

コンクリート橋診断エキスパートシステムの 推論機構の再構築と既存橋梁への適用

KNOWLEDGE IMPROVEMENT AND PRACTICAL APPLICATION OF NEURO-FUZZY EXPERT SYSTEM FOR SERVICEABILITY ASSESSMENT OF CONCRETE BRIDGES

三宅秀明* 宮本文穂** 中村秀明*** 山本秀夫****

Hideaki MIYAKE, Ayaho MIYAMOTO, Hideaki NAKAMURA and Hideo YAMAMOTO

*工学士 山口大学大学院 理工学研究科知能情報システム工学専攻 (〒755 宇部市常盤台 2557)

**工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

***博士(工学) 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

****修士(工学) 山口県土木建築部 (〒753 山口市滝町 1-1)

The aim of this study is to discuss knowledge improvement in a Concrete Bridge Rating Expert System with machine learning employing the combination of the neural networks and bidirectional associative memories, with an emphasis on engineering applications. The reasoning mechanism which includes with knowledge base in the improved Expert System was reconstructed based on the questionnaire survey to domain experts with the extracted *if-then* rules that have complete correspondence relation. By applying the system to actual in-service bridges, it has been verified that employed machine learning method using results of questionnaire surveys to bridge experts is effective for the system.

Key Words: concrete bridge, serviceability assessment, knowledge-based expert system
fuzzy set theory, neural network

1. はじめに

従来よりメンテナンスフリーであると考えられてきたわが国のコンクリート橋であるが、近年では塩害、中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学的コンクリート腐食などの問題を抱えるとともに、交通量の増加、車両の大型化などにより非常に過酷な条件の下で供用されているものも少なくない。また 2010 年には橋齢 50 年以上の老朽橋が約 35 % に達するといわれ、既存橋梁を維持管理していくことが新設橋梁の架設以上に重要視されるようになってきている。一般に、橋梁の維持管理の基本的なフローは「点検」→「診断」→「補修・補強」である。このうち特に「診断」は経験豊富な専門技術者の知識あるいは直感にゆだねられる部分が多いが、実際に各種点検結果に基づいて橋梁診断を正確に行える専門技術者の数は非常に少ないのが現状である。

そこで著者らは、今後予測される橋梁診断の重要性をふまえるとともに、これに携わる専門技術者不足にそなえて、各種点検結果を入力することにより橋梁の劣化状況を診断可能なエキスパートシステムの開発を数年前から行っている。前年度までに開発してきたシステム(以

下、前システム)の推論機構においては、多様な条件に対して完全な対応関係を持った *if-then* ルールで構築されていなかった。そこで本研究では、専門技術者の持っている知識(ルール)を過去に著者らが行った専門技術者に対するアンケート調査などの結果から、多様な条件に対して完全な対応関係を有する *if-then* 形式で抽出し、それを基に推論機構を再構築した(以下、本システム)。また、本システムを既存橋梁に適用し、前システムの診断結果と比較することにより、本システムによる診断結果の妥当性を検証した。

2. ルールの抽出

2.1 Π 関数の適用

著者らは、従来より専門技術者の知識をファジィ理論における帰属度関数と対応させて表現するため、数名の専門技術者に対するアンケート調査結果を利用することにより、 Π 関数のパラメータ(a,b,c)を求める手法を提案している¹⁾。 Π 関数の一般形を式(1)に示す。ここで、 ω は帰属度関数のピークの高さを変化させるパラメータである。

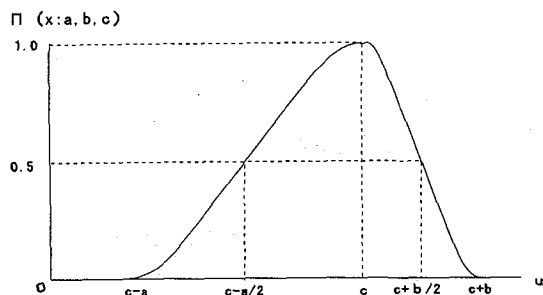


図-1 Π関数の概念図

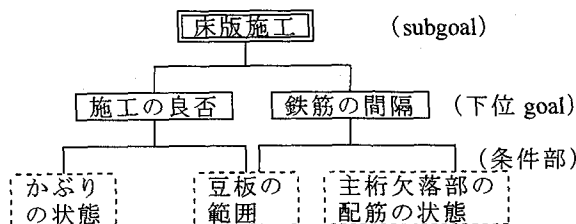


図-2 診断プロセスの一例『床版施工』

$$\Pi(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & (x \leq c-a) \\ a \times 2 \left\{ \frac{x-(c-a)}{a} \right\}^2 & (c-a < x \leq c - \frac{a}{2}) \\ a \times \left\{ 1 - 2 \left(\frac{x-c}{a} \right)^2 \right\} & (c - \frac{a}{2} < x \leq c) \\ a \times \left\{ 1 - 2 \left(\frac{x-c}{b} \right)^2 \right\} & (c < x \leq c + \frac{b}{2}) \\ a \times 2 \left\{ \frac{x-(c+b)}{b} \right\}^2 & (c + \frac{b}{2} < x \leq c+b) \\ 0 & (x > c+b) \end{cases} \quad (1)$$

Π関数の概念図を図-1に示す。

このように、帰属度関数はパラメータ a, b, c により任意に決定され、各パラメータはそれぞれ次の性質を示す。

c : 帰属度関数のピークの位置を表す、

a : c より左側 ($x \leq c$) のあいまいさのばらつきの程度を表す、

b : c より右側 ($x \geq c$) のあいまいさのばらつきの程度を表す。

著者らが開発したコンクリート橋診断エキスパートシステムでは各パラメータと専門技術者に対するアンケート調査結果を100点満点で表し(100点:架設直後の健全な状態, 75点:わずかに劣化しているが憂慮無く健全な状態, 50点:供用年数から考えて良くもなく悪くもない普通の状態, 25点:これ以上悪化すれば、補修補強が必要になる限界の状態, 0点:供用すべきでない状態), 次のように対応させて定義している。

c : 全評価点の平均値、

a : c と評価点の最小値との差の2倍、

b : c と評価点の最大値との差の2倍。

表-1 「施工の良否」のパラメータ

豆板の範囲	かぶりの状態	a	b	c
かなり発生	大きい	26.6	33.4	33.3
かなり発生	小さい	36.6	33.4	33.3
一部で発生	大きい	28.4	33.4	59.2
一部で発生	小さい	41.9	68.4	50.8
発生なし	大きい	25.0	25.0	100
発生なし	小さい	25.0	25.0	100

表-2 「鉄筋の間隔」のパラメータ

豆板の範囲	欠落部の配筋	a	b	c
かなり発生	大きい	40.0	40.0	20.0
かなり発生	小さい	21.6	28.4	35.8
一部で発生	大きい	50	30	35
一部で発生	小さい	18.4	31.6	54.2
発生なし	大きい	18.4	31.6	54.2
発生なし	小さい	25.0	25.0	100

2.2 ルールの抽出方法

本研究では上述のΠ関数のパラメータから帰属度関数を設定し、これを著者らが作成してきた診断プロセスに従い、Dempster の結合則²⁾で順次結合することにより各 subgoal ごとの診断用帰属度関数を求めてルールを抽出している。

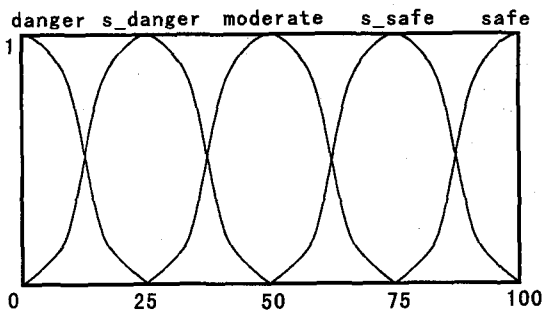
ルールの抽出手順を『床版施工』の subgoal を例にして説明する。診断プロセス(図-2)より『床版施工』は2つの下位 goal「施工の良否」と「鉄筋の間隔」から診断される。また「施工の良否」は条件部である【かぶりの状態】と【豆板の範囲】によって、「鉄筋の間隔」は【豆板の範囲】と【床版欠落部の配筋の状態】によって評価される。

過去に著者らが行った専門技術者に対するアンケート調査の結果から、【かぶりの状態】と【豆板の範囲】がわかっているときの「施工の良否」(表-1)および【豆板の範囲】と【床版欠落部の配筋の状態】がわかっているときの「鉄筋の間隔」(表-2)のΠ関数のパラメータを求めてきている。

Π関数のパラメータから帰属度関数をそれぞれ求め、これらの帰属度関数を Dempster の結合則で結合することにより、『床版施工』の診断用帰属度関数を求めることができる。そして、式(2)で表される平均健全度(G)を出力する。平均健全度とは、橋梁の健全さを100点満点で表したものであり、結合させた診断用帰属度関数のあいまいさを取り除くために非ファジィ化されており、本システムでは重心値を用いている。

$$G = \frac{\int x \cdot \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx} \quad (2)$$

この平均健全度を基に if-then ルールを抽出していく



図－3 判定用帰属度関数

表－3 結合後の平均健全度(G)とスケーリング結果

豆板の範囲	かぶり	配筋状態	G	スケーリング後
かなり発生	大きい	かなり密	26.9	3.6 (danger)
かなり発生	大きい	普通・不明	36.7	17.7(s_danger)
かなり発生	小さい	かなり密	24.4	0.0 (danger)
かなり発生	小さい	普通・不明	32.6	17.7(s_danger)
一部で発生	大きい	かなり密	49.1	35.6(s_danger)
一部で発生	大きい	普通・不明	62.1	54.4(moderate)
一部で発生	小さい	かなり密	44.5	29.0(s_danger)
一部で発生	小さい	普通・不明	56.3	46.5(moderate)
発生なし	大きい	かなり密	72.2	69.0 (s_safe)
発生なし	大きい	普通・不明	93.7	100.0 (safe)
発生なし	小さい	かなり密	72.2	69.0 (s_safe)
発生なし	小さい	普通・不明	93.7	100.0 (safe)

ことになるが、このままでは結合数が多くなると平均健全度が 50 点付近に集中してしまう傾向がみられる。そこでこれを防ぐために式 (3) を用いてスケーリングを行い、集中傾向をなくするように工夫した。

$$G' = \frac{G - G_{\min}}{G_{\max} - G_{\min}} \times 100 \quad (3)$$

ここで、 $G_{\max}$ 、 $G_{\min}$ はそれぞれ平均健全度の 100 点満点の最大値、最小値とする。

上述のようなスケーリングを行ったことにより、前件部の最も悪い状態の組み合わせに対しては 0 点、最も良好な状態の組み合わせに対しては 100 点をとるようになる。そこで、スケーリング後の G' (平均健全度) を図－3 の判定用帰属度関数の各点数におけるグレードが高いラベルを採用して、以下のように後件部命題を 5 段階に設定した。

$0 \leq G' < 12.5$	: danger
$12.5 \leq G' < 37.5$	: slightly danger
$37.5 \leq G' \leq 62.5$	: moderate
$62.5 < G' \leq 87.5$	: slightly safe
$87.5 < G' \leq 100$	: safe

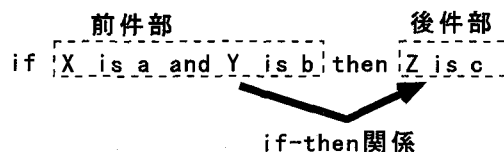
これらの結果『床版施工』では表－3 のような結果が得られ、次のような if-then ルールが抽出できる。

- Rule1: if (豆板の範囲＝かなり発生)
and (かぶりの状態＝大きい)
and (欠落部の配筋＝かなり密)
then (床版施工＝ danger)
- Rule2: if (豆板の範囲＝かなり発生)
and (かぶりの状態＝大きい)
and (欠落部の配筋＝普通 or 不明)
then (床版施工＝ s_danger)
- Rule3: if (豆板の範囲＝かなり発生)
and (かぶりの状態＝小さい)
and (欠落部の配筋＝かなり密)
then (床版施工＝ danger)
- Rule4: if (豆板の範囲＝かなり発生)
and (かぶりの状態＝小さい)
and (欠落部の配筋＝普通 or 不明)
then (床版施工＝ s_danger)
- Rule5: if (豆板の範囲＝一部で発生)
and (かぶりの状態＝大きい)
and (欠落部の配筋＝かなり密)
then (床版施工＝ s_danger)
- Rule6: if (豆板の範囲＝一部で発生)
and (かぶりの状態＝大きい)
and (欠落部の配筋＝普通 or 不明)
then (床版施工＝ moderate)
- Rule7: if (豆板の範囲＝一部で発生)
and (かぶりの状態＝小さい)
and (欠落部の配筋＝かなり密)
then (床版施工＝ s_danger)
- Rule8: if (豆板の範囲＝一部で発生)
and (かぶりの状態＝小さい)
and (欠落部の配筋＝普通 or 不明)
then (床版施工＝ moderate)
- Rule9: if (豆板の範囲＝発生なし)
and (かぶりの状態＝大きい)
and (欠落部の配筋＝かなり密)
then (床版施工＝ s_safe)
- Rule10: if (豆板の範囲＝発生なし)
and (かぶりの状態＝大きい)
and (欠落部の配筋＝普通 or 不明)
then (床版施工＝ safe)
- Rule11: if (豆板の範囲＝発生なし)
and (かぶりの状態＝小さい)
and (欠落部の配筋＝かなり密)
then (床版施工＝ s_safe)
- Rule12: if (豆板の範囲＝発生なし)
and (かぶりの状態＝小さい)
and (欠落部の配筋＝普通 or 不明)
then (床版施工＝ safe)

このようにして診断プロセスに基づき、各 subgoal すべての条件部に対して完全な対応関係を有する if-then ルールの抽出を行った。

3. システムの概要

3. 1 知識表現



図－4 ファジィ集合を含む if-then ルール

本研究では、抽出した Π 関数で表現された帰属度関数を含む if-then ルールを図－4 のように分割し、if-then ルールの前件部および後件部を非線形関数が同定可能な 3 層ニューラルネットワークを用いて表現し、両者を結び

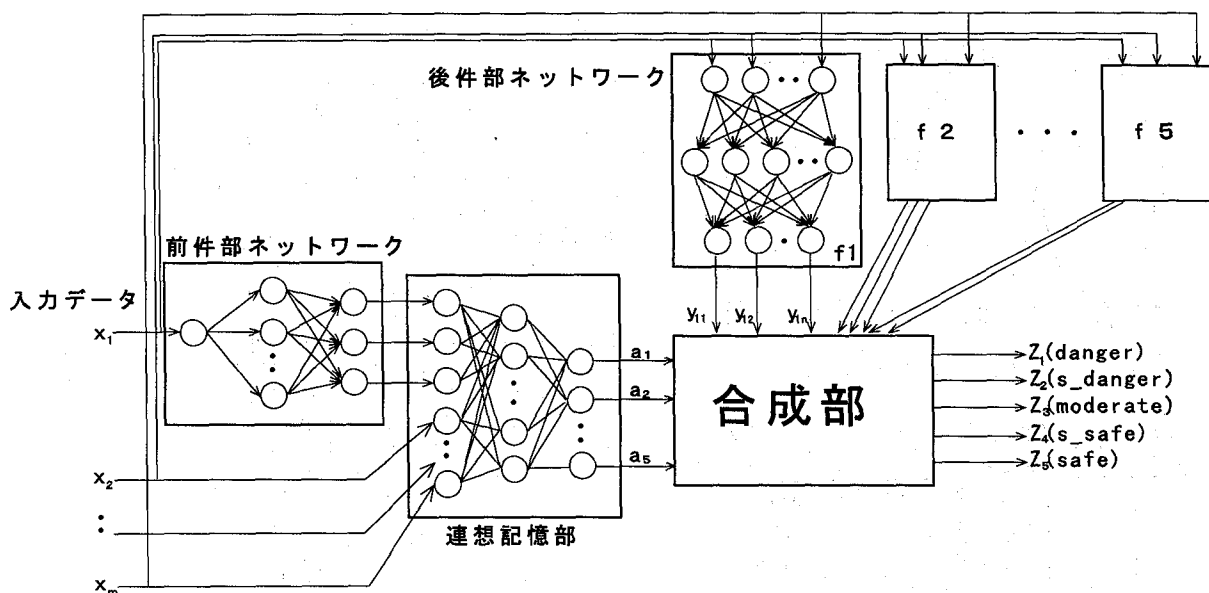


図-5 推論機構の概念図

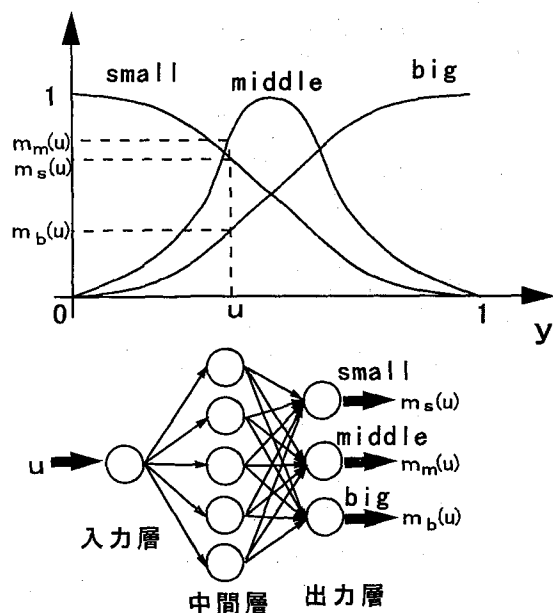


図-6 前件部ネットワーク

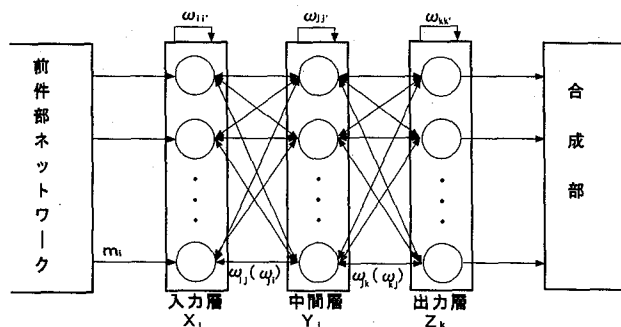


図-7 双方向連想記憶

つける if-then 関係に当たる部分に連想記憶を行うネットワークである双方向連想記憶 (BAM: Bidirectional Associative Memory) を適用している³⁾。

3.2 推論機構

本システムの推論機構の概念図を図-5に示す。

本システムの推論機構は前件部ネットワーク、連想記憶部、後件部ネットワーク、合成部からなっている。前件部ネットワークと後件部ネットワークにニューラルネットワークを用いることで専門家が持っている知識を更新することや連想記憶部に双方向連想記憶を用いることでファジィ推論を可能にしていることが特色である。

前件部ネットワークは図-6に示すような3層のニューラルネットワークで構築される。このネットワークは前件部のファジィ変数を記憶し、入力データに従いファジィ変数の帰属度関数のグレード、つまり前件部ファジィ命題の合致度を求めるようになっている。

連想記憶部では前件部ネットワークで求めた前件部ファジィ命題の合致度より、各ルールに対する重みを求める。連想記憶部は図-7に示すように入力から出力までの関係を双方向結合を含む離散時間形式で構築されており、その推論動作は次式に従うものとした。

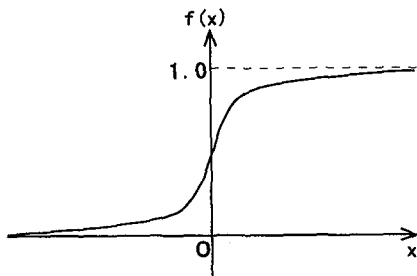


図-8 シグモイド関数のグラフ

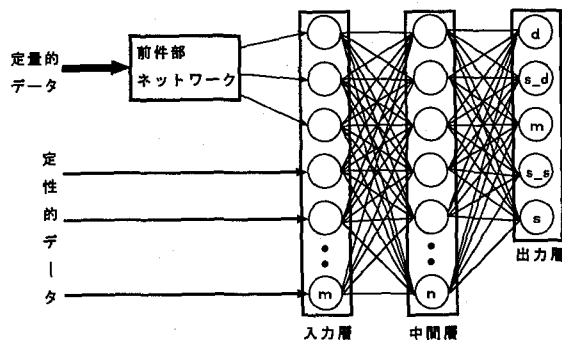


図-9 連想記憶部へのデータの入力

$$\left. \begin{aligned} X_i(t+1) &= f\left(m_i + \sum_j w_{ij} + \sum_j w_{ij}(t)Y_j(t)\right) \\ Y_j(t+1) &= f\left(\sum_i w_{ij}X_i(t+1) + \sum_j w_{jj}Y_j(t) + \sum_k w_{jk}Z_k(t)\right) \\ Z_k(t+1) &= f\left(\sum_j w_{jk}Y_j(t+1) + \sum_k w_{kk}Z_k(t)\right) \\ X_i(0) &= f(m_i) \\ Y_j(0) &= f\left(\sum_i w_{ij}X_i(0)\right) \\ Z_k(0) &= f\left(\sum_j w_{jk}Y_j(0)\right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ただし、

$X_i(t)$: 時刻 t における入力層ユニットの出力、
 $Y_j(t)$: 時刻 t における中間層ユニットの出力、
 $Z_k(t)$: 時刻 t における出力層ユニットの出力、
 w_{ii} : 入力層ユニットー入力層ユニット間の結合重み、
 w_{jj} : 中間層ユニットー中間層ユニットの結合重み、
 w_{kk} : 出力層ユニットー出力層ユニット間の結合重み、
 w_{ij} (w_{ji}): 入力層ユニットー中間層ユニットの結合重み、
 w_{jk} (w_{kj}): 中間層ユニットー出力層ユニット間の結合重み、
 m_i : 前件部ネットワークにより求められた前件部ファジィ命題の合致度。

ここで、 $f(\cdot)$ は本システムでは次式で表されるシグモイド関数を用いている。シグモイド関数のグラフを図-8に示す。

$$f(x) = \frac{1}{\{1 + \exp(-x)\}} \quad (5)$$

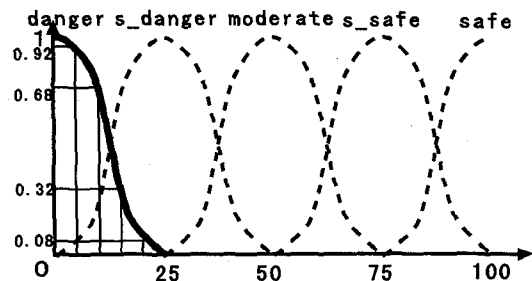


図-10 dangerを表す後件部ネットワーク

本システムでは診断対象橋梁の橋梁諸元、環境条件、交通量、各ひび割れの状態といった定量的および定性的データが入力される。連想記憶部には、定量的データは前件部ネットワークを通り、前件部ファジィ命題の合致度が入力される。一方、定性的データはそのまま連想記憶部の入力層へ入力されるようになっている（図-9参照）。連想記憶部ではこれらの入力から入力層ー中間層および中間層ー出力層の2つのBAMにおいて時間の経過に伴いルールが想起されていく。ここで、連想記憶部が複数のルールから適切な1つを選択するための状態遷移を起こすために、ある程度の時間がかかる。ゆえに、平衡状態に到達するまでのある時刻には、複数のルールが活性化しているといえる。

そこで、本システムではネットワークが平衡状態に到達するまえの時点で出力値を取り出すことにより、入力値との適合度を反映した複数のルールに対する重み（出力値）を得ることが可能となる。このことがファジィ推論を可能にしているといえる⁴⁾。

一方、後件部ネットワークは、図-10に示すような3層ニューラルネットワークで構築されており、後件部ファジィ命題の状態を表す帰属度関数を求める。後件部ネットワークでは5つのネットワークを用意しそれぞれ danger, slightly danger, moderate, slightly safe, safe の帰属度関数を0から100まで5点きざみで21分割したものを出力するようになっている。

このように前件部ファジィ命題から連想記憶部を通して後件部ファジィ命題に関する推論が順次行われ、合成部において連想記憶部から算出された後件部の重みと後件部からの出力を順次合成して帰属度関数 Z_j を求めて

表－４ 診断対象橋梁の概要

橋梁名	N橋	Y橋	F橋
架設年 (橋齢)	昭和３８年 (３３年)	昭和１２年 (５９年)	昭和３３年 (３８年)
橋梁形式	２主桁３径間 RC単純Ｔ桁橋	３主桁単径間 RC単純Ｔ桁橋	４主桁３径間 RC連続ゲルバー橋
主桁損傷状態	鉄筋腐食ひび割れ (10.00mm) 曲げひび割れ (0.3mm) 遊離石灰 コンクリートの欠落	鉄筋腐食ひび割れ (0.4mm) 曲げひび割れ (0.05mm) 遊離石灰 コンクリートの欠落	曲げひび割れ (0.1mm)
主桁の目視による損傷程度	大	中	小
床版損傷状態	支承付近ひび割れ (0.1mm)	ハンチ沿いひび割れ (0.2mm) 支承付近ひび割れ (0.2mm) 中央付近ひび割れ (0.3mm) 遊離石灰	支承付近ひび割れ (0.2mm)
床版の目視による損傷程度	中	大	中

いく（式（６）参照）。

$$Z_j = \frac{\sum_{i=1}^5 a_i y_{ij}}{\sum_{i=1}^5 a_i} \quad (j = 1, 2, \dots, 21) \quad (6)$$

ここで a_i は i 番目の後件部の重みを表し、 y_{ij} は i 番目の後件部ネットワークの出力を表す。

これに図－３の判定用帰属度関数を照合することにより５段階評価を算出し、さらにそれらの重心をとることにより平均健全度を求める。このような操作を繰り返すことによって各 subgoal ごとの最終的な推論結果が得られることになる。なお本システムの前件部ネットワークおよび後件部ネットワークについては、誤差逆伝播法（バックプロパゲーション；BP）^{５）}で学習を行い、特にひび割れ幅をファジィ変数（大きい、中程度、小さい）で表現するための学習については、前システムが 1mm までしか学習していなかったのに対して本システムでは既存橋梁の現状を考慮し 10mm まで学習させることにより適用範囲を広げている。

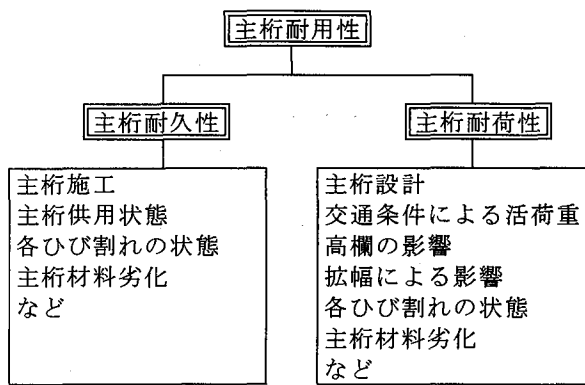
４．既存橋梁への適用

if-then ルールを抽出し直し、再構築した推論機構の妥当性を検証するため既存橋梁に対する本システムによる診断結果と著者らによる目視点検結果との比較および前システムの診断結果との比較を行った。ここで診断の対象とした橋梁は前年度本研究室で調査を行った山口県内の「N橋」、「Y橋」、「F橋」の３橋である。目視点検を行ったこれら３橋梁の概要を表－４にまとめて示す。また調査により、明らかになったこれら３橋の損傷状況等を以下に示す。

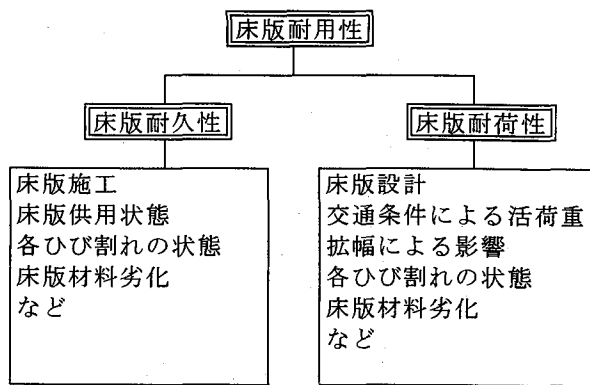
①「N橋」：昭和 38 年に架設された橋齢 33 年の 2 主桁 3 径間 RC 単純 T 桁橋である。損傷状態としては、主桁に「鉄筋腐食ひび割れ」がかなり多くみられ、最大ひび割れ幅も 10.0mm に達していた。その付近では、遊離石灰もかなり析出しており、コンクリートの欠落も全体的に見られ、錆びた鉄筋が露出していた。また、「曲げひび割れ」も少し発生しており、その付近でも遊離石灰、コンクリートの剥離も至る所で起こっていた。床版については、支承付近（支点付近）に細かいひび割れが発生しており、そこから遊離石灰、コンクリートの欠落が少し見られた。また一部に施工不良が原因と考えられる豆板が発生しており、損傷の程度は橋齢の割にかなり大きいものであると予想された。

②「Y橋」は、昭和 12 年に架設された橋齢 59 年の 3 主桁単径間 RC 単純 T 桁橋である。損傷は、特に上流側に著しく、主桁に「鉄筋腐食ひび割れ」がかなり発生していた。最大ひび割れ幅は 0.4mm で、その付近には遊離石灰も少し見受けられ、コンクリートもかなり欠落しており、錆びた鉄筋が露出していた。また、「曲げひび割れ」も少し発生していた。床版については、全体的にひび割れが発生しており、コンクリートの欠落は小さいものの、遊離石灰がかなり析出していた。さらに、高欄の一部は崩れてなくなっており、排水管が設置されていないため漏水跡がみられるなど、損傷はある程度進んでいると予想された。

③「F橋」は、昭和 33 年に架設された橋齢 38 年の 4 主桁 3 径間 RC 連続ゲルバー桁橋で、歩道部分は後に拡幅して独立に架設してある。主桁断面が大きく、ひび割れも微細なものが少し見られる程度で、豆板、コンクリートの欠落は見られず、施工状態は良好であったと思われる。大型車の交通量は多いものの、比較的健全な橋梁であると予想された。



図－１１ 主桁上位 subgoal の判定要因



図－１２ 床版上位 subgoal の判定要因

表－５ 本システムによる３橋に対する診断結果の一例（主桁）

橋梁名	判定項目	danger	s danger	moderate	s safe	safe	G	前 G
N 橋	曲げひび割れ	0.114	0.706	0.163	0.016	0.001	26.1	50.2
	鉄筋腐食ひびわれ	0.117	0.733	0.121	0.008	0.021	25.1	56.0
	主桁耐荷性	0.001	0.106	0.332	0.330	0.230	67.0	63.3
	主桁耐久性	0.023	0.627	0.206	0.110	0.035	37.7	55.6
	主桁耐用性	0.033	0.380	0.281	0.252	0.054	47.9	59.4
Y 橋	曲げひび割れ	0.012	0.136	0.692	0.145	0.116	50.3	76.2
	鉄筋腐食ひびわれ	0.117	0.727	0.125	0.010	0.021	25.3	27.6
	主桁耐荷性	0.024	0.153	0.314	0.310	0.199	62.7	58.9
	主桁耐久性	0.011	0.487	0.190	0.289	0.023	45.6	31.6
	主桁耐用性	0.031	0.311	0.265	0.337	0.056	51.9	41.9
F 橋	曲げひび割れ	0.044	0.168	0.421	0.283	0.084	55.6	73.2
	鉄筋腐食ひびわれ	0.000	0.001	0.001	0.242	0.755	94.1	86.3
	主桁耐荷性	0.083	0.074	0.224	0.324	0.295	66.9	57.3
	主桁耐久性	0.005	0.310	0.154	0.499	0.031	56.0	67.6
	主桁耐用性	0.028	0.169	0.190	0.506	0.106	62.3	61.3

表－６ 本システムによる３橋に対する診断結果の一例（床版）

橋梁名	判定項目	danger	s danger	moderate	s safe	safe	G	前 G
N 橋	床版施工	0.105	0.249	0.402	0.168	0.077	46.3	45.0
	ハンチ沿いひび割れ	0.002	0.012	0.033	0.238	0.716	94.1	86.3
	支承付近ひび割れ	0.026	0.141	0.360	0.371	0.102	59.4	44.5
	中央付近ひび割れ	0.002	0.008	0.021	0.250	0.720	94.1	86.3
	床版耐荷性	0.017	0.181	0.287	0.306	0.209	62.7	61.5
	床版耐久性	0.004	0.250	0.160	0.536	0.049	59.4	48.8
	床版耐用性	0.022	0.179	0.229	0.488	0.083	60.8	54.5
Y 橋	床版施工	0.113	0.176	0.216	0.250	0.245	60.8	60.1
	ハンチ沿いひび割れ	0.083	0.339	0.365	0.167	0.046	43.1	43.8
	支承付近ひび割れ	0.064	0.306	0.429	0.168	0.034	44.8	69.5
	中央付近ひび割れ	0.040	0.201	0.585	0.151	0.024	48.1	50.3
	床版耐荷性	0.021	0.213	0.304	0.283	0.180	59.7	60.0
	床版耐久性	0.013	0.480	0.210	0.286	0.011	45.0	57.1
	床版耐用性	0.033	0.343	0.271	0.307	0.047	49.8	58.8
F 橋	床版施工	0.113	0.176	0.216	0.250	0.245	60.8	60.1
	ハンチ沿いひび割れ	0.001	0.008	0.039	0.237	0.715	94.1	86.3
	支承付近ひび割れ	0.021	0.129	0.407	0.349	0.095	58.8	64.0
	中央付近ひび割れ	0.001	0.007	0.023	0.248	0.720	94.1	86.3
	床版耐荷性	0.014	0.279	0.210	0.245	0.252	61.1	58.8
	床版耐久性	0.004	0.237	0.146	0.571	0.042	60.2	65.4
	床版耐用性	0.024	0.216	0.186	0.481	0.093	60.1	62.3

本システムは、診断項目として、平均健全度Gと danger から safe までの5段階に属する程度が出力される。表-5に本システムによる主桁の診断結果の一例を示し、表-6に床版の診断結果の一例を示す。表中の「G」は本システムによる平均健全度、「前G」は前システムの平均健全度を表す。

主桁の診断結果から以下のことがわかる。

- ・『曲げひび割れ』の subgoal において、前システムより全て低い値を示している。「N橋」ではとくに「遊離石灰」やかなりの「コンクリートの欠落」が見られることから考えると、正しい結果が得られていると思われる。
- ・『鉄筋腐食ひび割れ』の subgoal において、前システムでは「N橋」の方が「Y橋」に比べて悪いデータを入力しているにもかかわらず「N橋」の方が悪い結果を出力してしまうという問題があったが、本システムではそれが改善され「N橋」の方が低い値が得られた。

・主桁の最上位 subgoal である『主桁耐用性』では本システムでは目視点検結果から予想されるとおり、「N橋」、「Y橋」、「F橋」の順に悪い結果を出力している。

次に、床版の診断結果から以下のことがわかる。

- ・『床版施工』などのルール数が少ない subgoal においては前システムと非常に近い結果が得られた。前システムが、これらの subgoal についてはルールを正しく抽出していることから考えると、本研究のルールの抽出方法が誤ってなかったものと思われる。

・『支承付近ひび割れ』において、前システムでは「N橋」が一番低い診断結果を得ているのに対して、本システムでは「Y橋」が一番低い診断結果を得ている。『支承付近ひび割れ』は抽出したルールによると、「遊離石灰」と「ひび割れ状況」が特に診断に影響を及ぼす。「遊離石灰」と「ひび割れ状況」ともに入力データが「N橋」より「Y橋」の方が悪いデータを入力していることから、前システムより本システムの方が正しい診断結果を得ているといえる。さらに「N橋」と「F橋」の『支承付近ひび割れ』に関する入力データがほぼ同じで、本システムの出力も同程度であることから本システムが正しく診断していることがわかる。

・床版の最上位 subgoal である『床版耐用性』では本システムでは目視点検結果と対応して「Y橋」に対して悪い結果を出力している。

これらのことから以下のことが明らかとなった。

- ①抽出したルールや目視点検結果から判断すると、全体

的に本システムでは前システムと同程度、もしくはそれ以上の診断結果が得られているといえる。

- ②本システムの診断結果がひび割れ幅の学習範囲を広げたことにより前システムで起こった『鉄筋腐食ひび割れ』の subgoal における診断結果の矛盾点が解消された。

- ③本システムでは、主桁の最上位 subgoal である『主桁耐用性』および床版の最上位 subgoal である『床版耐用性』について、目視点検結果と対応した診断結果が得られており、本システムの診断結果が妥当であると判断できる。

5. まとめ

本研究で得られた主な成果は以下のとおりである。

- ①過去に本研究室で行った専門技術者に対するアンケート調査結果等から、診断プロセスのすべての条件部を考慮したほぼ完全な if-then ルールの抽出を行うことができた。
- ②抽出したルールをもとに定量的データと定性的データの両方を扱うことができる推論機構を構築した。
- ③ニューラルネットワークに双方向連想記憶を組み合わせることにより、ファジィ理論の長所を生かしつつ「あいまいさの爆発」を抑えることができた。
- ④いずれの subgoal においても目視点検結果から推測される劣化状態にほぼ対応した診断結果が得られていることより、本システムが前システムよりさらに信頼性の高い診断結果を出力することが可能となった。

参考文献

- 1) 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, pp571-584, 1992.3.
- 2) 古田均, 小尻利治, 宮本文穂, 秋山孝正, 大野研, 背野康英: ファジィ理論の土木工学への応用, 1992.8.
- 3) 宮本文穂, 串田守可, 森川英典, 木下和哉: コンクリート橋診断ニューロ・ファジィエキスパートシステムの開発と信頼性の向上, 土木学会論文集 No.510/VI-26, pp.91-101, 1995.3.
- 4) 今崎直樹・山口亨: ファジィニューラルネットに向けて, Computer Today, No35, pp52-58, 1990.1.
- 5) 萩原将文: ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1994.

(1997年9月26日受付)