

論文 自動描画法による階層構造モデルを利用した構造物維持管理支援システム

白倉篤志^{*1}・前田剛志^{*2}・中村秀明^{*3}・宮本文穂^{*4}

要旨：著者らは従来より、階層構造モデルを用いて構造物の診断を行うシステムを構築している。本研究では、階層構造モデルの視覚化において、「可読性」などに配慮した自動描画手法を新たに提案することによって、最終的に FSM 法から階層構造モデルの構築と視覚的表示を可能とする「階層構造モデル作成機能」の構築を行った。さらに本機能と、従来のシステムを統合することで、モデルの構築→点検→診断といった一連の流れはもちろん、モデルの再構築（要因の追加・削除等）にも柔軟に対応が可能な、実用性の高いシステムへの改良を行った。

キーワード：階層構造モデル, FSM 法, 維持・管理, 補修・補強, 劣化診断

1. まえがき

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。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であるが、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いる。

このような状況に対応すべく著者らは、専門的な知識をあまり必要とせずに専門技術者と同等の診断が行えるよう「構造物維持管理支援システム」^{1),2)}の開発を行ってきた。これは、専門技術者の持つ過去の経験や知識をベースとして、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集合論を適用した耐用性診断を行うシステムである。しかし

ながら、これまでに著者らが開発してきたシステムは階層構造モデルの視覚化を手作業で行っていたため、階層構造モデルの妥当性の検討や再構築が十分に行えなかった。そこで著者らは、自動描画法を用いて階層構造モデルの視覚化を行った。これにより、モデルの再構築（要因の追加・削除等）にも柔軟に対応が可能な、実用性の高いシステムとなった。

2. 階層構造モデル作成過程

本システムは、各種構造物に適用可能であるが、今回はコンクリート橋を対象にシステムを構築した。そこでまず、対象となるコンクリート橋に関する損傷要因間の関連性を階層構造モデルとして構築する必要があった。以下に階層構造モデルの構築の一般的な流れを示す。

2.1 階層構造モデルの構築

まず、対象となる構造物の損傷要因の選定を行う。損傷要因は、階層構造モデルを構築する際に一人、または複数人の専門技術者によって決定される。今回の対象構造物はコンクリート橋である

*1 (株)ニチゾウテック 技術コンサルティング本部第1技術部, 工学士(正会員)

*2 山口大学大学院理工学研究科 博士前期課程知能情報システム工学専攻, 工学士

*3 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科, 博士(工学)(正会員)

*4 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科, 工博(正会員)

表-1 階層構造モデルの損傷要因表

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

ため、コンクリート橋に詳しい専門技術者の協力を得て、表-1 のように決定した。しかし、損傷要因には意味が捉えにくいものなどが含まれているため、本システムの使用対象となるユーザが理解しやすいように説明機能などの拡張が今後、必要である。

次に、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。従来より損傷要因の階層化手法として、ISM(Interpretive Structural Modeling)法、FSM(Fuzzy Structural Modeling)法があるが、本研究では専門技術者の主観を取り扱うため、ファジィ関係を用いる FSM 法を用いた。FSM 法は、要因間の関係に「あいまい二項関係」を導入しており、あいまい構造パラメータ λ と境界値 P を設定することにより一義的にならない柔軟な階層構造モデルを構築することができる。一般に、FSM 法には次の 3 つの制約条件がある（図-1）。

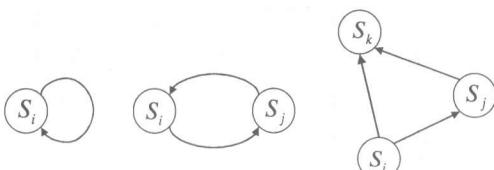


図-1 3 つの制約条件

- ①あいまい非反射律（自己ループがない）
- ②あいまい非対称律（サイクリック^{アス}がない）
- ③あいまい半推移律

これらの 3 つの制約条件を満たすように、全ての損傷要因間について一対比較を行い、あいまいマトリックスの作成を行う。あいまいマトリックスの対角成分には、あらかじめ 0 を入力しておく。これは、あいまい非反射律を満足すると共に、長時間に及ぶ数値入力を少しでも短縮するためである。また、実際に専門技術者にあいまいマトリックスの数値入力を行ってもらう際に次のような問題が発生した。本研究での階層構造モデルは、閉ループを持たない一方向モデルであるが、専門技術者に対し、この説明が不十分であったため、専門技術者の過去の経験からひび割れがさらなるひび割れの拡張を進めるという閉ループが発生してしまった。現実には起こり得る流れではあるが、ここでは上層要因が下層要因に再度影響を与えるものとしてループの削除を行った。このような専門技術者とのコミュニケーション不足は階層構造モデルの構築にかかる作業時間を大幅に増加させる原因となるため、今後注意していくべき点である。

作成されたあいまいマトリックスは、あいまい構造パラメータ λ と境界値 P を設定し、FSM 法を適用することで損傷要因間の関係を二値関係で導出することができる。

2.2 階層構造モデルの自動描画

前節で得られた損傷要因間の二値関係を基に

隣接行列を作成し、階層構造モデルの自動描画を行う。自動描画は、次の3つのステップを順次行っていくことで可能となる⁴⁾。

Step1：頂点の階層割当て

Step2：頂点の配置順序決定

Step3：頂点の配置座標決定

まず、Step1では、頂点の階層割当てを行う。これは与えられた非閉路有向グラフの各頂点のy座標を描画規則「一様分布」、「辺長小」を満たすように決定することである。すなわち、各階層にできるだけ一様に頂点を割当て、階層数を最少にすると共に、各頂点を結ぶ辺のスパンの総和を最小にすることを意味する。頂点の階層割当ての手法としては、階層数すなわち階層グラフの高さを最小とする最長パス階層化、各階層にはばらつきなく頂点を配置する一様幅階層化、長い辺をできるだけ避ける階層化などがある。本研究では、計算機に適した手法として、階層数を最少にするISM法⁵⁾における階層化と、ダミー頂点を用いてできるだけ長い辺を避ける階層化の2つの手法を併用して階層割当てを行う方法を用いることとした。ダミー頂点とは、辺のスパンが2以上の頂点間に追加する頂点のことである。最終的に描画する際には削除する。

次に、Step2では、各階層における頂点の配置順序決定を行う。このステップでは、先の階層割当てによって全ての頂点が各階層に分けられたので、次に描画規則「辺交差最少」を達成するよう各階層において頂点に順序付けを行った。全ての辺のスパンは1なので、辺の交差数は、頂点の細かな位置に依存せず各階層内での頂点の順序にのみ依存することになる。そのため、辺の交差数減少化の問題は各階層に対する適切な順序だけを選択する組合せ問題として捉えることができる。この問題は、単純な組合せ問題であるが、階層数が2つだけでもNP-完全問題であり、実際に解を求めるのは非常に困難である。そこで、辺の交差数の減少化を効果的に解決する手段として、2階層グラフに対して重心法⁴⁾、中央値法⁴⁾

と呼ばれる発見的手法が考案されている。これらは、各頂点をその隣接頂点の近くに配置する方が良いという直感に基づいたものである。本研究ではこれらの手法のうち、計算機に適した重心法を用いて辺交差を最少にしている（重心法については参考文献4）を参照されたい）。

Step2で交差数の少ない配置順序が決定されたので、Step3では4つの描画規則「最小分離」、「近接性」、「バランス性」、「直線性」を満たすように各頂点の配置座標を決定する。これを行う方法として杉山が提案している優先度法⁴⁾がある。優先度法は、優先度という概念を用いることで計算時間の短縮化を図った手法であり、本研究では、より早く描画結果を得る目的から、優先度法に改良を施して配置座標の決定を行った（優先度法については参考文献4）を参照されたい）。

2.3 階層構造モデルの合理性の判定

前節の自動描画法によりFSM法によって導出された階層構造モデルを描画する。その描画された階層構造モデルを専門技術者に吟味してもらい、合理性の判定を行う。この際、あいまい半推移律により発生したパスの合理性の判定や専門技術者が考えている階層構造モデルとの相違点などを挙げてもらい、それらを基にあいまいマトリックスの修正、または階層構造モデルへのパスの追加・削除を直接行う。これらの過程を幾度となく繰り返すことによって専門技術者の納得する階層構造モデルを構築することができる。階層構造モデルを構築する一連の流れを図-2に示す。

3. ファジィ集合論を用いた構造物の健全度評価

3.1 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¹⁾²⁾。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。

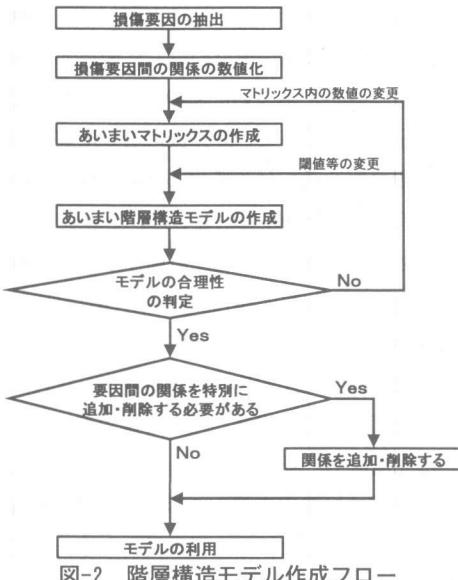


図-2 階層構造モデル作成フロー

図-3 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。

3.2 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(1)のように定義する。

$$R1 = \int_{X \times Y} \mu_{R1}(x, y)(x, y) \quad (1)$$

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

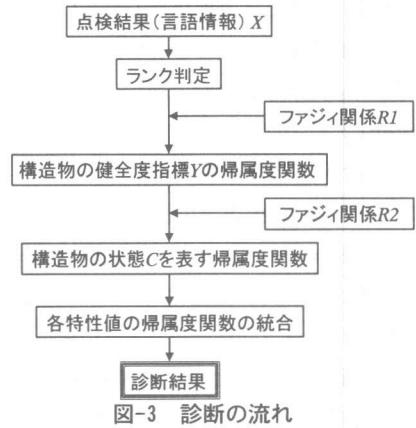


図-3 診断の流れ

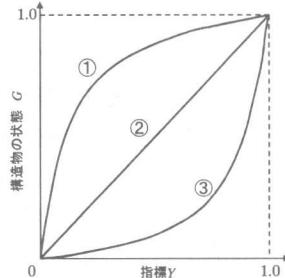


図-4 指標の影響度のパターン図

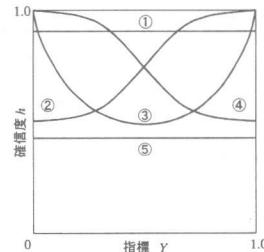


図-5 指標の確信度のパターン図

システムでは、帰属度関数を $\mu_{R1}(x, y)$ を、比較的任意に決定できる π 関数により決定している。

3.3 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。

(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

表-2 診断入力値

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

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。

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、「コンクリート構造物の維持管理指針(案)」³⁾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、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。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-5）が考えられる。

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(2)のように定義している。

$$R2 = \int_{Y \times C} \mu_{R2}(y, c) (y, c) \quad (2)$$

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 $R(R1 \cdot R2)$ 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。

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

4. 本システムの実橋への適用と検証

本研究では、このシステムを山口県内にある T 橋に適用し、検証を行った。表-2 に各判定要因に入力した5段階評価、影響度、確信度の一例を示す。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するようになっている。今回入力したハンチに沿ったひび割れにおいては、目視でかつ測定によるものであれば確信度 1 を、近距離であれば 3 を、遠距離であれば 2 が入る。以上のような入力をを行い、階層構造モデルの各要因の「耐久性」に対する帰属度関数を算出し、Dempster の結合則を用いてこれらを統合した。結果としてシステムから得られた「耐久性」の状態を表す帰属度関数を図-6 に示す。階層構造モデルの詳細については文献 2)を参照されたい。「耐久性」の帰属度関数から得られた最終的な損傷度は 0.64 であった。本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の注意が必要であり、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、本システムでは損傷度が 0.5 を超えると損傷度を 0.5 以下に下げるために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「排水枠および周辺の損傷」および「ひびわれ幅」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

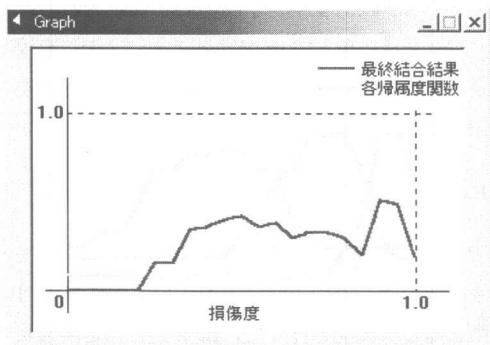


図-6 「耐久性」の状態を表す帰属度関数

- ・主桁のひびわれ
- 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、本システムによる診断結果は専門家による評価と非常に近い結果が出力されていると考えられる。ただし、図-6 の帰属度関数の形状をみると、広がりがあるため評価に対するあいまいさが比較的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が、目視による調査結果であり、確信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り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。

5.まとめ

本研究は、自動描画法による「階層構造モデル作成機能」の構築と既存のシステムとの統合を行い、実橋梁を用いて検証を行った。

以下に本研究で得られた成果をまとめると。

- ①「可読性」に優れた自動描画法を用いることにより、階層構造モデルを短時間で描画することが可能となり、モデルの再構築にも柔軟に対応

できるようになった。

- ② FSM 法による損傷要因間の関係の導出と自動描画法による描画機能を統合することにより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」の流れがスムーズに実現できるようになった。
- ③ 山口県内の T 橋に対する診断を行った結果、専門技術者とほぼ同様の診断結果が得られた。しかし、判定要因のあいまいさの取り扱いについては今後検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 西村 昭, 藤井 学, 宮本文穂, 富田隆弘 : 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.
- 2) 白倉篤志, 水口弘範, 宮本文穂, 中村秀明 : 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構築, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1025-1036, 1998.3
- 3) 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, 土木学会, 1995.10.
- 4) 杉山公造 : グラフ自動描画法とその応用—ビジュアル ヒューマン インタフェース, 社団法人計測自動制御学会, pp.44-71, 1993.7.
- 5) 吉川和広 : 新体系土木工学 52 土木計画のシステム分析, 土木学会, 1980.3.