

覆工のひび割れの密度とパターンによる 山岳トンネルの要注意箇所抽出手法

野城 一栄* 水谷 真基**

Extraction Method of Sections of Mountain Tunnels to be Noted Based on Crack Density and Pattern

Kazuhide YASHIRO Masaki MIZUTANI

On the basis of the tunnel crack index (TCI) and the crack pattern, this paper shows a method extracting sections to be noted in tunnel inspection. The threshold value of TCI is set according to the judgment results of the experienced persons, and the validity is confirmed by the model experiments. In addition, a crack pattern that should be noted is set as an auxiliary index. We applied the proposed method to an actual tunnel and verify the accuracy. As a result, we confirm that this method can be used as a method extracting sections to be noted in tunnel inspection.

キーワード：山岳トンネル，全般検査，変状展開図，TCI

1. はじめに

トンネルの維持管理において、ひび割れ等の変状を覆工撮影画像から自動的に抽出する機能が実用化されつつあり、ひび割れ等が記入された変状展開図を積極的に活用してトンネルの維持管理を行う方策が模索されている。このような目視情報から健全度を判定する目安として、RC構造物においてはひび割れ幅等により画一的に健全度を判定できるような定量的な判定ルールが整備されている¹⁾。一方で、山岳トンネルの覆工は、地山に囲まれたアーチ構造をしており、外力の増加に対して曲げモーメントと軸力が共に増加し、一つのひび割れが全体の構造安定性に直接大きな影響を与える恐れが少ないことから、個々のひび割れに対して判断基準を明確に示すようなことはされていない²⁾ 現状がある。

これまでの山岳トンネルの健全度の判定では、明確な判断基準が整備されていなくても、豊富な経験を有する技術者が、検査に十分な人工を割くことにより、安全性が確保されてきたが、今後は維持管理に関わる技術者の減少が見込まれており、山岳トンネルにおいても、自動化、機械化がますます求められることが想定される。このための基盤技術として、例えば、覆工撮影画像をもとにした定量的な健全度判定基準等が必要になると考えられる。

全般検査においては、変状展開図をもとにあらかじめ事前検討を行い、重点的に調べるべき箇所（以下「注意

すべき箇所」）を定めておいてから検査を実施すると、限られた検査のための時間を有効に活用できる他、発生した余力を注意すべき箇所に振り向けることにより安全性の向上につながると考えられる。本論文は、ひび割れ情報を積極的に活用して、トンネルの健全度判定を定量的に行う方策の検討に資するものとして、変状展開図より「注意すべき箇所」を抽出する方法について検討した結果を述べるものである。なお、ここでは、健全度A～Sで判定される健全度（はく落に対する安全性以外の健全度）について述べるものとする。

2. 健全度の定量化が可能な検査項目の検討

覆工撮影画像から、覆工表面の変状のうち、どのような変状を抽出できるかを示したものが表1である。覆工撮影画像からある程度確認可能な変状は、ひび割れ、打

表1 覆工撮影画像からの覆工表面の変状等の抽出の可否

変状等の種類	覆工撮影画像による抽出の可否	
	可否	注記
覆工の変形・変位	×	
ひび割れ	○	概ね幅 0.5mm 以下のひび割れは×
	～	ひび割れ幅は○（解像度 0.5mm 程度）
	×	汚れ等により不明瞭なひび割れは△ 覆工面に対して鋭角なひび割れは△
打継目	○	
コールドジョイント	△	確定は×
目地切れ・目地痩せ	△	目地痩せは×
食違い（段差）	×	
ジャンカ	○	はく離（浮き）は×
鋼材の腐食	△	錆汁等は○
凹凸部	×	
添架物・補修材	○	ボルトの緩み・抜けは× 補修材のはく離（浮き）は×
漏水	○	漏水量は×
つらら・側氷・氷盤	△	
表面の汚れ・変色	△	
濁音箇所	×	

○：可能，△：一部可能，×：不可能

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

** 構造物技術研究部 トンネル研究室（現 東海旅客鉄道株式会社）

継目、コールドジョイント、目地切れ、ジャンカ、鋼材の腐食、添架物・補修材の存在、漏水、つらら、表面の汚れである。これらのうち、画像からの定量的評価が現時点で可能なものとして、ひび割れ長さ、幅等のひび割れ情報に着目して以降の検討を行うものとした。

3. Tunnel Crack Index (TCI) による抽出法

3.1 TCIと経験者の判断との関係

ひび割れ等の変状情報の一つとして、Tunnel Crack Index (TCI, 図1)がある³⁾。TCIは、ひび割れの幅、長さ、方向から計算される定量的な指標で、変状展開図を元にしたトンネルの健全度判定で最近注目されているものである。ひび割れは、トンネル覆工表面に現れることからそれ自体が覆工の剥落に繋がる可能性がある。また、外力によるトンネルの変形はひび割れの発生がそのサインとなっていることもある。よって、TCIをうまく活用することにより、「注意すべき箇所」を選定することができるものと考えられる。

「注意すべき箇所」を選定する手法としては、ある値以上のTCIを有することを条件とすることが考えられる。そこで、過去に経験者により目視による調査が行われたトンネル(Aトンネル)に対し、経験者が「懸念箇所」(注意して維持管理を行う必要がある箇所)と判断した箇所と、その箇所のTCIとの関連を調べた。なお、TCIは、図1で示されるように縦断方向成分 F_{11} と横断方向成分 F_{22} の和 F_0 として示される。 F_{11} と F_{22} はひび割れの方向性を示すもので、例えば、 F_{11} が相対的に大きい場合は線路方向に続くひび割れが多いことを、 F_{22} が大きい場合は輪切りひび割れが多いことを示している。これらを個別に評価することにより、変状原因を明らかにできる可能性があるが、本論文では主に全般検査段階で「注意すべき箇所」を選定することに着目し、まずスカラー値である F_0 値を用いた。また、ひび割れ幅については不明であったためすべて1mmと仮定した。なお上記「懸念箇所」では、経過観察のため、多くの箇所で計測が行われており、「懸念箇所」は「注意すべき箇所」に相当するものと考えられる。Aトンネルについて、TCIと、経験者の「懸念箇所」が占める割合との関係を図2に示す。図2より、TCIが 4×10^{-4} を超えると経験者の「懸念箇所」が占める割合が増加する傾向が大きくなる。

3.2 TCIと覆工の変状や構造耐力との関係

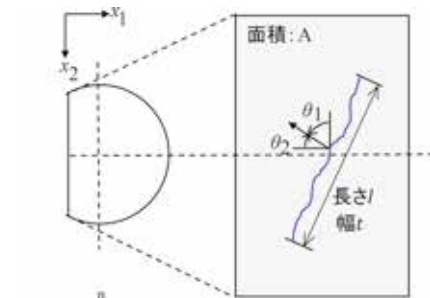
TCI値が大きい場合、トンネルに生じているひび割れの数が多い、ひび割れ幅が大きい等の状況が生じており、トンネルの安定性が低下していることが考えられる。そこで、覆工模型実験の結果に基づき、トンネルの変形率・

荷重とTCIの関係を整理した⁴⁾。

実験では大型トンネル覆工模型実験装置(図3)を用いた。模型の縮尺は実物(新幹線複線標準断面)の1/5相当である。実験は、天端部の载荷用油圧ジャッキを変位制御して鉛直下向きに変位 $\delta = 60\text{mm}$ 程度まで载荷することにより行った。载荷中、ひび割れ幅はクラックゲージにより測定した。なお、ひび割れはすべてトンネル軸方向に発生した。

トンネルの覆工には、健全なもの他、材料的な不具合や構造的な不具合を有するものも存在する。よって、覆工の各種欠陥を想定して、表2、図4に示す7ケースの実験を行った。ここで、ケース1を健全のケースとして、ケース2~4は材料に関する欠陥に着目したケース、ケース5~7は構造に関する欠陥に着目したケースである。

ケース1はコンクリートを投入後にバイブレータで適切に締め固めることによって密実にしたケースである。ケース2はコンクリート強度の小さなトンネル覆工



$$F_{11} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n t^\alpha l^\beta \cos \theta_{1i} \cos \theta_{1i} \dots \dots \dots (1)$$

$$F_{22} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n t^\alpha l^\beta \cos \theta_{2i} \cos \theta_{2i} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、
 A: TCIを計算する範囲の覆工コンクリートの面積 (m²)
 n: ひび割れの本数 (本)
 l: ひび割れの長さ (m)
 t: ひび割れの幅 (m)
 θ_1 : ひび割れの法線ベクトルが x_1 軸となす角度
 θ_2 : ひび割れの法線ベクトルが x_2 軸となす角度
 α : ひび割れ幅の重み付けに関する係数、1としてよい。
 β : ひび割れ長さの重み付けに関する係数、1としてよい。
 F_{11} : TCIの縦断方向成分
 F_{22} : TCIの横断方向成分
 $F_0 = F_{11} + F_{22}$: TCI

図1 TCIの定義

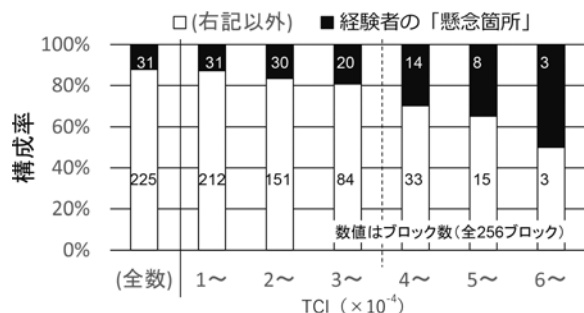


図2 TCIと経験者の「懸念箇所」が占める割合との関係

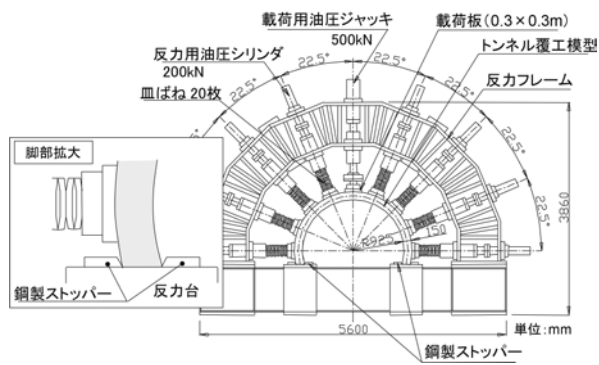


図3 実験装置の概要⁴⁾

表2 実験ケース⁴⁾

No.	条件	備考	28日強度 N/mm ²
ケース1	健全	(標準)	22.2
ケース2	強度小	配合変更, 養生期間短縮	16.2
ケース3	軽度材料分離	打設時パイプレタ省略	26.9
ケース4	著しい材料分離	ジャンカ模擬	健全 30.3 ジャンカ 14.4
ケース5	迫め部不良	SL部に巻厚不足箇所	
ケース6	天端初期ひび割れ	天端部に初期ひび割れ模擬	23.9
ケース7	コールドジョイント	コールドジョイント模擬	26.6

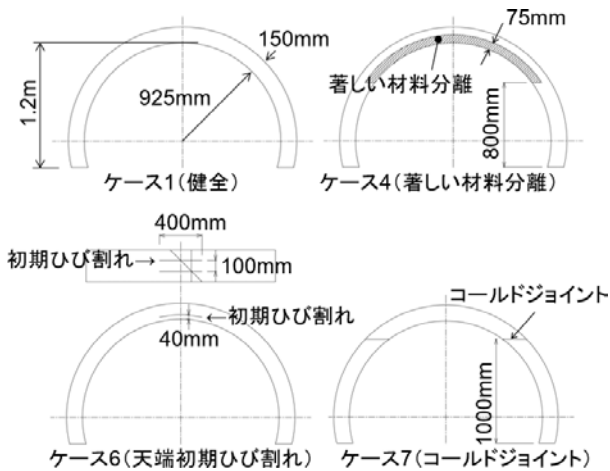


図4 各実験ケースの模式図⁴⁾

を想定し、配合を変更し、また、養生期間を短くして、実験時のコンクリート強度を小さくしたケースである。ケース3は軽度の材料分離を想定したケースで、パイプレタによる締め固めを省略した。覆工には軽度の材料分離が見られ、表面にアバタが現れている状態である(図5)。ケース4は著しい材料分離を再現したケースである。アーチ部のトンネル内空側75mm厚程度に粗骨材(最大粒径25mm程度の川砂利)が多く含まれる部分を打設し、意図的にジャンカ(図6)を設けた。ケース5は、スプリングライン(SL)部に巻厚不足箇所を設けたものである。発泡スチロールを用いて巻厚不足(最も薄いところで健全の1/3巻厚)箇所を作成した後コンクリートを打設して欠陥(図7)を作成した。ケース6は初期ひび割れをクラウン部内側付近に再現した



図5 材料分離
(ケース3)⁴⁾



図6 模擬ジャンカ
(ケース4)⁴⁾



図7 SL部欠陥
(ケース5)⁴⁾



図8 天端初期ひび割れ
(ケース6)⁴⁾



図9 CJ(ケース7)⁴⁾

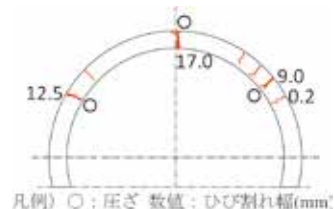


図10 破壊箇所(ケース1)⁴⁾

ケースである。天端部に対し、コンクリートカッターで幅2mm程度、深さ40mmの切り込みを入れることで初期ひび割れを作製した(図8)。このひび割れは、覆工の打設時に若干の地山の緩み等を受けたことにより発生したことを想定して、トンネルの軸方向に2本と、剥落が生じやすい状況を想定して斜め方向に1本の計3本を設定した。ケース7はコールドジョイント(CJ)を再現したケースである。コールドジョイントの位置はトンネル模型脚部から1mの高さとし、コンクリートの打設を2回に分けることで、左右両肩に作成した(図9)。

ケース1を例として、図10に変位 $\delta = 40\text{mm}$ 時の破壊状況を示す。載荷実験の結果によると、破壊が発生する順序は今回実施した7ケース間で大きな違いは見られなかった。すなわち、天端付近で曲げ引張ひび割れがいくつか発生した後、肩部で曲げ圧縮破壊(圧ざ)が発生した。これより、曲げと軸力がバランスするような断面力の発生形態となっていることがわかる。図11に、構造に関する欠陥に着目し、ケース1, 5~7について、 $\delta = 10\text{mm}$ 時の天端周囲の様子および $\delta = 45\text{mm}$ 時の肩部周囲の様子を示す。これらのケースは、覆工に初期ひび割れや欠陥を設けたものであるが、いずれのケースも、天端部では曲げ引張ひび割れ破壊が、両肩部では曲

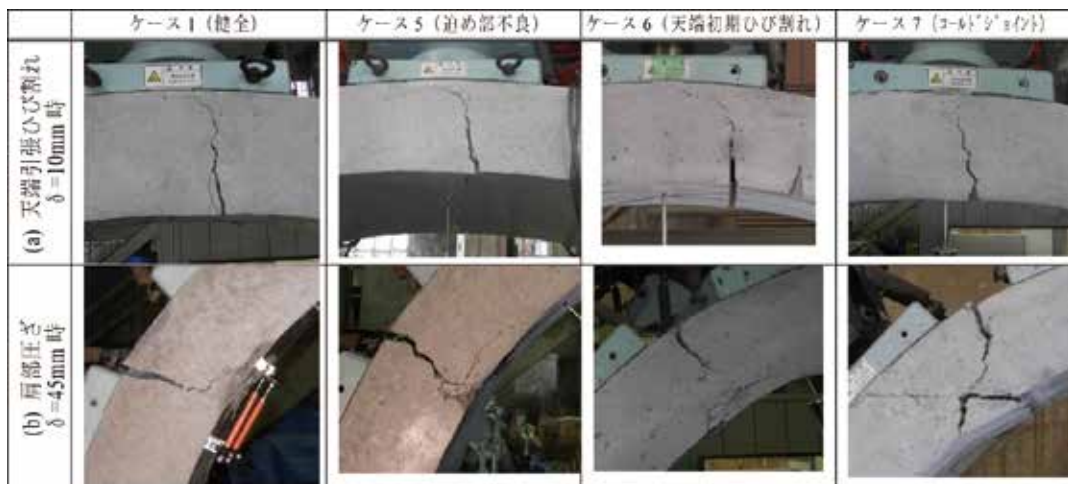


図 11 代表的なケースの破壊状況⁴⁾

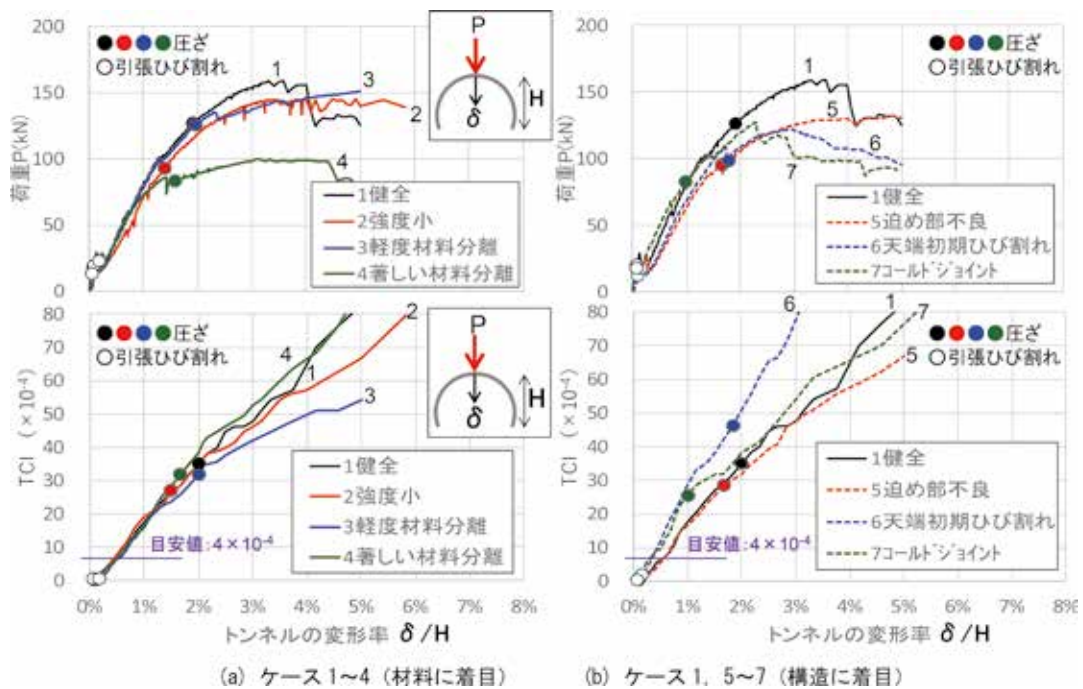


図 12 トンネルの変形率 (δ/H) と荷重 P および TCI との関係⁴⁾

げによる圧が発生する形態であることは変わらない。
 変位 δ を供試体の高さ H (1.2m) で除したトンネルの変形率 (δ/H) と荷重 P との関係を図 12 上図に示す。ケース 1 (健全) では、 $\delta = 2\text{mm}$ ($\delta/H = 0.17\%$) 程度で引張ひび割れが発生して 3 ヒンジアーチ状態となった際に荷重が一旦低下し、天端において圧が発生したのを境にトンネルとしての剛性が若干低下している。変形が大きくなると健全のケースと健全以外のケースとで差が見られ始めるが、少なくとも圧が生じるまでの小変形では大きな差はない。

図 12 下図は、トンネルの変形率 δ/H と TCI との関係である。TCI は、トンネルの変形にほぼ比例して増加する。直線の勾配は、もともとひび割れが入っていたケー

ス 6, 7 でやや大きい傾向があるが、破壊は、①ひび割れの発生 ($\text{TCI} = 1 \sim 2 \times 10^{-4}$) \rightarrow ②ひび割れの進展 (TCI の増加) \rightarrow ③圧 (TCI = $25 \sim 50 \times 10^{-4}$ 程度) \rightarrow ④荷重増加の鈍化 \rightarrow ⑤最大荷重の過程を進むことがわかる。図中には、3.1 節で示した TCI の値 4×10^{-4} を示したが、この値は、トンネルにおいて最大荷重が発生するときの TCI や、圧が発生するときの TCI よりも小さい値であることがわかる。なお、実際のトンネルにおいては、打設時の収縮ひび割れ、巻厚不足、背面空洞など、今回の実験では必ずしも設定できていない欠陥等も存在するため、TCI のしきい値の設定に際しては、十分安全側の評価を行う他、TCI のデータを増やして検証していく必要がある。

4. 注意すべき箇所抽出の試行

4.1 TCI による抽出の試行

これまでの全般検査においては TCI は調べておらず、ひび割れの多さは感覚的に判断せざるを得なかった。このため、健全度の判断はその多くを検査員の経験に依存してきた。そこで、3章で提案した、TCI により「注意すべき箇所」を抽出する手法について、実際のトンネルにおいて試行し、捕捉率を検証した。検証対象は、経験者による調査が行われたトンネルのうち調査時の資料や写真が多く残されている A トンネルとし、経験者による「懸念箇所」判定を正として、しきい値と捕捉率、見逃し率、空振り率との関係を調べることにした。試行ケースは、ケース 1 (しきい値 4×10^{-4}) と、ケース 2 (しきい値 3×10^{-4}) とした。ここで、各ケースについて、目地ごとに TCI を計算し、しきい値を超過した当該のブロックを「注意すべき箇所」と判定するものとした。

表 3 に試行結果をまとめる。ケース 1 (しきい値 4×10^{-4}) では「注意すべき箇所」の捕捉率 (= 正しく抽出できた割合) は 45% 程度であったが、ケース 2 (しきい値 3×10^{-4}) では 65% となった。また、見逃し率も 7% から 4% に減少した。ただし、しきい値を小さくしたことにともない空振り率が 13% から 33% に増加した。

表 3 A トンネル試行結果

評価指標	計算式	ケース 1 しきい値 4×10^{-4}	ケース 2 しきい値 3×10^{-4}
捕捉率	$A/(A+B)$	45%	65%
見逃し率	$B/(A+B+C+D)$	7%	4%
空振り率	$C/(A+B+C+D)$	13%	33%

凡例

該当数量	提案方法による評価	
	該当	非該当
経験者の評価	該当	非該当
	非該当	該当
	A(的中)	B(見逃し)
	C(空振り)	D

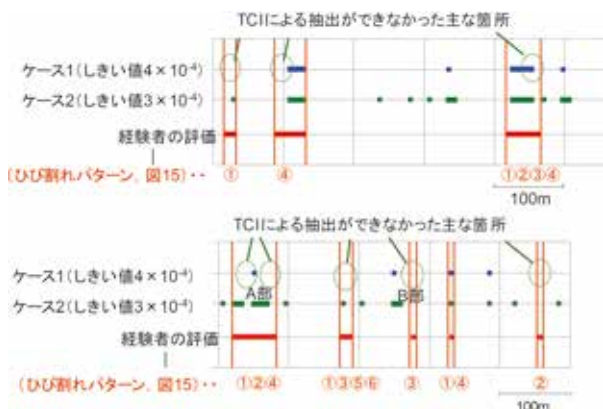


図 13 「注意すべき箇所」の分布

なお、表 3 で示したとおり、判断基準として TCI (しきい値 3×10^{-4}) とした場合でも「注意すべき箇所」の捕捉率は 65% にとどまる。これは、今後の検査の自動化を見据えた場合、改善の余地がある数値とも考えられる。ただし、この場合でも、抽出された区間の前後のブロックを追加すると捕捉率は 87% となることが確認できている。実務上は TCI により抽出した後、その前後区間を念入りに目視するなどの対応で捕捉率を向上できる可能性がある。

4.2 特別なひび割れパターンと特別な条件

各ケースで「注意すべき箇所」として抽出された箇所の分布を図 13 に、抽出ができなかった箇所の変状展開図を図 14 に示す。図 14 に示した A 部、B 部のよう、見かけ上ひび割れはさほど多くはないが、②目地跨ぎの水平方向のひび割れ、③側壁迫め部を通り抜ける輪切り方向のひび割れといった理由で経験者が抽出していた箇所を抽出できていないことがわかる。図 14 の①～③のようなひびわれパターンは、地圧の作用が疑われるひびわれと考えられ、TCI による判断とは別に、「注意すべき箇所」として抽出しておく必要があるものと考えられる。

そこで、TCI による判断とは別に、「注意すべき箇所」として抽出される条件を明らかにするため、A トンネルと同様に経験者による調査が行われ調査時の資料や写真が多く残されている B トンネルについて、「懸念箇所」とされた 19 箇所において発生していた変状を類型化し、数量を調査した。調査は、経験者調査報告書の判読、

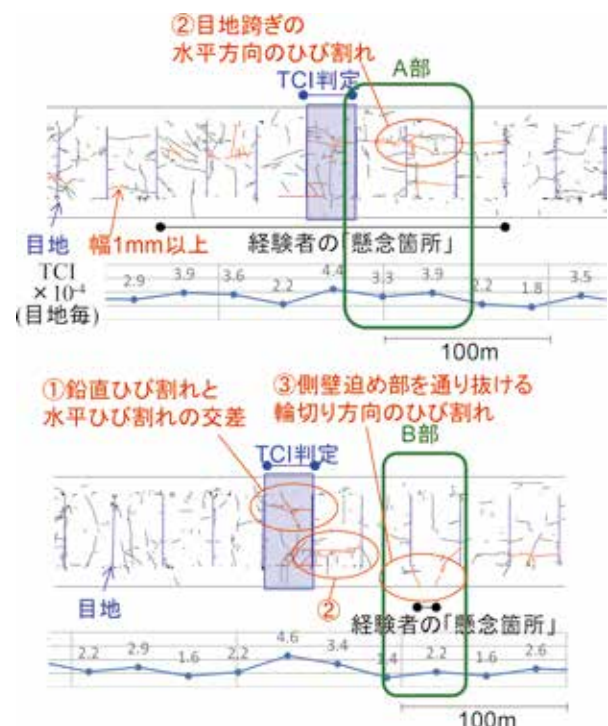


図 14 抽出ができなかった箇所の変状展開図の例

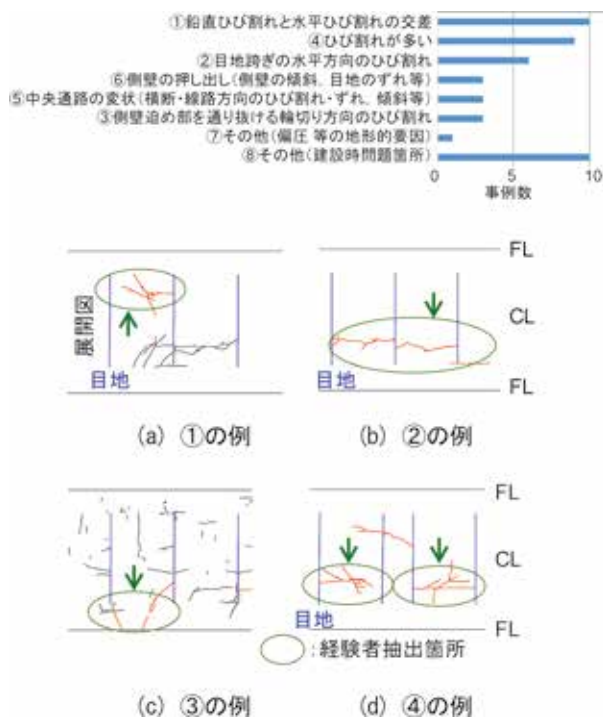


図 15 「懸念箇所」で見られたひび割れパターン

表 4 Aトンネル試行結果(再試行結果)

評価指標	計算式	ケース 1 TCIのみ	ケース 1 パターン併用
捕捉率	$A/(A+B)$	45%	68%
見逃し率	$B/(A+B+C+D)$	7%	4%
空振り率	$C/(A+B+C+D)$	13%	23%

変状展開図・連続撮影画像の分析により行った。

調査結果によると、経験者が当該箇所を「懸念箇所」と判定した根拠として、以下の①～⑧が挙げられる事がわかった。ここで、①～④のひび割れは、いずれも1mm以上の幅の広いひび割れである。

- ①鉛直ひび割れと水平ひび割れの交差(図15(a))
- ②目地跨ぎの水平方向のひび割れ(図15(b))
- ③側壁締め部を通り抜ける輪切り方向のひび割れ(図15(c))
- ④ひび割れが多い(図15(d))
- ⑤中央通路の変状(輪切りひび割れ(含ずれ)、線路方向ひび割れ(含ずれ)、傾斜等)
- ⑥側壁の押し出し(側壁の傾斜、目地のずれ等)
- ⑦その他(偏圧等の地形的要因)
- ⑧その他(建設時間問題箇所)

上記①～⑧について、図15上に発生変状の件数をまとめる。

これらのうち、①～④については「特別なひび割れパターン」、⑤～⑧については、画像からは抽出不可能な「特別な条件」として、TCIによる抽出とは別に抽出が

なされているものとしてAトンネルにおける試行結果を再整理したものを表4に示す。

再整理により、ケース1(しきい値 4×10^{-4})の、「注意すべき箇所」の捕捉率は45%程度だったものが68%となる。また、見逃し率については7%が4%に向上し、空振り率についても10%の増と比較的小さく抑えることができています。この場合についても、抽出された区間の前後のブロックを追加すると捕捉率は87%となることが確認できています。

以上から、TCIに「特別なひび割れパターン」や「特別な条件」による抽出を組み合わせることにより、TCIにより「注意すべき箇所」を抽出する精度が高められることがわかった。

5. まとめ

全般検査においては、変状展開図をもとにあらかじめ事前検討を行い、重点的に検査を行う箇所を定めておいてから検査を実施すると、限られた検査のための時間を有効に活用できる他、発生した余力を注意すべき箇所に振り向けることにより安全性の向上につながると考えられる。

トンネル覆工撮影画像をもとにひび割れ等の変状情報を活用して、トンネルの健全度判定を定量的に行う方策の検討に資するものとして、トンネル構造の安全性に関して、ひび割れ情報から注意すべき箇所を抽出する手法を提案した。特別なひび割れパターンや特別な条件を考慮することにより、TCIによる判定をスクリーニングの一手法として用いることもできることがわかった。

今後は、漏水や鋼材の腐食といった健全度にかかわるひび割れ以外の変状についても、画像からの抽出や変状程度のグレーディングの技術の開発についても行っていきたいと考えている。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)コンクリート構造物、丸善、2007
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル、丸善、2007
- 3) 海瀬忍、伊藤哲男、八木弘、水野希典、前田洗樹、進士正人：トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証、土木学会論文集F1(トンネル工学)、Vol.74, No.1, pp.1-14, 2018
- 4) 水谷真基、野城一栄：各種欠陥を有する山岳トンネル覆工の変形破壊挙動に関する研究、トンネル工学報告集、Vol.28, I-23, 2018