

階層構造モデルを利用した構造物の健全度診断システム

ニチゾウテック 正会員 白倉 篤志
山口大学工学部 正会員 中村 秀明
山口大学大学院 前田 剛志
ニチゾウテック 正会員 岡本 晋作

1. はじめに

現在我が国は、戦後半世紀、特に1960年代からの高度成長期に建設・整備された膨大な数の社会基盤構造物を抱えており、その大部分は建設後30～40年を経過している。我が国は、地質条件が複雑かつ地震国で、各種構造物にとっては極めて厳しい自然条件の地域が多いこと、また、環境条件の複雑さ、社会条件の変化などにより、一部の構造物では完成後の早期において劣化、変状が見られるようになっている。このため、定期点検などからできるだけ早い異状の発見、原因追求、そして適切な補修・補強等を行う維持管理が大変重要になっている。しかし、多くの構造物は、その多種多様な損傷及び損傷要因、損傷要因相互の複雑な関連性などのために、維持管理を実施する上で非常に困難な問題を含むことが多い。これは、これらの構造物が、多種多様な形状や、同一条件にある同種の構造物が少ないといった単産品であることが多いため、確率統計的に各種データを取り扱うことが困難であるといったことが原因として挙げられる。このため、これら構造物の維持管理には、豊富な技術的経験及び知識を持つ専門技術者による診断が必要不可欠となっている。しかし、近年においては、このような診断を行える専門技術者の数が、維持管理を必要としている構造物の数に対してかなり不足しており、今後益々増加するであろう維持管理業務に対して、人材不足となるのは必至である。

そこでここでは、専門的な知識をあまり必要とせず専門技術者と同等の診断が行える、主にコンクリート構造物を対象とした「構造物維持管理支援システム」の一例を紹介する。このシステムは、専門技術者の持つ過去の経験や知識をベースとしており、コンクリート構造物に見られる損傷要因間の関連性を階層化した「あいまい階層構造モデル（以下、階層構造モデルと略記する）」を用いて、対象構造物の点検結果を入力することにより損傷の推定を行うと同時に、最終的な診断にファジィ集合論を適用した耐用性診断を行うシステムである。また、このシステムは維持管理支援を目的としていることから、維持管理の基本的な流れである、「劣化予測」→「点検」→「評価・判定」→「対策」→「記録」に従うように、構造物の諸元や点検結果等の各種データの保存や、診断結果から対策が必要な損傷要因について詳細な損傷度の把握方法及び対策工についての情報の提示といった機能も備え、維持管理の一連の流れを実現している。

2. 診断プロセス

コンクリート構造物に発生する損傷は多くの要因の複合作用によって生じており、損傷発生によるこれら構造物への影響は非常に複雑な関連性を有している。ここでは、コンクリート構造物診断のシステム化を行うため、専門家の経験的知識をベースとした損傷要因間の関連性をアンケート調査を利用して抽出し、アンケート調査結果からグラフ理論的な階層構造モデルを作成する手法について説明する。

(1)階層構造モデル

キーワード：階層構造モデル、維持管理、診断、支援システム、ファジィ集合論

連絡先：〒551-0023 大阪市大正区鶴町 2-15-26 (株)ニチゾウテック 技術コンサルティング本部

TEL:06-6555-7055 FAX: 06-6555-7062 E-mail:shirakura@nichizotech.co.jp

一般にコンクリート構造物に発生する損傷は、単一の原因だけではなく、荷重の増加、過酷な環境条件、設計・施工の不備など、いろいろな要因が複雑に絡み合い、発生していると言われている。

これらの損傷と原因、また損傷発生による構造物諸機能への影響などに見られる関連性を一つのシステムとして捉え、各損傷要因をシステム工学的に階層化したものが、階層構造モデルである。この階層構造モデルは、損傷要因間の相関関係に専門技術者の豊富な知識や経験を反映させることによって、損傷がどのような原因で発生し、その後どのようにして耐荷性、耐久性や供用性などに影響を与えるかを、一連の流れとして把握することが可能となる。

コンクリート構造物の損傷要因間の関連性を整理し階層構造モデルを構築する手法として、システムを構成する要素を点で表し、各要素の関係を線で示すグラフ理論的な構造化モデルの利用がある。階層構造モデルを構築する手法としては、ISM(Interpretive Structural Modeling)法¹⁾やFSM(Fuzzy Structural Modeling)法²⁾がある。

(a) ISM(Interpretive Structural Modeling)法¹⁾

ISM法は、対象システムに関連する要素群を、要素間の関係に基づいて有向グラフの形に階層化する構造モデル化手法である。

いま、集合 S に属する要因 S_i, S_j において S_i が S_j に従属しているならば、2値行列 M の要素 $a(i, j)$ に1を与え、 S_i が S_j に従属していなければ $a(i, j)$ に0を与える。有向グラフにおいて $a(i, j)=1$ の時、頂点 S_i から S_j に向かって連結線を引き、 $a(i, j)=0$ の時、頂点 S_i から S_j へは連結線を引かない。すなわち集合 S 上の n 個の各要因相互の関連性を $a(i, j)$ を要素とする $n \times n$ の行列 M で表し有向グラフ作成に利用する。

(b) FSM(Fuzzy Structural Modeling)法²⁾

ISM法においては要素 $a(i, j)$ が0か1であったのに対し、FSM法では要素間に「あいまい二項関係」を導入し、要素 $a(i, j)$ を二項間の帰属度 $f_r(S_i, S_j)$ と対応させて次のように与える。 $a(i, j) = f_r(S_i, S_j)$, $0 \leq a(i, j) \leq 1$, ここで、 $f_r(S_i, S_j)$ は S_i が S_j に関係するというファジィ集合 r への帰属の程度を表す。これは、言い換えれば損傷要因 S_i が損傷要因 S_j に影響を与える程度を示す。逆に二項間に関係がないというファジィ集合 \bar{r} への帰属の程度 \bar{f}_r は次のように定義される。

$$\bar{f}_r(S_i, S_j) = \frac{1 - f_r(S_i, S_j)}{1 + \lambda \cdot f_r(S_i, S_j)} \quad (1)$$

ここで、 λ をあいまい構造パラメータ($-1 < \lambda < \infty$)と呼ぶ。また関係の有無の境界値として P ($0 < P \leq 1$)を設定する。すなわち $a(i, j) \geq P$ の時、頂点 S_i から S_j に至る連結線を引くことになる。これらのあいまい構造パラメータ λ および境界値 P を適宜変化させることによって、ISM法による有向グラフのように一義的とならない柔軟な有向グラフを求めることができる。

(2)FSM法による階層構造モデル構築のプロセス

FSM法を用いた階層構造モデル構築のプロセスを以下に説明し、その概念図を図-1に示す。

(a) 損傷要因の抽出

まず、階層構造モデル(多階層有向グラフ)の頂点となる各種損傷名および各損傷に関連する要因を文献や専門家からのヒヤリングをもとに選定する。

(b) 損傷要因間の数値化

頂点となる損傷要因を選定できれば、次の段階として頂点間を連結する線で表される要因間の関係を設定する。損傷要因間の関連性に関して専門家に対

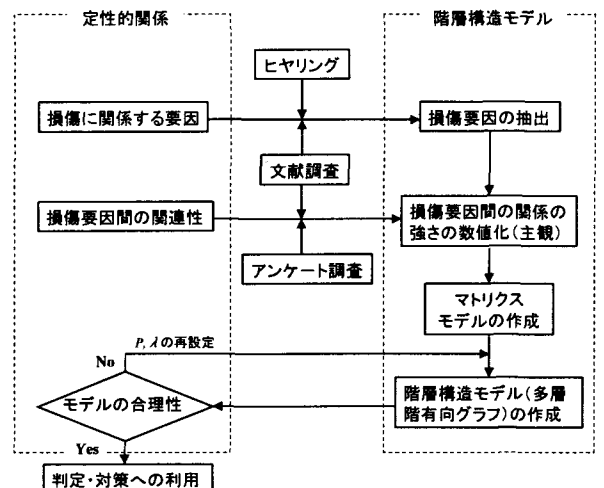


図-1 階層構造モデルの作成概念図

するアンケート調査を実施し、各要因間の相互関係を二項比較によって求めるが、FSM法では「あいまい二項関係」を導入する。任意の損傷要因を S_i, S_j とすると二項間の関係の強さは $f_r(S_i, S_j)$ で表せる。ここで、 $f_r(S_i, S_j)$ はアンケートの結果を参考にして、値域 $[0, 1]$ で与える。 $f_r(S_i, S_j)$ は、ファジィ理論における帰属度関数と同様の意味をもつ。 $f_r(S_i, S_j)$ を全ての損傷要因に対して決定し、ファジィマトリックス M を作成する。

(c) 階層構造モデルの作成

FSM法によって、各要因間の関係をモデル化する。FSM法では、ファジィマトリックス M において、要因間の一意的従属関係を示すレギュラー行(列)を順次消去し、グラフに消去したレギュラー行(列)の指標を加えることでシステムのグラフ化(階層構造モデル化)を行う。階層構造の決定に必要な定義および構造決定手法の詳細については文献[2],[3],[4],[5]を参照されたい。

(d) 階層構造モデルの合理性の判定

上述(c)によって作成したモデルの検証を行う。モデルの合理性を判定する基準としては、専門家の意見あるいは文献等の記述との一致性、パスの簡潔さ、モデルの利用方法などがある。モデルの合理性が最適でない場合は、(c)に戻って境界値 P 、あいまい構造パラメータ λ を再設定し、階層構造モデルを再構築する。

2.3 ファジィ集合論を用いた構造物の健全度評価

(1) システムにおける健全度評価の概要

このシステムにおける健全度評価は、階層構造モデルを利用して構造条件、属地条件等の下位の情報から耐久性、耐荷性の上位情報へのパスの経路をたどっていくことにより、種々の損傷要因が最上層にある耐久性等に影響を及ぼしているかどうかを判定する³⁾⁶⁾。ここで影響があると判断されれば、健全度の指標を通して最終的に対象となる構造物の状態を推定する。

図-2にこのシステムによる構造物診断のプロセスを示す。このシステムでは、コンクリート構造物の点検結果 X が与えられると、言語情報をランクによって判別を行い、ファジィ関係 $R1$ によって構造物の健全度指標 Y の帰属度関数を設定する。さらに、ファジィ関係 $R2$ で各指標に対する構造物の状態 C への変換を行い、最終的な評価を行う。

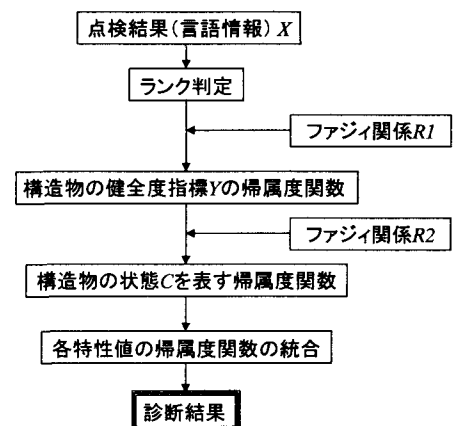


図-2 診断の流れ

(2) 点検結果から健全度の指標への変換

コンクリート構造物の点検結果から健全度評価を行う手順として、はじめに点検結果から健全度の指標への変換を行う。この変換過程には、「実橋モデルと解析モデルとのギャップ」などの技術的不確定性が存在する。これらの技術的不確定性を考慮し、点検結果 X から健全度の指標 Y を推定するためにファジィ集合論を適用する。

健全度の指標の推定は、 X から Y への写像 $f: X \rightarrow Y$ と考えることができる。よって、技術的不確定性を考慮した X から Y への写像をファジィ関係 $R1$ によって式(2)のように定義する。

$$R1 = \int_{X \times Y} \mu_{R1}(x, y)(x, y) \quad (2)$$

このことからファジィ関係 $R1$ は、帰属度関数 $\mu_{R1}(x, y)$, $x \in X, y \in Y$ で特性づけられる。このシステムでは、帰属度関数 $\mu_{R1}(x, y)$ を、比較的任意に決定できる π 関数 (図-3参照) により決定している。

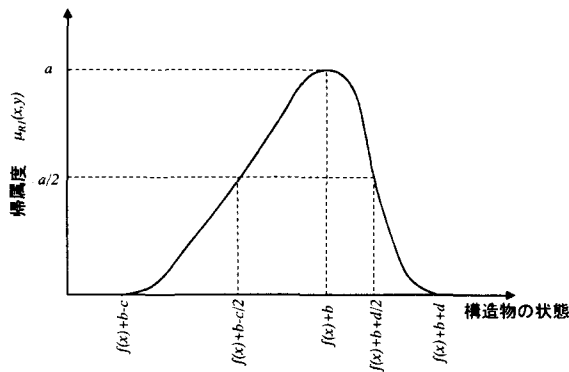


図-3 π関数とあいまいパラメータ

図中の各パラメータは、 a : 帰属度関数のピークの高さ、 b : ピークが $y = f(x)$ からずれる大きさ、 c, d : 左右のばらつきの範囲、 $f(x)$: 構造物の状態を表す関数をそれぞれ示す。

(3)健全度の指標から構造物の状態への変換

指標 Y は、その種類によって構造全体に与える影響や評価自体の確信度が異なるので、専門家はこれらの程度を考慮して診断を下していると考えられる。したがって、このシステムでは、指標 Y が構造物全体に与える影響を「影響度」とし、指標 Y に対する評価自体の確信の程度を「確信度」として取り扱い、前述のπ関数による指標に対して補正を行う。

評価自体の確信の程度を「確信度」として取り扱い、前述のπ関数による指標に対して補正を行う。

(a)指標 Y の影響度

影響度とは、指標 Y と健全度 S とがファジィ関係で表される場合の関数 $s = f(y)$ に関するあいまいさである。例えば、点検項目を「ひび割れ」と定義した場合、「ひび割れ」の種類や発生部位、構造物の種類によって軽微なひび割れが発生していても、構造物には重大な影響を与えるケースや、その逆に多大なひび割れが発生していても構造物にはあまり影響を与えないケースが考えられる。このように、指標 Y と構造物の状態には感度差が存在することを勘案して、図-4に示す3つの感度曲線(①初期付近の感度を大きくしたもの、②感度を一定にしたもの、③初期付近の感度を鈍くしたもの)を設定し、これらによって適切な補正を行うようにしている。

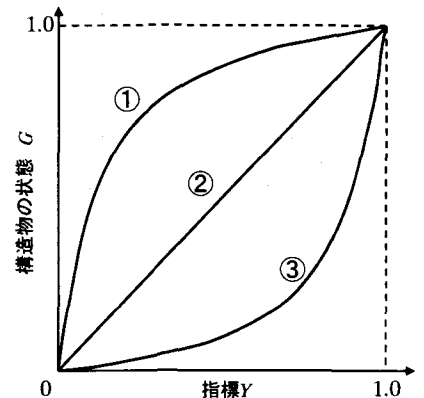


図-4 指標の影響度のパターン図

なお、評価判定にこのような感度曲線を用いて補正を行う考え方は、「コンクリート構造物の維持管理指針(案)」⁷⁾にも示されている。

(b)指標の確信度

確信度とは、各指標による健全度評価の正確さの度合いと定義され、図-5に示すように点検結果に対する確信度は、帰属度関数のばらつきの程度 h で表すことができると考えられる。また h は指標 Y の関数 $h = g(y)$ で表されるものとする。

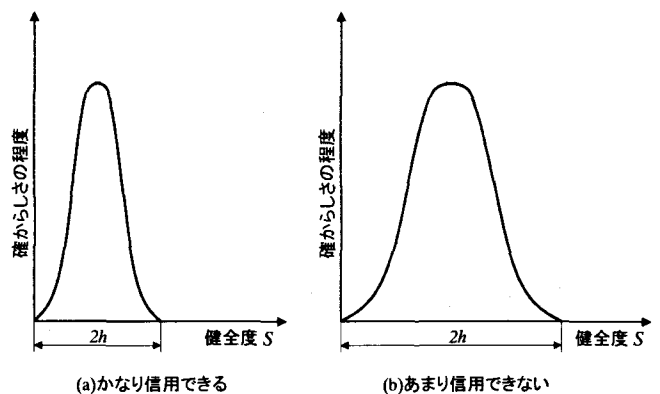


図-5 指標の確からしさ

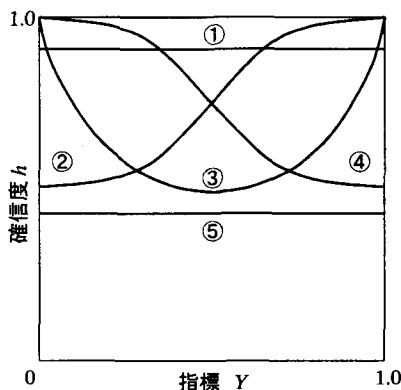


図-6 確信度分布のパターン図

このような関数のパターンとしては、

- ① : 全体的に確信度が高い
- ② : Y が大きい側で確信度が高い
- ③ : 良否が極端なとき確信度が高い
- ④ : Y が小さい側で確信度が高い
- ⑤ : 全体的に確信度が低い

という5つのパターン(図-6)が考えられる。

図-6に示す5つのパターンに対し、具体例を以下に挙げる。

- ①：技術的裏付けのある手法で得られた数値データをもとに評価する場合など（破壊試験データを利用する場合など）
- ②：損傷が内部で発生するか、または内部に向かって進行し、損傷がかなり進行しないと目視では確認できない項目を目視調査のみで評価する場合など（中性化、塩害の目視調査など）
- ③：損傷が全くない場合や、損傷が多である場合の確信度は高いが、損傷が中間的な場合には確信度が低い場合（ひび割れの目視調査など）
- ④：損傷が表面から内部に向かって進行し、損傷が進行しても目視では確認できない項目を目視調査のみで評価する場合など
- ⑤：実際に目視できない箇所の状態を周辺の状況等から予測技術的裏付けのない手法で得られた数値データをもとに評価する場合など

最終的には影響度と確信度の2種類の不確定性を考慮して健全度の指標 Y と構造物の状態 C との関係を帰属度関数 $\mu_{R2}(y,c)$ を利用して、ファジィ関係 $R2$ を式(3)のように定義している。

$$R2 = \int_{y \times c} \mu_{R2}(y,c)(y,c) \quad (3)$$

以上のように、ファジィ関係 $R2$ が決定されれば、ファジィ合成 $R(R1 \circ R2)$ を考えることにより、点検結果から構造物の状態（健全度）の可能性分布を求めることができる。

$$\mu_{R2}(x,c) = \max_y \cdot \min[\mu_{R1}(x,y), \mu_{R2}(y,c)] \quad (4)$$

(c) 帰属度関数の結合

構造物の診断では、各点検結果 x_i に対して設定される帰属度関数を順次結合していくことによって、最終的な診断結果の出力が行われる。点検結果 x_i の帰属度 $\mu_{A_i}(x_i)$ が、あいまいさ（ベグネス関数の値）と確信量の二つよりなっていることを考慮し、帰属度関数の結合にDempsterの結合則^{3),8)}を適用する。Dempsterの結合則による帰属度関数結合の流れを図-7に示す³⁾。

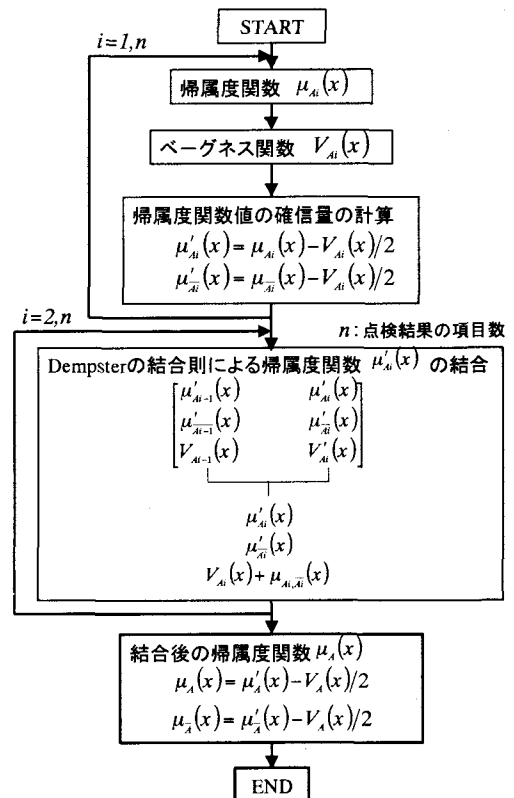


図-7 Dempster の結合則による帰属度関数

2. 4 構造物維持管理支援システム

(1)階層構造モデル作成機能

このシステムでは、現実に即した階層構造モデルの構築が最も重要であり、損傷要因の追加、削除を含む階層構造モデルの検討や再構築が十分に行える必要がある。そこで、ここでは、FSM法から階層構造モデルの構築と自動描画によって視覚的表示を行う「階層構造モデル作成機能」について説明を行う。

図-8に階層構造モデル作成および自動描画のフローを示す。本機能を用いた処理は、あらかじめ対象となる構造物におい

て、その損傷要因を文献調査、アンケート調査などにより抽出し、要因間の関連性を数値化したファジィマトリックス M を作成した後に行う。このファジィマトリックス M と閾値 P 、あいまい構造パラメータ λ を入力値として、FSM法による計算によって要素間の関連性の指標を導出する。次にこの指標を関連があるものを1、ないものを0とする隣接行列に変換し、描画アルゴリズムに従って階層構造モデルの自動表示を

行う。ユーザーはその階層構造モデルを見ながらモデルの合理性の判定を行い、修正が必要な場合はマトリックス、パラメータを変更し、再計算を行う。この処理をモデルの合理性が確認できるまで繰り返し行う。

(2)階層構造モデル作成機能と診断機能の統合

階層構造モデルの構築からシステムにおける診断までを一連の流れとして処理するためには、システムを統合する必要がある。それには以下の項目について検討を行う必要がある。

- (a)階層構造モデルの分割,
- (b)パス判定用の質問内容の設定,
- (c)モデル作成機能と診断機能間で引き継がれる階層構造モデルに関するデータの処理.

上述(a)は、最初に作成される階層構造モデルは対象構造物全体の損傷要因間の関連について表しているが、診断に用いるのは個々の最上層要因についてであるので、最上層要因が複数個ある場合には各最上層要因のみについてのモデル、すなわち部分階層構造モデルに分割する必要がある。これに対応するためのものである。この部分階層構造モデルへの分割は、複数個の最上層要因が存在する場合の全体モデルにおける要因関係の複雑化、不明確さの解決につながると考えられる。

(b)は、既存のシステムの診断が、一般にあらかじめ点検結果を入力することで、最上層要因に影響を及ぼしているそれぞれの要因を階層構造モデルのパスの通りから判定し、関連のあった各要因に基づいて最終的な判定を行うようになってきているが、種々の質問による階層構造モデルの変更に伴って、質問内容の変更および決定機能が必要であることに対応するものである。

(c)は、システムの統合化では階層構造モデル作成機能によって作成した階層構造モデルを診断機能でも認識できなければならないが、階層構造モデルに関するデータ（要因名、各要因の座標位置等）は膨大な量となることも予想されるため、スムーズに処理を行うための何らかの処置が必要であることに対応している。

以上の検討を行うことによって、階層構造モデル作成から診断までの一連の流れが形成されると考えられる。以下にこれらの検討項目について具体的に説明する。

(a) 階層構造モデルの分割

最初に設定されるファジィマトリックス M から FSM 法によって得られる要因間の指標を隣接行列 B として「階層割り当て」の処理を行う。ここで、この隣接行列 B をある最上層要因についての隣接行列へと変換することで、部分階層構造モデルを得ることができる。実際の手順としては、図-9 に示すように全体モデルの隣接行列 B を可達行列 T に変換し、ここで要素 i を最上層要因とする部分階層構造モデルに分割する場合、可達行列の i 列目

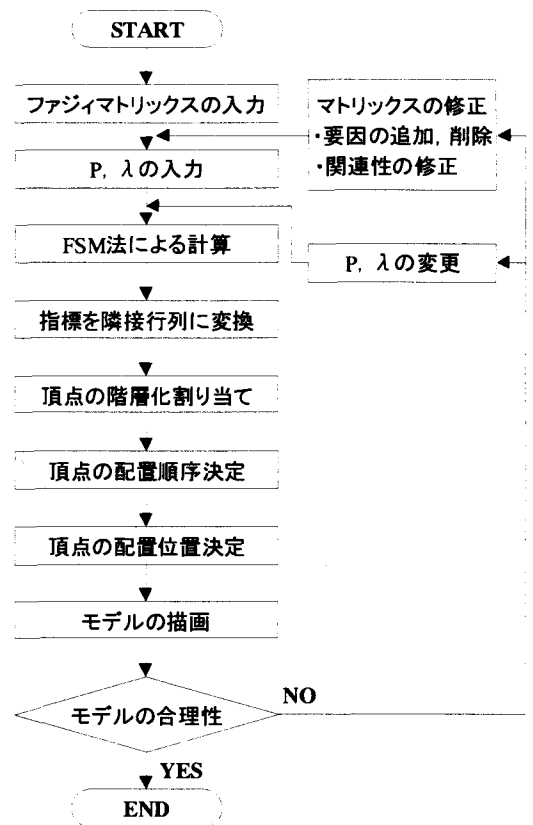


図-8 階層構造モデル作成および自動描画
フロー結合の流れ

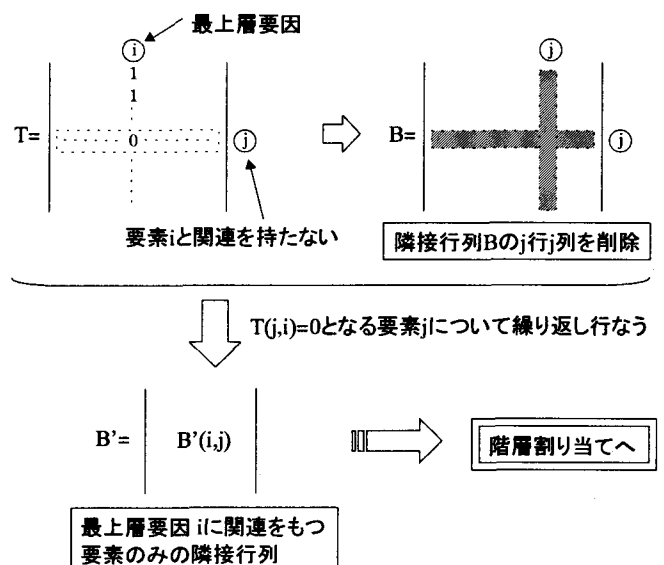


図-9 部分モデルへの分割

について、 $T(i, j)=0$ となる要素 j は要素 i に関連のない要素であることを示している。したがって、もとの隣接行列 B 上で、これらの要素を表す行と列を削除して得られる隣接行列 B' を、「階層割り当て」の入力とすることで、部分階層構造モデルの自動描画を行うことが可能となる。

(b) パス判定用の質問内容の設定

この問題に対しては、システム上で質問内容の設定が行えるような機能を設けている。処理の手順としては、階層構造モデル上でどの要因がどの要因に対して関連があるかを検索し、各質問内容の設定を行うようになるが、ここで実際に利用する場合を考えると、階層構造モデルの変更を行うごとに全ての質問内容を設定し直すことは作業効率の低下や入力ミスを引き起こすことが考えられる。そこで、はじめに質問内容の設定を行うときに、要因 A から要因 B に対する質問内容 C を「ルール」としてデータベースに蓄積しておくこと、次に階層構造モデルの変更によって質問内容を設定する際に、変更した階層構造モデルに同じ要因 A から要因 B への関連があった場合、「ルール」の中から質問内容 C を取り

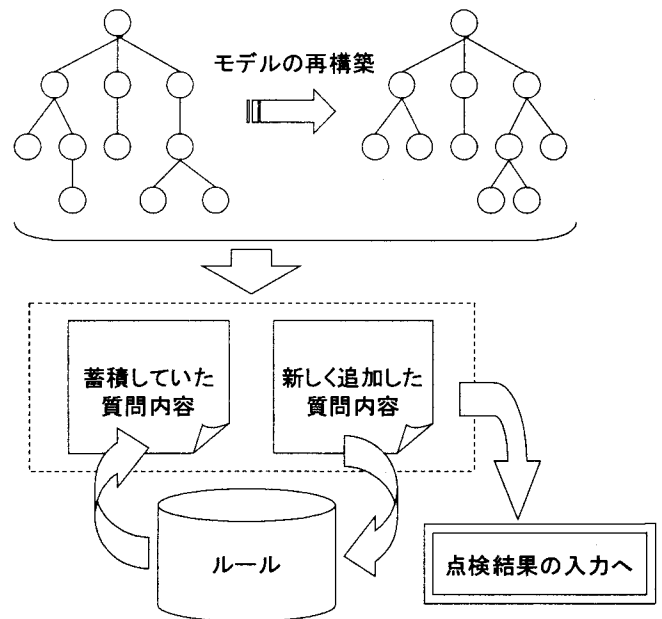


図-10 質問内容設定の流れ

出しユーザーに提案することができる。これによって、全ての関連性について新たに質問内容を入力することなく、必要最小限の作業によってすべての質問内容の設定を行うことができる。またさらに新しい要因について設定した質問内容を「ルール」として蓄積することで、新しい知見を得た場合にも対応できる(図-10)。

(c) モデル作成機能と診断機能間で引き継がれる階層構造モデルに関するデータの処理

実際に階層構造モデル作成機能から診断機能へ引き継ぐ「データ」には、次のようなものがある。

- ・階層構造モデル全体の要因数、
- ・各要因の要因名、
- ・各要因の座標位置、
- ・自分自身がダミー頂点かどうか、
- ・階層構造モデルにおける各要因間の関連（枝の開始要因と終点要因）。

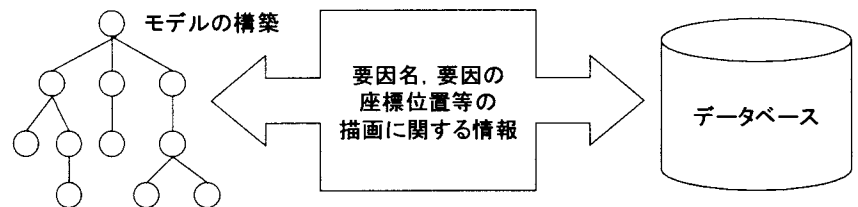


図-11 モデルの構築とデータベースの関係

これらのデータ量は、ダミー頂点を含めた総要因数に比例して増加することは明らかである。したがって、各種データを効率よく管理し、処理していく必要があると考えられる。

そこでこのシステムではこれらのデータをデータベース化することによって、上記の各種データを保存、整理しておくことで階層構造モデルの構築から診断までの一連の流れをスムーズに処理している(図-11)。また先に説明した質問内容の設定の際、関連のあるパスを探す際にもこのデータベースから検索が行える。

(3) 診断時における影響度と確信度の入力支援

システムでは診断する際に、階層構造モデルと点検結果によって得られる判定要因の損傷状況を、5段階による主観的評価と影響度、確信度の2つの不確実性をもとに、その状態を帰属度関数で表している。ここで影響度および確信度は図-4 および図-6 に示すパターンから診断毎に入力しなければならず、ユーザーの専門知識が浅い場合はこれらの入力値をいちいち決定することは困難であることが予想される。そこで、専門技術者と同等の診断を下すという本システムの目的から、この影響度と確信度については、各項目に対し

てあらかじめ設定しておくことも可能であるため、これらの入力にあたって以下のような検討を加えた。

このシステムにおいて影響度とは、判定要因の求める性能（例えば、耐久性等）に対する影響の程度と定義している。例えば「ひび割れ」では、ひび割れの種類や発生部位、構造物の種類などによって、軽微なひび割れでも構造物によっては重大な影響を与える場合があり、その逆に多大なひび割れが発生していてもあまり影響を与えない場合などがある。また、同じ判定要因でも耐久性と耐荷性のように求める性能が異なる場合には、与える影響が異なることが考えられる。このように考えると、影響度は主に判定要因の種類と求める性能によって決まると考えられる。

実際にコンクリート構造物の影響度について考える場合、点検や評価を行う際に求める性能に対して損傷要因がどれだけ重要視されているかを調査する必要がある。「コンクリート構造物の維持管理指針（案）」⁷⁾では構造物の劣化度を評価する際、生じている劣化の種類やその程度を組合せて評価することを提示しており、「性能と点検項目との組合せ一覧」として表を示している。ここで示された表では、例えば「乾湿繰返し（塩害）」は、耐久性については考慮すべき項目であり、耐荷性については特に考慮する必要がないとしている。考慮する必要があるということは、それだけ構造物に与える影響の度合いが大きいことを表していると考えられる。そこでここで示されている表を参考に従来の同様のシステム³⁾で用いていたコンクリート橋の損傷要因について、耐久性と耐荷性においてその影響度の決定を行った。その一部を表-1 に示す。なお表中の数値は図-4 中の番号に相当する。

表-1 コンクリート橋損傷要因の影響度設定の例

損傷要因	耐久性	耐荷性
輪荷重による衝撃力	2	1
塩害	1	3
凍結融解作用	1	2
鉄筋、PC鋼材、シースの腐食	1	1
中性化	1	2

次にシステムにおける確信度の扱いについて考える。システムにおいて確信度とは判定要因

の評価を行う際の評価の正確さの度合いと定義している。この正確さの度合いについては、例えば「中性化」についての判定を行う場合を考えると、目視調査のみによる判定と、指示薬を用いた分析結果をもとにした判定とでは評価に対する確信の度合いが異なることは明らかである。この確信度の決定については要因の評価を行った際の判定方法によって決定することができると考えられることから、実際の点検・評価手法を調査し、その手法によってどの程度技術的な裏付けが得られるかを考慮すれば決定することができると考えられる。実際に評価手法を調査、分析を行い決定した確信度の一例を表-2 に示す。なお表中の数値は図-6 の番号に相当する。

表-2 コンクリート橋損傷要因の確信度設定の例

中性化		確信度
調査方法		
1. 目視調査		2
2. 自然電位測定等(非破壊)		3
3. 指示薬による分析(部分破壊)		1
鉄筋の間隔、配力鉄筋量、かぶりの状態		確信度
調査方法		
1. 目視調査		5
2. パコメータ等(非破壊)		1
3. はつりを伴う調査(部分破壊)		1

2. 5 構造維持管理支援システムの適用例

構造物維持管理支援システム（本システム）の適用例として、既存コンクリート橋の診断を行う。使用するモデルは金海ら⁹⁾が作成したコンクリート橋の損傷要因に関する階層構造モデルを用いた。

対象橋梁は山口県が管理する「T橋」の第3スパンを対象とし、システムの診断時における入力となる点検結果及び判定には、事前に専門家によって行われた調査・点検データを利用して診断結果の出力を行った。

表-3 にT橋の橋梁諸元を示す。

表-3 T橋の諸元

橋梁名	T橋	橋格	一等橋
橋梁形式	3径間RC単純T桁橋	交差物	河川
橋長	81.20m	架設年月	昭和38年5月
幅員	4.50m	橋齢	36年
径間数	5径間	適用示方書	昭和31年版

(1)階層構造モデル

表-4 コンクリート橋階層構造モデル要因名と対応番号

No.	要因名	No.	要因名
1	耐久性	34	主桁の不等沈下
2	主桁曲げ耐力	35	コンクリートの品質の不均一
3	主桁せん断耐力	36	ひび割れ幅
4	床版全体的損傷	37	床版支間
5	床版部分的損傷	38	床版厚
6	コンクリート表面の変状	39	輪荷重の繰り返し頻度
7	鉄筋、PC鋼材、シースの腐食	40	配筋筋量
8	主鉄筋、PC鋼材の断面減少	41	主鉄筋の曲げ上げ位置
9	スターラップの断面減少	42	鉄筋の許容応力度過大評価
10	鉄筋の付着力の減少	43	主桁の剛度不足
11	コンクリート強度、弾性係数の低下	44	主桁相互の剛度差
12	主桁コンクリートの有効断面の減少	45	かぶりの厚さ
13	コンクリートのせん断伝達機能の低下	46	鉄筋、PC鋼材配置の不正確
14	床版の抜け落ち	47	大型車交通量
15	床版の部分的な亀甲状ひび割れ	48	輪荷重による衝撃力
16	床版の貫通ひび割れ	49	輪荷重通行軌跡
17	床版の2方向ひび割れ	50	施工不良
18	床版の1方向ひび割れ	51	養生不良、締固め不良
19	主桁スパン中央付近の鉛直方向ひび割れ	52	配合不良
20	主桁1/4L付近の斜め方向ひび割れ	53	凍害
21	支点付近のひび割れ	54	塩害
22	漏水	55	中性化
23	たわみの増大	56	化学作用
24	ひび割れのずれ、角落ち	57	災害
25	空洞、豆板	58	疲労
26	剥離(鉄筋露出)	59	適用示方書
27	ハンチに沿ったひび割れ	60	橋齢
28	支承の損傷	61	立地環境条件
29	橋面滞水	62	構造条件
30	舗装の変状	63	道路条件
31	排水溝および周辺の損傷	64	設計条件
32	排水溝及び周辺の損傷	65	下部工の変状
33	乾燥収縮		

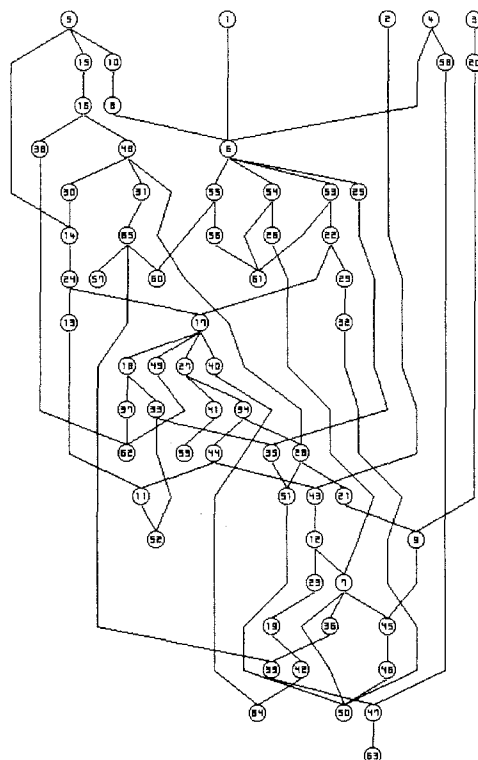


図-12 コンクリート橋損傷要因の階層構造モデル

本システムによる診断を行うにあたって、金海らの作成した階層構造モデルをこのシステムの階層構造モデル作成機能によってマトリックスデータから描画を行った。図-12 にその描画結果を、また表-4 に階層構造モデル要因名とその対応番号を示す。ここで示した階層構造モデルは、コンクリート橋全体についての損傷要因について階層化を行ったものであり、診断に適用する際には最上層要因ごとの部分階層構造モデルに分割する必要がある。そこで前節で示した階層構造モデルの分割化によって階層構造モデルの分割を行った。一例として、「耐久性」を頂点とする部分階層構造モデルを図-13 に、また表-5 に要因名とその対応番号を示す。

表-5 「耐久性」階層構造モデル要因名と対応番号

No.	要因名	No.	要因名
1	耐久性	24	輪荷重の繰り返し頻度
2	コンクリート表面の変状	25	配筋筋量
3	鉄筋、PC鋼材、シースの腐食	26	主鉄筋の曲げ上げ位置
4	スターラップの断面減少	27	鉄筋の許容応力度過大評価
5	コンクリート強度、弾性係数の低下	28	主桁の剛度不足
6	主桁コンクリートの有効断面の減少	29	主桁相互の剛度差
7	床版の2方向ひび割れ	30	かぶりの厚さ
8	床版の1方向ひび割れ	31	鉄筋、PC鋼材配置の不正確
9	主桁スパン中央付近の鉛直方向ひび割れ	32	大型車交通量
10	支点付近のひび割れ	33	輪荷重通行軌跡
11	漏水	34	施工不良
12	たわみの増大	35	養生不良、締固め不良
13	空洞、豆板	36	配合不良
14	剥離(鉄筋露出)	37	凍害
15	ハンチに沿ったひび割れ	38	塩害
16	支承の損傷	39	中性化
17	橋面滞水	40	化学作用
18	排水溝および周辺の損傷	41	適用示方書
19	乾燥収縮	42	橋齢
20	主桁の不等沈下	43	立地環境条件
21	コンクリート品質の不均一	44	構造条件
22	ひび割れ幅	45	道路条件
23	床版支間	46	設計条件

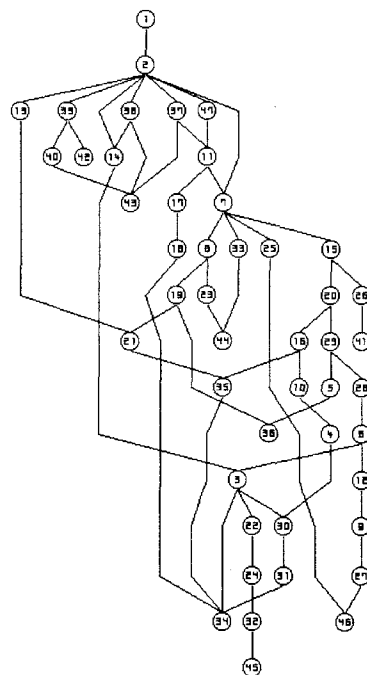


図-13 「耐久性」階層構造モデル

図-12 に示す自動描画結果が示すようにコンクリート橋全体に関する階層構造モデルは多くの要因が複雑に関連しているため、要因間の関連を容易に読み取ることは難しいが、図-13 のように部分階層構造モデルに分割することによって、要因間の関連が読み取りやすくなっている。このことは部分階層構造モデルに分割することの有効性を示している。

なお、図-13 で示した階層構造モデルは、実橋における点検データを試行的に入力し、専門技術者の評価と対比することによって、不具合点などを修正し改良したモデルである。

本システムでは、このように不具合点の修正や損傷要因間の相互関係に新たな知見が加わるような若干の修正に対して、容易に対応できる機能を設け、階層構造モデルの再構築に迅速に対応できる。

次に各要因間のパスの有無判定を行う質問内容を設定し、専門家による点検データをもとにシステムへ回答を入力（表-6）し、パスの判定を行った。図-14 は点検結果入力後のパスの要否について表しており、図中の太線は点検によって関連付けの必要なパスを、太点線は点検によって「不明（Unknown）」と判定されたパスをそれぞれ示している。

表-6 点検結果の入力値（一部）

質問内容	回答
空洞・豆板の箇所が見られますか？	NO
コンクリートの剥離、または鉄筋の露出が見られますか？	YES
架設箇所は海岸地域ですか？	NO
ハンチに沿ったひび割れが多数見られますか？	YES
支承部に異常が見られますか？	NO
路面に滞水が生じることがありますか？	YES
排水施設に損傷が見られますか？	YES
乾燥収縮による影響が見られますか？	NO
主桁の不等沈下が見られますか？	YES

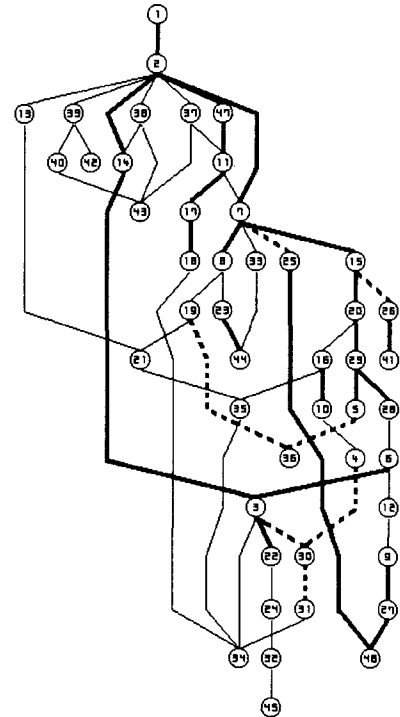


図-14 「耐久性」階層構造モデル（点検結果入力後）

続いて、このパスの判定結果から「耐久性」を判定するための判定要因を抽出する。判定要因は最上層要因である「耐久性」からパスをたどり、最下層に位置する要因を判定要因としている。ただし、「41. 適用示方書」のように、その状態を判定することができない、あるいは困難な要因については、その要因からパスによってつながっている上位の要因を判定要因として診断を行うこととした。すなわち、図-14 より判定要因としては「床版の一方向ひび割れ」、「ハンチに沿ったひび割れ」、「排水樹および周辺の損傷」、「ひび割れ幅」、「設計条件」が判定要因として選択される。次項でこれら判定要因の状態から「耐久性」の診断を行うプロセスについて説明する。

(2) システムの診断結果と考察

本システムにおける診断では、判定要因に対してその状態を5段階による主観的評価と影響度、確信度の不確定性からその状態を帰属度関数で表わしている。影響度の決定については前節で述べたように、求める性能に対してあらかじめ各要因毎に影響度を設定しているため、ユーザーが直接決定することはない。一方、確信度については各要因の判定手法によって選択することで決定される。

表-7 「耐久性」診断入力値の例

判定要因	5段階評価	影響度	確信度
床版の一方向ひび割れ	3	1	3
ハンチに沿ったひび割れ	2	1	3
排水樹および周辺の損傷	4	1	3
ひび割れ幅	4	1	3
設計条件	3	2	5

以上のようにして各要因毎に帰属度関数が決定されると、これらを Dempster の結合則によって結合し、求めようとする最上層要因の1つである「耐久性」の状態を表わす帰属度関数が決定される。最終的な結果としては結合後の帰属度関数の重心値をもって非ファジィ化しこれを損傷度として評価する。

表-7 に各判定要因に入力した5段階評価、影響度、確信度の例を示す。なお影響度と確信度の入力については、前項で述べたように影響度はあらかじめ性能と損傷要因との関連から決定した値が入っており、確信度についてはどのような調査結果によって判定したかを選択することによって値が決定している（図-15）。

以上のような入力を行い、最終的にシステムから出力された「耐久性」の状態を表す帰属度関数を図-16に示す(図中の黒線)。

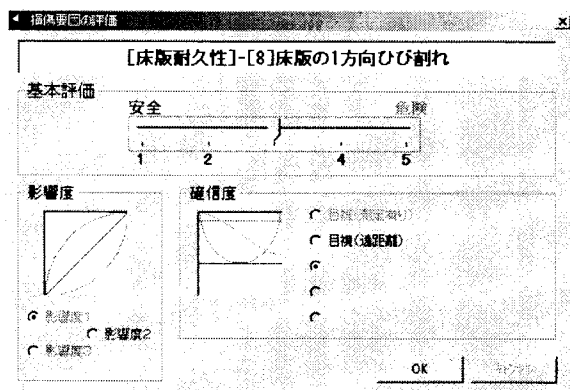


図-15 診断入力画面の例

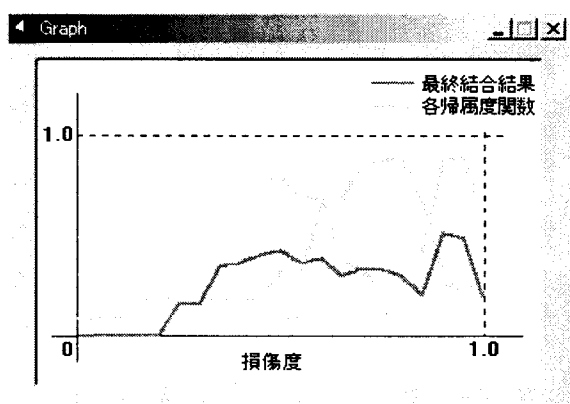


図-16 「耐久性」の状態を表す結合後の帰属度関数出力結果

図-16の「耐久性」の帰属度関数の重心から得られた最終的な損傷度は0.64であった。このシステムにおいて損傷度は0が健全な状態を表わし、1が非常に危険であり直ちに対策が必要な状態と定義している。したがって、システムから得られた数値から判断すると比較的注意が必要であり詳細調査や早い時機に対策が必要な状態を表わしているといえる。また、このシステムでは損傷度が0.5を超えると損傷度を0.5以下に下げするために補修、補強などの対策を実施して効果の高い要因を提示し対策工の例を示す機能があるが、その機能を実行すると「排水柵および周辺の損傷」および「ひび割れ幅」に対して対策を実施することを提示した。ここで、「T橋」の点検を行った専門家の評価は、

- ①「速やかに補修」するのが望ましいもの
 - ・主桁のひび割れ
- ②通常維持業務で補修するもの
 - ・伸縮装置の土砂詰まり
 - ・排水装置の土砂詰まり
- ③追跡調査(1回/2年)を行い、損傷が進行するようであれば補修の検討を行う
 - ・床版の遊離石灰
 - ・橋脚の遊離石灰

を挙げており、このシステムによる診断結果は専門家よる評価と非常に近い結果が出力されていることがわかる。ただし、図-16の帰属度関数の形状をみると、はっきりしたピークのない広がりのある帰属度関数となっているため評価に対するあいまいさが比較的大きく含まれていることがわかる。これは判定要因の評価を行う際の確信度の入力、目視による調査結果であり、確信度の低い中間的な評価を行っているためであると考えられる。現時点ではこのあいまいさの取扱いについては評価に加えていないが、今後はこのあいまいさを含めた評価を行えるように改良することについての検討も実施する必要があると考えられる。

(3) 画面表示によるシステムの流れ

図-17～図-20に本システムの一連の流れを画面表示によって順次示す。

図-17および図-18は、階層構造モデル作成機能の画面例である。すなわち図-17では、ファジィマトリックス、損傷要因及びパラメータ P 、 λ の入力、変更を行い、その結果を図-18のように表示している。図-19および前記の図-14,15は、維持管理支援機能の画面である。すなわち図-19では、各種点検結果の入力を行い、図-14では、パスの有無を階層構造モデルを用いて表示している。また、図-15では、損傷の原因となっている要因の影響度、確信度及び評価値を入力する。その評価結果として図-16のように総合的な判定となる帰属度関数のグラフを表示し、その重心値を損傷度の値として示す。最後に図-20では、実際に推奨された対策が行われたと仮定した場合の対策後の損傷度と帰属度関数のグラフを示している。

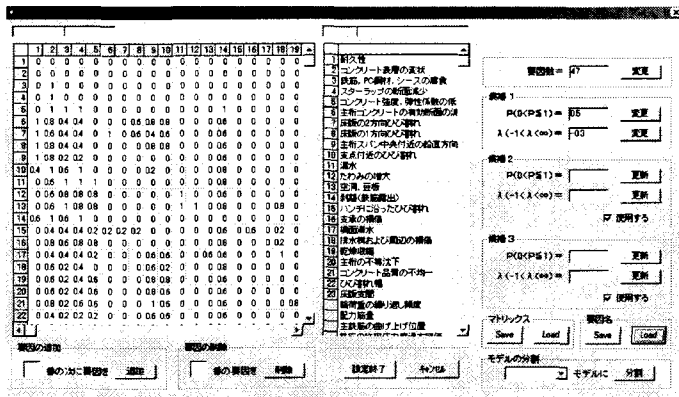


図-17 階層構造モデルのエディタ画面例

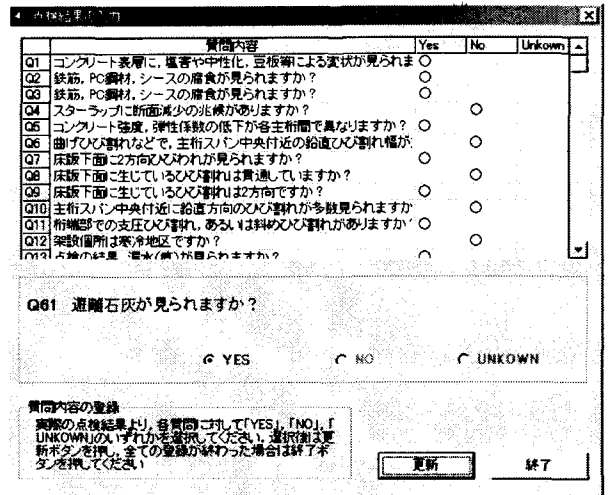


図-19 点検結果の入力画面例

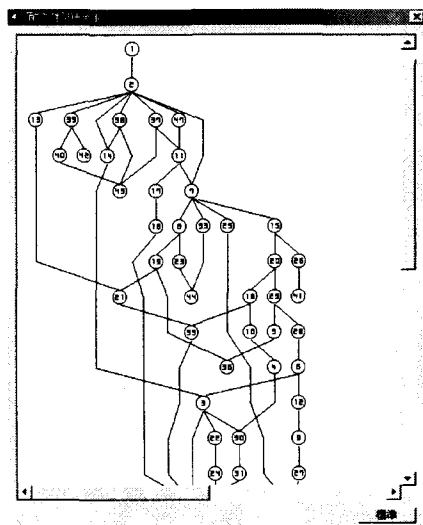
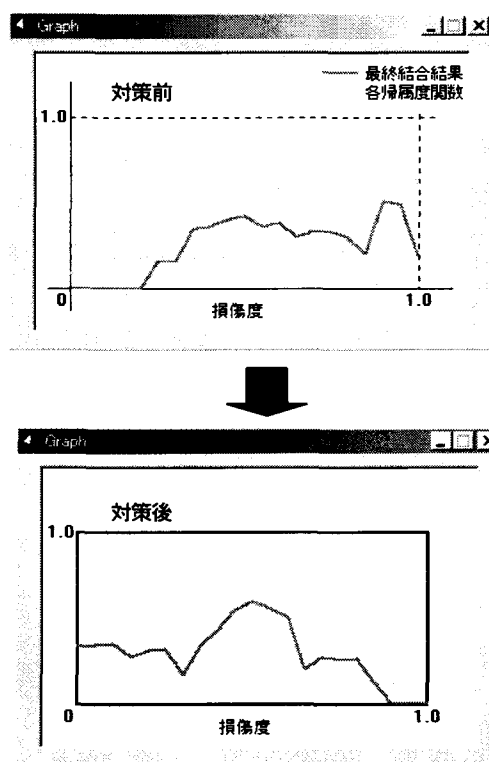


図-18 診断項目の階層構造モデル画面例



判定結果

修正前の評価損傷度 | 63.27

対策を行ったと仮定する要因
↓
[15]層の1方向入力のひび割れ

修正後の評価損傷度 | 41.61

この診断項目について「補修・増強」等の対策を行う必要は現在ありません

対策の表示 [終了]

図-20 対策後のグラフと損傷度画面例

【参考文献】

- 1) 木下栄蔵：多変量解析入門，啓学出版，pp.189-201，1992.1
- 2) 田崎栄一郎：あいまい理論による社会システムの構造化，数理科学，No.191，pp.54-66，1975.5
- 3) 古田 均，小尻利治，宮本文穂，秋山孝正，大野 研，背野康英：ファジィ理論の土木工学への応用，森北出版株式会社，1992.8
- 4) 串田守可：橋梁診断における知識獲得手法とエキスパートシステムの開発に関する研究，山口大学学位論文，pp.105-118，1998.3
- 5) 白倉篤志，水口弘範，宮本文穂，中村秀明：階層構造モデルを用いたコンクリート橋の維持管理支援システムの開発，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1025-1036，1998.3
- 6) 西村 昭，藤井 学，宮本文穂，小笠 勝：構造物の健全度診断へのファジー集合論の適用に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 380 号 / I-7，pp.365-374，1987.4
- 7) 土木学会：コンクリート構造物の維持管理指針(案)，コンクリートライブラリー-81，pp.75-85，1995.10
- 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) 金海 鈺，葛目和宏，宮本文穂：コンクリート橋損傷要因のファジィ階層化と維持管理への適用，コンクリート工学論文集，第 3 巻，第 2 号，pp.75-82，1992.