

論文 コンクリート橋劣化要因推定システムの開発と実橋への適用

中村秀明*1・鬼丸浩幸*2・宮本文穂*3・河村 圭*4

要旨：著者らは従来より、橋梁の維持管理が包括的にできる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。効果的な橋梁の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、損傷を発生させている劣化要因を抑制するような維持管理対策を選定する必要がある。

本研究では、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を新たに構築した。この機能を実橋に適用し、その妥当性の検証を行った。

キーワード：BMS, 維持管理, 因果ネットワーク, 損傷, 劣化要因

1. 緒言

我が国では、高度経済成長期をピークに多くのコンクリート橋が建設された。しかしながら、現在ではそ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が、現在、何らかの維持管理を必要としている橋梁は少なくない。さらに、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不可能であることは明らかである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っていかねばならない。また、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。

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、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や今後発生が予測される損傷を推定する劣化要因推定機能（以下、本機能）を構築した³⁾。また、本機能で対象部材に作用していると推定された劣化要因や発生している損傷に効果を持つ維持管理対策を策定する維持管理対策選定機能も同時に構築した。本論文では、これらの機能の内、本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妥当性の検証を行った。

2. 本機能のBMSにおける位置付け

本機能は、BMS の一機能として開発されており、BMS での位置付けは図-1 のように示される。BMS は、維持管理に関する様々な処理を複数の機能によって行っており、それぞれの機能を統合したシステムである。各機能を実行するために必要な入力データベース（図-1 中①）によって管理されている。また、データベースでは橋梁諸元や点検データなどの橋梁に関する様々なデータも格

*1 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)

*2 山口大学大学院理工学研究科 博士前期課程知能情報システム工学専攻, 工学士

*3 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)

*4 山口大学大学院理工学研究科 博士後期課程システム工学専攻, 博士(工学)

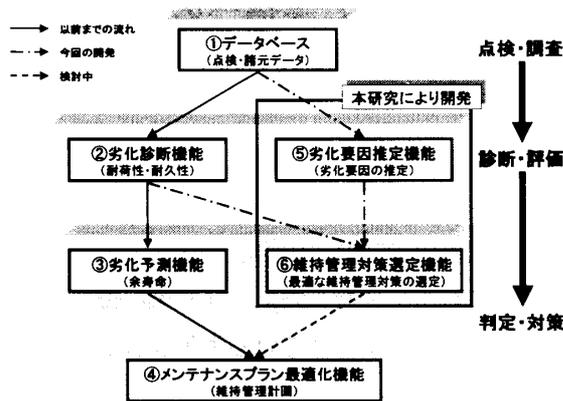


図-1 BMSにおける本機能の位置付け

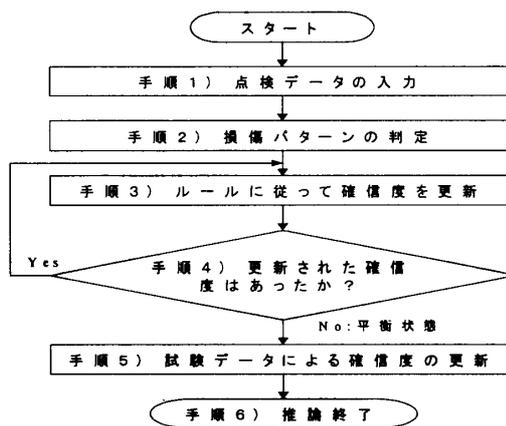


図-2 推論の流れ

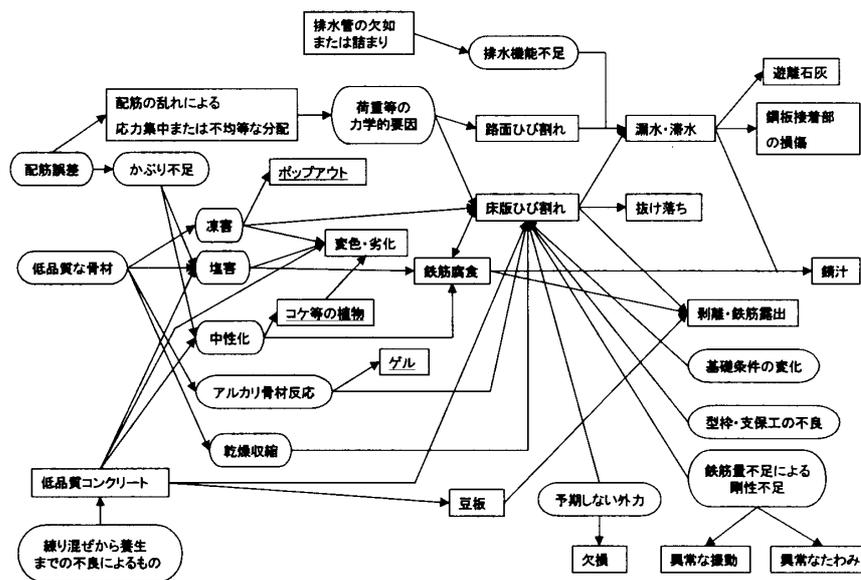


図-3 床版の因果ネットワークのイメージ

納している。BMSは、まず劣化診断機能(②)によって橋梁の各部材に対しての全体的な劣化の程度を診断し、劣化予測機能(③)によって劣化診断の結果から今後の劣化の進行を予測し余寿命を算出する。ここで、劣化予測機能において余寿命が予定供用年数を満たさないと予測されると、メンテナンスプラン最適化機能(④)によって予定供用年まで橋梁を供用するための維持管理計画の策定を行うという流れであった。しかし、ここで策定される維持管理計画は、劣化診断機能による部材の全体的な劣化程度をもとに策定されており、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。そのため、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、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。そこでこの問題を解消するため、新たに構築した劣化要因推定機能(⑤)によって対象部材に発生している損傷からその劣化要因を推定し、維持管理対策選定機能(⑥)によって推定された損傷や劣化要因を考慮した維持管理対策を策定することを試みた。本機能は、橋梁に発生する損傷や作用する劣化要因についての様々な因果関係を整理し、これらの因果関係をフォーマットしたルールに変換した後に因果ネットワーク⁴⁾を構築し、この因果ネットワークに従って推論(図-2参照)を行っている。因果ネットワークの例として、床版に対する因果ネットワークを図-3に示す。図中の四角囲みは損傷を表し、丸囲みは劣化要因を表す。推論の流れは、まず手順1で点検によって確認された損傷の

有無、また損傷が発生しているならばその程度を入力する。そして手順2では、ひび割れなどの特定の損傷が発生しているならばそのパターンについて入力する。これらを入力すると推論を開始し、因果ネットワークのルールに従って確信度を更新し推論を進めていく(手順3)。推論は確信度の更新が行われなくなるまで進められ、更新が行われなくなると推論を終了し手順5に進む。手順5では、点検とは別に簡単な試験を行った場合の結果や海岸からの距離など橋梁の環境条件などを入力し、損傷のみによる推論からさらに進んだ推論を可能としている。維持管理対策選定機能は、一般的に維持管理に用いられる様々な工法について、それぞれの工法が効果を持つ損傷や劣化要因をまとめ、その効果を定義している。そして、多数ある維持管理対策の組合せの内、対象橋梁に発生している損傷や作用している劣化要因に対して、最も効果のある対策の選定を組合せ最適化問題としてとらえ、その問題を解くことによって最適な維持管理対策の選定を行っている。

今後、本機能や維持管理対策選定機能の結果をこれまでのメンテナンスプラン最適化機能に反映させることによって、部材の全体的な損傷程度のみならず、部材に発生している損傷と作用している劣化要因をも考慮した維持管理計画を策定できると考える。なお、本論文ではその主旨を本機能の妥当性の検証としているため、BMSの各機能の詳細は参考文献2および3を参照されたい。

3. 本機能の適用橋梁の概要と適用結果の検証

本研究では、本機能に対する入力を獲得するために、山口県内で実際に供用されている5橋10スパンについて点検を行った。点検は、基本的には建設省土木研究所資料「維持管理指針(案)⁵⁾」に従った定期点検(遠望、目視)程度のものに本研究室で独自に改良を加えた点検を、橋梁の管理・設計経験が20年以上である専門技術者に行って頂いた。また、本機能の妥当性を検証するために、点検を行って頂いた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劣化

表-1 本機能で考慮する劣化要因

部材	No	劣化要因	部材	No	劣化要因
床版	1	荷重などの力学的要因	主桁	15	曲げ応力
	2	練り混ぜから養生までの不良		16	せん断応力
	3	配筋誤差		17	練り混ぜから養生までの不良
	4	かぶり不足		18	かぶり不足
	5	鉄筋量不足による剛性不足		19	鉄筋量不足による剛性不足
	6	アルカリ骨材反応		20	アルカリ骨材反応
	7	塩害		21	塩害
	8	中性化		22	中性化
	9	凍害		23	凍害
	10	低品質な骨材		24	低品質な骨材
	11	排水機能不足		25	排水機能不足
	12	予期しない外力(事故,地震等)		26	予期しない外力(事故,地震等)
	13	型枠・支保工の不良		27	型枠・支保工の不良
	14	基礎条件の変化		28	基礎条件の変化

表-2 専門技術者の回答基準

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

要因が作用している可能性を回答して頂いた。

本節では、まず本機能の適用橋梁についての概要とその橋梁で点検によって確認された損傷を示す。そして、その損傷を本機能に入力して得られた結果を示し、それらの妥当性を検証する。なお、本機能では損傷の劣化要因として表-1に示すものを考慮している。適用結果を示す表(表-4, 6, 8, 10, 12)においての「No」は表-1の「No」と対応している。また、丸数字はスパン番号を示している。そして、同表中の値は本機能から出力された推論結果であり、その劣化要因が作用している可能性を示す確信度(0.0~1.0)である。この確信度が大きいほどその劣化要因が作用している可能性が高いことを示す。さらに、()内の数字は、専門技術者へ実施したアンケート調査の結果である。この値が示す評価基準は表-2に示すものである。

3.1 対象橋梁の概要と本機能の適用結果

1) Ko橋(山口県N土木事務諸管轄)

大正6年2月に架設された橋齢82年に至る5主桁8径間のRC単純T桁橋である。主要県道に架設されており、交通量は比較的少ない。主桁では、下面に橋軸方向にひび割れが見られた。また床版打継目部分から遊離石灰が見られた。床版では、橋軸方向の遊離石灰が多く見られ、一部ではそれらが面的な拡がりを見せていた。舗装では盲

表-3 「Ko 橋」に発生していた損傷

部材およびスパン番号	損傷
床版	③ 路面ひび割れ, 遊離石灰
	⑧ ひび割れ, 路面ひび割れ, 豆板・空洞, 剥離・鉄筋露出, 遊離石灰
主桁	③ ひび割れ, 剥離・鉄筋露出
	⑧ 剥離・鉄筋露出, 遊離石灰

表-5 「Mi 橋」に発生していた損傷

部材およびスパン番号	損傷
床版	① ひび割れ, 路面ひび割れ, 豆板・空洞, 剥離・鉄筋露出, 遊離石灰
	③ 剥離・鉄筋露出, 遊離石灰
主桁	① ひび割れ, 鉄筋腐食
	③ ひび割れ, 欠損, 剥離・鉄筋露出

表-4 「Ko 橋」への本機能の適用結果と専門技術者へのアンケート結果の比較

No	③	⑧	No	③	⑧
1	0.60 (4)	0.40 (4)	15	0.40 (4)	0.24 (3)
2	0.13 (4)	0.36 (3)	16	0.40 (3)	0.24 (3)
3	0.10 (3)	0.07 (3)	17	0.36 (3)	0.22 (3)
4	0.04 (4)	0.10 (4)	18	0.10 (3)	0.10 (4)
5	0.14 (3)	0.40 (3)	19	0.40 (4)	0.24 (3)
6	0.14 (2)	0.40 (3)	20	0.40 (2)	0.24 (3)
7	0.09 (2)	0.24 (3)	21	0.24 (2)	0.24 (3)
8	0.09 (3)	0.24 (3)	22	0.24 (3)	0.24 (4)
9	0.14 (2)	0.40 (3)	23	0.40 (2)	0.24 (3)
10	0.13 (3)	0.36 (4)	24	0.36 (3)	0.22 (3)
11	0.54 (4)	0.54 (4)	25	0.24 (4)	0.54 (4)
12	0.14 (2)	0.40 (2)	26	0.40 (2)	0.24 (2)
13	0.14 (3)	0.40 (3)	27	0.40 (3)	0.24 (3)
14	0.14 (3)	0.40 (3)	28	0.40 (3)	0.24 (3)

表-6 「Mi 橋」への本機能の適用結果と専門技術者へのアンケート結果の比較

No	①	③	No	①	③
1	0.60 (2)	0.24 (2)	15	0.40 (2)	0.40 (2)
2	0.36 (5)	0.22 (5)	16	0.60 (3)	0.40 (3)
3	0.11 (4)	0.04 (4)	17	0.36 (5)	0.36 (5)
4	0.10 (4)	0.10 (4)	18	0.10 (4)	0.10 (4)
5	0.40 (3)	0.24 (3)	19	0.40 (3)	0.40 (3)
6	0.40 (3)	0.24 (3)	20	0.40 (3)	0.40 (3)
7	0.24 (1)	0.24 (1)	21	0.24 (1)	0.24 (1)
8	0.24 (2)	0.24 (2)	22	0.24 (2)	0.24 (2)
9	0.40 (2)	0.24 (2)	23	0.40 (2)	0.40 (2)
10	0.36 (5)	0.22 (5)	24	0.36 (5)	0.36 (5)
11	0.54 (3)	0.54 (3)	25	0.24 (3)	0.24 (3)
12	0.40 (2)	0.24 (2)	26	0.40 (2)	0.90 (2)
13	0.40 (4)	0.24 (4)	27	0.40 (4)	0.40 (4)
14	0.40 (3)	0.24 (3)	28	0.40 (3)	0.40 (3)

目地部にひび割れが見られた。「Ko 橋」において各部材に点検で確認された損傷を表-3 に示す。また、本機能の適用結果を表-4 に示す。

専門技術者は、この橋梁に対して作用している劣化要因として荷重による力学的な要因、施工不良、設計不良、材料不良、排水機能不足、中性化を挙げている。それに対して本機能からの出力は、荷重による力学的要因、排水機能不足といった劣化要因は推定できているものの、特に施工不良、設計不良といった劣化要因が推定できていない。

2) Mi 橋 (山口県 H 土木事務所管轄)

昭和 27 年 3 月に架設された橋齢 47 年となる 4 主桁 3 径間の RC 単純 T 桁橋である。この橋梁は、主要県道に架設されている。主桁では、下面に橋軸方向にひび割れがあった。また鉄筋露出も見られた。床版では、特に張り出し部に鉄筋露出が見られた。これらの鉄筋露出は施工不良によるコンクリートの充填不足が原因と思われる。橋脚や橋台には漏水跡が見られた。さらに浸食やすりへりが広範囲で起こっていた。「Mi 橋」において各部材に点検で確認された損傷を表-5 に示す。また、本機能の適用結果を表-6 に示す。

この橋梁に対して専門技術者は、施工不良、設

計不良、材料不良を劣化要因として挙げている。しかしながら、本機能ではこれらの劣化要因については低い値しか出力していない。逆に荷重による力学的要因や排水機能不足、予期しない外力といったものについて高い値を示しており、うまく推論しているとは言い難い。

3) Tu 橋 (山口県 H 土木事務所管轄)

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、曲げひび割れ、せん断ひび割れ、鉄筋腐食ひび割れが見られた。断面修復による補修箇所が随所に見られるが、ひび割れによる再劣化が多く見られた。床版では、遊離石灰をともなう橋軸直角方向のひび割れが一部見られた。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。「Tu 橋」において各部材に点検で確認された損傷を表-7 に示す。また、本機能の適用結果を表-8 に示す。

この橋梁に対して専門技術者は、第 3 スパンについては荷重による力学的要因や設計不良、中性化、排水機能不足を、第 4 スパンについては施工不良、排水機能不足を挙げている。それに対して

表-7 「Tu 橋」に発生していた損傷

部材およびスパン番号	損傷
床版	③ ひび割れ、排水管の詰まりまたは欠如、欠損、遊離石灰
	④ 遊離石灰
主桁	③ ひび割れ、排水管の詰まりまたは欠如
	④ 変色・劣化

表-8 「Tu 橋」への本機能の適用結果と専門技術者へのアンケート結果の比較

No	③	④	No	③	④
1	0.40 (4)	0.22 (2)	15	0.60 (4)	0.14 (3)
2	0.36 (3)	0.13 (4)	16	0.60 (3)	0.14 (3)
3	0.07 (3)	0.04 (3)	17	0.36 (3)	0.36 (3)
4	0.10 (3)	0.04 (3)	18	0.10 (4)	0.16 (3)
5	0.40 (4)	0.14 (3)	19	0.40 (4)	0.14 (3)
6	0.40 (3)	0.14 (2)	20	0.40 (3)	0.14 (2)
7	0.24 (2)	0.09 (2)	21	0.24 (3)	0.40 (2)
8	0.24 (3)	0.09 (3)	22	0.24 (4)	0.24 (3)
9	0.40 (3)	0.14 (2)	23	0.40 (3)	0.40 (2)
10	0.36 (3)	0.13 (3)	24	0.36 (3)	0.16 (3)
11	0.90 (4)	0.54 (4)	25	0.90 (4)	0.09 (4)
12	0.40 (2)	0.14 (2)	26	0.40 (2)	0.14 (2)
13	0.40 (3)	0.14 (3)	27	0.40 (3)	0.14 (3)
14	0.40 (3)	0.14 (3)	28	0.40 (3)	0.14 (3)

本機能では、荷重による力学的要因、排水機能不足といった劣化要因は高い値を出力しているが、やはり設計不良、施工不良といった劣化要因に対しては、低い値しか出力できていない。

4) Ha 橋 (山口県 N 土木事務所管轄)

昭和 42 年 3 月に架設された橋齢 32 年となる 4 主桁 2 径間の RC 単純 T 桁橋である。主要県道に架設されており、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最も多かった。主桁では、中央部にひび割れ、鉄筋露出が 1 箇所見られた。床版は張り出し部において、排水管の破損が原因と考えられる漏水が見られた。また遊離石灰も発生していた。「Ha 橋」において各部材に点検で確認された損傷を表-9 に示す。また、本機能の適用結果を表-10 に示す。

専門技術者は、この橋梁に作用している劣化要因として設計不良、排水機能不足を挙げている。本機能の出力でも排水機能不足は高い値を示しているが、設計不良については主桁ではうまく推論できているものの、床版では低い値しか出力できていない。しかしながら、今回検証を行った 5 橋の中で最もよい推論結果が得られた。

5) Ho 橋 (山口県 N 土木事務所管轄)

表-9 「Ha 橋」に発生していた損傷

部材およびスパン番号	損傷
床版	① 排水管の詰まりまたは欠如、路面ひび割れ、漏水・滞水、遊離石灰
	② 排水管の詰まりまたは欠如、漏水・滞水、遊離石灰
主桁	① ひび割れ、変色・劣化、排水管の詰まりまたは欠如、遊離石灰
	② 排水管の詰まりまたは欠如、剥離・鉄筋露出

表-10 「Ha 橋」への本機能の適用結果と専門技術者へのアンケート結果の比較

No	①	②	No	①	②
1	0.24 (3)	0.60 (4)	15	0.40 (3)	0.24 (3)
2	0.14 (2)	0.13 (2)	16	0.40 (3)	0.24 (3)
3	0.04 (3)	0.11 (3)	17	0.36 (3)	0.22 (3)
4	0.04 (3)	0.04 (3)	18	0.16 (3)	0.10 (3)
5	0.16 (4)	0.14 (4)	19	0.40 (3)	0.24 (3)
6	0.16 (2)	0.14 (2)	20	0.40 (2)	0.24 (2)
7	0.10 (3)	0.09 (3)	21	0.40 (3)	0.24 (3)
8	0.10 (2)	0.09 (2)	22	0.24 (2)	0.24 (2)
9	0.16 (3)	0.14 (3)	23	0.40 (3)	0.24 (3)
10	0.14 (3)	0.13 (3)	24	0.36 (3)	0.22 (3)
11	0.90 (5)	0.54 (5)	25	0.90 (5)	0.90 (5)
12	0.16 (3)	0.14 (3)	26	0.40 (3)	0.24 (3)
13	0.16 (3)	0.14 (3)	27	0.40 (3)	0.24 (3)
14	0.16 (3)	0.14 (3)	28	0.40 (3)	0.24 (3)

昭和 16 年 3 月に架設された橋齢 58 年となる 4 主桁 4 径間の RC 単純 T 桁橋である。一般道路に架設されており、交通量が点検対象橋梁の中で最も多かった。主桁の下面部に橋軸方向ひび割れと橋軸直角方向ひび割れが見られた。床版では、豆板が 1 箇所見られ、ひび割れが張り出し部に発生していた。張り出し部には漏水も見られた。地覆部には放射状のひび割れが見られた。「Ho 橋」において各部材に点検で確認された損傷を表-11 に示す。また、本機能の適用結果を表-12 に示す。

専門技術者は、この橋梁に対して荷重による力学的要因や設計不良、中性化といった劣化要因が作用していると判断している。これに対して本機能では、荷重に余る力学的要因は高い値を出力しているものの、その他の設計不良、中性化に対しては値が低く、うまく推論できていないものが多い。

3.2 本機能の出力結果の考察

対象部材に作用している劣化要因の推定について、専門技術者へのアンケート結果と本機能の出

表-11 「Ho 橋」に発生していた損傷

部材および スパン番号		損傷
床版	①	路面ひび割れ
	④	ひび割れ
主桁	①	ひび割れ, 豆板・空洞, 鉄筋腐食
	④	ひび割れ

表-12 「Ho 橋」への本機能の適用結果と
専門技術者へのアンケート結果の比較

No	①	④	No	①	④
1	0.60 (4)	0.40 (4)	15	0.60 (4)	0.60 (4)
2	0.13 (3)	0.36 (3)	16	0.40 (4)	0.40 (4)
3	0.11 (3)	0.07 (3)	17	0.36 (3)	0.36 (3)
4	0.04 (4)	0.16 (4)	18	0.10 (4)	0.10 (4)
5	0.14 (4)	0.40 (4)	19	0.40 (4)	0.40 (4)
6	0.14 (3)	0.40 (3)	20	0.40 (3)	0.40 (3)
7	0.09 (3)	0.40 (3)	21	0.24 (3)	0.24 (3)
8	0.09 (4)	0.40 (4)	22	0.24 (4)	0.24 (4)
9	0.14 (3)	0.40 (3)	23	0.40 (3)	0.40 (3)
10	0.13 (3)	0.36 (3)	24	0.36 (3)	0.36 (3)
11	0.09 (3)	0.24 (3)	25	0.24 (3)	0.24 (3)
12	0.14 (2)	0.40 (2)	26	0.40 (2)	0.40 (2)
13	0.14 (3)	0.40 (3)	27	0.40 (3)	0.40 (3)
14	0.14 (3)	0.40 (3)	28	0.40 (3)	0.40 (3)

力結果を比較すると、多くの部材で荷重などによる力学的な要因や排水機能不足といった劣化要因については、専門技術者が作用していると判断している場合は本機能も高い確信度を示しており、うまく推論が行われているといえる。しかしながら、施工不良や設計不良、材料不良といった劣化要因については大きく値の異なる結果を出力している。

この原因と考えられることとして、まず本機能では施工不良や設計不良、材料不良といった劣化要因に関するルールが少ないということが挙げられる。他の劣化要因に対しては、多くのルールが作用してその確信度が決定するが、これらの劣化要因ではその数が少なく、特に施工不良に関してはその確信度を決定するルールが1つしかない。よって、これらの劣化要因は確信度に多様性がなく偏ったものとなってしまう、うまく推論が行われないものと思われる。よって、今後うまく推論が行われていない劣化要因についてのルール数を追加して行く必要がある。また、他の劣化要因についても可能な限りルール数を増やしたり、ルールの改善を行うことで、より精度の高い推論が行えると思われる。

また、損傷や劣化要因の因果関係に基づく因果ネットワークによる推論だけでなく、対象橋梁の交通量や環境条件なども推論に用いることによって、精度の高い劣化要因の推定が行えると思われる。

4. 結論

本研究では、BMS に追加した「劣化要因推定機能」の妥当性を検証するために、実際に供用されている橋梁に対して点検を行い、本機能への入力データを獲得し、本機能の適用を行った。また、点検を行った専門技術者に対して、アンケート調査を別途実施し、その橋梁に作用している劣化要因を回答して頂いた。本機能の適用結果と専門技術者に対するアンケート調査結果を比較したところ、施工不良や設計不良、材料不良といった劣化要因では、多くの橋梁で本機能からの出力と専門技術者の回答が大きく異なっており、うまく推論できていなかった。この他の劣化要因については、ほぼ同じような値が出力されており、推論がうまくできていた。

今後、この問題点を解消するために、うまく推論が行えていない劣化要因を中心として、ルールの追加または改善を行っていく予定である。さらに、損傷や劣化要因の因果関係だけでなく、交通量や環境条件に関するルールも追加していく予定である。

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) 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.
- 5) 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.