

橋梁診断システム構築における知識獲得手法の提案

申田守可¹・宮本文穂²

¹正会員 工修 (株)栗本鐵工所 橋梁設計部 (〒559 大阪市住之江区柴谷 2-8-45)

²正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科

本研究は、橋梁診断システムの構築において非常に重要であると考えられる経験的知識の獲得手法を提案するものである。まず、有効な知識抽出手法の一つと考えられるアンケート調査を実施する場合の留意点を検討した。次に、アンケート調査結果に Dempster & Shafer 理論を適用することで経験的知識を表現する手法を提案した。さらに、Yager の測度と Dempster & Shafer 理論を併用することで、任意の評価範囲における主観的あいまいさの分布を定量的に表現する手法を提案した。最後に、既存橋梁の耐用性診断システムの構築を目的として新たに実施したアンケート調査結果に本手法を適用し、同時に実施した実橋試験による客観的な耐用性評価結果と比較することで、提案する経験的知識の獲得手法の妥当性を確認すると共に経験的知識自体の有効性を検証した。

Key Words : *bridge rating, knowledge acquisition, heuristics, subjective uncertainty, Dempster & Shafer theory, Yager's measure*

1. ま え が き

近年、エキスパートシステムの開発過程において、知識ベースへの知識獲得作業がシステム構築における最大のボトルネックであるという認識が定着してきている¹⁾。特に、本研究の対象領域とする既存橋梁の耐用性診断においては、専門家と呼ばれる熟練の橋梁管理者や橋梁点検者の経験的知識に基づく主観的判断に依存する部分が多いため、専門家の保有する経験的知識および必然的にそこに内在する主観的あいまいさの定量化を意識した知識の獲得手法²⁾⁻⁵⁾を確立することが、非常に重要な課題と考えられる。一般的に、専門家より抽出する経験的知識の洗練程度、いいかえれば経験的知識の質および信頼度は、知識の抽出時期に応じた種々のレベルのものが存在していると考えられる。そこで、本研究では、経験的知識の獲得を「①専門家の保有する経験的知識を忠実に抽出し、その洗練度を反映した実行可能でかつ汎用な形式に整理すること、②さらにシステムに取込んだ後の洗練を意識した柔軟な形式に変換すること、③獲得対象となる経験的知識に必然的に内在する主観的あいまいさを定量化し、その時点での経験的知識の信頼度を把握すること」と定義し、これまでに実施したアンケート調査および客観的な耐用性評価を目的とする実橋試験の成果^{6),7)}をバックデータとして、アンケート調査を利用した経験的知識の抽出、表現手法および主観的あいまいさの取扱い手法を提案するものである。

本論文では、まず、著者等が提案してきた経験的知識

の表現手法を概観し、問題点を明確にする。次に、有効な知識抽出手法の一つと考えられるアンケート調査を実施する場合の留意点を、既往のアンケート調査結果を検討することによりまとめる。そして、アンケート調査結果に Dempster & Shafer 理論⁸⁾を適用することにより上界確率と下界確率で経験的知識を表現する手法を提案する。さらに、Yager の測度⁹⁾と Dempster & Shafer 理論を併用することで、全体的な主観的あいまいさおよびその分布を定量的に表現することを可能にする手法を提案する。最後に、既存橋梁の耐用性診断システムの構築を目的として新たに実施したアンケート調査の結果¹⁰⁾に本手法を適用し、同時に実施した実橋試験による客観的な耐用性評価結果¹⁰⁾と比較することで、提案する経験的知識の獲得手法の妥当性を確認すると共に経験的知識自体の有効性を検証するものである。

2. 従来の研究

著者等は、かねてより橋梁診断システム構築において重要と考えられる、アンケート調査を利用した経験的知識獲得手法を提案してきた^{3),4),11)}。これらの研究は、アンケート調査により抽出した専門家の経験的知識をファジィ理論¹²⁾における帰属度関数と対応させて表現することで、主観的あいまいさを考慮した知識獲得が可能であるという考え方に基づくものである。

経験的知識を定量的に表現する場合、そこに主観的あいまいさが内在するがゆえに、可能性の観点から表現す

るか必然性の観点から表現するかという選択が必要となる。著者等は、この選択に柔軟に対応できる知識表現手法として、①アンケート調査結果より初期設定された帰属度関数のみかけの帰属度関数と考え、内在する主観的あいまいさに基づいて、可能性測度分布および必然性測度分布の両者で表現する手法⁴⁾、②アンケート調査結果より初期設定された帰属度関数におけるグレード値が、Dempster & Shafer 理論における上界確率と対応すると考えた上で算定された基本確率に基づき、可能性の観点からの知識を上界確率で、必然性の観点からの知識を下界確率で表現する手法¹¹⁾、を提案している。前者の手法は、経験的知識の全体的傾向を把握することが重要となる初期設定段階等においては有用であるが、表現された測度分布から、ある任意の幅で限定される評価範囲を支持する可能性や必然性の度合いを定量的に表現することは困難である。また、後者の手法は、限定される評価範囲を支持する可能性や必然性の度合いを上界および下界確率で表現することができるが、基本確率値がある評価範囲(焦点要素)に集中し確定値となる傾向があるため、主観的あいまいさが内在する経験的知識の柔軟な表現という観点からは不十分であると考えられる。さらに、著者等は、経験的知識に内在する主観的あいまいさの定量化をYagerの測度式を適用することで可能にする手法を提案している^{3),5)}。しかしながら、これらは、帰属度関数で表現された経験的知識に内在するあいまいさの総量を定量化することに着目しており、あいまいさの分布まで言及したものではない。

上述の知識表現手法およびあいまいさの定量化手法は、知識の初期設定から洗練段階における知識獲得局面においては有効であるものの、帰属度関数の形状を基に評価を下す段階においては不十分な点があると考えられる。そこで、本研究では、帰属度関数における本質的な情報はそのグレード値より、むしろ制約を受ける区間にあると考えた上で、既に提案してきた知識表現手法の問題点を解消できる新たな知識表現手法を検討するものである。

3. アンケート調査による知識の抽出

知識獲得の初期段階においては、著者等の研究^{3),4)}により、アンケート作成者と回答者の対面方式による集合調査法¹³⁾に基づいたアンケート調査方法が実用的な観点から最適であると考えられる。この場合、アンケート調査の対象とする特定の集団を評価母体とし、集団を構成する個人個人の回答のばらつきが評価母体のもつ主観的あいまいさに起因すると考えることができる。ゆえに、アンケート調査の実施に際しては、回答のばらつきに影響を及ぼす要因を検討した上でアンケート調査手法に工

夫を加えることにより、本来的に内在する主観的あいまいさによる回答のばらつき(fuzziness³⁾)以外の不確定な要因(ambiguity³⁾, generality³⁾)によるばらつきを可能な限り排除することが肝要である。回答のばらつきに影響を及ぼす要因には、アンケート回答者の特性によって生じる外的要因(選出効果, 外的尺度効果)とアンケート調査手法の特性によって生じる内的要因(内的尺度効果, 内容効果)があると考えられる。これらの要因によるアンケート調査結果のばらつきをできるだけ排除するために、アンケート調査実施に際して留意すべき点を以下にまとめる。

(1) 回答者の経験年数(選出効果)

専門家が保有する経験的知識は、その裏づけとなる経験が豊富であるほど信頼度が高いことは言うまでもない。これらは、既往のアンケート調査^{3),4)}において、経験年数10年を境界としてアンケート回答者をグルーピングし、定量的に表現されたそれぞれの経験的知識(ファジィ理論の帰属度関数で表現)を比較した結果、経験年数10年未満のグループの帰属度関数と経験年数10年以上のグループの帰属度関数の間には学習効果と考えられる集中化、明暗強化、ピーク値の移動等の帰属度関数の形状変化に基づいた差異がみられることから確認されている³⁾。また、経験年数が増すにつれて、安全側の回答を支持する傾向にあることも留意する必要がある。一方、アンケート回答者の職種(管理業務, 設計業務等)の違いによる経験的知識の特質の差異は、既往のアンケート調査結果からは確認されていない。ゆえに、橋梁診断に関するアンケート調査を実施する場合、関連業務における経験年数に十分留意してアンケート回答者を選出すると同時に、アンケート調査時に回答者個人個人の関連業務に関する経験年数を調査し記録しておくことが重要である。

(2) 評価尺度の数および評価軸の整合(内的および外的尺度効果)

池田等の研究¹⁴⁾によると、テストの評定値を複数の人間に、それぞれ異なる評定尺度の数で実施させたところ、評定尺度の数が増え尺度のきざみが細かくなるにつれて、異評定者間の評定値相関は平均的に高くなる傾向がみられることが明らかになっている。従って、アンケート調査においても評価尺度(回答選択肢)は多数であるほど望ましいと考えられるが、評価尺度(回答選択肢)が定性的な言語表現となる場合、種々の言語変数を利用することにより評価尺度の差異を回答者に伝達することは、評価尺度の数が多数になるにつれて困難となってくる。以上のことから、橋梁の耐用性診断に関するアンケート調査においては、回答者に対して柔軟な回

答選択肢を提供することができる数直線上で回答を求める手法が適切であると考えられる。これは、言語変数で表現された評価尺度は単なる順位尺度であるが数直線上での評価尺度は距離尺度であることから妥当であると考えられる。しかしながら、この場合、回答者個人個人が無意識の内に保有している評価軸と数直線上の数値の対応が各個人間で異なる場合があることに留意して、言語変数により表現された主要な評価尺度と数直線上の数値との対応を明確にすることが必要になると考えられる。

(3) 質問内容の表現方法に対応した回答の信頼度（内容効果）

既往のアンケート調査において、アンケート調査における質問内容が十分に限定できない場合、経験年数が長い技術者ほど多様な損傷状態やそれに対する処置に遭遇する機会があったことで回答におけるばらつきが逆になり、その結果あいまいさが増大する場合があることや、質問内容を明確にするために質問に数値的表現を含めることが、回答者への質問内容の伝達過程におけるあいまいさの増大防止に有効であることが分っている³⁾。橋梁の耐用性診断に関するアンケート調査においては、質問が定性的な言語表現になることが多く、この場合なるべく多義的な言語の使用を避けると同時に十分な事前説明によって言語の意味を特定することが望ましい。また、可能であれば数値による定量的表現あるいは写真等による視覚的表現を質問内に含めることがあいまいさの増大防止に有効となる。

4. 経験的知識の表現

(1) 知識表現手法

著者等は、主観的あいまいさが内在する経験的知識をファジィ理論における帰属度関数と対応させて表現した上で、様相論理¹⁵⁾を適用することにより可能性および必然性の両方の観点から帰属度関数を表現する手法を既に提案している⁴⁾。特に、経験的知識の初期設定の段階あるいは洗練段階において、既述の手法による知識表現は、その柔軟性において非常に有用なものであると考える。しかしながら、最終的な評価段階等において経験的知識の部分的な傾向を把握したい場合、いかえれば帰属度関数 $\mu_A(x)$ の形状から、任意の幅をもった横軸 $x_i \sim x_j$ の範囲における評価尺度を支持する可能性や必然性の度合いを定量的に表現することが必要な場合、既述の知識表現手法だけでは不十分と考えられる。そこで、この問題点を解消するために、帰属度関数で設定された経験的知識に Dempster & Shafer 理論における基本確率の概念を適用し、上界および下界確率によって任意の評価尺

表—1 拡張 II 関数における形状パラメータの初期設定

形状パラメータ	初期設定手法
k	回収された有効な回答数の、無回答も含めた全回答数に対する割合とする。
b	有効な全てのデータの平均値とする。
a	平均値 b より小さいデータの平均値 b 回りの標準偏差 σ を求め、 $a = b - 3\sigma$ とする。
c	平均値 b より大きいデータの平均値 b 回りの標準偏差 σ を求め、 $c = b + 3\sigma$ とする。
g	平均値 b より小さいデータの平均値 g とする。
f	平均値 b より大きいデータの平均値 f とする。
n	II 関数と同じく $n = 2$ とする。

度に対応した可能性と必然性を表現する手法を新たに提案する。

a) ファジィ理論における帰属度関数を適用した経験的知識の初期設定

既述のように、専門家の記憶領域内には、その洗練程度によって多様な形状の帰属度関数と対応させなければならない経験的知識が混在している。また、これらの知識をシステム内に定量的に取込むことができたとしても、それ以降に獲得する有効な情報の利用あるいは経験によるあいまいさの低減を意識した知識の洗練が必要となることから、知識表現の手段としての帰属度関数は多様な形状変化に柔軟に対応できるものでなくてはならない。そこで著者等は II 関数¹²⁾に形状パラメータを付加した拡張 II 関数³⁾を次式のように定義し、形状を特定するパラメータをアンケート調査結果より設定することにより経験的知識の初期設定を行う手法を提案している。

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} 0 & (x_i \leq a) \\ k[0.5 \cdot \{(x_i - a)/(\alpha - a)\}^n] & (a < x_i \leq \alpha) \\ k[1.0 - 0.5 \cdot \{(x_i - b)/(\alpha - b)\}^n] & (\alpha < x_i \leq b) \\ k[1.0 - 0.5 \cdot \{(x_i - b)/(\beta - b)\}^n] & (b < x_i \leq \beta) \\ k[0.5 \cdot \{(x_i - c)/(\beta - c)\}^n] & (\beta < x_i < c) \\ 0 & (c \leq x_i) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $\mu_A(x_i)$: 帰属度 ($0 \leq \mu_A(x_i) \leq 1$)

k : 帰属度 $\mu_A(x_i)$ を一様の比率により増減させるパラメータ

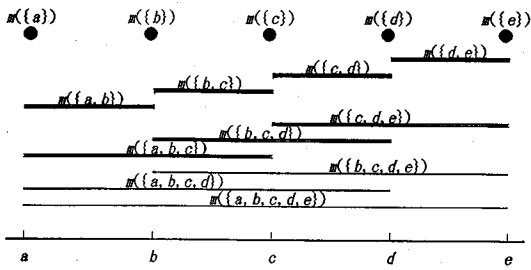
b : $\mu_A(x_i)$ が最大となる位置 x_i を特定するパラメータ

a, c : $\mu_A(x_i) = 0.0$ となる位置 x_i を特定するパラメータ

α, β : $\mu_A(x_i) = 0.5$ となる位置 x_i を特定するパラメータ

n : 明暗強化の程度を表現するパラメータ ($n \geq 1$)

アンケート調査結果より上記の形状パラメータを初期設定する手法は種々考えられるが、本研究においては、新たに表—1に示す考え方に基づいて形状パラメータを



図一 基本確率の概念図

設定している。ここでは、回答が0点~100点の範囲の評価尺度を持つ数直線上での任意の評価点として得られる場合を対象としている。なお、評価点の最大値と最小値がその評価全体の集合に属する帰属度を0.5と仮定し、最小値を α 最大値を β と対応させた上で、パラメータ a, c をそれぞれ、 $a=b-2(b-\alpha)$ 、 $c=b+2(\beta-b)$ により設定する手法も考えられる。しかしながら、特異な評価点がアンケートの回答中に存在する場合、帰属度関数の形状は直接その評価点に影響を受けることになるため、本研究においては標準偏差に基づく設定手法を考案した。

b) Dempster & Shafer 理論を適用した知識表現手法

Dempster & Shafer 理論は、ベイズ確率では取扱えない無知量を取扱うために、図一に示す基本確率の概念に基づく上界および下界確率を導入した A. P. Dempster の考え方を G. Shafer が発展させたものであり、種々の証拠を基に判断を下すような場合に適用するために確率論を拡張したものである。

まず、基本確率で定義される簡単な事象を用いて、上界および下界確率の概念について説明する。今、コンクリート床版にクラックが発生し、その原因として ω という要因が想定される場合を考える。発生原因が ω であることを記号 ω で、発生原因が ω でないことを記号 $\bar{\omega}$ で表す。種々の情報を収集した結果、 ω が発生原因である度合いが0.3(最大値1.0)であると分つたとする。ここで、残りの度合い0.7は無知に起因するものであり、 ω が発生原因であるのかないのかの信頼できる情報、いいかえれば証拠を収集することができなかった度合いが0.7であると考え、証拠として集められた重みを基本確率 $m(*)$ で表現すると次式ようになる。

$$\begin{cases} m(\omega)=0.3, m(\omega, \bar{\omega})=0.7 \\ m(\omega)+m(\omega, \bar{\omega})=1.0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで $\bar{\omega}$ は ω の余事象である。式(2)の基本確率から、 ω がクラックの発生原因である確率 $P(\omega)$ を推定してみる。 $m(\omega, \bar{\omega})=0.7$ の重みは、焦点要素 $\{\omega, \bar{\omega}\}$ の上を自由に移動できる。これより、最大値を考える場合の上界確率 $P^*(\omega)$ と最小値を考える場合の下界確率

$P_*(\omega)$ が次式のように得られる。

$$\begin{cases} P^*(\omega)=m(\omega)+\max\{m(\omega, \bar{\omega})\}=0.3+0.7=1.0 \\ P_*(\omega)=m(\omega)+\min\{m(\omega, \bar{\omega})\}=0.3+0.0=0.3 \end{cases} \quad (3)$$

以上より、上界確率は可能性の、下界確率は必然性の概念と対応していることが分る。式(3)より、 ω がクラックの発生原因である可能性は1.0であり、 ω がクラックの発生原因である必然性は0.3であるといえる。すなわち、推定区間は $[0.3, 1.0]$ となり、無知量0.7を反映して推定区間の幅も0.7であることになる。

上界および下界確率は一般的に次式のように定義できる。

$$\begin{cases} m(\phi)=0, \sum_{B \in S} m(B)=1 \\ P^*(A)=\sum_{A \cap B \neq \phi} m(B) \\ P_*(A)=\sum_{B \in A} m(B) \end{cases} \quad (4)$$

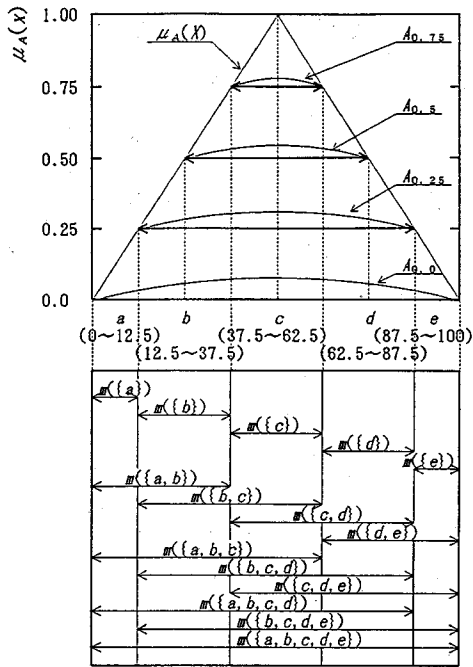
著者等は、帰属度関数のグレード値と上界確率を対応させることにより基本確率値を求める知識表現手法(以下、旧手法と略記する)を既に提案している¹¹⁾。旧手法では、帰属度関数の代表値に着目し、要因間の関連性の強弱を表現する場合等に適用可能となるが、帰属度関数の形状変化に十分追従できる知識の表現手法という観点からは下記に示す問題点が挙げられる。

- ① 帰属度関数 $\mu_A(x)$ において、 $\max\{\mu_A(x_i)\} < 1.0$ の場合、基本確率値を算定できない場合が生じる。すなわち、帰属度関数の代表的な形状変化の一つである高さの変化に対応した基本確率値が表現できない。
- ② 算出される基本確率値が部分的な焦点要素に集中する傾向がみられ、これに基づいて算出される上界および下界確率が確定値となる場合が生じる。特に帰属度関数の代表的な形状変化の一つである集中化が進行した場合、この傾向が顕著となり、算出される上界および下界確率値が、対応させる帰属度関数の形状変化に追従できなくなる。

一方、帰属度関数の細部にわたる精度の高い同定が困難であるということファジィ理論における本質的な問題ととらえた場合、帰属度関数における情報はそのグレード値より、むしろ制約を受ける区間にあると考えることができる。帰属度関数をクリスプな制約を受ける区間集合の集りと考えて表現する方法として、次式で定義される分解定理¹²⁾の考え方がある。

$$\begin{cases} A_\alpha = \{x_i \mid \mu_A(x_i) \geq \alpha\}, x_i \in X, \alpha \in [0, 1], \\ \mu_A(x_i) = \bigcup_{\alpha} \alpha A_\alpha, 0 \leq \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

本研究では、 α レベル集合 A_α によって特定される区間を基本確率と対応させて考え、さらに、 α を α レベル集合の集りの中でのそれぞれのレベル集合の重みと考えた上で、上界確率および下界確率を算定する手法を提



図—2 α レベル集合と基本確率の対応関係

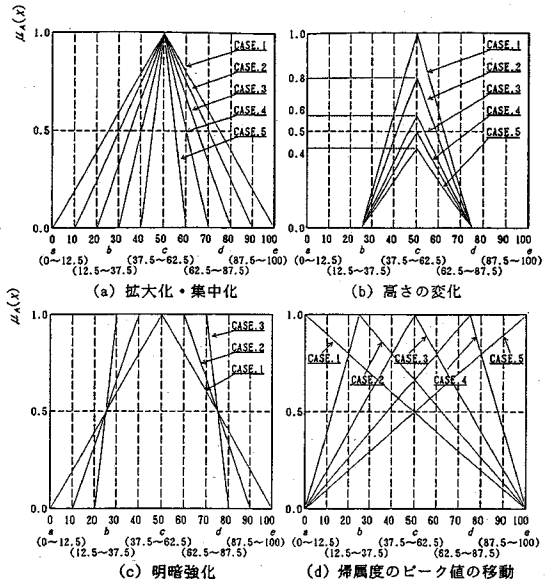
案する。図—2に α レベル集合と基本確率の対応を概念的に示し、図中に示される帰属度関数を対象として、以下に具体的な算定手法を述べる。なお、ここでは、評価尺度を a, b, c, d, e の5段階と考え、対応する評価点の範囲を図に示すように $a: 0$ 点 ~ 12.5 点、 $b: 12.5$ 点 ~ 37.5 点、 $c: 37.5$ 点 ~ 62.5 点、 $d: 62.5$ 点 ~ 87.5 点、 $e: 87.5$ 点 ~ 100 点と仮定する。

まず、アンケート調査結果より設定された帰属度関数 $\mu_A(x_i)$ をいくつかの α レベル集合に分割する。ここでは、一例として $A_{1.0}, A_{0.75}, A_{0.5}, A_{0.25}, A_{0.0}$ の5段階の α レベル集合に分割する。この場合、式(5)より帰属度関数 $\mu_A(x_i)$ は次式で表現されることになる。

$$\mu_A(x_i) = U(1.0 \cdot A_{1.0}, 0.75 \cdot A_{0.75}, 0.5 \cdot A_{0.5}, 0.25 \cdot A_{0.25}, 0.0 \cdot A_{0.0}) \quad (6)$$

次に、各 α レベル集合を制約された区間と考え、その区間に包含される基本確率と α レベル集合を次式により対応づける。

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.00 \cdot A_{0.00} = 0.00 \cdot [m(\{a\}) + m(\{b\}) + m(\{c\}) \\ \quad + m(\{d\}) + m(\{e\}) + m(\{a, b\}) \\ \quad + m(\{b, c\}) + m(\{c, d\}) + m(\{d, e\}) \\ \quad + m(\{a, b, c\}) + m(\{b, c, d\}) \\ \quad + m(\{c, d, e\}) + m(\{a, b, c, d\}) \\ \quad + m(\{b, c, d, e\}) + m(\{a, b, c, d, e\})] \\ 0.25 \cdot A_{0.25} = 0.25 \cdot [m(\{b\}) + m(\{c\}) + m(\{d\}) \\ \quad + m(\{b, c\}) + m(\{c, d\}) + m(\{b, c, d\})] \end{array} \right.$$



図—3 代表的な帰属度関数の形状変化

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.50 \cdot A_{0.50} = 0.50 \cdot [(1/2) \cdot m(\{b\}) + m(\{c\}) \\ \quad + (1/2) \cdot m(\{d\}) + (3/4) \cdot m(\{b, c\}) \\ \quad + (3/4) \cdot m(\{c, d\}) + (4/6) \cdot m(\{b, c, d\})] \\ 0.75 \cdot A_{0.75} = 0.75 \cdot [(1.0) \cdot m(\{c\})] \\ 1.00 \cdot A_{1.00} = 1.00 \cdot [(1.0) \cdot m(\{c\})] \end{array} \right. \quad (7)$$

そして、式(6)の考え方に従って、各レベル集合の和集合、いかえれば各基本確率の係数の最大値 K_i を求め、それを次式のように各基本確率の重みと考える。

$$\begin{aligned} & m(\{b\}) : m(\{c\}) : m(\{d\}) : m(\{b, c\}) \\ & : m(\{c, d\}) : m(\{b, c, d\}) = K_b : K_c : K_d \\ & : K_{b,c} : K_{c,d} : K_{b,c,d} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、各基本確率値の総合計は $\max\{\mu_A(X_i)\}$ と対応すると考えることにより、各基本確率値 $m(\{*\})$ は次式によって算出される。

$$m(\{*\}) = K_i \cdot (\max\{\mu_A(x_i)\} / \sum K_i) \quad (9)$$

以上の手順により基本確率値が算定されると、それぞれの評価範囲における上界確率 $P^*(\{*\})$ および下界確率 $P_*(\{*\})$ は、次式に基本確率値を代入することにより求めることができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} P^*(\{a\}) = m(\{a\}) + m(\{a, b\}) + m(\{a, b, c\}) \\ \quad + m(\{a, b, c, d\}) + m(\{a, b, c, d, e\}) \\ P^*(\{b\}) = m(\{b\}) + m(\{a, b\}) + m(\{b, c\}) \\ \quad + m(\{a, b, c\}) + m(\{b, c, d\}) \\ \quad + m(\{a, b, c, d\}) + m(\{b, c, d, e\}) \\ \quad + m(\{a, b, c, d, e\}) \\ P^*(\{c\}) = m(\{c\}) + m(\{b, c\}) + m(\{c, d\}) \\ \quad + m(\{a, b, c\}) + m(\{b, c, d\}) \end{array} \right.$$

表—2 代表的な帰属度関数の形状変化に対する
上界および下界確率値

(a) 拡大化・集中化

評価範囲	a	b	c	d	e
CASE. 1	0.0000	0.3823	0.8236	0.3823	0.0000
上界確率	0.0000	0.0882	0.3530	0.0882	0.0000
下界確率	0.0000	0.3382	0.8456	0.3382	0.0000
CASE. 2	0.0000	0.0772	0.4412	0.0772	0.0000
上界確率	0.0000	0.2949	0.8974	0.2949	0.0000
下界確率	0.0000	0.0513	0.5128	0.0513	0.0000
CASE. 3	0.0000	0.1842	0.9650	0.1842	0.0000
上界確率	0.0000	0.0175	0.7018	0.0175	0.0000
下界確率	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
CASE. 4	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
上界確率	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
下界確率	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000

(b) 高さの変化

評価範囲	a	b	c	d	e
CASE. 1	0.0000	0.2200	0.9200	0.2200	0.0000
上界確率	0.0000	0.0400	0.6400	0.0400	0.0000
下界確率	0.0000	0.1760	0.7360	0.1760	0.0000
CASE. 2	0.0000	0.0320	0.5120	0.0320	0.0000
上界確率	0.0000	0.1320	0.5520	0.1320	0.0000
下界確率	0.0000	0.0240	0.3840	0.0240	0.0000
CASE. 3	0.0000	0.1100	0.4600	0.1100	0.0000
上界確率	0.0000	0.0200	0.3200	0.0200	0.0000
下界確率	0.0000	0.0880	0.3680	0.0880	0.0000
CASE. 4	0.0000	0.0160	0.2560	0.0160	0.0000
上界確率	0.0000	0.0160	0.2560	0.0160	0.0000
下界確率	0.0000	0.0160	0.2560	0.0160	0.0000

(c) 明暗強化

評価範囲	a	b	c	d	e
CASE. 1	0.0000	0.3823	0.8236	0.3823	0.0000
上界確率	0.0000	0.0882	0.3530	0.0882	0.0000
下界確率	0.0000	0.3818	0.8182	0.3818	0.0000
CASE. 2	0.0000	0.0909	0.3637	0.0909	0.0000
上界確率	0.0000	0.4320	0.8252	0.4320	0.0000
下界確率	0.0000	0.0874	0.2913	0.0874	0.0000

(d) 帰属度のピーク値の移動

評価範囲	a	b	c	d	e
CASE. 1	0.5823	0.5845	0.4349	0.1955	0.0000
上界確率	0.2859	0.1330	0.0665	0.0332	0.0000
下界確率	0.2267	0.6974	0.5537	0.2493	0.0000
CASE. 2	0.0367	0.2935	0.1467	0.0550	0.0000
上界確率	0.0000	0.3823	0.8236	0.3823	0.0000
下界確率	0.0000	0.0682	0.3530	0.0682	0.0000
CASE. 3	0.0000	0.2493	0.5537	0.6974	0.2267
上界確率	0.0000	0.0550	0.1467	0.2935	0.0367
下界確率	0.0000	0.1955	0.4349	0.5845	0.5823
CASE. 4	0.0000	0.0332	0.0665	0.1330	0.2859
上界確率	0.0000	0.0332	0.0665	0.1330	0.2859
下界確率	0.0000	0.0332	0.0665	0.1330	0.2859

$$\begin{aligned}
 &+m(\{c, d, e\})+m(\{a, b, c, d\}) \\
 &+m(\{b, c, d, e\})+m(\{a, b, c, d, e\}) \\
 P^*(\{d\}) &=m(\{d\})+m(\{c, d\})+m(\{d, e\}) \\
 &+m(\{b, c, d\})+m(\{c, d, e\}) \\
 &+m(\{a, b, c, d\})+m(\{b, c, d, e\}) \\
 &+m(\{a, b, c, d, e\}) \\
 P^*(\{e\}) &=m(\{e\})+m(\{d, e\})+m(\{c, d, e\}) \\
 &+m(\{b, c, d, e\})+m(\{a, b, c, d, e\})
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 P_*(\{a\}) &=m(\{a\}) \\
 P_*(\{b\}) &=m(\{b\}) \\
 P_*(\{c\}) &=m(\{c\}) \\
 P_*(\{d\}) &=m(\{d\}) \\
 P_*(\{e\}) &=m(\{e\})
 \end{aligned} \tag{11}$$

帰属度関数の代表的な形状変化を次のように設定し、
図—3 (a)~(d) に示す。

① 拡大化・集中化 (図—3 (a)) : 帰属度 $\mu_A(x_i) > 0$ となる x_i の範囲が小さくなる場合を集中化とし、その逆の場合を拡大化とする。図中、CASE.1 から CASE.5 へと帰属度関数の集中化が進行していること

表—3 旧手法による上界および下界確率値 (拡大化・集中化)

評価範囲	a	b	c	d	e
CASE. 1	0.0000	0.5000	1.0000	0.5000	0.0000
上界確率	0.0000	0.0000	0.5000	0.0000	0.0000
下界確率	0.0000	0.3750	1.0000	0.3750	0.0000
CASE. 2	0.0000	0.0000	0.6250	0.0000	0.0000
上界確率	0.0000	0.1670	1.0000	0.1670	0.0000
下界確率	0.0000	0.0000	0.8330	0.0000	0.0000
CASE. 3	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
上界確率	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
下界確率	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
CASE. 4	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
上界確率	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
下界確率	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000

を示している。

② 高さの変化 (図—3 (b)) : 帰属度 $\mu_A(x_i)$ の値が全体的および部分的に、任意の値あるいは一様の比率等で増減することを高さの変化とする。図は $\mu_A(x_i)$ が一様の比率で増減する場合を表現している。図中、CASE.1 から CASE.5 へと帰属度の減少が進行していることを示している。

③ 明暗強化 (図—3 (c)) : 帰属度 $\mu_A(x_i) = 0.0, 0.5$ および 1.0 となる x_i の位置および帰属度は変化せず、 $1.0 > \mu_A(x_i) > 0.5$ の範囲の帰属度 $\mu_A(x_i)$ が増加し、 $0.5 > \mu_A(x_i) > 0.0$ の範囲の帰属度 $\mu_A(x_i)$ が減少する場合を明暗強化とする。図中、CASE.1 から CASE.3 へと帰属度関数の明暗強化が進行していることを示している。

④ 帰属度のピーク値の移動 (図—3 (d)) : 帰属度 $\mu_A(x_i) = 0.0$ となる x_i の位置は変化せず $\mu_A(x_i)$ が最大となる x_i の位置が変化する場合を帰属度のピーク値の移動とする。図中、CASE.1 から CASE.5 へと帰属度のピークを示す位置が評価範囲 $a \sim e$ へと順次移行していることを示している。

それぞれの帰属度関数に対して各評価範囲 ($a \sim e$) の上界および下界確率値を、提案する手法により算定した結果を表—2 (a)~(d) に示す。ここでは、評価尺度を a, b, c, d, e の5段階と考え、対応する評価点の範囲を $a: 0 \text{点} \sim 12.5 \text{点}$, $b: 12.5 \text{点} \sim 37.5 \text{点}$, $c: 37.5 \text{点} \sim 62.5 \text{点}$, $d: 62.5 \text{点} \sim 87.5 \text{点}$, $e: 87.5 \text{点} \sim 100 \text{点}$ と仮定している。また、比較のために、拡大化および集中化による帰属度関数の形状変化に対応する各評価範囲の上界および下界確率値を旧手法によって算定した結果を表—3 に示す。これらより、提案する手法によって算出した上界および下界確率値は以下の理由により妥当なものであると考えられる。すなわち、①拡大化および集中化による帰属度関数の形状変化においては、帰属度関数の集中化が進むにつれて、上界および下界確率値とも評価範囲 c を支持する傾向が強くなり、その他の評価範囲の上界および下界確率値は急激に低下している。②また、高さの変化による帰属度関数の形状変化に対しては、各評価範囲における上界および下界確率値の相対的な比率を変えることなく、帰属度の低減に応じて一様に確率値も低下している。③次に、明暗強化による帰属度関数

表—4 帰属度関数の拡大化・集中化に対する
あいまい度分布の算定

	各評価範囲におけるあいまい度分布				
	$F_r(a)$	$F_r(b)$	$F_r(c)$	$F_r(d)$	$F_r(e)$
CASE.1	0.0000	0.1595	0.1810	0.1595	0.0000
CASE.2	0.0000	0.1361	0.1278	0.1361	0.0000
CASE.3	0.0000	0.1067	0.0866	0.1067	0.0000
CASE.4	0.0000	0.0807	0.0386	0.0807	0.0000
CASE.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

の形状変化に対しては、顕著な確率値の変化は見られないが、明暗強化が進行し、評価範囲 b, d の帰属度が部分的に増加するにつれて、評価範囲 b, d における上界確率が増加している。④帰属度のピーク値の移動による帰属度関数の形状変化に対しては、当然ピーク位置に対応する評価範囲の上界および下界確率値が大きくなる傾向にある。

なお、表—3より、旧手法においては、部分的な焦点要素への基本確率値の集中化が顕著であり、その結果、帰属度関数の形状変化に対応した上界および下界確率値の変化が十分に表現できない場合が生じることが分る。

(2) 主観的あいまいさの取扱い手法

現在までに、ファジィ理論で取扱う対象に内在するあいまいさを測る尺度として、ファジィエントロピー¹⁶⁾の概念に基づく種々の指標が提案されている^{9), 17), 18)}。著者等は、帰属度関数の代表的な形状変化に対する各指標の感度解析の結果、橋梁診断に関するあいまいさの定量化に対して、次式で定義される Yager の測度式が有効であることを明らかにしている^{3), 5)}。

$$\sum_{x_i} F_Y(x_i) = \{n - \sum_{x_i} |\mu_A(x_i) - \mu_{\bar{A}}(x_i)|\} / n \quad (12)$$

Yager の測度式は、 $|\mu_A(x_i) - \mu_{\bar{A}}(x_i)|$ で表現されるファジィ集合 A とその補集合 \bar{A} との距離の大小が、そこに内在するあいまいさを測る重要な指標であるという考え方に基づいている。ここで、要素 $x_i (i=1 \sim n)$ におけるこの距離 $F_Y(x_i)$ の総和を要素数 n より減じ、最大値で正規化することにより対象とする帰属度関数におけるあいまいさの総和が定量化できる。本研究では、Dempster & Shafer 理論を適用した前述の知識表現手法と対応させて、任意の幅をもった x_i の範囲における評価尺度に内在するあいまい度を算定することを可能にするために、Dempster & Shafer 理論における上界確率と下界確率の差が無知量に起因するという特質を利用して、Yager の測度式によるあいまいさの定量化手法の拡張を試みるものである。

各評価尺度における上界確率と下界確率の差が、それぞれの評価尺度に内在するあいまい度の相対的な比率、いわゆる重みを示していると考えることによって、各評価尺度に内在するあいまい度を以下の手順によって算定することができる。まず、無知量 $I(i)$ は上界

確率 $P^*(i)$ と下界確率 $P_*(i)$ の差であると考え、次式のように基本確率で表現できる。なお、ここでは、評価尺度を a, b, c, d, e の5段階と考えている。

$$\left\{ \begin{aligned} I(a) &= [m(\{a, b\}) + m(\{a, b, c\}) \\ &\quad + m(\{a, b, c, d\}) + m(\{a, b, c, d, e\})] \\ I(b) &= [m(\{a, b\}) + m(\{b, c\}) + m(\{a, b, c\}) \\ &\quad + m(\{b, c, d\}) + m(\{a, b, c, d\}) \\ &\quad + m(\{b, c, d, e\}) + m(\{a, b, c, d, e\})] \\ I(c) &= [m(\{b, c\}) + m(\{c, d\}) + m(\{a, b, c\}) \\ &\quad + m(\{b, c, d\}) + m(\{c, d, e\}) \\ &\quad + m(\{a, b, c, d\}) + m(\{b, c, d, e\}) \\ &\quad + m(\{a, b, c, d, e\})] \\ I(d) &= [m(\{c, d\}) + m(\{d, e\}) + m(\{b, c, d\}) \\ &\quad + m(\{c, d, e\}) + m(\{a, b, c, d\}) \\ &\quad + m(\{b, c, d, e\}) + m(\{a, b, c, d, e\})] \\ I(e) &= [m(\{d, e\}) + m(\{c, d, e\}) \\ &\quad + m(\{b, c, d, e\}) + m(\{a, b, c, d, e\})] \end{aligned} \right. \quad (13)$$

次に、必然性が高くなるほどあいまい度が減少するという考え方に基づいて、各評価尺度の無知量 $I(i)$ を下界確率 $P_*(i)$ の値に対応させて補正する。すなわち、下界確率 $P_*(i)$ が最小値 0.0 をとる場合、無知量 $I(i)$ は上式で算定される値 ($I(i) = P^*(i) - P_*(i)$) となり、下界確率 $P_*(i)$ が最大値 1.0 をとる場合、無知量 $I(i)$ は 0.0 となることから、下界確率 $P_*(i)$ が中間値 ($0.0 < P_*(i) < 1.0$) をとる場合、無知量 $I(i)$ は、 $0 \sim I(i)$ 間を下界確率 $P_*(i)$ の値に対応させて線形的に補間することにより算定できると考える。これは、必然性の変化が、代表的な帰属度関数の形状変化である拡大化・集中化および明暗強化と対応すると考えた場合、本研究で対象とするあいまい度の範囲内では、必然性とあいまい度の間、ほぼ線形的に負の相関があると考えられる^{3), 4)} ことに基づいている。そして、各評価尺度における補正後の無知量 $I(i)$ の総和 $\sum I(i)$ が、式 (12) で示される Yager の測度式によるあいまい度の総和 $\sum F_Y(i)$ に等しくなると考えることにより、各評価尺度のあいまい度 $F_Y(i)$ は次式で算定されることになる。

$$F_Y(i) = \sum_i F_Y(i) \cdot \frac{[I(i) \cdot \{1 - P_*(i)\}]}{\sum_i [I(i) \cdot \{1 - P_*(i)\}]} \quad (i=a, b, \dots e) \quad (14)$$

図—3 (a) に示す拡大化・集中化による帰属度関数の形状変化に対して、上記の手法を適用して算出したあいまい度分布を表—4 に示す。表より、集中化が進行するにつれて、各評価尺度のあいまい度が急激に減少していることが分る。特に、評価尺度 c におけるあいまい度の減少が顕著であり、また、集中化の進行につれて評価尺度 b, d におけるあいまい度の分担率が大きくなって

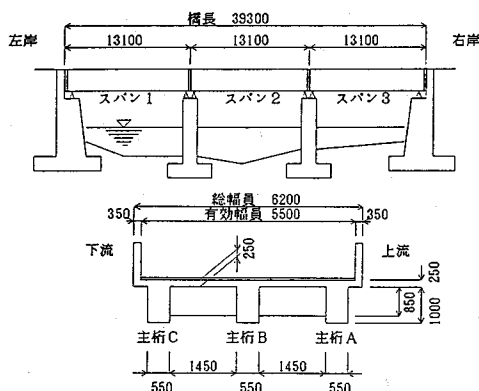


図-4 一般構造図(旧榎谷橋)

いることが分る。これらの傾向は掃属度関数の形状変化に対応した妥当なものと考えられる。

5. 「旧榎谷橋」におけるアンケート調査および実橋試験の実施と本手法の適用

アンケート調査により収集した経験的知識が橋梁を診断する上で有用な知識となりうるかどうかを検証すると同時に提案する知識獲得手法の妥当性を確認するために、実橋の耐用性診断を目的とした目視調査、現地でのアンケート調査および実橋試験¹⁰⁾を行った。

(1) 旧榎谷橋の概要および事前目視調査結果

旧榎谷橋は、試験実施時(平成4年12月)で橋齢41年(昭和26年度竣工)となるRC単純T桁橋3連よりなる。本橋は河川改修に伴い新設橋梁への架け替えが決定されていた。本橋の一般構造図を図-4に示す。なお、今回試験対象とした橋梁は図中に示されるスパン1とスパン2である。橋梁の損傷状態は、主桁においては、曲げひびわれが全体的にかなり多く発生しており、そのひびわれ幅は0.1mm~0.5mm程度が多く、最大ひびわれ幅は各主桁によって多少の差があるものの約0.8mm程度であった。せん断ひびわれ、鉄筋腐食ひびわれも曲げひびわれほどではないが各所で見受けられた。また、施工不良による豆板の発生およびコンクリートの欠落はスパン1よりもスパン2で顕著であった。床版においては、2方向ひびわれが発生していたが、ひびわれ幅が0.1mm以下のものがほとんどであった。施工不良による豆板の発生およびコンクリートの欠落はスパン2よりもスパン1で顕著であった。

(2) アンケート調査および実橋試験の概要

a) 耐用性診断アンケート調査の概要

橋梁診断に携わる専門家18名(耐用性診断に関する

業務経験年数0~4年の技術者7名、5~9年の技術者6名、10年以上の技術者5名)による目視調査および耐用性診断アンケート調査を実施した。耐用性診断は、定期点検程度の情報(アンケート回答者自身による目視調査、橋梁台帳)に基づいて、床版および主桁に対して材料および構造工学的観点からのみを行い、経済性は考慮しないものとした。アンケート実施方法は、回答者に回答用紙と共に橋梁台帳を配布し、回答者自身が対象橋梁を目視調査しながら、アンケート作成者立会いのもとで回答を記入する集合調査法とした。質問内容は「ハンチ沿いひびわれ」、「支承付近ひびわれ」、「床版中央のひびわれ」、「曲げひびわれ」、「せん断ひびわれ」、および「腐食ひびわれ」等のひびわれ状況からみた橋梁の健全度に関する項目、床版および主桁の「材料劣化」、「施工状態」および「路面状態」等からみた健全度に関する項目、さらに、「耐荷性」、「耐久性」および「耐用性」等の橋梁が有すべき機能からみた健全度に関する項目より構成されている。なお、健全度は100点満点の評価尺度を持つ数直線上にアンケート回答者が支持する評価点を記入する方式とし、評価尺度と数直線上の数値との対応を明確にするために、評価点にはあらかじめ以下の基準を設け、アンケート回答者に十分な事前説明を行った。

- 100点：設計施工共に問題のない架設直後の状態
(e: 87.5~100)
- 75点：わずかに劣化しているが憂慮なく健全な状態
(d: 62.5~87.5)
- 50点：供用年数から考えて、良くもなく悪くもない普通の状態 (c: 37.5~62.5)
- 25点：補修・補強が不可欠になる状態 (b: 12.5~37.5)
- 0点：供用すべきではない状態 (a: 0~12.5)

b) 実橋試験の概要

前述の耐用性診断アンケート調査と同時期に下記に示す現場非破壊試験および破壊試験を実施した。

- ① 重錘落下振動試験：重量300kgfの重錘を橋面上に落下させ、単一衝撃荷重を与えた場合の重錘の入力加速度および橋梁各点における応答加速度を測定し、モーダル解析¹⁹⁾により橋梁の振動特性を同定した。
- ② 主桁耐荷力試験：内桁をコンクリートカッターにより切断し独立させた上で、載荷桁を利用することにより破壊させた。
- ③ 材料試験：主桁耐荷力試験後、コンクリートコアと鉄筋の採取を行い、コンクリートコアに対する圧縮試験・中性化深さの測定および鉄筋に対する引張試験を行った。

(3) 客観的耐用性診断結果

客観的な耐用性診断結果と考えられる実橋試験結果に

表一五 SI法による主桁剛性の同定結果

	スパン1	スパン2
主桁A	2.439	2.289
主桁B	1.923	1.526
主桁C	1.983	1.798

注) 剛性EI: ($\times 10^{12}$ kgf \cdot cm 2)

表一六 せん断破壊に対する安全性評価指標

		L/4点		3L/4点	
		β	P_r	β	P_r
スパン1	主桁A	2.662	4.38×10^{-3}	2.534	6.24×10^{-3}
	主桁B	2.908	2.18×10^{-3}	2.827	2.77×10^{-3}
	主桁C	2.743	3.48×10^{-3}	2.622	4.90×10^{-3}
スパン2	主桁A	2.552	5.63×10^{-3}	2.414	8.17×10^{-3}
	主桁B	2.835	2.61×10^{-3}	2.750	3.34×10^{-3}
	主桁C	2.647	4.62×10^{-3}	2.519	6.57×10^{-3}

注) β : 安全性指標, P_r : 破壊確率

ついて、スパン1とスパン2の診断結果の比較を中心として下記にまとめる。

① 重錘落下振動試験による振動特性を実測値として、減衰を考慮した構造同定(SI)法^{20),21)}を適用し、主桁剛性を同定した結果を表一五に示す。本橋の損傷状態は、供用年数を考慮した剛性低下率の面からは良くもなく悪くもない普通の状態と考えられる。また、スパン別では、スパン2の方がスパン1に比べて剛性が小さくなっている。

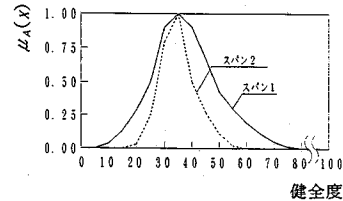
② 主桁より採取したコンクリートコアに対して実施した材料試験(圧縮強度、中性化深さ)結果より、スパン1では橋齡のわりに中性化深さが小さく(平均値: 3.55 cm)、また圧縮強度もある程度大きい(平均値: 152.7 kgf/cm 2)が、スパン2では中性化深さが大きい(平均値: 6.02 cm)上に圧縮強度も小さく(平均値: 106.9 kgf/cm 2)、コンクリートはかなり劣化していると考えられる。この原因として経年による材料劣化および施工不良が考えられる。

③ 主桁耐荷力試験では、スパン1(せん断破壊荷重理論値: 108.3 tf)は荷重113 tfにて支間中央付近でせん断破壊したが、スパン2(せん断破壊荷重理論値: 108.3 tf)では115 tfまで載荷したが破壊まで至らなかった。これは、主桁耐荷力試験の各荷重載荷段階において実施した重錘落下振動試験の結果を用いてSI法を適用した結果、支点回転拘束バネ定数の値が、スパン2ではスパン1の2倍になっていることが分かり、主桁剛性の同定結果(表一五)ではスパン2の剛性が低いにも拘らず、破壊荷重はスパン2の方がスパン1より大きかったという前述の結果を裏付けていると考えられる。

④ SI法によって同定された構造パラメータを基に曲げおよびせん断破壊に対する不確定性を考慮した安全性評価指標(安全性指標、破壊確率)を算定し、既往の実

表一七 「旧桜谷橋」アンケート調査結果(抜粋)

評価項目	床版									
	縦筋000h	縦筋000h	縦筋000h	縦筋000h	縦筋000h	縦筋000h	縦筋000h	縦筋000h	縦筋000h	縦筋000h
アンケート対象	スパン1	スパン2	スパン1	スパン2	スパン1	スパン2	スパン1	スパン2	スパン1	スパン2
全体	平均値	56.4	56.1	59.2	60.3	56.4	54.2	25.3	36.9	43.3
(18人)	標準偏差	20.4	21.4	18.7	18.7	19.3	18.2	16.3	11.8	16.2
経験10年以上	平均値	58.0	54.0	60.0	47.0	50.0	38.0	23.0	38.0	48.0
(5人)	標準偏差	18.6	22.2	21.7	15.4	20.3	6.0	13.3	19.3	19.6
評価項目	主桁									
アンケート対象	スパン1	スパン2	スパン1	スパン2	スパン1	スパン2	スパン1	スパン2	スパン1	スパン2
全体	平均値	35.1	40.3	51.7	52.2	50.8	50.0	34.7	29.7	46.1
(18人)	標準偏差	14.2	16.0	22.0	22.1	17.8	19.2	14.8	15.4	13.3
経験10年以上	平均値	34.0	33.0	43.0	45.0	42.0	41.0	36.0	24.0	38.0
(5人)	標準偏差	12.4	6.8	18.9	16.6	13.3	16.3	20.2	16.9	8.3



図一五 帰属関数(主桁部曲げひびわれ状況)

表一八 上界・下界確率値およびあいまい度(主桁部曲げひびわれ状況)

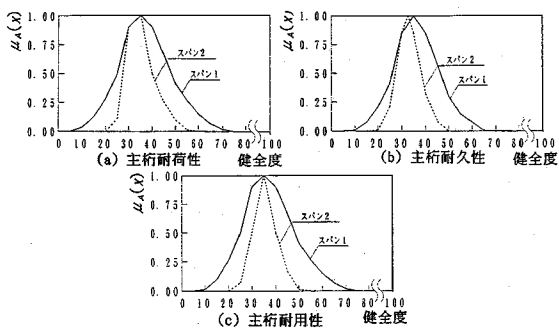
評価範囲		b		c	
		上界確率	下界確率	あいまい度	あいまい度
主桁部曲げひびわれ状況	スパン1	0.8488	0.3127		
	スパン2	0.9329	0.1722		
	スパン1	0.8873	0.1512		
	スパン2	0.8278	0.0671		
	スパン1	0.1225	0.1225		
	スパン2	0.0675	0.0675		

注) a, d, eに対する確率値は0であるため表記を省略する。

橋試験結果に基づいて設定した経年劣化曲線と比較するとスパン2におけるせん断破壊に対する安全性の低下が顕著であった。表一六にせん断破壊に対する安全性評価指標の計算結果を示す。

(4) 主観的耐用性診断結果と客観的耐用性診断結果の比較

主観的な耐用性診断結果と考えられるアンケート調査結果の一部を表一七に示す。これより、床版におけるひびわれ状況に関しては、両スパンとも評価点は50~60点程度であり、経験年数10年以上の回答者がスパン2の支承付近ひびわれおよびハンチ沿ひびわれに対して比較的低い評価点47点、38点をばらつきも少なく支持しているのが特徴的といえる。また、施工状態に対して、スパン1では評価点25点付近を支持しており、施工不良を指摘している。主桁のひびわれ状況に関しては、両スパンとも評価点は30~50点程度であり、床版のひびわれ状況に対してよりも厳しい評価をしているが、スパン間での顕著な差異はみられない。また、スパン2の施工状態に対して、経験年数10年以上の回答者が施工不良を指摘している。なお、主桁のひびわれ状況に対する全般的な傾向として、経験年数10年以上の回答者の方がそれ以下の経験年数の回答者より厳しい評価をしていることが分る。これらの評価結果は事前に実施した詳細



図—6 帰属度関数（主桁耐荷性・主桁耐久性・主桁耐用性）

表—9 上界・下界確率値およびあいまい度
（主桁耐荷性・主桁耐久性・主桁耐用性）

		評価範囲		b	c
主桁耐荷性	上界確率	スパン1	0.8707	0.4012	
		スパン2	0.9344	0.1701	
	下界確率	スパン1	0.5988	0.1293	
		スパン2	0.8299	0.0656	
あいまい度	スパン1	0.1145	0.1145		
	スパン2	0.0565	0.0565		
主桁耐久性	上界確率	スパン1	0.8718	0.2759	
		スパン2	0.9652	0.1312	
	下界確率	スパン1	0.7241	0.1282	
		スパン2	0.8688	0.0348	
あいまい度	スパン1	0.0955	0.0955		
	スパン2	0.0435	0.0435		
主桁耐用性	上界確率	スパン1	0.8509	0.3099	
		スパン2	0.9458	0.1402	
	下界確率	スパン1	0.6901	0.1491	
		スパン2	0.8598	0.0542	
あいまい度	スパン1	0.1105	0.1105		
	スパン2	0.0605	0.0605		

注) a, d, e) に対する確率値は0であるため表記を省略する。

な目視調査結果とほぼ一致しており、妥当な結果と考えられる。ただし、スパン間の材料劣化の比較においては、材料試験結果と逆の評価を行っており、目視調査のみの情報から材料劣化に対する評価を行うことの困難さを示唆している。

次に平均評価点だけではスパン1とスパン2の顕著な差異が認められない主桁部曲げひびわれのひびわれ状況に関する経験年数10年以上の回答者のアンケート調査結果に、提案する知識表現手法を適用した結果を図—5および表—8に示す。これらより、両スパンにおいて評価範囲b（補修・補強が不可欠になる状態）を大きく支持していることが分る。また、スパン間の上界および下界確率値を比較することで、スパン2のひびわれ状況の劣悪さをスパン1より大きく、しかもあいまい度は小さく支持されていることが定量的に把握可能となる。

以上の結果より、橋梁診断を行う基本的情報と考えられるひびわれ状況等に関する知識は、回答者自身に目視調査を行わせることにより、十分な信頼度で獲得できることが分る。次に、これらの知識を主要な診断要因として評価を下していると考えられる橋梁機能（耐荷性・耐

久性・耐用性）に関する知識について、客観的診断結果との整合性に留意して検討してみる。図—6（a）～（c）に主桁耐荷性、主桁耐久性および主桁耐用性に関するアンケート調査結果の帰属度関数による近似結果を、表—9にそれぞれに対応する上界確率分布、下界確率分布およびあいまい度を示す。これらより、主桁耐荷性、主桁耐久性および主桁耐用性の全てにおいて、スパン1よりスパン2の健全度の低下をあいまい度の減少を伴って明確に指摘していることが定量的に分る。主桁耐荷性において、特にスパン2の補強の必要性をスパン1より優先的に支持していることは、客観的診断結果と整合しており、これらは施工状態の主観的診断結果に大きく影響されているものと考えられる。主桁耐久性においても、スパン2の補修の必要性をスパン1より優先的に支持しているが、主桁耐荷性ほどスパン間での有意な差が定量的に表れていない。これは、既往のアンケート調査より耐久性の主要な診断要因であることが明らかになっている材料劣化に対して、スパン間的主観的診断結果に差異がないことから、施工状態の主観的診断結果のみに影響されたことが原因であると考えられる。主桁耐用性においては、主桁耐荷性と主桁耐久性に基づいて診断を行っていることから、これらと同様の傾向を示している。なお、橋梁機能全般において、スパン2では上界確率0.9以上、下界確率0.8以上で評価範囲bを支持しており、早急な対応処置が必要であると考えられるが、客観的診断結果と比較した場合、若干安全側の評価を下していると考えられる。なお、今回のアンケート調査においては、回答のばらつきが小さく、評価範囲bおよびcのみを支持する診断結果となり、あいまい度の評価範囲による差異は生じなかった。

以上より、ひびわれ状況等の橋梁診断における基本的情報や耐用性等の橋梁機能に対する専門家の主観的診断結果をアンケートを介して知識獲得をすることの妥当性が、客観的診断結果との比較を通して、ある程度検証されたと考えることができる。ただし、より信頼度の高い診断結果を提示するためには、材料劣化等の目視調査のみによる評価が困難な要因に対して、目視調査以外の客観的指標を事前に専門家に与えた上で、知識を獲得することの必要性が確認された。

6. あとがき

本研究は、アンケート調査を利用した経験的知識の獲得手法について、橋梁診断システム構築を主な対象として一提案を行ったものである。本研究で得られた主な結論を以下にまとめる。

(1) アンケート調査結果のばらつきに影響を及ぼす要因を検討することにより、本来的に内在する主観的あい

まいさ以外の不確定な要因によるばらつきを排除するために、アンケート調査の実施に際して留意すべき点を明確にした。

(2) Dempster & Shafer 理論における基本確率の概念を経験的知識の表現手法に適用し、上界および下界確率によって、任意の評価尺度に対応した可能性と必然性を定量的に表現する手法を提案した。そして、様相論理を適用した知識表現手法と併用することにより、知識の初期設定段階から最終的な評価段階に至るまでの様々な段階において、それぞれ適切と考えられる知識の表現が可能となった。

(3) Dempster & Shafer 理論と Yager の測度を併用することにより、任意の評価尺度に内在するあいまい度を算定する手法を提案した。これより、Yager の測度によって算定される全体的なあいまい度が、各評価尺度にどのように分布しているかを把握することが可能となった。

(4) 既存橋梁(旧榎谷橋)の耐用性診断を目的として、現地アンケート調査および実橋試験を行い、アンケート調査結果と実橋試験から得られた客観的な耐用性診断結果を比較することにより、専門家の保有する経験的知識の有用性を検証すると共にアンケートを介して経験的知識を獲得することの信頼性を確認することができた。

(5) 提案する知識獲得手法を現地アンケート調査結果に適用することで、主観的な耐用性診断結果として定量化し、実橋試験による客観的な耐用性診断結果との整合性に留意して検討することにより、提案する知識獲得手法の妥当性を確認することができた。

(6) 今後、さらに現地アンケート調査を行うことで、専門家が無意識の内に実行している知識の結合手法および洗練手法を研究し、既存橋梁の耐用性診断を目的としたエキスパートシステムの構築手法を提案していく予定である。

最後に、現地アンケート調査を行うにあたって多大なる御協力を戴きました兵庫県土木部の方々、神戸大学森川英典助手、神戸大学小林秀恵技官に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 上野晴樹：知識工学入門，オーム社，1985.5.
- 2) S. Valliappan and T.D. Pham : Constructing the Membership Function of a Fuzzy Set with Objective and Subjective Information, *Microcomputers in Civil Engineering* 8, pp.75-82, 1993.

- 3) 串田守可，徳山貴信，宮本文穂：橋梁診断における経験的知識に内在するあいまいさの定量化に対するファジィエントロピーの適用，*構造工学論文集*，Vol.38 A pp.571-584, 1992.3.
- 4) 串田守可，徳山貴信，宮本文穂：橋梁診断における知識獲得手法の提案，*構造工学論文集*，Vol.39 A, pp.503-516, 1993.3.
- 5) M. Kushida, T. Tokuyama and A. Miyamoto : Quantification of Subjective Uncertainty Included in Empirical Knowledge on Bridge Rating, *The Second International Symposium on Uncertainty Modeling & Analysis*, pp.22-28, 1993.4.
- 6) 財団法人建設工学研究所：県道373号線「旧青木橋」耐用性診断試験報告書，1991.3.
- 7) 財団法人建設工学研究所：県道53号線「旧大橋」耐用性診断試験報告書，1992.3.
- 8) 石塚満：Dempster & Shafer の確率理論，*電子通信学会誌*，Vol.66, No.9, pp.900-903, 1983.9.
- 9) R.R. Yager : On the Measure of Fuzziness and Negation Part I : Membership in the Unit Interval, *Int.J of General Systems*, 5, pp.221-229, 1979.
- 10) 財団法人建設工学研究所：県道411号線「旧榎谷橋」耐用性診断試験報告書，1993.3.
- 11) 串田守可，徳山貴信，宮本文穂：鋼橋損傷要因の階層化におけるファジィ階層化手法の適用について，*日本ファジィ学会誌*，Vol.3, No.4, 1991.11.
- 12) 水本雅晴：ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1988.2.
- 13) 辻新六，有馬昌宏：アンケート調査の方法，朝倉書店，1989.
- 14) 池田央：テストと測定，第一法規出版(株)，1982.6.
- 15) 水本雅晴：Fuzzy 集合と様相性，別冊・数理科学，pp.76-84, 1988.10.
- 16) 本多中二：ファジィエントロピーとはなにか，*数理科学*，No.294, pp.54-61, 1987.2.
- 17) A. De Luca and S. Termini : A Definition of a Nonprobabilistic Entropy in the Setting of Fuzzy Sets Theory, *Information and Control*, 20, pp.301-312, 1972.
- 18) A. Kaufmann : Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets, *Academic Press*, 1975.
- 19) 加川幸雄，石川正臣：モーダル解析入門，(株)オーム社，1987.10.
- 20) Bruce M. Douglas and Wayne H.Reid : Dynamic Tests and System Identification of Bridge, *ASCE*, Vol.108, NO.ST 10, 1988.2.
- 21) 熊谷稔：既存橋梁の安全性評価・寿命予測と補修・補強法の策定，神戸大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文，1991.2.

(1993.11.24 受付)

A PROPOSITION OF KNOWLEDGE ACQUISITION METHOD FOR KNOWLEDGE-BASED BRIDGE RATING SYSTEMS

Moriyoshi KUSHIDA and Ayaho MIYAMOTO

Serviceability assessment of existing bridges relies heavily on subjective judgements based on heuristics to be made by the experts. So, it is important to consider how to extract and express heuristics that has a certain level of intrinsic fuzziness due to subjectivity. In this paper, an empirical knowledge acquisition method is proposed by relating the knowledge, acquired from questionnaires, with a basic probability based on Dempster & Shafer theory, and quantifying the subjective uncertainty included in the knowledge using the concept of Yager's measure and Dempster & Shafer theory. Furthermore the proposed method has been applied to a questionnaire conducted to evaluate the serviceability of an existing bridge. And the validity of the method is verified through the comparison between the subjective rating results acquired from the application of the method and the objective rating results obtained from various field tests conducted to a same bridge.