

建築物安全度査定システム

小川 均、 田村進一
(大阪大学・基礎工学部)

1. はじめに

多くのエキスパート・システムが、各分野の専門家の知識を実現し、実用を目指して開発されている。例えば、医療診断 (Shortliffe, 1981)、化学 (Buchanan, 1978)、電気回路故障診断 (Davis, 1982) がある。建築物の被害度、または、安全度を査定するため、経験多い建築土木技術者の知識を用いてエキスパート・システムを構築する試みが続けられてきた。試作システム SPERIL-I が石塚、Fu、Yao によって開発された (1981, 1983)。SPERIL-I の構成やルールは地震による被害の査定を目標としており、入力データは主に地震計によるものである。SPERIL-II は SPERIL-I の概念を拡張し、建築物の一般的な被害に適用するように開発された。入力データは主に建築物の観測・検査データを用いる。

建築物の被害度、または、安全度を査定するエキスパート・システムの開発には3つの問題がある。最初の問題は、得られる情報があいまい、不正確であることである。一般に、実際の構造は正確には表わせない。例えば、接合部において接合方法が理想的なモデルや設計に合っているとは限らない。また、同じ観測データがいつも同じ被害度を示しているとは限らない。例えば、ある被害度に対して、ひび割れの大きさの幾とおりかの可能性がある。SPERIL-II ではファジイセット (Zadeh, 1978) を用いて不正確なデータを表現した。第2の問題はデータや推論ルールの確信度である。SPERIL-II では不正確なデータの表現としてファジイセットを用いているので、ファジイセットと確信度を統合して扱う必要がある。第3の問題は、安全度査定の推論過程は複雑であるため推論を制御する必要があることである。推論過程においては、被害の原因、構造物の各構成要素の被害度、構造物全体の被害度、安全度を副ゴールとして求めなければならない。各副ゴールの達成のための方法は構造物の材質によって異なる。また、データに関する質疑応答の方法は使用者の希望に従って行なうのが好ましい。

本論において、建築物安全度査定システム SPERIL-II の構成と推論方法について述べる。特に、ファジイセットと確信度を扱うために Dempster と Shafer の理論を利用したあいまい推論法、知識の表現形式、および、推論制御のためのメタルールについて述べる。

2. 建築物安全度査定手法

2.1 推論の概要

建築物の安全度、または、被害度は普通、破壊の確率によって示される。一般的に、破壊の確率は 10^{-n} の指数の負 n で示される。したがって、SPERIL-II では被害程度の尺度としての n の値とその可能性を求める。最後に n の値から安全を得る。安全度査定の手順を以下に示す。

- (1) 観測・検査データから被害の原因を推測する。
- (2) 被害の原因を考慮し、建築物の各部分について被害度を査定する。
- (3) 各部分の重要度を考慮し、建築物全体の被害度を査定する。
- (4) 建築物の被害度とその重要度から安全度を決定する。

不正確なデータを表現するためファジイセットを用いているが、データやルールには確信度があるので、両者をうまく扱う必要がある。SPERIL-IIではDempsterとShaferの理論(1976)を応用したあいまい推論を使用している。以下の節において、あいまい推論法と手順(3)(4)で用いられている手法について述べる。

2.2 あいまい推論

ルールに基づいたあいまい推論においては、データ、ルール、ルールの結論においてあいまいさがある。

データにおいては2種類のあいまいさがある。すなわち、データ表現に関するあいまいさ(解釈の多様性)と、データ自身のあいまいさ(確信度)である。SPERIL-IIにおいては、破壊確率 10^{-n} の指数 n を安全性の尺度として用いる。この尺度は専門家や建築・土木工学者にとって直感的に被害度を述べるのに適している。専門家は与えられた破壊確率に対してひび割れの大きさの可能性をグラフで示すことができる。逆に、このグラフを用いてあるひび割れのサイズに対して可能な被害確率を得ることができる。例えば、狭いひび割れはファジイセット $0.3/6+1/7+0.3/8$ で表現できる。すなわち、被害確率 10^{-6} 、 10^{-7} 、 10^{-8} の可能性はそれぞれ0.3、1、0.3である。したがって、ファジイセットはデータ表現のあいまいさを表わすのに使用される。確信度は0から1までの数で表わす。

ルール自体のあいまいさは、確信度の減衰として表わすことができる。

同じ項目について異なったルールから結論が得られた場合、それらを統合し一つの結論を得なければならない。SPERIL-IIにおいて、結論を組み合わせるのに以下の特長が要求される。

(1) 各ルールの結論において高い信頼性を持つ要素は、それらを組み合わせた結果においても高い信頼性を持つ。

(2) 各ルールの結論が3個以上ある場合、結果は組み合わせ順序に依存しない。

DempsterとShaferの理論は以上の特長を満足する。この理論においては要素の確率が扱われている。一方、本システムでは確信度が付けられたファジイセットを用いることになる。ファジイセットでは要素の可能性が示され、確率が示されているわけではない。要素は被害確率 10^{-n} の指数の負 n であり、そのmembership functionは $a \times 10^{-n}$ ($1 \leq a < 10$)で示される被害の可能性を示している。二つの確信度付きファジイセットの結合にDempsterとShaferの理論を適用する為、基本ファジイセットを使用する。基本ファジイセットとはmembershipが1の唯一の要素からなるファジイセットである。(例、 $1/x_i$)与えられたファジイセットに対する基本ファジイセットの確率を計算する為、Zadeh(1968)のfuzzy eventの確率の計算方法を利用する。以下に計算方法を示す。ファジイセット

$S = \mu_s(x_1)/x_1 + \dots + \mu_s(x_n)/x_n$ with certainty α ,
 に対して、基本ファジイセット $A_i = 1/x_i$ の確率 $P(A_i)$ は、

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^n \mu_{s \cap A_j} \cdot p,$$

で表わされる。 p は基本ファジイセットの確率を求めるための補正係数であり、

$$p = \frac{\alpha}{\sum \mu_s(x_j)},$$

から得られる。

基本ファジイセット A_i の基本確率 $m_1(A_i)$ は

$$\frac{\alpha \cdot \mu_s(x_i)}{\sum \mu_s(x_j)}$$

により得られる。同様に他のファジイセットの各要素に対応する基本ファジイセット B_j に対応する基本確率 $m_2(B_j)$ を得る。Dempster の結合の法則を用いると求めるべき基本確率 $m(C_k)$ ($k=1, \dots, n$) は

$$m(C_k) = \frac{\sum_{A_i \cap B_j = C_k} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j)}$$

で得られる。 $m(C_k)$ は基本ファジイセット $C_k = 1/x_k$ の確率 $P(C_k)$ である。これを考慮した新しいファジイセットの membership function は

$$\mu_o(x_i) = \frac{P(C_i)}{\max[P(C_j)]}$$

で得られる。 C の確信度 γ は $1 - m(\theta)$ で与えられる。

以上述べた計算手法の特長を次に述べる。

(1) 任意の2つのファジイセットに適用できる。

石塚の方法 (1982) においては、被害の程度を表わすファジイセットをあらかじめ決めておき、そのファジイセットで表わされる被害の発生確率を求めていたので、被害度の表現に制限があった。しかしながら、被害の表現はあらかじめ決めておけるものではない。また、観測データを表わす言葉 (ファジイセット) の種類と建築物の安全度を表わす言葉が異なるので任意のファジイセットに適用できる手法が必要である。

(2) 確信度付きファジイセットと、対応する基本ファジイセットの確率は以下の式により相互に変換可能である。

$$\max[P(C_i)] = \frac{\gamma}{\sum \mu_s(x_j)}$$

(3) 上記の結論組み合わせの特長を満足する。

2.3 各部分の重要度と安全度の決定

同じ建築物でも部分により安全性に対する重要度が異なる。例えば、同じ梁でも、自動車が通る床を支えるものと屋根を支えるものとは重要度が異なる。安全度査定の手順 (3) では B. Bresler と M. Hanson の提案した重み係数 w_i ($0 \leq w_i \leq 1$) を用いた。本システムでは、建築物全体の被害度を査定するルールの確信度の減衰として重み係数を用いた。建築物が特別な用途で利用されていない場合の重み係数を以下に示す。

[重み係数の例]	柱	0.8
	梁	0.7
	接合部	1

最も重要	危険				疑問				安全				
大変重要	危険				疑問				安全				
重要	危険			疑問			安全						
やや重要	危険		疑問		安全								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

図1. 建築物の重要度を考慮した安全性の尺度

建築物の安全度は破壊確率の指数の負nの可能性の高い値の範囲で決定する。その場合、その建築物の重要度を考慮しなければならない。例えば、原子力発電所と倉庫では安全性の尺度が異なる。SPERIP-IIでは図1に示す4種類の建築物の重要度を用いた。

3. 査定実行時の問題点

建築物の被害査定を行なう推論においては種々の副ゴールが存在する。また、対象とする副ゴールや建築物の部分に対応したルールやルールの集合がある。従って、推論を計算機上を実現するには以下の問題が存在する。

(1) 推論方法の指定・実行

推論の道筋が唯一でない時、すべての可能な推論の道筋を見つける必要がある。例えば、対象建築物の一部分の被害度を査定する為に、その要素に関するすべての結果を得る必要がある。多くのエキスパート・システムで用いられている推論方法、すなわち、プロダクション・システムでは、すべての可能な結果を得る事は難しい。しかし、効率良くすべての結果を求める推論方法があり、それを自由に使用できるなら問題はない。一般に、異なるタイプの問題には異なるタイプの解決方法を使用するのが好ましい。したがって、問題解決の為の表現には推論方法を指定できる能力が必要である。

(2) 副ゴールの達成すべき順序

本システムにおいては、ある部分について被害度が記述されていない場合、その部分の状態は最良であるとみなすデフォルト・ルールを用いている。このような場合、建築物全体の被害度を査定する前に、すべての部分について被害度を査定する必要がある。他の例として、被害の原因の調査順序がある。すなわち、設計ミスを最初に考えなければならない (Johnson, 1965)。

(3) 推論ルールのグループ化と選択

推論ルールは達成する副ゴールや建築物の材料に関してグループ化できる。ルールのグループを推論の状態に応じて選択できれば効率良く結果を得ることができる。この能力は各部分の重み付への変更や建築物の安全性の基準の変更を利用できる。

(4) 推論手法の選択

目的に応じた効率の良い推論方法を選択することも重要である。例えば、逆向

き推論は設計ミスの有無を調べるのに適している。また、ある要素の被害度が得られた推論の流れを知るのにも便利である。一方、前向き推論は、与えられたデータが示す被害箇所、その程度、原因を得るのに適している。

4. SPERIL-II

SPERIL-IIは基本的にはルールベース・システムであるが、知識やメタ知識は論理式で表現される。本節では、SPERIL-IIの構成と、知識やメタ知識を実現するメタルール、ルール、データの表現形式について述べる。

4.1 SPERIL-IIの構成

SPERIL-IIは推論部、知識ベース、メモリからなる。推論部は数個の推論方法（例えば、前向き推論法、縦型探索による逆向き推論法）を持っており、メタルールにより選択することができる。知識ベース上のルールとメモリ上のデータを用いて推論を行ない、結論をだす。知識ベースには、被害査定を行なうためのルールと、推論を制御し、ルール・グループと推論方法を選択するためのメタルールがある。メモリには多種のデータが蓄積される。例えば、対象とする建築物の構造、その観測データ、推論により得られた一時的結果などである。

4.2 データの表現形式

データは次の形式で表現される。

data (<述語式> {, <確信度> }) .

ここで、{ } は任意選択を意味する。<確信度>は0から1までの数で表わす。0であれば信頼性がないことを表わし、1ならば確信できる事実であることを示している。もし、<確信度>が記述されていなければ、1であるとする。データをルール中で参照する場合は述語式のみを記述すればよい。データ記述のために使用できる述語を表1に示す。英大文字は変数を示す。データ表現の例を下に示す。

- [例] (1) data(has(c1,[data3,in_a_whole])).
(2) data(symptom(data3,cracks,slight),1).
(3) data(specdata(data3,cracks,diagonal),1).

この例は、c1（柱1）全体に斜め方向の軽微なひび割れ（確信度1）があることを述べている。

4.3 ルールの表現形式

ルールの表現形式は以下の様である。

<ルール> ::= <グループ名> (<結論式>, <条件式>, <確信度>) .

<結論式> ::= <述語式>

<条件式> ::= [{<文>} +] | <文>

<文> ::= <論理式> | <述語式>

<論理式> ::= and ({<文>} +) | or ({<文>} +) | not (<文>)

ここで【と】で囲まれた<文>は左から右に解釈される。ルールの一例を下に示す。

- [例] estcause(cause(A,shringage,B),
and(symptom(A,cracks,B),
symptom(A,spalling,no),
specdata(A,cracks,diagonal)),
1).

表 1. データ表現に使用される述語

述語	意味
ako(A,B) has(A,K,in_a_part) has(A,K,in_a_whole) has(A,K, in_bearing_region_of,L) has(A,K,adjacent_to,L) joint(A,B,C) symptom(A,B,C) specdata(A,B,C) has(A,K,adjacent_to,L)	AはBの一種である。 Aは部分的な観測データKをもつ。 Aは全体的な観測データKをもつ。 AはLを支える部分に観測データKをもつ。 AはLの隣接部分に観測データKをもつ。 AはBとCの接合部である。 観測データAは程度Cの症状Bをもつ。 観測データAの症状Bは特長Cをもつ。 AはLの隣接部分に観測データKをもつ。

表 2. SPERIL-IIで使用できる推論方法

推論方法	意味
bwc bwca bwcatrace fwca	縦型探索による逆向き推論法で解を一つ得る。 逆向き推論法ですべての解を得る。 逆向き推論法ですべての解を探索し、 それらの解と使用したルールおよびデータを出力する 前向き推論ですべての解を得る。

これはルールグループ estcause のルールであり、崩れがなく、斜め方向のひび割れの症状の原因は (コンクリートの) 収縮であり、その被害度は B であることを述べている。

4.4 メタルールの表現形式

メタルールの表現形式はルールとはほぼ同様であるが、<文>の表現に以下の3つの形式を使用できるようにした。SPERIL-IIで使用できる推論方法を表2に示す。

(1) (<述語式> {, a_slot(X)} {, e_slot(Y)} {, c_slot(Z)}).

(2) ([<述語式> {, <論理式>}]
{, a_slot(X)} {, e_slot(Y)} {, c_slot(Z)}).

(3) <推論方法> (<グループ名>).

最初の形式において、a_slot、e_slot、c_slotはそれぞれ、<述語式>を達成するために使用されるルールグループ、推論方法、デフォルト推論用のルールグループを示す。例えば、

```
(cause(data1, design_error, A),  
a_slot(estcause), e_slot(bwc), c_slot(preaction)).
```

は設計ミスが原因の被害の程度Aを得るため、ルールグループ estcause中のルールを用いて、推論方法bwcにより cause(data1, design_error, A)を達成する。デフ

ォールト推論にはルールグループpreactionを用いる。ルールグループpreactionには、観測データがメモリ中にない場合、考慮中の症状が事実上ないとみなしたり、使用者に質問する為のルールがある。

第2番目の形式は最初の形式とほぼ同じであるが、達成すべきゴールの記述が異なる。すなわち、<述語式>の制限を述べる<論理式>の集合が記述される。例えば、

```
[cause(data1,B,C),not(B == design_error)],
    a_slot(estcause),e_slot(bwc),c_slot(preaction)).
```

は設計ミス以外の原因を求めるのに使用される。

最後の形式は上2つの形式と異なり、前向き推論のみに使用されるので、<推論方法>と<グループ名>を指定するだけでよい。例えば、

```
fwca(estlocal).
```

は、ルールグループestlocal用いて推論方法fwcaにより結果を得る。

5. 実験結果

アメリカ合衆国シカゴにある建築物の被害査定・修理助言の専門会社Wiss, Janney, Elstner and Associates, Inc. (WJE)で扱った4つの実例についてSPERIL-IIを適用した。これらの例はすべてあるていど被害はあるが崩壊はしていない状態である。SPERIL-IIで用いたモデルは正確には実際の構造と異なっている。理由を次に示す。

(1) より多くの種類の建物に適用するには、モデルの構造は建築物の材質、各要素の微妙な形の違い、結合部のタイプに依存しないのが理想的である。可能な限り、各要素や結合部タイプの記述としてより一般的な表現を選んだ。例えば、”逆T型梁”の代わりに”梁”を用いた。

(2) 建物全体が同じ構造の組み合わせで構成されている時、そして、その構造のみの査定によって建物全体の被害が推測できる時、その構造のモデルを用いる。

表3. SPERIL-IIと専門家の結果比較。

例	建築物の重要度	結果	
		専門家	SPERIL-II
1	最も重要 又は 大変重要	危険 又は 疑問	危険 又は 疑問
2	やや重要	疑問 又は 安全	疑問
3	重要	疑問	疑問
4	最も重要	危険	危険

例えば、ガレージ・ビルは各階がほぼ同じ構造をしているので、一番被害が大きいと思われる階を調べるだけで建物全体の被害が査定できる。

(3) SPERIL-IIのルール・メタルールの効果、各要素の重み付けの影響、被害確率の尺度妥当性を調べるには、なるべく簡単なモデルが好ましい。もちろん、そのモデルは実際の構造を反映するぐらい複雑でなければならない。

表3にSPERIL-IIの実験結果と専門家の結論を示す。SPERIL-IIと専門家の結果を簡単に比較するために、安全性の3つの分類(安全、疑問、危険)を用いた。建築物の重要度は専門家の判断を用いた。SPERIL-IIは専門家とほぼ同じ結果を得ている。

6. むすび

SPERIL-IIは観測・検査データから建築物の安全度を査定するシステムである。観測・検査データのあいまいさを表現するためにファジイセットを用いた。また、データやルールには確信度がある。したがって、複数の確信度付きファジイセットを統合するために、DempsterとShaferの理論を応用したあいまい推論法を提案した。安全度の査定には建築物の構造、用途、重要度を考慮しなければならない。このために、構造物の各部分の重み係数や重要度に応じた安全度決定尺度を用いた。

安全度査定のための推論は複雑である。本システムでは、推論を制御するためメタルールを用いた。メタルールにより推論方法、推論に使用されるルールグループ、デフォルト推論のためのルールグループが指定でき、正確かつ、より効率的な推論が可能である。

[参考文献]

- [1] Bresler, B. & J. M. Hanson (1982). Damageability and Reliability of Existing Structures. Ninth U.S. National Congress of Applied Mechanics, Cornell University, Ithaca, NY, 309-313.
- [2] Buchanan, B. G. et al (1978). DENDRAL and META-DENDRAL: Their Application Dimension. Artificial Intelligence, 11, 5-24.
- [3] Davis, R. et al (1982). Diagnosis Based on Description of Structure and Function, Proc. Second Nati. Conf. of AI, 137-142.
- [4] Ishizuka, M. et al (1981). Inexact Inference for Rule-Based Damage Assessment of Existing Structures. Proc. of 7th IJCAI, 837-842.
- [5] 石塚満 (1983). 建築物被害査定のエキスパート・システム. 情報処理学会論文誌, Vol.24, No.3, 357-363.
- [6] Johnson, S. M. (1965). Deterioration, Maintenance, And Repair Of Structure. McGraw-Hill, New York.
- [7] Shafer, G. (1976). A Mathematical Theory of Evidence, Princeton Univ. Press.
- [8] Shortliffe, E. H. et al (1981). ONCOCIN: An Expert System for Oncology Protocol Management. Proc. of 7th IJCAI, 876-881.
- [9] Zadeh, L. A. (1968). Probability measures of fuzzy events. Journal of Mathematical Analysis and Applications. 23, 421-427.
- [10] Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Int. J. Fuzzy Sets System. 1, 1, 3-28.