

## マルコフ連鎖モデルを用いた目視点検による橋梁の劣化予測手法の研究

愛媛大学大学院 学生員 ○瀬戸大輔

愛媛大学大学院 正会員 大賀水田生

愛媛大学大学院 正会員 全邦釘

### 1. はじめに

マルコフ連鎖モデルは劣化速度を遷移割合で表現し、これらを要素とした行列を用いて劣化予測を行う手法である<sup>1)</sup>。既往の研究<sup>2)</sup>では、マルコフ連鎖モデルから橋梁の劣化曲線を描き、劣化進行を予測している。しかし、予測精度が低いためにコスト面及び安全面の観点から有利な維持管理を行うことが困難となっている。また、外部環境要因について、橋齢、海岸距離、交通量などの劣化速度に影響を与えると考えられる要因を考慮している研究はあるが、大まかな傾向を定性的に判断しているのみであり、定量的な分析がなされていないものが多い。そこで、本研究では橋梁が持つ外部環境要因を考慮し、有利な維持管理計画の策定に繋がる精度の高い劣化予測手法の構築を目的とする。本報告で構築する手法は、マルコフ連鎖モデルを基本としており、その遷移割合の導出方法についてまず述べる。そして、遷移割合を確率変数として表現することで橋梁の劣化進行を一本の曲線ではなく、帯状の区間として予測する。さらに、ベイズ理論により個別の橋梁の劣化予測手法を構築する。

### 2. マルコフ連鎖モデルの定式化

マルコフ連鎖モデルとは点検データに基づいて遷移行列を導出し、過去及び将来の損傷状態を表す損傷ランク割合を予測する手法である。さらに、その割合を以下の式に当てはめることで BHI(Bridge Health Index：橋梁健全度)が算出され、橋梁の劣化曲線についても導出することができる<sup>3)</sup>。

$$\text{BHI} = R_a(n) \times 1.0 + R_b(n) \times 0.75 + R_c(n) \times 0.5 + R_d(n) \times 0.25 + R_e(n) \times 0 \quad (1)$$

現在の点検では橋梁部材の損傷を a,b,c,d,e の5段階で一般的に評価している。a は損傷がない状態を、そして e に近づくほど劣悪な損傷状態を表している。橋梁の部材には様々な点検項目が存在し、例えば、RC 橋の主桁・横桁の場合、ひびわれ・剥離・漏水といった項目について点検を行っている。本研究ではまず目視点検によって橋梁部材に存在する損傷割合  $R_a, R_b, R_c, R_d, R_e$  を実測値として評価する。遷移割合  $P_a, P_b, P_c, P_d$  は  $n$  年目から  $n+1$  年目で  $a \rightarrow b, b \rightarrow c, c \rightarrow d, d \rightarrow e$  に移る割合を指す。  $n$  年目と  $n+1$  年目の損傷割合

の関係は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} R_a(n+1) \\ R_b(n+1) \\ R_c(n+1) \\ R_d(n+1) \\ R_e(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-P_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_a & 1-P_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_b & 1-P_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_c & 1-P_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_d & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_a(n) \\ R_b(n) \\ R_c(n) \\ R_d(n) \\ R_e(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、架設された当初の橋梁に損傷がないと仮定すると、損傷割合は  $\{R_a, R_b, R_c, R_d, R_e\} = \{1, 0, 0, 0, 0\}$  と与えられる。従って、  $n$  年目の損傷割合は次式で計算される。

$$\begin{bmatrix} R_a(n) \\ R_b(n) \\ R_c(n) \\ R_d(n) \\ R_e(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-P_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_a & 1-P_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_b & 1-P_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_c & 1-P_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_d & 1 \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

右辺を計算することで得られる、  $n$  年目の損傷割合の理論値を  $Q_a, Q_b, Q_c, Q_d, Q_e$  と表すことにする。式(3)の左辺に実測値、  $n$  に架設されてから点検するまでの橋齢を代入し、以下の式を満たす遷移割合  $P_a, P_b, P_c, P_d$  を Nelder-Mead 法を用いて算出する。

$$\text{Minimize} \left\{ \sum_{i=a, b, c, d, e} [R_i(n) - Q_i(n)]^2 \right\} \quad (4)$$

逆に、算出された  $P_a, P_b, P_c, P_d$  を式(3)の右辺に代入し、  $n$  に任意の年数を与えることで  $n$  年目の損傷割合を算出することができる。

仮に、目視点検より供用年数 40 年目の損傷割合が  $\{R_a, R_b, R_c, R_d, R_e\} = \{0.6, 0.2, 0.1, 0.05, 0.05\}$  である場合、  $\{P_a, P_b, P_c, P_d\} = \{0.0127, 0.0363, 0.0545, 0.0739\}$  と式(4)から求められ、また式(1)に代入することで劣化曲線を導出することができる。図-1,2 にその損傷割合の推移と劣化曲線を示す。

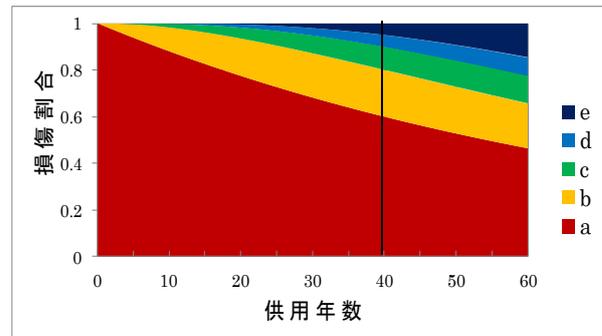


図-1 マルコフ連鎖モデルによる損傷割合の推移

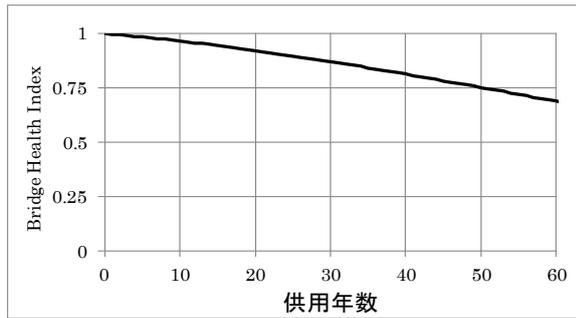


図-2 BHI の計算を用いた劣化曲線

### 3. モンテカルロシミュレーション

本研究はモンテカルロシミュレーションにより、確率分布として与えられる遷移割合を評価し、劣化区間を導出する。具体的にはグループに属する全ての橋梁が持つ遷移割合を確率分布で表し、その分布に従う乱数を発生させて、大量に劣化曲線を導出する。ここでまず、劣化進行を曲線から区間として予測する手法を構築する。まず、あるグループに属する橋梁の遷移割合  $P_a, P_b, P_c, P_d$  を算出し、そのグループに存在する橋梁が持つ遷移割合の頻度を確率分布で表現する。この確率分布を事前分布と命名し、ここでは  $P_a$  についての例を図-3 に示す。

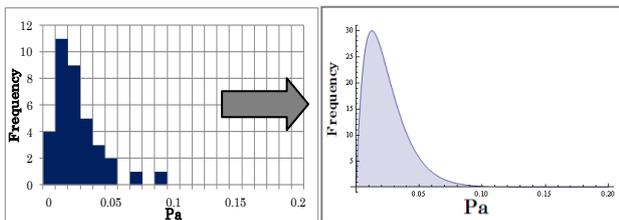


図-3  $P_a$  の事前分布

次に、事前分布に従う乱数を発生させて遷移割合を得る。これらの遷移割合はグループの外的環境要因が及ぼす現象を考慮していられると考えられ、これらの値を式(1), (3)に代入することで複数の劣化曲線が導出される。そして、それらの曲線の最大値と最小値から中央に向けて各 2.5%を除いた残りの曲線を採用することで、将来 95%の確率で BHI が存在する劣化予測区間を作成することができる。

### 4. ベイズ理論

さらに、本研究ではベイズ理論によって類似環境・構造を持つ橋梁群に属するある一橋の劣化予測手法を構築する。

図-3 で示したような橋梁群の全体的な劣化特性を表現している、事前分布に着目している橋梁の点検データから算出される尤度関数を掛けることで、橋梁群の全体的な劣化特性と橋梁の個体劣化特性の両方を反映した事後分布を導出する。ここで、事後分布からモ

ンテカルロシミュレーションを行い、将来その橋梁が 95%の確率で存在する劣化予測区間を導出する。例えば、T 橋と U 橋の劣化予測区間について述べる。これらの橋齢はともに 30 年であり、BHI はそれぞれ 0.854 と 0.992 と表されている。U 橋は T 橋に比べて BHI が高い。いわば、U 橋は同じ橋梁群の中でも劣化しにくい特性を持つ橋梁である。図-4 に U 橋及び T 橋のそれぞれの個体劣化特性を反映した事後分布から導出された劣化区間を示す。図-4 のように点検データを利用して導出した T 橋と U 橋の劣化予測区間を比較すると、U 橋は劣化しにくい傾向を持ち、T 橋は U 橋に比べてより右下に傾いて、劣化の進行が早いと予測され、これは点検データを反映した劣化予測区間になっている。また、反映後の劣化区間はグループの劣化区間と比べて、幅がより狭まっていることが分かる。

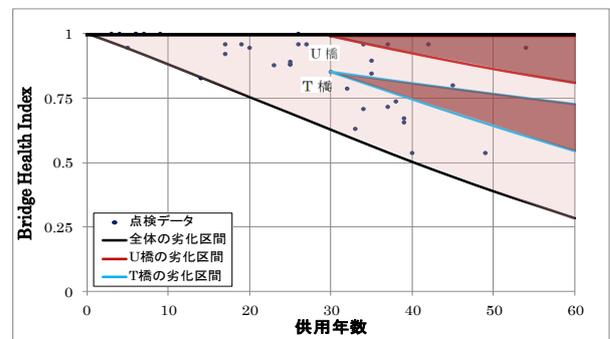


図-4 T 橋と U 橋の劣化区間

### 5. 結論

本研究では、橋梁の劣化の不確実性を考慮するため、劣化を帯状の区間で予測する手法を構築した。また、ベイズ理論により、ある着目する橋梁の劣化特性を反映し、劣化予測区間を更新する手法を構築した。更新後には劣化予測の精度が高まるため、予測区間の幅が狭まり、維持管理計画がより精度高く効率的に策定されると考えられる。今後の課題であるが、本研究で構築したベイズ理論による劣化予測への点検データの反映手法の妥当性は、複数回点検されている橋梁の点検データが少ないため、必ずしも十分に検証されていない。そこで、豊富な点検データを保持している構造物を今後の解析対象とし、その予測精度を検討したいと考えている。

### 参考文献

- 1)伊藤学ら：土木・建築のための確率・統計の応用、丸善株式会社、pp.125-133, 1998
- 2)竹田俊明ら：橋梁点検実測データに基づく橋梁資産劣化予測評価の検討、構造工学論文集 Vol.51A, pp.1157-1167, 2005
- 3)大島俊之：実践建設系アセットマネジメント、森北出版、2009