

論文 Bridge Management System における劣化要因を考慮した 維持管理対策の選定

横山博司*1・中村秀明*2・河村 圭*3・宮本文穂*4

要旨: 近年, 限られた予算の中で効果的な維持管理計画を策定するシステムが注目されている。このような背景のもと, 本研究室では「橋梁維持管理支援システム: Bridge Management System」の開発を行ってきた。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, その損傷を引き起こし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, 点検で確認された損傷や作用しているであろう劣化要因に対して, 効果的な維持管理対策が選定できる「維持管理対策選定機能」を BMS に新たに追加した。

キーワード: BMS, 維持管理, 損傷, 劣化要因, 維持管理対策

1. 緒言

我が国では, 社会基盤整備のため, 戦後多くのコンクリート橋が建設され, その多くは現在も供用されている。しかしながら, 現在ではこれら橋梁の劣化が進んできており, 剥離コンクリートの落下などによる事故も起こっている。コンクリート橋を長期間に渡って安全に供用していくためには, 適切な維持管理を行うことが必要不可欠である。しかしながら維持管理に用いることのできる予算には上限があるため, 要求される全ての維持管理業務を行うことは現実的に不可能である¹⁾。従って, 限られた予算内で合理的かつ効果的な維持管理を行う必要がある。効果的な維持管理を行うためには, 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・抑制する対策が必要である。

このような背景の下で, 著者らは, 橋梁に対する包括的な維持管理業務の支援を可能とする統合型システムとして, 橋梁維持管理支援システム「Bridge Management System (以下, BMS)」の開発を行ってきた²⁾。

本研究では, 点検で確認された損傷や作用して

いるであろう劣化要因に対して, 効果的な維持管理対策が選定できる「維持管理対策選定機能」を BMS に新たに追加した。さらに, これらの機能を山口県下で実際に供用されている橋梁に適用し, その出力結果と専門技術者へのアンケート結果とを比較することにより本機能の有効性を検証した。

2. 維持管理対策選定の流れ

橋梁の維持管理対策を選定する際に必要なことは, まず対象部材に発生している損傷や作用している劣化要因を正確に把握することである。しかしながら部材内部に発生している損傷や劣化要因は, 目視程度の点検データでは把握することは困難である。そこで, 目視程度の点検データで確認できない損傷や劣化要因を, 確認できた損傷から推定することが必要であり, BMS では, 劣化要因推定機能³⁾により, 作用している劣化要因や今後生じる可能性のある損傷を推定している。

次に, 効果的な維持管理対策を行うためには, 橋梁に発生している損傷や劣化要因を正確に把握し, 重大な損傷や劣化要因を優先的に修復したり,

*1 ㈱安部工業所 技術本部技術部長, 工修 (正会員)

*2 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科, 博士(工学) (正会員)

*3 山口大学 VBL 非常勤研究員, 博士(工学)

*4 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科, 工博 (正会員)

表-1 本研究で考慮した損傷および劣化要因

| No | 部材 | 損傷名 | No | 部材 | 劣化要因 |
|----|----|--------------|----|----|-----------------|
| 1 | ◎ | 低品質な骨材 | 22 | ◇ | 荷重などの力学的要因 |
| 2 | ◇ | 配筋の乱れによる応力集中 | 23 | □ | 曲げ応力 |
| 3 | ◎ | ポップアウト | 24 | □ | せん断応力 |
| 4 | ◎ | コケなどの植物 | 25 | ◎ | 練り混ぜから養生までの不良 |
| 5 | □ | ひび割れ | 26 | ◇ | 配筋誤差 |
| 6 | ◇ | 床版ひび割れ | 27 | ◎ | かぶり不足 |
| 7 | ◎ | 変色・劣化 | 28 | ◎ | 鉄筋量不足による剛性不足 |
| 8 | ◎ | 欠損 | 29 | ◎ | アルカリ骨材反応 |
| 9 | ◎ | 排水管の詰まり | 30 | ◎ | 塩害 |
| 10 | ◇ | 路面ひび割れ | 31 | ◎ | 中性化 |
| 11 | ◎ | 豆板・空洞 | 32 | ◎ | 凍害 |
| 12 | ◎ | 鉄筋腐食 | 33 | ◎ | 低品質な骨材 |
| 13 | ◎ | 漏水・滞水 | 34 | ◎ | 乾燥収縮 |
| 14 | ◇ | 抜け落ち | 35 | ◎ | 排水機能不足 |
| 15 | ◎ | 剥離・鉄筋露出 | 36 | ◎ | 予期しない外力(事故、地震等) |
| 16 | ◎ | 異常たわみ | 37 | ◎ | 型枠・支保工の不良 |
| 17 | ◎ | 遊離石灰 | 38 | ◎ | 基礎条件の変化 |
| 18 | ◎ | 異常な振動 | | | |
| 19 | ◎ | 鋼板接着部の損傷 | | | |
| 20 | ◎ | 錆汁 | | | |
| 21 | ◎ | ゲル状の流出物 | | | |

◎: 主桁・床版
◇: 床版
□: 主桁



図-1 維持対策選定の流れ

排除・抑制を行う必要がある。また、実行性の高い維持管理対策の立案には、予算や交通条件、施工条件等も考慮する必要がある。本研究での維持管理対策の流れを図-1示す。

2.1 損傷・劣化要因の把握

維持管理対策を選定するには、まず対象部材に発生している損傷や作用している劣化要因を正確に把握する必要がある。点検時に見られた損傷から劣化要因を推定し、さらに今後発生が予測される損傷を推定するため劣化要因推定機能³⁾が用いられる。劣化要因推定機能で考慮している損傷と劣化要因を表-1に示す。劣化要因推定機能の詳細

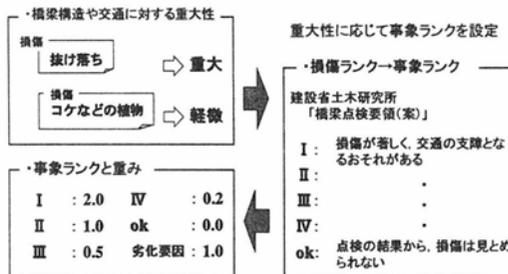


図-2 事象ランクの設定

については文献3)に譲る。

2.2 事象の重大性(事象ランク)の設定

効果的な維持管理対策を行うためには、対象部材に対して重大な影響を及ぼしている事象(損傷、劣化要因)を優先的に対策する必要がある。そこで、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。(図-2参照)

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、あるいは発生する危険性がある損傷
 - ③ 作用しているであろう劣化要因
- という3つの事象が含まれている。①に対しては、劣化要因推定機能への入力として、点検データとともに損傷ランクが入力されているのでそのラン

表-2 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 |
| O.K. | 0.0 |
| 劣化要因 | 1.0 |

クを事象ランクとして用いる。②に対しては、建設省土木研究所「橋梁点検要領(案)」⁴⁾に記述してある損傷に対しては、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対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、各損傷ランクのほか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を重みに変換することにより必要性に応じた維持管理対策の選定を行っている。維持管理対策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、どの事象ランクに重点を置いた対策であるかを調整することができる。ここでは、一般に構造物の劣化は、損傷が進むほど損傷の進む速度が速くなると考え、事象ランクの重みへの変換を表-2に示すように等比級数的に設定した。事象ランクの重みへの変換は、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ときは、劣化要因に対する重みを上げればよい。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ときは、劣化要因に対する重みを0.0にすればよい。

2.3 施工条件の判定

維持管理対策を実施する際には、「交通規制ができない」などといった施工条件が存在する。このような場合には施工条件を満足する維持管理対

表-3 本研究で考慮する維持管理対策

| No. | 対策工法名 | 対象部材 | 施工条件 |
|-----|-----------|--------|-------------------|
| 1 | 樹脂注入 | 主桁, 床版 | |
| 2 | 断面修復 | 主桁, 床版 | |
| 3 | 再舗装 | 床版 | 交通規制が必要 |
| 4 | 床版上面増厚 | 床版 | 交通規制が必要 再舗装と併用 |
| 5 | 床版下面増厚 | 床版 | |
| 6 | 床版打換え | 床版 | 交通規制が必要 再舗装と併用 |
| 7 | 表面保護 | 主桁, 床版 | |
| 8 | 鋼板(FRP)接着 | 主桁, 床版 | 樹脂注入と併用 |
| 10 | 電気化学的補修 | 主桁 | |
| 11 | 表面清掃 | 主桁, 床版 | |
| 12 | 排水管設置 | 主桁, 床版 | 既設の排水管なし |

策を選定する必要がある。表-3に本研究で考慮した維持管理対策の一覧を示す。施工条件で「交通規制ができない」場合には、「再舗装」、「床版上面増厚工法」、「床版打換え」は選択できないようにした。また、施工条件ではないが、既に排水管が設置されている場合には、再度排水管を設置することはないので、「排水管設置」は選択できないようにした。次に、対策によっては他の対策と組み合わせて施工する必要があるものもある。通常「鋼板(FRP)接着」を行う際には事前に「樹脂注入工法」でひび割れを埋めて、その後施工を行う。また、「床版上面増厚工法」、「床版打換え工法」は「再舗装」が必要となる。本研究では、これらの施工条件を考慮し、維持管理対策の選定を行っている。

2.4 維持管理対策工法の効果の定量化

維持管理対策を選定するためには、維持管理対策工法の効果をあらかじめ定量化しておく必要がある。維持管理対策工法の効果の概略を図-3に示す。本研究では、維持管理対策工法は、劣化要因を抑制し、損傷を修復するもので、複数の損傷および劣化要因に効果があるものとしている。また、維持管理対策工法には、「主効果」と「従効果」があるものと仮定している。「主効果」とは「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、「従効果」とは「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も効果がある副次的効果」と定義した。例えば、床版下面増厚工法に

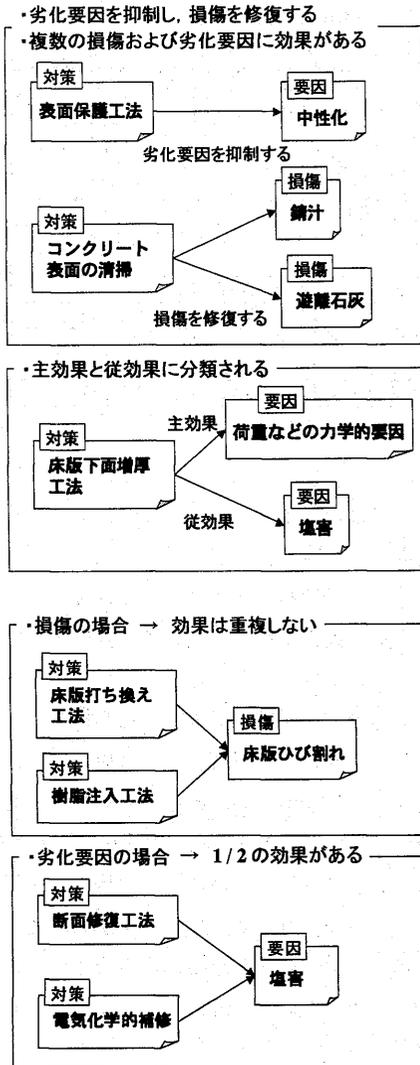


図-3 維持管理対策工法の効果の概略

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厚くなることによって塩害や中性化に効果がある。また、維持管理対策工法中の複数の対策工法が同じ損傷や劣化要因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り完全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ものとした。劣化要因に対しては、複数の対策工法により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低減されるもの二つ目以降の対策工法に対しても効果があるものとした。

表-4 対策工法の主効果,従効果,費用(主桁)

| No | 対策工法名 | 主効果(主桁) | 従効果(主桁) | 費用(U) |
|----|-------------|----------------|-------------|-------|
| 1 | 樹脂注入 | 5 | | 23.8 |
| 2 | 断面修復 | 8,11,,15,30,31 | 3 | 14.0 |
| 7 | 表面保護 | 30,31 | 32 | 25.2 |
| 8 | 鋼板 (FRP) 接着 | 19,28 | 16,18,23,24 | 75.0 |
| 9 | プレキャスト導入 | 23,24 | | 150.0 |
| 10 | 電気化学的補修 | 30 | | 30.0 |
| 11 | 表面清掃 | 4,9,17,20,21 | | 5.0 |
| 12 | 排水管設置 | 9 | | 30.0 |

表-5 対策工法の主効果,従効果,費用(床版)

| No | 対策工法名 | 主効果(床版) | 従効果(床版) | 費用(U) |
|----|-------------|------------------|------------|-------|
| 1 | 樹脂注入 | 6 | | 23.8 |
| 2 | 断面修復 | 8,11,14,15,30,31 | 3 | 14.0 |
| 3 | 再舗装 | 10 | | 15.0 |
| 4 | 床版上面増厚 | 22 | 2,16,18,28 | 43.0 |
| 5 | 床版下面増厚 | 22,27 | 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 | 19,28 | 2,16,18,22 | 75.0 |
| 10 | 電気化学的補修 | 30 | | 30.0 |
| 11 | 表面清掃 | 4,9,17,20,21 | | 5.0 |
| 12 | 排水管設置 | 9 | | 30.0 |

本研究で考慮する維持管理対策工法のそれぞれの損傷および劣化要因に対する主効果・従効果および対策工法の費用を公団等の平均的な補修・補強実績⁹⁾を基に表-4および表-5のように設定した。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の番号と対応している。また、費用の単位 U(Unit)は、1U≒¥1,000/m²と換算している。

2.5 維持管理選定問題の定式化

維持管理対策の選定は、「数種類ある対策をどのような組み合わせで用いれば条件を満たすような維持管理対策が行えるか」という組み合わせ最適化問題であると言える。そこで本研究では、橋梁の維持管理対策選定を組み合わせ最適化問題として定式化し維持管理対策の選定を行った。

本研究では、制約条件を維持管理対策に要するコストを予算内に抑えることとし、目的関数を対象部材に対する維持管理対策の「効果の最大化」とした。ここで、効果の最大化とは維持管理対策を実行することによって部材に発生している損傷や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。目的関数と制約条件を以下に示す。

Objectives

$$Y_1 = Y_{11} + Y_{12} \rightarrow \text{Max} \quad (1)$$

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

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

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

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

Subjective to

$$C \leq Bu \quad (4)$$

$$C = \sum_{i=1}^M A_i \times C_i \quad (5)$$

ここで、

i : 維持管理対策番号 (表-3参照)

j : 事象番号 (表-1参照)

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 の効果の重なりによる効果の有無

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

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

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

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 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

2.6 GAによる維持管理計画策定

前節で示した組み合わせ最適化問題を解く最適化手法には、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いている。GAは生物の遺伝的進化のメカニズムを工学的にモデル化したもので、組み合わせ最適化問題の解法として最近注目されている。GAの具体的な適用方法については文献3)に譲る。

表-6 劣化要因の推定結果

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

専門技術者の評価
 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

3. 本機能の実橋への適用と検証

適用例として山口県内に実際に架設されているTu橋に本機能を適用し、維持管理対策選定結果の検証を行った。

3.1 対象橋梁の概略と損傷状況

対象としたTu橋は、昭和38年5月に架設された橋齢36年となる3主桁4径間のRC単純T桁橋である。主要県道に架設されており、工事車両等が多く通行していた。主桁では、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、また側面には斜め方向のひび割れが見られた。床版では、中央部に遊離石灰を伴う橋軸直角方向のひび割れが一部発生しており、ハンチ沿いのひび割れも1箇所発生していた。さらに、伸縮装置および排水管において土砂詰まりが見られた。

3.2 劣化要因の推定

まず始めに、橋梁の点検を専門技術者をお願いし、確認された損傷を劣化要因推定機能に入力し、劣化要因および今後発生が予測される損傷の推定を行った。劣化要因推定機能³⁾により推定された結果を表-6に示す。劣化要因推定機能からの出力は0~1の範囲で出力される。

3.3 維持管理対策の選定

専門技術者および本機能の床版に対する工法選定の結果を表-7に示す。なお、表中の「規制可能」は「交通規制が可能」という条件で最適化した結果を示し、「規制不可」は「交通規制ができない」

表-7 「Tu 橋」に対する工法選定結果

| 回答者 | 対策工法 | 効果 | 費用 (U) |
|-------------------------------|--|-------|--------|
| 専門技術者 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 |
| 専門技術者 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 (特になし) | 3.85 | 131.8 |
| System (規制可能) (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 (規制不可) (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 (規制可能) (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 (規制不可) (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 (規制可能) (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 (規制不可) (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 |

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機能に入力し、計算した結果を示している。

表-7 の選定結果を見ると、予算の上限を 100U と設定した場合、本機能の選定結果と専門家の結果は、概ね一致している。また交通規制を考慮した場合の結果もほぼ一致している。本機能からの出力では表面清掃が選定されているが、これは、点検により排水管の詰まりが見られたことから、選定されている。予算の上限を 50U から 100U に変化させた場合、特に System(規制可能)では、その対策効果が大幅に増加している。一方、予算の上限を 100U から 150U に増加させた場合には、対策効果はそれほど増加していない。予算上限を 100U とした時点で、本機能からの出力結果は、専門家の出力結果よりも安価なコストで対策効果の高い対策工法を選定しており、比較的うまく選定していると言える。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、ひび割れからの漏水対策として橋面防水工を対策工法として選定しているが、本機能では、橋面防水工を対策工法としてシステムに組み入れていなかった(表-3 参照)ため、本来なら当然選定されるべき工法が選定されていない。今後は、本機能で扱う工法の追加等を行う必要がある。

4. 結論

本研究では、点検で確認された損傷や作用しているであろう劣化要因に対して、効果的な維持管理対策が選定できる「維持管理対策選定機能」を BMS に新たに追加した。さらに、これらの機能を山口県下で実際に供用されている橋梁に適用し、その出力結果と専門技術者へのアンケート結果とを比較することにより本機能の有効性を検証した。

本機能からの工法選定結果は、専門技術者の選定したものと概ね一致しており、また、専門技術者よりも安価なコストで対策効果の高い工法を選定しており、比較的うまく選定している。しかしながら、本機能で扱う工法が十分に充実しておらず、今後、工法の追加等が必要である。

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,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.
- 3) 鬼丸浩幸,宮本文穂,中村秀明,小野正樹: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,構造工学論文集, Vol.46A, pp.1213-1224, 2000.3.
- 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) 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.