

[1099] コンクリート橋の耐用性診断と現場試験による検証

正会員 ○ 宮本 文穂 (神戸大学工学部)
 正会員 西村 昭 (神戸大学工学部)
 正会員 藤井 学 (京都大学工学部)
 杉江 功 (阪神高速道路公团)

1. まえがき

橋梁管理システム構築上の核となる耐用性診断は、専門技術者の知識、経験あるいは直感といったものを背景とした主観的判断に任される部分が多い。しかし、維持管理業務の増大に伴う専門技術者の不足、客観的・合理的な診断の必要性を考慮すれば、橋梁診断のシステム化は重要な課題である。著者らはすでに、コンクリート橋の損傷要因をシステム工学的に階層化し、これを用いて、最終的な評価にファジー集合論を適用する耐用性診断システムの開発を行っている。このシステムは、入力条件より推定される損傷要因間の関連をパスの有無として表示でき、視覚的な理解が得易い利点を有するが、決定された階層モデルの修正、更新が困難である等の欠点があった。この点を改良するため、近年各方面で急速に導入されつつあるエキスパートシステムの手法を適用し、専門技術者の経験や知識をアンケート調査を行って知識ベースとして移植することによって、種々の推論・判断が可能となるシステムの提案をおこなった。また、本システムを架設後50年余を経て架替えの決定した RC-T 桁橋に適用するとともに、同橋に対する現場試験結果と比較し、その妥当性、有効性の検証を行った。

なお、システム構築用言語としては、人工知能用言語 Prolog を用いている。

2. 橋梁耐用性診断システムの概要

2. 1 あいまいな情報の取り扱い

真偽の2値で明確に規定できないあいまいな情報の取り扱いは、従来からエキスパートシステムを構築する上での大きな問題点であった。この問題に対して著者らは、例えばひびわれの状態を「かなり進行している」とか「問題ない」というような言語変数と対応させて、ファジー集合論における帰属度関数を用いて表し、各判定要因による評価を総合する演算法と最終的な診断の手法を提案した。この様な帰属度関数間の演算は、人工知能言語 Prolog が算術言語でないことから演算効率が悪く、検討の必要がある。そこで本研究では、Dempster & Shafer 理論における基本確率を用いた手法を提案する。すなわち、ファジー集合論における帰属度とは、ある要素がファジー集合に属する度合を表したものであるから、Dempster & Shafer 理論においては上界確率がこれと同値であると考える。今、図1のように $\mu = f(x)$ で表される帰属度関数が与えられたとし、横軸に $dx = 1/(n-1)$ 毎に要素を n 個 (a_1, a_2, \dots, a_n) 設ける。ここで、基本確率として、図のように焦

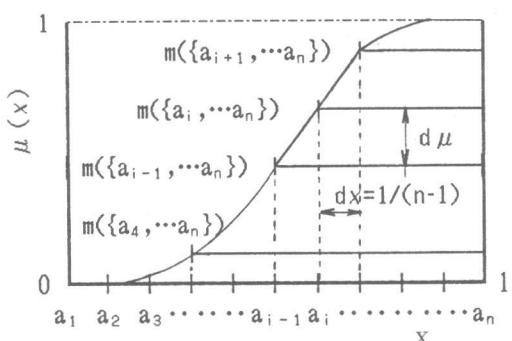


図1 基本確率と帰属度関数の関係

点要素 a_i から a_n の間に閉じ込められた基本確率 $m(\{a_i, \dots, a_n\})$ ($i=1, 2, \dots, n$) が存在すると考える。上述のように、ある要素 a_i [$x=(i-1) \cdot dx$] ($i=1, 2, \dots, n$) における帰属度 $\mu_{a_i} = f((i-1) \cdot dx)$ は、同要素の上界確率に等しいので、基本確率 $m(\{a_i, \dots, a_n\})$ は帰属度関数 $\mu = f(x)$ における a_{i-1} から a_i まで ($x=(i-2) \cdot dx$ から $x=(i-1) \cdot dx$ まで) の増分 $d\mu$ として次式で表される。

$$\begin{aligned} m(\{a_i, \dots, a_n\}) &= d\mu = f((i-1) \cdot dx) - f((i-2) \cdot dx) \\ &= f((i-2) \cdot dx + dx) - f((i-2) \cdot dx) \end{aligned} \quad (1)$$

このように定義すると、基本確率と帰属度関数は基本的に同じ性質を有し、帰属度関数が求めれば、式(1)より基本確率を求めることができ、逆に基本確率においては、上界値曲線が帰属度関数を表すことになる。

基本確率（帰属度関数）の統合については、Dempster の結合則を用いる。また、最終的な判定は、次式で与えられる評価値 $M(a_i)$ が最大値である要素 a_i を選ぶことによって実行する。^[2]

$$M(a_i) = \sum_{a_i \in A_k} \frac{m(A_k)}{N(A_k)} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

ここに、 $m(A_k)$ ：集合 A_k に対する基本確率、 $N(A_k)$ ：集合 A_k の要素数

さらに、質量の大きい基本確率が広い範囲を移動できるほどあいまいな状態と考えられることから、この評価に対する不確実性（Fuzziness） F は次式で与えられるものとする。

$$\begin{aligned} F &= \sum_{A_k} m(A_k) \cdot s(A_k) = \sum_{A_k} m(A_k) \cdot [\{N(A_k)-1\} \cdot dx] \\ &= \sum_{A_k} m(A_k) \cdot [\{N(A_k)-1\} / (n-1)] \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $s(A_k)$ ：集合 A_k に対する基本確率の移動可能距離、 $dx=1/(n-1)$ ：隣接した要素間の距離

以上のことと橋梁診断エキスパートシステムに適用する場合について言及する。今、耐用性診断結果のファジー集合の要素として safe, moderate, danger を考える。すなわち、 $n=3$ 、 $dx=1/(n-1)=0.5$ として要素 $s(a_1), m(a_2), d(a_3)$ を定義し、各要素の組合せで6つの基本確率を設定する。また、最も基本的な表現として、「ほぼ safe(mode., dang.) である」に対する基本確率の割当てを次式のようにする。

$$\begin{cases} \text{safe} : m(\{s\})=0.8, m(\{s, m\})=0.1, m(\{s, m, d\})=0.1 \\ \text{mode.} : m(\{m\})=0.7, m(\{s, m\})=0.1, m(\{m, d\})=0.1, m(\{s, m, d\})=0.1 \\ \text{dang.} : m(\{d\})=0.8, m(\{m, d\})=0.1, m(\{s, m, d\})=0.1 \end{cases} \quad (4)$$

このような基本確率による統合の特徴の一例として [safe × safe × safe] および [safe × mode. × mode.] について、その演算結果を帰属度関数の場合と比較し、図2に示す。これより、基本確率による統合結果はほぼ帰属度関数によるものと対応する形状となるが、図2 b) にみられるように基本確率では共通部の優位性が強調される結果が特徴として表現されており、より人間の感覚に近い取り扱いが可能となるといえる。

次に、上述の基本確率の合理的な決定

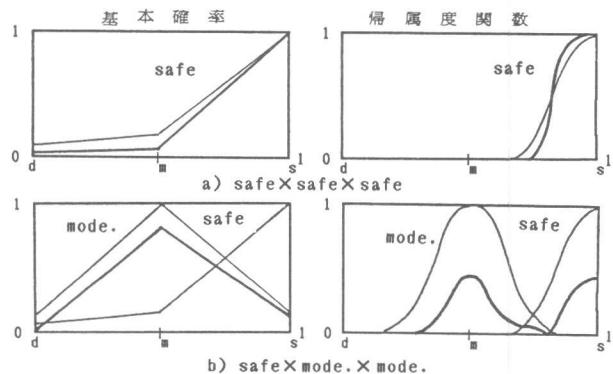


図2 基本確率と帰属度関数による演算結果の比較

法については、技術者の知識をシステムに知識ベースとして移植するという観点から、専門家に対するアンケートが有効であると考えた。その基本概念は、次の通りである。すなわち、多数の専門家からなる集団を橋梁を診断する一つの主体と考え、その要素である一人一人の解答のばらつきをその主体が下した診断に対するあいまい度とみなした。このときのあいまい度は、橋梁をある判定要因について数値評価した場合の標準偏差で定義できるものとした。アンケート調査は、各質問項目毎に0~100点まで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ている。

2.2 推論の流れ

本システムの推論機構は、前向きと後向きの併用型を採用しており、システム内における推論の流れは、図3に示す通りである。推論は、耐用性の診断を最終目標 (final goal) として、床版と主桁に分けて行い、各々が図3の流れに沿って診断される。従って、知識ベースは床版用、主桁用の2種類が用意されており、各々の診断の直前に読み込まれる。なお、ゴールとは一つの推論によって得られる結果を示す。診断の過程を概説すると、まず橋梁諸元や全ての対象橋梁で推論上必要となる項目について質問し、ユーザからの回答を事実節としてアサート（追加）する。推論は、この事実節を読み込むことから始まる。

読み込んだ事実節のデータ項目を条件部内に持つルールを検索し、そのようなルールが存在すれば読み込み、なければ次の事実節の読み込みに移る。読み込まれたルールは、条件部の照査が行われ、全ての条件が満たされれば、別に用意されているメッセージを出力した後、結論部の実行へ移る。実行は、その種別が「質問」であればその回答を、「推論」であればその結果を新たな事実節として、プログラム文の最後にアサートする。結論部の実行によって、そのルールにおける一連の作業を終了し、次のルールの検索へと進む。この繰り返しによって、推論は順に final goal へと近づいていく。これがいわゆる前向き推論であり、この動作は例えば、コンクリート橋に発生する遊離石灰などのように単純に「発生している」とか、「発生

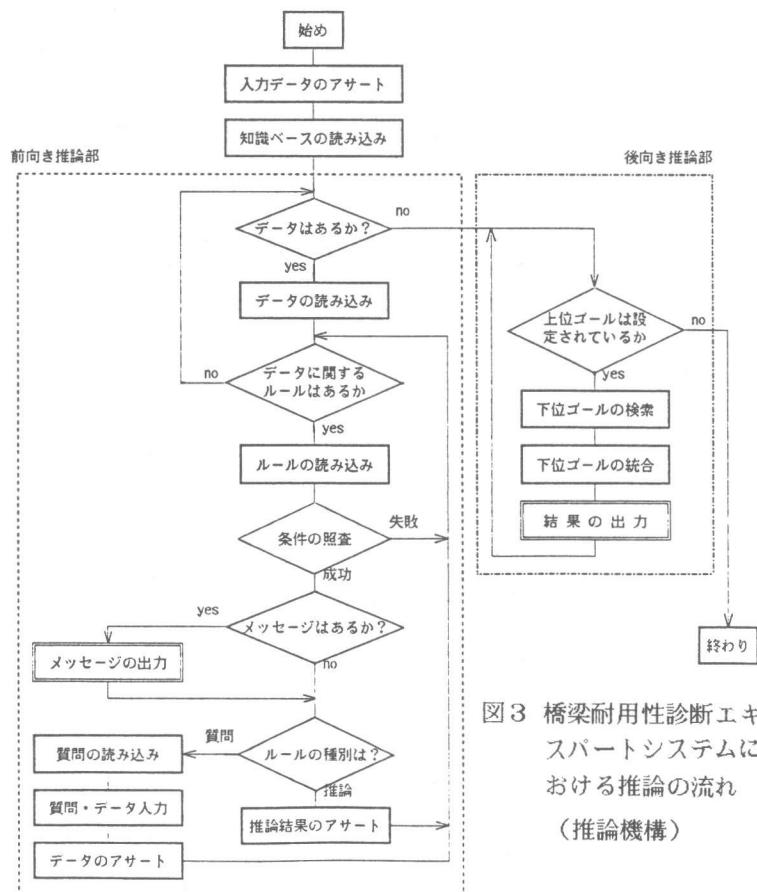


図3 橋梁耐用性診断エキスパートシステムにおける推論の流れ
(推論機構)

していない」というような所見の場合分けでは、さらに上位の推論を行うのに無理があるようなデータ項目にたどり着くまで続けられる。このようなデータ項目には、所見として適当な基本確率が割り当てられ、全てのデータがこの状態に達すると前向き推論は停止し、後向き推論にバトンタッチされる。なお、基本確率はアンケート調査の結果より、あるいはその結果を基準に主観によって知識ベース内のルールに与えられている。

後向き推論では、予め設定されている上位ゴールの推論に必要な下位ゴールが検索され、その基本確率が演算・統合されて新しい事実節としてアサートされる。なお、このとき新しく得られた上位ゴールについての基本確率より、safe、moderate、dangerに対する評価値を各々計算してその結果を出力する。そして最後に、final goalとして設定されている耐用性を、その下位ゴールである耐久性、および耐荷性より診断し、その結果を出力する。

3. 現場試験と橋梁耐用性診断システムの検証

対象とした実橋（「前野橋」）における現場試験とアンケートの結果^[3]から、本システムの有効性を検証する。

3.1 現場試験結果の概要

本橋は、昭和6年架設のRC-T桁橋（表2参照）で、ほぼ架設当時の構造系で現在に至っている。目視による点検では、主桁、床版ともに接近しなければひびわれの確認ができないなどかなり健全であった。また、鉄筋露出、ポップアウトは一部で見られたものの、遊離石灰やコンクリートの欠落など、耐久性、耐荷性上深刻な損傷は見られなかった。

図4は、専門技術者（20人）による本橋に関するアンケート調査結果の一例であり、ピークとなる項目を1.0として、他をその比率で表している。「前野橋」の健全度は、ほぼ moderate（50点）と safe（75点）の間で、しかもかなりばらつきの少ない結果となっている。これに対し余寿命は、ピークは5~10年にあるもののはらつきが大きくなっている。これは、目視での評価は健全でも橋齢が50年を越えているという情報のためと思われるが、そのばらつきは余寿命の大きい側に広がっており、少なくとも「前野橋」の損傷度が甚大であるということはないと推察される。

表1 主桁の各破壊安全率

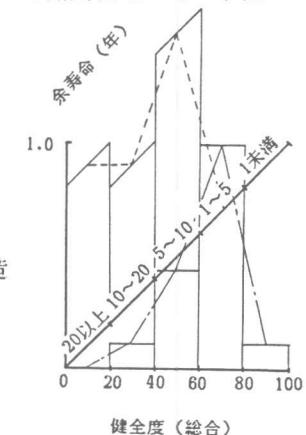
	全断面有効				有効幅の減少を考慮			
	A桁	B桁	C桁	D桁	A桁	B桁	C桁	D桁
曲げ破壊安全率	2.55	4.81	4.65	2.60	2.55	4.76	4.65	2.60
せん断破壊安全率	4.46	7.72	7.72	4.75	4.46	6.34	6.34	4.75

注) 曲げはL/2点、せん断はL/4点で計算 (L:スパン長)

[4]

次に、静的載荷による各主桁のたわみ分布に基づいたSystem Identification法の適用により求めた主桁の各破壊安全率を表1に示す。これより、全主桁とも曲げの方がせん断より安全率が低く推定されている。曲げ破壊安全率において、端桁(A,D桁)の安全率が中桁(B,C桁)よりも小さく推定されているが、これは高欄による死荷重および剛性の増大による荷重分担率の増大を考慮すると、各桁にそれほど大きな差異はないとい推察できる。さらに、主桁のフランジである床版の劣化による有効幅の減少により、破壊曲げモーメント(せん断力)が低下したときの安全率を見ると、全断面を有効とした場合とほとんど変わらないことが分かる。これより、各床版とも目視の結果と同様、かなり健全な状態であることが推察される。

現場試験の後、実験室で行った材料試験では、コンクリートの中性化は表面から平均6.45cmも進行しており、「前野橋」の耐久性はかなり低下している。すなわち、同橋が腐食環境にない



ことを考慮しても、今後ひびわれ部での鉄筋の腐食速度の増大には注意が必要となると考える。

3.2 エキスパートシステムによる診断

RC橋では、床版は主桁の一部とみなせることや、「前野橋」では床版に考慮すべき損傷が見られたことから、ここでは床版に対する診断結果を解説する。表2は、システム起動後の初期入力データである橋梁諸元等を示したものである。また、表3は「前野橋」のRC床版の診断過程における、システムとユーザの会話の一例を示したものである。システムからはまず、設計荷重について、大正15年以前の示方書で設計された2等橋で、スパンが2m以下の床版が、現行示方書に換算して5~8ton程度であると指摘した後、床版に見られる異状について質問している。こうした質問は、単岐あるいは多岐選択のメニュー方式の場合が多く、「前野橋」では「ハンチ沿いのひびわれ」が主な異状として観察される回答を与えている。この後システムは、目視から最も損傷が進んでいると思われる床版についての質問を行っている。「前野橋」におけるこのような床版のひびわれは「ほぼ一方向」で、全体的な状況はシステムから与えられたメニュー（状況1~8）に従って「状況3」を選択した。最大ひびわれ幅は、「1.0mm」であり、一般の許容ひびわれ幅を越えていることから補修の必要を提示している。さらに、このような床版が橋梁全体にしめる割合の入力が求められており、回答として「約半数」を選択している。次に質問の対象は、先に回答されている「ハンチ沿いのひびわれ」に移り、その付近で特に深刻な損傷、すなわち「遊離石灰」や「コンクリートの欠落」の有無を聞いてくる。「前野橋」ではそのどちらも発生しておらず、回答は「無し」である。

その後、システムはこのような「ハンチ沿いのひびわれ」の発生した原因を列挙している。すなわち、剛性の急変点であるため大型車の通行による衝撃に対して弱点となり、応力集中も起こり易い。また、荷重分配横桁がなく、圧縮材として十分作用すると考えられる高欄が付設されていることにより、各主桁間に不等たわみが生じていることも原因と考えられる。さらに、示方書が昭和48年以前であることから、床版主鉄筋の曲げ上げ位置の不適も一因として挙げられている。最後に、最大ひびわれ幅と、鉄筋が露出していないことから錆汁によって鉄筋の腐食状態を質問している。

ここまでが前向き推論の結果であり、次に後向き推論の主な結果を表4に示す。

表4によれば、「前野橋」はかなり健全度の高い橋梁であることが推察される。特に、路面状態や損傷に関する項目は、目視で得られる情報を基に推論するものであり、そのdangerの評価

表2 初期入力データ

橋 梁 名	前野橋	属 地 条 件	田園地区 寒冷地区 幹線道路
橋 長	45.8m	路面上のひびわれ、陥没	無し
幅 員	5.5m	路面の平坦性	ほとんど平坦
主 桁 本 数	4本	交 通 量	多い
床 版 ス パ ン	1.7m	高 檻	かなり大きな高欄
床 版 厚 度	20cm	横 桁	無し
形 式	単純桁橋	豆板、ポップアウト	一部で発生
示 方 書 等	大正15年 2等橋		
級			

表3 エキスパートシステムとユーザの会話の一例（「前野橋」）

システムからの質問および推論内容	ユーザからの回答
設計荷重を現行示方書に換算すれば 5~8ton程度である	
ポップアウトは施工不良が原因	ハンチ沿いのひびわれ
床版の異状？	ほぼ一方向
最も悪い床版のひびわれ性状？ -----	状況3
その全体系的な状況？ -----	床版スパン中央付近
通行軌跡の位置？ -----	
通行軌跡が床版スパン中央付近にある	
場合に床版にとって不利である	
最大ひびわれ幅は？ -----	1.0mm
補修の必要有り	
同様な床版の全体にしめる割合？ -----	約半数
ハンチ沿いのひびわれの状況？ -----	遊離石灰無し、コンクリートの欠落無し
ひびわれの原因の提示	
(高欄の影響、横桁のない事による 主桁の不等沈下、鉄筋の曲げ上げ不適)	
最大ひびわれ幅？ -----	0.2mm
ひびわれ幅は許容範囲内である	
錆汁の発生は？ -----	発生していない

値が '0.1' を下回るなど、同橋に対するアンケート調査の結果に良く符合している。これに対して、「設計」など目視からは判断し難いような項目は、橋齢や示方書等から間接的に推論するしかなく、「前野橋」が旧示方書で設計された老朽橋であることにより、目視からは健全であっても、評価は safe、moderate、danger にあまり差がなく、しかも danger の値が '0.2' を越える結果となっている。このような影響は、

最終的に「耐久性」にも影響し、僅かではあるが「耐荷性」に比べて、danger が高く、moderate が低くなっている。また、「最も悪い床版」に対する評価が、「ハンチ沿いのひびわれ」のそれに対して、safe が低く、反対に moderate が高いのは、「最大ひびわれ幅 (1.0mmと0.2mm)」が影響しているためである。

「床版耐荷性」および「耐久性」から推論される「床版耐用性」は、ほぼ moderate であると推察され、アンケートの結果よりは若干酷い診断結果となっている。しかし、逆に danger の評価値は、'0.0' となり、fuzziness も '0.1' 以下と低いことから、少なくとも「前野橋」は耐用性が大きく減退していることはないという診断を、システムは下したものと考えができる。この点では、アンケートの結果とも良く適合していると言える。

以上の結果より、本システムの妥当性、有効性を検討すれば、次のようになる。

本システムによる診断は、一般に酷い側の判定を下すように設定しているが、今後、基本確率に対する検討とより広い知識の蓄積によって、正確な診断が下せるように改良していく必要がある。ただし、エキスパートシステムの初期段階としては、安全側に余裕を持たせたという点で、意志決定のための支援システムという役割は十分果たすものと考えられる。また、目視で確認できず、専門技術者にも判断し難いような損傷、あるいは材料劣化、例えばコンクリートの中性化などは、橋齢や示方書等から間接的に推測するしかなく、診断システムへの反映も困難なものとなっている。今後、こうした項目の取り扱いを検討すると共に、間接的な推測からでも正確な診断ができよう、データの蓄積、あるいは実験の積み重ねが必要であると思われる。

4. あとがき

エキスパートシステムの導入と専門技術者の有する経験、知識のアンケートによる知識ベース化手法により、修正、更新が比較的容易な橋梁耐用性診断のシステム化が可能となり、実橋現場試験との比較により細部では更に検討の余地があるものの、ほぼ妥当な推論結果を得ることができた。今後、さらに実橋データを収集することにより本システムの検証を行っていく予定である。

参考文献

- [1]西村 昭、藤井 学、宮本 文穂、富田 隆弘：コンクリート橋損傷要因の階層化と耐用性判定、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.213～216、1986.6
- [2]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
- [3]西村 昭、藤井 学、宮本文穂、梶谷義昭、杉江功：現場載荷試験によるRC-T桁橋の耐荷力評価と検証、土木学会関西支部年次講演会論文集、1987.4
- [4]西村 昭、藤井 学、宮本 文穂、加賀山 泰一：橋梁診断ケーススタディー～RC桁橋の場合～、橋梁と基礎、Vol.19、No.4、pp.18～24、1985.4

表4 床版の各判定項目に対する推論（評価）結果の一例

判 定 項 目	safe	mode.	dang.	fuzz.
設 計 計	0.327	0.452	0.220	0.464
路 面 状 態	0.483	0.483	0.033	0.550
最 も 悪 い 床 版	0.279	0.667	0.055	0.303
ハンチ沿いのひびわれ	0.379	0.554	0.067	0.488
床 版 耐 荷 性	0.195	0.799	0.006	0.163
耐 久 性	0.200	0.760	0.039	0.234
床 版 耐 用 性	0.083	0.916	0.000	0.068