

武蔵工業大学 学生会員 黒木礼則
 武蔵工業大学 正会員 吉川弘道
 武蔵工業大学 学生会員 田中 功

1. はじめに

コンクリート構造物では、ひび割れが構造物の劣化に重大な影響を及ぼしている。そのため、維持、補修ではひび割れ原因を特定し、それを取り除くことが重要である。しかし、ひび割れの発生メカニズムは複雑であり、また系統的な記述が困難であるため、その原因推定は専門家の経験的な判断に委ねることが多い。

本研究は、ファジイ測度を推論機構に取り入れたエキスパートシステムを構築し、ひび割れ原因の推定を試みたものである。

2. システムの概要

本システムは、プロダクションシステムを母体とし、その推論機構にファジイ測度の一種である可能性理論を用いることで、従来のシステム¹⁾で取り扱っている「推論規則条件部のファジイな表現」に加え、「不完全な入力データ」、「信頼性の高くないデータ」、「推論規則条件部と結論部の不確実性」といったより多様な曖昧さを取り扱うことが可能である。

入力データとして、コンクリート構造物に発生したひび割れの状態等Y（以下、症状と呼ぶ）を与え、ひび割れ原因Xの推定を行う。推論規則はIF-THENルールで記述し、ひび割れ原因にそれぞれ対応する11規則を用いた。また、各規則条件部の真理値関数は5名のエキスパートに対しアンケート調査を行い、その結果を用いた。

3. マッチング処理

本システムは、プロダクションシステムであるので、ワーキングメモリ（以下、WMと略す）の内容と推論規則のマッチング処理を行うことで推論を進める。WMと推論規則のマッチング過程において4つの曖昧性を統合して取り扱うため、統合された曖昧さを真理値空間[0,1]上の可能性分布で表現し、これをWMと推論規則のマッチ度としている。

まず、入力データと推論規則を以下のように記述する。

入力データ： $\pi_{w1}(u) / e_1, \pi_{w2}(u) / e_2, \dots, \pi_{wi}(u) / e_i, \dots, \pi_{wn}(u) / e_n$

推論規則： $(\pi_r(u)) \text{ IF } A_1 \text{ and } A_2 \text{ and } \dots \text{ and } A_i \text{ and } \dots \text{ and } A_n \text{ THEN } C$

但し、 $\pi_{wi}(u)$ は入力データの信頼性を表す真理値空間{0,1}上の可能性分布、 e_i は可能性分布で表現された入力データ、 $\pi_r(u)$ は推論規則の信頼性を表す真理値空間{0,1}上の可能性分布、 A_i はファジイ述語で記述された条件、 C は結論部である。

マッチング処理は以下の4段階に分けて行う²⁾。

(1) 入力データと推論規則条件部のマッチング処理を行う。

$$\pi_u(u) = \sup_{u \in \mu_{A_i}(x)} e_i(x) \quad (1)$$

表-1 原因、症状の各項目

ひび割れ発生原因 X	
x 1	構造物の不等沈下
x 2	支保工・施工時の応力
x 3	鉄筋の発錆
x 4	初期凍害
x 5	凍結融解
x 6	温度応力（外部拘束）
x 7	温度応力（内部拘束）
x 8	沈降
x 9	プラスチック収縮
x 10	アルカリ骨材反応
x 11	乾燥収縮
ひび割れ症状 Y	
y 1	規則性、部材長手方向
y 2	規則性、配筋方向
y 3	規則性、その他
y 4	規則性、なし
y 5	パターン、網状・亀甲状
y 6	パターン、一本のみ
y 7	パターン、一方向複数
y 8	パターン、二方向複数
y 9	発生時期
y 10	ひび割れ幅
y 11	方向性、鉛直方向
y 12	方向性、水平方向
y 13	方向性、斜め方向
y 14	方向性、打設面上
y 15	方向性、ランダム
y 16	スケール

但し、 $\mu_{A_i}(x)$ はファジイ述語 A_i の真理値関数である。

(2) レベル1のマッチング結果と入力データの信頼性のマッチング処理を行う。

$$\pi_2(u) = \sup_{u=(x \wedge y)} \min(\pi_u(x), \pi_u(y)) \quad (2)$$

但し、 $\wedge$ はmin演算を表す。

(3) 推論規則各条件部のマッチングマッチ度の統合を行う。

$$\pi_3(u) = \sup_{u=\wedge(u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_m)} \min(\pi_{21}(u_1), \dots, \pi_{2i}(u_i), \dots, \pi_{2m}(u_m)) \quad (3)$$

(4) レベル3のマッチング結果と推論規則の信頼性のマッチング処理を行う。

$$\pi_4(u) = \sup_{u=(x \wedge y)} \min(\pi_3(x), \pi_r(y)) \quad (4)$$

ここで得られた $\pi_4(u)$ が最終的なマッチ度となり、本システムの場合結論部の確からしさ、すなわち原因 X である確からしさを表す。この確からしさは、真理値空間 $[0,1]$ 上の可能性分布で表現される。

4. 事例分析

本システムを用いて、橋脚に生じたひび割れ³⁾について原因推定を行った。専門家による判断は x_3 凍結融解である。

事例 「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、表-2の様に入力した。推論結果は、原因 x_i は表-3の様に、他の原因は全て真理値0.0の可能性測度が1.0になり、最も可能性の高いひび割れ原因は他の原因との比較で x_3 であると推定できる。

x_3 における低い真理値の可能性測度が大きく、「否定」の可能性が大きいことを示唆しているが、これは事例の入力データにおいて y_{11} の値を「真理値0.0の可能性測度1.0」と入力しているため、 x_3 の推論規則の y_{11} に対応する部分「真理値0.4の可能性測度1.0」（打ち継ぎ目から地下水が浸透した場合を考慮）とずれが生じ、入力データ y_{11} と推論規則のマッチ度が低くなったためである。

また、入力データの値を無作為に ± 0.2 した場合について推論を行った。推論結果は元データ入力時とほぼ同様の値となり、本システムは入力データの変動に対し柔軟性があることがわかる。

5. 考察

プロダクションルールの推論機構にファジイ測度を用いることで、従来のファジイ関係の逆問題を用いたシステムより柔軟性に富んだひび割れ診断システムを構築できることが示せた。しかし、ひび割れ原因が複合した場合については、入力データが推論規則と矛盾するため推論結果が得られないことが多い。また、本事例のように場合によっては発生しない症状が推論規則に含まれていると、否定の可能性が大きく評価される場合がある。これらの問題は、推論規則を増やし多様なひび割れ症状パターンを考慮すること、入力データ項目の再検討を行うことで解決可能であると考ええる。

参考文献

- 1) 田中・吉川・皆川：ひび割れ診断エキスパートシステムへのファジイ関係式の適用，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集 共通セッション，土木学会，pp.286-287，1996。
- 2) 日本ファジイ学会：講座ファジイ6 ファジイエキスパートシステム，日刊工業新聞社，1993。
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひびわれ調査，補修・補強指針，pp.218-222，1987。

表-2 入力データの可能性測度

真理値	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
y_4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.9	1.0	1.0
y_5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.9	1.0	1.0
y_9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.9	1.0	1.0
y_{10}	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0
y_{15}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.9	1.0	1.0
その他	1.0	1.0	0.9	0.5	0.2	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0

表-3 原因 x_i の可能性測度

真理値	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
x_3	1.0	0.9	0.5	0.0	0.5	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0
その他	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0