

# TCIを用いた覆工コンクリートの変状原因推定

前田 洸樹<sup>1</sup>・前田 佳克<sup>2</sup>・海瀬 忍<sup>3</sup>・伊藤 哲男<sup>4</sup>  
水野 希典<sup>5</sup>・重田 佳幸<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) トンネル部 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)  
E-mail:kouki.maeda@tk.pacific.co.jp

<sup>2</sup>正会員 株式会社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:y.maeda.aa@ri-nexco.co.jp

<sup>3</sup>正会員 株式会社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:s.kaise.aa@ri-nexco.co.jp

<sup>4</sup>正会員 株式会社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:t.ito.ak@ri-nexco.co.jp

<sup>5</sup>正会員 西日本高速道路株式会社 関西支社 建設事業部 (〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町1-13)  
E-mail:m.mizuno.aa@w-nexco.co.jp

<sup>6</sup>正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) トンネル部 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)  
E-mail:yoshiyuki.shigeta@tk.pacific.co.jp

トンネル覆工の変状原因としては、トンネルの外部から作用する力（以下、「外力」という。）等による外因と、材料や施工等による内因があるが、原因別によるひびわれの特徴については、不明瞭なところが多い。そこで本研究では、東日本、中日本、西日本高速道路株式会社（以下、「NEXCO」という。）が管理する道路トンネル覆工のひびわれ展開図から、ひびわれ指数（以下、「TCI (Tunnel-Lining Crack Index)」という。）を用いて外力性変状の可能性に関する閾値を設定した。さらに、設定した閾値と外力性変状が確認されているトンネルとの関係性を分析した。

**Key Words :** Lining concrete, cracks, Tunnel-Lining Crack Index,

## 1. はじめに

トンネル覆工のひびわれの原因としては、外力の作用等の外因と使用材料や施工等の内因に大別できる。一般には、外因、内因それぞれの変状原因が複合的に作用してひびわれが発生することから、トンネル覆工のひびわれ形態は多種多様である。しかし、トンネルの安定性や安全性を評価するためには、ひびわれの特徴を調査・分析し、変状原因を推定する事が重要となる。

そこで、筆者らは、変状原因は縦断方向及び横断方向のひび割れの発生状況から推定できると考え、ひび割れ指数 (TCI : Tunnel-lining Crack Index) の縦断方向成分、横断方向成分のひびわれ量の関係から変状原因を推定する手法を提案した。

本稿は、NEXCOが管理するトンネルの点検結果を収集・整理し、分析を行い、内因のひびわれ発生の特徴についてTCIを用いて分析し、客観的な変状原因の推定手

法の検討結果について報告する。

## 2. TCIの概要

既往の研究<sup>1)</sup>において、覆工のひびわれ評価指標として、岩盤工学で用いられる“クラックテンソル”を参考に、TCIが提案されている。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 $F_{11}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{12}$ 、 $F_{21}$ の各成分を用いてひびわれの特徴を把握できる。

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

$A$ : 覆工コンクリートの面積 ( $A=L_s \times L_a$ )  
 $L_s$ : 覆工コンクリートの縦断延長 (通常はスパン長)  
 $L_a$ : 覆工コンクリートの横断延長  
 $n$ : ひびわれの本数  
 $l^{(k)}$ : ひびわれ $k$ の長さ  
 $t^{(k)}$ : ひびわれ $k$ の幅  
 $\theta_i^{(k)}$ : ひびわれ $k$ の法線ベクトルが $x_i$ 軸となす角度  
 $\theta_j^{(k)}$ : ひびわれ $k$ の法線ベクトルが $x_j$ 軸となす角度  
 $\alpha$ : ひびわれ幅の重み付けに関する係数  
 $\beta$ : ひびわれ長さの重み付けに関する係数  
 $F_0$ : TCIの大きさ  
 $F_{11}$ : TCIの縦断方向成分  
 $F_{22}$ : TCIの横断方向成分  
 $F_{12}=F_{21}$ : TCIのせん断方向成分

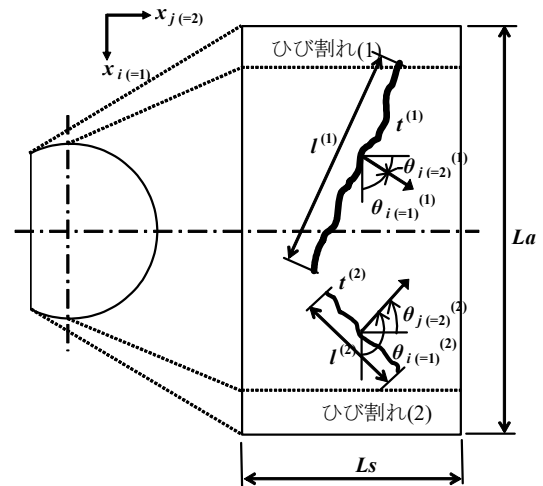


図-1 TCIの概念図

### 3. 検討概要

#### (1) 検討方法

本分析はTCIの縦断方向成分 $F_{11}$ と横断方向成分 $F_{22}$ を用いて行う。図-2に分析例<sup>2)</sup>を示す。グラフの横軸に $F_{11}$ 、縦軸に $F_{22}$ を設定し、覆工1スパンごとに算出した $F_{11}$ 、 $F_{22}$ との交点をプロットする。このとき、プロットがグラフ上の点線 ( $F_{11}=F_{22}$ ライン) より下側に分布すれば縦断方向ひびわれ卓越型、上側に分布すれば横断方向ひびわれ卓越型とできる。プロットが点線上もしくは点線付近に分布すれば、斜めひびわれ卓越型となる。このグラフから、中野らの報告<sup>1)</sup>によれば以下のような変状原因が推定できると考えられる。

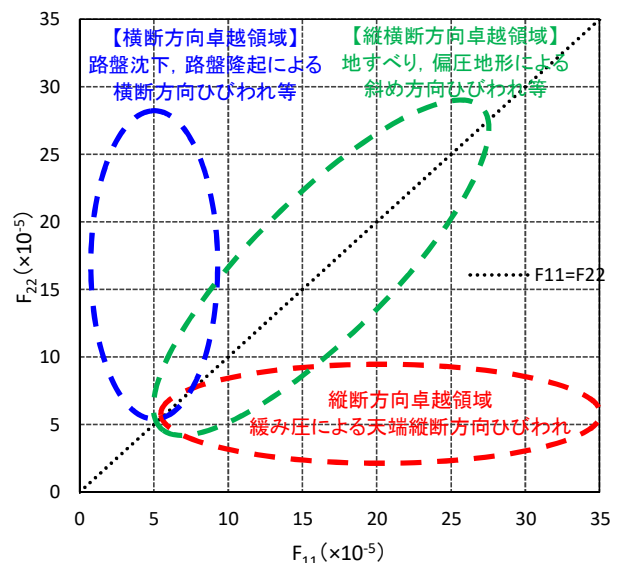


図-2 変状原因の分析例<sup>2)</sup>

$F_{11} > F_{22}$ : 緩み圧による天端縦断方向ひびわれ、水圧、塑性圧による側壁部縦断方向ひびわれ等  
 $F_{11} = F_{22}$ : 地すべり、偏圧地形による斜め方向ひびわれ等  
 $F_{11} < F_{22}$ : 路盤沈下、路盤隆起による横断方向ひびわれ等

本検討では、対象トンネルのうち、外力性変状の可能性があるスパンを除いた $F_{11}$ と $F_{22}$ の分布図を作成し、それを包含するような閾値を設定する。本分析は、既往の研究<sup>3)</sup>より、TCI成分による平均値 $u \pm$  標準偏差 $\sigma$ <sup>3)</sup>の範囲内に含まれるものは内因による変状 (標準的なひびわれ形態) であることを活用する。したがって、標準的ではない $F_0 > u + \sigma$ <sup>2)</sup> ( $u$ :  $F_0$ の平均値,  $\sigma$ :  $F_0$ の標準偏差) であるスパン、すなわち、ひびわれによる損傷が大きいスパンのうち、図-3に示す①, ②, ③のいずれかの条件を満たすスパンを外力性変状の可能性があるスパンと定義する。

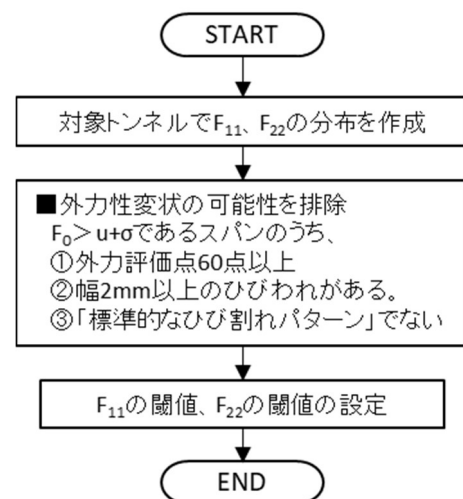


図-3 TCIの概念図

ここで、外力評価点<sup>3)</sup>は覆工の変状状況を点数化した指標であり、60点以上のスパンは重点点検スパンとされる。また、標準的なひびわれパターンとは既往の研究<sup>4)</sup>

表-1 対象トンネルと工法別の平均値と標準偏差

| 工法              |        | 矢板工法  | NATM  |
|-----------------|--------|-------|-------|
| スパン             |        | 3,339 | 6,020 |
| F <sub>11</sub> | 平均値 u  | 6.31  | 3.15  |
|                 | 標準偏差 σ | 4.89  | 4.26  |
| F <sub>22</sub> | 平均値 u  | 4.26  | 1.92  |
|                 | 標準偏差 σ | 3.83  | 3.47  |

において、施工起因のひびわれは、矢板工法は天端付近に2条の縦断方向ひびわれ、NATMは天端中央付近に1条の縦断方向ひびわれが発生する傾向があると定義されたものである。

以上より、適切な閾値を設定できれば、変状原因を外力性変状でない、すなわち、材質劣化、施工起因等と推定できる閾値をTCIのみで設定できると考えられる。

## (2) 対象トンネルと工法別の平均値と標準偏差

分析の対象トンネルを表-1に示す。NEXCOが管理しているトンネルのうち近接目視を実施されている矢板工法、NATMそれぞれ50トンネルを抽出し、工法別の対象スパンにおけるF<sub>11</sub>とF<sub>22</sub>の平均値および標準偏差を示す。

## 4. 分析結果

### (1) 矢板工法の閾値

図-4に矢板工法における外力性の可能性がある前述した①、②、③の条件を除いたスパンのF<sub>11</sub>とF<sub>22</sub>の分布を示す。このとき、F<sub>11</sub>、F<sub>22</sub>の閾値としてそれぞれ $u+2\sigma$ のラインを引いてみると、分布が概ね閾値以下となっていることがわかる。この閾値以下の領域に分布するスパンを図-5に示す。このとき閾値以下となるスパンは3,083スパンであり、対象全3,339スパンに対し、92.3%となる。一般的に外力性変状はトンネル全数に対し5%程度とされることから、本閾値は概ね妥当であると考えられ、閾値以下のスパンは変状原因を材質劣化、施工起因等と推定できると考えられる。

### (2) NATMの閾値

NATMにおいても矢板工法と同様の分析を実施した。その結果、図-6に示すように、F<sub>11</sub>、F<sub>22</sub>の閾値をそれぞれ $u+2\sigma$ と設定すると閾値以下の領域に分布するスパン数は5,460スパンとなり、対象全6,020スパンに対し90.7%となる。本閾値はやや安全側であるが矢板工法と同様に概ね妥当であると考えられる。

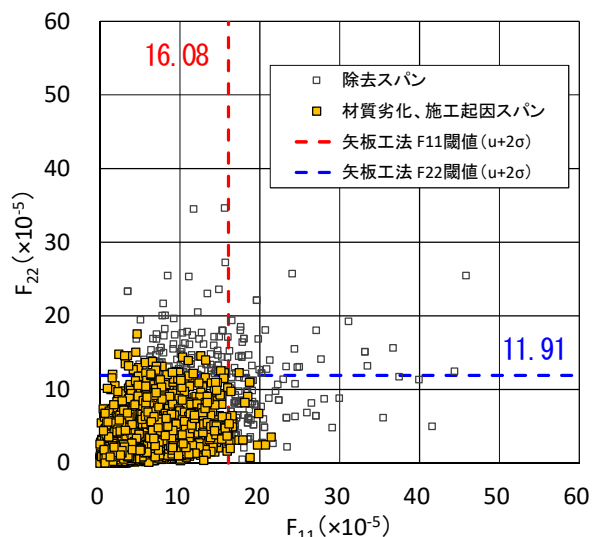


図-4 閾値の設定について

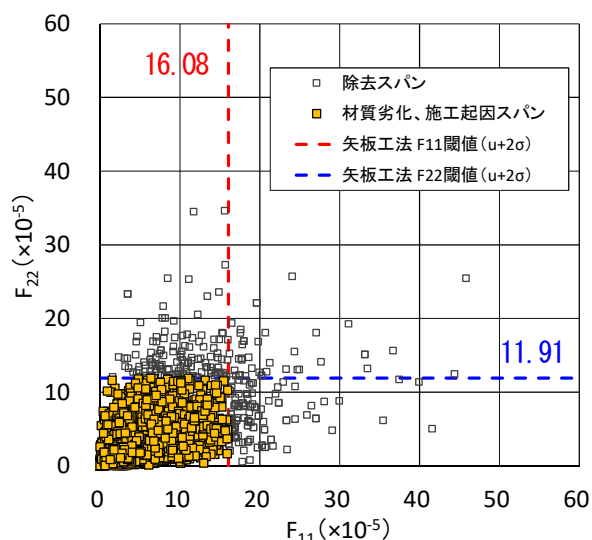


図-5 矢板工法の閾値

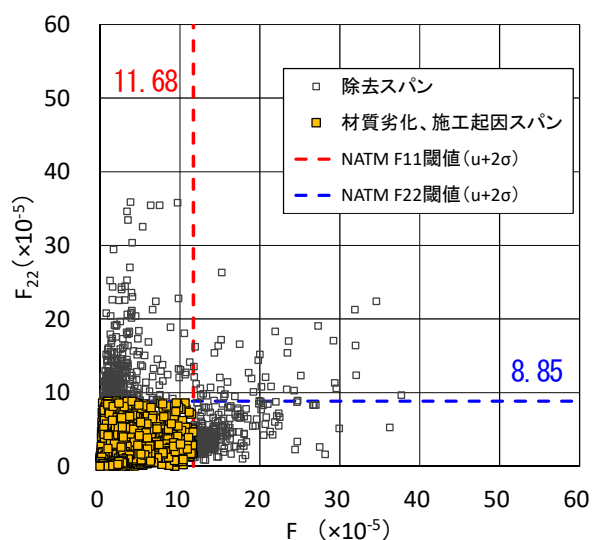


図-6 NATMの閾値

### (3) 外力性変状と閾値の比較（矢板工法）

図-7に矢板工法のトンネルで過去に外力性変状が発生した表-2に示すトンネルの $F_{11}$ 、 $F_{22}$ の分布を変状原因別に示す。このグラフに前述した矢板工法の $F_{11}$ 、 $F_{22}$ の閾値 $u+2\sigma$ を示すと、外力性変状が発生したスパンのうち1スパンのみ閾値の中に含まれることとなるが、外力性変状のほとんどは閾値の領域外に分布することがわかる。

したがって、材質劣化、施工起因等を変状原因と推定できる閾値は、 $F_{11}$ 、 $F_{22}$ それぞれ $u+2\sigma$ 以下が妥当であると考えられる。

## 5. まとめ

本検討では、TCIの $F_{11}$ と $F_{22}$ を用いて、材質劣化、施工起因等を変状原因と推定できる閾値を設定できる可能性があることが分かった。今後は外力性変状と進行性の関係性を把握し、適切な健全度判定の目安を設定する必要があると考えられる。さらに、分析トンネル数を増やす事による精度の向上を図り、変状原因推定手法を確立していきたい。

NEXCOは、老朽化する道路トンネルを管理し、補修計画を立案していく必要がある。一方、人口減少や少子高齢化により技術者の減少も懸念されている。今後は、トンネル点検をさらに効率化するために、点検者の技能によるバラツキをできるだけ無くし、定量的な評価ができる変状原因推定手法を確立することで、近接目視点検や打音点検を入念に行うスパンの選定や、大規模修繕工事の補修計画の立案においても寄与できると考えている。

### 参考文献

- 1) 中野清人，佐伯 徹，重田佳幸，大場 諭，西村和夫：トンネルの変状評価・原因推定へのひびわれ指数（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
- 2) 前田佳克，海瀬 忍，八木 弘，水野希典，重田佳幸，岡本直樹，前田洸樹：ひびわれ指数（TCI）による覆工の変状原因推定について，土木学会年次講演会，2017.9
- 3) 東日本・中日本・西日本高速道路㈱：保全点検要領 構造物編，2017.4

表-2 外力性変状トンネル（矢板工法）

| No. | トンネル名  | 変状原因   | 変状状況        |
|-----|--------|--------|-------------|
| 1   | A トンネル | 緩み圧    | 縦断および横断クラック |
| 2   | B トンネル | 緩み圧    | 縦断および横断クラック |
| 3   | C トンネル | 路盤隆起   | 横断，斜めクラック   |
| 4   | D トンネル | 路盤隆起   | 横断クラック      |
| 5   | E トンネル | 塑性圧    | 肩部縦断クラック    |
| 6   | F トンネル | 塑性圧    | 肩部縦断クラック    |
| 7   | G トンネル | 地すべり偏圧 | 肩部縦断クラック    |
| 8   | H トンネル | 地すべり偏圧 | 肩部縦断クラック    |
| 9   | I トンネル | 路盤隆起   | 横断クラック      |
| 10  | J トンネル | 地山のズレ  | 横断，斜めクラック   |

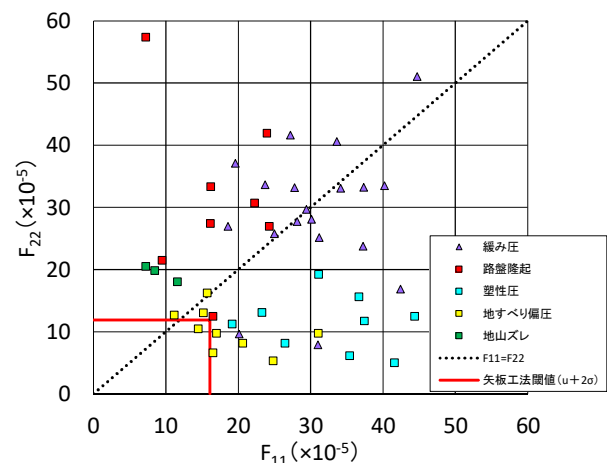


図-7 外力性変状と閾値の関係

- 4) 前田佳克，八木 弘，海瀬 忍，増田弘明，水野希典，重田佳幸，前田洸樹：ひびわれ指数（TCI）を用いた覆工に発生するひびわれ形態の整理，トンネル工学報告集第26巻，I-30，2016.11

(2018.8.10 受付)

# A STUDY OF THE ANALYSIS METHOD OF THE CAUSE OF TUNNEL LINING DEFORMATION USING TCI

Koki MAEDA, Yoshikatsu MAEDA, Shinobu KAISE, Tetsuo ITO,  
Maresuke MIZUNO and Yoshiyuki SHIGETA

In this study, authors estimated the cause of deformation with TCI (tunnel-lining Crack index) which is a quantitatively index composed by width, length and directions of cracks. And deformation index  $F_0$  is shown as sum of longitudinal direction  $F_{11}$  and that of transvers direction  $F_{22}$ .

As a result, it was discovered that there is a possibility of setting the threshold that enables the estimation of the cause of deformation such as material degradation and insufficient installation by using  $F_{11}$  and  $F_{22}$  of TCI.

This report analyses the characteristics of the internal factors that cause cracks by using TCI and presents the examination result of an objective estimation method regarding the cause of deformation.