

橋梁診断のシステム化に関する基礎的研究

ENGINEERING PREDICTION MODEL FOR BRIDGE RATING SYSTEM

西村 昭*・藤井 学**・宮本文穂***・富田隆弘****

By Akira NISHIMURA, Manabu FUJII, Ayaho MIYAMOTO and Takahiro TOMITA

The necessity of developing a computer-aided bridge rating system has been pointed out for maintenance, diagnosis, repair and rehabilitation of existing bridges. There are multiple processes of damage with a lot of damage factors in existing bridges in service. In this paper, an engineering prediction model for a bridge rating system is proposed based on the fuzzy hierarchy structural modeling. The fuzzy set theory which introduced the idea of a vagueness function and Dempster and Shafer's theory is applied to final stage of rating. A few concrete bridges on which field data have been collected are analyzed to demonstrate the applicability of this rating system.

The results obtained are sufficient to apply the rating to cracked reinforced concrete bridge girders and slabs.

Keywords : bridge rating, computer-aided system, structural model, fuzzy set, vagueness function, reinforced concrete bridge

1. まえがき

近年、道路網の発達に伴う自動車交通量、重量車両の増加によって、それらの通過する橋梁にさまざまな損傷が発生するようになり、維持、管理に重大な関心が寄せられている^{1),2)}。橋梁に発生する損傷とその原因、また損傷発生による橋梁諸機能への影響は複雑な関連性を有しており、1つのシステムとしての取り扱いが必要であると考えられる。このシステムを定量的に把握することは非常に困難なことであるが、橋梁補修に携わる経験豊富な技術者は、自身の中にこれまでの技術的経験と知識に裏付けられた損傷評価システムを概念的に構築し、診断を行っているものと考えられる。このような診断は、主観的判断に頼る部分を含み合理的とはいがたい面を有するが、現在までに蓄積された経験的知識を整理、統合し、知識ベース化することにより、橋梁診断支援ツールとして活用することが期待できる。

本研究では、橋梁診断のシステム化を行うため、過去の経験や知識をベースとした損傷要因間の関連性をシステム工学的に階層化し、下位の定性的、定量的情報から上位の耐荷性、耐久性に及ぼす影響が推定可能な階層構造モデル（多層階有向グラフ）^{3),4)}を構築した。この階層構造モデルを用いて、実橋に発生する損傷の種類および発生箇所の推定、あるいは、発生している損傷の原因推定等を行うとともに、最終的な診断に、ベーグネス関数⁵⁾と Dempster & Shafer 理論⁶⁾を用いて帰属度関数を結合するファジー集合論⁷⁾を適用した一連の橋梁診断システムを提案するとともに、本システムを道路橋鉄筋コンクリート桁および床版へ適用し、その妥当性、有効性を検証した例を示す。

2. 橋梁損傷要因の階層化

(1) あいまい階層構造モデル

橋梁に発生する損傷とその原因および損傷発生による橋梁の諸機能への影響は、種々の形で蓄積され、整理されている^{8),9)}。これらは、定性的な関連性に過ぎない面も有するが、貴重なデータや経験等に基づいて一般化されており、客觀性を有すると考えてよい。このような関連性を総合化し、橋梁全般を網羅した損傷要因間の相関関係を明らかにするために、あいまい階層構造モデル^{3),4)}

* 正会員 工博 神戸大学教授 工学部土木工学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

** 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部土木工学科
(同上)

*** 正会員 工博 神戸大学助手 大学院自然科学研究科
(同上)

**** 正会員 工修 (株)信和技研
(〒762 坂出市入船町1-3-2)

を導入する。あいまい階層構造モデル（以下、階層モデルと略記）は、損傷要因間の相関関係に対して、人間の主観や経験を反映させ、階層構造として構築されるものであり、その作成概念図を図-1に示す。

図-1に示すように、階層モデル作成の第一段階として階層モデルにおいて頂点となる損傷要因（損傷に関係する要因）を決定する必要がある。次に、階層モデルの頂点間を連結する“線”で表わされる要因間の関係を、要因相互の2項比較により、関連性の強さを数値 f_r で表現する。このとき、 f_r は主觀によって値域[0, 1]で与えられる。 f_r はファジー集合論の帰属度と同様の意味をもつものとして定義され、ここでは各要因間に関係が存在するという意味をもつファジー集合 r への帰属の程度を表わすものと考える。このような各要因間の関連性を行列で表わしたものを、あいまい従属行列（マトリックスモデル）とよび、次式のように表わす。

$$A = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & \cdots & S_N \\ S_1 & & & & \\ S_2 & & & & \\ \vdots & & & & \\ S_N & & & & \end{bmatrix} \quad (1)$$

$a(i, j)$

ここで、 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ は損傷要因であり、行列 A の要素 $a(i, j)$ は、次式となる。

$$a(i, j) = f_r(S_i, S_j) \quad (\text{ただし}, 0 \leq a(i, j) \leq 1) \quad (2)$$

$a(i, j)$ は損傷要因 S_i が損傷要因 S_j に与える影響の大きさを示していると考えることができる。したがって、階層モデルは有向グラフとなるが、階層モデル作成にあたって行列 A が次の3条件を満足していることを確認する必要がある：

(a) あいまい非反射律が成立する。すなわち、 $\forall (S_i, S_i) \in S \times S$ に対して $f_r(S_i, S_i) < P$ 、これは、図-2(a)に示す自己ループをもたないための条件である。

(b) あいまい非対称律が成立する。すなわち、 $\forall (S_i, S_j) \in S \times S, (i \neq j)$ に対して $f_r(S_i, S_j) < P$ 、も

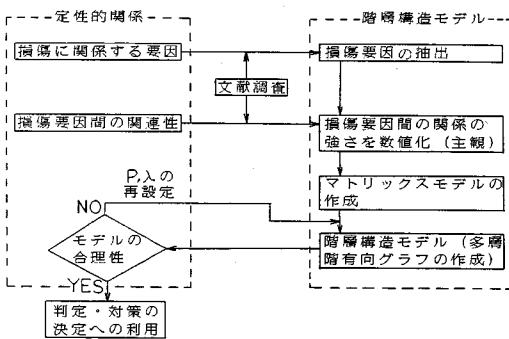


図-1 あいまい階層モデルの作成概念図

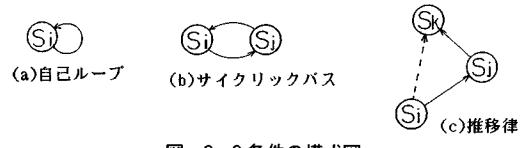


図-2 3条件の模式図

しくは $f_r(S_i, S_i) < P$ 、これは、図-2(b)に示すサイクリックパスをもたないための条件である。

(c) あいまい半推移律が成立する。すなわち、 $\forall (S_i, S_j), (S_j, S_k), (S_k, S_i) \in S \times S, (i \neq j), (j \neq k), (k \neq i)$ に対して $M = \bigvee_{j=1}^n (f_r(S_i, S_j) \wedge f_r(S_j, S_k) \geq P)$ のとき $f_r(S_i, S_k) \geq M$ 、これは、図-2(c)に示すように S_i から S_j , S_j から S_k のパスが存在するときに、 S_i から S_k にパスが存在しなければならないという条件である。ここで、 P は境界値で、 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_N\}$ である。

次に、階層モデル作成の実行となるが、ここでは1つのマトリックスモデルから複数個の有向グラフが得られる可能性があるため、階層モデルの合理性判定を行うことによって（図-1参照）、橋梁診断に最も適した有向グラフを階層モデルとして採用する必要がある。有向グラフが合理的でない場合は、境界値 P とあいまい構造パラメーター λ を試行錯誤的に再設定し、有向グラフを順次作成していく。ここで、 P は関係の有無の境界となる値であり、 λ は、ファジー補集合、ここでは関係がないという集合 $\bar{\tau}$ への帰属度 $f_r(S_i, S_j)$ を制御する変数である。 $f_r(S_i, S_j)$ は λ を用いて次式で決定される。

$$f_r(S_i, S_j) = \frac{1 - f_r(S_i, S_j)}{1 + \lambda \cdot f_r(S_i, S_j)} \quad (3)$$

(ただし、 $-1 < \lambda < \infty$)

(2) 橋梁損傷要因の階層モデルの作成

最初に、現在使用されている橋梁の諸機能に関する用語の定義および関連を確定する必要がある。本研究では、損傷発生により影響を受ける橋梁の諸機能を構造的なものと社会的なものの2つに分類し、それぞれが耐用性と供用性をもってその判定指標となるものと考えた。これらの関連をツリーで表わしたもののが図-3である。図-3中の各用語の意味を表-1に示す。これらの各用語は最終的な診断過程で必要となるものであり、損傷要因とは無関係に取り扱うが、図-3に示すツリーの最下層の用語のみを損傷により直接影響を受けるものとして、階層モデルの要因の中に含める。階層モデルの要因は、文献等に基づき橋梁の診断に必要と思われるものを網羅するように選定した。表-2に階層モデル作成のために選定した76個の要因と対応番号を示す。各要因は橋梁の上部工・下部工を網羅するように選んだが、高欄・照明施設等の付属施設は省略した。選定した各要因は、三種

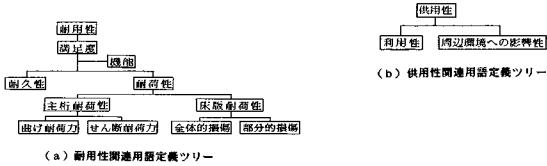


図-3 各用語関係ツリー

表-1 橋梁の諸機能を表わす用語の定義およびその意味

耐用性	満足度	満足度を指標とする対象構造物に対する現時点での評価
		耐候性及び耐久性より対象構造物が、その機能を構造的に安全に果たすか否かの尺度
機能		設計時に構造物に与えられた構造的な能力
耐候性		構造物の作用荷重に対する抵抗性
耐荷力		現時点において、構造物あるいは部材が、ある限界状態に達するまでに抵抗する荷重
耐久性		劣化速度から見た、現時点における構造物の劣化に対する抵抗性
劣化		構造材料が物理的・化学的作用等により経年で材料本来の性能を低下させること
全体的損傷		床版において、曲げ剛性低下の結果、使用限界として現れる損傷
部分的損傷		床版において、ひびわれ面でのせん断伝達能の低下として現れるコンクリート塊の抜け落ち
供用性		構築、すなわち道路構造物としての社会的影響度
利用性		走行時の安全性より見た路面状況の社会的影響度
周辺環境へ		構造物が存在することによる騒音・美観等構造物周辺への影響性

類に大別できる。すなわち、第一類は、損傷発生により影響を受ける橋梁の諸機能で、番号1: 利用性から8: 床版の部分的損傷までである。第二類は、損傷名であり、番号9: 床版ひびわれ面でのせん断伝達能の低下から60: 排水施設の破損までである。第三類は、番号24, 25, 57, および61~76の要因で表わされるような損傷の直接的、間接的原因となる構造条件、道路条件等である。

これら損傷要因間の相関の程度を表わす数値は、2項比較を行うことによって過去の経験、文献などの整理結果をもとにして主観的に決定することになる。この2項比較を全要因間にに対して実行すると、表-2中の全要因

に対するマトリックスモデルが得られるが、本研究では $76 \times 76 = 5776$ 個の2項比較が必要となる。そこで、今回は過去の経験や文献等を整理することにより、客観的となっている関係のみに0以上の数値を与え、それ以外はすべて0とした。

階層モデルの作成に先立って、境界値 P を仮定し、先に述べた3条件を調べたところ、あいまい非反射律(第1条件)とあいまい非対称律(第2条件)は成立していたが、あいまい半推移律(第3条件)が成立していないため、あいまい半推移律が成立するようにマトリックスモデルの修正を行った後、あいまい構造パラメータ λ を仮定し、階層モデルの作成を行った。いくつかの有向グラフを作成し、その合理性を判定した結果(図-1参照)、 $P=0.4$ 、 $\lambda=2.8$ として得られる有向グラフが、①パスの存在箇所が文献等の整理結果と一致していること、②パスが比較的簡潔であること等の理由により、作成した有向グラフの中では橋梁診断に対して最も合理的と判断し、階層モデルとして採用することとした。このようにして得られた損傷要因間の関連性を表わす階層モデルを図-4に示す。図-4の番号1から76は、要因番号であり(表-2参照)、 a から x はパスの接続を示している。また、要因番号の上下関係が、そのまま従属関係を示している。図-4に示す階層モデルは、橋梁の損傷要因間の関連性を総合的に表現している。このため、この階層モデルには、コンクリート桁、鋼桁、RC床版それぞれに特有に発生する損傷が含まれているのみならず、最終的な判定指標である耐用性、供用性という性質

表-2 階層モデル要因名と対応番号

番号	要因名	番号	要因名
1	利用性	39	主桁コンクリートの疲労
2	周辺環境への影響性	40	主桁コンクリートの劣化
3	走行安全性	41	引張筋筋量、PC鋼材量の減少と付着性状の変化
4	耐久性	42	スターラップ筋量の減少と付着性状の変化
5	主桁 曲げ耐荷力	43	鉄筋、PC鋼材の疲労
6	主桁 せん断耐荷力	44	支承機能の劣化
7	床版 全体的損傷	45	桁のひびわれ
8	床版 部分的損傷	46	鉄筋、PC鋼材の腐食
9	床版 ひびわれ	47	同上方向のひびわれ
10	主筋方向ひびわれ	48	支承附近のひびわれ
11	載荷筋方向ひびわれ	49	部材、床版構造の変位
12	ひびわれ	50	纏合、構造の変形
13	ハンダ溶接ひびわれ	51	基礎の変形
14	一部に集中したひびわれ	52	応力集中箇所の疲労
15	貫通ひびわれ	53	鋼骨ボックス、鋼腹板内への水の侵入
16	ひびわれ筋	54	鋼材のひびわれ
17	床版コンクリートの疲労	55	結露、滴水
18	床版コンクリートの劣化	56	塗装の劣化
19	床版コンクリートの剥離	57	部材位置
20	角落ち、すりへり	58	鋼材の腐食
21	遊離石灰	59	美観
22	床版での漏水	60	排水施設の破損
23	舗装の通行軌跡	61	泥つまり
24	配筋新規	62	清掃不足
25	床版厚	63	排水不良
26	主桁の剛性	64	路面漏水
27	主桁のねじれ、不等沈下	65	路面荷重の増大と振り返し頻度
28	主桁のねじれ	66	大規模な交通量
29	主桁の凹凸	67	点荷重
30	舗装のひびわれ	68	爆雷
31	道路線形	69	渋滞
32	主桁の振動、たわみ	70	渋滞緩解作用
33	舗装面での漏水	71	道路条件
34	アスファルトの老化	72	環境条件
35	伸縮装置の破損とその付近の凹凸	73	構造条件
36	陥没	74	施工不良
37	床版目地とその付近の凹凸	75	設計不良
38	主桁コンクリート部のせん断力分担能の低下	76	災害

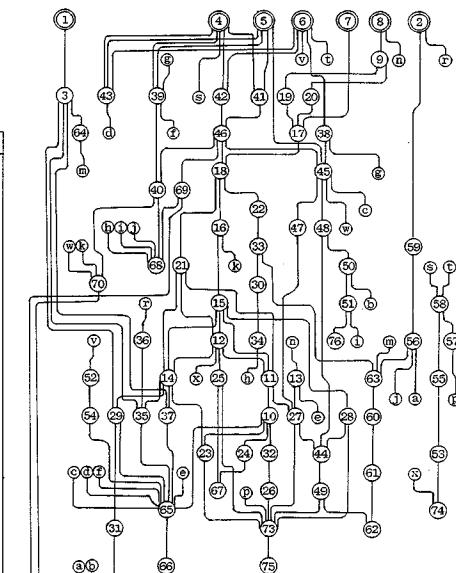


図-4 橋梁の損傷要因間の関連性に基づく階層モデル(全体図)

の異なるものに属する要因も同時に含んでいるため、RC 枠あるいは RC 床版といった個々についての損傷要因の関連性を理解するには不向きである。そこで、階層モデルの最上層要因(図-4の2重丸)に従って、階層モデルを分割する。分割は、階層モデルを最上層要因より逆にたどり、その要因に何らかの影響を与える可能性があるものすべてを含むものとした。分割した階層モデルの一覧表を表-3に示す。ただし、表-3の主桁の耐荷力、耐久性ではコンクリート桁、鋼桁を分けているが、図-4中の最上層要因においては分けていない。分割した階層モデルの一例として RC 枠せん断耐荷力診断用階層モデルを図-5に示す。さらに、図-4の階層モデルの従属関係を逆転させ、損傷原因を推定するための階層モデルを作成した結果を図-6に示す。図-6は、図-4の下部階層構造を利用して得られるもので、各損傷が最下層となり、損傷原因が最上層となるように作成した。

以上のように作成した各階層モデルにより、構造諸元、属地条件等に基づき、発生する損傷の予測を行い、点検の際に役立てることが可能となるのみならず、発生している損傷要因についての簡単な点検結果より、耐用性、供用性に与える影響の程度が診断可能となる。

3. ファジー集合論の診断への応用

橋梁の耐荷性、耐久性、供用性等を、主に目視点検結果のような、主観を含む情報に基づいて診断するためにファジー集合論⁷⁾を導入する。ファジー集合論を診断に

表-3 分割階層モデル名一覧表

- (1) 利用性
- (2) 周辺環境への影響性
- (3) 耐久性
- (4) R.C. 枝曲げ耐荷力
- (5) R.C. 枝せん断耐荷力
- (6) 鋼枝耐久性
- (7) 鋼枝耐荷力
- (8) 床版 全体の損傷
- (9) 床版 分割的損傷

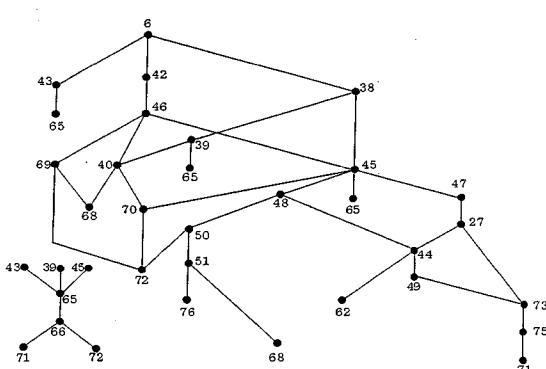


図-5 コンクリート主桁せん断耐荷性階層構造モデル

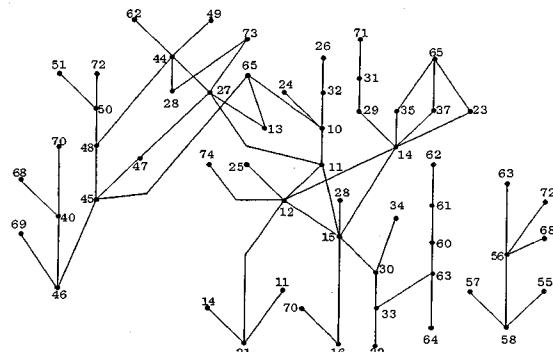


図-6 損傷原因追求用階層構造モデル

適用する際には、帰属度関数のもつあいまいさの取り扱いが問題となる。本研究では、このあいまいさをベーベンス関数⁵⁾で取り扱い、さらに、帰属度関数間の演算にDempster & Shafer理論⁶⁾を適用した。

(1) 帰属度関数のもつあいまいさ

ファジー集合の特徴は、ぼやけた境界を有する点にあり、そのぼやけた境界を表現しているのが、帰属度関数 $\mu_A(x)$ で、ある要素 x がファジー集合 A に属する程度を示している。要素 x_1 について考えると、 $\mu_A(x_1)$ の値が 1 または 0 に近ければ近いほど、 A に属するか属さないかがはっきりとし、要素 x_1 の帰属についてのあいまいさは小さくなる。逆に、 $\mu_A(x_1)$ が 0.5 に近づくと要素 x_1 の集合 A への帰属はわからなくなり、あいまいさは大きくなる。このあいまいさを帰属度関数 $\mu_A(x)$ に対応させて定義し、ベーグネス関数⁵⁾とよぶ。ベーグネス関数 $V_A(x)$ の定義域およびその関数形は、それぞれ式(4)、(5)で与えられるものとする。

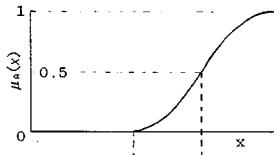
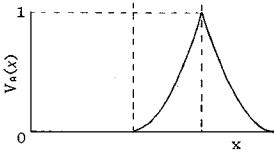
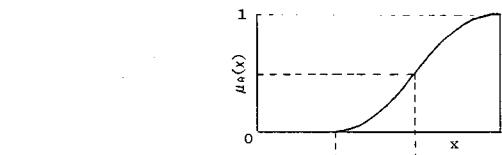
$$V_A(x) = \begin{cases} 2 \cdot \{1.0 - \mu_A(x)\} & \text{ただし } 1.0 \geq \mu_A(x) \geq 0.5 \\ 2 \cdot \mu_A(x) & \text{ただし } 0.5 > \mu_A(x) \geq 0.0 \end{cases}$$

図-7に、帰属度関数と、それに対応するベーグス関数を示す

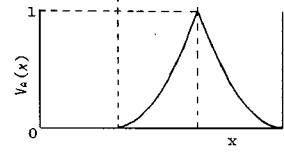
(2) 橋梁の状態の推定

上述の帰属度関数のもつあいまいさを考慮した帰属度関数の演算を提案し、この手法を用いた橋梁診断について述べる。ここで、橋梁の状態を以下のように定義する。すなわち、橋梁の状態とは、「橋梁が、要求される性能を満たす程度」と規定し、状態を表わす集合 C を区間 $[0, 1]$ で定義する。

ここで $c=0$ を、橋梁が、要求される性能を完全に満たすことのできる要素とし、 $c=1$ を全く満たすことのできない要素とする。また、状態 C は、定義上ファジー集合であると考える。

(a)帰属度関数 $\mu_A(x)$ (b)ベーグネス関数 $V_A(x)$ 図-7 帰属度関数とベーグネス
関数

(a)見掛けの帰属度関数



(b)ベーグネス関数

図-8 写像を導入した
診断の流れ

橋梁の検査結果には、客観的なものと主観的なものの2種類が存在する。客観的な検査結果を用いて診断を行う場合にも、検査結果を橋梁の状態を表わす特性値に結び付ける、もしくは特性値より橋梁の状態を推定する際に主観が存在すると考えられる。特に後者は、主観的な検査結果の場合にもいえることであり、それより、図-8に示すような診断の流れが考えられる。図-8において、ファジー関係 R_1 は、橋梁の検査結果 X より橋梁の状態を表わす指標となる特性値 Y への写像を行うものであり、ファジー関係 R_2 は、特性値 Y より橋梁の状態 C への写像を行うものである。このとき R_2 は、特性値の橋梁の状態評価への影響度と、特性値自身のもつ確信度の2つの主観的不確定性から成っていると考える。

(3) あいまいさを考慮した帰属度関数の演算

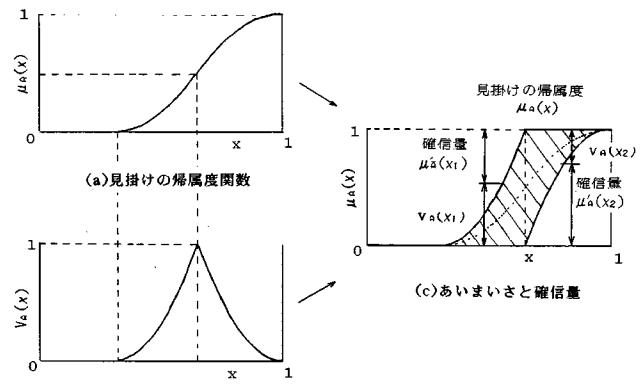
ベーグネス関数 $V_A(x)$ が、帰属度関数 $\mu_A(x)$ におけるあいまいさを表わしていることより、逆に、 $\mu_A(x)$ 中の確信量 $\mu_A(x)$ を求めると、次式のようになる。

$$\begin{cases} \mu'_A(x) = 1.0 - V_A(x), 1.0 \geq \mu_A(x) \geq 0.5 \\ \mu'_A(x) = 1.0 - V_A(x), 0.5 > \mu_A(x) \geq 0.0 \end{cases} \quad (7)$$

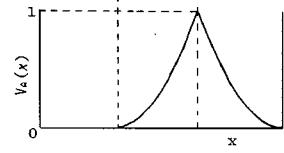
式(7)は、 $1.0 \geq \mu_A(x) \geq 0.5$ では、 $V_A(x)$ は、要素 x がファジー集合 A に属することに対するあいまいさを示し、 $0.5 > \mu_A(x) \geq 0$ においては、 $V_A(x)$ は、 x が A に属さないことに対するあいまいさを示すものであることを考慮している。式(7)を $\mu_A(x)$ と $V_A(x)$ で表わすと次式となる。

$$\begin{cases} \mu'_A(x) = \mu_A(x) - V_A(x)/2, 1.0 \geq \mu_A(x) \geq 0.5 \\ \mu'_A(x) = \mu_A(x) - V_A(x)/2, 0.5 > \mu_A(x) \geq 0.0 \end{cases} \quad (8)$$

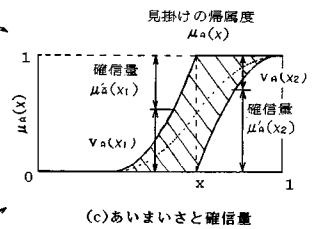
図-9(a)は、与えられた帰属度関数 $\mu_A(x)$ (見掛けの帰属度関数とよぶ)、図-9(b)はそれに対応するベーグネス関数 $V_A(x)$ を、また、図-9(c)には $\mu_A(x)$ と $V_A(x)$ より求めた確信量 $\mu'_A(x)$ と $\mu'_{\bar{A}}(x)$ とあいまいさ $V_A(x)$ を示している。ただし、斜線部分を $V_A(x)$ としている。



(a)見掛けの帰属度関数



(b)ベーグネス関数



(c)あいまいさと確信量

図-9 帰属度関数におけるあいまいさと確信量

以上、各要素 x_1 の帰属度 $\mu_A(x_1)$ が、あいまいさ (ベーグネス関数の値) と確信量の2つより成っていることを示した。このような主観的な不確定性をもつ情報を結合する方法として、Dempster & Shafer理論⁶⁾(以下、DS理論と略記)を導入する。これは、Bayes確率に適さない、主観にかかる不確実性を扱うために、Bayes確率の基本となる加法性を取り除いたものである。DS理論の基本は、下界・上界確率 (Lower & Upper Probability)を構成する基本確率 (Basic Probability)にあり、この基本確率 $m(A_i)$ を結合する方法として Dempsterの結合則 (以下、結合則と略記)がある。本研究では、各基本確率 $m_i(A_{ij})$ に、 $\mu'_{A1}(x_1)$, $\mu'_{\bar{A}1}(x_1)$, および $V_{A1}(x_1)$ を対応させ (図-10参照)、空集合 ϕ となる部分を矛盾量と考えて、正規化を実施しないものとした。したがって、図-10より結合後の確信量 $\mu'_{A1,A2}(x_1)$, $\mu'_{\bar{A}1,\bar{A}2}(x_1)$ は次式となる。

$$\mu'_{A1,A2}(x_1) = \mu'_{A1}(x_1) \cdot \mu'_{A2}(x_1) + \mu'_{A1}(x_1) \cdot V_{A2}(x_1) + \mu'_{A2}(x_1) \cdot V_{A1}(x_1) \dots \dots \dots (9)$$

$$\mu'_{\bar{A}1,\bar{A}2}(x_1) = \mu'_{\bar{A}1}(x_1) \cdot \mu'_{\bar{A}2}(x_1) + \mu'_{\bar{A}1}(x_1) \cdot V_{A2}(x_1) + \mu'_{\bar{A}2}(x_1) \cdot V_{A1}(x_1) \dots \dots \dots (10)$$

また、結合後のあいまい量 $V_{A1,A2}(x_1)$ と矛盾量 $\mu_\phi(x_1)$ は、それぞれ次式で表わされる。

$$V_{A1,A2}(x_1) = V_{A1}(x_1) \cdot V_{A2}(x_1) \dots \dots \dots (11)$$

$\mu_{A2}(x_1)$		
$V_{A2}(x_1)$	○	●
$\mu'_{\bar{A}2}(x_1)$	★	●
$\mu'_{A2}(x_1)$	○	★
$\mu_{A1}(x_1)$	○	●

図-10 帰属度関数の結合概念

したがって、式(8)を用いて、結合後の見掛けの帰属性度 $\mu_{A1,A2}(x_1)$, $\mu_{\overline{A1},\overline{A2}}(x_1)$ は次式で表わすことができる。

$$\begin{cases} \mu_{A1,A2}(x_1) = \mu'_{A1,A2}(x_1) + (V_{A1,A2}(x_1) + \mu\phi(x_1))/2 \\ \mu_{\overline{A1},\overline{A2}}(x_1) = \mu'_{\overline{A1},\overline{A2}}(x_1) + (V_{A1,A2}(x_1) + \mu\phi(x_1))/2 \end{cases} \dots\dots (13)$$

表-4に結合則による演算の特徴を、和集合演算、積集合演算、および $A+B$ 演算と比較し整理する。

(4) 耐用性、供用性の診断

これらを利用した診断は、前節までの手法を用いて求められる橋梁の状態を示す帰属度関数と、橋梁の状態をあらかじめいくつかのパターンに理想化し、決定しておいた帰属度関数との位置、形状の合致度を求めるによって行う。耐用性の診断は、主桁に対しては、耐荷性、耐久性の診断後、図一3(a)に従って行うものとする。床版に対しては、その損傷形式を規定しているので、耐久性の診断は行わず、耐荷性の診断をもって耐用性の診断とする。

耐用性診断は、図-11に示す5つのパターンI～Vとの識別によって行う。図-11においてCL軸が耐荷性からみた橋梁の状態であり、CD軸が、耐久性からみた橋梁の状態とし、CL=1.0、CD=1.0は、それぞれ機能的な意味での限界点を示しているとする。パターンI～Vのランクの定義を表-5に示す。

床版については、図-11とは別にあらかじめ5段階のランクを設定する¹²⁾。また、供用性については、利用性、周辺環境への影響性、それぞれに対し3段階評価を行いうものとする。

以上の診断の流れを示したものが図-12である。

4. 橋梁診断システム

2. で作成した橋梁の諸機能別の階層モデルと、3. で提案したファジー集合論の適用による最終段階での診断を結び付け、橋梁診断システムを開発する。本システムは、会話形式を取り、利用者が質問に答えることにより、図-13 に示す種々の利用が可能なものとする。すなわち、発生する損傷の予測、耐用性・供用性の診断、および損傷原因の推定である。以下橋梁診断システムの概略を述べるとともに、本システムを道路橋 RC 枠および RC 床版に適用した例について述べる。

(1) 橋梁診断システムの概要

図-14は、階層モデルの利用方法を示したものである。①の流れは、橋梁の構造諸元、属地条件等から発生する可能性のある損傷を予測する、あるいは発生箇所の予測の際、損傷の生ずる順序をバスの進む方向で示すも

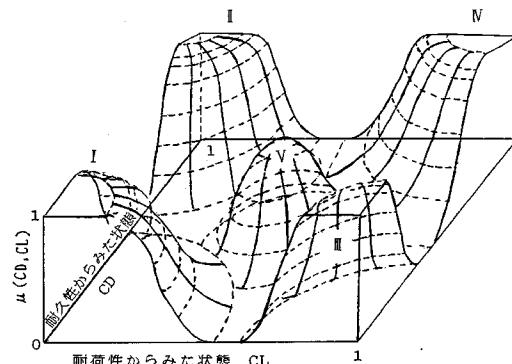


図-11 耐用性診断に用いる比較パターンの帰属度の概念図

表-5 耐用性ランクの定義

ランク	分類		対策
	耐荷性	耐久性	
I	良	良	問題無し
II	良	悪	補修要
III	悪	良	補強要
IV	悪	悪	詳細調査検査(含架替 追跡観察等)
V	中程度	中程度	

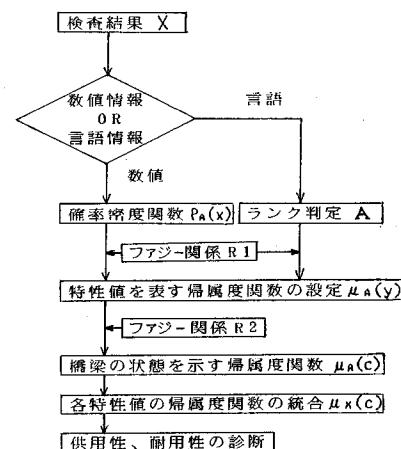


図-12 診断の流れ

表-4 結合則による演算の特徴

	$\mu_{\alpha_1}(x) \geq 0.5, \mu_{\alpha_2}(x) \geq 0.5$ 但し、 $\mu_{\alpha_1}(x) \geq \mu_{\alpha_2}(x)$	$\mu_{\alpha_1}(x) \leq 0.5, \mu_{\alpha_2}(x) \leq 0.5$ 但し、 $\mu_{\alpha_1}(x) \geq \mu_{\alpha_2}(x)$	$\mu_{\alpha_1}(x) \geq 0.5, \mu_{\alpha_2}(x) \leq 0.5$
和集合 $\mu_{\alpha_1 \cup \alpha_2}(x)$	常に、 $\mu_{\alpha_1 \cup \alpha_2}(x) = \mu_{\alpha_1}(x)$ ($\because \mu_{\alpha_1 \cup \alpha_2}(x) = \max_x \{\mu_{\alpha_1}(x), \mu_{\alpha_2}(x)\}$)		
積集合 $\mu_{\alpha_1 \cap \alpha_2}(x)$	常に、 $\mu_{\alpha_1 \cap \alpha_2}(x) = \mu_{\alpha_2}(x)$ ($\because \mu_{\alpha_1 \cap \alpha_2}(x) = \min_x \{\mu_{\alpha_1}(x), \mu_{\alpha_2}(x)\}$)		
A+B演算 $\mu_{\alpha_1 + \alpha_2}(x)$	常に、 $\mu_{\alpha_1 + \alpha_2}(x) \geq \mu_{\alpha_1}(x)$ ($\because \mu_{\alpha_1 + \alpha_2}(x) = \mu_{\alpha_1}(x) + \mu_{\alpha_2}(x) - \mu_{\alpha_1}(x) * \mu_{\alpha_2}(x)$)		
結合則 $\mu_{\alpha_1, \alpha_2}(x)$	$\mu_{\alpha_1, \alpha_2}(x) > \mu_{\alpha_2}(x)$	$\mu_{\alpha_1, \alpha_2}(x) < \mu_{\alpha_1}(x)$	$\mu_{\alpha_1}(x) > \mu_{\alpha_1, \alpha_2}(x) > \mu_{\alpha_2}(x)$

のである。②の流れは、目視点検および載荷試験等より得られる定性的、定量的評価結果より耐用性、供用性を診断するものである。一方、③の流れは、発生している損傷から構造諸元や属地条件を考慮してその原因を推定するものである。図-15は、本システム用に開発したプログラム群の関連を示したものであり、Path 0, 1, 2, 3は、それぞれ階層モデルのパスに関するもので、頂点、連結線の設定あるいはパスの探査を実行する役割を有する。Level 1, 2, 3は、それぞれ図-14中の流れ①, ②, ③に対応するものであり、諸条件の入力に対する質問を設定するプログラムである。また、Graph 1, 3は、階層モデルの状態を視覚化するためのプログラムである。

以上のプログラム群の統括、制御を含むシステムの起動、終了は、Menu プログラムで行い、その基本的流れは図-13に従っている。システムの起動後、表-6に示す利用目的の中から 1つを選択する。ここで、1：「パスの設定」は、階層モデルのパスの設定に用いられ、Path 0 で実行する。2：「パスの照査」は、無条件で全パスを検索するもので、Path 2 で実行され、主にパスの点検に用いる。3：「損傷発生の予測」は、図-13(a)に対応する利用方法であり、図-15中の①の流れに従う。4：「損傷原因の推定」は、図-13(b)に対応し、Level 3 の質問用プログラムに引き継がれる。5：「供用性、耐用性への影響調査」は、点検等の結果により耐用性、供用性へ及ぼす影響の有無を調べるものであり、Level 2 で実行する。6：「供用性、耐用性診断」は、5

表-6 システムの目的別利用法

番号	利用目的
1	パスの設定
2	パスの照査
3	損傷発生の予測
4	損傷原因の推定
5	供用性、耐用性への影響調査
6	供用性、耐用性診断

の結果と定量的、定性的評価結果を利用して診断を実行する際に使用するもので、耐用性診断プログラムへ引き継がれる。

(2) 橋梁診断システムの適用例

a) 道路橋 RC 枠

適用対象とした桜橋¹⁰⁾の概要を表-7に示す。これより明らかのように、橋齢は 50 年を越え一般的に考えられる寿命を過ぎている。また拡幅が実施されているが、拡幅は旧橋部と一体化するように主桁、および横桁が新設されている。周辺の道路条件としては、橋の両側とともにほぼ直線であるが、橋の左側に信号があり、橋上で車両が停止する。周辺は農村部であり、一般道路への架設である。以上が、本システムに与える初期条件となる。

桜橋の主桁耐用性を診断するためには、耐久性と耐荷性の診断を行う必要がある。そこで、まず主桁耐久性の診断を行う。上述の初期条件をもとに発生する損傷を予測するための必要な情報を得るために、本システムはいくつかの質問 (Level 1) を行うが、その質問に対して与えた回答の一部を表-8に示す。この回答を用いて耐久性階層モデルを探査した様子を、一例として下部階層構造のみを抜き出して図-16に示す。図-16 中の番号は、損傷要因の対応番号であり、実線がたどったパスを示し、破線が止まったパスを示しているが、桜橋は RC-T 枠橋であることより、床版関係のパスはすべて止まれとしている。これより、発生している可能性があると予測された損傷は、次のとおりである（上部階層構造は省略している）：

1：主桁のねじれ、不等沈下 (27), 2：支承付近のひびわれ (48), 3：主桁のひびわれ (45), 4：鉄筋の腐食 (46), 5：舗装面の凹凸 (29)

ここで、要因名の後尾の番号は要因番号である。

この予測結果に対し、過去に実施された調査結果¹⁰⁾より、表-9に示すような回答を、耐用性への影響推測のための質問 (Level 2) に対し与えた。この結果、耐久

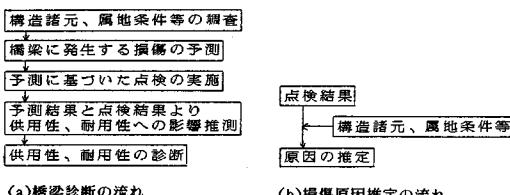


図-13 本診断システムの機能

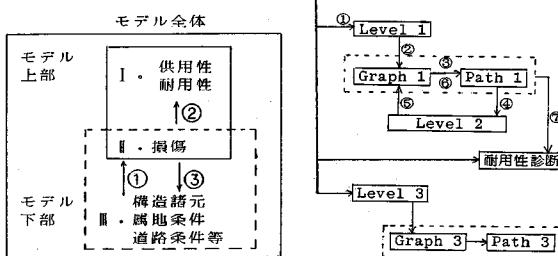


図-14 階層モデルの利用法

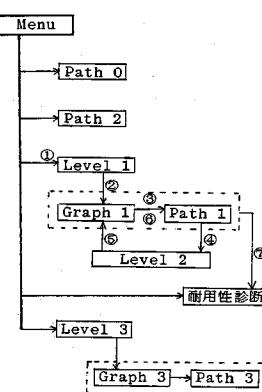


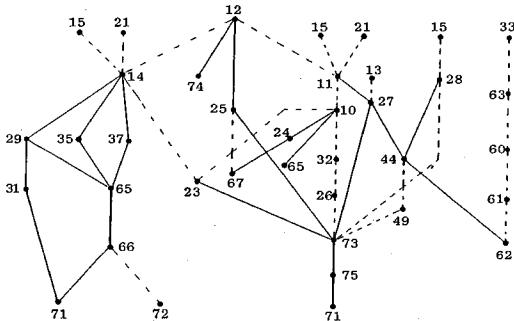
図-15 プログラム群の関連

表-7 桜橋の概要

所在地	兵庫県佐用郡三日月町
架設路線	国道 179 号線
橋長	2 @ 10.9 m = 21.8 m
形式	RC 単純 T 枠斜橋
断面	6.75 m
架設年次	昭和 8 年
適用示方書	大正 15 年版
設計荷重	TL - 8 (2 等構)
拡幅年次	昭和 43 年

表-8 損傷予測用入力（質問への回答）の一部

・構梁の前後に交差点がある
・床版厚（1 cm）
・支承部に対する点検は行われていない
・床版スパン（1.06 m）
・主桁部に部分的補強工事を行ったことがある

図-16 耐久性階層モデル下部階層構造におけるバスの経路
(損傷発生の予測)

性階層モデルの上部階層構造は、図-17のようになり、耐久性に対し、以下に示す損傷により影響が及んでいる可能性があることを出力した：

- 1：コンクリートの疲労（39）、2：引張り鉄筋の腐食（41）、3：スターラップの腐食（42）

これより診断システムは、耐久性診断のために次の3要因の損傷状況を評価したランク、もしくは試験値を入力するように求めた：

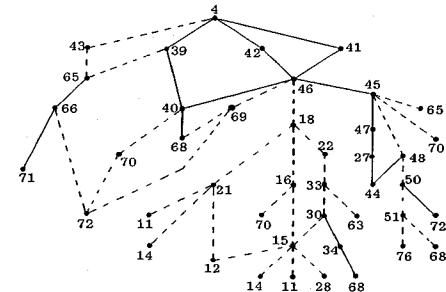
- 1：コンクリートの劣化状況（40）、2：引張り鉄筋の腐食状況（41）、3：スターラップの腐食状況（42）

上記の要因に対して目視点検および現場実験結果の評価をランクで入力することによって診断を行った。この場合の入力値を表-10に示す。主桁コンクリートの劣化に関しては、拡幅部以外では剥離、漏水、および変色がみられることから、劣化はかなり進行していると思われたため、最悪（33；3段階評価の3）とした。また、コンクリートの劣化が、鉄筋の腐食にも関係することより、診断への影響度は大（3）とし、この要因に対する確信度は全般にわたって低い（5）とした。引張り鉄筋の腐食とスターラップの腐食については、錆汁がコンクリート表面に現われているため最悪（55；5段階評価の5）とし、この要因に対する確信度は評価の悪い側で高い（2）とした。表-10の値より、ファジー集合論を用いて橋梁の状態を示す帰属度関数を求めたものが図-18である。図-18(a)（図中の番号は表-10と対応）をベーグネス関数とDempsterの結合則を用いて、結合した結果が図-18(b)である。

続いて、耐荷性の診断を行うが、桜橋の場合、耐荷性のうち、曲げ耐荷力に対し、せん断耐荷力の方が下回っ

表-9 耐久性の状態推測用入力（質問への回答）の一部

・支承部に損傷がある
・桁端部での支圧ひびわれは無い
・桁に同一方向の斜めひびわれがある
・鉄筋に発錆が見られる
・桁に0.2 mm以上のひびわれ幅のひびわれがある

図-17 耐久性階層モデル上部階層構造におけるバスの経路
(影響推測)

ているという判定結果¹⁰⁾がすでにあるため、せん断耐荷力の診断をもって耐荷性の診断とする。せん断耐荷力の診断のために本システムへ入力した情報の一部を表-11に示す。この回答を用いた結果、せん断耐荷力にも影響が出ていることが明らかとなり、その診断のための入力を表-12のように行った。その結果、得られた桜橋の

表-10 桜橋点検結果（耐久性診断時入力）

評価項目	ランク*	影響度	確信度
1. コンクリートの劣化	33	3	5
2. 引張り鉄筋の腐食	55	3	2
3. スターラップの腐食	54	3	2

* 3#:3段階評価 5#:5段階評価

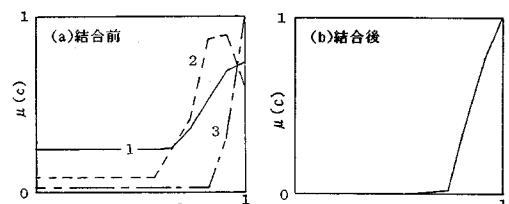


図-18 桜橋の耐久性診断における帰属度関数の形状

表-11 桜橋せん断耐荷力診断用入力情報（一部）

(a)Level 1への回答	(b)Level 2への回答
・橋台、橋脚に異常はない	・支圧ひびわれは見られない
・排水施設に破損はない	・斜めひびわれがある
・支承部の点検は行っていない	・腐食によるひびわれは無いが、
・拡幅工事を行っている	・錆汁の兆候がある
	・ウェブを貫通したせん断ひびわれがある
	・支承部の作動はあまり期待できない

表-12 桜橋点検結果（せん断耐荷力診断時入力）

評価項目	ランク*	影響度	確信度
桁のひびわれ	55	2	3
スターラップの腐食	54	3	2

* 3#:3段階評価 5#:5段階評価

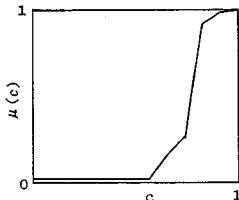


図-19 桜橋のせん断耐荷力診断における結合後の帰属度関数の形状

表-13 垂水橋の概要

所在地 架設路線 橋長 形式 舗装 主桁形式 床版	香川県丸亀市垂水町 県道岡田・善通寺線 8 # @ 24.2 m = 193.6 m 活荷重合成単純桁橋 6.0 m I型断面：3主桁 R C 床版（版厚 18 cm） コンクリート舗装（厚さ 5 cm） 昭和 37 年 TL - 14 (2 等橋) 昭和 31 年版
架設年次 設計荷重 適用示方書	昭和 37 年 TL - 14 (2 等橋) 昭和 31 年版

せん断耐荷力の状態を示す帰属度関数を図-19に示す。

図-18と図-19を合成することによって、図-11に示す5つの帰属度関数との合致度を求めたところ、桜橋の主桁の耐用性は、ランクIV；「耐荷性、耐久性ともに劣悪で、詳細調査必要」というものであった。

b) 道路橋 RC 床版

診断対象とした垂水橋¹¹⁾の概要を表-13に示す。垂水橋は、昭和37年に2等橋として架設されている。周辺は農村部であり、架設路線も県道であるが、碎石工場が近隣に建設されたことにより、載荷試験の行われた当時は、1等橋に匹敵する交通量、交通荷重にさらされていたので、一例として床版の部分的（抜け落ち）損傷¹²⁾の診断を行う。診断のために本システムへ入力した初期条件は、桜橋と同様とした。さらに、この初期条件に基づいて本システムが行った質問に対して与えた回答の一部を表-14に示す。図-20が、この情報をもとにたどったパスである。ここで、図-20(a)が、床版部分的損傷用階層モデルの上部階層構造であり、図-20(b)が下部階層構造である。

表-15に本システムの求めに応じて入力した項目に対する評価を示す。ここで、角落、すりへりに対するランクがUK(不明)となっているのは、写真判定であったために細かい点が不明なためである。また、 β は判定ランクが実際の状態を忠実に表現するように、ランクに与える帰属度関数を制御するための変数である。制御方法は、帰属度関数のピークの位置をずらすことによって行っている。ここでは、漏水のランクを3段階評価の2としているが、これよりも若干、実際の状態が悪いように思われたので、ランク2のピークの位置をランク3の方向へずらしている。これより、各評価項目による帰属度関数は、図-21(a)のようになり（図中の番号は表

表-14 垂水橋床版部分的損傷診断用入力情報（一部）

(a) Level 1 への回答

- ・舗装にかなりの損傷がある
- ・道路線形に問題はない
- ・床版厚は 18 cm である
- ・支承部の点検は行っていない
- ・車両は床版スパン中央を走行する
- ・主桁に対する補強工事はない

(b) Level 2 への回答

- ・支承部に損傷がある
- ・路肩の凹凸がある
- ・ひびわれは格子状である
- ・床版に漏水、遊離石灰がある
- ・角落ち、すりへりがある
- ・床版の設計荷重に比べ、実働荷重の方が大きい

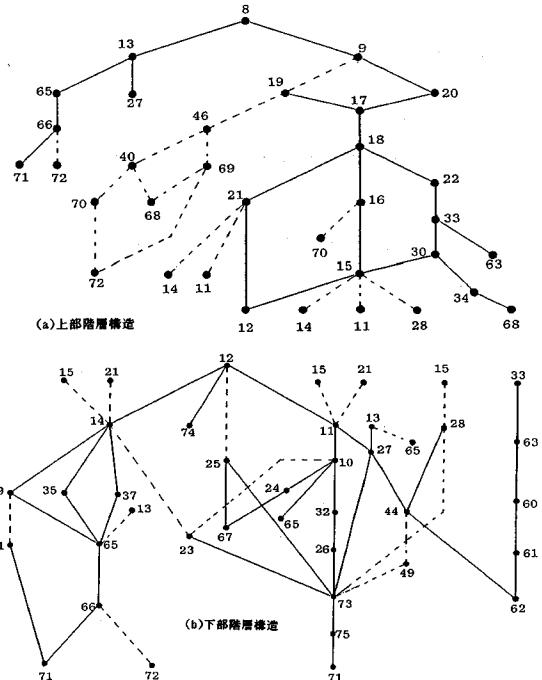


図-20 床版部分的損傷用階層モデルのパスの経路

表-15 垂水橋床版点検結果

評価項目	ランク*	β	影響度	確信度
1. 角落ち・すりへり	UK	0	3	5
2. ひびわれ状況	53	0	3	2
3. 漏水	32	0.1	2	2
4. 遊離石灰	32	0	2	3
5. 主桁沿いのひびわれ	54	-0.1	3	3

* 3 # : 3段階評価 5 # : 5段階評価 UK : 未判

—15と対応）、これらの結合後の帰属度関数は図-21(b)のように得られる。この帰属度関数により、床版に対してあらかじめ設定した5ランクの帰属度関数¹²⁾との合致度で行った最終的な診断結果は、Medium(5段階評価の3(中程度))が約40%、Low(5段階評価の4(悪い))が約55%となり、損傷が、進行しつつあることを示した。この結果を、過去に実施された調査結果¹¹⁾と比較すると、ほぼ一致する評価が得られた。

次に、損傷状況から、その原因の推定を行った。そのための入力を表-16に、また、バスの状態を図-22に示す。図-22において一点鎖線で示されたバスは、床版損傷に関係のないものであり、今回はバスの探査を

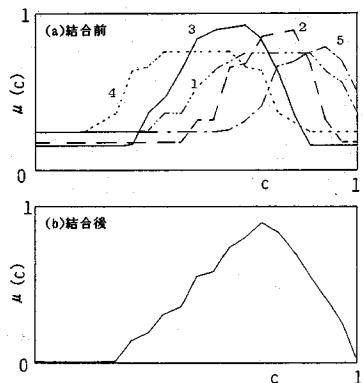


図-21 垂水橋の床版部分的損傷診断における帰属度関数の形状

表-16 損傷原因推定用入力情報

- ・ひびわれは格子状である
- ・漏水、逆離石灰がある
- ・舗装にひびわれがある
- ・床版厚は18 cmである
- ・道路線形は良好である
- ・車両の通行位置は悪い

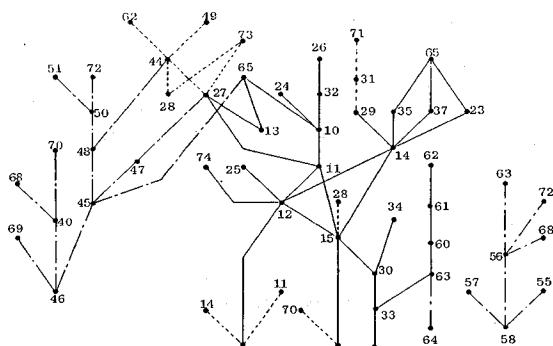


図-22 損傷原因推定用階層モデルのバスの経路

行っていない。損傷原因として出力されたものを以下に列記する：

1：輪荷重の増大と繰り返し頻度 (65), 2：主桁剛性の不足 (26), 3：配力筋量の不足 (24), 4：床版厚の不足 (25), 5：舗装のひびわれ (34), 6：施工不良 (74)

これらはいずれも垂水橋の実状（表-13参照）を考慮すれば妥当な推定結果と考えられる。

5. 結 論

本研究は、今後ますます重要性が増すと考えられる橋梁診断のシステム化を検討し、道路橋 RC 枠および RC 床版でその有効性を検証したものである。得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) 損傷要因間の相関関係を明らかにするために、要因間の関連性を、ファジー集合論的に数値化し、橋梁

全般を網羅した階層構造モデルを作成した。この階層構造モデルを利用して、既存橋梁の耐荷性、耐久性といった最上層要因別に発生する損傷の予測、あるいは階層構造モデルの従属関係を逆転させることにより、損傷原因の推定を可能とした。

(2) ファジー集合論⁷⁾を橋梁診断に適用するにあたり、ペーグネス関数⁵⁾を定義することにより、帰属度関数のもつあいまいさを考慮できるようにした。さらに、帰属度関数間の演算に、Dempster & Shafer 理論⁶⁾を適用することにより、合理的な演算結果が得られるようにした。

(3) 既存橋梁に発生する損傷の予測、耐用性、供用性への影響推測と診断、および損傷原因の推定が可能な会話形式を採用した橋梁診断システムを開発し、過去に調査が実施されている実橋 RC 枠および RC 床版へ適用することによってその有効性を検証した結果、ほぼ妥当な評価結果が得られることを確認した。しかし、これらは限られたデータに基づく検証結果を示したにすぎず、今後多くの実橋データでの検証が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 土木学会関西支部：既設の橋梁構造物及びその構成部材の健全度、耐久性判定に関するシンポジウム論文集, 1983. 2.
- 2) 構造材料の信頼性評価技術に関するフィージビリティスタディ特別委員会（日本鋼構造協会）：公共構造物等における材料の使用環境、損傷等に関する調査、昭和 57 年科学技術振興調整費調査報告書, 1983. 3.
- 3) 田崎栄一郎：あいまい理論による社会システムの構造化、数理科学, No. 191, pp. 54~66, 1975. 5.
- 4) Tazaki, E. and Amagasa, M. : Structural Modeling in a Class of Systems Using Fuzzy Sets Theory, Information Journal for Fuzzy Sets and Systems, Vol. 2, No. 1, pp. 1~7, 1979. 1.
- 5) 成田正弘・神近博三：人工知能、ロボットなどへ広がるファジーシステムの応用分野、日経コンピュータ, No. 104, pp. 48~65, 1985. 6.
- 6) 石塚 満：Dempster & Shafer の確率理論、電子通信学会誌, Vol. 66, No. 9, pp. 900~903, 1983. 9.
- 7) 浅居喜与治、ほか：あいまいシステム理論入門、オーム社, 1978.
- 8) 高架構造研究会編：道路橋の点検補修、理工図書, 1987. 1.
- 9) 土木学会関西支部：既存橋梁の耐荷力と耐久性, 1985. 7.
- 10) 西村 昭、ほか：橋梁診断ケーススタディーRC 枠橋の場合一、橋梁と基礎, Vol. 19, No. 4, pp. 18~24, 1985. 4.
- 11) 西村 昭、ほか：香川県垂水橋の耐用性診断、建設工学研究所報告, 第 25 号, pp. 61~99, 1983.
- 12) 西村 昭、ほか：道路橋 RC 床版の診断と評価に関する基礎的研究、材料, 第 34 卷, 第 376 号, 1985. 1.

(1986. 6. 7・受付)