

## 論文 メンテナンスプラン最適化支援システムの開発と J-BMS への実装

宮本 文穂\*1

**要旨：**既存橋梁の維持管理計画策定においては、対象橋梁の健全度、余寿命などの評価結果に基づいたライフサイクルコスト(LCC)の最小化が必要となる。本論文では、複数の橋梁を対象としたメンテナンスプラン最適化支援システム(MPOS)の開発を行い、これをJ-BMSへ実装することによって実用性を検討する。MPOSでは、(a)将来の更新費用の集中を避けるため、健全度診断結果に基づく補修、補強のみならず、更新を考慮した維持管理計画の立案、(b)各橋梁の現実的な供用予定年数を算出するための更新費用平滑化機能の付与、(c)橋梁管理者が予算条件や工事の施工条件を考慮して、各年度の補修、補強予算を設定できるようにした。

**キーワード：**橋梁維持管理支援システム(J-BMS), RLCC, メンテナンスプラン最適化, 平滑化, 劣化曲線

## 1. はじめに

橋梁維持管理支援システム(J-BMS)は<sup>1)</sup>、対象橋梁の諸元データや点検データを効率的に管理する橋梁維持管理データベースシステム(J-BMS DB)、各種点検データに基づいて劣化診断を行う橋梁診断エキスパートシステム(BREX)および対象橋梁ごとに最適維持管理計画の立案を行うメンテナンスプラン最適化支援システム(MPOS)の3種類のサブシステムから構成されている<sup>1)</sup>。J-BMS内では、以下の手順で結果出力が実行される：(a) J-BMS DBから橋齢、橋格などの諸元データ、ひび割れ、交通量などの点検データおよび補修、補強データを抽出する、(b) 抽出されたデータから対象橋梁の性能評価や損傷度の診断を行う。性能評価ではBREXを利用し、主桁耐久性や床版耐久性などの各項目において健全度0~100点で診断する、(c) 診断結果から劣化曲線を利用して対象橋梁の劣化予測を行う。劣化予測はMPOSを用いて行う、(d) 劣化予測結果から、対策の費用やその効果を検証する、(e) 検証結果から、最適な工法、時期およびコストを提案し、最適維持管理計画の提示を行う。

本研究では、複数橋梁を対象としたメンテナンスプラン最適化支援システムの開発を行い、これをJ-BMSへ実装することによって実用性を検討したものである。その際、本システムでは、(a)将来の更新費用の集中を避けるため、健全度診断結果に基づく補修、補強のみならず、更新を考慮した維持管理計画の立案を可能とする、(b)各橋梁の現実的な供用予定年数を算出するための更新費用平滑化機能を付与する、(c)橋梁管理者が設定できる予算条件や工事の施工条件を考慮して、各年度の補修、補強予算を満足する維持管理計画を策定できるとともに、システムユーザーによる橋梁ごとの補修、補強対策年の設定を可能とする、などを新たな機能として追加した。このような追加機能を有するMPOSを実装したJ-BMSに山口県が管理する橋梁データ<sup>2),3)</sup>を入力して種々の維持管理計画を策定、比較し、その有用性の検証を行った。

## 2. 最適化支援システムの概要と最適化手順

## 2.1 システムの概要

橋梁維持管理支援システム(J-BMS)では、最初にユーザが橋梁ごとに予定供用年数を設定し、各橋梁が設定された予定供用年数を満足するように維持管理計画を立案していた。しかし、山口県を例にとると、全体の約57%にあたる橋梁が1950年代から1970年代の間に集中的に架設されてきたため、例えば、橋梁の予定供用年数を100年と設定して維持管理計画を立案する場合においては、やはり2050年代から2070年代にかけて集中的に既存橋梁を更新する計画が立案されていた。そこで、本システム(MPOS)では、図-1に示す維持管理計画立案のフローに従って、更新費用を考慮した橋梁維持管理計画の策定を行う。提案するフローは大きく2つの手順から構成されている：①まず、既存橋梁の更新計画を策定する、②次いで、策定された更新計画を基に、各年の補修・補強予算条件や施工条件を満足するような合理的で効果的な維持管理計画を策定するものである。以下、図-1中の各項目(番号)に従って説明する：(1)長寿命化；既存橋梁ごとの付与条件を考慮して、最も橋梁の供用年数が長くなる維持管理計画を算出する、(2)更新費用平滑化；既存橋梁の供用年数が最も長くなる維持管理計画算出結果をもとに、ユーザが更新計画期間を設定し、その期間内で各年の更新費用を平滑化させる。これにより、更新のための予算が集中することを回避することが可能となる。また、各既存橋梁の予定供用年数が決定される。次に、この予定供用年数を満足する既存橋梁の維持管理計画を策定する。すなわち、(3)RLCC最小化；予定供用年数までに必要となる補修・補強費用(Remain Life Cycle Cost: RLCCと定義)が最小となる維持管理計画を立案する。このとき、立案された維持管理計画では、補修・補強に必要な費用が年度ごとにばらつく。そこで、本システムでは、更新費用と同様に、(4)補修・補強費用平滑化；補修・補強費用についても平滑化を行うか、また

\*1 山口大学名誉教授 (スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL) 客員教授) 工博 (正会員)

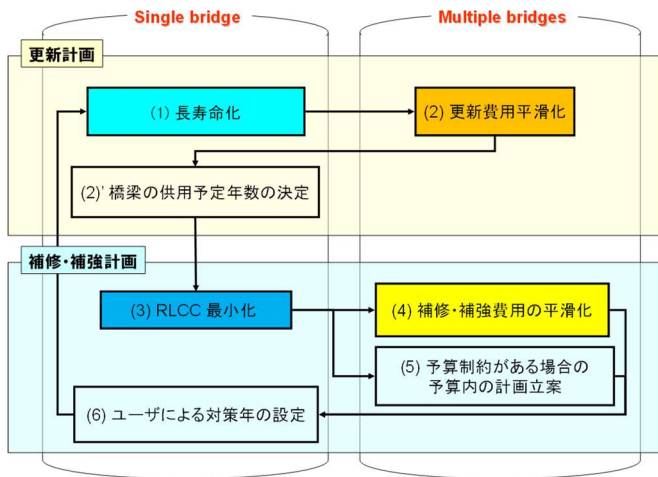
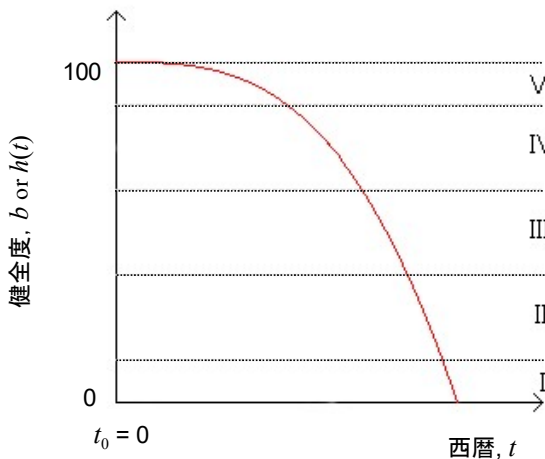


図-1 維持管理計画立案のフロー

は(5) 予算制約がある場合の予算内の計画立案；各年度の予算上限額を設定し、その予算内で計画を立案する。このように、補修・補強費用を平滑化することにより、橋梁を維持管理するために必要な予算規模を大まかに捉えることが可能となる。しかし、厳しい財政状況においては、補修・補強に必要な予算を確保できない場合が想定される。そこで本システムでは、(6) ユーザによる対策年の設定；各年度の予算上限をユーザが入力することによって、予算制約を考慮した実施可能な維持管理計画を策定するものである。

## 2.2 橋梁維持管理計画を策定するための条件設定

ここでは、橋梁ごと(単一橋)の橋梁維持管理計画を策定するために必要な条件の設定について述べる。



状態区分と健全度の対応表

状態区分	健全度	説明
V	87.5以上100.0以下	材料劣化の程度：小
IV	62.5以上87.5未満	材料劣化の程度：中
III	37.5以上62.5未満	材料劣化の程度：大
II	12.5以上37.5未満	耐荷力に影響：小
I	0.0以上12.5未満	耐荷力に影響：大

図-2 劣化予測曲線と状態区分および健全度の対応

## (1) 橋梁の状態区分

本研究では、既存橋梁の劣化の程度を「健全度」を指標として表し、図-2に示すように5段階に分けたり。ここで、区分Vを「材料劣化の程度：小」とし、区分IVを「材料劣化の程度：中」、区分IIIを「材料劣化の程度：大」、区分IIを「耐荷力に影響：小」、区分Iを「耐荷力に影響：大」と、それぞれ定義した。

## (2) 劣化曲線

既存橋梁の材料劣化の程度を表す指標である「健全度」を維持管理計画立案の指標とした。なお、健全度(縦軸)  $h(t)_n$  は、0~100の値をとり、その時間的変化(劣化予測曲線)は次式で表されるものとした。

$$h(t)_n = b_n - a_n(t - t_n)^c \quad (1)$$

ここで、 $t$ は西暦(年)、 $n$ は $t$ 年までに行った対策回数、 $a_n$ は $n$ 回目の対策を実施した時点での予想劣化曲線の傾き、 $b_n$ は $n$ 回目の対策を実施した時点での既存橋梁の「健全度」を表し、対策を行うと対策効果に従って変化する。架設年は、 $t_n=0 (=t_0)$ とする。また、 $c$ は劣化予測式のべき乗の次数である。

式(1)で表される劣化予測曲線は、従ってパラメータ $a$ 、 $b$ 、 $c$ を調整することにより任意に変化させることが可能である。なお、架設年の健全度 $b_0$ および劣化曲線の次数 $c$ は、本システムではユーザが任意で設定でき、ここでの初期値として、 $b_0=100$ 、 $c=3$ を用いるものとする。

劣化予測曲線の傾き $a_n$ は次式により点検時の健全度 $h(t)_n$ を用いて算出される。

$$a_n = \frac{(b_n - h(t)_n)}{(t - t_n)^c} \quad (2)$$

ここで、パラメータ $a_n$ 、 $b_n$ は、補修・補強などの対策を行うごとに次式を用いて更新するものとする。

$$b_n = h(t)_n = h(t)_{n-1} + R \cdot \rho \quad (3)$$

$$R = (h(t)_{n-1} - h(t)_{n-2}) \quad (4)$$

$$a_n = a_0 \cdot \eta^n \quad (5)$$

図-3に、劣化予測曲線に及ぼす対策効果のイメージ図を示す。ここで、上式(3)、(4)および(5)の記号は図-3中のもので対応している。なお、 $\rho$ は、健全度の回復量を減少させるパラメータである。また、 $a_0$ は初期の劣化曲線の傾きであり、 $\eta$ は劣化速度を速めるパラメータである。劣化予測曲線の設定では、対策効果の設定手法が大きな課題の一つである。本システムでは、劣化予測曲線<sup>1)</sup>の傾き $a_n$ は初期の劣化予測曲線の傾き $a_0$ に対して $\eta^n$ を乗じるものとした。今後の各種データの蓄積により、ユーザがパラメータ $\eta$ および $\rho$ を任意に設定可能とした。なお、表-1に示す対策回数の上限(右端欄)に従って対策を実施した場合には、既存橋梁の最大寿命が150年

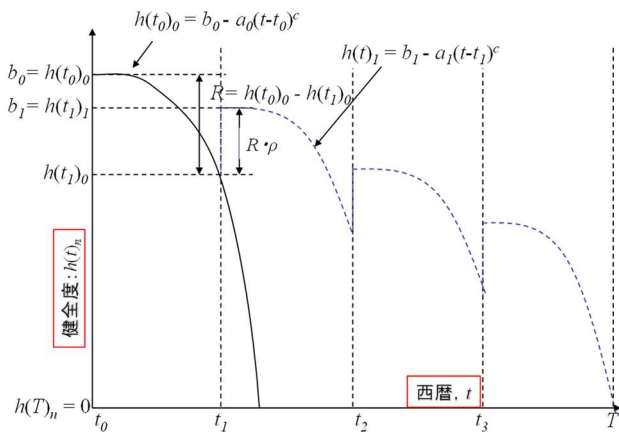


図-3 劣化予測曲線に及ぼす対策効果のイメージ図

程度となるように $\eta=2, \rho=0.9$ を初期値として設定した。

### 2.3 補修・補強費用と対策回数

実際の既存橋梁に対する維持管理では、橋梁の劣化状態に応じて対策工法が変化することが考えられる。そこで、本研究では、それぞれの状態区分に対して表-1に示される対策工法、対策費用、面積および対策回数の上限を設定した。なお、本システムでは、対策費用、面積および対策回数の上限はユーザが設定可能とし、その初期値として表-1に示している対策費用および対策回数の上限を用いた。ここで、区分Ⅰ～Ⅲの費用(単価)は、実際の補修事例をもとに設定した。また、区分Ⅳ、Ⅴの場合の費用(単価)については既存橋梁の損傷度が軽微であり、補修を行った事例のデータを入手することができなかった。しかしながら、これまでのように劣化・損傷が顕在化してから補修・補強を行うのではなく、今後既存橋梁を経済的かつ効率的に維持していくためには、劣化・損傷が軽微なうちに予防保全的に補修を行うことも考えられる。このため、区分Ⅳ、Ⅴにも対策工法を設定した。表-1は、今後実際の補修・補強事例などをもとにより現実的な対策または値に修正していく必要がある。

### 2.4 維持補修計画策定のための問題設定

#### (1) 長寿命化

前述図-1に示した「(1)長寿命化」では、既存橋梁

表-1 対策費用(単価)および対策回数の上限(初期設定)

区分	状態	対策工法	実施面積 <sup>注1)</sup>	単価(千円/m <sup>2</sup> )	対策上限 <sup>注2)</sup>
Ⅴ	材料劣化の程度小	なし	-	-	-
		防水(表面被覆工)	5%	16.0	1回
Ⅳ	材料劣化の程度中	なし	-	-	-
		補修(ひび割れ注入工)	10%	16.0	1回
Ⅲ	材料劣化の程度大	なし	-	-	-
		補修(断面修復工)	20%	45.7	1回
Ⅱ	耐荷力に影響小	なし(更新待ち)	-	-	-
		補修(断面修復+炭素繊維他)	50%	130.5	1回
Ⅰ	耐荷力に影響大	更新	100%	1280.0	1回

注1: 橋面積に対する対策実施の割合(橋面積=橋長×幅員)

注2: 各状態区分で対策可能な回数

の寿命を最大限延長する計画を立案することを目的としている。このための目的関数、 $F_1$ は次式で表すことができる。

[目的関数]

$$F_1 = Life \rightarrow \max \quad (6)$$

ここで、 $Life$ は既存橋梁の寿命(年)を表し、次式により求められる。

$$Life = t_L - t_0 \quad (7)$$

ここで、 $t$ は西暦を表し、 $t_0$ は架設時の西暦、 $t_L$ は橋梁寿命年(西暦)である。

[制約条件]

$$\sum_{t=t_0}^{t_L} x_{t,r} \leq n_{\max,r} \quad (8)$$

$$x_{t,r} = \begin{cases} 0 & t\text{年に状態区分}r\text{での対策を行わない場合} \\ 1 & t\text{年に状態区分}r\text{での対策を行う場合} \end{cases}$$

ここで、 $x_t$ を $t$ 年における対策実施の有無とし、 $x_{t,r}$ を状態区分 $r$ における $t$ 年の対策実施の有無、 $n_{\max,r}$ を状態区分 $r$ における $t$ 年の対策回数の上限とする。ただし、既存橋梁が寿命を迎える年( $t_L$ )では、健全度 $h(t_L)=0$ となるものとする。また、健全度 $h(t)$ は、前出式(1)で算出されるものとする。

#### (2) 更新費用平滑化

本研究では、健全度と状態区分を対応させ、状態区分ごとに対策回数の上限を定め、その回数を上回らないといった制約条件を設けた。このため、維持管理計画策定結果を一意に決定するため、既存橋梁に優先順位を設けて以下の条件式を満たすように既存橋梁の優先順位の高いものを優先的に長寿命化することとした。

$$C_t \leq B_t \quad (9)$$

ここで、 $C_t$ を $t$ 年における更新費用、 $B_t$ を $t$ 年の更新予算とする。ただし、西暦 $t$ 年は、 $t \in [t_s, t_E]$ の範囲をとるものとする。ここで、ユーザが設定した平滑化対象期間の開始年を $t_s$ 、終了年を $t_E$ とする。また、更新予算 $B_t$ は、平滑化対象期間内の総更新費用をもとに設定される。

#### (3) RLCC最小化

RLCC最小化の目的は、個々の既存橋梁に対して供用予定終了年まで既存橋梁の性能を維持でき、その費用が最小となる計画を求めることである。このため、目的関数は計画開始年から供用予定終了年までの補修・補強費用(RLCC)の最小化であり、制約条件は、供用予定終了年まで橋梁の性能を維持することである。これらを式で表すと以下のようになる。

[目的関数] 
$$F_3 = \sum_{t=t_s}^{t_E} c_t \rightarrow \min \quad (10)$$

[制約条件] 
$$h(t) < level \quad (11)$$

ここで、 $t$ を西暦(ただし、 $t=t_s \sim t_E$ 、 $t_s$ は計画開始年、 $t_E$ は供用予定終了年である)、 $h(t)$ を西暦 $t$ 年における既存

橋梁の健全度、 $c_t$ は西暦 $t$ 年における既存橋梁の補修・補強費用を示す。また、 $level$ は管理レベルを表す。既存橋梁の性能が著しく低下するのを防ぐため、既存橋梁の管理レベルを設け、健全度が所定の管理レベルを下回らないように既存橋梁を管理するものとした。このため、式(11)中の管理レベル( $level$ )を健全度 $h(t)=0$ の場合とし、健全度 $h(t)$ が0以下にならないように既存橋梁を管理するものとした。また、対策費用 $c_t$ は表-1に示される対策費用を用いるものとする。

#### (4) 予算内の計画立案

既存橋梁の性能保持に必要な補修・補強に対する年度予算を低く設定すると、十分な補修・補強が実施できず、供用予定終了年まで既存橋梁を維持することができないため更新が必要となる既存橋梁が出てくる。しかしながら、問題設定にあたり、単純に目的関数を可能な限り多くの既存橋梁が供用予定年数を満たすように設定したのでは、以下のような問題点が生じる：

1. 多額の補修・補強の費用のかかる大規模な橋梁の補修・補強が行われず、補修・補強費用が少額の小規模橋梁の補修・補強が優先されてしまう恐れがある。
2. 本システムの実用化といった観点から、同じ制約条件でありながら計画を立案するたびに個別橋梁の更新時期が変わるようなシステムでは信頼性に欠ける。

これらの問題を解決するため、既存橋梁に仮に優先順位を設け、以下の条件式を満足し、かつ優先順位の高い既存橋梁の対策を優先的に選択し維持管理計画を立案するものとした。

$$C_t \leq B_t \quad (12)$$

ここで、 $C_t$ を $t$ 年における補修・補強費用、 $B_t$ を $t$ 年の補修・補強予算とする。

制約条件における $t$ 年の補修・補強予算の上限 $B_t$ は、次式を適用することで算出する。

$$B_t = B_{t_0} \cdot (1 + \gamma)^{t-t_0} + \alpha \quad (13)$$

$$B_{t_0} = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_E} C_t}{\sum_{t=t_0}^{t_E} (1 + \gamma)^{t-t_0}} \quad (14)$$

ここで、 $\gamma$ ：年度予算増加率、 $\alpha$ ：年度予算への上乗せ可能費用である。

#### 2.4.5 ユーザによる対策年の設定

この機能は、実際に既存橋梁の補修・補強工事を実施する場合に、工事に伴い発生する通行制限などの様々な問題から、工事を実施する年度をユーザが設定することを可能にしたものである。ここでは、ユーザによる対策年の設定を制約条件として、図-1に示した維持管理計画立案のフローにより、「ユーザによる対策年の設定」を

考慮した計画を立案する。これを式で表したものが次式であり、ここで、 $t$ 年における対策実施の有無 $x_t$ は、 $t$ 年に対策を行う場合「1」をとり、 $t$ 年に対策を行わない場合「0」をとる。この「0」、「1」をユーザが任意に設定できることになる。

$$x_t = \begin{cases} 0 & t\text{年に対策を行わない場合} \\ 1 & t\text{年に対策を行う場合} \end{cases} \quad (15)$$

### 3. J-BMS への実装と実橋への適用

ここでは、本システム(MPOS)を実際に山口県が管理する既存橋梁<sup>2),3),4)</sup>に適用し、その実用性を検証する。なお、図-4に、MPOSの初期設定画面の一例を示す。

#### 3.1 対象橋梁

本研究では、山口県宇部土木建築事務所が管理する既存橋梁の内、128橋の点検データ(検証用)に対して実際に本システムに入力し、種々の維持管理計画を策定した。

#### 3.2 維持管理計画策定結果

128橋の点検データをシステムに適用し、図-1の維持管理計画立案フローに従って維持管理計画を策定した。

##### 3.2.1 長寿命化

最初に、前出表-1に示す条件を設定して、既存橋梁ごとの寿命が最大となる維持管理計画を策定する。図-5には、既存橋梁ごとの寿命を最大化したときの更新費用の算定例を示す。寿命を最大化したことにより、更新費用が2095年から2120年にかけて集中的に必要となることがわかる。これは、適用した既存橋梁の規模が同一でまた架設年代がほぼ同一時期であることが原因と考えられる。

##### 3.2.2 更新費用平滑化

上述のように長寿命化した維持管理計画策定で得られた結果では、更新費用が短期間に非常に集中して発生することになる。しかし、更新費用を短期間に確保することは将来的にも非常に困難と予想される。その結果、更新が実現しないため、通行不可能な既存橋梁により道路利用者の利便性が落ちることになる。そのような状況



図-4 MPOSの初期設定画面例(主析劣化予測曲線)

を回避するために、集中している更新費用を平滑化することで、実施可能な更新計画を立案するとともに、既存橋梁ごとの予定供用年数を算出した。その結果の例を図-6に示す。図-5と比較すると、2095年から2120年の期間に集中していた更新費用が、2027年から2120年の期間に分散されているのがわかる。また、各年度での更新費用も大規模橋以外は100,000千円前後に抑制されている。

### 3.2.3 RLCC最小化

上述の更新費用平滑化により、既存橋梁ごとの予定供用年数が算出されることから、既存橋梁ごとに予定供用年数を満足する補修・補強費用 (RLCC) を最小とする維持管理計画を策定する。その結果の例を図-7に示す。

### 3.2.4 予算制約内の計画立案

上述のRLCC最小化により得られた維持管理計画を実施するためには、予算の確保が必要である。しかし、最近の橋梁維持管理をめぐる予算確保は非常に厳しいため、得られた維持管理計画通りに実施するために必要な予算が確保できない可能性がある。このため、年度ごとの予算に上限を設け、その条件を満足するような補修・補強計画を立案する必要がある。本研究では、年度ごとの予算の上限を30,000千円とした場合における補修・補強予算算定例を図-8に示す。これを図-7と比較すると、2012年のピークが30,000千円以内に抑制され、2007年から2011年までの予算が増加していることがわかる。これは、RLCC最小化で得られた維持管理計画では、2012年に対策を行うべき既存橋梁が、予算の上限が設定されたため

に前倒しされたことが原因となっている。本システムでは、予算制約により、すべての既存橋梁に対して計画どおりに対策を行えない場合には、どの橋梁を計画どおりに対策を行うかを決定するために、橋梁に優先度を設定した。優先度は「橋齢の古い橋梁を優先する」、「橋長が長い橋梁を優先する」または「余寿命が長い橋梁を優先する」といった項目により設定される。本研究では、「供用予定年数が長い橋梁」を優先し、計画どおり対策を行うように設定した。その結果を表-2に示す。これによると、供用予定年数が136年ともっとも長いR橋から、Q橋、P橋と供用予定年数の長い橋梁の対策が、計画どおり2012年に行われるよう計画が立案されている。そして、A橋やB橋といった供用予定年数の短い橋梁の対策が、2007年に変更されていることがわかる。これにより、予算制約内の維持管理計画を立案することが可能となった。

以上のような各種機能のシステムでの出力画面の一例を、RLCC最小化に関して示したものが図-9である。

## 4. 結論

本研究で得られた主な成果を以下にまとめる：

1) 新たに開発した「橋梁維持管理計画策定支援システム」は、既存橋梁の更新計画を作成する機能を有しており、この機能により、これまでシステムのユーザが設定していた既存橋梁ごとの予定供用年数を合理的に算定することを可能とした。

2) 開発されたシステムは、ユーザが設定する各年度

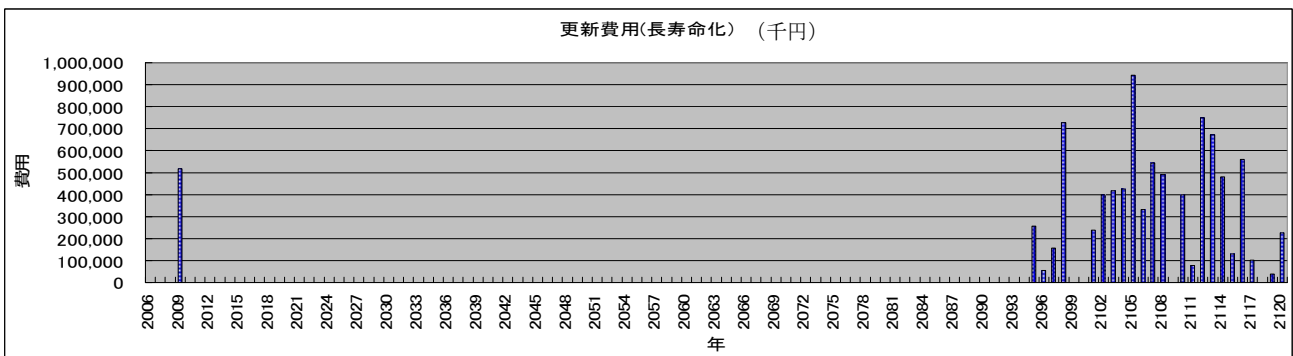


図-5 既存橋梁ごとの寿命が最大化された場合の更新費用の算出例

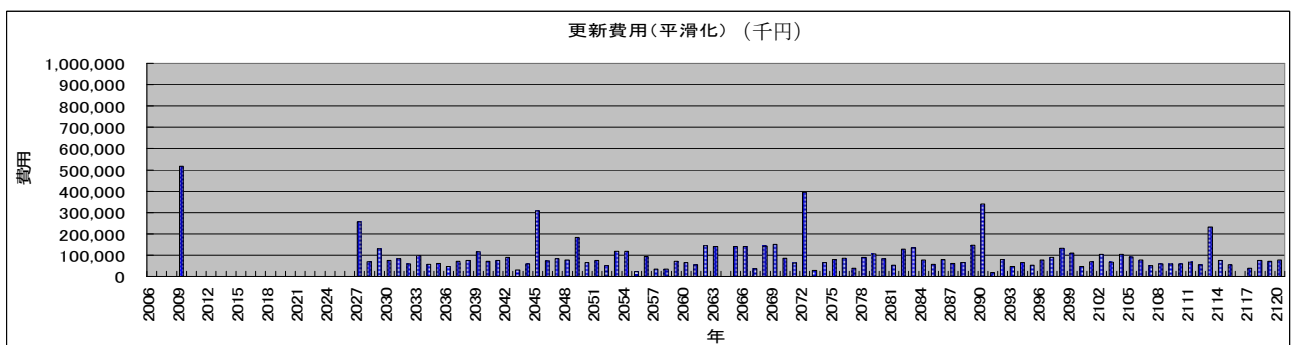


図-6 平滑化された更新費用の算出例

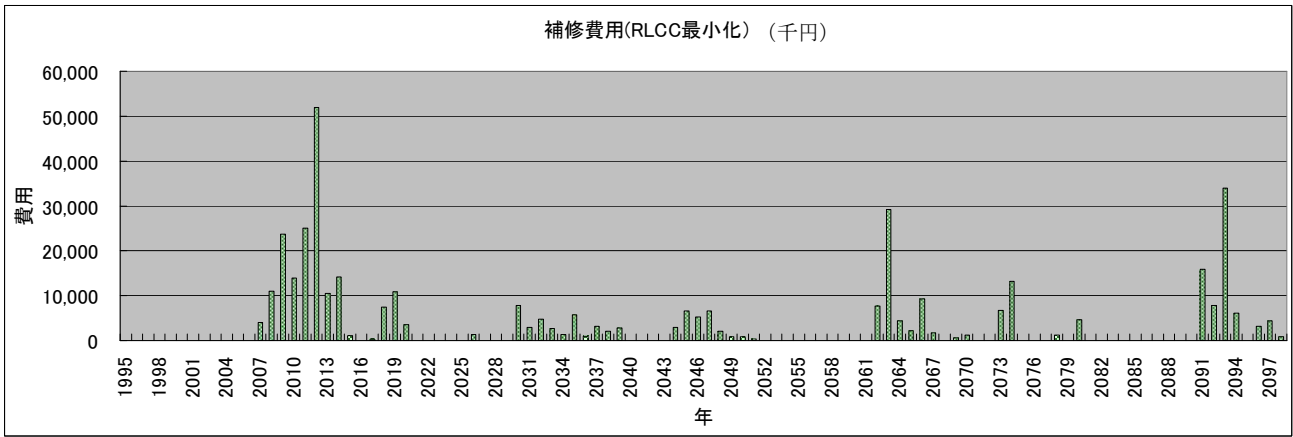


図-7 最小化された補修・補強費用の算出例

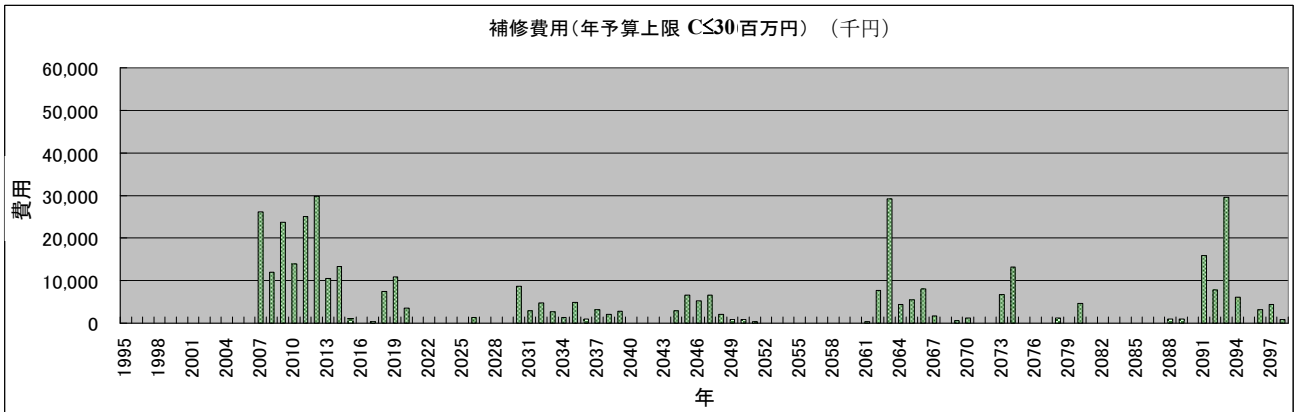


図-8 予算上限を考慮した維持管理計画策定における補修・補強費用の算出例

表-2 予算制約が考慮された結果、対策年が前倒しされた既存橋梁一覧

橋梁名	架設年	橋長(m)	2012年の対策費用(万円)	更新予定年	供用予定年数		予算制約の場合の対策年
					年	順位	
A	1955	2.5	136	2030	75	17	2007
B	1955	3.6	236	2030	75	17	2007
C	1955	4.09	207	2031	76	15	2007
D	1955	4.5	295	2931	76	15	2007
E	1955	5.09	353	2032	77	14	2007
F	1955	5.3	577	2033	78	13	2012
G	1955	5.4	341	2034	79	12	2007
H	1955	5.5	365	2035	80	11	2007
I	1955	6.9	282	2036	81	10	2007
J	1955	6.9	426	2037	82	9	2012
K	1955	7.0	459	2038	83	8	2012
L	1955	13.0	706	2039	84	7	2012
M	1961	4.2	63	2067	106	6	2012
N	1961	10.0	229	2068	107	5	2012
O	1961	10.4	240	2069	108	4	2012
P	1969	9.0	108	2100	131	3	2012
Q	1969	8.0	74	2103	134	2	2012
R	1969	11.0	101	2105	136	1	2012

の予算制約を満足する維持管理計画を立案することを可能とした。また、より実用的なシステムとするため、実際の補修・補強工事を実施する場合に発生する通行制限などの問題を考慮し、ユーザが既存橋梁の対策年を設定することを可能とした。

3) 山口県が管理する既存橋梁の点検データを入力して維持管理計画を策定した結果、予算制約のもとでは、既存橋梁ごとの優先順位が考慮された橋梁維持管理計画を策定することが可能となった。

参考文献

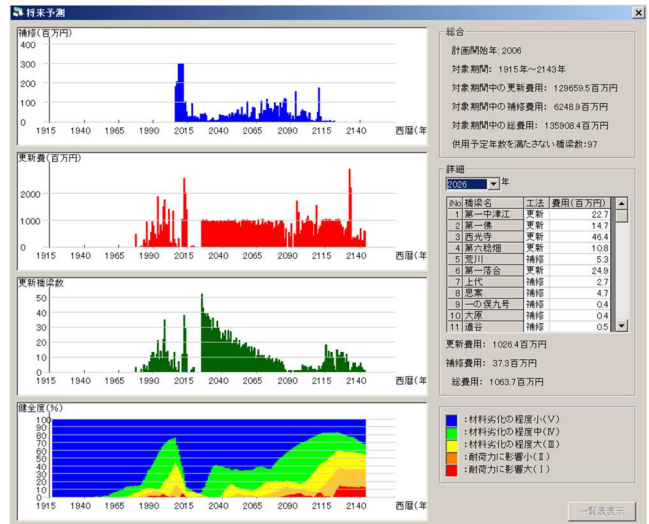


図-9 RLCC 最小化機能での将来予測出力画面例

- 1) 宮本文穂・浅野寛元・江本久雄・勝島龍郎：RC 橋維持管理支援システム(J-BMS RC 版)の開発と実橋への適用，土木学会論文集 F4,71(3), 105-124, 2015.
- 2) 山口県土木建築部・山口大学工学部：J-BMS のための点検マニュアルとその利用，2003 年 8 月版，2003.
- 3) 宮本文穂・伊藤大恭・一木秋浩：橋梁維持管理データベースシステム(J-BMS DB)の開発，社会基盤マネジメントシリーズ No.11, RCES, Yamaguchi Univ., 2009.
- 4) <https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/soshiki/128/23531.html>