

覆工の材料分離および巻厚空洞とひびわれパターンとの関係性分析

前田 佳克¹・伊藤 哲男²・海瀬 忍³・増田 弘明⁴・水野 希典⁵
前田 洸樹⁶・松岡 茂⁷

¹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

²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

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:s.kaise.aa@ri-nexco.co.jp

⁴正会員 東日本高速道路株式会社 東京外環工事事務所（〒177-0033 東京都練馬区高野台4-1-23）
E-mail:h.masuda.aa@e-nexco.co.jp

⁵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

⁶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

⁷正会員 鉄建建設（株）土木本部（〒101-8366 東京都千代田区三崎町二丁目5-3）
E-mail:shigeru-matsuoka@tekken.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、過去のコア削孔による巻厚空洞調査および背面空洞注入工事が実施されたコアを活用し、粗骨材分布、巻厚分布、背面空洞分布を調査し、各覆工スパンの変状展開図と比較した。変状展開図の比較においては、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、定量的な評価を行った。本研究は、粗骨材分布、巻厚分布、背面空洞分布がひびわれパターンにおよぼす影響について分析した結果を報告する。

Key Words : Lining concrete,Cracks,Tunnel-lining Crak 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、数スパンに渡って発生し外因の種類によって、特徴的なひびわれとなる事が多い。一方で設計施工に起因した内因によるひびわれは、全体的なひびわれ分布となるケースが多い。トンネル覆工の点検にあたっては、ひびわれの発生形態によって、外因か内因かが判断できれば、点検業務の効率化が期待できる。

本報告は、覆工の材料分離、巻厚不足および背面空洞の分布がひびわれパターンにおよぼす影響について分析

した結果を報告する。

2. 対象トンネルと分析方法

(1) 対象トンネルと分析概要

A トンネルは、矢板工法（上半先進工法）で施工され、1988 年に供用が開始された。表-1 に A トンネルの諸元を示す。本トンネルは過去にコア削孔による巻厚空洞調査および背面空洞注入工事が実施されているため、本検討では、これらの調査、設計、施工実績等のデータを参考にして分析を実施した。粗骨材分布にあつては粗骨材面積率を調査し粗骨材の偏在状況を調査した。巻厚分布、

表-1 A トンネルの諸元

供用年	1988年
施工方法	矢板工法（上半先進工法）
延長	1,386m
スパン数	134 スパン
覆工の設計巻厚	45cm～80cm
地質	輝石安山岩、凝灰角礫岩
断面図 および 削孔調査 測線位置	

背面空洞分布コンタ図を作成し、各スパンの覆工の変状展開図と比較することで、材料分離、覆工巻厚、背面空洞とひびわれパターンとの関係性を分析した。

(2) 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¹⁾。一方、既往の研究²⁾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 ($A = L_s \times L_a$)

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_0 : 1つのスパンに占めるひびわれの長さとは幅

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

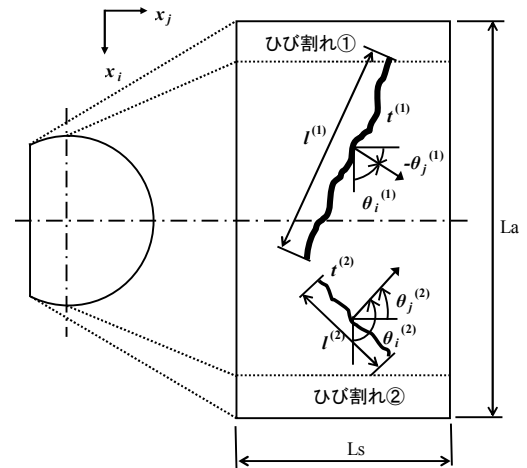


図-1 TCIの概念図²⁾

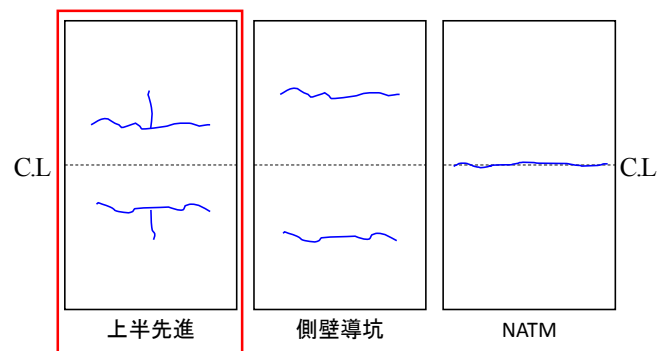


図-2 各工法別の標準的なひびわれパターン³⁾

表-2 工法別のTCIの平均値と標準偏差

	平均値 u 標準偏差 σ	矢板工法 上半先進	矢板工法 側壁導坑	NATM
F_0	u	10.5	9.82	4.97
	σ	7.9	6.71	6.86
	$u + \sigma$	18.39	16.53	11.84
	$u - \sigma$	2.6	3.11	0

(3) 標準的なひびわれパターン

既往の研究³⁾により TCI (ひびわれ指数) を用いて、乾燥収縮、材料劣化等により発生する矢板工法や NATM の各施工工法別の標準的なひびわれパターンを図-2のように提案している。これは TCI 成分 (F_0 , F_{11} , F_{22} , $F_{12}=F_{21}$) による平均値 u ($u=F_0$ の平均値) $\pm$ 標準偏差 σ ³⁾ を活用し、矢板工法 (上半先進工法) で施工されたトンネル 34 チューブ、2 669 スパンのデータを分析した結果、スパンの TCI 成分が平均値 $u \pm$ 標準偏差 σ の範囲に含まれるものは、標準的なひびわれパターンであると定義されたものである。表-2 に工法別の TCI の平均値と標準偏差を示す。本検討においても、この分析方法を用いて、表-2 の矢板工法 (上半先進工法) の平均値 $u + \sigma$ の 18.39 の閾値を下回ったひびわれ量 (F_0) のスパンを標準ひびわれが発生している A トンネルのスパンとして抽出し、覆工の巻厚および背面空洞の分布との

関係性を分析する。例えば、覆工巻厚が薄く、背面空洞
 が大きいスパンでも、当スパンの TCI が $\mu + \sigma$ より小さ
 ければ、標準ひびわれパターンと判断することができ、
 覆工巻厚と背面空洞の有無がひびわれ発生に与える影響
 は小さいと考えられる。

3. 粗骨材分布の影響

(1) 粗骨材分布調査

背面空洞注入工事の削孔コアから、粗骨材分布を把握
 するために、コア毎の粗骨材面積率を調べた。粗骨材面

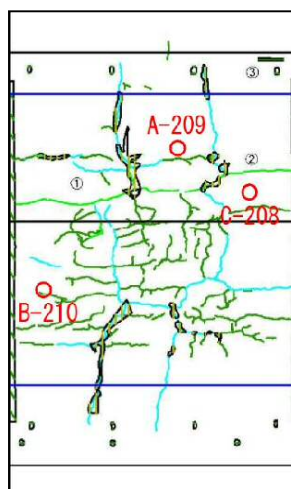


図-3 スパン 33 のひびわれ展開図
とコア採取位置

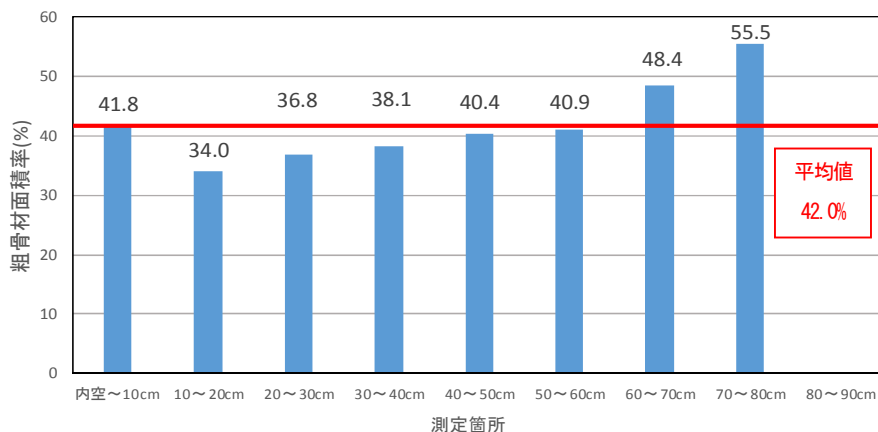


図-4 コア番号 C-208 の 10cm 毎の粗骨材面積率

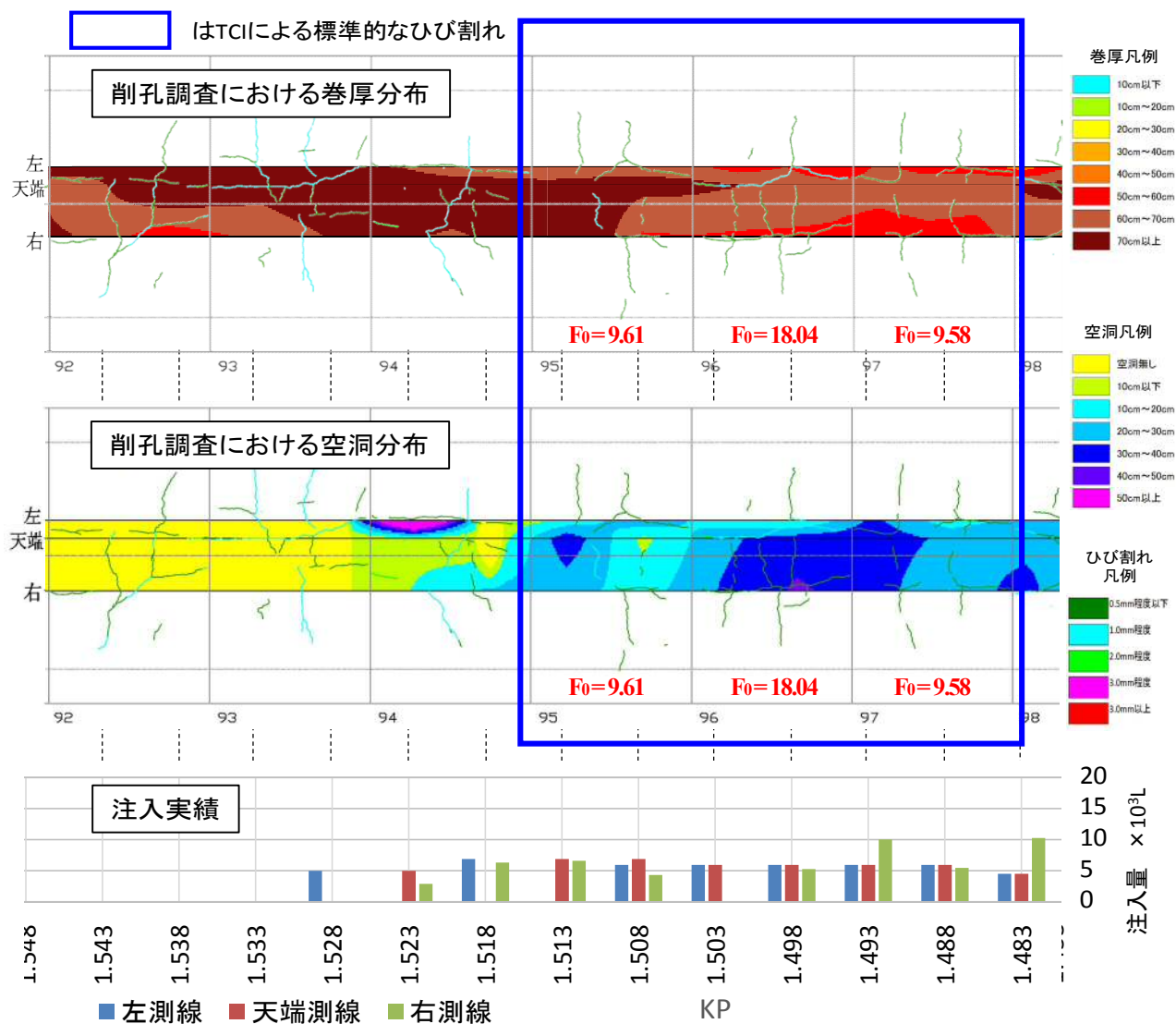


図-5 覆工巻厚および背面空洞とひびわれパターンの関係

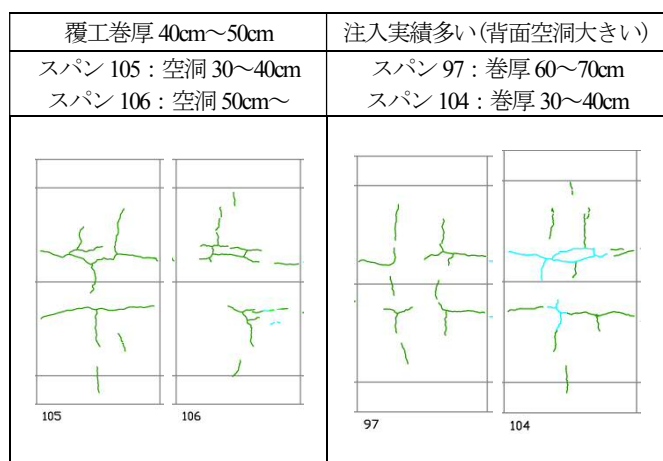


図-6 巻厚が比較的小さく背面空洞が大きいひびわれパターン

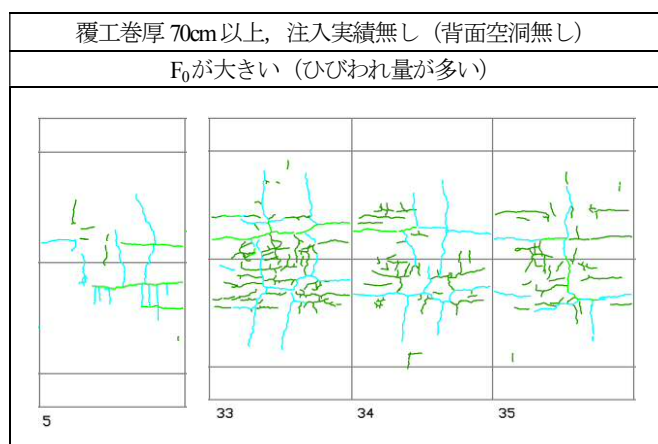


図-7 巻厚が十分に有り背面空洞も無いがひびわれが多いパターン

積率調査にあつては、コア表面に占める粗骨材表面積の比率を 10cm 毎に測定した。代表例として、A トンネルのスパン 33 のひびわれ展開図とコア採取の位置の状況を図-3 に、コア番号 C-208 の 10cm 毎の粗骨材面積率の状況を図-4 に示す。スパン 33 においては、亀甲状のひびわれが発生しているが、採取したコア番号 C-208 の 10cm 毎の粗骨材面積率をみると、内空側から 10cm～20cm の箇所において、34.0%となっており、コア全体の平均値 42.0%を大きく下回っていた。また、粗骨材面積率が低くなっているが、大きな偏在は確認できず粗骨材の増減している厚さは 10cm 程度の範囲におさまっており、粗骨材の増減が広範囲となる事はなかった。さらに、ひびわれが少ないスパンのコアについても同様に粗骨材面積率を調査したが、大きな偏在は確認できなかった。

以上より、粗骨材が増減している厚さは粗骨材面積率調査の結果より、10cm程度であり、粗骨材の増減がひ

びわれパターンに与える影響は小さいと考えられる。

4. 覆工巻厚と背面空洞の影響

(1) 覆工巻厚と背面空洞のコンタ図作成条件

覆工巻厚と背面空洞については、コンタ図を作成して分析を行った。コンタ図の作成条件を下記の①～③に示す。

①巻厚分布、背面空洞分布とともに削孔コアデータから作成しており、削孔位置間は線形補完してコンタ図を作成した。

②表-1 に示すように削孔測線は左 (CL から 2.5m) , 天端 (CL から 1.2m) , 右 (CL から 2.5m) の 3 測線である。

③コンタ範囲は左測線から右測線の範囲である。すなわち、左肩部から右肩部の範囲である。

(2) 覆工巻厚と背面空洞のひびわれパターンとの分析結果

図-5 にひびわれパターンと覆工巻厚および背面空洞の関係を示す。代表例として、スパン 92～97 を示しており、上段が調査設計時の覆工巻厚分布、中段が調査設計時の背面空洞分布、下段が注入量の実績を示している。また、青枠内は TCI により標準ひびわれと判断されるスパンを示している。調査設計時に背面空洞が大きいとされた箇所では注入の実績があることから、スパン 94～97 には実際に空洞が存在していたことがわかる。

スパン 95～97 をみると、巻厚が 60～70cm あるが、最大背面空洞厚が約 40cm 存在し、ひびわれは標準パターンと判断されている。対して、スパン 92, 93 は、巻厚 70cm であり、空洞も存在しないが、ひびわれは標準パターンと判断されていない。また、図-6 に A トンネルで巻厚が比較的小さい、あるいは、注入実績が多いスパンを抽出すると、いずれも図-2 の矢板工法 (上半先進工法) の標準ひびわれパターンに近いひびわれが発生していることがわかる。さらに、A トンネルでは、十分な覆工巻厚が確保され、かつ、背面空洞が存在しない箇所でも、ひびわれが標準ひびわれパターンと判断されているスパンが多く存在する他、図-7 に示すとおり、覆工巻厚が十分に有り、背面空洞も存在しないが、ひびわれが多く発生しているスパンもある。

以上より、A トンネルにおいては、巻厚が比較的小さい場合および背面空洞の有無がひびわれパターンに与える影響は小さいと考えられる。この要因は、覆工巻厚の薄い箇所でも、50cm～60cm の厚さが有り、全体的に設計の覆工厚さ 70cm に対し 70cm 以上の覆工厚さの箇所も多数有った。また背面空洞が有る箇所もトンネル全体

の 134 スパン中 22 スパンとなっており、矢板工法トンネルの覆工としては、比較的施工が良好であったと推察される。

5. まとめ

本報告では、A トンネルの材料分離、覆工巻厚および背面空洞とひびわれパターンの関係性を分析した。分析にあつては、ひびわれの定量的評価手法として提案されている TCI を活用し、矢板工法（上半先進工法）の標準的なひびわれパターンを用いて、材料分離、覆工巻厚、背面空洞との関係性を分析した。一般的に、矢板工法は材料分離が広範囲におよんでおり、巻厚不足や背面空洞箇所がひびわれ発生に影響していると言われているが、本検討結果からは、材料分離、巻厚不足および背面空洞の有無がひびわれパターンに与える影響は小さいことが

わかった。今後は分析するトンネル数を増やして、材料分離、覆工巻厚と背面空洞との組み合わせの関係をさらに精査し、トンネル点検の効率化につなげていきたいと考える。

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) 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，1-30，2016.

(2017.8.11受付)

A STUDY OF RELATION BETWEEN MATERIAL SEPARATION OF LINING CONCRETE ,LINING THICKNESS, REAR FACE CAVITIES AND CRACK PATTERN

Yoshikatsu MAEDA,Tetsuo ITO,Shinobu KAISE,Hiroaki MASUDA,
Maresuke MIZUNO, Kouki MAEDA and Shigeru MATSUOKA

Cause of cracks of tunnel lining are mainly divided by external forces and internal factors which are material deformation, construct and so on.

In this study, with the aim of improving the efficiency of inspection of tunnel lining concrete in the future, using the core that was conducted in the past investigation of lining thickness and rear face cavity by core drilling of linings and rear cavity injection work, concrete coarse aggregate distribution, lining thickness distribution, rear face cavity distribution and deformation development view were compared.

Comparison of deformation development view was performed using the index TCI (Tunnel-lining Crack Index) proposed as a quantitative evaluation method of cracks.

This paper sets out to report on analyzing the influence of concrete coarse aggregate distribution, lining thickness distribution, rear face cavity distribution on crack pattern.