

更新理論とマルコフ連鎖モデルを用いた鉄筋コンクリート栈橋の

塩害劣化予測に関する基礎的研究

早稲田大学大学院 学生会員 ○竹中孔信

早稲田大学大学院 学生会員

萩野統也

早稲田大学

正会員

秋山充良

東京都市大学

正会員

吉田郁政

1. はじめに

海洋環境にあるコンクリート構造物の余寿命評価において、たとえば、建設予定位置やコンクリートの水セメント比などの設計時に得られる情報のみから、50年後や100年後の塩化物イオンの浸透を予測することは極めて大きな不確定性を伴う。一方、既存構造物に関しては、供用期間中に現場位置で点検・検査を行うことで、劣化予測に係るパラメータを点検・検査の結果を再現するように更新できる。参考文献1)や2)では、対象とするコンクリート構造物で生じている腐食ひび割れの幅や塩化物イオン濃度の測定結果を再現できるように劣化予測に係る複数のパラメータをSequential Monte Carlo Simulation (SMCS) により更新し、構造物の安全性の将来的な経時変化を精度良く予測する手法を提示した。参考文献1)や2)の手法は、海洋からの塩化物イオンの飛来から構造物への浸透、さらには腐食ひび割れの発生や鉄筋腐食量の増加など、コンクリート構造物の劣化過程を既存の提案式や実験結果に基づき解いているため、非常に多くのパラメータが介在しており、その確率計算は相当に複雑である。

一方、近年、マルコフ連鎖を海洋環境にあるコンクリート構造物の劣化予測に適用する手法が提案されている³⁾。経験的に定めた遷移行列を用いることで、建設後 t 年目の構造物の劣化の状態を簡易に予測することができる。この手法に対して、点検・検査情報に基づいて遷移行列自体を更新することができれば、より簡易に点検・検査情報を活用した精度の高い将来予測が可能になると思われる。本稿では、マルコフ連鎖モデルと更新理論 (SMCS) を用いた鉄筋コンクリート栈橋の塩害劣化予測手法の概略を示し、その適用例を紹介する。

2. マルコフ連鎖モデルと更新理論を用いた鉄筋コンクリート栈橋の塩害劣化予測

本研究では、参考文献3)に基づき、海洋環境にあるコンクリート構造物の塩害劣化の状態を表-1に示すように劣化度0~5までの6段階で分類した。構造物の建設後 t 年において、劣化度0~5になる割合をそれぞれ $X_0 \sim X_5$ として表現すると、 $X_0 \sim X_5$ の算定式は式(1)となる。

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_1 & 1-p_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 1-p_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 1-p_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_4 & 1-p_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_5 & 1 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

表-1 劣化度と構造物の状態の関係³⁾

劣化度	鉄筋の腐食	ひび割れ	かぶりコンクリートの剥離
0	なし	なし	なし
1	点錆が見られる	ひび割れが見られる	なし
2	錆汁が見られる	ひび割れやや多し	浮きが見られる
3	錆汁多し	ひび割れ多し	剥離・剥落が見られる
4	浮き錆多し	ひび割れ幅数mm以上	剥離・剥落多し
5	浮き錆著しい		剥離・剥落著しい

ここで、点検・検査結果がない、つまり新設構造物を対象に式(1)を適用する際は、劣化度の遷移確率 $p_1 \sim p_5$ は、参考文献3)より式(2)を用いて求める。式(2)は、海洋環境にある既存の鉄筋コンクリート部材と劣化度の関係から求められた関係式であり、簡単化のため、劣化度の状態によらず遷移確率 p_i ($i=1, 2, \dots, 5$) はそれぞれ等しいとの仮定を設けている。

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = \chi \cdot 0.14 e^{-0.6H} \quad (2)$$

ここで、 χ は式(2)による推定値と実測値の比較から定めたモデル誤差であり、対数正規変数である。また、 H は部材と海面との距離である。

一方、適当な t 年において、目視点検により部材劣化度の割合が与えられたときには、 t 年目の観測情報を実現するように遷移確率 p_i ($i=1, 2, \dots, 5$) を更新できる。観測情報を用いて確率 p_i を更新する際には SMCS を用いる。SMCS を適用する際は、確率 p_i は劣化度に応じて独立な異なる値を取るものとする。本稿では、観測情報として、参考文献4)

表-2 想定した観測情報

劣化度	観測年数	
	16年目	22年目
割合		
0	0.42	0.40
1	0.18	0.15
2	0.30	0.32
3	0.08	0.11
4	0.02	0.02
5	0.00	0.00

Key Words : 塩害, マルコフ連鎖, Sequential Monte Carlo Simulation, 信頼性解析, 劣化予測

連絡先: 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学部社会環境工学科 TEL: 03 (5286) 2694

に示されている表-2の値を用いた。表-2は、建設後16年目および22年目に実施した点検・検査において、対象構造物を構成する部材のうち、劣化度0～5となっている部材の各割合である。この2度の点検・検査の結果に基づき遷移確率 p_i を修正し、22年目以降の劣化進展を予測することで、点検・検査の結果がない場合よりも高い精度で将来的な劣化予測を行うことができる。SMCSでは、観測値（点検・検査の結果）とそれに係る確率変数および観測誤差の関係式（観測方程式）が必要となる。本研究では、式(3)の観測方程式を想定する。

$$\begin{pmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \\ Z_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{0,ave} \\ X_{1,ave} \\ X_{2,ave} \\ X_{3,ave} \\ X_{4,ave} \\ X_{5,ave} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(p_1, t) \\ f(p_1, p_2, t) \\ f(p_1, p_2, p_3, t) \\ f(p_1, p_2, p_3, p_4, t) \\ f(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, t) \\ f(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここに、 Z_i は、劣化度 i の観測値であり、 v_i は観測量誤差、 $X_{i,ave}$ は式(1)により算定される劣化度割合の予測値である。

3. 解析結果

表-2にある16年目の点検・検査の結果（劣化度の各割合）を用いて確率 p_i ($i=1, 2, \dots, 5$)をSMCSにより更新し、それから22年目の各劣化度の割合を式(1)により予測した。そして、22年目の点検・検査により得られた劣化度の各割合の実測値（表-2）と比較した。結果を図-1に示す。一方、16年目の点検・検査結果を用いることで、式(2)にある確率変数 χ （モデル誤差）の確率分布が更新される。更新の前後の確率分布の比較を図-2に示す。22年目の劣化度の各割合の実測値と予測値には差が見られるものの、点検・検査の結果を用いることで、それが無い場合に比べ、22年目での劣化度の各割合の予測精度を大幅に改善できている。また、将来予測を行う際には、予測式が持つモデル誤差を考慮しなければならない。このような不確実性は、認識論的不確実性（epistemic uncertainty）に分類されるもので、点検・検査結果の実測値に基づいて低減可能なものである¹⁾。図-2に示されるように、SMCSによる更新により、モデル誤差のバラツキを大幅に小さくできていることが確認される。図-3には、経過年数と劣化度の各割合の経時変化を示す。16年目と22年目の点検・検査の結果を用いて更新を行っているため、劣化度の各割合の予測は16年目と22年目に大きく変動している。

4. まとめ

現時点では、長期にわたり劣化度の各割合の経時変化を実測した例がないため、今後、提示した手法により得られる予測値の精度検証が必要である。本稿で提示した手法は、複数回にわたる点検・検査の結果を反映した将来予測が可能であり、劣化予測に介在するモデル誤差を合理的に低減できること、および劣化予測に係る複数のパラメータの同時更新が可能な点に特徴を有する。

参考文献 1) Akiyama, M., Frangopol, D.M., and Yoshida, I.: Time-dependent reliability analysis of existing RC structures in a marine environment using hazard associated with airborne chlorides, Engineering Structures, Vol. 32, No. 11, pp. 3768-3779, 2010. 2) 吉田郁政, 秋山充良, 鈴木修一, 山上雅人: Sequential Monte Carlo Simulationを用いた維持管理のための信頼性評価手法, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 3, pp.758-775, 2009. 3) 小牟禮健一, 濱田秀則, 横田弘, 山路徹: RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, 港湾空港技術研究所報告, Vol.41, No.4, pp.31-38, 2002. 4) 谷口修, 田村保, 佐野清史, 濱田秀則: 目視調査結果に基づいた栈橋 RC 上部工の劣化予測手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.2049-2054, 2004.

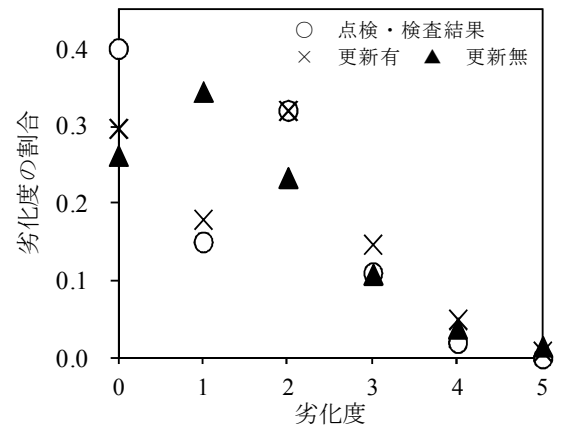


図-1 実測値と予測値の比較($t=22$ 年)

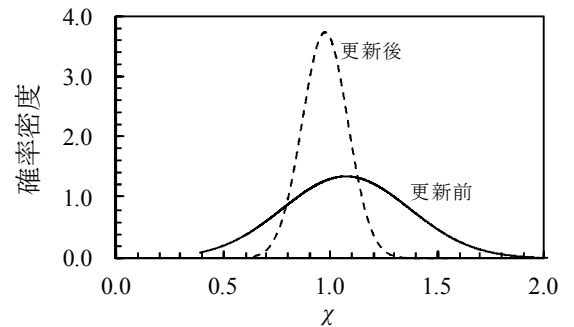


図-2 更新前後の確率分布の比較

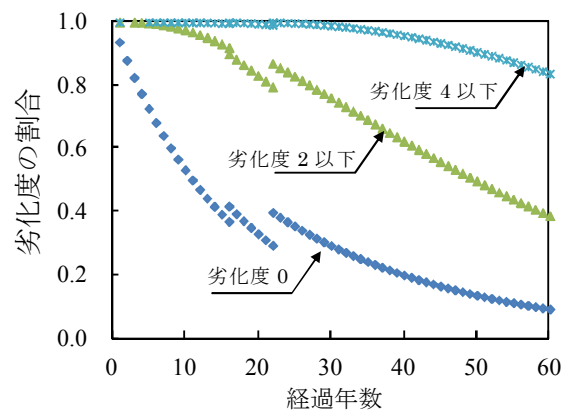


図-3 劣化度割合の経時変化の予測