化し、剥落することで粗骨材が露出している。ハンマーで触ると容易に剥がれ落ちる状態である。変状は左側壁に集中しており、右側壁には同様の変状は認められていない。過去の調査で最も劣化が著しい箇所で圧縮強度の低下(5N/mm²)が確認されており、配合不良も疑われているが、土質、水質ともに変状に起因する因子は無く、明確な原因の特定には至っていない。



写真-2 コンクリートの粉体化



4. 試験体採取および室内試験

コンクリートの劣化原因は、外力や環境などの外因と材料や施工、設計などの内因があるが、コンクリートのセメント分が軟化し、剥落する原因として、本調査では以下の3つに絞り、試験方法を検討した。

- ①酸性水による劣化¹⁾(図-2)
- ②煤煙内の酸の作用による劣化¹⁾(図-2)
- ③セメント代用品の使用による劣化¹⁾(図-3)

①②のメカニズムには同様であるが、過去の調査により、有害水は確認されなかったため、②③と推定して、室内試験を実施した。②では、劣化部のセメント分に石膏が生成することや酸性化合物が濃縮することが分かっているため、粉末X線回折および蛍光X線分析を実施し、②を特定できなかった場合は、電子顕微鏡によりセメント代用品である珪藻土などの有無を確認することとした。それに加えて配合推定、中性化試験および圧縮強度試験を実施した(表-1)。試験体採取箇所は、表層の劣化状態を確認して、劣化(大)、劣化(中)、健全部の3分類して選定した(表-2)。当該側壁以外にも、右側壁および並行している下線の側壁においても比較対象として計8カ所を実施した。

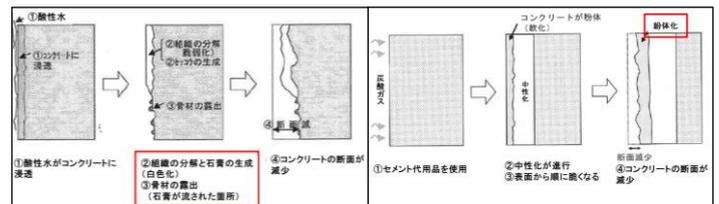


図-2 酸性水による劣化(煤煙) 図-3 セメント代用品の使用による劣化

表-1 試験項目一覧

試料No	採取位置 箇所	劣化度 (目視)	コア長 (mm)	コアの状態	孔底の状態	試験項目					
						圧縮 試験	超音波	中性化	配合 推定	粉末 X線	蛍光 X線
No.1	上り 左	劣化(大)	400	連続	コンクリート	○	○	○		○	○
No.2	上り 左	劣化(大)	100	他は土砂状	コンクリート				○	○	○
No.3	上り 左	劣化(中)	370	表~100mm分離	地山			○	○	○	○
No.4	上り 左	劣化(中)	350	連続	地山	○	○				
No.5	上り 左	健全部	380	連続	コンクリート			○	○		
No.6	上り 左	健全部	365	表~100mm分離	地山			○	○	○	○
No.7	上り 右	健全部	400	連続	コンクリート					○	○
No.8	下り 右	健全部	390	連続	レンガ(赤)					○	○

表-2 劣化状態の分類

劣化度	劣化(大)	劣化(中)	健全部
状態	・表層の著しい粉体化 ・骨材の露出	・表層で軽度の粉体化 ・濁音有り	・粉体化は見られない ・清音
写真			

キーワード : 煙害、セメント代用品、酸による劣化、粉末X線回折、蛍光X線分析

東日本旅客鉄道株式会社 横浜支社 横浜土木技術センター tel (045)565-5262

5. 室内試験結果

室内試験の結果を i) ~ vi) に示す。

i) 粉末 X 線回折測定

本調査では、供試体の表層部と深部において実施した。酸による劣化を受けているコンクリートは石膏 (CaSO₄) が生じるが、当該の左側壁においてはすべての供試体の表層部で確認された。劣化(大)においては深部まで確認されたため、劣化が深部まで及んでいると考えられる(表-3)。並行する下線トンネルにおいては石膏の生成は確認されなかった。

表-3 粉末 X 線回折結果

試料名	骨材由来											セメント由来											相対的質量の目安 ●: 非常に多量 ◎: 多量 ○: 中量 △: 少量 ▽: 僅か —: 検出されず
	Qz	Fl	Am	Mi	Ch	Ze	Lo	Sm	Gl	Ca	Ce	Po	Et	CAH	Ms	Gy	Va	Cas					
No.2 上線左-劣化(大)表層	○	△	△	△	▽	—	—	—	◎	—	—	—	—	—	—	○	○	○	Qz: 石英 (Ce: セメント鉱物) Fl: 長石類 (Po: 水酸化カルシウム) Am: 角閃石類 (Et: エクリン石) Mi: 雲母類 (CAH: セメント水化物) Ch: 沸石石 (Ms: モルタルフェート) Ze: 燧石類 (Gy: 石膏) Lo: コーケライト (Va: バイライト) Sm: スタウライト (C: カルシウムシリケート) Gl: 方晶石 (Ca: 方晶石)				
	○	▽	▽	▽	△	—	—	—	◎	—	—	—	—	—	—	○	○	○					
No.3 上線左-劣化(中)表層	○	△	△	△	▽	—	—	—	◎	—	—	—	—	—	—	△	○	—					
	○	▽	△	△	▽	—	—	—	◎	—	—	—	—	—	—	△	○	—					
No.6 上線左-健全部表層	◎	△	△	△	—	—	—	—	◎	—	—	—	—	—	—	△	▽	—					
	◎	△	△	△	—	—	—	—	◎	—	○	▽	—	—	—	△	▽	—					
No.7 上線右-健全部表層	○	▽	▽	▽	—	—	—	—	◎	—	—	—	—	—	—	▽	○	—					
	◎	△	△	△	—	—	—	—	◎	△	○	△	—	—	—	—	—	—					
No.9 下線右-健全部表層	◎	△	△	△	—	—	—	—	◎	△	○	△	—	—	—	—	—	—					
	◎	△	△	△	—	—	—	—	◎	△	○	△	—	—	—	—	—	—					

ii) 蛍光 X 線分析

劣化(大)、劣化(中)において表層の三酸化硫黄 (SO₃) の濃度が健全部に比べて高い値を示しており、表層部で酸による劣化が発生していると考えられる²⁾(表-4)。

表-4 蛍光 X 線分析結果 (抜粋)

試料名	No.2 劣化(大)		No.3 劣化(中)		No.6 健全部		No.8 健全部		No.9 健全部	
	表層	深層	表層	深層	表層	深層	表層	深層	表層	深層
Na2O	1.528	0.527	0.917	0.616	0.942	0.928	0.618	0.850	0.818	0.366
MgO	1.170	3.181	1.196	2.331	1.581	2.735	1.350	1.610	1.871	2.370
Al2O3	5.830	8.825	8.825	8.774	8.828	9.445	7.588	6.794	7.256	8.920
SiO2	22.357	33.068	27.160	30.707	34.248	40.638	30.694	38.613	27.945	39.771
SO3	2.490	1.496	1.684	0.982	1.130	1.217	1.158	0.719	0.783	0.789
K2O	0.466	0.694	0.559	0.622	0.776	0.694	0.637	0.570	0.621	0.426
CaO	23.121	20.479	26.145	26.289	27.433	22.049	30.157	26.905	28.216	25.867

iii) 電子顕微鏡観察

セメントの代用品(珪藻土)を使用したと考えられる多孔質物質は見られなかった(写真-3、写真-4)。

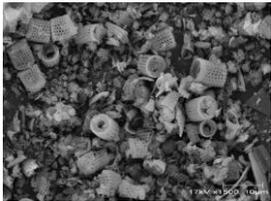


写真-3 珪藻土の画像

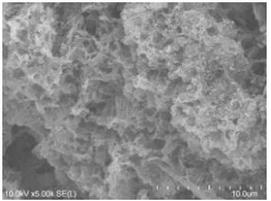


写真-4 劣化(大)の画像

iv) 配合推定 (セメント協会法)

当該左側壁においては、いずれの試料も水セメント比が 200% 以上と著しく大きな値であった。試験対象が古いコンクリートであるため試験精度が低いことが予想されるが、上線右側の健全部の 150% と比較しても相対的に大きな差があり、左右の側壁で元々の品質に差があると考えられる結果となった。(表-5)。

表-5 配合推定結果

試料名	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		
		水	セメント	骨材(表乾)
No.2 上線左-劣化(大)	265	209	79	1916
No.3 上線左-劣化(中)	237	192	81	1980
No.6 上線左-健全部	215	122	57	2198
No.7 上線右-健全部	158	208	132	1965

v) 中性化深さ測定 (JIS A 1152)

健全部においても 100 mm 程度、劣化(大)(中)においては 150 mm ~ 200 mm 程度と非常に中性化深さが大きい結果となった。配合推定より元々のコンクリートが疎な組織であったことに加えて、酸による組織の分解により空洞化が進むことで、中性化深さが大きくなったと考えられる(表-6)。

表-6 中性化深さ結果

試料名	中性化深さ測定結果 (mm)			
	1	2	3	平均値
No.1 劣化(大)	165.0	185.0	140.0	163.3
No.3 劣化(中)	175.0	185.5	200.0	186.8
No.6 健全部	89.6	94.0	96.5	93.4

vi) 圧縮強度試験 (JIS A 1108)

劣化(大)において 5.4kN/mm² と著しく低い値を示した。一方で劣化(中)、健全部においては 16~20kN 程度の強度を有していた(図-5)。劣化(大)は採取されたコアの表面状態と同様に圧縮強度は低いものとなった(写真-5)。劣化(中)は、表面は劣化しているが、圧縮強度は健全部に近い強度であった。

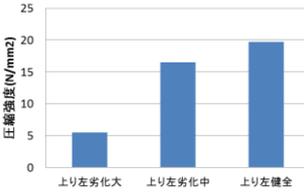


図-5 一軸圧縮試験結果



写真-5 劣化(大)試験後

6. 考察

各種調査より変状原因は、煤煙に含まれる酸による劣化であると考えられる。当該線区が電化開業する 1924 年までの 9 年間蒸気機関車の入線があったことから、その煤煙に含まれる酸が側壁コンクリートに作用して劣化に至ったと推測される。また、配合推定や中性化深さ測定から、当該左側壁はセメント分が極端に少なく、水セメント比が高い疎な組織のコンクリートであったことから酸が内部に侵入しやすかったと考えられる。

今後、当該トンネルには蒸気機関車の入線の予定はないため、煤煙が供給されることはなく、酸による劣化の進行はしない。しかし、劣化している部分の剥落は進行するため、対策工を検討しなければならない。

7. まとめ

本報告では、当該変状の原因を蒸気機関車による煤煙の供給と、元々のコンクリートが疎な組織であったことを特定した。

今回の調査結果をもとに今後の対策および維持管理方針を検討して、適切な維持管理に繋げていく。

参考文献

- 1) トンネル維持管理の基本 鉄道総合技術研究所
- 2) トンネル覆工コンクリートの劣化について

上田洋、松田芳範、西尾壮平、佐々木孝彦