骨組構造物の崩壊荷重に対するファジイ・信頼性評価

骨組構造物の崩壊荷重に対するファジイ・信頼性評価

宮　脇　幸治郎*

A Study of Fuzzy and Reliability Estimates for the Collapse Loads of Skelton Structure

Kojiro MIYAWAKI **

ABSTRACT

This study deals with an approach to a plastic analysis, a reliability analysis and a fuzzy method to apply to the design variables of the collapse loads of skelton.

A simplex method of LP-problems is used in the plastic analysis. Fuzzy valiables are plastic moments and the loads with the possible triangle distribution. On the plastic analysis we introduce a fuzzy slack, calculate typical values of collapse loads, and then determine the shape of membership function. And the fuzzy reliability is calculated with active loads and collapse loads.

Numerical simulations are practiced and the results are as follows. (1) fuzzy bias α, β of distribution for plastic moments and for active loads influence the reliability of the whole structure. At $S_o/R_o < 0.5$, effects of α, β are large but at $S_o/R_o > 1.0$, these of α are large than these of β. (2) In the case of failure bridges by earthquakes this estimate method is verified effective.

KEYWORD: Reliability, Fuzzy, Collapse Loads, Skelton Structure

1. はしがき

構造工学における設計には，機能性，安全性，経済性の条件を具備しなければならない．これらの条件に関する設計変数には，本質的にばらつきを伴ったものとなっている．従来このようなばらつきに関する取り扱いには，客観的な要因と主観的要因とを導入した確率統計的処理が行なわれている[1]．しかし，土木・建築分野においては，建設されるものが，単品に近いものになっており，設計変数のばらつきに対する把握が，統計的変量として扱い難い．一方，構造設計ならびに現況の構造物に対する損傷の診断において，その安全を照査する場合，構造部材に対するのではなく，構造全体に対して必要である．この場合，構造系全体の崩壊という概念に立って設計・評価することになるので，塑性解析が有効になる．

以上のような観点から，設計パラメータとしては塑性設計に関する変量を用い，ばらつきに関する把握は，変量が可能性分布を有するあいまいな，すなわちファジイ量とみなされ，信頼性解析が行われる．このような手法は構造最適設計の分野での工学的な意味を持っている[2]．

本研究は，塑性解析，信頼性解析，ファジイ理論の3つの手法を骨組構物の耐荷力という設計変量に適用するため，その理論の構築ならびにその有用性の確認を行っている．

まず，塑性解析は，線形計画問題におけるシンプレックス法の手法を用いて，すなわち，平衡条件と塑性条件を用いる下界定理に属する手法を用いて行っている[3]．つぎに，ファジイ量の導入には，線形区間法によるファジイＬＰ問題や可能性ＬＰ問題などの取り扱いが考えられるが，ここでは各部材の全塑性モーメントおよび作用荷重に三角形の可能性分布を与えている．この場合，H. J. Zimmermann によるファジイ不等号によるファジイ線形計画問題や，Negoita らによる線形計画問題によるファジイ線形計画問題などのモデル化によらず，Dubois と Prade によるモデル化の特殊な場合としての適用を行っている[4]．また塑性解析にはファジイスラクの導入により，構造系のファジイ耐荷力の代表値を求め，これを用いて可能性分布の形状を求めている．その後，各ファジイ作用荷重との関係より，ファジイ信頼性を求めている．

以上のような取扱によって誘導した理論の検証のため，簡単な数値シミュレーションを行っている．骨組構造として，2層門形ラーメンに4つの荷重が作用した場合について実施している．ひとつは，構造パラメータのファジイ分布の影響を調べ，もうひとつは，実際に1989年10月に発生したロマプリータ地震によって破壊したダブルデッキ形式の橋梁の例をとって検討している．その結果，塑性モーメントと作用力のファジイ的ばらつきを，それ

1990年4月9日受理
*土木工学科 (Department of Civil Engineering)

ぞれ変化させた場合のファジイ破壊確率を調べることにより，作用力より塑性モーメントのフィジイ的ばらつきの影響の方が大きくなっている．また，地震による橋梁破壊の例においても，ファジイ量を用いて良い推定がなされている．

2.　骨組構造物の耐荷力に対するファジイ的評価

2.1　基礎式の誘導

まず，骨組構造に対する平衡方程式は，

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} M_j + \sum_{k=1}^{m} b_{ik} P_k L = 0 \quad [i = 1, 2 \ldots, l] \qquad (2-1)$$

ここに，n：可能塑性ヒンジ数

m：全載荷荷重数

l：平衡方程式数

塑性条件式

$$|M_j| \leqq M_{pj} \quad [j = 1, 2 \ldots, n] \qquad (2-2)$$

と与えられる．ここで，次のように変数 M_j, P_k を変換する．

$$\left.\begin{aligned} M_{pj} &= \alpha_j M_p \\ P_k &= \beta_k P \end{aligned}\right\} \qquad (2-3)$$

とおき，

$$\left.\begin{aligned} m_j &= (M_j + \alpha_j M_p)/M_p \\ p &= PL/M_p \end{aligned}\right\} \qquad (2-4)$$

とおく．さらに，（2－1）において，

$$\left.\begin{aligned} \gamma_i &= \sum^{n} a_{ij}\, \alpha_j \quad [i = 1, 2 \ldots, l] \\ \delta_i &= \sum^{m} b_{ik}\, \beta_k \quad [i = 1, 2 \ldots, l] \end{aligned}\right\} \qquad (2-5)$$

とおく．以上の変換の結果，式（2－1），（2－2）は次のようになる．

$$\begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta_l \end{Bmatrix} p + \begin{bmatrix} a_{11}, a_{12} \ldots, & a_{1n} \\ a_{21} & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ a_{l1} & a_{ln} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} m_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ m_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \gamma_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma_l \end{Bmatrix} \qquad (2-6)$$

$$0 \leqq m_j \leqq 2\alpha_j \qquad (2-7)$$

なる条件において，最大の p を求める問題となる．

次に，構造物を構成している部材のあいまいさ，作用している荷重のあいまいさをファジイ数と見なして可能性分布と考える．本研究における問題では，（2－3）において導入した変数 $\underset{\sim}{\alpha}_i$, $\underset{\sim}{\beta}_i$ および，（2－5）の $\underset{\sim}{\gamma}_i$,　$\underset{\sim}{\delta}_i$ をファジイ数として取り扱うことになる．したがって，ファジイ数の係数を持った可能性線形問題は，次のように表せる．

目的関数　　$\max p = p^*$　　（2－8）

制約条件　　$\underset{\sim}{Z}_k = \underset{\sim}{\delta}_k \underset{\sim}{p} + \sum a_{ki} \underset{\sim}{m}_j - \underset{\sim}{\gamma}_k = \underset{\sim}{0}$

$[k = 1, 2, \ldots, l]$　（2－9）

$Z_i = \underset{\sim}{m}_i + \underset{\sim}{\lambda}_i - 2\underset{\sim}{\alpha}_i = \underset{\sim}{0}$

$[i = 1, 2, \ldots, n]$　（2－10）

ここに，$\underset{\sim}{\lambda}_i$：ファジイスラックス係数

いま，変数 $\underset{\sim}{\alpha}_i$, $\underset{\sim}{\beta}_i$ がファジイ係数であり，対称な L 型ファジイ数であるとする．そして，本研究では，ファジイ係数は図２－１に示すような三角形とする．すなわち，これらのメンバーシップ関数は，

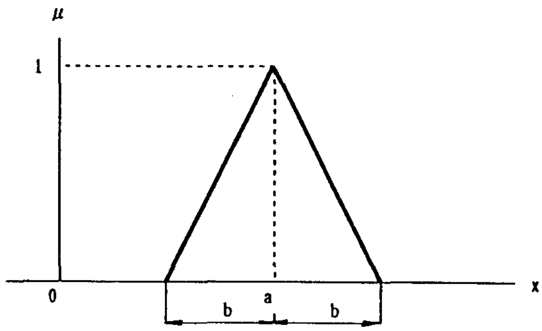

図２－１　ファジイ係数

$$\left.\begin{aligned} \underset{\sim}{\alpha}_i &= (a_i, b_i): \\ \mu_\alpha &= 1 - \frac{|x - a_i|}{b_i} \\ \underset{\sim}{\beta}_i &= (c_i, d_i): \\ \mu_\beta &= 1 - \frac{|x - c_i|}{d_i} \end{aligned}\right\} \qquad (2-11)$$

と仮定する．こうすると，

$$\left.\begin{aligned} \underset{\sim}{\gamma}_i &= (e_i, f_i) \\ &= (\sum a_{ij}\, a_j,\ \sum a_{ij}\, b_j): \\ \mu_\gamma &= 1 - \frac{|y - e_i|}{f_i} \end{aligned}\right\} \qquad (2-12)$$

$\delta_i = (y_i, h_i)$

$$\left.\begin{aligned} &= (\textstyle\sum b_{ik}\, c_k,\ \sum b_{ik}\, d_k):\\ &\mu_\delta = 1-\frac{|y-y_i|}{h_i}\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}13)$$

なる，同型のメンバシップ関数をもつことになる．

次に，制約条件（2－10）は，スラク変数$\underset{\sim}{\lambda}$を導入することにより，左辺が$\underset{\sim}{0}$に等しい符号を持った条件となっている．したがって，(2－9)，(2－10)は，ファジイ係数を持った同形式の線形条件式と見なせ，Dubois と Prade が導入したファジイ数の不等式の定義は必要がなくなる．すなわち，(2－9)，(2－10)に対するメンバシップ関数は，

$$\left.\begin{aligned} \underset{\sim}{m}_j &= (m_j,\ \eta_j)\\ \underset{\sim}{\lambda}_j &= (\lambda_j,\ \xi_j)\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}14)$$

とおいて，

$$\begin{aligned} &\underset{\sim}{Z}_k = (y_k\, p+\textstyle\sum a_{kj}\, m_j-e_k,\ h_k\, p+\sum a_{kj}\, \eta_j+f_k):\\ &\mu_{Zk} = 1-\frac{|Z_k-\{y_k\, p+\sum a_{kj}\, m_j-e_k\}|}{h_k\, p+\sum a_{kj}\, \eta_j+f_k}\end{aligned} \qquad (2\text{-}15)$$

$$\begin{aligned} &\underset{\sim}{Z}_i = (m_i+\lambda_i-2a_i,\ \eta_i+\xi_i+2b_i):\\ &\mu_{Zi} = 1-\frac{|Z_i-\{m_i+\lambda_i-2a_i\}|}{\eta_i+\xi_i+2b_i}\end{aligned} \qquad (2\text{-}16)$$

であり，$\underset{\sim}{0}$に対するメンバシップ関数は，図２－２のような形である．

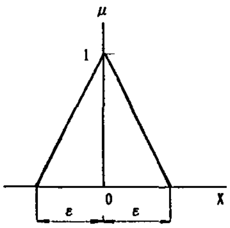

図２－２　$\underset{\sim}{0}$ファジイ数

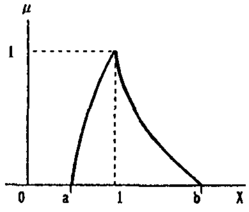

図２－３　$\underset{\sim}{1}$ファジイ数

ここで，ファジイ数$\underset{\sim}{Z}_k$, $\underset{\sim}{Z}_i$に対する

$$\left.\begin{aligned} \underset{\sim}{Z}_k &= \underset{\sim}{0}\\ \underset{\sim}{Z}_i &= \underset{\sim}{0}\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}17)$$

の定義は，

$$\left.\begin{aligned} \mu_{Zk}(0) &= 1\\ \mu_{Zi}(0) &= 1\end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}18)$$

とする．

この時，(2－15) および (2－16) は，(2－17)，(2－18) より，次のようになる．

$$Z_k = y_k\, p+\textstyle\sum a_{kj}\, m_j-e_k = 0 \quad [k = 1, \ldots, l] \qquad (2\text{-}19)$$

$$Z_i = m_i+\lambda_i-2a_i = 0 \quad [i = 1, \ldots, n] \qquad (2\text{-}20)$$

以上より，(2－8) から (2－10) は，(2－19)，(2－20) の制約条件のもとで，(2－8) の目標を求めるファジイＬＰ問題となる．

2.2　耐荷力の分布の誘導

2.1で求めたpの値は，ファジイ数の平均値であるから，ここで，pの分布（メンバシップ関数）を誘導する．pは，式 (2－9) の制約条件を満足している．すなわち，pは，

$$\underset{\sim}{Z}_k = \underset{\sim}{\delta}_k\cdot\underset{\sim}{p}+\textstyle\sum a_{kj}\cdot\underset{\sim}{m}_j-\underset{\sim}{\gamma}_k = \underset{\sim}{0} \quad [k = 1, 2, \ldots, l] \qquad (2\text{-}21)$$

ここに，$\underset{\sim}{\delta}_k$, $\underset{\sim}{p}$, $\underset{\sim}{m}_j$, $\underset{\sim}{\gamma}_k$, $\underset{\sim}{0}$ は，ファジイ数なるℓ個の式をすべて満足している．これらの式において，p以外の変数はすべて既知であるから，右辺に移項してδ_kで両辺を割ると，

$$(\underset{\sim}{\delta}_k/\underset{\sim}{\delta}_k)\cdot\underset{\sim}{p} = (\underset{\sim}{0}-\textstyle\sum a_{ki}\cdot\underset{\sim}{m}_j+\underset{\sim}{\gamma}_k)/\underset{\sim}{\delta}_k \qquad (2\text{-}22)$$

となる．ここで，

$$\underset{\sim}{\delta}_k/\underset{\sim}{\delta}_k = \underset{\sim}{1}$$

ここに，$\underset{\sim}{1}$はファジイ数（だいたい１）であるから，式 (2－22) は，

$$\underset{\sim}{1}\cdot\underset{\sim}{p} = (\underset{\sim}{0}-\textstyle\sum a_{ki}\cdot\underset{\sim}{m}_j+\underset{\sim}{\gamma}_k)/\underset{\sim}{\delta}_k \qquad (2\text{-}23)$$

となる．これは，(だいたい１)・$\underset{\sim}{p}$の分布を表している．$\underset{\sim}{1}$を図２－３のようなファジイ数であるとすると，

$$\underset{\sim}{1} = [a,\ b], \quad -\underset{\sim}{1} = [-b,\ -a]$$

であるから，

$$\begin{aligned} \underset{\sim}{1}/(-\underset{\sim}{1}) &= [a,\ b]/[-b,\ -a]\\ &= [-1,\ -1]\\ &= -1\end{aligned} \qquad (2\text{-}24)$$

となる．これを用いて，近似的に$\underset{\sim}{p}$を求めると，

$$\underset{\sim}{p} = -(\underset{\sim}{0}-\textstyle\sum a_{ki}\cdot\underset{\sim}{m}_j+\underset{\sim}{\gamma}_k)/\{\underset{\sim}{\delta}_k\cdot(-\underset{\sim}{1})\} \qquad (2\text{-}25)$$

となる．(2−25) で　は ℓ 個求まる事になるが，そのうち最大のものが (2−8) の目的関数を満足することになる．

以上より，(2−25) を計算することにより，$\underset{\sim}{p}$ の分布を求めることができる．この $\underset{\sim}{p}$ と (2−4) より，最終荷重 P_u は，

$$P_u = \underset{\sim}{p}\frac{M_P}{L} \tag{2-26}$$

と表される．ここで求めた P_u の平均値，すなわちレベルが1での値は，シンプレックス法により求めた値と一致している．

3.　骨組構造のファジイ的信頼性評価

3.1　ファジイ確率を用いた破壊確率の計算

ファジイ事象の概念は，本質的に確率的なものではないが，ファジイ集合によって表現されるあいまいな事象がどれぐらいの割合で生起するかの確率を定義できる．

確率空間の自然なファジイ化として，ファジイ確率空間は，次のように定義する．

k は Ω のファジイ確率空間 (Ω; k, p) で表される．ただし，確率測度 p は，次の性質を満足するものである．

① $P(\Omega) = 1$

② $\chi, \chi' \in k$

$\chi \cap \chi' = 0 \rightarrow P(\chi \cup \chi') = P(\chi) + P(\chi')$

そこで，ファジイ事象を $E \in k$ として，その特性関数を χ_E とする．ファジイ事象の確率 $P(E)$ は，

$$P(E) = \int_R \chi_E(x)\ dp \tag{3-1}$$

で定義される．

つぎにファジイ確率を用いた破壊確率の計算は，

$$Pf = \int_{R<S} f_R(r) f_S(s)\ drds \tag{3-2}$$

というように定義できる．ここで，f_R, f_S は，主観的不確定性を考慮した $R \cdot S$ のファジイ化された確率密度関数 $P(r) \cdot P(s)$ を正規化することによって求められる．これをある骨組構造物に当てはめるとする．

構造物全体の耐荷力を Γ，荷重の作用しているところの部材の耐荷力を R，作用荷重を S とする．またここで R は，Γ をばらつきをもった荷重係数 B 倍するということで評価することにする．

Γ と B のメンバシップ関数をそれぞれ $\mu_\Gamma(x)$, $\mu_\beta(y)$ とする．そうすると R のメンバシップ関数は，$\mu_{\Gamma\beta}(x, y)$ となり2変数になる．そこで α カットを用いる．

μ_Γ の逆関数を λ_Γ, μ_β の逆関数を λ_β とすると，

$$\left.\begin{aligned} \lambda_\Gamma(\alpha) &= \mu_\Gamma^{-1}(x) \\ \lambda_\beta(\alpha) &= \mu_\beta^{-1}(y) \end{aligned}\right\} \tag{3-3}$$

となり，

$$\begin{aligned} \lambda(\alpha) &= \lambda_\Gamma(\alpha) \cdot \lambda_\beta(\alpha) \\ &= \mu_{\Gamma\beta}^{-1}(x, y) \end{aligned} \tag{3-4}$$

となるので，1変数の式で表すことができる．

これを用いて R の確率 $P(r)$ を表すと，

$$\begin{aligned} P(r) &= \int_R \alpha\ dp = \int_R \alpha\ f(\alpha)\ d\lambda \\ &= \int_R \alpha\ f(\alpha) |\partial\lambda / \partial\alpha|\ d\alpha \end{aligned} \tag{3-5}$$

となる．これを正規化すると，

$$f_R(r) = p(r) / \int_{-\infty}^{\infty} p(r)\ dr \tag{3-6}$$

となる．ここに，

$$p(r) = dp(r) / dr \tag{3-7}$$

である．

また，S のメンバシップ関数を μ_S とすると，S の確率 $P(s)$ は，

$$P(s) = \int_S \mu_S(x)\ dp = \int_S \mu_S(x) f(x)\ dx \tag{3-8}$$

となる．

これを正規化すると，

$$f_S(s) = p(s) / \int_{-\infty}^{\infty} p(s)\ ds \tag{3-9}$$

となる．ここで，R, α, S は，それぞれ $[-\infty < x < \infty]$, $[0 < \alpha < 1]$, $[-\infty < y < \infty]$ の範囲である．

次に，μ_Γ や λ_Γ などのメンバシップ関数やその逆関数は，それぞれのあいまいさを表現する関数であり，$f(\alpha)$ や $f(x)$ などは，密度関数で，それぞれ一様な分布を採用することにする．また $F_S(r)$ は，分布関数である．

3.2　構造物系に対する信頼性指標の評価

いま，n 個の事象 Ei ($i = 1 \sim n$) を持つ系の場合，その和事象の確率は，ド・モルガンの定理を用いて表現すると，次のようになる．

$$P(E_1 \cup E_2 \cup \ldots \cup E_n) = 1 - P(\bar{E}_1 \cdot \bar{E}_2 \ldots \bar{E}_n) \tag{3-10}$$

ここで，E_i を点 i に作用する荷重による i 次の破壊事象とし，各モード間の事象は，独立であると仮定すると，(3−10) より，信頼性指標　は，

$$L = \prod P(\bar{E}_i) \tag{3-11}$$

と評価できる．

4. 数値シミュレーション

4.1 計算モデルの設定

1989. 10. 7に発生したロマプリータ地震により，880号線サイプレイス地区の道路高架橋が大被害を受けた．この道路は，**図4－1**の説明図のように標準幅員15.6mのＲＣ製のボックスガーダーで作られ，これを約25m間隔に建てられた2層の門形フレームで支えている．フレームは，多ヒンジ構造Ａ，Ｂとあと比較のための剛接構造Ｄであり，これを図4－2に示す．なお，構造形式Ａの上の梁はＰＣ製であり，形式Ｂ，ＤはＲＣ製であり，他の部材はすべてＲＣ製である．

このような地震被害を受けた構造物検討は耐震的な見地から文献5，6の報告書に詳細に検討されているが，ここでは応答スペクトル法的およびファジイ的取り扱い例を数値計算によって示してみる．

(1) 作用力の推定

まず**図4－2**のような構造物に作用する地震による水平力を推定するには，その構造物のばね定数を求めなければならない．ばね定数は，せん断分布係数［D値］による方法で計算する．このときＰＣ，ＲＣの弾性係数をそれぞれ

$$\mathrm{PC}: E_{PC} = 3.5\times10^5 \ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

$$\mathrm{RC}: E_{RC} = 2.7\times10^5 \ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

と仮定する．その結果，橋脚の固有周期 T_i (sec) は**表4－1**のように得られ，サンブレ周辺の地震記録から求めた地震加速度応答スペクトルは，図4－3のように求められているので，これを用いて最大加速度をrmsによって推定した結果を同じく**表4－1**に示している．この値を用いて推定した荷重 P_i は，**表4－2**のように求められる．

(2) 部材の強度の推定

この橋梁構造物が準拠した設計指針および設計図は明らかにされていないので，ＲＣ部材の終局曲げモーメントは，終局強度理論による精度で求めるのが望ましいが，ここでは適合性のよい略算式を用いる．すなわち，曲げ強度算定式は，日本建築学会：鉄筋コンクリート計算基準同解説[7]を用い，ＰＣ部材についても，順用する．

(a) はり部材

$$M_p = 0.9\cdot a_t\cdot\sigma_y\cdot d \qquad (4-1)$$

$$a_t = p\cdot b\cdot d \qquad (4-2)$$

ここに，

a_t：はり上ばあるいははり下ばの主鉄筋断面積

p ：引張鉄筋比

b ：はりの幅

σ_y：主鉄筋の降伏応力

d ：はりの有効高さ

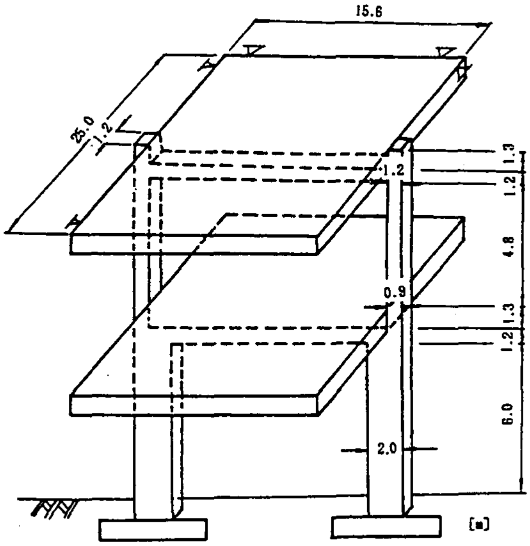

図4－1　対象構造物の概略図

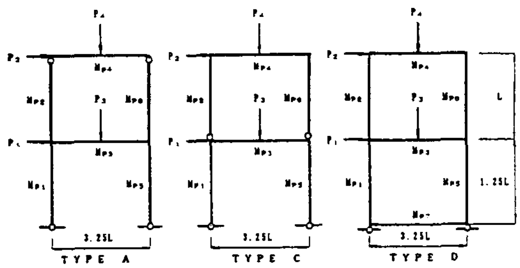

図4－2　数値計算モデル図

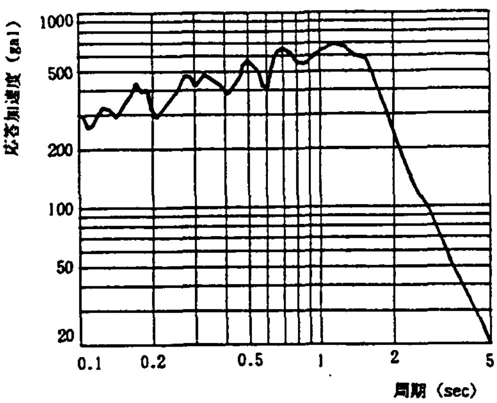

図4－3　Ewery Ville EWの5％加速度応答スペクトル[5]

(b) 柱部材

2) $N \leqq 0.4bDF_c$ のとき

$$M_p = 0.8\cdot a_t\cdot\sigma_y\cdot D + 0.5\cdot N\cdot D\{1-(N/bDF_c)\} \qquad (4-3)$$

2）$N>0.4bDF_c$

$$M_p=0.8\cdot a_t\cdot\sigma_y\cdot D+0.12\cdot b\cdot D^2\cdot F_c \qquad (4-4)$$

ここに，

a_t：引張鉄筋の断面積

b　：柱幅

D：柱背高

N：軸力

F_c：コンクリートの設計基準強度

これに具体的な数値を入れた結果が表4－3である．ここで鉄筋比を $p=1\%$ と仮定する．

表4－1　推定した橋脚の固有周期と最大加速度

i		1	2
A	T i(sec)	0.482	0.180
	α i(gal)	385	586
B	T i(sec)	0.462	0.153
	α i(gal)	415	558
D	T i(sec)	0.340	0.133
	α i(gal)	326	532

表4－2　推定した作用荷重の値

i		1	2	3	4
P i (tf)	A	237	363	603	607
	B	256	345	603	607
	D	201	329	603	607

表4－3　推定した部材の全塑性モーメントの値

i		1	2	3	4	5	6	7
Mpi (tf·m)	A	1392	604	1944	13550	1392	604	-
	B	1392	604	1944	3387	1392	604	-
	D	1392	604	1944	3387	1392	604	1792

4.2　計算例（その1）

図4－2における構造形式Aにおいて，荷重 P_k（$k=1,\ldots,m$）の係数 β_k と，各部材の塑性モーメント M_{pi} の係数 α_i（$i=1,\ldots,n$）をファジイ数として与えている．ここで，それぞれのばらつきを与えるファジイ係数を β_{ok}，α_{oi} とすると，P_k と M_{pi} は，図4－4のようなファジイ係数をもつことになる．

ここで，α_{oi}，β_{ok} は各部材，各荷重点でのあいまいさを与えるメンバーシップ関数の分布の拡りを与え，α，β は構造系全体のあいまいさの拡りの大きさを与える．

数値計算は，パラメタとして2.2の式（2-26）の構造系全体の耐荷力に相当する p_R（R_o と表示する）と作用荷重に相当する p_S（S_o と表する）との比，α，β，R_o のメンバーシップ関数の左右の拡り Dev_L と Dev_R（図4－5参照）と信頼性 L との関係を行なう．

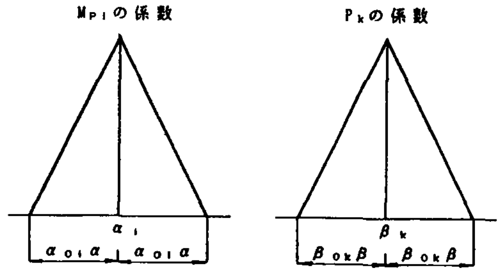

図4－4　ファジイ係数 β_{ok}，α_{oi}

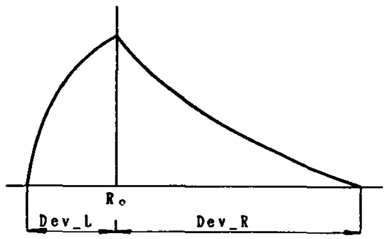

図4－5　耐荷力の分布の幅

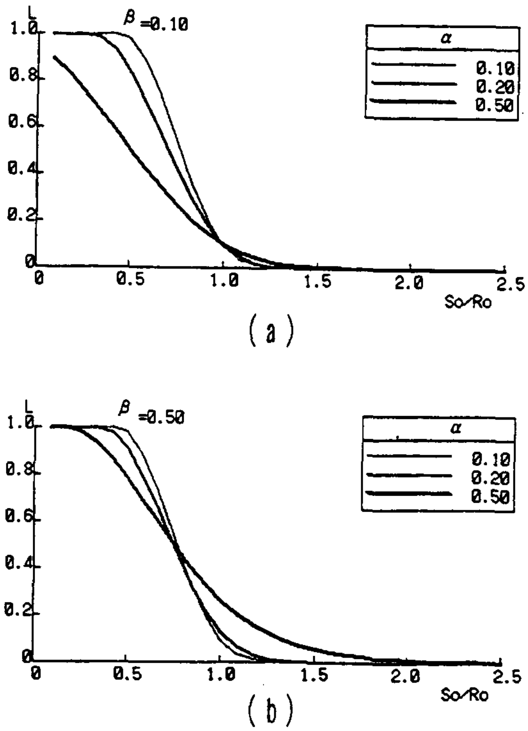

図4－6　$L-S_o/R_o$ の関係図（TYPE A）

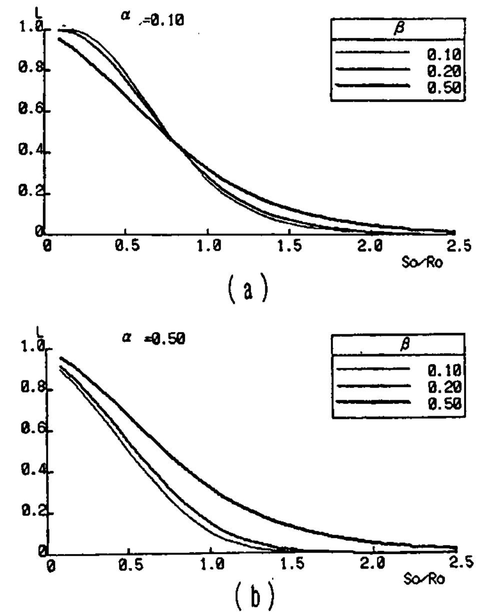

図4－7　$L-S_o/R_o$ の関係図（TYPE A）

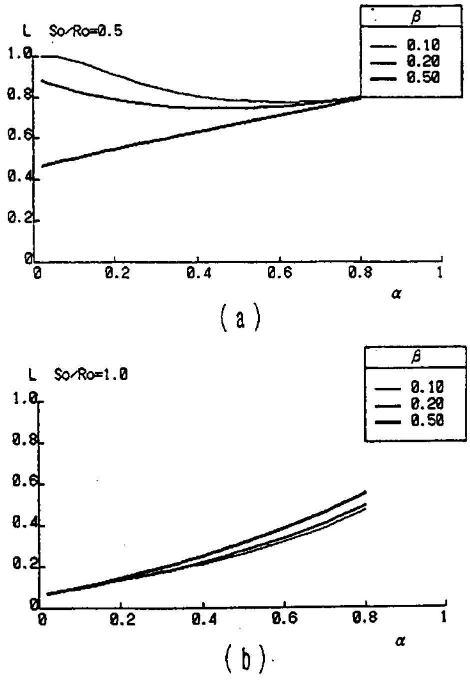

図4－8　$L-\alpha$ の関係図（TYPE A）

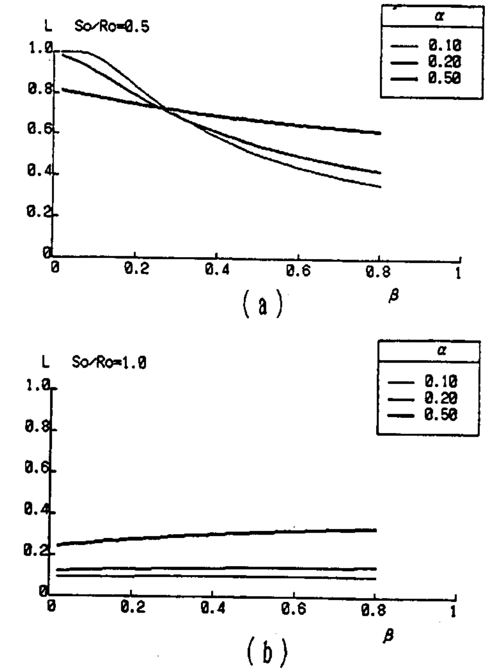

図4－9　$L-\beta$ の関係図（TYPE A）

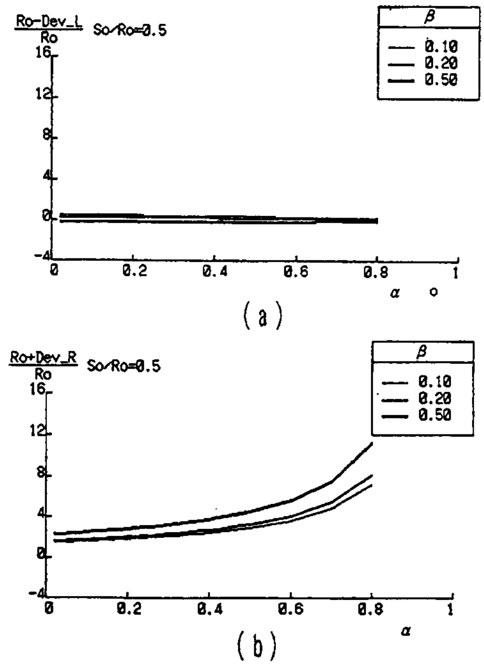

図4－10　$(R_o-\mathrm{Dev\_L})/R_o-\alpha$
および $(R_o-\mathrm{Dev\_R})/R_o-\alpha$ の関係図

まず，図4－6(a),(b)は，$L-S_o/R_o$ の関係をパラメタ $\beta=0.1, 0.5$ に固定し，パラメタ $\alpha=0.1, 0.2, 0.5$ に変化させた場合を示している．図の結果から，$\beta=0.1$ の場合，α の値が大きくなるに従って，信頼性 L は低下しているが，$\beta=0.5$ の場合，S_o/R_o が約0.7付近で α の関係が逆転している．すなわち，$S_o/R_o<0.7$ では α の値が大きいほど信頼性 L が低下しているが，$S_o/R_o>0.7$ では α の値が大きいほど信頼性 L が増加している．

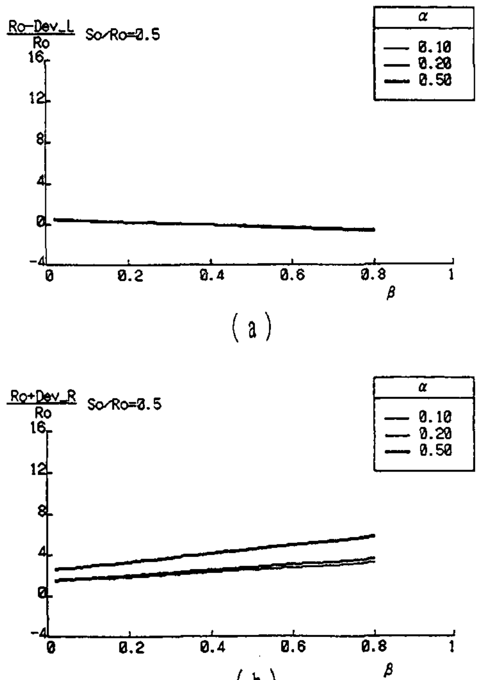

図4－11　$(R_o-\mathrm{Dev}_{-}\mathrm{L})/R_o-\beta$
および $(R_o-\mathrm{Dev}_{-}\mathrm{R})/R_o-\beta$ の関係図

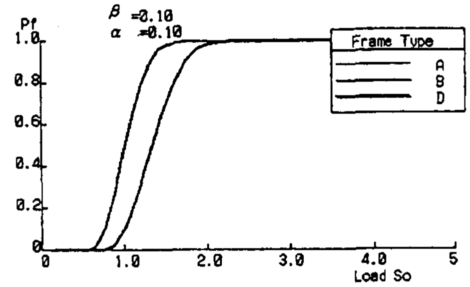

図4－12　P_f-S_o の関係図（その１）

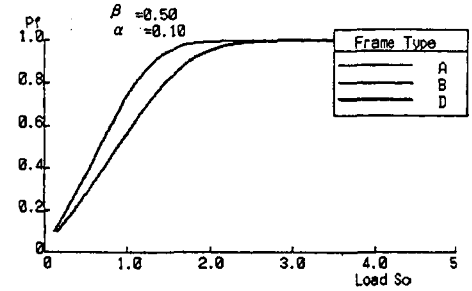

図4－13　P_f-S_o の関係図（その２）

図4－7(a), (b)は，$L-S_o/R_o$ の関係をパラメタ $\alpha=0.1, 0.5$ に固定し，パラメタ $\beta=0.1, 0.2, 0.5$ に変化させた場合を示している．図の結果から，$\alpha=0.1$ の場合，S_o/R_o が約 0.7 で α の関係が逆転している．すなわち，$S_o/R_o<0.7$ では β の値が大きいほど信頼性 L が低下しているが，$S_o/R_o>0.7$ では β の値が大きいほど信頼性 L が増加している．一方，$\alpha=0.1$ の場合，β の値が大きいほど信頼性 L が増加して，S_o/R_o が 1 よりかなり大きい値まで大きな L の値を有している．

つぎに，**図4－8(a), (b)**は，$L-\alpha$ の関係をパラメタ $S_o/R_o=0.5, 1.0$ に固定し，パラメタ $\beta=0.1, 0.2, 0.5$ に変化させた場合を示している．図の結果から，$S_o/R_o=0.5$ の場合，β が 0.1, 0.2 で，α が約 0.6 付近まで L が低下しその後 α の増加と共に増加し，$\beta=0.5$ では，α の増加と共に増加している．一方，$S_o/R_o=1.0$ の場合，β の値が大きいほど信頼性 L が大きく，α の増加と共に増加している．

つぎに，**図4－9(a), (b)**は，$L-\beta$ の関係をパラメタ $S_o/R_o=0.5, 1.0$ に固定し，パラメタ $\alpha=0.1, 0.2, 0.5$ に変化させた場合を示している．図の結果から，$S\ /R_o=0.5$ の場合，β の増加と共に L が低下するが，$\beta=0.5$ の場合はその変化が小さい．一方，$S_o/R_o=1.0$ の場合，α の値が大きいほど信頼性 L が大きく，β の増加と共に若干増加している．

以上の**図4－6～4－9**の結果から，部材のファジイ的なばらつき α と作用力のファジイ的なばらつき β の構造全体に対する信頼性への影響は，S_o/R_o が小さい場合は α, β 共に大きいが，S_o/R_o が大きい場合は α の影響が大きいことを示している．また，荷重レベルが大きい場合で，ファジイ的ばらつき α，β が大きい場合に信頼性 L が大きくなっているのは，ファジイ破壊確率の計算の模式図から説明できる．いま，α を固定して β を大きくするということは，作用力の分布形状の拡りが大きくなることであり，ファジイ的な確率密度関数の値が相対的に小さくなり，耐荷力の分布関数は固定しているから，破壊確率が小さくなり，結果として信頼性が高くなったことになる．

図4－10(a), (b)は，**図4－5**に示したファジイ耐荷力のメンバーシップ関数の分布形状の拡りを α との関係で図示したものである．

S_o/R_o が 0.5 において，分布のピーク値からの偏りは左より右の方が非常に大きい．すなわち，Dev₋L は Dev₋R より非常に小さく，α に対して変化は小さい．一方，Dev₋R は，α に対して変化が大きい．

図4－11(a), (b)は，ファジイ耐荷力のメンバーシップ関数の分布形状の拡りを β との関係で図示したものである．

分布のピーク値からの偏りは左より右の方が非常に大きい．すなわち，Dev₋L は Dev₋R より非常に小さく，

α に対して変化は小さい．一方，Dev-Rは，β に対して変化が線形比例的に大きくなっている．

4.3　計算例（その2）

まず，4.1で地震時の最大作用力を推定した高架橋の，構造的な特徴についての概要は，つぎのように述べられている[5]．この高架橋には多ヒンジ構造が用いられている．ヒンジの配置箇所によって，3種類のタイプに分類できるが，本研究では，上層フレームの柱の上部にヒンジを配したAタイプと，上層下層共に柱の下部にヒンジを配したBタイプの2種類を選び，これらと比較するため，ヒンジを用いない剛節ラーメンをDタイプとしている．また，Aタイプの上層の梁には当時としてはめずらしいＰＣ構造が用いられており，ポストテンション工法によって，柱に曲げ応力が作用するのを防ぐためだと推測されている．

このようなラーメン構造について，破壊確率を計算した結果は図4－12，4－13である．ここで，塑性モーメントおよび作用力のファジイ的ばらつきは0.1, 0.5,の2種類としている．A，B，D各タイプの構造形式に対する耐荷力は，次のようになる．

A：1.31　M_p/L

B：1.48　M_p/L

D：1.73　M_p/L

ただし，この値は耐荷力の分布の平均値である．この耐荷力に相当する荷重が作用したときファジイ破壊確率を図から推定すると，ばらつきが小さい場合は95%になっているが，作用力のばらつきが大きくなると，70%となっている．

地震による最大作用力に対するファジイ破壊確率を求めると，作用力のばらつきが大きい時にも90%になっている．A，Bタイプについて最大作用力と耐荷力を比較すると，最大作用力はA：1.88，B：2.03 であるから，どちらも作用力の方が1.4倍近く大きいことがわかる．このように耐荷力が小さくなった要因としては，設計の際の地震による作用力の評価が低かったことと，ヒンジを多く配置した構造形式を採用したことが挙げられる．設計震度は0.06であったと報告されている．これを数値計算における無次元の作用力に直すと約0.29であるから，実際の地震による作用力の十分の一しか考慮されていなかったことになる．また，上層のフレームにヒンジが配置されることにより，静定に近い構造になり，構造要素の数少ない破壊で耐力が決まるので，耐荷力としては小さくなることになる．Dタイプと比較すると，A，Bタイプは耐荷力が小さいことからも明らかである．A，Bタイプについて，耐荷力を大きくするためには，次のような方法が考えられる．

①多ヒンジ構造を採用せず，すべて剛節とする．

②上層フレームの柱の断面を大きくし，外側への傾斜をなくす．

③帯鉄筋（せん断補強筋）の増加．

言い換えると，Dタイプのような剛節ラーメンを採用し，各部材の強度を大きくすることである．地震による水平方向の作用力も正確に評価し，設計において考慮する必要があろう．

5.　あとがき

本研究では，骨組構造を対象として現況における健全度や地震などによる損傷の診断において作用する荷重のあいまいさ，および構造物を構成する各部材のあいまいさを考慮した耐荷力と構造物全体のファジイ信頼性を算定した．その研究成果を挙げると次のようになる．

(1)　塑性モーメントと作用力を可能性分布のファジイ数として扱うことにより，耐荷力をばらつきのあるファジイ数として評価できた．算定には，可能性分布のＬＰ問題として扱うが，このときファジイスラックスの導入により耐荷力のピーク値を求めた後，分布形状を求める方法で行った．

(2)　ファジイ数として求まる耐荷力は，各部材の塑性モーメントのメンバーシップ関数により定まる分布（三角形）と作用荷重のメンバーシップ関数により定まる分布（三角形）の影響をうけ，その分布はピーク値から右裾の拡りが大きい偏りのある分布となった．

(3)　耐荷力をファジイ数として求めることにより，それを利用して各荷重作用点でのファジイ破壊確率を求め，構造物全体のファジイ信頼性（破壊確率）を求めた．

(4)　部材のファジイ的なばらつき α と作用力のファジイ的なばらつき β の構造全体に対する信頼性への影響は，S_o/R_o が小さい場合は α，β 共に大きいが，S_o/R_o が大きい場合は α の影響が大きいことを示していた．

(5)　実際の地震被害を受けた2層建形式の道路橋梁構造に，本研究の評価法を適用した．その結果，簡便な本手法の有効性が確認できた．

最後に，本研究にあたり貴重なご助言を頂いた本校助教授若林拓ならびに多くの協力を頂いた本校卒業生の森正浩，大原隆勝君に深く感謝の意を表わします．

参　考　文　献

1) 土木学会構造工学委員会編："構造物の安全性・信頼性"，土木学会，1976.10, pp.45～48.
2) 山田善一編："構造システムの最適化——理論と応用—"，土木学会，1988.9, pp.
3) 石川信隆，大野友則："入門・塑性解析と設計法"，森北出版，1988, pp.164～165.
4) 寺野寿郎，浅居喜代治，菅野道夫："ファジイシステム入門"，オーム社，1987.10, pp.122～129.
5) 家村浩和，亀井正博，丸山忠明，後藤洋三，大内一："ロマプリータ地震（1989.10.17）による橋梁被害の調査概要，1989.11, pp.27～47.
6) 北浦勝，池本敏和，佐藤忠信，杉戸真太，高田至郎："LOMA PRIETA 地震（1989.10.17）被害調査報告"，1990.1, pp.40～48.
7) 大崎順彦："実務家のための建築物の耐震設計法"，コロナ社，pp.189～246.