ファジィ理論のRC床版の疲労解析への応用[†]

古 田 均* 尾 崎 美 伸** 白 石 成 人***

Application of Fuzzy Sets Theory to Fatigue Analysis of RC Bridge Deck

by

Hitoshi FURUTA*, Yoshinobu OZAKI** and Naruhito SHIRAISHI***

Recently, fatigue failure has become frequent in RC (Reinforced Concrete) decks of urban expressway bridges, because of the increase of heavy vehicle transit and the deterioration of the structure itself. In a usual fatigue analysis of mechanical components and systems, their fatigue lives are estimated by using the simple law of cumulative damage. This law is based on the relation between the load intensity and its repeated cycles until failure. This relation is presented in the form of a so-called $S-N$ curve which is determined from experiments. To obtain a reliable $S-N$ curve, a great deal of experimental data should be collected. However, it is difficult to conduct a sufficient number of fatigue experiments on RC bridge decks, due mainly to the financial and technical restrictions.

In this paper, an attempt was made to apply the fuzzy sets theory to the fatigue analysis of RC bridge decks. The $S-N$ curve was modeled through the fuzzy regression theory instead of using probabilistic concepts. This was because the concept of frequency is useless in case of having few data, i. e., about ten samples. By using the fuzzy regression analysis, it was possible to develop a possibility model to draw up an $S-N$ curve and to estimate the fatigue life of RC bridge deck in a more realistic and significant manner.

Key words : Bridge deck, Fatigue analysis, Fuzzy sets, Regression analysis, Possibility model, RC slab

1 ま え が き

鉄筋コンクリート (Reinforced Concrete; RC) 床版の余寿命予測の基となる疲労解析には、疲労実験や実荷重のモデル化におけるあいまいさ、 $S-N$ 曲線や累積損傷則の適合性など、さまざまな不確定性が存在している。この中でも特に、RC 床版の疲労実験では供試体の大きさ、載荷方法等に関わる多くの制約条件から、実験データの数に限られ、これらの少ないデータから $S-N$ 曲線を精度よく推定することは容易ではない。確率統計の手法を用いて $S-N$ 曲線をモデル化することも、高々 10 個ぐらいのデータに対してはそれほど有効ではなく、また工学的な意義もあまりないと考えられる。そこで本研究では、データ数が非常に少ないことから個々のデータはそれぞれなんらかの意味をもつと考え、頻度の概念を用いずに、各データから得られる情報を十分に反映できる $S-N$ 曲線のモデル化を考える。すなわち、各データのばらつきを考慮するために可能性分布の概念を導入し、疲労寿命をファジィ数として表現することにより、ある程度の広がりを持った形で予測することを試みる。

2 ファジィ数の定義

ファジィ集合とは、言語などで表現されるような境界があいまいな集合であり、その集合への帰属度をメンバーシップ値として、 μ ($0 \leq \mu \leq 1$) で表す。このメンバーシップ値からなるメンバーシップ関数によって、ファジィ集合が特定される。また、このメンバーシップ関数を可能性分布と解釈することもできる¹⁾。例えば、「 $x=a$ 」を拡張して「 x はだいたい a ぐらい」とすると、この集合のメンバーシップ関数 $\mu(x)$ は、 x が a ぐらいである可能性の度合を示していると解釈できる。この「だいたい a ぐらい」を表す数をファジィ数²⁾と呼ぶ。

本研究では、Dubois と Prade による L-R 関数³⁾の概念を用いて、ファジィ数を中央値 α と左右の広がり C_L および C_R の 3 つの代表値で表す。ただし、 $C_L \geq 0$ 、 $C_R \geq 0$ である。このとき、 L 、 R をおのおの左右の関数形とすると、ファジィ数を規定するメンバーシップ関数は、次式で定義される。

$$\mu(x) = \begin{cases} L((\alpha-x)/C_L) & ; x < \alpha \\ R((x-\alpha)/C_R) & ; x \geq \alpha \end{cases} \quad (1)$$

ここではファジィ数 A を、Fig. 1 のように α と C_L 、 C_R の 3 つの代表値によってメンバーシップ関数の形

† 原稿受理 平成 2 年 5 月 23 日 Received May 23, 1990

* 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto

** 鹿島建設 (元京都大学院生) 京都市左京区吉田本町, Graduate Student, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto

*** 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto

Fig. 1. L-R function.

を三角形に規定し、計算の簡略化を図る。

また、ファジ数代数演算は通常の代数則では行えないので、ここでは拡張原理に基づいた演算法を用いる。2つのファジ数の演算 $C=A*B$ に対して、拡張原理は以下のように定義される。

$$\mu_c(x) = \sup_{C=A*B} \{ \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \} \quad (2)$$

ここで、記号 $\wedge$ は minimum を表す。この拡張原理に基づき、Dubois と Prade は L-R 関数による近似計算法を提案しており、本研究でもこの近似計算法を用いる。

3 可能性分布に基づく S-N 曲線のモデル化

一般に定振幅荷重下での疲労特性は、荷重振幅 S と破壊に至るまでの載荷回数 N の関係、すなわち S-N 曲線として表される。例えば、S-N 曲線として次式が提案されている⁴⁾。

$$\log N = k - m \log S \quad (3)$$

ここで、 k, m は定数であり、実験により求められる。ところが、実験データにはさまざまな不確実性が存在し、両対数紙上においても直線に乗らない場合も多々ある。

本研究では、これらのデータの取扱い方法として、ファジ線形回帰分析^{5),6)}を使ってモデルを作成し、データのばらつきを単なる誤差としてではなく、可能性分布として取り扱うことを試みる。ファジ線形回帰分析では、推定値 $\tilde{Y}_i$ とデータ $(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n, y_i)$ の不整合はモデル式の係数の可能性に依存しているとみなし、

$$\tilde{Y}_i = \tilde{A}_1 x_{i1} + \dots + \tilde{A}_n x_{in} \quad (4)$$

をファジモデルとし、 y が $\tilde{Y}$ にある度合以上で含まれるようにファジ係数 $\tilde{A}_j$ を決定する。式(4)において記号 $\sim$ はファジ集合を表す。

ここで、 $\tilde{Y}$ と y の適合度を計る基準として、パラメータ h ($0 \leq h \leq 1$) を導入し、ファジ数 $\tilde{Y}$ が y を少なくとも h 以上の度合で含まなければならないと

考えると、

$$\min (\mu(y)) \geq h \quad (5)$$

という制約条件が得られる。このとき、係数 $\tilde{A}_j$ 全体のあいまいさ、すなわち

$$s = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (6)$$

あるいは

$$s' = \sum_{j=1}^n C_j x_j \quad (7)$$

が最小になるようなファジ係数を求めることを目標とする。ここで、式(6)の C_j ($j=1, \dots, n$) は係数 $\tilde{A}_j$ を L-R 関数を用いて表したときのファジ数の広がり⁷⁾を表している。ここでは計算を簡単にするために、 $C_R = C_L$ すなわち左右の広がりを等しくとっている。このとき、 s は C_j の和であるので、 $\tilde{A}_j$ ($j=1, \dots, n$) すべてのあいまいさを表している。また、式(7)の s' は式(6)の目的関数に、各変数 x_j の値によって重み付けをしたものである。

ここで、ファジ線形回帰分析を次式で定義される簡単な例を用いて説明する。

$$\tilde{y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 x \quad (8)$$

上式を $x-y$ 平面上に表わしたものが、Fig. 2 である。Fig. 2 において回帰直線は、式(8)の定義により、ある x においては y は3角形状の可能性分布をもつ。

いま、この分布内において、あるデータ (x, y) は h の可能性の度合をもっていることになる。このように、すべてのデータ (x, y) の h が、指定した h 以上の度合で含まれるように、回帰式が決定される。すなわち、可能性分布の端部を示す破線は h の値を大きくとると上下に広がり、小さくとると狭くなる。以上のように、 h の値は回帰直線の広がりを規定するもので、この値を決定者が自由にコントロールすることによって、少ないデータに対する種々の判断を導入することができる。通常、 h の値は 0.5 程度を目安に考えることが实际的であり、具体的には中心線から離れているデータの内容を個別的に検討し、そのデータがどの程度信用できるかということから、 h の値を決定することに

Fig. 2. Explanation of fuzzy regression analysis.

なる。すべてのデータが十分信用できるもので、そのデータが直線上にのらない場合には h の値は大きくなり、ファジィ回帰直線は大きな幅を持つことになる。ただし、中心線の傾きは h の値にはほとんど影響されないで、中心線の傾きを重視する場合には、 h の設定はそれほど厳密でなくてもよい。

また、ファジィ線形回帰分析は、拡張原理により、次のような線形計画問題に帰着できる。

目的関数：

$$s = \sum_{j=1}^n C_j \rightarrow \text{Min} \quad (9)$$

$$\text{あるいは} \quad s' = \sum_{j=1}^n C_j x_j \rightarrow \text{Min} \quad (10)$$

制約条件：

$$(1-h) \sum_{j=1}^n C_j |x_{ij}| + \sum_{j=1}^n \alpha_j x_{ij} \geq y_i \quad (11)$$

$$(1-h) \sum_{j=1}^n C_j |x_{ij}| - \sum_{j=1}^n \alpha_j x_{ij} \geq -y_i \quad (12)$$

$$C_j \geq 0 \quad (13)$$

本研究では、S-N 曲線の定義式にこの方法を適用し、 k および $-m$ をそれぞれ $\tilde{A}_0$ 、 $\tilde{A}_1$ とおき、疲労寿命 N を

$$\log \tilde{N} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 \log S \quad (14)$$

のようにファジィ数として表現する。

4 数値計算例

参考文献 8) のデータを基に、ファジィ線形回帰分析を用いて S-N 曲線を求める。ここで、 S として鉄筋の引張り応力 P_a で無次元化した応力（あるいは荷重） P/P_a を用いる。

まず、S-N 曲線は

$$\log \tilde{P}/\tilde{P}_a = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 \log N \quad (15)$$

という直線で表わされると仮定し、繰返し数 N を通常の数で、 $\tilde{P}/\tilde{P}_a$ をファジィ数として規定し、回帰を行った結果を Fig. 3 に示す。図中の ○ 印がコンクリート床版の繰返し移動載荷実験によって得られた実験値を表している。ここで、 m は幅をもっているが、 k

Fig. 3. $\log N - \log \tilde{P}/\tilde{P}_a$ diagram.

Fig. 4. $\log \tilde{P}/\tilde{P}_a - \log \tilde{N}$ diagram.

は幅をもたない通常の数となっている。 m がファジィ数として求まったことにより、S-N 曲線は繰返し数 N が大きくなるにつれて、大きな広がりをもつ形で表わされることになる。荷重 S が小さいと破壊に至る数は当然大きくなり、その推定精度は悪くなると考えられ、このモデル化は直感に合致し、妥当なものであると考えられる。ここで実線は S-N 曲線の中央値を表わし、破線は $h=0.5$ の結果、一点鎖線は $h=0.7$ のときの幅を表し、 h が大きくなると S-N 曲線の幅は大きくなっている。

Fig. 4 に、横軸に $\log \tilde{P}/\tilde{P}_a$ を、縦軸に $\log \tilde{N}$ をとった結果を示す。Fig. 3 と同じく、○ 印がコンクリート床版の疲労実験値を表している。この場合、荷重は通常の数 (crisp 数) で、繰返し数をファジィ数と考えていることになる。Fig. 3 および Fig. 4 より明らかのように、どちらをファジィ数と考えるかによって結果はかなり変化する。Fig. 4 では傾きを表すパラメータは通常の数となり、切片を表すパラメータがファジィ数となる。これより、S-N 曲線は荷重の大きさに関わらず同じ幅を持つことになる。また、同じデータで今度は式 (10) の目的関数 s' 、すなわち係数の重みを考慮して回帰を行ったところ、全く同じ結果となった。

ここで、Fig. 3 と Fig. 4 の S-N 曲線の意義について考えてみる。まず、第一の利点として、これらの結果が幅をもつ形で与えられていることが挙げられる。解が幅をもつということは、解の robustness あるいは toughness を表わしており、実験条件の多少の変化、

あるいは未知の要因が多少あったとしても、それなりの解を得ることができることを示している。さらに、ファジ数ではその範囲内の値に対してその実現の可能性の度合いが示されているので、各値に対する信頼度が判断できる。このことは、異なる観点からは、感度分析の結果が内包的に示されているとも考えられる。しかしながら実際の応用においては、幅をもった形ではなくある特定値で用いたい場合も多くあると考えられる。その場合の意義としては、以下のことが考えられる。式 (9) から (13) の定式化は回帰直線の幅を最小にするという判断基準を基にしている。このために、回帰直線の中央値 (α 値) は通常最小自乗基準による解とは異なった結果を与えることになる。例えば Fig. 4 では、最小自乗基準によると、回帰直線の勾配はより大きくなる。この直線を用いると、疲労寿命は長く推定されることになり、ある場合には危険側の解を与えることも考えられる。これに対し、本方法を用いると、この場合は安全側の解が得られる。もちろん、他のデータを用いると逆の結果が得られることも考えられるが、本方法では推定値が幅をもっているため、その場合でも疲労寿命を長く推定してしまうという危険性は多少回避できる。

以上の回帰結果においては、 $\tilde{A}_0$ と $\tilde{A}_1$ の両者ともにファジ数とはならず、どちらか一方のみがファジ数になっている。これは、第一にデータの分布形状、第二に説明変数の数が 1 個であるためと考えられる。すべての結果をファジ数で得ることが必要であれば、例えば参考文献 9) に示されているように、式 (11) から (13) の他にファジ数の幅 C に関する制約条件を付加すればよい。

5 RC 床版の寿命予測

Miner の累積損傷則は、各応力振幅 S_i の発生する回数 n_i と、 S - N 曲線から求められる破壊に至るまでの載荷回数 N_i によって、全累積損傷度 D が式 (16) のように計算され、 D の値が式 (17) の条件を満たすとき、破壊が生じるというものである。

$$D = \sum (n_i / N_i) \quad (16)$$

$$D = 1 \quad (17)$$

さらに、荷重状態が将来も一定と仮定すると、 D を用いて疲労寿命 T は次式より求められる。

$$T = 1/D \quad (18)$$

本研究ではこの理論を拡張して、 n_i 、 N_i がファジ数の場合に、 D をファジ数として以下のように定義する。

$$\tilde{D} = \sum (\tilde{n}_i / \tilde{N}_i) \quad (19)$$

上式では疲労実験に含まれる種々の不確定性等により、 $\tilde{N}_i$ はあいまいな数として与えられていると考えている。よって、これを除数とする $\tilde{D}$ にはそれ以上

Fig. 5. Membership function for ultimate failure $\tilde{F}$.

のあいまいさが存在することになる。ここで、「 D が 1 となるときの破壊が生じる」という定義について考えると、 $\tilde{D}$ の中央値 d が 1 という正確 (crisp) な数となる場合を破壊と定義することの根拠はそれほど無いように思われる。そこで本研究では、種々の不確定性を考慮できるように、「破壊する」という事象をファジ集合 $\tilde{F}$ で定義し、 $\tilde{D}$ と $\tilde{F}$ の比較によって破壊を規定することを考える。

$\tilde{F}$ の一例を Fig. 5 に示す。ここで横軸の値 $d=0$

Fig. 6. Relation between D_o and D_c .

は全く損傷が無いことを表し, $d=1$ は破壊を表している. この図は $d=1$ 以下, 例えば $d=a$ でも破壊する可能性が $\mu(a)$ あり, また $d=1$ でも破壊せず $d=b$ に至って破壊する可能性が $\mu(b)$ あることを示している. ここで, $\tilde{F}$ は 1 という数 (crisp number) を拡張 (ファジィ化) したものであるから, 式 (18) を式 (20) のように拡張すると, 疲労寿命 T がファジィ数として以下のように定義される.

$$\tilde{T} = \tilde{F} / \tilde{D} \quad (20)$$

一方, 「使用限界」の集合を $\tilde{F}'$ とすると, $\tilde{F}'$ は $\tilde{F}$ とは全く違ったメンバーシップ関数をもつはずである. さらに, 使用限界の定義によりメンバーシップ関数 $\mu_{F'}(d)$ は変化し, その影響で寿命およびその広がりも変動すると思われる. 本研究では使用限界状態の集合 $\tilde{F}'$ を文献 10) に示されたたわみとひび割れ密度の関係をを用いて, たわみによる劣化度 D_o を媒介として $\tilde{F}$ と $\tilde{F}'$ を関連付ける. たわみによる劣化度 D_o とひび割れによる劣化度 D_c が, $D_o = D_c$ という関係を保っている時点では, 床版は使用限界には達していないと

いう仮定から, $D_o = 1.0$ の点が使用限界状態で, 終局限界状態は $D_o = 2.3$ と考えられる (Fig. 6 参照). これより新たに $D_o/2.3$ というパラメータを考え, これを各限界状態を表すファジィ集合の中央値と考える. 以上の仮定から, $\tilde{F}$ と $\tilde{F}'$ は以下のように計算される.

$$\tilde{F} = (1.0, 0.1, 0.1) \quad (21)$$

$$\tilde{F}' = (0.435, 0.1, 0.1) \quad (22)$$

上式の表現は L-R 関数の表記による. 式 (20) より, 使用限界寿命 $\tilde{T}'$ は

$$\tilde{T}' = \tilde{F}' / \tilde{D} \quad (23)$$

となる.

さて, 文献 8) のデータを $h=0.3$ でファジィ線形

Table I. Numerical results of N_i and D_i
($h=0.3$, $P_a=8.0$ tonf).

Kind of vehicle	$\tilde{N}_i$			$\tilde{n}_i / \tilde{N}_i$		
	α	C_L	C_R	α	C_L	C_R
1	7.51E+0.9	6.17E+09	3.47E+10	4.61E-08	2.13E-07	3.79E-08
2	5.15E+07	4.24E+07	2.38E+08	4.48E-06	2.07E-05	3.68E-06
3	7.05E+09	5.80E+09	3.26E+10	8.10E-08	3.74E-07	6.66E-08
	2.67E+11	2.19E+11	1.23E+12	2.14E-09	9.89E-09	1.76E-09
4	3.74E+07	3.07E+07	1.73E+08	2.84E-05	1.31E-04	2.33E-05
	1.46E+09	1.20E+09	6.75E+09	7.26E-07	3.36E-06	5.97E-07
5	3.40E+10	2.80E+10	1.57E+11	1.56E-09	7.20E-09	1.28E-09
	3.83E+10	3.15E+10	1.77E+11	1.38E-09	6.39E-09	1.14E-09
6	4.86E+07	3.99E+07	2.25E+08	1.65E-06	7.62E-06	1.35E-06
	5.47E+07	4.50E+07	2.53E+08	1.46E-06	6.76E-06	1.20E-06
7	5.36E+09	4.41E+09	2.48E+10	4.42E-08	2.04E-07	3.64E-08
	9.09E+09	7.48E+09	4.20E+10	2.61E-08	1.21E-07	2.14E-08
	1.31E+10	1.08E+10	6.06E+10	1.81E-08	8.36E-08	1.49E-08
8	5.36E+09	4.41E+09	2.48E+10	9.41E-08	4.35E-07	7.73E-08
	9.09E+09	7.58E+09	4.20E+10	5.54E-08	2.56E-07	4.56E-08
	5.90E+07	4.85E+07	2.73E+08	8.56E-06	3.95E-05	7.02E-06
9	1.04E+10	8.52E+09	4.79E+10	4.73E-09	2.19E-08	3.89E-09
	1.59E+11	1.31E+11	7.37E+11	3.07E-10	1.42E-09	2.53E-10
10	8.26E+09	6.79E+09	3.82E+10	1.03E-08	4.76E-08	8.46E-09
	1.04E+10	8.52E+09	4.79E+10	8.20E-09	3.79E-08	6.74E-09
11	2.82E+11	2.32E+11	1.30E+12	3.55E-10	1.64E-09	2.92E-10
	9.77E+11	8.03E+11	4.51E+12	1.02E-10	4.73E-10	8.42E-11
12	3.54E+08	2.91E+08	1.64E+09	6.30E-07	2.91E-06	5.18E-07
	1.20E+09	9.88E+08	5.56E+09	1.86E-07	8.58E-07	1.53E-07
13	2.70E+10	2.22E+10	1.25E+11	3.97E-09	1.83E-08	3.26E-09
	3.54E+10	2.91E+10	1.64E+11	3.02E-09	1.40E-08	2.49E-09
14	3.20E+07	2.63E+07	1.48E+08	2.53E-06	1.17E-05	2.08E-06
	4.19E+07	3.45E+07	1.94E+08	1.93E-06	8.93E-06	1.59E-06
$\tilde{D} = \Sigma(\tilde{n}_i / \tilde{N}_i)$				5.09E-05	2.35E-04	4.18E-05

回帰分析を実行し, 得られた S-N 曲線に各荷重モードを $P_a=8.0$ (tonf) として求めた終局破壊に至るまでの回数 N を Table I に示す. Table I では α は繰返し回数の中央値, C_R , C_L をその上下の広がり度, $\alpha - C_L$ が下限, $\alpha + C_R$ が上限である. どの結果も C_L より C_R の方が大きな値となっているのは, S-N 曲線の決定時に規定したメンバーシップ関数が対数軸上で三角形をしており, N の大きな値に対してよりなだらかな可能性分布を与えているためである. さらに, 各荷重モードの一日に通る回数 n を用いて n/N を求める. ここで, n は輪重が一日に通る回数で, ここでは簡単のために広がり度の無い通常の数として計算して

Table II. Results of fatigue lives (year).

h	P_d (tf)	Limit states	$\bar{T}$		
			α	C_L	C_R
0.5	8.0	Ultimate	60.4	55.7	307.2
0.5	8.0	Serviceability	26.3	27.6	149.4
0.5	9.6	Ultimate	204.9	189.0	1042.2
0.5	9.6	Serviceability	89.1	93.8	507.0
0.1	8.0	Ultimate	60.4	43.3	107.0
0.1	8.0	Serviceability	26.3	22.3	52.0
0.1	9.6	Ultimate	204.9	146.9	363.0
0.1	9.6	Serviceability	89.1	75.5	176.6

いる。また、 n/N は各軸種の一日当りの損傷度を表している。

つぎに、各荷重モードの n/N を総和すると、 D が求まり、これが床版が一日に受ける損傷と考えられる。 h および P_d を変えて寿命推定を行った結果を Table II に示す。 h としては 0.1 と 0.5 を考え、 P_d は 8 tonf とその 20% 増しの 9.6 tonf を考えている。破壊状態としては終局限界状態と使用限界状態を想定している。当然のことながら、 D の中央値 α は P_d の値のみによって変化し、 C_L と C_R は h の値によって変化する。 $h=0.5$ として $S-N$ 曲線を求め $P_d=8.0$ tonf と仮定すると、終局破壊に至る疲労寿命 T は 4.7 年から 367.6 年以内であると推定され、最も可能性の高いのは 60.4 年ということになる。これに対し使用限界状態には計算上 -1.3 年から 175.7 年以内で到達することになる。ここで下限値として負の値になっているが、これは実際上は意味を持たないため、0 年と考えるべきであろう。以上のようにあまりにも幅広いファジィ数で結果が得られると、一見全く意味がないように見えるが、この 4.7 から 367.6 年あるいは -1.3 から 175.7 年というのは、この範囲以外は全く可能性がないということを表わしている。工学的に意味があるのはメンバーシップ値が例えば 0.8 以上というように考えると、もっとその推定範囲は小さくなり、疲労寿命を推定する上で有用な情報が得られることになる。

いま、 $P_d=9.6$ tonf と床版が厚くなったと仮定すると、 T は 15.9 年から 1247.1 年の範囲と、かなり増加する。 C_L より C_R の方が大きくなるのは、 N の場合と同じ理由による。 h を 0.5 から 0.1 に下げると T の推定値は小さくなり、 $S-N$ 曲線を決定する際の h の値の影響が忠実に反映されていることが分かる。

6 あとがき

本研究では、疲労解析の基となる限界状態の定義、

疲労実験、 $S-N$ 曲線の決定に含まれる不確定性の取扱方法について基礎的な検討を加えた。特に、RC 床版の疲労実験のデータの少なさに注目して、 $S-N$ 曲線を可能性分布を用いてモデル化した。可能性分布の概念はファジィ集合論の基本概念の一つであり、不確定性を頻度という概念を用いずに取り扱おうとするものである。この可能性分布を用いて $S-N$ 曲線をファジィモデルで定義することにより、疲労寿命等をファジィ数で表現することができ、ある程度の広がりを持った形での推定が可能になった。

ファジィ理論の利点の一つは計算が簡単であるということであり、その意味ではここで得られた幅をもつ解というのは、ある程度の目安を与える近似解として利用すべきであろう。しかし、解が幅をもつということは、解の robustness あるいは toughness を表わしており、実験条件の多少の変化、あるいは未知の要因が多少あったとしても、それなりの解を得ることができることを示している。さらに、ファジィ数はその範囲内の値に対してその実現の可能性の度合が付加されているので、各値に対する信頼度が判断できる。また異なる観点からは、感度分析の結果が内包的に示されているとも考えられる。

もちろん、このような解法には適用限界があることは自明であり、近似解ではなく厳密な解が必要である場合、あるいは数多くの信頼のおける実験データが得られる場合には、確率モデルや通常の統計的手法の方がより良い結果を与えられと考えられる。

参 考 文 献

- 1) L. A. Zadeh, Fuzzy Sets and Systems, 1, 3 (1978).
- 2) A. Kaufman and M. Gupta, "An Introduction to Fuzzy Arithmetics" (1979) Van Norstrand
- 3) D. Dubois and H. Prade, Fuzzy Sets and Systems, 2, 327 (1979).
- 4) 岡本舜三監修, "鋼構造の研究", p. 447 (1977) 技報堂
- 5) B. Heshmaty and A. Kandel, Fuzzy Sets and Systems, 15, 159 (1985).
- 6) 田中英夫, システムと制御, 28, 447 (1984).
- 7) 寺野寿郎, 浅居喜代治, 菅野道夫 (監修), "ファジィシステム入門" (1988) オーム社
- 8) 亀田弘行, 森田信吾, "都市高速道路の荷重評価と設計基準の最適化に関する研究報告書", 阪神高速道路公団報告書, p. 108 (1984).
- 9) 石淵久生, 田中英夫, 黄 承国, システム制御情報学会論文誌, 3, 90 (1990).
- 10) 松井繁之, "道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究", 大阪大学博士論文 (1984).