

寒冷地トンネルの覆工における劣化過程の同定と長期予測

須藤 敦史¹・近野 正彦²・丸山 収¹・佐藤 京³・西 弘明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学生会員 東京都市大学大学院, 工学研究科 (〒158-8557東京都世田谷区玉堤1-28-1)

³正会員 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)

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、今後は老朽化の進行が予測されるため、効率的かつ経済的なメンテナンス、維持管理が求められている。そこで計画的な維持管理を行うため、ライフサイクルマネジメント(Life Cycle Management : LCM)の構築が検討されている。しかし、LCMにはトンネル覆工における現状の劣化度、また将来的な劣化予測がきわめて重要であるにも係わらず、これらを定量的に同定、予測する手法の検討がなされていないのが現状である。

本研究は、寒冷地のトンネル覆工における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、北海道内で得られた点検データを用いてトンネル覆工における劣化の同定を行い、同時に予防保全を前提としたLCMを実施する上で重要な劣化の長期予測を示している。

Key Words : identification, prediction, stochastic process, tunnel lining, management system

1. はじめに

北海道は積雪、寒冷地という地域特性に加えて、広域分散型の社会、都市構造であるために地域間を結ぶ交通、物流手段としての道路への依存度が非常に高いのが特徴である。

そこで、昭和30年代後半から道内の道路網の拡充に伴う山岳トンネル等の整備が進められているが、図-1に示すように建設から30年以上を経過したトンネルでは凍害や塩害など北海道特有の環境劣化の影響を受けてトンネ

ル覆工などの老朽化が進行してきているため、今後は社会資本として積雪、寒冷地特有の劣化要因を考慮した性能水準の低下防止やその保持が急務となっている。

そこで公共構造物に対する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)や社会資本を資産(アセット)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つつある^{1),2),3)}。

LCMにおけるトンネル構造物の劣化と補修、補強の関係は図-2に示すように、その保有性能、機能が経年

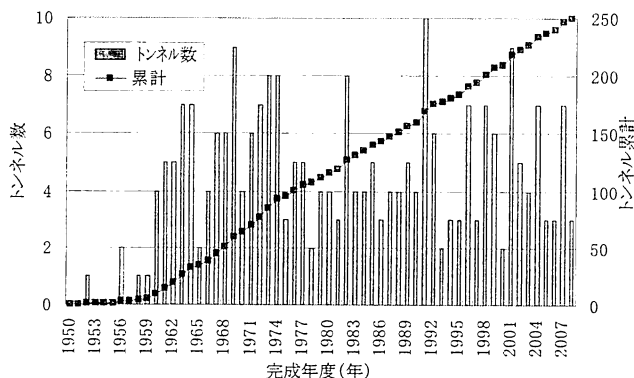


図-1 北海道における道路トンネル数と累計

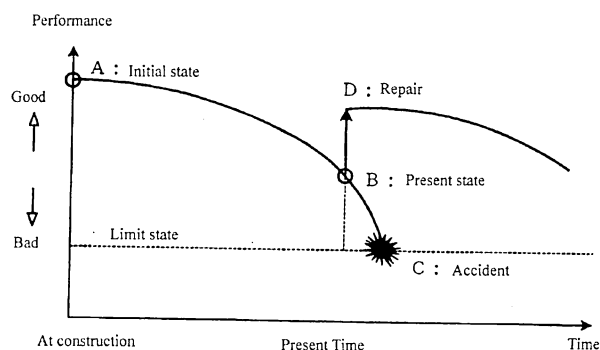


図-2 構造物の性能劣化と補修、補強の概念図

劣化などである水準以下になると予測された場合には補修、補強を実施して性能・機能を回復させて、トンネル構造物の長寿命化を図っていくものである。

したがって、寒冷地のトンネル構造物においてLCMを合理的、効率的に実施していくためには、覆工における現状の劣化度を把握し、加えてその将来予測を正確に行うことがきわめて重要である。

しかし、トンネル覆工における性能水準の劣化推移の把握もしくは推定は非常に難しく、加えてその将来予測の研究は少ないのが現状である。

本研究では、寒冷地トンネルの覆工における劣化過程の時間推移を幾何学的ブラウン運動（伊藤型確率微分方程式）にモデル化して、同時にトンネル覆工における現状の経年劣化度の把握、およびそれらの将来予測を北海道内162カ所で実施されたトンネル覆工の点検データを用いて算出している。

2. 土木構造物における劣化過程の同定手法

社会資本のマネジメントシステム(Management System)では、構造物の供用に伴う損傷度の時間推移を適切に評価して予測することが非常に重要である。しかし、寒冷地のトンネル覆工の場合には、冬期の環境が厳しいため、その劣化、損傷形態が多岐にわたり、加えて一般的に劣化評価値の変動が大きいことから、適切な評価、予測システムの構築がきわめて難しいのが現状である⁴⁾。

トンネル構造物における劣化度の評価・予測を行うには、1)トンネル群全体の平均的な劣化を対象とする場合、2)個別のトンネルにおける具体的な劣化を対象とする場合がある。

1)は膨大な点検データなどの情報から劣化過程の背後に存在する規則性をモデル化する統計的な手法であり、加えて劣化過程の不確実性を考慮するかしないかで確定的、確率的アプローチと分けられる。

2)は劣化過程やメカニズムを直接モデル化する物理的な手法が用いられる場合が多い。

また、不確実性を考慮した確率的手法において、①点検データを平均化してマクロ的な劣化現象を対象とする集計的手法と②点検データから個別（ミクロ的）の劣化現象を対象とする非集計的手法が挙げられる⁵⁾。

本研究では、北海道内で得られている複数トンネルで実施されている点検データを有効に活用することも目的としているため、確率論的手法における集計的方法を劣化過程の同定に採用しているが、集計的手法では平均（マクロ）的な劣化特性を議論するため、劣化過程の予測精度を確保するためには膨大な点検データが必要とな

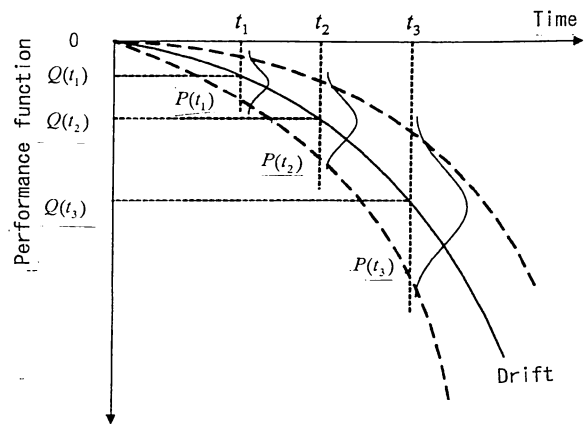


図-3 トンネル覆工の（性能）劣化モデル

る。

そこで、北海道開発局が平成 15 年度より実施しているトンネル点検のデータベース化を図り、それらを基に寒冷地トンネルの維持管理を目的とした劣化過程の同定とその長期予測を試みている。

3. トンネル覆工における劣化過程モデル⁶⁾など

一般にトンネル覆工の劣化過程（性能の推移）は経過年数 t_i と劣化度（性能関数） $Q(t_i)$ との関係として表される⁷⁾。トンネル覆工の健全度低下モデルは、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、経過年数 t_i における劣化度の分布は $P(t_i)$ となり、図-3に示すように確率的パスで表現することができる。

これを算術ブラウン運動（伊藤型確率微分方程式）モデルを適用すると次式で表される（例えば文献⁸⁾など）。

$$dQ(t) = \beta dt + \sigma dW(t) \quad (1)$$

ここに 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。

ここで $W(t)$ はウィナー過程であり、連続で平均0、分散 $\sigma^2 t$ の正規分布に従う。また、 $W(t)$ は独立増分過程あることより、時刻 s 以降の $W(t)$ の振る舞いは、過去の履歴に依存しないマルコフ過程⁹⁾である。

一方、トンネル構造物を含めた社会資本の劣化度（性能関数）において全体の低下傾向の不確実性を考慮すると、経過年数 t_i に対して $Q(t_i) \geq 0$ であるため、式(1)は幾何ブラウン運動式(2)で表される（例えば文献¹⁰⁾など）。

$$dQ(t) = \beta Q(t)dt + \sigma Q(t)dW(t) \quad (2)$$

ここで劣化度の分布 $P(t_i)$ は対数正規分布で表され、式(3)の一般解が得られる。

そこで、得られている複数におけるトンネル覆工の点検データ等に基づいて幾何ブラウン運動（伊藤型確率微分）方程式の係数を最尤法により同定する。

(1) 最尤法によるパラメータ同定¹¹⁾

幾何ブラウン運動モデルは、大きく分けて2つの部分からなる。まず式(2)の右辺第一項は劣化過程の平均的な動きすなわちドリフト項となる。同様に、式(2)の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）項である。

ここで、式(2)右辺第二項および図-3 から分かるように幾何ブラウン運動は劣化状態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そのばらつきも大きくなる。

ここで、幾何ブラウン運動に対して「伊藤の公理」を適用することにより式(3)を得る（詳細は APPENDIX 参照）。

$$Q(t) = Q(0) + (\beta - \frac{1}{2}\sigma^2)t + \sigma W(t) \quad (3)$$

$W(t)$ が標準ブラウン運動であるため、 $Q(t)$ は平均 $Q_0 + (\alpha - \sigma^2/2)t$ ，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式(4)となる。

$$Q(t_{n+1}) - Q(t_n) = (\beta - \frac{1}{2}\sigma^2)(t_{n+1} - t_n) + \sigma(W(t_{n+1}) - W(t_n)) \quad (4)$$

$$dQ(t) = Q(t_{n+1}) - Q(t_n), dt = t_{n+1} - t_n$$

$$dW(t) = W(t_{n+1}) - W(t_n)$$

ここで尤度関数の導出にはブラウン運動に着目すると $W(t_n)$ は標準ブラウン運動で $W(t_{n+1}) - W(t_n)$ は平均値0、分散 $(t_{n+1} - t_n)$ の正規分布に従うことになり、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である。

したがって、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の解は次式のように求められる。

$$Q(t) = Q_0 \exp\{-(\beta + 1/2\sigma^2)t - \sigma \cdot W(t)\} \quad (5)$$

$$\alpha = \{-(\beta + 1/2\sigma^2)t - \sigma \cdot W(t)\}$$

ここで、実際に得られるトンネル覆工の時系列点検データ $(Q(t_0), Q(t_1), \dots, Q(t_N))$ と最尤法により、劣化過程の解(5)における係数 $(Q(t_0), \alpha)$ の推定値は、それらの点検データが最も高い確率で抽出されるように算出される。

一方、平均的なトレンドの動きに注目すると以下の微分方程式(6)が得られ、これを $(t, t + \Delta t)$ の範囲で解くと式(7)が得られる。

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \beta Q(t) \quad (6), \quad Q(t + \Delta t) = Q(t)e^{\beta \Delta t} \quad (7)$$

すなわち、劣化過程の平均的なトレンドの動きは指数関数により表現されることより、微小時間間隔 $(t, t + \Delta t)$ において指数関数 $(Q(t), \beta)$ を実際に得られているトンネル覆工の時系列点検データより同定する。

(2) トンネルの補修、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 Q_1^* に改善された場合に直前の健全度（臨界健全度）を Q_2^* （図-2では B:Present state → D:Repair）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¹²⁾。

$$dQ(t) = \beta Q(t)dt + \sigma Q(t)dW(t) + \sum_{i>1} \{Q_1^* - Q_2^*\} \delta(t - t_i^*) \quad (8)$$

ここで l はディラック測度であり $t = t_1^*$ のときのみ確率測度1を与え、それ以外のときは確率測度0を与える。加えて確率測度0のときに式(8)は式(2)となり、この確率微分方程式も「伊藤の公理」を適用すれば劣化過程の確率分布における時間的推移を求めることができる。

$$Q(0) = Q_0 \quad (9a), \quad Q_2^* = Q_1^*(t = t_1^*) \quad (9b)$$

$$Q(t) = Q(t_1^*) \exp\left\{\left\{\beta - \frac{1}{2}\sigma^2\right\}(t - t_1^*) - \sigma(W(t) - W(t_1^*))\right\} \quad (10)$$

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

本研究では、北海道開発局が保有するトンネル管理台帳の補修、補強履歴より、補修、補強の時期とその種類を抽出して、式(8)の補修、補強を考慮した劣化度に変換している。

(3) 劣化度の評価指標

一般にトンネル覆工における点検項目は、①ひび割

れ、②はく離、はく落、③漏水、④目地ずれ、開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰など劣化状態を評価する¹²⁾などのものであるが、これらがどのようにトンネル覆工の劣化度に対して影響するかを評価することは非常に難しい。

そこで指標として代表的な「ひび割れ」と「はく離・はく落」を使用して劣化度の評価を行う。

1) ひび割れの定量（数値）化

著者らの既存のひび割れの評価は、幅や形状は特に考えずに単純に長さのみで評価していたが、形状によっては剥離・剥落につながるおそれがあるため、ひび割れ幅や形状による影響も考慮した評価を考える。

トンネル覆工におけるひび割れの評価¹³⁾は、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ている。

なお、交点に関して 0.3mm 未満同士の交点については、第三者被害の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では表-2 に示すウエイト値を設定した。なお、ウエイト値はトンネル点検技術者、管理技術者などのアンケート調査結果から求めている。

次に、本研究では確率論的手法における集計的方法を採用しているため、トンネル覆工の経過年数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。そこで各覆工における劣化度は以下のように設定する。なお、評価値は 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。

劣化評価値=区間比×補正係数+交点数×交点ウェイト
区間比: 観察面積/覆工スパン面積
補正係数=ウェイトⅠ×ウェイトⅡ×打音ウェイト
ウェイトⅠ:変状種類別の係数(重み),
ひび割れ長さ×ひび割れパターンウェイト
ウェイトⅡ:発生原因, 位置, 状態による係数,
打音ウェイト:打音検査による係数

ここでウェイトⅡと打音ウェイトについては簡素化のため、それぞれ材料劣化 1.5、清音・反発 1.0 に固定している。

2)浮き、はく離の定量（数値）化

トンネル覆工における剥離・剥落は、一般的にその面積が劣化度の指標となるが、単純な面積和のみでは判断していくと弊害があるため、浮き、はく離に対する重み式(11)および表-3 に示すように設定した。

$$V_{FC} = R_F \times W_F + R_C \times W_C \tag{11}$$

V_{FC} :はく離、はく落評価値、 R_F :はく落区間比(はく落面積/覆工スパン面積)、 W_F :はく落ウェイト、 R_C :はく離

表-1 ひび割れパターンの分類

種 別	ひび割れの条件	ひび割れパターン
A	0.3mm以上	短いひび割れ散布
B		長いひび割れ(クロス有)
C		大きな三角,四角形
D		特定部分が蜜(クロス有)
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		長いひび割れ(クロス有)
H		大きな三角,四角形
I		特定部分が蜜(クロス有)

表-2 ひび割れの重み（交点ウェイト）

交点の種類	ウエイト
0.3mm未満同士	0.003
0.3mm以上関連	0.1

表-3 浮き・剥離の重み

項目	大きさ	発生部	ウエイト
はく離	小	アーチ	42
		側 壁	21
	大	アーチ	63
		側 壁	31.5
はく落	小	アーチ	14.7
		側 壁	7.35
	大	アーチ	21
		側 壁	10.5

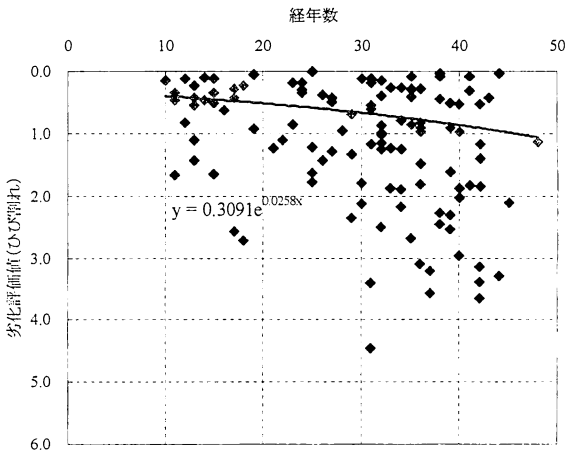


図-4 覆工の劣化評価値（ひび割れ）

区間比(はく離面積/覆工スパン面積)、 W_C :はく離ウェイト

4. トンネル点検データによる劣化過程の同定

北海道内において矢板工法で施工されたトンネル（162 箇所）で得られた覆工の点検データから、ひび割れに着目した経年劣化過程を図-4 に示す。

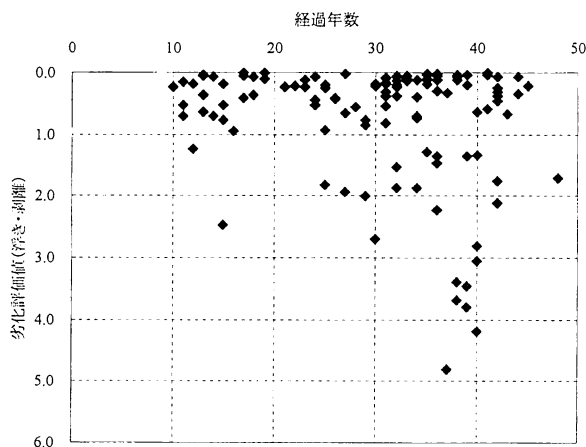


図-5 覆工の劣化評価値（浮き・剥離）

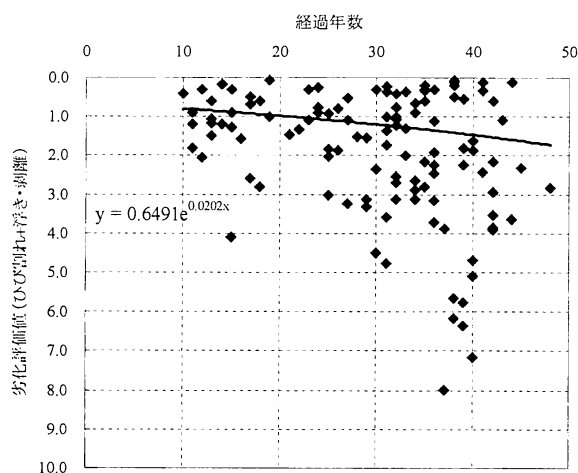


図-6 覆工の劣化評価値（ひび割れ+浮き・剥離）

図-4 より，トンネル覆工の劣化評価値は建設年代（経過年数）に伴い劣化の傾向を示している。

次に図-5 に覆工点検データにおける②浮き，はく離に着目した経年劣化過程を示す。また図-6 に覆工点検データにおける①ひび割れと②剥離，はく離に着目した経年劣化過程を示す。

図-6 より，複数の点検項目においても劣化評価値建設年代に伴い低下の傾向を示している。

以上より，①ひび割れ，②浮き・はく離，③漏水，④目地ずれ・開き，⑤豆板，空洞，⑥遊離石灰の6項目を数値化して，総合的なトンネル覆工における劣化評価は基本的に可能であることが判明した。

しかし，各点検項目の評価値において数値の大きさ（ディメンジョン）や分布幅（レンジ）などが異なるため，重みなどによる調整が必要である。

ここで，同一個所のトンネル覆工を経年にわたる観測データがないため，現在得られている複数の点検データから劣化過程の時間推移を同定している。しかし，少な

いデータ数ではあるが，同一個所の点検データにより本解析の信頼性を確認している。

5. トンネル覆工における劣化過程の長期予測

ライフサイクルマネジメント(LCM)やストック，アセットマネジメントでは，図-2に示すように構造物の劣化の程度により最適な補修，補強を行い，その健全度を回復させる過程が非常に重要であるが，現状の構造物における劣化度の把握，また将来的な劣化予測はきわめて難しいため，その将来予測に関する研究は少ないのが現状である。

ここでは，式(7)に示した幾何ブラウン運動（確率微分）方程式の解（係数部，指数部）を，現在得られている複数の覆工点検データより劣化予測の時間的な推移過程を同定し，同時にその将来予測を行う。

ここでも得られたトンネル覆工における点検データから，①ひび割れ，②浮き，はく離の2項目の劣化評価値を用いている。

(1) 劣化モデルのベイズ推定

ベイズ推定は，専門技術者が事前に保有している情報，知識，経験等を活用して主観的に確率を決定するものであり，事前情報を積極的に活用するため標本が少なくても未知パラメータの推定を行うことが可能である。

また，標本の追加に対しても容易にモデルを更新できるという優れた特徴を有している。

トンネル構造物のアセットマネジメントでは，過去の検査データの蓄積が十分ではないため，技術者の経験的判断に基づいて劣化予測モデルを設定せざるを得ない。

加えて，トンネル覆工における点検データが蓄積されていないため，新しい点検データが得られた段階で劣化予測モデルを逐次更新していく必要がある。

そこでベイズ推定法を用いることにより，先験的な事前情報の有効利用，追加的データに基づいたモデルの更新を統一的な枠組みの中で実施することが可能となる。

(2) 経過年数による劣化度の評価指標

矢板工法で施工されたトンネル（162 箇所）覆工における時間的な劣化推移の平均的なトレンドの動きを把握（式(7)における係数部と指数部を同定）する目的で，用いた点検データの経過年数を変えた結果を図-7(a)，(b)，(c)および表-4 に示す。

図-7(a)，(b)，(c)および表-4 より，トンネルの建設年代（経過年数）に伴い覆工の劣化度は低下する傾向を示しており，加えて用いる点検データの経過年数を変

表4 覆工の劣化 (係数部, 指数部) 同定値

データ年数	係数部	指数部
10～20年	0.1025	0.1395
10～30年	0.397	0.054
10～40年	0.6614	0.0346

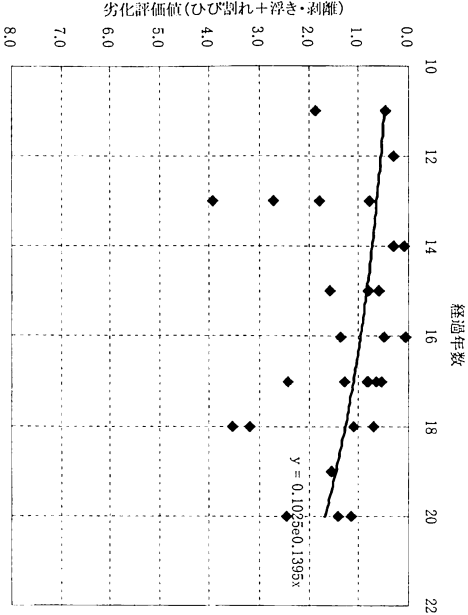


図-7(a) トンネル覆工の劣化評価値(～20年)

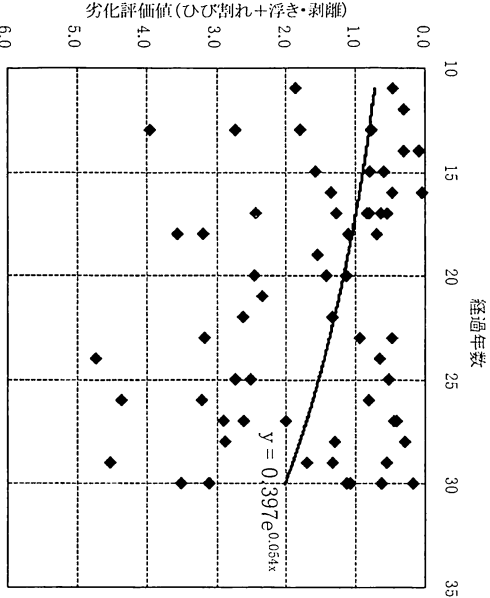


図-7(b) トンネル覆工の劣化評価値(～30年)

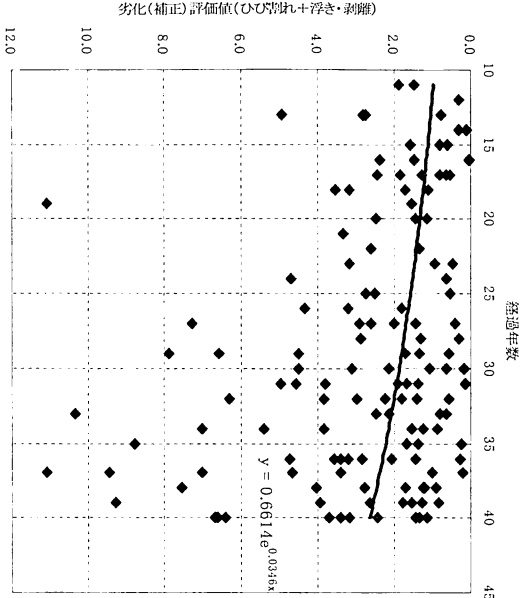


図-7(c) トンネル覆工の劣化評価値(～40年)

化させると式(7)における係数部と指数部も規則的に変動している。

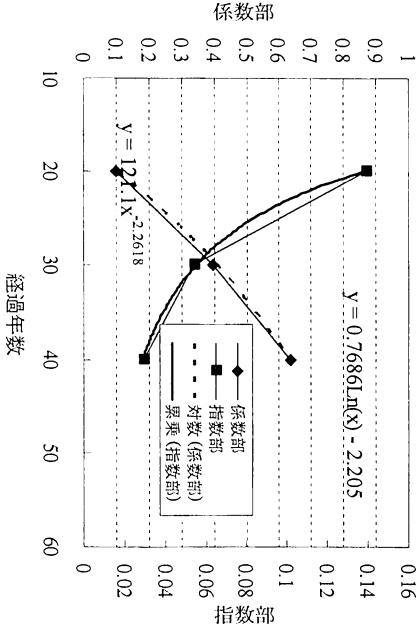


図-8 覆工の劣化 (係数部, 指数部) 補間値

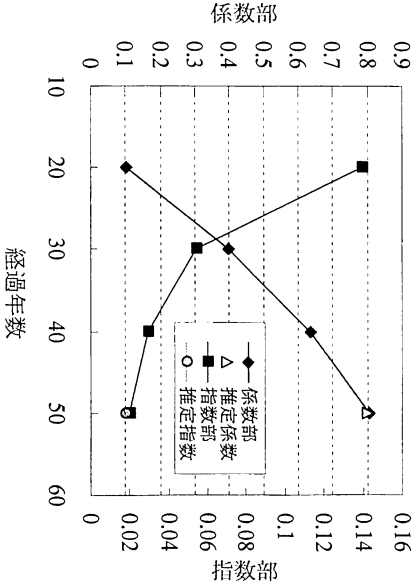


図-9 覆工の劣化度 (係数部, 指数部) 予測

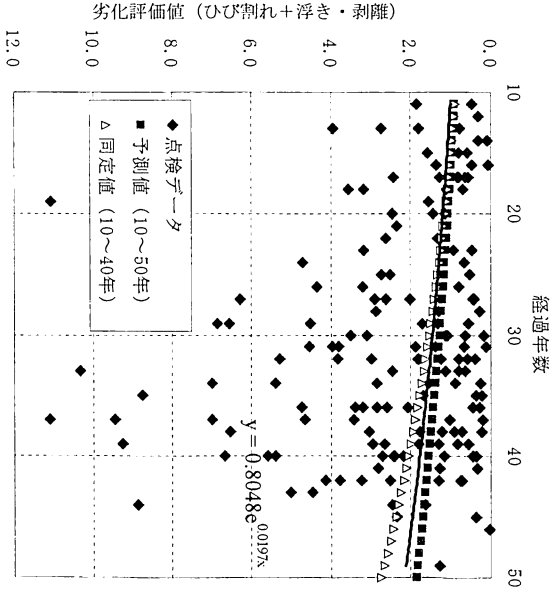


図-10 覆工の劣化における予測値

6. トンネル覆工の劣化過程の長期予測

トンネル覆工における点検データの経過年数ごとの係数部と指数部を示すと図-8に示すように規則的に変動しており、式(7)における係数部と指数部ともに回帰することができる¹⁴⁾。ここで予測回帰式は、ベイズの情報量基準に基づいて最適な式および項数を選定した。

次に、回帰式より10年後(10～50年)の係数部と指数部を推定したものと実際の点検データより同定したものを図-9に示し、同時に劣化過程の予測値(10年後)と同定値(～40年)および実際の劣化曲線における平均的なトレンドの動きを図-10に示す。

図-10より、幾何ブラウン運動(確率微分)方程式の係数(係数部、指数部)の経年変化を点検データより回帰し、その変化を予測することにより、トンネル覆工における劣化度の将来予測を精度良く行うことが可能となる。

7. トンネル覆工の劣化分布(ボラティリティ)

伊藤の確率微分(ブラック・ショールズ)方程式(2)もしくは(8)は、幾何ブラウン運動を示すため、以下の性質を示す¹¹⁾。

- 1) 初期値 $Q(0) > 0$ ならば $Q(t)(t > 0) \geq 0$
- 2) 初期値 $Q(0) = x > 0$ が与えられると $q(t)$ は平均

が $x \exp\{\beta t\}$ 、分散 $x^2 \exp\{2\beta t\}(\exp\{\sigma^2 t - 1\})$

の対数正規分布を示す。

ここで、式(1)もしくは(7)の基礎検討として、北海道内において矢板工法で施工されたトンネル(162箇所)で得られた覆工の点検データから得られた、劣化過程(経年劣化)の分布(ボラティリティ)項の期間ごとの推移を図-11に示す。

図-11に示すように劣化度(性能関数) $Q(t_i)$ は経過年数とともに広がる傾向を示しており、その分布は対数正規分布 $P(t_i)$ を示すと考えられ、図-3および式(2)に示した幾何ブラウン運動の理論どおりに経過年数 t_i とともに劣化度(性能関数) $Q(t_i)$ は対数正規分布で広がっている。

8. まとめ

寒冷地トンネルにおけるライフサイクルマネジメン

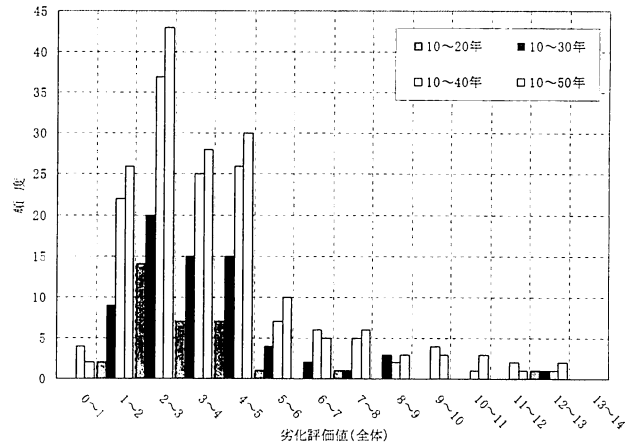


図-11 経年別の劣化評価の分布状況(経過年数31～50年)

ト(LCM)やストックアセットマネジメントの構築を目的として、現状のトンネル覆工における劣化と経過年数との関係の同定と将来的な劣化予測を、北海道内における矢板工法のトンネルで得られた覆工の点検データを用いて考察した結果、以下の結論が得られた。

- 1) トンネル覆工の劣化度は、建設年代(経過年数)に伴い劣化していく傾向を示し、また劣化モデル(ブラック・ショールズ)の解における係数(係数、指数部)も経過年数に伴った変化を示した。
- 2) 劣化モデルの一般解における係数の時間変化を推定して、その傾向を予測することにより、トンネル覆工における劣化評価値の将来予測を精度良く行うことが可能となると考えられる。
- 3) 劣化評価(性能関数)の分布は、幾何ブラウン運動の理論通りに対数正規分布を示しており、経過年数とともに広がっていくと考えられる。
- 4) ブラック・ショールズの劣化モデルは、トンネル覆工における劣化評価の将来予測が行えるため、最適な補修、補強時期が適切に判断ができ、合理的なライフサイクルマネジメント(LCM)やストック、アセットマネジメントの構築が可能となる。

【APPENDIX】(伊藤の公理)

伊藤の確率微分方程式

$$dx(t) = b(t)dt + s(t)dw(t) \quad (a1)$$

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。

$$y(t) = f(x(t)) \quad (a2)$$

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 $x(t)$ 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。

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

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

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。

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

中心極限定理で $dw(t)^2 = dt$ 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,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.
- 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) 安田亨,大津宏康,大西有三:厳しい予算制約条件下におけるトンネル構造物のミニマムメンテナンス,建設マネジメント勉強会,Summer School 2006, pp.167-172,2006.
- 4) 中村一樹,細沼宏之,高田充伯,大津宏康,小林潔司:トンネルアセットマネジメント,建設マネジメント勉強会, Summer School 2006, pp.173-181,2006.
- 5) 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.
- 6) 保江邦男:Excelで学ぶ金融市場予測の科学,講談社,2000.4
- 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) 栗野盛光,小林潔司,渡辺晴彦:不確実下における最適補修投資ルール,,土木学会論文集,No.667/IV-50,pp.1-14,2001.
- 9) 森村英典,高橋幸雄:マルコフ解析,日科技連,1995.
- 10) 飛田武幸:ブラウン運動,岩波書店,1975.
- 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.
- 12) 須藤敦史,佐藤京,西弘明,野村貢: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,土木学会,第19回トンネル工学研究発表会,2009.
- 13) 日本道路公団:設計要領第三集トンネル(1)トンネル本体工保全編(変状対策),2006.
- 14) M. Hoshiya, A. Sutoh : Identification of Consolidation parameters and Settlement Prediction on Peaty Soft Deposits, Proceedings of Compression and Consolidation of Clayey Soil, Vol.1, pp.519-524,1995.

IDENTIFICATION AND PREDICTION OF STOCHASTIC DEGRADING PROCESS FOR COLD REGION TUNNEL LINING

Astushi SUTOH, Masahiko KONNO, Osamu MARUYAMA, Takashi SATO and Hiroaki NISHI

Infrastructure maintenance is becoming increasingly important in Japan. Especially in Hokkaido, about 40% conventional construction method road tunnels have been constructed over the past 40~50 years. Therefore, many conventional construction method road tunnels will come to its rehabilitation stage, and almost tunnel linings must be maintenance or repair. This paper proposes identification methods based upon actual inspection data in order to carry out strategic maintenance for tunnel structures. The resistance of deteriorating tunnel structures is non-stationary stochastic processes, and reliability problems of such structures are essentially different of time-independent reliability problems.