

第IV部門

平均費用法による複数橋梁管理のためのシミュレーションモデルに関する研究

京都大学工学部	学生会員	○徳岡 真司
京都大学大学院	学生会員	津田 尚胤
京都大学大学院	フェロー	小林 潔司

1. はじめに

我が国において、インフラストラクチャ(以下、インフラと略す)管理を目的としたアセットマネジメントの考え方は必要不可欠なものとなっている。アセットマネジメントにおいては、ライフサイクルコスト(以下、LCCと称す)を考慮したミニマムメンテナンスが重要となる。このLCC評価手法には、将来時点に発生する補修費用に社会的割引率を用いるか用いないかによって2つの方法に大別される。1つは社会的割引率を用いてLCCを計算する割引現在価値法である。対して、社会的割引率を用いずにLCCを計算する方法が非割引現在価値法であり、現時点から将来時点に発生するLCCを年平均費用の流列に置き換えて評価する平均費用法が提案されている。本研究では、複数のインフラを対象とした劣化・補修過程に関するシミュレーションモデルを提案し、両法による政策で個々の橋梁のLCCを集計化した場合について、理想的な補修実施下でのシミュレーションを行い、平均費用法の有効性を検証する。

2. 本研究の基本的考え方

アメリカの橋梁管理システムであるPONTISをはじめとして多くのアセットマネジメントが、LCC評価方法として割引現在価値法を採用している。しかし、これらの議論は単一橋梁のみでのマネジメントを考慮しており、それが複数橋梁においても同様の戦略を取ることで全体のLCCを最小にできるとは限らない。ところが、複数橋梁の管理を考えた場合、その補修政策の組み合わせは膨大なものになってしまう。したがって、個別の橋梁で導出した最適補修戦略により得られた結果を集計化し、複数橋梁の管理を考えた場合でも同時にそれがシステム全体の最適な補修戦略になることが望ましい。

複数の橋梁の管理を考える際には、補修のタイミングが新たな問題として発生する。劣化が確定的であり、かつ2つの対称な橋梁において、補修のタイミングが分散されているような場合、個別橋梁に対して平均費用法で評価することで全体の最適化も達成できるとされている。さらに、平均費用法は本研究で提案する橋梁管理会計と整合性を持ち、世代間の公平性を解決できるなどの特長があるため、今後のアセットマネジメントにおいてLCC評価の重要な手法の一つとなりうるものであると考えられる。このことに着目し、本研究では劣

化過程に不確実性を伴い、さらに橋梁の数が多数であるような場合の劣化・補修過程についてシミュレーションモデルを提案した上で、平均費用法による補修政策を提案し、複数橋梁を管理する場合に、評価方法の違いが結果に与える影響を分析する。

3. 複数橋梁管理シミュレーションモデル

(1) モデル化の前提条件

橋梁管理者が、数多くの橋梁群で構成されている橋梁システムの維持・補修を管理する問題を考えよう。時間軸を初期時点 $t = 0$ から無限に続く離散的時刻の系列 $t (t = 0, 1, \dots)$ で表現する。橋梁は数多くの部材で構成されているが、その中のある特定の部材の劣化・補修過程をモデル化しよう。個別橋梁部材の劣化予測モデルをマルコフ推移確率行列で表現し、橋梁部材ごとに劣化過程が不確実であることを表現する。

いま、管理対象とする橋梁部材の総数を N とする。また、部材 $n (n = 1, \dots, N)$ は時間とともに劣化するが、劣化過程は部材ごとに独立であると考ええる。橋梁部材の健全度は目視検査により判定され、その健全度は K 個の離散的なレーティング $i (i = 1, \dots, K)$ で表される。健全度が最も劣化した状態である K になれば、直ちに更新される。つぎに、各橋梁部材の劣化過程が、離散的な健全度 $i (i = 1, \dots, K)$ で構成される状態空間 $S = \{1, 2, \dots, K\}$ 上で定義される斉時マルコフ連鎖を用いて記述できると仮定する。橋梁部材 n の時点 t の健全度 i から、時点 $t+1$ で観測された部材 n の健全度が j に推移する確率を $\text{Prob}[j|i] = p_n^{ij}$ と表すこととする。推移確率の定義より $\sum_{j=1}^K p_n^{ij} = 1$ が成立する。部材の補修がない限り、健全度 K は吸収状態であり、 $p_n^{KK} = 1$ が成立する。

(2) 劣化・補修過程のモデル化

橋梁管理者が健全度に応じて補修工法を決定するルールを「補修アクション」と呼ぶ。いま、部材 n の補修アクションベクトルを $\eta^{dn} = (\eta^{dn}(1), \dots, \eta^{dn}(K))$ とし、補修政策 $d_n \in D_n$ を構成する補修アクション $\eta^{dn}(i)$ により生じる施設の健全度の変化を

$$q_{ij}^{dn} = \begin{cases} 1 & \eta^{dn}(i) = j \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (i, j = 1, \dots, K) \quad (1)$$

と定義する。さらに、劣化・補修過程における補修履歴を考慮した場合の補修政策 $d_n \in D_n$ の下で時点 t と時点

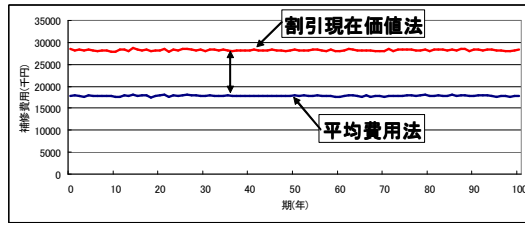


図-1 各期期待補修費用

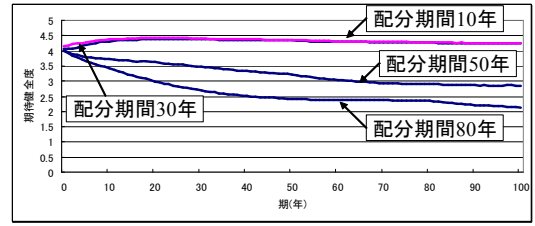


図-2 期待寿命が30年の場合の期待健全度

$t+1$ の間における健全度の推移確率 $p_{ij,n}^{d_n}$ を

$$p_{ij,n}^{d_n} = \begin{cases} p_n^{ii} & i=j \text{ の時} \\ \sum_{k=i+1}^K p_n^{ik} q_{kj}^{d_n} & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (i, j = 1, \dots, K-1)$$

と定義する．健全度 K が観測されれば，当該部材が直ちに取替えることを仮定しているため， $p_{Kj,n}^{d_n} = 0, p_{iK,n}^{d_n} = 0$ ($i, j = 1, \dots, K$)が成立する．そこで，部材 n ($n = 1, \dots, N$)の補修アクションを考慮した健全度の推移確率行列 $\mathbf{P}_n^{d_n}$ を $(K-1 \times K-1)$ 次行列に縮約し，

$$\mathbf{P}_n^{d_n} = \begin{pmatrix} p_{11,n}^{d_n} & \cdots & p_{1K-1,n}^{d_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{K-11,n}^{d_n} & \cdots & p_{K-1K-1,n}^{d_n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

と表すことができる．

(3) 平均費用最小化政策

橋梁システムの劣化・補修過程をモデル化するためには，各部材ごとに補修アクション d_n の内容を具体的に求める必要がある．本研究では平均費用法，割引現在価値法という2つのライフサイクルコスト評価法に基づいた最適補修政策を用いることとする．

平均費用最小化政策は期待累積LCC $u_n^{d_n}(i, T)$ に基づいて評価される． $u_n^{d_n}(i, T)$ は補修政策 $d_n \in D_n$ の下で，時点 $t=0$ において健全度 i の初期状態から時点 $t=T$ に至るまでに発生する橋梁部材 n の補修費の総和に関する期待値であり，また，次式のように

$$u_n^{d_n}(i, T) = Tq_n^{d_n} + v_n^{d_n}(i) \quad (i = 1, \dots, K-1) \quad (3)$$

期間長 T に比例する項 $Tq_n^{d_n}$ と初期健全度 i に依存する項 $v_n^{d_n}(i)$ に分解することができる．この時，平均費用 $w_n^{d_n}(T)$ の最小化を目的とする平均費用最小化モデルは

$$w_n^{d_n}(i) = \min_{d_n \in D_n} \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{u_n^{d_n}(i, T)}{T} \right\} \quad (i = 1, \dots, K-1) \quad (4)$$

と定式化できる．(4)を満足するものが平均費用最小化政策である．

(4) 割引現在価値最小化政策

期待LCCの割引現在価値の最小値（以下，最適割引現在価値と呼ぶ）を $\tilde{v}_n(i)$ と表そう．この時， $\tilde{v}_n(i)$ を再帰的に定義すれば，割引現在価値最小化モデルは， $u_n^{d_n}(i, T)$ は，補修政策 $\tilde{d}_n$ の下での部材 n の1期当たりの期待補修費ベクトル $\mathbf{r}_n^{\tilde{d}_n} = (r_n^{\tilde{d}_n}(1), \dots, r_n^{\tilde{d}_n}(K))'$ を用

いて

$$\tilde{v}_n(i) = \min_{\tilde{d}_n \in D_n} \left\{ r_n^{\tilde{d}_n}(i) + \beta \sum_{j=1}^{K-1} p_{ij,n}^{\tilde{d}_n} \tilde{v}_n(j) \right\} \quad (i = 1, \dots, K-1) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{1+r} \quad (6)$$

を満足する最適補修政策 $\tilde{d}_n^*$ を求める問題として定式化できる．なお， r は社会的割引率， β は割引因子である．(5)を満足するものが割引現在価値最小化政策である．

4. ケーススタディ

(1) 両政策の比較

補修のタイミングが分散された状態の下，両政策を比較する．本研究では，タイミングが分散された状態を每期補修費用が一定になる状態として考える．每期補修費用一定状態は式(2)の推移確率の定常状態において達成される．よって，推移確率の定常状態分布を初期分布としてシミュレーションを行った．図-1は各期に発生する期待補修費用である．平均費用最小化政策の方がより毎期の費用を小さくできることをふまれば，何世代にもわたって補修政策を平均費用最小化政策で固定し，橋梁システム全体の維持管理を続けていくことが望ましいであろう．

(2) 期待寿命と予算配分問題

次に，予算制約下において補修費用の配分期間の設定が橋梁の管理に与える影響を分析した．予算問題は橋梁管理会計と関係したものであるが，橋梁管理会計については紙面の都合上，詳細は省略する．補修費用の配分期間は部材の期待寿命と関係があると考え，色々な期待寿命に対して4つの配分期間を設定した．図-2は結果の一例である．配分期間と期待寿命の間には，管理が成功する場合と失敗する場合の閾値が存在するものと考えられる．

5. おわりに

本研究では，アセットマネジメントを考えるにあたって，複数橋梁管理において劣化・補修過程のシミュレーションモデルを提案した．その上で補修のタイミングにより平均費用法が有効である場合を示し，橋梁管理会計と関係した予算の配分問題について分析を行った．