

時系列 MSS 信頼性評価手法による RC 構造物の補修計画最適化

香川大学工学部 学生会員 ○福本 直也
フェロー会員 白木 渡
正会員 井面 仁志
正会員 松島 学

1. はじめに

港湾や海岸に面して建設されている構造物, 特にRC構造物は鉄筋の腐食等による経年劣化が問題で, 維持管理の在り方が議論されてきた. 本研究では, 塩害を受ける栈橋のRC床板を対象として, その塩害劣化予測並びに信頼性評価を, 時系列を考慮したMSS(Multi-State System: 以下MSSと略)^{1), 2)}を用いて行う. その結果を踏まえて, 補修費用を考慮した補修計画の最適化について検討する.

2. 時系列 MSS (Multi-State System)

有限個の性能値を有するシステムを MSS と呼ぶ. MSS において, k_j 個の性能を有する任意のシステム要素 j の性能値 g_j は式(1)で表される. また, 任意の時刻 t におけるシステム要素 j の $p_j(t)$ 状態確率は式(2)で表される.

$$g_j = \{g_{j1}, g_{j2}, \dots, g_{jk_j}\} \quad (1)$$

$$p_j(t) = \{p_{j1}(t), p_{j2}(t), \dots, p_{jk_j}(t)\} \quad (2)$$

一般に, システムの性能は, 性能劣化と補修により変化し, それぞれの状態推移率は式(3)で表される.

$$\lambda = 1/MTTF, \quad \mu = 1/MTTR \quad (3)$$

MTTF は平均故障時間, MTTR は平均補修時間間隔である. 図1に表されるような時間経過に伴う性能劣化及び補修によるシステムの状態移行をマルコフ過程でモデル化すれば, 式(4)の微分方程式が成立し, 時刻 t での各状態確率 $p_j(t)$ が求められる.

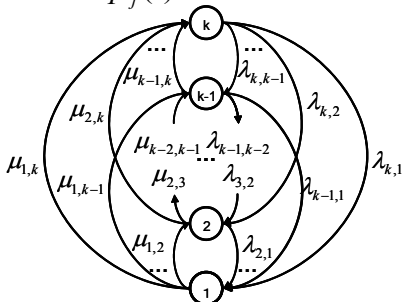


図1 システムの状態推移図

$$\begin{cases} \frac{dp_k(t)}{dt} = \sum_{e=1}^{k-1} \mu_{e,k} p_e(t) - p_k(t) \sum_{e=1}^{k-1} \lambda_{k,e} \\ \frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{e=i+1}^{k-1} \lambda_{e,i} p_e(t) + \sum_{e=1}^{i-1} \mu_{e,i} p_e(t) - p_i(t) \left(\sum_{e=1}^{i-1} \lambda_{i,e} + \sum_{e=i+1}^k \mu_{i,e} \right) \quad (1 < i < k) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = p_k(t) \sum_{e=2}^k \lambda_{e,1} - \sum_{e=2}^k \mu_{1,e} p_1(t) \end{cases} \quad (4)$$

MSS の信頼性の指標として, 式(5)~(7)で定義されるアベイラビリティ $A(t)$, 性能期待値 E_t , 性能不足値 D_t が用いられる.

$$\text{アベイラビリティ} \quad A(t) = \sum_{k=1}^K p_k(t) l(g_k \geq w) \quad (5)$$

性能期待値

$$E_t = \sum_{k=1}^K p_k(t) g_k \quad (6)$$

性能不足値

$$D_t = \sum_{k=1}^K p_k(t) \max(w - g_k, 0) \quad (7)$$

3. 時系列 MSS による RC 床板の信頼性評価

表1 塩害劣化予測の計算条件

設計かぶり (cm)	4.0
鉄筋径 (mm)	15.9
コンクリートの単位質量 (kg/m ³)	2100.0

既存の研究より, 鉄筋の塩害腐食による断面減少率が20%に達したとき, 鉄筋とコンクリートの付着力がほぼゼロになるとされている. これより, 設計上は断面減少率が20%以上となれば危険と考えている.

従って, 本研究では, 断面減少率が20%以上となる状態を耐力喪失状態とし, その状態に到るまでの性能低下の過程をモデル化する. かぶり位置での塩化物イオン量の多さの割合から, 健全な状態, 鉄筋の腐食, コンクリートのひび割れ, 床版の耐力低下, 耐力喪失, の5つの性能状態をMSSでモデル化する. 塩害によるRC床版の性能劣化の確率モデルを図2に示す.

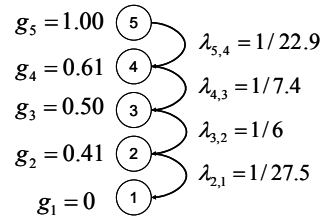


図2 RC床版の性能劣化の確率モデル

ただし, λ の単位は $[year^{-1}]$ である. このモデルに対して, 式(4)より各状態についての状態確率を算出し, MSS による信頼性評価, 従来の信頼性評価を行い, それらの比較結果を図3, 図4に示す.

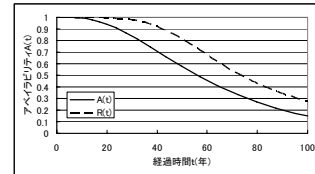


図3 信頼度 $R(t)$ とアベイラビリティ $A(t)$ の比較

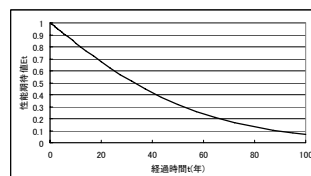


図4(a) 性能期待値

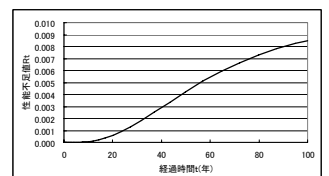


図4(b) 性能不足値

MSS による信頼性評価によって求められたアベイラビリティは、従来の信頼性評価による信頼度よりも低下時期が早く、RC 床版のより現実的な性能劣化の再現が可能となる。また、性能期待値により、RC 床版の性能値が要求性能値より平均してどの程度低下した状態にあるか把握できる。さらに、性能不足値により、RC 床版の性能値が要求性能値より平均してどの程度不足した状態にあるか把握できることから、戦略的な補修計画の立案が可能となる。

従来の信頼性設計法では、供用期間中の信頼度を規定値以上に保つための設計を目指しているが、MSS による信頼性評価法では、3つの信頼性指標（アベイラビリティ、性能期待値、性能不足値）によって、時間経過に伴う RC 床版の性能低下を考慮した戦略的かつ多様な設計が期待できる。

4. 補修計画の最適化

本研究で対象としている RC 床板は、長期にわたって供用されることから維持管理が不可欠であり、図 2 で示した RC 床版の劣化モデルに図 5 のような補修を考慮した MSS のモデルを考える。

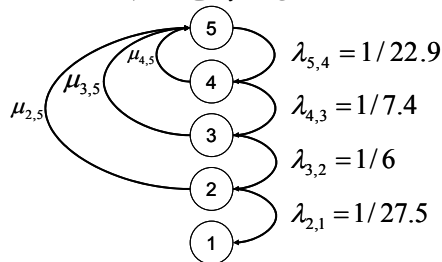


図 5 補修を考慮した RC 床板の状態推移図

維持管理の内容は、表 2 に示すように、大中小 3 種類の補修の組み合わせを変化させて 7 つの補修計画の立案が可能となる。ここで、補修率 μ が “—” となる補修は補修計画に含まれない補修のことを意味する。

表 2 補修計画ごとの補修内容

	$\mu_{4,5}$	$\mu_{3,5}$	$\mu_{2,5}$
補修計画①	1/22.9	—	—
補修計画②	—	1/30.3	—
補修計画③	—	—	1/36.3
補修計画④	1/22.9	1/30.3	—
補修計画⑤	1/22.9	—	1/36.3
補修計画⑥	—	1/30.3	1/36.3
補修計画⑦	1/22.9	1/30.3	1/36.3

それぞれの補修計画に対して、MSS による信頼性評価と、小補修費用を 21,000 円/㎡、中補修費用を 71,000 円/㎡、大補修費用を 206,000 円/㎡としたとき、式 (8)、(9) を用いた補修にかかる費用の計算を行い、100 年経過時点での補修計画の違いによる信頼性評価と総補修費用を比較した結果を図 6 に示す。

年間の補修費用の期待値

$$C_R = 21000 \times \mu_{4,5} + 71000 \times \mu_{3,5} + 206000 \times \mu_{2,5} \quad (8)$$

100 年間の総補修費用（現在価値法適用）

$$C_T = \sum_{i=1}^{100} \frac{1}{(1+k)^i} C_R \quad (9)$$

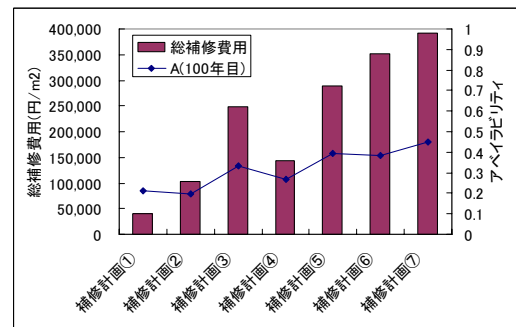


図 6 100 年経過時点での補修計画の比較結果

補修計画ごとのアベイラビリティを比較すると、補修計画に含まれる補修の種類や回数、規模が大きくなるほどアベイラビリティが高くなるのが分かる。しかし、補修にかかる費用も考慮すれば、補修の種類や回数、規模が大きくなるほど総補修費用が高くなり、その補修計画の実施が経済的に可能かどうか確認する必要がある。例えば、総補修費用の上限が 200,000 円/㎡と設定されるなら、図 6 から補修計画③のアベイラビリティが最高となり、補修計画③が安全面と経済面の要求を満たす最適な補修計画といえる。

このように、MSS による RC 床板の信頼性評価と補修にかかる費用を同時に考慮することで、補修計画ごとに RC 床版の信頼性と総補修費用の関係が推定できる。また、補修計画ごとの補修率を変化させることで、様々な要求に対応した補修計画の立案が可能となる。

5. おわりに

本研究では、時系列 MSS を用いることによって、時間経過に伴う構造物の性能低下を考慮した信頼性評価が可能になることを示した。また、MSS では 3 つの信頼性指標を用いて多角的な観点から構造物の信頼性評価が可能となるメリットも示した。そして、性能低下の進行状況から適切な補修計画を立案し、同時に補修にかかる費用も考慮することで、より現実的な補修計画への最適化の提案が可能になることを示した。

しかし、本研究では、限定した条件下での補修計画の比較を行っており、より最適な補修計画を立案するためには、補修の実施時期、規模、組み合わせをそれぞれ変化した多様な補修計画の比較が必要となる。その場合は、遺伝的アルゴリズムなどの最適解を導くアルゴリズムの導入が必要である。これについては、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Anatoly Lisnianski, Gregory Leviti: MULTI-STATE SYSTEM RELIABILITY Assessment, Optimization and Applications, World Scientific, 2003.
- 2) 森崎啓・白木渡・久保田大祐・井面仁志: Multi State System を用いた構造物の信頼性評価法に関する研究, 材料, 第 57 巻, 第 3 号, pp. 27-284, 2008.