

大阪大学大学院工学研究科 学生員 ○福田 泰樹 起塚 亮輔 正会員 貝戸 清之
西日本高速道路株式会社 正会員 橋爪 謙治
西日本高速道路エンジニアリング中国株式会社 正会員 横山 和昭

1. はじめに

社会基盤施設に対する補修等の意思決定は目視点検を通して、点検員や専門技術者の経験的判断によってなされる場合が少なくない。一方で近年における社会基盤施設を取り巻く経済的状況は厳しく、このような意思決定プロセスの視覚化が重要な課題となっている。

本研究では、高速道路の橋梁床版における遊離石灰による劣化に着目し、混合マルコフ劣化ハザードモデル¹⁾を適用し、床版個々の劣化過程に介在する異質性を含めた劣化予測を行う。その上で個々の床版に対する劣化速度を表現するハザード率の相対評価を行い、最適な補修順位を決定する。

2. 混合マルコフ劣化ハザードモデル

健全度 $i(i=1, \dots, I-1)$ における、床版 $k(k=1, \dots, K)$ の劣化速度を規定する標準ハザード率は、

$$\tilde{\lambda}_i^k = \exp(\bar{\mathbf{x}}^k \boldsymbol{\beta}_i') (i=1, \dots, I-1) \quad (1)$$

で定義される。ただし、 n は考慮した特性変数の数、 $\bar{\mathbf{x}}^k$ は床版の劣化速度に影響を及ぼすと考えられる床版の構造特性や使用・環境条件を表す特性変数、 $\boldsymbol{\beta}_i$ は、未知パラメータによる行ベクトルで、記号「 $'$ 」は転置操作を表す。さらに、床版 $k(k=1, \dots, K)$ の劣化過程を混合指数ハザード率

$$\lambda_i^k = \tilde{\lambda}_i^k \varepsilon^k (i=1, \dots, I-1) \quad (2)$$

を用いて表現する。ただし ε^k は床版 k ごとの固有の変動特性を表す異質性パラメータであり、平均 1、分散 $1/\phi$ のガンマ分布に従うと仮定すると、平均マルコフ推移確率は標準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^k$ と異質性パラメータの確率分布の分散パラメータ ϕ を用いて表現できる。また、推移確率はデータが観察された点検間隔 $\bar{\mathbf{z}}^k$ にも依存する。このことを明示するため平均マルコフ推移確率を目視点検による実測データ $(\bar{\mathbf{z}}^k, \bar{\mathbf{x}}^k)$ と未知パラメータ $\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{\beta}_1, \dots, \boldsymbol{\beta}_{I-1}, \phi)$ の関

数として $\tilde{\pi}_{ij}^k(\bar{\mathbf{z}}^k, \bar{\mathbf{x}}^k; \boldsymbol{\theta})$ と表すとマルコフ推移確率は、

$$\tilde{\pi}_{ii}^k(\bar{\mathbf{z}}^k, \bar{\mathbf{x}}^k; \boldsymbol{\theta}) = \frac{\phi^\phi}{\{\tilde{\lambda}_i^k \bar{\mathbf{z}}^k + \phi\}^\phi} \quad (3)$$

$$\tilde{\pi}_{ij}^k(\bar{\mathbf{z}}^k, \bar{\mathbf{x}}^k; \boldsymbol{\theta}) = \sum_{s=i}^j \frac{\psi_{ij}^s(\tilde{\lambda}^k) \phi^\phi}{\{\tilde{\lambda}_s^k \bar{\mathbf{z}}^k + \phi\}^\phi} \quad (4)$$

$$\text{ただし、} \psi_{ij}^s(\tilde{\lambda}^k) = \prod_{m=i, \neq s}^{j-1} \frac{\tilde{\lambda}_m^k}{\tilde{\lambda}_m^k - \tilde{\lambda}_s^k} \quad (5)$$

と定義される。ここで床版 $k(k=1, \dots, K)$ に関して L 組の目視点検サンプルが獲得された状況を想定する。点検時点の RC 床版の健全度結果に基づいて、ダミー変数 $\bar{\delta}_{ij}^l (i=1, \dots, I-1, j=i, \dots, I; l=1, \dots, L)$ を

$$\bar{\delta}_{ij}^l = \begin{cases} 1 & h(\bar{\tau}_A^l) = i, h(\bar{\tau}_B^l) = j \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (6)$$

と定義すると、対数尤度関数は

$$\ln L(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\Xi}) = \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j=i}^I \sum_{u=1}^U \sum_{l_u=1}^{L_u} \bar{\delta}_{ij}^{l_u} \ln \tilde{\pi}_{ij}^{l_u}(\bar{\mathbf{z}}^{l_u}, \bar{\mathbf{x}}^{l_u}; \boldsymbol{\theta}) \quad (7)$$

と表される。対数尤度関数(7)を最大にするようなパラメータの最尤推定値は

$$\frac{\partial \ln L(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\Xi})}{\partial \theta_i} = 0 \quad (i=1, \dots, (I-1)M+1) \quad (8)$$

を同時に満足するような $\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{(I-1)M+1})$ として与えられる。

3. 混合マルコフ劣化ハザードモデルの推計

混合マルコフ劣化モデルを目視点検データに基づき、パラメータ推計と個別橋梁の異質性パラメータの推計を行った。適用橋梁と目視点検結果の概要を表-1 に示す。遊離石灰法²⁾の健全度は 5 段階で評価されており、健全度 5 の状態を除く合計 4 つの健全度に対して混合マルコフ劣化モデルを定義できる。各健全度に対応する劣化速度を表す混合指数ハザード率の特性変数の候補となる変数を組み合わせ、ハ

表-1 目視点検データの概要

総橋梁数	146					
供用開始年	1974～1993					
総スパン数	644					
総サンプル数	975					
健全度と劣化度の関係	健全度	1(OK)	2(V)	3(IV)	4(III)	5(I・II)
	サンプル数	72	415	132	333	23
	漏水劣化度平均	0.08%	1.26%	3.72%	8.28%	19.00%
	剥離劣化度平均	0.20%	0.47%	0.86%	1.41%	5.72%

表-2 パラメータ推計結果

健全度	定数項	支間長	凍結防止剤散布量	漏水劣化度異質性
	$\beta_{1,0}$	$\beta_{1,1}$	$\beta_{1,2}$	$\beta_{1,3}$
1	-12.1 (-6.43)	4.13 (2.28)	3.83 (3.37)	9.64 (4.20)
2	-11.9 (-13.3)	2.55 (2.60)	2.38 (7.77)	9.62 (9.96)
3	-6.55 (-6.73)	-	1.49 (4.41)	5.09 (4.71)
4	-9.13 (-7.01)	-	5.99 (4.24)	-
ϕ	2.15 (2.41)			
対数尤度	-590.4			
AIC	1,206			

注) 括弧内はt値を示している。

ザード率の推計を行った。その中で符号条件を満足し、かつそれぞれの t -値に対して、特性変数が有意でないという帰無仮説が有意水準 95%で棄却される臨界値 1.96 を上回るものを採用した。さらにこのとき、多変数を考慮したそれぞれのモデルに対してモデルと実データのあてはまり具合を評価するために、情報量基準 AIC の算出を行い、AIC が最小となるモデルを最適モデルとして選定した。表-2 に以上の手順で推計した混合マルコフ劣化モデルの最尤推定量 $\hat{\beta}$, $\hat{\phi}$ を示す。また同表には各特性変数の t -値を示している。このとき、採用された特性変数は、1) 支間長、2) 凍結防止剤散布量、3) 漏水劣化度異質性パラメータであった。次に、各径間の異質性パラメータを推計し、664 本の期待劣化パスを算出した。図-1 に全ての期待劣化パスを示すが、健全度が 4 に到達する年数は平均 22.7 年、最小で 1.74 年、下限 5%で 5.26 年であった。

4. ハザード率の相対評価

標準ハザード率と異質性パラメータの推定値を用いて、個別橋梁の RC 床版の劣化速度を相対評価する。図-2 は、推計結果を用いた健全度 3 における標準ハザード率の推定値と異質性パラメータの関係を示している。ここで異質性パラメータの推定値に基づいて信頼域を 95%とする重点監視集合を定義する。信頼域を 95%とした場合、臨界的異質性パラメータ値は 1.256 となる。式(3)に示す通り、橋梁の劣化速度（混合指数ハザード率）の推定値は標準ハザード率の推定値と異質性パラメータの積で定義される。平均標準ハザード率と異質性パラメータの平均値の積により、平均混合ハザード率を定義し同図に示す。この曲線より上方に位置する橋梁は、混合ハザード率が 151 橋梁の平均より大きい橋梁であることを示している。さらに同図には標準ハザード率と異質性パラメータの積の 95 パーセンタイル曲線も併せて示している。95 パーセンタイル曲線より上方に位置する橋梁が重点管理集合に位置することになる。

5. おわりに

本研究では、これまで定量的、あるいは客観的に評価することが困難であった補修優先順位や、今後の目視点検で蓄積していくべき情報に対する効率的な意思決定を支援する方法論を提案した。その一方

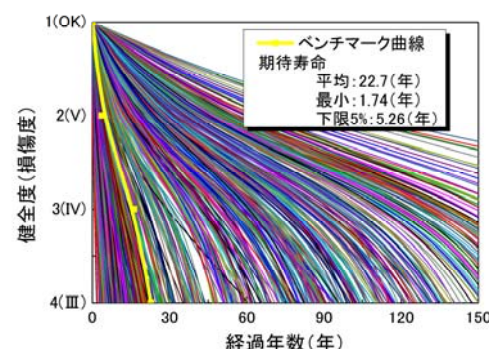


図-1 期待劣化曲線

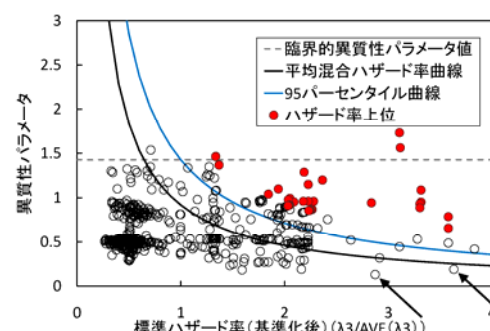


図-2 ハザード率相対評価

で今後の課題としては

- ①補修効果の視覚化、②目視点検時に詳細情報を取得することによる経済的効果の分析
- といった2点があげられる。

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) 西日本高速道路株式会社: 保全点検要領 (構造物編), 2006.