

高速道路トンネル覆工の変状把握の 精度向上に関する検証

鈴木 俊雄¹・杉崎 直人²・河合 隆則³・木村 定雄⁴

¹正会員 中日本高速道路株式会社 (〒914-0014 敦賀市井川 17 号字稲荷敷 8-1)

E-mail: t.suzuki.an@c-nexco.co.jp (Corresponding Author)

²非会員 株式会社東設土木コンサルタント 基盤情報部 (〒113-0033 東京都文京区本郷 1-28-10)

E-mail: sugisaki@tousei.co.jp

³非会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋株式会社 (〒910-2178 福井市梅野町 12 字 9-1)

E-mail: t.kawai.b@c-nexco-hen.jp

⁴正会員 金沢工業大学教授 工学部 環境土木工学科 (〒924-0838 白山市八束穂 3-1)

E-mail: s.kimura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

高速道路トンネルの覆工表面は煤や油、汚濁水およびエフロッセンス等により汚れている場合が多い。この汚れは覆工の表面に存在する変状の把握を困難にしている。さらに、矢板工法で施工されたトンネルは、漏水が生じている場合が多く、漏水の発生箇所には、導水樋を設置する対策が施されている。したがって、導水樋によって覆われた部位の変状の確認は難しくなる。これらの要因は、走行型の画像撮影点検はもとより、近接目視による点検においても、変状把握の正確性に影響する。本論文は覆工表面に生じる変状把握の精度向上を目的として、覆工表面の洗浄手法を検討し、洗浄が変状把握に与える影響を明らかにするとともに、導水樋により覆われた箇所の変状の可視化を目的とした透明型導水樋の設置箇所における変状把握手法について検証したものである。

Key Words: tunnel lining, water leakage, crack, cleaning, inspection, water leakage treatment

1. はじめに

長期的に供用されている高速道路トンネルの覆工表面は、通行車両の排気ガスに含まれる煤や油、通行車両からの引き込み雨水に路面の埃が混入した汚濁水の飛散およびエフロッセンス等で汚れている場合が多い。また、矢板工法で施工されたトンネルは、建設時に湧水の多い箇所において、鋼製支保工にビニール製の導水シートを施工することや、覆工目地部に止水板を入れ、漏水対策は施されているものの、目地やひび割れから漏水が生じる場合が多く、導水樋を用いた対策が多用されている(写真-1参照)。この行為は措置として施された導水樋を設置することが、導水樋によって覆われた部位の変状の把握を難しくすることを意味する。

他方、点検作業の効率化および近接目視の支援を目的として、覆工表面の画像撮影を用いた走行型トンネル撮影システム等が導入されている(例えば1),2)が、画像撮影によって、覆工表面の汚れや導水樋で覆われた部位の変状を適切に把握することは難しいと考えられる。覆工表面の汚れ対策や漏水対策にかかわる既往の研究について見てみる。覆工表面の汚れでは、環境を配慮した覆工表面の清掃方法の開発や洗浄工法を検討した報告はある3),4)ものの、覆工表面の洗浄(以下、覆工洗



写真-1 供用中の覆工状態 (矢板工法)

浄)が変状把握に与える影響を検討したものは少ない。また、漏水対策では、道路トンネルにおける漏水の発生箇所と発生時期に関する調査事例や点導水の漏水対策の効果を確認した報告5),6)はあるものの、導水樋で覆われた部分の変状に着目し、変状把握について論じたものは、現在のところ確認できない。

一方、最近では、補修後の変状目視観察を可能とした補修材や導水樋内部の変状を近接目視による可視化を可能とした透明型導水樋(以下、透明型樋)の導入が図られている。しかしながら、前述した画像撮影によって、透明型樋内部の変状把握を検討するまでには至っていない。

そこで、本研究では覆工表面で観察される変状把握の精度向上を目的として、覆工表面の汚れ対策および導水樋の対策において、変状の可視化を可能とする手法を検討する。まず、高速道路トンネルを対象として、トンネル点検の現状技術を整理し、覆工の変状把握における課題について言及する。次に、覆工の変状把握における課題である覆工表面の汚れに対し、ウォータージェットによる覆工洗浄の手法を検討するとともに、それが変状把握の精度向上に与える有効性を検証する。さらに、近接目視のみならず、画像撮影によって取得される画像上で、透明型樋で覆われた覆工表面の変状を可視化するための手法を検討し、その手法の有効性を検証する。

2. 高速道路におけるトンネルの点検手法とその課題

(1) トンネル点検の種類と目的

トンネルの点検は、初期点検、日常点検、定期点検および臨時点検に分類される。ここでは、定期点検（以下、詳細点検と呼ぶ）に着目してその点検の考え方を整理する。図-1は詳細点検の流れを示したものである。詳細点検はトンネルの全延長を対象として、経年による材質劣化や外力による変状を把握する点検であり、詳細点検A、詳細点検Bおよび詳細点検Cによって構成される。これら点検結果に基づいて、覆工等に生じる変状の判定や健全度評がなされ、追加調査の可否の判

定および対策工の検討が行われる⁷⁾。

詳細点検Aは、走行型トンネル撮影システム（写真-2参照）によって、主に上半の覆工コンクリート表面の画像を取得し、その画像から変状展開図を作成することによって、変状の種類やその程度を机上で判定するものである。ここで、点検の対象となる変状は、ひび割れ、補修材劣化、豆板（ジャンカ）、エフロレッセンスおよび漏水であり、ひび割れについては計測精度を考慮し、その幅が0.5mm程度以上としている。これらの変状を覆工コンクリートの一打設長となるスパン単位で、変状展開図および詳細点検Aシートを作成し、重点点検箇所や重点点検スパンの判定を行う。

詳細点検Bは、近接目視、かつ打音点検を実施することを基本とし（写真-3参照）、打音点検は詳細点検Aの判定結果から判断される重点点検箇所や重点点検スパン、ならびに近接目視で打音点検が必要と判断される箇所について実施される。詳細点検Bでは、詳細点



写真-2 覆工表面撮影状況

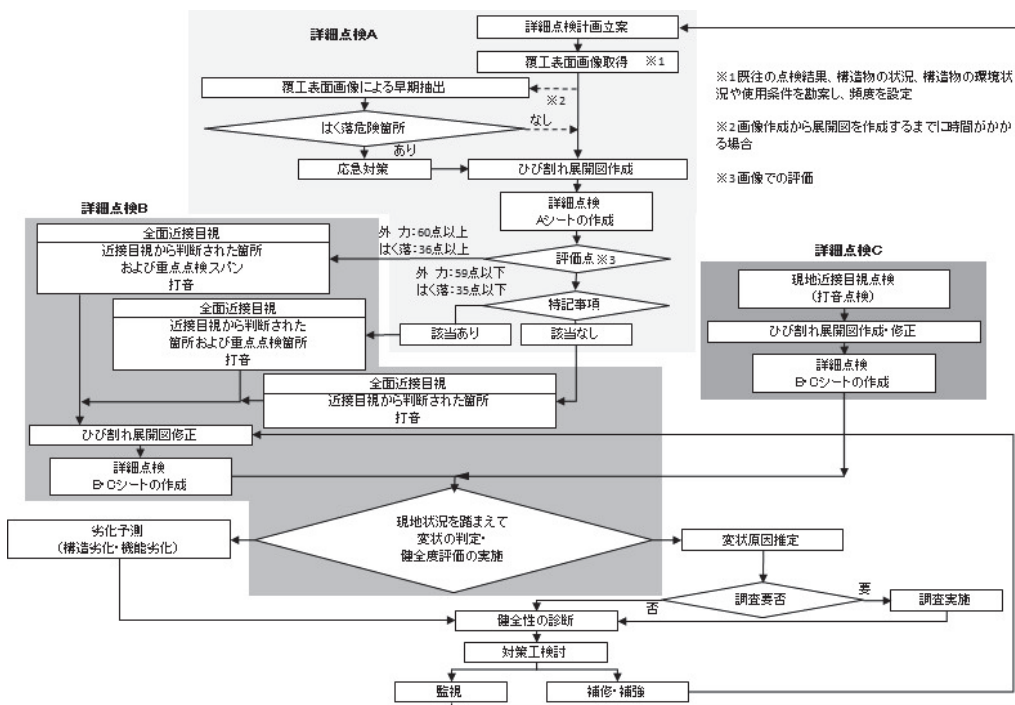


図-1 高速道路トンネルの詳細点検の流れ⁷⁾一部修正

表-1 覆工画像撮影の機材および仕様

名称	仕様		数量
デジタルビデオカメラ	イメージセンサー	1.0型 Exmor R CMOS	9台
	総画素数	2090万画素	
	有効画素数	1420万画素 (16:9)	
	レンズ	ZEISS パリオ・ソナー T	
	f (焦点距離)	9.3-111.6 mm	
	ズーム	光学 12倍 (デジタル 160倍)	
	シャッタースピード	1/8-1/10000	
	動画記録画素数/フレームレート	XAVC S HD: 1920 × 1080/60p	
照明	クリアドームテープ LED 36W (3m)		90本
発電機	2.5kV		2台
撮影架台	SUS製		1台
撮影車両	4t車		1台



写真-3 近接目視・打音点検状況

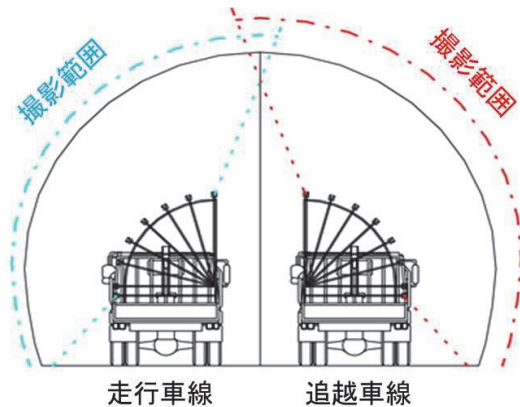


図-2 覆工画像撮影範囲

検 A で把握された変状の他、浮き、はく離、スケーリングおよび鋼材腐食が調べられる。

詳細点検 C は、トンネルアーチ部以外の側壁や路面を対象として、近接目視、かつ打音点検が実施される。その結果、詳細点検 A により作成した変状展開図の修正や追記録がなされ、詳細点検 B および詳細点検 C の結果とあわせて、健全度評価が行われる。

(2) 走行型トンネル撮影システム

本論文で論じる走行型トンネル撮影システム⁸⁾は、前述した詳細点検 A で用いられているものである。これは複数台のデジタルビデオカメラを搭載した車両で走行しながら、覆工コンクリート表面を撮影することで変状を調査するものである。画像撮影に使用する機材および仕様を表-1 に示す。まず、画像撮影前に、モバイル・マッピング・システム (以下、MMS と呼ぶ) により、トンネル三次元座標データを取得し、トンネルの断面形状、寸法、スパン長および施設設備の位置情報を取得する。次に、MMS で測定したトンネルの断面形状にあわせて、個々のカメラと覆工面との距離 (撮影距離) および撮影角度を設定して時速 80 km/h で車両

を走行しながら、走行車線および追越車線を各々半断面ずつ撮影する (図-2 参照)。なお、非常駐車帯部は断面形状が異なるため、カメラ設定を変更して、別途に撮影を行う。最後に、取得した画像を用いて変状展開図を作成する。これにより、人力によるスケッチに比べて変状の位置や規模の記録作業が簡素化でき、変状記録の作業時間が短縮し、点検・記録の効率化が図れる。走行型トンネル撮影システムを適用する詳細点検 A は、覆工に生じる変状を巨視的に把握するスクリーニングとしての役割が大きい。

(3) 覆工の表面状態と点検上の課題

覆工表面の汚れの主な原因である排気ガスの規制は、1966 (昭和 41) 年にガソリン車の一酸化炭素の濃度測定導入が契機となり、1972 (昭和 47) 年にディーゼル車の黒煙の規制が施行され、その後、順次規制が強化されてきている⁹⁾。しかしながら、約 40 年以上の長期に亘って供用されてきた道路トンネルの覆工表面は

煤や油により汚れている場合が多く、また、通行車両からの引き込み雨水に路面の埃が混入した汚濁水の飛散や漏水に伴う析出物の付着があいまって、変状状態の正確な把握を困難にしている。さらに、矢板工法で施工されたトンネルは、防水シートが施されていないため、横断目地、水平目地および覆工表面のひび割れから漏水が発生している場合が多い。この漏水は利用者に対する安全性の低下や附属物の劣化促進に影響を及ぼすリスクが高い。このため、漏水箇所に通水樋を用いた対策が多用されている。しかしながら、通水樋を設置する行為が通水樋によって覆われた箇所の覆工表面に生じているひび割れや漏水などの変状の経時変化を把握することのへい害となる。とくに、通水樋が施されている箇所は他と比べて変状が著しい場合が多い。したがって、通水樋で覆われた箇所の内部の可視化は変状把握において重要な意味をもつ。これらの他、覆工表面の状態把握を困難にするものには、浮かし張内装板や照明ラックなどがある。本論文では、覆工表面の状態把握を困難にしている覆工表面の汚れや通水樋を設置する行為に対し、とくに着目するものである。

3. 覆工洗浄の有効性

(1) 概要

供用から約40年経過した高速道路トンネルの覆工表面をウォータージェット工法により洗浄する手法をとり上げた。同工法は建物の外壁、劣化コンクリート、浄化槽、橋脚などのチッピング、目荒らしおよびライニングのはくり作業に使用されているものである。本章では、ウォータージェット工法による覆工洗浄の手法を検討するとともに、それが変状把握に与える影響を検証する。

(2) 洗浄システムの詳細

洗浄システムの概要を図-3に示す。この工法は、給水車より水タンクへ水を供給し、超高圧水発生機で発生させた超高圧水を超高圧ホースにより導水し、ウォーターノズルを複数個配置したノズルヘッドから噴射し、

その噴射反力でノズルを回転させ、コンクリート表面のはつり作業で多用されているシステムである。また、作業において発生する汚濁水を同時にバキューム車に回収することができる特徴があり、視界確保や騒音の低減、洗浄水の飛散防止等、作業環境の向上や第三者への影響を小さくすることができ、限られた交通規制環境や作業時間で覆工を洗浄するシステムとして適していると判断した。

しかしながら、ウォータージェットによる覆工表面の洗浄の実績はあるものの¹⁰⁾、様々な汚れに対する洗浄であること、覆工コンクリート表面の強度がその設計値を上回ることなど、大きく異なる場合もあることから、洗浄手法を合理的に定める必要がある。

そこで、まず対象となるトンネルの覆工表面のコンクリートの性状を把握するためのキャリブレーション手法を確立し、次に汚れや地山からの析出物が多い実トンネルにおいて洗浄効果を確認する。

その上で、洗浄前後の変状状態を比較して、変状把握の有効性を検証する。洗浄システムにおけるノズルヘッドの外観を写真-4、写真-5に、その仕様を表-2に示す。ノズルヘッドは使用圧力が80~180MPaの幅で設定が可能であり、ノズルは6穴式で、許容回転数は3000min⁻¹である。

ノズルヘッドの特徴を示すと次のとおりである。1) ノズル回転用の駆動モーターがないため、軽量かつコンパクトで、作業性が向上する。2) 洗浄領域やはつり



写真-4 ノズルヘッドの外観（表面）

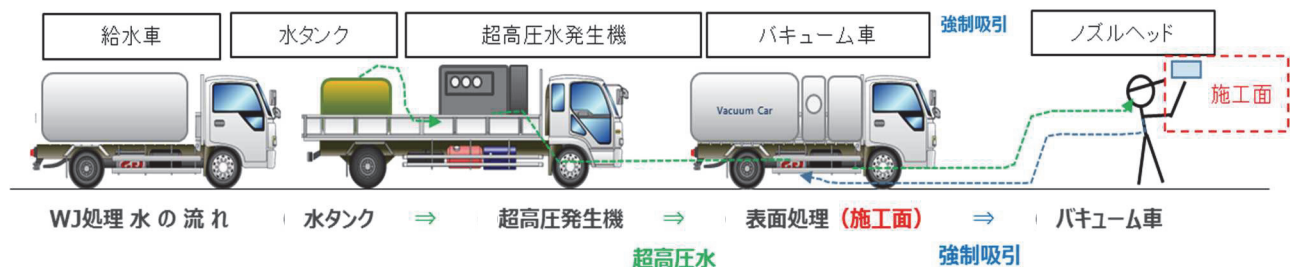


図-3 洗浄システムの概要

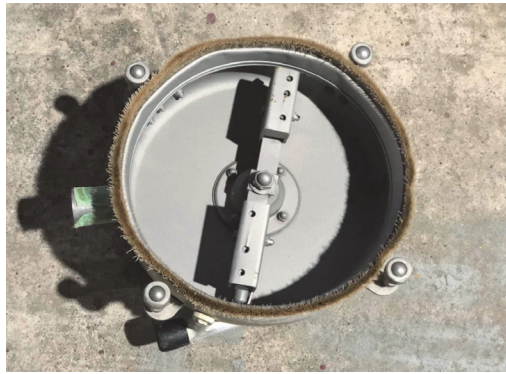


写真-5 ノズルヘッドの外観（裏面）

表-2 ノズルヘッドの仕様

型式	ASR-2515A-12
最高使用圧力	180 MPa
最低使用圧力	80 MPa
流量	12 L/min
噴射角度	12°
回転速度	1 700~2 800 min ⁻¹
質量	約 6 kg (ホース類含まず)
超高圧ホース接続口	3/4-16UNF
バキューム吸い込み口	1・1/2 (40A)
パイロットエアホース接続口	Φ 6 チューブ用



写真-6 超高圧水発生機の外観

幅が広く、ノズル回転が高速なため、施工時間の短縮が図れる。3) 適切なノズル配列により、均一な処理が可能である。4) バキューム機能を装備し、作業中のミストを回収でき、作業者の手元で噴射や停止操作が可能である。

超高圧水発生機の外観を写真-6に、その仕様を表-3に示す。超高圧水発生機は、高圧洗浄、はつりなど、ウォータージェット作業用に最適な小型パワーポンプである。その吐出圧力は最高 280 MPa、常用 245 MPa であり、吐出流量は 30 ℓ/min である。また、駆動機は 191 kW の出力が可能であり、外観寸法は幅が 4 050 mm、

表-3 超高圧水発生機の仕様

仕様		形式番号	
		標準タイプ	
吐出圧力	最高	MPa	280
	常用	MPa	245
吐出量		L/min	30
搭載エンジン出力		kW	191
外観寸法	幅	mm	4 050
	奥行	mm	1 650
	高さ	mm	2 100
質量		kg	3 750

奥行が 1 650 mm および高さが 2 100 mm であり、質量は 3 750 kg である。超高圧水発生機の特徴は次のとおりである。1) 従来の高圧ポンプに比べ吐出流量を最大 20 % 増大でき、洗浄やはつりの作業速度が高まる。2) 高精度ヘルカギアを内装することにより、エンジンを直結し、設備の大幅な省スペース化を図ることができる。3) 大容量アキュムレータの採用により高圧脈動を抑え、ホースやノズルの耐久性が向上する。4) 設備ユニット全体は従来の剛性や強度を保持しながら軽量である。

バキューム車は、スーパーモービルという車両を用いている。スーパーモービルは汚泥の吸引や沈砂の回収で一般に多用されているものである。外観寸法は幅が 4 050 mm、奥行が 1 650 mm、高さが 2 100 mm であり、タンクの容量は 3 m³ のものとした。

(3) キャリブレーション手法

ウォータージェットの吐出圧力および吐出流量の仕様を決定するために、覆工洗浄を行う部位に近接する覆工表面でキャリブレーション手法を検討した。これは前述のとおり、覆工表面の強度特性に応じて仕様を定める必要があるためである。そこで、既存資料から覆工コンクリートの設計強度を調べたところ、その値は 20 N/mm² であった。実際に、覆工コンクリートからコアを採取し、圧縮強度試験を行った結果、圧縮強度 30 N/mm² であった。

図-4 はキャリブレーションの概要を示したものである。1 箇所当りの面積を 1 m² とし、洗浄は図-4 の矢印一方向当りを約 10 秒間とし、約 50 秒間の洗浄を行うものである（写真-7 参照）。吐出圧力は 5 段階（80 MPa、100 MPa、120 MPa、150 MPa、180 MPa）とし、吐出流量も吐出圧力に合わせて 5 段階（8 ℓ/min、9 ℓ/min、10 ℓ/min、11 ℓ/min、12 ℓ/min）とした。この吐出流量は現場における汚水の回収とその作業性を考慮して定めたもので

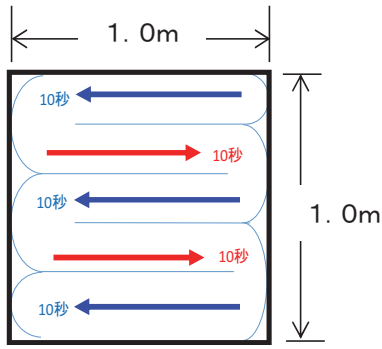


図-4 1箇所あたりのキャリブレーション



写真-7 キャリブレーションの実施状況

表-4 キャリブレーションのパターン

パターン	1	2	3	4	5
試験面積 (m ²)	1	1	1	1	1
吐出圧力 (MPa)	80	100	120	150	180
パス数	5	5	5	5	5
試験目標時間 (sec)	50	50	50	50	50

ある。なお、キャリブレーションは本洗浄で用いる洗浄システムと同じである(表-4参照)。キャリブレーション後、近接目視で覆工表面の汚れの除去程度および表面粗さの確認を行い、本洗浄で適用する仕様を決定した。

洗浄前後の覆工の表面状態を図-5に示す。吐出圧力が80~120MPaでは、表面にやや煤汚れが残留するとともに、固着したエフロレンスが除去できない箇所が確認された。吐出圧力が180MPaでは、煤汚れやエフロレンスの大部分を除去できることが確認できたが一方で、表面を過大に削り過ぎるため、粗骨材の露出が確認された。他方、吐出圧力が150MPaでは、煤汚れやエフロレンスの大部分が除去できることを確認するとともに、表面粗さも180MPaに比べて、抑えられていることが確認された。これより、本洗浄における吐出圧力は150MPaとすることとした。

以上に述べたキャリブレーション手法により、覆工

使用圧力	覆工洗浄前	覆工洗浄後
80MPa		
100MPa		
120MPa		
150MPa		
180MPa		

図-5 キャリブレーション実施前後の表面状態

洗浄の対象となるトンネル覆工に適した仕様を定めることができる。

(4) 覆工洗浄

覆工洗浄を実施したトンネルは、矢板工法によって構築されたものであり、供用から約40年が経過している。また、供用期間中、覆工洗浄は施されていない(写真-8参照)。その延長は1272m、覆工スパン数は110である。覆工洗浄の対象となる覆工スパンは過去の点検結果を鑑み、覆工の変状が著しく、また汚れが顕著なスパンを選定し、トンネル入口から805~888mの区間とした。また、横断方向の洗浄部位は走行車線の監視員通路上から追越車線の監査廊上の周長18mとし、約1200m²の覆工洗浄を行った(図-6参照)。



写真-8 覆工表面洗浄前の状況



写真-10 表面洗浄後の汚れ除去不可能箇所

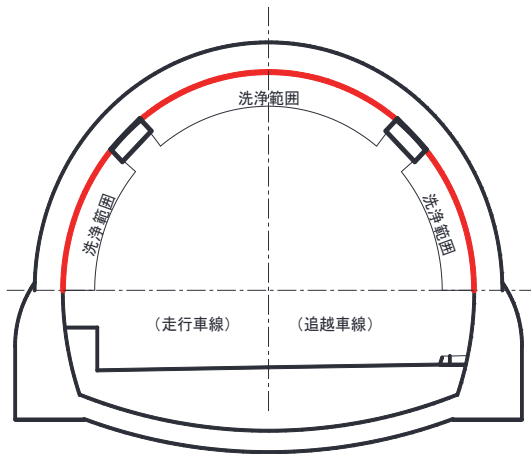


図-6 洗浄範囲 (周方向)



写真-9 洗浄状況 (走行車線側)

覆工洗浄は、まず事前に支障となる内装板や肥大化している溶脱物の部分的な除去を行い、導水樋については漏水する恐れがあるため存置した。洗浄作業は一車線を供用しながらの作業となるため、走行車線側と追越車線側の車線規制を切り替えて行い、半断面ずつ行った(写真-9参照)。

洗浄作業は車線規制を施した後、洗浄システムを搬入・設置し、キャリブレーションで決定した吐出圧力

(150 MPa)で行った。洗浄作業により生じた汚濁水は、別のヤードに設置したノッチタンク(10 m³)に移し、浮遊物質を沈殿させ、中和剤処理を施した上でPH値を確認して、河川に放流した。また、ノッチタンクに沈殿した汚泥は産廃処理とした。今回の洗浄作業は人力で行うため、アーチ部の作業については、ノズルヘッドを操作する作業員を高所作業車に乗車させて行い、存置している導水樋や照明設備およびケーブルラックについては、接触しないよう注意しながら洗浄作業を行った。作業時間は日中のみで、全体数量1200 m²を6日間で洗浄し、施工能力は200 m²/日であった。覆工洗浄後、覆工表面を観察した結果、表面に付着していた煤、油の汚れおよびエフロッセンスの大部分を洗浄できた。しかし、覆工コンクリートの深部まで浸みこんだ汚れについては、図-4に示すとおり、洗浄面積1 m²に対し、約50秒間の洗浄を行うものを約100秒間と設定し、洗浄を行ったが、除去不可能な箇所もあった(写真-10参照)。

(5) 覆工洗浄前後の状態評価

a) 覆工表面輝度による洗浄効果の確認

洗浄前および洗浄後の覆工表面輝度を測定し、覆工洗浄の効果を確認した。輝度はスポットタイプ一眼レフ方式デジタル輝度計を用いて測定した。輝度計の仕様は表-5に示すとおりである。また、輝度測定は洗浄後、覆工表面が乾燥した状態で、20 m当りで1箇所、走行車線側と追越車線側の各々で3箇所ずつ側壁部で実施した。輝度測定結果を図-7に示す。

走行車線側の輝度は洗浄前の平均輝度が0.27 cd/m²に対し、洗浄後の平均輝度は0.99 cd/m²となった。また、追越車線側の洗浄前の平均輝度は0.18 cd/m²に対し、洗浄後1.06 cd/m²となった。走行車線側および追越車線側とも輝度の改善が確認できた。また、路面からの遠望目視や走行しながら車上確認を行った結果、覆工洗浄後は覆工洗浄前に比べてトンネル内が明るく感



写真-11 輝度計

表-5 輝度計の仕様

形式	スポットタイプ 一眼レフ方式デジタル輝度計
測定角	1/3°
光学系	$f = 85 \text{ mm F2.8}$
測定距離 (測定面積)	$\infty \sim 1014 \text{ mm}$ ($\infty \sim \Phi 4.8 \text{ mm}$)
輝度単位	cd/m^2
使用温湿度範囲	0~40°C 相対湿度 85%以下 (35°C のとき)
保管温湿度範囲	-20~55°C 相対湿度 85%以下 (35°C のとき)
寸法	79 (W) × 208 (H) × 150 (D) mm
重量	850 g (電池別)

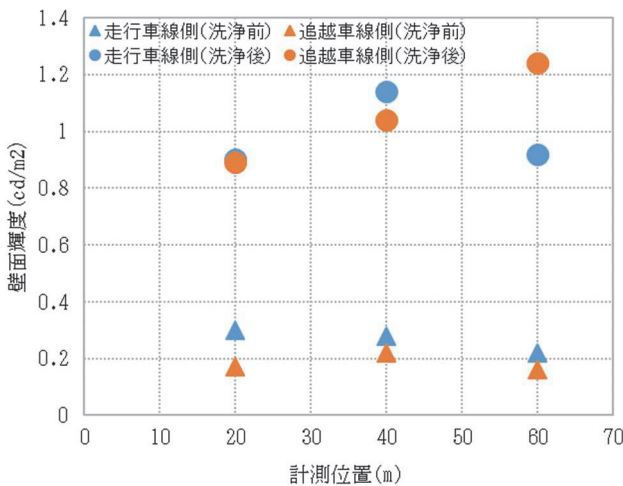


図-7 覆工洗浄前後の壁面輝度

じることを確認した (写真-12 参照)。

b) 近接目視による洗浄効果の確認

洗浄後の約1週間後に、アーチ部および側壁部の近接目視点検を実施した。また、洗浄前の点検結果は洗浄前に同じく近接目視点検を実施している。これら両者を比較して、変状把握の有効性を確認した。変状種



写真-12 覆工洗浄前 (左)・後 (右) の状況

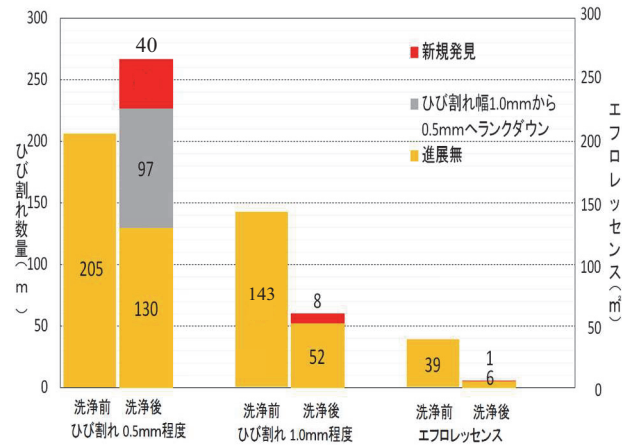


図-8 覆工洗浄前後の変状把握

類はひび割れとエフロレッセンスとした。ひび割れについては、幅0.5mm以下を0.5mm程度とし、幅0.6~1.0mmの幅を1mm程度として整理した⁷⁾。なお、点検対象とした範囲に幅1.0mm以上のひび割れは覆工表面洗浄の前後で、該当するものはなかった。洗浄の前後の変状把握の数量を図-8に示す。幅0.5mm程度のひび割れは、その延長として表すと、洗浄前に把握していた205mの延長に対し、洗浄後は267mであった。延長267mのうち、40mの延長が新たに発見され、洗浄前に幅1.0mm程度とされたひび割れが幅0.5mm程度のひび割れに変更したものが97mであった。また、幅1.0mm程度のひび割れは、洗浄前で延長143mであったのに対し、洗浄後は60mの延長を確認した。延長60mのうち、8mのひび割れが新たに発見された。これらの結果から、これまで煤やエフロレッセンスが覆工表面に付着していることによって、ひび割れの発見ミスやひび割れ幅の正確な確認を困難にしていたことが明らかとなった。したがって、覆工洗浄を施すことによって汚れ部の変状の新規発見や観察精度が相当に改善されるものと考えられる。とくにエフロレッセンスは、洗浄前に把握していた39m²の面積に対し、洗浄後は7m²であり、面積7m²のうち、1m²のエフロレッセンスが新たに発見された。新たに確認されたエフロレッセンスは、エフロレッセンスの表面に煤が付着しており、洗

浄後に表面の煤が除去されたことで覆工表面上に現れたものである。一方、覆工洗浄により大部分のエフロレッセンスが除去できたものの、前記の**写真-10**で示すようなエフロレッセンスが覆工表面に残る箇所があった。このような除去が不可能であったエフロレッセンスを除去するためには吐出圧力を上げる手法も考えられる。しかしながら、吐出圧力を上げ過ぎると、覆工表面が粗くなるへい害もあるため、必要以上の覆工洗浄は実施しなかった。

他方、詳細点検 B および C の近接目視点検の実施者にヒアリングした結果、覆工表面の汚れを除去したことで、覆工表面が綺麗になるとともに覆工スパン全体が明るくなったことで、点検がしやすくなったという意見も得られている。

4. 透明型樋内の変状把握の改善手法の有効性

(1) 概要

導水樋に覆われた箇所の変状状態の把握を目的として、近接目視点検で導水樋内部の変状を把握できる、すなわち、可視化機能を付加した透明型樋が適用されるケースがでてきている (**写真-13**参照)。2.(2)で前述したように、点検作業の効率化および近接目視の支援を目的として、画像撮影等を用いた走行型トンネル撮影システムが佐野ほか¹¹⁾により提案され、導入されている。

そこで、この手法によって覆工表面画像から透明型樋内部の覆工表面の変状把握の可否を確認した。その結果、上半部天端付近の透明型樋内部の変状の把握は可能であった。一方、下半部になるにつれて照明が樋に反射して、透明型樋内部の変状を把握することができないことがわかった。この照明の反射の原因は、撮影カメラと透明型樋の光源と反射面の関係、すなわち正対角が影響していると考えた。そこで、室内において、照明の反射を軽減できる正対角および距離を分析するため、透明型樋と画像撮影の機材を用いた実験によって、透明型樋の反射特性を把握するとともに、ひ

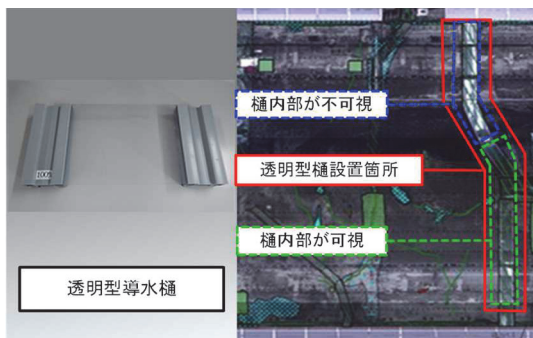


写真-13 透明型導水樋および覆工表面撮影画像

び割れの可視性の基本特性を把握する。次に、その基本特性を踏まえ、透明型樋を設置した高速道路トンネルで、覆工表面の画像撮影を行い、透明型樋内部の変状把握の有効性を検証する。

(2) 漏水の形態とその対策

漏水は、それ自体が問題になることはもとより、覆工の材質劣化、背面地山からの土砂流出、それに伴う外力変状の原因となる。さらに、漏水に伴う二次的な変状である土砂流入は、噴泥、沈砂、滞水、石灰分の溶出、つらら、側水、氷盤の変状をも引き起こすとされている。NATMでは、覆工背面から排水溝や排水管に地下水を導いて排水させる構造となっており、トンネル坑内に漏水が発生する原因は、防水シートの破損による防水機能の低下や排水管の目詰まり等による排水機能の低下である。一方、矢板工法では、防水シートが布設されていないため、覆工コンクリートの横断目地や水平打継目地およびひび割れ発生箇所から漏水が発生する特徴がある (**図-9**参照)。このため、矢板工法では、漏水の噴出や流出が、舗装面に滞水し、利用者の安全に直接影響を及ぼす恐れがあり、漏水対策工が重要となっている¹²⁾。漏水対策工は、1) 樋等により天端または壁面から脚部へ導水する方法 (導水工法)、2) 漏水箇所のひび割れに注入工を施して止水する方法 (止水工法)、3) 地下水を強制排水 (水位低下工法) する方法の三つに大別される (**図-10**参照)。これらの対策工の中で供用中のトンネルに多用されているのが導水工法である。導水工法は主に車道への漏水の落下を防ぐこ

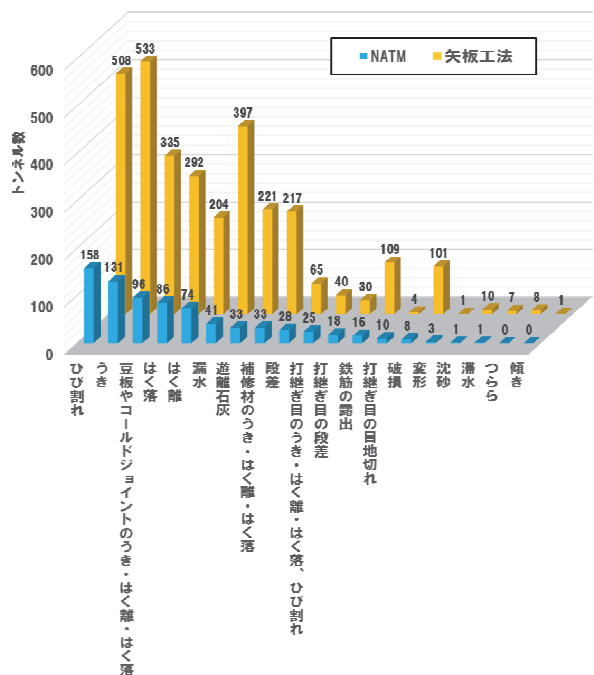


図-9 変状現象別度数分布¹¹⁾一部修正

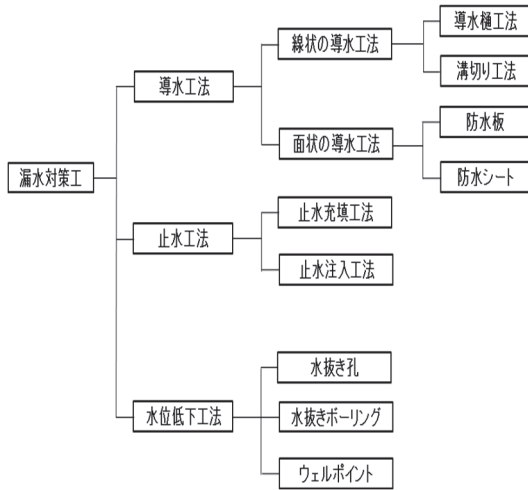


図-10 漏水対策工の種類¹³⁾一部修正

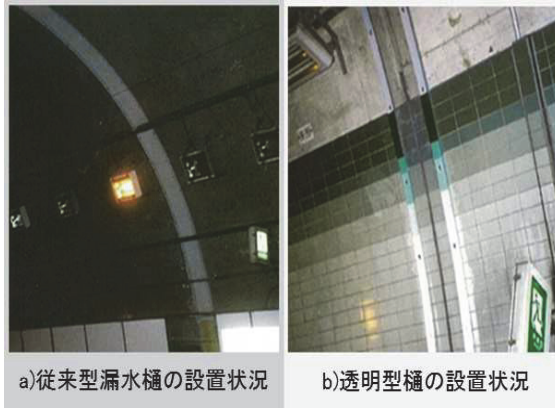


写真-14 従来型導水樋・透明型樋の設置状況

とを目的として、水みちを閉鎖せずに漏水箇所に沿って水を導く工法である。その代表的な方法には、覆工表面に平型の導水樋を取り付けて導水する方法と覆工面をU型に溝切りして、半割パイプや合成ゴム等の成型材料を取り付けて導水する方法とがある。導水工法は樋を覆エコンクリート表面にアンカーボルトで固定するだけの簡易な工法であるため、漏水発生時の即応性が高く、設置後の脱着も容易である。しかしながら、従来に採用されてきた導水樋は、樋の色が灰色であるため、導水樋を設置後、樋内部の変状状態を確認できないという課題があった(写真-14参照)。そこで、近接目視で樋内部を可視化する機能を付加した透明型樋が開発され、実用されている。樋内部を可視化することで漏水現象の把握のみならず、ひび割れの形態、規模、パターン、密度等を観察できるとともに、その進行状況を把握することが可能となる。透明型樋は、樋材としてアクリル変性高衝撃塩化板やポリ塩化ビニルを用いるのが一般的である(表-6参照)。

表-6 透明型樋の仕様の一例

材質	硬質 P.V.C
引張強さ	49.3 MPa
伸び	140%
シャルピー衝撃強さ	110 kJ/m ²
曲げ強さ	75.2 MPa
耐燃性	V-O 級
	自己消火性

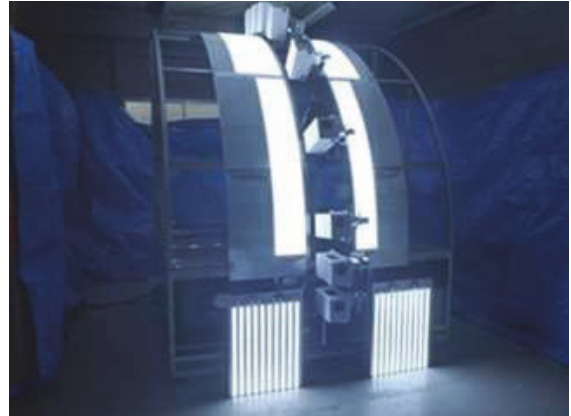


写真-15 画像撮影装置

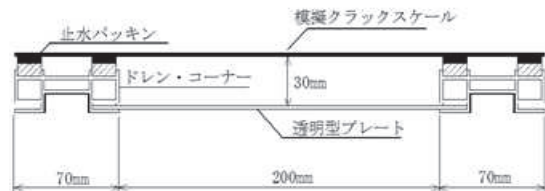


図-11 透明型樋の設置断面

(3) 透明型樋の反射特性の確認

a) 室内実験の概要

室内実験に用いた画像撮影装置を写真-15に示す。この撮影装置は、架台に走行型トンネル撮影システムで使用するものと同様のカメラを9台取り付け、その両側に照明装置を配置したものである。本実験では9台のカメラのうち、1台を使用して撮影した。透明型樋の背面には、幅0.1mm~1.0mmのひび割れを模擬したクラックスケールを配置した(図-11および写真-16参照)。

実トンネルにおける撮影距離は2.0~3.3mとしているため、カメラから供試体(透明型樋)までの距離は、その平均値に近い2.5mとした。また、撮影はカメラと供試体を同じ高さに設定した(図-12参照)。その際、正対角の影響を把握するため、カメラと供試体の正対角を7段階(0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°)とした。この設定した7段階の正対角度によって照明の反射の

影響を把握するため、カメラと透明型樋の正対角を把握することとした(図-14参照).

b) 室内実験の結果およびその考察

正対角が反射に及ぼす影響を図-13に示す. 図中の透明型樋が白く帯状となる部分が照明の反射である. これより、カメラと樋の正対角が5°以下になると、照明が反射して、樋内部の模擬ひび割れを検知することは難

しいことが明らかとなった. 一方、正対角が10°以上の場合、照明の反射はなく、樋内部の幅0.1mm~1.0mmのすべての模擬ひび割れを検知することが可能であった. 以上から、1台のカメラの撮影範囲を鉛直方向で約2m、また、水平方向で約1mとして、10°以上の正対角を設けることで、ひび割れ観察が可能となることを確認した.

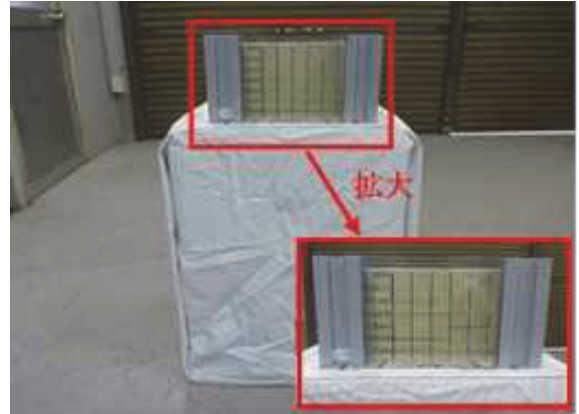
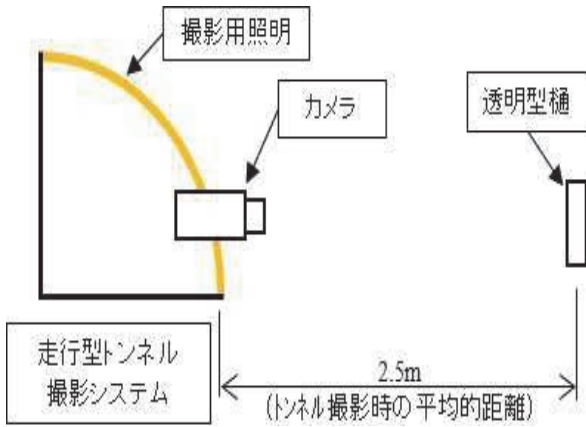


図-12 室内実験の撮影概要

写真-16 透明型樋の反射特性の確認

反射状況 写真				
正対角度	0°	5°	10°	15°
反射面積	15.3 cm ²	19.5 cm ²	—	—
反射率	39%	50%	—	—
コメント	反射影響 有	反射影響 有	反射影響 無	反射影響 無
反射状況 写真				
正対角度	20°	25°	30°	
反射面積	—	—	—	
反射率	—	—	—	
コメント	反射影響 無	反射影響 無	反射影響 無	

図-13 正対角度が反射に及ぼす影響

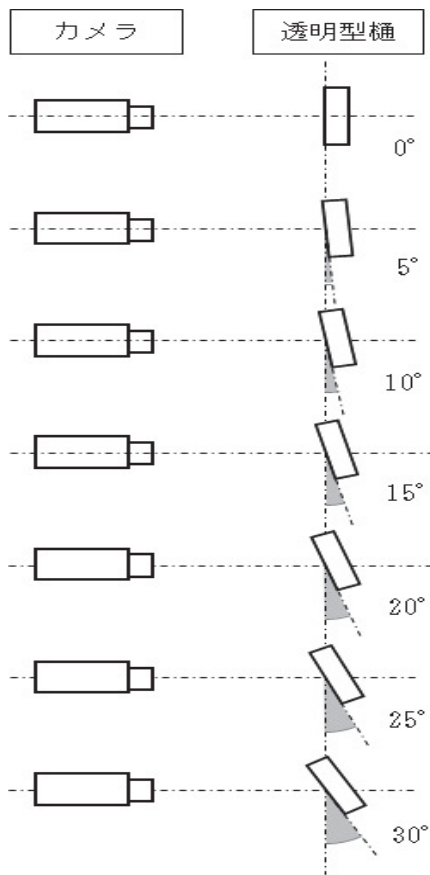


図-14 正対角度パターン

表-7 トンネルに設置している透明型樋の状況

トンネル延長 (m)	供用年	透明型樋設置時期	スパン番号	透明型樋設置面積 (m ²)
2925	1980	2013年	22	6.9
			31	3.2
			32	7.1
			49	9.9
			94	7.3
			139	7.1
			175	6.3

(4) 改善した画像撮影手法の現場適用性

a) 概要

改善した画像撮影手法の有効性を矢板工法によって施工され、供用から約40年経過した道路トンネルにおいて検証した。トンネルの延長は2,925mであり、覆工のスパン数は254である。このスパン数のうち、7スパンに透明型樋が設置されている(表-7参照)。透明型樋を設置後、5年経過してから走行型トンネル撮影システムによる撮影を行った。走行型トンネル撮影システムによる撮影は、夜間に、時速80km/hで走行しながら、走行車線および追越車線を各々半断面ずつ撮影し

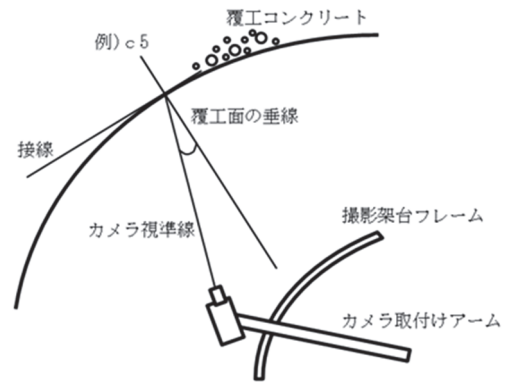
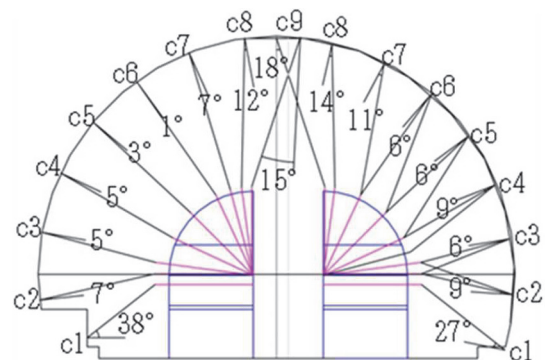
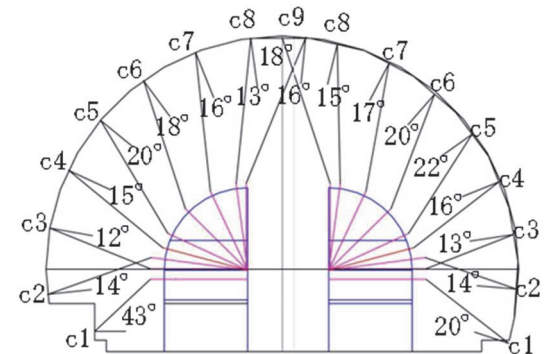


図-15 カメラと覆工面の正対角度



カメラ角度変更前



カメラ角度変更後

図-16 カメラ角度変更前・変更後

た。撮影手順は、まず9台のカメラ角度を変更せずに撮影した(以下、「角度変更前」)。次に、室内実験で得られた知見を基に、個々の9台のカメラと覆工面との正対角を10°以上となる13°~43°に設定(以下、「角度変更後」)して撮影した(図-15および図-16参照)。これらの撮影結果をもとに照明の反射状況および検知した変状の種類やその規模を分析した。また、本撮影とは別に近接目視を行い、変状状況を詳細に確認した。

b) 照明の反射状況

透明型樋が設置されている7スパンについて、「角度変更前」と「角度変更後」の反射面積を図-17に示す。「角度変更後」は「角度変更前」に比べて、約15%以

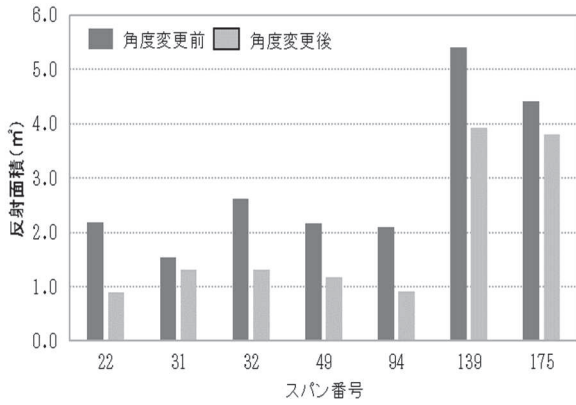


図-17 角度変更前・角度変更後の反射面積

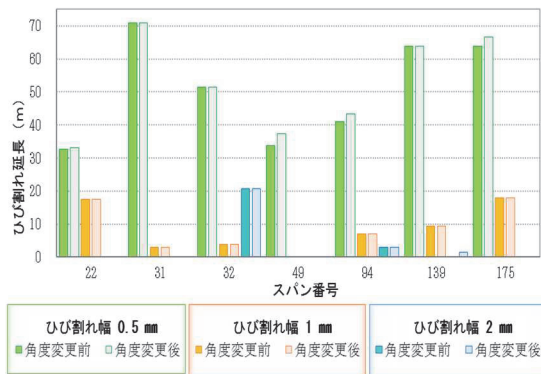


図-18 ひび割れ検知

上の反射面積が削減できることをすべてのスパンで確認した。このうち4スパン(スパン番号22, 32, 49, 94)は反射面積の削減率が平均50%程度であり、スパン番号139は約30%であった。しかしながら、スパン番号31および175は反射面積の削減率が15%であった。この原因は、設置している透明型樋の表面に歪みがあり、これによって乱反射が発生したためである。

以上の結果から、正対角を10°以上に設定することで反射を軽減できることがわかった。その一方で、樋表面に歪みがある場合には入射光がさまざまな角度で反射し、乱反射が起こるため、透明型樋を設置する際は、樋表面が歪まないよう丁寧に設置することが重要であることがわかった。

c) 正対角度の変更による変状把握の有効性

「角度変更前」と「角度変更後」について検出した変状の種類および数量を比較した結果を図-18～図-20に示す。「角度変更後」は反射箇所が軽減した結果、スパン番号22, 49, 94, 175では、幅0.5mmで長さ0.4～3.8mのひび割れを1～6箇所新たに検知した。また、スパン番号139では幅2.0mmで長さ1.5mのひび割れを1箇所新たに検知した。その他、スパン番号49, 94で、0.07～0.77m²の溶脱物(エフロレッセンス)を新たに検知

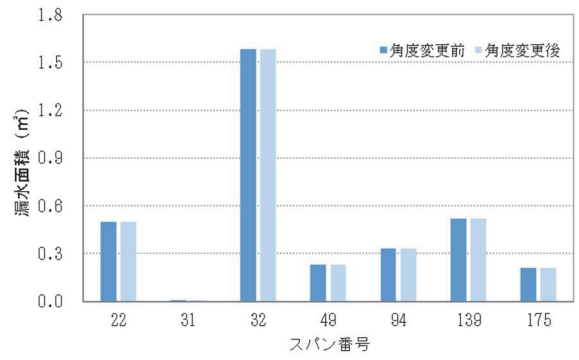


図-19 漏水検知検知

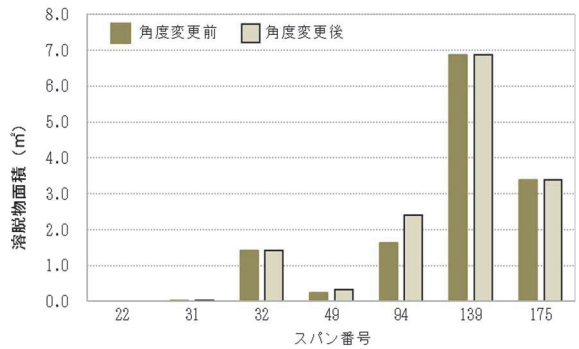


図-20 溶脱物(エフロレッセンス)の検知

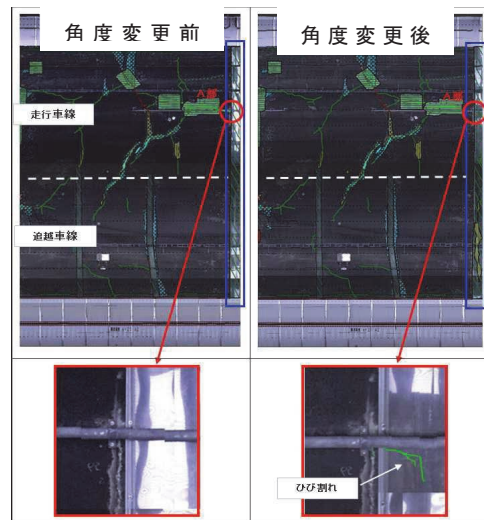


図-21 角度変更前後の画像状況の例(スパン94)

した。また、「角度変更前」で確認されていた変状の種類および数量は、「角度変更後」でも同様に確認することができた。

以上の結果から「角度変更後」は画像上の反射面積を軽減でき、「角度変更前」に把握できなかった透明型樋内部の新たな変状の検知の有効性が確認された。したがって、透明型樋は近接目視のみならず、走行型トンネル撮影システムによっても撮影カメラの正対角を変

更することで、ある程度効率的に画像上から変状やその規模を把握できることが確認できた (図-21 参照)。

(5) 長期的な可視性能の検討

前述した現場における検討では、透明型樋が設置されてから約5年が経過しており、樋表面の汚れを確認した。今後、車両の排気ガスや溶脱物(エフロッセンス)等により、汚れが進行し、透視性の低下が懸念される。そのため、透視性を維持するためには、定期的な清掃が重要であると考えられる。

5. まとめ

本文では、覆工表面の汚れに対し、ウォータージェットによる覆工洗浄の手法を確立するとともに、それが変状把握の精度向上に与える有効性を検証した。また、近接目視点検のみならず、画像撮影によって取得される画像上で透明型樋で覆われた覆工表面の変状を可視化するための手法を検討し、その手法の有効性を検証した。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) ウォータージェットによる覆工洗浄を適用する場合は、トンネル毎に覆工コンクリートの強度特性や表面状態等が異なる。本洗浄の仕様の決定には事前のキャリブレーションが重要であり、その手法を確立するとともにキャリブレーションの有効性を明らかにした。
- (2) 覆工洗浄を実施したことで覆工表面に付着した汚れで把握できなかった部分の変状の新規発見や観察精度が相当に改善できる。また、輝度の向上が確認され、近接目視点検の実施者の作業環境が改善される。
- (3) 透明型樋の反射特性の確認の結果、樋とカメラの正対角を 10° 以上に設定することで、照明の反射が軽減され、透明型樋内部のひび割れを確認することができる。
- (4) 実トンネルの画像撮影においては、正対角を 10° 以上に設定することで、反射を軽減できることを確認した。一方、樋表面に歪みがある場合は、入射光がさまざまな角度で反射し、乱反射が起きてしまうため、透明型樋の設置の際は樋表面が歪まないよう丁寧に設置することが重要である。
- (5) 「角度変更後」は画像上の反射面積を軽減でき、「角度変更前」に把握できなかった透明型樋内部の新たな変状の検知の有効性が確認された。したがって、透明型樋は近接目視のみならず、走行型トンネル撮影システムによっても撮影カメラの正対角を変更することで、ある程度効率的に画像上から変状やその規模を把握できることができる。

- (6) 現場に設置されている透明型樋は設置から約5年経過しており、今後、車両の排気ガスや溶脱物(エフロッセンス)等の汚れにより、透視性の低下が懸念されるため、透視性を維持するためには、定期的な清掃が重要である。また、定期的な清掃を行うことにより、溶脱物等の堆積によるつまりを解消することで、水みちの変化による漏水箇所を増加を抑えられる可能性がある。

本文では、検証の結果、覆工洗浄が変状把握の精度向上に与える影響および画像撮影による透明型樋内部の変状把握の有効性を確認することができた。今後は、洗浄後の汚れを抑制するための防汚対策や透明型樋の表面の汚れなどにより透視性が低下することが懸念されるため、透明型樋の洗浄方法など、メンテナンス手法について検討していく所存である。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、関係者の方々に御協力頂いた。ここに深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 水口尚司, 大西有三, 徳田浩一郎, 西山哲, 石村勝伸: 道路トンネルにおける画像およびレーザーデータを用いたマネジメント手法の研究, 土木学会論文集 F2, Vol. 71, No. 1, pp. 20-30, 2015.
- 2) 佐野信夫, 伊藤哲男: 連続印刷画像を用いたトンネル覆工コンクリートのひび割れ評価におよぼす技術者資格の影響, 土木学会論文集 F2, Vol. 71, No. 1, pp. 20-30, 2015.
- 3) 樋口邦寛, 岡村幹男, 中西巧, 丹間泰郎, 鈴木繁: トンネル覆工コンクリート洗浄工法の検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会, IV-304, 2001.10.
- 4) 長田文博, 小林睦志, 小林俊彦, 山田裕一: 環境に配慮した覆工表面等清掃方法の開発, 土木学会第 58 回年次学術講演会, VI-237, 2003.9.
- 5) 岡崎健治, 山崎秀策: 矢板トンネルにおける漏水発生状況の調査事例, 日本応用地質学会平成 28 年度研究発表会講演論文集, 2016.10.
- 6) 岡崎健治, 山崎秀策: トンネルの漏水の発生箇所と発生時期に関する調査事例, 平成 28 年度土木学会北海道支部論文報告集, 第 73 号, 2017.2.
- 7) 中日本高速道路(株): 保全点検要領(構造物編), p. 151, 2017.
- 8) (株)東設土木コンサルタント: 走行型トンネル撮影システム技術資料, 2017.
- 9) 石井素: 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 47 号, 第 6 号, 2012.
- 10) 駒村一弥, 藤井久矢, 永留君明: ウォータージェットを用いたトンネル点検手法の検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会, VI-079, 2008.9.
- 11) 佐野信夫, 馬場弘二, 山田隆昭, 吉武勇, 中川浩二, 西村和夫: 高速道路トンネルの合理的な点検システムの提案, 土木学会論文集 D, Vol. 63, No. 3, pp. 391-400, 2007.9.
- 12) (社)日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧, pp. 28-37, 2015.6.
- 13) (社)土木学会: トンネル・ライブラリー 14 トンネルの維持管理, p. 78, 2009.5.

(Received September 29, 2020)

(Accepted December 17, 2020)

PRECISION IMPROVES FOR GRASP TO CHANGE OF THE TUNNEL LINING OF THE ROAD TUNNEL

Toshio SUZUKI, Naoto SUGISAKI, Takanori KAWAI and Sadao KIMURA

The surface to line of the expressway tunnel offered open is often dirty by a soot and oil, contamination water and eluviation thing. In addition, the measures that installed a raw water transmission gutter are performed that a leak of water often produces the tunnel constructed in Yaita method of construction and covers the occurrence point to change such as leaks of water. By these factors, as for the image shooting check of the run type, there is concern to influence accuracy of the grasp to change in the check by the proximity viewing from the start. This article carried out the washing of the surface to line for the purpose of further improvement of the grasp to change to occur on the surface to line and examined influence to give the grasp that washing changed and examined the effectiveness of the transparence type raw water transmission gutter for the purpose of the visualization of changing it of the point covered by an installed raw water transmission gutter.