

R C床版の耐用性評価のためのファジィ・ニューラル・エキスパートシステム

A FUZZY NEURAL EXPERT SYSTEM FOR DURABILITY EVALUATION OF RC BRIDGE DECK

渡邊 英一* 古田 均** 馬野 元秀*** 賀 建紅****

Eiichi WATANABE, Hitoshi FURUTA, Motohide UMANO and Jianhong HE

This paper aims to propose a method that helps maintenance engineers to evaluate the damage states of reinforced concrete bridge deck and to select its appropriate repairing methods by using a fuzzy neural expert system. The evaluation measures include damage cause, damage degree and damage propagation speed. One of important items in the maintenance program is that the repairing methods are automatically selected. Using a neural network as a subsystem, the present system can provide several appropriate repairing methods by taking account of the past experience through its learning ability. Since the system is built on a 32 bit engineering workstation and is written with *Common Lisp* and *C language*, anyone can use this system without difficulty.

Keywords: Damage, Expert System, Fuzzy Reasoning, Neural Network, RC Deck

1. まえがき

近年、土木工学分野においても、構造物を新しく建設するよりも、既存の構造物を維持・管理・補修することに重点が移りつつあり、構造物の維持管理業務の重要さが増してきている。橋梁構造物においては、とくに、昭和40年以前に建設された橋梁について、その経年による劣化、損傷がもたらす機能低下が問題となっている。また、その後、現在に至るまでの日本の社会環境の変化、自動車交通量の激増、車両の大型化建設当初は予想もしなかった苛酷な供用状況の影響などにより、橋梁の劣化、損傷がますます深刻な問題となってきた。したがって今日、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きた¹⁾。

このように、劣化、老朽化、環境条件の変化に伴って補修、補強のサイクル期に差しかかってきている多くの橋梁が存在するが²⁾、限られた予算の中で、損傷の進んだ橋梁をすべて架け替えることは、経済的に不可能である。このため、橋梁構造物の維持補修を適切に行うことが必要となり、そのためにはその耐用性評価が必要不可欠である。まず、橋梁の損傷状況を踏まえた上で、それが近い将来どのように進展していくかすなわち、橋梁の損傷原因、その損傷原因における損傷程度、損傷進行程度などを的確に予測し、さらに、橋梁構造物の構造的、経済性、社会的な影響(交通の遮断が可能かどうか、あるいは、近隣への影響など)などを合わせて考慮し、これらの推論結果に基づいて、どの橋梁を補修すべきか、そして、どのような工法で補修すべきか、またどの橋を架け替えるべきかという判断を的確に行うことが要求される³⁾。

* 工博 Ph.D	京都大学教授	工学部土木工学科	(〒606-1 京都市左京区吉田本町)
** 工博	京都大学助教授	工学部土木工学科	(〒606-1 京都市左京区吉田本町)
*** 工博	大阪大学助教授	工学部精密工学科	(〒565 吹田市山田丘2-1)
**** 工修	京都大学大学院	土木工学専攻	(〒606-1 京都市左京区吉田本町)

ところが、橋梁の維持補修の必要性がますます高まっているにもかかわらず、維持補修に従事する専門家の数はその需要に比べて不足する一方で、維持補修上の判断を必要とする橋梁すべてに対して、十分に対処することは困難である。したがって、橋梁に関する基本的な工学知識を有する一般の土木技術者が、維持補修に関する種々の判断を、専門家と同程度にできる手法について検討することは、非常に意義あることと思われる⁴⁾。

こうした背景を踏まえた上で、本研究では、汎用性の高い、誰にでも利用できる鉄筋コンクリート（ＲＣ）床版の耐用性評価のためのエキスパートシステムの構築を試みる。本システムは２つの部分システムからなる。１つはファジィプロダクションシステムによる推論を行うサブシステムであり、もう１つはニューラルネットワークにより必要な解を得るサブシステムである。ファジィプロダクションシステムは比較的知識が明確な損傷原因の推定、損傷程度あるいは損傷進行度の評価に用い、ニューラルネットワークは多くの要因を総合的に判断する必要がある補修工法の選定に用いる。このように特徴の異なる２つの方法を用いることにより、より実用的なシステムの構築が可能になると思われる。

２．エキスパートシステム構築の基本的考え方

2.1 利用環境について

本システムでは、データの入力方法の簡便化、知識の追加・変更に対する柔軟性、システムの移植性・拡張性などを整え、誰でも、またどこでも利用できるようなシステムを構築するために、従来のＲＣ床版の耐用性評価システム⁴⁾に対して、以下に示すいくつかの改良を行っている。

- ①従来の耐用性システムは、ワークステーション NEWS（SONY 社製）の Franz Lisp 上で作成していた。これに対し、本システムでは、Common Lisp 上に構築することにより、システムの移植性・拡張性を高め、どこでも利用できるシステムとしている。
- ②従来のシステムでは、システム内部のルールの内容がローマ字により記述されていた。これに対し、本システムでは、ルールの拡張・更新・管理などを容易にするために、かな・漢字によりルールが記述されている。
- ③データ入力を対話形式としている。

2.2 システムの推論機構について

従来のＲＣ床版の耐用性評価システムは、ファジィプロダクションシステムにおける前向き推論のみを用いている。これに対して本システムでは、ファジィプロダクションシステムにおいて、前向き推論、後向き推論、および両推論を統合したものを用いている。後向き推論の導入、ルールの構造化によって、推論時間を短くしている。従来のシステムでは、推論を始めてから結果を出力するまで、１５～２０分程度かかるが、本システムでは、推論時間を１／４以下におさめている。

2.3 評価法について

維持管理上の判断を効果的に支援するためには、評価目標として何をとりのが適当かを明確にした上で、そのための評価指標、評価手順を適切に設定することが必要である。そこで、本システムでは、ＲＣ床版の耐用性を評価するために、補修工法の選定が重要であると考えて、ファジィプロダクションシステムにより、損傷原因、損傷度、損傷進行度を推定し、補修の要否を決定する^{3), 4)}。さらに、ニューラルネットワークの学習能力を用いて、

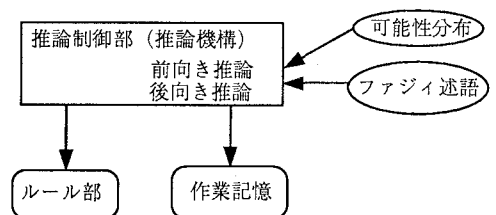


図-1 ファジィプロダクションシステムの構造

補修工法を自動的に選定することを考えている。

3. R C床版の耐用性評価のためのエキスパートシステム

3.1 概要

3.1.1 ファジィプロダクションシステム^{5)・6)}

ファジィプロダクションシステムとは、ファジィ集合を導入して、あいまいな概念や知識を取り扱えるように通常のプロダクションシステム拡張したシステムである。ファジィプロダクションシステムの構造は図-1に示すようにファジィ・ルールを含むルール部、ファジィ・データを含む作業記憶、それらを用いてファジィ推論を行う推論制御部からなる。

本システムでは、後向き推論を導入することにより、ファジィプロダクションシステムにおいて前向き推論と後向き推論の両方を使用することができる。実際のエキスパートシステムを構築する場合には、対象となる知識に応じて、前向き推論と後向き推論の役割分担を決めて、両者を統合的に用いることが望まれる。本システムでは、特にR C床版の損傷原因を判定する段階において、前向き推論と後向き推論を組み合わせた推論を使用している。具体的には、後向き推論のルールの条件部で前向き推論を実行する推論を使っている。本システム内のR C床版の損傷原因を判定するためのサブシステムのごく一部のルールを図-2に示す。以下、図-2について説明する。

例えば、(?- (" 損傷原因" g-1))という問い合わせ、すなわちR C床版における損傷原因は「g-1: 過大な輪荷重であるか」という問い合わせを行った場合、まず、後向き推論用ルール(backward-rules)のr1の結論部 (" 損傷原因" g-1)とマッチする。そして、その条件部(*fc " 損傷-原因-1")でシステム関数*fcを使用して、前向き推論用ルールに移し、(rules 損傷-原因-1 . . .)を実行させる。すなわち、前向き推論用ルールで、損傷原因は「g-1: 過大な輪荷重であるか」について調べる。このとき、前向き推論用ルールは、モジュール(各損傷原因、表-1に示す17個に分ける)に分けて記述している。ルールの構造化は、R C床版の損傷原因推定用ルールのように、大規模な知識ベースを構築する場合には有効な方法となる。ある結論のみが導かれるかどうかを知りたいときには、前向き推論と後向き推論の統合推論を用いることにより、システム全体のルールを調べなくても、ある損傷原因に関するルールのみについて調べればよい。問い合わせが成功すれば、例えば、以下のような推論結果が出力される。

g-1: 過大な輪荷重 (確信度: やや大きい)

問い合わせが失敗すると、推論結果は、「なし」と出力される。

例えば、橋梁構造物の維持管理に関する知識を持つ技術者が、予備調査・点検などに基づく自分の主観的な判断(ある損傷原因)の正否について調べたい場合、前向き推論と後向き推論の統合推論(ここでは、後向き推論のルールの条件部で前向き推論を実行する

損傷原因に関する後向き推論用ルール:

```
(backward-rules
(r1 ("損傷原因" g-1) :- (*fc "損傷-原因-1"))
(r2 ("損傷原因" g-2) :- (*fc "損傷-原因-2-1"))
.....
(r16 ("損傷原因" g-16) :- (*fc "損傷-原因-16-1-1"))
)
```

損傷原因に関する前向き推論ルール:

```
(rules 損傷-原因-1
(rule-1
if (ひび割れ 形状 幅員(主筋)方向)
then (change-rb 損傷-原因-1-1))
.....
(rule-dummy
if (*dummy)
then (change-rb result-0-1))
)
```

ここで、関数*fcを使用して、前向き推論を実行する

図-2 前向き推論と後向き推論の統合用ルール例

表-1 損傷原因

荷重	[g-1]: 過大な輪荷重の作用
	[g-2]: 衝撃作用
	[g-3]: 支持桁配置の不適切
設計・構造上	[g-4]: 床版厚不足による剛性不足
	[g-5]: 主鉄筋量不足
	[g-6]: 配力鉄筋量の不足
	[g-7]: 荷重分配横桁の不備
	[g-8]: 主桁の不等沈下による付加曲げモーメント
施工上	[g-9]: コンクリートの低品質
	[g-10]: 締め固め不足
	[g-11]: 養生の施工不良
	[g-12]: 施工打継目の処理不十分
	[g-13]: かぶり不足
その他	[g-14]: 塩分
	[g-15]: 表面排水の不良
	[g-16]: 下部工の移動
	[g-17]: アルカリ骨材の反応

推論)を採用することができる。

後向き推論のルール条件部で前向き推論を実行する利点は以下のとおりである。

- ①後向き推論のルール条件部で前向き推論を実行することができるため、ルールをモジュールに分けて記述することができる。
- ②ルールをモジュールに分けて記述することで、知識の追加・整理を比較的簡単に行うことができる。
- ③ある結論のみが導かれるかどうかを知りたいときには、システム全体のルールを調べなくても、ある結論に関するルールのみについて調べればよい。すなわち、むだな探索を防ぐことができ、効率的なシステムになる。

3.1.2 ニューラルネットワーク⁷⁾

本システムでは、ニューラルネットワークの学習機能とパターン認識の能力を用いて、補修工法を選定するサブシステムを構築する。ニューラルネットワークの概要を以下と図-3に示す。

学習方法：誤差逆伝播法(Back-propagation)

結合方法：多層型ニューラルネットワーク(4層)

入出力方法：事象

学習対象パラメータ：シナプス荷重、しきい値

細胞の入出力関数：シグモイド関数

$$f(x) = 1 / (1 + \exp(-x))$$

ニューラルネットワークをエキスパートシステムに導入することにより、補修工法を自動的に選定する段階において、RC床版の構造的な要因のみではなく、橋梁下部工などに関する要因、橋梁の重要度、経済性、施工性などを合わせて考慮することができる。ただし、実際にニューラルネットワークによる推定結果を利用するには、何らかの保証が必要である。そのために、別途補修工法選定のためのプロダクションシステムも構築している⁸⁾。しかしながら、前述したように、ニューラルネットワークの方が多くの要因を考慮しているため、推定結果はより信頼がおけると考えられる。

3.2 RC床版の耐用性評価のエキスパートシステムの構築

3.2.1 ファジィプロダクションシステムによる損傷原因、損傷程度、損傷進行度の推定^{6), 9)}

本システムでは、損傷の原因を橋梁の設計諸元、環境条件および点検データから推定し、各原因の損傷度

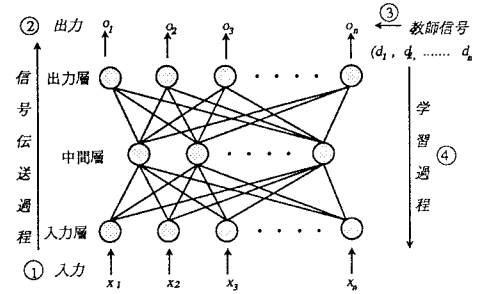


図-3 多層型ニューラルネットワークと誤差逆伝播法

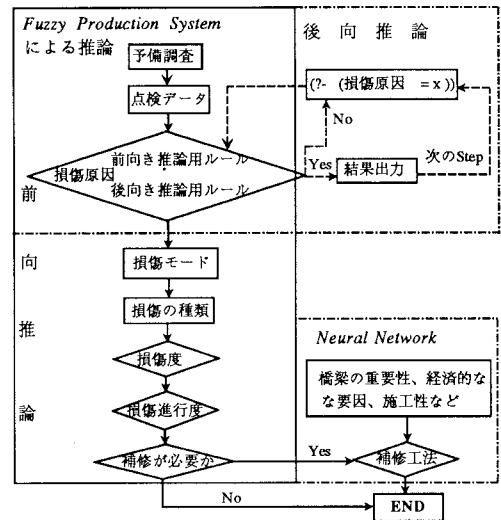


図-4 本システムの推論手順

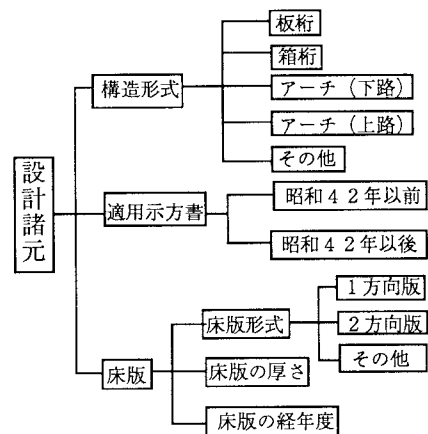


図-5 RC床版の設計諸元

と損傷進行度を評価する。ファジィプロダクションシステムによる推論手順を図-4に示す。

まず、橋梁の設計諸元と環境条件についてそれぞれ図-5と図-6に示すような項目を調査する。つぎに、現場で点検を行う。点検項目はひび割れ、はくり、路面舗装、コンクリート、鉄筋など、すなわち、図-7に示すような点検項目である。上述の調査・点検結果に基づいて、表-1に示すような損傷をもたらす原因を推定する。例えば、つぎのようなルールが用いられる。

```
(rules 損傷原因-1-2-2
very true
if (構造形式 桁-plate)
(ひび割れ 形状 幅員(主筋) 方向)
(ひび割れ 位置 片持部 真上)
(輪荷重 位置 片持部 真上)
then (deposit (損傷原因 過大な輪荷重))
(change-rb 損傷原因-1-3))
```

この損傷原因-1-2-2ルールの意味は、「もし構造形式がプレートガーダーで、ひび割れ形状が幅員方向で、ひび割れ位置は片持部真上で、輪荷重位置は片持部真上であれば、損傷原因は過大な輪荷重である」ということが、確信度「非常に大 (very true)」で言えることを表している。最後のchange-rbは、ルールベースを損傷原因-1-3に変更することを表している。ここで、depositはカレント（現在使っている）の作業記憶に要素を追加することを指示する。

従来のRC床版耐用性評価システム⁴⁾では、損傷原因を判定する際に前向き推論による推論を行ってきた。本システムでは後向き推論を追加することにより、前向き推論と後向き推論の統合推論を用いることができる。本システムにおける前向き推論用のルールの一部を図-8に、前向き推論と後向き推論の統合用のルールの一部を図-2に示す。また、本システムで用いられたメンバーシップ関数の一部を、図-9に示す。つぎに、同一の損傷原因に起因する損傷種類だけから構成される損傷モードを設定する。例えば、点検結果から床版の損傷原因として「過大な輪荷重」が推定されるとすると、「過大な輪荷重」という原因に対する損傷モ

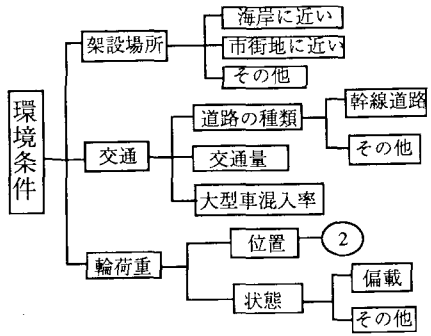


図-6 RC床版の環境条件

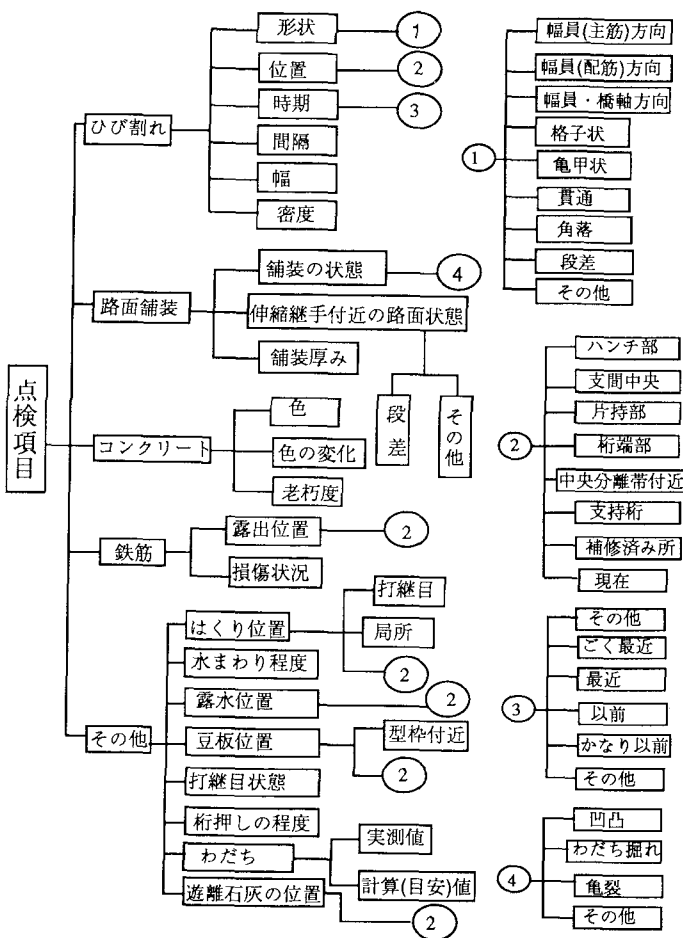


図-7 RC床版の点検項目

ードは、「ひび割れ」という損傷種類から構成される。例えば、

```
(rules add-mode-1
  (rule-1
    if (損傷原因 過大な輪荷重)
    then (add (mode ひび割れ) 1.0)
          (change-rb add-mode-2) )
  (rule mode-1
    (rule-1-1
      if (mode ひび割れ)
      then (change-rb ひび割れ-損傷度-1) )
```

ここで、addはカレントの作業記憶に要素を追加することを指示する。

そして、損傷の種類であるひび割れ損傷度、鉄筋損傷度、路面損傷度、コンクリート損傷度、構造上の損傷度などが規定される。例えば、ひび割れ損傷度を決定するルールとして、以下のものが考えられる。

```
(rules ひび割れ-損傷度-1-1
  (rule-1-1
    true
    if (ひび割れ 形状 幅員(主筋)方向)
        (ひび割れ 幅 大きい)
        (ひび割れ 間隔 小さい)
    then (deposit (ひび割れ-損傷度 やや大きい) ) )
```

さらに、損傷モードを構成する損傷の程度と損傷原因、環境条件、橋梁の経年などから損傷の進み具合(損傷進行度)を以下のように設定する。

損傷度の判定基準:

- (1): 損傷が床版全体に及んでいる
- (2): 損傷が床版の縁端部に集中している
- (3): 損傷が床版の両端部に集中している
- (4): 損傷が床版の張り出し部に集中している
- (5): 損傷が床版の中央部に集中している
- (6): 損傷がそれほど大きくない

損傷進行度の判定基準:

- (1): 損傷の進行度が床版全体にわたって大きい
- (2): 損傷の進行度の大きい個所が縁端部に集中している
- (3): 損傷の進行度の大きい個所が床版の両端部に集中している
- (4): 損傷の進行度の大きい個所が主桁からの張り出し部に集中している
- (5): 損傷の進行度の大きい個所が床版の中央部に集中している
- (6): 損傷の進行度が床版全体としてそれほど大きくない

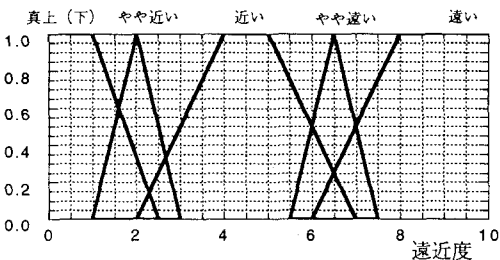


図-9 遠近をあらわすメンバーシップ関数の例

```
(rules 損傷-原因-1-1-1
  (rule-1-1-1
    absolute-true
    if
      (構造形式 桁-plate)
      (示方書 =x) (*/<= x 7)
      (ひび割れ 形状 幅員(主筋)方向)
      (ひび割れ 位置 支間中央 真上)
      (輪荷重 位置 支間中央 真上)
    then
      (deposit (損傷-原因 g-1))
      (change-rb 損傷-原因-1-2)
  )
  (rule-dummy
    if (*dummy)
    then (change-rb 損傷-原因-1-1-2)
  )
)

(rules 損傷-原因-1-1-2
  (rule-1-1-2-1
    very-true
    if
      (構造形式 桁-plate)
      (示方書 =x) (*/<= x 7)
      (ひび割れ 形状 幅員(主筋)方向)
      (ひび割れ 位置 支間中央 真上)
    then
      (deposit (損傷-原因 g-1))
      (change-rb 損傷-原因-1-2)
    )
  )
  .....
  )
  .....
  )
  ここで、g-1: 過大な輪荷重
```

図-8 前向き推論のためのルールの例

3.2.2 ニューラルネットワークによる補修工法の自動選定¹⁰⁾

本システムでは、図-4に示すように、まず、ファジィプロダクションシステムにより、RC床版の損傷原因、損傷度、損傷進行度を評価する。つぎに、RC床版の構造要因、橋梁の下部工などの影響、橋梁の重要度、経済性、施工性などの影響を考慮し、ニューラルネットワークの学習能力を用いて、最適な補修工法を選定する。以下に、ニューラルネットワークによる補修工法自動選定システムの構築手順について説明する。

①3.2.1 に述べたように、まず、ファジィプロダクションシステムにより得られた推論結果、即ち、RC床版の損傷原因と損傷度、損傷進行度を入力データとする。これに、構造的、経済性、施工性、社会的影響などを合わせて考慮する。ただし、ファジィプロダクションシステムで得られた結果はファジィ集合で表されている。

②ニューラルネットワークの層数として

4層を用いる（図-3を参照）。

・第1層（入力層）：

入力層では、ファジィ集合のメンバーシップ関数（図-9を参照）を用いることによって、あいまいさを含むデータをファジィ・ユニット・グループとして、あいまいさを含まないデータをクリस्प・ユニット・グループとして表現する。

・第2層：20ユニット¹¹⁾

・第3層：20ユニット

・第4層（出力層）：

補修工法の代表的なものとしては、増桁工法、鋼板接着工法、打換工法を考え、それぞれをA、B、Cで表す。出力がBであることを

(A, B, C) = (0, 1, 0)

で表現する。

③入力データを学習させる。

④学習が終了したニューラルネットワーク

の性能評価には、正しく識別されたかを決定する判定基準が必要とされる。本研究では、事例とニューラルネットワークによって得られた結果がほぼ合致している場合、“高い精度で診断された”とする。

3.3 実行例

R C床版の耐用性評価システムに実際にデータを入力し、本システムの有用性について検討する。実際に大阪市が過去に実施した13橋梁の補修工法選定例（表-2）を対象として、本ファジィプロダクションシステムとニューラルネットワークにより、補修工法選定に関する数値実験を行う。

3.3.1 ファジィプロダクションシステムによる推論

構造形式などの入力は、対話形式で、図-10に示すような形で行われる。ここで、耐用性評価を行うために、次のようなルールを用いる。

- ①損傷推定ルール (31個)
- ②損傷原因推定ルール： (223個)
 - 前向き推論による推定用ルール
 - 後向き推論による推定用ルール
- ③損傷モード用ルール (5個)
- ④ひび割れ損傷程度評価ルール (55個)

表-2 実際の橋梁の補修工法選定例

橋梁番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
橋梁	床版	ひび割れ損傷度	a	b		a	b	b		b	b	c	c	b
	版	剥離												
		鉄筋露出												
		コンクリートの劣化												
	舗装	ひび割れ損傷度				a	b	c					b	
	装	段差												
		その他												
	高欄・地覆	破損							b					
		変形												
		その他												
	伸縮継手	破損												
		変形												
		その他												
造	排水設備	腐食												
		びみ												
		の堆積												
		その他												
性	支	腐食												
	承	支												
		座												
		モルタル破損												
主	桁	塗装												
		腐食												
		変形												
		ボルトの緩み・抜落												
下	部	欠損												
	工	その他												
	その他	コンクリートの劣化												
		剥離												
経済性		基礎部の洗掘												
		その他												
		橋の振動												
		高橋防止構造												
施工性		データがない												
		重視する												
		それほど重視しない												
		データがない												
補修工法		A	A	C	A	A	B	C	C	A	C	C	B	A

a：損傷が小さい
A：増桁工法

b：損傷が中くらい
B：鋼板接着工法

c：損傷が大きい
C：打換工法

><データのインプット>

1. データファイル作成
2. 既存のデータファイルのロード
=>1

曲線橋か？

y: はい
n: いいえ
=>y

どの程度確信しているか？

1. 動かしようもない事実である
2. 絶対的に確信する
3. 非常に確信する
4. 確信する
5. 少し確信する
6. あまり確信していない
- x. その他
=>1

橋梁の構造形式は？

1. 板桁
2. 箱桁
3. アーチ(下路)
4. アーチ(上路)
5. その他
=>1

.....

以上のデータをファイルに書き込みますか？

y: はい
n: いいえ
=>y

ファイル名入力=>file.1

別のデータファイルを作成しますか？

1. 別のデータファイルの作成, 又は実行
2. 推論実行
=>2

推論結果:

.....

図-10 対話型入力

- ⑤路面損傷程度評価ルール (37個)
- ⑥鉄筋損傷程度評価ルール (4個)
- ⑦コンクリート損傷程度評価ルール (20個)
- ⑧構造損傷程度評価ルール (20個)
- ⑨総合損傷度判定ルール (187個)
- ⑩損傷進行度判定ルール (28個)
- ⑪補修工法選定ルール (31個)
- ⑫結果を出力するルール (51個)

まず、予備調査と点検により得られたデータ、例えば表-3と表-4に示した一つの橋梁の設計諸元、環境条件、損傷状況点検データを入力し、作業記憶を図-11のように書き直す。

表-3の設計諸元である床版の経年度は普通、確信度はやや大きいであることは次のように書き直される。

very-true/(床版 新旧 s-medium)

つぎに、この書き直した作業記憶と推論に関するルールを用いて、前向き推論を開始する。この推論時間は2分程度でつぎのような結果が出力される。ただし、確信度は言語で近似した形で記す。

推論結果：

1. 損傷原因：
 - g-1：過大な輪荷重 (確信度：やや大)
 - g-6：配力鉄筋量不足 (確信度：小)
 - g-15：排水不良 (確信度：大)
2. 損傷度：
 - g-1：損傷度：やや大 (確信度：小)
 - g-6：損傷度：やや大 (確信度：小)
 - g-15：損傷度：大 (確信度：やや大)
3. 損傷進行度：
 - g-1：損傷進行度：やや大 (確信度：やや大)
 - g-6：損傷進行度：普通 (確信度：小)
 - g-15：損傷進行度：やや大 (確信度：大)

上述の推論結果「g-15：排水不良(確信度：大)、損傷度：大(確信度：やや大)、損傷進行度：やや大(確信度：大)」により、補修することが必要であることがわかる。

ある損傷原因が存在したかどうかを知りたいとき、本システムでは、RC床版の損傷原因を判定する段階において、後向き推論のルールの条件部で前向き推論を実行する推論を用いることができる。この場合、問い合わせ内容と後向き推論のルールの結論部とのマッチングを行い、ルールの条件部が成立するかどうかを調べることになる。損傷原因が「g-1：過大な輪荷重」であるかという問い合わせに対して、以下の推論結果が得られる。

> (?- (損傷原因 g-1))

[推論結果]

g-1：過大な輪荷重 (確信度：やや大)

表-3 RC床版の設計諸元及び環境条件

種類	項目	データ	確信度
設計諸元	構造形式	板桁	1
	適用示方書	昭和39年6月	1
	床版の床版厚	普通	やや大
	床版厚	小さい	1
環境条件	架設場所	市街地に非常に近い	1
	交通	道路の種類	幹線道路
		交通量	多い
		大型車混入率	大きい
	輪荷重位置	ハンチ部に非常に近い	大
		支持桁の真上	やや大

表-4 損傷状況点検データ

損傷種類	損傷項目	損傷状況	確信度
ひび割れ	形状	幅員(主筋)方向	大
	位置	支間中央の真上	やや大
	密度	6.63	1
	間隔	大きい	やや大
路面	幅	大きい	普通
	舗装	大きい凹凸	やや大
コンクリート	舗装	小さい亀裂	普通
	色の変化	かなりある	1
	老朽度	多少老朽している	1
鉄筋	遊離石灰	位置は支間中央	大
	損傷状況	錆びている	大
その他	水まわり	多少まわてきてい	普通
	漏水	位置は支間中央で	やや大

(wm

```

      ((構造形式 桁-plate),
       (示方書 6),
       very-true/(床版 新旧 s-new),
       (床版 厚み sa-small),

       (場所 市街地 very-near),
       (幹線道路),
       absolute-true/(交通量 many),
       absolute-true/(t-混入率 tk-large),
       absolute-true/(輪荷重 位置 p-1 very-near),
       very-true/(輪荷重 位置 p-6 on),

       absolute-true/(ひび割れ 形状 h-1),
       very-true/(ひび割れ 位置 p-2 on),
       (ひび割れ 密度 6.63),
       very-true/(ひび割れ間隔 i-large),
       true/(ひび割れ 幅 w-large),

       very-true/(路面 舗装 凹凸 large),
       true/(路面 舗装 亀裂 small),

       (concrete 色-変化 large),
       (concreteの老朽 medium),
       absolute-true/(遊離石灰 流出 p-2 small),

       absolute-true/(鉄筋 錆び),

       true/(水まわり more-or-less-large),
       very-true/(漏水 p-2 small))
  )

```

図-11 作業記憶の内容の例

3.3.2 ニューラルネットワークによる補修工法の選択

ファジィプロダクションシステムにより補修の必要があると判定されれば、ニューラルネットワークを用いて補修工法の選定を行う。設計、環境条件および点検データの一部と表-2に示すデータの一部はファジィ集合で表されており、あいまいさを含んでいる。そこで、あいまいさを含むデータ (a, b, c) をファジィ・ユニット・グループとして、あいまいさを含まないデータ (○と空白) をクリस्प・ユニット・グループとして表現する。例えば、あいまいさを含むデータである「ひび割れ損傷が小さい」が{1/0, 0.66/1, 0.33/2, 0/3, 0/4, 0/5, 0/6, 0/7, 0/8, 0/9, 0/10}のように定義されているとする。このとき、ニューラルネットワークの入力層には、ファジィ・ユニット・グループとして、「ひび割れ損傷度が小さい」={1, 0.66, 0.33, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}の11ユニットが与えられる。表-2のひび割れ損傷度のa、b、cは「損傷が小さい」、「損傷が中くらい」、「損傷が大きい」を表し、点検データより得られる。あいまいさを含んでいないデータの場合、クリस्प・ユニット・グループとして2値で表される。例えば、「鉄筋露出がある場合」を1、「鉄筋露出がない場合」を0とする。出力値はA, B, Cの3つである。例えば、出力がBであることを(A, B, C) = (0, 1, 0)で表現する。次に、入力データを学習させる。学習が終了したニューラルネットワークの性能評価には、例えば橋梁番号1の出力値は、A(増桁工法)が0.94、B(鋼板接着工法)が0.05、C(打換工法)が0.05であり、A(増桁工法)が補修工法として選択されたことがわかる。表-5に示すように、実際の学習データと比較すると、学習データでの補修工法と全く一致しており、学習が高い精度で行われたことが分かる。

表-5 ニューラルネットワークを用いたRC床版の耐用性評価の認識結果

橋梁番号 補修方法	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A:増桁工法	0.94	0.92	0.04	0.95	0.92	0.06	0.05	0.08	0.95	0.07	0.05	0.08	0.93
B:鋼板接着工法	0.05	0.04	0.01	0.03	0.06	0.92	0.01	0.01	0.08	0.01	0.01	0.95	0.03
C:打換工法	0.05	0.06	0.97	0.07	0.05	0.05	0.94	0.92	0.02	0.93	0.96	0.02	0.08

4. 結論およびおとがき

橋梁構造物の維持管理には、その耐用性を適切に評価することが重要である。本研究では、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によってなされていることに注目し、専門家の持つ知識をコンピュータに移植し、その情報をもとに橋梁構造物の耐用性を評価するエキスパートシステムの開発を行った。このシステムでは、評価対象をRC床版の耐用性評価に絞り、損傷原因、損傷度、損傷進行度に注目することにより、補修工法を自動的に選定できる。このシステムでは、ファジィ理論を導入することで、技術者の主観性に基づくあいまいさの処理が可能となり、不完全なデータからでも、実用的な解を得ることが可能であり、ニューラルネットワークをエキスパートシステムに導入することにより、様々な要因を考慮することができ、補修工法の自動選定ができる。

本RC床版耐用性評価エキスパートシステムの特徴として、以下のものが挙げられる。

- ①本システムでは、ワークステーション NEWS (SONY 社製)の Common Lisp 上に作成されており、システムの移植性・拡張性が高くなり、どこでも利用できる。
- ②多くの橋梁を比較的短期間で評価できる。
- ③ルールを構造化することによって、推論時間を短くすることができる。従来のシステム⁴⁾では、推論を始めてから結果を出力するまで、15～20分程度かかったが、本システムでは、1/4以下になっている。
- ④データの入力方法が対話形式を採用しているため、誰でも簡単に利用できる。
- ⑤本システムでは、後向き推論が可能になったことより、ファジィプロダクションシステムにおいて前向き

推論と後向き推論の両方を使用できる。また、後向き推論ルールの条件部で前向き推論を実行することで、ルールをモジュール化できるので、推論時間を短くすることができる。

- ⑥本研究で明らかになったように、具体的な問題を効率的に解決するためには、知識獲得が容易な部分、すなわち、知識の事象間の相関関係が明確な場合には、ファジィプロダクションシステムを用いて適切な推論結果が得られる。また、ルールの作成が困難な部分については、ニューラルネットワークの学習能力を用いれば、少ない事例を用いることにより、何らかの意義ある解を得ることができる¹²⁾⁻¹⁴⁾。

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，「構造材材料の信頼性評価技術に関するフィジビリティスタディー」調査報告，(1983)。
- 2) 小間井孝吉・木俣昇・小堀為雄：維持・管理計画のための橋梁評価システムに関する基礎的研究，土木学会論文集，第428号／I-15，pp.137-146，(1991)。
- 3) 白石成人・古田均・馬野元秀・川上宏一郎：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，第386号／I-8，pp.285-291，(1987)。
- 4) 古田均：橋梁の鉄筋コンクリート床版の耐用性評価システム，寺野寿郎・浅居喜代治・菅野道夫：「応用ファジィシステム入門」，pp.175-180，オーム社，(1987)。
- 5) 馬野元秀：Lispによるファジィ集合システム，第3回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.167-172，(1987)。
- 6) 中嶋直紀：ファジィ・プロダクション・システムにおける後向き推論の実現とファジィ・データベースとの結合，関西大学修士論文，(1991)。
- 7) 林陽一・井村敦：あいまいな教師信号を用いるニューラルエキスパートシステム，第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.49-55，(1990)。
- 8) 古田均・渡邊英一・馬野元秀・賀建紅：鉄筋コンクリート床版の健全性評価ファジィエキスパートシステムの改良，第11回材料・構造信頼性シンポジウム，pp.122-127，(1992)。
- 9) 古田均：ファジィ・エキスパート・システム，システム／制御／情報，Vol.34，pp.288-294，(1990)。
- 10) 古田均・大谷裕生・白石成人：ニューラルネットワークを用いたRC床版の健全性評価システムのための知識獲得法，第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.377-380，(1990)。
- 11) 古田均・大谷裕生・白石成人：ニューラルネットワークの補修工法選定への応用，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，第14巻，pp.339-344，(1990)。
- 12) 宮本文穂・森川英典・古川正典：知識更新機能を有するコンクリート橋診断エキスパートシステムの開発，構造工学論文集，Vol.38A，pp.543-556，(1992)。
- 13) 三上市蔵・田中成典・倉地晶・米田慎二：鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムにおける類推推論と負の学習，構造工学論文集，Vol.38A，pp.557-570，(1992)。
- 14) 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)。

(1993年1月16日受付)