道路橋 RC 床版の診断と評価に関する基礎的研究[†]

西 村 昭* 藤 井 学* 宮 本 文 穂**

Damage Assessment of Reinforced Concrete Slabs for Highway Bridges

by

Akira NISHIMURA*, Manabu FUJII* and Ayaho MIYAMOTO**

The necessity of systematization has been widely discussed for maintenance, diagnosis, repair and rehabilitation of existing bridges. This study was intended to give objective and quantitative basis for the rating and the evaluation of serviceability of cracked reinforced concrete slabs. The factors used to judge the serviceability of slabs were selected and rated quantitatively, and the applicability of the reciprocal averaging method and the fuzzy analysis were tested as the synthetic rating method. The results obtained are summarized as follows:

(1) The current rating method based on "crack density" was not able to evaluate the extent of crack penetration into the slab, and the crack density did not correspond to the load carrying capacity of the slab when it exceeded a certain degree.

(2) The reciprocal averaging method as one of the synthetic rating methods was found to be effectively used by taking more than 3 evaluating factors. It was possible to evaluate quantitatively the relative serviceability by selecting the upper and the lower limits.

(3) The fuzzy analysis may possibly be used to do rating accurately without trying extra measurements and to estimate the type of damage in reinforced concrete slabs.

キー・ワード: RC 床版, 耐用性, 構造診断, ファジー集合, ファジー積分

1 緒 言

最近, 既存橋梁の損傷の進行が大きく社会問題化しつつあることは周知の通りである。その際, 橋梁の状態を正確に診断し, その状態に適応した補修, 補強を行うことが必要となる。本研究では, 橋梁損傷部の中で比較的調査研究例の多い RC 床版に着目した耐用性診断および評価法を検討する。従来より著者らは, 損傷度と対応した判定因子の確立, 判定基準の作成および総合的耐用性判定法の開発を行ってきたが¹⁾²⁾, これらの判定因子のいくつかは確定的因子として信頼性の高いものであるが, 他のは損傷度と何らかの相関は認められるもののあいまいなものとなっている。そこで本論文では, RC 床版の耐用性診断に主としてファジー集合論の適用を試み, 技術者の経験に基づくファジー集合で表された主観的評価を, ファジー集合論を用いて総合化し, 余寿命と対応させるとともに, RC 床版の多様な破壊形式に対応する因子の分類, 寄与をあいまい量として扱い, ファジー集合論を適用することにより損傷形式を考慮した診断を行い, 補修, 補強を必要とするか否かの評価のみならず, 補修, 補強方法の選択の指針としようとするものである。

2 判定因子の定量化, 分類および実橋デー

タの整理¹⁾

人工ひびわれを導入した室内モデル床版および実橋切出し床版に関する実験で, 判定因子を抽出, 定量化し, これら判定因子の実橋床版への適用性の検討を行い¹⁾, 信頼性の高い因子については5段階評価を, 信頼はできても詳細判定を行うには不十分な因子については3段階評価を行った。これらの判定基準の位置付けをもとに各因子別判定基準を作成した¹⁾。各因子別の損傷度判定結果を現在までに調査した実橋床版および室内実験床版について Table I にまとめて示す。

以下, 各判定因子について概略説明し, 各因子の損傷に対する正確さおよび実橋 RC 床版で生起する破壊形式, すなわち床版の曲げ剛性の低下による主に使用性の低下からの破壊(全体的損傷), および貫通ひびわれ面でのせん断伝達能低下による抜け落ち破壊(部分的損傷)の2形式の損傷との対応性について考察する。

(a) ひびわれ密度(5段階評価) 最も一般的に用いられる簡便な判定因子であり, 過去の実績から考えてかなりの信頼性を有する。ひびわれ密度とたわみ比(剛性比)との関係は, ほぼ比例することが明らかにされており³⁾, 使用性を左右する全体的損傷と関連ある因子と考えられる。しかし, ひびわれ密度がある限

[†] 原稿受理 昭和59年4月13日 Received Apr. 13, 1984

* 正 会 員 神戸大学工学部 神戸市灘区六甲台町, Faculty of Engineering, Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe

** 正 会 員 神戸大学大学院 神戸市灘区六甲台町, Graduate School, Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe

Table I. Results of judgement for each factor.

Slabs \ Factors	Crack density X_1	Deflection index X_2	Behavior of crack $ \delta_V /\delta_H$ X_3	Characteristic behavior due to push up loading X_4	Max. acc. response $\alpha_{\max}/G$ X_5	Phase difference at natural freq. X_6	Increasing rate of damping const. X_7	Deflection curve or state of cracking X_8
Model slab-1	5(VH)	5(VH)	5(VH)	3(VH)	3(VH)	3(VH)	3(VH)	3(VH)
Model slab-2	3(M)	3(M)	1(VL)	2(M)	2(M)	2(M)	2(M)	2(M)
Model slab-3	1(VL)	2(L)	1(VL)	1(VL)	1(VL)	1(VL)	1(VL)	1(VL)
Model slab-4 (as-prepared)	4(H)	5(VH)	3(M)	—	3(H)	3(H)	3(H)	3(H)
Model slab-4' (just before repair)	4(H)	3(M)	3(M)	—	2(M)	2(M)	1(L)	2(M)
Model slab-5 (as-prepared)	3(M)	5(VH)	2(L)	—	2(M)	2(M)	2(M)	3(H)
Model slab-5' (just before repair)	3(M)	3(M)	2(L)	—	1(L)	1(L)	1(L)	2(M)
Bridge Y	2(L)	3(M)	2(L)	2(M)	2(M)	2(M)	—	1(L)
Bridge I	3(M)	2(L)	4(H)	2(M)	2(M)	2(M)	2(M)	2(M)
Bridge T	3(M)	3(M)	2(L)	2(M)	2(M)	2(M)	2(M)	2(M)
Bridge TA-I	3(M)	1(VL)	3(M)	—	2(M)	1(VL)	—	—
Bridge TA-II	4(H)	3(M)	4(H)	—	2(M)	2(M)	—	—
Bridge TA-III	3(M)	3(M)	3(M)	—	2(M)	2(M)	—	—
Bridge TA-IV	3(M)	3(M)	3(M)	—	3(H)	2(M)	—	—

Where, VH : very high, H : high, M : medium, L : low, VL : very low

界値以上になると、ひびわれ密度は増大せずに損傷は断面内に進行して行き、ひびわれ密度と剛性の間には相関がなくなることが考えられる。すなわち、損傷程度が著しい側で誤差が大きくなると考えられる。

(b) たわみ指標および1次固有振動数(5段階評価) RC床版のひびわれ発生前後の挙動、および床版全域に亀甲状のひびわれが発生したほぼ終局状態での挙動は、それぞれ等方性版から移行した異方性版の挙動および膜的作用の支配領域での挙動と対応すると考えられる。これらを床版の曲げ剛性の低下として統一的に表すために、静的荷重下での版中央を通る主鉄筋と配力鉄筋の両方向の、たわみ面積を乗じた量を考え、これをたわみ指標(DI)と定義し、版剛度 D 、版の1次固有振動数 f_0 との関係を求めると、基準となる健全床版(あるいは理論値)の1次固有振動数、版剛度、たわみ指標をそれぞれ f_{00} 、 D_0 、 DI_0 、損傷床版のそれらを f_{0i} 、 D_i 、 DI_i として次式が成立する。

$$DI_0/DI_i = (D_i/D_0)^2 = (f_{0i}/f_{00})^4 \quad (1)$$

これらの関係は、静的、動的試験に基づく全体的な版剛性低下の相対的評価を精度良く与えるものとなる。

(c) ひびわれ挙動(5段階評価) ひびわれの断面内進行に伴う曲げ剛性の低下は、ひびわれ幅の拡大 δ_H の増大となって現れる。他方、ひびわれ面でのせん断伝達能の低下は鉛直せん断変形量 δ_V の増大となって現れると考えられる。これらはひびわれの断面貫通の有無、鉄筋量、骨材のかみ合い程度によって異なるが、これらの比、 $|\delta_V|/\delta_H$ の値はせん断伝達能の優劣、すなわちRC床版で一般にみられるコンクリー

ト塊の抜け落ちを外的に判定する因子となりうると思われる。この因子による判定精度は、健全時と抜け落ち前の両極端で高くなることが考えられる。

(d) 応答加速度分布(3段階評価) ひびわれが発達し、ブロック化した床版では、各測点における最大応答加速度の入力加速度に対する比($\alpha_{\max}/G$)の分布形は、荷重落下位置近傍に集中し、その絶対値は健全床版と比較して大きくなる。これはひびわれ面での衝撃力伝達能あるいは床版のブロック化の進行程度を概略評価するうえで有効であると考えられる。が、分布形による判定は主観的域を出ず、信頼性は高くはない。

(e) 位相差(3段階評価) 従来からの実験により、床版のブロック化に伴い、位相差が増大することが認められており、位相差の増大という傾向により、主観的にひびわれの分布状況あるいは進行程度を判定することが可能であり、全体的および部分的損傷の両方を示す因子と考えられる。

(f) 減衰定数増加率(3段階評価) 床版の減衰定数は、系から散逸するエネルギーに関係し、全体的な劣化に伴って増大し、減衰定数増加率と剛性(DI 比)低下との関係はほぼ直線関係にあることが実験的に認められている。この場合、損傷の著しい方が散逸エネルギーに含まれる誤差が小さくなり、判定精度が上がる事が考えられる。

(g) 逆曲げ特性(3段階評価) 自重および輪荷重と逆向きの荷重を床版下面から加え、得られる荷重-変位曲線の形状から床版のひびわれ進行程度および版全体の剛性低下を判定するものである。この因子

Table II. Kinds and reliability of factors for judgement.

Factors	Test method	Related property	Feature of judgement
X_1	Observation	Crack density	Low reliability for lower grade
X_2	Loading	Deflection index	High reliability for all grades
X_3	Loading	Behavior of crack	Moderate rel.; High rel. for both extreme grades
X_4	Loading	Characteristic behavior due to pushup loading	Moderate rel.; High rel. for lower grade
X_5	Loading	Max. acc. response	Moderate reliability for all grades
X_6	Loading	Phase difference	Low reliability for all grades
X_7	Loading	Increasing rate of damping const.	High reliability for lower grade
X_8	Observation	State of cracking	High reliability for both extreme grades

Table III. Category of damage and the corresponding factors effective to judge.

Category of damage \ Factors	Crack density X_1	Deflection index X_2	Behavior of crack X_3	Characteristic behavior due to push up loading X_4	Max. acc. response X_5	Phase difference X_6	Increasing rate of damping const. X_7	Deflection curve X_8
Damage caused by dominant bending effect	○	○	—	○	—	○	○	○
Damage caused by dominant shear effect	—	—	○	—	○	○	—	○

は床版が膜的挙動を呈するような状態に達した場合に有効になると考えられる。

(h) たわみ特性あるいはひびわれ状況 (3段階評価) 目視試験, 静的試験によりひびわれ状況あるいは床版たわみ分布を測定し, たわみ理論値との比較あるいはひびわれ部での角落ち, 漏水等により判定するものであり, 全体的および部分的剛性低下を把握するものである。

以上の考察より, 各判定因子と損傷に対する正確さおよび損傷形式との対応を Table II, III のように仮定する。RC 床版の耐用性診断にファジー集合論を適用するため前述の5段階評価を, 5=very high(VH), 4=high(H), 3=medium(M), 2=low(L), 1=very low(VL) のように言語変数で表現し, RC床版のグレード b を10段階の客観的評価値1, 2...10で表したものの間に次のようなファジー集合を導入する。

$$\left. \begin{aligned}
 m_{VL}(b) &= 1|1 + 0.5|2 + 0|3 \\
 m_L(b) &= 0|1 + 0.5|2 + 1|3 + 0.7|4 \\
 &\quad + 0.3|5 + 0|6 \\
 m_M(b) &= 0|3 + 0.3|4 + 0.7|5 + 1|6 \\
 &\quad + 0.5|7 + 0|8 \\
 m_H(b) &= 0|6 + 0.5|7 + 1|8 + 0.5|9 + 0|10 \\
 m_{VH}(b) &= 0|8 + 0.5|9 + 1|10
 \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで, 1は完全に損傷状態にある場合に, また, 10は全く損傷がない場合に対応するものとする。式(2)の意味は, 例えば第4式の場合, 健全度“H”は, それへの帰属度がそれぞれ0, 0.5, 1, 0.5, 0のグレード6, 7, 8, 9, 10の集合のことで, より現実的

な表現としては, 複数の技術者に診断を求めてその結果を集計すると, グレード7と9の場合にそれを健全度“H”と判断する人は50%であるが, グレード8の場合は全員が健全度“H”と判定し, グレード6と10の場合は, 健全度“H”と判定する人は皆無である場合に当たる。Table I には, 上記のように対応させた言語変数を3段階評価の場合も含めて併記した。

3 診断, 評価法の検討および考察

3・1 総合評価 (相対比較)

(a) **Reciprocal Averaging Method (RA 法)**
 による判定 RA 法は, 主成分分析を変形した手法であり, 行と列の相互関係を総合評価に組込もうとするものである。すなわち, 個々の因子の評価にはある程度の不確実性が含まれるため, 全体的なバランスを考えた総合評価が必要となる。ここではこの手法をさらに修正して, Table I の各床版の因子別判定結果をもとに5段階, 3段階の重みづけを行った判定マトリックスを作成し, これより損傷度が既知とみなせるモデル床版-1 (健全) を上限値 (スコア 100), モデル床版-3 を下限値 (スコア 0) として, 各判定対象床版の行ベクトルにより $3 \times n$ 行列を作成した。これを RA 法により計算した結果として得られる判定床版のスコアは, モデル床版-1, 3に対する相対位置を表すものと考え, その床版の評価値とした。各判定床版のスコアを因子数の変化とともに示すと Fig. 1 のようになり, 因子数が3個以上になればスコアの変動は小さい。これより, 一般に行われている“ひびわれ密度”のみによる判定の信頼性が低いことがわかる。最

Fig. 1. Variation of score with number of factors.

Table IV. Ranking based on RA method.

Ranking	Score	Slabs
1	0	Model slab-3
2	23.78	Model slab-5'
2	23.78	Model slab-2
4	30.99	Bridge Y
5	32.13	Bridge TA-I
6	48.47	Bridge T
6	48.47	Bridge TA-III
8	58.58	Model slab-4'
8	58.58	Model slab-5
8	58.58	Bridge I
8	58.58	Bridge TA-IV
12	68.71	Bridge TA-II
13	90.67	Model slab-4
14	100	Model slab-1

最終的な計算結果である5個の因子を考慮した場合の各床版の損傷度を損傷の大きい順（スコアの小さい順）に Table IV に示す。これより、程度の異なる人工ひびわれモデル床版-4, 5 の作成直後と静的繰返し荷重を載荷した補修前の位置関係が明確になっていることがわかる。

(b) ファジー集合論による判定 実橋測定結果に基づく診断に際しては、測定条件等の種々の制約によりいかに実験を重ねようとも測定段階および評価段階で人間が介在する限り、耐用性診断における主観性は解消されない。このことから考えて、主観性を積極的に受入れて、耐用性診断における柔軟な判定システムを確立すべきであるとする。このための一手法としてファジー集合論を適用して RC 床版の評価を行うことを試みる。

前節で定義したように、言語変数と健全度のグレードは帰属度関数により特性付けられるが、各因子に対する言語変数の表す意味が異なる可能性がある (Table

II 参照)。例えば、健全度 very low (VL) と評価された場合でも、判定因子の性質によっては測定結果がそのまま真の状態を示すと考えられるものもあれば疑わしいものもある。ここでは Table II に基づいて各因子に対する判定の確からしさを表す指標を導入し、これを確度と定義する。確度は各因子について専門的な知識に基づいて [0, 1] の範囲で経験的、主観的に決められる。Table II の確からしさに基づいて決定した確度を Table V に示す。各因子に対する健全度ファジー集合の帰属度は次式により修正される。

$$m_p(b) = p \times m(b) \quad (3)$$

ここで、 p は確度、 $m(b)$ は元の帰属度である。

Table V. Reliability of assessment to the factors to diagnose RC slabs.

Factors	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
Assessment of soundness								
Very high (VH)	1.0	0.8	0.8	0.6	0.6	0.3	0.5	1.0
High (H)	0.6	0.8	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3
Medium (M)	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3
Low (L)	0.4	0.8	0.6	0.6	0.5	0.3	0.6	0.3
Very low (VL)	0.4	0.8	0.8	0.8	0.6	0.3	0.8	0.8

つぎに、構造健全度評価の目的の主たるものが余寿命の大小に応じて補修、補強策を立てるための資料を得ることにあることより、各因子の評価を総合化する方法の一つとして健全度 b と余寿命 t との間にファジー関係を定義することにより RC 床版の余寿命を考慮した総合評価を行う。

構造物の設計寿命を T_d 年としたとき、 b と t の関係は両対数グラフ上で $b=1, 10$ のときそれぞれ $t=1, T_d$ 年である点を結んだ直線で表されると仮定する。さらに、これらのあいまいさを表現するために対数正規分布型の核によってファジー化する。対数正規分布の確率密度関数は次式で与えられる。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \varphi \cdot t} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \lambda}{\varphi} \right)^2 \right] \quad (4)$$

ここで、 $\lambda = E(\ln t)$ 、 $\varphi = \sqrt{\text{Var}(\ln t)}$ である。

上式を帰属度関数として用いるためには $\ln t = \lambda$ のとき $f(t) = 1$ である必要がある。そのため、次のように帰属度関数 $m(t)$ を定義する。

$$m(t) = \frac{f(t)}{f(e^\lambda)} = \frac{1}{t} \exp \left[\lambda - \frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \lambda}{\varphi} \right)^2 \right] \quad (5)$$

以上より、健全度 b と余寿命 t のファジー関係は次式で与えられる。

$$m_R(b, t) = \frac{1}{t} \exp \left[\lambda_b - \frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \lambda_b}{\varphi} \right)^2 \right] \quad (6)$$

ここで、 $\lambda_b = \ln(b^{\log T_d})$ である。

ここでは一例として、上式において $\varphi = 0.2$ 、 $T_d =$

50年とした場合を取上げ, そのファジー関係を Fig. 2, に示す.

Fig. 2. Fuzzy relation between grade of soundness, b , and remaining lives of RC slabs.

つぎに確度を考慮した健全度ファジー集合 B と余寿命ファジー集合 T をファジー関係 R を用いて次式のようにファジー合成することにより関連付ける.

$$T = R \circ B \quad (7)$$

このとき T の帰属度関数は次式で与えられる.

$$m_T(t) = \max_b \min\{m_B(b), m_R(b, t)\} \quad (8)$$

Fig. 3. Fuzzy sets of remaining lives of cracked RC slabs.

以上より, 各因子ごとの余寿命に対するファジー集合が得られる. その結果の一例を Fig. 3 に示す.

各因子ごとに余寿命 T_i に対する評価を総合化し全体としての相対的余寿命の推定を行う. ファジー集合で与えられた評価を総合化する方法として, 和集合と積集合があるが, ここでは全体的評価に注目するため,

次式で示す和集合を用いる.

$$T_T = UT_i, \quad m_{T_T}(t) = \max_i[m_{T_i}(t)] \quad (9)$$

上式で与えられる余寿命のファジー集合の分布形より各床版の耐用性を比較することが可能となるが, この方法だけでは相対的評価が容易でない. ここではファジー積分^{5),8)}を適用することにより, あいまいな対象を主観的に計量する. ファジー積分は, 確率測度の拡張であるファジー測度 g_λ を用いて実行され, ファジー分布関数 $H_{(r)}$ と g_λ の関係は次式によって定義される.

$$H_{(r)} = g_{r1} + H_{(r-1)} + \lambda \cdot g_{r1} \cdot H_{(r-1)}, \quad H_{(r1)} = g_{r1}$$

$$\text{ただし } 0 \leq H_{(r1)} \leq \dots \leq H_{(rn)} = 1 \quad (10)$$

また, 区間 $[0, 1]$ の値域をもつ関数を $h_{(r)}$ とすると, ファジー積分は次式のように定義される.

$$f(h_{(r)}) \circ g(\cdot) = \bigvee_{i=1}^n [h_{ri} \wedge H_{(ri)}] \quad (11)$$

上記のファジー積分を実行するにあたり, 余寿命90年までで等間隔に16点をサンプリングして各要素 u_i における帰属度 $m_{T_T}(u_i)$ をファジー測度 g_{ui} とし, h をRC床版の健全さの度合いを表す帰属度関数 $h_{(ui)}$ と考える.

これらを用いてファジー積分を実行した結果の一例を Fig. 4 に示す. また, 各RC床版の評価値と基準評価値とを Table VI にまとめて示す. これより各床版の評価値と基準値を比較することにより概略の健全度を評価できる.

ファジー集合論を用いた判定法の妥当性を検討するため, RA 法による結果(8因子すべてを考慮した結果)を Table VI に併記する. 表中()内は, 最高評価を100, 最低評価を0となるように計算し直した

Fig. 4. Estimation with fuzzy integral.

Table VI. Comparison of the estimation by fuzzy integral with the reference value.

Ranking	Assessment with RA method		Assessment with fuzzy sets		Standard value	
1	Model slab-1	100	Model slab-1	0.80 (100)	Standard A	0.80
2	Model slab-4	93.18	Model slab-4	0.73 (83)	Standard B	0.73
3	Model slab-5	64.78	Bridge I	0.67 (68)	—	—
4	Bridge I	56.68	Model slab-5	0.60 (50)	Standard C	0.60
5	Bridge T	48.71	Bridge T	0.60 (50)	—	—
6	Model slab-4'	48.71	Model slab-4'	0.55 (38)	—	—
7	Bridge Y	34.49	Bridge Y	0.53 (33)	—	—
8	Model slab-2	28.40	Model slab-5'	0.53 (33)	Standard D	0.46
9	Model slab-5'	22.90	Model slab-2	0.46 (15)	—	—
10	Model slab-3	0	Model slab-3	0.40 (0)	—	—
					Standard E	0.22

Table VII. Weight for each factor.

Category of damage	Factors*	X_1	X_2	X_3	X_5	X_6
Damage caused by dominant bending effect		0.24	0.66	0	0.05	0.05
Damage caused by dominant shear effect		0.1	0	0.45	0.21	0.24

* See Table I

もので RA 法と比較しやすいようにしたものである。Table VI より、両者の判定結果はほぼ一致しており、経験豊富な技術者の主観的評価を生かせる等のファジー集合論の利点が明らかになったと言える。

3・2 損傷形式を考慮した評価

実橋床版で観察される主要な損傷形式は、曲げ剛性低下の結果、使用限界として現れる全体的な損傷およびひびわれ面でのせん断伝達能の低下として現れる部分的な損傷の2形式に大別される。ここでは損傷形式を考慮した判定法として Table III に基づいて各破壊形式に寄与する各因子の分類およびその程度をあいまい量として取扱い、ファジー集合論の適用を試みた。

まず、Table III で得られた損傷形式に対応した各判定因子に対する重みの決定を Fig. 5 に示すフローに従って行う。人工ひびわれを導入したモデル床版の全体的、部分的損傷度 (W_T , W_L) がそれぞれ既知であるとする。つぎにモデル床版の各判定因子の損傷度 (d_T , d_L) を重みを考慮したファジー積分により計算する。これより既知の損傷度 (W) とファジー積分による損傷度 (d) との誤差 (J) が最小となるように各判定因子に対する重み (α_{iT} , α_{iL}) を繰返し計算により決定する。誤差 (J) は次式で定義する。

$$J_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (W_{jk} - d_{jk})^2 \quad (12)$$

ここで、 k は損傷形式、 j は各モデル床版、 n はモデル床版数である。ここでは全床版についてのデータがそろっている判定因子 $X_1 \sim X_6$ について決定した重みの結果を Table VII に示す。

Fig. 5. Flow of determining of weights.

つぎに和集合による判定のアルゴリズムを示す。

①実橋測定により得られた各判定因子の損傷ランクを帰属度関数で表現する。

②Table VII の重みを各ファジー集合 (A_i) に乗じる。

$$B_i = \alpha_i \times A_i \quad (13)$$

③各判定因子に対するファジー集合 (B_i) の和集合 (B) を求める。

④和集合 (B) を言語変数に変換するために、各言語変数を代表するファジー集合 (C_i) と B との共通度 (D_i) を次式で求める。

$$D_i = \sum_{j=1}^n \{\min(\mu_{B_j}, \mu_{C_{ij}})\}^2 \quad (14)$$

⑤ $D = \max(D_i)$ を与える i を求め、これを損傷状態として言語変数で表現する。

以上のアルゴリズムに従い、改めて損傷ランクおよび損傷状態に対する帰属度関数を Fig. 6, 7 のように

仮定し、計算を行った結果を次に示す。Fig. 8 は各損傷形式に対応した帰属度関数 B の分布を各判定対象床版に対して示したものである。これより重みをすべて等しくした場合の帰属度関数の分布は TA 橋床版-II あるいは Y-橋の場合に現れているように不明りょうなものとなっているが、損傷形式を考慮することにより、これらの分布がより明りょうに集中したものになっていることがわかる。つぎにこれらの分布を言語変数に変換したものをモデル床版に対するものを含めて Table VIII に示す。これより、モデル床版-2, 4, 5 は断面を貫通した人工ひびわれを導入したことによる部分的損傷（コンクリートブロックの抜け落ち傾向）が明らかとなっている。また、他の実橋床版でもこれに基づきどの点に重点を置いた補修、補強を検討すべきかの参考となるものと考ええる。

4 結 論

本研究は橋梁 RC 床版の耐用性診断に、主にファジー集合論の適用を試み、種々の検討を行ったものである。これらの手法は室内外の実験データさえ蓄積されれば橋梁全体系の診断、評価も可能なものであり、今

Fig. 6. Membership function for rank of damage.

Fig. 7. Membership function for damage state.

Fig. 8. Membership function on each type of damage.

Table VIII. Results of damage assessment.

Slabs	Damage caused by dominant bending effect	Damage caused by dominant shear effect	Case with same weight for each factor
Model slab-1	VH(5)	VH(5)	VH(5)
Model slab-2	M(3)	VL(1)	M(3)
Model slab-3	L(2)	VL(1)	VL(1)
Model slab-4	VH(5)	M(3)	VH(5)
Model slab-4'	M(3)	M(3)	M(3)
Model slab-5	VH(5)	M(3)	M(3)
Model slab-5'	M(3)	L(2)	M(3)
Bridge Y	M(3)	L(2)	M(3)
Bridge I	H(4)	M(3)	M(3)
Bridge T	M(3)	M(3)	M(3)
Bridge TA-I	VL(1)	M(3)	M(3)
Bridge TA-II	M(3)	H(4)	M(3)
Bridge TA-III	M(3)	M(3)	M(3)
Bridge TA-IV	M(3)	M(3)	M(3)

後検討していく予定である。本研究の範囲内で得られた主要な結果をまとめると次のようになる。

(1) RC 床版の健全度と余寿命の関係を対数正規分布型の核によりファジー化し、技術者の経験の度合いに基づく確度なる変数を導入して、ファジー集合論を適用した RC 床版耐用性の総合評価法による判定結果は、RA 法による結果とほぼ対応し、技術者の主観性に基づくあいまいさの処理が可能となる。

(2) RC 床版の多様な損傷形式に対応した判定因子の分類および寄与をあいまい量として取扱い、ファジー集合論を適用することにより、RC 床版の損傷経路の推定が可能となり、補修、補強法策定にあたっての参考となる。

最後に本研究を遂行するにあたり、多大の協力をいただいた(株)駒井鉄工所長谷川敏之氏ならびに神戸大学大学院生小笠勝君に深謝します。

(昭和58年9月29日 土木学会第38回年次学術講演会にて一部講演)

参 考 文 献

- 1) 西村 昭, 藤井 学, 宮本文穂, 既設の橋梁構造物およびその構成部材の健全度, 耐久性の判定に関するシンポジウム論文集 (土木学会関西支部), p. 99 (1983).
- 2) A. Nishimura, M. Fujii and A. Miyamoto, Memoirs of the Faculty of Engineering Kobe University, **30**, 51 (1983).
- 3) 土木学会関西支部編, 昭和52年度講習会テキスト, p. 11 (1977).
- 4) 西村 昭, 昭和56年度 科学研究費補助金研究成果報告書 (1982).
- 5) 浅井喜代治, C. V. ネゴイダ共編, “あいまいシステム理論入門” (1978) オーム社.
- 6) D. I. Blockley, Proc. ICE, **62** (1972).
- 7) M. O. Hill, J. of Ecology (1973).
- 8) 菅野道夫, 計測自動制御学会論文集, **8**, No. 2 (1972).