

# 既設トンネルのひび割れの進展と維持管理のあり方

角湯克典\* 真下英人\*\*

## 1. はじめに

道路トンネルを合理的で経済的に維持管理するためには、点検データを分析し変状の発生原因を適切に推定するとともに、変状が今後どのように進展し健全度がどこまで低下するかを予測を行い、変状状態に対して効果が最も効率的に発揮できる時期に適切な対策工を実施する必要がある。このため、土木研究所トンネルチームにおいては、「トンネルの維持管理手法の高度化に関する研究(平成15年度～平成18年度)」を立ち上げ、トンネル覆工のひび割れの進展の予測を試みたところである。

本報文では、少なくとも過去2回以上にわたってトンネル覆工の点検や調査を実施した33本のトンネルを対象に、ひび割れの発生原因を推定し、「ひび割れ密度」を指標として、ひび割れ発生原因別にその進展について検討を行った結果を報告する。また、はく落防止対策を対象にして変状の進展率や変状対策工の耐用年数をパラメータとし、対策の実施方法により総対策工事費がどのように変化するかを試算し、総対策工事費等からみたマクロ的なトンネル維持管理のあり方についても報告する。

## 2. ひび割れ密度の進展について

トンネル覆工に発生する主な変状には、ひび割れ、うき・はく離・はく落、漏水等がある。これらの変状は様々な原因で発生するが、頻繁に発生する、変状として重大性が大きいという視点から、外力に起因するひび割れと、温度応力または乾燥収縮によるひび割れを対象にその進展について検討を行った。

ひび割れの進展の検討対象とする定量的パラメータとしては、ひび割れ長、ひび割れ幅が考えられるが、ひび割れ幅はトンネル内の温度変化により周期的に変動しており、変動幅が大きいこと

から不適切であると考え、総ひび割れ長を覆工コンクリートの打設単位であるスパンの表面積で除した「ひび割れ密度」を用いることとした(写真-1)。

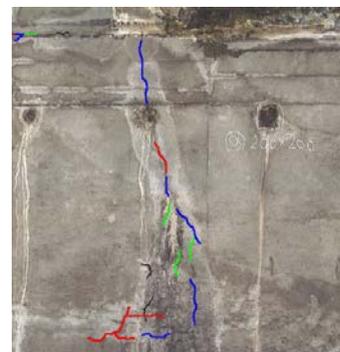


写真-1 ひび割れの抽出

### 2.1 ひび割れ密度と経過年の関係

ひび割れの進展の検討にあたっては、少なくとも過去2回以上にわたってトンネル覆工の点検を行い、ひび割れ密度を調査した33本のトンネルを対象に調査を行った。

図-1に、33本のトンネルのひび割れ密度と供用後の経過年の関係を示す。なお、矢板工法で建設されたトンネルについては建設直後からの状態は不明なため、ひび割れ密度のデータは建設から数十年経過後からのものとなっている。施工法(NATMと矢板工法)の違いによる明確な傾向の差は認められず、全体的にひび割れ密度が増加していない、または微増のトンネルが多いが、幾つかのトンネルについてはひび割れ密度が増加している。

以下、33本のトンネルを対象に、推定されたひび割れ発生原因に着目してその進展について検討を行った結果を示す。なお、ひび割れの発生原因はひび割れなどの変状の形態と既存資料から得られたトンネルのおかれている条件に関する情報等から推定した。

### 2.2 温度応力、乾燥収縮に起因すると考えられるひび割れ密度と経過年の関係

図-2に、温度応力または乾燥収縮に起因するひび割れと推定されたNATMのトンネルのひび割れ密度と供用後の経過年の関係を示す。データが得られた9トンネルすべてにおいて、完成後5年程度でひび割れ密度が一定値または微増に留まる傾向が見られた。

図-3に、温度応力または乾燥収縮に起因する

ひび割れと推定された矢板工法の18トンネルのひび割れ密度と供用後の経過年との関係を示す。大半のトンネルではひび割れの増大は認められないが、一部のトンネルでは供用後の経過年数が20年以上であるにもかかわらずひび割れ密度の増加が見られるものもある。これらのトンネルについてはひび割れ発生原因を温度応力または乾燥収縮と推定したもの、ひび割れ発生原因の推定に必要な資料が十分得られていないものもあり、別の原因でひび割れが発生している可能性が高いものと考えられる。

### 2.3 外力に起因すると考えられるひび割れ密度と経過年の関係

図-4に、ひび割れ発生原因が外力に起因すると推定されたトンネルのひび割れ密度と供用後の経過年の関係を示す。Cトンネル以外の矢板工法の3トンネルでは、経過年数が10年以上であるにもかかわらずひび割れ密度が増加している。また、地すべりが原因でひび割れが発生しているBトンネルについては、10年間近い長期間にわたってひび割れ増加が続いている。

一方、地すべりが原因のA、膨張性土圧が原因のCトンネルではそれぞれ経過年10、20年程度以降でひび割れ密度の増加が見られないなど異なる傾向が見られることから、外力に起因するひび割れでも、一定期間増加した後は安定する場合があることを示していると考えられる。

## 3. 変状対策工事費のライフサイクルコストからみたトンネル維持管理のあり方

変状対策として採用される頻度が最も多いはく落防止対策を対象にして、変状の進展速度や変状対策工の耐用年数等をパラメータとし、対策の実施方法により総対策工事費がどのように変化するかについて検討を行った。また、総対策工事費等からみたマクロ的なトンネル維持管理のあり方について検討を行った。

### 3.1 総対策工事費の考え方

変状した構造物の対策の考え方としては、一般に予防保全的対策と事後保全的対策の2つに大きく分類される。予防保全的対策とは構造物の変状の程度が使用限界レベルに達する前に対策を行うこと、事後保全的対策とは使用限界レベルに達した時点で対策を行うことと観念される。また、ト

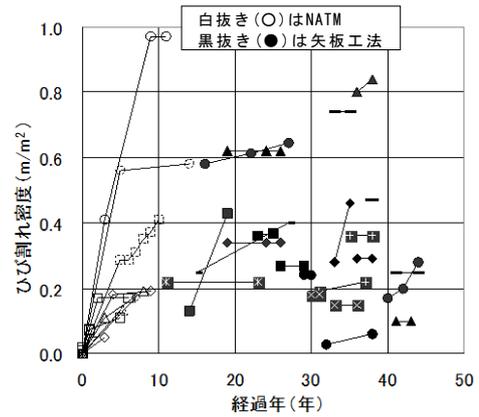


図-1 33本のトンネルのひび割れ密度の経年変化

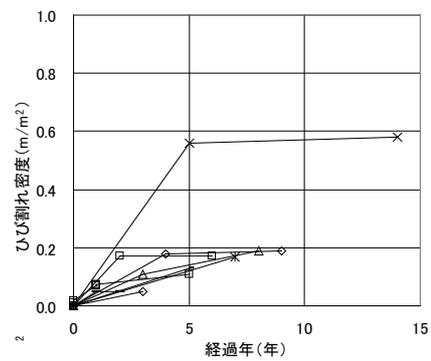


図-2 温度応力・乾燥収縮に起因すると考えられるひび割れ密度の経年変化 (NATM)

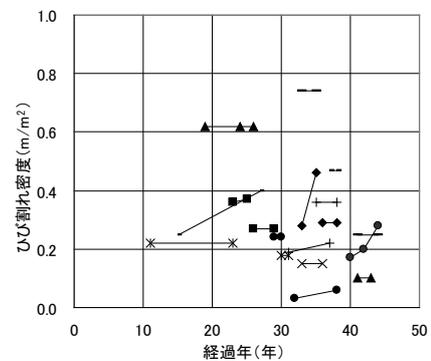


図-3 温度応力・乾燥収縮に起因すると考えられるひび割れ密度の経年変化 (矢板工法)

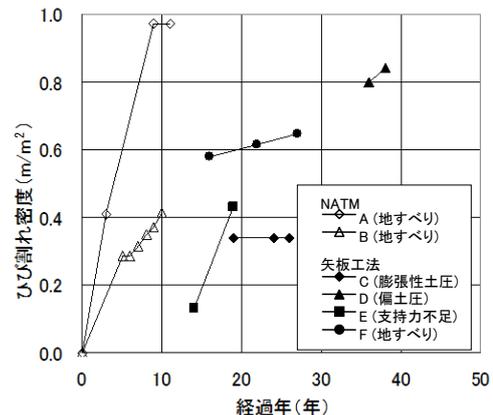


図-4 外力に起因すると考えられるひび割れ密度の経年変化

ンネルの維持管理は図-5の模式図に示すようにモデル化すれば、変状発生後一定期間の対策に要する費用（総対策工事費）は次式で表される。

$$C = \text{初回対策工事費} + \text{対策工更新費} \times n$$

ここに、C：変状発生後一定期間における総対策工事費、n：変状発生後一定期間における対策工の更新回数

ここで、初回対策工事費は、変状発生後の変状の進展速度と使用限界レベルにより決定され、初回対策を先延ばしにすると変状が進展する場合には初回対策工事費が増大する。また、対策工更新費×n（総更新費）は対策工の耐用年数と初回に対策工を施した面積に左右され、変状発生後の一定期間内に頻繁に対策工の更新が必要な場合や初回対策の先延ばしにより変状規模が大きくなる場合にはその費用が増大する。

このことから、予防保全的対策は変状規模が大きくなる前に初回対策を実施することにより初回対策工事費やその後の対策工更新費の縮小を図れるが、初回対策を早期に実施することにより変状発生後の一定期間内における対策工の更新回数が多くなり、総更新費が増大する対策といえ、事後保全的対策は可能な限り初回対策を先延ばしすることにより初回対策工事費やその後の対策工更新費は増大するが、変状発生後の一定期間内における対策工の更新回数が少なくなり、総更新費を縮小する対策といえる。なお、このモデル化においては初回対策を実施した時点から変状の規模は拡大しないと仮定している。

### 3.2 総対策工事費の試算

3.1の考え方をもとに、使用限界レベルに達するまでの時間と変状対策工の耐用年数をパラメータとして、予防保全的対策を行った場合と事後保全的対策を行った場合とで総対策工事費がどのように変化するか試算した。試算条件は、表-1に示すように設定した。また、対策工は繊維シート工とし、対策工の更新費は既設工の撤去を伴うことから初回対策費の1.5倍と仮定した。図-6に対策工の耐用年数を5年とした場合の予防保全的対策を行ったときと事後保全的対策を行ったときの総対策工事費の変化を示す。なお、対策工は耐用年数に達した時点で一斉に更新を行うこととなりその時点で対策工更新費が発生するが、本試算においては計算期間内（30年間）に更新が行わ

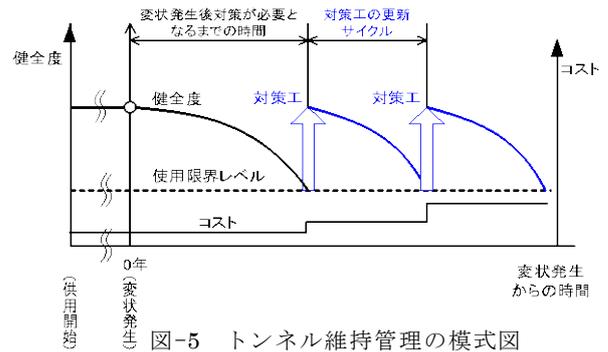


図-5 トンネル維持管理の模式図

表-1 試算条件

変状箇所数	100箇所
初期変状面積	1m <sup>2</sup>
変状の進展率	2倍/10年
対策工の耐用年数	3, 5, 10年 (3パターン)
使用限界レベルまでの時間	5, 10, 15年 (3パターン)
繊維シート補強工単価	50千円/m <sup>2</sup> (更新75千円/m <sup>2</sup> )
計算年数	30年間

れる回数から総更新費を予め求めておき、その値から1年当たりの対策工更新費を求め、各年毎に割り付けた。

図-6より、予防保全的対策の工事費と事後保全的対策の工事費が逆転するのは、使用限界レベルに達するまでの時間が5年の場合は計算開始時点から12年後、10年の場合は17年後、15年の場合は22年後であることがわかる。しかしながら、この試算においては変状の進展率として2倍/10年を採用しているが、変状の進展率が2倍/10年より小さい場合は、予防保全的対策のコスト縮減効果が現れるのはさらに後となることが想定される。

### 3.3 予防保全コスト縮減効果が現れる時期の検討

ここでは、変状の進展率が2倍/10年以下の場合に、予防保全のコスト縮減効果が現れる時期つまり予防保全的対策の工事費が事後保全的対策の工事費より小さくなる時期がどのように変化するかについて、3.2と同様の手法を用いて試算を

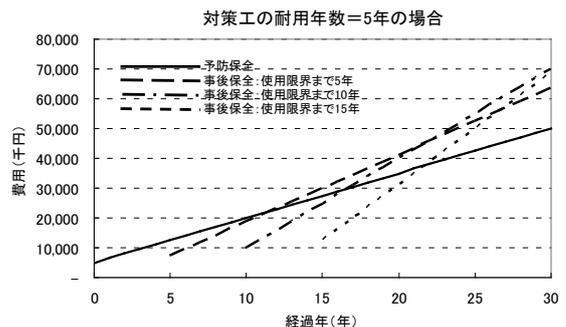


図-6 総対策工事費と経過年の関係

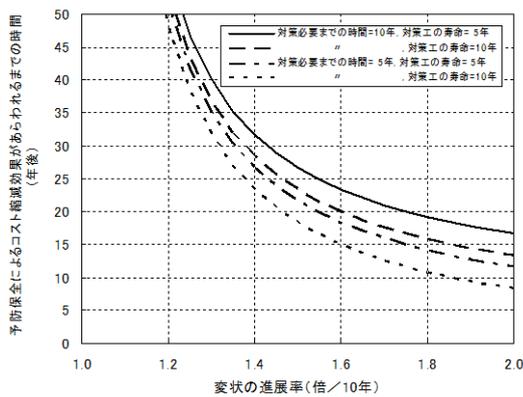


図-7 変状の進展率と予防保全によるコスト縮減効果があらわれるまでの時間との関係

行った。使用限界レベルに達するまでの時間と対策工の耐用年数はそれぞれ5年、10年とした。変状の進展率と予防保全のコスト縮減効果が現れる時期の関係を整理した結果を図-7に示す。

図-7より、変状の進展率が小さくなるにつれて、予防保全的対策のコスト縮減効果が現れる時期が遅くなることがわかる。特に、変状の進展率が1.2~1.4倍/10年の場合には、予防保全的対策のコスト縮減効果が現れる時期が30年後以降になることがわかった。

一般にトンネルの変状の進展は、変状発生原因が外力性のものを除けば、非常に緩慢であり、2.で検討対象としたトンネルにおいては、変状の進展率は2倍/10年以下のものが約80%を占める。また、温度応力や乾燥収縮に起因するひび割れは、当初5年程度進展した後はほとんど進展しなくなる傾向が見られ、変状が全く進展しないものが過半数を占めている。

以上のことから、マクロ的に見ればはく落に対するトンネルの変状対策は、ひび割れが初期の段階で実施するより、ひび割れが閉合しはく離が確認される等使用限界レベルに達する直前で対策を行う方がコストの観点から見れば有利であると考えられる。一方、トンネルの維持管理という観点からは、トンネルの変状が使用限界レベルに達した時点でははく落が生じ利用者被害が発生するとい

う事態を未然に防止する必要がある。このことから、トンネル維持管理の全体スキームとしては、変状の発生原因に応じて適切な間隔で定期点検を実施し、その際に利用者被害の可能性のある覆工等のうき・はく離箇所を除去するとともに、使用限界レベルに達する直前の箇所について対策を実施するのが、コスト面、安全面からみて望ましいものと考えられる。ただし、これらははく落を対象としたものであり、地すべりなど外力に起因する変状については、別途検討が必要である。

#### 4. まとめ

- 1) トンネルに発生するひび割れの進展の程度は、ひび割れの発生原因によって異なり、ひび割れの発生原因の特定がトンネル維持管理を行っていく上で非常に重要となる。
- 2) トンネルに発生するひび割れのうち、大きな割合を占める温度応力または乾燥収縮によるひび割れについては、当初5年程度進展した後にほとんど進展しなくなる。
- 3) トンネルの維持管理の全体スキームとしては、定期点検とその際のうき・はく離箇所の除去、使用限界レベルに達する直前の箇所の対策の実施を組み合わせるのが、コスト面、安全面からみて望ましいものと考えられる。

角湯克典\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所道路技術研究グループトンネルチーム 首席研究員, 工修  
Katsunori KADOYU

真下英人\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所道路技術研究グループ長, 工博  
Dr.Hideto MASHIMO