

# 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

前田 佳克<sup>1</sup>・八木 弘<sup>2</sup>・海瀬 忍<sup>3</sup>・増田 弘明<sup>4</sup>・水野 希典<sup>5</sup>  
重田 佳幸<sup>6</sup>・前田 洸樹<sup>7</sup>

<sup>1</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>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:h.yagi.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:h.masuda.aa@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

<sup>7</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

トンネル覆工コンクリートのひびわれの要因としては、外力の影響による外因と設計施工に起因して発生する内因とに区分される。本検討では、今後のトンネル覆工コンクリートの点検の効率化に向けて、トンネルの覆工コンクリートに発生した施工に起因するひびわれ形態を把握するために、過去のひびわれの点検データを収集した。そして、トンネルの代表的な工法である矢板工法（上半先進，側壁導抗）および NATM で施工されたトンネルの覆工コンクリートに発生するひびわれ形態について、ひびわれの定量的評価手法として提案されているひびわれ指数 TCI (Tunnel-lining Crack Index) を用いて、定量的な評価を行い標準的な施工工法別のひびわれ分布の特徴を分析した結果を報告する。

**Key Words :** Lining concrete, Cracks, Tunnel-lining Crack index, Check, Efficiency

## 1. はじめに

トンネル覆工のひびわれの要因としては、大きく分類して外力の影響による外因と設計施工に起因して発生する等の内因とに区分される。外因によるひびわれについては、数スパンに渡って連続的に発生し外因の種類によって、特徴的なひびわれ分布となっていることが多い。一方で設計施工に起因した内因によるひびわれのうち、施工に起因するひびわれは、トンネル1 チューブあたりの全体的なひびわれ分布となるケースが多く、そのひびわれ発生パターンは多種多様である。

トンネル覆工コンクリートの長期耐久性を評価するため、覆工の耐久性に影響を与えるひびわれ発生原因に着

目し、材料分離、断面形状、養生効果に関する検討をする上で実際のトンネルにどのようなひびわれが発生しているかを把握する必要があった。そこで、今後のトンネル覆工点検の効率化に向けて、ひびわれのデータを収集分析し、特徴的なひびわれを抽出した。

本報文では、既設覆工のひびわれ分析について、ひびわれ指数「以下、TCI (Tunnel-lining Crack Index) という。」を用いて、トンネルの代表的な工法である矢板工法（上半先進，側壁導抗）および NATM で施工されたトンネルについて、工法別にひびわれ分布の特徴を分析し得られた知見について報告する。

## 2. TCIの概要

### (1) TCIの算出式

岩盤工学の分野では、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”が用いられてきた<sup>1)</sup>。一方、既往の研究<sup>2)</sup>において、覆工コンクリートのひびわれ評価指標として、この“クラックテンソル”を参考に、TCIが提案されている。

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た。

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

$A$ : 覆工コンクリートの面積 ( $A = Ls \times La$ )

$Ls$ : 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

$F_0$ : 1つのスパンに占めるひびわれの長さとの幅

$F_{11}$ : ひびわれの縦断方向成分

$F_{22}$ : ひびわれの横断方向成分

$F_{12} = F_{21}$ : ひびわれのせん断方向成分

### (2) TCIの算出例

図-2に示す例において、求める $F_0$ は、ひびわれ番号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、ひびわれ幅、長さに関する係数 $\alpha$ 、 $\beta$ を便宜上1.0と仮定して求めた。

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

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

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

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

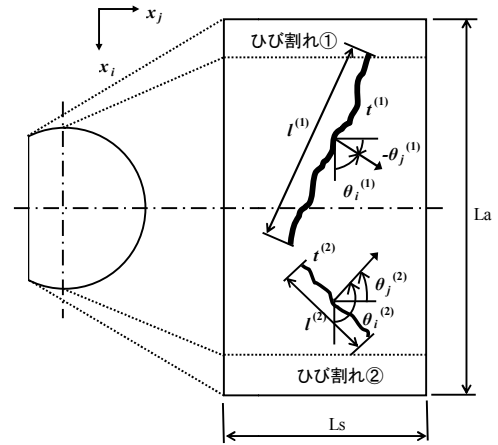


図-1 TCIの概念図<sup>2)</sup>

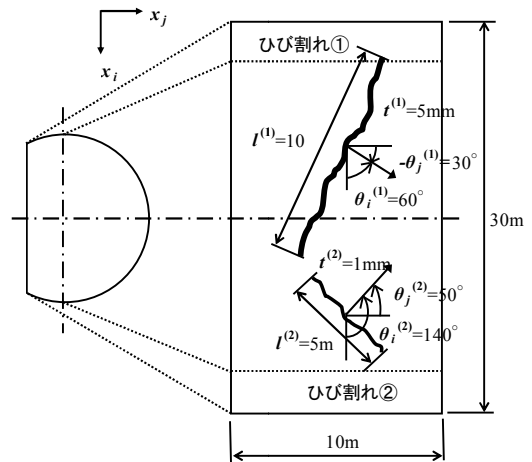


図-2 TCIの算出例の展開図<sup>2)</sup>

表-1 ひびわれ量が異なる場合のTCI算出例

| ケース                              | A-1  | A-2  | A-3  |
|----------------------------------|------|------|------|
| 模式図<br>( $A=210.1\text{m}^2$ )   |      |      |      |
| ひびわれ                             |      |      |      |
| 本数                               | 10   | 10   | 10   |
| 幅(mm)                            | 2.5  | 2.5  | 5.0  |
| 長さ(m)                            | 3    | 6    | 3    |
| 密度<br>( $\text{cm}/\text{m}^2$ ) | 14.3 | 28.6 | 14.3 |
| TCI( $\times 10^{-4}$ )          | 3.57 | 7.14 | 7.14 |

表-2 ひびわれ方向性が異なる場合のTCI算出例

| ケース                              | B-1  | B-2  | B-3  |
|----------------------------------|------|------|------|
| 模式図                              |      |      |      |
| ひびわれ方向 $\theta_i$                | 90°  | 45°  | 0°   |
| ひびわれ方向 $\theta_j$                | 0°   | 45°  | 90°  |
| TCI( $\times 10^{-4}$ ) $F_{11}$ | 0    | 1.79 | 3.57 |
| TCI( $\times 10^{-4}$ ) $F_{22}$ | 3.57 | 1.79 | 0    |
| TCI( $\times 10^{-4}$ ) $F_0$    | 3.57 | 3.57 | 3.57 |

※ひびわれ幅 2.5mm、長さ 3m、本数 10 本、面積  $A=210.1\text{m}^2$

### (3) TCIの特性

TCIは、ひびわれの量の変化とひびわれの方向性を評価できる特性を有している。

本検討では、まずひびわれ量に対するTCIの特性を整理する。表-1は、ケースA-1～A-3（トンネル軸直角方向ひびわれ）を用いて、ひびわれ量に対するTCIの特性を整理した結果である。この結果に示すように、同じひびわれ方向にあっても、ひびわれの幅、長さ（累計長）が異なると、異なるTCIを示すことが分かる。とくに、このTCIによる評価法（以下、TCI評価法）では、ひびわれ量に対して、段階的なランク付け評価と異なり、連続した数値で評価できる点に優位性があるものと思われるため、進行性の評価を行う上で有効な手法と考えられる。なお、本検討では、過去の検討結果<sup>3)</sup>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。

また、TCI評価法の特徴としてひびわれの方向性を評価に取り入れることが可能である。同じひびわれ量でも、その方向性が異なるケースについて試算を行った。計算に用いたモデルは、表-2に示すケースB-1（トンネル軸直角方向： $\theta_i=90^\circ$ 、 $\theta_j=0^\circ$ ）、ケースB-2（同45度方向： $\theta_i=\theta_j=45^\circ$ ）、およびケースB-3（トンネル軸方向： $\theta_i=0^\circ$ 、 $\theta_j=90^\circ$ ）の3ケースである。

表-2に示す $F_0$ は、 $F_{11}$ と $F_{22}$ の和であるため、理論上、3ケース間の差異はないことになる。そのため、 $F_{11}$ と $F_{22}$ を整理することにより、トンネル軸方向および軸直角方向の成分を個々に定量化できるため、変状原因の推定や落危険性評価等への適用が期待される。

### 3. 検討概要

トンネル覆工コンクリートの施工方法や材質に起因するひびわれの発生状況を把握するため、点検等の資料に基づき分析を実施した。

図-3に検討フローを示す。変状の実態分析として、800トンネル、80000スパンのデータから、施工法、地質、支保パターン等から対象トンネルを抽出し、ひびわれ形態の分析を行った。その中で、展開図によるパターン分析として定性分析を、TCIによるひびわれ定量化分析として定量分析を実施した。本報告では定量化分析について述べる。

そこで、標準的なひびわれ発生形態を整理するために、スパンに発生するひびわれのTCIの各成分（ $F_0$ 、 $F_{11}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{12}=F_{21}$ ）が、全スパンのTCIの平均値±標準偏差の範囲内に含まれれば、そのスパンに発生するひびわれは標準的なひびわれ形態であると考え、検討を行った。その検討結果から、各施工法における標準的なひびわれ形態を整理した。

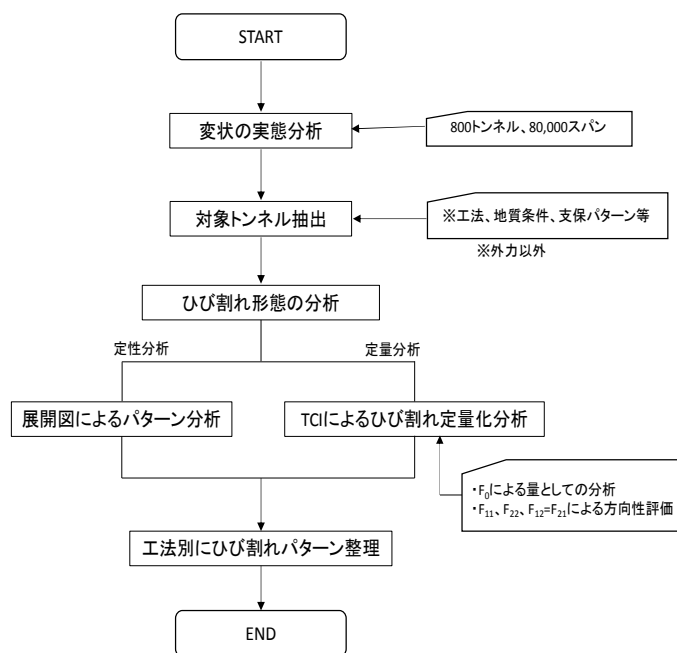


図-3 検討フロー

表-3 対象トンネルの内訳

|       | 矢板工法<br>(上半先進) | 矢板工法<br>(側壁導坑) | NATM   | 合計     |
|-------|----------------|----------------|--------|--------|
| トンネル数 | 34             | 23             | 324    | 381    |
| スパン数  | 2,669          | 980            | 33,388 | 37,037 |

## 4. 分析結果と標準的なひびわれ形態

### (1) TCIによるひびわれ定量化分析方法

外力性のひびわれなど、有害な変状区間を除外し、標準的なひびわれ形態を調査するため、TCIによる分析を実施した。NEXCO管轄トンネルのうち、対象となるトンネルのTCI（ $F_0$ ）の平均値 $\mu$ 、標準偏差 $\sigma$ をそれぞれ算出する。対象とするトンネルはNEXCO管轄の968トンネルの内、詳細点検B<sup>4)</sup>を実施したトンネルを対象とした。対象トンネルの内訳を表-3に示す。一般的に、平均値±標準偏差の範囲内に分布するデータは、全データに対しておよそ70%とされており、本検討においても、平均値±標準偏差の範囲内に分布する $F_0$ を標準的な変状と判定する。また、矢板工法（上半先進）、矢板工法（側壁導坑）、NATMの3工法について、代表的なトンネルを5トンネルずつ抽出した。その3工法15トンネルについて、全体の平均値±標準偏差と比較し、標準的な変状かどうか確認した。また、15トンネルの一覧を表-4に示す。

## (2) 15トンネルによる標準的なひびわれ形態の確認

各トンネルのスパンに着目し矢板工法（上半先進），矢板工法（側壁導坑），NATM の対象トンネルで，TCI の各成分 ( $F_0$ ,  $F_{11}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{12}=F_{21}$ ) の分布から標準的なひびわれ形態を抽出する。

抽出方法は，対象トンネルの各スパンの TCI ( $F_0$ ,  $F_{11}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{12}=F_{21}$ ) が，それぞれ，工法別における全スパンの TCI ( $F_0$ ,  $F_{11}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{12}=F_{21}$ ) の平均値±標準偏差 ( $u \pm \sigma$ ) の範囲内に含まれるかを確認する。ただし，変状規模が小さければ，標準的な変状とするため，平均-標準偏差  $> 0$  の場合，平均-標準偏差 = 0 として分析する。したがって，スパンの TCI 成分全てが，工法の全スパンにおける平均値±標準偏差の範囲内に含まれれば，その

表-4 15トンネルの一覧

| 工法             | トンネル | 延長m   | スパン数 | 供用年  |
|----------------|------|-------|------|------|
| 矢板工法<br>(上半先進) | A    | 374   | 37   | 1982 |
|                | B    | 540   | 52   | 1982 |
|                | C    | 707   | 67   | 1983 |
|                | D    | 197   | 17   | 1975 |
|                | E    | 193   | 18   | 1985 |
| 矢板工法<br>(側壁導坑) | F    | 406   | 39   | 1985 |
|                | G    | 458   | 45   | 1983 |
|                | H    | 392   | 38   | 1985 |
|                | I    | 293   | 34   | 1982 |
|                | J    | 99    | 9    | 1985 |
| NATM           | K    | 556   | 54   | 2003 |
|                | L    | 399   | 39   | 2005 |
|                | M    | 634   | 61   | 2005 |
|                | N    | 306   | 31   | 1998 |
|                | O    | 384.6 | 36   | 2003 |

スパンは標準的なひびわれ発生形態であると判断される。

表-5 に工法別の全スパンにおける TCI ( $F_0$ ,  $F_{11}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{12}=F_{21}$ ) の平均値と標準偏差を示す。また，A トンネルにおける TCI 分布を図-4 に示す。図-4 中のひびわれ展開図上の青枠は，標準的なひびわれ形態と判断されたスパンを示している。それ以外のスパンについては，外力性の変状の可能性のあるスパンを示していることから，標準的なひびわれ形態ではないと判断した。

表-5 工法別の TCI の平均値と標準偏差

|                 | 平均値u<br>標準偏差σ | 矢板工法<br>上半先進 | 矢板工法<br>側壁導坑 | NATM  |
|-----------------|---------------|--------------|--------------|-------|
| $F_0$           | u             | 10.5         | 9.82         | 4.97  |
|                 | σ             | 7.9          | 6.71         | 6.86  |
|                 | u+σ           | 18.39        | 16.53        | 11.84 |
|                 | u-σ           | 2.6          | 3.11         | 0     |
| $F_{11}$        | u             | 6            | 6.87         | 2.05  |
|                 | σ             | 4.95         | 4.83         | 3.25  |
|                 | u+σ           | 10.95        | 11.7         | 5.3   |
|                 | u-σ           | 1.05         | 2.04         | 0     |
| $F_{22}$        | u             | 4.5          | 2.95         | 1.06  |
|                 | σ             | 4.03         | 2.67         | 2.48  |
|                 | u+σ           | 8.53         | 5.61         | 3.54  |
|                 | u-σ           | 0.46         | 0.28         | 0     |
| $F_{12}=F_{21}$ | u             | 0.09         | 0.18         | 0.02  |
|                 | σ             | 0.73         | 0.52         | 0.27  |
|                 | u+σ           | 0.82         | 0.69         | 0.3   |
|                 | u-σ           | -0.64        | -0.34        | -0.25 |

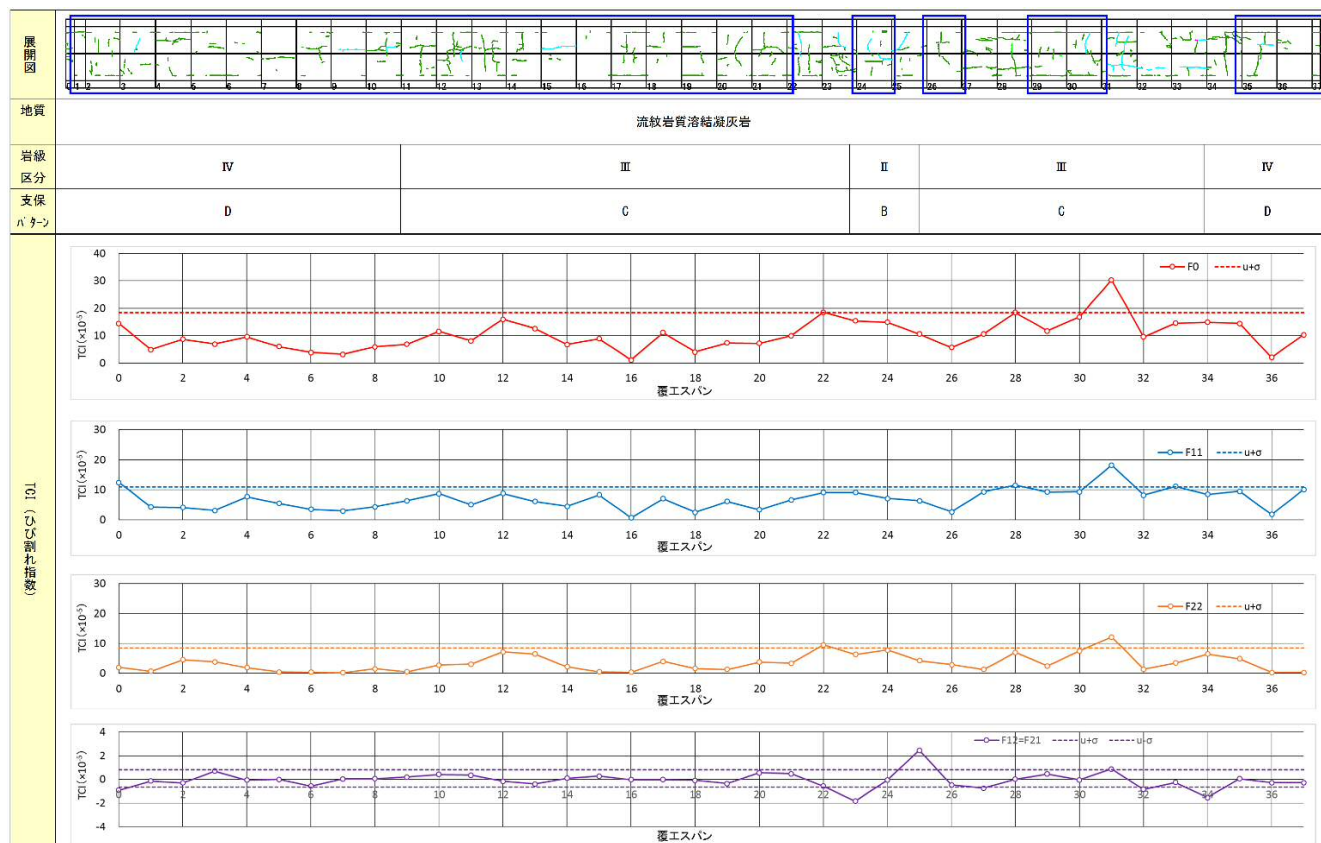


図-4 A トンネルにおける TCI の分布

この手法により、A～Oトンネルの15トンネルについて、標準的なひびわれ形態のスパンを抽出し、そのひびわれの代表的な展開図を図-5、図-6および図-7にそれぞれ示す。

矢板工法（上半先進）のトンネルに発生しているひびわれは、天端付近に2条の縦断方向ひびわれが発生する。さらに、その縦断ひびわれから、数本の横断方向ひびわれを確認した。

矢板工法（側壁導坑）のトンネルに発生しているひびわれは、天端から側壁にかけて2条もしくは細かい縦断方向ひびわれが発生する。横断方向ひびわれは、上半先進に比べると、本数は少ないが、発生している。

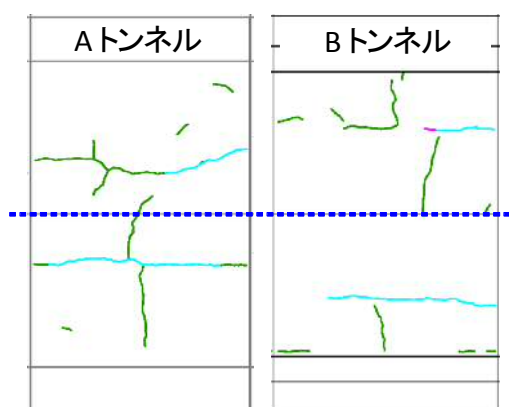


図-5 標準ひびわれ（上半先進）

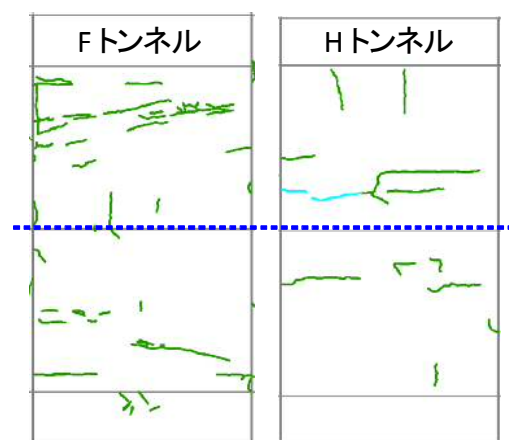


図-6 標準ひびわれ（側壁導坑）

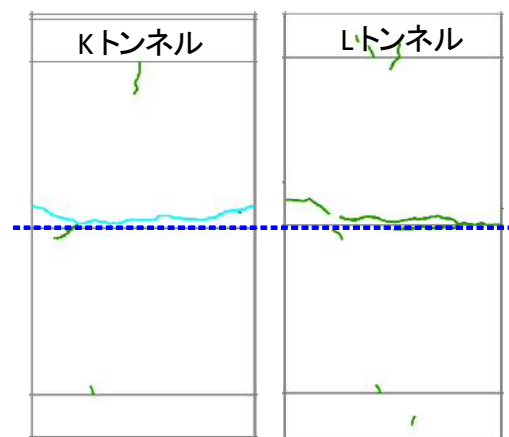


図-7 標準ひびわれ（NATM）

NATMのトンネルに発生しているひびわれは、天端に1条の縦断方向ひびわれが発生しており、わずかではあるが、S.L.周辺に横断ひびわれが発生している。

### (3) 代表的ひびわれの定量的分析

(2)で整理した各工法のひびわれ発生傾向について、定量的分析を行った。分析は、TCIの $F_{11}$ と $F_{22}$ を用いて、工法別にひびわれの発生方向の特徴を把握する。対象とするデータは、(2)で標準的なひびわれであると抽出したスパンとする。

図-8、図-9 および図-10 に分析結果を示す。グラフは、各スパンにおける $F_{11}$ と $F_{22}$ の関係を示しており、横軸が $F_{11}$ 、縦軸が $F_{22}$ である。このとき、プロットがグラフ上の点線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。分析結果をみると、3工法いずれも縦断方向ひびわれ卓越型となった。また、線形近似直線を各工法で比較すると、上半先進>側壁導坑>NATMの順で直線の傾きが大きいことが確認できた。すなわち、上記順で横断方向ひびわれの割合が大きいことがわかった。

以上により、代表的なひびわれを定量的分析した結果、(2)で整理した施工工法別のひびわれ形態の傾向を確認することができた。

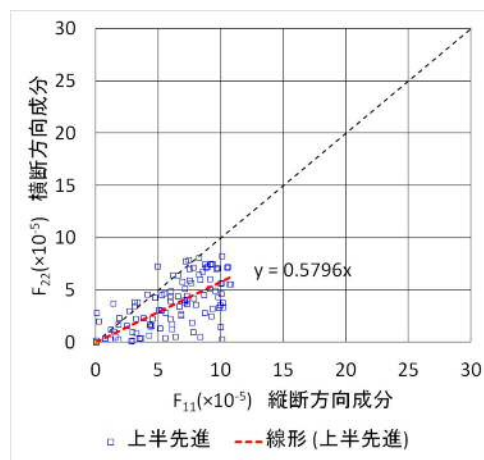


図-8 上半先進における $F_{11}$ と $F_{22}$ の関係

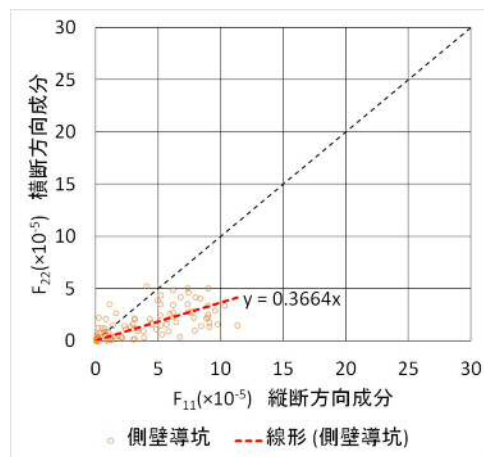


図-9 側壁導坑における $F_{11}$ と $F_{22}$ の関係

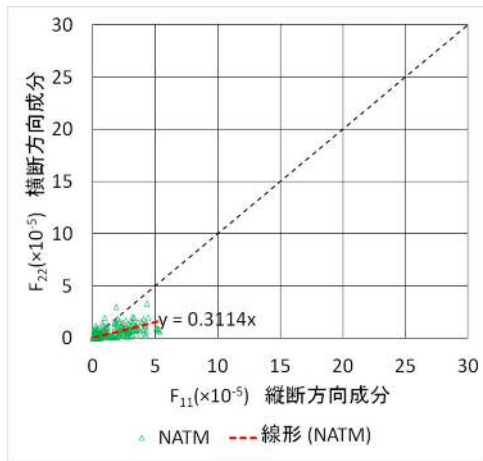


図-10 NATMにおける  $F_{11}$  と  $F_{22}$  の関係

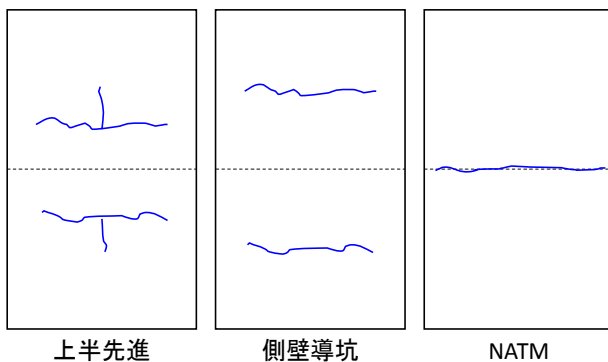


図-11 標準的なひびわれ形態

#### (4) 標準的なひびわれ形態

代表的な3工法における標準的なひびわれ形態は、図-11に示すようなひびわれであると考えられる。上半先進は、天端付近の2条の縦断方向ひびわれに加え数本の

横断方向ひびわれ、側壁導坑は、左右アーチ肩部に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であり、これらのひびわれ形態は施工に起因したものであると考えられる。

#### 5. まとめ

本検討では、矢板工法（上半先進、側壁導坑）およびNATMで施工されたトンネルの覆工に発生するひびわれ形態について、TCIを用いて定量的な評価を行い標準的なひびわれ形態を確認することができた。今後は、ひびわれ発生原因を究明し、将来はく落する原因となるひびわれ発生形態を把握することで、点検時に注視すべきポイントとして整理する予定である。

#### 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) 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・原因推定へのひび割れ指数（TCI）の適用性の可能性について，トンネル工学報告集第20巻，pp.239-243，2010.
- 3) 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，Vol62，No.4，pp.628-632，2006.
- 4) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：保全点検要領構造物編，2015.4

(2016.8.5 受付)

## DISPOSE OF CONCRETE CRACKS CONFIGURATION USING TUNNEL LINING CONCRETE CRACKS INDEX

Yoshikatsu MAEDA, Hiroshi YAGI, Shinobu KAISE, Hiroaki MASUDA, Maresuke MIZUNO, Yoshiyuki SHIGETA and Kouki MAEDA

Cause of Tunnel lining concrete cracks were sorted out the external cause due to external force and the internal cause due to be caused by the tunneling construction.

For making more efficient of tunnel inspection, and take hold of the crack configuration arise from lining construction, we got a collection of the data that crack configuration on the lining constructed by the fore pole excavation method(Upper side fore going, pilot tunnel for side wall) and NATM (New austrian tunneling method) which were typical tunnel excavation method in the world.

This study set out the approach used in TCI(Tunnel-lining Crack Index) advanced for the quantitative evaluation method of tunnel lining cracks, and reports on the result of feature analysis worked out crack distribution of the each tunnel excavation methods.