

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

Examination of Crack Tensor for Soundness of Tunnel Lining

大場 諭¹⁾, 亀村勝美²⁾, 重田佳幸³⁾, 進士正人⁴⁾, 中川浩二⁵⁾

Satoshi OHBA, Katsumi KAMEMURA, Yoshiyuki SHIGETA,
Masato SHINJI and Koji NAKAGAWA

The evaluation of tunnel lining degradation state is commonly conducted by engineers directly on the site. However, it is uneasy works. Moreover the degree of health judgment has not been clear whether it is made systematically or rationally. In this research, quantification of tunnel lining degradation degree has been tried from crack tensor based on rock mechanics engineering. The results were compared to the one outcome from the degree of health. It has shown that the crack tensor and the degree of health have a correlation, therefore it may be used as a tool in maintenance management work.

Key Words: crack, tunnel lining, crack tensor, tunnel deformation, maintenance

1. はじめに

トンネル構造が果たすべき最も重要な機能は、安全かつ快適な空間の確保である。しかし現在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ものや、建築限界を一部おかしているものが存在し、維持管理上の大きな問題となっている。

トンネル覆工の変状を示す最も基本的なデータとして覆工コンクリートのクラック(ひび割れ)や覆工からの湧水状況があり、それらの情報を基に維持管理計画が立案されている。特に覆工に発生したクラックの情報は、トンネルの健全度を判定する目安として非常に重要視されている¹⁾。しかし、クラック情報からトンネルの健全度を定量的または客観的に評価することは技術的に難しく、現場技術者の判定根拠となる各マニュアルは他の構造物に比べて定性的な表現が目立ち、技術者の経験的判断によるところが大きい。したがって、統一かつ合理的な視点に立ち、最適な健全度判断がなされているかどうかは不明瞭である。

本研究では、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²⁾に基づき算出したクラックテンソル³⁾により、覆工コンクリートの劣化度の定量化を試みる。また、その結果と従来行われた現場技術者による健全度判定結果を比較することで、定量的な健全度判定への適用性を検討する。

2. クラックテンソルのトンネル覆工への適用

(1) トンネル覆工のクラック情報の定量化

トンネル覆工の健全度を評価するために種々の評価マニュアルが事業者毎に制定されている。それらのマニュアルの中で、クラック情報は健全度判定に重要な役割を果たしている。どのマニュアルにおいても共通して言えることは、一次点検で得られる覆工の変状展開図に示された大小様々な

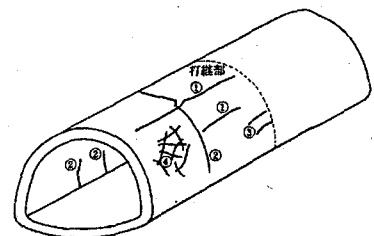


図-1 代表的なクラックパターン⁴⁾

- | | |
|-----------|-------------------------------|
| 1) 学生会員 | 山口大学大学院 理工学研究科 |
| 2) フェロ-会員 | 博士(工学) 大成建設(株) |
| 3) 正会員 | 修士(工学) (株)ダイヤコンサルタント(元山口大学助手) |
| 4) 正会員 | 学術博士 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 |
| 5) フェロ-会員 | 工学博士 山口大学教授 工学部社会建設工学科 |

クラックを評価していることである。具体的にはクラックの本数、長さ、開口幅、密度、方向などである。しかし実際にはマニュアルに基づいても、現場技術者によっては本数を重要視する考え、開口幅を重要視する考えとその評価は様々である。そこでクラックデータを定量的に評価する必要性が生じる。

図-1に覆工のクラックの模式図を示す⁴⁾。すなわち、①トンネル軸方向(縦断方向)に直線的に伸びるクラック、②トンネル軸直角方向(横断方向)に直線的に伸びるクラック、③継ぎ目部近傍でトンネル軸方向に伸びるクラック、④亀甲状あるいは網目状のクラックの一打設長当りの状態より、トンネル覆工の健全度を評価している。

岩盤力学では、岩盤中の不連続面の密度、方向、規模がマスとしての岩盤物性(変形係数、透水係数)に大きく影響するため、これらの影響を定量化する研究が進められてきた。そして、クラックテンソルと呼ばれるクラックの密度、方向、規模を定量化する指標が導出されている。一方、トンネル覆工のクラックの状況を定量化する際、必要となる情報としては、①クラックの本数 n 、②クラックの開口幅 t 、③クラックの方向 θ 、④クラックの長さ l が挙げられる。両者の概念には共通しているものが多く、トンネル覆工に関してもクラックテンソルの考え方を利用すれば、トンネル覆工の強度低下を健全度としてクラックの本数、開口幅、延長、方向による一つの数量で定量的に評価できると考えられる。

以下に2次元のクラックテンソルの算出式と、図-2に算出式を概念を示す。但し、劣化の規模はクラック長の1乗、クラック開口幅の1乗に比例するものと仮定する。また、 $F_0 = F_{11} + F_{22}$ はクラックテンソルの不変量であり、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、 F_{11} 値はクラックの縦断成分、 F_{22} 値はクラックの横断成分を意味する。

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

ここで、

- A: 対象とする覆工の面積
- m: 対象とする覆工に存在するクラック本数
- $l^{(k)}$: k番目のクラックの長さ
- $t^{(k)}$: k番目のクラックの幅
- $\theta_i^{(k)}$: k番目のクラックの法線ベクトルがi軸(トンネル縦断方向)となす角度
- $\theta_j^{(k)}$: k番目のクラックの法線ベクトルがj軸(トンネル横断方向)となす角度

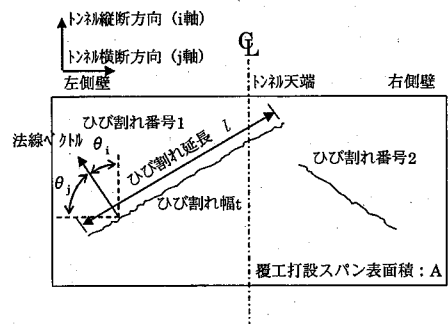


図-2 トンネル覆工におけるクラックテンソルの概念図

(2) クラックテンソルの算出例

図-3に示すようなクラックのモデルの時のクラックテンソルの計算例を以下に示す。また、不変量 F_0 は算出する部位の総和であるため、図-3の範囲内のクラックテンソルを算出する場合、この範囲内の不変量 F_0 はひび割れ番号1とひび割れ番号2の F_{11} 値と F_{22} 値を足し合わせる。

$$F_{11} = \frac{1}{10 \times 30} \times 0.001 \times 10 \times \cos 30 \times \cos 30$$

$$+ \frac{1}{10 \times 30} \times 0.0005 \times 10 \times \cos 40 \times \cos 40 = 3.48 \times 10^{-5}$$

$$F_{12} = F_{21} = \frac{1}{10 \times 30} \times 0.001 \times 10 \times \cos 30 \times \cos 60$$

$$+ \frac{1}{10 \times 30} \times 0.0005 \times 10 \times \cos 40 \times \cos 50 = 2.26 \times 10^{-5}$$

$$F_{22} = \frac{1}{10 \times 30} \times 0.001 \times 10 \times \cos 60 \times \cos 60$$

$$+ \frac{1}{10 \times 30} \times 0.0005 \times 10 \times \cos 50 \times \cos 50 = 1.52 \times 10^{-5}$$

$$F_0 = F_{11} + F_{22} = 5.00 \times 10^{-5}$$

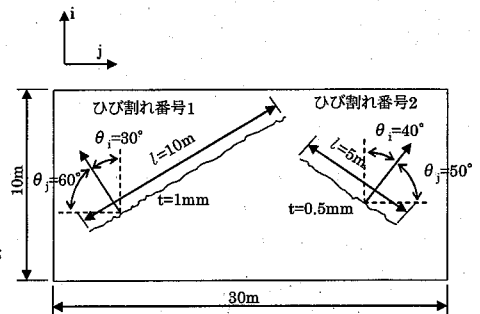


図-3 クラックのモデル図

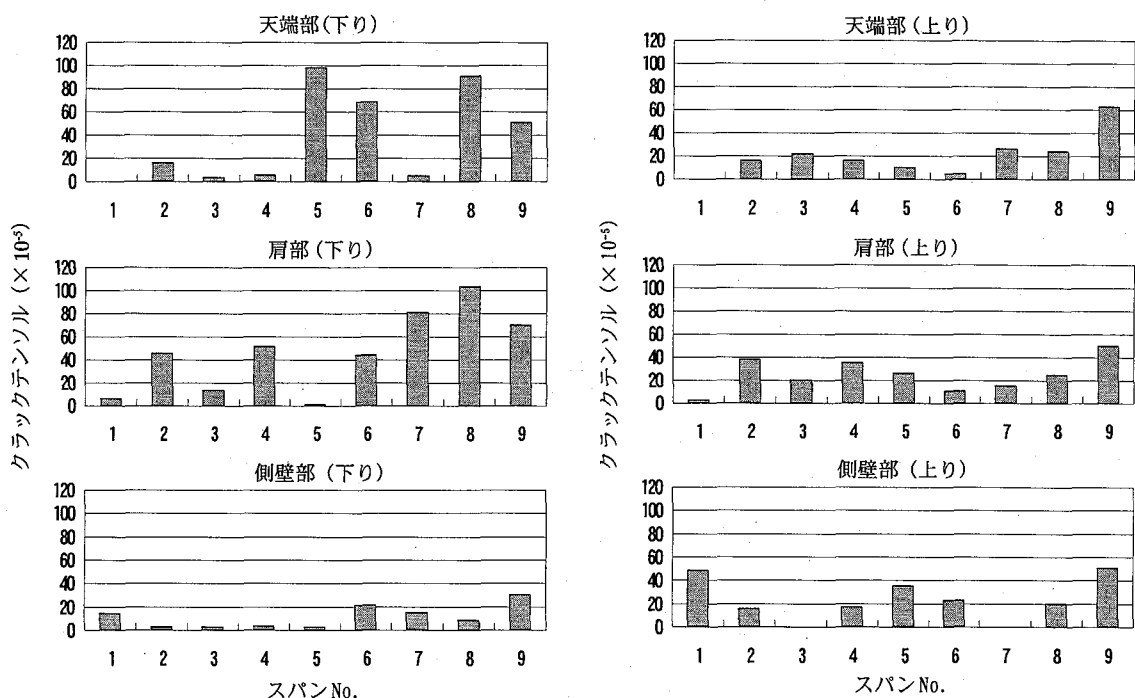
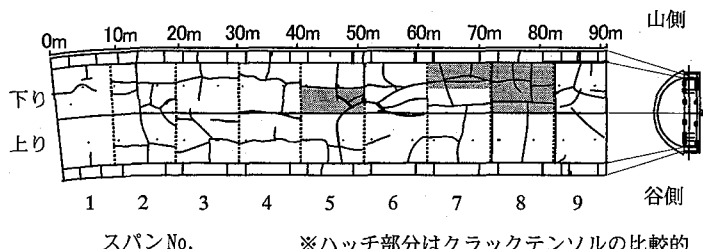


図-6 Aトンネルの各部位におけるクラックテンソルの分布



※ハッチ部分はクラックテンソルの比較的大きい部分(80×10^{-5} 以上)を示す。

図-4 Aトンネルの変状展開図

表-1 Aトンネルにおける健全度判定結果

スパンNo.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ひび割れ	A	A	A	A	2A	2A	2A	3A	2A
断面強度 うき・剥離	B	2A	2A	B	A	2A	B	B	B
漏水	B	B	B	B	A	B	B	B	B
突発性の 崩壊	A	3A	3A	3A	2A	3A	3A	3A	-
総合判定	A	3A	3A	3A	2A	3A	3A	3A	2A

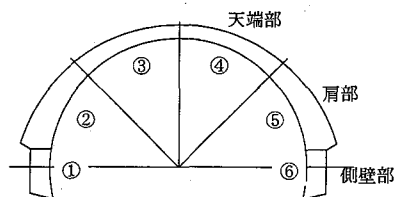


図-5 覆工断面図と各部位

表-2 判定区分の内容

判定区分	判定の内容
3A	変状が大きく、通行者・通行車両に対して危険があるため、直ちに何らかの対策を必要とするもの
2A	変状があり、それが進行して、早晚、通行者・通行車両に対して危険を与えるため、早急に対策を必要とするもの
A	変状があり、将来、通行者・通行車両に対して危険を与えるため、重点的に監視をし、計画的に対策を必要とするもの
B	変状がないか、あっても軽微な変状で、現状では通行者・通行車両に対して影響は無いが、監視を必要とするもの

3. 実トンネルにおけるクラックテンソルの算出

2つの道路トンネルのクラック情報を用いてクラックテンソルの算出を行った。クラックテンソルを算出する方法はトンネルの変状展開図からクラック情報(クラック幅、延長、角度)を読み取り、式(1)に代入する。図-4に一例としてAトンネルの変状展開図を示す。ここで、トンネル覆工の状況を詳細に評価するため、縦断方向は打設スパン毎、横断方向は図-5に示すように側壁部、肩部、天端部と、6分割して行った。式(1)により算出したクラックテンソルと実際のトンネルの健全度評価結果を比較・検討する。また、BトンネルについてもAトンネルと同様の手法

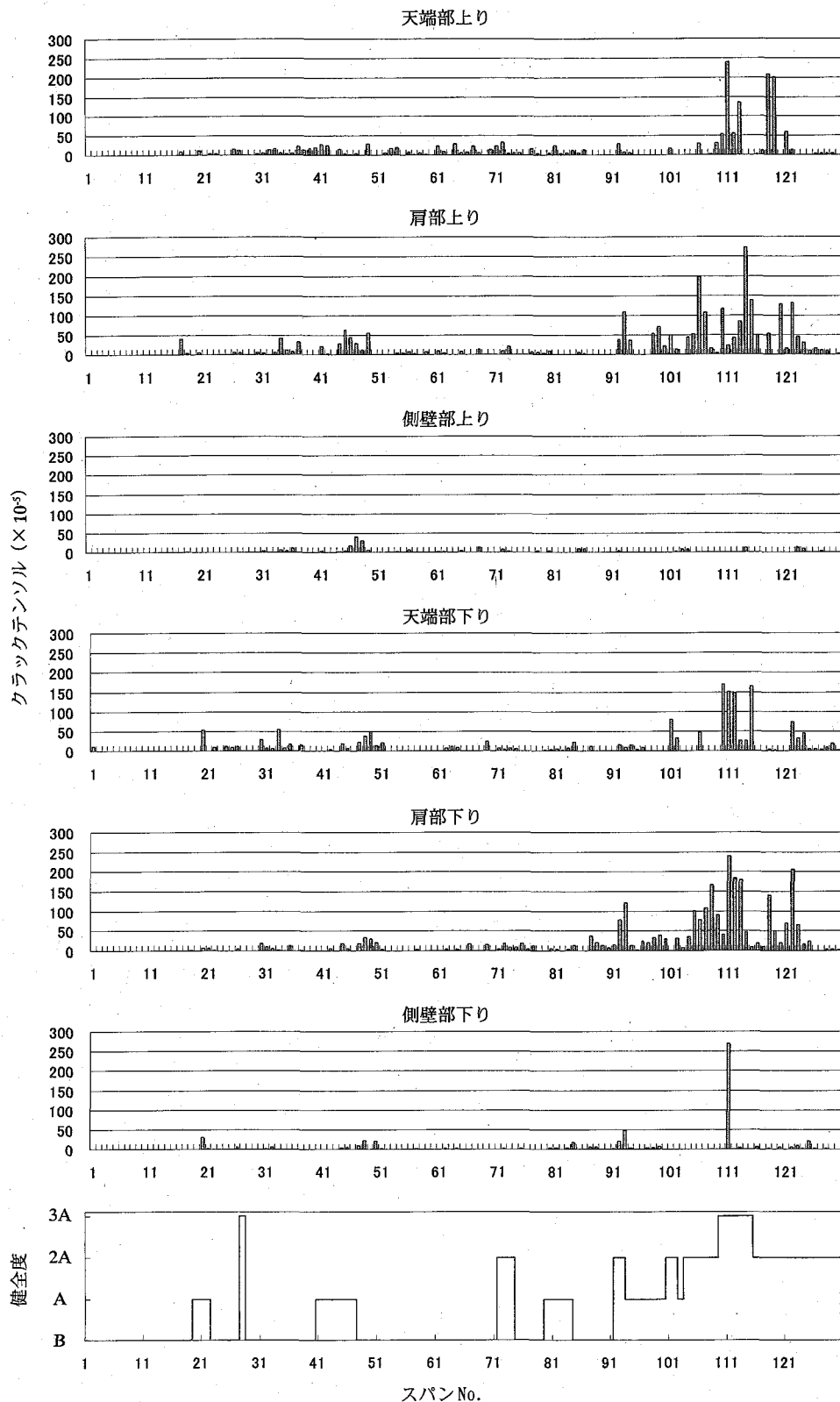


図-7 Bトンネルの各部位におけるクラックテンソルの分布と健全度判定結果(ひび割れ項目のみ)

で検討した。但し、今回の検討では変状展開図から読み取れる情報のみを用いることとし、クラックの深度方向に関しては一定であると仮定した。クラック延長の取り方は、詳細にクラック延長を取った場合も大まかに取った場合も、全体のクラックテンソルの値に比べてその差は微々たるものであったので、今回はクラックを約2m間隔で取るものとする。クラックの開口幅に関しては、一本のクラックの最大開口幅とした。

4. クラックテンソルの算出結果・考察

(1) クラックテンソルと健全度の相関

a) Aトンネル

図-6にAトンネルの各部位におけるクラックテンソル(F_0)の分布を示す。また、表-1にAトンネルの現場技術者が判定した健全度判定結果を示し、表-2に判定区分の内容を示す。図-6から、下り車線のクラックテンソルが全体的に上り車線の値よりも大きく、特に下り車線の第8スパンの値が比較的大きい。下り車線の第8スパンの天端部、肩部のクラック状況を変状展開図から調べると、開口幅が比較的大きいクラックが目立つ。これは、実際の現場調査結果により第8スパン周辺には地すべりの影響でクラックが発生していると判断していることから、同様の傾向を示している。変状が大い箇所はクラックの開口幅が大きくなり、クラックテンソルも大きくなる。このことから、変状展開図からクラックテンソルを算出することにより、クラックの量をトンネル覆工の健全度として顕著に表現できることが分かる。

また、表-1の健全度(ひび割れ項目)と比較すると、ひび割れ項目の第8スパンが3A、第8スパン周辺も2Aとなっており高ランクの健全度であることが分かる。このことから、健全度評価のものとクラックテンソル量には相関があると考えられる。しかし他の項目や総合評価とは相関が見られず、剥離・剥落が評価できないという問題点も挙げられる。

b) Bトンネル

図-7にBトンネルの各部位におけるクラックテンソルの分布と健全度判定結果(ひび割れ項目のみ)を示す。図-7から、第100スパン以降からクラックテンソルが大きくなっている。また、健全度判定結果から第110、第111、第112、第113、第114、第115スパンと3Aが続いており、第100スパン以降から高ランクの健全度が判定されている。このことから、Bトンネルにおいてもクラックテンソルが比較的大きい箇所は健全度が大きくなると考えられる。第28スパンの3Aは大規模な剥落箇所を評価したものであるため、クラックテンソルでは評価していない。

c) AトンネルとBトンネルの相对比较

個々のトンネルにおいて、現場技術者の健全度評価は異なるものの、クラックテンソルは同一の判断結果となるため、トンネル相互間におけるメンテナンスの優先順位の決定にも用いることができ、統一的な評価ができると考えら

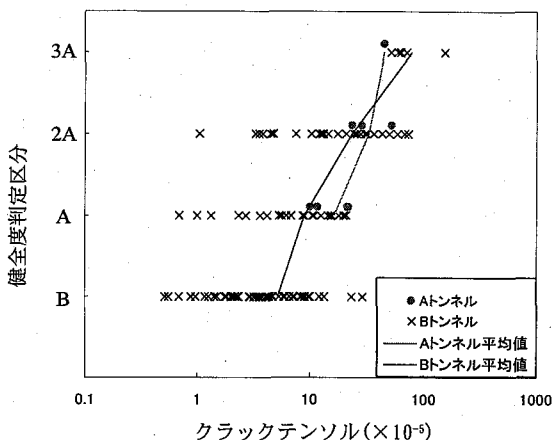


図-8 両トンネルのクラックテンソルと健全度評価結果の分布

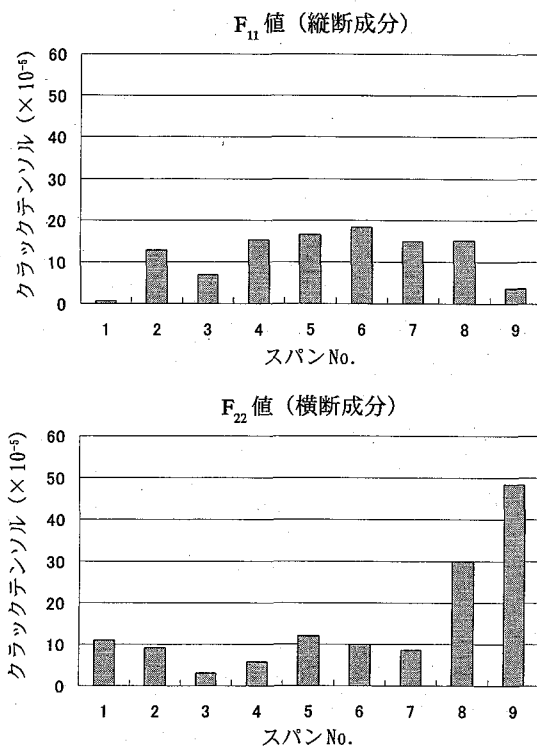


図-9 Aトンネルにおける各スパン毎の F_{11} 値(縦断成分)と F_{22} 値(横断成分)の分布

れる。図-8に両トンネルのスパン毎におけるクラックテンソルと健全度判定結果の分布を示す。図-8から、Bトンネルにおいては3Aを除いて、各健全度評価で 100×10^5 程度の値のばらつきが見られる。Aトンネルに関しては、トンネル延長が短く、データ数が少ないということもあるが、Bトンネルに比べ比較的高い値に分布していることが分かる。また、両トンネルのクラックテンソルの平均値はさほど差が無いことが分かる。つまり一般的に、現場における健全度判定はその現場技術者が行うため、健全度判定結果は各現場毎に内容が異なるが、AトンネルとBトンネルの技術者の健全度評価の考え方は、クラックテンソルの平均値の観点から言えば、ほぼ一致していると考えられる。

このように、クラックテンソルで健全度を数量で表すことにより、トンネル相互間の優劣の決定が可能であると考えられる。

(2) クラックテンソルと変状原因の相関

トンネルの変状原因を推定する際には、様々な調査結果や情報が必要とされている。そこでクラックテンソルをトンネル縦断方向、横断方向の各方向成分に分割することにより、変状原因を推定するための簡易的な情報としての適用性について検討する。図-9にAトンネルにおける各スパン毎の F_{11} 値（縦断成分）と F_{22} 値（横断成分）の分布を示す。この図より、全体的にクラックテンソルの縦断成分は坑口付近を除いて同じような値を示していることが分かる。実際に変状展開図や現場写真からも、Aトンネルでは縦断クラックが全スパンにわたり生じている。また、地すべりの影響を受けた第8スパン、第9スパンは、クラックテンソルの横断成分が比較的大きい値を示している。このことから、各成分の分布状況を把握することにより、変状原因を地すべりと判定するための手掛かりになり得ると考えられる。

クラックテンソルから危険箇所を判定するだけでなく、覆工の各部位毎に方向成分の分布状況を分析することにより、変状原因を推定する際の情報となる可能性があると考えられる。

5. まとめ

覆工コンクリートに発生したクラックの情報を用いてクラックテンソルを算出し、クラックテンソルの健全度判定指標としての適用性を検討した結果、得られた知見を以下に示す。

- ① 実例のデータを用いて検討した結果、クラックテンソルは健全度判定結果（ひび割れ項目）と相関がある。また、数量的に評価ができる。
- ② トンネル相互間におけるメンテナンスの順位付けの比較材料としてクラックテンソルを用いることにより、効率的・経済的な維持管理が望める。
- ③ F_{11} 値（縦断成分）、 F_{22} 値（横断成分）を比較検討することにより、変状原因を推定する際の情報として使える可能性があると考えられる。

今後は、このようなアプローチで、より多くのデータについて検討を行い、その特徴を捉え、各健全度ランクに対応するクラックテンソルの取りうる値の範囲について検討する予定である。

【参考文献】

- 1) (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.
- 2) (社) 日本道路協会：「道路トンネル維持管理便覧」，1993. 11.
- 3) (社) 日本材料学会：「岩の力学 基礎から応用まで」，1993. 12.
- 4) 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.
- 5) 土木学会：トンネルコンクリート施工指針（案）