

階層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

APPLICATION OF DAMAGE HIERARCHY MODEL TO DECISION SUPPORT SYSTEM FOR MAINTENANCE, REPAIR AND REHABILITATION OF CONCRETE BRIDGES

白倉篤志* 水口弘範** 宮本文穂*** 中村秀明****

Atsushi SHIRAKURA, Hironori MINAKUCHI, Ayaho MIYAMOTO and Hideaki NAKAMURA

*工学士 (株) ニチゾウテック 技術本部第1技術部 (〒551 大阪市大正区鶴町 2-15-26)

**工学士 山口大学大学院理工学研究科 知能情報システム工学専攻 (〒755 宇部市常盤台 2557)

***工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

****博士 (工学) 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

The necessity of developing a computer-aided rating system has been pointed out for maintenance, diagnosis, repair and rehabilitation of existing bridges. There are multiple damaging processes with a lot of damage factors in existing bridges in service. In this paper, the decision support system for maintenance, repair and rehabilitation of concrete bridges is proposed by using the rating system with an engineering prediction model based on the fuzzy hierarchy structural modeling. A concrete bridge on which field data have been collected are analyzed to demonstrate the applicability of this system.

The results obtained by the above analysis show that the rating system is applicable to an old concrete bridge. And it is concluded that this system is able to obtain the best procedure of repair and rehabilitation for old concrete bridges.

Key Words: decision support system, computer-aided system, concrete bridge, bridge rating, damage hierarchy model, fuzzy set

1. はじめに

近年、橋梁は、経年による変状や交通量特に大型車の増大や、設計時からの厳しい環境条件などに伴い、架設直後からすでに劣化が始まっているのが現状である。その一方で、橋梁の大規模化が進み、さらに過酷な環境条件下で長期にわたって耐えることを要求されている。このため、定期点検などからできるだけ早い異常の発見、原因の追求、そして適切な補修・補強を行うという維持管理が大変重要となっている。しかし橋梁は、多種多様の形状で単産品が多く、確率統計的に各種データを取り扱うことが困難であることから、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不可欠である。しかし、近年においては、このような専門技術者が、診断を必要とする橋梁数に対してかなり不足しているという問題がある。

この問題を解決すべく、筆者らは専門的な知識を余り必要とせずに専門技術者と同等の診断が下せるよう、これまでに専門技術者の持つ過去の経験や知識をベースとした損傷要因間の関連性を階層化し、最終的な診断にファジィ集合論を適用した橋梁診断システムの開発に取り

組んだ¹⁾。しかし、これまでに開発したシステムでは、診断対象となる構造物のデータや診断結果の記録、診断結果に対する対策工の提案などが抜けており、「維持管理」という目標を完全に満たしたシステムとしては開発途上であった。また、このシステムで使われている階層構造モデルは、コンクリート橋と鋼橋という異なる性質を持つ橋梁を対象として損傷要因を階層化したため、より精度の高い診断を行うという点から見ると、階層モデルを再考する余地があった。そこで本研究は、従来のシステムの手法に以下に示す諸点に改良を加えた。

① 従来の研究においては階層構造モデルの作成をすべて手計算によって行ってきたが、階層構造モデルの作成に対し柔軟な対応が可能となるよう、プログラム化を行った。また階層構造モデルの損傷要因をコンクリート橋を念頭に置き、改良することで診断の信頼性向上をはかった。

② これまでに開発されたシステムは N88BASIC によるもので、操作性や、視覚的レイアウト等、現在ではやや不満の残るものであった。そこで、Windows95 上でシステムの開発を行った。これにより操作性・画面レイ

アウトなどさらなるシステムの向上や、ネットワーク上での操作を可能にした。

③ 従来のシステムにはなかった「記録」、「対策（補修・補強工法の選定）」機能の開発によって、現在の維持管理のみならず将来の維持管理を意識したシステムへの向上を目的とし、維持管理の最も基本的な考え方である「劣化予測」→「点検」→「判定」→「対策」→「記録」という一連の流れの実現をはかった。

2. あいまい階層構造モデル作成手法のプログラム化

2.1 あいまい階層構造モデル²⁾

一般に橋梁に発生する損傷は、単一の原因だけではなく、交通量の増大、車両の大型化による荷重の増加、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。

この損傷と原因、また損傷発生による橋梁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、あいまい階層構造モデル（以下階層モデルと略記）である。この階層モデルは、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久性や供用性に影響を与えるかが、一連の流れとして把握することが可能となる。

2.2 あいまい階層モデルの作成手法

階層モデルを作成するために、これまで様々な手法が考えられているが、本研究ではFSM(Fuzzy Structural Modeling)法³⁾を用い、階層モデル化手法のプログラム化を行った。FSM法は、2つの要素間にあいまい2項関係を導入して区間[0,1]によって表す。これにより専門技術者の知識・経験あるいは主観が反映された階層モデルが構築できる。

2.2.1 FSM法の概要

FSM法は階層モデルの頂点間を連結する「線」で表される要因間の関係を、要因相互の2項比較によって関連性の強さ f_r で表現する。この f_r は主観によって区間[0,1]で与えられる。 f_r はファジィ理論の帰属度と同様の意味を持ち、各要因間に関係が存在するという意味を持つファジィ集合 r への帰属の程度を表すものと考ええる。このような各要因間の関連性を行列で表したものを、あいまい従属行列（ファジィマトリックス）と呼び、(1)式のように表す。

ここで、 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ は損傷要因であり、行列 A の要素 $a(i, j)$ は(2)式となる。

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & \dots & S_N \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \vdots \\ S_N \end{matrix} & \begin{matrix} a(1, 1) \\ a(2, 1) \\ a(3, 1) \\ \vdots \\ a(N, 1) \end{matrix} \end{matrix} \quad (1)$$

$$a(i, j) = f_r(S_i, S_j) \quad (0 \leq a(i, j) \leq 1) \quad (2)$$

(2)式より、要素 $a(i, j)$ は損傷要因 S_i が損傷要因 S_j に与える影響の大きさを示していることがわかる。

またあいまい2項関係がないという集合 r への帰属度 $\bar{f}_r(S_i, S_j)$ はパラメータ λ を用いて、(3)式のように定義される。

$$\bar{f}_r(S_i, S_j) = \frac{1 - f_r(S_i, S_j)}{1 + \lambda \cdot f_r(S_i, S_j)} \quad (-1 < \lambda < \infty) \quad (3)$$

これらの関係の有無の境界値となる P ($0 \leq P \leq 1.0$)を設定することにより、 $a(i, j) \geq P$ のとき、損傷要因と損傷要因の関係を示す階層モデルを有向グラフとして示すことができる。

2.2.2 階層モデル作成までのアルゴリズム

前節のFSM法を用いた階層モデルの作成までの手順は次のようになる。

(1) 損傷要因の抽出

作成するモデルについて文献や現状を考慮して、必要と思われる要因をすべて網羅するように選定する。

(2) 損傷要因間の数値化

(1)で選定した要因について、各要因間の相互関係を2項比較によって求め、マトリックスの要素 $a(i, j)$ の値を決定する。

(3) 階層モデルの作成

FSM法によって、各要因間の関係をモデル化する。

(4) 階層モデルの合理性の判定

(3)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、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、(3)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、階層モデルを再構築する。

2.3 階層化手法のプログラム化

これまでの研究では図-1のような流れに従って、全て手計算によって階層モデルが作成されてきた。この手計算による手法は、階層モデルの要因数が多くなるほどその計算は複雑化するため、時間の浪費や、計算ミスによる結果の信頼性など多くの問題があることは明らかである。そこで、本研究ではあらかじめ要因間の関連性を数値化したマトリックスから階層モデルの要因間の指標を導き出すまでのプログラム化を行った。このプログラムを作成することで、階層モデルの作成の高速化とモデルの再構築において、より柔軟な対応が可能となる。

階層モデルの構築において、各要因間の関連性を示すマトリックスモデルは、「あいまい非反射律」「あいまい非対称律」「あいまい半推移律」が成り立たなくてはならない。すなわち、

- ①あいまい非反射律が成り立つ
=自己ループを持たない
- ②あいまい非対称律が成り立つ
=2つの任意の要因間にサイクリックパスは存在しない
- ③あいまい半推移律が成り立つ
=要因Aから要因B, 要因Bから要因Cにパスが存在するとき, 要因Aから要因Cへのパスが必ず存在する

プログラム実行に用いるマトリックスモデルは, あらかじめ①, ②の条件が満たされているマトリックスを使用する. これは要因間の関連を数値化するとき, これらの条件を満足するように作成されるからである.

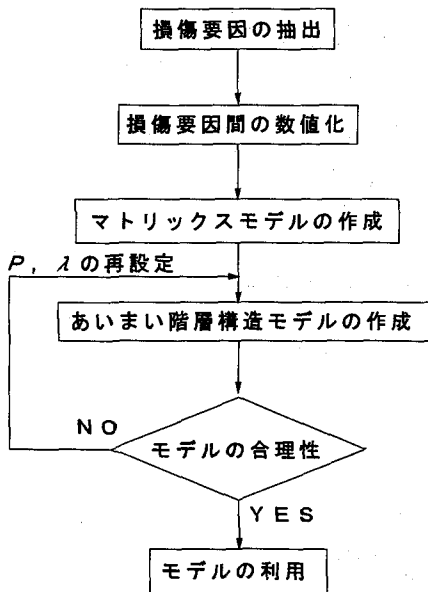


図-1 階層モデル作成の概念図

よって, プログラムのアルゴリズムは次のように与えられる.

STEP-1

マトリックスがあいまい半推移律を満足していなければ, 以下の処理を行いマトリックスの修正をする.

1行目において, 境界値 P 以上の値を持つ要素を調べる.

いま, $(1,i) \geq P$ のとき, i 行目の P 以上の要素があるか調べる.

ここで, $(i,k) \geq P$ なる要素が存在したとき, $(1,k) > (i,k)$ であれば $(1,k)$ を (i,k) に書き換える. ただし, $(1,i) < (i,k)$ であれば $(1,k)$ は $(1,i)$ に書き換える.

同様の操作を $2 \sim n$ 行について実行し, マトリックスを修正する.

STEP-2

各要素を以下に示すレベル集合ごとに分類する.

最上層レベル集合 $L_1(S)$: その要素からパスは出でず, その要素へのパスのみが存在する要素の集合

中間層レベル集合 $L_2(S)$: その要素からパスが出ており, かつその要素へのパスも存在する要素の集合

最下層レベル集合 $L_3(S)$: その要素からパスが出ており, その要素へのパスは存在しない要素の集合

独立層レベル集合 $L_4(S)$: その要素からのパスも, その要素へのパスも存在しない要素の集合

STEP-3

それぞれのレベル集合ごとに以下の処理を行う

$L_1(S)$: これに属する要素は, 従属する要素がないので行を削除する.

$L_2(S)$: これに属する要素は, 従属される要素がないので列を削除する.

$L_3(S)$: これに属する要素は, 従属する要素も従属される要素もないので行と列を削除する.

STEP-4

(1) マトリックスからレギュラー行が存在するかどうかを調べる. 存在しない場合は(2)の処理を行う. ここでのレギュラー行(列)とは, 任意の i 行(列)において, j 列(行)目の要素のみが P 以上であったとき, j に対するレギュラー行(列)は i であるという.

j に対するレギュラー行が i であったとき, j 列を

$$[a_{*j}] = [a_{*i}] \wedge [a_{*i}]$$

で置き換え, i 行を削除する. j 列がないときは置き換えをせず i 行を削除する. また, j から i への指標を与える.

(2) マトリックスからレギュラー列が存在するかどうかを調べる. 存在しない場合は(3)の処理を行う.

i に対するレギュラー列 j が存在するとき, i 行を

$$[a_{i*}] = [a_{i*}] \wedge [a_{j*}]$$

によって置き換え, j 列を削除する. i 行がないときは置き換えはせず, j 列を削除する. また, i から j への指標を与える.

(3) レギュラー行もレギュラー列も存在しない場合は, 最も P 以上の要素の数が少ない行を分割しレギュラー行として, (1)と同様の処理を行う.

(1)~(3)の処理を全ての行が削除されるまで続ける.

図-2に本プログラムのフローチャートを示す.

以上の方法によって, 損傷とその原因との間の関連を階層モデルで表すことによって, 下位の定性的情報から上位の耐久性, 耐荷性が推定可能となる. また, 階層モデルを耐久性, 耐荷性の上位から下位へ辿ることにより, 上位の性能を低下させる原因・要因を明らかにすることができる. すなわち, 階層モデルを下位から上位へ辿れば「判定」が行え, 逆に上位から下位へ辿れば「劣化予測」が行える.

本研究のシステムで使用する階層モデルの損傷要因⁴⁾を表-1に, また本プログラムを実行することにより得られた階層モデルを図-3に示す.

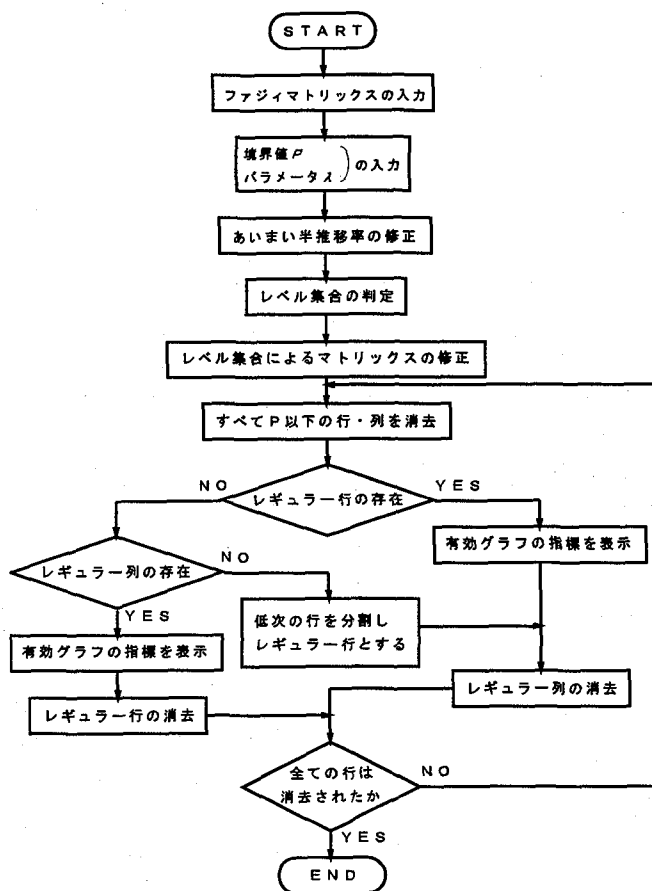


図-2 プログラムのフローチャート

表-1 階層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	主桁曲げ耐荷力	35	コンクリートの品質の不均一
3	主桁せん断耐荷力	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	コンクリート表層の変状	39	軸荷重の繰り返し頻度
7	鉄筋、P C鋼材、シースの腐食	40	配筋筋量
8	主鉄筋、P C鋼材の断面減少	41	主鉄筋の曲げ上げ位置
9	スタースラップの断面減少	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、P C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	軸荷重による衝撃力
16	床版の真直ひび割れ	49	軸荷重通行軌跡
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	指令
28	支承の損傷	61	立地環境条件
29	橋面帯水	62	構造条件
30	舗装の変状	63	道路条件
31	伸縮継手及び周辺の損傷	64	設計条件
32	排水斜及び周辺の損傷	65	下部工の変状
33	乾燥収縮		

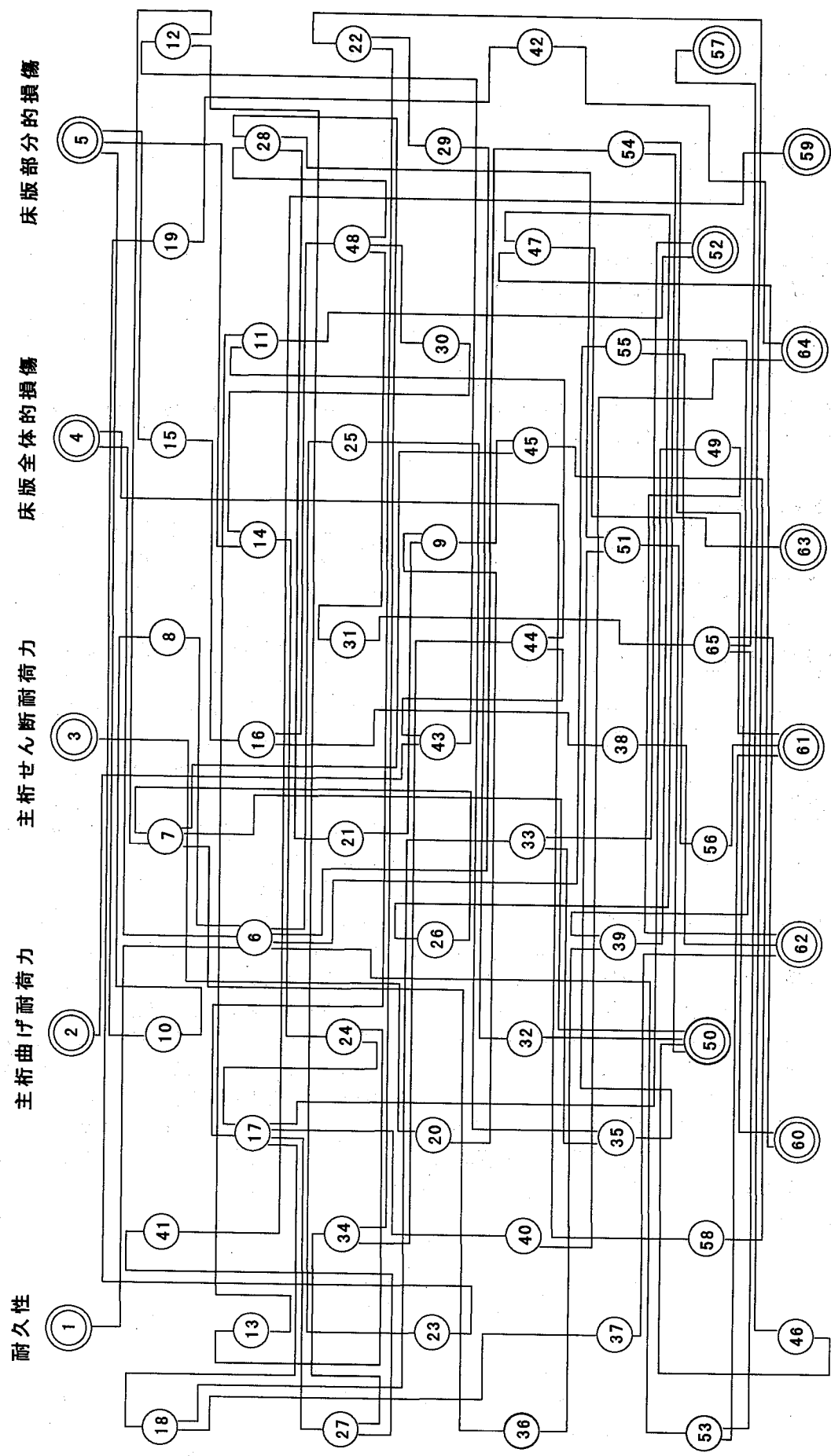


図-3 損傷要因間の関連性に基づく階層モデル

3. ファジィ集合論を利用したコンクリート橋の健全度評価

3.1 システムにおける健全度評価の概要

本システムにおける健全度評価⁵⁾は、階層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。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ものである。

図-4に最終的なコンクリート橋の状態を推定するまでの流れ³⁾を示す。すなわち、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 $R1$ によって橋梁の損傷度の指標 Y の帰属度関数を設定する。さらに、ファジィ関係 $R2$ で各指標に対する橋梁の状態 C への変換を行い最終的な評価を行う。

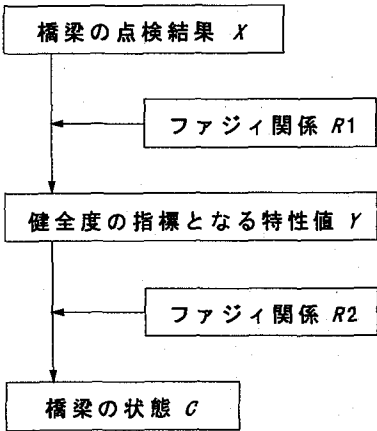


図-4 橋梁診断の流れ

3.2 点検結果から健全度の指標への変換

点検結果から橋梁の健全度評価を行う手順として、まず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、検査結果 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(4)式のように定義する。

$$R1 = \int_{X \times Y} \mu_{R1}(x,y) | (x,y) \tag{4}$$

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。本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関数⁶⁾ (図-5) により決定する。

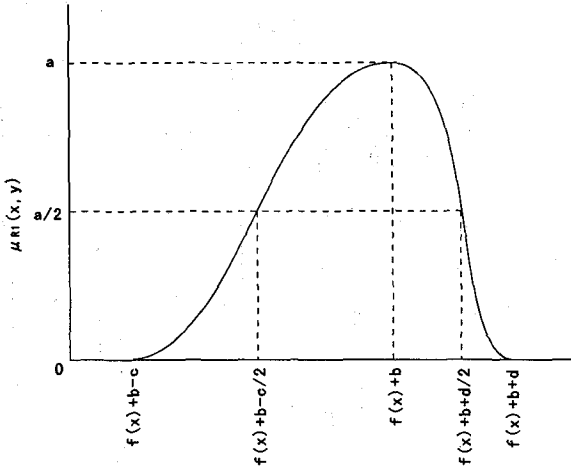


図-5 π 関数とあいまいパラメータ

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
 $f(x)$: 橋梁の状態を表す関数を示す。

3.3 健全度の指標から橋梁の状態への変換

指標 Y は、その種類によって橋梁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も考慮して診断を下している。

したがって本システムでは、指標 Y が橋梁全体に与える影響を「影響度」とし、指標 Y にたい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。

(Ⅰ) 指標 Y の影響度⁶⁾

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 と橋梁の状態には感度差が存在することを勘案して、図-6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、補正を行うようにした。

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。

(Ⅱ) 指標の確信度⁶⁾

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³⁾、図-7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

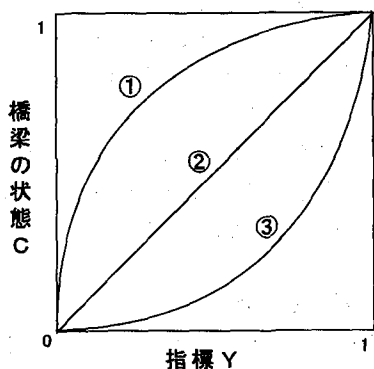


図-6 指標の影響度のパターン図

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。

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-8) が考えられる。

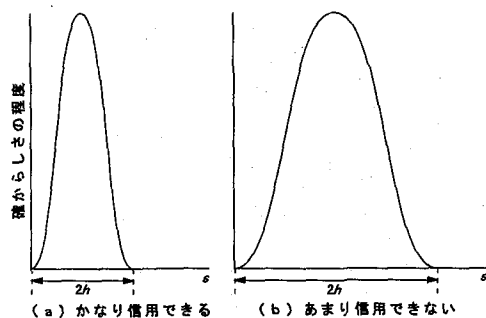


図-7 指標の確からしさ

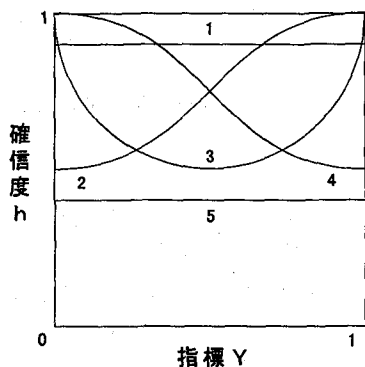


図-8 確信度分布のパターン図

図-8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想したり、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 と橋梁の状態 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 (5) 式のように定義する。

$$R2 = \int_{xc} \mu_{R2}(y,c) (y,c) \quad (5)$$

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 ((6) 式参照) 考えることにより、点検結果から健全度の可能性分布を求めることができる。

$$\mu_{R2}(x,c) = \max_y \min [\mu_{R1}(x,y), \mu_{R2}(y,c)] \quad (6)$$

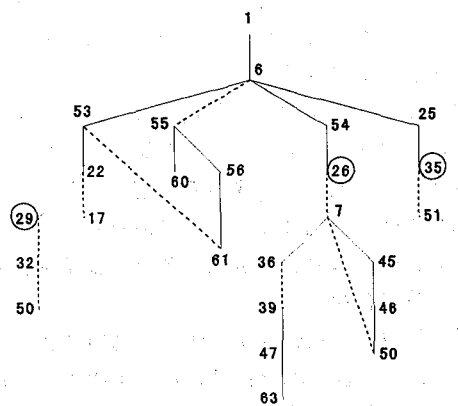
3.4 階層モデルと帰属度関数の結合

前節までの方法により、ある一つの損傷の健全度を帰属度関数によって表現することが可能となった。しかし、耐荷性や耐久性を考慮するときには様々な損傷要因が複雑に絡み、また影響を及ぼしている。

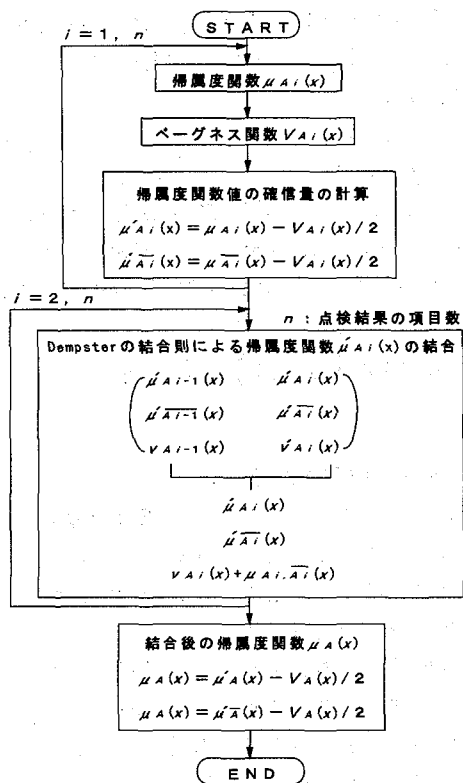
この複雑な関連性を本システムでは階層モデルにより表現している。また、この階層モデルのパスを調べ、上位層である耐久性、耐荷性までに影響を及ぼしている損傷要因を結合させ、判定を行う。

実際に本システムで使用しているモデルを用いて解説すると、図-9は耐久性を判定する際に用いる階層モデルであるが、図中の実線はパスが通っていること示し、点線はパスが通っていないことを表している。いま、図-9のようにパスが通っているとすると、この階層モデルから1: 耐久性までパスが通っている要因は、26: 剥離 (鉄筋露出)、29: 橋面帯水、35: コンクリート品質の不均一であることがわかる。ゆえに本システムでは、以上の3つの損傷要因について前節までの方法によりそれぞれの健全度を帰属度関数によって表し、この3つの帰属度関数を Dempster の結合則⁷⁾ (図-10参照) を用いることによって、一つの耐久性の健全度を示す帰属度関数を求める。そして最終的な評価を図-11

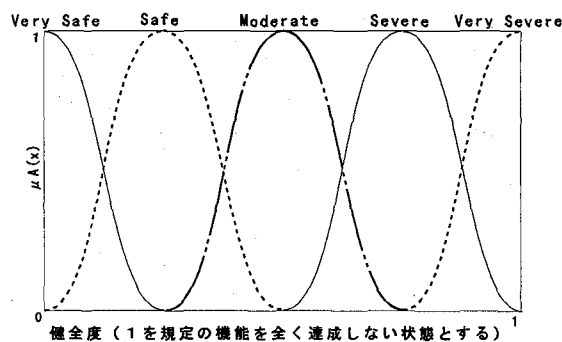
のような、あらかじめ設定した帰属度関数との合致度によって実行する。



図－9 コンクリート橋に対する耐久性用階層モデル



図－10 Dempsterの結合則による帰属度関数結合の流れ



図－11 診断に用いる比較パターンの帰属度関数の模式図

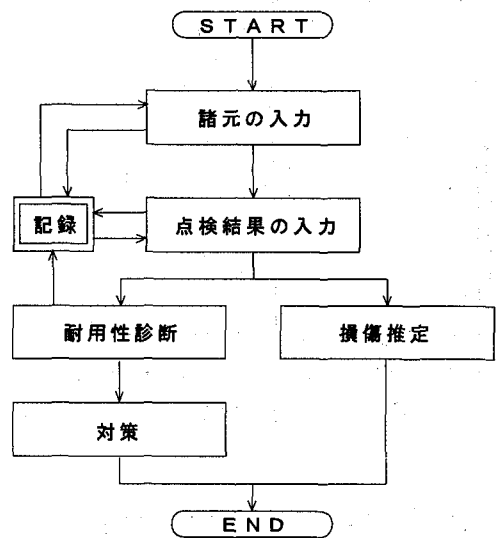
4. コンクリート橋維持管理支援システムの開発と検証

システムを開発する際、インターフェースの開発はシステムの操作性に影響するため重要な役割を示す。従来のコマンドインタプリタ方式よりも人とコンピュータの間の意志疎通をより円滑にしており、このようなソフトウェアをGUI (Graphical User Interface) と呼ぶ。本研究ではVisual Basicを用いGUI環境を実現したシステムの開発を行った。

4.1 システム構成と流れ

本研究で開発したシステムは、図－12に示すような流れになっている。

従来までのシステムは、諸元の入力後、耐用性診断を行うパスを選択してから点検結果の入力を行っていたため、別の診断を選択するともう一度点検結果の入力を行うという、ユーザーとしてはやや不満の残るものであった。そこで本システムでは初めに全ての入力を行った後、それぞれの処理に移るような流れに修正した。また、橋梁諸元や点検結果等の「記録」と発生している損傷に対する「対策」の表示の機能を加えることで、現在考えられている維持管理の考えに沿ったシステムを開発した。



図－12 システムの各項目群の流れ

4.2 諸元の入力

本システムでは、まず維持管理を行う対象であるコンクリート橋梁の構造条件、属地条件等の入力(図－13)を行う。ここでの入力項目は、一般的に記録されているものを参考にし、また階層モデルのパスの判定を行うのに必要なものを含めて決定した。

4.3 点検結果の入力

諸元の入力後、図－14に示すような画面に従って、点検によって得られた結果の入力を行う。

ここでの質問項目は文献等に記載されているものや、現在行われている点検及び判定を参考にして決定した。

図－１３ 橋梁諸元の入力画面

図－１４ 点検結果入力画面

以上の諸元及び点検結果の入力により、階層モデルのパスが通るかどうかを判定する。

また図－１４に見られるように、質問に対する回答の選択肢には「YES」、「NO」のほかに「UNKNOWN」という選択肢がある。この「UNKNOWN」の扱いについては、階層モデルのパスの判定を行う際には「YES」と同様の扱い、すなわちパスを通すことにしているが、診断を行うときや、耐久性等に影響を及ぼしている損傷要因を判定する際には、「NO」と同様の扱い、すなわち判定因子として選択しないことにしている。これは、本研究においては「UNKNOWN」は耐久性などに影響している可能性はあるが、その損傷が発生しているかどうか分からないため、判定しかねるということからこのような扱いをしている。ただし、質問項目については、なるべく現場において確認・推定が可能な項目を挙げており、「UNKNOWN」となる項目としては設計図書に関する項目等数項目程度であると考えられる。したがって、判定に及ぼす影響としては小さいものと考えられるが、実橋への適用を通じ「UNKNOWN」の取り扱いについて検討を加えていく。

なお、点検前に諸元とある程度の推定をもって点検結果を入力すれば、階層モデルのパスの通りを確認することにより、どのような損傷(劣化)が生じているか予想することができる。この劣化予測結果は点検時の重点確認項目として位置付けできる。この劣化予測を行う場合、当然のことながら「UNKNOWN」の入力項目が多くなることが予想されるが、劣化予測という目的からすると得られる結果に重要性は認められず問題はない。

4.4 耐用性診断

本システムでは耐用性診断として、「耐久性」、「主桁曲げ耐力」、「主桁せん断耐力」、「床版全体的損傷」、「床版部分的損傷」の５つの項目（図－３における最上層要因）についてそれぞれ診断を行う。診断の手順は３章で述べた手順に従って実行する。

まず各種の調査結果に基づいて、判定因子に５段階、あるいは３段階の主観的評価を与える（図－１５）。このとき、実際の状況と決定したランクにずれがあるなら、あいまいパラメータ b （図－５）の値によって調整を行う（図－１６）。

次に、判定因子が最上層要因である耐久性に対する影響度の程度を示す影響度（図－１７）と、評価に及ぼす確信の程度を示す確信度（図－１８）を決定する。検査結果、影響度、確信度の入力はいずれも入力したいボタンをクリックし、選択することで簡単に入力が行われる。これが本システムで適用した GUI の利点でもある。ここまでの入力によって、先に述べたようにファジィ関係 $R1$ （図－１９の黒線で示された帰属度関数）、 $R2$ を計算し、（３）式を用いることによって、判定因子の状態を表す帰属度関数が修正される（図－１９の矢印で示された帰属度関数）。

以上の動作を各判定因子ごとに行い、それぞれの状態を示す帰属度関数を計算し、Dempster の結合則によって、「耐久性」、「主桁曲げ耐力」、「主桁せん断耐力」、「床版全体的損傷」、「床版部分的損傷」における帰属度関数（図－２０）を求める。最終的な結果としてはそれぞれの項目において「Very Safe」、「Safe」、「Moderate」、「Severe」、「Very Severe」の５段階による評価を図－１１のような予め幾つかのパターンに理想化し決定しておいた帰属度関数との位置、形状の合致度を求めることによって、判定（図－２０）を行う。

図－１５ 耐用性診断画面１

耐久性

判定因子 25:空洞、豆板

帰属度関数のピークのずれ

判定ランクより良ければ＋で、悪ければ－で入力して下さい

帰属度関数のピークのずれ

B = ($-0.125 \leq B \leq 0.125$)

NEXT

図－１６ 耐用性診断画面２

耐久性

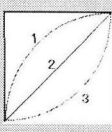
判定因子 25:空洞、豆板

影響度の入力

この判定結果の診断に対する影響度を入力して下さい

帰属度関数 $M(y)=PI(y;0.25,0.25,1)$

1 2 3 NEXT



図－１７ 耐用性診断画面３

耐久性

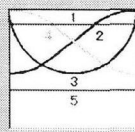
判定因子 25:空洞、豆板

確信度の入力

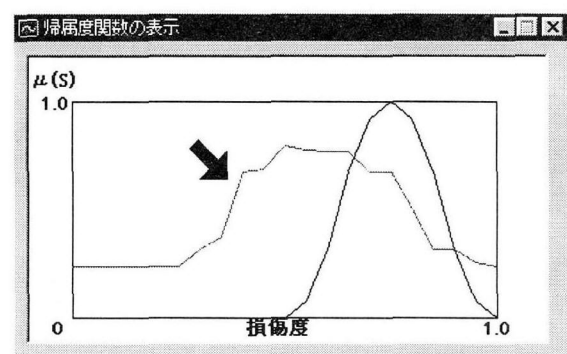
この判定結果の診断に対する確信度を入力して下さい

帰属度関数 $M(y)=PI(y;0.35,0.35,1)$

1 2 3 4 5 NEXT

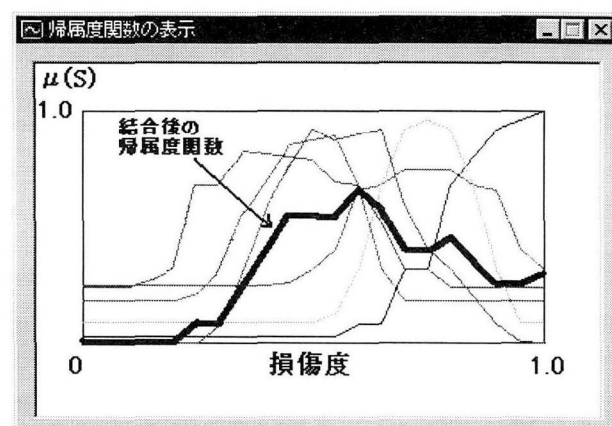


図－１８ 耐用性診断画面４



図－１９ 耐用性診断画面５

図－２１の診断結果から、Ｙ橋の「耐久性」は Moderate が 50.1 %，Severe が 34.6 % となり耐久性の低下が進行しつつあり、補修の必要性が高いことを示している。同時に実施した経験豊富な橋梁技術者の目視調査による診断結果も本システムと同様の結果となり、床版や主桁に幅 0.2mm 以上のひび割れが多数発生し、かぶり不足により鉄筋が腐食して剥離している箇所が認められるという状況からも、妥当な診断結果を得ることができたと考えられる。



図－２０ 耐用性診断画面６

耐久性

判定因子

VERY SAFE = 0.0 %

SAFE = 5.3 %

MODERATE = 50.1 %

SEVERE = 34.6 %

VERY SEVERE = 10.0 %

終了

図－２１ 耐用性診断画面７

表－２ Ｙ橋の「耐久性」診断入力値

判定因子	５段階評価	影響度	確信度
空洞・豆板	2/5	1	2
ハンチに沿ったひび割れ	5/5	3	3
排水桝及び周辺の損傷	4/5	2	5
コンクリート品質の不均一	4/5	2	3
配力鉄筋量	4/5	3	1
中性化	3/5	2	2

※５段階評価は１/５が最良，５/５が最悪の状態を示す

４．５ 対策工の提案（選定）

本システムは、維持管理を必要とする膨大な量の構造物に対して健全度評価を実施しようとすることから、目視点検を中心とした簡易データ、いわゆる１次点検データのみを利用している。したがって、最終的な評価において、「何らかの対策が必要」という結果になった場合

図－２０及び図－２１は、山口県内の橋齢 60 年のコンクリート橋（Ｙ橋）に対して本システムを適用して得られた耐久性に関する診断結果を示している。Ｙ橋の耐久性に関しては、諸元及び点検結果を入力することにより 6 項目の判定因子が抽出され、表－２に示す入力値によって診断を実施した。なお、Ｙ橋では、床版や主桁に幅 0.2mm 以上のひび割れが多数発生していたり、かぶり不足により鉄筋が腐食して剥離していた。

には、「詳細調査を実施する必要がある」という結論になり、対策工の要否判定及び対策工の選定については詳細調査の結果を踏まえて実施するというのが現実的である。

しかし、本システムを実行することによって得られるデータは、1次点検データのみを用いているとはいえ、現在までに蓄積された経験的知識を整理、統合したものであり、有意なデータを有していると考えられる。

また、実際に対策工を実施しようとする場合には、詳細調査を実施して詳細設計を行うことになるが、詳細調査を実施する前段階において、対策工法の選定がある程度把握できておれば、管理構造物の補修・補強の予算化及び計画化が概略実施でき、管理者にとって非常に意義があると考えられる。

したがって、本システムで得られたデータを利用した対策工の提案（選定）方法について検討を加える。

本システムでは、階層モデルを利用することによって判定因子が抽出され、その判定因子ごとにそれぞれの状態を表す帰属度関数を計算し、最終的には Dempster の結合則によって1つの帰属度関数（図-20）を求めている。

ここで以下の仮定を設ける。

①結合後の帰属度関数の重心位置の損傷度が0.5を超える場合を対策が必要な状態とする。

②ある項目に対し対策工が実施されたとした場合、その項目は判定因子から除くものとする。

上記仮定により、診断に用いられた判定因子を種々除くことによって、結合後の帰属度関数の重心位置を求め直し、損傷度が0.5以下になるケースを抽出する。そして求められたケース（判定因子）に対する対策工を図-22に示すように表示すれば、「対策」まで含めた維持管理を実行したことになる。



図-22 損傷に対する対策表示の画面

ただし、結合後の帰属度関数の重心位置が損傷度0.5以下となるケースは複数得られることが考えられ、どの組み合わせが最適であるかを判定しなければならないという問題点がある。

実際には、対策工は工期や予算によって決定される要素が大きいが、本システムでは以下の条件を設け対策工の選定に関し優先順位をつけるようにした。

すなわち；

①結合後の帰属度関数の重心位置が損傷度0.5以下となるケースの中で、判定因子の組み合わせ数の最も少ないケースを抽出する。

②上記①で同じ組み合わせ数の場合、損傷度が0.5を下回る程度が最も大きいケースを抽出する。

また、対策工については、1つの要因に対する対策工が複数存在するケースも考えられる。そのため、本システムでは画像データの取り込みや利用が容易である Visual Basic の特性を活かして、これまでの対策工を実施した事例を多く収集してデータベース化をはかり、現状の損傷状況と似たケースを写真から選択することによって、そのときに実施された工法、工期、費用が把握できるようなシステム化に向けデータを収集している。

このようなデータの提供が、管理者にとって最も具体性を持って「対策」についての考慮ができるものと考えられる。

ただし、これらの実施については今後数多くのデータを得てデータベース化をはかるとともに、実橋への適用を実施することによって、検証を加えていく必要がある。

5. まとめ

本研究では、過去の経験や知識から得られたコンクリート橋損傷要因間の関連性を階層モデルで表現した。またこの階層モデルを用いて、目視調査、資料調査等によって得られた点検結果からコンクリート橋に発生している損傷の推定を行うと同時に、ファジィ集合論を適用した耐用性診断と、発生した損傷の対策を表示する、維持管理支援システムの開発をはかった。

以下に本研究の成果をまとめる。

1. これまで手計算によって行われてきた階層モデル化手法をプログラム化した。これによって、新たな階層モデルの作成や、既存モデルの損傷要因間に新たな関連性が明確にされた場合、柔軟に対応し、素早く階層モデルの再構築を行えるようになった。

2. システム開発に GUI を導入することによって、画面レイアウトによるシステムの視覚化や、ほとんどの操作をマウスによって行うことで、操作性の向上を行った。

3. 本システムにおける「評価・判定」においては、健全度の指標に影響度と確信度という2種類の不確定性を考慮できるようにして、専門技術者が実施している診断方法により近づけた。

4. 対策工の選定法に関して、基本的な考え方を示すことにより、維持管理の基本構成である「劣化予測」→「点検」→「評価・判定」→「対策」→「記録」という一連の流れを実現することが可能となった。

また、検討課題として以下が挙げられる。

1. 影響度・確信度の入力値の確定

本システムにおける「評価・判定」において、現時点で影響度及び確信度は、診断毎に入力しなければならない

いなど、専門知識が浅くとも専門技術者と同等の診断が下せるという目的に対してやや不十分な点がある。今後、個々の指標における影響度及び確信度の入力値を確定する必要がある。

2. 階層モデル及び対策工選定法の妥当性

今後、対策工実施例のデータを数多く収集してデータベース化を行い、数多くの実橋への適用を実施することによって、本システムの「評価・判定」及び「対策工選定法」の妥当性に関し検証を加えていく必要がある。

3. 点検結果入力時の「UNKNOWN」の取り扱い

階層モデルの妥当性にも関連するが、入力項目の見直しを含め、「UNKNOWN」の取り扱いに関して検証する必要がある。

参考文献

- 1) 宮本文穂, 田中常夫: コンクリート橋損傷要因の階層化とその診断への適用, 建設工学研究所報告 第30号, pp.109 ~ 132, 1988.11.
- 2) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 富田孝弘: 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/V-6, pp.175 ~ 184, 1987.2.
- 3) 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.
- 4) 金海鉦, 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, pp.75 ~ 82, 1992.7.
- 5) 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ィ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.
- 6) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 富田孝弘: 橋梁診断における主観的あいまいさの取り扱い, 財団法人建設工学研究所研究報告第28号, pp.77 ~ 97, 1986.12.
- 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) 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, pp.193 ~ 197, 1992.8.

(1997年9月26日受付)