

トンネル覆工のひび割れ自動抽出技術の構築と健全度評価への適用

DEVELOPMENT OF TECHNIQUE FOR AUTOMATICALLY EXTRACTING CRACKS IN TUNNEL LINING AND ITS APPLICATION TO THE SOUNDNESS EVALUATION

谷口 徹也¹・徳田 尚器²・仲田 慶正³・蔣 宇静⁴

Tetsuya TANIGUCHI¹, Naoki TOKUDA², Yoshimasa NAKATA³, Yujing JIANG⁴

The current structure is inspected by near visual inspection once every five years, and it is mandatory to record and save inspections and diagnosis results. Periodic inspection of tunnels by West Japan Highway Co., Ltd. firstly evaluate the deformations extracted from the lining surface image for the purpose of supporting close proximity vision, and intensively select points requiring close visual inspection. Therefore, the tunnel lining inspection system is developed which acquires the lining surface image and extracts the cracks automatically with the aim of efficiency, accuracy and uniform implementation of the proposed method. In this paper, the consistency of the cracks automatically extracted by the proposed tunnel lining inspection system was verified and the application to the soundness evaluation of the lining concrete was also carried out. Moreover, it was confirmed by the site verification that the proposed system could be used practically.

Key Words : tunnel periodic inspection, line sensor camera, cracked automatic extraction, soundness evaluation

1. はじめに

産業基盤施設としての道路トンネルは，経済成長とともに充実してきた．その一方で，膨大な構造物を健全に維持することが困難になってきており，覆工コンクリート片のはく落事故や，天井板崩落事故など，老朽化を要因とした人命を脅かすほどのリスク事象が発生している．

平成 26 年 7 月 1 日，道路構造物のメンテナンスサイクルを確立するため，道路の維持修繕に関する省令，告示により，①国が定める統一的な基準により 5 年に 1 回の頻度で近接目視点検を行うことを基本とする，②点検，診断の結果等について記録，保存する，③統一的な尺度で健全性の診断結果を分類する，と制定，施行された¹⁾．我々技術者は，日々近接目視によるトンネル定期点検を実施しているが，この点検手法は道路を交通規制し，通行車両の直近で作業を行うため事故のリスクが高く，さ

らに閉塞空間で上向き作業が多いため苦渋を伴う．その一方で，国内にはおよそ 1 万トンネルという膨大な量の管理施設数があり，平成 27 年度末時点でのトンネル点検実施率が約 29%²⁾と道半ばである．このような状況から，近接目視点検の効率化，高度化が必要とされている．

東日本，中日本，西日本高速道路株式会社（以下，「NEXCO」という）では，トンネル覆工表面の展開画像（以下，「覆工表面画像」という）を活用して，近接目視点検実施前に机上でトンネルの変状を把握し，重点的に点検が必要な個所を選定することで近接目視点検を支援するという点検手法が採用されている．³⁾

覆工表面画像を用いた変状把握は，様々な手法が提案されている．国土交通省および経済産業省は，「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」を共同設置し⁴⁾，今後取り組むべき重点分野の一環としてトンネル維持管理技術を公募し，「トンネル維持管理技術の現場

キーワード：トンネル定期点検，ラインセンサカメラ，ひび割れ自動抽出，健全度評価

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 営業部 Sales Department, West Nippon Expressway Engineering Kyushu Corp.
(E-mail:ttaniguchi.a@w-e-kyushu.co.jp)

²正会員 西日本高速道路株式会社 技術環境部 Technology and Environment Department, West Nippon Expressway Corp.

³正会員 株式会社フジエンジニアリング 研究開発部 Research and Development Department, Fuji Engineering Corp.

⁴フェロー会員 長崎大学大学院教授 工学研究科 Professor, Graduate School of Engineering, Nagasaki University

検証・評価の結果」を公表した⁹⁾。このなかで本研究に類似する覆工表面画像取得技術は、デジタルカメラやビデオカメラ、ラインセンサカメラなどが使用され、また、赤外線カメラや非接触レーダなどを併用したうき、はく離検出やトンネル断面形状計測の技術も構築されている。

覆工表面画像を用いて変状を効率的に把握する研究も行われている⁹⁾¹⁰⁾。例えば河村らは¹⁰⁾、対話型遺伝的アルゴリズム(iGA)による視覚的な画像処理パラメータ調整と、タッチパネルを用いた直感的なひび割れ抽出という2つの機能の特徴とするひび割れ半自動抽出ソフトウェアを開発している。また全らは¹¹⁾、Random Forestによる教師あり機械学習法と非正方形型フィルタを用いた画像処理を組み合わせたひび割れ検出手法を提案している。

本研究は、健全度評価に適用可能なひび割れ自動抽出技術の構築を目指しているが、既往の研究等では道路管理者が定めた基準による健全度評価への適用事例は紹介されていない。本稿では、①覆工表面撮影車両、②覆工表面画像作成ソフトウェア、③ひび割れ自動抽出ソフトウェアで構成する「覆工点検システム」を開発し、当システムによるひび割れ自動抽出結果の整合性検証および、健全度評価への適用検証を行った結果について述べる。

2. 現在のトンネル覆工点検手法

国土交通省の道路トンネル定期点検要領（平成26年6月）によると、定期点検の目的は「変状、異常を把握、診断し、必要な措置を特定するために必要な情報を得る

ものであり、トンネルに係る維持管理を適切に行うために必要な情報を得ること」とされている¹²⁾。またNEXCOの保全点検要領構造物編（平成27年4月）によると、「安全な道路交通を確保するとともに第三者等被害を未然に防止するために、構造物の状況を的確に把握、評価し、必要な対策や措置を決定することで、構造物を長期的に良好な状態に維持管理する」とされている³⁾。変状、異常を的確に把握診断し、構造物へ必要な措置を行うという目的が両者共通している。次に、国土交通省およびNEXCOのトンネル覆工点検手法をしめす。

(1) 国土交通省およびNEXCOのトンネル定期点検手法

a) 国土交通省のトンネル定期点検

国土交通省におけるトンネル定期点検の基本的なフローを図-1に示す。定期点検は、近接目視による変状の観察と、打音検査による覆工表面のうき、はく離の把握により行われ、適宜うき、はく離を撤去するなど応急措置を講ずる。初回点検では、全延長に近接目視および打音検査を行うが、2回目以降の打音検査は必要に応じて併用する。健全性の診断は、まず変状ごとに診断し、これに基づきスパンごとの診断、続いてトンネル全体としての診断を行う。注目すべき点は、「近接目視によって行う評価と同等の評価が行えると判断できる新技術が開発された場合は、新技術の併用を妨げるものではない」とされ、定期点検の高度化、効率化に資する新技術を積極的に導入することが視野にあるとかがえる。

b) NEXCOのトンネル詳細点検

図-2にNEXCOのトンネル詳細点検の基本的なフロー

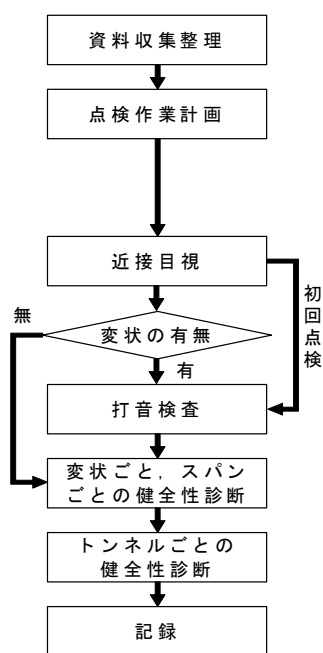


図-1 国土交通省定期点検フロー（抜粋）¹²⁾
（一部編集あり）

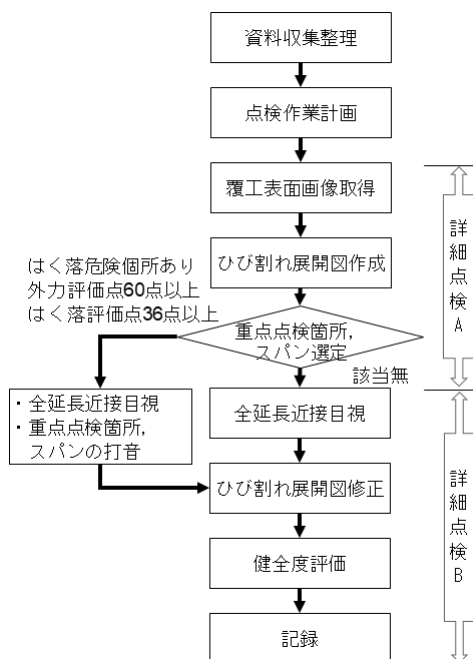


図-2 NEXCOトンネル詳細点検フロー（抜粋）³⁾
（一部編集あり）

をしめす。トンネル詳細点検は、国土交通省のトンネル定期点検とほぼ同義で点検手法は近接目視かつ打音であるが、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）を行うところが異なる。覆工表面画像は、覆工表面撮影用の機材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）と利用者の安全性に対する評価点（以下、「はく落評価点」という）を求め、重点的に点検が必要なスパンを判定する。はく落の危険性がある変状が確認された場合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近接目視および打音点検を実施する（以下、「詳細点検 B」という）。詳細点検 B 実施後は、覆工本体の構造的な安定性に対してスパンごとの評価、覆工本体の利用者の安全性にかかわる変状および、坑門工や路面など覆工本体以外の変状は個別に評価する³⁾。

(2) NEXCO の評価点算出方法

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エフロレッセンス、漏水の有無により、外力評価点とはく落評価点を算出する³⁾。①と②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の TCI (Tunnel-Lining Crack Index) を用いている。TCI の基礎式を式(1)に、図-3 に TCI 算出のための展開図をしめす。

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

ここに、 F_{ij} : TCI

A : 覆工コンクリートの面積($A=L_s \times L_a$)

n : ひび割れの本数

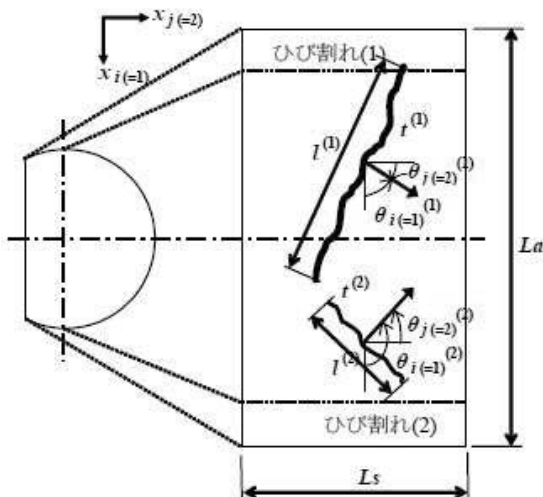


図-3 TCI算出のための展開図例

$l^{(k)}$: k 番目のひび割れの長さ

$r^{(k)}$: 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

各評価点は、式(1)で求めた F_{11} , F_{22} をもとに式(2)で F_0 を算出し、式(3)、式(4)および以下の閾値から求める。

$$F_0 = F_{11} + F_{22} \quad (2)$$

ここに、 F_0 : TCI

F_{11} : 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

$$\text{外力評価} \quad y_1 = \frac{58 \times F_0 \times 10^5}{F_0 \times 10^5 + 10} \quad (3)$$

ここに、 y_1 : 外力評価点

$$\text{はく落評価} \quad y_2 = \frac{32 \times F_0 \times 10^5}{F_0 \times 10^5 + 13} \quad (4)$$

ここに、 y_2 : 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 $y_1 = 4$ ($0.7 \leq Z < 1.0$) 横断卓越型

$y_1 = 7$ ($0.3 \leq Z < 0.7$) 縦横断拮抗型

$y_1 = 11$ ($0.0 \leq Z < 0.3$) 縦断・斜め卓越型

はく落評価 $y_2 = 2$ ($0.7 \leq Z < 1.0$) 横断卓越型

$y_2 = 4$ ($0.3 \leq Z < 0.7$) 縦横断拮抗型

$y_2 = 6$ ($0.0 \leq Z < 0.3$) 縦断・斜め卓越型

ここに、 Z : F_{22}/F_0

(3) 近接目視点検の問題点と解決策

図-4 に近接目視点検実施状況をしめす。近接目視点



図-4 近接目視点検実施状況

検には次の問題点が整理できる。

問題点 1 交通規制内作業により事故のリスクが高く、さらに継続的な上向き作業など過酷な環境であるため、点検技術者の疲労による変状の見落としや記録漏れが生ずる可能性がある。

問題点 2 点検技術者の熟練度の差により、変状の抽出に個人差が生ずる可能性がある。

これらの問題点に対する解決策として、近接目視点検作業の負担軽減と、変状抽出の個人差の抑制が可能となる「トンネル覆工点検システム」の開発が必要と考えた。

3. トンネル覆工点検システムの開発

(1) トンネル覆工点検システムの目標性能と構成

トンネル内を走行する周辺車両に対して安全で、変状を正確に把握し、NEXCO の健全度評価が適用可能なトンネル覆工点検システムを目指して 4 項目の課題を設定した。課題と目標性能を表-1 にしめす。

課題 A に対する目標性能は、高速道路を走行する周辺車両の交通流を阻害しない撮影速度 100 km/h を目指す。

課題 B に対する目標性能は、図-5 のような撮影時に周辺車両のわき見運転を誘発する可能性があるまぶしい光を発しない照明を目指す。

課題 C に対する目標性能は、閉合ひび割れなどコンクリート片がはく落する危険性があるひび割れ（以下、

「はく落危険箇所」という）を早期発見するために微細なひび割れを写すことができ、さらに様々な断面形状のトンネルに対する撮影汎用性を両立できる解像度の技術上の限界として、経験的に 0.5mm/画素を目指す。

課題 D に対する目標性能は、近接目視点検で最も労力を必要とし、個人差が生じやすいひび割れの抽出、記録の自動化技術の構築を目指す。課題 C で設定した解像度による自動抽出可能なひび割れ幅は 1 画素のおよそ半分の幅である 0.2mm を目標とする。

(2) 覆工表面撮影システムの開発

a) 全体構成

覆工点検システムの全体構成は、①走行しながら覆工表面を撮影する「覆工表面撮影車両」（以下、「撮影車」という）、②撮影した画像からトンネル全体の覆工表面画像を作成する「覆工表面画像作成ソフトウェア」、③覆工表面画像を解析してひび割れを自動抽出する「ひび割れ自動抽出ソフトウェア」とした。撮影車の撮影機材はカメラによるものとし、複数のカメラでトンネル半周を分割撮影する。例えば、図-6 のとおり 2 車線トンネルの場合、左右の車線をそれぞれ走行し半周づつ撮影する。なお当システムを搭載する車両は、時速 100 km で走行可能な車種とする。

b) 撮影用カメラの選定

解像度 0.5mm/画素の覆工表面画像を取得するには、たとえば上半半径 5.5m、スプリングライン高 1.6m の場合、

表-1 トンネル覆工点検システムの課題と目標性能

課 題	目標性能
A. 撮影時の交通阻害を抑制	撮影速度最高 100km/h の覆工表面撮影システム開発
B. 走行撮影時における周辺通行車両のわき見運転防止	撮影時照明を不可視化した覆工表面撮影システム開発
C. はく落危険箇所の早期発見と様々な断面寸法のトンネルに対する撮影汎用性を両立した解像度の覆工表面画像	高解像度画像が取得可能な覆工表面撮影システムおよび覆工表面画像作成ソフトウェアの開発（解像度 0.5mm/画素）
D. ひび割れ、はく落危険箇所の抽出、記録の労力低減および個人差抑制	ひび割れ自動抽出ソフトウェアの開発（自動抽出ひび割れ最小幅 0.2mm）



図-5 覆工表面撮影状況の例

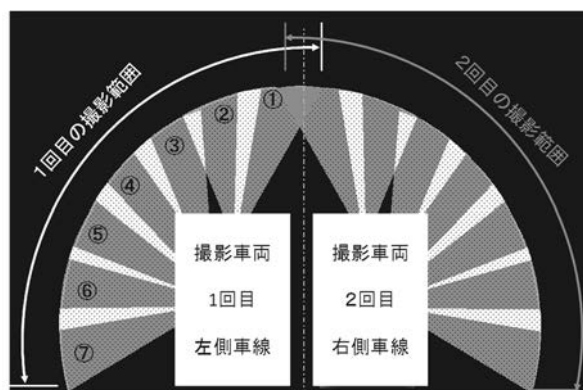


図-6 複数カメラによる分割撮影の例

周長は約 20.5m となり、約 41 000 画素で撮影可能な台数のカメラが必要である。また複数台のカメラ画像を合成する処理が必要であり、健全度評価へ早期につなげるには画像合成処理をできるだけ速やかに行わなければならない。このような観点から、撮影用カメラの選定は一般的なビデオカメラであるエリアセンサカメラと、工場の品質管理などで使用されるラインセンサカメラを表-2 のとおり比較した。エリアセンサカメラは、センサの形状が矩形で撮影データは動画となる。覆工表面画像の作成は、動画を静止画に変換して写真を生成し、撮影進行方向および隣り合うカメラ同士の画像合成を行う。一方でラインセンサカメラは、センサの形状がライン状で、撮影データは撮影進行方向に連続した静止画像となる。したがって、静止画変換作業および撮影進行方向の画像合成が不要となるため、ラインセンサカメラのほうが画像合成処理を省力化できる。次に、式(5)、式(6)に基づきハイビジョンビデオカメラとラインセンサカメラの必要台数を試算した。図-7 に模式図をしめす。

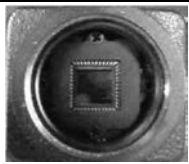
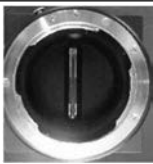
$$L \div (n-2) \times g \times (1-a) \times 2 + 2 \times g \times (1-a) \quad (5)$$

$$n \div \left(\frac{L}{g} - 0.3 \right) / 0.7 \quad (6)$$

ここに、 L ：トンネル周長方向の画素数（41 000 画素）

n ：カメラ台数

表-2 エリアセンサカメラとラインセンサカメラの比較

比較項目	エリアセンサカメラ	ラインセンサカメラ
センサ		
撮影データ	動画	静止画
取得画像	静止画変換し、一般的に、撮影進行方向に 30 枚/秒の写真	撮影進行方向に帯状連続画像 シャッター 56,000 回/S (時速 100 km)
撮影進行方向の画像合成	必要	不要

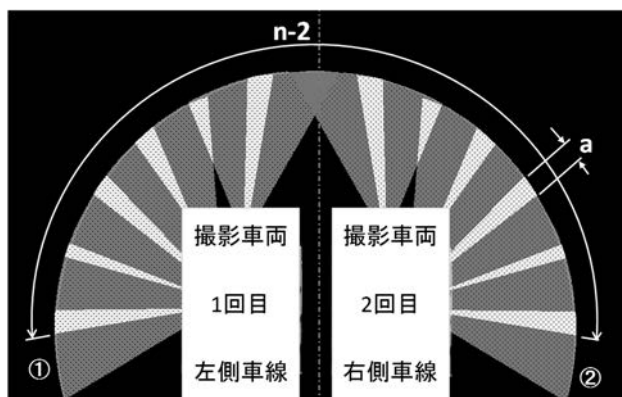


図-7 カメラ必要台数試算模式図

g ：カメラの画素数

ハイビジョンカメラ：1920 画素

ラインセンサカメラ：4096 画素

a ：隣り合うカメラの重複率（15%）

試算の結果、ハイビジョンカメラの場合 30 台（撮影車両搭載台数 15 台）、ラインセンサカメラの場合 14 台（撮影車両搭載台数 7 台）となった。したがって、画像合成の効率性の面からラインセンサカメラを採用した。ラインセンサカメラの性能は、課題 A,C である時速 100km で解像度 0.5mm/画素の撮影を行うために 56kHz 以上のラインレートが必要である。また、課題 D であるひび割れ自動抽出を実現するために、ひび割れをより鮮明なコントラストで表現可能なモノクロ画像でダイナミックレンジの大きさを優先した。表-3 に撮影用カメラの選定結果をしめす。

c) カメラレンズ調整機構

撮影対象となるトンネル断面の形状寸法は様々であるため、様々な形状寸法に対して解像度 0.5mm/画素となる視野幅に調整するズームレンズが必要となる。しかし、ラインセンサカメラ用のレンズにはオートフォーカス、ズーム機構を有する機種が存在しない。そのため、ズームについてはレンズのズームリングをギヤとモーターで自動制御する機構を開発した。フォーカスについては、別体のレンズ制御アダプタを採用した。図-8 にズーム、フォーカス制御機構をしめす。

d) 近赤外線照明

課題 B の走行撮影中における通行車両のわき見運転防止策は、撮影用照明に近赤外線照明を採用して不可視化することとした。また、近赤外線照明の波長域のみで撮影できるようにラインセンサカメラのセンサ前面部にバンドパスフィルタを設置した。当波長域での撮影は、

表-3 撮影用カメラの選定結果

カメラの種類	ラインセンサカメラ
画素数	4 096 画素
ラインレート	56kHz/100km/h 以上
画像の色	モノクロ
ダイナミックレンジ	70.7dB



図-8 ズーム、フォーカス制御機構

図-9 (http://wwwb.pikara.ne.jp/ogawa-iken/image_process/image_031.html (2017/06/25 参照))に示すとおり、太陽光の波長域のうち使用波長域以外を排除することで、トンネル入口部撮影時における太陽光の影響を抑制する効果も期待される。

近赤外線照明の光源は、集光性および品質・安全面から反射型 LED を採用し、ライン状に 60 個配置してリニアフレネルレンズによりライン状に集光させる照明ユニットを開発した。さらにカメラレンズ調整機構を備えたラインセンサカメラの撮影軸と照明ユニットの光軸を一致させたユニット（以下、「撮影ユニット」という）を開発した。図-10 に撮影ユニットをしめす。

e) 撮影ユニット配置シミュレーションソフトウェア

様々な形状寸法のトンネルに対し、7 台の撮影ユニットの角度、ズーム、フォーカスの最適値をシミュレーションするソフトウェアを開発した。図-11 に撮影ユニット配置シミュレーション結果の例をしめす。

f) 撮影ユニット角度調整機構

撮影ユニット配置シミュレーション結果に応じて、撮影ユニットが自動的に角度調整を行う機構を開発した。撮影ユニット角度調整機構は、走行撮影中の車両の振動による撮影ユニットの揺れを抑制するために、強固な昇

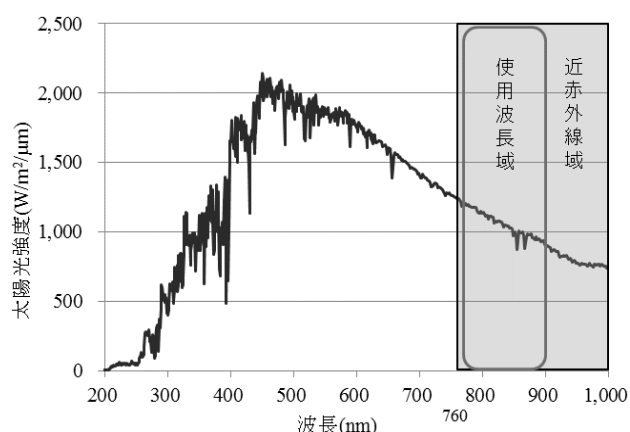


図-9 太陽光の波長域とバンドパスフィルタの波長域

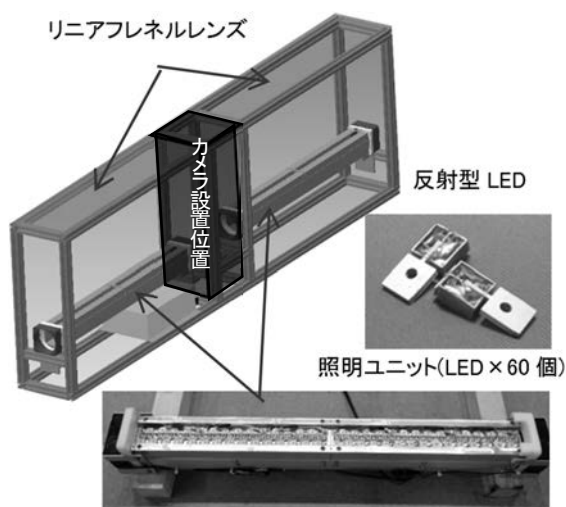


図-10 撮影ユニット

降機構と支持機構で構成される。図-12 に撮影ユニット角度調整機構をしめす。

g) 撮影制御ソフトウェア

撮影ユニット配置シミュレーション結果に基づいて、撮影ユニット角度調整機構への指令、撮影操作、および撮影画像の画質と隣り合うカメラ同士の画像の重複を確認を行う機能をそなえたソフトウェアを開発した。

h) 覆工表面撮影車両

撮影車の開発仕様は、表-4 のとおりとした。撮影車の構造は、運転室、撮影操作室、機器室に分かれ、撮影

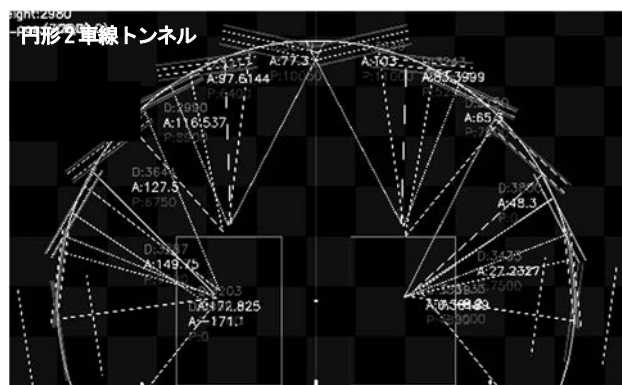


図-11 撮影ユニット配置シミュレーション結果の例

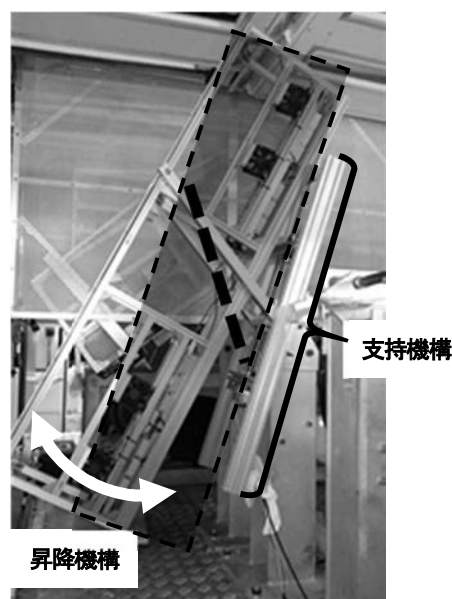


図-12 撮影ユニット角度調整機構

表-4 覆工表面撮影車両の開発仕様

仕様項目	仕様
撮影走行速度	5~100km/h
対象車両	ベース車両 3.5t クラス
乗車定員	4 名
適用規格	JIS, 道路交通法, 路交通法施行令, 道路運送車両法, 車両制限令
保護性能	IP55 相当(防塵、防噴流水), 近赤外線照明が人体に影響を与えない防護構造
空調管理	高温、低温時に正常に移働するための空調を備える

操作室には、撮影制御ソフトウェアがインストールされた専用コンピュータが設置されている。機器室は、撮影ユニット角度調整機構を伴った撮影ユニットが7台設置されている。機器の配置を図-13 にしめす。撮影ユニットは、撮影制御ソフトウェアからの指令により最適な配置と設定に自動で調整される。走行撮影中は、車両の蛇行や速度変化によりシミュレーションで設定したフォーカスやラインレートにずれが生ずる。これらのずれに対しては、距離センサによる覆工面までの測距データと、非接触速度計による速度データを撮影制御ソフトウェアに収集し、車両と壁面までの距離と速度の変化に応じて、フォーカスとラインレートを走行撮影中に制御する機構を開発した。

(3) 覆工表面画像作成ソフトウェアの開発

本ソフトウェアの処理手順は以下のとおりである。

a) シェーディング補正による輝度レベルの統一

シェーディング補正では、下記の5点について輝度補正を行い、一様な照明条件下の画像を生成することで各

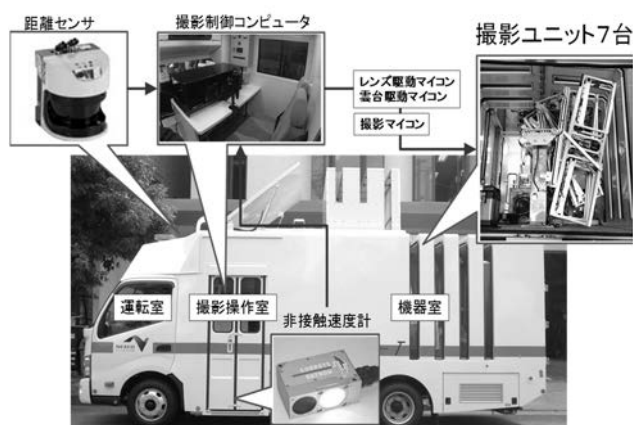
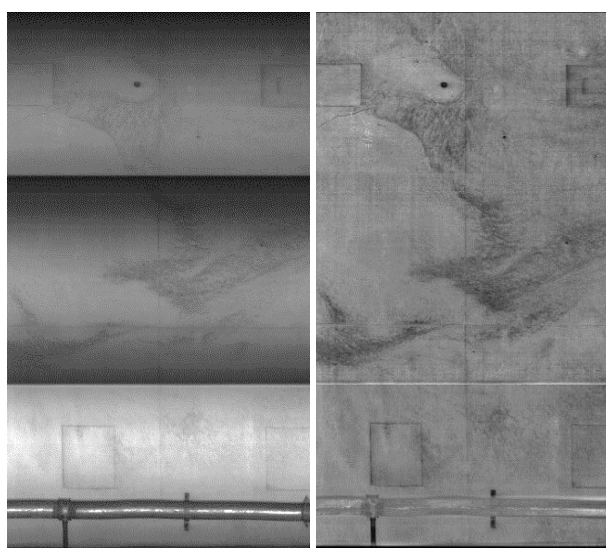


図-13 覆工表面撮影車両機器等配置状況



補正前 補正後

図-14 シェーディング補正状況

カメラ画像の輝度格差を解消する。輝度補正は、平均輝度と分散値を撮影データから算出し、その平均値と分散値が所定の値になるようにした。

- ① レンズの周辺の光量低下
- ② LED照明の輝度むら(周辺光量の低下)
- ③ 撮影ユニットから覆工表面までの距離
- ④ 撮影ユニットの傾きによる輝度傾斜
- ⑤ 覆工表面の汚れ具合による輝度低下

図-14 左図の補正前画像では各カメラ間の距離・向きの違いからカメラ間およびカメラ中央部と周辺部の輝度レベルが大きく異なっている。図-14 右図の補正後の画像では、各カメラ画像の輝度レベルが一様になり、カメラ間の輝度差も解消されている。

b) 逆射影による画像歪みのキャンセル

距離センサから得たトンネルの形状と覆工表面に対する各カメラとの相対位置のデータに撮影画像に逆射影することで、各カメラの覆工表面までの距離が一律でないこととあおり撮影による解像度の不均一、レンズ収差による画像のひずみについて補正を行う。

c) 隣り合う撮影画像の位置合わせ

隣り合う撮影画像を正確に合成するための位置あわせを実施する。処理の手順はつぎのとおりである。

手順1 各撮影画像について、正確にスパン両端の境界を切り出し、スパン境界が垂直になるようにスパン境界上下端の4点を4隅とする長方形に変形するホモグラフ変換を行う。

手順2 水平方向のエッジ成分を抽出し、隣り合う撮影画像の重複部分において一致度の最も高い個所を検索して画像の整合点とする。図-15 に隣り合う撮影画像の位置合わせ処理の効果をしめす。このように画像のずれが解消されている。

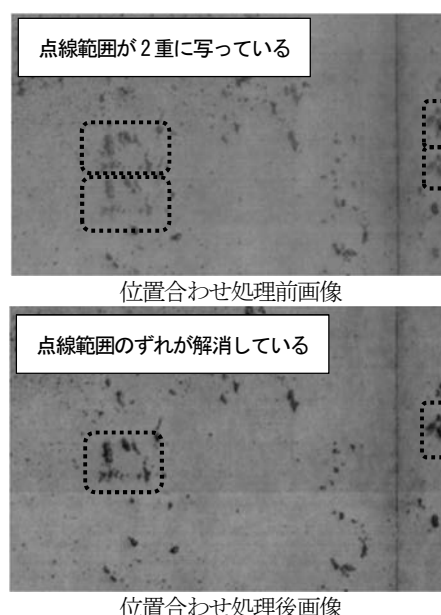
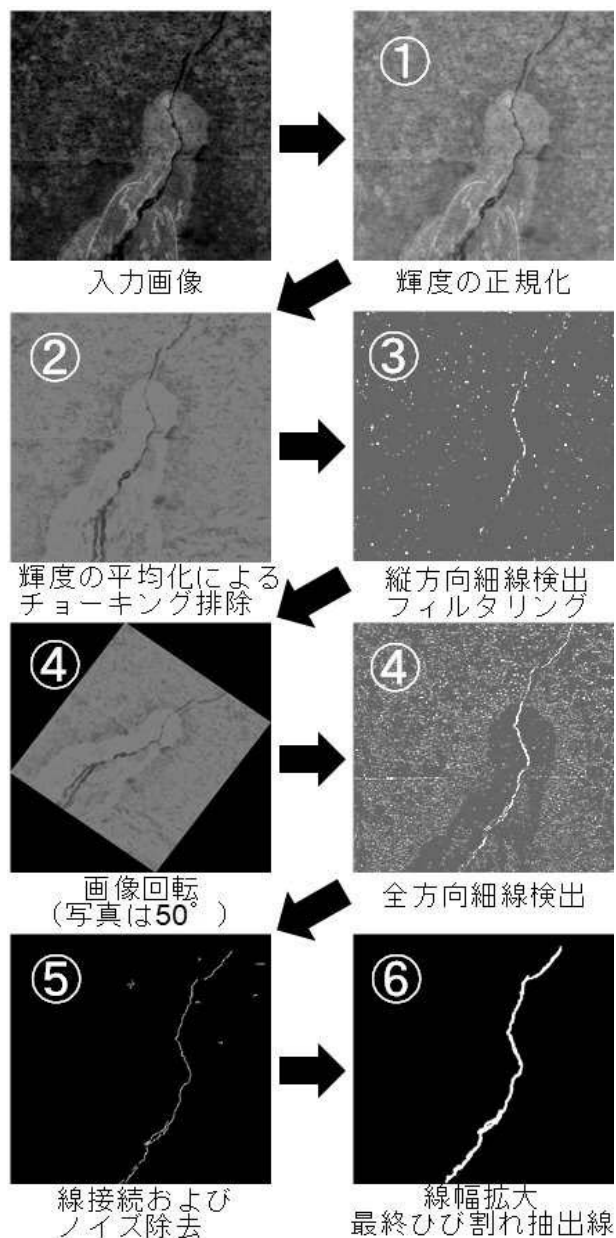


図-15 隣り合う撮影画像の位置合わせ処理の効果

(4) ひび割れ自動抽出ソフトウェア

ひび割れ自動抽出ソフトウェアは、覆工表面画像を図-16 にしめす手順で解析して、覆工表面画像に写るひび割れを自動抽出、図化する。

- ①画像の輝度平均を計算し、指定した輝度値に変換する。
- ②輝度平均値以上の領域を検出し、平均値で埋める処理を行いチョーキングを排除する。
- ③ひび割れの輪郭フィルタカーネルによるフィルタリングを行い、細線の縦方向成分を検出する。
- ④画像を回転させながら③の処理を行うことで、全方向の細線を検出する。
- ⑤全方向細線検出画像から、距離センサデータおよび直線検出アルゴリズムなどを用いて、トンネル内施設物、型わく跡などの人為的な線を除去したうえで細線を接続し、長さが短い線分をノイズとして除去する。



⑥接続した細線を、ひびわれ図として見やすくするために線幅を拡大する。

なお、図-17 および下記にしめす事象はひび割れ自動抽出が不可能である。

- ①照明や補修個所の裏面など画像に写っていない場合。
- ②漏水、エフロレッセンスにより覆工表面の色とのコントラスト差が少ない、もしくは輝度が高い場合。
- ③幅 0.2mm 未満のひび割れ。
- ④煤汚れが著しく、コントラスト全体的に低い場合。
- ⑤ピントが合っていない場合。

4. ひび割れ自動抽出精度の検証

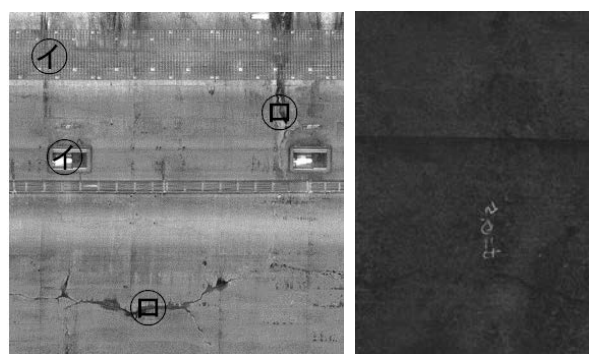
(1) ひび割れ自動抽出精度検証手順

表-5 のとおり、覆工表面状況の特徴が異なる NATM および矢板工法の検証対象トンネルの対象スパンに対し、ひび割れ自動抽出ソフトウェアの自動抽出ひび割れ延長の精度を検証した。実施手順は次のとおりである。

手順 1 撮影車を時速 100km で走行させて覆工表面撮影を行い、対象スパンの覆工表面画像作成およびひび割れ自動抽出、図化を行う。

手順 2 手順 1 と並行して、定期的近接目視点検のひび割れ図をもとに現地を詳細確認し、幅 0.2mm 以上のひび割れの記録漏れを図面上に追記する（以下、「ひび割れ詳細確認」という）。

手順 3 ひび割れ詳細確認結果図とひび割れ自動抽出結果図のひび割れを個別にピクセル数で比較し、ひび割れ詳細確認結果を 100% としてひび割れ延長の整合率を算出する。



漏水、エフロレッセンス、照明 ③煤汚れが著しい覆工面

図-17 ひび割れ自動抽出対象外の例

表-5 ひび割れ自動抽出精度検証対象トンネル

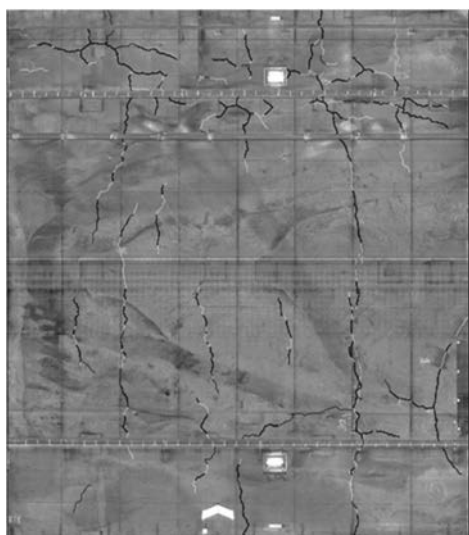
トンネル	工法	特徴	対象スパン数
A	NATM	煤汚れ平均的、コンクリート打設模様あり	5
B	矢板工法	煤汚れ平均的、漏水・エフロレッセンス、コンクリート打設模様顕著	5

(2) ひび割れ自動抽出精度検証結果

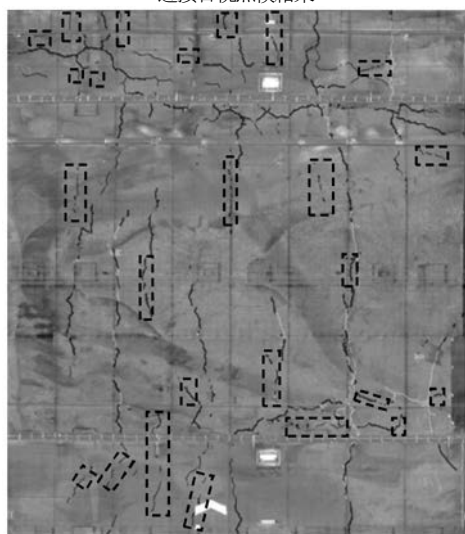
A トンネルのひび割れ詳細確認結果とひび割れ自動抽出結果を表-6 に、近接目視点検のひび割れ図と自動抽出ひび割れ図の比較例を図-18 にしめす。平均延長整合率は 93%と実用に耐えうる結果となった。なお、図-18 の自動抽出ひび割れ図中の点線で囲んだ範囲は、近接目視点検で記録漏れであった個所である。これは、前述の問題点である変状の見落としや記録漏れ、抽出の個人差を解決できる可能性があることを示している。

表-6 A トンネルひび割れ自動抽出整合率

スパン No.	詳細確認結果 (ピクセル数)	ひび割れ自動抽出結果	
		ピクセル数	整合率 (%)
1	156 523	150 241	96
2	255 602	245 389	96
3	170 393	156 743	92
4	134 652	125 209	93
5	132 512	117 935	89
平均			93



近接目視点検結果



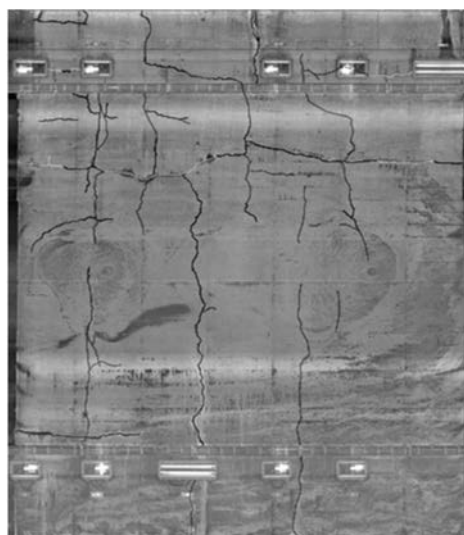
ひび割れ自動抽出結果

図-18 A トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.2)

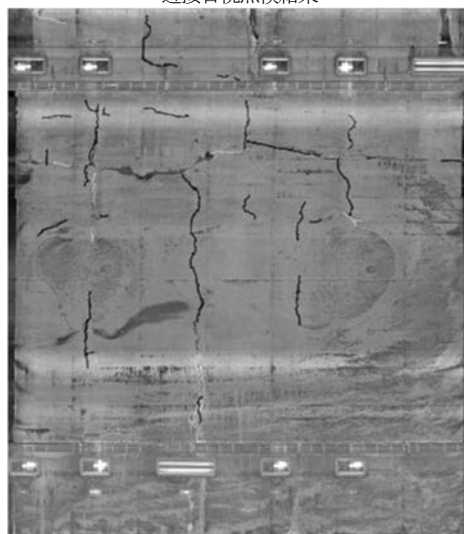
B トンネルのひび割れ詳細確認結果とひび割れ自動抽出結果を表-7 に、近接目視点検のひび割れ図と自動抽出ひび割れ図の比較例を図-19 にしめす。平均延長整合率は 88%と NATM より低いが比較的良好な結果となった。NATMのAトンネルと矢板工法のBトンネルの整合率の差の原因は、矢板工法のトンネルにおいて、覆工コンクリート打設の模様に沿って生じたひび割れが、覆工面とひび割れのコントラスト不足により抽出できなかったことに起因すると考えられる。

表-7 B トンネルひび割れ自動抽出整合率

スパン No.	詳細確認結果 (ピクセル数)	ひび割れ自動抽出結果	
		ピクセル数	整合率 (%)
1	681 985	588 553	86
2	196 648	181 523	92
3	426 363	391 786	92
4	494 301	447 468	91
5	327 546	262 089	80
平均			88



近接目視点検結果



ひび割れ自動抽出結果

図-19 B トンネルのひび割れ抽出比較例 (スパン No.1)

5. 自動抽出ひび割れの健全度評価適用性検証

ひび割れ自動抽出結果と覆工表面画像を観察してなぞり書きしたひび割れは、線形の形状が異なる。この違いにより健全度評価が著しく異なる場合は、ひび割れ自動抽出結果をそのまま健全度評価に用いることが困難である。そこで、ひび割れ自動抽出結果の健全度評価への適用判断を目的として、両者のひび割れ線形の相違による健全度評価結果の比較検証および考察を行った。

(1) ひび割れ抽出方法の相違によるひび割れ線形の傾向

点検技術者が覆工表面画像を観察してなぞり書きしたひび割れ（以下、「手動抽出ひび割れ」という）と自動抽出ひび割れの相違点の例を図-20 にしめす。手動抽出は、ひび割れの折れ点を細くなくならないため滑らかなひび割れ線形になる傾向にある（ケース 1）。自動抽出の場合はひび割れ線形を正確に図化する（ケース 2）。ただし、ひび割れ線形の中に幅 0.2mm 未満の部分が混在する場合は、当該部分は抽出されず断続的な線形になる（ケース 3）。ひび割れ線形が断続的である場合、自動抽出はあるがままに図化するが（ケース 4）、手動抽出の場合はひび割れが連続していると見みなしてなぞり書きする場合がある（ケース 5）。このような各ひび割れ抽出方法におけるひび割れ線形の相違が与える評価点への影響を検証した。評価点は、2. (2) NEXCO の評価点算出方法に従って算出した。

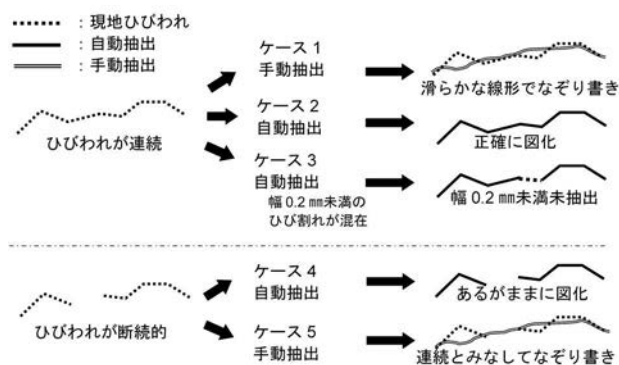


図-20 手動抽出ひび割れと自動抽出ひび割れの線形の相違点

表-8 検証対象トンネルおよびスパン

トンネル名	ひび割れ密度別選定スパン数 Hi: ひびわれ密度 (m/m²)		
	0.2 ≥ Hi	0.2 < Hi ≤ 0.5	0.5 < Hi
C	5	8	8
D	5	3	1
E	5		
F			5
G		4	1
H	9	27	19
合計	24	42	34

(2) 検証内容

本検証に使用するひび割れの定義を次のとおりとする。

- ①自動抽出ひび割れは、覆工表面画像からひび割れ自動抽出ソフトウェアを使用して抽出したものをいう。
- ②手動抽出ひび割れは、ひび割れ線形の違い以外の影響を排除するため、自動抽出ひび割れと同一個所を、覆工表面画像を観察しながらなぞり書きしたものをいう。
- ③近接目視ひび割れは、近接目視点検結果のうち、ひび割れのみをいう。

検証対象トンネルの選定スパン数を表-8 にしめす。

選定スパンは、3 つのひび割れ密度範囲区分を設定して合計 100 スパンとした。

a) 自動抽出および手動抽出ひび割れと近接目視ひび割れとの比較

当検証は、C トンネル 21 スパンを対象とする。まず、近接目視点検結果から算出した評価点について、ひび割れ評価点（前項 2(2)の①②）とその他の変状による評価点（前項 2(2)の③④）を分類する。次に、近接目視、自動抽出および手動抽出のひび割れ評価点を比較し、評価点の相違の有無や相違がある場合の要因を考察する。

b) 自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れとの比較

当検証は全トンネル 100 スパンを対象とする。自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れについて、TCI および評価点を算出して比較し、両ひび割れの TCI の相関性および評価点の相違の傾向について考察する。

(3) 検証結果と考察

a) 自動抽出および手動抽出ひび割れと近接目視ひび割れとの比較

図-21 にひび割れ抽出方法種別ごとの評価点の構成をしめす。図中の点数は 21 スパンの平均点である。

近接目視点検結果に対する近接目視のひび割れ評価点の割合は、外力評価点では 88%、はく落評価点では 58%

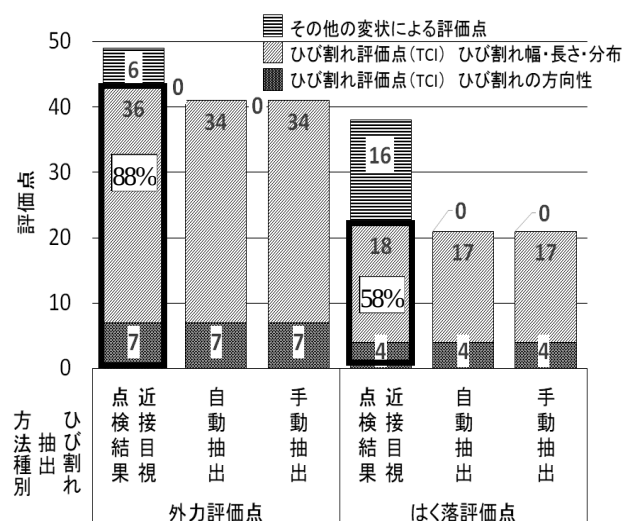


図-21 健全度評価点比較表

であった。これは、外力評価がひび割れ評価点の影響を大きく受けることを表す。近接目視と自動抽出のひび割れ評価点は、ひび割れ幅、長さ、分布において外力評価点とはく落評価点に若干の違いが生じた。この原因は、抽出されたひび割れ個所の相違や同一ひび割れの長さの相違、ひび割れ角度成分の相違が考えられる。その一方で、自動抽出と手動抽出のひび割れ評価点は同点であった。自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れの線形の実例を図-22 にしめす。図-20 ケース 1 と同様の線形の違いがあることから、本検証によるひび割れ線形の相違による評価点への影響は少なかったと考えられる。

b) 自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れとの比較

図-23 に自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れにおけ

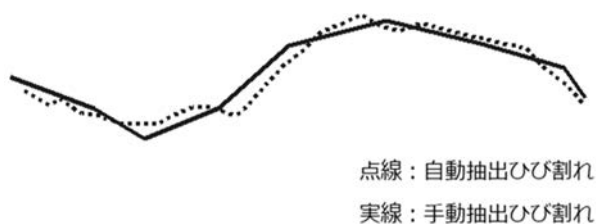


図-22 自動抽出と手動抽出のひび割れ線の例

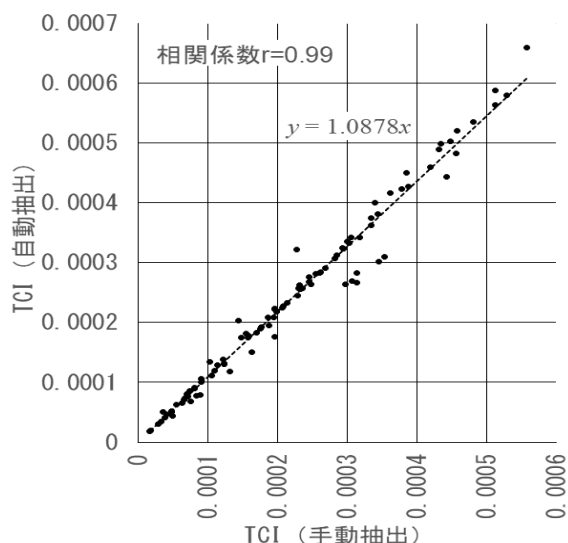


図-23 手動抽出と自動抽出ひび割れの TCI (FO) の相関性

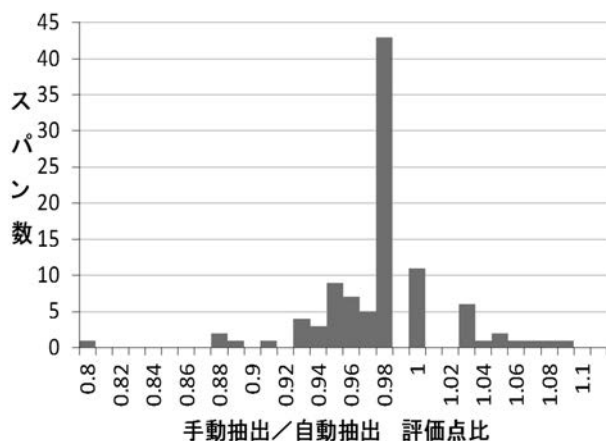


図-24 ひび割れ幅、長さ、分布に対する外力評価の点数比

る TCI の相関性をしめす。相関係数が約 0.99 と、正の相関性を確認できた。ただし、手動抽出の TCI に対して自動抽出の TCI は 1.08 倍程度高くなる傾向がみられた。これは TCI の値が小さいため、ひび割れ線形の相違により値の相違が鋭敏に表れた結果と考えられる。

図-24、図-25 にひび割れ幅、長さ、分布における自動抽出ひび割れに対する手動抽出ひび割れの評価点比のヒストグラムをしめす。外力評価において評価点比 0.98 のスパンが最も多い結果となった。また、はく落評価においては評価点比 1 が最も多い結果となった。

図-26、図-27 にひび割れの方向性に対する評価点比のヒストグラムをしめす。外力評価、はく落評価ともほぼすべてのスパンで評価点比 1 という結果になった。

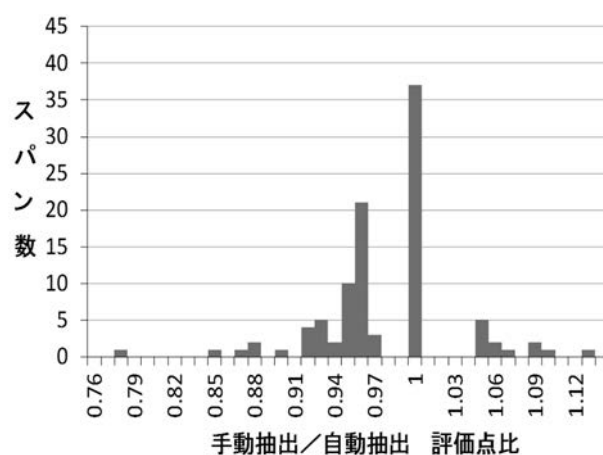


図-25 ひび割れ幅、長さ、分布に対するはく落評価の点数比

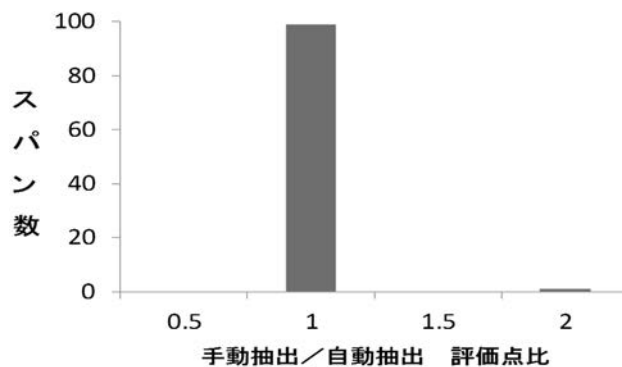


図-26 ひび割れの方向性に対する外力評価の点数比

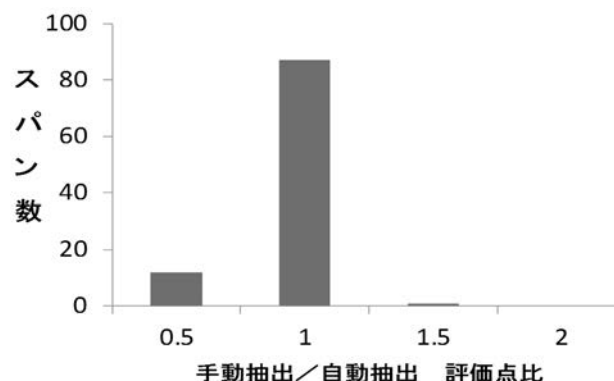


図-27 ひび割れの方向性に対するはく落評価の点数比

これらの結果から、外力評価においては評価点が若干高くなる（悪い評価）傾向にあり、そのほかの評価項目ではほぼ同等となることから、図-20 のようなひび割れ線形の相違により健全度が良くなる傾向の評価となるなどの悪影響は少ないと判断できる。

6. おわりに

覆工点検システムの開発により次の事項が実現可能となった。

- ① 最高時速 100 kmでの走行撮影により、覆工表面画像を早期に取得することができるようになった。
- ② 覆工表面の走行撮影時に、撮影用照明が不可視化されたことで、通行車両から注目されないため、わき見運転防止に寄与できるようになった。
- ③ 解像度 0.5mm/画素という高解像度の覆工表面画像を取得可能になったことで、点検技術者の観察が容易になり、変状を把握しやすくなった。
- ④ 高解像度画像とひび割れ自動抽出ソフトウェアの組合せにより、覆工表面に生じている複雑なひび割れの分布を自動的に抽出、図面化できるようになり、近接目視点検実施前に、点検技術者の技術に頼ることなくひび割れの分布状況をほぼ把握できるようになった。
- ⑤ 事前に取得したひび割れ分布が併記された覆工表面画像を近接目視点検に活用することで、現地でのひび割れ検索や記録を最小限にすることが可能となった。
- ⑥ 自動抽出ひび割れデータを用いて、NEXCO の保全点検要領による健全度評価が実施可能であることを確認し、これにより健全度評価の個人差を抑制することが可能になった。また、NEXCO の健全度評価と国土交通省のトンネル定期点検要領の健全性診断区分は対比できるため³⁾、NEXCO以外の定期点検にも活用できる可能性がある。

今後の展望は、自動抽出ひび割れと手動抽出ひび割れの健全度評価比較データの蓄積を継続して行い、信頼性を向上させたいと考える。また、本稿ではひび割れ幅について言及していない。近接目視点検では、点検技術者がクラックスケールで任意の個所を計測して 1 本のひび割れの代表幅とするのが一般的であるが、本ひび割れ自動抽出ソフトウェアは最大や平均などで代表幅を計算できるほか、ひび割れ幅の変化を細かく表示する機能も有している。今後は、ひび割れ幅の適切な定義や、ひび割れデータを用いた他の健全度評価方法について研究を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 道路の維持修繕に関する省令，告示の制定について（道路法施行規則の一部改正等），国土交通省道路局，http://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000412.html，p.1，2014.4.2
- 2) 平成 27 年度道路メンテナンス年報，国土交通省道路局，http://www.mlit.go.jp/road/si-saku/yobohozen/yobohozen_maint_h27.html，p.2，2016.9.12
- 3) 保全点検要領（構造物編），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，p.5，pp.143_145，p.167，2015.4
- 4) 国土交通省：報道発表資料次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野（別紙 2），http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000104.html，2014.12.25
- 5) 国土交通省：報道発表資料 2015 年度次世代社会インフラ用ロボット現場検証・評価結果の公表について，http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000149.html，2016.3.30
- 6) 半田兼一，大西有三，西山哲，矢野隆夫，西川啓一，下澤正道：デジタル画像処理を利用したひび割れ抽出による道路トンネル健全性評価，第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，講演番号 3，土木学会，pp.13_18，2008.1
- 7) 藤田悠介，中村秀明，浜本義彦：画像処理によるコンクリート構造物の高精度なひび割れ自動抽出，土木学会論文集 F Vol.66，No.3，pp.459_470，2010.9
- 8) 鶴飼正人，下田一也：ラインセンサカメラを用いたトンネル変状検査システム，建設の施工企画，pp.35_40，2011.11
- 9) 広田健一，勝尾伸一，小島尚人，大和田勇人，山下剛史：コンクリート表面ひび割れのリアルタイム点検支援システムの拡充と現場適用効果，土木学会論文集 F3，Vol.71，No.2，pp.11_66-11_77，2015
- 10) 河村圭，村上慧季，塩崎正人：対話型遺伝的アルゴリズムを用いたひび割れ半自動抽出手法の研究，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.71，No.2，pp. I_114_I_122，2015.9
- 11) 全邦釘，井後敦史：Random Forest によるコンクリート表面ひび割れの検出，土木学会論文集 F3（土木情報学）Vol.71，No.2，pp.I_1-I-8，2015
- 12) 道路トンネル定期点検要領，国土交通省道路局国道・防災課，p.5，p.10，2014.6