

不確定因素處理模式在結構損害度  
評估之應用

**APPLICATION OF UNCERTAINTY TREATMENT  
METHODS IN STRUCTURAL DAMAGE  
EVALUATIONS**

易隆毅

L. Y. Yee

原著載於第二屆結構工程研討會暨國科會工程處結構工程專題計畫  
研究成果研討會論文集，第二冊，197-203頁

1994年11月

*Reprinted from Proceedings of The Second National Conference  
on Structural Engineering  
November 1994, Vol. 2, pp. 197-203*

# 不確定因素處理模式在結構損害度評估之應用

易隆毅博士<sup>1</sup>

關鍵詞：結構損害度、不確定因素、或然率

## 摘要

在結構損害度評估 ( Structural Damage Assessment ) 的過程中，不確定因素 ( Uncertainty ) 的處理是一個不可缺少的要件。不確定因素的處理不但是土木工程領域這些年來研究的重要項目，同時也是決策分析、哲學、統計學及心理學等領域長期以來探討的重要課題。經由學者專家們長期的努力，現已研發出數個不確定因素的處理模式，這些模式並曾先後的被應用於專家系統 ( Expert System ) 上。本文將確定因子法 ( Certainty Factors of MYCIN )、模糊集合理論 ( Fuzzy Set Theory ) 及因果網狀圖 ( Causal Network ) 三種不確定因素的處理模式，有效的結合在一起，應用於結構損害度的評估上。

## 1. 前言

近年來，國人對公共建設及建築住宅安全方面的特別注意，結構桿件的部份損害是否會危及到整體結構的安全，常常是新聞媒體報導的焦點。由於每一結構體本身都具有其唯一與複雜的特性，因此不論是用數學模式、試驗方法或經驗法則進行結構損害度分析 ( Structural Damage Assessment )，最後仍是在許多不確定因素 ( Uncertainty ) 的情況下，評估結構損害的程度及其可能導致安全問題。不確定因素的處理及其模式的應用，是結構損害度評估過程中一個不可缺少的要件。

本文將介紹六個曾被成功的應用在專家系統 ( Expert System ) 中不確定因素的處理模式。此六個不確定因素處理模式為：(1) 貝氏決策理論 ( Bayesian Decision Theory )，(2) 確定因子法 ( Certainty Factors of MYCIN )，(3) 模糊集合理論 ( Fuzzy Set Theory )，(4) DS理論 ( Dempster-Shafer Theory )，(5) 合成法 ( Combinations of SPERIL ) 及(6) 因果網狀圖 ( Causal Network )。同時本文並將確定因子法 ( Certainty Factors of MYCIN )，模糊集合理論 ( Fuzzy Set Theory ) 及因果網狀圖 ( Causal Network ) 三種不確定因素的處理模式，有效的結合在一起，應用於結構損害度的評估上。此一合成特別的不確定因素處理模式，是第一次被應用在結構損害度的評估上。

此一合成特別的不確定因素處理模式的特點是，能夠更有效的處理不確定的因素，同時能夠清楚的表示桿件損害程度與結構整體安全之間的因子關係。本文將詳細說明此一模式，並介紹此一模式在建築房屋受地震襲擊後，其結構損害度評估之應用。文中並有例子描述此一模式應用的過程。

<sup>1</sup> 亞新工程顧問股份有限公司正工程師

## 2. 研究方法

在現有的不確定因素處理模式中，大家比較熟悉的有貝氏決策理論 ( Bayesian Decision Theory )，確定因子法 ( Certainty Factors of MYCIN )，模糊集合理論 ( Fuzzy Set Theory )，DS理論 ( Dempster-Shafer Theory )，合成法 ( Combinations of SPERIL )，及因果網狀圖 ( Causal Network ) 等。對於這些方法的討論，簡述如后：

### 2.1 貝氏決策理論 ( Bayesian Decision Theory )

貝氏法為統計學推估演繹的方法，其基本精義在於認為一事件發生的或然率為個人主觀相信度的表徵，同時認為個人主觀相信的程度將因客觀條件事實的驗證而須隨時修正。因此貝氏 ( Bayes' ) 理論提供了一套嚴緊的數學法則，使得原先所“認知”的或然率分佈曲線 ( 即prior distribution curve )，可以因新資料的獲得而得以合理的修正。然後再依據已修正後的個人 ( 如 expert ) 主觀相信的程度 ( 即post distribution curve ) 去從事更能合乎現況的評估。顯然的，貝氏理論提供了一套可以結合個人主觀判斷與客觀事實的數學理論基礎，以便進行不確定因素情況下問題的評估與分析。然而，由於貝氏理論數學的嚴緊性，在實際從事不確定因素情況下複雜問題的評估時，如何能將此複雜問題轉換成適用貝氏理論的數學模式及研擬出各個條件排列組合下的個人主觀相信程度 ( 即Conditional Probability ) 曲線，則是應用此法從事評估、分析成敗的關鍵。貝氏定理在工程上應用的例子，請參閱參考資料 [Ang]。

### 2.2 確定因子法 ( Certainty Factors of MYCIN )

此法認為既然不確定因素的影響是由人們主觀判定來決定，那麼不確定因素的影響程度將可由人們主觀的相信 ( belief ) 及不相信 ( disbelief ) 來判定。其對問題推斷結果的確定度、可信度與不可信度可由下列式子表示：

$$CF[h,e] = MB[h,e] - MD[h,e] \quad (1)$$

$$MB[h,e] = 1 \quad \text{假如} \quad P(h) = 1 \quad (2a)$$

或

$$MB[h,e] = \frac{\max[p(h|e), p(h)]}{1-P(h)} \quad (2b)$$

$$MD[h,e] = 1 \quad \text{假如} \quad P(h) = 0 \quad (3a)$$

或

$$MD[h,e] = \frac{\min[p(h|e), p(h)]}{0-P(h)} \quad (3b)$$

其中 CF[h,e] 表示對判斷“h”依據客觀條件“e”的確定因子 ( certainty factor )  
MB[h,e] 表示對判斷“h”依據客觀條件“e”的相信度  
MD[h,e] 表示對判斷“h”依據客觀條件“e”的不相信度  
P[h] 表示對判斷“h”之原先或然率  
P[h|e] 表示對判斷“h”在客觀條件“e”情況下之或然率

同時對於不同資料來源整合後之判斷“h”的確定因子，則是依照計算式(4)的方式處理：

$$CF[h, e_1 + e_2] = CF[h, e_1] + CF[h, e_2] - CF[h, e_1]CF[h, e_2] \quad (4)$$

確定因子法 ( Certainty Factors of MYCIN ) 曾被應用於醫學的診斷上，而且得到不錯的結果 [Shortliffe]。但由於此法不具有數學的嚴緊性，因此在應用此法於複雜問題的連續推演分析 ( chains of inference ) 時，須特別小心，以避免產生似是而非的結論。

### 2.3 模糊集合理論 ( Fuzzy Set Theory )

在模糊集合理論中，集合的定義可用方程式(5)表示：

$$F = u_1|y_1 + \dots + u_i|y_i + \dots + u_n|y_n \quad (5)$$

其中 F 表示此模糊集合的代號

n 表示元素的總數

$y_i$  表示第 i 個元數

$u_i$  表示相對於第 i 個元素存在於此集合的支持度或可能度

而對於模糊集合 A 及 B 之交集與聯集的運算，則定義如下：

$$A \text{ 交集 } B : \min(u_A, u_B) \quad (6)$$

$$A \text{ 聯集 } B : \max(u_A, u_B) \quad (7)$$

由於模糊集合理論對不確定因素問題的描述與人類思考的方式較相近，因此此法廣被從事專家系統研究者所愛用。雖然模糊集合理論已具有相當程度的數學嚴緊性，但應用此法從事問題解析的連續推演 ( long chains of inference ) 時，仍有可能產生不適切的結論。模糊集合理論在結構工程方面的應用，請參閱參考資料 [Yee] 及 [Brown]。

### 2.4 DS理論 ( Dempster-Shafer Theory )

本來DS理論是為了處理不完全或然率分佈曲線之可信度而研發的。但由於此法提供了對於不完整資料處理的方法，所以也可以用來處理不確定因素的問題。一個不具完整資料的問題，經由DS理論 ( Dempster-Shafer Theory ) 的處理後，可以得到其或然率的上下限值，並可依此上下限值作為判斷的依據。DS理論可以看成是或然率理論的一種延伸。關於此法的討論，請參閱參考資料 [Wise]。

### 2.5 合成法 ( Combinations of SPERIL )

此法是將或然率、模糊集合理論及DS理論結合在一起，作為房屋結構在地震襲擊後結構安全評估上不確定因素處理的數理基礎。合成法 ( Combinations of SPERIL ) 的應用請參閱參考資料 [Yao]。

### 2.6 因果網狀圖 ( Causal Network )

前面所述的幾個方法，都是對於不確定因素數值上的處理模式，對於如何將一個複雜問題有系統的解析表達則沒有述及，而因果網狀圖 ( Causal Network ) 則提供了

如何將一個複雜問題有系統表達的方式。此法以圖示的方式表達影響( effects )及因子( cause )之間的邏輯關係。在應用此法時是先從小地方著手，然後再一個層次接著下一個層次的連續因果關係推演分析，而得到最後的結果[Spiegelhalter]。所以如果將這個推演的程序，其層次與層次之間的因果關係連接起來且註明推演的方向，則所勾畫出的圖形即為所要的因果網狀圖( Causal Network )。正確的因果網狀圖必定是一個開放性的網路，且在此網路圖中沒有任何迴路( no circle in the network )。

在問題的分析上，要從片面結果的現象去判定造成的原因，總是比知道原因後去推論結果困難些[Shachter]。而這也是這些年來，許多人研究因果網狀圖( Causal Network )，以便應用此法處理複雜問題的原因。然而在處理一個複雜的問題時，要從許多原因的排列組合去推演結果，卻是一件不容易的工作。

## 2.7 本文的方法

基於前面對各種方法的討論，得知各種方法都有其適用的情況。如何將上述的各個方法適當的引用、結合，以便從事結構損害度評估的應用，是為本文探討的課題。經由研究所得，可將確定因子法( Certainty Factors of MYCIN )、模糊集合理論( Fuzzy Set Theory )及因果網狀圖( Causal Network )有效的結合在一起，應用於結構損害度的評估上。對以此合成方法的基本法則，說明如后：

圖一所示為基本的因果網路示意圖。圖一說明由兩處的資料來源 $E_1$ 及 $E_2$ 而推演出結論 $H$ ；其中 $E_1$ 、 $E_2$ 及 $H$ 為一般的集合。而 $E_1$ 、 $E_2$ 與 $H$ 的因果關係，則是由 $E_1$ 與 $E_2$ 兩集合元素的組合 $\{e_1, e_2\}$ 與 $H$ 集合元素 $h$ 的因果關係定之。但於實際複雜問題的分析時，由於所得的資料可能不完整，同時也不可能得到因果集合中所有元素之排列組合的因果關係。因此將圖一所示的基本因果網路圖，結合模糊集合理論( Fuzzy Set Theory )及確定因子法( Certainty Factors of MYCIN )修正成圖二所示的合成因果網路圖。於圖二中， $E_1$ 、 $E_2$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 及 $H$ 都為模糊集合；而 $E_1$ 、 $E_2$ 與 $H$ 的關係，則解析成 $E_1$ 與 $H_1$ 的關係及 $E_2$ 與 $H_2$ 的關係，然後再依確定因子法把 $H_1$ 與 $H_2$ 合成而得到 $H$ 。所以經由因果網路圖、模糊集合理論及確定因子法的適當合成，而能有效處理不確定因素情況下複雜問題的評估。

## 3. 結構損害度評估

本節將以一個簡單的例子，說明此一合成的因果網路圖模式在處理建築房屋受地震襲擊後，其結構損害度評估之應用。在從事結構損害度分析時，最重要的就是如何從基本構件(如梁、柱等等)的損害程度情況，去評估整體結構的安全。在現有的結構損害度分析的研究中，大都是依據桿件損害的程度，評估桿件強度( strength )及剛度( stiffness )的折減，再依據桿件強度及剛度的折減去推估整體結構強度、剛度的損失，進而判斷整體結構損害的情況[Yao]及[Siller]。然而在這樣的解析過程中，要從桿件強度及剛度的折減去推估整體結構強度、剛度的損失，則往往要有相當程度的數學計算[Yee]。所以在解析結構損害度問題時，應在桿件與整體結構之間再加上樓層，也就是由該層桿件強度及剛度的損失推估此層樓強度及剛度的折減，再由樓層強度及剛度的折減，評估整體結構強度及剛度的損失[Yee]。如此的解析方式，不但可以提昇評估結構損害度的能力，同時也能與實際建築結構遭受地震襲擊破壞的情況相近(即受地震破壞的都為最弱的樓層)。

現假設有一棟十層樓的鋼筋混凝土建築物，在地震襲擊後，除第一樓的結構有受損外，其餘各樓的結構都沒有受損。而第一樓的一般柱系統尚稱良好，但短柱方面則

發現有裂縫的情況。假如把結構的損害度分為四級，即沒有受損、輕微受損、中度受損及強烈受損等四級。同時下列的因果關係及假設條件成立：

1. 在地震襲擊前，整個結構完好。  
即整棟結構受損情況：1.0 | 沒有 + 0.0 | 輕微 + 0.0 | 中度 + 0.0 | 強烈
2. 樓層的受損情況可直接反應整棟建築的受損情況。
3. 構件受損及樓層受損的因果關係為：
  - (1) 構件沒有受損時，樓層沒有受損的或然率為1.0。
  - (2) 構件輕微受損時，樓層沒有受損與輕微受損的或然率各為 0.5。
  - (3) 構件中度受損時，樓層輕微受損與中度受損的或然率各為 0.5。
  - (4) 構件強烈受損時，樓層中度受損與強烈受損的或然率各為 0.5。
4. 第一樓構件受損的情況為：
  - (1) 一般柱：1.0 | 沒有 + 0.0 | 輕微 + 0.0 | 中度 + 0.0 | 強烈
  - (2) 短柱：1.0 | 沒有 + 0.7 | 輕微 + 0.3 | 中度 + 0.0 | 強烈

則整棟建築的損害情形評估如下：

1. 第一樓  
損害度：0.61 | 沒有 + 0.30 | 輕微 + 0.09 | 中度 + 0.0 | 強烈
2. 第二樓至第十樓  
損害度：1.00 | 沒有 + 0.00 | 輕微 + 0.00 | 中度 + 0.0 | 強烈
3. 整棟建築  
損害度：0.61 | 沒有 + 0.30 | 輕微 + 0.09 | 中度 + 0.0 | 強烈

#### 4. 結論

本文說明了在結構體安全方面考量下，不確定因素處理之重要性，並提出一個有效的不確定因素處理模式，以合理解決在結構損害度或安全評估中所面臨的問題。

#### 5. 參考文獻

##### (1) 期刊

- Brown, C.B. and J.T.P. Yao, "Fuzzy Sets and Structural Engineering," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 5 (1983).
- Shortliffe, E.H. and B.G. Buchanan, "A Model of Inexact Reasoning in Medicine," *Mathematical Biosciences*, Vol. 23, pp. 351-379 (1975).
- Yee, L.Y. and D. Okrent, "An Expert System for Finding Fragility Curves of Building Structural System at the Preliminary Design Stage," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 30 (1990).

##### (2) 書籍

- Ang, A.H-S. and W.H. Tang, *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol. I, John Wiley & Son.
- Yao, J.T.P., *Safety and Reliability of Existing Structures*, Pitman Publishing, Inc. (1985).

##### (3) 論文集

##### (4) 學位論文

##### (5) 研究報告

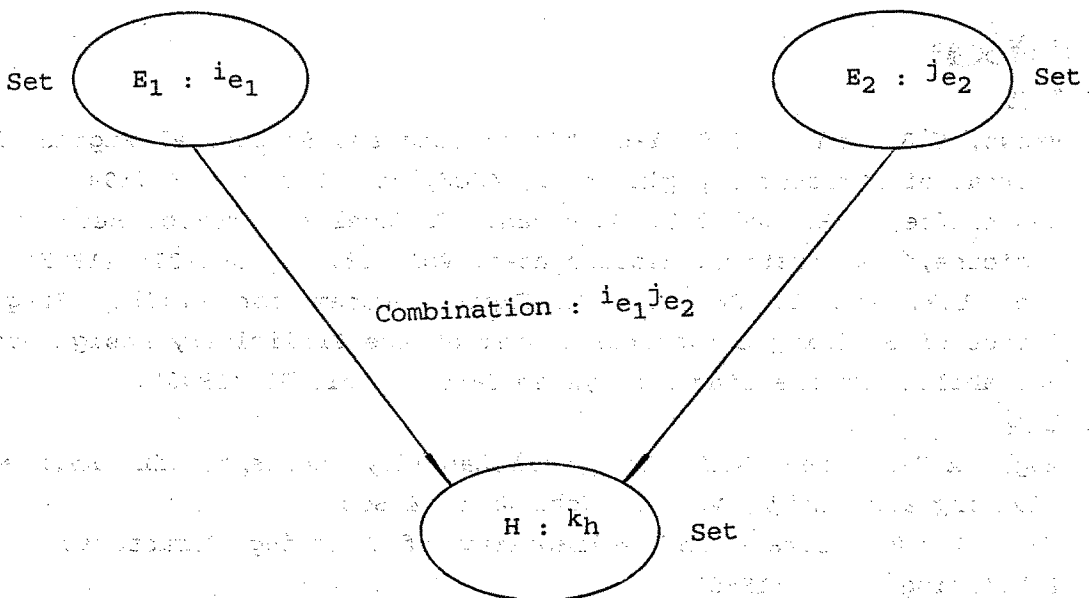
- Shachter, R.D. and D.E. Heckerman, "A Backwards View for Assessment,"

Stanford University Research Report, Stanford University, CA (1987).  
 Siller, T., S.J. Fenves, J. Bielik, and D.A. Reed, "A Prototype Knowledge-Based System for Seismic Damage Assessment," NCEER Project Report 86-4022, Department of Civil Engineering, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA (1989).  
 Spiegelhalter, D.J., "Probability Reasoning in Predictive Expert System," University AI, North-Holland: Amsterdam (1986).  
 Wise, B.P., "Experimental Comparison of Uncertain Inference Schemes," Department of Engineering and Public Policy Research Report, Carnegie-Mellon University, PA (1986).

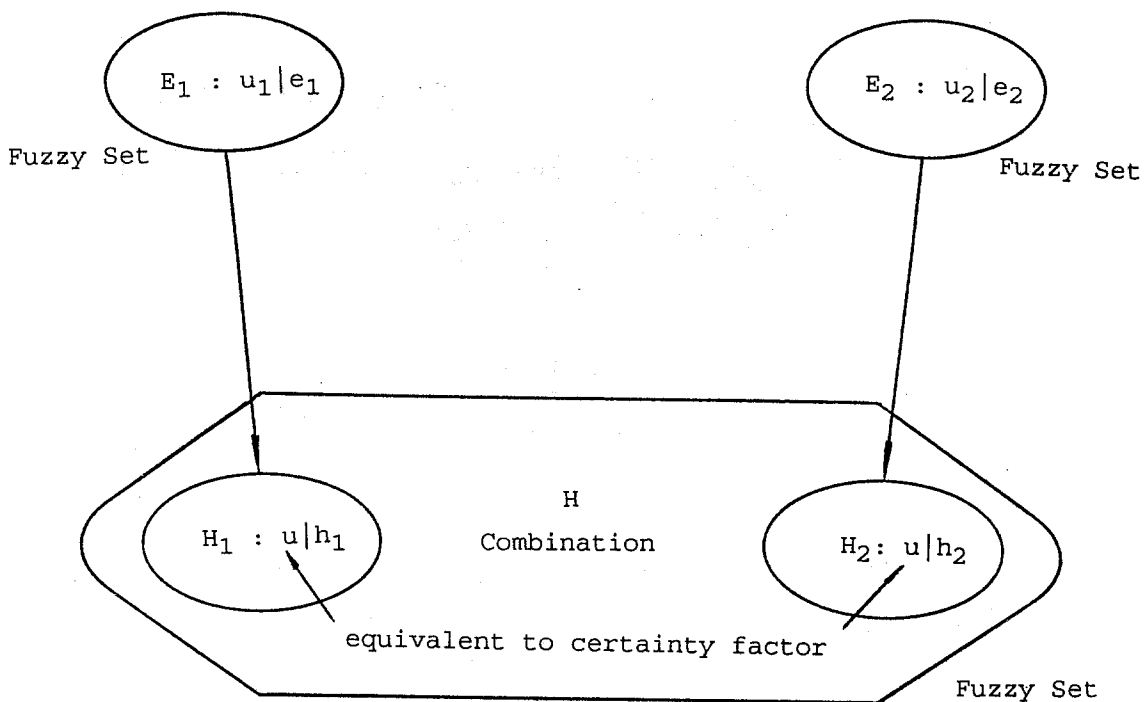
### 英文摘要

The process of structural damage assessment involves a decision-making under uncertainty. Recently, reasoning with or about uncertainty is one of the major research topics in civil engineering. In addition, treatment of uncertainty is the research topic which has been concentrated by decision analysis, philosophy, statistics, and psychology for many years. With the efforts of many researchers, several methods for the representation of reasoning under uncertainty have been developed and have been utilized in the artificial intelligence to implement the uncertain inference schemes. A particular scheme, a combination of Certainty Factors of MYCIN, Fuzzy Set Theory and Causal Network, was developed and will be examined in detail in this paper. The application of this particular scheme for structural damage assessment will also be discussed.

### 圖及表



圖一：基本的因果網路示意圖



圖二：基本的合成因果網路示意圖