

点検データに基づく橋梁補修計画立案への GA の援用に関する研究

A STUDY ON GA APPLIED BRIDGE REPAIR PLANNING
BASED ON INSPECTION DATA

近田 康夫*・木下 真二**

Yasuo CHIKATA and Shinji KINOSHITA

*正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野 2-40-20)

**正会員 工修 戸田建設 KK

In order to optimize a repair planning of existing bridges within the budget, the bridge maintenance support system (prototype) has been proposed. This system decides an optimum combination of repaired bridges and their items based on inspection data by using genetic algorithm. But the prototype includes some points at issue about the evaluation of repaired bridges and the objective function of the knapsack problem. In this paper, some investigations are made on that points at issue. For example, a new approach to evaluate repaired bridges is shown, that uses the important coefficients of items obtained from inverse analysis on inspection data. And to make the objective function more practical in actual scenes, some conditions are added to it.

Key Words : bridge inspection, repair planning, genetic algorithm, knapsack problem

1. はじめに

橋梁は、計画・設計・施工・供用の後、補修・補強を経て架け替えというライフ・サイクルをたどり、十分な維持管理のもとでは、目標とする耐用年数以上を供用することができる。しかし、戦後多くの橋梁が架設されたものの、建設当初には予想だにし得なかった過酷な状況(交通量など)に置かれた結果、橋梁の劣化・老朽化に拍車をかけることとなった。さらに、社会経済の進展、価値観の多様化などに伴い、維持管理水準の保持・向上の要求や、環境問題についての住民の要求が高まるなど、維持管理に対する要請は、高度化・多様化してきており、既存橋梁を効率よく維持管理していくことが、橋梁の建設と同等以上に重要視されるようになってきている。

一般に、橋梁の維持管理は自治体が行うが、建設時期や暴露環境の異なる多数の橋梁を一括管理する必要があり、人間における定期健康診断に相当する点検調査の実施、データの蓄積による早期発見・早期治療(補修)体制の確立が急がれている^{1),2)}。

従来、既設橋梁の点検調査の結果は、専門家の診断を経て管理下の橋梁の健全度あるいは損傷度を評価し、エキスパートシステムの構築を行うことに関心が集められていた傾向がある³⁾⁻⁶⁾。しかし、点検調査の後には、架け替えや大規模補修などの別枠の予算を要求するのは別にして、限られた予算のうちで、社会的満足性を最大限に満たす適切な維持管理計画を立案するための方法の確立が求められよう。換言すると、管理する橋梁の数、要補修点検項目数の膨大な組み合わせから迅

速に補修計画を立案することが求められるが、その検討例は少ない⁷⁾。組み合わせ数の大きな組み合わせ最適化問題に対しては遺伝的アルゴリズム(GA)の適用が注目されており、杉本等⁸⁾による道路整備順位決定問題への適用例が報告されている。

筆者らは、既設橋梁の点検結果に基づいて、一定の予算内で最大の効果をもたらす補修対象橋梁と補修部位の組み合わせを決定し、補修計画の支援を行う一方法を提示した⁹⁾。具体的には、点検結果の数量化理論第II類による分析結果を用いた橋梁の健全度(損傷度)の定量的表現に基づき、補修後に管理対象橋梁群のトータル健全度を最大とする補修橋梁・部位の組み合わせ最適化問題に、遺伝的アルゴリズムを援用したナップサック問題を適用することで解決している。しかしながら、定式化に若干の問題を含んでおり、GAを適用した場合の解探索効率が大きく阻害されていたために改良を試みている^{10),11)}。

本報告では、筆者らの試み⁹⁾での問題点の整理とその対策および計算例をまとめ、GAの橋梁補修計画への実用的適用のための資料とするものである¹⁾。

2. 橋梁点検台帳

今回提供を受けた橋梁点検結果のデータは、I県が昭和57年度から63年度の間に調査を行った橋梁診断台帳を利用した。収容橋梁数は208橋で、そのうちコンクリート橋148橋、鋼橋60橋である。点検項目とともに点検結果の例を表-1に示す¹²⁾。

¹⁾ 一部既発表の内容^{10),11)}に加筆したものを含む

橋梁名	橋面舗装	地覆高欄	床版	床組工	主構	支承	伸縮継手	排水装置	塗装	洗掘変動	躯体変動	安定構造	安定材質	耐震性	評価
A橋	○	○	△	△	△	○	△	△	○	○	○	○	○	○	B
B橋	○	△	○	○	○	○	○	○	-	○	○	△	○	△	D
C橋	○	○	x	x	x	x	x	x	-	△	○	△	○	△	A
D橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
E橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
F橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
G橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
H橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
I橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
J橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
K橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
L橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
M橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
N橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
O橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
P橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
Q橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
R橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
S橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
T橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
U橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
V橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
W橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
X橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
Y橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	B
Z橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	C

・コンクリート橋(表では、B、C橋)に関しては塗装の項目はない。

・コンクリート橋(表では、B、C橋)に関しては塗装の項目はない。

×: 損傷が激しい. 危険性が高い.

D: 健全であり、目立った損傷は見られない。

3. 点検結果の補修計画への応用

これは、橋梁の定期点検の概念が人間の定期健康診断に例えられることに倣って説明すると以下のようになる。定期健康診断で、要精密検査あるいは直ちに手術などの加療が必要と判断されれば、健康診断ではなく治療に移行する(これが上述した別予算で実行されるものに該当する)。一方、異常が無い、あるいは多少の異常は認められるものの経過を観察したり、1,2回の簡単な治療(投薬など)で済むものには対しては、容易に健康状態に戻せることとなる。後者が、ここで対象としているものである。この場合、治療のための費用に制約がある場合にどの患者のどの異常を治療すれば費用の範囲内で対象者全体としての健康状態を最も高く

要因	評価	判断基準	
上	舗装	△ 縦方向のひび割れ,あるいは数箇所段差が見られる。	
		× 縦方向, 亀甲状のひび割れがある。あるいは, 実際に走行してみて, 明らかに支障があると思われる。	
	地覆高欄	△ 地覆に劣化が見られ, ひび割れが生じている。また, 高欄が事故などで一部破損している。	
		× 地覆の劣化が激しく, 欠け落ちが見られる。高欄の腐食が激しく, 耐荷力に不安がある。	
	床版	△ 亀甲状のひび割れがある。何箇所も石灰分の遊離が見られる。	
		× ひび割れの間隔が狭く, 欠け落ちが見られる。あるいは施工不良により, 骨材の分離, 鉄筋の露出が激しい。	
	床組工・主構	△ コンクリート構造の場合, ひび割れ, 剥離が見られる。 鋼構造の場合, 全体にわたって腐食している。	
		× コンクリート構造の場合, ひび割れに間隔がある。鋼構造の場合, 腐食が激しく, 耐荷力に不安がある。また, 鋼材がひび割れを起こしている。	
	部 支 承	△ 錆, 腐食が激しい。あるいは, 変形, 破損がある。	
		× 上記の症状が助長し, 支承が可動しなくなっている。	
工	伸縮継手	△ 後打材やシール部に欠陥が見られる。あるいは, 目地周辺が陥没している。	
		× 盲目地になっている。あるいは, 水漏れが激しく周辺部を腐食している。また, 実際に車で走行してみて, 著しく衝撃・騒音がある。	
	排水	△ 土砂の堆積, 配水管のずれなどのより, 排水が不完全である。	
	装置	× 路上に水がたまる箇所がある。	
	塗装	△ 部分的にはがれ, 発錆が見られる。	
		× 全体的に劣化し, 発錆が著しい。	
	耐震性	△ 支承縁端距離が不足している。あるいは, 支承の機能が著しく低下している。	
		× 橋梁が古いため, 移動制限装置が施されていない。耐震構造的に極めて不安定である。	
	下 部	洗掘	△ 洗掘が見られる。
		変動	× 洗掘が進み, 基礎の安定性を欠くと思われる。
躯体変動		△ 躯体の沈下, 移動, 傾斜が見られる。	
変動		× 症状が進み, 上部工にまで影響がみられる。	
工 安定性(構造)	△ ひび割れ, 鉄筋露出, 腐食による劣化等構造的な破損が見られる。		
	× ひび割れの間隔が大きい。あるいは, 一部が欠け落ちている。		
工 安定性(材質)	△ 構造的な破損と合わせ, 極めて不安定である。		
	× 破損, 移動が激しく, 極めて不安定である。		

上述した考え方で、補修計画を進めるには、補修の前後で橋梁の評価値を数値的に表現できることが求められる。例えば、補修前の評価値は5であったが、補修後には10になったといったようにである。このように、橋梁の安全性のレベルを数値的に表わせれば、容易に目的関数は各橋梁の評価値の総和を最大化すれば良いことがわかる。

一方、多くの橋梁を管理していれば、軽微な異常を有する橋梁も多く、上述の補修計画の対象となる橋梁も多くなる。すなわち、どの橋梁のどの要補修部位を補修すれば良いかという組合せ最適化問題となる。平均して2個所の要補修箇所を持つ橋梁が100橋あれば、

それぞれの要補修箇所に対して「補修する／しない」を決定するから検討すべき組み合わせ数は $2^{2 \times 100}$ となる。このような、膨大な数の組合せをすべて検討することは現実的ではないことから、遺伝的アルゴリズム (GA)¹³⁾ による解探索を試みることにする。

要約すれば、橋梁の補修前後の状態を評価値として数値的に表現することと、補修部位に関する組合せ最適化問題を効率よく解くことの2点に問題は集約される。

4. プロトタイプの問題点

以上の考え方に立脚して筆者らが構築したプロトタイプは以下のような手順を採った。

- 橋梁の点検結果を数量化理論第Ⅱ類により解析し、その結果として得られるカテゴリー・スコアを橋梁毎に合計してその橋梁の評価値とする。例えば、部位 i に関して損傷レベル (3,2,1) に対してカテゴリー・スコアが (1.0, 2.0, 3.0) と得られていれば、損傷レベル3のものを補修すればこの部位を含む橋梁の評価値は $3-1=2$ だけ上昇する。これを、一般化した式で表現すれば次式のようになる。

$$Y = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{c_j} a_{jk} \delta_{jk} \quad (1)$$

$$\delta_{jk} = \begin{cases} 1 \dots (\text{点検項目 } j \text{ の損傷度が } i \text{ である}) \\ 0 \dots (\text{それ以外の場合}) \end{cases}$$

ここで、 Y は橋梁評価値、 R は点検項目 (アイテム) 数、 c_j は j 点検項目の損傷度 (アイテムのカテゴリー数)、 a_{jk} は j アイテム k カテゴリーのカテゴリー数量 (スコア) である。

- 組合せ最適化問題は、予算内 (容量) で、橋梁の評価値 (価値) の総和が最大となる、補修箇所 (荷物) の組合せを考えるナップサック問題として考えることができるから、目的関数と制約条件はそれぞれ

$$F = \sum_{i=1}^n C_i (e_{i2} - e_{i1}) \rightarrow \max \quad (2)$$

$$g = E - C > 0 \quad (3)$$

ここで、 n は橋梁数、 e_{i2} は補修前の橋梁の評価値、 e_{i1} は補修後の橋梁の評価値、 C_i は i 番目の橋梁の補修にかかる費用、 C は代替案の費用、 E は予算である。

こうして、問題の定式化はできたが実際に解析を行ってみると以下のような問題点が指摘された。

- ① 数量化理論第Ⅱ類による分析結果から得られるカテゴリー数量は、必ずしも損傷状態の重度から軽微への変化に対して単調増加ではない。これは、用いたデータにも依存することではあるが、結果として、補修すれば橋梁の評価値がかえって減少する場合がある。

- ② GA の染色体 (線列) フォーマットが一定長である。これは、プログラムの簡便化のために線列構成を橋梁毎に全ての点検項目を含んだものとしたが、これではなんら損傷の無い部位も解探索空間に入ることになり、解探索効率を大きく阻害していた。この対策として損傷評価が1 (損傷無し) の項目をできるだけ補修しないようにペナルティを与える付加条件を追加したが結果的には不十分であった。
- ③ 橋梁群全体の補修箇所をランダムに探索するため、現実の補修作業 (例えば、足場を組む場合には幾つかの損傷をまとめて補修する) 形態を考慮していない。
- ④ 淘汰過程でのペナルティー関数が進化初期に $g = 0$ 近傍の非適合解を排除する傾向が強すぎるため、非適合領域側からの解の改良がほとんど見込めない。

表-3 各部位の補修内容とその費用

項目	補修内容	補修費用 (千円)
橋面 舗装	オーバーレイ	3 (単位面積当たり)
地覆 高欄	旧地覆撤去 地覆・高欄設置	57 (単位長さ当たり)
床版	旧床版撤去 新床版建設	40 (単位面積当たり)
床組工	増設桁工 (図-1)	700 (単位重量当たり)
支承	省交換 (50t)	400 (1箇所当たり)
伸縮 継手	ジョイント交換 (ゴム, 鋼, アルミ)	250 (単位長さ当たり)
排水 装置	塩化ビニル管交換	5 (単位長さ当たり)
塗装	ケレン, 下塗り, 中塗り, 上塗り	10 (単位面積当たり)
耐震性	移動制限装置設置	250 (1基当たり)
安定性 (材質)	ASR 補修	29 (単位面積当たり)

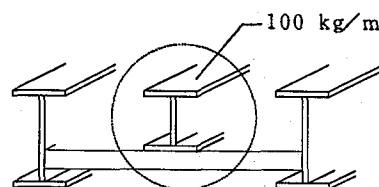


図-1 増設桁工の重量

橋地床床主支伸排塗洗軀安安耐
面覆 組 縮水 掘体定定震
舗高 組 継装 変変構材震
装欄版工構承手置装動動造質性

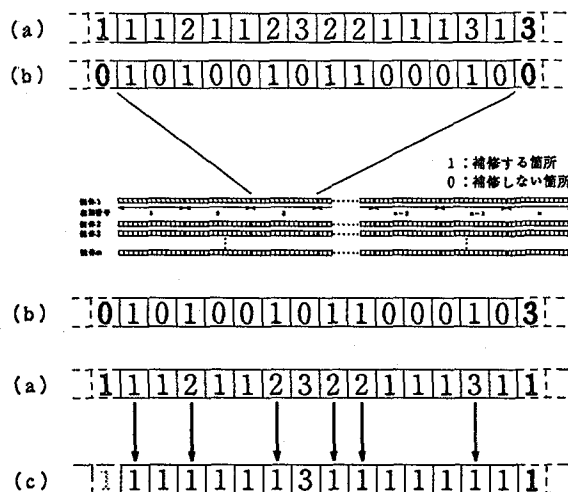


図-2 線列フォーマット (旧)

橋地床床主支伸排塗洗軀安安耐
面覆 組 縮水 掘体定定震
舗高 組 継装 変変構材震
装欄版工構承手置装動動造質性

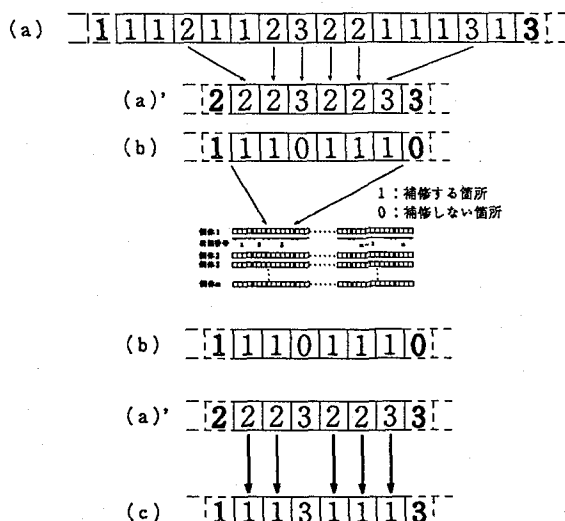


図-3 線列フォーマット (新)

5. 改良モデル

先に示した、プロトタイプでの問題点への対策を考えて改良モデルを構築する。

なお、補修費用に関してはプロトタイプと同様に以下のような方法を探った。

橋梁の各部位の補修費用(工事費を含む)に関しては、実績調査などにより表-3のように定めた。ほとんどの部位は、単位面積、または、単位長さ当たりの費用である。ただし、床組工の増設桁工は単位重量当たりの費用であり、重量の求め方は図-1に示す通りである。橋梁の点検データには、橋長、幅員をデータとして追加し、便宜的に補修面積を算出している。実際にはこのように、補修費用が一義的に決定されることはないが、点検結果だけでなく、例えば、沓の種類、高欄の種類等の橋梁台帳の内容のデータベースとの連携なども考えることで、ある程度実際に即したものに発展できると考えられる。また、補修時に足場を設ける場合には、複数の損傷を同時に補修したほうが経済的なことが多いと考えられるが、ここでは、そのような作業効率や補修作業に伴う交通規制などは考慮していない⁹⁾。

5.1 線列の短縮化^{10),11)}

まず、問題点②の冗長な線列についてはプログラムの改良により、点検データで損傷レベルが2,3の要補修箇所のみを線列に取込むようにした結果、飛躍的に解の探索効率が向上した。

新旧の線列フォーマットを概念を-図2, 3に示す。図-3では、補修する必要のある項目(a)'を点検結果の項目(a)から抜き出し、(a)'の項目数に合わせて遺伝子

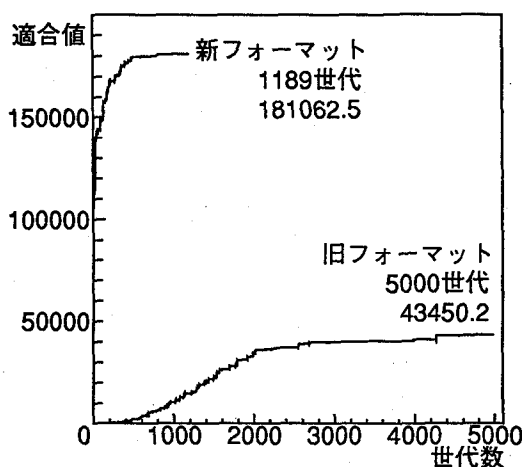


図-4 新旧線列フォーマットでの進化過程

を与える。(c)の補修後の点検結果は、床版、支承、排水装置、塗装、安定性(材質)の評価が1になったことを表している。旧フォーマットでは、線列中の1橋梁あたりの遺伝子数は等しかったが、新フォーマットでは、損傷状態に応じて遺伝子数が異なることになる。また新旧のそれぞれの線列フォーマットを用いた計算結果の比較例を-図4に示す(図中の適合値は式(2)の値)。

この、線列長の短縮により、GAでのパラメータは短縮前の個体数300 or 400, 突然変異率0.5からそれぞれ100, 0.05程度で十分であることが種々のパラメータ値での計算により確認できた(交差率は0.6~0.8で変化無し)。

なお、図-4の比較では、適合値の差がかなり大きい
が、これは旧線列フォーマットを用いた場合には、先
に述べた線列の冗長さだけではなく、損傷度1の個所
を補修した場合にペナルティを加えるようにしている
ため、差が強調されていることによる。

5.2 橋梁評価式の改良

問題点①の категория 数量が補修に対して単調増加
にならないことに対しては、橋梁の点検結果を用いて
新しい線形判別式を構築した。

プロトタイプで用いている橋梁の評価を行う式 (1)
の線形判別式は、数量化理論第 II 類によるカテゴリー
スコアが全ての項目において単調増加でないため、補修
により橋梁の評価を下げてしまう可能性を残す。そこ
で、各点検項目に重要度を設定し、次のような線形判別
式を橋梁の評価に用いることにする。

$$Y = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{c_j} w_j b_{jk} \delta_{jk}, \quad \begin{cases} b_{j1} = 300 \\ b_{j2} = 200 \\ b_{j3} = 100 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、Yは橋梁の評価値、Rはアイテム数、 c_j はjアイ
テムの категория 数、 w_j はjアイテムの重要度係数で
ある。

式 (4) のように、単純に線形な点数を与えた場合、各
点検項目の重要度係数の値 w_j が重要である。

そこで、ファジィ理論を用いた点検データの逆解析を
行うことにより、各点検項目の重要度を決定する¹⁴⁾。逆
解析は、式 (5) を最小にする組み合わせ最適化問題に置
き換え可能なので、図-5のフローチャートに示すよう
にGAを用いて解く。

今回の問題では、離散化した変数 (重要度係数および
帰属度関数の傾き) による線列 (遺伝子) を生成し1橋
分の点検結果 i に含まれる14項目の判定値を用いて
ファジィ積分²⁾を行い、損傷度評価 (D_L に相当) $V_1(i)$
を得る。これと専門家による損傷度評価 $V_0(i)$ により n 橋
の点検結果に対する目的関数値 *Object* を次式で得る。

$$Object = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |V_1(i) - V_0(i)| \quad (5)$$

逆解析の結果から得られた各点検項目の重要度係数
を図-6に示す。図中の点検項目番号は表-4に示すと
おりである。

表-4 点検項目番号

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
補修項目	橋面舗装	地覆高欄	床版	床組工	主構	支承	伸縮継手	排水装置	塗装	洗掘変動	躯体変動	安定構造	安定材質	耐震性

²⁾ ファジィ積分については文献14)を参照されたい。

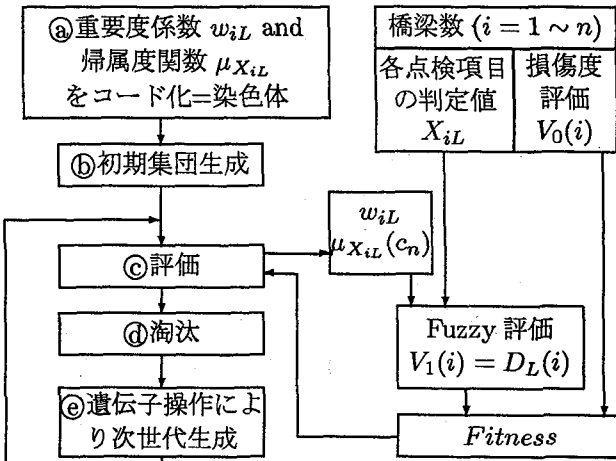


図-5 GAによる逆解析フローチャート

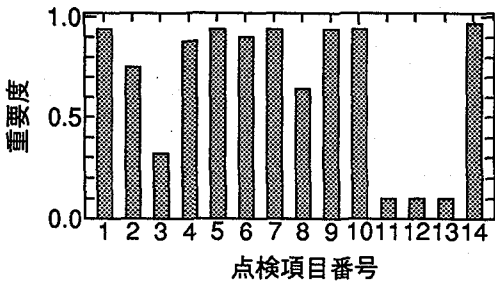


図-6 逆解析による各点検項目の重要度係数

5.3 目的関数の改良

式 (2) は、評価値の増加量と補修費用を乗じた項が含まれるため、評価値の増加量を最大にする代替案の作成ができない。そこで、評価値の増加量を最大に、かつ、予算を使いきるための目的関数を式 (6) のように設定する。 αg の項の作用によって、 F_3 が予算を使いきる方向に向かう。ただし、 α は適宜与える正值係数である。

$$F_{30} = \sum_{i=1}^n (e_{i2} - e_{i1}) - \alpha g \longrightarrow \max \quad (6)$$

5.4 制約条件の付加

問題点③に関しては、本システムは、補修前と補修後の橋梁群全体の評価を比較して、その評価値が、限られた予算内で、最大限増加することのみを目的に補修代替案を作成している。そのため、橋梁の置かれている経済的・社会的条件は、全く考慮されておらず、実用に耐え得るシステムとは言えない。例えば、補修時に足場を設ける場合には、複数の損傷を同時に補修した方が経済的なことが多いと考えられる。また、大局

的には、耐用年数内におけるライフサイクルコストを考慮する、あるいは、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、限られた予算内で最大の利潤を得る補修代替案を作成することにより、より実際的なシステムとなるであろう。

ここでは、上述の制約条件を工夫することによって、よりきめ細やかな補修計画が出来ることを次の2つの場合を例にとりて示す。

1. 橋梁単位の補修計画
2. 路線単位の補修計画

また、特記しない限り表-5のパラメータを使用した。

表-5 GA の主なパラメータ

人口数	: 100
淘汰	: エリートの保存と増殖
交叉率	: 0.6
突然変異率	: 0.05

- さらに、GA の収束条件は、以下のように設定した。
1. 集団中の個体が全て同一の線列になったとき。
 2. 集団中の最大の適応度が、1000 世代以上更新されないとき。
 3. 世代交代が 5000 世代に到達したとき。

なお、費用に関する制約条件を考慮するためのペナルティー項は次式のとおりである。

$$\Psi = \begin{cases} 0 & (g \geq 0) \\ -r(-g) & (g < 0) \end{cases} \tag{7}$$

ただし、 r はペナルティ係数と呼ばれるもので、右辺第1項の目的関数に対する第2項のペナルティ項の効き具合を調節するためのパラメータである。式(6)及び後出の目的関数にも g が含まれるが、それらでは $g < 0$ (非適合)の場合にはかえって適合値が上昇してしまうので、ここで述べたペナルディーを加えることにした。

(1) 橋梁単位の補修計画

今までは、補修後に評価値の増加量が最大になることだけを目的に補修代替案を決定してきたが、状況によっては同一の橋梁からより多くの補修部位を選んで補修の方がより現実的であると考えられる。

そこで、同一の橋梁からより多くの部位を補修するほど、値が大きくなるような目的関数を式(8)のように設定する。式中の $\beta(\dots)^2$ の項が、その働きをする。

$$F_{i1} = \sum_{i=1}^n \left\{ (e_{i2} - e_{i1}) + \beta \left(\sum_{j=1}^R \varepsilon_{ij} \right)^2 \right\} - \alpha g \rightarrow \max \tag{8}$$

ただし、

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} 1 \dots (i \text{ 橋の } j \text{ アイテムを補修するとき}) \\ 0 \dots (i \text{ 橋の } j \text{ アイテムを補修しないとき}) \end{cases}$$

また、 n : 橋梁数、 R : アイテム数(点検項目数)、 e_{i2} : 補修前の橋梁の評価値、 e_{i1} : 補修後の橋梁の評価値である。

表-6 F_{i1} を用いた場合の数値実験の結果

No.	目的関数値	補修予算
1	13395	49931
2	13328	49644
3	13324	49871
4	13392	49958
⑤	13412	49903

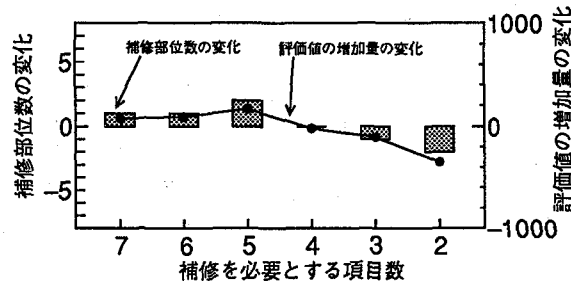


図-7 橋梁単位の補修計画 (1)

補修案に差が出やすいように予算5千万円で、式(8)を目的関数に用いた場合の数値実験を5回行った。これは予算を2億円とすると、ほとんどの要補修箇所が補修対象となってしまう、代替案の差が生じにくいためである。また、 α 、 β はデータや予算額に依存して適切な値は変化する。ここでは予備的な数値実験から $\alpha = 0.008$ 、また、 $\beta = 10$ とした。

結果を表-6、図-7に示す。表-6より5回目の試行の時が最も目的関数値が大きくなり最良の結果といえる。

図-7において図の縦軸(左)の補修部位数の変化とは、橋梁単位の代替案の補修部位数から従前の代替案の補修部位数を引いたもので、縦軸(右)の評価値の増加量の変化も同様に、橋梁単位の代替案の評価値の増加量から従前の代替案の評価値の増加量を引いたものである。横軸は、補修を必要とする項目を多く含んでいる橋梁群を左から順に示している。図-7では、要補修部位数が7, 6, 5の橋梁群の補修部位数が増加しているのに対して、要補修部位数が4, 3, 2の橋梁群の補修部位数が減少している。すなわち、補修部位をより多く含んでいる橋梁を優先して補修していることが分かる。このことから、この補修代替案には、同一橋梁の部位から補修していくという傾向が現れていると言える。

また、図-7では、評価値の増加量の変化(折れ線)は、正の値よりも負の値のほうが大きく、評価値の上昇よ

りも橋梁単位の補修を優先していることをここからも読み取れる。

表-7 F_{i2} を用いた場合の数値実験の結果

No.	目的関数値	補修予算
1	26544	49997
2	26688	49940
3	26700	49969
4	26690	49903
⑤	26714	49979

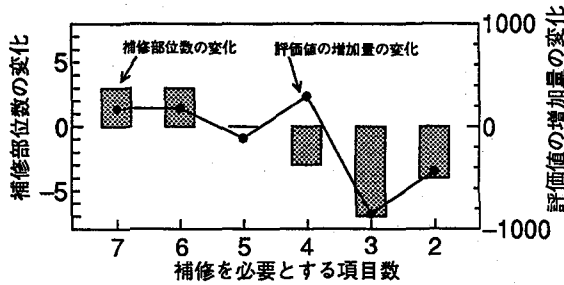


図-8 橋梁単位の補修計画 (2)

次に、さらに、明確に橋梁単位の補修計画を行うために式(9)の目的関数を設定する。式(9)は、式(8)よりも $\beta(\dots)$ の項の次数が高いので、より同一の橋梁から補修部位が選ばれる傾向が強くなるというわけである。

$$F_{i2} = \sum_{i=1}^n \left\{ (e_{i2} - e_{i1}) + \beta \left(\sum_{j=1}^R \varepsilon_{ij} \right)^3 \right\} - \alpha \gamma \rightarrow \max \quad (9)$$

予算5千万円で、式(9)を目的関数に用いた。同様の数値実験を5回行い、その結果を表-7に表す。5回目の試行の時が、最も目的関数値が大きくなり最良の結果といえる。なお、このときの係数は、 $\alpha = 0.008$ 、 $\beta = 10$ である。また、結果を図-8に図示する。

図-8では、要補修部位7,6の橋梁群の補修部位数が大幅に増加している。つまり、さらに明確な橋梁単位の補修代替案が得られたといえる。

しかし、評価値の増加量の変化(折れ線)は正の値よりも負の値のほうが大きい、付加した条件の影響度を強めるほど、評価値を最大限上昇させることができなくなってくる。

(2) 路線単位の補修計画

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た補修代替案を考えるにあたり、今回は、まずその第一歩として、同一路線上の橋梁からより多くの補修部位が選ばれるような目的関数を考えてみる。

路線単位の補修計画を考慮した目的関数として、式(10)の目的関数を設定する。この目的関数は、式(11)

に示す項の作用により、同一路線上の橋梁からより多くの部位が補修されることになる。

表-8 路線単位の数値実験の結果

No.	目的関数値	補修予算
1	10955	49952
2	10956	49993
3	10912	49998
4	10973	49935
⑤	11021	49993

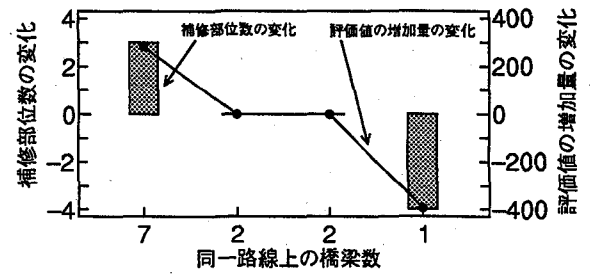


図-9 路線単位の補修計画

$$F_{i3} = \sum_{i=1}^n (e_{i2} - e_{i1}) + \gamma B - \alpha \gamma \rightarrow \max \quad (10)$$

ここで、

$$B = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^R \varepsilon_{ij} \times r_i (r_i - 1) \right\} \quad (11)$$

ただし、

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} 1 \dots (i \text{ 橋の } j \text{ アイテムを補修するとき}) \\ 0 \dots (i \text{ 橋の } j \text{ アイテムを補修しないとき}) \end{cases}$$

また、 n : 橋梁数、 R : アイテム数(点検項目数)、 e_{i2} : 補修前の橋梁の評価値、 e_{i1} : 補修後の橋梁の評価値、 r_i : i 番目の橋梁を含む路線上の補修橋梁数である。

予算5千万円で、式(10)を目的関数に用いた同様の数値実験を5回行った。結果を表-8に表すと、5回目の試行の時が、最も目的関数値が大きくなり最良の結果といえる。なお、このときの係数は、 $\alpha = 0.008$ 、 $\gamma = 10$ である。

もともと今回利用した点検データには同一路線上の橋梁はあまり含まれていない。唯一、ある路線(以下路線R5)上に7橋あるだけで、他はほとんど1路線に1橋である。そこで、路線R5上の橋梁に注目してみると、従前の数値実験では、補修対象となった要補修部位を含んでいる橋梁は5橋だったのに対し、路線単位の数値実験では、7橋全てが補修対象橋梁になっている。(図-9では、7橋の橋梁を含む路線上の橋梁群は、補修部位が5個増加している。)

使用したデータの性質上、路線単位の補修代替案は、従前の補修代替案と比較して、顕著な違いを読み取る

ことはできないが、路線 R5 上の橋梁のみで比較すると、同一路線上の橋梁から優先して部位を補修するという傾向は得られたといえる。

図-9では、評価値の増加量の変化(折れ線)は、正の値よりも負の値のほうが大きく、ここでも評価値の上昇よりも路線単位の補修を優先していることが確認できる。

5.5 淘汰方法¹¹⁾

本研究で対象としている問題では、既に述べたような方法で線列を短縮化しても線列数がかなり長く、また、個体数も少なくなっても 100 程度と多く設定するため、淘汰方法としてはエリート保存法(戦略)が適している。一般的なルーレット・ルールによる淘汰では個体数が多すぎてスケーリングを施してもうまく差別化できない(優良線列とそうでないものの淘汰過程での生存確率の差が小さい)ことが比較計算から確認できている。また、ここで用いているエリート保存戦略では、各世代の最低適合線列を最良適合線列で置換する方法を採っているの、④で指摘された $g=0$ 近傍の解の非適合領域側からの改良はほとんど阻害されないことになる(エリートによって置換される個体の適合値はそのほとんどが $g=0$ から大きく離れた負数である)。

したがって、少なくとも $g=0$ 近傍ではペナルティー関数の形状には依存しないことになる。

6. 結論

既存橋梁の目視点検結果に基づいた最適補修代替案作成支援を、補修前後の橋梁の数値的評価方法と補修個所選択の GA を援用したナップサック問題としての定式化により試みた。

本研究では、プロトタイプで指摘された問題点を整理するとともにその解決方法を検討した。

以下に、成果を列挙する。

- 1 Fuzzy 推論機構とその逆解析によって得られる重要度係数を用いて橋梁を評価することにより、数量化理論 II 類の分析結果に見られた損傷状態と橋梁評価値の対応の矛盾を解決した。すなわち、補修すれば必ず橋梁評価値も上昇することになった。
- 2 GA での線列フォーマットを要補修個所に対応した遺伝子のみで構成するようにしたことによって解の探索能力が著しく向上した。
- 3 目的関数で橋梁評価値と予算制約項を分離することにより、評価(合計)値を最大化しつつ予算を使いこなすことが出来るようになった。
- 4 より実地的な補修形態を考えて、1つの橋梁から出来るだけ多くの補修個所を補修するようにする付帯制約条件の付加と1つの路線上の橋梁を出来

るだけ多く補修するための付帯制約条件の付加を試み、それぞれが橋梁群の評価値合計は減少しても目的を満足する(つまり、同一橋梁から多くの個所を優先的に補修したり、同一路線上の橋梁を優先的に補修する)方向へ解を改良することが確認できた。

- 5 淘汰方法としては、エリート保存戦略が適していることを確認した。

今後は、補修データだけでなく橋梁台帳のデータとのリンクを図って、補修費用の算出方法の根拠をより詳細にすることや、補修履歴の考慮、補修計画の年次進行や、橋梁のライフタイム管理との関連を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 黒田勝彦:構造物のライフタイムリスクの評価, pp.138-143, 土木学会, 1988.
- 2) 建設省土木研究所:橋梁点検要領(案), 土木研究所資料第2651号, 1988.7.
- 3) 例えば, 古田均:ファジィ推論(計算力学・応用力学への応用) 5章, pp.147-188, 培風館, 1991.
- 4) 小堀為雄, 木俣昇, 小間井孝吉, 竹村哲:専門家による橋梁診断の支援コンピュータ, システムに関する研究, 橋梁と基礎, Vol.24, pp.45-60, 1990.11.
- 5) 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.
- 6) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 小笠勝:構造物の健全度診断へのファジー集合論の適用に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.380/I-7, pp.365-374, 1987.
- 7) 小間井孝吉, 木俣昇, 小堀為雄:維持, 管理計画のための橋梁支援システムに関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.428/I-15, pp.137-146, 1991.4.
- 8) 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.
- 9) 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, 1995.4.
- 10) 福山貴久, 近田康夫, 小堀為雄:GAを援用した, 土木学会中部支部研究発表会, I-46, pp.95-96, 1995.3.
- 11) 杉本博之, 近田康夫:9)への討議・回答, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.281-283, 1996.7.
- 12) I 県:昭和 57 年度~昭和 63 年度 橋梁診断調査総括表集, 1990.
- 13) Goldberg, D.E.:Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesely Publishing Company, 1989.
- 14) 安田 登, 近田康夫, 松島 学, 小堀為雄:「緑化されたコンクリート擁壁の景観評価の逆解析」, 土木学会論文集, No.514/V-27, PP.55-64, 1995.5

(1996 年 9 月 6 日 受付)