

FISM/fuzzyによる構造物診断のための 階層構造モデル作成の効率化

白倉篤志¹・中村秀明²・宮本文徳³

¹正会員 工学士 (株)ニチワケック 技術コンサルティング 本部第1技術部 (〒551-0023 大阪市大正区鶴町2-15-26)

²正会員 博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

著者らは、これまで損傷要因間の関連を階層構造モデルで表し、この階層構造モデルを基に構造物の診断を行う「構造物維持管理支援システム」の開発を行ってきた。このシステムでは、これまでに階層構造モデルの自動描画手法を提案し、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プロセスの構築を行ってモデル作成の効率化を図ってきた。しかし、この方法においても、各要因間の関連性の強さに関して全ケースの入力が必要であるという非効率的な問題を抱えていた。そこで本研究では、階層構造モデル作成の効率化に対して検討を加えるため、ファジィ理論を導入した構造モデリング手法の1つであるFISM/fuzzyの適用を試み、アルカリ骨材反応による損傷を例にFSM法と比較・検討した。

Key Words : *diagnosis, maintenance, fuzzy hierarchy structural model, decision support system, fuzzy flexible interpretive structural modeling, fuzzy set theory*

1. はじめに

著者らは日常点検程度の入力データで専門技術者と同等の診断が行える、階層構造モデル(以下階層モデルと略記する)を利用した「コンクリート構造物維持管理支援システム」の開発を行ってきた^{1),2)}。このシステムは、「階層モデル作成機能」を有し、構造物の損傷要因間の関連を表す階層モデルを作成し、この階層モデルを核に診断等を実施している。この「階層モデル作成機能」では、これまでコンピュータを利用した高速演算や自動描画手法を取り入れて階層モデルの可視化を行い効率化を図っている³⁾が、全ての要因に対して関連性の強さを定義しなければならず、効率性と合理性に関して十分満足のいくモデリングが行われていないのが現状である。そこで、よりスムーズに専門技術者の知識や経験をシステムに組み込むプロセスの構築が必要であると考え、本研究では「階層モデル作成機能」の効率化に対して検討を加えるため、ファジィ理論を導入した構造モデリング手法の1つであるFISM/fuzzy(Fuzzy Flexible Interpretive Structural Modeling)の適用を試みた。

2. 既存システムの問題点

既存のシステムでは、FSM(Fuzzy Structural

Modeling)法⁴⁾を用いて階層モデルの作成を行っているが、いくつかの問題点を抱えている。その1つとしてFSM法では一対比較の効率化が考慮されていないため、あいまいマトリックスの形成に多大な労力と時間を要することが挙げられる。また、FSM法では入力に際して特別な制約を持たないが、構造同定を行う前に全体の推移性を考慮するため、閾値 P において制約条件を満たすようにあいまいマトリックスを修正する必要がある。FSM法の修正方法では特定の要因間の関係が全体に波及する可能性が高く、多くの修正を受けてしまう。そのため、作成された階層モデルはその合理性の判定において、さらなる修正が必要となる場合が多い。そこで、ファジィ理論を導入したもう1つの構造モデリング手法であるFISM/fuzzyを適用し、FSM法による構造モデリングとの比較・検討を行った。

3. FISM/fuzzyによる構造モデリング

FISM/fuzzyは、人間の自由な思考や柔軟な発想を考慮した対話的構造モデリング手法であり、効率性と論理性に関して、ファジィ部分可到達行列と含意規則を用いることにより、構造モデリングを論理的に無矛盾かつ効率よく実現する事が可能である^{3),4)}。また、閾値の変更にも柔軟に対応できることから、閾値の抽出自体も可能である。構造化過程において

は、閾値 α のみをパラメータとして使用しているの
 で、FSM 法を用いた階層モデル作成機能における
 不明瞭な部分であった「閾値 P とあいまいパラメー
 タ λ の組み合わせ」を考慮しなくてもよいという点
 でも有効であると思われる。

FISM/fuzzy の適用に関して基本的な事項となる記
 号と定義について以下に簡単に記述する^{3,4)}。

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ を要因集合とし、 $J = S \times S$ と
 する。 $R = \{(i, j) | i, j \in S\} \subseteq J$ は S 上のファジィ反
 射性とファジィ推移性を満たすファジィ 2 項関係 (フ
 ザジィ擬順序関係またはファジィ前順序関係) を指
 し、次のような性質がある。

$$\text{ファジィ反射性: } I \subseteq R \quad (I: \text{単位行列}) \quad (1)$$

$$\text{ファジィ推移性: } R^2 \subseteq R \quad (2)$$

ファジィ行列 (Fuzzy matrix) とは、ファジィ擬
 順序関係 R への帰属度を表す数値を要素とする行
 列のことであり、行列 M の (i, j) 要素を m_{ij} と書く。

ただし、 $0 \leq m_{ij} \leq 1$ である。すなわち

$$M(i, j) = [m_{ij}] \quad (3)$$

と書くことができる。

次に、ファジィ行列 M の値 m_{ij} 、 m_{im} およびファ
 ジィ行列 $A = [a_{ij}]$ 、 $B = [b_{ij}]$ に対して、以下の演算
 を定義する。

$$m_{ij} m_{im} = \min(m_{ij}, m_{im}) \quad (4)$$

$$m_{ij} + m_{im} = \max(m_{ij}, m_{im}) \quad (5)$$

$$m_{ij} @ m_{im} = \begin{cases} 1 & : m_{ij} \leq m_{im} \\ m_{im} & : m_{ij} > m_{im} \end{cases} \quad (6)$$

$$(A + B)_{ij} = \max(a_{ij}, b_{ij}) \quad (7)$$

$$(AB)_{ij} = \max_k [\min(a_{ik}, b_{kj})] \quad (8)$$

ファジィ可到達行列とは以下の条件を満たす正方
 ファジィ行列 M のことである。

$$\begin{cases} M + I = M \\ M^2 = M \end{cases} \quad (9)$$

部分的既知なファジィ行列とは、その行列の要素
 が上限値 \bar{m}_{ij} と下限値 \underline{m}_{ij} を持つ行列であり、行列
 M の (i, j) 要素を $m(i, j) = [\underline{m}_{ij}, \bar{m}_{ij}]$ と表す。ただし、
 $0 \leq \underline{m}_{ij} \leq \bar{m}_{ij} \leq 1$ である。 $m(i, j)$ が、 $\underline{m}_{ij} < \bar{m}_{ij}$ の時は
 未知要素、 $\underline{m}_{ij} = \bar{m}_{ij}$ の時は既知要素と呼び、未知要
 素と既知要素を持つ行列を部分的既知なファジィ行
 列と呼ぶ。

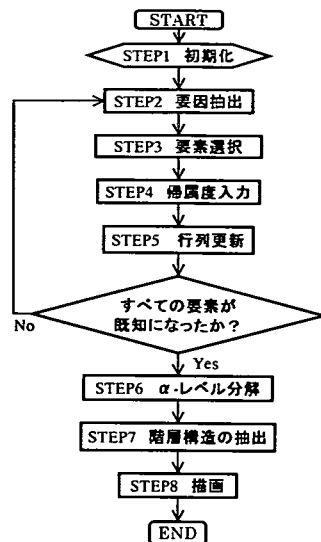


図-1 FISM/fuzzy のフロー

ファジィ部分可到達行列とは、部分的既知なファ
 ジィ行列でかつファジィ反射性とファジィ部分可到
 達性を満たす行列 M のことである。

また、ファジィ部分可到達行列の更新を目的とし
 た含意規則は、ファジィ部分可到達行列の未知要素
 に値を与えたときに、新たな行列が再びファジィ部
 分可到達性を満たすために、他の未知要素の値を決
 定する規則である。

FISM/fuzzy による構造モデリングのフローを図-1
 に示す。各 STEP では以下の処理を行い、STEP2 から
 STEP5 を具象化、STEP6 から STEP8 を構造化と呼ぶ。

[STEP1: 初期化]

一対比較行列 M (ファジィ部分可到達行列) の
 初期化を行う。行列 M がファジィ部分可到達行列
 であるとは、その行列の要素が最大値と最小値を持
 ち、かつファジィ反射性とファジィ部分推移性を満
 足する行列である。よって初期化において、行列の
 対角要素はファジィ反射性により 1、その他の要素
 はファジィ部分推移性により $[0, 1]$ に設定する。

[STEP2: 要因抽出]

必要があれば要因の追加、削除を行う。

[STEP3: 要素選択]

帰属度を入力する要素対を選択する。どの要素対
 を選択するかによって一対比較の回数に影響を及ぼ
 すので、より効率的なマトリックス作成を目指すな
 らば要素対選択戦略を利用するとよい。

[STEP4: 帰属度入力]

選択された未知要素対 $(i, j) (i, j = \{1, 2, \dots, n\}; i \neq j)$ の帰属度を決定する。ただし、これらの値は既に制約されている区間値内の値でなければならない。

[STEP5 : 行列更新]

選択された要素対 (i, j) の新たな帰属度 $[m'_{ij}, \overline{m'_{ij}}]$ と含意規則を用いて行列 M を更新する。含意規則を適用して他の $(l, m) (l, m = \{1, 2, \dots, n\}; l \neq m)$ 要素の値 $[m_{lm}, \overline{m_{lm}}]$ を、新たな値 $[m'_{lm}, \overline{m'_{lm}}]$ へ変更する。変更後の行列 M' は、含意規則によりファジィ部分可到達行列となる。

STEP2 から STEP5 の処理を行列 M 内の未知要素がすべて既知要素になるまで繰り返す。こうして得られた行列 M はファジィ可到達行列になる。

[STEP6 : α -レベル分解]

閾値 α を設定し、STEP2 から STEP5 の処理で得られたファジィ可到達行列 M を α -レベル分解 $(1: m_{lm} \geq \alpha, 0: m_{lm} < \alpha)$ し、2値可到達行列 (α -レベル分解行列) にする。

[STEP7 : 階層構造の抽出]

有向グラフ表示のため、2値可到達行列に対して、ISM 法の処理 (強連結部分の縮約, パート分割, 階層レベル分割等の計算) を行う。

[STEP8 : 描画]

結果を出力する。その表現形式を階層グラフで表現する。

4. 本システムの適用例

FISM/fuzzy の適用性を検討するため、過去に FSM 法で構造モデリングが行われているコンクリート構造物のアルカリ骨材反応による損傷⁹⁾を取り上げ、主にアルカリシリカ反応 (以下, ASR と略記する) 発生メカニズムの構造化を FISM/fuzzy の適用対象とした。

損傷発生要因の抽出は、FSM 法との比較・検討を行うため、参考文献に基づいて行った⁹⁾。アルカリ骨材反応発生要因を表-1 に示す。ここでは、「骨材の反応性」と「ひび割れ進行性」の2つを最上層要因とし ASR による損傷か否かの判定を行っている。また、「ひび割れ進行性」は「ひび割れ幅」と「ひび割れパターン」によって決定されると定義した。

FSM 法においては、閾値 P とあいまい構造パラメータ λ を試行錯誤的に組み合わせて、合理的な階層モデルを模索する。参考文献⁹⁾では、FSM 法による階層モデルとしては最終的に $P=0.6$, $\lambda=0.5$ を用いたモデルを合理的なモデルであると判断してい

表-1 アルカリ骨材反応発生要因⁹⁾

番号	要因名	番号	要因名
1	骨材の反応性	13	構造物の種類
2	ひび割れ進行性	14	膨張量
3	ひび割れパターン	15	施工時期
4	ひび割れ幅	16	施工の良否
5	ひび割れ拘束度	17	立地条件
6	骨材岩種	18	排水の程度
7	骨材産地	19	単位セメント量
8	反応性骨材混合比	20	セメントの種類
9	反応リングの量	21	水セメント比
10	ゲルの性質	22	湿和材の種類
11	鉄筋量	23	ひび割れ発生時期
12'	部材寸法		

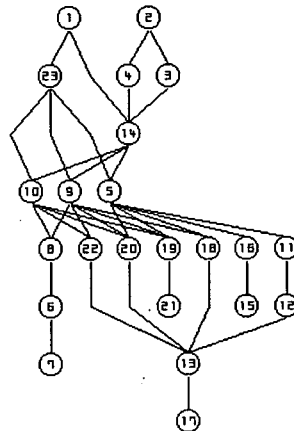


図-2 FSM 法による階層構造モデル

(図-2 参照)。同図を基に、FISM/fuzzy によって作成される階層モデルと比較・検討を行った。

また、FSM 法における制約条件による修正を行う前のマトリックスは、損傷発生要因の隣接関係のみを単純に表していると考え、FISM/fuzzy 適用実験における入力値として使用した。

(1) FISM/fuzzy における入力順序

FISM/fuzzy では、具象化が進むにつれて含意規則による制約が増え、帰属度の値を入力できる範囲が狭まってくる。すなわち、入力順序が後になる程、入力における自由度が減ってくる。また、入力順序は入力回数にも影響を及ぼす。選択された要素対によって含意される箇所が異なるからである。したがって、FISM/fuzzy による構造モデリングには、対象問題に応じた入力順序を考える必要がある。

本研究の目的は、矛盾のないモデルを効率よく作成することにある。したがって、今回の対象問題にとって最適な入力順序は、入力の自由度が高い段階で、要因間の関連性について確信度が高いものから

順に入力していく方法であると考え、これを確信度優先入力とする。確信度が高いものから順に入力していくことで含意規則による制約を避け、確信度の低いものはある程度、含意にまかせて入力することで労力の削減が図れる。

次に、入力順序の決定にともない、確信度をどのように定義すれば良いのかを検討した。ここでは、確信度を「数値の優先順位」と「要因の優先順位」を組み合わせることで定義する事とした。優先順位の設定方法について以下に記述する。

a) 数値の優先順位

あいまいな関係を厳密に数値化することは非常に困難である。例えば、関連性を表す数値として 0.5 と 0.6 を比較した場合、その差を明確に定義するのは非常に困難である。反対に、関連性の有無が明確なものは、数値化が比較的容易であると考えられる。したがって、数値化が容易であるということは確信の高さに直結していると考えられる。そこで本研究では、損傷発生要因間の関連性を表す数値が 1.0 に近ければ近いほど、または 0.0 に近ければ近いほど数値の優先順位を高く設定する事とした。

入力値は 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.0 の 6 種類を設定した。0.8 は 1.0, また 0.2 は 0.0 から 0.2 離れているが、関連性の数値化の際には、関連性のあるものから数値化を行うことにしているため、0.8 の優先順位を高く設定する。また、0.0 の確信度を高く設定し優先入力を行うと、連結線の多くが消去された階層モデルが作成される可能性が高いので、0.0 の優先順位を最も低く設定する。このようにして、1.0 → 0.8 → 0.2 → 0.6 → 0.4 の順に数値の優先順位を設定し、0.0 は他の数値が全て入力された後に入力する事とした。

b) 要因の優先順位

関連性を表す帰属度の値が同じ場合は、要因につけられた優先度によって選択する。

まず、ASR による損傷か否かの最終的な判定は 2 つの最上層要因 (1: 骨材の反応性, 2: ひび割れ進行性) によって決定すると定義しているため、最上層要因について優先順位をつける。今回の最上層要因の優先順位は、表-1 に示す要因番号順とする。

次に、最上層要因以外の要因について優先順位を決定する。要因間の関連性を数値化する際、各要因の最上層要因への影響度は比較的イメージが容易であり、また最終的な判定は最上層要因によって決定しているため、「数値の優先順位」を基に最上層要因への影響度を考慮して要因へ優先順位をつける事とした。このようにして要因に優先順位をつける方

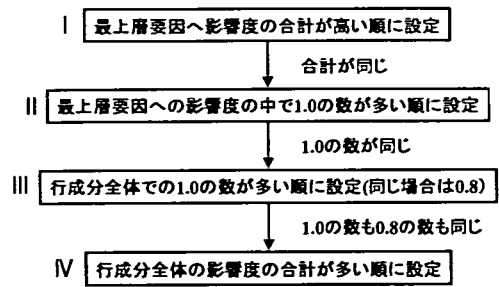


図-3 要因の優先度を設定する方法

表-2 要因の優先順位

優先順位	要因名(要因番号)	優先順位	要因名(要因番号)
1	骨材の反応性 (1)	13	反応リングの量 (9)
2	ひび割れ進行性 (2)	14	部材寸法 (12)
3	ひび割れパターン (3)	15	施工の良否 (16)
4	ひび割れ幅 (4)	16	水セメント比 (21)
5	膨張量 (14)	17	立地条件 (17)
6	ひび割れ拘束度 (5)	18	単位セメント量 (19)
7	ゲルの性質 (10)	19	セメント種類 (20)
8	鉄筋量 (11)	20	施工時期 (15)
9	骨材岩種 (6)	21	排水の程度 (18)
10	反応性骨材混合比 (8)	22	混和剤の種類 (22)
11	構造物の種類 (13)	23	ひび割れ発生時期 (23)
12	骨材産地 (7)		

法を図-3 に示す。図-3 に示す方法では、要因間の関連性を表すマトリックスの行成分に注目して設定を行っている。マトリックスの行成分は、関連性の数値化に関し影響を与える側、すなわち要因 A から要因 B への影響はどの程度あるかというように関連性をイメージして行うものであり、入力容易であることから、数値を入力する際も行成分方向から入力する事とした。この方法によって決定した要因の優先順位を表-2 に示す。

数値の優先順位と要因の優先順位を組み合わせ、以下の 2 種類の確信度優先入力を設定した。

方法 1: 表-2 に示す要因の優先順位に従って要因を選択し、その要因の行成分について、数値の優先順位に従い入力を行う。同じ値は列成分の優先順位によって選択する。

方法 2: 数値の優先順位に従って、行列内における 1.0 を全て入力する。行列内に 1.0 は複数個あるので、まず行成分の優先順位によって選ぶ。その行内にまだ 1.0 が複数個ある場合は、列成分の優先順位によって選ぶ。同様の作業を数値の優先順位に繰り返す。

このようにして、方法 1, 方法 2 によって作成したマトリックスを用いて階層モデルを作成し、作成された階層モデルの評価を行った。

表-3 入力回数と減少率

入力順序	入力回数	減少率 (%)
単純行入力	318	37.2
単純列入力	234	54
確信度優先入力 方法1	195	61.5
確信度優先入力 方法2	190	62.5

(2) FISM/fuzzy による構造モデリングの評価

FISM/fuzzy と FSM 法との比較を行い、効率性と合理性について検証を行った。効率性はマトリックスを作成する際の対比較の入力回数からの減少率について、また合理性は作成された階層モデルを比較することにより考察した。

a) 入力効率向上の検証

マトリックス作成における入力率を、

$$\frac{\text{入力した回数}}{\text{入力対象となる全要素数}} \times 100 (\%)$$

と定義する。

今回の検証は要因数 23 個で行ったため、マトリックスの要素数は 529 個 (23×23=529) となる。対角成分は、FSM 法ではあいまい非反射律により 0.0 を、FISM/fuzzy ではファジィ反射性により 1.0 を入力するので、入力対象から外す。したがって、入力対象となる要素数は 506 個 (529-23=506) となる。FSM 法は、全ての要因間について対比較を行い、数値を入力しなければならないため、入力回数は 506 回となる。FSM 法の入力率を 100(%)として、減少率を

$$100 - (\text{FISM/fuzzy 各入力順序による入力率})(\%)$$

と定義し、入力効率向上の検証を行った。

確信度優先入力の減少率の比較対象として、要因番号順に行成分方向から単純に入力する方法 (以降、単純行入力とする) と要因番号順に列成分方向から単純に入力する方法 (以降、単純列入力とする) とを取り上げ、比較を行った。各入力順序の入力回数とその減少率を表-3 に示す。表-3 に示すように、単純列入力の減少率が、単純行入力の減少率よりも高かったため、確信度優先入力の方法 1、方法 2 ともに 0.0 の入力も単純列入力で行った。

表-3 に示す検証結果より、方法 1、方法 2 ともに含意規則が有効に働き、入力の効率性向上に十分な効果があったといえる。

b) FSM 法による階層モデルとの比較

方法 1、方法 2 によって作成したマトリックスと 3 種類の閾値 ($\alpha=0.8, 0.6, 0.2$) を用いて階層モデルを作成した。閾値を低く設定 ($\alpha=0.2$) するとモデル

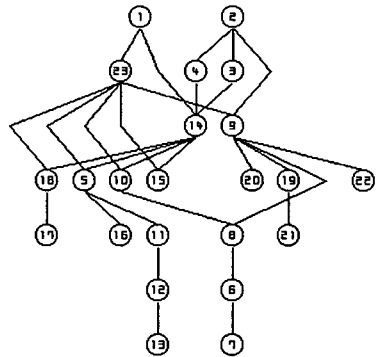


図-4 方法 1、閾値 0.6 の階層構造モデル

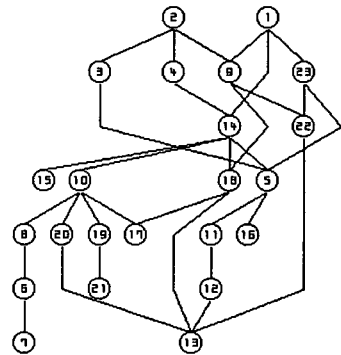


図-5 方法 2、閾値 0.6 の階層構造モデル

が単純になり、高く設定 ($\alpha=0.8$) すると階層関係が希薄になる。以上のことから、 $\alpha=0.6$ の階層モデルが最も的確に要因間の関連性を表現しているといえる。また、このことから、閾値は 0.6 付近に設定されていると判断できる。方法 1 によるマトリックスを閾値 0.6 で構造化した階層モデルを図-4、方法 2 によるマトリックスを閾値 0.6 で構造化した階層モデルを図-5 に示す。

図-4、図-5 に示す FISM/fuzzy による階層モデルの連結線を図-2 に示す FSM 法による階層モデルとの比較を行うため表-4 に示すように分類した。

表-4 に示すように、方法 1、方法 2 ともに FSM 法と同じ要因間の関係を表す連結線は同数の 23 本であった。しかし、その内訳は異なっている。例えば、9→23 の連結線は方法 1 にのみ見られ、18→9 の連結線は方法 2 にのみ見られる。これは、入力順序の違いが階層モデルに反映されたものと考えられる。23 本の FSM 法と共通の連結線のうち、方法 1 と方法 2 のどちらか一方にのみ存在する連結線は 12 本あり、方法 1 と方法 2 の両方に存在する連結線は 17 本あった。

表-4 FISM/fuzzyによる階層構造モデルの連結線

	FISM/fuzzyによる階層構造モデル	
	方法1($\alpha=0.6$)	方法2($\alpha=0.6$)
総連結数(本)	29	31
FSM法と同じ要因間の関係を表す連結線(本)	23	23
FSM法には存在しない連結線(本)	6	8
FSM法にのみ存在する連結線(本)	12	12

逆に FSM 法には存在しない連結線のうち、方法1と方法2の両方に存在する連結線は4本あった。この4本の連結線は、FISM/fuzzyの可到達性を重視する構造モデリングによって発生したと考えられる。

FSM法にのみ存在する連結線が、方法1と方法2ともに12本であった事は、FISM/fuzzyでは隣接行列が存在しないため、隣接関係の把握が困難である事を表していると考えられる。

実験の結果から FSM 法と共通の連結線が23本あることは、方法1と方法2で若干違いが見られるものの、FISM/fuzzyによる階層モデルの大部分は合理的であったと判断できる。

5. まとめ

本研究では、構造モデリングに FISM/fuzzy の適用を試み FSM 法との比較を行い FISM/fuzzy の有効性を検証した。本研究の主な成果を以下にまとめる。

- ① FISM/fuzzy 適用により、FSM 法に比べ階層モデル作成の効率性が向上した。また、閾値の設定も比較的容易になった。
- ② コンクリート構造物の劣化現象の1つである ASR 発生メカニズムの構造化において、FISM/fuzzy による階層モデルの大部分は合理的であると判断できた。これにより、FISM/fuzzy による階層モデル化はコンクリート構造物の劣化・損傷メカニズムの構造化にも適用可能である

と考えられる。

- ③ 実験結果から、FISM/fuzzy の入力順序としては確信度優先入力が有効であると考えられる。

また、今後の課題として以下の点が挙げられる。

- ① 要因間の関連性を細部にわたって構造化するためには、要因間の隣接関係を求める手段を検討する必要がある。
- ② FISM/fuzzy の既存システムへの適用性を検討するため、要因数が非常に多いコンクリート橋などの実構造物の損傷要因を FISM/fuzzy で構造化し、検証を行う必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、前田剛志氏（㈱富士通プライムテクノロジ）ならびに田嶋裕士氏（明治電機工業㈱）には多大なるご協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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構築, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1025-1036, 1998.3.
- 2) 白倉篤志, 宮本文穂, 中村秀明, 前田剛志: 自動描画法を用いた構造物診断のための階層構造モデルの構築, 土木学会論文集, No.658/VI-28, pp.267-272, 2000.9.
- 3) 三田村 保, 大内 東: ファジィ構造モデリングにおけるファジィ推移的具象化の理論とアルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.2, pp.301-308, 1994.2.
- 4) 大内 東, 三田村 保, 若林 高明: FISM/fuzzy: 柔軟なファジィ構造モデリング, 電学論 C, Vol.114, No.3, pp.361-366, 1994.
- 5) 藤井学, 宮川豊章, 井上晋, 宮本文穂: アルカリ骨材反応及び塩害発生要因の階層モデル化と耐用性判定手法の開発に関する研究, 京都大学平成2年度科学研究費補助金(一般研究(B)) 研究報告書, 1991.3.

(2001.12.11 受付)

VERIFICATION OF MODELING SYSTEM FOR HIERARCHY MODEL IN STRUCTURAL DIAGNOSES BY FUZZY FLEXIBLE INTERPRETIVE STRUCTURAL MODELING

Atsushi SHIRAKURA, Hideaki NAKAMURA and Ayaho MIYAMOTO

The authors have been working for some time on the development of a maintenance support system for concrete structures based on a combination of both the fuzzy hierarchy structural model and the fuzzy set theory which deal with the subjective information related to the serviceability assessment. In this study, in order to improve the flexibility and practicality of the maintenance support system, a modeling system by fuzzy flexible interpretive structural modeling (FISM/fuzzy) for hierarchy modeling was newly developed and also compared FISM/fuzzy with fuzzy structural modeling (FSM) to apply the system to alkali-silica reaction.