

論文 Bridge Management System (BMS) のコンクリート橋への適用

中村秀明^{*1}・河村 圭^{*2}・宮本文穂^{*3}

要旨：著者らは従来より、橋梁の維持管理が包括的に行え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。現段階までに開発したシステムは、劣化診断機能、劣化予測機能、維持管理計画最適化機能などを有している。

本研究では、本BMSの実用性をさらに高め、実際に使えるシステムとするため、実際に供用されている山口県下の橋梁に対して本BMSを適用し、さらに専門技術者を対象とするアンケート調査の結果と比較することによりシステムの出力結果について検討を行った。

キーワード：BMS、維持・管理、補修・補強、劣化診断、劣化予測

1. まえがき

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梁が建設されてきた。しかし、建設時から50年近く経過した現在では、橋梁自体の老朽化や周辺環境の変化、道路構造令の改正に伴う活荷重の増大などにより、設計時に考慮した状態よりも厳しい供用状態のもとで著しい損傷を受け、早急に何らかの維持管理対策が必要な橋梁が増えてきている。

このような背景の下で、著者らは、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¹⁾。現段階までに本BMSは、劣化診断機能、劣化予測機能、維持管理計画最適化機能を有している。劣化診断機能は、「コンクリート橋診断ニューロ・ファジィエキスパートシステム (以下エキスパートシステム)」を用い、専門技術者の推論過程を診断プロセスとして階層化し、各プロセスごとにニューラルネットワークと双方向連想記憶を組み合わせたファジィ推論システムを構築することで専門技術者の持つ主観的あいまいさの取扱いを可能にしている。また、劣化予測機能は、橋梁の状態を表す指標として耐荷性および耐久性を定義して、橋梁の余寿命予測が行えるようになってい

る。そして、維持管理計画最適化機能では、遺伝的アルゴリズム (以下GA) を用いて、評価指標を経済性および品質としたときの最適な維持管理計画を高速に求めることが可能となっている²⁾。これらの機能を用いることにより、本BMSは、橋梁維持管理支援システムとして、かなり実用性の高い段階に近づいている。そこで、本BMSの実用性をさらに向上させ、実際に使えるシステムとするため、本システムを山口県下で実際に供用されている橋梁に適用し、システムが有する各機能の出力結果と専門技術者へのアンケート結果と比較することによりシステムの有効性を検証した。

2. 本BMSの構築と特徴

本BMSは、補修または補強が行われていない既存のRC橋梁を対象としており、これらの橋梁の劣化診断や劣化予測、経済性および品質を考慮した上で橋梁が予定供用年数を満たすことができる維持管理計画の作成が可能なシステムの構築を行った。システムのフロー図を図-1に示す。

本BMSでは、まず対象橋梁について点検を行う。点検は目視点検程度のものを主としており、ひび割れ状況、環境条件、交通量、ひび割れ幅と

*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 博士後期課程, 修士(工学)

*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)

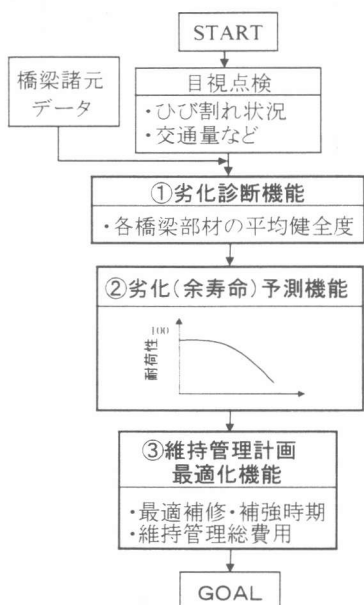


図-1 システムのフロー図

いった定性的および定量的データ、さらには橋梁諸元データが入力される。次に、橋梁各部材の劣化診断（図-1 中の①）が行われる。劣化診断機能については、従来より本研究室で開発してきたエキスパートシステムを劣化診断機能として導入している。このシステムは、専門家の持つあいまいさを含む知識をシステムに取り込んでおり、目視点検程度の情報から、対象橋梁の現在の劣化状況を診断できるシステムである。この機能の出力は各橋梁部材の劣化程度の5段階評価および平均健全度である。さらに、劣化予測機能（②）によって、床版および主桁の劣化予測および余寿命予測を行う。ここで、劣化予測手法としては、劣化診断機能から出力される「耐荷性」と「耐久性」の「平均健全度」を用いて、橋梁各部材の経年劣化を示す「予想劣化曲線」を定式化し、劣化予測を行っている¹⁾。次に本BMSでは、対象橋梁をある期間維持管理していく上で、経済性および品質を考慮した維持管理計画を策定する機能として、維持管理計画最適化機能（③）を構築している。これは、先に述べた劣化診断機能により現在の状態を把握した上で、将来における部材の劣化予測を行い、経済性および品質の面で最適な維持

管理計画を提示する機能である。この機能では、橋梁に対する維持管理対策を「補修」と「補強」に区分し、これらが橋梁各部材に及ぼす影響をもとに補修・補強を行った後の予想劣化曲線に対する影響を定量化することで、将来の橋梁の状態を予測し、最適な維持管理計画を提示することを可能にしている¹⁾。また、維持管理計画の最適化は、非常に組み合わせ数の多い組み合わせ最適化問題となるので、その最適化手法には、GAを用い高速にその近似最適解を探索している。

3. 専門技術者へのアンケート調査と目視点検

3.1 アンケート調査と目視点検の概要

橋梁に対する目視点検およびアンケート調査は、山口県周辺の建設コンサルタント会社（4社）に勤務する橋梁診断の経験年数が10年以上の専門技術者7名を対象として行った。調査対象の橋梁は、7橋梁9スパンである。アンケート調査票の回答形式は、劣化診断機能で用いる教師データを得る質問については、0点～100点まで5点刻みで得点をチェックする形式を取っている。また、劣化予測機能を検証するためのデータを得る質問は、あらかじめ設定した年数の範囲、例えば、10年未満、11年～20年などのどの範囲に属するかを選択してチェックする形式である。補修・補強工法についての質問は、自由回答形式とした。

3.2 アンケート調査の結果と考察

アンケート調査の結果を表-1にまとめて示す。ここでは、主桁について専門技術者が診断を行い、各項目に付けた点の平均点を示す。なお、橋梁名の丸付き数字は、スパン番号を表している。

主桁の診断結果では、耐久性および耐荷性をみると「Ni橋」が最も悪く、「Ge橋」が最も良いと診断された。「Ni橋」の評価は、鉄筋腐食ひび割れの判定項目以外すべて7橋中最も低い結果になっている。鉄筋腐食ひび割れは、「Ha橋」が最も悪かった。「Ge橋」は、ほとんどの判定項目で最高点を得ている。実際の目視の状況と比較してみると、専門技術者の診断は実際の橋梁の状況と合っていることがわかる。

表-1 専門技術者による主桁の診断結果

橋齢	43 年	58 年	41 年	31 年	31 年	32 年	42 年	42 年	29 年
橋梁名	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
判定項目									
主桁設計	59.3	47.9	58.3	75.8	75.0	77.5	70.8	60.8	78.3
主桁施工	55.0	31.4	62.5	75.0	73.3	72.5	71.7	53.3	74.2
主桁供用状態	72.1	47.1	59.2	82.5	85.0	85.0	75.8	73.3	76.7
主桁材料劣化	48.6	47.9	75.0	72.5	74.2	87.5	77.5	62.5	85.0
曲げひび割れ	75.0	37.1	73.3	80.0	75.8	87.5	81.7	72.5	75.0
せん断ひび割れ	92.9	67.9	87.5	95.8	95.8	98.3	92.5	97.5	98.3
鉄筋腐食ひび割れ	40.7	45.7	86.7	87.5	75.0	92.5	73.3	53.3	75.8
付着ひび割れ	90.0	80.7	95.0	91.7	90.0	94.2	93.3	93.3	93.3
主桁の全体的損傷	55.7	37.1	77.5	76.5	74.2	87.5	75.0	64.2	80.0
主桁耐荷性	67.1	35.7	70.0	76.7	76.7	81.7	70.0	63.3	81.7
主桁耐久性	55.0	35.0	69.2	78.3	75.8	85.8	71.7	56.7	81.7
主桁耐用性	62.9	33.6	66.7	75.0	70.8	85.0	71.7	60.8	81.7

表-2 主桁耐久性からみた余寿命

橋梁名	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
年数									
10 年以内	CD	ACDFG	D		D	D		D	
11～20 年	AG	BE	ABC	BD	B	E	ABD	AB	
21～30 年	F		F	ACF	ACEF	AF	F	CF	ABDF
31～40 年	BE		E	E		CE	CE	E	C
40 年以上									E

表-3 主桁耐荷性からみた余寿命

橋梁名	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
年数									
10 年以内	D	ADFG			D	D			
11～20 年	AG	BE	ABCD	BD	B	B	ABD	ABD	D
21～30 年	CF	C	F	ACF	ACEF	AF	F	CF	ABF
31～40 年	BE		E	E		CE	CE	E	C
40 年以上									E

※表中のアルファベットは各専門技術者を表し、網掛けは以下のことを表す

■：専門技術者による診断結果の耐荷性および耐久性の平均健全度から

予想劣化曲線を用いて算出した余寿命

■：劣化診断機能から出力された耐荷性および耐久性の平均健全度から

予想劣化曲線を用いて算出した余寿命

■：■と■の両方が重なっている

表-4 主桁における専門技術者の補修・補強工法選定結果

橋梁名	補修・補強工法の必要性	維持管理対策（補修・補強工法）
Ha 橋	有	パテ、フレハット [®] コンクリート
Ni 橋	有	パテ、FRP 接着、鋼板接着
No 橋	無	
Mi 橋①	無	
Mi 橋③	無	
Ge 橋	無	
To 橋①	無	
To 橋②	有	パテ、フレハット [®] コンクリート
O 橋	無	

次に、表-2～表-3 に専門技術者による主桁耐久性および耐久性からみた橋梁の余寿命予測の結果を示す。ただし、表中の A～G は、実際にアンケート調査を行った専門技術者を示している。

次に補修・補強の必要性に関するアンケート調査結果を示す。対象橋梁を見て維持管理対策が必要と判断された橋梁について、必要とされる補

修・補強工法の一覧を表-4 に示す。

「Ha 橋」は、主桁に鉄筋露出・腐食がみられることからパテ工法およびプレパックドコンクリート工法が選択された。「Ni 橋」は、主桁には鉄筋露出部分にパテ工法、曲げひび割れが多くみられることから鋼板または FRP 接着工法が選択された。「No 橋」は、主桁には、補修・補強の必要

表-5 劣化診断機能を用いた主桁診断結果

判定項目	橋梁名	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
主桁設計		69.1	60.8	60.5	68.4	69.8	71.4	67.4	64.2	56.7
主桁施工		65.2	43.4	75.9	68.5	68.7	61.9	62.0	71.5	68.5
主桁供用状態		70.1	74.2	73.2	83.3	82.0	67.9	69.6	70.1	69.5
主桁材料劣化		50.1	39.1	78.3	64.6	68.3	71.2	76.7	38.4	72.9
曲げひび割れ		58.9	32.7	58.2	79.6	81.4	78.9	79.1	84.4	82.3
せん断ひび割れ		92.2	95.0	92.7	91.7	91.7	91.4	92.1	91.5	91.4
鉄筋腐食ひび割れ		49.5	46.8	84.3	84.1	65.2	82.4	89.0	40.1	73.9
付着ひび割れ		91.6	92.6	91.0	91.4	91.6	91.0	91.2	91.2	91.2
主桁の全体的損傷		53.4	49.9	84.7	75.6	73.5	80.4	84.3	37.6	81.8
主桁耐荷性		52.8	64.3	73.5	91.4	91.6	65.0	64.3	51.7	55.3
主桁耐久性		49.9	57.6	84.2	71.7	68.5	74.8	79.9	44.0	78.1
主桁耐用性		50.9	64.8	78.7	73.8	76.5	69.3	75.4	49.9	68.3

表-6 余寿命

橋梁名	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
余寿命									
主桁耐久性 (年)	11	19	34	16	14	18	29	8	19
主桁耐荷性 (年)	8	17	16	26	26	9	12	8	6

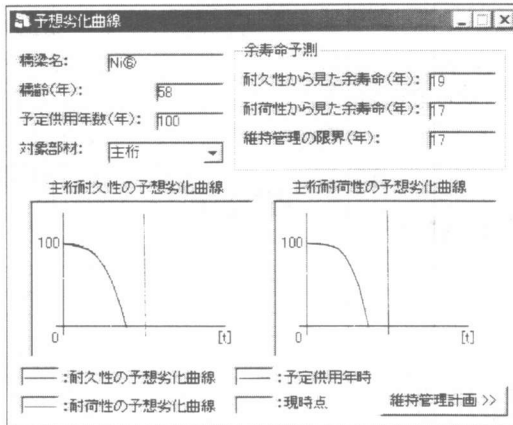


図-2 予想劣化曲線 (Ni 橋⑥)

性はないと判定された。「To 橋」は、主桁に一部で鉄筋が露出していることから、パテ工法およびプレバックドコンクリート工法が選択された。また、この橋梁は、拡幅を行っていて、その新旧の継ぎ目から漏水、遊離石灰がみられることから、グラウト注入工法が選択された。「O 橋」は、補修・補強の必要はないとされた。

今回点検を行った橋梁では、損傷箇所は見られるものの専門技術者からは、ほとんどが早急に補修・補強工法を必要としないとの判断を得た。

4. 本BMSの実橋への適用と検証

ここでは、本BMSに目視点検で得られたデー

タを実際に入力して、各機能からそれぞれ出力された結果と前節で示した調査結果とを比較することによって、本BMSの実用性を検証していく。

4.1 劣化診断機能

劣化診断機能から出力された結果を表-5に示す。これらの結果は、劣化診断を行う橋梁以外の橋梁を学習データとして用いて学習を行い、変更された学習後の重みを用いて出力させたものである。入力に用いたデータは、実橋目視点検を行った専門技術者全員の平均値を用いた。また、学習時に教師データとしたのは、専門技術者全員の診断結果の平均値である。

Mi 橋①、③スパンがアンケート結果にかなり近い結果を出力している。「Ni 橋」が全体的に評価が良くなり多少異なる結果となっている。これは「Ni 橋」だけが他の橋梁に比べて損傷を受けており、ニューラルネットワークの学習の時に与えられたデータが比較的健全な橋梁のデータのみであったためと考えられる。また、「To 橋」②スパンは、「主桁耐久性」が、アンケート結果に比べてかなり下がっているが、本機能への入力において「鉄筋腐食ひび割れ」に関する項目の「ひび割れ幅」が 4.8 mm とかなり悪かったことや「鉄筋腐食状況」の評価が悪かったために、「主桁材料劣化」の評価を下げ、その上位サブゴールである「主桁の全体的損傷」の評価が下がったためと思われる。

メンテナンス計画 - 維持管理計画

最適化モード: □コスト最小化 橋梁名: Ni橋 対象部材: 主桁

index	施工年	維持管理対策	費用
1.	13	珪藻土充填付付 樹脂注入(補修、表面保護)	136
2.	14	樹脂注入(補修)	138
3.	15	珪藻土充填付付 樹脂注入(補修、表面保護)	136
4.			
5.			
6.			

点検実施予定(年): 14, 07, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40. 点検費用: 162

トータルコスト: 143

NEXT >>

図-3 主桁維持管理計画(費用最小化)Ni橋⑥

メンテナンス計画 - 維持管理計画

最適化モード: □品質最大化 橋梁名: Ni橋 対象部材: 主桁

index	施工年	維持管理対策	費用
1.	09	FRP2枚接着or鋼板接着 断面修復 樹脂注入(補修、補修)	1074
2.	11	珪藻土充填付付 樹脂注入(補修、表面保護)	136
3.			
4.			
5.			
6.			

点検実施予定(年): 14, 07, 12, 17, 21, 26, 31, 35, 38, 41. 点検費用: 160

トータルコスト: 181

NEXT >>

図-4 主桁維持管理計画(品質最大化)Ni橋⑥

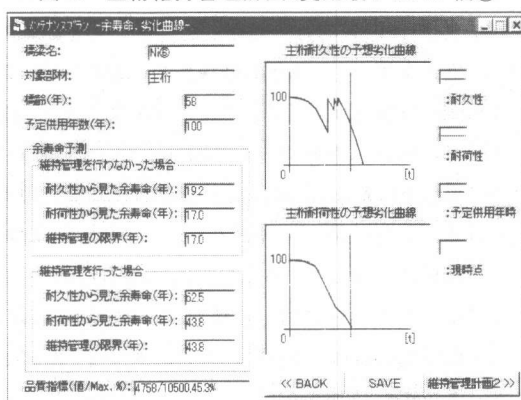


図-5 維持管理後対策後の予想劣化曲線(Ni橋⑥)
(費用最小化、品質指標: 4758)

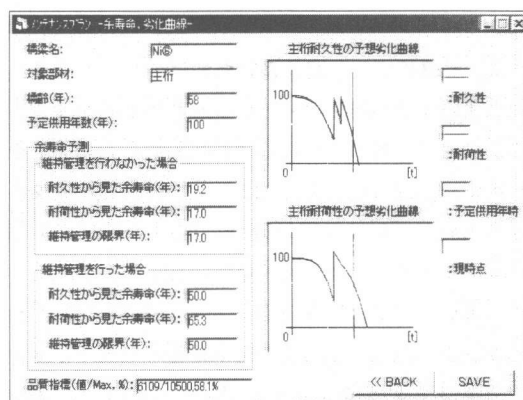


図-6 維持管理後対策後の予想劣化曲線(Ni橋⑥)
(品質最大化、品質指標: 6109)

劣化診断機能は、ニューラルネットワークの学習に用いる橋梁の損傷状態の分布によって、信頼性が左右されるが、橋梁のサンプル数を増やしていくことでその問題は解消されると思われる。

4.2 劣化予測機能

劣化診断機能によって診断された橋梁の耐荷性および耐久性の診断結果を用いて、劣化予測機能から出力された余寿命予測の結果を図-2 および表-6に示す。本機能からは、表-6のように年数が出力されるが、アンケート調査では10年間を一つの範囲としてどこに余寿命が属するかを調査した。表-2～表-3に劣化診断機能の診断結果を用いた余寿命予測、専門技術者による診断結果を用いた余寿命予測を行った結果を網掛けで示す。

耐久性および耐荷性の余寿命予測についてみると、「To橋②」および「O橋②」については、アンケート調査の結果に比べ余寿命を短く見積も

っているものの、その他の橋梁については診断機能の診断結果を用いたものも専門技術者による診断結果を用いたものも比較的アンケート調査の結果と合致しているといえる。「Mi橋」①、③スパンについては、専門技術者の診断結果および劣化診断機能の出力結果から予想劣化曲線を用いて算出した余寿命が両方ともアンケート調査の結果とあまり合致しているといえない。しかし、診断結果をみてもと橋梁の割に耐久性および耐荷性の健全度が低く評価されていることから、本機能の余寿命予測方法を用いると余寿命が専門技術者の感覚より、かなり短く評価されてしまうと考えられる。また、余寿命の評価の方法において、専門技術者は床版および主桁の全体を見て判断していると考えられる。しかし、本BMSに入力する項目は、損傷の一番厳しいところを見て入力しており、本機能においても橋梁の損傷が一番厳しいと

ここで余寿命を判断していることになる。したがって、専門技術者が回答した余寿命より若干厳しい結果として出力されることは十分考えられる。以上のことを考慮すると、専門技術者による診断結果と、劣化診断機能の出力結果である耐久性および耐荷性の平均健全度を用いて計算した余寿命予測の結果を全体的にみれば、専門技術者が持つ余寿命の感覚に比較的にうまく合致していたといえる。

従って、本機能の劣化予測手法は、橋梁の劣化診断後に専門家が判断する余寿命に近いものを推定できるといえる。

4.3 維持管理計画最適化機能

劣化予測機能により出力された予測結果を用いて、維持管理計画の最適化を行った。対象とした橋梁は、専門技術者へのアンケート調査の結果から何らかの維持管理対策が必要とされた「Ni 橋⑥」である。予定供用年数は、100 年とした。

維持管理計画の最適化を行った結果を図-3 および図-4 に示し、維持管理対策後の予想劣化曲線を図-5 および図-6 に示す。図中の施工年は、維持管理対策を実施する年を西暦の下 2 ケタで示しており、維持管理対策は、実施する補修・補強工法を示している。そして、費用は、維持管理対策に必要な費用を記しており、費用の単位 U(Unit)は、 $1U = ¥1,000/m^2$ と換算するものとする。

主桁に対する維持管理計画についてみていく。

図-3 は、必要費用の最小化を条件として、予定供用年数 100 年まで供用するための「Ni 橋⑥」における維持管理計画を示したものである。費用最小化を条件としたこの計画では、補修を中心として選ばれている。これは、主桁の耐荷性より耐久性の健全度評価が低かったことを考慮すると妥当であると思われる。また、この計画に費用を上乗せして、費用の上限を 200 とした場合、図-4 に示すとおり、FRP 2 枚 or 鋼板接着工法が選ばれ、品質指標も向上している。鋼板接着工法は、専門技術者も推奨していた工法である。従って、この工法を行うことは、実際の維持管理にあっていると考えられる。

5. まとめ

本研究は、現在開発中の BMS の検証と問題点の抽出のため、山口県内で実際に供用されている橋梁に本システムを適用するとともに、橋梁を点検する専門技術者に対して、アンケート調査を実施し、本システムの出力結果の有効性を検証した。

以下に本研究で得られた成果をまとめる。

- ① 橋梁点検の専門技術者を対象とした山口県下の橋梁（7 橋 9 スパン）に対して目視点検およびアンケート調査を実施した。専門技術者の判断は、実際の橋梁の状態とよく一致していた。
- ② 専門技術者に対して行ったアンケート調査の結果を用いて、劣化診断機能の学習を行い、実際に目視点検で得られたデータを入力して、出力された診断結果と専門技術者による診断結果との比較を行った。その結果、概ね専門技術者の診断結果とエキスパートシステムの診断結果は一致しているものの、ニューラルネットワークの学習に用いる橋梁データにより信頼性が左右され、学習範囲外の診断では、診断精度が劣っていた。
- ③ 劣化予測機能における劣化予測手法を検証するため、専門技術者に対して行ったアンケート調査における診断結果および劣化診断機能からの出力結果を用いて各橋梁に対する余寿命を予測し、専門家が回答した余寿命との比較をおこなった。本システムからの出力による余寿命は、専門家のものより、余寿命を短めに推定する傾向がみられた。
- ④ 維持管理計画最適化機能により、費用を最小化した場合と設定した費用内で橋梁の品質を最大化する場合の 2 種類の維持管理計画を策定した。概ね専門家の判断と近い結果が得られたが、専門家は、施工条件等も念頭に入れて判断を行っているが、本システムでは、施工条件等は考慮していないため、若干異なった結果を示す場合もみられた。

参考文献

- 1) 宮本文徳、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.