

Bridge Management System(BMS)を利用した 既存橋梁の最適維持管理計画の策定

宮本文穂¹・河村 圭²・中村秀明³

¹正会員 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)

²学生会員 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)

³正会員 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)

本研究は、従来より著者らが開発してきた「橋梁維持管理支援システム (Bridge Management System)」の核となる1機能として、対象とする各橋梁ごとに経済性および橋梁部材の品質の両方を考慮した最適維持管理(補修・補強)計画が作成できる機能の追加を行ったものである。なお、多目的問題に対してはε-制限法を適用し、最適解の探索には並列的な解探索が可能である遺伝的アルゴリズム(GA)を適用した。また、構築したシステムの有用性を検討するため、実橋への適用を試み、出力結果の妥当性を考察した。

Key Words : *BMS(Bridge Management System), bridge rating, lifecycle cost, multiobjective optimization, maintenance planning, genetic algorithm(GA)*

1. 緒言

我が国の国道を始めとする主要道路に架かる橋梁は、全長 15 m以上の主要なものだけで約 13 万橋(1996 年現在)あり、これより小さなものは数え切れないほど架設されている。今後、2030 年代には、この約 13 万橋のうち橋齢 50 年以上の橋梁が約 5 割を占めるほどに膨れ上がると言われており、今後、橋梁の老朽化が重要な社会問題となることは明白である¹⁾。また、上述の既存の橋梁の現状は、厳しい自然条件、近年における急激な交通量の増加や車両の大型化などから、当初の設計よりも過酷な供用条件のもとでの使用に耐え、著しい損傷を受けているものも多くなってきている。さらに、特にコンクリート橋においては、従来より高い耐久性を有しメンテナンスフリーとする考えが支配的であったが、塩害や中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学的腐食などを原因とする耐久性、耐荷性の低下が見受けられるようになっており、維持管理対策を急ぐべき状態の橋梁が年々増加している。

このような状況から近い将来、これらの橋梁に対する維持管理業務が増大し、補修・補強(維

持管理)対策費が新設橋梁の建設費を圧迫する事態になることが予想される。そこで、既存橋梁の正確な劣化診断ならびに診断結果に基づく補修・補強工法の選定のみならず、限られた予算内で最大の効果を得るための最適維持管理計画の作成が合理的かつ効率的に実施可能な統合型支援システムが必要とされてきている。

このような背景のもと、著者らは従来より「橋梁維持管理支援システム: Bridge Management System(BMS)²⁾」(以下、前 BMS と略記する)の開発に取り組んできたが、本研究では、これをさらに発展させるために、「橋梁診断システム」、「補修・補強工法選定システム」などの前 BMS に付与すべき主要な機能の1つとして、「経済性」および「橋梁部材の品質」の両方を考慮した最適維持管理計画が作成できる機能を追加したものである。なお、最適解の探索には、近年組み合わせ最適化問題の解法として注目されている遺伝的アルゴリズム(GA)を適用することで高速に近似解の提示を可能とした。さらに、これらの機能を組込んで充実をはかった BMS (以下、本 BMS と略記する)の有用性を検討するため、これに実橋に関する系統的なデータ入力を行い、その出力結果の妥当性について考察した。

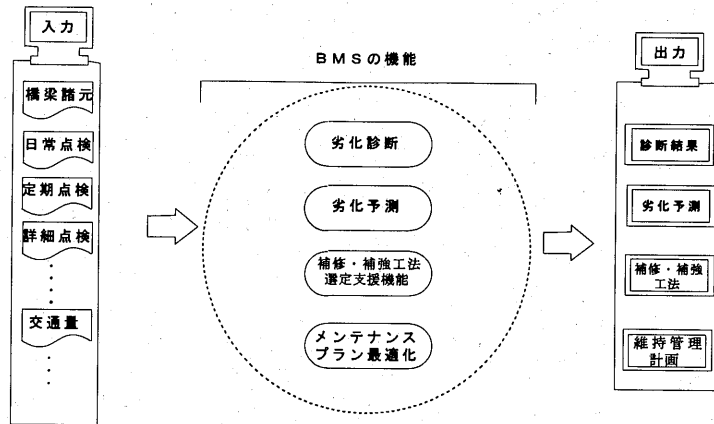


図-1 本BMS構成のイメージ図

2. 本BMS構築の現状と特徴

(1) システム化の範囲

BMS を最も広義な定義で言うならば、文献によっては多少ニュアンスが異なっているが、「橋梁に関わる全ての行為（計画・設計・施工・点検・劣化診断・補修・補強・架替）を最適に実行するための支援システム³⁾」とすることができる。また、これらの行為を最適化する場合に用いられる評価指標（目的関数）も様々なもの（例えば、経済性、品質、安全性、機能性、環境性、耐震性など）が考えられている^{4), 5)}。さらに、BMS 開発の最終的な目標は、「道路網を構成する橋梁全体をネットワークとしてとらえ、限られた予算の中で要求される性能に対して最大の効果を得るための最適維持管理計画の作成を支援する」と言えるであろう⁶⁾。しかしながら、はじめからこれらを目標とする BMS の構築を考えると非常に複雑なシステムになる。そこで、本研究における現時点での BMS の開発目標を「橋梁管理者が対象橋梁のメンテナンスプランを考慮する際に、その意志決定の支援となる維持管理計画案が作成可能なシステムの開発」とした。また、その評価指標（目的関数）としては経済性（維持管理対策に必要なコスト）と品質（耐久性と耐荷性の両方を考慮した指数）を考慮する。さらに、維持管理する橋梁を道路網レベルつまりネットワークレベルで考慮しておくネットワーク上の交通状況や各橋梁の重要度の設定など仮定すべき膨大な情報が必要になることから、本 BMS では1橋ごとのレベルで考慮して行くものとする。なお、本 BMS で主として対象とする橋梁はコンクリート橋であり、対象部材は主桁と床版としている。

(2) 全体像と特徴

本 BMS は、次の 4 つの機能から構成されている。

①劣化診断機能

対象橋梁の点検を行った時点での劣化状態を診断する機能である。この機能には、従来より本研究室で開発を行っている「コンクリート橋診断エキスパートシステム⁷⁾」（以下、エキスパートシステムと略記する）を適用している。

②劣化予測機能

対象橋梁の部材の性能が、今後どのように劣化して行き、いつ供用限界が来るのか、また補修・補強を行うと「耐久性」および「耐荷性」にどのような影響を与えるのかを示す機能である。

③メンテナンスプラン（補修・補強）最適化機能

劣化予測の結果、対象橋梁が予定供用年数を満たさないと判断された場合、いつ、どのような補修・補強を行って橋梁を維持管理していけば良いかを提示する機能である。

④補修・補強工法の選定支援機能

劣化診断機能の出力を基に、点検を行った時点において適切と思われる補修・補強工法を提案する機能である。

以上を集約すると、本システムの構成は、図-1に示すようなイメージ図で表すことができる。また、本 BMS の主要な特徴をまとめると、以下の 5 つに集約できる。

①橋梁の劣化診断機能にエキスパートシステムを適用している。

②橋梁の劣化を示す性能指標に、エキスパートシステムにおける最上位の診断項目である「耐荷性」および「耐久性」を用いており、それぞれに対して予想劣化曲線を仮定している。

- ③各種メンテナンス工法を補修および補強工法に区別し、それぞれの工法が予想劣化曲線へ及ぼす効果の定量化を行っている。
- ④エキスパートシステムの診断結果を基に、点検を行った時点での適切なメンテナンス工法の選定が可能である。
- ⑤予定供用年数を設定すると、最適化指標を満たすメンテナンスプラン（維持管理計画）の提示が可能である。

3. 維持管理計画の策定方法

(1) 本BMSのフロー

本 BMS では、図-2 に示すフローに従って最適維持管理計画の策定を行う。まず、本 BMS に橋梁諸元データやひび割れ状況などの目視点検データなどを入力する [①]。この入力データは、劣化診断機能で処理され、点検時における橋梁部材の診断結果が出力される。例えば、「耐荷性」や「耐久性」の平均健全度の値が 0 ~ 100 点で表される [②]。次に、劣化予測機能では劣化診断機能の出力である「耐荷性」と「耐久性」の平均健全度の値を用いて、予想劣化曲線より部材劣化の現在までの進行経路とこれからの余寿命を予測する [③]。この結果から、橋梁の寿命が予定供用年数を満たさないと判断されると、メンテナンスプラン最適化機能において維持管理費最小化といったような評価基準を基に最適維持管理計画が作成される [⑥]。また、この最適化を行うためにあらかじめ維持管理対策（補修・補強工法）と費用の関係や維持管理対策が予想劣化曲線へ及ぼす効果を定量化しておく [④⑤]。なお、本 BMS の最終出力項目は、最適補修・補強時期、適用工法、耐荷性、耐久性、必要な費用などである。

(2) 橋梁部材の劣化診断機能⁷⁾

橋梁部材の劣化診断手法としては、従来より本研究室で開発を行ってきているエキスパートシステムを適用している。このシステムは、技術者が橋梁の診断を行う際の診断過程を耐用性を頂点 (final goal) とする階層構造となるように診断プロセス⁸⁾を設定しており、例えば、主桁に対する診断を行う場合には、まず橋梁諸元や点検データより下位の診断項目である「鉄筋の腐食ひび割れ」や「主桁設計」などについての診断を行った後に、上位の診断項目である「耐荷性」や「耐久性」の診断を行う。具体的な構築方法は、この診断プロセスをファジィ集合を含む複数の if-then ルールの形で表し、それぞれを前

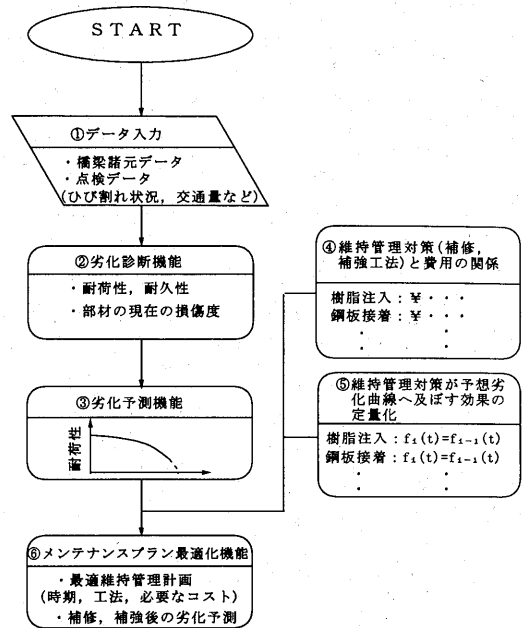


図-2 本BMSのフロー図

件部の命題, if-then 関係, 後件部の命題の3つのパートに分解する。そして、前件部および後件部の命題を非線形関数が同定可能な3層ニューラルネットワークで表現し、両者を結びつける if-then 関係にニューラルネットワークの連想記憶を適用してファジィ推論を可能とするエキスパートシステムである。このシステムは、損傷程度を示す danger ~ safe の5段階評価を支持する程度と平均健全度を最終的に出力する。なお、平均健全度は、5段階評価を非ファジィ化したものであり、帰属度関数の重心値を 0 ~ 100 点で表示したものである。また、エキスパートシステムを構築する際、点数にはあらかじめ以下のような基準⁹⁾を設けている。

- 100: 設計、施工ともに問題のない架設直後の状態 (safe)
- 75: 僅かに劣化しているが何等憂慮もなく健全な状態 (slightly safe)
- 50: 供用年数から言えば、良くもなく悪くもない普通の状態 (moderate)
- 25: 補修・補強が不可欠になる状態 (slightly danger)
- 0: 供用すべきでない状態 (danger)

(3) 橋梁部材の劣化予測機能

橋梁部材の劣化は、一般に橋齢が古くなるに従って急速に進行すると考えられているため、横軸に橋齢を、縦軸に耐荷性、耐久性の平均健全度を取って

グラフを描くと、凸状のグラフになることが予想される。耐荷性の劣化曲線については現在のところ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^{10), 11)}などから、おおよそ四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、耐荷性の劣化曲線式を四次関数と仮定する。一方、耐久性については、耐荷力などの橋梁の性能などの経時変化に対する抵抗性と定義されていることから¹²⁾、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、耐久性の劣化曲線式を三次関数と仮定した。以上のことから、本 BMS では、劣化診断機能の出力である「耐荷性」、「耐久性」の平均健全度をそれぞれ $S_L(t)$ 、 $S_D(t)$ とおき、それぞれの性能の予想劣化曲線式は、耐荷性については橋齢年数 t についての四次関数、一方、耐久性については三次関数で表されると仮定している²⁾。しかし、これらの曲線は、架設されている地域や劣化原因などによって異なってくると考えられることから、今後のデータ蓄積により逐次更新する必要がある。

予想劣化曲線の算出方法

供用開始時から、本 BMS の劣化診断機能を用いて点検を行う時点までの予想劣化曲線の式を、

$$S_L(t) = f_{0i}(t) = b_{L0i} - a_{L0i} t^4 \quad (1)$$

$$S_D(t) = g_{0i}(t) = b_{D0i} - a_{D0i} t^3 \quad (2)$$

とおき、 i 回目の維持管理対策（補修・補強）後の予想劣化曲線式を、

$$S_L(t) = f_{0i}(t) = b_{L0i} - a_{L0i} t^4 \quad (3)$$

$$S_D(t) = g_{0i}(t) = b_{D0i} - a_{D0i} t^3 \quad (4)$$

とおくものとする。

ここで、式(1)および(2)の定数 a_{L0i} 、 b_{L0i} 、 a_{D0i} 、 b_{D0i} の値は、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、また、本 BMS の劣化診断機能を用いて対象橋梁の診断を行ったときのそれぞれの平均健全度を利用することによって、それぞれ求めることができる。

なお、維持管理対策（補修・補強）後の予想劣化曲線の求め方は、補修・補強工法またその組み合わせごとに異なるものとする。維持管理対策が予想劣化曲線に及ぼす効果についての詳細は、次節で説明を行う。

(4) 維持管理対策効果の定量化²⁾

a) 各種補修・補強工法の効果

補修および補強効果を一例として主桁についてまとめたものを表-1 および表-2 に示す。ここで、表中の費用の単位 U(Unit) は $1U \equiv \text{¥}1,000/\text{m}^2$ と換算している。

表-1 補修・補強効果と費用（主桁）

工法	耐荷性	耐久性	費用
樹脂注入	※1	100 まで回復	23.8U
断面修復	※1	100 まで回復	14.0U
ガラスクロス	効果なし	※1	25.2U
モルタル吹付け	効果なし	※2	14.0U
鋼板接着	表-2	70 まで回復	112.5U
FRP 接着	表-2	70 まで回復	4 枚 112.5U 2 枚 78.0U
外ケーブル	表-2	効果なし	150.0U

※1 傾きが半分に回復、※2 傾きが 3/5 倍に回復
注) 耐荷性回復度については、表-2 参照。
補修費には、補修用足場費用 4.2U を含む。

表-2 設計年次別各補強工法による耐荷性回復度 R（主桁）

設計年次	鋼板接着 (FRP 4 枚)	FRP 接着 (2 枚)	外ケーブル
～1939 年	130	120	150
～1956 年	120	110	140
1956 年～	100	100	100

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管理機関に属する技術者（専門技術者）の意見を参考に以下のように仮定する。なお、仮定の妥当性については文献 2) を参照されたい。

① 耐久性の平均健全度が 100 にグレードアップする。

これは、補修を行う以上、耐久性については新設時と同じ状態にまで回復させることを目標とするのが普通であるため、補修工法による耐久性の平均健全度は 100 に回復するであろうと考えたことによる。

② 耐荷性の劣化速度が緩和される（耐荷性の予想劣化曲線の傾きが (1/2) 倍に回復する）。

これは、補修を行うことは、耐久性のグレードアップのみならず、耐荷性の劣化スピードを緩やかにする働きもあるであろうと考えたためである。この傾きの回復の度合いをいくらかに設定するかについては、現状では不確定な部分が多いが、初期設定値として「傾き（劣化曲線式の微係数）が (1/2) 倍に回復する」ものとした。

③ 表面保護は以下のように特例として考える。すなわち、「ガラスクロス」および「モルタル吹付け」であるが、本研究ではこれらを表面保護工法として考え、その効果を「耐久性の予想劣化曲線の劣化速

度が緩和される」のみとした。これは、表面保護工法を適用すると耐久性の不連続な回復にはならないが橋梁部材の劣化、特に耐久性の劣化を抑制する効果があると考えられるためである。表面保護工法の具体的な効果は、次のように設定した。すなわち、ガラスクロスは樹脂注入や断面修復工法と組み合わせて使用されるとすると、ガラスクロスを使用した補修は、樹脂注入および断面修復のみを用いた工法と比べてその効果として「耐久性の予想劣化曲線の傾きが(1/2)倍に回復する」が加わる。また、モルタル吹き付けを含んだ工法も同様に、耐久性の劣化曲線の傾きが緩和されると考える。この効果は、ガラスクロスの8割とした。

補強の効果

補強を行った場合の具体的な効果の定量化を専門技術者の意見を参考に以下のように仮定する。

①耐荷性の平均健全度が100以上にグレードアップする。

これは、補強工法が何らかの形でその部材の耐荷機構を変化させ、耐荷力の増強を目指すという目的で行われるものであり、補強というものが古い設計基準に基づいて設計されたものの「レトロフィット」、すなわち、補強を行うことにより、時代と共に徐々に増加してきた交通荷重に対しても十分に抵抗できるように耐荷機構そのものを改善するという概念に基づいていることから、供用開始時点での耐荷性の平均健全度を100としたならば、補強後の耐荷性の平均健全度は、古い設計基準に基づいて設計されたものについては少なくとも100以上に回復させることができると考えたことによる。耐荷性の回復度は、文献2)において実際の設計基準の変遷を考慮して求めている。

本BMSの補強の基本概念では、補強の効果は①のみであるが専門家と補強効果について検討し、次の2つの効果を補強の効果として新たに付け加えるのが妥当との結論に至った。

②耐荷性の劣化速度の緩和を考慮する(耐荷性の予想劣化曲線の傾きが(2/3)倍に回復する)。

これは、補強による耐荷力の余裕分を考慮すると、補強による耐荷性の劣化曲線への影響として、劣化曲線の縦軸方向へのグレードアップの他に劣化曲線の傾きの緩和という効果が期待できると考えたことによる。

③レトロフィットを考慮した耐荷性の回復度の意味あいにより、耐荷性の劣化曲線の傾きが、 (R_{old}/R_{new}) 倍になる。

ここで、 R_{old} は「対象とする部材で用いられている設計基準の回復度」、 R_{new} は「新しい工法にお

ける設計基準の回復度」である。例えば、1940～1956年の基準で設計された主桁に対して補強を行う場合を表-2を参考にして考える。この橋梁に対して1994年に初めて補強として鋼板接着を行うとすると、元々は1940～1956年の基準で設計されている主桁の回復度(供用開始時点の耐荷性回復度 $R_{old} = 100$)は、1956年以後の基準で設計された主桁と同じレベルの回復度($R_{new} = 120$)にまで引き上げられる。さらに、1996年に外ケーブルで補強を行ったとすると($R_{old} = 120$: R_{old} には前回補強時の R_{new} が入る)、主桁の回復度は、140($R_{new} = 140$)になる。

上述の補修・補強効果の設定は初期設定値であり、今後の点検データなどの蓄積により逐次更新できるものとするが、現在のところはこの設定値を用いて維持管理計画案を作成している。

b) 維持管理対策とその効果

3.(4)a)では、橋梁部材の維持管理を目的として行われる工法が「耐荷性」または「耐久性」に及ぼす効果の定量化を行ってきた。ここでは、橋梁部材に対して行う単独の補修や補強またはその組み合わせ工法を1つの維持管理対策として考え、これらの対策が「耐荷性」および「耐久性」の予想劣化曲線に及ぼす効果を式(1)から式(4)および各工法の特性に基づいて以下のように算出する。

まず、本BMS中では、主桁および床版に対して考慮される維持管理対策を、それぞれ表-3の①～⑩および表-4の①～⑨とした。以下、一例として主桁について主に述べることにする。主桁に対する維持管理対策②(表-3)の補修1では、部材の劣化はひび割れが発生して断面の欠損が生じてくると考えて維持管理対策を行う年の「耐久性」の平均健全度の値($S_D(t)$)がある一定の値(境界値)以上であれば樹脂注入のみを考え、一定の値よりも小さくなると樹脂注入と断面修復の組み合わせを行うこととした。また、維持管理対策③および④は、対策②に表面保護工法を併用して行うとしたものである。この場合も、「耐久性」の平均健全度の値によって補修工法の組み合わせが異なるとした。この境界となる耐久性の平均健全度の値(50)は、劣化診断機能へサンプルデータの値をいくつか入力して求めた結果を利用して設定している。以下に、維持管理対策後の予想劣化曲線の導出方法をいくつか示す。

主桁に対する維持管理対策

対策②: 補修1を行う

補修1では、この維持管理対策を行うとき(橋齢 t 年のとき)の耐久性の値($S_D(t)$)が50以上の

表-3 各維持管理対策の予想劣化曲線への影響とそのコスト（主桁）

維持管理対策	工費 (U)	対策後の予想劣化曲線
①補修・補強を行わない	0	$f_{\omega}(t) = b_{L(t-1)} - a_{L(t-1)} t^4$ $g_{\omega}(t) = b_{D(t-1)} - a_{D(t-1)} t^3$
②補修1を行う A) 樹脂注入 B) 樹脂注入+断面修復	A) 23.8 B) 33.6	$f_{\omega}(t) = \{ b_{L(t-1)} - (1/2) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{\omega}(t) = \{ 100 + a_{D(t-1)} (t'')^3 \} - a_{D(t-1)} t^3$
③補修2を行う A) 樹脂注入+ガラスクロス B) 樹脂注入+断面修復 +ガラスクロス	A) 44.8 B) 54.6	$f_{\omega}(t) = \{ b_{L(t-1)} - (1/2) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{\omega}(t) = \{ 100 + (1/2) a_{D(t-1)} (t'')^3 \}$ $- (1/2) a_{D(t-1)} t^3$
④補修3を行う A) 樹脂注入+モルタル吹き付け B) 樹脂注入+断面修復 +モルタル吹き付け	A) 33.6 B) 43.4	$f_{\omega}(t) = \{ b_{L(t-1)} - (1/2) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{\omega}(t) = \{ 100 + (3/5) a_{D(t-1)} (t'')^3 \}$ $- (3/5) a_{D(t-1)} t^3$
⑤鋼板接着 or FRP 4 枚接着 (補修1含む)	A) 132.1 B) 141.9	$f_{\omega}(t) = \{ R_{new} + (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{\omega}(t) = \{ 100 + a_{D(t-1)} (t'')^3 \} - a_{D(t-1)} t^3$
⑥FRP 2 枚接着 (補修1含む)	A) 97.6 B) 107.4	$f_{\omega}(t) = \{ R_{new} + (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{\omega}(t) = \{ 100 + a_{D(t-1)} (t'')^3 \} - a_{D(t-1)} t^3$
⑦外ケーブル	150.0	$f_{\omega}(t) = \{ R_{new} + (2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{\omega}(t) = b_{D(t-1)} - a_{D(t-1)} t^3$
⑧外ケーブル+補修1	A) 169.6 B) 179.4	$f_{\omega}(t) = \{ R_{new} + (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{\omega}(t) = \{ 100 + a_{D(t-1)} (t'')^3 \} - a_{D(t-1)} t^3$
⑨外ケーブル+補修2	A) 190.6 B) 200.4	$f_{\omega}(t) = \{ R_{new} + (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{\omega}(t) = \{ 100 + (1/2) a_{D(t-1)} (t'')^3 \}$ $- (1/2) a_{D(t-1)} t^3$
⑩外ケーブル+補修3	A) 179.4 B) 189.2	$f_{\omega}(t) = \{ R_{new} + (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{\omega}(t) = \{ 100 + (3/5) a_{D(t-1)} (t'')^3 \}$ $- (3/5) a_{D(t-1)} t^3$

注) 表中のAとBの区別は、「耐久性」の平均健全度の値が 50 以上の場合はAが選択され、50 未満の場合はBが選択されるとしている。

とき、補修工法の樹脂注入のみを行うものとする。また、耐久性の値が 50 未満のとき、樹脂注入と断面修復を組み合わせた補修が行われるとする。樹脂注入のみの効果は、表-1 に示されているものを使用する。樹脂注入と断面修復を組み合わせた維持管理対策の場合は、この組み合わせを1つの補修工法と考え、樹脂注入また断面修復を単独で行ったときの効果と同じであると考え。つまりどちらの場合でも予想劣化曲線に及ぼす影響は同じで、工費のみ異なるものとする。これは、本研究の補修効果の検討において、どのような損傷状態にあっても補修を行うからには、供用開始時の状態（耐久性の平均健全度 100）に回復すると仮定したことによる。

・耐荷性について

この維持管理対策を行う前の耐荷性の予想劣化曲線式を、 $f_{\omega-1}(t) = b_{L(t-1)} - a_{L(t-1)} t^4$ とする。この対策の具体的な効果は、「耐荷性の予想劣化曲

線の傾きが(1/2)倍ほど緩和される」であることから維持管理対策後の予想劣化曲線は、 $f_{\omega}(t) = b_{L(t)} - a_{L(t)} t^4 = b_{L(t-1)} - (1/2) a_{L(t-1)} t^4$ となる。また、この維持管理対策を行うときの橋齢を t'' 年とすると、 $f_{\omega}(t'') = f_{\omega-1}(t'')$ が成立することから、 $b_{L(t)} = b_{L(t-1)} - (1/2) a_{L(t-1)} (t'')^4$ となる。よって、この維持管理対策後の予想劣化曲線（耐荷性）は、

$$f_{\omega}(t) = b_{L(t)} - a_{L(t)} t^4 = \{ b_{L(t-1)} - (1/2) a_{L(t-1)} (t'')^4 \} - (1/2) a_{L(t-1)} t^4 \quad (5)$$

で表される。

・耐久性について

この維持管理対策を行う前の耐久性の予想劣化曲線式を $g_{\omega-1}(t) = b_{D(t-1)} - a_{D(t-1)} t^3$ とし、この対策を行ったときの予想劣化曲線を、 $g_{\omega}(t) = b_{D(t)} - a_{D(t)} t^3$ とする。この効果は、「耐久性の平均健全度が 100 までグレードアップする」である。このこ

表-4 各維持管理対策の予想劣化曲線への影響とそのコスト (床版)

維持管理対策	工費 (U)	対策後の予想劣化曲線
①補修・補強を行わない	0	$f_{D(t)} = b_{D(t-1)} - a_{D(t-1)} t^4$ $g_{D(t)} = b_{D(t-1)} - a_{D(t-1)} t^3$
②補修を行う A) 樹脂注入 B) 樹脂注入+断面修復	A) 23.8 B) 33.6	$f_{D(t)} = \{ b_{D(t-1)} - (1/2) a_{D(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2) a_{D(t-1)} t^4$ $g_{D(t)} = \{ 100 + a_{D(t-1)} (t'')^3 \} - a_{D(t-1)} t^3$
③縦桁増設	44.3	$f_{D(t)} = \{ R_{new} + (2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{D(t)} = b_{D(t-1)} - a_{D(t-1)} t^3$
④縦桁増設 (補修含む)	A) 63.9 B) 73.7	$f_{D(t)} = \{ R_{new} + (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{D(t)} = \{ 100 + a_{D(t-1)} (t'')^3 \} - a_{D(t-1)} t^3$
⑤床版増厚	43.0	$f_{D(t)} = \{ R_{new} + (2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{D(t)} = b_{D(t-1)} - a_{D(t-1)} t^3$
⑥床版増厚 (補修含む)	A) 62.6 B) 72.4	$f_{D(t)} = \{ R_{new} + (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{D(t)} = \{ 100 + a_{D(t-1)} (t'')^3 \} - a_{D(t-1)} t^3$
⑦鋼板接着 or FRP 4 枚接着 (補修含む)	A) 94.6 B) 104.4	$f_{D(t)} = \{ R_{new} + (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{D(t)} = \{ 100 + a_{D(t-1)} (t'')^3 \} - a_{D(t-1)} t^3$
⑧FRP 2 枚接着 (補修含む)	A) 71.6 B) 81.4	$f_{D(t)} = \{ R_{new} + (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} (t'')^4 \}$ $- (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a_{L(t-1)} t^4$ $g_{D(t)} = \{ 100 + a_{D(t-1)} (t'')^3 \} - a_{D(t-1)} t^3$
⑨床版打替え	45.0	$f_{D(t)} = R_{new} - (R_{old}/R_{new}) a_{L(0)} (t - t'')^4$ $g_{D(t)} = b_{D(0)} - a_{D(0)} (t - t'')^3$

注) 表中のAとBの区別は、「耐久性」の平均健全度の値が50以上の場合はAが選択され、50未満の場合はBが選択されるとしている。

とから、この維持管理対策を行うときの橋齢を t'' 年と設定すると、この年に耐久性の平均健全度が100まで回復することから $b_{D(t)} = 100 + a_{D(t)} (t'')^3$ となる。また、劣化速度は変わらないことから、この維持管理対策後の予想劣化曲線(耐久性)は、

$$g_{D(t)} = b_{D(t)} - a_{D(t)} t^3 = \{ 100 + a_{D(t-1)} (t'')^3 \} - a_{D(t-1)} t^3 \quad (6)$$

で表される。

対策③：補修2を行う

この維持管理対策の耐荷性および耐久性の予想劣化曲線に及ぼす効果は、対策②の効果にガラスクロスの効果を加えたものになる。

・耐荷性について

ガラスクロス(表面保護工法)は、耐荷性には影響を及ぼさない。このことから、予想劣化曲線に及ぼす影響は、対策②と同様である。

・耐久性について

この維持管理対策を行う前の耐久性の予想劣化曲線を $g_{D(t-1)} = b_{D(t-1)} - a_{D(t-1)} t^3$ とする。ガラスクロス(表面保護工)の効果は「耐久性の予想劣化曲線の傾きが(1/2)倍ほど緩和される」であるから、この対策を行ったときの耐久性の予想劣化曲線は、

$g_{D(t)} = b_{D(t)} - a_{D(t)} t^3 = b_{D(t)} - (1/2) a_{D(t-1)} t^3$ となる。また、樹脂注入(樹脂注入と断面修復の組み合わせ)による補修効果は、「耐久性の平均健全度が100までグレードアップする」である。このことから、この維持管理対策を行うときの橋齢を t'' 年と設定すると、この年に耐久性の平均健全度が100まで回復することから、 $b_{D(t)} = 100 + a_{D(t)} (t'')^3$ となる。以上より、この維持管理対策後の予想劣化曲線(耐久性)は、

$$g_{D(t)} = b_{D(t)} - a_{D(t)} t^3 = \{ 100 + (1/2) a_{D(t-1)} (t'')^3 \} - (1/2) a_{D(t-1)} t^3 \quad (7)$$

で表される。

対策⑤：鋼板接着またはFRP 4 枚接着(補修1を含む)

鋼板接着またはFRP 4 枚接着で補強を行う場合は、その特徴から必ず補修1を含むと考える。

・耐荷性について

この維持管理対策を行った後の予想劣化曲線の求め方は、まず補強を行った場合の予想劣化曲線を求めておき、それをさらに補修したと考える。この維持管理対策を行うときの橋齢を t'' 年とする。 R_{new} については、表-2を参照して設定するものとする。

例えば、対象橋梁が1940年から1956年までの設計基準で施工されているとすると R_{new} は表-2より120となる。

<ステップ1：補強の効果>

補強効果のみを考慮したときの予想劣化曲線を、 $f_{I0}(t)$ とする。3.(4)a)で説明した補強効果②および③の設定を考慮すると、 $f_{I0}(t) = b I_{L0} - a I_{L0} t^4 = b I_{L0} - (2/3)(R_{old}/R_{new}) a I_{L0}^{-1} t^4$ となる。また、この維持管理対策を行うときの橋齢を、 t'' 年とすると、この年に耐荷性の平均健全度が R_{new} まで回復することから、 $b I_{L0} = R_{new} + (2/3)(R_{old}/R_{new}) a I_{L0}^{-1} (t'')^4$ となる。以上より、補強効果のみを考慮した予想劣化曲線(耐荷性)は、 $f_{I0}(t) = \{R_{new} + (2/3)(R_{old}/R_{new}) a I_{L0}^{-1} (t'')^4\} - (2/3)(R_{old}/R_{new}) a I_{L0}^{-1} t^4$ (8) となる。

<ステップ2：f1式に補修の効果を考慮>

f1式に補修の効果を検討したものをf2とすると、補修の具体的な効果は、「耐荷性の予想劣化曲線の傾きが(1/2)倍ほど緩和される」ことから次式となる。

$$f_{20}(t) = b I_{L0} - (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a I_{L0}^{-1} t^4 \quad (9)$$

ここで、この維持管理対策の補修および補強は、橋齢 t'' 年に行われることより、 $f_{I0}(t'') = f_{20}(t'')$ の関係が成り立つ。これより、 $b I_{L0} = b I_{L0} - (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a I_{L0}^{-1} (t'')^4$ となる。以上より、この維持管理対策後の予想劣化曲線(耐荷性)は、

$$f_{0}(t) = \{R_{new} + (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a I_{L0}^{-1} (t'')^4\} - (1/2)(2/3)(R_{old}/R_{new}) a I_{L0}^{-1} t^4 \quad (10)$$

で表される。

・耐久性について

鋼板接着またはFRP4枚接着を行ったときは、その特徴から「耐久性の平均健全度が70までグレードアップする」(表-1)とした。しかし、この工法を実際に維持管理対策として行うときは補修1と併用して行われることがほとんどであることから、補修の効果である「耐久性の平均健全度が100までグレードアップする」(表-1)が適用される。

以上の理由より、この維持管理対策が予想劣化曲線に及ぼす影響は対策②と同様となる。

(5) メンテナンスプラン(維持管理計画)最適化機能

本研究では、経済性(維持管理対策に必要なコスト)と品質(耐久性と耐荷性の両方を考慮

した指数)を評価指標(目的関数)とした維持管理計画の策定を行うメンテナンスプラン最適化機能の構築を目的としていることから、この最適化問題は、次に示される組み合わせ最適化問題でかつ多目的な計画問題としてモデル化できる。

【問題のモデル化】

劣化診断機能を用いて、ある橋梁(橋齢： t' 年、予定供用年数： T 年)の劣化診断を行い、さらにその結果を基に劣化予測機能を用いて将来の劣化予測を行ったとき、この橋梁部材の寿命が予定供用年数を満たさないと判断されれば、何らかの維持管理対策を行い予定供用年数を満たすようにしなければならない。予定供用年数を満たさない橋梁に対しては、次に示す問題設定を基に評価指標(維持管理費用の最小化と品質の最大化)を満足する最適な維持管理対策の組み合わせをメンテナンスプランとして提示する。

【評価指標】

経済性：予定供用年数を満たすために行われた維持管理対策の総費用(U)の最小化

品質：劣化診断機能で橋梁の診断を行った時点(現時点： t' 年)から予定供用年数 T までの各年における「耐荷性」と「耐久性」の平均健全度値の総和であり、この値が大きいものほど品質が良いと考える。

【問題設定】(対象部材：主桁)

主桁において考慮される維持管理対策は、表-3に示されるように10通りある。これらの維持管理対策は橋齢 t' 年から毎年考慮され、いずれかの対策が選択されると考える。つまり、維持管理対策を考慮する周期は1年ごとであるとする。橋齢 t 年で行う維持管理対策が選択されると、表-3に示すように t 年に必要となる工費と維持管理対策の効果が対応づけられる。ここで決定変数である維持管理対策の種類①~⑩を、それぞれ維持管理対策 j ($j = \{1, 2, 3, \dots, 10\}$) と置く。これら維持管理対策(決定変数の要素)は橋齢 t ($t \geq t'$) において排他的に選択される。

ここで、橋齢 t 年における耐荷性と耐久性の平均健全度は次式で求まる。

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq t < t' \text{ のとき } S_L(t) = f_{(i)}(t) \\ \qquad \qquad \qquad S_D(t) = g_{(i)}(t) \\ t' \leq t \leq T \text{ のとき } S_L(t) = f_{(i)}(t) \\ \qquad \qquad \qquad S_D(t) = g_{(i)}(t) \end{array} \right\} \quad (11)$$

$f_{(i)}(t)$, $g_{(i)}(t)$ は i 回目の維持管理対策後の予想劣化曲線式である。今回の問題設定では、一

年周期で維持管理対策を考慮することから $t' \leq t \leq T$ のとき $i = t - t' + 1$ となる。以上を考慮すると本問題は、維持管理費用の最小化また品質の最大化を目的とする組み合わせ最適化問題として次のように定式化できる。

【問題の定式化】

(目的関数)

$$F_1 = \sum_{i=t'}^{T-1} C_{tj} \rightarrow \min \quad (12)$$

$$F_2 = \sum_{t=t'}^T \{S_L(t) + S_D(t)\} \rightarrow \max \quad (13)$$

(制約条件)

$$S_L(t) > 0, S_D(t) > 0, 0 \leq t \leq T \quad (14)$$

ここで、

t : 橋齢,

j : 実施される維持管理対策の種類,

t' : 現在の橋齢 (現時点),

T : 予定供用年数,

$S_L(t)$: 橋齢 t 年での耐荷性の平均健全度,

$S_D(t)$: 橋齢 t 年での耐久性の平均健全度,

C_j : 橋齢 t 年に実施される維持管理対策 j の費用.

F_1 : 維持管理対策の総費用 (経済性指標)

F_2 : 「耐荷性」と「耐久性」の平均健全度値の総和 (品質指標)

(その他の制約条件)

① 鋼板あるいは FRP 4 枚接着の後に、また鋼板あるいは FRP 4 枚接着を行うというような実際に有り得ない対策順序をもつ維持管理計画は解候補から除く。

② 補強回数は橋梁の耐用期間において最大 3 回まで、維持管理対策として採用できるものとする。

4. 最適維持管理計画策定への GA の適用

この章では、前章で定式化を行ったメンテナンスプラン最適化問題に適用した最適化手法について述べる。この最適化問題は、多目的な組み合わせ最適化問題と考えられる。また、具体的な最適解の探索に、莫大な維持管理対策の組み合わせを考慮しなければならないことから、最適化手法としては遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた。さらに、多目的計画問題に関しては ϵ -制限法¹³⁾ を用いて対処した。

(1) 最適解探索アルゴリズム

多目的問題の最適化手法には、いくつかの解法が

あるが本 BMS では遺伝的アルゴリズムに対し適用が簡単な ϵ -制限法を用いて最適化を行った。この方法では、まず始めに費用最小のもとで最適化を行い、次に最小費用と上乘せ予算 α を足した額を制約条件として、品質最大化のもとで最適化を行うものである。これにより経済性のみならず品質をも考慮した維持管理対策が比較的簡単に求まる。

a) ϵ -制限法¹³⁾

この方法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できる。いま、目的関数の重要度は、 $F_k(x)$, $F_{k-1}(x)$, \dots , $F_2(x)$, $F_1(x)$ の順とする。

$$\left. \begin{array}{l} \text{maximize } F_1(x) \\ \text{subject to } F_i(x) \geq \epsilon, \quad i=2, \dots, k \\ x \in X \end{array} \right\} \quad (15)$$

これは $F_2(x)$, \dots , $F_{k-1}(x)$, $F_k(x)$ が高位の目的関数であり、これらの目的関数の取る値をある値以上に拘束し、最も重要度の低い (この場合 $F_1(x)$) 目的関数の最大化を求めようとするものである。この問題では $F_i(x) \geq \epsilon_i$, $i=2, \dots, k$ が X 内に許容領域を持つように ϵ_i を定めなければならない。

b) ϵ -制限法を用いた対話的手法のアルゴリズム

本研究ではユーザの費用設定によって様々な維持管理計画が提示できるように、以下に示すような ϵ -制限法を利用したアルゴリズムを考えた。

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。

Step 1 : 目的関数 F_1 のみを考慮したメンテナンス最適化問題を GA で求める。つまり、このステップでは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、そのときの F_1 の値を Cost 1, また F_2 の値を Quality 1 とする。

Step 2 : ϵ -制限法の適用

このステップからは、次に示す問題を GA で求める。ここで、 α は Cost 1 に上乘せるコスト (U) であり、ユーザが設定を行う。

$$\text{(目的関数)} \quad F_2 \rightarrow \max \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{(追加制約条件)} \quad F_1 &\leq \epsilon \\ &= \text{Cost } 1 + \alpha \end{aligned} \quad (17)$$

Step 3 : α の値を変更し、Step 2 へ戻る。

(2) 遺伝的アルゴリズム (GA)

a) 遺伝的アルゴリズム (GA) の概要

高等生物において増殖は、有性生殖によって行われるため父方と母方の遺伝子が混ざり合う。そして次世代へは、各個体の中でもより優れたもの、つま

り環境への適応度の高い個体の遺伝情報が優先的に伝えられ、同時に適応度の低い個体が自然淘汰されて行く。また、増殖を行う際には微妙なエラー（突然変異）を生じることがあり、生物の多様性が広がる。GAは、このような生物の遺伝と進化のメカニズムを工学的にモデル化したものであり、近年組み合わせ最適化問題の解法として注目されている手法である。具体的には、まず対象とする問題を遺伝子列（個体）として表現し、これらの個体集団に遺伝的操作を加えながら、世代交代を繰り返すことによって確率的に優れた解を求めようとするものである。GAは従来の解探索法と比べて、複数の探索点が相互協力的に解を探索して行くことにより、短時間でよい解を見つけることができるが、対象となる問題を具体的にGAで解くための一般的な方法がなく、設計者が選択すべきパラメータが多いというような特徴がある¹⁴⁾。図-3にGAの用語のイメージを示す。

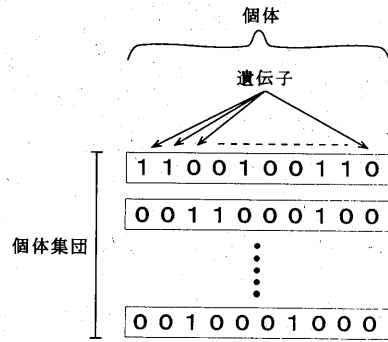


図-3 GA関連用語のイメージ図

b) GAの基本的な適用手順^{14), 15)}

GAを最適化問題に適用する際の一般的な手順を以下に示す。

<机上での適用部分>

Step 1 : 対象となる問題のモデル化・定式化

決定変数および制約条件の選定、また最大化あるいは最小化すべき目的関数 F の設定を行う。

Step 2 : 遺伝子型の決定 (コーディング)

対象とする問題の解候補を記号列 (個体) へ変換する方法を決定する。

Step 3 : 個体の適応度の定量化

目的関数 F と適応度関数 G との対応規則を決める。

Step 4 : 遺伝的操作の具体化

選択 (淘汰)、交叉、突然変異手法などの操作方法や関連するパラメータの値を定める。

<計算機上でのシミュレート>

Step 5 : 初期個体集団の決定

決められた遺伝子型で、要素が異なる様々な個体をランダムに、あらかじめ設定した集団サイズほど発生させる。

Step 6 : 各個体の適応度の評価

各個体の適応度をあらかじめ定めた方法で計算する。

Step 7 : 選択 (淘汰)

次のステップで交叉を行う個体の生存分布を決定する。

Step 8 : 交叉

遺伝子を組み替えて、新しい個体を発生させる。

Step 9 : 突然変異

遺伝子のある部分の値を強制的に変えて、個体集団としての多様性を大きくする。

Step 10 : 個体集団 (群) の評価

個体集団が、終了条件を満たしていれば終了し、満たしていなければ Step 6 に戻り計算を続ける。

c) GAの遺伝的操作とその手法のバリエーション

GAはその一般的な手法が確立されておらず、各プログラムの試行錯誤によるところが多い手法である。それ故、GAの適用手順の各 Step での手法にも多くのバリエーションが存在し、プログラマはそれらを取捨選択して問題にあたる必要がある。ここでは遺伝的操作の代表的な手法について述べる。

「選択 (淘汰) 手法」¹⁴⁾

選択 (淘汰) とは、個体集団の中からより適応度の高いものを次の世代の親として残し (選択)、適応度の低いものは選ばない (淘汰) という操作である。以下にその代表的な選択手法を述べる。

<適応度比例方式 (ルーレット方式)>

各個体の適応度からその世代の個体集団中での適応度の比をとり、その値を個体を選択される確率として用いる方式。その後、必要とされる個体の数だけその確率に従い選び出す。

<トーナメント方式>

「無作為に選んだ2つの個体を比べ、適応度の高い側の個体を残す」という作業を必要とされる個体の数だけ繰り返す方式。比べる個体の数は通常は2つだが、3つやそれ以上の場合もある。

<エリート保存方式>

個体集団の中で最も高い適応度を持つ個体を、そのまま交叉も突然変異もなしで次の世代に残すという方式。この手法が単独で使われることは少なく、他の手法と併用されることが多い。

<その他の方式>

ランク方式や期待値方式などが提案されている。

「交叉手法」

交叉とは、異なる個体間で遺伝子を組み替えることにより、新しい個体を発生させる操作である。これにより個体間の良い部分が組み合わせられてより良い個体を作ることができる（むしろその逆も起こりうる）。図-4には、基本的な交叉方法である1点交叉を示す。その他の交叉手法として、N点交叉やマスク方式¹⁴⁾、一様交叉¹⁵⁾などが提案されている。

「突然変異手法」

突然変異とは、個体集団が収束した際にその解が局所解に収束してしまうことのないように個体集団中の個体に多様性を持たせる操作である。通常、ある一定の確率で個体中の無作為に選んだ位置の遺伝子を0なら1に1なら0に逆転させる操作を行う。突然変異確率をあまり高くしすぎるとランダム探索と同様になるため、通常0.1 - 10.0%程度の値が良いといわれている。

「個体群の評価の手法」¹⁶⁾

計算機上での進化シミュレーションを終了するための代表的な評価基準を以下に示す。通常はIまたはIVを設定することが多い。

- I：個体集団中の最大の適応度が、設定されたあるしきい値より大きくなった。
- II：個体集団全体の平均適応度が、設定されたあるしきい値より大きくなった。
- III：世代交代回数に対する個体集団の適応度の増加率が、設定されたあるしきい値以下の世代が一定期間以上の長い間続いた。
- IV：世代数が、あらかじめ設定した回数に到達した。

(3) 具体的なGAの適用方法

a) 遺伝子型へのコーディング

GAにおける遺伝的操作は個体という記号列で行うことから、対象問題の解候補を個体の形に置き換える（コーディングする）必要がある。つまり、これは個体のどの部分にどのような順番で解候補を遺伝子として配置させるかを決定する作業である。ここでは維持管理計画策定問題のコーディング方法についての説明を行う。

本研究では、遺伝子は維持管理対策（決定変数）を表し、個体は維持管理計画を表現するものとした。一例として、いま、各年度ごとに取り得る主桁の維持管理対策の種類（決定変数の要素）は、表-3に示されるように10通りあることから、これを2進数表現を用いて各対策と2進数コードを対応づけさせようとすると4 bit 必要となる。このとき、4 bit の2進数で表現可能な対策数は16通りであることから、2進数コードと各対策を1対1で対応づける

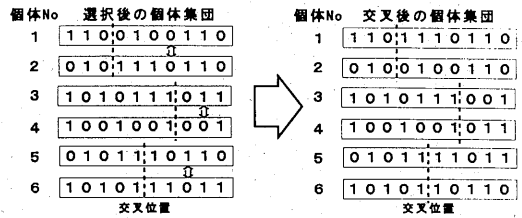


図-4 1点交叉の概念

表-5 主桁の維持管理対策の2進数表現

コード	主桁の維持管理対策
0110	対策②
1000	対策③
1101	対策④
0010	対策⑤
0100	対策⑥
1100	対策⑦
0111	対策⑧
1001	対策⑨
0011	対策⑩
others	対策①

と6通りのコードの余りができてしまう。この表現方法で計算を行っていくと致死遺伝子を持つ個体が発生し、計算効率が悪くなる。そこで、本研究での問題設定では、維持管理対策①「補修・補強を行わない」は、他の維持管理対策よりも頻繁に選択されることが考えられることから余りのコードは全て対策①に対応づけることにした。また、本研究の突然変異の方法は、この4 bit コードのうち1 bit を選択しその値を反転させるとしていることから、突然変異が起こった場合にある対策が変わり得る対策の数はハミング距離が1である4つの対策だけであるのでこのコードと対策の種別との対応づけにも気をつけなければならない。以上のことを考慮して、本研究では、表-5のように維持管理対策を2進数表現している。さらに、個体の表現方法は、図-5に示すように維持管理計画を行って表し、各維持管理対策を列で表現する2次元配列としている。

b) 適応度の計算方法

GAの基本的操作である選択（淘汰）を行うとき、各個体の適応度が非常に重要になる。ここでは、本研究における適応度の計算方法について説明を行う。前節で表現した個体はそれ自身が1つの維持管理計画を表現していることから、そのメンテナンスプランに必要な総費用（トータルコスト）は表-3を参照することで求めることが可能である。経済性を考慮して最適化する場合は、目的関数 F が総費用の最小化であるので、求めた総費用の値の逆数を個体の適応度の値として用いることができる（式(18)参照）。また、品質指標を最適化する場合は

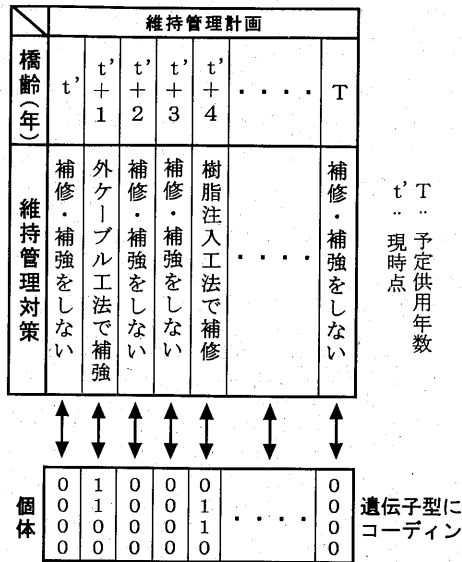


図-5 メンテナンスプランのコーディング例 (主桁)

3. (4) b) で示した方法で求まる予想劣化曲線式により経年ごとの「耐荷性」と「耐久性」の平均健全度が求まることから、その合計値を個体の適応度の値として用いることができる(式(19)参照)。このように、本研究では適応度関数 G の値が大きいもほど適応度の高い個体としている。

$$G_1 = \frac{1}{F_1} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n C_{ij}} \quad (18)$$

$$G_2 = F_2 = \sum_{i=1}^n \{S_L(t) + S_D(t)\} \rightarrow \max \quad (19)$$

ただし、制約条件である「耐荷性」と「耐久性」の平均健全度が 0 より大きいという条件(式(14))を満たさなくなった個体には、その時点でペナルティとして総費用に 5000 U を加えている。また、さらに品質指標を最適化する場合には、必要な総費用が維持管理者の定めたコスト上限以内に収まるという条件(式(17))を満たさなくなった個体は、ペナルティとして適応度を 0 にしている。このように、ペナルティを受けた個体は、次世代の親として選択される確率が小さくなる。

c) GA の各パラメータの設定

最適化問題に GA を用いる際には 4. (2) で述べたような遺伝的操作の各パラメータを設定しなくてはならない。表-6 に本研究で実際に最適化計算を行う際に用いた各パラメータを示す。本研究では、維持管理費用の最小化を行う場合に、GA での適応

表-6 計算に用いた遺伝的操作の各パラメータ

項目	パラメータの値, 手法
集団サイズ	30 個体
世代数	300 世代
突然変異率	10%
選択手法	トーナメント方式とエリート保存方式
交叉手法	1 点交叉
交叉率	100%
終了条件	世代交代数が世代数に達したら終了

度として、式(12)で求まる総費用の逆数(式(18)を参照)を用いている。選択手法として一般に用いられている「適応度比例方式」を採用した場合には、それぞれの個体ごとの適応度の差が小さくなり、費用の差が選択確率として反映されにくい。それに対して適応度の大小だけで選択を行う「トーナメント方式」は、適応度の値が直接に反映され、また計算効率の面からも優れていると考え、本研究においては、この方式を選択手法として採用した。さらに、本研究ではこの方式と「エリート保存方式」を組み合わせているが、これは、エリート保存方式を用いなかった場合、初期世代で良い解が見つかった場合でも、探索途中に淘汰されるケースが多く、エリート保存を組み合わせた選択手法の方がより良い解を出力するケースがほとんどであったことから、この組み合わせを採用した。集団サイズ、世代数、突然変異率の値は、幾度かの試行錯誤により定めたものである。また、交叉手法や終了条件は、代表的なものを用いた。

d) 最適化計算の流れ

本研究では、上述した方法によりメンテナンスプランの最適化計算を行っている。最適化計算の全体的な流れを図-6 に示す。

5. BMS の既存橋梁への適用と出力結果の考察

前章までに述べた事項をもとに、メンテナンスプラン最適化機能を構築し、実際に本 BMS を用いて山口県内に架設されている Y 橋(表-7)に対する維持管理計画の策定を行った。

(1) 維持管理計画の策定

本 BMS に入力データとして Y 橋に関する橋梁諸元および目視点検データ(表-7)が入力されると、これらのデータ項目が劣化診断機能で処理され、診

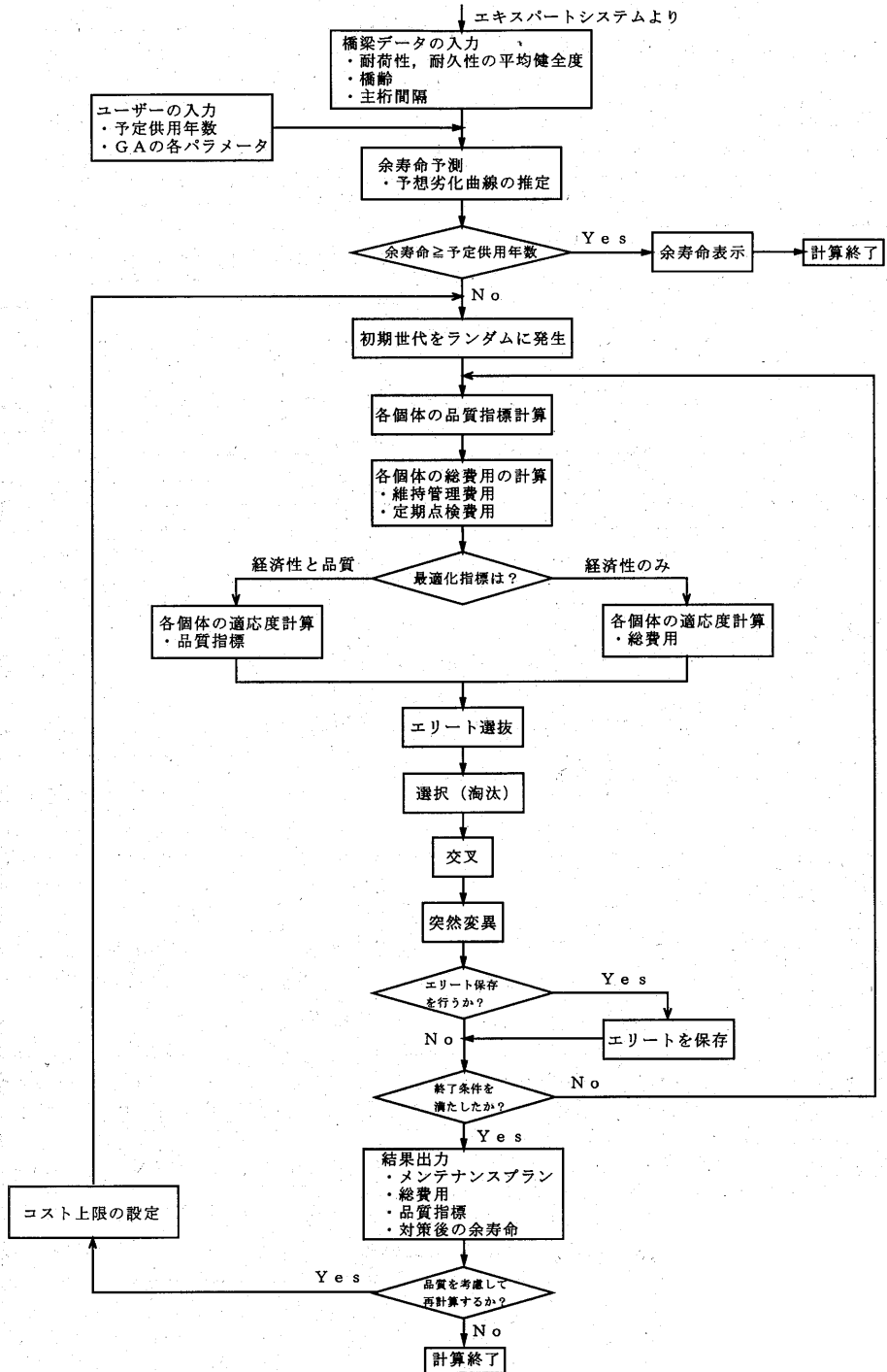


図-6 最適化計算全体の流れ

表-7 対象橋梁の概要と損傷状態 (本BMSへの入力データの一部)

橋梁名	Y橋	橋齢(年)	61
適用示方書	1919	等級	2
橋長/幅員(m)	11.0 / 4.10	主桁本数	3
主桁スパン長(m)	10.5	主桁間隔(m)	1.05
床版スパン長(m)	1.57	床版厚(cm)	30
構造形式	①:単純橋	2:連続橋	
断面形状	①:T型断面	2:箱形断面	
断面寸法	1:大きい	②:小さい	
支承の形式	①:単純支持	2:固定支持	
支承の状態	1:かなりの不等沈下	2:少しの不等沈下	③:不等沈下なし
道路種別	1:幹線道路	②:一般道路	
道路の勾配	1:大きい	②:小さい	
信号	1:ある	②:ない	
路面の平坦性 (走行衝撃)	①:ほぼ平坦	2:凹凸、段差がある	
	1:大きい	2:小さい	3:感じない
路面上の陥没	1:ある	②:ない	
舗装ひび割れ	①:ある	2:ない	
橋梁の振動	1:大きい	②:小さい	
高欄の断面寸法	1:大きい	②:小さい	
横桁	1:ある	②:ない	
排水管 (排水管のつまり)	1:ある	②:ない	
	1:つまっている	2:つまっていない	
豆板の発生状況	1:かなり発生している	2:少し発生している	③:発生していない
交通量	1:非常に多い	2:多い	③:少ない
大型車交通量(台/日)	0		
大型車通行位置	1:片輪が支持桁付近を通行する ②:片輪が床版の中央付近を通行する 3:両輪の中心が床版中央を通行する		
拡幅経歴 (拡幅方法)	1:拡幅されている	②:拡幅されていない	
	1:桁を剛結	2:桁は独立	
架設箇所	1:市街地	2:工場地区	3:港湾・湾岸地区
	④:田園地区	5:寒冷地区	
主桁			
G1. 曲げひび割れ	①:発生している	2:発生していない	
a)ひび割れ状況	1:かなり多い	2:多い	③:少ない
b)ひび割れ幅(mm)	0.05		
c)遊離石灰の発生状況	1:かなり発生している	②:少し発生している	3:発生していない
d)コンクリートの欠落	1:かなり欠落している	2:少し欠落している	③:欠落していない
e)鉄筋の錆	1:かなり錆びている	2:少し錆びている	③:錆びていない
f)錆汁	1:かなり発生している	②:少し発生している	3:発生していない
G2. せん断ひび割れ	1:発生している	②:発生していない	
G3. 鉄筋腐食ひび割れ	①:発生している	2:発生していない	
a)ひび割れ状況	①:かなり多い	2:多い	3:少ない
b)ひび割れ幅(mm)	0.4		
c)遊離石灰の発生状況	1:かなり発生している	②:少し発生している	3:発生していない
d)コンクリートの欠落	①:かなり欠落している	2:少し欠落している	3:欠落していない
e)鉄筋の錆	①:かなり錆びている	2:少し錆びている	3:錆びていない
	3:錆びていない	4:露出していない	
G4. 付着ひび割れ	1:発生している	②:発生していない	
G5. コンクリートの欠落状況	1:欠落なし	2:少し欠落	③:かなり欠落
G6. コンクリートの欠落の大きさ	①:大きい	2:小さい	
G7. コンクリートのかぶり	1:大きい	②:小さい	3:不明
G8. コンクリート欠落部の配筋の状態	1:普通の状態	②:かなり密な状態	3:不明
G9. 主桁の全体的なひび割れ状況	1:かなり多い	2:多い	③:少ない
G10. 主桁損傷による周辺環境への影響	1:大きい	②:小さい	3:不明

* 0印のついた数字が点検結果。

断結果(表-8)が出力される¹⁷⁾。この出力項目の内「耐荷性」および「耐久性」の平均健全度が劣化予測機能に入力されると3.(3)で示した劣化予測手法を用いて、橋梁部材に対して維持管理対策を行わなかった場合の「耐荷性」および「耐久性」からみた余寿命が予測される。ここで、ユーザーが予定供用年数(T年)を入力すると、先ほど求めた余寿命がこの年数を満たさない場合にはメンテナンスプラン最適化機能において経済性と品質を考慮した最適なメンテナンスプランが策定される。ここでの最適化は、まず、第1ステップとして、経済性つまり維持管理費用の最小化のみを考慮した最適解をGAを用いて探索する。この出力より、予定供用年数を満たすための最小費用とそのメンテナンスプランがわかる。次のステップでは、この最小費用を基にユーザーが費用の上限を設定し、制約条件としてこれを追加する。これをもとに、各部材の品質の最大化を目的とする最適解をGAで求めて行く。

実際に、Y橋(予定供用年数:100年)主桁のデータを基にこの最適化を行った本BMSによる最終出力画面を、図-7および図-8に示す。この画面の上部の2つのウィンドウには、橋梁部材(主桁)に対する「耐久性」と「耐荷性」の予想劣化曲線をグラフにしたものが表示される。また、下部のウィンドウにはメンテナンスプラン、そのコスト、部材(主桁)の余寿命が表示される。表-9には、GAで求めた解の妥当性を検証するために、他の最適化手法として費用最小化問題に分枝限定法¹⁸⁾を用いた場合の最適解を示す。

(2) 策定結果に対する考察

図-7の下部ウィンドウより、今後、Y橋(橋齢60年)に対して何らかの維持管理対策を行わなければ「耐荷性」および「耐久性」からみた余寿命は、それぞれ16年と10年であり、予定供用年数100年を満たすことができないことが分かる。本BMSでは、経済性のみを考慮した場合の維持管理計画案として橋齢62年、67年、76年目に維持管理対策を行う計画を策定している。この維持管理計画により余寿命は48年に延び、その対策コスト(総費用)は140Uである。さらに、画面上部の2つのウィンドウに示される「耐荷性」および「耐久性」の予想劣化曲線からも、選択された工法が設定した予定供用年数を満足していることが分かる。一方、図-8は、図-7で求めた対策コスト(140U)に上乗せ予算として75Uを上乗せし、これを予算制約額(215U)として品質の最大化を行った結果である。これを図-7と比較すると、維持管理対策として補強工法が選

択されており、品質指標も46%から70%に向上していることが分かる。また、提案された維持管理計画の対策コストは206Uであり、予算制約額(215U)を満足している。

Y橋に対する劣化診断結果(表-8)を見ると、耐荷性よりも耐久性の劣化の程度が悪くなっており「slightly danger」を強く支持している。また、損傷状態として「鉄筋腐食ひび割れ」や「コンクリートの欠落」が見られる(表-7)ことから、本BMSが策定したY橋に対する1回目の維持管理対策(モルタル吹き付け+樹脂注入+断面修復)は、妥当な選択であると言える。

Y橋以外の橋梁に対しても、本BMSを適用して維持管理計画案の作成を行ったところ、経済性のみを考慮した場合には、補修工法の維持管理対策が頻繁に選択され、品質の最大化を考慮した場合には、補強工法を含んだ維持管理対策が選択されやすくなる傾向があった。これは、補修工法の維持管理対策は、耐久性の平均健全度のグレードアップのみならず耐荷性の劣化速度の緩和にも効果があり、さらに補強工法を含んだ維持管理対策よりも安価であることから、選択されやすくなっていると考えられ、逆に品質を考慮した場合には、予算制約に余裕があれば耐荷性の平均健全度のグレードアップの効果がある補強工法を含んだ維持管理対策が選択されやすくなっていると考えられる。

次に、分枝限定法で求めた最適メンテナンスプラン(表-9)とGAを用いて得たプラン(図-7)を比較すると、分枝限定法では点検費用(4U×10回)を考慮していなかったことを考えると、GAを用いて得られたプランは、ほぼ最適であると言える。また、計算時間の比較では、GAの方が比較にならないくらい高速に解が求まった。

本システムでは、費用最小化のみを目的としたメンテナンスプランだけではなく、コスト上限を設定し、品質最大化を目的としたプランをユーザーが設定した基準で表示可能となっている。これにより経済性のみならず品質も考慮した様々な設定でのプラン作成が可能になったことが分かる。

6. 結言

本研究は、前BMSに費用の総和としての「経済性」および耐荷性と耐久性の両方を考慮した「品質」を評価指標とした最適維持管理(補修・補強)計画が作成できる機能を追加したものである。以下に、本研究で得られた成果をまとめる。

①維持管理費用の最小化および品質の最大化を考慮

表-8 Y橋の診断結果（主桁）

診断項目	損傷程度 平均健全度	danger	slightly danger	moderate	slightly safe	safe
主桁設計	70.8	0.017	0.061	0.175	0.639	0.107
主桁施工	56.4	0.112	0.209	0.204	0.262	0.203
主桁供用状態	51.2	0.000	0.117	0.717	0.151	0.015
主桁材料劣化	60.5	0.044	0.102	0.259	0.583	0.013
主桁曲げひび割れ	50.3	0.012	0.136	0.692	0.145	0.016
主桁せん断ひび割れ	94.1	0.001	0.008	0.040	0.237	0.715
鉄筋の腐食ひび割れ	25.3	0.117	0.727	0.125	0.010	0.021
主桁付着ひび割れ	94.1	0.007	0.042	0.007	0.229	0.715
主桁の全体的損傷	64.4	0.200	0.113	0.040	0.204	0.444
主桁耐荷性	62.7	0.024	0.153	0.314	0.310	0.199
主桁耐久性	45.6	0.011	0.487	0.190	0.289	0.023

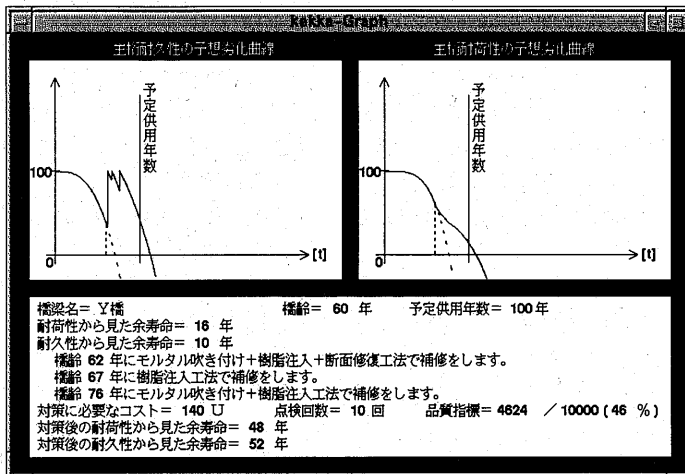


図-7 経済性のみを考慮した維持管理計画案

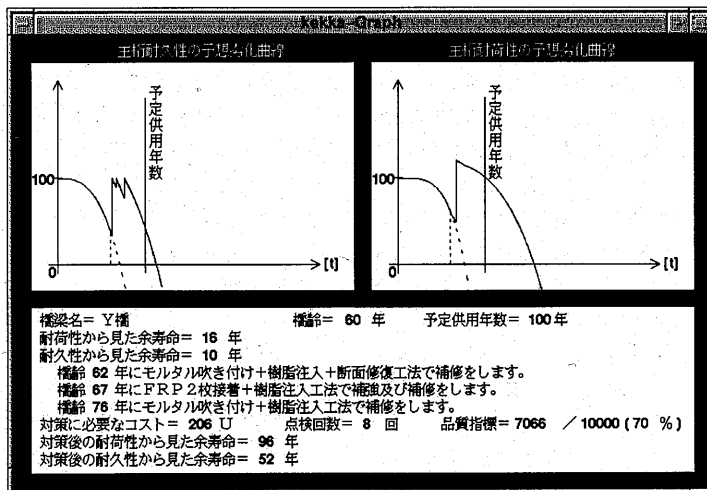


図-8 経済性に品質最大化を考慮した維持管理計画案

表-9 分枝限定法による最適化結果（経済性のみ考慮）

橋 齢（年）	維持管理対策	費用（U）
65	ガラスクロス+樹脂注入+断面修復	91.0 U
70	ガラスクロス+樹脂注入	
75	樹脂注入	

したメンテナンスプランが、ユーザーとの対話形式で策定できる機能を前 BMS に追加した。ε-制限法を用いた最適化アルゴリズムを考案したことによって、経済性と品質の両方を考慮でき、多様な維持管理計画の作成が可能となった。

②経済性および橋梁部材の品質の両方を考慮したメンテナンスプラン最適化機能をC言語を用いてプログラミングし、作成された維持管理計画案とその劣化曲線を視覚的に表現することができた。

③最適化手法としてGAをメンテナンスプラン策定問題に適用することで、高速な近似最適解の探索が可能となった。

④実際に本システムを山口県内の既存橋梁に適用し、診断結果との比較から策定されたメンテナンスプランの妥当性が検証された。

⑤経済性のみを考慮したメンテナンスプランの比較では、GAを用いて得られたメンテナンスプランと分枝限定法で得られたメンテナンスプランはほぼ同等であり、最適化に要した計算時間はGAの方がはるかに短かった。

最後に、本 BMS をより実用的なものにするためのこれからの課題を以下に列挙する。

① BMS の最終目標である橋梁網（ネットワーク）レベルでの維持管理が可能なシステムの開発が必要となる。また、それに伴うデータベースの開発も必要となる。

②維持管理対策として新設橋および橋梁の架替えを追加し、Life Cycle Cost を考慮に入れた最適維持管理計画を考慮する必要がある。

③「耐荷性」と「耐久性」の予想劣化曲線は、過去に行った実験データを基に仮定したものであるため、実際の劣化と異なる可能性がある。また、補修・補強工法が予想劣化曲線に及ぼす効果の定量化は、橋梁管理の専門家の意見を基にしているため、実際の効果と異なる可能性があることから、今後の点検データや診断結果の蓄積によって自動的に改良が行える機能を構築していく必要がある。

謝辞：本研究のまとめにあたり、種々のご援助を頂いた山口大学大学院生 山岡健一、小野正樹両氏に

感謝の意を表します。

参考文献

- 1) NIKKEI CONSTRUCTION, pp.33-34, 1996.12.
- 2) 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, pp91-106, 1997.3.
- 3) 阪神高速道路公団: Bridge Management Systemに関する検討, コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会, 1994.3.
- 4) Cosyn, P.: A Mathematical Programming Model for Computer-aided Railway Bridge Repair, Maintenance and Replacement, *Bridge Management 2*, pp.806-814, 1993.
- 5) DAS, P. C.: BRIDGE MANAGEMENT OBJECTIVES AND METHODOLOGIES, *Bridge Management 3*, pp.1-7, 1996.
- 6) VASSIE, P. R.: EVOLUTION OF BRIDGE MAINTENANCE MANAGEMENT SYSTEMS, *Bridge Management 3*, pp.195-202, 1996.
- 7) 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.
- 8) 宮本文穂: 疲労・荷重等にかかわる耐久性の診断方法, *コンクリート工学*, Vol.26, No.7, pp.61-71, 1988.6.
- 9) 宮本文穂, 森川英典, 古川正典, 松原拓磨: アンケートを利用した知識更新と橋梁診断エキスパートシステムの実用化, *コンクリート工学建設工学研究所報告第33号*, pp.23-65, 1991.11.
- 10) 土木学会: コンクリート構造物の維持管理指針(案), *コンクリートライブラリー 81*, 1995.10.
- 11) 宮本文穂: 道路橋鉄筋コンクリート床版の力学的特性とその耐用性判定に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1984.9.
- 12) 森川英典: 既存コンクリート橋の安全性および寿命評価に関する基礎的研究, 神戸大学学位論文, 1994.8.
- 13) 伊里政夫, 今野浩: 数理計画の応用<理論編>, 産業図書, pp.210-219, 1982.12.
- 14) 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.
- 15) 玉置久, 喜多一: 遺伝的アルゴリズムII, システム/制御/情報, No.10, pp.431-438, 1995.
- 16) 安居院猛, 長尾智晴: ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂, p.14, 1993.
- 17) 三宅秀明, 山本秀夫, 宮本文穂, 中村秀明: 橋梁診断エキスパートシステムの推論機構の再構築と診断結果の比較, 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.69-70, 1997.5.
- 18) 浅野孝夫, 今井浩: 計算とアルゴリズム - 計算機の科学 -, オーム社, pp.56-61, 1986.

(1997. 8. 26 受付)

MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF MAINTENANCE PLANNING FOR EXISTING BRIDGES BY USING BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM(BMS)

Ayaho MIYAMOTO, Kei KAWAMURA and Hideaki NAKAMURA

The aim of this study is to develop a new function of bridge management system which is currently being developed. This function is able to offer some maintenance plans based on a combination of maintenance cost minimization and quality maximization approach. Then, the Genetic Algorithm(GA) is adopted in this optimum problem. The results suggest that the GA is more effective for this problem than the other algorithm. Furthermore, by applying this function to an existing bridge, it has been verified that employed optimum method is effective.