

鋼橋 RC 床版の道路ネットワークを考慮した補修順位決定支援システムの構築

A DECISION SUPPORTING SYSTEM

FOR MAINTENANCE OF REINFORCED CONCRETE DECKS OF STEEL BRIDGES BASED UPON ROAD NETWORK

古田 均*・能勢善夫**・大村和久***・堂垣正博****

Hitoshi FURUTA, Yoshio NOSE, Kazuhisa OHMURA, and Masahiro DOGAKI

- * 工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)
- ** 学士(工学) 関西大学大学院博士課程前期課程 工学研究科土木工学専攻 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)
- *** 学士(工学) 高田機工(株) 工事部 (〒596-0825 岸和田市土生町 1,808 番地の 1)
- **** 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 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 steel bridges. Emphasis is placed on how to obtain an appropriate order of repair for the existing RC decks by considering the characteristics of the road network and the concept of life cycle cost. Namely, in order to account for the importance of each bridge and the adequate resource allocation, the influence of repair works on the surrounding areas and various practical technical and economical conditions for their repair are considered. And in case of planning the repair plan, the several-years evaluation of the repair plan is considered. 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.

Key words: Maintenance, Optimal repairing, Reinforced concrete decks of steel bridges, Bridge network, Life cycle cost, Several years evaluation of repair plan, Genetic algorithm, Fuzzy reasoning

1. まえがき

橋梁は重要な社会基盤施設の一つである。わが国の橋梁には、現在、交通量や重量車両の増大により、経年劣化が進行している。しかし、わが国の今後の経済状況を展望したとき、膨大な数の橋梁を大切に使用せざるを得ない状況にある。したがって、限られた予算内で最大の便益が得られるような補修計画がつねに望まれる。

橋梁の維持管理に関する研究には、以下のようなものがある。三上・江澤・田中・朝倉は、コンクリート床版の適切な補修工法を選定するためのエキスパートシステムを構築した¹⁾。古田・渡辺・賀は、RC床版の耐久性評価のためのファジィエキスパートシステムを構築した²⁾。足立・小塚・水谷は、確率論に基づいた床版の経年劣化モデルを提案し、リスクなる概念に基づいて維持補修計画の最適化を計った³⁾。

これらの研究は、一橋梁を対象に、その維持管理計画

をシステム化したものである。今日では、道路ネットワーク上の複数の橋梁やライフサイクルコスト (Life Cycle Cost: 以下、LCC と称する) が橋梁の維持管理計画に考慮され始めた。筆者らは、さきに道路網を考慮した橋梁 RC 床版群の補修順位決定支援システムを構築した⁴⁾。ここでは、組合せ最適化問題の解法に遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: 以下、GA と称する) が用いられている。また、中村・宮本・河村は、橋梁部材の劣化を予測した維持管理計画をシステム化し、その最適化を GA で行った⁵⁾。

さらに、RC 床版だけに留まらず、すべての構成部材を対象とした橋梁の維持管理計画支援システムが開発されつつある。たとえば、横山・安井・ラファエル・モンターニョは、実用的な橋梁マネジメントシステムを作成し、その維持管理計画をシステム化した⁶⁾。近田・橋・城戸・小堀は、一橋梁に注目し、上下部工の主要部材の補修順位決定に GA を適用した⁷⁾。また、宮本・串田・足

立・松本は、コンクリート橋の耐久性診断エキスパートシステムを利用し、橋梁の劣化予測、最適な補修工法の選定が実行可能な橋梁維持管理システム（Bridge Management System）を開発した⁸⁾。

本研究では、補修計画域内の道路網上に位置する橋梁群を対象に、それらを構成する構造要素のなかで最も損傷の著しい RC 床版に注目し、その補修順位決定支援システムを構築する。本支援システムでは、限られた予算内で効率的かつ合理的に補修すべき橋梁ならびに補修工法が決定できるように、橋梁の LCC、橋梁の周辺状況、補修対象エリア内における道路網などを勘案する。また、最適化手法に GA を採用する。

2. 維持管理計画モデルの構築

橋梁の RC 床版は、橋面上に加わる荷重を直接支え、床組・主桁・主構に伝達する役目をもつ。また、車両や歩行者の安全な通行を確保するための機能も有する。

本研究では、中小橋梁の床版において、圧倒的に多用されている RC 床版を対象に、その補修計画を検討する。

2.1 劣化損傷

RC 床版の損傷が財政的に問題になりつつあるが、昨今、構造的にも深刻な問題となっている。その原因として、文献 9) には

- 1) 過大な輪荷重の作用
 - 2) 過大な衝撃の作用
 - 3) 輪荷重通行軌跡による過大モーメントの作用
 - 4) 設計耐力の不足
 - 5) コンクリート品質と施工の不良
 - 6) 配筋鉄筋量の不足
 - 7) 床版の剛性不足
 - 8) 主桁作用による負の曲げモーメントまたは引張力の作用
 - 9) 自由縁における過大モーメントの作用
 - 10) 支持桁の不等沈下による付加モーメントの作用
- などが挙げられている。RC 床版はそれらが複雑に組み合わせられて損傷に至っているものと考えられる。

床版の劣化損傷には、つぎのようなものがある¹⁰⁾。

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

2.2 健全度ランク

RC 床版の健全度を評価するため、松井・前田が提案した方法¹¹⁾、すなわち、ひび割れ密度から劣化度を算出する方法を採用する。ここに、ひび割れ密度とは、床版下面に発生したひび割れの単位面積あたりの長さである。

松井・前田の方法によれば、使用限界までの RC 床版に対して、その劣化度 D_c がひび割れ密度 C_d (m/m^2) を

用いて

$$D_c = \frac{C_d}{10.0} \quad (1)$$

によって判定される。

劣化度の評価結果に基づき、劣化度別に分類された損傷は損傷度、もしくは、健全度と呼ばれる。本研究では、劣化度を 5 段階に区分し、それらを健全度ランクと呼ぶことにする。

さらに、床版の健全度ランクと維持管理方法との関係は表-1 のようで¹¹⁾、健全度ランク V が使用限界とされる。ただし、つぎのような現象が生じている場合には、健全度ランクが低くても早急な対策が望まれる。

- 1) ハンチ付近にひび割れが集中している場合
- 2) 一方向のひび割れが橋軸直角方向に卓越している場合
- 3) ひび割れ箇所に黄色い溶出物の沈着がある場合

表-1 健全度ランクと維持管理方法

健全度 ランク	損傷状態		維持管理方法
	劣化度 D_c	ひび割れ密度 $C_d(\text{m/m}^2)$	
V	0.9 以上	9 以上	補強または打ち換え
IV	0.8~0.9	8~9	補修・補強または打ち換え
III	0.6~0.8	6~8	補修または補強
II	0.3~0.6	3~6	定常維持管理や補修
I	0.0~0.3	0~3	定常維持管理

2.3 経年劣化モデルとリスクの定量化^{3), 12)}

構造物の経年劣化とは、その性能が時間とともに低下していく現象のことである。性能が何らかの指標で定量化できるとすれば、経年劣化は図-1 のように表現できる。

本研究では、橋梁 RC 床版群の最適な維持管理計画を立案するため、RC 床版の経年劣化モデルとリスクの定量化に阪神高速道路公団が確率論に基づいて考案した方法を採用する^{9), 12)}。その方法は、つぎのとおりである。すなわち、経年劣化を伴う床版の推移がホモジニアスなマルコフ過程にあるものと仮定し、これを単位時間あたりの遷移確率マトリックス P で表現する。ここに、遷移確率マトリックスは、過去の床版の点検データから推定される。たとえば、その一例を示すと、

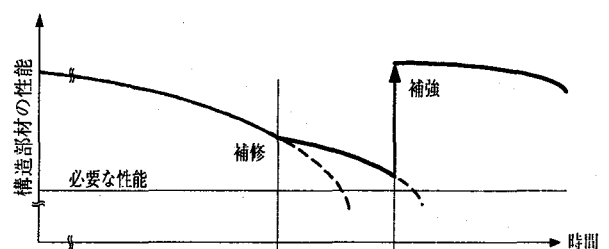


図-1 構造物の経年劣化と補修・補強

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} & \text{V} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{I} \\ \text{II} \\ \text{III} \\ \text{IV} \\ \text{V} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.90 & & & & 0 \\ 0.09 & 0.86 & & & \\ 0.01 & 0.13 & 0.83 & & \\ & 0.01 & 0.15 & 0.80 & \\ 0 & & 0.02 & 0.20 & 1.00 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

のようである。ここに、I～Vは劣化の程度に対応した床版の健全度ランクである。遷移確率マトリックスの各要素 P_{ij} は経年劣化により単位時間に床版の損傷が状態 j から状態 i に遷移する確率を示す。なお、空白の要素はゼロである。

n 年後の RC 床版の状態 $S(n)$ は、遷移確率マトリックス P を用いて、

$$S(n) = P^n S(0) \quad (3)$$

のように推定される。ここに、 $S(0)$ は状態量ベクトルで、健全度ランク I～V に対応した 5 つの要素からなる列ベクトルである。

一方、時点 t におけるリスク $R(t)$ は、RC 床版の健全度ランクがランク V の使用限界状態に陥る場合には

$$R_L(t) = L_L^T S(t) \quad (4)$$

から、健全度ランクがランク I～IV にある場合には

$$R_D(t) = D^T S(t) \quad (5)$$

から求められる。ここに、 D は危険度ベクトル、 L_L は限界危険度ベクトルである。本研究では、

$$D = \{0, 0, 10, 20, 0\}^T, \\ L_L = \{0, 0, 0, 0, 100\}^T$$

とした。ちなみに、これらベクトルの要素は、健全度ランク V の使用限界状態を危険度 100 とした場合、RC 床版がランク I～IV にあることの危険度を表す。

以上のことから、点検時から補修検討時までの間に RC 床版が遷移する状態量は

$$S(t) = P^n S(0) \quad (6)$$

から、また補修時から翌一年間のリスクは

$$R(t) = D^T S(t) + L_L^T P S(t) \quad (7)$$

から求められる。ここに、式(6)で用いられる遷移マトリックス P' は、補修対象の床版がそれまでに使用限界状態に陥ったことはないという前提のもとに、通常の遷移確率マトリックス P を変更（健全度ランク V への遷移分を健全度ランク IV に戻した）したものである。

2.4 RC 床版の補修や補強の工法

2.4.1 補修・補強工法の特徴と選択基準

補修・補強工法を選択基準は道路管理機関によってさまざまで、統一的な基準は、現在のところ、みあたらない。考えられうる補修・補強工法とその特徴は、以下のようである。

- 1) 樹脂系接着剤注入工法
鉄筋の防錆効果と床版の防水性が期待される工法。
- 2) モルタル吹き付け工法
内部のコンクリートや鉄筋を保護する目的で行われる工法。
- 3) 鋼板接着工法
床版コンクリートの下面に薄鋼板を接着し、活荷重に対する抵抗力を高めるための工法。施工後の再損傷発生率は少ない。
- 4) FRP 接着工法
床版コンクリートの下面に FRP (Fiber Reinforced Plastics) を接着し、活荷重に対する抵抗力を高めるための工法。鋼板に比べて、はるかに柔軟で、コンクリートの凹凸にもなじみやすい。
- 5) 縦桁増設工法
既存の床版支持桁間に 1 本あるいは 2 本の縦桁を増設し、床版に発生する曲げモーメントを減少させるための工法。
- 6) 床版増厚工法
床版の上面に新たにコンクリートを打ち足す工法で、曲げおよびせん断に対する耐力が増加する。
- 7) 部分打ち換え工法
損傷部分だけを取り除き、他の部分と同程度の機能に回復させるための工法。
- 8) 全面打ち換え工法
文字どおり、床版を全面にわたって打ち換える工法。それらの選択基準は表-2 のようである。

表-2 補修・補強工法とその選択基準の一例

対策	工法	選択基準の一例
補修	樹脂系接着剤注入	初期段階にひび割れ損傷がある場合
	モルタル吹き付け	初期段階のコンクリートに欠損や劣化が見受けられる場合
補強	鋼板接着	配力鉄筋が不足する場合
	FRP 接着	配力鉄筋が不足する場合
	縦桁増設	変形剛性が不足する場合
	床版増厚	床版厚が不足する場合
打ち換え	部分打ち換え	局部的に重大な損傷が見受けられる場合
	全面打ち換え	損傷が著しく他の工法では対応できない場合など

2.4.2 補修・補強工法の効果と費用

損傷した床版に補修や補強を行った場合、前述の床版の劣化度と遷移確率マトリックスがどのように回復するかを推定することは、現在のところ、極めて難しい。これは、補修・補強後の床版の状況が長期間にわたってモニタリングされた事例がほとんどなく、損傷状況に関するデータが今日まで蓄積されていないためである。それゆえ、現状では個々の補修工法の費用も含めて不確実な部分が多いが、専門家と種々検討し、本支援システムでは表-3 のように仮定した。また、各工法において、それ

が交通規制を伴う工法であれば、それに伴う経済的損失を表-3 の費用に加える必要がある。本支援システムでは、交通規制に伴う損失費用 C_T を

$$C_T = C_L V d \quad (8)$$

で算定することにした⁸⁾。ここに、 C_L は1台あたりの通行止めによる損失、 V は1日あたりの交通量、 d は通行止めの日数である。

2.5 ライフサイクルコスト分析

本支援システムでは、補修と補強の経済性を LCC の概念で評価する。ちなみに、LCC による代替案の評価はライフサイクルコスト分析といわれる¹³⁾。

2.5.1 ライフサイクルコスト

LCC とは、特定の財について、それが供用された時点から供用限界に達して撤去されるまでの期間にかかる総費用のことである¹³⁾。RC 床版の補修と補強における経済性を考慮するため、予算内での LCC を算定する。ここでは、LCC を RC 床版の補修および補強の工費と、それによる効果を金銭に換算した値との合計とする。

LCC の算定に際し、まず、各工法の効果を考慮する。橋梁 j の補修時から5年後のリスク R_{ij} は、維持管理計画案 i で与えられる補修工法を橋梁 j に適用することによって RC 床版が表-3 に示すように回復した時の遷移確率マトリックス P と劣化度 D_c を用いて、算定される。この5年後のリスク R_{ij} を用いれば、計画案 i に示された補修工法を橋梁 j に適用した時の LCC の値 L_{ij} が

$$L_{ij} = \sum_{n=1}^m C_{ijn} + C_j^F \frac{R_{ij}}{R_{\max}} \quad (9)$$

で求められる。ここに、 C_{ijn} は計画案 i で与えられた補修工法が橋梁 j に n 年目に適用された場合の補修費、 C_j^F は橋梁 j が使用限界状態に陥った時に必要な取替え費用、 $R_{\max}$ は使用限界時のリスク（ここでは 100 とする）、である。

本支援システムでは、複数年の間に発生するコストを

算出し、補修計画を立案する。この場合、将来の金銭価値を現在の金額に換算し評価する必要がある。そこで、将来の金額をつぎのように現在の金額に換算する。すなわち、 n 年後の工費を L とすると、その現在価値 L' は、

$$L' = \frac{L}{(1+\eta)^n} \quad (10)$$

で求められる。ここに、 η ：期間中の利子率、である。

なお、複数年における評価については後述する。

2.5.2 Cost Effectiveness 式による評価値の算定

1) コスト・エフェクティブ（費用効果分析）

本支援システムでは、LCC 分析における評価法の一つである Cost Effectiveness 式（以下、CE 式と称する）¹³⁾

$$\text{Cost Effectiveness} = \frac{\text{System Effectiveness}}{\text{Life Cycle Cost}} \quad (11)$$

を適用する。ここに、分子の System Effectiveness（以下、SE と称す）はシステムの使用期間中の効果である。

本支援システムでは、LCC、補修工法のファジィ推論による適応度、橋梁の補修から5年後のリスクの回復度の3項目を評価対象とするため、式(11)の分子と分母をいずれも可変量とする。

2) 評価式の適用方法

式(11)の CE 式の分子と分母には、つぎの事項を考えた。すなわち、分子 SE には補修対象橋梁の周辺状況や損傷の種類・原因に対応してファジィ推論で求められた補修・補強工法の適応度 (T) と個々の橋梁における5年後のリスクの回復度 (R) を、分母 LCC には前述の各種補修工法の LCC 値、を考えた。それゆえ、式(11)は

$$H = \frac{R + T}{LCC} \quad (12)$$

で表される。したがって、評価値 H の高い工法が優れた工法と見なされて選定される。

2.6 補修・補強工事における周辺状況

RC 床版の補修工法の選定に影響すると思われる要因

表-3 補修工法の効果と費用

対 策	工 法	効 果	費 用 (円/㎡)
補 修	樹脂系接着剤注入	遷移マトリックスの要素 P_{ij} が 60% 回復する	①23,000
	モルタル吹き付け	樹脂系接着剤注入と同じ	②14,000
補 強	鋼板接着	劣化度 D_c が 0.40 回復する。遷移マトリックスの要素 P_{ij} が 45% 回復する	③75,000
	FRP 接着	劣化度 D_c が 0.35 回復する。遷移マトリックスの要素 P_{ij} が 45% 回復する	④75,000
	縦桁増設	劣化度 D_c が 0.50 回復する。遷移マトリックスの要素 P_{ij} が 35% 回復する	⑤44,000
	床版増厚	劣化度 D_c が 0.60 回復する。遷移マトリックスの要素 P_{ij} が 40% 回復する	⑥45,000
打ち換え	部分打ち換え	劣化度 D_c が 0.65 回復する。遷移マトリックスの要素 P_{ij} が 45% 回復する	⑦47,000
	全面打ち換え	劣化度 D_c は 0.0 になり、遷移マトリックスが初期値に戻る	⑧47,000
工法の 組合せ	鋼板接着+補修工法	劣化度 D_c が 0.40 回復する。遷移マトリックスの要素 P_{ij} が 75% 回復する	③+①又は②
	FRP 接着+補修工法	劣化度 D_c が 0.35 回復する。遷移マトリックスの要素 P_{ij} が 75% 回復する	④+①又は②
	縦桁増設+補修工法	劣化度 D_c が 0.50 回復する。遷移マトリックスの要素 P_{ij} が 65% 回復する	⑤+①又は②
	床版増厚+補修工法	劣化度 D_c が 0.60 回復する。遷移マトリックスの要素 P_{ij} が 70% 回復する	⑥+①又は②

には、損傷原因、損傷状態、補修工費などがある。その他に、橋梁の置かれている状況、すなわち、周辺状況もある。それらは、つぎのとおりである⁷⁾。

- 1) 住宅地の周辺状況：人・自動車などの交通の安全性、騒音、振動などの点で考慮
- 2) 工事に対する周辺環境：資材置き場、工事用車両の通行の確保などの点で考慮
- 3) 迂回路の状況：道路網で考慮
- 4) 現橋幅員内での交通処理能力：橋の幅員で考慮
- 5) 現橋幅員を拡幅しての交通処理能力：歩道などを一時的に車道に利用できるか否かで考慮
- 6) 時間と時期の交通規制：その他の工事や都市計画の関係、補修工事の工期などで考慮
- 7) 大型車の交通規制：通行車両の重量で考慮
- 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で考慮
- 9) 路下の状況：河川、鉄道線路、重交通などで考慮
- 10) 重要幹線道路上の橋梁：災害時の使用、周辺経済への影響で考慮
- 11) 建設地域の自然条件：地形、地質、気象で考慮
- 12) 施工性：橋梁の維持管理のしやすさ、構造形式で考慮

2.7 補修工法の選択時における他年度評価

RC 床版の補修・補強工法の LCC と 5 年後のリスクが考慮され、複数年にわたる補修が可能なシステムを構築する。複数年にわたる補修計画の一例として、ここでは 2 年間にわたって補修工事がなされる場合を検討する(図-2 を参照)。すなわち、補修計画の初年度に選定された工法にかかる総費用が補修計画予算に収まり、5 年後のリスクが最小で(効果が最大となる)、かつ 5 年間の総工費が最小となるように補修計画する。

3. 組合せ最適化問題の解析手法

3.1 本支援システムの流れ

本支援システムの流れは図-3 のようで、その概略を以下に説明する。

1) 床版の損傷度判定

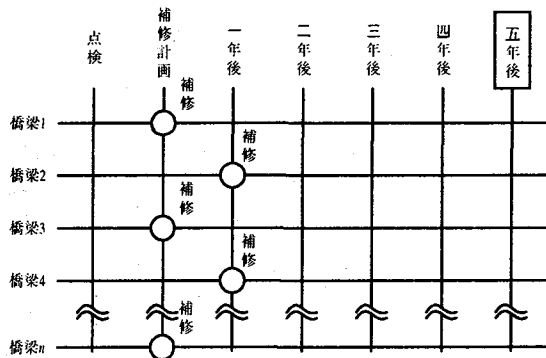


図-2 複数年における評価

点検データ(床版の諸元、損傷の状態と原因、遷移確率マトリックスなど)に基づき、劣化度 D_c 、健全度ランク、補修時のリスクなどを算出する。

- 2) 橋梁ごとの適切な補修工法の選択
補修工法ごとの LCC と適応度を算出する。
- 3) 補修すべき橋梁と工法の選定
予算、道路網、適応度、リスクなどの制約条件のもとに、補修すべき橋梁とその工法を選定する。
- 4) 補修計画案の作成
上述の手順で補修計画案を作成する。その際、補修橋梁・補修工法・補修時期の膨大な組合せが存在するため、最適解が比較的容易に求められる GA を解析手法に採用した。

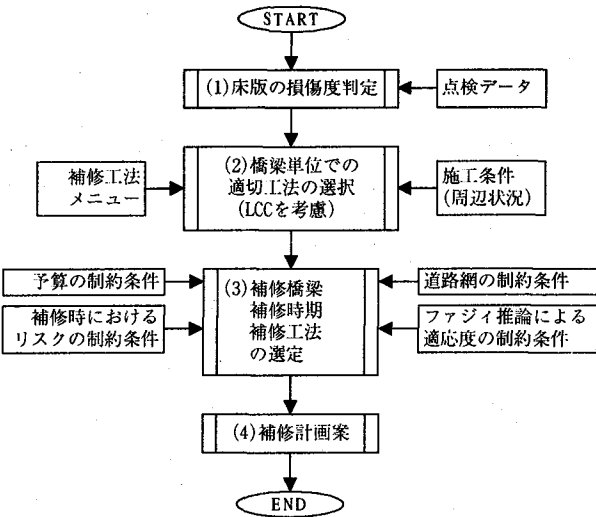


図-3 本支援システムの流れ

3.2 最適化問題の解法

3.2.1 GA の概要

GA は、ダーウィンの生物進化論にヒントを得て、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するものである。すなわち、生存する生物群を環境により適応性の強い生物と見なし、その上で淘汰・増殖、遺伝子間の交叉、および、突然変異なる生物進化のプロセスを簡単な数理モデルで表し、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穏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、穏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が見いだされるので、理論的には有限回の検索で最適解に巡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、ならびに、その時期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

の数が多くなったり、補修計画を考える期間が長くなったりすると、組合せ数の爆発に行き当たり、有限回の検索といえども、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、厳密な解を求めることは、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岐限定法や動的計画法などの手法は適用できない。

本研究では、最適解の検索に GA を採用するが、その理由は、上述の点や厳密解を必ずしも必要としない場合に GA が有効な点、ならびに、

- 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検索する場合よりも低いと期待される点
- 3) プログラミングが容易な点にある。

3.2.2 仮想生物と環境の設定および単純 GA の処理手順

最適な床版の補修案は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が、どのような形式で伝えられ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。ここでは、図-4 に示すような 0 と 1 の並びからなる長さ l_b のビット列を一個体（一補修案）の遺伝子とする。RC 床版の補修工法に 12 種の工法を採用するため、それぞれの補修工法は 4 ビットからなる 0, 1 の並びでコード化される。そして、補修期間が 2 ケ年とされるため、これは 2 ビットの 0, 1 の並びでコード化できる。たとえば、 n_b 橋が補修対象になれば、それらを

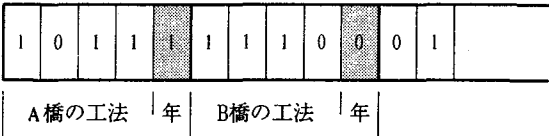


図-4 橋梁が5ビットの遺伝子列で表現され、すべての橋梁の補修工法を表す遺伝子列

表-4 コードと補修・補強工法

対策	工法	コード
補修	樹脂系接着剤注入	0000
	モルタル吹き付け	0001
補強	鋼板接着	0010
	FRP 接着	0011
	縦桁増設	0100
	床版増厚	0101
打ち換え	部分打ち換え	0110
	全面打ち換え	0111
補修 + 補強	鋼板接着	1000
	FRP 接着	1001
	縦桁増設	1010
	床版増厚	1011

橋梁の数 n_b だけ結合し、橋梁群全体の補修案とすることができる。それゆえ、その遺伝子列の長さ l_b は $5n_b$ ビットとなる。なお、12 種の補修工法に対して、表-4 に示すように、0000 から 1011 までのコードを当てはめた。ただし、計算の便宜上、13 番目 (1100) 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に、単純 GA の枠組みに沿って生物集団を進化させ、優性な個体が生存するように探索を繰り返せば、環境に適した最適解を見いだすことができる。その探索過程は図-5 のようである。

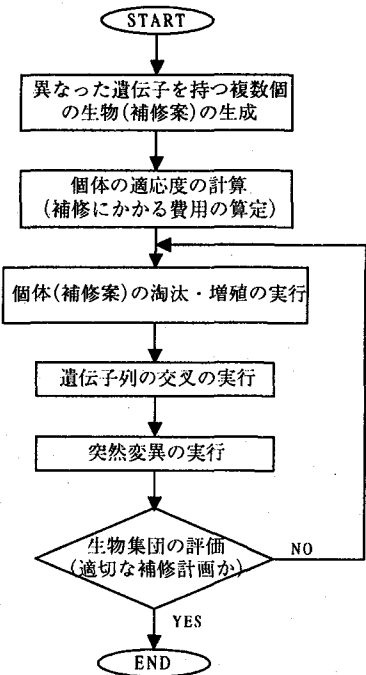


図-5 GA による最適な補修計画案の検索手順

3.3 ファジィ推論ルール

3.3.1 損傷 RC 床版に対する補修工法ファジィ推論による適応度の算出

補修対象橋梁の周辺状況や損傷の種類・原因に対する補修工法の適応度が維持管理計画には必要である。ここでは、適応度を求める方法として、人のもつ判断力と曖昧さを兼ね備えたファジィ推論を用いる。

ファジィ推論を採用した理由は、つぎのようである。

- 1) 床版の損傷状況や原因、周辺の環境状況（施工に伴う騒音や交通規制などの条件）を定量化するのは不可能である¹⁴⁾。
- 2) 本研究の目的が人間社会の向上を目指すものにつながり、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、人間の主観に起因する曖昧さが入り込む¹⁴⁾。

ファジィ推論は、「もし…ならば、…である」という計算科学における推論表現にファジィ変数を用いたものである¹⁴⁾。「もし…ならば」は前件部、「…である」は後件部と呼ばれ、一般に

$$IF\ X=A_i\ THEN\ Y=B_i\ (i=1,2,\cdots,n) \quad (13)$$

のように表される。ここに、 A_i 、 B_i はそれぞれファジイ変数、 i はファジイ集合の数である。

本研究では、ファジイ推論の中でも演算が簡単で制御結果が良好な簡略化ファジイ推論を適用する。簡略化ファジイ推論は、式(13)で表されるような後件部が実数値である推論である。

$$IF\ X=A_i\ THEN\ Y=C_i\ (i=1,2,\cdots,n) \quad (14)$$

たとえば、式(14)の前件部のファジイ変数を図-6 のようなメンバシップ関数で与え、入力値を X_0 とすると、適合度は f_i となる。その結果、各ルールの推論結果すなわち適応度 F_i は適合度 f_i と後件部の実数値 C_i との積

$$F_i = C_i f_i \quad (15)$$

から求められる。

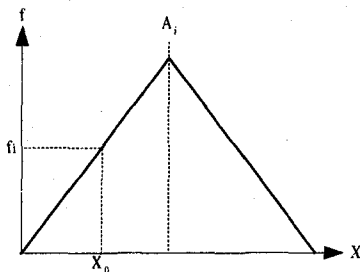


図-6 メンバシップ関数の一例

3.3.2 ファジイ推論ルールの入力値

損傷橋梁に対する補修・補強工法の適応度をファジイ推論によって算出する場合、ファジイ推論ルールの入力値が極めて重要になる。また、ファジイ推論は曖昧さを定量化する手法であるため、ファジイ推論ルールの入力値に曖昧さがあってはならない。そこで、入力値にできる限り客観性を持たせるため、橋梁に対する各周辺状況にある指標を設け、それを参考に、ファジイ推論ルールの入力値を決定する。たとえば、2.6 に示した周辺状況のうち、1) 住宅地の周辺状況と9) 路下の状況に対して設けた指標は、以下のとおりである。

1) 住宅地の周辺状況

主に、補修・補強工事による騒音などの問題を勘案し、土地の用途地域の種別で分類した。

住宅地域	住宅密集地
住宅地域+商業地域、工業地域	やや住宅密集地
商業地域+工業地域	どちらでもない
商業地域	やや住宅閑散地
工業地域	住宅閑散地

9) 路下の状況

工事による周辺への危険度を勘案し、路下に存在するもの、すなわち、河川、鉄道、重層交通、グラウンドによって分類した。

重層交通、鉄道の状況の度合い	$-1.0 \leq x < 0.0$
グラウンド	$0.8 \leq x < 1.0$

空き地	$0.4 \leq x < 0.8$
河川	$0.0 \leq x < 0.4$

3.4 制約条件

個々の補修対象橋梁に対してさまざまな補修工法が考えられ、それらのうち、いくつかは最適化問題での有効な解となる。橋梁や補修に要求される条件として、ファジイ推論による適応度に対する制約条件のほか、つぎの1)~5)の条件が加味される。すなわち、

- 1) 損傷の状態や原因に無関係に不適切な工法を選定した。
- 2) 総費用が予算をオーバーした。
- 3) 道路網を無視した工法を選択した⁴⁾。
- 4) 補修時のリスクがある値（ここでは 50）を越えているにも関わらず補修しなかった。
- 5) 近い将来に補修の計画がある橋梁に補修や補強が施された場合（ただし、リスクがある値を越えているときは除外する）。

これらの条件が1つでも含まれる解は不適切とみなした。このような制約条件を最適化問題で取り扱う方法には、さまざまな方法が考えられる。ここでは、GA あるいはファジイ推論において、ペナルティを与える方法を採用する。

4. 数値解析結果とその考察

4.1 仮定の補修計画エリアと道路網の概要

本支援システムを図-7 に示す 14 本の道路網と 35 橋の橋梁群からなる補修計画エリアに適用し、損傷した RC 床版の補修・補強計画を検討する。道路のルート番号、橋梁の番号などの情報を表-5 に示す。また、RC 床版の損傷状態、損傷原因、橋梁の規模、交通量などは表-6 の

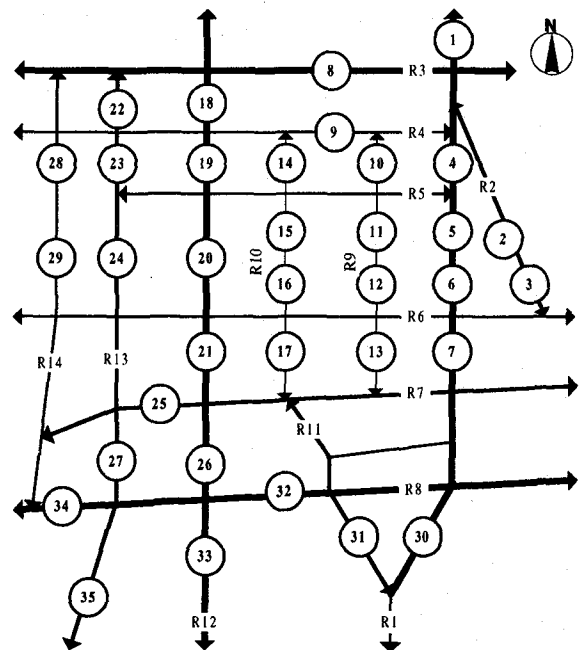


図-7 仮定の補修計画エリア

ようである。

4.2 GA パラメータの設定

補修対象橋梁・補修工法・補修時期の組合せ最適化問題を GA で解析する場合、最適な GA パラメータ、すなわち、個体総数、淘汰率、交叉率、突然変異率が必要である。

表-5 個々の橋梁とルートに対応

道路番号	橋梁番号	備考
R1	1,4,5,6,7,30	北行き一方通行(一部)
R2	2,3	
R3	8	
R4	9	
R5	-	
R6	-	
R7	25	
R8	32,34	
R9	10,11,12,13	南行き一方通行
R10	14,15,16,17	北行き一方通行
R11	31	北行き一方通行
R12	18,19,20,21,26,33	
R13	22,23,24,27,35	
R14	28,29	

GA パラメータの値を検討した結果、表-7 に示す GA のパラメータ値で効率的に、かつ評価値の高い解が求められた。したがって、これらを用い、仮定の補修計画域に存在する橋梁群に対し、適切な補修計画案を求める。

4.3 数値解析結果とその考察

仮定の補修計画エリアに存在する 35 橋の橋梁群に対して、予算が 5 億円と 10 億円の場合での最適な補修計画案を探索した。その結果、表-8 に示す結果を得た。

まず、予算 10 億円の場合に対して、数値解析の結果を検討する。計画初年度に補修される橋梁番号 2, 6, 30, 31 では、RC 床版に崩壊寸前と思われる損傷が認められている。このことを勘案すれば、計画案は適切な補修時

表-7 最適な GA パラメータの値

GA パラメータ	パラメータ値
個体総数	300
淘汰率 (%)	20
交叉率 (%)	40
突然変異率 (%)	1

表-6 各橋梁と損傷状況

橋梁番号	橋長 (m)	幅員 (m)	交通量 (台/日)	通行止め損失 (円/台)	主な損傷状態	主な損傷原因	ひび割れ密度 (mm/m ²)
1	200	20	22,000	150	経年による老朽化	ひび割れ	4.2
2	80	15	15,000	80	設計耐力の不足	剥離、鉄筋の露出	8.6
3	60	15	15,000	80	過大な輪荷重の作用	部分的鉄筋の露出	3.2
4	150	20	24,000	100	配力鉄筋の露出	豆板、剥離	6.5
5	80	20	22,000	80	過大な輪荷重の作用	ひび割れ	4.8
6	120	20	22,000	80	コンクリートの品質や施工の不良	陥没	5.8
7	150	20	20,000	100	床版の剛性不足	部分的ひび割れ	4.1
8	300	25	30,000	80	過大な輪荷重の作用	部分的ひび割れ	1.6
9	200	10	12,000	80	輪荷重通行軌跡による過大モーメントの作用	剥離、鉄筋の露出	2.4
10	120	6	6,500	50	設計耐力の不足	豆板	6.4
11	80	6	8,000	50	過大な輪荷重の作用	ひび割れ	5.2
12	90	6	8,000	50	過大な輪荷重の作用	ひび割れ	4.3
13	100	6	7,000	50	配力鉄筋の露出	剥離、陥没	2.8
14	70	6	6,000	40	配力鉄筋の露出	剥離、陥没	2.5
15	80	6	8,000	40	床版の剛性不足	漏水、遊離石灰	3.5
16	100	6	8,000	40	床版の剛性不足	漏水、遊離石灰	4.3
17	120	6	7,500	40	経年による老朽化	ひび割れ	6.4
18	300	20	26,000	80	経年による老朽化	部分的損傷、ひび割れ	5.1
19	100	20	28,000	80	コンクリートの品質や施工の不良	剥離	5.8
20	250	20	27,000	80	コンクリートの品質や施工の不良	空洞、陥没	5.8
21	120	20	29,000	80	設計耐力の不足	剥離、鉄筋の露出	3.1
22	200	15	20,000	80	配力鉄筋の不足	剥離、豆板	1.4
23	90	15	17,000	80	コンクリートの品質や施工の不良	部分的損傷、漏水、遊離石灰	1.8
24	100	15	16,000	80	過大な輪荷重の作用	部分的損傷、ひび割れ	3.5
25	70	15	15,000	80	設計耐力の不足	豆板	6.6
26	100	20	26,000	100	過大な輪荷重の作用	ひび割れ	3.8
27	90	15	18,000	80	配力鉄筋の不足	剥離、陥没	1.5
28	120	10	15,000	70	床版の剛性不足	漏水、遊離石灰	1.2
29	80	10	15,000	70	経年による老朽化	ひび割れ	2.4
30	180	20	24,000	150	過大な輪荷重の作用	部分的損傷、鉄筋の露出	6.5
31	180	15	17,000	150	床版の剛性不足	陥没	9.5
32	180	25	26,000	100	床版の剛性不足	漏水、遊離石灰	3.1
33	250	20	24,000	150	過大な輪荷重の作用	ひび割れ	1.3
34	150	25	28,000	80	コンクリートの品質や施工の不良	剥離	3.3
35	70	15	20,000	150	経年による老朽化と設計耐力の不足	ひび割れ	1.8

期と補修工法を提示しているものと考えられる。

また、2 年とも補修しない橋梁は 8, 9, 18, 22, 26, 27, 33, 34, 35 である。これらは、補修時の健全度ランクがランクⅠあるいはランクⅡで良好な上、リスクが小さい、劣化の進行が遅く 5 年後でも危険な状態に陥らない、などの理由から補修されなかったものと思われる。

つぎに、道路網と補修橋梁との関係について検討する。主要幹線道路であるルート 9 上に架かる橋梁番号 5 と 6 には、交通規制を伴う部分打ち換え工法が採用されている。ルート 9 の迂回路が近くに存在し、かつ損傷が著しいため（特に、橋梁番号 6 の場合）、交通規制を伴う工法が採用されたものと思われる。この場合、橋梁番号 2 と 3 も前述の橋梁と同じ年に補修工事がなされるが、交通規制を伴わないので、妥当な案であると考えられる。

ルート 10 上の橋梁番号 15 と 16 は、次年度に交通規制を伴った部分打ち換え工法でなされる。ルート 10 の迂回路であるルート 12 には、交通規制を伴わない補修工法が選択されているため、ルート 10 の橋梁番号 15 と 16 に交通規制を伴う補修工法が採用されても問題ない。

すべての橋梁に対して補修工法を検討すれば、総体的に適切な工法が採用されている。初年度の総工費は 8 億 8,229 万円で、予算の 10 億円に収まっている。それゆえ、提案された補修計画案は妥当である。また、本解析例では、対象年限を 2 ヶ年とする補修計画案を示したが、個々の橋梁の補修に対して道路網が考慮され、初年度と次年度の 2 ヶ年にわたって適切な工法が採用されていることがわかった。

つぎに、予算を 5 億円とし、補修計画案を探索した。

表-8 RC 床版の維持管理計画案

橋梁番号	健全度ランク	補修時の劣化度	補修時のリスク	予算 5 億円の補修計画案				予算 10 億円の補修計画案			
				補修・補強工法		補修後の劣化度	5 年後のリスク	補修・補強工法		補修後の劣化度	5 年後のリスク
				当年度	次年度			当年度	次年度		
1	Ⅲ	0.42	32.70	—	FRP 接着	0.07	17.45	—	鋼板接着	0.02	17.45
2	V	0.86	100.00	鋼板接着+モルタル吹き付け	—	0.46	38.60	鋼板接着+モルタル吹き付け	—	0.46	38.60
3	Ⅱ	0.32	15.98	—	FRP 接着+モルタル吹き付け	0.00	14.07	FRP 接着+モルタル吹き付け	—	0.00	14.07
4	Ⅳ	0.65	45.00	FRP 接着+モルタル吹き付け	—	0.30	28.33	—	部分打ち換え	0.00	17.11
5	Ⅲ	0.48	29.19	FRP 接着	—	0.13	17.12	部分打ち換え	—	0.00	17.13
6	V	0.83	100.00	部分打ち換え	—	0.18	20.58	部分打ち換え	—	0.18	20.58
7	Ⅲ	0.41	28.66	鋼板接着	—	0.01	16.15	鋼板接着	—	0.01	16.15
8	Ⅰ	0.16	3.71	—	—	0.16	15.87	—	—	0.16	15.87
9	Ⅱ	0.24	8.43	—	—	0.24	20.98	—	—	0.24	20.98
10	Ⅳ	0.64	40.00	部分打ち換え	—	0.00	9.77	部分打ち換え	—	0.00	9.77
11	Ⅲ	0.52	24.68	—	床版増厚+樹脂系接着剤注入	0.00	6.31	—	FRP 接着+樹脂系接着剤注入	0.17	6.11
12	Ⅲ	0.43	25.43	—	床版増厚+樹脂系接着剤注入	0.00	6.92	FRP 接着	—	0.08	8.02
13	Ⅱ	0.28	6.89	FRP 接着+モルタル吹き付け	—	0.00	6.18	FRP 接着	—	0.00	7.41
14	Ⅱ	0.25	6.73	—	鋼板接着+モルタル吹き付け	0.00	3.86	FRP 接着	—	0.00	4.63
15	Ⅲ	0.45	27.05	—	部分打ち換え	0.00	10.40	—	部分打ち換え	0.00	10.40
16	Ⅲ	0.53	30.05	—	部分打ち換え	0.00	13.35	—	部分打ち換え	0.00	13.35
17	Ⅳ	0.64	40.00	—	部分打ち換え	0.00	9.77	—	床版増厚+樹脂系接着剤注入	0.04	8.53
18	Ⅲ	0.51	33.27	—	—	0.51	42.77	—	—	0.51	42.77
19	Ⅲ	0.58	30.76	—	鋼板接着	0.18	18.79	鋼板接着	—	0.18	18.79
20	Ⅲ	0.58	29.19	—	—	0.18	38.75	—	鋼板接着	0.18	17.13
21	Ⅱ	0.31	16.15	—	鋼板接着+モルタル吹き付け	0.00	15.10	FRP 接着+モルタル吹き付け	—	0.00	15.10
22	Ⅰ	0.14	1.78	—	—	0.14	8.96	—	—	0.14	8.96
23	Ⅲ	0.43	26.56	—	縦桁増設+樹脂系接着剤注入	0.00	8.77	部分打ち換え	—	0.00	9.77
24	Ⅱ	0.35	8.43	FRP 接着	—	0.00	10.10	—	FRP 接着	0.00	10.10
25	Ⅳ	0.66	40.00	縦桁増設	—	0.16	10.27	縦桁増設+モルタル吹き付け	—	0.16	8.78
26	Ⅱ	0.38	12.55	—	—	0.38	28.79	—	—	0.38	28.79
27	Ⅰ	0.15	1.69	—	—	0.15	8.65	—	—	0.15	8.65
28	Ⅱ	0.22	12.49	—	FRP 接着+樹脂系接着剤注入	0.00	9.47	鋼板接着+樹脂系接着剤注入	—	0.00	9.47
29	Ⅱ	0.24	11.33	—	FRP 接着+樹脂系接着剤注入	0.00	9.26	FRP 接着	—	0.00	10.87
30	Ⅳ	0.65	46.00	—	縦桁増設	0.15	21.73	縦桁増設	—	0.15	21.73
31	V	0.95	100.00	鋼板接着+モルタル吹き付け	—	0.55	33.18	鋼板接着	—	0.55	34.02
32	Ⅲ	0.41	31.35	—	FRP 接着+樹脂系接着剤注入	0.06	15.18	FRP 接着+樹脂系接着剤注入	—	0.06	15.18
33	Ⅰ	0.13	3.57	—	—	0.13	17.11	—	—	0.13	17.11
34	Ⅱ	0.33	12.97	—	—	0.33	30.68	—	—	0.33	30.68
35	Ⅰ	0.18	1.78	—	—	0.18	8.96	—	—	0.18	8.96

その結果を表-8 に示す。

同表から明らかなように、初年度の総工費は4億9,760万円で、予算5億円に収まっている。また、補修検討時から5年後のリスクの合計は591.63で、予算10億円の場合の562.39と比べて増加している。しかし、橋梁の数が35橋であることを考えると、それほど大きな差ではなく、問題ないと思われる。

橋梁番号3, 12, 14, 23, 28, 29, 30, 32 に対し、予算10億円と5億円の補修計画案の比較を行えば、両者で補修時期に相違がみうけられる。予算10億円では初年度に、予算5億円では次年度に補修される案が提案されている。ただし、工費に約3億円の差異があり、予算規模に左右されることが分かる。橋梁20は、5年後のリスクの相違が顕著である。予算10億円の場合には「鋼板接着工法」で補修する案が提示され、予算5億円では2ヶ年とも補修しない案となっている。また、5年後のリスク

表-9 単年度評価と複数年評価の比較

	単年度評価	複数年評価
当年度総費用(円)	9億9410万	8億8299万
5年後のリスク	629	562
ファジィ推論による適応度	2888.25	3026.25

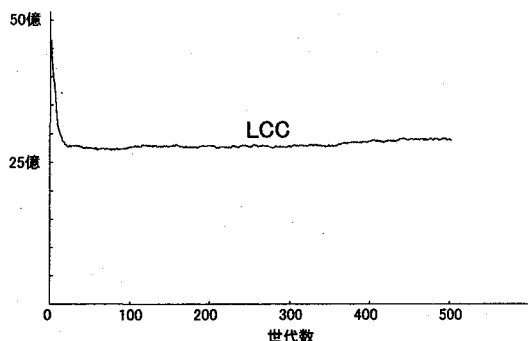


図-8 評価式における分母の変化

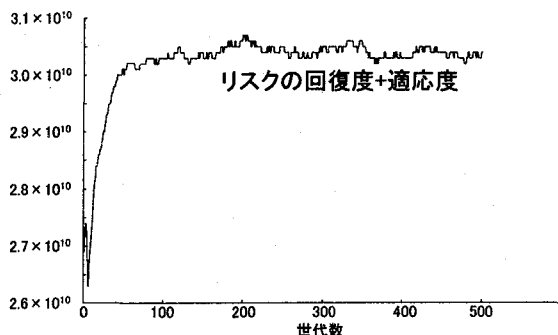


図-9 評価式における分子の変化

を比較すると、予算10億円では17.13であるのに対し、予算5億円では38.75にも上っている。その理由として、この橋梁は劣化の進行が遅いため、予算が10億円であれば補修されても、予算が5億円ではなされないことが考えられる。しかし、予算5億円の場合に「補修しない」が選択されたことが適切であるかどうかは判断しがたい。

つぎに、GAにおける評価値について考察する。図-8と図-9は、予算が10億円の補修計画案を例に、CE式の分子（リスクの回復度(R)と適応度(T)の合計）と分母（LCC）の世代ごとの推移を示す。ただし、分子と分母の値は各世代の平均値である。

本支援システムでは、周辺環境を考慮しながら、補修による効果と経済性の高い補修計画案を作成することを目的にしている。すなわち、5年後のリスクと適応度の和が大きく、LCCが小さい工法が選定される。図-9に示すように、CEの分子は世代とともに増加する。一方、図-8に示すように、LCCの値は世代とともに減少する。これは、工法による効果が上昇し、経済的な解が探索されるというGAの機能が組合せ最適化問題にうまく働いていることを示している。

本支援システムでは、複数年にわたる補修計画を作成した。最後に、複数年にわたった補修と単年度で行った補修との違いを明らかにする。表-9には、単年度補修と複数年補修の計画案に対し、総費用、5年後のリスク、ファジィ推論による工法の適応度を示す。

表-9から明らかなように、総工費は両計画案とも予算に収まっている。5年後のリスクとファジィ推論による適応度は、複数年にわたって補修する方が単年度だけに補修する場合よりも高い値となる。これは、複数年にわたる補修の方が単年度の補修よりも補修の効果が高いことを意味する。したがって、同予算で比較すると、複数年にわたる補修の方が効果的であることがわかる。

5. あとがき

補修計画域内の道路網上に位置する多数の橋梁を対象に、限られた予算内で効率的かつ合理的に補修すべき橋梁ならびにその補修工法が決定できるようなRC床版の補修順位決定支援システムを構築した。

本支援システムの特徴は、以下のとおりである。

- 1) 床版の劣化度をひび割れ密度により算出し、5段階の健全度ランクで区分した。
- 2) 補修工法の選択時に、阪神高速道路公団による床版の経年劣化によるリスクの定量化手法を用いた。
- 3) 橋梁に対する補修工法の選択において、床版のリスクの回復度、工法の周辺状況への適応度、工法の補修費用を勘案し、CEで評価した。
- 4) 大規模組合せ最適化問題の解法に単純GAを適用した。
- 5) 個々の補修工法の損傷橋梁に対する適応度を周辺状況を勘案しながらファジィ推論によって求めた。

- 6) 補修するか否かおよびその工法の選定には、補修対象橋梁の状態だけでなく、道路網をも考慮に入れた。
- 7) 補修時における床版のリスク、補修予算、道路網、ファジィ推論による適応度を最適化問題の制約条件として組み込んだ。
- 本支援システムを損傷橋梁 RC 床版を含む仮想の補修計画エリアに適用し、複数年にわたる補修計画案を提示した。

参考文献

- 1) 三上市藏・江澤義典・田中成典・朝倉隆文：道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷判定と補修工法選定のための知識ベースエキスパートシステム，構造工学論文集，土木学会，Vol.33A，pp.317-326，1987-3.
- 2) 古田 均・渡邊英一・賀 建紅：遺伝的アルゴリズムを用いた RC 床版の維持管理支援ファジィエキスパートシステム，第 2 回ファジィ土木応用シンポジウム講演論文集，pp.27-36，1994-2.
- 3) 足立幸郎・小塚幹夫・水谷 守：経年劣化構造物の維持補修計画最適化に関する研究，JCROSSAR'95 論文集，Vol.3，pp.341-348，1997-12.
- 4) 古田 均・金森敦司・堂垣正博：ライフサイクルコストを考慮した橋梁群の RC 床版の最適維持管理計画支援システムに関する研究，材料，Vol.47，No.12，pp.1245-1250，1998-12.
- 5) 中村秀明・宮本文穂・河村 圭：遺伝的アルゴリズムによる既存橋梁の最適維持管理計画の策定，第 5 回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集，pp.49-54，1997-12.
- 6) 横山功一・安井淳治・ラファエル モンターニョ：チリの橋梁維持補修計画，道路，Vol.649，pp.88-92，1995-3.
- 7) 近田康夫・橋 謙二・城戸孝良・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，pp.151-159，1995-4.
- 8) 宮本文穂・串田守可・足立幸郎・松本正人：Bridge Management System (BMS) の開発，土木学会論文集，No.560/VI-34，pp.91-106，1997-3.
- 9) 日本道路協会編：道路橋補修便覧，1979-2.
- 10) 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，1978.
- 11) 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.419-426，1986-10.
- 12) 足立幸郎・関 惟忠・小塚幹夫・藤井 学・大矢敏雄：点検時期の異なる構造物における補修優先順位の決定手法，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集，pp.806-807，1996-9.
- 13) 日比宗平：ライフサイクルコストリング，日本プラントエンジニア協会，1978-3.
- 14) 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，1992-8.

(平成 11 年 9 月 17 日受付)