

II-19 コンクリート構造物のひび割れ診断 エキスパートシステムの開発

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

1. はじめに

コンクリート構造物は維持管理の比較的容易な構造物として我が国の社会資本に多用されてきた。コンクリート構造物は、発生したひび割れが耐力、耐久性、水密性といった性能の低下に大きく影響している。そのため維持管理、補修においてはひび割れの発生原因を特定し、それを取り除くことが重要である。しかし、ひび割れの発生要因は複雑であり、かつ系統的な記述が困難である。従って、その発生原因の特定には専門家の高度な技術的判断が必要となることが多い。

そこで、本研究はコンクリート構造物に発生したひび割れの発生原因を推定する、ひび割れ診断システムを構築し、経験の浅い技術者でも容易かつ的確にひび割れ原因の推定を行えるようにすることを目的とするものである。

2. システムの概要

コンクリート構造物に発生するひび割れは、構造物の設計条件や環境条件等によってひび割れ原因が成立し、その結果構造物にひび割れが発生する(図1)。ひび割れ原因推定のアプローチには、ひび割れの症状Y(以下症状Y)からひび割れ原因X(以下原因X)を推定する一次診断とひび割れの条件Z(以下条件Z)から原因Xを推定する二次診断があり、本システムではどちらか一方、または両方を用いて推論を行う。原因X、症状Y、条件Zの項目数は8人の技術者とディスカッションを行い、表1のように設定した。

このシステムはプロダクションシステムをベースとして、推論機構にファジイ測度を適用したファジイプロダクションシステム(FPS)である。

システムはワーキングメモリ(WM)、プロダクションメモリ(PM)、推論機構から構成されている。WMは入力データ、推論規則の実行結果が格納され、PMには推論実行時に用いられる規則が格納されている。推論機構はWMに格納されているデータから実行できる規則を選択し、実行する。

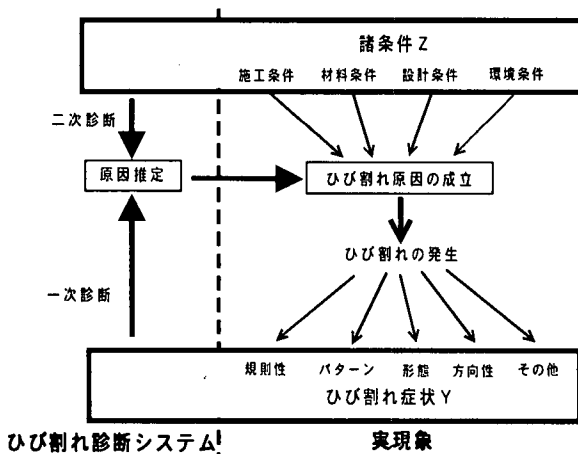


図1 ひび割れの発生要因

表1 入力、出力の各項目

原因 X	
x 1	セメントの異常凝結
x 2	反応性骨材
x 3	沈下、ブリージング
x 4	プラスチック収縮
x 5	乾燥収縮、自己収縮
x 6	初期凍害
x 7	かぶり厚さ不足
x 8	支保工の沈下
x 9	温度応力(外部拘束)
x 10	温度応力(内部拘束)
x 11	凍結融解
x 12	鉄筋発錆
x 13	荷重(過荷重等)
x 14	構造物の不等沈下
症状 Y	
y 1	規則性あり
y 2	形態、表層
y 3	形態、貫通
y 4	形態、打設面上
y 5	パターン、網状・亀甲状
y 6	パターン、一方複数
y 7	パターン、二方複数
y 8	パターン、配筋状(鉄筋上)
y 9	方向性、水平方向
y 10	方向性、鉛直方向
y 11	方向性、斜め方向
y 12	方向性、部材長手直方向
y 13	方向性、ランダム
y 14	発生時期
y 15	ひび割れ幅
y 16	スケールリングあり
y 17	剥離、剥落あり
y 18	ポップアウトあり
y 19	錆汁発生
条件 Z	
z 1	施工、打設温度
z 2	施工、打設時期
z 3	施工、締め固めの程度
z 4	施工、養生の程度
z 5	施工、型枠・支保工撤去時期
z 6	鉄筋のかぶり
z 7	配合、単位セメント量
z 8	配合、単位水量
z 9	配合、スランブ
z 10	配合、空気量
z 11	配合、水セメント比
z 12	配合、反応性骨材の使用
z 13	配合、海砂の使用
z 14	配筋量
z 15	気温
z 16	湿潤状態
z 17	設計外荷重
z 18	支持基盤の程度
z 19	拘束あり

キーワード：ニューロ&ファジイ、その他(ひび割れ診断)、その他(エキスパートシステム)

* 武蔵工業大学大学院工学研究科土木工学専攻(〒158 世田谷区玉堤1-28-1, TEL: 03-3703-3111(ext. 3241)
FAX: 03-5707-2125, e-mail: kuroki@shear.civil.musashi-tech.ac.jp)

** 武蔵工業大学工学部土木工学科

表3 アンケートの回答の平均値

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13	Y14a	Y14b	Y14c	Y14d	Y15a	Y15b	Y15c	Y15d	Y16	Y17	Y18	Y19
X1	2.00	4.18	2.13	3.11	4.11	1.38	2.00	1.25	1.38	1.38	1.33	1.33	4.40	3.75	3.18	1.60	1.20	3.70	2.70	1.90	1.67	1.40	1.89	1.89	1.33
X2	3.42	4.13	2.07	2.58	4.50	1.62	2.00	1.93	1.64	1.64	1.45	1.77	4.60	1.17	1.15	2.38	4.25	2.67	3.00	2.69	2.77	1.67	3.07	3.64	1.77
X3	3.83	4.44	1.20	4.71	2.00	2.23	2.00	4.00	2.23	1.75	1.50	1.62	2.00	4.47	2.80	1.77	1.15	3.53	3.27	2.27	1.73	1.67	1.40	1.22	1.45
X4	2.55	4.19	1.64	4.00	3.69	1.77	2.50	2.58	1.55	1.45	1.36	2.00	3.00	4.33	2.31	1.46	1.46	3.93	2.79	1.69	1.46	1.22	1.30	1.11	1.10
X5	3.08	3.67	3.20	3.07	3.00	3.07	2.00	2.21	2.25	2.69	2.17	3.14	2.62	2.17	2.92	4.00	3.07	3.69	3.43	2.50	2.00	1.33	1.50	1.22	1.55
X6	2.00	4.08	1.33	3.00	3.09	1.78	2.11	2.00	2.00	2.00	2.00	1.75	3.89	3.85	3.53	1.25	1.25	3.33	2.33	2.00	1.67	3.11	3.20	1.88	1.55
X7	3.18	4.14	1.15	3.00	1.27	2.18	2.00	4.14	2.40	2.90	1.80	2.45	1.64	2.11	2.18	2.22	3.27	3.10	3.33	2.70	2.60	1.78	3.92	1.33	3.45
X8	3.73	3.20	3.53	2.83	1.33	3.67	2.83	1.67	2.27	3.00	2.58	2.08	1.58	3.54	3.71	2.25	1.17	2.90	2.50	2.64	2.55	1.33	1.55	1.33	1.30
X9	3.92	2.43	3.86	2.54	1.25	3.79	1.85	1.38	2.36	3.50	2.33	3.15	1.42	1.58	3.31	3.54	3.00	2.82	3.30	2.91	2.62	1.11	1.20	1.11	1.64
X10	3.17	3.73	2.23	2.75	1.77	2.93	2.57	1.36	2.73	2.82	2.18	2.54	1.83	3.25	3.92	2.54	1.46	3.08	3.36	2.08	2.00	1.11	1.30	1.11	1.45
X11	2.75	4.13	2.15	2.55	3.83	2.00	2.20	2.00	1.64	1.73	1.45	1.92	4.08	1.50	2.09	2.67	3.77	3.08	3.50	2.67	2.50	4.36	4.00	3.42	1.50
X12	3.08	4.38	1.57	3.00	1.50	2.42	2.17	4.44	3.22	3.00	2.22	2.90	1.56	1.17	1.15	1.93	4.33	2.64	3.27	3.08	2.67	1.42	3.64	1.83	4.75
X13	3.92	3.17	3.59	2.34	1.81	3.77	3.12	1.63	2.46	3.35	2.88	2.51	1.23	1.45	1.58	3.46	3.85	3.00	3.00	3.30	2.85	1.24	2.82	1.46	1.61
X14	3.50	3.07	3.71	2.55	1.31	3.77	2.67	1.42	2.27	3.25	3.27	1.60	1.33	1.73	2.18	3.08	3.08	2.56	3.33	3.20	3.00	1.22	2.30	1.25	1.55

但し	ひび割れ発生時期	ひび割れ幅
	Y14a 数時間から一日	Y15a 微細(0.2mm以下)
	Y14b 数日	Y15b 小(0.2から0.5mm以下)
	Y14c 数十日から数ヶ月	Y15c 中(0.5から1.0mm以下)
	Y14d 一年以上	Y15d 大(1.0mm超)

3. 知識の獲得

コンクリート構造物に発生するひび割れの原因は、ひび割れの発生時期、パターン、形態などからある程度の推定が可能である³⁾。そこで、原因Xと症状Yの因果関係について技術者にアンケートを行い、その結果を推論規則条件部の可能性分布関数の決定に用いた。アンケートは16名の技術者（建設6名、コンサルタント4名、セメント3名、大学3名）に対して行い、原因Xと症状Yの因果関係の強さを表2の評価項目より選択してもらった³⁾。表3に16人の技術者による回答の平均値を示す。全回答の標準偏差は0.98となり、ややばらつきが生じた。回答の平均値と標準偏差の関係（図2）を見ると、因果関係の高いものと低いものはばらつきが小さく、中間の評価のものはばらつきが大きくなった。これは中間の評価のものは因果関係が曖昧なため、技術者の評価が分かれたためである。そこで、推論規則作成の際には因果関係の大きいものを重視した。また、回答結果から項目ごとの偏差値を求め、偏差値30以下と70以上の回答は無効とし、一部の技術者の判断の違いが全体に影響を及ぼさないように考慮した。

4. 推論機構

入力データ及びWM内のデータと推論規則は次のように記述する。

入力データ

$$\pi_w(u)/(e_1, e_2, e_3, \dots, e_i, \dots, e_k)$$

$\pi_w(u)$: 入力データの信頼度
($e_1, e_2, e_3, \dots, e_i, \dots, e_k$) : 入力データ

推論規則

$$(\pi_r(u)) \text{ IF } A_1 * A_2 * \dots * A_i * \dots * A_n \text{ THEN } C$$

($\pi_r(u)$) : 推論規則の条件部と
結論部の不確実性
 A_i : 推論規則条件部
 C : 推論規則結論部

ここで $\pi_w(u)$ でデータの信頼性、 e_i で不完全な入力データ、($\pi_r(u)$)で推論規則の条件部と結論部の不確実性、 A_i で推論規則条件部のファジイな表現

表2 因果関係の評価

5	極めて高い
4	高い
3	中間（どちらともいえない）
2	低い
1	きわめて低い
0	わからない

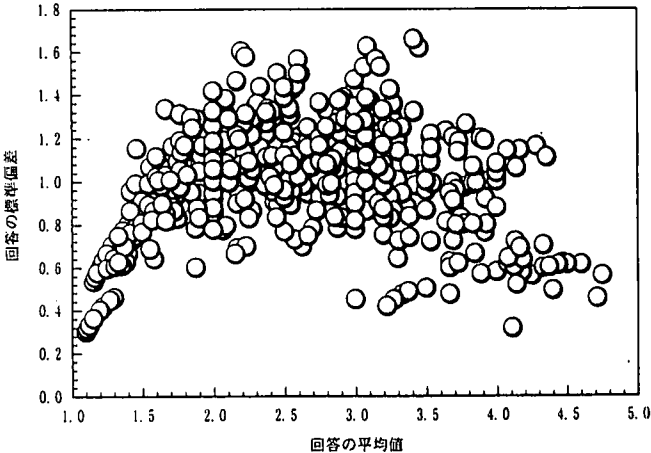


図2 回答の平均値と標準偏差の関係

といった4つの曖昧性を取り扱うことができる。

本システムは、FPSであるので、WM内のデータと推論規則のマッチング処理を行うことで推論を進めていく。マッチング処理は次の4段階に分けて行う³⁾。

(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。

$$\pi_{11}(u) = \sup_{u=\mu A_i(x)} e_i(x)$$

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。

$$\pi_{21}(u) = \sup_{u=(x \wedge y)} \min(\pi_w(x), \pi_{11}(y))$$

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度の統合を行う。

$$\pi_3(u) = \sup_{u \in \Lambda(u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_m)} \min(\pi_{21}(u_1), \dots, \pi_{2i}(u_i), \dots, \pi_{2n}(u_n))$$

(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。

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

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される。

5. 実事例への適用

「ひび割れ調査、補修・補強指針」⁴⁾のひび割れ診断事例を本システムに適用し検討を行った。システムの推論規則数は58、症状Yのみを用いて推論を行った。症状Yは真理値空間 $[0,1]$ 上の可能性分布で与え、この時大きい真理値(1.0が最大値)の可能性測度の値が大きいほど、その症状は真であることを表す。表4、表5は入力データを表わしたもののだが、表の最上段が真理値であり、マトリックスは各症状Y_iの可能性分布関数を示している。

(事例1) 浄水場沈澱池壁体に生じたひび割れ

「浄水場の沈澱池築造工事において、外壁コンクリートの一部にひび割れが発生した(図3)。この沈澱池は96m×42.7m×7.1mの規模の構造物で、外周をコンクリート打設2ヵ月後に埋め戻し、最終的に外壁コンクリートは天端から50cmしか露出していない。ひび割れはコンクリートの打設後10日目に発生し、壁体の長手直方向に4～5m間隔で入っていた。平均ひび割れ幅は0.1～0.2mmであるが大半は壁体を貫通していた。」

以上の状況の記録を基に、症状Yを表4のように設定した。Y₁₄発生時期は真理値0.3が10日目に対応している。診断結果は図4のようになり、X₉温度応力(外部拘束)とX₁₀温度応力(内部拘束)において、大きい真理値の可能性測度が大きい。よって、このどちらかがひび割れ原因であると推定できるが、X₉乾燥収縮がひび割れ原因である可能性も否定できない。文献⁴⁾による判断はひび割れの主原因は温度応力によるひび割れ、副因として乾燥収縮が発生している可能性があるとなっている。よって正しい推論結果が得られたといえる。

次にY₃ひび割れ形態・貫通の入力値を変化させた場合について推論を行った。入力値は可能性分布関数の形は変化させず、可能性測度が最大値である真理値を1.0から0.5まで0.1刻みで変化させた。X₉温度応力(外部拘束)に関する診断結果を図5に示す。図5より入力値のピークの真理値が0.5に近づくにつれ、低い真理値の可能性測度が大きくなっていることが分かる。これはX₉の推論規則のY₃に関する条件部の可能性分布関数が0.8をピークとした関数になっているためであり、推論規則と症状の入力値のずれが大きくなるにしたがって否定的な要因が大きくなったためである。

しかし、Y₃の入力値が推論規則とずれが生じてもその他の症状Yと推論規則とのマッチ度からX₉

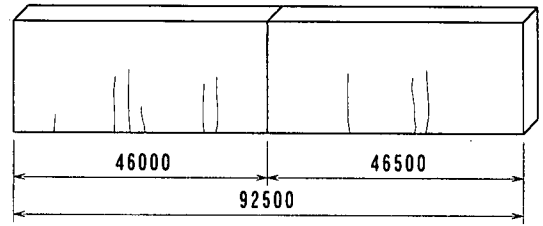


図3 事例1のひび割れ図(一部分)

表4 事例1の入力データ

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 ₁	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.9
Y ₂	0.3	0.6	0.9	1.0	0.9	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Y ₃	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9
Y ₆	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.9
Y ₁₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.5	1.0	0.9
Y ₁₄	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Y ₁₅	0.0	0.3	0.6	0.9	0.9	1.0	0.9	0.6	0.3	0.0	0.0
Y ₁₆	0.6	0.9	0.9	1.0	0.9	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Y ₁₇	0.6	0.9	0.9	1.0	0.9	0.6	0.3	0.9	0.0	0.0	0.0
その他	0.9	1.0	0.9	0.6	0.3	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0

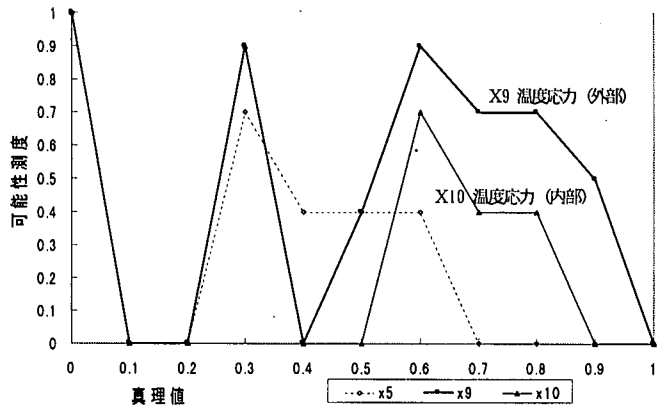


図4 事例1の診断結果

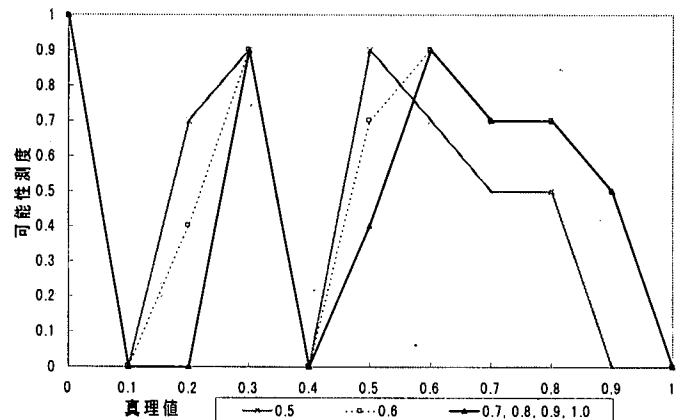


図5 Y₃を変化させた場合のX₉の診断結果

である可能性が依然として大きく、これは個人の主観の違いによる入力値の差異（症状の程度によっても異なる）による推論規則と入力値とのずれをシステムがある程度吸収しているためと考えられる。

（事例2）箱形RCラーメンの側壁に生じたひび割れ
「箱形RCラーメンの側壁（厚さ約1m）に、2～5m間隔でひび割れが発生した（図6）。ひび割れの多くは上下のうち継ぎ目までつながり、その幅は0.2～1.0mmである。ひび割れは型枠を撤去したとき（打設から二週間後）に発見されたが、それ以前より発生していたらしい。」

症状Yを表5のように設定した。Y₂、Y₃についてはひび割れが貫通しているかどうか判断できないため、「不明」として扱い、入力値は全真理値の可能性測度を1.0に設定した。Y₁₄発生時期は真理値0.5が2週間目に対応しており、Y₁₅ひび割れ幅は真理値の値がそのままひび割れ幅に対応している。

診断結果を図7に示す。図7よりX₉とX₁₀における高い真理値の可能性測度が大きく、この2原因のどちらかがひび割れ原因であることが分かる。詳しく比較するとX₁₀の可能性測度の方がX₉より若干大きく、ひび割れの主原因はX₁₀温度応力（内部拘束）、副因としてX₉温度応力（外部拘束）であるという結果が得られた。これは文献⁹⁾の判断、セメント水和熱による温度ひび割れと矛盾しない。

6. 結論

ファジイを用いた推論エンジン及びアンケート調査による知識の獲得によって、ひび割れ診断システムのプロトタイプを完成させた。

事例1より本システムは入力値のばらつきに対する許容幅が大きいことが分かった。また、事例2より入力値が一部不明である場合においても、不明な条件の全真理値における可能性測度を1.0に設定することで推論可能であり、柔軟性に富むシステムである事が分かった。

しかし、現在の推論規則で正しい推論結果が得られる割合は60%程度であり、また発生しない推論規則が存在しているななど、推論規則の洗練を行うことで更に推論精度の向上が可能であると考ええる。

今後の課題としては、ひび割れ原因が複合している場合の推論精度の向上、推論結果をもっとわかりやすくユーザーに説明するインターフェイスを実装する、症状Yの入力値を設定するさい、ひび割れがどの程度の状態であるとき、どのような可能性分布関数を設定するのか明確でないので入力しにくいといった問題に対する解決を行うことが必要である。

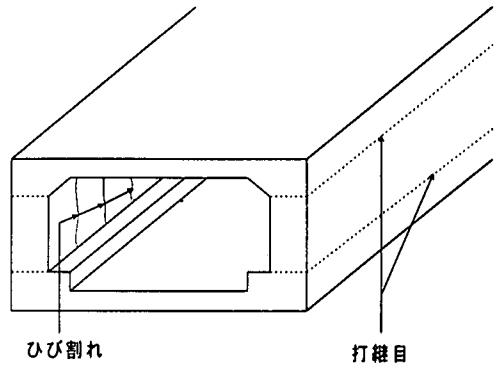


図6 事例2のひび割れ図

表5 事例2の入力データ

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 ₁	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.9	0.9	1.0	0.9
Y ₂	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Y ₃	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Y ₆	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.9	1.0	0.9
Y ₁₀	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.9	0.9	1.0	0.9
Y ₁₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.9	0.9	1.0	0.9
Y ₁₄	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Y ₁₅	0.0	0.0	0.6	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.6	0.6
その他	0.9	1.0	0.9	0.9	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

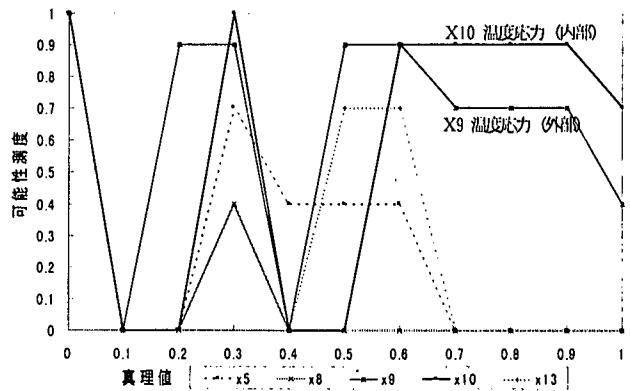


図7 事例2の診断結果

参考文献

1) 丸山能生：コンクリート構造物のひび割れ診断，ファジイ活用事例集，工業調査会，1991。
2) 田中功：ひび割れ診断エキスパートシステムの開発，平成8年度武蔵工業大学修士論文，1997。
3) 小山宏・三好力・深海悟・馬野元秀：LIFE FEShellファジイプロダクションシステムにおける曖昧さの取り扱いとその実現，第7回ファジイシステムシンポジウム，pp. 651-654，1991。
4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，1992。