

事故解析へのファジィ積分の応用

APPLICATION OF FUZZY INTEGRAL FOR ANALYSIS OF STRUCTURAL ACCIDENTS

白石 成人*・古田 均**・川村 幸男***

By Naruhito SHIRAISHI, Hitoshi FURUTA and Yukio KAWAMURA

1. ま え が き

構造物の安全性を合理的に評価するためには、設計・施工過程などに含まれる種々の不確定性の影響を定量的に把握することが必要である。これまでの構造物の信頼性解析では、確率・統計理論を基礎として、破壊確率・安全性指標などの尺度を用いて不確定性の影響を考慮してきた。しかしながら、実際の構造物における安全性が、確率・統計理論によって求められる安全性と異なっているのではないかと指摘がなされている¹⁾。これは、構造物の安全性を評価するには、不確定性の中のいわゆるランダム性を持ち、確率変数として取り扱える荷重・抵抗のばらつきなどの不確定性のみを考慮するだけでは不十分であることを示している。すなわち、このようなランダム性をもつ不確定性だけでなく、ある程度の経験や工学的判断によって評価されるヒューマンエラーや施工中の過誤、さらには構造設計を取り巻く社会的・政治的・経済的要請などの不確定性（本論文ではこれらの不確定性を主観的不確定性とよぶ）の影響をも定量的に把握し構造物の安全性評価に結びつけていくことが、真に有効な信頼性解析を行うためには必要である²⁾。そのためには、実際にどのような要因が主観的不確定性に含まれ、それらがどのように構造安全性に関与しているかを、実構造物の調査・実験を通じて把握することが重要である。

一般に土木構造物は大規模であり、多数の部材が複雑に組み合わされて作られているため、実構造物の全体あるいは部分に関しても実験・観測を行うことは容易ではなく、有用なデータを得ることは困難である。また、同一のものが大量に作られることがないため、同一条件下

の様なデータは得られず、たとえ得られたとしてもその量は十分ではない。そこで、数少ない既往構造物の破壊事故に対して事故解析を行い、事故原因の分析を通して不確定要因の抽出とその影響を把握することが、将来の構造物に対する安全性評価にとって必要となる。事故解析とは、発生した事故の調査・報告等から事故原因を明確にし、事故との因果関係を解明することで、将来の設計に有益な情報を与えようとするものである。さらに、本研究では、事故解析により、従来の信頼性理論では十分に考慮できなかった要因が明らかとなり、その影響を推定する手懸りが得られると考え、信頼性解析の基礎理論の1つとして位置づける。

過去、いくつかの橋梁事故に対し、調査委員会などからその事故原因が報告されているが、通常は設計者や専門家の経験・工学的判断により主観的に事故原因が評価され明確な形で評価されることは少ない。また、報告の大半は直接的な原因の言及にとどまることが多く、その誘因となる2次的原因や原因相互間の関連性などについてはあまり触れられていない。このように現在のところ、事故そのものを一般的な研究対象としてとらえ、その原因を系統的に把握し、定量的に分析する解析法は確立されていないと思われる。そこで、本研究では、橋梁事故の事故原因における主観的不確定性に注目し、その影響の定量的な把握と構造安全性における重要性を明らかにし、より合理的な事故解析法を見出すことを試みる。

まず、過去の橋梁事故調査報告より事故を引き起こしたと考えられる原因を抽出し、その中で主観的不確定性の重要性を明確にする。次に、大規模システムの信頼性を評価するために考案されたフォールトツリー解析(FTA)を導入し、これらの不確定要因が破壊にどのような形で影響を及ぼしているか、また各不確定要因相互間にどのような関係があるかについて検討を加える。

橋梁事故の場合、いくつかの事故原因が複雑に絡み合って破壊がもたらされると考えられ、さらにそれらの各

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 大阪市役所(元・京都大学大学院生)

事故原因が実際に生じたかどうかすら曖昧で明確な形で評価できない場合がある。すなわち、すでに起こった事故に対する解析でも、各事故原因に含まれる主観的不確定性の影響や原因相互間の関係を議論するためには、従来のFTAで用いられる2値論理演算では不十分であると考えられる。ここでは各事故原因の発生の有無や他の原因との関係における不確定性の影響を定量的に評価するために、主として主観性に起因する曖昧さを定量的に評価するのに適していると考えられるファジィ理論⁹⁾をFTAに適用することを考える。その際、FTAにファジィ演算を用いると、構造関数に論理和・論理積の定義を直接使うため演算の簡略化が図られる。このとき、構造安全性は事故の総合的評価値の帰属度関数として求められる。この帰属度関数の定量的評価を行うために、菅野¹⁰⁾により提案されたファジィ積分を用いて、帰属度関数の代表値を決定し、それから事故の不可避性を計算する。ファジィ積分は曖昧な対象の計量法として考案されたもので、確率測度の拡張であると考えられるファジィ測度で定義される。本研究では、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についても検討する。さらに、FTAにおける各事故原因の重要度をファジィ積分を用いて計算し、構造物の事故解析における不確定要因の重要性を明確にする。最後に、2, 3の数値計算例を行うことにより、ファジィ演算を用いたフォールトツリー解析の事故解析に対する有効性について考察する。

2. 橋梁の事故原因

橋梁事故が発生すると、人的災害も含めて大きな被害が引き起こされる場合が多い。一般に、事故原因の究明は調査委員会が組織されて行われるが、調査範囲はその事故のみに限定され、直接の原因には触れられているものの、事故の背景や基本事象(原因)と頂上事象(事故)の因果関係などについて、一般的な評価はなされないことが多い。しかしながら、一連の事故調査報告書を比較検討することにより、橋梁の事故原因の一般的傾向を把握することは可能である^{6), 7)}。その場合、直接的な原因のみならず、2次的原因まで含めて調査していくことが、事故解析を通して将来の構造安全性を議論するうえで重要である。たとえば、Smith⁸⁾は143例の橋梁事故について調査を行い、その結果、橋梁事故は洪水・地震・風などの自然現象で生じることが多いと述べている。しかし、これは直接事故に関与する1次的原因のみに注目しているためであり、その誘因となる原因については考慮していない。たとえば、洪水による事故について考えてみた場合、ピーアが洗掘されており橋梁を取り巻く環

境の整備がなされていなかったとか、維持管理が不十分であったなどの2次的原因の存在によって洪水時に事故が引き起こされたとも考えられる。他の事故例についても同様に考えていくと、2次的原因である設計ミス・解析誤差・施工誤差・ヒューマンエラーなど(ここではこれらを主観的不確定要因という言葉で定義する)が事故の発生に大きな影響を及ぼしていることがわかる。このように、実構造物の破壊事故には必ず主観的不確定性が関与しており、その影響を考慮することの必要性が認識できる。

以下に、Smithの調査例および日本の橋梁事故例⁹⁾をもとに、2次的原因をも考慮して得られた代表的な橋梁の事故原因を、計画・設計・施工・維持管理の段階に注目して挙げる。

- | | | |
|-------|---|--|
| 設計全般 | { | <ul style="list-style-type: none"> 1. 天災・異常な出来事(地震・風・洪水・火災等) 2. 構造物の外的要因(経済・政治・産業・職業的要因等) |
| 計画・設計 | { | <ul style="list-style-type: none"> 3. 荷重作用の予測誤差 4. 抵抗強度の統計的ばらつき 5. 構造物の解明されていない挙動 6. 設計者の人為的ミス |
| 施工 | { | <ul style="list-style-type: none"> 7. 設計・施工における一体性の欠如 8. 知識の不足・先例の欠如 9. 施工中の人為的ミス 10. 施工段階における予測し得ない出来事の発生 |
| 維持管理 | { | <ul style="list-style-type: none"> 11. 構造物の不適切な使用 12. 構造物の不適切な維持管理 |

3. ファジィ理論の事故解析への応用

構造物の事故解析を行う場合、直接的な原因のみならず誘因となる2次的原因まで考慮して、事故原因が事故に及ぼした影響や因果関係を検討し、事故の発生機構を明確にしなければならない。その際、事故原因間の関係が複雑になり考慮すべき原因数も多くなるため、体系的な解析を行う必要がある。ここでは橋梁の事故解析に、大規模システムの信頼性解析法であるFTA¹⁰⁾を利用することを考える。

FTAでは、頂上事象・中間事象・基本事象を規定し、それらを“AND”あるいは“OR”の論理ゲートで結ぶことによりフォールトツリー(FT)が構成される。ANDゲートはすべての入力事象が生じたとき出力事象が発生するという関係を、ORゲートは入力事象のうち1つ以上が生じたときに出力事象が発生するという関係を表わす。FTAの利点としては、事故原因間の関

連性が明確に把握でき他の方法で見出し得なかった事故原因を見出すことができる、あるいは、事故に重大な影響を及ぼした原因の発生過程が明らかになり事故の発生機構が視覚的に理解できるなどが挙げられ、この方法によると事故の演繹的な解析が可能になる。

ある基本事象の発生が頂上事象にどのような影響を与えるかを知るために、構造関数 ϕ が定義される。いま、基本事象 i の状態を x_i で表わすと、 x_i は次のように 2 値論理で定義される。

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{基本事象 } i \text{ が生起している} \\ 0 & \text{基本事象 } i \text{ が生起していない} \end{cases} \quad \dots(1)$$

頂上事象の状態 ϕ は、 $\underline{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ の関数として次式で定義される。

$$\phi(\underline{x}) = \begin{cases} 1 & \text{頂上事象が発生している} \\ 0 & \text{頂上事象が発生していない} \end{cases} \quad \dots(2)$$

AND, OR の論理ゲートに対する構造関数は、

$$\phi_{\text{AND}}(\underline{x}) = \prod_{i=1}^m x_i \quad \dots(3)$$

$$\phi_{\text{OR}}(\underline{x}) = \prod_{i=1}^m x_i \stackrel{\text{def}}{=} 1 - \prod_{i=1}^m (1 - x_i) \quad \dots(4)$$

と定義される。ここに、 m は基本事象の数である。一般の FT では AND ゲートと OR ゲートが組み合わされて頂上事象の構造関数が構成されるので、直接 $\phi(\underline{x})$ を計算して頂上事象の状態を知ることは、基本事象の数やゲートの数が多くなると、論理演算が複雑になるため容易ではない。さらに、構造関数が 2 値論理で定義されているため、基本事象の発生の有無が明確でない場合には、使うことができない。そこで、本研究では、AND, OR ゲートに対する構造関数を論理和・論理積の考え方を直接用いて、式 (3), (4) を次式のように定義し直す。

$$\phi_{\text{AND}}(\underline{x}) = \bigwedge_{i=1}^m x_i \stackrel{\text{def}}{=} \text{Min } x_i \quad \dots(5)$$

$$\phi_{\text{OR}}(\underline{x}) = \bigvee_{i=1}^m x_i \stackrel{\text{def}}{=} \text{Max } x_i \quad \dots(6)$$

式 (5), (6) はファジィ理論において代数演算が Min, Max 演算のみで実行されることに対応している。これらは式 (3), (4) に比べて簡単な形をしており、頂上事象に対する構造関数 ϕ の値を直接計算でき、計算の簡略化が図られる。また、基本事象 i での状態 x_i を必ずしも 0 と 1 の 2 値論理で取り扱う必要がなく、 x_i は $\{0, 1\}$ から $[0, 1]$ に拡張可能である。

橋梁事故に対してフォールトツリーを作成すると、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が多い。そして、各事故原因の発生の有無が橋梁事故を引き起こしたかどうかよりも、各要因がどの程度橋梁事故に影響を及ぼしているかが問題になることがある。そこで、事故原因の規定の仕方や他の事故原因との関連性などに伴う主観的不確定性を考慮し、各原因の事

故に及ぼす影響を定量的に評価するために、ファジィ集合の考え方を考える。

事故原因に含まれる主観的不確定性の影響を断定的な形で評価することは困難であるため、ここでは Blockley⁽¹¹⁾ により提案された言語変数による評価法を利用する。いま、ある事故原因を F_i と表わすと、 F_i の要因評価は言語変数を用いて、たとえば発生した破壊事故における F_i の生起の程度の大きさ (G_i) が大であったとすれば Large, 中程度であれば Medium, 小さかったとすれば Small という形で行う。さらに、 F_i が生起したときの破壊事故に及ぼす影響や他の事故原因との関連性に伴う影響を考慮するために、事故原因の重要性 (I_i) を大きさの評価と同様に言語変数を用いて評価し、両者を組み合わせた形で F_i の影響を定義する。この重要性 I_i は FT の構築に伴うあいまいさ、すなわち各基本事象の FT における位置の設定や各事象間の関連に伴うあいまいさを考慮するためのもので、拡張信頼性解析における補正係数の役目をもつものである⁽²⁾。ここで用いる各言語変数は $[0, 1]$ で定義される台集合をもつファジィ集合として規定され、その特性は帰属度関数で与えられる。 F_i の評価値を E_i , 事故原因の大きさの評価を G_i , その重要性の評価を I_i とすると、評価値 E_i は次式のように表わされる。

$$E_i = G_i \cap I_i \quad \dots(7)$$

ここに、 E_i, G_i, I_i は言語変数で規定されるので、 $[0, 1]$ で定義される台集合をもつファジィ集合となる。記号 \cap は積集合を表わす。ここで、 E_i, G_i, I_i の帰属度関数をそれぞれ $\mu_{E_i}, \mu_{G_i}, \mu_{I_i}$ とすると、 μ_{E_i} は

$$\mu_{E_i}(u) = \mu_{G_i}(u) \wedge \mu_{I_i}(u), u \in [0, 1] \quad \dots(8)$$

ここに、記号 \wedge は Min を表わす。

頂上事象に対する帰属度関数 $\mu_{E_T}(u)$ は、各事故原因 F_i の帰属度関数 $\mu_{E_i}(u)$ を FT から得られた構造関数 ϕ に代入することにより次のように求められる。

$$\mu_{E_T} = \phi(\underline{\mu}_{E_i}) \quad \dots(9)$$

ただし、 $\underline{\mu}_{E_i}$ は帰属度関数 μ_{E_i} を成分とするベクトルである。上式より、頂上事象の状態は $\{0, 1\}$ の 2 値ではなく、帰属度関数の形で評価できることになり、種々の主観的不確定性を含めたより汎用的な形で定義できることになる。

4. ファジィ積分を用いた評価法

事故解析における構造安全性は、3. の式 (9) で示された総合的评价値 E_T の帰属度関数 $\mu_{E_T}(u)$ で評価される。本節では、この $\mu_{E_T}(u)$ で表わされる主観的不確定性の影響をより明確な形で取り扱うために、ファジィ測度で定義されるファジィ積分を用いて帰属度関数の代

表値を決定することを考える。ファジィ積分を用いることにより、 $\mu_{E_T}(u)$ の台集合である u の定義に含まれるあいまいさをより柔軟な形で評価でき、さらにファジィ演算に基づく計算法の統一性を確保することができる。明確な定量的評価が可能になれば、破壊事故の不可避性が議論でき、さらには他の破壊事故との比較が行えることになる。

ファジィ積分の事故解析への適用を考える前に、ファジィ積分とその定義に用いられるファジィ測度⁹⁾について説明をする。通常の評価法における測度には一般に加法性が仮定されており、また面積の計量というような物理的な計量概念が基礎となっている。ところが、ファジィ測度は加法性の代わりに単調性のみが仮定され、確率測度を拡張したものと考えられ、あいまいな対象を主観的に計量するために考案されたものである。このファジィ測度に基づいてファジィ積分が定義され、複雑であいまいな対象の定量的評価が可能になる。

ファジィ測度 g_λ はボレル集合 B 上で定義される集合関数であり、 $E \in B$ に対して $0 \leq g_\lambda(E) \leq 1$ で、 $g_\lambda(\phi) = 0$ かつ $g_\lambda(X) = 1$ [ϕ : 空集合, X : 全集合] を満たし、さらに $E, E' \in B$ に対して、 $E \cap E' = \phi$ のとき次式を満足する。

$$g_\lambda(E \cup E') = g_\lambda(E) + g_\lambda(E') + \lambda g_\lambda(E) \cdot g_\lambda(E') \dots\dots\dots(10)$$

ただし、 \cup は和集合を表わす。また、パラメーター λ は $-1 < \lambda < \infty$ で定義され、この λ を変化させることにより、 g_λ は以下の性質をもつ。

$$g_\lambda(E \cup E') > g_\lambda(E) + g_\lambda(E') \quad \lambda > 0 \text{ のとき} \dots\dots\dots(11)$$

$$g_\lambda(E \cup E') < g_\lambda(E) + g_\lambda(E') \quad \lambda < 0 \text{ のとき} \dots\dots\dots(12)$$

式 (11), (12) は評価尺度としての相乗効果、減殺効果をそれぞれ表わす。また、 $\lambda = 0$ の場合にファジィ測度 g_λ は加法性を満たし、確率測度に一致する。 g_λ は具体的には、区間 $[0, 1]$ で単調的に増加する確率分布関数と同じ性質をもつファジィ分布関数 $H(r)$ を用いて構成される。 $H(r)$ と g_λ の関係式は

$$\left. \begin{aligned} H(r_1) &= g_\lambda \\ H(r_k) &= g_\lambda + H(r_{k-1}) \\ &\quad + \lambda g_\lambda H(r_{k-1}) \quad k=2, 3, \dots, n \\ H(r_n) &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

ただし、 g_λ は上式では離散化されており、 n はその総数である。

ある評価を行いたい問題に対して、 $[0, 1]$ の値域をもつ関数 $h(r)$ が与えられたとき、 $h(r)$ と上で述べた g_λ を用いてファジィ積分が次式のように定義される。

$$\int h(r) \circ g_\lambda = \bigvee_{k=1}^n [h(r_k) \wedge H(r_k)] \dots\dots\dots(14)$$

ただし、上式において $h(r_k)$ は $h(r_1) \geq h(r_2) \geq h(r_3) \geq \dots$ と値の大きい順に並べておく必要があり、実際の計算は離散化されて実行される。式 (14) より、あいまいな対象の総合的な評価値が定量的に求められ、計算された値は物理的には関数 $h(r)$ のファジィ期待値を表わすと考えられる。

上述のファジィ測度・ファジィ積分の考え方を構造物の事故解析に適用する。評価すべき総合的な評価値 E_T の帰属度関数 μ_{E_T} には、事故原因の評価に含まれる主観的不確定性の影響が考慮されているため、評価尺度としてはファジィ測度の方が適していると思われる。すなわち、加法性よりも緩やかな単調性のみを仮定したファジィ測度を用いて定量的評価を行う方が、主観的不確定性をよりの確に把握できると考えられる。式 (14) のファジィ積分の定義式を用いて式 (9) の帰属度関数 μ_{E_T} の代表値を求めるには、まず、 $\mu_{E_T}(u)$ の element value $u \in [0, 1]$ を離散量にとり、 $h(u) = u_k$ ($k=1, 2, \dots, n$) と考える。そして、各 u_k の帰属度 $\mu_{E_T}(u_k)$ をファジィ測度 g_λ と考える。このとき、代表値は次式のファジィ積分を実行することにより求められる。

$$u^* = \int h(u) \circ g_\lambda = \bigvee_{k=1}^n [u_k \wedge H\mu_{E_T}(u_k)] \dots\dots\dots(15)$$

ここに、 $H\mu_{E_T}(u)$ は $\mu_{E_T}(u)$ から得られるファジィ分布関数である。また、 u^* は $\mu_{E_T}(u)$ の代表値で μ_{E_T} の重心に対応し、各事故の不可避性の指標となる。

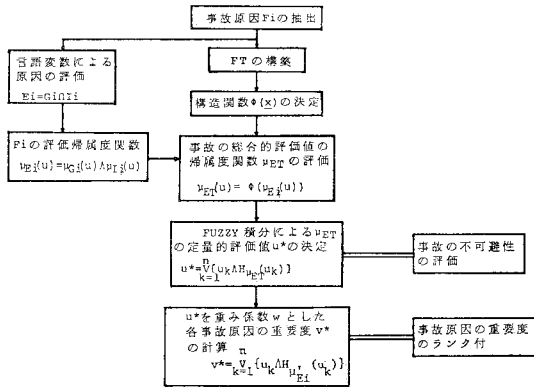
次に、各事故原因の橋梁破壊事故における重要度のランク付けについて考える。事故原因 F_i の重要度は単純に各破壊事故における評価値 E_i の和を考えても評価できるが、本研究では事故の不可避性の影響を重要度の評価に加味することを考える。すなわち、事故例 j について求められた F_i の帰属度関数 $\mu_{E_i,j}(u)$ を事故の不可避性から計算された重み w_j を用いて修正し、それらを j について総合化することによって、各事故原因の評価値 μ'_{E_i} を求める。

$$\mu'_{E_i} = \bigvee_{j=1}^l (w_j \wedge \mu_{E_i,j}(u)) \dots\dots\dots(16)$$

ここに、 l は事故例の数であり、重み w_j は事故例 j の代表値 u_j^* (式 (15) 参照) から求められる。そして、前と同様に帰属度関数 $\mu'_{E_i}(u)$ を g_λ と考え、以下のファジィ積分を実行する。

$$v_i^* = \int u_k \wedge H\mu'_{E_i}(u_k), \quad i=1, 2, \dots, m \dots\dots\dots(17)$$

ただし、 $H\mu'_{E_i}(u)$ は μ'_{E_i} から計算されるファジィ分布関数である。ここで、 v_i^* は事故原因 F_i の重要度を表わす指標となり、 m は事故原因の数を表わす。上式

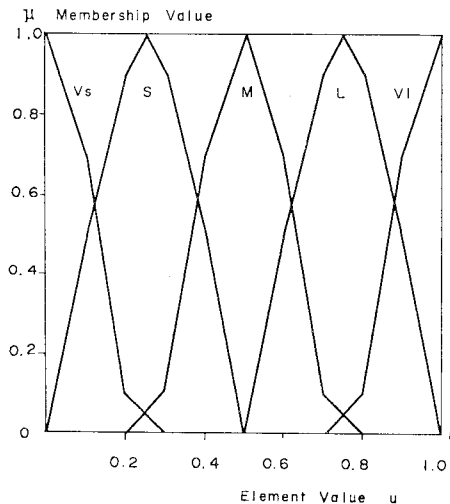


図一 事故解析の手順

より各事故原因の重要度が計量化でき、そのランク付けあるいは分類を行うことにより、破壊事故において重視すべき事故原因の一般的傾向が把握できる。さらに、その評価を用いることにより、破壊性状態あるいは被害程度による事故の分類も容易になると思われる。最後に本研究で考えている事故解析の手順の流れ図を図一に示す。

5. 数値計算例および考察

橋梁の破壊事故の原因に対して、5段階の言語変数 Very large (Vl), Large (L), Medium (M), Small (S), Very small (Vs) を用いて、その大きさ (size) と重要性 (importance) の評価を行う。本研究の計算例で



- Vl = Very large : 0.1/0.8+0.7/0.9+1/1
- L = Large : 0.5/0.6+0.9/0.7+0.9/0.8+0.5/0.9
- M = Medium : 0.1/0.3+0.7/0.4+1/0.5+0.7/0.6+0.1/0.7
- S = Small : 0.5/0.1+0.9/0.2+0.9/0.3+0.5/0.4
- Vs = Very small : 1/0+0.7/0.1+0.1/0.2

図二 言語変数に対する帰属度関数

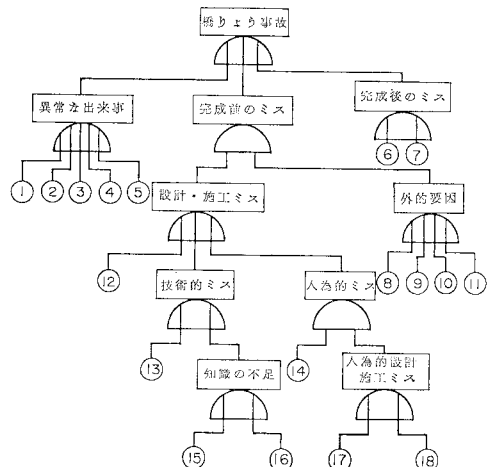
表一 事故原因と評価計算例

No.	事故原因	size (Ex.)					importance	\$f_{hog}\$
		1	2	3	4	5		
1	異常な出来事	Vs	Vl	Vs	Vs	Vs	Vl	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	Vl	Vs	Vs	Vl	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
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	0.4
11		M	S	S	Vs	Vs	S	0.4
12	予測不可能な事象	S	Vl	Vl	Vl	Vs	L	0.83
13	解析誤差	M	L	L	M	Vs	M	0.5
14	一体感の欠如	Vl	S	Vl	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	Vl	L	L	Vl	Vl	Vl	0.9
18	施工ミス	Vl	L	L	M	Vs	Vl	0.9
weight (\$f_{hog}\$)		0.6	0.75	0.7	0.6	0.4		

- Vl : Very large
- L : Large
- M : Medium
- S : Small
- Vs : Very small

用いた各言語変数の帰属度関数を図二に示す。図二の横軸 \$u\$ (element value) は、\$u=1\$ でいま考えている事故原因が発生し、\$u=0\$ で発生しないことを表わし、縦軸の帰属度 \$\mu(u)\$ は \$u\$ の値の確からしさの度合を表わす。

2. で示した代表的な橋梁の事故原因(2次的要因も含む)と、それらの言語変数を用いた評価例を表一に示す。いま、ある原因の生じている可能性が大変大きかったと考えられるなら、Very large という言語変数を用いて size の評価がなされ、同様に importance もたとえば Large というように評価がなされる。ここでは、



図三 フォールトツリーの例

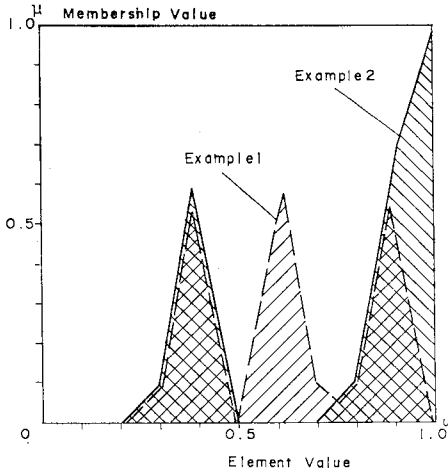


図-4 総合的評価値の帰属度関数

橋梁の破壊事故例として、Ex. 1~Ex. 5 の5つのもの
を考えている。これらの評価例に対して用いたフォール
トツリーの一例を 図-3 に示す。このフォールトツリー
についてファジィ演算を行って得られた総合的評価値
 E_T の帰属度関数 $\mu_{E_T}(u)$ の計算例を 図-4 に示す。
図-4 の帰属度関数は、 $u=1$ で完全な破壊事故が起こり
、 $u=0$ で破壊事故が起こらなかったことを表わして
いる。この計算例から、Ex. 2 の破壊事故の方が帰属度
関数 μ_{E_T} が全体として $u=1$ に近い付近で大きな値を
とり、Ex. 1 に比べて破壊が起こりやすかった、すなわ
ち事故の不可避性が高かったことがわかる。この原因
は Ex. 2 では FT で頂上事象に非常に近い位置にある
No. 1 の異常な出来事（たとえば、地震等）が生じてい
るためである。

次に、図-4 で示した Ex. 1, Ex. 2 の総合的評価値
の帰属度関数 $\mu_{E_T}(u)$ のファジィ積分による 定量的評

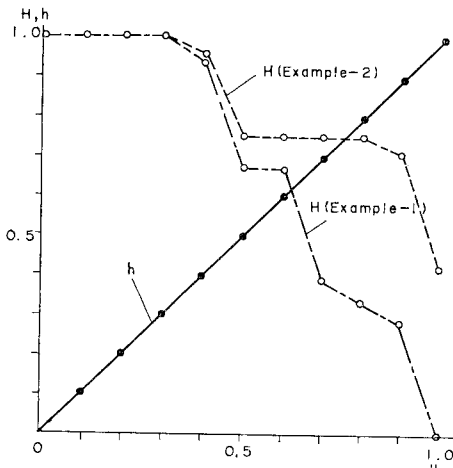


図-5 ファジィ積分による $\mu_{E_T}(u)$ の評価

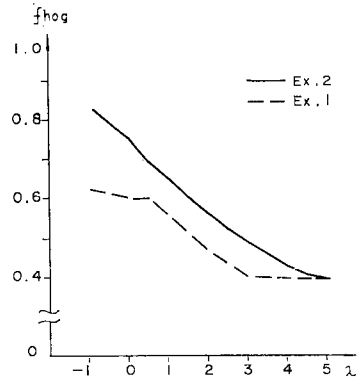


図-6 λ のファジィ積分への影響

価法を 図-5 を用いて示す。図-5 から、総合的評価
値の代表値が、 g_i （ただし、ここでは $\lambda=0$ と仮定し
ている）から得られるファジィ分布関数 $H(u)$ と $h(u)$
に Min-Max 演算（式 (16) を参照）を施すことによ
り、両関数の交点の u の値として得られることがわか
る。このとき、Ex. 1 の代表値は 0.6、Ex. 2 の代表値
は 0.75 と決定される。表-1 の最下段に Ex. 1~Ex.
5 のファジィ積分による総合的評価値を示す。この結果
からも、Ex. 2 が最大値 0.75 をとり事故の不可避性が
最も高かったことがわかる。

ファジィ測度 g_i のパラメーター λ を変化させたとき
のファジィ積分値の変化を 図-6 に示す。この図より
、Ex. 1, Ex. 2 の $\mu_{E_T}(u)$ の評価値は λ が大きくなると
差がなくなることがわかる。これは、 λ が大きくなると
 u の値が 0 に近いところよりも 1 に近いところの帰属度
を重大視することになり、結果的にファジィ積分値が小
さくなるためである。このように、 g_i は λ の値を変化
させることにより評価尺度そのものの主観性が考慮で
き、より幅広い尺度として用いることができる。

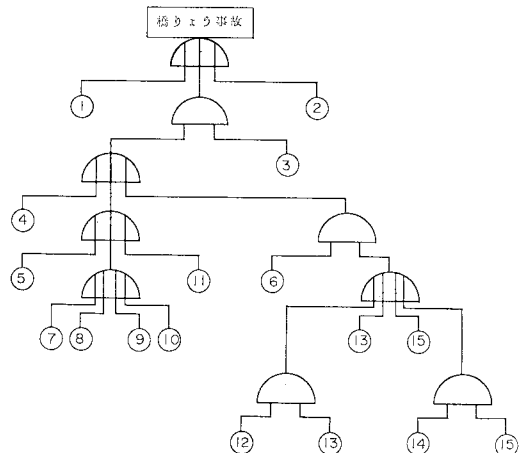


図-7 橋梁の破壊事故に対するフォールトツリー

表-2 橋梁事故の評価例

Bridge	No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tay		Vs	Vl	Vl	S-M	L-Vl	S-M	S	Vs	M-Vs	L-Vl	Vl	M-L	Vl	Vl	L-Vl
Qubec 1		Vs	Vs	M	Vl	Vl	L-Vl	Vs	Vs	S-L	Vl	L-Vl	Vl	L-Vl	L-Vl	Vs
Qubec 2		Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vl	Vs	Vs	L	Vs
Tacoma		Vs	Vs	Vs	Vl	L-Vl	Vs	Vs	Vs	Vs	Vl	M-L	Vl	Vs	Vs	Vs
Kings Bridge		Vs	Vs	M	Vs	Vs	L-Vl	Vl	Vs	Vs	Vl	M-Vl	Vs	M-Vl	Vl	Vl
Point Pleasant		Vs	Vs	Vs	Vs	S-L	Vs	L-Vl	Vs	Vs	Vl	S-Vs	Vs	Vs	Vs	Vs
Westgate		Vs	Vs	Vl	Vl	L-Vl	M-L	Vs	S-M	Vl	M-Vl	Vl	Vs	L	Vl	Vl
Second Narrows		Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	M-L	Vs	Vl	Vs	Vs
Heron Road		Vs	Vs	Vs	Vs	S-M	Vs	Vs	Vs	Vs	M-L	Vs	Vs	Vl	Vs	M-Vl
Lodden		Vs	Vs	Vs	Vs	S-M	Vs	Vs	Vs	Vs	M-L	Vs	Vs	L-Vl	Vl	Vl
Aroyo Seco		Vs	S	Vs	Vs	S-M	Vs	Vs	Vs	Vs	S-Vs	Vs	Vs	Vl	Vl	Vl
Listowel		Vs	L-S	L-S	Vs	Vs	M-L	Vs	Vs	Vs	S-Vs	Vl	Vs	S	Vl	Vl
Aldershot		Vs	Vs	Vs	Vs	L-Vl	L-S	Vs	M-Vs	Vs	M	Vl-M	Vl	Vl	Vl	Vl
Bedford		Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	L-Vl	Vs	Vl	Vs	Vs	Vs
Ronan Point		Vl	Vs	L	Vs	Vl	L	Vs	M	Vs	L	L-Vl	M-L	Vl	M	M-L
Camden		Vs	Vs	Vs	Vs	Vl	Vs	L-Vl	Vs	Vs	L	Vs	Vs	Vl	S-M	Vs
Stepney		Vs	M-L	Vs	Vs	Vs	Vs	Vl	Vs	M-Vl	Vl	Vs	Vs	Vl	L-Vl	L-Vl
Ilford		Vs	M-L	Vs	L	Vs	Vs	Vs	Vs	Vs	M-L	Vs	Vs	Vl	Vl	L-Vl
Ferrybridge		Vs	Vs	Vs	Vl	L	M-Vl	Vs	Vs	Vs	L	Vl	M	Vs	Vs	Vs
Mt Gambier		Vs	Vs	Vs	Vs	M-Vl	Vs	Vs	Vs	Vs	Vl	Vs	Vs	M-Vl	Vl	Vs
Sea Gem		Vs	L	Vs	Vs	M-L	Vs	Vs	L	Vs	Vl	M-L	Vs	L-Vl	Vl	Vl
Ardeer		Vs	M	S	Vl	L-Vl	M	Vs	Vs	Vs	Vl	Vs	Vs	Vs	Vl	Vs
Trans Ocean 3		Vs	Vl	Vs	Vs	L	Vs	Vs	L-Vl	Vs	L-Vl	M-L	Vs	Vl	Vs	Vs

for example S-M=G1 : Small, Ii : Medium, Vs=Vs-Vs

表-3 各橋梁事故の不可避性とその原因の重要度

Order	Bridge Name	f_{hog}	Order	(No.)	事故原因	f_{hog}
1	Sea Gem	0.6	1	10	解明されない事象	0.676
	Ronan Point	0.6				
2	Tay	0.5	2	5	解析誤差	0.622
	Westgate	0.5				
3	Ardeer	0.5	3	11	示方書の不備	0.6
	Trans Ocean 3	0.5				
4	Aroyo Seco	0.3	4	13	設計者の経験不足	0.6
	Stepney	0.25				
5	Ilford	0.25	4	15	現場管理者の施工ミス	0.571
	Quebec 1	0.1				
6	Quebec 2	0.1	5	4	予測不可能な事象	0.541
	Tacoma	0.1				
7	Kings Bridge	0.1	6	1	異常な出来事	0.5
	Point Pleasant	0.1				
8	Second Narrows	0.1	6	2	使用ミス	0.5
	Heron Road	0.1				
9	Aldershot	0.1	6	3	外的要因	0.5
	Listowel	0.1				
10	Bedford	0.1	6	6	一体感の欠如	0.5
	Camden	0.1				
11	Ferrybridge	0.1	7	8	先例の欠如(形式)	0.5
	Mt Gambier	0.1				
12	Lodden	0.1	7	14	施工ミス	0.5
		8	12	設計ミス	0.4	
						9

各事故原因について得られた重要度の計算結果を表-1の右端に f_{hog} として示す。本例題の計算結果からは、地震や予測不可能な事象などの事故原因と同様に、設計・施工ミスなどの主観的不確定性も大きな重要度をもっていることになる。この点に関しては、次の実橋の事故調査に関するデータ¹²⁾を用いて詳しく議論する。

Blockley¹²⁾ は、実際の 23 の落橋事故例について調査報告書などから検討を加え、主観的評価に基づく事故解析を行っている。ここでは、彼の用いた事故例とそ

の主観的評価の結果を利用することにより、本方法と Blockley の方法を比較し、各事故の発生可能性とその事故原因の重要度について検討する。

まず、Blockley の挙げた 25 の事故原因を 2. で示した分類をもとにして、表-3 の右欄に示すように 15 の項目に分類仕直す。これは、Blockley の挙げた 25 の原因をそのまま用いて FT を構築すると、各原因間にかなりの重複がみられるので、それらを除き整理するためである。さらに、Blockley の評価をもとに、各 15 項目の評価を前の例題と同様に size と importance を用いて言語変数の形で行う(表-2 参照)。図-7 の FT を用いて各事故の総合的評価値の帰属度関数を求め、さらにファジィ積分を実行してその代表値を求めた結果を表-3 の左欄に示す。表-3 では、事故の不可避性が高い順に、あるいは重要度の高い順に、それぞれ事故例と事故原因を整理している。ここで用いた 23 の事故例は、それぞれの帰属度関数のファジィ積分値の大きさにより

5つのグループに分けられることがわかる。ファジィ積分値が 0.6~0.5 と大きい値をとっている事故例の場合、FT において頂上事象に近い位置にある No. 1 の異常な出来事(天災等)や No. 2 の使用ミスが事故原因として存在し、それらの影響が大きく評価されている。ただし、West Gate Bridge は少し傾向が違い、外的要因と予測不可能な事象が組み合わさって大きな影響を及ぼしていると考えられる。この事故の不可避性の順位は、本方法と Blockley の方法では傾向は大体同じと

なるが、細かい順位あるいはグループ分けに若干の違いが出ている。これは、25の原因を15個に分類し直したこともあるが、本方法では総合的評価値をFTに基づいて求めており、それをファジィ積分値で評価していることによると考えられる。すなわち、Blockleyの方法では各事故原因の重要度はimportanceのみで考慮されており、総合的評価値は和(Max)演算のみを用いて求められている。これに対し、本方法では各原因の重要度がFTとimportanceによって評価されており、総合的評価値もORゲートとANDゲートの働きにより和と積(Min)演算で評価されている。さらに、最終的な総合的評価値の帰属度関数を主観的に判断するか、ファジィ積分を用いて判断するかの違いも影響していると思われる。

次に、各事故のファジィ積分値を重み係数と考え、15個の事故原因の重要度を計算した結果をみると、大体3つのグループに分けられることがわかる。すなわち、重要度が0.5未満、0.5、それ以外のグループである。最も重要度の高いグループには、解析誤差や設計者の経験不足などの主観的不確定性に起因する事故原因が含まれており、解明されない事象や異常な出来事と同様に破壊事故に重大な関連をもっていることがわかる。しかし、同様に主観的不確定性に関係する設計ミスや使用材料に関する先例の欠如という項目は、比較的下位に見積られている。これは、もちろんここで扱っている事故例の数が少なく、また特殊な例に属するものが多いということもあるが、これらの事故原因のFTにおける位置が低く、事故に直接的な影響を与えにくいとめと考えられる。

6. あとがき

本研究では、橋梁の事故解析にフォールトツリー解析を導入し、さらにファジィ理論を組み合わせることにより、破壊事故と事故原因との因果関係を系統的に分析し、主観的な不確定性に起因する事故原因の破壊に与える影響を把握することを試みた。その際、事故の総合的評価値に対する帰属度関数を定量的に評価するためにファジィ積分の概念を応用した。

本論文で得られた結論は以下のとおりである。

(1) 橋梁の破壊事故において、直接的な原因のみならず誘因となる2次的な原因までを抽出し、それらの関連性および事故への影響を明確にするためにFTAの手法を導入した。しかし、橋梁の事故解析には従来の2値論演算を基礎とするFTAでは計算が複雑となり、事故原因のもつ主観的不確定性を考慮することができない。本研究で示したファジィ演算に基づくFTAを利用すれば、構造関数の計算が簡単に行え、事故原因のも

つ主観的不確定性の影響を考慮してシステムの解析が行える。

(2) すなわち、事故原因が生じたかどうか、あるいはその原因が生じればどれだけの波及効果があるかをファジィ集合で規定し、それを言語変数の形で評価することにより、主観的な要素も定量的な形で評価できる。

(3) 構造安全性は、FTAから得られた総合的評価値 E_T の帰属度関数を用いて議論できるが、主観的不確定性の影響をより明確に把握し、より正確に評価するために、ファジィ積分を用いて帰属度関数のある特性値で代表させることを考えた。この特性値を用いた定量的評価を行うことにより、事故の不可避性を明確な形で評価できるようになった。

(4) また、ファジィ測度 g_λ を構成するパラメータ λ を変化させて、事故の不可避性に対する評価尺度に含まれる主観性の検討を行った。ファジィ測度は確率測度に比べて柔軟性をもち、今後、事故解析以外の多くの評価問題に対して適用できると思われる。

(5) ファジィ積分を用いて得られた各事故の総合的評価値の代表値を重み係数と考えて、各事故原因の重要度を算定することを考えた。その結果、主観的不確定性の大きい事故原因の重要性が明らかとなり、重要度に応じて事故原因の分類を行うことが可能となった。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費によったものであり、計算には京都大学大型計算機センターFACOM M-200を用いた。

参考文献

- 1) Pugsley, A.: The Prediction of the Structural Accidents, Structural Engineer, Vol. 51, No. 3, pp. 195~196, 1973.
- 2) 白石成人・古田均・池島賢治: 信頼性解析法へのファジィ理論の適用に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第325号, pp. 1~10, 1982年9月.
- 3) Zadeh, L.: Fuzzy Sets, Information and Control, Vol. 8, pp. 338~353, 1965.
- 4) 菅野道夫: Fuzzy測度とFuzzy積分, 計測自動制御学会論文集, Vol. 19-3, pp. 218~226, 1972.
- 5) Negoita, C.V., 浅居喜代治: ファジィ積分と評価, あいまいシステム理論入門, オーム社, pp. 134~145, 1978.
- 6) Smith, D.: Bridge Failures, Proc. ICE, Vol. 60, pp. 362~382, 1976.
- 7) Silby, P. and A. Walker: Structural Accidents and Their Causes, Proc. ICE, Vol. 62, pp. 191~208, 1977.
- 8) Smith, D.: Why Do Bridge Fail?, Civil-Engineering ASCE, pp. 58~62, Nov., 1977.
- 9) たとえば, 福田武雄: 橋梁事故物語, 土木学会誌, 第50巻7号, pp. 14~15, 1975.
- 10) 井上紘一・幸田武久: FTAの基礎理論, 安全工学, Vol. 17, No. 3, pp. 150~157, 1978.
- 11) Blockley, D.: Predicting the Likelihood of Structural Accidents, Proc. ICE, Vol. 59, pp. 659~668, 1975.
- 12) Blockley, D.: Analysis of Structural Failures, Proc. ICE, Vol. 62, pp. 51~74, 1977.