

大阪大学工学部

大阪大学大学院工学研究科

京都大学経営管理大学院

大阪大学大学院工学研究科

学生員 ○宇野 裕亮

正会員 貝戸 清之

フェロー 小林 潔司

学生員 二宮 陽平

1.はじめに

現在、老朽化した高速道路橋におけるコンクリート系床版に対し、抜本的に修繕・更新を行うべく、大規模修繕・更新事業が計画されている。そこで大規模修繕・更新事業の対象となる床版を選定するために、コンクリート系床版の詳細な劣化予測に関する知見が必要となっている。劣化予測モデルとして、目視点検データを用いた統計的劣化予測モデルが開発されてきており、特にマルコフ推移確率をハザードモデルを用いて推計するマルコフ劣化ハザードモデルの開発によって、統計的劣化予測モデルは大きく進歩した。さらに、マルコフ劣化ハザードモデルにおける説明変数のみでは考慮しきれないような劣化速度の異質性を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデルも開発されている。混合マルコフ劣化ハザードモデルでは劣化速度の異質性を表現するために施設グループ毎に固有の異質性パラメータを定義している。しかしながら、実際の社会基盤施設の劣化過程の異質性は様々な要因によって時間や状態ごとに変化する可能性がある。よって従来の混合マルコフ劣化ハザードモデルでは劣化速度の過小評価、過大評価の危険性が存在する。

そこで本研究では、蓄積された目視点検データを用いて、階層的な異質性を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデルを構築する。具体的には、1)健全度毎の階層的な異質性を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデルを定式化する。2)コンクリート系床版に発生するひびわれ損傷は、水の存在下で進展速度が上昇する。よって、実高速道路橋におけるコンクリート系床版に発生しているひびわれ損傷に対する目視点検データを用い、本研究で提案するモデルの実証分析をおこなう。3)推計された異質性パラメータを用いコンクリート系床版のひび割れ損傷の進展速

度に対する床版防水の効果に関して分析する。

2.階層的な異質性を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデル

(1)モデルの定式化

本研究においては目視点検データに基づく、個々社会基盤施設の劣化予測を目的としている。分析の対象とする社会基盤施設を K 個の施設グループ(評価単位)に分割する。ある施設グループ $k(k=1, \dots, K)$ は、合計 L_k 個の施設で構成されている。また目視点検では社会基盤施設の劣化状態によって健全度が I 段階で記録される。施設グループ k が健全度 $i(i=1, \dots, I-1)$ の状態での劣化速度(以下、ハザード率)の異質性を表す異質性パラメータ ε_i^k を導入する。このとき、施設グループ k の施設 $l_k(l_k=1, \dots, L_k)$ の健全度 i での個別ハザード率 $\lambda_i^{l_k}$ は

$$\lambda_i^{l_k} = \tilde{\lambda}_i^{l_k} \varepsilon_i^k \quad (1)$$

と定義される。ここで、 $\tilde{\lambda}_i^{l_k}$ は施設グループ k の施設 l_k の健全度 i での標準ハザード率である。異質性パラメータ ε_i^k は個別ハザード率 $\lambda_i^{l_k}$ の標準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{l_k}$ からの乖離の程度を表す確率変数である。標準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{l_k}$ としては指数ハザードモデル

$$\tilde{\lambda}_i^{l_k} = \exp(x^{l_k} \beta'_i) \quad (2)$$

を採用した。 x^{l_k} は社会基盤施設の構造特性や環境条件を表す特性ベクトル、 β_i は未知パラメータベクトルを表し'は転置を表す。

式(1)を用いることにより、ある時刻に健全度 i と判定され、時間 z^{l_k} 経過後、健全度 j と判定されるマルコフ推移確率 π_{ij} は

$$\pi_{ij} = \begin{cases} \exp(-\lambda_i^{l_k} z^{l_k}) & (i=j) \\ \sum_{s=i}^j \prod_{m=i, \neq s}^{j-1} \frac{\lambda_m^{l_k}}{\lambda_m^{l_k} - \lambda_s^{l_k}} \exp(-\lambda_s^{l_k} z^{l_k}) & (i < j) \\ 0 & (i > j) \end{cases} \quad (3)$$

と表される。

(2)ベイズ推計

本研究ではパラメータの推計手法としてマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた階層ベイズ推計を用いる。異質性パラメータ ε_i^k の事前分布として平均1, 分散 $1/\phi_i$ のガンマ分布を仮定する。さらにガンマ分布の分散パラメータ ϕ_i に対しても事前分布として平均 $\alpha_i\gamma_i$, 分散 $\alpha_i\gamma_i^2$ のガンマ分布を仮定している。

3.実証分析

(1)データベースの概要

本研究で提案したモデルを実高速道路橋のコンクリート系床版に発生しているひび割れに対して適用した。ひび割れ損傷に対しては近接目視による定期点検によって3段階の判定が行われている。この点検データを用い、データベースを作成した。その中で、ひび割れ損傷に対し、処置・補修を行っている場合、その後の損傷進展過程に影響を及ぼしていると考え、処置・補修を行った後のサンプルは除外した。その結果、サンプルサイズは39,222サンプルであった。

(2)推計結果

本分析において階層的な異質性パラメータを径間毎に設定した。さらに、本分析では異質性パラメータを用い、床版防水がコンクリート系床版におけるひび割れ損傷の進展速度低減に及ぼす影響を評価することとした。よって床版防水の施工の有無によって異質性パラメータを設定した。これにより、径間毎に異質性パラメータを最大で4個設定した。階層ベイズ推計による異質性パラメータの推計結果を図-1, 図-2に示す。またそれぞれの平均に関しては表-1となっている。異質性パラメータに床版防水の施工の有無によって差異が生じているか否かをWilcoxonの符号付順位和検定を用いて検定した。検定を行う際、床版防水の施工の有無以外の構造特性や環境条件を取り除くため、同一径間の同一階層で、かつ床版防水施工の有無による異質性パラメータの組を作成できるものをサンプルとした。帰無仮説として、床版防水施工によって異質性パラメータに差が無い、対立仮説を床版防水施工によって異質性パラメータに差がある、として片側検定を行ったところ、統計検定量がそれぞれ-7.44, -2.14となり、有意水準5%で帰無仮説が棄却された。つまり、床版防水を施工することによって異質性パラメータが低減

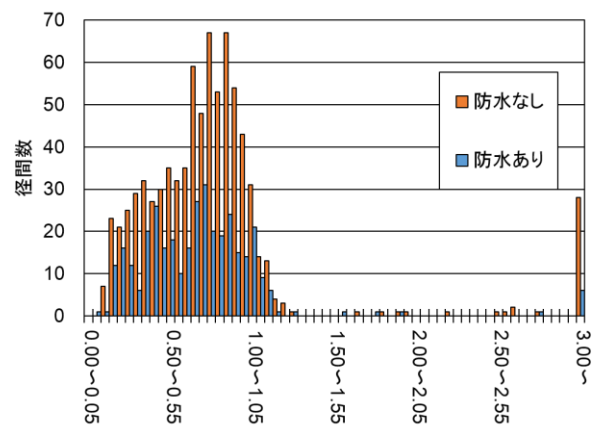


図-1 ε_1 の頻度分布（全データ）

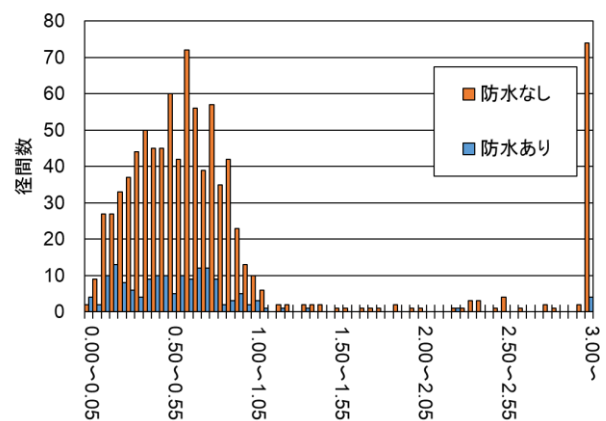


図-2 ε_2 の頻度分布（全データ）

表-1 異質性パラメータの期待値の平均

異質性パラメータ	床版防水あり	床版防水なし
ε_1	0.921	0.991
ε_2	0.624	1.036

しているといえる。

4.おわりに

本研究では、個々の社会基盤施設の階層的な異質性を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデルを提案した。また、提案したモデルを用いることで、床版防水がコンクリート系床版におけるひび割れ損傷の進展速度低減に及ぼす影響を評価した。

【参考文献】

- 1) 小濱健吾, 岡田貢一, 貝戸 清之, 小林 潔司: 劣化ハザード率評価とベンチマーキング, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 4, pp. 857-874, 2008.
- 2) 貝戸清之, 小林潔司, 青木一也, 松岡弘大: 混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計, 土木学会論文集 D3, Vol.68, No.4, pp.255-271, 2012.