

地震ハザードを考慮したトンネル覆工の劣化モデル

東京都市大学 正会員 ○須藤 敦史，丸山 収
 関西大学 兼清 泰明
 土木研究所寒地土木研究所 正会員 佐藤 京

1. 目的

最近，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おり，しっかりしたメンテナンス・維持管理システムの構築とその運用が求められている．一方，山岳トンネルは長い耐用年数を有する構造物であり，加えて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，予防保全を基本とした維持管理とともに供用期間に生じるさまざまなリスクに考慮したライフサイクルマネジメント(Life Cycle Management: LCM)のシステム構築が必要となる．本論文は，地震ハザードを考慮したトンネル覆工に対する確率論による劣化推移モデルを検討し，同時に点検データを用いたトンネル覆工の劣化予測を行っている．

2. トンネルの Life Cycle Cost (LCC)

一般に構造物の LCC は，初期建設費と耐用年数期間のリスクによる破壊時（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．

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

ETC : 期待総費用, P_f : 対象事象の破壊確率,
 C_i : 初期建設費, C_f : 破壊時費用（維持管理費含む）
 予防保全を前提とした維持管理システムには，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，さらに供用期間に生じるさまざまな事象（リスク）を組み込んだ劣化予測モデルが必要である(図.1 参照)．

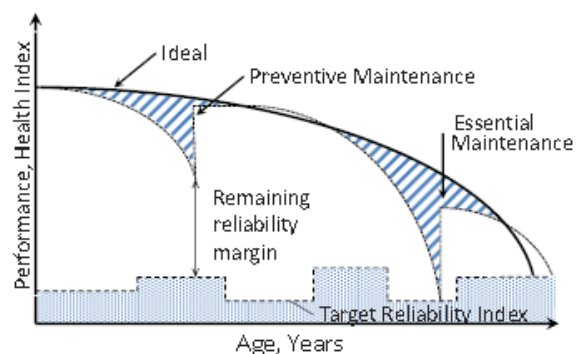


図.1 LCMにおける維持管理の概念²⁾

3. 地震ハザードを考慮したトンネル劣化推移モデル

$X(t)$ を時刻 t における損傷度として，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， $X(t)$ において評価値が悪くなってしまう確率が厳密にゼロとなる式(3)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)となる．

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．

キーワード 地震ハザード，劣化推移モデル，ライフサイクルコスト，確率過程

連絡先 〒105-8488 東京都港区西新橋 3-23-5 Tel:03-3436-31783 E-mail:a.sudou@iwata-gr.co.jp

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、種々の原因による劣化現象の累積を表す。

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

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

Ito の公式を適用することにより、解は式(5)となる。

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

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. 地震の年平均発生確率

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⁾ 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)より、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(7)より算定される。

$$\nu_a = -\ln\{1.0 - P(T \leq N)\}/N \quad (7)$$

ここで 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, 年平均発生率は 250m メッシュの「今後 30 年間に任意の地震動が発生する確率(平均ケース)」の算定結果(年平均発生率)を図.2 に示す。

5. 地震ハザードを考慮したトンネル覆工の劣化推移

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の劣化推移を図.3 に示す。以上より、劣化進展に地震ハザードを考慮することより LCC の最適化を図ったトンネルの維持管理が構築できる。

6. まとめ

本論文では、地震リスクを考慮したトンネル覆工の劣化推移モデルを提案し、実際の点検データおよび北海道における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を示した。

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 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/>

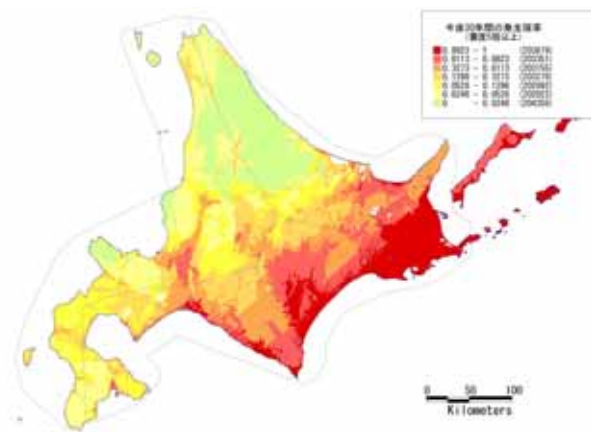


図.2 今後 30 年間に震度 5 弱以上が発生する確率

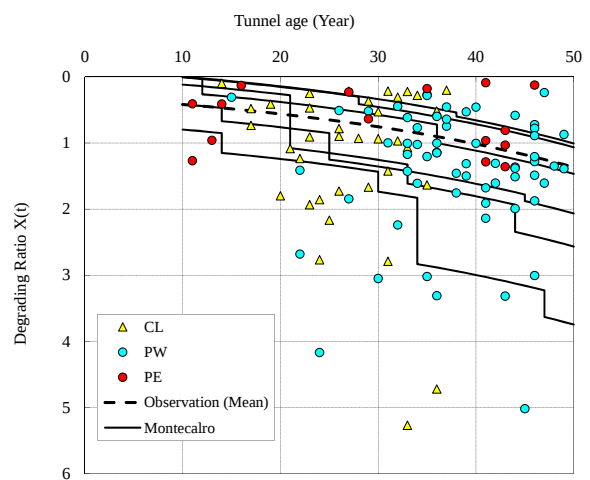


図.3 災害リスクを考慮した損傷度成長モデル