

道路橋 R C 床版の補修順位決定支援システムに関する研究

A DECISION SUPPORTING SYSTEM
FOR MAINTENANCE OF REINFORCED CONCRETE DECKS OF HIGHWAY BRIDGES

古田 均*・市田孝治**・堂垣正博***

Hitoshi FURUTA, Takaharu ICHIDA, and Masahiro DOGAKI

- * 工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-0011 大阪府高槻市霊仙寺町2-1-1)
 ** 学士(工学) 横河工事(株) 技術部技術二課 (〒170-0021 東京都豊島区西巣鴨4-14-5)
 *** 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

In this paper, an attempt is made to develop a decision supporting system for the maintenance program of Reinforced Concrete (RC) decks of highway bridges. Emphasis is placed on how to obtain an appropriate order of repair for the existing RC decks by considering the characteristics of road network. Genetic Algorithm (GA) is employed here to find a practical and rational solution for the maintenance problem, because GA has such an advantage that it can provide us with useful solutions for large and complex combinatorial and scheduling problems with discontinuous or vague objective functions. Moreover, fuzzy reasoning is applied to express the objective functions in a flexible manner such as "If-Then" rules. Several numerical examples are presented to demonstrate the efficiency of the system developed here.

Keywords : Maintenance, Optimal Repairing, Reinforced concrete decks of highway bridges, Network of road, Genetic Algorithm, Fuzzy reasoning

1. まえがき

社会資本として重要な土木構造物の一つに橋梁がある。その多くは、戦後の高度経済成長期に新設されたり架け換えられたりしたもので、現在も供用されている。今後のわが国の経済環境を展望した時、それらをできる限り大切に活用し、長期間にわたって使用せざるをえないのは明白である。

ところが、経年による老朽化とともに、近年の交通量の増加や車両の大型化は橋梁の劣化・損傷を進行させ、その結果、補修事業が増加の一途を辿っている。このようなことから、橋梁の維持管理は、健全な社会システムを堅持していく上で極めて重要で、工学的にも社会科学的にもその重要性が増している。

道路橋において、鉄筋コンクリート床版(RC床版)は、荷重を直接受けるため、橋梁を構成する部材の中でも最も損傷が著しい¹⁾。それゆえ、可能な限り補修を繰り返し行い、万一、破壊の恐れがある場合には最善の方法で補強したり架け換えたりしながら、常に維持管理しなければならない。

現在、RC床版は様々な方法で補修されている。補修計画の立案時には、補修工法の合理性や補修の有効性はもとより、経済性や交通事情なども勘案しなければならない²⁾。さらに、近い将来には、これらの補修・補強事

業が橋梁の新設事業を圧迫するようになると推測されるため、補修を必要とする多数の橋梁の中から適切な橋梁を選び出し、最適な工法で補修・補強することに心がけ、維持管理のための限られた予算を最大限有効に活用することが肝要である。

しかしながら、多数の橋梁の中から補修すべき橋梁を選び出し、適切な補修工法が提示できるような補修順位決定のための有効な方法は、現在までのところ、確立されていない³⁾。また、RC床版を補修・補強するか否かの判定は、通常、橋梁工学分野の専門家や経験豊かな道路管理者の判断に委ねられているが、専門家が不足する傾向にある。したがって、経験に乏しい道路管理者がRC床版の劣化・損傷の判定結果に基づいて適切な補修計画を立てることのできる支援システムがあれば、極めて重宝である⁴⁾。

ここでは、限られた予算内で効率的・合理的な床版補修を計画するため、補修計画地域内の道路網上に点在する多数の橋梁群の中から補修すべき橋梁と損傷に見合ったRC床版の補修工法を大規模組合せ最適化問題の解として遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: 以下、GAと称する)で決定するシステム、いわゆる補修順位決定支援システムを構築する。その際、補修の要否を左右する道路網と橋梁の架設地点における固有の条件を考慮に入れる。

2. 道路橋 R C 床版の損傷度とその補修工法

まず初めに、道路橋 R C 床版の劣化・損傷の種類とその程度、および補修工法について述べる。

2.1 R C 床版の損傷原因と種類

R C 床版の損傷が、財政上、問題であることはまえがきでも触れたが、昨今、構造上も深刻な問題となっている⁹⁾。床版の損傷原因には、

- 1) 計画時に予想できなかったほどの重量車両の頻繁な通行
- 2) 床版厚や鉄筋量の不足
- 3) 主桁間の不等沈下
- 4) 高品質コンクリート用骨材の入手難
- 5) 熟練技能者の減少による不十分な現場施工
- 6) 経年による老朽化

などが考えられ、これらが関係しあって床版の損傷に至っている。

また、床版の劣化・損傷の種類は、次のようである。

- 1) ひび割れ
- 2) はく離
- 3) 鉄筋の露出と腐食
- 4) 漏水、遊離石灰、錆の流出
- 5) 豆板、空洞
- 6) 陥没

2.2 R C 床版の健全度ランク

R C 床版の損傷の度合を判定する基準はわが国の諸団体によって損傷の種類ごとに個々に制定され^{9)~12)}、それが定期点検時に用いられているが、床版の損傷判定は技術者一人ひとりの判断に委ねられるところが大である。

床版の損傷判定とは、その劣化・損傷の状態を調査・点検し、それを総合的に判断し、補修の要否を決定することをいう。損傷の評価結果に基づき、損傷の進行度を分類したものは「損傷度」、「健全度」などと呼ばれるが、ここでは「健全度」と呼ぶことにする。また、補修や補強によって、①床版耐力の回復と向上、②橋梁利用者への安全性の向上、③補修後のメンテナンス性など、床版の性能が補修前より向上する割合をここでは「健全度ランクアップ値」と呼ぶことにする。

本研究では、個々の損傷に対して健全度を細かく規定せず、単独あるいは複数の損傷が組み合わさっている現状を鑑み、総合的な見地から、Table 1 に示すように、健全度ランクを設定した。すなわち、R C 床版の健全度を「床版の機能に全く問題のない状態」から「床版の機能が完全に失われた状態」までの4段階に分類し、それらを16段階の健全度ランクに数値化した。

2.3 補修工法とその設定

本システムでは、R C 床版の補修工法として、10種

類の工法を採用し、それぞれの工法で補修や補強を行った場合の床版の機能回復の度合、いわゆる健全度ランクアップ値をTable 2のように設定した。また表中には、それらの単価と損傷状態に対応した工法も示した。なお、床版の補修単価は施工条件によってかなり異なると思われるが、本システムで提案する補修案の総工費は概算でよいため、標準的な補修単価を用いることにした。

2.4 補修や補強工事における周辺状況

床版の補修工法の選定に関わる要素として、①損傷の種類とその程度、②補修費用、③補修橋梁を取り巻く周辺の状況などがある。ここに、第3の要因は極めて曖昧な点を多々含むが、これを無視すると、望ましい工法が選定できなくなる恐れがある。したがってここでは、第3の要因も考慮することとした。

R C 床版の補修に影響すると思われる周辺の状況と考慮すべき点は、次のようである。

- 1) 住宅地域・・・人や自転車などの通行の安全性、騒音や振動など。
- 2) 工事に関わる事項・・・資材置き場、工事用車両の交通の確保など。
- 3) 迂回路の有無・・・道路網。
- 4) 補修橋梁の幅員内での交通処理能力・・・橋梁の幅員。
- 5) 対象橋梁の幅員拡張による交通処理・・・歩道などの車道への転用。
- 6) 時刻や時期の交通規制・・・その他の工事や都市計画の関係、補修工事の工期など。
- 7) 大型車両の交通規制・・・車両重量。
- 8) 全面交通規制・・・補修工事後の交通開放、周辺経済の鈍化など。
- 9) 路下の状況・・・河川、鉄道線路、重交通など。
- 10) 主要幹線道路上の橋梁・・・災害時の使用、周辺経済への影響など。

3. 支援システムにおける解析手法

R C 床版の補修順位決定支援システムの概要と、それに用いる解析手法について述べる。

Table 1 R C 床版の損傷状態とその健全度ランク

健全度ランク	床版の損傷状態
15	全く問題のない状態
14～11	損傷はあるが、床版の機能に問題のない状態
10～1	補修や補強が必要な状態
0	機能が完全に失われた状態

Table 2 R C床版の補修工法，損傷の度合，補修後の健全度ランクアップ値，および補修単価

コード	補修工法	損傷の度合	健全度のランクアップ値	費用 (千円)	備考
0000	注入工法 (樹脂系)	微細なひび割れ	+ 4	9 / m	
0001	注入工法 (セメント)	微細なひび割れ	+ 6	7 / m	
0010	パテ・吹き付け (樹脂系，セメント)	はく離 鉄筋の露出	+ 8	5 / m ²	
0011	FRP接着工法	多大なひび割れ はく離 豆板	+ 8	64 / m ²	4 層
0100	鋼板接着工法	過大なひび割れ はく離 豆板	+ 8	60 / m ²	4.5mmの鋼板
0101	縦桁増設工法	過大なひび割れ	+ 8	1,700 / m	鋼 I 桁 1.8t/m×950千円/t
0111	打ち足し工法 (増厚)	過大なひび割れ はく離 鉄筋の露出 豆板	+ 8	45 / m ²	上面増厚10cm
0111	部分な打ち換え	部分的に過大な損傷	+ 1 0	75 / m ²	
1000	ブレイク床版に置換		+ 1 5	150 / m ²	
1001	全面打ち換え		+ 1 5	75 / m ²	

3.1 支援システムの概要

支援システムの流れを図示すれば，Fig.1のようになる。すなわち，

- 1) 道路橋RC床版の点検データに基づき，個々の橋梁の床版の健全度を評価する。
- 2) 施工に関わる条件，いわゆる周辺の状態と損傷の種類を勘案し，Table 2に揚げた補修工法の中から個々の床版の損傷に叶った工法を選定する。ただし，補修橋梁の周辺環境を評価に取り入れるが，その評価は極めて曖昧なため，曖昧さの評価に最適なファジィ推論を適用する。
- 3) 予算と道路網を制約条件とし，最適な補修すべき橋梁とその工法を選定する。その際，①多数の橋梁と工法の組合せが存在すること，②その組合せを数値化して扱うため，目的関数の値が離散的に求められること，から最適解の探索にはGAを適用する。

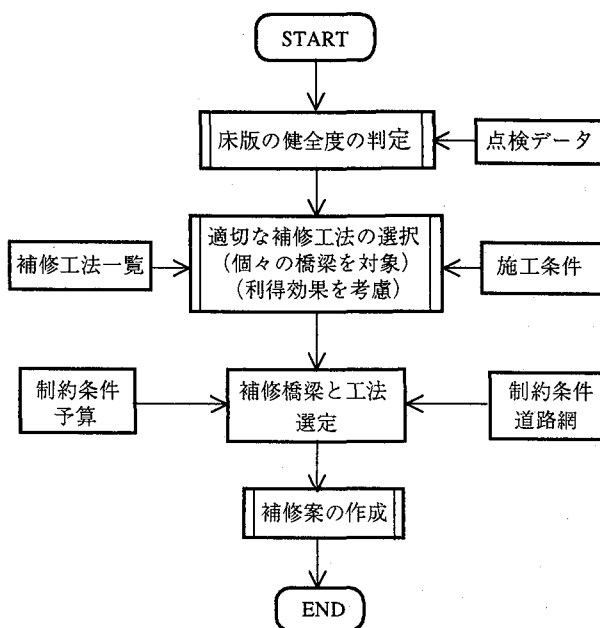


Fig.1 RC床版の補修順位決定支援システムのフローチャート

3.2 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (GA) は，ダーウィンの生物進化論にヒントを得，適者生存の過程を組合せ最適化問題の最適解の探索過程に応用したものである。すなわち，現存する生物群を環境に対してより適応性の強い最適な生物と見なし，その上で淘汰・増殖，遺伝子間の交叉，および突然変異の生物進化のプロセスを簡単な数理モデルに置き換え，それを最適化手法としたものである。

GAは，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。この結果，世代交代シミュレーシ

ョンに必要なパラメータの設定など，不確定な要素を多々含むため，これが欠点とされる。しかし，緩やかな枠組みを有しているがゆえに，応用範囲は広い。

一般に，組合せ最適化問題では，離散変数の有限個の組合せの中から最適な組合せを見い出すので，理論的には有限回の探索で最適解に辿り着くことができる。本研究のような多数の橋梁の中から補修すべき橋梁と損傷に叶った補修工法を決定する組合せ最適化問題も同様に

求解できるが、対象とする橋梁数が多くなると、組合せ数の爆発に行き当たり、有限回の探索といえども、膨大な演算回数すなわち演算時間を要することになる。それゆえ、厳密解を求めることは事実上不可能となる。このような理由で、大規模な組合せ最適化問題には分枝限定法や動的計画法などの手法は適用できない。

そこで本研究では、最適解の探索にGAを用いることにしたが、その理由は、上に述べた点、GAが厳密解を必ずしも必要としない場合に有効である点、ならびに以下の点にある。すなわち、

- 1) 最適化に目的関数の微分が不要な点。
- 2) 個体が集団的に適応度を高めようと動作するため、局所解に陥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点。
- 3) プログラミングが容易な点。

3.3 仮想生物と環境の設定および単純GAの処理手順

床版の最適な補修案が生物の進化過程を模した単純GAによって求められる。GAでは、世代交代時に親から子にどのような情報を、どのような形式で伝えるかのルールを定めておく必要がある。情報の伝達には遺伝子が用いられるが、その表示は、一般に、一次元のビット列でなされる⁹⁾。ここでは、Fig.2に示すような0と1の並びからなる長さ ℓ のビット列を一個体（一補修案）の遺伝子とする。たとえば、 n 本の橋梁が補修対象になれば、RC床版の補修工法としてここでは10種類の工法を採用するため、それぞれの補修工法は4ビットの0、1の並びでコード化でき、それらを橋梁の数 n だけ結合し一補修案とする。それゆえ、その遺伝子列の長さ ℓ は $4n$ ビットとなる。なお、10種類の補修工法に対して、Table 2に示すように、0000から1111までのコードを当てはめた。ただし、計算の便宜上、11番目（1010）から16番目（1111）のコードには、「未補修」なる工法を当てた。

仮想の生物と生活環境を設定した後、単純GAの枠組みに沿って生物集団を進化させ、優性な個体を探索すれば、環境に適合した最適解を見つけ出すことができる。その探索過程はFig.3のようである。

3.4 ファジィ推論ルール

本システムでは、GAで損傷した床版の最適な補修工法を選定するが、そのためには、個々の床版に対するそれぞれの補修工法の適応度を求める必要がある。適応度は補修対象となる橋梁の周辺状況、損傷の種類や程度を



Fig.2 一橋梁が4ビットの遺伝子列で表現され、すべての橋梁の補修工法を表す遺伝子列

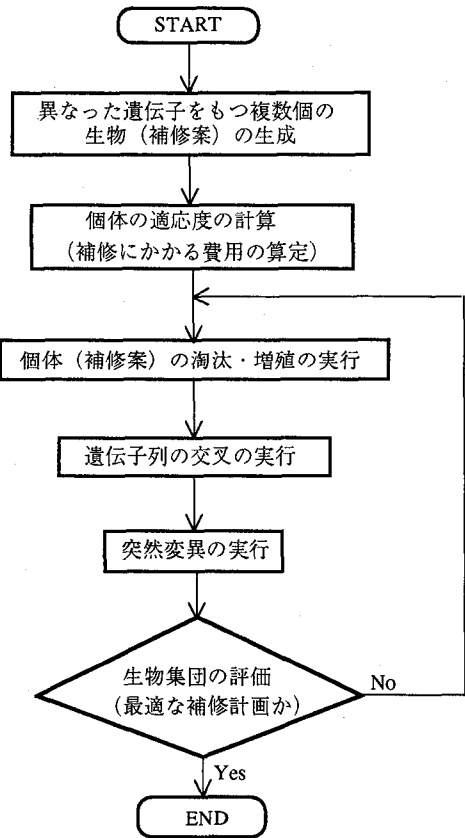


Fig.3 GAによる最適な補修計画案の探索手順

勘案して求められるが、周辺状況などの条件は極めて曖昧なため、ファジィ推論によって求めることにする。

ファジィ推論は人のもつ判断力と曖昧さの2面を備えた手法で、本システムに導入した理由は次の点にある。

- 1) 床版補修が対象となる橋梁の損傷状況や周辺の環境状況（施工に伴う騒音や交通規制などの条件）を明確に定量化するのは不可能である¹⁰⁾。
- 2) 本研究の目的が社会の向上を目指すものに関係し、人との関わりがどうしても避けられず、補修対象橋梁の周辺状況の良否を判定するには、人の主観に起因する曖昧さが入り込む¹⁰⁾。

3.5 最適解の探索

GAでは、補修すべき橋梁とその補修工法が個体で表される。個体間の優劣は、次の2つの値で評価される。

①補修後の健全度の総ランクアップ値 V_i

$$V_i = \sum_{j=1}^n R_j \tag{1}$$

②ファジィ推論から求められる補修工法の適応度 F_i

$$F_i = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^r \sum_{m=1}^5 c_{k,m} \phi_{k,m} \right) \tag{2}$$

である。ここに、

R_j : j 番目の橋梁の床版がTable 2に示された補修工法のいずれかで補修された時の健全度のランクアップ値

$c_{k,m}$: 2.4で述べた10個の周辺条件に対し、個

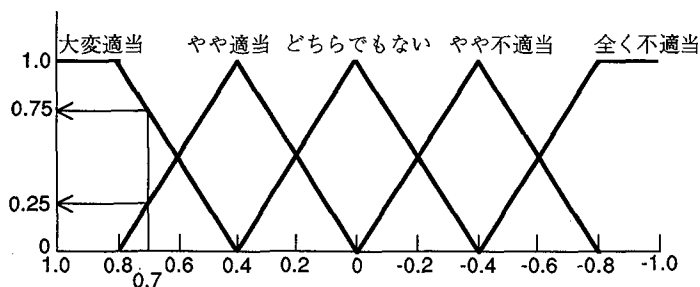


Fig.4 メンバシップ関数

々の補修工法が有する固有の重み

$\phi_{k,m}$: メンバシップ関数に入力値を代入して得られる適合度. たとえば, Fig.4に示されるように, 入力値を0.7とすれば, 大変適当に対する適合度は0.75, やや適当に対するそれは0.25となる.

i : 個体番号

n : 橋梁数

r : 考慮する周辺状況の数

である.

式(1)と(2)から求められる値は, 全く次元の異なった値である. これらの値を個体間の優劣の判定にそのまま用いると, 問題が生じる. したがってここでは, 個体固有の健全度ランクアップ値 V_i と適応度 F_i をそれらの最大値でそれぞれ除して正規化し, それらの内の小さい値を個体の優劣の評価に用いる.

3.6 制約条件

Fig.2に示したように, ある個体すなわち一組の補修変数は補修すべき橋梁とその補修工法を遺伝情報に持つ. 性質の異なる多数の個体が存在する中, そのいくつかは最適化問題の有効な解となる. また中には, 補修すべき橋梁とその補修工法の最適な組合せを決定づける条件, すなわち制約条件を満足しないものもある.

個体が生き残るための制約条件には,

- 1) 床版の損傷状態に見合った補修工法であること.
- 2) 補修費が予算を上回らないこと.
- 3) 道路網を優先した補修工法であること.

①路線上にある橋梁に道路の封鎖や規制を伴う補修工法が選択される場合, その路線の迂回路となる道路上の橋梁には, 道路の封鎖や規制を伴う補修工法は選択しないこと.

②路線上にある橋梁に道路の封鎖や規制を伴う補修工法が選択された場合, 同一路線上にある他の橋梁においても, その損傷状態が良好でなければ, 先と同様, 道路の封鎖や規制を伴った補修工法が選択される. この条件は交通管制の面から考えて妥当である.

などがある. これらの条件を満足しなければ, 不適切な解とする.

上述の制約条件を最適化問題の探索過程に課する方法として, いくつかの方法が考えられる. たとえば, 不適切な個体の場合, ①その遺伝子进行操作し, 優性な個体に変異させる方法, ②ファジィ推論の過程でペナルティを与え, 劣性な個体に変異させる方法, などが考えられる. ここでは, 後者の方法を採用し, 不適切な個体が最適解の探索過程で選択されないようにする.

そこで, 上述の3条件のうち, 1) の条件を満足しない場合には, ファジィ推論の過程で用いられる工法の適合度に過大なペナルティを与え, 式(2)から計算される個体の補修工法の適応度が過小評価されるようにした. また, 2) と3) の条件を満足しない場合には, GAの探索過程で個体の優劣の判定に用いられる評価値, いわゆる式(1)と(2)から計算される値をそれぞれの最大値で正規化した値, そのものを小さくした. このようにした理由は,

- a) 1) の条件は個々の橋梁に関することであり, 2) と3) の条件は補修計画全体に関わることであるということ
- b) 1) の条件が満足されない補修工法にも関わらず, それが選択されると, 極めて不合理な補修計画となるのに対し, 2) と3) の条件はある橋梁の補修工法を変えるだけで, 制約条件を満足するかもしれないということ

である.

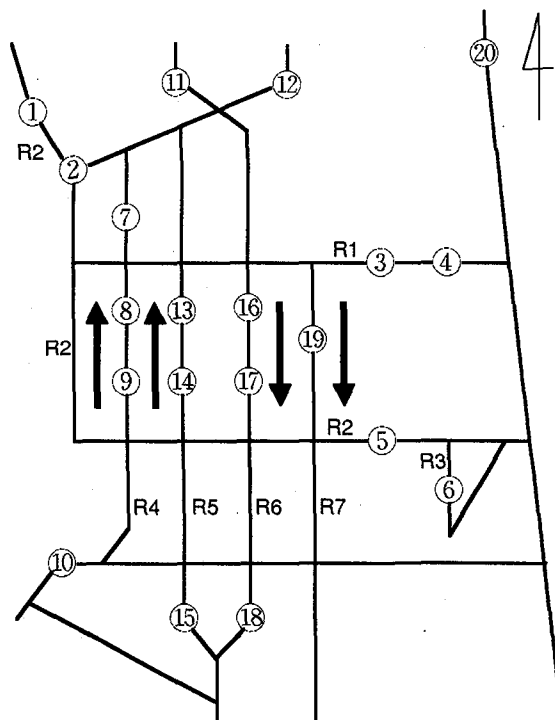


Fig.5 仮定の補修計画地域内に設けられた道路網とそれに点在する橋梁群

4. 数値解析結果とその考察

3. で構築したRC床版の補修順位決定支援システムを複数の幹線道路網とそのネット上に点在する複数の橋梁からなる仮想の補修対象地域に適用し、RC床版の補修案を提示する。

4.1 仮想の補修対象地域

本システムの有用性を検討するため、補修対象地域をFig.5（橋梁の数20、幹線道路の数7本）のように仮定する。幹線道路の番号、橋梁番号、および迂回路との関係をTable 3に示す。また、床版の損傷状態とその規模をTable 4のように設定する。

Table 3 道路の番号、その路線上に存在する橋梁の番号、およびその迂回路

道路番号	橋梁番号	迂回路	備考
R 1	3, 4	R 2	
R 2	1, 2, 5	R 1	
R 3	6	R 2	
R 4	7, 8, 9, 10	R 5	北行き的一方通行
R 5	13, 14, 15	R 4	北行き的一方通行
R 6	16, 17, 18	R 7	南行き的一方通行
R 7	19	R 6	南行き的一方通行
その他	11, 12, 20		

4.2 GAパラメータの最適値

単純GAで組合せ最適化問題の準最適解を効率よく探索するには、GAの固有なパラメータ（淘汰率、交叉率、突然変異率、個体数）の最適な値を用いる必要がある。

そこで、様々なGAパラメータの値に対し、組合せ最適化問題を解析した結果、準最適解がTable 5に示すGAのパラメータ値で効率的に求められることが分かった。したがって以下では、これらの値を用い、仮想の補修計画地域内に存在する橋梁RC床版の適切な補修案を求める。

なおここでは、探索空間に存在する生物集団の数（補修案の数）を演算時間の関係から50個体に限定した。それを100あるいは1,000倍に増やし、探索空間をより広くとれば、補修案をより速く探し出すことも可能であろう。ただし、個体数を増やせば、一世代の計算に要する演算時間は多くなり、どの程度の個体数が最適であるかは問題によって異なり、詳細な検討を要する。

4.3 GAによる最適解探索の有効性

損傷した床版の補修計画を検討する前に、GAによる解析の有効性を検証する。

損傷したRC床版を3体とし、その補修工法をTable 2に示す10種類のほかに5種類付け加え、組合せ数 $15^3=3,375$ ケースのすべてに対して評価値を算定した。同様に、本システムをこの問題に適用し、単純GAによる最

Table 4 橋梁の規模、およびRC床版の損傷の種類と規模

橋梁番号	損傷の種類	健全度の度合	ひび割れの長さ(m)	損傷面積(m ²)	橋長(m)	幅員(m)	床版面積(m ²)
1	はく離、鉄筋の露出	4	0	600	50	20	1,000
2	部分的なひび割れ	12	20	20	50	20	1,000
3	豆板	8	0	1,200	100	20	2,000
4	なし	15	0	0	100	20	2,000
5	部分的な鉄筋の露出	7	0	120	20	30	600
6	部分的なひび割れ	14	2	1	20	30	600
7	陥没の恐れ	2	0	200	60	10	600
8	ひび割れ	5	300	300	60	10	600
9	部分的なひび割れ	10	60	10	60	10	600
10	はく離、鉄筋の露出 豆板、陥没の恐れ	4	0	500	60	10	600
11	はく離	5	0	1,200	100	20	2,000
12	ひび割れ	5	50	200	100	20	2,000
13	ひび割れ	9	50	500	50	20	1,000
14	はく離、陥没の恐れ	4	0	500	50	20	1,000
15	空洞、陥没の恐れ	1	0	100	50	20	1,000
16	なし	15	0	0	50	20	1,000
17	ひび割れ	3	100	20	50	20	1,000
18	陥没の恐れ	4	0	20	50	20	1,000
19	ひび割れ	3	200	500	50	20	1,000
20	部分的な鉄筋の露出	10	0	200	100	20	2,000

Table 5 最適なGAパラメータの値

GAパラメータ	%
淘汰率	40
交叉率	20
突然変異率	1

適解も求めた。その結果、GAによる最適解は全数チェックによる最大評価値と完全に一致した。このこと

より、組合せ最適化問題の解法にGAの優れていることが分かった。

なお、全組合せの評価をSONY NEWS S5000Xで行ったところ、約90分の演算時間を要した。本研究で取り

扱う 20 橋の補修計画に全組合せ計算を仮に適用したとすれば、補修の工法数が 11 種類の場合でも

$$(11^{20}/16^3) \times 1.5(h) \div 2.5 \times 10^{17}(h) \\ \div 1.0 \times 10^6(\text{日}) \div 2.8 \times 10^{13}(\text{年})$$

だけの時間を要し、全く非現実であることが分かる。

一方、本システムを適用した場合には、準最適解が個人で所有可能なパーソナル・コンピュータ（たとえば、富士通(株)製の FMV SE, CPU : Pentium 100MHz, メモリ : 40MB) でも 1 分以内に求められ、G A が大規模な組合せ最適化問題の解法に威力を発揮することが分かる。

4.4 数値解析結果とその考察

(1) 予算 3 億円での補修案

4.1 に示した仮定の補修計画地域内に廻らされた道路網上に存在する 20 橋の中から、補修すべき橋梁とそれらの損傷に叶った補修工法を予算 3 億円内で探索する。

20 橋に対し、最適な補修工法を単純 G A で探索したところ、Table 7 のような結果を得た。この場合、

- 1) 補修費用は 2 億 8,944 万円
- 2) 健全度の総ランクアップ値は 112
- 3) 評価値は 0.355

であった。

探索結果から明らかなように、補修経費は予算 3 億円内に収まっている。また、健全度の総ランクアップ値はすべての橋梁の健全度が 15 となるように補修した場合の総ランクアップ値の 70% に達し、損傷した橋梁の 7 割が機能回復したことになる。

また、Fig.6 の網掛け数字 13 ~ 15, 17, 18 は交通規制や道路封鎖を伴って補修される橋梁である。

以上のように、Table 6 の補修案は、橋梁の損傷の種類と度合に叶った妥当な補修工法を示しており、本システムは適切な補修案を提示しているものと考えられる。

(2) 道路網と補修案との関係

上述のように、Fig.6 に網掛け数字で示した橋梁は、交通規制や道路封鎖を伴った工法で補修される。それゆえ、13 ~ 15 の橋梁が存在する R 5 の道路は、何らかの交通規制がなされる。その結果、R 5 の迂回路として機能する R 4 上に点在する 7 から 10 の橋梁のうち、7 と 10 の橋梁は、損傷が著しいにも関わらず、交通規制を伴わない簡易な工法で補修されるか、あるいは無補修のまま放置される結果となった。これは、道路網の条件

Table 6 予算 3 億円の場合の R C 床版の最適補修案

橋梁 番号	損傷の状態		補 修		補修後の 健全度の 度合
	損傷の種類	健全度の 度合	補修工法	健全度 ランクアップ値	
1	はく離、鉄筋の露出	4	FRP接着工法	+ 8	12
2	部分的なひび割れ	12	補修せず	0	12
3	豆板	8	鋼板接着工法	+ 8	15
4	なし	15	補修の必要性なし	0	15
5	部分的な鉄筋の露出	7	吹き付け工法	+ 8	15
6	部分的なひび割れ	14	補修せず	0	14
7	陥没の恐れ	2	補修せず	0	2
8	ひび割れ	5	注入工法（樹脂系接着剤）	+ 4	9
9	部分的なひび割れ	10	注入工法（樹脂系接着剤）	+ 4	14
10	はく離、鉄筋の露出 豆板、陥没の恐れ	4	吹き付け工法	+ 8	12
11	はく離	5	鋼板接着工法	+ 8	13
12	ひび割れ	5	FRP接着工法	+ 8	13
13	ひび割れ	9	打ち換え工法（部分的）	+10	15
14	はく離、陥没の恐れ	4	打ち換え工法（部分的）	+10	14
15	空洞、陥没の恐れ	1	打ち換え工法（部分的）	+10	11
16	なし	15	補修の必要性なし	0	15
17	ひび割れ	3	打ち換え工法（部分的）	+10	13
18	陥没の恐れ	4	打ち換え工法（部分的）	+10	14
19	ひび割れ	3	注入工法（セメント）	+ 6	9
20	部分的な鉄筋の露出	10	吹き付け工法	+ 8	15

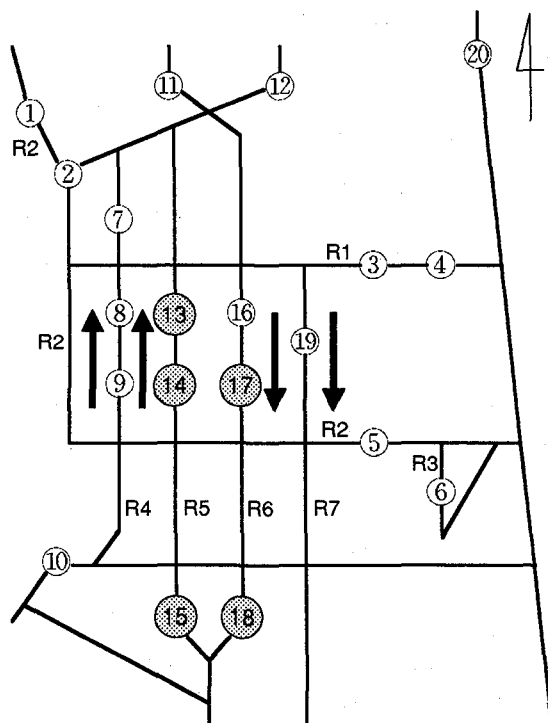


Fig.6 予算 3 億円の補修計画で交通規制される橋梁 (13-15, 17, 18)

が補修案に強く反映した結果である。

また、16 ~ 18 の橋梁が存在する R 6 と、19 の橋梁が存在する R 7 の間にも同様の関係にある。

(3) 補修後の再補修の効果

床版の補修が上述の計画案どおり実施され、その後、新たな損傷が発生せず、かつ未補修橋梁の損傷も全く悪化しなかったものと仮定する。

この条件のもとに、予算2億円をさらに投入し、第2段の補修を計画する。補修すべき橋梁とその最適な補修工法を単純GAで探索したところ、Table 7のような結果を得た。ただし、同表の損傷の欄において、第1段の補修にも関わらず、健全度が15に至っていない橋梁の損傷の種類には、第1段の補修がなされる前のそれをそのまま記述した。

この場合、

- 1) 補修費用は1億6,365万円
- 2) 健全度の総ランクアップ値は31
- 3) 評価値は1.14

となった。この結果から明らか

なように、補修の費用は予算2億円内に収まっている。また、健全度の総ランクアップ値は、損傷している橋梁をすべて健全度が15となるように補修した場合の65%に達している。なお、交通規制や道路封鎖を伴った補修がなされる橋梁をFig.7に網掛け数字で示した。

Table 6に示した第1段の補修案では、損傷が著しいにも関わらず、道路網の制約がある関係上、7と10の2橋が未補修のままであった。しかし、第2段の補修が計画された結果、これらはいずれも補修されることになった。したがって、第2段の補修後には、補修が必要な健全度ランク10以下の橋梁はない。

(4) 予算5億円での補修案

前述の第1次補修案（予算3億円）と第2次補修案（予算2億円）では、総計で5億円の予算が投入された。次に先の例とは異なって、20橋の床版を総額5億円で一度に補修することを考える。

20橋に対して最適な補修工法を単純GAで探索したところ、Table 8のような結果を得た。この場合、

- 1) 補修費用は4億6,532万円
- 2) 健全度の総ランクアップ値は118
- 3) 評価値は0.351

であった。これから明らかなように、補修経費は予算の5億円内に収まっている。また、健全度の総ランクアップ値は、すべての橋梁の健全度が15となるように補修した場合の74%に達している。なお、交通規制や道路封鎖を伴った補修がなされる橋梁をFig.8に網掛け数字で

Table 7 補正予算2億円で2次補修する場合のRC床版の補修案

橋梁 番号	損傷の状態		補 修		補修後の 健全度の 度合
	損傷の種類	健全度 の度合	補修工法	健全度 ランクアップ値	
1	はく離、鉄筋の露出	12	FRP接着工法	+ 8	15
2	部分的なひび割れ	12	補修せず	0	12
3	なし	15	補修の必要性なし	0	15
4	なし	15	補修の必要性なし	0	15
5	なし	15	補修の必要性なし	0	15
6	部分的なひび割れ	14	補修せず	0	14
7	陥没の恐れ	2	打ち換え工法（部分的）	+10	12
8	ひび割れ	9	打ち換え工法（部分的）	+10	15
9	部分的なひび割れ	14	打ち換え工法（部分的）	+10	15
10	はく離、鉄筋の露出 豆板、陥没の恐れ	12	打ち換え工法（全面）	+15	15
11	はく離	13	補修せず	0	13
12	ひび割れ	13	鋼板接着工法	+ 8	15
13	なし	15	補修の必要性なし	0	15
14	はく離、陥没の恐れ	14	補修せず	0	14
15	空洞、陥没の恐れ	11	補修せず	0	11
16	なし	15	補修の必要性なし	0	15
17	ひび割れ	13	補修せず	0	13
18	陥没の恐れ	14	補修せず	0	14
19	ひび割れ	9	鋼板接着工法	+ 8	15
20	なし	15	補修の必要性なし	0	15

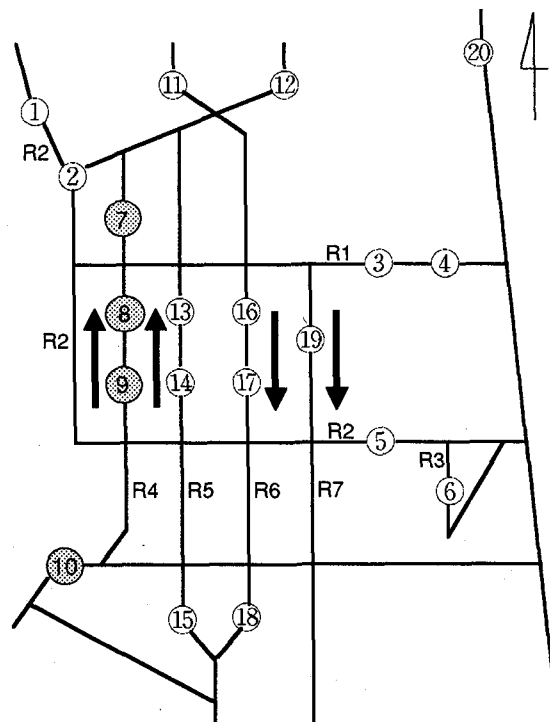


Fig.7 予算2億円の補修計画で交通規制される橋梁（7-10）

示した。

この場合、3億円の予算で計画した第1次の補修案よりも達成率は高くなった。しかし健全度の総ランクアップ値118は、第1次と第2次の補修案のそれらの合算値143には及ばなかった。

このように、総額が同じであっても、一度に補修するのと、2度に分けて補修するのでは、補修後の健全度に差異のあることが分かる。これは、2度に分けて補修する案では、2回目の補修で交通規制を伴う大規模な補修工事を必要とするような損傷橋梁が減少し、その結果、道路網の制約を受けにくくなるため、バラエティに富んだ補修を計画することができからであろう。

なお、健全度ランクが10以下で、今後、補修を必要とする橋梁が3橋残った。

(5) 最適解の収束状況

先の3ケースの補修計画に対し、最適な補修案が得られるまでの探索過程を評価値と世代との関係で示すと、Fig.9～Fig.11のようになる。ここに、縦軸は評価値を、横軸は世代数を示す。

5. あとがき

損傷した多数のRC床版を限られた予算内で効率的かつ合理的に補修するため、補修すべき橋梁とその適切な補修工法が選択できるような支援システムを構築した。

本システムを仮想地域内の道路網上に点在する多数の損傷橋梁の補修計画に適用し、最適な補修案を求めた。数値解析結果を用い、システムの妥当性を検討した。

本システムの特徴は、次のとおりである。

- (1) RC床版の健全度を4種類に大別し、16のランクに区分した。
- (2) 組合せ最適化問題の解法に単純GAを適用した。
- (3) 個々の損傷橋梁に対するそれぞれの補修工法の適応度を、周辺の状況（施工条件）を勘案しながら、ファジィ推論によって求めた。
- (4) 補修するか否かの判断、および適切な補修工法かどうかの評価には、対象橋梁の損傷度だけでなく、道路網をも考慮に入れた。
- (5) 補修予算を制約条件とした。

本研究では、RC床版の補修順位決定のための支援システムを構築し、その有用性を数例の数値解析で検証した。補修案の探索に単純GAを用いたが、この方法からは、常に最適な解が求められるとは限らず、それに近い準最適な解が求められる場合もある。しかし、本研究の目的は、補修計画を立てる技術者が、損傷状態などの点検データによって、直感やひらめきによって計画するよりも、支援システムによって合理的に計画することにあ

Table 9 予算5億円の場合のRC床版の最適補修案

橋梁 番号	損傷の状態		補 修		補修後の 健全度の 割合
	損傷の種類	健全度 の割合	補修工法	健全度 ランクアップ値	
1	はく離、鉄筋の露出	4	プレハブ床版に置き換え	+15	15
2	部分的なひび割れ	12	補修せず	0	12
3	豆板	8	鋼板接工法	+8	15
4	なし	15	補修の必要性なし	0	15
5	部分的な鉄筋の露出	7	打ち換え工法（部分的）	+10	15
6	部分的なひび割れ	14	補修せず	0	14
7	陥没の恐れ	2	補修せず	0	2
8	ひび割れ	5	注入工法（樹脂系接着剤）	+4	9
9	部分的なひび割れ	10	注入工法（セメント）	+6	15
10	はく離、鉄筋の露出 豆板、陥没の恐れ	4	吹き付け工法	+8	12
11	はく離	5	吹き付け工法	+8	13
12	ひび割れ	5	FRP接工法	+8	13
13	ひび割れ	9	打ち換え工法（部分的）	+10	15
14	はく離、陥没の恐れ	4	打ち換え工法（全面）	+15	15
15	空洞、陥没の恐れ	1	打ち換え工法（部分的）	+10	11
16	なし	15	補修の必要性なし	0	15
17	ひび割れ	3	打ち換え工法（部分的）	+10	13
18	陥没の恐れ	4	打ち換え工法（全面）	+15	15
19	ひび割れ	3	注入工法（セメント）	+6	9
20	部分的な鉄筋の露出	10	鋼板接工法	+8	15

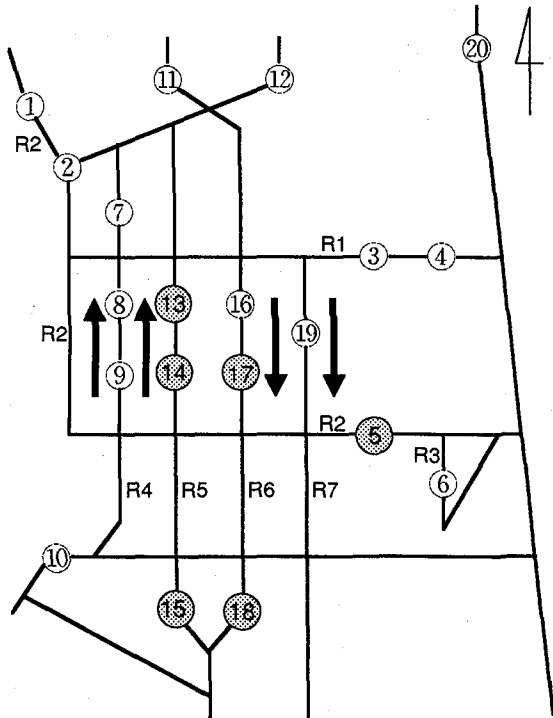


Fig.8 予算5億円の補修計画で交通計画される橋梁（5、13-15、17、18）

るので、準最適な解でも十分に許容できるものと思われる。

なお、さらに検討すべき課題として、

(1) 補修費の考え方

①本システムで評価値として計算される費用は、R

C床版の補修に要する工費のみである。建設地点によっては、床版の補修に仮設橋が必要なこともある。このような場合には、床版の補修費そのもののほかに、仮設費も加味しなければならない。

②資材の置き場や架設橋が私有地に設けられる場合には、その借地代や買い上げ費用も加味されねばならない。

(2) 補修計画支援システムについて

本システムで用いる入力データは床版の損傷度のみで、床版が損傷した原因のデータまでは入力していない。仮に、外的な要因で損傷が生じたのであれば、それから橋梁を守る措置を講じる必要がある。また、内的な要因で生じたのであれば、設計時の規準などを参照し、当時の規準荷重と現在のそれとを比較し、両者かなりの相違がある場合には、樹脂注入などの工法ではなく、要因に叶った工法を採用する必要がある。

などがある。

最後に、本研究が今後ますます重要となる橋梁の維持管理に関する研究に少しでも役に立てば幸いである。

謝 辞

本研究を行うにあたり、実務者の立場から(株)近代設計の出口恒宣氏(元(株)日本工業試験所)から貴重なご意見とご助言を賜った。ここに、深謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 高架構造研究会編：道路橋の点検補修，理工図書，1978.
- 2) 太田 実：床版の損傷と対策，橋梁と基礎，Vol.4, No.10, pp.30-33, 1970-10.
- 3) 吉崎 収：道路整備優先順位決定手法の検討，オペレーションズリサーチ，Vol.30, No.3, pp.71-73, 1985-3.
- 4) 古田 均・中塚紀江・堂垣正博：鋼橋の塗膜補修順位決定システムに関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.43A, pp.601-607, 1997-3.
- 5) NCB研究会編：新しい合成構造と橋，山海堂，1996.
- 6) コンクリート構造物の補修ハンドブック編集委員会編：コンクリート構造物の補修ハンドブック，技報堂出版，1988.
- 7) 小村 敏・太田 実：新体系土木工学36 コンクリート構造物の維持・補修・取壊し，技報堂出版，1983.

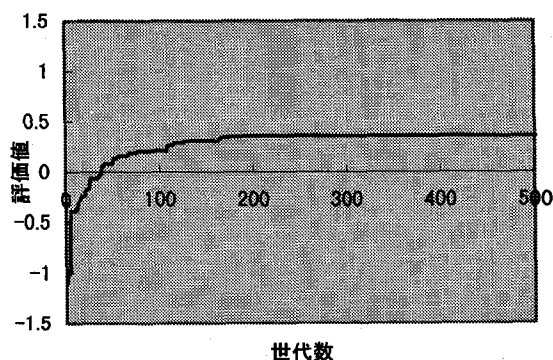


Fig. 9 予算3億円の第1次補修計画案における評価値の収束状況

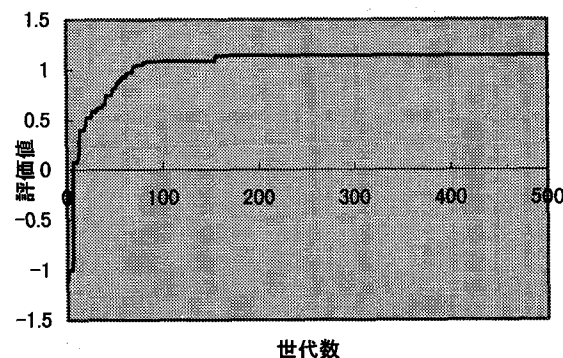


Fig. 10 予算2億円の第2次補修計画案における評価値の収束状況

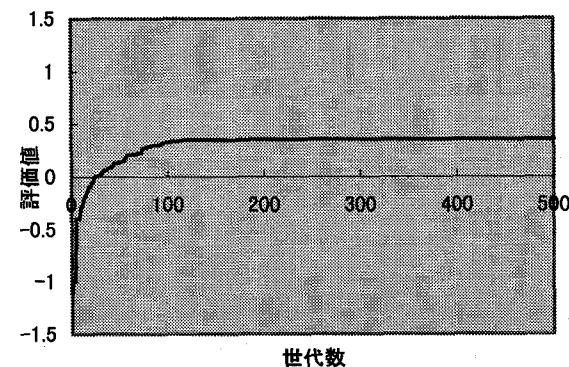


Fig. 11 予算5億円における評価値の収束状況

- 8) 阪神高速道路公団・保全施設部・保全技術課編：道路構造物の点検標準(土木構造物編)，1992.
- 9) たとえば，安居院 猛・長尾智晴：ジェネティックアルゴリズム，昭晃堂，1995.
- 10) 古田 均・小尻利治・宮本文穂・秋山孝正・大野研・背野康英：ファジィ理論の土木工学への応用，森北出版，1992.

(1997年9月26日受付)