

橋梁補修代替案作成へのGA適用に関する一考察

A Consideration on application of GA to bridge repair planning

近田 康夫* 中山 善隆** 廣瀬 彰則***
Yasuo CHIKATA, Yoshitaka NAKAYAMA and Akinori HIROSE

*工博，金沢大学助教授，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，奈良県土木部高田土木事務所

*** 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）

Bridge repair alternate plan preparation combines it and can catch as an/the optimization problem. The characteristic of each solution of in the case that, that virus evolution style GA was applied with a/the repair pattern line line was studied, with in the case that the addition condition was put to a/the purpose function with the repair alternate plan line line of a/the part unit about the consideration of scaffold sharing and relation part, to make the realistic solution of profitable cheap in this research.

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

1. はじめに

既存橋梁の維持管理を行っていくことは新規橋梁の建設と同等以上に重要になってきており，早急にその維持管理対策を行う必要に迫られている。

橋梁補修代替案作成は組合せ最適化問題として捉えることができる。解法としてGAを用いた場合に，線列構造を補修部位単位にすれば，解の自由度は大きい，非現実的な補修部位の組合せが生じる場合が多く，線列構造を補修パターンで構成すれば，現実的な解が得られやすいものの，あらかじめ補修パターンを作成することが必要であり，かつ，解空間も部位に基づく補修部位組合せの場合に比較して狭くなる。

本研究では，現実的な解を得やすくするために，足場共有や関連部位の考慮について，部位単位の補修代替案線列で付加条件を目的関数に加えた場合と，補修パターン線列でウイルス進化型GAを適用した場合，のそれぞれの特徴を考察する。

2. 橋梁維持管理システムの概要

2.1 点検データ

橋梁のデータにはI県が調査を行った表-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段階で行ったものを，数値化して使用した。

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，欠値等のない75橋分をデータとして使用した。

2.2 補修計画への橋梁部位単位アプローチ

部位単位での補修計画とは，橋梁群全体に割り当てられた予算に対して，全ての損傷部位の中から，補修

表-1 点検結果の例

橋梁名	橋面舗装	地覆高欄	床版	床組	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。

箇所をばらばらに選択するものであり，これまで，さまざまな工夫がなされてきた^{1),2),3)}。この場合，補修部位選択の自由度が大きく，橋梁群全体では橋梁の評価値を大きく上げ，補修による効果を最大限にすることが可能であるが，橋梁単位で見たときに合理的な補修計画となっているとはいえない場合が少なくなかった。

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)で与えた。これから各橋梁の評価値を求めることができる。

ここで， R はアイテム数， c_j は j アイテムのカテゴリ数， w_j は j アイテムの重要度係数である。重要度係数には，ニューラルネットワークの感度解析によって得られた値を使用しており，表-2に示すようにST橋とRC橋とに分けたものとなっている。また，補修を施した橋梁はその評価値が増加するように， b_{jk} の値を定めた（数値自体に根拠はない）。

（評価式）

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

表-2 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	
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

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。

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-3、表-4 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-4 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

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。

(無次元化した目的関数)

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

(制約条件)

$$g = E - C \geq 0 \tag{3}$$

- 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 : 予算
- C : 補修費用合計
- ζ : $\left(\text{全ての要補修部位を補修した場合の評価値増加量} \right) \times \frac{\text{予算}}{\text{総費用}}$

全ての要補修部位を補修した場合の評価値増加量とは、橋梁補修の対象となるデータが 43 橋の場合、要補修部位となる 137 部位すべてを補修した時に得られる評価値増加量を示しており、数値としては 2814 となっている。また、総費用とは 137 部位すべてを補修するのに必要な費用であり、17 億 8220 万 7 千円ある。な

表-3 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)
床組工	増設桁工	850 (単位重量当たり)
支承	脊交換 (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	4 (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-4 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)

表-5 ζ の値

データ	43 橋		
予算	5 千万円	1 億円	2 億円
ζ	78.947	157.894	315.788

お、この総費用は、足場が共有可能な部位すべてにおいて足場の共有を考慮している。

表-5 に ζ の予算ごとの値を示す。

2.6 遺伝的アルゴリズム (GA) の適用

組合わせ最適化問題に GA を適用するにあたって、ある橋梁における線列のコーディングを図-1 のように行った。まず、点検データの中から補修が必要な項目だけを抜き出し、それぞれの項目に 0 か 1 の遺伝子を与え、1 の遺伝子が与えられた部位は補修するとし、その損傷度を 1 に置き換える。ここで図-1 の例は 1 橋分の線列であるが、実際には 1 個体にすべての橋梁が配置され、1 つの補修計画案を示している。なお、淘汰方法にはエリート保存戦略を採用し、交叉は一点交叉で行う。

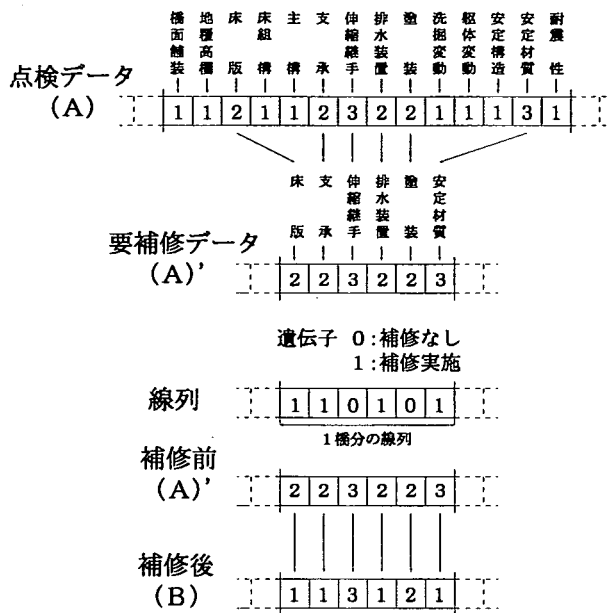


図-1 補修部位選択における遺伝子フォーマット

表-6 同時補修、足場共有部位の組合せ

同時に補修すべき部位の組合せ (6パターン, 15組)

1	支承	→	塗装	耐震性
2	舗装	→	伸縮継手	排水装置
3	材質安定性	→	支承	伸縮継手
4	床組構	→	床版	材質安定性
5	床版	→	舗装	伸縮継手 排水装置
6	地覆高欄	→	舗装	床版 伸縮継手 排水装置
足場共有可能な部位の組合せ (4パターン, 7組) 種別番号				
7	支承	→	耐震性	(3)
8	床版	→	床組構 排水装置 塗装	(2)
9	床組構	→	排水装置 塗装	(2)
10	排水装置	→	塗装	(2)

3. 足場共有の考慮

橋梁を補修する際に足場を組む場合が生じるが、この場合、経済性や実務性を考慮すると、同じ足場を利用し補修できる箇所は同時に補修した方が効率が良い。本研究では、足場の共有を「ある橋梁の複数の部位を補修する際に、ある足場を2箇所以上の部位補修に利用すること」と定義し、本文では足場共有と示す。また、足場共有以外にも施工上の都合から複数部位を同時に補修した方が良い場合があり、その同時補修部位の組合せと足場共有可能な部位の組合せを表-6に示す。

3.1 足場共有関数の導入

本研究では、足場共有を積極的に促進するために、GAによる計算過程において個体中のある橋梁に対し、表-6の組合せが存在する場合、同時補修すべき部位1組に対して t ポイント与え、足場共有可能な部位1組に対して u ポイント与える。ここで t を同時補修パラメータ、 u を足場共有パラメータとする。このようにある橋梁に対して表-6の計22組すべてを調べ、ポイン

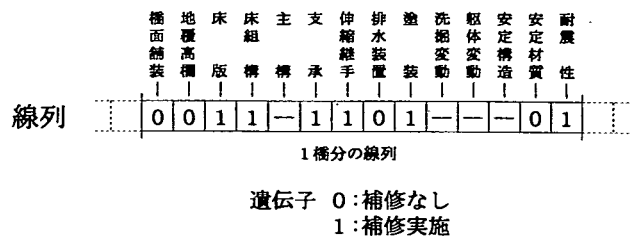


図-2 個体中の線列の例

トを累積する関数を足場共有関数とする。 i 番目の橋梁に対する足場共有関数の合計ポイントを S_i とする。

図-2は、ある個体中のある橋梁の補修部位データである。この線列を例にとってポイントの換算を試行する。

同時に補修すべき部位における6パターンそれぞれのポイントの合計を s_1 から順に s_6 とすると、

$$s_1 = t + t, s_2 = 0, s_3 = 0, s_4 = t, s_5 = t, s_6 = 0 \quad (4)$$

となり、同時補修ポイントの合計は、 $4t$ となる。

足場共有可能な部位における4パターンそれぞれのポイントの合計を s_7 から順に s_{10} とすると、

$$s_7 = u, s_8 = u + u, s_9 = u, s_{10} = 0 \quad (5)$$

となり、足場共有ポイントの合計は、 $4u$ となる。

そこで図-2に与えられるポイントの合計は、

$$S_i = s_1 + s_2 + \dots + s_{10} = 4t + 4u \quad (i \text{ は橋梁の識別番号}) \quad (6)$$

となる。

ここで t, u にそれぞれ“1”, “3”という値が設定された場合、図-2の橋梁における同時補修部位の組合せ数は4組であり、同時補修ポイントは4ポイントである。また、足場共有部位の組合せ数は4組であり、足場共有ポイント12ポイントである。

このようにある橋梁データに対して10パターンすべてを調べ、ポイントを累積する目的関数を足場共有関数とする。

3.2 目的関数への追加

式(7)は、足場共有関数を加えた目的関数である。 α は、0以上の数値で与えられ、式(8)は目的関数値に対して足場共有関数値が占める割合であり、以下単に占有率と示す。

$$F_b = \frac{\sum_{i=1}^n (e_{i2} - e_{i1})}{\zeta} - \frac{g}{E} + \alpha \sum_{i=1}^n S_i \Rightarrow \max \quad (7)$$

$$\text{占有率} = \frac{\alpha \sum_{i=1}^n S_i}{F_b} \times 100 \quad (\%) \quad (8)$$

4. ウイルス GA との比較

ウイルス進化型 GA(以下 VGA) とは、進化はウイルス感染によって起こるという仮説⁴⁾に基づく GA のアプローチである。ウイルス進化論によれば、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。

GA 操作の流れで考えれば、橋梁補修パターンとしてウィルス进行を定義し、線列群に対して一定の割合(感染率)に応じて、複数の線列の同一遺伝子座を同一内容に書き換える操作を行う、突然変異操作の拡張であると言える。これにより、単なる突然変異よりも、大規模にしかも同一内容の遺伝子の変化が生じることになり、解探索の効率が向上することが望める。

清水ら⁵⁾はこの構ウイルス進化型 GA を橋梁補修計画作成システム適用した。あらかじめ橋梁ごとの補修パターンを用意し、各橋梁からその補修パターンを選択し組合わせることによって補修案を作成する。このパターン化した補修計画作成システムにウイルス進化論を導入することによって解探索の効率を高め、より優れた解の選出を目指している。清水らによれば、遺伝子型を、要補修部位から橋梁毎の補修パターンに変更することで、SGA でも解の自由度は減少するものの、解探索の効率は向上し、さらに、VGA を適用することで、さらに解探索の効率は向上としている。

清水らは、このシステムを構築するにあたり、75 橋データを用いており、予算 5 億円の設定でパラメータチューニングを行っている。本研究では、VGA との比較のため 75 橋データを用いており、部位単位の補修計画作成システム(SGA)により数値実験を行う。なお、SGA には足場共有関数を追加した目的関数を用いており、予算は 5 億円と、予算の制約を厳しくした 1 億円の設定で行う。数値実験に際して占有率、同時補修パラメータ t 、足場共有パラメータ u の設定の組合せと計算回数は、占有率の値ごとに異なるランダムシーズを用いて 5 回とした。VGA の計算回数は、各予算ごとに異なるランダムシーズを用いて 5 回とした。予算 1 億円においては VGA には本来パラメータチューニングを施すべきであるが、本実験では予算 5 億円と同じパラメータを用いた。

数値実験に使用した SGA の諸数値について、部位単位の手法で使用したものは表-7 に、パターン化した手法で使用したものを表-8 に示す。

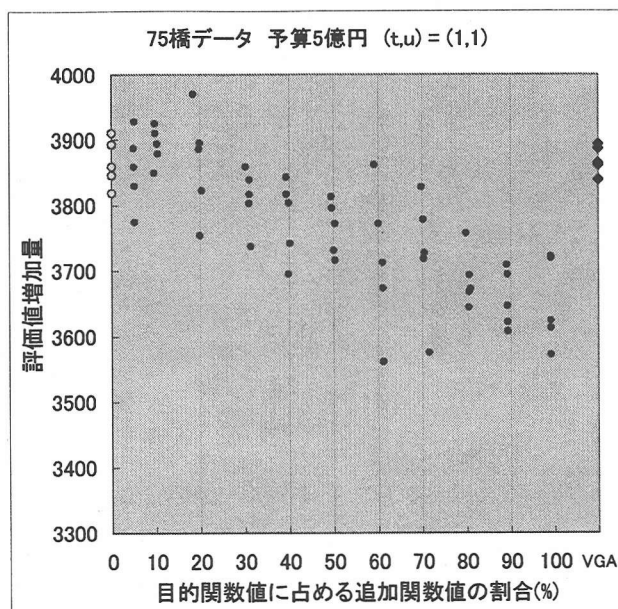


図-3 評価値増加量の変化 (Type1)

表-7 SGA の諸数値 (部位単位)

集団数	: 1
人口数	: 100
エリート個体数	: 1
交叉	: 一点交叉
交叉率	: 0.6
突然変異率	: 0.05

表-8 VGA の諸数値 (橋梁単位)

集団数	: 1
人口数	: 100
エリート個体数	: 1
交叉	: 一点交叉
交叉率	: 0.9
突然変異率	: 0.07

から 20% の場合と同程度の評価値増加量を得ており、解のバラツキを見ると SGA に比べ狭い範囲で解を得ていることが解る。

(2) 予算 5 億円 (該当補修組数の変化)

予算 5 億円における SGA と VGA の該当補修組数の Type1 に対する散布図を図-4 に示す。

該当補修組数の比較では、VGA は SGA における占有率が 10% 前後の場合と同等の数値を得ている。

予算 5 億円において SGA と VGA の評価値増加量と該当補修組数の変化を比較すると、従来の GA(占有率 0%) に比べ、評価値増加量では同等の値を得ており、該当補修組数では約 10 組が同時補修部位の組合わせ、または足場共有部位の組合わせとして選択されている。解のバラツキを見ても VGA は高い評価値増加量を得つつ、該当補修組数も従来の GA に比べ高い数値を得ている。

4.1 VGA の検証

(1) 予算 5 億円 (評価値増加量の変化)

予算 5 億円における SGA と VGA の評価値増加量の Type1 に対する散布図を図-3 に示す。

なお、Type1 とは、 $(t, u) = (1, 1)$ の設定で行った SGA の結果を意味する。 $(t, u) = (1, 3)$ とした Type2 の結果も以後の図中の一部に示すが、予算が豊富な場合に足場共有が促進される以外は結果に大きな違いがないので、必要がない限り Type1 の結果を示す。

図中に示されるように、VGA は SGA の占有率が 0%

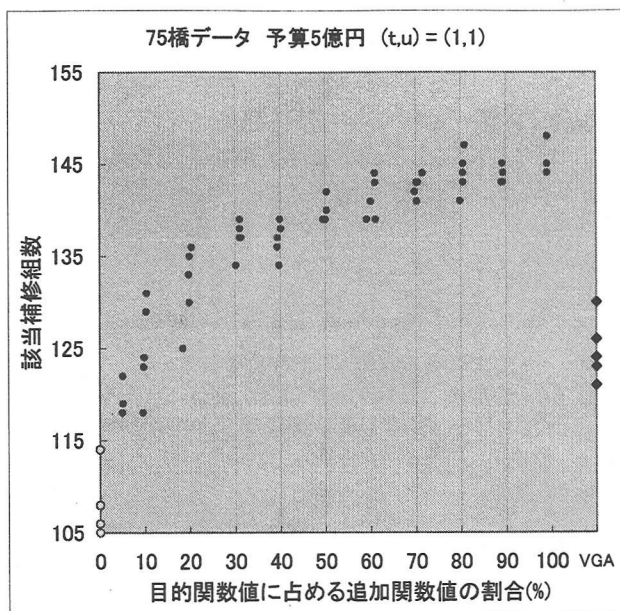


図-4 該当補修組数の変化 (Type1)

これら、従来の GA や VGA に比べ、本研究で用いた足場共有関数を追加した目的関数による補修計画作成システムでは、重み係数を変化させることにより様々な解を得ることができる。特に占有率が5%、10%、ときに20%では、VGAと同等の評価値増加量を得ながらVGA以上の該当補修組数となる解を得ることができた。また、占有率を大きく設定した場合においても評価値増加量はそれほど高くないが、多数の該当補修組数を示す解を得ることができた。

4.2 足場共有パラメータの効果と予算規模の影響

(1) 予算5億円

予算5億円での占有率の変化に対する同時補修組数の変化を図-5に、足場共有組数の変化を図-6に、その合計数である該当補修組数の変化を図-7に示す。なお、図は各占有率における最適解をプロットしたものである。また、比較のためVGAによる5回の計算結果の中で最も高い評価値増加量を示した解から、その解の同時補修組数、足場共有組数、該当補修組数の値をそれぞれの図に対して占有率に関係なく線として表している。

VGAの値は、評価値増加量が同等である占有率0～20%の範囲において占有率0%でSGAより上回っているだけで、それ以外の占有率では同値かそれ以下の値である。また、占有率30%以上では、Type1、Type2ともに増加の傾向を示しており、VGAとの同時補修組数の差は広がる傾向にある。

図-6の足場共有組数の変化では、 α の増加に対応して、共有組数が増加の傾向を示している。また、VGAの値は、評価値増加量が同等である占有率0～20%の範囲全てにおいて2～6上回っている。占有率30%以上でも最大4の差があるが若干下回っているだけである。

図-7の該当補修組数の変化でも同様の傾向を示している。

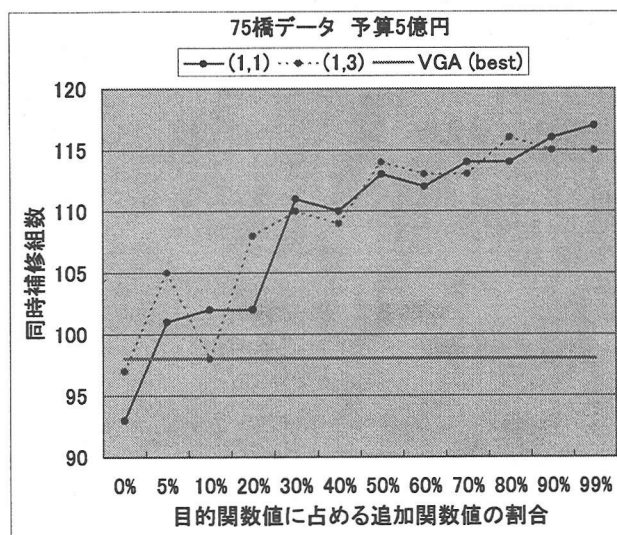


図-5 同時補修組数の比較

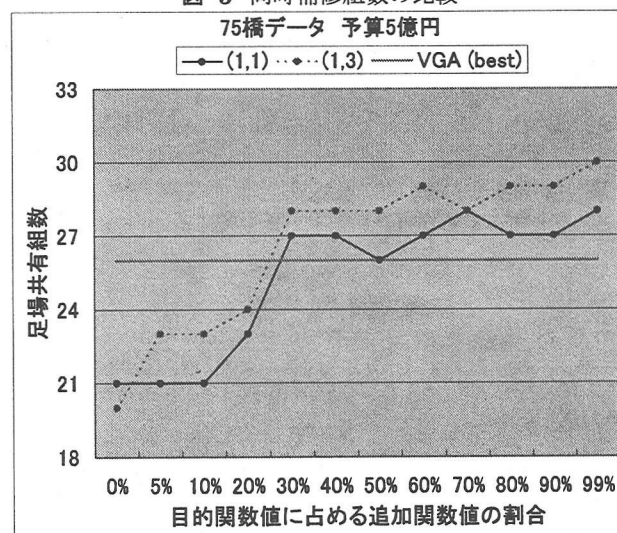


図-6 足場共有組数の比較

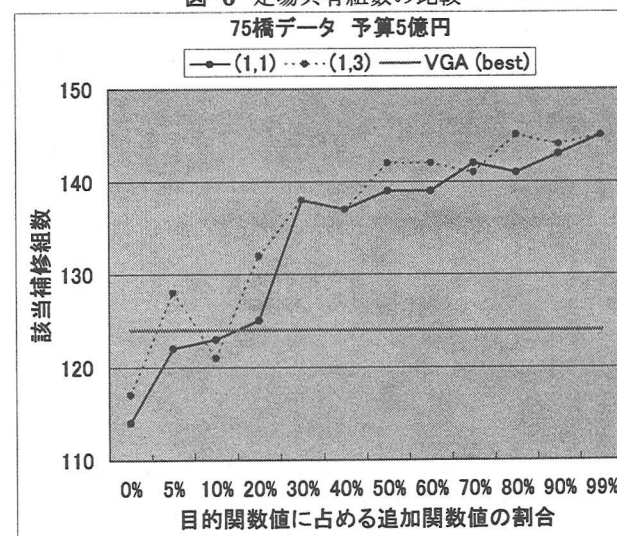


図-7 該当補修組数の比較

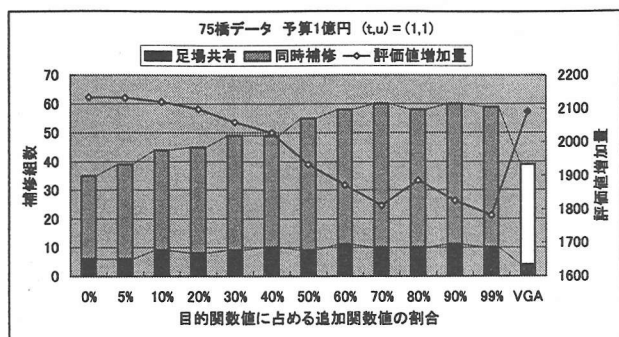


図-8 評価値増加量と該当補修組数の変化 (Type1)

VGA の値は、評価値増加量が同等である占有率 0～20% の範囲全てにおいて 0% では明らかに SGA を上回っているが、5～20% では同程度の数値となっている。また、占有率 30% 以上では、同時補修組数の変化の場合と同様に SGA が増加の傾向を示しており、VGA との同時補修組数の差は広がる傾向にある。

(2) 予算規模の影響

予算規模の影響を検討するために、予算 1 億円でも同様の計算を実施した。ここでは、詳細は省略して、予算 5 億円の場合との比較結果を記述するに留める。

予算 1 億円と 5 億円の該当補修組数の変化において VGA は、ほぼ同様の傾向を示した。しかし、その該当補修組数の中の同時補修組数と足場共有組数の比率は、大きく異なっている。予算 1 億円において 39 組中、同時補修組数が 35、足場共有組数が 4 なのに対し、予算 5 億円では、124 組中、同時補修組数が 98、足場共有組数が 26 である。これは予算の制約が緩い 5 億円では、各橋梁における補修パターン選択の自由度が上がり、足場共有部位が多く含まれたパターンが選択されていると推測される。また、予算の制約が厳しい 1 億円では、各橋梁における補修パターン選択の自由度は小さくなる。足場共有部位の組合わせがあまり選択されていないのは、足場共有部位を含む補修パターンは費用が大きくなり、それらのパターンを組合わせるよりも足場共有部位を含まない補修パターンを組合わせたほうが評価値増加量が増加したためと考えられる。

SGA については、特別大きな変化は見られなかった。

5. 結論

橋梁維持管理システムとは、対象となる地域に存在する橋梁を効率よく維持管理するためのシステムである。このシステムは、対象となる地域の橋梁に関するデータ管理と、そのデータを用いた補修計画案の作成が主となる。この橋梁維持管理システムに含まれる橋梁補修計画作成システムは、橋梁のデータを用いて限られた予算で最大の効果を生む橋梁補修計画案を作成するシステムである。本研究では、補修計画作成に足場の共有を考慮することによって、より現実的で多様な補修パターンを持つ補修計画案の作成を行った。その具体的な内容をあげると、以下に示す 2 点である。

1. 要補修部位を遺伝子型とする SGA によるアプロー

チにおいて、要補修部位選択で目的関数に同時補修と足場の共有を優先させる関数を追加することにより、より実的な補修計画案の作成を試みた。

2. 橋梁毎の補修パターンを遺伝子型とするウィルス進化型 GA による補修代替案作成結果と比較することにより、2 つのアプローチの特徴を検討した。

1. に関しては、追加した目的関数 (足場共有関数) の重み係数を増加させることで、同時補修、足場共有の効果は確認された。また、同時補修パラメータと足場共有パラメータの値に違いを持たせることによって足場共有のみの優先も可能であると言える。しかし、予算の制約が厳しい場合、足場共有関数の効果は現われにくく、重み係数をかなり大きく設定しなければ足場共有の効果は得られないことがわかった。目的関数における、足場共有や同時補修の寄与分はせいぜい 10% 程度が適当である。

2. については、補修パターンを遺伝子型とした VGA では評価値増加量、部位共有、足場共有のいずれにおいても比較的良好な解を安定して得られる傾向にある。一方、足場共有関数を導入した SGA では、VGA よりも良好な解が得られることもあるが、解自体はかなりばらついたものとなる。

本研究において、多様な評価値と該当補修部位の組合わせを示す解が得られたことはこれまでに述べてきた。また、橋梁の補修・補強工事の施工手法が多様化している現在、本研究が用いたような一定の補修費用設定は、現実的とは言えない。新たな施工手法が開発される中で、それらの情報をすばやくシステムに取り込み、すでに始まっている情報化社会に適応した橋梁維持管理システムの開発が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 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, 1997.
- 2) 近田康夫, 福山 貴久: GA による補修項目の関連を考慮した橋梁補修計画, 構造物の診断に関するシンポジウム論文集, pp.59-64, 1998.
- 3) 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.
- 4) 中原 英臣, 佐川 峻: ウィルス進化論, 早川書房, 1996.
- 5) 近田康夫, 清水宏孝, 廣瀬彰則: ウィルス進化型 GA を援用した橋梁補修計画支援に関する研究構造工学論文集, Vol.47A, pp.211-218, 2001.3.