

論文 PC 橋診断エキスパートシステムの開発

宮本 文穂^{*1}・横山 博司^{*2}・中村 秀明^{*3}・泉元 昌彦^{*4}

要旨：PC 構造は，予想範囲内にある外力のあらゆる組合せに対して，コンクリートの弱点である引張応力を制御でき，維持管理業務を最小限にとどめることが可能となるが，あらゆる部位にプレストレスを導入するのは不可能であり，RC 構造となる部位も存在するため通常の事後保全的な維持管理が必要となる場合がある。本研究では著者らが開発している，主として RC 橋を対象とする橋梁マネジメントシステム (J-BMS) 内の一つの機能として付加している PC 橋を対象とする劣化診断システム(PC 橋版 BREX)について具体的開発例を紹介する。

キーワード：PC 橋，診断システム，エキスパートシステム，J-BMS

1. はじめに

PC 橋などの PC 構造は，RC 構造に比べて部材断面にプレストレスを導入することによって，予想される外力による不利な応力を打ち消して部材全断面を有効に利用できるため，維持管理業務の面からも大変合理的なものにすることができる。そのため，PC 橋の場合には，日常および定期点検を通して劣化・損傷が顕在化した後に維持管理業務に移る。RC 構造でこれまで一般的であった「事後保全」より，例えば，PC 鋼材などの構造上の主要部材に対して何らかのセンサーを設置して，その挙動の時系列変化を計測するヘルスマonitoringシステムによって維持管理業務に関する意志決定を行う「予防保全」が一般化すると考えられる¹⁾。

このように PC 橋の健康診断は，その構造特性より基本的にはヘルスマonitoringを併用した予防保全が一般的となると考えられるが，RC 構造の部位も混在するため，橋梁全体としての維持管理業務には事後保全の実施を併用することも必要となる。本論文では，著者らが開発している，主として RC 橋を対象とする橋梁マネジメントシステム (J-BMS) 内の一つの機能

として付加している PC 橋を対象とする劣化診断システム(PC 橋版 BREX)について具体的な開発例および実橋への適用例について述べる。

2. J-BMS の概要と PC 橋の診断機能

J-BMS によるライフサイクルコストを考慮した最適維持管理計画策定までの流れを図 - 1 に示す²⁾。J-BMS では，維持管理業務の基本フロー(点検 診断 対策)に従って，まず，既存橋梁の目視点検程度の点検と一部詳細点検に分類される点検を組合わせて行い，それを「データベース」に格納する。そして，「データベース」とのリンクによって検索された対象橋梁に関する点検データと橋梁諸元データを入力して，「橋梁診断エキスパートシステム(BREX)」を起動し(劣化診断機能)，診断対象部材である主桁および床版について，その耐荷性，耐久性を 100 点満点の健全度で表すことによって，対象橋梁の診断・評価を行う。次に，「劣化診断機能」で得られた健全度をもとに「劣化予測機能」によって今後の劣化予測を行い，対象部材の今後の劣化進行を視覚的に確認する。最後に，「劣化予測機能」から出力された劣化進行状況から，そ

*1 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)

*2 (株)安部工業所 工修 (正会員)

*3 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)

*4 山口大学 工学部知能情報システム工学科 博士前期課程学生

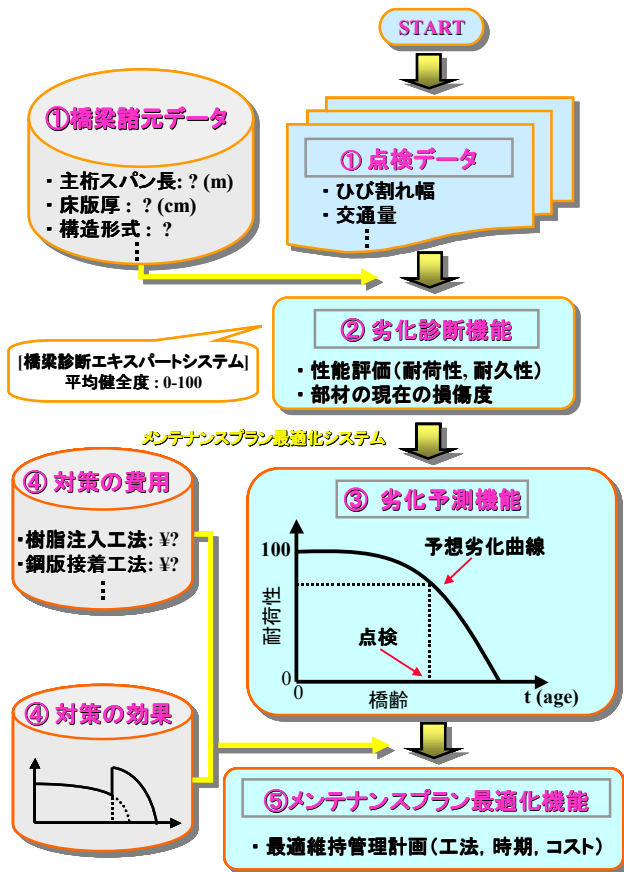


図 - 1 J-BMSによる診断および維持管理計画策定の流れ

それぞれの対策工法の効果および必要な費用を組合わせて考慮することによって、今後の最適維持管理計画（工法選択，時期，ライフサイクルコストなど）を導出する。本システムは、主として既存コンクリート橋を対象としており、その健全度診断ならびに診断結果に基づく補修・補強工法の選定のみならず、限られた予算内で最大の効果を得るための最適維持管理計画の作成が合理的かつ効率的に実施可能な統合型マネジメントシステムで、ニューロ・ファジィ・エキスパートシステム、遺伝的アルゴリズム(GA)あるいは免疫アルゴリズム(IA)などの最新情報処理技術を利用してシステム構築を行っている²⁾。ここでは、J-BMS内の「劣化診断機能」である「橋梁診断エキスパートシステム」を、PC橋固有の点検データを含めて取扱うことによって、RC橋の場合とほぼ同様の健全度診断が可能となるように再構築したものである。

3. PC橋診断システム(PC橋版 BREX)の開発
本章では、RC橋を対象として構築されたBREXにPC橋固有の点検項目を追加して再構築したPC橋診断システム(PC橋版 BREX)の開発を行った³⁾。以下、PC橋を対象とした「評価プロセス」と「知識更新機能」を中心にして具体的に説明を加える。

3.1 知識獲得とその表現

通常、種々の分野の専門知識は専門家（技術者）の経験的な知識を中心として構成されている場合が多く、経験豊富な専門技術者であるほどその知識は無意識的なものとなる傾向がある。従って、これを明確に提示することは困難となり、専門技術者の知識、経験に基づくエキスパートシステム構築を効率良く行うためには、知識獲得手法が大変重要となる。

本研究では、PC橋の維持管理に長年携わってきた専門技術者が体得している劣化の過程と性能評価の関連（評価プロセス）について整理するため、PC橋の劣化、損傷とその原因などの関連図を作成した。このように作成した関連図に基づいてPC橋の劣化、損傷要因などを整理し、入力（点検）項目や評価項目の抽出を行った。その後、実際に専門技術者へのインタビューや個別のディスカッションなどを通じて評価プロセスの作成を行った。その結果得られたPC橋評価プロセスの一部を一例として図-2に示す。

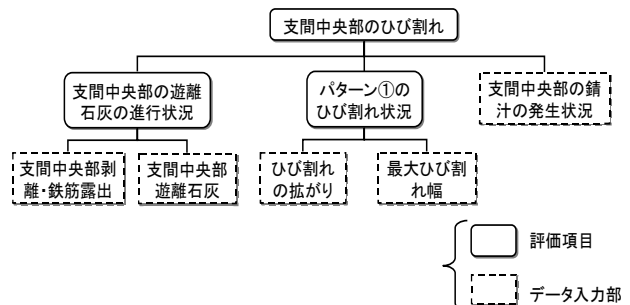


図 - 2 PC橋評価プロセスの一部

3.2 評価プロセスと推論機構

上述のように作成した評価プロセスに基づいて劣化診断をシステム化するためには、推論機構を構築する必要がある。ここでは、上述図 -

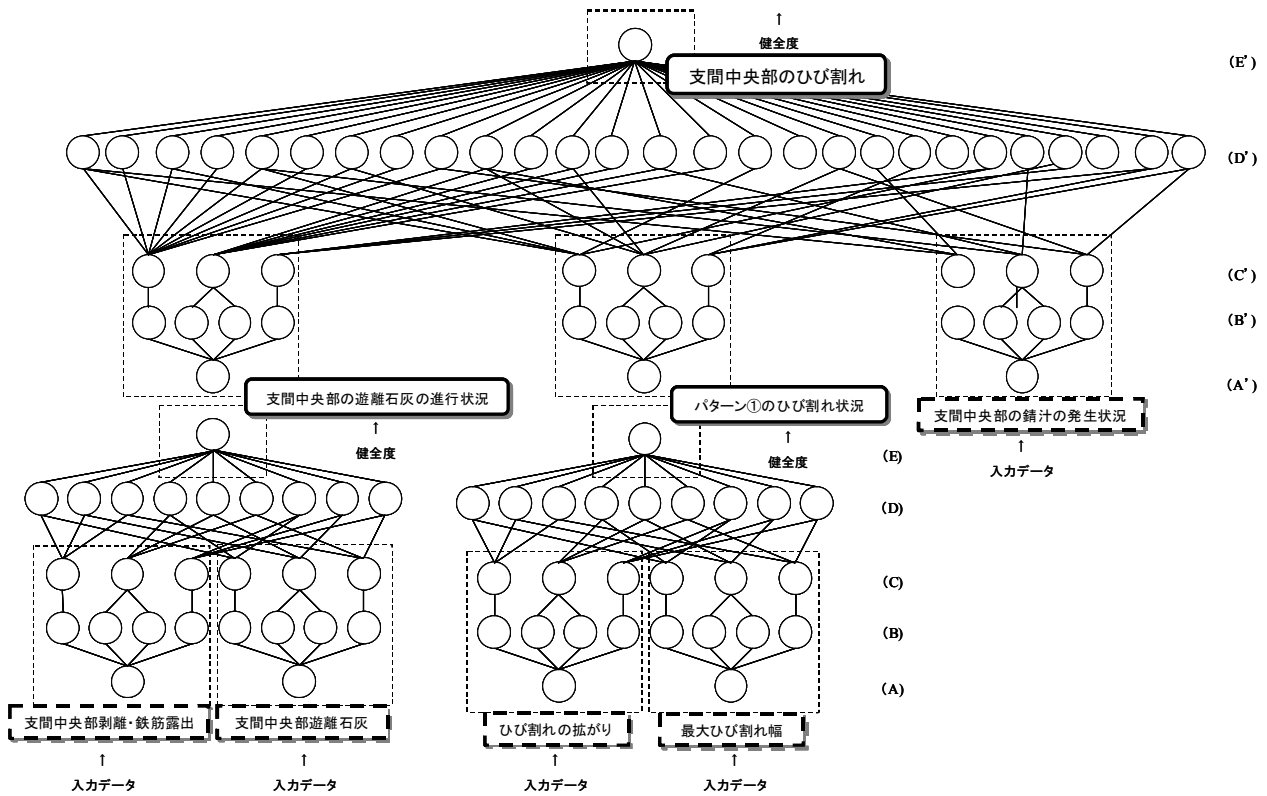


図 - 3 ニューラルネットワークによる評価プロセスの表現

S14	間詰め部 遊離石灰の発生状況	✓ 間詰め部にかかり発生している 発生している 発生していない
		✓ 0.1m ² 以上の遊離石灰が、[2]箇所以上発生している 0.1m ² 未満の遊離石灰が、[]箇所以上発生している

図 - 4 点検アンケートの一部

2に示した評価プロセスを例として以下に説明する；図-2に示す評価プロセス中の階層構造の構成は、「データ入力部 評価項目」または「評価項目 評価項目」を1セットとして、これらの2パターンの組み合わせにより構成されている。システム内部では、この1セットを5層からなるニューラルネットワークとして表現し、これを階層的に組み合わせることにより、図-2の評価プロセスに対応させた階層構造ニューラルネットワークとして構成している（図-3参照）。すなわち、まずデータ入力部である（A）層に入力データが入力され、（B）-（C）-（D）層を経て、（E）層の出力値が決定される。このように決定された（E）層の出力値は、（A'）層へ伝えられる。このような操作を全ての入力データに対して行い、最終評価（（B'）~（E'）層）

まで到達することで本システムからの推論結果（診断）を出力するようになっている。

3.3 橋梁点検アンケートと知識更新

本研究において構築を行ったPC橋版BREXによる実橋梁の評価を検証するため、および知識ベースの知識更新に用いるデータ、すなわち学習用データを作成するために、PC橋維持管理の専門技術者に対して現地での点検および評価に関するアンケート調査を行った。ここで、点検アンケートは、損傷に関する質問項目の場合、図-4に一例を示すような主観的な質問および客観的な質問の2つの形式で回答するものとした。なお、客観的な質問に対しては、本システムの入力データとして用い、主観的な質問に関しては、次段階データ収集の必要性の有無のためのものである。一方、図-5は、システムが

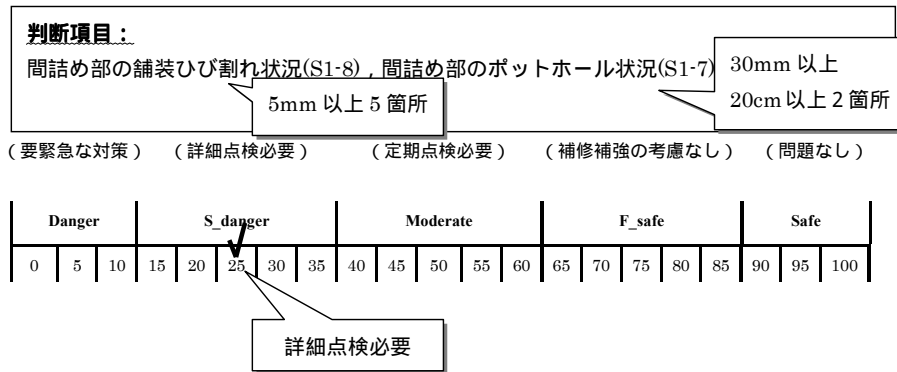


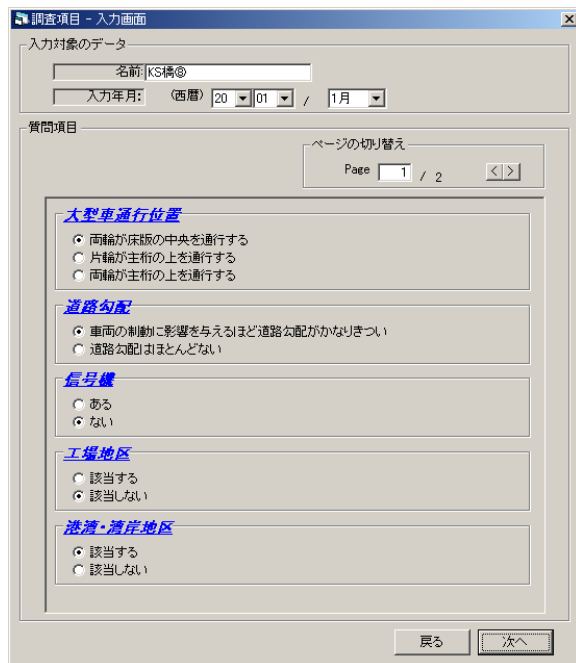
図 - 5 教師データ用アンケートの一部

らの出力結果の検証ならび知識ベースの知識更新に用いるための教師データ用アンケートの一部を一例として示したものである。専門技術者は、判断項目にかかっている各項目の状態から判断した評価項目ごとの点数を、別途用意している”Safe ~ Danger”のカテゴリー表を参考にし、”0 ~ 100”点で評価する²⁾。例えば、図 - 5 の場合には、専門技術者は、「詳細点検(対策としては補修)が必要である」と判断し、その程度は100点満点で考えると25点と評価していることになる。

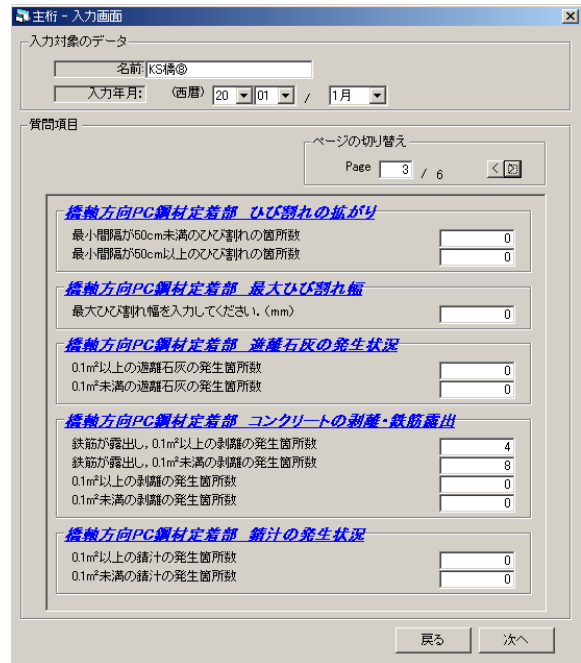
4. 実橋梁への適用例

ここでは、既存 PC 橋の一例として、山口県

内の 8 径間単純 PC ポストテンション T 桁橋である”KS 橋スパン 8”に関する点検データを入力して推論される最終診断結果などを示してみる。図 - 6 は、主桁および床版に関する本システムへの入力画面の一部を示したものである。すなわち、橋梁諸元、各種点検から得られた橋梁全体についての調査、点検結果、また床版および主桁についてのひび割れ状況など、数十項目についての入力を行う。PC 橋固有の点検データとしては、橋軸方向 PC 鋼材定着部での変状、シーす付近での変状や横方向 PC 鋼材定着部の変状など PC 鋼材への影響を考慮した点検結果を入力する項目が設けられている(図 - 6 参照)。このような点検結果に関する入力には主観的に



(a)調査結果入力画面



(b)主桁点検結果入力画面

図 - 6 入力画面の例



図 - 7 診断結果画面の例

定められた選択肢を含むものもあり、該当するものをクリックして選ぶことができるようにしている。図 - 7 は、PC 橋用に構築された診断プロセスの結合計算に従って推論された最終診断結果の視覚的な画面表示を示したものである。すなわち、診断対象橋梁の主桁および床版について、その耐荷性、耐久性、耐用性を 100 点満点の健全度で表している。このように主桁および床版の総合判定結果を視覚的に画面表示することができる。PC 橋においては特に、PC 鋼材について、その劣化状況を把握することが最も重要視されることから、画面にはその劣化状況

を表すために PC 鋼材定着部の損傷およびシーすに沿った損傷評価の推論結果も示している。

図 - 7 中に示している「健全度」の推論結果の主なものを前述の専門家へのアンケート結果と比較してみると、「主桁耐荷性」：73 60、「主桁耐久性」：68 35、「シーすに沿った損傷」：99

60 などとやや安全側の評価になる傾向があり、知識更新が必要となる。なお、本診断機能には、システムからの診断結果の確認およびニューラルネットワークを利用した学習機能を付与しており、前出図 - 7 中右上の「How 機能の実行」ボタンをクリックすると図 - 8 に一例を示すような画面に移る。ここでは、PC 橋用に構築した診断プロセスの全体を示すとともに（画面左）、診断結果の確認を希望する項目（ここでは、主桁 PC 鋼材定着部の損傷）の診断プロセスの詳細（点検項目）とそれを組み合わせたプロダクションルール(if-then ルール)（ここでは、

横方向 PC 鋼材定着部の損傷、錆汁の発生状況、主桁 PC 鋼材定着部の遊離石灰の進行状況、および パターン のひび割れ状況) 群が示され³⁾、今回どのルールがどれだけ適用されて最終診断結果を推論したかの確認が容易になるようにしている（画面右上）。さらに、各項目のメンバーシップ関数の形状が確認可能なように、上記「横方向 PC 鋼材定着部の損傷、錆汁

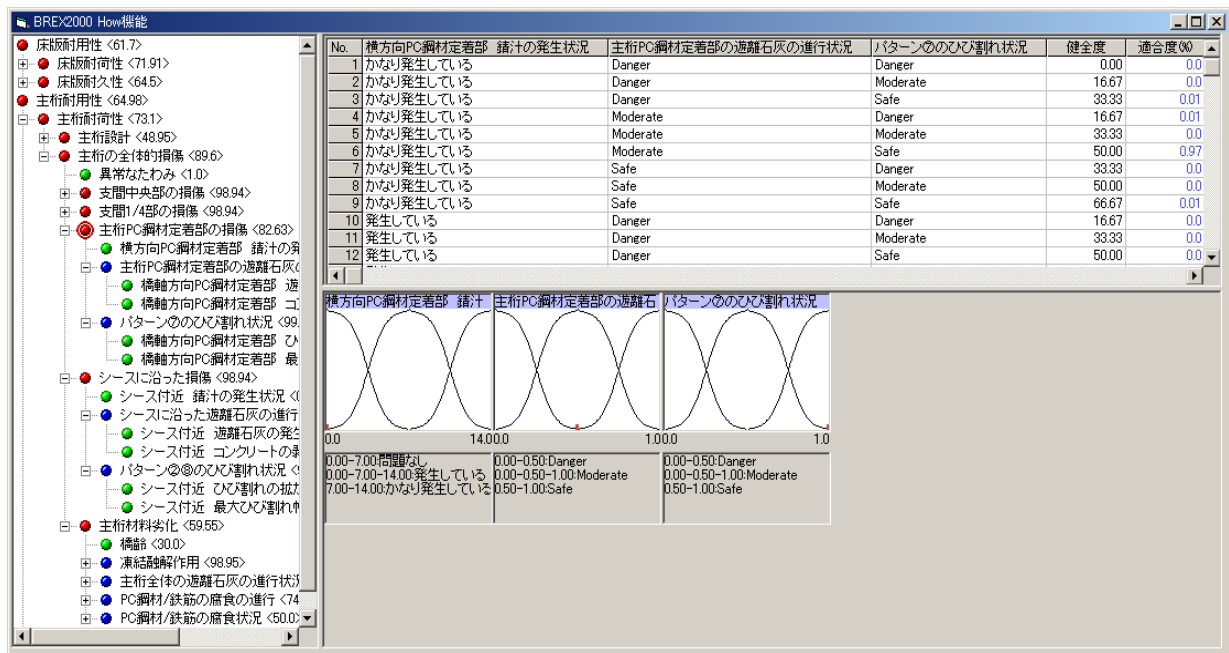


図 - 8 How 機能画面の例

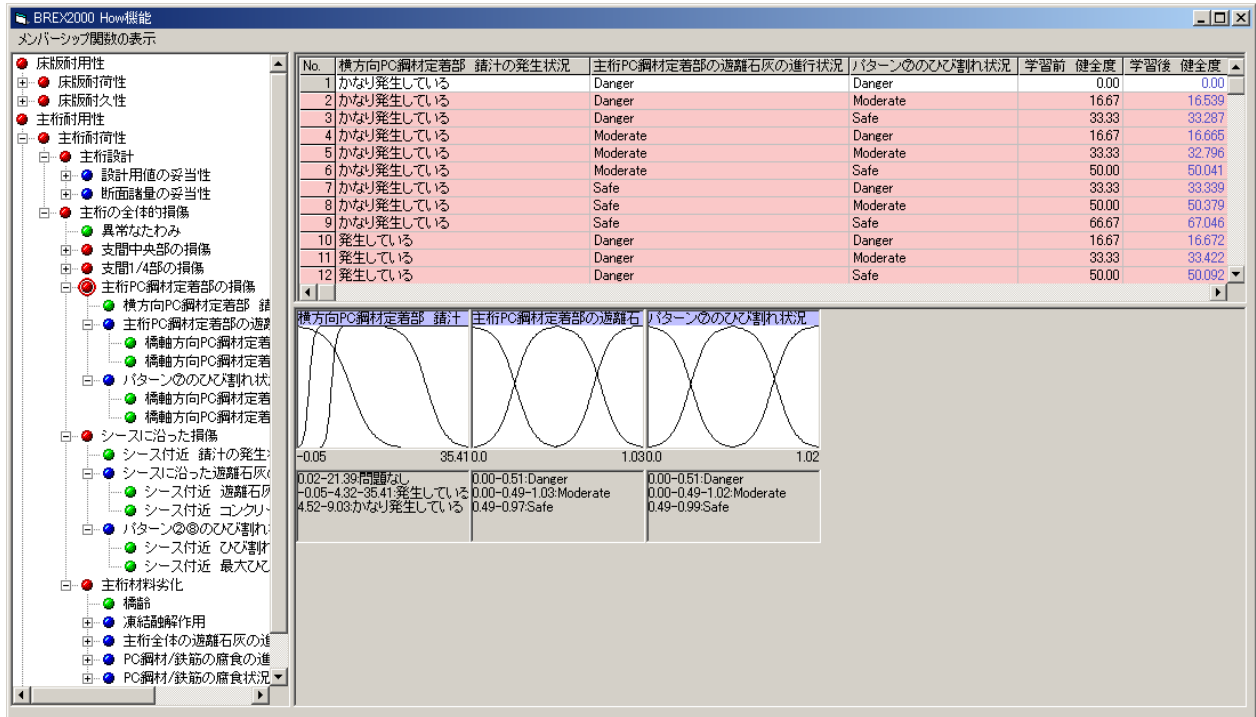


図 - 9 知識更新の確認画面の例

の発生状況」「主桁 PC 鋼材定着部の遊離石灰の進行状況」「パターン①のひび割れ状況」それぞれについての現状でのメンバーシップ関数の形状が図示される（画面右下）。また、本システムは、前述したようにニューラルネットワーク利用した誤差逆伝播法による学習機能を有しており、この項目の診断結果が専門家の意見や実験結果などの「正解」と食い違いが見られる場合に知識の更新が可能となっている。この場合、本システムは、単に診断結果と「正解」の誤差の減少に着目するだけでなく、どのように知識の更新がなされたかを確認させることにより（図 - 9 参照）知識更新にあたっての専門技術者とシステム開発者の効果的なコミュニケーションのサポートを可能としている。

5. 結論

本研究では、J-BMS を PC 橋の維持管理に適用するため、「橋梁診断エキスパートシステム (BREX)」を PC 橋の性能評価が可能となるように再構築(PC 橋版 BREX)し、実橋梁に適用することにより種々の検討を行ったものである。以下に本研究の成果をまとめる。

- (1)PC 橋の合理的な維持管理のための性能評価を行うための評価プロセスおよびニューラルネットワークによるモデル化を専門技術者に対するインタビューなどによって作成した。
- (2)PC 橋版 BREX を開発し、実橋梁である PC 道路橋ポステンション T 桁の主桁および床版の耐荷性、耐久性などの性能評価に適用して評価結果を得るとともに、専門家に対するアンケート結果との比較によってその合理性を検討した。その結果、やや安全側の評価結果を出力する傾向が明らかとなり、知識更新が必要である。
- (3)今後、システム内の知識更新を合理的に行うことによって、本システムからの出力結果に対する信頼性が向上し、PC 橋に対する合理的な維持管理業務に役立つと期待できる。

参考文献

- 1) Klaus Brandes: Information Technology in Bridge Management, プレストレストコンクリート, Vol. 43, No.1, 2001.1.
- 2) Miyamoto, A.: A Practical Bridge Management System for Existing Concrete Bridges, Concrete Structures in the 21st Century, pp.111-120, fib2002 Osaka Congress, 2002.10.
- 3) 三輪宅弘：評価型エキスパートシステム構築ツールの開発と PC 橋への適用, 山口大学大学院理工学研究科修士論文, 2001.2.