

エキスパートシステム構築用ツールを利用したコンクリート橋耐用性診断システムの開発と実用化

An Expert System for Serviceability Rating of Concrete Bridges and Its Practical Application

宮本文穂* 山口裕史** 西村 昭***

By Ayaho MIYAMOTO, Yuji YAMAGUCHI and Akira NISHIMURA

In this paper, an expert system for serviceability rating of concrete bridges is developed based on a combination of several components which are the knowledge base including the subjective information related to the rating, the inference engine, etc. The computer system and supporting tool for expert system which is used in the expert system are the PC-9801VX41 personal computer and "COMEX", respectively. For the construction of the knowledge base including the subjective information, it is a fatal problem in dealing with subjective informations which cannot be allotted binary codes such as true or false. As a remedy to this problem, a concept of the basic probability according to the Dempster & Shafer's theory are introduced in the present system. The upper probabilities in the Dempster & Shafer's theory to introduce experiences and knowledges accumulated into the knowledge base are obtained through questionnaires sent out to bridge experts. The results of the rating at the final stage produced by this system are considered to be presented with three elements expressed by the linguistic expressions as "safe" "moderate" "danger".

An existing concrete bridges on which field data have been collected are analyzed to demonstrate the applicability of this expert system. Through the application to the cracked reinforced concrete bridge girders and slabs, reasonable results are obtained by inference with the expert system.

1. はじめに

道路網の基幹をなす橋梁の損傷が顕在化し、その維持管理が大きな社会問題になろうとしている。特に、コンクリート橋の場合、70年代骨材反応あるいは塩害等の新たに加わった諸要因による損傷が著実に華々しく取上げられるに及んでこれらを含む実用的な橋梁管理システムの早急な開発が大きな社会的要請となってきた。このような橋梁管理システムの核となる橋梁診断は、これまで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支配される部分が多く、今後の維持管理業務の増大にともな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及びこれを利用した管理システムの構築が重要な課題であると考えられる。

本研究は、近年各方面で急速に導入されつつある人工知能(AI)を利用したエキスパートシステムの手法を適用し、特にコンクリート橋を対象とした維持管理の基本70-「調査」→「診断」→「補修・補強」において、「診断」の位置付けを、「損傷程度(健全度)は?」「余寿命はあと何年?」「あと10年もたすための処置は?」という、橋梁管理者の最も関心のある点に明確な回答を準備することであると定義し、これらの出力が可能な70-70高次診断システム(エキスパートシステム)の構築を目指すものである。この目的のために、本研究では、市販のエキスパートシステム構築用ツール(COMEX)を用いたコンクリート橋診断エキスパートシステム構築にあたって重要となる、診断プロセスの設定及び橋梁診断における知識経験あるいは診断過程に存在する主観的あいまいさの取扱い手法の提案を行なうとともに、構築したシステムの実用化にあたって必要不可欠となる診断結果の検証を、現場試験を実施したコンクリート橋に対する健全度評価のアンケート調査及び現場試験による評価結果とシステムによる診断結果を比較、検討することにより実行したものである。

* 工博, 神戸大学助教授, 工学部土木工学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

** 工修, 日本道路公団, 東京第二建設局 (〒370 高崎市上中居町平塚50)

*** 工博, 神戸大学教授, 工学部土木工学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

2. 橋梁診断の現状¹⁾

橋梁診断の現状は、橋梁が他分野の製品と比べて大規模で単製品となること、その耐用期間が非常に長いこと等のため、実証試験、再現試験が困難であることより、評価・判定・診断によって直接、「現有耐荷力」あるいは「余寿命」を求めることはできず、目視調査、各種載荷試験等より得られる検査結果(ひびわれ状況あるいは卓越振動数等)から、損傷度の指標(鉄筋の腐食程度あるいは剛性の低下率等)を通して最終的に橋梁の状態(耐用性:耐荷力、余寿命)を推定するという流れに従っている。現在のところ、この変換過程に検査技術者の主観が入る余地を残しており、あるいは技術者の主観的判断に頼らざるをえない部分が存在し、診断に相当のばらつきを生むことになっている。このような現状にある橋梁診断法の開発には、大別して二つの流れが存在すると考えられる。すなわち、一つは、橋梁の耐用性を支配する劣化要因(例えば、疲労、鉄筋の腐食等)を明確に規定し、診断過程から経験則とか主観を排除することによって、あくまで客観的な診断結果を出力しようとするもの、他は、診断過程における資料不足、知識・経験不足を認めた上で、定性的・定量的情報の組合せによりあくまで大まかな総合的耐用性判定が可能となる診断結果を出力しようとするものである。後者のような、経験豊富な専門家の判断によるある意味での工学的(技術的)決定問題には、ファジ集合論やエキスパートシステムの手法が有利に適用される。この場合、橋梁診断に存在する技術者の主観的あいまいさの取扱いが重要となる。

3. コンクリート橋診断エキスパートシステムの開発

3.1 エキスパートシステムの構築

エキスパートシステム構築用ツールは多数市販されているが、ここではこれらの内、パーソナルコンピュータでの構築を目標として開発されたエキスパートシステム構築用ツール“COMEX”を用いてコンクリート橋診断エキスパートシステムの構築を試みることによって橋梁診断への適用性を検討した。このような市販の構築用ツールを用いた場合、システムの構成はすでに完成したものであるためユーザは知識ベースを入力するだけでよく、システム構築は短時間でできるという利点があるが、逆にシステムの制約から、ユーザ自身が描いたイメージ通りのシステムを構築できないといった欠点もある。本節では最初に“COMEX”の概要を述べ、次にエキスパートシステム構築に必要なコン

クリート橋診断のプロセスの設定を行い、エキスパートシステムの基本となる知識ベースの作成において、専門技術者の知識の収集とそれをいかに知識ベースへ移植するかについて述べる。

3.1.1 “COMEX”の概要²⁾：“COMEX”は図1に示すように大きく分けて「所見」、「中間仮説」、「クライテリアフレーム」、「結論仮説」の4つの部分で構成されている。「結論仮説」とは所見と対応する診断結果群のことである。“COMEX”では所見に対してあらかじめ「床版の耐用性はsafeである」等々といった診断結果を定義しておく必要がある。「所見(質問)」とは知識ベースにおいて、推論を行ない結論仮説を導き出すために外部から取り入れなければならない判断材料であり、利用者に対して行なわれるさまざまな質問項目である。所見の形式はYES/NO形式と数値形式の2種類がある。これらの質問の中で、ある質問の回答により、他の質問の回答が決まるような場合、その質問に自動的に値を設定することができる。これが質問制御ルールである。常識的な質問を抑止したり、不必要な質問を回避するのに用い、次のような形で定義する。

もし、(条件部)ならば(実行部)

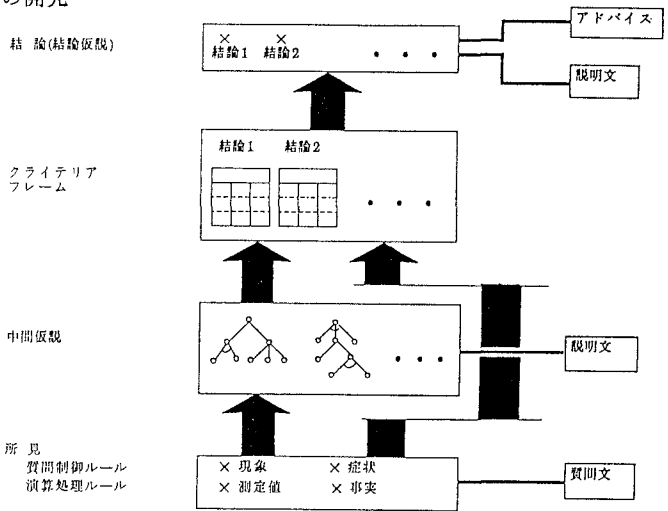


図1 “COMEX”における知識の構造

「EXHAUSTIVE」システムでは、所見に対する利用者側の回答を材料にして結論を推論するのであるが、「COMEX」では所見に対する回答から一挙に結論を導くのではなく、途中で中間的な結論を設けて、そこから最終的な結論を導いている。この「中間仮説」は大別すると選択型と論理型の形式をとっている。選択型とは指定されたYES/NO形式の属性を持った所見や中間仮説のうちの、最低何個が成立すればよいかを指定するときに用いる。例えば、

という論理式で考えると、この場合A、B、C、Dという所見もしくは中間仮説のうちの2個以上が成立すれば、この論理式の指定された中間仮説が成立することを表わしている。一方、論理型はYES/NO形式の属性を持った所見、中間仮説や比較式を、AND（論理積）やOR（論理和）で結んだ論理構造を作るときに用いる。例えば、

という論理式は図2の様な構造を示す。この様な機能を持つ中間仮説を用いることにより、所見と結論だけで知識を表現するのとは比べ、知識の構造化が促進され、図3に示すAND/OR ツリー構造で推論が実行でき、専門家の知識に近い形で、より複雑な論理判定を行なうことが可能となる。

図4はクリテリアフレームの概念図である。クリテリアフレームでは結論仮説を導くための判断基準を、結論仮説に対する確信の強さによって区別して与えている。確信の強さは、「きっと(確定)」、「多分(疑い)」、「おそらく(可能性)」という3段階に分けられており、並べた順に確信の強さが低下する。それぞれの確信の強さごとに判断ルールが、以下のよう

に3段階に分けて与えられる：①判定基準：結論仮説が成り立つと判定するためのおおまかな条件(根拠)、②確認項目：判定基準が成立したのち、さらに必ず成立しなければならない項目、③除外項目：判定基準と確認項目がともに成立しても、これが成り立てば結論仮説は成立しないという項目。

```
graph TD; A(( )) --- B[ ]; A --- C[ ]; A --- D[ ]; B --- E[ ]; B --- F[ ]; B --- G[ ]; C --- H[ ]; C --- I[ ]; C --- J[ ]; D --- K[ ]; D --- L[ ]; D --- M[ ]; E --- N[ ]; F --- O[ ]; G --- P[ ]; H --- Q[ ]; I --- R[ ]; J --- S[ ]; K --- T[ ]; L --- U[ ]; M --- V[ ]; N --- W[ ]; O --- X[ ]; P --- Y[ ]; Q --- Z[ ]; R --- AA[ ]; S --- AB[ ]; T --- AC[ ]; U --- AD[ ]; V --- AE[ ]; W --- AF[ ]; X --- AG[ ]; Y --- AH[ ]; Z --- AI[ ]; AA --- AJ[ ]; AB --- AK[ ]; AC --- AL[ ]; AD --- AM[ ]; AE --- AN[ ]; AF --- AO[ ]; AG --- AP[ ]; AH --- AQ[ ]; AI --- AR[ ]; AJ --- AS[ ]; AK --- AT[ ]; AL --- AU[ ]; AM --- AV[ ]; AN --- AW[ ]; AO --- AX[ ]; AP --- AY[ ]; AQ --- AZ[ ]; AR --- BA[ ]; AS --- BB[ ]; AT --- BC[ ]; AU --- BD[ ]; AV --- BE[ ]; AW --- BF[ ]; AX --- BG[ ]; AY --- BH[ ]; AZ --- BI[ ]; BA --- BJ[ ]; BB --- BK[ ]; BC --- BL[ ]; BD --- BM[ ]; BE --- BN[ ]; BF --- BO[ ]; BG --- BP[ ]; BH --- BQ[ ]; BI --- BR[ ]; BJ --- BS[ ]; BK --- BT[ ]; BL --- BU[ ]; BM --- BV[ ]; BN --- BW[ ]; BO --- BX[ ]; BP --- BY[ ]; BQ --- BZ[ ]; BR --- CA[ ]; BS --- CB[ ]; BT --- CC[ ]; BU --- CD[ ]; BV --- CE[ ]; BW --- CF[ ]; BX --- CG[ ]; BY --- CH[ ]; BZ --- CI[ ]; CA --- CJ[ ]; CB --- CK[ ]; CC --- CL[ ]; CD --- CM[ ]; CE --- CN[ ]; CF --- CO[ ]; CG --- CP[ ]; CH --- CQ[ ]; CI --- CR[ ]; CJ --- CS[ ]; CK --- CT[ ]; CL --- CU[ ]; CM --- CV[ ]; CN --- CW[ ]; CO --- CX[ ]; CP --- CY[ ]; CQ --- CZ[ ]; CR --- DA[ ]; CS --- DB[ ]; CT --- DC[ ]; CU --- DD[ ]; CV --- DE[ ]; CW --- DF[ ]; CX --- DG[ ]; CY --- DH[ ]; CZ --- DI[ ]; DA --- DJ[ ]; DB --- DK[ ]; DC --- DL[ ]; DD --- DM[ ]; DE --- DN[ ]; DF --- DO[ ]; DG --- DP[ ]; DH --- DQ[ ]; DI --- DR[ ]; DJ --- DS[ ]; DK --- DT[ ]; DL --- DU[ ]; DM --- DV[ ]; DN --- DW[ ]; DO --- DX[ ]; DP --- DY[ ]; DQ --- DZ[ ]; DR --- EA[ ]; DS --- EB[ ]; DT --- EC[ ]; DU --- ED[ ]; DV --- EE[ ]; DW --- EF[ ]; DX --- EG[ ]; DY --- EH[ ]; DZ --- EI[ ]; EA --- EJ[ ]; EB --- EK[ ]; EC --- EL[ ]; ED --- EM[ ]; EE --- EN[ ]; EF --- EO[ ]; EG --- EP[ ]; EH --- EQ[ ]; EI --- ER[ ]; EJ --- ES[ ]; EK --- ET[ ]; EL --- EU[ ]; EM --- EV[ ]; EN --- EW[ ]; EO --- EX[ ]; EP --- EY[ ]; EQ --- EZ[ ]; ER --- FA[ ]; ES --- FB[ ]; ET --- FC[ ]; EU --- FD[ ]; EV --- FE[ ]; EW --- FF[ ]; EX --- FG[ ]; EY --- FH[ ]; EZ --- FI[ ]; FA --- FJ[ ]; FB --- FK[ ]; FC --- FL[ ]; FD --- FM[ ]; FE --- FN[ ]; FF --- FO[ ]; FG --- FP[ ]; FH --- FQ[ ]; FI --- FR[ ]; FJ --- FS[ ]; FK --- FT[ ]; FL --- FU[ ]; FM --- FV[ ]; FN --- FW[ ]; FO --- FX[ ]; FP --- FY[ ]; FQ --- FZ[ ]; FR --- GA[ ]; FS --- GB[ ]; FT --- GC[ ]; FU --- GD[ ]; FV --- GE[ ]; FW --- GF[ ]; FX --- GG[ ]; FY --- GH[ ]; FZ --- GI[ ]; GA --- GJ[ ]; GB --- GK[ ]; GC --- GL[ ]; GD --- GM[ ]; GE --- GN[ ]; GF --- GO[ ]; GG --- GP[ ]; GH --- GQ[ ]; GI --- GR[ ]; GJ --- GS[ ]; GK --- GT[ ]; GL --- GU[ ]; GM --- GV[ ]; GN --- GW[ ]; GO --- GX[ ]; GP --- GY[ ]; GQ --- GZ[ ]; GR --- HA[ ]; GS --- HB[ ]; GT --- HC[ ]; GU --- HD[ ]; GV --- HE[ ]; GW --- HF[ ]; GX --- HG[ ]; GY --- HH[ ]; GZ --- HI[ ]; HA --- HJ[ ]; HB --- HK[ ]; HC --- HL[ ]; HD --- HM[ ]; HE --- HN[ ]; HF --- HO[ ]; HG --- HP[ ]; HH --- HQ[ ]; HI --- HR[ ]; HJ --- HS[ ]; HK --- HT[ ]; HL --- HU[ ]; HM --- HV[ ]; HN --- HW[ ]; HO --- HX[ ]; HP --- HY[ ]; HQ --- HZ[ ]; HR --- IA[ ]; HS --- IB[ ]; HT --- IC[ ]; HU --- ID[ ]; HV --- IE[ ]; HW --- IF[ ]; HX --- IG[ ]; HY --- IH[ ]; HZ --- II[ ]; IA --- IJ[ ]; IB --- IK[ ]; IC --- IL[ ]; ID --- IM[ ]; IE --- IN[ ]; IF --- IO[ ]; IG --- IP[ ]; IH --- IQ[ ]; II --- IR[ ]; IJ --- IS[ ]; IK --- IT[ ]; IL --- IU[ ]; IM --- IV[ ]; IN --- IW[ ]; IO --- IX[ ]; IP --- IY[ ]; IQ --- IZ[ ]; IR --- JA[ ]; IS --- JB[ ]; IT --- JC[ ]; IU --- JD[ ]; IV --- JE[ ]; IW --- JF[ ]; IX --- JG[ ]; IY --- JH[ ]; IZ --- JI[ ]; JA --- JJ[ ]; JB --- JK[ ]; JC --- JL[ ]; JD --- JM[ ]; JE --- JN[ ]; JF --- JO[ ]; JG --- JP[ ]; JH --- JQ[ ]; JI --- JR[ ]; JJ --- JS[ ]; JK --- JT[ ]; JL --- JU[ ]; JM --- JV[ ]; JN --- JW[ ]; JO --- JX[ ]; JP --- JY[ ]; JQ --- JZ[ ]; JR --- KA[ ]; JS --- KB[ ]; JT --- KC[ ]; JU --- KD[ ]; JV --- KE[ ]; JW --- KF[ ]; JX --- KG[ ]; JY --- KH[ ]; JZ --- KI[ ]; KA --- KJ[ ]; KB --- KK[ ]; KC --- KL[ ]; KD --- KM[ ]; KE --- KN[ ]; KF --- KO[ ]; KG --- KP[ ]; KH --- KQ[ ]; KI --- KR[ ]; KJ --- KS[ ]; KK --- KT[ ]; KL --- KU[ ]; KM --- KV[ ]; KN --- KW[ ]; KO --- KX[ ]; KP --- KY[ ]; KQ --- KZ[ ]; KR --- LA[ ]; KS --- LB[ ]; KT --- LC[ ]; KU --- LD[ ]; KV --- LE[ ]; KW --- LF[ ]; KX --- LG[ ]; KY --- LH[ ]; KZ --- LI[ ]; LA --- LJ[ ]; LB --- LK[ ]; LC --- LL[ ]; LD --- LM[ ]; LE --- LN[ ]; LF --- LO[ ]; LG --- LP[ ]; LH --- LQ[ ]; LI --- LR[ ]; LJ --- LS[ ]; LK --- LT[ ]; LL --- LU[ ]; LM --- LV[ ]; LN --- LW[ ]; LO --- LX[ ]; LP --- LY[ ]; LQ --- LZ[ ]; LR --- MA[ ]; LS --- MB[ ]; LT --- MC[ ]; LU --- MD[ ]; LV --- ME[ ]; LW --- MF[ ]; LX --- MG[ ]; LY --- MH[ ]; LZ --- MI[ ]; MA --- MJ[ ]; MB --- MK[ ]; MC --- ML[ ]; MD --- MM[ ]; ME --- MN[ ]; MF --- MO[ ]; MG --- MP[ ]; MH --- MQ[ ]; MI --- MR[ ]; MJ --- MS[ ]; MK --- MT[ ]; ML --- MU[ ]; MM --- MV[ ]; MN --- MW[ ]; MO --- MX[ ]; MP --- MY[ ]; MQ --- MZ[ ]; MR --- NA[ ]; MS --- NB[ ]; MT --- NC[ ]; MU --- ND[ ]; MV --- NE[ ]; MW --- NF[ ]; MX --- NG[ ]; MY --- NH[ ]; MZ --- NI[ ]; NA --- NJ[ ]; NB --- NK[ ]; NC --- NL[ ]; ND --- NM[ ]; NE --- NN[ ]; NF --- NO[ ]; NG --- NP[ ]; NH --- NQ[ ]; NI --- NR[ ]; NJ --- NS[ ]; NK --- NT[ ]; NL --- NU[ ]; NM --- NV[ ]; NN --- NW[ ]; NO --- NX[ ]; NP --- NY[ ]; NQ --- NZ[ ]; NR --- OA[ ]; NS --- OB[ ]; NT --- OC[ ]; NU --- OD[ ]; NV --- OE[ ]; NW --- OF[ ]; NX --- OG[ ]; NY --- OH[ ]; NZ --- OI[ ]; OA --- OJ[ ]; OB --- OK[ ]; OC --- OL[ ]; OD --- OM[ ]; OE --- ON[ ]; OF --- OO[ ]; OG --- OP[ ]; OH --- OQ[ ]; OI --- OR[ ]; OJ --- OS[ ]; OK --- OT[ ]; OL --- OU[ ]; OM --- OV[ ]; ON --- OW[ ]; OO --- OX[ ]; OP --- OY[ ]; OQ --- OZ[ ]; OR --- PA[ ]; OS --- PB[ ]; OT --- PC[ ]; OU --- PD[ ]; OV --- PE[ ]; OW --- PF[ ]; OX --- PG[ ]; OY --- PH[ ]; OZ --- PI[ ]; PA --- PJ[ ]; PB --- PK[ ]; PC --- PL[ ]; PD --- PM[ ]; PE --- PN[ ]; PF --- PO[ ]; PG --- PP[ ]; PH --- PQ[ ]; PI --- PR[ ]; PJ --- PS[ ]; PK --- PT[ ]; PL --- PU[ ]; PM --- PV[ ]; PN --- PW[ ]; PO --- PX[ ]; PP --- PY[ ]; PQ --- PZ[ ]; PR --- QA[ ]; PS --- QB[ ]; PT --- QC[ ]; PU --- QD[ ]; PV --- QE[ ]; PW --- QF[ ]; PX --- QG[ ]; PY --- QH[ ]; PZ --- QI[ ]; QA --- QJ[ ]; QB --- QK[ ]; QC --- QL[ ]; QD --- QM[ ]; QE --- QN[ ]; QF --- QO[ ]; QG --- QP[ ]; QH --- QQ[ ]; QI --- QR[ ]; QJ --- QS[ ]; QK --- QT[ ]; QL --- QU[ ]; QM --- QV[ ]; QN --- QW[ ]; QO --- QX[ ]; QP --- QY[ ]; QQ --- QZ[ ]; QR --- RA[ ]; QS --- RB[ ]; QT --- RC[ ]; QU --- RD[ ]; QV --- RE[ ]; QW --- RF[ ]; QX --- RG[ ]; QY --- RH[ ]; QZ --- RI[ ]; RA --- RJ[ ]; RB --- RK[ ]; RC --- RL[ ]; RD --- RM[ ]; RE --- RN[ ]; RF --- RO[ ]; RG --- RP[ ]; RH --- RQ[ ]; RI --- RR[ ]; RJ --- RS[ ]; RK --- RT[ ]; RL --- RU[ ]; RM --- RV[ ]; RN --- RW[ ]; RO --- RX[ ]; RP --- RY[ ]; RQ --- RZ[ ]; RR --- SA[ ]; RS --- SB[ ]; RT --- SC[ ]; RU --- SD[ ]; RV --- SE[ ]; RW --- SF[ ]; RX --- SG[ ]; RY --- SH[ ]; RZ --- SI[ ]; SA --- SJ[ ]; SB --- SK[ ]; SC --- SL[ ]; SD --- SM[ ]; SE --- SN[ ]; SF --- SO[ ]; SG --- SP[ ]; SH --- SQ[ ]; SI --- SR[ ]; SJ --- SS[ ]; SK --- ST[ ]; SL --- SU[ ]; SM --- SV[ ]; SN --- SW[ ]; SO --- SX[ ]; SP --- SY[ ]; SQ --- SZ[ ]; SR --- TA[ ]; SS --- TB[ ]; ST --- TC[ ]; SU --- TD[ ]; SV --- TE[ ]; SW --- TF[ ]; SX --- TG[ ]; SY --- TH[ ]; SZ --- TI[ ]; TA --- TJ[ ]; TB --- TK[ ]; TC --- TL[ ]; TD --- TM[ ]; TE --- TN[ ]; TF --- TO[ ]; TG --- TP[ ]; TH --- TQ[ ]; TI --- TR[ ]; TJ --- TS[ ]; TK --- TT[ ]; TL --- TU[ ]; TM --- TV[ ]; TN --- TW[ ]; TO --- TX[ ]; TP --- TY[ ]; TQ --- TZ[ ]; TR --- UA[ ]; TS --- UB[ ]; TT --- UC[ ]; TU --- UD[ ]; TV --- UE[ ]; TW --- UF[ ]; TX --- UG[ ]; TY --- UH[ ]; TZ --- UI[ ]; UA --- UJ[ ]; UB --- UK[ ]; UC --- UL[ ]; UD --- UM[ ]; UE --- UN[ ]; UF --- UO[ ]; UG --- UP[ ]; UH --- UQ[ ]; UI --- UR[ ]; UJ --- US[ ]; UK --- UT[ ]; UL --- UV[ ]; UM --- UW[ ]; UN --- UX[ ]; UO --- UY[ ]; UQ --- UZ[ ]; UR --- VA[ ]; US --- VB[ ]; UT --- VC[ ]; UV --- VD[ ]; UW --- VE[ ]; UX --- VF[ ]; UY --- VG[ ]; UZ --- VH[ ]; VA --- VJ[ ]; VB --- VK[ ]; VC --- VL[ ]; VD --- VM[ ]; VE --- VN[ ]; VF --- VO[ ]; VG --- VP[ ]; VH --- VQ[ ]; VI --- VR[ ]; VJ --- VS[ ]; VK --- VT[ ]; VL --- VU[ ]; VM --- VV[ ]; VN --- VW[ ]; VO --- VX[ ]; VP --- VY[ ]; VQ --- VZ[ ]; VR --- WA[ ]; VS --- WB[ ]; VT --- WC[ ]; VU --- WD[ ]; VV --- WE[ ]; VW --- WF[ ]; VX --- WG[ ]; VY --- VH[ ]; VZ --- VI[ ]; WA --- WJ[ ]; WB --- WK[ ]; WC --- WL[ ]; WD --- WM[ ]; WE --- WN[ ]; WF --- WO[ ]; WG --- WP[ ]; WH --- WQ[ ]; WI --- WR[ ]; WJ --- WS[ ]; WK --- WT[ ]; WL --- WU[ ]; WM --- WV[ ]; WN --- WW[ ]; WO --- WX[ ]; WP --- WY[ ]; WQ --- WZ[ ]; WR --- XA[ ]; WS --- XB[ ]; WT --- XC[ ]; WU --- XD[ ]; WV --- XE[ ]; WW --- XF[ ]; WX --- XG[ ]; WY --- XH[ ]; WZ --- XI[ ]; XA --- XJ[ ]; XB --- XK[ ]; XC --- XL[ ]; XD --- XM[ ]; XE --- XN[ ]; XF --- XO[ ]; XG --- XP[ ]; XH --- XQ[ ]; XI --- XR[ ]; XJ --- XS[ ]; XK --- XT[ ]; XL --- XU[ ]; XM --- XV[ ]; XN --- XW[ ]; XO --- XX[ ]; XP --- XY[ ]; XQ --- XZ[ ]; XR --- YA[ ]; XS --- YB[ ]; XT --- YC[ ]; XU --- YD[ ]; XV --- YE[ ]; XW --- YF[ ]; XX --- YG[ ]; XY --- YH[ ]; XZ --- YI[ ]; YA --- YJ[ ]; YB --- YK[ ]; YC --- YL[ ]; YD --- YM[ ]; YE --- YN[ ]; YF --- YO[ ]; YG --- YP[ ]; YH --- YQ[ ]; YI --- YR[ ]; YJ --- YS[ ]; YK --- YT[ ]; YL --- YU[ ]; YM --- YV[ ]; YN --- YW[ ]; YO --- YX[ ]; YP --- YY[ ]; YQ --- YZ[ ]; YR --- ZA[ ]; YS --- ZB[ ]; YT --- ZC[ ]; YU --- ZD[ ]; YV --- ZE[ ]; YW --- ZF[ ]; YX --- ZG[ ]; YY --- ZH[ ]; YZ --- ZI[ ]; ZA --- ZJ[ ]; ZB --- ZK[ ]; ZC --- ZL[ ]; ZD --- ZM[ ]; ZE --- ZN[ ]; ZF --- ZO[ ]; ZG --- ZP[ ]; ZH --- ZQ[ ]; ZI --- ZR[ ]; ZJ --- ZS[ ]; ZK --- ZT[ ]; ZL --- ZU[ ]; ZM --- ZV[ ]; ZN --- ZW[ ]; ZO --- ZX[ ]; ZP --- ZY[ ]; ZQ --- ZZ[ ]; ZR --- AA[ ]; ZS --- AB[ ]; ZT --- AC[ ]; ZU --- AD[ ]; ZV --- AE[ ]; ZW --- AF[ ]; ZX --- AG[ ]; ZY --- AH[ ]; ZZ --- AI[ ]; ZR --- AJ[ ]; ZS --- AK[ ]; ZT
```

○ 中間仮説
□ 所見

図3 中間仮説の構造

```

graph TD
    Root[I H2] -- OR --> Node1[AND]
    Root -- OR --> Node2[NOT F]
    Node1 -- A --> LeafA[A]
    Node1 -- B-C > 10.5 --> Node3[OR]
    Node3 -- OR --> LeafD[D]
    Node3 -- OR --> LeafNotF2[NOT F]
  
```

結論仮説名		補助項目	
主項目		1.	2.
	1.		
	2.		
	きつと	多分	おそらく
判定基準			
確認項目			
除外項目			

— 501 —

ただし、主項目、補助項目となる所見は、YES/NO形式のものに限られている。

以上のように「クレテリアル」は、3段階の確信の強さごとに、3段階の判断ルールを与えるようになっており、合計9組の判断ルールがまとまってひとつのルールを構成している。この9組の判断ルールは次のような順序で評価される：①確信度の高いほうから評価が始まる、②もし、それより上位の確信度の判定基準が成立していないときには、ある確信度に対する評価は、判定基準→確認項目→除外項目の順に行なわれる。もし、判定基準や確認項目が不成立の場合、それ以下の判断基準は評価されない、③もし、上位の確信度に対する判定基準や確認項目が成立しているときは、ある確信度に対する評価は、それより上位の確信度に対する判定基準が成立しなかったレベルから評価を始める。例えば、「確信度」「きつ」とにおける判定基準が成立し、確認項目が不成立の時、「多分」のレベルでは判定基準の評価は行なわれずに、確認項目から評価される、④ある確信度に対する判定基準と確認項目が成立し、除外項目が不成立だったとき、

該当する結論仮説が、その確信度で成立したと判断され、それ以下の確信の強さに対する判定基準は評価されない。

以上のような順序で評価を行ない、該当する結論仮説の判定を行う。

3.1.2 診断プロセスの設定：Expertシステムを構築する場合、技術者が橋梁の診断を行なう際の推論の道筋を決定しなければならない。この推論過程は個人により違いがあると思われるが、本システムを開発するにあたり、多数の文献³⁾⁴⁾を参考にした推論過程を設定した。すなわち、床版、主桁それぞれの耐用性に影響を及ぼすと考えられる要因をリストアップし、各要因が耐用性を頂点(final goal)とする階層構造となるように診断プロセスを設定した。一例として、床版に対する診断プロセスを示したものが図5である。設定したプロセスの考え方についての一例を述べると、「ハンチ沿いのひびわれ」、「支束付近のひび

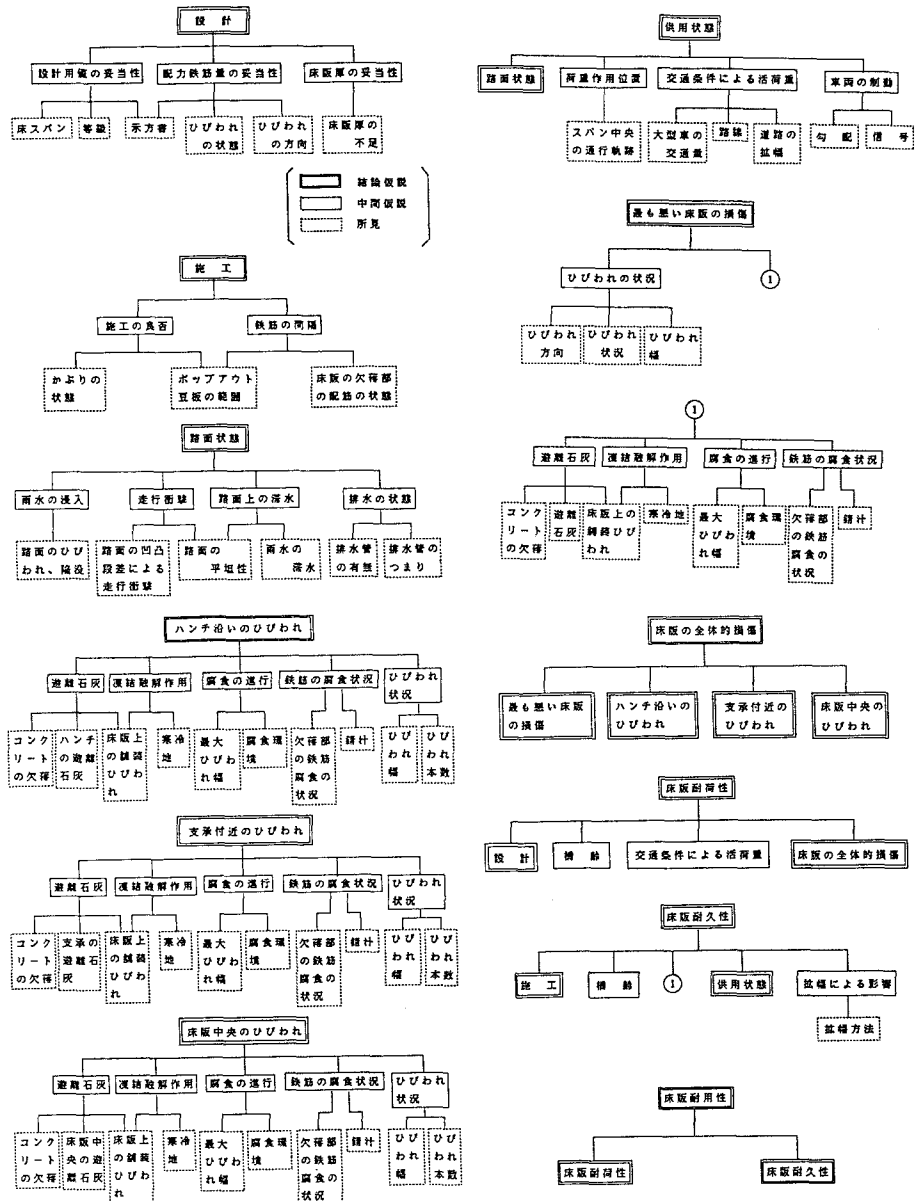


図5 床版の耐用性診断プロセス

われ」等(sub goal)の各ひびわれについて推論する際の要因には以下のような事を考慮していることになる：①遊離石灰による損傷の評価、②凍結融解作用の影響の評価、③架設環境、ひびわれによる腐食進行性の評価、④鉄筋の腐食による損傷の評価、⑤ひびわれの状況による損傷の評価。

3.1.1で述べた結論仮説、中間仮説、所見はそれぞれ、図5に示すように、上位項目(sub goal)(設計、施工等)、中間項目(設計用値の妥当性、配力鉄筋量の妥当性等)、下位項目(主桁形式、桁筋等)に該当する。

3.1.3 専門技術者へのアンケート調査による知識の収集と整理法：橋梁診断エキスパートシステムの構築にあたり、推論機構(診断プロセス)と同様に重要であるものが専門家の有する知識、経験の収集法と知識、経験をベースとした人間の持つ主観的あいまいさの取扱ひ法である。つまり専門家の知識をいかにシステム内の知識ベースに移植するかが実用性のあるエキスパートシステムを構築する鍵となる。

(1)専門知識収集のためのアンケート調査：兵庫県土木部他の協力を得、橋梁診断についての専門家の経験、知識を収集するため実際に橋梁の管理および設計等に当たる技術者を対象としてアンケート調査を行なった。アンケート調査は主催者側の意志を確実に回答者に伝えること、疲れによる無責任な回答を防止することおよびシステム構築者の知識レベルの向上を目的とし、回答者数名づつとの対面調査形式を用いた。アンケートの内容は3.1.2の診断プロセスに従って設定されている。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(ほぼ危険と評価できる要因である)、75点は safe(ほぼ安全と評価できる要因である)、50点は moderate(これといって良くもなく悪くもなく普通(の状態)である)というように規定している。実際の質問は、橋梁の状態を提示しこれについての評価を回答してもらうものである。診断に無関係、無意味な質問および経験不足等により個人的に評価できないものについては別に記入をお願いしている。

なおこのアンケート調査には次のような仮定および定義を設けている：①対象は全てRC橋である、②診断とは定期点検程度の情報から、床版及び主桁に対して行うもので、舗装、下部構造、環境等はこれに影響する要因とする、③診断は材料・構造学的な観点からのみ行い、経済性等は考慮しない、④耐久性は、ひびわれ、コンクリートの中性化、鉄筋の腐食等を原因とするコンクリート構造物の構造的劣化速度と定義する、⑤耐荷性は、橋梁の耐荷力、交通量等を考慮した橋梁の耐荷能力のことと定義する、⑥耐用性は、耐荷性と耐久性両方を考慮した橋梁の全体的性能と定義する。

(2)アンケート調査の整理と結果⁶⁾⁷⁾：アンケート調査結果の整理は、Dempster & Shafer理論⁵⁾における基本確率の上界確率がファジィ集合論⁸⁾における帰属度と対応するものと考え⁴⁾、これによって専門技術者の主観的あいまいさをシステム内で取扱うものとする。すなわち、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、ファジィ集合論における帰属度関数 $\mu(x)$ を求め、各質問項目が示す橋梁の状態を次式で表現するものとする。

$$\begin{aligned}\mu_L(x) &= \exp[-\{(x-x_{ave})/\sigma_L\}^2] & (x \leq x_{ave}) \\ \mu_R(x) &= \exp[-\{(x-x_{ave})/\sigma_R\}^2] & (x \geq x_{ave})\end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 x_{ave} は平均値、 σ_L は平均値より左側のデータに対する標準偏差、 σ_R は平均値より右側のデータによる標準偏差である。

ここで、基本確率の要素を a(25点)、b(37.5点)、c(50点)、d(62.5点)、e(75点)とすると、それぞれの上界確率 $p^*({x})$ は次式のようになる。

$$\begin{aligned}p^*({a}) &= \mu(25), p^*({b}) = \mu(37.5), p^*({c}) = \mu(50), \\ p^*({d}) &= \mu(62.5), p^*({e}) = \mu(75)\end{aligned} \quad (2)$$

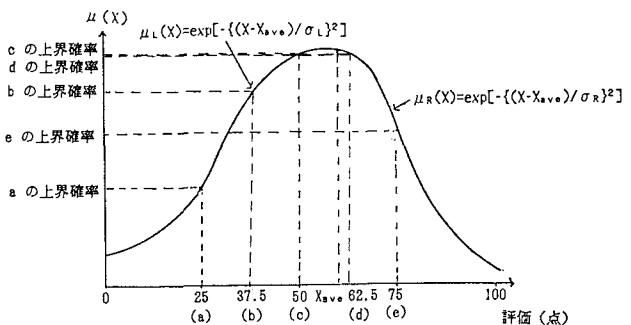


図6 評価結果と上界確率の対応

これらの関係を模式的に表したものが図6である。以上の整理法に基づいたアンケート調査結果の一例を表1に示す。

3.1.4 アンケート調査結果の"COMEX"知識ベースへの移植(診断クライテリアの構築)："COMEX"では、3.1.2で述べたように診断プロセスを中間仮説で、また、診断におけるあいまいさをクワイリアルームで表現している。このため、推論過程にあたる中間仮説、主項目、補助項目の設定およびクワイリアルームで設定される結論が成立するために必要とする項目数の設定を行なわなければならない。本研究では、これらの数値をシステム構築者が適当に設定するので

はなく、客観的・合理的に決定できる手法の提案を行なう。なお、3.1.2で述べたように、結論仮説は図5の上位項目(床版、主桁の耐久性及び耐荷性)に該当するが、それぞれに対しsafe, moderate, dangerの3種類で評価するものとする。また、推論の途中において成立する中間的なゴール(例えば、設計、施工、供用条件等)についても各々safe, moderate, dangerの評価を出力するものとする。

表1に示すアンケート調査結果から得られたすべての橋梁の状態をそれぞれ中間仮説として定義する。本節では、まずそれらが主項目、補助項目のいずれに属するのかを決定する方法を述べ、次に定義された結論仮説が成立するために必要な項目数を設定する。

(1)主項目、補助項目の決定法：診断プロセスにおける最下層の条件("COMEX"では所見)の一つ上位に位置する要因("COMEX"では中間仮説)が、結論仮説の3つの評価(safe, moderate, danger)に対する主項目および補助項目(全部で6つのグループ)のどれに属するかを決定しなければならない。ここでは、中間仮説を、分布形が標準偏差20の正規分布と仮定することによって図7に示すような5つのグループに分類し、アンケート調査結果の平均値と標準偏差をもとに式(1)で表わすことによって、次式で各要素(点a, b, c, d, e)と対応させた帰属度 $m_F(x)$ を得、アンケートの各状態がどのグループに最も近いかを判定して分類を行なうこととする。

$$m_F(a)=\mu(25)/\alpha, m_F(b)=\mu(37.5)/\alpha, m_F(c)=\mu(50)/\alpha, m_F(d)=\mu(62.5)/\alpha, m_F(e)=\mu(75)/\alpha \quad (3)$$

ここに、 $\alpha=\max\{\mu(25), \mu(37.5), \mu(50), \mu(62.5), \mu(75)\}$

分類は、「フジ-リレーションデータベース(FRDB)」における検索の手法である可能性測度⁹⁾、否定測度の概念を適用して実行する。すなわち、可能性測度Poss(・)及び否定測度Nega(・)を、それぞれ次式で定義する。

$$\text{Poss}(X \text{は} A \text{である}) \triangleq p(A) \\ = \sup_{u \in U} m_A(u) p_X(u) \quad (4)$$

$$\text{Nega}(X \text{は} A \text{である}) \triangleq p(\bar{A}) \\ = \sup_{u \in U} (1.0 - m_A(u)) p_X(u) \quad (5)$$

ここで、Aは帰属度関数 m_A で特性付けられるU上のフジ-部分集合、 $\bar{A}$ はAの補集合、 $p_X(u)$ はXの値がAに属する可能性、すなわち Π_X 、 Π_X はUの値をとる変数Xに関連した可能性分布である。

これを、アンケート調査で得られたすべての結果と、図7で示される代表的な分布とに対し可能性測度及び否定測度それぞれの下限値及び上限値を変化させてデータの適合を判定する演算を行い、最適となる分類を見いだす。このようにしてアンケート調査で得られた橋梁のすべての状態を5つのグループに分類し、主項目、補助項目を設定する。

表1 アンケート集計結果の一例

質問
①床版についての評価
q 1: 床版スパン2m以下, 示方書: 大正8年または15年, 1等橋 (現在の設計荷重の約50%)
q 2: 床版スパン2m以上, 示方書: 昭和14年, 1等級 (現在の設計荷重の約80%)
q 3: 路面上にひびわれもしくは陥没箇所がある
q 4: 車両が路面の凹凸段差を高速で通過する時の衝撃を大きく感じる
q 5: 路面上に凹凸段差があり、雨水が滞水する
②主桁について
q 6: 単純桁, 桁スパン15m以上, 示方書: 大正8年または15年, 2または3等級
q 7: ポップアウト・豆板がかなり発生、コンクリートのかぶりが多い
q 8: ポップアウト・豆板が一部で発生、床版欠落部の配筋がかなり密
q 9: 曲げひびわれ多く、最大ひび割れ幅1.0mm程度
q10: せん断ひびわれ多く、最大ひび割れ幅0.5mm程度

質問	平均値	標準偏差	上界確率				
			$p^*(\{a\})$	$p^*(\{b\})$	$p^*(\{c\})$	$p^*(\{d\})$	$p^*(\{e\})$
q 1	48.5	25.1 29.0	0.521	0.869	1.000	0.736	0.331
q 2	66.3	15.1 18.3	0.006	0.088	0.471	1.000	0.756
q 3	47.6	22.6 29.5	0.564	0.800	1.000	0.656	0.233
q 4	51.1	23.1 13.3	0.022	0.355	1.000	0.791	0.348
q 5	64.4	22.2 24.0	0.069	0.287	0.702	1.000	0.804
q 6	47.1	31.5 18.9	0.256	0.777	1.000	0.796	0.463
q 7	43.4	23.4 12.9	0.144	0.879	1.000	0.558	0.177
q 8	39.5	15.1 20.8	0.621	1.000	0.626	0.101	0.004
q 9	27.4	15.8 15.1	1.000	0.689	0.137	0.008	0.000
q10	30.9	28.3 14.2	0.886	1.000	0.672	0.307	0.095

(注) 表の標準偏差の欄は上段: σ_R , 下段: σ_L である。

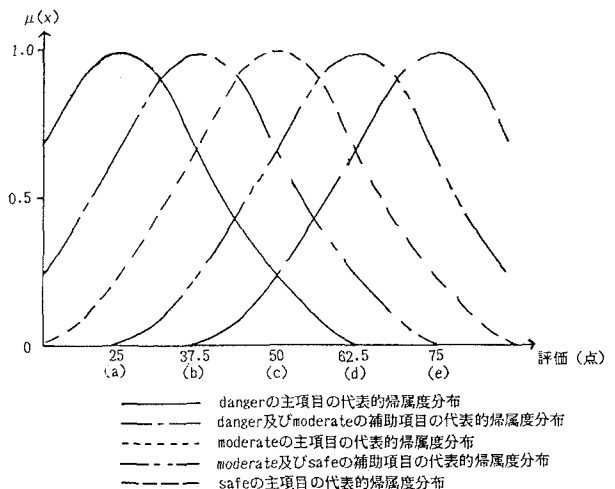


図7 主項目、補助項目の分布の設定

(2)結論成立項目数の設定法：主項目と補助項目の成立個数により、結論仮説の判定の程度は「きっと」「多分」「おそらく」の3段階で設定される。この主項目と補助項目の個数の間の関係を基本確率の演算より明らかにすることを試みる。ここでは、主項目と補助項目及びそれ以外の項目の帰属度を次式を用いて設定する。

$$\text{主項目の帰属度:}1.0/a+0.677/b+0.210/c+0.030/d+0.002/e \tag{6}$$

$$\text{補助項目の帰属度:}0.677/a+1.0/b+0.677/c+0.210/d+0.030/e \tag{7}$$

$$\text{上記以外の項目の帰属度:}0.210/a+0.677/b+1.0/c+1.0/d+1.0/e \tag{8}$$

これを表したものが図8である。これらを基本確率に変換すると次のような関係が得られる⁶⁾⁷⁾。

$$\text{主項目の基本確率:}m(\{a\})=0.323, m(\{ab\})=0.467, m(\{abc\})=0.18, m(\{abcd\})=0.028, m(\{abcde\})=0.002 \tag{9}$$

$$\text{補助項目の基本確率:}m(\{b\})=0.323, m(\{abc\})=0.467, m(\{abcd\})=0.18, m(\{abcde\})=0.030 \tag{10}$$

$$\text{上記以外の項目の基本確率:}m(\{cde\})=0.323, m(\{abcd\})=0.467, m(\{abcde\})=0.21 \tag{11}$$

以上のように得られる基本確率を次式を用いて統合し、

$$m(A_k)=\frac{\sum_{A_{1i}\cap A_{2j}=A_k}m_1(A_{1i})\cdot m_2(A_{2j})}{1-\sum_{A_{1i}\cap A_{2j}=\phi}m_1(A_{1i})\cdot m_2(A_{2j})} \quad (\text{但し、}A_k\neq\phi) \tag{12}$$

統合後の基本確率の評価値を次式によって算出する⁶⁾。

$$M(a_i)=\sum_{a_i\in A_k}\frac{m(A_k)}{N(A_k)} \quad (i=1,2,\cdots n) \tag{13}$$

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。

このような評価値を表した一例を図9及び図10に示す。一例として図9の場合についてみると、主項目の個数=1と補助項目の個数=2との交点の値0.5は、主項目、補助項目、その他

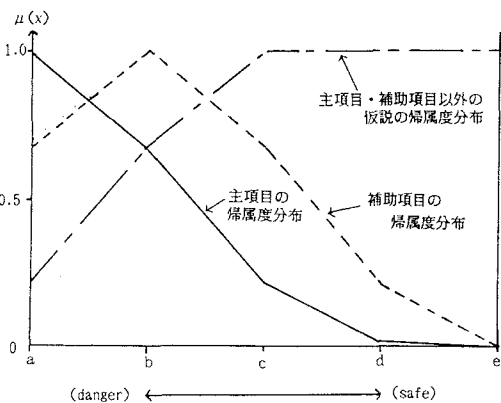


図8 主項目、補助項目、それ以外の項目における帰属度

の基本確率を、それぞれ1,2,1個統合したものの評価値を表している。評価値は、基本確率の結合より得られた結果を最も基本とする要素であるa,c,e(それぞれ,danger, moderate, safeに相当する)に確率値を配分したものであり、bの評価値はa,cに均等に配分されるものとした。図中の数字はaに対する評価値M(a)であり、次式で表わされる。

$$M(a)=m(\{a\})+m(\{b\})/2.0+3.0\cdot m(\{a,b\})/4.0+m(\{b,c\})/4.0+m(\{a,b,c\})/2.0+m(\{b,c,d\})/6.0+3.0\cdot m(\{a,b,c,d\})/8.0+m(\{b,c,d,e\})/8.0+3.0\cdot m(\{a,b,c,d,e\})/10.0 \tag{14}$$

ここで、クワイアラムで規定される「きっと」「多分」「おそらく」に対する主項目、補助項目の個数は、図9及び図10における評価値の下限値を設定することにより決定するものとする。

3.2 橋梁診断への適用と問題点

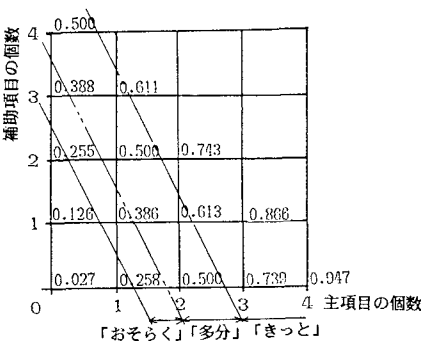


図9 基本確率を用いた主項目、補助項目の演算結果(4要素)

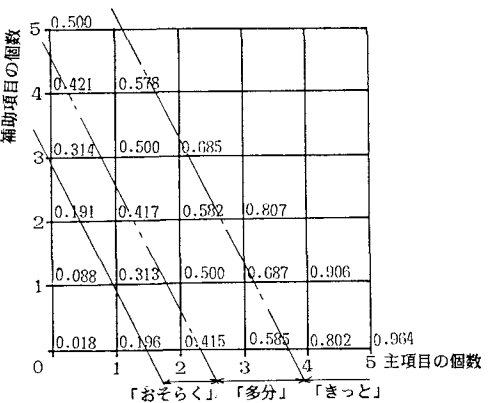


図10 基本確率を用いた主項目、補助項目の演算結果(5要素)

“COMEX”では所見の総数が200個、結論仮説の総数が100個、中間仮説の総数が200個までと言った制限がある。そのため、床版についての診断と主桁についての診断を1つのシステムとして構築しようとする、中間仮説の数が制限を越えてしまうため、両者の診断を別々にして、2つのシステムにせざるを得ない。

クライテリアで定義される「きつと」「多分」「おそらく」に対する主項目、補助項目の個数は、前述のように決定されるが、ここでは「きつと」に属する演算後の評価値は0.7以上、「多分」に属する演算後の評価値は0.45以上0.7未満、「おそらく」に属する評価値は0.3以上0.45未満とした。一例として、図5の診断テストにおける「路面状態」に着目すると、これに対する評価は、「雨水の浸入」「走行衝撃」「路面上の滞水」及び「排水の状態」の4つの項目から推論され、この4つの項目が中間仮説に相当する。所見の値から、この4つの項目が図7の5つのグループのうちどれに属するかが決定される。路面状態がsafeであることに対する推論は、主項目である(e)に属する中間仮説と補助項目である(d)に属する中間仮説の成立個数によって行う。また、クライテリアで定義される「きつと」「多分」「おそらく」に対する主項目、補助項目の個数は図9から上記の評価値の範囲内で設定する。

クライテリアの主項目、補助項目は、一つの項目(図5の設計用値の妥当性、施工の良否等)に対して、a,b,c,d,eの5つの要因を設定しなければならない。その設定には前節で述べたようにアンケート調査結果を用いるのであるが、アンケート調査結果から5つの要因すべてを設定できるとは限らない。なぜならアンケートの質問によっては中間仮説がsafe, moderate, danger どれかに偏って設定されるものがあり、本来なら、例えば主桁の設計といった一つの項目に対して、「主桁の設計がsafeである」「主桁の設計がmoderateである」「主桁の設計がdangerである」という3種類の結論仮説を定義しなければならないが、アンケート集計結果の偏りのために3種類の結論仮説の主項目、補助項目を全て定義できるとは限らないからである。

表2「対田橋」の橋梁諸元

橋 梁 名	対 田 橋
所 在 地	兵庫県美方郡浜坂町
路 線 名	国道178号線
橋 長	49.00m (支間割: 5@9.8)
幅 員	5.50m
架設年度	昭和25年
適用示方書	昭和14年(2等橋)
構造形式	上部: RC-T 単純桁 (3 主桁) 橋台: 重力式 直接基礎 橋脚: 重力式 直接基礎

4. コンクリート橋診断エキスパートシステムの実用性

エキスパートシステムの開発においては、システムの下す評価がどれだけ信頼性を有するかが最大の懸案となり、評価結果の検証が必要となる。本研究では、架替えの決定した既存橋梁に対して実施された専門技術者へのアンケート調査結果及び耐用性評価のための現場試験結果を基に、本システムの実用性を検証するものとする。

4.1 現場実橋試験

4.1.1 対象橋梁の概要：現場試験対象とした「対田橋」の概要を表2及び図11に示す。本橋は、昭和25年に架設された3主桁5径間鉄筋RC単純T桁橋で、橋齢は約40年である。架設後両端カンの片側にそれぞれ増桁が設けられたが、構造的には独立したものであり、構造系の大幅な変更なしに、ほぼ架設当時の状態で供用されてきている。また、周辺道路の整備による新橋の架設に伴い取壊される事が決定した。

このような「対田橋」の目視試験によるひびわれ状況をカン別に記述する。なお、本橋では香住側の1カン目、2カン目及び3カン目を試験対象とし、上流側からカン1主桁A～C、カン2主桁A～C、カン3主桁A～Cとする(図11参照)。

＜カン1＞：このカンの床版には他カンに比べひびわれの発生が多くみられ、ほとんどが二方向ひびわれとなっているのみならず、多くは遊離石灰を伴っている。最大ひびわれ幅は、0.3mm程度であるが、一部に面積は小さいが鉄筋の露出が見られる。このカン

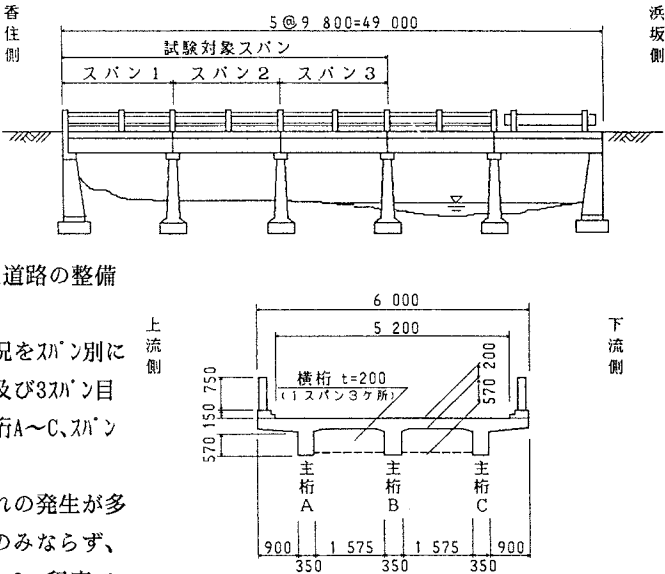


図11「対田橋」の概要

単位：mm

ン路面のコンクリート舗装には大きなひびわれがあり、これが損傷の進行を早めていると考えられる。一方、主桁については、ひびわれは最大0.3mm程度の曲げひびわれが殆どであるが、一部に1.0mm程度のひびわれの存在がみられる。下流側C桁の橋台付近の桁下面にコンクリートの欠落と腐食、付着ひびわれ等が認められる。他の全てのスパンに共通していることであるが、この橋の腐食ひびわれは下流側C桁の支点付近に集中しており、これはC桁が常に海側からの西風を受けていること、また支点付近に損傷が見られるのは、スパンの継目より雨水が浸入することが原因となっていると考えられる。また、これとは別に桁中央付近にも損傷が集中しておりこの部分に劣化の進行が見られる。＜スパン2＞：このスパンでは、半数の床版で二方向ひびわれが見られるものの、スパン1に比べてひびわれ、遊離石灰とも少ない。一方、主桁に発生しているひびわれは、スパン1と同様、ほとんどが曲げひびわれである。これらの桁の内、B桁とC桁の支点付近に腐食ひびわれが見られる。特に、C桁には、中央部にもコンクリートの剝離、鉄筋の露出が見られ、このスパンの中で最も桁の損傷が進行しているものと考えられる。＜スパン3＞：床版のひびわれは3スパンの中で最も少なく、ひびわれ幅もほとんどが0.15mm程度であり、遊離石灰はまったく見られない。しかし主桁については他のスパンとほぼ同様の傾向を示しており、特にC桁の腐食ひびわれが顕著となっている。

4.1.2 現場試験の概要：(1)アンケート調査¹⁰⁾：知識ベース構築のためのアンケートとは別に、橋梁管理、補修に携わっている技術者(20数名)に対して、現地において、橋梁諸元等のデータを参考とする実橋目視調査に基づく実橋の評価に対する回答(アンケート形式)を求めた。回答は、健全度、余寿命、耐荷力等といった各質問項目(補修・補強の要否及び補修材の選択も含め約15項目)に対し、0～100点の評価点を記入するものとした。

(2)静的載荷試験¹¹⁾：既知重量の試験車(積載総重量20tトラック)を、各主桁ごとに最も不利となるように載荷し、各主桁のスパン4等分点でそれぞれたわみを測定した。これらの試験は高欄の有無各場合について実施した。このようにして得られたたわみデータを基にして、System Identification¹²⁾(構造同定：SI)法の適用によって構造パラメータとして断面二次モーメント、ヤング係数などを得、各破壊形式に対応した安全率より静的な面からの損傷度を推定する。

(3)重錘落下振動試験¹¹⁾：橋梁路面上の各位置に重錘(重量300kgf)を高さ約1mから落下させ、単一衝撃を与えた場合の重錘の加速度及び各桁の応答加速度より伝達関数を得、モデル解析¹³⁾を適用してモデルパラメータ(振動数、振動形、振幅、減衰定数、位相)を同定することによって動的な面からの各主桁の剛性低下(損傷度)を推定する。この場合、重錘落下位置は低次の基本振動のみでなく高次の曲げ及びねじり振動が卓越し易いように選定した。

(4)主桁破壊試験¹¹⁾：主桁の耐荷力及び破壊形式を明かにし、耐荷力評価結果を検証するため、RC床版部で縁切りを行って各主桁を独立させ、単純支持のRC-T桁として中央載荷を行い破壊に至らせた。

(5)構成材料試験：橋梁構成材料の強度及びコンクリートの耐久性を判定するために主桁破壊試験終了後、コンクリートコア抜き、鉄筋採取を行い、研究室にて材料試験を実施した。試験内容はコアに関しては圧縮試験及び中性化深さ測定を、鉄筋に関しては引張試験を行った。

4.1.3 評価結果及び考察

(1)アンケート調査結果：健全度と余寿命に関するアンケート集計結果の一例を図12に示す。これらの図では、既述の帰属度関数の表現に類似させるため、健全度、余寿命ともに最も回答者の多かったカテゴリを1.0として、他をそれに対する比率で表している。図12より、健全度のピークは全て40～60点

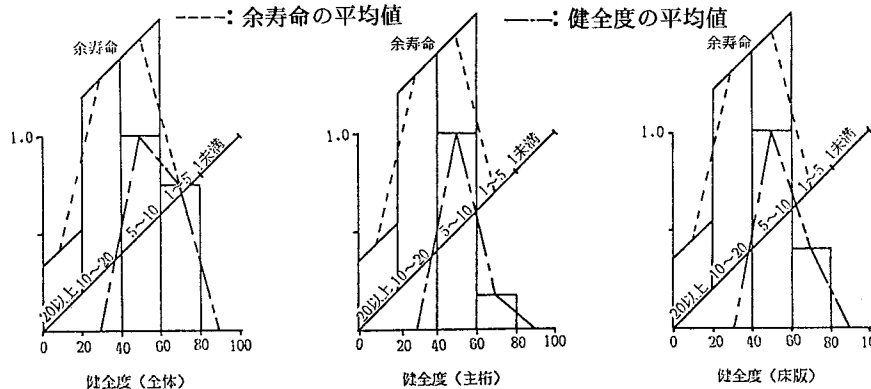


図12 「対田橋」に対する健全度と余寿命に関するアンケート集計結果の一例

にあり、ばらつきも少ないが、余寿命分布は5～20年に広がっていることがわかる。次に各スパン別のアンケート集計結果の一例を表3(a)～(c)に示す。これより、各スパンで評価はあまり変わらないが主桁についてはスパン3の評価がその

表3「対田橋」に関するアンケート集計結果の一例 (b)スパン2

(a)スパン1

番号	床版			主桁			全体		
	耐久性	耐荷性	耐用性	耐久性	耐荷性	耐用性	耐久性	耐荷性	耐用性
1	75 (0.8)	75 (0.8)	75 (0.8)	50 (0.8)	50 (0.8)	50 (0.8)	75 (0.8)	75 (0.8)	75 (0.8)
2	75 (1.0)	75 (1.0)	70 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	60 (1.0)	60 (1.0)	50 (1.0)
3	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)
4	70 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)	70 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)	70 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)
5	75 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	75 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	75 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)
6	75 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)	50 (0.5)	50 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)	50 (0.5)	55 (0.5)
7	80 (0.7)	80 (0.7)	80 (0.7)	80 (0.7)	80 (0.7)	80 (0.7)	80 (0.7)	80 (0.7)	80 (0.7)

番号	床版			主桁			全体		
	耐久性	耐荷性	耐用性	耐久性	耐荷性	耐用性	耐久性	耐荷性	耐用性
1	75 (0.8)	75 (0.8)	75 (0.8)	50 (0.8)	50 (0.8)	50 (0.8)	75 (0.8)	75 (0.8)	75 (0.8)
2	75 (1.0)	75 (1.0)	70 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	60 (1.0)	60 (1.0)	50 (1.0)
3	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)
4	70 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)	70 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)	70 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)
5	75 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)
6	75 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)	50 (0.5)	40 (0.5)	45 (0.5)	60 (0.5)	50 (0.5)	50 (0.5)
7	80 (0.7)	80 (0.7)	80 (0.7)	75 (0.7)	75 (0.7)	75 (0.7)	75 (0.7)	75 (0.7)	75 (0.7)

(c)スパン3

番号	床版			主桁			全体		
	耐久性	耐荷性	耐用性	耐久性	耐荷性	耐用性	耐久性	耐荷性	耐用性
1	75 (0.8)	75 (0.8)	75 (0.8)	50 (0.8)	50 (0.8)	50 (0.8)	75 (0.7)	75 (0.7)	75 (0.7)
2	75 (1.0)	75 (1.0)	75 (1.0)	40 (1.0)	40 (1.0)	40 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)
3	50 (1.0)	50 (1.0)	50 (1.0)	25 (1.0)	25 (1.0)	25 (1.0)	25 (1.0)	25 (1.0)	25 (1.0)
4	70 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)	70 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)	70 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)
5	75 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)	50 (0.7)
6	75 (0.5)	50 (0.5)	60 (0.5)	50 (0.5)	40 (0.5)	45 (0.5)	60 (0.5)	50 (0.5)	50 (0.5)
7	80 (0.7)	80 (0.7)	80 (0.7)	77 (0.7)	77 (0.7)	77 (0.7)	77 (0.7)	77 (0.7)	77 (0.7)

他よりも悪い方に分布が広がっており、3つのスパンの中では比較的損傷を受けていると言える。これらの結果はほぼ目視調査結果と一致している。また、回答者各人が診断の際に重視した要因についての集計結果の一例を表4に示す。この表から、評価の際、技術者により重視する項目が異なることがわかる。すなわち、床版の場合、ひびわれに比べ、設計、供用条件等の占める割合が多い。一方、主桁では、鉄筋腐食によるひびわれがC桁に多く見られたため、腐食ひびわれを評価において重視する項目とする割合が多くなっている。

(2)載荷試験結果：主桁の実測たわみに基づくSI法の適用によって推定されたコンクリートのヤング係数E_c及び各桁の断面2次元モデルをもとに、L-20荷重に対する曲げ破壊安全率 γ_m 及びせん断破壊安全率 γ_s を算出した¹⁴⁾。その結果をまとめて表5(a)、(b)に示す。各破壊安全率から見ると、曲げ破壊よりせん断破壊に対する安全率の方が高い傾向にあり、また、主桁Aに比べ主桁Cの安全率がやや低く、既述した試験開始前のひびわれ発生状況と一致した結果が得られた。安全率を指標とした耐荷性の面からみた安全性評価を行うと、スパン2,3においてその差はほとんどなく、比較的健全であると評価できる。なお、高欄の除去に伴う安全率の変化は小さく、高欄死荷重の減少が影響しているに過ぎないと考えられる。一方、重錘落下振動試験より得られる加速度応答にモデル解析を適用し、モデルパラメータとして振動特性を推定した結果の一例として、重錘落下位置の振幅を1.0とした場合の各桁の1-1次の振動形を比較したものを図13に示す。これより、スパン2,3において、全ての桁がほぼ左右対称で滑らかな振動形を示しており、特に

表4「対田橋」の診断において重視された項目の集計結果の一例

		スパン1			スパン2			スパン3		
		1位	2位	3位	1位	2位	3位	1位	2位	3位
1	床版	中央	支承	ハンチ	中央	支承	ハンチ	中央	支承	ハンチ
	主桁	付着	腐食	曲げ	付着	腐食	曲げ	付着	腐食	曲げ
2	床版	最悪版	路面	供用	最悪版	路面	供用	最悪版	路面	供用
	主桁	せん断	曲げ	供用	せん断	曲げ	供用	せん断	曲げ	供用
3	床版	中央	ハンチ	設計	中央	ハンチ	設計	中央	ハンチ	設計
	主桁	曲げ	せん断	施工	曲げ	せん断	施工	腐食	せん断	曲げ
4	床版	供用	路面	設計	供用	路面	設計	供用	路面	設計
	主桁	腐食	せん断	供用	せん断	腐食	供用	腐食	せん断	供用
5	床版	設計	供用	路面	設計	供用	路面	設計	供用	路面
	主桁	腐食	曲げ	設計	腐食	曲げ	設計	腐食	曲げ	設計
6	床版	設計	供用	支承	設計	供用	支承	設計	供用	支承
	主桁	設計	供用	曲げ	設計	供用	曲げ	設計	供用	曲げ
7	床版	最悪版	ハンチ	支承	最悪版	ハンチ	支承	最悪版	ハンチ	支承
	主桁	施工	曲げ	腐食	施工	曲げ	腐食	施工	曲げ	腐食

表中の文字は、評価に当たり重点を置いた項目を示し、記号は以下のものを表す。

①床版について

設計：床版厚、示方書等、設計精度に関するもの
 施工：ポップアウト・豆板等、施工不良に関するもの
 路面：橋梁の材料的劣化を引き起こす要因となる。路面の凹凸による漏水、路面のひびわれ等に関して
 供用：路線、大型車の交通量、車輪の軌道、制動による影響等に関して
 最悪版：最も悪い床版のひびわれ状況、鉄筋の腐食、コンクリートの劣化等に関して
 ハンチ：ハンチのひびわれのひびわれ状況、鉄筋の腐食、コンクリートの劣化等に関して
 付着：支承付近のひびわれのひびわれ状況、鉄筋の腐食、コンクリートの劣化等に関して
 せん断：床版中央のひびわれのひびわれ状況、鉄筋の腐食、コンクリートの劣化等に関して

②主桁に関して

設計：断面、構造形式、示方書等、設計量に関するもの
 施工：ポップアウト・豆板等、施工不良に関するもの
 供用：路線、大型車の交通量、振動感覚による影響等に関して
 曲げ：曲げひびわれのひびわれ状況、鉄筋の腐食、コンクリートの劣化等に関して
 せん断：せん断ひびわれのひびわれ状況、鉄筋の腐食、コンクリートの劣化等に関して
 腐食：鉄筋の腐食ひびわれのひびわれ状況、鉄筋の腐食、コンクリートの劣化等に関して
 付着：付着ひびわれのひびわれ状況、鉄筋の腐食、コンクリートの劣化等に関して

(b)せん断破壊安全率

		主桁	S_u (tf)		S_d (tf)		S_1 (tf)		γ_s	
			L/4	3L/4	L/4	3L/4	L/4	3L/4	L/4	3L/4
ス	高欄有	A	21.1	21.2	4.25	4.25	3.29	3.74	4.99	4.42
		B	21.1	21.2	3.17	3.17	1.97	2.71	8.94	6.53
		C	21.1	21.2	5.33	5.33	3.81	4.60	4.00	3.33
ン	高欄無	A	21.2	21.2	4.28	4.28	3.30	3.75	5.00	4.40
		B	21.1	21.2	3.10	3.10	1.95	2.69	9.12	6.57
		C	21.1	21.2	5.38	5.38	3.84	4.64	3.95	3.29
ス	高欄有	A	21.1	21.2	5.40	5.40	3.65	4.46	4.15	3.42
		B	21.1	21.2	3.37	3.37	1.62	2.40	10.7	7.29
		C	21.1	21.2	5.74	5.74	3.82	4.66	3.87	3.19
ン	高欄無	A	21.1	21.2	5.38	5.38	3.63	4.44	4.18	3.44
		B	21.1	21.2	3.31	3.31	1.68	2.36	10.4	7.44
		C	21.1	21.2	5.82	5.82	3.86	4.70	3.81	3.15
ス	高欄有	A	21.1	21.2	5.30	5.30	3.58	4.41	4.47	3.49
		B	21.1	21.2	3.71	3.71	1.75	2.55	9.72	6.71
		C	21.1	21.2	5.62	5.62	3.75	4.61	3.98	3.26
ン	高欄無	A	21.1	21.2	5.28	5.28	3.57	4.40	4.28	3.50
		B	21.1	21.2	3.69	3.69	1.72	2.52	9.91	6.80
		C	21.1	21.2	5.65	5.65	3.76	4.62	3.96	3.24

表5 SI法による推定結果に基づく破壊安全率の一覧

(a)曲げ破壊安全率

		主桁	M_u (tfm)	M_d (tfm)	M_1 (tfm)	γ_M
ス	高欄有	A	74.4	20.1	17.5	3.01
		B	75.3	10.9	9.68	6.54
		C	75.3	24.9	21.3	2.25
ン	高欄無	A	74.4	20.2	17.5	2.88
		B	75.3	10.5	9.60	6.64
		C	75.3	25.1	21.5	2.22
ス	高欄有	A	75.3	25.5	20.8	2.27
		B	75.3	12.0	8.40	7.39
		C	75.3	27.2	21.8	2.08
ン	高欄無	A	75.3	25.4	20.7	2.29
		B	75.3	11.7	8.20	7.61
		C	75.3	27.6	22.0	2.04
ス	高欄有	A	75.3	25.1	20.8	2.29
		B	75.3	13.7	9.19	6.55
		C	75.3	26.8	21.7	2.11
ン	高欄無	A	75.3	25.1	20.7	2.30
		B	75.3	13.6	9.06	6.66
		C	75.3	27.0	21.8	2.09

注) M_u ; 破壊曲げモーメント M_d ; 死荷重による曲げモーメント M_1 ; L-20による曲げモーメント γ_M ; 曲げ破壊安全率 γ_M' ; 有効幅を考慮した曲げ破壊安全率

注) S_u ; 破壊せん断力 S_d ; 死荷重によるせん断力 S_1 ; L-20によるせん断力 γ_s ; せん断破壊安全率 γ_s' ; 有効幅を考慮したせん断破壊安全率

卓越した損傷は見あたらぬ。ただし、主桁Aの振幅が主桁Cよりやや大きくなっているが、これは、主桁Aの剛性低下、あるいは主桁Aと主桁Bの間の床版や横桁の剛性低下が原因であると考えられる。

以上の評価結果を検証するために、主桁耐荷力評価試験及び主桁構成材料試験を実施した。その結果、表6は、主桁の荷重～たわみ曲線の直線部分から算出した曲げ剛性EIと、静的載荷試験に基づくSI法によって推定された曲げ剛性EIを比較して示したものである。ここで、スパン2に対するものはコンクリート舗装を除去した結果を示している。

表6の試験結果を各スパンで比較してみると、スパン1は、他のスパンに比較して剛性低下が著しいと評価できる。また、

表7は、スパン中央たわみがL/500に達した時点と破壊とみなした場合の各主桁の曲げ破壊に対する安全率を求めたものであり、表5(a)と比較すると安全率を過大に評価する結果となっていることがわかる。一方、耐久性の指標となるコンクリート圧縮強度、及び鉄筋引張試験結果を表8に示す。圧縮強度、及びヤング係数はそれぞれ平均156kgf/cm²、

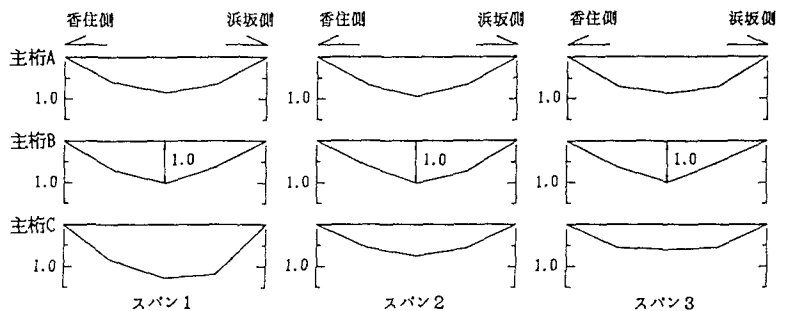


図13「対田橋」各主桁の1-1次振動モード(振幅)の比較

1.14×10⁵ kgf/cm²(設計時の推定値は、それぞれ210kgf/cm²、2.3×10⁵ kgf/cm²)と非常に小さい値となり、耐久性の低下が見られる。また、中性化深さは、平均3.65cmとなり、これは主鉄筋のかぶり厚(5cm)より小さい値であるが、スパン別にみると、スパン1の中性化深さが比較的大きく、かぶり厚を越えているものがある。また、主鉄筋及びスタップについては、表面に

	CASE1 EI	CASE2 EI	CASE3 EI	CASE4 EI
スパン1	5.33	2.73	6.50	6.11
スパン2	5.22	3.33	5.00	4.88
スパン3	8.64	4.21	5.81	5.74

(×10¹¹ kgcm²)

注) CASE1: 初期直線部分から算出
CASE2: δ=L/500を過ぎた次の載荷の直線部分から算出
CASE3: SI法による高欄有の場合の推定結果より算出
CASE4: SI法による高欄無の場合の推定結果より算出

表7 各主桁の曲げ破壊荷重及び曲げ破壊安全率

	$\delta = L/500$ 時 (1/f)	破壊安全率
スパン1	22.3	2.93
スパン2	27.3	2.87
スパン3	37.3	2.85

かなりの錆が広がっているものの、SR24の材質を満足するものであり、材料としての強度劣化は見られなかった。

以上のような載荷試験の結果を要約すると以下ようになる：①スパン1は、他のスパンに比較して健全度が低下していると評価できる。また、スパン2及びスパン3の健全度には優劣の差はほとんどみられず、耐荷性の面から見て、両スパンとも比較的健全であると考えられる。②全体的にみて下流側の主桁Cの方が上流側の主桁Aより、やや損傷程度が大きい傾向がみられる。

③全体的に見て、ある程度損傷が進行しているものの、部分的に卓越した損傷は見られない。

④材料試験結果より、コンクリートの劣化が著しく耐久性の面からは健全度がかなり低下した状態にあると評価できる。

4.2 コンクリート橋診断エキスパートシステムの有効性の検証

4.2.1 エキスパートシステムによる診断結果：本システム起動後からの質問に応じて、表9に一例を示すようなデータを順次入力して得られた「対田橋」に対する診断結果を各スパンごとに示したものが表10(a)～(c)である。

これより、表10(a)に示すスパン1の床版についてみると、「床版耐用性」は「多分moderateである」「おそらくsafeである」「おそらくdangerである」と診断され、moderateを中心に広く分布した結果となっている。つまり「床版耐用性がmoderateである」ことの可能性が最も大きい、それと同時にあいまいさも大きくなり「safeである」「dangerである」となる可能性も含んでいると理解できる。

表9 入力データの一例

橋梁名	対田橋	架設箇所	港湾・海岸地区
橋幅	4.9m	拡幅	寒冷地区
主桁本数	5.2m		スパン1 された
主桁スパン	3本		スパン2 されていない
床版スパン	9.8m	勾配	スパン3 されていない
床版厚	1.575m	配号	小さい
	スパン1 14.6cm	路面	ない
	スパン2 16.7cm	面上	スパン1 あり
	スパン3 15.5cm	ひびわれ	スパン2 ない
		、陥没	スパン3 ない
橋形式	単純橋	路面の平坦性	殆ど平坦
断面寸法	T型	交通量	多い
断面形状	大きい	大振型	少ない
等沈下	単純支持	高橋	小さい
等沈下	なし	排水	断面小さい
等沈下	昭和14年	豆板・ポップアウト	ない
等沈下	2等級		一部で発生

散っており、最終的にあいまいさの多い評価となったものと考えられる。一方、スパン1の主桁についてみると、曲げひびわれの評価で「きっとdangerである」と確信度のかなり高い評価となっている。これは曲げひびわれ幅の最大値に1.0mmを入力したことがかなり影響したものと考えられる。次に、スパン2(表10(b))についてみると、床版にはひびわれ、遊離石灰とも少なくdangerの要因はほとんど現われていないため、すべてがかなり確信を持ってsafeおよびmoderateと評価されており、最終的な耐用性についてもsafeとmoderateに支持が分布した結果となっている。一方、主桁に対しては、「主桁耐荷性」と「主桁耐久性」がともに「おそらくmoderateである」と診断されているため、最終的な耐用性評価はmoderateとなっている。ここで、曲げひびわれ、腐食ひびわれが「おそらくdangerである」と評価されているのは、曲げひびわれ部に欠落があること、また、腐食ひびわれでは、ひびわれ幅の最大値が1.0mmであることが原因と考える。さらに、スパン3(表10(c))についてみると、床版ではスパン2と同様、ひびわれ、遊離石灰が少ないためdangerの支持はなく、safeとmoderateに支持が分布した評価となっている。主桁については、曲げひびわれと腐食ひびわれにおいて確信度がかなり高くdangerと評価されている。これは、両ひびわれともひびわれ幅の最大値が1.0mm以上で、欠落あり、鉄筋がかなり錆びていると入力したことが原因と考える。

(b)補強鉄筋

	スパン	直径 (cm)	降伏点強度 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)
主	1	25.03	30.82	43.28
	2	24.70	33.39	33.40
	3	24.63	34.02	50.84
鉄	平均		32.74	47.90
	標準偏差		2.139	6.021
ス	1	8.57	31.30	45.41
	2	8.85	31.06	45.98
	3	8.80	29.88	44.94
タ	平均		30.75	45.44
	標準偏差		1.697	3.184

以上3パンの診断結果を相互に比較すると、床版ではスパン2、スパン3の健全度が高いことが明らかとなる。一方、主桁では、最終的な結果である耐用性はすべて「おそらく moderateである」と評価されているが、結論に達するまでの過程に違いが生じている。すなわち、スパン1では、他のパンよりもひびわれの状態が悪く、耐荷性、耐久性とも悪く評価されているが、moderateに関する要因が多く、最終的にはmoderateとなっている。これに対し、スパン3では、曲げひびわれ等細部のひびわれでかなり確信度を持ってdangerとなっているが設計、施工が影響してmoderateとなっている。このように3パン間で評価に大きな違いはないものの、強いて順位をつけるならスパン1が最も悪く、スパン2が最も良いと評価できる。

なお、「COMEX」では診断が終わると、こういった流れで診断が行なわれたかを表示することができる。

4.2.2 現場実橋試験結果との比較：以上のような本システムによる診断結果をアンケート調査結果(図12、表3、4)及び載荷試験結果(表5～8、図13)と比較してみる。アンケート調査では、健全度の平均は全て40～60点であり、中程度と評価されている。これに対応するシステムによる診断結果は、床版については、スパン1～3の全てにおいてsafeとmoderateの中間にあり、アンケート調査結果とほぼ同様の結果と行うことができる。また、主桁に関しては、moderateの評価が卓越しており、良い対応を示していると言える。一方、パン別に見ると、床版では、アンケートおよび目視でもスパン1が若干悪いと評価でき、システムの出力とほぼ一致する。また、主桁については、アンケート調査結果によると、スパン3の主桁は3パン中で比較的損傷を受けているという評価となっているが、システムによる評価でも、「主桁の全体的損傷」について見ると、スパン3は他の2パンより評価が劣っており、ほぼ妥当と言える。次に、載荷試験結果より明らかとなっている床版及び主桁の耐久性は、その指標であるコンクリートの劣化の進行に支配され、全体的にスパン1のコンクリートの圧縮強度低下及び中性化深さが他パンのものと比べて大きくなっているが、システムによる診断結果もほぼこれらと対応したものとなっている。また、主桁耐荷性は、主桁剛性及び破壊荷重で全体的にスパン1が他のパンに比べて低下しているとの評価結果となっており、システムによる診断結果とほぼ一致していることがわかる。なお、以上の検証結果からも明かなように、本システムによる診断は、診断プロセス内のsub goalごとの評価結果の出力が可能である反面、診断結果はあくまで定性的な評価にとどまっている。

表10「対田橋」に関する推論結果の一例

(a) スパン1

	判定項目	safe	moderate	danger
床版	施設 路面 供用状態	多分 多分 多分	多分 多分 おそらく	
	最も悪い床版の損傷 ハンチ沿いのひびわれ 支承付近のひびわれ 床版中央のひびわれ		おそらく 多分 おそらく おそらく	多分 多分 多分 多分
	床版の全体的損傷 床版耐荷性 床版耐久性	多分	おそらく 多分 多分	きつと おそらく おそらく
	床版耐用性	おそらく	多分	おそらく
主桁	施設 供用状態	多分 多分 多分	きつと	
	曲げひびわれ 鉄筋の腐食ひびわれ 付着ひびわれ		おそらく おそらく おそらく	きつと 多分 おそらく
	主桁の全体的損傷 主桁耐荷性 主桁耐久性		おそらく 多分 多分	多分 おそらく おそらく
	主桁耐用性		おそらく	

(b) スパン2

	判定項目	safe	moderate	danger
床版	施設 路面 供用状態	多分 多分 おそらく	多分 多分 おそらく	
	最も悪い床版の損傷 支承付近のひびわれ 床版中央のひびわれ	おそらく おそらく おそらく	おそらく おそらく おそらく	
	床版耐荷性 床版耐久性	多分 多分	多分 多分	
	床版耐用性	多分	多分	
主桁	施設 供用状態	多分 多分 多分	きつと	
	曲げひびわれ 鉄筋の腐食ひびわれ		おそらく	おそらく おそらく
	主桁の全体的損傷 主桁耐荷性 主桁耐久性		おそらく おそらく	おそらく
	主桁耐用性		おそらく	

(c) スパン3

	判定項目	safe	moderate	danger
床版	施設 路面 供用状態	多分 多分 おそらく	おそらく 多分 おそらく	
	最も悪い床版の損傷 床版中央のひびわれ	多分	多分	
	床版耐荷性 床版耐久性	多分 多分	多分 多分	
	床版耐用性	多分	多分	
主桁	施設 供用状態	多分 多分 多分	きつと	
	曲げひびわれ 鉄筋の腐食ひびわれ			きつと 多分
	主桁の全体的損傷 主桁耐荷性 主桁耐久性		おそらく おそらく	多分
	主桁耐用性		おそらく	

4.2.3 実用化における問題点：“COMEX”を利用したエキスパートシステムでは、3.1.4で述べた診断クリテリアの構築法からも明らかなように要因が少なくなる(上位ゴールになる)に従い、成立する中間仮説の個数設定に誤差が生じ易くなるため、safe, moderate, dangerに分散するデータが打ち消し合うことはなく、上位ゴールに進むほどあいまいさが大きくなる結果、確定的な評価を行うことが困難となる。また、現段階での“COMEX”によるシステムでは、これ以上細分化した評価は行えない。なお、“COMEX”によるシステムでは、結論仮説にたどり着くまでに診断プロセス内のsub goalの成立過程でかなりの近似が行なわれており、ここに推論の誤りが入り込み易く注意を要する。

5. 結 論

本研究は、管理技術者の主観的な判断に委ねられる場合が多い橋梁の耐用性診断を合理的に行うため、エキスパートシステム構築ツールを用いて「橋梁診断エキスパートシステム」の開発を試みたものである。

本研究を通じて明らかになった結果及び今後の課題をまとめると以下のようになる。

- (1) エキスパートシステム構築においては、知識ベースの構築、すなわち、いかにして専門家の知識、経験を獲得して、システム内の知識ベースに移植するかが重要となる。本研究では、専門家の知識、経験の獲得をアンケート調査により行い、その結果を Dempster & Shafer理論における上界確率及び基本確率を用いて整理し、知識ベースへ移植する方法の提案を行った。この方法により、専門家の知識、経験を知識ベースへ移植することが合理的に行えるのみならず、知識の主観的なあいまいさの取扱いも可能となった。
- (2) 上記手法を適用すると、専門技術者の知識、経験を知識ベースとして移植する際のクリテリアフレーム構築における主項目、補助項目決定及び評価(結論)が成立するための主項目、補助項目の個数決定を客観的に行うことが可能となる。
- (3) 最終ゴールである「耐用性」に関する評価(結論)を導く過程におけるsub goalごとの評価(結論)の成立過程にかなりの近似が行われており、ここに推論の誤りが入り込む可能性がある。
- (4) 本研究で構築したエキスパートシステムの実用性を検証するため、「対田橋」に対する現場実橋試験として実施した健全度評価に関するアンケート調査結果及び載荷試験結果と、システムによる診断結果との比較、検討を行った。その結果、細部にわたる評価結果には問題が残るものの、各カテゴリー間の相対的ランクの出力あるいは各カテゴリー間の損傷程度の差異などの評価が可能であることが明らかとなった。これらの出力結果は、実橋に対する目視調査及び評価結果の検証試験結果を通じて得られた各床版及び各桁の健全度あるいは安全性といった指標とほぼ対応することが明らかとなった。
- (5) 本研究では、システムの実用性の検証を「対田橋」のみを対象として行ったが、今後、さらに他の橋梁に対してもデータを収集し、システムによる診断結果と比較、検討を行っていく必要がある。

最後に、本研究は昭和62年度科学研究費補助金(課題番号62850087)によるものの一部であることを付記し、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1)西村昭、宮本文穂：構造物の損傷度診断の現状、コンクリート構造物の維持管理研究討論会資料、土木学会、1987.9、
- 2)COMEX HAND BOOK、富士フロンテック(株)、1986.1、
- 3)例えば、R. Johnston, et al.: Bridge Rating and Analysis of Structural System(BRASS), Federal Highway Administration Offices of Research and Development, 1973、
- 4)例えば、西村昭ほか：橋梁診断のシステム化に関する基礎的研究、土木学会論文集、第378号、1987.2、
- 5)石塚 満：Dempster & Shafer の確率理論、電子通信学会誌、Vol.66、No.9、1983.9、
- 6)宮本文穂ほか：コンクリート橋の耐用性診断と現場試験による検証、コンクリート工学年次論文報告集、9-1、1987、
- 7)宮本文穂ほか：コンクリート橋診断システム構築におけるアンケート調査の利用、コンクリート工学年次論文報告集、10、1988、
- 8)浅居喜代治ほか：あいまいシステム理論入門、オーム社、1978、
- 9)M. ツェマンコフ リーチ、A. カンデル：ファジィ・リレーショナル・データベース、啓学出版、1987、
- 10)浜野勝茂ほか：コンクリート橋診断におけるアンケート調査の有効性、第17回日本道路会議論文集、1987.10、
- 11)宮本文穂ほか：コンクリート橋の安全性評価とその検証法の開発、コンクリート工学年次論文報告集、10、1988、
- 12)西村昭ほか：橋梁診断ケーススタディーRC桁橋の場合一、橋梁と基礎、Vol.19、No.4、1985.4、
- 13)Ewins, D. J.: Modal Testing—Theory and Practice—, Research Studies Press, 1984、
- 14)土木研究所資料1228号：コンクリート橋の耐荷力に関する研究調査、1977.11 (1989年10月2日受付)