

トンネルの維持管理手法の高度化に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 15～平 18

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：真下英人、角湯克典

【要旨】

本研究では、少なくとも過去2回以上にわたってトンネルの点検や調査を実施したトンネルを対象に、点検・調査結果を分析することにより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。また、変状の進展率等をパラメータとし、対策の実施方法によりはく落防止のための総対策工事費がどのように変化するかを検討した。

その結果、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、温度応力又は乾燥収縮によるひび割れ密度については、当初5年程度進展した後にはほとんど進展しなくなることがわかった。また、総対策工事費とトンネルに発生するひび割れの進展の実態から見ればトンネルの変状対策は、構造物の劣化の程度が使用限界レベルに達する前に対策を行う予防保全的対策より、使用限界レベルに達した時点に対策を行う事後保全的対策の方が有利であることがわかった。

キーワード：ひび割れ密度、ひび割れ進展予測、予防保全、事後保全、トンネル維持管理スキーム

1. はじめに

供用中の道路トンネルの中には覆工コンクリートにひび割れなどの変状が発生し、コンクリート等の剥落などによるトンネル利用者への被害を未然に防止するための適切な対策を必要とするトンネルが現れてきている。また、高度経済成長期に大量に建設された道路トンネルの老朽化による覆工コンクリート等の劣化が懸念されている。これらを踏まえ、直轄国道のトンネルに関しては、コンクリート等の剥落の防止等を考慮した「道路トンネル定期点検要領（案）」（国土交通省道路局国道課、平成14年4月）が作成され、平成15年度までにほぼ全トンネルについて近接目視・打音検査を併用した初回定期点検が実施されたところである。

今後は補修・補強等の対応が必要とされる老朽化した道路トンネルの合理的で経済的な維持管理を実施していくために、上記点検で得られたデータを分析し、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、トンネルの健全度がどこまで低下するか劣化予測を行い、各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補修・補強工を実施する維持管理手法の確立が求められる。また、点検データの収集に関する課題等を考慮した上で、より合理的な点検方法やトンネル健全度の判定方法等についても検討を進めていく必要がある。

本研究では、少なくとも過去2回以上にわたってトンネル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。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検討した。

2. ひび割れ密度の進展について

2. 1 予測モデルの作成

トンネル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、本研究では頻繁に発生する、変状として重大性が大きいという視点から、外力に起因するものと、温度応力または乾燥収縮によるものを対象にしてモデルの作成を試みた。

ひび割れ進展のモデル化の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、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。

2. 2 ひび割れ密度と経過年の関係

本研究では少なくとも過去2回以上にわたってトンネルの点検を行い、ひび割れ密度を調査した33本のトンネルを対象に、その進展について検討を行った。

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ものがある。

以下に、33本のトンネルについて推定されたひび割れ発生原因に着目し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. 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と経過年の関係

図2に、「温度応力又は乾燥収縮」に起因するひび割れと推定されたNATM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又は微増に留まる傾向が見られた。

図3に、温度応力又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又は乾燥収縮と推定したものの、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、別の原因で発生している可能性が高いものと考えられる。

2. 4 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温度応力又は乾燥収縮以外の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、同じ地すべりが原因のA、Cトンネルではそれ

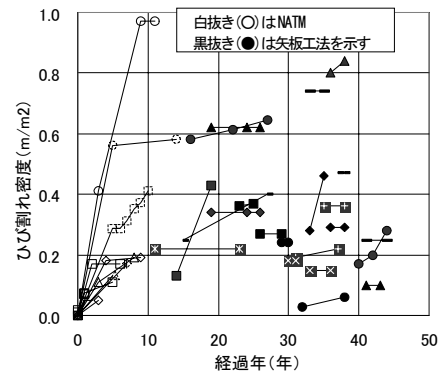


図1 33本のトンネルのひび割れ密度と経年変化

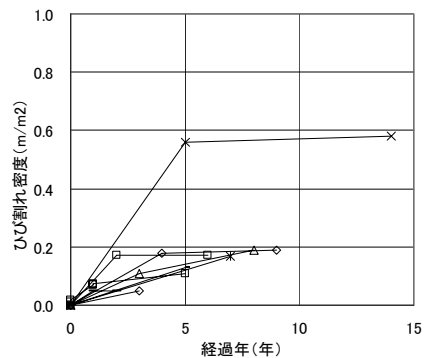


図2 温度応力・乾燥収縮に起因すると考えられるひび割れ密度と経年変化(NATM)

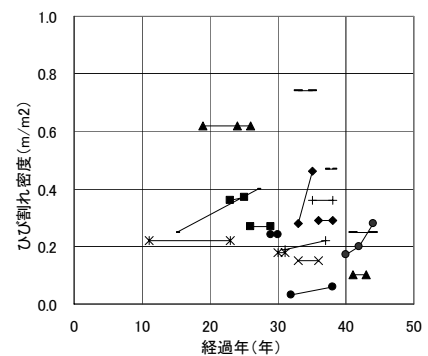


図3 温度応力又は乾燥収縮に起因すると考えられるひび割れの経年変化(矢板工法)

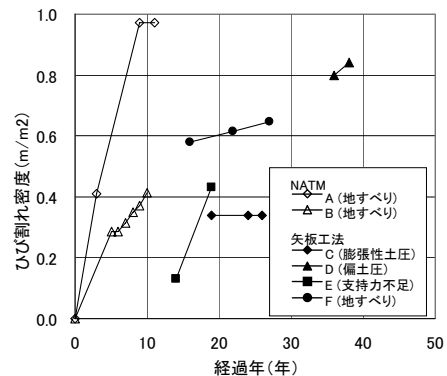


図4 外力に起因すると考えられるひび割れ密度の経年変化

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。したがって、
 外力に起因すると考えられるひび割れについては、その
 進展を単一の曲線でモデル化することは難しいと思
 われる。

図5に、ひび割れ発生原因が地すべりによるものと推
 定された3トンネルのひび割れ密度と経過年との関係につ
 いてひび割れ密度の増加状況に対して、最小自乗法によ
 る近似曲線を求めた結果を示す。これら3トンネルにつ
 いてはひび割れ密度の増加は以下の式でモデル化でき
 ると考えられる。

$$f = A \cdot y^B$$

ここに、 f ：トンネル内のスパン中で最もひび割れ
 が多いスパンのひび割れ密度 (m^2/m^2)、 y ：経過年 (年)、
 A および B はトンネル毎に定まる定数であり、概ね 0.1
 $< A < 0.4$ 、 $0.2 < B < 0.8$ の範囲にある。

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 総変状対策工事費の考え方

劣化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劣化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に対策を行うことと観念され
 る。また、トンネルの維持管理は図6の模式図に示すよ
 うに観念され、この図に従えば変状発生後一定期間の対
 策に要する費用は次式で表される。

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

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、劣化の進展速度と規模の
 拡大の程度により決定される。つまり、初回対策の時期
 を先延ばしにすると劣化が進展し規模が拡大する場合
 には初回対策工事費が増大する。また、対策工更新費 $\times n$
 は対策工の耐用年数に左右され、頻繁に対策工の更新が
 必要な場合にはその費用が増大する。

このことから、対策工の耐用年数にもよるが、一般に
 予防保全的対策は劣化の進展速度が速く、規模も拡大す

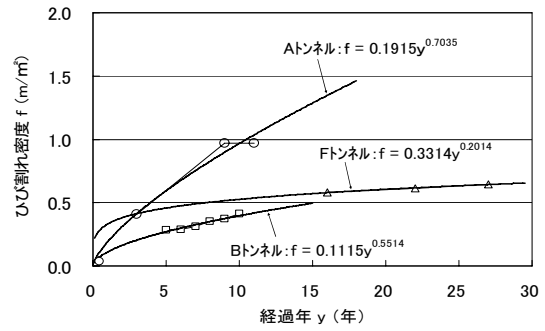


図5 トンネルひび割れ密度増加のモデル化

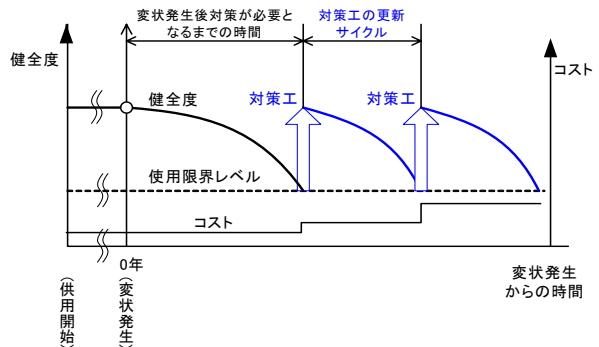


図6 トンネル維持管理の模式図

るような変状を使用限界レベルに達する前に対策を行う
 ことで工事費の削減を図ることが可能となり、一方、事
 後保全的対策は劣化の進展速度が遅く、変状の規模もそ
 れほど拡大しないような変状に対して、対策時期を先延
 ばしにすることによって工事費の削減を図ることができ
 ると考えられる。

3. 2 総変状対策工事費の試算

3. 1の考え方をもとに、変状の進展速度や変状対策
 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変状対策
 工事費がどのように変化するか試算した。計算条件は、
表1に示すように設定した。ここで、変状箇所数および
 初期変状面積は仮定の値を用いた。また、対策工は一般
 的に実施されている繊維シート補強工とし、対策工の更
 新費用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7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
 行ったときの総変状対策工事費の変化を示す。なお、本

表1 試算条件

変状箇所数	100箇所
初期変状面積	1m ²
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 ² (更新75千円/m ²)
計算年数	30年間

計算条件では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）に更新が行われる回数から総対策工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7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 予防保全の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8に示す。

図8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.での検討からも読みとれるように、変状の進展率は2倍/10年以下の場合がほとんどと考えられる。また、変状発生原因の多くを占める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た。

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、構造物の劣化の程度が使用限界レベルに達する前に対策を行う予防保全的対策より、使用限界レベルに達した時点に対策を行う事後保全的対策の方がコストの観点から見れば有利である。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、

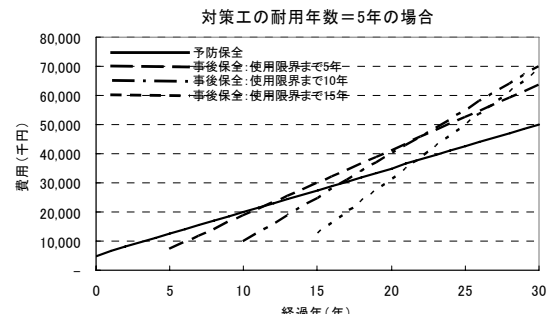


図7 総対策工事費と経過年の関係

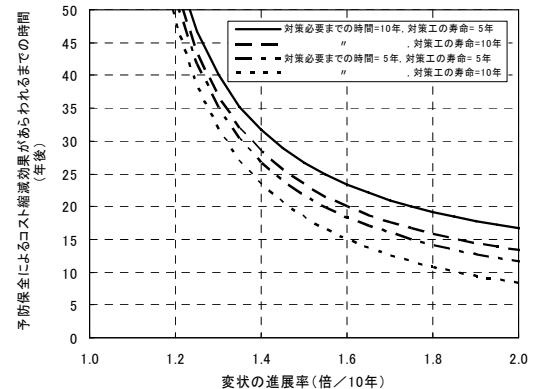


図8 変状の進展率と予防保全によるコスト縮減効果があらわれるまでの時間の関係

その際利用者被害の可能性のある覆工等のうき・はく離箇所を撤去し、変状対策は変状箇所が使用限界レベルに達した時点で実施するのが、コスト面、安全面から見てもっとも望ましいものと考えられる。

4. 本研究により得られた成果

- 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又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。外力に起因するひび割れは、その進展を単一の曲線によりモデル化することは難しいが、地すべりに起因するひび割れ密度は経過年数の増加に応じて増加し、またその傾向は指数曲線によりモデル化することができる場合がある。
- 3) 変状の進展率が小さくなるにつれて、はく落に対する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り、トンネルに発生する変状の進展の実態を考慮するとトンネルの変状の維持管理の全体スキームとしては、定期点検と変状箇所の事後保全を組み合わせるのが、コスト面、安全面からみてもっとも望ましい。

STUDY ON ENHANCEMENT ABOUT TUNNEL MAINTENANCE METHOD

Abstract :In this research, the prediction model about prospective tunnel degradation was tried to propose by revealing the relationship between the age of tunnel, configuration and geological condition around tunnel, environment in tunnel. Total cost of reactive countermeasure was compared with that of proactive countermeasure by using deformation progress as a parameter.

The result from this research was that cracks caused by concrete shrinkage due to a drop in tunnel temperature or lower humidity in tunnel expanded within almost five years after tunnel construction, and it did not expand anymore after that. And tunnel deterioration curve for cracks caused by landslide was defined as an exponential curve by using an index of crack density. It was also clarified that tunnel deformation progressed very slowly so, reactive countermeasure was more economical than proactive countermeasure in term of total cost of countermeasure.

Key words :crack density, prediction of crack progress, proactive countermeasure, reactive countermeasure, scheme of tunnel management