

損傷を受けた不静足構造物の信頼性解析

京都大学工学部 正 員 白石 成人
株式会社鴻池組 正 員 〇大島 昌彰

京都大学工学部 正 員 古田 均

1 はじめに 土木構造物の部材あるいは要素の損傷が構造物全体の安全性にどのような影響を及ぼすかをすることは、適切な維持管理を行う上で重要なことである。そのためにはまず、損傷度評価を行うことが必要であるが、部材の損傷状態、ましてや劣化、損耗状態を正確に知ることは経済的、時間的に非常に困難である。したがって本研究ではその損傷度をファジィ集合で表すことにより、技術者の経験や直感に基づく工学的判断を有効に利用し、言語変数を媒介として信頼性解析に反映させることを考える。

このようなファジィ理論を用いた評価法については、前回にも発表しているが、その方法は、対象とする構造物において可能な破壊モードを予め見出しおかなければならないという制約があった。構造物の不静足次数が高くなり破壊モードが多くなると、この方法では信頼性解析が困難となる。そこで本研究ではこの問題に対応すべく、また損傷により、支配破壊モードが変化する場合にも対応できる解析法について検討を加えた。

2 損傷を受けた構造物の破壊モードの自動生成法 ここでは、対象とする構造物の全ての破壊モードを相關の影響を考慮していくつかのグループに分け、そのグループ内で最大の破壊確率の破壊モードを代表モードとして選んでいくというPNET法を利用して石川の方法を損傷を受けた構造物の信頼性解析に適用する。すなわち、相関係数 $\bar{\rho}$ がある臨界相関係数 $\bar{\rho}_0$ より小さいという制約の中で、安全性指標 $\bar{\rho}$ を最小にするモードを順次選んでいく。したがって、それは式(1)、(2)のように非線形計画問題として定式化できる。

ここで記号 $\bar{\rho}$ はファジィ量を表す。また、 $\bar{\phi}$ を損傷の度合いを表す低減係数、 $\bar{\phi} \cdot \mu_R$ は損傷を受けた構造物の内力は事(抵抗)の平均値、 $(\bar{\phi} \cdot \sigma_R)^2$ はその分散、 μ_S は外力は事(荷重)の平均値、 σ_S^2 はその分散、そして、 $\bar{\rho}(n)$ は第 n 代表モードと第 N 代表モード間の相関係数、 $\widetilde{Cov}(Z_n, Z)$ はその共分散、 $(\sigma_{Z_n})^2$ は第 n 代表モードの安全余裕 $\widetilde{Z}_n (= [\text{抵抗}] - [\text{荷重}])$ の分散、 $(\sigma_Z)^2$ は第 N 代表モードの安全余裕 $\widetilde{Z}_N$ の分散を表している。

目的関数

$$\bar{\rho}_n = \frac{\bar{\phi} \cdot \mu_R - \mu_S}{\sqrt{(\bar{\phi} \cdot \sigma_R)^2 + \sigma_S^2}} \rightarrow \min \quad (1)$$

制約条件

$$\bar{\rho}(n) = \frac{\widetilde{Cov}(Z_n, Z)}{\sigma_{Z_n} \cdot \sigma_Z} < \bar{\rho}_0 \quad (2)$$

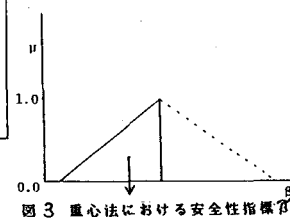
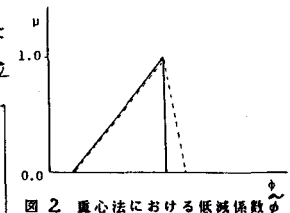
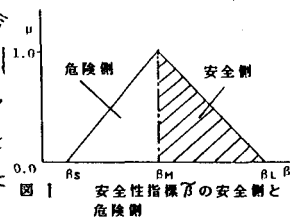
($n = 1, 2, \dots, N-1$)

$$P_f = \sum_n \Phi(-\bar{\rho}_n) \quad (3)$$

結局、構造物の破壊確率 P_f は、 Φ を標準正規分布関数として、式(3)で表わされる。

3 ファジィ量の演算法 損傷程度をファジィ量 $\bar{\phi}$ で表すと、複雑な形の $\bar{\rho}$ 、 $\bar{\rho}$ の演算方法をいかに簡潔に行うか、また $\bar{\rho}_n$ 、 $\bar{\rho}(n)$ と $\bar{\rho}_0$ の順序付けをいかなる方法で決定するかという問題が生じる。本研究では力学的特性を失わずに、しかも簡単に計算を行う方法

を提案した。ここでは簡単のため、 $\bar{\phi}$ の形を三角形状と仮定し、さらにそれから計算される $\bar{\rho}_n, \bar{\rho}(n)$ も三角形状と仮定し、その計算法はL-R関数の概念を用いることとする。また $\bar{\rho}_n$ の順序付けに関しては、 $\bar{\rho}$ を安全側と危険側に分けて考える(図1)。そして $\bar{\rho}$ が安全側の直に左右され、破壊の可能性を無視してしまうという危険性を小さくするために、できる限り $\bar{\rho}$ の危険側に着目するようにする。いま $\bar{\rho}$ は $\bar{\phi}$ に起因するものであるので、 $\bar{\phi}$ の安全領域を小さくすることを考える(図2一点線)、本研究では簡単のため特にそれを0と仮定した(図2二点線)。ここで $\bar{\rho}$ の順序付けは、 $\bar{\rho}$ (図3)の重心の位置で決定する。この方法を重心法と呼ぶこととすると、それは、



式(1),(2)の代わりに式(4),(5)のように定式化できる。ここで、添字s, m, Lはそれぞれ、最小値、中央値、最大値を表すものとする。(図1参照)

目的関数

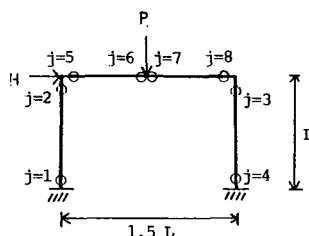
$$\frac{\rho_s + 2\rho_m}{3} \rightarrow \min \quad (4)$$

制約条件

$$\frac{\rho_s + \rho_m + \rho_L}{3} < \frac{\rho_s + \rho_m + \rho_L}{3} \quad (5)$$

4 計算例

図4に示す簡単な構造物について考える。表1のパターン1から3は、それぞれ $j=5, 6, 7, 8$ 、 $j=1, 2$ 、 $j=2, 3, 5, 8$ が損傷を受けているモデルを考えている。



L = 100 cm ○ 塑性ヒンジ
 $M_i = N(40.0 \text{ Nm}, 64.0 \text{ Nm})$
 $(i=1, 2, \dots, 8)$
 $H = N(0.5 \text{ N}, 0.01 \text{ N})$
 $P = N(1.0 \text{ N}, 0.04 \text{ N})$
 $\bar{\phi}_j = (0.65, 0.70, 0.75)$
 $\bar{\phi} = (0.5, 0.75, 1.0)$

本研究で考える構造モデル

メンバーシップ関数の幅(LとSの差)の小さなものを優先して順序付けをする方法1、メンバーシップ関数の危険側に着目した方法2の前の方法に比べ、本方法は安全側を無視したためか、破壊確率のs, m, Lの値が多少、大きくなっているものがある。(表1参照)

5 結論 損傷を受けた不静定構造物の安全性を評価するために必要な支配的な破壊モードの自動生成法がファジィ非線形計画問題として定式化が可能となった。また、ここに含まれるファジィ演算を実行するために、力学特性を考慮した方法を提案したが、前回の方法に比べ、精度も適当であり、計算も機械的にできて簡単であると思われる。

参考文献

1) 白石、古田、小山 “損傷構造物の信頼性解析” 土木学会関西支部年次学術講演概要、2) 石川ら “大規模骨組構造物の最適信頼性設計に関する一考察” 学会論文集

表1 破壊確率 $\bar{P}$ の計算結果

	本方法	方法1	方法2
パターン1	0.387	0.384	0.384
パターン2	0.998×10^{-2}	0.964×10^{-2}	0.964×10^{-2}
パターン3	0.883×10^{-4}	0.531×10^{-4}	0.531×10^{-4}
パターン4	0.163×10^{-2}	0.777×10^{-3}	0.163×10^{-2}
パターン5	0.440×10^{-3}	0.279×10^{-3}	0.440×10^{-3}
パターン6	0.124×10^{-3}	0.124×10^{-3}	0.124×10^{-3}
パターン7	0.110×10^{-1}	0.110×10^{-1}	0.110×10^{-1}
パターン8	0.102×10^{-2}	0.102×10^{-2}	0.102×10^{-2}
パターン9	0.883×10^{-4}	0.883×10^{-4}	0.883×10^{-4}

各欄の上段、中段、下段は、それぞれメンバーシップ関数のL, M, Sを表す