

トンネルの変状評価・原因推定への ひび割れ指数 (TCI) の適用可能性について

中野 清人¹・佐伯 徹²・重田 佳幸³・大場 諭⁴・西村 和夫⁵

¹正会員 (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:k.nakano.aa@ri-nexco.co.jp

²(株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

³正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 交通技術本部 (〒163-6018 東京都新宿区西新宿6-8-1)
元 (株)ダイヤコンサルタント 設計事業部

⁴正会員 (株)ダイヤコンサルタント 設計事業部 (〒331-8638 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)

⁵正会員 首都大学東京大学院教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

トンネルに発生している変状の原因は、トンネル覆工に発生している変状の状況により推定されてきた。しかし、変状状況からの原因推定は技術者判断に依存し、定量的な原因推定手法が求められていた。そこで本研究では、客観的な変状評価・原因推定を目的とし、ひび割れの定量的評価手法として提案されているひび割れ指数 (TCI) を用い、変状評価や変状原因推定の一次的な指標としての活用の可能性について検討した。本研究では、変状原因が明らかなトンネルの実データを用いて TCI を算出し、変状原因と TCI の数値の分布状況を比較し、変状原因推定の指標としての可能性について考察した。その結果、TCI の数値が変状原因毎に概ねまとまった領域を示したため、TCI による変状原因推定は適用の可能性があることが分かった。

Key Words : tunnel lining concrete, tunnel-lining crack index, evaluation of soundness

1. はじめに

山岳トンネルの変状は、外因(外力や環境等の外的な要因)と内因(材料や設計、施工等に起因する構造的な要因)に大別され、トンネルの変状の多くが複数の原因によって生じる¹⁾。覆工コンクリートに発生したひび割れの方向、発生部位などに特徴があり、変状原因推定の目安として評価に用いられている。

一方、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 (TCI : Tunnel-lining Crack Index) が提案されている²⁾。このひび割れ指数 (TCI) は、ひび割れの幅、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客観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³⁾。また、ひび割れ指数 (TCI) は、応力テンソルと同じ 2 階のテンソルであるため、得られる成分からモールの応力円と同様な図

化処理が可能であり、覆工コンクリートに発生したひび割れの主たる方向を求めることができる。

そこで、本研究は、変状原因が明らかなトンネルの実データを用いてひび割れ指数 (TCI) により、トンネルの変状の特徴や程度の評価への適用性について可能性を検討した。

2. TCIの概要

岩盤工学の分野では、岩盤中のひび割れ(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、覆工コンクリートのひび割れ評価指標として、この“クラックテンソル”を参考に、TCIが提案されている。

(1) TCIの算出式

TCIの基礎式を式(1)に示すとともに、その概念図を

図-1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，さらに F_{11} , F_{22} , F_{12} , F_{21} の各成分を用いて図化を行った．

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

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

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

(2) TCIの算出例

図-2に示す例において，求める F_0 は，ひび割れ番号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，ひび割れ幅・長さに関する係数 α β を，便宜上1.0と仮定して求めた．

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

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

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

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

3. ひび割れの主方向の算出

TCIは応力テンソルと同じ2階のテンソルである．応

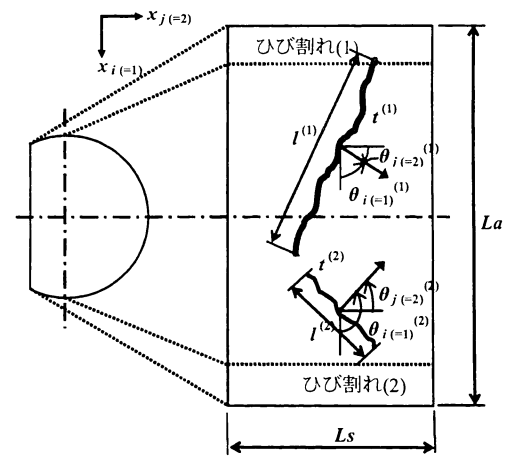


図-1 TCIの概念図

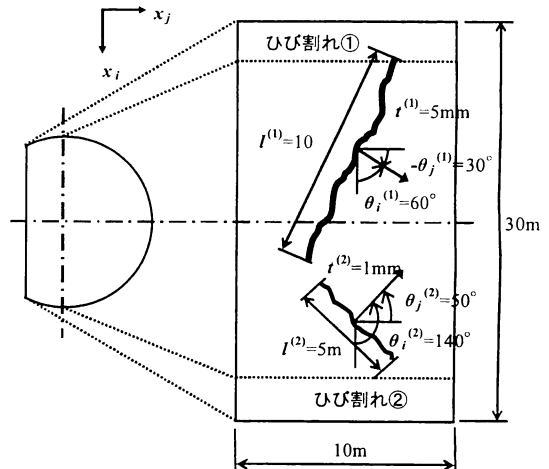


図-2 TCI算出例の展開図

力テンソルは，主応力とせん断力の関係を図示することができ，モールの応力円上の点(σ , τ)と σ_m の直線と σ 軸のなす角が 2α となる．

同様に，ひび割れデータから算出したTCIの各成分(F_{11} , F_{22} , F_{12} , F_{21})によりモールの応力円のような円(以下TCIの円)を描くことが可能であり，覆工のひび割れ展開図からひび割れの主方向を求めることが可能である．

(1) ひび割れ主方向の算出式

式(2)にひび割れの主方向の算出式を示す．

ひび割れを回転させ， F_{11} を横軸， F_{12} を縦軸とした場合のTCIの円上の点と円の x 軸との交点を結ぶ直線による角度 α を求める．

$$\theta = \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{F_{12}}{r + (F_{11} - (F_0/2))} \right) \quad (2)$$

ここで， θ ：ひび割れの主方向

α ：TCIの円が x 軸と交わる点と点

(F_{11} , F_{12})を結ぶ直線と x 軸のなす角

r ：TCIの円の半径

(2) 図化处理によるTCIの特徴

ひび割れ幅は等しいが、長さ、2本のひび割れの交差角を変化させた場合にTCIの円がどのような形状となるか検討した。図-3に検討ケースを示す。ケース1は2本のひび割れ延長が10mで相互のひび割れの角度が45°のケース、ケース2はひび割れ延長が5mと10mで相互のひび割れ角度が45°のケース、ケース3は2本のひび割れ延長が10mで、相互のひび割れ角度が30°のケース、ケース4はひび割れ1本のケースである。

図-4にTCIの円の算出結果を示す。ケース1とケース3は同一の F_0 値であるが、ケース3が円の半径が大きくなる。これは、 F_{12} の大きさの違いであり、ひび割れが1方向に集中すると円の半径が大きくなる特徴を示したものである。

ケース1、2、4を比較すると円の中心が原点に近づく傾向となった。これは、 F_0 の大きさの影響であり、ひび割れの長さが短くなるにつれ、円の中心は次第に原点に近づく傾向となった。

また、実トンネルにおけるひび割れ展開図を用いたひび割れの主方向の算出結果を図-5に示す。図-5よりTCIの算出結果からひび割れの主方向を算出することができると考えられる。また、詳細点検結果では両トンネルとも健全度ランクは同ランクと判定されているが、図-6のようにTCIの円を図化することで円の中心位置の違いによりひび割れの量の違いが分かるなど、同じ健全度でも覆工状態の違いを示せると考えられる。

5. 変状原因推定法の提案

近接目視点検は点検技術者の経験や技術力に左右されるため、トンネル覆工に発生している変状において、変状原因の判断に差が生じる。そこで、変状原因が明らかにされている実トンネルのデータを用いて、変状原因推定の際の一次的な指標としてのTCIの適用性について検討した。

(1) 対象トンネル

高速道路トンネルを対象として、過去に変状を起こしたトンネルの変状原因を推定した資料を収集・整理した。表-1に対象トンネルの変状概要を示す。資料は、変状原因が分かるものと、軽微な変状のもので展開図が読み取れるものを検討対象とした。表中のひび割れパターンは、これまでの研究事例に基づきひび割れの方
 向と分布の割合を示したものである。

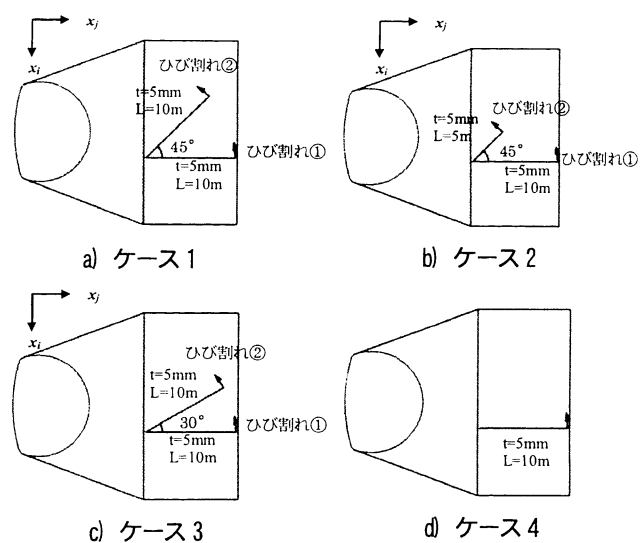


図-3 検討ケース

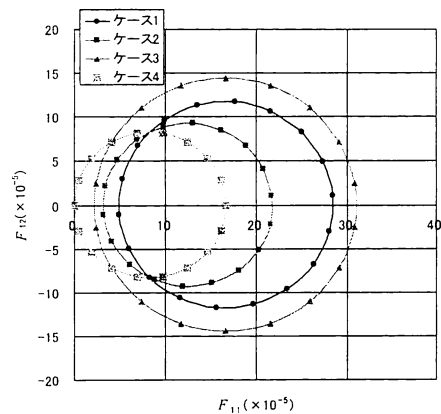


図-4 TCIの円の算出結果

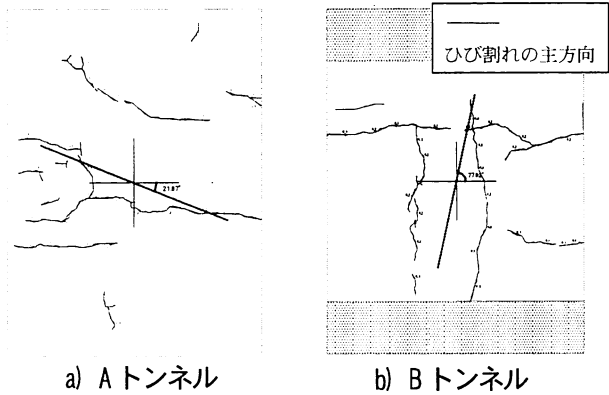


図-5 ひび割れの主方向

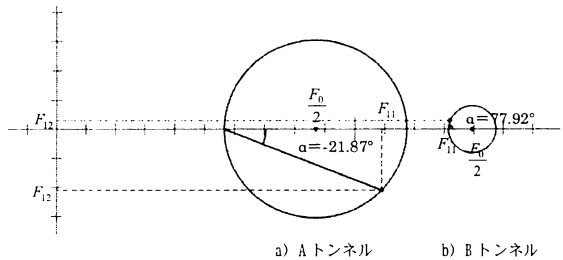


図-6 TCIの円の算出結果

表-1 対象トンネルの変状概要

トンネル名	主な変状原因	ひび割れ幅	ひび割れパターン	発生部位
Aトンネル	地すべり	大半が0.5mm程度以下	縦断・斜め卓越型	アーチ部
Bトンネル	偏圧	0.5～2.0mm程度	縦横断拮抗型	肩部，側壁部
Cトンネル	偏圧	大半が0.5mm程度以下	縦断・斜め卓越型	天端部，側壁部
Dトンネル	偏圧	大半が0.5mm程度以下	縦断・斜め卓越型	天端部，側壁部
Eトンネル	緩み圧	大半が0.5～2.0mm	縦断・斜め卓越型	肩部，側壁部
Fトンネル	緩み圧	大半が0.5～5.0mm程度	縦横断拮抗型	アーチ部
Gトンネル	塑性圧	0.3～2.5mm	縦断・斜め卓越型	天端部，側壁部
Hトンネル	塑性圧	0.1～5.0mm	縦断・斜め卓越型	天端部，側壁部
Iトンネル	路盤隆起	0.1～3.0mm	横断卓越型	アーチ部
Jトンネル	路盤隆起	大半が1.0mm程度以下	縦横断拮抗型	アーチ部
Kトンネル	材質劣化	0.5～3.0mm程度	横断卓越型	アーチ部
Lトンネル	材質劣化	大半が1.0mm程度	縦断・斜め卓越型	アーチ部

(2) 変状原因推定法

ひび割れ展開図より TCI を算出し、既知となっている変状原因と TCI を比較・分析することにより、TCI から変状原因の推定の可能性を検討した。図-7 に変状原因と TCI の関係を示す。図-7 は、横軸に TCI の縦断成分 (F_{11}) を、縦軸に TCI の横断成分 (F_{22}) をとり、それぞれの変状原因別に色分けしてプロットしたものである。緩み圧による変状は、縦断成分が卓越し、塑性による路盤隆起は、横断成分が卓越する領域に分布した。また、地すべり、偏圧による変状は、縦断成分、横断成分がほぼ同程度の領域に分布する。さらに、塑性圧による変状は、縦断成分が若干卓越する領域に、材質劣化は、縦断成分、横断成分がほぼ同程度であるが、それぞれの成分が小さな領域 (10×10^5 以下) に分布した。変状原因別にある程度の領域に分布する結果が得られたことから、TCI を用いて変状原因推定の可能性があるものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、サンプルの展開図を用いて TCI を算出し、TCI の円を図化することで、トンネルの変状の特徴や程度の評価への適用性について可能性を検討した。

さらに、変状原因が明らかな実トンネルの展開図より TCI を算出し、既知となっている変状原因と TCI を比較・分析することにより、TCI から変状原因の推定の可能性を検討した。

本研究結果のまとめを以下に挙げる。

①ひび割れがトンネル縦断方向、横断方向等、一方向に集中すると TCI の円の半径が大きくなる。このことから、TCI の円の半径の大小によりひび割れの分布の特徴を評

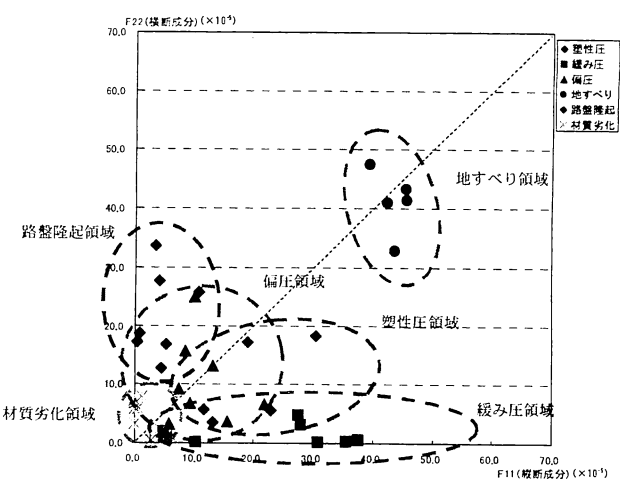


図-7 変状原因と TCI の関係

価できる可能性がある。

②ひび割れの量（長さ、幅）が小さいほど、TCI の円の中心 ($F_0/2$) が原点に近づく。すなわち、ひび割れ変状の程度は TCI の円の中心位置 ($F_0/2$) で評価できる。

③実トンネルのひび割れ展開図から TCI の円を描画することにより、外力変状の推定や、外力変状と内的要因による変状の区分け等の可能性がある。

④ F_{11} と F_{22} の関係をプロットすることにより、変状原因推定の目安となる可能性がある。

以上のように、TCI の方向成分を考慮することにより覆工コンクリートに発生するひび割れの主たる方向や特徴、変状原因推定など、これまで技術者の定性的判断で評価されてきた事項を TCI を適用することでこれまでより客観的に評価できる可能性があることが分かった。今後は、データを追加して、さらなる検討を行うことで、健全度評価や変状原因推定などに適用できるものと考え

られる。ただし、最終的に変状原因を推定する際には、地形、地質及びひび割れ発生部位等も考慮した総合的な判断を行うことが必要である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、山口大学大学院吉武勇准教授から貴重なご意見をうかがいました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会トンネル変状メカニズム研究小委員会：トンネルの変状メカニズム，2003.
- 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) 田隆昭，佐野信夫，馬場弘二，重田佳幸，吉武勇，西村和夫：ひび割れ指数を用いたトンネル覆工コンクリートの健全度評価法の構築，土木学会論文集 F，Vol.65 No.1，pp.11-16，2009.
- 4) 例えば，山辺 正，原 夏生，小田匡寛：クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメーターの決定に関する研究，土木学会論文集，No.382/III-7，pp.121-130，1987.
- 5) 山田 隆昭，佐野 信夫，馬場 弘二，吉武 勇，中川 浩二，西村 和夫トンネル覆工コンクリートの定量的な健全度評価基準，土木学会論文集F，Vol.63 No.1，pp.86-96，2007.

APPLICATION POSSIBILITY OF TCI TO THE CAUSE OF THE TRANSFORMATION OF THE TUNNEL

Kiyohito NAKANO, Toru SAEKI, Yoshiyuki SHIGETA,
Satoshi OOBA and Kazuo NISHIMURA

The cause of the tunnel has been estimated by the situation of the transformation that occurred to a tunnel lining. However, it depended on engineer judgment to estimate a cause from the strange situation of the form, and quantitative cause estimate technique was demanded. I collected the data of the strange tunnel where was in the past. And I performed Tunnel-lining health evaluation from data of the crack. I examined the possibility of the strange form cause estimate by using TCI (Tunnel-lining Crack Index).