

I-221

橋梁診断エキスパートシステムにおける主観的あいまいさの取扱いに関する一考察

神戸大学大学院 学生員○山口裕史

神戸大学工学部 正会員 西村 昭、宮本文穂

阪神高速道路公団 正会員 杉江 功

兵庫県土木部 正会員 前田 強

1. まえがき 橋梁診断エキスパートシステムの構築にあたり、専門家の有する知識、経験をベースとした主観的あいまいさの取扱いが重要となる。このような主観的あいまいさは、従来よりファジー集合論における帰属度関数として表現されているが、使用言語によっては非効率となる場合がある。そこで、本研究では、Dempster & Shafer 理論における基本確率としてこれらを取扱い、その合理的決定にアンケート調査を利用して、基本確率及びあいまい度を求める手法について述べるものである。

2. 基本確率及びあいまい度の決定 兵庫県内にある「前野橋（4主桁RCT桁橋、昭和6年架設）」の架替への機会に、耐荷性、耐久性に関する各種実験を実施するとともに質問形式のアンケート調査を実施し、これより得られる診断結果に基づいて基本確率及びあいまい度を設定する。アンケート調査は、各質問項目毎に0～100点の評価点を記入する形式をとるものとし、特に、25点は danger（これ以上悪化すれば補修・補強が必要となる状態）、75点は safe（何等憂慮すべき事項がない状態）、50点は moderate（その中間）というように規定した。アンケート調査結果を各質問項目ごとに集計し、その平均値と標準偏差を得ることによって、ファジー集合論における帰属度関数を求め、各質問項目が示す橋梁の状態を表現すると次のようになる。

$$\mu(x) = \exp[-\{(x - x_{ave})/\sigma\}^2] \quad (1)$$

ここに、 x_{ave} は平均値、 σ は標準偏差である。

ここで、上述の帰属度関数と基本確率の要素 safe、moderate、danger における上界確率の対応を次のような関係におく。

$$p^*(\{s\}) = \mu(75), p^*(\{m\}) = \mu(50), p^*(\{d\}) = \mu(25) \quad (2)$$

これらの関係を模式的に表したものが図1である。平均値 x_{ave} が75点より大きい場合は safe に対する上界確率を、25点より小さい場合は danger に対する上界確率をそれぞれ1.0とする。基本確率の性質から次の4つの式を得ることができる。ここで m は、() 内の要素を支持する確率である。

$$\begin{aligned} m(\{s\}) + m(\{s, m\}) + m(\{s, m, d\}) &= p^*(\{s\}) \\ m(\{m\}) + m(\{s, m\}) + m(\{m, d\}) + m(\{s, m, d\}) &= p^*(\{m\}) \\ m(\{d\}) + m(\{m, d\}) + m(\{s, m, d\}) &= p^*(\{d\}) \\ m(\{s\}) + m(\{m\}) + m(\{d\}) + m(\{s, m\}) + m(\{m, d\}) + m(\{s, m, d\}) &= 1.0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、各々の基本確率は0～1.0の実数でなければならないので、上式より次の条件が成立する。

$$\begin{aligned} \max\{0, p^*(\{s\}) + p^*(\{d\}) - 1\} &\leq m(\{s, m, d\}) \\ &\leq \min\{p^*(\{s\}), p^*(\{m\}), p^*(\{d\}), (p^*(\{s\}) + p^*(\{m\}) + p^*(\{d\}) - 1)/2\} \end{aligned} \quad (4)$$

本研究では、橋梁診断エキスパートシステムへの組込みを考慮し、基本確率 $m(\{s, m, d\})$ は上式で得られる値の最大値をとるものとする。

$m(\{s, m, d\})$ が求まると、式(3)より、

$$m(\{m\}) = 1 + m(\{s, m, d\}) - p^*(\{s\}) - p^*(\{d\}) \quad (5)$$

上式より $m(\{m\})$ 、 $m(\{s, m, d\})$ が求れば、式(3)より次の条件式が成立する。

$$\max\{0, p^*(\{m\}) - p^*(\{d\}) - m(\{m\})\} \leq m(\{s, m\})$$

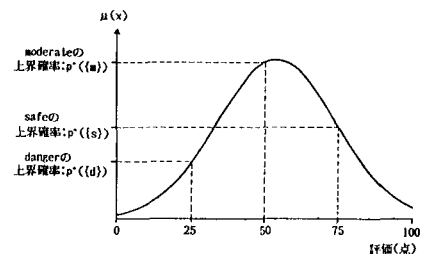


図1. 評価結果と帰属度関数及び上界確率の対応

$$\begin{aligned}
 &\leq \min\{p^*(\{s\})-m(\{s,m,d\}), p^*(\{m\})-m(\{m\})-m(\{s,m,d\})\} \\
 &\max\{0, p^*(\{m\})-p^*(\{s\})-m(\{m\})\} \leq m(\{m,d\}) \\
 &\leq \min\{p^*(\{d\})-m(\{s,m,d\}), p^*(\{m\})-m(\{m\})-m(\{s,m,d\})\} \quad (6) \\
 &\max\{0, 1-p^*(\{m\})-p^*(\{d\})+m(\{s,m,d\})\} \leq m(\{s\}) \\
 &\leq \min\{1-p^*(\{m\}), 1-p^*(\{d\}), p^*(\{s\})-m(\{s,m,d\})\} \\
 &\max\{0, 1-p^*(\{s\})-p^*(\{m\})+m(\{s,m,d\})\} \leq m(\{d\}) \\
 &\leq \min\{1-p^*(\{s\}), 1-p^*(\{m\}), p^*(\{d\})-m(\{s,m,d\})\}
 \end{aligned}$$

ここで、 $m(\{s,m,d\})$ の場合と同様に $m(\{s,m\})$ 、 $m(\{m,d\})$ についても式 (6) における最大値をとるように設定すれば、6つの基本確率全てを決定することができる。また、あいまい度については、 $m(\{s\})$ 、 $m(\{m\})$ 、 $m(\{d\})$ は、100%その評価を支持するものとし、あいまい度は0.0、 $m(\{s,m\})$ 、 $m(\{m,d\})$ は、safe～moderate、moderate～dangerの間（距離0.5とする）を移動しうる確率であり、それらの確率値の0.5をあいまい度とする。同様に、 $m(\{s,m,d\})$ は、safe～dangerの間（距離1.0）を移動しうる確率であり、その確率値をあいまい度と考える。そして、これらすべてを加算したものを全体のあいまい度とする。

3. 結果及び考察 表1は、「前野橋」のアンケート調査結果より得られた各質問項目についての平均値と標準偏差をもとに、主桁の各判定項目、総合判定について基本確率及びあいまい度を求めたものである。これより総合評価はどの桁においても safe に属する可能性が大きい、moderate に属する可能性も存在する。このような傾向は各主桁間でほぼ同様となっている。表2は、床版についてまとめたものであるが、床版は主桁に比べ、健全度はさらに高い評価が得られている。一方、あいまい度は、橋齢と設計時の諸量とによる評価以外で床版の方がかなり小さくなっている。あいまい度は、健全度評価に対する評価者の自信の程度を表すものと考えられ、主桁及び床版の評価結果と対応したものとなっている。すなわち、健全度の低下とともにあいまい度は大きくなる傾向が見られる。

4. あとがき 本研究により、基本確率及びあいまい度の合理的設定法の基盤ができ、アンケート調査のエキスパートシステムへの有効利用が可能となった。しかし、今回のアンケートでは、焦点要素となる safe、moderate、danger を式 (2) に示す点数に固定し、各々に定性的表現の規定を与えているが、これらの表現や固定した点数（25、50、75点）の正当性については、なお検討の余地がある。また、ここでの結果は、1橋についてのものであり、上記の様な問題点を解決するためには、数多くの橋梁についてのデータ収集及び検証が必要である。なお、本手法を組み込んだ橋梁診断エキスパートシステム¹⁾の例を、関連論文として当学会にて発表している。

参考文献 1) 杉江、宮本、西村、梶谷：橋梁診断エキスパートシステムの開発、土木学会第42回年次学術講演会論文集 I、1987.9

表1 基本確率の演算結果（主桁）

判定項目	焦点要素の集合						評価値			あいまい度
	s	m	d	s,m	m,d	s,m,d	safe	mod	dan	
橋 齢	.361			.639			.681	.320		.320
設計時の諸量	.401			.590		.040	.684	.293	.013	.320
主 桁		.262		.718		.020	.366	.628	.007	.379
ひびわれ性状	.374			.619		.007	.686	.312	.002	.317
ひびわれ幅	.729			.271			.865	.136		.136
ひびわれ密度	.376			.613		.011	.686	.310	.004	.318
コクリットの劣化度	.424			.571		.005	.711	.287	.002	.291
1 総合										
主 桁		.146		.850		.004	.426	.572	.001	.429
ひびわれ性状	.333			.666		.002	.687	.314	.001	.335
ひびわれ幅	.374			.622		.004	.686	.312	.001	.315
ひびわれ密度	.570			.419		.013	.783	.213	.004	.222
コクリットの劣化度	.513			.485		.002	.756	.243	.001	.245
2 総合										
主 桁		.373		.621		.006	.313	.686	.002	.317
ひびわれ性状	.069			.921		.010	.533	.464	.003	.471
ひびわれ幅	.225			.770		.004	.611	.388	.001	.389
ひびわれ密度	.570			.418		.013	.783	.213	.004	.222
コクリットの劣化度	.184			.802		.013	.589	.405	.004	.414
3 総合										
主 桁		.217		.782		.156	.366	.583	.052	.470
ひびわれ性状	.091			.909		.094	.530	.439	.031	.502
ひびわれ幅	.014			.982		.184	.480	.466	.055	.575
ひびわれ密度	.096			.903		.186	.517	.421	.062	.545
コクリットの劣化度	.066			.931		.102	.516	.450	.034	.518
4 総合										

表2 基本確率の演算結果（床版）

判定項目	焦点要素の集合						評価値			あいまい度
	s	m	d	s,m	m,d	s,m,d	safe	mod	dan	
橋 齢	.505		.171	.323		.193	.698	.108	.409	
設計時の諸量	.181		.562	.258		.367	.548	.086	.539	
床 版										
ひびわれ性状	1.0					1.0	.920	.081		.081
ひびわれ幅	.839		.161			.999	.999	.002		.002
ひびわれ密度	.997		.003			1.0	1.0	.001		.001
コクリットの劣化度	.999		.001			1.0	1.0	.001		.001
1 総合										
床 版										
ひびわれ性状	.994		.006			.997	.997	.003		.003
ひびわれ幅	.732		.267		.001	.866	.134		.135	
ひびわれ密度	.990		.010			.995	.995	.005		.005
コクリットの劣化度	1.0					1.0	1.0			
2 総合										
床 版										
ひびわれ性状	1.0					1.0	.876	.125		.125
ひびわれ幅	.751		.249			1.0	.001		.001	
ひびわれ密度	.999		.001			1.0	.001		.001	
コクリットの劣化度	.998		.001			1.0	1.0		.001	
3 総合										
床 版										
ひびわれ性状	.983		.017			.992	.009		.009	
ひびわれ幅	.960		.040			.980	.020		.020	
ひびわれ密度	.982		.018			.991	.009		.009	
コクリットの劣化度	.999		.001			1.0	.001		.001	
4 総合										