

ハザードモデルによる橋梁劣化予測に関する一考察

福井工業大学 正会員 谷脇 一弘
 (株) 帝国コンサルタント 正会員 ○安久 裕一
 福井工業大学 正会員 竹田 周平

1. まえがき

近年、マルコフ推移確率を用いて劣化を推定する方法が着目されており、津田らは¹⁾、ハザードモデルに基づいてマルコフ推移確率を推定することにより橋梁劣化の予測を行う方法を提案している。この方法は、個々の橋梁の特性を考慮して劣化過程を表現することができることから、汎用性があり操作性に優れている。本研究では、ハザードモデルによる橋梁劣化の予測方法を用い、福井県内の利用可能な床版の点検データを利用して劣化の予測を試み、その有効性について基本的考察を述べるものである。

2. ハザードモデルによる橋梁の健全度の推移確率

対象とする橋梁の健全度を1~Jに区分し、Jが最も劣化が進行した状態と仮定する。橋梁の劣化の推移は、時点tで健全度iであったときに、次の時点t+1に健全度jに推移する確率が、状態iに到達する前の履歴によらず、定常的に推移していくマルコフ過程で表現できるものとする。橋梁の健全度の推移は、健全度iからjへ推移する確率推移 π_{ij} を要素とする確率 Π を用いて確率的に表現することができる。 Π は1年後の推移確率であるとする。t年後の健全度の状態ベクトル $S(t)$ は $S(t) = \Pi^t S(0)$ により得られる。

ハザードモデルを用いた推移確率の要素の計算は文献1)に詳述されているので、ここでは計算式のみ記す。初期検査時で健全度がi (i=1, ..., J-1)であったものとし、Z年後の次の検査時において健全度iが継続するマルコフ推移確率 π_{ii} 、健全度がi+1となる推移確率 $\pi_{i,i+1}$ 、健全度がj (j ≥ i+2)となる推移確率 π_{ij} および健全度がJとなる推移確率 π_{iJ} はそれぞれ次式で与えられる。すなわち、

$$\pi_{ii} = \exp(-\theta_i Z) \tag{1}$$

$$\pi_{i,i+1} = \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} \{- \exp(-\theta_i Z) + \exp(-\theta_{i+1} Z)\} \tag{2}$$

$$\pi_{ij} = - \sum_{k=i}^{j-1} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_j} \pi_{ik} + \prod_{m=i}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_j} \exp(-\theta_j Z) \tag{3}$$

$$\pi_{iJ} = 1 - \sum_{j=1}^{J-1} \pi_{ij} \tag{4}$$

表-1 床板の健全度の設定

健全度	内容
1	健全である。
2	局所的な損傷は見られるが補修を行う必要はない。
3	今現在補修の必要はないが継続的に点検が必要。
4	損傷があり状況に応じて補修を行う必要がある。
5	速やかに補修を行う必要がある。
6	緊急に補修を行う必要がある。

表-2 福井県内の橋梁データ

番号	完成年(竣工後)	橋種	径間数	橋長(m)	幅員(m)	幅員×橋長 ÷径間数 (平均面積)	交通量(台 /12時間)	健全度
1	H11(8年)	PC・RC	7	202.0	8.6	248.2	3360	2
2	S54(27年)	PC	2	57.2	10.0	286.0	3360	2
3	H8(9年)	鋼	1	33.7	11.0	370.7	289	2
⋮								
42	S8(73年)	RC	1	9.4	8.2	77.5	14383	6
⋮								
91	S38(43年)	RC	1	8.6	5.3	45.6	435	2
92	S38(43年)	PC	1	12.2	5.6	67.7	435	3
93	S38(43年)	RC	1	13.6	5.5	74.1	515	3
94	S50(31年)	RC	1	16.6	9.5	157.7	808	4
95	S50(31年)	PC	1	15.5	8.4	130.2	808	4
96	S50(31年)	RC	1	6.6	6.0	39.6	5458	4
97	S81(20年)	鋼	1	7.1	4.5	31.7	5458	4
98	S58(23年)	RC	1	3.1	14.5	44.8	15468	4
99	S58(23年)	RC	1	4.4	8.9	39.2	3014	4
100	S38(43年)	RC	1	6.5	5.4	34.8	616	5

ここに、 θ_i は健全度iに対するハザード率であり、未知パラメータである。

本研究では表-1に示すように健全度を6つのレーティングで評価するものとし、健全度6の場合を除く合計5つのレーティングに対して指数ハザードモデルを定義する。橋梁の劣化過程を特徴づけるハザード率 θ_i^k を特性ベクトル x^k と重み β を用いて以下のように表す。

$$\theta_i^k = \beta_{i,1} + \beta_{i,2} x_2^k + \beta_{i,3} x_3^k \quad (i=1, \dots, 5; k=1, \dots, K) \tag{5}$$

ここに、Kは検査サンプル数、 x_2, x_3 は文献1)に従い正規化された1支間あたりの平均床版面積及び交通量の特徴値を考慮している。 $\beta_{i,1}$ はすべての橋梁に共通のi番目の健全度の重み、 $\beta_{i,2}$ および $\beta_{i,3}$ はそれぞれ床版面積および交通量の特徴値のi番目の健全度に対する重みを示す。

キーワード ハザードモデル, マルコフ推移確率, 橋梁劣化予測, 維持管理

連絡先 〒910-8505 福井市学園3丁目6番1号 福井工業大学 建設工学科 土木環境工学専攻

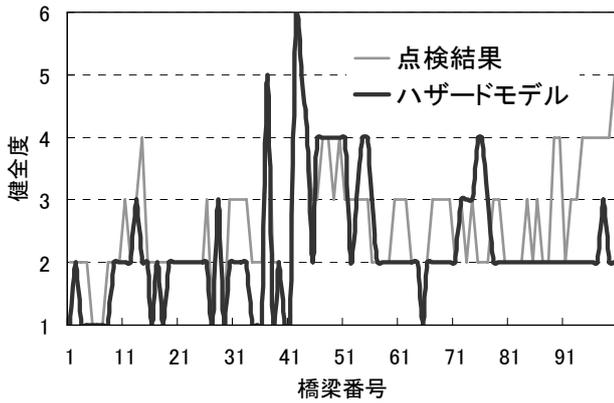


図-1 点検結果およびハザードモデルによる健全度の比較(100橋)

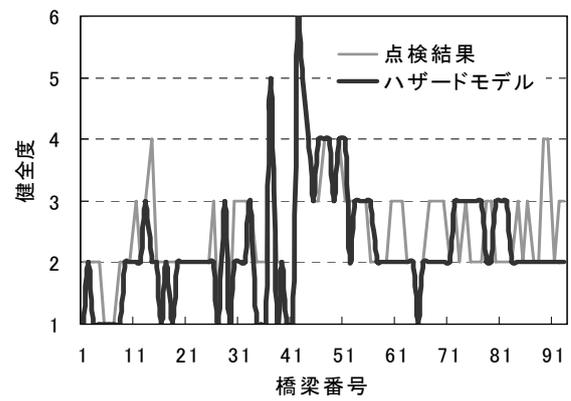


図-2 点検結果およびハザードモデルによる健全度の比較(93橋)

K 個の橋梁部材の劣化が互いに独立であると仮定し、推移確率 π_{ij} を Z^k, x^k, β の関数として表し、全検査サンプルの劣化推移パターンの同時生起確率密度を表す対数尤度関数を導入する。

$$\ln[L(\beta)] = \ln \left[\prod_{i=1}^{J-1} \prod_{j=i+1}^J \prod_{k=1}^K \{\pi_{ij}(Z^k, x^k; \beta)\}^{\delta_{ij}^k} \right] = \sum_{i=1}^{J-1} \sum_{j=i+1}^J \sum_{k=1}^K \delta_{ij}^k \ln[\pi_{ij}(Z^k, x^k; \beta)] \quad (6)$$

ここに、 δ_{ij}^k は該当する場合 1、該当しない場合 0 を示す。上式を最大化する β を求めることにより、 θ_i^k を決定し推移確率を決定することができる。本研究では、 β の最小値を 0.01 と設定し、変数の改良幅を規定する move limit の制約条件(最大 20%)を考慮した勾配射影法を用いて式(6)を最大化する β を決定した。

3. ハザードモデルによる福井県内の橋梁の劣化予測に関する考察

上で述べたハザードモデルを用いた推移確率の推定方法を用い、表-2 に示す福井県内の利用可能な 100 橋について床版の劣化予測を行った。利用できるデータは 1 回の点検結果のみであるので、最初の点検時点を供用開始時とし健全度を 1 と設定した。検査間隔 Z は 1 年とし、1 年後の推移確率を求めることとした。表-2 の健全度は表-1 に示す 6 レーティングの評価基準に対して入手した点検結果をもとに床版の健全度を評価した結果を示している。表-2 に示すデータはわずか 100 橋分であること、および健全度の分布が 1~3 の領域に集中していることより、レーティング 1 から 6 に至る劣化過程を示す良好な推移確率行列を得ることができないことが考えられるため、本研究では全体のデータから検討を行い、交通量の多い橋梁群に対して供用開始後 55 年で健全度 5、70 年で健全度 6 の仮想のデータを追加して推移確率を求めることとした。また、42 番の橋梁は既に補修がされているが、補修を行わない場合の健全度として評価している。表-2 の 94 橋~100 橋は事前調査により施工不良によるかぶり不足が判明している橋梁であるが、まずこの 7 橋も含めた 100 橋についてハザードモデルによる劣化の推定を行った。100 橋の点検結果およびハザードモデルで推定した場合の確率が最も大きくなる場合の健全度の比較を図-1 に示す。この図において、各橋梁の健全度は離散的に表現すべきであるが、点検結果とハザードモデルで推定した結果との比較を分かりやすくするために折れ線グラフで表現している。図より明らかなごとく、94 橋~100 橋の健全度は、点検結果とハザードモデルによる推定結果が大きく異なっている。このことより、ハザードモデルを用いることにより、施工不良や点検による健全度の判断ミスの橋梁を比較的容易に判別できることが明らかとなった。

次に、施工不良の 94 橋~100 橋を取り除き 93 橋について再度ハザードモデルで健全度を推定し、点検結果と比較した結果を図-2 に示す。ハザードモデルの健全度は点検結果とおおむね一致しており、図-1 に示した結果と比較してもより精度良く推定しているといえる。しかし、14,89,90 番の橋梁は点検結果とハザードモデルに 2 つの健全度の隔たりが見られるため検討した結果、これらの橋梁は海岸の近辺に位置しており塩害の影響を受けたものと推測される。このことより、橋梁の床版面積や交通量のみならず塩害の影響を受けやすいかどうかを示す指標をも式(5)に考慮する必要があることが明らかとなった。

<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.69-82, 2005.10