コンクリート橋診断エキスパートシステムの 開発と実用化[†]

宮 本文 穂* 益 成 一 郎** 西 村 昭***

Development of Expert System for Serviceability Rating of Concrete Bridges and Its Practical Application

by

Ayaho MIYAMOTO*, Ichiro MASUNARI** and Akira NISHIMURA***

A major part of bridge rating which is the kernel of bridge maintenance system is usually performed based on the subjective judgment of experts in the related fields. By considering the shortage of experts in the expanding field of bridge maintenance and need for the exact diagnosis of bridge condition, the systematization of bridge rating to replace the subjective information of bridge engineers such as professional experience, knowledge on bridge rating, etc. has become an important problem. The present paper is to introduce a newly developed expert system capable not only of various inferences and judgments for maintenance but also of output of estimation results of remaining life for existing bridges. Moreover, its application to some reinforced concrete T-beam bridges in service is also considered. For the construction of the knowledge base including the subjective information related to bridge rating, a concept of fuzzy set theory is adopted to deal with it. The final results produced by this system are represented by five elements of linguistic expressions with the fuzziness value which is the degree of subjective uncertainty.

Key words: Expert system, Serviceability rating, Maintenance, Repair, Remaining life, Reinforced concrete bridge, Subjective uncertainty, Fuzzy set theory

1 緒 言

既存橋梁の損傷、劣化事例が増大している中で、橋梁の維持管理の基本フローである「調査」→「診断」→「補修・補強」という流れの核となる「診断」の必要性が社会的要請として高まってきている。これに対して、現在、① 非破壊試験などによる客観的な評価・診断法の確立、② 専門技術者等による橋梁診断過程に存在する主観的要素を合理的に処理できるシステム化手法の応用という二つの側面からのアプローチが試みられている。本研究は、後者のアプローチとして、検査結果より得られる定性的・定量的情報の組合せから合理的な診断が可能な「コンクリート橋診断エキスパートシステム」の開発・実用化を試みるものである。過去に開発したプロトタイプシステム²⁾は、実用性という観点から、① 診断過程に内在する主観的あいまいさの処理法として、Dempster & Shafer 理論³⁾における基本確率の考え方を導入しているが、基本確率の結合数が多くなればなるほどあいまいさが小さく

なり、どれか1つの評価ランクを確定的に支持してしまう。② 基本確率の結合を行なう際、すべての判定項目を同じ重みで掛け合わせており、各判定項目間の重要度の違いを考慮していない。③ 橋梁管理者にとって最も関心があると思われる余寿命を示すことができない等の問題点があることが明らかとなった。

本研究では、これらの問題点を改善するために、主観的あいまいさの取扱い手法として、fuzzy 集合論を適用し、また、診断対象橋梁の余寿命の推定が可能なシステムの開発を行い、実橋に適用することによりシステムのさらなる実用化を目指したものである。

2 コンクリート橋診断エキスパートシステムの概要

本システムは、Prolog 言語の処理系である Prolog-KABA および同拡張ツール WING を用いて構築されている。また、推論過程に必要な数値計算は C 言語で行なっている。Fig. 1 は、本システムの構成を示したものである。

† 原稿受理 平成2年2月1日 Received Feb. 1, 1990

* 正 会 員 神戸大学工学部 神戸市灘区六甲台町, Faculty of Engineering, Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe

** 神戸大学大学院 神戸市灘区六甲台町, Graduate Student, Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe

*** (故)神戸大学工学部 神戸市灘区六甲台町, (Deceased) Faculty of Engineering, Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe

Fig. 1. General feature of the expert system.

2・1 知識ベースの構築

システム構築の核の一つである知識の収集・整理は、少人数（本論文では2人）の専門家に対する数回のアンケート調査により行い、この回答結果のばらつきが診断における専門家の有する主観的あいまいさであると考えた。ここで、主観的あいまいさの取扱い方法として、fuzzy 集合論における帰属度関数の考え方を適用した。帰属度関数は Π 関数を用いて次式で定義することとした：

$$\Pi(u; a, b, c) = \begin{cases} S(u; c-a, c-a/2, c) & (u \leq c) \\ 1-S(u; c, c+b/2, c+b) & (u > c) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、

$$S(u; x, y, z) = \begin{cases} 0 & (u \leq x) \\ 2\left(\frac{u-x}{z-x}\right)^2 & (x < u \leq y) \\ 1-2\left(\frac{u-z}{z-x}\right)^2 & (y < u \leq z) \\ 1 & (z < u) \end{cases} \quad (2)$$

Π 関数はパラメータ a, b, c により任意に決定されることから、専門家へのアンケート調査結果の利用により柔軟性を持つ帰属度関数を決定することができ、専門家の知識を比較的的確に知識ベース内に移植することが可能となると考えられる。

なお、従来より実施してきた実橋試験結果等を利用して、高欄等の付帯構造が橋梁全体に及ぼす影響も上述と同様の手法により知識として収集・移植した。

2・2 fuzzy 集合論を用いた推論機構

推論プロセスの設定は、床版、主桁それぞれの耐用性（耐荷性、耐久性）に影響を及ぼすと考えられる要因をリストアップし、各要因が耐用性を頂点（final

goal）とする階層構造となるようにした⁴⁾。推論プロセスの一例として、sub goal の一つである「曲げひびわれ」の場合の階層構造を Fig. 2 に示す。

Fig. 3 は本システムの推論の流れを示したものである。まず、前向き推論により、基本的なデータから必要とする所見を次々と尋ねてゆき、すべての判定要因に帰属度関数が割り当てられる。その後、後向き推論により上位ゴールの推論に必要な判定要因の帰属度関数が結合されて、各 sub goal の評価値およびあいまい度（fuzziness）が決定される⁵⁾。つぎに、fuzzy 写像を行うことにより「耐荷性」および「耐久性」の評価を行い、この両者の評価結果より、final goal として設定されている「耐用性」の評価が行われる。以下に、帰属度関数の結合方法、fuzzy 写像、評価値の算定方法について説明する。

まず、Dempster の結合則を用いた帰属度関数の結合方法について述べる。与えられた帰属度関数 $\mu_A(x)$ （見掛けの帰属度関数と呼ぶ）を次式によりあいまい量（ベグネス関数） $V_A(x)$ 、肯定の確信量 $\mu'_A(x)$ および否定の確信量 $\mu''_A(x)$ に分割する。

$$\begin{cases} V_A(x) = \begin{cases} 2 \times [1.0 - \mu_A(x)] & (1.0 \geq \mu_A(x) \geq 0.5) \\ 2 \times \mu_A(x) & (0.5 > \mu_A(x) \geq 0.0) \end{cases} \\ \mu'_A(x) = \mu_A(x) - V_A(x)/2 & (1.0 \geq \mu_A(x) \geq 0.5) \\ \mu''_A(x) = \mu_A(x) - V_A(x)/2 & (0.5 > \mu_A(x) \geq 0.0) \end{cases} \quad (3)$$

そして、結合後の肯定の確信量 $\mu'_{A,B}(x)$ 、否定の確信量 $\mu''_{A,B}(x)$ 、あいまい量 $V_{A,B}(x)$ および矛盾量 $\mu_\phi(x)$ を次式より求める。

$$\begin{cases} \mu'_{A,B}(x) = \mu'_A(x) \cdot \mu'_B(x) \\ \quad + \mu'_A(x) \cdot V_B(x) + \mu'_B(x) \cdot V_A(x) \\ \mu''_{A,B}(x) = \mu''_A(x) \cdot \mu''_B(x) \\ \quad + \mu''_A(x) \cdot V_B(x) + \mu''_B(x) \cdot V_A(x) \\ V_{A,B}(x) = V_A(x) \cdot V_B(x) \\ \mu_\phi(x) = \mu'_A(x) \cdot \mu'_B(x) + \mu'_A(x) \cdot \mu''_B(x) \\ \quad + \mu''_A(x) \cdot \mu'_B(x) + \mu''_A(x) \cdot \mu''_B(x) \end{cases} \quad (4)$$

これらを利用すると、結合後の見掛けの帰属度 $\mu_{A,B}(x)$ 、 $\mu_{\bar{A},\bar{B}}(x)$ は次式で表される。

$$\begin{cases} \mu_{A,B}(x) = \mu'_{A,B}(x) + (V_{A,B}(x) + \mu_\phi(x))/2 \\ \mu_{\bar{A},\bar{B}}(x) = \mu''_{A,B}(x) + (V_{A,B}(x) + \mu_\phi(x))/2 \end{cases} \quad (5)$$

ここで、結合する帰属度関数が3個以上の場合には、

結合順による影響をなくするために、初めの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、すべての結合が終わってからベグネスに繰り入れることにする。

つぎに、fuzzy 写像について述べる。耐荷性、耐久性および耐用

Fig. 2. Example of reasoning process for flexural cracks (a sub stage).

Fig. 3. Flow of reasoning in inference engine of the expert system.

性の評価は、各 sub goal の帰属度関数を結合することによって行われるが、この結合を行うためには、sub goal の状態を表す帰属度関数から、橋梁全体の状態を表す帰属度関数への写像を行う必要がある。ここで、写像を行なう際の fuzzy 関係 R には、sub goal の状態の橋梁の状態評価への「影響度」と、sub goal の状態自身の有する「信頼度」という2つの主観的不確定性により特性づけられる係数を考慮することとした。すなわち、「影響度」は、sub goal の種類により橋梁の状態評価に与える影響が異なることを考慮するためのものであり、Fig. 4 に示すように3種類を定義した。図中の番号は、以下のことを示している：

- 1: Low influence; $[c=100-(100-y)^2/100]$
- 2: Medium influence; $[c=y]$
- 3: High influence; $[c=y^2/100]$

また、各 sub goal の状態を表す帰属度関数の「信頼度」は、それぞれ異なるだけでなく、橋梁の状態に応じても変化すると考えられるため、Fig. 5 に示すよ

Fig. 4. Definition of effectiveness function.

Fig. 5. Definition of reliability function.

うに定義した。なお、図中の番号は、以下のことを示している：

- 1: 全般に信頼度が高い; $[h(y)=0.96]$
- 2: 良否が極端なときに信頼度が高い;
 $[h(y)=2(y/100)^2-2(y/100)+1]$
- 3: 良い側で信頼度が高い;
 $[h(y)=-(y/100)^3+1.5(y/100)^2+0.5]$
- 4: 悪い側で信頼度が高い;
 $[h(y)=(y-100)^3-1.5(y/100)^2+1]$
- 5: 全般に信頼度が低い; $[h(y)=0.5]$

なお、「影響度」および「信頼度」は、専門家に対するアンケート調査結果を利用して決定した。

以上の2種類の主観的不確定性を考慮して、fuzzy 写像のための fuzzy 関係 R を決定する。fuzzy 関係 R は帰属度関数 $\mu_R(y, s)$ で特性づけられ、Fig. 6 に示すように Π 関数を用いて与えるものとする。図中の $f(y)$ は sub goal の「影響度」によって決定される関数であり、また、 $g(y)$ は sub goal の「信頼度 $h(y)$ 」に応じて Π 関数のばらつきを特性づける関数であり、次式で定義されるものとする：

$$g(y)=100(1-h(y))/3 \quad (6)$$

(ただし、 $g(y)<5$ ならば $g(y)=5$)

したがって、各 sub goal の橋梁の状態を表わす帰属度関数 $\mu_A(c)$ は、各 sub goal の状態を表わす帰属度関数 $\mu_A(y)$ を、次式を用いて fuzzy 写像させることにより決定される：

$$\mu_A(c)=\max_y \min\{\mu_A(y), \mu_R(y, c)\} \quad (7)$$

一例として、影響度が3 (High influence) で、信頼度が2 (良否が極端なときに信頼度が高い) の場合の fuzzy 関係 R を Fig. 7 に示す。

以上のように、fuzzy 関係 R は各 sub goal ごとに特有な影響度および信頼度より決定されるため、sub goal の種類により異なった関係を示すことになる。したがって、前述のプロトタイプシステムで問題とされた「判定要因間の重要度の違いを考慮していない」という点についての一つの解答を与えることができたと考える。

つぎに、評価値およびあいまい度の算定方法について述べる。評価値を求めるにあたり、safe, slightly

Fig. 6. Π function expressive of fuzzy relation, R .

Fig. 7. Example of fuzzy relation, R .

Fig. 8. Membership function for serviceability rating.

safe, moderate, slightly danger, danger の5種類の状態を、あらかじめ帰属度関数の形式で Fig. 8 に示すように定義した。そして、評価値は、評価対象とされる帰属度関数と Fig. 8 のようにあらかじめ設定された5種類の状態を示す帰属度関数との合致度を求めることにより、それぞれの状態に属する確率に準ずる値として出力する。この他、評価対象とされる帰属度関数の重心を平均健全度として求め、また、評価対象とされる帰属度関数に式(3)を適用して求められるベグネス関数 $V_A(x)$ を基に、評価全体に対するあいまい度(fuzziness)を出力するものとした。

2・3 余寿命の推定

橋梁が他分野の製品と比べて大規模で単品となること、その耐用期間が非常に長いこと等のため、知識・経験不足による寿命の定義のあいまいさあるいは寿命予測において考慮すべき要因の多さが影響し、予測結果には相当の誤差を覚悟しなければならない現状にある。ここでは、専門技術者が評価する橋梁の健全度と余寿命の間には、何らかの相関関係があると考え、この両者の関係を従来より実施してきた実橋(「前野橋」、「対田橋」および「旧中井橋」)に対する耐用性に関するアンケート調査(各橋梁とも20数名)結果から次のように求めた。すなわち、Fig. 9 はアンケート調査結果より求めた健全度と余寿命の関係を示したものであるが、図中の全橋における近似曲線(実線)は、健全度が与えられたときに、その健全度に対して専門家が推定する余寿命の平均的な値を示していると考えられる。ここで、健全度 s と余寿命 t の関係を表す

Fig. 9. Relationship between the soundness, s and the remaining life, t based on the questionnaire results.

近似式を、次式のように定義した：

$$t = a \cdot s^b \quad (t: \text{余寿命}, s: \text{健全度}, a, b: \text{定数}) \quad (8)$$

そして、3橋のデータに最小自乗法を適用することにより、健全度 s と余寿命 t の関係式を求めた。

$$t = (3.03 \times 10^{-1}) \cdot s^{0.98} \quad (9)$$

しかしながら、アンケート調査結果にはかなりのばらつきがみられるため、健全度と余寿命との対応を確定的に関係づけるのは合理的と考えられないため、これらの間に主観的あいまいさを含む取扱いが必要であると考へた。そこで、このあいまいさを表現するために、式(9)で表される曲線を対数正規分布型の確率密度関数によってfuzzy化した。対数正規分布の確率密度関数は次式で与えられる：

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \phi \cdot t} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \lambda}{\phi} \right)^2 \right] \quad (10)$$

ここで、 $\lambda = E(\ln t)$, $\phi = \sqrt{\text{Ver}(\ln t)}$

上式を帰属度関数として用いるためには、 $f(t)$ の最大値が1.0である必要がある。このため、次のように帰属度関数 $\mu_R(t)$ を定義する：

$$\mu_R(t) = \frac{f(t)}{f(t_m)} = \frac{t_m}{t} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \lambda}{\phi} \right)^2 \right] \quad (11)$$

ここで、 $\lambda_s = \ln[t_m] = \ln[(3.03 \times 10^{-1}) \cdot s^{0.98}]$ とすると、健全度と余寿命のfuzzy関係は次式で与えられる：

$$\mu_R(s, t) = \frac{t_m}{t} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \lambda_s}{\phi} \right)^2 \right] \quad (12)$$

本研究では、一例として式(12)において $\phi = 0.2$ の場合を健全度と余寿命のfuzzy関係と定義した。このfuzzy関係の模式図を Fig. 10 に示す。これにより、「コンクリート橋診断エキスパートシステム」により出力される健全度の帰属度関数 $\mu_s(s)$ から余寿命の帰

Fig. 10. Fuzzy relation between grade of soundness and remaining life of concrete bridges.

属度関数 $\mu_r(t)$ を次式により推定することができる:

$$\mu_r(t) = \max_s \min\{\mu_s(s), \mu_R(s, t)\} \quad (13)$$

このようにして求めた余寿命の帰属度関数において、余寿命が「 ~ 10 年」「 $10 \sim 20$ 年」「 $20 \sim 30$ 年」「 $30 \sim 40$ 年」「 40 年 $\sim$ 」の各ランクに属する程度を、その帰属度全体の総和に対する各ランク内に含まれる帰属度の総和の割合として求めて出力する。また、余寿命の帰属度関数の重心を求め、平均余寿命 t_m として出力するものとした。

3 システムの実用性の検討

3.1 診断対象橋梁の概要

「コンクリート橋診断エキスパートシステム」の実用化にあたって、実橋での有効性の検証が必要となる。今回診断対象とした「旧中井橋」は、橋齢 60 年の 10 径間 RC 単純 T 桁橋である。目視検査の結果、主桁の損傷については各スパンともひびわれ幅が 1.0 mm を越えるものが多くあり、遊離石灰をともった腐食ひびわれ、コンクリートの浮き、欠落等がみられた。また、曲げひびわれだけでなくせん断ひびわれも見られた。なお、目視検査とは別に、本橋に対する静的載荷試験、重錘落下振動試験、主桁破壊試験、構成材料試験等も実施しており、これらの試験結果から、主桁は全体的にせん断に対する耐荷性が低下しているという結果が得られた。一方、耐久性の面からは、コンクリートの材料的劣化（強度、中性化、ヤング係数等）がみられたが、主鉄筋およびスターラップについては、表面にかなりの錆が広がっているものの SR24 の材質を満足するものであり、強度劣化はほとんどみられていない。試験結果の一例として主桁破壊荷重を Table I に示すが、最大

Table I. Test results of ultimate load test.

Tested span & girder	Span 1	Span 2	Span 3
	Girder B	Girder B	Girder B
Maximum load	58.0	65.0	67.0
Load at $\delta = L/500$	—	56.5	59.9
Load at shear failure	35.9	42.7	42.9

δ : Deflection, L : Span length

(unit: tf)

荷重、せん断破壊荷重ともスパン 1 よりスパン 2 の方が大きく、スパン 1 に比べてスパン 2 の方が健全であることが明らかとなる。また、材料試験結果からもスパン 2 の方が健全であることが明らかとなっている。

3.2 実橋に対するシステムの適用例

「旧中井橋」に対して「コンクリート橋診断エキスパートシステム」を適用し、診断を行った結果について述べる。Table II にシステムへの初期入力データを示す。これを基に、システムは床版および主桁それぞれに対する診断を実行するのに必要な情報を得るため、順次新たな質問を行い、利用者とシステムとの会話形式で診断が進められていく。Table III は「旧中井橋」のスパン 1 の主桁の診断を行なったときの会話例を示したものである。

ここで、システムによる推論過程の実行例を、主桁の推論プロセスにおける sub goal の 1 つである「曲げひびわれ」について説明する (Fig. 2 参照)。Table III の曲げひびわれに関する質問への回答から、推論プロセスの最下層に位置する条件部が決定される。例えば、判定要因の 1 つである「遊離石灰」では、その条件部が「コンクリートの欠落は少し発生」「遊離石灰はわずかに発生」というように決定される。システムはこれらの条件部を基に、すべての判定要因についての II 関数パラメータ a , b , c を知識ベースから検索する。これらのパラメータに式 (1) および式 (2) を適用して帰属度関数に変換し、式 (3)、式 (4) および式

Table II. An example of initial input data for Nakaibashi bridge to the expert system.

Bridge name	Nakaibashi	Location	Industrial area,
Total length	107.92 m		Main road
Width	5.0 m	Widening of bridge	Not to be done
Number of main girder	3 girders	Slope of approach	Gentle
Span of main girder	10.8 m	Traffic signal near approach	Present
Span of slab	1.55 m	Crack or caving of road surface	None
Thickness of slab	17.7 cm	Flatness of road surface	Almost flat
Bridge Age	60 years old	Traffic volume	Large
Bridge type	Simple beam	Percent of large-sized truck	Little
Cross section	T type	Vibration	Small
Size of cross section	Large	Handrail	Small cross section
Supporting condition	Simple support	Cross beam	Span 1 and 2: Present
Differential settlement	None		Span 4 : None
Applied specification	1926	Drainpipe	None
Bridge grade	First grade	Forming of honeycomb & popout	Occured partly

Table III. An example of dialog between the expert system and user for main girder.

Question and explanation from the expert system	Answer from user
What kind of cracks are there in main girders?	Flexural crack Shear crack Corrosion crack
What level is the bending cracks?	3rd stage; a few cracks
What is the maximum crack width?	0.3 mm
Are there any water leakage & free lime near the cracks?	Occurred slightly
Are there any spalling of cover concrete near the cracks?	Occurred slightly
What degree of reinforcement corrosion is there near the cracks?	Severely corroded
[C: Vertical cracks are inferred as caused by bending moment] [C: Deteriorated area are recommended to be repaired immediately because the spalling of cover concrete will be caused by volume expansion of steel corrosion]	
What level is the shear cracks?	3rd stage; a few cracks
What is the maximum crack width?	0.45 mm
Are there any water leakage & free lime near the cracks?	Occurred slightly
Are there any spalling of cover concrete near the cracks?	Nothing
Are there any rust deposition?	Nothing
[C: Diagonal cracks are inferred as caused by shearing force] [C: Cracks over 0.3 mm width are recommended to be repaired]	
What level is the corrosion cracks?	2nd stage; a lot of cracks
What is the maximum crack width?	3.0 mm
Are there any water leakage & free lime near the cracks?	Occurred considerably
Are there any spalling of cover concrete near the cracks?	Occurred slightly
Are there any rust deposition?	Nothing
[C: Horizontal cracks parallel to longitudinal direction are inferred as caused by volume expansion of steel corrosion] [C: Cracks considerably over 0.3 mm width are recommended to be repaired immediately]	

(5) により結合することにより「曲げひびわれ」の帰属度関数が決定される。そして、この帰属度関数を基に「曲げひびわれ」の平均健全度、評価値および評価結果の有するあいまい度を求め出力する。

同様に、他の sub goal の評価値も計算され、最後に final goal として設定されている耐用性を、その下位ゴールである耐久性および耐荷性の帰属度関数をもって評価する。そして、この耐用性の帰属度関数を基にして、健全度と余寿命の fuzzy 関係より余寿命が推定される。

システムによる推論結果（診断）は、スパン 1、スパン 2、スパン 4 の主桁および床版それぞれに対して行ったが、ここでは一例としてスパン 1 およびスパン 4 の主桁の診断結果を Table IV (a), (b) に示す。

3・3 出力結果の検証

Table IV より、スパン 1 の主桁の施工に対する評価は、それぞれ moderate となっているのに対し、スパン 4 では、それぞれ slightly danger と評価されている。これは、スパン 4 では砂目およびコンクリートの欠落が多くみられたことが原因と考えられる。また、final goal である主桁耐用性の評価結果より明らかな

ように、スパン 4 に比べスパン 1 の方が相対的に健全度が高いといえる。一方、スパン 2 の診断結果は、表には示していないが、スパン 1 およびスパン 4 に比べて健全であることが分かった。これより、各スパンに対するシステムの評価値は、実橋試験結果と相対的に一致しているといえる。しかしながら、主桁破壊試験により、スパン 1、スパン 2 はせん断破壊したにもかかわらず、システムによるスパン 1 の主桁耐荷性の評価は moderate で、危険側の評価になっていない。また、曲げひびわれに比べてせん断ひびわれはかなり健全なほうに評価していることから、システムのひびわれに対する評価と、主桁破壊形式は必ずしも一致しないことが分かる。

これらの点に関しては、スターラップの材料的劣化がみられなかったことから、せん断破壊の原因は、設計によるところが大きいと思われるが、せん断ひびわれが橋梁全体に与える影響度も含めて、今後検討し直す必要があると考えている。つぎに、主桁耐久性の評価はスパン 1 は、slightly danger と moderate を同程度に支持しており、スパン 4 では slightly danger となっているが、これは、材料試験結果よりほぼ妥当だといえる。また、余寿命推定結果は、両スパンともほとんど差がなく、約 18 年と推定された。

4 結 論

以下に本研究で得られた結果をまとめる。

(1) 専門家に対するアンケート調査によって得られた定量的な知識を、fuzzy 集合論における帰属度関数を用いて II 関数パラメータとして知識ベースに移植する方法を適用した。これにより、専門家の知識を主観的あいまいさとともに比較的的確に移植可能となった。

(2) 帰属度関数を順次結合していくことにより診断を行なう推論機構を開発した。これによって、基本確率の結合数が多くなると評価結果がすべて確定値と

Table IV. Inference results.

(a) Inference results for Nakaibashi bridge (Span 1).

	Judgement factor	Soundness (Average)	Danger	Slightly danger	Moderate	Slightly safe	Safe	Fuzziness
Main girder	Design	55.5	0.000	0.180	0.453	0.328	0.039	0.499
	Execution of work	48.0	0.000	0.208	0.663	0.129	0.000	0.154
	Service condition	57.3	0.000	0.026	0.657	0.316	0.000	0.163
	Flexural crack	53.4	0.041	0.281	0.299	0.225	0.155	0.655
	Shear crack	65.1	0.000	0.248	0.233	0.214	0.305	0.373
	Corrosion crack	49.7	0.228	0.297	0.000	0.196	0.279	0.423
	Whole damage	52.8	0.122	0.258	0.192	0.282	0.146	0.615
	Load carrying capability	46.1	0.089	0.278	0.378	0.191	0.064	0.499
	Durability	47.6	0.063	0.325	0.322	0.219	0.070	0.577
	Serviceability	47.9	0.042	0.328	0.378	0.194	0.059	0.276
	Judgement factor	Average	~10 yrs.	10~20 yrs.	20~30 yrs.	30~40 yrs.	40 yrs.~	
	Remaining life	17.5 years	0.269	0.357	0.319	0.053	0.002	0.245

(b) Inference results for Nakaibashi bridge (Span 4).

	Judgement factor	Soundness (Average)	Danger	Slightly danger	Moderate	Slightly safe	Safe	Fuzziness
Main girder	Design	55.5	0.000	0.180	0.453	0.328	0.039	0.499
	Execution of work	29.2	0.130	0.633	0.237	0.000	0.000	0.183
	Service condition	57.3	0.000	0.026	0.657	0.316	0.000	0.163
	Flexural crack	51.9	0.044	0.298	0.318	0.176	0.165	0.620
	Shear crack	65.1	0.000	0.248	0.233	0.214	0.305	0.373
	Corrosion crack	45.7	0.240	0.326	0.000	0.147	0.261	0.396
	Whole damage	49.9	0.128	0.272	0.232	0.227	0.140	0.701
	Load carrying capability	44.0	0.094	0.294	0.423	0.123	0.065	0.379
	Durability	41.1	0.143	0.344	0.288	0.151	0.074	0.523
	Serviceability	43.9	0.082	0.362	0.380	0.110	0.066	0.360
	Judgement factor	Average	~10 yrs.	10~20 yrs.	20~30 yrs.	30~40 yrs.	40 yrs.~	
	Remaining life	17.6 years	0.262	0.345	0.334	0.056	0.002	0.335

になってしまうというプロトタイプシステムにおける問題点を解決した。また, fuzzy 写像に影響度および信頼度を導入することにより, 各判定項目間の重要度の違いを考慮した評価結果の出力を可能とした。

(3) 「コンクリート橋診断エキスパートシステム」より出力される耐用性の評価結果と診断対象橋梁の余寿命とを, アンケート調査より求めた fuzzy 関係を用いて結びつけることにより, 「余寿命はあと何年?」という橋梁管理者にとって最も関心のある点に対してはほぼ定量的な回答を出力することを可能とした。

(4) 実橋に対して本システムを適用し, システムの診断結果を耐用性診断試験結果と比較することにより, 推論(診断)結果の検証を行なった。その結果, 細部にわたる評価結果には問題が残るものの, 各橋梁間の相対的ランクの出力あるいは同一橋梁内における各スパン間の損傷程度の差異などの評価が可能であること

が明らかとなった。

(平成元年11月30日, 12月1日 第9回設計における信頼性工学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 西村 昭, 宮本文穂, 土木学会研究討論会資料(1987)。
- 2) 宮本文穂, 西村 昭, 木村英幸, 益成一郎, 本庄敬選, 平成元年度土木学会関西支部年講概要集(1989)。
- 3) 石塚 満, 電子通信学会誌, **66** (1983)。
- 4) 宮本文穂, コンクリート工学, **26** (1988)。
- 5) 西村 昭, 藤井 学, 宮本文穂, 富田隆弘, (財)建設工学研究所「研究報告」, **28** (1986)。
- 6) 浜野勝茂, 梶谷義昭, 宮本文穂, 西村 昭, 第17回日本道路会議論文集(1987)。
- 7) 宮本文穂, 西村 昭, 前田 強, 山本恭義, (財)建設工学研究所「研究報告」, **30** (1988)。