

寒冷地におけるトンネル覆工の劣化分布とその推移予測

須藤 敦史¹・佐藤 京²・丸山 収¹・兼清 泰明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1-34)

E-mail: taka4@ceri.go.jp

³関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-0073 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)

E-mail: hiro.t.k@kansai-u.ac.jp

山岳トンネルは、長い耐用年数を有する構造物であり、北海道では多くの国道トンネルが建設されている。今後、これらのトンネルの維持管理や長寿命化は社会情勢により必要不可欠である。しかし山岳トンネルの長寿命化には、予防保全を前提にしたトンネル維持管理システム (Tunnel Management System: TMS) の構築が必要であり、これらの効率的な運用には覆工劣化の現状把握や将来的な推移予測手法の確立、加えて費用対効果を考慮して適切な時期に更新を図るための、モニタリングや補修・補強などの維持管理システムが欠かせない技術である。そこで本研究では寒冷地 (北海道) におけるライフサイクルコスト (LCC) に基づいたTMSの構築を目標として、実際に得られているトンネル点検データより、①トンネル覆工における劣化の状態を統計的に整理・分類している。②トンネル覆工の劣化モデルより劣化の推移予測を求め、同時に寒冷地トンネルのTMSに適用するための考察を行っている。

Key Words : Tunnel Management System, Duration, Stochastic Process, Distribution

1. はじめに

山岳トンネルは、長い耐用年数を有するきわめて寿命の長い構造物であり、トンネルの長寿命化を図ってゆくには、予防保全を前提にしたトンネル維持管理システム (Tunnel Management System: TMS) を構築して効率的に運用してなければならない。

北海道では図-1に示すように建設から30年以上を経過したトンネル数が40%以上となってきたため、寒冷

地特有の劣化要因を考慮しながら、限られた予算の中で多くの既設トンネルにおいてライフサイクルコスト (Life Cycle Cost : LCC) の低減化・最適化が図れるような寒冷地におけるTMSが必要不可欠となっている^{1)~3)}。

この TMS は図-2 に示すような予防保全の考え方により、構造物の障害発生時期 C 点を予測し、その状態に至る前に補修・補強 (B点→D点) を施して、計画的に長寿命化を図ってゆくものである。

そこで、著者らは寒冷地の道路トンネルを対象とした TMS 構築のための、さまざまな検討を実際のトンネ

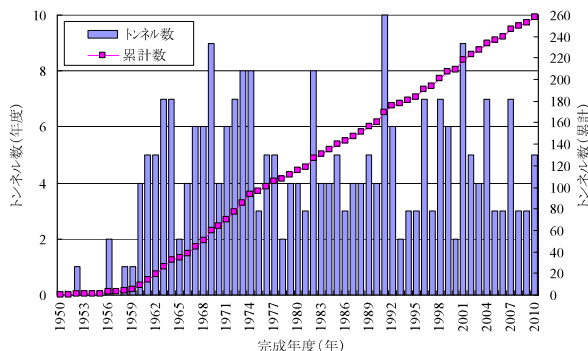


図-1 北海道における国道トンネル数と累計

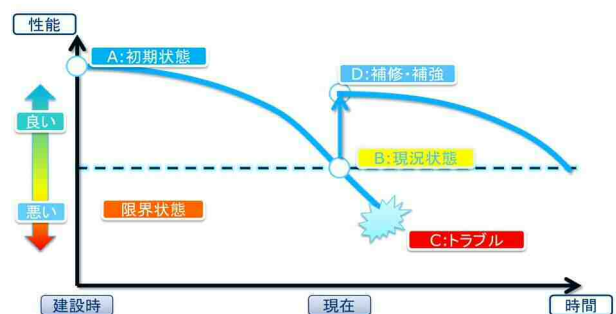


図-2 予防保全に基づいた LCC 概念図

ル点検データを用いて実施してきている⁴⁴⁾。

山岳トンネルは、本来、長い耐用年数を有する構造物であり、計画的な維持管理を効率的に運用して行くためには、トンネル覆工に対して劣化・損傷の現状把握やそれらの将来的な推移予測手法の確立は急務である。加えて、費用対効果を考慮して適切な時期に補修・補強・更新を図るための、モニタリングや意思決定支援などが維持管理システムに欠かせない技術である。

そこで、本研究では、寒冷地（北海道）におけるライフサイクルコスト（LCC）に基づいた TMS の構築を目標として、以下に示す項目を実施している。

- 1) 実際に得られているトンネル点検データより、トンネル覆工における劣化の状態を確率・統計的に整理して、その分布形態を明らかにしている。
- 2) 提案している覆工劣化モデルの（理論）分布と観測値より得られた劣化の分布を比較し、提案理論の有用性を示している。
- 3) 寒冷地（北海道）におけるトンネル覆工の劣化モデルと実際のトンネル点検データにより、劣化の推移予測を求め、その予防保全を前提とした TMS への適用性を示している。

2. 観測値より求めたトンネル覆工の劣化分布

(1) トンネル覆工における点検結果

北海道開発局では、平成12年10月に国土交通省により示された「道路トンネル定期点検要領（案）」⁹⁾を基本（一部「道路トンネル維持管理便覧」⁷⁾（日本道路協会平成5年11月）を参考）とし、平成15年度より矢板工法と NATM トンネルに対して覆工点検を実施している

点検項目は、覆工の損傷・変状種類ごとに①ひび割れ、②浮き・剥離、③漏水、④目地ズレ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰の6種類を基本としており、トンネル覆工におけるすべての損傷・変状に対してスパン毎の整理・蓄積を実施し、これらを基に劣化評価値（健全：0）も求めている。

(2) 矢板工法

矢板工法により施工された国道トンネル（167 箇所）における 436 点検結果から、トンネル覆工における供用期間ごとの劣化評価値における分布の推移（①15～30 年、②30～40 年、③40～50 年）を図-3、表-1 に示す。

図-3 より、矢板工法のトンネル覆工における劣化評価値の分布状況は対数正規分布を示している。

また、図-3 および表-1 に示すように劣化評価値の平均値は供用期間が長くなるに応じて（対数もしくは指数曲線）劣化が進行している⁴⁵⁾など。

次に、供用時間（経過年数）ごとの平均評価値の

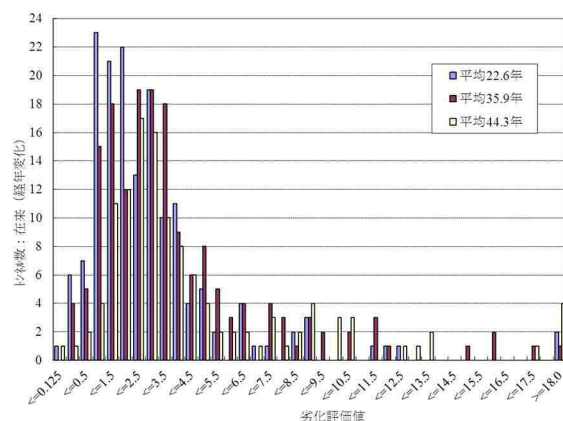


図-3 経年ごとのトンネル覆工の劣化分布（矢板工法）

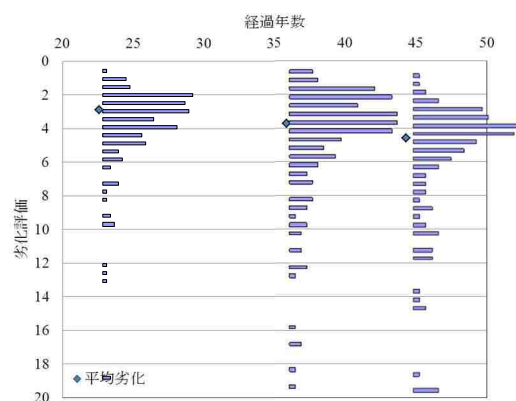


図-4 トンネル覆工の平均劣化値と分布（矢板工法）

表-1 トンネル覆工の平均年数と劣化値（矢板工法）

供用期間		平均年数	平均劣化値
矢板工法	10～30年	22.558	2.895
	30～40年	35.856	3.728
	40～50年	44.272	4.586

分布とその平均値を図-4 に示す。図-4 より、トンネル覆工における劣化評価値の分布は供用期間が長くなるにともない裾野部分（性能関数:劣化評価値の大きい部分）のロングテール化も見られる。

(3) NATM

次に NATM で施工された国道トンネル（100 箇所）における 180 点検結果から、トンネル覆工における供用期間ごとの劣化評価値における分布の推移（①0～10 年、②10～20 年）を図-5、表-2 に示す。

図-5 より、NATM のトンネル覆工においても劣化評価値の分布状況は対数正規分布を示しており、同様に供用期間にともない裾野部分（性能関数:劣化評価値

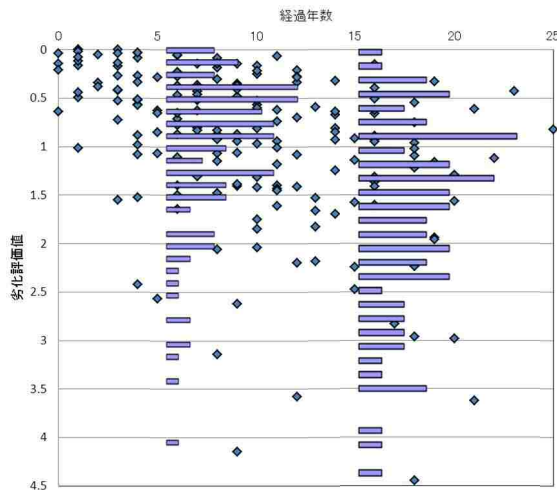


図-5 トンネル覆工の平均劣化値と分布 (NATM)

表-2 トンネル覆工の平均年数と劣化値 (NATM)

	供用期間	平均年数	平均劣化値
NATM	0～10年	5.696	0.726
	10～20年	14.997	1.296

の大きい部分) のロングテール化も見られる。

また、表-2 に示すように NATM においても劣化分布の平均値は供用期間に応じて進行を示している。

3. 劣化モデルの分散 (ボラティリティ) 特性

寒冷地トンネルに適用する TMS では、トンネルの供用に伴う部材における劣化・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。

そこで、北海道開発局が平成15年度より構築しているトンネル点検のデータベース (トンネル2003) に基づいて寒冷地トンネルにおける劣化分布 (平均と分布) の同定とその長期推定を試みた。

(1) 損傷度成長モデルの定式化

損傷度成長モデルにおいて性能関数 (劣化評価値) $X(t)$ を時刻 t での損傷度の大きさとし ($X(t)=1$ 健全な状態), 時間の経過と共に成長していくような過程は以下の確率微分方程式で記述される ^{4)5)参照}。

$$dX(t) = \mu_0 X(t)dt + X(t-)dZ(t) \quad (1)$$

ここで $Z(t)$ は平均ゼロの確率過程で損傷度 (性能関数) の時間成長の不規則性を支配する雑音, μ_0 は平均時間成長率, また $X(t-)$ は左連続化したものである。

雑音 $Z(t)$ は、時間一様な Gauss 過程である Wiener 過程

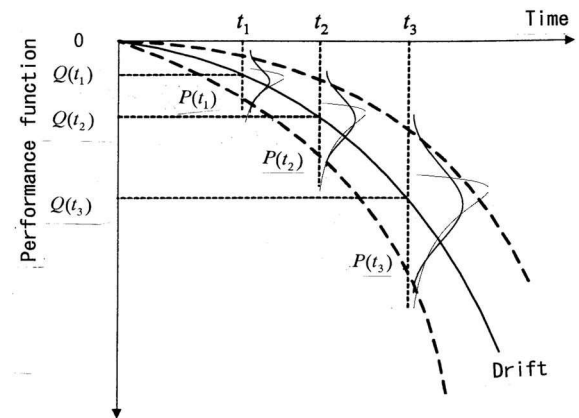


図-6 トンネル覆工における劣化成長モデル

が、このような確率微分方程式では広く用いられているが、Wiener 過程を採用した場合に解 $X(t)$ のサンプルが激しく増減を繰り返してしまうため、トンネル覆工の劣化過程 (挙動) の再現という点では適切性に欠ける。

そこで、 $X(t)$ が減少 (覆工の劣化評価値がよくなる現象) する確率を厳密にゼロとするため次式とする。

$$Z(t) = C(t) - \lambda q_1 t \quad (2)$$

ここで、 $C(t)$ は複合 Poisson 過程、すなわち Poisson 過程により不連続ジャンプが到着し、各ジャンプが互いに独立で同一の確率分布に従うような確率過程であり、 λ はジャンプの到着の強度 (単位時間当たりの平均ジャンプ発生回数) q_1 は各ジャンプの平均値である。

これより、式(1)の確率微分方程式は以下となる。

$$dX(t) = \mu X(t)dt + X(t-)dC(t)$$

$$\mu = \mu_0 - \lambda q_1 \quad (3)$$

この損傷成長モデルでは、 $C(t)$ の不連続ジャンプが発生するときを除いては、対数平均成長率 μ で指数関数的に劣化度は成長していき、 $C(t)$ のジャンプ発生時に呼応して不連続に大きく成長する。

また $C(t)$ のジャンプに伴う劣化度の成長は、稀に発生する規模の大きい地震災害等による大きな損傷成長を表し、それを除く指数関数的成長は、図-6 に示すように厳しい気象環境など種々の原因による劣化の累積を表す。

この確率微分に Ito の公式を適用することにより、解は式(4)のように与えられる。

$$X(t) = X(0)e^{\mu t} \prod_{k=1}^{N(t)} (1 + Y_k) \quad (4)$$

ここで $N(t)$ は $C(t)$ のジャンプ発生を表す強度 λ の Poisson 過程で Y_k は $C(t)$ の k 回目のジャンプ量を表す。

また、劣化評価値（性能関数） $X(t)$ の平均（期待値）は以下に示す指数関数的成長となり、その分布は対数正規分布を示し、前章で求めたトンネル覆工における損傷状態の観測結果と一致している。

$$E\{X(t)\} = X(0)e^{\mu_0 t} \quad (5)$$

ここで $X(t)$ の確率密度関数は対数正規分布（lognormal distribution）に従う。

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda/\zeta}{\sigma_X}\right)^2\right], 0 < x < \infty \quad (6)$$

また平均値および分散値は λ, ζ を用いて以下となる。

$$\mu_X = \exp\left(\lambda + \frac{1}{2}\zeta^2\right) \quad (7), \sigma_X^2 = \mu_X^2(e^{\zeta^2} - 1) \quad (8)$$

したがって、トンネル覆工における劣化・損傷の平均（期待）値は、経過年数にともなって指数関数的成長を示し、その対数正規分布は経過年数にともなって劣化値の分散（ボラティリティ）も大きくなる。

そこで、トンネル覆工における劣化・損傷の平均（期待）値と対数正規分布（分散）の係数を、現在得られている複数のトンネル覆工における点検結果より同定し、その時間的な推移過程を推定することにより、長期的な劣化推移の予測を行う。

(2) 劣化分布の平均・分散の推移予測

矢板工法のトンネル覆工における点検データの経過年数ごとの平均劣化式(5)における係数部: $X(0)$ と指数部: μ の同定（データ区間①10～20年、②10～30年、③10～40年）を実施した結果を図-7に示す。また、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係数部と指数部を図-8に示す。

ここで、係数部と指数部の時間推移を回帰することにより、劣化曲線の推移予測を行っている。

図-8では、点検データの経過年数（10～20年、10～30年、10～40年）による劣化曲線の係数部（◇）と指数部（□）、これより10年後（10～50年）の係数部と指数部を回帰した曲線（点線）、および実際の点検データより求めた劣化曲線の係数部（△）と指数部（○）を示している。

また、10年後における劣化評価値の平均推移（10～50年）を予測したもの（■）、現在の同定値（10～40年）より10年後を推定したもの（△）、および実際の点検データ（◆）を図-9に示す。

図-9より、分布の推移を予測することにより、トンネル覆工における劣化曲線の将来予測が可能となる。

次に、矢板工法のトンネル覆工における点検データの

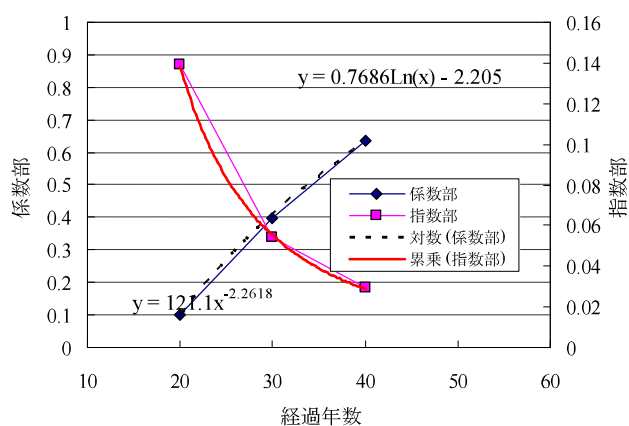


図-7 覆工の劣化係数（係数部、指数部）の同定値

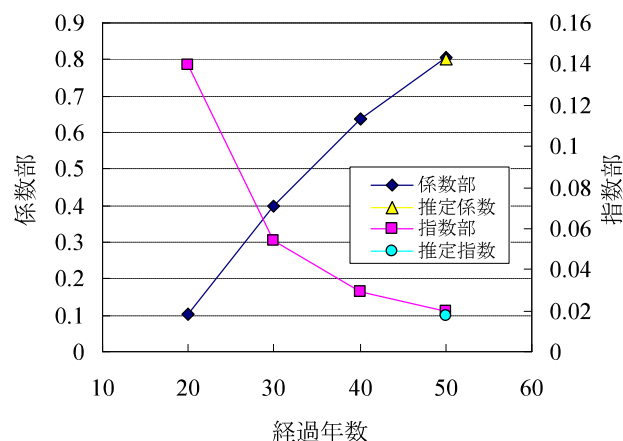


図-8 覆工の劣化係数（係数部、指数部）の推定値

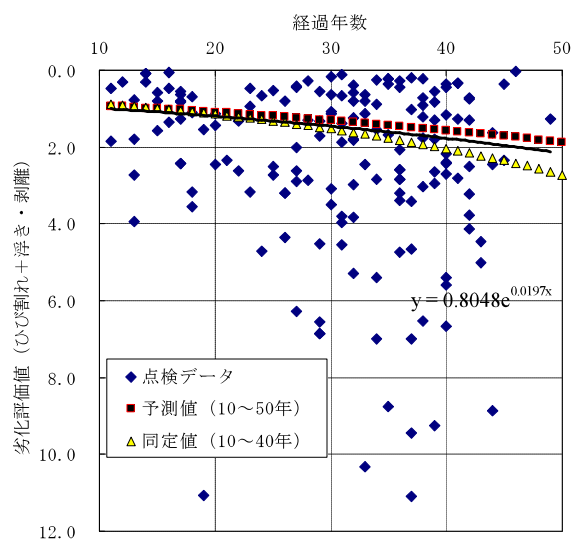


図-9 覆工の劣化平均値における予測値（矢板工法）

経過（供用）年数ごとの劣化評価値（性能関数）の対数正規分布式(6)の同定（データ区間①10～20年、②10～30年、③10～40年、④10～50年）を実施した結果を表-3および図-10示す。

表-3、図-10より、対数正規分布（分散）においても、経過年数にともなって一様に推移していることより、平均劣化と同様な手順により、長期的な劣化推移の予測は

表-3 矢板工法における対数正規分布の同定値（正規化）

供用期間		平均	分散
矢板工法	10～20年	1.349	0.77
	10～30年	1.471	0.93
	10～40年	1.554	1.22
	10～40年	1.706	1.51

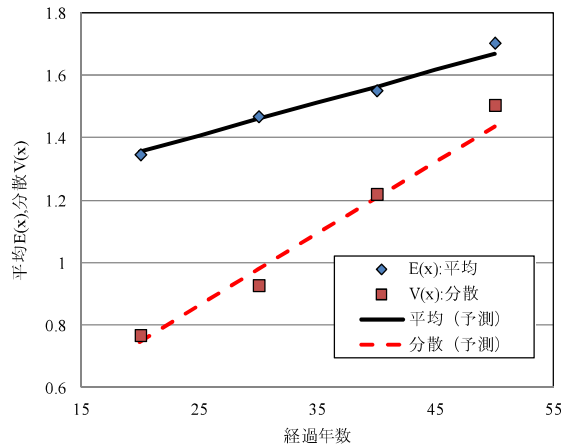


図-10 矢板工法における対数正規分布（正規化）

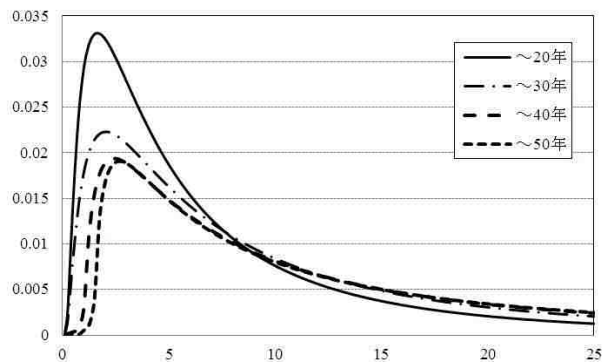


図-11 供用年数における劣化対数正規分布（矢板工法）

可能である。またNATMにおいても同様に対数正規分布の時間推移の予測が可能である。

ここで、観測値より得られた矢板工法における経過（供用）年数ごとの劣化評価値の対数正規分布（正規化）を図-11に示す。

図-11より、同様に矢板工法のトンネル覆工における劣化評価値の分布は供用期間にともない裾野部分（劣化評価の大きい部分）のロングテール化も見られる。

4. 覆工劣化におけるロングテール分布

実際に得られているトンネル点検データより、トンネル覆工における劣化分布は供用期間にともない裾野部

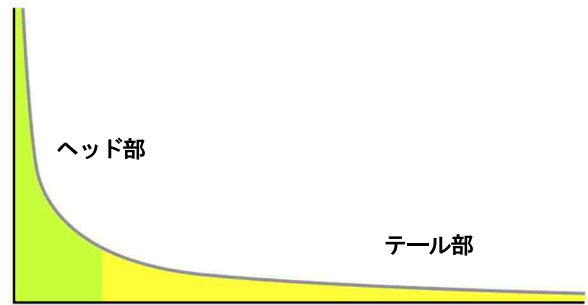


図-12 ロングテール分布の概念図

分（劣化評価値の大きい部分）のロングテール化を示している。以下にこれらを確率・統計的に整理・検討して、劣化評価値の分布状態の考察を行う。

(1) ロングテール分布

ロングテール（Long Tail）分布とは、eコマースやインターネット・マーケティングの分野で有名になった裾が長い状態であり（図-12参照），理論分布としてはベキ分布（Power-law distribution）や対数正規分布（Log-normal distribution）が適用されるのが一般的である⁸⁾など。

ここで確率変数 X （劣化評価値：性能関数）がすべての $x > 0$ について式(9)を満たす確率分布はロングテールとなる。

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \Pr[X > x+t | X > x] = 1 \quad (9)$$

これは累積確率分布関数を F として式(10)と同じである。

$$\bar{F}(x+t) \sim \bar{F}(x), x \rightarrow \infty \quad (10)$$

簡単にいえば、 $x \rightarrow \infty$ ではほとんど減衰しない裾野を持つ分布である。

ここで図-4、図-5および図-11に示すよう、トンネル覆工における劣化評価値（性能関数）の分布は供用期間にともない裾野部分（劣化が大きい）のロングテール化しており、トンネル覆工における不具合を予防や保全（効率的なTMSの運用）を行うためには、この対数正規分布の裾野部分が動向評価・推移予測として重要となる。また、様々な現象において分布のロングテール化が報告されており、注目されている分野である⁹⁾など。

(2) 覆工劣化におけるロングテール分布

個々のトンネルにおける点検データより得られたG トンネルにおける覆工劣化の平均評価値の経年変化とその分布状況を図-13に示す。図-13より、G トンネルの個々覆工においても経過年とともに平均劣化は進行し、ロングテール化の分布傾向を示す。

さらに、ロングテール分布（冪分布・対数正規分布）

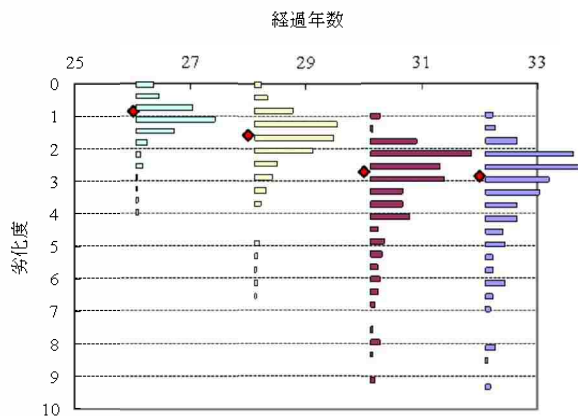


図-13 劣化評価値の平均と分布の
ロングテール化 (G トンネル)

の特徴として、フラクタル構造が分布の中に存在¹⁰⁾とすることが報告されており、前記のトンネル全体と個々のトンネルにおける覆工劣化(対数正規分布)のロングテール化がフラクタル構造との関連性が考えられるが解明は今後の課題となる。

5. 終わりに

本研究は、寒冷地(北海道)におけるライフサイクルコストに基づいたTMSの構築を目標として、トンネル覆工の劣化・損傷の把握やそれらの将来予測をモニタリングデータの活用を検討し、以下の結論が得られた。

- 1) 実際に得られているトンネル点検データより、トンネル覆工における劣化評価値(性能関数)は対数正規分布を示し、供用期間にともない裾野部分(評価値の大きい部分)のロングテール化も見られる。
- 2) 損傷度成長モデルにおいて、観測値より劣化分

布の平均と分散の時間的な推移過程を推定することができ、加えて長期的な劣化推移の予測は可能である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 須藤敦史, 佐藤京, 西弘明: 積雪寒冷地トンネルにおける TMS 構築に関する研究, 土木学会 第 21 回トンネル工学研究発表会論文集, pp.203-208, 2011.
- 4) 須藤敦史, 近野正彦, 丸山収, 佐藤京, 西弘明: 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, 土木学会 論文集 F1 (トンネル工学), Vol.20, pp.61-68, 2010.
- 5) 須藤敦史, 丸山収, 佐藤京, 西弘明: 性能規定に基づく寒冷地トンネル覆工の劣化予測のためのマルコフ遷移確率行列の同定, 土木学会 論文集 F1 (トンネル工学), Vol.22, pp.61-68, 2012.
- 6) 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.
- 7) 日本道路協会:道路トンネル維持管理便覧, 1993, 11.
- 8) Anderson, C. (2006), The Long Tail: Why the Future of Business Is Selling Less of More, Hyperion, 2006. (篠森 ゆりこ 訳『ロングテール—売れない商品』を宝の山に変える新戦略) 早川書房, 2006.
- 9) 菅谷義博: 80 対 20 の法則を覆すロングテールの法則, 東洋経済新報社, 2006.2.
- 10) マーク・ブキャナン (水谷淳訳): 歴史は「べき乗則」で動く種の絶滅から戦争までを読み解く複雑系科学, 早川書房, 2009.

(2015. 8. 7受付)

IDENTIFICATION AND ESTIMATION OF DURATION DISTRIBUTIONS FOR TUNNEL LINING IN THE COLD REGION

Asushi SUTOH, Takashi SATO, Osamu MARUYAMA and Hiroaki KANEKIYO

In this paper consist of three parts; 1) An 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. 2) Log-normal distribution shows excellent fit with various data on the durations of disabilities, irrespective of their severity. Persisting long tails suggest the fractal nature of disability distributions.

Finally, numerical examples are worked out to demonstrate the usefulness of this estimation method for Tunnel Management System. And long tails of the duration distributions for the tunnel linings are analyzed.