トンネル工学研究発表会
論文・報告集 第1巻 1991年12月

トンネルの対策工選定支援のための データベースとファジィ理論

DATABASE SYSTEM AND FUZZY SET THEORY FOR SUPPORT SYSTEM TO SELECT COUNTERMEASURES IN TUNNELLING

近久博志* ・荒井幸夫* ・筒井雅行* ・清水則一**
Hiroshi CHIKAHISA, Yukio ARAI, Masayuki TSUTSUI and Norikazu SHIMIZU

In tunnelling, we often face the emergency case that we have to take effectable countermeasures against the unkown abnormal situations of support members. We study several basic theories concerned with database system and fuzzy set to develop a tunnel expert system which assists us to solve such difficult problems instead of engineers of experience. This paper presents the system and available basic schemes to verify adaptation of the system to select countermeasures in construction site.

Keywords : feedback system of measured and/or observed results, countermeasures, database system, fuzzy set theory, tunnnel expert system

1．まえがき

施工中のトンネル構造物に変状が認められる場合に実施すべき対策工の選定は、その最終的な意志決定が現場技術者個人の経験に委ねられているという傾向が強い。これに対して筆者らは、過去の経験豊富な技術者が自らの施工現場で実施してきた変状対策等の経験を他の技術者が自らの知識ベースの中に取り込み、未知なる経験の中での対応の信頼性を向上させることを目的にした「トンネルの対策工選定支援システム」の開発を進めてきた[1),2)]。

本報告は、本支援システムの中から、データベース化された過去の施工実績を基にしたファジィ推論をトンネル施工時の変状対策を選定に活用した場合の適用性について検討するものである。

2．トンネルの計測管理システム

開発してきたトンネル計測管理システム（以下ＭＡＳＴと呼ぶ）[1)]は、図－１に示したように、トンネル現場の計測管理に必要な評価、解析、分析手法とそれを実施する際に活用するツール（電算機や電算プログラム等）から成っている。この中で今回の対策工選定時に活用するシステムは図－２のようになる。

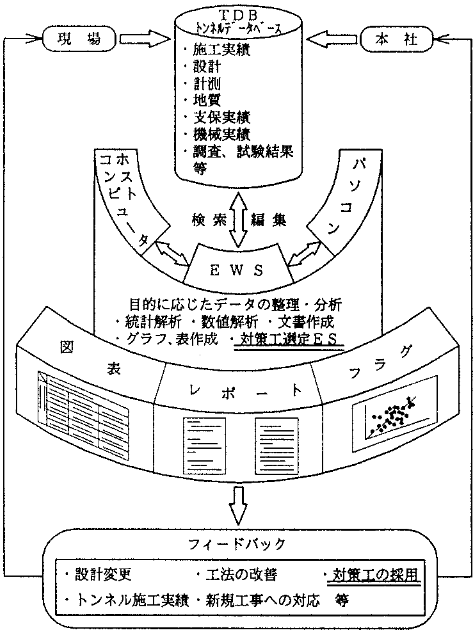
変状や異常現象に遭遇した場合、施工中に集められるデータを基にして、まず何に起因する異常であるかを見極め、その主因に対する対策工を実施する必要がある。しかし、実際には、原因が曖昧のままで対応を

* 正会員　飛島建設(株)　技術本部　構造技術部
**正会員　　　　神戸大学助手　工学部土木工学科

余儀なくされることも多く、また、たとえ原因が明確になっても有効的な対策工の判断ができなかったりすることも多い。このため、構築する対策工選定支援システムは、現場技術者の推論過程に存在するさまざまな曖昧さを評価できる手法が必要となる。ここでいう曖昧さとは、次のように分類される。

1) 切羽観察記録等を記入するときの曖昧さ
2) 変状等の注意ﾚﾍﾞﾙを設定するときの曖昧さ
3) 対策工を採用するときの曖昧さ
4) 対策工の効果を評価するときの曖昧さ

これに対して、本システムは、経験豊富な技術者が実施してきた施工現場での実績をデータベース化して、そのデータを整理分析し、さらに、対策効果が向上するように検討を加えて、経験していない技術者が施工中に遭遇する変状等の異常現象に対して適切な対策工の選定ができるようにすることを目的としている。



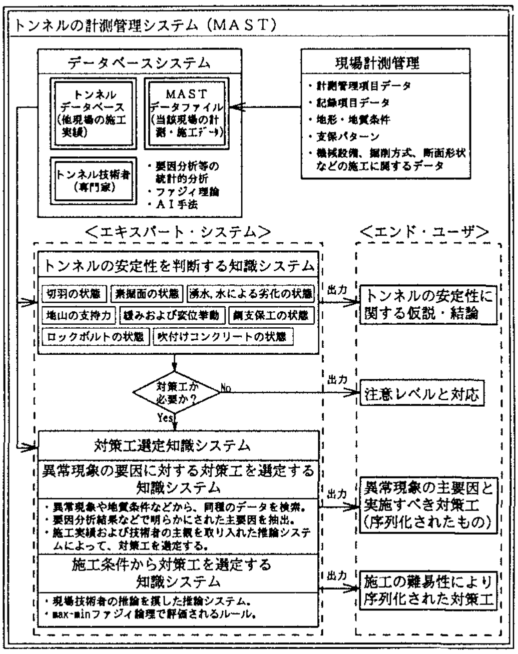
図－1 MASTにおけるデータの流れ

3．トンネルの計測管理手法 [3]

トンネルの対策工選定の基礎となる計測管理手法の流れを図－3に示し、下記に概要について説明する。施工中に得られるデータの中で計測管理に必要な項目を地質、支保、計測および施工の中から選定し、記録項目と管理項目の二つに分けて整理する。

1) 記録項目 ： 変状や異常の原因追求や対策の検討の資料となる項目（例えば、切羽観察記録など）
2) 管理項目 ： トンネルの安全性や安定性を把握するための項目（例えば、表－1の計測管理表など）

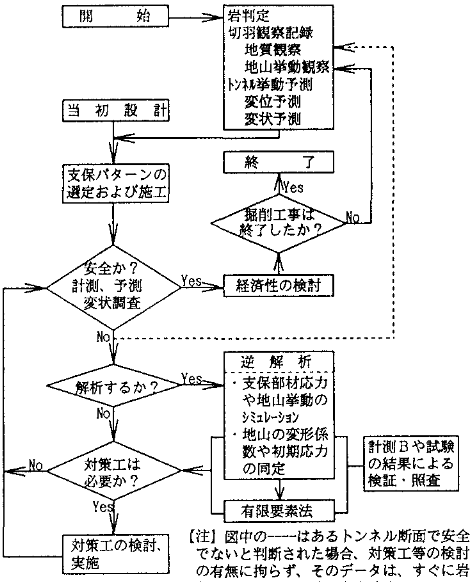
管理項目には表－2に示すように、それぞれ構造物の許容、降伏、破壊の3つの状態を考えた場合の管理基準値を境とした、安定、注意、異常および限界の4つの注意レベルを想定しており、各注意レベルに対する概略の対応を表－3のように設定している。また、それぞれの管理項目が異常レベルに達してから対策を考えているのでは施工的にかなり遅れることにもなる。このような状況を勘案して、過去の実績を基にして作成した対策工の目安を表－4に示す。



図－2 対策工選定ESの全体構成

4．ファジィ推論

トンネル施工中に自立性の乏しい切羽に遭遇した現場のデータを基にして、技術者の対策工選定時の推論過程について説明する。データ分析に用いたトンネルは、掘削断面が 80 ～ 90 m^2 程度で、領家帯の圧砕岩、三波川帯の緑色岩および秩父帯の堆積岩区間をNATMによって施工されており、途中で切羽の自立性が著しく低下した断層破砕帯に遭遇し、さまざまな切羽保持の為の対策工の採用を余儀なくされている。



【注】図中の-----はあるトンネル断面で安全でないと判断された場合、対策工等の検討の有無に拘らず、そのデータは、すぐに岩判定の資料とする流れを意味する。

図－３　計測管理の流れ

表－１　計測管理表

地層名：　　地山区分：D　（　年　月　日　記入）（計測断面　　　）（支保パターン：　　　）（観察位置　STA　　＋　　）

	管理項目（注意レベル／管理基準値）	レベル１（安定状態）	レベル２（注意状態）	レベル３（異常状態）	レベル４（限界状態）
地山	A　切羽の状態	自立している	肌落ちがある	局部的に自然にまたは手で容易に崩れる	全体的に自然に崩れあるいは流出する
	B　素掘面の状態	自立している	肌落ちがある	小崩落がある(<1m³)手で容易に崩れる	大崩落がある(>1m³)自然に崩れ、流出
	C　湧　水	な　し	にじみ水、滴水程度	常時しみ出し	流　出、噴　出
	C' 水による劣下	な　し	部分的に軟弱化割れ目が開きゆるむ	部分的に崩壊、流出全体的に軟弱化	大崩壊流　出
計測	D　内空変位量　(mm) D' 内空変位速度 (mm/d)	D<19.6 (D=　) D<2.4 (D'=　)	19.6<D<57.8 (D=　) 2.4<D<7.0 (D'=　)	57.8<D<170.0 (D=　) 7.0<D<20.7 (D'=　)	170.0<D (D=　) 20.7<D (D'=　)
	E　天端沈下量　(mm)	E<19.6 (E=　)	19.6<E<57.8 (E=　)	57.8<E<170.0 (E=　)	170.0<E (E=　)
	F　地中変位区間歪　(%)	F<0.179 (F=　)	0.179<F<0.525 (F=　)	0.525<F<1.546 (F=　)	1.546<F (F=　)
	G　鋼支保工軸力　(ton) G' 鋼支保工軸歪　(%)	G<52 G<0.08 (G=　)	52<G<93 0.08<G<0.15 (G=　)	93<G<129 0.15<G<22.5 (G=　)	129<G 22.5<G (G=　)
	H　ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ軸力　(ton) H' ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ軸歪　(%)	H<10 H<0.10 (H=　)	10<H<18 0.10<H<0.17 (H=　)	18<H<25 0.17<H<20.0 (H=　)	25<H 20.0<H (H=　)
	I　吹付ｺﾝｸ応力(kg/cm2)	I<60 (I=　)	60<I<120 (I=　)	120<I<180 (I=　)	180<I (I=　)
変状	J　泥　寧　化	な　し	少しあり	あ　り	著しい
	K　鋼支保工	変状なし	吹付コンクリートと少し分離	吹付コンクリートと大きく分離、変形底盤プレートの湾曲フランジの局部座屈	大きく座屈
	L　ロックボルト	変状なし	頭部打たくと高音がする、プレートの小変形	プレートの大変形	プレートの押抜せん断、ネジ部破断
	M　吹付コンクリート	変状なし	軽微なクラック	顕著なクラックRBによる押抜せん断分離、剥離	崩　落大規模な剥脱

4・1　前件部のメンバーシップ関数

前件部のメンバーシップ関数に関して、ここでは、現場の計測管理として記入されている地山観察記録と計測管理表のデータから無作為に 38 断面のデータを抽出して、数量化理論第Ⅱ類を用いて分析した。このとき、現場での適用を考えて、説明変数と外的基準を次のように設定した。

1）説明変数 ････「圧縮強度、風化・変質、割れ目の間隔、割れ目の状態、割れ目の形態、湧水」

2）外的基準 ････「切羽の状態の注意レベル」

分析結果として、回帰係数と相関係数を表－５に、サンプル値（第一固有ベクトルスコア）に対する回帰結果の分布を図－４に示す。

前件部のメンバーシップ関数としては、本分析結果から各サンプル値に対する切羽の状態の注意レベルの発生割合を本トンネルにおける帰属度として定義すると、図－５のように表される。

表－２　計測管理値と支保部材の状態

計測管理値	支保部材の状態
	注意レベルⅠ（安定状態）トンネルの挙動に追従しても、支保部材としての安全性に問題がないレベル。
管理値 1 許容ひずみ	注意レベルⅡ（注意状態）トンネルの挙動に追従しても、支保部材の耐力の増加が期待でき、構造物として安全性に問題がないものの、耐力の限界に近づきつつあり、注意が必要なレベル。
管理値 2 降伏ひずみ	注意レベルⅢ（異常状態）トンネルの挙動に追従すると、破壊状態ではないが、支保部材の耐力の増加が期待できず、設計で想定された支保能力が期待できないため、何らかの補強が必要となるレベル。
管理値 3 破壊ひずみ	注意レベルⅣ（限界状態）支保部材は破壊状態にあり、支保機能が発揮できない状態にあるため、至急補強すると共に、ここに至ることとなった施工法と設計全体にわたって見直しをする必要があるレベル。

表－３　注意レベルの概略の対応

注意レベル	状態	対　応　策
レベルⅠ	安定	通常の計測や観測を続ける。
レベルⅡ	注意	計測や観察の結果や現場の状況を総合的に判断して変状等の異常は何が主因となっているかを検討する。この間計測・観察の頻度や精度を増し、地山の安定状態の確認に努める。必要に応じて、対策工の資材の準備をする。
レベルⅢ	異常	異常の原因追求に努め、主因に対する対策工を実施する。この場合、施工的に簡単な変更で済む対策工を採用する。
レベルⅣ	限界	工法全体の見直し、支保部材の追加や補助工法の併用も含めて、比較的大規模な変更が必要となる。この場合、現場の状況や設備を十分に勘案し、適切な対策工の採用が望まれる。

4・2　後件部のメンバーシップ関数

後件部のメンバーシップ関数として、現場での各対策工の実施度合いと帰属度を図－６のように定義する。そして、本現場で切羽の安定性確保のために採用したもしくは採用が検討された「鏡吹付けコンクリート、鏡ボルト、リングカットおよび機械掘削」の対策工に対して、この定義に従って実施度合いを４段階に分けて評価した。次に、説明変数を切羽の状態の注意レベルとし、外的基準を各対策工の実施度合いとして前件部と同様に数量化理論第Ⅱ類を活用して分析した。分析結果として、サンプル値に対する各対策工の実施度

表－4(a) 対策工の目安

現　象	管理項目	分類	注意レベル3	注意レベル4
切羽が不安定	A	EX	1, 4, 6	2, 5
		SR	5	
		SC	1, 4	
		RB	5, 6, 7	
		SO	1,11	5
天端等が不安定	B	EX	1, 4, 6	2, 5
		SR	1, 5	
		SC	1, 3, 5,10	
		RB	1, 6, 7,11	
		SO	1,11	5
湧水および水による劣化	C, C'	EX		2, 5
		SR	1	
		SC	1, 2,11	
		RB	1,11,12,13,14	
		SO	2, 3, 7	4, 5, 6
地山の支持力不足	C, D E, F G, H I	EX	3	5
		SR	1, 2, 3, 4	
		SC	1, 3, 7, 8,10,12	9
		RB	1, 2, 4, 9	
		SO	6, 7, 8	5,10
緩みの発達が著しい、または、変位挙動が大きいか収束しない	D, E F, (H)	EX	3	5
		SR	1, 2, 4	
		SC	3, 5, 6,10,12	9
		RB	2, 3, 4, 9	
		SO	6, 7, 8, 9,11	5,10
鋼支保工の変状	G, K	EX	3	5
		SR	1, 3, 4	
		SC	3, 5, 6, 7, 8,10	9
		RB	2, 3, 4, 9	
		SO	6, 7, 9	5,10
ロックボルトの変状	H, L	EX	3	5
		SR	1	
		SC	3	9
		RB	2, 3, 4, 8, 9,10	
		SO	6, 7, 9	5
吹付けコンクリートの変状	I, M	EX	3	5
		SR	1, 3, 4	
		SC	3, 5, 6, 7, 8,10	9
		RB	2, 3, 4, 8, 9	
		SO	6, 7, 9	5

表－4(b) 対策工（記号の説明）

記　号	対　策　工
EX 1	リングカットにする（核を残す）。
EX 2	部分掘削する（加背割りを小さくし、自立できる範囲で掘削と吹付けコンクリートを繰り返し、所定の断面を仕上げる）。
EX 3	ベンチ長を短くする（リング閉合距離を短くする）。
EX 4	施工ピッチを短くする（一掘進長を短くする）。
EX 5	掘削工法を変更する（サイロット工法など）。
EX 6	薬量を抑え、極力、ブレーカーなどで掘削する。
SR 1	鋼支保工の使用、もしくは、ランクを上げる。
SR 2	鋼支保工の建て込み時に予想変形分だけ上げ越し、拡げ越す。
SR 3	鋼支保工の底板プレートの下にシートパイルなどを設置し、支持面積を増やす。
SR 4	鋼支保工に脚部止めロックボルトを施工する。
SR 5	ルーフボルトを施工する場合、H型鋼支保工のウエブにルーフボルト用の孔を開ける。
SC 1	掘削後、早期に吹付ける。
SC 2	急結剤の添加量を増す。
SC 3	吹付けコンクリートによって、トンネル縦断方向の連続性を増す。
SC 4	鏡を吹付ける。
SC 5	吹付け厚さを増す。
SC 6	増し吹付けを施工する（剥離部は、はつり落とす）。
SC 7	根固め吹付けを施工する。
SC 8	脚部の吹付け厚を厚くし、支持面積を大きくする。
SC 9	上半盤に吹付けコンクリートによって仮インバートを作製する。
SC10	吹付けコンクリート施工前に、補強金網を施工し、ラップを十分にとる。
SC11	目の細かい補強金網を施工し、地山と吹付けコンクリートの付着を良くする。
SC12	吹付けコンクリートのインバートを施工し、早期リング閉合する。
RB 1	早期に施工する。
RB 2	ロックボルトの本数を増やす。
RB 3	ロックボルトの長さを長くする。
RB 4	増しボルトを施工する。
RB 5	鏡ボルトを施工する。
RB 6	斜めボルトを施工する。
RB 7	ルーフボルトを施工する（必要に応じて注入タイプを用いる）。
RB 8	ベアリングプレートを大きくする。
RB 9	ベアリングプレートを鋼支保工にかける。
RB10	ベアリングプレートを二枚使用する（厚くする）。
RB11	定着用モルタルに急結剤を使用する。
RB12	定着剤を樹脂系（ウレタンなど）に変更する。
RB13	注入タイプのロックボルトを用いる。
RB14	挿入タイプの定着剤を使用する。
SO 1	縫地工法（ミニパイプ、先行鋼矢板など）を採用する。
SO 2	集水工（水抜きボーリング、ウェルポイントなど）を採用する。
SO 3	排水工（RB孔周辺の水抜き孔、掘削面の排水ドレーン、路盤の排水など）を採用する。
SO 4	止水（注入）工法を採用する。
SO 5	地盤改良工法を採用する。
SO 6	インバート（もしくは底板コンクリート）によって早期リング閉合する。
SO 7	支持地盤の劣化（泥濘化も含む）を防止する（吹付けコンクリートでシールしたり、排水を良くする）
SO 8	変形余裕量を設ける。
SO 9	支保規模を1ランク上げる。
SO10	縫返す。
SO11	鏡止め。
SO12	垂直縫地工。

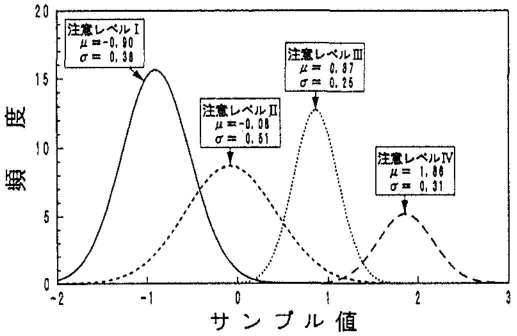
（凡例）EX：掘　削、SR：鋼支保工、SC：吹付けコンクリート、RB：ロックボルト、SO：補助工法およびその他

表－5　回帰係数と相関係数

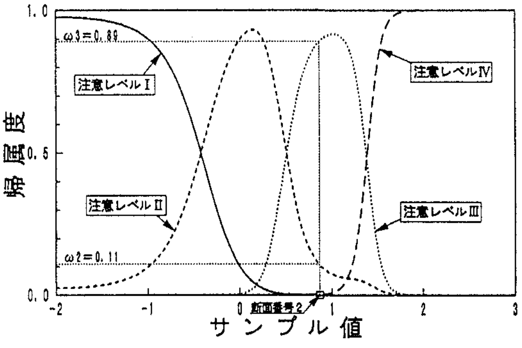
アイテム ＼ カテゴリー	1	2	3	4	単相関係数	偏相関係数
C．圧縮強度	-3.127	-0.830	-0.101	0.453	0.430	0.730 *
D．風化・変質		0.084	-0.253	0.298	0.539	0.350
E．割れ目の間隔		-0.744	0.204	0.160	0.381	0.628 *
F．割れ目の状態		-0.033	-0.249	0.180	0.462	0.238
G．割れ目の形態	0.763	-0.789	0.062	-0.552	0.026	0.723 *
H．湧水	-0.335	0.991	0.733		0.476	0.788 *

注）* は、偏相関係数がF分布による検定で5％有意であるアイテムを表す。

合いのサンプル値の分布を図－7に示す。この結果から、本現場における切羽の状態に対する対策工採用状況が分かる。例えば、切羽の状態に対する対策工としての鏡吹付けコンクリートは、「①実施しない」と「④実施する」という判断に関しては、切羽の状態を見ただけでかなり明確に分かれている。それに対して、「②実施しない方がよい」という判断は「①実施しない」という判断と大きく重なっており、両者の判断の違いに関してはかなり曖昧さのあることが分かる。「③実施した方がよい」という判断に関しては、さらに曖昧さが大きくなり、切羽の状態からはほとんど判断していない様子が良く分かる。これは、例えば、断層破砕帯区間で良く経験されることであるが、切羽の状態が連続しておらず自立性の悪い区間と



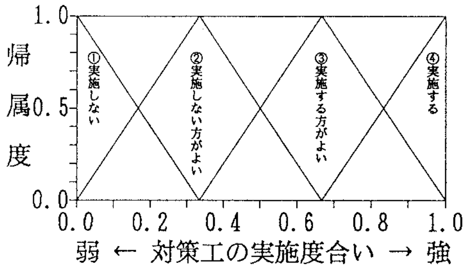
図－4　切羽観察記録と切羽の状態に関する分析結果



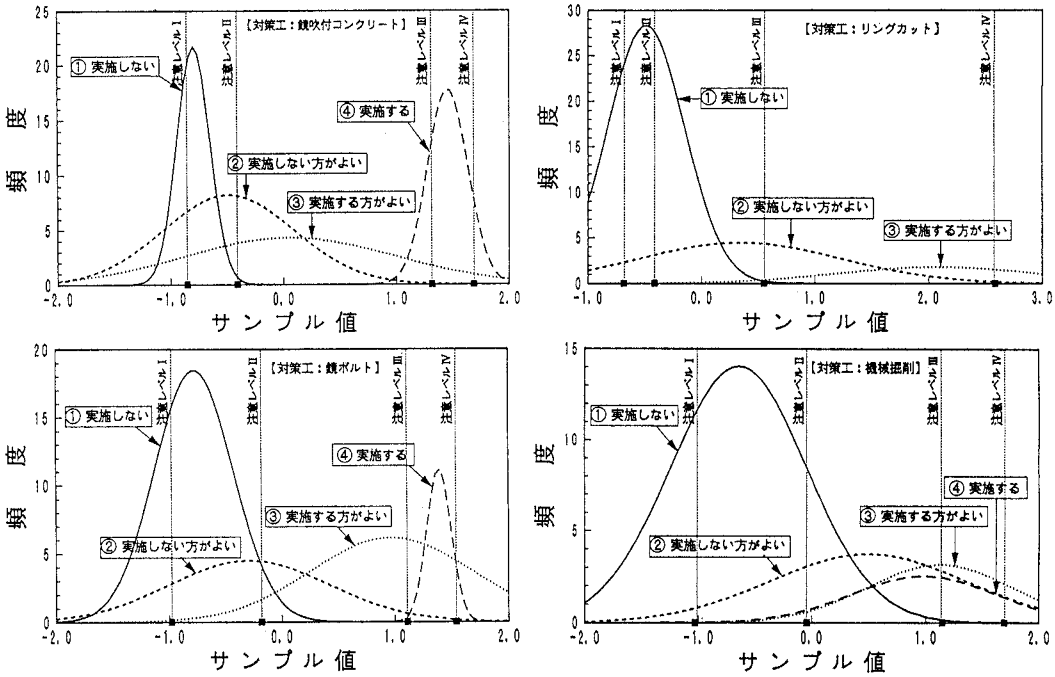
図－5　前件部(切羽の状態)のﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数

良い区間が交互に出現するような場合に、目視できる切羽の状態が良くても次掘削時のために鏡吹付けコンクリートは実施しておいた方がよいと判断しているためであろうと考えられる。

このように曖昧さが残る対策工選定に関する判断に関してはサンプル値に対する標準偏差等で評価しておき、実際の推論に対しては、各注意レベルに対する対策工の実施度合いの頻度が最も多い評価をその注意レベルに対する評価として定義すると、推論の基本的なルールとして表－6のような結果が導かれる。



図－6　後件部のﾒﾝﾊﾞｰｼｯﾌﾟ関数



図－7　切羽の状態に対する各対策工の実施度合い

表－6　推論の基本ルール

注意レベル	I	II	III	IV	凡　例
鏡吹付コンクリート	①	②	④	④	①：実施しない
鏡ボルト	①	②	③	④	②：実施しない方がよい
ﾘﾝｸﾞｶｯﾄ	①	①	②	③	③：実施する方がよい
機械掘削	①	①	③	③	④：実施する

4・3　推論過程

分析に使用したデータの中から無作為に抽出したトンネル断面に対して、対策工選定時の推論過程を再現してみると次のようになる。

対象断面の切羽観察記録と切羽の状態の注意レベルに対する適合度（帰属度）が表－7のようになっている。この中で、断面番号 2 の切羽保持のための対策工の選定を例にして推論過程（図－8）を説明する。

1) 切羽観察記録簿の記録からそのトンネル断面のサンプル値を求める（表－7）。
2) 各サンプル値に対して、図－5の前件部のメンバーシップ関数から各注意レベルの適合度 { ωi : 0.0 , 0.11 , 0.89 , 0.0 } を求める。
3) 表－6の推論の基本ルールに基づいて、図－6で示される後件部のメンバーシップ関数に関して、各注意レベルの適合度ωiで頭切りを行う。
4) 得られた結果を max 合成することによって結論とする。

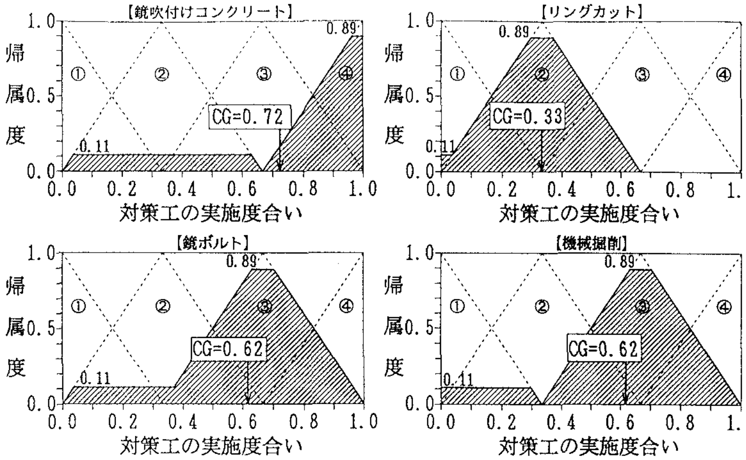
この手順によって得られた関数から、例えば重心を結論とすると、本断面の切羽保持のための対策工の実施度合いについて図－８と表－７のように結論付けることになる。鏡吹付けコンクリートを例にして説明すると、図－８から実施する度合いとして0.72 が求められ、さらに、この値と図－６から「③実施した方がよい」という結論が導き出される。本手法は、前記した計測管理手法の中の全ての対策工の選定に対しても活用できるものであり、現地で採用された対策工と同じような推論過程が再現できることが分かる。

表－７　対策工選定システムの適用結果

断面番号		1	2	3	4	5	6
切羽観察記録	C．圧縮強度	4	4	3	3	3	3
	D．風化・変質	4	4	3	4	3	3
	E．割れ目の間隔	3	3	3	3	2	3
	F．割れ目の状態	4	4	3	4	3	3
	G．割れ目の形態	3	3	3	3	3	3
	H．湧水	2	1	2	1	2	1
前件部の適合度	注意レベルⅠ	0	0	0	0.01	0.36	0.75
	注意レベルⅡ	0	0.11	0.25	0.85	0.64	0.25
	注意レベルⅢ	0	0.89	0.75	0.14	0	0
	注意レベルⅣ	1.00	0	0	0	0	0
推論結果	鏡吹付けｺﾝｸﾘｰﾄ	0.89	0.72	0.62	0.54	0.31	0.24
	鏡ボルト	0.89	0.62	0.57	0.39	0.31	0.24
	リングカット	0.67	0.33	0.32	0.30	0.12	0.11
	機械掘削	0.67	0.62	0.56	0.31	0.12	0.11

5．おわりに

本書においては、開発を続けてきたトンネル計測管理システム（ＭＡＳＴ）の機能の中からトンネル対策工選定のための支援システムについての研究の一部を紹介した。とりわけ、施工中に遭遇した変状に対して対策工を選定する場合、推論過程にさまざまな曖昧さがあるにもかかわらず、ファジィ推論を導入することによって有効的な対策工選定ができることが確かめられた。とくに、知識ベースとなるトンネルのデータベースの活用によって、過去の経験豊富なトンネル技術者の施工経験を他の技術者でも容易に活用できるようになることは本システムの大きな利点であると考えている。今後は、推論過程の精度を向上させ、かつ、現場で発生してくる多岐に渡る問題点の解決に対応できるようにさらに改良を加えて行きたいと考えている。



図－８　断面番号２における対策工選定時の推論結果

6．参考文献

1）山縣、近久、黒坂、荒井、中原："トンネル計測管理システムの開発"、とびしま技報／土木、NO.40、1989

2）尾崎、谷井、山口、近久、黒坂："変状観察を中心としたトンネル計測管理手法について"
第42回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-244、Ⅲ-255、土木学会、1987

3）合理的トンネル設計施工のための諸測定の調査研究報告書，日本トンネル技術協会，1988.3.

4）近久、荒井、筒井、黒坂："ﾄﾝﾈﾙの対策工選定ｴｷｽﾊﾟｰﾄｼｽﾃﾑに関する基礎的研究"
第40回土質工学研究発表会、土質学会、1991.6