

I-24 橋梁マネジメントシステムアプリケーション

Bridge Management System Application

青木一也¹・若林伸幸²・大和田慶³・小林潔司⁴

Kazuya Aoki, Nobuyuki Wakabayashi, Kei Owada, and Kiyoshi Kobayashi

抄録：本研究では橋梁システムを最適に維持管理するための橋梁マネジメントシステムアプリケーション（Bridge Management System Application, 以下、BMS アプリケーションと略す）を提案する。BMS アプリケーションの目的は、橋梁のアセットマネジメントのための基礎情報をパソコン上で解析し、会計年度における橋梁システムの効率的な補修計画に関するマネジメント情報と会計年度ごとの橋梁システムの資産管理に関する管理会計情報を道路管理者に提供することである。橋梁の劣化過程は多大な不確実性を含んでいることから、BMS アプリケーションはマルコフ推移確率を点検データから推計するモジュールと、管理する橋梁の状態に適応する最適な補修戦略を導出するための劣化・補修過程のシミュレーションモジュールを搭載している。適用事例として、国土交通省姫路河川国道事務所が所轄する橋梁資産を対象として BMS アプリケーションを試行的に運用し、その有用性を実証的に分析する。

Abstract: In this paper, a bridge management system application, which supports the bridge managers to design the optimal rehabilitation/maintenance (R&M) policies, is presented, whereby the system provides the managers with the technical information for the optimal R&D plans as well as managerial accounting information for asset valuation of the bridges every fiscal year. The system installs an estimation module to estimate Markov transition probabilities based upon the observation data set by inspection and the simulation module of deterioration/rehabilitation processes of the bridge systems as a whole to evaluate the life-cycle costs of the R&M policies. The system presented in the paper is applied to the bridge systems managed by Himeji Office of Ministry of Land, Infrastructure and Transport, and the applicability of the systems is tested against the real world data.

キーワード：橋梁マネジメント、繰延維持補修会計、アセットマネジメント、ライフサイクル費用

Keywords : bridge management, deferred maintenance accounting, asset management, life cycle costing

1. はじめに

近年、橋梁のアセットマネジメントシステムに関する研究が進展している。橋梁の最適な補修政策はライフサイクル費用をはじめとする管理指標を用いて工学的に選定されることが望ましい。しかし、橋梁管理者は橋梁の維持管理のための最適な補修政策を実施できる予算を毎年確保できるとは限らず、限られた補修予算の中で、優先順位の高い橋梁部材から補修せざるを得ない場合も少なくない。当該年度に補修されなかつた箇所に関しては、その補修が翌年度以降に先送りされることとなる。

わが国の橋梁は、高度成長期に建設されたものも多く、これらの橋梁が今後一斉に維持更新期を迎ることが予想される。これに伴い橋梁の維持補修需要も劇的に増加するであろう。一方、少子高齢化に伴う社会

保障費の大幅な増大や税収の減少から、財政支出の削減が求められており、橋梁の維持管理予算も例外ではない。こうした状況の下、橋梁をはじめとする新規の社会資本整備のニーズに応えつつ、現存の橋梁を運用していくためには、橋梁の補修需要を的確に予測し、予算管理を効果的に実施するための橋梁のアセットマネジメントシステムを構築することが不可欠である。

本研究では、橋梁の維持管理業務を合理的に執行するための橋梁マネジメントシステム（Bridge Management System: 以下、BMS と略す）を提案する。さらに、本システムを橋梁管理の実務において運用するために、パソコンでの操作を可能とするアプリケーション（以下、BMS アプリケーションと呼ぶ）の開発を試みる。本研究で開発する BMS アプリケーションは、1) データの管理を行う台帳システム、2) 橋梁の補修を計画し記録するアセットマネジメントシス

1 : 正会員 京都大学大学院博士後期課程 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, Tel: 075-753-5073, E-mail: kazuya_aoki@psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

2 : 国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所 所長

(〒670-0947 兵庫県姫路市北条1丁目250番地, Tel 0792-82-8211)

3 : 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, Tel: 075-753-5073, E-mail: owadakei@psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

4 : フェローメンバー 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, Tel: 075-753-5071, E-mail: kkoba@psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

テム、3) 補修実績を記録し橋梁の維持補修予算を管理する管理会計システムの3つのサブシステムにより構成される。さらに、2) のアセットマネジメントシステムは、a) 長期的な維持管理計画を策定するため、5つのモジュールにより構築される戦略レベル、b) 戰略レベルのアウトプットを基に中期的な補修優先順位を決定する戦術レベル、c) 単年度ごとの補修実施状況を記録するための維持補修レベルの3つのサブシステムにより構成されている。本論文の以下では、2. でBMS アプリケーションの基本的な考え方を、3.においてBMS の基本的構成を述べる。さらに、4. でBMS アプリケーションについて説明し、5. において国土交通省姫路河川国道事務所の管理下にある国道バイパスの橋梁システムを対象とした適用事例を紹介する。

2. 本研究の考え方

(1) 従来の研究概要

近年、橋梁の健全度判定や診断の結果から補修工法を合理的に選択し、最適な維持補修戦略を立案することを目的としたBMSに関する研究^{1),2)}が蓄積されている。例えば、米国における代表的なBMSの1つであるPONTISをはじめ、橋梁の長期的なライフサイクル費用(Life Cycle Cost: 以下、LCCと呼ぶ)の削減を目指したBMSが実用化されている。橋梁の維持補修にあたっては、個々の橋梁を対象としたプロジェクトレベルの維持補修と、管理対象となるすべての橋梁を対象としたシステムレベルにおける維持補修という、2つの異なるレベルのマネジメント問題を同時に取り扱う必要がある。このうち、プロジェクトレベルを対象とした橋梁部材の最適補修モデルに関してはいくつかの研究事例がある³⁾⁻⁷⁾。例えば、前述のPONTISでは、異なる時刻で発生する費用に対して割引率を用いて現在価値に換算する割引現在価値法を用いてLCC評価をおこなっている。また、マルコフ決定モデル⁸⁾⁻¹¹⁾を用いた最適補修モデル¹²⁾⁻¹⁷⁾が各種提案されており、実用的BMSにおいても採用されている。一方で、割引現在価値法では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がある³⁾。これに対して、貝戸らは、将来時刻に発生するライフサイクル費用を年平均費用に置き換えて評価する平均費用法を用いて最適補修政策を求めるマルコフ決定モデル⁶⁾を提案している。このように、プロジェクトレベルにおける橋梁の補修戦略を決定するいくつかの方法が存在するが、現実的な橋梁管理においては建設時期や構造特性・劣化特性が異なる数多くの橋梁を同時に管理することが求められる。このような橋梁システム全体の維持管理を

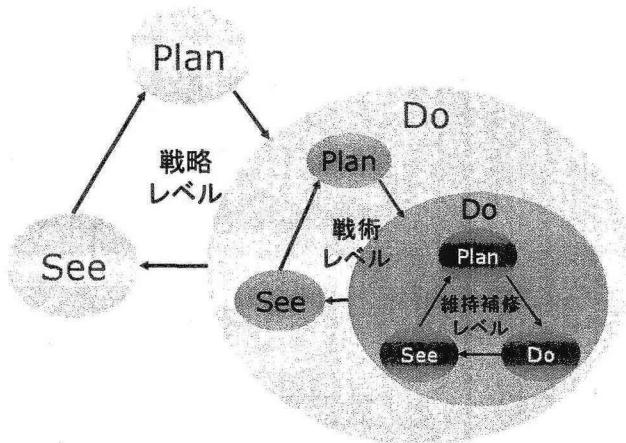


図-1 階層的マネジメントサイクル

対象とする場合、各会計年度における維持補修実績に基づいて、橋梁システム全体の維持補修実績のパフォーマンスを評価するための橋梁資産評価と予算管理を目的とした管理会計システムの開発が不可欠である。本研究で提案するBMSでは貝戸らが提案した平均費用法に基づくマルコフ決定モデルを用いてプロジェクトレベルの最適補修戦略を決定する。平均費用法を用いたLCC評価は、繰延維持補修会計原則と整合的であり、本研究で提案するBMSは、ある単一の管理者による橋梁システム全体について繰延維持補修会計原則に基づいた資産評価と予算管理を同時に達成できる点に新規性を有している¹⁹⁾。併せて、本BMSアプリケーションは、定期的に蓄積されていく点検データに基づいて橋梁部材の劣化予測モデルを推計する機能も内蔵化しており、個々の橋梁部材の劣化予測モデルを点検結果に基づいて更新できる機能を有している。

なお、本BMSは基本的には「部材-橋梁システム」という関係を中心に議論する段階に止まっており、将来的に「部材-橋梁-橋梁システム」の関係を明示的に考慮したBMSに拡張する必要があることは言うまでもない。本アプリケーションでは、個々の橋梁の劣化状態に関する情報は、物理的情報と管理会計情報として集約されていることを付記しておく。

(2) BMSの構成

本研究では、前述のようにBMSのシステム構成をプロジェクトレベル、システムレベルという2つの階層に分割する。さらに、BMSにおけるマネジメントサイクルの時間的視野に着目し、BMSを、図-1に示すように、戦略レベル(長期計画)、戦術レベル(中期計画)、維持補修レベル(単年度計画)の3つのレベルで構成される階層的マネジメントシステムとして構成する。いずれのレベルにおいても、プロジェクトレベルにおける検討や維持補修の結果は、システムレベルの情報として集計化される。図-1に示すBMSの

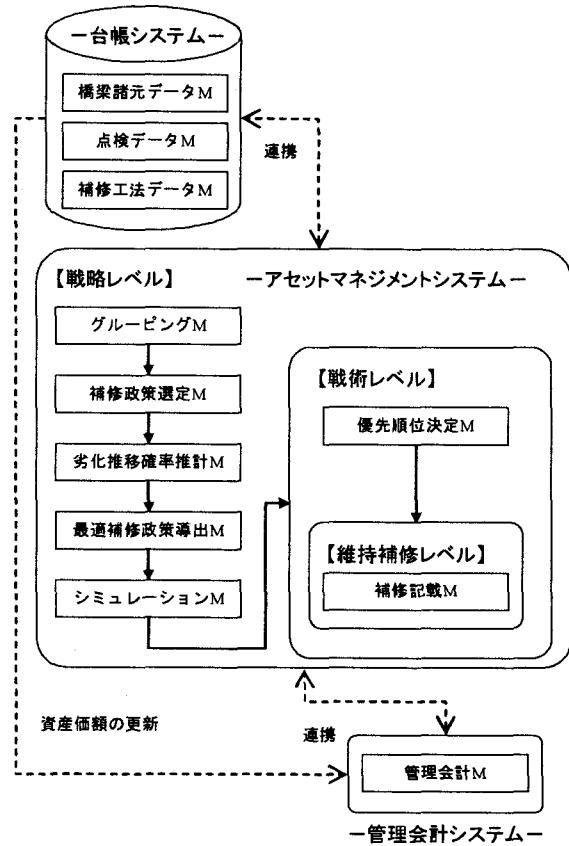


図-2 BMS の全体構成

中で、戦略レベルでは、個別橋梁部材ごとの最適補修戦略と、橋梁システム全体としての補修戦略が検討される。その際、各橋梁の健全度の現状、および重要度やその施設の供用条件等に基づいて、各橋梁の維持補修戦略が検討され、その結果に基づいて橋梁がグループ化される（グループ化モジュール）。その分類されたグループ毎に、例えば予防的補修戦略や事後的補修戦略といった橋梁の維持補修戦略やさらには具体的な補修工法が決定される。橋梁部材の健全度の推移は不確実で確定的に予測することはできない。橋梁部材の劣化予測モデルをマルコフ連鎖モデルで表現する。この劣化予測モデルは定期点検によって取得された点検データに基づき部材毎に推計される（劣化推移確率推計モジュール、3. (1) 参照）。推計によって導出した推移確率行列から、マルコフ決定モデルを用いて最適補修政策を求める（最適補修政策導出モジュール、3. (2) 参照）。さらに、複数の橋梁部材で構成される橋梁システム全体または橋梁特性によって分類されたグループを対象とした劣化・補修過程のシミュレーションを行い、各期予算や健全度分布状況の推移をシミュレートすることによりグループ毎の最適政策の決定や目標予算、管理基準等を決定する（シミュレーションモジュール、3. (3) 参照）。

戦術レベルは、戦略レベルにて導出されたアウトプットを用いて中期的に優先的に補修を実施すべき対象箇所が選定される（優先順位決定モジュール）。新たに定期点検が実施され、新たに取得した健全度から、損傷が激しくより詳細に調査を継続的に実施すべき施設や、早期に補修を実施すべきと判断される施設が新しいカテゴリーに分類される。定期点検の結果による危険度判定や健全度目標、予算目標等の条件から、中期的に補修を実施すべき施設とその優先順位が検討される。補修の優先順位は、損傷危険度の指標だけでなく、施設の重要性や管理瑕疵に対するリスク等の様々な指標により総合的に判断される。

維持補修レベルでは、単年度の予算制約のもと、戦術レベルによって決定された優先順位に従って補修が実施される。補修が実施された箇所は、補修記録として情報が蓄積され、中期の補修リストから削除され、次年度の計画に反映される（補修記録モジュール）。さらに、当該年度に実施された実績は、管理会計システムにて実施状況を記録する（3. (4) 参照）。なお、以下では、BMS の核となる機能を担う劣化推移確率の推計方法、最適補修政策の決定方法、最適予算額を求めるシミュレーションモデル、資産評価のための管理会計システムの概要について説明する。

3. BMS 構築のための検討

(1) 劣化推移確率の推計

橋梁は複数の部材で構成されており、それらの部材毎に劣化過程が不確実でライフサイクルが異なる。これらの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。各橋梁部材の健全度の推移が不確実であり、将来生起する状態を確定的に予測できないと考える。ある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 $S = \{1, \dots, K\}$ 上で定義される齊時マルコフ連鎖を用いて記述できると仮定する。時刻 t の健全度が $\omega(t) = i$ で表される時、時刻 $t+1$ で観測された部材の健全度が $\omega(t+1) = j$ に推移する確率を、

$$\text{Prob}[\omega(t+1) = j | \omega(t) = i] = \pi_{ij} \quad (1)$$

と表すこととする。さらに、健全度の推移確率行列を、

$$\Pi = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \cdots & \pi_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{KK} \end{pmatrix} \quad (2)$$

と定義する。推移確率の定義より $\sum_{j=1}^K \pi_{ij} = 1$ が成立する。マルコフ推移確率行列を、過去の点検データベースから推計することが可能である。推移確率の推計方法に関する詳細は参考文献¹⁸⁾に譲るが、ここでは読者の便宜を図るために、推計方法の概要について簡単に紹介する。

マルコフ推移確率は個別部材の劣化過程を表す多段階劣化ハザードモデルを用いて定義することができる。健全度 i の寿命を確率変数 ζ_i で表し、確率密度関数 $f_i(\zeta_i)$ 、分布関数 $F_i(\zeta_i)$ に従うと仮定する。このとき、対象とする部材の健全度 i の状態が初期時刻から期間 y_i が経過した時刻で健全度 $i+1$ に推移する確率密度をハザード関数 $\lambda_i(y_i)$ を用いて表現する。このハザード関数は、使用時間 y_i まで健全度が i のまま継続する生存確率 $\tilde{F}_i(y_i)$ を用いれば、

$$\lambda_i(y_i) \Delta y_i = \frac{f_i(y_i) \Delta y_i}{\tilde{F}_i(y_i)} \quad (3)$$

と定義できる。ハザード関数 $\lambda_i(y_i)$ は、初期時刻から使用時間 y_i まで健全度 i の状態が継続したという条件の下で、期間 $[y_i, y_i + \Delta y_i]$ 中に水準 $i+1$ に進展する条件付確率である。橋梁部材の劣化過程がマルコフ性を満足し、ハザード関数がサンプル時間軸上の時刻 y_i に依存せず、常に一定値 $\theta_i > 0$ ($i = 1, \dots, K$) をとると仮定すると、

$$\lambda_i(y_i) = \theta_i \quad (4)$$

が成立する。指数ハザード関数を用いることにより、橋梁部材の劣化過程が過去の履歴に依存しないというマルコフ性を表現することが可能となる。さらに、このハザード関数を用いれば、健全度 i の寿命が y_i 以上となる確率 $\tilde{F}_i(y_i)$ は、

$$\tilde{F}_i(y_i) = \exp(-\theta_i y_i) \quad (5)$$

と表される。

いま、ある時刻 τ_A における目視点検の結果、健全度が i であるという観測結果が得られたとする。この時、サンプル時間軸上の時刻 y_A で、健全度が i であったという条件の下で、さらに時刻 y_A から追加的に $z_i (\geq 0)$ 以上にわたって健全度 i が継続する確率 $\tilde{F}_i(y_A + z_i | \zeta_i \geq y_A)$ は、

$$\begin{aligned} \tilde{F}_i(y_A + z_i | \zeta_i \geq y_A) \\ = \text{Prob}\{\zeta_i \geq y_A + z_i | \zeta_i \geq y_A\} \end{aligned} \quad (6)$$

と定義できる。この時、確率 $\tilde{F}_i(y_i)$ の定義より、

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{F}_i(y_A + z_i)}{\tilde{F}_i(y_A)} &= \frac{\exp\{-\theta_i(y_A + z_i)\}}{\exp\{-\theta_i y_A\}} \\ &= \exp(-\theta_i z_i) \end{aligned} \quad (7)$$

が成立する。すなわち、検査時刻 y_A において健全度が i と判定され、次の検査時刻 $y_B = y_A + Z$ においても健全度が i に判定される確率は、

$$\text{Prob}[\omega(y_B) = i | \omega(y_A) = i] = \exp(-\theta_i Z) \quad (8)$$

と表される。ただし、 Z は2つの検査時刻の間隔を表す。確率 $\text{prob}[\omega(y_B) = i | \omega(y_A) = i]$ はマルコフ推移確率 π_{ii} に他ならない。指數ハザード関数を用いた場合、推移確率 π_{ii} はハザード率 θ_i と検査間隔 Z のみに依存し、時刻 y_A 、 y_B に関する確定的な情報を用いなくても推移確率を推計することが可能となる。津田ら¹⁸⁾は、以上の議論を拡張し、指數ハザード関数を用いて、検査時刻 y_A と y_B の間で健全度が i から健全度 j に推移するマルコフ推移確率 π_{ij} が、

$$\begin{aligned} \pi_{ij} &= \text{Prob}[h(y_B) = j | h(y_A) = i] \\ &= \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z) \end{aligned} \quad (9)$$

と導出できることを示している。また、 π_{iK} に関してはマルコフ推移確率の条件より

$$\pi_{iK} = 1 - \sum_{j=i}^{K-1} \pi_{ij} \quad (10)$$

が成立する。なお、参考文献¹⁸⁾には最尤推定法を用いてマルコフ推移確率を推計する方法も示している。

(2) 最適補修政策の導出

最適補修政策導出モジュールは、橋梁部材の劣化過程をマルコフ推移確率で表現し、LCC を最小にするような最適補修政策をマルコフ決定モデルを用いて導出する機能を有している。LCC 評価法として、前述したように、1) 割引現在価値法、2) 平均費用法が提案されているが、小林は数多くの複数部材で構成される橋梁システム全体の最適補修政策を評価する方法として平均費用法が望ましい性質を有していることを指摘している²⁰⁾。BMS アプリケーションでは、割引現在価値法、平均費用法に基づいて最適補修政策を求める機能を内蔵しているが、ここでは平均費用法を用いた LCC 評価の方法と、マルコフ決定モデルを用いた最適補修モデルについて簡単に説明しておく。なお、最適補修モデルの詳細は参考文献⁶⁾に譲る。

a) モデル化の前提条件

初期時刻 $t = 0$ から無限に続く離散的時刻の系列を考える。橋梁は数多くの部材により構成されるが、ここではそ

の中のある特定の部材の補修問題に着目する。橋梁部材の劣化過程を、前述したハザードモデルにより推計したマルコフ推移確率行列で表現する。橋梁部材の健全度を複数の離散的なレーティング指標により評価する。橋梁管理者は、部材の健全度を点検により把握し、劣化が進展した部材に関しては補修により健全度を回復する。その場合、橋梁管理者は事前に決められた補修ルールに従って最適な補修工法を選択する。この劣化した部材の健全度を回復するために適用する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、補修政策 $d \in D$ (D は補修政策の集合)を、各健全度 i に対して、その時刻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する。補修政策 d を構成する補修アクション $\eta^d(i) \in \eta(i)$ 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。また、集合 $\eta(i)$ は健全度が i の場合に利用可能な補修工法の集合である。いま補修アクションベクトルを

$$\eta^d = (\eta^d(1), \dots, \eta^d(K)) \quad (11)$$

と表す。つぎに、補修アクション $\eta^d(i)$ を実施する際に必要となる補修費用をつぎの費用ベクトルで定義する。

$$c^d = (c_1^d, \dots, c_K^d) \quad (12)$$

費用 c_i^d は健全度 i の部材に適用する補修に必要な費用であり、部材の健全度を i から $\eta^d(i) = j$ ($1 \leq j \leq i$) へ修復するための補修費用で定義される。

b) 劣化・補修過程のモデル化

補修政策 $d \in D$ を構成する補修アクション $\eta^d(i)$ により生じる部材の健全度の変化を、

$$q_{ij}^d = \begin{cases} 1 & \eta^d(i) = j \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (i, j = 1, \dots, K) \quad (13)$$

と定義する。いま、時刻 t において部材の健全度が i と判定され、次の時刻 $t+1$ までに、健全度はマルコフ推移確率 Π に従って健全度 j ($j > i$) に推移した場合に補修が実施されると考えよう。その際、部材が同一の健全度であっても、補修によって当該健全度に回復した場合と、良好な状態から劣化によって当該健全度に推移した場合がある。後者の場合は補修により健全度を回復させることができるが、前者の場合には、補修政策は適用されずに、その健全度に留まるという条件を設ける必要がある。このような劣化・補修過程における補修履歴を考慮するために、補修政策 $d \in D$ の下で健全度の推移確率を

$$\pi_{ij}^d = \begin{cases} \pi_{ii} & i = j \text{ の時} \\ \sum_{k=i+1}^K \pi_{ik} q_{kj}^d & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (i, j = 1, \dots, K-1) \quad (14)$$

と定義する。健全度が最悪の状態である K が観測されると、当該部材は直ちに更新されると仮定するため、各期の期首で補修が行われた後に健全度 K の部材が存在することはない。ここで、補修アクションを考慮した健全度の推移確率行列を、 $(K-1 \times K-1)$ 行列に縮約して

$$\Pi^d = \begin{pmatrix} \pi_{11}^d & \cdots & \pi_{1K-1}^d \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi_{K-11}^d & \cdots & \pi_{K-1K-1}^d \end{pmatrix} \quad (15)$$

と表現する。

c) 平均費用最小化政策

最適な補修アクションの望ましい組み合わせを平均費用評価に基づいて評価しよう。いま、時刻 $t=0$ において健全度 i が観測されたとし、次の時刻 $t=1$ へ経過する間に部材が劣化し、時刻 $t=1$ の直前に健全度 j が観測されたと考える。健全度 j に対する補修アクションは、時刻 $t=1$ の直前に実施されるものとする。時刻 $t=0$ において時刻 $t=1$ に実施される補修を確定的に予測することは不可能であるため、時刻 $t=1$ の直前までに補修政策 d の下で必要となる期待補修費用を

$$r^d(i) = \sum_{j=i+1}^K \pi_{ij} c_j^d \quad (i = 1, \dots, K-1) \quad (16)$$

と表現する。時刻 $t=0$ から 1 期経過する間に劣化が進展し、時刻 $t=1$ に健全度が j に推移したと考える。時刻 $t=1$ から補修政策 d を適用し、時刻 $t=n$ に至るまでの $n-1$ 期間に発生する期待累積ライフサイクル費用と、初期時刻における期待累積ライフサイクル費用の関係は

$$u^d(i, n) = r^d(i) + \sum_{j=1}^{K-1} \pi_{ij}^d u^d(j, n-1) \quad (i = 1, \dots, K-1) \quad (17)$$

と再帰的に定義することができる。十分大きな n に対して、再帰方程式の解は、

$$u^d(i, n) = nq^d + v^d(i) \quad (i = 1, \dots, K-1) \quad (18)$$

により近似できる⁶⁾。すなわち、期待累積ライフサイクル費用 $u^d(i, n)$ は、期間長 n に比例する項 nq^d と初期健全度 i に依存する項 $v^d(i)$ に分解できる。このとき、式(17)と式(18)の関係から、連立方程式

$$q^d + v^d(i) = r^d(i) + \sum_{j=1}^{K-1} \pi_{ij}^d v^d(j) \quad (i = 1, \dots, K-1) \quad (19)$$

を得る。ここに、式(19)に表される q^d は、補修政策 d を用いた場合に必要となる補修費用の流列を毎年等価な費用

として再配分した平均費用を表している。これにより、橋梁部材を半永久的に維持するために必要な補修・更新費用を、毎年等価な平均費用の流列(q^d, \dots, q^d, \dots)に置き換えることができる。さらに、初期健全度に依存する $v^d(i)$ は、現在時刻において部材の劣化が進展しており、その健全度を回復させるための大規模補修に必要な費用を表しており、これを相対費用と定義する。

補修政策 d により将来時刻 n まで補修を繰り返した際の期待累積ライフサイクル費用 $u^d(i, n)$ を用いれば、時刻 n までの平均費用を、期待累積ライフサイクル費用を期間長で除すことにより表現できる。さらに、無限的視野のマネジメント期間を考えることにより、平均費用を

$$w^d(i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u^d(i, n)}{n} \quad (20)$$

$$(i = 1, \dots, K - 1)$$

と定義できる。このとき平均費用の最小化を目的とした平均費用最小化モデルは、次式のように定式化できる。

$$w^{d^*}(i) = \min_{d \in D} \left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u^d(i, n)}{n} \right\} \quad (21)$$

$$(i = 1, \dots, K - 1)$$

平均費用最小化モデルの最適補修政策 d^* を平均費用最小化政策と呼ぶ。最適補修モデルは、平均費用最小化マルコフ決定モデルであり、最適政策は時間に関して定常的な政策となる。この定常的な最適解は、Howard の戦略改良法⁸⁾等により求めることができる。なお、平均費用最小化モデルの解法については参考文献⁹⁾に詳しい。

平均費用最小化原則に基づく最適補修政策は、橋梁を半永久的に維持することを前提としたときに、毎年一定の予算制約の下で LCC 最小化を達成するという望ましい性質を持っている。さらに、LCC を毎年等価な平均費用の流列として評価でき、橋梁を非償却資産として位置づける繰延維持補修会計原則に従った予算管理が可能となる。橋梁の管理会計システムについては、のちに 3. (4) で説明する。本 BMS アプリケーションには、割引現在価値法を用いて最適補修政策を求めるための割引現在価値最小化モデルも搭載されている。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。この割引現在価値最小化モデルの詳細については、参考文献^{6), 17)}を参照して欲しい。

(3) 橋梁劣化シミュレーション

a) シミュレーションの手順

シミュレーションモジュールでは、平均費用最小化モ

ル、割引現在価値最小化モデルという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に従って推移する劣化・補修過程をシミュレーションによって分析し、管理対象となる橋梁部材の管理基準(健全度分布)及び予算基準の設定を検討することを目的とする。現実の管理対象には、必要となる対策工法や補修費用、健全度が異なる様々な橋梁が含まれており、本モジュールはこれらの異質性を考慮したような様々なシミュレーション実験が可能なように設計されている。本シミュレーションモジュールは、最適な補修戦略の検討、予算制約による管理基準に与える影響などを分析し、道路管理の現場の意図に合致した橋梁補修戦略を検討するための情報を提供することを目的としている。ここでは、シミュレーションの手順についてとりまとめることとする。

いま、管理対象とする橋梁システムの部材の総数を M とする。また、それぞれの部材を $m(m=1, \dots, M)$ と表現する。ここで、時刻 t における部材 m の健全度を状態変数 $\omega_m(t)$ により表現する。このとき、橋梁システム全体における健全度を健全度ベクトル

$$\boldsymbol{\omega}(t) = (\omega_1(t), \dots, \omega_M(t)) \quad (22)$$

を用いて表現できる。いま、橋梁システムが同種の橋梁によって構成されていると考えよう。この仮定は、あくまでも記述の簡略化のためであり、BMS アプリケーションでは多数の異質な橋梁部材を同時に取り扱えるように設計されている。いま、時刻 t において健全度が i と評価された部材の総数を $\xi^i(t)(i=1, \dots, K)$ と表す。部材数ベクトルを

$$\boldsymbol{\xi}(t) = (\xi^1(t), \dots, \xi^K(t)) \quad (23)$$

但し

$$\xi^i(t) = \sum_{m=1}^M \delta_{im}(t) \quad (i = 1, \dots, K)$$

$$\delta_{in}(t) = \begin{cases} 1 & \omega_m(t) = i \text{ の時} \\ 0 & \omega_m(t) \neq i \text{ の時} \end{cases}$$

と定義する。ここで、初期時刻 $t = 0$ を基準時刻と考え、橋梁システムの劣化過程をシミュレートする問題を考える。現時刻において、将来時刻における健全度を確定的に予測することは不可能であるため、初期時刻から n 期経過した時刻 $t = n$ における部材 m の健全度の確率分布を、

$$\kappa_m(n) = (\kappa_m^1(n), \dots, \kappa_m^K(n)) \quad (24)$$

と表す。ただし、 $\kappa_m^i(n)$ は、 $t = n$ において、部材 m の健全度が i となる確率を表している。このとき、初期時刻の健全度が $\omega_m(0) = i$ であった部材 m の n 期後の健全度分

布は、

$$\kappa_m(n) = e_i(\Pi_m)^n \quad (25)$$

と表すことができる。ただし、 $e_i = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ は、第 i 番目の要素のみが値 1 をとり、それ以外の要素がすべて 0 をとする行ベクトルである。さらに、 $(\Pi_m)^n$ は推移確率行列 Π_m の n 乗を表している。また Π_m は部材 m について定義される推移確率行列である。

つぎに、劣化した部材に対して補修政策 d を適用した場合を考える。初期時刻の健全度が $\omega_m(0) = i$ であった橋梁部材 m の n 期後の健全度分布は、

$$\kappa_m^d(n) = e_i(\Pi_m^d)^n \quad (26)$$

と表せる。ただし、 $\kappa_m^d(n)$ は部材 m の健全度分布であり $\kappa_m^d(n) = (\kappa_m^{1,d}(n), \dots, \kappa_m^{K,d}(n))$ と表現できる。このとき、補修政策 d の下で実現する橋梁システム全体の健全度の分布確率は

$$\kappa^d(n) = \{\kappa_1^d(n), \dots, \kappa_M^d(n)\} \quad (27)$$

で表現される。マルコフ連鎖モデルを反復的に利用することにより、各期における健全度分布を求めることができる。時刻 n に各健全度が観測される期待部材数ベクトル

$$E\xi^d(n) = (E\xi_1^d(n), \dots, E\xi_{K-1}^d(n)) \quad (28)$$

と定義したとき、時刻 $t = n$ に健全度 i と判定される期待部材数 $E\xi_i^d(n)$ は、

$$E\xi_i^d(n) = \sum_{m=1}^M \kappa_m^{i,d}(n) \quad (i = 1, \dots, K-1) \quad (29)$$

と定義できる。さらに、時刻 $t = n$ の直前に発生する健全度 i である部材 m の補修費の期待値は、

$$E\xi_m^d(n) = \sum_{j=i+1}^K \kappa_m^{i,d}(n-1) \pi_{ij} c_j^d \quad (30)$$

であり、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を

$$E\xi^d(n) = \sum_{m=1}^M E\xi_m^d(n) \quad (31)$$

と表すことができる。シミュレーションを行う場合、橋梁部材の初期健全度 $\omega(0) = (\omega_1(0), \dots, \omega_M(0))$ を与件として設定する。以上の手順によって、橋梁システムの劣化・補修

過程をシミュレートすることができる。なお、本モジュールのシミュレーションでは、モンテカルロ法により擬似乱数を発生させ、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ている。サンプルパスの試行回数は任意に設定することが可能である。発生させたサンプルパス上で評価した LCC を多数のサンプルパスに対して平均化操作を行うことにより、各年時で発生する年間補修費用及び健全度別部材数の期待値を求めることができる。

b) 予算制約を考慮した場合のシミュレーション

各期の補修費用に制約がない場合には、ライフサイクル評価によって導出された最適補修政策に基づいた補修が確実に実施される。しかし、現実の橋梁管理においては、最適補修政策を遂行するための予算を毎年確保できるとは限らず、確保された予算枠の中で優先的に補修すべき箇所を選定して補修が実施される。補修の優先順位を決定するための基準として費用便益ルールを用いる。ある橋梁の損傷箇所の補修工事の便益を、「当該時刻で補修をせずに 1 期間放置し、次期に補修を行った場合の期待ライフサイクル費用」と「最適補修政策に基づいて当該期に補修を行った場合に算出される期待ライフサイクル費用」の差として定義する。予算制約により健全度 i の橋梁部材 m の補修を 1 期間放置した場合の当該部材の期待ライフサイクル費用を $LCC_{i,m}^*$ 、最適補修政策に従って当該期に補修を行った場合の期待ライフサイクル費用を $LCC_{i,m}$ と表すと、補修による便益は、 $LCC_{i,m}^* - LCC_{i,m}$ と定義できる。このとき、当該期 t における健全度 i の橋梁部材 m を最適補修政策 d^* の下で補修するアクションの費用便益比 $(B/C)_{i,m}$ は

$$(B/C)_{i,m} = \frac{LCC_{i,m}^* - LCC_{i,m}}{c_i^{d^*}} \quad (32)$$

として計算できる。分母の $c_i^{d^*}$ は、当該部材の健全度 i のときに補修アクション C による補修費用である。 $c_i^{d^*} = 0$ の場合（補修しないというアクション）は $(B/C)_{i,m}$ を算出する必要はない。但し、期待ライフサイクル費用は、平均費用最小化モデルによって求めた補修費用の平均費用及び相対費用の割引現在価値を用いて評価する。平均費用最小化モデルによって求めた最適補修政策 d^* に対して、LCC を毎年等価な平均費用 q^{d^*} と相対費用 $v_i^{d^*}$ に分解できる。この時、平均費用最小化原則に基づいた期待ライフサイクル費用の割引現在価値 $LCC_{i,m}$ 、 $LCC_{i,m}^*$ は

$$LCC_{i,m} = \sum_{t=0}^{\infty} \frac{q^{d^*}}{(1+\beta)^t} + v_i^{d^*} \quad (33)$$

$$LCC_{i,m}^* = \sum_{j=i}^K \frac{\pi_{ij}(LCC_{j,m} + c_j^{d^*})}{1+\beta} \quad (34)$$

と表すことができる。以上のように定式化した費用便益分析により、予算制約下における橋梁部材の補修の優先順位を決定する。その決定手順を以下に示す。

- 1) 当該期に補修の対象となる部材を抽出する。
- 2) 抽出した部材に対して、費用便益比 $(B/C)_{i,m}$ を算出し、費用便益比 $(B/C)_{i,m} > 1$ となる部材群の中で $(B/C)_{i,m}$ の大きい順に配列する。
- 3) 以上により決定した優先順位に従い順次補修を行い、その補修費用を加算する。
- 4) 加算した補修費用が当該期の予算制約を超えない範囲で補修を実施し、補修が実施されなかった部材は次期以降に補修を行う。

ただし、この優先順位決定モデルは、本 BMS において戦略レベルにおける劣化・補修過程のシミュレーションモデルに適用されるモデルであることを断っておく。戦術レベルにおける補修の優先順位の決定には、このような費用便益分析のほか、路線の重要性や管理瑕疵に関するリスク、さらには橋梁管理者の定性的戦略など様々な要因を総合的に勘案して決定される。

(4) 管理会計の構築

a) 管理会計情報

BMS アプリケーションは、橋梁管理会計システムを搭載している。橋梁管理会計システムは、各期に発生する補修費用を予算管理情報として記述し、管理会計情報として橋梁のアセットマネジメントの各場面における意思決定の合理化を目的としたシステムである。管理会計情報は多様な目的のために用いられるが、橋梁のアセットマネジメントのモニタリング機能として、例えば以下の 2 つがあげられる¹⁹⁾。第 1 に、橋梁システムの維持管理に必要な各期の平均的な予算規模を求めるとともに、必要な補修が経年に着実に実施されているかをモニタリングすることが必要である。橋梁部材の劣化は経年に進展し、劣化が顕著になるまで非常に長い時間を要するものが多い。このような構造物を管理する場合、各会計年度の補修費用を厳密に平滑化する必要はなく、各会計年度においては確保できる予算枠に応じた補修が実施されればいい。しかし、短期的には補修費用の増減が認められても、将来に繰り延べられた補修需要はいずれかの会計年度において補修を実施しなければならない。このように短期的には補修費用の増減が許されても、長期的には平均して一定の補修費用の支出が必要となる。このことから、各期に支出した補修費用の累積支出額を経年にモニタリングしておく必要がある。第 2 に、過去に補修されるべきであった橋梁部材が現時刻で相当程度積み残している場合、積み残された補修需要規模を算定し、

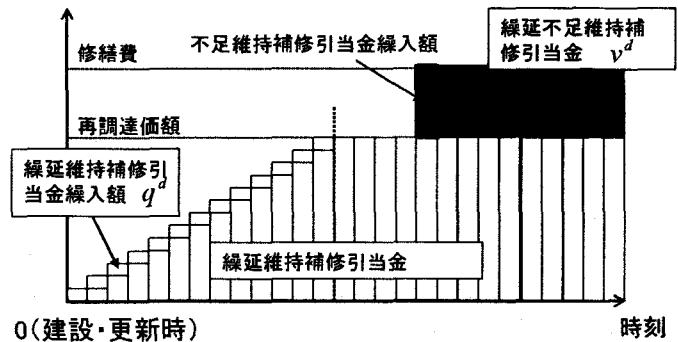


図-3 繰延維持補修会計の計算

それを将来時点にわたって消化するための維持補修計画を立案することが必要となる。このような維持補修計画の策定にあたり、橋梁管理会計システムは重要な役割を果たすことになる。

b) 平均費用最小化原則と繰延維持補修会計原則

3. (2) で述べたように、橋梁部材の最適補修政策を決定する手法として、本 BMS では平均費用最小化法を採用している。平均費用最小化モデルを用いた場合、補修政策 d の下で、時刻 $t = 0$ から将来時刻 $t = n$ までに必要な補修費用の期待累積ライフサイクル費用を、十分大きな n に対して

$$u^d(i, n) = nq^d + v^d(i) \quad (i = 1, \dots, K - 1) \quad (35)$$

と近似的に分解できることを示した。ここで、 q^d は補修政策 d を用いたマネジメントサイクルにおいて必要となる補修費用を毎年等価な費用として再配分した平均費用であり、これにより補修費用を毎年等価な平均費用の流列に置き換えることができる。このことは、繰延維持補修会計¹⁹⁾において、構造物を半永久的に維持すべき非償却性資産として位置づけ、毎期ごとに構造物を維持するための費用として繰り入れられるべき繰延維持補修繰入金を認識することに他ならない。つまり、各会計年度の平均的な予算規模を決定するために、繰延維持補修会計原則では平均費用 q^d が重要な情報を提供する。橋梁が建設あるいは部材が更新された時刻から補修費用として毎年、平均費用 q^d を繰り入れる。当該会計年度において、繰入金を補修費用として費消しなければ、その繰入金は将来発生する補修のための準備金（繰延維持補修会計における引当金）として引き当てる。補修が実施された場合には、その補修費用は積み立てられた引当金より取り崩される。

一方、初期時刻において劣化が進行しており、平均費用の毎期の積立額のみでは大きな損傷を回復させるための費用が不足するケースが存在する。この場合、

式(35)を満足する相対費用 v^d を初期時刻の健全度に對応して積み立てられているべき繰延不足維持補修引当金と捉えることができる。つまり、毎期に積み立てられる平均費用のみで解消できない補修需要に対して、相対費用によって表される補修需要を将来期間にわたって順次解消できるような計画を立案するための情報を提供する。このように、平均費用最小化原則によるライフサイクル費用評価の情報から繰延維持補修会計原則に従った有用な会計情報を提供できる。

4. BMS アプリケーションの設計

(1) BMS アプリケーションの概要

本研究で提案した橋梁マネジメントシステムであるBMSに基づき、国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所が所轄する橋梁システムを対象としたアプリケーションを設計した。本研究で設計したアプリケーションは、分析、出力を行うモジュールではVisualBasic.Netを用いて作成しており、橋梁の台帳や出力データをMicrosoft Accessで管理している。つまりこのアプリケーションは、パソコン上に同事務所が所轄する橋梁における電子化された管理情報を格納するとともに、VB.Netを用いたコントロールオブジェクトを通じて管理情報をアクセスし、システムユーザーである橋梁管理者に管理会計情報及びストック管理水平に関する情報を提供可能なアプリケーションである。以下では、本研究で設計したアプリケーションにおけるシステムユーザーとのインターフェイスである各システム内の主要なモジュールについて説明する。

(2) 台帳システム

管理下にある橋梁に関する基本諸元情報や点検データ、基本となる補修工法に関する情報等を一括して管理するシステムである(図-4参照)。個別橋梁の詳細を確認するとともに、データの追加更新、削除などを行うことが可能である。橋梁諸元データモジュールにおける基本データは、国土交通省が管理する「MICHI」データベースから必要な項目を抽出することが可能なインターフェースを構築した。後のアセットマネジメントシステム及び管理会計システムで利用するための橋梁の基本情報を生成し、橋梁諸元データを推移確率推計モジュール用、シミュレーションモジュール用、管理会計モジュール用として、それぞれアウトプットされる。また点検データモジュールは、定期的に実施された点検の結果の一覧を確認することができる。点検が実施された後に、橋梁部材ごとの点検結果の情報(点検日、橋梁名、部材、損傷形態、損傷度など)を追加・更新し、アセットマネジメントシステ

図-4 台帳システム(橋梁諸元モジュール画面)

ム、管理会計システム用のデータベースに反映する。補修工法データモジュールは、橋梁システムを構成する部材に対して適用される補修工法の基礎情報を格納する。橋梁部材や健全度毎に設定された補修工法に関する情報を確認することができる。補修工法データは、補修工法名、部材区分、部材番号、損傷形態、損傷度、単価、単価単位、特記事項をインプットできる。また、新たな補修工法が開発、導入される場合には、それらの新情報を任意に追加・削除・変更を本モジュールで行うことができる。

(3) アセットマネジメントシステム

アセットマネジメントシステムは、台帳システムから提供されるデータをもとに、マネジメントに有用な各種情報を導出する。まず、戦略レベルのマネジメントでは、グルーピングモジュールによって、管理する橋梁システム全体を、管理の戦略に従って分類する。ここで分類設定したグルーピングに従い、劣化確率の推計や劣化・補修過程のシミュレーションなどの分析が個別に実施される。分類したグルーピング毎に劣化推移確率の推計、最適補修政策の導出、劣化・補修過程のシミュレーションを実施する。

つぎに戦術レベルのマネジメントにおいて中期的に優先的に補修すべき対象部材を選定する。優先順位の決定の手法は、費用便益分析の他、路線の重要度など複数の決定ルールを任意に選択できる。

維持補修レベルでは、戦術レベルにおいて決定した優先順位(中期的に補修すべき箇所のリスト)に従って補修を実施した履歴を記録する。補修が完了した部材は、補修対象箇所リストから削除される。

a) 劣化推移確率推計モジュール

点検データモジュールから提供された点検データをインプット情報として、劣化推移確率を推計するモジュールである。推計モデルには、3.(1)で解説し

	OK	IV	III	II	I
OK	0.9048	0.0927	0.0023	0.0000	0.0000
IV	0.0	0.9512	0.0477	0.0010	0.0000
III	0.0	0.0	0.9574	0.0417	0.0007
II	0.0	0.0	0.0	0.9636	0.0363
I	0.0	0.0	0.0	0.0	1

図-5 推移確率推計モジュール画面

注) 本図は適用事例においてコンクリート床版のひび割れ損傷について点検データをもとに推計を行った結果を示す。

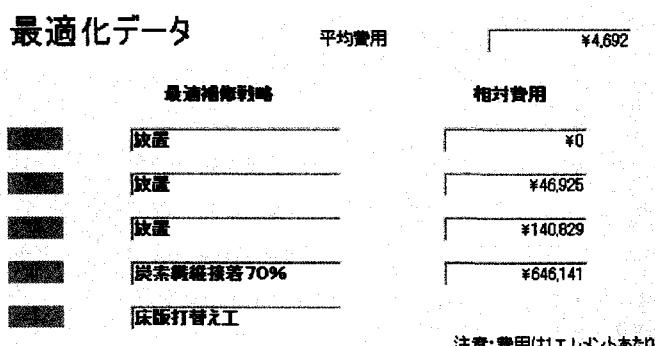


図-6 最適補修政策導出モジュール画面

注) 本図は適用事例においてコンクリート床版について平均費用最小化政策によって最適補修政策を求めた結果を示す。

たハザードモデルを用いる。推計に必要なデータは、点検調査年月日及び損傷度である。さらにハザード率を特定するために、劣化に影響を及ぼす説明変数を任意にインプットデータとして追加し推計することにより、モデルに影響を与えて説明変数の感度分析を行うことができる。劣化推移確率の推計は分類したグループ単位で推計することができる。このように推計した結果は、離散的な健全度間の推移確率行列として導出される。ただし、ハザードモデルによる劣化推移確率の推計は、ある程度の点検データの蓄積を前提としており、点検データが蓄積されていない部材については、本モデルによって推計することはできない¹⁸⁾。この場合の対処法として、当該部材の各健全度の期待寿命長から、マルコフ劣化推移確率を計算する機能を搭載した。既往の研究や当該部材の性能規定等から推測される各健全度の期待寿命長を外生的に与えることによって、健全度ハザード率 θ_i は、

$$\theta_i = \frac{1}{E[RMD_i]} \quad (36)$$

により求めることができる。このハザード率 θ_i を、式

管理会計表示対象									
<input checked="" type="radio"/> 全体	<input type="radio"/> グループ								
<input type="radio"/> フォルダ	<input type="radio"/> 個別機関								
会計年度選択 2005 <input type="button" value="変更"/>									
<input type="button" value="管理会計表示"/>									
資産残高表									
<table border="1"> <tr> <td>資産の部</td> <td>負債の部</td> </tr> <tr> <td>固定資産</td> <td>¥236,000</td> </tr> <tr> <td>維持補修引当金</td> <td>¥1,030,634,694</td> </tr> <tr> <td>総額</td> <td>¥253,694</td> </tr> </table>		資産の部	負債の部	固定資産	¥236,000	維持補修引当金	¥1,030,634,694	総額	¥253,694
資産の部	負債の部								
固定資産	¥236,000								
維持補修引当金	¥1,030,634,694								
総額	¥253,694								
<table border="1"> <tr> <td>資本の部</td> <td>利益の部</td> </tr> <tr> <td>維持補修引当購入金</td> <td>¥1,030,634,694</td> </tr> <tr> <td>不足維持補修引当購入金</td> <td>¥3,225,920,600</td> </tr> <tr> <td>総額</td> <td>¥3,225,920,600</td> </tr> </table>		資本の部	利益の部	維持補修引当購入金	¥1,030,634,694	不足維持補修引当購入金	¥3,225,920,600	総額	¥3,225,920,600
資本の部	利益の部								
維持補修引当購入金	¥1,030,634,694								
不足維持補修引当購入金	¥3,225,920,600								
総額	¥3,225,920,600								

図-7 管理会計モジュール画面

(9)に代入することによって、マルコフ推移確率行列を導出することができる

b) 最適補修政策導出モジュール

推計した推移確率行列と補修工法のデータから、橋梁部材単体の最適補修政策を導出するモジュールである(3. (2) 参照)。最適化手法として、平均費用最小化モデルと割引現在価値最小化モデルの2つの異なる評価手法を搭載し、任意に選択することができる。分析によって導出される情報は、双方の最適化手法による各健全度に対応した最適補修政策と、平均費用と相対費用またはライフサイクルコストである。

c) シミュレーションモジュール

導出した最適補修政策と推移確率行列をもとに、橋梁部材の劣化・補修過程をシミュレートし、各期の補修需要の予測、必要予算などを分析する。シミュレーションの条件として、シミュレーション期間(年)、年間予算の制約条件、モンテカルロ法により擬似乱数を発生させる回数などを設定する。シミュレーションの結果は、経年的な損傷度分布、各期の費用推移を部材毎あるいは全部材を合計した値を、グラフによって示すことにより視覚的に表現する。また予算制約によってシミュレーション期間内に補修を実施した数量及び補修が繰越された部材の数量を計算する。健全度がI(最も劣化が進展した状態)にもかかわらず予算制約によって補修が繰越された部材の数量を回数としてカウントし、アラート機能として表示する。また、費用便益分析によって補修の優先順位を決定し、優先的に補修をおこなう部材のリストを一覧として表示する。

(3) 管理会計システム

アセットマネジメントシステムと台帳システムによるデータ(主に橋梁諸元データと補修実施データ)より、橋梁の維持補修に必要な予算を自律的に取得するための管理会計情報を作成する。前年度末の個別橋梁会計データをインプットデータとして、当該会計年度における固定資産(再調達価額)、緑延維持補修引当

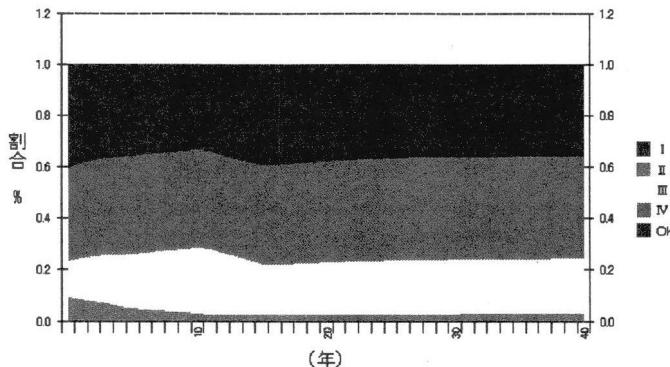


図-8 (A) 経年的損傷度分布図

注) 年間の制約予約を、2億円に設定してシミュレーションを行った場合の、当該部材の損傷度の経年変化を示す。

金、維持補修引当金繰入額、不足維持補修引当金繰入額、繰延維持補修引当金の情報を提供する。

5. 適用事例

本研究では国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所が所轄する橋梁システムのマネジメント問題として、BMS アプリケーションを適用した。同事務所が管理する国道 2 号バイパスは、延長が約 40km からなり、供用後約 30 年が経過しており、約 230 橋の橋梁を有するものである。本路線は、日交通量が 10 万台を超え、大型車両も多く混入することから、繰返し加重による床版や鋼桁の疲労損傷などが今後加速することが予測される。本研究では、同事務所が管理する国道 2 号バイパスの橋梁を対象としたアセットマネジメントシステムの適用事例について述べる。ここでは、同事務所の管理方法を踏まえた上で、複数部材で構成される橋梁システムのうち、コンクリート床版とコンクリート桁のひび割れ損傷、鋼桁の塗装劣化の 3 部材についての分析結果を示す。

同事務所では橋梁の点検が定期的に実施されており、その点検結果はデータベースとして蓄積されている。一例として、コンクリート床版のひび割れ損傷についての過去の点検データから、推移確率を推計した結果を図-5 に示す(推移確率推計モジュール)。さらに、コンクリート床版のひび割れ損傷についての平均費用最小化モデルにより導出した最適補修政策を図-6 に示す(最適補修政策導出モジュール)。同図には、1 部材あたりの平均費用及び健全度毎に定義された相対費用を併記している。これらの条件のもと、3 部材に対しての劣化・補修過程のシミュレーションを実施した(シミュレーションモジュール)。尚、以下の結果はシミュレーション期間を 40 年とし、モンテカルロ法により 20 回の試行を行ったものである。シミュレーション回数は任意に設定できるが、試行の結果シミュレ

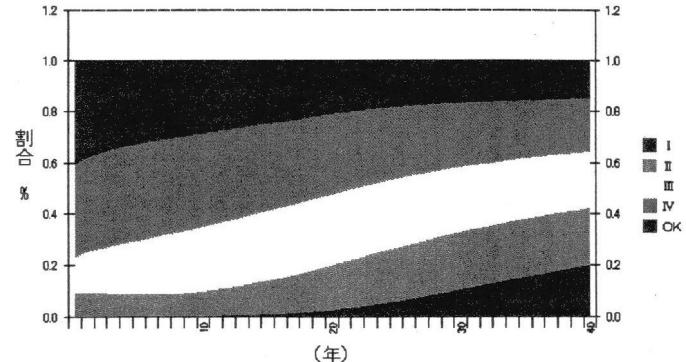


図-8 (B) 経年的損傷度分布図

注) 年間の制約予約を、1.75 億円に設定してシミュレーションを行った場合の、当該部材の損傷度の経年変化を示す。

ーション回数 20 回程度で安定した結果が得られている。まず、毎年の予算は 2 億円ずつ計上されるものと仮定してシミュレーションを行った時の、経年的損傷度分布図を図-8 (A) に示した。これによると、最低の劣化状態である I の状態は長期にわたり出現することはなく、長期にわたり当該部材が健全に維持されるという結果が示されている。一方、毎年の予算が 1.75 億円ずつ計上されるものと仮定してシミュレーションを行った結果を図-8 (B) に示した。これによると、最低の劣化状態である I の状態が次第に出現し始め、当該部材が計上される予算では長期にわたる当該部材の健全な維持補修の難しいことが示唆されている。以上の要領で幾度かシミュレーションを行い、それらの結果を分析することにより、当該部材は補修費として 1.85 億円から 2 億円の間で管理されるのが望ましいことが考察される。このような手順にて、アセットマネジメントシステム内の戦略レベルに位置する各モジュール(図-2 参照)により、予算管理水準をはじめとした長期的なマネジメント案が策定される。

次に、長期的なマネジメント案と当該部材の現在の点検結果を考慮した上で、中期的な補修リストを作成する(優先順位モジュール)。現在は 3. (3) で述べたように B/C を用いて優先順位が自動的に決定される。その上で管理者により、現実のマネジメント手法と照らし合わせて補修リストの優先順位を調整する。

さらに、維持補修業務が実施されれば、その実施状況はデータベースに記載され(補修記載モジュール)、補修リストの更新が行われ、効率的な維持補修業務の実行を支援することが可能となっている。

また、会計年度が終了する毎に、アセットマネジメントシステムや台帳システムにより蓄積されたデータを反映し、管理会計が構築される(管理会計モジュール)。当該部材のストック価値や補修需要の積み残しを定量的に把握することが可能となり、維持補修計画の見直しを行う際の指

標となる。

上記の例に示したマネジメントサイクルにより当該部材の長期的な管理を支援することができるシステムとなっている。尚、同事務所の台帳システムが更新された時には、マネジメントサイクル全体にわたり結果を見直すことが必要となることを留意されたい。

6. おわりに

本研究では橋梁維持管理問題に関して効率的なマネジメントを行うためのBMSアプリケーションの開発を行い、国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所が所轄する道路橋梁に対してその有用性を検証した。検証の結果、本アプリケーションが現場の実務レベルにおいての橋梁マネジメントから上位の予算管理に至るまでに非常に有用なツールとなり得ることが検証された。本研究で開発したBMSの有用性をさらに高めるためにはいくつかの課題が残されている。まず第1に、現実の橋梁点検業務においては目視点検により健全度を判定する。その場合、検査された健全度に判定誤差が含まれることは避けられない。この種の判定誤差を克服できる推計システムの開発が必要である。第2に、今後、定期的な検査を重ねることにより検査データが蓄積される。その際に、新しい検査データに基づいて、劣化推移確率を表現するハザードモデルのパラメータをペイズ更新するシステムの開発が必要となる。第3に、橋梁システムは多数の橋梁、部材によって構成されるものであり、個々の橋梁間や部材間の劣化・補修の関係を無視できないケースも少なくない。このように、複数橋梁、部材の補修のタイミングを互いに調整するようなミクロ補修同期化政策を求めるシステムの開発が必要である。第4に、本研究で使用しているデータは電子データに置き換えた台帳システムとを考えることができる。橋梁は道路ネットワーク上に数多く点在している施設であり、道路のネットワークを考慮した空間的な分析を必要とするものである。これらの橋梁システムを効率的に管理するためには、橋梁が使用されている道路の周辺環境などを空間的に把握したい。そのためには、GISにより管理情報を空間的な関係によりリンクした情報を元に総合的に把握する必要がある。このようなユーザーインターフェースを向上させることにより、本アプリケーションが橋梁マネジメントの有用なツールとなり得るものである。

謝辞：本研究の遂行においては、新都市社会技術融合創造研究会（代表：大西有三教授）により検討を行っており研究会のメンバーからのご支援を賜っている。また、適用事例として国土交通省近畿地方整備局姫路

河川国道事務所のご支援を賜っている。ここに感謝の意を表します。

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) 宮本文穂、河村圭、中村秀明、山本秀夫: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開発、土木学会論文集, No.644/IV-46, pp.67-86, 2000.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 貝戸清之、阿部允、公門和樹、藤野陽三:ストック効果を考慮したトータルコスト最小化に基づく橋梁マネジメント、構造工学論文集, Vol.47A, pp.991-998, 2001.
- 6) 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(印刷中).
- 7) 保田敬一、小林潔司:BMSにおける点検結果と状態推移確率がLCCに及ぼす影響、建設マネジメント論文集, Vol.11, pp.111-122, 2004.
- 8) 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.
- 9) Heyman, D.P. and Sobel, M.J. (eds.): *Stochastic Models, Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol.2, North-Holland, 1990.
- 10) White, D.J.: *Markov Decision Process*, Wiley, 1992.
- 11) Puterman, M.L.: *Markov Decision Process*, Wiley, 1994.
- 12) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research*, Part B, Vol.27B, pp.425-438, 1993.
- 13) Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol.28, pp.55-62, 1994.
- 14) Durango, P. and Madanat, S.: Optimal maintenance and repair policies for infrastructure facilities under uncertain deterioration rates: An adaptive control approach, *it Transportation Research*, Part A, Vol. 36, pp.763-778, 2002.
- 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) 慶道充、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) 織田澤利守、石原克治、小林潔司、近藤佳史:経済的寿命を考慮した最適補修政策、土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.169-184, 2004.
- 18) 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定、土木学会論文集(印刷中).
- 19) 江尻良、西口志浩、小林潔司:インフラストラクチャ会計:課題と展望、土木学会論文集, No.770/VI-64, pp.15-32, 2004.
- 20) 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, No.793/VI-68, pp.59-71, 2005.

(2005.5.20 受付)