

鋼橋の塗膜補修順位決定システムに関する研究

A Decision Supporting System for Painting of Steel Bridges

古田 均*・中塚 紀江**・堂垣 正博***

Hitoshi FURUTA, Norie NAKATSUKA, and Masahiro DOGAKI

- * 工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-11 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)
 ** 学士(工学) (株)春本鐵工 本社設計部設計一課 (〒104 東京都中央区新川2-26-3)
 *** 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科 (〒564-80 大阪府吹田市山手町3-3-35)

An attempt is made to develop a decision supporting system for maintenance of steel bridges. In recent year, Genetic Algorithms(GA) have attracted attention as a technique for solving combinatorial optimization problems with discrete design variables and a discontinuous objective function. In this paper, GA is put to use a prototype of the present system. GA is used in a method to search for the most suitable planning of painting of steel bridges. An example shows to prove the ability to search for the fittest painting plan.

Key words : Genetic Algorithms, combinatorial optimization, maintenance, painting, steel bridges

1. まえがき

供用中の鋼橋は、かならず年とともに老朽化する。鋼橋は重要な社会基盤施設の一つで、膨大な数の鋼橋を長期間にわたって有効利用するには、日頃からの入念な維持管理が重要である。橋梁の維持管理は、一般に、自治体が行っており、その技術者は建設時期や立地環境の異なる数多くの橋梁を一括管理しなければならない。それゆえ、点検調査の実施や点検データの蓄積を定期的に行い、補修時期が的確に判断できる体制を整えておく必要がある。

ところで、鋼橋の維持管理に必要な経費のうち、塗装の塗り替えに要する費用の占める割合は相対的に大きい。塗り替えを迎える鋼橋の増大に伴って、今後、経費のますますの増大は容易に推測できる。しかし、維持管理に当てられる予算には限度があり、限られた予算内で最大の便益が得られるよう補修計画を策定することが望まれる。

塗装を塗り替えるかどうかの判定には、塗膜の劣化程度が必要である。また、その時期は、通常、塗装の専門家の判断に委ねられるが、専門家が不足している現状では、一般の道路管理者でも塗膜の劣化度が的確に判定できる簡易なシステムを確立する必要がある。このような状況下において、さまざまな方法がこれまでも提案されてきたが¹⁾²⁾、さらに、予算の効果的な執行のため、塗膜の劣化度の判定結果に基づいて適切な補修計画が立案できる手法が必要である。

さて、塗膜補修の対象となる数多くの鋼橋の補修箇所

のなかから、限りある予算内で塗膜補修が効果的に実施できる組合せを決定することは容易でない。そのような組合せの多い最適化問題には、近年とみに注目されてきた遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms: 以下、GAと称する)の適用が有効であろう。

GAが最適化問題へ適用された例として、道路整備順位決定³⁾、連続桁RC床版の打設順位決定⁴⁾、塗膜補修をも含めた単一橋梁の補修順位決定⁵⁾などがある。

そこで、限られた予算内で効率的かつ合理的な塗膜の補修ができるように補修箇所を決定するための支援システムの構築を試みる。ただし、支援システムの構築にあたって、補修の可否を決定する要因を加味し、補修箇所の多数の組合せのなかから最適な組合せが選択できるようなシステムを目指した。なお、鋼橋の塗り替えには、一橋全体を全面的に塗り替える場合と部分的に塗り替える場合とが考えられる。いずれの補修方法が得策であるかを判断する機能を最適化問題のなかに組み込むことも可能であるが、ここでは部分的な塗り替えだけを対象とした。これには、将来、構築するシステムが実用化されることを鑑み、

- ① 塗膜の補修を必要とする鋼橋が多数あること
- ② 橋梁規模が大きく、たとえ一橋であっても全面塗り替えに必要な経費が予算をはるかに越えることなどの条件を問題に設定したいからである。

2. 塗膜の健全性ランクの設定

塗膜の劣化は、鋼橋の立地環境や塗装の種類によつ

て、その形態や進行の度合いが異なる。塗膜の劣化現象には、一般に、さび、はがれ、われ、ふくれなどがある。

各種協会や団体では、鋼橋を対象に塗膜の劣化度の評価基準を制定し⁹⁾¹⁰⁾、定期点検に供している。塗膜の劣化度評価とは、個々の塗膜の劣化現象に対して劣化状態を調査し、その結果を総合的に判断して補修の必要性を決定することである。劣化度の評価結果に基づき、劣化度別に分類したものは損傷度もしくは健全度と呼ばれるが、ここでは健全性ランクと称することにする。

本研究では、健全性ランクを各種団体における塗り替え時期の判断基準を参考に、表-1のように設定した。すなわち、「塗膜にほとんど異常がないもの」から「塗膜効果を完全に喪失しているもの」までを4段階A、B、C、Dに区分した。ただし、それらを0、1、2、3と数値化した。

3. 解析手法

3.1 塗膜補修計画問題の定式化

塗膜補修計画問題は、補修が必要な要因や予算規模などを勘案し、最も効率的な補修計画を立案することで、ここではこの問題を最適化問題として定式化する。

ところで、最適化問題の解法のうち、非線形計画法などの最適化手法は、問題にそって定式化された目的関数が微分可能な連続関数でなければならない。本研究では、最適化問題として解くうえで必要な目的関数に経済性や補修による効果など、補修箇所を決定する要因を取り入れるため、目的関数が不連続な関数となり、非線形計画法などの最適化手法では解けない。

また、組合せ最適化問題では、離散変数の有限個の組合せのなかから最適な組合せを見出すことになるので、理論的には有限回の探索で最適解を得ることができる。しかし、問題の規模が大きくなれば、有限回と言っても、膨大な演算回数、すなわち膨大な演算時間を要することになり、厳密な解を求めることは実際上不可能である。このような理由で、現実的な大規模組合せ最適化問題に対しては、厳密解が求められる分枝限定法や動的計画法は事実上適用できない。

そこで、1980年代後半から工学分野における最適化手法の一つとして、注目されるようになったGAを適用する¹³⁾¹⁶⁾。その理由はつぎのようである。

- ① 対象問題において、目的関数の微分を必要とせず、不連続な関数にも対応できる。
- ② 個体が集団的に適応度を高めようと動作するため、局所解に落ち入る確率が一つの解をもとに探索する場合よりも小さいと期待される。

③ プログラミングが簡単である。

ちなみに、GAは、最適化問題の探索手法の一つで、生物の遺伝と進化の過程をシミュレートした人工モデルである。その枠組みは1960年代にホーランドによって確立された。その原理は、最適解の探索過程を生物の進化におけるダーウィンの適者生存の過程とみなし、増殖、淘汰、遺伝子の交叉および突然変異のプロセスを簡単な数理モデルに置き換えたものである。プログラミングの詳細を規定しない緩やかな枠組みを有しているため、各種の規則やパラメータの設定など、不確定な要素を多く含む方法論であるが、応用範囲は広い。

本研究では、GAのなかでも最も基本とされる単純GAを用いることにする。その簡単な計算過程を図-1に示す。

表-1 健全性ランクの分類

健全性ランク		現象	対処法
A	0	塗膜にほとんど異常がない	点検の継続
B	1	塗膜にさびはほとんどない。ただし、光沢減退チョーキングが著しく、上塗り塗膜が消失している部分もある。	適時な塗替えが必要
C	2	点さびが多く発生し、ひびわれ、さび、はがれなども部分的に発生している。しかし、一部活膜も残っている。	早急な塗替えが必要
D	3	塗膜面にさび、ひびわれ、はがれが発生し、塗膜効果が完全に失われている。	緊急な塗替えが必要

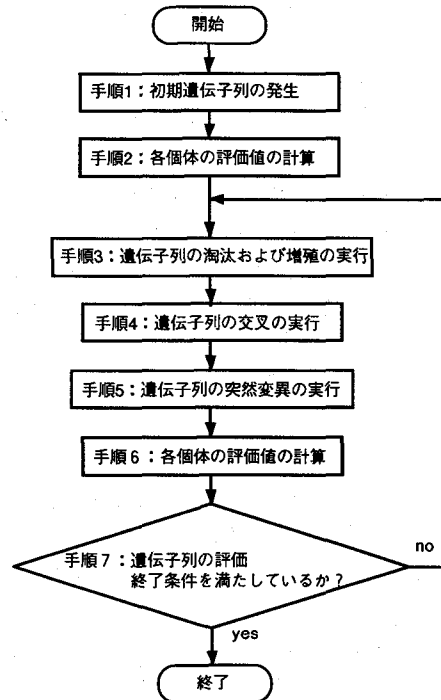


図-1 単純GAのフローチャート

3.2 最適化問題の定式化

塗膜の補修計画では、補修要因や予算などを勘案しながら、最も効率的な補修計画を立案することが重要である。このため、塗膜の補修計画問題をつぎのように組合せ最適化問題として定式化する。すなわち

$$\text{目的関数: } OBJ(\{I\}) = \sum_{i=1}^n (T_i + A_i) I_i \rightarrow \max \quad (1)$$

$$\text{制約条件: } g(\{I\}) = D - E \leq 0 \quad (2)$$

$$\text{補修変数: } \{I\} = \{I_1, I_2, \dots, I_n\} \quad (3)$$

である。ここに、 T_i : i 番目の補修箇所を補修した後の健全性ランクのアップ度による重み、 A_i : i 番目の補修箇所の補修面積による重み、 I_i : i 番目の補修変数の値 (補修する = 1, 補修しない = 0), n : 補修対象となる部位の数、 D : 補修に要する費用で補修変数 I_i の関数、 E : 予算(定数)である。

したがって、式(1)は補修後の健全性ランクのアップ度が高い補修箇所を選ぶほど、また、補修箇所の面積が広い補修箇所を選ぶほど、目的関数である評価値が高くなることを示す。式(2)は補修に要する費用が予算内に収まらねばならないことを意味する。

制約条件を扱う方法として、GAでは

- ① 制約条件を満たす個体を生成するように遺伝子操作する。
- ② ペナルティとして評価関数に組み込む。

の2通りが考えられる。本研究では、前者を採用し、初期値の生成過程で予算内に収まる補修箇所の組合せのみが生まれるように遺伝子の操作を行い、予算オーバーの個体は除去した。

4. 数値計算結果とその考察

4.1 解析対象の橋梁モデル

構築した塗膜補修箇所の決定システムの有用性を検証するため、解析対象の橋梁モデルをつぎのように設定する。すなわち、

- ① 補修対象の橋梁を a 橋、b 橋、c 橋の3橋とする。
- ② 3 橋の橋種は、a 橋を箱桁橋、b 橋と c 橋を I 桁橋とする。
- ③ スパン長は a 橋: 30m, b 橋: 28m, c 橋: 32m とする。
- ④ 塗装の対象面積は a 橋: 462 m^2 , b 橋: 502.32 m^2 , c 橋: 529.92 m^2 とする。
- ⑤ a 橋、b 橋、c 橋の主桁の本

数をそれぞれ1本、4本、3本とする。

補修対象の橋梁をつぎのように区分し、それぞれの区分を1つの補修対象の領域とする。すなわち、図-2~4に示すように、幅員方向に

a 橋: 2 区間 (箱桁の内面と外面)

b 橋: 4 区間 (それぞれの主桁を1つの区分とする)

c 橋: 3 区間 (b 橋と同じ)

橋軸方向に

a 橋: 3 領域 (10mの等間隔)

b 橋: 3 領域 (7m, 14m, 7mの不等間隔)

c 橋: 4 領域 (8mの等間隔)

とする。

塗装費用を算定するための塗装面積として、箱桁橋の内面では、縦横の補剛材やダイヤフラムなどが設けられていることを考慮して主桁面積を20%増し、また I 桁橋では、横構・対傾構などが設けられていることを考慮して主桁面積を15%増すこととする。

また、足場の面積は、幅員に2.0mを加えた長さで橋軸方向の区間長を掛け合わせたものとする。

4.2 補修対象箇所の健全性ランク値の設定

4.1 で示した橋梁群に対し、補修対象箇所ごとに健全性ランクを図-5のように設定する。ただし、箱桁では外面より内面、I 桁橋では外桁より内桁のほうがさびやす

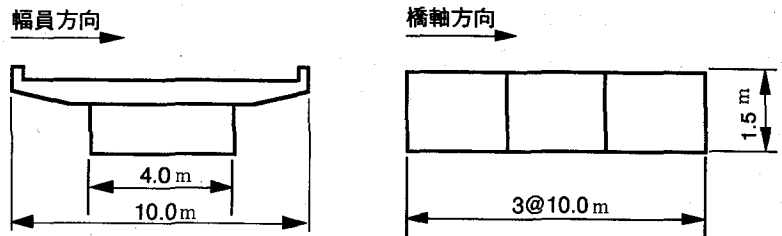


図-2 a橋

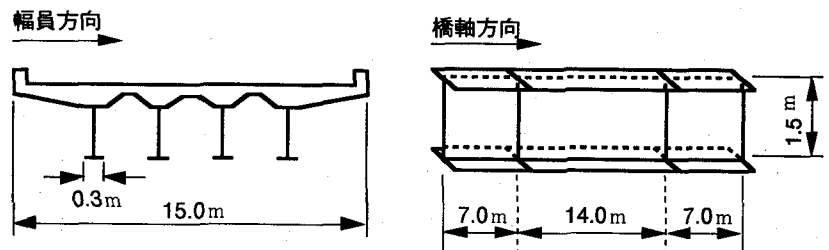


図-3 b橋

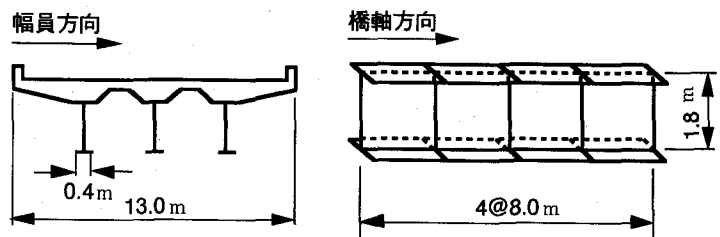


図-4 c橋

いものとした。3.で示したように、補修による健全性ランクのアップ度の相違による重みを目的関数に取り入れる。すなわち、健全性ランクがDの箇所を補修した場合の重みを10、CとBの箇所を補修した場合の重みをそれぞれ5、3とした。

なお、健全性ランクがAの場合は、もともと健全なので、補修する必要はない。また、健全性ランクがDの場合は、損傷がかなり進んでいるため、必ず補修するものとする。

4.3 GAの探索に必要なパラメータの決定

塗膜の補修計画を策定するには、予算の規模、塗装費および足場費が必要である。

【予算の規模】まず、予算であるが、その規模によって、補修できる面積が左右される。ここでは、橋梁群すべてを全面塗装した時に要する費用を基準に、その6割すなわち650万を予算とした。

【塗装費】つぎに、塗装費は塗装系などによって変動するが、補修計画をたてる際には、厳密な額を必要としないことから、単位面積あたり一律4,000円とした。

【足場費】足場費は足場の種類によって異なるが、吊り足場を考え、単位面積あたり3,500円とした（道路公団の歩掛りを参照した）。

ところで、単純GAの基本である増殖、交叉、突然変異などの操作に必要なパラメータとして、個体総数、交叉率、突然変異率、選択手法、進化シミュレーションの終了条件がある。これらの適切な値を設定する。

(1) 選択手法

選択手法には、エリート戦略を採用する。エリート戦略とは、評価値の高い個体を常に残す手法である。ここでは、平均以上の評価値を与える個体を常に残すことにする。この方法の利点は、探索能力に優れている点にある。ただし、局所解に陥る場合があるのが欠点である。

(2) 進化シミュレーションの終了条件

進化シミュレーションの終了は、予め定めた世代交代数に到達した時点とする。これは、本研究では、全対象面積や健全性ランクの値で評価値が変わるということ、また、この値以上の評価値になればよいという決まった値が存在しないことからである。

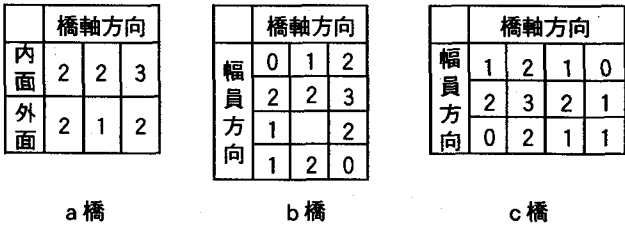
世代交代の数を基準に終了することで、その間の最高の評価値が最適解を与えると考えてもほぼ妥当であると思われるからである。ここでは、世代交代の限界を150世代とする。

規定した世代交代数によって終了させるほかに、一定数の世代交代にもかかわらず、最高の評価値に変化が起らない場合も終了させるように

した。これは、最高の評価値が一定期間続けば、解は収束したものとみなせるものと考え、それ以上、世代の交代を重ねても最高の評価値に変化が現れないとしたからである。ただし、低い評価値のまま終了した場合は、局所解に陥り、探索が失敗したことになる。ここでは、一定期間の世代交代数を15世代とした。

(3) 個体総数と交叉率

GAによって最適解を得るために必要となる最適な個体総数と交叉率を検討する。個体総数を20から50まで10



◎健全性ランク 0=A, 1=B, 2=C, 3=D
図-5 設定した健全性ランク

表-2 個体総数が20のときの交叉率別の最高評価値, 最初に最高評価値を与える世代, 最高評価値のときの補修費

交叉率	最高評価値	最初に最高評価値を与えた世代	最高評価値のときの補修費用 (円)
0.4	103.6153	38	6,467,020
0.5	104.6062	61	6,433,240
0.6	103.6821	135	6,206,380
0.7	106.7398	74	6,331,960
0.8	104.6062	132	6,433,240
0.9	103.7291	26	6,312,000

表-3 個体総数が30のときの交叉率別の最高評価値, 最初に最高評価値を与える世代, 最高評価値のときの補修費

交叉率	最高評価値	最初に最高評価値を与えた世代	最高評価値のときの補修費用 (円)
0.4	104.6062	64	6,433,240
0.5	104.6062	25	6,433,240
0.6	106.7398	47	6,331,960
0.7	103.6586	59	6,155,320
0.8	103.6153	37	6,433,240
0.9	106.7398	60	6,331,960

表-4 個体総数が40のときの交叉率別の最高評価値, 最初に最高評価値を与える世代, 最高評価値のときの補修費

交叉率	最高評価値	最初に最高評価値を与えた世代	最高評価値のときの補修費用 (円)
0.4	106.7398	104	6,331,960
0.5	106.7398	56	6,331,960
0.6	106.7398	118	6,331,960
0.7	106.7398	139	6,331,960
0.8	106.7398	68	6,331,960
0.9	106.7398	72	6,331,960

個体ずつ増やし、それぞれの個体総数に対して交叉率を0.4から0.9まで0.1ずつ増やして探索したところ、表-2～5の結果を得た。ただし、突然変異率は0.01で一定とした。これらの表からわかるように、最高の評価値を与える交叉率は、

- 個体総数が20 : 0.7
- 個体総数が30 : 0.6と0.9
- 個体総数が40 : 0.4から0.9まで
- 個体総数が50 : 0.5, 0.6, 0.8, 0.9

であった。このうち、個体総数が30、交叉率が0.6の場合、一番少ない世代交代で最高の評価値が得られた。

以上のほかに、個体の総数が30が優位であると思われる点はつぎのようである。

- ① 本研究では探索における遺伝子列中の遺伝子数は30であり、個体総数が遺伝子数より多くなりすぎると計算量が多くなる。
- ② 一般に、より多くの個体数でより少ない世代交代のもとに解を求めようとするよりも、より少ない個体数でより多くの世代交代を行って解を求めるほうがよい。

（4）突然変異率

個体総数を30、交叉率を0.6に固定し、突然変異率を0.005, 0.01, 0.015で探索したところ、表-6のような結果を得た。表から明らかなように、突然変異率が0.01と0.015の場合、0.01の場合のほうが0.015の場合よりも少ない世代で最高の評価値が得られる。ただし、突然変異率が0.005の場合には、最高の評価値が得られなかった。

このことより、以下では、個体総数を30、交叉率を0.6、突然変異率を0.01、選択手法にエリート戦略、進化シミュレーションの終了条件に規定の世代交代数によるものとする。

4.4 補修決定の要因

4.1～4.3で設定したパラメータをもとに、さきの橋梁群に対して最適な補修箇所を探索したところ、評価値の最大、平均、最小の値が世代とともに図-6のように推移した。

塗膜の補修計画に必要な最大の評価値に注目し、その推移を調べる。図から明らかなように、47世代目で最高の評価値に達している。また、47世代目以降は最大値に変動が少なく、少し低い評価値で推移していることがわかる。このことは、ほぼ同じ遺伝子列の個体が集団の多くを占め、交叉の影響が現れなくなったためであろう。その後、145世代目で再び47世代目と同じ評価値に達した。150世代をこえて、さらに世代の交代を試みたところ、156世代目以降の最大の評価値

に変動はなく、さきの47世代目で得られた値と同じ値となった。

以上のことから、世代交代の数が150世代以降からは

表-5 個体総数が50のときの交叉率別の最高評価値、最初に最高評価値を与える世代、最高評価値のときの補修費

交叉率	最高評価値	最初に最高評価値を与えた世代	最高評価値のときの補修費用 (円)
0.4	103.6586	122	6,155,320
0.5	106.7398	48	6,331,960
0.6	106.7398	51	6,331,960
0.7	104.6062	141	6,433,240
0.8	106.7398	99	6,331,960
0.9	106.7398	62	6,331,960

表-6 個体総数30、交叉率を0.6としたときの突然変異別の最高評価値、最初に最高評価値を与える世代、最高評価値のときの補修費用

突然変異率	最高評価値	最初に最高評価値を与えた世代	最高評価値のときの補修費用 (円)
0.005	103.6136	104	6,477,340
0.010	106.7398	47	6,331,960
0.015	106.7398	48	6,331,960

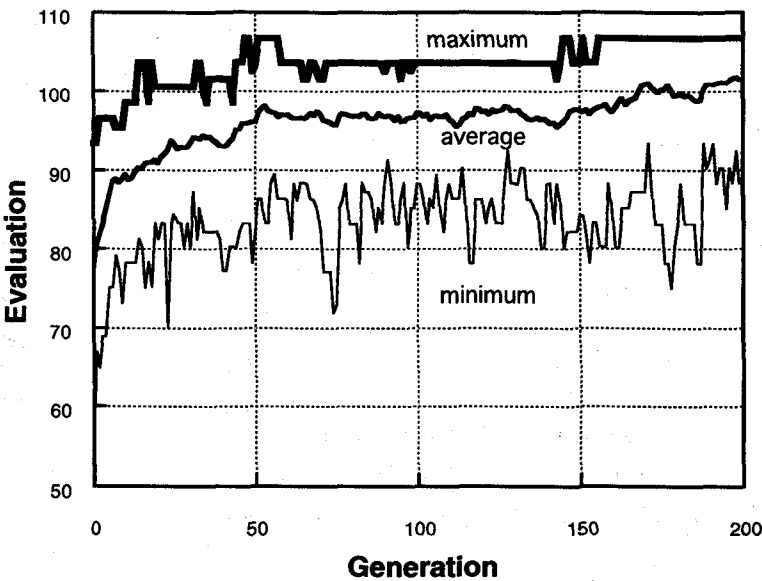
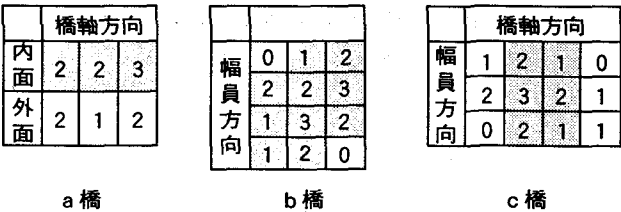


図-6 世代交代数が200世代の場合の世代ごとの最大、平均、最小の評価値の推移



□ 補修する箇所

図-7 最高の評価値を与える補修箇所の組合せ

評価値に変化が現われなかったため、本研究では世代数を150世代とした。

この結果、最大の評価値を与える補修箇所は、図-7に示すようになった。網かけの部分が補修される箇所として提案される。また、補修に要する費用は633万1,960円である。

つぎに、予算規模が補修箇所の選定にどのように関わっているかを調べる。まずはじめに、予算規模をさきの例から20%増やす。この場合、予算が20%増すことによって、補修面積が約15%増えた。最高の評価値を与える補修箇所が図-8のように決定された。一方、予算を20%減らすと、補修面積は約24%減った。この場合、最高の評価値を与える補修箇所は図-9のようになった。

補修決定の要因が最適解に及ぼす影響を調べてみよう。補修を決定する要因として、本研究ではつぎの2つを考えた。

- ① 健全性ランクが高いほど補修の必要性が高い。
 - ② 補修箇所の数が多い場合、補修面積が多くなる
- 補修箇所の組合せが選ばれる。

図-8において、c橋では、健全性ランクが3の補修箇所を幅員にもつところ、健全性ランクが1、2、1である幅員をもつ区間を補修すればよいと得た。これは、健全性ランクが3であれば、その箇所は必ず補修され、足場が設けられるため、その幅員に位置するすべての箇所が補修箇所として選ばれることを示している。健全性ランクが1、2、1となる箇所が選ばれた理由は、健全性ランクが1、2、0と0、1、1の他の2つの箇所に比べて、健全性ランクの組合せから補修の必要性が高かったためと思われる。このように、補修を決定する要因が最終の結果に強く反映されることがわかる。

GAによる補修案として、図-7に示す補修箇所の組合せが得られた。この妥当性を検討するため、補修箇所のすべての組合せに対し、補修費用と評価値を計算した。この結果、補修費用の総額が650万円以内であること、健全性ランクがゼロの箇所は補修しないことを条件に、最高の評価値を与える組合せがGAで得られた結果と同じになった。

なお、処理時間を比較したところ、表-7のようになった。ちなみに、全組合せによる演算は、 $2^{20}=1,073,741,824$ 回である。すなわち、GAを適用することによって、1/1,440の処理時間の短縮が図られ、信頼度の高い補修案が提示されることが明らかになった。

5. あとがき

本研究では、限られた予算内で効率的かつ合理的に鋼橋の塗膜補修箇所を決定するための支援システムを構築した。仮定の橋梁モデル群に支援システムを適用し、その有用性を検証した。構築した塗膜補修順位決定支援シ

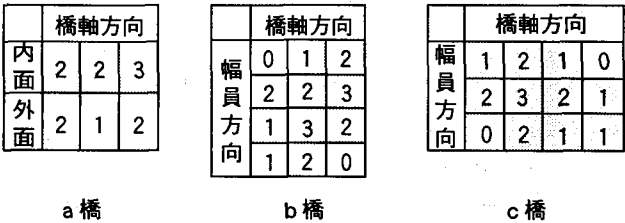


図-8 20%増の予算で最高の評価を与える補修箇所の組合せ

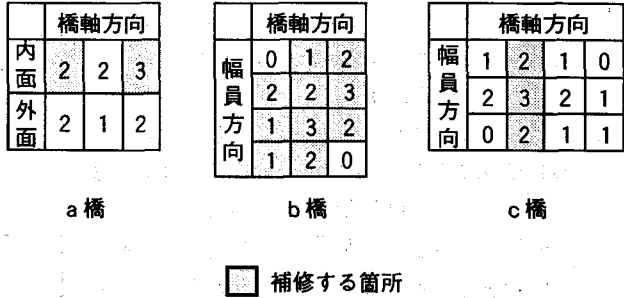


図-9 20%減の予算で最高の評価を与える補修箇所の組合せ

表-7 GAとすべての組合せを計算した場合の処理時間

	GA	すべての組合せ計算
処理時間	20秒	8時間

- ステムの特徴は、つぎのとおりである。
- (1) 塗膜補修の必要度を4段階に分類し、健全性ランクとして表した。
 - (2) 大規模な組合せ最適化問題にGAを適用した。
 - (3) GAの選択手法に探索能力に優れたエリート戦略を採用した。
 - (4) 補修を決定する要因として、健全性ランクの値が高いほど補修の必要性が高いこと、補修箇所の数が同じ場合、補修面積の広い補修箇所の組合せが選ばれることなどを考慮し、目的関数に組み込んだ。
 - (5) 補修費用が予算内に収まるという制約条件を遺伝子列の発生に反映させた。

なお、GAは組合せの数が多い最適化問題に威力を発揮する解法である。本実行例は補修箇所の数が比較的少なく、GAの能力が十分に発揮されるまでにいかなかった。今後、より大規模な補修計画へ本システムを適用し、その有用性を検証する予定である。

また、塗膜の健全性ランクを各種協会や団体などの基準を参考に設定したが、本支援システムを補修箇所決定の実務で利用する際には、再度ランクづけを見直し、入念に検討し、より基準に沿ったランク度の設定を行う必

要があろう。さらに、橋梁の重要度や立地環境の相違などによる補修の優先順位づけを条件に課したり、塗膜補修順位決定の要因を再検討し、目的関数に加えることも考えたい。ただし、この場合には、GAに内包するサブシステムを別途構築すればよいと思われる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、(株)栗本鐵工所の串田守可氏と元(株)日本工業試験所の出口恒宣氏（現(株)近代設計）には実務者の立場から貴重なご意見とご助言を頂いた。ここに、深謝する次第である。

参考文献

- 1) 松井繁之・前田幸雄：道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集，No.374/I-6，pp.419-426，1986.
- 2) 小堀為雄・木俣 昇・小間井孝吉・竹村 哲：橋梁診断支援コンピューターシステムに関する研究，橋梁と基礎，Vol.24，No.11，pp.45-60，1990.
- 3) 藤原 博・出川定男・河野幸弘・菅野照造：画像処理技術を応用した鋼橋の塗膜劣化診断システムに関する研究，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，I-215，pp.578-579，1993-9.
- 4) 三宅 将・藤原 博・赤井隆晃：鋼橋の塗膜劣化診断システムの開発，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，I-362，pp.724-725，1995-9.
- 5) 田村 亨・杉本博之・上前孝之：遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用，土木学会論文

- 集，No.482/IV-22，pp.37-46，1994-1.
- 6) 夏秋義広・向台 茂・保田敬一・古田 均：連続桁RC床版の打設順位決定問題への遺伝的アルゴリズムの適用，構造工学論文集，土木学会，Vol.41A，pp.627-642，1995-3.
- 7) 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.315/I-31，pp.151-159，1995-4.
- 8) 鉄道技術研究所編：鋼構造物塗装設計施工指針，1993.
- 9) 日本道路協会編：鋼道路橋塗装便覧，1990-6.
- 10) 日本鋼構協編：鋼橋塗膜調査マニュアル，1993-9.
- 11) 日本鋼構協編：鋼橋塗装ライフサイクル調査研究最終報告，1994-11.
- 12) 日本鋼構協編：鋼橋塗膜の評価基準，1995-9.
- 13) 伊庭斎志：遺伝的アルゴリズムの基礎，オーム社，1994.
- 14) 安居院 猛・長尾智晴：ジェネティックアルゴリズム，昭晃堂，1993.
- 15) 計測と制御「特集 遺伝的アルゴリズム」，Vol.32，No.1，1993.
- 16) 小林重信：遺伝的アルゴリズムの現状と課題，計測と制御，Vol.32，No.1，pp.2-9，1993.
- 17) 杉本博之・鹿 下麗・山本洋敬：離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究，土木学会論文集，No.471/I-24，pp.67-76，1993-7.
- 18) 山田善一・大久保禎二：最適構造設計，丸善，1983-10.

(1996年9月6日受付)