

## 橋梁の最適維持管理計画に関する一考察

### Application of optimization to bridge maintenance system

交通事業本部 交通第2部  
北海学園大学 工学研究科  
北海学園大学 工学部 社会環境工学科

木内 順司<sup>1)</sup>  
齋藤 善之<sup>2)</sup>  
杉本 博之



1)



2)

#### 概要(Abstract)

橋梁の維持管理行政は、LCC 最小化の概念のもとに予防保全が基本である。部材補修が前提であるが、それでは無駄が多いので、パソコンから出力された部材の補修順序を参考にして、管理者は手作業で実際の補修順を決めているのが実情である。そこに最適化手法を利用して、より合理的な支援システムを構築するのが本研究の目的の一つである。また、現在は点検結果から得られる部材種ごとの劣化曲線を用いて、種々の計算がなされているが、実際はバラツキが多く、このばらつきを考慮する維持補修計画の策定がもう一つの重要な課題であると考えられる。そこで、本研究では、このばらつきを考慮した維持補修計画のための基礎的な考察を加えることも試みている。

#### 1. はじめに

高度経済成長期(1957年～1973年)及びその後四半世紀にわたり、俗にいう右肩上がりの状態で社会基盤整備のため多くの土木構造物が造られた。それらの構造物の内いくつかは、すでに耐用年数を迎えつつあり、10年後にはその数が急速に増加することはすでに指摘されている。一方で地方公共団体の経済状態がひっ迫している現在では、多くの公共構造物を維持していくためのより効率的な維持管理手法の確立が、必要不可欠の問題として挙げられる。数年前には、木曾川のトラス橋の斜材が断裂し、同年米国では夕方のラッシュ時に落橋事故があり13名の人命が失われている。また橋梁だけでなくトンネル等、他の公共構造物でも事故の報告は絶えない状態である。土木構造物全体を通じて早急に維持管理戦略を立てなくてはならない状況にあると考えられる。

橋梁に関しては、他の構造物と同じように、ライフサイクルコスト(以下、LCC)をいかに少なく抑えるかが重要な課題である。そのため、限られた予算を有効に活用する橋梁維持管理システム(以下、BMS)に関する研究が多くなされている。<sup>1)～6)</sup>

本論文では、まず北海道内の橋梁から任意に選ばれた10橋を説明する。それらが本研究の維持管

理計画策定の対象となる。次に、橋梁を構成する部材の劣化曲線を説明し、1本の曲線で代表させる場合と、点検データのばらつきを考慮して5本の劣化曲線群で表される場合を説明する。これらの5本の劣化曲線は、それぞれ生起確率が仮定されている。

最後に各部材の補修順位を決定する最適化問題について説明する。劣化曲線が1本で代表される場合は、確定論的な扱いになり、複数の劣化曲線を扱う場合は確率論的な扱いとなる。これらの数値計算結果に考察が加えられ、確定論的な場合と確率論的な場合の結果の差について、あるいは、最適化手法の適用の可能性について検討が加えられる。

#### 2. 対象橋梁の説明

本報告では、北海道内の橋梁の内、トラス橋、アーチ橋および補修費算定に必要な諸元データが欠落している橋梁を除いた1028橋の中から、鋼橋(以下S橋)5橋、コンクリート橋(以下C橋)5橋の計10橋を選定し、BMSの対象橋梁とした。選定した対象橋梁の詳細なデータを表-1に示す。

計画開始時の健全度の値が、基本的に小数点部を持っているのは、複数径間であれば、それぞれの径間の点検評価値の平均をとることを想定しているからである。

表-1 対象橋梁のデータ

| 橋梁<br>番号 | 橋<br>種 | 供用<br>年数 | 径間<br>数 | 橋長<br>[m] | 有効<br>幅員<br>[m] | 軀体<br>高さ<br>[m] | 主桁<br>高さ<br>[m] | 主桁<br>本数 | 計画開始時の健全度 |      |      |          |      |         |
|----------|--------|----------|---------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|-----------|------|------|----------|------|---------|
|          |        |          |         |           |                 |                 |                 |          | 床版        | 主桁   | 軀体   | 伸縮<br>装置 | 支承   | 橋面<br>工 |
| 1        | S      | 22       | 2       | 54        | 11.0            | 9.5             | 1.45            | 5        | 3.00      | 4.00 | 3.00 | 3.00     | 3.33 | 3.38    |
| 2        | S      | 19       | 1       | 42        | 12.0            | 16.5            | 2.10            | 5        | 5.00      | 4.00 | 3.00 | 2.00     | 5.00 | 4.75    |
| 3        | S      | 29       | 2       | 60        | 7.5             | 6.2             | 1.60            | 4        | 3.00      | 3.00 | 3.50 | 5.00     | 2.00 | 3.33    |
| 4        | S      | 18       | 1       | 35        | 7.5             | 7.0             | 1.70            | 4        | 3.00      | 5.00 | 2.00 | 2.00     | 3.33 | 4.67    |
| 5        | C      | 25       | 3       | 97        | 10.0            | 6.3             | 1.65            | 6        | 3.00      | 3.00 | 2.00 | 3.00     | 5.00 | 3.75    |
| 6        | C      | 27       | 2       | 77        | 7.5             | 6.2             | 1.65            | 5        | 3.50      | 3.50 | 2.00 | 4.00     | 5.00 | 4.00    |
| 7        | C      | 48       | 3       | 63        | 5.5             | 18.3            | 1.00            | 3        | 2.67      | 3.00 | 2.67 | 3.33     | 2.00 | 3.22    |
| 8        | S      | 43       | 3       | 77        | 8.5             | 7.0             | 1.30            | 3        | 2.67      | 5.00 | 3.00 | 2.00     | 3.78 | 3.56    |
| 9        | C      | 22       | 1       | 28        | 8.5             | 4.4             | 1.40            | 5        | 5.00      | 3.00 | 5.00 | 5.00     | 5.00 | 4.00    |
| 10       | C      | 32       | 1       | 25        | 8.0             | 5.4             | 1.25            | 5        | 3.00      | 4.00 | 3.00 | 4.00     | 5.00 | 2.67    |

### 3. 劣化曲線について

BMS では中長期の維持管理計画を策定することから、将来における橋梁部材の劣化予測が必要となる。劣化予測として一般的なのが劣化曲線を用いた予測であり、本報告においても劣化曲線を用いて劣化予測を行うこととする。本報告で用いた劣化曲線式を式(1a)、(1b)に示す。<sup>7)</sup>

$$r(t) = 5 - 4 \left( \frac{t}{T} \right)^f \quad (1a)$$

$$r(t) = 1 \quad (1b)$$

ここで、 $r(t)$  は供用年数  $t$  における健全度、 $T$  は耐用年数、 $f$  は形状係数を表す。健全度は部材の健全の程度を表す指標であり、5 が最も健全な状態、1 が最も劣化した状態を表す。耐用年数は供用開始から健全度 1 になるまでの供用年数を表す値であり、その値が大きくなるほど劣化の進行が遅いことを表す。供用年数  $t$  が耐用年数  $T$  より大きくなれば、式(1b)に示すように健全度は 1 となる。また形状係数  $f$  は劣化曲線の形状を決定するパラメータであり、 $f=1$  で劣化曲線は直線となり、 $f$  の値を大きくするほど劣化曲線の形状は上に凸となる。本研究では  $f=2$  を用いた。<sup>7)</sup>

劣化曲線を用いた予測は、部材ごとに 1 本の劣化曲線を作成し、それを全橋梁に対して共通に用いるのが一般的である。しかし既に述べた通り、点検にはばらつきが存在し、点検によって補修の有無が決定されることを考えると、劣化予測の段階においてばらつきを考慮することが必要であると考えられる。そこで、本報告ではばらつきを考慮するための劣化モデルとして、生起確率を有する 5 本の劣化曲線からなる劣化曲線群を用いた。劣化曲線群の一例として、S 橋における主桁および C 橋における軀体の劣

化曲線群を図-1 および図-2 にそれぞれ示す。それぞれの曲線の生起確率は、左から順に 10%、20%、40%、20%、10%としており、中心となる曲線すなわちばらつき小さい曲線の生起確率が最も高く、両端の曲線すなわちばらつき大きい曲線の生起確率が最も小さくなる。

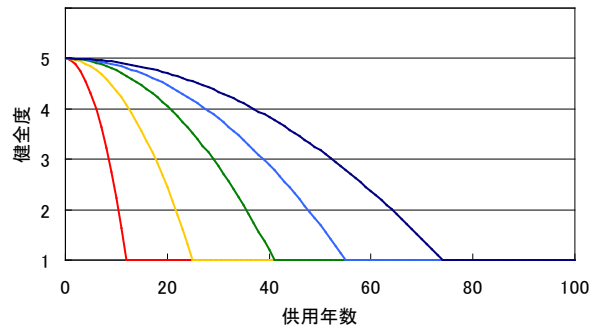


図-1 S 橋 主桁の劣化曲線群

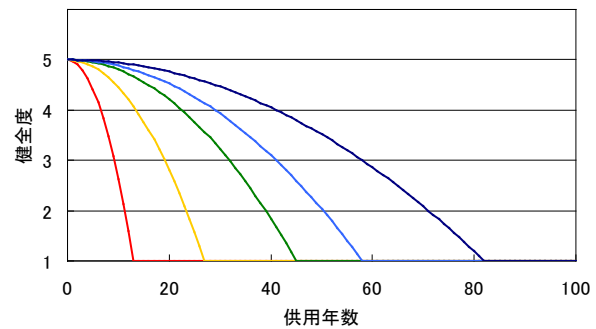


図-2 C 橋 軀体の劣化曲線群

### 4. 橋梁群モデルへの GA 適用

本研究の最適化問題は、変数が離散量で、スケジューリング問題に相当する。そのため、一般の最適化手法では解くことができないため、遺伝的アル

ゴリズム(Genetic Algorithms, 以下GAと略する)を用いることにする。

ここでは、まず GA のコーディング、デコーディングについて説明する。

設計変数は補修を行う年度としたが、橋梁ごとに 6 部材あるとし、ライフサイクル期間を 50 年とすると、各部材各年度に補修のあるなしを(0, 1)の 2 進数でコーディングを行うと 1 橋当り設計変数の数は 300 変数となり効率的とはいえない。そこで本研究では 1 部材に対してライフサイクル期間中に最大実施される補修回数を設定し、補修が実施される年度を 10 進数でコーディングを行った。これにより、1 橋当りの設計変数を 60 程度に減少することができた。

デコーディングの説明を簡略にするために小規模な問題を設定する。1 橋梁は 3 部材からなるとし、ライフサイクル期間を 20 年、その間の補修回数 3 回とする。1 橋梁あたりの設計変数の数は 9 となり、それが次のように得られたとする。

.....10175911531513.....

これを取り出し、部材毎に切り分けると次のようになる。

[10 17 5][9 1 15][3 15 13]

部材毎に数字(年度)の若い順に並べ替える。

[5 10 17][1 9 15][3 13 15]

これらが、部材ごとに補修が入る年度になる。例えば部材 1 であれば、5 年度、10 年度、17 年度に補修が行われることになる。このとき、同じ年度が現れれば、一方は無視される。つまり、ライフサイクル期間中の補修回数は 2 回となる。また、該当年度の部材の健全度が 5 であれば、この年度もやはり無視されることになる。

## 5. 最適化問題の定式化

本報告では、3. で述べた劣化曲線群を用いた最適化の他に、1 本の曲線で表されるばらつきを考慮しない劣化モデルを用いて最適化を行うことにより、確定論的および確率論的な維持管理計画の両方を策定し、これらの比較によってばらつきを考慮する必要性の検討を試みた。以下に確定論的問題および確率論的問題のそれぞれにおける最適化問題の定式化について説明する。

### 5.1 確定論的問題

以下に、劣化曲線が部材種ごとに 1 本で代表される確定論的問題設定の場合の目的関数、制約条件、および設計変数を示す。

$$\text{目的関数: } OBJ = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{y=1}^{NY} C_{iy} \rightarrow \min \quad (2)$$

$$\text{制約条件: } g(y) = \sum_{i=1}^{NB} C_{iy} - B_y \leq 0 \quad (y = 1 \sim NY) \quad (3)$$

$$g(NY + i) = 2 - R_i^{\min} \leq 0 \quad (i = 1 \sim NB) \quad (4)$$

設計変数: 補修年度

$$v_{ijf} \quad (i = 1 \sim NB, j = 1 \sim NM, f = 1 \sim NF) \quad (5)$$

ここで、OBJ は目的関数、NB は対象となる橋梁数、NY はライフサイクル期間、 $C_{iy}$  は橋梁  $i$  において  $y$  年度に発生する総費用、 $g(y)$  は  $y$  年度における予算の制約条件、 $B_y$  は  $y$  年度における年度予算、 $g(NY + i)$  は橋梁  $i$  における健全度に関する制約条件、 $R_i^{\min}$  は 11 年目以降のライフサイクル期間における橋梁  $i$  の全部材中での健全度の最小値、 $v_{ijf}$  は橋梁  $i$  部材  $j$  に対して  $f$  回目の補修を行う年度、NF はライフサイクル期間内で 1 部材あたりに行う最大の補修回数を表す。

部材の健全度の制約を 11 年目以降としたのは、本報告で対象としている橋梁群の中には、初期状態で健全度が 2 以下となっている部材が複数存在するためである。計画開始時に既に劣化している部材がある状態で、計画 1 年目から健全度が 2 以下にならないよう制約を行うと、当然設計解は得られないことから、これらの部材に対して補修をおこなうための健全度制約を課さない猶予期間を設ける必要がある。また、初期状態において既に劣化している部材に対する補修は計画の初期に集中して行われるため、必然的に予算制約を満たさなくなり、最適解が得られなくなる現象が見られた。

そこで本論文では、健全度制約の猶予期間を 10 年と設定し、その期間内はレベルを下げた補修を行うことにより計画初期において補修費が予算規模を超えて高額になることを抑制した。

つまり、最初の 10 年間は以下のような処置を行った。通常の補修を行った場合、部材の健全度は 5 まで回復するが、初期 10 年間に行う補修に関しては、補修時の健全度が 2 以上 3 未満であった場合、補修後の健全度は 4 になり、また補修時の健全度が 2 未満であった場合は補修後の健全度は 3 になるものとしている。この場合の補修費は、健全度を 5 まで回復させるために要する補修費の 40%とした。

### 5.2 確率論的問題

確率論的問題では、各設計に対して多数回のシミュレーションを行って期待値を算出する(モンテカル

ロシミュレーション)ことにより設計の評価を行う。1回のシミュレーションでは、各橋梁、各部材において対応する劣化曲線群の複数の曲線の中から、生起確率に従ってランダムに劣化曲線を決定しLCCを算出する。このシミュレーションをN回繰り返すことによって、目的関数値および制約条件値を算出し、設計の評価を行う。以下に目的関数、制約条件、および設計変数を示す。

$$\text{目的関数: } OBJ = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{NB} \sum_{y=1}^{NY} C_{niy} \rightarrow \min \quad (6)$$

制約条件:

$$g(y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{NB} C_{niy} - B_y \leq 0 \quad (y = 1 \sim NY) \quad (7)$$

$$g(NY+i) = P_i^{\max} - P_a \leq 0 \quad (i = 1 \sim NB) \quad (8)$$

設計変数: 補修年度

$$v_{jif} \quad (i = 1 \sim NB, j = 1 \sim NM, f = 1 \sim NF) \quad (9)$$

ここで、OBJ は目的関数、Nはシミュレーションにおける総試行回数、NB は対象となる橋梁数、NY はライフサイクル期間、C<sub>niy</sub> はn 回目の試行においてy 年度に発生する橋梁i の総費用、g (y) はy 年度における予算の制約条件、B<sub>y</sub> はy 年度における年度予算、g (NY+i)は橋梁i における健全度に関する制約条件、P<sub>i</sub><sup>max</sup> は11年目以降のライフサイクル期間において健全度が2を下回る確率の橋梁i における全部材中の最大値、P<sub>a</sub> は健全度が2を下回る確率の制約値、v<sub>jif</sub> は橋梁i 部材j に対してf 回目の補修を行う年度、NF はライフサイクル期間内で1部材あたりに行う最大の補修回数を表す。

また計画の初期10年は、確定論的問題の場合と同様、健全度制約の猶予期間とし、レベルを下げた補修を行うこととしている。

## 6. 数値計算結果

ここでは、前章で述べた確定的および確率的問題の2つの最適化問題に、2. で示した10橋を対象(NB =10)として最適化を行った結果を示し、比較・考察を行う。

GA<sup>8)</sup>のパラメータは、どちらの問題においても人口サイズを500、交叉確率を80%、突然変異確率を5%、最大変異回数を20回としている。なお、GAの終了条件は世代数が2000に達するか、500世代にわたって最適解の更新が行われない場合、もしくは21回目の大変異発生条件を満たした場合に計算を終了することとした。また、ライフサイクル期間はNY=50年、年度予算はB<sub>y</sub> =1億円(y=1~Y)、ライフサイクル期間内の1部材に対する最大補修回数を

NF =10回とし、確率論的問題において1線列に対する総試行回数をN =1000回、健全度が2を下回る確率の制約値はP<sub>a</sub> =12%としている。

最適化を行った結果、確定論的問題の最終世代数は374、確率論的問題の最終世代数は2000であった。確定論的問題では、21回目の大変異発生条件を満たしたため、確率論的問題では世代数が最大数に達したため最適化を終了している。最適化の収束過程について、確定論的問題の場合を図-3に、確率論的問題の場合を図-4にそれぞれ示す。図-3、図-4は横軸に世代、縦軸にはその世代における最適解の目的関数値を示している。どちらの問題においても初期段階では最適解の推移が大きく振動しているのは、その世代において許容解(すべての制約条件を満足する設計解)が無かったことを表している。これはGAのプログラムがその世代において許容解が無かった場合に1.0×10<sup>20</sup>という目的関数値を返すためである。

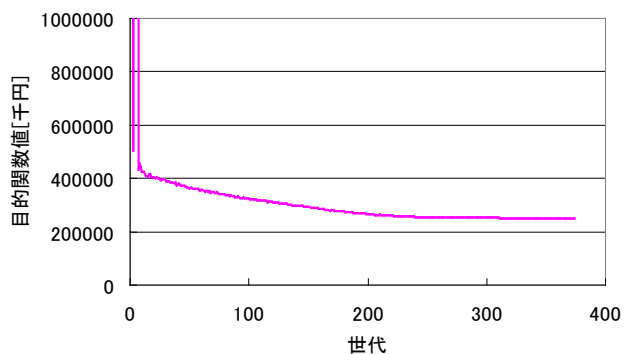


図-3 確定論的問題における収束過程

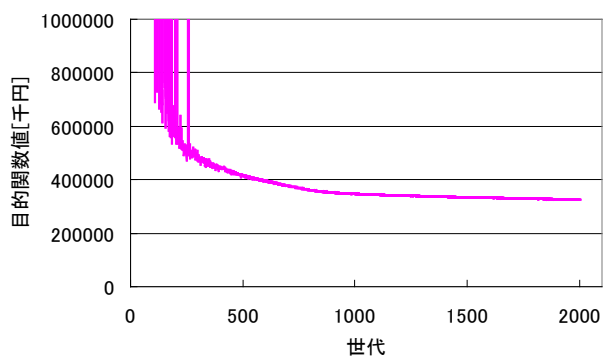


図-4 確率論的問題における収束過程

最適解における総費用(期待値)と平均健全度(期待値)の年度推移について、確定論的問題を図-5に、確率論的問題を図-6にそれぞれ示した。

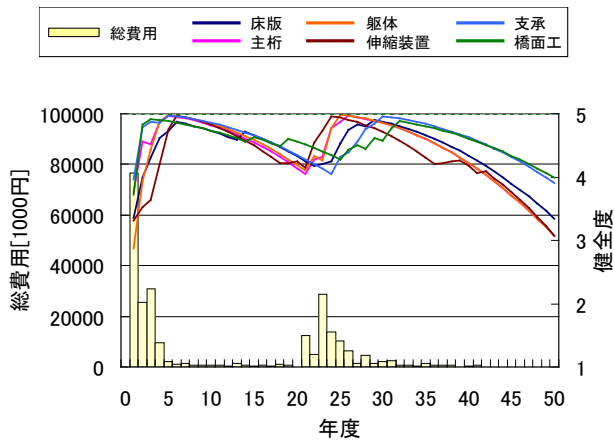


図-5 確定論的問題における総費用と健全度の年度推移

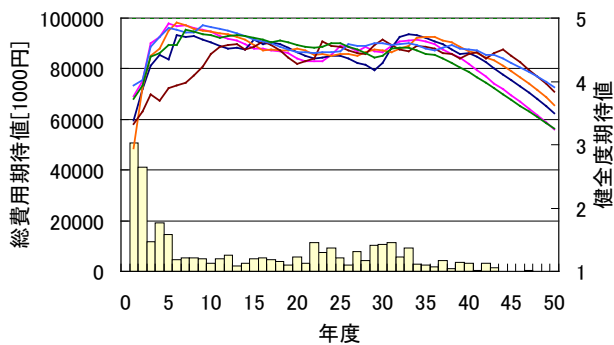


図-6 確率論的問題における総費用期待値と健全度期待値の年度推移

図-5、図-6は横軸が計画開始からの年度、左の縦軸および棒グラフが各年度の総費用(確率論的問題の場合はその期待値)、右の縦軸および折れ線が各部材の健全度(確率論的問題の場合はその期待値)の全橋における平均値を表している。確定論的問題における総費用は2億5056万円となったのに対し、確率論的問題における総費用期待値は3億2747万円と確定論的問題と比較して約31%増加する結果となった。

この結果は、確定論的立場で公表されることの多い維持管理のコストが、現実の部材健全度のばらつきを考慮するとかなり多めに出る可能性を示しており、情報公開に当たって注意が必要であることを示唆している。

図-7に確定論的問題における補修間隔の分布、図-8に確率論的問題における補修間隔の分布をそれぞれ示す。補修間隔は、ライフサイクル期間/補修回数(確率論的問題の場合はその期待値)で算定している。図中の赤線は、補修間隔の全部材における平均値を表し、確定論的問題で26.3年、確率論

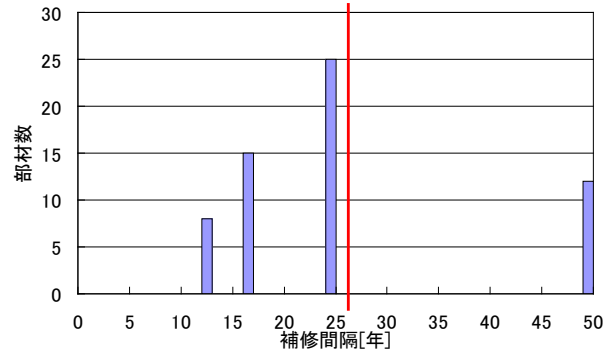


図-7 確定論的問題における補修間隔の分布

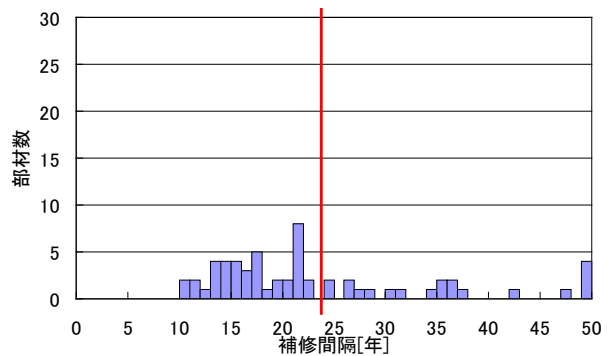


図-8 確率論的問題における補修間隔の分布

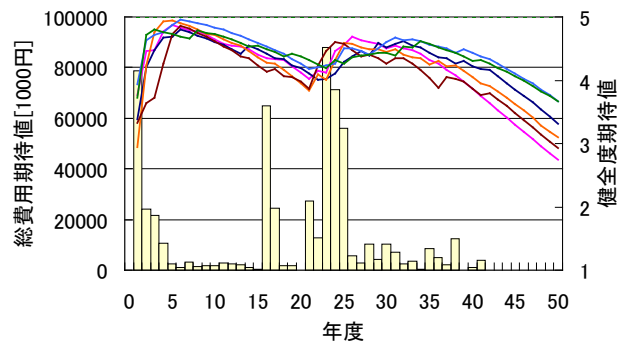


図-9 確定論的問題の最適解のばらつきのある環境下での総費用期待値と健全度期待値の年度推移

的問題では23.9年であった。やはり、部材健全度にばらつきがある場合は、早め早めの補修が行われていることを示している。

次に、確定論的問題より得られた最適補修計画が、3.で説明した複数の劣化曲線群を有する環境下で実施された場合を想定して計算した結果を示す。この場合、総費用期待値は5億8378万円と、確定論的に計算した場合の2億5056万円と比較して、約133%増加する結果となった。このときの総費用期待値の年度推移および平均健全度期待値の推移を図-9に示した。なお、図-9の表記方法は図-6と同様

である。

## 7. あとがき

橋梁の維持管理行政は、多くの自治体で実施されているが、現状では、少なくない課題を包含していると考えられる。

その一つに点検のばらつきがある。橋梁が置かれている環境は、それぞれ異なり、施工の質も異なると考えるのが自然である。そのため、本来部材健全度のばらつきは存在するものと考えらるべきであるが、現状では、それらの要因以外に点検者の差によるばらつきも散見される。

そのような背景のもとで、現状では、部材種ごとに1本の劣化曲線をあてはめて将来予測を行いライフサイクルコストなどを計算し、また補修順の根拠ともなっている。

そこで、本研究では、点検健全度にばらつきを仮定して、確率論的に橋梁の維持補修順を決定し、1本で代表される確定論的に求められる結果と比較、検討を試みた。

結果は、あくまでも本論文で仮定したばらつきの範囲のものであるが、50年を想定したライフサイクルの期間で、総コストに期待値レベルで3割程度大きな値が必要となるという結果になった。

これは、実務上もこの程度のコストアップを想定して長期計画を作成すべきであると同時に、情報開示においても注意を要することを示している。

同様の結論が、確定論的に得られた補修計画がばらつきのある環境下で実施された場合の結果からも得られた。この場合は、やはり2.3倍強のコストが必要となることが示されている。

今後、実データなどを参考にして、更に検討を進めることが必要と考えられる。

なお、本研究では、10橋を対象とした。実務を考えるとこれはきわめて少ない橋梁数であり、得られた結論の妥当性が問われることになる。<sup>9)</sup>

これは、確率論的問題を解く場合の最適化問題の定式化によるところが多く、モンテカルロ法的な手法が最適化の過程に導入されるため、計算時間が必然的に多くなり、強い制約となって、扱える橋梁数を制限する。

また、本定式化では、図-5及び図-6に見られるようにライフサイクル期間の後半には補修がほとんど入らないという結果になる。これは、総コスト最小化のもとではやむを得ない現象であるが、現実的な結果とは言い難い。

以上の観点を踏まえて、今後、最適化の定式化にさらに工夫を加えて、より効率的、かつ現実的な定式化を求め、格段と多数の橋梁を扱えるようにして、同様な検討を加えていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Hudson, W.R., Haas, R. & Uddin, W.: Infrastructure Management, McGraw-Hill, 1997.
- 2) Ryal, M. J. : Bridge Management, Planta Tree, 2001.
- 3) 夏秋・向台・保田・古田: 連続桁RC床版の打設順序決定問題への遺伝的アルゴリズムの応用, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.627-633, 1995.
- 4) 近田・橋・城戸・小堀: GAによる既存橋梁の補修計画支援の試み, 土木学会論文集, No.513/I-35, pp.151-159, 1995.
- 5) 築山・古田・堂垣: 道路橋の維持管理計画支援システムへのウイルス型GAの適用, 第7回システム最適化シンポジウム講演論文集, pp.7-12, 2001.
- 6) 近田・清水・廣瀬: 橋梁補修計画へのウイルス進化型GAの適用に関する研究, 構造工学論文集 Vol. 48A, pp.195-202, 2002.
- 7) Yanev, Bojidar. Bridge Management. John Wiley & Sons., 2007.
- 8) 杉本・鹿: 工業最適設計のための汎用GAプログラムについて, 北海学園大学学園論集, 第96・97号, pp.81-105, 1998.
- 9) 杉本: 維持管理と最適化, 電力土木, No.342, pp.3-8, 2009.

