

トンネル覆工における劣化過程の予測

A Estimation for Degrading Process of Tunnel Lining Concrete

東京都市大学工学部 正会員 須藤 敦史 (Atsushi Sutoh)
 (独)土木研究所寒地研究所 正会員 佐藤 京 (Takashi Sato)
 (独)土木研究所寒地研究所 正会員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)
 神戸大学大学院 正会員 野村 貢 (Mistugu Nomura)

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、今後は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。

そこで計画的な維持管理を行うライフサイクルマネジメント(Life Cycle Management : LCM)や社会資本を資産と見なすストックやアセットマネジメントの検討¹⁾などが行われているが、これらでは覆工における要求性能の設定ならびに現状の劣化度の把握、また将来的な劣化予測が重要であるが予測できないのが現状である。

そこで本研究では、トンネル覆工における補修・補強を考慮したブラック・ショールズの幾何学的ブラウン運動(伊藤型確率微分方程式)モデルの定式化を行い、矢板工法でのトンネルを対象とした覆工の劣化推移の同定を試みている。

2. トンネル覆工における劣化過程²⁾

一般に覆工の劣化過程を図-1に示すように経過年数 t_i と劣化度 $Q(t_i)$ との関係として表され、経過年数 t_i における劣化度の分布は $P(t_i)$ となる。

ここでトンネル覆工の劣化モデルは、各スパンや全体の健全度低下傾向の不確実性を考慮して、幾何学的ブラウン運動を適用すると劣化過程は次式で表される。

$$dX(t) = \beta X(t)dt + \sigma X(t)dW_1(t) \quad (1)$$

β は平均劣化率(トレンド)、 σ は分散の程度を表すパラメータ(ボラティリティ)である。また $W_1(t)$ はウィナー

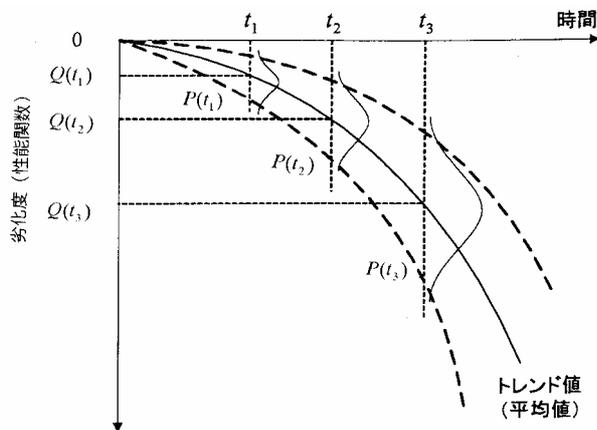


図-1 トンネル覆工の(性能)劣化モデル

過程であり、 $W_1(t)$ は連続 $W_1(0) = 0$ 、 $W_1(t)$ は正規分布 $N(0, t)$ に従う。増分 $W_1(s+t) - W_1(s)$ は正規分布 $N(0, t)$ に従い、時刻 s までの $W_1(t)$ の履歴とは独立である(マルコフ過程³⁾)という3つの性質を満足する。

この幾何学的ブラウン運動(確率微分)方程式を伊藤積分すれば、トンネル覆工における健全度(確率分布)の時間的な推移過程が次式のように求められる。

$$X(t) = x_0 \exp\{-(\beta + 1/2\sigma^2)t - \sigma \cdot W_1(t)\} \quad (2)$$

(1) 矢板工法におけるトンネル覆工

ライフサイクルマネジメントを基本としたトンネルの維持管理ではトンネル覆工の性能水準を劣化度により補修・補強の実施により健全度を回復させ、ライフサイクルコストの向上を図るものである。

ここで在来トンネルは経年劣化が進行しているため、トンネル覆工に補修・補強がなされていることが多く、経年劣化の同定は補修・補強による覆工の改善値を含んだ点検データであるため、トンネル覆工における真の経年劣化を表していない。

(2) 補修・補強過程のモデル化

トンネル覆工において補修・補強が時刻 t_i^* に実施され、覆工の健全度が Z_1^* に改善された場合に直前の健全度(臨界健全度)を Z_2^* とすれば補修・補強が施されたトンネル覆工のブラック・ショールズの幾何学的ブラウン運動(伊藤型確率微分方程式)における劣化過程は次式となる¹³⁾。

$$dZ(t) = \beta Z(t)dt + \sigma Z(t)dW_1(t) + \sum_{i>1} \{Z_1^* - Z_2^*\} \delta(t - t_i^*) \quad (3)$$

ここで δ はディラックの測度であり $t = t_i^*$ の時のみ確率測度1を与え、それ以外の時は確率測度0を与える。

3. 補修・補強を修正した点検データによるトンネル覆工の劣化過程の同定

(1) トンネル覆工の点検データ(劣化指標)

トンネル覆工の点検は ひび割れ、浮き・剥離、漏水、目地ずれ・開き、豆板・空洞、遊離石灰の

6項目に対して実施されるものであるが、今回は「ひび割れ、浮き・剥離」の2項目を用いて、トンネル覆工の補修・補強を考慮した経年劣化に対してブラック・ショールズの幾何学的ブラウン運動（伊藤型確率微分方程式）モデルに適用を試みる。

(2) 点検データによるトンネル覆工の劣化同定

在来工法で施工された山岳トンネル（120箇所）で実施された覆工の点検データを使用し、補修・補強を実施したトンネル覆工における経年劣化の検討を試みたものを図-2に示す。

ここでトンネル覆工における補修・補強を考慮した経年劣化（トレンド値）を一点鎖線、補修・補強を考慮しない場合の経年劣化を実線で示している。なお、トンネル覆工の点検データにおいて、補正無し（ \square ）、補正有り（ \diamond ）で示している。またトンネル覆工における補修・補強の劣化評価値に対する補正值（0.5point）は、実際にトンネル点検業務を担当している技術者へヒアリング調査を実施して求めている。

図-2より、トンネルの建設年代（経年）に伴い覆工の劣化度は低下（評価値は上昇）傾向を示している。加えて、覆工の補修・補強を考慮したの経年劣化（トレンド値）は大きい値を示すことより、トンネル覆工における真の経年劣化の評価は可能になった。

(3) 補修・補強を考慮した拡散（ボラティリティ）

同様の覆工の点検データを使用し、補修・補強を実施したトンネル覆工における経年劣化の拡散（ボラティリティ）項の時間的な推移の検討を試みたものを図-3(a)、(b)に示す。

図-3(a)、(b)に示すように分布関数 $P(t_i)$ も経過年数と共に広がる傾向を示しており、図-1に示したような経過年数 t_i と劣化度（性能関数） $Q(t_i)$ との概念のようになっている。

またトンネル覆工に対する補修・補強を考慮すると劣化度（性能関数） $Q(t_i)$ の分布状態は対数正規分布にのように見て取れるが、対数正規分布であれば理論通りであると考えられる。

4. ま と め

寒冷地のトンネル覆工における劣化評価値の経過年数との関係を同定することを目的として、道内120カ所得られた点検データを用いて考察した結果、

- (a) 覆工の劣化評価値は、建設年代（経過経年）に伴い増加していく傾向を示し、経過年数とともに解の係数も規則的に変動する傾向を示した。
- (b) 幾何学的ブラウン運動（確率微分）方程式の解の係数を推定することにより、建設年代（経年）にともな

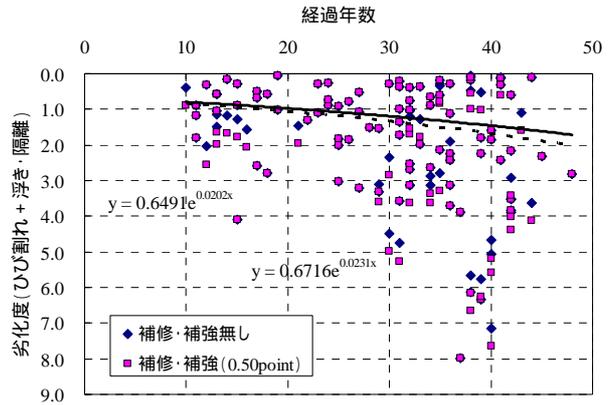


図-2 覆工の補修・補強が評価値に与える影響

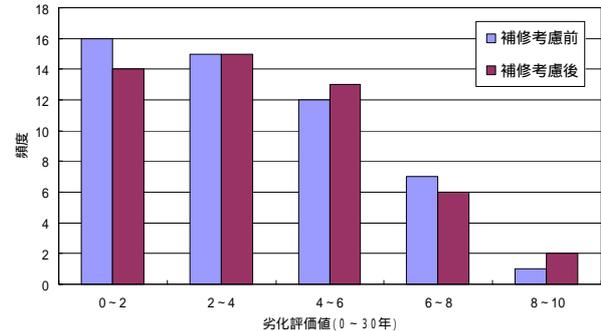


図-3(a) 劣化評価値の頻度（経過年数10～30年）

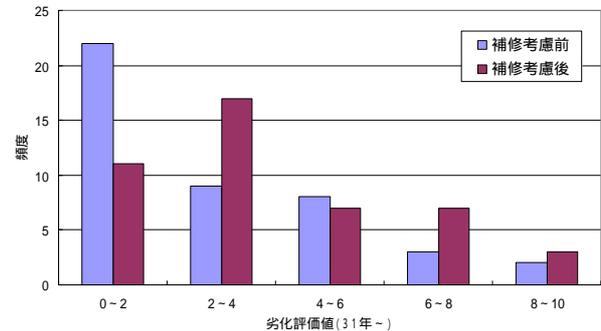


図-3(b) 劣化評価値の頻度（経過年数31～50年）

うトンネル覆工の劣化度の予測を行うことが可能となる。

【参考文献】

- 1) 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 Vol.11,2004.12.
- 2) 須藤敦史,三上隆,佐藤京,西弘明,河村巧:寒冷地トンネルの覆工点検データによる覆工の劣化過程の同定,第62回年次学術講演会講演概要集,2007.
- 3) 森村英典,高橋幸雄:マルコフ解析,日科技連,1995.