

変状トンネルにおける 新たな調査手法に関する検討

谷川 征嗣¹・安田 亨²・田近 宏則³・石田 智朗³

¹ 国土交通省 九州地方整備局 北九州国道事務所(〒802-0803 福岡県北九州市小倉南区春ヶ丘10-10)

²正会員 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
(〒163-6018 東京都新宿区西新宿6-8-1)

³正会員 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
(〒541-0052 大阪府大阪市中央区安土町2-3-13)
E-mail:hironori.tadika@os.pacific.co.jp

わが国の供用トンネルは高度成長期に建設されたものが最も多く、また同時期に建設されたトンネルは変状が発生している割合も多い状況である。最近ではトンネル点検が定期的の実施されるようになり、変状発生が明らかになることで調査や対策が実施される件数も増えてきたが、変状原因を特定することは容易ではなく対策を検討する上での課題となっている。

ひび割れに関しては、コンクリート打設時の沈下や乾燥収縮などの施工要因によるものか、外力による有害なものかの判断が難しいことが課題である。また、コンクリートの劣化が顕著なものがあるが、進行が緩やかであることもあり、原因自体の調査はあまり行われていないのが現状である。本研究では、変状原因究明のための新たな調査方法を適用した結果、有効であることを確認したので報告する。

Key Words : old tunnel, survey method, crack, degradation, deformation factor

1. はじめに

山岳トンネルの補修・補強対策においては、変状原因の究明が重要であるが、原因を特定することは容易ではなく課題となっている。原因特定を困難にする要因は主に2点あり、コンクリートや支保工以外に地山自体が構造体の一部であること、部材の厚みや構造、施工法などが不明瞭であること、が挙げられる。

また、同じ規模のひび割れであっても、外力が作用するものとそれ以外の施工要因等によるものでは、対策規模が大きく異なると考えられ、変状要因に応じた健全度評価基準の策定が課題である。

本検討は、これらの課題に対して、昭和42年2月に開通した国道トンネルを対象として、変状原因究明のための調査方法について検討を行ったものである。

本報告は、これらの結果について報告するものである。

2. 対象トンネルの概要

本検討は、国道201号の福岡県田川郡香春町～京都郡みやこ町に位置する新仲哀トンネルを対象とした。

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

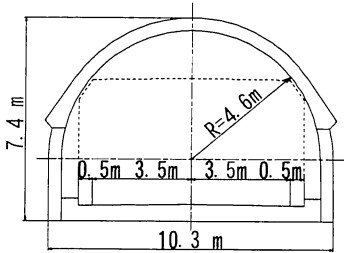


図-1 新仲哀トンネル断面

同トンネルは、漏水や覆工コンクリートのひび割れやコンクリート表面の材料劣化などの変状が著しいことから、平成19年3月に新設の新仲哀トンネル開通に伴い閉鎖された。

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、両坑口の100m間程度は、風化状況が著しく脆弱な地質である。

3. 変状状況

建設後40年以上経過していることから、ひび割れのほか、目地部の浮き・はく離や漏水、コールドジョイントも多数認められる。

これら多数の変状のうち、本検討の対象とし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	<u>ひび割れA</u> 起点側坑口付近は、幅0.3～2.0mm長さ10m程度の偏土圧的な縦断ひび割れが5スパンに連続して認められる。
	<u>ひび割れB</u> 終点側坑口付近は、両肩部に幅0.3～3.0mm長さ10m程度の縦断ひび割れが6スパンに連続して認められる。
材料劣化	<u>全線にわたり、材料劣化が認められる</u> ・表面のコンクリートが砂状で茶色に変色し骨材の露出分や薄片状のはく落が認められ、酸劣化の可能性がある。 ・表面剥離跡を打音すると硬質な金属音がするところが多く、表面のみの劣化である可能性が高い。

次項以降では、上記の変状に対する原因究明について述べる。

4. 当初想定した変状原因

(1) ひび割れ

坑内から地質調査ボーリングを実施したところ、ひび割れA部ではトンネル上部に強風化した脆弱な岩盤が分布することが確認できた。ひび割れの発生位置や地形との関係と併せて考察した結果、ひび割れは外力によるひび割れである可能性が疑われた。

一方、ひび割れB部では、トンネル上部には亀裂の少ない新鮮な花崗岩が分布することや、一部に背面空洞が残ることが確認できたため、外力が作用した可能性は低いと考えられた。

実際に外力に起因する変状である場合には、補強対策が必要となる可能性があり、外力作用の有無の判定が重要な課題であった。

(2) 材料劣化

水質分析の結果、漏水は酸性水ではなく中性～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。

劣化要因が表面側にある場合は表面の処理だけで済むが、地山側にある場合には対策は容易ではなく大規模となることから、劣化要因や劣化機構の特定が重要課題であった。

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や、亀裂変位計による進行性の確認などが一般的であるが、これらの結果だけでは外力の作用を判断することは難しいのが実情である。そこで本検討では、原因推定の判断材料となりうる新たな調査手法の適用性について評価を行なった。

(1) MMSによる3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。変形を把握する手法としては断面測量があるが、多数の点を測量することは難しく得られる情報は限られていることから、変形が顕著なケース以外では変形傾向の把握は難しい。そこで、MMS（モバイルマッピングシステム）を利用した3次元レーザー計測を実施し、検証を行った。

a) MMSの概要

レーザーレーダーに加え、高精度GPSとカメラを搭載したシステムであり、レーザーを用いて壁面形状を高精度に計測できる手法である。計測した点は3次元座標による位置情報を有することから、覆工表面を多点計測することで、覆工の3次元形状を取得することが可能である。

同システムを搭載した車両を走行させながら計測することができるため、供用中のトンネルであっても交通規制無しで計測できる利点がある。

多数得られた3次元座標を持つ点群より、覆工の曲面に沿った近似円を求める手法で出来型を推定した基準断面を設定し、基準断面と計測点の差分により変形モードを把握することができることから、外力の作用有無の判定への応用を試みた。

なお、実証実験により、今回使用したレーザースキャナー（13,500点/秒）の50km/h走行時における浮き・段差の検出能は、検出対象が50cm角で2mm程度であることを確認した。変形モードの検出精度は、壁面の相対形状差分で算出することから2mm程度の精度は確保でき、

数回の計測による変形モードの再現性についても実証済みである。MMS搭載車両の概要を図-2に示す。

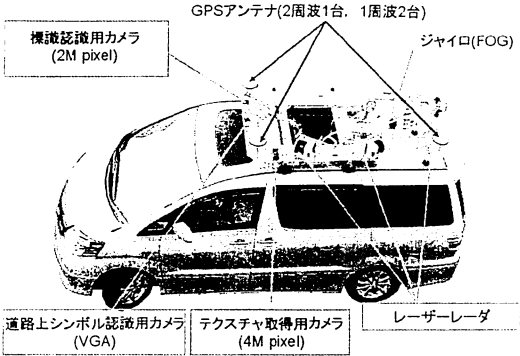


図-2 MMS計測車両

b) MMSによる計測結果

今回のMMSによる3次元レーザー計測（走行速度50km/h）により得られた点群を図-3に示す。

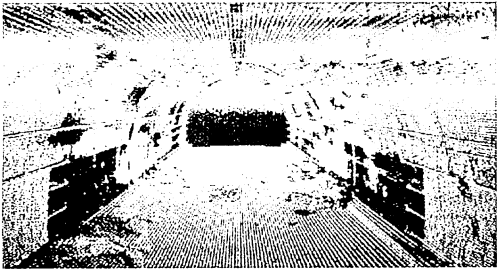


図-3 MMS計測結果

表-2に示す2箇所の特徴的なひび割れ部に対して、変形モードの確認を行なった。

基準断面に対する変形量の計算結果を図-4および図-5に示す。

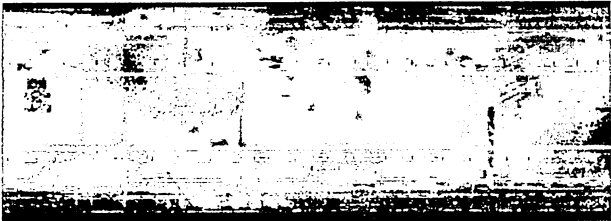
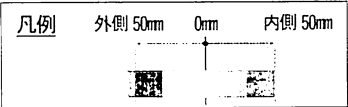


図-4 (i) ひび割れA部の変形量計算結果

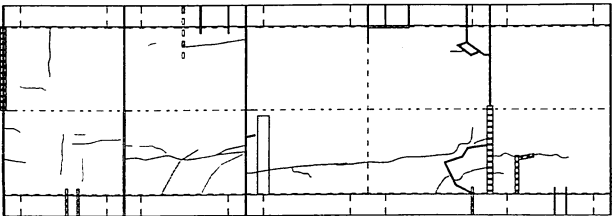


図-4 (2) ひび割れA部の展開図

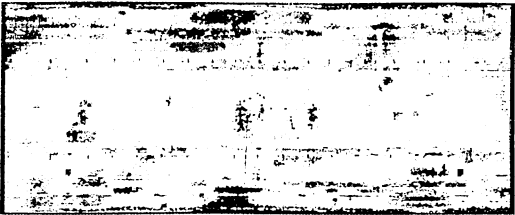


図-5 (i) ひび割れB部の変形量計算結果

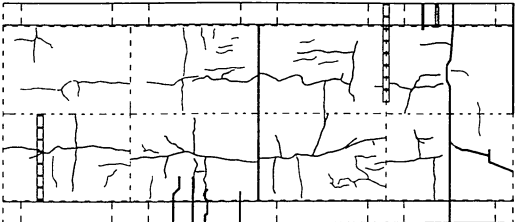


図-5 (2) ひび割れB部の展開図

図-4および図-5より、以下のことが確認できた。

- ・ ひび割れA部では、覆工肩部に生じた縦断方向の連続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。
- ・ ひび割れB部では、壁面の押し出し傾向がやや認められるが、ひび割れとの相関性は明瞭ではない。ただし、区間中央部では天端付近が地山側へ変形する傾向が認められる特徴がある。

なお、ひび割れB部の天端付近には背面空洞が残っていることが確認されており、これをモデル化した温度応力解析を実施したところ、内空側の温度が高くなった場合に空洞がある地山側に変位する挙動や、それに伴い空洞周縁部に内側引張となる応力が生じ、ひび割れB部に発生しているひび割れの方向と一致することが分かった。

(2) ひび割れ沿いの中性化試験

ひび割れの発生時期や進展状況が分かれば、外力によるひび割れか、乾燥収縮等施工要因によるひび割れかを推定することができる。そこで、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、ひび割れ沿いの中性化試験を実施した。

a) 試験方法の概要

コアボーリングにより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

エ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。

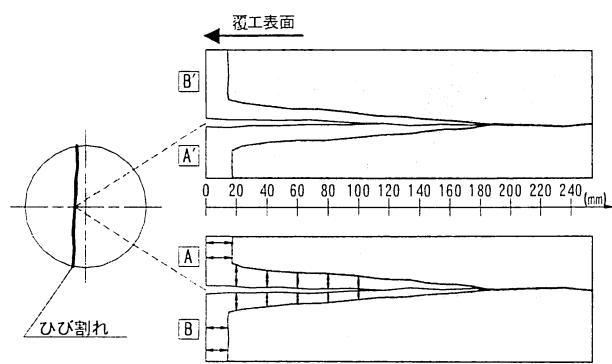


図-6 ひび割れ沿いの中性化試験方法

b) 試験結果

ひび割れ部A部およびひび割れB部で採取したコアにて実施した試験結果を写真-1～写真-2および表-3～表-4に示す。

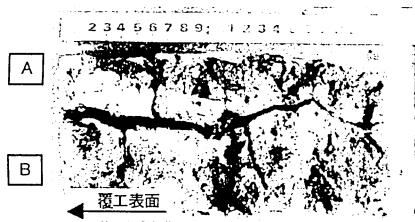


写真-1 中性化状況（ひび割れA部）

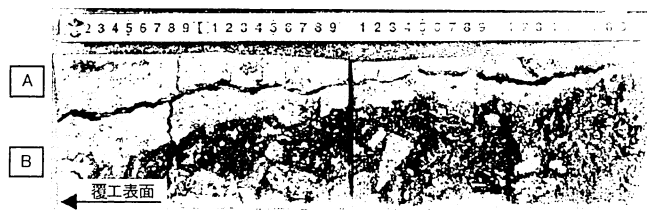


写真-2 中性化状況（ひび割れB部）

表-3 ひび割れ沿いの中性化深度（ひび割れA部）

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

表-4 ひび割れ沿いの中性化深度（ひび割れB部）

覆工表面からの距離 (mm)		20	40	60	80	100	120	140	200	260	300	360
中性化深度 (mm)	a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	b	23.0	30.0	26.0	29.0	21.0	20.0	14.0	14.0	15.0	12.0	7.5
	平均	23.0	30.0	26.0	29.0	21.0	20.0	14.0	14.0	15.0	12.0	7.5

ひび割れ部Aのコアは、覆工表面の中性化深度は26mm

であった。これに対してひび割れ沿いの中性化深度は、覆工表面付近では最大23mmとなっており表面と同程度であったが、表面から遠ざかるにつれて徐々に減少し205mmの位置で0となった。

したがって、ひび割れは施工後間もない時期に発生し、徐々に進行していった様子が伺えることから、外力によるひび割れの可能性があるかと推定した。

ひび割れ部Bのコアは、覆工表面の中性化深度は13mmであった。ひび割れがコアの側面にそれて行ったため片面しかデータが得られなかったが、ひび割れ沿いの中性化深度は覆工表面付近では23mmとなっており覆工表面より深くなっている。この理由としては、漏水の影響により覆工表面の中性化速度が遅くなった可能性が挙げられる。また、覆工表面からの距離が増えても中性化深度はあまり変化が無く、表面から360mm地点でやや減少する傾向が認められた。

したがって、中性化深度の絶対値よりひび割れは比較的初期において深部まで短期間に進展し、その後はあまり進行していない様子が伺えることから、乾燥収縮や温度変化などによるひび割れの可能性があるかと推定した。

6. 材料劣化の原因推定に用いた調査手法

材料劣化部では特に表層の劣化が顕著であり、トンネル全線にわたり認められたことから、当初は酸劣化などの化学的な劣化を想定していた。しかし、科学的劣化を念頭に実施したX線回折分析やE PMA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。材料劣化は酸性水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。そこで本検討では、調査を追加し原因究明を行った。

(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。

a) 試験の概要

無水削孔により採取したコアを使用し、図-7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。

試料は、漏水の有無や骨材露出、はく離など材料劣化箇所の表面状態がそれぞれ異なる4箇所から採取した。

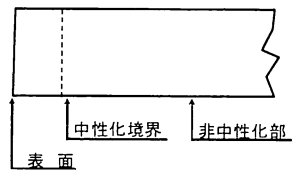


図-7 示差熱重量分析実施位置

b) 試験結果

試験結果を表-5に示す。中性化した表面付近ではCaCO₃（炭酸カルシウム）が多く含まれていることが分かったことから、中性化の原因は炭酸化であると判断した。

前述の通り表面の劣化状態は異なるが、いずれも同様に中性化が進行していることが分かる。試料3のみ表面付近でもCa(OH)₂が検出されており、原因は不明であるが、中性化試験やX線回折分析の結果と一致している。

表-5 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

また、フェノールフタレイン法による中性化試験では、表-6に示すとおり材料劣化部の中性化深さは健全部やひび割れ部と比較して3倍となっていることが確認でき、材料劣化部では中性化速度が速いことが分かった。

表-6 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

(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、コンクリート内

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。

a) 試験の概要

残存水分分析は、図-7に示す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。

b) 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中性化境界や非中性化部と比較して残存水分率が大幅に低下していることが確認できた。

これは、Ca(OH)₂が炭酸化によりCaCO₃とH₂Oに分解されることで水分量が減少しているものと考えられる。

表-7 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

中性化部の残存水分は非中性化部より大幅に少ないことから、脱水により生じた空隙から炭酸ガスや水が浸透しやすくなっていると考えられる。

7. 変状原因の考察

当初想定した変状原因に対して、5. および6. に示した調査結果により考察した変状原因を以下に示す。

(1) ひび割れ

ひび割れA部は、MMSの結果より壁面の押出しによる変形傾向が認められたことから、偏土圧地形や風化岩盤が分布する事実を総合的に判断し、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。ひび割れ沿いの中性化試験でも、ひび割れが徐々に進展した傾向が伺えることや、別途実施した亀裂変位計による1年間の変位計測においても、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られるものと考えている。

ひび割れB部は、MMSの結果では背面空洞が残る天端付近が空洞側へ変形している傾向が認められ、ひ

び割れ位置ともある程度一致する傾向があった。ただし、天端を押し上げるような側壁の押し出し傾向は認められなかったことや前述の温度応力解析結果から、外力に起因するひび割れでは無いと判断した。亀裂変位計による変位計測においても温度変化に伴う伸縮しか認められなかった。

(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、トンネル覆工によく見られる材料劣化は、酸劣化などの特殊な劣化ではなく、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なものではないが、トンネル覆工は施工上の問題から特に古いトンネルでは締め固め不足などによる品質不良部が発生し易く、このような劣化が生じ易いものと考えられる。

なお、漏水周縁部のエフロレッセンスを観察した結果、エフロレッセンスにより押し出されたコンクリートの表層が数mm角程度の小さな薄片状にはく離する現象を確認した（写真-3）。これも成分溶脱による劣化機構の一つである。



写真-3 エフロレッセンスによる表層はく離
(○で囲んだ部分)

8. まとめ

MMSによる3次元レーザー計測により、トンネルの変形傾向を把握することができ、ひび割れとの位置関係から外力作用の可能性を判断することが可能であることが分かった。この手法によっても外力作用の有無を断定することはできないが、原因推定の客観的な判断材料として有効であると考えられる。

また、ひび割れ沿いの中性化試験は、漏水等により常に湿潤状態にある部位には適用できないが、発生時期や進展状況を推定できる簡便な手法として有効であると考えられる。

材料劣化の原因究明として実施した示差熱重量分析および残存水分分析は、X線回折分析やE P M A分析などと比較して低コストで比較的簡単に実施することができる試験方法である。中性化試験と組み合わせて実施することで、劣化原因を概ね推定できるため、調査初期段階で実施することが有効であると考えられる。

謝辞：本研究にあたり、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・蔣宇静教授ほか委員の方々に、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.

A STUDY OF NEW SURVEY METHOD ABOUT DEFORMED TUNNEL.

Masatsugu TANIGAWA, Toru YASUDA, Hironori TADIKA and Tomoaki ISHIDA

It is high-growth period that the largest number of tunnel were constructed in Japan, and these tunnels which were constructed in the same period also have deformation with high ratio. Recently, tunnel inspection has been carried out periodically, and the number of survey and countermeasures has been increasing by clearing occurrence of deformation. However, it is not easy to find out deformation factors, and they are issues in examining countermeasures. It is an issue that is not easy to judge whether a factor of construction like settlement in concreting and drying shrinkage or a factor of hazardous like external force in regard to cracks. And even though the deterioration of concrete is obvious, it is slow. Thus the survey about itself has not been often carried out. In this study, authors reported that new survey method is effective for determining the cause of deformation.