

京都大学大学院 学生員 尾崎美伸

京都大学工学部 正員 白石成人

京都大学工学部 正員 古田 均

1. まえがき RC床版の余寿命予測のもと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、様々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。確率統計的手法を用いて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何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もった形で予測することを試みる。

2. 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 $\log N = C - m \log S$ で表される。実験データには様々な不確定性が存在し、両対数紙上においても直線上にの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として、ファジィ線形回帰分析¹⁾を使ってモデルを作成し、データのバラツキを単なる誤差としてではなく、可能性分布として扱うことを試みる。ファジィ線形回帰分析では、推定値 $\tilde{Y}_i$ とデータ (x_{ij}, 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、

$$\tilde{Y}_i = \tilde{A}_1 x_{i1} + \tilde{A}_2 x_{i2} + \cdots + \tilde{A}_n x_{in} \quad (j=1, 2, \dots, n) \cdots (1)$$

をファジィモデルとし、 y_i が $\tilde{Y}_i$ にある度合以上で含まれるようにファジィ係数 $\tilde{A}_j$ を決定する。式(1)において、記号 $\sim$ はファジィ集合を表す。ここで、 $\tilde{Y}_i$ と y_i の適合度を測る基準としてパラメータ h ($0 < h < 1$) を導入し、ファジィ数 $\tilde{Y}_i$ が y_i 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、 $\min(\mu_{\tilde{Y}_i}(y_i)) \geq h$ 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、 $S = c_0 \tilde{Y}_i + c_1 + \cdots + c_j$ が最小になるようなファジィ係数を求めることを目標とする。また、ファジィ線形回帰分析は線形計画問題に帰着できる。ここで、 h の値は回帰直線の広がりや決定するもので、この値を決定者が自由にcontrol することによって、少ないデータに対する種々の判断を考慮することができる。本研究ではS-N曲線の定義式にこの方法を適用し、Cおよび-mをそれぞれ $\tilde{A}_0$ 、 $\tilde{A}_1$ とおき、疲労寿命 $\tilde{N}$ を $\log \tilde{N} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 \log S$ のようにファジィ数として表現する。さて、参考文献2)に与えられた疲労実験データを基に、ファジィ線形回帰分析を用いてS-N曲線を求める。図1において横軸はくり返し数Nの対数値を示し、縦軸は鉄筋の引張応力Pdで無次元化された応力(あるいは荷重)の対数値を表わしている。

まず、S-N曲線は $\log P/Pd$ と $\log N$ で直線で表わされると仮定し、くり返し数Nを通常の数で、 P/Pd をファジィ数として規定する。ここで m は幅をもっているが、 C 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曲線はくり返し数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になると考えられ、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 $h = 0.7$ のときの幅を表わし、 h が大きくなるとS-N曲線の幅は大きくなっている。図2に、横

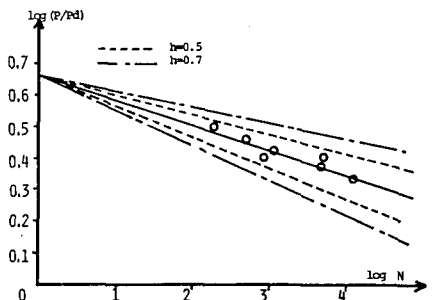


図1 ファジィ線形回帰分析を用いたS-N曲線(1)

軸に $\log P/P_d$ を、縦軸に $\log N$ をとった結果を示す。この場合、荷重は通常の数で、くり返し数をファジィ数と考えていることになる。図1および図2より明かなように、どちらをファジィ数と考えるかにより結果はかなり変化する。図2では傾きを表わすパラメータは通常の数 (crisp number) となり、切片を表わ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もつことになる。本研究では、図2の結果を用いて寿命推定を行う。

3. RC床版の寿命予測 ここではMinerの累積損傷則を拡張し、 n_i 、 N_i がファジィ数の場合に、 D をファジィ数として $\tilde{D} = \sum (\tilde{n}_i / \tilde{N}_i)$ のように定義する。ここで、 $\tilde{N}_i$ はあいまいさな数と考えられるので、これを除数とする $\tilde{D}$ にはそれ以上のあいまいさが存在することになる。ここで、「 D が1となるとき破壊が生じる」という定義について考えると、 d ($\tilde{D}$ の中央値) 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ないと思われる。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ィ集合 $\tilde{F}$ 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。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、疲労寿命 T がファジィ数として $\tilde{T} = \tilde{F} / \tilde{D}$ のように定義される。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 μ (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。 $\tilde{F}$ 。本研究では、参考文献3)に示されたたわみとひび割れ密度の関係を用いて、たわみによる劣化度 D_δ を媒介として $\tilde{F}$ と $\tilde{F}'$ を関連づける。たわみによる劣化度 D_δ とひび割れ密度による劣化度 D_c が、 $D_\delta = D_c$ 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、 $D_\delta = 1.0$ の点が使用限界状態で、終局限界は $D_\delta = 2.3$ と考えられる。これより、新たに $D_\delta / 2.3$ というパラメータを考え、これを各限界状態を表わすファジィ集合の中央値と考える。以上の仮定から $\tilde{F} = (1.0, 0.1, 0.1)$ 、 $\tilde{F}' = (0.435, 0.1, 0.1)$ と計算され、使用限界寿命 $\tilde{T} = \tilde{T}' = \tilde{F}' / \tilde{D}$ と定義できる。ここでは、亀田、森田²⁾らの使用したデータを用いてケーススタディを行う。ここで、各荷重モードおよびその回数は、床版の応答振幅より求めるべきであるが、ここでは自動車、特に大型車の輪重が直接床版にかかると仮定し、その輪重期待値を荷重モードとし、その輪重が通る回数を用いる。各荷重モードの一日に通る回数 $\tilde{n}_i$ を用いて $\tilde{n}_i / \tilde{N}_i$ を求め、各荷重モードの $\tilde{n}_i / \tilde{N}_i$ を総和すると $\tilde{D}$ が求まり、これが床版が一日にうける Damage と考えられる。表1に h および P_d を変えて寿命推定を行った結果を示す。 h としては、0.1 と 0.5 を考え、 P_d は 8 ton とその20%増しの9.8ton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。

4. あとがき 本研究ではRC床版の疲労解析に対して可能性分布の概念を適用することを試み、基礎的な検討を行った。今後は、より実的なデータを用い、その実用化に対して研究する必要がある。特に、限界状態の規定、疲労実験の追加、S-N曲線のモデル化に対して今後の研究が望まれる。

参考文献 1) B. Heshmaty and A. Kandel : Fuzzy Linear Regression and Its Applications to Forecasting in Uncertain Environment, Fuzzy Sets and Systems 15, pp. 159 ~ 191, 1985 2) 亀田弘行, 森田信吾 : 都市高速道路橋における損傷の要因分析とRC床版の疲労における活荷重の影響に関する解析, 都市高速道路の荷重評価と設計規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, pp. 108 ~ 146, 1984 3) 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

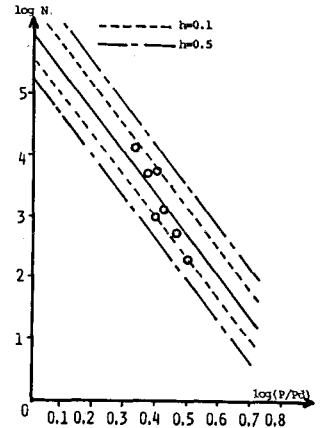


図2 ファジィ線形回帰分析を用いたS-N曲線(2)

表1 寿命推定の結果の一例 (単位: 年)

h	Pd (t)	破壊状態	$\tilde{T}$		
			α	C_1	C_2
0.5	8.0	終局限界	60.4	55.7	307.2
0.5	8.0	使用限界	26.3	27.8	149.4
0.5	9.8	終局限界	204.9	189.0	1042.2
0.5	9.8	使用限界	89.1	83.8	507.0
0.1	8.0	終局限界	60.4	43.3	107.0
0.1	8.0	使用限界	26.3	22.3	52.0
0.1	9.8	終局限界	204.9	148.9	363.0
0.1	9.8	使用限界	89.1	75.5	178.8