

因果ネットワークを用いた橋梁劣化要因の推定と維持管理対策の選定

Estimation of Bridge Deterioration Factors using Cause-Effect Network
and Applies to the Selection of Maintenance Measures

鬼丸浩幸*, 宮本文穂**, 中村秀明***, 小野正樹****

Hiroyuki Onimaru, Ayaho Miyamoto, Hideaki Nakamura, Masaki Ono

*学生員 工学士 山口大学大学院 理工学研究科博士前期課程 (〒755-8611宇部市常盤台2-16-1)

**正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611宇部市常盤台2-16-1)

***正会員 博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611宇部市常盤台2-16-1)

****修士(工学) (株)CSK (〒163-0227 東京都新宿区西新宿2-6-1新宿住友ビル)

In order to maintain the bridges effectively, it is necessary not only to restore the damages of bridge but also to suppress the deterioration factors which generate damages. This paper describes the estimation of deterioration factors which is one of the functions in bridge management system (BMS). The function aims to presume factor of deterioration from bridge damages at inspection by using cause-effect network. From the comparison of the results based on this system to some actual in-service bridges with the results of questionnaire surveys to domain experts, it is found that the estimation of deterioration factors can be predicted accurately using this system.

Key Words: Bridges maintenance, BMS(Bridge Management System), Cause-effect Network, Maintenance Measures

キーワード: 橋梁維持管理, BMS (橋梁維持管理支援システム), 因果ネットワーク, 維持管理対策

1. はじめに

現在, 我が国が保有する道路橋の総数は約 60 万橋といわれ, その建設時期が昭和 30~50 年に集中しており, 仮にそれらの供用年数を 50 年とすれば平均的には 12,000 橋の橋梁を毎年更新する必要がある。しかし現在の経済情勢を考えると, このような架け換え計画の実行が不可能であることは明らかである。すなわち, 橋梁は架設の時期から維持管理の時期へと差し掛かっていることは明らかである¹⁾。

このような背景の下, 著者らは橋梁に対する包括的な維持管理業務の支援を行うことのできるシステムとして, 「橋梁維持管理支援システム: Bridge Management System (BMS)」(以下, 本 BMS) の開発を行ってきた^{2), 3)}。

効果的な維持管理を行うには, 損傷を修復することはもちろん, その損傷を発生させている劣化要因を排除・抑制することが重要である。そこで, 本研究では本 BMS に追加する新たな機能として, 点検時に見られた損傷からその劣化要因を推定し, 損傷および劣化要因を考慮に入れた最適な維持管理対策を選定する「維持管理対策選定システム」(以下, 本システム) の構築を試みた。また本システムの実橋

梁への適用として, 実際に専門技術者による橋梁点検を行い, 点検により得られたデータを本システムに入力し, 劣化要因の推定と維持管理対策の選定を行った。さらに, 専門技術者に対してアンケート調査を実施し, 点検を行った橋梁に発生している損傷の劣化要因とその橋梁に対して推奨される維持管理対策を回答してもらった。そして, このアンケート結果と本システムからの出力を比較し, 本システムの妥当性の検証を行った。

2. 本BMSにおける本システムの位置付け

本システムは本 BMS の一機能として開発されており, 本 BMS での位置付けは図-1 のように示される。本 BMS は, まず橋梁諸元および点検データ等の対象橋梁に関するデータが BMS データベースに格納される(図-1 中の①)。次に劣化診断機能により部材の全体的な損傷程度が出力される(②)。その出力を用いて劣化予測機能により劣化予測を行い, 余寿命などを予測する(③)。その際, 余寿命が予定供用年数を満たしていない場合は, 何らかの維持管理対策が必要となるので, メンテナンスプラン最適化機能において維持管理計画を策定する(④)と

いうものであった。しかし、ここで策定される維持管理計画は発生している損傷およびその劣化要因を考慮していないため、システムから出力された対策により損傷を修復しても劣化要因は作用し続ける。そのため、同じ損傷が再び起こる恐れがあり、効率の悪い維持管理対策を出力する可能性があった。そこで、本システムでは現在の損傷状態に即した維持管理対策を選定することを目指した。本システムは、点検時に見られた損傷からその劣化要因の推定を行う「劣化要因推定機能」(⑤)と、その出力から最適な維持管理対策を選定する「維持管理対策選定機能」(⑥)から構成されている。

3. 維持管理対策選定システム

3.1 本システムにおける用語の定義

本システムを構築する際に用いた用語を表-1 のように定義した。

3.2 劣化要因推定機能

本システムは、人工知能の分野で用いられている因果ネットワークを用いて劣化要因の推定を行っている。そこで、因果ネットワークにおいて劣化要因を推定するために用いるルールの抽出方法と表現、推論方法について以下に示す。

(1) ルールの抽出と表現

劣化要因の推定を行うためには、劣化要因を推定するためのルールが必要である。橋梁の劣化要因と

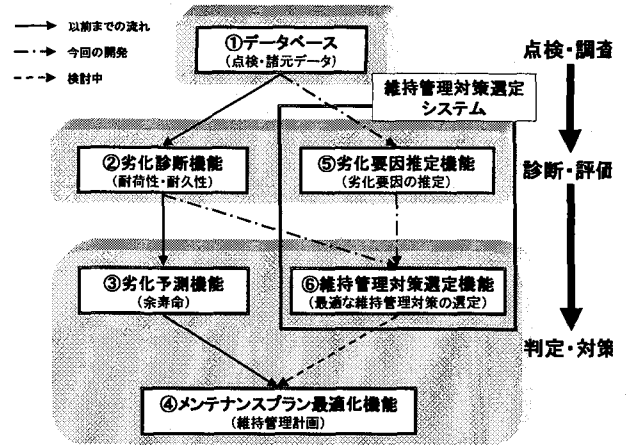


図-1 本BMSにおける本システムの位置付け

その測定方法に関してはこれまでに多くの研究成果が報告されており、本システムを構築する上で必要となる様々な知識〔ルール〕として参考にすることができる。しかし、それらのルールの形式は一定の書式で統一されたものではなく、そのままの形で利用することは難しく、効率が良いとは言えない。例えば、「ひび割れが進行すればコンクリートが剥離する」というように言葉だけで記述されている場合もあれば、「if 発生(ひび割れ) then 発生(剥離)」というように何らかの書式に従って記述されている場合もある。また、この例のように事象の因果関係に関するルールもあれば、「海岸線からの距離が150 m以内であるなら塩害の危険性がある」というよう

表-1 本システムにおける用語の定義

用語	定義
損傷	劣化要因によって部材に発生し、部材の性能を低下させる現象または状態。本研究では、建設省土木研究所「橋梁点検要領(案) ⁴⁾ 」に載っているものに加えて、本研究で独自に追加した損傷を考慮している。
劣化要因	部材に作用することで損傷を引き起こす現象または状態。
事象	劣化要因、または損傷を示す。これは、劣化要因と損傷は実際には明確に区別できるものではないためである。
損傷ランク	損傷の程度(重大性)を示す指標。判定基準には「橋梁点検要領(案) ⁴⁾ 」にあるⅠ～OKの5段階の区分を利用する。
事象の確信度	事象が発生または作用していると考えられる危険性(可能性)を示す指標。0.0～1.0の範囲で示され、確信度が大きいほど危険性(可能性)が高いとみなす。
事象ランク	事象に対する維持管理対策の必要性(重要性)を示す指標。本研究で独自に定義した指標で、維持管理対策選定の際に利用するための事象ランクの重みを持つ。
維持管理対策の効果	維持管理対策を施工することによって対象構造物に発生している損傷が修復されること、または対象構造物に作用している劣化要因が排除または抑制されること。
維持管理対策の主効果	対策の効果の内、ある損傷や劣化要因に効果をあげるために施工される対策本来の効果。
維持管理対策の従効果	対策の効果の内、ある損傷や劣化要因に効果をあげるために施工されるが、他の損傷や劣化要因に効果がある対策の付随的な効果。

な、因果関係とは無関係に劣化要因を推定するルールもある。そこで、本研究においてはこれらのルールを3つのカテゴリーに分けて捉え、それぞれを適宜利用することで、劣化要因の推定を効率良く行うことを試みた。以下に3つのカテゴリー分けについて述べる。

①「因果関係を示すルール」

橋梁部材では、劣化要因が作用することによって損傷が発生する。また、何らかの損傷や劣化要因が作用することにより、別の新たな損傷や劣化要因が発生する。これらの逆を考えることで、何らかの損傷が見られたとき、その発生原因となる劣化要因が推定できるというルールを構成できる。つまり、このカテゴリーでは以上に述べたような劣化要因と損傷との因果関係を表すルールが分類される。以降「①のルール」という記述は、このカテゴリーに属するルールを示す。

例1)「遊離石灰」があるなら、「漏水・滞水」が発生している可能性がある。

例2)「床版ひび割れ」が進行すると「抜け落ち」が発生する。

②「試験結果から劣化要因や損傷の真偽を判定するルール」

劣化要因や損傷が働いているかどうかを判定するため、何らかの試験の結果や、対象橋梁が架設されている環境条件などを用いて劣化要因や損傷の進行状況を推定する方法がある。このカテゴリーでは、このような試験結果や環境条件を用いて劣化要因を推定するルールが分類される。以降「②のルール」という記述は、このカテゴリーに属するルールを示す。

例1) 海岸線からの距離が80mなので塩害の可能性はある。

例2) 塩化物含有量が 1.2 kg/m^3 なので部材内部で塩害による鉄筋腐食が発生している。

③「損傷パターンから劣化要因を推定するルール」

RC 橋梁部材の劣化要因を推定するということは、とりもなおさずひび割れの要因を推定することに他ならない。すなわち、大部分の損傷はひび割れが進行することで発生し、大部分の劣化要因はひび割れを発生させると言える。他の多くの研究によって、何らかの劣化要因が作用して発生したひび割れは、その劣化要因の種類によって様々な特徴を持ったひび割れとなって見られることが報告されている。また、ひび割れ以外の損傷においてもその損傷パターンごとに劣化要因が推定できるといったルールが存在する。以上のように、このカテゴリーでは損傷パターンによって劣化要因を推定するルールが分類される。以降「③のルール」という記述は、このカテ

ゴリーに属するルールを示す。また、このようなルールは条件付きの①のルールと捉えることができる。

例1) ひび割れが配力筋に平行して発生しているので、内部に鉄筋腐食が考えられる。

例2) ひび割れが床版に格子状に拡がっているので、アルカリ骨材反応が作用している可能性が高い。

以上のように、本システムでは3つのカテゴリーに分けたルールを用いて劣化要因の推定を行う。本システムでは、これらのルールをプロダクションルール (if~,then~) の形で用いる。

(2) 暗黙のルールの生成

①のルールに分類されるルールが存在する場合、その因果関係は、「原因→結果」の方向と「結果→原因」の方向の2つの関係に分類することができる。本研究では、前者を「影響の関係」、後者を「要因の関係」と呼ぶ。影響と要因の関係はそれぞれの逆関係であることから、そのルールの方向が影響の関係であれ要因の関係であれ、その逆の方向のルールが存在する可能性があると考えられる。そこで、あるルールをまとめた際にその逆の方向のルールも自動的に生成することができる。このようにして作成されるルールを暗黙のルールと呼ぶ。このルールを事象のもつ影響または要因の関係のルールとして追加することで、①のルールは必ず「影響の関係」と「要因の関係」の二つの方向のルールとなる。すなわち、ルール数が増加し、より深い推論を行うことが可能になる。

(3) 因果ネットワークによる推論機構^{5),6),7)}

劣化要因を推定する際に、数多く存在するルールに対して単純なマッチングを用い、すべてのルールに対して順次推論を行っていくのは効率が悪いと考えられる。そこで、本研究では効率良く推論を行うために、分類されまとめられたルールを一つのネットワークとしてとらえ、これをまとめた因果ネットワークを構築することにより、劣化要因の推論を行った。

まず、それぞれの事象（損傷および劣化要因）に対して全てのルールを参照し、後件部に対象の事象があるかどうかを確認する。後件部にその事象がある場合、そのルールの前件部の事象を対象の事象と関係のある事象として記載する。この操作を全ての事象について行うことで、数種類のルールを持つ事象同士が絡み合った因果ネットワークが構築される。因果ネットワークのイメージを図-2に示す。図中の罫みは事象を示している（四角罫みは損傷、丸罫みは劣化要因）。事象はその確からしさを示す確信度を

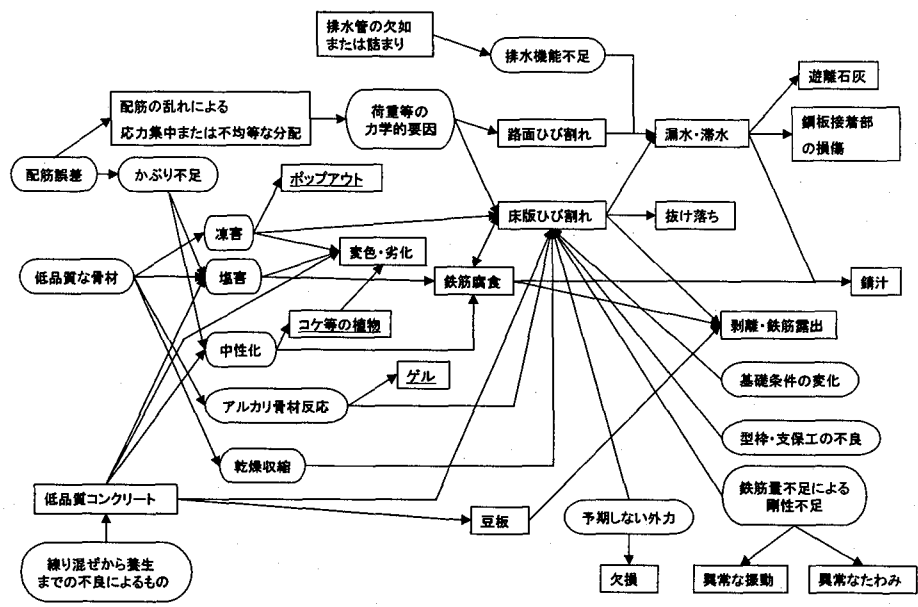


図-2 床版の因果ネットワークのイメージ

表-2 損傷ランクの判定基準

損傷ランク	判定基準
I	損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れがある。
II	損傷が大きく、詳細調査を実施し補修するかどうか検討を行う必要がある。
III	損傷が認められ、追跡調査を行う必要がある。
IV	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある。
OK	点検の結果から損傷は認められない。

持っており、0.0～1.0で表現され、値が大きいほどその事象が発生している可能性が高いことを示す指標である。矢印は事象を結びつけるルールを示している。ルールごとに0.0～1.0で表現されるルールの確信度があり、事象同士の結びつきの強さが設定されている。

(4) 推論の流れ

前節のように構成された因果ネットワークを用いて推論を行う。その推論の流れを図-3に示す。

手順1) 初期化処理, 点検データの入力

初期化処理として全ての事象の確信度はNULL(空)とする。その後、ユーザーによって全ての点検データと損傷ランクが入力される。その際、入力された事象の確信度は点検によって得られた事実であるため1.0として入力される。損傷ランクは損傷の程度(重大性)を示す指標であり、その判定

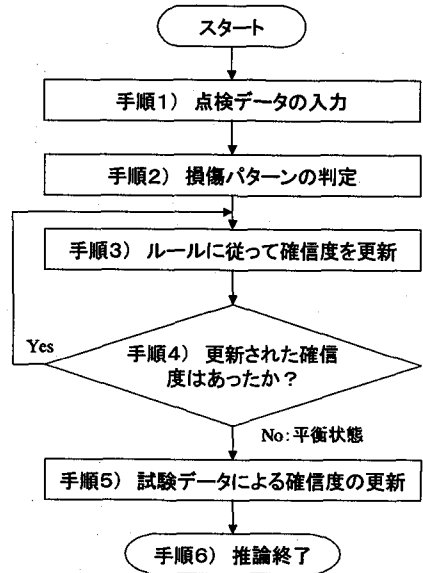


図-3 推論の流れ

には建設省土木研究所「橋梁点検要領(案)⁴⁾」にあるI～OKの5段階の区分を利用する。各区分の判定基準は表-2に示すとおりである。

手順2) 損傷パターンの有無の確認

③のルールに適合する損傷が存在する場合は、対応するルールの確信度を変更量に従って変更する。

手順3) ルールに従って確信度を更新

各事象のもつルール(図-2中の矢印)を参照し、事象の確信度を更新する。後件部の確信度は、前件部の確信度とルールの確信度の積として計算される。複数のルールにより同時に確信度の更新があった場合、最も高い確信度を用いて更新する。

手順4) 更新された確信度はあったか？

因果ネットワーク内の事象全体で、一つでも確信度の更新があったかどうかのチェックを行う。更新があれば、手順3の判定に戻り確信度の更新を続ける。更新がなければ、因果ネットワークが平衡状態になったものとして、手順5に進む。

手順5) 試験データによる確信度の更新

ある程度高い確信度を持つ事象に②のルールが存在している場合は、その試験結果にしたがって確信度を更新する。この②のルールを参照するかどうかのしきい値は、ユーザの手で変更可能になっている。試験結果が存在しない場合は確信度の更新は行われない。

手順6) 推論終了

手順5までを終えると、推論は終了する。その時の各事象の確信度の値が推論の結果である。以下に得られた確信度による出力の意味合いを示す。

- ・ 確信度がNULLの事象は、入力した点検データからでは推論ができなかった事象を示す。
- ・ 確信度が1.0の事象は、点検データとして入力された事実を示す。
- ・ 確信度が0.0より大きく1.0より小さい事象 ($0.0 < CF < 1.0$) は、点検データから推論された事象である。事象が劣化要因である場合は、そのような劣化要因が作用している可能性を示しており、事象が損傷である場合は、そのような損傷が発生している危険性（もしくは損傷がこれから発生する危険性）を示す。

この中で、確信度が0.0から1.0の事象をその事象が損傷であるか劣化要因であるかによって表-3と表-4のカテゴリーに分けて出力し、それを推論結果とする。各カテゴリーは、出力される確信度に関わらずの意味合いを持たせるために設定してある。このしきい値は、著者らが仮定した数値であり、今後専門家へのアンケート調査等を行うことで妥当な数値に近づけていく必要があると思われる。

3.3 維持管理対策選定機能

この節では、まず劣化要因推定機能の出力（事象の確信度）を用いて、対象部材に発生している損傷や作用している劣化要因に対して最適な維持管理対策を選定する流れを示す。また、最適化手法として用いた遺伝的アルゴリズム (GA) についてのコーディング方法、各パラメータについて示す。

(1) 橋梁の維持管理対策選定の流れ

橋梁の維持管理に用いることのできる費用には上限があるため、対象部材に発生している（または発生していると考えられる）損傷や作用している劣化

表-3 推論後の各事象（損傷）の分類

推論後の事象（損傷）の確信度 (CF)	カテゴリー
CF=0.0 (NULL)	発生する危険の少ない損傷
$0.0 < CF < 1.0$	発生している可能性のある損傷
CF=1.0	点検で確認された損傷

表-4 推論後の各事象（劣化要因）の分類

推論後の事象（劣化要因）の確信度 (CF)	カテゴリー
$0.0 \leq CF < 0.25$	作用している可能性の低い劣化要因
$0.25 \leq CF < 0.75$	作用している可能性のある劣化要因
$0.75 \leq CF < 1.0$	間違いなく作用していると思われる劣化要因

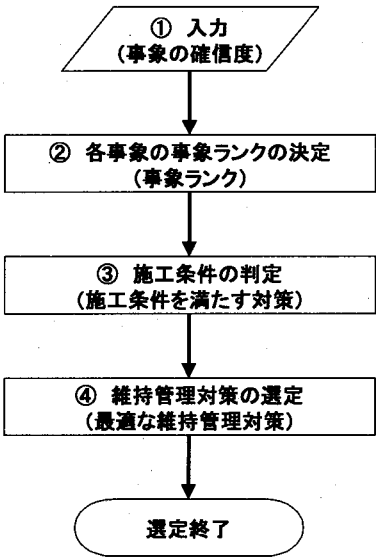


図-4 維持管理対策選定の流れ

要因（または作用していると考えられる）を全てに対して対策を施すことは困難である。よって、橋梁の維持管理対策を選定する際には、それらの損傷や劣化要因の中でより重大ものを修復、排除・抑制する対策を優先的に選択することが重要である。そこで、それらの損傷や劣化要因それぞれについての重要度を設定した。さらに、維持管理対策にはその対策ごとに施工条件があり、橋梁によってはその施工条件を満たせない場合がある。そのような場合は、考慮することのできる対策に制約ができるため、施工条件を満たす対策の中から維持管理対策を策定しなければならない。

以上のことを考慮して、維持管理対策選定機能における維持管理対策選定を行うまでの流れを図-4

に示す。まず入力として劣化要因推定機能において推定された損傷や劣化要因の確信度を受ける（図-4中の①）。②では、より重大な事象に対して優先的に対策を施すために、推定された各事象に対してその重大性（対策の必要性）を示す事象ランクを決定する。③では、考慮している対策から施工条件を満たす対策の判定を行う。④においては、施工条件を満たす対策から事象の確信度と事象ランクを用いて、損傷および劣化要因を考慮した維持管理対策を選定する。以上が維持管理対策を選定するまでの流れである。

(2) 事象ランクの決定

予算内で最適な維持管理対策を選定するには、より維持管理対策を必要とする事象、つまり、対象部材に対してより重大な影響を及ぼす事象に対して効果のある対策を維持管理対策として選定することが重要である。よって、対象部材に対して最適な維持管理対策を選定するためのパラメータとして、劣化要因推定機能によって推定された事象に対して、維持管理対策の必要性（重大性）を示す「事象ランク」を定義した。

劣化要因推定機能によって推定された事象には、

- 1) 点検で確認された損傷
- 2) 点検では確認されていないが発生している（または、発生する危険のある）と思われる損傷
- 3) 作用しているであろう劣化要因

という3種類が含まれている。1)に対しては、点検データの入力時にあらかじめ損傷ランクに対応付けて入力してあるためそのランクを事象ランクとしても用いる。2)に対しては、建設省土木研究所「橋梁点検要領(案)」に記述してある損傷に関しては、その損傷が取りうるランクの中で最もランクの低いものに設定し、記述されていない損傷に関しては、構造力学的に対象部材へ著しく影響を与えらるものに対してはランクⅡ、影響を与えらるものに対してはランクⅢ、構造力学的には影響ないが、美観を損ねたりするような損傷はランクⅣに相当するものと設定した。3)に対しては、表-2の各損傷ランクのほかに劣化要因のランクを設けて、すべての劣化要因はそのランクに属するものとした。

本システムでは、これらの事象ランクに重みを設定することで必要性を考慮した維持管理対策の選定を試みた。維持管理対策を選定する際の目的によって各事象ランクの重みを変更することによって、どの事象ランクを重視した対策を選定するかを変化させることができるようにした。一般に構造物の劣化は、時間に対して3次あるいは4次関数で劣化が進むと考えられるため、損傷が進むほど損傷の進む速

表-5 事象ランクと重み

事象ランク	重み
I	2.0
Ⅱ	1.0
Ⅲ	0.5
Ⅳ	0.2
OK	0.0
劣化要因	1.0

表-6 維持管理対策選定機能で考慮する対策

対策番号	対策名 (対象部材)
1	樹脂注入工法 (主桁, 床版)
2	断面修復工法 (主桁, 床版)
3	表面保護工法 (主桁, 床版)
4	再舗装 (床版)
5	床版上面増厚工法 (床版)
6	床版下面増厚工法 (床版)
7	床版打換え工法 (床版)
8	鋼板 (FRP) 接着工法 (主桁, 床版)
9	プレストレス導入工法 (主桁)
10	強制電気工法 (主桁)
11	表面清掃 (主桁, 床版)
12	排水管設置 (主桁, 床版)

度が速くなると考え、事象ランクの初期設定を表-5に示すように等比級数的に設定した。事象ランクの重みは、橋梁を管理する管理機関ごとに管理基準が異なるため、システム実行時に変更可能としている。例えば、事象ランクⅠの重みを他に比べ大きく設定すると、維持管理対策の選定の際に、事象ランクⅠに対する維持管理対策が選定されやすくなる。また、劣化要因を重視して維持管理対策を選定したいならば、劣化要因に対する重みを上げればよい。また、逆に劣化要因を全く考慮しないで維持管理対策を選定したいならば、劣化要因に対する重みを0.0にすればよい。

(3) 施工条件の判定

まず、施工条件として制約がない場合に維持管理対策選定機能において考慮する対策を表-6に示す。対策名の後の（ ）内は考慮する部材を示す。

施工条件には種々のものが考えられるが、維持管理対策選定機能では「交通規制ができない」という施工条件を考慮する。そして、この条件が生じた場合に施工できなくなる対策を「再舗装」・「床版上面増厚工法」・「床版打換え」とした。また、施工条件ではないが対象橋梁にすでに排水管が設置されている場合には、「排水管設置」という対策を行うことはないため、「排水管が設置してある」という条件も施工条件に加え、この条件が生じた場合に施工できなくなる対策を「排水管設置」とした。

表-7 主桁における各対策の事象に対する主効果、従効果の有無とコスト

対策名	主効果	従効果	コスト(U)
樹脂注入	ひび割れ		23.8
断面修復	欠損、路面ひび割れ、漏水・滞水、塩害、中性化	ポップアウト	14
表面保護	塩害、中性化		25.2
鋼板 (FRP) 接着	鋼板接着部の損傷、鉄筋量不足による剛性不足	異常たわみ、異常な振動、 曲げ応力、せん断応力	75
プレストレス導入	曲げ応力、せん断応力		150
強制電気工法	塩害		30
表面清掃	コケなどの植物、排水管の詰まりまたは欠如、遊離石灰、 錆汁、ゲル状の流出物		5
排水管設置	排水管の詰まりまたは欠如		30

※費用の単位 U(Unit)は $1U = ¥1000/m^2$

次に、ある種の対策には他の対策と組み合わせて施工する必要があるものがある。そのため、それらの対策を施工する際に組み合わせて施工する対策を決定する必要がある。維持管理対策選定機能で考慮する対策の中では、「鋼板 (FRP) 接着工法」を施工する際には、鋼板をコンクリートに接着するための「樹脂注入工法」を組み合わせて施工する必要がある。舗装をはがして施工する必要がある「床版上面増厚工法」・「床版打換え工法」では「再舗装」を組み合わせて施工する必要がある。これらの対策を考慮する時には、必ず組みになっている対策も施工するものとして考慮する。

(4) 維持管理対策選定問題の定式化

ある問題に対して最適解を決定するためには、その問題を最適化する際の評価指標（目的関数）や制約条件の設定が必要であるため、維持管理対策選定問題に対して、最適な維持管理対策を決定するための評価指標（目的関数）や制約条件の設定を行った。

前節までに述べてきたように、維持管理対策を選定するときには、劣化要因の推定は終了している状態であり、各事象に対して確信度が与えられ、各事象は事象ランクに分けられている。さらに、考慮している対策の中で施工条件を満たす対策の判定が行われている。

ここで、維持管理対策の選定を行う際の維持管理者の要求としては、

- ① なるべく多くの損傷を修復、劣化要因を抑制したい。
- ② ある一定の費用におさえたい。またはなるべく費用をおさえたい。

というものが考えられる。そこで、維持管理対策選定問題を「数種類ある対策をどのように組み合わせれば①、②を最も満たせるか」という組み合わせ最適化問題であると考えた。①は維持管理対策の

効果を「対策を施工することによって対象部材に発生している損傷が修復、または作用している劣化要因が排除または抑制されること」と定義していることから、「なるべく維持管理対策の効果を大きくしたい」と言い換えることができ、②は、「維持管理対策に要する費用を予算内に抑えたい。または、維持管理対策に要する費用に対しての効果を大きくしたい。」と言い換えることができる。そこで、制約条件を維持管理対策の施工に要する費用を予算内に抑えることとし、目的関数として対象部材に対する維持管理対策の「効果の最大化」、「費用対効果の最大化」の二つを設定した。ここで、「効果の最大化」とは、維持管理対策を施工することによって部材に発生している損傷・作用している劣化要因へ及ぼす効果を最大化するものであるとし、「費用対効果の最大化」とは、維持管理対策に要する費用に対する維持管理対策の効果を最大化するもの、つまり、維持管理対策を施工することによる効果を維持管理対策の施工に要する費用で割ったものの最大化であるとした。

また、本研究では対策の効果には「主効果」と「従効果」があるとし、前者は、「対策の効果の内、ある損傷や劣化要因に効果をあげるために施工される対策本来の効果」であり、後者は、「対策の効果の内、ある損傷や劣化要因に効果をあげるために施工されるが、他の損傷や劣化要因に効果がある対策の付属的な効果」と定義した。例えば、床版下面増厚工法には主効果として床版が厚くなることによって力学的な劣化要因に効果があり、従効果としてかぶりが厚くなることによって塩害や中性化に効果がある。

次に、維持管理対策の効果を求めるためには、各対策がどの事象に対して効果があるのか、効果があるならばそれが主効果であるか従効果であるかを決定する必要がある。また、維持管理対策の「費用対効果」を求めるためには、維持管理対策に要する費

用を設定する必要がある。そこで、考慮する各対策の事象に対する主効果・従効果、および各対策を施工するために必要な費用を、公団等の平均的な補修・補強実績を基に表-7のようにまとめた^{8),9)}。

次に、目的関数と制約条件を設定する。目的関数は、維持管理対策の対象部材に対する「効果の最大化」と「費用対効果の最大化」の二つがあるため、前者を目的関数 Y_1 、後者を目的関数 Y_2 の最大化とした。維持管理対策の対象部材に対する効果は、損傷の程度（損傷ランク）がひどいほど、損傷が発生しているまたは劣化要因が作用している確信度が高いほど効果がある。さらに、対策の従効果によるものよりも、主効果によるもののほうが効果があると思われるため、主効果と従効果による効果にそれぞれ重みを設定した。また、維持管理対策中の複数の対策が同じ事象に対して効果を持つ場合、損傷に対しては一つの対策によって完全に修復することができ、二つ目以降の対策による効果は無いとし、劣化要因に対しては複数の対策によって別の角度から劣化要因を抑制・排除する効果を期待できるため、効果が小さくなるものの二つ目以降の対策に対しても効果があるとした。さらに、主効果と従効果が同じ事象に効果がある場合は、主効果の効果が優先されるものとした。

以上のことより、維持管理対策選定問題の目的関数、制約条件は以下に示す式となる。

Objective

$$Y_1 = Y_{11} + Y_{12} \rightarrow \text{Max} \quad (\text{効果の最大化}) \quad (1)$$

$$Y_2 = Y_1 / C \rightarrow \text{Max} \quad (\text{費用対効果の最大化}) \quad (2)$$

$$Y_{11} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^S f(l_j) \times A_i \times E_{ij} \times CF_j \times RK_j + \sum_{i=1}^M \sum_{j=3}^S \frac{1}{2^{j-1}} \times A_i \times E'_{ij} \times CF_j \times RK_j \quad (3)$$

$$Y_{12} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^S f(l_j) \times A_i \times E_{ij} \times CF_j \times RK_j + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=3}^S \frac{1}{2^{j-1}} \times A_i \times E'_{ij} \times CF_j \times RK_j \quad (4)$$

Subject to

$$C \leq Bu \quad (5)$$

$$C = \sum_{i=1}^M A_i \times C_i \quad (6)$$

ここで

Y_1 : 維持管理対策の効果

Y_{11} : 維持管理対策の主効果

Y_{12} : 維持管理対策の従効果

Y_2 : 維持管理対策の効果効率

l_j : 維持管理対策の事象 j への効果の重なり回数

$f(l_j)$: 損傷 j に対する効果の重なりによる効果の有無

$$f(l_j) = \begin{cases} 1 & \dots\dots l_j = 0 \text{ のとき} \\ 0 & \dots\dots l_j \geq 1 \text{ のとき} \end{cases}$$

A_i : 維持管理対策に対策 i を含めるかの決定変数

$$A_i = \begin{cases} 1 & \text{: 対策 } i \text{ を含める} \\ 0 & \text{: 対策 } i \text{ を含めない} \end{cases}$$

E_{ij} : 対策 i の事象 j に対する主効果の有無

$$E_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{: 主効果あり} \\ 0 & \text{: 主効果なし} \end{cases}$$

E'_{ij} : 対策 i の事象 j に対する従効果の有無

$$E'_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{: 従効果あり} \\ 0 & \text{: 従効果なし} \end{cases}$$

RK_j : 事象 j のランクの重み

CF_j : 事象 j の確信度

M : 対策数

N : 事象数

S : 損傷数

C : 維持管理対策に要する費用

Bu : 維持管理対策に用いる事のできる予算

C_i : 対策 i に要する費用

(5) 遺伝的アルゴリズムによる最適化¹⁰⁾

本機能での維持管理対策選定問題の最適化手法には、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた。GA は生物の遺伝と進化のメカニズムを工学的にモデル化したものであり、近年組合せ最適化問題を解く手法として注目されている最適化手法である。GA の一般的な操作については他の文献等に譲り、本論文では割愛する。

GA を維持管理対策選定問題の最適化に適応するためには、問題の解の遺伝子へのコーディング、GA の遺伝的操作に関する各パラメータの決定、制約条件や施工条件の GA への適応などを行う必要がある。以下に、維持管理対策選定問題への、GA の具体的な適用方法を述べる。

a) コーディング

M を考慮する対策数とすると、一つの維持管理対策は、遺伝子が M ビットの 2 進数配列として表される。1 ビットは、対応する対策を施工するかどうかを表す。例えば、 m ビット目が 1 であるならば m 番目の対策を施工し、0 であるならば施工しないことを意味する。個体の適応度は、前節で設定した目的関数 Y_1, Y_2 を用いる。つまり Y_1, Y_2 の値が大きいほどその個体の適応度は高くなる。

b) 遺伝的操作のパラメータ

GA の遺伝的操作に関する各パラメータは、表-8 に示すものとした。GA の特徴として、並列的な処理

表-8 遺伝的操作に関する各パラメータ

パラメータ	設定値
発生個体数	100
選択方法	適応度比例方式, エリート保存方式の併用
交叉方法	1点交叉法
突然変異率	5%
終了条件	世代数100に達する

による解探索の高速化があるが、発生個体数を少なくしすぎると、この特徴をうまく発揮することができず、また発生個体数を多くしすぎると、一世代あたりの計算量が多くなり時間がかかるものとなる。そこで、いくつかの実験から個体数を100と決定した。これならば、発生個体数を少なくしすぎることによる初期収束も起こさず、また計算時間もさほど長くないためである。終了条件に対しても100世代に達すれば、ほぼ集団は収束しており、計算時間もさほど長くないためこのような条件とした。選択方法・交叉方法・突然変異率は、一般的に用いられているものを適用した。

c) 制約条件・施工条件

制約条件は維持管理対策に必要な費用を予算内に抑えることである。この条件を満たすため、適応度を計算する前にGAの中で発生したすべての個体に、制約条件を満たすかどうかの判定を行う。制約条件を満たさない個体に対しては、維持管理対策に含まれている対策の中からランダムに1つの対策を削除して費用を減少させる。この操作を繰返すことにより、すべての個体は制約条件を満たすものとなる。

施工条件は、「交通規制ができない」という条件が生じることによって、「再舗装」・「床版上面増厚工法」・「床版打換え」を施工できなくなり、「排水管が設置してある」という条件が生じた場合に施工できなくなる対策を「排水管設置」とした。これらの条件が発生すると、それぞれの条件によって施工できなくなる対策に対応する個体の遺伝子が、強制的に0にされることによってこれらの条件を満たすようにした。

また、対策の組み合わせによる条件は「鋼板（FRP）接着工法」に「樹脂注入工法」を、「床版上面増厚工法」・「床版打換え工法」には、「再舗装」を組み合わせる必要があることから、個体の「鋼板（FRP）接着工法」または「床版上面増厚工法」・「床版打換え工法」に対応する遺伝子が1であるときは、「樹脂注入工法」または「再舗装」に対応する遺伝子を1にすることによって組み合わせ条件を満たすようにした。

図-5 点検結果入力画面

図-6 損傷パターンを入力画面

4. 本システムの実行画面

前節までに述べた概念で実際のシステムを構築し、その実行画面を紹介する。その際、システムとしての実用性を高めるため、簡易なフレームを用いてシステムの構築を試みる。フレーム間は、劣化要因の推定に用いるルールでつながっている。すなわち事象フレーム同士は影響・要因の関係のルールでつながっており、ある要因が結果として出力されたとき、影響の関係をたどることにより、どのような損傷が原因でそのような推論を行ったかを追うことができる。

また、各フレームを個別に参照するだけでなく、何らかの目的にそったフレームのセットを出力することでデータを多角的に利用することができる。現在、システムが出力するフレームのセットとしては、

- ・点検データである損傷一覧
- ・点検データから推測された損傷および劣化要因の一覧

などがある。

以下に、実際に構築したシステムの画面を示す。まず点検データを入力するために対象橋梁を選択し、その後各点検データを入力する（図-5）。ここでは、点検における各損傷の有無を入力し、もし損傷が見られたならばその損傷ランクを入力する。さらに、その損傷に対して試験結果などによるルール（②のルール）やパターン分類によるルール（③のルール）が存在する場合は、図-6の画面などによってそれらのルールに関する質問を行う。全ての点検結果を入力して推論を開始する。推論が終了すると、図-7の画面で推論結果である各事象の確信度が出力される。ここまでが劣化要因推定機能であり、この後に維持

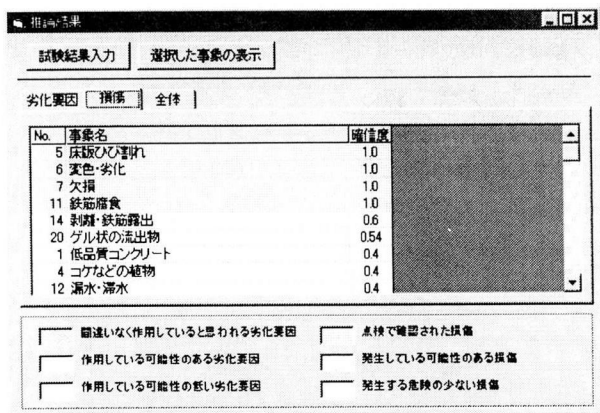


図-7 劣化要因の推定結果画面

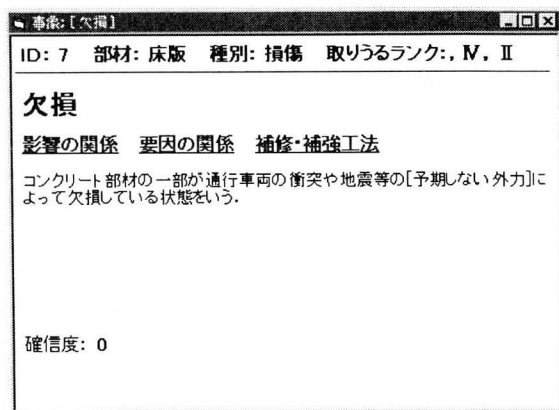


図-10 事象の詳細説明画面

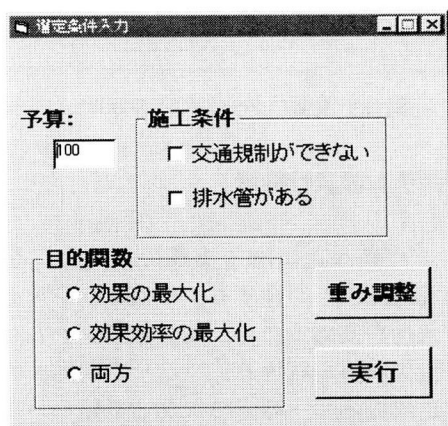


図-8 施工条件・予算・使用目的関数の入力画面

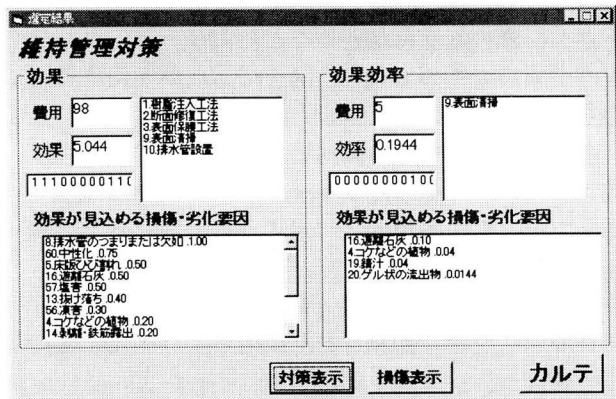


図-9 維持管理対策選定結果の表示画面

管理対策選定機能へと進む。維持管理対策の選定では、まず図-8で予算・施工条件を入力し、さらに最適化に使用する目的関数の選択を行う。また、どのランクの事象を維持管理対策に強く考慮するかの重みの設定も行うことができる。維持管理対策の選定を実行すると、図-9で選定された維持管理対策・その効果・費用・効果のある事象が出力される。また、図-7や図-9の画面では、フレームシステムによって選択した事象の詳細を表示できるようになっている(図-10)。

5. 本システムの実橋への適用と検証

前節までに述べた概念で構築した本システムへの入力である橋梁点検データを得る目的で、山口県内の橋梁に対して専門技術者による点検を行った。そして、その点検データを本システムに入力し劣化要因の推定と維持管理対策の選定を行った。また、本システムの妥当性を検証するために、専門技術者に対してアンケート調査を行い、対象橋梁に対しての劣化要因推定と維持管理対策選定を行ってもらった。

劣化要因の推定結果の一例を表-9に示す。表中の「A~D」は各専門家を表し、下の数字は専門家による回答を示している。専門家へのアンケートは5段階評価(1~5)で実施し、値が大きいほど強く考えられることを示している。「本システム」以下の数字は、本システムによる推論結果の確信度である。これを見ると、全体的に傾向がばらつき、専門家の間でも評価のずれが見られる。また、「排水機能不足」において専門家の多くが5または4と回答しており、強くその劣化要因が示唆されている。これに対して、本システムからの出力では0.90と、高い値を出力しており、比較的うまく推論しているといえる。

次に、予算上限150Uでの維持管理対策の選定結果の一例を表-10に示す。表中の「A~D」は各専門家を表している。「本システム①」は「交通規制が可能」という条件で最適化した結果を示しており、「本システム②」は「交通規制ができない」という条件で最適化した結果を示している。また、本システムから出力された維持管理対策の「I」は目的関数1を用いて最適化した結果を示し、「II」は目的関数2を用いて最適化した結果を示している。専門家の回答中の効果と費用は専門家から得られた維持管理対策を本システムに入力して算出した。これを見ると、専門家の回答した補修工法と同様の対策を本システムも出力しており、さらに、本システムでは床版下面増厚工法を推奨しているが専門家の多くも何らか

表-9 劣化要因の推定結果（床版）の例

劣化要因名	A	B	C	D	本システム
荷重などの力学的要因	3	2	2	3	0.60
練り混ぜから養生までの不良	2	2	3	2	0.14
配筋誤差	3	2	3	2	0.11
かぶり不足	3	3	2	2	0.04
鉄筋量不足による剛性不足	4	2	4	2	0.16
アルカリ骨材反応	2	2	1	3	0.16
塩害	3	2	1	3	0.10
中性化	2	3	1	4	0.10
凍害	3	3	1	3	0.16
低品質な骨材	3	2	4	3	0.14
排水機能不足	5	4	5	4	0.90
予期しない外力(事故,地震等)	3	2	1	3	0.16
型枠・支保工の不良	3	2	1	3	0.16
基礎条件の変化	3	2	1	3	0.16

表-10 維持管理対策の選定結果の例

回答者	維持管理対策	効果／費用対効果	費用（U）
A	床版（床版上面増厚，床版下面増厚， <u>床版打ち換え</u> ，橋面防水工），主桁（断面修復，架け換え）	7.55／0.06	137
B	床版（床版上面増厚， <u>表面保護</u> ， <u>表面清掃</u> ，排水管設置），主桁（断面修復， <u>表面保護</u> ）	3.45／0.02	142.4
C	床版（ <u>鋼板接着</u> ， <u>表面保護</u> ），主桁（ <u>鋼板接着</u> ， <u>表面保護</u> ）	2.42／0.01	200.4
D	床版（樹脂注入），主桁（樹脂注入， <u>断面修復</u> ）	2.20／0.04	61.6
本システム①	I：床版（断面修復，床版打ち換え， <u>表面清掃</u> ，再舗装），主桁（ <u>樹脂注入</u> ， <u>断面修復</u> ， <u>表面保護</u> ， <u>表面清掃</u> ） II：床版（床版打ち換え），主桁（特になし）	9.90／0.13	I：147 II：45
本システム②	I：床版（床版下面増厚，断面修復， <u>表面保護</u> ， <u>表面清掃</u> ），主桁（ <u>樹脂注入</u> ， <u>断面修復</u> ， <u>表面保護</u> ） II：床版（ <u>表面清掃</u> ），主桁（特になし）	4.76／0.11	I：147.2 II：5

* 表中アンダーラインは専門技術者の回答と本システムの出力が一致している部分を示す。

の補強工法を回答している。また，専門家は橋梁の耐水性を向上するために橋面防水工といった本システムでは考慮していなかった工法を回答しているが，本システムでは表面清掃を排水管の詰まりなどを改善するための工法と設定していることから，おおよそ妥当な選定結果が得られているといえる。

6. 結論

本研究は，従来より本研究室で研究してきたBMSの一機能として，「維持管理対策選定支援システム」の開発を行ったものである。このシステムでは，橋梁の点検データをもとに，点検時に見られた損傷の劣化要因と点検時には確認されなかった損傷の発生の危険性を推定し，これらを考慮して限られた予算を最適に活用できる維持管理対策を選定することを目的としている。そのため，劣化要因の推定には劣化要因推定機能を構築し，維持管理対策選定には維持管理対策選定機能を構築した。劣化要因の推定では，推定に関するルールを3つのカテゴリーに分類

して整理する方法を示した。また，暗黙のルールについて説明し，ルール数を増やしてルールを充実させる手法を示した。さらに，これらのルールを組み合わせさせて因果ネットワークを構築することにより，劣化要因の推定と損傷の危険性を推定することを可能にした。維持管理対策の選定では，橋梁部材に対する維持管理対策の効果を定式化し，維持管理対策の選定問題を組み合わせ最適化問題と捉えることで，選定を行うことを可能にした。この際，最適化手法としてGAを用いることで比較的迅速に選定を行うことができた。また，実橋梁点検を行い，専門家に対するアンケート結果と維持管理対策選定システムの出力を比較することにより，本システムの妥当性について検証した。

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- ① 劣化要因に関する様々なルールを3つのカテゴリーに分けて分類・整理する事で，数多く存在する知識をシステム内に取りこむ事を可能にした。また，一つのルールから暗黙のルールを生成することでルール数の充実を図った。さらに，こ

これらのルールから因果ネットワークを構築することで劣化要因の推定，および損傷の危険性の推定を可能にした。

- ② 橋梁部材に対する維持管理対策の効果を定式化し，維持管理対策の選定問題を組み合わせ最適化問題と捉えることで，維持管理対策の選定を行うことを可能にした。また，最適化手法に GA を用いる事で，比較的迅速に選定を行うことができた。
- ③ 専門家による実橋梁調査で得られた点検データを用いて，維持管理対策選定システムにより劣化要因の推定および維持管理対策の選定を行った。その結果，システムからの出力は専門家へのアンケート調査の結果とおおむね一致していたが，ルールの不足による結果の差異も見られた。

参考文献

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.1-10，1994.10.
- 2) 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.
- 3) 宮本文穂，河村圭，中村秀明：Bridge Management System (BMS) を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定，土木学会論文集，No.588/VI-38，pp.191-208，1998.3.
- 4) 土木研究所資料第 2651 号橋梁点検要領(案)，建設省土木研究所，1988.7.
- 5) 上野晴樹：知識工学入門，オーム社，1989.
- 6) 西田豊明：定性推論の諸相，朝倉書店，1993.3.
- 7) 三上市蔵，三木千壽，田中成典，土田貴敬：鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムのための因果ネットワークによる推論手法，構造工学論文集，Vol.36A，1990.3.
- 8) 阪神高速道路管理技術センター：損傷と補修事例に見る道路橋のメンテナンス，1993.3.
- 9) (株)NIPPON P.S：メンテナンス ―補修・補強―
- 10) 原将人：ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム，産業図書，1994.

(1999 年 9 月 17 日受付)