

最新情報処理技術を用いた構造物診断支援システムの開発

山口大学工学部 正会員 中村秀明
山口大学工学部 正会員 河村 圭
山口大学大学院 学生員 三輪宅弘
山口大学工学部 正会員 宮本文穂

1. はじめに

我が国では、1950年代から始まった全国規模での道路交通網の整備により、数多くのコンクリート橋梁が建設されてきた。しかしながら、これらの橋梁は建設時から50年近く経過しており、橋梁自体の老朽化が進んでおり、また、道路構造令の改正に伴う活荷重の増大などにより、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。

このような背景のもと、著者らは、以前より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「橋梁維持管理支援システム；Bridge Management System(BMS)」(以下、本BMSと略記す)の開発を行ってきた^{2),3),4)}。本BMSは、最新の情報処理技術が随所に用いられており、既存橋梁の劣化診断ならびに診断結果に基づく劣化予測を行う機能、経済性および橋梁部材の品質を考慮した最適維持管理計画を策定する機能、さらに劣化要因を考慮した維持管理対策を選定する機能を有している。劣化診断機能は、高等生物の脳の情報処理機能を模倣したニューラルネットワークとあいまいさの取り扱いが可能なファジィ理論を用いた「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」により構築されている^{5),6)}。このエキスパートシステムは、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合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り扱いを可能にしている。また、ニューラルネットワークの誤差逆伝播法による知識更新も付加している。また、劣化予測機能³⁾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³⁾では、維持管理計画は、各年の維持管理対策を組合せた組合せ最適化問題となることから、高等生物の遺伝と進化を模倣した遺伝的アルゴリズム(以下GA)、生体のもつ免疫システムを模倣した免疫アルゴリズム⁷⁾(以下IA)が、組合せ最適化問題の解法として用いられている。さらに、劣化要因推定機能⁴⁾では、因果ネットワーク、ルールベースを用いて、点検時に見られた損傷からその劣化要因を推定し、維持管理対策選定機能⁴⁾では、点検で確認された損傷、劣化要因推定機能で推論された損傷および劣化要因の修復および排除するための対策工法の選択をGAを用いて行う。本論文では、これらの機能のうち劣化診断機能について紹介する。

2. 本BMSの概要

本BMSのフローを図-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であり、ひび割れ状況、環境条件、交通量、ひび割れ幅と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、劣化診断機能により橋梁各部材の劣化診断が行われる。劣化診断機能では、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^{5),6)}が用いられている。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する。劣化状況は、各橋梁部材の劣化程度の5段階評価および平均健全度

キーワード：Bridge Management System(BMS), 維持・管理, 補修・補強, 点検

連絡先：〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1 山口大学工学部知能情報システム工学科

TEL & FAX: 0836-85-9531 E-mail:nakamura@design.csse.yamaguchi-u.ac.jp

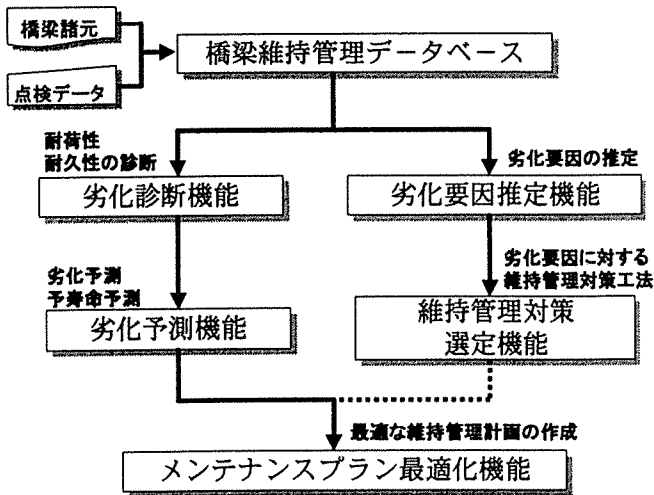


図-1 本BMSの概要

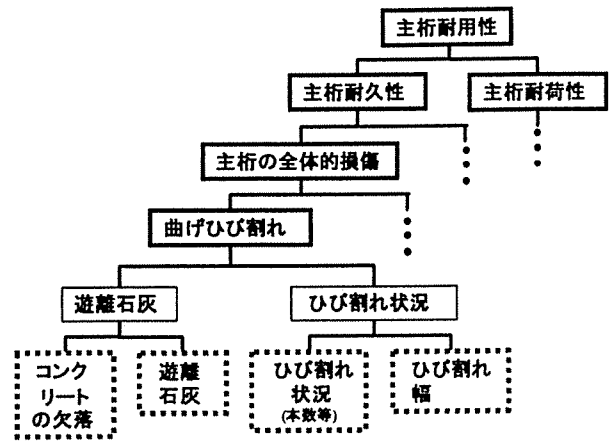


図-2 診断プロセス

で出力される。次に、劣化予測機能³⁾によって、主桁および床版の劣化予測および余寿命予測を行う。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」を仮定し、劣化予測を行っている。次に本BMSでは、橋梁を予定供用年数まで維持管理していく上で、経済性および品質を考慮した最適な補修・補強計画を策定する機能として、メンテナンスプラン最適化機能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。また、維持管理計画の最適化は、非常に組合せ数の多い組合せ最適化問題となるので、その最適化手法には、GAあるいはIAを用い高速にその近似最適解を探索している。劣化要因推定機能⁴⁾は、点検時にみられた損傷からその劣化要因を推定したり将来的に発生する可能性のある損傷を推定するもので、損傷や劣化要因を事象として取り扱い、それぞれの事象の因果関係をネットワークで表現した因果ネットワークを用いて推論を行っている。維持管理対策選定機能⁴⁾では、点検で確認された損傷、劣化要因推定機能で推論された損傷および劣化要因の修復および排除するための対策工法を施工の条件、工法の効果を考慮しながら選定する。工法の組合せは、膨大となることから、最適化にはGAが用いられている。

3. 劣化診断機能

劣化診断機能では、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が用いられている。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、橋梁諸元や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する。劣化状況は、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出力される。このシステムの知識表現には if then 形式のプロダクションルールが用いられており、推論は階層構造ニューラルネットワークによるファジィ推論が行われている。また学習機能は誤差逆伝播法（Back Propagation 法、BP 法）で行われている。具体的に詳しく説明すると、本診断システムでは専門家の持っている診断の知識が図-2に示すような階層構造の診断プロセスとして整理されており、その診断プロセスによって推論が行われる。診断プロセスでは下位の点線で囲まれている入力項目を診断システムに入力することにより、順次上位の項目が推論され、最終的に部材の耐久性、耐荷性、耐用性といった項目が推論される。本論文では、推論過程の具体的例として図-2に示す階層構造のうち「ひび割れ状況（本数等）」と「ひび割れ幅」から「ひび割れ状況」を推論する過程を取り上げ説明する。

表-1 ひび割れ状況（本数等）のカテゴリー分け

	大	中	小
ひび割れ幅	0.3mm 以上	0.2mm 以上 0.3mm 未満	0.2mm 未満

表-2 下位 GOAL 「ひび割れ状況」におけるプロダクションルール

No.	条件部（前件部）		下位 GOAL（後件部）
	ひび割れ状況（本数等）	ひび割れ幅	「ひび割れ状況」の健全度
1	かなり多い	かなり大きい	0.0
2	かなり多い	大きい	7.5
3	かなり多い	小さい	49.9
4	かなり多い	極小さい	60.1
5	多い	かなり大きい	20.8
6	多い	大きい	28.2
7	多い	小さい	69.9
8	多い	極小さい	76.1
9	少ない	かなり大きい	40.8
10	少ない	大きい	52.8
11	少ない	小さい	75.6
12	少ない	極小さい	100.0

3.1 点検データの入力

診断システムへの入力データとしては、橋梁点検者の主観的判断をできるだけ排除するため、基本的に建設省土木研究所資料「橋梁点検要領(案)」⁸⁾に従った点検結果を用いた。「橋梁点検要領(案)」では、ひび割れの状況が表-1に示されるようにカテゴリー分けされており、その箇所数が点検調書および損傷図に記録されている。本研究では、この大、中、小にカテゴリー分けされたひび割れ発生箇所数を診断システムへの入力データとして用いている。具体的には、図-2の入力項目の「ひび割れ幅」には、点検で確認された最大ひび割れ幅(mm)が入力され、「ひび割れ状況（本数等）」には、次に示す評価点が入力される。

$$\text{評価点} = (\text{カテゴリー大の発生箇所数}) \times (\text{カテゴリー大の重み}) + (\text{カテゴリー中の発生箇所数}) \times (\text{カテゴリー中の重み}) + (\text{カテゴリー小の発生箇所数}) \times (\text{カテゴリー小の重み}) \quad (1)$$

現在のところ各カテゴリーの重み（大、中、小）はそれぞれ 1.5, 1.0, 0.5 を用いている。

3.2 推論過程

このシステムの知識表現には次式に示す if-then 形式のプロダクションルールが用いられている。

$$R^i : \text{if } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } \dots \text{and } x_m \text{ is } A_m \text{ then } y \text{ is } B_i \quad (2)$$

ここで R^i は i 番目のルール、 x_1, \dots, x_m は入力変数すなわち点検項目あるいは橋梁諸元項目など、 y は出力すなわち診断項目となる。また A_1, \dots, A_m はファジィ変数、 B_i はクリस्प変数（健全度）である。表-2に「ひび割れ状況」の診断に利用されるプロダクションルールの一覧を示す。また、図-3にはプロダクションルール前件部に記述されているファジィ集合の初期形状を示す。いま点検により最大ひび割れ幅が 0.5mm、ひび割れの発生箇所数として大 4 箇所、中 3 箇所、小 2 箇所が得られた場合を考える。このとき、「ひび割れ状況（本数等）」の評価値は 10.0 となる。この入力値を用いて図-3中の前件部ファジィ集合のグレードを求める。最大ひび割れ幅が 0.5mm であることから「小さい」、「大きい」を表現するファジィ集合のグレードはそれぞれ 0.8 となり、「極小さい」、「かなり大きい」は 0.0 となる。また、「ひび割れ状況（本数等）」の評価値は 10.0 であることから、「多い」、「かなり多い」を表すファジィ集合のグレード値は、それぞれ 0.8, 0.4 となり、

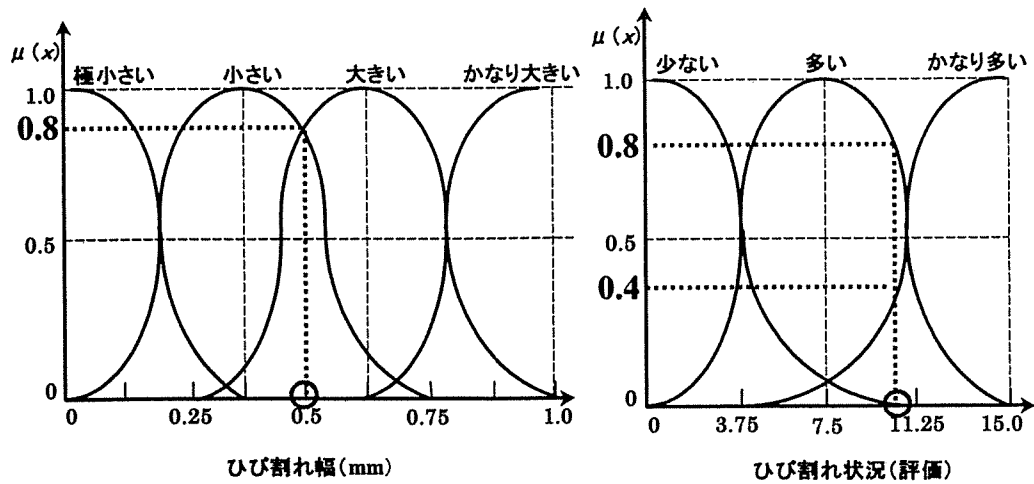


図-3 前件部ファジィ集合の形状

No.	条件部(前件部)			前件部の適合度
	ひび割れ状況	ひび割れ幅		
1	かなり多い (0.4)	かなり大きい (0.0)	$(0.4) \times (0.0) = 0.0$	0.0
2	かなり多い (0.4)	大きい (0.8)	$(0.4) \times (0.8) = 0.32$	0.17
3	かなり多い (0.4)	小さい (0.8)	$(0.4) \times (0.8) = 0.32$	0.17
4	かなり多い (0.4)	極小さい (0.0)	$(0.4) \times (0.0) = 0.0$	0.0
5	多い (0.8)	かなり大きい (0.0)	$(0.8) \times (0.0) = 0.0$	0.0
6	多い (0.8)	大きい (0.8)	$(0.8) \times (0.8) = 0.64$	0.33
7	多い (0.8)	小さい (0.8)	$(0.8) \times (0.8) = 0.64$	0.33
8	多い (0.8)	極小さい (0.0)	$(0.0) \times (0.0) = 0.0$	0.0
9	少ない (0.0)	かなり大きい (0.0)	$(0.0) \times (0.8) = 0.0$	0.0
10	少ない (0.0)	大きい (0.8)	$(0.0) \times (0.8) = 0.0$	0.0
11	少ない (0.0)	小さい (0.8)	$(0.0) \times (0.8) = 0.0$	0.0
12	少ない (0.0)	極小さい (0.0)	$(0.4) \times (0.0) = 0.0$	0.0

図-4 本システムの推論課程 (前件部適合度の計算)

No.	前件部の適合度		下位 GOAL(後件部) 「ひび割れ状況」の 平均健全度	
1	0.0	×	0.0	= 0.0
2	0.17	×	7.5	= 1.3
3	0.17	×	49.9	= 8.5
4	0.0	×	60.1	= 0.0
5	0.0	×	20.8	= 0.0
6	0.33	×	28.2	= 9.3
7	0.33	×	69.9	= 23.1
8	0.0	×	76.1	= 0.0
9	0.0	×	40.8	= 0.0
10	0.0	×	52.8	= 0.0
11	0.0	×	75.6	= 0.0
12	0.0	×	100.0	= 0.0

} **42.2**

図-5 本システムの推論過程 (下位 GOAL の健全度の計算)

「少ない」のグレード値は0.0となる。これらファジィ集合のグレード値を用いて前件部の適合度が図-4のように計算される。なお、前件部の適合度はそれぞれのルールの適合度の合計値が1.0になるように正規化されている。この例では、No.2 および No.3 のルールが17%ほど支持され、No.6 および No.7 のルールが33%ほど支持されている。

最後に各前件部の適合度と後件部に記述してある健全度の値より、診断結果である下位 GOAL「ひび割れ状況」の平均健全度を求める。具体的には図-5に示すように各ルールごとに前件部の適合度と後件部の健全度を掛け合わせたものを総和することにより下位 GOAL「ひび割れ状況」の平均健全度42.2が求まる。

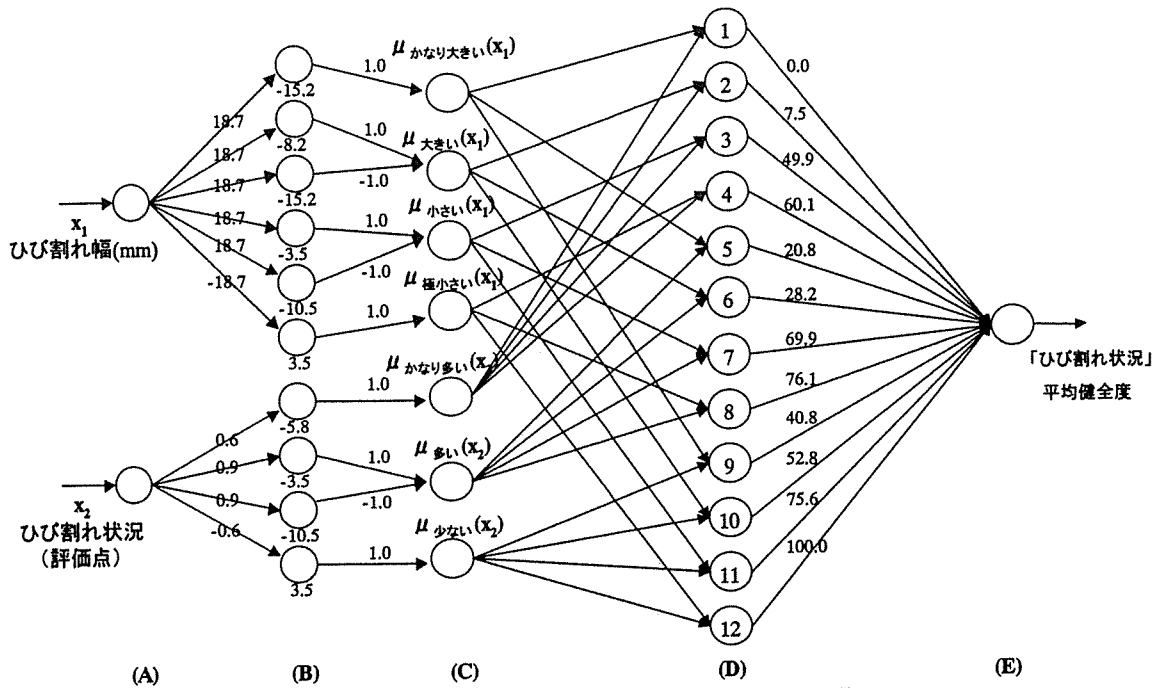


図-6 階層構造ニューラルネットワークによる推論機構

3.3 ニューラルネットワークを用いた推論過程の構築

本診断システムの推論機構は、図-6 に示す5層のニューラルネットワークで構成されている。この5層のニューラルネットワークは、(A)層の入力部、(B)層および(C)層の前件部、(D)層のファジィ論理演算部、(E)層の出力部からなる。(A)層-(B)層-(C)層は、図-3 に示すファジィ集合の形状を近似しており、(A)層のニューロンにひび割れ幅(mm)とひび割れ状況(評価点)が入力されると、(C)層よりそれぞれのファジィ集合に合致する程度つまりグレードが出力される。このように(A)層-(B)層-(C)層は、プロダクションルールの前件部ファジィ命題に対応している。(D)層のニューロンは、対応するプロダクションルールの前件部ファジィ命題を表現している(C)層のニューロンと結合している。この結合重みの初期値は0.5である。(D)層-(E)層は、プロダクションルールの後件部を同定しており、その結合重みは、プロダクションルールの後件部に記述されている健全度の値となっている。出力部(E)層のニューロンは、(D)層より出力された各プロダクションルールの適合度とプロダクションルールの後件部クリスプ変数(健全度)である結合重みを掛け合わせた値の総和を診断結果として出力する。

3.4 ニューラルネットワークの学習

本診断システムの推論機構は、図-6 に示すように5層の階層構造ニューラルネットワークで構成されている。ニューラルネットワークの特徴として教師データからの学習が可能である。本診断システムで用いている階層構造ニューラルネットワークでは、各層間の結合重みおよびニューロンのしきい値が特定の意味を持って設定されており、この結合重みおよびしきい値を変化させることにより、ファジィプロダクションルールの同定および前件部ファジィ集合の形状を調整し、学習を行っている。本診断システムでは誤差逆伝播法(Back Propagation 法, BP 法)による学習を行っている。図-7 に学習の概念を示す。診断システムの入力として、ひび割れ幅 0.5mm、ひび割れ状況(評価値) 10.0 を入力した場合、出力として「ひび割れ状況」の平均健全度 42.2 点 が得られる。しかしながら橋梁維持管理の専門家の判断が 70 点であった場合、専門家と同じ判断が下せるように、学習によりニューロンのしきい値および結合重みを調整する。具体的に学習する箇所は、(A)層-(B)層間の重み、(B)層のしきい値、(C)層-(D)層間の重みおよび(D)層-(E)層間の重みである。本診断システムでは、ファジィ推論を行っているが、制約条件を設けず単に BP 法で学習した場合には、メンバシップ関数の形状が不適切なものとなり推論処理が説明のつかないブラックボックスになる可能性が

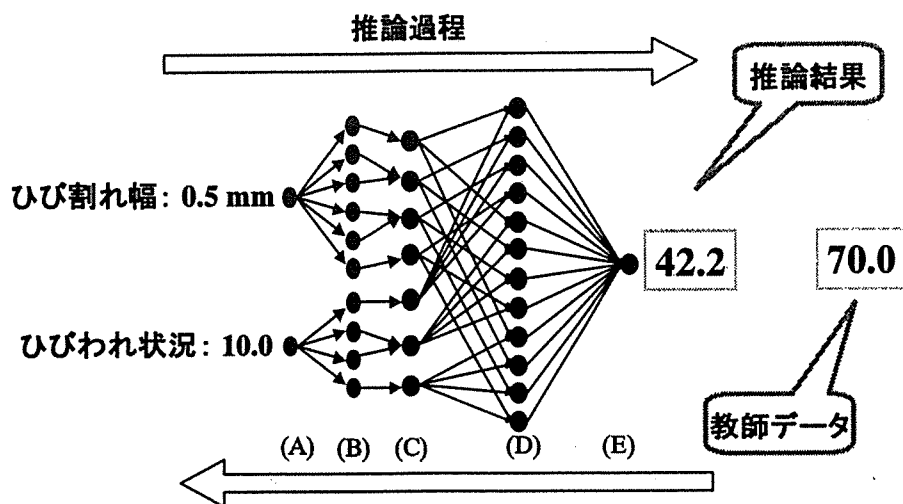


図-7 学習の概念

表-3 学習用教師データ

	Ko橋②	Ko橋⑧	Mi橋①	Mi橋③	Tu橋③	Ha橋①	Ha橋②	Ho橋①	Ho橋④
主桁設計	s-d(35.0)	s-d(35.0)	M(40.0)	M(40.0)	s-d(35.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(30.0)	s-d(30.0)
主桁施工	M(40.0)	M(40.0)	s-d(20.0)	s-d(30.0)	M(40.0)	M(50.0)	M(50.0)	M(40.0)	M(40.0)
主桁供用状態	s-d(35.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)	M(40.0)	M(40.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)
主桁材料劣化	M(40.0)	s-d(35.0)	s-d(20.0)	s-d(25.0)	s-d(30.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)
曲げひび割れ	M(40.0)	M(40.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	M(40.0)	M(50.0)	s-d(25.0)	s-d(25.0)
せん断ひび割れ	M(40.0)	M(40.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)	M(45.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	s-d(30.0)
鉄筋腐食ひび割れ	s-d(35.0)	s-d(30.0)	M(45.0)	M(45.0)	M(45.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(30.0)	s-d(30.0)
付着ひび割れ	M(40.0)	M(40.0)	M(45.0)	M(45.0)	s-d(30.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)
主桁の全体的損傷	s-d(35.0)	s-d(35.0)	s-d(25.0)	s-d(35.0)	s-d(30.0)	M(40.0)	M(50.0)	s-d(30.0)	s-d(30.0)
主桁耐荷性	s-d(35.0)	s-d(30.0)	s-d(30.0)	s-d(30.0)	s-d(35.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(30.0)	s-d(25.0)
主桁耐久性	s-d(35.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)	M(40.0)	s-d(30.0)	M(40.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)
主桁耐用性	s-d(35.0)	s-d(30.0)	s-d(35.0)	M(40.0)	s-d(35.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	s-d(30.0)
床版設計	M(40.0)	s-d(35.0)	s-d(20.0)	s-d(20.0)	s-d(30.0)	M(50.0)	M(40.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)
床版施工	M(40.0)	M(40.0)	D(10.0)	s-d(25.0)	M(40.0)	M(50.0)	M(50.0)	M(40.0)	M(40.0)
路面状態	s-d(30.0)	M(40.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(25.0)	M(40.0)	M(50.0)	M(40.0)	M(40.0)
床版供用状態	s-d(35.0)	s-d(35.0)	M(40.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)
床版材料劣化	M(40.0)	s-d(35.0)	s-d(15.0)	s-d(30.0)	s-d(35.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)
ハンチ沿いひび割れ	M(50.0)	s-d(35.0)	M(40.0)	M(50.0)	M(40.0)	s-s(75.0)	s-s(75.0)	M(40.0)	s-d(35.0)
支点付近ひび割れ	M(50.0)	s-d(35.0)	M(40.0)	M(40.0)	s-d(35.0)	M(60.0)	M(40.0)	M(40.0)	s-d(35.0)
床版中央のひび割れ	M(45.0)	s-d(30.0)	M(40.0)	M(50.0)	s-d(25.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)	s-d(30.0)
張出部のひび割れ	M(40.0)	s-d(30.0)	M(40.0)	M(40.0)	s-d(35.0)	M(50.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)
床版の全体的損傷	M(40.0)	s-d(30.0)	s-d(25.0)	s-d(35.0)	s-d(25.0)	M(40.0)	M(40.0)	s-d(35.0)	s-d(30.0)
床版耐荷性	s-d(35.0)	s-d(30.0)	s-d(20.0)	s-d(35.0)	s-d(25.0)	M(50.0)	M(45.0)	s-d(35.0)	s-d(30.0)
床版耐久性	s-d(35.0)	s-d(30.0)	s-d(25.0)	s-d(35.0)	s-d(30.0)	M(50.0)	s-d(35.0)	s-d(35.0)	s-d(30.0)
床版耐用性	s-d(35.0)	s-d(35.0)	s-d(25.0)	s-d(35.0)	s-d(25.0)	M(50.0)	M(45.0)	s-d(35.0)	s-d(30.0)

注) S: safe, s-s: slightly-safe, M: moderate, s-d: slightly-danger, D: danger

った。そこで、本研究では、BP 法による学習アルゴリズムに、メンバーシップ関数の変動に関する制約を設け、学習を行った。

3.5 実橋の診断

本節では、本診断システムを実際に山口県下に架設されているRC橋梁に適用し、その実用性を検証する。ここでは、学習前の推論機構が初期状態（プリワイヤ）であるときの本診断システムの出力結果と専門技術者へのアンケート調査結果から獲得された学習用教師データを用いて学習を行った後の診断システムの出力結果を比較した。学習用の教師データは、山口県下に架設されている5橋（9スパン）に対して実際に専門技術者（1名）が点検を行い、その結果をもとに同じ専門技術者が本診断システムの診断項目について0～100点の評価を行ったものを用いた。表-3に専門技術者の評価結果すなわち学習用教師データを示す。ここ

表-4 プリワイヤによる診断結果

	Ko橋②	Ko橋③	Mi橋①	Mi橋③	Tu橋③	Ha橋①	Ha橋②	Ho橋①	Ho橋④
主桁設計	M(40.6)	M(40.8)	M(47.9)	M(61.6)	M(45.5)	M(59.6)	M(59.6)	M(39.3)	M(39.3)
主桁施工	M(39.1)	M(39.1)	s-d(25.0)	M(50.0)	S(97.9)	M(39.1)	M(39.1)	S(97.9)	S(97.9)
主桁供用状態	M(61.6)	M(61.6)	M(56.6)	M(56.6)	M(50.5)	S(98.2)	S(98.2)	S(98.1)	S(98.1)
主桁材料劣化	M(51.7)	s-s(66.8)	M(51.7)	M(51.6)	M(41.5)	s-s(70.2)	s-s(75.4)	M(51.6)	M(51.6)
曲げひび割れ	S(99.9)	M(57.9)	S(99.9)	S(99.9)	M(58.2)	S(93.0)	S(99.9)	s-d(23.2)	s-d(23.2)
せん断ひび割れ	S(99.9)	S(99.9)	s-s(73.5)	M(50.7)	S(99.9)	S(99.9)	S(99.9)	S(99.9)	S(95.8)
鉄筋腐食ひび割れ	D(11.2)	s-d(35.6)	M(50.4)	D(5.5)	D(5.5)	s-s(80.9)	S(99.9)	D(11.2)	D(11.2)
付着ひび割れ	S(99.9)	M(51.8)	S(96.8)	S(96.8)	s-d(16.3)	S(99.9)	S(99.9)	M(57.5)	S(96.9)
主桁の全体的損傷	s-d(28.8)	M(42.2)	M(45.8)	s-d(27.9)	D(11.6)	s-s(80.3)	s-s(87.2)	s-d(30.3)	M(38.1)
主桁耐荷性	s-s(86.7)	S(93.2)	S(88.0)	s-s(80.8)	M(51.8)	S(90.3)	S(90.3)	s-s(67.5)	s-s(71.6)
主桁耐久性	s-d(31.6)	M(46.4)	M(48.1)	s-d(30.1)	D(6.5)	s-s(83.9)	S(92.4)	s-d(34.0)	M(43.4)
主桁耐用性	s-s(63.9)	s-s(72.4)	s-s(71.1)	M(59.2)	s-d(27.1)	S(91.8)	S(95.3)	M(51.0)	M(58.1)
床版設計	s-s(74.1)	M(49.4)	M(61.0)	M(62.5)	M(44.9)	s-s(79.7)	M(62.0)	M(61.0)	M(49.4)
床版施工	M(49.8)	M(49.8)	s-d(13.4)	M(49.8)	S(98.0)	S(98.0)	S(98.0)	M(49.8)	M(49.8)
路面状態	M(56.2)	M(56.2)	M(56.2)	S(96.4)	s-d(26.1)	M(56.2)	S(96.4)	S(96.4)	S(96.4)
床版供用状態	s-s(73.0)	s-s(73.0)	s-s(72.4)	s-s(75.5)	M(61.9)	s-s(72.8)	s-s(78.2)	M(62.3)	M(62.3)
床版材料劣化	s-s(71.6)	s-d(31.4)	M(61.1)	s-s(72.6)	s-s(69.9)	s-s(74.3)	s-s(74.3)	s-s(70.7)	M(51.6)
ハンチ沿いひび割れ	S(99.9)	s-s(73.2)	S(99.9)	s-s(73.3)	M(53.7)	S(99.9)	S(99.9)	S(99.9)	s-s(73.3)
支点付近ひび割れ	S(99.9)	s-s(74.2)	S(99.9)	S(99.9)	s-s(74.2)	S(99.9)	S(99.9)	S(99.9)	s-s(74.3)
床版中央のひび割れ	S(99.9)	M(51.3)	M(58.7)	s-s(74.0)	M(52.9)	S(99.9)	S(97.5)	S(91.3)	M(55.3)
張出部のひび割れ	S(99.9)	s-s(73.2)	s-s(70.3)	s-s(73.2)	M(60.2)	S(99.9)	S(99.9)	S(99.9)	S(99.9)
床版の全体的損傷	S(93.9)	s-s(69.3)	S(90.4)	S(90.8)	s-s(79.5)	S(94.6)	S(94.6)	S(93.6)	s-s(78.4)
床版耐荷性	S(98.6)	s-s(82.7)	S(96.3)	S(96.5)	s-s(87.1)	S(98.8)	S(97.1)	s-s(86.1)	s-s(81.2)
床版耐久性	S(96.7)	s-s(65.4)	S(94.8)	S(95.1)	s-s(82.5)	S(97.0)	S(97.0)	S(96.6)	s-s(80.9)
床版耐用性	S(98.0)	s-s(73.7)	S(97.3)	S(97.4)	S(89.6)	S(98.0)	S(97.8)	S(94.5)	s-s(85.0)
誤差合計	935.0	674.3	921.5	890.7	763.8	942.9	1046.5	936.7	884.2

表-5 学習後の診断結果 (全標本学習法, 学習回数 100 回)

	Ko橋②	Ko橋③	Mi橋①	Mi橋③	Tu橋③	Ha橋①	Ha橋②	Ho橋①	Ho橋④
主桁設計	s-d(32.9)	s-d(32.9)	M(39.0)	M(47.7)	s-d(37.0)	M(46.1)	M(46.1)	s-d(31.8)	s-d(31.8)
主桁施工	M(44.0)	M(44.0)	s-d(23.1)	s-d(34.7)	M(40.1)	M(44.0)	M(44.0)	M(40.1)	M(40.1)
主桁供用状態	s-d(34.9)	s-d(34.9)	M(37.5)	M(37.5)	M(40.0)	M(49.9)	M(49.9)	s-d(35.2)	s-d(35.2)
主桁材料劣化	s-d(34.3)	M(46.3)	s-d(20.2)	s-d(20.2)	s-d(26.8)	M(41.4)	s-s(72.8)	s-d(33.4)	s-d(33.4)
曲げひび割れ	M(48.8)	s-d(37.4)	M(48.8)	M(48.8)	s-d(37.4)	M(40.3)	M(48.8)	s-d(24.9)	s-d(24.9)
せん断ひび割れ	M(44.3)	M(44.3)	s-d(34.9)	s-d(35.0)	M(44.3)	M(44.3)	M(44.3)	M(44.3)	s-d(30.3)
鉄筋腐食ひび割れ	M(37.5)	s-d(30.1)	M(42.2)	s-d(36.6)	s-d(36.7)	M(50.0)	M(51.7)	M(37.5)	M(37.5)
付着ひび割れ	M(47.3)	s-d(37.3)	M(41.3)	M(41.3)	s-d(30.0)	M(47.3)	M(47.3)	M(37.7)	M(41.3)
主桁の全体的損傷	s-d(32.7)	s-d(34.2)	s-d(27.8)	s-d(26.0)	s-d(26.8)	M(41.9)	M(57.6)	s-d(32.3)	s-d(34.3)
主桁耐荷性	M(38.2)	M(38.8)	s-d(30.9)	s-d(31.4)	s-d(25.3)	M(46.2)	M(51.6)	s-d(29.0)	s-d(29.4)
主桁耐久性	s-d(34.7)	s-d(36.5)	s-d(36.8)	s-d(28.1)	s-d(27.5)	M(43.5)	M(52.1)	s-d(35.0)	s-d(37.3)
主桁耐用性	M(40.1)	M(41.7)	s-d(36.2)	s-d(29.9)	s-d(24.2)	M(48.2)	M(52.2)	s-d(33.4)	s-d(35.2)
床版設計	M(45.9)	s-d(32.3)	s-d(33.1)	s-d(23.8)	s-d(31.7)	M(50.7)	s-d(30.0)	s-d(33.1)	s-d(32.3)
床版施工	s-d(37.0)	s-d(37.0)	D(10.1)	s-d(37.0)	M(47.0)	M(47.0)	M(47.0)	s-d(37.0)	s-d(37.0)
路面状態	M(40.4)	M(40.4)	M(40.4)	M(44.7)	s-d(25.0)	M(40.4)	M(44.7)	M(44.7)	M(44.7)
床版供用状態	M(39.4)	M(39.4)	M(39.8)	M(42.1)	s-d(36.9)	M(46.7)	M(49.1)	s-d(35.3)	s-d(35.3)
床版材料劣化	M(53.1)	s-d(26.8)	s-d(27.2)	M(53.7)	M(48.7)	s-s(67.7)	s-s(68.4)	M(52.9)	s-d(35.1)
ハンチ沿いひび割れ	M(58.3)	M(40.0)	M(58.3)	M(40.1)	M(40.0)	M(58.3)	M(58.3)	M(58.3)	M(40.1)
支点付近ひび割れ	M(46.7)	s-d(35.0)	M(46.7)	M(46.7)	s-d(34.9)	M(46.7)	M(46.7)	M(46.7)	s-d(35.0)
床版中央のひび割れ	M(48.1)	s-d(29.2)	s-d(36.4)	M(51.5)	s-d(26.7)	M(48.1)	s-d(34.2)	s-d(35.8)	s-d(31.3)
張出部のひび割れ	M(43.3)	s-d(36.5)	s-d(37.2)	s-d(38.5)	s-d(35.0)	M(43.3)	M(43.3)	M(43.3)	M(43.3)
床版の全体的損傷	M(42.2)	s-d(27.1)	s-d(32.1)	M(43.5)	s-d(36.1)	M(50.0)	M(50.1)	M(41.8)	s-d(29.9)
床版耐荷性	M(43.0)	s-d(33.9)	s-d(35.6)	s-d(34.0)	s-d(37.1)	M(47.5)	M(39.1)	M(45.2)	s-d(27.0)
床版耐久性	M(40.2)	s-d(29.1)	s-d(32.0)	M(40.9)	s-d(37.2)	M(43.4)	M(43.5)	M(39.7)	s-d(31.5)
床版耐用性	M(43.7)	s-d(33.1)	s-d(35.8)	M(38.4)	M(39.3)	M(46.6)	M(42.7)	M(44.3)	s-d(29.5)
誤差合計	124.6	90.6	128.4	158.5	113.7	124.5	152.9	121.1	64.7

で、表中の橋梁名後の丸囲み数字は橋梁のスパン番号を表し、()内の数値は、0~100点の評価値である。
また、英文字(S, s-s, M, s-d, D)はそれぞれ safe, slightly-safe, Moderate, slightly-danger, danger を示している。

学習前の初期状態（プリワイヤ）において、本診断システムの出力結果を表-4に示す。表中の網掛け部は、それぞれ次のことを表している。■は、表-3の教師データと比較したときカテゴリーが1ランクだけ外れている場合を表し、■は、カテゴリーが2ランクだけ外れている場合を表す。また、表の最下行は誤差の絶対値を各スパンごとに合計したものである。学習前の初期状態（プリワイヤ）では、専門技術者の評価結果と比べかなりの誤差が見られ、誤差の合計はスパン平均で888ポイント、1項目あたり平均35.5ポイントとなっている。表-4に全標本学習法による診断結果を示す。学習後の結果は、学習前（プリワイヤ）に比べ誤差が大幅に減少しており、誤差の合計は、スパン平均で120ポイント、1項目あたり平均4.8ポイントとなっており、学習により診断の信頼性は、格段に良くなっている。このことから本診断システムは良好に学習できていると言える。

4. まとめ

本研究は、著者らが従来より開発している「橋梁維持管理支援システム；Bridge Management System(BMS)」の機能のうち劣化診断機能である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の紹介を行ったものである。本研究で用いた制約のあるBP法による学習により、学習後も推論処理に矛盾な点は生じず、内部処理のブラックボックス化が防げた。また、初期状態（プリワイヤ）の診断結果は専門技術者の評価と比べ差異の大きなものであったが、学習を行うことでその差異は小さくなり、診断結果の信頼性向上が図れた。

参考文献

- 1) 河村圭：Bridge Management System(BMS)の開発と橋梁の最適維持管理計画，山口大学大学院修士論文，1997.2.
- 2) 宮本文穂，串田守可，足立幸郎，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) 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/VI-48，pp.121-139，2000.9.
- 5) 宮本文穂，串田守可，森川英典，木村和哉：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の開発と信頼性の向上，土木学会論文集，No.510/VI-26，pp.91-101，1995.3.
- 6) 河村 圭，宮本文穂，中村秀明，三宅秀明：階層構造ニューラルネットワークを用いたコンクリート橋診断エキスパートシステムの実用化，土木学会論文集，No.644/VI-46，pp.67-86，2000.3.
- 7) 中村秀明，宮本文穂，松本 剛：改良型免疫アルゴリズムによる構造設計支援に関する研究，日本ファジィ学会誌，Vol.11，No.6，pp.501-512，1999.12.
- 8) 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.