

確率過程を用いた寒冷地のトンネル覆工 における性能（劣化）水準の同定

須藤 敦史¹・佐藤 京²・西 弘明²・野村 貢³

¹正会員 東京都市大学 工学部都市工学科（〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1）

E-mail:a.sudou@iwata-gr.co.jp

²正会員 （独）土木研究所寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

³正会員 神戸大学 大学院工学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

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ている。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)が構築が検討されているが、これらではトンネルの覆工における現状の劣化度の把握、また将来的な劣化予測が極めて重要であるにも係わらず、性能水準の推移（劣化）過程を定量的に同定・予測する手法が開発されていないのが現状である。

本研究では、寒冷地のトンネル覆工における性能水準（劣化）の時間推移をブラック・ショールズ（伊藤型確率微分方程式）モデルで定式化を行うとともに北海道内で実施された点検データを用いてトンネル覆工における劣化過程の同定を試みている。

Key Words : Identification, Stochastic process, Tunnel lining, Degrading Process

1. はじめに

北海道は、広域分散型の社会構造であるため、地域間を結ぶ交通・物流手段として道路への依存度が本州に比較して高いのが特徴である。

加えて、積雪・寒冷地でもあり山岳トンネルにおいては周辺部における雪庇・吹溜りや坑内の氷柱・つらら・路面凍結などが毎冬発生することにより、トンネル覆工

など種々の構造物に冬期の環境が原因と考えられる劣化現象が多く生じている。

そこで、図-1に示すように昭和30年代後半から道内における道路網の拡充に伴って山岳トンネル等の整備が進められてきており、昭和60年代以降はNATMの普及と合間って、トンネルの漏水・防水対策や坑口部における地山の凍結防止対策^{1)~5)}など、冬期の交通障害対策が実施されてきている。

しかし、建設から30年以上を経過したトンネルでは環境による劣化もしくは経年劣化などが進行してきており、改築や補強・補修などなんらかの対策が必要となるトンネルは増加すると考えられる。しかし、昨今の社会的・経済的状況より、今後は山岳トンネルにおいても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⁶⁾などが行われているが、これらではトンネル覆工における現状の性能水準（劣化）の評価、また、それらの将来的な予測が重要であるにもかかわらず、実際データを用いたトンネル覆工に

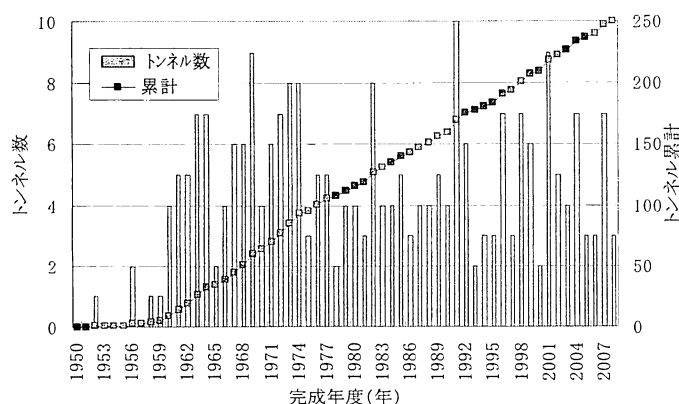


図-1 北海道における道路トンネル数と累計

における性能水準および推移の定量化やそれらの同定・予測手法などの検討がなされていないのが現状である。

そこで本研究は、寒冷地道路トンネルのロングライフ化を図るためのトンネル・マネージメント・システム(Tunnel Management system : TMS)の構築を目標として、以下に示す事項の検討を実施している。

- 1) トンネル覆工における性能水準（劣化）の時間推移をブラック・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）モデルで定式化を行い、同時に最尤法による点検データを用いた同定手法を提案している。
- 2) 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、矢板工法で建設された（在来）トンネルを対象とした覆工の性能水準（劣化）の推移の検討を行っている。
- 3) 北海道内で実施されたトンネル覆工における点検データから、それらの性能水準（劣化）を同定するとともに、性能水準（劣化）の推移における平均特性や点検データのばらつきに対する基礎考察を行なっている。

2. 確率過程によるトンネル覆工の劣化推移

(1) ブラック・ショールズ（伊藤確率微分）方程式

一般にトンネル覆工の性能（劣化）推移は図-2 に示すように経過年数 t_i と性能関数（劣化度） $Q(t_i)$ との関係として表され⁷⁾など、トンネル覆工の健全度低下（劣化の進行）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、経過年数 t_i における劣化度の分布は $P(t_i)$ で表現することができる。

ここでトンネル覆工の劣化過程の不確実性を考慮して、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⁸⁾を用いると次式で表される。

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

$$X(t) = X_0(t) \quad (2)$$

ここで $X(t)$ は劣化度、 β は平均劣化率（トレンドもしくはドリフト）、 σ は拡散（ボラティリティ）の程度を表すパラメータである。

また $W_1(t)$ はウィナー過程であり、① $W_1(t)$ は連続で $W_1(0) = 0$ 、② $W_1(t)$ は正規分布 $N(0, t)$ に従う。③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 $W_1(t)$ の履歴と独立である（マルコフ過程¹⁰⁾）という3つの性質を満足するとする。

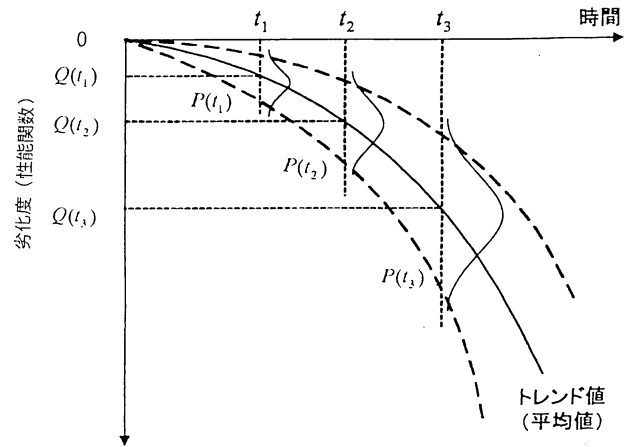


図-2 トンネル覆工の（性能）劣化モデル

ここで、得られている複数のトンネル覆工における点検データ等に基づいて式(1)に示したブラック・ショールズの幾何学的ブラウン運動（伊藤型確率微分）方程式のパラメータを以下に記述する確率・統計的な手法により同定する。

(2) 最尤法によるパラメータ同定¹¹⁾

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）モデルは、大きく分けて2つの部分から構成されている。

まず、式(1)の右辺第一項は性能水準（劣化）の平均的な動き、すなわちトレンド項となる。次に右辺第二項は確率的なランダムな動きすなわち拡散（ボラティリティ）項で構成されている。

ここで式(1)においての平均的な動きに注目して、極限操作をすると式(2)に示す微分方程式が得られる。

$$\frac{dX_t}{dt} = \beta X_t \quad (3)$$

これを $(t, t + \Delta t)$ の範囲で解くことにより、式(4)が得られる。

$$X_{t+\Delta t} = X_t e^{\beta \Delta t} \quad (4)$$

すなわち、トンネル覆工における性能水準（劣化）のトレンド値は指数関数により表現される。

また式(1)、図-2からも分かるように性能水準（劣化）の拡散項が時間の推移（劣化の進行）に比例して大きくなると定義されているため、より劣化が進行すれば拡散の仕方も大きくなる。ここでは Δt はトンネル覆工の点検間隔になり3～5年程度と考えている。

ここで式(4)に対して微少な時間間隔 $(t, t + \Delta t)$ で劣化状態が u 倍になる場合と d 倍になる場合のベルヌーイ試行を考える。

すなわち、時間間隔($t, t + \Delta t$)に劣化状態 X_t が確率 P で $u \cdot X_t$ に確率 $(1 - P)$ で $d \cdot X_t$ になるとする。

このときに時間($t, t + \Delta t$)における劣化状態の平均値は $P \cdot u \cdot X_t + (1 - P) \cdot d \cdot X_t$ となり、この平均値が式(4)と等しいと考える。

$$P \cdot u \cdot X_t + (1 - P) \cdot d \cdot X_t = X_t e^{\beta \Delta t} \quad (5)$$

その結果、確率 P を以下のように求めることができる。

$$P = \frac{e^{\beta \Delta t} - d}{u - d} \quad (6)$$

次に、式(6)における u と d は、拡散項より状態変数 X_t の消去するための対数変換

$y_t = f(X_t) = \log(X_t)$ を行い、「伊藤の公理」の適用により、式(7)を得る（詳細は APPENDIX I 参照）。

$$y_t = y_0 + \left(\beta - \frac{1}{2}\sigma^2\right)t + \sigma B_t \quad (7)$$

ここで B_t が標準ブラウン運動であるためには y_t は平均 $y_0 + (\alpha - \alpha^2/2)t$ 、分散 $\sigma^2 t$ の正規分布に従う。

また離散データに対してインデックス番号を与えて方程式を離散データに対して表現すると以下となる。

$$y_{m+1} - y_m = \left(\beta - \frac{1}{2}\sigma^2\right)(t_{n+1} - t_n) + \sigma(B_{m+1} - B_m) \quad (8)$$

$$dy_t = y_{m+1} - y_m, dt = t_{n+1} - t_n, dB_t = B_{m+1} - B_m$$

ここで尤度関数はブラウン運動に着目すると B_m は標準ブラウン運動であるから $(B_{m+1} - B_m)$ は平均値 0、分散 $(t_{n+1} - t_n)$ の正規分布に従い、 $(y_{m+1} - y_m)$ は平均 $E = (\beta - \sigma^2/2)(t_{n+1} - t_n)$ 、分散 $V = \sigma^2(t_{n+1} - t_n)$ の正規分布の確率変数となる。

実際に観測された時系列データ $(X_{t_0}, X_{t_1}, \dots, X_{t_N})$ を考えると最尤法により係数 (β, σ) の推定値は、それらの観測データが最も高い確率で生じられるように求められる。

観測値 $(X_{t_0}, X_{t_1}, \dots, X_{t_N})$ を対数変換 $y_t = \ln(X_t)$ したデータ $(y_{t_0}, y_{t_1}, \dots, y_{t_N})$ は式(9)となる。

$$\begin{aligned} p(X_{t_0}, X_{t_1}, \dots, X_{t_N}) \\ = p(y_{t_0}, y_{t_1}, \dots, y_{t_N}) \left| \frac{\partial(y_{t_0}, y_{t_1}, \dots, y_{t_N})}{\partial(X_{t_0}, X_{t_1}, \dots, X_{t_N})} \right| \quad (9) \\ \left| \frac{\partial(\dots)}{\partial(\dots)} \right| : \text{ヤコビアン行列の行列式の絶対値} \end{aligned}$$

表-1 ひび割れパターンの分類

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(交点加付)

交点の種類	ウェイト
0.3mm未満同士	0.003
0.3mm以上関連	0.1

上式の対数を取ると観測データ $(X_{t_0}, X_{t_1}, \dots, X_{t_N})$ に

基づいた対数尤度関数は以下となる。

$$\begin{aligned} \log p(X_{t_0}, X_{t_1}, \dots, X_{t_N}) \\ = \log p(y_{t_0}, y_{t_1}, \dots, y_{t_N}) - \sum_{n=0}^N \log(X_{t_n}) \quad (10) \end{aligned}$$

したがって、観測データ $(X_{t_0}, X_{t_1}, \dots, X_{t_N})$ に対する係数は式 (9) を最大化することによって推定できるが、対数変換した $(y_{m+1} - y_m)$ は、平均 E 、分散 V の正規分布に従うために2つのデータ $(y_{t_0}, y_{t_1}, \dots, y_{t_N})$ と $(X_{t_0}, X_{t_1}, \dots, X_{t_N})$ と式(9)から、係数 (β, σ) の最尤法による推定値は式(11)を最大化することにより求められる。

$$\begin{aligned} \log p(y_{t_0}, y_{t_1}, \dots, y_{t_N}) \\ = \log p(y_{t_0}) + \log \prod_{n=0}^{N-1} p(y_{m+1} | y_m) \\ = \log p(y_{t_0}) - \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\log(2\pi V) + \frac{(y_{m+1} - y_m - E)^2}{V} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

3. 点検データを用いた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)

一般的に山岳トンネルにおける覆工の点検は、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項目に対して実施される¹²⁾など。ここではトンネル覆工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」を用いて、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。

文献 12)などを参照して、各トンネル覆工の点検データより、ひび割れを幅 0.3mm 以上と 0.3mm 未満、それぞれのひび割れ延長、ひび割れの交点の数 (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) とし、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定量化を試みた。

なお、交点に関して 0.3mm 未満同士の交点については剥落の要因になる等、第三者被害の危険度はそれほど高くはないと考えられるため 0.3mm 以上が関連する交点では表-2 に示すウエイト値を設定した。

次に、トンネル年代と劣化度の関係を求めるには覆工における劣化度の平均値を算出しなければならない。

そこで覆工における劣化度の平均値は以下と設定して、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 (12)

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:変状の種類別に対する係数(重み) ,

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

ここで、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。

(2) 点検データによるトンネル覆工の劣化同定

北海道内 (小樽地区) における在来の 68 トンネルと 14 の NATM トンネルで実施された覆工の点検データから、ひび割れを性能水準の評価指標として経年劣化の同定結果を図-3(a), (b) に示す。

ここで、在来トンネル:Type-1, NATM トンネル:Type-2 としている。

図-3(a), (b) においてトンネル覆工の劣化過程 (ブラック・ショールズの幾何学的ブラウン運動方程式) のトレンド項とボラティリティ項を点検データより同定し、求めたトレンド (平均) のみによる経年劣化を太実線、トレンドとボラティリティを用いた (モンテカルロ) シミュレーションにより、再現された経年劣化を細実線や点線などで示している。

なお、使用したトンネル覆工の点検データは (▲) で示している。

(3) 拡散 (ボラティリティ) の経年変動

次に、幾何学的ブラウン運動モデルにおける確率的なランダムな動き、すなわち拡散 (ボラティリティ) 項の時間的な推移の考察結果を図-4 に示す。

図-4 では、使用した点検データは経年数を 0 年～

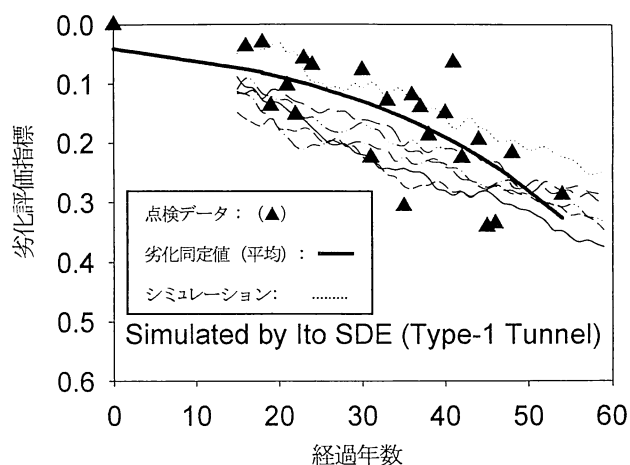


図-3(a) 在来トンネル覆工の劣化同定値とシミュレーション

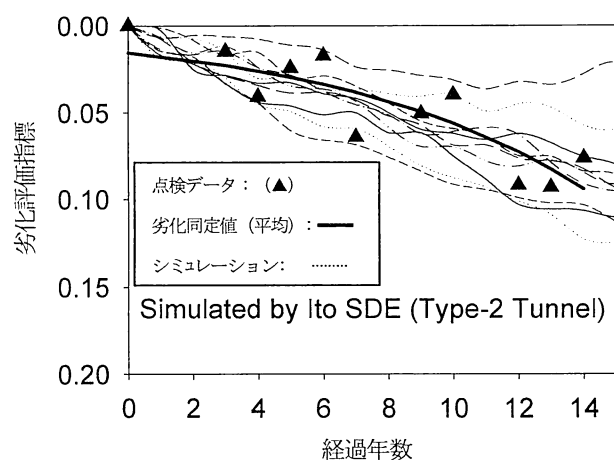


図-3(b) NATM トンネル覆工の劣化同定値とシミュレーション

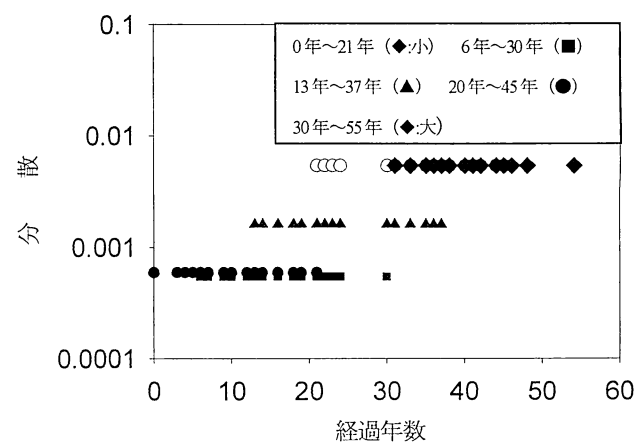


図-4 分散項の経時変化

21 年 (◆:小), 6 年～30 年 (■), 13 年～37 年 (▲), 20 年～45 年 (●), 30 年～55 年 (◆:大) というように概ね 20 年程度の期間のデータセットを用いてそれぞれの拡散 (ボラティリティ) の変化を示したものであり、年数の経過により劣化状態の変動幅が大きくなる傾向が確認できる。

図-3(a)，(b)より，在来・NATMトンネルともにトンネル覆工の劣化値は建設年代（経年）に伴い低下の傾向を示している。また，図-4より，劣化値の分布も経過年数に伴い広がる傾向を示している。

したがって，ブラック・ショールズの幾何学的ブラウン運動方程式（トレンド・ドリフト成分）はトンネル覆工における性能水準（劣化）の推移現象を適切に表現していると考えられる。

4. トンネル覆工における補修・補強と劣化過程

(1) トンネル覆工における補修・補強

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図-5に示すように，その劣化度により補修・補強の実施により健全度を回復させ，ロングライフ化とともにライフサイクルコストの向上を図るものである。

ここでトンネルの維持管理に着目すると在来トンネルが対象となり，これらの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い。

したがって，図-3(a)に示した在来工法で建設されたトンネル覆工における経年劣化の同定結果は，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と言える。

そこで，以下では覆工の補修・補強効果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う。

(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⁾。

$$dZ(t) = \beta Z(t)dt + \sigma Z(t)dW_1(t) + \sum_{i>1} \{Z_1^* - Z_2^*\} \delta(t - t_i^*) \quad (13)$$

ここで l はディラックの測度であり， $t = t_1^*$ 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。

この確率微分方程式(13)を式(1)と同様に「伊藤の公理」を適用すれば以下に示す劣化過程における確率分布の時間的推移を求めることができる。

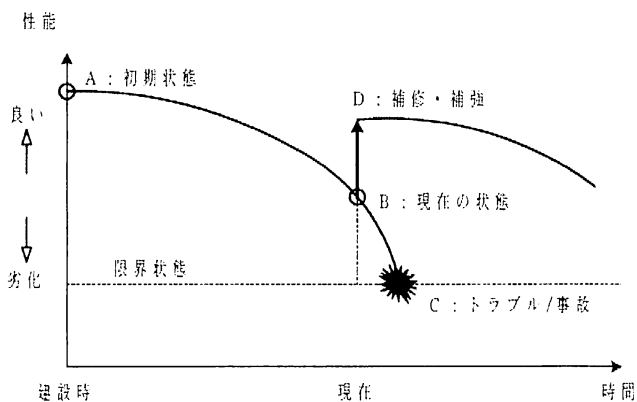


図-5 トンネル覆工の補修・補強の概念図

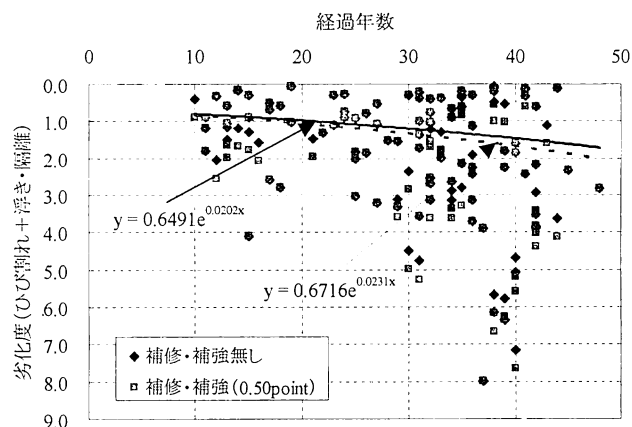


図-6 覆工の補修・補強が評価値に与える影響

$$Z(0) = Z_0 \quad (14a) \quad , \quad Z_2^* = Z_1^*(t = t_1^*) \quad (14b)$$

$$Z(t) = Z(t_1^*) \exp \left\{ \left\{ \beta - \frac{1}{2} \sigma^2 \right\} (t - t_1^*) - \sigma (W_1(t) - W_1(t_1^*)) \right\} \quad (15)$$

$$t_i^* < t < t_{i+1}^*$$

5. 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項目に対して実施され，これらの状態を定量的・総合的に評価しているものであるが，これらの項目がどのように覆工の性能水準に影響するかを評価することは非常に難しい。

そこでトンネル覆工の劣化度を示す指標として「①ひび割れ，②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) 点検データによる補修・補強を考慮した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-6 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（◆），補正有り（■）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-6 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-7(a)，(b)に示す。

図-7(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-2 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） $Q(t_i)$ の分布状態は正規分布ではない分布のようにも見て取れるが、この点に関する検討は今後の課題と考えている。

6. ま と め

寒冷地のトンネル覆工における性能水準の経過年数と劣化度との関係を定量的に把握することを目的として、道内で実施された点検データを用いて考察し、以下の結果が得られた。

1) トンネル覆工の劣化モデルは、各スパンや全体の

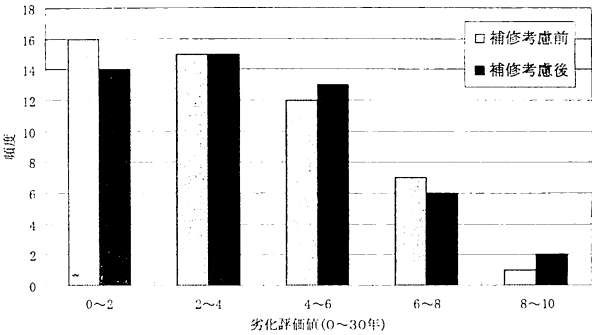


図-7(a) 劣化評価値の頻度（経過年数10～30年）

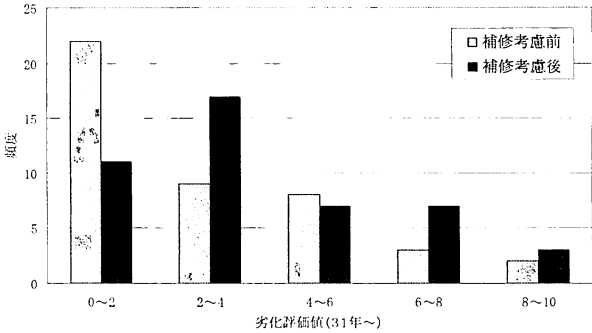


図-7(b) 劣化評価値の頻度（経過年数31～50年）

健全度低下傾向の不確実性を考慮して、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）モデルを適用できる。

2) トンネル覆工の劣化は、建設年代（経過経年）に伴い増加していく傾向を示し、同様にその分布も経過年数に伴い広がる傾向を示した。

3) トンネル覆工に対する補修・補強を考慮することで覆工における真の経年劣化の評価が可能となったが、経年劣化の分布では劣化モデルと異なる分布である可能性が生じた。

【APPENDIX 1】（伊藤の公理）

伊藤の確率微分方程式

$$dx(t) = b(t)dt + s(t)dw(t) \tag{a1}$$

式(a1)に従う確率過程 $x(t)$ について、関数 $y = f(t)$ によって別の確率過程 $y(t)$ とすると関係式(a2)が得られる。

$$y(t) = f(x(t)) \tag{a2}$$

このとき、確率過程 $y(t)$ は確率微分方程式(a3)に従う。

$$dy(t) = \{f'(x(t))b(t) + 1/2 f''(x(t))s(t)^2\}dt$$

$$+ f'(x(t))s(t)dw(t) \quad (a3)$$

ここで、確率過程 $x(t)$ についての確率微分方程式において $dx(t) = x(t+dt) - x(t)$, また $y(t) = f(x(t))$ より

$$dy(t) = y(t+dt) - y(t) = f(x(t+dt)) - f(x(t)) \quad (a4)$$

となるため、式(a5)が得られる。

$$dy(t) = f(x(t+dt)) - f(x(t)) \quad (a5)$$

2 次のテーラー展開より $a = x(t)$, $\Delta a = dx(t)$ とすると式(a6)が得られる。

$$f(x(t+dt)) \approx f(x(t)) + f'(x(t))dx(t) + 1/2 f''(x(t))dx(t)^2 \quad (a6)$$

これから

$$dy(t) = f(x(t+dt)) - f(x(t)) \approx f'(x(t))dx(t) + 1/2 f''(x(t))dx(t)^2 \quad (a7)$$

となる。

これに $x(t)$ について確率微分方程式(a1)を代入すると式(a8)が得られる。

$$dy(t) \approx f'(x(t))b(t)dt + f'(x(t))s(t)dw(t) + 1/2 f''(x(t))s(t)^2 dw(t)^2 \quad (a8)$$

中心極限定理より $dw(t)^2 = dt$ となり、式(a9)が得られる。

$$dy(t) \approx f'(x(t))b(t)dt + 1/2 f''(x(t))s(t)^2 dt + f'(x(t))s(t)dw(t) \quad (a9)$$

極限 $dt \rightarrow 0$ より等式となる。

参考文献

- 1) 須藤敦史, 三上 隆, 荻澤憲吉, 斉藤知秀: 寒冷地道路トンネルの断熱材設計のための地山熱定数の推定, 土木学会論文集, No.553/VI-33, pp.201-208, 1996.
- 2) 岡田正之, 三上隆, 須藤敦史: 寒冷地道路トンネルの外部断熱材厚さの実用的な算定法について, 寒地技術論文・報告集, Vol.13, pp.213-218, 1997.
- 3) 須藤敦史, 三上 隆, 岡原貴司, 岡田雅之, 荻澤憲吉: 寒冷地道路トンネルの断熱材設計における気温変動の推定, 土木学会論文集, No.616/VI-42, pp.103-110, 1999.
- 4) 須藤敦史, 三上隆, 岡田正之, 飯塚哲善: トンネル内(延長方向)の気温変動について, 寒地技術論文・報告集, Vol.17, pp.66-73, 2001.
- 5) 須藤敦史, 三上隆, 豊田邦男, 外塚信: 寒冷地の高速道路トンネルにおける坑口と坑内の推定気温の精度検証, トンネル工学研究論文・報告集第 15 巻, 論文, pp.205-210, 2005.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 飛田武幸: ブラウン運動, 岩波書店, 1975.
- 9) Black, F., : The Pricing of Commodity Contracts, Journal of Financial Economics, 3, pp.167-179, 1976.
- 10) 森村英典, 高橋幸雄: マルコフ解析, 日科技連, 1995.
- 11) 吉本: 不確実性下における人工林施業の経済分析, 統計数理, Vol.51, no.1, pp.121-133, 2003.
- 11) 国土交通省道路局国道課: 道路トンネル定期点検要領(案), 2002.4.
- 12) 田村謙介, 小林潔司: 不確実性下における道路舗装の修繕ルールに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.18(1), pp.97-107, 2001.

IDENTIFICATION OF DEGRADING PROCESS FOR COLD REGION TUNNEL LINING USING STOCHASTIC PROCEDURE

Atsushi SUTOH, Takashi SATO, Hiroaki NISHI and Mitsugu NOMURA

A resurgence of attention to and interest in system identification techniques has recently been observed among engineers in the field of structural engineering in conjunction with the rehabilitation of existing structures possibly damaged by past earthquakes and other loads. The load resisting capacity of these structures may also degraded due to aging. As a structure deteriorates or approaches its design life, the existing condition may be quite different from that of the original system. In this regard, the field of system identification has special significance in the connection with the asset management of the existing structure.

Especially, tunnel concrete degradation has become serious social problem since tips of concretes fell off in concrete structures. So far, the monitoring and maintenance of concrete structure has been done by visual inspections. Then, system identification techniques must exhibit analytical stability and numerical efficiency in identifying significant parameters indicative of deteriorating process of tunnel concrete.