

GA による既存橋梁の補修計画支援の試み

近田康夫¹・橋謙二²・城戸隆良³・小堀為雄⁴

¹ 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)

² 正会員 工修 川崎重工業 KK.

³ 正会員 金沢大学技術官 工学部 土木建設工学科

⁴ 正会員 工博 金沢大学教授 工学部 土木建設工学科

数多くの既存橋梁の補修計画において、限られた予算の範囲内でどの橋のどの部分を補修するかを的確に意思決定することは容易ではない。本研究では、補修対象となる既存橋梁群に対する補修橋梁と補修部位の組合せ最適化問題にナップサック問題を適用し、遺伝的アルゴリズムを援用することで最適解を得ようとする試みである。なお、投資効果を最大にするために、橋梁の健全度あるいは損傷度を橋梁点検台帳のデータに基づく数量化理論第 II 類の分析結果による判別関数により判定し、補修効果を定量的に取り扱っている。

Key Words : genetic algorithm, bridge maintenance, repair planning

1. はじめに

第 2 次世界大戦後、積極的に道路、橋梁などの社会資本の蓄積が進められてきたが、現在では、新たな社会資本の構築と並んで既設の社会資本の維持管理問題が大きな課題となってきた。

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でき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), 4), 5), 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ものは別にして、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合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⁾。組合せ数の大きな組合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。

以上の背景の下で、本研究で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合せを決定し、補修計画の支援を行う一方法を提示するものである。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・部位の組合せ最適化問題に、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。

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⁹⁾。

各点検項目の評価基準として、次の 3 段階評価が設定されている。(各項目の具体的な判断基準を表-2 に示す。)

○: ほとんど損傷していない。危険性はない。

表-1 点検結果の例

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	洗掃変動	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

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	洗掃変動	躯体変動	安定構造	安定材質	耐震性	評価
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。

△: 損傷している。危険性はやや高い。

x: 損傷が激しい。危険性が高い。

また、各橋梁の損傷度評価は、上記点検結果に基づいて専門家が次の4段階評価で行う。

A: 架け替え、あるいは全面的な補修を必要とする。

B: 早急に補修を必要とする損傷がある。

C: 軽微な補修を必要とする損傷がある。

D: 健全であり、目立った損傷は見られない。

なお、本研究では今後各要因の判断基準を○, △, x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。

3. 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下GAと記す) は、Hollandらによって1960年代に提唱された自然界におけるシステムの適用過程を説明し、生物の進化メカニズムを模倣しようとする人工的なモデルである。それが、最近になって組み合わせ最適化問題の解法として注目を集めつつある^{10),11)}。

GAはその名が示す通り、自然界における遺伝と自然淘汰のメカニズムを計算機上で模倣したものであり、解くべき問題の解を遺伝子列(染色体)として表現するものとし、それらを任意に複数個設定することにより集団を形成した上で、「より優れた親(解)はより多くの子孫を残すことができ、また、子供は親である2つの解の性質を個々に受け継ぐため、場合によっては、親よりも優れた解を得ることができる(当然、逆の場合もある)。」という状況の下で、数十世代~数百世代にわたって世代交替を繰り返すことによって、確率的に優れた解を求めようとするものである¹²⁾。

GAの基本的な処理の流れをまとめると、図-1のようである。乱数による初期世代の生成を経て、適合度の評価、適合度を指標とした淘汰・増殖、交叉、突然変異などの線列操作の繰り返しによる世代交代を重ねて、収束判定条件を満たした世代の最良線列(最も適合度が高い線列)を解として採用する。

表-2 各点検項目の判断基準

要因	評価	判断基準
上部	舗装	△ 縦方向のひび割れ。あるいは数箇所に段差が見られる。 x 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も、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。
		x 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。
		x 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	△ コンクリート構造の場合、ひび割れ、剥離が見られる。
		x 鋼構造の場合、全体にわたって腐食している。
	主構	△ 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。
		△ 錆、腐食が激しい。あるいは、変形、破損がある。
	支承	x 上記の症状が助長し、支承が可動しなくなっている。
△ 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。		
伸縮継手	x 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も、著しく衝撃・騒音がある。	
	△ 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。	
排水装置	x 路上に水がたまるとある箇所がある。	
	△ 部分的にほがれ、発錆が見られる。	
塗装	x 全体的に劣化し、発錆が著しい。	
	△ 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。	
耐震性	x 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。	
	△ 洗掃が見られる。	
洗掃変動	x 洗掃が進み、基礎の安定性を欠くと思われる。	
	△ 躯体の沈下、移動、傾斜が見られる。	
躯体変動	x 症状が進み、上部工にまで影響がみられる。	
	△ 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。	
安定性	x 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。	
	△ 構造的な破損と合わせ、極めて不安定である。	
(構造)	x 破損、移動が激しく、極めて不安定である。	
	x 破損、移動が激しく、極めて不安定である。	

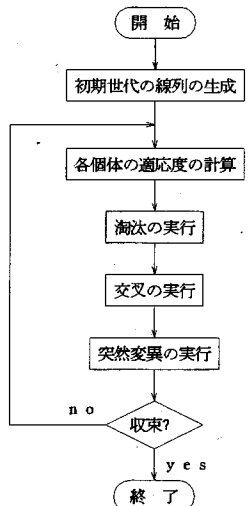


図-1 遺伝的アルゴリズムの基本的な流れ

GAにおける、個々の線列操作やその意味については文献^{13),14)}に譲ることとする。

4. 橋梁補修計画へのGAの援用

本研究では、多数の既存橋梁の補修計画にナップサック問題を適用した。はじめに、ナップサック問題について述べる。

(1) ナップサック問題

ナップサック問題は、制約式が1つだけの、形式的には最も単純な構造をもつ整数計画問題であるが、現実的応用例が豊富であり、かつ、しばしばより複雑な問題を解く過程でその部分問題として現れてくることがある¹⁵⁾。

具体的な例としては、一定の容積を持った袋(ナップサック)に複数個の荷物の中から幾つかを任意に選んで詰め込んだとき、袋の容積に最大限に詰め込める荷物の組み合わせを求める問題がある。

容積 V の袋に、様々な容積の n 個の荷物をできるだけ多く入れる問題では、各荷物に関して袋に入れるか入れないかの判断をすることになり、例えば $n = 100$ とすると組み合わせの数は $2^{100} - 1 \approx 1.3 \times 10^{20}$ 通りになり、1通りの計算に1秒かかるとすると、全ての組み合わせを計算し終わるまでに約 1.5×10^{15} 日という莫大な時間が必要となる。

また、組み合わせ数が多い場合のナップサック問題には、分枝限定法が適用されることもあるが、それでも組み合わせ数の増加に対してはおのずと限界がある。

したがって、ナップサック問題のように膨大な計算量を必要とする問題の解を求めるには、GAが適していると考えられる。GAを用いると、多くの場合、比較的良好な解を短時間に求めることが可能である。このことは、種々の応用問題で発生する組み合わせ問題において、厳密な最適解が必ずしも必要でない場合においては、GAを用いて近似解を容易に求めることが可能なことを示唆している¹⁶⁾。

本研究で対象とする、多数の既存橋梁における補修対象橋梁と補修箇所との組み合わせのうち、最適なものを探るといった問題はある程度橋梁数が多くなるといわゆるNP完全問題となり、原理的には列挙法などにより求解が可能でも現実には実行できない組み合わせの爆発に行き当たってしまう。この場合、GAの適用が考えられることになる。

(2) 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、つぎのように、目的関数、制約条件を設定した。(目的関数)

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



図-2 橋梁補修の遺伝子フォーマット

(制約条件)

$$g = E - C \geq 0 \quad (2)$$

ただし、 n :橋梁数、 e_{i1} :補修前の i 番目の橋梁の評価値、 e_{i2} :補修後の i 番目の橋梁の評価値、 C_i : i 番目の橋梁の補修費用、 E :予算、 C :補修費用合計。

一般のナップサック問題と比較すると、一定の容積を持った袋(ナップサック)は与えられた予算に、荷物が各橋梁部位の補修費用に、それぞれ相当する。

いま、1つの橋梁につき14箇所の点検箇所(鋼橋の場合)があるので、例えば、補修の対象となる橋梁が10橋あるとすると、組み合わせは $2^{14 \times 10} = 2^{140} \approx 1.4 \times 10^{42}$ 通りになる。したがって、膨大な計算量と時間が必要となるため、本研究では、GAを用いて解くことにする。GAを適用するためには、線列(遺伝子列)として扱えるようにナップサック問題をコーディングしなければならない。本研究では線列を図-2のように定めた。図中の0はその箇所を補修しない、1は補修するというを表わしている。さらに、補修することになった項目の点検の評価が1になるものとした。これは、中途半端な補修を行わないと考えたためである。図-2では床版、支承、排水装置、塗装、安定性(材質)の評価が1になったことを表わしている。図-2では補修する必要のない項目も線列として組み込んでしまい、線列に冗長な部分が生じてしまうが、点検結果のデータベースファイル(dBASE形式)を直接操作することによるプログラム上の問題であり早急に改善する予定である。

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、式(2)を目的関数に含めて式(3)のように定式化した。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整するためのパラメータである。

$$\Psi = \begin{cases} F & (g \geq 0) \\ F - r\sqrt{-g} & (g < 0) \end{cases} \quad (3)$$

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な効果もたらされる。さらに、根号を付けることによって図-3のように根号を付けない場合よりも $g = 0$ の近傍(許容領域の少し外側)においてペナルティ項の値が大きくなるため、適応度(目的関数値)が小さくなる。

このペナルティ項は制約条件を大きく満足していない領域での非適合解の排除の効率が悪くなること、初期世代における $g = 0$ 近辺の多様な線列のかんりの部分を排除する可能性があるといった問題点を含んでいるが、予備的に行った数値実験の結果からあえて $g > 0$ の側の解を改良する方法を採った。

なお本研究では、予備計算による試行錯誤の結果、rの値を $r = 1000.0$ と定めた。rの値が大きいのは、代替案の費用が少しでも予算を超えた場合に、大きなペナルティを与えて適応度を小さくするためである。

また、補修の必要のない判断基準1の点検結果である項目箇所を補修することになった場合にも適応度の0.05倍をペナルティ項に加えることにした。

(3) 橋梁の評価値

橋梁の評価には、力学的方法¹⁷⁾と専門家の経験による評価法^{18), 19)}があるが、本研究では後者に近い数量化理論第II類の解析結果から得られる線形判別式式を利用する。この線形判別関数は補修後の橋梁評価が定量的に行え、また、日常の定期点検結果が利用できるという点で優れている。まず、数量化理論第II類の解析結果を示す。

a) 数量化理論第II類の解析結果

コンクリート橋 解析の対象となった橋梁数は、148橋で項目(アイテム)数は塗装を除いた13である。解析結果を表-3左段に示す。相関比は、0.74と高い。図-4は、ここで得られた各アイテムのカテゴリースコアを横軸、偏相関係数を縦軸に示したものである。図中の点の間隔は、そのアイテムのカテゴリースコアのレンジを表わしており、レンジが大きいアイテムほど判別に与える影響が大きいと判断できる。また、偏相関係数もその値が大きいほど判別に与える影響が大きい。

したがって、図-4では、レンジ、偏相関係数から判断して安定性(材質)、主構、床組工が判別に大きく寄与していると解釈できる。

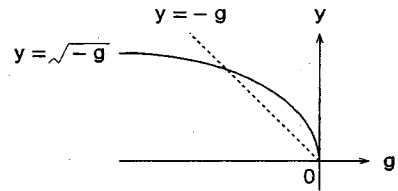


図-3 ペナルティ項の概念($g < 0$)

鋼橋 60橋を対象に解析を行った。項目(アイテム)数は14である。解析の結果を表-3右段に示す。相関比は、0.79と高い。図-5は、コンクリート橋と同様に各アイテムのカテゴリースコアを横軸、偏相関係数を縦軸に示したものである。図-5から判断して洗掘変動、床組工、主構、安定性(構造)が判別に大きく寄与していると解釈できる。

b) 橋梁の評価値

線形判別式は式(4)で与えられるので、これから各橋梁の評価値(サンプル・スコア)Yが求められる。

$$Y = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{c_j} a_{jk} \delta_{jk} \quad (4)$$

ただし、

$$\delta_{jk} = \begin{cases} 1 \dots (\text{ある個体が要因の } j \text{ アイテム} \\ \quad k \text{ カテゴリーに反応したとき}) \\ 0 \dots (\text{その他のとき}) \end{cases}$$

ここで、R:アイテム数、 c_j :jアイテムのカテゴリースコア数、 a_{jk} :jアイテムkカテゴリーのカテゴリースコア。

例えば、表-4のようなコンクリート橋の点検結果が得られたとすると、この橋梁の評価値は、表-3を用いて、式(5)のように与えられる。

$$\begin{aligned} Y &= 0.0389 - 0.3048 - 0.0669 + 0.0169 + 0.0432 \\ &\quad + 0.0952 + 0.0988 - 0.0269 - 0.0141 - 0.0445 \\ &\quad + 0.0374 + 0.2528 + 0.1170 \\ &= 0.0128 \end{aligned} \quad (5)$$

このように求めた評価値を損傷度別にプロットしたのが図-6、図-7である。2つの図をみると、損傷度評価が1の橋梁がよく判別されていることが分かる。また、損傷度評価が2と3の橋梁は同じような評価値になっており、あまりよく判別されていない。

5. 数値実験

先に述べた、橋梁点検結果のデータを用いて、補修計画の数値実験を行い、本研究で試みている手法の有効性の検討を行う。

数値実験の対象となった橋梁数は、主構、洗掘変動、躯体変動、安定性(構造)の4項目の点検結果が1(損傷

表-3 数量化理論第II類による解析結果

要因名 アイテム	コンクリート橋			鋼橋		
	損傷度 カテゴリ	カテゴリ 数	偏相関係数	損傷度 カテゴリ	カテゴリ 数	偏相関係数
橋面舗装	○:1	0.0389	0.4838	○:1	0.0713	0.4613
	△:2	0.0779	0.2166	△:2	-0.0184	0.2145
	×:3	-0.4059		×:3	-0.3900	
地覆高欄	○:1	0.0202	0.3250	○:1	-0.2788	1.0106
	△:2	0.0099	0.1095	△:2	0.4060	0.4018
	×:3	-0.3048		×:3	0.7318	
床版	○:1	-0.0669	0.6801	○:1	0.1072	1.0812
	△:2	0.0658	0.1592	△:2	0.1397	0.4512
	×:3	0.6132		×:3	-0.9415	
床組工	○:1	0.0169	1.4103	○:1	-0.1932	1.2216
	△:2	0.0435	0.1450	△:2	0.4980	0.4450
	×:3	-1.3668		×:3	1.0284	
主構	○:1	0.0432	2.1506	○:1	0.0720	2.1270
	△:2	0.0722	0.2463	△:2	0.0670	0.3653
	×:3	-2.0784		×:3	-2.0550	
支承	○:1	0.0952	0.7486	○:1	-0.0151	0.2448
	△:2	0.0340	0.2405	△:2	-0.0273	0.1087
	×:3	-0.6534		×:3	0.2175	
伸縮継手	○:1	0.0024	0.1291	○:1	0.1899	0.4240
	△:2	-0.0303	0.0632	△:2	-0.1720	0.2340
	×:3	0.0988		×:3	0.2520	
排水装置	○:1	-0.0269	0.1487	○:1	0.0030	0.5127
	△:2	0.1217	0.0838	△:2	-0.2142	0.2222
	×:3	0.0823		×:3	0.2985	
洗掘変動	○:1	-0.0141	0.1745	○:1	0.0474	7.9750
	△:2	0.1603	0.0750	△:2	0.6176	0.5374
	×:3			×:3	-7.3574	
躯体変動	○:1	-0.0445	0.6585	○:1	-0.0489	0.4886
	△:2	0.6136	0.2175	△:2	0.4397	0.1715
	×:3			×:3		
安定性 (構造)	○:1	0.0374	0.7391	○:1	0.1320	2.0781
	△:2	-0.0049	0.1599	△:2	-0.5344	0.3503
	×:3	-0.7018		×:3	1.5437	
安定性 (材質)	○:1	0.2528	3.4546	○:1	0.1359	0.4039
	△:2	-0.1750	0.6826	△:2	-0.2680	0.3159
	×:3	-3.2018		×:3	-0.1587	
耐震性	○:1	0.1170	0.2855	○:1	-0.0045	0.6716
	△:2	-0.0423	0.1313	△:2	0.2348	0.3570
	×:3	-0.1686		×:3	-0.4368	
塗装	○:1			○:1	0.0293	0.3424
	△:2			△:2	-0.0668	0.1325
	×:3			×:3	0.2756	
相関比	$\eta^2 = 0.74$			$\eta^2 = 0.79$		

表-4 点検結果の例(コンクリート橋)

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	洗掘変動	躯体変動	安定構造	安定材質	耐震性
1	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1

がない)の43橋(コンクリート橋26橋, 鋼橋17橋)である。これは、上記4項目の損傷が大きい橋梁は架け替えが必要になり、本研究の対象外となるためである。実験対象となった橋梁の点検結果ならびに諸データ(橋長, 面積)を表-5, 表-6に示す。

GAに関する諸数値を表-7に示す。表中の数値は予備的な数値実験試行に基づいて定めたものである。本実験は5000世代で終了するものとした。淘汰は、集団中で適応度(目的関数値)の最も小さい1個体を最も大きい1個体で置き換えるエリート保存方式を採用した。交叉は1点交叉であり、交叉率0.3とは300個の個体のうち180個体(90組)が交叉を行うことである。突然

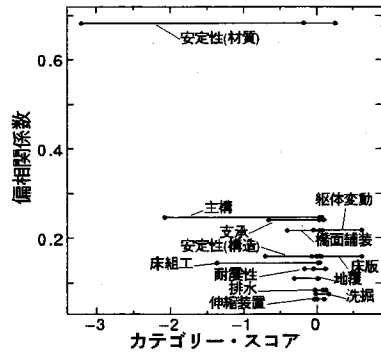


図-4 各アイテムのレンジと偏相関係数(RC)

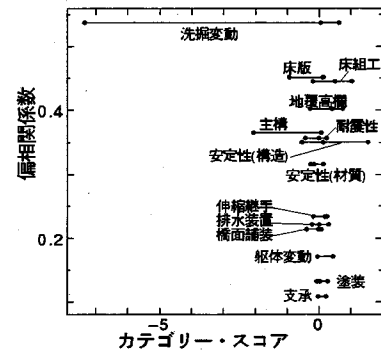


図-5 各アイテムのレンジと偏相関係数(ST)

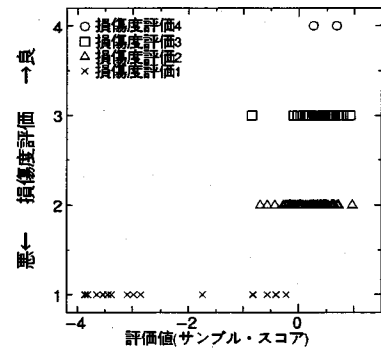


図-6 損傷度別の評価値の分布(RC)

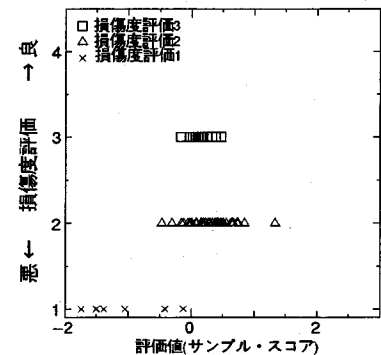


図-7 損傷度別の評価値の分布(ST)

表-5 コンクリート橋のデータ

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	洗掘変動	躯体変動	安定構造	安定材質	耐震性	損傷評価	面積	橋長
RC1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	3	163	27
RC2	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	340	34
RC3	2	2	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	3	1	126	16
RC4	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1	40	6
RC5	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3107	173
RC6	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	82	13
RC7	1	3	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1	103	27
RC8	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1	119	21
RC9	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	86	19
RC10	3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	102	17
RC11	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	170	17
RC12	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	68	15
RC13	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	234	39
RC14	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	273	50
RC15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	120	20
RC16	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1	466	67
RC17	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	70	14
RC18	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	2	3	1	90	12
RC19	2	2	1	1	1	2	3	1	1	1	1	2	3	1	79	5
RC20	3	3	1	1	1	2	3	1	1	1	1	2	3	1	45	10
RC21	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	3	1	64	15
RC22	2	1	1	2	1	2	3	1	1	1	1	2	3	1	45	10
RC23	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	1	1	3	1	85	12
RC24	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	2	2	1	98	15
RC25	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3	1	118	20
RC26	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	56	8

面積の単位は m^2 、橋長は m

表-6 鋼橋のデータ

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	洗掘変動	躯体変動	安定構造	安定材質	耐震性	損傷評価	面積	橋長
ST1	1	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1289	219
ST2	1	2	3	1	1	2	2	3	3	1	1	1	1	2	117	22
ST3	3	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	368	67
ST4	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	576	133
ST5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	329	47
ST6	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	313	57
ST7	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	191	91
ST8	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	141	20
ST9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	92	22
ST10	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	3	4270	305
ST11	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	3	165	30
ST12	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	57	12
ST13	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	3	93	17
ST14	3	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	182	41
ST15	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3	105	17
ST16	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	120	20
ST17	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	3	45	6

面積の単位は m^2 、橋長は m

表-7 GAに関する諸数値

世代数	5000
個体数	300
エリート保存する個体数	1
交叉率	0.30
突然変異率	0.50

表-8 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-8参照)	700 (単位重量当たり)
支承	沓交換(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)

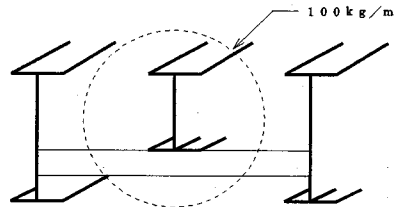


図-8 増設桁工の重量

変異は2世代に1回の割合で発生し、その場合10個体で突然変異が起こるようにした。このように突然変異率が大きいのは淘汰でエリート保存方式を採用するために、局所解に陥ることを避けるためである。

ここでは、2億円の予算で数値実験を行う。また、結果はランダム・サーチとの比較を行い、GAの結果との優位性を検証する。

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-8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-8に示す通りである。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、点検結果だけではなく、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、その様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。

数値実験の環境は、PC9801Ap2(DX2-66) + Borland C(ver.3.1) + QuickFILE/db(ver.1.1) である。QuickFILE/dbはC言語でdBASE形式のファイルを直接操作するためのライブラリである。

表-9 数値実験の結果 (コンクリート橋)

橋梁名	橋面舗装	地覆高欄	床版	床組工	主承	支承	伸縮継手	排水装置	洗掘変動	躯体変動	安定構造	安定材質	耐震性	評価値	
														補修前	補修後
RC1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	0.6452	0.6452
RC2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-0.5439	0.4903
RC3	2	2	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	1	0.7739	0.7739
RC4	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	0.4576	0.4903
RC5	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	0.0359	0.0359
RC6	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5169	0.5169
RC7	1	3	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	0.0128	0.4903
RC8	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	0.5356	0.5683
RC9	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	0.3151	0.5293
RC10	3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0721	0.0721
RC11	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.3354	0.3966
RC12	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	0.2698	0.4903
RC13	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	-0.1580	0.0621
RC14	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0.3700	0.5293
RC15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.4903	0.4903
RC16	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	0.4966	0.4966
RC17	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.3639	0.4842
RC18	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	1	2	0.3662	0.5867
RC19	2	2	1	1	1	2	3	1	1	1	1	1	2	0.4442	0.6257
RC20	3	3	1	1	1	2	3	1	1	1	1	2	2	-0.9512	0.4903
RC21	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	0.3249	0.4842
RC22	2	1	1	2	1	2	3	1	1	1	1	1	2	0.4318	0.4930
RC23	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	0.5716	0.6655
RC24	1	1	1	1	1	2	3	1	1	1	1	1	2	0.3662	0.5867
RC25	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	0.4966	0.4966
RC26	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0455	0.4903

○は補修する箇所を表す。

表-10 数値実験の結果 (鋼橋)

橋梁名	橋面舗装	地覆高欄	床版	床組工	主承	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	評価値	
															補修前	補修後
ST1	1	1	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	-0.4719	0.9387
ST2	1	2	3	1	1	2	3	3	1	1	1	1	2	2	0.2906	1.7134
ST3	3	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	-0.0555	1.1716
ST4	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	0.5132	0.9323
ST5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	0.0829	0.0829
ST6	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.1574	0.4846
ST7	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	-0.1239	0.2800
ST8	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	0.1514	0.2475
ST9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	0.4868	0.4868
ST10	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	0.1839	0.1839
ST11	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1456	0.1456
ST12	2	1	2	2	1	2	2	2	1	2	1	1	1	2	0.6506	1.2105
ST13	2	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	0.3846	0.3846
ST14	3	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	0.0676	1.1716
ST15	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	-0.1716	0.2475
ST16	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.4710	0.9323
ST17	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	0.0230	0.4868

○は補修する箇所を表す。

6. 結果および考察

実験の結果を表-9, 表-10に示す。表中の○囲みの数値はその箇所を補修するということを表わしている。代替案の補修箇所(表-9, 10)の補修費用単価(表-8)に橋長あるいは面積(表-5,6)を乗じたものを橋梁毎に加算した総費用は約1億9800万円となり、ほぼ予算を使いきっている。

図-9, 10はそれぞれ、コンクリート橋、鋼橋の評価値の増加を示している。

図-11は、初期世代から5000世代までの適応度の推移である。図では最初の約100世代の適応度が非常に小さいために縦軸のスケールの関係上除かれている。約3800世代から適応度の変化が生じていない。これは、集団中にほぼ同じ線列で表現される個体が多数を占めると、交叉の影響が出なくなるためと考えられる。また、突然変異によって発生した新種の個体も適応度が低く、すぐに淘汰されてしまうものと考えられる。本研究では、5000世代で終了したがさらに世代を更新した場合、より大きな適応度の個体が発生する可能性もあるが、その出現を突然変異の結果に期待するだけとなり、実行時間からも5000世代で終了するのが妥当と判断した。

GAで得た補修計画案で、評価値が大きく改善された2つの橋梁(RC20, ST2)について詳しく見てみる。まず、表-11はRC20橋の結果である。RC20橋は、橋面舗装、地覆高欄、支承、伸縮継手、安定性(材質)、耐震性の6箇所を補修することによって、評価値が-0.9512

から0.4903に上がった(図-12では、RC20橋の評価値の推移がわかるように縦軸方向に少しずらしてプロットしてある。以下同様)。

RC20橋は点検結果では損傷度評価が3と高いが(表-5)、図-12を見てもわかるように評価値から判断すると、むしろ損傷度評価が1と判断されるべきレベルであると考えられる。補修の結果、損傷度評価は大きく改善され、3のレベルにまで向上した。

次に鋼橋ST2の結果を見てみる。ST2橋の結果を表-12に示すように、補修箇所は床版、支承、伸縮継手、塗装となった。評価値は、0.2906から1.7134になり、図-13を見るとST2橋は損傷度評価2から4になったと考えられる(ただし、鋼橋に関しては損傷度評価が4の橋梁がデータにはないために推定である)。

GAで得られた結果の妥当性を示す一つの指標としてランダム・サーチ(1,500,000個体)による度数分布との比較を行った。結果を、図-14に示す。図からわかるように、ランダムサーチの結果はGAで得られた結果にはるか及ばず、GAで得られた解の優位性を示している。しかし、線列内に冗長な部分が含まれるなど、ランダムサーチに不利な設定となっていることは否めない。

数値計算結果全体を通しての考察と、検討課題をまとめると以下のようである。

今回用いた橋梁点検データによる線形判別関数は、橋梁補修に対して単調増加関数とならなかったため、投資効果の検討が難しくなった。点検データの検討、目的関数の表現の検討、さらには別の橋梁評価方法の検

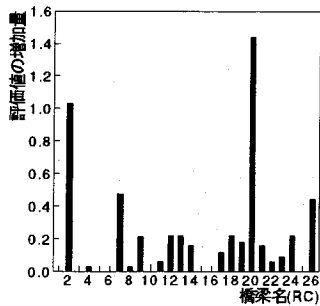


図-9 コンクリート橋の評価値の増加

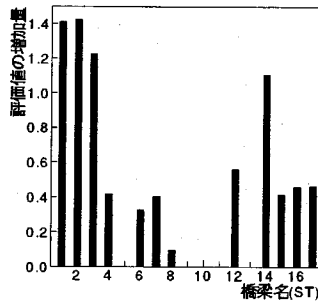


図-10 鋼橋の評価値の増加

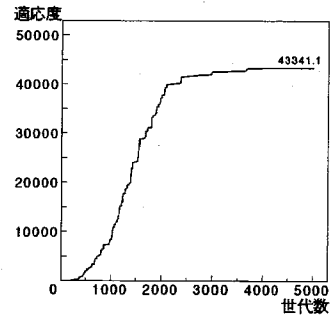


図-11 適応度の推移

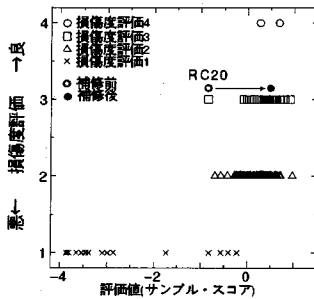


図-12 RC20 橋の評価値の推移

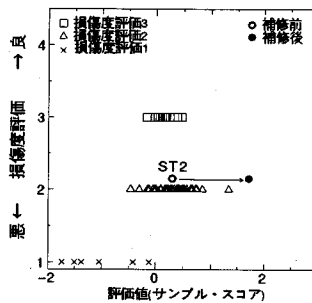


図-13 ST2 橋の評価値の推移

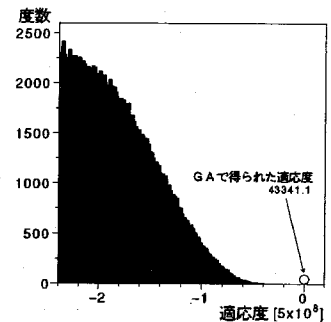


図-14 ランダム・サーチによる適応度の度数分布 (1.5×10^6 個体)

表-11 RC20 橋の結果

橋梁名	RC20		
損傷度評価	3		
点検項目	点検結果	補修箇所	補修後の評価
橋面舗装	3	○	1
地覆高欄	3	○	1
床版	1		1
床組工	1		1
主構	1		1
支承	2	○	1
伸縮継手	3	○	1
排水装置	1		1
河床洗掘	1		1
躯体変動	1		1
安定構造	1		1
安定材質	2	○	1
耐震性	2		1
補修前の評価値	-0.9512	補修後の評価値	0.4903
この橋梁の補修にかかる費用		4235(千円)	

○は補修する箇所を表す。

表-12 ST2 橋の結果

橋梁名	ST2		
損傷度評価	2		
点検項目	点検結果	補修箇所	補修後の評価
橋面舗装	1		1
地覆高欄	2		2
床版	3	○	1
床組工	1		1
主構	1		1
支承	2	○	1
伸縮継手	2	○	1
排水装置	3		3
塗装	3		3
河床洗掘	1		1
躯体変動	1		1
安定構造	1		1
安定材質	1		1
耐震性	2		2
補修前の評価値	0.2906	補修後の評価値	1.7134
この橋梁の補修にかかる費用		6410(千円)	

○は補修する箇所を表す。

討や、橋梁の規模や重要度による補修優先順位などの条件を付加することも考えられる。

GA による解の向上を行うために、GA パラメータの検討、淘汰におけるルーレット選択法の併用、多点交叉の採用などを検討する余地がある。また、既に述べたように点検データのデータベースファイルを直接操作する際のプログラムの容易さから線列に冗長な部分が含まれており、これが解探索の効率を大きく阻害していると考えられるので、早急にプログラムの改良を行う必要がある。

GA による補修代替案の妥当性の検討にランダムサーチの結果との比較を行ったが、過去の補修事例などを

シミュレーションして再現してみることも必要であろう。また、損傷箇所の単位コスト当たりの評価値の上昇値を計算し、値の高いものから順にトータルコストが上限値に達するまで選んだ値およびその内容を解の検証用に用いることも考えられる。

7. まとめ

本研究では、橋梁点検台帳に基づいて、限られた予算内で最大限の効果を上げる補修計画立案を支援するための一手法を提案し、数値実験を通してその有用性を検討した。

提案した手法の特徴は、以下に示す通りである。

1. 橋梁点検台帳を利用して、橋梁の損傷評価を数量化理論第 II 類から得られる線形判別関数を用いて表わした。
2. 橋梁の最適補修計画にナップサック問題を適用した。
3. 膨大な組み合わせ数に対応するために、GA(遺伝的アルゴリズム)を採用した。
4. 橋梁点検データは多くの自治体や公団でも整備していると考えられるので、それらを容易に活用することができる。

実務への適用にあたっては、考察に述べたように克服すべき課題も多いが、検討するに値する手法であると考る。

本研究では、ある時点での補修に関する予算配分を合理的に決定することを目的としているが、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、あるいは道路網の要素としてのネットワークの信頼性を高めることを目的として目的関数を考える方が实际的であろう。本研究が、橋梁点検データとこのような目的とを結び付けるヒントを与えることができれば幸いである。

最後に、橋梁点検台帳の利用、補修費用データの収集などに協力して頂いた I 県を含めた関係機関、各位に感謝する次第である。

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) I 県: 昭和 57 年度~昭和 63 年度 橋梁診断調査総括表集, 1990.
- 10) Goldberg, D.E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesely Publishing Company, 1989.
- 11) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, p.13, 産業図書, 1993.
- 12) 藤田喜久雄: 遺伝的アルゴリズムによる最適化問題へのアプローチ, 日本機械学会関西支部設計 AI 研究懇話会第 4 回資料, p.1, 1992.
- 13) 西川緯一: 遺伝アルゴリズムとその工学的意味, システム/制御/情報, Vol.37, No.8, p.447, 1993.
- 14) 杉本博之, 鹿 麗, 山下洋敬: 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, 1990.7.
- 15) 今野浩, 鈴木久敏: 整数計画法と組み合わせ最適化, p.149, 日科技連, 1982.
- 16) 前出 11), p.133.
- 17) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 加賀山泰一: 橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性, 土木学会論文集, No.380, pp.355-364, 1987.4.
- 18) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 梶谷義昭, 春名真義: 既設橋梁の耐荷力評価とその検証に関する研究(上, 下), 橋梁と基礎, pp.8-15, 1987.2, pp.34-39, 1987.3.
- 19) 木俣昇, 沢田茂善, 小間井孝吉: 橋梁の間主観的診断システム, 第 18 回日本道路会議特定課題論文集, pp.223-225, 1980.10.

(1994.5.26 受付)

AN APPROACH TO REPAIR PLANNING OF EXISTING BRIDGES BY GENETIC ALGORITHM

Yasuo CHIKATA, Kenji TACHIBANA, Takayoshi KIDO and Tameo KOBORI

This paper shows an approach to optimum repair planning of existing bridges within the budget. The planning process is formulated as the knapsack problem and the genetic algorithm is adopted. The evaluation of repaired bridge is made, based on the results of analysis by Quantification Analysis Type II for damage check lists of the bridges.