構造健全性評価のためのファジィエキスパート システムの改良[†]

古 田 均* 馬 野 元 秀** 川 上 宏 一 郎***
大 谷 裕 生**** 白 石 成 人*****

An Improvement on Fuzzy Expert System for Structural Damage

by

Hitoshi FURUTA*, Motohide UMANO**, Koichiro KAWAKAMI***

Hiroki OHTANI**** and Naruhito SHIRAISHI*****

This paper attempts to improve the fuzzy expert system which was previously developed by the authors for assessing damage states of RC (Reinforced Concrete) bridge deck. Using the concept of "damage mode", it is possible to evaluate the remaining life of RC bridge deck. Moreover, it is intended to introduce the neural computing technique for the refinement or generation of fuzzy production rule. An illustrative example is presented to demonstrate the applicability of the system.

Key words : Damage, Expert system, Fuzzy sets, Neural network, Production rule, Rule refinement

1 ま え が き

戦前に建設された橋梁はもとより、高度成長期に建設された橋梁構造物でも、架設後20年以上経過しており、経年による劣化、老朽化がもたらす橋梁構造物の機能低下が問題となっている。また、昭和40年以降の社会環境の変化、とりわけ自動車交通量の激増、車両の大型化等は、建設時においては予想もしなかった苛酷な供用状況を生み出し、橋梁構造物の劣化・老朽化に拍車をかける結果となっている。このような状況の中で今日、橋梁構造物の維持管理をどのように計画、実行していくかが重大な関心事となっている。

維持管理上の判断を的確に行うためには、外観調査から得られる損傷の状況と他の要因（たとえば損傷の原因および進行状況等）や構造物の設計諸元等から構造物の余寿命を推定し、それに構造物の重要度や周囲の環境条件等を考慮して、総合的な見地から構造物の健全性を評価する必要がある。しかしながら、健全性の評価に利用できるデータは、量的に不十分なばかりでなく、その多くが何らかのあいまいさを含んでおり、それらを有効に利用することは容易ではない。さらに、推論を進めていく際に必要な知識についても質的、量的に十分とは言えず、経験的、直感的なものが多い。したがって健全性の評価は、経験豊富な専門家の工学的

判断に頼らざるを得ないというのが現状である。

こうした背景を踏まえ、筆者らは¹⁾、維持管理業務の専門家の持つ工学的知識、経験的知識、判断プロセスをコンピュータに輸入蓄積することにより汎用性の高い、誰にでも利用できる健全性評価のためのファジィエキスパートシステムを構築した。

本研究では、このシステムを改良し、実際の維持管理業務での使用に耐えうるようにした。具体的には、損傷モードの概念を提案し、その損傷程度、損傷進行度を考えることにより、構造物の余寿命を推定することを試みた。さらに、ニューラルネットワークの考え方を導入することにより、エキスパートシステムの実用化で問題となる知識の洗練化を試みた。

2 システムの構成

本システムは Fig. 1 に示すように、入出力システム、データベース、ルールベース、推論機構、ファジィ集合処理システムから構成されている。データは、入力システムを介してデータベースに格納される。この入力システムは、入力の手間を大幅に減じるものである。すなわち、入力はシステムの質問に答えていくという形で進めることができる。システムは質問の際、入力予想される項目をメニュー形式で表示するので、多くの場合その中から項目を選択するだけで入力が行え

[†] 原稿受理 平成3年9月30日 Received Sep. 30, 1991

* 正 会 員 京都大学工学部土木工学科 〒606-01 京都市左京区吉田本町, Dept. of Civil Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

** 大阪大学工学部精密工学科 〒565 吹田市山田丘, Dept. of Precision Eng., Osaka Univ., Yamadaoka, Suita, 565

*** 京都大学大学院(現在 NTT) 〒606-01 京都市左京区吉田本町, Graduate Student, Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

**** 京都大学大学院(現在近畿日本鉄道) 〒606-01 京都市左京区吉田本町, Graduate Student, Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

***** 京都大学工学部土木工学科 〒606-01 京都市左京区吉田本町, Dept. of Civil Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

Fig. 1. Architecture of the system.

る。もちろんメニュー以外の項目の入力も可能である。さらに入力されたデータはファイルという形で保存しておくこともできる。これに伴う画面表示はすべて日本語で行われ、いっそうの使いやすさを実現している。これらの機能により利用者はデータの入力形式等を意識することなく入力することができ、また入力ミスの心配も著しく減少すると思われる。ただし、入力するデータの項目が多すぎる場合等は入力の手間がかえってかかることもあり得るので、その場合は一括入力による方法をとらざるを得ない。本システムにおいて一括入力は、あらかじめ一定の形式で作成したデータファイルをシステムに読み込ますことにより行う。入力システムを介したデータは、データの対象ごとに自動的に分類して複数のデータベースに別々に格納される。このようにデータを分割して格納することにより、実行速度の向上が図れる。また、ルールベースも複数に分割することが可能であり、これにより、実行速度の向上はもちろんルールの構造化も図れる。推論機構は、前述のようにデータベースを参照し、ルールベースの中から利用できるルールを選択し、実行するという働きをする。ファジィ集合処理システムは、推論機構の要求に応じて、ファジィ集合の処理をし、結果を推論機構に帰す。最後に、出力システムはデータベースに格納された推論結果を利用者の理解できる形になおし、出力することを行う。

本研究では、上記のシステムをコンピュータ上にプログラムとして構築するのに Lisp 言語²⁾を使用している。Lisp は、記号処理に適した言語であり、特にデータ構造がその場その場で変わるファジィ集合を取り扱うのに適していると思われる。本研究では、このようなシステムをワークステーション上に構築した。ワークステーションを使用することにより、以下に示す

ような利用環境が実現できる。

- ① オペレーティングシステムに UNIX³⁾を採用しているため、本システムを他のコンピュータへ移植するのが容易である。
- ② 小型で場所をとらないため、どこでも本システムを利用できる。
- ③ マルチタスク機能により、複数の端末を接続すると、本システムを同時に複数の利用者が利用できるため、利用効率が向上する。
- ④ 分散処理機能により、異なる機種、OS 間におけるファイルの共有およびネットワークを介したファイルのアクセスが可能であり、本システムを利用しやすい環境をつくるのが容易である。
- ⑤ フロッピーディスクによるデータ交換が可能のため、本システムを簡単に他のワークステーション上へ移植できる。

本研究では、以上のようなハードウェアの機能を余すところなく利用し、誰もがどこでも利用できる汎用性の高いシステムを構築した。

3 RC 床版健全性評価システム

本研究では以前に開発した RC 床版の健全性を評価するためのエキスパートシステムの改良を行った。本システムでは、健全性を的確に評価するために以下の事項に注目した。

- ① 維持管理業務の専門家と何度も会い時間をかけて対話することにより、専門家特有の知識を獲得した。
- ② ファジィ理論を導入することにより、点検から得られたデータに含まれるあいまいさ、専門家か

Fig. 2. Procedure of damage assessment.

Table I. Representative damage causes.

Load	Extreme wheel load Impact effect Inadequacy of girder arrangement
Design and structural factor	Short of deck depth Lack of main steel bar Lack of distribution bar Inadequacy of distributed cross beams Additional moment due to differential settlement
Construction condition	Poor quality of cement Poor compaction Inadequate curing of construction joint Lack of covering
Other factors	Salt Poor drainage Movement of substructure

ら獲得した知識に含まれるあいまいさの取り扱いを可能とした。

- ③ RC 床版の健全性を評価するためには、余寿命の推定が重要であると考え、RC 床版の余寿命の推定を試みた。そのための指標として、損傷原因、損傷程度、損傷進行度を考えた。

健全性評価は、床版の各パネル単位で行う。推論は Fig. 2 に示す手順に従って進められる。まず、1つのパネルについて点検により得られたデータから損傷の種類を特定する。たとえば点検によりあるパネルに関して以下のようなデータが得られたとする。このとき、このパネルの被っている損傷の種類はひび割れ、路面の損傷である。

「ひび割れの密度が大きい」

「ひび割れの形状が亀甲状である」

「路面の舗装に凹凸がある」 (1)

本システムでは、損傷の種類として「ひび割れ」、「路面の損傷」、「鉄筋の損傷」、「コンクリートの損傷」、「構造上の損傷」を設定した。つぎに橋梁の設計諸元、環境条件、点検結果から、損傷原因を推定する。損傷原因として考えられるものを Table I に示す。原因は一般に複数個推定されるが、いまそれぞれの原因に対して損傷モードというものを考える。損傷モードとは、各損傷原因に起因する損傷の種類だけから構成されたものである。たとえば (1) のような点検結果から床版の損傷原因として「衝撃作用」が推定されるとすると、「衝撃作用」という原因に対する損傷モードは、「ひび割れ」、「路面の損傷」という損傷の種類から構成される。つぎに、現在の損傷程度の評価を行う。しかしながら、このとき複数の原因によって損傷が引き起こされているとき、異なった原因に起因する損傷を一緒に評価して損傷程度を求めることは意味がないと思われる。したがって本評価法では、各原因に起因する損傷の程度、すなわち損傷モードの損傷程度を評価する。損傷モードの損傷程度は、損傷モードを構成する損傷の程度を評価することにより求める。すなわち、損傷

モードごとにひび割れ、鉄筋、路面、コンクリート、構造上の損傷度を求め、それらをまとめることにより、損傷モードの損傷程度が得られる。これは、人間がたとえば、風邪と食当りという2つの病気にかかっている時、体が病気にむしばまれている程度を咳のひどさと体温と腹痛の程度から表現せず、風邪の程度と食当りの程度を個々の病気の症状から別々に求めることで表現するのに似ている。ここで、「風邪」や「食当り」等の病名に相当するものが損傷モードといえる。さらに損傷モードごとに損傷の進行度を損傷原因、環境条件、橋梁の経年等から評価する。これら一連の損傷程度および損傷進行度は、「大きい」、「やや大きい」、「中くらい」、「やや小さい」、「小さい」等のファジィ集合で定義された言葉で表される。以上のようにして求めたモードの損傷程度と損傷進行度と床版の経年をあわせて評価することにより、各損傷モードについて余寿命が推定される。以下、本研究における余寿命の推定方法について述べる。

設計上考慮されていない有害な作用を受けることがないような床版の、経年と損傷程度の関係を図 3 中の曲線 S-0 のように仮定する。さらに、損傷進行度「大」、「やや大」、「中」、「やや小」、「小」のそれぞれに対応するものとして、Fig. 3 に示す直線 S-1~S-5 を仮定した。ここで、たとえば経年20年の RC 床版の、あるパネルの損傷程度が「やや小」であるとき、このパネルの余寿命を推定することを考える。このパネルの状態は、Fig. 4 において点 P で表される。もし損傷進行度が「やや大」であれば、点 P から直線 S

Fig. 3. Relation between construction year and damage state.

Fig. 4. Estimation of remaining life.

-2に平行に直線を引き、限界状態と交わる点 Q を求め、Q の水平座標から P の水平座標を差し引くことにより余寿命を求める。しかし、もし損傷進行度が「やや小」であれば、この進行度は曲線の S-0 の経年30年以降の損傷進行度を下回るので、経年30年を越えた辺りでは曲線 S-0 の進行度（直線 S-3 で近似）が支配的になると思われる。したがって、Fig. 4 に示すように点 P から直線 S-4 に平行に引いた直線は、点 R で折れ曲がり、点 R からは、直線 S-3 に平行な直線になり、限界状態線と点 Q で交わる。したがって、寿命は Q の水平座標から P の水平座標を差し引くことにより求めることができる。このような考え方をともに、経年と損傷程度、損傷進行度から余寿命を推定するルールを作成し、余寿命を8段階、すなわち「2年以内」、「2～5年」、「5～10年」、「10～15年」、「15～20年」、「20～25年」、「25～30年」、「30～35年」で推定した。

4 適用例と考察

取り上げた橋梁（A 橋）は、昭和13年に架設された3径間ゲルバー板桁である。Table II に設計諸元および環境条件を示す。ここでは、評価を行ったパネルのうちの1つのパネル P-1 について、その実行過程を簡単に説明する。

まず、設計諸元、環境条件、輪荷重通行位置、

Table II. Design and environmental conditions.

Kind	Factor	State	Truth value
Crack	Direction	Direction to bridge width	FL
	Location	Center of deck span	FL
		Haunch	M
	Density	1.72 m/m ²	1
	Between distance	Large	FL
	Width	Medium	FL
Concrete	Free lime	Medium	FL

Table III. Inspection results.

Kind	Factor	Data	Truth value
Design	Structural type	3-spanned cantilever girder bridge (straight)	1
	Design specification	Before 1967	1
	Construction year	Old	Large
Condition	Deck width	20 cm	1
	Bridge length	69.00 m	1
	Bridge width	12.95 m	1
	Lanes	3 lanes	1
	Footway	One-side	1
	Road rank	Main road	1
Environment	Rate of heavy vehicle	Medium	FL
	Location of wheel load	Center of deck span	Large

```
(rule-1-1-2-2
if (crack configuration width-direction)
   (crack location center-of-deck-span)
   (wheel-load location center-of-deck-span)
   (design-specification before-1967)
then (deposit (damage-cause exteme-wheel-load)
        (*cf times very-true = match)))
```

```
(rule-1-3-4-5
if (crack configuration width-direction)
   (crack location haunch)
   (design-specification before-1967)
then (deposit (damage-cause exteme-wheel-load)
        (*cf times fairly-true = match)))
```

```
(rule-1-5-3-6
if (crack configuration bridge-direction)
   (crack location center-of-deck-span)
   (design-specification before-1967)
   (wheel-load location center-of-deck-span)
then (deposit (damage-cause exteme-wheel-load)
        (*cf times true = match)))
```

Fig. 5. Examples of rules for damage causes.

Table III に示したパネル P-1 の点検データ等から損傷原因が、つぎのように推定された。

原因①：過大な輪荷重（確信度：やや小）

原因②：配力鉄筋量不足（確信度：やや小）

原因③：表面排水不良（確信度：やや小）

ここで、原因①を推定する際、実行されたルールを Fig. 5 に示す。ルールの内容は、システム内部ではローマ字で記述されているが、ここでは分かりやすくするために、漢字で表記する。たとえば rule-1-1-2-2 は、「もし、幅員方向のひび割れが床版支間中央に発生しており、輪荷重通行位置が支間中央で、適用示方書が昭和42年までのものであれば、損傷の原因が過大な輪荷重の作用である、という結論をデータベースに追加せよ。」という意味である。つぎに、これらの原因に起因する損傷の種類から損傷モードを特定し、損傷程度を損傷モードを構成する損傷種類の損傷度を評価することにより求め、さらに損傷進行度を損傷原因と環境条件などより求める。これらの結果を表にまとめると Table IV のようになる。この結果をもとに、各原因に起因する損傷に対するパネル P-1 の余寿命を推定すると、つぎのような結果が得られた。

原因①：5年から10年（確信度：やや小）

原因②：5年から10年（確信度：小）

原因③：2年（確信度：やや小）

A 橋は交通量の非常に多い地域に位置しており、ま

Table IV. Estimated damage causes.

Damage cause	Remaining life	Truth value
Cause (1)	5 to 10 yrs.	Fairly small
Cause (2)	5 to 10 yrs.	Small
Cause (3)	2 yrs.	Fairly small

Fig. 6. Neural network model.

た適用示方書も大正15年と古いことから、「過大な輪荷重の作用」が損傷原因であることは十分考えられることである。また、「配力鉄筋量の不足」に関しても、適用示方書の古さが大きな要因ではないかと思われる。さらに、「表面排水の不良」が推定されていることより、排水管の目詰まり等が生じている可能性が大きく、これに対する余寿命も2年と短いことから、早急に補修をすることが求められる。以上、損傷原因の推定結果などは、かなり妥当な結果が得られたと思われるが、余寿命に関してはまだまだ推定誤差も大きいと思われる、推論精度の向上が今後の課題であると思われる。

5 ニューラルネットワークによるルールの洗練化

ニューラルネットワークを用いてルールの洗練化を行うためには、まずファジィプロダクションルールをニューラルネットワークによって表現しなければならない。以下にその方法について述べる。

n 個の要素 ($C1, C2, C3, \dots, Cn$) と m 個の要素 ($R1, R2, R3, \dots, Rm$) を用いて、ファジィプロダクションルールを次のように記述することができる。

if ($@p1/(C1 @f1), @p2/(C2 @f2), \dots,$
 $@pn/(Cn @fn)$
 then ($@q1/(R1 @g1), @q2/(R2 @g2), \dots,$
 $@qm/(Rm @gm)$) (2)

ここで、前件部の $@pi (i=1, 2, 3, \dots, n)$ と後件部の $@qi (i=1, 2, 3, \dots, m)$ はファジィ確信度を表し、($Ci @fi$) ($i=1, 2, 3, \dots, n$) は「原因の要素 Ci の値が $@fi$ である」ことを表し、($Ri @gi$) ($i=1, 2, 3, \dots, m$) は「結果の要素 Ri の値が $@gi$ である」ことを表している。また、 $@fi$ や $@gi$ はファジィ述語を表している。

ファジィプロダクションルールをニューラルネット

ワークによって表現する場合、Fig. 6 のように原因の要素である $C1 \sim Cn$ に対し、ファジィ述語を表現するユニットと確信度を表現するユニットを用意し、結果の要素である $R1 \sim Rn$ の各要素に対しても、確信度およびファジィ述語を表現するユニットを用意する必要がある。ファジィ述語も確信度もファジィ集合で表されるから、それを表現するためには複数のユニットを用意し、おのおののユニットをファジィ集合における要素と考えておのおのにグレード（メンバシップ値）を与えればよい。

6 RC床版の損傷原因推定ルールの洗練化

RC床版の損傷の原因を推定するための調査要因とその値を Table V に示す。例えば構造形式が桁であれば、「構造形式・桁」がとる値は二値（0または1）であるので、要因「構造形式・桁」の値が1となり、その他の「構造形式・下路式アーチ」や「構造形式・box」は0となる。また、ファジィ集合を値とする要因については、例えば要因「ひび割れ密度の大きさ」に対して、「大きい」とか「小さい」等を与える。ただしこの際には、「大きい」とか「小さい」を表すメンバシップ関数をあらかじめ決定しておかなければならない。このようなファジィ集合を値とする要因に対しては、ファジィ確信度を与えることにした（もちろ

Table V. Input for neural network.

Factor	Value	Truth V.
Structural type	1.0	1.0
Design spec.	1.0	1.0
Crack config.	1.0	1.0
Occurrence time of crack	Very near	Fairly true
Difference between wheel load and crack	Near	True
Crack density	Medium	True
2-dimensional slab	1.0	1.0
Depth of slab	Large	Slightly true

ん、クリスプな集合でファジィ確信度を持つ場合や、ファジィ集合で $[0, 1]$ の確信度を持つ場合も扱うことができる。

さて、RC 床版の損傷原因とそれを推定するための要因がどのような関係にあるのかを調べるために、本研究では3人の維持管理の専門家にアンケート調査を行った。このアンケート結果を基にニューラルネットワークによって学習を行った。例えば、アンケートに対する解答より、次の形式の学習データを作成することができる。

① 原因推定のための要因の値とその確信度

構造形式・桁: 値 = 1, 確信度 = 1

示方書・昭和7年まで: 値 = 1, 確信度 = 1

ひび割れ形状・幅員方向: 値 = 1, 確信度 = 1

ひび割れと輪荷重位置: 値 = 近い,

確信度 = 絶対的に正しい

ただし、ファジィ集合「近い」は離散的に $\{0/0, 0/2, 1/4, 0.5/6, 0/8, 0/10\}$ のように表し、「絶対的に正しい」は離散的に $\{0/0, 0/0.2, 0/0.6, 0.5/0.8, 1.0/1.0\}$ のように表す。

② 原因1～原因8のファジィ確信度

原因1: ファジィ確信度 = やや正しい

$= \{0/0, 0.5/0.2, 1.0/0.4, 0.5/0.6, 0/0.8, 0/1.0\}$

以上の作業をアンケートの各設問に対する各解答者の解答に対して行い、ニューラルネットワークによって学習を行った。

ニューラルネットワークによる結果と維持管理の専門家へのアンケート結果とを比較すると、ほぼ一致していることがわかった。つまり維持管理部門の専門家に対するアンケート結果にニューラルネットワークを適用することによって、ファジィプロダクションルールを修正あるいは生成することができる。

7 結論および今後の課題

本研究では、評価対象を RC 床版に絞り、より実用的な評価のできる構造健全性評価エキスパートシステムを開発した。その結果、以下のような結論を得た。

(1) ファジィ理論を導入することにより、あいまい

さを持つ自然言語をルールの中で使用できるようになり、専門家から獲得した知識（自然言語で表現されている）をそのままの形でシステムに移植することができた。さらに推論方法にファジィ推論の概念を用いることにより、あいまいなデータ、知識からでも妥当な推論結果を得ることができるようになった。このとき、ファジィ集合の処理をファジィ集合処理システムという独立したシステムによって行うことにより、全体のシステム開発を容易に行うことができた。

(2) データの入力方法の改善を図り、また画面表示を日本語化し、さらにワークステーション上にシステムを構築することにより、誰もがどこでも利用できるシステムとすることができた。

(3) 維持管理業務の専門家との綿密な対話により、評価に有用な専門的知識の獲得ができた。さらに RC 床版の健全性評価に損傷モードの概念を導入し、その損傷程度、損傷進行度から余寿命を推定して評価することにより、維持管理上の種々の判断に直接利用できる評価結果を得ることができた。

(4) ニューラルネットワークを用いることにより、知識の洗練化あるいは生成が容易にできる。本研究で提案したニューラルネットモデルを用いれば、ファジィプロダクションルールをニューラルネットワーク上で容易に扱うことができる。ただし、ニューラルネットワークを用いて有効な結果を得るには、専門家へのアンケートを十分に行い、さらに有用な事例を数多く収集することが必要である。

参考文献

- 1) 白石成人, 古田 均, 馬野元秀, 川上宏一郎, 大谷裕生, 材料, **39**, 19 (1990).
- 2) R. フレインスキー, 平林真一, 河田 享, 世古 忠訳, “LISP 技法(上)(下)” (1987) 講談社
- 3) Brian W. Kernighan, Rob Pike, 石田晴久監訳, “UNIX プログラミング環境” (1985) アスキー出版局
- 4) 宮本文徳, 道路橋 RC 床版の力学的特性とその耐用性判定に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, p. 21 (1984).