

論文 Bridge Management System における劣化要因推定システムの 推定精度向上

中村 秀明*1・鬼丸 浩幸*2・河村 圭*3・宮本 文穂*4

要旨：著者らは従来より橋梁の維持管理を支援する「橋梁維持管理支援システム(Bridge Management System, BMS)」の開発を行ってきた。BMSの機能の一つに、発生している損傷から劣化要因を推定する劣化要因推定機能があるが、従来構築したこの機能は、いくつかの劣化要因に対して推定がうまく行われていなかった。そこで、本研究では、この機能に改良を加え、本機能の推定精度の向上を図った。改良された本機能を5つの橋梁に適用した結果、一部の劣化要因については、まだ十分ではないが、概ね全ての劣化要因に対して推定精度の向上が図れた。

キーワード：Bridge Management System, 損傷, 劣化要因, 因果ネットワーク

1. はじめに

日本では、1950年代から始まった道路交通網の整備により、多くのコンクリート橋が建設された。しかし、建設時から50年近く経過した現在では、これらの橋梁の中には、著しい損傷を受け、何らかの維持管理対策が必要なものも増えてきている。

このような背景の下で、著者らは従来より橋梁に対する維持管理業務の支援を目的とした「Bridge Management System」(以下、本BMS)の開発を行ってきた。本BMSの一機能である劣化要因推定機能^{1),2)}(以下、本機能)は、対象としている橋梁の主桁および床版に対して、発生している損傷からその劣化要因を推定する機能である。劣化要因推定機能は、概ねうまく推定しているものの、既存の研究により、いくつかの劣化要因に対しては推定がうまく行われていないことが問題点として挙げられている。そこで、本研究は、本機能に対して劣化要因の推定に関するルールの追加や変更等を行うことによってこの問題点を解消し、本機能の劣化要因推定の精度向上を図った。

2. 劣化要因推定機能の改良

2.1 既存の劣化要因推定機能の問題点

構築された本機能を実際の橋梁に適用し、専門家を交えて検証した結果、以下のような問題点があることが判明した。

- (1) 本機能では、床版の損傷として20項目、劣化要因として15項目を考慮しているが、損傷や劣化要因として考慮する必要のないものが含まれている。また、逆に本来は考慮すべきである損傷や劣化要因が含まれていない。
- (2) 損傷と劣化要因に関するルールは、そのほとんどが既往の文献等を参考に作成されたものであり、劣化要因推定のための全てのルールが抽出できていない。
- (3) ルールの確信度は、専門技術者ではなくシステム開発者が任意に決定したものであり、損傷や劣化要因についての信頼性が低い。
- (4) 劣化要因推定のためのルールは、全ての橋梁に対して同じルールを用いていることから、一般的な劣化機構は推定できるものの、対象橋梁特有の劣化機構を推定することができない。

*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 安川情報システム(株) 修士(工学)

*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 改良後の本システムで考慮する損傷（床版）

低品質コンクリート	配水管の詰まりまたは欠如	異常たわみ
配筋の乱れによる応力集中 または不均等な分配	路面ひび割れ	遊離石灰
ポップアウト	豆版・空洞	異常な振動
コケなどの植物	鉄筋腐食	鋼板接着部の損傷
床版ひび割れ	漏水・滞水	錆汁
変色・劣化	抜け落ち	ゲル状の流出物
欠損	剥離・鉄筋露出	

— : 削除された項目

■ : 整理統合された項目

表-2 改良後の本システムで考慮する劣化要因（床版）

荷重などの力学的要因	設計不良によるもの	乾燥収縮
練り混ぜてから養生までの不良	アルカリ骨材反応	排水機能不足
配筋誤差	塩害	予期しない外力
かぶり不足	中性化	型枠・支保工の不良
施工不良によるもの	凍害	基礎条件の変化
材料不良によるもの	低品質な骨材	鉄筋量不足による剛性不足

■ : 整理統合された項目

■ : 追加された項目

これらの問題点により本機能では、いくつかの劣化要因に対して推定がうまく行われていないものと思われる。本機能では、劣化要因推定に用いるル-ルを文献調査によりシステム開発者が抽出していたが、実際には、劣化要因の推定には、非常に高度な専門知識が必要であり、ル-ルの抽出が不十分であったことがこれらの問題点の原因であると思われる。そこで、本研究では、橋梁の設計・維持管理に関わった経験年数が20年以上の熟練した専門技術者（技術士）1名の協力のもとに、ル-ルの再構築を行い、劣化要因推定の精度向上を図った。

2.2 考慮する損傷・劣化要因の再定義

従来の本機能で考慮されていた損傷は、「橋梁点検要領（案）」³⁾を参考に定義されたものであるが、その中には、通常の点検によって発生の有無が確認できないもの（“異常たわみ”、“異常な振動”、“鋼板接着部の損傷”）が含まれていた。そこで、損傷発生の有無が確認できないものについては、考慮する損傷から削除した。また、損傷の中には、専門家の指摘により損傷と定義するよりは、むしろ劣化要因として定義した方が良いと思われる項目が含まれていた。そこで、その項目については、劣化要因として新

たに再定義した。次に、本機能で定義されていた劣化要因は、主に文献調査により定義されたものであるが、施工不良、材料不良、設計不良といった人為的な劣化要因については、あまり考慮していなかった。このためこれらの要因をうまく推定できていなかった。そこでこれらの劣化要因を定義するとともに、整理統合を行った。具体的には、“低品質コンクリート”と“低品質な骨材”を“材料不良によるもの”として考慮し、“練り混ぜから養生までの不良”、“かぶり不足”、“型枠・支保工の不良”、“施工不良によるもの”として考慮する。また、“配筋の乱れによる応力集中または不均等な分配”を“設計不良によるもの”として考慮する。表-1には、再定義された床版に対する損傷を、表-2には床版に対する劣化要因を示す。

2.3 損傷・劣化要因に関するル-ルの設定

本機能では、if~then形式のプロダクションル-ルを用いて劣化要因の推定を行っている。損傷や要因間の因果関係を表した因果ネットワークを図-1に示し、因果ル-ルの一例を表-3に示す。表中の各ル-ルは、「前件部事象が発生（または作用）しているならば、後件部事象が発生（または作用）している可能性は、確信度

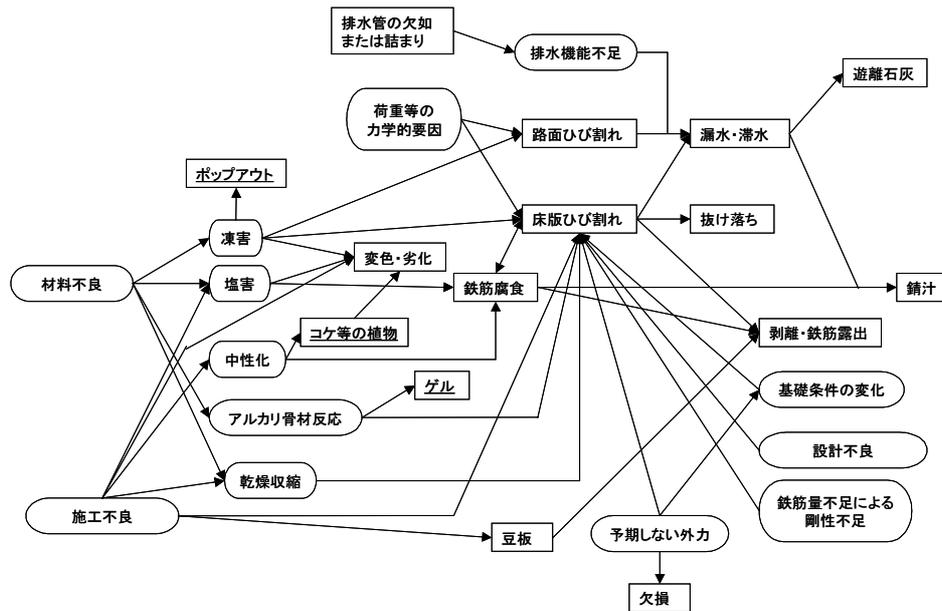


図-1 変更後の床版に対する因果ネットワーク

表-3 因果関係に関するル - ルの一例 (床版)

ル - ル No	前件部事象	後件部事象	ル - ルの確信度
1	コケなどの植物	変色・劣化	0.9
2	床版ひび割れ	漏水・滞水	0.4
3	床版ひび割れ	抜け落ち	0.4
4	床版ひび割れ	剥離・鉄筋露出	0.6
5	配水管の詰まりまたは欠如	排水機能の不足	0.9
:	:	:	:
78	乾燥収縮	施工不良によるもの	0.4
79	乾燥収縮	材料不良によるもの	0.4
80	中性化	施工不良によるもの	0.4
81	排水機能の不足	配水管の詰まりまたは欠如	0.6
82	基礎条件の変化	予期しない外力	0.4

～である」ということを示している。ここでは、前節で定義された損傷・劣化要因をもとに、各損傷・劣化要因間の因果関係に関するル - ルを専門技術者の意見を参考に再構築し、各ル - ルの確信度(ル - ルの可能性の割合)を設定した。

2.4 環境条件・周辺状況に関するル - ル

本機能では、損傷や劣化要因に関する一般的なル - ル、すなわち一般的な劣化機構を考慮して劣化要因の推定を行っている。この方法では、同様の損傷が発生している橋梁は同様の劣化要因が作用していると推定されてしまう。しかしながら、実際の橋梁では、環境条件や周辺状況に影響を受けるため、同じ損傷が生じていても劣化要因が異なることが考えられる。そこで、本機能では、環境条件や周辺状況等によって劣

化要因の因果関係のル - ルを変化させるル - ルを専門家とともに作成し、対象としている橋梁特有の劣化要因を推定している。表-4 にル - ルの一部を示す。ここで、表-4 に示すル - ルは、質問に対する回答によって対応するル - ルの確信度が変更されることを示している。例えば、「片車線の大型車交通量」が「1000 台 / 24h 以上」と回答すると、「床版ひび割れ」が発生しているならば、その要因は「荷重等の力学的要因」である」というル - ルの確信度が 0.6 からランクアップされることを示す。このように確信度を変更し、対象橋梁特有の環境条件や周辺状況をシステムに取り入れることによって、より専門家に近い劣化要因の推定が行える。

表-4 本システムに追加した環境条件・周辺状況に関するル - ル (一部)

質問	部材	影響するルール			質問に対する回答による確信度の変更値				
		前件部事象	後件部事象	確信度					
片車線の大型車交通量は以下のどれに該当しますか？	床版	床版ひび割れ	荷重などの力学的要因(床版)	0.6	R ≥ 1000台 / 24h	ランクUP	1000台 / 24h	不明	不明
	床版	路面ひび割れ(床版)	荷重などの力学的要因(床版)	0.6		ランクUP			
	主桁	ひび割れ	曲げ応力(主桁)	0.4		ランクUP			
	主桁	ひび割れ	せん断応力(主桁)	0.4		ランクUP			
橋齢は以下のどれに該当しますか？	床版	床版ひび割れ	荷重などの力学的要因(床版)	0.6	T ≥ 50年	ランクUP			
	床版	路面ひび割れ(床版)	荷重などの力学的要因(床版)	0.6		ランクUP			
	床版	鉄筋腐食(床版)	塩害(床版)	0.4		ランクUP	50年 ≥ 10年 > T		ランクDOWN
	床版	鉄筋腐食(床版)	中性化(床版)	0.4		ランクUP		10年 > T	ランクDOWN
	主桁	ひび割れ	曲げ応力(主桁)	0.4		ランクUP			
	主桁	鉄筋腐食(主桁)	塩害(主桁)	0.4		ランクUP			ランクDOWN
	主桁	鉄筋腐食(主桁)	中性化(主桁)	0.4		ランクUP			ランクDOWN
設計示方書は以下のどれに該当しますか？	床版	床版ひび割れ	鉄筋量不足による剛性不足(床版)	0.4	昭和45年以前のもの	ランクUP	昭和46年以後のもの	不明	不明
	主桁	ひび割れ(主桁)	鉄筋量不足による剛性不足(主桁)	0.4		ランクUP			

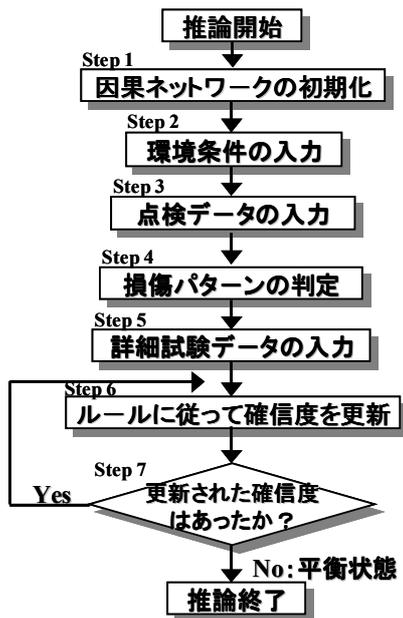


図-2 劣化要因推定の手順

2.5 劣化要因推定の手順

機能の改良により推定手順も従来のものから変更された。本節では変更された劣化要因推定の手順について説明を行う。(図-2 参照)

Step1)因果ネットワークの初期化

因果関係を示すル - ルによって初期の因果ネットワークを構築し、各事象の確信度を初期化 (Null) する。

Step2)環境条件の入力

対象橋梁 (部材) の環境条件・周辺状況を入力し、対応するル - ルに従って因果ネットワークのル - ルの確信度を変更する。

Step3)点検データの入力

点検の結果に基づいて、各損傷の有無とそのランクを入力する。「損傷有り」と入力された事

象の確信度には 1.0 が入力される。

Step4)損傷パターンの判定

Step1)において「損傷有り」と入力された事象のうち、「損傷パターンに関するル - ル」に適合する損傷が存在する場合は、対応するル - ルに従って因果ネットワークのル - ルの確信度を変更する。

Step5) 詳細試験データの入力

詳細試験の結果が存在する場合には、その結果を入力し、「試験結果から劣化要因や損傷の真偽を判定するル - ル」に従って対応する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。

Step6) ルールに従って確信度を更新

因果ネットワークのル - ルに従って、各事象の確信度を更新する。

Step7) 更新された事象の確信度はあったか？

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Step6)に戻り事象の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推論を終了する。

3. 実橋梁への適用結果と考察

改良を行った本機能による劣化要因推定の精度を検証するため、実橋梁に対して本機能を適用した。結果の検証には、対象橋梁に対して点検を行った専門技術者に、作用していると推測される劣化要因をアンケート調査した結果を用

表-5 対象橋梁の概要

梁名橋	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	4 本	5 本
		間隔	3@1.40m	2@1.80m(RC 部)	3@1.10m	3@1.60m	4@0.80m
	横桁	有	有(RC 部)	有	有	無	
	高欄	コンクリート製	コンクリート製	コンクリート製	コンクリート製	コンクリート製	

い、このアンケート調査の結果と点検結果を入力した既存機能、改良後の機能の結果を比較した。本機能を適用した橋梁の概要を表-5 に示す。

推定精度の検証は、これらの橋梁に対して点検を行った専門技術者に対して行ったアンケート調査の結果、点検結果を入力した既存の本機能による結果と改良後の本機能による結果を比較することで行うが、アンケート調査の結果や既存機能の結果と改良後の機能では考慮している劣化要因が変更されているため、単純に比較することができない。したがって、これらの比較を可能とするため、2.2 節で述べた「損傷・劣化要因の再定義」に従ってアンケート調査の結果や既存機能の結果を改良後の機能の結果に変換した。上記の方法によって得られた床版の推定結果を表-6 に示す。表中の専門技術者の評価は、5 段階で評価されており、数値が大きい程作用している可能性が高い。なお、「設計不良によるもの」は、既存機能に相当する劣化要因が存在しないため、専門技術者と既存機能の欄は空白とし検証は行わないこととした。

表-6 中の [] の網掛け部分は、専門技術者の回答に対して既存機能によっては推定できていなかったものが、改良後の機能によってうまく推定できるようになった部分を示している。例

えば「荷重などの力学的要因」は、荷重が原因の劣化要因であるが、この劣化要因がうまく推定できるようになった理由としては、環境条件・周辺状況に関するル-ルを追加したことが考えられる。橋齢が 50 年以上の橋梁に対しては、表-4 に示すように床版の「床版ひび割れ」の原因が「荷重等の力学的要因」である」を示すル-ルの確信度がランク UP される。この結果、橋齢が 50 年を超える橋梁に対しては、荷重による劣化要因が強く作用していることを示すようになり、うまく推定できるようになったと思われる。この他、「施工不良によるもの」がうまく推定できているが、これは、「豆板・空洞」の原因は、「施工不良によるもの」である」のル-ルの確信度を高く設定したことによるものと考えられる。多くの場合「豆板・空洞」とは「施工不良によるもの」によって発生するものであり、このことを考慮してル-ルの確信度を高く変更した結果、「豆板・空洞」が発生している橋梁に対して「施工不良によるもの」をうまく推定できたものとする。

一方、表-6 中の [] の網掛け部分のように、改良後の機能によって専門技術者の回答と大きく異なる結果を出力しているケースがある。これは、部材に発生している損傷が少ないため、

表-6 既存機能と改良後の機能の実橋梁への適用結果（床版）

橋梁名・診断者 劣化要因名	Ho橋(④)			Tu橋(③)			Mi橋(③)		
	専門技術者	既存機能	改良後の機能	専門技術者	既存機能	改良後の機能	専門技術者	既存機能	改良後の機能
荷重などの力学的要因(床版)	4	0.6	0.9	4	0.6	0.6	2	0.2	0.4
施工不良によるもの(床版)	4	0.4	0.9	3	0.4	0.4	5	0.2	0.4
材料不良によるもの(床版)	3	0.4	0.2	3	0.4	0.2	5	0.2	0.1
設計不良によるもの(床版)			0.4			0.4			0.2
凍害(床版)	3	0.4	0.4	3	0.4	0.4	2	0.2	0.2
塩害(床版)	3	0.2	0.4	2	0.2	0.2	1	0.2	0.2
アルカリ骨材反応(床版)	3	0.4	0.4	3	0.4	0.4	3	0.2	0.2
乾燥収縮(床版)	3	0.4	0.5	3	0.4	0.4	3	0.2	0.2
中性化(床版)	4	0.2	0.4	3	0.2	0.2	2	0.2	0.2
予期しない外力(事故、地震)(床版)	2	0.4	0.4	2	0.4	0.4	2	0.2	0.2
排水機能不足(床版)	3	0.2	0.2	4	0.9	0.9	3	0.5	0.5
基礎条件の変化(床版)	3	0.4	0.4	3	0.4	0.4	3	0.2	0.2
鉄筋量不足による剛性不足(床版)	4	0.4	0.6	4	0.4	0.6	3	0.1	0.4

橋梁名・診断者 劣化要因名	Ha橋(①)			Ko橋(②)		
	専門技術者	既存機能	改良後の機能	専門技術者	既存機能	改良後の機能
荷重などの力学的要因(床版)	3	0.6	0.9	4	0.6	0.9
施工不良によるもの(床版)	3	0.2	0.2	4	0.1	0.2
材料不良によるもの(床版)	3	0.1	0.2	3	0.1	0.2
設計不良によるもの(床版)			0.2			0.2
凍害(床版)	3	0.2	0.4	2	0.1	0.4
塩害(床版)	3	0.1	0.1	2	0.1	0.1
アルカリ骨材反応(床版)	2	0.2	0.2	2	0.1	0.2
乾燥収縮(床版)	3	0.2	0.2	3	0.1	0.2
中性化(床版)	2	0.1	0.1	3	0.1	0.1
予期しない外力(事故、地震)(床版)	3	0.2	0.2	2	0.1	0.2
排水機能不足(床版)	5	0.9	0.9	4	0.5	0.5
基礎条件の変化(床版)	3	0.2	0.2	3	0.1	0.2
鉄筋量不足による剛性不足(床版)	4	0.2	0.4	3	0.1	0.3

因果関係による推定がうまく実行できていない（推定のための情報が不足している）ことが原因と考えられる。専門技術者は因果関係のみではなく、何らかの情報によってこの劣化要因が作用していると判断していると考えられる。よって、今後このようなル-ルを本機能に追加し、劣化要因推定の精度をさらに向上させていく必要があると考える。

4. まとめ

本研究では、劣化要因推定機能に改良を加え、劣化要因推定の精度向上を図った。さらに改良後の本機能を実橋梁に適用し精度の検証を行った。検証の結果、既存機能に比較して“荷重等の力学的要因”、“施工不良によるもの”、“鉄筋量不足による剛性不足”といった事象に対して、専門技術者の評価と近い結果を出力することができた。しかしながら、本機能の入力となる損傷が少ない場合、すなわち、対象部材に損傷があまり発生していない場合には、劣化要因推定に関する情報量の不足から、うまく推定できな

いことがわかった。専門技術者は、このような情報量の少ない場合にも何らかの他の情報により劣化要因を推定しており、したがって、今後、本機能に対してもさらなるル-ルの追加が必要であると思われる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 河村圭, 宮本文穂, 中村秀明, 小野正樹: Bridge Management System (BMS) における維持管理対策選定システムの開発, 土木学会論文集 No.658/ -48, pp.121-139, 2000.9
- 3) 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