

トンネル覆工健全度評価のための TCIの適用性向上に関する研究

Examination of TCI for the quantitative integrity evaluation of Tunnel Lining

古賀克哉¹・安村成史²・重田佳幸³・進士正人⁴・中川浩二⁵

Katsuya Koga, Narihumu Yasumura, Yoshiyuki Shigeta,
Masato Shinji and Koji Nanagawa

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2-16-1)

E-mail:koga@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 修(工) 山口県土木建築部道路整備課 (〒755-8611 山口県山口市滝町1-1)

³正会員 修(工) (株)ダイヤコンサルタント (〒331-8638 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)
(元山口大学助手 工学部社会建設工学科)

⁴正会員 学博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁵正会員 工博 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

The most important function as tunnel structure is securing safe and comfortable space. In the present maintenance management, integrity evaluation of existing tunnel lining which can evaluate the existing tunnel quantitatively and objective is desired. In the past research, quantification of the degree of degradation of Tunnel lining concrete is tried from the information of the crack by TCI (Tunnel lining Crack Index) drawn based on the crack tensor theory used in the field of rock engineering.

This research reexamined about the applicability of TCI to integrity evaluation of tunnel lining by making examination data increase, and approaching about the subject in the conventional research, in order to raise practicality more.

Key Words : tunnel lining, crack, integrity evaluation, crack tensor, TCI

1. はじめに

トンネル構造として最も重要な機能は、安全かつ快適な空間を確保することである。しかし、供用中のトンネルの中には、覆工や路盤に変状が認められるトンネルが数多く存在し、中には危険な状態のものもあり、維持管理上の大きな問題となっている。現在、これらのトンネルを定量的・客観的に評価できる健全度判定法が望まれている。

これまで、著者らは覆工に発生したクラックの情報に着目し、岩盤力学の分野で用いられているクラックテンソル理論¹⁾に基づき導出したTCI(覆工クラック指数; Tunnel lining Crack Index)により、覆工コンクリート劣化度の定量化を試みている^{2)~}

⁴⁾。その結果、技術者の健全度評価との相関を示し、覆工健全度評価としての適用性を示している。

そこで本研究は、従来の研究で示された下記の3つの課題について、検討データを増加し、トンネル

覆工の健全度評価に対するTCIの適用性について再検討を行った。

- ①クラックの健全度評価に対応するTCIの範囲の決定
- ② TCIの方向成分による変状状態の詳細な表現方法
- ③ 維持管理計画への適用性

2. TCIの概要

効率的な維持管理を行うには、点検時のデータを用いて、覆工健全度の定量的・客観的評価を行う必要がある。

過去の研究⁴⁾においては、図-1に示すようなクラックデータ(延長、開口幅、密度、方向)に着目し、岩盤工学で用いられているクラックデータを定量化したクラックテンソル理論に基づき、式(1)に示

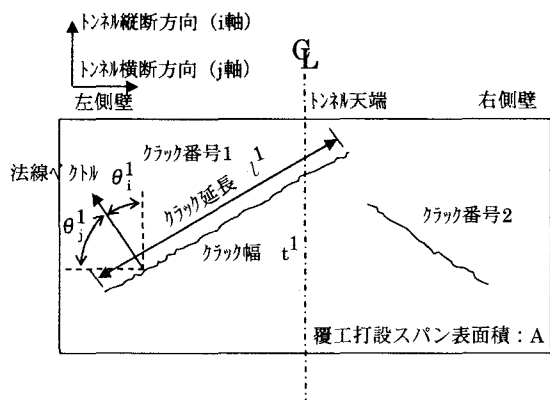


図-1 トンネル覆工におけるTCIの取り方

すTCIの算出式を導いている。クラックの幅と延長に関連する係数は、道路トンネルの各機関のマニュアル^{5~7)}におけるクラックの評価は、クラックの幅または密度を重要視していることより、これに着目してクラックの幅に2乗、延長に1/2乗の重み付けを行なっている。なお、F11値はクラックの横断成分、F22値はクラックの縦断成分を意味しており、 $F0=F11+F22$ は考慮している範囲内の劣化量の総和としてみなすことができる。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n (t^k)^2 (l^k)^{\frac{1}{2}} \cos \theta_i^k \cos \theta_j^k \quad (1)$$

ここで、

- A: 対象とする覆工の面積
- n: 対象とする覆工に存在するクラック本数
- t^k : k番目のクラック幅
- l^k : k番目のクラック延長
- θ_i^k : k番目のクラックの法線ベクトルがi軸となす角度
- θ_j^k : k番目のクラックの法線ベクトルがj軸となす角度

3. TCIの健全度判定に対する範囲の決定

技術者の健全度判定に対するTCIの値の範囲を決定する。これまで、技術者が健全度評価を行ったトンネル数2本、合計54スパンの情報をを用いて、比較を行っている。そこで、今回はトンネル数14本、合計926スパンのデータ数を増やし、TCIと技術者による健全度評価との比較を行った。その結果を図-2に示す。この図に示した箱型図は全データの上位・下位25%のデータを除去して示しており、箱内にデータの中央値を線で、全データの平均値を点で示している。これから、TCIの値が大きくなるにつれ

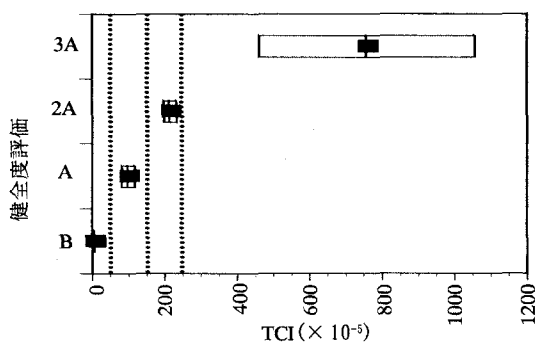


図-2 TCIと健全度評価の比較

表-1 各健全度評価に対応するTCIの範囲

健全度 ランク	維持管理 便覧	JH第3集	補修・補強 マニュアル	TCIの値 の範囲 ($\times 10^5$)
a	3A	I	AA	~250
b	2A	II	A1・A2	250~150
c	A	III	B・C	150~50
d	B	—	S	50~0

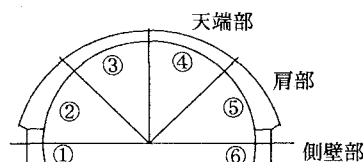
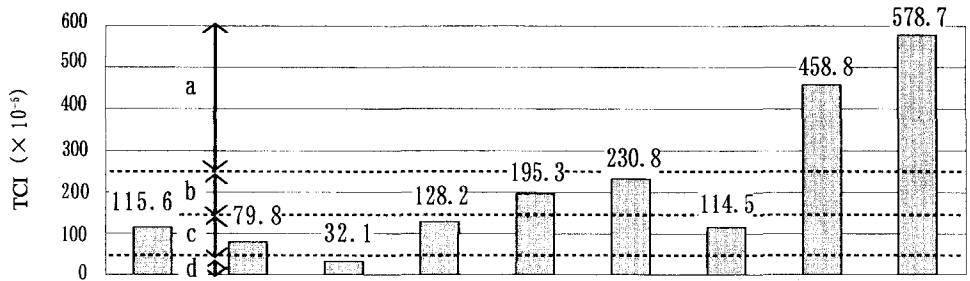


図-4 覆工断面図と各部位

で、健全度評価が高くなっていることがわかる。この結果から、健全度評価に対応するTCIの範囲を表-1のように決定した。なお、各機関において評価基準の区分が異なっているため、各判定内容を基にして評価区分の統一も合わせて行った。

次に、表-1に示すような基準にしたがい、TCIによる健全度評価を行い、現場技術者の結果との比較を図-3に示す。この結果、ほとんどのスパンにおいて、両者の評価区分が一致していることがわかる。また、第9スパンにおいては評価区分が大きく異なっているが、第3スパンではcランクに近い値を示している。このことから、TCIによりクラックに対する健全度を定量的・客観的に評価することが可能である。

また、Aトンネルにおいて図-4のように、トンネル縦断方向はスパンごとに、横断方向は6分割に区分したTCIの算出結果を図-3に示す。第8スパンと第9スパンを比較すると、第9スパンは各部位において比較的大きな値を示しているが、第8スパンにおいては肩部上りが 20.8×10^3 と最大の値、天端部上りにおいては 182.23×10^3 と2番目に大きな値を示している。このように、局所的にクラックが生じていることが



スパン数		1	2	3	4	5	6	7	8	9
健全度評価	技術者	c	c	c	c	b	b	b	a	b
	TCI	c	c	d	c	b	b	c	a	a
各部位における TCI	①側壁上り									
	②肩部上り									
	③天端部上り									
	④天端部下り									
	⑤肩部下り									
	⑥側壁下り									
	TCI (x 10^-5)	100 200	100 200	100 200	100 200	100 200	100 200	100 200	100 200	100 200
最大		97.72	30.76	14.33	57.35	141.65	85.49	66.33	220.84	158.79

図-3 Aトンネルの現場技術者とTCIによる健全度評価の比較と算出結果

見受けられる。このことから、技術者はこの箇所を考慮して、スパン全体の評価を行ったものと推測できる。

以上より、各部位においてTCIを求めることにより、クラックの変状程度を範囲を限定して定量的に表現することによって、客観的に健全度評価を行うことができると考えられる。

4. TCIの方向成分に関する検討

TCIの値(F0)は、横断方向成分(F11)と縦断方向成分(F22)の総和である。そのため、TCIを方向成分に分けてみると、クラックがどの方向に卓越しているのかを判断することが可能である。

既往の研究^{5~8)}においては、外因・内因によって生じるクラックの傾向が示されており、各変状原因から生じるクラックの傾向を整理すると表-2のようになる。なお、外因の名称は維持管理便覧の名称に統一した。その結果、クラックの部位ごとの方向性を検討することで、クラックの発生要因の推定が可能と考える。

そこで、実際に変状が生じたAトンネルのデータを用い、クラックの傾向をTCIで表現することにより変状原因の推定が可能であるか検討する。図-5に

表-2 各変状原因によるクラックの傾向

クラック		外因						内因		
部位	方向性	塑性圧	偏圧	突発性崩壊	地すべり	支持力不足	水圧	巻厚不足	温度・乾燥収縮	型枠による圧迫
天端	縦断		○	○	○			○		
	横断					○				
	斜め	○	○					○		
肩	縦断	○		○	○				○	
	横断			○						
	斜め	○	○							○
側壁	縦断	○			○	○	○			
	横断					○	○			○
	斜め	○	○							

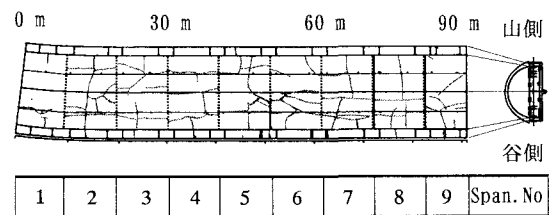


図-5 Aトンネルの覆工展開図

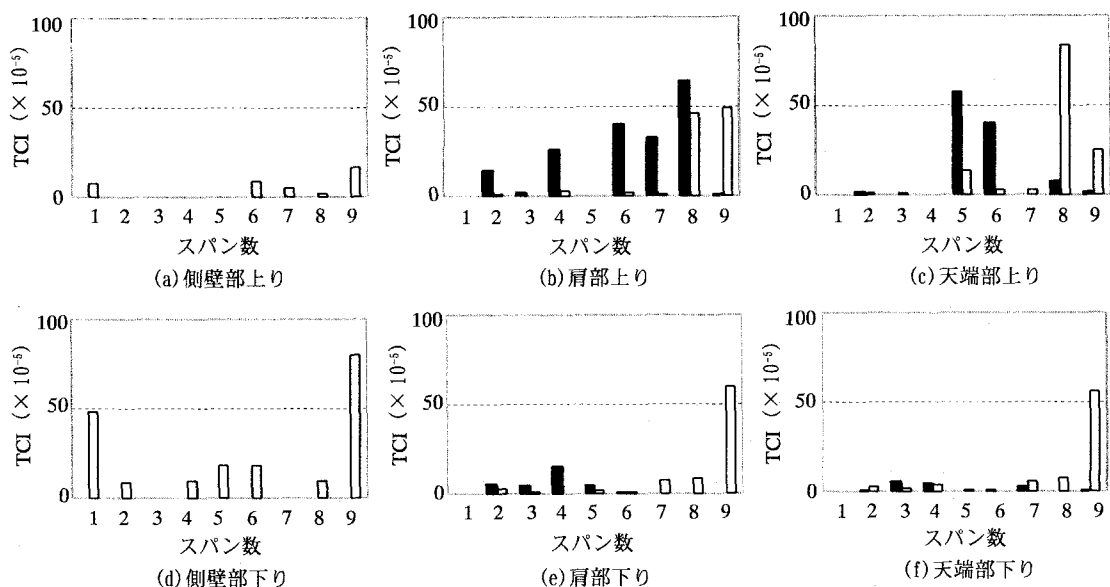


図-6 各部位・各スパンにおける TCI 算出結果

■ 横断 (F22) □ 横断 (F11)

Aトンネルの変状展開図を示す。このように、Aトンネルにおいては各方向にクラックが生じている。

Aトンネルは地すべり地帯に通過しており、詳細調査により、覆工背面の上り(山側)に外力が加わり、トンネル脚部の下り(谷側)に拘束が生じていることがわかった。これらの結果から、変状の主要因は地すべりによる外力であるとされている。

このようなAトンネルに対し、各部位・各スパンにおけるTCIの算出結果を図-6に示す。図-6(b)、(c)の両者に縦断方向(F22)のクラックが卓越しており、地すべりの外力によって生じるクラックと同様な傾向が得られている。また、反対路線である側壁部下りににおいては横断方向(F11)にクラックが卓越しており、支持力不足によって生じるクラックの傾向が得られている。

以上より、TCIの部位ごとの値の傾向を把握することで、変状原因を推定するためのひとつの指標として活用できることを示した。

さらに、第4～8スパンに加わる地すべりによる外力と第9スパンが坑口部であり拘束されているということを考慮すると、路線方向に対してのせん断方向の外力が加わっているため第8～9スパンにおいて横断方向のクラックが生じた可能性があることがわかる。このように、TCIによりクラックの傾向を表現することで様々な判断を行うことができると考えられる。

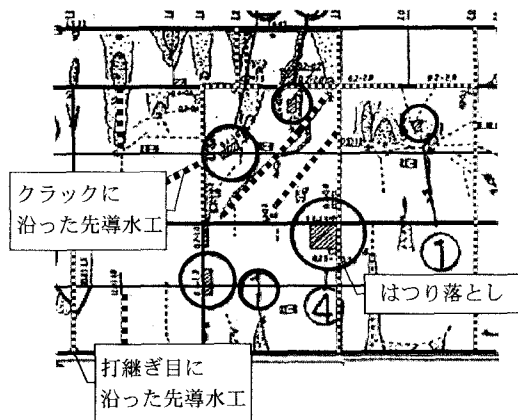


図-7 Bトンネルの覆工断面図(一部)

5. 補修・補強が行われたトンネルへのTCIの適用性の検討

補修・補強が既に行われ、対策前のトンネル覆工のクラック情報が得られていないトンネルにおいては、TCIに必要なクラック情報が得られず、TCIによる健全度評価が行えない。このようなトンネルは少なくなく、この問題について検討する必要がある。

そこで、補修が行われたBトンネルを用いて、TCIの適用性を検討する。図-7にBトンネルの覆工展開図の一部を示す。このように、クラックに沿って施工された先導水工においては、TCIに必要なクラックの幅は不明なものの、長さ・方向の情報が抽出で

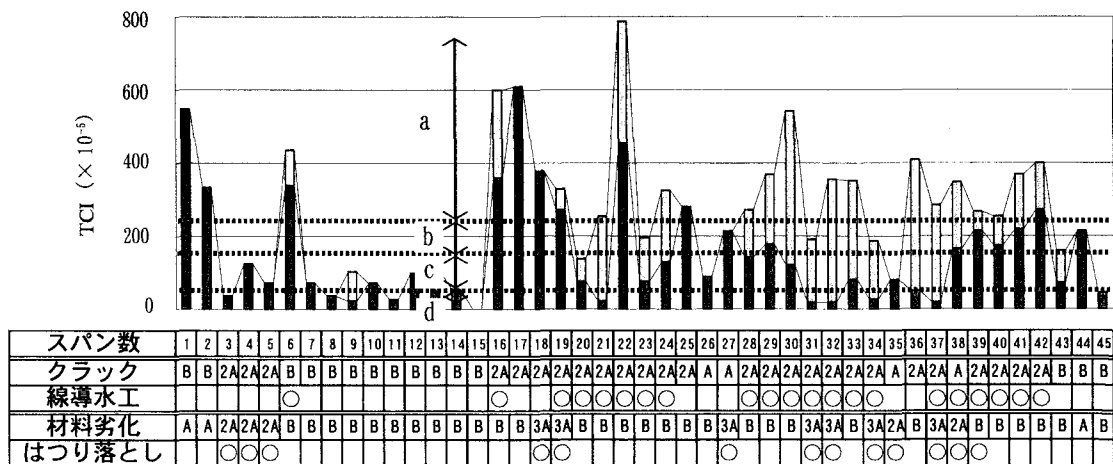


図-8 Bトンネルにおける線導水工を考慮したTCIの算出結果と維持管理情報

きる。そこで、クラックの幅を仮定してTCIを算出した。このとき、仮定する幅の大きさはBトンネルのクラック最大幅3mmを採用した。

図-8に線導水工を考慮したTCIの算出結果を示す。このように、線導水工の情報を加えることにより、クラックの情報が増え、TCIの値が増加することによって第31スパンのように技術者と同じbランクの評価を行うことができた。

また、Bトンネル全体において、TCIと現場技術者による健全度評価の比較を行った。クラックのみで算出したTCI、先導水工を考慮して算出したTCIと技術者との健全度評価の比較を図-9に示す。この結果より、線導水工の情報を考慮し、評価することによって技術者の評価に近づくことがわかる。

以上より、線導水工を行ったトンネルに対してもTCIを適用することにより、従来の技術者の評価と同様な結果が得られることがわかった。

次に、材料劣化の評価をみると、はつり落としを行ったスパンにおいては高ランクの評価がなされているがTCIは小さい値を示している。

図-10に各スパンにおける材料劣化の健全度評価と剥離箇所別における剥落量の分布を示す。天端部・肩部の剥離は剥離面積が小さいにも関わらず、材料劣化の評価は高い。一方、側壁部の剥離については剥離面積が大きくても評価が低い。この結果から、材料劣化の評価にあたっては剥離面積の比重が小さく、剥離箇所の比重が大きいいといえる。

図-11に各スパンにおける材料劣化の健全度評価と剥離箇所数の比較を示す。剥離箇所が多いスパンにおいては評価が高くなっている。この結果から、材料劣化の評価においては、剥離箇所数の比重が大きいいといえる。

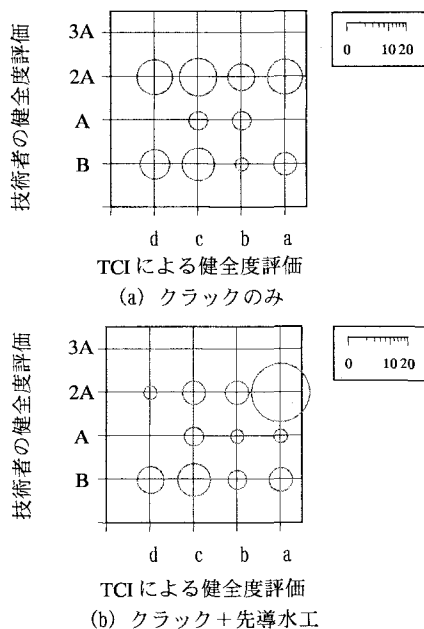


図-9 技術者とTCIとによる健全度評価の比較

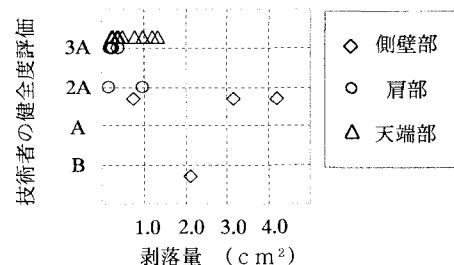


図-10 Cトンネルの材料劣化の健全度評価と剥落量の分布

以上より、TCIに剥離発生部位・剥離箇所数の情報を用いることによって、クラック・材料劣化の定量的な評価を行える可能性が示せた。

6. TCIによる維持管理優先順位に関する検討

従来の健全度評価手法では数段階のランクにより健全度を決定していたため、同ランクの健全度のトンネルにおいて相互の明解な差を示すことができないといった事態が生じた。しかし、TCIは数量的に評価できるため、劣化度の違いを顕著に表現することが可能である。

そこで、供用中の70トンネルのデータを集積し、TCIによりトンネル相互間におけるメンテナンスの順位付けを検討する。図-12にトンネルのスパンで算出したTCIの最大値をそのトンネルの代表値とし、トンネル相互間の値を比較し、順位付けた結果（上位20位）を示す。このように、TCIは数量的に評価できるために、トンネル相互間でも統一的に評価でき、客観的な順位付けが可能となり、今後多くのトンネルを対象とした維持管理計画を合理的に実施するためのアセットマネジメントの基礎資料としてTCIを用いることができると考えられる。

7. まとめ

今回は、従来の研究とされた課題について、検討データを増加してトンネル覆工の健全度評価に対するTCIの適用性について再検討を行った。以下に各課題における結論を示す。

- ① 以前よりTCIデータを蓄積することによって、健全度評価に対応するTCIの値の範囲を決定できた。また、技術者の評価と比較することによって、TCIから定量的に健全度評価が出来ることを示せた。さらに、覆工面の箇所別にTCIを算出することで、客観的に変状状態を把握することができると判った。今後は、さらにデータを増やし、より信頼性の高い範囲を示す必要がある。
- ② TCIを箇所別・方向成分で表すことによって、クラックの傾向からクラックの発生原因を客観的に推定することができた。今後は、他の変状原因においても、実際の変状トンネルデータを用いて検討を行う必要がある。
- ③ 先導水工をクラックとみなしてTCIを算出することによって、技術者のクラックの評価に近づくことができた。しかし、技術者は進行性を判断要

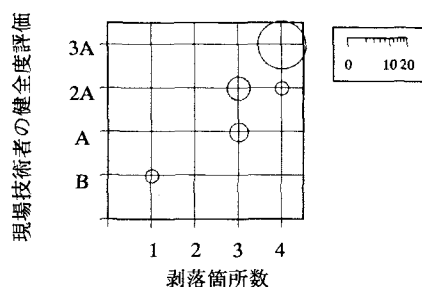


図-11 Bトンネルの材料劣化の健全度評価と剥離箇所数の比較

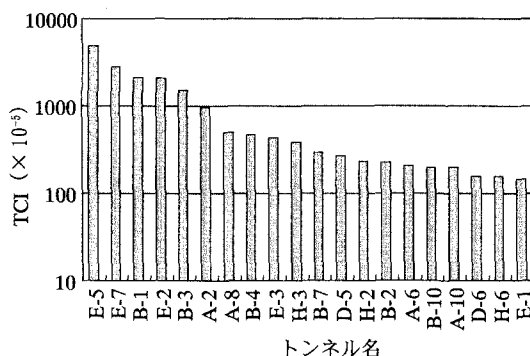


図-12 TCIの算出結果による順位付け

因としているところがあり、TCIと技術者の評価が異なっていた。今後はTCIを蓄積して、変状の進行性を把握することで健全度評価を行うことを検討する必要がある。

参考文献

- 1) (社)日本材料学会：岩の力学，基礎から応用まで，1993.12.
- 2) 亀村勝美，須藤敏明：トンネル覆工劣化度評価のためのデータ解析の試み，土木学会第57回年次学術講演概要集，pp.213-214，2002.9.
- 3) 大場諭，亀村勝美，重田佳幸，進士正人，中川浩二：トンネル覆工健全度評価のためのクラックテンソル適用性の検討，土木学会第58回年次学術講演概要集，pp.91-92，2003.9.
- 4) 大場諭，亀村勝美，重田佳幸，進士正人，中川浩二：トンネル覆工健全度評価のためのクラックテンソルの適用性の検討，トンネル工学論文集報告，pp.371-376，2003.11.
- 5) (財)鉄道総合技術研究所：トンネル補強・補修マニュアル，1990.10.
- 6) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，1993.11.
- 7) 日本道路公団：設計要領 第三集 トンネル，トンネル本体工保全編，1998.10.
- 8) ジェオフロンテ研究会：覆工コンクリートの初期ひび割れについて，2003.12.