

橋梁診断エキスパートシステムにおける知識獲得手法 およびシステム信頼性向上に関する研究

申田守可¹・宮本文穂²・中川正樹³

¹正会員 工修 山口大学博士後期課程(〒755-0031 宇部市常盤台2557)

²正会員 工博 山口大学教授 知能情報システム工学科(〒755-0031 宇部市常盤台2557)

³正会員 工修 JR東海 新幹線鉄道事業本部(〒100-0005 東京都千代田区丸の内1-6-5)

本研究は著者等が開発し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のさらなる実用化を目指して、エキスパートシステム技術自体が直面している種々の問題点を検討し、システムの信頼性を高めることを目的としている。まず、従来のアンケート調査による教師データ獲得手法を見直し、教師データに内在する不要なあいまいさを排除する手法を提案する。また、学習機能を保有するシステムの最大の欠陥である推論過程のブラックボックス化を防止する支援機能を新たに開発し、システム自体の推論機構の信頼度を向上させる。そして、現システムの知識ベースを提案する手法により洗練した上で、実橋の耐用性診断を行い、その診断結果および目視調査結果を比較する事で提案手法の妥当性を検証する。

Key Words : expert system, knowledge acquisition, teaching data, membership function, combination's law

1. はじめに

戦後の11次にわたる道路整備計画に基づく道路網整備により急速に整備された我が国の橋梁は、約70万橋(支間長2m以上)にのぼる。これらの多くが昭和30年代から40年代に架設されたものであり、既に供用開始後30年以上経過していることを考慮すれば、今後老朽橋梁の維持管理の重要性がさらに増大することは明らかである。このような状況を受け、近年、橋梁維持管理システム(Bridge Management System: 以下、BMSと略記する)構築の必要性が各方面で叫ばれ、BMSに関する研究が、関係各機関で着手されはじめている^{1), 2)}。BMSとは橋梁の耐用性診断から、対象橋梁の将来の劣化予測、最適な補修・補強工法とその費用の算定、さらには道路網の総合的なマネージメントまでが実行可能なシステムであり、従来より著者等が開発に取り組んできた、既存橋梁の現状の劣化程度を出力する事が可能である「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」^{3), 4)}はBMSの核となるモジュールであり、一層重要な位置を占めることになる。現システムは、対象とする問題領域の専門知識を利用して推論を行い、専門的に高度な問題の解決に関して専門家と同等あるいはそれに近い能力を持ち、対応できる知的問題解決システムの構築を可能とするエキスパートシステム技術を適用したものであり、

橋梁の維持管理の専門技術者(以下、専門家と略記する)から知識を獲得し、診断対象橋梁の目視点検程度の情報から、総合的な耐用性診断を行うものである。これまでに、専門家の診断過程を診断プロセスとして階層構造化し、さらに専門家の持つ知識のあいまいさの表現にファジィ理論を適用しており、システム自体かなり実用化に近づいていると考えられる。しかし、現システムのみならず実用的なエキスパートシステムの開発には、以下に示す問題点が依然存在しており、真の意味での実用化への大きなハードルとなっている。

- ①知識、情報に不適切なあいまいさが含まれており、信頼度の高い知識(教師データ)の獲得が困難であり、信頼度の高い知識の更新が容易でない。
- ②ニューラルネットワークを適用した学習機能を有する推論機構は、推論過程を明示することが困難であり、ブラックボックスとなる。

エキスパートシステムで用いられる手法は、あくまでもシステム内に獲得した知識を利用して、種々の推論方法により判断を行う情報処理手段であり、専門家等から知識を獲得し構築された知識ベースが、そのエキスパートシステムの有用性を左右する最も重要な要因となる。その知識の獲得手法(問題点①)は、現在でも合理的な手法が確立されているとはいえず、特に本研究で獲得対象とする橋梁診断に関する経験的知識においては、専門家に対するアンケート調査を試行

錯誤的に実施している状況にある。著者等が開発中の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、現システムと略記する）においても、知識の獲得は専門家を対象としたアンケート調査より行っている。アンケート調査による知識の獲得で問題となるのが、獲得した知識に含まれるあいまいさの処理である。本来、診断過程における専門家の判断には主観的なあいまいさが含まれており、それをクリスプな情報として抽出・ルール化する際にさらにあいまいさが加わる。システムの信頼性向上のためには、システム構築段階でこのあいまいさを削除しようとするのではなく、逆にあいまいさを評価し診断過程で合理的に処理することにより、診断結果に含まれるあいまいさの程度とその根拠を明確に示すことが重要となる。しかし、エキスパートシステムで評価しようとするあいまいさは、専門家個々の持つ主観的なあいまいさの相違であるが、知識の獲得をアンケート調査で行う場合、得られたアンケート調査結果には専門家個々の持つ主観的なあいまいさ以外の排除すべき要因によるあいまいさ⁵⁾が含まれている場合が多く、その対処法を検討する事が必要になる。

次に、プロトタイプシステムを実際に適用していくようになると、知識の更新あるいは学習に関する問題点が生じてくる。つまり人間は日常において常に様々な経験を重ね学習している。しかしエキスパートシステムにおいては、一旦知識の獲得を終えると、その知識による判断を不変的に行わざるを得ない。しかし実際に適用されるほとんどの問題においては、様々な未知の要因が含まれるため、適用を重ねる度に、知識の更新、または根本的な診断プロセスの改善の必要が生じる。知識更新機能、学習機能の付与に関して、現システムでは人間の脳の構造をヒントとした神経回路網状のネットワークメカニズムによる情報処理手法であるニューラルネットワークを導入することで、知識の更新を可能としている。しかし正しい学習を行うには正しい教師データの獲得が必要であり、問題点①の克服が重要となる。

さらに、現システムではニューラルネットワークの欠点であるブラックボックス化(問題点②)を防ぐために、診断プロセスの階層構造化を行っているが、その診断結果がどのような過程で出力されたか、言い換えれば、階層構造に基づいた専門家の診断結果と整合しているかを検証できる機能は保有していない。

本論文では、まず現システムの問題点を整理した上で、知識ベースの信頼性向上を目的とした教師データ作成手法の検討を行う。ここでは専門家個人が持つ主観的なあいまいさを抽出し、その他の要因によるばらつきを可能な限り排除しうる手法を提案する。

次に、現システムの診断プロセスにおける上位 sub goal (全体的損傷)と下位 sub goalを結びつける sub goal間の重みを、専門家に対する下位 sub goal間の一対比較アンケート調査より決定し、専門家の診断プロセスを検討する。さらに、ファジィ理論における帰属度関数の結合則の改良を行い、その改良則と sub goal間の重みを用いて、システムの診断結果の信頼性を向上させるための診断結果に対する妥当性確認支援システムの開発を行う。そして、新たに提案した手法に基づいて作成した教師データを用いて、現システムの知識の更新を行い、知識更新後のシステムにより既存橋梁を診断し、その診断結果を、アンケート調査結果より作成した教師データと比較することにより、診断システムが学習により知識を正しく獲得できたかどうかの検証を行う。また開発した妥当性確認支援システムを利用し、専門家の診断過程に従って得られた診断結果と、システムによる診断結果との比較を行うことで、システムの診断結果の妥当性を検証する。

2. 事象統一手法による教師データ作成手法の提案

アンケート調査を利用して学習を行う場合には、専門家の経験的知識を利用するために、獲得したアンケート調査結果から主観的なあいまいさによるばらつきのみを抽出し、その他の変動要因によるばらつきは極力排除することが重要となる⁶⁾。

現システムの知識の更新に用いる教師データ作成のために実施した、既存橋梁を対象とする実橋アンケート調査では、専門家が採点を行う際の損傷状態の把握の違いの実態を検討するために、調査内容にひび割れに対する採点だけでなく、どのようなひび割れ状況に対して採点したのかという質問項目を設けた。実橋アンケート調査結果の抜粋を表-1に示す。

表-1より明らかなように、実際に獲得した実橋アンケート調査結果の分析を行うと、目視箇所については最も損傷の進んだ箇所について採点が行われているにも拘わらず、専門家によって認識された損傷状態が異なることが分かる。採点結果の相違を、すべて専門家個々の持つ評価尺度の違い、つまり橋梁診断システムの知識に獲得させるべきあいまいさとして教師データを作成し、学習させるには問題がある。この採点結果の相違は、専門家個々の持つ評価尺度の違いと、目視しているひび割れ状況およびそれに対する認識の違い双方に起因していると考えられる。本論文では橋梁診断システムに獲得させるべき専門家個々の持つ評価尺度に起因するあいまいさを抽出する手法を提案するものである。

表-1 実橋アンケート調査結果 (一部抜粋)

| 経 験 年 数 (年) | | 5~10 | | 10~20 | | | | | 20~30 | | |
|---------------|------|------|----|-------|-----|----|----|----|-------|-----|----|
| 専 門 家 | | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
| 床版中央 ひび割れ | (状況) | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| | (幅) | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | - | 2 |
| | (採点) | 75 | 60 | 75 | 50 | 75 | 35 | 80 | 75 | 100 | 60 |
| 支受付近 ひび割れ | (状況) | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| | (幅) | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| | (採点) | 90 | 50 | 50 | 70 | 65 | 35 | 70 | 50 | 90 | 60 |
| ハンチ沿い ひび割れ | (状況) | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| | (幅) | 1 | 2 | 2 | - | 1 | 2 | 3 | 2 | - | 2 |
| | (採点) | 80 | 60 | 75 | 100 | 90 | 35 | 40 | 75 | 100 | 70 |

* 状況：採点を行うひび割れ発生状況の分類
 1. かなり多い, 2. 多い, 3. 少ない, 4. ひび割れなし

* 幅：採点を行う最大ひび割れ幅の分類。
 1. ~0.1mm, 2. 0.1~0.2mm, 3. 0.2~0.5mm
 4. 0.5~1.0mm, 5. 1.0mm~

* 採点はひび割れ状況, 最大ひび割れ幅を考慮した上での採点結果 (100点満点) であり, 採点結果に対するイメージは以下のものである。
 0点: 損傷是最悪の状態 (早急に補修, 補強が必要)。
 25点: かなりの損傷が生じており, そのままの状態では危険な状態。
 50点: 損傷状態は良くも悪くもなく普通の状態。
 75点: 少し損傷が生じているが, あまり問題にならない状態
 100点: ほとんど損傷を受けておらず, 全く健全な状態。

(1) 事象統一の必要性和実橋アンケート調査結果の分析

実橋アンケート調査から得られた採点結果には, 専門家個々の持つ評価尺度の違いだけでなく, 異なった損傷状態の採点を行ったことによるばらつきも含まれていることが分かった。ここで, 専門家個々の持つ評価尺度の違いとは, 例えば「ひび割れ」に関する項目について説明を行えば, 同じひび割れ状況を目視しても, それに基づく評価がアンケート回答者個人個人で異なっている場合に, その原因となっているものである。ひび割れ状況は一般的に発生状況 (多い, 少ない等) と最大ひび割れ幅で表現されるため, ひび割れ状況の相違とは, 「発生状況が違う」, 「最大ひび割れ幅が違う」, 「そのどちらも違う」という3つの場合が考えられる。ここでアンケート調査結果における発生状況の違いは専門家個々の尺度により大きく影響される。これは専門家の主観的あいまいさに起因するものである。一方最大ひび割れ幅が異なる場合, 専門家はそれぞれが最も損傷の進んだ箇所を採点しているにも拘わらず, 最大ひび割れ幅が相違しているということは目視を行った部位が他の専門家と違うと考えられる。これは専門家が本来的に持つ主観的あいまいさ⁵⁾に起因するものではなく, 目視調査の不十分さから生じているものであり, 可能な限り排除すべきものと考えられる。すなわち「ひび割れ状況」に関する項目において, 専門家個々の主観的あいまいさを抽出するには, 何らかの手法により, ひび割れ状況におけるひび割れ幅に関するばらつきを排除した上で教師データを作成することが適切であると考えられる。この行為をここでは

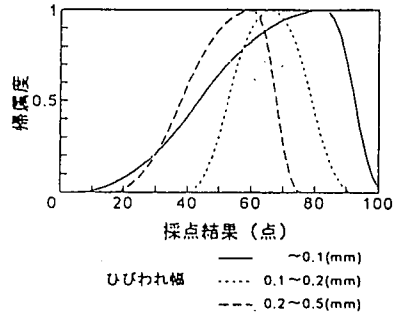


図-1 専門家のひびわれ幅に対する認識を示す帰属度関数

事象統一と定義する。

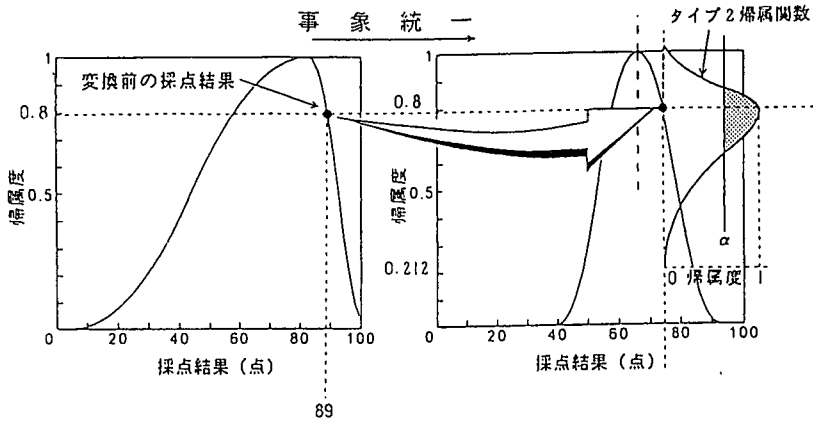
なお, 事象統一手法を提案する事前検討として, 実橋アンケート調査に参加した専門家個々の各ひび割れ状況に対する採点結果を示す帰属度関数の作成を行った。各帰属度関数は, 目視点検結果における, ひび割れ状況, 最大ひび割れ幅ごとに作成する。このひび割れ状況はアンケート調査用紙上で, 非常に多い, 多い, 少し, なしの4段階に分かれており, 最大ひび割れ幅は~0.1(mm), 0.1~0.2(mm), 0.2~0.5(mm), 0.5~1.0(mm), 1.0(mm)~の5段階に分かれている。ひび割れが無いと判断した場合の採点結果は100点であり, これに関する採点結果のばらつきはないと考え帰属度関数の作成は不要とした。

帰属度関数の作成法は, 採点結果全体の算術平均を帰属度関数の軸とし, 算術平均よりも大きい採点結果の標準偏差のN倍を, 帰属度関数の軸の右側の幅を表すパラメータとし, 算術平均よりも小さい採点結果について標準偏差を求めN倍したものを帰属度関数の軸の左側の幅を表すパラメータとして, π 関数を作成した。ここで, Nは任意に設定すればよく, 本研究ではN=6とした。

以上の手順により, ある専門家の採点結果を帰属度関数として表したものを図-1に示す。この結果から, 専門家は橋梁の採点を行う際に, ひび割れ幅ごとに採点結果へのイメージ (規則性) を保有していることが分かる。すなわち, 帰属度関数を用いて, 採点結果の予測を行うことは可能であると考えられる。

(2) タイプ2 ファジィ集合を準用した事象統一手法の提案

提案する手法は専門家個々のひび割れ状況ごとに作成した帰属度関数間で評価値の変換を行うものである。すなわち, まず変換前のひび割れ状況を表す帰属度関数における評価値の帰属度を特定し, この帰属度の値に基づいて, 変換しようとするひび割れ状況に対する帰属度関数における評価値の範囲を算定しようとする



状況3.1(ひび割れが少し,
最大ひび割れ幅 $\sim 0.1\text{mm}$)
を表す, ある専門家の帰属度関数

状況3.2(ひび割れが少し,
最大ひび割れ幅 $0.1\sim 0.2\text{mm}$)
を表す, ある専門家の帰属度関数

図-2 事象統一手法のイメージ図

表-2 シミュレーションによる変換結果の一例

| | 帰属度 | 変更前の採点結果(点) | 予測された採点結果の有効範囲(点) | 予測される採点結果の幅(点) |
|---------|------|-------------|-------------------|----------------|
| CASE T1 | 0.8 | 89 | 64~84 | 20 |
| CASE T2 | 0.56 | 92 | 76~92 | 16 |
| CASE T3 | 1.00 | 82 | 56~75 | 19 |

表-3 提案する手法による変換結果の一例

| | 帰属度 | 変更前の採点結果(点) | 予測された採点結果の有効範囲(点) | 予測される採点結果の幅(点) |
|---------|------|-------------|-------------------|----------------|
| CASE N1 | 0.8 | 89 | 73~76 | 3 |
| CASE N2 | 0.8 | 58 | 57~59 | 2 |
| CASE N3 | 0.56 | 92 | 77~84 | 7 |
| CASE N4 | 0.56 | 44 | 51~55 | 4 |
| CASE N5 | 1.00 | 82 | 66 | 0 |
| CASE N6 | 0.2 | 30 | 48~58 | 10 |
| CASE N7 | 0.2 | 96 | 84~92 | 8 |

ものである。そして、変換しようとするひび割れ状況に対する専門家が保有する帰属度関数において帰属度自身がファジィ集合をなしているというタイプ2ファジィ集合⁷⁾の考え方を準用するものである。

この手法では、変換前のひび割れ状況を表す帰属度関数(以下、変換前帰属度関数と略記する)の帰属度を、変換しようとするひび割れ状況の評価を表す帰属度関数(以下、変換用帰属度関数と略記する)上の同一帰属度自体のばらつきを示す帰属度関数(以下、タイプ2帰属度関数と略記する)の中心軸としている。そして、アンケート調査で得られた採点結果を用い、既述の手法によりタイプ2帰属度関数の拡がりを設定している。

タイプ2帰属度関数から求まる、変換用帰属度関数

の評価値の範囲(採点結果の有効範囲)は、タイプ2帰属度関数の下限に対応する変換用帰属度関数の帰属度を支持する評価値(採点結果)とタイプ2帰属度関数の上限に対応する変換用帰属度関数の帰属度を支持する評価値(採点結果)により設定される区間とする。

上述した事象統一手法により得られる変換結果の一例を表-2に示す。変換はひび割れ状況3.1(ひび割れが少し, 最大ひび割れ幅 $\sim 0.1\text{mm}$)からひび割れ状況3.2(ひび割れが少し, 最大ひび割れ幅 $0.1\sim 0.2\text{mm}$)の間で行い, 実際のアンケート調査データを使用する。

表中, 想定した帰属度0.56は専門家がそのひび割れ状況を目視した場合に, 採点した結果が妥当であるかないか確信がもてないという場合であり, 逆に帰属度1.00はそのひび割れを目視した際に採点した結果として最も確信のもてるものであるといえる。ゆえに帰属度0.56から予測する採点結果はあいまいさが大きくなり, 採点結果の有効範囲も広く想定され, 逆に帰属度1.00の場合は, あいまいさが小さくなり予測される採点結果の範囲も小さくなると考えられる。しかし表-2においては帰属度0.56の予測された採点結果の幅が16点なのに対して, 帰属度1.00の予測される採点結果の幅が19点であり, これらの点に関して改良を行う。すなわち, タイプ2帰属度関数を, 変換前の採点結果の帰属度で α カットすることにより, 同程度の妥当性をもつ採点結果の範囲予測が可能になると考えられる。図-2に提案する事象統一手法のイメージ図を示す。本手法による変換結果の一例を表-3に示す。変換は表-2の変換と同じくひびわれ状況3.1からひびわれ状況3.2への変換とする。変換を行う帰属度は, 0.8, 0.56, 1.00に加えて, 新たに0.2についても行った。

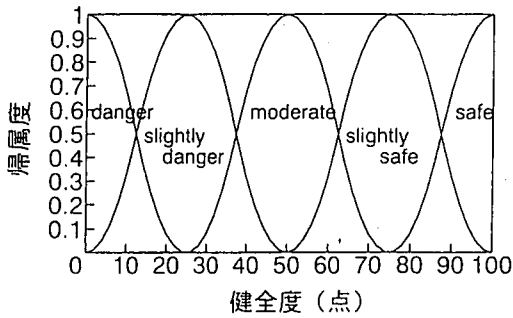


図-3 教師データ作成用帰属度関数

改良前の手法の結果では、変換前の帰属度が変換後の予測される採点結果の範囲に影響することはなかったが、この手法では帰属度が高いほど予測される採点結果の幅が小さくなっており、帰属度を採点結果への信頼度と考えるのに妥当な結果となっている。

(3)採点結果の帰属度関数化および教師データへの変換手法

既述の手法により変換された個々の専門家の採点結果を集計し、帰属度関数化する事で教師データの作成を行う。なお、帰属度関数の中心軸および拡がり採点結果の平均値 x 、標準偏差 σ に基づいて設定する方法は既に説明した通りであるが、ここでは採点結果自身が重みを持っていることにより、帰属度関数の中心軸および拡がりの設定には、採点結果の重みを考慮する事が必要となる。式(1)、(2)に各々の算定式を示す。

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n p_i l_i}{\sum_{i=1}^n p_i} = \frac{p_1 l_1 + p_2 l_2 + \dots + p_n l_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} \quad (1)$$

ここに p_i : 各重み, x : 最確値(中心軸), l_i : 各採点結果

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i} \sum_{i=1}^n p_i^2 (x - l_i)^2} \quad (2)$$

ここに p_i : 各重み, x : 最確値(中心軸), σ : 最確値標準偏差, l_i : 各採点結果

式(1)は重み付き平均をもって、帰属度関数の中心軸とするものであり、式(2)は標準偏差算出の際の距離自体に重みを作用させた上で2乗和をとることで重みの影響を強調した結果とするものである。これは、通常の距離の2乗に重みを作用させることでは、重みに対する感度が低いことによる。以上により帰属度関数

化された採点結果と図-3に示す教師データ作成用の5段階の評価用帰属度関数との重なり部を求め、重なり部の面積を正規化する事で教師データを求める。

3. 専門家の推論過程の再現および診断結果の妥当性確認支援システムの開発

知識更新後のシステムの診断結果と専門家の診断過程を再現する事で得られる診断結果を比較して、システムの診断結果の妥当性の確認を行うことを可能とする妥当性確認支援システムの開発を行う。

ここでは橋梁の耐用性診断において「耐荷性」、「耐久性」を評価するにあたり、特に重要であると考えられる、床版および主桁の「全体的損傷」に着目し、この sub goal (中間仮説を求める階層構造モデルの中の評価項目) を評価の最終目標とした場合の、下位 sub goal間の最終目標に対する重要度を、専門家から一対比較で抽出する。そして、その重要度を専門家が「全体的損傷」の評価を行う際の下位 sub goalの重みとしてとらえ、下位 sub goalの帰属度関数に獲得した重みを作用させた上でそれらの結合を行い、専門家の「全体的損傷」の診断過程の再現を試みる。

(1)AHP手法を用いた下位 sub goalの重みの決定

「全体的損傷」の評価に対する専門家の診断過程のモデル化のための、下位 sub goal間の重み付けをAHP (Analytic Hierarchy Process : 階層分析法)を用いて行う。AHPとはSaatyにより提唱された階層分析法という不確定な状況や多様な評価基準における意志決定手法であり、従来より損傷度評価における重みの設定に適用されている⁸⁾。この手法は複雑な、あるいはあいまいな状況の下での問題の分析において、人間の主観的判断を考慮できることが特徴である。

この分析を床版の「全体的損傷」の下位 sub goalである「ハンチ沿いひび割れ」、「支承付近ひび割れ」、「床版中央ひび割れ」、「材料劣化」の4項目、さらに主桁に関しては同じく「全体的損傷」の下位 sub goalである「曲げひび割れ」、「せん断ひび割れ」、「鉄筋腐食ひび割れ」、「材料劣化」の4項目に適用する。

まずAHP手法を適用し評価要因間の重みを獲得するために、下位 sub goalに関しての一対比較アンケート調査を行う。この一対比較は各下位 sub goal同士を比較した場合に「同程度重要」、「一方が他方よりやや重要」、「一方が他方より非常に重要」と分類して行う。このときの一対比較値として、同程度重要なときに1、やや重要なときには3、非常に重要なときには5とおいた。ある専門家の一対比較結果を表-4に示す。この専門家によれば、床版に関しては「材料劣化」が他の

表-4 ある専門家についての床版、主桁に関する一対比較表

| 床版 | ハンチ | 支承 | 床中 | 材劣 | 主桁 | 曲げ | せん断 | 鉄筋 | 材劣 |
|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|----|----|
| ハンチ | 1 | 1 | 3 | 3 | 曲げ | 1 | -5 | -3 | 1 |
| 支承 | 1 | 1 | 1 | 3 | せん断 | 5 | 1 | 5 | 5 |
| 床中 | -3 | 1 | 1 | 3 | 鉄筋 | 3 | -5 | 1 | 1 |
| 材劣 | -3 | -3 | -3 | 1 | 材劣 | 1 | -5 | 1 | 1 |

*ハンチ：ハンチ沿いひび割れ
支 承：支承付近ひび割れ
床 中：床版中央ひび割れ
材 劣：材料劣化

*曲 げ：曲げひび割れ
せん断：せん断ひび割れ
鉄 筋：鉄筋腐食ひび割れ
材 劣：材料劣化

表-5 AHPにより得られた床版および主桁の「全体的損傷」の下位goalの重み

| 上位 goal | 床版「全体的損傷」 | | | |
|---------|-----------|----------|----------|-------|
| 下位 goal | ハンチ沿いひび割れ | 支承付近ひび割れ | 床版中央ひび割れ | 材料劣化 |
| 重 み | 0.281 | 0.269 | 0.266 | 0.184 |

| 上位 goal | 主桁「全体的損傷」 | | | |
|---------|-----------|---------|----------|-------|
| 下位 goal | 曲 げひび割れ | せん断ひび割れ | 鉄筋腐食ひび割れ | 材料劣化 |
| 重 み | 0.133 | 0.351 | 0.308 | 0.208 |

どの要因よりも重要度が低いことがわかる。また主桁に関しては「せん断ひび割れ」の重要度が他の要因よりも高いことがわかる。このような一対比較を各専門家について実施し、AHP手法による分析を行った。

分析結果には4項目の要因の重みと整合度が出力されるようにした。この整合度は判断の整合性を示す指標で、一対比較表が完全に整合している場合に0となるが、一般に正の値を持ち、不整合な表になるほど、その値は大きくなり、許容できる限度は一般的に0.1程度とされている⁹⁾。ゆえに、整合度が0.1以下となる一対比較表を選定して、AHP手法により各専門家の既述の下位 sub goalの重みを求めた。各専門家の重みを各 sub goalごとに算術平均した結果を表-5に示す。

これらの評価要因間の重みは、関係各機関で設けられている損傷度判定基準とある程度対応する結果となっている。例えば、主桁「全体的損傷」に対する「曲げひび割れ」は設計時点から予測され、計算に加味されているため、すべてが構造物に有害とは言えず、その重みはあまり大きくない¹⁰⁾と考えられるし、また床版「全体的損傷」に関しては、同一ひび割れ密度であっても、床版中央よりハンチ付近にひび割れが集中している場合に注意を要する¹¹⁾という考え方と対応している。以上より、表-5の値は、専門家が床版および主桁の「全体的損傷」を評価する際の各下位 sub goalの重みとして妥当であると考えられる。

(2)帰属度関数の結合則の提案

ここでは、現システムにおける帰属度関数結合則(以下、現結合則と略記する)を検討・改良し、重みを持つ知識(帰属度関数)の結合手法を新たに提案するものである。

a) 現結合則の概説

現システムにおける帰属度関数のモデル化および知識結合手法¹²⁾について以下に説明する。詳細は参考文献を参照されたい。

まず帰属度関数 μ_A とは、本来ある集合 X におけるファジイ集合 A を表すものである。要素 $x \in X$ に対する値 $\mu_A(x) \in [0, 1]$ は、 x がファジイ集合 A に属する度合いを示している。この場合、 $\mu_A(x)$ が1に近ければ、 x の A に属する度合いが高いことを示し、逆に0に近ければ属する度合いの小さいことを示している。

著者等は、帰属度関数 $\mu_A(x)$ の持つあいまいさの程度を帰属度関数に対応させて、ベグネス関数 (Vagueness function, $0 \leq V_A(x) \leq 1$) で表した¹²⁾。ベグネス関数は以下の式で定義される。

$$\begin{aligned} V_A(x) &= 2 \cdot (1.0 - \mu_A(x)) : 1.0 \geq \mu_A(x) \geq 0.5 \\ &= 2 \cdot \mu_A(x) : 0.5 \geq \mu_A(x) \geq 0.0 \end{aligned} \quad (3)$$

帰属度関数 $\mu_A(x)$ をベグネス関数 $V_A(x)$ を含む見かけの値と見なすものとして、肯定の確信量および否定の確信量は次式のように定義される。

$$\begin{aligned} \mu_A^+(x) &= \mu_A(x) - \frac{1}{2} V_A(x) : 1.0 \geq \mu_A^+(x) \geq 0.5 \\ \mu_A^-(x) &= \mu_A(x) - \frac{1}{2} V_A(x) : 0.5 \geq \mu_A^-(x) \geq 0.0 \end{aligned} \quad (4)$$

上述したように、現システムで用いられている帰属度関数 $\mu_A(x)$ は、あいまいさ(ベグネス)と確信量の2つから成り立っているとして表現されている。このような主観的な不確実性を持つ情報を結合する手法として、Dempster & Shafer 理論における基本確率の結合方法であるDempsterの結合則が適用されている。このDempsterの結合則は、一般的に基本確率 $m(A_i)$ に関して以下の式で定義される。

$$m_p(A_k) = \frac{\left(\sum_{A_{i1} \cap A_{2j}} m_{p1}(A_{i1}) \cdot m_{p2}(A_{2j}) \right)}{\left(1 - \sum_{A_{i1} \cap A_{2j} = \emptyset} m_{p1}(A_{i1}) \cdot m_{p2}(A_{2j}) \right)} \quad (5)$$

上式の分子は、 A_{i1} と A_{2j} の積集合 A_k に基本確率の積を割り当てることを意味しており、積集合が空集合となる場合を考慮し、全体を分母で正規化している。しかし現システムにおいて用いる場合は、空集合となる

部分を矛盾量と考えて、正規化は行っていない。

すなわち、現システムにおける結合後の肯定の確信量 $\mu'_{A,B}(x)$ 、あいまい量 $V_{A,B}(x)$ 、および矛盾量 $\mu'_\varphi(x)$ はそれぞれ以下のように与えられている。

$$\mu'_{A,B}(x) = \mu'_A(x) \cdot \mu'_B(x) + \mu'_A(x) \cdot V_B(x) + \mu'_B(x) \cdot V_A(x) \quad (6)$$

$$V_{A,B}(x) = V_A(x) \cdot V_B(x) \quad (7)$$

$$\mu'_\varphi(x) = \mu'^{-}_A(x) \cdot \mu'^{-}_B(x) + \mu'_A(x) \cdot \mu'^{-}_B(x) \quad (8)$$

そして結合後の見かけの帰属度関数は次式で表されている。

$$\mu_{A,B}(x) = \mu'_{A,B}(x) + \frac{1}{2} \left\{ V_{A,B}(x) + \mu'_\varphi(x) \right\} \quad (9)$$

現結合則では、結合関数が3つ以上の場合にも帰属度関数を2つずつ結合し、その結果に次の関数を結合していくという結合則を用いているが、その際に生じる結合順序による相違を排除するために、始めの2つを結合した段階で生じる矛盾量をその段階ではベグネスに繰り込まず、すべての結合が終了してからベグネスに繰り込んでいる。

b) 結合則の提案と決定

新たに結合則の提案を行い、実際の結合結果を現結合則と比較した上で、支援システムに適用する結合則を選定する。

①結合則A

あいまい量は確信量から求められることより、あいまい量も含めた式(6)を以下のように変更する。

$$\begin{aligned} \mu'_{A,B}(x) = & \mu'_A(x) \cdot \mu'_B(x) + \mu'_A(x) \cdot \left\{ 1 - V_A(x) \right\} \\ & + \mu'_B(x) \cdot \left\{ 1 - V_B(x) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

現結合則では確信量を求める際に、一方の確信量と結合対象のあいまい量の積を用いていたが、この手法では一方の確信量に対して同じ関数から求めたあいまい量の積を求め、その値を確信量とした。これにより2つの関数が重なっていない場合についても確信量が求まり、また、あいまい量の小さな部分についてその確信量が際だち、逆にあいまい量の大きな確信量については結合後の影響が小さくなるようになっている。その他のあいまい量、矛盾量の求め方は現結合則と同じである。

以上の手法を用いて、現結合則との結合結果の比較を行う。なお、比較に用いる2つの結合用帰属度関数

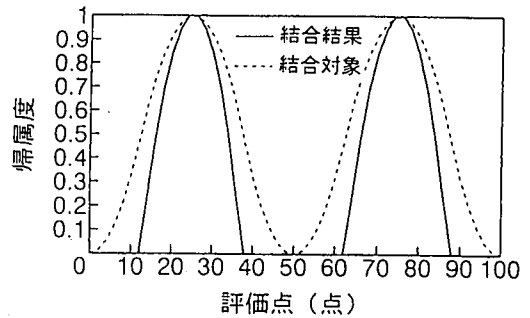


図-4 case1.1結合結果

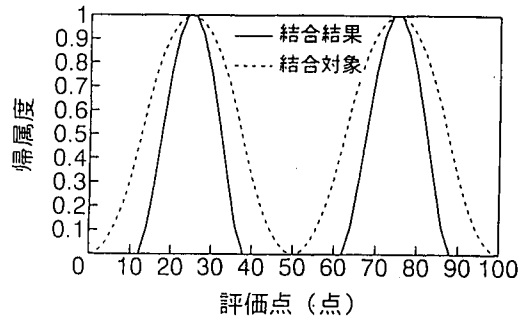


図-5 case1.2結合結果

の位置関係と用いる手法によって以下のような場合分けを行う。

case1.1: 2つの結合用帰属度関数に重なり部がなく、それらを現結合則で結合。

case1.2: 2つの結合用帰属度関数に重なり部がなく、それらを結合則Aで結合。

なお、case2.半分ほど重なっている場合、case3.ほぼ重なっている場合、case4.完全に重なっている場合等も同じ要領で場合分けを行う。さらに帰属度関数の形状が異なる(重みを考慮した結果、帰属度関数の高さが異なる)場合についても結合結果の比較を行う。

case1に関しては、case1.2において、若干関数の膨らみが小さくなったが両手法でほとんど差のない結果となった。それぞれの結合結果を図-4、図-5に示す。なお、図中点線表示した帰属度関数は結合対象関数であり、実線が結合後の帰属度関数である。

case2に関して結合結果の検討を行う。現結合則で結合したcase2.1の結果は、結合関数のピーク位置からピーク位置までがすべて1となる。case2.2の結合結果は結合関数のピーク値を結合後もピークとしながらも、確信量が小さくなり、あいまい量が増大するにつれて結合後の確信量も小さくなっている。帰属度0.5のあいまい量が最大になる点の結合結果は0.5より小さいものとなっており、確信量の小さいものは否定側にシフトされる傾向を示している。それぞれの結合結果を図-6、図-7に示す。

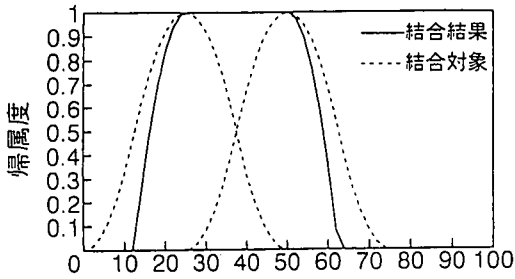


図-6 case2.1結合結果

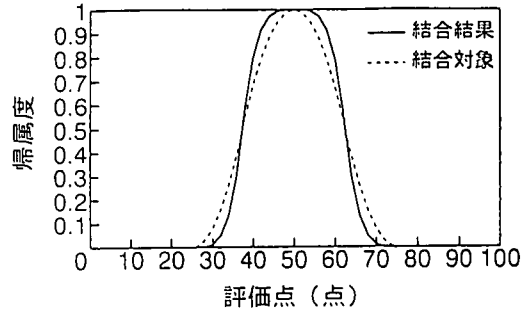


図-10 case4.1結合結果

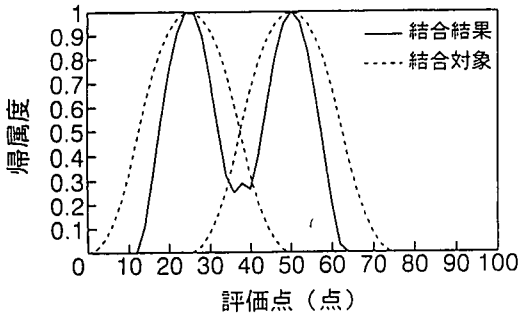


図-7 case2.2結合結果

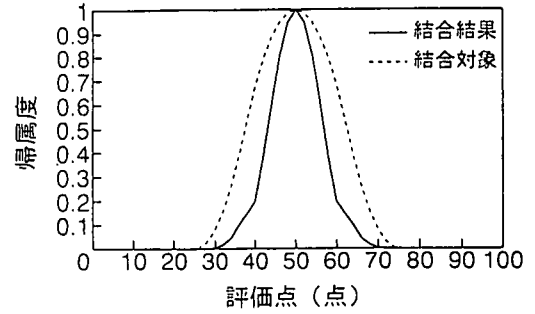


図-11 case4.2結合結果

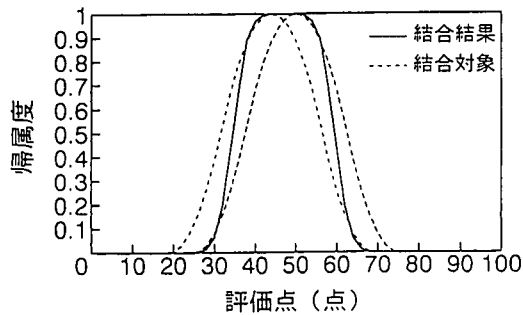


図-8 case3.1結合結果

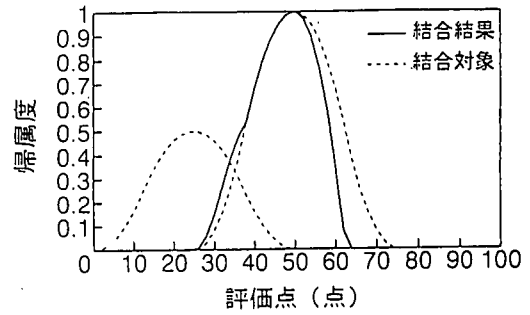


図-12 現結合則による結合結果

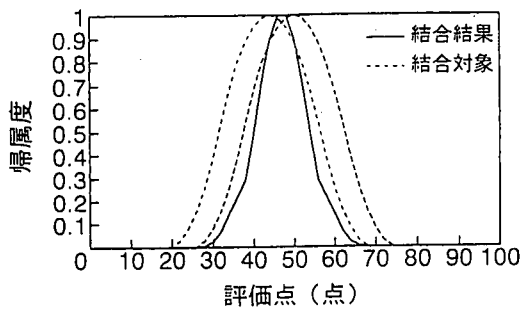


図-9 case3.2結合結果

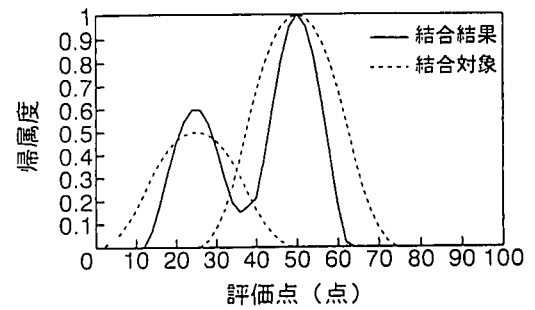


図-13 結合則Aによる結合結果

case 3について結合結果の検討を行う。現結合則を用いたcase 3.1は結合前のピーク位置が結合後もピークになっており、互いにあいまいさの小さい方に引

張られている傾向がある。case 3.2では結合結果はほぼ互いに重なった部分のみとなっている。それぞれの結合結果を図-8、図-9に示す。

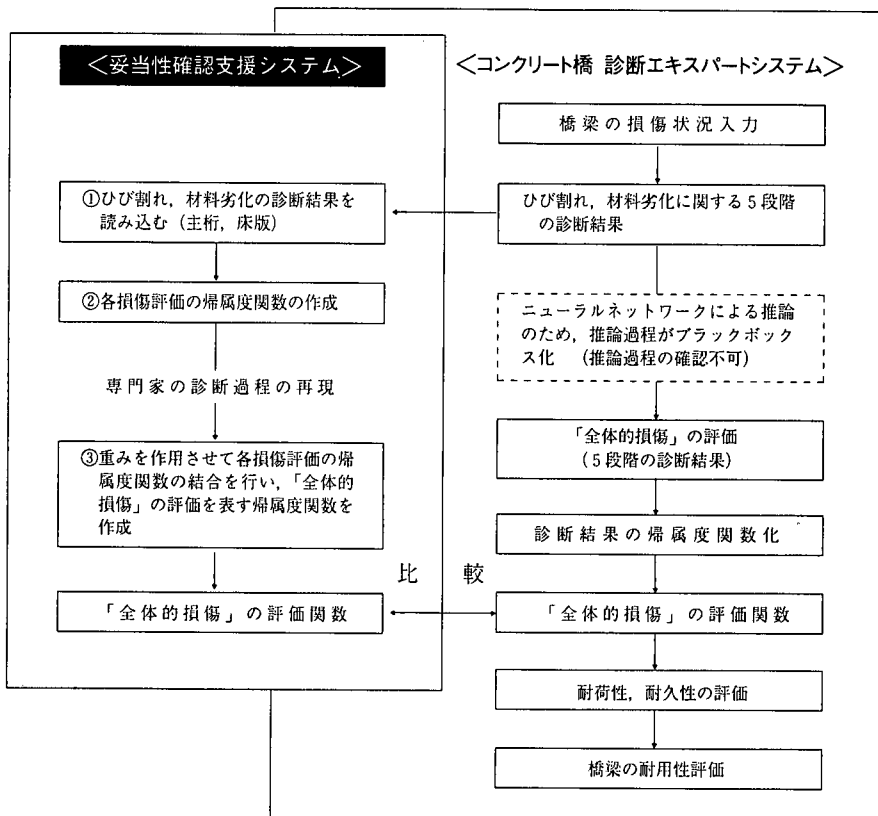


図-14 妥当性確認支援システムの流れ

case 4について結合結果の検討を行う。現結合則を用いたcase 4.1はcase 3.1の場合と同じく結合結果として妥当と考えられる。あいまいさの小さくなっているcase 4.2の結果は、帰属度関数が示す事象を互いに強調しあっていると考えられ、全体のあいまいさが小さくなることに合理性を有していると考えられる。それぞれの結合結果を図-10、図-11に示す。

次に、重みを帰属度関数の高さを変化させる事で作用させ結合を行う場合について検討を行う。図-12に現結合則を用いて結合を行った結果を、図-13に結合則Aを用いて結合を行った結果を示す。図-12では重みの小さい方の関数の影響が結合結果にほとんど反映されていないことが分かる。結合則Aを用いた結果では、重みの小さい方の関数の影響も適切に反映していると考えられる。

本研究の目的である、橋梁診断の専門家による診断過程の再現および橋梁診断システムの診断結果の妥当性を確認できる「妥当性確認支援システム」の構築においては、この重みを考慮した帰属度関数の結合結果が非常に重要となる。ゆえに、知識結合時の重みが結合結果に反映されている結合則Aを開発する妥当性確認支援システムでは適用することにする。

(3) 妥当性確認支援システムの開発

獲得した「全体的損傷」の下位 sub goalの重み、そして改良した帰属度関数の結合則を用いて、妥当性確認支援システムを構築する。本支援システムは事前に診断システムを用いて診断を行った橋梁の診断結果を、専門家の行う診断結果と比較し、その妥当性を確認することを目的としている。この場合、視覚的な比較を考慮し、システムおよび専門家の診断結果を帰属度関数化する事が適切と考えた。すなわち、診断システムの「全体的損傷」に対する診断結果を帰属度関数に変換する手法として、診断結果が確率に準じた値であることから、5段階の診断結果を表す帰属度関数に、診断結果値を重みとして高さに乗じ、それらを既述の帰属度関数の結合則を用いて結合し、診断結果を表す帰属度関数とする。また、妥当性確認支援システムにおける専門家の診断結果の再現および帰属度関数化は以下の手順により行う。

- ①床版、主桁別に、診断システム内の各ひび割れ、材料劣化の診断結果を妥当性確認支援システム内に取り込む。
- ②次に、5段階の診断結果のそれぞれのイメージ (danger~safe) に対して重みを考慮し、各々の帰属

度関数を結合する。この重みは①で読み込んだ診断結果の値であり、帰属度関数の高さに重みを乗じる。

③以上により床版、主桁別に4種類の sub goal の損傷状態、つまりシステムの診断結果を表す帰属度関数が作成される。これらの帰属度関数の重要度を示すのが、先にAHPで獲得した重みであり、この重みを各 sub goal の帰属度関数の高さに乗じた上で、sub goal の結合を行う。

以上の手順で最終的に sub goal の帰属度関数を結合した結果が、専門家の診断過程を再現して求めた「全体的損傷」の診断結果となる。本支援システムの流れを図-14に示す。

4. 提案する知識更新手法の実橋への適用とシステムの診断結果の妥当性確認

ここでは、実橋アンケート調査で獲得したデータに対して事象統一手法を適用し、専門家が本来的に持つあいまいさのみを抽出し、そのデータから作成した教師データを用いて、現システムの知識の更新を行う。そして知識更新後のシステムにより、既存コンクリート橋を対象として診断を行い、診断結果と教師データ、さらには知識更新前の診断システムによる診断結果との比較を行い、知識の更新によって現システムが、教師データから正しく専門家の知識を獲得できたかについて検証を行う。また、妥当性確認支援システムを用いて、知識更新後の診断システムが、専門家の行う診断と同等の診断を実行しているかを検討する。

(1)ニューラルネットワークを用いた知識の更新

知識の更新に適用する橋梁は、実橋アンケート調査を実施した橋梁群から4橋を選定し、損傷程度の進んだ橋梁から健全な橋梁まで、教師データとして損傷程度が偏らないように留意する。これら4橋について作成した教師データを用いて、現システムの知識の更新を行うが、知識の更新つまりニューラルネットワークで学習する場合、学習データはif-thenルールに基づき入力値と出力値を設定する必要がある。この場合、出力値は専門家に対して実施した実橋アンケート調査から作成された教師データであり、入力値は各学習項目によって異なり、例えば主桁「曲げひび割れ」であれば、遊離石灰・コンクリートの欠落・ひび割れ状況・最大ひび割れ幅の4項目について各状況を数字に置き換えたものとなる。ただし、最大ひび割れ幅については、その大きさによってBig, Medium, Smallの3段階に分ける。また診断システムの下位 sub goal は、この各損傷状況別に推論ルールをもっており、知識の更新を行う場合には作成した入力状況に合致するルー

ルについてのみ知識の更新を行う。

以上より、作成した教師データを用いて現システムの知識の更新を行い、更新後のシステムの検証を行う。なお、知識更新後のシステムにより各々の橋梁の耐用性診断を実施したが、ここでは、その内の代表的な2橋の診断結果について詳述する。診断対象とした橋梁の目視調査結果の概要を以下に記す。

「U橋」は昭和9年に架設された橋齢63年のRC2径間連続T桁橋である。架設地域は田園地帯を走る一般道路であるが、交通量は非常に多く、大型車交通量も1日に1,000台を越える。路面は平坦で付近に信号機はなく、過去に拡幅工事も施されていない。主桁の損傷状態は、特に「鉄筋腐食ひび割れ」による損傷が著しく、最大ひび割れ幅は1.5mm程度である。またコンクリートの欠落はないものの「曲げひび割れ」や「せん断ひび割れ」が多数発生している。床版のひび割れ性状は2方向に広がっており、かなり劣化していることが分かる。さらに床版のひび割れ発生付近ではコンクリートがかなりの大きさで欠落しており、鉄筋が露出し腐食している。床版には遊離石灰も少し発生しており、全体的に施工不良が原因である豆板がかなり多く、損傷程度はかなり大きいと推測される。

「Me橋」は昭和46年に架設され、橋齢26年の単径間RCT桁橋である。架設地域は田園地帯であり、交通量も少ない。路面の陥没や舗装ひび割れは全く見られない。全体にひび割れは少なく、最大ひび割れ幅も0.15mm程度である。豆板およびコンクリートの欠落等も見られず、健全な状態であると考えられる。

(2)実橋を対象とした耐用性診断と診断結果の検証

上記の2橋について、知識更新後の診断システム(以下、本システムと略記する)による耐用性診断を行い、その結果を従来のシステムによる診断結果および教師データと比較し、本システムの知識ベースが専門家の知識、つまり教師データを獲得できたかどうかの検証を行う。

検証の際に考慮する要因は、①5段階の診断結果について最も支持している項目、②平均健全度、③あいまいさを表すFuzziness、④教師データと診断結果の一致度合いを総合的に表す指標 A^3)を用いる。一致度 A は、教師データおよび診断結果の5段階の評価結果の状態を表す帰属度関数が共通部分を持つ程度と、互いの平均健全度の比の積で定義される指標であり、全く同形状の帰属度関数の比較を行った場合に100ポイントとなる。既述の2橋に対する本システムでの診断結果を、知識更新前の診断システムの結果と併せて表6~表9に示す。

表-6 本システムによる「Me橋」耐用性診断結果

| 判定項目 | danger | slightly danger | moderate | slightly safe | safe | 平均健全度 | Fuzziness | 一致度 A | |
|------|-----------|-----------------|----------|---------------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| 床版 | 床版設計 | 0.000 | 0.004 | 0.172 | 0.505 | 0.319 | 72.8 | 0.245 | — |
| | 床版施工 | 0.000 | 0.000 | 0.029 | 0.410 | 0.561 | 80.6 | 0.196 | — |
| | 路面状態 | 0.003 | 0.097 | 0.125 | 0.481 | 0.294 | 69.3 | 0.270 | — |
| | 床版供用状態 | 0.006 | 0.129 | 0.247 | 0.355 | 0.262 | 64.8 | 0.454 | — |
| | ハンチ沿いひび割れ | 0.021 | 0.022 | 0.117 | 0.484 | 0.356 | 72.7 | 0.266 | 73.68 |
| | 支承付近ひび割れ | 0.007 | 0.007 | 0.066 | 0.423 | 0.496 | 77.9 | 0.254 | — |
| | 床版中央ひび割れ | 0.001 | 0.006 | 0.018 | 0.235 | 0.740 | 84.1 | 0.088 | 91.04 |
| | 床版材料劣化 | 0.001 | 0.006 | 0.008 | 0.301 | 0.684 | 83.2 | 0.115 | 94.29 |
| | 床版の全体的損傷 | 0.133 | 0.101 | 0.139 | 0.239 | 0.387 | 62.9 | 0.395 | — |
| | 耐用性 | 0.004 | 0.029 | 0.275 | 0.472 | 0.221 | 67.5 | 0.280 | 40.36 |
| 主桁 | 主桁設計 | 0.002 | 0.136 | 0.640 | 0.210 | 0.012 | 51.9 | 0.141 | — |
| | 主桁施工 | 0.000 | 0.000 | 0.024 | 0.409 | 0.566 | 80.8 | 0.192 | — |
| | 主桁供用状態 | 0.001 | 0.131 | 0.320 | 0.436 | 0.112 | 60.5 | 0.324 | — |
| | 曲げひび割れ | 0.005 | 0.007 | 0.399 | 0.479 | 0.109 | 63.6 | 0.272 | 68.85 |
| | せん断ひび割れ | 0.003 | 0.003 | 0.071 | 0.456 | 0.467 | 77.7 | 0.285 | 83.60 |
| | 鉄筋腐食ひび割れ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.185 | 0.815 | 86.3 | 0.057 | — |
| | 付着ひび割れ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.185 | 0.815 | 86.3 | 0.057 | — |
| | 主桁材料劣化 | 0.004 | 0.009 | 0.003 | 0.253 | 0.732 | 84.0 | 0.092 | 97.29 |
| | 主桁の全体的損傷 | 0.004 | 0.017 | 0.219 | 0.406 | 0.354 | 71.8 | 0.365 | — |
| | 耐用性 | 0.003 | 0.059 | 0.362 | 0.411 | 0.166 | 63.6 | 0.358 | 48.10 |
| 桁 | 耐用性 | 0.007 | 0.004 | 0.074 | 0.536 | 0.379 | 75.5 | 0.216 | 90.79 |
| | 耐用性 | 0.006 | 0.031 | 0.087 | 0.752 | 0.124 | 69.1 | 0.082 | 60.52 |

表-7 知識更新前の「Me橋」耐用性診断結果

| 判定項目 | danger | slightly danger | moderate | slightly safe | safe | 平均健全度 | Fuzziness | 一致度 A | |
|------|-----------|-----------------|----------|---------------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| 床版 | 床版設計 | 0.000 | 0.004 | 0.172 | 0.505 | 0.319 | 72.8 | 0.245 | — |
| | 床版施工 | 0.000 | 0.000 | 0.029 | 0.410 | 0.561 | 80.6 | 0.196 | — |
| | 路面状態 | 0.003 | 0.097 | 0.125 | 0.481 | 0.294 | 69.3 | 0.270 | — |
| | 床版供用状態 | 0.006 | 0.129 | 0.247 | 0.355 | 0.262 | 64.8 | 0.454 | — |
| | ハンチ沿いひび割れ | 0.006 | 0.056 | 0.418 | 0.361 | 0.159 | 62.2 | 0.349 | 41.66 |
| | 支承付近ひび割れ | 0.000 | 0.079 | 0.340 | 0.304 | 0.277 | 65.6 | 0.485 | — |
| | 床版中央ひび割れ | 0.000 | 0.008 | 0.001 | 0.410 | 0.582 | 81.3 | 0.180 | 78.37 |
| | 床版材料劣化 | 0.017 | 0.297 | 0.216 | 0.243 | 0.228 | 57.4 | 0.593 | 33.71 |
| | 床版の全体的損傷 | 0.139 | 0.113 | 0.154 | 0.279 | 0.315 | 60.3 | 0.544 | — |
| | 耐用性 | 0.006 | 0.066 | 0.294 | 0.424 | 0.210 | 65.3 | 0.340 | 38.00 |
| 主桁 | 耐用性 | 0.003 | 0.204 | 0.063 | 0.638 | 0.093 | 62.3 | 0.142 | 42.92 |
| | 耐用性 | 0.016 | 0.103 | 0.180 | 0.589 | 0.113 | 63.6 | 0.175 | 37.16 |
| | 主桁設計 | 0.002 | 0.136 | 0.640 | 0.210 | 0.012 | 51.9 | 0.141 | — |
| | 主桁施工 | 0.000 | 0.000 | 0.024 | 0.409 | 0.566 | 80.8 | 0.192 | — |
| | 主桁供用状態 | 0.001 | 0.131 | 0.320 | 0.436 | 0.112 | 60.5 | 0.324 | — |
| | 曲げひび割れ | 0.011 | 0.053 | 0.267 | 0.416 | 0.253 | 67.0 | 0.350 | 77.55 |
| | せん断ひび割れ | 0.002 | 0.041 | 0.014 | 0.372 | 0.571 | 79.4 | 0.188 | 90.93 |
| | 鉄筋腐食ひび割れ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.185 | 0.815 | 86.3 | 0.057 | — |
| | 付着ひび割れ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.185 | 0.815 | 86.3 | 0.057 | — |
| | 主桁材料劣化 | 0.079 | 0.378 | 0.073 | 0.147 | 0.324 | 55.2 | 0.412 | 28.96 |
| 桁 | 主桁の全体的損傷 | 0.008 | 0.064 | 0.191 | 0.364 | 0.374 | 70.7 | 0.418 | — |
| | 耐用性 | 0.009 | 0.169 | 0.328 | 0.347 | 0.147 | 59.1 | 0.470 | 38.46 |
| | 耐用性 | 0.002 | 0.111 | 0.071 | 0.726 | 0.090 | 65.8 | 0.094 | 60.93 |
| | 耐用性 | 0.017 | 0.108 | 0.201 | 0.583 | 0.092 | 62.5 | 0.179 | 52.22 |

表-8 本システムによる「U橋」耐用性診断結果

| | 判定項目 | danger | slightly danger | moderate | slightly safe | safe | 平均健全度 | Fuzziness | 一致度 A |
|----|-----------|--------|-----------------|----------|---------------|-------|-------|-----------|-------|
| 床版 | 床版設計 | 0.001 | 0.115 | 0.342 | 0.351 | 0.151 | 59.9 | 0.462 | — |
| | 床版施工 | 0.053 | 0.579 | 0.345 | 0.021 | 0.002 | 36.8 | 0.182 | — |
| | 路面状態 | 0.013 | 0.253 | 0.218 | 0.212 | 0.303 | 60.8 | 0.574 | — |
| | 床版供用状態 | 0.007 | 0.063 | 0.284 | 0.363 | 0.283 | 67.1 | 0.439 | — |
| | ハンチ沿いひび割れ | 0.124 | 0.262 | 0.340 | 0.212 | 0.062 | 45.6 | 0.485 | 99.95 |
| | 支承付近ひび割れ | 0.687 | 0.251 | 0.052 | 0.004 | 0.005 | 17.8 | 0.114 | 96.63 |
| | 床版中央ひび割れ | 0.256 | 0.574 | 0.160 | 0.006 | 0.004 | 28.6 | 0.186 | 98.15 |
| | 床版材料劣化 | 0.733 | 0.237 | 0.011 | 0.011 | 0.009 | 16.5 | 0.091 | 88.89 |
| | 床版の全体的損傷 | 0.272 | 0.340 | 0.196 | 0.147 | 0.045 | 37.1 | 0.485 | — |
| | 耐荷性 | 0.125 | 0.131 | 0.340 | 0.327 | 0.078 | 52.0 | 0.485 | 37.52 |
| | 耐久性 | 0.012 | 0.186 | 0.391 | 0.308 | 0.103 | 56.1 | 0.389 | 37.95 |
| | 耐用性 | 0.023 | 0.234 | 0.380 | 0.322 | 0.042 | 52.5 | 0.408 | 36.32 |
| 主桁 | 主桁設計 | 0.002 | 0.169 | 0.611 | 0.205 | 0.012 | 51.1 | 0.159 | — |
| | 主桁施工 | 0.206 | 0.634 | 0.154 | 0.004 | 0.002 | 29.2 | 0.145 | — |
| | 主桁供用状態 | 0.001 | 0.026 | 0.322 | 0.566 | 0.086 | 64.2 | 0.192 | — |
| | 曲げひび割れ | 0.154 | 0.426 | 0.363 | 0.031 | 0.027 | 37.0 | 0.337 | 92.31 |
| | せん断ひび割れ | 0.267 | 0.657 | 0.065 | 0.006 | 0.005 | 26.5 | 0.131 | 97.80 |
| | 鉄筋腐食ひび割れ | 0.323 | 0.626 | 0.025 | 0.013 | 0.013 | 25.3 | 0.149 | 96.44 |
| | 付着ひび割れ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.185 | 0.815 | 86.3 | 0.057 | — |
| | 主桁材料劣化 | 0.339 | 0.603 | 0.027 | 0.029 | 0.001 | 25.0 | 0.165 | 86.93 |
| | 主桁の全体的損傷 | 0.406 | 0.383 | 0.133 | 0.022 | 0.056 | 28.8 | 0.366 | — |
| | 耐荷性 | 0.045 | 0.232 | 0.392 | 0.298 | 0.034 | 50.9 | 0.388 | 30.18 |
| | 耐久性 | 0.005 | 0.312 | 0.376 | 0.281 | 0.026 | 50.3 | 0.415 | 56.46 |
| | 耐用性 | 0.001 | 0.470 | 0.435 | 0.093 | 0.002 | 42.5 | 0.282 | 64.91 |

表-9 知識更新前の「U橋」耐用性診断結果

| | 判定項目 | danger | slightly danger | moderate | slightly safe | safe | 平均健全度 | Fuzziness | 一致度 A |
|----|-----------|--------|-----------------|----------|---------------|-------|-------|-----------|-------|
| 床版 | 床版設計 | 0.001 | 0.155 | 0.342 | 0.351 | 0.151 | 59.9 | 0.462 | — |
| | 床版施工 | 0.053 | 0.579 | 0.345 | 0.021 | 0.002 | 36.8 | 0.182 | — |
| | 路面状態 | 0.013 | 0.253 | 0.218 | 0.212 | 0.303 | 60.8 | 0.574 | — |
| | 床版供用状態 | 0.007 | 0.063 | 0.284 | 0.363 | 0.283 | 67.1 | 0.439 | — |
| | ハンチ沿いひび割れ | 0.164 | 0.655 | 0.176 | 0.003 | 0.003 | 30.5 | 0.132 | 35.41 |
| | 支承付近ひび割れ | 0.178 | 0.751 | 0.061 | 0.003 | 0.006 | 28.2 | 0.083 | 60.99 |
| | 床版中央ひび割れ | 0.255 | 0.518 | 0.210 | 0.012 | 0.004 | 29.8 | 0.232 | 88.87 |
| | 床版材料劣化 | 0.017 | 0.297 | 0.216 | 0.243 | 0.228 | 57.4 | 0.593 | 25.55 |
| | 床版の全体的損傷 | 0.271 | 0.334 | 0.207 | 0.145 | 0.043 | 37.1 | 0.499 | — |
| | 耐荷性 | 0.020 | 0.227 | 0.370 | 0.322 | 0.062 | 53.6 | 0.426 | 36.40 |
| | 耐久性 | 0.104 | 0.706 | 0.158 | 0.023 | 0.009 | 32.6 | 0.104 | 65.3 |
| | 耐用性 | 0.058 | 0.499 | 0.271 | 0.152 | 0.020 | 41.5 | 0.251 | 45.94 |
| 主桁 | 主桁設計 | 0.002 | 0.169 | 0.611 | 0.205 | 0.012 | 51.1 | 0.151 | — |
| | 主桁施工 | 0.206 | 0.634 | 0.154 | 0.004 | 0.002 | 29.2 | 0.145 | — |
| | 主桁供用状態 | 0.001 | 0.026 | 0.322 | 0.566 | 0.086 | 64.2 | 0.192 | — |
| | 曲げひび割れ | 0.010 | 0.066 | 0.349 | 0.348 | 0.227 | 64.3 | 0.466 | 28.92 |
| | せん断ひび割れ | 0.010 | 0.270 | 0.260 | 0.223 | 0.237 | 58.1 | 0.676 | 44.62 |
| | 鉄筋腐食ひび割れ | 0.207 | 0.326 | 0.012 | 0.182 | 0.273 | 49.8 | 0.516 | 49.00 |
| | 付着ひび割れ | 0.013 | 0.249 | 0.241 | 0.196 | 0.302 | 60.5 | 0.579 | — |
| | 主桁材料劣化 | 0.079 | 0.378 | 0.073 | 0.147 | 0.324 | 55.2 | 0.412 | 39.37 |
| | 主桁の全体的損傷 | 0.095 | 0.158 | 0.220 | 0.267 | 0.260 | 58.8 | 0.688 | — |
| | 耐荷性 | 0.027 | 0.195 | 0.413 | 0.329 | 0.035 | 53.0 | 0.356 | 25.57 |
| | 耐久性 | 0.011 | 0.409 | 0.149 | 0.409 | 0.022 | 50.4 | 0.361 | 56.35 |
| | 耐用性 | 0.030 | 0.271 | 0.295 | 0.371 | 0.033 | 52.1 | 0.424 | 54.17 |

a) 知識の更新前後の診断システムによる診断結果の比較と検証

①健全な橋梁(Me橋)の診断結果に対する検討

(表-6, 表-7参照)

本橋に関しては、橋齢も若く損傷状態も軽微なものであったため、床版に関する教師データは下位 sub goal, 上位 sub goalを問わず、すべての評価項目でsafeを最も支持している。これに対して知識の更新前の診断システムの結果を見ると、「床版中央ひび割れ」は一致度が78.37p(ポイント)とかなり一致しているが、その他の評価項目はmoderateもしくはslightly dangerを支持しており、教師データに比べてかなり悪い結果を示している。しかし、本システムの診断結果を見ると、「ハンチ沿いひび割れ」以外の項目は、safeを支持しており、全体の一致度も向上している。「床版中央ひび割れ」では一致度は91.04pとなり、また学習前に一致度が33.71pであった「材料劣化」は94.29pまで向上している。このように下位 sub goalの診断結果には学習効果が顕著に表れている。また上位 sub goalに関しては、最も支持する項目や一致度の変化を見ると、とくに床版「耐用性」に関して、学習効果が表れていることが分かる。主桁に関しては、学習前後で上位 sub goal, 下位 sub goalそれぞれについて最も支持する項目については全く変化はない。しかしほとんどの項目で一致度の上昇とあいまいさを表すFuzzinessの減少が見られ、より教師データに近い診断が可能になったと考えられる。

全体的に見ると、学習効果は診断結果や一致度に確実に反映されており、その傾向は下位 sub goalで顕著に表れている。これは、下位 sub goalは、学習を行う項目が1つの sub goalでも損傷状況によって分類されており、学習用に作成した入力値に対して、その値に該当する項目についてのみ学習を行っている。それに対して上位 sub goalでは、1つの sub goalに1つのネットワークが存在するため、全ての損傷状況に対して1つの推論用ネットワークで推論を行わねばならず、下位 sub goalほど顕著に学習効果が表れていないものと考えられる。

②損傷の進んだ橋梁(U橋)の診断結果に対する検証

(表-8, 表-9参照)

本橋の診断結果に関しては、最も支持している項目の学習前後の変化はほとんどない。すなわち、損傷の進んだ橋梁に対しての学習前の診断システムの信頼度が高かったことが分かる。しかし、学習後の診断結果の一致度は学習前の診断結果の一致度よりも高くなっており、損傷の進んだ橋梁の診断に対しても信頼性はさらに向上したと考えられる。

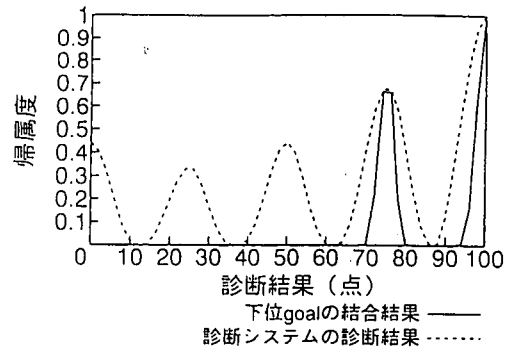


図-15 「Me橋」床版「全体的損傷」

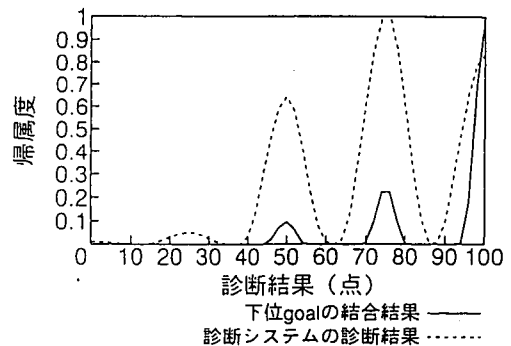


図-16 「Me橋」主桁「全体的損傷」

b) 診断システムの診断結果と妥当性確認支援システムの結果の比較

本システムで診断を行った2橋の診断結果と妥当性確認支援システムの診断結果を比較する。図-15に、「Me橋」の床版「全体的損傷」に関する妥当性確認支援システムによる診断結果と本システムの診断結果を示す。また、図-16に「Me橋」の主桁「全体的損傷」に関する妥当性確認支援システムの診断結果と本システムの診断結果を示す。

図-15より、床版「全体的損傷」に関して、最も支持している評価項目について妥当性確認支援システムの結果も本診断システムの結果も同様にsafeを支持していることが分かる。また図-16より、主桁に関して妥当性確認支援システムの結果はsafeを最も支持しているが、本システムの診断結果はやや安全側のslightly safeを最も支持していることが分かる。

次に、「U橋」に関する床版「全体的損傷」に関する妥当性確認支援システムの診断結果と本システムの診断結果を図-17に、主桁「全体的損傷」に関する各々の診断結果を図-18に示す。

図-17より、床版「全体的損傷」に関して、妥当性確認支援システムの結果はdangerとmoderateを全く同様に支持していることが分かる。この結果に対して本システムの診断結果はslightly dangerを最も支持しており、平均的な値が本システムからは出力されている

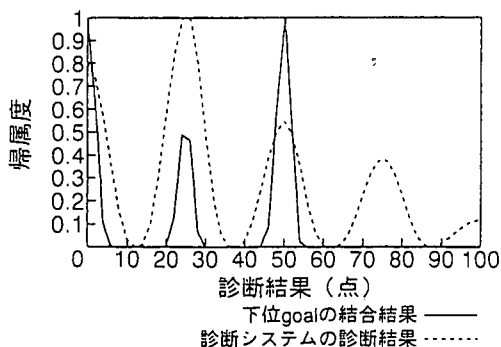


図-17 「U橋」床版「全体的損傷」

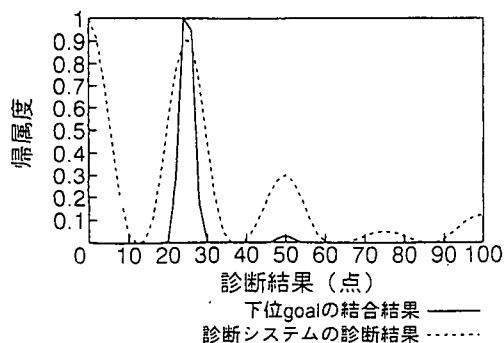


図-18 「U橋」主桁「全体的損傷」

ことが分かる。また図-18の主桁「全体的損傷」の結果に関しては、図-16に示す「Me橋」の主桁の場合と同じく、診断システムの診断結果の方が妥当性確認支援システムの結果よりもやや安全側の診断を下していることが分かる。

以上より、妥当性確認支援システムの結果(下位 sub goalの結合結果)と診断システムの結果において、最も支持する項目の大きな相違はないものの、若干、本診断システムの結果の方が安全側に評価する結果となった。これは、下位 sub goalの結合の際に考慮した重みは専門家に対する評価要因間の一対比較アンケート調査から得たものであり、この重みは、あくまで結合を行う際、つまり「全体的損傷」の評価を行う際に専門家が保有する理論値であると考えられる。一方、本診断システムの学習に用いた教師データは、実際に専門家が橋梁を診断して得たアンケート調査結果に基づいて作成しているため、その中には診断を行う際に専門家が用いている経験則も含まれていると考えられる。すなわち、妥当性確認支援システムで用いた重みは、個々の橋梁に対する経験則を含んだ評価要因間の重みを反映したものではなく、平均的な重み、言い換えれば理論値を示していると考えられる。ゆえに、妥当性確認支援システムをある限定された橋梁群に適用する場合は、対象橋梁群に固有な状況を考慮に入れた重み

を獲得する必要がある。なお、実橋を実際に目視して判断した評価要因間の重みを採用している本システムの診断結果が、理論的に予測される平均的な重みを採用している妥当性確認支援システムによる診断結果より、やや安全側に評価されるのは、熟練の専門家は若干安全側の評価を行うという従来の目視調査に基づいたアンケート調査結果の傾向からみて、妥当な結果であるともいえる。

5. 画面表示による妥当性確認支援システムの流れ

ここでは妥当性確認支援システムの流れを、写真を用いた画面表示例によって説明する。入力モデルは、既述の「Me橋」に対応するものである。

写真-1に妥当性確認支援システムのメニュー画面を示す。ユーザーはこの画面上の選択項目にあるように、床版の診断結果の確認を行うのか、主桁について診断結果の確認を行うのか、終了するのを選択する。写真-1は床版の診断結果の確認を行うことに決定した画面である。写真-2に妥当性確認支援システムの目的画面を示す。なお、写真-1、写真-2より分かるように、画面上、妥当性確認支援システムはuser information systemという名称で表現している。写真-3は本システムの床版「全体的損傷」に関する診断プロセスを示す画面である。また同時にAHPによる分析で獲得した床版「全体的損傷」に関する各 sub goal間の重みについてもこの画面で表示している。写真-4は、本システムの主桁「全体的損傷」に関する診断プロセスを示す画面である。これはメニュー画面で主桁を選択した場合に出力される画面である。写真-5は下位 sub goalの診断結果の出力例を示す。ここでは本システムで診断された「床版中央ひび割れ」の診断結果(画面上ではシステム診断結果)およびその診断結果を帰属度関数化した評価関数を示している。画面内の緑色の帰属度関数は、診断結果の把握の目安としてdanger~safeの評価を表す帰属度関数を表示している。写真-6は本システムで診断された「床版材料劣化」の診断結果(画面上ではシステム診断結果)およびその診断結果を帰属度関数化した評価関数を示している。画面上部にそれまでに画面表示を行った下位 sub goalについての結果をクリップしている。写真-7は、これまでに表示した下位 sub goalの4種類の評価関数の結合結果を示している。この結合結果が専門家の診断過程を再現して求めた床版「全体的損傷」であり、結合には写真-3で示した診断プロセスに表示されていた各 sub goal間の重みを作用させている。画面上部には参考として、結合を行った4種類の下位 sub goalの評価関数をクリップしている。また「全体的損傷」の帰属度関数の右側に

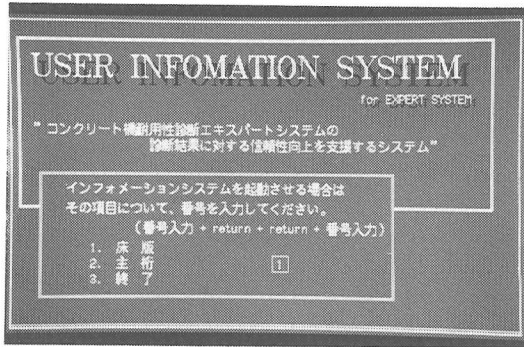


写真-1 メニュー画面

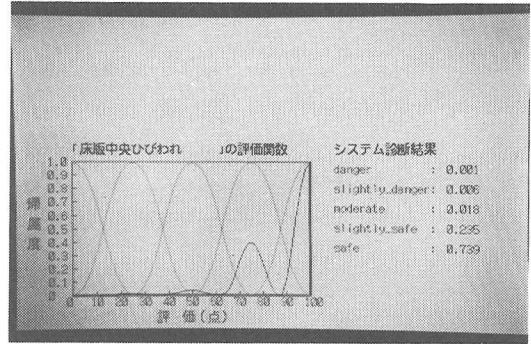


写真-5 下部 sub goal の出力例(1)

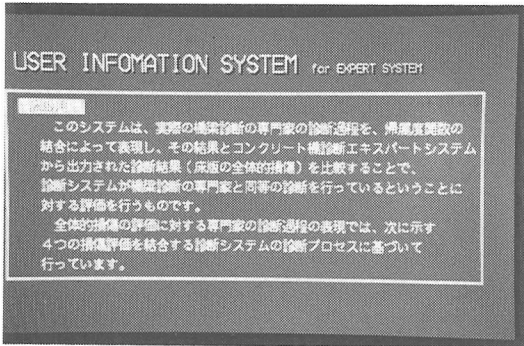


写真-2 妥当性確認支援システムの目的画面

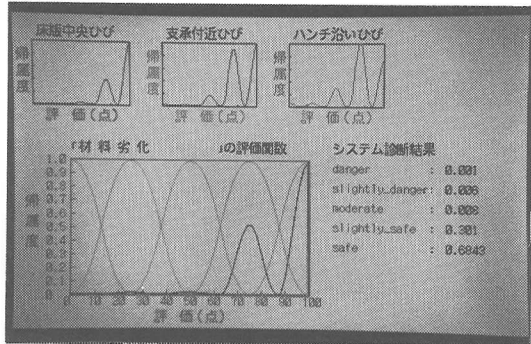


写真-6 下部 sub goal の出力例(2)

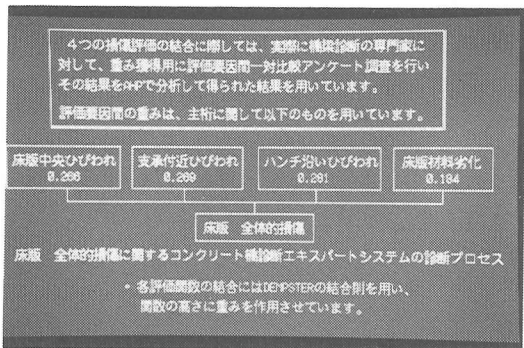


写真-3 床版の診断プロセスおよび重み

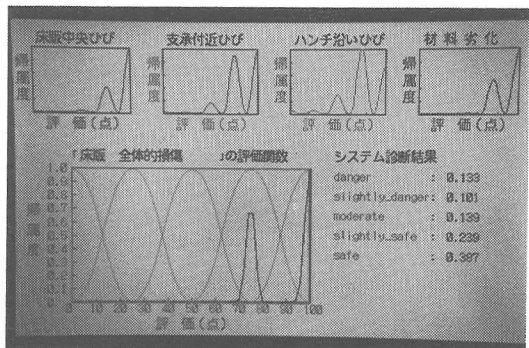


写真-7 「全体的損傷」の出力例

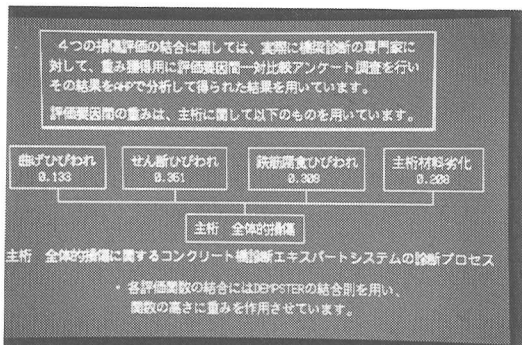


写真-4 主桁の診断プロセスおよび重み

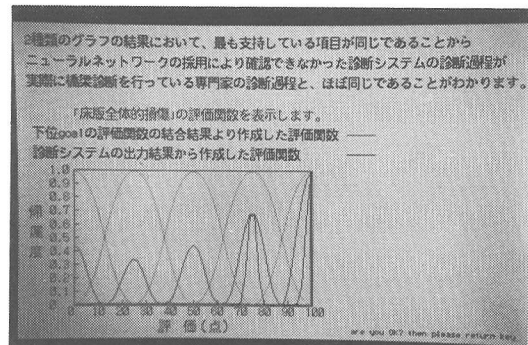


写真-8 床版における診断結果の比較例

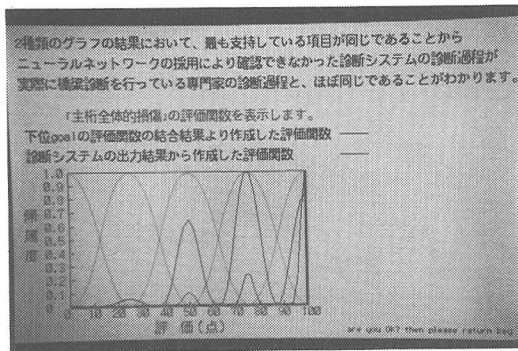


写真-9 主桁における診断結果の比較例

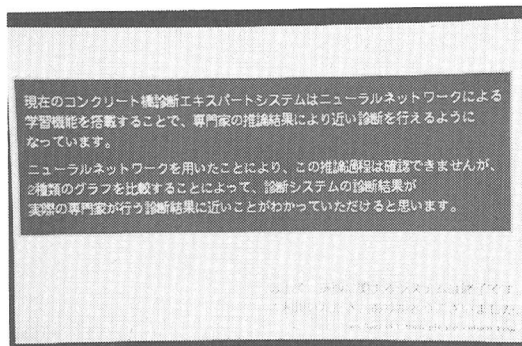


写真-10 結論画面

表示しているシステム診断結果は、本システムで診断された床版「全体的損傷」の診断結果である。写真-8は専門家の診断過程を再現して求めた床版「全体的損傷」と本システムで診断した結果を帰属度関数化した床版「全体的損傷」の結果を比較している。また写真-9には同じく主桁「全体的損傷」に関する結果を示している。写真-10は結論を示す画面である。

この後メニュー画面に戻る。そこで再び別の項目の診断結果の確認を行うならばその項目を選択し、終了するならば終了の選択を行う。以上で妥当性確認支援システムは終了する。

6. まとめ

著者等が開発中の「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」について、実用化に向けた問題点を検討した結果、知識(教師データ)の獲得手法および、そこに内在するあいまいさの取り扱い方、推論機構のブラックボックス化に関して検討の必要性があることが分かった。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

①アンケート調査結果に内在する専門家が本来的に持つ主観的なあいまいさの抽出に事象統一手法を用いることで、知識ベースに取り込むべき主観的なあいまい

さのみを抽出し、それ以外の要因によるばらつきを排除することが可能となった。また教師データ作成の際に、アンケート調査結果に対する信頼性を重みで考慮することにより、教師データの信頼性が向上した。

②上位 sub goalの診断を行う際に、評価の対象となる各要因間の重要度を知るために、専門家に対して評価要因間の一対比較アンケート調査を行い、床版、主桁の各「全体的損傷」の評価を行う際の下位 sub goalである各ひび割れおよび材料劣化の重みをAHP (Analytic Hierarchy Process : 階層分析法) で分析し獲得した。さらに、従来用いていた帰属度関数の結合則の改良を行い、帰属度の重みが結合結果に反映されるようにした。

③作成した教師データを用いて現システムの知識の更新を行い、既存の2橋梁について耐用性診断を行った結果、知識の更新を行う前に比べて教師データに対する一貫度はかなり向上し、知識ベースの質が向上したことを確認できた。

④評価要因間の重みおよび改良した帰属度関数の結合則を用いて、専門家の診断過程を再現する妥当性確認支援システムを構築した。そして、妥当性確認支援システムによる診断結果と本システムの診断結果を比較することで、本システムの診断結果の妥当性を確認した。

謝辞：本論文をまとめるに際して、有益なるご助言を頂きました神戸大学高田至郎教授、森川英典助教授に感謝の意を表します。また、実橋アンケート調査の実施に快くご協力頂きました兵庫県土木部の関係各位、神戸大学小林秀恵技官ならびに検査・診断関係各社の専門技術者各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 藤井学, 前川義雄: 米国における橋梁の維持管理システム, 橋梁と基礎, pp.33~37, 建設図書, 1995.6.
- 2) US.Department of Transportation: *PONTIS Technical Manual*, 1993.12.
- 3) 木下和哉: 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, 神戸大学大学院工学研究科修士論文, 1994.2.
- 4) 宮本文穂, 串田守可, 森川英典, 木下和哉: 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, 第510号/VI-26, pp.91~101, 1995.3.
- 5) 串田守可, 徳山貴信, 宮本文穂: 橋梁診断における経験的知識に内在するあいまいさの定量化に対するファジィエントロピーの適用, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.571~584, 1992.3.

- 6) 申田守可, 徳山貴信, 宮本文穂: 橋梁診断における知識獲得手法の提案, 構造工学論文集, Vol.39A, pp. 503~516, 1993. 3.
- 7) 水本雅晴: ファジィ理論とその応用, サイエンス社, pp. 282~298, 1988. 7.
- 8) 中村秀治, 松浦真一, 寺野隆雄, 篠原靖志: 水力鋼構造物の寿命予測エキスパートシステムとその適用, 土木学会論文集, 第374号/I-6, pp. 513~521, 1986. 6.
- 9) 刀根薫: ゲーム感覚意志決定法 - AHP入門 -, 日科技連, pp. 33~46, 1992. 3.
- 10) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会, (財)道路保全技術センター: コンクリート橋の点検, 橋梁点検技術研修テキスト, 1994. 6.
- 11) 松井繁之: コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策, 過大荷重による劣化と劣化診断, コンクリート工学, '95/6. Vol.33. No.6, 日本コンクリート工学協会 No.357, pp. 59~67, 技報堂出版, 1995. 6.
- 12) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 富田隆弘: 橋梁診断のシステム化に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp. 175~184, 1987. 2.
- (1997.3.19受付)

A STUDY OF SYSTEM RELIABILITY IMPROVEMENT FOR NEURO -FUZZY BRIDGE RATING EXPERT SYSTEM

Moriyoshi KUSHIDA, Ayaho MIYAMOTO and Masaki NAKAGAWA

The purpose of this study is aimed at improvement of system reliability for the Neuro-Fuzzy Bridge Rating Expert System, by investigating representative problems related to knowledge -base refinement. In this paper, the previous empirical knowledge (teaching data) acquisition method is reviewed, and a reliable method which can extract the intrinsic fuzziness from questionnaire survey results, is proposed. And, in order to represent experts' inference flow for user, a user information system is newly developed, and installs into the expert system. Furthermore, by applying the improved expert system to an actual in-service bridge rating, it is verified that the proposed teaching data acquisition method and the user information system are effective.