

定量的なトンネル覆工健全性評価に向けた TCIによる技術者の判定分析

桑田 大輝¹・林 久資²・藏重 聡志³・宮脇 猛弘⁴・進士 正人⁵

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 2-16-1)

E-mail:a016veu@yamaguchi-u.ac.jp

²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 2-16-1)

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

³山口県 土木建築部 宇部土木建築事務所 (〒759-2212 山口県美祢市大嶺町東分3449-5)

E-mail:kurashige.satoshi@pref.yamaguchi.lg.jp

⁴山口県 土木建築部 道路整備課 (〒753-8501 山口県山口市滝町1番1号)

E-mail:miyawaki.takehiro@pref.yamaguchi.lg.jp

⁵フェロー会員 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2-16-1)

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

我が国の道路トンネルは高度成長期に集中的に建設され、今後これらのトンネルの老朽化が一斉に進むことが懸念されている。トンネル健全性を確保するためには適切なメンテナンスが必要であり、そのために現在、トンネル覆工における様々な健全性評価手法が提案されている。そのうち既往研究で提案されているTunnel-lining Crack Index (TCI) は、覆工に生じたひび割れの幅、長さ、角度を数値化できるため、覆工の定量的健全性評価指標として注目されている。本研究では、TCIを用いることで健全性の定量的な判定指標を提案することを目的とし、技術者が覆工のひび割れを定性的に判定している対策区分と数量的な指標であるTCIとの比較分析を行ったうえで、現状の健全性判定に関する詳細な傾向を把握した。

Key Words : maintenance, inspection, Tunnel-lining Crack Index, evaluation category of cracks

1. はじめに

現在、道路トンネルの定期点検は、平成26年度の道路法の一部改正に伴って、5年に1回の頻度で実施することが義務付けられている¹⁾。その点検結果にもとづく対策区分の判定では、覆工コンクリート（以降、覆工と称す）1スパンに発生するひび割れ等の各変状に対して、その変状の誘因である外力、材質劣化、漏水等ごとに判定がなされている。この判定結果にもとづき、スパンごとにトンネル健全性を診断した上で、もっとも厳しい対策区分がそのトンネルの判定結果となる。そのため、対策区分の判定結果は、変状等が利用者に及ぼす影響を把握し、適切な措置を計画するための基盤になる。

しかし、健全性診断の基準は技術者の主観的かつ定性的な判定が中心であり、技術者の技術、経験による判定のばらつきが懸念されている。さらに、今後のわが国の少子高齢化による技術者不足を考慮す

ると、より技術者に依存しない定量的な判定基準が必要となる。そうした中、令和元年度までに道路トンネルの点検が一巡したことで、ほぼすべてのトンネルの点検結果が明らかになった。これまで単年の健全性把握しかできなかったが、今後は点検間の変状の進行性を把握できることから、より正確なトンネル健全性の把握が期待されている。

ここで、既往研究²⁾で提案されているTunnel-lining Crack Index（以降、TCIと称す）は覆工に生じたひび割れの幅、長さ、角度を数値化できる覆工の定量的健全性判定指標であるが、これまで技術者の技術、経験的な判定結果との比較・考察はほとんど行われていない。

そこで、本研究ではTCIと技術者による定性的な判定結果を比較することで、現状の技術者のトンネル健全性判定に関する詳細な傾向を把握し、TCIによる定量的な判定指標の実現を目的としている。具体的には、判定結果とTCIおよびTCI増加量との比較

表-1 本体内における対策区分

対策区分	変状の状態
I	利用者に対して影響が及ぶ可能性がないため、措置を必要としない状態
II	IIb 将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、監視を必要とする状態
	IIa 将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的な対策を必要とする状態
III	早晚、利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、早期に措置を講じる必要がある状態
IV	利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、緊急に対策を講じる必要がある状態

表-2 圧ざ、ひび割れに対する対策区分

対策区分	変状の状態
I	ひび割れが生じてない、または生じていても軽微で、措置を必要としない状態
II	IIb ひび割れがあり、その進行が認められないが、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監視を必要とする状態
	IIa ひび割れがあり、その進行が認められ、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的な対策を必要とする状態
III	ひび割れが密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が低下しているため、早期に措置を講じる必要がある状態
IV	ひび割れが大きく密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が著しく低下している、または圧ざがあり、緊急に対策を講じる必要がある状態

分析、ならびに判定結果とひび割れの幅、長さの増大との関係性を検討した。さらに従来のTCIによる健全性評価方法では、考慮できない顕著なひび割れを適切に評価することを目的に、ひび割れあたりのTCIを算出し判定結果との比較を行うことで手法の妥当性を検討した。

2. 分析対象データの概要

(1) 対策区分の判定の概要

現在、トンネルの健全性を評価するにあたって、利用者に及ぼす影響や措置の必要性の観点からトンネルに発生する詳細な変状状態の把握を行う対策区分の判定³⁾がなされている。「本体内における対策区分の判定」はトンネルに発生する変状である外力、材質劣化、漏水などに関する項目を集計した対策区分であり、表-1にもとづいて5段階で評価されている。このうち覆工に生じるひび割れに関する判定は、「外力による変状に対する対策区分の判定」における「圧ざ、ひび割れに対する対策区分の判定」によって行われている。そのうち後者の詳細を表-2に示す。本研究においての、覆工健全性の定量化に向けた分析は、TCIを援用したものである。TCIは後述するよう

表-3 分析対象トンネルの概要

トンネル	全長 (m)	スパン (個)	建設年 (年)	点検年 (年)
A	670	67	1973	2011, 2017
B	178	44	1958	2005, 2017
C	318	58	1958	2005, 2017
D	166	17	1978	2013, 2017
E	273	29	1971	2008, 2016
F	358	40	1971	2008, 2016
G	708	68	2008	2011, 2016
H	334	33	2001	2011, 2016
I	45	6	1958	2011, 2016
J	587	58	1991	2013, 2017
K	217	25	2002	2013, 2017
L	283	28	2003	2011, 2015
M	278	28	2003	2010, 2015
N	103	17	1969	2013, 2018
O	343	49	1968	2010, 2017
P	197	20	1983	2013, 2017
Q	355	35	1982	2013, 2017
R	350	35	1983	2011, 2017
S	190	19	1991	2013, 2017
T	1030	102	1991	2011, 2017
U	1159	107	1982	2011, 2017
V	416	40	2001	2011, 2018
W	78	12	1968	2013, 2018
X	435	48	1978	2013, 2017

に覆工に発生するひび割れに着目したものであるため、覆工におけるひび割れの有無、進行性、密集度などを技術者の技術、経験により健全性を判定するために用いている表-2の対策区分による分析を行っていく。

(2) TCIの概要

本研究では、覆工に発生したひび割れの定量的評価手段として、岩盤のクラックテンソルの考えをもとに提案された覆工ひび割れ指数TCI²⁾を用いた。TCIの基礎式を式(1)に示す。このTCIは対象覆工面積内に存在するひび割れの幅、長さ、角度からひび割れの量を定量的に示すことができるため覆工の健全性指標となりうる。ただし、TCIによる覆工の健全性評価は相対的評価であり、現状ではTCIのみで覆工の健全性を評価することはできていない。

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

A：覆工コンクリートの面積

n：ひび割れの本数

$l^{(k)}$ ：ひび割れkの長さ

$t^{(k)}$ ：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

表-4 対策区分ごとのスパン数

対策区分	I	IIb	IIa	III	IV
スパン数	748	229	14	11	0

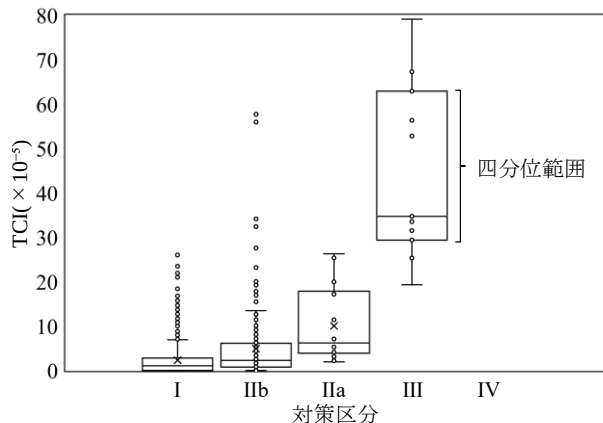


図-1 TCIと対策区分の関係

(3) 分析対象トンネル

分析対象トンネルは計24本のトンネルであり、分析対象データは、各トンネル2回分の点検結果である。各トンネルの概要を表-3に示す。ここで、本研究で分析したデータは点検回数2回分であるため、分析スパン数は1970スパンである。このうち山口県が管理するトンネルが22本、福岡県が管理するトンネルが2本である。

3. 対策区分とTCIとの関連分析

分析対象トンネルは表-3におけるA～Mトンネルである。対策区分ごとのスパン数を表-4に示す。ここで、本研究で用いるスパンごとの対策区分は、表-2に示す技術者が判定した「圧ぎ、ひび割れに対する対策区分（以降、対策区分と称す）」である。表-4より総数1002 (501×2) スパンに対して、対策区分IまたはIIbと判定されたスパンは977スパンであったことから、多くのスパンが対策区分IまたはIIbと判定され、対策区分が低い（健全性が低い）対策区分IIIまたはIVと判定されるスパンは比較的少ないことがわかった。また、図-1に分析対象トンネルのスパンごとのTCIと対策区分の関係を示す。ここでは、対策区分ごとのTCIのばらつきや密度を把握するために箱ひげ図を用いた。図-1から、対策区分が低下するほどTCIが増加していることから技術者の判定とTCIは相関関係にあるといえる。また、箱ひげ図の四分位範囲に着目すると対策区分が低下するほど、四分位範囲が広がり、TCIのばらつきは大きくなることもわかる。これは、表-2に示す技術者による判定の指標に着目すると、対策区分IからIIbにおいてはひび割れの有無によって技術者が対策区分を決定しているが、対策区分IIbからIIaにおいてはひび割れ進行性、つまりひび割れの経年的変化によって技術者が対策区分を決定していることが強く影響していると

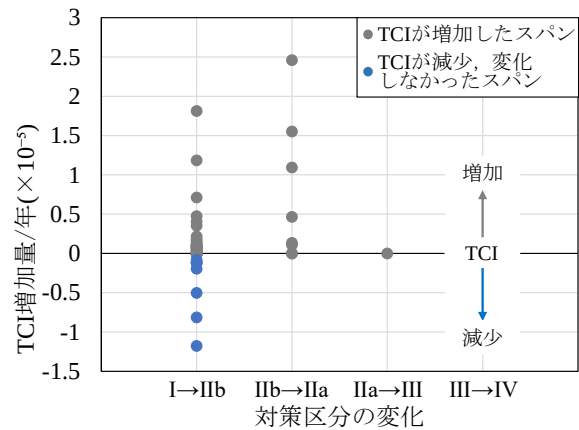


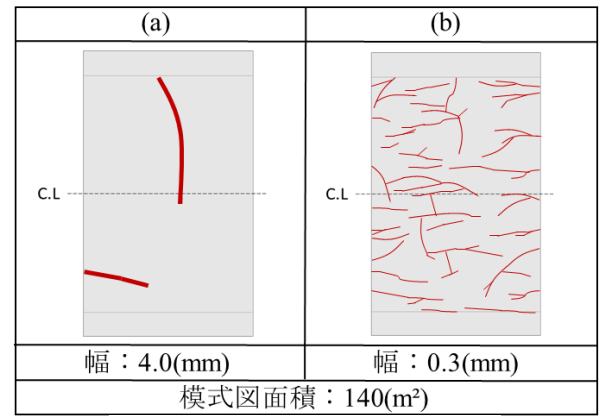
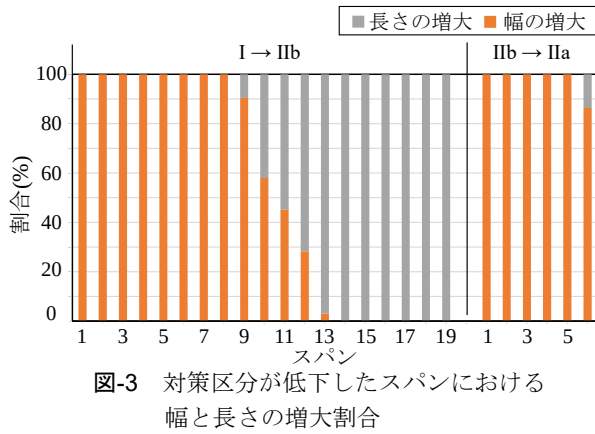
図-2 対策区分が低下したスパンにおける対策区分とTCI増加量

考えられる。このことから、ひび割れを定量的に評価したTCIのみで対策区分との比較を行うのではなく、ひび割れ進行性に注目する必要があると考えられる。さらには、対策区分III評価（健全性が低い）と判定されたスパンであってもTCIが20 (×10⁻⁵) 程度の比較的低いスパンが存在することから、現状TCIにより健全性が比較的低い一部のスパンを適切に評価できていない可能性があると考えられる。

4. 対策区分とTCI増加量の関連分析

(1) 対策区分とTCI増加量の関連分析結果

前章の結果からひび割れ進行性に注目する必要があると考え、本章では対策区分とTCI増加量との関連分析を行った。ここでTCI増加量とは過去2回分の点検記録から差分をとることでひび割れ状況の経年的変化、つまり劣化の進行性傾向を示すことができると想定している。対象トンネルは表-3におけるA～Xトンネルである。分析対象トンネルごとに、各スパンにおけるひび割れ進行性を示すTCI増加量を算出し、技術者が健全性を判定した対策区分と比較した。図-2に、定期点検1回目より2回目の対策区分が低下したスパン（64スパン）における対策区分とTCI増加量との関係を示す。なおここで示したTCI増加量は各トンネルごとに点検間隔が一定でないため、TCI増加量を点検間隔期間で除し、1年間あたりのTCI増加量に補正している。図-2より、対策区分がIからIIbに低下したスパンではTCI増加量が減少（ひび割れが減少）しているスパンが多く見られた。一方で、対策区分がIIbからIIaに低下したスパンでは、TCI増加量が減少したスパンが見られず、ほとんどのスパンでTCI増加量が増加（ひび割れが増加）した。これは、表-2に示す技術者判定の指標からわかるように、対策区分がIIbからIIaに低下するとき、ひび割れ進行性によって対策区分を決定していることがわかる。このことから、技術者判定とTCI増加量の傾向は一致していると判断できる。したがって、技術者が技術、経験により判定したひび割れ進行性はTCI



増加量によって適切に評価できる可能性が示唆された。

(2) 対策区分とひび割れの幅および長さの経年的な進行の関連分析

前節で技術者の判定とTCI増加量におけるひび割れ進行性に対する評価に親和性が認められることがわかった。一方で、トンネル覆工に生じるひび割れはTCI増加量を新しく発生したひび割れ、ひび割れ幅の増大、ひび割れ長さの増大、に起因するものの3種類に分離した場合、トンネル供用後、経年により幅の増大の寄与率が支配的になることが既往研究⁴⁾でわかっている。しかしながら既往研究では、経年に伴う覆工健全性の変化と技術者の判定との比較を行っていない。そこで、本研究では新しく発生したひび割れ、さらに幅の増大と長さの増大に分離し、技術者の判定との比較を行い、健全性が比較的低下したスパンにおけるひび割れ幅の増大が占める割合を調査した。

a) TCI増加量の分離方法

既往研究⁴⁾において提案された分離方法は、TCIの基礎式である式(1)を用いて考えると、TCIにおけるひび割れ幅の増分は $\Delta t^{(k)}$ 、ひび割れ長さの増分は $\Delta l^{(k)}$ と表され、それらの増分を考慮した場合が式(2)である。これをさらに展開すると式(3)となり、もともと存在していたひび割れ量を示す $t^{(k)}l^{(k)}$ に加え、 Δt と Δl をそれぞれ含む項になる。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n \left(t^{(k)} + \frac{\Delta t^{(k)}}{\text{幅の増大}} \right) \left(l^{(k)} + \frac{\Delta l^{(k)}}{\text{長さの増大}} \right) \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (2)$$

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n \left(\underbrace{t^{(k)}l^{(k)}}_{(i)} + \underbrace{t^{(k)}\Delta l^{(k)}}_{(ii)} + \underbrace{\Delta t^{(k)}l^{(k)}}_{(iii)} + \underbrace{\Delta t^{(k)}\Delta l^{(k)}}_{(iv)} \right) \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (3)$$

式(3)の F_{ij} から算出されたそれぞれの項の物理的な意味からそれにより算出されるTCIを評価すると、以下のように解釈できる。

- (i) 前回点検時のTCI
 - (ii) 前回点検時からひび割れの長さが今回増加したことに起因するTCI
 - (iii) 前回点検時からひび割れの幅が今回増加したことに起因するTCI
 - (iv) 前回点検時には確認されず、今回の点検で初めて確認された新しく発生したひび割れによるTCI
- b) 技術者による判定とひび割れの幅および長さの経年的な増大の関連分析結果

分析対象スパンは前章の図-2で示した対策区分が低下したスパンのうち、点検間で経年的にTCI増加量が増加した30スパンである。該当スパンは、対策区分がIからIIbに低下したスパンが24スパン、対策区分がIIbからIIaに低下したスパンが6スパンである。ここで、図-3に対策区分がIからIIbに低下したスパン、対策区分がIIbからIIaに低下したスパンにおける幅の増大に占めるTCIと長さの増大に占めるTCIを各スパンの全TCI増加量に対する割合で示す。ちなみに、点検間で新しく発生したひび割れに関しては省略している。この図における対策区分がIからIIbに低下したスパンでは長さの増大および幅の増大に占めるTCIの両方が見られるのに対して、対策区分がIIbからIIaに低下したスパンでは幅の増大に占めるTCIが大半であることが確認できた。このことから対策区分がIIbからIIaに低下する、つまり健全性が低下する場合、長さの増大に対して幅の増大が卓越していることがわかり、幅の増大が技術者判定に与える影響が大きいと推測できる。

5. 顕著なひび割れを考慮できる覆工健全性評価手法の提案

3章の対策区分とTCIとの関連分析において現状のTCIによる覆工健全性評価手法では比較的健全性が低い一部のスパンを適切に評価できていない可能性があることがわかった。これは従来のTCIによる健全性評価方法では、覆工に生じた複数のひび割れをスパンごとに一括評価するために、ひび割れの程度が顕著なひび割れを適切に評価できていないためであ

表-5 点検時の対策区分の目安例

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ						判定区分
		幅			長さ			
		5mm以上	3~5mm	3mm未満	10m以上	5~10m	5m未満	
覆工	断面内			○	○	○	○	I ~ IIa
			○				○	IIb , IIa
			○			○		III
			○		○			III
		○					○	IIb ~ III
		○				○		III
		○		○			IV	

と考えられる。例えば、図-4(a)に示すようなひび割れ密度は小さいものの、ひび割れの幅や長さが顕著なひび割れを含むスパンと図-4(b)のように各ひび割れは微細であるが、数多くひび割れが存在するスパンをTCIで評価すると両スパンのTCIは両者とも約30 ($\times 10^{-5}$) となりTCIにより健全性評価を行うとほぼ同評価になる。一方で、技術者が覆工健全性の判定を行う場合は、異なった評価が示される可能性が高い。実際に、道路トンネル維持管理便覧には表-5に示すように点検時の対策区分の目安例³⁾が示されており、ひび割れの幅や長さが顕著なひび割れを含むスパンにおいては健全性が低いと判断されると読み取れる。すなわち、図-4(a)に示すような顕著なひび割れを含むスパンでは健全性が比較的低いと判断できるが、TCIにおける評価では覆工全体のひび割れ量は同等であると評価され、実際の技術者評価との間に差異が生じると考えられる。これはTCIによる健全性評価では、顕著なひび割れを適切に評価できていないことが示唆されるため、対策が必要なひび割れを含むスパンを適切に評価できるTCI評価手法が必要である。そこで新たなTCI評価手法として、本研究ではTCIとひび割れあたりのTCIを算出し、対策区分と関連分析をすることで有用性の検討を行った。

(1) ひび割れあたりのTCI算出方法

ひび割れあたりのTCIはTCIをそのスパンに存在するひび割れの本数で除することで算出される。ここでひび割れあたりのTCIの式を(4)に示す。

$$F_{ij} = \frac{1}{nA} \sum_{k=1}^n (t^{(k)})(l^{(k)}) \cos \theta_i^{(k)} \cos \theta_j^{(k)} \quad (4)$$

(2) 対策区分ごとの従来のTCIとひび割れあたりのTCIの関連分析結果

分析対象トンネルは図-1で示したトンネルの各スパンであり、それらのトンネルにおけるひび割れあたりのTCIを算出した。図-5に対策区分ごとの従来のTCIとひび割れあたりのTCIの関係を示す。図-5より従来のTCIを用いた評価を行った場合（図-5縦軸）、比較的健康性の低い対策区分Ⅲのスパンがおおよそ20 ($\times 10^{-5}$) 以上となる一方で、健全性の高い対策区

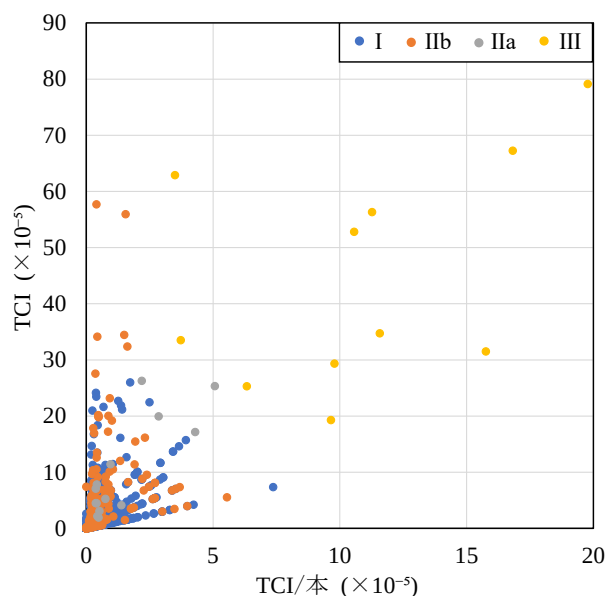


図-5 対策区分ごとの従来のTCIとひび割れあたりのTCIの関係

分ⅠやⅡbのプロットにおいても20 ($\times 10^{-5}$) を上回るスパンが多く見られる結果となった。次に、ひび割れあたりのTCIを考慮した場合（図-5横軸）、比較的健康性の低い対策区分Ⅲのスパンにおいては、多くのスパンにおいてひび割れあたりのTCIが5 ($\times 10^{-5}$) 以上となるが、対策区分ⅠやⅡbのプロットは該当するスパンがそれぞれ2スパンのみであり、ほぼ見られないことがわかった。これらより、ひび割れあたりのTCIを算出することで、早期措置段階の判定につながるようなひび割れに対する対策区分Ⅲのスパンを抽出できる可能性があると考えられる。

今後は引き続き、このほかのトンネルにおいてもひび割れあたりのTCIの算出を行い、結果の妥当性を検討する。

6. まとめ

本研究では、トンネル健全性の定量的な判定指標を提案することを目的とし、技術者が覆工のひび割れを定性的に判定している「圧ざ、ひび割れに対する対策区分の判定」による対策区分と数量的な指標であるTCIおよびTCI増加量との比較分析を行い、ならびに対策区分とひび割れの幅、長さの増大との関係性を検討した。さらに従来のTCIによる健全性評価方法では、考慮できない顕著なひび割れを適切に評価する手法の妥当性を検討した。これらより得られた知見は以下の通りである。

- ① 対策区分が低下し、覆工健全性が低下するほどTCIが増加し、TCIのばらつきも大きくなる。
- ② TCI増加量によりひび割れ進行性を適切に把握できる。また、ひび割れ進行性に対する技術者の判定とTCI増加量における評価は一致する。
- ③ 覆工の健全性が比較的低下しているスパンで

はひび割れの幅の増大が卓越する。健全性の判定の際にひび割れの進行性、さらにはひび割れ幅の進行性を考慮することで、より高度な判断が可能になることが示唆された。

- ④ ひび割れあたりのTCIを算出することで、早期措置段階の判定につながるようなひび割れに関する対策区分Ⅲ以上のスパンを抽出できる可能性が示唆された。

2014.

- 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.
- 3) 公益社団法人日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧[本体工編], p195-241, 2015.
- 4) 相緒春菜・中村剛・藏重聡志・林久資・進士正人: トンネル覆工の健全性評価実用化のためのTCI項目の寄与度分析に関する研究, トンネル工学報告集, 第29巻, 1-17, 2019.

参考文献

- 1) 国土交通省道路局: 道路トンネル定期点検要領, p6,

(2021. 8. 6 受付)

THE ANALYSIS OF JUDGEMENTS BY ENGINEERS USING TCI FOR THE QUANTIFICATION OF TUNNEL-LINING HEALTH ASSESSMENT CONCERNING OF THE CRACK

Hiroki KUMEDA, Hisashi HAYASHI, Satoshi KURASHIGE,
Takahiro MIYAWAKI and Masato SHINJI

The civil engineering structures in Japan were constructed intensively during the period of high economic growth and the aging of these structures will be progressing all at once in the future, so appropriate maintenance of each structure is necessary to ensure their safety. Especially, Various methods for assessment of health concerning of the crack occurring on tunnel lining are currently being proposed. Among other things, Tunnel-lining Crack Index(TCI) proposed in previous studies can quantify the width, length and angle of the cracks. So, it is getting a lot of attention as quantitative category for assessment of health. The purpose of this study is to propose a quantitative measure of tunnel integrity. In this study, a quantitative measure of tunnel integrity was compared with TCI, which is a quantitative measure of crack integrity.