

CS-143 ひび割れ診断エキスパートシステムへのファジィ関係式の適用

武蔵工業大学 学生会員 田中 功

武蔵工業大学 正会員 吉川 弘道

武蔵工業大学 正会員 皆川 勝

1. はじめに

コンクリート構造物には異なる原因によるひび割れが発生し、それは構造物の耐力・耐久性・水密性などの諸機能を低下させる大きな要因となる。ひび割れによる不具合が発生したときは、その発生原因を明らかにして的確な補修・補強を行わなくてはならない。ひび割れの発生機構は複雑で、多くの場合複数の原因によりひび割れが発生する。したがって、その原因を明らかにするためには、多くの情報と専門家の高度な技術的判断が必要であり、各種エキスパートシステムが構築されてきた。

本研究では、エキスパートシステムにファジィ関係式を適用し、構造物に発生したひび割れの原因推定を試みた。

2. ひび割れ診断エキスパートシステムの概要¹⁾

本システムで採用した診断方法は、ひび割れの発生原因と症状の因果関係と、設計・施工・配合条件などの基礎的条件(以下、略して条件)とひび割れ発生原因の因果関係を、それぞれファジィ関係で表す。そして、症状と条件の両面からひび割れの原因を特定する。診断作業の流れは、先ず構造物に発生したひび割れの症状から複数の発生原因を挙げる一次診断を行い、次に条件から発生原因をさらに絞り込むための二次診断を行う。

症状と原因のファジィ関係を $R = \{r_{ij}\}$ 、条件と原因のファジィ関係を $S = \{s_{ki}\}$ 、症状から推定する原因を $X^1 = \{x_i^1\}$ 、症状を $Y = \{y_j\}$ 、条件から推定する原因を $X^2 = \{x_i^2\}$ 、条件を $Z = \{z_k\}$ とする。そこで、 R 、 S が既知として与えられると、max-min 合成により、次のようなファジィ関係式で各関係を記述することができる。

$$X^1 \circ R = Y \quad (1)$$

$$Z \circ S = X^2 \quad (2)$$

一次診断は式(1)において、 R と Y が既知で X^1 を求める逆問題となり、二次診断は式(2)において、 S と Z が既知で X^2 を求める順問題となる。本研究では、原因 X 、症状 Y 、条件 Z の各項目は表-1

に示すような主要なものに限定した。技術者の知識を表す関係 R と S は、3名の経験ある技術者のアンケート調査をまとめたもので、既報1)にて報告した。

3. ファジィ関係式の逆問題

塚本・田代によるファジィ対応の逆問題の従来の解法²⁾では、原因数及び症状数が多い場合は多大な推論時間が必要とするため、実時間系のエキスパートシステム等の推論エンジンとして従来の解法を用いるのは困難であった。そこで本研究では、ファジィ関係式の逆問題の解法に林・井村により提案されたファジィ対応の逆問題の超高速解法³⁾を適用し、一次診断を行った。また、ファジィ関係式の逆問題の解は、入力や因

表-1 原因、症状、条件の各項目

ひび割れ発生原因 X			
x_1 ...	構造物の不等沈下	x_7 ...	温度変化(内部拘束)
x_2 ...	支保工・施工時応力	x_8 ...	沈降
x_3 ...	鉄筋の発錆	x_9 ...	プラスチック収縮
x_4 ...	初期凍害	x_{10} ...	アルカリ骨材反応
x_5 ...	凍結融解	x_{11} ...	乾燥収縮
x_6 ...	温度変化(外部拘束)		
ひび割れ症状 Y			
規則性	y_1 ...	部材長手直方向	
	y_2 ...	直筋方向	
	y_3 ...	その他	
	y_4 ...	なし	
パターン	y_5 ...	網状・亀甲状	
	y_6 ...	一本のみ	
	y_7 ...	一方向複数	
	y_8 ...	二方向複数	
発生時期	y_9 ...	数時間から一日	
	y_{10} ...	数日	
	y_{11} ...	数日から数ヶ月	
	y_{12} ...	一年以上	
ひび割れ幅	y_{13} ...	微細(0.2mm 以上)	
	y_{14} ...	中(0.2mm~1.0mm)	
	y_{15} ...	大(1.0mm 以上)	
方向性	y_{16} ...	鉛直方向	
	y_{17} ...	水平方向	
	y_{18} ...	斜め方向	
	y_{19} ...	平面面上	
	y_{20} ...	ランダム	
スケーリング	y_{21} ...	有り	
	y_{22} ...	無し	
	露出	y_{23} ...	発生
	ポップアウト	y_{24} ...	発生
基礎的条件 Z			
z_1 ...	打込み温度	z_4 ...	反応性骨材
z_2 ...	打置時期	z_5 ...	海砂の使用
z_3 ...	締め固め	z_6 ...	部材断面の複雑
z_4 ...	養生	z_7 ...	部材断面
z_5 ...	支保工	z_8 ...	最小留保厚
z_6 ...	型枠撤去時期	z_9 ...	配筋量
z_7 ...	鉄筋のぶり	z_{10} ...	気温
z_8 ...	打込み高さ	z_{11} ...	湿度状態
z_9 ...	単位セメント比	z_{12} ...	部材外荷重
z_{10} ...	単位水量	z_{13} ...	支持地盤
z_{11} ...	スランプ	z_{14} ...	拘束
z_{12} ...	空気量	z_{15} ...	塩分環境
z_{13} ...	水セメント比	z_{16} ...	風

果関係を普通のメンバーシップ関数で与えても、その結果は下限値と上限値を持つ区間値メンバーシップ関数となる。一方、ファジィ関係式の逆問題の解法には、症状のメンバーシップ値の与え方により、原因が推定できないという問題があることが明らかになった。この問題を解決するため、韓・関口により提案された、記号行列を用いたファジィ関係式の逆問題の解の存在性判別法⁴⁾を用いて、症状の値を修正した。

4. 事例診断

数値解析手順は、まず症状 Y と関係 R の大小関係より、逆問題の解の存在性判別法を用いて、入力となる症状 Y の値を調節する。逆問題の超高速解法で、症状 Y より原因 X^1 を求める。次に、二次診断を行う。条件 Z より max-min 合成演算で、原因 X^2 が求まる。そして最後に、本診断システムでは、総合診断結果 X を次のように評価した。

$$[x_{i(l)}, x_{i(u)}] = \begin{cases} [x_{i(l)}^1 \vee x_i^2, x_{i(u)}^1 \wedge x_i^2] & : \text{if } x_{i(l)}^1 \vee x_i^2 \leq x_{i(u)}^1 \wedge x_i^2 \\ \phi & : \text{if } x_{i(l)}^1 \vee x_i^2 > x_{i(u)}^1 \wedge x_i^2 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 (l) , (u) は下限値, 上限値を表す。

次に凍結融解作用により生じた橋脚のひび割れ⁵⁾について、本システムの適用例を示す。

例題「竣工後5年を経過した頃に、橋脚に微細な網目状のひび割れが生じた。」

症状 Y は、 $y_4=1.0$, $y_5=1.0$, $y_{12}=1.0$, $y_{13}=1.0$, $y_{14}=0.7$, $y_{20}=1.0$ (その他は 0.0)を設定した。ここで、逆問題の解の存在性を判別した結果、逆問題の解は存在しなかった。そこで、 $y_4=0.8$, $y_5=0.8$, $y_{12}=1.0$, $y_{13}=1.0$, $y_{14}=0.7$, $y_{20}=0.8$ (その他は 0.0)に症状 Y の値を置き換えて、一次診断における入力とした。条件 A は、 $a_2=0.2$, $a_{12}=0.2$, $a_{13}=0.3$, $a_{20}=1.0$, $a_{21}=0.5$, $a_{26}=0.3$ (その他は 0.0)を二次診断における入力とした。一次診断、二次診断、総合診断結果を、表-2、表-3、表-4に示す。

一次診断による結果は、凍結融解 $x_5[1.0,1.0]$ とプラスチック収縮 $x_9[0.8,1.0]$ が、最もらしい原因である。しかし、その他の原因は下限値は 0.0 であるが上限値は 0.0 ではなく、原因の一つとして考慮に入れなければならない。そこで、二次診断結果を用いることにより、総合診断結果は凍結融解 x_5 が最も可能性のある原因である結果となった。また、その他の原因も解の範囲を更に絞ることができた。

5. 考察

ファジィ関係式を原因と症状、条件と原因という因果関係を用いて表すことにより、ひび割れ診断を行うことができることを示した。また、ファジィ関係式の逆問題の解が存在しない場合でも、解の存在性判別法を用いて入力を修正することにより、ひび割れ診断が行えることを示した。しかし、条件の項目に問題があることなどにより、二次診断によりひび割れの発生原因を特定するまでには至っていない。エキスパートシステムを構築する上で生ずる問題は、項目にない原因を診断できないこと、診断結果が技術者の知識を表すファジィ関係に依存した解であることなどが挙げられる。

これらの問題は、各症状、原因、条件の項目の再検討、ファジィ関係についてはアンケート調査を重ねること、ニューラルネットワークを用いたファジィ関係の学習・更新が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 皆川・吉川:ひび割れ診断へのファジィ関係方程式の応用と学習の可能性, 第1回ファジィ土木応用シンポジウム講演論文集, pp. 100-109, 1993. 11.
- 2) 塚本・田代:Fuzzy 逆問題の解法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 15, No. 1, pp. 21-25, 1979.
- 3) 林・井村:ファジィ対応の逆問題の超高速解法, 第6回ファジィシステム講演論文集, 日本ファジィ学会, pp. 183-188, 1990.
- 4) 韓・関口:ファジィ関係逆問題における解の存在性判別, 日本ファジィ学会誌, Vol. 5, No. 5, pp. 1142-1154, 1993.
- 5) 日本コンクリート工学協会:コンクリートのひび割れ診断, 補修・補強指針, pp. 218-222, 1987.

表-2 一次診断結果 X^1

原因	下限値	上限値
x_1	0.0	0.7
x_2	0.0	0.7
x_3	0.0	1.0
x_4	0.0	0.7
x_5	1.0	1.0
x_6	0.0	0.7
x_7	0.0	0.7
x_8	0.0	1.0
x_9	0.8	1.0
x_{10}	0.0	0.7
x_{11}	0.0	0.7

表-3 二次診断結果 X^2

原因	メンバーシップ値
x_1	0.0
x_2	0.0
x_3	0.5
x_4	1.0
x_5	1.0
x_6	1.0
x_7	1.0
x_8	0.5
x_9	0.5
x_{10}	0.5
x_{11}	0.5

表-4 総合診断結果 X

原因	下限値	上限値
x_1	0.0	0.0
x_2	0.0	0.0
x_3	0.5	0.5
x_4	ϕ	ϕ
x_5	1.0	1.0
x_6	ϕ	ϕ
x_7	ϕ	ϕ
x_8	0.5	0.5
x_9	ϕ	ϕ
x_{10}	0.5	0.5
x_{11}	0.5	0.5