

# 既設トンネル覆工の変状原因推定手法に関する検討

まえだこうき  
前田洸樹<sup>1</sup>・水野希典<sup>2</sup>・前田佳克<sup>3</sup>・海瀬忍<sup>3</sup>・伊藤哲男<sup>3</sup>・重田佳幸<sup>1</sup>

<sup>1</sup>パシフィックコンサルタンツ（株）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）

<sup>2</sup>西日本高速道路（株） 関西支社 建設事業部（〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町1-13）

<sup>3</sup>（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）

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。）を用いて標準的なひびわれを抽出した。これにより、内因と外因のひびわれを定量的に分類できた。また、外因による変状トンネルにて、走行型レーザー計測により断面計測を実施し、ひびわれ形態と断面変形に相関があることを把握した。

**Key Words** : 覆工, ひびわれ, TCI, レーザ計測

## 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。したがって、ひびわれの発生原因は、発生機構も含めて不明瞭なところが多いため、ひびわれの状況から単純に変状原因を推定することは困難である。

一方でNEXCOの管理トンネルでは、平成25年6月に道路法の改訂に基づき、5年に1回の頻度で近接目視による詳細点検を実施している。さらに、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ため、トンネル点検を更に効率化する必要がある。

そのため、ひびわれの分布状況から定性的、定量的に変状原因を推定できる手法が望まれる。客観的な変状原因推定が可能となれば、点検時に注視すべきひびわれ分布についても把握することが可能となり、点検の効率化にも寄与できると考える。

本論文は、NEXCOが管理している道路トンネルの点検で得られたひびわれ情報からTCI (Tunnel-Lining Crack Index) を用いて分析し、外因のひびわれの特徴を把握し、客観的な変状原因の推定手法についての検討を行ったものである。

また、外因にて区分したトンネルにおいて、走行型レーザー計測にて断面計測を実施し、外因によるトンネル断面の変位を把握したうえで、ひびわれ発生状況との相関を確認したものである。

## 2. TCIの概要

岩盤中のひびわれ（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」が岩盤力学の分野で研究されている<sup>1)</sup>。この「クラックテンソル」の考え方を採用し、覆工コンクリートのひびわれ評価指標としてTCIが既往の研究<sup>2)</sup>において提案されている。

TCIは、覆工表面のひびわれの幅、長さ、方向を定量化とした指標である。基礎式を式(1)に示すとともに、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 $F_{11}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{12}$ 、 $F_{21}$ の各成分を用いてひびわれの特徴を把握できる。

なお、過去の検討結果を踏まえひびわれ幅と長さに関する係数 $\alpha$ 、 $\beta$ を同じ重み1.0に設定した。

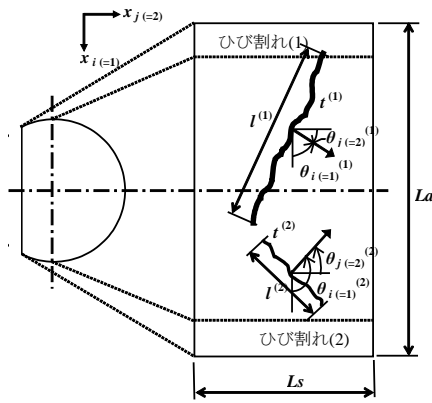


図-1 TCIの概念図.

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

A : 覆工コンクリートの面積 (A=Ls×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x<sub>i</sub>軸となす角度

j(k) : ひびわれkの法線ベクトルがx<sub>j</sub>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<sub>0</sub> : TCIの大きさ

F<sub>11</sub> : TCIの縦断方向成分

F<sub>22</sub> : TCIの横断方向成分

F<sub>12</sub>=F<sub>21</sub> : TCIのせん断方向成分

### 3. 変状原因推定手法に関する検討

#### (1) 検討概要

変状原因推定にあたり、原因を内因および外因に大別する必要がある。内因によるひびわれについては、材料や施工に起因していることからトンネル単位で、標準的なひびわれが発生することが想定される。一方で外因については、外力の作用によって局部的に特異なひびわれが発生する。

そこで、標準的なひびわれを抽出するにあたり、トンネルの各スパンにおけるひびわれ発生形態をTCIの各成分により分析した。

前田らの報告<sup>3)</sup>によれば、表-1内にあるトンネルのあるスパンのTCIの各成分が同表の工法別の全スパンのTCIの各成分の平均値±標準偏差(u±σ)内にすべて含まれれば、そのスパンは標準的なひびわれ発生形態として判断ができるとしている。

本論文では、TCIの縦断方向成分F<sub>11</sub>と横断方向成分F<sub>22</sub>を用いて分析を行う。対象トンネルは、表-2に示すように外力性変状の可能性のある2トンネルを抽出し、TCIによるひびわれ発生の原因推定手法について検討した。

表-1 NATMにおけるTCIの平均値uと標準偏差σ

TCI (トンネル数324, スパン数33, 388)					
F <sub>11</sub>	u	2.05	F <sub>22</sub>	u	1.06
	σ	3.25		σ	2.48
	u+σ	5.30		u+σ	3.54
	u-σ	0.00		u-σ	0.00

表-2 分析対象トンネル

対象トンネル	工法	対象スパン	変状原因
A	NATM	104~107	塑性圧
B	NATM	43~47	断層破砕帯のズレ

#### (2) 分析方法

図-2に分析例を示す。グラフの横軸にF<sub>11</sub>、縦軸にF<sub>22</sub>を設定し、覆工1スパンごとに算出したF<sub>11</sub>、F<sub>22</sub>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<sub>11</sub>=F<sub>22</sub>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>4)</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。

F<sub>11</sub>>F<sub>22</sub> : 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<sub>11</sub>=F<sub>22</sub> : 地すべり、偏圧地形による斜め方向ひびわれ等

F<sub>11</sub><F<sub>22</sub> : 路盤沈下、路盤隆起による横断方向ひびわれ等

さらに、前述した表-1に示す324トンネルのTCIにおける平均値±標準偏差(u±σ)により求まる標準ひび割れの手法を援用し、分析対象トンネルの各スパンのTCI成分 (F<sub>11</sub>, F<sub>22</sub>) が、図-2に示す標準ひびわれ境界であるTCI成分 (F<sub>11</sub>, F<sub>22</sub>) の平均値u±標準偏差σの範囲内に含まれるものは、内因による変状であると判断する。

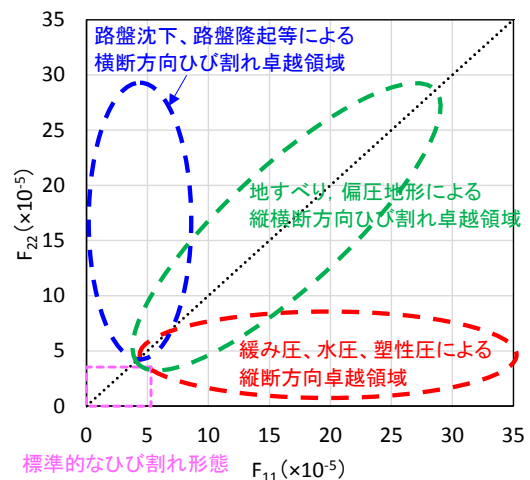


図-2 TCI (F<sub>11</sub>, F<sub>22</sub>) の分析例

### (3) TCIと変状原因の関係分析

分析結果を以下に示す。なお、外力性変状の可能性のあるトンネルについては、今回現地調査を実施しており、Aトンネル、Bトンネルでひびわれ展開図上に図示しているひびわれ幅については、現地調査時（平成28年）に計測したものである。

#### a) Aトンネルの変状状況

変状状況としては、図-3に示すようにスパン104～107で路盤隆起が確認されており、塑性圧による外力性変状と判定された区間が存在する。スパン105では、側壁が地山の側圧によって押し出され、路肩排水溝が閉口している。また、路盤隆起により覆工には横断方向ひびわれが発生した。

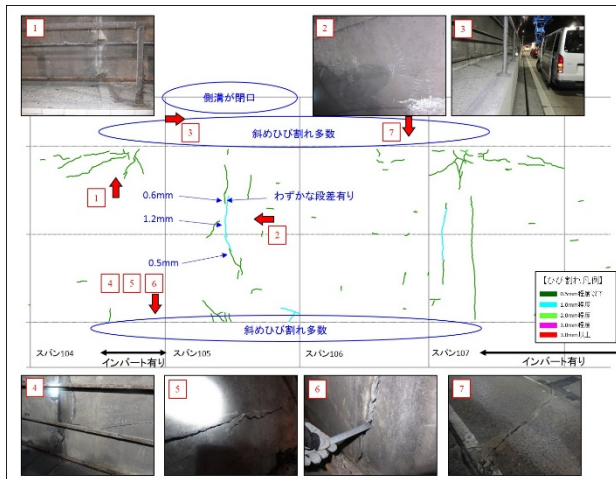


図-3 Aトンネルの変状状況

#### b) Bトンネルの変状状況

Bトンネルは、NATMで施工されており、図-4に示すように43～47スパンにおいて横断方向および斜め方向ひびわれが発生しており、地山の地すべり性挙動による外力性変状と判定された区間が存在する。

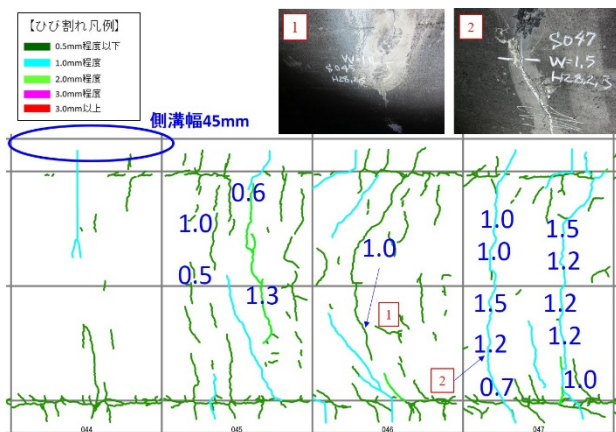


図-4 Bトンネルの変状状況

#### c) $F_{11}$ と $F_{22}$ の関係による変状原因推定

AトンネルおよびBトンネルの $F_{11}$ と $F_{22}$ の関係を図-5に示す。これをみると、Aトンネルでは、外力性変状の可能性のある105、106、107スパンは標準ひびわれ境界外に分布していることから、 $F_{11}$ と $F_{22}$ の関

係性を分析することで、外力性変状の可能性を捉えられていることがわかる。

さらに、Bトンネルでは、外力性と判定された43～47スパンは標準ひびわれ境界の外側に分布していることがわかる。また、これら変状スパンのプロットが、 $F_{11}=F_{22}$ ラインより $F_{22}$ 側に分布していることから、横断方向および斜め方向ひびわれの発生を捉えられていることがわかる。

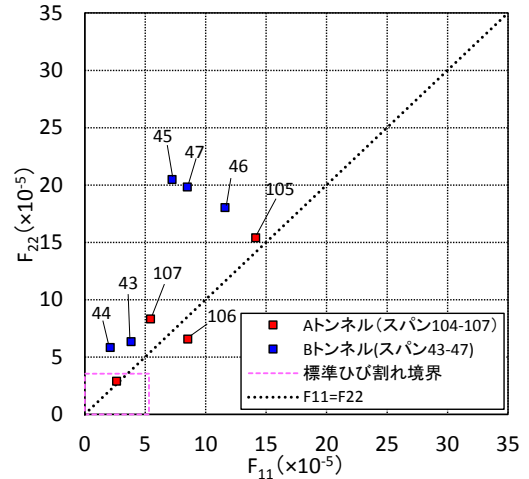


図-5  $F_{11}$ と $F_{22}$ の関係による変状原因分析

## 4. 外力作用のひびわれと断面変形の相関把握

外因によるひびわれについて、TCIの $F_{11}$ と $F_{22}$ の関係により、外力作用による変状原因の推定が可能であることがわかった。しかし、外力性変状以外でも標準ひび割れ境界外に分布することも考えられる。

そこで、覆工コンクリートのひびわれは変形を伴うことに着目し、TCIによる分析で外力による変状と推定されたトンネルに対し、走行型レーザー計測による断面形状の変化とひびわれの発生状況との相関を確認することで変状原因を推定した。

### (1) 走行計測技術の概要

本分析では走行しながらのレーザー計測が可能である走行型計測車両MIMM-R<sup>5)</sup>を用いる。レーザー計測で得られる点群データは単なる三次元の座標データでしかないので、基準となるトンネル平均断面を設定し、その面に対して点群データがどのような位置にあるかをコンター図で示し視覚化することで、変形モードを把握する<sup>6)</sup>。変形コンター図の色は、赤色であるほど内空側へ変位しており、青色であるほど地山側へ変位していることを示す。また、断面変形箇所とひびわれ発生箇所が一致した場合、その変状は外力性変状である可能性が高いと判断できる。

軸座標(XY)は、軸座標が平滑化軸との水平差を示しており、水平方向の断面のずれを示している。軸座標(H)については、軸座標が平滑化軸との高さ差、すなわち縦断方向の断面のずれ(表示色: orange)と、道路面縦断変位(表示色: red)を示している。

(2) ひびわれと断面変形の相関検証

検証するトンネルは、前章で外力作用のひびわれが発生しているとして検討を行ったAトンネル、Bトンネルを対象とした。検証結果を以下に示す。

a) Aトンネル

断面計測結果を図-6に示す。側溝の閉口が確認されているスパン105付近は、コンター図を見ると内空側へ変形しており、断面計測で変状状況を再現できていることがわかる。さらに、同スパンの路盤隆起は、道路面縦断変位で再現されていることがわかる。また、コンター図において、側壁部および天端中央部でひびわれ発生箇所と断面変形箇所が一致し、外力が作用したことでひびわれが発生した可能性がある。

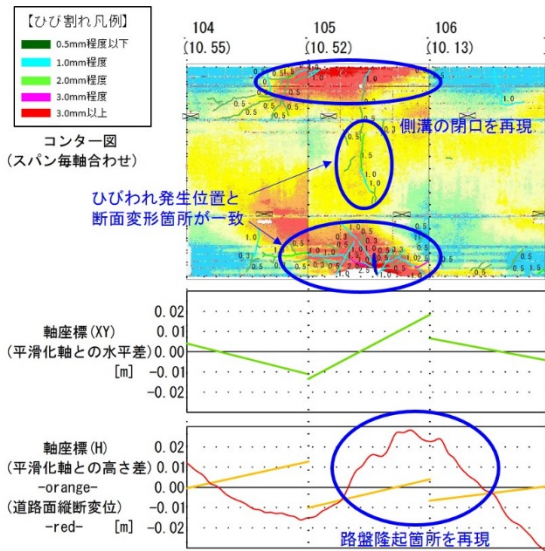


図-6 Aトンネルの断面計測結果。

b) Bトンネル

断面計測結果を図-7に示す。スパン43~47では、レーザー計測により縦断変位が確認されており、特にスパン45, 46では水平方向のズレも確認されている。コンター図を確認すると、横断方向ひびわれが平行に複数発生している箇所でも断面変形しており、外力に起因する変状であると考えられる。

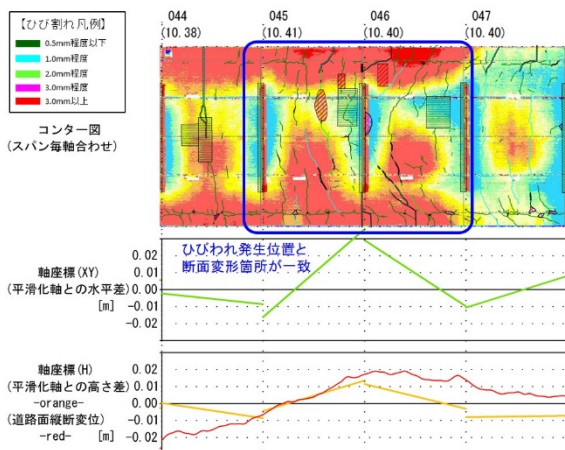


図-7 Bトンネルの断面計測結果。

5. まとめ、今後の展望

(1) まとめ

本論文では、外力性変状について、TCIの縦断方向成分、横断方向成分である $F_{11}$ 、 $F_{22}$ を用いて変状原因を定量的に推定できることがわかった。

さらに、走行型レーザー計測によりひびわれと断面変形の相関について確認を行った結果、TCIにより外力性変状の可能性が高いとしたトンネルについて、ひび割れ発生位置と断面変形位置が一致し、外力性変状の可能性が高いという結果を得た。

以上より、外力性変状について、TCIによる変状原因の推定が可能であることがわかった。

(2) 今後の展望

既設覆工のひびわれ発生の原因推定については、TCIを用いた標準ひびわれ境界の設定が核となることから、さらなる詳細点検結果の収集、分析を実施していく。それに加えて、TCIの差分を用いたひび割れ進行性評価を行うことで、定量的な変状の進行性を把握できると考え、今後、検討を進めていく。

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、トンネル点検を更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

- 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の決定に関する研究, 土木学会論文集, No. 382/III-7, pp. 121-130, 1987.
- 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.
- 前田佳克, 八木弘, 海瀬忍, 増田弘明, 水野希典, 重田佳幸, 前田洗樹: 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, 26巻, I-30, 2016.
- 中野清人, 佐伯徹, 重田佳幸, 大場論, 西村和夫: 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, トンネル工学報告集, 20巻, pp. 239-243, 2010.
- 重田佳幸, 前田佳克, 水野希典, 海瀬忍, 前田洗樹, 山本秀樹, 安田亨: 走行型計測による既設トンネル覆工の外力変状評価, トンネル工学報告集, 26巻, I-21, 2016.
- 新都市社会技術融合創造研究会 道路トンネル健全性評価技術研究プロジェクト: 走行型計測技術による道路トンネルの健全性評価の実用化研究 研究成果報告書, 2013.2