

トンネル覆工健全性評価の定量化に向けた TCI とひび割れの判定区分に関する比較分析

条田 大輝¹・林 久資²・進士 正人³

¹学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒55-8611 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

我が国の土木構造物は高度成長期に集中的に建設され、今後これら土木構造物の高齢化が一斉に進むことから安全性を確保するために適切なメンテナンスが必要である。特に、道路トンネル覆工における健全性評価手法では様々な手法が現在提案されている。そのうち既往研究で提案されているTunnel-lining Crack Index(TCI)は、岩盤のクラックテンソルの考えをもとに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判定指標として注目されている。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断している判定区分と数量的な指標であるTCIならびにTCI増加量との比較分析を行い、また判定区分とひび割れの幅、長さの増大との関係性を検討した。

Key Words : Tunnel-lining Crack Index, category of cracks, progressive of the cracks,length of cracks

1. はじめに

平成26年度の道路法の一部改正に伴い、道路トンネルの定期点検は5年に1回の頻度で定期点検を実施することが義務付けられた¹⁾。その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スパンにおけるひび割れ等の各変状に対して、変状の誘因である外力、材質劣化、漏水ごとに判定が行われている。この判定結果にもとづき、スパンごとに健全性を診断した上で、もっとも厳しい判定区分がそのトンネルの判定結果となる。しかし、健全性診断の判定基準は技術者の主観的かつ定性的な判断が中心で、技術者の技術、経験による判断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3月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。これまで単体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。

一方で、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、本研究はトンネル健全性の定量的な判定指標にTCIを活用する方法を検討することを目的に、技術者が判断した判定区分とTCIおよびTCI増加量との相関分析を行った。そして、技術者の判定区分とひび割れの幅、長さの増大との関係性を検討した。

2. 分析対象データの概要

(1) 対策区分³⁾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、トンネルに発生する変状の把握を行う対策区分の判定がなさ

れている。「本体工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、漏水に関する項目を集計した判定区分であり、表-1にもとづいて評価されている。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、ひび割れに対する判定区分」によって行われている。詳細を表-2に示す。現状、技術者は表-2のように、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、経験により判断している。

(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、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

(3) 分析対象トンネル

分析対象トンネルは過去2回以上の点検記録がある計15本のトンネルである。各トンネルの概要を表-3に示す。ここで、A～Mトンネルのスパン数は501スパン、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1002スパンである。同様に、NトンネルおよびOトンネルのスパン数は91スパン、点検回数4回分を分析したため分析スパン数は364スパンである。よってA～Oトンネルの分析対象スパンは総数1366スパンである。

3. 判定区分とTCIとの関連分析

(1) 判定区分とTCIの比較

分析対象トンネルは表-3におけるA～Mトンネルである。各判定区分ごとのスパン数を表-4に示す。ここで用いるスパンごとの判定区分は、表-2に示す技術者が判定した「圧ざ、ひび割れに対する判定区分（以下、判定区分と称す）」である。表-4より総数1002（501×2）スパ

表-1 本体工における対策区分

判定区分	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に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、早期に対策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、ひび割れに対する判定区分

判定区分	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、 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に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、早期に対策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

表-3 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	2012, 2017
E	273	29	1971	2008, 2016
F	358	40	1971	2011, 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	2012, 2017
L	283	28	2003	2010, 2015
M	278	28	2003	2010, 2015
N	837	80	1981	2002, 2007, 2013, 2016
O	87	11	1984	2002, 2010, 2013, 2015

ンに対して、判定区分IまたはIIbと判断されたスパンは977スパンであったことから、多くのスパンが判定区分IまたはIIbと判断され、判定区分が低い（健全性が低い）スパンは少ないことがわかった。また、図-1に分析対象トンネルの各スパンごとのTCIと判定区分の関係を示す。ここでは、判定区分ごとの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、判定区分が低下するほどTCIが増加していることがわかる。また、箱ひげ図の四分位範囲に着目すると判定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。ここで、表-2に示す技術者による判定の指標に着目すると、判定区分IからIIbにおいてはひび割れの有無によって技術者が判定区分を決定しているが、判定区分IIbからIIaにおいてはひび割れ進行性、つまり覆工ひび割れの経年的変化によって技術者が判定区分を決定していることが読み取れる。このことから、ひび割れを定量的に評価したTCIのみで判定区分との比較を行うのではなく、ひび割れ進行性に着目する必要があることがわかった。

(2) 判定区分とTCI増加量の関連分析

分析対象トンネルは表-3におけるA～Mトンネルである。分析対象トンネルにおけるTCI増加量を算出し、技術者が判断した判定区分と比較した。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、つまり進行性を示すことができる。図-2に、定期点検1回目より2回目の判定区分が低下したスパン（19スパン）における判定区分とTCI増加量の関係を示す。図-2より判定区分がIからIIbに低下したスパンではTCI増加量が減少、つまりひび割れが減少し、進行性がみられないスパンの方が多く見られた。一方で、判定区分がIIbからIIaに低下したスパンでは、すべてのスパンでTCI増加量が増加、つまりひび割れが増加し、ひび割れの進行性がみられた。これは、表-2に示す技術者による判定指標に示すとおり、判定区分IIbからIIaにおいてはひび割れ進行性によって技術者が判定区分を決定していることが読み取れる。したがって、技術者の判断とTCI増加量の傾向は一致していることからTCI増加量によって、技術者が定性的に判断したひび割れ進行性を適切に評価できることがわかった。このことから、TCI増加量をさらに分析することで、より詳細なひび割れ進行性を把握するとともに判定区分との比較分析を試みた。

4. 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

表-4 判定区分ごとのスパン数

判定区分	I	IIb	IIa	III	IV
スパン数	748	229	14	11	0

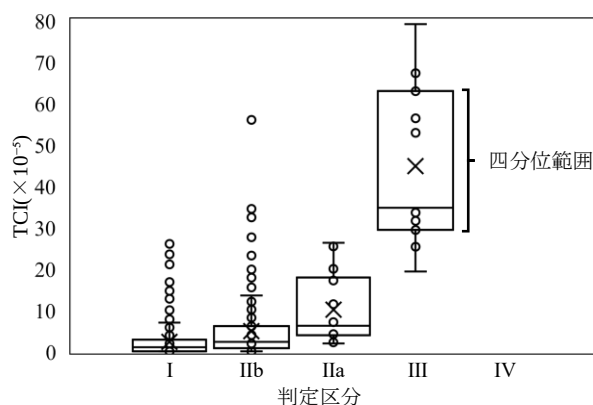


図-1 各スパンごとのTCIと判定区分

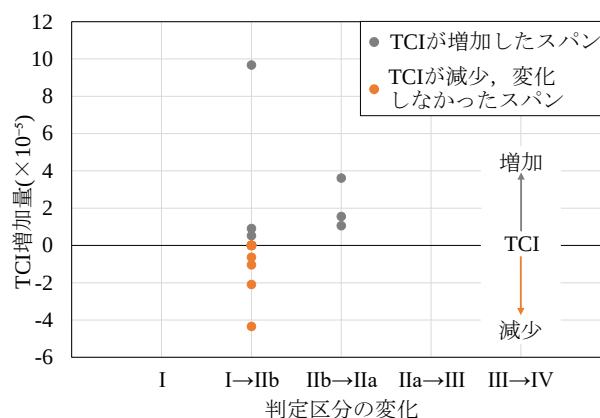


図-2 判定区分が低下したスパンにおける判定区分の変化とTCI増加量

前章で技術者の判定と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、経年に従って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断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、技術者の判断との比較を行い、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。

(1) 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

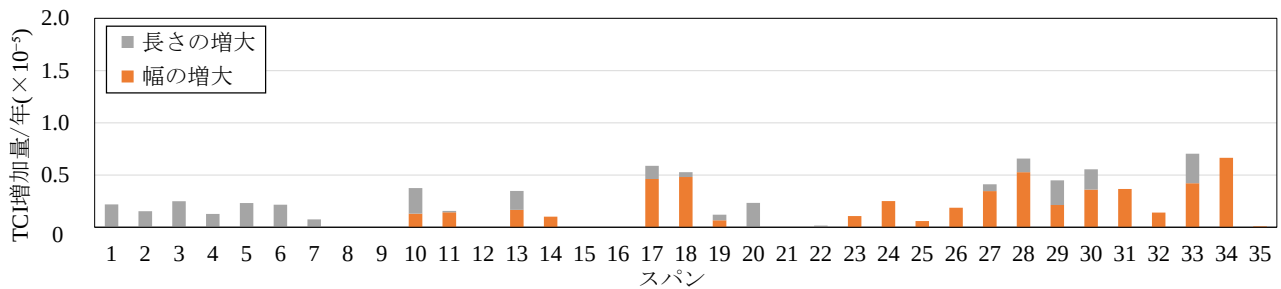


図-3 対策区分がIからIIに低下したスパンにおける TCI 増加量のうち幅と長さの増大(N トンネル)

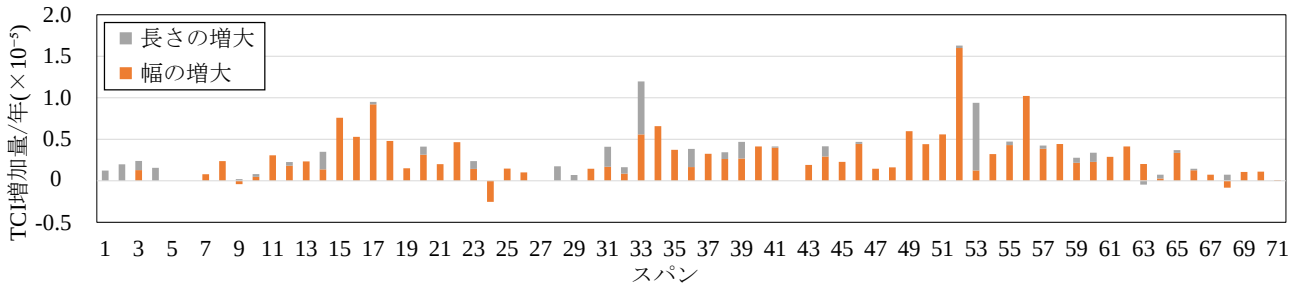


図-4 対策区分がIからIII、もしくはIIからIIIに低下したスパンにおける TCI 増加量のうち幅と長さの増大(N トンネル)

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。

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

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

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

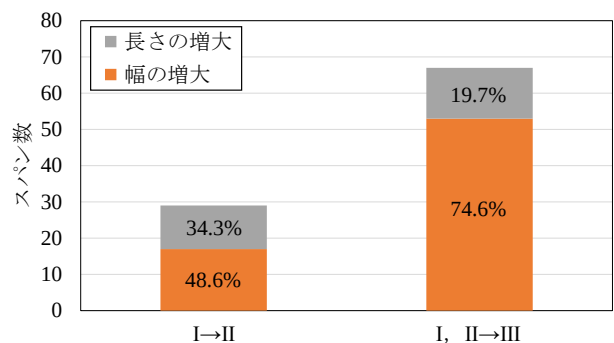


図-5 幅、長さの増大が卓越しているスパン数(N トンネル)

(2) 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

対象トンネルは、既往研究⁹⁾においてTCI増加量を整理した2つのトンネル、NトンネルおよびOトンネルである。ここで、NトンネルおよびOトンネルの概要は表-3の示した通りであり、分析対象スパンは364 (91×4) スパンである。ちなみに、これらのトンネルで示すスパンごとの判定区分は、前章での分析で用いた「圧さ、ひび割れに対する判定区分」ではなく、「本体工における対策区分(以下、対策区分と称す)」¹⁾、つまり外力、材質劣化、漏水に関する項目を集計した対策区分を用いた。また、トンネル点検結果はトンネルごとに点検間隔が一定でないため、TCI増加量を点検間隔で除し、1年間あたりのTCI増加量に補正した値を用いた。

まず、Nトンネルについて対策区分の変化とひび割れ幅が増大したスパン数および長さが増大したスパン数を検討した。図-3に対策区分がIからIIに低下したスパン

(35スパン)における幅が増大したスパン数、長さが増大したスパン数を、図-4に対策区分がⅠからⅢ、もしくはⅡからⅢに低下したスパン(71スパン)における幅が増大したスパン数、長さが増大したスパン数を棒グラフにまとめた。ちなみにこれらの図では、新しく発生したひび割れに関しては言及しない。対策区分がⅡに低下するとき(図-3)に比べて対策区分がⅢに低下するとき(図-4)の方が各スパンごとの幅と長さを合算したTCI増加量の値が比較的大きいことが読み取れる。また、図-3、図-4どちらのケースも増大したひび割れのうち幅の増大が卓越していることがわかった。次に、図-3、図-4で示した対策区分が低下したスパンにおいて長さの増大と幅の増大のどちらが卓越しているのかの比較を行い、それぞれのスパン数をまとめた。その結果を、図-5に示す。この図より、対策区分がⅡに低下するとき、対策区分がⅢに低下するときのどちらにおいても長さの増大に比べて幅の増大が卓越しているスパンが多いことが確認できる。特に、対策区分がⅢに低下する、つまり健全性が相対的に低下した場合、幅が増大するスパン数が53スパンに対して長さが増大したスパン数が14スパンであり、幅が増大したスパンの割合は74.6%となり、対策区分がⅡに低下するスパンでの48.6%と比較すると、幅の増大が卓越していることがわかる。これは、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ことから、健全性の評価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、より高度な評価が可能になることが示唆された。ただしここで示した割合は、対策区分が低下したスパンにおいて新しく発生したひび割れのみが確認されたスパンを含めた割合である。上述したとおり、過去の点検結果においてひび割れが認められていない箇所にひび割れが発生した場合、つまり新たなひび割れのみが発生したスパンを除いているため、割合の合計が100%になっていない。

一方、Oトンネルについても図-5と同様とりまとめを行った結果を図-6に示す。Oトンネルでは、対策区分がⅡに低下するときには幅の増大が、対策区分がⅢに低下するときには長さの増大が卓越するスパンが多く、健全性が比較的低下したスパンの方がひび割れの長さが進展していることがわかった。このような結果が得られた要因として、Oトンネルは全スパンにおいて覆工に鉄筋が配置されており、既存のひび割れがさらに進行する際、鉄筋により幅の進展が拘束されることによって生じた結果と考えられる。

これらより、覆工の健全性が比較的低下しているスパンの評価には、ひび割れの幅の増大を何らかの指標として考慮できる可能性があることがわかる。その上、覆工の中でも無筋スパンに限定される可能性があることがわかった。今後、これらの予想結果の信頼性を向上させる

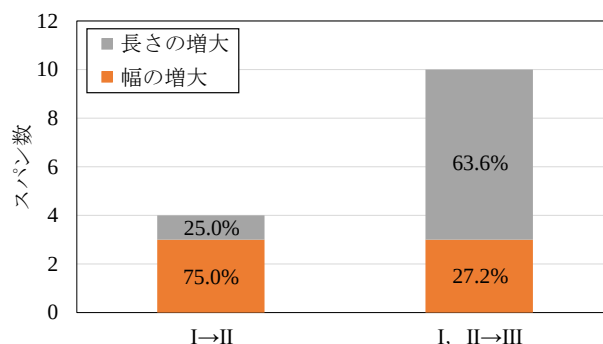


図-6 幅、長さの増大が卓越しているスパン数(Oトンネル)

ために、他のトンネルでの検証を行いたい。

5. 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量的に判定している判定区分と数量的な指標であるTCIならびにTCI増加量との比較分析を行い、また判定区分とひび割れの幅、長さの増大との関係性を検討した。それにより得られた知見は以下の通りである。

- ① 判定区分が低下し、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。健全性の判断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。

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，p6，2014。
- 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，I-17，2019。

(2020.8.7 受付)

A COMPARATIVE STUDY OF EVALUATION CATEGORY AND TCI FOR THE QUANTIFICATION OF TUNNEL-LINING HEALTH ASSESSMENT CONCERNING OF THE CRACK

Hiroki KUMEDA, Hisashi HAYASHI 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.