

ひび割れ指数TCIを援用した 既設トンネルのメンテナンス優先度箇所判定

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 山口大学大学院助教 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: charlie@yamaguchi-u.ac.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

近年，土木構造物の維持管理・長寿命化が我が国の重要施策として注目されつつあり，既設トンネルの健全度評価方法に関するシステム開発が進んでいる．その中，重田らは覆工コンクリートに発生したひび割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ひび割れ指数Tunnel-lining Crack Index (以下TCIと称す)を提案している．そこで筆者らは，TCIをトンネル覆工に発生するひび割れの経年的評価指標として取り入れ，国土交通省の管理する4つの既設道路トンネルの過去複数回分の覆工展開図に適用し，TCIの経年変化について分析した．そして，トンネル毎の劣化の進展状況の把握および定量的なメンテナンス優先順位決定とひび割れ集中箇所の抽出によるそれぞれのトンネル内のより詳細なメンテナンス優先箇所判定を試みた．

Key Words : Tunnel-lining Crack Index, crack map, maintenance priority, tunnel lining, inspection

1. はじめに

日本には，すでに約1万本を超えるトンネルが使用されている．現在，その中で建設後50年以上経過したトンネルが全体の20%を超えており，20年後にはそれがその半数を占めると想定されている¹⁾．この状況を受け，日本では既設社会インフラの維持管理・長寿命化が重要政策として実施されつつあり，トンネルの健全度評価方法に関する研究が進んでいる．しかしながら，平成27年度に点検が実施されたトンネルは全体の16% (表-1参照)であり²⁾，全国のすべてのトンネルの劣化状況を把握することは難しく，また点検が実施されたトンネル内の補修優先度や次回点検の時期を判定するための基準も明確ではないのが現状である．

そこで本論文は，点検結果にばらつきが生じやすい現場技術者の判断に依存した従来のトンネル健全度評価基準をより一般的かつ定量的に行うため，重田ら³⁾が提案する指標 (TCI：覆工ひび割れ指数) を用いて，それを複数年度の覆工展開図に適用し，TCIの経年変化について分析し，トンネルのメンテナンス優先度判定および優先度の高いスパンの判定を試みた．

2. TCIの概要

本研究では，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 (覆工ひび割れ指数；Tunnel lining Crack Index) を用いる³⁾．

表-1 平成27年度全国トンネル実施状況²⁾

管理者	管理 施設数	点検 実施数	点検 実施率
国土交通省	1 548	405	26%
高速道路会社	1 904	505	27%
都道府県 政令市等	5 314	774	15%
市町村	2 258	115	5%
合計	11 024	1 799	16%

(1) TCIの基礎式

TCIの基礎式を式(1)に示す。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m (t^{(k)}) (l^{(k)}) \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (1)$$

A : 対象とする覆工の面積

n : 対象とする覆工に存在するひび割れの本数

$l^{(k)}$: 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*i*軸となす角度

$\theta_j^{(k)}$: k 番目のひび割れの法線ベクトルが*j*軸となす角度

α : ひび割れ幅の重み付けに関する係数

β : ひび割れ長さの重み付けに関する係数

式(1)をTCI（覆工ひび割れ指数；Tunnel lining Crack Index）基礎式と呼ぶ。そして、本論文ではTCIのトンネル縦断成分（F11値）と横断成分（F22値）の和をTCI（F0値）とする。ここで、式(1)の α 、 β は既往研究³⁾にもとづき1.0とした。

(2) TCI算出例

図-1に示すようなクラックモデル図のTCI計算例を以下に示す。また、F0は算出する部位の総和であるため、図-1の範囲内のTCIを算出する場合、この範囲内のF0値はひび割れ番号1とひび割れ番号2のF11値とF22値を足し合わせる。以下にサンプルデータを用いた際の算出式を示す。

$$F_{11} = \frac{1}{10 \times 30} \times 0.005 \times 10 \times \cos 30^\circ \times \cos 30^\circ + \frac{1}{10 \times 30} \times 0.001 \times 5 \times \cos 40^\circ \times \cos 40^\circ$$

$$= 1.35 \times 10^{-4}$$

$$F_{22} = \frac{1}{10 \times 30} \times 0.005 \times 10 \times \cos 60^\circ \times \cos 60^\circ + \frac{1}{10 \times 30} \times 0.001 \times 5 \times \cos 50^\circ \times \cos 50^\circ$$

$$= 0.48 \times 10^{-4}$$

$$F_0 = F_{11} + F_{22} = 1.35 \times 10^{-4} + 0.48 \times 10^{-4} = 1.83 \times 10^{-4}$$

3. 対象トンネルの概要

本研究では国土交通省が管理する4つのトンネル（C、Dトンネルはめがねトンネル）を研究対象とし、定期点検の際に作成される覆工展開図をもとにTCIを算出した。表-2に研究対象とした道路トンネルの概要を示すとともに、覆工展開図の一例としてBトンネルの覆工展開図の一部を図-2(a)～(d)に示す。

Bトンネルでは現在までに3回点検が実施されており、覆工展開図を作成する様式は様々であるが、TCIを採用することでこれらのひび割れの進行状況を定量的に表すことができる。

ここで、TCIを算出する手順は以下のとおりである。

- 1) 覆工展開図からひとつひとつのクラック情報（クラック幅、延長、角度）を読み取る。
- 2) クラック情報をスパンごとに集約する。
- 3) 2.(1)の式(1)にクラック情報を代入し、スパンごとにTCIを算出する。

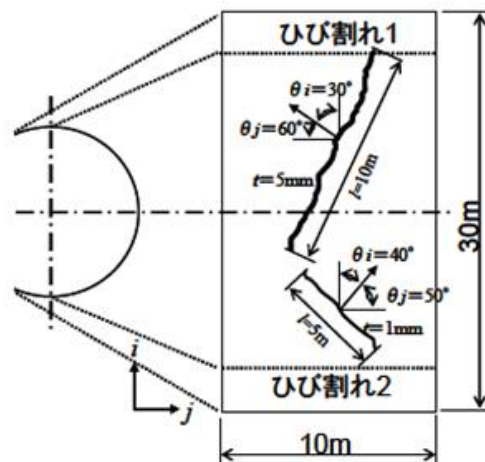
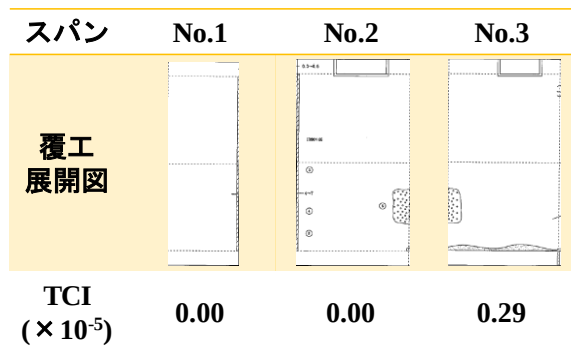


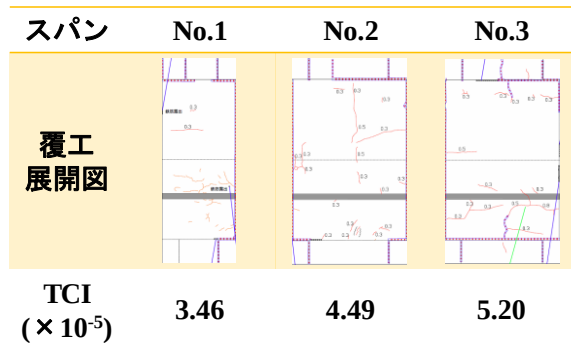
図-1 クラックモデル図³⁾

表-2 対象トンネルの概要

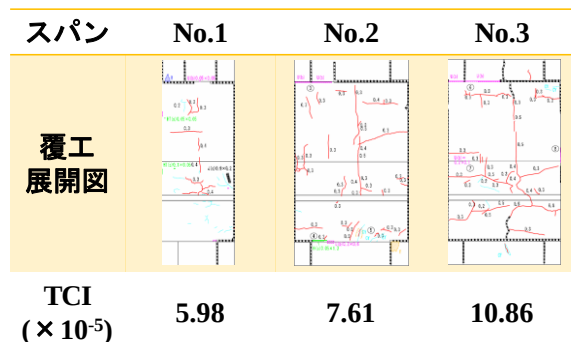
トンネル	工法	竣工 (年)	延長 (m)	スパン	点検 回数
A	矢板	1981	837	80	5回
B	矢板	1981	347	32	3回
C	矢板	1984	87	11	4回
D	NATM	2000	84	11	3回



(a) 覆工展開図とTCI (2001年)



(b) 覆工展開図とTCI (2010年)



(c) 覆工展開図とTCI (2013年)

図-2 覆工展開図経年変化の一例 (Bトンネル)

4. TCI算出結果・考察

前章で述べた算出方法に従い、4つの道路トンネルにおけるTCIの経年変化傾向を図-3、図-4、図-5、図-6に示す。ここで図中の各色の実線は、それぞれのスパン毎のTCI経年変化を示している。長いトンネルの場合はスパン数が多いため、図-3からわかるように、TCIは $0 \sim 20 \times 10^{-5}$ に幅広く分布することがわかる。また、経年的に下がるスパンも見受けられるが、それはひび割れが補修された場合においてひび割れそのものがなくなったと判断したためである。

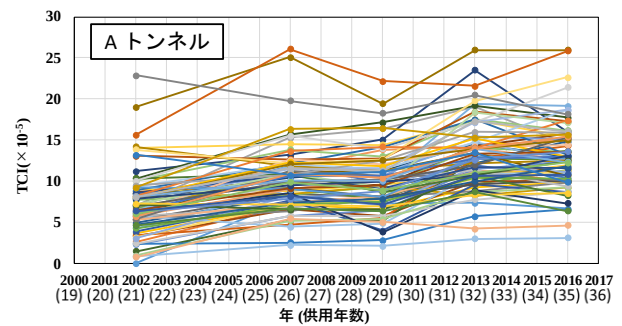


図-3 Aトンネル経年変化傾向

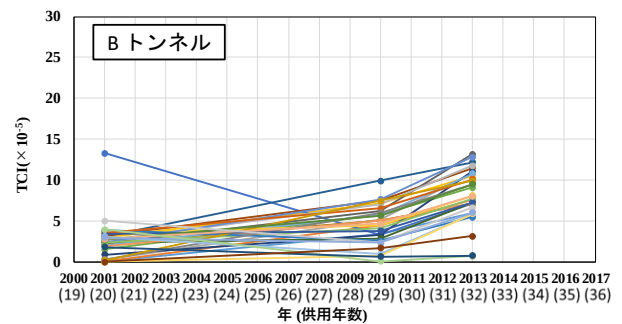


図-4 Bトンネル経年変化傾向

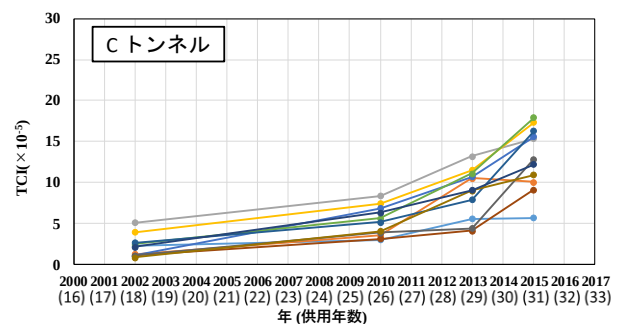


図-5 Cトンネル経年変化傾向

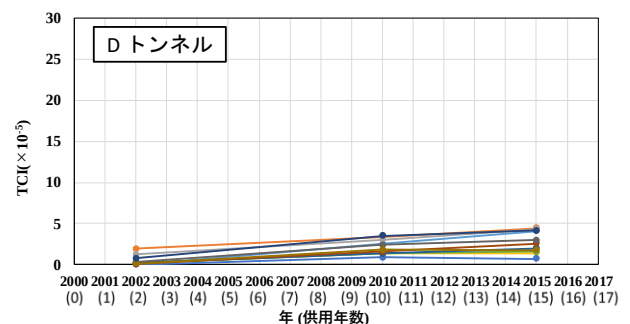


図-6 Dトンネル経年変化傾向

図-3～図-6からわかるように、複数回分の点検記録をTCIで表現することでトンネルによって覆工コンクリートの経年劣化傾向が異なることがわかる。とくに、DトンネルはNATMによる施工がされているため、他の3ト

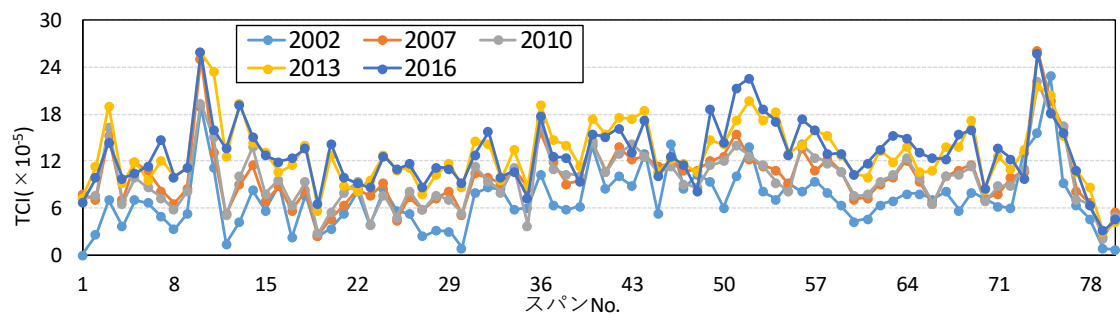


図-9 Aトンネル年別経年変化傾向

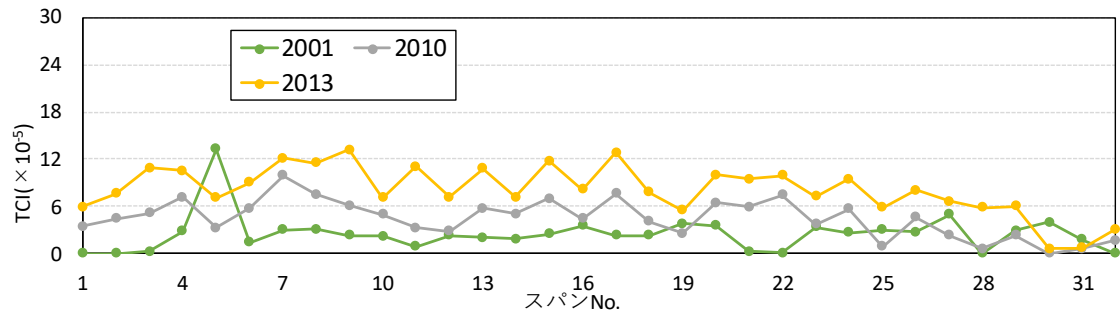


図-10 Bトンネル年別経年変化傾向

ンネルとは構造が異なるため、劣化状況が異なることが確認できた。さらに、同一トンネル内においてもスパンごとに劣化の程度が異なるが、ほとんどのスパンにおいてTCIは増加または横ばいに推移していることも併せてわかる。

以上の結果により、複数回点検を実施することで単数年の点検記録では判定できない劣化予測を可能にすると考えられる。

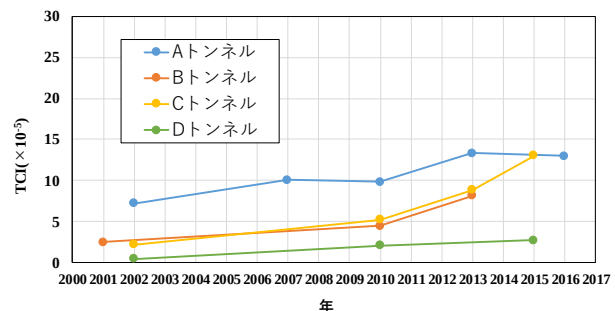


図-7 TCI平均値経年変化傾向

5. メンテナンス優先度判定

4つのトンネルの健全度変化傾向を評価するため、トンネル毎のTCIの平均値を図-7に示す。図-7から、各トンネルにおいてもTCIは増加しており、覆工の健全度が経年的に低下傾向にあることがわかる。さらに、各トンネルにおいて前回点検から次回点検までのTCI増加傾向にも特徴が見られる。すなわち、AトンネルのTCIの平均値は比較的高いが2013年以降は増加傾向がみられない。また、Dトンネルにおいても供用年数は短くNATMによる施工であることからひび割れは比較的少なくメンテナンス優先度は低いと判定できる。一方、B、CトンネルのTCIは2010年を境に急激に増加する傾向を示し、2013年以降TCIはさらに増加することが予測できるため、TCIの変化傾向を踏まえたメンテナンス優先度判定をする必要があるとわかる。

以上より、TCI平均値の増加傾向や供用年数、施工方法を考慮すると、A～Dトンネルのメンテナンス優先順位はCトンネル>Bトンネル>Aトンネル>Dトンネルと判定できる。

次に、個々のトンネルにおける劣化がより進展している箇所を抽出するため、各トンネルのスパン毎の年別TCI経年変化傾向を図-9～図-12に示す。

これらの図より、各トンネル内においてどこで劣化が進展していかを把握することができ、たとえば、AトンネルのスパンNo.10とNo.74のTCIは、2002年の時点で高い値を示しているが、2013～2015年の間では変化がほとんどなく、次のメンテナンス優先度は高くないと判定できる。一方、CトンネルのスパンNo.7に着目すると、2013～2015年間で急激に増加していることから、TCI自体は比較的低いが個別スパンのメンテナンス優先度は高いと判定できる。これらの特徴から、ひび割れの発生には供用年数や施工方法のほかにも地山、土被りなど様々な要因が影響を与えていると考えられ、トンネルが受けている外的要因を推定することもできる。

以上の結果から、スパン毎のTCI経年変化傾向を把握することで、将来劣化状況を加味したメンテナンス優先度判定ができると考えられる。

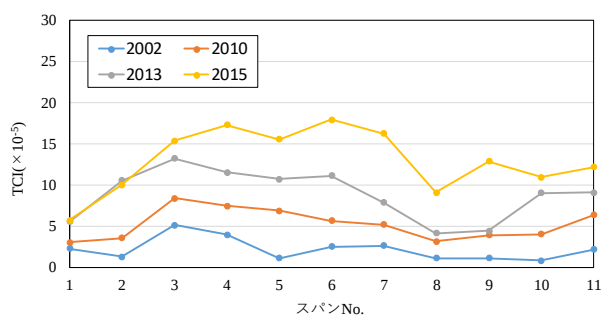


図-11 Cトンネル年別経年変化傾向

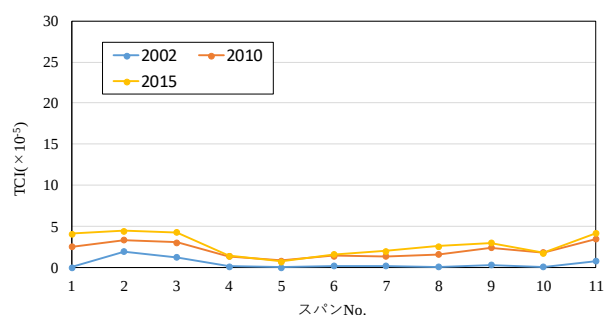


図-12 Dトンネル年別経年変化傾向

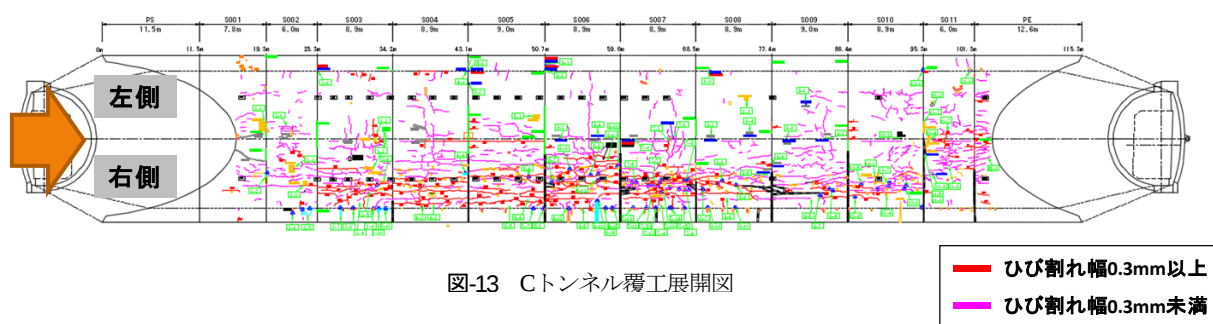


図-13 Cトンネル覆工展開図

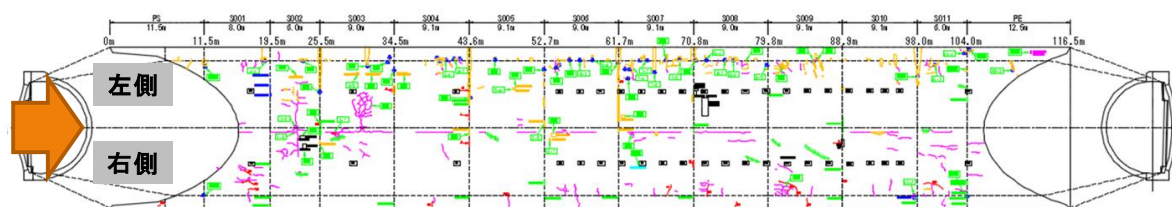


図-14 Dトンネル覆工展開図

さらに、めがねトンネルであるC、Dトンネルの覆工展開図から、ひび割れが比較的集中して発生している箇所において局部的に劣化が進展していることが見受けられたため（図-13、図-14参照）、今後はトンネルの右側・左側に分けてTCIの分析を行う予定である。

6. 結論

本研究では国土交通省が管理している4つのトンネルにおける過去複数回分の覆工展開図からスパン毎、トンネル毎のTCIを算出し、その結果から将来劣化状況を加味したメンテナンス優先順位の決定を試みた。それにより得られた知見を以下に示す。

- ① A～DトンネルそれぞれのTCI経年変化傾向から、4つのトンネルのTCIは徐々にではあるが増加傾向にある。したがって、覆工コンクリートの劣化は長期間にわたり、徐々に進展していることがわかった。
- ② トンネル覆工コンクリートの経年変化は施工方法や供用年数の違いによって異なる傾向を示すことがわかった。さらに同一トンネル内でもスパンによって経年変化にばらつきがあることがわかった。

- ③ 単数年の点検結果では判断できない劣化の進展状況を複数回分の点検結果から算出したTCIによって将来予測をすることで、メンテナンス優先順位の判定ができた。

- ④ トンネルの箇所別にTCIを経年的に分析することで、トンネル内の劣化状況を詳細に把握でき、トンネル覆工コンクリートに作用する外力要因を推定できる可能性を見出した。

今後はC、Dトンネルのトンネルの覆工展開図から見受けられたひび割れ発生箇所の特徴を踏まえて、1スパンを分割して（例：右側・左側）分析を行う予定である。

謝辞： 本論文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。

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，2016.9
- 3) 重田佳幸，飛田敏行，亀村勝美，進士正人，吉武勇，

EVALUATION OF MAINTENANCE PRIORITY POINT FOR ROAD TUNNEL BY USING TUNNELCRACK (TCI)

Ayaka KITAMURA, Shingo MORIMOTO and Masato SHINJI

The maintenance methodology for road tunnels, especially those over 50 years old, became a serious issue after a ceiling collapse accident at the Sasago highway tunnel occurred in 2012. Following this accident, the MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan) required administrators to conduct periodic inspections of road tunnel. Such health monitoring is performed by skilled tunnel inspectors. However, the results of the evaluation depend largely on their experience, since the evaluation criteria are mainly based on qualitative indices. One of the authors proposed Tunnel lining Crack Index (TCI) to quantitatively assess the health condition of tunnel lining. In this study, such TCI was applied to four road tunnels. We used multiple tunnel lining crack maps to evaluate TCI and compare the crack in the four tubes. Thus, the benefits of employing TCI for quantitative priority assessment of tunnel lining maintenance needs become clear.