

走行型計測によるトンネルの 変状進行性評価法について

重田 佳幸¹・山本 秀樹²・小平 哲也³・安田 亨⁴

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ（株） トンネル部（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）

E-mail: yoshiyuki.shigeta@tk.pacific.co.jp

²正会員 パシフィックコンサルタンツ（株） トンネル部（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）

E-mail: hideki.yamamoto@tk.pacific.co.jp

³正会員 パシフィックコンサルタンツ（株） トンネル部（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）

E-mail: tetsuya.kodaira@tk.pacific.co.jp

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ（株） 品質・技術統括C（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）

E-mail: tooru.yasuda@os.pacific.co.jp

走行型計測システム（MIMM-R）は，トンネル用に開発された走行型画像計測（MIS：Mobil Imaging Technology System），走行型レーザ計測（MMS：Mobile Mapping System），非接触レーダー探査（MRS：Mobile Radar System）の一体型車両である．時速50km程度での計測が可能であるため，交通規制を必要としない効率的な点検が可能である．また，本システムは，従来の目視主体による点検と比較して客観的なデータが取得できるため，トンネルの変状進行性を評価するための基本データとして有効である．本報告は，トンネルの変状進行性の評価方法の開発を目的として，トンネル覆工コンクリートに発生したひびわれの定量的評価手法として提案されているひびわれ指数（TCI）の適用性について検討したものである．

Key Words : mobil imaging technology system, mobile mapping system, tunnel-lining crack index

1. はじめに

トンネル点検は近接目視で行うことが基本であるが，従来の点検技術は，スケッチによる変状の記録，点検者の主観による打音の判定，暗所で狭隘の作業であるなどの理由で，安全性や客観性が乏しく，見落としの発生や変状進行の適正評価ができないなどの課題が指摘されている．また，特に矢板工法のトンネルでは，巻厚不足や覆工背面空洞の存在がトンネルの健全性評価の重要な項目となっている．これらの課題に対する解決策として，走行型画像計測（MIS：Mobil Imaging Technology System），走行型レーザ計測（MMS：Mobile Mapping System）の一体型車両（MIMM：ミーム）が開発された．また，国土交通省近畿地方整備局の産官学連携プロジェクト「新都市社会技術融合創造研究会：プロジェクトリーダー大西有三京都大学名誉教授」が，走行型計測技術によるトンネル健全性評価の実用化を検証し，その後，多数のトンネルに対し実用レベルで活用されている¹⁾²⁾．

さらにトンネル覆工コンクリートの巻厚評価，覆工背面空洞評価を目的として非接触レーダー探査（MRS：Mobile Radar System）を搭載した一体型車両（MIMM-R：

ミーム・アール）が開発され，多数のトンネルの点検や調査に活用されている．

一方，筆者らは岩盤工学の分野で提案されているクラックテンソル等³⁾の概念を援用し，トンネル覆工コンクリートに発生したひびわれの評価法としてひびわれ指数（TCI：Tunnel-lining Crack Index）を提案している．このひびわれ指数（TCI）は，ひびわれの幅，長さ，方向性を一つの数値化された評価尺度として利用できる特徴を有しており，点検技術者の技術力に依存せず定量的な評価ができるため，効率的な健全度評価，作業の省力化が期待され，トンネル覆工コンクリートの健全度評価への導入が検討されている⁴⁾．

そこで，本研究は，走行型計測で得られた客観的なデータからひびわれ変状の進行性評価法としてひびわれ指数（TCI）の適用性について検討した．

2. 走行型計測の概要

(1) 走行型計測システムの概要

走行型計測システム（MIMM）の概要を図-1に示す．



図-1 走行型計測車両 MIMM-R の計測システム

走行型計測システム（MIMM-R）は、高精度レーザー、画像計測装置、非接触型電磁波レーダー、GPS、オドメトリ等から構成されている。レーザ計測装置は、レーザー照射能力 1,000,000 点/秒であり、従来型（レーザー照射能力 13,500 点/秒）より高精度の点群データを取得することが可能である。画像装置は、20 台の CCD カメラ（38 万画素）と 60 台の LED 照明から構成され、走行速度 70km/h で 0.5mm 程度のひびわれを認識できる（最小分解能 0.2mm）。

走行型計測システム（MIMM）の特徴としては、時速 50km/h 程度で走行しながら計測が可能であるため、交通規制を必要としない。そのため、安全性と効率性の向上が図られる点が挙げられる。また、走行型計測システムによる変状展開図は、トンネル覆工コンクリート表面全体の画像を取得することができ、さらに高精度レーザー計測による三次元座標と GPS 時刻で同期することで従来のスケッチによる変状展開図と異なり客観的なデータを取得できる。このため、ひびわれ等の変状の進行性を把握することが可能となる。

(2) 走行型画像計測の有用性

トンネルの変状の進行性は、ひびわれの幅や長さ、本数の変化により評価される。従来の目視主体の点検や調査においては、厳しい条件下で点検が実施され、バラツキや見落としが懸念される。さらにスケッチであるため、変状の位置が不正確な場合もある。そのため、定期点検においてトンネル変状の進行性把握は困難な場合が多い。

走行型計測システム（MIMM）は、複数台の CCD ビデ

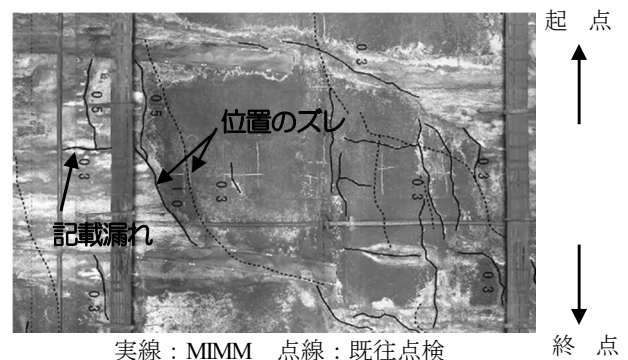


図-2 変状展開図の比較

オカメラにより連続画像を取得し、正確に記録できるため、客観的な評価が期待される。

図-2に過年度点検と走行型計測（MIMM）との展開図の比較を示す。図は、展開画像と画像から抽出した変状展開図および過年度点検のスケッチによる展開図を重ね書きしたものである。図中の点線が過年度点検のもので、実線が走行型計測（MIMM）によるものである。両者を比較するとひびわれや補修工等の変状の位置、形状に差異がみられることがわかる。

3. TCIの概要

(1) TCIの算出式

岩盤工学の分野では、岩盤中のひびわれ(節理)の密度や方向、幅が岩盤物性(変形係数・透水係数)に大きく影響するため、これらの影響を総括的に定量化できる指標

の“クラックテンソル”が用いられてきた⁴⁾。一方、既往の研究において、覆工コンクリートのひびわれ評価指標として、この“クラックテンソル”を参考に、TCIが提案されている。

TCIの基礎式を式(1)に示すとともに、その概念図を図-3に示す。式(1)により求まる F_{11} 、 F_{22} は、それぞれTCIの縦断成分、横断成分を示すものである。覆工コンクリートの劣化の指標 F_0 は、テンソルの不変量として縦断・横断成分の和($F_0=F_{11}+F_{22}$)として表され、この F_0 をTCIの変状程度の評価値とした。

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

A : 覆工コンクリートの面積 ($A=Ls \times La$)

Ls : 覆工コンクリートの縦断延長

La : 覆工コンクリートの横断延長

n : ひびわれの本数

$l^{(k)}$: ひびわれ k の長さ

$b^{(k)}$: ひびわれ k の幅

$\theta_i^{(k)}$: ひびわれ k の法線ベクトルが x_i 軸となす角度

$\theta_j^{(k)}$: ひびわれ k の法線ベクトルが x_j 軸となす角度

α : ひびわれ幅の重み付けに関する係数

β : ひびわれ長さの重み付けに関する係数

(2) TCIの算出例

図-4に示す例において、求める F_0 は、ひびわれ番号①、②における F_{11} と F_{22} の総和となる。以下に、計算例を示す。なお本計算例では、ひびわれ幅・長さに関する係数 α, β を、便宜上1.0と仮定して求めた。

$$F_{11} = \frac{0.005 \times 10 \times \cos 60^\circ \times \cos 60^\circ}{10 \times 30} + \frac{0.001 \times 5 \times \cos 140^\circ \times \cos 140^\circ}{10 \times 30} = 5.14 \times 10^{-5}$$

$$F_{12} = F_{21} = \frac{0.005 \times 10 \times \cos 60^\circ \times \cos(-30^\circ)}{10 \times 30} + \frac{0.001 \times 5 \times \cos 140^\circ \times \cos 50^\circ}{10 \times 30} = 6.40 \times 10^{-5}$$

$$F_{22} = \frac{0.005 \times 10 \times \cos(-30^\circ) \times \cos(-30^\circ)}{10 \times 30} + \frac{0.001 \times 5 \times \cos 50^\circ \times \cos 50^\circ}{10 \times 30} = 13.2 \times 10^{-5}$$

$$F_0 = F_{11} + F_{22} = \sqrt{F_{11}^2 + F_{12}^2 + F_{21}^2 + F_{22}^2} = 18.3 \times 10^{-5}$$

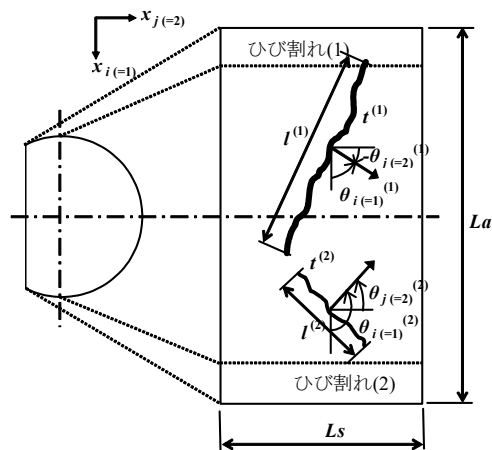


図-3 TCIの概念図

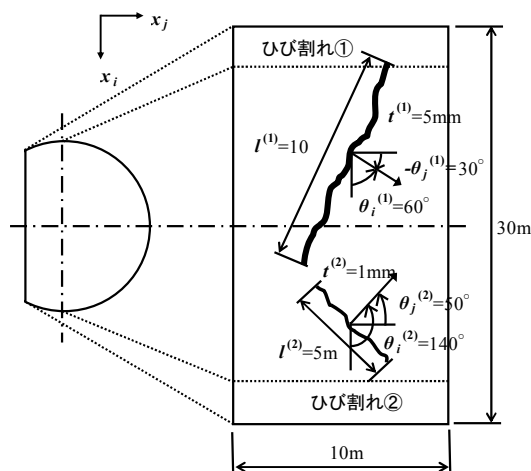


図-4 TCI算出例の展開図
表-1 ひびわれ量が異なる場合のTCI算出例

ケース	A-1	A-2	A-3
模式図 ($A=210.1\text{m}^2$)			
ひびわれ			
本数	10	10	10
幅(mm)	2.5	2.5	5.0
長さ(m)	3	6	3
密度(cm/m^2)	14.3	28.6	14.3
TCI($\times 10^{-4}$)	3.57	7.14	7.14

表-2 ひびわれ方向性が異なる場合のTCI算出例

ケース	B-1	B-2	B-3
模式図			
ひびわれ方向 θ_i	90°	45°	0°
ひびわれ方向 θ_j	0°	45°	90°
TCI($\times 10^{-4}$) F_{11}	0	1.79	3.57
TCI($\times 10^{-4}$) F_{22}	3.57	1.79	0
TCI($\times 10^{-4}$) F_0	3.57	3.57	3.57

※ひびわれ幅 2.5mm, 長さ 3m, 本数 10本, 面積 $A=210.1\text{m}^2$

(3) TCIの特性

TCIは、ひびわれの量の変化とひびわれの方向性を評価できる特性を有している。

本検討では、まずひびわれ量に対するTCIの特性を明らかにするため、表-1に示すケースA-1～A-3(トンネル軸直角方向ひびわれ)を用いてTCIの算定を行った。この結果に示すように、同じひびわれ方向にあっても、ひびわれの幅・長さ(累計長)が異なると、異なるTCIを示すことが分かる。とくに、このTCIによる評価法(以下、TCI評価法)では、ひびわれ量に対して、各基準に示されるような段階的なランク付け評価と異なり、連続した数値で評価できる点に優位性があるものと思われるため、進行性の評価を行う上で有効な手法と考えられる。なお、本検討では、過去の検討結果を踏まえひびわれ幅と長さに関する係数 α 、 β を同じ重み1.0に設定した。

また、TCI評価法の特徴としてひびわれの方向性を評価に取り入れることが可能である。同じひびわれ量でも、その方向性が異なるケースについて試算を行った。計算に用いたモデルは、表-4に示すケースB-1(トンネル軸直角方向： $\theta_i = 90^\circ, \theta_j = 0^\circ$)、ケースB-2(同45度方向： $\theta_i = \theta_j = 45^\circ$)、およびケースB-3(トンネル軸方向： $\theta_i = 0^\circ, \theta_j = 90^\circ$)の3ケースである。

表-4に示す F_0 は、 F_{11} と F_{22} の和であるため、理論上、3ケース間の差異はないことになる。ここで、このTCI評

価法では、トンネル軸方向および軸直角方向の成分を個々に定量化できるため、変状原因の推定や落危険性評価等への適用が期待される。

4. 実トンネルにおける検討

(1) トンネル概要

検討対象トンネルは、昭和42年完成の矢板工法で構築された延長1,220mの2車線道路トンネルである。トンネルの変状としては、ひびわれ、材質劣化、漏水である。覆工表面に煤煙の付着が著しく材質劣化の進行も確認されていた。

(2) TCI算出条件

トンネルの覆工コンクリートに発生するひびわれは、地圧など外力を受けていない場合においても坑内気温の変化によりひびわれ幅の開閉がみられる。本検討においては、ひびわれ変状の進行性を検討対象とした区間は、2009年と2010年に走行型画像計測による計測を実施した区間から外力による変状を受けていない区間とした。

一般にトンネル覆工コンクリートに発生したひびわれは、坑内気温の変動に伴い開閉している。本検討では、これらの変動を考慮し、微細なひびわれを無視して画像

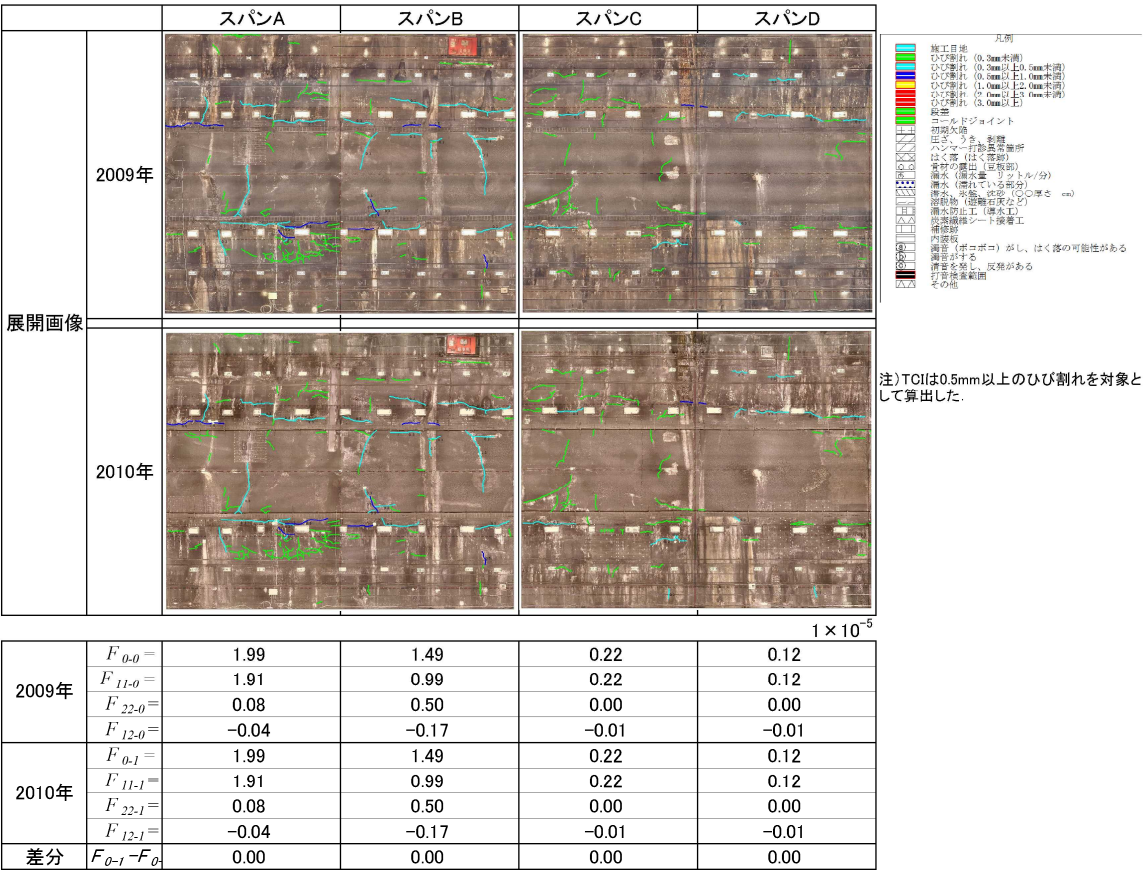


図-5 TCI算出例の展開図

計測によって得られ幅 0.5mm 程度以上のひびわれ用いて TCI を算出した。

(3) 進行性検討結果

トンネル覆工コンクリートに発生したひびわれの進行性評価は、ひびわれの幅の変化、長さの変化、ひびわれ密度の変化を確認するのが一般的である。しかし、多数のトンネルを対象とした点検においては、トンネル覆工コンクリートに発生した多数のひびわれを各々確認することは作業が煩雑となる。このため本検討では、覆工コンクリートに発生したひびわれを指数化することで進行性を確認することとした。

図-5 に各スパンの展開画像と TCI 算出結果を示す。進行性の確認は、TCI の F_0 を用いて評価することとした。TCI の F_0 は、トンネル覆工コンクリートに発生したひびわれの面積当たりの総量を意味する値である。

TCI における 2009 年の F_0 は、 $0.2 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$ であり、2010 年の F_0 は、 $0.2 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$ で変化がないことを定量的に確認することができた。

5. おわりに

本報告では、走行型計測技術によるひびわれの進行性評価法としてひびわれ指数 (TCI : Tunnel-lining Crack Index) の適用について事例を示した。

走行型計測システム (MIMM-R) は、CCD カメラと LED 照明による画像計測システム (MIS) 、高精度レーザー計測システム (MMS) 、非接触レーダー探査システム (MRS) を同一車両に搭載したシステムであり、トンネル覆工表面の画像、三次元形状、巻厚、覆工背面空洞が取得できるシステムである。

本報告では、これらのシステムのうち、走行型画像計測システム (MIS) から得られる客観的な変状展開図を用い、ひびわれ指数 (TCI) を活用することでトンネルのひびわれ変状に関する進行性評価法について検討した。

検討は、他の調査により変状の進行性のないスパンを抽出し、ひびわれの総量を示す TCI の F_0 を比較することで進行性の評価を行った。その結果、ひびわれ指数 (TCI) を用いることで定量的に進行性評価が行えることが確認された。

今後は、トンネル覆工に発生するひびわれは、坑内気温の変化によりひびわれ開口幅が変化するため、ひびわれ指数 (TCI) を算出する際のひびわれ開口幅の算出単位やひびわれ抽出の際に発生する人為的誤差などの検討を多数の事例を用いて分析し、適用性を検討していきたい。

参考文献

- 1) 新都市社会技術融合創造研究会 道路トンネル健全性評価プロジェクト：道路トンネルの健全性評価技術の研究 研究成果報告書，2010.
- 2) 新都市社会技術融合創造研究会 走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化研究プロジェクト：走行型計測技術による道路トンネルの健全性評価の実用化検討に関する研究 研究成果報告書，2013.
- 3) 重田佳幸，飛田敏行，亀村勝美，進士正人，吉武 勇，中川浩二：ひび割れ方向性を考慮した覆工コンクリートの健全度評価法，土木学会論文集 F，Vol.62，No.4，pp.628-632，2006.
- 4) 重田佳幸，田近宏則，西川啓一，下澤正道，安田亨：トンネル維持管理における走行型計測の適用，トンネル工学報告集，pp.209-214，2011.

(2015.8.7 受付)

DEFORMATION PROGRESSIVE EVALUATION METHOD OF TUNNEL BY MOBILE TYPE MEASURING SYSTEM

Yoshiyuki SHIGETA, Hideki YAMAMOTO,
Tetsuya KODAIRA and Toru YASUDA

Mobile type measuring system (MIMM) which was developed for tunnel maintenance is a vehicle integrated MIS that is initial letter of Mobile Imaging technology System with MMS that is initial letter of Mobile Mapping System. It is a very efficient method of measurement where no traffic control required since measurements can be taken at traveling speed of 50km/h. And compared to conventional check which is mainly conducted by visual inspection, it is possible to get objective data. In this report, it is intended to develop a tunnel deformation progressive evaluation method of the proposed index that there is (TCI) was examined the applicability of cracking as a quantitative evaluation method of cracks occurring in the tunnel lining concrete.