橋梁アセットマネジメントのためのシミュレーションモデル *

Simulation Model for Bridge Managemant*

青木一也** ・貝戸清之*** ・小林潔司****

by Kazuya AOKI**, Kiyoyuki KAITO*** and Kiyoshi KOBAYASHI****

1. はじめに

橋梁マネジメントシステム（以下，BMS（Bridge Management System）と略す）では，橋梁の補修政策の効率性を比較検討するためのライフサイクル費用評価が重要な課題となる．ライフサイクル費用評価法として，1）割引現在価値法，2）非割引現在価値法という２つの評価法がある．しかし，割引現在価値法に基づいた費用比較による方法では，将来時点における費用を割り引くため，橋梁の長寿命化の効果を積極的に評価できないという指摘もある．また，現実の橋梁マネジメントにおいては，毎年確保される予算制約の下で維持補修を実施する必要がある．そのための予算は年度を通じて平滑化されることが望ましく，ライフサイクル費用に割引率を考慮する必要はないという議論がある．小林[1)]は，平均費用法を用いて個々の供用開始時期の異なる橋梁に対する最適補修政策を検討することにより，結果的に橋梁システム全体を対象とした集計的なライフサイクル費用の割引現在価値を最小化することが可能であることを示した．さらに，分権的ライフサイクル費用法として平均費用はいくつかの望ましい性質を有していることを明らかにしているが，そこでの議論は確定的な劣化過程を有する２つの対称的な橋梁を対象としたものである．以上の問題意識の下に，本研究では個別橋梁部材の劣化過程をマルコフ連鎖モデルを用いて表現するとともに，建設時期が異なる数多くの橋梁で構成される橋梁システムの劣化・補修過程をモンテカルロシミュレーションにより分析する方法を提案する．

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 問題提起

いま，橋梁管理者が，永久的に供用が予定されている２つの対称的な橋梁を同時に管理していると考える．橋梁の寿命は２期間であり，２期目の期末には大規模補修が必要となる．橋梁のマネジメント政策として，1）事後補修政策，2）予防補修政策を考える．事後補修政策を採用した場合，２期目に10億円の更新費用が発生する．一方，予防補修政策を採用した場合，毎期ごとに補修費用として4億円が必要となる．いま，２期間の割引因子を0.5としよう．事後補修政策を用いた場合，ライフサイクル費用の割引現在価値は$0.5 \times 10 = 5$億円である．一方，予防補修政策を採用した場合の割引現在価値は$4 + 0.5 \times 4 = 6$億円となる．したがって，ライフサイクル費用の割引現在価値を比較すれば，5億円 $<$ 6億円となり，事後補修政策の方が望ましい．ここで，視点を変えて２つの橋梁を同時に管理する問題を考えよう．**図－１**に示すように，２つの橋梁の供用年数が１期ずつ異なる場合を考える．図の第１期において，橋梁Aはライフサイクルの第２期目，橋梁Bは第１期目にある．過去から将来にわたって事後補修政策を採用している場合，毎期ごとに２つの橋梁のうち一方を大規模補修しなければならず，毎期ごとに10億円が支出される．一方，予防補修政策を採用している場合，毎期8億円ずつの補修費用が必要となる．橋梁管理者がこのような２つの橋梁を管理する場合，割引因子γの値が$0 \leq \gamma < 1$を満足する限り，どのような割引因子を用いても予防補修政策の方が望ましいことが保証される．この数値事例は，２つの橋梁のライフサイクル費用を個別に評価しても，それによって橋梁システム全体のライフサイクル費用の最小化を達成できる保証はないことを示している．このように橋梁システムのライフサイクル費用評価において，個々の橋梁のライフサイクルの動的な関係が極めて重要な影響を及ぼすこととなる．

(2) シミュレーション実験の課題

図－１に示した数値事例において，割引現在価値法による分権的ライフサイクル費用評価が失敗する原因は，個

*キーワーズ：土木施設維持管理，財源・制度論

**正会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL 075-753-5073)
***正会員　工博　（株）BMC
(〒261-7125 千葉市美浜区中瀬2-6 WBG マリブウェスト25F)
****フェロー 工博 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL 075-753-5073)

		1期	2期	3期	4期	…
事後	橋梁A	10	0	10	0	…
補修	橋梁B	0	10	0	10	…
	合計	10	10	10	10	…
予防	橋梁A	4	4	4	4	…
補修	橋梁B	4	4	4	4	…
	合計	8	8	8	8	…

図－1 簡単な数値事例（単位：億円）

々の橋梁のライフサイクル費用を他の橋梁と切り離して単独に評価した点にある．2つの橋梁の補修タイミングが異なる場合，2つの橋梁の補修政策を調整することにより，橋梁全体のライフサイクル費用を削減することが可能である．すなわち，この数値事例は，個別橋梁を対象とした部分的な最適化により，橋梁システムを対象とした全体的な最適化を常に達成できる保証がないことを表している．

平均費用評価法[2)]は，分権的ライフサイクル費用評価法として望ましいいくつかの性質を持っている．平均費用評価法はライフサイクル費用を毎年等価な平均費用の流列として評価する方法であるが，各橋梁ごとに平均費用を最小化するような補修政策を求めることにより，結果的に各会計年度において発生する橋梁補修費用の平滑化に資することが可能となる．特に，**図－1**に示すように，橋梁の補修タイミングが非同期化されている場合，平均費用最小化政策を採用することにより，橋梁システム全体を管理するための年平均費用の最小化が達成されることが保証される．しかし，現実の橋梁システムは，多くの異質性を含んでおり，分権的ライフサイクル費用評価法として平均費用法が常に望ましいとは限らない．そこで，本研究では，橋梁管理者が，平均費用法，あるいは割引現在価値法を用いて最適な個別橋梁（部材）の補修政策を決定した場合を想定するとともに，橋梁システム全体の長期的な補修・劣化過程をシミュレートし，橋梁補修政策の分権的評価法が，橋梁システム全体のライフサイクル費用に及ぼす影響について分析する．

3. シミュレーションモデル

(1) 劣化・補修過程のモデル化

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 $(t=0,1,\cdots)$で表現しよう．対象とする橋梁システムは無限期にわたり供用され，その要求性能は一定に保たれると考える．また，新規の橋梁が建設される計画もないと考えよう．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・補修過程をシミュレートしよう．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する．また，健全度によって橋梁部材の補修工法と費用が異なると考える．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 $(n=1,\cdots,N)$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 $(i=1,\cdots,K)$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．各橋梁部材の劣化過程が，離散的な健全度i $(i=1,\cdots,K)$で構成される状態空間$S=\{1,2,\cdots,K\}$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し，部材n $(n=1,\cdots,N)$の健全度の推移確率行列を$\boldsymbol{P}_n$で表現する．

つぎに，橋梁管理者が観測された健全度に対して実施する補修アクションを指定する一連のルールを，補修政策d_nと表す．このとき，部材nの補修アクションを考慮した健全度の推移確率行列$\boldsymbol{P}_n^{d_n}$と表現すると，橋梁部材の補修政策d_nを考慮した場合，初期時点の健全度が$\omega_n(0)=i$であった橋梁部材nのT期後の健全度分布は

$$\boldsymbol{\pi}_n^{d_n}(T)=\boldsymbol{e}_i\bigl(\boldsymbol{P}_n^{d_n}\bigr)^T \tag{1}$$

と表せる．健全度分布$\boldsymbol{\pi}_n^{d_n}(T)$の各要素を$\pi_{i,n}^{d_n}(T)$ $(i=1,\cdots,K-1)$と表記する．さらに，橋梁システムに対して採用される補修政策ベクトルを$\boldsymbol{d}=(d_1,\cdots,d_N)$と定義しよう．この時，補修政策ベクトル$\boldsymbol{d}$の下で実現する構成部材全体の健全度の確率分布は，

$$\boldsymbol{\pi}^{\boldsymbol{d}}(T)=\{\boldsymbol{\pi}_1^{d_1}(T),\cdots,\boldsymbol{\pi}_N^{d_N}(T)\} \tag{2}$$

で表現される．マルコフ連鎖モデル(1)を反復的に利用することにより各期の健全度分布(2)を求めることができる．さらに，時点Tに各健全度にレーティングされる期待部材数ベクトル$E\boldsymbol{m}^{\boldsymbol{d}}(T)=(Em_1^{\boldsymbol{d}}(T),\cdots,Em_{K-1}^{\boldsymbol{d}}(T))$を定義しよう．ここに，$Em_i^{\boldsymbol{d}}(T)$は，時点$t=T$に健全度$i$と判定される期待部材数を表し

$$Em_i^{\boldsymbol{d}}(T)=\sum_{n=1}^{N}\pi_{i,n}^{d_n}(T)\ (i=1,\cdots,K-1) \tag{3}$$

と定義される．

(2) 平均費用最小化政策

いま，時点$t=0$において，橋梁部材n $(n=1,\cdots,N)$の健全度iが観測されたとしよう．期待累積ライフサイクル費用$u_n^{d_n}(i,T)$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を表している．時点$t=0$から時点$t=1$へ１期経過する間に劣化が進展し，時点$t=1$の直前に健全度がjに推移したと考えよう．時点$t=1$の直前に補修アクションが実施されると考える．時点$t=0$において時点$t=1$にどのような補修が実施されるかは不確実である．そこで，$t=0$において，健全度がiである場合，時点$t=1$の直前までに補修政策dの下で必要となる部材nの期待補修費用$r_n^{d_n}(i)$は

$$r_n^{d_n}(i)=\sum_{j=i+1}^{K-1}p_n^{ik}q_{kj}^{d_n}c_n^{d_n}(k)\ (i=1,\cdots,K-1) \tag{4}$$

と表される．つぎに，初期時点から１期だけ時間が進んだつぎの時点$t=1$に着目しよう．時点$t=0$から時点$t=1$へ１期経過する間に劣化が進展し，時点$t=1$の直前に実施された補修アクションを経て，時点$t=1$に健全度がjに推移したと考えよう．さらに，時点$t=1$から補修政策d_nを適用し，時点$t=T$に至るまでの$T-1$期間中に発生する期待累積ライフサイクル費用を$u_n^{d_n}(j,T-1)$と表そう．時点$t=0$から時点$t=1$までの間に，健全度が$\omega_n(0)=i$から$\omega_n(1)=j$に推移する確率$p_{ij,n}^{d_n}$を用いれば，期待累積ライフサイクル費用$u_n^{d_n}(i,T)$と$u_n^{d_n}(j,T-1)$の間に次式が成立する．

$$u_n^{d_n}(i,T)=r_n^{d_n}(i)+\sum_{j=1}^{K-1}p_{ij,n}^{d_n}u_n^{d_n}(j,T-1)$$
$$(i=1,\cdots,K-1) \tag{5}$$

T期末の期待累積ライフサイクル費用$u_n^{d_n}(i,0)$は$u_n^{d_n}(i,0)=0$ $(i=1,\cdots,K-1)$を満足する．十分大きなTに対して，再帰方程式(5)の解$u_n^{d_n}(i,T)$が

$$u_n^{d_n}(i,T)=Tq_n^{d_n}+v_n^{d_n}(i)\ (i=1,\cdots,K-1) \tag{6}$$

と近似できる．すなわち，期待累積ライフサイクル費用$u_n^{d_n}(i,T)$は期間長Tに比例する項$Tq_n^{d_n}$と初期健全度iに依存する項$v_n^{d_n}(i)$に分解できる．式(6)で表される$q_n^{d_n}$は補修政策d_nを用いた場合のライフサイクル費用を毎年等価な費用として再配分した平均費用を表す．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

$$w_n^{d_n^*}(i)=\min_{d_n\in D_n}\left\{\lim_{T\to\infty}\frac{u_n^{d_n}(i,T)}{T}\right\} \tag{7}$$
$$(i=1,\cdots,K-1)$$

と定式化できる．

(3) シミュレーションの手順

橋梁部材の初期健全度$\boldsymbol{\omega}(0)=(\omega_1(0),\cdots,\omega_N(0))$を与件としよう．さらに，補修政策$d_n$とその下での推移確率$\boldsymbol{P}_n^{d_n}$が与えられれば，時点$t=T$における部材$n$の健全度分布$\boldsymbol{\pi}_n^{d_n}(T)$は，マルコフ推移確率$\boldsymbol{P}_n^{d_n}$を用いて式(1)で表現できる．この時，橋梁システムの健全度分布は式(2)で，各健全度の期待部材数ベクトル$Em^{\boldsymbol{d}}(T)$は式(3)で表現できる．さらに，時点$t=T$に発生する部材nの補修費の期待値$Er_n^{d_n}(T)$は

$$Er_n^{d_n}(T)=\boldsymbol{\pi}_n^{d_n}(T)\boldsymbol{r}_n^{d_n} \tag{8}$$

と表せる．各部材の期待補修費を加算し，各期における橋梁システムの年間補修費の期待値$Er^{\boldsymbol{d}}(T)$を

$$Er^{\boldsymbol{d}}(T)=\sum_{n=1}^{N}Er_n^{d_n}(T) \tag{9}$$

と表す．

4. シミュレーション実験

(1) シミュレーション実験のシナリオ

シミュレーション実験は，平均費用評価法，割引現在価値法という２つの異なったライフサイクル費用評価法で求めた橋梁部材の補修政策（平均費用最小化政策と割引現在価値最小化政策）が，橋梁システムの劣化・補修過程に及ぼす影響を分析することを目的とする．ここでは，シミュレーション実験の対象部材としてRC床版をとりあげる．RC床版の健全度を５つのレーティングで評価する．各健全度に対して採用可能な補修工法が適用され，もっとも劣化が進展した健全度５が観測されれば直ちに当該部材を取り換える．RC床版の確率的劣化過程はマルコフ推移確率行列P_nで表現する．本推移確率行列は点検データに基づいて，多段階指数ハザードモデル[3)]を用いて推計した．

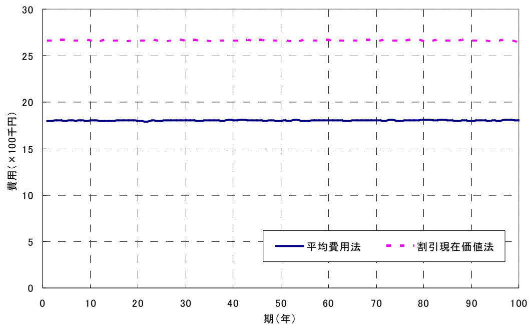
平均費用最小化政策と割引現在価値最小化政策を求めた結果を，**表−１**に示している．橋梁管理者が同一の劣化特性を有する1,000個の橋梁部材を管理していると考えよう．シミュレーション実験では，モンテカルロ法により乱数を発生させ，各橋梁部材の劣化・補修過程を表現するサンプルパスを発生させた．このようなサンプルパスを10,000回試行し，各年時で発生する年間補修費，および健全度別部材数の期待値を求めた．

表－１　最適補修政策の比較

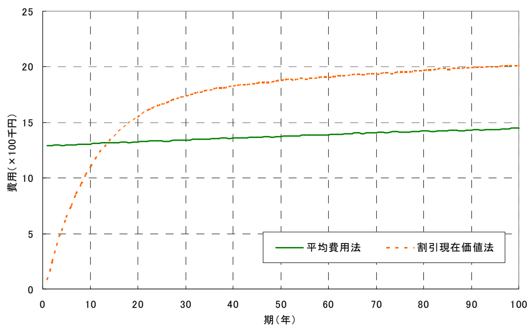
健全度	平均費用最小化政策	割引現在価値最小化政策
1	なし	なし
2	表面被覆工	なし
3	ひび割れ注入工	ひび割れ注入工
4	なし	鋼版接着工
5	床版打替工	床版打替工
平均費用	$q_n^{d_n^*}$	$q_n^{\tilde{d}_n^*}$
	1.805 千円/m^2	2.664 千円/m^2

(2) シミュレーション実験の結果

現在時点において，採用する政策それぞれに対して定常状態が実現していると仮定し，その上で，現時点から 100 年間にわたって，同一の政策を継続したケースを考える．この条件にて各年度に発生する年間補修費の期待値パスを求めた結果を**図－２**に示す．平均費用法最小化政策の下で発生する年間補修費が，割引現在価値最小化政策を採用した時に支出される年間補修費より常に小さくなっている．補修タイミングの分散化が十分に達成されているような定常状態においては，平均費用評価法により橋梁システム全体のライフサイクル費用の割引現在価値の抑制を達成することが可能となる．一方，劣化・補修過程が非定常的な状況にある場合は，必要となる補修費が時間を通じて一定となる保証はない．**図－３**には，すべての橋梁部材が健全度 1 の状態にあると仮定し，２つの定常政策を採用した場合に発生する年間補修費の期待値パスを表している．平均費用最小化政策を採用した場合，年数を経過するに従って，年間補修費は微増するものの，時間を通じて補修費はほぼ一定に保たれる．一方，割引現在価値最小化政策を採用した場合，初期時点直後の年間補修費は低く抑えられる．しかし，年間補修費は，初期時点から 14 年経過した時点で，割引現在価値最小化政策を採用した場合よりも大きくなる．劣化過程に不確実性が存在する（マルコフ連鎖モデルで表現できる）ため，初期時点より時間が経過するにつれて，橋梁部材の健全度分布は次第に定常状態に漸近することになる．それに従って，割引現在価値最小化政策を採用した場合の年間補修費は継続的に平均費用最小化政策に発生する年間補修費より大きくなる．現在世代が割引現在価値最小化政策を採用することにより，当該世代が負担する補修費を抑制することができるが，すべての将来世代が負担する補修費が増加することになる．将来世代も含めたすべての世代が負担する補修費を持続的に抑制するためには，初期時点から平均費用最小化政策を採用することが望ましい．



図－２　年間補修費の期待値パス



図－３　年間補修費の期待値パス

5. おわりに

本研究では，ライフサイクル評価法が橋梁システムの劣化・補修過程に及ぼす影響についてシミュレーション実験を行った．提案したシミュレーション実験の方法は実用性の高いものであり，BMS のサブシステムとして機能させることが可能である．実用的な BMS の構築のためには，多くの実証分析の積み重ねが必要である．本シミュレーション実験の方法を用いて，管理状態の異なる橋梁システムの劣化・補修過程や，予算制約のあり方によるライフサイクル費用への影響等を分析することが可能である．このような実証分析の結果については発表時に報告させていただきたい．

参考文献

1) 小林潔司：分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性，土木学会論文集第 IV 部門（登載決定）
2) 貝戸清之，保田敬一，小林潔司，大和田慶：平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略，土木学会論文集第 I 部門（登載決定）
3) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推計，土木学会論文集第 I 部門（登載決定）．