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[†]

古田 均*

1. まえがき

現存する構造物の中には、建設後から現在に至るまでの間に、地震、台風、衝撃等の様々な外的作用によって何らかの被害を被り、その結果使用性あるいは安全性に問題を有しているものもかなりある。今日、これらの既存構造物の維持管理をどのように行っていくかは非常に重要な問題となっている。

ところが、現状では構造物の損傷が進んでいるからといって、それら全てを新しく作り直すということは、経済面から考えて不可能である。このため現在、どの構造物を建て替えるか、あるいは補修すべきかを的確に判断することが望まれている。構造物が一見して明かな損傷を呈している場合には、これらの判断はさほど難しくはないが、見かけ上は問題はないが内部に重大な損傷を含んでいる場合にはかなり難しくなる。

このような複雑な損傷状況に関する判断を適切に行うには、表面にみられる損傷の状況とそれに関連する種々の要因、あるいは、利用できる情報（損傷の原因および進行状況、構造物の重要度、構造物の設計諸元、周囲の環境など）を相互に関連させ、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質・量ともに十分ではなく、数少ないあいまいなデータを種々の側面から検討し、直感や経験を基に、損傷の程度、損傷の進行状況などを推定していかなければならない。このため、これまで健全性の評価は経験豊富な専門家の直感や工学的判断に頼らざるを得なかった。

構造物の維持補修の必要性がますます高まっている今日、専門家の数はその需要に比べて不足する一方であるので、問題が生じている構造物全てに専門家が対処することは不可能である。したがって、一般の構造技術者でも、専門家が行うのと同程度の評価結果に到達できる健全性評価システムを開発することは非常に意義深いことである^{1)~3)}。

このような構造健全性評価エキスパートシステムとしては、建築構造物の耐震健全性評価のために開発された有名な SPERIL⁴⁾があるが、この詳細は既に多くのところで紹介⁴⁾されているので、ここでは筆者らにより開発された橋梁の鉄筋コンクリート床版の健全性評価エキスパートシステム⁵⁾の概要について説明する。まず、確信度を用いた健全性評価エキスパートシステムについて述べ、続いてそのシステムへのファジィ集合処理システム⁶⁾の導入について説明する。

2. 鉄筋コンクリート床版の健全性評価 エキスパートシステム^{5),7)}

前述したように、構造物の健全性評価には、総

[†] Fuzzy Expert System for Integrity Assessment of Bridge Structures
Hitoshi FURUTA

*1 京都大学工学部土木工学教室
Department of Civil Engineering, Kyoto University

合的評価にどうしても人間の判断に頼らざるを得ない部分がある。つまり、人間の持つ対象が不明確で漠然としていてもその本質を把握し、特性の判別が出来る総合的評価能力で、情報不足やモデルの不備などを補うわけである。ここでは、鉄筋コンクリート床版の健全性評価のためのエキスパートシステムを紹介する。

2.1 システムの特徴

このシステムの特徴として以下の点を挙げることが出来る。

- ①実際に維持管理業務に携わっている専門家との対話を通じて専門的、経験的な知識の獲得を試みている。
- ②コンピュータ言語として Lisp を用いて、ルールの変更や追加に対する柔軟性を確保している。
- ③確信度(certainty factor;CF)を導入することにより、入力データの不確定性及びルール自体に含まれる不確定性を考慮できるようにしている。
- ④ルールベースおよびデータベースを複数個に分割し、必要に応じてそれらを切り替えて使えるようにすることにより、実行速度の短縮を図っている。
- ⑤損傷度を評価するための指標として、損傷程度の他に、損傷原因および損傷進行度を考え、これらの指標を組み合わせることで、より多面的な評価を可能にしている。

2.2 システムの構成

本システムの基本構造は図-1にみられるように、インタープリタ(推論エンジン、推論機構)、ルールベース(ルールの集まり)、データベース(ワーキングメモリとも呼ばれる)に大別される。データベースおよびルールベースは複数個に分割できる。例えば、入力データをデータベース1に、出力データをデータベース2に格納できる。インタープリタは、要求に応じてルールベースに書かれたルールを順に参照し、条件部がデータベース中のデ

ータに一致するルールがあればその結論部を実行する。結論部は、出力結果をデータベースに格納するなどの操作を行う。

2.3 確信度の計算

構造物の健全性評価に用いられるデータの多くは定性的なものであり、そのためそれらは本質的に不正確さやあいまいさを含んでいる。一方、人間の持つ知識にも不正確であいまいなものが多い。したがって、得られたデータを基に、人間である専門家から取り出した知識を用いて問題を解決していくエキスパートシステムには、こうした不正確であいまいな情報を処理できる能力が不可欠である。ここでは、これらの不確実性やあいまいさを扱うために確信度を用いている。確信度 CF を用いると、データおよびプロダクションルールは、それぞれ次のように書かれる。

データ 1 : C_1 , データ 2 : C_2 , ..., データ h : C_h
 IF 条件1, 条件2, ..., 条件 n
 THEN 結論 1 : C'_1 , 結論 2 : C'_2 , ...,
 結論 m : C'_m

ここで、 $C_1, C_2, \dots, C_h$ および $C'_1, C'_2, \dots, C'_m$ は確信度を表している。

CF を含んだルールを実行するには、①条件部全体としての CF をどうして求めるか、②結論に対する CF をどのように求めるか、③2つ以上の

図-1 システムの概要

ルールが同じ結論を与えるとき全体としての CF をどのように求めるか、について考えなければならない。このシステムでは以下のような計算方法をとっている。

- ①条件1、条件2、…、条件 n にマッチするデータの CF を $C_1, C_2, \dots, C_m$ とするとき、条件部全体としての CF (入力 CF) は

$$C_{in} = \min(C_1, C_2, \dots, C_m) \quad (1)$$

で与える。

- ②条件部全体としての CF を C_{in} 、 k 番目 ($k=1, 2, \dots, m$) の結論の CF を C'_k とするとき、 k 番目の結論に対する CF (出力 CF) を

$$C_{out, k} = C_{in} \times C'_k \quad (2)$$

とする。

- ③同じく結論を導く k 個のルールの出力 CF を、 $C_{out, 1}, C_{out, 2}, \dots, C_{out, k}$ とするとき、その結論に対する全体としての CF を

$$C = \max(C_{out, 1}, C_{out, 2}, \dots, C_{out, k}) \quad (3)$$

とする。

2.4 健全性評価手順

損傷度の評価は、損傷パターン、損傷原因、損傷進行度という3つの指標を用いて行われる。損傷パターンは、パネルごとの点検により得られたデータから導かれる損傷程度(A、B、C)の分布状況が、予め設定しておいた基準損傷パターンのどれに属するかで決定される。ここで、パネルとは、主桁と対傾構で区切られた長方形の部分と言う。損傷原因は、損傷状況、損傷パターン、床版の機能劣化の程度から推定され、床版の両端部、張り出し部、中央部について別個に求める。損傷進行度は、ひび割れ発生時期、ひび割れパターン、損傷原因、床版の機能性等から推定される。損傷進行度もパネルごとにA、B、Cの3段階で評価し、パターン化を行う。損傷度評価は、上記の損傷パターン、損傷原因、損傷進行パターンを組み合わせで行う。これにより、床版のどの部分に損傷が集中し、将来それがどのように進展して行くかを明らかにすることが出来る。この手順を図-2に示す。

本システムの総ルール数は848個で、その内訳は(1)損傷程度の評価(ルール数は92個)、(2)ひび割

図-2 鉄筋コンクリート床版健全性評価手順

れの発生時期の評価(258個)、(3) ひび割れ原因の評価(365個)、(4) 損傷進行度の評価(65個)、(5) 損傷状況の表示(9個)、(6) 損傷パターンの判定(30個)、(7) 損傷進行パターンの判定(29個)である。これらは12個のルールベースに分割され、格納されている。(1)から(4)はパネルごとの評価のために適用されるルールであり、(5)から(7)はすべてのパネルの評価が終わってから、床版全体の評価を行うために適用されるルールである。これらは、各種文献あるいは専門家から獲得した知識をルール化したものである。

図-3に本システムの推論手順を示す。まず入力データとしての鉄筋コンクリート床版の点検結果が床版1パネルごとにデータベースに格納される。評価ルールは各ルールベースに項目ごとに分割して格納されている。例えば、データとして床版のひび割れ状態が入力されたとすると、それに対してその損傷程度、発生時期、発生原因、進行度に関する評価ルールが順次適用され、損傷原因、損傷パターン、損傷進行パターン等の評価結果が得られる。

図-3 推論過程

このように健全性評価は、得られたデータにブロッグションルールの形で表現されている知識を順次適用して行くことによりなされるが、この際データや知識に含まれる不確実性を考慮できるように、確信度 CF が用いられるわけである。

2.5 適用例

次に適用例を示す。あるパネルに関する点検データを表-1に示す。これに図-4に示すようなルールを適用し、表-2の結果が得られる。1つのパネルについて複数の損傷程度が求まる場合はもっともランクの高いものの中で最大の CF を有するものを選択する。したがって、このパネルの評価結果は、「損傷程度 A ($CF=0.5$)」となる。これを全パネルについてパネル位置とともに示したのが図-5である。図中、括弧内の数字は、損傷程度に対する CF を表し、“?”で示した箇所は、与えられたデータからは評価できなかったことを示す。次に、この結果を使って損傷パターンを求める方法を示す。まず、床版を図-6に示すような3つのゾーン(ゾーン1、ゾーン2、ゾーン3)に分割する。そして、表-3に示すような代表的な床版の基準損傷パターンに従って損傷パターンを求める。その結果、「損傷パターン P2($CF=0.9$)」が得られる。ほぼ同様にして、「損傷進行パターン P2($CF=0.36$)」が求まる。さらに、各ゾーン毎に最大の CF を有する損傷原因を選択し、

表-1 点検データ

点検項目	点検結果	CF
ひび割れ幅	0.1mm	0.8
ひび割れ間隔	0.45cm	0.7
ひび割れ方向	2方向	0.7
端横桁からの浮き	あり	0.5
遊離石灰の流出	0.24m ²	0.6
ひび割れ形状	レンズ状	0.4
ひび割れ状況	連続	0.4
ひび割れ内の泥	多い	0.9
鉄筋損傷程度	A	0.8
遊離石灰	多い	0.3

(損傷程度-1-2
IF
 (ひび割れ幅 =x =CF1)
 (#< =x 0.2) (#>= =x 0.1)
THEN
 (#deposit (ひび割れ幅 中 =CF1)))

(損傷程度-1-5
IF
 (ひび割れ間隔 =x =CF1)
 (#< =x 60) (#>= =x 40)
THEN
 (#deposit (ひび割れ間隔 中 =CF1)))

(損傷程度-2-13
IF
 (ひび割れ方向 2方向 =CF1)
 (ひび割れ幅 中 =CF2)
 (ひび割れ間隔 中 =CF3)
THEN
 (#deposit 損傷程度 B (#times 1.0 (#min =CF1 =CF2 =CF3))))

(損傷程度-3-10
IF
 (流出 遊離石灰 =x =CF1)
 (#< =x 0.3)
THEN
 (#deposit (流出 遊離石灰 小 =CF1)))

(損傷程度-4-13
IF
 (流出 遊離石灰 小 =CF1)
THEN
 (#deposit (損傷程度 B (#times 1.0 (#min =CF1))))

(損傷程度-4-20
IF
 (端部からの浮き =CF1)
THEN
 (#deposit (損傷程度 A (#times 1.0 (#min =CF1))))

図-4 床版損傷程度適用ルール

表-2 推論結果

適用ルール推定結果	
損傷程度-2-8	損傷程度 B 0.7
損傷程度-4-13	損傷程度 B 0.6
損傷程度-4-20	損傷程度 A 0.5

A (0.50)	A (0.90)	B (0.70)	B (0.40)	B (0.60)	A (0.40)
B (0.80)	B (0.70)	A (0.80)	?	A (0.30)	A (0.50)
A (0.90)	C (0.80)	A (0.60)	?	B (0.80)	C (0.80)
C (0.20)	A (0.50)	B (0.50)	?	A (0.70)	A (0.60)
B (0.60)	B (0.80)	C (0.40)	A (0.60)	A (0.90)	A (0.30)

図-5 損傷程度分布

図-6 ゾーン分割

表-3 基準損傷パターン

基準損傷パターン	定 義
パターン1(P1)	損傷程度が A または B であるパネルがゾーン1,2,3においていずれも70%以上ある。
パターン2(P2)	損傷程度が A または B であるパネルがゾーン1,2においてのみいずれも70%以上を占める。
パターン3(P3)	損傷程度が A または B であるパネルがゾーン1においてのみ70%以上を占める。
パターン4(P4)	損傷程度が A または B であるパネルがゾーン2においてのみ70%以上を占める。
パターン5(P5)	損傷程度が A または B であるパネルがゾーン3においてのみ70%以上を占める。
パターン6(P6)	損傷程度が A または B であるパネルがゾーン1,2,3においていずれも70%未満である。

それを各ゾーンの損傷に対する主要な原因であるとみなす。損傷原因としては次のものが推論されている。ゾーン1：「打ち継ぎ部の不良(CF=0.45)」、ゾーン2：「セメントの不良(CF=0.2)」、ゾーン3：「コンクリートの沈降(CF=0.35)」。以上の結果より、この床版は周辺部の損傷が進んでおり、しかも現在も比較的大きな速度を持って進行中であるため、再点検および補修が、特に周辺部で必要だと思われる。さらに、これらの結果と損傷原因を合わせて評価することにより、損傷の発生および進展メカニズムの解明のための有力な手がかりが得られ、また補修が必要かどうか、あるいは必要な場合の補修工法選定のための有益な情報が得られる。

推論ステップは入力データに依存するので、一概に何回とは言えないが、ここで使った1パネルの例についていうならば、約30回である。

3. ファジィエキスパートシステムへの拡張

構造健全性評価のためのデータやルールには様々な不確実性あるいはあいまいさが含まれている。例えば、前述のシステムで用いた図-4に示すルールを見ても、ひび割れ幅が「中」、ひび割れ間隔が「中」、遊離石灰が「小」というような表現がみられる。これらは明らかにルール自体に関わるあいまいさではなく、ルールの前提部あるいは結論部の内容(記述方法等に関わる)に関わるあいまいさであり、確信度では扱うことのできない性質のものである。そのためここでは、ファジィ集合⁸⁾の考え方を導入することを考える。

3.1 ファジィ推論

あいまいな情報から何らかの結論を導き出すためには、それに応じた推論機構が必要であるが、本システムでは、ファジィ推論^{9),10)}の概念を導入した推論機構を使用している。ここでは、ファジィ推論について簡単に述べるとともに、この概念を使ってファジィプロダクションシステムで実際にどのように推論が行なわれているかを具体的に説明する。

人間が、普段の生活の中で使っている知識は、たとえば「赤いりんごは熟している」や「背の高い人は足が長い」のように、条件や結論を記述するのにあいまいな概念を持つ単語を使うことが多い。これらはすべて「もし～ならば～である」というルールの形で表すことができるが、確信度の使用しか許さない知識表現では、たとえば「赤みがかったりんごは熟しているか?」とか「非常に背の高い人の足の長さはどうか?」等の問題に対して推論を行えず、あいまいな知識を表現しているとは言えない。あいまいに表現されたルールを用いた推論を定式化しているものの一つとしてファジィ推論と呼ばれているものがある。いま、次

のようなルールを使って推論を行う場合のことを考える。

$$\begin{array}{ll} \text{IF} & X \text{ is } A \\ \text{THEN} & Y \text{ is } B \end{array} \quad (4)$$

ここで、属性 X 、 Y の属性値 A 、 B があいまいさを有する単語である。あいまいさを取り扱うことのできない推論機構は、「 A 」があいまいさを持った単語であることを認識できないため、「 $X \text{ is } A$ 」というデータに対しては、「 $Y \text{ is } B$ 」という結論を導けるが、 X が A とは少し異なる A' である場合には、(4)のルールは用いられず、結論を導くことはできない。

ここで人間が実際、頭の中でどのように推論を行っているかを考えてみよう。人間は「 $X \text{ is } A'$ 」というデータを得ると、予め頭脳に蓄積されている、「 X 」の属性値に関する知識群の中から「 A' 」に最も近い、すなわち一致する度合いが最も高い属性値である「 A 」に関する知識を選択し、それを使って推論を試みる。このとき、ルール(4)の条件部とデータとは完全に一致しないため、その一致度に応じて得られる結論も「 $Y \text{ is } B$ 」とは少し異なった「 $Y \text{ is } B'$ 」となるであろう。このような、人間の頭脳の中で行われる推論メカニズムに近い推論機構(近似推論と呼ばれる)は、ファジィ推論の概念を用いて実現できる。いま、「 A' 」が「 A 」と少し異なるとき、あいまいなデータ「 $X \text{ is } A'$ 」と(4)に示すようなあいまいな知識から推論を行うことを考える。このような推論は、「 A' 」をファジィ集合「 $@A'$ 」で表しデータを「 $X \text{ is } @A'$ 」と書き換え、ルール(1)の「 A 」、「 B 」をそれぞれファジィ集合「 $@A$ 」「 $@B$ 」で表し、(5)のように書き換えることにより可能である。

$$\begin{array}{ll} \text{IF} & X \text{ is } @A \\ \text{THEN} & Y \text{ is } @B \end{array} \quad (5)$$

この推論の結果として、「 $Y \text{ is } @B'$ 」という「 $@B$ 」とは少し異なるファジィ集合「 $@B'$ 」が「 Y 」の属性値として得られる。このような推論方法がファジィ推論である。

3.2 ファジィプロダクションシステム

本システムは、このファジィ推論の概念に基づいた推論機構を使って、あいまいなデータと知識から推論を行う。プロダクションシステムにファジィ推論を組み合わせていることから、ファジィプロダクションシステムと呼ぶことにする。以下、本システムの推論過程を簡単な例で説明する。

まず点検結果から、「ひび割れが大きい」、「ひび割れの位置は支間中央の真下」、「床版の経年度はやや新しい」、というデータを得たとする。このデータには「大きい」、「真下」、「やや新しい」等のあいまいな表現が含まれているので、これらをファジィ集合で表現する。また、これらの入力情報に対応するルールもファジィプロダクションルールの形を取っている。ファジィプロダクションル

```
(rules 損傷推定-3-1
  (rule-3-1-1
    if
      (床版 経年度 やや新しい)
    then
      (deposit (コンクリート 老朽 小) (*cf times absolute-true *match)))

  (rule-3-1-2
    if
      (床版 経年度 中)
    then
      (deposit (コンクリート 老朽 やや大) (*cf times very-true *match)))

  (rule-3-1-3
    if
      (床版 経年度 約30年)
    then
      (deposit (コンクリート 老朽 大) (*cf times absolute-true *match)))

  (rule-3-1-4
    if
      (床版 経年度 古い)
    then
      (deposit (コンクリート 老朽 中) (*cf times very-true *match)))
)
```

⋮

```
(rule-1-1-2-2
  if
    (ひび割れ 形状 幅員方向)
    (ひび割れ 位置 支間中央 真下)
    (輪荷重 位置 支間中央 真上)
    (適用示方書 昭和42年まで)
  then
    (deposit (損傷原因 過大な輪荷重の作用) (*cf times very-true *match)))
```

図-7 損傷推定ルール

ールの一例を図-7に示す。ここでは、「新しい」、「やや新しい」、「普通」、「やや古い」、「古い」等の床版の古さを表現するメンバーシップ関数を、横軸に経年数、縦軸にグレード μ をとって図-8のように設定し、「大」、「中」、「小」、等のひび割れ幅を表現するメンバーシップ関数を、横軸にひび割れ幅(mm)、縦軸にグレード μ をとり図-9のように設定する。これらのメンバーシップ関数は、ルールの条件部で使うものは関数 predicate を用いて Lisp 関数として定義し、データやルールの結論部に使うものは要素列挙型ファジィ集合で近似して用いている。

図-8 床版の古さを表すメンバーシップ関数

図-9 ひび割れ幅を表すメンバーシップ関数

本システムでは、各データにどの程度信憑性があるかを表す指標(真理値あるいは確信度)を付加することができる。真理値(確信度)もファジィ集合で記述することができ、利用者が自由に設定、変更することができる。ファジィ真理値としては、

図-10に示すように、“more-or-less true”、“fairly true”、“true”、“very true”、“absolute true”等を設定している。この真理値も要素列挙型ファジィ集合で規定されており、実際に真理値付きのデータをシステムに入力する際には、真理値と、データの間を“/”で区切って入力する。

図-10 ファジィ真理値を表すメンバーシップ関数

次に、図-7のルールについて具体的に考えてみよう。ここで、「損傷程度-3-1」とはルールベース名で、rule-3-1-1、rule-3-1-2等はルール名を示している。例えば、ルール-3-1-1の意味は「床版が新しければ、コンクリートの老朽化は小である」である。ルール-3-1-2は床版の古さが中ぐらいの場合であり、ルール-3-1-3は床版の古さが約30年の時のコンクリートの老朽化の程度を示している。さらに、ルール-3-1-4もあるので、床版の古さに関してはあるような形で情報が入力されても、それに対応するコンクリートの老朽化の程度を推定することが出来る。すなわち、「新しい」はもちろん、「やや古い」もあるいは「24年」でも、前述したファジィ推論の考え方を基に何らかの結論を導出することができる。

また、各ルールの THEN 部の=match にはデータとルールの条件部との一致の度合(matching degree)が格納されている。本システムのルール表記では、変数には先頭に“=”を付加し、Lisp 関数には先頭に“*”を付加して、他のデータと区別している。結論全体の真理値は、「=match」とルールの確信度との間でファジィ演算を行うことにより求める。その演算を規定しているのが Lisp 関

数「cf」であり、ルール-3-1-2の例では「(*cf times very-true =match)」により、ルールの確信度「very-true」と一致度「=match」の間の演算を「times:掛け算」と規定している。(deposit A t)は、結論「A」に真理値 t を付加し、データベースに登録するという働きをする。

この例からみて、本システムの推論機構が「t/(x is @A')」というデータから(5)に示すルールを使って推論を行うと、「t/(y is @B)」という結論を出力することがわかる。ここで、結論中の@Bが@B'となっていないが、この推論もファジィ推論の一種であると言える。@Bを@B'に変える方法として真理値 t を@Bに反映させる真理値限定という方法も提案されているが、一方では、@Bを@B'に変えることは不都合な場合が多く行うべきでないという意見もある。例えば本システムの場合、健全性評価に際して、損傷原因、損傷度、損傷進行度等に関してそれぞれ結論が得られるが、これらの中には、場合によっては結論を変化させるのが適当と思われるもの(例えば損傷度、損傷進行度)もあるが、そうでないもの(例えば損傷原因)もある。

3.3 ファジィエキスパートシステムの利点

プロダクションシステムにファジィ集合処理システム¹¹⁾を組み込むことにより、以下のことが可能になる。

- ①あいまいな情報の処理が可能となる。すなわち、あいまいさを含んだデータ、知識などからでもそれらを組み合わせて何らかの結論を得ることができる。さらにあいまいな意味をもつ単語もそれ本来のあいまいさを保ったまま使用できる。この点が、確信度によるあいまいさの表現と異なる点である。
- ②知識はプロダクションルールの形で表現するが、ルールの中で自然言語が使用できることから、自然言語で表現された知識も容易にコンピュータに入力できる。
- ③②により、知識を専門家との対話により自然言語に近い形で獲得することが可能になり、

知識獲得が容易になる。

- ④あいまいな知識をも取り込めることから、一つの知識の表現できる範囲が広がり、評価に必要な知識の数を最小限に抑えることができる。

4. あとがき

構造物の維持管理には、その健全性を適切に評価することが重要である。そのための実用的な健全性評価システムとして開発された鉄筋コンクリート床版の健全性評価のためのエキスパートシステムの概要を紹介した。実際の維持管理業務上の種々の判断が専門家と呼ばれる技術者の手によってなされていることを考えると、専門家の持つ知識をコンピュータに移植し、その情報をもとに構造物の健全性を評価するエキスパートシステムの導入は有意義であろう¹²⁾。

前半のシステムでは、健全性評価に関わるデータやルールに含まれる種々の不確実性やあいまいさは確信度で取り扱われている。しかしながら、確信度だけでは、対象物自身に関わるあいまいさを扱うことは困難であるので、ファジィ集合の考え方を導入することを考えた。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ことになり、専門家から獲得した知識(自然言語で表現されている)をほぼそのままの形でシステムに移植することができる。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る。

しかしながら、本システムをさらに実用的なものとするには、以下の問題を解決する必要がある。

- ①現在のシステムでは、計算を始めてから結果を出力するまで、かなりの演算時間がかかる。今後、この短縮を図る必要がある。

- ②本システムの目的は構造物の健全性を評価することであるが、実際の維持管理業務では健全性もさることながら、その余寿命を推定し、さらに補修時期や工法の選定に対する示唆を与えることが望まれる。
- ③本システムでは、専門家からの知識の獲得を対話を通じて行ったが、この方法だけでは、専門家の持つ経験的、直感的知識をすべて抽出することはできない。今後ニューラルネットワーク等を用いた学習機能をもたせることが必要である。

参 考 文 献

- 1) 古田均, Fu, K. S., Yao, J. T. P.: 知識工学—エキスパートシステム—の構造工学への応用、土木学会誌、第70巻、第9号、pp.28-33、1985.
- 2) 三上、江澤、森澤、田中、朝倉: RC床版の点検・補修に関するエキスパートシステム、第11回電算機利用に関するシンポジウム論文集、pp.159-166、1986.
- 3) 中村、松浦、寺野、篠原: 水力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、pp.513-521、1986.
- 4) 寺野、浅居、菅野: ファジィシステム入門、オーム社、1987.
- 5) 白石、古田、馬野、川上: RC床版の耐用性評価システムに関する基礎的研究、土木学会論文集、No.386/I-8、pp.285-291、1987.
- 6) Umamo, M.: A Fuzzy Production System; in H. Prade and C. V. Negoita (Eds.): Fuzzy Logic in Knowledge Engineering, Verlag TÜV Rheinland, pp.194-208, 1986.
- 7) Furuta, H., Umamo, M., Kawakami, K. and Shiraishi, N.: An Expert System for Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Deck, 2nd IFSA Congress, Vol. 1, Tokyo, pp. 160-163, 1987.
- 8) Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets, Information and Control, Vol. 8, pp.338-353, 1965.
- 9) 水本雅晴: ファジィ理論とその応用、サイエンス社、1988.
- 10) Gupta, M. et al. (Eds.): Approximate Reasoning in Expert Systems, North-Holland, 1985.
- 11) 馬野元秀: Lisp によるファジィ集合処理システ

ム、第3回ファジィシステムシンポジウム、pp.167-172、1987.

- 12) 古田均：エキスパートシステム、土木学会誌、第73巻、第2号、p.24、1988.

(1990年2月25日受付)

[問い合わせ先]

〒606 京都市左京区吉田本町
京都大学 工学部 土木工学教室
古田 均
Tel. 075-753-5078
Fax. 075-761-0646

著 者 紹 介

古 田 均 (ふるた ひとし)

京都大学 工学部 土木工学科

昭和51年京都大学大学院博士課程修了。同年4月京都大学工学部土木工学科助手。講師を経て現在助教授。59年から60年米国パデュー大学客員助教授。62年米国プリンストン大学客員研究員。エキスパート・システム、信頼性工学、最適設計、損傷度解析、ファジィ理論の構造工学への応用などの研究に従事。工学博士。日本ファジィ学会、国際ファジィシステム学会、NAFIPS、計測自動制御学会、システム制御情報学会、土木学会、ASCE、日本材料学会、日本建築学会、日本鋼構造協会会員。