

RC床版の耐用性評価システムに関する基礎的研究

AN EXPERT SYSTEM FOR EVALUATING STRUCTURAL DURABILITY
OF RC BRIDGE DECKS

白石成人*・古田 均**・馬野元秀***・川上宏一郎****

By Naruhito SHIRAIISHI, Hitoshi FURUTA, Motohide UMANO and Koichiro KAWAKAMI

In this paper, an attempt is made to develop an expert system for evaluating the structural durability of bridges. The damage assessment of reinforced concrete decks is considered, because their failures have been occasionally reported. Similar to the usual expert systems, this system consists of interpreter, data-base and rule-base. All rules are represented by means of production rules with certainty factors. Both data-base and rule-base are divided into several groups to reduce the execution time and make the modification of rules easier. An application example is presented to illustrate and demonstrate the expert system developed herein.

Keywords : damage assessment, expert system, lisp, reinforced concrete deck, structural durability

1. ま え が き

現存する橋梁構造物の中には、架設後から現在に至るまでの間に、地震、台風、衝撃等のさまざまな外的作用により何らかの損傷を被り、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少なくない。したがって今日、これらの橋梁構造物の維持管理をどのように計画し、実行していくかは、重大な問題となっている¹⁾。

現状では、損傷の進んだ橋梁をすべて架け替えることは、経済面から考えて不可能である。このため、どの橋梁を架け替えるべきか、あるいはどの橋梁を補修すべきかという判断を的確に行うことが要求される。この判断は、構造物が一見して明らかな損傷を呈している場合には容易であるが、見掛け上はそれほどでもないが内部に重大な損傷を含んでいる場合には困難なものとなる。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耐用性を評価する必要がある。しかしながら、耐用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、直感や経験をもとに、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、これまで耐用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。

橋梁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、維持補修上の問題が生じている橋梁すべてに専門家が対処することは不可能である。したがって、一般の土木技術者でも、専門家が行うのと同程度の評価結果に到達できる耐用性評価手法について考究することは意義あることと思われる。

こうした背景を踏まえたくらうで、本研究では、維持補修の専門家とよばれる技術者のもつ工学的知識をコンピュータに入力・蓄積することにより、汎用性の高い、誰にでも利用できる耐用性評価システムを鉄筋コンクリート床版を対象に作り上げた。ここで鉄筋コンクリート床版を取り上げたのは、常に過酷な荷重条件下にある

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室
(〒611 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学講師 工学部土木工学教室
(同上)

*** 工博 大阪大学講師 大型計算機センター
(〒567 茨城市美穂ヶ丘5-1)

**** 学生会員 京都大学院生 工学研究科修士課程

こと、および実際に損傷を受けた例が多くみられること等の理由による。

本耐用性評価システムでは、橋梁構造物の耐用性評価に必要な知識をプロダクションルール²⁾で表現し、それらを相互に組み合わせて推論を実行することにより結論を導く。本システムの作成にあたっては、以下の事項に注目した。

- 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して、基本的知識（構造技術者が通常もっていると考えられる知識）、専門的知識（維持管理業務特有の知識）、経験的知識（専門家が長年の経験から得た知識）の獲得を試みた。
- ② 確信度係数³⁾を使用することにより入力データの不確実性およびルール自体に含まれる不確実性を考慮できるようにした。
- ③ プロダクションシステムのインタプリタをコンピュータ言語 Lisp⁴⁾を用いて作成することにより、ルールの変更や追加に対する柔軟性を確保した。
- ④ できるだけ多くのルールの獲得を試みた。
- ⑤ 耐用性評価指標として、損傷パターン、損傷原因、損傷進行度を設定することにより、多面的な評価を試みた。

2. 鉄筋コンクリート床版の耐用性評価システム

(1) システムの概要

本システムの基本構造は、図-1 にみられるようにルールベース（ルールの集まり）、データベース（データの集まり、作業記憶ともよばれる）、インタプリタに大別される。データベースおよびルールベースは複数個に分割することが可能である。たと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。また、ある特性1に関する評価ルールをルールベース1に、異なる特性2に関する評価ルールをルールベース2に格納できる。インタプリタは、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。

本システムにおいては、まず入力データとして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格納されている。たとえば、データとして床版のひびわ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図-2 に示すように順次適用され、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。

本システムでは、鉄筋コンクリート床版の耐用性を詳細に評価できるように種々の点について工夫した。以下にそれを示す。

- ① ルールの数を格段に増やした。すなわち前システム⁵⁾の約60個から約900個にしている。その内容は、本論文で提案している損傷パターン、損傷進行パターン、損傷原因を推定するためのルールが大部分である。このようにルールを増加させることにより、損傷度評価が多面的に行えることになり、かな

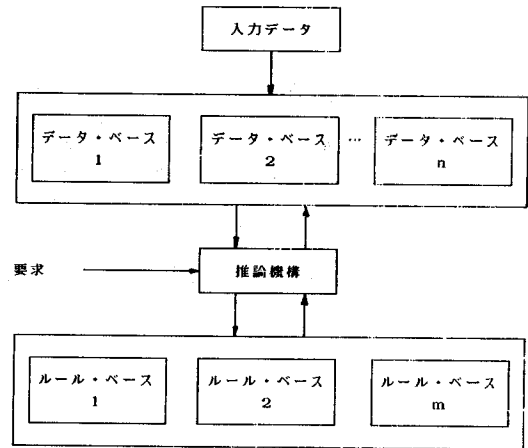


図-1 システムの概要

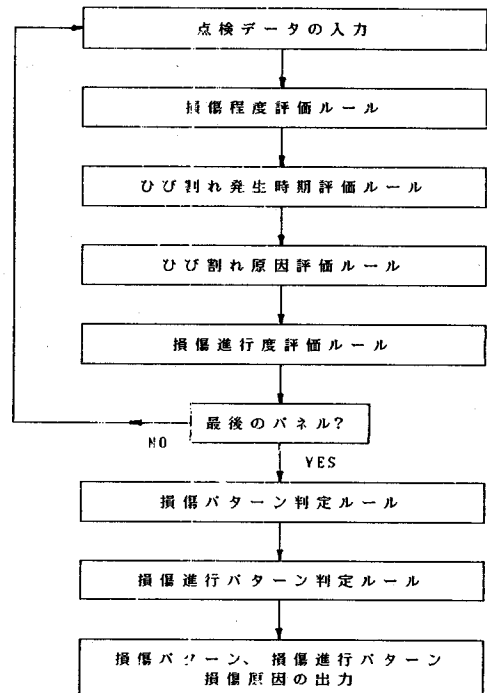


図-2 推論過程

り正確な推論結果が得られるようになった。

- ② 実行速度を速めるために、ルールベースを分割した。これは、①によって生じるマイナス面を補う意味で効果があると同時に、関連したルールを1か所に集め、ルールの照査および整理を容易にするためである。
- ③ 評価指標として、損傷パターン、損傷進行パターン、損傷原因の3つを考えた。ここで損傷(進行)パターンとは、床版各パネルの損傷(進行)程度の床版全体における分布状況を考慮したものである。

(2) 確信度係数

橋梁構造物の耐用性の問題を扱う際に得られるデータの多くは定性的なものであり、そのためそれらは不正確さやあいまいさを含んでいる。一方、人間のも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もとに、人間である専門家から取り出した知識を使っ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。本研究では、こうした必要性から不確実性を測る尺度として確信度係数(CF)を使用した。以下、プロダクションシステムにおけるCFの取り扱い方法を述べる。確信度係数CFを使用すると、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 $C_1^*, C_2^*, \dots, C_m^*$ は確信度係数を示している。

CFを含んだルールを用いて推論を実行するには、①条件部全体としてのCFをどのようにして求めるか、②結論に対するCFをどのようにして求めるか、③2つ以上のルールが同じ結論を与えるとき全体としてのCFをどのようにして求めるか、について考えなければならない。本プロダクションシステムでは、以下の演算方法を採用した⁶⁾。

- 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_n とするとき、条件部全体としてのCF(入力CF)は、

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

で与える。

- ② 条件全体としての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

$$C_{out,k} = C_{in} \times C_k^* \dots \dots \dots (2)$$

とする。

- ③ 同じ結論を導く 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

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

とする。

次に、確信度係数CFの計算例を具体的に示す。

ある橋梁の床版についての調査データが表-1のように与えられたとする。このデータにマッチするルールの例を図-3に示す。ただし、ルールのみやすいように漢字に直してある(以下も同じ)。ここで(*deposit X)は、データベースにXを追加するという動作を行う関数である。

まずルール<損傷程度-2-1>の条件部とのマッチングが成功し、このとき変数=CF1, =CF2, =CF3にそれぞれ0.9, 0.5, 0.7が与えられる。次に、結論部の実行では、まず式(1)に従い C_{in} を計算する。すなわち、(*min =CF1=CF2=CF3)^{注1)}で=CF1, =CF2, =CF3の最小値が計算され、 $C_{in}=0.7$ と求まる。次に、式(2)に従い C_{out} を計算する。 $C_k^*=1.0$ であるので、 $C_{out,k}=0.7 \times 1.0=0.7$ と求まる。したがって結論として、(損傷程度A 0.7)が得られる。同様にして、ルール<損傷程度-4-1>を適用した結果、結論として(損傷程度A 0.5)が得られる。このように同じ結論が得られた場合には、式(3)に従い、CFの大きい方をとるので、結局、全体としての結論は、(損傷程度A 0.7)となる。

(3) 評価法

次に、本耐用性評価システムにおける鉄筋コンクリー

表-1 床版の点検結果例

点検項目	点検結果	CF
ひび割れ方向	2方向	0.9
ひび割れ幅	中	0.5
ひび割れ間隔	小	0.7
はく離	穴	0.5

```
(損傷程度-2-1
IF
(ひび割れ方向 2方向 =CF1)
(ひび割れ幅 中 =CF2)
(ひび割れ間隔 小 =CF3)
THEN
(*deposit (損傷程度 A (*times 1.0 (*min =CF1=CF2=CF3))))
```

```
(損傷程度-4-1
IF
(剥離 大 =CF1)
THEN
(*deposit (損傷程度 A (*times 1.0 (*min =CF1))))
```

図-3 床版損傷程度ルール例

注1) (*min =CF1=CF2=CF3) は min (=CF1, =CF2, =CF3) を Lisp 形式に書き換えたもので、“*”は“min”がLisp関数であることを示す。

ト床版の評価法について詳しく述べる。従来の評価方法⁵⁾は、損傷度を主として外観調査から得られた損傷程度に関する情報のみを用いて評価しているため、その精度を上げることは損傷程度のランク分けを細かくすることになる。しかしながら、限られた情報をもとにしたあまりにも細かいランク分けは、各ランク間の相違を不明確にし、場合によっては評価の混乱を招くこともある。そこで本研究では、ランクの細分化ではなく、損傷パターン、損傷進行パターン、損傷原因という3つの独立な指標を用いて多面的に評価することで評価精度の向上を図る。図4にこの評価手順を示す。この図からわかるように、損傷パターンは点検により得られたデータから導かれる損傷度の分布状況があらかじ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。また、損傷進行パターンは、ひびわれの発生時期、損傷パターン、損傷原因などから各パネルごとの損傷進行度を求め、その分布状況があらかじめ設定しておいた基準損傷進行パターンのどれに属するかで決定される。損傷進行パターンと損傷パターンを組み合わせることにより、現時点だけでなく、将来までも含めた耐用性評価がある程度可能になるとと思われる。本システムでは、基準損傷（損傷進行）パターンとして次の6つのものを設定した。

- パターン1：損傷度（損傷進行度）が床版全体にわたって大きい。
- パターン2：損傷度（損傷進行度）の大きい箇所が床版の縁端部に集中している。
- パターン3：損傷度（損傷進行度）の大きい箇所が床版の両端部に集中している。
- パターン4：損傷度（損傷進行度）の大きい箇所が主桁からの張り出し部に集中している。
- パターン5：損傷度（損傷進行度）の大きい箇所が床版の中央部に集中している。
- パターン6：損傷度（損傷進行度）が床版全体として

それほど大きくない。

このように基準損傷（損傷進行）パターンを設定したのは、たとえ損傷（損傷進行）度が同程度であっても損傷を被っている箇所によって、その損傷が橋梁全体の機能性および安全性に及ぼす影響が異なると思われるからである。たとえば床版の周辺部と中央部とでは、損傷の原因や損傷の進行状況が異なっていると考えられ、評価の際にはこの点を考慮する必要がある。

さらに、損傷原因は、図4にみられるように、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る。損傷原因を求めることは、損傷の発生メカニズムを解明する意味において重要であり、また補修工法選択の段階でも意味をもつと思われる⁷⁾。ここでは損傷原因を床版の両端部、張り出し部、中央部について個別に求める。

上記の損傷パターン、損傷進行パターン、損傷原因を組み合わせることで鉄筋コンクリート床版の耐用性の評価を行う。損傷パターンと損傷進行パターンを組み合わせることで評価することにより、床版のどの部分に損傷が集中し、将来その損傷は、どのように進展していくかといったことを明らかにすることができる。また、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、さらに、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。

3. 適用例と考察

ここでは、本耐用性評価システムに実際にデータを入力し、その有用性について検討を加える。

- ルールは、(1) 損傷程度の評価（ルール数は92個）、(2) ひびわれの発生時期の評価（258個）、(3) ひびわれ原因の評価（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

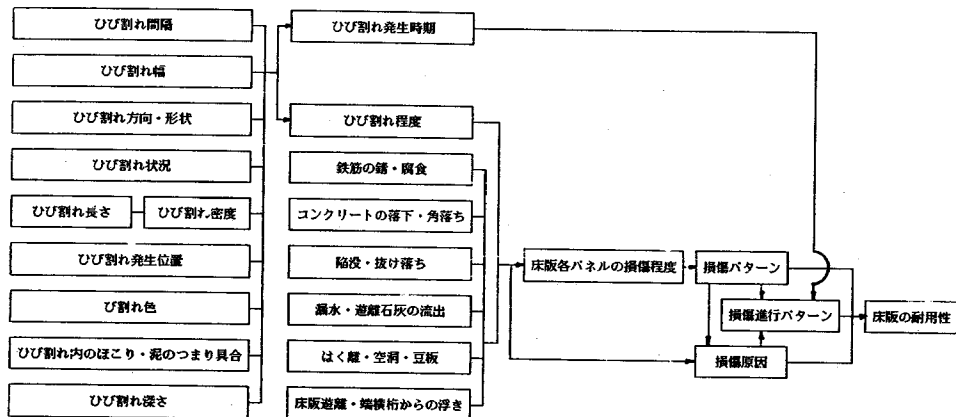


図4 鉄筋コンクリート床版耐用性評価システム評価手順

(30個), (7) 損傷進行パターンの判定 (29個) を行うものからできており, 12個のルールベースに分割され, 格納されている。(1)~(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)~(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, 文献8), 9) および専門家から得た知識をルール化したものである。

本システムに点検データを与えると床版各パネルについての損傷程度をA (大), B (中), C (小) の3段階で評価し, パネル位置に対応した形で画面上にその結果を表示する。損傷進行度についても同様の表示を行う。対象とする橋梁の構造は, 主桁本数4本, 一床版につき7本の対傾構をもつ桁橋である。主桁と対傾構で区切られた部分がパネルで, 実際の点検は1パネルごとに行われる。各パネルに番号をつけて示したものが図-5である。入力データをたとえばパネル1-1について示すと表-2のようなものである。ここで, たとえばひびわれ幅のように測定できるものに対してもCFを与えているのは, 正確にスケール等で測った場合ではなく, 目測で推定した場合も入力データとして取り込めるようにしているからである。これらに適合するルールが働き, 図-6に示される損傷程度の分布と図-7に示される損傷進行度の分布が表示される。ここで, かっこ内の数字は損傷程度に対するCFを表わし, 「?」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表わす。

ここでは, 特に損傷パターン評価を例にとって, その評価プロセスについて説明を加える。パネル1-1の損傷程度評価までに実行されたルールを図-8に示す。この結果, パネル1-1に関する損傷程度として以下の評価が得られる。すなわち, 左に示したルールから, 右の結論が得られる。

<損傷程度-2- 8> → 損傷程度: B 0.7

表-2 点検データ (パネル1-1)

点検項目	点検結果	CF
ひび割れ幅	0.1 mm	0.8
ひび割れ間隔	0.45 cm	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	0.24 m 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	0.4
鉄筋損傷程度	A	0.8
遊離石灰	多い	0.3

<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

ここで損傷程度: Bに対するCFは, 前述の式(3)により最大のCFを選択し0.7となる。また, 1つのパネルについて, 複数の損傷程度が求まる場合は, 最もランクの高いものを選択する。したがって, パネル1-1については, 「損傷程度: A 0.5」を損傷程度の評価結果とする。このようにして各パネルの損傷程度を求め, その分布状況を画面上に表示する。これを図示したものが図-6である。

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-9に示すような3つのゾーン(ゾーン1, 2, 3)に分割する。そして, 代表的な床版の損傷パターンとして, 先に示した基準損傷パターンに基づいて次のP1~P6の6つのものを考えた。

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

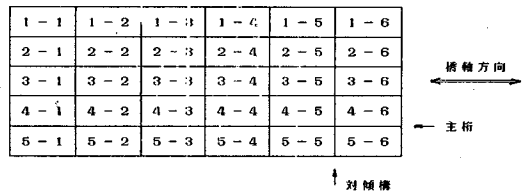


図-5 床版のパネル番号

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-6 損傷程度分布

B (0.08)	A (0.34)	A (0.12)	C (0.04)	A (0.10)	B (0.22)
A (0.36)	C (0.06)	A (0.22)	?	B (0.17)	A (0.36)
A (0.08)	?	A (0.16)	?	C (0.10)	B (0.02)
B (0.06)	A (0.26)	A (0.07)	B (0.06)	B (0.16)	B (0.23)
C (0.04)	A (0.10)	B (0.04)	B (0.06)	A (0.08)	A (0.13)

図-7 損傷進行度分布

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。

この基準に従って損傷パターンを求めると、「損傷パターン：P2 CF：0.9」と求まる。ここで損傷パターンに付加されるCFは、損傷程度に関するCFの中の最大値をとることにする。

ほぼ同様にして、損傷進行パターンも、「損傷進行パターン：P2 0.36」のように求まる。

さらに各ゾーンごとに最大のCFを有する損傷原因を選択し、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。主要な損傷原因として次のものが推論された。

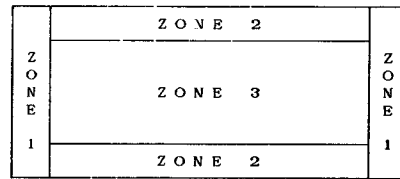


図-9 ゾーン分割

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

以上の結果を考察すると、次のことがいえる。損傷パターン、損傷進行パターンともに「P2」であることから、この床版は、周辺部の損傷が進んでおり、しかも損傷は現在も進行中であるため、再点検および補修が、特に周辺部で必要と思われる。さらに、周辺部（ゾーン1, 2）の主要な損傷原因として、打ち継ぎ部の不良およびセメントの不良が考えられるので、以後の補修にはこれらの点に注意を払う必要がある。ただここで問題となるのは、床版の損傷パターンのCFを各床版パネルの損傷程度に付随するCFの最大値をとって求めたため、この例では、CF=0.9と非常に大きな値となっている点である。損傷パターンのCFの求め方の検討が今後さらに必要であると思われる。

推論ステップは入力データに依存するもので、一概に何回ということはいえないが、ここで使った1パネルの例についていうならば、約30回ぐらいである。

4. 結論および今後の課題

本研究では、橋梁構造物の維持補修には、その耐用性を適切に評価することが重要であると考え、実用的な耐用性評価システムの開発を試みた。実際の維持補修業務上の種々の判断の多くが専門家とよばれる人々の手によってなされていることに注目し、専門家のもつ知識をコンピュータに移植し、その知識をもとに鉄筋コンクリート床版の耐用性を評価するシステム（エキスパートシステム¹⁰⁾）をプロダクションシステムの手法を用い、京都大学大型計算機センターのM-382上のUtilispで作成した。その結果、以下に挙げるような結論を得た。

(1) 実際に維持管理業務に従事している専門家から協力を得ることができ、耐用性評価のためのルールに専門家特有の知識をある程度盛り込むことができた。

(2) 確信度係数を導入することにより、あいまいなデータや、あいまいなルールからもある程度信頼のおける推論を行うことができるようになった。

(3) 評価指標として損傷パターン、損傷進行パターン、損傷原因を設定することにより、将来にわたっての耐用性の評価が可能となった。

```

(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-B
  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
    (増横桁からの浮き =CF1)
  THEN
    (#deposit (損傷程度 A (*times 1.0 (*min =CF1))))
    
```

図-8 床版損傷程度適用ルール

(4) 専門家特有の知識の導入や確信度係数の導入により、ルールの数を格段に増やすことができ、これにより推論の精度の向上が期待できるようになった。

次に、今後の課題を示す。

(1) 現在のシステムは、前向き推論のみで実現しているが、後向き推論が適当な部分もあり、前向きと後向き推論の併用が必要である¹¹⁾。

(2) データの入力方法については、入力方法に対話形式にする等の工夫が必要だと思われる。さらに説明機能などの充実も望まれる。

(3) データおよびルールに含まれるある種のあいまいさをCFで表現したが、CFの計算法については今後も検討を加える必要があると思われる。また、これらのあいまいさの多くが言葉による表現に起因していることを考えると、ファジイ理論¹²⁾の導入を考える必要がある。

最後に本研究の一部は文部省科学研究費〔試験(2)62850084〕の援助を得たことを付記し、感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 日本鋼構造協会：公共構造物における材料の使用環境、損傷に関する調査、「構造材料の信頼性評価技術に関するフーズピリティースタディー」調査報告，S 58. 3.
- 2) Davis, R., Buchanan, B. and Shortliffe, E. : Produc-

tion Rules as a Representation for a Knowledge Based Consultation Program, Artificial Intelligence, Vol. 8, 1977.

- 3) Shortliffe, E. H. : Computer-Based Medical Consultations ; MYCIN, American Elsevier, 1976.
- 4) 中西正和：Lisp 入門，近代科学社，1981.
- 5) Furuta, H., Shiraishi, N. and Yao, J. T. P. : An Expert System for Evaluation of Structural Durability, Proc. 5th OMAE Symposium, Tokyo, Vol. 1, pp. 11~15, 1986.
- 6) 馬野元秀：あいまいな知識の表現と利用，大阪大学大型計算機センターニュース，Vol. 15, No. 2, pp. 55~65, 1985.
- 7) 三上市蔵・江澤義典・森澤敬文・田中成典・朝倉隆文：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.
- 8) 高架構造研究会編：道路橋の点検補修，理工図書，1985.
- 9) 阪神高速道路公団：道路構造物の点検標準（土木構造物編），1985.
- 10) 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，pp. 28~33, 1985.
- 11) 中村秀治・松浦真一・寺野隆雄・篠原靖志：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.
- 12) 馬野元秀：ファジイ集合論と人工知能，第2回「ファジイシステムシンポジウム」講演論文集，pp. 74~81, 1986. (1986. 2. 9・受付)