

構造設計問題へのエントロピー理論の 適用に関する基礎的研究

A FUNDAMENTAL STUDY USING ENTROPY THEORY TO THE STRUCTURAL DESIGN

小 山 健*

By Ken KOYAMA

1. ま え が き

構造物の安全性、経済性の問題は、従来の破壊確率もしくは安全性指標のみで論じようとする立場から、もっとより幅のある研究へと進歩してきているように思われる。それらは、構造物の設計の中でたとえば設計者の経験、直感および好みといった、あいまいな判断材料によって決まってくる、確率論にのらない部分がどうしても入り込むことが避けられない点を認め、その結果として構造全体が有する機能あるいは強度がはたして設計者の意図するとおりにあるかどうかといった構造体のもつあいまいな部分のある程度定量化し、安全性、経済性を論じようとする点にその主眼があるように思われる。

このような立場からは、破壊の確率あるいは安全性指標のみでの議論では不十分であることは、多くのこの分野での研究者たちが十分理解しているところである。

その理由としては、この安全性指標を何らかの方法で求めるうえで、確率論にうまくのりやすい部分だけを対象として求めているのが現状であると思われるからである。しかしながら、構造物あるいは構造システムの設計というような人間(=設計者)の判断が入るような領域においては、たとえば強度の評価あるいは荷重の評価等の確率論にのりやすい部分以外のものについては、定量化が非常に困難になってくる。つまり、確率量として明確に処理できないあいまいさといった量の評価が、現状の安全性の評価には、万人に十分説得力のある方法で処理されているとは思われない。しかもそれらの量が構造物全体の安全性ひいては経済性に及ぼす影響は、かなりの部分を占めているに違いない。

このようなあいまいさ(人間の主観、判断等に帰因する)を定量的に処理して、確率論を基礎とした信頼性解析に組み込んで構造物のもつ安全性あるいは経済性を評

価してゆこうとする場合の研究に用いられる学問にファジィ理論(Fuzzy Set Theory)がある。この理論を適用して安全性および、経済性の評価のよくわからない部分を埋めてゆこうとする研究も、最近ではみられるようになった^{1)~4)}。

しかしながら、このファジィ理論をもってしても、結局のところ、たとえば帰属度関数(membership function)といったファジィさを定量的に表わそうとする部分で人間の判断が入ってきてしまうこと、またこの関数をより設計において説明しやすいように決定してしまいがちな点があるのではないかということも指摘されるようになってきている。このことは、ファジィ理論を研究する研究者たちが十分胆に銘じておかなければならない、またより発展的な批判⁵⁾として受け止めるべきことであるように思われる。

なお、この帰属度関数の決定に主観が入るのは当然のことであって、その主観に基づく情報をどのように取り入れるかという方法論の方にこそ解決されなければならない問題点があるのだとの主張もある。

以上のように、このあいまいさの取扱いの方法、つまり、その定量化の方法は非常に難しいことも確かではある。

一方、このよくわからないあいまいさといった量を、そのままよくわからないものとして考慮してゆこうとする考え方がある。それは、エントロピー論的アプローチあるいはファジィ理論とそれの組合せによるアプローチの方法である^{6)~8)}。このアプローチは、あいまいさを形づくる個々の要因が生起する頻度は等しくまったくでたらめに分布している、つまりあいまいさのエントロピーが最大となるように、確率的に分布しているものと考えようとするものである。

設計という観点に立つと、人間の主観・判断も含めてそれはエントロピーを最小にするような作業であることは疑問の余地がない。

* 正会員 工修 信州大学助手 工学部

構造体あるいは構造システムに生ずる、過去には理解不可能な現象等も、現在までの研究および計算機等の発達とともに、ある部分では解明されるようになってきているが、このように解明できた現象の部分については、設計のルーチンに取り入れ、使用材料を指定したり、設計方法を改善したりすることでその安全性を確保したり、安全率を小さくすることでその経済性を改善してきているという歴史的事実がある。これはとりもなおさず、あいまいさを取り除く、つまりあいまいさのエントロピーを小さくするようにしていることである。

しかしながら、このようなあいまいさは、これらによってすべて取り除かれ得るのか、あいまいさのエントロピーを0にすることができるのか？ この疑問に対する答は否である。研究の進歩あるいは方法論の確立等によって改善されることで取り除かれたあいまいさ以外の、まだ厳然として残る設計者の判断、直感といったあいまいさに対して、上記のような考え方をもちて処理してゆこうとするものである。

本文では、このエントロピー論的なアプローチによって、特に経済性の観点からの構造物あるいは構造システムの総建設費用の破壊に対する損失費用の最適配分比率の決定法を、後述するような設計環境条件のもとに、エントロピー最大化説によって提案しようとするものである。

2. あいまいさの尺度としてのエントロピー

(1) 序

本来エントロピーなる言葉は、熱力学の分野における熱力学の第2法則を説明するために、1865年ドイツの物理学者のクラウジウス(Clausius)によって初めて導入されたといわれている⁹⁾。その後、この第2法則を統計力学的にマクロな現象としての説明を $S=k \ln W$ なる式で表現したのはボルツマン(Boltzmann)である。この式によって熱のようなマクロな現象を非常に理解しやすい形で説明できるようにしたことは、自然科学史の中でも最も重要な発見であったといわれている。

一方、このエントロピーなる量を情報理論に取り込んだのはシャノン(Shannon)によるといわれている¹⁰⁾。シャノンは確率分布

$$p=(p_1, p_2, \dots, p_n), p_i \geq 0, \sum_i p_i=1 \dots \dots (1)$$

の関数

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n)=-\sum_i p_i \ln p_i \dots \dots (2)$$

をエントロピーと名づけた¹⁰⁾。この式(2)の意味するのは、ある確率分布に従って生起する状態のあいまいさ(不確かさの量)を $-\ln p_i$ とすると、その生起する

状態のあいまいさの平均量 $-\sum_i p_i \ln p_i$ がエントロピーであると定義したものである。

このように、エントロピーが現象あるいは状態のあいまいさを定量的(相対的意味)に表現する一つの物理量である以上、社会現象における種々な無秩序さあるいはあいまいさを評価し得る道具として有用なことは理解できる。

本文では、社会現象の中でも特に設計という現象を本来的な意味で経済活動の一環としてとらえ、設計者の漠然ともっている安全性に対する費用配分の判断のあいまいさを、このエントロピーなる量で評価しようとするものである。

(2) 設計におけるあいまいさ

一般に設計なる作業は、たとえば示方書等に書かれてある文意を多義的にとらえられて設計されるといったあいまいさを減少させて、合目的な実体を作成するための資料を提供するものであるとも考えられる。この作業のためには、それぞれの分野で特有な設計ルーチンが具備されており、それに基づいて作業を進めることになる。

現行における設計の多くは上記のようなルーチンに従っての作業という意味合いが強く、設計者の創造力が入り込むような余地はほとんどないのが実状であろう。

土木構造物の多くは公共事業であるが、その場合の設計作業をその建設を計画した監督官庁がすることはほとんどない。数社のコンサルタントに依頼して予備設計をしてもらい、監督官庁の責任者の判断でその中の一つを採用し、採用されたコンサルタントは、さらに詳細な設計を行い、設計図、材料表等を提出する。提出された資料をもとに、監督官庁は独自の単価表からその構造物の建設費用をあらかじめ求め、監督官庁が提示した設計図等を参考にして建設費用を算出したコントラクターの入札価格から判断して、その建設費用を決めるものがほとんどである。したがって、この建設費用を決定するまでのシステムの中に、構造物の安全性を確保するために一体どれくらいの費用が、建設費のほかに、大まかなものであれ考慮されているかといったことは、まったくおもてに出るはこない。設計者が漠然と安全性に対して考慮するであろう費用が、示方書レベルの中に埋没してしまっているのが現状である。

一方、数少ない例ではあるが、コントラクターに設計させ、その建設費用を独自の設計書に基づいて評価してもらい、競争入札によって、建設費を決定しているシステムもあることはある。

本文では設計者にある程度自由度(設計者が示方書レベルでの安全率等の考慮に対して)をもたせる場合でかつその設計によって建設された構造物の破壊に対してま

で、設計者側に責任をもたせるような、現状の設計システムとは両極をもつような設計システムを考える。このように考えることで、設計者の自由度が入り込む余地のあるシステムでの設計者のもつ種々のあいまいさを、現状のシステムの中にある程度反映して考えることができるものと思われる。

それでは、このようなシステムの設計の中にもどの部分で設計者によるあいまいさが主として入り込んでくるのであろうか。それらは次のようなものが代表的なものともみなされるであろう。

- (a) 設計ルーチン以外の設計者の経済性等に関連した判断の入る部分
- (b) 設計者の実績からくる直感による部分
- (c) 設計者の創造力から生じる好みによる部分

これらのあいまいさによって、設計の結果として作成される構造体は種々の安全度合の異なるものとなるであろうが、設計者の意識的なミスあるいは思考過程における重大な誤解等がない場合は、ほとんどが同じ程度の社会的に受容可能な意味での安全度が確保できると期待できる（コスト・パフォーマンスはほぼ一定）。

その理由としては、このようなシステムでの設計とは、経済活動の一環であり、監督官庁の予算という観点からも、あまりかけ離れた設計は、経済活動の中で残存することが難しいと考えられるからである。

以下、特に構造物の経済性の面からみた建設費用の配分モデルの問題を(a)の面からとらえ、マクロな見方で処理してゆこうとするものである。

なお、以下のエントロピー・モデルの定式化において、従来の安全性指標はおもてに出てこないが、設計を前述のようにとらえた場合、これまでのように社会的受容可能な安全度を、構造体あるいは構造システムがもつであろうことを前提とすることを、特に断っておく。

3. エントロピー・モデルによる費用配分

(1) 従来の費用配分モデル

現実の構造物の設計における建設費用配分モデルは、通常考えられている最適費用配分モデル（総費用最小化モデル）とは事実上異なっているように思われる。

通常の最適費用配分モデルは、建設総費用として以下のようなモデルが提案されている¹¹⁾。ただし、正確には維持管理・補修費については、問題を単純化するために考慮していない。また、耐用年数等についての費用の割引の問題については別に発表する予定である。

$$C_T = C_I + P_F \cdot C_F \dots\dots\dots (3)$$

$$P_F = \phi(-\beta) \dots\dots\dots (4)$$

- ここで、 C_T ：期待建設総費用
- C_I ：構造物の建設費用
- P_F ：構造物の破壊確率
- C_F ：破壊に伴う損失費用（負の効用）
- $\phi(\cdot)$ ：標準正規確率分布関数
- β ：構造物の安全性指標

である。

このモデルは、宝クジを買った場合の期待受取り（支払い）金額を計算するモデルとアナログ的であるとす、すなわち以下の式から導かれるものである¹²⁾。

$$C_E = P \cdot E(\text{当り}) + (1-P) \cdot E(\text{外れ}) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $E(A)$ ：Aという状態が生起することに対する期待費用

P ：Aという状態が生起する確率

である。

上記の式(5)で、 $E(\text{当}) \equiv E(\text{破壊}) = -(C_I + C_F)$ 、 $E(\text{外れ}) \equiv E(\text{非破壊}) = -C_I$ 、 $C_E = -C_T$ とすれば式(3)が得られる。

しかしながら、予算という観点からいうと、現実の設計における建設費用として問題になっているのは、前述したように C_I 項のみであり、 C_I でもって破壊に対しても保障しているのが実状である。 C_F は一般には評価が難しく、また別枠用の費用として予算の中に入っているわけではない。

いま、ある構造物を建設する場合を考えてみよう。土木構造物では公共事業である場合がほとんどであるが、その建設費用は2.(2)で述べたように通常コントラクターによって競争入札が行われて決まるケースがほとんどであろう。

ところで、一般にはこのような公共事業による建造物はその性格上、社会的・経済的に果たす役割が大きくまた建設評価額もかなりのものになるのが普通である。したがって、通常の設計において用いられている安全率で評価されたこのような構造物の安全性は、社会的に許容される安全レベルをもつものとして、破壊の確率で表わすと $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度であると考えても大きな間違いではなさそうに思われる。むしろ常識的な値であろう。

式(3)の設計によると、もし建設費用 C_I が 10^8 円程度だとすると、 C_F を仮にその10倍、つまり 10^9 円程度（この額を小さすぎると判断するかどうかは主観が入るのではあるが、ここではかなり大きな額と判断する。つまり、 C_F を仮に100倍程度とみなさなければならぬような場合には、 C_I によりウェイトを置く設計がなされるべきであるとの考えに立つものである）と評価しても、総費用 C_T は $(10^8 \text{ 円程度}) + (10^8 \sim 10^9 \text{ 円程度})$ となる。 10^8 円程度は純粋な建設費用に、また破壊するかもしれない事象を考慮し、そのための保障の費用は

10⁴ 円～10⁸ 円程度だと評価していることになる。これは、破壊に対して考慮する費用の $P_F \cdot C_F$ が建設費用 C_I に対して異常に小さくなっている。

建設費用に大きな費用をかけると期待される場合に、破壊確率で $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度の安全な構造物ができること期待できるのであって、破壊確率で $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度の保障を期待するために $P_F \cdot C_F$ 円を C_I のほかに用意しているわけではないのである。

以上のように、社会的・経済的に損害を被るであろうと考えられる部分はすでに暗黙なうちに C_I の中で考慮されていると考えた方が妥当であろう。したがって前記の式 (3) のモデルは、将来採用されるかもしれない設計における費用配分モデルとしては十分ふさわしいものとは考えにくい。よって以下に述べるような最適費用配分モデルを提案する。

(2) エントロピー最大化説による配分モデル

ここでは、2.(2) で述べたような、現状の設計システムとは異なり、設計者の自由度がある程度認められておりかつ破壊に対しては設計者側の責任であるとする設計システムにした場合を考える。

このような設計システムの中で設計される構造物あるいは構造システムは、常識的な安全性（破壊の確率にして $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度、安全性指標では 4.0～5.0 程度）をもつものと仮定する。また設計者（入札者）は自己の過大な PR 等をする意志がなく、したがって正当な建設費用の見積りを行うことを前提とする。そう仮定することで、前述したように、設計とは経済活動の一環であるから、あまりかけ離れた安全性あるいは経済性をもつ構造物また構造システムは作成されないだろうと考えてよい。

このような経済活動の中で、設計者は安全性を確保するために、建設総費用のうちで一体どれくらいの部分を、漠然と意識のうちに判断して考慮するであろうかを、大まかな意味で求める方法を以下のように提案する。

$$C_T = Q \cdot C_I + P \cdot (C_I + C_F) \rightarrow \min \quad \dots \quad (6)$$

$$H = -P \ln P - Q \ln Q \rightarrow \max \quad \dots \quad (7)$$

subject to

$$P + Q = 1.0 \quad \dots \quad (8)$$

ここで、 P, Q ：設計者の漠然とした判断による費用配分率

C_I, C_F ：非破壊、破壊を考慮した場合の全費用に占めるコスト

である。

式 (6) の意味は、構造物あるいは構造システムの建設費用に対して漠然と破壊に対しても考慮に入れた、入札等

で評価されるべきコストであり、式 (7) の意味は、設計者の経験または判断によって、構造物の重要度、地域的特性あるいは耐用期間等の種々の要因を考慮した場合に、費用の占有率に判断の違いによって幅が生じるが、そのような幅（＝あいまいさ）が広がっても、ほぼ同じ程度の安全性を有する構造物あるいは構造システムが作成されることを保証するためのものであり、式 (8) は配分率に対する制約条件である。

式 (6) だけではなるべく P の比率を小さく取ろうとするであろうが、それでは常識的な安全性は得られないであろう。また式 (7) だけでは、 P と Q の比率をどのような条件についても同じ ($P=Q=1/2$) に取るが、それでは経済活動に勝てないであろう（ただし、公共投資について納税者側がそれでもよいと望むなら、話は別であるが、その場合にはかなりの税の増額が行われるであろう）。しかしながら一応ここでは、仮説としての式 (6) と式 (7) が社会的に受け入れられるものと仮定する。

以上によってこの問題は、制約条件式 (8) のもとで目的関数式 (6), (7) を満たす最適化問題として定式化され、 P, Q はその解となる。

式 (6), (7) を次のように変換する。

$$V = \frac{H}{C_T} \rightarrow \max \quad \dots \quad (9)$$

subject to

$$P + Q = 1.0 \quad \dots \quad (10)$$

この問題は、ラグランジュの未定乗数 λ を持ち込むことで、次式を解けばよいことになる。

$$\frac{\partial}{\partial P} \left\{ \frac{H}{C_T} + \lambda (P + Q - 1.0) \right\} = 0 \quad \dots \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial Q} \left\{ \frac{H}{C_T} + \lambda (P + Q - 1.0) \right\} = 0 \quad \dots \quad (12)$$

これから、費用配分率 P, Q は次のような分布に従うことがよく知られている¹³⁾。

$$P = e^{-H \frac{C_I + C_F}{C_T}} \quad \dots \quad (13)$$

$$Q = e^{-H \frac{C_I}{C_T}} \quad \dots \quad (14)$$

式 (13) と式 (14) の P, Q を式 (10) に代入すると解が求められる。この解は、 $(C_I + C_F)/C_T$ と C_I/C_T の比の値だけに依存し、唯一に決定されることが保証されている¹³⁾。 $(C_I + C_F)/C_T$ と C_I/C_T の比の値を変化させ、費用配分率 P, Q の分布を調べたのが図-1である。この図-1で、横座標は比の値を、縦座標は左側に P の値を、右側に Q の値を取ってある。また図-2には、その配分率に従った場合の建設総費用を取ってある。

(3) 考 察

エントロピー最大化説によった費用配分モデルから、

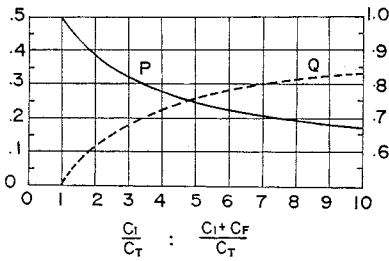


図-1 費用配分比率 P, Q

費用の配分比率は C_I/C_T と $(C_I+C_F)/C_T$ の比が大きくなるに従い、設計者が破壊に対して漠然と考慮するであろう配分比率は減少するという、ごく常識的な結果が得られた。これは破壊した場合の効用の損失が大きいと思われる構造物あるいは構造システムに対しては、建設費用に大きくウェイトを置くことで経済的には十分最適なものになるということを示している。

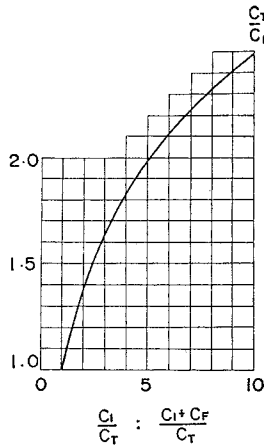


図-2 費用比率に対する総費用 C_T

これは前述のように、設計という作業を経済活動の一環としてみた場合、かなり妥当な説明となるように思われる。

ところで初期建設費 C_I は、現行設計における C_I でもって、破壊した例はほとんどない（人為的ミスを除いて）ことから、安全率で評価される現行設計における C_I 程度の値を採用しても十分だと考えられる。

また、図-1 によると、破壊した場合の損失が非常に大きい ($(C_I+C_F)/C_T \geq 10.0$) と考えられる場合には、 C_I に対する配分比 Q が約 0.85 程度となっている。このことは、現行設計が C_I でもって非常にまれな破壊に対する損失費用まで暗に考慮に入れているものとしたら、 C_I をもう少し、たとえば 5~10% 程度の費用の節約ができることを意味している。

現行の許容応力度設計法におけるたとえば鉄筋コンクリートはり断面等の安全性は、通常中央安全率でほぼ 2.5 ぐらいである¹⁴⁾。この中央安全率でほぼ 2.5 という値は、建設費用に対してどのような意味をもっているかを考えてみる。

いま破壊に対する終局限界状態を簡単のために次のようにする。

$$R - S < 0 \dots \dots \dots (15)$$

中央安全率 $\bar{\theta}$ は、

$$\bar{\theta} = \bar{R}/\bar{S} \dots \dots \dots (16)$$

で表わされる。ただし、 R, S はそれぞれ強度および荷重影響を表わす確率変数、 \bar{R}, \bar{S} はその平均値である。

許容応力度設計における強度、荷重影響の値として公称値を用いるものとする、許容応力度設計法における安全率 f は以下の式で表わされる。

$$f = \frac{R^n}{S^n} \dots \dots \dots (17)$$

ここで、 R^n, S^n はそれぞれ強度および荷重の公称値である。この R^n, S^n は一般に材料強度および荷重影響のある非超過および超過確率を勘案して決められている（許容応力度設計法ではその超過確率はおもてには出てこない）。

この $\bar{\theta}$ と f との関係はおおよそ以下の式で表わされる。

$$f = \alpha \bar{\theta} \quad (\alpha \leq 1.0) \dots \dots \dots (18)$$

式 (18) 中の α は、強度の非超過確率が約 10% ($k_R \approx 1.28$)、荷重影響の超過確率が約 2~3% ($k_S \approx 2.05$) とし、それぞれの変動係数が 0.05~0.2 程度のものに対しては、 $(1 - k_R V_R)/(1 + k_S V_S)$ で計算すると、おおよそ代表的に約 0.6~0.7 程度の値となる。そうすると、 $\bar{\theta} \approx 2.5$ に対して f の値は約 1.5~1.8 程度の値になる。このような値は大まかに考えて、通常現行の許容応力度設計法に基づいて設計された構造物全体の安全性とみても妥当であるといえるであろう。

建設費用の増加は、 f に比例すると考えても、大して間違いないから、 $f=1.0$ に比べて総費用は約 1.5~1.8 倍程度増加することになる。

現行の設計は、ここで用いられている設計システムとは異なっているが、もし仮にこのような設計システムが、現行設計での設計者の安全性に対する費用配分の判断のあいまいさをある程度定量化するための判断材料となるとすると、前述のことは次のように説明できる。

図-2 からみると、 C_I/C_T と $(C_I+C_F)/C_T$ の比が約 2.5~4.0 程度となり、 C_F としては、 C_I の約 1.5 倍から約 3 倍程度と設計者は暗に判断していることになっている。それに対する費用の配分比は、約 70% : 約 30% 前後とみることができる。

以上非常に大ざっぱに現象面をとらえて考察してきたが、現状の設計のおおまかな線が、本文で考えた設計システムに照らすことで説明できるように思われる。実用設計に供するにはまだほど遠いとはいえ、設計者のある程度の自由度が入り込める設計システムに対しては、構造物の中央安全率のおおよそ値を知ることで、予算との関連で、漠然と金額にしてどれほどを安全（危険）に対して考慮しているかが推定できた。

(4) 計量経済学におけるロジット・モデルとの関連性

設計者が漠然と考えているであろう費用配分比 P, Q の分布は 3. (2) で述べたように、式 (13), (14) で表わされる。

ここでは、この式 (13), (14) の意味を、計量経済学の分野で、質の選択をする場合の経済モデルとなっている、ロジット・モデルと関連させて考えてみる。

式 (13), (14) から以下の式が導かれる。

$$\frac{P}{Q} = e^z \dots\dots\dots (19)$$

ここで、

$$Z = -H \frac{C_F}{C_T} \dots\dots\dots (20)$$

である。

式 (19) の両辺の対数をとると、

$$Z = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) \dots\dots\dots (21)$$

となる。

この式 (21) は、とりもなおさずロジット・モデルと同じ形をした式となっている¹⁵⁾。

計量経済学でのロジット・モデルのもつもとの意味は、2つ以上の質の選択に関連する場合のモデルに対して、サーベイ・データから帰帰式のパラメーターを推定する場合のモデルの1つであり、ある情報 z が得られた場合に、個人がある選択をする確率が P であることを示すことを表わすモデルである。

したがって、出発点が一方はエントロピー最大化説によって求められた配分比率の解が、計量経済学における、累積ロジスティック確率関数に基づいて定式化されたロジット・モデル、

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}} \dots\dots\dots (22)$$

に一致することを示している。

このことは、構造物の設計という作業が、実は経済活動における個人の質の選択（たとえば交通手段として、ジェットにするか国鉄を利用するか、船にするかといったもの）と同等なものと、結果的にはなっていることを示しており、非常に興味深いものがある。

4. ま と め

以上を要約すると次のようになる。

(1) 土木構造物の設計に内在する設計者の建設費用の配分に対する判断のあいまいさを、エントロピーを尺度にして評価し、経済活動の一環として、マクロな現象面からとらえた。

(2) それによると、本文で考えられた設計システムからの反映として、現行の許容応力度設計法がもっている大まかな安全性（社会的に受容されていると思われる安全性で、破壊確率にして $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度）に対して、設計者がどの程度漠然と費用配分比で考慮しているかを、簡単なエントロピー・モデルを通して推定した。

(3) 建設総費用に占める破壊に対する費用は、従来の費用配分モデルでは十分うまく説明できない部分があるが、本文のようなエントロピー・モデルを採用することによって、その占める割合が、現行の許容応力度法に照らし合わせても、大体妥当ではなかろうかと思われる配分比率になっている点を指摘することができた。

(4) 破壊費用 C_F をそれ自体で評価するのは、現実問題として困難であるが、総費用に対する比として大まかな値をつかまえることで、最適な費用配分が可能となる。

(5) 設計書に基づいて建造される構造体のようなものは、一種のマクロな状態とみなし得る。このようなマクロな現象をエントロピーを尺度として論ずることは、たとえば、土木構造物のようなものはよくわからない現象があるにしても、実際に物を作ってゆかなければならないといったことから、そのような種々の現象に対して大ざっぱな経済性等を評価し、対応してゆくという点からいっても、今後いろいろな方面で必要となる研究テーマであるように思われる。

最後に、ファジィ理論について有益な助言をいただきました古田 均助手（京都大学）に謝意を表します。また、本文をまとめるにあたり、討議に加わっていただいた長 尚教授（信州大学）ならびに、設計の実務サイドからのご指摘をいただいた矢野 勲氏（構造計画コンサルタント）にも、謝意を表します。

なお本研究は、昭和 56 年度文部省科学研究費の補助を得て行われたものであることを付記し、謝意を表します。また計算の一部は、信州大学リモート・バッチ・ステーションを経由した、東京大学大型計算機センターの M200H を利用した。

参 考 文 献

- 1) Brown, C.B.: A Fuzzy Safety Measure, ASCE, No. EM. 5, 1979.
- 2) Yao, J.T.P.: Damage Assessment of Existing Structures, ASCE, No. EM. 4, 1980.
- 3) Ditlevsen, O.: Formal and Real Structural Safety. Influence of Gross Errors, IABSE, Proceedings P-36/80, Nov., 1980.
- 4) 池島・白石・古田: Fuzzy 代数の信頼性解析への適用に関する一考察, 第 35 回土木学会年次学術講演会概要集, I-329, 1980.
- 5) 杉山・酒井・伊藤: 構造物の安全性評価へのファジィ理論の応用について, 第 36 回土木学会年次学術講演会概要集, I-327, 1981.

- 6) Brown, C.B. : Entropy constructed Probabilities, ASC E, No. EM. 4, 1980.
- 7) Brown, C.B. : The Merging of Fuzzy and Crisp Information, ASCE, No. EM. 1, 1980.
- 8) 小山 健 : 荷重係数決定法のエントロピー論的アプローチに関する研究, 第35回土木学会年次学術講演会概要集, I-327, 1980.
- 9) 寺本 英 : エネルギーとエントロピー, 化学モノグラフ 25, 化学同人, 1973.
- 10) たとえば, 有本 卓 : 確率・情報・エントロピー, 森北出版, 1980.
- 11) たとえば, 土木学会編 : 構造物の安全性・信頼性, pp. 52~53, 昭和 51 年 10 月.
- 12) Mau, S. and R.G. Sexsmith : Minimum Expected Cost Optimization, ASCE, No. ST 9, 1972.
- 13) たとえば, 国沢清典 : エントロピー・モデル, 日科技連, 1975.
- 14) 長 尚・小山 健 : 土木構造物の安全性に影響を及ぼす要因に関する若干の考察, 第37回土木学会年次学術講演会概要集, I-43, 1982.
- 15) Pindyck, R.S. and D.L. Rubinfeld (金子敬生監訳) : 計量経済学 (上), マグロウヒル好学社, 1981.

(1982.7.19・受付)
