

## - 22 GA を援用した橋梁群の経時的補修費用均等化に関する研究

## A Study on GA Applied Annual Repair Cost Equalization of Bridge Group

近田康夫<sup>1</sup>・新谷光平<sup>2</sup>・阿曾克司<sup>3</sup>・城戸隆良<sup>4</sup>

Yasuo CHIKATA, Kouhei SHINTANI, Katsushi ASO, and Takayosi KIDO

抄録：橋梁群を対象としたアセットマネジメントを実現するためのアプローチについて、様々な提案がなされている。その一つに、対象とする橋梁群における個々の橋梁のLCC最小化を試みたものがあるが、年度予算がばらついていることにより、実現不可能であった。そこで本研究では、2次元線列で構成される遺伝的アルゴリズムを援用し、橋梁群の年度補修予算を均等化するアプローチを提案した。計算例により、提案した手法が効果的であることを示した。

**Abstract** : There are many proposed methodologies for implementation of asset management of bridge group. One of them tries minimizing the LCC of each bridge in the group under consideration, but the difference between annual budgets becomes impracticable. Thus in this report, an approach is proposed to equalize the annual budget for the bridge group repair by using the genetic algorithm with two dimensional string structure. Numerical examples show that the proposed approach works effectively.

キーワード：橋梁補修，遺伝的アルゴリズム，アセットマネジメント

**Keywords** : Bridge maintenance, Genetic algorithm, Asset management.

## 1. はじめに

我が国では、現在までに建設されてきた多数の橋梁が、近い将来、劣化による補修・補強が必要となることが予想されている。そこで、橋梁を資産としてとらえ、管轄下にある橋梁群の状態を把握・評価し限られた予算の範囲内で費用対効果の高い補修を行っていく、アセットマネジメントの取組みが試みられだしている<sup>1)2)</sup>。

アセットマネジメントを実現するためのアプローチには複数あり、これまでに様々な考え方が提案されている。単年度における費用対効果の高い補修橋

梁と補修部位の組合せを得ようと試みたもの、1つあるいは少数の橋梁を対象として、LCCの最小化、確率的な手法から補修部位の詳細な劣化予測、そして中長期的に補修費用を年度ごとに均等化しようと試みたものなどがある。

既存の研究では、単年度における費用対効果の高い補修橋梁と補修部位の組合せを得ようと試みたものとしては、文献<sup>3)4)5)6)</sup>等がある。LCC最適化の研究としては、文献<sup>7)</sup>では道路橋の床版のLCCの最適化、文献<sup>8)</sup>では社会的損失費用、信頼性などを考慮したLCCの最適化を試みている。河村ら<sup>9)</sup>はBridge Management System(BMS)の一部として、1橋梁に

<sup>1</sup> 正会員 工博 金沢大学 教授 大学院自然科学研究科社会基盤工学専攻

(〒920-1192 石川県金沢市角間町 金沢大学大学院自然科学研究科 Tel:076(234)4634 E-mail:chikata@t.kanazawa-u.ac.jp)

<sup>2</sup> 学生会員 金沢大学 大学院自然科学研究科社会基盤工学専攻

<sup>3</sup> 正会員 工修 金沢大学 大学院自然科学研究科環境科学専攻(株式会社 日本海コンサルタント)

<sup>4</sup> 正会員 工博 金沢大学 技術専門職員

おける各部位において詳細な劣化予測を行い、予定供用年数内における経済性、および部位の品質の両方を考慮した最適維持管理計画の作成を試みた。原田ら<sup>10)</sup>は道路構造物の維持管理計画を支援する計算モデルの一つとして、単年度における一定の補強予算の元、道路橋の耐震補強の組合せ最適化、および2階層のGAを援用して複数橋梁に対する中長期的な維持管理計画を策定するモデルを提案した。津田ら<sup>11)</sup>はマルコフ推移確率を用いて橋梁部位の統計的劣化予測を行う方法を提案した。貝戸ら<sup>12)</sup>は実測データを用いて構造物群全体平均劣化曲線の算出手法を構築、およびマルコフ過程を用いた確率論的手法により個別の構造物の劣化予測を行った。

しかし、地方自治体などでの実務における補修計画では100橋以上の橋梁群が補修対象とされると想定され、同程度の橋梁群を対象としたアセットマネジメントの研究事例はほとんど見当たらない。

また、個々の橋梁のLCCを最小化した場合には個別橋梁の管理計画としては最適化されるものの、管理対象橋梁数が増加すると、補修予定が重複して年度間の補修予算に大きな差が生じ、実現可能性に疑問が生じる場合が少なくない。

本報告では、多数の橋梁を対象としてLCCの最小化を図りつつも、年度補修費用を均等化するプロセスを組みこむことで、より実現的な管理アプローチを試みた。

また、橋梁の補修計画をGA(遺伝的アルゴリズム)の遺伝子型にコーディングする際、遺伝子を2次元線列としたGAを適用すると共に、部位ごとの補修間隔を遺伝子列から省くことにより冗長性の少ない遺伝子デザインを工夫することにより処理効率の向上を目指した。

## 2. 補修

### (1) 補修対象

使用する橋梁データは、I県が昭和57年から63年に行った定期点検に基づく橋梁点検台帳のデータである。ここから、欠値のない204橋を対象とし、さらに14点検項目から10項目を補修対象とした(表-1)。

14点検項目は、橋面舗装、地覆・高欄、床版、床組構、主構、支承、伸縮継手、排水装置、塗装、洗掘

表-1 初年度における健全度別の補修部位数

補修部位	Level1	Level2	Level3	Level4	Level5
床版	0	20	62	40	82
地覆・高欄	0	5	35	78	86
橋面舗装	0	0	55	45	104
主構	0	29	59	47	69
支承	0	4	17	89	94
伸縮継手	0	10	35	47	112
排水装置	0	5	35	78	86
塗装	0	0	42	57	105

Level1：最低健全度，Level5：最高健全度

変動、躯体変動、安定構造、安定材質、耐震性である。このうち、洗掘変動、躯体変動、安定構造の評価が低いと多くの場合、橋梁の架け替えを必要とすること、また経年劣化とは言い難いと考えられるため本システムの補修部位から除外した。また、床組構の増設桁は補強であり、耐震性は移動制限装置の設置であり、同じく経年劣化とは言い難いと考えられるため除外した。安定材質についても、特異な劣化形態であるため今回は対象外とした。

各橋梁の各部位は後述する劣化曲線に従って経年劣化するものとする。ただし、この点検台帳には補修履歴の詳細な記述がないため、架設年からこれまで劣化予測に基づいた理想的な補修が行われてきたものと仮定する。また、橋梁の架け替えを行わず、半永久的に供給するものとする。この供用予定期間を越えた橋梁の架け替の考慮をしないのは、プログラム上の制約ではなく、今回のコーディング方法や目的関数の設定などの効果を確認することを優先したための簡略化である。

部位によっては足場費用などを考慮すると、同時に補修する方が合理的かつ経済的である場合が多い。これを考慮するための組合せを表に表-2を示す。この組合せは、橋梁コンサルタント・エンジニアの協力を得て作成したものである。

### (2) 補修費用

橋梁の補修工法・補修費用は、各橋梁の種類、損傷度などの程度により異なるが、全橋梁の全補修部位に対して個別に補修工法を決定し、補修費用を算出するには橋梁数が多い場合には組合せが複雑になりすぎて現実的ではない。中長期の計画では予想される標準的な劣化とそれに対応する標準的な工法・費用を用いるざるを得ない。そこで補修を行うときの

表-2 同時に補修することが好ましい項目

タイプ	点検項目	舗装	高欄	床版	主構	支承	継手	排水	塗装	材質
1	橋面舗装							②		
2	地覆高欄		①	②				②		
3	床版			②	②	③			②	
4	主構			②	②					④
5	支承					③			②	
6	伸縮継手									
7	排水装置							②		
8	塗装				②	③			②	
9	安定材質				②	③				④

数字は足場の種類(同じ番号であれば共有可)

①,②つり足場, ③張り出し足場, ④枠組み足場

表-3 補修工法・補修費用

補修部位	補修工法	補修費用
橋面舗装	オーバーレイ	5,760 円/m <sup>2</sup>
地覆・高欄	旧地覆撤去, 地覆・高覧設置	60,000 円/m
床版	旧床版撤去, 新床版建設	130,000 円/m <sup>2</sup>
主構	断面修復工	250,000 円/m <sup>2</sup>
支承	鋼製支承交換	500,000 円/箇所
伸縮継手	ゴム製ジョイント交換	200,000 円/m
排水装置	塩化ビニル管交換	5,000 円/m <sup>2</sup>
塗装	塩化ゴム系塗装	6,000 円/m <sup>2</sup>
安定材質	ASR 補修	2,900 円/m <sup>2</sup>

主構は全面ではなく、任意の割合を設定可能とした。

各橋梁、各部位の損傷度は一定とし、各部位の補修工法・補修費用を一律に定めて用いることとする。

補修工法・補修費用の算出には主桁、伸縮継手、橋台、沓、移動制限装置の数、および橋梁の塗装面積などのデータが必要である。しかしこれら全てのデータは得られず、またシステムを実際に運用する際、全橋梁のデータを入力するのも現実的でない判断し、全て単純橋として算出した値を用いる。算出方法を以下に示す。

- 主桁 3m を主桁間隔の最大値として幅員より算出(幅員 ÷ 3 ただし余りは繰り上げ)
- 伸縮継手 支間数より算出(支間数 + 1)
- 橋脚数 支間数より算出(支間数 - 1)
- 橋台数 2
- 沓・移動制限装置 支間数と橋桁数から算出
  - 単純橋—主桁数 × ((橋脚数 × 2) + 橋台数)
  - 連続橋—主桁数 × (橋脚数 + 橋台数)

また、今回用いた各部位において一律に定めた補

修工法・補修費用の表を表-3 に示す。補修工法・補修費用に関しても表-2 と同様に橋梁コンサルタント・エンジニアの協力から得た情報、および文献<sup>13)</sup>などを参考にして設定した。

主構に関しては、断面修復を全面にわたって行うとは考えにくいいため、部分的な修復割合を設定できるようにした。

### 3. GA の適用

#### (1) システムの概要

ここでは、本報告の目的を実現するために構築した、橋梁補修計画立案を支援するシステムについての概要について説明する。

対象橋梁群が補修費用の制約無しに仮定された経年劣化に基づく理想的な補修を受けた場合の計画を初期計画と定義する。現実の橋梁の維持・管理では、劣化曲線を設定したとしても、健全度レベルを階段状に設定し、健全度レベルが管理レベルに達した段階で処置を実施するのが一般的である。

本報告の目的としている年度補修費用の均等化は、各橋梁における各補修部位の補修年度を初期計画(劣化曲線に基づいた健全度レベルが管理レベルに達した時点)から前後に数年ずらすことにより実現する。ずらし幅の上限はパラメータ入力時に任意に定めることとし、初期計画の補修時期から任意に定めた一定の範囲内で動くのであれば補修工法・補修費用が変わらなると仮定する。

そして、各補修部位における複数の補修時期でのずらし幅の組合せを一つの補修計画案とする。また、ずらし幅の組合せ数は膨大な数となることから、GA を援用し準最適解を探索する。

GA は、遺伝子に 2 次元線列を用いること以外一般的な流れのものを使用した<sup>14)</sup>。構築したシステムのフローチャートを図-1 に示す。

初期に与えるパラメータは一般的な GA のパラメータ以外では、計画年数、主構の補修割合、標準補修間隔の選択、目的関数・ペナルティの選択、ファイル書き込み条件などがある(図-2)。終了条件は、①最大世代数に達する、②任意の世代数間最優良解が更新されない、とした。

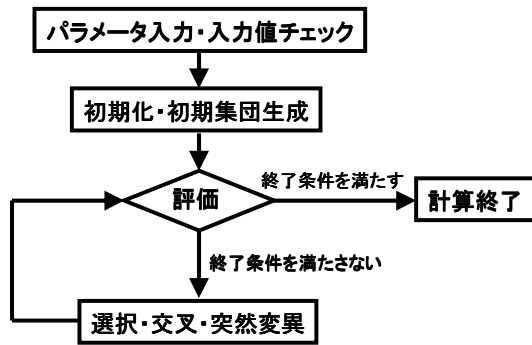


図-1 フローチャート

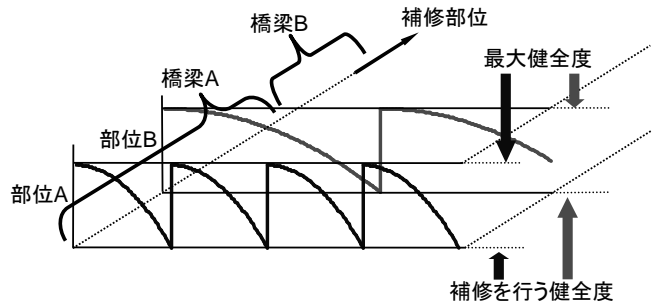


図-3 劣化曲線

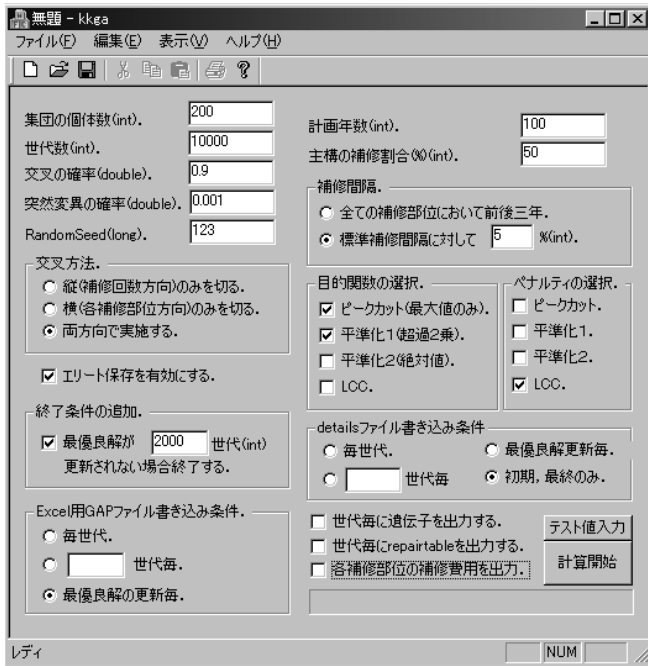


図-2 プログラムウィンドウ

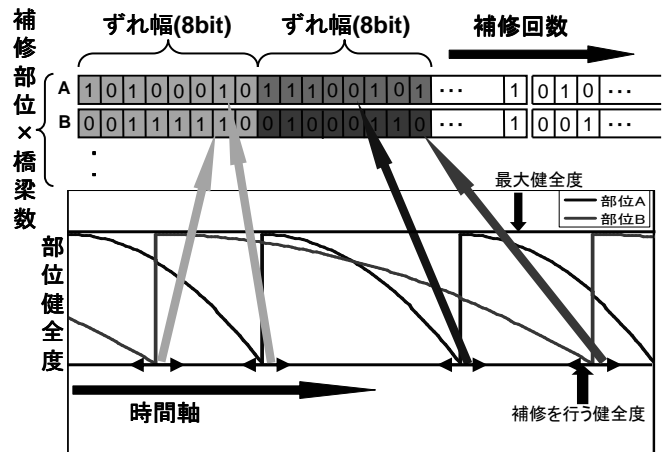


図-4 線列構造

## (2) 劣化予測

構築したシステムにおける劣化予測には、任意に定めた関数に従って一律に健全度が経年劣化する劣化曲線を用いた。劣化曲線とは、多くは横軸を時間、縦軸を各補修部位の健全度とした経年劣化を予測する手法をいい、構造物などの劣化予測に用いられることが多い。

劣化曲線は、厳密には各橋梁、各部位により個別に異なる。本来なら点検結果に基づき全ての部位において個別に劣化曲線を設定することが望ましい。しかし、部位の劣化はその材質、施工精度、暴露環境などにより大きく変化することから、劣化曲線そのものを、あるいは維持管理対策が予想劣化曲線へ及ぼす効果を定量化するのは非常に難しく、また実務においても全部位の劣化曲線を設定するのは現実的で

はないと判断した。そこで、各補修部位ごとに一律に劣化曲線を仮定し、補修回数によっても変化しないこととした。補修は、各橋梁の各補修部位が仮定した劣化曲線に従って経年劣化し、任意に定めた健全度(管理レベル)に達した時に行うものとする。健全度は補修によって完全に元の状態に戻り、再び同じ劣化曲線に従って経年劣化を繰り返すこととした(図-3)。

ただし、プログラム上では、個々の部位にそれぞれ異なる劣化曲線を与えることは可能になっている。

## (3) 遺伝子の構成

遺伝子フォーマットは、初期計画における補修時期から前後何年ずらすかの移動量を遺伝子とし、部位毎に初回、2回目…の補修時期が行を構成、数行でひとつの橋梁の補修計画部分線列となる。これを全橋梁分組合せて2次元の全体線列となる(図-4)。

交叉は、1次元軸、2次元軸それぞれに対する一点交叉を用意し、任意にどちらか一方、あるいは両方を実行する。突然変異は1bitごとに実行する。

デコードの流れは、まず8bitで表現する数を割合に

換算し、先に計算しておいたずれ幅の最大値を 100% として全部位のずれ幅を計算する。GA で採用する 2 次元線列では、1 行が 1 つの部位の供用期間内の補修計画を意味し、個々の遺伝子は、標準補修時期からのずれの量を表す。従って、線列から読み取った 1 番目の遺伝子の情報に基づいて、最初の補修時期が定めれば、そこから劣化曲線に基づいて次の補修時期を求め、2 番目の遺伝子情報から補修時期の修正を行う。この作業を繰り返して 100 年分の補修計画を再構成する。

#### (4) 目的関数・ペナルティ

目的関数は以下の 4 つから任意に 2 つを組合せて選択できるようにした。

① 計画年数内における年度補修費用の最大値を最小化、② 年度補修費用が初期平均費用(初期計画における平均年度補修費)を上回る年度のみ対象として、年度補修費用と平均値との差を最小化、③ 各年度補修費用と初期平均費用との差を最小化、④ 橋梁群の LCC を最小化する。

橋梁群の LCC が初期計画の LCC を上回った場合に、これをペナルティとして評価する。また、それぞれの目的関数に対応する評価値が初期計画の評価値を下回った場合のみにペナルティを課すこともできるようにした。

### 4. シミュレーション結果

現在までに構築したプログラムでのシミュレーション結果についての考察を述べる。計算は、個体数 200、交叉率 0.9、突然変異率 0.01、最大世代 10000 とした。

図-5 は、横軸に年度、縦軸に年度補修費用をとり、計画年数を 100 年、各補修部位がずれることのできる幅は各標準補修間隔の 5%、目的関数は①と②の組合せによる均等化を行った結果の一例を示している。

均等化前では、10 年、55 年、100 年前後に 3 度ピークがあり、最も高い 10 年前後のピークでは約 17 億円であったが、均等化後は約 7 億円までピークを下げることができた。同じく、2 度目、3 度目のピークも下げることができている。これは、ピーク年度付近の補修が前後に分散したためである。図-6 は橋梁毎の補修費用の内訳を表している。最初のピークを例にとると、11 年度に比較的大きな補修を行う橋梁が

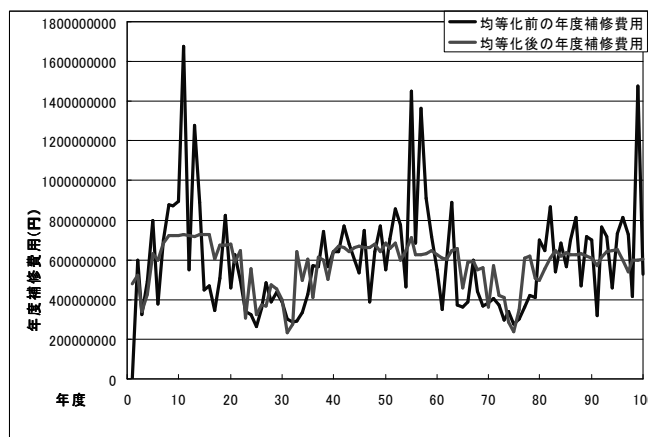


図-5 年度費用均等化

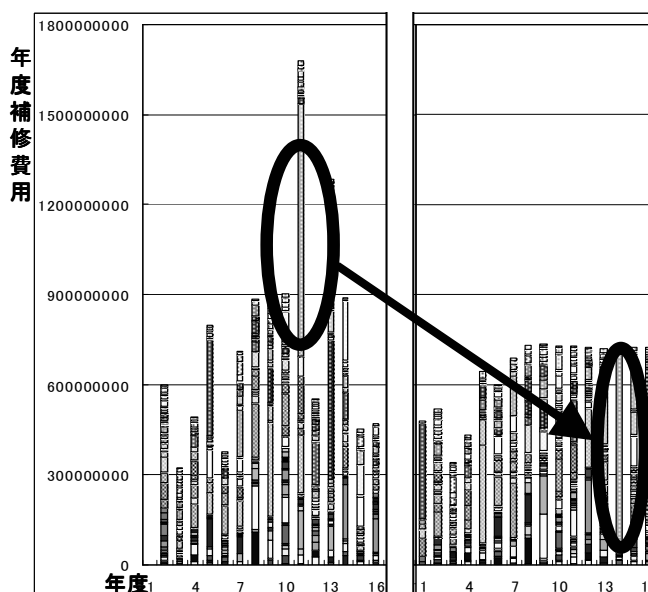


図-6 年度補修費用内訳

数橋あるが、均等化後にはこれらが前後に分散することでピークを下げていることがわかる。また、ピーク年度周辺の比較的大きな補修においても、年度補修費用の少ない年度へとずれることによって、ピーク年度にあった補修のずれる余地が生まれている。

図-6 から、もともと橋面積の大きな橋梁では、床版や主構といった補修単価の高い部位の補修費用が非常に高くなる。そのため、均等化が進むと 1 つの橋梁の補修費用が当該年度の予算をほぼ占める結果となり、それ以上の均等化が困難となる。

また、この計算時の GA の評価値は、中途から大きく変わることが無く、横ばいに推移していた(図-7)。これはある程度平準化が進むと解の改良に対して評価値の上昇が低くなり、結果解の改良が進みにくく

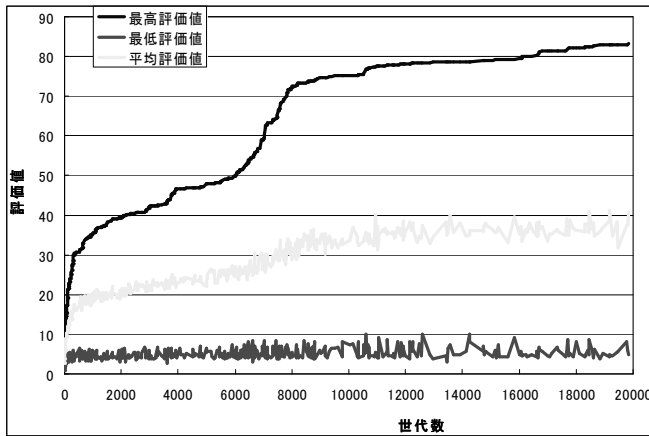


図-7 GA の評価値の推移

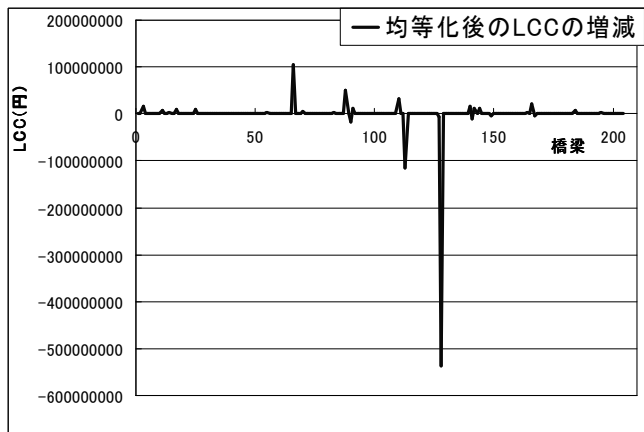


図-8 LCC の増減

なっているためと考えられる。

GA で求められた準最適解において、補修時期の移動量は小さく、時期をずらしても補修費用は変わらないとしているので、初期計画からの LCC の増減はほとんどない(図-8)。

LCC で差を生じているのは、100 年度付近のピークを下げるには、個々の補修部位を後年へずらしていき、補修回数を少なくした方が下げ易かったからであろう。実際、初期計画で 100 年度付近のピークの大部分を占めていた補修部位が、後年へずれることによって計画年数からはずれ、補修回数が少なくなっていた。本研究では、補修時期をずらせる範囲内であれば補修工法・補修費用が変化しないため、補修を後回しにする計画と、前倒しにする計画に補修費用の差が生じない。このため、後回しにする計画が選択されたと考えられる。

## 5. おわりに

個々の橋梁の LCC 最小化を指標とした場合には、年度予算のばらつきが極端になり、全体として非現実的な管理計画となることから、年度予算の平坦化が求められている。これを解決するためのひとつのアプローチを試み、効果を確認することができた。

基本的なスキームを構築できたことから、今後は実務的に考慮すべき事柄、例えば、予算制約を行った場合の合理的な処理などを実装していく予定である。

## 参考文献

- 1) 中谷昌一：国土交通省における道路アセットマネジメントの考え方，土木学会誌 Vol.89，pp.24-26，2004 年 8 月
- 2) 小澤一雅：アセットマネジメントシステム導入の考え方，土木学会誌 Vol.89，pp.10-11，2004 年 8 月
- 3) 池端重紀：橋梁補修計画への GP の適用，金沢大学卒業論文，2004 年 3 月
- 4) 近田康夫，清水宏孝，廣瀬彰則：ウイルス進化型 GA を援用した橋梁補修計画支援に関する研究，構造工学論文集 Vol.47A，pp.211-218，2001 年 3 月
- 5) 近田康夫，橋 謙二，城戸隆良，小堀為雄：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-31，pp.151-159，1995 年 4 月
- 6) 近田康夫，西雄一，廣瀬彰則，城戸隆良：スケジュールを考慮した GA 援用橋梁補修計画支援の試み，構造工学論文集 Vol.46A，pp.371-378，2000 年 3 月
- 7) Mark G. Stewart, Allen C. Estes, and Dan M. Frangopol : Bridge Deck Replacement for Minimum Expected Cost Under Multiple Reliability Constraints , JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING , SEPTEMBER 2004
- 8) Jung S.Kong, and Dan M. Frangopol : Probabilistic Optimization of Aging Structures Considering Maintenance and Failure Costs , JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING , APRIL 2005
- 9) 河村圭：Bridge Management System(BMS) の開発および実用化に関する研究，山口大学博士論文，2000 年 3 月
- 10) 原田隆郎：道路構造物の維持管理を支援する計算モデルの構築，茨城大学博士論文，2003 年 6 月
- 11) 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 No.801/I-73，pp.69-82，2005 年 10 月
- 12) 貝戸清之，阿部允，藤野陽三：実測データに基づく構造物の劣化予測，土木学会論文集 No.744/ -61，pp.29-38，2003 年 10 月
- 13) 日経 BP 社：これから始めるコンクリート補修講座，日経コンストラクション，pp.206-217，2002 年 4 月
- 14) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993。

(2006.5.19受付)