TCI による覆工コンクリートの変状原因分析手法の検討

（株）高速道路総合技術研究所*)　正会員　伊藤哲男　海瀬　忍　前田佳克
パシフィックコンサルタンツ（株）**)　正会員○前田洸樹　重田佳幸　岡本直樹

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．

本稿は，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 [1]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．

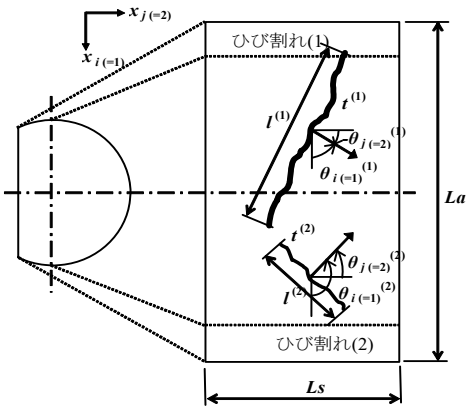

図-1 TCI の概念図

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

A：覆工コンクリートの面積（A=Ls×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：ひびわれの本数
l(k)：ひびわれ k の長さ
t(k)：ひびわれ k の幅
i(k)：ひびわれ k の法線ベクトルが xi 軸となす角度
j(k)：ひびわれ k の法線ベクトルが xj 軸となす角度
α：ひびわれ幅の重み付けに関する係数
β：ひびわれ長さの重み付けに関する係数
F_{11}：TCI の縦断成分，F_{22}：TCI の横断成分
$F_{12}=F_{21}$：TCI のせん断方向成分

３．検討概要

3-1 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 [1]．**図-2** に分析例 [2]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，**図-2** に示すように，F_{11} と F_{22} の関係により，プロットの位置から変状原因を推定できると考えられる．

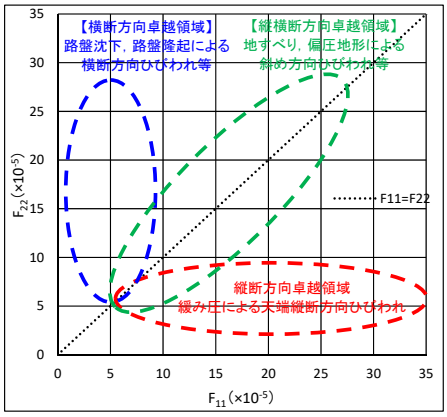

図-2 変状原因の分析例

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 [3]より，TCI 成分による平均値 u ± 標準偏差 σ[3]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 $F_0 > u+\sigma$[2]（u：F_0 の平均値，σ: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．

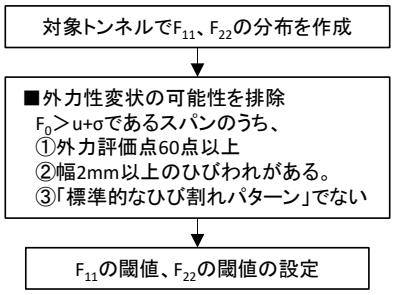

図-3 検討フロー

ここで，外力評価点 [3]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 [4]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．

キーワード：トンネル　ひびわれ　TCI　変状原因
連絡先：*)　〒194-8508　東京都町田市忠生 1-4-1　TEL 042-791-1629　FAX 042-791-2380
**)　〒101-8462　東京都千代田区神田錦町 3-22　TEL 03-5989-8321　FAX 03-5989-8329

3-2 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．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_{11} と F_{22} の平均値および標準偏差を示す．

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_{11}	平均値 u	6.31	3.15
	標準偏差 σ	4.89	4.26
F_{22}	平均値 u	4.26	1.92
	標準偏差 σ	3.83	3.47

4．分析結果

4-1 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_{11} と F_{22} の分布を示す．このとき，F_{11}，F_{22} の閾値としてそれぞれ u＋2σ 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．

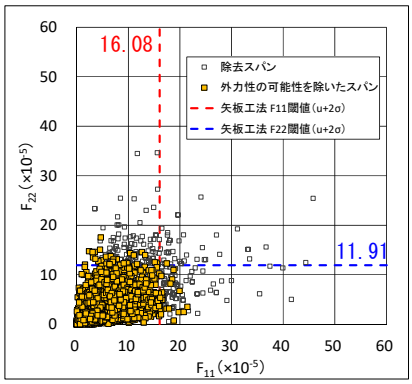

図-4 閾値の設定について

4-2 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_{11}，F_{22} の閾値をそれぞれ u＋2σ 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．

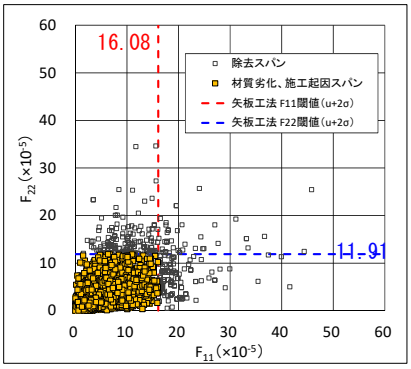

図-5 矢板工法の閾値

4-3 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スパンの 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＋2σ 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+2σ 以下が妥当であると考えられる．

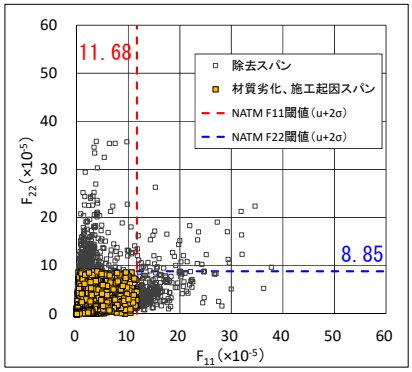

図-6 NATM の閾値

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．

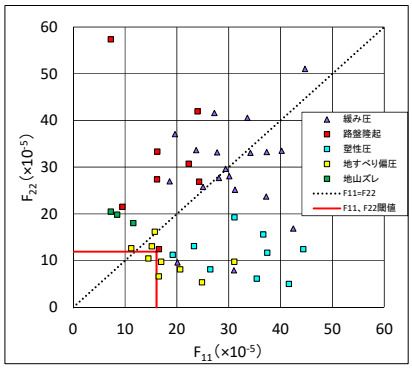

図-7 外力性変状と閾値の関係

【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
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