

時系列を考慮した MSS による RC 橋脚の信頼性評価

香川大学工学部 フェロー ○白木 渡
香川大学工学部 正会員 井面仁志
隆祥産業(株) 非会員 矢部俊輔

1. はじめに

阪神淡路大震災以降、耐震技術向上の必要性が指摘されはじめ、信頼性設計法が導入されるようになった。しかしこれまでの信頼性設計法では、供用期間が経過するに従って多段階に変化する構造物の性能を考慮せず、設計で規定されている特定の1つの要求性能に注目して、構造物の破壊確率や信頼度を評価しているという問題点がある。

本研究では、時系列変化を考慮した MSS^[1]を用いて、多状態に変化する構造物の性能を統一的に考慮可能な信頼性評価手法を提案する。そして、塩害を受ける RC 橋脚を対象に提案手法と従来の信頼性評価法と比較検討して、提案手法の有効性を示す。

2. 時系列を考慮した MSS (Multi-State System)

システムは、その機能を発揮するために要求される性能を有していなければならない。この性能を有有限個有するシステムを MSS という。MSS においては、 k 個の性能を有する任意のシステム i の性能値 $g_i(t)$ は式(1)で表される。

$$g_i(t) \in \{g_1, g_2, \dots, g_k\} \quad (1)$$

一般に、システムの性能は、性能劣化と補修により状態推移し、その対応する推移確率は式(2)で表される。

$$\lambda = 1/MTTF, \quad \mu = 1/MTTR \quad (2)$$

ここに、MTTF は平均故障時間、MTTR は平均補修時間間隔である。図 1A、図 1B に表されるような各性能状態への移行をマルコフ過程でモデル化すると、図 1B の場合、式(3)の微分方程式が成立し、時刻 t での各状態確率 $p_i(t)$ が求められる。

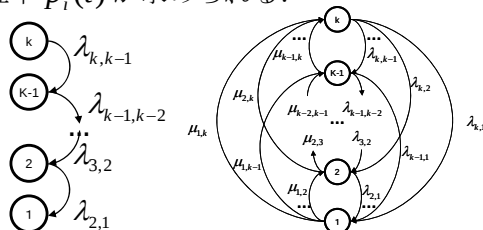


図 1A 無補修

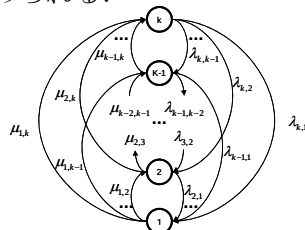


図 1B 補修有り

$$\begin{cases} \frac{dp_k(t)}{dt} = \sum_{e=1}^{k-1} \mu_{e,k} p_e(t) - p_k(t) \sum_{e=1}^{k-1} \lambda_{k,e} \\ \frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{e=i+1}^{k-1} \lambda_{e,i} p_e(t) + \sum_{e=1}^{i-1} \mu_{e,i} p_e(t) - p_i(t) \left(\sum_{e=1}^{i-1} \lambda_{i,e} + \sum_{e=i+1}^k \mu_{i,e} \right) \quad (1 < i < k) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = p_k(t) \sum_{e=2}^k \lambda_{e,1} - \sum_{e=2}^k \mu_{1,e} p_1(t) \end{cases} \quad (3)$$

MSS の信頼性の指標として、式(4)~(6)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。

$$\text{アベイラビリティ} \quad A(t) = \sum_{k=1}^K p_k(t) 1(g_k \geq w) \quad (4)$$

$$\text{性能期待値} \quad E_t = \sum_{k=1}^K p_k(t) g_k \quad (5)$$

$$\text{性能不足値} \quad D_t = \sum_{k=1}^K p_k(t) \max(w - g_k, 0) \quad (6)$$

3. 時系列を考慮した RC 橋脚の信頼性評価

本研究では図 2 に示す RC 橋脚に対し、case1 として鉄筋数 52 本、case2 は鉄筋数 55 本として、従来の信頼性評価と MSS による耐震信頼性評価を行う。要求性能はともに地震時外力 P_w とし、式(7)で表される。

$$P_w = 600(\text{gal}) \times W / 980(\text{cm}^2 / \text{sec}) \quad (7)$$

ここに、 W は構造物の重量(tf)である。

従来の信頼性設計法では、橋脚の耐力が地震時外力 P_w を下回れば破壊すると考える。MSS では、 P_w を下回った状態を耐力喪失状態とする。MSS ではさらに、健全な状態、鉄筋の腐食開始状態、コンクリートのひび割れ発生状態、と合わせて 4 つの性能状態を考慮する。case1, case2 それぞれの性能劣化の確率モデルを図 3 に示す。

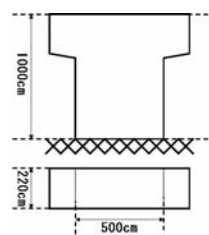


図 2 RC 橋脚

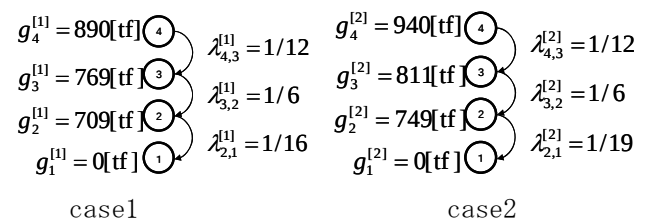


図 3 性能劣化の確率モデル

ただし、 λ の単位は $[\text{year}^{-1}]$ である。このモデルに対して、式(3)より各状態についての状態確率を算出する。

以上の準備のもとに、従来の信頼性評価、MSS による評価を行う。各 case における評価結果を図 4、図 5(a)~図 5(c) に示す。

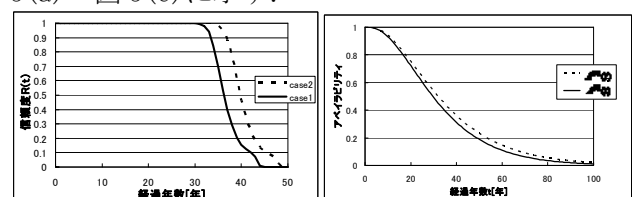


図 4 信頼度の比較

図 5(a) アベイラビリティ

キーワード MSS, RC 橋脚, 信頼性評価

連絡先〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20 香川大学工学部信頼性情報システム工学科 TEL 087-864-2243

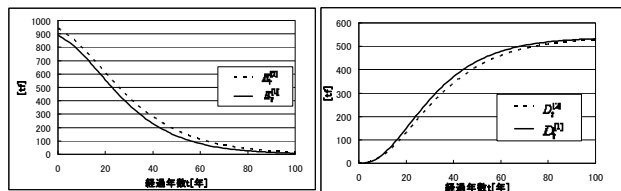


図 5(b) 性能期待値

図 5(c) 性能不足値

信頼度では、性能の違いが 30 年から 50 年の間でしか判断出来ない。しかしアベイラビリティでは、鉄筋を 3 本追加するだけで、約 60 年の期間全体を通して性能の向上が確認できる。さらに、性能期待値を評価に用いることによって、性能値が要求性能値より平均してどの程度低下しているか数値的に把握することができる。また性能不足値をみれば、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数値的に把握できるので、戦略的な補修・補強を図ることができる。

以上の結果から分かるように、MSS による評価法は従来の信頼性評価法と異なり、経年変化に伴う橋脚の性能低下が考慮された現実的な評価が行われている。従来の信頼性設計法では、信頼度を規定値以上にする信頼性設計しか行えないが、MSS による信頼性評価法を用いれば 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）による評価が可能となり、多様な設計が期待できる。

4. 補修を考慮した MSS による信頼性評価

本研究で対象としている RC 橋脚は、長期にわたって供用されることから維持管理（メンテナンス）業務が不可欠である。メンテナンス業務として、監視、補修・補強等の業務が定期的あるいは不定期に行われる。

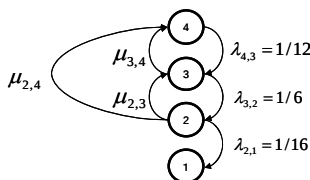


図 6 補修を考慮した RC 橋脚の状態推移図

ここでは、図 3(case1)で示した劣化モデルに図 6 のような補修を考慮した MSS のモデルを考える。補修率を変化させることにより様々な補修計画が検討できる。まず、表 1 に示した補修条件に基づいた補修計画を補修計画①、その計画を変更した補修計画②（表 2 参照）を考え、それぞれの計画に対して MSS による RC 橋脚の信頼性評価を行い、補修計画の違いによる信頼性評価結果を比較・考察する。

表 1 補修計画①[year⁻¹]

$\mu_{3,4}$	$\mu_{2,3}$	$\mu_{2,4}$
1	1/5	1/50

表 2 補修計画②[year⁻¹]

$\mu_{3,4}$	$\mu_{2,3}$	$\mu_{2,4}$
1/20	1/5	1/10

2 つの補修計画に基づいて式 (3) の微分方程式を解き、各状態確率を求めた結果を図 7(a), 7(b) に示す。得られた状態確率を用いてアベイラビリティを計算し比較した結果を図 8 に示す。

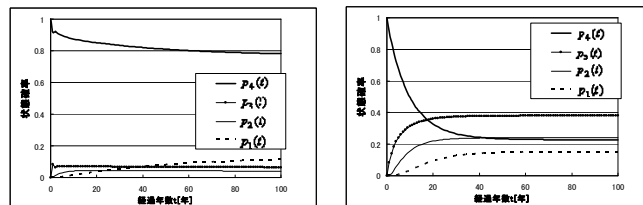


図 7(a) 補修計画①

図 7(b) 補修計画②

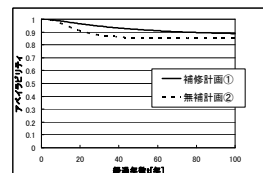


図 8 アベイラビリティの比較結果

両補修計画とも、アベイラビリティが高い値を保っており、無補修に比べ長寿命化が実現できている。また、構造物の要求アベイラビリティが 0.8 以上で良いなら、性能状態 3 の段階で平均 20 年に 1 回の補修計画②を採用すればよい。要求値が 0.9 以上必要なら年平均 1 回の補修を実施する補修計画①を採用すべきであることが分かる。

図 7(a), 7(b) を比較すると、補修計画①では、 $p_4(t)$ が 0.8 程の高い確率を保っているが、補修計画②では、状態確率 $p_3(t)$ が 20 年程度で $p_4(t)$ を逆転し 0.4 に近い値を示している。初期状態を長く保持できる補修計画①は、供用期間がさらに伸びると考えられる。一方、補修計画②では、腐食・ひび割れが発生している確率が高く、構造物としては、健全・安全であるとは言い難い。

このように、時系列を用いた MSS による信頼性評価では、性能低下が発生する各時点で要求されるアベイラビリティや健全な状態を平均的に長く保つ性能期待値を尺度として、最適な補修を計画することが可能となる。

5. おわりに

本研究では、時系列を考慮した MSS を用いれば、従来の信頼性評価法では評価できなかった鉄筋腐食状態、コンクリートのひび割れ状態、耐力喪失状態という一連の性能低下の状態変化を時間経過とともに捉えた信頼性評価が可能となることを示した。また、MSS ではアベイラビリティ、性能期待値、性能不足値の 3 つの指標によりシステムの信頼性評価が可能であること、また性能低下の状態がどの程度進んでいるのかを確率的に評価でき、補修を行う時期を適切に判断できるというメリットがあることを示した。

しかし、ここでは、建設費及びメンテナンス費用については考慮せずに解析を行っている。今後は、これらの費用を考慮したライフサイクルコストを最小化する最適信頼性設計への適用が必要であると考えている。

参考文献

- [1] Anatoly Lisnianski, Gregory Levitin : MULTI-STATE SYSTEM RELIABILITY Assessment, Optimization and Applications, World Scientific, 2003.