

道路橋維持管理費の不確実性を考慮した将来推計

国土技術政策総合研究所 正会員 ○松村 裕樹
 土木研究所 正会員 玉越 隆史
 国土技術政策総合研究所 正会員 星隈 順一
 国土技術政策総合研究所 白戸 真大
 国土技術政策総合研究所 河野 晴彦

1. はじめに

道路橋維持管理費（以下、LCC という）の最小化を図るため、予防保全の適切なタイミングを計るなどの合理的な維持管理・更新を実施するにあたり、LCC の算定方法の明確化と精度の高い算定方法の検討が求められている。その一方で、個々の劣化過程には極めて大きなばらつきが避けられないことが明らかにされている¹⁾。劣化予測の不確実性が維持管理費のばらつきとして大きく表れる場合には、修繕計画において対策を講じる道路橋の順位が、確定的手法を用いた場合と比べて逆転する可能性や、より早期に対策が必要な橋梁を見逃す可能性がある。

このような不確実性を考慮した LCC の将来予測を行う手法として、モンテカルロシミュレーション（以下、MCS という。）が考えられる。本研究では、MCS による不確実性を考慮した LCC の将来推計を行い、LCC がどの程度ばらつくかを示し、修繕計画に影響を与えうるのかどうかについて検討を行う。

試算対象として、3 径間単純鋼合成鋼桁橋（4 主桁）橋長 66.6 m、支間長 21.6 m、C 系塗装材料使用、非塩害地域に架設された新設橋梁を想定する。試算では、鋼主桁、RC 床版、RC 下部工、鋼支承、鋼製伸縮装置の 5 部材で橋梁が構成されているものとする。

2. MCS による将来推計手法

(1) 遷移確率行列の作成

道路橋の経時的な劣化過程は、状態遷移確率で表現することができる。本研究では、文献 2)、3) に倣い、同じ部材の同じ位置（同一要素）で、概ね 5 年間隔で得られた 2 回の点検記録で状態遷移確率を求める。

点検によって状態が確認された時刻も、状態の評価も離散的な記録であり、実際の状態変化が点検間のどの時点で生じたのかは不明である。すなわち、実際には連続的に変化する状態に対して、状態推移点と点検時期が一致することはなく、点検記録からそれを特定することもできない。ここでは、ある点検時点（時刻 t_A ）による損傷程度が次の点検時点（時刻 $t_B (=t_A+5 \text{ 年})$ ）において、どの損傷程度にどのような確率で推移するかについて、実データを数え上げて集計してマルコフ推移確率を求めた。データの集計では、部材毎に要素データの最悪損傷程度を代表させた。また、5 年以内に損傷程度が回復しているものは除外した。時刻 t_A における損傷程度を i 、時刻 t_B における損傷程度を j とすると、マルコフ推移確率は式(1)のとおりとなる。ここで、 $i=a,b,c,d,e$ 、 $j=a,b,c,d,e$ であり、 a, b, c, d, e は、点検要領の損傷程度の評価である。また、全ケースのマルコフ推移確率を状態遷移確率行列 P として、次式により表すことができる。このとき、前後 2 回の点検間で評価が改善しているものは除いているため、状態遷移確率行列は三角行列となる。（式(2)）

$$p_{ij} = \frac{\text{時刻}t_A\text{点検時に}i\text{かつ時刻}t_B\text{点検時に}j\text{である個数}}{\text{時刻}t_A\text{点検時に}i\text{である個数}} \quad (1) \quad P = \begin{pmatrix} p_{aa} & p_{ab} & p_{ac} & p_{ad} & p_{ae} \\ 0 & p_{bb} & p_{bc} & p_{bd} & p_{be} \\ 0 & 0 & p_{cc} & p_{cd} & p_{ce} \\ 0 & 0 & 0 & p_{dd} & p_{de} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{ee} \end{pmatrix} \quad (2)$$

図-1 に非塩害地域に架設されている鋼桁橋で C 塗装系を母集団とする腐食の状態遷移確率行列をべき乗して得られる状態確率分布を示す。これは、100 年間の損傷程度の割合の推移を予測したものである。全体の 50%

キーワード モンテカルロシミュレーション、LCC、橋梁点検、将来推計

連絡先 〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地 国土交通省国土技術政策総合研究所 TEL029-864-4919

は約 25 年で損傷程度 d,e となる一方で, 50 年以上経過しても損傷程度 a,b,c を保持している部材もある. ここで, 損傷程度 d に達した部材を補修すると仮定した場合は, 50 年経過しても 1 度も補修を行わない部材もあれば, 15 年で 1 回目の補修を行い, その後も複数回補修が行われる部材もある. このようなばらつきを考慮した LCC の推計を MCS によって行う.

(2) MCS の計算条件

供用開始時点の損傷程度 a として, (1)で作成した遷移確率行列を基に 5 年後の損傷程度を確率的に予測することを 100 年間行う. この計算を 1 万回繰り返して遷移確率に基づいたあらゆる劣化過程を予測する. 予防保全の場合は損傷程度 c 以下になった時点, 事後保全の場合は損傷程度 d 以下に達した時点で補修し損傷程度 a に回復させる. このとき, 損傷程度 d 以下になった部材に対して補修費用を計上する.

MCS の表-1 に各部材の対象とする損傷および補修工法, 単価, 1 回の補修に掛かる費用を示す. 一般的な鋼橋を支間長 30 m の非合成 I 桁と仮定し, 橋面積当たりの鋼材重量と鋼材重量当たりの塗装面積から橋面積当たりの塗装面積を算出し, 標準単価を乗じることで, 橋面積当たりの補修単価とした. 下部工の補修単価は, 全体の 30%を補修するものとした. 標準単価は, 建設物価土木コスト情報'13-4, 橋梁架設工事の積算 (平成 25 年度版), 土木工事積算標準単価 (平成 25 年度版) から引用した.

3. MCS の結果

図-2 に MCS による対象橋梁の累積補修費用の推移を示す. MCS では, 計算回数分の累積補修費用の推移を得るため, 各 5 年の累積補修費用の分布から平均値 μ と標準偏差 σ および 2σ を算出し, 累積補修費用の推移を $\mu, \mu \pm \sigma, \mu \pm 2\sigma$ として表した. μ は平均的な累積費用の推移を示す. 図から, 累積補修費用が 40 百万円かかるまでに, μ では約 50 年であるが, $\mu + \sigma$ では約 35 年, $\mu - \sigma$ では約 75 年と同水準までの到達年に関きがある. また, 50 年経過時点で必要な補修費用を見ると, 約 10 ~ 70 百万円の範囲でばらついていることがわかる.

4. まとめ

遷移確率に基づく MCS による不確実性を考慮した 100 年間の LCC の推計を行った. その結果, 同じ補修費用に到達する時間, および同じ時点で必要な補修費用が大きくばらついていた. 結果から, ばらつきを考慮して道路橋の修繕計画を立てることで, 対策を講ずる順番が変わりうること, 計画通り実施した時の維持管理費の縮減効果を確定的に求めることはできないと考えられる.

参考文献

1)玉越隆史ほか: 全国規模の実測データによる道路橋の劣化特性とその定量的評価, 土木学会論文集 F4, Vol.70No.4, pp.61-72, 2014, 2)玉越隆史ほか: 全国規模の道路橋点検データに基づく鋼橋の劣化の特徴, 鋼構造論文集, Vol.21No.82, pp.99-113, 2014.6, 3)玉越隆史ほか: 全国規模の点検データに基づく道路橋のコンクリート部材の劣化の特徴, コンクリート工学論文集第 25 巻, pp.167-180, 2014

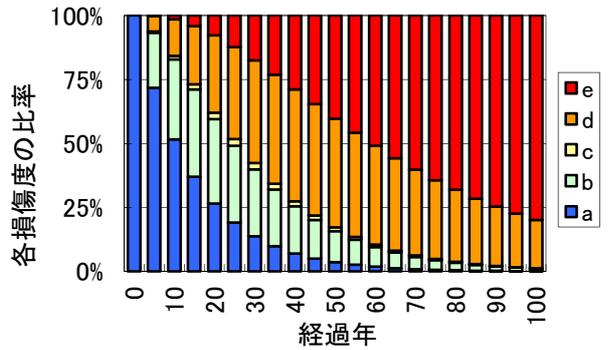


図-1 状態確率分布

(鋼桁-C 塗装系-一般環境)

表-1 各部材の補修工法及び補修費用

部材	鋼主桁	RC床版	RC下部工 (橋台・橋脚)	鋼製 支承	鋼製 伸縮装置
対象とする 損傷	防食機能 の劣化	ひびわれ	ひびわれ	機能障害	路面の凹凸
補修工法	再塗装工 (Rc-I)	炭素繊維 接着工+ 橋面防水工 (塗膜系)	ひびわれ 注入工+ 断面修復工	支承 補修工 (溶射)	伸縮装置 取替工
補修単価	29.7 (千円/ 橋面積m ²)	69 (千円/ 橋面積m ²)	24.2 (千円/ 表面積m ²)	122.8 (千円/基)	252 (千円/ 延長m)
補修費用 (百万円)	17.7	41.1	5.92	2.9	8.1

*鋼主桁・再塗装工(Rc-I)の標準単価 8千円/塗装面積m²
*下部工は全表面積の30%に対して補修を行うことを想定

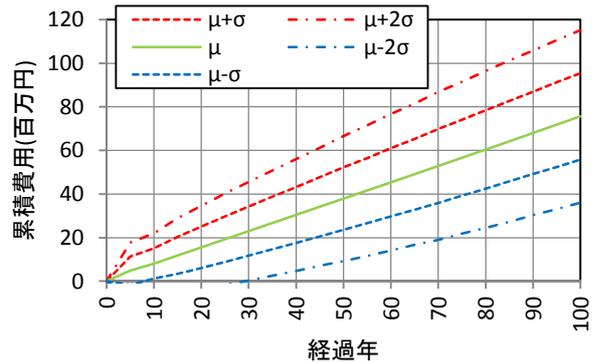


図-2 MCS による累積補修費用の推移