

高速道路トンネル覆工の調査および補強対策

谷口 徹也¹・山戸 隆秀²・篠崎 岳太³・蔣 宇静⁴

¹正会員 西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社（〒810-0073 福岡市中央区舞鶴 1-2-22）

E-mail:t.taniguchi.a@w-e-kyushu.co.jp

²正会員 西日本高速道路株式会社九州支社長崎高速道路事務所（〒854-0063 長崎県諫早市貝津町 1008）

E-mail:t.yamato.aa@w-nexco.co.jp

³非会員 応用地質株式会社九州支社（〒811-1302 福岡市南区井尻 2-21-36）

E-mail:shinozaki-taka@oyonet.oyo.co.jp

⁴フェロー会員 長崎大学大学院教授 工学研究科（〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14）

E-mail:jiang@nagasaki-u.ac.jp

長崎自動車道日岳トンネルは，過去に覆工背面空洞注入工，導水工や部分的な落対策工などの補修工が鋭意行われていた．しかし，トンネル覆工表面画像を用いたひび割れ抽出，図化および近接目視点検結果（以下，「詳細点検結果」という）により健全度評価を実施した結果，大規模修繕が必要と判断された．そこで，詳細点検結果に基づいて変状原因を仮定して各種調査を行い，これらの結果から変状原因を推定して覆工補強工法の選定および設計を実施した．

Key Words: lining concrete, back cavity, deformation mechanism, close visual observation, countermeasure

1. はじめに

西日本高速道路株式会社（以下，「NEXCO 西日本」という）は，政府が平成 25 年 11 月 29 日に取りまとめた「インフラ長寿命化基本計画」¹⁾，国土交通省が平成 26 年 5 月 21 日に作成した「インフラ長寿命化計画（行動計画）平成 26 年度～平成 32 年度」²⁾および，東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社が平成 26 年 1 月 22 日に策定した「大規模更新，大規模修繕計画（概略）」³⁾に基づき，NEXCO 西日本が管理する高速道路等の維持管理，更新等を着実に推進するための中長期的な取組の方向性を明らかにする「NEXCO 西日本インフラ長寿命化計画（行動計画）」⁴⁾（以下，「行動計画」という）を策定した．行動計画は，これまで進めてきた取組を継続し，予防保全の観点等から高速道路資産の点検等を実施し，点検，診断の結果に基づいて必要な対策を適切な時期に，着実かつ効率的，効果的に実施することにより，トータルコストの縮減と確実な高速道路機能の維持を図るとともに，これらの取組を通じて得られた高速道路資産の状態や対策履歴の情報を記録し，次の点検，診断等に活用する「メンテナン

スサイクル」の継続的な発展につなげるものである．

NEXCO 西日本では，図-1 の高速道路の点検から補修の流れ⁵⁾に示すように，目的に応じた頻度，手法により点検を行い，構造物の変状を適時，適切に把握し，通行上の安全を確保するために必要な措置を講じている．必要な措置のうち，変状が著しい場合や経過年数の増大や使用環境の影響が一因とみられる劣化に伴う変状が顕著

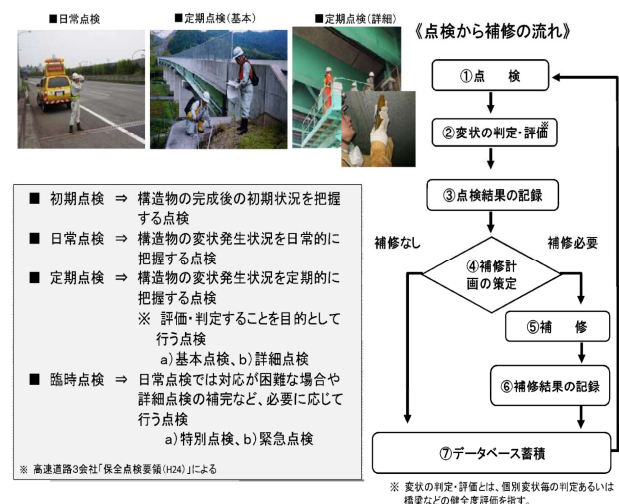


図-1 高速道路の点検から補修の流れ⁵⁾

な場合は、予防的観点も取り入れた、大規模更新および大規模修繕（以下、「特定更新等工事」という）が取り組まれる。特定更新等工事は、ライフサイクルコストの最小化、予防保全および性能強化の観点を考慮し、技術的見地から必要かつ効果的な対策を講ずることにより、高速道路資産の機能を長期にわたって健全に保つために行うものである。

長崎自動車道日岳トンネルは、特定更新等工事としてトンネル覆工の大規模修繕を行うトンネルである。過去には、トンネル覆工に部分的なはく落対策工、覆工背面空洞注入工や漏水対策工などの補修が行われていたが、今なおひび割れが多く分布している区間が存在している。

本稿は、トンネル覆工表面画像を用いたひび割れの定量データ把握および近接目視点検結果（以下、「詳細点検結果」という）をもとに健全度評価を実施し、これに基づいて各種調査を行い、当該ひび割れの発生原因を推定して覆工補強工法の選定および設計を実施した結果に

ついて報告するものである。

2. 日岳トンネルの概要と変状概要

(1) 概要

日岳トンネルは、長崎自動車道の大村 IC と諫早 IC の間に位置し、供用年数 36 年の矢板工法で建設されたトンネルである。図-2 に日岳トンネルの位置、図-3 に標準断面図を示す。上下線は別線でそれぞれ 2 車線断面である。トンネル周辺の地質は、火山礫凝灰岩、凝灰質礫岩、玄武岩、凝灰質シルト岩、砂質凝灰岩、砂岩が分布する。主な過去の補修は、メッシュシートなどによる部分的なはく落対策工、エアモルタルによる覆工背面空洞注入工、導水樋などによる漏水対策工が施工されている。表-1 に日岳トンネルの諸元を示す。



図-2 日岳トンネル位置図

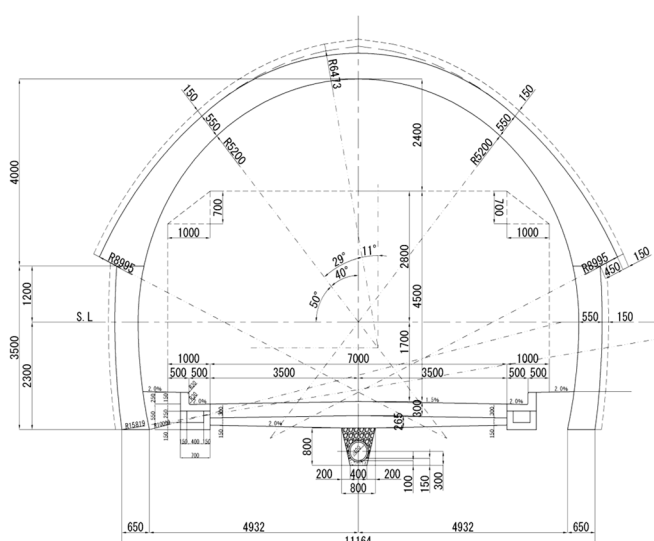


図-3 日岳トンネル標準断面図

表-1 日岳トンネルの諸元

所在地	長崎県大村市
延長	上り線：777m，下り線：780m
供用年数	36年（昭和57年供用）
地質	火山礫凝灰岩，凝灰質礫岩，玄武岩 凝灰質シルト岩，砂質凝灰岩，砂岩
施工方法	矢板工法
主な補修履歴	- 部分的なはく落対策工（メッシュシートなど） - 覆工背面空洞注入工（エアモルタル注入） - 漏水対策工（導水樋）

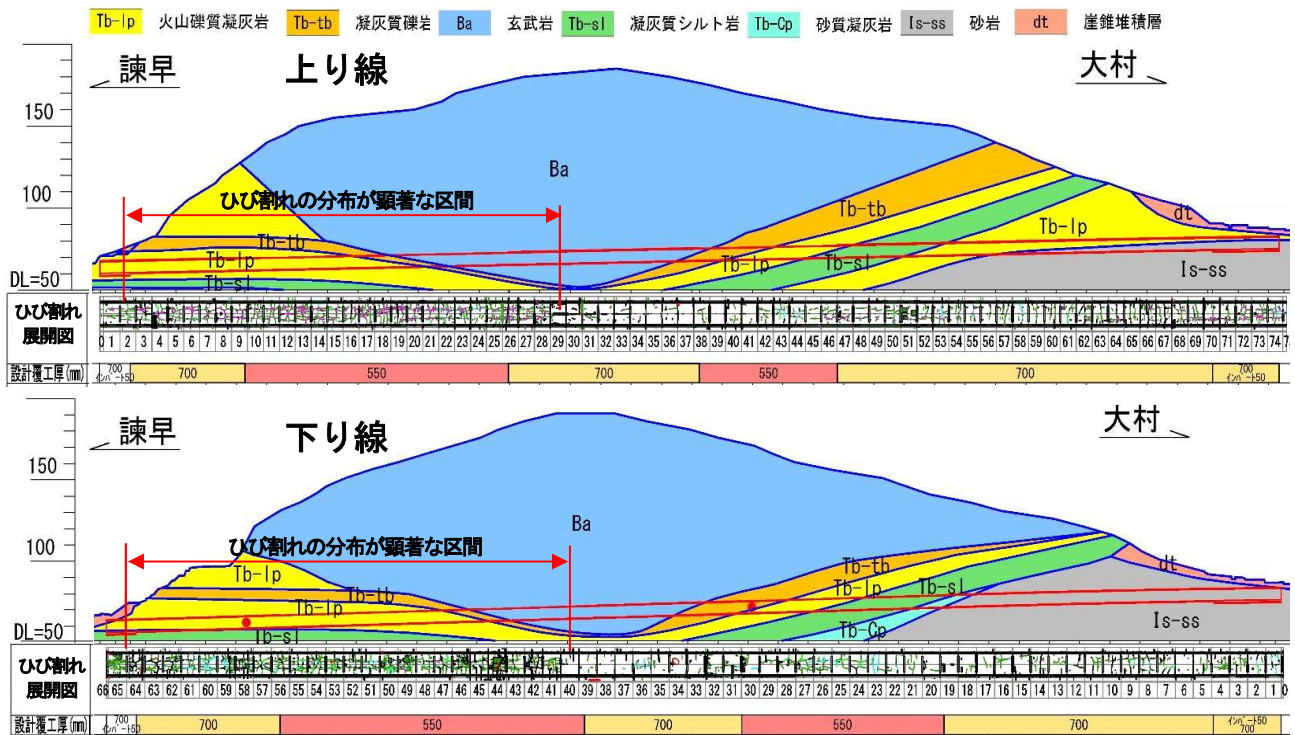


図-4 日岳トンネルの地質概要およびひび割れ分布状況

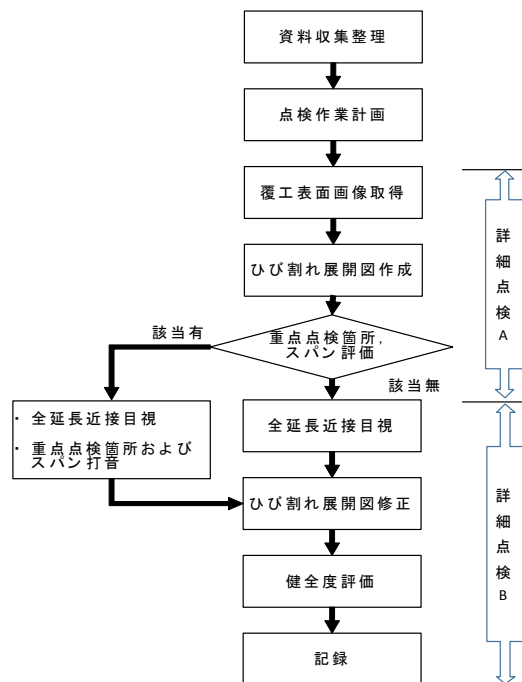


図-5 NEXCO 西日本トンネル詳細点検フロー (抜粋) ⑨
(一部編集あり)

(2) トンネルの変状概要

図-4に、日岳トンネルの地質縦断面図およびひび割れ展開図を示す。トンネル覆工のひび割れ発生状況は、上下線ともに諫早側の約300m区間において分布が顕著である。当該区間の地質は、主に火山礫質凝灰岩である。また、全線にわたり上半と下半の水平打継目やひび割れから漏水が生じている。



写真-1 覆工表面撮影車両による撮影状況

3. トンネル詳細点検結果

(1) トンネル詳細点検の方法

図-5にNEXCO西日本のトンネル詳細点検の基本的なフローを示す⁹⁾。トンネル詳細点検は、近接目視かつ打音を実施することを基本とするが、近接目視の支援として、近接目視実施前に覆工表面画像による変状の机上判定(以下、「詳細点検A」という)を行う。覆工表面画像は、写真-1に示す覆工表面撮影車両で撮影して取得する。机上判定は、覆工表面画像から変状を観察、記録して、覆工コンクリート1打設長(以下、「スパン」という)ごとに、後述する算出方法にて構造的な安定性に対する評価点(以下、「外力評価点」という)および利用者の安全性に対する評価点(以下、「はく落評価点」



写真-2 近接目視、打音点検状況

という)を求め、重点的に点検が必要なスパンを判定する。また、はく落の危険性がある変状が確認された箇所は重点点検箇所として判定する。続いて、詳細点検Aの判定結果に基づき、写真-2に示す近接目視および打音点検を実施する。これを詳細点検Bという。詳細点検B実施後は、はく落や漏水など利用者の安全性に対する変状は個別に判定し、構造的な安定性に対しては、スパン単位で評価点を用いた手法により健全度評価を行う。

(2) 評価点算出方法

評価点は、①ひび割れの幅、長さ、分布、②ひび割れの方向性、③ひび割れの形状パターン、④漏水、エフロレンスの有無により、外力評価点とはく落評価点を算出する。また構造的な安定性に対しては、評価点をもとに健全度ランクが決定される。表-2に健全度ランクの標準を示す⁷⁾。①と②については、岩盤力学の分野で研究されているクラックテンソルの考え方を採用したひび割れ指数であるTCI(Tunnel-Lining Crack Index)が用いられる。TCIの基礎式を式(1)に、図-6にTCI算出のための展開図を示す⁸⁾。TCIは、トンネル覆工表面のひび割れの幅、長さ、方向をパラメータとしている。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n \left(l^{(k)} \right)^a \left(t^{(k)} \right)^b \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (1)$$

ここに、 F_{ij} : TCI

A : 対象とする覆工コンクリートの面積

n : ひび割れの本数

$l^{(k)}$: k 番目のひび割れの長さ

$t^{(k)}$: k 番目のひび割れの幅

$\theta_i^{(k)}$: k 番目のひび割れの法線ベクトルが x_i 軸となす角 (反時計回りを正)

$\theta_j^{(k)}$: k 番目のひび割れの法線ベクトルが x_j 軸となす角 (反時計回りを正)

a : ひび割れ幅の重み付けに関する係数

b : ひび割れ長さの重み付けに関する係数

表-2 健全度ランクの標準 (一部編集あり)⁸⁾

健全度ランク (外力)					
I	II	III-1	III-2	IV	V
- 変状なし - 軽微 - 外力評価点 30点以下 - 進行性なし	- 外力評価点 31~59点 - 継続的監視	外力評価点 60点以上で進行性が緩やか	III-1の状況から進行しているようにみられる	- 放射状ひび割れ - 圧ざ 5mm以上の段差、すれのあるひび割れ	変状の進行が極めて著しい
対策必要なし	継続的監視が必要	適切な時期に対策検討が必要	速やかに対策検討が必要	早急に対策検討が必要	直ちに対策が必要

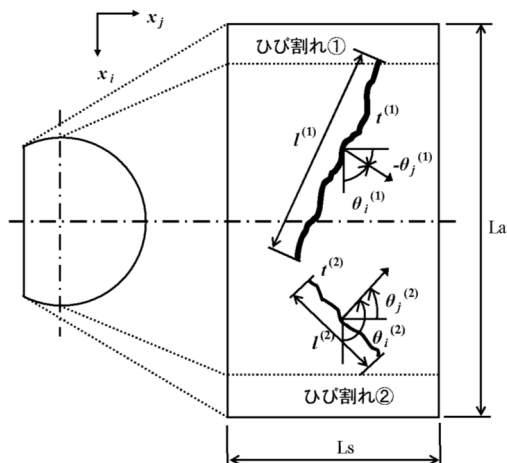


図-6 TCI算出のための展開図例⁸⁾

各評価点は、式(1)により求めた F_{I1} , F_{22} をもとに、式(2)のとおり F_0 を算出し、式(3)、式(4)および以下の閾値により求める。

$$F_0 = F_{I1} + F_{22} \quad (2)$$

ここに、 F_0 : TCI

F_{I1} : TCI (縦断成分)

F_{22} : TCI (横断成分)

① ひび割れの幅、長さ、分布に対する評価

$$\text{外力評価 } y1 = \frac{58 \times F_0 \times 10^5}{F_0 \times 10^5 + 10} \quad (3)$$

ここに、 $y1$: 外力評価点

$$\text{はく落評価 } y2 = \frac{32 \times F_0 \times 10^5}{F_0 \times 10^5 + 13} \quad (4)$$

ここに、 $y2$: はく落評価点

② ひび割れの方向性に対する評価

外力評価

$y1=4$ ($0.7 \leq Z < 1.0$) 横断卓越型

$y1=7$ ($0.3 \leq Z < 0.7$) 縦横断拮抗型

$y1=11$ ($0.0 \leq Z < 0.3$) 縦断・斜め卓越型

はく落評価

$y2=2$ ($0.7 \leq Z < 1.0$) 横断卓越型

$y2=4$ ($0.3 \leq Z < 0.7$) 縦横断拮抗型

$y2=6$ ($0.0 \leq Z < 0.3$) 縦断・斜め卓越型

ここに、 Z : F_{22}/F_0

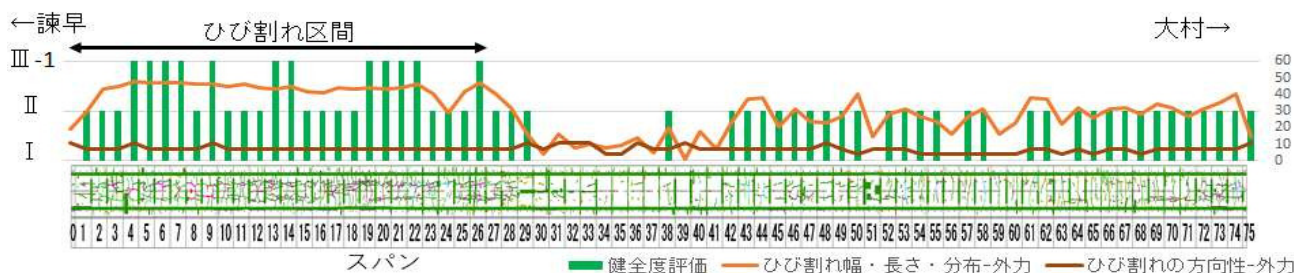


図-7 平成 26 年度詳細点検のひび割れ展開図，ひび割れ評価点および健全度ランク（上り線）

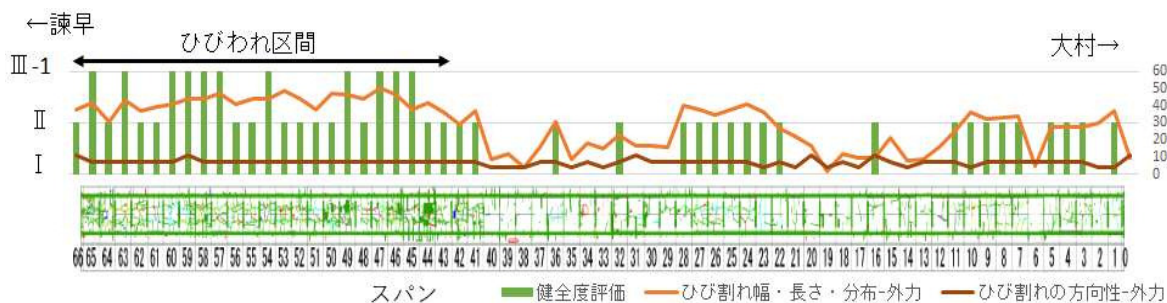


図-8 平成 26 年度詳細点検のひび割れ展開図，ひび割れ評価点および健全度ランク（下り線）

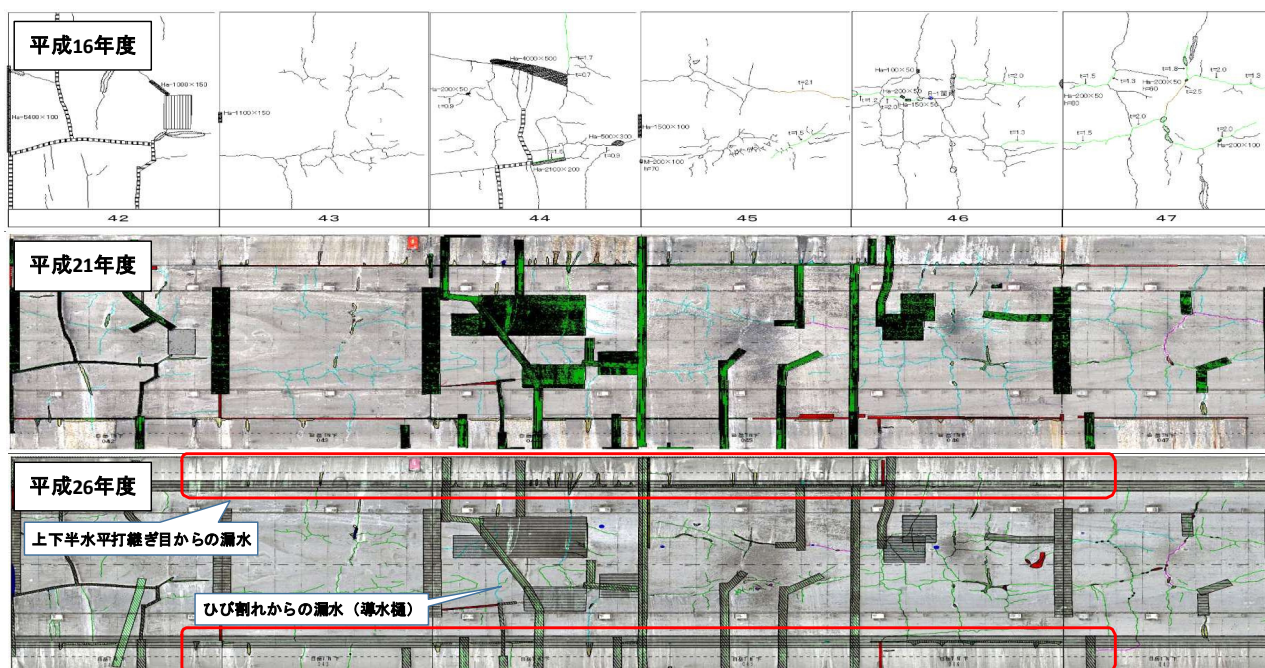


図-9 各年度のひび割れ展開図比較の例（下り線 No.42～47 スパン）

(3) 詳細点検結果

図-7，図-8 に平成 26 年度詳細点検のひび割れ展開図，ひび割れ評価点および健全度ランクを示す。上下線とも諫早側坑口から約 300m 区間にひび割れ評価点が高く健全度ランクⅢ-1 のスパンが集中している。ひび割れに段差，圧差はない。また図-9 の覆工表面画像から確認できるとおり，ひび割れや上下半水平打継目からの漏水が顕著である。これらの状況から，当該区間を対策検討区間とした（以下，「ひび割れ区間」という）。

(4) ひび割れの経年変化

日岳トンネルは，平成 16 年度，平成 21 年度および平

成 26 年度に詳細点検が実施されている。図-9 に各年度のひび割れ展開図を示す。平成 16 年度と平成 21 年度のひび割れ展開図は，寸法が正確でないため定量的な比較が困難であるが，各年度のひび割れ展開図を目視で比較した結果，大きな経年変化は認められなかった。

4. ひび割れ発生の原因究明

(1) 原因究明のための着目点

詳細点検などで判明した特徴を次のとおり整理した。

①健全度ランクⅢ-1 のスパンが上下線とも諫早側の約

表-3 調査項目と目的

調査項目		調査目的
現況構造調査	覆工電磁波探査, 削孔空洞調査	既施工の背面空洞注工の注入状況を確認
	水質分析試験	漏水が覆工の劣化も影響を与える水質か否かの確認
外力の可能性調査	調査ボーリング, 岩石試験	ひび割れ区間における膨張性地山の有無
覆工コンクリートの品質調査	使用骨材産地調査	ひび割れ区間の覆工コンクリートの反応性骨材使用の有無
	アルカリ骨材反応試験	ひび割れ区間の覆工コンクリートのアルカリ骨材反応の可能性
	覆工強度調査 (シュミットハンマー)	ひび割れと覆工コンクリート強度の関連



写真-3 削孔空洞調査孔内状況の例

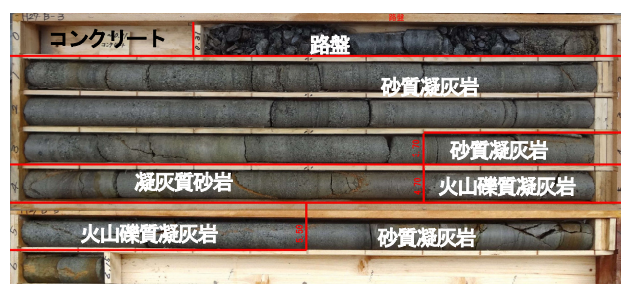


写真-4 調査ボーリングコア写真 (鉛直, 下り, No.58)

300m 区間に集中している (ひび割れ区間)。

- ②300m 区間のひび割れに段差や圧ぎは生じていない。
- ③過去の詳細点検結果からひび割れの経年変化はない。
- ④ひび割れや上下半水平打継目から漏水が生じている。
- ⑤背面空洞注工が平成 17～20 年に実施済みである。

これらの特徴から、ひび割れ発生の原因を外力作用と覆工コンクリートの品質の可能性を仮定し、表-3 に示す「現況構造調査」、「外力の可能性調査」、「覆工コンクリートの品質調査」を実施した。

(2) 現況構造調査

a) 覆工電磁波探査, 削孔空洞調査

過去に実施された背面空洞注工の注入状況を確認することを目的として、天端部縦断方向に覆工電磁波探査を、過去に空洞が存在した個所に対する削孔およびファイバースコープによる目視調査を実施した。調査の結果、写真-3 のとおり空洞が無く、覆工コンクリートは十分な厚さを有し健全な状態であることを確認した。

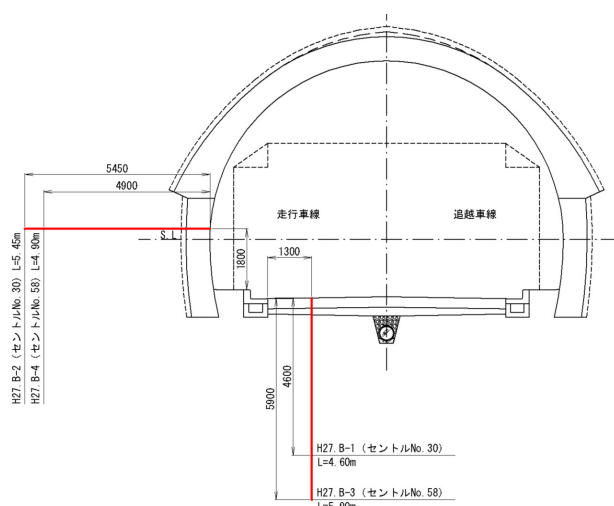


図-10 調査ボーリング削孔位置



写真-5 調査ボーリングコア写真 (水平, 下り, No.58)

b) 水質分析試験の結果

削孔空洞調査の際に流出した覆工背面の水および、覆工からの漏水を採取し、水素イオン濃度 pH, 電気伝導率 EC, イオン分析を行った。試験の結果、覆工コンクリートに悪影響を及ぼす水質ではないことを確認した。

(3) 外力の可能性調査

a) 調査ボーリング結果

ひび割れ区間において、図-10に示す位置に、地層に粘土鉱物が含まれるか、また膨潤性の地質であるかを確認することを目的として調査ボーリングを実施した。

写真-4, 写真-5に調査ボーリングコアの写真を示す。コアは棒状であり未固結部分は存在しなかった。また、風化しやすい岩といわれる凝灰岩を確認した。

b) 岩石試験結果

地山の膨張性の有無を明らかにするため、調査ボーリ

ングコアで岩石試験を行った。図-11、図-12に膨張性指標ダイヤグラムを示す。ダイヤグラム中の赤線は、トンネル標準示方書の「地山の膨張性を示す指標の例」⁹⁾を参考にした。鉛直コアにおいては、含水比、単位体積重量、一軸圧縮試験について指標を上回るものもあるが、変形係数、浸水崩壊、膨張率では膨張性を示さない。水平コアにおいてはすべての項目で膨張性を示さない結果となった。加えて、X線粉末回析による膨潤性を持つ粘土鉱物の有無を確認した結果、サポナイトが検出されたが含有量が微量であったため、トンネル周辺の地山は膨張性の可能性が低い地山と判断した。また地山強度比¹⁰⁾についても概ね2より大きいことから、膨張性土圧の発生は考えにくい地山であると判断した。

(4) 覆工コンクリートの品質調査

a) 使用骨材産地調査およびアルカリ骨材反応試験結果

ひび割れの分布状況が格子状であるため、アルカリ骨材反応を疑った。本覆工コンクリートに使用された骨材の産地を調査したところ、近傍他構造物でアルカリシリカ反応をおこしている骨材と同じ産地の安山岩であることが分かった。アルカリ骨材反応試験結果を図-13に示す。すべてのコアは材齢14日間で膨張率が0.10%以下であり、無害と判定される。なお、C-4は材齢24、28日で0.11%となるが、28日間で0.11%に収束していることから、「潜在的に有害な膨張性はない」と判断した。

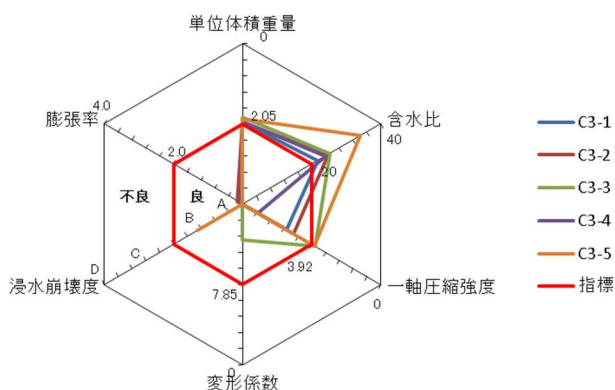


図-11 膨張性指標ダイヤグラム（鉛直，下り，No.58）

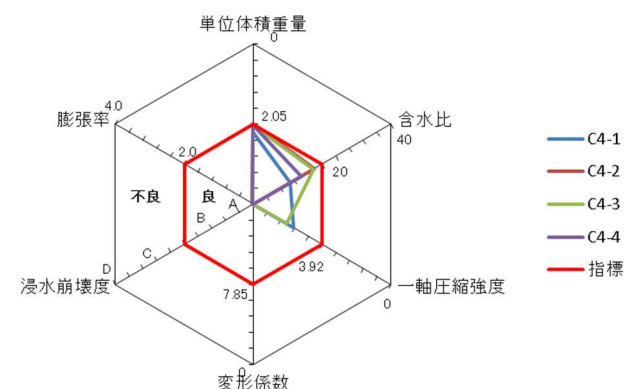


図-12 膨張性指標ダイヤグラム（水平，下り，No.58）

b) 覆工強度調査

ひび割れ区間の覆工コンクリートの強度をシュミットハンマーにより推定した。強度測定位置は、図-14 のとおり覆工打設模様の有無によって選定した。その結果、すべての測定位置で設計基準強度は満たしており、覆工コンクリートの品質は良好であることを確認できた。

(5) ひび割れ発生原因の究明と対策方針

詳細点検および各種調査結果から判明した状況を整理すると次のとおりとなる。

a) 外力作用の可能性

- ①ひび割れの進行性は認められない
- ②背面空洞注入実施済み
- ③有害な地下水はみとめられない
- ④地山に膨張性は認められない

b) 覆工コンクリートの品質

- ①アルカリ骨材反応は認められない
- ②コンクリート強度は設計基準強度を満足する

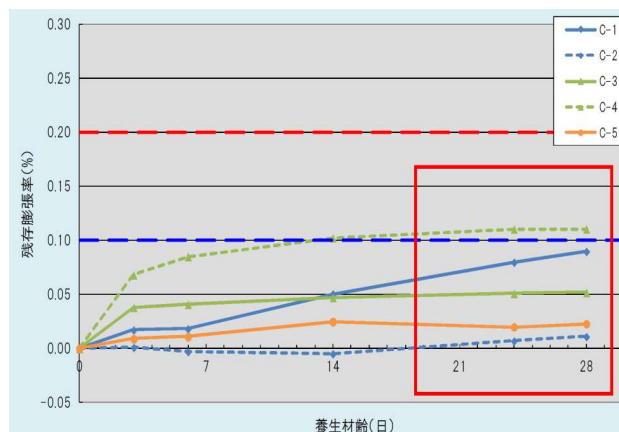


図-13 アルカリ骨材反応試験結果

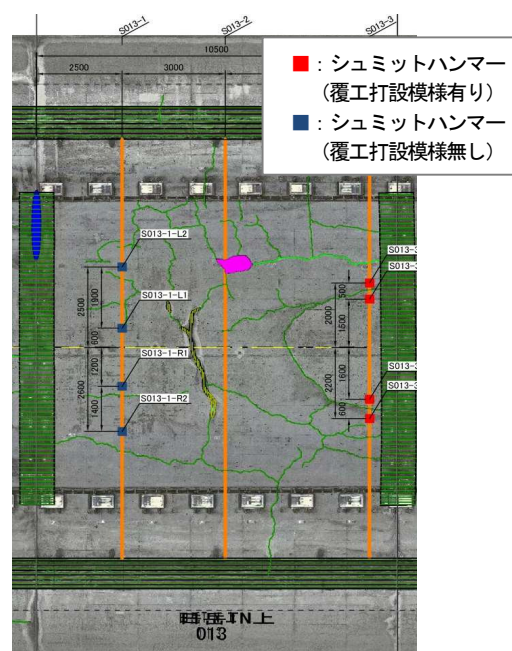


図-14 覆工強度調査位置（上り，No.13）

表-4 主な変状対策工の選定目安¹⁾

◎：非常に有効 ○：有効 △：場合により適用できる

変状対策工	変状要因							施工条件
	塑性 圧	偏 圧	鉛 直 圧	水 圧	支 持 力 不 足	材 料 劣 化	イ ン バ ー ト 無	
裏込め注入工	◎	◎	◎	○			○	◎ 片側車線規制で施工可能
ロックボルト補強工	○	○	△	△				片側車線規制で施工可能
内巻工	○	○	○	△		△	△	トンネル内通行止めが必要
繊維シート接着工	○	○	○	△		△	△	片側車線規制で施工可能
鋼板接着工	○	○	○	△		△	△	トンネル内通行止めが必要 ※採用には細心の注意が必要
路盤下補強工					○		○	片側車線規制で施工可能
アンカー補強工	◎	○	△				△	片側車線規制で施工可能
インバート補強工					○		◎	トンネル内通行止めが必要 ²⁾
水抜き工 ²⁾				◎				片側車線規制で施工可能

注 1) 近年では片側車線規制でも施工が可能な場合がある。

注 2) 水抜き工は本要領においては補修工に分類される。

詳細点検結果および各種調査結果から総合的に勘案すると、地山に膨張性は認められず、背面空洞もないことから継続的な外力の作用は考えられない。また、覆工コンクリートは十分な強度を有し、アルカリ反応性骨材でもないことから、コンクリートの品質が原因とも考えられない。したがって、ひび割れは施工後初期の段階で初期地圧の作用や背面空洞による緩み土圧の作用により発生したものと考えられる。なお、ひび割れには進行がみられないため、トンネル構造としては安定した状態と考えられるが、覆工コンクリートがひび割れによりブロック化しているため、ひび割れの補強による覆工の一体化が必要と判断した。

5. 補強対策工

補強対策工は、NEXCO 西日本の設計要領第三集トンネル保全編¹⁾に従い、鉛直土圧に対する覆工の一体化を目的として選定した。表-4 に対策工選定の目安を示す。鉛直土圧の対策工は内巻工、繊維シート接着工、鉄板接着工が有効である。本トンネルでは、車線規制を行い通行車両の直近で施工する必要があるため、材料搬入が簡易でひび割れを補強する効果があり、十分な接着が期待できる炭素繊維シート接着工法を選定した。なお当該施工範囲は、事前にひび割れ止水注入工を施工する。

上下半水平打継目からの漏水対策は、水抜き削孔を行いトンネル背面の地下水を直接導水する工法を選定した。図-15 に補強対策工施工範囲図を示す。

6. おわりに

本稿では、覆工表面画像を用いてひび割れを抽出、図

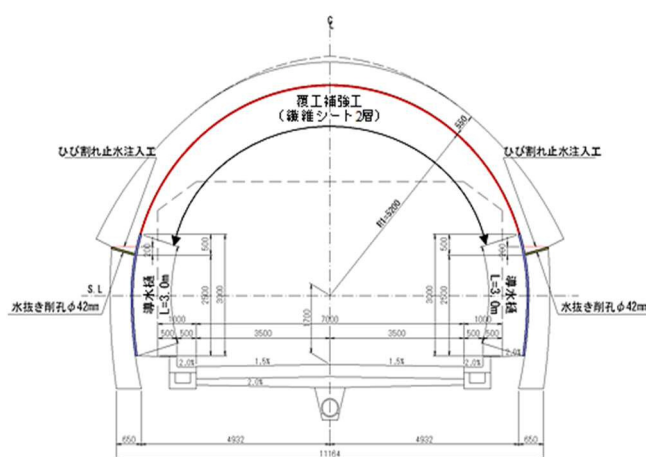


図-15 補強対策工および漏水対策工

化して健全度評価を実施した。この手法は、ひび割れを定量データとして表現可能であるため、より正確で再現性のある健全度評価と経年変化の把握が可能である。今回の検討では、トンネル覆工に発生するひび割れに対する必要な調査や補強対策工選定など、対策検討を実施する際にも非常に有効であることが確認できた。日岳トンネルは、高速道路会社3社の中でも先陣を切ってトンネル覆工の特定更新等工事を行うトンネルである。覆工表面画像を用いたひび割れ定量データ把握技術が、後続の特定更新等工事に活用されれば幸いである。

参考文献

- 1) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議：インフラ長寿命化基本計画，2013.11
- 2) 国土交通省：国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）平成26年度～平成32年度，2014.5
- 3) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：高速道路における大規模更新・大規模修繕計画（概略），2014.1
- 4) 西日本高速道路株式会社：NEXCO 西日本インフラ長寿命化計画（行動計画）平成26年度～平成32年度，2015.3
- 5) 西日本高速道路株式会社：NEXCO 西日本インフラ長寿命化計画（行動計画）平成26年度～平成32年度，p12，2015.3
- 6) 西日本高速道路株式会社：保全点検要領構造物編，p143，2015.4
- 7) 西日本高速道路株式会社：保全点検要領構造物編，P164，2015.4
- 8) 西日本高速道路株式会社：保全点検要領（構造物編）補足資料（案）【技術資料】，p5-21，2015.4
- 9) 土木学会：トンネル標準示方書[共通編]・同解説／[山岳工法編]・同解説，p45，2016
- 10) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】，p46，2015.6
- 11) 西日本高速道路株式会社：設計要領第三集トンネル保全編（変状対策），p4-2，2016.8

(2017.8.11 受付)

INVESTIGATION AND REINFORCEMENT FOR HIGHWAY TUNNEL LINING

Tetsuya TANIGUCHI, Takahide YAMATO, Takahiro SHINOZAKI,
Yujing JIANG

In the Hitake Tunnel of Nagasaki Highway, the countermeasures against falling of the concrete peel and injecting into the back cavity of the lining concrete were implemented. However, as a result of conducting soundness assessment based on inspection of cracks by using the tunnel lining surface image and the close visual observation, it was judged that the significant repair work was necessary. Therefore, in this paper, based on the detailed inspection results, various investigations were made based on assuming the deformation factors, and the deformation mechanism was estimated from these results, and the selection and design of the lining reinforcement method was studied.