

橋梁構造物の架設中の安全性評価に関する基礎的研究

SAFETY EVALUATION OF BRIDGE STRUCTURES DURING CONSTRUCTION

白石 成人*, 古田 均**

By Naruhito SHIRAISHI and Hitoshi FURUTA

In the safety assessment of structures during construction, various uncertainties due to the properties peculiar to individual structures should be considered. To establish an appropriate safeguard system, it is important to utilize the qualitative information based on engineers' intuition and experience, as well as the quantitative information such as the measured stress and displacement. Using the concept of fuzzy reasoning, an attempt is made here to develop an evaluating system which is implemented on the basis of the modus ponens. The ultimate objective of this prototype system is to monitor the change of structural safety during construction. To illustrate this system, a numerical example is presented herein.

1. まえがき

構造信頼性理論の実際問題への応用という観点からは、多くの構造物を対象とした全般的な構造安全性について議論するだけではなく、個々の構造物の安全性評価に注目する必要がある。個々の構造物の安全性を議論するには、特に架設・施工中の安全性評価が問題となる。このことは、特に橋梁の場合、架設中に多くの事故が発生していることから明らかである。架設中の事故が多いのは、大規模で個性が高く過酷な自然環境下におかれているなどの土木構造物が持つ固有の性質にもよるが、架設工事に関わる特殊性に対して十分な配慮を行った安全性評価法が確立されていないためであると思われる。

本研究では、橋梁の架設・施工時の安全性評価の重要性に注目をし、架設に起因する不確定要因を明確にし、その影響を橋梁構造物の安全性評価に定量的な形で導入する方法について検討する。一般に橋梁の架設工事は、¹⁾

- 1) 各橋梁工事ごとに工法が違ふ。(本体設計・仮設備)
- 2) 構造物の大規模化により、設計、製作、施工の分業化が行われている。(架設計画)
- 3) 汎用性が少ない特殊な機械、仮設備の使用が多い。
- 4) 架設状況が変化する。(架設の段取り、作業空間等)

* 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 工博 京都大学講師 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

5) 自然環境の影響が大きい。(台風、洪水等)

など工事内容、現場条件も種々さまざまであり、設計、製作に比べて統一的に取扱うことが困難である。そのため、架設中の状況の変化や、架設計画立案時に考慮されえなかった問題の発生など、架設時の安全性評価にはその特殊性を十分に考慮する必要がある。すなわち、この架設工事に関する特殊性に起因して、考慮されるべき不確定性も、熟練した設計者や現場技術者の経験、工学的判断に基づいて評価されるものが多い。さらに、現場条件や自然環境が絶えず変化するため、状況変化に伴う不確定性の影響も考えておく必要がある。

以上のことから、架設中の安全性評価法としては、構造物の変位量や、測定応力などの定量的な情報だけでなく、設計者や現場技術者の経験や工学的判断を有益な情報としてとらえ、これらいわゆる定性的な情報と定量的な情報を組合わせて総合的な評価をすることが必要である。さらに、構造物を取巻く環境条件の経時的な変化を考慮するために、モニタリングシステム的な取扱いが望ましい。すなわち、安全性評価システムとしては、モニタリングシステムの形態をとり、不確定要因の影響を架設中の定性的、定量的な情報を基に総合的に評価できるエキスパートシステム²⁾を構築することが有用であろう。ここでは、架設現場における技術者の工学的判断をも定量的な形で取込むために、ファジィ推論を用いた構造安全性評価法を提案する。

ファジィ推論³⁾は数理論理学における推論形式を基に、2値論理¹⁾を拡張したファジィ論理⁵⁾を用いて規定される。すなわち、ファジィ集合の概念を用いることにより、命題判断に含まれるあいまいさを考慮した上で近似的ではあるが妥当な結論を導くことを目的としている。架設中の不確定要因をファジィ推論を用いて評価することにより、経験や工学的判断に基づいた定量的な安全性評価が可能となる。ファジィ推論では、多値論理推論などを基盤にいくつかの演算方法が提案されている。そこで、本研究では、これらの演算形式について比較検討を行い、簡潔で安全性評価法に最も適している方法を見出し、それを基に総合的な安全性評価システムを構築することを試みる。

2. ファジィ推論の基礎的事項^{3), 5)}

本論文では、ファジィ推論を用いて橋梁の架設中の安全性評価について検討する。ここでは、その際必要なファジィ推論の基礎的な事項について記し、ファジィ推論の実行過程で用いられるいくつかの演算法を示す。ファジィ推論は通常の推論形式を前提部、結論部にファジィ命題を含む場合に拡張したものである。演繹的推論⁶⁾には、肯定式(modus ponens)と否定式(modus tollens)がある。前提Pが成り立てば結論Qが成立するという条件付規則があるとき、Pが得られて結論としてQが得られるという推論が肯定式であり、Qの否定 $\bar{Q}$ が得られてPの否定 $\bar{P}$ が結論として得られるという推論が否定式である。いま、条件付規則PならばQをIF P THEN Qと表し、さらにPを(X is F)、Qを(Y is G)と表現すると、肯定式、否定式はそれぞれ以下のように表せる。

$$\begin{array}{cc} \text{IF } X \text{ is } F \text{ THEN } Y \text{ is } G & \text{IF } X \text{ is } F \text{ THEN } Y \text{ is } G \\ \hline X \text{ is } F & Y \text{ is } \bar{G} \\ \hline Y \text{ is } G & X \text{ is } \bar{F} \end{array}$$

このXとYの属性を表すFとGを全体集合WとV上に定義されるファジィ集合で規定したファジィ条件付規則を用いることにより、肯定式および否定式の一般化が行える。

ファジィ推論による肯定式は次のように表せる。

$$\begin{array}{c} \text{IF } X \text{ is } F \text{ THEN } Y \text{ is } G \\ \hline X \text{ is } F' \\ \hline Y \text{ is } G' \end{array}$$

ファジィ推論の特徴は前提部Xの属性が得られた情報に完全に一致しなくても、何らかの意味ある結論が得られることである。Zadehの研究⁶⁾によると、ファジィ肯定式は可能性分布 $\Pi(\cdot)$ を用いて実行される。

$$\begin{aligned}\Pi(X/Y) &= (F \times G) \cup (\bar{F} \times V) \\ \Pi(X) &= F' \\ \hline \Pi(Y) &= F' \cdot ((F \times G) \cup (\bar{F} \times V))\end{aligned}$$

ここで、 $\Pi(X/Y)$ の X/Y は条件付規則を表しており、記号 $\times$ と $\cup$ はそれぞれ直積と和集合を表す。また記号 $\cdot$ は以下で定義される合成則(compositional rule)を表す。

$$P \cdot Q = \int_{U \times V} \max_{v \in V} (\min(\mu_P(u, v), \mu_Q(v, w)) | (u, w)) \quad (1)$$

ここで、 μ_P, μ_Q はそれぞれ $U \times V, V \times W$ 上に定義されるファジィ集合PとQのメンバーシップ関数である。ただし、式(1)の積分記号は通常の積分演算ではなく和集合を表し、記号 $|$ はセパレータである。

このZadehの用いたLukasiewiczの論理に基いた推論演算以外にも、いくつかの推論演算が条件付規則を規定するファジィ関係に対して提案されている。^{7), 8)}

$$Rc = F \times G = \int_{U \times V} \min\{\mu_F(u), \mu_G(v)\} | (u, v) \quad (2)$$

$$Rs = F \times V \xrightarrow{S} V \times G = \int_{U \times V} [\mu_F(u) \xrightarrow{S} \mu_G(v)] | (u, v) \quad (3)$$

$$\text{ただし, } \mu(u) \xrightarrow{S} \mu(v) = \{1: \mu_F(u) \leq \mu_G(v), 0: \mu_F(u) > \mu_G(v)\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}Ra &= (\bar{F} \times V) \oplus (U \times G) \\ &= \int_{U \times V} \min[1, (1 - \mu_F(u) + \mu_G(v))] | (u, v)\end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}Rm &= (F \times G) \cup (\bar{F} \times V) \\ &= \int_{U \times V} \max[\min(\mu_F(u), \mu_G(v)), (1 - \mu_F(u))] | (u, v)\end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\oplus$ は限界和を表わす。

3. ファジィ推論を用いた安全性評価法

ファジィ推論に基づいた安全性評価法を構築するには、まず入力情報および評価関係に関する規則を作成

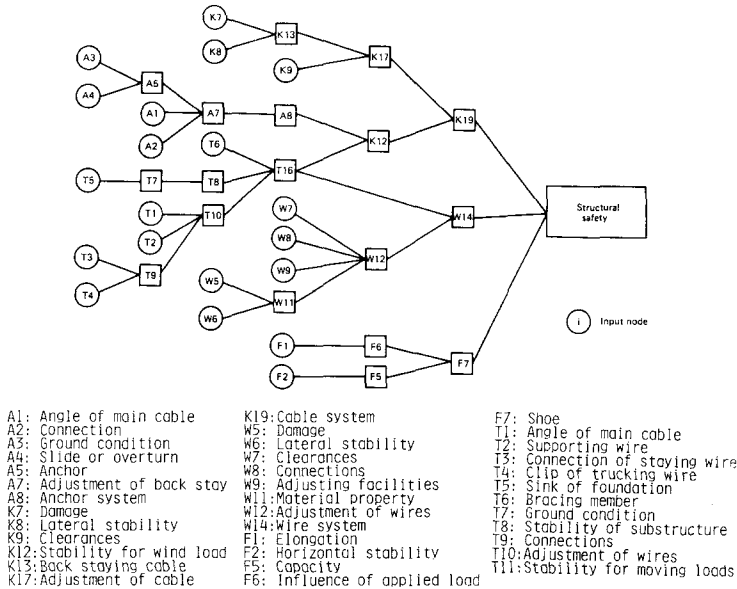


図-1 推論機構図

し、それをデータベースとして蓄積しておく必要がある。データベースの作成は以下の手順に従う。

- 1) あらかじめ、架設中に構造物の安全性を評価する上で必要と考えられる項目 $X, Y, Z, \dots$ (たとえば、仮設備、溶接等など) を抽出する。
- 2) 全ての評価項目 X_i, Y_i に対して、 X_i から推論される項目 Y_i を全ての評価項目間で決定する。($X_i \rightarrow Y_i$)
ここで、推論関係は当然、同一の項目間 ($X_i \rightarrow X_j$) にも設定される。
- 3) 設定された各推論関係に対し、経験、工学的判断をもとに X_i のある評価に対して推論される Y_i の評価を規定する。すなわち、条件付規則 “IF X_i is F THEN Y_i is G” の F, G を仮定評価値として決定しておく。この評価には、言語変数を用いる。この F, G に対して種々の仮定値を設定しておくことで、いろいろな架設状況に応じた条件下での推論が行える。
- 4) 以上の入力情報評価関係を計算機に蓄積・格納する。

このように作られたデータベースをもとに、架設工事の開始に合わせて安全性評価を開始する。ある評価時点の安全性は、その時に対応する評価推論機構(たとえば図-1)に入力すべき項目 X_i の評価を言語変数を用いて F_i として与え、前述したファジィ推論における肯定式を実行することにより項目 Y_i の状態 G_i が推論される。すなわち、 X is F が入力情報のとき出力情報として Y is G が得られる。このとき、ファジィ集合 G のメンバーシップ関数 μ_G はファジィ関係 R を用いて次式で計算される。

$$\mu_{G'}(v) = \mu_F(u) \cdot R \tag{7}$$

この G' は、 Y からさらに推論される評価項目 Z の推論関係への入力情報となる。この操作は、図-1からわかるように入力情報による評価が直接構造物の安全性評価に結びつくまで続行される。また図-2の X_i と X_j のように Y_j に同時に異なる評価が伝わるときは、($X_i \rightarrow Y_j$) と ($X_j \rightarrow Y_j$) による出力情報 G', G'' の積集合を考え、安全度が小さくなるように評価する。

$$G''' = G' \cap G'' \tag{8}$$

この G''' も次の推論関係への入力情報となる。 G', G'', G''' の帰属度関数を $\mu_{G'}, \mu_{G''}, \mu_{G'''}$ とすると

$$\mu_{G'''}(u) = \min \{ \mu_{G'}(u), \mu_{G''}(u) \} \tag{9}$$

以上の計算を全ての入力情報に対して行うことにより、その時点に注目した構造物の安全性評価が最新の情報を基に総合的な形で行えることになる。以上の手順を図-3のフローチャートに示す。

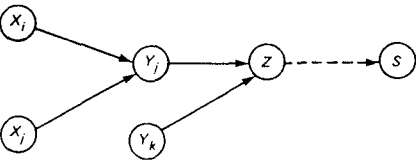


図-2 推論関係

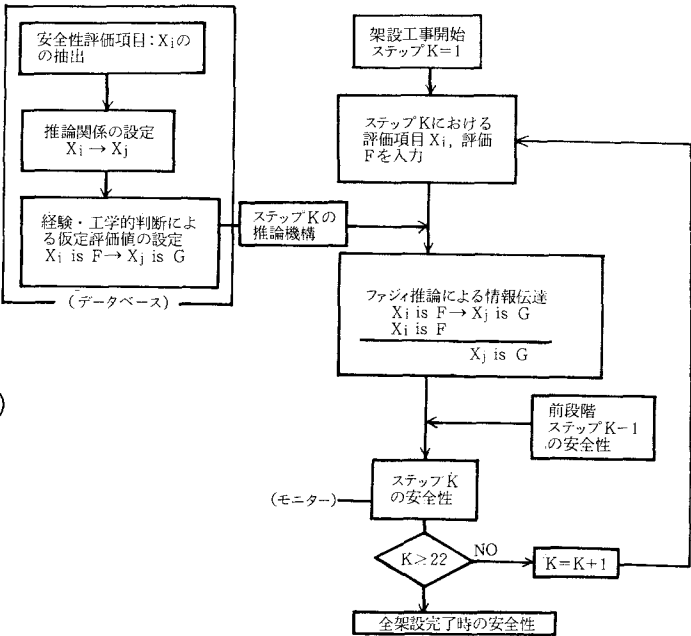
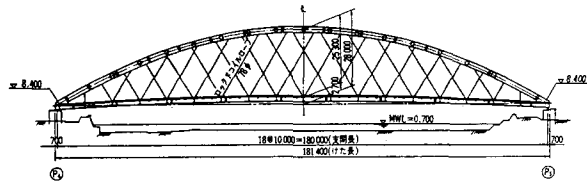


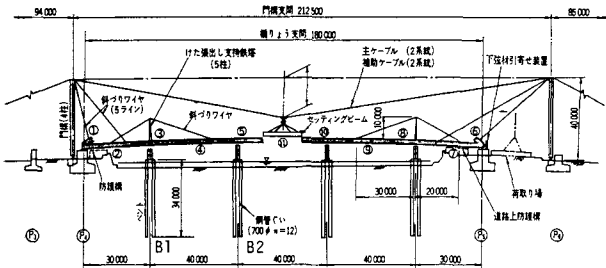
図-3 架設中の安全性評価手順

4. 数値計算例および考察⁹⁾

橋梁の架設工法中特に事故の多いケーブル工法に注目をし、図－4に示すニールセン系ローゼ桁橋の上部工下弦材架設を対象として、その安全性評価に関する数値計算を行う。簡単な架設手順の概略図を図－5に示す。架設工法としては、ケーブルクレーンおよびトラッククレーンベント工法を仮定する。架設手順としては、河川内に4基のベントを設置し、ベント工にケーブルクレーンによって順次下弦材を架設していくことを考える。初めに左右兩岸より中央付近まで架設する。その時、ベントB1とB2の間隔が広いので、けた張出し支持構を設置する。そして、架設完了後、中央部材を落し込み閉合する。そして、架設完了後、歩道デッキをケーブルクレーン架設する。以上の架設工程を仮定する。

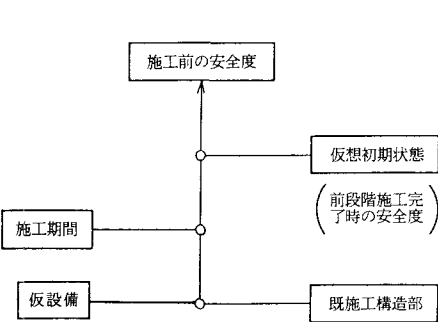


図－4 ニールセン系ローゼ桁橋外觀図

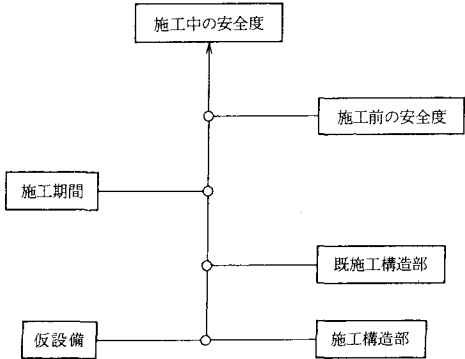


図－5 下弦材架設要領図⁹⁾

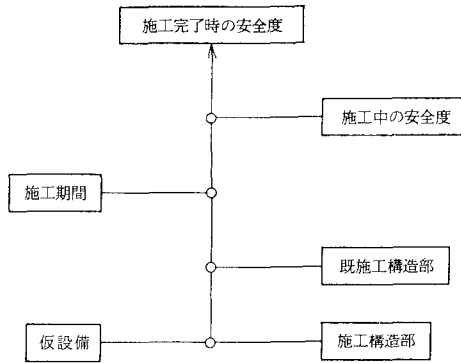
構造物の安全性評価の考え方として、下弦材各ブロックの架設工程ごとに、図－6, 7, 8に示すような“施工前”、“施工中”、“施工完了時”を想定する。各図は安全性評価時点の構造物に直接影響をおよぼすと考えられる大まかな要因と、その要因に関する情報の流れを示している。さらに、各下弦材ブロック架設ごとの安全性に関する情報の流れを詳細に規定する。例えば、図－9は下弦材第1ブロック架設中における構造物の安全性評価をする際の評価入力情報の流れを示している。



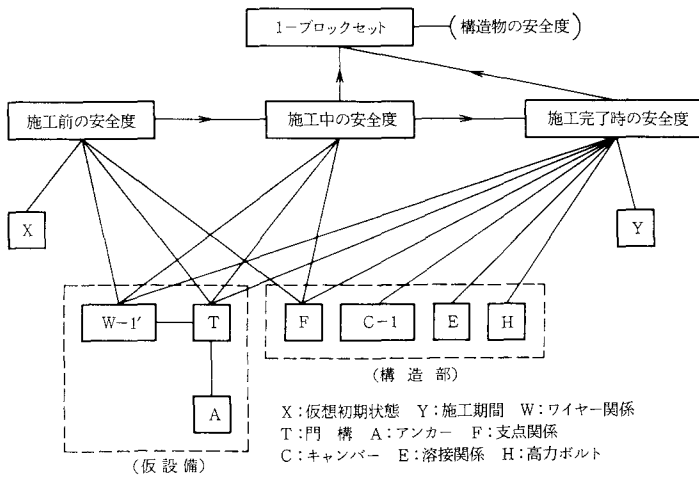
図－6 施工前の安全性評価のためのフローチャート



図－7 施工中の安全性評価のためのフローチャート



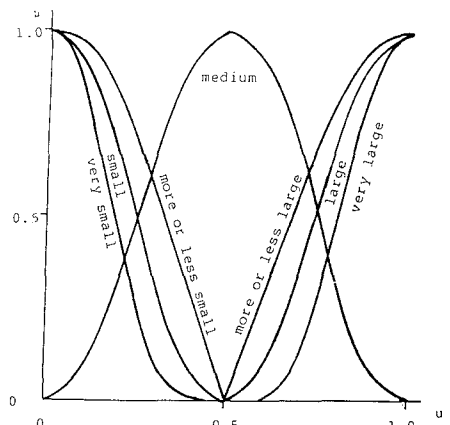
図－8 施工後の安全性評価のためのフローチャート



図－9 施工中の安全性評価手順

本例題では、入力情報としては7段階の言語変数 7－Very Large (安全度は大変大きい), 6－Large (安全度は大きい), 5－More or Less Large (安全度は多少大きい), 4－Medium (安全度は普通), 3－More or Less Small (安全度は多少小さい), 2－Small (安全度は小さい), 1－Very Small (安全度は大変小さい) を用いる。実際の現場では、このような7段階もの精密な評価はできないと思われるが、本例題ではファジィ関係の演算法の比較検討を行う目的で、多くの言語変数を用意した。また、言語変数 Very Large～Very Small のもつ意味は、対象とする構造部位、施工段階等で異なるが、ここでは簡略化のために「安全度は大きい、あるいは小さい」という共通の概念で表現している。図-10にこれら7つの言語変数に対するメンバーシップ関数を示す。これらの言語変数を用いて、たとえばT-16の状態、すなわち“(タワーは安定している)ことの(安定度は大きい)”=“T16 is Large”などの各状態に対して、“(ワイヤー部は安定している)”=“W14 is Large”などの導かれる推論結果を、設計者や現場技術者の経験・工学的判断をもとに決定しておく。

図－1で示した推論機構図は、図－9で示した第1ブロック架設段階の“施工前”の安全度評価を行うためのものである。



図－10 言語変数のメンバーシップ関数

この推論機構図を用いて、式(2),(3),(5),(6)に示したファジィ関係の演算法 R_c, R_s, R_a, R_m の比較計算を行う。計算で用いる各項目間の仮定評価値 F, G を表-1に示す。表-1の仮定評価値のもとで図-1の全ての情報入力ノードの評価として $IN=7$ (Very Large), $IN=6$ (Large), $\sim IN=1$ (Very Small)をそれぞれ入力したときの結果を表-2に示す(IN は入力値を示す)。ここで、帰属度関数のElement Valueは $u=1$ で「構造物は完全に安全」、 $u=0$ で「構造物は完全に危険」を表わす。これらの表からわかるように、 R_s, R_a, R_m は $IN=1, 2, 3, 4$ の場合に対して同じ結果を示し、帰属度関数のグレード値がすべて1となる。これは表-

表-1 比較計算のための関係評価例

推論関係 仮定評価値				推論関係 仮定評価値			
A	→	B	: A B	A	→	B	: A B
T 1	→	T 10	5 5	K 7	→	K 13	6 5
T 2	→	T 10	5 5	K 8	→	K 13	6 5
T 3	→	T 9	7 7	K 9	→	K 17	6 5
T 4	→	T 9	7 7	K 12	→	K 19	6 5
T 5	→	T 7	6 6	K 13	→	K 17	6 6
T 6	→	T 16	6 6	K 17	→	K 19	6 5
T 7	→	T 8	6 6	K 19	→	S	7 7
T 8	→	T 16	6 6	F 1	→	F 6	7 6
T 9	→	T 10	6 5	F 2	→	F 5	6 5
T 10	→	T 16	6 5	F 5	→	F 7	6 6
T 16	→	K 12	6 5	F 6	→	F 7	6 6
T 16	→	W 14	6 6	F 7	→	S	7 7
A 1	→	A 7	7 6	W 5	→	W 11	6 5
A 2	→	A 7	6 5	W 6	→	W 11	6 5
A 3	→	A 5	6 6	W 7	→	W 12	6 5
A 4	→	A 5	7 7	W 8	→	W 12	6 6
A 5	→	A 7	6 5	W 9	→	W 12	7 7
A 7	→	A 8	6 5	W 11	→	W 12	6 6
A 8	→	K 12	6 6	W 12	→	W 14	6 5
				W 14	→	S	7 7

1の仮定評価値として7(Very Large), 6(Large), 5(More or Less Large)の大きな値しか設定されていないためである。例えば(X is Large) $\rightarrow$ (Y is Large)の規則に対して $IN=2$ (X is Small)を入力しても Y の安全度を表わすファジィ集合のメンバーシップ値は全て1となり、 Y の安全度は安全とも言えるし危険とも言えるという結論しか得られないことになる。これに対し、 R_c は $IN=1, 2, 3$ に対し逆に全てのメンバーシップ値が0となる。このことは、 $X \rightarrow Y$ の関係において Y の安全度を評価できない、すなわち表-1の仮定評価値のもとでは価値のある推論ができないことを示している。そして、 R_c は $IN=4$ では有意なグレード値をもつ帰属度関数を与えている。また、 $IN=5, 6, 7$ で R_c は全て6(Large)という結果を与え、 R_s は5(More or Less Large), 6(Large), 7(Very Large)の結果を与える。このことは R_c, R_s ともほぼ妥当な推論を与え、特に R_s は X

表-2 数値計算結果

入力情報		Element Value										
		R	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
IN=1~3	R_c		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	R_s		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	R_a		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	R_m		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
IN=4	R_c		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08	0.32	0.32	0.32	0.32
	R_s		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	R_a		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	R_m		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
IN=5	R_c		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08	0.32	0.68	0.92	1.0
	R_s		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.28	0.57	0.82	0.96	1.0
	R_a		0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.71	0.82	0.86	0.96	1.0
	R_m		0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.82	0.92	1.0
IN=6	R_c		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08	0.32	0.68	0.92	1.0
	R_s		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08	0.32	0.68	0.92	1.0
	R_a		0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.68	0.86	0.94	1.0
	R_m		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.68	0.92	1.0
IN=7	R_c		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08	0.32	0.68	0.92	1.0
	R_s		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.10	0.46	0.85	1.0
	R_a		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.58	0.67	0.85	0.94	1.0
	R_m		0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.50	0.68	0.92	1.0

の入力情報の影響をYに正確に伝達しており、入力情報の変化に敏感であることを示している。これに対し R_a, R_m は Element Value が $0 \leq u \leq 0.5$ の範囲においてもそれぞれ 0.64, 0.5 前後の値を与えており、入力情報が正確に反映されているとは言い難く、満足のいく推論が行われていないことになる。以上のことから、架設中の安全性評価には、 R_c あるいは R_s の推論演算が適当であることがわかる。

ファジィ関係 R_c, R_s を用いて架設中の安全性評価を行う。図-11, 12に示す計算結果は、図-5の下弦材架設工事を22ステップに分け、第3ブロック“架設時”(Step 8)以降に強風が発生したため、ケーブルワイヤ関係の評価項目を“安全性は(普通)”と小さめに評価した例である。ただし、他の評価項目は“安全性は(大変大きい)~(多少大きい)”としている。図-11がファジィ関係が R_c の場合で、図-12が R_s の場合である。第3ブロック“架設前”のStep 7までは、 R_c, R_s とも帰属度関数が $u=1$ (構造物は安全である)付近で大きなグレード値をとり、“安全性は(大変大きい)”と評価されている。Step 8~Step 17, Step 18~Step 22と架設進行に伴ない図-11では安全性が下がり、図-12ではStep 18~Step 22で始めて安全性が下がっている。これは、Step 8以降の強風による影響を R_c の方が R_s よりも敏感に反映していることを示している。このことは、 R_c, R_s による帰属度関数のファジィ積分¹⁰⁾による評価からも明らかであり、 R_c の方が R_s より不確定要因の影響を安全性評価に反映させるのに有効であると思われる。このように実際問題に適用した場合に R_c の方が R_s よりも鋭敏な結果を与えるのは、多くの前提条件から一つの結論を導き出す場合の計算法(式(9))に起因していると思われる。

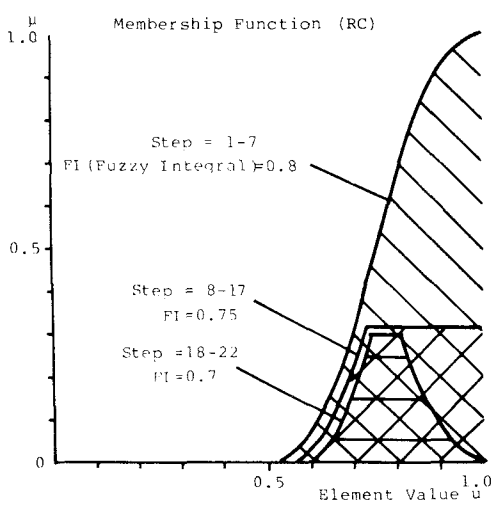


図-11 R_c による結果

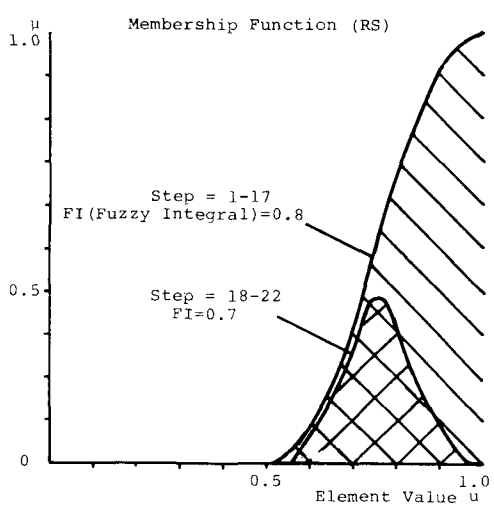


図-12 R_s による結果

5. 結論およびあとがき

ファジィ推論を用いた架設中の安全性評価法について検討を加え、架設中の安全性評価モニターリングシステム開発のための方法論を提案した。本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

1. ファジィ推論を適用することにより、これまで用いられてきた架設中で得られる定量的な情報だけでなく、直観や経験、工学的判断などの定性的な情報をも考慮することができ、架設中の特殊性を十分に考慮した総合的な安全性評価が行える。この場合、知識データを蓄積しておき、随時利用できるようにすることが重要である。
2. ファジィ関係の演算法の比較検討を行った結果、直積に基づく R_c を用いたファジィ推論が入力情報を最も忠実に結果に反映させ、しかも計算も簡単であることから、架設中の構造物安全性評価システム構

築に最も有用であると考えられる。

3. ファジィ推論は命題に含まれる曖昧さを取扱うことができるため、曖昧な情報から有意な結論を引出すことが可能である。架設中の安全性評価計算においても、このことが確認された。ただし、曖昧さの考慮には、おのずから限界があり、通常の推論と同じように無から有が生じることはない。
4. 完全な形でモニタリングが出来るわけではないが、架設中の安全性の経時的変化が本方法を用いることにより把握できる。その際、推論機講図をブレンストーミング、構造モデル法等^{11), 12)}を用いて、より実際に即した形で規定する必要がある。

最後に本研究に際し多くの御協力を頂いた川村幸男氏(元京都大学院生)に対して深く感謝致します。

参 考 文 献

1. 架設特集, 橋梁と基礎, Vol. 16, No. 8, pp. 19~44, 1982
2. 古田 均, Fu, King-Sun, Yao, James T.P.: 知識工学—エキスパートシステム—の構造工学への応用, 土木学会誌, Vol. 70, pp. 28~33, 1985
3. 水本雅晴: Fuzzy 理論と近似的推論, 数理科学, No. 200, pp. 47~55, 1980
4. 近藤洋逸, 好並英司: 論理学入門, 岩波全書, 1979
5. 塚本弥八郎: Fuzzy 推論について, 数理科学, Vol. 191, pp. 28~33, 1979
6. Zadeh L. A.: Fuzzy logic and approximate reasoning, Synthesis, Vol. 30, pp. 407~428, 1975
7. Mizumoto M., Fukami S. and Tanaka K.: Some methods of fuzzy reasoning, M.M. Gupta (Ed.) Advances in Fuzzy Set Theory and Applications, North-Holland, pp. 117~136, 1979
8. Mizumoto, M. and Zimmermann, H. J.: Comparison of fuzzy reasoning methods, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 8, pp. 253~283, 1982
9. 石山勝郎他: 鏡川大橋の架設工事, 土木施工, Vol. 21, No. 11, pp. 11~22, 1980
10. 白石成人, 古田 均, 川村幸男: 事故解析へのファジィ積分の応用, 土木学会論文報告集, No. 339, pp. 33~40, 1983
11. 星谷 勝, 大野春雄, 山本欣弥: あいまい理論によるライフライン機能の震害影響波及の構造化, 土木学会論文集, No. 344/I-1, pp. 323~332, 1984
12. Blockley, D I.: The Nature of Structural Design and Safety, Ellis Horwood, 1980

(1986年10月18日受付)