

現地レポート：舗装・トンネルの維持管理技術

新仲哀トンネルの変状調査

谷川征嗣* 鋏 淳司** 安田 亨*** 田近宏則****

1. はじめに

山岳トンネルの補修・補強対策においては変状原因の究明が課題である。同規模の変状であっても、外力要因とその他要因によるものでは対策規模が大きく異なると考えられ、変状原因に応じた健全度評価基準の策定が必要であるが、変状原因の特定は容易ではない。

本トンネルでは、これらの課題に対して、平成19年度から学識経験者等で構成される委員会を設置し変状の原因究明、健全性の評価及び補修補強対策工の検討を行っているところである。

2. 対象トンネルの概要

国道201号新仲哀トンネルは、昭和42年の供用開始後40年以上経過しており、覆工のひび割れや表面の材料劣化など変状が著しいことから、平成19年3月の新トンネル開通と同時に閉鎖したトンネルであり、活用可能性の検討を行っているところである。

トンネルの概要を表-1、図-1に示す。

表-1 トンネルの概要

施工法	矢板工法（在来工法）
供用年月	昭和42年2月
トンネル延長	1220m
内空断面積	44m ²

新仲哀トンネル

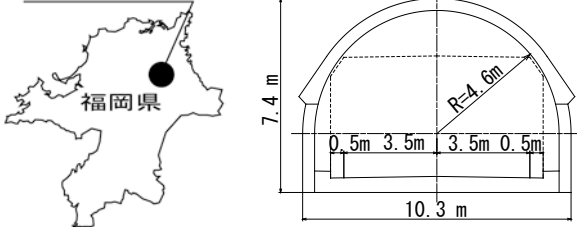


図-1 新仲哀トンネル断面

地質構成は、トンネル延長の2/5程度が片岩を主体とし、残りは花崗岩主体である。トンネル中間部の花崗岩は硬質で良好な地山であるが、両坑口部は、風化が著しく脆弱な地質である。

3. 変状状況

建設後40年以上経過した古いトンネルであり、ひび割れのほか浮き・はく離や漏水など多数の変状が認められるが、主に調査対象となった特徴的な変状箇所を表-2に示す。

表-2 対象トンネルの変状の特徴

変状	概要
ひび割れ	縦断ひび割れの連続 起点側坑口付近は、幅0.3～2.0mmでスパン全長にわたる縦断ひび割れが5スパンに片側のみ連続して認められる。
材料劣化	全線にわたり、材料劣化が認められる 表面のコンクリートが砂状で茶色に変色し骨材の露出や薄片状のはく落が認められ、劣化が顕著である。



写真-1 肩部の縦断ひび割れ 写真-2 材料劣化部の例

4. 当初想定した変状原因

4.1 ひび割れ

坑内からボーリング調査を実施したところ、縦断ひび割れ連続部ではトンネル上部に強風化岩盤が分布することを確認した。ひび割れ発生位置や地形との関係と併せて考察した結果、ひび割れは外力の作用が要因である可能性が疑われた。

4.2 材料劣化

水質分析の結果、漏水は中性～弱アルカリ性であることが確認できたため、酸劣化の可能性は低いと判断した。また、X線回折分析の結果からは

エトリンガイトやセッコウの生成は確認できず硫酸塩劣化の可能性は低いと判断したが、骨材露出やはく離の原因は不明であった。

5. ひび割れ原因推定に用いた調査手法

ひび割れの原因調査としては、地質状況や地下水位から土圧・水圧作用の可能性を推定する手法などが一般的であるが、これらの結果だけでは外力作用の判断は難しいのが実情である。そこで新たな調査手法も含めた調査を行い、原因推定を行った。

5.1 三次元レーザー計測

外力によるひび割れの場合には、トンネル断面に変形が生じている場合がある。そこで、MMS（モービルマッピングシステム）による三次元レーザー計測（断面測量）を実施した。

5.1.1 MMSの概要

車載レーザーを用いて、走行しながら壁面形状を高精度に計測できる手法である。取得した断面形状より基準断面を設定し、基準断面と実測の差分により変形モードを把握することで、外力の作用有無の判定への応用を試みた。

5.1.2 三次元レーザー計測による計測結果

表-2に示す特徴的な縦断ひび割れ連続部において計算した変形量を図-2に示す。

図-2より、縦断ひび割れ連続部では、ひび割れに対応する位置に、覆工内側への変形傾向が認められた。これは、地形との関係から偏圧が作用する方向とも一致している。

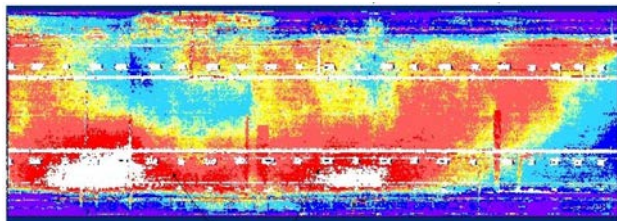
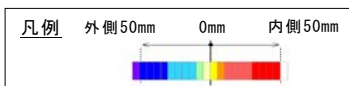


図-2(1) 縦断ひび割れ連続部の変形量計算結果

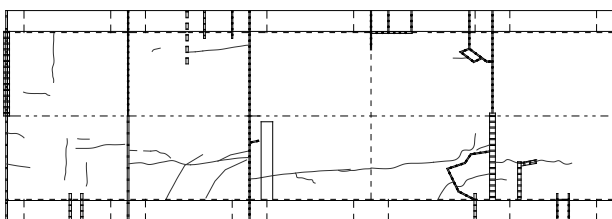


図-2(2) 縦断ひび割れ連続部の展開図

5.2 ひび割れ沿いの中性化試験

ひび割れ面からの中性化深度からおおよその発生時期や進展状況を推定することを目的として、ひび割れ面沿いの中性化試験を実施した。

5.2.1 試験方法の概要

ひび割れを挟んだコアを採取し、割裂によりひび割れ面と直交する断面を出し、フェノールフタレイン法によりひび割れ沿いの中性化深度を調査した。

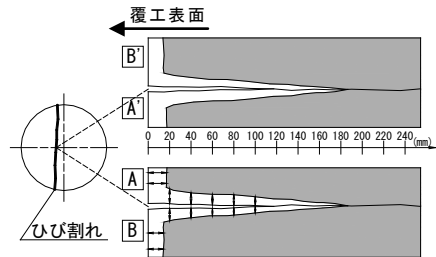


図-3 ひび割れ沿いの中性化試験方法

5.2.2 試験結果

縦断ひび割れ連続部で採取したコアにて実施した試験結果を写真-3および表-3に示す。

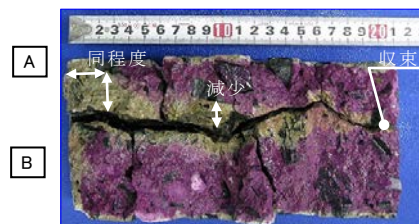


写真-3 縦断ひび割れ面の中性化状況

表-3 ひび割れ沿いの中性化深度

覆工表面からの距離 (mm)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	205	
中性化深度 (mm)	A	—	23.0	14.0	19.0	20.0	7.0	2.0	10.5	6.5	2.5	0.0
	B	10.0	10.5	8.0	13.5	8.5	12.0	19.0	4.5	0.0	0.0	0.0
	平均	—	16.8	11.0	16.3	14.3	9.5	10.5	7.5	3.3	1.3	0.0

ひび割れが覆工深部まで同時期に進行したのであれば、ひび割れ面からの中性化深さは覆工表面と深部で同等になると考えられるが、試験の結果、ひび割れ面からの中性化深さは覆工深部に向かって徐々に減少し収束する傾向を確認した。したがって、ひび割れは施工後間もない時期に発生し徐々に進行した、外力によるひび割れの可能性があるとして推定した。

5.3 亀裂変位計によるひび割れ幅計測

前述の各調査により外力が作用する可能性が高まったため、亀裂変位計による自動計測を行い、ひび割れ幅の進行性を確認した。

1時間に1回の自動計測を約2年間継続した結果、縦断ひび割れ連続部では、0.05mm/年程度の進行性があることを確認した。この進行速度に竣工後の経過年数を掛けると約2mmとなり、実際のひび割れ幅とも一致する。

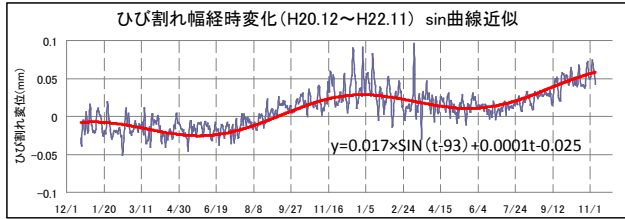


図-4 ひび割れ幅計測結果

6. 材料劣化の原因推定に用いた調査手法

材料劣化部は特に表層の劣化が顕著であり、当初は酸劣化などの化学的な劣化を想定していたが、X線回折分析やE P M A分析では、酸劣化や硫酸塩劣化を示す明瞭な結果は得られなかった。材料劣化は酸性土壌など特殊環境下を除いて、原因調査はあまり実施されておらず、単に経年劣化としている例が多い。そこで、下記の調査も行い原因究明を行った。

6.1 示差熱重量分析 (TG-DTA)

示差熱重量分析は中性化（炭酸化）の影響を調べるためなどに実施される試験であり、水酸化カルシウム、炭酸カルシウムの含有量を定量することができる。材料劣化箇所は、漏水箇所やその周辺に比較的多く見られることから、本検討では漏水による成分溶脱の可能性を調べる目的で実施した。

6.1.1 試験の概要

無水削孔により採取したコアを使用し、図-5に示すように表面、中性化境界、非中性化部の3箇所より試料を採取し、示差熱重量分析を実施した。

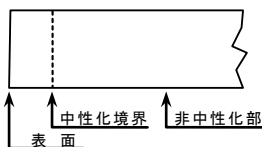


図-5 示差熱重量分析実施位置

6.1.2 試験結果

試験結果を表-4に示す。中性化した表面付近ではCaCO₃（炭酸カルシウム）が多く含まれており、中性化の原因は炭酸化であることを確認した。

また、フェノールフタレイン法による中性化試験では、表-5に示すとおり材料劣化部の中性化深さは健全部と比較して3倍であることが確認でき、

材料劣化部では中性化速度が速いことが分かった。

表-4 示差熱重量分析結果

試料名		含有率(%)	
		Ca(OH) ₂	CaCO ₃
試料1	表面	-	52.6
	中性化境界	-	-
	非中性化部	9.68	-
試料2	表面	-	56.5
	中性化境界	-	13.3
	非中性化部	-	6.00
試料3	表面	9.98	54.2
	中性化境界	-	7.18
	非中性化部	試料なし	試料なし
試料4	表面	-	52.3
	中性化境界	-	6.73
	非中性化部	10.2	6.81

表-5 中性化試験結果

中性化深さ (mm)	健全部 (試料数12)	ひび割れ部 (試料数16)	材料劣化部 (試料数10)
中央値	11.5	9.5	35.3
平均値	12.0	12.1	29.9

6.2 残存水分分析

材料劣化部では、炭酸化等によるコンクリートの脆化に伴いコンクリートの結合が緩み、内部の水分が消失することで更に脆化が進んでいる可能性があると考え、残存水分分析を実施した。

6.2.1 試験の概要

残存水分分析は、示差熱重量分析と同じコアの同じ位置から試料を採取して実施した。

6.2.2 試験結果

試験結果を表-7に示す。中性化した表面付近では残存水分率が大幅に低下しており、Ca(OH)₂が炭酸化により分解されたため水分量が減少していると考えられる。また、脱水により生じた空隙から炭酸ガスや水が浸透し易くなると考えられる。

表-6 残存水分分析結果

試料名		残存水分率(mass%)
試料1	表面	5.4
	中性化境界	25.5
	非中性化部	20.6
試料2	表面	5.6
	中性化境界	31.9
	非中性化部	20.8
試料3	表面	4.8
	中性化境界	16.5
	非中性化部	試料なし
試料4	表面	5.6
	中性化境界	22.5
	非中性化部	16.2

7. 変状原因の考察

当初想定した変状原因に対して、追加調査の結果を考慮した変状原因の考察を以下に示す。

7.1 ひび割れ

縦断ひび割れ連続部は、地形・地質からの推定の他、三次元レーザー計測による変形傾向や、ひび割れ沿いの中性化試験による進展傾向などから総合的に判断し、偏土圧による外力に起因するひび割れであると判断した。亀裂変位計による監視でも、温度変化とは相関しない変位増加傾向が認められたことも、外力の影響を裏付けるものと考えている。

7.2 材料劣化

各分析試験結果は、いずれも水酸化カルシウムが分解され溶脱している影響を示しており、基本的には水との接触や炭酸化に起因する成分溶出による空疎化・脆化が原因であることを解明した。

劣化機構自体は特殊ではないが、在来工法の覆工は施工上の問題から品質不良部が発生し易く、劣化が生じ易いものと考えられる。

しかし、覆工表面が薄くはく離する劣化部については、覆工に厚く付着した煤に含まれるSO_xやNO_xが水と反応して硫酸イオン、硝酸イオンが発生し、局所的な酸劣化が生じた可能性が残るため、煤やはく離片の成分分析など現在も調査中である。

8. 今後の補強補修方針

8.1 ひび割れ

縦断ひび割れ連続部は、外力が要因であり、進行性があることが確認できている。外力性のひび割れで進行性がある場合には内面補強等の対策が必要であるが、進行速度が0.05mm/年程度である

ことから、当面補強対策は行なわずモニタリングによる監視を行なう「予防管理」による対応も可能である。当面は経過観察を行ないながら補強対策の実施時期も含め、対応を検討することとしている。

8.2 材料劣化

材料劣化は、成分溶脱や炭酸化が主要因であること、内部のコンクリート圧縮強度は十分な強度があることなどから、特殊な対策は不要であると判断した。覆工表面のはく離現象に対しては、煤に含まれるNO_x、SO_xによる酸劣化の可能性があるが、酸性土壌による地山側からの劣化ではなく、覆工表面側から劣化が進行する点は成分溶脱や炭酸化と同じである。劣化が進行した箇所は、元々品質に問題があったと考えられることなどから、対策工としては、劣化部の除去と進行速度抑制のため、ウォータージェット等による壁面の洗浄+はつりを基本として行なうことを検討している。

謝 辞

本トンネルの補修補強対策の検討にあたり、ご指導を頂いた新仲哀トンネル（既設）補修対策検討委員会の九州大学教授・江崎哲郎委員長をはじめ、九州共立大学・牧角龍憲教授、長崎大学・蔣宇静教授、(独)土木研究所・真下英人委員、(株)高速道路総合技術研究所・城間博通委員に、この場をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小林一輔監修：コンクリート実務便覧、pp.430～463、オーム社、2004.
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 '09、2009.

谷川征嗣*



国土交通省九州地方整備局北九州国道事務所工務課長
Masatsugu TANIGAWA

鋦 淳司**



国土交通省九州地方整備局北九州国道事務所工務課専門官
Junji KUWA

安田 亨***



パシフィックコンサルタンツ株式会社交通技術本部トンネル部長、工博
Dr. Toru YASUDA

田近宏則****



パシフィックコンサルタンツ株式会社大阪本社交通技術部技術課長
Hironori TAJIKA