

# 都市施設・構造物のサイズミック・リスク・アナリシス

(地震時損傷状態の評価法について)

鈴木浩平\*

## 要 約

都市の地震防災の問題を考えると、さまざまな機能をもつ、各種の施設・構造物に対する耐震性の判定や、地震による損傷状態の判断を総合的に行うことが重要となる。本稿では個々の施設・構造物に対する地震時損傷の評価の考え方についての整理を行ったあと、その結果を空間的に拡がりをもつ都市などのシステムに拡張する場合の問題点について概説する。次に、現存する構造物などの地震時損傷状態を判断するに当たって、パターン認識の手法を導入すること、および確率論などによる客観的評価だけではなく、“あいまい集合”の理論を導入した、主観的判断基準も採用することが可能であることを示し、その動向について事例も混えて紹介する。

## 1. はじめに

サイズミック・リスク・アナリシス (seismic risk analysis, SRA と略す) は、近年地震工学の分野で急速に重視されてきている分野である。とくに、各種の施設や構造物の耐震設計における最適設計値の決定や、サイズミック・マイクロゾーニングに対して、SRA は必要不可欠である。都市の地震防災の立場から、とくに SRA を都市内の施設や構造物の耐震問題に応用しようとするとき、考慮しなければならないいくつかの問題があることに気づく。

本稿では、従来著者が関連してきた生産施設の耐震問題を中心に、とくに発展が望まれる課題について、最近の研究動向の紹介をもとに概説する。

第一の問題は、従来、主として個々の施設・構造物を対象にすすめられてきた SRA の手法を、例えば都市という、種々の施設を包含した、“空間的な拡がりをもつ” (wide spread) システムに対して適用する場合の考え方の整理である。第二の点としては、地震時における現存施設、現存構造物の損傷の評価方法の問題をとりあげる。これらの問題は、いずれも、従来行われてきた計算機を駆使しての工学的解析方法では完全には処理しきれない内容、すなわち、“意志決定” (decision making) や “あいまい集合” (fuzzy set) などに関連するものを含ん

でいる。

地震防災におけるリスクの考え方は、それぞれの専門分野において個別に検討されているが、少なくとも都市施設防災については、現存する若干のとりえ方の差異の調整を行いつつ、体系化がなされることが望まれており、本稿がそのための何がしかの役割を果たすことができれば、幸甚である。

## 2. 都市空間における施設・構造物の地震時損傷評価の考え方

特定のサイトにおける、特定施設についての SRA の基本が、「その施設の建設に必要なイニシャルコストと、地震発生に伴って必要となるコストとの和としてのトータルコストを最小にするために必要な、当該施設にとっての最適設計値の選択」という意志決定 (decision making) にあるとすると、都市などの wide spread なシステムについての SRA は、「多数のサイトに存在している多種多様な施設・構造物についてのトータルコストを最小にすべき、設計コードや設計条件の選択」という意志決定問題を基盤にすることとなる。前者が、特定の施設や構造物に関連する、家主や居住人、経営者や勤労者などの利益をもとにした“ローカルな”特徴をもつ判断基準 (criteria) を前提とするのに対し、後者は、その全空間内にかかわるコミュニティ全体に有効な一般的ポリシー

\* 東京都立大学都市研究センター・工学部

を考慮した目的関数に基づく“グローバルな”判断基準を必要とする。ここで注意すべきことは、前者による解をただ総和 (superposition) すれば後者の解になるといった線形関数が成立しないということである。

ところで、ある特定期間内でおこりそうなすべての地震を想定するサイズミック・リスクは、一般に不規則関数として表わされ、内容としては、

(i) ある特定期間T内で期待される地震の強さ (intensity) の評価を行う環境リスク (environmental risk; ER)

(ii) 特定の施設・構造物が、その全寿命においてこおむる潜在的損失 (potential loss) としての個別リスク (individual risk; IR)

の二者がある。(i)は、主として、過去の地震及び地震被害史、地殻の歪エネルギー伝播の機構、及び、その領域の地域形態学的特徴などに依存するのに対し、(ii)は構造物の機能や構造物自体の、地震応答により生ずる損害、家主や居住人の人的・経済的損傷の推定を前提とすることになる。

こうした考え方は、ひとつのコミュニティにおける住民や財産のリスクの評価へ拡張することができ、特定サイトの施設についてのリスク評価を都市圏における全施設のリスク評価に発展することができる。この拡張が可能になると、都市計画の将来構想や新しい“街づくり”などに際して、設計コードの最適規格化を行うときに必要となる、潜在的損傷 (potential damage) の予測も可能となる。

特定のサイトについての環境リスク(ER)については、従来、とくに米国や日本を中心に研究が行われており、その基本は、特定期間T (例えば、10年間、20年間、100年間……) において、その領域のいかなる場所にも予測可能な地震動の大きさ (最も一般的には、地表面の最大加速度) の値を確率量として与えることである。この評価は、周知のように、サイズミック・ゾーンクや、サイズミック・リスク・マップの最も一般的表現となる。

この評価のために必要な理論モデルとしては、

(1) 地震発生についてのポアソン分布、過去の地震の相互関連性についてのマルコフ・チェーン (Markov chain)

(2) マグニチュードの分布則

(3) 地震動の大きさの距離による減少則 (attenuation law)

(4) 既存データにもとづく経験式

などがある。

一般に施設・構造物の損傷には、いろいろな型 (type) と機構 (mechanism) があるが、例えば

(a) 構造的損傷 (structural damage) と非構造的損傷 (non-structural damage)

(b) 内容物への損傷 (damage of contents) と装置への損傷 (damage of equipments)

(c) 修復・交換の可能な損傷 (repairable or replacible damage) と修復・交換の不可能な損傷 (unrepairable or unreplacible damage)

といった分類法が可能であろう。

さらに施設・構造物の損傷特性の評価法としては、

(イ) 過去の地震被害経験から、損傷についての統計的評価を行い、それらを直接的に地震の強さ (震動) と結びつける手法

(ロ) 非弾性領域での応答挙動の解析を含む動的解析法によって損傷を推定する手法

などが良く行われており、これらの手法によって得られた結果を用いて、最終的には

$$\text{損傷率} = \frac{\text{損傷の修復に必要な全コスト}}{\text{施設・構造物の全コスト}} \dots\dots\dots (1)$$

を損傷評価の基準にとるのが一般的である。この式の分子のファクタには、

(i) 地震によってこおむる生産性低下による損失コスト

(ii) 新建設に伴うコストの増加

(iii) 地震発生による住民避難にかかわる損失コストなど、「2次的損失」についての配慮もなされる必要がある。

これまでに述べた個々の特定施設に対するリスク解析を、wide spread なシステムとしての都市圏全域 (あるいは、都市圏内のある限定された領域) に拡張して適用する場合の問題点について述べる。このような総合化の場合、さまざまな施設の相互間の機能の相関性を考慮にいれなくてはならず、個々の施設についてのリスク解析の結果を単純に総和することはできない。すなわち、個々の施設の機能を不規則変数であらわし、それらの間の相互相関特性を確率論的手法によって評価するグローバルな理論がどうしても必要となるのである。

上記のことを考慮した、グローバルなシステムのリスク解析の方法を段階的にまとめると、大略、次のようになると考えられる。

【第1ステップ】；震央距離とマグニチュードによる地震の周波数特性の変化、巨大地震の再来周期および地盤特性の影響を考慮した環境リスク関数 (environmental risk function) の決定

【第2ステップ】；サイズミック・リスクの定義の中で、特に構造物の確率的変動特性の影響の評価

【第3ステップ】；単一の施設・構造物の地震応答特性と、その構造の耐震特性 (降伏特性や座屈特性を含む) であらわされる

損傷率関数 (damage ratio function; DRF) の決定

[第4ステップ] ; 第3ステップによるDRFの評価と、地域的な特性を考慮して、個々の施設に対する損失関数(individual loss function; ILE)と、リスク関数(individual risk function; IRF)の決定

[第5ステップ] ; 考察の対象となる都市圏全体(あるいは、限定領域)におけるグローバルな損失関数(global loss function; GLF)とグローバルなリスク関数(global risk function)の決定。(但し、このステップでは、個々の施設間の相互相関特性を考慮することになるため、第4ステップで決定したILF, IRFに適切な補正が必要となる。)

以上述べてきたリスク解析の考え方は、とくにここ数年、例えば米国のスタンフォード大学などにおいて大型プロジェクトとして研究が進められてきており、現在、日本でも積極的なくみか要請されている。具体的展開の例としては、カリフォルニア大学バークレーの地震工学研究所の報告(例えば、Oliveira, C.C., 1975年)などに詳しく、わが国の地震被害想定の研究、調査の方法に採り入れるべき点も多いと考えられる。

### 3. 現存する施設・構造物の地震時損傷の具体的な推定法

#### 3.1 損傷状態把握の体系化

今、特定の施設・構造物が、現時点から $t$ なる時間を経過する過程で、生じた地震によって“安全を保ちうる、つまり、損傷をうけない事象”を $E_T(0, t)$ とあらわしてみる。この定義から、この事象 $E_T$ についての信頼度関数(reliability function)を $R_T(t)$ とすると、

$$\begin{aligned} R_T(t) &= P_{rob.}(E_T) \\ &= R_T(0) \cdot \exp\left\{-\int_0^t h_T(t) dt\right\} \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

と表わせる。ここで、 $T$ は施設・構造物の耐用期間を示す不規則変数であり、 $h_T(t)$ は地震に対するリスクを表わすもので、一般に災害関数(hazard function)といわれ、地震荷重と施設の抵抗(耐震強度)をあらわすパラメータをもつ不規則過程(random process)である。

ところで、既存の施設・構造物のうち、とくに、高圧ガス施設のような生産施設に対しては、定期的に安全性の検査(inspection)が行なわれるものが多い。このよう

な場合、もし、 $t_i$ なる時期に $i$ 回目の安全検査があったとして、その結果をも考慮すると、式(2)は

$$R_T^{(i)} = R_T^{(i)}(t_i) \cdot \exp\left\{-\int_{t_i}^t h_T^{(i)}(t) dt\right\} \dots\dots\dots(3)$$

のように書きなおすこともできる。従って、現存の施設・構造物に対する損傷の一般的評価は、

(1) 当該の施設・構造物の現時点における安全性を与える信頼度関数 $R_T^{(i)}(t_i)$ の評価と

(2) 当該施設・構造物の将来にわたる地震危険度を評価する災害関数 $h_T(t)$ の推定

の二つのプロセスから成るといえよう。これらの関数の評価、推定は一般には容易ではないが、近年 Yao, Shinzuka らの研究によって、実験データや検査の結果などを有効に生かせるようになってきた。

従来の安全性評価における最終的判断は、ある定められた判定基準(criteria)にもとづいて、“安全”か、“不安全”かを認定することが前提であった。しかし、単純な真直棒が軸方向の引張りによって破断するかしないか、というような判定問題と異なり、現存する種々の複雑な施設・構造物に対して、“安全でなければ不安全”、“不安全でなければ安全”、という二者択一的(binary)な判断基準を定めるのは困難であるし、適切ではない。

実際の施設・構造物が地震により損傷をうけたとき、その損傷状態の程度がわかれば、それらを修復すべきかどうかの判断ができる。この状態は、解析的には

- (1) 入手可能な設計計算や、設計製図図面からの検討
- (2) 仕様書の中で利用できるものの検討
- (3) 各種の分野の知識を使つての構造解析などの結果に依存するであろうし、実験的には、
  - (1) 破損または損傷箇所が発見
  - (2) 欠陥があると認定された要素構造についての探知(detection)

(3) X線、超音波などによる非破壊検査(nondestructive inspection; NDI)

(4) 載荷試験

などの結果を総合的に用いて判断することになる。

近年、米国 Purdue 大学の Yao らは、現存の施設・構造物の地震時損傷状態の推定にパターン認識理論を導入することを提唱している。その概略を示したものが図1である。現存構造物に対する主要な特性をパターンとしておきかえて、パターン空間において、実際の損傷状態を決定あるいは、識別していくというのが、その基本的な考え方である。図2は、この考えに沿って、具体的に損傷状態の程度を識別していくプロセスの例について、まとめたものである。このなかで、(i)のプロセスは、A, B, Cといった測定、観察などの結果から、対象とする施設・構造物が厳しい損傷をうけているか否かのクライテリアが適切か否かを判断するプロセスであ

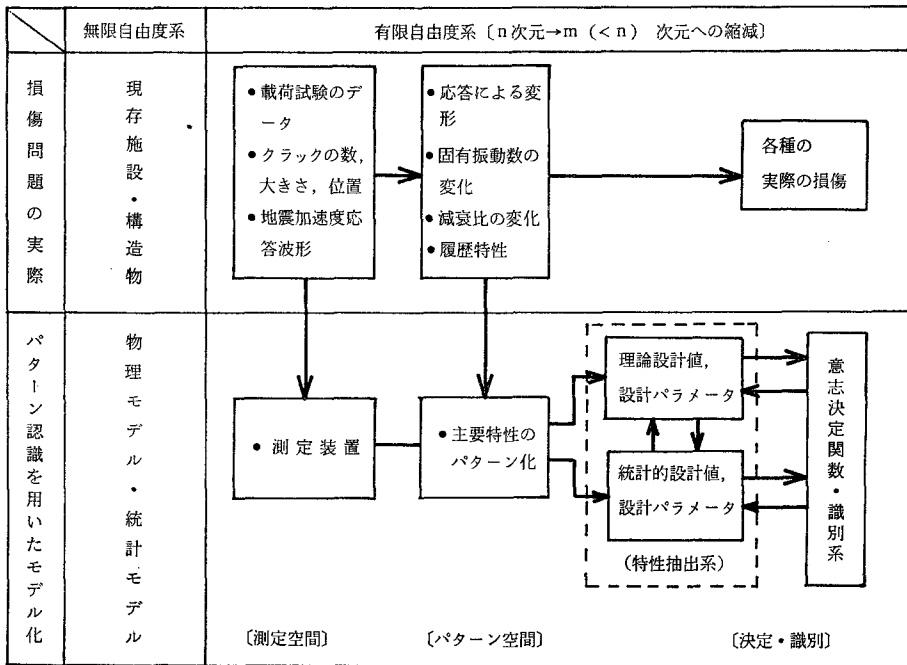


図1 パターン認識を応用した損傷推定の概略 (yao)

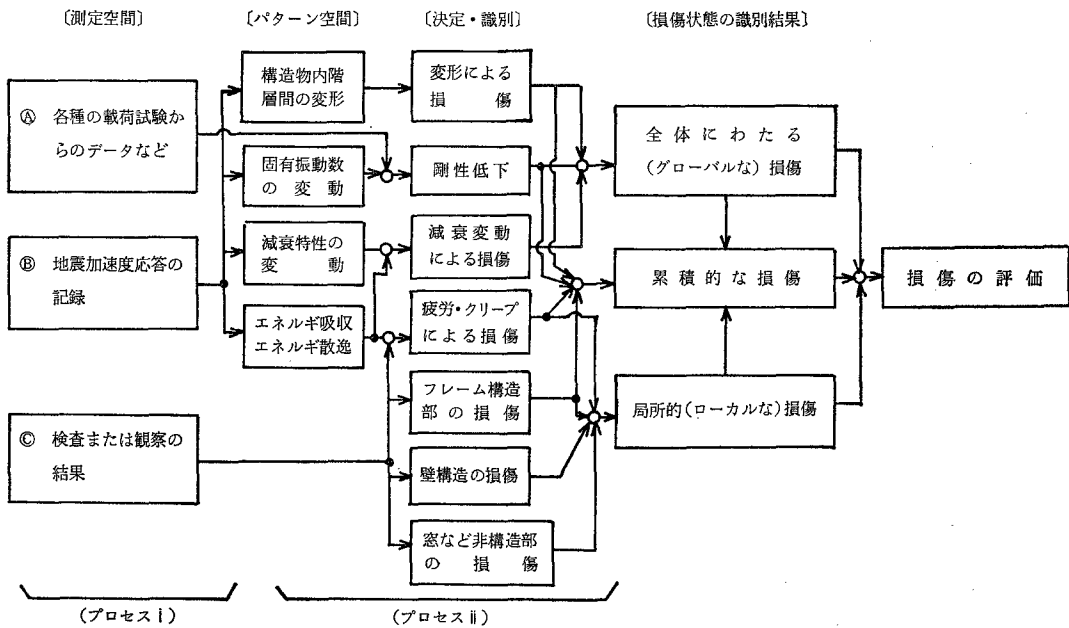


図2 損傷状態推定・評価の流れ図

り、(ii)のプロセスは、その施設・構造物の損傷についての複雑な問題を、より簡単な副次的問題に分割していくプロセスである。この分割には、パラレルな分割法と、シーケンス的な分割方法がある。この例のように、損傷そのものについて、“グローバルな”とか、“累積的な”とか、あるいは、“局所的な”といった意味づけが可能になり、単なる“損傷していない⇒安全”、“損傷している⇒不安全”といった直載の判断より、一層実用的な判断がなされることになる。

### 3.2 損傷状態の判断への“あいまい理論”(Fuzzy Theory)の導入

前節でのべたように、施設・構造物が複雑であればあるほど、それらが損傷したか否かの判断は、on-off 的なクライテリアでなされにくくなる。また、さまざまな要因で生じる損傷モード(曲げ、せん断、引張り、座屈など)の組み合わせ(combination)としての損傷を考えると、従来の確率論や統計学の知識だけでは、損傷状態の判断が的確にはなしえないと考えられる。

MIT(マサチューセッツ工科大学)のZadehが提唱した“Fuzzy Set”(あいまい集合)の理論が、こうした損傷判断に有効であるとして期待されつつある。あいまい理論においては、“あいまい性の度合”をあらわす尺度として、“メンバシップ関数”(membership function)というものが導入される。例えば、“ある小さい自然数  $x$ ”から成る“あいまい集合”  $A$  を考えよう。

このとき、まず  $x=0$  は、この集合  $A$  に対して、「あいまい性のまったくない(nonfuzzyな)」資格もっている、 $x=1$  も「非常に強い」資格もっているといえよう。また、 $x=2$  についても「かなり強い」資格があろう。しかし、 $x=3$  になると、その帰属の資格は「弱い」ものになろうし、 $x \geq 4$  では、もはや“小さい自然数”としての資格は「ない」というが通常の“主観的判断”であろう。メンバシップ関数は、このような主観の入る余地を認めた判断関数であり、この例の場合

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1.0, & (x=0); \text{ nonfuzzy membership} \\ 0.8, & (x=1); \text{ strong membership} \\ 0.6, & (x=2); \text{ fairly strong membership} \\ 0.3, & (x=3); \text{ weak membership} \\ 0, & (x \geq 4); \text{ non-membership} \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

などとあわせよう。もちろん、0.8、0.6、0.3といった数値は、多分に主観的なもので、このほかの値もとりうる。

第2の例として、図3に示すような、同一方向に引張りをうけた矩形平板を考えよう。今、問題をきわめて単純化し、引張り方向と直角方向に生じるクラックの幅のみによってこの板の損傷状態を判断しようとする。“重

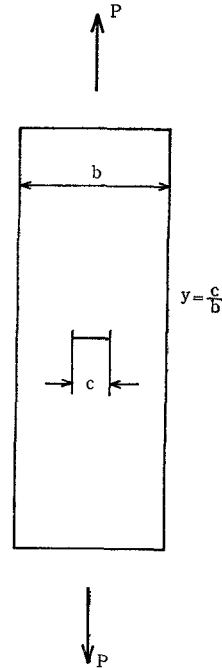


図3 引張力Pをうけた矩形平板

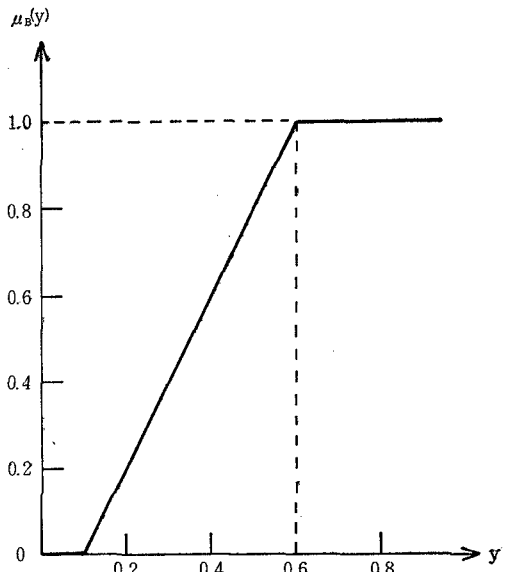


図4 メンバシップの関数

大な損傷をうけた状態にあるこの板の集合を  $B$  とすると、メンバシップ関数  $\mu_B(y)$  は、例えば

$$\mu_B(y) = \begin{cases} 1.0, & (y < 0.1); \text{ severe damage} \\ 2(y-0.1), & (0.1 \leq y \leq 0.6); \text{ fuzzy damage} \\ 0, & (y > 0.6); \text{ non severe damage} \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

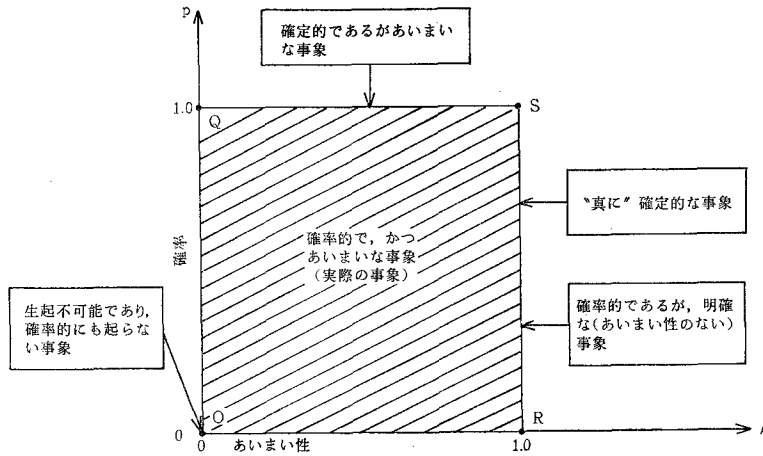


図5 確率事象とあいまい事象の関係

のようにあらわされ、これは図4のようなグラフとなる。あいまい集合の例としては、このほかにも「シルバーシートに席をゆずるべき老人」とか、「健康的な人」など、いくらかでも例示することができる。

問題を本筋に戻して、現存の施設・構造物が地震によって損傷しているか否かの判断（意志決定；decision making）には、どうしても当該の施設・構造物自体がもつ、あれこれの“あいまい性”や、“確率的変動特性”のほかに、観察者の知識の濃淡や主観に起因する“あいまい性”が混入してくることを妨げることは不可能であろう。図5は、数学的、容観的判断で対処できる“確率統計現象”と、主観的な判断を用いる“fuzzy 現象”の関連を概念的にあらわしたものである。すなわち、両者とも、それぞれ単独では、現実の状態の中に特殊なケースをみている（図中の直線、SQ, SR）ことになり、実際の判断は斜線部矩形の“確率的で、かつ、あいまいな”現象ということになる。

以上にのべたように、現存する施設・構造物の耐震性判断の方法に、従来から導入されている数学的に厳密な確率論的アプローチのほかに、fuzzy theory の考え方を導入して、「数字」のみでなく、「言葉」をも含めた損傷状態の判断クライテリアを作成しようとする動向がすでに検討されている。当然のことながら、このクライテリアの確立のためには、広範囲からの観察、例えば

- (1) 施設・構造物の各箇所のみ視点検
- (2) 地震時における各部の加速度や変位の応答記録
- (3) 各種の非破壊検査
- (4) 地震前後における載荷試験

や、その他の条件（構造物の大きさ、形状、耐用年数、地盤条件、検査する人の能力や経験年数など）が必要となる。しかしながら、これらのうちのいくつかが不備で

あったとしても、Bayse の確率論などを用いると、その不足が補えるし、さらに fuzzy 理論は、あくまでも近似的ではあるが、統計的データがなくても、人間の経験や感覚に適合した合理化ができるという特徴をもつ。

最後に、非常は簡単化した例として、fuzzy の理論を導入した建築構造物の損傷判断の例を示そう。

(I) 材質が鉄筋コンクリートであり、地震による剛性変動がややみられる。⇒“グローバルに重大な損傷を受けた構造”としてのメンバーシップ関数の値は、 $\mu = 0.6$

(II) 材質が主として鋼製で、地震による剛性変動がわずかにある。⇒同じくメンバーシップ関数の値は、 $\mu = 0.6$

(III) 材質が鉄筋コンクリートであり、地震後、各層間にかんがりの相対変形がみられた。⇒同じくメンバーシップ関数の値は、 $\mu = 0.9$

実際の施設・構造物に対しては、メンバーシップ関数を定めるための判断項目がずっと多数にわたり、マトリックス的な decision making になると予想される。

#### 4. おわりに

著者自身は、risk analysis についての研究業績はほとんどないため、本稿が必ずしもこの分野の研究の全体を見通した解説になっていないことをおことわりし、浅学をおわびする。著者は、この分野での調査研究を目的とし、1982年10月に文部省短期在外研究員として約1ヶ月半滞在した Stanford 大学の J.A. Blume 地震工学センターにおいてこの稿を書き上げた。この大学では、著者の指導をして下さっている Shah 教授の下で、年間約10万ドルの予算で、seismic risk analysis のプロジェクト

ト研究が1977年から引続き行われている。まったく、うらやましい話ではあるが、東京都立大学においても、とくに都市研究センターを中心にこうした規模の研究がなされる必要を痛感している。さまざまな分野からの総合的研究協力体勢がととのわなくては、都市圏などを対象としたリスク・アナリシスの研究がすすめられないことを強調したい。

#### 文 献 一 覧

- C.S. Oliveira; 「Seismic Risk Analysis for a Site and a Metropolitan Area」, Rep. of Earthquake Engineering Center, University of California, No. EERC-75-3, August, 1975.
- J.T.P. Yao; 「Probabilistic Methods for the Evaluation of Seismic Damage of Existing Structures」, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 1, No. 3, July, 1982.
- K.S. Fu and Yao, J.T.P.; 「Pattern Recognition and Damage Assessment」, The 3rd ASCE Engineering Mechanics Division Speciality Conference, 1979.
- A.S. Kiremidjian and Shah, H.C.; 「Sesmic Risk Analysis for California State Water Project」, Rep. of the John A. Blume Earthquake Engineering Center, TR-33, October, 1978.

## SEISMIC RISK ANALYSIS FOR FACILITIES AND STRUCTURES IN METROPOLITAN AREAS (On an Evaluation of Seismic Damage State)

Kohei Suzuki

Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

*Comprehensive Urban Studies*, No. 17, 1982, pp. 109-115

This paper deals with an introduction survey concerning seismic risk analysis for various types of structural facilities in metropolitan areas. After evaluation for an individual facility by determining a loss function and a risk function, the evaluation method can be developed for wide spread system like a metropolitan area. In this procedure, correlation among various structural facilities should be adequately considered.

Then, practical seismic damage estimation method based on the pattern recognition technique and "Fuzzy Set" theory is briefly introduced. By using this method, decision making for identification of seismic damage state can be satisfactorily carried out not only from the purely mathematical or probabilistic view points but also the points including subjunctive inference of inspectors.