

Bridge Management System (BMS) における 維持管理対策選定システムの開発

河村 圭¹・宮本文穂²・中村秀明³・小野正樹⁴

¹正会員 博士 (工学) 山口大学 VBL 特別研究員 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)

²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 (同上)

³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 (同上)

⁴修士 (工学) ㈱CSK (〒163-0227 東京都新宿区西新宿2-6-1 新宿住友ビル)

本研究は、従来より著者らが開発してきた「橋梁維持管理支援システム (Bridge Management System)」からの出力をより実用的なものにするために、新たに維持管理対策選定システムを開発したものである。このシステムは、点検時に見られた損傷からその劣化要因を推定する劣化要因推定機能および点検時に見られた損傷だけでなく、潜在的に発生する危険性がある損傷と橋梁に作用しているであろう劣化要因 (外力) を考慮した工法選定を行う維持管理対策選定機能を有する。また、開発したシステムを実橋梁に適用し、システムからの出力と専門技術者に対するアンケート結果とを比較することにより、出力結果の妥当性の検証を行っている。

Key Words : BMS(Bridge Management System), maintenance strategy, support system, deterioration cause, causal network, certainty factor, genetic algorithm(GA)

1. 緒言

現在我が国が保有する道路橋の総数は、60万橋を越すと言われており、多くの新設橋梁を架設する時期から既存橋梁の維持管理および更新の時期へと差し掛かっている。しかし、現在の経済情勢ならびに少子化、高齢化の進む社会情勢を考えれば、合理的かつ効率的な補修・補強および架け換え計画の立案が必要不可欠となることは明らかである¹⁾。

このような背景のもと、著者らは、橋梁に対する様々な維持管理業務の支援を可能とする統合型支援システムとして、「Bridge Management System (以下、本 BMS と略記する)」の開発を行ってきた。現段階において本 BMS は、劣化診断機能、補修・補強工法の選定支援機能、劣化予測機能、メンテナンスプラン最適化機能の各機能を有する^{2), 3)}。これらの機能の中で、補修・補強工法の選定支援機能は、その工法の選定に、劣化診断機能において出力される診断項目の出力値を利用することにより、点検を行った時点において適切と思われる補修・補強工法の選定を行っている。しかし、現状の劣化診断機能

は、部材の全体的な損傷状態 (荷重、中性化等による経時的な劣化度) を評価することを主目的とした機能であり、橋梁に発生する損傷にかかわる劣化要因 (外力) すべてを診断項目として評価していない。特に、塩害やアルカリ骨材反応のような化学的劣化要因は、現状では独立した劣化外力として考慮されていない。また、工法選定時にも劣化診断機能の診断項目のみを利用しているため、対象橋梁に発生している個々の損傷レベルおよび劣化要因を考慮した工法の選定を行っていないことから、結果として出力された工法を施工しても修復されない損傷が存在する可能性があるという問題点があった。

そこで、本研究では、本 BMS からの出力をさらに実用的にするためには、損傷を修復することももちろん、損傷を発生させる劣化要因を抑制する維持管理対策工法を選定することが必要であると考え、補修・補強工法の選定支援機能に代わるものとして新たに劣化要因推定機能および維持管理対策選定機能を構築した。なお、本研究では、これら 2 つの機能を合わせたものを「維持管理対策選定システム」と呼ぶ。劣化要因推定機能は、劣化要因の推定に関

わる多くのルールを収集および分類し、推論機構として因果ネットワークを構築することにより、点検時に見られた損傷からその劣化要因を推定するものである。また、維持管理対策選定機能は、点検時に見られた損傷だけでなく、潜在的に発生する危険性がある損傷と橋梁に作用しているであろう劣化要因を考慮した工法の選定を行う。このように維持管理対策選定システムは、維持管理対策工法の選定時に劣化要因を考慮した工法の選定を行えることから、同様な箇所に同じ損傷を繰り返し発生させてしまう工法を選定するという問題を回避することができる考えた。なお、この維持管理対策工法の選定問題は、組合せ最適化問題として捉えられることから、その最適化手法として高速に近似最適解を求めることができる遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm：GA）を用いている。また、本システムを実橋梁に適用し、その結果を専門技術者に対するアンケートより得られた結果と比較することにより、本システムの推論結果ならびに対策工法の選定結果の妥当性を検証した。

2. 維持管理対策選定システムの開発

(1) 本BMSにおける維持管理対策選定システムの位置付け

維持管理対策選定システム（以下、本システムと略記する）は、本BMSが有する機能の1つであった補修・補強工法の選定支援機能に代わるものとして開発された。本BMSにおける本システムの位置付けは、図-1のように示すことができる。

本BMSには、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入力される（図-1中の①）。続いて、劣化要因推定機能では、これらの入力データをもとに現在対象橋梁において発生している損傷および対象橋梁に作用している劣化要因を推定する（③）。同時に、劣化診断機能では、現在の各部材の全体的な劣化度が診断され、維持管理対策の必要性が出力される（②）。これにより何らかの維持管理対策の必要があるとされた場合、維持管理対策選定機能が実行され、点検時点の損傷状況と劣化要因を考慮した補修・補強工法の組合せである維持管理対策を出力する（⑤）。また、劣化予測機能では、劣化診断機能の出力をもとに耐荷性および耐久性の劣化予測が行われ（④）、この結果から対象橋梁の寿命が予定供用年数を満たさないと判断されるとメンテナンスプラン最適化機能において耐荷性および耐久性の劣化を考慮した最適維持管理計画が

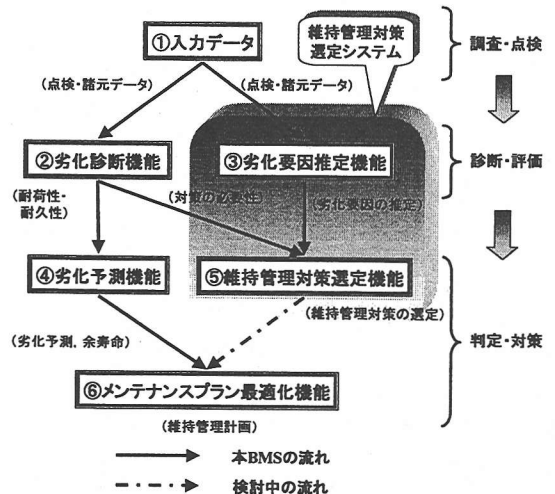


図-1 本BMSにおける維持管理対策選定システムの位置付け

提示される（⑥）。なお、現在は検討段階であるが、ステップ③および⑤の出力を基にした損傷および劣化要因の発生予測手法が確立されれば、現在の耐荷性および耐久性の低下のみに着目した工法選定を実行しているメンテナンスプラン最適化機能に、さらに対象橋梁に作用している劣化要因（外力）などを考慮したメンテナンスプランが策定可能となるであろう（⑥）。なお、本論文では、劣化要因推定機能および維持管理対策選定機能の具体的な構築手法を記述することとし、その他の機能についての詳細は、文献2) および文献3) を参照されたい。

(2) 本システムで用いた用語の定義

劣化要因推定機能で用いる主要な関連用語を、以下のように定義する。なお、これらの用語の中には、一般的でないものもあり、本システムで独自に用いている用語もある。

【損傷】：劣化要因（外力）によって部材に発生する、部材性能を低下させる現象または状態を示す。本研究では、点検の際に参考にした建設省土木研究所資料「橋梁点検要領（案）」⁴⁾に記載し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。本研究で用いた損傷の一覧を表-1に示す。ここで、基本的に要領（案）の損傷を考慮したことからNo.19の「鋼板接着部の損傷」のみ、再損傷の現象を扱っている。本来ならば、再損傷例を挙げると上面増厚および下面増厚の増厚コンクリートの浮き、剥離なども損傷として考慮すべきであるが、本研究では要領（案）に準じているため、考慮していない。
例) 床版ひび割れ、鉄筋腐食など。

表-1 本研究で用いた損傷の一覧

| No. | 損傷名 (部材) | No. | 損傷名 (部材) | No. | 損傷名 (部材) |
|-----|-------------------------------|-----|-------------------|-----|----------------------|
| 1 | 低品質コンクリート (主桁, 床版) | 8 | 欠損 (主桁, 床版) | 15 | 剝離・鉄筋露出 (主桁, 床版) |
| 2 | 配筋の乱れによる応力集中または不均等な分配 (床版) | 9 | 排水管の詰まり または欠如 | 16 | 異常たわみ (主桁, 床版) |
| 3 | ポップアウト (主桁, 床版) | 10 | 路面ひび割れ | 17 | 遊離石灰 (主桁, 床版) |
| 4 | コケなどの植物 (主桁, 床版) | 11 | 豆板・空洞 (主桁, 床版) | 18 | 異常な振動 (主桁, 床版) |
| 5 | ひび割れ (主桁) | 12 | 鉄筋腐食 (主桁, 床版) | 19 | 鋼板接着部の損傷 (主桁, 床版) |
| 6 | 床版ひび割れ (床版) | 13 | 漏水・滞水 (主桁, 床版) | 20 | 錆汁 (主桁, 床版) |
| 7 | 変色・劣化 (主桁, 床版) | 14 | 抜け落ち (床版) | 21 | ゲル状の流出物 (主桁, 床版) |

表-2 本研究で用いた劣化要因 (外力) の一覧

| No. | 劣化要因 (部材) | No. | 劣化要因 (部材) | No. | 劣化要因 (部材) |
|-----|-------------------------------|-----|----------------------|-----|----------------------------------|
| 22 | 荷重などの力学的要因 (床版) | 29 | アルカリ骨材反応 (床版, 主桁) | 36 | 予期しない外力 (事故, 地震等) (床版, 主桁) |
| 23 | 曲げ応力 (主桁) | 30 | 塩害 (床版, 主桁) | 37 | 型枠・支保工の不良 (床版, 主桁) |
| 24 | せん断応力 (主桁) | 31 | 中性化 (床版, 主桁) | 38 | 基礎条件の変化 (床版, 主桁) |
| 25 | 練り混ぜから 養生までの不良 (床版, 主桁) | 32 | 凍害 (床版, 主桁) | / | |
| 26 | 配筋誤差 (床版) | 33 | 低品質な骨材 (床版, 主桁) | | |
| 27 | かぶり不足 (床版, 主桁) | 34 | 乾燥収縮 (床版, 主桁) | | |
| 28 | 鉄筋量不足による 剛性不足 (床版, 主桁) | 35 | 排水機能不足 (床版, 主桁) | | |

【劣化要因 (外力)】：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を示す。漏水のように、損傷でもあり劣化要因でもある現象を区別する必要がある時は、本研究では損傷として区分する。本研究で用いた劣化要因の一覧を表-2に示す。

例) 過大な曲げ応力, 低品質な骨材など。

【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。

例) 剝離・鉄筋露出 (損傷), 過大な輪荷重 (劣化要因), これらは全て事象である。

【損傷ランク】：損傷の程度 (重大性) を示す指標。判定基準には建設省土木研究所資料「橋梁点検要領 (案)」にある I~OK の区分を利用する。各損傷ランクの判定基準は、表-3に示すとおりである。

【事象ランク】：維持管理対策工法を選定する際に考慮する、事象ごとの対策の必要性 (重大性) を示す指標。損傷と劣化要因という似てはいるが完全には同じでない現象を同等に扱うために、本研究で独自に定義した指標。本研究において扱われる損傷お

表-3 損傷ランクの判定基準⁴⁾

| 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の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。 |

よび劣化要因を、基本的に表-3と対応付けたものである。また、これは、維持管理対策工法の選定の際に利用するための事象ランクの重みを持つ。なお、事象ランクの判別方法は、4. (2)に示す。

【因果関係】：劣化要因によって損傷が発生する現象を示す。本研究での劣化要因の推定は、主にこの因果関係から推定しそれぞれの事象間の因果関係が推論に用いるルールとなる。

例) 漏水と遊離石灰には、漏水が発生すると遊離石灰が発生するという因果関係がある。

【様相】：事象の状態を示す。事象が劣化要因なら

表-4 ルールの確信度の値

| ルールの強さ | 確信度の値 |
|--------|-------|
| 必然的 | 0.9 |
| 高い可能性 | 0.6 |
| 可能性 | 0.4 |
| 低い可能性 | 0.2 |

「作用している」という値を持ち、事象が損傷なら「発生している」という値を持つ。本研究では「作用していない」、「発生していない」という様相の値は考えない。これは、推論時に無限ループに陥ることを防ぐためである。

例) ○剥離・鉄筋露出がある, ×剥離・鉄筋露出していない。

【事象の確信度】：事象の持つ様相が考えられる危険性（可能性）を示す値（指標）。本研究では、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。1.0は事実を示すが、0.0は否定的な事実を示すわけではない。0.0は「～ではない」のではなく、「～であるかどうかわからない」ことを示す。

例) 剥離・鉄筋露出の確信度が1.0である。これは、実際に損傷として確認されていることを示す。

【関係（ルール）】：事象と事象をつなぐ因果関係を示す。これが推論に用いるルールである。なお、関係は、関係の強さを表すルールの確信度と、ルールの方向を持つ。

【ルールの確信度】：ルールの持つ確からしさを表し、本推論では、特に事象と事象の因果関係の強さを表す。ルールの確信度としては「必然的」、「高い可能性」、「可能性」、「低い可能性」の4つの強さを考慮する。それぞれの値は0.0～1.0で表され、この値が大きいほど強い関係であることを示す。それぞれのルールの確信度が持つ値は、変更可能としているが、基本値として表-4に示す値を用いている。

例) 遊離石灰が発生していれば、必然的に漏水・滞水が発生している。

【ルールの方向】：対象のルールが「原因→結果」の関係であるか、「結果→原因」の関係であるかを示す。前者の関係を「影響の関係」と呼び、後者の関係を「要因の関係」と呼ぶ。この二つの関係はそれぞれの関係の逆関係にあたる。

例1) 漏水・滞水が発生すると、遊離石灰が発生する。→「影響の関係」。

例2) 遊離石灰が発生していれば、漏水・滞水が発生している。→「要因の関係」。

3. 劣化要因推定機能

本章では、まず始めの機能である劣化要因推定機能を構築するためのルールの分類とその表現方法について説明した後に、より深い推論を行うための暗黙のルールの生成方法について記述する。更に推論を行うための因果ネットワークについて述べ、最後に劣化要因推定機能全体での推論の流れについて説明を行う。

(1) ルールの抽出と表現手法

a) ルールの分類

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。橋梁の劣化要因とその測定方法にはこれまでに多くの研究成果が報告されており^{5),6)}、これらは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）として参考にできる。しかし、それらのルールの記述形式は、統一されたものではなく、そのままの形で一様にルールとして利用することは難しく、また効率が良いとは言えない。そこで、本研究では、これらのルールを3つのカテゴリーに分類し、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。すなわちこれは、一般的には「損傷が進行する」という現象である。さらに、これらの現象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、上述の劣化要因と損傷との因果関係を表すルールを扱う。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) 「遊離石灰」があるなら、「漏水・滞水」が発生している。

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」

劣化要因や損傷が対象橋梁に作用し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⁶⁾。このカテゴリーでは、このような試験結果を用いて劣化要因を推定するルールを扱う。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) 塩化物含有量が1.2 kg/m³なので部材内部

で鉄筋腐食が発生している可能性が高い（塩害が発生している）。

③「損傷パターンから劣化要因を推定するルール」

RC 橋梁の部材の劣化要因を推定することは、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場合が多い⁷⁾。すなわち、損傷の大部分は、ひび割れが進行することで発生し、劣化要因の大部分は、ひび割れを発生させると言える。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言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を扱う。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、これに分類されるルールは、条件付きの①のルールとみなすことができる。

例) ひび割れが床版に橋軸直角方向に発生しているので、その発生要因として荷重等の力学的要因が考えられる。

b) ルール表現

上述したように、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が、本機能内では、これらのルールをプロダクションルールの形で利用している。以下は、何らかのルールが得られた際に、本機能内で用いることのできるルールの形に表現する方法について記述する。

手順1) ルールをカテゴリー分けする

対象のルールが前述した「①のルール」か、「②のルール」か、または「③のルール」かのいずれに分類されるかを見極め、①の場合は手順2)へと進み、②の場合は手順6)へと進み、③の場合は手順8)へとそれぞれ進む。

例1) 塩害や中性化、または床版貫通ひび割れに漏水が生じることにより内部鉄筋に腐食が生じる。 →①であるので手順2)へ

例2) 塩化物含有量が1.2kg/m³なので、塩害が発生している。 →②であるので手順6)へ

例3) 床版ひび割れが、橋軸直角方向に発生しているなら、その発生要因は荷重等の力学的要因が考えられる。

→③であるので手順8)へ

手順2) ルールの方向を判別する

対象のルールが「原因→結果」の方向（影響の関係）であるか、「結果→原因」の方向（要因の関係）かを判別する。これを判別することで以降の手順に影響があるわけではないが、表現したルールをまとめる際や、ルールを実際に用いて推論する際に役に立つ。

例) 塩害や中性化、または路面ひび割れに漏水が

生じることにより内部鉄筋に腐食が生じる。

→「原因→結果」（影響の関係）である。

手順3) 事象と対応させ前件部・後件部を形成する

対象のルールに記述されている用語や状態を、表-1および表-2に示した本推論で用いることのできる事象に対応付けし、これをif-then形式として記述する。なお、if-then形式のルール中に記述してあるandおよびorは論理演算子であり、それぞれandは（～かつ～）を、orは（～または～）を意味している。

例) 塩害や中性化、または床版貫通ひび割れに漏水が生じることにより内部鉄筋に腐食が生じる。

↓←変換すると、

```
・ if 作用 (塩害) or
    作用 (中性化) or
    [発生 (路面ひび割れ) and
    発生 (漏水・滞水)]
  then 発生 (鉄筋腐食)
```

手順4) ルールの分割

本推論では、ルール中にor演算子がある場合、それを境に別々のルールとして分割する。

例) if 作用 (塩害) or
 作用 (中性化) or
 { 発生 (路面ひび割れ) and
 発生 (漏水・滞水) }
 then 発生 (鉄筋腐食)

↓←分割すると、

```
・ if 作用 (塩害) then 発生 (鉄筋腐食)
・ if 作用 (中性化) then 発生 (鉄筋腐食)
・ if 発生 (路面ひび割れ) and 発生 (漏水・滞水) then 発生 (鉄筋腐食)
```

手順5) ルールの確信度を決定する

ルールの関係の強さを表す「ルールの確信度」を決定する。あらかじめ何らかの指針がある場合は、それにしたがってルールの確信度を決定し、ルールの関係の強さに関する指針のない場合は、「可能性がある」という強さに設定する。以上に述べてきたように、①のルールに分類されるルールは、手順2)～手順5)のような手順によって表現される。

例) if 作用 (中性化) then 発生 (鉄筋腐食)

↓←ルールの確信度をつける、

```
if 作用 (中性化) then [可能性] 発生
(鉄筋腐食)
```

手順6) 試験方法を調べその試験結果を区分化する

ルールが、②のルールに分類される場合、まずその試験方法とそこから得られる試験結果を、対象の

事象に及ぼす影響ごとに区分化し、質問とその回答を構成する。

例)

分極抵抗による腐食性判断基準

| 損傷度 | 分極抵抗 R_p ($k\Omega \cdot cm^2$) | 腐食性 |
|-------|-------------------------------------|-----|
| I, II | $R_p \leq 40$ | 大 |
| III | $40 < R_p \leq 60$ | 軽微 |
| IV | $R_p > 60$ | なし |

↓ ← 変換すると、

(質問) 分極抵抗法による試験結果を参照してください。分極抵抗 R_p ($k\Omega \cdot cm^2$) は、以下のどの区分に分類されますか？

A: $R_p > 60$, B: $40 < R_p \leq 60$, C: $R_p \leq 40$.

手順7) 回答後の事象の確信度の変更量を設定する

手順6) で分類した回答の区分ごとに、回答後の事象の確信度の変更量を設定する。その際に、試験による結果が信憑性の高いものであればあるほど変更する値を極端なものにする。また、試験による結果が強く結果を示唆するものでない場合は事象の確信度を変更しない。このように、②に分類されるルールは手順6)、手順7) のような手順によって表現される。

例) 回答ごとの分類 事象の確信度の変更量
 A: $R_p > 60$ 0.2
 B: $40 < R_p \leq 60$ → - (変更なし)
 C: $R_p \leq 40$ 0.9

手順8) 対象のルールを選択し対応付ける

ルールが③のルールに分類される場合、必ずそれに対応する「要因の関係」の①のルールが存在する。すでに対応するルールがある場合はそれに対応付け、ルールがない場合は、手順3) ~ 手順5) にしたがってルールを生成する。

例) 床版ひび割れが、橋軸直角方向に発生しているなら、その発生要因は荷重等の力学的要因が考えられる。

↓ ← 対応する①のルール、
 床版ひび割れが発生している場合、その発生要因は荷重等の力学的要因である可能性がある。

手順9) 対応するルールの確信度の変更量を設定する

ルールの前件部である損傷パターンにマッチした場合の、対応するルールの確信度の変更量を設定する。損傷パターンが見られた場合には、その劣化要因が強く示唆されるものとして、ルールの確信度の値を強くするように変更量を設定する。

例) 床版ひび割れが発生していた場合、その発生

要因が荷重等の力学的要因である[可能性]がある。

↓ 損傷パターンが確認された場合、[可能性]を [高い可能性]に変更、

床版ひび割れが、橋軸直角方向に発生していた場合、その発生要因は[高い可能性]で荷重等の力学的要因である。

以上のような手順により、これまでの研究などで得られてきた数多くある知識や経験を本推論で用いることのできるルールの形に表現することが可能となる。

さらに、①のルールに分類されるルールが存在する場合、影響の関係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すなわち暗黙のルールが存在すると考えることができる。そこで、本研究では、この暗黙のルールを生成することによるルール数の増加をはかり、より深い推論を可能とした。なお、具体的な暗黙のルールの生成方法は、文献8を参照されたい。

(2) 因果ネットワークによる推論機構

a) 因果ネットワークの構築

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、効率よ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⁹⁾を構築することにより、劣化要因の推論を行うことを試みた。

因果ネットワークの構築では、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、事象同士が絡み合った因果ネットワークが構築される。図-2は、床版における因果ネットワークの例である。ここで、図中の囲みは、事象を示している(丸囲みは劣化要因、四角囲みは損傷)。この因果ネットワークを利用した推論後の各事象は、その確からしさを示す確信度を持っており、0.0~1.0で表現され、値が大きいくほどその事象が発生している可能性が高いことを示す。また、図中の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、

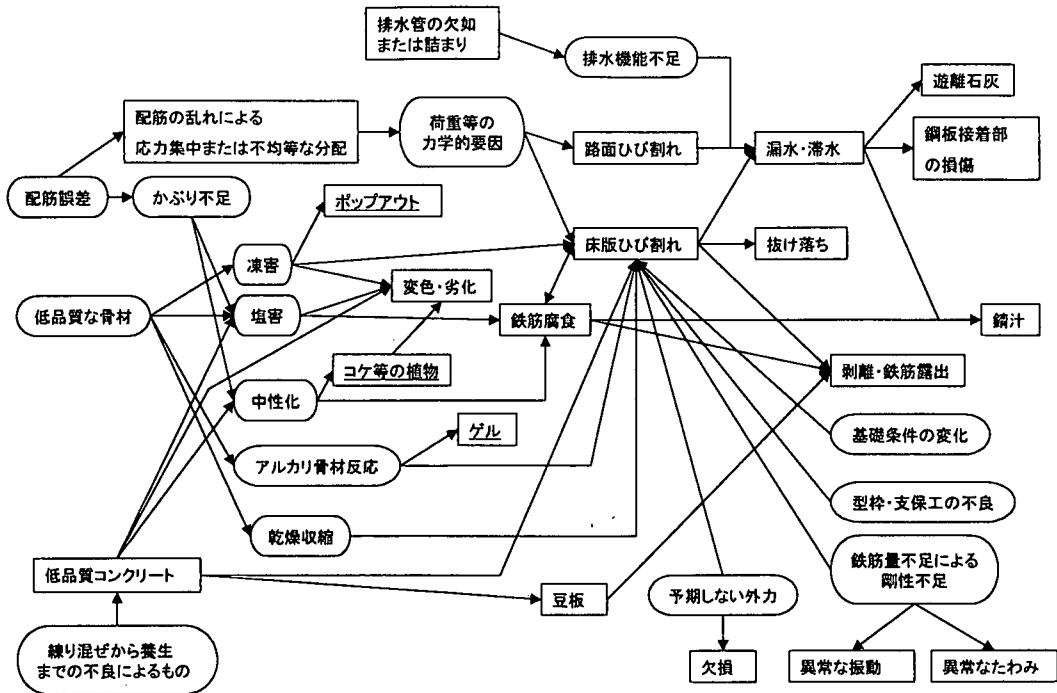


図-2 床版における因果ネットワークの例

事象どうしの結びつきの強さが設定されている。なお、矢印の順方向は、「影響の関係」を示し、逆方向は「要因の関係」を表している。なお、図-2は、これまでに報告されている研究成果^{5), 6), 7)}を参照することにより、著者らが独自に作成したものである。したがって、信頼性の高い推論を行うには、今後さらにネットワークの修正や事象の追加および変更が必要であろう。

b) 推論手法

劣化要因推定機能における推論は、基本的に前節で説明した因果ネットワークを用いて行う。図-3は、本機能における推論の流れを示す。

手順1) 点検データの入力

ユーザーにより、建設省土木研究所資料「橋梁点検要領(案)」⁴⁾に従って行われた対象橋梁の点検データと損傷ランクが対応する事象に入力される。その際、「損傷あり」と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。なお、損傷ランクについての詳細は、次章で述べる。

手順2) 損傷パターンの有無の確認

手順1)において「損傷あり」と入力された事象のうち、③のルールに適合する損傷が存在する場合は、損傷パターンに関する入力をユーザーに求め、

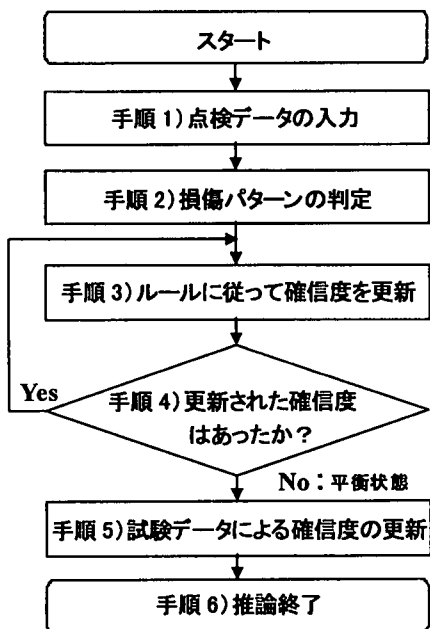


図-3 推論の流れ

入力があった場合は、対応するルールの確信度を事前に設定されている確信度の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①のルール(図-2中の矢印)を参照し、事象の確信度を更新する。以下に、事象の確信度を計算する手法を示す。

- ・後件部の事象の確信度は、前件部の事象の確信度とルールの確信度の積として求められる。
- ・前件部において and 演算子がある場合、前件部の事象の確信度は前件部の要素であるそれぞれの事象の持つ確信度の中で、最も小さい確信度を用いる。
- ・同一の事象に対して、複数のルールから確信度の更新がある場合は、最も高い確信度を用いて更新する。

この確信度の計算方法を用いて計算を行うと、対象の事象に関するルールの中で最も可能性の高いルールを支持した値が出力される。これは、事象に対して一つだけルールがマッチしている場合と、複数のルールがマッチしている場合とでは、その値が変化しないことを意味している。このことを考慮して、複数のルールによって支持される事象には上乗せの確信度を考慮した計算方法も存在するが、本研究で適用している推論過程では、無限ループに陥る可能性が高いため、上記の計算方法を用いている。

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

各事象に②のルールが存在している場合には、本システムは、ユーザーに対して試験結果の入力を求め、その試験結果にしたがって事象の確信度を更新する。試験結果が存在しない場合は、事象の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。この時点での各事象の確信度の値が、最終的な推論の結果となる。なお、確信度がNULL(0.0)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。また、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。さらに、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(外力)の場合は、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。

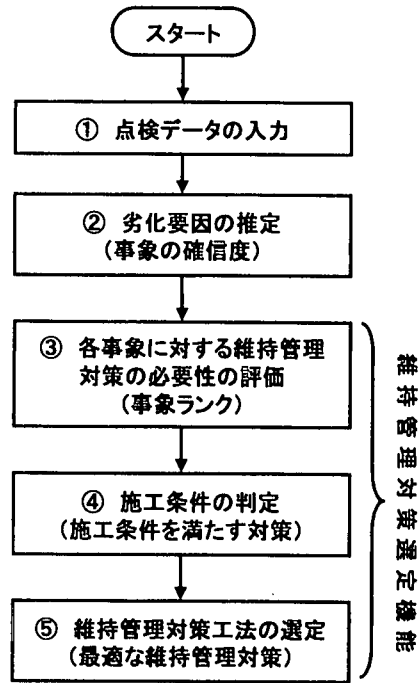


図-4 維持管理対策工法の選定までの流れ

4. 維持管理対策選定機能

本章では、維持管理対策選定機能における橋梁の維持管理対策工法の選定問題について記述する。ここでは、この問題を組合せ最適化問題として捉え、目的関数と制約条件の設定を行い、定式化する。更に、この組合せ最適化問題を解く最適化手法として用いたGAの説明を行い、本問題へ適用するためのコーディング方法について述べる。

(1) 橋梁の維持管理対策工法選定の流れ

図-4には、本システムにおける維持管理対策工法の選定を行うまでの流れを示す。

図-4中のステップ①では、基本的に建設省土木研究所資料「橋梁点検要領(案)」⁴⁾に従った主として目視点検より得られた点検データが、本システムに入力される。ステップ②では、ステップ①で入力されたデータから、対象橋梁に発生しているであろう損傷および作用しているであろう劣化要因を推定し、事象(損傷と劣化要因)が発生している確からしさを表す確信度を出力する。これは、前章において述べた劣化要因推定機能による劣化要因の推定結果である。ステップ③では、ステップ②において推

定された各事象の事象ランクより、対象橋梁に発生している事象に対する維持管理対策の必要性を評価する。なお、事象ランクおよび維持管理対策の必要性の評価方法については、次節を参照されたい。ステップ④では、本システムから推奨される工法として考慮される対策工法から施工条件を満たす工法の判定を行う。ここでは、例えば、対象橋梁において交通規制が出来なければ床版上面増厚、再舗装、床版打換えは対策工法として考慮できないといった判定を行う。ステップ⑤では、施工条件を満たす対策工法からステップ③の出力である維持管理対策の必要性および維持管理対策工法の効果を考慮した工法の選定を行う。

(2) 各事象に対する維持管理対策の必要性評価手法

予算や交通条件などの制約条件から最適な維持管理対策工法を選定するには、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、それを修復、排除または抑制する効果のある対策工法を優先的に維持管理対策として選定することが重要である。本研究では、対象部材に対して最適な維持管理対策工法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、事象発生の重大性の程度を示す「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る事象には、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、および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、その損傷の程度が点検データの入力時にあらかじめ損傷ランク（表-3を参照）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、その損傷が建設省土木研究所資料「橋梁点検要領(案)」⁴⁾に記述してある損傷に関しては、その損傷が取りうる損傷ランクの中で最もランクの低いものを、その損傷の損傷ランクと考え、これを事象ランクとして用いる。また、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と思われるものに対してはランクⅡ、影響を与えらると思われるものに対してはランクⅢ、構造力学的には影響がないが、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、初期設定において現在のところすべてランクⅡに属するとした。

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維持管理対策の必要性の程度を考慮した維持管理対策工法の選定を行う。これにより、維

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 |

注) 初期設定では、劣化要因はランクⅡに属する。

持管理対策工法を選定する際の目的に応じて各事象ランクの重みを変更することによって、特定の事象ランクを重視した対策工法の選定が可能となる。初期設定では、表-5に示される事象ランクの重みが設定してあるが、これはシステム実行時に変更可能としている。例えば、劣化要因を重視して維持管理対策工法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工法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。なお、各事象に対する維持管理対策の必要性は、次式により評価される。

$$[\text{事象 } j \text{ に対する維持管理対策の必要性}] = CF_j \times RK_j \quad (1)$$

ここで、

CF_j : 事象 j の確信度

RK_j : 事象 j の事象ランクの重み

(3) 施工条件の判定

具体的な維持管理対策工法を選定する際には、対象となる対策工法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、維持管理対策工法の選定時に考慮することのできる対策に制約ができるため、システムは、施工条件を満たす対策の中から維持管理対策工法を選定しなければならない。本研究では、維持管理対策選定機能で考慮する床版・主桁それぞれに対する施工条件を現在のところ次のように設定している。施工条件として「交通規制ができない」という条件を考慮し、この条件が生じた場合に施工できなくなる工法を「再舗装」、 「床版上面増厚工法」および「床版打換え」の3種類とした。また、施工条件ではないが、すでに対象橋梁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。

さらに、維持管理対策工法の選定時に注意すべきことは、ある対策工法は、他の対策工法と組合せた

表-6 床版における各対策工法の事象に対する主効果, 従効果の有無と費用

| No. | 対策工法名 | 主効果(床版) | 従効果(床版) | コスト(U) |
|-----|-------------|-----------------------|---------|--------|
| 1 | 樹脂注入 | 6 | | 23.8 |
| 2 | 断面修復 | 8, 11, 15, 30, 31 | 3 | 14.0 |
| 3 | 再舗装 | 10 | | 15.0 |
| 4 | 床版上面増厚 | 16, 18, 22, 28 | 2 | 43.0 |
| 5 | 床版下面増厚 | 16, 18, 22, 27, 28 | 30, 31 | 35.0 |
| 6 | 床版打換え | 36, 38以外 | | 45.0 |
| 7 | 表面保護 | 30, 31 | 32 | 25.2 |
| 8 | 鋼板 (FRP) 接着 | 6, 16, 18, 19, 22, 28 | 2 | 75.0 |
| 10 | 電気防食工法 | 30 | | 30.0 |
| 11 | 表面清掃 | 4, 9 | | 5.0 |
| 12 | 排水管設置 | 9 | | 30.0 |

注 1) No. 8 の鋼板接着工法は、樹脂注入工法と一体工法であることから、主効果として 6 を考える。

注 2) No. 11 の表面清掃の効果 9 は、対象橋梁に排水管が設置されてある場合のみ考慮する。

施工が必要とされる場合があることである。維持管理対策選定機能において考慮される工法の中では、舗装を一度取り除いて施工する必要のある「床版上面増厚工法」および「床版打換え工法」は、「再舗装」を組合せて施工する必要がある。このように、これらの対策工法を考慮する際には、必ず対になっている工法も施工するものとして考慮される。

(4) 維持管理対策工法の効果

本研究では維持管理対策工法の効果には「主効果」と「従効果」があると仮定した。前者は、「ある特定の損傷や劣化要因に対して効果をあげるために施工される維持管理対策工法本来の効果」と定義し、後者は、「ある特定の損傷や劣化要因に対して効果をあげるために施工されるが、主目的とされる損傷や劣化要因以外の損傷や劣化要因にも効果がある維持管理対策工法の付随的な効果」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剛性向上などによる力学的な劣化要因に効果があるが、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と考えられる。そこで、本システムにおいて考慮される各対策工法の事象に対する主効果・従効果、および各対策工法を施工するために必要な費用を、表-6に示されるようにまとめた⁹⁾。なお、表中の主効果および従効果の欄内に記述してある数値は、表-1および表-2中の番号と対応している。また、費用の単位U (Unit) は、 $1 U \approx \text{¥}1,000/\text{m}^2$ と換算している。

維持管理対策工法の対象部材に対する効果は、損傷の程度(損傷ランク)が著しいほど、また損傷が

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大きいと考えられる。すなわち、効果は、式(1)を用いることができる。さらに、対策工法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。本研究では、従効果の効果は、基本的に主効果の1/2倍と仮定した。また、維持管理対策工法中の複数の対策工法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工法によって完全に修復することができるため、二つ目以降の対策工法による効果は無いとし、劣化要因に対しては複数の対策工法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工法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。

(5) 維持管理対策選定問題の定式化

維持管理対策工法の選定を行う際に考慮される維持管理者の要求としては、以下のことが考えられる。

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

そこで、本研究では、維持管理対策工法を選定するための制約条件を「維持管理対策工法の施工に要する費用を予算内に抑える」とし、目的関数を対象部材に対する維持管理対策工法の「効果の最大化」と設定した。ここで、「効果の最大化」は、維持管理対策工法を施工することによって部材に発生して

いる損傷および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。

以上のことをまとめると、維持管理対策選定問題の目的関数および制約条件は、それぞれ以下に示す式としてまとめることができる。

Objective

$$Y_1 = Y_{11} + Y_{12} \rightarrow \text{Max} \quad (2)$$

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

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

Subject to

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

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

ここで、

i : 維持管理対策工法の番号 (表-6を参照)

j : 事象番号 (表-1および表-2を参照)

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

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

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

A_i : 維持管理対策に工法 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} : 対策工法 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} : 対策工法 i の事象 j に対する従効果の有無

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

CF_j : 事象 j の確信度

RK_j : 事象 j が属する事象ランクの重み

M : 対策工法の数

N : 事象数

S : 損傷数

C : 維持管理対策に要する費用

C_i : 対策工法 i に要する費用

Bu : 維持管理対策に用いることのできる予算

(6) 遺伝的アルゴリズムによる維持管理対策工法選定の最適化

組合せ最適化問題を解く手法として、さまざまな手法が考案されているが、本機能では維持管理対策工法の選定問題の最適化手法として、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遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた^{10,11)}。その特徴は、他の最適化手法より比較的高速に解を求めることができる。以下に、維持管理対策工法の選定問題へのGAの具体的な適用方法を述べる。なお、GAの一般的な操作については他の文献等に譲ることとし、本論文では割愛する。

a) コーディング

いま、解候補として考慮される対策工法の数を N とすると、一つの解候補は、遺伝子を N ビットの2進数配列として表される。なお、1ビットは、対応する対策工法を施工するかどうかを表す。例えば、 n ビット目が1であるならば n 番目の対策工法を施工し、0であるならば施工しないことを意味する。また、個体の適応度は、前節で設定した目的関数 Y_1 を用いる。つまり Y_1 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、種々の試行を行った結果、表-7に示すものを使用した。GAの特徴として、並列的な処理による解探索の高

表-7 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 |

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、初期収束を起こす可能性が高い。一方、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。そこで、本研究では、幾度かの試行錯誤により個体数を100と決定した。また、終了条件は、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。選択方法は、個体の適応度として目的関数 Y_1 を用いて得られる効果をそのまま利用していることから、その効果の差が個体の選択確率として反映される「適応度比例方式」と他の選択手法と組み合わせることで効果的な解探索を可能とする「エリート保存方式」の組合せを用いた。なお、交叉方法および突然変異率は、一般的に用いられているものを適用している。

c) 制約条件および施工条件

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い、制約条件を満たさない個体に対しては、ランダムに対策工法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。

一方、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」および「床版打換え」が施工できなくなり、「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工法を「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工法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、対策工法の組合せによる条件は、「床版上面増厚工法」および「床版打換え工法」には、「再舗装」を組合せて施工する必要があることから、個体の「床版上面増厚工法」および「床版打換え工法」に対応する遺伝子が1であるときは、「再舗装」に対応する遺

表-8 劣化要因に関するアンケートの評価基準

| 評価 | 基準 |
|----|------------------|
| 1 | 全く作用していないと考えられる |
| 2 | あまり作用していないと考えられる |
| 3 | 不明 |
| 4 | 少し作用していると考えられる |
| 5 | 強く作用していると考えられる |

伝子を1にすることによって組合せ条件を満たすようにした。

5. 本システムの実橋への適用と検証

(1) アンケート調査および実橋点検

本システムでは、入力データとして建設省土木研究所資料「橋梁点検要領(案)」⁹⁾における主として定期点検(遠望、目視)程度の点検データを必要とする。そこで、本システムの検証を行うために、専門技術者による実橋梁点検を実施した。また、本システムは、これらのデータから対象橋梁に作用している劣化要因の推定を行い、現時点において最も有効な維持管理対策工法を選定して出力するものであるが、これらの出力の妥当性を検証するために、専門技術者に対してこれらの出力に相当するアンケート調査を実施した。以下に、その詳細を述べる。

a) アンケート調査の方法



アンケート調査は、橋梁に携わった年数が20年以上の熟練した専門技術者2名に回答して頂いた。なお、回答してもらった専門技術者は、現場での点検も行い、実際に橋梁を見て回答している。

劣化要因に関するアンケートでは、本システムで考慮している主桁、床版それぞれの劣化要因に対して、その劣化要因が対象橋梁に作用していると考えられるかどうかを5段階の評価でチェックして頂いた。なお、表-8には、5段階の各評価の基準を示す。また、その劣化要因が作用していると考えられる場合は、それが原因となって発生していると思われる損傷名を記述して頂いた。さらに、専門技術者が維持管理対策の必要性があると判断した場合は、本システムで考慮している維持管理対策工法の中から、推奨される工法を選んで頂き、推奨する維持管理対策工法が本システムで考慮している対策工法中にならない場合は、別途記述して頂いた。なお、本システムの劣化要因推定および維持管理対策工法の選定は、1スパンごとに行われることから、点検およびアンケート調査も1スパンごとに実施されている。

b) 対象橋梁の概要

本研究で点検およびアンケート調査を実施した橋梁は、山口県が管理している5橋である。表-9には、各対象橋梁の概要を示す。また、表-10には、対象橋梁の主な損傷状態を記述する。

(2) アンケート調査結果および本システムからの出力結果

点検およびアンケート調査を実施した各橋梁に対する本システムからの劣化要因の推定結果を表-11および表-12に示す。表中の「A, B」は各専門技術者を表し、それぞれの欄内の数字は専門技術者による回答を示している。専門技術者へのアンケート調査は、表-8に示す5段階評価(1~5)に従って実施されており、その値が大きいかほど劣化要因が強く作用していると考えられる。なお、5段階評価のうち評価3(不明)は、本システムからの出力である確信度の値0.0に対応づけられる。また、項目「System」の欄内の数字は、本システムによる推論結果の確信度である。本節では、表-11および表-12中の値のうち、2人の専門技術者が4以上と回答した項目(表中の網掛け部: を参照のこと)と本システムの推論において0.5以上と出力された事象(表中の網掛け部: を参照のこと)とを比較する。すなわち、本システムが、その劣化要因が強く作用している可能性があるとして出力した劣化要因($0.5 \leq CF$)とを比較する。

Ho橋の“荷重などの力学的要因”では、専門技術者はいずれも4と回答しており、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は、0.6と出力しており、良好に推論が行われていると考える。一方で、“中性化”では、専門技術者はいずれも4と回答しているが、本システムからの出力は、0.2とその結果が異なっている。中性化は、時間の経過と共に進行していく現象であることから、専門技術者は、対象橋梁の損傷と共にHo橋の橋齢も考慮にいれて回答したと思われる。しかし、本システムでは、現在中性化を推論するルールとして橋齢を考慮したものが存在しないために、このような結果になったと思われる。今後は、②のルールとして、橋齢ごとの中性化が進行している可能性を考慮したルールを追加することにより、この問題が解消されると考える。

Tu橋の“排水機能不足”では、専門技術者は4または5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もまた、0.9とその劣化要因を強く示唆している。また、本システムは、“荷重などの力学的要因”を

0.6と推論している。これに対して、専門技術者の回答は4と3であるが、表-10に示されている損傷を考慮すると本システムは妥当な推論を行っているものと思われる。

Mi橋の“かぶり不足”では、専門技術者はいずれも4と回答している。これは、鉄筋露出の損傷より考慮されてものであるが、本システムのルールには、剥離および鉄筋露出という損傷よりかぶり不足という劣化要因を推論するルールが存在しないために、推論されなかったものとする。今後、これに関するルールの追加が必要である。また、“排水機能不足”に対する本システムからの出力は、0.5であるが、これは、対象スパンに排水管がないことから推論されたものであり、妥当であると考えられる。

Ha橋の“排水機能不足”では、専門技術者は4または5と回答しており、強くその劣化要因を示唆している。これに対して本システムからの出力は、0.9とその劣化要因を強く示唆しており、損傷として漏水や遊離石灰が見られたことから妥当な結果を推論していると言える。一方、“荷重などの力学的要因”では、専門技術者は2または3と回答しているのに反して、本システムは、その出力を0.6としている。これは、システムの持つルール「路面ひび割れが発生しているならば、荷重などの力学的要因が高い可能性で推測できる」の利用により推論されたものであるが、専門技術者の結果から判断すると、このルールの確信度(高い可能性: 0.6)を修正する必要がある。

Ko橋の“荷重などの力学的要因”では、専門技術者はいずれも4と回答している。本システムからの出力も0.6とその要因を示唆しており良好な推論結果を示している。また、対象橋梁の損傷に橋軸直角方向に遊離石灰を伴うひび割れが散見されたことを考慮しても、その結果は妥当と考える。また、“排水機能不足”においても、専門技術者はいずれも4と回答しており、本システムの出力結果0.5は、妥当であると思われる。

以上の結果および専門技術者が評価3(不明)もしくは、評価2(あまり作用していないと考えられる)と判断している項目を見ると、本システムは比較的低い値の確信度を出力している傾向より、本システムは、全体的に専門技術者と同様な傾向を確信度として出力していると言える。しかしながら、専門技術者の判断にもバラツキが見られるように、本システムと専門技術者との判断が一致しない項目も見られる。これは、本システムに蓄積されているルールの不足、点検データ以外の橋梁諸元データ等の利用およびルールが持つ確信度の変更が必要であ

表-9 対象橋梁の概要

| 梁名 | Ho橋 | Tu橋 | Mi橋 | Ha橋 | Ko橋 |
|-------------|----------------|---|----------------|----------------|---------------|
| 橋格 | 一等橋 | 一等橋 | 一等橋 | 一等橋 | 一等橋 |
| 橋梁形式 | RC単純T桁橋 | RC単純T桁橋 (1, 2, 3径間) PCT桁橋 (4, 5径間) | RC単純T桁橋 | RC単純T桁橋 | RC単純T桁橋 |
| 橋長 | 31.40m | 81.20m | 28.70m | 28.90m | 63.00m |
| 有効幅員 | 6.30m | 5.50m | 5.60m | 7.80m | 4.40m |
| 径間割 | 4径間 | 5径間 | 3径間 | 2径間 | 8径間 |
| 路線 | 一般県道 | 主要県道 | 主要県道 | 主要県道 | 主要県道 |
| 架設年 (橋齢) | 昭和16年 (58年) | 昭和38年 (36年) | 昭和27年 (47年) | 昭和42年 (32年) | 大正6年 (82年) |
| 適用示方書 | 昭和14年版 | 昭和31年版 | 昭和14年版 | 昭和39年版 | 不明 |
| 交差物 | 河川 | 河川 | 河川 | 河川 | 河川 |
| 交通量 | 4300台/12h | 2800台/12h | 1500台/12h | 1800台/12h | 300台/12h |
| 構造概要 | 主桁本数 | 4本 | 3本(RC部) | 4本 | 5本 |
| | 主桁間隔 | 3@1.40m | 2@1.80m(RC部) | 3@1.10m | 4@0.80m |
| | 横桁 | 有 | 有(RC部) | 有 | 無 |
| 高欄 | コンクリート製 高欄 | コンクリート製 高欄(RC部) | コンクリート製 高欄 | コンクリート製 高欄 | コンクリート製 高欄 |

注) 橋齢は、点検を行った時点で換算してある。

表-10 対象橋梁の主な損傷状態(床版、主桁)

| | 床版の損傷 | 主桁の損傷 | その他 |
|------------|---|---|--|
| Ho橋 (④) | 一部、床版中央部に軸直角方向のひび割れが見られる。 一部、張出部に鉄筋露出が見られる。 豆板が一箇所見られる。 | 主桁下面に軸方向ひび割れおよび軸直角方向ひび割れが散見される。 | 横桁にひび割れが散見される。 交通量が点検対象橋梁の中で最も多かった。 地覆部に放射状のひび割れが見られた。 |
| Tu橋 (③) | 一部、床版中央部に遊離石灰を伴う軸直角方向のひび割れが発生している。 ハンチ沿いのひび割れも一箇所見られる。 遠望目視では確認できないが、毛細ひび割れがかなり発生していると思われる。 遊離石灰が見られる。 | 主桁下面に軸方向ひび割れおよび軸直角方向ひび割れが見られる。また、側面に斜め方向のひび割れが見られる。 | 補修箇所(断面修復)が随所に見られるが再劣化(ひび割れ)が多く見られる。 工事車両等の大型車が多く通行していた。 伸縮装置および排水管において土砂詰まりが見られた。 |
| Mi橋 (③) | 張出部に、鉄筋露出および遊離石灰が見られた。 | 主桁下面に軸方向ひび割れが見られた。 鉄筋露出が一箇所見られた。 | 横桁に、かぶりコンクリートの不足から鉄筋露出が随所に見られた。 排水管なし。 |
| Ha橋 (①) | 一部、張出部に排水パイプ腐食が原因の漏水および遊離石灰が見られた。 | 剥離および鉄筋露出が見られた。 主桁下面に軸方向ひび割れが一箇所見られた。 | 交通量が比較的多く、特に大型車交通量は点検対象橋梁の中では最も多かった。 路面ひび割れが見られた。 |
| Ko橋 (②) | 軸直角方向に遊離石灰を伴うひび割れが散見される。 | 主桁下面に軸方向ひび割れが見られた。 鉄筋露出が、一箇所見られた。 | 交通量は比較的少ない。 舗装では、盲目地部にひび割れが見られた。 排水管なし。 |

注) 表中に記述されている丸囲みの数字は、スパン番号を示す。

ることを示すとともに、本研究では、推論時に無限ループに陥ることを防ぐために考慮しなかった様相、すなわち「作用していない」また「発生していない」という状態を考慮する、言い換えると確信度の

マイナス方向を考慮する必要があると考える。

続いて専門技術者により、補修または補強の必要があるとされた橋梁のうち Tu 橋および Ko 橋に対する工法選定の結果をそれぞれ表-13 および表-14

表-11 本システムからの劣化要因の推定結果（床版）（その1）

| 劣化要因名 | 橋梁名&診断者 | | | Ho橋 (④) | | | Tu橋 (③) | | | Mi橋 (③) | | |
|-----------------|---------|---|--------|---------|---|--------|---------|---|--------|---------|--|--|
| | A | B | System | A | B | System | A | B | System | | | |
| 荷重などの力学的要因 | 4 | 4 | 0.6 | 4 | 3 | 0.6 | 2 | 4 | 0.2 | | | |
| 練り混ぜから養生までの不良 | 3 | 3 | 0.4 | 3 | 2 | 0.4 | 5 | 2 | 0.2 | | | |
| 配筋誤差 | 3 | 3 | 0.1 | 3 | 2 | 0.1 | 4 | 1 | 0.0 | | | |
| かぶり不足 | 4 | 2 | 0.1 | 3 | 2 | 0.1 | 4 | 4 | 0.1 | | | |
| 鉄筋量不足による剛性不足 | 4 | 2 | 0.4 | 4 | 2 | 0.4 | 3 | 3 | 0.2 | | | |
| アルカリ骨材反応 | 3 | 3 | 0.4 | 3 | 3 | 0.4 | 3 | 3 | 0.2 | | | |
| 塩害 | 3 | 3 | 0.2 | 2 | 3 | 0.2 | 1 | 3 | 0.2 | | | |
| 中性化 | 4 | 4 | 0.2 | 3 | 4 | 0.2 | 2 | 4 | 0.2 | | | |
| 凍害 | 3 | 3 | 0.4 | 3 | 4 | 0.4 | 2 | 3 | 0.2 | | | |
| 低品質な骨材 | 3 | 3 | 0.4 | 3 | 3 | 0.4 | 5 | 2 | 0.2 | | | |
| 排水機能不足 | 3 | 5 | 0.2 | 4 | 5 | 0.9 | 3 | 4 | 0.5 | | | |
| 予期しない外力(事故,地震等) | 2 | 2 | 0.4 | 2 | 3 | 0.4 | 2 | 2 | 0.2 | | | |
| 型枠・支保工の不良 | 3 | 2 | 0.4 | 3 | 2 | 0.4 | 4 | 2 | 0.2 | | | |
| 基礎条件の変化 | 3 | 2 | 0.4 | 3 | 2 | 0.4 | 3 | 2 | 0.2 | | | |

表-12 本システムからの劣化要因の推定結果（床版）（その2）

| 劣化要因名 | 橋梁名&診断者 | | | Ha橋 (①) | | | Ko橋 (②) | | |
|-----------------|---------|---|--------|---------|---|--------|---------|--|--|
| | A | B | System | A | B | System | | | |
| 荷重などの力学的要因 | 3 | 2 | 0.6 | 4 | 4 | 0.6 | | | |
| 練り混ぜから養生までの不良 | 2 | 2 | 0.1 | 4 | 3 | 0.1 | | | |
| 配筋誤差 | 3 | 2 | 0.1 | 3 | 3 | 0.1 | | | |
| かぶり不足 | 3 | 3 | 0.0 | 4 | 3 | 0.0 | | | |
| 鉄筋量不足による剛性不足 | 4 | 2 | 0.2 | 3 | 3 | 0.1 | | | |
| アルカリ骨材反応 | 2 | 2 | 0.2 | 2 | 3 | 0.1 | | | |
| 塩害 | 3 | 2 | 0.1 | 2 | 3 | 0.1 | | | |
| 中性化 | 2 | 3 | 0.1 | 3 | 4 | 0.1 | | | |
| 凍害 | 3 | 3 | 0.2 | 2 | 3 | 0.1 | | | |
| 低品質な骨材 | 3 | 2 | 0.1 | 3 | 2 | 0.1 | | | |
| 排水機能不足 | 5 | 4 | 0.9 | 4 | 4 | 0.5 | | | |
| 予期しない外力(事故,地震等) | 3 | 2 | 0.2 | 2 | 2 | 0.1 | | | |
| 型枠・支保工の不良 | 3 | 2 | 0.2 | 3 | 2 | 0.1 | | | |
| 基礎条件の変化 | 3 | 2 | 0.2 | 3 | 2 | 0.1 | | | |

に示す。なお、表中の「A, B」は、各専門技術者を表している。また、「System①」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、「System②」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。ここで、専門技術者の回答欄中の効果と費用は、専門技術者から得られた維持管理対策工法を本システムに入力し計算された結果を示している。

本システムは、システムのユーザーによって入力された予算制約内で、点検時に発生しているまたは作用が考えられる損傷および劣化要因に対して最も効果のある維持管理対策工法を選定するものである。そこで、本論文では一例として、予算制約を50U, 100Uおよび150Uと設定し、維持管理対策工法の選定を行った。

これらの結果を見ると、予算上限が100Uと設定された場合では、本システムからの出力結果と専門技術者による結果とは、ほぼ一致している。また、交通規制を考慮した場合の本システムからの結果も

良好に選択されている。さらに、予算上限の変化とそれに伴う対策工法の効果の変化を見ると、予算上限を50Uから100Uへと予算を変化させた場合では、特にSystem①の出力結果を見ると、その効果が大幅に増加している。一方で、予算上限を100Uから150Uへと変化させた場合では、前者よりも効果の大幅な増加は見られない。また、予算上限を100Uとした時点ですでに、本システムからの出力結果の効果が、専門技術者の回答した対策工法の効果よりも、安価なコストで高い効果の対策工法を推奨している。しかしながら、専門技術者は、遊離石灰の析出状況などから、ひび割れなどからの漏水対策である橋面防水工を対策工法として挙げているが、本システムでは、この工法を対策工法として挙げていなかったことから（表-6）、本来であれば当然として、選択されるべき工法が出力されなかった。今後は、この橋面防水工など本システムで扱うことのできる対策工法を追加していく必要がある。

続いて個々の橋梁に対する出力結果を見ると、

表-13 「Tu 橋 (㊸)」に対する工法選定結果

| 回答者 | 対策工法 | 効果 | 費用 (U) |
|--------------------------|--|-------|--------|
| A | 床版(床版上面増厚, 床版下面増厚, 床版打換え, 再舗装, 橋面防水工) 主桁(断面修復, 架け換え) | 12.11 | 152.0 |
| B | 床版(樹脂注入, 床版上面増厚, 床版下面増厚, 排水管設置) 主桁(特に無し) | 3.85 | 131.8 |
| System ① (予算上限: 50U) | 床版(断面修復, 表面清掃) 主桁(樹脂注入, 表面清掃) | 5.27 | 47.8 |
| System ② (予算上限: 50U) | 床版(断面修復, 表面清掃) 主桁(樹脂注入, 表面清掃) | 5.27 | 47.8 |
| System ① (予算上限: 100U) | 床版(断面修復, 再舗装, 床版打換え, 表面清掃) 主桁(断面修復, 表面清掃) | 13.92 | 98.0 |
| System ② (予算上限: 100U) | 床版(断面修復, 床版下面増厚, 表面清掃) 主桁(樹脂注入, 断面修復, 表面清掃) | 7.67 | 96.8 |
| System ① (予算上限: 150U) | 床版(断面修復, 再舗装, 床版打換え, 表面清掃) 主桁(樹脂注入, 断面修復, 表面保護, 表面清掃) | 15.36 | 147.0 |
| System ② (予算上限: 150U) | 床版(樹脂注入, 断面修復, 床版下面増厚, 表面清掃) 主桁(樹脂注入, 断面修復, 表面保護, 表面清掃) | 8.61 | 145.8 |

表-14 「Ko 橋 (㊸)」に対する工法選定結果

| 回答者 | 対策工法 | 効果 | 費用 (U) |
|--------------------------|--|-------|--------|
| A | 床版(床版上面増厚, 床版下面増厚, 床版打換え, 橋面防水工) 主桁(断面修復, 架け換え) | 7.92 | 137.0 |
| B | 床版(床版上面増厚, 表面保護, 表面清掃, 排水管設置) 主桁(断面修復, 表面保護) | 3.58 | 142.4 |
| System ① (予算上限: 50U) | 床版(再舗装, 表面清掃) 主桁(断面修復, 表面清掃) | 3.10 | 39.0 |
| System ② (予算上限: 50U) | 床版(表面清掃) 主桁(樹脂注入, 断面修復, 表面清掃) | 3.10 | 47.8 |
| System ① (予算上限: 100U) | 床版(床版打換え, 再舗装) 主桁(樹脂注入, 断面修復) | 8.76 | 97.8 |
| System ② (予算上限: 100U) | 床版(断面修復, 床版下面増厚, 表面清掃) 主桁(樹脂注入, 断面修復, 表面清掃) | 4.44 | 96.8 |
| System ① (予算上限: 150U) | 床版(断面修復, 再舗装, 床版打換え, 表面清掃) 主桁(樹脂注入, 断面修復, 表面保護, 表面清掃) | 10.08 | 147.0 |
| System ② (予算上限: 150U) | 床版(断面修復, 床版下面増厚, 表面保護, 表面清掃) 主桁(樹脂注入, 断面修復, 表面保護, 表面清掃) | 5.02 | 147.2 |

Ko 橋では、本システムからの出力で再舗装が選択されているが、点検結果に舗装ひび割れが見られたことから妥当な選択であると考えられる。また、Tu 橋では、表面清掃が本システムより選択されているが、点検により排水管のつまりが見られたことから妥当な選択である。一方で、Ko 橋は、排水管がないことを考えると、本来ならば本システムからの選択結果として、排水管の設置が選択されるべきであるが、表面清掃が選択されている。表-6 に示されるように、対象橋梁に排水管がない場合では、表面清掃の効果は表-1 に示される損傷 No.6 のコケなどの植物のみであるが、本システムの劣化要因推定機能では、その推論に因果ネットワークを利用していることから、点検にその損傷が見られなくとも、推論によりその発生の可能性を示す確信度が出力される。これ

により、本研究で利用している工法の効果の計算方法では、本システムの推論より得られた事象の確信度の値が 0.0 以上であれば、その効果が見込まれることから、表面清掃のように安価でかつある程度の効果が見込める工法は、選択されやすくなっている。このことから、今後、工法選択において考慮される事象の確信度に閾値を設ける（例えば、0.5 以上の確信度の値のみを考慮する）などの工夫が必要である。また、床版打換え工法は、交通規制等を行うことによるユーザコストを考慮していないことから、今後このようなコストの検討も重要な課題である。さらに、予算制約は、システムのユーザによって設定されるが、どの程度に予算を設定すれば良いかの指標がないことから、対象橋梁における維持管理の必要性（式(1)を参照）の総量に対して、ある予算

制約において選定された維持管理対策工法が、どの程度その必要性を満足するかを示すような指標を設ける必要がある。

6. 画面表示による本システムの流れ

本節では、実際のシステムの画面（図-5 から図-9）を用いて本システムの機能の流れを説明する。なお、本システムは Windows 上でグラフィカルなユーザーインターフェースに優れたイベントドリブン型のプログラミング言語を用いて開発されている。

STEP 1：メニュー画面

システムを起動すると、図-5 に示す画面が表示される。ユーザーは「点検結果入力」、「推論開始」、「工法選定」の各ボタンを順に押すことで、「入力」→「劣化要因の推定」→「維持管理対策工法の選定」を進めていく。

STEP 2：対象橋梁の選択

図-5 中の「点検結果入力」ボタンを押すと、図-6 に示す画面が表示される。ここで、対象橋梁を選択すると、橋梁諸元データが BMS データベースからシステムへ入力される。

STEP 3：点検データ入力

図-6 中の「点検データ入力」ボタンを押すと、図-7 に示す画面が表示される。点検結果より損傷の有無を確認し、損傷がある場合は、その損傷ランクを選択する。点検データの入力が完了し、「入力完了」ボタンを押すと、図-5 に示すメニュー画面へ戻る。

STEP 4：劣化要因の推定

STEP 3 までが終了した状態で、図-5 中の「推論開始」ボタンを押すと、損傷パターンの有無（③のルールに関する質問）を問う画面が表示される。この問いに答え終わると、因果ネットワークに利用されるルールの確信度が更新され、因果ネットワークが平衡状態になるまで推論が行われる。

STEP 5：劣化要因の推定結果

推論が終了した後は、図-8 に示す画面が表示される。画面内には、各事象が確信度の高い順番に色分けして表示される。ここで、「試験結果入力」ボタンを押すと、②のルールに関する質問画面が表示される。この問いに答え終わると、システムは図-8 で出力された事象の確信度の変更を行う。

STEP 6：予算上限および施工条件の入力

STEP 5 までが終了した状態で、図-5 中の「工法選定」ボタンを押すと、予算上限および施工条件の入力を行う画面が表示される。この入力が終了する

と、維持管理対策工法の選定が行われる。

STEP 7：橋梁診断カルテ

図-9は、本システムからの最終出力画面である。ここでは、橋梁諸元データ、点検データ、劣化要因の推定結果、維持管理対策工法の選定結果が同時に表示される。

7. 結論

本研究は、従来より著者らが開発してきた BMS の一機能である工法選定支援機能を、新しく概念から再構築した「維持管理対策選定システム」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（外力）の推定と、点検時には確認されなかった損傷の発生の可能性を推定する。さらに、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工法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、維持管理対策工法の選定には維持管理対策選定機能を構築した。

以下に、本研究で得られた成果をまとめる。

- ① 劣化要因の推定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・整理する方法を示し、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、および損傷発生の可能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工法の効果を定式化し、維持管理対策工法の選定問題を「予算内でどのように対策工法を組合せて行えば最も効果が高くなるか」という組合せ最適化問題と捉えることで、維持管理対策工法の選定を行うことを可能にした。また、最適化手法に GA を用いることで、比較的迅速に選定を行うことができた。
- ③ 維持管理対策選定システムの妥当性を検証するために、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工法の選定を行った。さらに、実橋梁調査および専門技術者に対するアンケート調査を実施した。その結果、システムからの出力は専門技術者からの出力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。本システムは、現在のと



図-5 メニュー画面

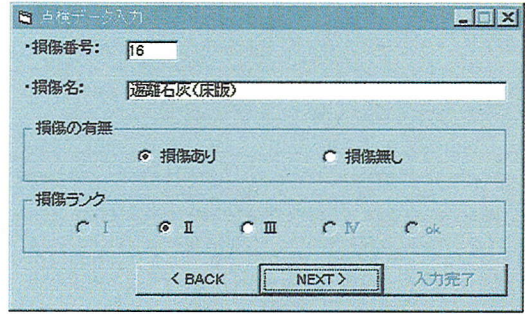


図-7 点検データ入力画面の例

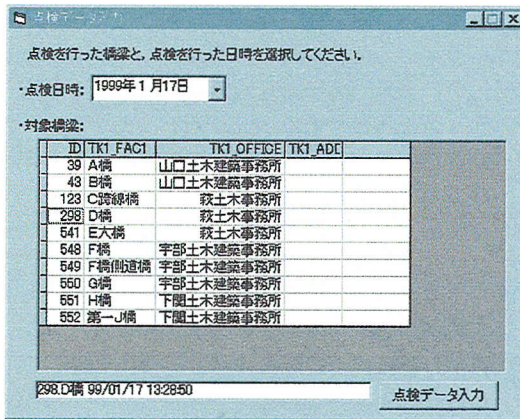


図-6 対象橋梁の選択画面の例

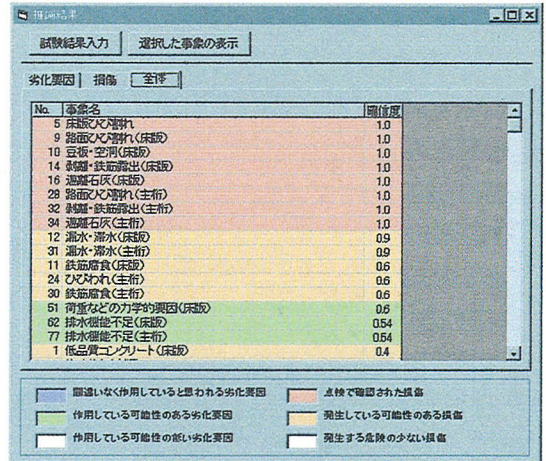


図-8 劣化要因の推定結果画面の例

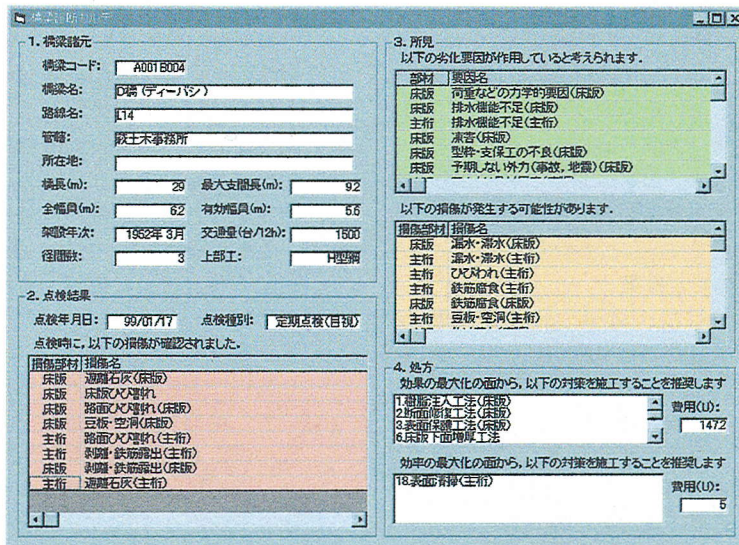


図-9 橋梁診断カルテ画面の例

ころプロトタイプであり、実用化に向けてさらなるルールの追加や修正などの継続的な開発が必要である。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、種々のご援助を頂いた山口大学大学院生 鬼丸浩幸氏に感謝の意を表します。また、現地での橋梁点検およびアンケート調査に快くご協力頂いた山口県土木建築部道路整備課 師井努氏、他に深く感謝します。

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，足立幸朗，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 橋梁点検要領（案），建設省土木研究所，土木研究所資料 2651号，1988. 7.
- 5) 例えば，川村満紀：コンクリート構造物の耐久性上の問題とその対策 アルカリ骨材反応（その 1），コンクリート工学，Vol. 32，No. 4，pp. 74-79，1994. 4.
- 6) 例えば，コンクリート構造物の健全度診断技術の開発に関する共同研究報告書—コンクリート構造物の健全度診断マニュアル（案）—，建設省土木研究材料施工部コンクリート研究室・日本構造物診断技術協会，共同研究報告書，整理番号第 195号，1998. 3.
- 7) 例えば，ひびわれ判断の手引き（案）＜近畿地建版＞，建設省・近畿地方建設局・近畿技術事務所，1997. 3.
- 8) 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，pp. 554-563，1990. 3.
- 9) 例えば，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
- 10) 萩原将人：ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム，産業図書，1994.
- 11) 玉置久，喜多一：遺伝アルゴリズムⅡ —GAによる最適化計算 1，システム／制御／情報，Vol. 39.No8，pp. 400-407，1995.

(1999. 7. 12 受付)

DEVELOPMENT OF MAINTENANCE STRATEGY SUPPORT SYSTEM FOR BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM(BMS)

Kei KAWAMURA, Ayaho MIYAMOTO, Hideaki NAKAMURA and Masaki ONO

The aim of this study is to propose a support system as part of Bridge Management System(BMS) developed by authors, which is able to present a more effective maintenance strategy. This support system has a estimation function of deterioration cause and a selection function of maintenance measures. The former function enables some deterioration cause to be estimated by inspection data and non-destructive testing. The latter function allows a maintenance strategy to be determined using the output of the estimation function. Furthermore, the new system is applied to existitng concrete bridges so as to demonstrate the validity of the proposed system.