土木学会論文集 No. 801／I -73, 83-96, 2005. 10

平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略

貝戸清之[1]・保田敬一[2]・小林潔司[3]・大和田慶[4]

[1]正会員　博（工）　（株）BMC　(〒 261-7125 千葉市美浜区中瀬2-6 WBG マリブウェスト25F)
E-mail:kaito@hashimori.jp
[2]正会員　博（工）　（株）ニュージェック　東京本社　道路G　橋梁T (〒 135-0007 東京都江東区新大橋1-12-13)
E-mail:yasudakc@newjec.co.jp
[3]フェロー会員　工博　京都大学大学院教授　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)
E-mail:kkoba@psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp
[4]学生会員　京都大学大学院修士課程　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)
E-mail:owadakei@psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究では，橋梁部材の維持・補修のために必要となるライフサイクル費用を，割引率を用いずに平均費用を用いて評価する問題をとりあげる．その際，橋梁を半永久的構造物として位置づけることにより，構造物のライフサイクルの目標年度や現時点における橋梁部材の健全度に影響を受けないような平均費用評価が可能になることを明らかにする．また，ある将来時点までに発生する期待累積ライフサイクル費用が初期の劣化状態に依存する相対費用と毎年等価に発生する年平均費用に分解できることを示す．さらに，本研究で提案する平均費用法に基づいた最適補修戦略を求めるために，割引率を用いないマルコフ決定モデルを適用する．最後に，現実の橋梁部材のアセットマネジメント問題を対象として平均費用法の有効性を実証的に検討する．

Key Words : *bridge management, average cost method, optimal repair strategy, budget control*

1．はじめに

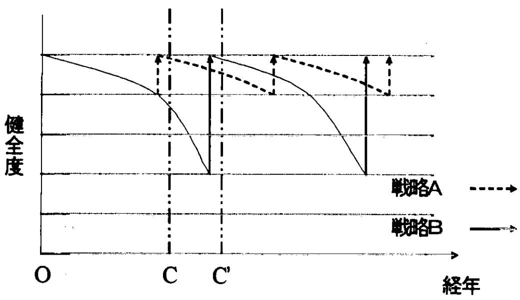
近年，橋梁の健全度判定や診断の結果から補修・補強工法を選定し，限られた予算内で最大の効果を得るための橋梁マネジメントシステム（BMS: Bridge Management System）が構築されている[1),2)]．その中では，橋梁部材の劣化予測が重要となるが，劣化過程をマルコフ推移確率で表現する方法がよく用いられる[3)-5)]．さらに，マルコフ決定モデル[6)-9)]を用いて土木構造物の最適補修戦略を求める方法も数多く提案されている[10)-12)]．

マルコフ決定モデルを用いて橋梁の最適補修モデルを定式化する場合，ある補修戦略を採用した場合に発生するライフサイクル費用を評価することが必要となる．ライフサイクル費用評価法として，1）ライフサイクル費用の割引現在価値を評価する割引現在価値法，2）割引率を用いずライフサイクル費用を直接評価する非割引現在価値法がある．このうち，割引現在価値法は，異なる将来時点に発生する費用に対して割引率という重みをかけることにより，現在価値として集計化する方法である．割引現在価値法は既往の最適補修モデル[10)-16)]や米国の代表的な橋梁マネジメントシステムの1つであるPONTISにおいても採用されている．

橋梁マネジメントでは，適切な維持管理を通じて橋梁を長寿命化し，費用縮減を図ることが重要であるとされる[17)-19)]．しかし，割引現在価値法に基づいたライフサイクル費用の比較では，橋梁の長寿命化戦略の経済効率性を正当化できない場合がある[17)-19)]．たとえば，橋梁の長寿命化による費用縮減効果が長期的に出現する場合，割引率を用いたライフサイクル費用の節約額の現在価値が小さくなり，単純なライフサイクル費用の比較では長寿命化戦略を正当化できない．このような問題を回避するために，割引率を用いずにライフサイクル費用を直接評価する方法が用いられる場合も少なくない．割引率を用いない場合，無限の将来にわたって発生する補修費用を単純に加算すれば無限大に発散する．そのため，初年度からマネジメントの目標年度までの期間に発生するライフサイクル費用を加算した累積ライフサイクル費用等の評価指標が提案されている．しかし，この方法では，1）目標年度の設定に任意性が残る，2）異なる目標期間を持つ補修戦略の効果を単純に比較できないという問題が生じる．

割引率を用いずにライフサイクル費用を評価する別の方法として，ある期間中に発生する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がある．この場合でも，累積ライフサイクル費用を用いた評価方法と同様に，目標年度の設定の任意性等の問題が存在する．本研究では，橋梁を必要な補修や更新を通じて，半永久的に供用される資産と位置づけた場合，マネジメントの目標期間（以下，目標期間と呼ぶ）や現在時点での橋梁部材の健全度に影響を受けないライフサイクル費用評価が可能となることを指摘する．以下，本研究では平均費用法という用語を用いる

が，特に断らない限り半永久的構造物を対象とした平均費用の評価法を意味することとする．さらに，平均費用法に基づいた最適補修戦略を，割引率を用いない平均費用最小化原則に基づくマルコフ決定モデル（以下，平均費用最小化モデルと呼ぶ）を用いて求めることができることを明らかにする．また，平均費用法に基づいて橋梁マネジメントのための予算管理情報を作成する方法を提案する．のちに5.（3）で言及するように，本研究で提案する平均費用法を用いて作成した予算管理情報は，繰延維持補修会計原則に基づいたインフラ会計と整合的であるという利点を有している．以下，2．において本研究の基本的な考え方を述べ，3．で平均費用法をモデル化する．4．で平均費用最小化モデルを説明し，5．で適用事例について述べる．



図－1　ライフサイクル費用評価

戦略Aは予防補修戦略を，戦略Bは事後補修戦略を採用した場合の健全度の推移を表している．予防補修戦略を採用した場合には，健全度が良い段階で早期に補修が実施される．

2．本研究の基本的な考え方

（1）ライフサイクル費用評価

橋梁マネジメントにおいて，橋梁部材の最適補修戦略を決定するためのライフサイクル費用の評価は重要な課題であるが，ライフサイクル費用の定義は未だ確立していない．たとえば，ライフサイクル費用を，橋梁のライフサイクルにおいて発生する建設費用，維持補修費用，および更新費用の割引現在価値と定義する場合もある．しかし，この定義では非割引現在価値法に基づいたライフサイクル費用評価を排除することになる．そこで，本研究では，橋梁部材の維持・補修のために発生する各期ごとの費用の流列（キャッシュフロー）をライフサイクル費用と定義する．ライフサイクル費用を評価するためには，時間軸上の特定の時点において，将来に生じるであろう不確実なライフサイクル費用を何らかの方法で集計化することが必要となる．本研究では，ライフサイクル費用の集計化操作を，ライフサイクル費用評価法と呼ぶ．

いま，ある橋梁を適切な維持補修や更新を通じて半永久的に供用することを目的とするマネジメント問題を考えよう．橋梁マネジメントにおけるライフサイクル費用は，初期時点における建設費用，維持補修費用，更新費用等が，時間軸上の異なる時点において発生する．図－1は戦略A，戦略Bという異なる補修戦略を適用した場合，ある橋梁部材の健全度が時間とともにどのように推移するかを示したものである．戦略Aは予防補修戦略を実施した場合を例示している．この場合，橋梁の供用後，比較的早い段階で補修費用が発生するが，1回ごとの補修費用は戦略Bよりも少なくてすむ．一方，戦略Bは事後補修戦略を実施した場合を例示している．この場合には，初期の段階において補修費用は発生しない反面，戦略Aを適用した場合よりも早い段階で橋梁部材の更新が必要となる．橋梁部材の補修戦略に関するライフサイクル費用評価を行うためには，時間的に異なったタイミングで発生するライフサイクル費用を一元的な評価値として集計することが必要となる．このようなライフサイクル費用を割引率を用いずに評価する方法として，ある目標期間を設定し，その期間中に発生するライフサイクル費用の総和を求めることが考えられる．このようなライフサイクル費用評価法を累積ライフサイクル費用評価法と呼ぼう．この方法は単純で分かりやすいが，そもそもマネジメントの目標計画期間の設定に任意性が残る．たとえば，目標計画期間を図－1に示す期間O-Cに設定したとしよう．この場合，戦略Aでは予防的補修費用が発生しているが，戦略Bでは補修費用が発生しないため，戦略Aの方が累積ライフサイクル費用が大きくなる．一方，計画期間をO-C'に設定した場合，戦略Bでは更新費用が発生し，逆に戦略Bの方が累積ライフサイクル費用が大きくなることも起こりえる．このように累積ライフサイクル費用法は目標計画期間の設定方法により，評価結果が異なるという問題が発生する．

割引率を利用しないライフサイクル費用評価法として，ある目標計画期間中に発生する補修費用を1年当たりの平均費用に換算して評価する方法もある．この場合においても，目標計画期間の設定方法により，評価結果が異なるという問題が発生する．このような目標計画期間の任意性を克服するために，対象とする橋梁が適切な補修や更新を通じて半永久的に供用されると仮定し，平均費用を算出する方法が考えられる．しかし，橋梁の劣化過程に不確実性が存在する場合，寿命期間にわたって発生する累積ライフサイクル費用を求め，その値を期間長で割ることにより単位期間（年）

あたりの費用を算出するという単純な方法を採用することができない．無限期間にわたって発生する不確実なライフサイクル費用の流列から，単位期間当たりの平均費用の期待値を求める方法が必要となる．

（2）半永久的構造物に対する平均費用法

橋梁を半永久的構造物と考え，ライフサイクル費用評価を行うことには一定の理由がある．橋梁が供用されることにより便益が発生する．特に，将来時点に橋梁の拡幅や機能向上，あるいは破棄が実施される計画がある場合，ライフサイクル費用のみに基づいて橋梁補修戦略を検討することには問題がある．この場合，橋梁の拡幅や機能向上がもたらす経済便益とライフサイクル費用を同時に考慮に入れながら，橋梁の補修戦略を検討することが必要となる．一方，現在の橋梁の機能が適切な維持補修や更新により半永久的に維持される場合には，橋梁がもたらす便益に変化が生じるわけではないため，ライフサイクル費用のみに着目して橋梁（あるいは，その部材）の補修戦略を検討することが正当化されうる．

本研究では，橋梁の機能が補修，更新を通じて半永久的に持続される場合には，ある補修戦略の下で発生する補修費用を単位期間（たとえば１年）当たりの平均費用に変換することによって，ライフサイクル費用を評価することが可能であることに着目する．橋梁部材の劣化過程が確定的であれば，橋梁部材の新設・更新時点から次の更新時点までの期間を当該部材の寿命期間と定義し，その期間中に発生する補修費用の総和を寿命期間長で割ることにより平均費用を算定することができる．平均費用を用いたライフサイクル費用評価は単純な方法ではあるが，前述したような目標計画期間の任意性の問題を克服することが可能である．さらに，小林[20]は，多くの建設時期や寿命が異なる橋梁を半永久的にマネジメントする場合，平均費用法を用いて個別の橋梁部材の補修戦略を決定することにより，結果的に管理橋梁群全体（以下，橋梁システム全体と呼ぶこととする）のマネジメントに要する総ライフサイクル費用の割引現在価値の最小化を達成することが可能であることを示している（付録参照）．

橋梁部材の劣化過程を確定的にモデル化できる場合には，上述の方法で平均費用を容易に定義できる．しかし，劣化過程に不確実性が存在する場合，時間を通じた健全度の変化を一意的に定義することができなくなる．さらに，ライフサイクル費用の評価時点において，橋梁部材の劣化がある程度進展している場合，つぎの更新時点までの余寿命を考慮することが必要となる．本研究では半永久的供用が予定されている橋梁の各部材の不確実な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，無限期間の将来にわたって生じるライフサイクル費用を毎年等価な年平均費用の流列として評価する方法を提案する．なお，ここでいう年平均費用とは会計的費用概念であり，無限期間の中で発生するライフサイクル費用を毎年等価な会計的費用として再配分した平均費用を表す．このような会計的費用概念としての平均費用を「年平均費用」と呼ぶこととし，ライフサイクル費用評価において慣習的に用いられている「平均費用」という用語と区別する．

さらに，本研究では，このような平均費用法に基づいて橋梁部材の最適補修戦略を求めるために，割引率を考慮しない標準的な平均費用最小化原則に基づくマルコフ決定モデル[6]（以下，平均費用最小化モデルと呼ぶ）を適用する．平均費用最小化モデルは，部材の劣化・補修過程の不可逆性を考慮するなどの若干の工夫を試みているが，基本的には標準的なマルコフ決定理論を用いている．マルコフ決定理論を用いることにより，無限期間にわたって発生する補修費用の流れを，毎年等価な年平均費用の流れと，劣化状態に応じた資産評価額という２つの費用項目に分解して計算することが可能となる．ライフサイクル費用を，平均費用評価（フローの評価），資産価額評価（ストックの評価）という２つの費用項目に分解して評価する方法は，のちに**5.（3）**で言及するように，インフラ会計のための繰延維持補修会計原則と整合的であるという利点がある．このように，本研究では橋梁を半永久的構造物として位置づけた平均費用法により，１）会計原則に従った予算管理情報を作成すること可能であること，２）最適補修政策や予算管理情報を標準的な平均費用最小化原則に基づくマルコフ決定モデルにより計算できることを示すことを目的とする．

3．ライフサイクル費用評価モデル

（1）モデル化の前提条件

橋梁管理者は，初期時点$t=0$から無限に続く各時点$t\ (t=0,1,\cdots)$において，橋梁のマネジメントを実施する．橋梁は無限期にわたり供用され，橋梁に対する要求性能レベルは一定に保たれると考える．各時点tの直前に目視検査により，橋梁各部材の健全度が判定され，その結果に基づいて時点tの直前に修繕アクションが実施されると考える．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過程に着目しよう．対象とする部材の健全度はK個の離散的なレーティング$i\ (i=1,\cdots,K)$で表され，部材の劣化が進むにつれてiの値が大きくなると考えよう．健全度$i=K$は最悪の健全度である．健全度がKになれば，その部材は直ちに取り替えられると考える．部材の健全度の

推移過程は不確実であり，将来生起する状態を確定的に予測することはできない．橋梁管理者は，部材の健全度をモニタリングし，劣化が進展すれば補修により部材の健全度を回復する．その場合，橋梁管理者は事前に定められたルールに従って，橋梁部材の健全度に応じた補修工法を選択する．橋梁管理者がある健全度に対して，採用すべき補修工法を指定するルールを「補修アクション」と呼ぶ．

いま，補修戦略$d \in D$を，各健全度iに対して，その時点で実施する補修アクションを指定する一連のルールとして定義しよう．ただし，Dは補修戦略の集合である．補修戦略dを構成する補修アクション$\eta^d(i) \in \Theta(i)$は，健全度iに対して補修を実施し，健全度が$\eta^d(i)$に推移することを意味する．たとえば，補修アクション$\eta^d(i)=j$は健全度がiの時に補修を実施し，健全度がjに回復することを意味する．また，集合$\Theta(i)$は健全度がiの場合に利用可能な補修工法（すなわち，補修アクション）の集合を表している．健全度i $(i=1,\cdots,K)$のそれぞれに対して採用されるべき補修アクションの内容を指定した補修アクションベクトル$\boldsymbol{\eta}^d$を，

$$\boldsymbol{\eta}^d = \left(\eta^d(1),\cdots,\eta^d(K)\right) \tag{1}$$

と表そう．補修アクション集合$\Theta(i)$ $(i=1,\cdots,K)$の中には,「補修をしない」という補修アクションも含まれる．健全度iの時に補修をしないというアクションが選択される場合には$\eta^d(i)=i$と表される．健全度が最悪のランクKに到達した場合，その部材は必ず新しい部材に更新される．すなわち，$\eta^d(K)=1$が成立すると仮定する．つぎに，補修アクション$\boldsymbol{\eta}^d$を実施する場合に必要となる補修費用を費用ベクトル$\boldsymbol{c}^d=(c_1^d,\cdots,c_K^d)$により表そう．費用$c_i^d$は健全度が$i$の場合に補修アクション$\eta^d(i)$を採用する場合に必要となる補修費用を意味する．健全度をiからj $(1 \leq j \leq i)$へ回復させるための補修費用をc_{ij}と表せば，$\eta^d(i)=j$の時，$c_i^d=c_{ij}$が成立する．補修を実施しない場合（$\eta^d(i)=i$が成立する場合）には$c^d(i)=c_{ii}=c$が成立する．cは定常的な清掃・維持費用である．ただし，補修費用は条件

$$c_{kk} \leq \cdots \leq c_{jk} \leq \cdots \leq c_{Kk} \tag{2}$$
$$(k \leq j \leq K; k=1,\cdots,K)$$

を満足すると仮定する．このことは補修前の健全度が悪い方が同一の健全度に回復するための費用が大きくなることを意味する．この時，補修戦略$d \in D$の内容は，各健全度iに対して採用する補修アクション$\eta^d(i)$と補修費用c_i^dの組$(i,\eta^d(i),c_i^d)$ $(i=1,\cdots,K)$により記述される．各健全度に対して利用可能な補修アクションの数は高々有限個である．補修戦略は各健全度に対して利用可能な補修アクションの組み合わせにより定義できるため補修戦略の数も有限となる．

（２）劣化・補修過程のモデル化

橋梁部材の劣化過程を，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する．いま，時点tの健全度を状態変数$h(t)$を用いて表そう．さらに，時点tの健全度$h(t)=i$から，時点$t+1$で健全度$h(t+1)=j$に推移する確率を

$$\mathrm{Prob}[h(t+1)=j|h(t)=i]=p_{ij} \tag{3}$$

と表すこととする．さらに，健全度の推移確率行列を

$$\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & \cdots & p_{1K} \\ 0 & p_{22} & \cdots & \cdots & p_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & p_{KK} \end{pmatrix} \tag{4}$$

と定義する．推移確率行列$\boldsymbol{P}$の(i,j)要素であるp_{ij}は推移確率であり，非負の値をとる．補修がない限り常に劣化が進行するため$p_{ij}=0(i>j)$が成立する．推移確率の定義より$\sum_{j=1}^K p_{ij}=1$が成立する．健全度Kはもっとも劣化した状態を表し，補修がない限りマルコフ連鎖における吸収状態となり，$p_{KK}=1$が成立する．

つぎに，補修戦略$d \in D$を構成する補修アクション$\eta^d(i)$により生じる橋梁部材の健全度の変化を

$$q_{ij}^d=\begin{cases} 1 & \eta^d(i)=j\text{の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \tag{5}$$
$$(i,j=1,\cdots,K)$$

と定義する．つまり，補修が実施された後の健全度に確率１で推移し，補修が実施されない場合は，もとの健全度に確率１でとどまることを示している．以上の推移確率を$\boldsymbol{Q}^d$として整理することにより，

$$\boldsymbol{Q}^d=\begin{pmatrix} q_{11}^d & q_{12}^d & \cdots & \cdots & q_{1K}^d \\ q_{12}^d & p_{22}^d & \cdots & \cdots & q_{2K}^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ q_{K1}^d & q_{K2}^d & \cdots & \cdots & q_{KK}^d \end{pmatrix} \tag{6}$$

となる．健全度がKの場合，当該部材は直ちに補修され

$$q_{K1}^d=1, \quad q_{Kj}^d=0\ (j=2,\cdots,K-1) \tag{7}$$

が成立する．

（３）劣化補修過程の部分的不可逆性

通常のマルコフ連鎖モデルでは補修アクションにより，健全度間の移動が常に達成できることを想定している．たとえば，ある健全度iから補修アクションにより健全度j $(1<j<i)$に推移したとしよう．さらに，健全度jの部材を健全度１の状態にまで回復させるような戦略が存在する限り，健全度iから健全度jに回復し

た状態から，さらに健全度1に回復することが可能となる．しかし，現実には健全度があるレーティング以上に悪化した場合，当該の部材をとりかえない限り，健全度1まで回復することが不可能な場合が存在する．このように健全度間の移動に制約がある場合，劣化・補修過程が部分的に不可逆的であると呼ぶこととする．このような部分的不可逆性を表現するために，伝統的なマルコフ連鎖モデルを拡張しよう．

いま，時点tにおいて健全度がiと判定されたとする．次の時点$t+1$までに，健全度は推移行列$\boldsymbol{P}$に従って推移する．健全度が$j\ (j>i)$に推移した場合，補修戦略$d \in D$を用いて補修が実施される．言い換えれば，時点tから時点$t+1$に移行する過程で健全度が悪化し，戦略dの下で補修が必要と判断される場合には，時点$t+1$の直前に補修が直ちに実施されると考える．ここで，健全度がKの時は必ず補修されるものとしているので，時点tにおいて状態Kは観測されない．

このような部分的に不可逆な劣化・補修過程を表現するために，行列$\boldsymbol{P}$を

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{P}^- + \boldsymbol{P}^+ \tag{8}$$

と分解しよう．ただし，$\boldsymbol{P}^-$の(i,j)成分p_{ij}^-は，

$$p_{ij}^- = \begin{cases} p_{ij} & i=j\text{の時} \\ 0 & i \neq j\text{の時} \end{cases} \tag{9}$$

$$(i,j=1,\cdots,K)$$

と定義される．また，$\boldsymbol{P}^+$の(i,j)成分p_{ij}^+は，

$$p_{ij}^+ = \begin{cases} p_{ij} & i<j\text{の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \tag{10}$$

$$(i,j=1,\cdots,K)$$

と定義される．さらに，補修戦略$d \in D$の下で時点tと時点$t+1$の間における補修アクションを考慮した健全度の推移確率行列$\boldsymbol{P}^d$を$(K \times K)$次行列

$$\boldsymbol{P}^d = \boldsymbol{P}^- + \boldsymbol{P}^+\boldsymbol{Q}^d \tag{11}$$

で表現しよう．式(11)の右辺第1項は時点tに健全度$i\ (i=1,\cdots,K-1)$に到達しており，かつ時点$t+1$において健全度iが維持される場合には補修は実施されないことを意味している．一方，第2項は時点$t+1$の直前に健全度が悪化しランクiに到達した場合には補修戦略$d \in D$が適用されることを意味している．このように推移確率行列$\boldsymbol{P}^d$を$\boldsymbol{P}^-$と$\boldsymbol{P}^+\boldsymbol{Q}^d$に分解することにより，より上位の健全度から劣化により健全度iに推移した事象と，より下位の健全度$j\ (j>i)$から補修により健全度iに回復した事象を区別することが可能となる．ところで，これまでの議論により，$\boldsymbol{P}^d$の成分に関して，

$$p_{iK}^d = 0\ (i=1,\cdots,K-1) \tag{12}$$

が成立する．すなわち，時点$t+1$の直前に健全度Kが観測されれば，直ちにその部材は更新されるため，時点$t+1$においては健全度Kが観測されることはない．そこで，補修を考慮した推移確率行列を，$\boldsymbol{P}^d$の$(K-1 \times K-1)$次行列

$$\tilde{\boldsymbol{P}}^d = \begin{pmatrix} p_{11}^d & \cdots & \cdots & p_{1K-1}^d \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ p_{K-11}^d & \cdots & \cdots & p_{K-1K-1}^d \end{pmatrix} \tag{13}$$

と縮約して表現することが可能である．以下，補修を考慮した推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$として，式(13)で定義される$(K-1 \times K-1)$次行列を用いることとする．さらに，推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$は以下で述べるような完全エルゴード性を満足すると仮定する．すなわち，初期の健全度がiの状態から，推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$によりn回推移した後に健全度jに到達する確率$\pi_{ij}^d(n)$を

$$\pi_{ij}^d(n) = \sum_{k=1}^{K-1} \pi_{ik}^d(n-1)p_{kj}^d \tag{14}$$

と表そう．さらに，極限$n \to \infty$における推移確率π_{ij}^dを$\pi_{ij}^d(n)$を用いて

$$\pi_{ij}^d = \lim_{n\to\infty} \pi_{ij}^d(n) \tag{15}$$

と表す．任意の健全度$j\ (j=1,\cdots,K-1)$に対して

$$\pi_{1j}^d = \pi_{2j}^d = \cdots = \pi_{K-1j}^d \tag{16}$$

を満足する場合，推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$が完全エルゴード性を満足すると定義する．条件(16)は，定常状態において状態jに達する確率π_{ij}^dが初期状態iに依存しないことを意味する．推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$の(i,j)要素$p_{ij}^d\ (i \leq j)$がすべて$p_{ij}^d > 0$の場合には完全エルゴード条件を満足する．通常の橋梁アセットマネジメントにおいて，健全度の推移確率行列は完全エルゴード性を満足すると考えることができる．のちに3.（4）で説明するように，完全エルゴード性は橋梁部材のライフサイクル費用評価が唯一に決定されるための必要十分条件である[6]．

（4）期待累積ライフサイクル費用の構造

いま，対象とする橋梁部材のマネジメント期間nを与件とし，補修戦略$d \in D$の下で，現時点$t=0$から時点$t=n$までに発生する期待累積ライフサイクル費用を定義しよう．以下の議論は，基本的にはHoward[6]に基づいているが，次節でライフサイクル費用評価について議論する際の便宜を図るために，期待ライフサイクル費用の構造について説明することとする．

いま，時点$t=0$において，健全度iが観測されたとしよう．この時点において将来に発生するライフサイクル費用を確定的に予測できない．期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$は，補修戦略$d \in D$の下で，時点$t=0$において初期健全度iの状態から時点$t=n$に至るまでの各期に発生するライフサイクル費用の総和に関する期

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$t=1$の直前に行われた目視検査により健全度がjに推移したと判定されたとしよう．その結果，時点$t=1$の直前に補修アクションが実施される．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$t=1$の直前までに補修戦略dの下で必要となる期待補修費用e_i^dを

$$e_i^d = \sum_{j=i+1}^{K} p_{ij}^{+} c_j^d \ (i=1,\cdots,K-1) \tag{17}$$

と定義しよう．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$t=1$から補修戦略dを適用し，時点$t=n$に至るまでの$n-1$期間中に発生する期待累積ライフサイクル費用を$u_j^d(n-1)$と表そう．時点$t=0$から時点$t=1$までの間に，補修戦略$d \in D$の下で，健全度が$h(0)=i$から$h(1)=j$に推移する確率をp_{ij}^dと表せば，期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$と$u_j^d(n-1)$の間に

$$u_i^d(n) = e_i^d + \sum_{j=1}^{K-1} p_{ij}^d u_j^d(n-1) \tag{18}$$
$$(i=1,\cdots,K-1)$$

が成立する．マネジメント期間の最終時点nの期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(0)$は$u_i^d(0)=0$ $(i=1,\cdots,K-1)$と表せる．いま，列ベクトル$\boldsymbol{u}^d(n)=(u_1^d(n),\cdots,u_{K-1}^d(n))'$，$\boldsymbol{e}^d=(e_1^d,\cdots,e_{K-1}^d)'$を定義すれば，式(18)は

$$\boldsymbol{u}^d(n) = \boldsymbol{e}^d + \tilde{\boldsymbol{P}}^d \boldsymbol{u}^d(n-1) \tag{19}$$

と表すことができる．ただし，$\boldsymbol{u}^d(0)=\boldsymbol{o}$である．再帰方程式(19)の解$\boldsymbol{u}^d(n)$を求めよう．いま，行列$\overline{\boldsymbol{P}}^d$を

$$\overline{\boldsymbol{P}}^d = \lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{t=0}^{n}\tilde{\boldsymbol{P}}^d(t) \tag{20}$$

と定義しよう．ただし，$\tilde{\boldsymbol{P}}^d(t)=\{\tilde{\boldsymbol{P}}^d\}^t$である．また，列ベクトル$\boldsymbol{v}^d=(v_1^d,\cdots,v_{K-1}^d)'$を

$$\boldsymbol{v}^d = \sum_{t=0}^{\infty}\left\{\tilde{\boldsymbol{P}}^d(t)-\overline{\boldsymbol{P}}^d\right\}\boldsymbol{e}^d \tag{21}$$

と定義しよう．右辺は収束し有界である[9]．ここで，

$$\boldsymbol{q}^d = \overline{\boldsymbol{P}}^d \boldsymbol{e}^d \tag{22}$$

と表そう．この時，列ベクトル$\boldsymbol{v}^d$は

$$\boldsymbol{v}^d = \sum_{t=1}^{n}\tilde{\boldsymbol{P}}^d(t)\boldsymbol{e}^d - n\boldsymbol{q}^d + \sum_{t=n+1}^{\infty}\left\{\tilde{\boldsymbol{P}}^d(t)-\overline{\boldsymbol{P}}^d\right\}\boldsymbol{e}^d \tag{23}$$

と分解できる．ここで，$\overline{\boldsymbol{P}}^d$の$(i,j)$要素$\overline{p}_{ij}^d$は$(K-1\times K-1)$次元行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d(n)$の$(i,j)$要素$p_{ij}^d(n)$を用いて

$$\overline{p}_{ij}^d = \lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{t=0}^{n}p_{ij}^d(n) \tag{24}$$

と表せる．ここに，$\sum_{t=0}^{n}p_{ij}^d(n)$は初期時点から時点$n$までに初期状態$i$から出発して状態$j$を推移する回数の期待値である．したがって，マルコフ推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$が完全エルゴード性を満足するとき，$\overline{p}_{ij}^d$は長期定常状態において

$$\pi_j^d = \sum_{k=1}^{K-1}\pi_k^d p_{jk}^d \ (j=1,\cdots,K-2) \tag{25a}$$

$$\sum_{j=1}^{K-1}\pi_j^d = 1 \tag{25b}$$

を満足する定常状態確率π_j^dに他ならない[9]．したがって，マルコフ推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$が完全エルゴード性を満足するとき，

$$\overline{\boldsymbol{P}}^d = \begin{pmatrix} \pi_1^d & \cdots & \cdots & \pi_{K-1}^d \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \pi_1^d & \cdots & \cdots & \pi_{K-1}^d \end{pmatrix} \tag{26}$$

が成立する．したがって，

$$\begin{aligned} \boldsymbol{q}^d &= \overline{\boldsymbol{P}}^d \boldsymbol{e}^d \\ &= \left(\sum_{i=1}^{K-1}\pi_i^d e_i^d,\cdots,\sum_{i=1}^{K-1}\pi_i^d e_i^d\right) \\ &= (q^d,\cdots,q^d)' \end{aligned} \tag{27}$$

を得る．すなわち，$q^d=\sum_{i=1}^{K-1}\pi_i^d e_i^d$は定常状態において生じる1期あたりの期待補修費用であり，平均費用法における年平均費用に相当する．式(27)で定義される年平均費用は初期状態に依存しない．したがって，マネジメント期間nにおける期待累積ライフサイクル費用$\boldsymbol{u}^d(n)$ は

$$\boldsymbol{u}^d(n) = \sum_{t=1}^{n}\tilde{\boldsymbol{P}}^d(t)\boldsymbol{e}^d \tag{28}$$

と表される．この時，式(23)，(28)より

$$\boldsymbol{u}^d(n) = n\boldsymbol{q}^d - \boldsymbol{v}^d - O(n) \tag{29}$$

を得る．ただし，

$$O(n) = \sum_{t=n+1}^{\infty}\left\{\tilde{\boldsymbol{P}}^d(t)-\overline{\boldsymbol{P}}^d\right\}\boldsymbol{e}^d \tag{30}$$

であり，式(24)より$\lim_{n\to\infty}O(n)=0$が成立する．したがって，十分大きなnに対して，期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$を次式で近似できる．

$$u_i^d(n) = nq^d + v_i^d \ (i=1,\cdots,K-1) \tag{31}$$

すなわち，期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$は期間長nに比例する項と初期健全度iに依存する項に分解する

ことができる．橋梁を半永久的に供用する場合，マネジメント期間長nは無限大であり，式(31)が常に近似的に成立する．

(5) 平均費用法と予算管理情報

期待ライフサイクル費用の近似式(31)を用いることにより，橋梁部材のアセットマネジメントのための重要な予算管理情報を得ることができる．いま，マネジメント期間nが十分に大きく，期待累積ライフサイクル費用を式(31)と近似できるとしよう．すなわち，期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$は

$$u_i^d(n) = e_i^d + \sum_{j=1}^{K-1} p_{ij}^d u_j^d(n-1) \tag{32a}$$

$$u_i^d(n) = nq^d + v_i^d \tag{32b}$$

を満足する．式(32a)に式(32b)を代入すれば，

$$nq^d + v_i^d = e_i^d + \sum_{j=1}^{K-1} p_{ij}^d[(n-1)q^d + v_j^d] \tag{33}$$

を得る．$\sum_{j=1}^{K-1} p_{ij}^d = 1$を考慮すれば，連立方程式

$$q^d + v_i^d = e_i^d + \sum_{j=1}^{K-1} p_{ij}^d v_j^d \ (i = 1, \cdots, K-1) \tag{34}$$

を得る．連立方程式(34)には，$K-1$本の方程式に対して，q^dと$v_i^d(i = 1, \cdots, K-1)$の合計$K$個の未知変数が含まれている．ひとまず，$v_1^d = 0$と置くことにしよう（$v_1^d = 0$を仮定する理由はのちに言及する）．推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$が完全エルゴード的である場合，$K-1$本の連立方程式(34)が互いに独立になり，$v_i^d$と$q^d$に関して一意的に解くことができる[6]．すなわち，ライフサイクル費用評価の結果が一意的に決定されることになる．ここに，式(27)で表されるq^dは補修戦略dを用いたアセットマネジメントにおいて必要となるライフサイクル費用を毎年等価な会計的費用として再配分した年平均費用を表す．これにより，橋梁性能を半永久的に維持するために支出される補修費用の流れ$(e_0^d, \cdots, e_t^d, \cdots)$を，毎年等価な年平均費用の流列$(q^d, \cdots, q^d, \cdots)$に置き換えることができる．初期時点$t = 0$において，橋梁部材が新規取得時の状態$(h(0) = 1)$を維持していれば，式(27)で定義される年平均費用q^dをある目標年度まで積み上げることにより，初期時点から当該年次までに発生する期待累積ライフサイクル費用を求めることができる．期待累積ライフサイクル費用は，目標年度までに必要となる総補修予算額の期待値（以下，期待予算総額と呼ぶ）を表す．しかし，現在時点において橋梁部材の劣化が進展していれば，今後時間の経過に伴ってより大規模な補修が必要となる可能性がある．そこで，現在時点から目標年度までに必要となる期待予算総額は，当該年次から目標年度までに発生する年平均費用を積み上げるとともに，現在時点における健全度iに応じて定義される相対費用$v_i^{d^*}$を加算することが必要となる．このように，相対費用$v_i^{d^*}$は過去から現在時点までに発生した橋梁部材の劣化によって発生した資産価額の減少額を表しており，将来時点において相対費用に相当する補修費用を追加的に支出しなければならない．言い換えれば，毎年等価な年平均費用の流列は，各会計年度において発生するフローとしての補修需要を表すのに対して，相対費用は過去から現在時点までに蓄積されてきたストックとしての補修需要を表している．当然のことながら，現在時点において橋梁部材の健全度が新規取得時の水準である$i = 1$の場合，期待予算総額を補正する相対費用は必要でないため$v_1^d = 0$と置くことができる．時点$t = 0$から時点$t = n$までに，アセットマネジメントのために必要となる期待予算総額は，十分大きなnに対して，

$$u_i^d(n) = nq^d + v_i^d \tag{35}$$

と近似できる．すなわち，期待予算総額u_i^dは，n期間内に発生した平均費用nq^dと時点$t = 0$における橋梁部材の健全度に応じた相対費用v_i^dの和で表される．

4．平均費用法に基づく最適補修戦略

(1) 最適補修モデルの定式化

橋梁管理者は，初期時点$t = 0$から無限に続く各年度t $(t = 0, 1, \cdots)$において，年平均費用を最小にするように橋梁部材の維持管理を試みると考える．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最適補修戦略を求める問題を考える．補修戦略dを用いた場合，時点nまでの期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$を用いて，時点nまでの条件付き平均費用を$u_i^d(n)/n$と定義する．ここで，マネジメント期間nを無限大に延長した平均費用$w^d(i)$を

$$w^d(i) = \lim_{n\to\infty} \frac{u_i^d(n)}{n} \tag{36}$$

と定義しよう．この時，平均費用$w^d(i)$の最小化を目的とする最適補修モデルは

$$w^{d^*}(i) = \min_{d\in D} \left\{ \lim_{n\to\infty} \frac{u_i^d(n)}{n} \right\} \tag{37}$$

と定式化できる．式(37)は無限的視野のマルコフ決定モデルとなっている．平均費用最小化モデル(37)の最適補修戦略d^*を平均費用最小化原則に基づく最適補修戦略と呼ぶこととする．ここで，式(32b)より，

$$w^d(i) = \lim_{n\to\infty} \left\{ q^d + \frac{v_i^d}{n} \right\} = q^d \tag{38}$$

が成立することに着目しよう．すなわち，無限期間を対象とした平均費用$w^d(i)$は，本研究で考察している平均費用法における年平均費用q^dに一致する．そのた

め，平均費用最小化原則に基づく最適補修戦略は，橋梁を半永久的に維持することを前提とした年平均費用の最小化を達成するという特性を持っている．また，式(38)に示すように，最適年平均費用は初期時点の健全度iに依存しない．nが十分大きい場合，期待累積ライフサイクル費用は

$$u_i^{d^*}(n) = v_i^{d^*} + nq^{d^*} \tag{39}$$

と表される．$v_i^{d^*}$はマネジメント期間nに関わらず一定である．平均費用最小化原則に基づいた最適補修戦略は，十分大きな任意のマネジメント期間nに対して定義される期待累積ライフサイクル費用$u_i^d(n)$の最小化も同時に達成していることが保証される．

（２）最適補修戦略の解法

最適補修モデルは，標準的な平均費用最小化マルコフ決定モデルであり，種々の解法を用いることが可能である．状態変数が有限個であり，時刻に依存する変数が存在しないことから，最適戦略は時間に関して定常的な戦略となる．本研究では定常的な最適解を求めるためにHowardの戦略改良法[6)]を用いる．計算手順の記述を容易にするために，戦略$d \in D$に対してそれを構成する部分戦略d_i $(i = 1, \cdots, K)$を定義しておく．前述したように，補修戦略dは各健全度iに対して$(i, \eta^d(i), c_i^d)$を対応させるルールである．そこで，部分戦略d_iを，各健全度iに対して$(i, \eta^{d_i}(i), c_i^{d_i})$を対応させる部分ルールと定義する．この時，戦略$d$はそれを構成する部分戦略の組$d = (d_1, \cdots, d_K)$として定義される．平均費用最小化モデルの計算手順は以下の通りである．

（ステップ１）$k = 0$とする．初期戦略$d^{(0)} = (d_1^{(0)}, \cdots, d_K^{(0)})$を与える．

（ステップ２）与えられた戦略$d^{(k)}$に対して$p_{ij}^{d^{(k)}}$，$e_i^{d^{(k)}}$を定義し，連立方程式

$$q + v_i = e_i^{d^{(k)}} + \sum_{j=1}^{K-1} p_{ij}^{d^{(k)}} v_j \tag{40a}$$
$$(i = 1, \cdots, K-1)$$
$$v_1 = 0 \tag{40b}$$

を満足するq，v_i $(i = 1, \cdots, K-1)$を求め，その値を$q^{d^{(k)}}, v_i^{d^{(k)}}$とする．

（ステップ３）$i = 1$とし，健全度Kに対する部分戦略を$d_K^{(k+1)} = d_K^{(k)}$に固定する．

（ステップ４）部分戦略d_iの集合を$D(i)$と表す．健全度iに対応する部分問題

$$\min_{d_{i+1} \in D(i+1)} \left\{ p_{ii+1}^{+} c_{i+1}^{d_{i+1}} + p_{ii+1}^{+} \sum_{j=1}^{i+1} q_{i+1j}^{d_{i+1}} v_j^{d^{(k)}} \right\} \tag{41}$$

の最適解d_{i+1}^*を求め，$d_{i+1}^{(k+1)} = d_{i+1}^*$と置く．

（ステップ５）$i = K-2$であれば，$d^{(k+1)} = (d_1^{(k+1)}, \cdots, d_K^{(k+1)})$として，ステップ６へ進む．そうでない場合，$i = i+1$としてステップ４へ戻る．

（ステップ６）$d^{(k+1)} \neq d^{(k)}$であれば，$k = k+1$としてステップ３へ戻る．$d^{(k+1)} = d^{(k)}$であれば$d^* = d^{(k)}$として計算を終了する．また，$q^{d^*} = q^{d^{(k)}}$, $v_i^{d^*} = v_i^{d^{(k)}}$である．

以上の計算手順は，基本的にはHowardの政策改良法を適用しているが，マルコフ推移確率行列が部分的不可逆性を含んでいるため，部分問題(41)の定式化がHowardの政策改良法と異なっている．マルコフ推移確率行列が完全エルゴード性を満足するとき，以上の手順で平均費用最小化モデル(37)の最適解が求まることが理論的に保証される．

（３）割引現在価値最小化モデル

平均費用最小化モデルの特性を明確にするために，割引現在価値最小化原則に基づく最適補修モデル（以下，割引現在価値最小化モデルと呼ぶ）を定式化しておこう．ここでは，当該橋梁を半永久的に維持するための補修戦略について分析することを目的とし，橋梁の機能向上や長寿命化等の戦略は考慮しない．割引率をβと表そう．割引率に基づき算出される割引因子αは，

$$\alpha = \frac{1}{1+\beta} \tag{42}$$

と表される．現在時点tにおいて健全度がiであり，現在時点以後，割引現在価値最小化原則に基づいて最適に橋梁部材を補修することにより達成可能な期待ライフサイクル費用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$\tilde{\psi}_i$と表そう．この時，$\tilde{\psi}_i$を再帰的に定義すれば，割引現在価値最小化モデルは

$$\tilde{\psi}_i = \min_{\tilde{d} \in D} \left\{ e_i^{\tilde{d}} + \alpha \sum_{i=1}^{K-1} p_{ij}^{\tilde{d}} \tilde{\psi}_j \right\} \tag{43}$$

を満足する最適補修戦略$\tilde{d}^*$を求める問題として定式化できる．すなわち，最適補修モデルは健全度iごとに最適アクション$\eta^{\tilde{d}^*}(i) \in \eta(i)$を求める問題となっている．さらに，平均費用最小化モデルは，割引現在価値最小化モデルにおいて割引率をゼロとした特殊ケースに相当することが理論的に証明されている[6)]．また，割引現在価値最小化モデル(43)を行列表示をすれば，

$$\tilde{\boldsymbol{\psi}} = \min_{d \in D} \left\{ \boldsymbol{e}^{\tilde{d}^*} + \alpha \tilde{\boldsymbol{P}}^{\tilde{d}^*} \tilde{\boldsymbol{\psi}} \right\} \tag{44}$$

と表せる．ただし，$\tilde{\boldsymbol{\psi}} = (\tilde{\psi}_1, \cdots, \tilde{\psi}_{K-1})'$は各健全度における最適割引現在価値$\psi_i$に関する列ベクトルを表している．最適割引現在価値は式(44)より

$$\tilde{\boldsymbol{\psi}} = \left[\boldsymbol{I} - \beta \tilde{\boldsymbol{P}}^{\tilde{d}^*} \right]^{-1} \boldsymbol{e}^{\tilde{d}^*} \tag{45}$$

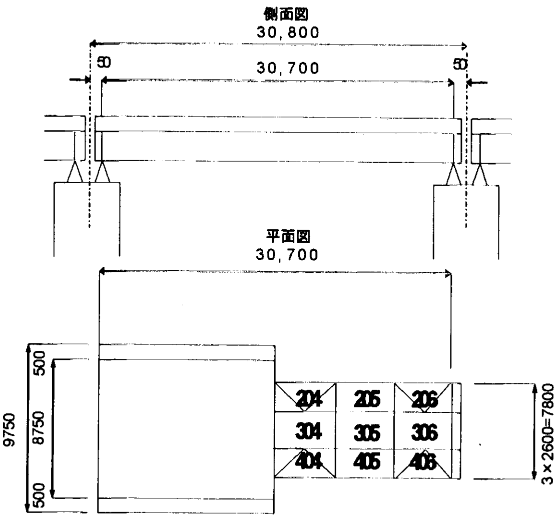
と表される．なお，平均費用最小化モデルで求めた最適補修戦略のライフサイクル費用の割引現在価値の期待値$\psi = (\psi_1, \cdots, \psi_{K-1})$も，平均費用最小化モデルで求めた最適戦略$d^*$を用いて次式で表される．

$$\psi = \left[I - \beta \tilde{P}^{d^*} \right]^{-1} e^{d^*} \tag{46}$$

（4）平均費用法の適用範囲

平均費用法を用いたライフサイクル費用評価は，「対象とする橋梁を半永久的に継続すべき資産（非償却性資産）」と位置づける1つのマネジメント戦略を前提としている．2.（2）で議論したように，橋梁管理者が建設時期の異なる数多くの橋梁を同時に管理している場合を考えよう．この場合，各橋梁部材の補修戦略を，各橋梁部材ごとに評価したライフサイクル費用のみに基づいて決定する方法は，橋梁システム全体における総ライフサイクル費用のマクロな時間的変動を制御することを目的としているわけではない．その結果，個別橋梁部材に対して割引現在価値最小化モデルで求めた最適補修戦略が，橋梁システム全体として発生するマクロな総ライフサイクル費用の割引現在価値の最小化を達成する保証はない．各橋梁の建設時期が異なっている場合，それぞれの橋梁部材に対して年平均費用を最小にするような最適補修戦略を採用することにより，橋梁システム全体としての年平均費用を最小にすることが可能となり，結果的に橋梁システム全体としてのライフサイクル費用の割引現在価値の縮減が可能となる（付録参照）．さらに，橋梁部材の劣化過程に不確実性が存在する場合，マルコフ連鎖モデルで表現される劣化補修過程を通じて，長期的には各健全度が観察される確率は定常確率$\pi_i^{d^*}$に収束する．すなわち，建設時期が同一の橋梁であっても，長期的には補修時期が分散化されることになる．したがって，橋梁を半永久的に継続すべき資産として供用する場合，平均費用最小化モデルを用いて個別橋梁部材の最適補修戦略を求める方法により，結果的に橋梁システム全体としてのライフサイクル費用の縮減を達成することが可能であろう．以上の結果に関しては，現実の橋梁群を対象としたシミュレーション実験を通じて確認すべき課題である．本研究では単一の橋梁部材を対象としたライフサイクル費用評価に基づく最適補修戦略を求める方法論に主眼を置いており，橋梁群を対象としたシミュレーション実験に関しては別の機会に発表したいと考える．

なお，橋梁を半永久的に継続すべき資産（非償却性資産）と位置づけるマネジメント戦略は，数多くあるマネジメント戦略の1つに過ぎない．近い将来，橋梁の新設，機能向上といった施策を講じることが予定されている場合には，橋梁を非償却性資産と位置づけること自体に問題があろう．



図－2　橋梁一般図

このようなマネジメント戦略に関しては，機能向上がもたらす便益も含めて割引現在価値を用いた費用便益分析を通じて検討することが必要となる．

5．適用事例

（1）適用事例の概要

本研究で提案した最適補修モデルを，ある高規格道路におけるＹ橋のＲＣ床版に適用した事例を示す．適用事例の目的は，本研究で提案した平均費用最小化モデルを用いたライフサイクル費用評価の方法を具体的に示すことにある．当然のことながら，方法論の有効性を検証するためには，今後の適用事例の蓄積を待たざるを得ないことは言うまでもない．適用事例において対象としたＹ橋の諸元は，以下のとおりである．

- 橋長：358.58m
- 支間長：8@30.700m+3@26.900m+30.900m
- 交通量：17,171台（12時間），大型車混入率27.8%
- 有効幅員：8.750m（総幅員：9.750m）
- 適用示方書：昭和47年道示（TL-20）
- 架設年次：1975年（昭和50年）
- 上部工形式：鋼単純桁
- 下部工形式：控え壁式橋台（鋼管杭），T型橋脚（鋼管杭）

図－2に橋梁一般図を示す．図中の平面図の番号は点検台帳における床版のパネル番号を表す．RC床版の損傷は，交通荷重に伴う繰り返しによる疲労損傷が主で，そのひびわれの進展メカニズムもある程度解明されて

表－１　健全度判定区分

健全度	状態区分	一般的状況
1	OK	点検の結果から，損傷は認められない．
2	I	損傷が認められ，その程度を記録する必要がある．
3	II	損傷が認められ，追跡調査を行う必要がある．
4	III	損傷が大きく，詳細調査を実施し，補修を行うかどうかの検討を行う必要がある．
5	IV	損傷が著しく，交通の安全確保の支障となる恐れがある．

状態区分は「橋梁点検要領（案）」[22]による区分である．

表－２　検討対象となる補修工法

健全度	補修工法	補修単価	回復水準
2	表面被覆工法	13 千円/m^2	1
3	ひび割れ注入工法	35 千円/m^2	2
4	鋼版接着工法	80 千円/m^2	3
5	床版打替工法	350 千円/m^2	1

いる[21]．また，点検で損傷を把握しやすく，劣化予測も可能である．対象部材の健全度の判定は「橋梁点検要領（案）」[22]によって，「橋梁点検・補修の手引き（近畿地方整備局版）」[23]を基準とした点検方法を用いて行われている（**表－１**参照）．また，健全度は５つの離散的な状態変数で表され，それぞれ**表－１**に示すように定義される．対象部材の補修で用いられる補修工法を**表－２**に示している．現在のところ，補修により健全度がどの状態に回復するかに関するデータはないが，健全度５の際に行われる床版打替工法に関してはOK（健全度$i=1$）に回復し，その他の工法に関しては健全度を１ランク回復させると考える（**表－２参照**）．さらに，対象部材の劣化過程を示す推移確率行列$\boldsymbol{P}$を，指数ハザードモデルを用いた劣化予測モデルで表現し，最尤推定法により推計した．指数ハザードモデルの詳細に関しては参考文献24)を参照して欲しい．対象とする高規格道路では平成6年度と14年度の２時点において，全橋梁を対象とした定期点検も実施されている．点検結果に基づいて，指数ハザードモデルを用いて推計したマルコフ推移確率行列を**表－３**に示す．マルコフ推移確率行列$\boldsymbol{P}$は１年間の期間中における推移確率を表現している．

（２）分析結果の考察

５．（１）で示したＲＣ床版に対して，平均費用最小化原則に基づく最適補修戦略を求めた結果を**表－４**に示す．**表－３**に示したマルコフ推移確率行列によって，補修アクションを考慮した推移確率行列が完全エルゴード性を満足するため，初期時点の健全度に依存せずに，年平均費用q^dは一定となる．一方，初期時点の健全度の相違による期待累積ライフサイクル費用の違いは相対費用v_iによって表される．最適補修戦略は，健全度がランク２と３に推移した時には補修を行い，健全度がランク４に推移した時には補修を行わないという戦略である．最適補修戦略によるライフサイクル費用削減効果を分析するために，代替的な補修戦略を採用した場合に要する年平均費用，および相対費用を求めた．その結果を**表－４**に併記している．この表に示すように，最適補修戦略を採用せずに，それ以外の補修戦略を採用することにより，年平均費用が増加することが理解できる．同表に示した代替的補修戦略１，及び代替的補修戦略２においては，健全度４の相対費用が定義されない．これは，戦略１および戦略２が採用された場合，健全度４が観測されれば直ちに補修が実施されるためである．したがって，点検後においても，健全度４の状態が持続することはなく，健全度４の状態はマルコフ連鎖モデルにおける過渡的な状態となる．したがって，健全度４に対する相対費用は定義されない．

つぎに，平均費用最小化モデルによる最適補修戦略と割引費用最小化モデルによる最適補修戦略を比較する．ここでは，対象となる橋梁を半永久的に供用することを前提として，２つの最適補修戦略を用いることの優劣を平均費用法を用いて評価してみよう．橋梁を半永久的に供用するという前提が成立する限り，２つの最適補修戦略に対して同一の便益が発生するので，ライフサイクル費用のみを比較すればいい．本計算事例において，平均費用最小化モデルと割引現在価値最小化モデルを用いて求めた最適補修戦略を**表－５**に示している．計算にあたっては割引率として公共事業評価に当たり採用されている4%を採用する．割引率の設定に関して種々の議論があるが，本論文の目的は割引率を用いない平均費用法に基づいた最適補修戦略を求める点にあり，割引率を用いた最適補修戦略はあくまでも比較の対象として取り上げていることを断っておく．この表に示すように，平均費用最小化モデルを用いた場合，健全度が２の段階で補修が行われており，より予防補修に重点を置いた結果となっている．同表には，２つのモデルで求めた最適補修戦略を用いた場合に発生するライフサイクル費用を平均費用法を用いて評価した結果と，割引現在価値法を用いて評価した結果を示している．平均費用法を用いてライフサイクル費用を評価する場合，平均費用最小化モデルを用いた場合の方が年平均費用が小さくなる．

表－３　推移確率行列

健全度	1	2	3	4	5
1	0.9048	0.09278	0.002344	0.0000342	0.0000003
2	0	0.9512	0.04772	0.001041	0.0000129
3	0	0	0.9575	0.04176	0.0007839
4	0	0	0	0.9636	0.03636
5	0	0	0	0	1

表－４　代替的補修戦略とライフサイクル費用評価結果

補修シナリオ		最適補修戦略	1	2	3
健全度	1	なし	なし	なし	なし
	2	表面被覆工法	表面被覆工法	なし	なし
	3	ひび割れ注入工法	ひび割れ注入工法	ひび割れ注入工法	なし
	4	なし	鋼版接着工法	鋼版接着工法	なし
	5	床版打替工法	床版打替工法	床版打替工法	床版打替工法
年平均費用 (千円/m^2)		1.772	2.578	2.805	4.348
相対費用 (千円/m^2)	1	0	0	0	0
	2	202.91	529.58	28.22	43.48
	3	260.40	1323.94	1034.40	130.44
	4	301.20	-	-	230.42

構造物の劣化過程に含まれる部分的不可逆性に起因して，２つのモデルにより求めた最適補修戦略の下で発生する橋梁部材の劣化補修過程が異なる．平均費用最小化モデルを用いた場合，目視検査により健全度が１から２に変化したことが判明すれば，その段階で表面被覆工法により予防補修が実施される．しかし，橋梁部材の劣化が予想以上に進行し，健全度３に移行した場合，ひび割れ注入工法による補修が試みられるが，部材は完全に修復されるのではなく，健全度２までの修復に留まる．マルコフ推移確率行列$\tilde{\boldsymbol{P}}^d$における状態変数は，補修アクション実施後に到達する健全度を用いて定義している．このため，**表－５**において，健全度２の状態は，予想以上の劣化により橋梁部材の健全度が１から健全度３に変化した後に，補修により健全度２まで回復した状態を表している．劣化がさらに進展し，健全度が４に移行した場合には補修は実施されない．これは，鋼版接着工法による修復を行っても，健全度が完全には修復されず，健全度３に留まるという想定に依存している．すなわち，高価な鋼版接着工法による部分的修復を繰り返すよりは，劣化の進展を観察しながら適切な時点で床版を打替えた方が望ましいという結果となっている．一方，割引現在価値最小化モデルを用いた場合，健全度２の段階で予防補修は実施されない．このため，**表－５**において，健全度２の状態には，健全度１から健全度２にはじめて移行した場合と，健全度１もしくは２から健全度３に移行して，補修により健全度２に修復した場合の双方が含まれる．さらに，健全度４に移行した場合には，鋼版接着工法による補修が実施される．

表－５　最適補修戦略の比較

健全度	平均費用最小化モデル	割引現在価値最小化モデル
1	なし	なし
2	表面被覆工法	なし
3	ひび割れ注入工法	ひび割れ注入工法
4	なし	鋼版接着工法
5	床版打替工法	床版打替工法
年平均費用	1.772 千円/m^2	2.805 千円/m^2
健全度	相対費用 (千円/m^2)	
1	0	0
2	202.91	28.22
3	260.40	1034.40
4	301.20	-
健全度	ψ_i(千円/m^2)	$\tilde{\psi}_i$(千円/m^2)
1	34.38	33.68
2	47.24	46.90
3	99.76	92.84
4	189.69	189.36

本適用事例の場合，２つのモデルで求めた最適補修戦略の間には，明らかな差異がみられる．すなわち，平均費用最小化モデルの場合，予防補修により重点が置かれることになる．このような初期の段階における予防補修による長寿命化を実施することにより，橋梁補修のために必要となる年平均費用の最小化が達成できる．しかし，現在時点において，橋梁部材の劣化がすでに進展し，健全度が２以上の場合には，各年度に発生する年平均費用だけでなく，相対費用に相当する金額だけ，現時点以後の補修費用が増加することになる．割引費用最小化モデルの場合，健全度が４まで移行した場合，鋼版接着工法による部分的修復を繰り返すた

め，より多くの相対費用が必要となる．なお，**表－5**には，２つのモデルで求めた最適補修戦略のライフサイクル費用を，割引現在価値ψ，$\tilde{\psi}$を用いて評価した結果も表している．当然のことながら，割引現在価値最小化モデルを用いた場合の方が割引現在価値が小さくなる．すなわち，割引現在価値を用いた場合，予防補修による補修費用の節減効果が時間遅れを伴って現れるため，結果的にライフサイクル費用の割引現在価値の縮減効果が小さく評価されることになる．このように，平均費用法を用いれば，実際に生じるライフサイクル費用を毎年等価な年平均費用q^{d^*}の流列というフローとして発生する費用と，過去から現時点までに発生した橋梁部材の劣化に伴う相対費用$v_i^{d^*}$というストックとしての費用に分解できる．このようなライフサイクル費用評価の結果を用いて，橋梁マネジメントにおける予算管理情報を作成するためには，個別部材を対象としたライフサイクル費用評価の結果を対象橋梁すべての部材に亘って集計化することが必要となる．このような予算管理情報を作成するためには，橋梁を対象としたインフラ会計[25)-26)]を作成することが必要となる．橋梁を対象としたインフラ会計の詳細に関しては，本論文の範囲を逸脱しているが，以下では，平均費用法によるライフサイクル費用評価の結果を，インフラ会計に反映させるための基本的な考え方について簡単に説明しておくこととする．

（3）インフラ会計への展開の可能性

橋梁マネジメントにあたっては，橋梁のライフサイクルに対応した費用の発生を予算管理情報として記述できるインフラ会計を整備することが望ましい[25)]．橋梁マネジメントのための管理会計情報の目的は多様であるが，本研究と関係した目的として以下の２つがあげられる．第１に，橋梁部材の劣化過程は非常にゆっくりとしたものであり，補修予算を毎期厳密に一定にしなければならないというものでもない．橋梁の補修予算の年次的変動は避けられない．しかし，短期的変動はあるにせよ，長期的には平均して一定の補修費用が支出されなければならない．インフラ会計の１つの目的は，橋梁システム全体をマネジメントするために必要となる各会計年度の平均的な予算規模を求めるとともに，必要な補修費用が経年的に費消されているかどうかを検討できるようなモニタリング情報を提供することにある．第２に，過去に建設された橋梁の中には，適切な予防補修が施されずに，劣化が進展している橋梁が少なからず存在する．このように過去の時点において積み残した補修需要に関しては，本研究で提案したライフサイクル費用評価法を用いれば相対費用$v_i^{d^*}$として明示的に計上されることになる．橋梁アセットマネジメントにおいては，相対費用として計上される補修需要を計画的に解消し，定常的な補修・劣化過程を実現するためのマネジメント計画を作成することが必要である．そこで，インフラ会計の第２の目的は，過去の時点において適切な予防補修を実施しなかったために追加的に発生した補修需要規模を求めるとともに，追加的な補修需要が計画通り解消されているかを検討するためのモニタリング情報を提供する点にある．

本研究で提案した平均費用法を用いれば，橋梁を非償却性資産として位置づける繰延維持補修会計原則に従ったインフラ会計を作成することが可能である．紙面の都合上，繰延維持補修会計原則に従ったインフラ会計の詳細は参考文献26)を参照して欲しい．インフラ会計の第１の目的である各会計年度の平均的な予算規模を決定するために，繰延維持補修会計では年平均費用$q_i^{d^*}$が重要な情報を提供する．すなわち，橋梁建設時（あるいは部材更新時）以降の各会計年度にわたって，年平均費用を毎年積み立てることにより，将来発生する部材の補修費用を調達することが可能となる．橋梁管理者は多くの橋梁を同時に管理しており，各橋梁部材で求めた年平均費用を全橋梁部材にわたって集計化することにより，橋梁マネジメントに要する各会計年度における予算総額を求めることができる．いま，**付録**に述べるような意味において，各橋梁の補修タイミングが時間に沿って平滑化されていると考えよう．平均費用法では，ライフサイクル費用を各会計年度にわたって毎年一定の年平均費用の流列として評価する．したがって，年平均費用を集計化した予算総額も，各会計年度にわたって一定額となる．しかも，平均費用法によって求めた補修戦略を採用することにより毎年等価な予算総額の最小化を達成することが可能となる．一方，すでに劣化が進展している部材に対しては，年平均費用を積み立てるだけでは不十分であり，劣化の進展と対応して相対費用$v_i^{d^*}$を上積みしておく必要がある．インフラ会計の第２の目的を達成するためには，相対費用$v_i^{d^*}$を全橋梁部材に対して集計化することにより，過去の劣化に対して引き当てておくべき予算総額を求めることが必要となる．繰延維持補修会計原則では，このように実際に進展している劣化現象に対して追加的に上積みすべき予算総額を繰延維持補修引当金と呼ぶ．すなわち，繰延維持補修引当金は，年平均費用の総額として表現される予算総額だけでは解消できない補修需要を表しており，このような繰延維持補修引当金で表される補修需要を費消するような補修計画を作成することが必要となる．このように平均費用法を用いたライフサイクル費用の評価結果を用いて，効率的な予算管理を実施するための重要な管理会計情報を作成することが可能となる．

付表－1　ライフサイクル費用（億円）

Case			1期	2期	3期	4期	…
1	事後補修	橋梁A	0	10	0	10	…
		橋梁B	0	10	0	10	…
		合計	0	20	0	20	…
	予防補修	橋梁A	0	8	0	8	…
		橋梁B	0	8	0	8	…
		合計	0	16	0	16	…
2	事後補修	橋梁A	10	0	10	0	…
		橋梁B	0	10	0	10	…
		合計	10	10	10	10	…
	予防補修	橋梁A	4	4	4	4	…
		橋梁B	4	4	4	4	…
		合計	8	8	8	8	…

6．おわりに

本研究では，橋梁を半永久的に維持すべき資産と位置づけ，ライフサイクル費用を毎年等価な年平均費用の流列として評価する方法を提案した．その際，ライフサイクル費用が，現時点における健全度に依存する相対費用と毎年等価ずつ発生する年平均費用に分解できることを指摘した．さらに，平均費用法に基づいた最適補修戦略を求めるために，平均費用最小化原則に基づくマルコフ決定モデルを適用した．このように求めた最適解は，長期間にわたり当該橋梁を供用することを前提として，毎年度に予算として獲得すべき年平均費用の最小化を達成するという望ましい特性を持っている．最後に，現実の橋梁アセットマネジメント問題を対象として，本研究で提案した平均費用法の有効性を実証的に検討した．

本研究で提案した方法論を現実の橋梁アセットマネジメントにおいて適用していくためには，今後にいくつかの課題が残されている．第1に，本研究で提案した平均費用法では，橋梁管理者が負担するライフサイクル費用のみを対象としている．利用者費用や補修工事に伴う迂回費用や混雑費用等の外部不経済を考慮に入れたようなライフサイクル費用評価法を開発することが必要となる．また，本研究では個別部材を対象とした最適補修戦略を対象としている．個別部材の健全度に基づいて，橋梁全体としての更新戦略を考慮できるような拡張が必要である．今後，実用的な橋梁マネジメントシステムを開発するためには，橋梁部材間の重要性，橋梁間の重要性や優先順位を評価するような方法論を開発することが必要である．さらに，補修前の健全度間の推移確率と補修後の推移確率が，同じマルコフ推移確率で表現される保証はない．補修後の推移確率が変化するような状態を想定したマルコフ決定モデルの開発が必要である．第2に，本研究で提案したライフサイクル評価法に基づいた管理会計システムの開発が課題である．そのためには，個々の橋梁，部材に対するアセットマネジメントシステムを作成すると同時に，橋梁システム全体を管理するためのマネジメントシステムの開発が必要である．最後に，橋梁の補修戦略に関わる費用便益分析の方法論が必要となる．その際，橋梁のライフサイクル費用の割引現在価値の比較だけではなく，補修戦略により発生するさまざまなオプションの価値を比較する必要がある．このようなリアルオプション[27),28)]の価値を考慮した費用便益分析法[29),30)]を開発することが重要となる．

付録　補足説明

小林は平均費用法に基づく個別橋梁のライフサイクル費用評価により，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最小化が図れることを指摘している[20)]．簡単な数値事例を通じて，その基本的な考え方を紹介しておく．いま，橋梁管理者が，永久的な供用が予定されている２つの同一タイプの橋梁を管理していると考える．橋梁マネジメント戦略として，事後補修と予防補修を考える．橋梁の寿命は２期間であり，事後補修を行う場合，２期目のみに10億円の更新費用が発生する．一方，予防補修を行う場合，毎期ごとに４億円の補修費用が必要となると仮定する．各橋梁の１期当たりの平均費用は事後補修の場合は２．５億円，予防補修の場合は２億円となり，予防補修の方が有利である．２期間目の割引因子を0.5に設定しよう．付表－１のCase 1に示すように２つの橋梁の補修更新のタイミングが同期化されている場合を考えよう．事後補修を行う場合，最初の２期間における総補修費用の割引現在価値は$0.5 \times 16 = 8$億円である．一方，予防補修を行う場合，２期間の補修費用の現在価値は$8 + 0.5 \times 8 = 12$億円となる．補修費用の割引現在価値を比較すれば8億円 < 12億円となり，事後補修の方が望ましい．つぎに，２つの橋梁のライフサイクルが付表－１のCase 2に示すように１期ずれている場合を考えよう．図の第１期において，橋梁Aはライフサイクルの２期目，橋梁Bは１期目にある．過去から将来にわたって事後補修を実施している場合，毎期２つの橋梁の内のどちらか一方を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，予防補修を行う場合，毎期８億円ずつの補修費用が必要となる．２つの橋梁のライフサイクル費用を同時に評価した場合，どのような割引因子$\alpha \in [0,1)$を用いても予防補修の方が有利である．以上では２つの橋梁を対象としているが，橋梁の個数を増加させるとともに，期間数を増加させても同様の議論が成立する．このように橋梁管理者が多くの建設時期の異なる橋梁を同時に管理する（Case 2が成立する）場合，個別橋梁のライフサイクル費用を平均費用法を用

いて評価することにより，結果的に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最小化をもたらすことが可能となる．

参考文献

1) 国土交通省道路局：「道路構造物の今後の管理・更新のあり方」に関する提言，2003-2004.
2) 川村圭，宮本文穂，中村秀明，三宅秀明：階層構造ニューラルネットを用いたコンクリート橋診断エキスパートシステムの実用化，土木学会論文集，No.665/VI-49, pp.45-64, 2000.
3) 水谷守，足立幸郎，小塚幹夫：経年劣化構造物の維持補修計画最適化に関する研究，ICOSSAR'95 論文集，pp.341-348, 1995.
4) 赤石沢総光，吉田郁政，安田登，宮本幸始：性能設計を活用したRC構造物の保守頻度・事故の最適化に関する研究，構造工学論文集，Vol.47A, pp.277-284, 2001.
5) 小牟禮健一，濱田秀則，横田弘，山路徹：RC桟橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発，港湾空港技術研究所報告，Vol.4, pp.3-37, 2002.
6) Howard, R.A.: *Dynamic Programming and Markovian Processes*, 関根智明他訳：ダイナミックプログラミングとマルコフ過程，培風館，1971.
7) たとえば，Heyman, D.P. and Sobel, M.J. (eds.): Stochastic Models, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol.2, North-Holland, 1990.
8) White, D.J.: *Markov Decision Process*, Wiley, 1992.
9) Puterman, M.L.: *Markov Decision Process*, Wiley, 1994.
10) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research*, Part B, Vol.27B, pp.425-438, 1993.
11) Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol.28, pp.55-62, 1994.
12) Durango, P. and Madanat, S.: Optimal maintenance and repair policies for infrastructure facilities under uncertain deterioration rates: An adaptive control approach, *Transportation Research*, Part A, Vol. 36, pp.763-778, 2002.
13) 栗野盛光，小林潔司，渡辺晴彦：不確実性下における最適補修投資ルール，土木学会論文集，No.667/IV-50, pp.1-14, 2001.
14) 田村謙介，小林潔司：不確実性下における道路舗装の修繕ルールに関する研究，土木計画学研究・論文集，No. 18(1), pp. 97-107, 2001.
15) 小林潔司，上田孝行：インフラストラクチャのマネジメント：研究展望，土木学会論文集，No.744/IV-61, pp.15-27, 2003.
16) 慈道充，小林潔司：不確実性下における最適点検補修ルール，土木学会論文集，No.744/IV-61, pp.39-50, 2003.
17) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，Vol.501/I-29, pp.1-10, 1994.
18) 山口亮太，伊藤裕一，三木千壽，市川篤司：社会的損失を考慮した道路橋のライフサイクルコスト評価の試み，構造工学論文集，Vol.47A, pp.983-989, 2001.
19) 貝戸清之，阿部允，公門和樹，藤野陽三：ストック価値を考慮したトータルコスト最小化に基づく橋梁マネージメント，構造工学論文集，Vol.47A, pp.991-998, 2001.
20) 小林潔司：ライフサイクル費用評価とアセットマネジメント，京都大学サマースクールテキスト，pp.1-14, 2004.
21) 松井繁之，西川和廣，大田孝二：鋼橋の床版(3)，RC床版とその損傷（その2），橋梁と基礎，Vol. 32, pp.47-50, 1998.
22) 建設省土木研究所：橋梁点検要領（案），1988.
23) （財）道路保全技術センター：橋梁点検・補修の手引き（近畿地方整備局版），近畿地方整備局，2001.
24) 小林潔司：インフラ資産評価・管理の最適化に関する研究，第2回新都市社会技術セミナー，新都市社会技術融合創造研究会.
25) 筆谷勇：公会計原則の解説，自治体外部監査における実務指針の解説，中央経済社，1998.
26) 江尻良，西口志浩，小林潔司：インフラストラクチャ会計の課題と展望，土木学会論文集，No.770/VI-64, pp.15-32, 2004.
27) Trigeorgis, L.: *Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*, MIT Press, 1996.
28) Brennan, M.J. and Trigeorgis, L. : *Project Flexibility, Agency, and Competition: New Developments in the Theory and Application of Real Options*, Oxford University Press, 2000.
29) 織田澤利守，小林潔司：プロジェクトの事前評価と再評価，土木学会論文集，No.737/IV-60, pp.189-202, 2003.
30) 織田澤利守，小林潔司，松田明広：評価費用を考慮したプロジェクトの事前評価と再評価，土木学会論文集，No.751/IV-62, pp.97-110, 2004.

(2004. 10. 8 受付)

OPTIMAL MAINTENANCE STRATEGIES OF BRIDGE COMPONENTS WITH AN AVERAGE COST MINIMIZING PRINCIPLES

Kiyoyuki KAITO, Keiichi YASUDA, Kiyoshi KOBAYASHI and Kei OWADA

In this paper, the average cost calculation, which is not rely on discount rates, is investigated to evaluate the life cycle cost for the bridge components management. By assuming that the concerned bridge is under the perpetual usage, it is shown that the average cost evaluation becomes free from the conditionality for life-cycle cost evaluation: i.e., the setting of the target year of evaluation period as well as the current health-states of the bridge components. The expected cumulative life cycle cost defined for the arbitrary duration starting from the present time can be divided into the sum of the average annual cost and the relative cost conditionally defined upon the health states of the bridge components at the present time. It is also discussed that the average optimal maintenance strategies, which are evaluated by the evaluation scheme presented in the paper, can be obtained by the average cost minimizing Markov decision model. The validity of the model is investigated by a case study dealt with an actual highway bridge.