トンネル健全性評価の精度向上を目的とした 覆工ひびわれ指数TCI算出法と評価法の改善

北村 彩絵¹・森本 真吾²・進士 正人³

¹学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

E-mail: w019ve@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 ドボクリエイト株式会社 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

E-mail: charlie@dobocreate.jp

³正会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

笹子トンネルの事故を契機として、道路トンネル定期点検方法の見直しが平成26年に行われ、同時に点検時の健全度評価指標に関する研究も進んできた。著者のひとり、覆工に発生したひびわれの定量的評価手法として、クラックテンソルの考えを導入した覆工ひびわれ指数TCIを提案し、健全度評価指標として覆工の経年変化について分析している。しかし、これまでの健全度評価方法はスパンごとにTCIを算出するため、覆工の劣化が進展している箇所の抽出は難しいといった問題点があった。そこで、本ノートでは、TCI算出時の対象覆工面積を複数に分割比較すること、並びにTCIの方向成分ごとの経年分析をすることで、覆工の健全度変化を明らかにし、トンネル覆工補修箇所の優先度が判定ができることを示した。

Key Words : TCI, crack map, aging analysis, tunnel lining, periodic inspection

1. はじめに

現在、日本には約1万本を超えるトンネルが存在し、その中で、建設後50年以上経過したトンネルが全体の20%を超えている。20年後には、それが全体の半数を超えると想定されている¹⁾。しかし、平成28年度に点検が実施されたトンネルは全体の18%の1 986本でしかなく、全国のすべてのトンネルの劣化状況を統一的に把握することは難しい²⁾。加えて、補修優先度や次回点検時期を判定するための判断基準も明確ではない。この状況のもと、筆者のひとり、覆工ひびわれ指数Tunnel-lining Crack Index (以下「TCI」と称す)を提案し³⁾、この指標を用いて、覆工の劣化状況の数量化を試みてきた。しかしTCI算出において、例えば初期収縮ひびわれと外力等によるひびわれは同等に評価されるため、覆工健全度とTCIを直接関連付けることが難しかった。加えて、対象覆工面積を1スパン (一般的にスパン長10.5m×覆工周長約20m) とし、1スパンあたりに発生するひびわれ状況をTCIとして数値化する。そのため、たとえ覆工の片側にひびわれが集中して発生していても、覆工全体としてTCIが平均化されてしまい、利用者の安全性に深く係わる天端部や肩部と、比較的影響が小さいと想定される側

壁部に対しても同じ健全度で判断されるなどの問題点も明らかになってきた。

そこで、覆工点検が複数回実施されたトンネルを対象として、TCIにより覆工の経年変化を評価することで、初期収縮ひびわれの影響を除外することとした。そして、健全性評価の精度向上を目的として、TCI算出時の対象覆工面積を細分化および分割比較するとともに、TCI方向成分の経年変化を調べることで、既設トンネル覆工補修優先箇所をより明確に判定できる可能性を明らかにした。

2. TCIの概要

ここでは、従来の岩盤力学の分野で提案されているクラックテンソル理論にもとづくTCIの基本式を紹介する。

(1) TCIの基礎式

式(1)にTCIの基礎式³⁾を示す。

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

A : 対象とする覆工の表面積

n : 対象とする覆工に存在するひびわれの本数
 $l^{(k)}$: k 番目のひびわれの長さ
 $t^{(k)}$: k 番目のひびわれの幅
 $\theta_i^{(k)}$: k 番目のひびわれ法線ベクトルが x 軸となす角度
 $\theta_j^{(k)}$: k 番目のひびわれ法線ベクトルが y 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

式中の α , β は既往研究³⁾を参考し1.0とした。そして、TCIのトンネル縦断方向成分 (F_{11}) と横断方向成分 (F_{22}) の和 (第1不変量) をTCI (F_0) とする。

(2) TCI計算例

図-1にTCIの概念図³⁾を示す。以下にTCIを算出する手順と図-1に示すひびわれを対象とした時の計算例を示す。

- 1) 覆工展開図からひとつひとつのひびわれ情報 (ひびわれ幅, 延長, 角度) を読み取る。
- 2) ひびわれ情報を対象範囲ごとに集約する。
- 3) 式(1)にひびわれ情報を代入し, 対象範囲ごとにTCIを算出する。

$$\begin{aligned}
 F_{11} &= \frac{1}{10 \times 30} \times 0.005 \times 10 \times \cos 60^\circ \times \cos 60^\circ \\
 &\quad + \frac{1}{10 \times 30} \times 0.001 \times 5 \times \cos 140^\circ \times \cos 140^\circ \\
 &= 5.14 \times 10^{-5}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{22} &= \frac{1}{10 \times 30} \times 0.005 \times 10 \times \cos(-30^\circ) \times \cos(-30^\circ) \\
 &\quad + \frac{1}{10 \times 30} \times 0.001 \times 5 \times \cos 50^\circ \times \cos 50^\circ \\
 &= 13.2 \times 10^{-5}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_0 &= F_{11} + F_{22} = 5.14 \times 10^{-5} + 13.2 \times 10^{-5} \\
 &= 18.3 \times 10^{-5}
 \end{aligned}$$

3. 対象トンネルの概要

研究対象とした既設トンネルの概要を表-1に示す。このトンネルは山口県にある片側2車線の道路めがねトンネルであり、I期線トンネル (以降, Aトンネルと呼ぶ。) とII期線トンネル (以降, Bトンネルと呼ぶ) は施工方法, 竣工年が異なる。トンネル直上には古墳の存在が確認されており, その保護を目的にめがねトンネルが建設された。地質は古生代砂質片岩, 泥質片岩であり, 図-2上部にAトンネル (I期線) の縦断面図を, 下部にスパン

番号S001から見たS004の横断面図に示す。これらの図から土被り高さは約5~20mであり, 横断面では約20%の勾配で右上に傾斜している。本ノートでは在来工法で建設されたAトンネル (I期線) について主に検討する。

図-3に, 2015年点検時のS001から見たAトンネル覆工展開図の一部とそれぞれのスパンのTCIの計算例を示し, 図-4にすべてのスパンごとのTCIとその平均の経年変化を示す。これらの図におけるTCIの対象覆工面積は1スパン (スパン長8.9m×覆工周長19.8m) としている。図-4から明らかのように, 2000年にめがねトンネルが完成したにも関わらず, Aトンネルの各スパンのTCIは徐々に増加し, 2013年~2015年にはさらに加速的な傾向を示すスパンが出現した。そのため, 2015年に実施された覆工

図-1 TCI概念図³⁾

表-1 対象トンネルの概要

トンネル	工法	竣工 (年)	延長 (m)	スパン	点検 回数
A(I期線)	在来 工法	1984	87	11	4回
B(II期線)	NATM	2000	84	11	3回

図-2 対象トンネルの位置関係

図-3 覆工展開図とTCIの一例 (2015年点検時)

図-4 スパンごとのTCIの経年変化 (Aトンネル)

図-5 左右を分割した場合のTCIの経年変化

点検では、道路トンネル定期点検要領に準拠し区分Ⅲ（早期措置段階）と報告されている⁴⁾。さらに、図-3に示すAトンネルの覆工展開図の一部からもわかるように、トンネルの右側センターピラー側の肩部にひびわれが集中して発生している特徴が見受けられた。そのため、トンネルの左側、右側に2分割してそれぞれ部分ごとのTCIを算出し、全11スパンの合計値と左右の経年変化を比較した。その結果を図-5に示す。この図から、Aトンネルではトンネルの左側、右側ごとにひびわれの発生状況は異なり、その進展具合にも明確な差が生じており、特にⅡ期線トンネル側に近接する右側に経年的なTCIの増加傾向がみられることがわかる。このことから、スパン内においてひびわれが偏在している場合、従来のTCI算出方法では、ひびわれが集中している個所の経年的な変化を見落とす可能性があることがわかる。したがって、次章において対象覆工面積の違いによるTCI健全性評価の比較、検討を行う。

4. 対象覆工面積の検討

(1) 検討パターン

本章では、図-6に示すように、TCI算出時における対象覆工面積を従来の方法を含む計4つのパターンで比較し、その有用性について考察する。ここで、対象覆工面積とは式(1)における面積 A を表し、TCI算出には2015年の点検時に作成されたAトンネルの覆工展開図を用いた。なお、対象面積を変化させてもそれぞれの検討対象領域に発生しているひびわれの量を基に算出しているので、面積を揃える必要はないと考えている。

4つの検討パターンを設定した理由は以下のとおりである。

パターン1：これまでのTCI算出方法を踏襲した方法。

パターン2：覆工を左右2分割してTCIを算出した方法。

パターン3：覆工の上半部を4分割したうえで、天端部と

図-6 対象覆工面積を変化させた検討パターンと分割領域番号

図-7 覆工展開図並びに分割数を変更した場合のTCI分布

左右肩部に3分割し、部位毎にTCIを算出した方法。

パターン4：覆工の下半部に加え、上半部を4分割してそれぞれの分割領域ごとのTCIを算出した方法。

(2) 検討結果・考察

2015年点検時の4つの分割パターンそれぞれのTCI分布図と覆工展開図を図-7に示す。ここで、図中の数値はそれぞれの分割領域のTCIを表しており、その値に応じて色付けし、配色の違いで各個所のTCIの大きさが視覚的に判別できるように表現している。

この図から、分割数を増やすほどトンネル内のTCIの分布がより詳細にわかる。特に、従来の方法では評価が難しい各スパン内における劣化集中個所の抽出ができることがわかる。以下、パターン2～パターン4の結果から考察されるそれぞれの特徴を述べる。

まず、2分割（パターン2）では左右で分割されているため、実際のひびわれ状況との照合がとりやすくどちら

の側にひびわれが発生しているかなどの次回の点検時の参考資料あるいは補修優先度の判定材料に活用可能である。次に、3分割（パターン3）では重点点検箇所である天端部のTCIを評価できるので利用者の安全性を考慮した健全性の評価と考えられるが、Aトンネルのようなトンネルの右側にひびわれが集中して発生している特徴を有するトンネルに対しては、その特徴が薄まってしまうことが見て取れる。この場合、天端部と壁面部の重要度を重み係数として掛け合わせるなどの評価方法の見直しも考えられる。また、6分割（パターン4）では、上半部と下半部を分割して評価することで、TCIの把握がより容易となる。たとえば、S006スパンの覆工展開図からわかるように、2分割では最も大きなTCI値である32.4を示す右側が3分割では天端部のTCIが19.2と小さくなる。これは、6分割の場合で示す下半部(1)と(6)、並びに肩部左側(2)と天端部左側(3)のひびわれが他の領域と比較して極端に少ないため分割領域の範囲の取り方でTCIが変化するためである。このように、比較的分割数は若干多

図-8 変状原因とTCI成分との関係⁹⁾

図-9 TCI成分分布図 (2015年点検時)

図-10 TCI分布の推移 (S005スパン)

すぎるとも思えるものの、補修が必要とされる範囲を限定するには、6分割 (パターン4) は有効な分割方法であることがわかる。

ここでは、最新点検データを用いた検討結果のみを示したが、過去の点検データにもとづく経年変化も踏まえて分析することで、今後の劣化予測を加味した健全性の評価が可能であると考えられる。

(3) TCI方向成分別経年変化

図-8は、高速道路会社が収集した既往トンネル覆工の変状原因とTCIの方向成分 (F_{11} : 縦断方向, F_{22} : 横断方向) との関係を整理した図である⁹⁾。既往研究では、TCIを方向成分ごとに分離し、図中にプロットされる位置により変状原因の推定が可能であるとしている。そこで、本ノートでもAトンネルの変状原因を推定する目的で、TCIの方向成分別 (F_{11} : 縦断方向, F_{22} : 横断方向) に分離し表示した。

まず、2015年点検時のスパンごとのTCIの方向成分の分布図を図-9に示す。縦断方向の成分が横断方向よりも卓越するものの、この結果を図-8と比較すると、Aトンネルに発生するひびわれは材料劣化、緩み圧、塑性圧のどの原因による変状であるか判断としないことがわかる。しかし、前述したとおり、従来のTCI算出方法ではスパン内の劣化状況を平均化したものであり、局所的な変状が把握できない懸念があるため、図-6に示す対象面積を変化させた検討パターンによるTCIを算出し、その経年変化を整理した。すなわち、過去4回の点検データを用いてTCIの F_{11} (縦断方向成分) と F_{22} (横断方向成分) の経年分布を検討パターンごとに算出した。

図-10にその一例として、S005スパンにおけるパターン1(分割なし)ケース並びにパターン4(6分割)の分割領域(5)のTCI成分の経年分布図を示す。この箇所では、経年的に F_{11} (縦断方向成分) の卓越する変化を示す覆工領域が存在している。覆工を分割しても覆工全体の変状原因は大きく変化しないと考え、この結果を図-8に適用すると、分割領域(5)は、材料劣化領域から緩み圧領域へ2010年に移行している。この結果は、覆工を分割して検討することでトンネル右肩部周辺は緩み圧による影響を受けていると複数回の覆工調査を待たずに判断できる可能性を示唆している。図-2に示すとおり、AトンネルはめがねトンネルのI期線であり、右側に2000年に竣工したNATM工法で建設されたBトンネルが隣接することによる影響も考えられる。これらのことから、対象覆工面積を複数分割することで、覆工スパン内の変状の原因を推定する指標にTCIがなりうる可能性を示した。

TCI算出時の対象覆工面積を従来より細分化することで、細部の変状の原因およびその進行性を把握することは、ひびわれが集中している個所の特定化につながり、補修対策や次回点検時における重点箇所の選定などの有効な資料になると考えられる。

今後は、Aトンネルの設計報告書、Bトンネル設計時

の調査報告書、設計報告書などが提供されたため、調査結果に基づき進行性の発生に関するメカニズムの解明を行いたい。また、TCI算出の適用トンネルを増やし、覆工の個所による重みの評価に関する検討や、ひびわれの特徴を潜在化させない普遍的な検討パターン της 考案などを継続して実施する予定である。

5. 結論

本ノートでは、既設めがねトンネルであるAトンネルの点検時に作成される覆工展開図を用いて、TCI算出時における対象覆工面積を3パターン考案し、従来の算出結果との比較、検討を試みた。それにより得られた知見を以下に示す。

1. TCI算出時の対象覆工面積を分割し、比較することで、これまでのTCI算出方法よりも覆工の劣化範囲と状況をより詳細に把握することができた。
2. 対象覆工面積の分割数を多くすると、劣化がより進行している分割領域と進行しない分割領域との差を明確に表すことができた。
3. 分割数を多くした上で、TCIを方向成分別に分析すると、TCIの経年的変化がより強く表れるため、覆工の変状原因およびスパン内で今後劣化が進行する領域をより早い段階で予測することが明らかとなり、補修優先箇所や次回点検時の点検重点箇所を選別できることがわかった。

これらの知見はトンネル健全性評価の精度向上に寄与

する成果である。

今後は、分割幅を変化させることがTCIに与える影響や、分割した時のトンネル変状原因とTCI成分との関係整理、検討した分割パターンを他の道路トンネルやめがねトンネルに適用することで、TCI算出方法の一般性を検証する予定である。

謝辞：本ノートを取りまとめるにあたり、国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所の方々には、貴重なデータを提供して頂いたことに深く感謝申し上げます。また、山口大学大学院創成科学研究科助教林久資氏には図表作成にご尽力を頂いた、合わせて感謝いたします。

参考文献

- 1) 一般社団法人建設コンサルタンツ協会近畿支部：維持管理研究委員会報告書，2015.2
- 2) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2017.8
- 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.628-632，2006.10
- 4) 国土交通省道路局 国道・防災課：道路トンネル定期点検要領，p.30，http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo3_1_9.pdf
- 5) 中野清人，佐伯徹，重田佳幸，大場諭，西村和夫：トンネル変状評価・原因推定へのひび割れ指数（TCI）の適用可能性について，トンネル工学報告集，第20巻，pp.239-243，2010.11

(2018. 1. 16 受付)

STUDY ON IMPROVEMENTS OF EVALUTATION AND CALCLATION OF TUNNEL-LINING CRACK INDEX (TCI) FOR ASSESS THE HEALTH MONITORING OF TUNNEL LINING

Ayaka KITAMURA, Shingo MORIMOTO and Masato SHINJI

The health monitoring for tunnels, especially over 50 years old, became a serious issue after the ceiling panel collapse accident at Sasago highway tunnel occurred in 2012. Following this accident, MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan) required administrators to conduct periodic inspections of road tunnel. One of the authors has already proposed Tunnel-lining Crack Index (TCI) to assess the health monitoring for tunnel lining quantitatively. Periodical inspection data of twin road tunnel were applied for the estimation of TCI. However, health monitoring by using TCI is usually performed focus on each span or each tunnel. In this study, the effectiveness of TCI separating the section of tunnel lining become clear by comparing the difference of area by four patterns. Thus, benefits of employing TCI become clear for quantitative priority health assessments of tunnel lining.