

トンネル覆工の健全性評価実用化のための TCI項目の寄与度分析に関する研究

相緒 春菜¹・中村 剛²・藏重 聡志³・林 久資⁴・進士 正人⁵

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:i001ve@yamaguchi-u.ac.jp

²山口県 土木建築部 道路整備課 (〒753-8501 山口県山口市滝町1番1号)
E-mail:nakamura.takashi.02@pref.yamaguchi.lg.jp

³山口県 土木建築部 道路整備課 (〒753-8501 山口県山口市滝町1番1号)
E-mail:kurashige.satoshi@pref.yamaguchi.lg.jp

⁴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:hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

⁵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

我が国の高度経済成長期に集中的に整備された道路トンネルは、すでに建設後30～50年以上経過し、今後その老朽化が急激に進行することが想定されている。このため、トンネルの長寿命化を図る適切な維持管理方法の構築が望まれている。覆工健全度の定量的評価法の確立を目指して、著者らは、既設トンネルですでに複数回実施された覆工点検記録にひび割れ指数 (TCI) を適用し、その経年変化を分析してきた。しかし、これまでの分析方法では覆工の健全性の低下を示すTCIの増加がひび割れの長さや幅のいずれの増大によるものかを区別をしておらず、詳細なひび割れの進行性を把握できない問題点があった。そこで、本研究では、TCIの増加量に対するひび割れ長さおよび幅それぞれの寄与度の分離を試行し、覆工劣化の進行性評価ができることを明らかにした。

Key Words : Tunnel-lining Crack Index, crack map, progression, crack length, crack width

1. はじめに

近年、我が国の土木構造物の整備状況は建設の時代から維持管理の時代へ移行しつつあり、既設道路トンネルにおいてもその重要性が指摘され、各機関で健全性評価システムに関する研究が進められている¹⁾。このような動きに伴い、現在、山口県では管理する129本の道路トンネルの長寿命化を図るため、維持管理の基本方針を従来の事後保全型から予防保全型へ転換しつつある²⁾。しかしながら、現在のトンネル点検マニュアルに基づく健全性評価方法は、点検技術者の経験に基づく定性的な指標が含まれるといった様々な問題点を有し、合理的な維持管理手法が確立されているとはいえない。このような状況に加え、今後、供用年数が50年を超え、補修などの対策を要するトンネルが急激に増加していくことが予想されることから、129本ものトンネルの維持管理を適切に行っていくための定量的かつ安全なトンネルの健全性

評価方法の確立と実用化が急務である。

筆者らは、これらの現状を受け、著者ら³⁾が提案するひび割れ指数 (以下、TCIと称す) を山口県内の複数の既設道路トンネルに適用し、覆工の健全性の数値化とその経年変化に基づくトンネル点検優先度判定を試みてきた⁴⁾。しかし、これまでのTCIによる評価方法では、剥落など利用者への危険性増加割合が異なると考えられるひび割れの長さの増大と幅の増大のいずれの場合も同じTCIの増加量として評価されるため、TCIにそれぞれの要素がどれだけ寄与しているのかが判別できないという問題点が明らかになった。

そこで、本研究は、覆工の健全性低下を示すTCIの増加量をひび割れ長さの増大とひび割れ幅の増大、さらに新しく発生したひび割れの3種類に分離し、それぞれの寄与度を分析することを提案する。そして、山口県が管理する既設道路トンネルを対象に、従来よりも詳細なひび割れの進行状況を把握できる可能性を示した。

2. 山口県におけるトンネル維持管理の課題

現在、山口県ではトンネル長寿命化修繕計画²⁾に基づき、各トンネルの健全性評価が行われている。トンネル本体工の場合、点検結果に基づき、外力、材質劣化、漏水の各変状に対して5段階（Ⅰ：健全、Ⅱb：要監視段階、Ⅱa：予防保全段階、Ⅲ：早期措置段階、Ⅳ：緊急措置段階）の健全度判定区分により評価を行う。これらの評価は、図-1に示すように、まず、トンネルの最小構造単位である覆工コンクリートの1スパン毎に行われ、その結果をもとにトンネル全体の健全性評価が総合的に行われる。この判定方法では、トンネル内の最も健全性の低いスパンをトンネル全体の健全性とするため、評価ミスによるリスクは低いと考えられるが、例えば、トンネル全体でひび割れが発生しているトンネルと1スパンのみ局所的にひび割れが発生しているトンネルを比較した場合、変状の発生状況が大分異なるにも関わらず同様な判定結果になってしまう。このため、複数のトンネル間でその健全性を比較しても最終的にその差は小さく、詳細な覆工健全度の状態を把握することは難しい。また、表-1にひび割れに関する点検時の判定目安を示す。この表から、ひび割れ幅と長さに基づき5段階の判定区分が設定されていることがわかるが、幅は3mmと5mm、長さは5mと10mで大別されていることから、その区分間隔は大まかであり、判定区分結果のみでは幅と長さのどちらが増大しているのかがわかりにくい。

近年は覆工の剥落事故や地震による健全性の低下が確認され、トンネルの点検や補修の必要性が高まってきていることから、以上のような問題点を踏まえ、今後は、トンネルおよびスパン毎の健全性をより詳細に把握できる定量的な健全性評価方法の実用化が求められる。

3. TCIの概要

本研究では、覆工に生じ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TCI（Tunnel-lining Crack Index）を用いた³⁾。TCIの基礎式を式(1)に示す。このTCIはひび割れの幅、長さ、方向から評価尺度を数値化するため、点検技術者の主観に依存することなく、定量的な評価ができる特徴を有している。

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

A：覆工コンクリートの面積（ $A=Ls \times La$ ）（ m^2 ）

Ls：覆工コンクリートの縦断延長(m)

La：覆工コンクリートの横断延長(m)

n：ひび割れの本数(本)

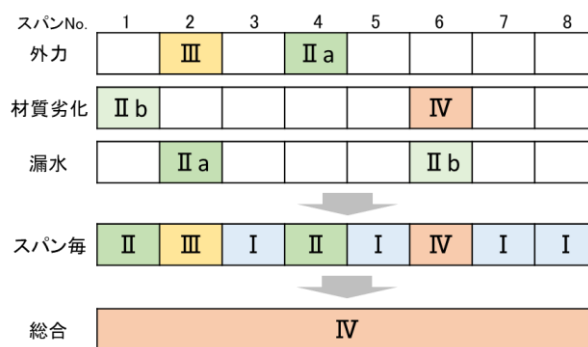


図-1 トンネル毎の健全性評価の流れ

表-1 点検時の判定目安（ひび割れ）

進行の有無が確認できない場合		長さ			進行が確認された場合	長さ		
		5m未満	5-10m	10m以上		5m未満	5m以上	
幅	3mm未満	Ⅰ - Ⅱ _a				幅	3mm未満	Ⅱ _a - Ⅲ
	3-5mm	Ⅱ _a	Ⅲ	Ⅲ	3mm以上		Ⅲ	Ⅳ
	5mm以上	Ⅱ _b - Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ				

表-2 対象トンネルの概要

トンネル	延長(m)	スパン	竣工(年)	工法	点検(年)
A	82	11	1990	在来	2010, 2019

$l^{(k)}$ ：ひび割れkの長さ(m)

$t^{(k)}$ ：ひび割れkの幅(m)

$\theta_i^{(k)}$ ：ひび割れkの法線ベクトルがx軸となす角度(°)

$\theta_j^{(k)}$ ：ひび割れkの法線ベクトルがy軸となす角度(°)

式(1)により算出されるTCIには縦断方向成分 F_{11} と横断方向成分 F_{22} があり、覆工コンクリートの劣化の指標 F_0 はクラックテンソルの一次不変量として縦断・横断方向成分の和($F_0=F_{11}+F_{22}$)として表される。本研究では、この F_0 を覆工健全度の評価値としてTCIと呼ぶ。この数値が大きいほど1打設長当たりのひび割れ量が多く、覆工の健全度は相対的に低いことを意味する。

4. 対象トンネルの概要およびTCI適用結果

研究対象とした既設道路トンネルの概要を表-2に示す。このトンネルは山口県が管理するトンネルのうち、過去2回の点検記録があるトンネルの中の1本であり、交通量はそれほど多くないが、ひび割れの発生と進行が著しいと管理者から報告を受けたトンネルである。このトンネルの健全性を定量的に評価するために、定期点検時に作成された覆工展開図をもとにTCIを算出した。

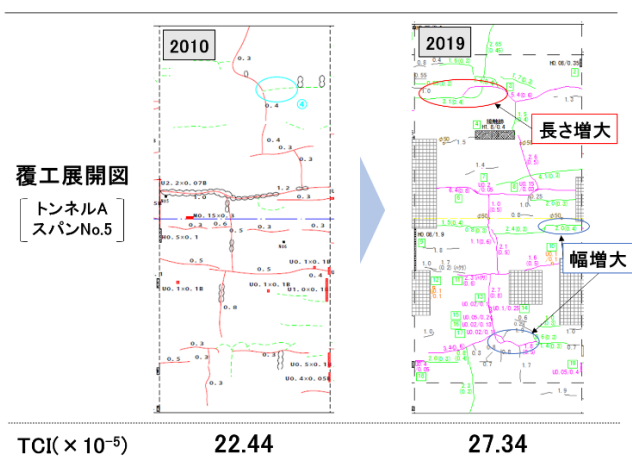


図-2 トンネルA覆工展開図とTCIの一例

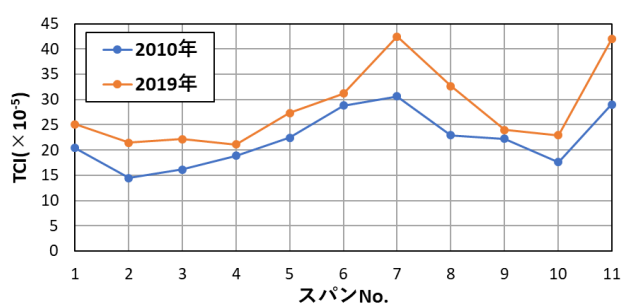


図-3 トンネルAの点検年別TCI算出結果

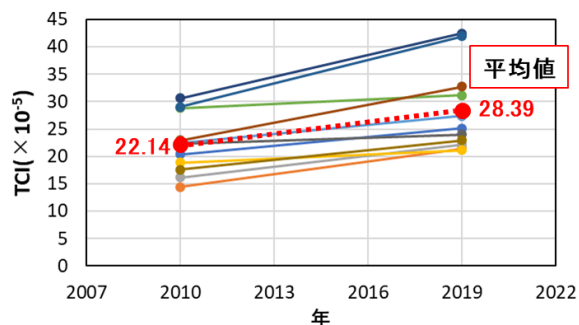


図-4 トンネルAのスパン毎のTCI経年変化

ケース		初期状態	長さ増大	幅増大
模式図 面積 A=210.1m ²	横断方向			
	縦断方向			
ひび割れ	本数	5	5	5
	幅t (mm)	2.5	2.5	5.0
	長さl (m)	3	6	3
TCI($\times 10^{-4}$)		1.78	3.57	3.57

図-5 TCI増加シミュレーション

図-2に、一例としてトンネルAのスパンNo.5の覆工展開図とTCI算出結果を示す。この図から、トンネルAでは2010年時点ですでにひび割れがスパン全体に多く生じており、2010年から2019年にかけてTCIが増加していることから健全性が低下傾向にあることがわかる。また、覆工の一部で対策工による補修が行われていることから、そのひび割れの多さと進行性が見て取れる。さらに、図-3に全スパンにおける点検年別のTCI算出結果を示し、図-4に各スパンのTCIの経年変化を示す。これらの図から、トンネルAでは覆工展開図を示したスパンNo.5と同様にどのスパンにおいてもTCIが増加しており、特にスパンNo.7、11におけるTCIの増加量が多いことが読み取れる。また、トンネルAはトンネル全体でTCIが増加傾向にある特徴に加え、TCIが大きいうすなわちひび割れ量が多いという特徴を有する。これまで筆者らがTCIを適用した山口県が管理する10本のトンネルに2本のトンネルを追加した12本のトンネルにおける直近点検時のTCI平均値は 4.20×10^{-5} であったが、トンネルAの直近点検時におけるTCIは 28.39×10^{-5} であり、相対的にかなり大きな値を示している。以上のことから、トンネルAはひび割れ量が多く、過去に一度補修が実施されているが、今後さらにひび割れが急激に進行する懸念を有するトンネルと判断できる。

5. TCI増加量における寄与度分析

(1) 従来のTCI評価方法の課題

上述のように、TCIを過去の複数回分の点検記録に適用することで、定量的なトンネル覆工の健全性評価が行えることを示した。その中で、特に健全性の低下を意味するTCIの増加量に着目してきたが、TCIは式(1)に示したように、ひび割れの幅と長さをかけ合わせて算出するため、両要素が混在しており、TCIのみではそのどちらが増大しているのが判別できない。例えば、図-5のように、ひび割れの長さtと幅lがそれぞれ2倍に増大した場合のシミュレーション結果を見ると、ひび割れが縦断と横断のいずれの方向であっても、TCIは初期状態の 1.78×10^{-4} から 3.57×10^{-4} へ増加している。このように、従来の評価方法ではひび割れの進行状態が異なる場合でも同じTCI増加量でその進行性が示されてしまうことが確認できる。実際に、図-2に示したトンネルAのスパンNo.5においても、TCIが 22.44×10^{-5} から 27.34×10^{-5} に増加しており、覆工展開図からはひび割れの長さtと幅lの両方の増加が確認できるが、どちらが多くTCIの増加量に寄与しているのかはわからない。本研究では、この問題点に着目し、より詳細なひび割れ進行性を把握するための新しい評価方法の検討を行った。

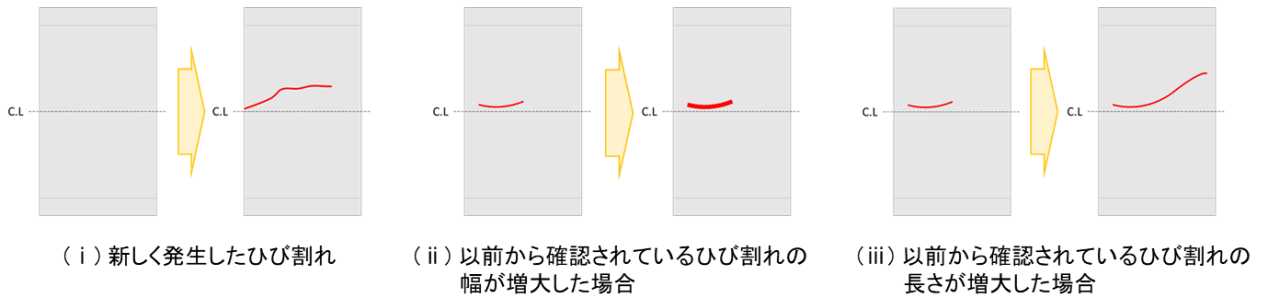


図-6 ひび割れの進行パターン

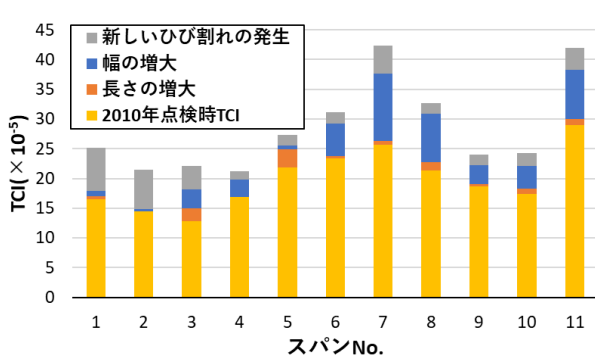


図-7 トンネルAにおけるスパン毎のTCI増加量の分離

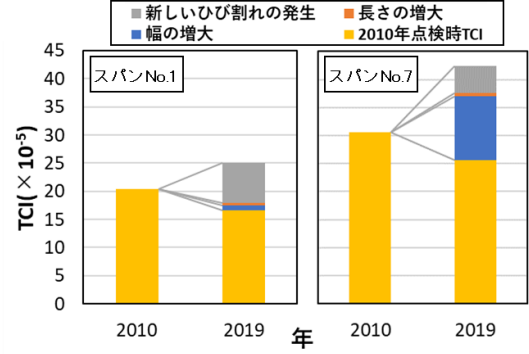


図-8 トンネルAスパンNo.1, 7におけるTCI推移

(2) TCI増加量の分離方法

本研究では、上記の課題に対する検討として、TCIの増加量すなわちひび割れの進行を3パターンに分離して評価を行った。具体的には、図-6に示すようなパターン分けであり、詳細は以下の通りである。

- (i) 前回点検時には確認されず、今回の点検で初めて確認された新しく発生したひび割れ
- (ii) 前回点検時以前から確認されているひび割れの幅が増大した場合
- (iii) 前回点検時以前から確認されているひび割れの長さが増大した場合

また、TCIの基礎式である式(1)を用いて考えると、TCIにおけるひび割れ幅の増分は $\Delta t^{(k)}$ 、ひび割れ長さの増分は $\Delta l^{(k)}$ と表され、それらの増分を考慮した場合が式(1)'である。これをさらに展開すると式(2)となり、もともと存在していたひび割れ量を示す $t^{(k)}l^{(k)}$ に加え、 Δt と Δl を含む項、すなわちひび割れの増加分を示す(i)～(iii)の3項が導出される。それらが上述した3つのひび割れ進行パターンを表している。

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

$$= \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n \left(\underbrace{t^{(k)}}_{\text{幅の増大}} + \underbrace{\Delta t^{(k)}}_{\text{長さの増大}} \right) \left(\underbrace{l^{(k)}}_{\text{長さの増大}} + \underbrace{\Delta l^{(k)}}_{\text{長さの増大}} \right) \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (1')$$

$$= \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n \left(\underbrace{t^{(k)} l^{(k)}}_{\text{(iii)}} + \underbrace{t^{(k)} \Delta l^{(k)}}_{\text{(ii)}} + \underbrace{\Delta t^{(k)} l^{(k)}}_{\text{(ii)}} + \underbrace{\Delta t^{(k)} \Delta l^{(k)}}_{\text{(i)}} \right) \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (2)$$

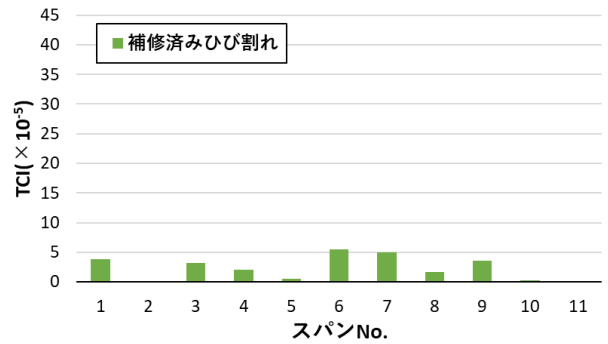


図-9 トンネルAの補修によるスパン毎のTCI減少量

(3) トンネルAのTCI増加量における寄与度調査結果

図-7に、(2)のTCI増加量の分離方法をトンネルAに適用した結果を示す。これは2019年点検時におけるTCI算出結果の内訳を色別で示しており、2010年に確認されたひび割れ（2010年点検時TCI）に加え、それらが2019年にかけてどのように進行したのかが読み取れる。さらに、図-8に、全11スパンの中から例としてスパンNo.1, 7のTCIの内訳の推移を示す。この図から、スパンNo.1では2010年から2019年にかけて新しいひび割れが多く発生しており、一方、スパンNo.7では、スパンNo.1と同様に新しいひび割れも発生しているが、特にもともと存在していたひび割れの幅の増大によるTCIの増加量が多いことがわかる。ここで、両スパンにおいて2010年点検時のTCIが2019年に減少しているのは、トンネルAでは図-2の覆工展開図からもわかるように、一部で剥落対策工による補修が行われ、この場合は保全点検要領に基づき、ひ

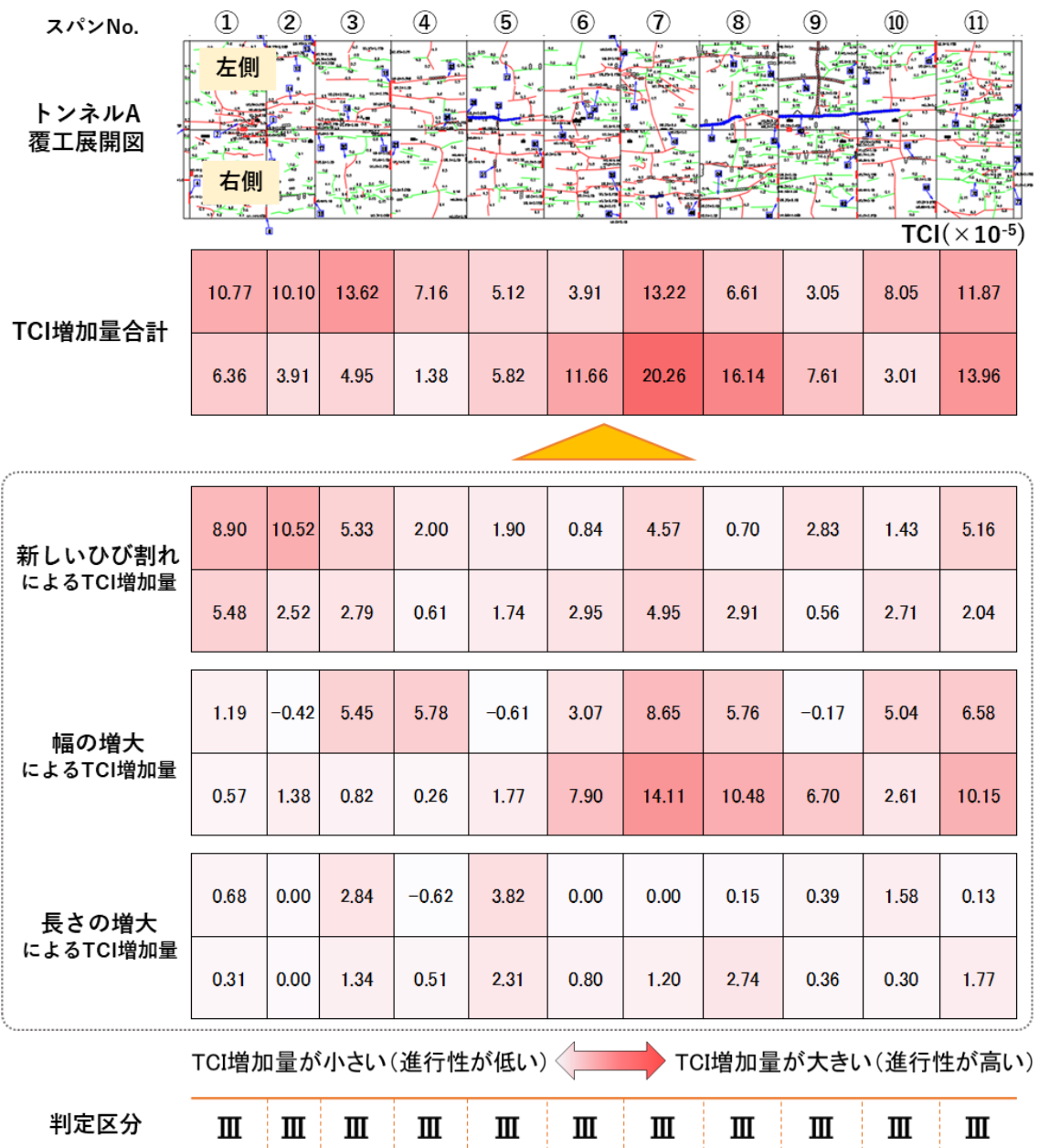


図-10 トンネルAにおけるTCI増加量の分布図

ひび割れはなくなったと想定しているためTCIが減少した結果となった。図-9に、各スパンの補修によるTCI減少量を示す。この図に示すTCI減少量を2010年点検時のTCIから引き、そのTCI値に2010年～2019年の増加分を足し合わせると、図-7になる。図-9より、トンネルAではほとんどのスパンで補修工事が実施されていることがわかるが、これまで述べてきたように、トンネルAはTCIが増加傾向にあることから、補修後もその箇所以外の覆工でひび割れが発生・進行していると判断できるため、今後は点検頻度を高めるなど、注意して監視を続ける必要があると考えられる。また、伊藤ら⁹⁾は、ひび割れ幅が増大すると剥落に対する危険性が急激に高くなる傾向が見られると報告していることから、スパンNo.6, 7, 8,

11のようなひび割れ幅の増大が著しいスパンをトンネルAの中でもとくに重点的に経過観察するべきであるといった判断もできる。

以上のように、ひび割れの進行パターン毎のTCI増加量を算出することにより、従来よりも詳細なひび割れの進行状況を把握でき、とくに剥落などの危険性が高いスパンの抽出も可能となることがわかる。

(4) トンネルAにおけるひび割れ進行状況の分布

図-10に、トンネルAにおけるTCI増加量の分布図を示す。この図は、各スパンを左右2分割し、それぞれの箇所における2010年から2019年にかけてのTCIの増加量を色の濃淡で視覚的に把握できるようにしている。色が濃

い箇所ほど、TCI増加量が大きく、ひび割れの進行性は高いことを意味する。また、これまで述べてきたTCI増加量の分離方法の適用結果を用いて、3パターンのひび割れ進行状況の分布図も併せて示す。これらの新しいひび割れ、幅の増大、長さの増大の全パターンを重ね合わせるとTCI増加量合計となる。例えば、最も色の濃いスパンNo.7の右側においては、TCI増加量の合計が 20.26×10^5 であり、そのうち、新しいひび割れによるものが 4.95×10^5 、幅の増大によるものが 14.11×10^5 、長さの増大によるものが 1.20×10^5 であることから、この箇所ではひび割れ幅の増大が著しいことが読み取れる。また、トンネル全体で見ると、新しいひび割れはどのスパンでも概ね偏りなく発生しているが、ひび割れ幅の増大箇所は色の濃淡がスパンによって大きく異なることから、局所的に増大していることもわかる。

このように、覆工展開図上にTCI増加量を色分けして表示することで、図-7よりもトンネル覆工のどの箇所で、新しいひび割れ、幅の増大、長さの増大が大きいのか把握しやすくなり、次回の点検をこの分布図と照らし合わせながら実施することで、ひび割れ進行性の高い箇所をより注意深く観察するなど、効率的に点検を進めることができると考えられる。

さらに、図-10の下部にトンネルAの直近点検時（2019年）における点検技術者によるスパン毎の健全性判定区分を示す。トンネルAでは、5段階の判定区分のうち全スパンで「Ⅲ：早期措置段階」と判定されており、トンネル全体で何らかの対策を要する状態であることはわかるが、スパン毎の健全性低下度合いの違いがわかりにくい。このような場合に、今回のようにTCIを用いてスパン毎、さらに左右に分けて細かくひび割れの進行状態を分析することで、今後の進行性を加味したトンネルの健全性評価が可能になると考えられる。

6. まとめ

本論文では、今後のトンネル健全性評価の精度向上と実用化を目的として、山口県が管理する道路トンネルの点検記録である覆工展開図を用いて、TCIによるひび割れ進行性の評価方法を3パターンに分離する手法を考案し、従来の評価結果との比較を行った。それにより得られた知見を以下に示す。

1. 覆工の健全性低下度合いを示すTCI増加量を、新しいひび割れの発生、ひび割れ幅の増大、ひび割れ長さの増大の3つのパターンに分けて各要素の寄与度を調査することにより、従来よりもひび割れ進行状態を詳細に把握でき、健全性低下要因を明確化することができた。

2. TCI増加量の分離により、ひび割れ幅の増大に着目することで、剥落など第三者被害につながる危険性の高いトンネルおよびスパンの抽出が可能となることを示した。
3. 3パターンのTCI増加量を覆工展開図上に色分けして表示することにより、例えば「新しいひび割れが多く発生している箇所」などの抽出が可能となり、今後のトンネル維持管理における参考資料になり得る可能性を示した。
4. 従来の5段階の判定区分によるトンネル健全性評価結果とTCIによる評価結果を比較することで、スパン毎の詳細なひび割れ発生状態を定量的に把握できるTCIの有用性が確認できた。

今後は、引き続き他のトンネルにおいてもTCI増加量におけるひび割れ幅と長さの寄与度調査を行い、データ数を増やしながらかひび割れ進行性の傾向を分析していく。さらに、TCIによる健全性評価の実用化に向け、点検技術者による点検記録とTCIによる評価結果の比較を行い、整合性を調査する予定である。

謝辞：本研究は、山口県との共同研究として実施してきた内容の一部を取りまとめたものである。山口県土木建築部道路整備課には、貴重な点検データを提供して頂いた。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：地下構造物のアセットマネジメント導入に向けて、p67, 2015.
- 2) 山口県土木建築部道路整備課：山口県トンネル長寿命化修繕計画、2016.
- 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性評価法、土木学会論文集F, Vol.62, No.4, pp.628-632, 2006.
- 4) 相緒春菜、中村剛、山田賢、森本真吾、林久資、進士正人：TCIを用いた道路トンネル覆工のひび割れ発生要因と進行性に関する研究、トンネル工学報告集、第28巻、1-22, 2018.
- 5) 東日本・中日本・西日本高速道路(株)：保全点検要領構造物編、p.145, 2015.
- 6) 伊藤哲男、馬場弘二、城間博通、吉武勇、中川浩二：トンネル覆工コンクリートのひび割れ形態調査による剥落危険性評価、土木学会論文集F, No.763, pp.87-93, 2004.

(2019.8.9 受付)

THE STUDY ON CONTRIBUTION ANALYSIS OF TCI ITEMS FOR HEALTH EVALUATION OF TUNNEL LINING

Haruna AIO, Takashi NAKAMURA, Satoshi KURASHIGE,
Hisashi HAYASHI and Masato SHINJI

Road tunnels in Japan were developed intensively during the period of high economic growth, and they have already been estimated 30 to 50 years or more have passed since their construction. It is assumed that the aging will progress rapidly in the future. Therefore, it is desirable to construct appropriate maintenance and management method to extend the life of the tunnel. One of the authors applied the Tunnel-lining Crack Index(TCI) to tunnels as a quantitative health evaluation method of cracks in lining and analyzed its aging change. However, until now it has not been possible to determine if the increase in TCI which indicates a decrease health of the lining, is due to the increase in crack length or the increase in width. Thus, it was a problem that it was not possible to grasp the progress of detailed cracks.

In this study, the contribution of each of the crack length and width to the increase of TCI was investigated, and indicated the possibility of the more practical and safe health evaluation method than before.