

トンネル覆工の定量的なひびわれ進行性 評価手法に関する研究

上谷 明生¹・中野 清人²・山崎 哲也³・重田 佳幸⁴・柿崎 陽介⁵

¹ 正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 トンネル研究室（〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1）

E-mail: a.kamitani.aa@ri-nexco.co.jp

² 正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 トンネル研究室（〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1）

E-mail: k.nakano.aa@ri-nexco.co.jp

³ 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.yamazaki.ac@ri-nexco.co.jp

⁴ 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 インフラマネジメント部（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町 3-22）

E-mail: yoshiyuki.shigeta@tk.pacific.co.jp

⁵ パシフィックコンサルタンツ株式会社 インフラマネジメント部（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町 3-22）

E-mail: yousuke.kakizaki@tk.pacific.co.jp

東日本・中日本・西日本高速道路株式会社の管理するトンネルの健全度評価は、特定更新等工事の実施時期の指標に活用される等、トンネルの維持管理において重要な評価であるが、ひびわれの進行性の評価において必ずしも定量的な基準となっていない。本文は、全国の点検データを統計的手法により分析し、ひびわれの進行を定量的に評価できる新たな基準を作成することで、技術者による健全度評価のばらつきがなくなるといった合理化を目的に検討を行ったものである。

Key Words: tunnel inspection, quantitative indicators, crack, covered concrete, progressive

1. はじめに

平成 26 年度に道路法が改正されたことを受けて、道路トンネルは 5 年に 1 度の定期点検を行い、道路トンネル毎の健全性の診断を行うことが道路トンネル定期点検要領¹⁾に定められている。この道路トンネル毎の健全性の診断は、法令で求められる 4 つの区分に分類されており、これらへ対応するため、東日本・中日本・西日本高速道路株式会社（以下「NEXCO」という）の管理するトンネルにおいては、覆工撮影画像を用いて作成したひびわれ展開図の情報から、評価点（ひびわれ、はく落）を算出して健全度評価を行うことで、道路トンネル毎の健全性の診断における評価指標としている²⁾。道路トンネル毎の健全性の診断と NEXCO の健全度評価の関係を表-1 に示す。

しかしながら、表-2 に示す NEXCO の健全度評価における標準において、I-1、I-2、II-1 では評価点による定量的な評価を行っている一方で、II-1 と II-2 の区分は

表-1 道路トンネル毎の健全性の診断と
NEXCO の健全度評価の関係

国土省定期点検要領 における健全性診断区分			NEXCO保全点検要領 における健全度評価区分	
区分		状態	健全度	定義
IV	緊急措置 段階	道路トンネルの機能に 支障が生じている、又は 生じる可能性が著しく 高く、緊急に措置を講 ずべき状態。	IV	耐荷性能の低下が生じ ている、又は生じる可 能性が著しく高く、緊 急措置が必要な状態。
III	早期措置 段階	道路トンネルの機能に 支障が生じる可能性が あり、早期に措置を講 ずべき状態。	III	耐荷性能の低下が生じ る可能性があり、早期 に措置が必要な状態。
II	予防保全 段階	道路トンネルの機能に 支障が生じていない が、予防保全の観点か ら措置を講ずることが 望ましい状態。	II-2	耐荷性能に対する注意 が必要で、予防保全の 観点から適切な時期に 措置を行うことが望ま しい状態。
			II-1	耐荷性能に対する注意 が必要で、予防保全の 観点から適切な時期に 対策検討を行うことが 望ましい状態。
I	健全	道路トンネルの機能に 支障が生じていない状 態。	I-2	注意が必要な耐荷性能 の低下は無く、措置を 必要としない状態。
			I-1	耐荷性能の低下が無い 状態。

表-2 NEXCOの健全度評価における標準

判定項目	健全度評価の標準					
	I-1	I-2	II-1	II-2	III	IV
ひび割れ評価点、 変状の状態	・変状が無い、若しくは 軽微なもの ・評価点で30点以下	・評価点で31～59点	・評価点が60点以上であるが、 進行性が緩やかなもの	・健全度ランクII-1の 状況から進行している ようにみられる	・放射状ひび割れが見られる ・圧が見られる	・変状の進行が極めて 著しくみられる
変状の進行状況	・進行性が見られないもの				・5mm以上の段差、ずれのあるひび割れが見られる	

判定項目	健全度評価における参考指標(抜粋)					
	I-1	I-2	II-1	II-2	III	IV
ひび割れ幅	0.2mm未満	0.2～1.5mm	1.5～3.0mm	3.0～5.0mm	5.0～10.0mm	10mm以上
ひび割れ幅変位速度の目安	—			(0.3mm/年以上)	(1.5mm/年以上)	(1.0mm/時間)
覆工撮影画像による変化	変状に進行がみられない			変状に進行がみられる		

判定の基準となるひびわれの進行において定性的な記載になっており、現地では参考指標をもとに判断がなされている現状にある。さらに、II-1とII-2の区分は特定更新等工事の実施時期の指標に活用される等、重要な評価であることから、定量的に評価することが求められる。

このようなことから、覆工コンクリートのひびわれを定量的に評価できる、TCI (Tunnel-lining Crack Index) ³⁾ を指標として検討した。NEXCOにおいては平成24年度から、トンネルマネジメントシステム (TMS) で、トンネルの点検データを統一したデータ形式で蓄積しており、トンネルの施工工法、変状内容、補修情報等に関して、TCIの指標を用いることにより定量的な検討や評価が行うことが可能となる。本研究は、このトンネル点検に関するプラットフォームを活用して、全国の点検データを統計的手法により分析し、ひびわれの進行を定量的に評価できる新たな基準案を検討したものである。

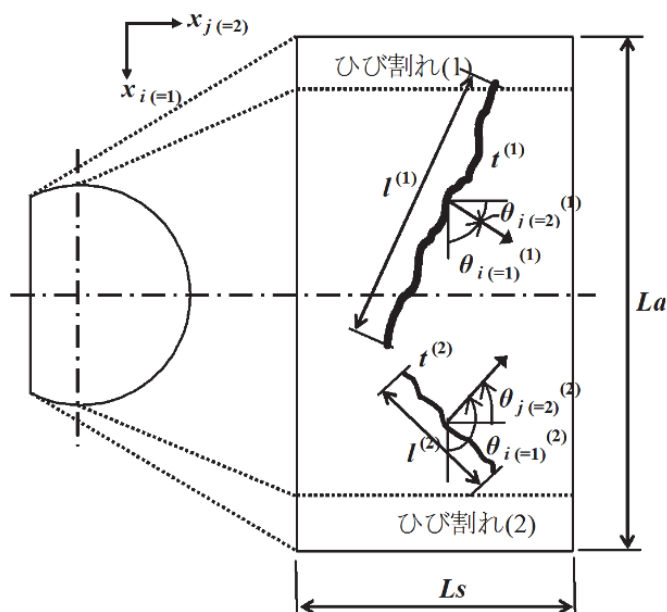


図-1 TCIの概念図

2. TCIの概要

TCIとは、図-1に示すように、ひびわれの覆工1スパンあたりの本数、幅、長さおよび方向を定量的に評価できる指標であるクラックテンソルを援用し、NEXCOでは過年度からひびわれの評価指標として用いている。 F_{11} はTCIのひびわれの縦断方向成分、 F_{22} はひびわれの横断方向成分を示すもので、図-1の式(1)により求めることができる。つまり、覆工コンクリートのひびわれの指標 F_0 は、テンソルの不変量として縦断および横断方向成分の総数($F_0 = F_{11} + F_{22}$)として表される。

3. TCIを用いた健全度評価の検討

現在、ひびわれの進行性に関する評価は上述のとおり、II-1、II-2を区分する上で極めて重要であるにもかかわらず

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

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

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

α : ひびわれ幅の重みづけに関する係数

β : ひびわれ長さの重みづけに関する係数

らず、健全度評価の標準では定性的な基準となっている。加えて、その参考指標においてもひびわれ幅のみの記載でひびわれ長さの進展について定義しておらず、現地で健全度評価において判断しにくいケースもあるとの意見がある。したがって、これを定量的に評価する必要性が考えられる。このようなことから、覆工の各スパンに顕在化したひびわれの本数、幅、長さおよび方向を定量的に集計して評価できる TCI を用いて、ひびわれの進行性を評価する手法を検討し、Ⅱ-1 と Ⅱ-2 の明確な区分（以下「しきい値」という）を設定する。

検討において、複数回の詳細点検が実施されたトンネルについて、覆工スパン毎における F_0 の値の変動に着目し、図-2 に示すフローに沿って進行性評価を実施する。

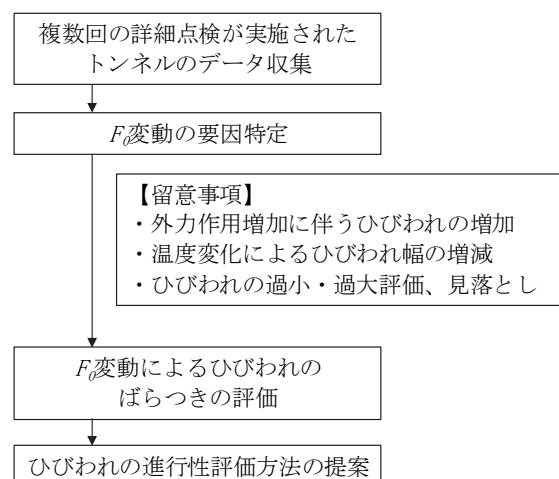


図-2 ひびわれ進行性評価検討フロー

(1) F_0 の変動要因

詳細点検を実施した結果、前回点検時と比べて F_0 の値が増減することがある。その主な要因については下記のケースが推察される。

①ひびわれの進行

ひびわれの長さおよび幅が大きくなり、変状が進行することにより式 (1) から F_0 の値が増加する。

②ひびわれの過小評価・見落とし

ひびわれの長さおよび幅の過小評価やひびわれの見落としにより、 F_0 の値が減少する。

③ひびわれの過大評価

ひびわれの長さおよび幅の過大評価により、 F_0 の値が増加する。

④ひびわれに対する補修の実施

ひびわれの補修実施箇所は、TCI 算出時にカウントしないこととしているため、 F_0 の値が減少する。

⑤温度変化によるひびわれ幅の変動

温度変化によるコンクリートの膨張および収縮により、ひびわれの長さおよび幅が変動し、 F_0 の値が増減する。

⑥画像精度・判読による差

覆工画像の撮影において、カメラの解像度や撮影精度の向上によりこれまで検出されなかった微細なひびわれが確認でき、ひびわれの評価精度の向上によって差が生じ F_0 の値が増加する。これらの F_0 の変動要因に対し②、③および⑥は、海瀬らの研究⁴⁾により、誤差程度の小さなものとして有意な差はないとされている。また、④は補修済箇所であり、対象外として取り扱うこととした。さらに、⑤は過年度の研究において温度変化によるひびわれ幅を通年で計測したところ、ひびわれの幅の変動はわずかであることから F_0 の変動が少なく、影響は小さなものであることを結論付けた。

以上のことから、①が F_0 における明確な変動要因として絞り込むことができるため、詳細点検ごとでの比較

により、ひびわれの進行性を定量的に確認ができることが整理できた。

(2) 変状の進行性評価に関する検討方針

詳細点検結果を比較することで評価できる F_0 の進行度を、ここでは ΔF_0 （最新の点検による F_0 - 前回点検による F_0 ）と定義する。覆工スパンごとのひびわれの進行による ΔF_0 について、平均値 (μ) および標準偏差 (σ) を算出して、統計学的手法により、明確なひびわれの進行がみられる定量的なしきい値を設定することを目標に検討を行う。統計学において $\pm \sigma$ に ΔF_0 が入る確率は約 69%、 $\pm 2\sigma$ に ΔF_0 が入る確率は約 96%、 $\pm 3\sigma$ に ΔF_0 が入る確率は約 99.7% であるが、本検討で設定するしきい値はひびわれの増加分に関する検討を行うことから $\mu + \sigma$ と仮定し、このとき、変状が進行しているスパンであると評価できるかについて確認する。なお、 ΔF_0 の算出にあたっては、①最小ひびわれ幅を整合させる、②展開図上で補修材背面のひびわれをカウントしないといった調整を行い、詳細点検ごとのひびわれ抽出条件を統一することで、 ΔF_0 のブレを排除することとした。

(3) 変状の進行性評価に関する検討結果

NEXCO における山岳トンネルの資産数量は矢板工法 379Tube、山岳トンネル工法 1,296Tube の合計 1,675Tube であるが、NEXCO 各支社において、詳細点検時に使用する走行型画像撮影車によって取得できる覆工表面画像の精度や、変遷にばらつきがあることを考慮して、全支社を網羅して詳細点検データを収集した。また矢板工法と山岳トンネル工法は、施工方法や覆工コンクリートの地山側における拘束状況が相違しており、水野らの研究⁵⁾により顕在化するひびわれ形態が異なることが示されていることを踏まえて、両者を分けて、 ΔF_0 におけるしきい値 ($\mu + \sigma$) を算出する必要があると考えた。

表-3 矢板工法の分析結果

	A支社	B支社	C支社	D支社	E支社	F支社	G支社	H支社	I支社	J支社	K支社	L支社	全支社
管轄支社全トンネル数	6	29	30	40	28	22	34	36	40	82	6	26	379
トンネル数	4	4	3	2	18	4	5	2	17	32	1	5	97
分析トンネル割合	67%	14%	10%	5%	64%	18%	15%	6%	43%	39%	17%	19%	26%
スパン数	176	206	103	147	1,084	105	235	140	959	2,762	67	488	6,472
平均値 $u(\times 10^{-5})$	3.02	1.40	6.99	0.99	1.71	0.60	1.94	1.09	1.78	1.69	1.62	0.88	1.73
標準偏差 $\sigma(\times 10^{-5})$	3.21	3.35	6.95	3.17	12.12	1.79	2.39	2.41	6.54	8.59	2.61	3.80	8.10
しきい値 $u+\sigma(\times 10^{-5})$	6.22	4.75	13.94	4.15	13.83	2.38	4.33	3.49	8.32	10.28	4.23	4.68	9.83

表-4 山岳トンネル工法の分析結果

	A支社	B支社	C支社	D支社	E支社	F支社	G支社	H支社	I支社	J支社	K支社	L支社	全支社
管轄支社全トンネル数	46	91	59	139	91	146	27	23	156	218	142	158	1296
トンネル数	22	8	16	8	9	7	1	2	23	115	11	7	229
分析トンネル割合	48%	9%	27%	6%	10%	5%	4%	9%	15%	53%	8%	4%	18%
スパン数	3,396	881	1,292	987	520	468	37	31	2,104	9,579	1,200	207	20,702
平均値 $u(\times 10^{-5})$	0.85	1.31	6.10	0.95	1.23	0.56	3.43	0.43	2.01	0.98	1.69	1.64	1.43
標準偏差 $\sigma(\times 10^{-5})$	1.82	3.17	13.00	2.69	6.43	2.21	2.69	1.40	4.70	4.52	3.08	2.36	5.19
しきい値 $u+\sigma(\times 10^{-5})$	2.67	4.48	19.10	3.64	7.66	2.76	6.12	1.82	6.71	5.50	4.77	4.00	6.62

表-5 しきい値の提案値

全支社（特殊要因除去後）		
工法	矢板工法	山岳トンネル工法
トンネル数	76	204
スパン数	5283	18878
平均値 $u(\times 10^{-5})$	1.62	1.12
標準偏差 $\sigma(\times 10^{-5})$	7.05	3.90
しきい値 $u+\sigma(\times 10^{-5})$	8.67	5.02

平成27年度から令和元年度まで、5年にわたって詳細点検データの収集を行い、矢板工法 97Tube（全体の25.6%）、山岳トンネル工法 229Tube（全体の17.7%）のトンネルにおけるTCIのデータ分析を行った。各支社別に矢板工法と山岳トンネル工法に分けて、管轄する全トンネル数と今回分析対象としたトンネルの数量と割合、スパン数、 ΔF_0 の平均値(u)、標準偏差(σ)および提案する ΔF_0 のしきい値($u+\sigma$)について算出した結果を、表-3および表-4に示す。

ここで、CおよびE支社のしきい値は他支社と比べて突出しており、原因を確認したところ、火災等の特殊な外的要因により変状が進行したトンネルがあることや、1回目の点検における明らかな変状の未抽出があることが判明した。これらは、全支社を平均して算出したしきい値の増加要因、すなわち危険側の評価を招く原因となることが考えられたため、除いて検討する必要があると判断した。改めて算出したしきい値を表-5に示す。

各々の工法のしきい値($u+\sigma$)に対する変状進行状況として、Aトンネル（山岳トンネル工法）、Bトンネル（山岳トンネル工法）およびCトンネル（矢板工法）を例としてそれぞれ図-3および図-4に示す。

各トンネルの ΔF_0 が、仮定したしきい値($u+\sigma$)を超過したスパンで変状の進行状況を確認すると、山岳トンネル工法のAトンネルのスパン3およびスパン18において、ひびわれ本数が増加しており、スパン3はわずかにしきい値を超過したものであるが、微細なひびわれを捉えた進行性を表している。Bトンネルのスパン17においては代表的なひびわれの幅が増大（0.5mmが1mmに増加）していることが確認できる。一方で同トンネルのスパン75はひびわれが多いトンネルであるが、 ΔF_0 はしきい値以下のスパンであることから、ひびわれの本数もしくは幅の増大は見えてとれない。さらに、図-5に示す矢板工法のCトンネルも同様に代表的なひびわれ幅の増大（1mmが2mmに増加）が確認できる。したがって、これらの変状進行情形から、 ΔF_0 のしきい値を $u+\sigma$ として、これを超過したスパンを抽出することで、微細なひびわれを包含して明確な変状の進行をとらえられていると判断でき、変状の明確な進行性を評価する指標として妥当であることが導かれる。

また、ここでのしきい値は健全度評価における目安を示すものであることを踏まえて、小数点以下を切り下げることにした。

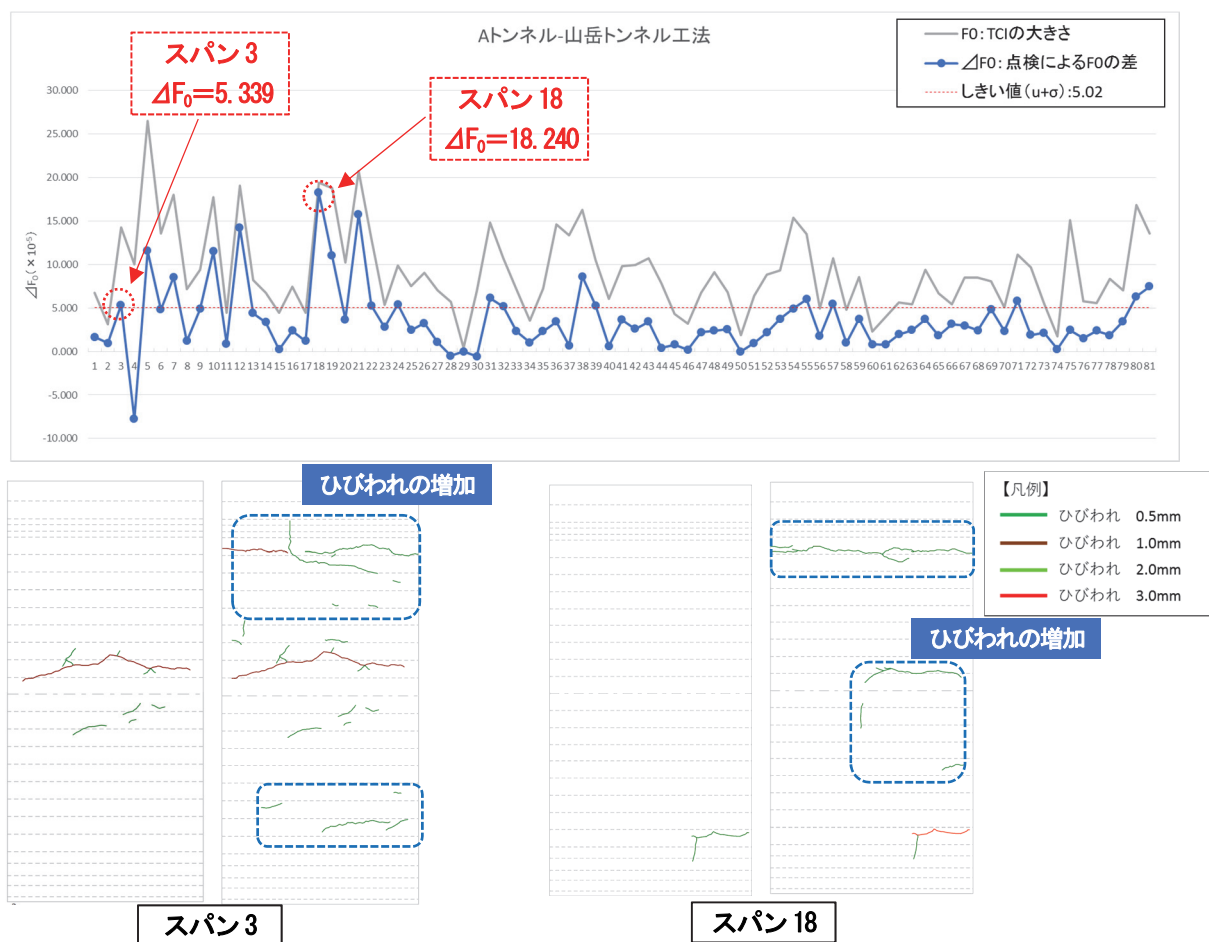


図-3 A トンネルの変状進行例

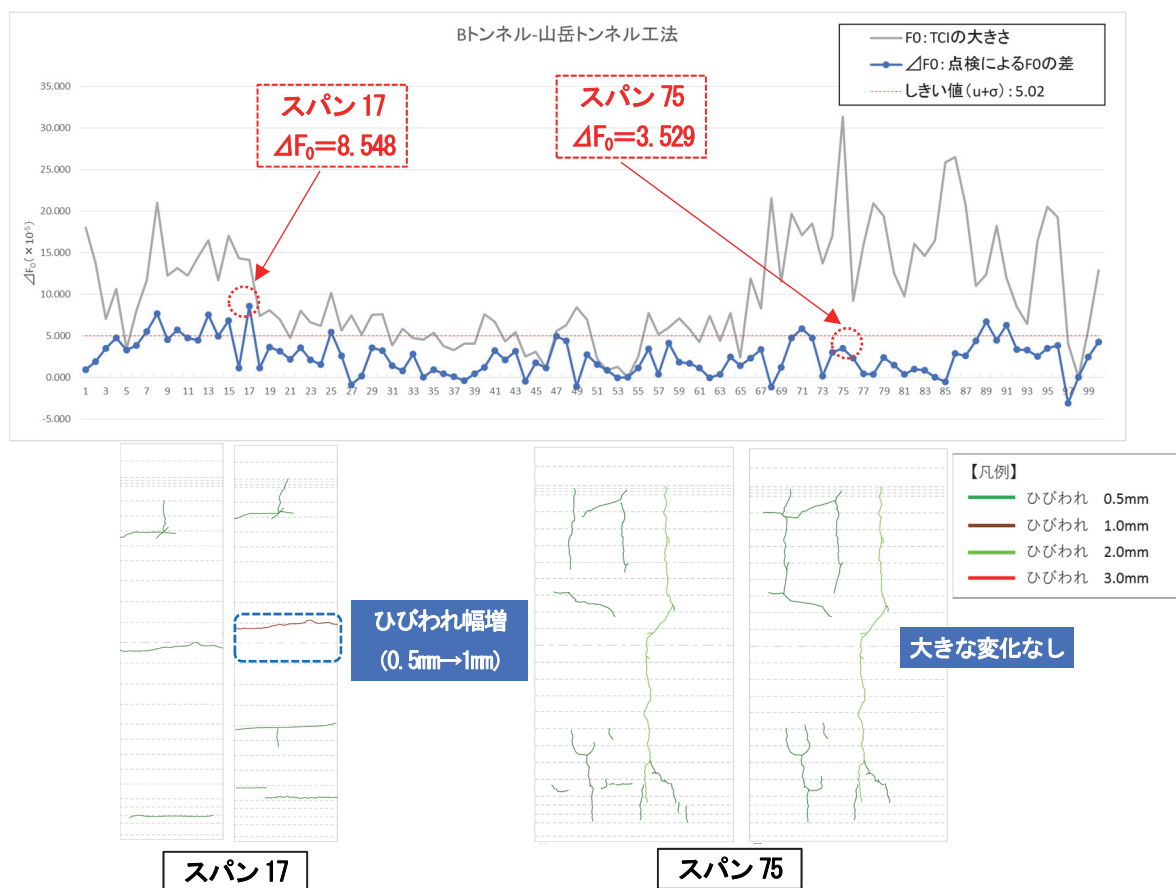


図-4 B トンネルの変状進行例

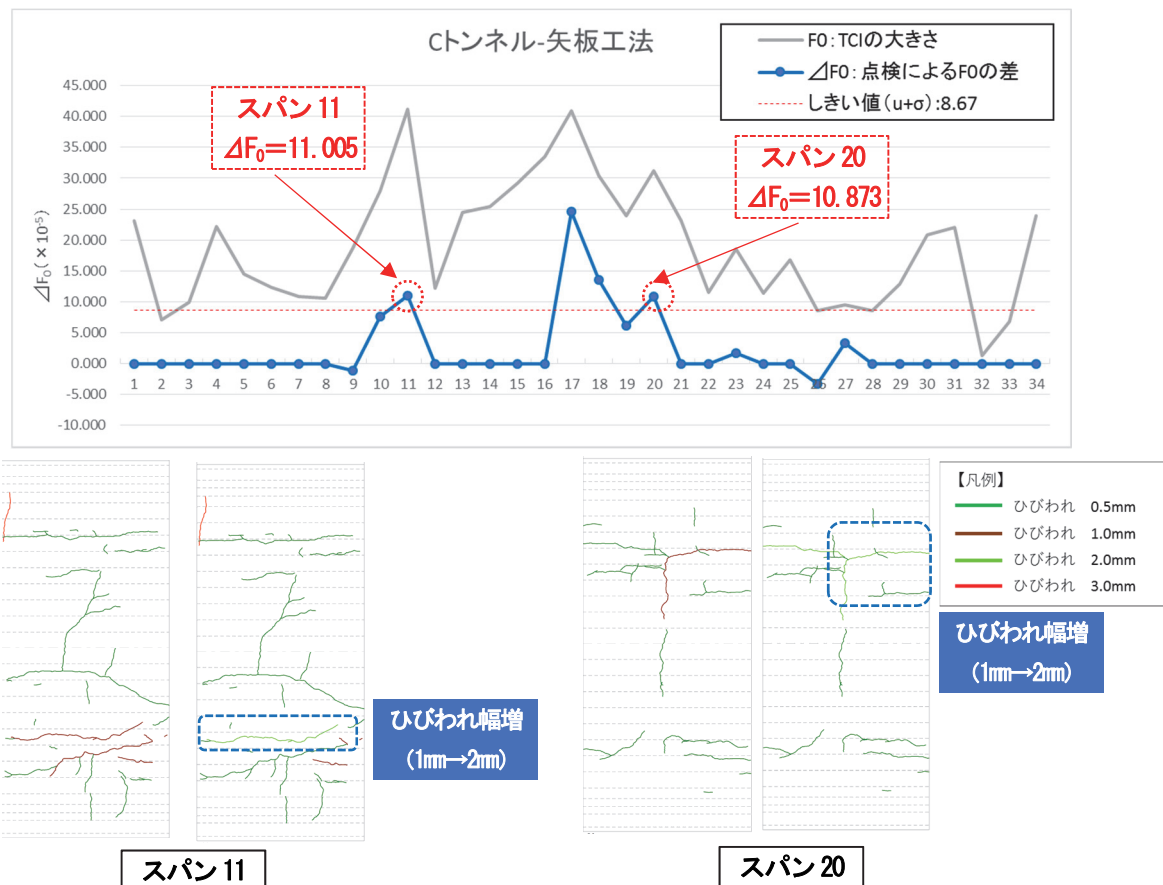


図-5 Cトンネルの変状進行例

表-6 トンネル覆工の新たな健全度評価

判定項目	健全度評価の標準					
	I-1	I-2	II-1	II-2	III	IV
ひび割れ評価点、変状の状態	・変状が無い、若しくは軽微なもの ・評価点で30点以下	・評価点で31～59点	・評価点で60点以上であるが、進行性が緩やかなもの	・健全度ランクII-1の状況から進行しているようにみられる	・放射状ひび割れが見られる ・圧が見られる ・5mm以上の段差、ずれのあるひび割れが見られる	・変状の進行が極めて著しくみられる
変状の進行状況	・進行性が見られないもの					

(下線を追加)

判定項目		健全度評価における参考指標(抜粋)											
		Ⅰ-1		Ⅰ-2		Ⅱ-1		Ⅱ-2		Ⅲ		Ⅳ	
TCIによる 進行性 (/5年)	矢板工法	$\Delta F_0 \leq 8 \times 10^{-5}$						$\Delta F_0 \geq 8 \times 10^{-5}$					
	山岳 トンネル工法	$\Delta F_0 \leq 5 \times 10^{-5}$						$\Delta F_0 \geq 5 \times 10^{-5}$					
ひび割れ幅		0.2mm未満		0.2～1.5mm		1.5～3.0mm		3.0～5.0mm		5.0～10.0mm		10mm以上	
ひび割れ幅変位速度の 目安		—						(0.3mm/年以上)		(1.5mm/年以上)		(1.0mm/時間)	
覆工撮影画像による変化		変状に進行がみられない						変状に進行がみられる					

※ひび割れ幅の項目における値は矢板工法における参考値であり、外力の作用が認められる場合は、その影響を考慮して判定を行う。

4. 保全点検要領における新たな健全度評価基準の提案

保全点検要領（構造物編）においてトンネルの健全度評価の標準が示されているが、今回検討したTCIによる変状の進行性のしきい値を踏まえた新たな基準案につい

て表-6に示す。顕在化しているひびわれの絶対量や漏水の有無などを主な指標としたひびわれ評価点によって、健全度I-1、I-2およびII-1以上の3段階に区分し、II-1とII-2以上を区分するため評価において ΔF_0 におけるしきい値を用いることとする。現状のトンネル構造物の99%以上を占めていることから、ほとんどのトンネルに

において、統一的な基準を用いて健全度評価を実施することができるようになり、点検業務において、技術者による健全度評価の差がなくなるといった、合理化が図られるようになるを考える。

5. まとめ

本研究では、トンネル覆工の定量的なひびわれ進行性評価手法の確立を目的に、TCIを活用した変状の進行性に着目した分析によって、新たな判定基準案を作成した。少子高齢化による技術者が減少する状況下において、点検における判定のばらつきのリスクが考えられるが、ひびわれの進行性を定量的に判断できる基準を運用することは上記リスクの低減、ひいては変状状況に応じた的確な点検であるとともに、高精度な点検に有効な手段として活用されることが期待できる。

- 2) 東日本高速道路㈱・中日本高速道路㈱・西日本高速道路㈱：保全点検実施要領（構造物編）p137, 2021.4
- 3) 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
- 4) 海瀬忍, 伊藤哲男, 八木弘, 水野希典, 前田洸樹, 進士正人：トンネル覆工のひびわれ進行性評価手法に関する検証 土木学会論文集 F1（トンネル工学），vol.73, No.3（特集号），I_10-I_20, 2017
- 5) 水野希典, 前田佳克, 海瀬忍, 前田洸樹, 重田佳幸, 松岡茂, 西村和夫：既設トンネル覆工の変状原因推定手法に関する検討 土木学会論文集 F1（トンネル工学），vol.73, No.3（特集号），I_1-I_9, 2017

(2021.8.6 受付)

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，p4, 2019.2

RESEARCH ON QUANTITATIVE CRACK PROGRESS EVALUATION METHOD FOR TUNNEL LINING

Akio KAMITANI, Kiyoto NAKANO, Tetsuya YAMAZAKI, Yoshiyuki SHIGETA and Yosuke KAKIZAKI

The soundness evaluation of the tunnel managed by East Japan, Central Japan, and West Japan Expressway Co., Ltd. is an important evaluation in the maintenance and management of the tunnel, such as being utilized as an index for the implementation time of the construction such as specific renewal, but it is described qualitatively in part of the evaluation category, and there is a current situation where judgment is made based on reference indicators in the field. This time, by analyzing the inspection data nationwide by statistical method and creating a new standard that can quantitatively evaluate the progress of cracks, the purpose of this study was to rationalize the possibility of eliminating variations in soundness evaluation by engineers.