

トンネルで発生した変状の原因は？

覆工コンクリートの変状要因究明

株式会社フジヤマ 静岡支店事業部 橘 亮汰

1. はじめに

宇久須隧道は、昭和7年に建設された、国道136号と黄金崎を結ぶトンネル(L=77.6m、W=5.3m)である。黄金崎は、駿河湾と富士山の眺望がすばらしく、夕陽を浴びて黄金色に輝く美しい岩肌で知られる景勝地で、西伊豆町の人気の観光地である。



図-1 位置図

出典：静岡県 GIS HP

令和2年度に、定期点検が実施され、「覆工全体にコンクリートの著しい材質劣化が見られ、はく落の危険性がある」ことから『健全度Ⅲ』と判定されていた。

令和3年度に、①変状の原因究明と、②対策工設計が発注され、弊社が受託した。

本稿は、業務を進めていく中で、覆工全体に確認されたコンクリートの材質劣化の変状要因が特異で、特定することが困難であったことから、業務と並行して、弊社独自に、変状要因を究明するために実施した各種調査とその結果を取りまとめたものである。

2. 変状状況と要因究明のための調査

(1) 現地踏査で確認出来た変状状況

現地踏査で次の点を確認できた。

- ① 覆工表面にひび割れ等の変状が無い
- ② 覆工全体で、触診によりコンクリート表面がボロボロと崩壊する
- ③ 覆工表面に、表面が黄褐色に変色した箇所がまばらに点在している



図-2 覆工全体状況



図-3 黄褐色変色箇所

(2) 変状要因究明のための調査および資料収集

覆工表面にひび割れ等の変状が無いことから、外力及び覆工巻厚不足、背面空洞によるゆるみ土圧等に起因するものでは無いことが確認できる。

それを裏付けるために、下記の3つの調査を実施した。

1) 変状深さの確認

トンネル全体の変状状況を把握するため、トンネル起点、終点、中間部の天頂部3箇所、コンクリートコアを採取した。その結果、表面から約7cm(平均覆工厚 32.3cm)が土砂化していることを確認した。このことから、劣化は、一般的に考えられる「外力や材質劣化に起因する変状状態」にあてはまらず、特異な変状であると考察した。

2) 変状状況把握のための調査

覆工の変状深さや強度把握を目的として削孔した3つのコアを利用しコンクリート圧縮強度試験を実施した。

本トンネルの劣化した表面を除く覆工の強度は、コンクリート圧縮強度試験結果から、無筋コンクリートの設計基準強度である18N/mm²を満足する



図-4 コア状況

値が得られたため、発生している劣化は表面的なものであり、内部は十分に健全な状態であることが判明した。なお、覆工巻厚は、劣化により約7cm程度不足している状態であるが、ひび割れ等の巻厚不足による変状が発生していないことから、応力的な影響は発生していないと判断した。

表-1 圧縮強度試験結果

採取箇所	最大荷重(kN)	圧縮強度(N/mm ²)
起点側	46.9	20.4
中間部	58.7	25.0
終点側	46.1	19.2

3) 周辺地質状況の分析

本トンネルは竣工が昭和7年と古く、竣工資料や、竣工時の地質調査資料が無いことから、トンネルの地質状況が把握できなかった。そのため、地質状況の把握を目的に、周辺の地質調査を実施した。その結果、本トンネルの周辺地山の露岩部には、本トンネルと同様の黄褐色の変色箇所が確認された。

3. 変状要因の推測結果

(1) 変状要因の推測

本トンネルの変状要因は、前項の3つの調査から、竣工年度が古く、建設時は骨材に関する明確な基準が設定されていなかったと推測される。竣工された時代、現地状況を勘案し、周辺地山からコンクリート骨材を調達したと推測されることか

ら、材料由来による変状と推測した。

変状要因となった骨材は、周辺地質の特性等について記載されたWEB資料等から、2つの物質の含有が想定された。一つは、①アルカリシリカ反応（以降ASRと記載）を発生させるシリカ鉱物である。もう一つは、②セメント分を化学反応により破壊し脆弱化させる可能性のある黄鉄鉱である。

しかし、両物質に起因する変状は共通しているため、変状要因の特定まで至らなかった。

(2) 周辺の地質分布と特徴

本トンネルが位置する西伊豆町黄金崎周辺は、伊豆半島の基盤をつくる新第三紀の地層である湯ケ島層群を構成するプロピライトの大露頭が存在

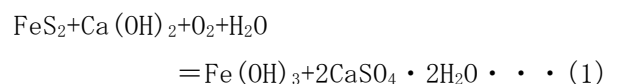


図-5 黄金崎露岩部¹⁾

する¹⁾。このプロピライトは、安山岩等が熱水による変質を受けたもので、本来緑暗色であるが、風化によって黄金崎や周辺地山の露岩部に見られるような黄褐色に変色する鉱物である。一般にシリカ鉱物を含むとされている²⁾。また、安山岩をプロピライトへ変質させる熱水変質作用は、一般に黄鉄鉱などの自然由来重金属を生成するとされている。

シリカ鉱物は、コンクリート骨材に含まれる場合、ASRによりコンクリートを破壊することが確認されている。

黄鉄鉱は、コンクリート骨材中に存在すると、コンクリート表面からの酸素及び水の供給により、(1)式の化学反応³⁾が発生し、錆の生成による錆汁の析出と酸化鉄の膨張によるポップアウトの発生及び黄褐色への変色が確認されている。



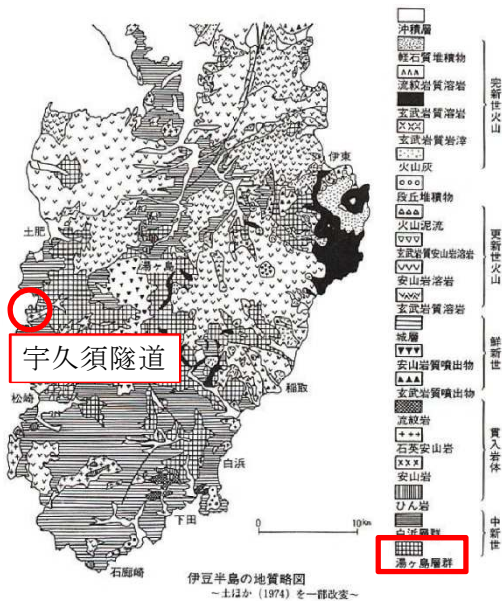


図-6 湯ヶ島層群分布状況⁴⁾

3. 課題と対応策

(1) 業務遂行における課題

変状要因を特定する上での課題は、変状状況が共通する2つの原因物質を絞り込むことである。

しかし、変状要因と推測されるシリカ鉱物及び黄鉄鉱の骨材への含有は、同時に確認する調査方法が無い。

(2) 対応策

原因物質を特定するために、以下の2つの調査を実施した。

- ① ASR 反応性骨材の含有調査：ASR 簡易試験
- ② 黄鉄鉱の含有調査：X線回折装置による反応性鉱物の定性分析(以下 XRD 分析)

1) ASR 簡易試験(ゲルス테인法)

ASR 簡易試験は、覆工コンクリートから採取したコア断面に、ASR ゲルと反応し黄色を示す試薬を塗布し、反応を観察する試験である。本調査では、ASR 簡易試験に使用するコンクリートコアを健全部で1本、劣化部で3本採取し試験を行った。試験結果は、健全部、劣化部共に試薬の変色は確認されなかった。それにより、「ASR 反応は発生していない」と推測した。

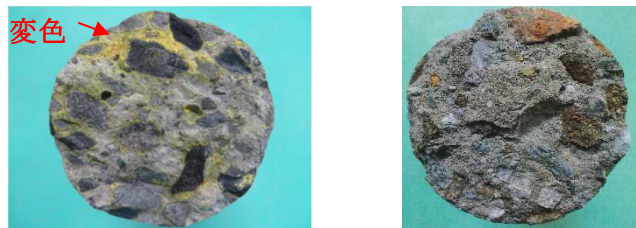


図-7 ゲルス테인試験によるシリカゲル反応例(左)※と今回試験結果(右)(反応なし)

※出典：M・T 技研株式会社 HP

2) XRD 分析

XRD 分析は、試料に X 線を照射し、構成物質を確認する試験方法である。試験結果は、骨材の主要鉱物として構成される石英(Q)、白雲母(Mu)をはじめ、緑泥石(Ch)や粘土鉱物であるカオリン(Ka)、硫化鉱物である黄鉄鉱(Py)、黄鉄鉱の酸化が起因と思われる鱗鉄鉱(Le)が検出された。このため、「覆工骨材に黄鉄鉱が混入していた」ことを確認した。

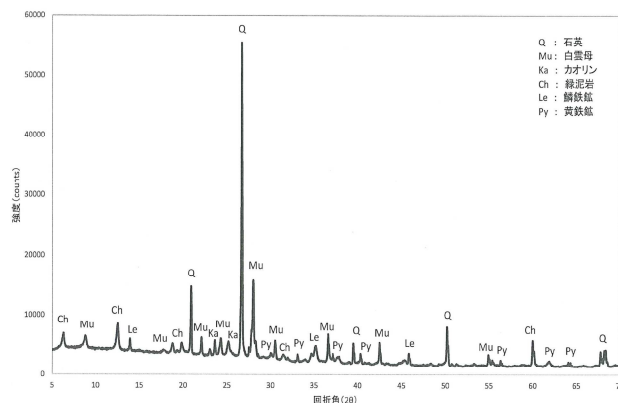


図-8 X線回折結果抜粋

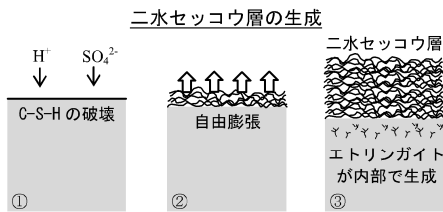
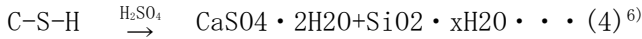
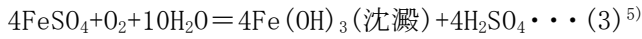
(3) 詳細調査を受けた変状要因の最終考察

本トンネルで発生した変状は、黄鉄鉱の化学反応に起因すると考察した。黄鉄鉱は、骨材混入していた場合に水と酸素に反応し、(2)(3)式⁵⁾のような反応で生成される硫酸(H₂SO₄)を発生させる。発生した硫酸は、セメント水和物(C-S-H)と反応し(4)式によりコンクリートの脆弱化、ひびわれ、剥離の要因と



図-9 採取コア中の黄鉄鉱(接写)

なる二水石膏 ($2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) が生成されることが確認されている⁶⁾。本トンネルで発生した変状の要因は、コンクリート骨材に含まれる黄鉄鉱の化学反応によるものであると推定した。



- ①：硫酸により C-S-H の骨格が破壊される。
- ②：拘束力を失った組織の中で二水セッコウが自由に成長する。
- ③：脆弱な二水セッコウ層が形成される。

図-10 二水石膏層の生成による組織劣化

メカニズム⁶⁾

(4) 変状対策工

本トンネルに発生している変状は、コンクリート骨材に含まれる黄鉄鉱が、コンクリート表面より供給される酸素及び水により化学反応し、劣化要因となっていることが明らかとなった。覆工内部は、健全な状態であり黄鉄鉱による変状は進行していないと判断される。

本トンネルに発生している材質劣化への対策工は、

- ① 表面の脆弱化したコンクリートを除去し、除去後の覆工巻厚を補うとともに、表面以深のコンクリートへ化学反応の原因となる水及び酸素の供給を断つ表面保護を目的とした工法を選定した。
- ② 脆弱コンクリートの除去による巻厚不足の解消および表面保護を目的とした対策工法は、本トンネルの内空断面が小さいことから、幅員及び建築限界を狭めないよう劣化部を除去したうえで断面を補完する吹付けコンクリート工法を採用した。吹付け材料は、吹付けコンクリートのはく落を防止するため、靱性が高く既設コンクリートへの付着性が高い高付着性繊維混入セメント材料を選定した。

4. おわりに

本トンネルで確認された変状は、一般的にトンネルで発生する変状と異なり、原因究明が困難であった。しかし、適切な対策を行うためには、原因の究明が必要不可欠と考え、既往研究資料の分析やトンネル工事の経験豊富な施工会社及び地質専門家を含めたヒアリングを地道に行うことで原因究明を果たし、適切な対策工が立案できたと考えている。本業務を通し、限られた手掛かりの中から、最適な対策工を立案するためには、幅広い知識・経験と、僅かな可能性も要因推定のための手掛かりとして捉え調査を続ける探求心が重要であると改めて感じた。

参考文献

- 1) 静岡県文化財課. しずおか文化財ナビ 黄金崎のプロピライト. <http://www.pref.shizuoka.jp/bunka/bk-180/bunkazai/detail/1054201.html> (参照：2022-09-02)
- 2) 鈴木淑夫. 「岩石学辞典」. 『朝倉書店』. 2005-02-28, P528
- 3) 寺内伸. 打放しコンクリート表面の汚染事例とその原因・対策. 鹿島建設(株) 建築管理本部
- 4) 静岡県環境政策課企画班. 自然観察ガイドブック 2. ふるさと自然 伊豆編. P3. <http://www.prrpr.shizuoka.jp/kankyoku/ka-020/kankyokyoku/nnatur-guidebook.html> (参照：2022-09-02)
- 5) 小笠原洋、田尻宜夫、新見健. 黄鉄鉱起源の酸性浸出水による水質汚染の影響・対策事例
- 6) 吉田夏樹、中山健一. 硫酸および硫酸塩によるコンクリートの化学的浸食に関する考察. コンクリート工学年次論文集. 2013. Vol135