

ウイルス進化型 GA を援用した橋梁補修計画支援に関する研究

A Study on GA Applied Bridge Repair Planning
with the Virus Theory of Evolution

近田 康夫*・清水 宏孝**・廣瀬 彰則***
Yasuo CHIKATA, Hirotaka SHIMIZU and Akinori HIROSE

*工博, 金沢大学助教授, 金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻 (〒 920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

**工修, 滋賀県技師, 長浜土木事務所道路計画課 (〒 526-0033 長浜市平方町 1152-2)

*** 中央復建コンサルタンツ株式会社 (金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻)

For making alternatives of repair plan that determine the combination of bridge and their parts to be repaired, the repair planning is modeled as knapsack problem, and Genetic Algorithm was applied. This study presented a new approach to the simple GA by introducing the virus theory of evolution. Virus infection was adopted in addition to crossover and mutation as Genetic operations. The results of numerical examples show that the application of GA with virus is effective to the solution search.

Key Words : Bridge maintenance, Genetic algorithm, Virus theory of evolution

キーワード : 橋梁補修, 遺伝的アルゴリズム, ウイルス進化論

1. はじめに

我が国では, 現在数多くの橋梁が, 補修・補強のサイクル期にさしかかってきており, 既存橋梁を効率良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た。

ライフサイクルを考慮して, ライフサイクルコストを最小化する考え方も広がっているが, 補修計画立案には選択肢が多すぎて, 何らかの目的関数を設定しても最適案を見つけるのは容易ではない。

補修計画立案は基本的には組合せ最適化問題として捕らえることができるので遺伝的アルゴリズム (GA) の適用が有効であると考えられる。橋梁の維持管理や建設計画などの様々な問題は組合せ最適化問題として捕らえることができるので同様なアプローチが多く報告されている^{1)~4)}。GA を用いた橋梁補修や道路整備計画へのスケジューリングには, 道路のサービスレベルを指標としたもの⁴⁾⁵⁾, 新設橋梁の計画等への応用が試みられている⁶⁾。

一方, 橋梁を人間に準えて, 橋梁の定期点検を定期健康診断に対応させ, 損傷の早期発見早期補修を行う予防医学的な考え方も広がっている。ここでは, 大規模な補修が必要となる前に適切な補修を行って橋梁性能の維持を目指している。この考え方に沿って筆者らは, 既存の橋梁点検台帳に基づいて, 限られた予算内で最大の効果をもたらす橋梁補修部位の組合せを決定する問題として橋梁補修計画立案を捕らえ, 解探索手法として GA を援用した^{2),3)}。単年度予算で割り当てられた維持管理予算に基づいて, 多くの橋梁をまとめて管理することを考えれば現実的なアプローチであると言える。しかし, 要補修部位単位の組合せ問題としての取扱いであり, 組合せの自由度は高いものの, 足場の共有や, 部位間の関連を考慮し難い面は否めなかった。

本研究においては, 橋梁群全体での補修効果を最大にすることに加えて, 橋梁単位でも合理的で無駄のない補修部位の選択が行われるように補修計画支援システムの改良を行い, より優れた補修計画代替案の作成を試みた。また, GA の解探索の効率を高めより優れた解を得るために, 単純 GA (SGA) に代えて, ウイルス進化型 GA (VGA) を援用した。

2. 橋梁補修計画支援の考え方

橋梁の定期点検によって得られた点検結果より, 補修の対象となる要補修部位の選定を行う。この要補修部位は, それぞればらばらに補修するより, 同時に補修することが好ましい項目同士を同時に補修した方が, 実務的にも経済的にも効果的であるといえる。そこで, 得られた要補修部位を橋梁単位で一定のルールにしたがって組合せ, 数種類の補修パターンを設定する。各橋梁の補修パターンごとに補修費用ならびに評価値の増加量を算出しておき, 各橋梁ごとに用意された補修パターンの中から, 一定の予算内で補修による橋梁群全体の評価値の増加が最大となるような補修パターンの組合せを探る問題をナップサック問題として定式化する。このナップサック問題の組合せ総数は膨大なものとなるため, その解探索にウイルス進化型 GA を援用する。その結果得られた解が補修計画代替案となる。

以下, この流れに沿って具体的な説明を行う。

2.1 橋梁点検台帳

橋梁のデータには I 県が昭和 57~63 年に行った, 表-1 に示すような 14 の点検項目と総合評価からなる橋梁点検台帳の点検結果を用いた。各点検項目の基準として, ○, △, × の 3 段階評価が設定され, 各橋梁の損傷度評価は, 各点検項目の結果に基づいて専門家が, A,

B, C, D の4段階で行う。なお、本研究では今後各要因の判断基準を○, △, ×の順にそれぞれ1, 2, 3, 損傷度評価をA, B, C, Dの順にそれぞれ1, 2, 3, 4と数値化することにした。

この点検台帳には208橋の点検結果が収録されているが、このうち、損傷が著しいと橋梁自体の架け替えが必要となってしまう主構・洗掘変動・躯体変動・安定構造(下部工)の4つの点検項目が1(損傷なし)であった75橋を橋梁補修計画案の対象とした。この4つの項目を除いたのは、本研究は与えられた予算内での橋梁補修計画を対象としており、架け替えや別枠予算を必要とする補修・補強は考慮していないためである。

表-1 点検結果の例

橋梁名	橋面舗装	地覆高欄	床版	床組構	主構	支構	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	損傷度評価
A 橋	△	○	○	○	○	○	△	△	○	○	○	△	△	○	B
B 橋	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	○	D
C 橋	○	○	×	×	×	×	×	×	○	○	○	△	△	○	A
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Z 橋	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	C

・コンクリート橋(表では、B, C 橋)に関して塗装の項目はない。

2.2 補修部位のパターン化

橋梁を補修する際には、足場を設ける都合などで、同時に補修することが好ましい項目がある。本研究では、そのような部位同士の相互関係を考慮し、同時に補修することが好ましい項目がばらばらに選択されることのないように、あらかじめ補修部位をセットにして補修パターンとして設定した。こうすることで、橋梁単位で見たときに、より無駄のない合理的な補修計画案が作成可能となる。

部位を組合せる際のルールは、専門家への聞き取りによれば表-2 のようである。このルールにしたがって、点検台帳の点検結果をもとに補修部位を組合せ、各橋梁ごとに幾通りかの補修パターンを作成し、さらにパターン同士を組合せることによって、全く補修しないパターンから全ての部位を補修するパターンまでを設定した。こうして作成した補修パターンの数は、本研究で使用した75橋のデータでは、橋梁当たり最小2パターン、最大42パターンで、橋梁群全体では512通りの補修パターンとなった。

なお、ここで使用している組合せのルールは橋梁の種類や損傷状態等の要因を考慮していない。考慮すれば、さらにパターン数が増加することになる。

2.3 橋梁の評価

橋梁の評価には、重要度係数を用いた線形判別式を利用している。線形判別式は式(1)で与えられ、これから各橋梁の評価値を求めることができる。また、補修を施した橋梁はその評価値が増加するようになる。

ここで、 R はアイテム数、 c_j は j アイテムのカテゴリー数、 w_j は j アイテムの重要度係数である。

表-2 同時に補修することが好ましい項目

補修タイプ	点検項目	舗装	高欄	床版	床組	支承	継手	排水	塗装	材質	耐震
1	橋面舗装	○					○	②			
2	地覆高欄	○	①	②			○	②			
3	床版	○		②	②	③			②		
4	床組構			②	②					④	
6	支承					③			②		③
7	伸縮継手	○					○				
8	排水装置	○						②			
9	塗装					③			②		
13	安定材質					③	○			④	
14	耐震性					③					③

数字は足場の種類(同じ番号であれば共有可)

①②つり足場, ③張り出し足場, ④枠組み足場

重要度係数には、ニューラルネットワークの感度解析^{7),8)}によって得られた値を使用しており、表-3 に示すようにST 橋とRC 橋とに分けたものとなっている。(評価式)

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

なお、 δ_{jk} は j アイテム k カテゴリーに反応したとき1, その他のとき0である。

表-3 感度解析による各点検項目の重要度係数

	橋面舗装	地覆高欄	床版	床組構	主構	支構	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
RC 橋	.17	.23	.30	.13	.08	.13	.23	.08	—	.18	.12	.36	.32	.17
ST 橋	.17	.21	.22	.13	.08	.13	.27	.07	.08	.07	.59	.36	.18	.14

2.4 橋梁各部位の補修費用・足場の種類と費用

補修計画を行うにあたり、専門家のアドバイスに基づいて、橋梁各部位の補修費用および足場の費用を表-4、表-5 に示すとおりに設定した。本来ならば、橋梁の種類・損傷度の程度などにより、補修方法・補修費用が異なってくると思われるが、ここでは一律に設定している。

なお、表-5 において、○の中の数字は足場の種類を表しており、同じ番号の足場であれば、共有が可能であるとして、足場費用の計算を行う。

2.5 ナップサック問題の適用

本研究における橋梁補修部位の組合せ問題を一般のナップサック問題と比較すると、一定の容量を持った袋(ナップサック)が与えられた予算に、荷物が各橋梁部位の補修費用に、それぞれ相当する。いま、一つの橋梁につき10の補修パターンがあるとすれば、その組合せの総数は、対象とする75橋が512の補修パターン

表-4 各部位の補修内容とその費用

部位	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	80 (単位長さ当たり)
床版	旧床版撤去 新床版建設	100 (単位面積当たり)
床組構	増設桁工	850 (単位重量当たり)
支承	杓交換 (50tf)	500 (1 箇所当たり)
伸縮継手	ジョイント交換 (ゴム, 鋼, アルミ)	150 (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)
安定性 (材質)	ASR 補修	29 (単位面積当たり)
耐震性	移動制限装置設置	500 (1 基当たり)

表-5 各部位の足場の種類と費用

部位	足場の種類	費用 (千円)
橋面舗装	必要なし	
地覆高欄	①つり足場	10 (単位長さ当たり)
床版	②つり足場	5 (単位面積当たり)
床組構	②つり足場	5 (単位面積当たり)
支承	③張り出し足場	3 (単位面積当たり)
伸縮継手	必要なし	
排水装置	②つり足場	5 (単位面積当たり)
塗装	②つり足場	2.5 (単位面積当たり)
安定材質	④枠組み足場	3 (単位面積当たり)
耐震性	③張り出し足場	3 (単位面積当たり)

を持つので、単純に平均しても $512/75=6.82/\text{橋}$ の代替案があり、 $(512/75)^{75} = 3.7 \times 10^{62}$ 通りとなる。試みに、CPU が Pentium 90MHz の計算機を使用して総当たりで組合せをチェックしてみた結果、1ヶ月間で約16億通りの計算をするにとどまり、制約条件を満たした有効な解を得ることすらできなかった。組合せの総数を考えると、計算機の数や数を指数的に増やさない限り、総当たりによって有効な解を得ることは現実的に不可能であるといえる。

橋梁の補修計画にナップサック問題を適用するにあたり、式(2)、式(3)のように目的関数、制約条件を設定した。この目的関数は、橋梁の評価値と費用という全く異なった値を一つの式で扱えるように無次元化したものであり、橋梁の評価値の増加を最大に、また予算を使い切る方向に向かわせるようにしたものである。また、予算によるパラメータの調整が不要になるという利点もある。

なお、補修対象部位を全て補修した場合の補修費用は25億1034万1千円であり、補修に割り当てる予算は3億円とした。また、全ての部位を補修した場合の橋梁群全体の評価値の増加量は4811となる。したがって、 ζ の値は574.941となり、仮に今、補修による評価値の増加量が3200、補修費用が2億9000万円とすると、無次元化関数の右辺第一項は、5.566、第二項は

0.00398 となり、その比は約1398:1となる。
(無次元化した目的関数)

$$F_a = \frac{\sum_{i=1}^n (e_{i2} - e_{i1})}{\zeta} - \frac{g}{E} \Rightarrow \max \quad (2)$$

(制約条件)

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

n : 橋梁数

e_{i2} : 補修後の i 番目の橋梁の評価値

e_{i1} : 補修前の i 番目の橋梁の評価値

e_{i1}, e_{i2} は式(1)による計算値

E : 予算

C : 補修費用合計

ζ : 全ての要補修部位を補修した場合の評価値増加量 $\times$ $\frac{\text{予算}}{\text{総費用}}$

2.6 遺伝的アルゴリズム (GA) の適用

遺伝的アルゴリズムとは、生物進化(選択・淘汰・突然変異)のメカニズムを工学的に応用したものであり、確率的探索・学習・最適化の一手法と考えることができる。本研究では、代替案を作成するにあたりGAを採用する。これにより、膨大な補修箇所の中から、確率的に優れた組合せを短時間で見つけ出すことができる。

GAを適用するためには遺伝子のコーディングを行わなければならないが、本研究では、染色体(線列)は、一つの遺伝子に1橋梁の補修パターンが対応する、数値列として表現されている(図-1)。

選択・淘汰の方法には、エリート個体の保存と増殖を採用した。他に選択・淘汰の方法としてルーレット方式があげられるが、本研究で設定した個体の数は100であり、このような個体数の多い状況でルーレット方式を採用すると個体の選択がランダムな選択と等価となってしまう、結果的に優れた解が得られなくなってしまう。したがって、本研究ではエリート個体の保存と増殖を採用した。また、交叉の手法としては一点交叉を採用している。

遺伝子	補修タイプ	補修対象部位	補修費用 (千円)	評価値増加量	投資効率
0	0	なし	0.0	0	0.0
1	2	高欄	5400.0	21	0.003889
2	6	支承、塗装	5437.5	34	0.006253
3	13	支承、耐震性	9240.0	44	0.004762
4	2・6	高欄、支承、塗装	10837.5	55	0.005075
5	2・13	高欄、支承、耐震性	14640.0	65	0.004440
6	6・13	支承、塗装、耐震性	11677.5	52	0.004453
7	2・6・13	高欄、支承、塗装、耐震性	17077.5	73	0.004275

個体A: 3 9 6 0 5

図-1 パターン化した補修計画の遺伝子のコーディング

2.7 ウイルス進化論の導入

ウイルス進化論とは、進化はウイルス感染によって起こるという仮説である⁹⁾。ウイルスによる遺伝子の水平移動が起こることを認めれば、種の急速な変化、種の急速な絶滅、定向進化、平行進化など、ダーウィン進化論では説明できなかった難点を説明できるようになる。

従来の GA では、遺伝的操作に選択、淘汰、交叉および突然変異を行うが、ウイルス進化型 GA では、これらの遺伝的操作に加えてウイルスの発生と感染を行う(図-2)。

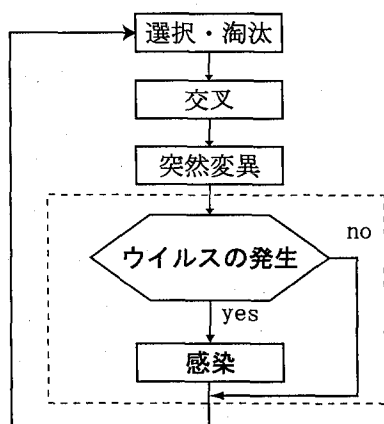


図-2 ウイルス進化型 GA の基本的な流れ

感染の方法は文献¹⁰⁾を参考に、以下のような方法で行った。まず、各遺伝子座に入りうる補修パターンの一つ一つをウイルスとして定義し、この一つ一つにウイルス自身の適応度を与える。次に、一定の世代間隔にしたがってウイルスを発生させ、ウイルスが発生したら、ランダムに選択した個体に感染させる。ウイルスに感染した個体は、そのウイルスが運んできた遺伝子によって新たな遺伝子に書き換えられる(図-3)。ここで、感染させるウイルスの選択は、それぞれのウイルスが持つ適応度に応じて確率的に行う。ウイルス感染が起きた場合、感染した個体の適応度を計算し、適応度の増減にしたがってウイルスの適応度を変更する。こうして一定の感染率のもとで次々と他の個体にウイルスを感染させていき、感染によって評価関数値が下がった個体が感染する個体数(=個体数×感染率)の10%を越えたら、その時点で感染を終了させる。なお、ウイルスの適応度を式(4)で定義する。ここで a は初期世代におけるウイルスの適応度であり、 $a = 10.0$ と設定した。また、ウイルスの適応度にはべき乗スケリングを施し、ルーレットルールによって遺伝子を選択している(図-4)。

$$f_0 = a$$

$$f_{i+1} = f_i + (F_2 - F_1) \quad (4)$$

- a : 初期世代のウイルスの適応度
- f_i : i 回の感染後のウイルスの適応度
- F_1 : ウイルス感染した個体の感染前評価関数値
- F_2 : ウイルス感染した個体の感染後評価関数値

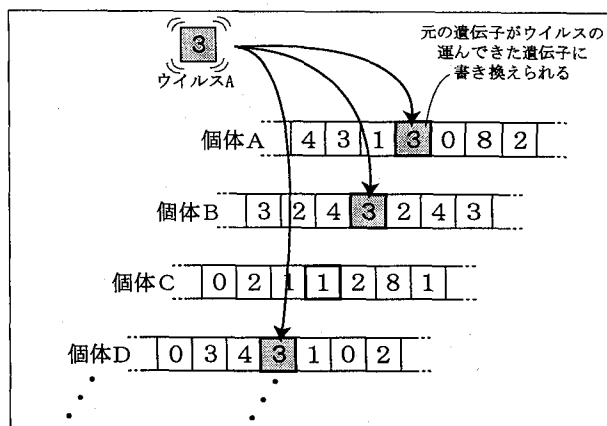


図-3 ウイルスによる感染

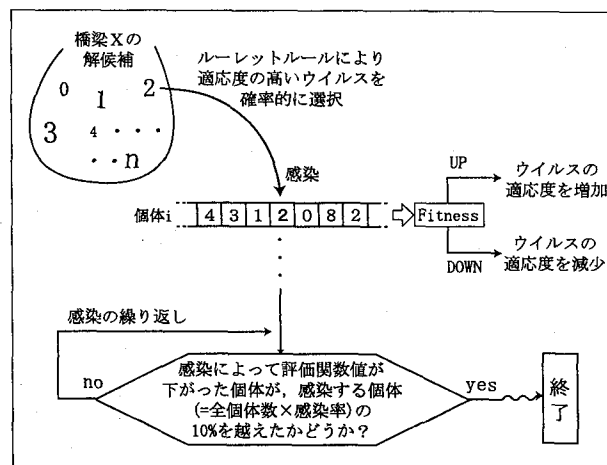


図-4 ウイルスの感染手法

2.8 ペナルティ関数と収束条件

GA では制約条件を含む問題をペナルティ関数法を用いて無制約の問題に変換する必要がある。そのため、本研究では、目的関数 F を制約条件 g と合わせて式(5)のように定式化した。制約条件が満たされない($g < 0$)場合、目的関数にペナルティ項が加えられることによって制約条件があるのと同様の効果がもたらされる。なお、 r はペナルティ係数と呼ばれるもので、ここでは $r = 50$ と設定している。

$$\Psi = \begin{cases} F & (g \geq 0) \\ F - r(-g) & (g < 0) \end{cases} \quad (5)$$

GA の計算終了を判定する収束条件は、以下のよう設定した。

- 集団中の適応度最大の個体が5000世代更新されなかった場合。
- 集団中の個体が、すべて同一になった場合。
- 世代交代が10000世代に到達した場合。

表-6 GA の諸数値

集団数	: 1
人口数	: 100
エリート個体数	: 1
交叉	: 一点交叉
交叉確率	: 0.9
突然変異確率	: 0.07
ウイルス感染世代間隔	: 2
ウイルス感染確率	: 0.3

表-7 補修計画案 (ST 橋)

橋梁番号	遺伝子	橋面舗装	地覆高欄	床版	床組	支承	伸縮継手	排水装置	塗装	安定材質	耐震性	補修費用 (千円)	足場費用 (千円)	評価値増加量
1	2	1	3	2	1	②	1	1	1	1	1	5400	0	27
2	9	②	2	2	1	②	1	1	③	1	③	9884	312	93
3	1	1	③	1	2	②	③	3	1	2	1	19894	1034	106
4	12	1	③	②	1	1	②	1	②	②	2	23850	1400	117
5	7	③	2	1	1	②	1	1	2	②	②	4756	0	75
6	14	③	2	2	2	②	1	②	②	1	②	6645	324	103
7	1	②	2	2	1	1	②	1	1	1	1	4011	0	44
8	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	0	0	0
9	6	1	1	3	1	1	②	②	1	1	1	5196	348	34
10	2	1	1	2	1	1	②	1	1	1	2	3300	0	27
11	6	1	1	2	1	1	1	1	1	③	②	11674	813	50
12	0	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	0	0	0
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	②	1	4160	390	18
14	1	②	1	2	1	1	1	1	2	2	1	828	0	17
15	0	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	0	0	0
16	2	1	2	1	1	③	1	1	②	2	1	5438	488	34
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	②	2000	0	14
18	0	1	1	2	1	2	1	1	2	1	2	0	0	0
19	0	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	0	0	0
20	1	②	1	1	1	1	1	1	1	1	1	495	0	17
21	3	②	1	1	1	②	1	1	1	1	1	2495	0	30
22	1	②	1	1	1	1	1	1	1	1	1	648	0	17
23	0	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	0	0	0
24	2	②	②	1	1	1	②	1	2	1	1	4991	340	65
25	15	③	2	2	1	1	②	②	2	1	②	4710	406	82
26	0	1	1	1	1	1	2	1	2	2	3	0	0	0
27	1	②	1	2	1	1	②	1	1	1	1	2176	0	44
28	1	②	2	2	1	1	②	1	1	1	1	3341	0	44
29	2	③	②	1	1	1	1	1	1	1	1	3960	400	55
30	8	1	2	2	1	1	②	1	②	2	1	3114	293	35

表-8 補修計画案 (RC 橋)

橋梁番号	遺伝子	橋面舗装	地覆高欄	床版	床組	支承	伸縮継手	排水装置	安定材質	耐震性	補修費用 (千円)	足場費用 (千円)	評価値増加量
31	1	②	1	1	1	1	②	②	1	1	4634	272	48
32	1	②	1	1	1	1	②	1	1	1	3034	0	40
33	0	1	1	1	1	3	1	1	1	3	0	0	0
34	1	②	2	1	1	1	③	③	1	1	5548	170	79
35	6	②	1	1	②	1	②	③	1	2	4091	254	69
36	0	1	1	2	1	1	1	1	2	2	0	0	0
37	3	③	1	1	②	1	1	1	1	1	866	33	47
38	1	1	1	1	②	1	1	1	1	1	783	44	13
39	0	1	2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
40	1	1	③	1	1	1	②	1	1	1	7713	532	69
41	1	1	1	1	②	1	1	1	1	2	540	30	13
42	2	②	②	1	1	1	②	1	1	1	6665	416	63
43	0	1	1	1	1	2	1	1	1	2	0	0	0
44	2	②	②	1	1	2	②	1	1	2	5721	382	63
45	3	③	1	1	②	1	1	1	1	1	1058	38	47
46	1	②	1	1	1	2	1	1	1	1	630	0	17
47	4	②	1	1	②	2	1	1	1	2	1269	45	30
48	0	1	1	1	1	2	1	1	1	1	0	0	0
49	1	1	1	1	1	②	1	1	1	②	4000	0	30
50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	②	2000	0	17
51	2	1	1	1	1	②	1	1	1	②	11506	720	45
52	1	②	1	1	1	1	1	1	1	1	225	0	17
53	0	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0	0	0
54	3	1	1	1	1	1	1	1	②	②	8045	379	49
55	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0	0	0
56	0	1	2	2	1	1	1	1	3	1	0	0	0
57	2	1	2	1	1	1	②	1	1	1	5400	0	23
58	5	②	②	1	②	1	1	1	1	1	3325	316	53
59	7	②	1	1	②	1	②	1	1	②	4160	25	70
60	1	1	1	1	1	1	③	1	1	1	2100	0	46
61	5	1	1	1	1	1	②	1	②	②	7030	195	72
62	11	③	③	1	1	②	③	1	②	②	8725	335	188
63	11	③	1	1	1	②	②	②	③	②	7527	271	159
64	7	1	1	1	②	1	②	1	1	②	5730	35	53
65	1	1	1	1	1	1	1	1	1	②	2000	0	17
66	7	②	1	1	②	②	③	1	1	②	6100	25	106
67	1	②	2	2	1	1	②	1	1	1	3188	0	40
68	15	1	1	1	②	②	②	②	1	1	6081	154	57
69	5	②	1	1	1	②	②	1	②	1	10961	470	85
70	3	1	1	1	1	②	③	1	1	②	7950	0	76
71	3	③	1	1	②	1	②	1	1	1	3571	40	70
72	1	②	1	1	1	1	②	1	1	1	2153	0	40
73	1	③	1	1	1	1	1	1	1	1	274	0	34
74	11	③	②	1	②	②	②	1	1	②	9289	348	123
75	3	1	1	1	②	1	②	1	1	1	2730	35	36

3. 数値実験

3.1 橋梁補修計画案の作成

数値実験に使用した GA の主なパラメータは表-6 に示すものである。ここで、交叉確率、突然変異確率、ウイルス感染世代間隔、ウイルス感染確率は、それぞれのパラメータの数値をもとに、乱数を発生させて確率的に起こるようにしている。これらは、予備的な数値実験により設定した。

数値実験の結果を、ST 橋、RC 橋に分けて、それぞれ表-7、表-8 に示す。表中の各部位に与えられている 1,2,3 の数字は点検台帳の点検結果を示しており、○で囲まれているものは補修箇所として選択されたことを示している。また、表の 2 列目に示されているのは GA によって得られた線列、すなわち遺伝子の値であり、その橋梁における補修パターンを意味する。表の右側 3

列は、補修に要する費用ならびに足場費用、補修によって増加した橋梁の評価値であり、補修費用には足場費用が含まれている。

この代替案による補修の結果、橋梁群全体の評価値の増加量は 3252 となり、補修費用は 2 億 9958 万、その内、足場にかかる費用は 1211 万円となった。評価値の増加量は、ランダムサーチの最大値が 2398 であったことを考えれば、非常に優れた値となっており、また、補修費用については、予算である 3 億円をほぼ使いきる結果となった。

ここで表-7、表-8 を見ると、補修部位の選択が RC 橋に集中しており、RC 橋ではほとんどの補修部位が選択されているのに対し、ST 橋の方では、選択されていないものが多く存在している。このように RC 橋が ST 橋に比べてより多く選択されたのは、RC 橋の方がスパンの短い橋が比較的多く、補修費用が安価であったためと考えられる。したがって、ST 橋、RC 橋全体で見れば、予算内で最大限の補修効果を上げようとす

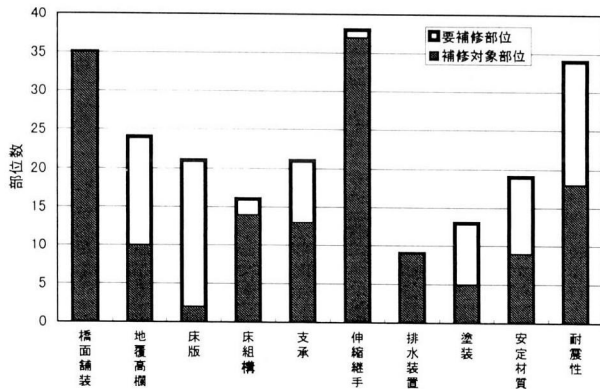


図-5 部位ごとの補修箇所数

る GA の効果が現われたものということができる。

選択部位について詳しく見ると、ST 橋、RC 橋ともに、橋面舗装ならびに伸縮継手がほぼ全て選択されている結果となった(図-5)。表-2 に示すルールでは、これらの部位は同時に補修されるように組合せられていることが多く、GA における解探索の段階では、これらが組合せられた補修パターンが多く選択されたということができる。これらの部位が多く選択された理由としては、まず、伸縮継手は他の部位に比べて重要度係数が高く(表-3)、補修による評価値の増加量が大いことがあげられる。また、橋面舗装、伸縮継手はともに補修費用が安価であり、それが補修部位として数多く選択される一因になったとも考えられる。逆に、床版は重要度係数が比較的高いにもかかわらず、ST 橋、RC 橋ともに、ほとんど選択されない結果となった。この原因としては、床版は、補修費用が高いうえに足場費用がかさむため、補修対象部位として選択されにくくなったのではないかと考えられる。

なお、得られた代替案は、あらかじめ同時に補修することが好ましい項目同士を組合せ、パターン化しているため、全てその組合せのルールに合致したものとなっており、橋梁単位ではより合理的な代替案になっているものといえる。

ここで、ST6 橋と RC35 橋についてその補修案内容を詳細に見てみよう。

まず、ST6 橋(表-9)では、点検結果より、橋面舗装、地覆高欄、床版、床組構、支承、伸縮継手、排水装置、塗装、耐震性の9つの部位が要補修となっていた。この中から、GA による解探索の結果、補修部位として選ばれたのが、橋面舗装、支承、伸縮継手、排水装置、塗装、耐震性の6つである。これらの選択された補修部位は、表-2 の組合せルールでは1番目と6番目の補修タイプが組合せられた補修パターンである。すなわち、橋面舗装を補修することから伸縮継手と排水装置を同時に、また、支承を補修することから塗装と耐震装置の補修を同時に行うようにしたものである。足場に関しては、排水装置と塗装はつり足場が、支承と耐震装置では枠組み足場が共有されていることになる。足場にかかる費用は32万4千円であるが、これらの部位を同時ではなくばらばらに補修し、その都度足場をか

表-9 ST6 橋の結果

	橋面舗装	地覆高欄	床版	床組構	支承	伸縮継手	排水装置	塗装	安定材質	耐震性
点検結果	3	2	2	2	2	2	2	2	1	2
補修箇所	補修タイプ1	●				●	●			
	補修タイプ6				●			●		●
足場					③		②	②		③

●補修部位、②つり足場、③張り出し足場

表-10 RC35 橋の結果

	橋面舗装	地覆高欄	床版	床組構	支承	伸縮継手	排水装置	塗装	安定材質	耐震性
点検結果	2	1	1	2	1	2	3	0	1	2
補修箇所	補修タイプ1	●				●	●			
	補修タイプ4		○	●					○	
足場				②			②			

●補修部位、○非補修対象、②つり足場

けた場合には、足場の費用は44万4千円となる。したがって、この橋梁については8万円の費用の削減ができたことになる。ただし、この橋梁の補修にかかる費用が664万5千円であることからすれば、その割合は小さいといえるが、実務的な面も考慮すれば、足場を共有することの効果はあるといえよう。

一方、RC35 橋(表-10)では、橋面舗装、床組構、伸縮継手、排水装置、耐震性の5つの要補修部位の中から、橋面舗装、床組構、伸縮継手、排水装置の4つの部位が補修対象として選択された。これは、表-2 の組合せルールにおける1番目と4番目の補修タイプが組合せられた補修パターンである。この4つの補修部位の中で、橋面舗装と伸縮継手、排水装置が同時に補修することが好ましい項目として組合せられたものである。床組構については、表-2 では床版と安定材質を同時に補修するようになっているが、この橋梁については床版と安定材質は要補修部位ではなかったため、床組構が単独で補修部位として選択されたことになる。なお、この橋梁にかかる補修費用は409万1千円であり、足場費用が25万4千円となっている。

3.2 複数年での補修計画

ここでは、一定の予算を数年間にわたって与え続けることによって、点検台帳に載せられている要補修部位を全て補修することを考えてみる。具体的には、年間5億円づつの予算を使って、補修部位の選択を行っていく。このような複数年での補修を行っていくことによって、足場を共有すること等の効果について考察する。なお、補修部位単位の橋梁補修計画支援¹¹⁾ プログラムとの比較を行う。これは、補修部位をばらばらに選択するようにしたものであり、足場費用は考慮している(足場を共有できる部位が選択された場合には足

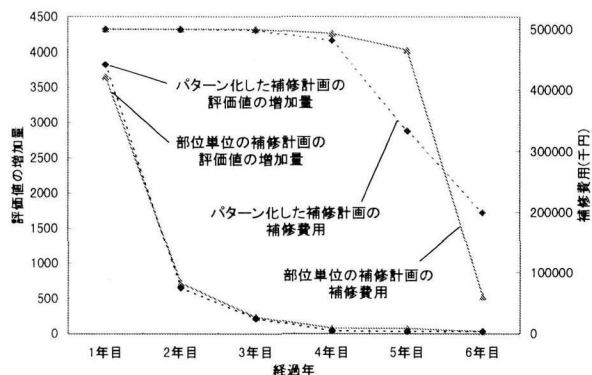


図-6 複数年での補修計画

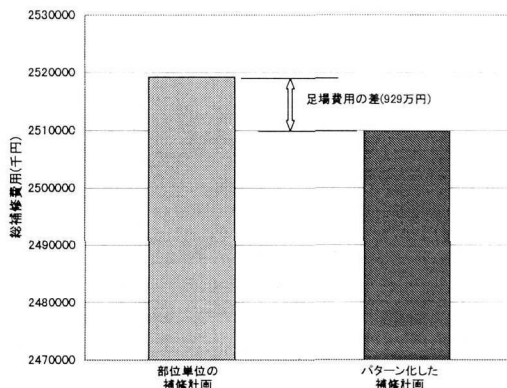


図-7 コーディングによる足場費用の差

場費用を一組み分のみ考慮する)が、積極的に共有させるような設定はなされていない。

図-6は、補修計画を複数年にわたって実行した結果である。グラフでは、評価値の増加量が徐々に下がっていき、最終的に0となった、つまり、補修対象となる部位がなくなったことを示している。このように年間5億円ずつの予算を投じていくことによって、6年間で全ての損傷箇所を補修できたことになる。ここで、評価値の増加量が初年度において最も高くなっているのは、その時点における補修効果を最大限に高めようとするGAの効果が見れたものだということができる。

また、補修部位をばらばらに選択する部位単位の補修計画と、本研究における補修部位をパターン化した補修計画とでは、補修による評価値の増加は初年度においてパターン化した場合が若干大きく、それ以降は大きな差がみられない。パターン化した補修計画が同時に補修すべき部位の組合せを優先させていることを考慮すれば、より優れた(現実的な)代替案となったということができる。補修費用では、部位単位の場合、6年目まで費用は減少しない(5年で補修をほぼ完了する)が、パターン化した場合には、5年目以降で直線的に減少する。この例では、最終的に部位単位の補修計画とパターン化した補修計画とで補修に要した費用の差は約1千万円であった。

3.3 SGAとVGAとの比較

本研究における線列のコーディングのもとで、SGAとVGAとの比較実験を行った。使用したパラメータは、SGA、VGAともに、予備実験において最適化を図ったものであり、最も優れた値を得やすいと思われるものを採用している。

図-8はSGAとVGAの各世代における評価関数値と標準偏差の推移を示している。図の上から、評価関数値の最大値、平均値、最小値となっており、これらは左側に軸を、また、その下は標準偏差値となっており、これは右側に軸をとっている。図-8より、標準偏差の値についてVGAの方がSGAよりも大きくなっており、集団内のばらつきが大きいことを示している。また、評価関数最大値の推移では、SGAが世代が進むとほとんど更新しなくなるのに対し、VGAでは、最後まで評価

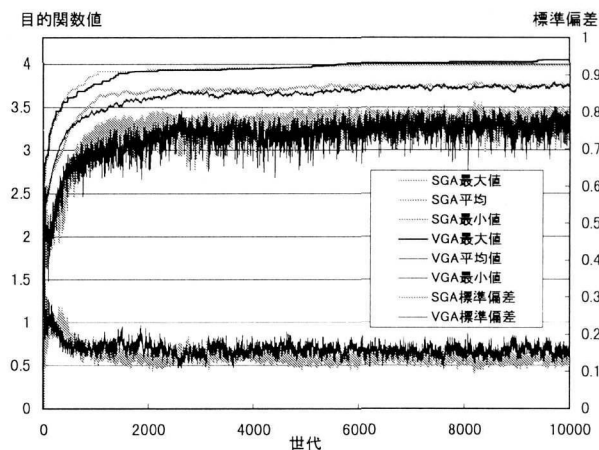


図-8 世代推移

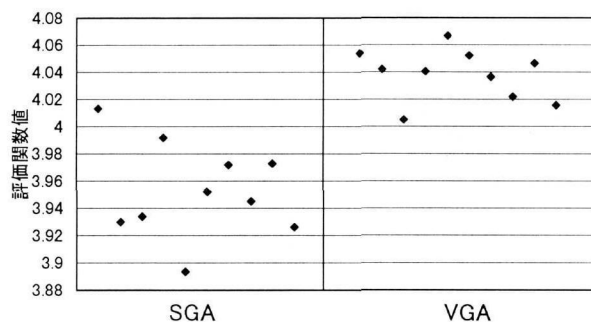


図-9 SGAとVGAとの比較

関数値が更新し続けており、ウイルス感染によって集団内のばらつきは大きくなるが、その分、局所解から脱しやすくなっていることを示しているといえよう。

図-9はSGAとVGAについて、それぞれ異なるランダムシーズを用いた10回の試行を行った結果をプロットしたものである。VGAの値がほぼ全てにおいてSGAの値を上回った値を得られていることがわかる。

3.4 単純ソートとの比較

橋梁ごとに補修パターンを設定できれば、何らかの指標を設けて、その指標値の高い順に並べて、累積費用が予算に達するまでの内容を選択することで最適補修代替案の近似解が求まるのではないかと考えることもできる。

ここでは、評価指標として、

$$\text{投資効率} = \text{評価値増加量} / \text{補修費用 (千円)}$$

を設定して試算する。

図-10は各橋梁の補修パターンの中で最も投資効率が高いものを選び出し、それらを全橋梁について左から投資効率の高い順に並べていったものである。この中から、投資効率の高い順に、補修費用が予算3億円に収まるように補修パターンの選択を行っていく。残った橋梁については、自動的に補修しないパターンが選ばれることになる。

この結果、72橋で、補修費用は264680.8千円となり、評価値の増加量は2276にとどまった。これは、3.1節で示した、GAで得られる評価値増加量の最大値3252に、はるかに及ばない。このときの、投資効率値のレンジは[0.00101, 0.124269]、評価値増加量のレンジは[7, 80]、そして補修費用のレンジは[225, 22770]であった。

より単純に考えて、各橋梁の評価値増加量が最大となる補修パターンを、評価値増加量が大きい順に採用すると、12橋で、補修費用は299328千円、評価値増加量は1617となった。このときの評価値増加量のレンジは[102, 188]、補修費用のレンジは[6100, 92254.5]であった。

したがって、このような方法で本研究における組合せ最適化問題を解くことは、困難であるといえる。

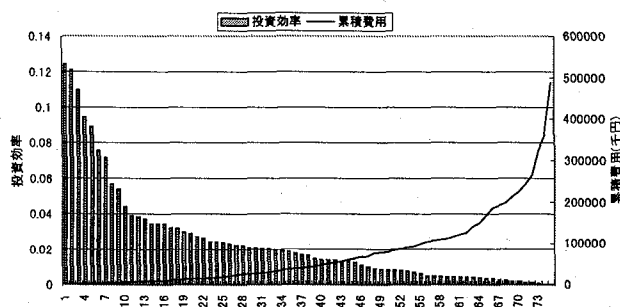


図-10 投資効率順に並べ替え (橋梁単位)

4. 結論

本研究では、橋梁補修計画代替案を作成するにあたり、橋梁単位での補修計画の最適化を優先させ、同時に補修すべき部位の組合せを考慮して橋梁の補修代替案をパターン化した。結果として得られた代替案は、全て組合せのルールに合致するものであり、評価値の増加量も十分に大きな値が得られたことから、より優れた補修計画案とすることができたといえよう。また、総補修費用を少なくすることにもつながった。

VGAとSGAとの比較では、VGAの方が優れた解を得ることができ、VGAの優位性が示せたといえる。ただし、VGAの課題点としては、パラメータ設定のむずかしさがあげられる。パラメータによっては逆に劣った解となってしまうこともあり、パラメータのチューニングをいかに効率よく行うかが重要な課題であるといえよう。また、使用するデータや線列の長さ等によって、その効果に違いがでてくる可能性がある。今後、ウイルス感染の手法を改良したり、複数の感染手法を組合せ、世代によって使いわけを行うことなどによって、さらに探索能力をあげることができると期待できる。

今後の課題としては、異なるデータや設定のもとで数値実験を行い、得られた結果に対する検討が必要であろう。また、本研究では、橋梁群全体での補修計画の最適化に合わせて、橋梁単位での補修計画の合理化を目的としており、それ以外の指標は取り入れていない。橋梁補修計画の考え方としては、橋梁群全体での最適化と橋梁単位での最適化の他に、道路網の要素としてのネットワークの信頼性を考慮したものや、交通流を考慮したもの、またスケジューリングやライフサイクルを考慮したものなどがあげられる。今後、このようなさまざまな指標をできるだけ同時に満たしていくことができるような、より現実に近い優れた代替案を作成していくことが必要であろうと思われる。

参考文献

- 1) 小野正樹, 宮本文穂, 中村秀明, 河村 圭: 既存橋梁の最適補修・補強計画への遺伝的アルゴリズムの適用, 土木情報システム論文集, pp.181-188, 1997.
- 2) 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, 1994.
- 3) 近田康夫, 木下真二: 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, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.593-600, 1997.3.
- 4) 上前 孝之, 杉本 博之, 山本 洋敬: GAによる橋梁の維持・補修工事の順序決定, 土木学会北海道支部論文報告集, 1993.2.
- 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) 古田均, 杉本博之, 井下泰具, 横田哲也, 廣瀬彰則, 中谷武弘: 中長期事業計画問題へのGAの応用, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.497-502, 1998.3.
- 7) 近田康夫, 清水宏孝, 城戸隆良: ネットワーク信頼性を指標としたGA援用橋梁補修計画, 土木情報システム論文集, Vol.8, pp.199-206, 1999.10.
- 8) 安田登, 白木渡, 松島学, 堤知明: ニューラルネットワークに基づいたコンクリート構造物点検技術者の思考過程評価, 土木学会論文集, No.196/V-24, pp.41-49, 1994.8.
- 9) 中原 英臣, 佐川 峻: ウイルス進化論, 早川書房, 1996.
- 10) 狩野均, 長谷川和代, 松本美幸, 西原清一: ウイルス進化論に基づく制約充足問題の解法, 第23回知能システムシンポジウム, pp.75-80, 1996.
- 11) 近田康夫, 西 雄一, 廣瀬彰則, 城戸隆良: スケジュールを考慮したGA援用橋梁補修計画支援の試み, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.371-378, 2000.3.

(2000年9月14日受付)