

トンネル覆工健全性評価の定量化に向けた覆工ひび割れ指数TCIと技術者判定の比較

山口大学大学院 学生会員 ○糸田 大輝
山口大学大学院 正会員 林 久資
山口大学大学院 フェロー会員 進士 正人

1. はじめに

平成26年度の道路法の一部改正に伴い、道路トンネルの定期点検は5年に1回の頻度で実施することが義務付けられた¹⁾。定期点検結果にもとづく対策区分の判定では、覆工コンクリート（以降、覆工と称す）1スパンにおけるひび割れ等の各変状に対して、その誘因である外力、材質劣化、漏水ごとの判定が行われている。この判定結果にもとづきスパンごとに健全性を診断し、もっとも厳しい判定区分がそのトンネルの判定結果となる。しかし、健全性診断の判定基準は技術者の主観的かつ定性的な判断が中心で、技術者の技術、経験による判断のばらつきが懸念されている。さらに、今後のわが国の少子高齢化による技術者不足を考慮すると、技術者に依存しない定量的な判定基準が必要となる。

一方で、既往研究²⁾で提案されているTunnel-lining Crack Index（以降、TCIと称す）は覆工に生じたひび割れの幅、長さ、角度を数値化できる覆工の定量的健全性判定指標であるが、これまで技術者の技術、経験的な判定結果との比較・考察はほとんど行われていない。

そこで、本研究ではトンネル健全性の定量的な判定指標を提案することを目的とし、表-1に示す技術者の覆工のひび割れに対する判定区分³⁾（以降、判定区分と称す）とTCIおよびTCI増加量との相関分析を行った。また、TCIを導出する際に用いるひび割れの幅、長さの経年的な増大との関連分析を行った。

2. 分析対象データの概要

外力に起因するひび割れの判定は、表-1のひび割れに対する判定区分³⁾を参考に行う。

また、本研究では、覆工に発生したひび割れの定量的評価手段として、岩盤のクラックテンソルの考えをもとに提案された覆工ひび割れ指数TCIを用いた。

表-1 ひび割れに対する判定区分³⁾

判定区分	変状の状態
I	ひび割れが生じてない、または生じていても軽微で、措置を必要としない状態
II	IIb ひび割れがあり、その進行が認められないが、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監視を必要とする状態
	IIa ひび割れがあり、 進行が認められ 、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
III	ひび割れが密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が低下しているため、早期に対策を講じる必要がある状態
IV	ひび割れが大きく密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が著しく低下している、または圧迫があり、緊急に対策を講じる必要がある状態

表-2 判定区分ごとのスパン数

判定区分	I	IIb	IIa	III	IV
スパン数	748	229	14	11	0

TCIの基礎式を式(1)に示す。

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

A：覆工コンクリートの面積

n：ひび割れの本数

$l^{(k)}$ ：ひび割れkの長さ

$t^{(k)}$ ：ひび割れkの幅

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

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

分析対象トンネルは過去2回以上の点検記録がある計13本のトンネル、総数1002スパンである。このうち山口県が管理するトンネルが11本、福岡県が管理するトンネルが2本である。

3. 判定区分と TCI との関連分析

3-1. 判定区分と TCI の比較

分析対象トンネルにおけるスパンごとの判定区分のスパン数を表-2に示す。図-1に、判定区分ごとのTCIのばらつきや密度を箱ひげ図で示す。図-1から、判定区分が低下するほどTCIが増加していることがわかる。また、箱ひげ図の四分位範囲に着目すると判定区分が低下するほどTCIのばらつきは大きくなることもわかる。ここで、表-1に示す技術者による判定の指標に着目すると、判定区分IからIIbにおいてはひび割れの有無によって技術者が判定区分を決定し

キーワード トンネル, TCI(Tunnel-lining Crack Index), 判定区分, ひび割れ進行性

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-1-1 山口大学大学院創成科学研究科 TEL0836-85-9332

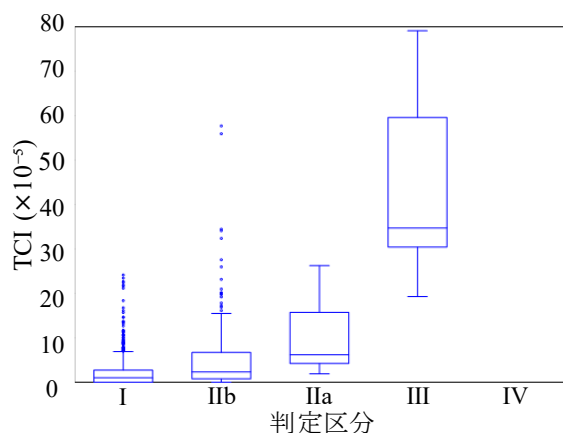


図-1 判定区分ごとのTCIの箱ひげ図

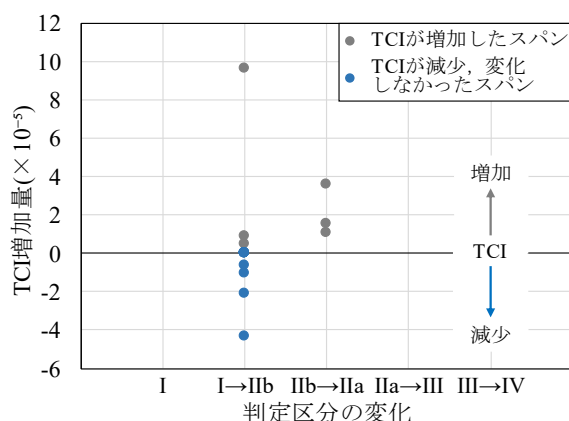


図-2 判定区分が低下したスパンにおける判定区分の変化と TCI 増加量

ているが、判定区分IIb からIIa においてはひび割れ進行性、つまり覆工ひび割れの経年的変化によって技術者が判定区分を決定していることが読み取れる。このことから、ひび割れを定量的に評価した TCI のみで判定区分との比較を行うのではなく、ひび割れ進行性に着目する必要があると判断できる。

3-2. 判定区分とTCI増加量の関連分析

分析対象トンネルにおけるTCI増加量を算出し、技術者が判定した判定区分と比較した。ここで、TCI増加量とは過去2回分の点検記録から差分をとることによってひび割れ状況の経年的変化、つまり進行性を示すことができる。図-2に、定期点検1回目より2回目の判定区分が低下したスパン(19スパン)における判定区分とTCI増加量の関係を示す。図-2より判定区分がI からIIbに低下したスパンではTCI増加量が減少(ひび割れが減少)しているスパンの方が多く見られた。一方で、判定区分がIIbからIIaに低下したスパンでは、すべてのスパンでTCI増加量が増加(ひび割れが増加)した。これは、表-1に示す技術者による判定の指標となる表のとおり、判定区分IIbからIIaにおいてはひび割れ進行性によって技術者が判定区分を決定してい

表-3 TCIとTCI増加量における分析結果

説明変数	オッズ比	
	I→IIb	IIb→IIa
TCI	1.15	0.55
TCI増加量	0.88	3.68

ることが読み取れる。したがって、技術者の判定とTCI増加量の傾向が一致している。

3-3. ロジスティック回帰分析の適用

TCIならびにTCI増加量が判定区分に与える影響度を明確化するためにロジスティック回帰分析⁴⁾を行った。ロジスティック回帰分析とは、目的変数(ある現象発生確率)を $P(x)$ 、説明変数(現象発生要因)を $x_1 \dots x_n$ とおくと、次の式(2)(3)で表される。式(3)における α と各 β_i を求めることで目的変数 $P(x)$ を求める。

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (2)$$

$$z = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i + \dots + \beta_n x_n \quad (3)$$

ここでは、判定区分に与える影響度としてオッズ比を算出する。オッズ比とは説明変数が1増加するとき目的変数 $P(x)$ 確率が何倍になるのかを表す統計量である。すなわち、オッズ比から目的変数に対する各説明変数の影響度を相対比較することができる。

そこで、説明変数をTCIとTCI増加量とし、それぞれが目的変数(判定区分)に与える影響度を求めた。

表-3に分析結果を示す。この結果から判定区分がIからIIbに低下するとき、判定区分に対してTCIは1.15と正の(1以下、判定区分を低下させる)影響があることがわかる。このとき、TCI増加量は0.88と負の(1以上、判定区分を低下させない)影響があると考えられる。また、判定区分がIIbからIIaに低下するときには、TCI増加量が判定区分を低下させる影響が強いと判断できる。このことから判定区分が低下するにつれ、TCIよりもTCI増加量の方が判定区分に強く影響すると推測できる。これらの結果は前項までに述べたことに一致している。

4. 覆工ひび割れ幅および長さの経年変化分析手法

既往研究⁵⁾では、TCI増加量をひび割れ幅の増大とひび割れ長さの増大、さらに新しく発生したひび割れに起因するものの3種類に分離することで詳細なひび割れ進行性を把握できることを明らかにした。しかし、提案の方法では技術者の判定との比較は行われていないことや、分離方法として点検結果のひび割れ1本ずつの幅と長さの経年変化を把握する必

要があり、多くの手間を要するという問題点があった。そこで本研究では、簡便にひび割れの幅と長さの増加割合を知るために、覆工 1 スパンにおけるひび割れの単位長さあたりの幅および、単位幅あたりの長さを算出し、経年によるそれらの変化を分析した。

4-1. 算出方法

各スパンに発生したひび割れの幅と長さの積の和からそのスパンにおけるひび割れの総面積を算出した。そして、総面積をそのスパンにおけるひび割れの長さの合計で除することで、単位長さあたりの平均幅を、また、総面積をそのスパンにおけるひび割れの幅で除することで、単位幅あたりの長さを算出した。ここで、スパンに発生したひび割れの長さを l 、ひび割れの幅を t と仮定すれば、単位長さあたりの平均幅、単位幅あたりの長さはそれぞれ式(4)(5)で算出される。これらの算出結果を比較することで経年的にひび割れの長さか幅のどちらが増大したのかを判断した。

$$T = \frac{(l_1 \times t_1) + (l_2 \times t_2) + \dots + (l_n \times t_n)}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} \quad (4)$$

$$L = \frac{(l_1 \times t_1) + (l_2 \times t_2) + \dots + (l_n \times t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (5)$$

4-2. 技術者による判定とひび割れ幅、長さの経年変化の関連分析

前節では、技術者の判定とTCI増加量に関連性が認められた。そこで、より詳細なひび割れ進行性と技術者の判断を比較するため、判定区分が低下したスパンにおけるひび割れ幅の増大と長さの増大の関係を求めた。図-3に判定区分がIからIIbに低下したスパン(16スパン)における幅と長さの増大の関係を、図-4に判定区分がIIbからIIaに低下したスパン(3スパン)における幅と長さの増大の関係を示す。各図は点検1回目の算出結果に対する点検2回目の算出結果を割合で示したものである。図-3より、判定区分がIからIIbに低下したスパンでは幅と長さの増大に明確な関係は見られないことがわかる。しかし、図-4より判定区分がIIbからIIaに低下したスパンでは、すべてのスパンでひび割れ幅の増大が卓越している。このことからIIbからIIaに判定区分が低下する場合は、ひび割れ幅の増大が技術者の判断に大きく影響していると推測できる。

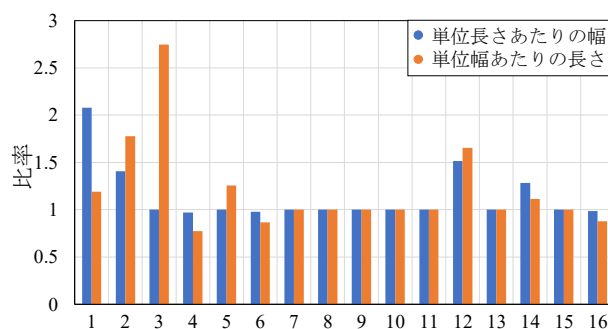


図-3 判定区分がIからIIbに低下したスパンにおける長さとの増大

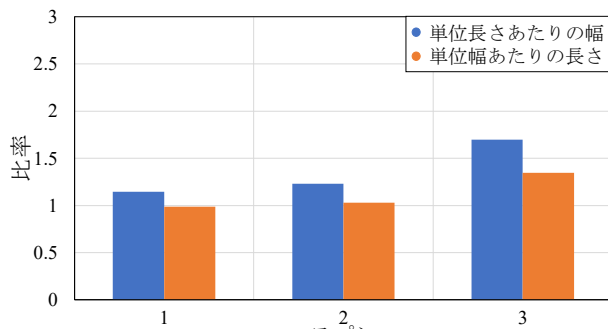


図-4 判定区分がIIbからIIaに低下したスパンにおける長さとの増大

5. まとめ

本研究では、判定区分とTCIおよびTCI増加量との相関分析、ならびにTCIを導出する際に用いるひび割れの幅、長さの経年的な増大との関連分析を行った。得られた知見を以下に示す。

- ① 判定区分が低下し、覆工健全性が低下するほどTCIが増加し、TCIのばらつきも大きくなる。
- ② ひび割れ進行性に対する技術者の判定とTCI増加量における評価は一致する。
- ③ ロジスティック回帰分析の結果、判定区分が低下するほどTCIよりもTCI増加量の方が判定区分に強く影響する。
- ④ TCI増加量のうちひび割れ幅、長さの増大に着目をするすると、幅の増大が技術者の判断に与える影響が大きいと推測できる。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局:道路トンネル定期点検要領, p6, 2014
- 2) 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
- 3) 公益社団法人日本道路協会:道路トンネル維持管理便覧[本体工編], p202, 2015
- 4) オーム社(株): SPSSによるロジスティック回帰分析, pp.1-115, 2016
- 5) 相緒春菜・中村剛・藏重聡志・林久資・進士正人: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, トンネル工学報告集, 第29巻, I-17, 2019