

ファジィラーニングとクラシファイアを適用した 橋梁維持管理計画支援システムの構築

Application of Fuzzy Learning and Classifier to Bridge Maintenance Management System

古田 均*・横田知則**・堂垣正博***

Hitoshi FURUTA, Tomonori YOKATA, and Masahiro DOGAKI

*	工博	関西大学教授 総合情報学部	(〒569-1052 高槻市霊仙寺町 2-1-1)
**		関西大学工学部土木工学科	(〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)
****	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 recent years, the emphasis has shifted from the construction of new highway bridges to the maintenance of existing ones. In this study, the probability matrix for predicting a degradation state of bridges is up-dated by using Fuzzy Learning and Classifier. The objective of this study is to develop a decision supporting system for the maintenance program for Reinforced Concrete (RC) decks of highway bridges by using the created probability matrix. The characteristics of the highway network and the concept of life cycle cost are taken into account for selecting an appropriate order of repair for the existing decks. In order to find the practical and rational solution for the maintenance problem, genetic algorithm (GA) is applied to the optimization technique. The change of traffic volume on the highway network by repair is calculated by divide distribution method.

Key Words : *decision-support system, bridge maintenance scheduling, RC bridge deck, life cycle cost, fuzzy learning, classifier, genetic algorithms*

キーワード: 維持管理計画支援システム, 橋梁 RC 床版, ライフサイクルコスト, ファジィラーニング, クラシファイア, 遺伝的アルゴリズム

1. まえがき

社会基盤施設である道路や鉄道などは、人々の生産活動を円滑に進め、豊かな生活を持続する上で必要不可欠な施設である。それを構成する構造物にとって重要なことは、一定の安全性を確保し信頼度を保ち続けることである。そのためには、すべての構造要素が力学的に均整のとれた特性を有し、耐久性に富んでいることであろう。

わが国では、1950年代から始まった本格的な高速道路整備事業に伴って、多くの道路橋が建設されてきた。初期に建設されたものは50年の歳月を経ようとしており、その老朽化が懸念される。さらに、近年では交通量の増加や車輛の大型化なども相まって設計時より厳しい環境下にあるため、その耐久性が心配される。このような状況のもと、維持管理を必要とする橋梁が増えていることは Fig.1 から疑いのない事実である。

わが国では、今日、社会資本整備事業の中で維持管理の

占める割合が年々増加しているが、少子高齢に伴う生産年齢人口の減少や長引く不況による国家の財政が悪化している関係上、維持管理に割り当てられる予算にも限界がある。それゆえ、補修補強が必要な社会基盤施設でもその効果を計ることなく、無計画な維持管理事業は成り立たない。

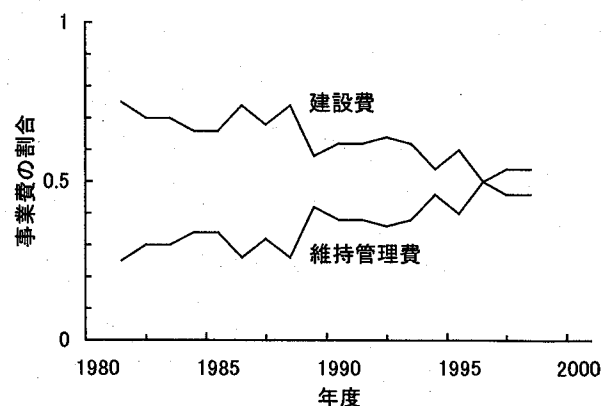


Fig.1 橋梁建設事業に占める建設費と維持管理費の割合

以上のことから、限られた予算を最大限に活用し、市民の満足度を高めた効率的かつ合理的な社会基盤施設の維持管理計画と実施が望まれる。たとえば、橋梁では専門技術者による日常点検や定期点検が行われ、点検データが蓄積され活用されている。しかし、将来の性能がそのデータから正確に推定され、的確な維持管理のためにフィードバックされているとは思われない。それゆえ、点検業務の高度化・合理化、収集された点検データの効率的活用、維持管理事業におけるライフサイクルコスト(Life Cycle Cost : 以下、LCC と称する)の分析などは個々の課題として重要である。さらに、それらを統一的に取り扱い、点検から整備に至るまでを一貫した考えのもとにシステム化し、維持管理を支援することが望ましい。

本研究では、道路橋 RC 床版の維持管理計画をより効果的かつ効率的に立案することを目的に、点検ごとに収集される損傷データを効率的に活用し、将来の RC 床版の性能を予測する機能を有した維持管理計画支援システムを構築する。

2. 道路橋 RC 床版の維持管理計画支援システムの概要

道路橋は通常、通行車両や自然環境などの要因で劣化し、ある限界に達して寿命を迎える。橋梁の維持管理は寿命を迎えるまでに行われるさまざまな行為の総称をいう。橋梁の十分な維持管理は、その寿命を延ばすと同時に、LCC を低減させることに通じる。

本研究における維持管理計画は、道路網上にある橋梁群を対象に、定期点検結果に基づいて橋梁の将来予測を行い、損傷に見合った適切な補修・補強工事計画を立案することにある。計画案は補修橋梁(Which)、補修時期(When)、維持管理工法(How)からなる。維持管理の対象は、橋梁を構成する部材要素のなかでも損傷の著しい RC 床版とする。

維持管理計画支援システムの流れを示せば、Fig. 2 のようになる。すなわち、

①対象エリア、人口、道路網、橋梁群を設定する。

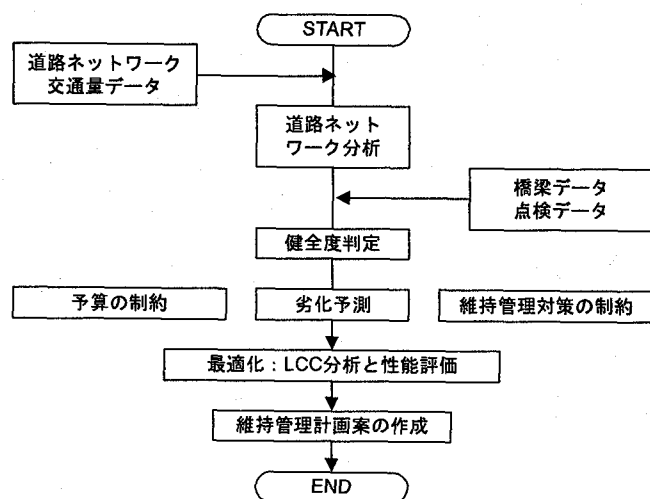


Fig.2 維持管理計画支援システムの流れ図

②道路網の特性を表す道路区間での車線数、距離などのデータと、道路の起点・終点での交通量を総括した OD 表のデータを入力する。

③上述のデータをもとに道路網における交通量を分割配分法で、最短経路の探索をダイクストラ法で行う。

④個々の橋梁の点検データを基に、橋梁の点検時の健全度を評価する。

⑤個々の橋梁における損傷状態とその劣化過程をマルコフ確率過程論に則って遷移確率マトリクスで表現し、橋梁の経年劣化を予測する。しかし、橋梁の劣化を正確に予測することは難しい。ここでは橋梁の点検データを活用した将来予測の改善すなわち点検業務によって得られた損傷データから橋梁の劣化予測に用いられる遷移確率マトリクスの高精度化を試みる。点検業務によって得られたデータは、橋梁の劣化予測を行う上で重要である。それらは専門家の判断によるものであるが、主観的な曖昧さを含んでいる。したがって、主観的な曖昧さを可能な限り客観的な情報に変換しなければならない。そのため、損傷の遷移確率マトリクスの作成にファジィラーニングとクラシファイアシステム¹⁾³⁾を適用する。

⑥道路橋 RC 床版の補修・補強に適用可能な工法は、その立地点や周辺環境などの制約を受ける。工法によっては道路網上の交通流にも影響を及ぼす。周辺住民は工事による騒音や振動などの影響を受ける。従来、重視されてこなかったこのような項目を維持管理計画案の作成時に勘案する。その結果、2 目的関数からなる道路橋維持管理計画の LCC 分析すなわち Cost Effectiveness(CE)を最適化すれば、“Which, When, How” の組合せからなる道路橋の維持管理計画案を立案することができる。複数年にわたる最適維持管理計画案を最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms : 以下、GA と称す) で探索する。

3. 道路橋 RC 床版の損傷と経年劣化

3.1 道路橋 RC 床版の損傷

橋梁点検によって得られた部材要素の損傷割合や損傷種類割合を Table 1 と Table 2 に示す。部材要素の損傷割合を示す Table 1 によれば、RC 床版の損傷は全体の 22% を占め、損傷の著しい部材の一つである。コンクリート部材の損傷には、Table 2 に示すように、床版ひび割れ、遊離石灰、剥離、鉄筋露出などが挙げられ、全体の 2 割程度を占める。

道路橋の構造要素のなかで RC 床版は交通荷重を直接支える部材要素で、繰り返し荷重の影響を常に受ける。RC 床版に起きる損傷はコンクリートのひび割れや剥離、豆板、鉄筋露出、腐食などで、輪荷重の繰り返し载荷によって次第に進展するものが多い。それゆえ、RC 床版の損傷は自然環境による影響に加え、疲労の影響が大きいことから広義の疲労損傷とされる。

Table 1 橋梁における損傷部位
と損傷比率

損傷構造部位	損傷割合 (%)
RC床版	22
斜材・端柱	15
鋼主桁	10
鋼支承	6
鋼横桁	6
縦桁	5
鋼製溶橋防止装置	5
排水装置	4
RC主桁	4
ゴム支承	3
その他	20

Table 2 RC 構造における損
傷種類と損傷比率

損傷種類	損傷割合 (%)
腐食	33
塗装劣化	33
床版ひび割れ	9
遊離石灰	6
ひび割れ	5
剥離・鉄筋露出	5
漏水・滞水	2
変色・劣化	1
土砂詰まり	1
欠損	1
その他	4

Table 3 健全度ランクの総合評価

健全度ランク	運転保安に対する影響	床版の状態	措置
I	現状は無影響	軽微	重点的検査
II	進行すれば、ラ ンク A に至る	進行すれば、ラ ンク A に至る	監視（必要に 応じた措置）
III	将来脅かす	変状の進行、 機能低下の恐れ	必要な時期に 措置
IV	早晚脅かす、異 常外力の作用時 に危険	変状の進行、 機能低下の恐れ	早急な措置
V	危険	重大	直ちに措置

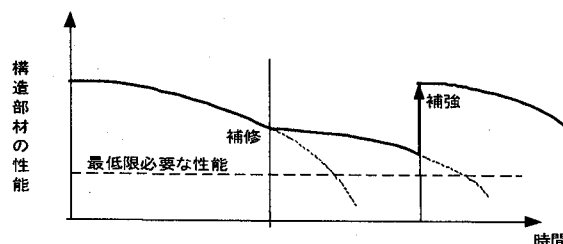


Fig.3 構造物の経年劣化と補修・補強の関係

3.2 健全度ランクの判定

(1) ひび割れの判定

道路橋 RC 床版の損傷状況は、数年ごとに実施される点検によって把握される。その状態が点検データに基づいてランキングできれば、コンピュータ援用による維持管理計画のシステム化が図りやすい。

道路橋 RC 床版の健全度をランキングするため、松井・前田による劣化度判定法^{4) 5)}を用いる。彼らは RC 床版の劣化の進行を知る上でたわみとひびわれ密度 $C_d(\text{m/m}^2)$ が有効であることを疲労試験から得た。すなわち、RC 床版の劣化度 D_c を

$$D_c = \frac{C_d}{10} \quad (1)$$

から求める。なお、RC 床版の使用限界を $10.0(\text{m/m}^2)$ のひびわれ密度とし、劣化度を 1.0 に設定した。

(2) 剥離・豆板・鉄筋の錆の判定

RC 床版に生じる剥離や豆板は、鉄筋の腐食に影響する。鉄筋が腐食し膨張すれば、床版の劣化はさらに進行する。したがって、RC 床版の健全度ランクにかかわる剥離や豆板は、鉄筋の露出度によって行う。また、鉄筋の露出を伴わない剥離や豆板であっても鉄筋の状態が錆などの影響により、黄色い溶出物の沈着が確認される場合は健全度ランクを上位に設定する。

(3) 漏水・遊離石灰の判定

RC 床版は、ひび割れ密度が小さい場合でも輪荷重の繰り返し作用で貫通ひび割れに至ることがある。その結果、遊離石灰の浸出が顕著になる。RC 床版が重度の損傷に至っているかどうかは漏水や遊離石灰の浸出の有無で判断される。ここでは漏水・遊離石灰の判定に日本道路公団の漏水・遊離石灰による判定基準を採用する。

(4) 健全度ランクの総合判定

上述の判定を総合的に評価し、建造物保守管理標準で示

される健全度評価法に従って Table 3 のように健全度を 5 段階に分ける。健全度の評価には上述のひび割れ、剥離、豆板、遊離石灰などの判定基準を利用する。ひび割れ、剥離、豆板、遊離石灰による損傷の判定のうち、損傷が使用限界に近いものを基準に健全度ランクを決定する。

(5) 遷移確率マトリクス

橋梁のような構造物は、繰り返し荷重などの物理的要因と環境などの化学的要因によって、時間とともに性能が低下していくいわゆる経年劣化を引き起こす。この現象は、土木構造物のような長年にわたって使用されるものにとって特に重要である。そのため、定期的に点検を実施し、常に構造物の状態を把握し、必要に応じて補修・補強などの維持管理対策を行わなければならない。

構造物の経年劣化と補修・補強の関係を Fig.3 に示す。図に示すように、劣化する構造物の性能を何らかの方法でモデル化する必要がある。本研究では、RC 床版の経年劣化をマルコフ確率過程論に基づいた遷移確率マトリクスで表す。遷移確率マトリクスは、経年劣化に伴う RC 床版の状態推移がホモジニアスなマルコフ過程にあると仮定し、これを単位時間あたりの変化で表現したものである。遷移確率マトリクスの一例をつぎに示す。

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} & \text{V} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{I} \\ \text{II} \\ \text{III} \\ \text{IV} \\ \text{V} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.81 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.15 & 0.85 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.04 & 0.14 & 0.82 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.01 & 0.15 & 0.78 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.03 & 0.22 & 1.00 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

ここに、I～Vは健全度ランクである。遷移確率マトリクスの各要素 P_{ij} は、経年劣化によって健全度ランクが i から j に遷移する単位時間あたりの確率である。

RC床版の n 年後の状態 $S(n)$ は、遷移確率マトリクス P によって、

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

のように表される。ここに、 $S(0)$ は点検時における RC 床版の健全度ランクを表す単位ベクトルである。点検が行われると、構造物の状態が確定するため、点検時の状態ベクトルは、各ランクでつぎのようになる。

$$\begin{aligned} \text{ランク I : } S(0) &= \{1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}^T \\ \text{ランク II : } S(0) &= \{0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}^T \\ \text{ランク III : } S(0) &= \{0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0\}^T \\ \text{ランク IV : } S(0) &= \{0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0\}^T \\ \text{ランク V : } S(0) &= \{0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1\}^T \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、上添字 t は転置行列を表す。

4. 遷移確率マトリクスの作成方法

4.1 ファジィラーニング

橋梁の点検データは、専門技術家による判断の結果であるものの、主観的な曖昧さを含んでいる。したがって、主観的な曖昧さをできるだけ客観的な情報に変換し、コンピュータ上で系統的に取り扱えるようにしなければならない。本研究では、ファジィの学習能力によって、点検データの主観的な曖昧さを数値化し、クリスプな入力データへ変換する。以下にファジィの手順について述べる。

- 1) プロダクションルールを定める。
- 2) 変数となる言語をメンバーシップ関数で表す。
- 3) 入力に対する各ルールの推論結果を求める。
- 4) 各ルールの推論結果から最終結果を求める。

1) のプロダクションルールは、IF-THEN の形式でつぎのように表される。

$$\begin{aligned} \text{規則 1 : } & \text{IF } x_1 \text{ is } A_1, x_2 \text{ is } B_1 \text{ THEN } F_2 \text{ is } C_1 \\ \text{規則 2 : } & \text{IF } x_1 \text{ is } A_2, x_2 \text{ is } B_2 \text{ THEN } F_2 \text{ is } C_2 \\ & \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (5)$$

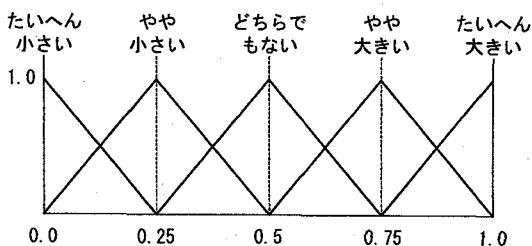


Fig.4 メンバーシップ関数の一例

規則 N : IF x_1 is A_n , x_2 is B_n THEN F_2 is C_n

ここに、前件部の変数 x_1, x_2 は条件変数で、メンバーシップ関数に入力される。後件部の変数 F_i は結論変数である。 A_i, B_i, C_i はそれぞれファジィ集合で、メンバーシップ関数 $\mu_{A_i}(x_1), \mu_{B_i}(x_2), \mu_{C_i}(y)$ をもつ。

プロダクションルールは前件部と後件部に分かれる。前件部の条件を複数個に増やせば、有効な後件部が得られる。また、変数となる言語はひび割れ、遊離石灰、剥離・豆板・鉄筋の錆などの損傷で、それぞれの度合いを 0 から 1 の数値で表す。ここでは前件部のメンバーシップ関数に Fig.4 の関数を用いる。

つぎに、前件部における各条件の度合いのグレード値をメンバーシップ関数によって求める。

$$\begin{aligned} M(t) &= 1 + 2.5t \\ M(t) &= 1 - 2.5t \end{aligned} \quad (6)$$

それぞれの度合いについて求めたグレード値を“AND”演算する。すなわち、各度合いの関数により求めたひび割れによるグレード値、遊離石灰によるグレード値、剥離・豆板・鉄筋の腐食によるグレード値の最小値を求める。最後に、それぞれの度合いに集合“OR”演算を施し、ファジィ集合の重心を解とする。本研究では、Max-Min 法を用い、後件部のファジィ集合を前件部から求めたグレード値で切り取って台形型のファジィ集合を作り、解としてこの集合の和の重心を求める。重心演算は、求める重心を y_0 、横軸を y 、合成したファジィ集合を $\mu(y)$ とすれば、

$$y_0 = \frac{\int y \mu(y)}{\int \mu(y)} \quad (7)$$

で表される。

上述のように求められる重心の値と前述の総合健全度ランクとの対応は、Table 4 のようである。

4.2 クラシファイアシステムの概要

クラシファイアシステムは、Holland によって提案された単純であるが、強力な学習機能を備えた機械学習システムである。それは条件部と結論部によって表現されたルールで構成される。システムの入出力は、すべてメッセージと呼ばれるビット列によって行われる。さらに、クラシファイアシステムにおけるルールは、メッセージに対応させ

Table 4 重心の値 y_0 と健全度ランクとの関係

健全度ランク	重心位置
I	0.0～0.2
II	0.2～0.4
III	0.4～0.6
IV	0.6～0.8
V	0.8～1.0

るため、条件部と結論部はともにビット列で表現される。クラシファイアシステムの概要を Fig.5 に示す⁹⁾。

本研究では、道路橋の周辺環境、RC 床版にかかる荷重、損傷状態などを入力のビット列としてコード化し、また、出力においては一年後における健全度ランクの低下をビット列としてコード化する。なお、クラシファイアシステムの学習機能には、遺伝的アルゴリズムによってルールを生成する部分とバケットブリゲードアルゴリズムによって信頼度を割り当てる部分とがある。

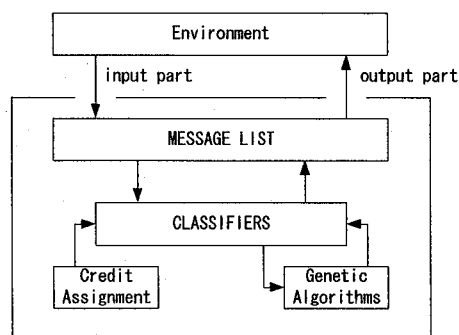


Fig.5 クラシファイアシステムの概要

(1) ルールの生成

ルールの探索には、強度の低いルールを取り換えるため、より見込みのあるルールを発見する必要がある。そのためには、過去の経験に照らし合わせ、明らかに間違っていないと判断できる能力が必要である。クラシファイアシステムでは、各ルールの強度がルールへの適合度であると解釈できる。したがって、このルール集団に遺伝的アルゴリズムが適用できる。既存の有効なルールを利用して新しいルールを生成し、システムが学習を積み重ねることで洗練された的確なルールが作り出される。

(2) 信頼度の割り当て

信頼度の割り当ては、バケットブリゲードアルゴリズムでなされる。バケットブリゲードアルゴリズムは、直接関与したルールを強化するだけでなく、有益な行動を導くようにお膳立てしたルールも強化することができる。そして、ある環境における活性化させるルールの決定に中心的な役割を果たすのが競争である。競争は、主にバケットブリゲードアルゴリズムによって調整されたルールの強度によってなされる。また、ルールの強度は、過去から現在までのシステムに対する有効性を表したものである。

5. 道路橋維持管理計画支援システムに採用された補修・補強工法とライフサイクルコストの算定法

5.1 RC 床版に適用可能な補修・補強工法

RC 床版は橋梁部位の中でも損傷しやすい部材要素で、その耐久性を維持するために補修工

法、補強工法、打ち替え工法などが採用される。

補修工法は、主に劣化の初期段階で用いられる。ここでは“ひび割れ注入工法”と“断面修復工法”を採用する。劣化が進行すれば、補修工法では根本的に解決できず、損傷の原因を取り除くような補強工法が必要となる。ここでは“鋼板接着工法”、“FRP 接着工法”、“縦桁増設工法”、“床版増厚工法”を採用する。劣化がさらに進行すれば、床版の打ち替えが最適な工法となる。実際には上述の工法を複合して用いる場合が多い。補修と補強の複合工法に“鋼板接着工法+補修工法”、“FRP 接着工法+補修工法”、“縦桁増設工法+補修工法”、“床版増厚工法+補修工法”を採用する。

上述の工法が損傷 RC 床版に与える補修効果とその費用を橋梁設計の実務者とのヒアリングから Table 5 のように設定した。補修工法では、遷移確率マトリクスの回復によって経年劣化による損傷速度を減速させることができる。また、補強工法や打ち替え工法では、遷移確率マトリクスの回復だけでなく、劣化度の回復も可能で、RC 床版の状態そのものが改善される。

5.2 道路橋 RC 床版の維持管理における LCC 分析

建設事業における LCC は、「構造物が建設された時から寿命を迎え撤去されるまでの間にかかる費用」で定義できる。すなわち、

LCC=初期投資費用+維持管理費用+更新費用
である。ここに、

初期投資費用：計画・設計・建設にかかる費用

維持管理費用：点検・補修・補強にかかる費用

更新費用：撤去・取り替えにかかる費用

本研究では、橋梁維持管理計画案の評価を Cost Effectiveness の概念に従い、LCC と補修・補強による便益を適用して LCC 分析で行う⁷⁾。すなわち、

$$\text{CostEffectiveness} = \frac{\text{SystemEffectiveness}}{\text{LCC}} \quad (8)$$

Table 5 損傷 RC 床版に適用される補修工法、その補修効果および費用

対策	工 法	効果(回復量)		工 費 (円/㎡)	通行規制日数	GA コード [*]
		D_c	マトリクス			
補修	ひび割れ注入	-	60%	① 24,000	0	000
	断面修復	-	60%	② 14,000	0	
補強	鋼板接着	0.45	45%	③ 73,000	0	001
	FRP 接着	0.35	45%	④ 75,000	0	
	縦桁増設	0.50	35%	⑤ 44,000	0	
	床版増厚	0.60	40%	⑥ 45,000	30	
補強 + 補修	鋼板接着+補修	0.45	75%	③+①or②	0	011
	FRP 接着+補修	0.35	75%	④+①or②	0	
	縦桁増設+補修	0.50	65%	⑤+①or②	0	
	床版増厚+補修	0.60	70%	⑥+①or②	30	
打ち 替え	部分打ち替え	0.65	65%	⑦ 47,000	15	101
	全面打ち替え	1.00	100%	⑧ 47,000	60	

である。ここに、分子の System Effectiveness (以下、SE と称する) は道路網が供用期間中に生む便益である。

また、LCC 分析は将来を考えた長期間に発生する便益と費用を比較しながら行われる。そのため、それぞれの計画案に対して金銭の時間的価値を考慮しなければならない。本研究では、つぎのような係数で金銭の時間的価値を算定する。すなわち、複利係数は、

$$S = (1 + r_p)^y P \quad (9)$$

また、原価係数は、

$$P = \frac{1}{(1 + r_R)^y} S \quad (10)$$

ここに、

- S : y 年後の元利合計
- P : 現在の価値または元金合計
- r_p : 物価上昇年率
- y : 期間
- r_R : 社会的割引率

(1) 橋梁管理機関のライフサイクルコスト分析

本研究では、既設の道路橋 RC 床版を補修の対象とするため、初期投資費用は LCC 分析に含めない。すなわち、過去に支出した費用は考慮せず、将来に発生する維持管理費用と更新費用で LCC 分析を行う。したがって、維持管理計画案 m に占める橋梁 i のライフサイクルコスト LCC_{Ami} は、

$$LCC_{Ami} = \sum_{y=0}^T \left\{ C_{Mmiy} (1 + r_p)^y \frac{1}{(1 + r_R)^y} \right\} \quad (11)$$

から求められる。ここに、

- T : 補修を計画する期間
- C_{Mmiy} : 計画案 m における橋梁 i の y 年後の補修・補強費

つぎに、橋梁を管理する機関が補修・補強によって受ける便益について考える。橋梁の管理者は補修・補強工事によって将来発生する橋梁管理機関の社会的・経済的損失を低減することができる。この損失を正確に算定することは極めて難しい。そこで、補修・補強工事によって生じる期待損失値の低減額を橋梁管理機関の直接的な便益と考える。

構造物の破壊確率を P_f 、破壊による損害を C_{fa} とすれば、橋梁管理機関の期待損失値 C_{RA} は

$$C_{RA} = C_{fa} P_f \quad (12)$$

で求められる。

補修せずに放置したままの部材と補修した部の期待損失値の差がその低減額、すなわち、橋梁管理機関の便益と考える。それゆえ、計画案 m における橋梁 i の便益は

$$SE_{Ami} = \sum_{y=0}^T \left\{ (C_{RLAmiy} - C_{RIAmiy}) (1 + r_p)^y \frac{1}{(1 + r_R)^y} \right\}$$

で求められる。ここに、

SE_{Ami} : 補修計画案 m における橋梁 i の橋梁管理機関の便益

C_{RLAmiy} : 補修計画案 m における橋梁 i において、補修せずに放置した場合の y 年後の期待損失値

C_{RIAmiy} : 補修計画案 m における橋梁 i において、補修した場合の y 年後の期待損失値

したがって、橋梁管理機関のライフサイクルコスト分析で用いる評価式は

$$CE_{Am} = \frac{\sum_{i=0}^{n_b} SE_{Ami}}{\sum_{i=0}^{n_b} LCC_{Ami}} \quad (14)$$

である。ここに、

CE_{Am} : 補修計画案 m の CE 値

n_b : 橋梁の数

(2) 道路利用者のライフサイクルコスト分析

橋梁利用者の LCC は、工事に伴う交通規制による利用者の負担として見積もられる。すなわち、ほとんどが国民の税金で賄われている維持管理業務に伴う諸費用は考慮せず、利用者が直接負担する費用いわゆるユーザーコストを考える。ユーザーコストとは、利用者が交通規制によって新たにこうむる走行距離と走行時間の増加を金銭価値で表現したものである。これらを道路網全体で考え、橋梁利用者の LCC とする。

まず、交通規制による走行距離の増加で生じる負担は、

$$C_{ULmi} = \alpha D \left(\sum_{l=0}^{n_l} Q_{wl} T_{wl} - \sum_{l=0}^{n_l} Q_{ol} T_{ol} \right) \quad (15)$$

から算定される。ここに、

C_{ULmi} : 橋梁 i が交通規制された場合の計画案 m の走行距離増加費用

Q_{wl}, Q_{ol} : 各リンクの交通量 (下添字 W : 交通規制時, O : 通常時)

T_{wl}, T_{ol} : 各リンクの走行時間

n_l : リンクの数

D : 補修・補強による通行止め日数

α : 走行費用原単位

つぎに、交通規制によって渋滞などが発生し、運転者の走行時間が増加することによる費用は、

$$C_{UTmi} = \beta D \left(n \sum_{l=0}^{n_l} Q_{wl} L_l - \sum_{l=0}^{n_l} Q_{ol} L_l \right) \quad (16)$$

から算定される。ここに、

C_{UTmi} : 橋梁 i が交通規制された場合の計画案 m の走行時間増加費用

L_l : 各リンク距離

β : 時間価値原単位

したがって、式(15)と式(16)によって道路網全体における橋梁利用者のLCCが、

$$LCC_{Um} = \sum_{i=0}^{n_b} (C_{ULmi} + C_{UTmi}) \quad (17)$$

から算定される。ここに、

LCC_{Um} : 補修計画案 m のLCC

つぎに、橋梁利用者の便益について、橋梁利用者は橋梁が存在することによって常に負担額に相当する見返りを受けていると考える。それゆえ、橋梁が使用できなくなることで発生する橋梁利用者の被害額 C_{fui} は

$$C_{fui} = n_c (C_{Li} + C_{Ti}) \quad (18)$$

で算定される。ここに、

C_{fui} : 橋梁 i が使用できなくなることによって発生する被害額

C_{Li} : 橋梁 i が存在する場合と存在しない場合について算定した走行距離増加費用

C_{Ti} : 橋梁 i が存在する場合と存在しない場合について算定した走行時間増加費用

n_c : 橋梁が利用できない日数

また、橋梁利用者の期待損失値 C_{RU} は

$$C_{RU} = C_{fui} P_f \quad (19)$$

で求められる。

したがって、補修・補強による期待損失値の減少、すなわち橋梁の破壊確率の減少を橋梁利用者の直接便益と考え、計画案 m における橋梁 i の便益が、

$$SE_{umi} = \sum_{y=0}^T \left\{ (C_{RLumi} - C_{RIumi}) (1 + r_p)^y \frac{1}{(1 + r_r)^y} \right\} \quad (20)$$

から求められる。ここに、

SE_{umi} : 補修計画案 m における橋梁 i における橋梁利用者の便益

C_{RLumi} : 補修計画案 m における橋梁 i を補修せずに放置した場合の y 年後の期待損失値

C_{RIumi} : 補修計画案 m における橋梁 i を補修した場合の y 年後の期待損失値

したがって、橋梁利用者のライフサイクルコスト分析に用いる評価式は、

$$CE_{Um} = \frac{\sum_{i=0}^{n_b} SE_{umi}}{LCC_{Um}} \quad (21)$$

である。ここに、

CE_{Um} : 補修計画案 m のCE値

SE_{umi} : 補修計画案 m における橋梁 i の便益値

LCC_{Um} : 補修計画案 m のLCC値

5.3 損傷 RC 床版への補修・補強工法の適応度

損傷した RC 床版に適用される補修・補強工法がどの程度適応しているかを算定する。すなわち、橋梁 i へ採用する補修・補強工法の適応度 (fitness) F_{Fi} は

$$F_{Fi} = \frac{\sum_{r=1}^{n_r} \sum_{k=1}^5 C_{rk} f_{Firk}}{f_{Fmax}} \quad (22)$$

ここに、

C_{rk} : 補修工法の周辺環境への対応度を与える重み

f_{Firk} : メンバシップ関数に橋梁 i の周辺環境条件を入力して得られる工法の適合度

f_{Fmax} : 橋梁 i の周辺環境における最大適合度

n_r : 考慮すべき環境条件の数

つぎに、RC 床版の損傷度と補修工法との適応性を考える。はじめに、道路橋 RC 床版にその重要度を勘案して持ち点を与える。床版の損傷状態や損傷原因に適合しない工法が選択された場合にはペナルティとして持ち点から一定の点を減ずる。すなわち、

$$F_{Bi} = \frac{\sum_{r=1}^{n_R} (f_{Br} - f_{BD})}{F_{Bmax}} \quad (23)$$

ここに、

f_{Br} : RC 床版の重要度を勘案した持ち点

f_{BD} : 補修・補強工法の RC 床版への不適格を表す総減点数

F_{Bmax} : 橋梁 i への補修工法の最大適合度

n_R : 考慮される損傷状況と損傷原因

したがって、計画案 m の周辺環境への適応度は

$$F_{Tm} = \sum_{y=0}^T \sum_{i=0}^{n_b} (w_A F_{Fiy} + w_B F_{Bi}) \quad (24)$$

ここに、

F_{Fiy} : 補修工法の RC 床版 i に対する適応度

F_{Bi} : 補修工法の RC 床版 i に対する損傷状態と損傷原因への適応度

w : 算定値に対する重み

5.4 大規模組合せ問題の最適化手法

多目的最適化問題において、すべての目的関数を同時に最適化する解すなわち完全最適解は一般に存在しない。この種の問題の場合、複数個の目的関数を一つの関数に置き換えて、通常の数理的手法で解かれる。しかし、多目的最適化問題の本質は、複数個の目的関数間にあるトレードオフの関係をいかにバランスさせるかという点にある。

本研究では、多目的の組合せ最適化問題を解く方法にパレート保存戦略を取り入れた遺伝的アルゴリズム⁸⁾を用いる。ちなみに、パレート最適解とは、“他の目的関数の評価値を悪化させることなく、どの目的関数も改善しえない

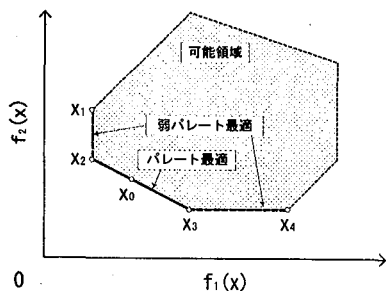


Fig.6 パレート最適解の一例

解集合²⁾ のことである。したがって、ハレート最適解は複数個の解からなり、これを集合として求めることが効率的かつ適切に多目的な意思決定には重要である。

Fig.6 に 2 目的関数の場合におけるパレート最適解の例を示す。図中、 $f_1(x)$ と $f_2(x)$ が目的関数で、これらを最小化することが目的である。実線と破線はそれぞれパレート最適解と弱パレート最適解である。

本研究における目的関数は、

①橋梁管理者の CE 値：式(14)

②橋梁利用者の CE 値：式(21)

③周辺環境、施工条件、立地条件への適応度：式(24)である。

6. RC 床版の維持管理計画支援システムの適用例

6.1 遷移確率マトリクスの妥当性

ファジィラーニングとクラシファイアを適用して改善した遷移確率マトリクスについて検討する。点検データの情報を用いて Table 6 のように仮定する。この場合、遷移確率マトリクスは、

$$P = \begin{bmatrix} 0.88 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.82 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.02 & 0.14 & 0.77 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.04 & 0.17 & 0.73 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.06 & 0.27 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (25)$$

のように求められる。設定したデータでは、8 年目にランク I からランク II へ遷移している。作成した遷移確率マトリクスを用い、7 年目におけるランク I の状態遷移ベクトルは、

$$S = \{0.41 \quad 0.22 \quad 0.37 \quad 0.00 \quad 0.00\}^t \quad (26)$$

のように求められる。上記ベクトルにおいて、ランク I の状態を維持する確率が 0.41 であるのに対し、ランク II やランク III の状態に遷移する確率の合計が 0.59 と高い。遷移確率マトリクスの要素は、8 年目に健全度ランクが低下するデータから得られた値としては妥当のようである。また、他のランクからの遷移状態ベクトルも同様の結果が得られ、遷移確率マトリクスの要素の修正は妥当である。

Table 6 道路橋 RC 床版の点検データの一例

年度	損傷状態	ひび割れ密度 (mm/m ²)	損傷面積 (m ²)	健全度ランク
建設時	損傷なし	0.1	10	I
1	損傷なし	0.3	18	I
2	損傷なし	0.6	37	I
3	損傷なし	1.1	49	I
4	損傷なし	1.4	76	I
5	損傷なし	1.8	107	I
6	損傷なし	2.2	146	I
7	損傷なし	2.7	189	I
8	1 方向ひび割れ	3.2	224	II
9	1 方向ひび割れ	3.7	275	II
10	1 方向ひび割れ, 剥離	4.8	416	II
11	1 方向ひび割れ, 剥離, 遊離石灰	5.3	466	II
12	1 方向ひび割れ, 剥離, 遊離石灰	5.9	522	II
13	2 方向ひび割れ, 剥離, 遊離石灰	6.5	587	III
14	2 方向ひび割れ, 剥離, 遊離石灰	6.9	643	III
15	2 方向ひび割れ, 剥離, 遊離石灰	7.3	698	III
16	亀甲状ひび割れ, 剥離, 遊離石灰	8.1	829	IV
17	亀甲状ひび割れ, 剥離, 遊離石灰	8.5	906	IV
18	亀甲状ひび割れ, 剥離, 遊離石灰	8.9	972	IV
19	使用限界	9.5	1,104	V

6.2 道路網の設定

道路橋 RC 床版の維持管理計画支援システムを実行し、システムの有効性を検討するため、対象とするエリアを設定する。たとえば、大阪市北東部地域をモデル化し、Fig.7 のような対象エリアを想定した。

つぎに、ユーザーコストの算定に必要な時間価値原単位と走行費用原単位について述べる。補修対象エリアにおける道路網でのリンク間の交通量と速度は密接な関係にあり、それは関数化できる。本研究では、交通量と速度との関係に街路橋梁長期計画研究会が採用している Fig.8 の Q-V 曲線を適用する。ここに、 Q_c は各リンク間の可能交通量、 V_{max} は自由走行速度で、

2 車線道路の場合： $Q_c=36,000$ (台/日)、 $V_{max}=50$ (km/h)

1 車線道路の場合： $Q_c=12,000$ (台/日)、 $V_{max}=40$ (km/h)

とした。また、時間価値原単位 β を 82(円/台・分)、走行費用原単位 α を Table 7 のように設定した⁹⁾。

6.3 数値解析結果とその考察

Fig.7 に示す補修対象エリアに存在する 20 橋に対して補修計画を立てる。橋梁の損傷状態を Table 8 のように仮定した。また、

一年間に使用できる予算：5 億円

補修計画の期間 : 5 年
 物価上昇率 : 1%
 社会的割引率 : 5%

とし、予算の制約を満足する最適補修計画案を探索した。ここに、物価上昇率

数値解析を行った結果、本システムで探索された最適な補修計画案を **Table 9** に示す。探索されたパレート最適解の適応度は 82.2、補修費用は初年度に 3 億 7,400 万円、5 年間の総費用は 9 億 9,100 万円であった。また、管理者の期待損失値の改善は 22 億 6,000 万円、利用者の期待損失値の改善は 3,000 億円である。

つぎに、それぞれの橋梁について検討する。

①橋梁 1

多くのパレート解において、鋼板接着工法が 1 年目に選択されている。これは、他の橋梁に比べて劣化の進行が遅く、損傷箇所が少ないため、損傷の著しい橋梁が優先されたものと考えられる。

②橋梁 2

初年度に断面修復工法、翌年度にひび割れ注入工法、3 年目に床版増厚工法と連続して補修が計画されている。橋梁 2 は交通量の多い道路上に位置し、交通流を確保するため、初年度に断面修復工法が応急的な処置として考えられた。その結果、2 年目以降に床版増厚工法などの補強が計画されている。

③橋梁 3

4 年目にひび割れ注入工法で補修される。補修時期に違いがあるが、劣化がそれほど進行しないため、補修工法の適用が最善と考えられる。

④橋梁 4, 11, 17, 19

これらの橋梁には、1 年目に鋼板接着工法+ひび割れ注入工法が計画された。橋梁 4, 19 は利用頻度が高いため、通行規制による損失額と補修効果との比較の結果、それに見合った補修工法が選定された。橋梁 11, 17 は損傷面積が狭く、費用も極めて少額なため、予算の制限に問題のない範囲の補修工法が選定されている。

⑤橋梁 5

初年度に部分打ち替え工法が選択されている。本橋は、国道間の交通を誘導する道路上に架けられているが、通行止めによる損失額が一日あたり 1,100 万円程度であるため、通行止めを伴う工法も選択できたものと思われる。

⑥橋梁 6, 9, 20

初年度に鋼板接着工法が選択されている。鋼板接着工法が橋梁 6 に選択された理由として、本橋の交通量が 28,860(台/日)と極めて多く、橋梁利用者への影響が大きいたことが考えられる。橋梁 9, 20 は劣化が著しく、他のランクへの遷移確率も高いため、早急に補修されたものと考えられる。

⑦橋梁 7, 15

劣化の進行も緩慢であるため、補修がなされない。これは、橋梁管理機関と利用者の期待損失値の上昇率が低い

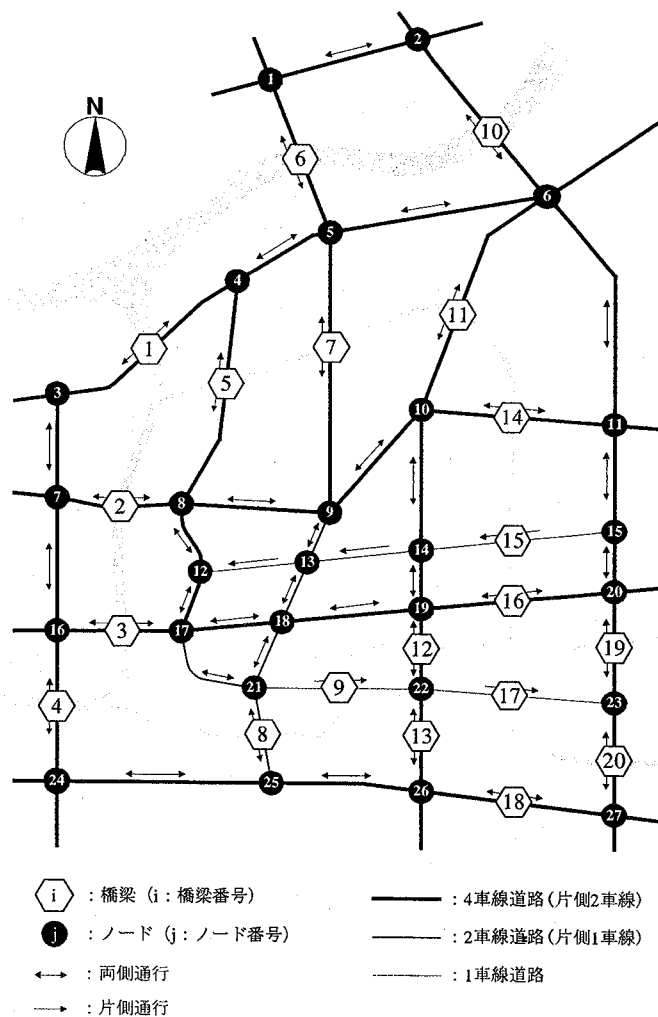


Fig.7 維持管理計画策定エリア

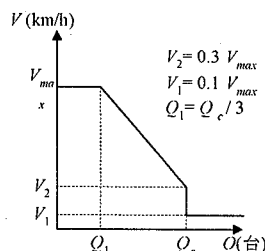


Fig.8 Q-V 曲線

Table 7 走行費用原単位

速度 (km/h)	α (円/台・分)
5	35
10	28
20	21
30	18
40	18
50	18
60	18

ためと考えられる。

⑧橋梁 8, 18

初年度に鋼板接着工法、2 年目に縦桁増設工法が選択されている。橋梁管理機関の CE 値から判断すれば、一度の工事で効果の上がる床版増厚工法が選択されてよいはずである。しかし、多目的最適化の結果、橋梁利用者の CE 値を考慮して上述の工法が選択された。

⑨橋梁 10

2 年目に FRP 接着工法が選択されている。本橋梁は、劣化の進行が遅く、利用率が高いため、予算の制約から工事が後回しになり、通行止めを伴わない工法が選択された。

⑩橋梁 12

Table 8 道路橋 RC 床版の損傷状態, 損傷原因, 損傷規模

橋梁 番号	点検後 の年数	損傷面積 (m ²)	ひび割れ密 度 (m/m ²)	損傷度 ランク	主な損傷状態	主な損傷原因
1	0	712.54	2.1	I	1方向ひび割れ	過大な輪荷重の作用
	3	1,441.80	4.2	II	2方向ひび割れ	
2	0	431.25	4.5	II	剥離	輪荷重走行軌跡による過大モーメントの作用
	3	754.00	7.1	III	漏水・錆の流出, 部分損傷	
3	0	416.00	1.5	I	1方向ひび割れ	
	3	881.72	3.2	II	2方向ひび割れ	
4	0	162.04	3.3	II	2方向ひび割れ, 剥離	過大な輪荷重の作用, コンクリートの品質, 施工不良
	3	233.05	6.9	III	亀甲状ひび割れ, 空洞, 部分損傷	
5	0	217.43	3.8	II	1方向ひび割れ	設計耐力の不足
	1	531.25	8.2	IV	床版陥没, 部分損傷	
6	0	1,306.28	2.2	I	1方向ひび割れ	配力鉄筋の不足
	2	2,058.84	3.2	II	2方向ひび割れ, 豆板, 部分損傷	
7	0	40.53	1.1	I		
	1	82.56	2.1	I	1方向ひび割れ	
8	0	64.97	4.3	II	2方向ひび割れ	輪荷重走行軌跡による過大モーメントの作用
	4	105.91	6.1	III	亀甲状ひび割れ	
9	0	186.77	5.1	II	1方向ひび割れ, 遊離石灰	過大な輪荷重の作用
	4	300.05	8.5	IV	遊離石灰, 漏水, 錆の流出	
10	0	1,390.68	4.8	II	2方向ひび割れ	床版の剛性不足
	2	2,189.46	6.2	III	亀甲状ひび割れ	
11	0	67.24	3.3	II	1方向ひび割れ	過大な輪荷重の作用
	1	104.07	5.1	II	1方向ひび割れ	
12	0	61.54	5.7	II	漏水, 錆の流出	配力鉄筋の不足
	1	123.86	8.3	IV	漏水, 錆の流出, 部分損傷	
13	0	112.46	1.8	I	1方向ひび割れ	
	1	223.65	3.2	II	2方向ひび割れ, 剥離	
14	0	45.36	4.1	II	遊離石灰	過大な輪荷重の作用
	2	93.60	8.1	IV	遊離石灰	
15	0	21.87	2.8	I	1方向ひび割れ	経年による老朽化
	2	39.71	4.4	II	2方向ひび割れ	
16	0	140.95	5.3	II	剥離	輪荷重走行軌跡による過大モーメントの作用, 老朽化
	2	241.50	8.7	IV	漏水, 錆の流出, 剥離	
17	0	19.31	1.6	I		
	2	35.30	2.9	I	1方向ひび割れ	
18	0	325.13	4.7	II	2方向ひび割れ	輪荷重走行軌跡による過大モーメントの作用
	3	542.50	6.9	III	亀甲状ひび割れ, 空洞, 部分損傷	
19	0	76.25	1.9	I	1方向ひび割れ	過大な輪荷重の作用
	2	153.46	3.7	II	2方向ひび割れ	
20	0	121.66	3.6	II	2方向ひび割れ	過大な輪荷重の作用
	2	211.68	6.1	III	亀甲状ひび割れ	

初年度に部分打ち替え工法, その後, ひび割れ注入工法が選択されている。これは一度で十分な効果が得られたためと考えられる。

⑪橋梁 13

2年目に“FRP 接着工法+ひび割れ注入工法”が選択されている。本橋梁は, 劣化の進行が遅く, 利用率が高いため, 予算の制約から後回しになり, 通行止めを伴わないFRP 接着工法が選択された。

⑫橋梁 14

縦桁増設工法, 複合工法などが選択されている。この橋梁は, 劣化度が大きく, 早急な補修が必要とされている。ただし, 4車線の幹線道路上にあり, 通行止めを伴わない工法が選択されている。

⑬橋梁 16

断面修復工法と縦桁増設工法が選択されている。これは管理者, 利用者, 周辺環境の3条件をいずれも満たす案である。

7. あとがき

本研究では、道路橋 RC 床版の維持管理計画をより効果的かつ効率的に立案するために、点検時に収集される損傷データを取り入れた維持管理計画支援システムを構築した。

本研究の主な内容は、つぎのとおりである。

- 1) 道路網上に点在する橋梁群を対象に、複数年を維持管理計画の期間とし、限られた予算の中で効率のよい実施が可能となる道路橋 RC 床版の維持管理計画支援システムを検討した。
- 2) 道路橋 RC 床版の維持管理補修計画を多目的組合せ最適化問題に定式化した。RC 床版の維持管理計画の最適解をパレート保存戦略を取り入れた遺伝的アルゴリズムで求めた。
- 3) 橋梁を管理する機関の LCC、橋梁を含む道路の利用者の LCC、補修工法の損傷橋梁と周辺環境への適応度 (Fitness) を目的関数に、最適解を求めた。ただし、LCC の算定に Cost Effectiveness の評価式を採用した。
- 4) RC 床版の劣化はマルコフ過程論に従うものと仮定し、RC 床版の将来予測に用いられる遷移確率マトリクスをファジィラーニングとクラシファイアによって組み立て、最新の点検データで遷移確率マトリクスを更新する方法を提案した。
- 5) 構築したシステムに仮想地域の道路橋を適用し、それらの維持管理計画を立案した。数値解析の結果から支援システムの妥当性を検証した。

本研究の一部は、関西大学先端科学技術推進機構における平成 14 年度「ライフエンジニアリング研究グループ」からの研究補助によって行った。

参考文献

- 1) 川上 敬・嘉数侑昇：クラシファイアシステムによる自律型ロボットナビゲーション問題に関する研究，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol. 59, No. 564, pp. 75-81, 1993-8.
- 2) 松浦賢一・嘉数侑昇：クラシファイアシステムにおける組織的ルール形成法の構築，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol. 62, No. 601, pp. 179-186, 1996-9.
- 3) Stephane, G., Lionel, P., and Maurice, M. : Dynamic handwriting recognition based on an evolutionary neural classifier, pp. 394-397.
- 4) 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,

Table 9 道路橋 RC 床版の補修・補強工事の一覧

橋梁 番号	初年度	2年目	3年目	4年目	5年目
1		鋼板接着			
2	断面修復	びび割れ注入	床版増厚		
3				びび割れ注入	
4	鋼板接着+びび割れ注入				
5	部分打ち換え				
6	鋼板接着				
7					
8	鋼板接着	縦桁増設			
9	鋼板接着				
10		FRP接着			
11	鋼板接着+びび割れ注入				
12	部分打ち換え	びび割れ注入			びび割れ注入
13		FRP接着+びび割れ注入			
14	縦桁増設	床版増厚+びび割れ注入	FRP接着		
15					
16	断面修復	縦桁増設			
17	鋼板接着+びび割れ注入				
18	鋼板接着	縦桁増設			
19	鋼板接着+びび割れ注入				
20	鋼板接着				

1986-10.

- 5) 石井孝男・谷倉 泉・庄中憲・國原博司・松井繁之：23 年供用した RC 床版の損傷実態・残存疲労寿命と維持管理との関係に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 537/I-35, pp. 155-166, 1996-4.
- 6) 川上 敬・嘉数侑昇：クライシファイアシステムアーキテクチャの進化的合成に関する研究，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol. 62, No. 598, pp. 398-405, 1996-6.
- 7) 能勢善夫・古田 均・堂垣正博：複数年を考慮した道路橋 RC 床版の最適補修計画支援システムの構築，土木学会第 54 年次学術講演会講演概要集，I-A223, pp. 446-447, 2000-2.
- 8) Holland, J. H. : Adaptation in Natural and Artificial Systems, 1993 (嘉数侑昇訳：遺伝的アルゴリズムの理論，森北出版，1999).
- 9) 道路投資の評価に関する指針検討委員会編：道路投資の評価に関する指針 (案)，((財) 日本総合研究所，1998-12.

(2002年9月13日受付)