

京都大学大学院 学生員 川村 幸男 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 橋梁事故解析では、事故の直接的な原因だけでなく、その誘因となる2次的な原因、すなわち、主観的不確定要因の影響まで考慮することが必要である。筆者らは、これまでに事故解析にフォールトツリー解析(FTA)とファジィ理論を適用し、主観的不確定要因の影響を評価し、その重要性を明らかにしてきた¹⁾。この方法では、各不確定要因は言語変数の形で評価され、その総合的評価値をFTAの構造関数を用いて求められる。その際、構造安全性は総合的評価値の帰属度関数を用いて評価される。本研究では、この帰属度関数の評価に、確率測度を拡張した測度を用い主観的不確定性をより明確な形で取扱うことを考える。すなわち、ファジィ測度で定義されるファジィ積分により、総合的評価値を定量的に求め事故の不可避性を明らかにする。また、ファジィ測度の規定の仕方により主観的不確定性が事故解析にどのような影響を与えるかも検討する。さらに、各事故原因の重要度を、ファジィ積分を用いて評価し、構造物の事故解析における主観的不確定性の重要性を明確にする。

2. ファジィ測度とファジィ積分^{2),3)} 通常の評価における測度には一般に加法性が仮定されており、面積の計量というような物理的な計量概念が用いられている。ところが事故解析のようなあいまいな事象を扱う場合には、必ずしもその評価尺度に加法性が成り立たず、単調性のみが保証される場合がある。このようなあいまいな対象を主観的に計量するためにファジィ測度 g_λ は考案されたもので、区間 $[0,1]$ で次式(1)を満たすように定義される。

$$E, E' \in \beta \text{ (ボレル集合)} \quad E \cap E' = \phi : g_\lambda(E \cup E') = g_\lambda(E) + g_\lambda(E') + \lambda \cdot g_\lambda(E) \cdot g_\lambda(E'), -\infty < \lambda < \infty \quad (1)$$

$$g_\lambda(E \cup E') > g_\lambda(E) + g_\lambda(E') ; \lambda > 0 \quad (2), \quad g_\lambda(E \cup E') < g_\lambda(E) + g_\lambda(E') ; \lambda < 0 \quad (3)$$

($E \cap E' = \phi$) 式(1)の λ を変化させることにより、式(2)(3)のように相乗、減殺効果を g_λ にもたせることができる。ファジィ測度 g_λ は、確率分布関数と同様のファジィ分布関数 $H(r)$ を用いて構成され、 $H(r)$ と g_λ の関係式は、

$$H(r_k) = g_\lambda + H(r_{k-1}) + \lambda \cdot g_\lambda \cdot H(r_{k-1}), \quad H(r_1) = g_\lambda \quad (4) \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (H(r_0)=0, H(r_n)=1)$$

となる。式(4)で $\lambda=0$ のとき g_λ は確率測度と一致する。ここで、区間 $[0,1]$ の値域をもつ関数 $h(r)$ が与えられたとき、 $h(r)$ と g_λ を用いて、ファジィ積分は、次式のように定義される。

$$\int h(r) \circ g_\lambda = \bigvee_{i=1}^n [h(r_i) \wedge H(r_i)] \quad (5)$$

上式より、あいまいな対象の総合的評価が定量的に求められる。物理的には式(4)は h のファジィ期待値である。

3. ファジィ積分を用いた橋梁事故の評価法 橋梁事故にFTAを適用すると各基本事象(事故原因)がかなりあいまいな形で規定されることか多く、各要因の発生の有無よりも、その要因が問題となる場合がある。事故原因には主観的不確定性が多く含まれているため、その影響を評価するために言語変数を利用する。いま、ある事故原因 F_i の評価を E_i 、事故原因の大きさの評価を G_i 、その重要性を I_i とすると評価 E_i は、

$$E_i = G_i \cap I_i \quad (6) \quad E_i, G_i, I_i : \text{ファジィ集合}, \cap : \text{積集合}$$

E_i, G_i, I_i の帰属度関数を $\mu_{E_i}, \mu_{G_i}, \mu_{I_i}$ とすると μ_{E_i} は、

$$\mu_{E_i}(u) = \mu_{G_i}(u) \wedge \mu_{I_i}(u) \quad (7)$$

と計算され、頂上事象に対する帰属度関数 $\mu_{ET}(u)$ は $\mu_{E_i}(u)$ をフォールトツリーから得られた構造関数 ϕ に代入し、

$$\mu_{ET}(u) = \phi(\mu_{E_i}(u)) \quad (8)$$

となる。ここで、 μ_{E_i} を定量的に評価し、総合的評価値を得るためにファジィ積分を適用する。 μ_{ET} のElement Value u を離散量にとり、 $h(u) = \mu_{ET}(u)$ と考え、各 u_k の帰属度 $\mu_{ET}(u_k)$ をファジィ測度 g_λ にとると、式(5)は μ_{ET} の評価値 μ_{ET} が決定される。また、式(4)における λ を変えることによりファジィ測度が変化し、評価尺度に主観的不確定性が反映できる。次に各事故原因個々の重要度を評価することを考える。事故原因 F_i の重要度は、各事故例について求めら

れた $\mu_{Ej}(u)$ を事故の不可避性から計算された重みを用いて総合化し、前と同様にファジィ積分を援用することにより決定される。すなわち、事故 j の反に対する評価 $\mu_{Ej}(u)$ をファジィ測度 g_j とし、 g_j を事故 j の総合的評価値 V_j を用いて重み付けをして、次式のファジィ積分を実行することになる。

$$f_h[\bigvee_j (w_j \wedge g_j)] = f_h[\bigvee_j (w_j \wedge \mu_{Ej}(u))] \quad (9) \quad \begin{matrix} w_j: \text{事故}j\text{の総合的評価値} \\ g_j: \text{事故}j\text{のファジィ測度} \end{matrix}$$

4. 数値計算例 橋梁事故における代表的な事故原因(2次的原因も含む)と、言語変数を用いた各要因に対する評価例を表-1に示す。

表-1の事故評価例Ex.1~5に対してフォールトツリーを用いて計算した総合的評価値 V_j の帰属度関数 $\mu_{Ej}(u)$ の例を図-1に示す。図-1の評価計算例では帰属度関数 $\mu_{Ej}(u)$ が $u=1$ に近い箇所で大なる帰属度をもつEx.2の事故評価例の方がEx.1より破壊が起りやすいと考えられる。この原因はEx.2では、事故原因の重要性 I (Importance)がV1(Very Large)と評価されている異常な出来事(地震)が生じているためである。 $\mu_{Ej}(u)$ のファジィ積分による評価値(ただし $\lambda=0$ と仮定)を表-1の最下段に示す。ここで、 $u=1$ のとき完全な破壊が生じ、 $u=0$ のとき破壊が生じないとしている。この表から、Ex.2はWeightが0.75と、Ex.1~5の中で最大値をとるため事故の不可避性が最も高いことがわかる。ファジィ測度 g_j の λ を変化させた結果を図-2に示す。Ex.1,2の $\mu_{Ej}(u)$ の変化は図より λ が大きくなると評価値に差がなくなることからわかる。このことは、 λ が大きくなると u の値が1に近いところよりも0に近いところを重視していることとなる。このように、 λ の値を変えることにより評価尺度に対する主観性が考慮される。次に、各事故原因の重要度の計算結果を表-1の右端に示す。この値を用いることにより、各事故原因を重要度に応じて分類することができる。本例題の結果からは、設計・施工ミスなど主観的不確定性に帰因する要因も、地震や予測不可能な事象などと同样に重要度が大きいことがわかる。

5. あとがき 本研究より以下の結論が得られた。

1) 言語変数を用いることで、主観的不確定性を含んだ事故原因の影響を考慮することができ、2) 総合的評価値の帰属度関数をファジィ積分を用いることにより定量的に評価することができ、事故の不可避性が評価できる。また、 λ を変化させることにより評価尺度に対する主観性を反映させることができる。3) 総合的評価値を重み係数と考え、各事故原因を重要度に応じて分類できる。今後は、実際の橋梁事故例を用いて本手法の適用性を検討することが必要であろう。

参考文献) 1) 川村, 白石, 古田: 事故解析への不確理論の適用に関する一考察, 昭和57年度関西支部年次学術講演会
2) 菅野道夫; 計測制御学会論文集 vol.19-3 pp 218-216, 1974 3) C.V.初彦, 浅居喜代治: ないはいシス
テム理論入門, オーム社 pp134-145, 1978 4) 古田, 白石: オート回構造工学シンポジウム pp1-8, 1982, 2

表-1 事故原因と評価計算例

No.	事故原因	size(Ex.)					Importance	f.hog
		1	2	3	4	5		
1	異常な出来事	Vs	V1	Vs	Vs	Vs	V1	0.9
2		Vs	Vs	Vs	M	Vs	L	0.6
3		Vs	Vs	Vs	Vs	S	M	0.4
4		Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	M	0.0
5		Vs	Vs	V1	Vs	Vs	V1	0.9
6	使用ミス	Vs	Vs	L	M	Vs	L	0.7
7	維持管理ミス	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	M	0.0
8	外的要因	L	S	L	Vs	Vs	L	0.7
9		L	S	M	Vs	Vs	M	0.5
10		S	S	S	Vs	Vs	S	0.3
11		M	S	S	Vs	Vs	S	0.3
12		S	V1	V1	V1	Vs	L	0.9
13	解析誤差	M	L	L	M	Vs	M	0.5
14	一休感の欠如	V1	S	V1	Vs	Vs	L	0.83
15	先例の欠如	L	S	S	Vs	L	M	0.5
16	解明されない事象	L	L	Vs	Vs	Vs	M	0.6
17	設計ミス	V1	L	L	V1	V1	V1	0.9
18	施工ミス	V1	L	L	M	Vs	V1	0.9
weight(f.hog)		0.6	0.75	0.7	0.6	0.4		

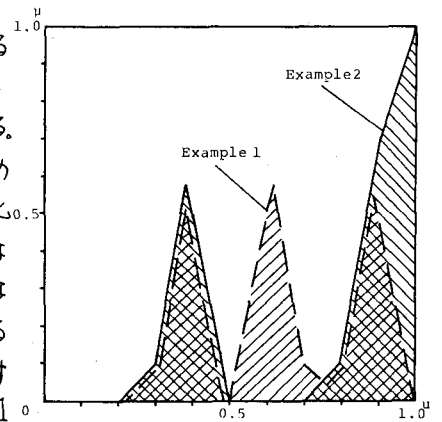


図-1 総合的評価値 V_j の帰属度関数の例

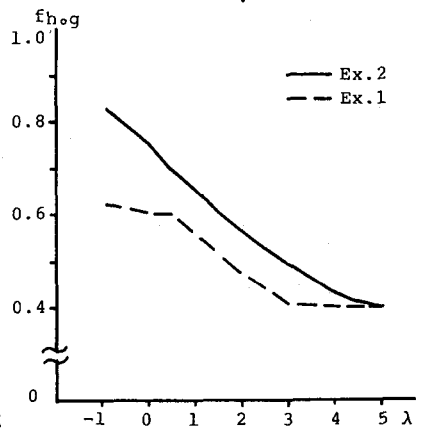


図-2 λ のファジィ積分への影響