

TCIを用いた道路トンネル覆工の ひび割れ発生要因と進行性に関する研究

相緒 春菜¹・中村 剛²・山田 賢³・森本 真吾⁴・林 久資⁵・進士 正人⁶

¹学生会員 山口大学大学院 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:i001ve@yamaguchi-u.ac.jp

²山口県 道路整備課 (〒753-8501 山口県山口市滝町1番1号)
E-mail:nakamura.takashi.02@pref.yamaguchi.lg.jp

³山口県 道路整備課 (〒753-8501 山口県山口市滝町1番1号)
E-mail:yamada.satoshi@pref.yamaguchi.lg.jp

⁴正会員 ドボクリエイト株式会社 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail:charlie@dobocreate.jp

⁵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:hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

⁶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

我が国の土木構造物は高度経済成長期に集中的に整備されたため、今後急激な高齢化の進行が懸念されている。そのため、土木構造物に応じた健全度評価を行い、判定結果に基づいてメンテナンス重要度を判定する手法の開発が急務である。道路トンネルの覆工においては様々な健全度評価方法の提案がなされている。その中の一つに、重田らが提案したひび割れ指数Tunnel-lining Crack Index (TCI)があり、これにより覆工に発生したひび割れを定量的に評価できる可能性を見出している。そこで筆者らは、このTCIを山口県が管理する複数の既設道路トンネルに適用することで、各トンネルのひび割れ発生状況を把握し、特徴的なひび割れ発生箇所についてはその要因を推察した。さらに、TCIの経年変化を追うことで次に点検を実施すべきトンネルを決定する優先度判定手法の検討を試みた。

Key Words : Tunnel-lining Crack Index, crack map, maintenance priority, inspection

1. はじめに

山口県が管理する道路トンネルの多くは1965年以降に建設されているため、全トンネルの約1割が供用開始後50年経過しており、今後その割合は急激に増加する¹⁾。そのため、維持管理面においてはこれまでの事後保全型から予防保全型への転換が必要とされている。また、2014年に道路トンネルの定期点検は5年に1度の実施が義務付けられた²⁾。このため、山口県では129本のトンネルにおいて1回目の点検が完了し、2回目も順次実施されている³⁾。今後、供用年数が50年を超えるトンネルが増加していく中で、このような数のトンネルの定期点検を繰り返し実施していくためには、維持管理における効率性および経済性が重要視される。しかしながら、従来のトンネル覆工の健全度評価方法は点検技術者の経験に基づ

く定性的な指標が含まれる問題点を有し、また、このような点検技術者も将来的に不足することが明らかである。さらに、これまで同一トンネルにおける点検結果の比較は参考程度とされてきたが、複数のトンネル間の相互比較は難しく、点検や修繕が優先されるトンネルの決定を裏付ける定量的なデータが不足している。

そこで本論文は、トンネル覆工の健全度評価をより定量的に行うために、重田ら³⁾が提案するひび割れ指数(以下、TCI)を山口県が管理する計10本のトンネルに適用し、TCIの経年変化に伴うひび割れの進行性とひび割れ発生要因の分析を行った。そして、その結果から今後のトンネル維持管理効率化のための点検優先度判定を試みた。

2. TCIの概要

本研究では、岩盤工学の分野において岩盤中のひび割れの密度や方向、幅が岩盤物性（変形係数・透水係数）に大きく影響することから、これらの影響を総括的に定量化できる指標としてクラックテンソルの考えに基づいて提案されているひび割れ指数 TCI（Tunnel-lining Crack Index）を用いた。TCI の基礎式を式(1)に示す。この TCI はひび割れの幅、長さ、方向から評価尺度を数値化するため、点検技術者の主観に依存することなく、定量的な評価ができる特徴を有している。

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

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：ひび割れの本数

$l^{(k)}$ ：ひび割れkの長さ

$b^{(k)}$ ：ひび割れkの幅

$\theta_i^{(k)}$ ：ひび割れkの法線ベクトルが x_i 軸となす角度

$\theta_j^{(k)}$ ：ひび割れkの法線ベクトルが x_j 軸となす角度

α ：ひび割れ幅の重み付けに関する係数

β ：ひび割れ長さの重み付けに関する係数

式(1)により算出される TCI には横断方向成分 F_{11} と縦断方向成分 F_{22} があり、覆工コンクリートの劣化の指標 F_0 はテンソルの一次不変量として縦断・横断方向成分の和($F_0=F_{11}+F_{22}$)として表され、本研究ではこの F_0 を TCI の評価値として用いた。この数値が大きいかほどひび割れ量が多く、覆工の健全度は相対的に低いことを意味する。ここで、式(1)の α 、 β は便宜上 1.0 と仮定した。

3. 対象トンネルの概要およびTCI算出結果

本研究では、山口県が管理する道路トンネルのうち、過去2回以上の点検記録があるトンネル計10本を対象とした。各トンネルの概要を表-1に示す。これらのトンネルにおいて、定期点検時に作成される覆工展開図をもとにそれぞれTCIを算出した。その中で特徴的な経年変化を示したトンネルA、B、C、FのTCI算出結果を示すとともに、局所的なひび割れ発生箇所についてはその要因の推察を行った。

表-1 対象トンネルの概要

トンネル	延長 (m)	スパン	建設 (年)	工法	点検年
A	358	40	1971	在来	1999,2008 2016
B	273	29	1971		1997,2008 2016
C	318	58	1958		2011,2017
D	178	44	1958		2010,2017
E	45	6	1958		2011,2016
F	166	17	1978		2012,2017
G	600	67	1973		2011,2016
H	334	33	2001	NATM	2011,2016
I	708	68	2008		2011,2016
J	587	58	1991		2012,2016

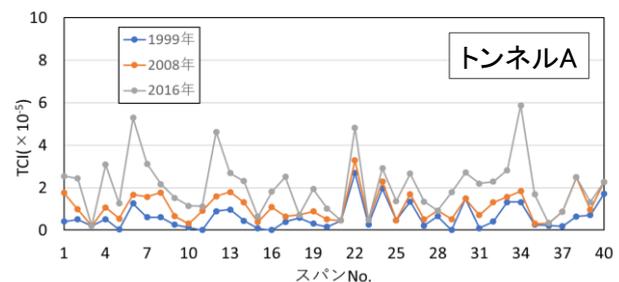


図-1 トンネル A 年別 TCI 算出結果

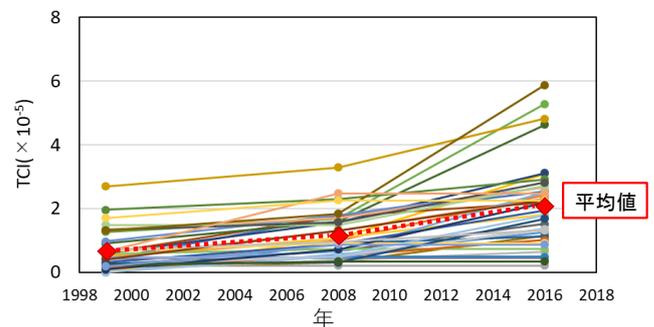


図-2 トンネル A スパン別 TCI 経年変化傾向

(1) トンネルA

トンネルAのスパン毎のTCI算出結果を図-1に、また全40スパンそれぞれの経年変化を図-2に示す。トンネルAはスパン毎にばらつきがあるものの、平均値を見てもわかるようにTCIは全体的に増加傾向にあり、ひび割れが進行しているといえる。特に、スパンNo.6, 12, 34については、第2回点検から第3回点検にかけてTCIの増加量が大きく、ひび割れの進行が加速していると考えられる。一方、スパンNo.3, 18, 23についてはTCIの増減が認められず、ひび割れ状況の変化が小さいと判断できる。トンネルAは、今後もひび割れの進行が予測されることから、計画的な対策が必要であると考えられる。

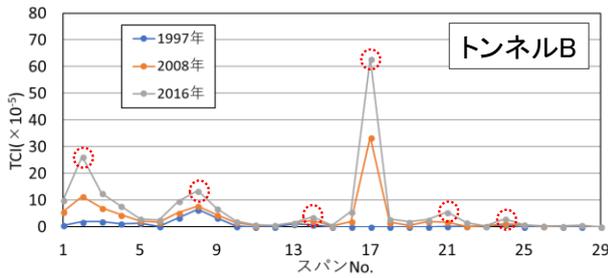


図-3 トンネルB 年別 TCI 算出結果

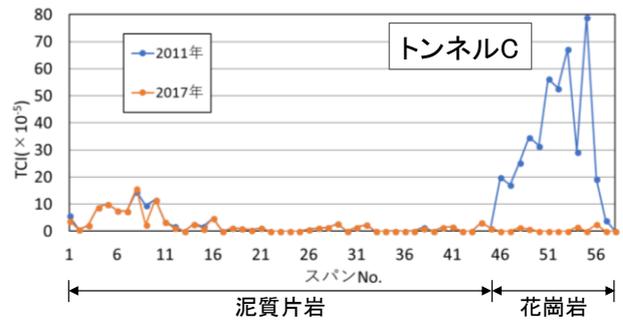


図-6 トンネルC 年別 TCI 算出結果

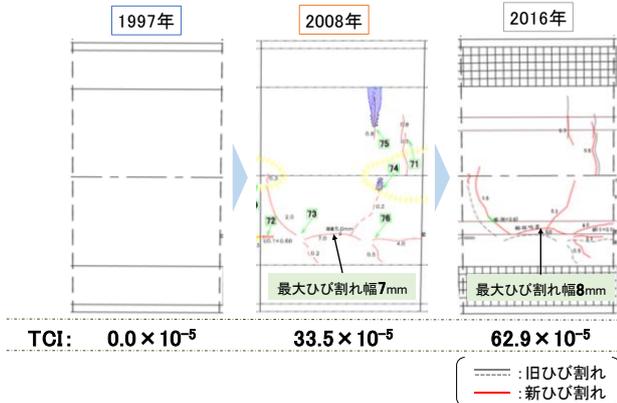


図-4 トンネルB スパンNo.17における覆工展開図と TCI 推移

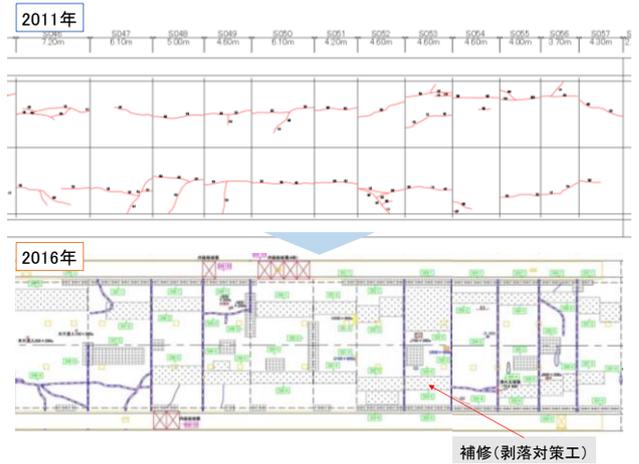


図-7 トンネルC スパンNo.46~57における覆工展開図

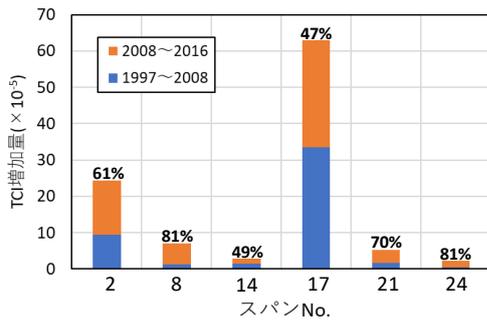


図-5 抽出スパンにおける TCI の増加量

(2) トンネルB

トンネルBのスパン毎のTCI算出結果を図-3に示す。トンネルBはスパンNo.17におけるTCIの増加が顕著に認められた。図-4にスパンNo.17の過去3回の点検時に作成された覆工展開図を示す。1997年実施の初回点検ではひび割れは見受けられないが、2008年実施の第2回点検では最大で幅7mmのひび割れが報告されている。さらに2016年実施の第3回点検では新たに幅8mmのひび割れが確認されたこと、かつ従来からのひび割れの幅が増大したことから、TCIの増加が顕著であったと考えられる。トンネルB付近の地質は堅硬緻密な泥質や珪質片状ホルンフェルスであり地山強度としては問題ないと考えられる。しかし、スパンNo.17地点は土被りが約55mと本トンネル最大であり、付近に断層が存在することから、TCIの増加が顕著であった要因と推察する。また、トンネルBにおいてはスパンNo.17以外にも図-3の赤丸の破線で囲んだスパンでは、点検を重ねる毎にTCIの増

加が認められ、グラフが山なりになっていることが読み取れる。これらのスパンにおけるTCIの増加量の比較を図-5に示す。図-5は第2回~3回点検時(2008~2016)におけるTCIの増加量の全体の増加量に対する割合(%)を示しており、その数値が大きいほどひび割れの進行が加速傾向にあることを示す。この図より、トンネルBにおいてはスパンNo.17だけでなく、抽出した他のスパンもひび割れが急速に進行していると判断できることから、スパンNo.17と同様に早急な対策が必要であると考えられる。

(3) トンネルC

トンネルCのスパン毎のTCI算出結果を図-6に示す。図-6ではトンネル中央部でひび割れがほとんど認められないが、2011年の点検時にはスパンNo.45を境にTCIが急に大きくなり、スパンNo.55では最高値の 79.1×10^{-5} となった。TCIが大きいスパンNo.46~57の2011年及び2016年点検時の覆工展開図を図-7に示す。この覆工展開図より、2011年時点ではトンネルアーチ部に縦断方向のひび割れが連なって発生していることが確認できるが、その後、2015年にスパンNo.46~57にかけて剥落対策工が実施され、保全点検要領に基づきひび割れはなくなったとみなしたため、2017年の第2回点検時にはTCIが減少した結果となった。また、2012年に実施されたトン

ネル本体補修設計時のコアボーリング結果によると、スパン No.45 を境に地質が泥質片岩から花崗岩に変化していることから、現段階ではその地質の変化が TCI に影響していると推察している。今後は、剥落対策工が施された箇所以外に着目し、仮に新たなひび割れの発生や進行性が確認される場合は、補修方法の見直しが必要であると判断できる。

(4) トンネルF

トンネルFのスパン毎のTCI算出結果を図-8に、また、2017年点検時におけるスパンNo.1～5の覆工展開図の一部を図-9に示す。トンネルFは、ほとんどのスパンにおいて初回点検から第2回点検にかけて大きなTCIの増加は認められなかった。このため、ひび割れの進行性は比較的低いと考えられる。しかし、図-9から覆工全体にひび割れが認められ、TCIの平均値は他の9トンネルが直近点検時において 2.76×10^5 であるのに対し、トンネルFでは 19.75×10^5 と大きな値になった。特に、坑口付近でひび割れが密集している箇所が認められるほか、スパンNo.5のように既に補修が実施されているスパンもあり、トンネル全体でひび割れが多発していることがわかる。以上のことより、トンネルFは供用年数30年を超える比較的古いトンネルであり、トンネルB、Cのように局所的なひび割れの発生及び進行ではないことから何らかの外力の作用等ではなく、ひび割れの発生要因は覆工の材料劣化によるものと推察できる。

同様に、他の7トンネルにおいてもそれぞれTCIの経年変化による分析を行った。例に挙げたトンネルA、B、C、Fのように、複数年分の点検記録によるTCIの経年変化を比較することで、1回の点検記録では把握できないひび割れの進行性や発生要因の推察が可能になると考えられるとともに、覆工それぞれの進行性の把握の重要性が改めて明らかとなった。

4. ひび割れ進行性の分析

(1) 平均TCIの経年変化による考察

図-10に本論文で対象とした全10トンネルにおける1スパンあたりの平均TCIの経年変化を示す。この図より、TCIが増加しているトンネルA、B、E、Gは覆工の健全性が低下傾向にあることがわかる。また、NATMで施工されているトンネルH、I、JのTCIはほぼ横ばいに推移し、現段階では健全性の低下は認められないが、在来工法と覆工が担う役割が異なることから、供用年数の増加に伴ってTCIがどのように推移していくのかを今後の定期点検結果から確認する必要があると考える。さらに、供用年数が50年を超える3トンネルのうち、トンネル

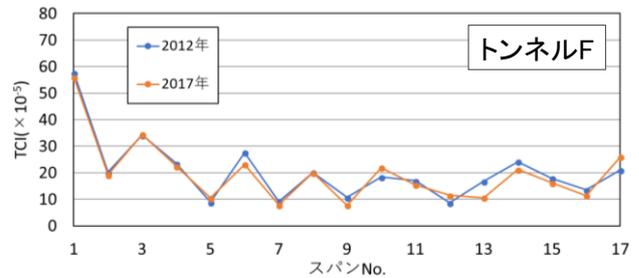


図-8 トンネルF年別 TCI 算出結果

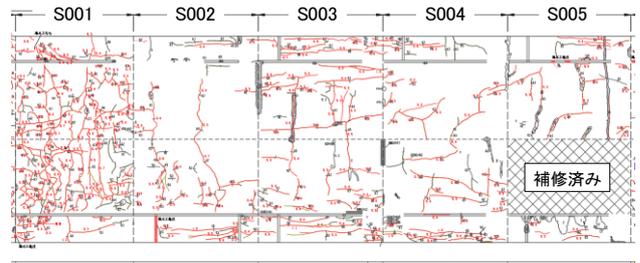


図-9 トンネルFスパン No.1～5における覆工展開図 (2017年)

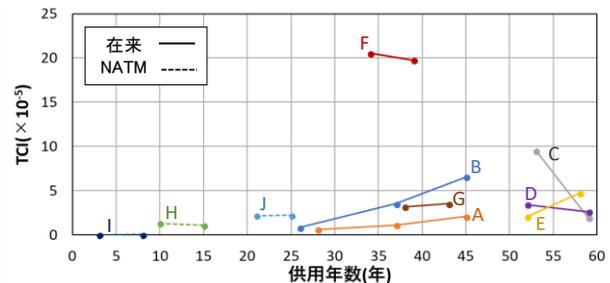


図-10 対象トンネルの平均 TCI 経年変化

C、D は既に一部で補修工事が実施されているが、トンネルEでは補修記録がなく TCIが増加傾向を示すことから、トンネルEは今後特に注意して点検すべきトンネルであると考えられる。しかし、図-10に示す平均推移だけでは図-3に示すトンネルBのスパンNo.17のようなTCIの急増が不明瞭になってしまうことが懸念されるため、次項ではさらに着眼点を変えることで考察を行った。

(2) ひび割れ進行部とひび割れ量に着目した点検優先度判定

10トンネルそれぞれを分析すると、トンネルによってひび割れが全域的に、また局所的に進行している場合がある。本論文における全域性とはトンネル全体で、また局所性とは特定のスパンにおいて著しくひび割れが進行している場合を意味する。こういった詳細なひび割れの進行状況を図-10に示すTCIの平均推移のみで把握するのは困難である。また、トンネルFのような進行性はあまり見られないがひび割れ量が多いといった特徴を有するトンネルもともに把握したい。そこで、図-11にトンネルの全域的な進行性を示すと考えられるTCI平均年間増

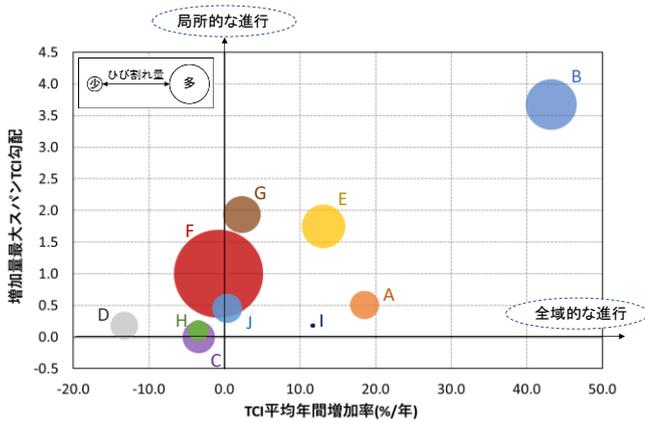


図-11 点検優先度判定

加率と、局所的な進行性を示すと考えられる増加量最大スパンのTCI勾配、さらにひび割れ量を示す直近点検時におけるスパン平均TCIの3項目による散布図を示す。ここで、増加量最大スパンにおいては初回点検時のTCIに0が含まれる場合があり、増加率の計算ができないケースがあったため、進行性を示す他の尺度としてTCI勾配を採用している。平均年間増加率は図-10における各トンネルの初回点検時から第2回もしくは3回点検時までのTCI増加率を点検間隔年数で除した値である。ここで増加率を用いたのはTCIの増加量に着目するためである。例えば、図-10のトンネルB、Eの勾配はそれぞれ0.379、0.375とほとんど差はないが、増加量はトンネルBの方が大きいため、年間増加率を求めるとそれぞれ43.2%、13.1%と大きく異なる。さらに、ひび割れ量を示す直近点検時におけるスパン平均TCIはバブルの大きさを相対的に表し、バブルが大きいほどTCIが大きい、すなわちひび割れ量が多いことを意味する。

図-11において、右斜め上にプロットされるトンネルほど、ひび割れが全域的にも局所的にも進行しているため点検優先度は高くなると考えられ、対象とした10トンネルの中ではトンネルBの点検を最優先すべきであると判断できる。また、前述した考え方から同程度の点検優先度であると判断できるトンネルA、GにおいてトンネルAは全域的、トンネルGは局所的なひび割れの進行が見られる等といった特徴の違いを把握することができるが、たとえ局所的であっても著しい変状が見られる場合は、通行車両や歩行者の安全性を第一に考慮し、早急な対策を行う必要があると考え、またひび割れ量もトンネルGの方が多いため、トンネルAよりもトンネルGの方が優先度を高くすべきであると考える。

また、トンネルFは他のトンネルと比較してひび割れ量は多いが、進行性は低く慢性的な挙動を有することがわかる。一方、トンネルBのひび割れ量はトンネルFより少ないが、進行性は高いため急性的な挙動を有すると判断でき、点検が優先されると考えられる。このように進行性を重視すると、必ずしもひび割れ量が多いトンネ

ルほど点検優先度が高くなるとは限らないが、ひび割れが一部に多く集中すると剥落の危険性が高まるため、点検等で注意すべきトンネルであると考えられる。一方、トンネルC、D、H、I、Jはひび割れ進行性が低く、ひび割れ量も比較的少ないことから、他のトンネルA、B、E、F、Gと比べ点検を急ぐ必要はないと判断できる。

5. まとめ

本論文では、今後の維持管理の効率化とトンネル覆工の定量的な健全度評価を目的として、山口県が管理する10本の道路トンネルの点検結果である覆工展開図にTCIを適用し、その結果からひび割れ発生要因の推察とひび割れ進行性の分析を行い、さらにその分析結果から点検優先度判定を試みた。それにより得られた知見は以下の通りである。

- ① TCIの経年変化を追うことで、各トンネルのひび割れ発生状況とその進行性を定量的に把握し、同一のトンネルにおいてもスパン毎で様々な傾向を示すことがわかった。
- ② トンネルB、CではTCI急増スパンに着目し、土被りや断層、地質の変化をひび割れ発生要因の可能性として見出した。また、トンネルFではひび割れがトンネル全体に分布していることから、ひび割れ発生要因は一部に外力が作用している等ではなく、トンネル覆工の材料劣化によるものであると推察した。
- ③ ひび割れがトンネルの全域的に、また局所的に進行しているかに着目することで、より各トンネルのひび割れ進行性の特長を把握することができた。さらに、進行性に加えひび割れ量を考慮することによって、ひび割れが急性的であるか、慢性的であるか判断でき、それらのデータから点検優先度判定を行うことで、今後の維持管理の効率化につながると思われる。

今後は、引き続き他のトンネルにおいてもTCIを適用し、TCIの経年変化によるひび割れの進行性を分析していくとともに、1本のトンネルの中でも側壁や天端、打継目地部等、どの部分でひび割れが進行しているのかを把握するために、これまで1スパン毎に算出していたTCIを例えば天端から左右1mずつといったように分割して算出し、より詳細な点検優先度箇所を抽出できるよう、データ整理を行っていく。

参考文献

- 1) 山口県土木建築部道路整備課：山口県トンネル長寿命化修繕計画, pp.11-15, 2016
- 2) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領, pp.1-2, 2014
- 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性評価法, 土木学会論文集F, Vol.62 No.4, 628-632, 2006
- 4) 東日本・中日本・西日本高速道路(株)：保全点検要領構造物編, p.145, 2015

(2018. 8.10 受付)

THE STUDY ON CRACK OCCURRENCE FACTOR AND PROGRESSION FOR TUNNEL LINING BY USING TUNNEL LINING CRACK INDEX (TCI)

Haruna AIO, Takashi NAKAMURA, Satoshi YAMADA, Shingo MORIMOTO, Hisashi HAYASHI and Masato SHINJI

Many of the road tunnels managed by Yamaguchi prefecture in Japan were constructed after 1965, about 10% of all tunnels have been 50 years since the start of service. Along with the aging of such tunnels, the conversion from “post-maintenance type” to “preventive-maintenance type” has been reviewed on the maintenance and management aspect. Therefore, huge number of tunnels need to be carried out periodic inspection repeatedly with a limited budget in the future. However, the evaluation of the tunnel lining depends on the experience of the inspection engineer. In order to improve the efficiency of maintenance, a quantitative method for judging the health evaluation of tunnel lining is required.

In this study, Tunnel-lining Crack Index(TCI) by using the crack maps of multiple road tunnels was applied in Yamaguchi prefecture. From the aging change of TCI, the crack progression and priority of tunnel inspection were analyzed.