

伸縮装置の劣化が鋼桁端部の腐食に及ぼす影響評価

大阪大学工学部 学生員 ○阪本 凌一

大阪大学大学院工学研究科 学生員 音地 拓

大阪大学大学院工学研究科 正会員 貝戸 清之

京都大学経営管理大学院 正会員 小林 潔司

1. はじめに

橋梁の維持管理において、鋼桁端部（橋台および橋脚上部の鋼製部材）の劣化は修繕・更新の意思決定の主要な要因となる。鋼桁端部では、腐食が主要な劣化事象であり、それらの上部に設置されている伸縮装置からの漏水が原因であると考えられる。そのため、伸縮装置の点検間隔および取替え間隔を適切に設定することにより、橋梁の長寿命化とライフサイクル費用の低減が可能となり得る。本研究では、伸縮装置の劣化が鋼桁端部の腐食に及ぼす影響をマルコフ劣化ハザードモデル¹⁾とマルコフ・スイッチングモデル²⁾を援用したマルコフ・スイッチング・マルコフ劣化ハザードモデルにより表現し、その劣化予測結果を用いて両者の関係について定量的に評価する方法論を提案する。最後に、道路橋を対象とした適用事例を通して、本研究で構築した方法論の有用性を実証的に検証する。

2. マルコフ・スイッチング・マルコフ劣化ハザードモデル

(1) モデル化の前提条件

本研究で対象とする劣化過程は、腐食の進展過程と漏水の発生状況という2つの複合的な劣化過程で構成されており、それぞれを互いに相互作用を有するようなマルコフ連鎖モデルで表現する。いま、時刻 τ^{m-1} において $m-1$ ($m=1, \dots, M$)回目の点検が実施され、ついで時刻 τ^m に m 回目の点検が実施されたと考える。ここで、期間 $G^m = [\tau^{m-1}, \tau^m]$ を定義し、期間 G^m における漏水管理モードを表す状態変数 s^m

$$s^m = \begin{cases} 1 & \text{異常モード} \\ 0 & \text{通常モード} \end{cases} \quad (1)$$

を導入する。漏水管理モードは伸縮装置の損傷に影響

された腐食の進展状況が生起しているかどうかを表すリスクモードであり、漏水管理モードにより腐食の進展速度が異なると考える。実際に生起している漏水管理モードは観測不可能であり、状態変数 s^m は排他的に0もしくは1のうち、どちらか一方の値のみが生起する。いま、漏水管理モード $s^m = i$ ($i=0,1$)における腐食の進展速度を λ^m と表す。このとき、期間 G^m における腐食進展速度 λ^m は次式で表される。

$$\lambda^m = s^m \lambda_1^m + (1 - s^m) \lambda_0^m \quad (2)$$

(2) 腐食進展モデル（マルコフ劣化ハザードモデル）

漏水管理モード s を与件とした健全度 i ($i=1, \dots, I-1$)の腐食ハザード率 $\lambda_i(s)$ を

$$\lambda_i(s) = s \lambda_{1,i}^m + (1 - s) \lambda_{0,i}^m \\ = s x_{1,i} \beta_{1,i} + (1 - s) x_{0,i} \beta_{0,i} \quad (3)$$

と表す。ただし、 $x_{s,i}$ は説明変数ベクトル、 $\beta_{s,i}$ は未知パラメータベクトルを表す。このとき、漏水管理モード s の下で、2時点において健全度 i が継続する確率は、

$$\pi^{ii}(s) = \exp\{-\lambda^i(s)\} \quad (4)$$

となる。また、健全度が i から j に推移するマルコフ推移確率 $\pi^{ij}(s)$ は、次式で表される。

$$\pi^{ij}(s) = \sum_i^j \prod_{r=i, \neq z}^{j-1} \frac{\lambda^r(s)}{\lambda^r(s) - \lambda^z(s)} \exp\{-\lambda^z(s)\} \quad (5)$$

$$(i=1, \dots, I-1; j=i+1, \dots, I)$$

また、 $\pi^{ij}(s)$ に関しては、マルコフ推移確率の条件より次式で表される。

$$\pi^{ii}(s) = 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi^{ij}(s) \quad (s=0,1) \quad (6)$$

(3) 状態変数モデル（マルコフ・スイッチングモデル）

期間 G^m と G^{m+1} の間における漏水管理モードの推移確率は、期間 G^m の期首において観測可能な漏水条件等

キーワード アセットマネジメント, マルコフ・スイッチングモデル, マルコフ劣化ハザードモデル

連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 TEL: 06-6879-7622 E-mail: r.sakamoto@civil.eng.osaka-u.ac.jp

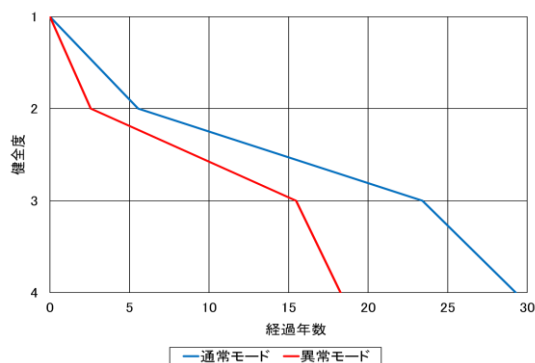


図-1 一般塗装系の腐食進展過程

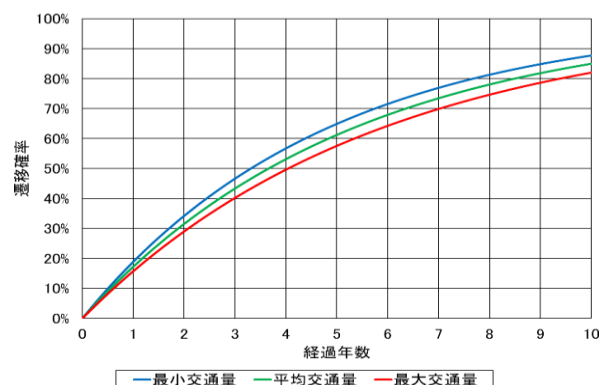


図-2 通常モードから異常モードへの推移確率

に依存して決定される。本研究では、漏水管理モードの推移確率が、 G^m 期の期首で観測される情報に基づいて作成される指数ハザードモデルで表現され则认为。ハザード率 $\theta_s^m (s=0,1)$ を期間 G^m における漏水特性等を表す特性ベクトル y_s^m を用いて、

$$\theta_s^m = \exp(y_s^m \alpha_s') \quad (7)$$

と表す。また、 α_s は未知パラメータによる行ベクトルを表す。このとき、期間 G^m と期間 G^{m+1} において同一の漏水管理モードとなる確率は、

$$\tilde{F}_s^m = \exp(-\theta_s^m z) \quad (s=0,1) \quad (8)$$

と表せ、式(8)を用いることにより、点検間 G^m における漏水管理モードのマルコフ推移確率 P^m は、

$$P^m(\theta_s^m) = \begin{bmatrix} \tilde{F}_0^m(z|\theta_0^m) & 1 - \tilde{F}_0^m(z|\theta_0^m) \\ 1 - \tilde{F}_1^m(z|\theta_1^m) & \tilde{F}_1^m(z|\theta_1^m) \end{bmatrix} \quad (9)$$

と表せる。

3. 適用事例

(1) 適用事例の概要

本研究で提案したマルコフ・スイッチング・マルコフ劣化ハザードモデルの有用性を示すために、実際の橋梁点検データに適用した。本研究で用いたのは、近畿地

方整備局管轄橋梁 787 橋のうち、伸縮装置の漏水（健全度は有無の 2 段階）と主桁の腐食（健全度 5 段階）の鉛直方向の位置属性が整合している 123 橋の 866 サンプルである。

(2) 推計結果

本研究では、説明変数として塗装仕様を採用し、一般塗装系と呼ばれる A, B 塗装系のグループと、重防食塗装と呼ばれ、厳しい腐食環境に使用される C 塗装系に分類し、2 値変数のダミー変数を用いて推計を行った。図-1 に一般塗装系の腐食進展過程を示す。健全度の全ての推移で通常モードと異常モードでは差が生じ、期待寿命には、約 11 年の差が生じることが確認できる。本研究で用いたサンプルは健全度 5 のサンプルが欠損していたが、今後、点検データの蓄積を続ければ、さらに期待寿命に差が生じることが推測される。また、図-2 に通常モードから異常モードへの遷移確率を示す。本研究では、伸縮装置の漏水が発生する原因として、車両による衝撃を考え、説明変数に交通量を採用したが、5 年経過時点で、最小交通量と最大交通量では約 7%の差が生じることが確認できる。

4. おわりに

本研究では、マルコフ・スイッチング・マルコフ劣化ハザードモデルを定式化し、通常モードと異常モードでの損傷進展過程の推計を行い、伸縮装置からの漏水が鋼桁端部の腐食に与える影響について定量的に評価した。これによって、伸縮装置からの漏水の有無によって鋼桁端部の腐食進展過程を区別して考えることができる。また、交通量を説明変数として考慮した通常モードから異常モードへの遷移確率を表現することにより、伸縮装置の適切な交換時期を選定でき、橋梁を維持管理していく上で有益な情報となり得る。

【参考文献】

- 1) 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.68-82, 2005.
- 2) 水谷大二郎, 貝戸清之, 小林潔司, 平川恵士: 気象状況を考慮したポットホール管理重点化ルール, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.70, No.3, pp.63-80, 2014.