

寒冷地トンネルの覆工コンクリート における劣化過程の同定

Identification of tunnel linings deterioration forecasting in cold region

須藤 敦史¹・三上 隆²・佐藤 京³・河村 巧⁴・西 弘明³

Atsushi SUTOH, Takashi MIKAMI, Takashi SATO, Takumi KAWAMURA and
Hiroaki NISHI

¹正会員 工博 (株)地崎工業 生産技術部 (〒105-8488 東京都港区新橋5丁目11番3号)

E-mail: 1714@chizaki.co.jp

²正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科社会基盤専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 (独)土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

⁴正会員 (株)地崎工業 北海道本店土木部 (〒060-0051 札幌市中央区南1条東2丁目6番地)

In this paper, a methodology to estimate and/or identify the probability model is presented to forecast the statistical deterioration process of road tunnel linings. The deterioration states of the tunnel linings are categorized into several ranks, and their deterioration processes are characterized by hazard models. The statistical transition probabilities between the deterioration states which are defined for the fixed intervals between the inspection points in time, are described by the exponential hazard model. The applicability of the estimation methodology presented in this paper is investigated by the empirical data set of tunnel in Hokkaido. Finally, numerical examples are worked out to demonstrate the usefulness of these considerations.

Key Words : Tunnel Management system, LCC, Lining condition, Identification

1. はじめに

北海道では昭和30年代後半から道路整備に伴う山岳トンネルの建設が進んでいるが、建設から30年以上を経過したトンネルでは老朽化が進行してきており、今後改築や補強・補修など何らかのメンテナンスを必要とするトンネルの増加が予想される。

しかし、最近の社会・経済環境よりトンネルの新設は難しく、加えて供用下における補修・改修作業は様々な制約条件を受け難いため、効率的かつ経済的なメンテナンス・維持管理が求められるようになる。

一方、昭和60年以降NATMが普及し、漏水・防水対策やまた北海道では坑口部における地山の凍結防止対策などにより、覆工コンクリートの耐久性は改善されてきているが、今後は公共構造物としてその性能水準の維持対策が急務となっている。

そこで、図-1に示すように予防保全の考え方により、トンネルの計画的な維持管理と延命対策を行う、ライフサイクルマネジメント (Life Cycle Management : LCM) や社会資本をアセット(資産)と見なすアセットマネジメントに対する様々な検討が行われている^{1),2),3)}。

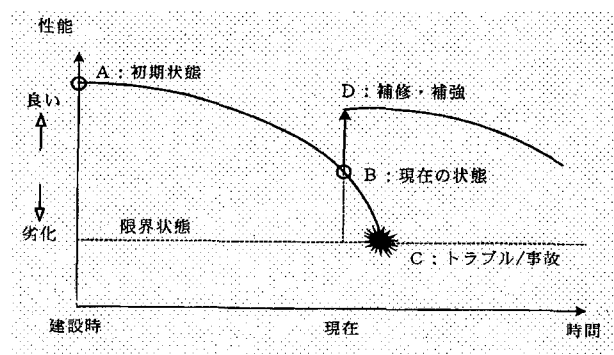


図-1 性能劣化と補修・補強の概念図

本研究は LCM およびアセットマネジメントを行う上で不可欠な覆工コンクリートの性能水準の推移（劣化）過程を同定する基礎検討として、北海道内小樽地区における 68 カ所のトンネルで実施された覆工コンクリートの点検データの中からひび割れデータを用いて試みている。

2. 山岳トンネルにおける維持管理

山岳トンネルは覆工・吹付けコンクリート、支保工、ロックボルトおよび周辺岩盤(地山)などで構成されているが、通常の点検は覆工コンクリート表面が主であり、各部材個々の劣化度評価が難しく、加えて北海道におけるトンネルは、その多くは海岸線沿いまたは山岳地の生活道路に位置しており、その新設・改築などは難しいため、トンネル構造物として延命化を図ることが重要となり、計画的なアセットマネジメント(維持管理手法)が必要となる。

これまでトンネルに対する維持管理は、各機関から発行されているマニュアルなど^{4),5),6)}によって行われてきたが、現実には以下の課題があるため、その実行は容易ではない。

- ① 調査・設計・施工時の記録が残っておらず、それらを維持管理にフィードバックに利用できない。
- ② 地山・支保部材など変状の初期値および長期観測、また進展過程の観測記録があまりない。
- ③ トンネル供用時の点検データがデータベースとしてまとめられておらず、加えて点検結果を定量的に評価する手法が構築されていない。
- ④ 適切な対策工の選定とその効果および対策時期の設定に対する意志決定・判断基準が不明確である。

これらに対して北海道では、①に対しては施工された各トンネルにおける設計データや施工中の各計測データの蓄積・データベース化を行っており、②に対しては文献 7),8)に示すようにトンネル周辺地山や支保部材の長期観測を実施している。また、③に対しては点検データの基準化および判定結果のデータベース化も進められている^{9),10)}。

今後は④に示したトンネル構造物のもつ特殊性を考慮した適切な維持管理と意思決定に関連する研究がアセットマネジメントを確立する上で急務である。

3. 覆工コンクリートの経年劣化について

(1) 覆工コンクリートの劣化過程

既設トンネルにおける覆工コンクリートの長寿命

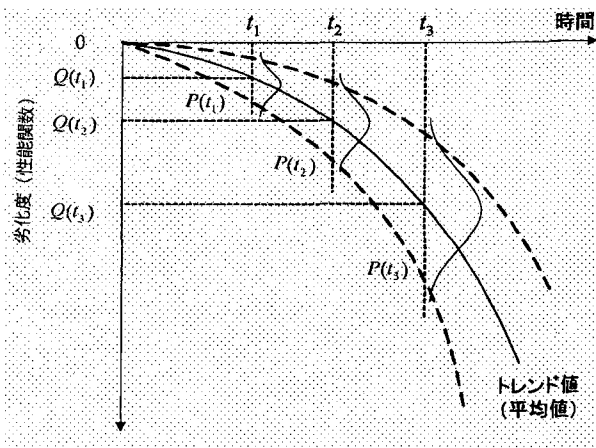


図-2 覆工コンクリートの（性能）劣化モデル

化を考える上で、現在のコンクリート部材の損傷・劣化状態を正確に把握し、さらに今後の劣化過程を予測することが適切な補修・補強時期を判断する上で重要となる。

一般に、このような山岳トンネルにおける覆工コンクリートの（性能）劣化過程をモデル化すると図-2に示すように経過年数 t_i と覆工コンクリートの劣化度（性能関数） $Q(t_i)$ との関係として表される。ここで経過年数 t_i における劣化度の分布は $P(t_i)$ となる。

すなわち、覆工コンクリートの劣化度を同定するには、同一トンネルにおいて定められた点検・調査間隔（時間・空間的）とその方法により、数多くのデータを収集・蓄積する必要がある。

しかし、実際に多くの点検データより覆工コンクリートの経年劣化の推移過程として求めた事例がないのが現状である。

したがって、実施されているトンネル覆工コンクリートの（目視）点検データ等に基づいて覆工コンクリートの劣化予測を確率・統計的手法を用いて行わざるを得ないのが現状である。

一方、トンネルの維持管理、特に覆工コンクリートの劣化度は、a)ある地域のトンネル群における平均的な劣化度を予測する場合とb)個々のトンネル覆工における劣化・損傷を予測する場合とに大別されるが、本研究では、トンネルの点検データ等により得られた（集計的）情報から覆工コンクリートの劣化過程（性能関数）を統計的に同定するものである。

(2) 時間に依存した劣化過程

山岳トンネルにおける覆工コンクリートの劣化過程のような時間に依存した現象・事象を説明する理論的背景もまだ完全に確立されはしない。

しかし、このような考え方としてマルコフ（連鎖

モデル) 過程¹¹⁾が挙げられ、最近ではコンクリート構造物(梁・床版)を小領域に分割した劣化進行過程をマルコフ連鎖で表した解析・検討が行われている¹²⁾が、これはサンプルを数え上げることにより集計的に劣化過程を推定しているものである。

一方、目視点検データから個々の施設に対する劣化過程を推定する手法^{13),14)}があるが、一般的な構造物におけるマクロ的な劣化予測に適用する場合には、何らかの平均化操作が必要となる。

4. 点検データの定量化と覆工の経年劣化

本来、覆工コンクリートの劣化過程(進行度)は連続した値であるが、トンネルの点検は一般的に3年~10年程度の間隔で行われることが多く、また健全度は数値やアルファベットによる離散データになり、加えて実施回数も少ないのが現状である。

本来ならば劣化の進行度は個々の覆工コンクリートにおける時間推移で示さなければならないが、ここではこのような観測・点検データが存在しないため、点検したトンネルの建設年代を覆工コンクリートにおける経過年数とみなして経年劣化を求めた。

(1)点検データの数値化

一般的に、山岳トンネルにおける点検項目は覆工コンクリートの要求性能に直接影響すると考えられている①ひび割れ、②浮き・剥離、③漏水、④目地ずれ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰の6項目における劣化状態を定量的に表して、総合的に評価しているものであるが、これら6項目がどのように影響するかを評価することは非常に難しい。

今回の覆工コンクリートにおける劣化評価の試行

表-1 ひび割れのパターン

種別	ひび割れ幅の条件	ひび割れパターン
A	0.3mm以上	短いひび割れ散布
B	0.3mm以上	長いひび割れ(クロスあり)
C	0.3mm以上	大きな三角・四角形
D	0.3mm以上	特定部分が密(クロスあり)
E	すべてのひび割れ	その他平凡
F	0.3mm未満	短いひび割れ散布
G	0.3mm未満	長いひび割れ(クロスあり)
H	0.3mm未満	大きな三角・四角形
I	0.3mm未満	特定部分が密(クロスあり)

表-2 ひび割れの重み

交点の種類	ウエイト
0.3mm未満どうし	0.003
0.3mm以上関連	0.1

では、第三者影響度に特に関係する性能である、ひび割れに対して評価を行うこととする。

(2)ひび割れによる覆工コンクリートの劣化度

本研究では、覆工コンクリートの劣化度を示す指標として代表的な劣化現象である「ひび割れ」を使用する。

既存の評価方法では、ひび割れ幅や形状は特に考えずに単純に総長さのみを計測し、そこから各スパンでのひびわれによる評価値を算出していたが、ひび割れ形状によっては、剥離・剥落につながる恐れがあると考えてひび割れ幅やひび割れ形状による影響も考慮したひび割れの評価方法を考える。

まず、幅0.3mm以上と0.3mm未満それぞれのひび割れ延長、ひびわれの交点の数(0.3mm以上が関連するものと、0.3mm未満同士の場合とを区別)、またひび割れのパターンを表-1のように場合分けして、重み付けを行って評価を試みている。

なお交点に関しては0.3mm未満同士の交点については剥落の要因になる等、第三者被害の面で危険度はそれほど高くないと考えられるため、0.3mm以上が関連する交点とはウエイト面で表-2に示すよ

値を設定した。
次に、トンネルの年代と劣化度の関係を求めるには、覆工コンクリートにおける劣化度の平均値を算出しなければならない。そこで標本の分散値より大きな評価値は特異点として除いている。

ここで覆工コンクリートの劣化評価値は以下となり、0点を健全として評価点数が大きいほど劣化が進行している。

評価値=区間比×補正係数+交点数×交点ウエイト

補正係数=ウエイトI×ウエイトII×打音ウエイト

ウエイトI:変状種類別の係数(重み)

ウエイトI=ひび割れ長さ×ひび割れパターンウエイト

ウエイトII:発生原因・位置・状態による係数

打音ウエイト:打音検査による係数

なお、ウエイトIIと打音ウエイトについては、それぞれ材料劣化1.5、清音・反発1.0に固定している。

5. 点検データによる

覆工コンクリートの経年劣化同定

北海道内小樽地区における68カ所のトンネルで実施された点検データを用い、ひび割れに対して前記の評価手法により、覆工コンクリートの経年劣化の同定を行っている。

(1) 在来トンネルにおける

覆工コンクリートの経年劣化

まず、小樽管内における在来工法で施工されたトンネル（45箇所）の覆工コンクリートのひび割れに対する経年劣化の評価値を図-3に示す。

図-3より、トンネルの建設年代（経年）に伴い覆工コンクリートのひび割れに対する劣化度は低下

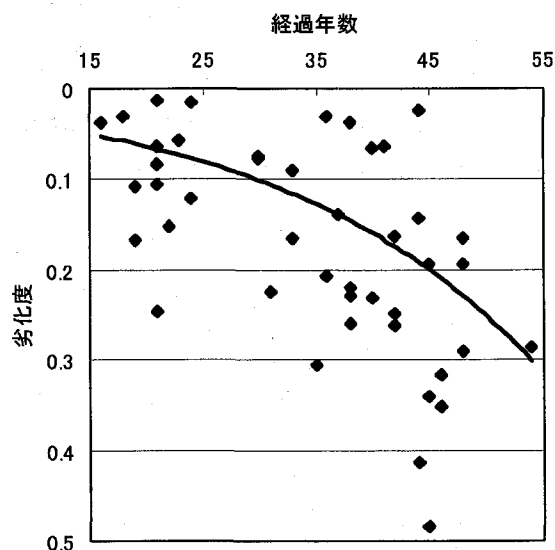


図-3 ひび割れに対する覆工の経年劣化
(在来トンネル)

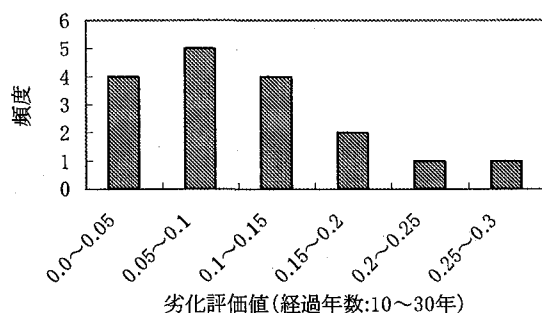


図-4 劣化評価値の頻度（経過年数10～30年）

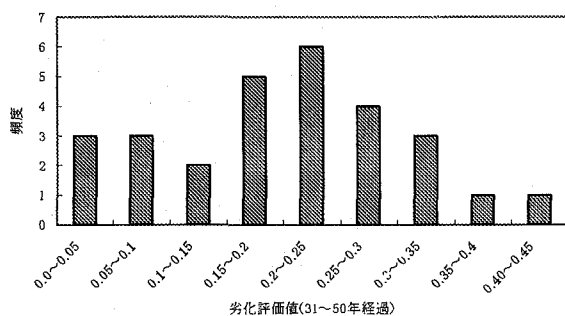


図-5 劣化評価値の頻度（経過年数31～50年）

（評価値は上昇）傾向を示している。

ここで、少ないデータ数であるが在来トンネルにおける劣化度のトレンド（平均）値を同定すると式(1)となる。

$$Q(t_i) = 0.0257e^{0.0456x} \quad (1)$$

加えて、図-4,5に示すように分布関数も経過年数にしたがって広がっているが、経年劣化および分布形態は点検データ数が少ないため、まだ信頼性が低いのが現状である。今後、点検データの追加を実施して全体的な傾向を求めていく予定である。

(2) NATM トンネルにおける

覆工コンクリートの経年劣化

次に、同様に北海道内の小樽地区における24カ所のNATMトンネルで実施された点検データを用い、ひび割れに対して前記の評価手法により覆工コンクリートのひび割れに対する経年劣化の評価値を図-6に示す。

ここで図-7より、NATMトンネルにおいてもトン

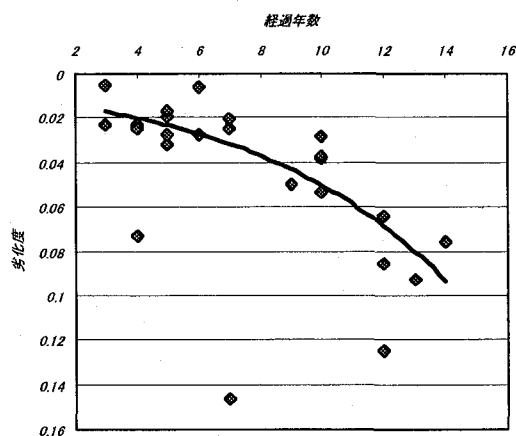


図-6 ひび割れに対する覆工の経年劣化
(NATMトンネル)

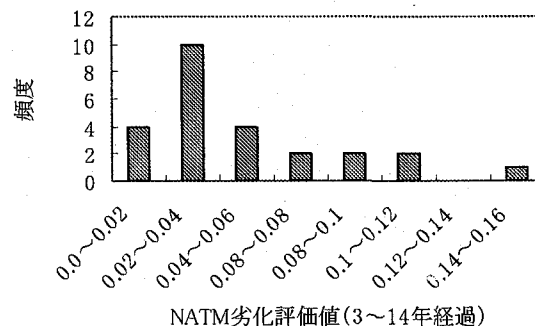


図-7 NATM劣化評価値の頻度
(経過年数3～14年)

ネルの建設年代（経年）に対して覆工コンクリートのひび割れに対する劣化度は低下（評価値は上昇）傾向を示している。

ここで、少ないデータ数であるが NATM トンネルにおいても劣化度のトレンド（平均）値を同定すると式(2)となる。

$$Q(t_i) = 0.0108e^{0.154x} \quad (2)$$

加えて、図-7 に示すように NATM トンネルにおいても経過年数にしたがってその分布も広がっているが、同様に点検データ数が少ないため、信頼性が低いのが現状である。

(3) NATM、在来トンネルにおける経年劣化

最後に NATM トンネルと在来トンネル（68 箇所）の覆工コンクリートのひび割れに対する経年劣化の評価値を図-8 に示す。

ここで図-8 より、NATM トンネルが在来トンネルよりも、劣化度の進行が早いように見えるが、NATM トンネルは初期ひび割れが、無筋で薄肉覆工であることに起因して、在来トンネルより多い傾向があるものの、その力学的特性（地山荷重は吹付けコンクリート・支保工・ロックボルトなどの支保部材で負担し、覆工コンクリートは化粧巻き）より、ひび割れの長期推移は比較的安定している^{7,8)}ことから、一概に危険であると指摘することはできない。

加えて、在来トンネルにおいては漏水箇所は面導水を施しており、ひび割れの点検・調査がなされていないため、全体の劣化評価値が平均して良い傾向である可能性も有している。

今後、維持管理方法も含めてトンネルの劣化度を評価するためには、個々のトンネルの定期点検記録の検討および全体の統計処理が必要であろう。

6. ま と め

寒冷地トンネルにおける LCM およびアセットマネジメントを行う上で不可欠な覆工コンクリートの性能水準の推移（劣化）過程を同定する目的として、北海道内小樽地区における 68 カ所のトンネルで実施された覆工コンクリートのひび割れデータを用いて試みた結果を以下に示す。

- (1) 在来トンネルの覆工コンクリートにおける劣化度（性能関数）は、（性能）劣化過程モデルに示すように、トンネルの建設年代（経年）に伴い減少していく傾向を示している。加えて、分布関数も経過年数にしたがって広

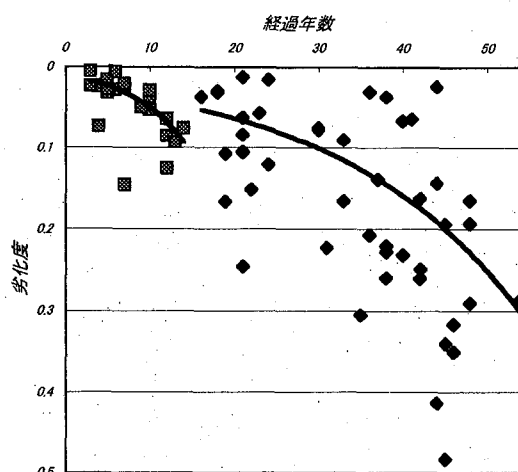


図-8 ひび割れに対する覆工の経年劣化
(NATM・在来トンネル)

がる傾向を示す。

- (2) NATM トンネルにおいても、同様に覆工コンクリートにおける劣化度（性能関数）は、トンネルの建設年代（経年）に伴い減少していく傾向を示し、その分布関数も経過年数にしたがって広がる傾向を示す。
- (3) NATM トンネルと在来トンネルにおける覆工コンクリートにおける劣化度（性能関数）は、力学的条件・点検データの条件など様々な要因を有している。加えて、在来トンネルにおける点検データには地山起因によるものも含まれている可能性があり、変状トンネルの調査と現状を踏まえて再検討する必要がある。

現在の社会的・経済的環境を考えるとトンネルの長寿命化は必要不可欠であり、点検・検査・維持管理技術の定量的評価はトンネルのライフサイクルマネジメントやアセットマネジメントを行う上で重要な項目であるため、点検データ数を増やして検討していく予定である。

【参考文献】

- 1) 須藤敦史, 三上隆, 岡田正之, 河木巧, 角谷俊次: 寒冷地トンネルにおける二次覆工コンクリートの長寿命化に関する一考察, 土木学会第21回建設マネジメント問題に関する研究発表会, pp.191-194, 2003.
- 2) 岡田正之, 三上隆, 川村浩, 須藤敦史, 角谷俊次: 寒冷地トンネルにおけるライフサイクルマネジメントの基礎考察, 土木学会第59回年次学術講演会IV-397, pp.791-792, 2004.
- 3) 中村一樹, 竹内明男, 山田正: トンネルマネジメント

- システムの構築,土木学会,建設マネジメント研究
論文集Vo1.11,2004.12.
- 4) 日本道路協会:道路トンネル維持管理便覧,1993,11.
- 5) 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.
- 6) 土木学会:トンネルの維持管理トンネル・ライブ
ラリー第14号,丸善,pp.27-31,2005.
- 7) 角谷俊次,三上隆,岡田正之,河村巧,須藤敦史:既設
トンネルにおける完成後 10 年間のB計測挙動に
ついて,-TMS (旧凍結防止) 分科会報告-,北海道
土木技術会トンネル研究委員会,トンネル技術研
究発表会論文集, 2004.
- 8) 須藤敦史,三上隆,岡田正之,川村浩二,角谷俊次:
寒冷地トンネルの長寿命化に関する基礎検討-
二次覆工コンクリートの挙動観測から-,第 17
回ふゆトピア,2005,2.
- 9) 道路保全技術センター(ROMECC)平成 16 年度報告
書,平成 17 年 4 月.
- 10) 須藤敦史,三上隆,岡田正之,河村巧,角谷俊次:寒冷
地トンネルにおける二次覆工コンクリートの長寿
命化に関する一考察,土木学会第21回建設マネジ
メント問題に関する研究発表会,pp.191-194,2003.
- 11) 森村英典,高橋幸雄:マルコフ解析,日科技連,1995.
- 12) 小牟禮健一,濱田秀則,横田 弘,山路 徹:RC 橋上
部工の塩害による劣化進行モデルの開発,港湾空
港技術研究所報告,第 41 巻,第 4 号,2002.12.
- 13) 津田尚胤,貝戸清之,青木一也,小林潔司:橋梁劣化
予測のためのマルコフ推移確率の推定,土木学会
論文集,No.801/I -73,pp.69-82,2005.
- 14) 杉山光一, 貝戸清之,小林潔司:目視点検調査周期
の不均一性を考慮した統計的劣化予測手法の構築,
土木学会構造工学論文集,Vol.52A,pp781-790,2006.