

地震リスクを考慮したトンネル覆工の劣化推移モデル

A consideration on earthquake risk of degrading process model for tunnel lining

東京都市大学工学部都市工学科 ○正会員 須藤敦史(Atsushi Sutoh)
(独)土木研究所寒地土木研究所 佐藤 京 (Takashi Sato)

1. はじめに

山岳トンネルは長い耐用年数を有する構造物であり、北海道のような厳しい使用環境のなかで長寿命化を実現するためには、供用期間に生じるさまざまなリスク設計時に考慮した維持管理を図ってゆくライフサイクルマネジメント(Life Cycle Management: LCM)の考え方が重要である。一方、最近では社会基盤施設の老朽化に伴うさまざまな不具合が現れてきているため、今後はしっかりしたメンテナンス・維持管理の構築・運用が求められている。

本論文は、地震リスクに対する対策(Risk Management: RM)を適用したトンネル覆工の劣化推移を検討し、同時にトンネルにおける予防保全を基本とした維持管理における劣化予測の重要性の考察を行っている。

2. 山岳トンネルの Life Cycle Cost(LCC)

一般に LCC による構造物の設計は、耐用年数における初期建設費と破壊による破壊時(復旧)費用の和で表される式(1)の期待総費用を指標としている¹⁾など。

$$ETC = C_i + P_f C_f \quad (1)$$

ETC : 期待総費用, C_i : 初期建設費,

P_f : 対象事象の破壊確率,

C_f : 破壊時費用(維持管理費含む)

そこで、トンネル構造物が社会資本として満足しなければならない性能水準を定めて、さらに供用期間(耐久年数)に生じるさまざまな事象(リスク)と構造物の劣化を考慮した予防保全を前提とした維持管理システムの構築が必要である(図.1 参照)。

3. リスクを考慮したトンネル劣化モデル

北海道の山岳トンネルは厳しい気象環境による経年劣化や地震などのさまざまなリスク環境下にさらされているため、LCCをできる限り軽減していくためにはリスクを組込んだ劣化モデルが必要となる。

(a) 損傷度成長モデル

損傷度成長モデルにおいて $X(t)$ を時刻 t での損傷度の大きさとして、時間経過と共に劣化していくような過程は以下の式で記述される³⁾など。

$$dX(t) = \mu_0 X(t)dt + X(t-)dZ(t) \quad (2)$$

ここで $Z(t)$ は平均ゼロの確率過程で損傷度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

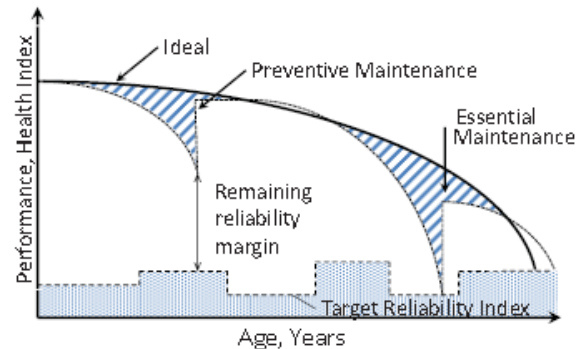


図.1 LCMにおける維持管理の概念²⁾

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 過程であるが、確率微分方程式に Wiener 過程を採用した場合に解 $X(t)$ が激しく増減を繰り返してしまうため、トンネルの劣化過程(挙動)という点では適切性に欠ける。

そこで、 $X(t)$ において評価値がよくなる確率を厳密にゼロとする次式を導入する。

$$Z(t) = C(t) - \lambda q_1 t \quad (3)$$

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、式(3)の確率微分方程式は式(4)以下となる。

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

$$\mu = \mu_0 - \lambda q_1 \quad (4)$$

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、リスクとして稀に発生する規模の大きい地震による損傷成長を表し、それを除く指数関数的成長は、図.2 に示す種々の原因による劣化現象の累積を表す。

この確率微分に Ito の公式を適用することにより、解は式(5)のように与えられる。

$$X(t) = X(0)e^{\mu t} \prod_{k=1}^{N(t)} (1 + Y_k) \quad (5)$$

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し、 $X(t)$ の平均 (期待値) は以下に示す指数関数的成長となる。

$$E\{X(t)\} = X(0)e^{\mu_0 t} \quad (6)$$

4. 損傷度成長モデルにおける地震リスク

(a) 地震の年平均発生率

地震の年平均発生率は、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション (J-SHIS: Japan Seismic Hazard Information Station: J-SHIS) ⁴⁾ (以降、J-SHIS) が公開する地震動の発生確率 (今後 N 年間で任意の震度以上の揺れが発生する確率) を用いて算定し、地震の発生確率がポアソン過程に従うと仮定すると地震の再現期間は指数分布の累積分布関数 $F_T(t)$ は次式となる。

$$F_T(t) = P(T \leq t) = 1 - e^{-\nu t} \quad (7)$$

ν : 平均発生率 (再現期間の逆数), t : 時間

式(7)より J-SHIS における地震動の超過確率を用いれば、任意の地震動以上の揺れが発生する年間当りの平均発生率 (年平均発生率) は式(8)より算定される。

$$\nu_a = -\ln\{1.0 - P(T \leq N)\}/N \quad (8)$$

ν : 任意の震度 a 以上の揺れを生じさせる地震の年平均発生率, $P(T \leq N)$: 今後 N 年間で震度 a 以上の揺れが発生する確率

(b) 地震の年平均発生率の算定結果

年平均発生率は J-SHIS が公開する 250m メッシュ単位の「今後 30 年間に任意の地震動が発生する確率 (平均ケース)」を式(8)により、算定結果 (年平均発生率) を図.3 に示す。

(c) リスクを考慮したトンネルの損傷度

地震など自然災害の発生リスクを考慮した損傷度成長モデルによるトンネル覆工における劣化の時間推移を図.4 に示す。以上より、劣化進展にリスクを考慮することより LCC の最適化を図った維持管理が構築できる。

5. おわりに

本論文では、山岳トンネルにおいて地震リスクを組み込んだ山岳トンネルの劣化モデルを提案し、実際の点検データおよび地震ハザードにより劣化進展の予測の数値解析例を示すことで提案手法の有用性が示せた。

参考文献

- 1) 長尾 毅, 柴崎隆一, 尾崎竜三: 経済損失を考慮した期待総費用最小化のための岸壁の常時のレベル信頼性設計法, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.389-400, 2005.
- 2) K.Bergmeister: Life-cycle design for the world's longest tunnel project, Proceedings of the Third International

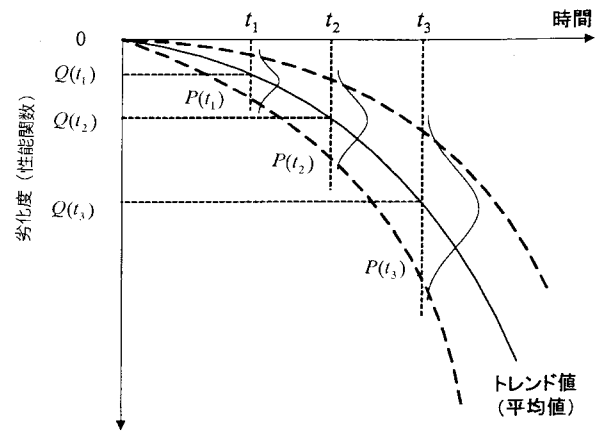


図.2 山岳トンネルの性能劣化モデル

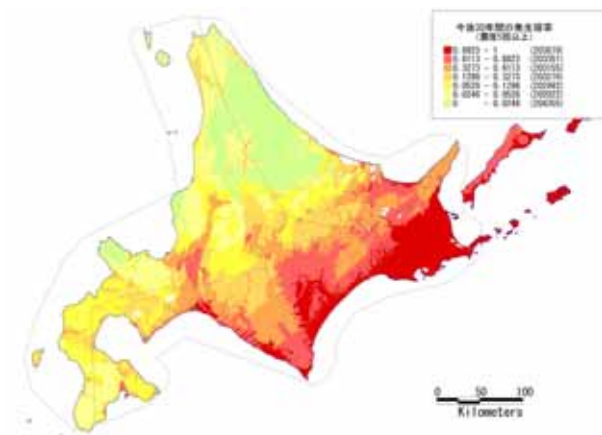


図.3 今後 30 年間に震度 5 弱以上が発生する確率

損傷度 $X(t)$

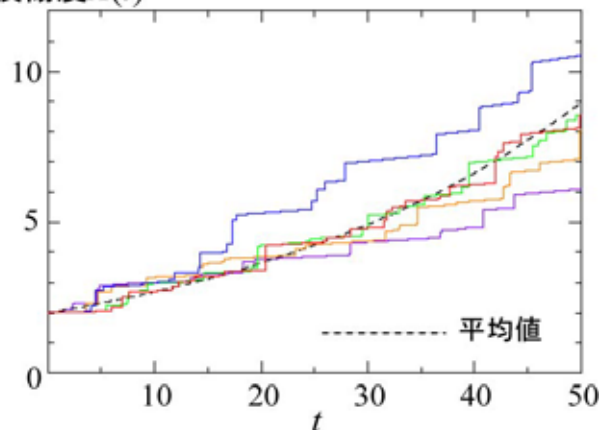


図.4 災害リスクを考慮した損傷度成長モデル

Symposium on Life-Cycle Engineering, pp.51-59, 2012.

- 3) 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.
- 4) 独立行政法人防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション (J-SHIS: Japan Seismic Hazard Information Station), <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>