

TCIを用いた施工法の違いによる 覆工評価の比較

中島 彰吾¹・海瀬 忍²・森本 真吾³・進士 正人⁴

¹学生会員 山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

E-mail:snakashima@yucivil.onmicrosoft.com

²正会員 (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)

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

³正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

E-mail: charlie@yamaguchi-u.ac.jp

⁴正会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

現在, 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社が実施する高速道路のトンネル点検は同一の水準で行われている。しかし, 矢板工法やNATMといった施工法や施工時期による覆工構造の違いや, 覆工の変状履歴やその進行具合により, 覆工点検のやり方は異なる可能性がある。そこで本研究では, 矢板工法とNATMのそれぞれの覆工表面に発生するひびわれに着目し, 施工法による変状の違いや特徴を把握することを目的とした。また, 本研究では, 覆工コンクリートに発生した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)を用いて, ひびわれ評価の経年変化等を調査した。その結果, 矢板工法とNATMのそれぞれのひびわれに関する進行具合の違いや特徴を把握することができた。

Key Words : tunnel lining, crack, evaluation of soundness, TCI

1. はじめに

建設後50年以上経過する土木構造物が今後急速に増加することが見込まれている現状をふまえ, 土木構造物の維持管理・更新といった老朽化対策が喫緊の課題となっている。また, 平成26年に「道路トンネル定期点検要領」が策定され, 道路トンネルの定期点検は5年に1回の頻度で実施することが基本とされた¹⁾ことから, 点検結果を考慮したより効率的なメンテナンスが求められている。

道路トンネルの定期点検は, まず「点検・(調査)」において, トンネル覆工の様子を表す変状展開図等を記録する。次に, 技術者が変状展開図等の点検・調査結果をふまえた総合的な判断である「健全性の診断」を行う。重田ら²⁾は既往研究で覆工コンクリートに発生したひびわれの定量的評価手法として, クラックテンソルの考えを導入したひびわれ指数 TCI (Tunnel-lining Crack Index) を提案している。そこで筆者らはこれまでの研究において, TCI を用いたトンネル覆工のひびわれ評価に経年的評価に取り組むことを試みた³⁾。その結果, 覆工に生じるひびわれの経年的発生状況は, スパン毎に大きく進行

具合が異なることがわかった。また, TCI の経年変化を参照することで, 補修の優先順位付けの可能性を見出すことができた。

一方で, 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社ではトンネル点検の健全性の評価において, 一部に TCI を活用した評価を行っている。具体的には, まず覆工画像撮影結果による判定(詳細点検 A)を行い, 詳細点検 A で定められた基準値を超えたスパンは, 現地での打音点検等の重点点検(詳細点検 B)を行っている。しかしながら, 見逃しを避けるために, 詳細点検 B を行うスパンの中には, 詳細点検 A で低い数値を示すスパンでも詳細点検を行っている事例が多数存在している。そこで, 第一段階として, 詳細点検 A の課題に対し本研究では施工法の違いに着目した。先に述べた定期点検や詳細点検 A は全てのトンネルに対し同一の水準で行われているものの, 矢板工法や NATM といった施工時期や施工法による構造の違いによって, 覆工の変状やその進行具合は異なる可能性がある。そこで本研究は, 矢板工法と NATM について TCI を用いたひびわれ評価の経年変化等に着目し, 各施工法による変状の違いや特徴を把握することを

目的とした。

2. TCIの概要

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、ひびわれ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。一方、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²⁾。

(1) TCIの算出式

TCIの基礎式を式(1)に示す。

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

ここに、A：対象とする覆工コンクリートの面積

n：ひびわれの本数

$l^{(k)}$ ：k番目のひびわれの長さ

$t^{(k)}$ ：k番目のひびわれの幅

$\theta_i^{(k)}$ ：k番目のひびわれの法線ベクトルがi軸となす角度

$\theta_j^{(k)}$ ：k番目のひびわれの法線ベクトルが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

を表す。

ここで式(1)に示す重み付け係数 α 、 β について、両係数は既往研究²⁾に記される最も相関性が高い1.0を設定した。

なお、式(1)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り、 F_{12} 、 F_{21} は、 F_{11} （縦断）と F_{22} （横断）の斜め成分を表している。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（ $F_0 = F_{11} + F_{22}$ ）として表される。

(2) TCIの算出例

図-1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。

$$F_{11} = \frac{0.005 \times 10 \times \cos 30^\circ \times \cos 30^\circ}{10 \times 30} + \frac{0.001 \times 5 \times \cos 40^\circ \times \cos 40^\circ}{10 \times 30} = 1.35 \times 10^{-4}$$

$$F_{22} = \frac{0.005 \times 10 \times \cos 60^\circ \times \cos 60^\circ}{10 \times 30} + \frac{0.001 \times 5 \times \cos 50^\circ \times \cos 50^\circ}{10 \times 30} = 0.48 \times 10^{-4}$$

$$F_0 = F_{11} + F_{22} = \sqrt{F_{11}^2 + F_{12}^2 + F_{21}^2 + F_{22}^2} = 1.83 \times 10^{-4}$$

また、本研究では F_{12} を扱うため、その算出例を示す。

$$F_{12} = F_{21} = \frac{0.005 \times 10 \times \cos 30^\circ \times \cos 60^\circ}{10 \times 30} + \frac{0.001 \times 5 \times \cos 40^\circ \times \cos 50^\circ}{10 \times 30} = 0.8 \times 10^{-4}$$

3. 対象トンネルのデータ

本研究で対象としたトンネルは矢板工法で施工された3本とNATMで施工された3本の計6本の高速道路トンネルである。矢板工法のトンネルでは平成18年と平成27年、NATMのトンネルでは平成21年と平成26年に点検した際の変状展開図が記録されており、各トンネルの2年分のTCIを算出した。各トンネルの詳細を以下に記す。本論文では、矢板工法、NATMのそれぞれ1例を取り上げて説明する。

① Aトンネル（矢板工法）

全長：1619m，スパン数：195，供用開始年：1968年

② Bトンネル（矢板工法）

全長：314m，スパン数：43，供用開始年：1968年

③ Cトンネル（矢板工法）

全長：1641m，スパン数：151，供用開始年：1973年

④ Dトンネル（NATM）

全長：853m，スパン数：85，供用開始年：2003年

⑤ Eトンネル（NATM）

全長：711m，スパン数：69，供用開始年：1991年

⑥ Fトンネル（NATM）

全長：1627m，スパン数：165，供用開始年：2003年

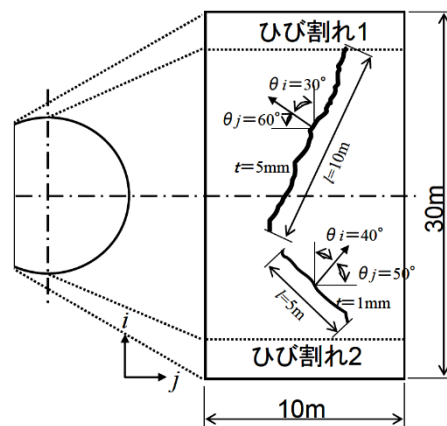


図-1 TCI算出例のためのひびわれ展開図

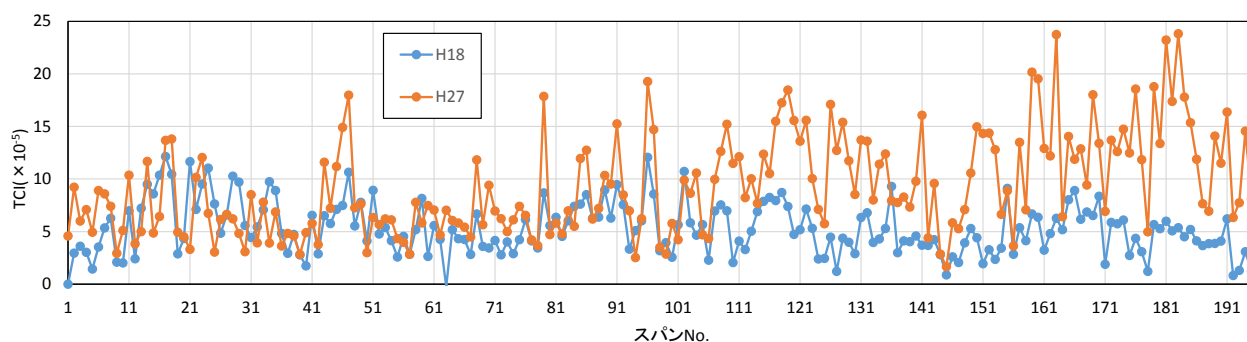


図-2 Aトンネルの各スパンのTCI算出結果

4. TCI算出結果

(1) Aトンネル（矢板工法）の結果・考察

Aトンネルの各スパンのTCI算出結果を図-2、Aトンネルの平成18年と平成27年における全スパン・スパンNo.1~100・101~195のTCI平均値を図-3に示す。図-2より、平成18年ではTCIが $10(\times 10^5)$ 未満のスパンがほとんどであり低い数値が集中しているのに対して、平成27年では全体的にTCIが $10(\times 10^5)$ 以上のスパンが多く表れており高くなっていることがわかる。また、図-3より、全スパンのTCI平均値は平成18年から平成27年にかけて増加していることがわかる。これは、ひびわれが進行してトンネル覆工の健全性が低下していることが推測される。

また、図-2より、平成18年と平成27年を比較した場合、差分が大きいのはスパンNo.101~195の区間に集中している。そこで、スパンNo.1~100とNo.101~195の各区間でTCI平均値をとり比較する。図-3より、平成27年においてスパンNo.101~195のTCI平均値はNo.1~100よりも高いことから、スパンNo.101~195の区間は健全度が低く評価されていることがわかる。また、平成18年から両区間ともに増加しているが、スパンNo.101~195の区間の方が増加傾向が高い。コンクリートの性質上、今後も増加傾向が同様に続くことと仮定できるため、スパンNo.1~100よりもスパンNo.101~195の区間の方をより優先的にメンテナンスするべきと判断できる。

次に、AトンネルのスパンNo.101~195について詳しく考察する。図-4にAトンネルのスパンNo.101~195のF0、F11（縦断方向成分）、F22（横断方向成分）のTCI平均値を示す。図-4より、平成18年から平成27年にかけて、F11は約2.2から約4.7、F22は約2.7から約6.9に増加している。両成分とも増加しているが、増加量はF11が約2.5、F22が約4.2でありF22の方が増加が大きいことから、横断方向のひびわれの進行が高い傾向にあることがわかる。

図-5に図-2のTCI算出結果に土被り、インバートの有無、地山等級、支保パターンの情報を追加したものを示す。図-5より、スパンNo.155~195の地山等級がC、Dである区間にTCIの経年変化が大きく表れている。スパン

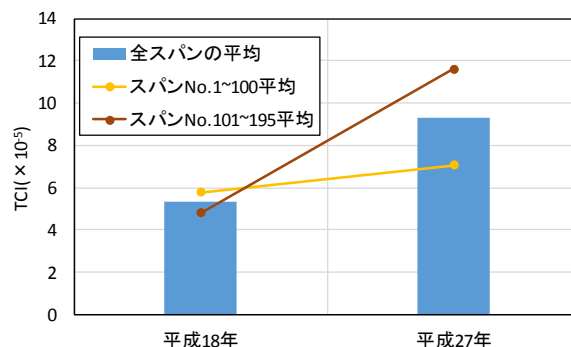


図-3 Aトンネルの各年の全スパン・スパンNo.1~100・101~195のTCI平均値

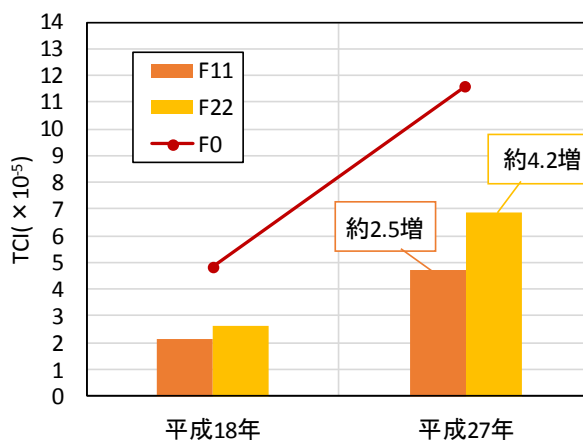


図-4 AトンネルのスパンNo.101~195の成分別TCI平均値

No.155~195の地山等級がC、Dである区間にTCIの経年変化が大きく表れている。スパンNo.155は地山等級B、Cの境目であり、土被りも周辺に比べて小さいが、スパンNo.155付近ではTCIの経年変化が小さい。これは、支保パターンを地山等級Cより一段階上のDで施工し、インバートを設置したことによる効果と推測される。

また、AトンネルのF12（せん断方向成分）成分のTCI算出結果を図-6に示す。図-6より、スパンNo.101~195はスパンNo.1~100に比べてF12の経年的な増加が大きいことがわかる。Aトンネルの平成27年の変状展開図の一部

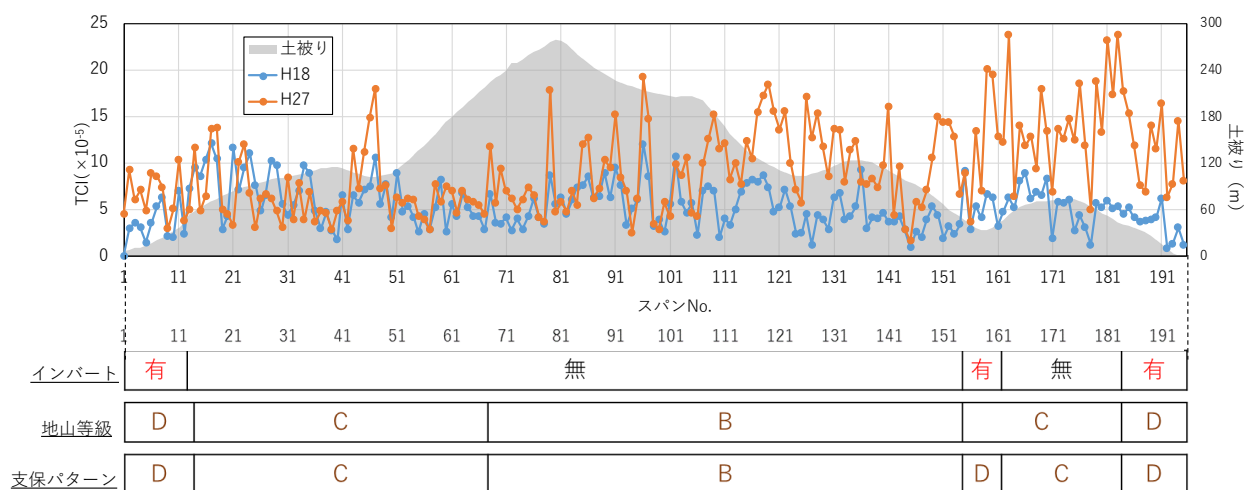


図-5 AトンネルのTCI算出結果、土被り、インバート、地山等級、支保パターン

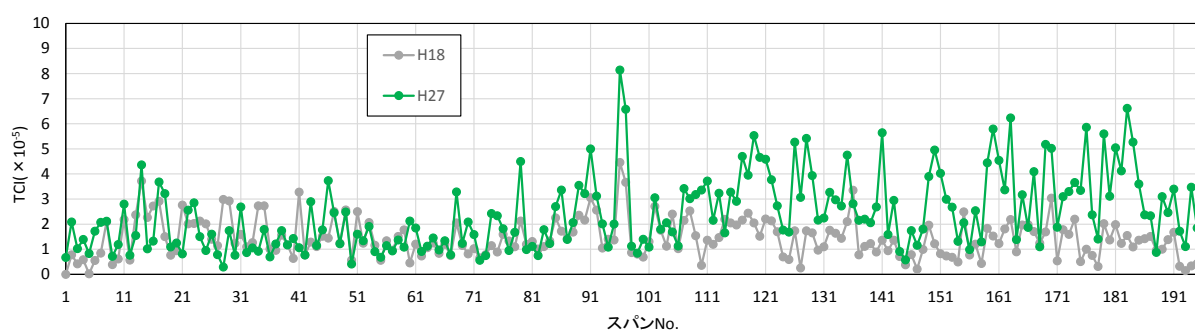


図-6 AトンネルにおけるF12（せん断方向）成分のTCI

を図-7に示す。図に示すように、Aトンネルではアーチ肩部にひびわれが集中しているスパンが多い。以上のように、Aトンネルではアーチ肩部にトンネル縦断方向・せん断方向のひびわれが多く確認できるため、変状原因として塑性圧の作用やコールドジョイントが挙げられる⁴⁾。よって、TCIの成分に着目することで、変状原因を推定できる可能性が示された。

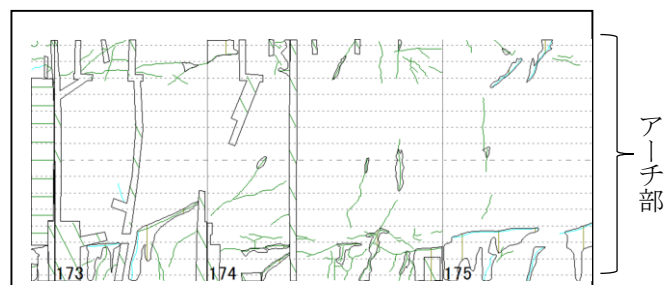


図-7 Aトンネルの平成27年の変状展開図
(スパンNo.174付近)

(2) Eトンネル (NATM) の結果・考察

図-8にEトンネルのF0, F11（縦断方向成分）, F22（横断方向成分）のTCI平均値を示す。図-8より、平成18年から平成27年にかけて、F0は約3.7から約2.8に減少している。また、成分別に見ると、F22はほとんど経年変化がないが、F11は減少していることがわかる。以上から、EトンネルにおけるTCIの経年的な減少には縦断方向のひびわれが影響していると考えられる。この特徴は変状展開図から確認することができた。図-9にEトンネルの平成21年と平成26年の変状展開図の一部を示す。図-9より、平成21年から平成26年にかけてひびわれの進行や新たなひびわれの発生はほとんど見られず、天端付近にある縦断方向のひびわれ幅が1 mm（青色）から0.5 mm（緑色）に減少している。Eトンネルの全69スパン

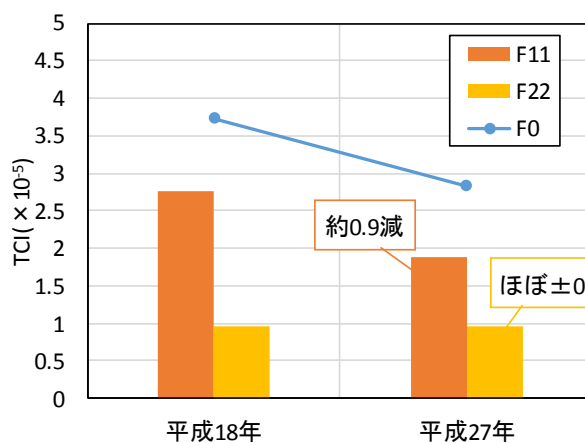


図-8 Eトンネルの成分別TCI平均値

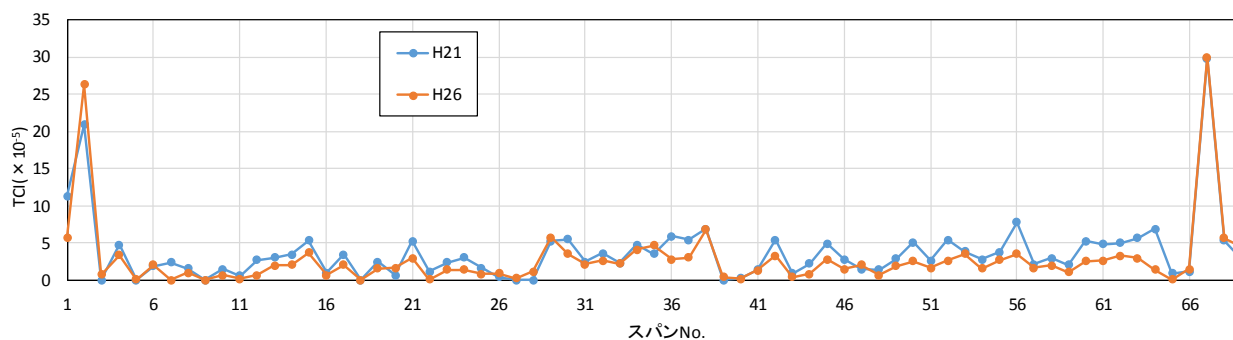


図-10 EトンネルにおけるTCI算出結果

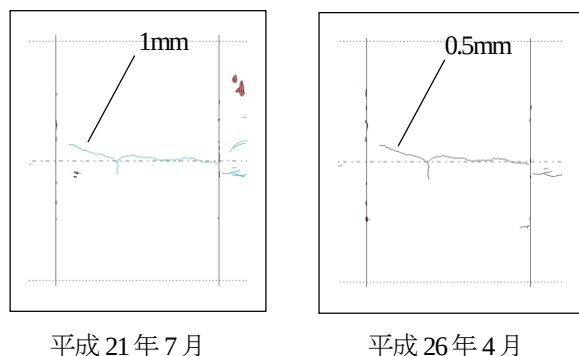


図-9 NATMのEトンネル変状展開図
(スパン No.63)

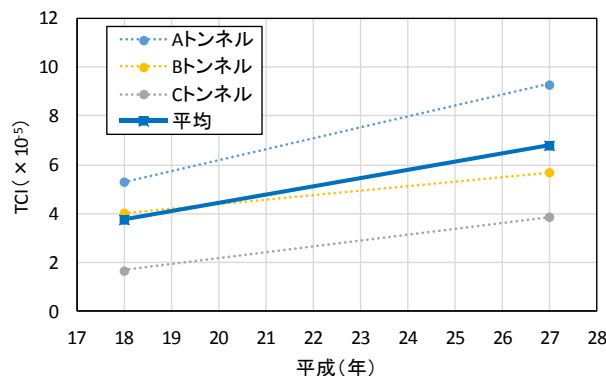


図-11 矢板工法によるトンネル別TCI平均値

のうちほとんどが図-9に示すスパンNo.63と同様な傾向を示していた。つまり、TCIの経年変化には天端付近にある縦断方向のひびわれ幅が減少したことが影響していると考えられる。しかしながら、幅が減少する原因は解明しておらず、今後も検討が必要である。

図-10にEトンネルの各スパンのTCI算出結果を示す。

図-10より、Eトンネルでは平成21年と平成26年ともに全体的にTCIは低い数値を示しているが、坑口付近は高い数値を示しており、坑口付近はひびわれの進行度が高いことが伺える。坑口付近は夏期、冬期にわたる温度差の影響を受けやすいため、覆工厚の薄いNATMでは坑口付近の覆工でひびわれが進行しやすいと考えられる。また、ほとんどのスパンで経年変化は見られるものの、その経年変化はAトンネルと比べ小さいといえる。

5. 施工法の違いによる特徴

まず、先に述べたAトンネルとEトンネルの特徴を以下にまとめる。

Aトンネル（矢板工法）の特徴について、

- ・TCIは経年的に増加している。
- ・スパンNo.101~195はスパンNo.1~100に比べてTCIの経年的な増加が大きく、横断方向のひびわれが進行する割

合が高いとともに、トンネルのアーチ肩部にひびわれが多く見られる。

Eトンネル（NATM）の特徴について、

- ・TCIは経年的に減少している。
- ・平成21年から平成26年にかけて天端付近にある縦断方向のひびわれ幅が1mmから0.5mmに減少している。
- ・トンネル全体的にTCIは低い、坑口付近は高い数値を示す。

上記にまとめたA、Eトンネルの特徴を参考に矢板工法のB、Cトンネル、NATMのD、Fトンネルを含めた計6本のトンネルを対象に、施工法の違いについてTCIを用いた比較を行なった。

(1) 経年変化に関する特徴

図-11に矢板工法によるトンネル別TCI平均値を示す。矢板工法のトンネルについて、図-11より、TCIが経年的に増加しているトンネルはAトンネルだけでなくB、Cトンネルもであり、3本のトンネルの平均は増加を示している。つまり、矢板工法のトンネルでは経年的にひびわれが進行していることがわかる。また、先に述べたAトンネルの特徴について、二つの区間で経年変化の大きさが異なるように、B、Cトンネルにおいても経年変化が異なる区間を確認した。

図-12にNATMによるトンネル別TCI平均値を示す。

NATMによるトンネルは、図-11に比較して、全体的にTCIが小さいが、DトンネルはTCIが経年的に増加しているが、E、Fトンネルは減少しているため3本のトンネルの平均では減少傾向を示している。先に述べたEトンネルの特徴について、経年的にひびわれ幅が減少しているように、D、Fトンネルにも同様な特徴が見られた。しかしながら、Dトンネルでは平成26年にひびわれの進行や新たなひびわれが発生するスパンが多くあったため、TCIは経年的に増加した。今後は対象トンネル数を増やして、ひびわれが縮小する原因を追求し、原因をふまえて経年的な変化を考察する必要がある。

また、TCIの数値について、図-11から、平成27年における矢板工法のトンネルの平均は約6.3であり、図-12から、平成26年におけるNATMのトンネルの平均は約3.2である。このことから、現状のトンネルにおいて、矢板工法のトンネルはTCIが比較的高く、NATMのトンネルは比較的小さい傾向にあると考えられ、矢板工法の方がひびわれが進行していると推測される。また、先に述べたEトンネルの特徴について、坑口付近のTCIが高くなる点があるように、D、Fトンネルにおいても片方の坑口付近で高い数値が見られたため、NATMのトンネルでは坑口付近にひびわれが進行する特徴を有する可能性があると考えられる。

(2) TCIの成分に関する特徴

図-13に各施工法のTCI成分（F11：縦断方向、F22：横断方向）別平均値と割合を示す。図-13から、矢板工法におけるF11とF22の割合は、平成18年と平成27年ともに約50%を示している。Aトンネルの特徴と同様にCトンネルも主にF22の経年変化が多いが、Bトンネルは主にF11の経年増加が多かった。つまり、矢板工法のトンネルでは縦断方向と横断方向のどちらにも卓越したひびわれが進行する可能性があると考えられる。対して、NATMにおけるF11の割合は、平成21年と平成26年ともにF11が約80%であり、縦断方向のひびわれがほとんどであることがわかる。また、Eトンネルの特徴と同様にD、Fトンネルにも天端付近に縦断方向のひびわれが現れていた。従来から言われているように、NATMでは天端付近に縦断方向のひびわれが確認されており⁹⁾、NATMの特徴といえる。

(3) ひびわれ幅に関する特徴

図-14に各施工法のTCI平均値に対するひびわれ幅分布を示す。図-14より、0.5mm、1mmの幅であるひびわれの割合について、矢板工法とNATMのどちらも約60%、約30%と同程度を示している。しかし、2mmの幅となると、矢板工法が2%に対してNATMが9%とNATMの方が若干多い。また、3mmの幅では、矢板工法のトンネ

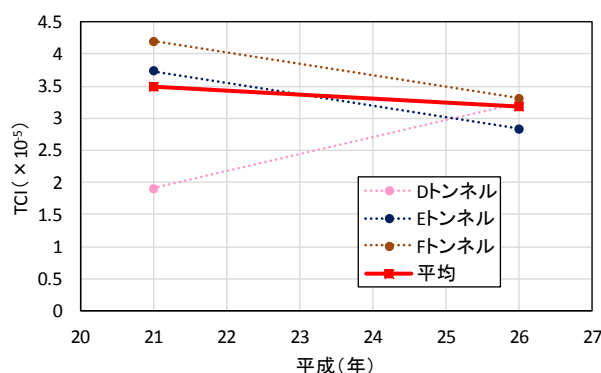


図-12 NATMによるトンネル別TCI平均値

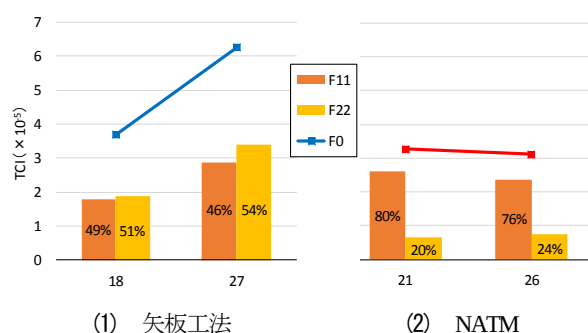


図-13 各施工法のTCI成分別平均値と割合
(各3トンネル平均値)

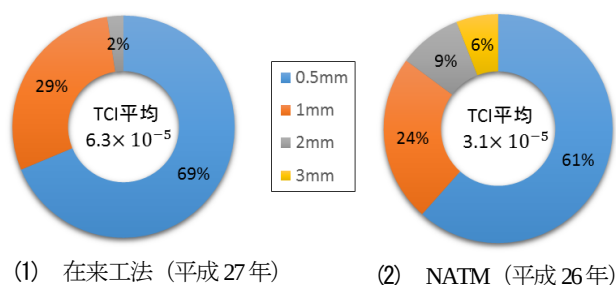


図-14 TCI総合値に対するひびわれ幅分布

ルではなくNATMで6%もあることがわかる。矢板工法のトンネル覆工は覆工自体はNATMの覆工と比較して厚いものの、外力の影響を受けやすい構造となっているため、ひびわれの進行が大きくTCI平均値はNATMよりも高い数値を示しているが、ひびわれ幅が大きいものではなく細かいひびわれが多いことがわかる。一方で、NATMのトンネルは2mm以上の幅をもつひびわれの割合が比較的高い。NATMにおける覆工コンクリートに発生しているひびわれの発生メカニズムは、覆工表面の乾燥・放熱の影響による内部拘束によるものだと考えられている⁹⁾。また、既往文献⁶⁾では、明らかに掘削工法の違いによる力学的挙動の違いが、ひびわれ発生の一つの原因になっている、とされており、NATMのトンネルの方が2mm以上の幅をもつひびわれが多く発生しているのは

NATM特有の発生状況といえる。

(4) 供用年数に関する特徴

NATMは1970年代後半から日本に導入されており、これまで主流であった矢板工法よりもトンネルの建設年代は若い。そのため、NATMのトンネルの供用年数は矢板工法よりも短い。図-15に供用年数に対する施工別TCI平均値と指数近似を示す。ここで、図-15は、本研究で対象とした6本のトンネルの他に、1回だけ点検が実施されたトンネル16本分のデータ（NATM：11本、矢板工法：5本）より算出したTCIを追記している。図に示すように、矢板工法は、供用年数が47年の時点でTCIが高い数値を示すトンネルが多くあり、供用年数が増えるにつれてTCIも高くなっている。一方、NATMは、矢板工法に比べてTCIは低い数値を示しているものの、供用年数が10~20年と短い時点で、矢板工法の供用年数30~40年と同程度のTCI数値を示している。指数近似を見ても、NATMは矢板工法に比べ初期から高い数値を示しており、供用年数が23年のNATMは供用年数が47年の矢板工法と同程度の数値を示している。

以上から、供用年数の長い矢板工法に比べて、NATMは供用年数が短いものの、初期から高い数値を示していることがわかった。しかしながら、NATMの特徴として5.(2)で述べたように、NATMのトンネルでは天端付近にある縦断方向のひびわれが主であり、その部分を補修等の対策をすることでTCIは低くなると考えられる。また、供用年数が増えるにつれてNATMの指数近似も上がっているが、供用年数が18年と23年のTCIは指数近似よりも低く、5.(1)で述べたように、NATMは経年的に減少する傾向が見られるため、図-15の指数近似のように必ずしも上がっていくとは限らず、今後もトンネル数を増やして検討を行う必要がある。

6. まとめ

矢板工法やNATMといった施工時期や施工法による構造の違いによって、覆工の変状やその進行具合は異なる可能性があるため、本研究では、TCIを用いて矢板工法とNATMの変状の違いや特徴を把握することを目的として分析を行った。矢板工法とNATMのそれぞれ3本ずつで計6本のトンネルに対する結果は以下のとおりである。

- (1) TCIの経年変化に関して、矢板工法のトンネルはTCIが比較的高く、経年的に増加しておりひびわれが進行している。対して、NATMはTCIが比較的低く、経年的に減少する傾向が見られた。また、矢板工法は経年変化が大きく異なる区間がいくつか見られ、NATMは一方の坑口付近でTCIが高くなる特徴が見

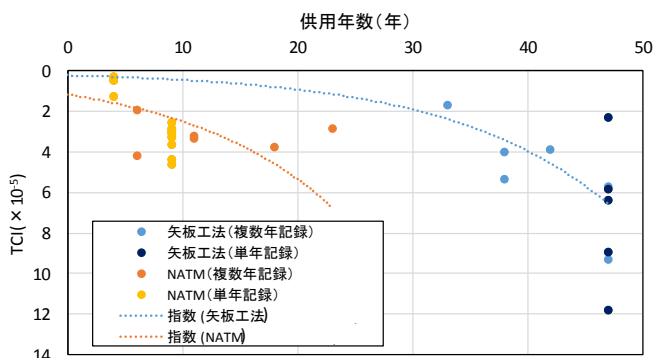


図-15 供用年数に対するTCIと近似曲線

られた。

- (2) TCIの成分に関して、矢板工法のトンネルでは縦断方向と横断方向のどちらにも卓越したひびわれが進行しており、NATMは縦断方向のひびわれがほとんどである。また、NATMの縦断方向のひびわれは天端付近に進行しているものが主であった。
- (3) ひびわれ幅に関して、矢板工法のトンネルは幅が2mm以上の大きいひびわれはあまりなく細かいひびわれが多い。NATMは2mm幅のひびわれが矢板工法に比べて多く、矢板工法には見られなかった3mm幅のひびわれも見られた。
- (4) 供用年数に関して、NATMは比較的供用年数が短いものの、初期からTCIが高い数値を示している。また、矢板工法とNATMの両方とも供用年数が増えるにつれてTCIが高くなっており、経年劣化状況を定量的に把握することができた。

以上のように、TCIを用いて矢板工法とNATMのひびわれに関する違いや特徴を把握することができた。しかしながら、NATMのトンネルでは天端付近にあるひびわれの幅が経年的に狭くなっており、TCIは経年的に減少している。その原因を追究することもふまえて、今後も対象トンネル数を増やして施工法の違いによる変状の特徴をより検討する必要がある。また、詳細点検Aの課題に関して、本研究と今後の研究による施工法の違いによる変状の違いを活用して取り組む必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路トンネル定期点検要領，2014.6.
- 2) 重田佳幸，飛田敏行，亀村勝美，進士正人，吉武勇，中川浩二：ひびわ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.
- 3) 中島彰吾，濱砂宏，水野準也，森本真吾，進士正人：TCIによるトンネル覆工の経年変化の定量的な把握，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集，Vol.70，VI-172，2015.
- 4) 土木学会：トンネルの変状メカニズム，pp.52-61，土木学会，2004

- 5) 高山博文, 増田康男, 仲山貴司, 植村義幸, NarentornYINGYONGRATTANAKUL, 朝倉俊弘: トンネル覆工コンクリートに生じるひびわれの発生メカニズムに関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.132-145, 2010.3
- 6) 福島啓一: わかりやすいトンネルの力学, pp.217-221, 株式会社土木工学社, 1994
- (2016. 8. 5 受付)

A STUDY ON THE COMPARISON OF TUNNEL LINING ASSESMENT BY TUNNEL CONSTRUCTION MESTHDS USING TUNNELCRACK INDEX

Shogo NAKASHIMA, Shinobu KAISE, Shingo MORIMOTO and Masato SHINJI

East, Central and West Nippon Expressway Company Limited performs same inspection procedures of tunnel lining on expressways tunnel in Japan. The inspection procedure of NEXCO has based TCI. It was proposed as quantitative evaluation method of cracks on tunnel lining. However, it has a possibility that the inspection procedure have a different way by the difference of thickness of tunnel lining by construction method, construction age and the past inspection results. This study shows the difference and the characteristics of the aging by tunnel construction methos such as the conventional tunnel construction method and NATM.