

## (9) 遺伝的アルゴリズムによる既存橋梁の 最適維持管理計画の策定

### OPTIMIZATION OF MAINTENANCE PLANNING FOR EXISTING BRIDGES BY USING GENETIC ALGORITHM

中村秀明\* 宮本文穂\*\* 河村 圭\*\*\*

Hideaki NAKAMURA, Ayaho MIYAMOTO and Kei KAWAMURA

\*博士(工学) 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

\*\*工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

\*\*\*修士(工学) 山口大学大学院理工学研究科博士後期課程 (〒755 宇部市常盤台 2557)

This paper describes an optimization technique of repair and strengthening planning for deteriorated existing bridges. The genetic algorithm (GA) that is search algorithm based on the mechanics of natural selection and natural genetics was adopted in order to search optimal maintenance planning with both of the minimum maintenance costs and maximum quality. By applying this system to an existing bridge, it has been verified that employed system is effective for making optimal maintenance planning.

**Key Words:** genetic algorithm(GA), multiobjective optimization, maintenance planning, repair, strengthening

#### 1. はじめに

道路交通網の中で重要な位置を占める橋梁の維持管理対策が重要な社会問題となってきた。現在の日本では、橋齢 50 年を越えた橋梁は、欧米に比べまだまだ少ないものの、今後、昭和 30 年代に架設された橋梁が設計寿命を迎え、その老朽橋対策が問題となることが予想される。既設橋梁の多くは、車両制限令の改正に伴う車両の大型化、あるいは交通量の増大等により設計当初に考えられていたよりも過酷な条件下にさらされている。さらに、コンクリート橋においては、塩害や中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学的腐食等による劣化も進んでいる。このような状況の中、道路整備に使える予算には限りがあるので、限られた予算の中で社会資本である橋梁を維持していくためには、適切な維持管理により橋梁の余寿命を延ばす必要がある。橋梁の維持管理を合理的に行うためには、まず始めに橋梁の調査や点検を行い、橋梁の現在の損傷状況を診断し、その後、診断結果をもとに維持管理計画を立てる必要がある。当研究室では、従来より、簡単な目視および非破壊検査程度の点検結果を入力することによりコンクリート橋の診断が行える「コンクリート橋耐用性診断エキスパートシステム<sup>1)</sup>」の開発に取り組んできた。本研究では、このエキスパートシステムの診断結果を基に予定の供用年数(余寿命)を満

たすための維持管理計画が策定できるシステムの構築を行った。この維持管理計画問題は、対象とする橋梁の損傷程度に応じて、多数の補修・補強工法と施工時期との組み合わせによる組み合わせ最適化問題に帰着される。本研究で対象とするような組み合わせ最適化問題は、問題の変数、規模が非常に大きくなり、厳密な最適解を得ることが実用上困難である。このため、必ずしも最適ではないが実用上支障をきたさない程度の準最適解を効率良く求める方法として、近年生物の遺伝と進化を模倣した遺伝的アルゴリズム(GA)<sup>2)</sup>が注目されており、本研究においては、遺伝的アルゴリズムを用いた既存橋梁の維持管理計画の最適化を試みた。

#### 2. システムの概要

図-1 に本システムの概要を示す。本システムでは、まず始めに簡単な目視および非破壊検査による点検を行い、その結果をエキスパートシステムに入力し、橋梁部材の点検時における健全度(損傷の程度)を評価する。次に、この点検結果を基に、劣化予測式より現在までの劣化の進行状況とこれからの余寿命を予測する。さらに、補修・補強工法とその効果、費用の関係から遺伝的アルゴリズムを用いて維持管理計画の最適化を行う。

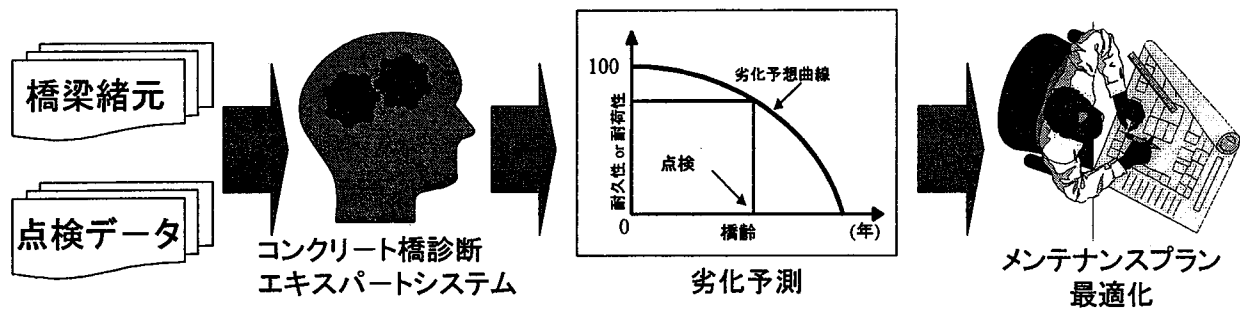


図-1 本システムの概要

## 2.1 コンクリート橋診断エキスパートシステム<sup>1)</sup>

このシステムは、橋梁台帳にある橋梁緒元などのデータと簡単な目視および非破壊検査による点検（供用状態やひび割れ箇所、幅など）の結果を用いることで現在の橋梁の性能（例えば、耐荷性や耐久性など）を0～100の平均健全度の値で評価する。

## 2.2 橋梁部材の劣化予測

エキスパートシステムによって橋梁部材の現在の損傷の程度は把握できるが、将来の劣化の進行程度は予測できない。そこで、橋梁部材ごとの健全度を表す指標として「耐荷性」、「耐久性」の2つを考え、それぞれについて劣化の進行状態を曲線で表現した「予測劣化曲線」を仮定した。すなわち、エキスパートシステムの出力である耐荷性、耐久性の平均健全度をそれぞれ $S_L, S_D$ とおくと、それぞれの予想劣化曲線は次式となると仮定した。

$$S_L(t) = f(t) = b_L - a_L t^4 \quad (1)$$

$$S_D(t) = g(t) = b_D - a_D t^3 \quad (2)$$

現在のところ耐荷性の予想劣化曲線については明確なデータはないが、過去に行った実橋床版および主桁に関する実験データなどから、おおそ4次関数に近い形でカーブを描くことが予想されることから、耐荷性の劣化曲線については式(1)に示す橋齢 $t$ についての4次関数を仮定し、一方、耐久性については、耐荷性よりも次数が1つ少ない（微係数）という考えが一般的かつ合理的であると考えられるため、耐久性の予想劣化曲線を式(2)に示すように橋齢 $t$ についての3次関数と仮定した<sup>3)</sup>。

ここで、式(1)および式(2)の定数 $a_L, b_L, a_D, b_D$ は、供用開始時（橋齢0年）の耐荷性および耐久性の平均健全度が100であること、および、点検時の橋梁の平均健全度（エキスパートシステムからの最終出力結果）の2点を用いることにより求めることができる。また、維持管理対策（補修・補強）が予想劣化曲線に及ぼす影響については、補修・補強工法またはその組み合わせにより異なるため、次節で詳しく説明する。

## 2.3 各種補修・補強の効果

### a) 補修の効果

補修を行った場合の具体的な効果の定量化を実際に橋梁を維持管理する技術者の意見を参考に以下のように仮定する<sup>3)</sup>。

- ①耐久性の平均健全度が100に戻る。
- ②耐荷性の劣化速度が緩和される。（実際には耐荷性の予想劣化曲線の傾きが1/2になる。）
- ③表面保護工法の効果は、特例として以下のように考える。すなわち、「ガラスクロス」および「吹き付け」の効果は、耐久性の予想劣化曲線の傾きが緩和されるのみとし、ガラスクロスでは傾きが1/2に、吹き付けでは、傾きが3/5になるとした。

### b) 補強の効果

補強を行った場合の具体的な効果の定量化についても、橋梁を維持管理する技術者の意見を参考に以下のように仮定する<sup>3)</sup>。

- ①耐荷性の平均健全度が架設時以上に戻る。
- ②補強による耐荷力の余裕分として、耐荷性の劣化速度が緩和される。（実際には、耐荷性の予想劣化曲線の傾きが2/3になる。）
- ③耐久性には効果なし。

## 2.4 維持管理計画のモデル化

実際の維持管理計画の最適化では、非常に多くの要因を総合的に判断しなくてはならない。その際に考慮する指標としては、経済性だけでなく、安全性、機能性、環境性等が考えられるが、現時点でこれら全てを考慮することは、非常に難しいため、本研究では、第1段階として経済性と品質の2つの指標をもとに最適化を行った。ここで言う経済性とは、実際に橋梁の維持管理にかかった費用の合計、すなわち補修・補強費用と定期点検費用の合計であり、これを最小化する。また品質は、診断を行った時点から予定供用年数までの各年における「耐荷性」と「耐久性」の平均健全度の総和であり、これを最大化する。

維持管理計画の最適化は、図-2に示されるように、経年ごとに考慮される数種類の維持管理対策を「いつ、ど

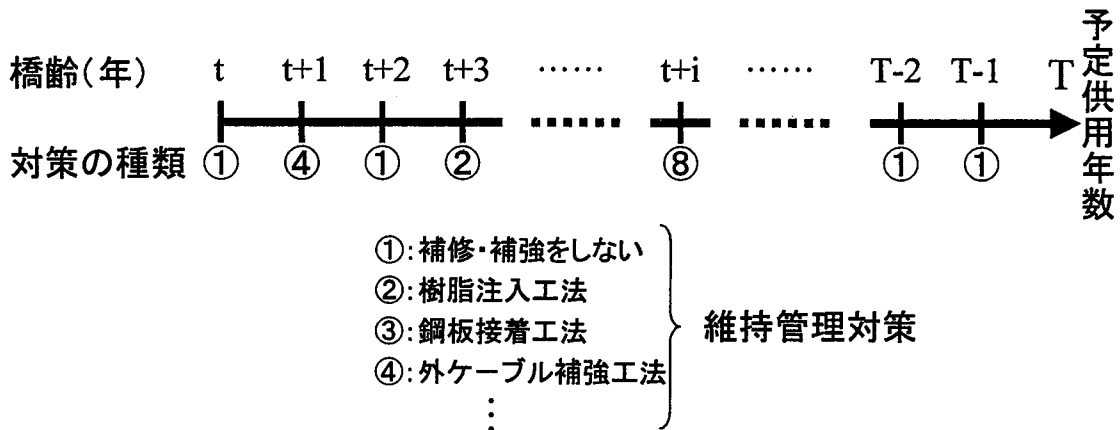


図-2 維持管理計画のモデル化

のような組み合わせで行えば効率良く維持管理ができるか」という組み合わせ最適化問題としてモデル化することができる。このように本研究では、維持管理計画を経済性と品質の両方を考慮に入れた多目的な組み合わせ最適化問題としてとらえ最適化を行った。

### 3. GAを用いた維持管理計画の最適化

維持管理計画は、対象とする橋梁の損傷程度に応じて、多数の補修・補強工法と施工時期との組み合わせによる組み合わせ最適化問題に帰着される。本研究で対象とするような組み合わせ最適化問題は、問題の変数、規模が非常に大きくなり、最適解を得ることが実用上困難である。このため、必ずしも最適ではないが実用上支障をきたさない程度の準最適解を効率良く求める方法として近年注目されている遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた最適化を試みた。また、本研究での最適化問題は、経済性と品質といった多目的な計画問題となることから  $\epsilon$ -制限法<sup>4)</sup>を用いて対処した。

#### 3.1 $\epsilon$ -制限法<sup>4)</sup>

$\epsilon$ -制限法とは、何らかの方法で目的関数に優先するものがある場合に、次のような問題として定式化する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{maximize} \quad f_1(x) \\ \text{subject to} \quad f_i(x) \geq \epsilon_i \quad i = 2, \dots, k \\ \quad \quad \quad x \in X \end{array} \right\} \quad (3)$$

これは、 $f_2(x), \dots, f_k(x)$  が高位の目的関数であり、これらの目的関数のとる値をある値以上に拘束し、最も重要度の低い (この場合  $f_1(x)$ ) 目的関数の最大値を求めようとするものである。

#### 3.2 $\epsilon$ -制限法を用いた対話手法のアルゴリズム

今、 $f_1$  を維持管理対策費の総費用 (経済性の目的関数)、 $f_2$  を「耐荷性」と「耐久性」の平均健全度の総和 (品質の目的関数) とする。目的関数の重要度は、 $f_1$ 、 $f_2$  の順とする。つまり経済性重視と考える。この場合には、 $\epsilon$ -制限法を用いた対話手法のアルゴリズムは次のようになる。

**Step 1:** 目的関数  $f_1$  のみを考慮した維持管理計画最適化問題を GA で求める。つまり、この経済性のみを考慮した最適維持管理対策の組み合わせを求める。このときの  $f_1$  の値を費用 (Cost) とする。

$$\text{(目的関数)} \quad f_1 = \sum_{t=t'}^{T-1} C_{jt} \rightarrow \min \quad (4)$$

ここで、 $C_{jt}$  は橋齢  $t$  年に実施される維持管理対策  $j$  の費用。

**Step 2:** このステップでは、 $\epsilon$ -制限法を適用し、次に示す最適化問題を GA で求める。ここで、 $\alpha$  は費用に上乗せできるコストであり、ユーザーが任意に設定する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{(目的関数)} \quad f_2 \rightarrow \max \\ \text{(追加制約条件)} \quad f_1 \leq \epsilon = \text{Cost} + \alpha \end{array} \right\} \quad (5)$$

**Step 3:**  $\alpha$  の値を変更し、Step 2 に戻る

#### 3.3 維持管理対策の GA へのコーディング

GA における解の探索は、個体という記号列を用いて行うため、対象の問題を個体の形に置き換える (コーディングする) 必要がある。本研究では、まず既存橋梁に対する各補修・補強工法を整理し、それらの組み合わせで維持管理対策を整理した。その結果、主桁では 10 通り、床版では 9 通りの維持管理対策があり、どちらも 2 進数で表現しようとする 4 bit 必要となる。このとき、

表-1 維持管理対策のコーディングの例 (主桁)

2進数コード	主桁の維持管理対策
0110	樹脂注入 or 樹脂注入+断面修復
1000	ガラスクロス+樹脂注入 or ガラスクロス+樹脂注入+断面修復
1101	モルタル吹付け+樹脂注入 or モルタル吹付け+樹脂注入+断面修復
0010	FRP 4枚 (鋼板) 接着+樹脂注入 or FRP 4枚 (鋼板) 接着+樹脂注入+断面修復
0100	FRP 2枚接着+樹脂注入 or FRP 2枚接着+樹脂注入+断面修復
1100	外ケーブル
0111	外ケーブル+樹脂注入 or 外ケーブル+樹脂注入+断面修復
1001	外ケーブル+ガラスクロス+樹脂注入 or 外ケーブル+ガラスクロス+樹脂注入+断面修復
0011	外ケーブル+モルタル吹付け+樹脂注入 or 外ケーブル+モルタル吹付け+樹脂注入+断面修復
others	補修・補強をしない

表-2 維持管理対策のコーディングの例 (床版)

2進数コード	床版の維持管理対策
0110	樹脂注入 or 樹脂注入+断面修復
0010	FRP 4枚 (鋼板) 接着+樹脂注入 or FRP 4枚 (鋼板) 接着+樹脂注入+断面修復
0100	FRP 2枚接着+樹脂注入 or FRP 2枚接着+樹脂注入+断面修復
1100	縦桁増設
1011	縦桁増設+樹脂注入 or FRP 2枚接着+樹脂注入+断面修復
0111	床版増厚
1000	床版増厚+樹脂注入 or 床版増厚+樹脂注入+断面修復
0011	床版打替え
others	補修・補強をしない

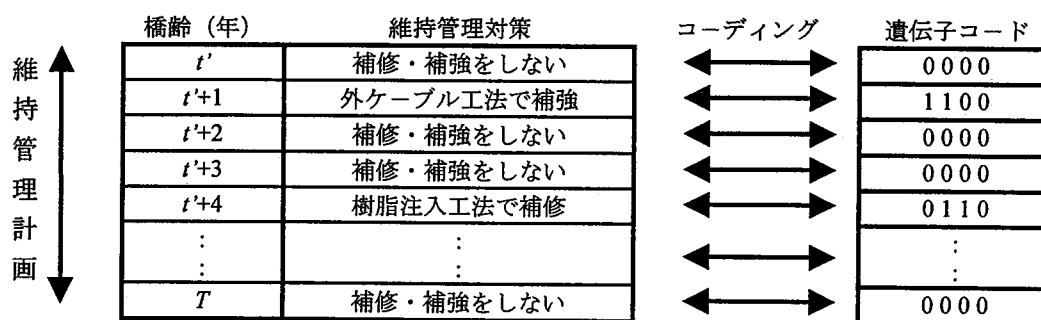


図-3 維持管理計画のコーディング例

表-3 計算に用いたGAのパラメータ

項目	パラメータの値, 手法
個体数	30
世代数	300
突然変異率	10%
選択手法	トナメント方式+エリート保存方式
交叉手法	1点交叉
交叉率	100%
終了条件	世代交代数=世代数

4 bit の 2 進数で表現可能な対策は 16 通りであり、コードと各対策を 1 対 1 で対応づけると主桁では 6 通り、床版では、7 通りの致死遺伝子をもつ個体が発生してしまう。そこで、実際の維持管理計画では、「補修・補強をしない」が他の対策に比べ選択される回数が多いことから余りのコードは全て「補修・補強をしない」に対応づけることとした。また、本研究の突然変異の方法は、4 bit コードのうち 1 bit を選択しその値を反転させる方法を用い

ているため、ある維持管理対策が突然変異により変わらう対策はハミング距離が 1 である 4 つの対策だけであるので、コードと各対策との対応づけを考慮し、表-1 および表-2 のように維持管理対策と 2 進数コードの対応づけを行った。また、維持管理の対象となる期間は現時点から予定供用年数までで、対策は各年について行うため、各年の維持管理対策を行で表し、維持管理計画としては、それを各年について並べた 2 次元配列状の個体とした。維持管理計画のコーディング例を図-3 に示す。

### 3.4 GAの各パラメータの設定

GAの手法には様々なアルゴリズムが提案されているが、本研究では、単純GAを採用した。実際に計算に用いたGAの各パラメータを表-3 に示す。これらのパラメータは幾度かの試行錯誤により決定したものである。なお、GAを用いた最適化では、解が局所解に陥る恐れがあるため、本研究では、維持管理計画の策定を数回繰り返し、その内の最良解を採用している。

表-4 維持管理計画策定のための入力データ

項目	入力データ
橋梁名	Y橋
主桁耐久性	39.0
主桁耐荷性	62.1
床版耐久性	48.4
床版耐荷性	59.6
主桁間隔 (m)	1.57

表-5 分枝限定法による維持管理計画

橋齢	維持管理対策 (主桁, 費用最小化)	費用 (U)
65	ガラスクロス+樹脂注入+断面修復	91.0U
70	ガラスクロス+樹脂注入	
75	樹脂注入	

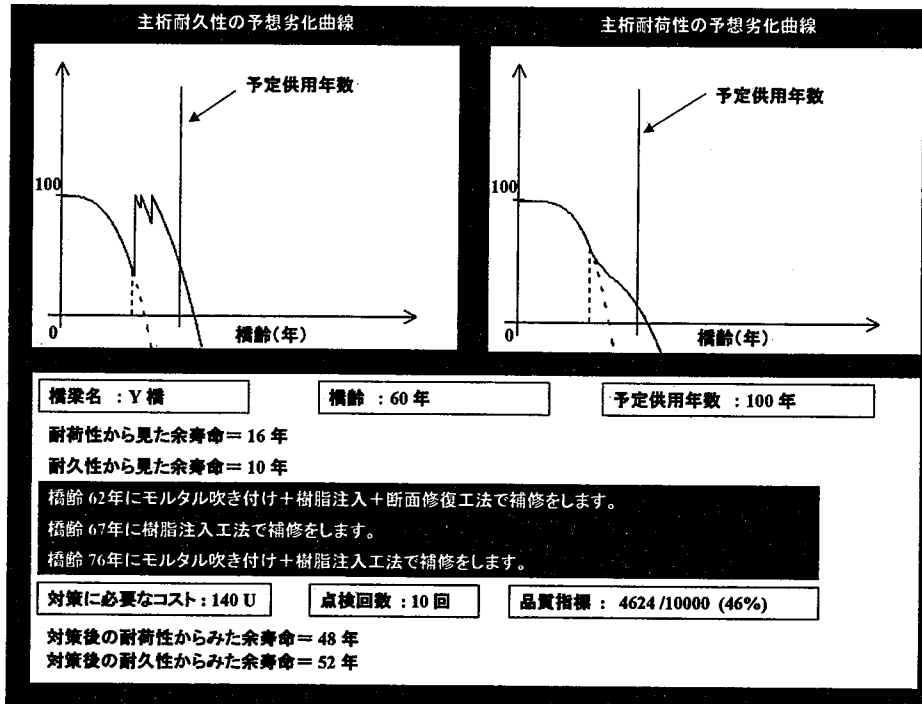


図-4 維持管理計画の出力結果 (主桁, 費用最小化)

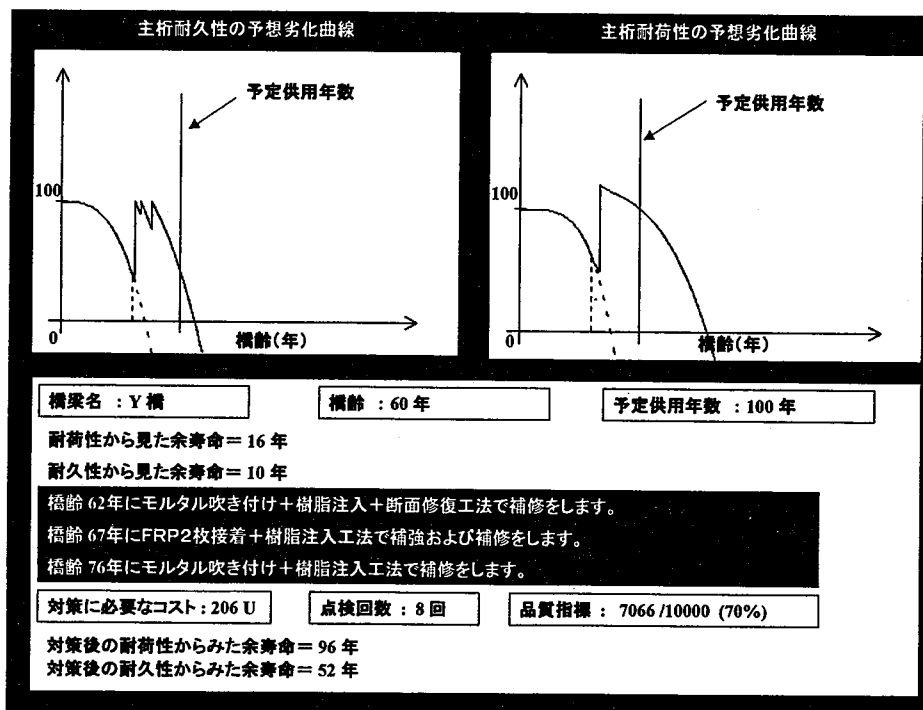


図-5 維持管理計画の出力結果 (主桁, 品質最大化)

#### 4. 既存橋梁への適用

本システムの妥当性を検討するため、山口県内に実際に架設されている「Y橋（橋齢 60 年）」に対する維持管理計画の最適化を行った。入力データは、コンクリート橋診断エキスパートシステムの出力結果を用いた。実際に本システムに入力した値を表-4 に示す。本システムによる最適化の結果として、図-4 に主桁に対して費用最小化を目的として最適化を行った場合のシステムの出力画面を示す。また図-5 には、図-4 の結果に上乗せ予算として 75U（1U≒¥1,000/m<sup>2</sup>）を上乗せし、これを予算制約額として品質の最大化を行った結果を示す。これらの出力画面は、本システムの最終画面であり、上部には、耐荷性と耐久性の予想劣化曲線をグラフにしたものが表示され、下部には策定された維持管理計画、必要なコスト、余寿命などの各結果が示される。図-4 の結果から「耐荷性」および「耐久性」からみた余寿命は、それぞれ 16 年、10 年であり、このままでは予定供用年数を満たすことができないことが分かる。図-4 では、経済性のみを考慮に入れた最適化を行うことにより、橋齢 62 年、67 年、76 年にそれぞれ補修が行われ、その結果これらの維持管理対策により余寿命は 48 年延び、その費用は、140U である。一方、図-5 は上乗せ予算を 75U として総費用 215U を制約条件として品質の最大化を行った結果であるが、これによると、橋齢 67 年に補強および補修が行われており、その結果品質指標が 46%（図-4 参照）から 70%に上がっており、耐久性の余寿命は変わらないものの、耐荷性の余寿命は、48 年から 96 年に延びている。また、総費用は 206U で制約条件である 215U を満足している。

以上のようなGAの最適化手法としての妥当性を検証するため、比較手法として分枝限定法<sup>4)</sup>を用いて経済性のみを考慮に入れて最適化を行った維持管理計画を表-5 に示す。分枝限定法では、点検費用(4U×10 回)を考慮していないことを考えると、GAを用いて最適化した結果とほぼ同様の維持管理計画が得られている。

#### 5. まとめ

本研究では、準最適解を効率良く求める方法として、近年注目されているGAを、橋梁の維持管理計画の策定に適用し、「経済性」と「品質」の両方を考慮できる維持管理計画の策定を行ったものである。以下に本研究で得られた成果をまとめる。

- 1) GAにε-制限法を適用することにより、多様な維持管理計画の作成が可能となり、維持管理費用の最小化および品質の最大化の両方を考慮できる維持管理計画の策定が可能となった。
- 2) 最適化手法としてGAを用いることで、実用上支障をきたさない準最適解を効率良く求めることが可能となった。
- 3) 経済性のみを考慮に入れた維持管理計画の比較では、GAを用いて得られた維持管理計画と分枝限定法を用いて得られた維持管理計画はほぼ同等であり、計算量はGAの方がはるかに少なかった。

#### 参考文献

- 1) 宮本文穂, 串田守可, 森川英典, 木下和哉: コンクリート橋診断ニューロ・ファジィエキスパートシステムの開発と信頼性の向上, 土木学会論文集, No. 510/VI-26, pp. 91-101, 1995. 3.
- 2) 荻原将人: ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, 産業図書, pp. 93-110, 1994.
- 3) 宮本文穂, 串田守可, 足立幸郎, 松本正人: Bridge Management System(BMS)の開発, 土木学会論文集, No. 560/VI-34, pp. 91-106, 1997. 3.
- 4) 伊藤正夫, 今野浩: 数理計画の応用(理論編), 産業図書, 1982.

(1997. 10. 20 受付)