

山梨大学 正 杉山 俊幸
 神奈川県 正 酒井 利夫
 東京大学 正 伊藤 学

1. はじめに

建造物の安全性・使用性に関する諸要因が本来ばらつきを有する不確定量であることから、安全性・使用性の評価に確率論的概念を導入するのが望ましいという主張は今や広く認められている。しかし、構造設計に際しては確率論的に取扱うことの困難な主観的不明量が介在することも念頭におく必要があろう。また、本来確率論的処理が妥当である不確定量ではあるが、現時点においては統計資料が不足しているため、当面主観的判断を行なわざるを得ない場合もある。従って、技術者の経験・知識・能力などに基づく情報や、対象とする建造物が破壊したり機能を喪失した場合の社会的経済的影響・心理的影響に関する情報など、統計量として表わし難い主観的情報を如何に相込んでいくのが望ましいかを検討しておく必要があろう。こうした視点に立脚して、最近ではあいまいさを対象とするファジイ理論の導入によって主観的情報と積極的に構造設計に相込んでいこうとする試みがなされるようになり、幾つかの研究が報告されている。しかしながら、「ファジイ理論の構造設計への応用」に関してはまだ初歩的段階にすぎず、議論の余地が多く残されている。

そこで本研究では、建造物の安全性評価に関する分野でのファジイ理論の応用について、既往の研究と整理しその可能性・妥当性について、従来より考えられているベイズの方法との関連も含めて考察を加えることにする。(ファジイ理論の基礎的な定義など詳細は文献に譲ることにし、ここでは省略する。)

2. 既往の研究

既往の研究のうち代表的なものとその概要を表-1に示す。この他にも、拡張信頼性理論の判断係数 N の評価にファジイ理論を導入し、主観的な不確定性の影響を考慮した安全性指標の決定を試みたものもある。また Yao の研究などもあるが、これらは Brown の提案した方法と本質的な違いはないのでここでは省略する。

3. ベイズの方法とファジイ理論

ベイズの方法は、いわゆるベイズの定理に基づいて従来の経験・結果と新たなデータから得られる情報と結びつける方法で、決定理論の発展とともに最近注目を浴びてきている。このベイズの方法とファジイ理論との関連については次のように考えられる。

ファジイ理論はあいまいにしか評価できない情報についての理論ではあるが、確率論的不確定さといまいさをもった問題における意志決定にファジイ理論とベイズの方法を組合せて用いることができる。例えば、情報

研究者	Blockley ¹⁾	Brown ²⁾	Ditlevsen ³⁾
出発点	確率論的な立場から計算した破壊確率と現実の建造物の破壊のしやすさとの間に差がある ↓ 建造物の破壊事故原因 (i) 統計的な変動性ゆえに生じる荷重の設計値超過・強度不足 (ii) (i)以外の主観的にしか把握できない(幾つかの)要因(の重なり) (Ditlevsen は Gross Error と定義)		
要因(i)の取扱い	先験的に「破壊の起りやすさ指標」 π と与える (ただし $P_f = 10^{-n}$)	エントロピー-最大化の原則により確率 π と与える ($P_f = 10^{-n}$)	従来の確率論を用いて計算。 (部材断面の寸法決定にのみ用いる)
要因(ii)の取扱い	破壊に関する幾つかの要因を分類・定義 ① 構造形式は新しいタイプかどうか ② 施工方法は新方式かどうか etc. ↓ 諸要因が破壊に影響する度合(size) → 主観的に諸要因の重要度(weight)を評価 階層度関数の決り方は任意 (この取扱いは Blockley の提案)		
ファジイ理論に基づく操作	ファジイ理論に基づいて、各要因評価を統合した上で、主観的情報量 P を得る ↓ ファジイ関係 R を用いて π と P でファジイ化し、破壊の起りやすさ指標とファジイ集合の結び表わす		
結果の判読	ファジイ集合のままで表わされた破壊の起りやすさ指標と知識・経験のある技術者が判読する		
特長	主観的に下した評価と、本来客観的な指標である破壊確率に結びつけようとする考え方		

表-1 既往の主な研究の概要

源 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_r\}$ があり、ある量の事前確率を $P(s_k)$ 、 x_j という情報が得られた場合の事後確率を $P(s_k|x_j)$ とする。「 s_k が真」という条件での x_j の確率を $f(x_j|s_k)$ と仮定すると、ベイズの定理によれば

$$P(s_k|x_j) = f(x_j|s_k) \cdot P(s_k) / f(x_j) \quad \text{ただし} \quad f(x_j) = \sum_k f(x_j|s_k) \cdot P(s_k)$$

と表わされる。ここで、情報が唯一の数値 x_j ではなく、 X 上のファジイ集合 M_m ；“ x_m の近傍”ということが観測されたとする。 M_m の X 上での帰属度関数を $\mu_{M_m}(x_j)$ とおくと、 M_m という情報を得た場合の事後確率は

$$P(s_k|M_m) = \sum_j f(x_j|s_k) \cdot \mu_{M_m}(x_j) \cdot P(s_k) / f(M_m), \quad f(M_m) = \sum_j \sum_k f(x_j|s_k) \cdot \mu_{M_m}(x_j) \cdot P(s_k)$$

と表わされる。すなわち、“だいたいある状態”ということがわかれば、“だいたどのような行動をとればよい”ということが導き得るわけである。このように、ファジイ理論とベイズの方法は相対立するものではなく、むしろファジイ理論によってベイズの方法を拡張しようとも見せよう。

4. 考察

荷重や強度の統計的なばらつき（客観的情報）以外の、人間が介在したりすることによって生ずる様々な要因—主観的情報—が構造物の安全性に及ぼす影響を評価する一手法として応用されようとしているのがファジイ理論である。すなわち、「構造物の安全性に関するある種の高度な工学的判断は長年の経験や勘、高度な専門知識を必要とする。その際、その判断材料となる幾つかの要因が明確に指摘でき、各要因についての評価から最終的な結果としての工学的判断に至るまでのプロセスがモデル化できたとする。そうならば、特に長年の経験や勘、専門知識が少ない技術者でも、（一段低レベルの）各要因についての簡単な評価を行えば、熟練者と同様の工学的判断が下せる」ことになるのである。従って、ファジイ理論はこの主観的な認識過程の一つのモデル化と見なせるが、このような観点から、前述したような研究が幾つか報告されているわけである。そこでこのファジイ理論の構造設計分野への適用の可能性・妥当性について検討してみることにする。

まず、ファジイ理論を用いるに際しては常に帰属度関数の決定が問題となるが、ベイズの方法も、「事前分布を仮定しなければならないが、何ら情報がないか少ない場合にはこの分布形を主観的に決定せねばならず、そこにある程度の任意性が入ることは不可避である」という実用上の根本的な問題を有している。従って、仮にベイズの方法の適用を認めるのであれば、ファジイ理論の適用を否定する理由は全くないことになる。

さて、現時点において（ベイズの方法も含めて）ファジイ理論の構造設計への応用に関して大きな障害となっているのは、Ditlevsenも指摘しているように、主観的評価とファジイ理論に基づいて構造物の安全性評価に組込んでいく上での基礎となる情報が非常に不足しており、また、この種の情報収集も容易でないことである。このことは、比較的得やすい客観的情報においてさえ、不確定量の確率分布の形の同定が半永久的に不可能であることから裏付けされよう。しかし、さらに注目すべきなのは、仮に情報がある程度得られたとしても、文献(4)にみられるように、適当な仮定の下でファジイ理論を応用して安全性指標を計算したところで、その値に有意な差が認められないことである（ファジイ理論を用いた場合とそうでない場合の安全性指標の値の差は、少数点以下2桁目の差にすぎない）。このことは、著者の1人が行なった簡単な数値計算（構造物の破壊確率をファジイ理論を用いて算出⁶⁾）からも確かめられている。

以上を総合すると、現時点においては、構造物の安全性評価に関してファジイ理論が特に有用であるとの確信は得難いようである。ただし、これはある程度の適用範囲を有する設計示方書を作成する際の応用に関してであって、具体的に一つの構造物あるいは対象を目前にした場合の安全性評価については、ファジイ理論を応用した認識過程モデルは、ベイズの方法と共に、適用の可能性は十分にあると思われる。自動制御の分野でファジイ理論が積極的に応用され好結果を生むようになるまで10年程費やされていることを考慮すると、構造設計の分野においても、今後のより多方面からの研究によって新しい領域が開かれていくことも期待できよう。

参考文献) 1) D. I. Blockley; Predicting the likelihood of Structural accidents, Proc. ICE, Part 2, 1975, Dec. 号 2) C. B. Brown; A Fuzzy Safety Measure, ASCE, Vol. 105, EM 5, Oct. 1979 号 3) O. Ditlevsen; Formal and Real Structural Safety, Influence of Gross Errors, IABSE Proc. P-36/80, Nov. 1980 4) 北島賢治 他; Fuzzy 代数の信頼性解析への適用に関する一考察, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集, I-329, 1980 5) J. T. P. Yao; Damage Assessment of Existing Structures, ASCE, Vol. 106, EM 4, Aug. 1980 6) 酒井利夫; 構造物の信頼性解析モデルに関する研究, 昭和55年度東京大学修士論文 1981年3月