

ファジィ回帰モデルに基づくトンネル岩盤分類法の提案

A PROPOSAL OF ROCK MASS CLASSIFICATION FOR TUNNELS BY THE FUZZY REGRESSION MODEL

鈴木昌次*・古川浩平**・井上洋司***・中川浩二****

By Shoji SUZUKI, Kohei FURUKAWA, Yoji INOUE and Koji NAKAGAWA

In this paper, an attempt is made to apply the fuzzy sets theory to the rock mass classification of granite tunnels. By using the fuzzy regression analysis, it is possible to develop an objective and simplified equation to classify rock masses, which can be applied to a tunnel face under construction. Each classified region derived from the proposed equation has sectional and continuous values with possibility distribution. Discussions on the adequacy of the equation in rock engineering, the comparison with the usual statistical approach and a methodology of modification to adapt it to each granite tunnel are mentioned.

Keywords: rock mass classification, the fuzzy regression model, granite tunnel

1. はじめに

岩盤分類は、岩盤を力学特性、存在状況等の工学的、地質学的な性質に基づいた良好度の評価に従って行われるものである。岩盤分類は、一般に設計、施工計画から実際の施工に至る幅広い技術的判断に用いられる。岩盤分類法は、従来から多くの提案がなされ実用に供せられている¹⁾が、岩盤の挙動がきわめて多くの不確定な要因の相互作用に基づくため、分類基準は主として定性的な記述によらざるを得なかった。この結果、岩盤分類は判定を行う技術者の主観に多くを依存してきた。

一方、RMR法²⁾、Qシステム³⁾等は、岩盤の良好度に影響を与える工学的な要因に対し評価点を与え、その総合評価点をもって分類基準としている。ところが、分類法としては複雑すぎるきらいがあり、また国内での十分な適応性をもつとはいえないようである^{4),5)}。しかしながら、分類要因に対する客観的、定量的な記述の方法

としては効果的である。同様な評価点による要因の記述方式は、最近特にトンネル切羽観察をもとに要因をさらに厳選した形で多く用いられており⁶⁾、その総合として分類を行うのが現時点では最も有効な方法であると考えられる。ところが、この方法においても要因評価、総合評価の段階において技術者の主観的な判断に依存することは否めない。

すなわち、岩盤分類においては評価点方式の要因記述に加え、専門技術者の経験的主観を定量的に表現した総合評価のための客観的基準を設けることが必要と考えられる。また、土木構造物を対象とした岩盤分類では、ダム基礎、トンネル地山等の対象別に特殊性を考慮することが必要である。

本研究は以上のような見地から、対象構造物を岩盤トンネルに限定し、専門技術者の経験に基づく主観を定量的に評価し得るファジィ理論を応用し、従来の定性的な記述に代わる定量的な岩盤分類基準を提案することを目的とする。さらに、日本道路公団が発注した施工中のトンネルにおける各種データを用いて、本研究で提案した手法の妥当性を明らかにしている。

ファジィ理論とは、ファジネスとよばれる不確実性を定量的に扱う数学理論であり1965年にZadehにより提案⁷⁾されて以来、基礎理論の発展に伴いモデル、評価、

* 正会員 山口大学助手 工学部建設工学科
(〒755 宇部市常盤台 2557)

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部土木工学科 (同上)

*** 正会員 日本道路公団広島建設局建設第二部
(〒730 広島市中区土橋町 7-1 中国新聞ビル 6F)

**** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科
(〒755 宇部市常盤台 2557)

最適化、制御、診断等の多分野に応用されてきた。土木分野での応用例としては、構造物の健全度評価⁸⁾、骨組構造の最適耐震設計⁹⁾、斜面崩壊危険度の判定¹⁰⁾等を始め広範囲な領域に発展しつつある。

ここでは、岩盤分類を専門技術者の経験的主観を内包する1つのあいまいシステムであるとみなし、ファジィモデルの概念に基づく可能性モデル¹¹⁾を応用する。

本文では、まず岩盤分類法に対する基礎的な考察を行い、本研究の目的とする岩盤分類法の性格を明らかにする。次に、可能性線形システムおよびファジィ線形回帰分析によるモデリングの方法を示す。続いて、実際の施工時の岩質判定データを用いた可能性線形システムの同定を行い、その工学的妥当性を明らかにする。また、同定したシステムの予測性能について、従来の統計的手法との比較を行う。最後に、システムに対する適応修正のための方法論を示す。

ファジィ理論を応用した岩盤分類法には、清水らの提案¹²⁾がある。これは、分類要因の判定区分、重要度係数等に専門技術者の主観によるメンバーシップ関数を与え、ファジィ測度とファジィ積分によって分類を行う方法論を示したものである。著者らの提案する分類法は、対象構造物の特殊性を考慮し、さらに岩盤分類というファジィシステムに対し実際に専門技術者の行った岩質判定資料に基づいて専門技術者の主観を表現している点が特色と考えられる。実際の施工中に得られた岩質判定資料は、それに基づいて実施工がなされたことを考えると現時点で得られる資料としては信頼性も高く、多くの要因が総合的に包含されていると思われる。したがって、専門技術者に対する研究上の任意アンケートによる調査分析方法に比し、実用性に優れたものであると思われる。

2. 岩盤分類に対する考え方

ここでは、岩盤分類法の備えるべき基礎的条件を考察し、本研究の目的とする岩盤分類法の性格を明らかにする。

一般にトンネルにおける岩盤分類は設計、施工に影響を与える岩盤の性質を等級に分類し、おのおのの岩盤に対応した合理的な設計、施工を行うことを目的とする¹³⁾。したがって、岩盤分類法は、基本的に次の条件を備えることが望ましいと考えられる。

- ① 設計、施工に共通に適用でき、統一的な分類を行うことができる。
- ② 岩盤の工学的挙動を具体的に説明できる。
- ③ 岩盤の性質が、設計、施工面に反映できる客観的な数値で定量的に表現でき、かつ簡易性、一貫性を有する。
- ④ 岩盤の力学的性質は本来連続的であると考えられ

る。したがって、分類等級も段階的であるよりも、区間値で示すことが望ましい。

- ⑤ 岩盤挙動は、トンネルの施工条件（断面、掘削方法、支保工等）によっても影響を受ける。したがって、施工条件に対する配慮を行う必要がある。

上記のうち、①についてはトンネル掘削の性質上、設計時に得られるデータと施工時に得られるデータが内容、質ともに大きく異なり、共通のデータのみを用いてその他の条件を満足する分類法を作成することは困難である。そこで、設計時の分類法と施工時の分類法を別個に作成しておき、その相互関係を明らかにすることが考えられる。②、③では、岩盤分類に対する入力データをできるだけ少なくし、簡易な調査で定量的に得られるものに限定したうえで簡易な分類基準式にまとめることが必要であろう。④については、従来の調査方法、岩盤の力学的挙動の評価方法から得られた結果を直接採用し、従来の数学モデル等で表現しようとする限り困難であると思われる。⑤については分類基準に断面、掘削方法等のパラメーターを導入するか、もしくは施工条件に応じて分類基準を作成することが考えられる。ところが、施工時の岩盤分類を考えた場合、たとえば支保パターンは一般に岩盤分類結果を参考に決定されるものであるし、掘削方法等を定量的に評価し、パラメーターとして導入することは困難であると考えられるため後者を採用することが良いと思われる。

以上のことから、本研究では研究対象を施工時の岩盤分類に限定する。さらに対象トンネルを NATM で掘削された日本道路公団の岩盤トンネルに限定する。そのうえで、岩盤分類自体を1つの未知なシステムとみなし、実際の施工で得られたデータをもとにシステムを同定することを考える。同定方法としてフィルタリング理論は不確定な要因、非線形な要因が多いため適さない。また、従来から多く採用されてきた重回帰分析や数量化理論等の統計的手法では、回帰係数、カテゴリーウェイト等の数値に対し、工学的解釈が困難な場合も多く、予測値が確定値として与えられるため適切でない。これに対し、ファジィ理論に基づく可能性線形システムの出力は区間連続値であり、区間内の数値に対する可能性分布も同時に与えられる。さらに、施工時の専門技術者の判断結果として得られたデータを用いることによって、岩盤の工学的性質のみならず、経済的判断、施工条件等、専門技術者の主観に含まれていると考えられる数量化のできない条件をも考慮することができるため好都合である。なお、このようにして同定されたファジィシステムの工学的意義づけが明解であり、分類結果が技術者の考えに沿うものであれば、望ましいとされた上記のすべての条件を満たすことができるであろう。

3. 可能性線形システム

可能性線形システム¹¹⁾の説明に入る前にファジィ数を簡単に説明しておく。ファジィ数は実数集合を台集合とする正規かつ凸のファジィ集合で、弱 α カットが閉区間になるものをいう。すなわち、「およそ3」等のあいまいな実数値であり、図-1に示すようなメンバーシップ関数で表現される。ここで、 α カットはファジィ集合 A について次式を満足するものである。

$$\{x | \mu_A(x) \geq \alpha\} \dots \dots \dots (1)$$

ファジィ数の演算は拡張原理¹⁴⁾に基づく演算則に従う。なお、ファジィ数に対して一般に用いる確定的な実数値をクリस्प数という。

線形システムの係数がファジィ数によって定義される時、可能性線形システムとよび、

$$Y_i = A_0 + A_1 X_{i1} + A_2 X_{i2} + A_3 X_{i3} + \dots + A_n X_{in} \dots \dots (2)$$

ここに、 X_{ij} : データセット i における j 番目のデータ ($i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$)

Y_i : 予測ファジィ数

m : データセット数

n : データセットに含まれる説明変数の個数

で表わす。ファジィ数 A_j は可能性分布関数と考えることができる。すなわち、式(2)で定義したシステムはその構造自身にあいまいさを認め、システムの揺らぎは、係数の可能性に依存していると考えられる。ファジィ数にはいくつかの形式があるが、ここでは対称な L-R ファジィ数¹¹⁾のうちの三角形ファジィ数を採用する。このとき、ファジィ数 A_j は

$$A_j = (\beta_j, C_j) \dots \dots \dots (3)$$

と表現し、そのメンバーシップ関数は

$$\mu_{A_j}(x) = 1 - |x - \beta_j| / C_j, C_j > 0 \dots \dots \dots (4)$$

と定義される。式(3)において、 β_j は中心、 C_j は可能性の幅を与え、図-2のように示される。

式(2)に示す可能性線形システムにおけるファジィ出力 Y_i のメンバーシップ関数は次式(5)で与えられる。

$$\mu_{Y_i}(y_i) = 1 - |(y_i - X_i^T \beta) / (C^t |X_i|)| \dots \dots \dots (5)$$

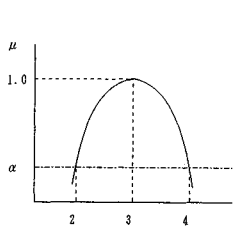


図-1 ファジィ数「およそ3」

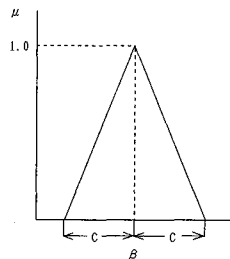


図-2 三角形ファジィ数

ここに、 y_i : 観測値

X_i : 説明変数ベクトル

$$|X_i| = (|X_{i1}|, |X_{i2}|, \dots, |X_{in}|)^t$$

これより、式(5)における可能性分布関数が式(3)で与えられれば出力 Y_i の可能性分布は次式(6)で計算できる。

$$Y_i = \left(\sum_{j=1}^n \beta_j^i X_{ij}, \sum_{j=1}^n C_j^i |X_{ij}| \right) \dots \dots \dots (6)$$

このとき、 Y_i の中心は $\sum_{j=1}^n \beta_j^i X_{ij}$ 、幅は $\sum_{j=1}^n C_j^i |X_{ij}|$ である。

4. 可能性線形回帰モデル

ここでは、可能性線形システムをモデル化する線形回帰分析¹¹⁾を説明する。通常回帰モデルでは、データとモデルによる予測値との差は観測誤差とみなしているが、ファジィ回帰モデルでは入出力関係を表わすシステム構造自体のあいまいさであると仮定し、観測値 y_i と式(2)による予測値 Y_i との差は線形システムの係数である可能性分布に依存していると考えられる。そこで、観測値 y_i がシステムの出力ファジィ数に可能性の度合 h 以上で含まれるように A_j を決定する。このときの h を適合基準度(レベル)とよぶ。レベル h での予測ファジィ数 Y_i のメンバーシップ関数は、

$$\mu_{Y_i}(y_i) \geq h \dots \dots \dots (7)$$

であるから、

$$1 - |(y_i - X_i^T \beta) / (C^t |X_i|)| \geq h \dots \dots \dots (8)$$

と表わすことができる。また、式(8)の条件下での可能性線形システムによって得られる予測ファジィ数の揺らぎは、 $C^t |X_i|$ が Y_i の幅を与えることから、

$$S = \sum_{i=1}^m C^t |X_i| \dots \dots \dots (9)$$

のように表わせる。

以上より、式(2)の係数 A_j は、式(8)の条件下で、式(9)を最小にすることによって求められ、可能性線形回帰は次の線形計画問題に帰着できる。

$$\min_{\alpha, c} \sum_{i=1}^m C^t |X_i| \dots \dots \dots (10)$$

subject to

$$(1-h)C^t |X_i| + X_i^T \beta \geq y_i$$

$$(1-h)C^t |X_i| - X_i^T \beta \leq -y_i$$

$$C^t \geq 0, i=1, 2, \dots, m$$

よって、可能性線形システムは、式(10)の線形計画問題を解くことによって得られる。ここで、 X_i, y_i は、クリस्प数である。なお、適合度 h は $0 \leq h \leq 1$ であり、予測ファジィ数の幅を決定する。 h が大きいほど、予測値の幅は広がり、システムのあいまいさが大きくなる。したがって、 h の値を自由に設定することによって、データ数の多少、データの信頼性等に対する判断を考慮できる。

5. 可能性線形システムの同定

日本道路公団では、従来からトンネル施工において坑内観察を統一様式で行っている。その中で、図-3に示す切羽観察記録表は、圧縮強度、風化変質等の切羽状況を示す9項目(以下、図-3に従い各項目を(A)~(I)と標記する)に対し、岩盤工学上良好な状態から不良な状態へ1~4段階の評価を行っている。また、岩盤等級はA~Eの5段階で定義している¹⁵⁾。

実際の施工においては、切羽観察記録およびその他の状況を考慮して専門技術者が日本道路公団の定める分類基準¹⁵⁾に照らし合わせたうえで岩盤等級を判定し、判定結果を岩質判定記録に記載している。この岩質判定記録をもとに最終的な設計変更や積算等がなされており、切羽観察記録、岩質判定記録は、定量的に評価されたデータとして信頼性も高く、工学的意義のみならず経済的、社会的側面においても重要なものと考えられる。

そこで、著者らは以下の考察より、広島型花崗岩地山に施工されたトンネルにおける切羽観察記録と岩質判定記録に基づき、花崗岩トンネルにおける可能性線形システムの同定を行った。

1) 岩盤の挙動を支配する要因は無数にあると考えられる。しかしながら、これらの要因のすべてをデータとして扱うことは不可能である。そこで、代表値として切羽観察記録の9項目を採用し、岩盤の工学的挙動に関するその他の諸要因は、上記9項目に分散して含まれ、施工に対する制約的な要因は専門技術者の主観に存在すると考える。

2) 切羽観察記録に記載された評価ランクは、客観的に評価されたものであるが、実際には観察者が4段階の評価に対し「どちらかといえば…」というあいまいな判

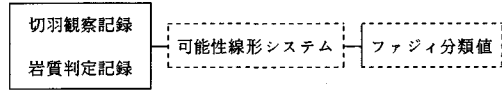


図-4 可能性線形システム

断を行っている場合も多いと考えられる。また判定結果についても同様であると考えられる。したがって、要因評価、判定結果も本来ファジィ量として評価すべきである。しかしながら、現在の観察記録から評価の度合を読み取ることは不可能である。そこで、切羽観察記録、岩質判定値を、客観的確定値として扱い、可能性線形帰帰モデルへの入力データとして用いる。このときのシステム関係を図-4に示す。図-4で、実線に囲まれた部分はクリスプ集合、点線に囲まれた部分はファジィ集合を表わす。

3) 岩盤の挙動は、花崗岩、砂岩等の岩種によって異なり、(A)~(I)の各項目評価が岩質判定結果に及ぼす影響は同一ではないと考えられる。そこで、可能性線形システムも岩種別に同定する必要がある。なお、切羽観察記録の「割れ目の状態」については、岩種ごとに特徴的な形態を有することもあり各岩種への適用性に疑問はある。たとえば、柱状、層状の割れ目形態は変成岩、堆積岩類に特徴的な形態である。ところが、このような形態も巨視的にはいずれの岩種においても存在し、岩塊の抜け落ち、土圧に対する抵抗力等において、この順に不良な状態に移行すると考えられる。さらに、観察者の目視によって割れ目の形態が判断され、岩種も考慮したうえで、この判断結果から岩質の判定がなされたのであるため、岩種を問わず切羽観察記録と現場での岩質判定結果をデータとして採用することは妥当であると考えられる。

入力を施工時に記入された切羽観察記録、出力を予測岩盤等級とする可能性線形システムは、次のように表わせる。

$$Y_i = A_0 + A_A X_A + A_B X_B + A_C X_C + A_D X_D + A_E X_E + A_F X_F + A_G X_G + A_H X_H + A_I X_I \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 A_A, A_B, \dots, A_I : 切羽観察項目(A)~(I)のファジィ係数

X_A, X_B, \dots, X_I : 切羽観察項目(A)~(I)の評価ランク(1~4)

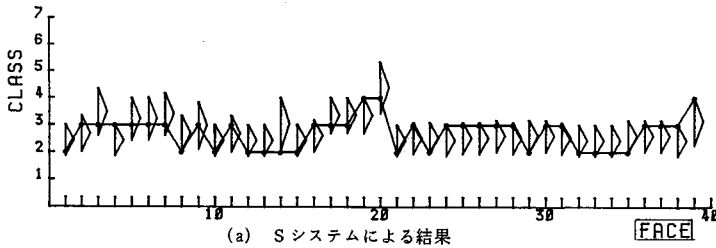
Y_i : 予測岩盤等級

ただし、岩盤等級は日本道路公団の標記A~Dを1~4のクリスプな数値に対応させている。また、現場の観察において記入された各切羽観察項目の評価ランクも同様に1~4の数値に対応させている。たとえば、本研究で用いたaトンネルにおける数値化後のシステム入力データの一部を示せば表-1のようである。

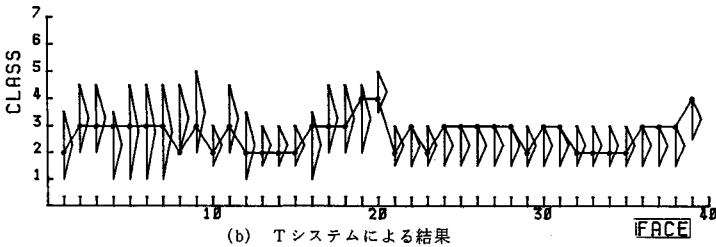
③	切羽の状態	1.安定	2.鏡面から岩塊が抜け落ちる	3.鏡面の押出しを生じる	4.鏡面は自立せず崩れあるいは流出
④	素地面の状態	1.自立(普請不要)	2.時間がたつと緩み肌落ちする(後普請)	3.自立困難程度後早期に支保する(先普請)	4.掘削に先行して山を寄せておく必要がある
⑤	圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る	2. $1000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー打撃でかかる	3. $200 > \sigma_c \geq 50$ 軽打撃でかかる	4. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー刃先くいつむ
⑥	風化変質	1.なし・健全	2.岩目に沿って変色、強度やや低下	3.全体に変色、強度相当に低下	4.土砂状、粘土状、砂粒、当初より未固結
⑦	割れ目の傾度	1.間隔 $d \geq 1\text{m}$	2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	4. $5\text{cm} > d$ 破砕、当初より未固結
⑧	割れ目の状態	1.密着	2.部分的に開口	3.開口	4.粘よをはきむ、当初より未固結
⑨	割れ目の形態	1.ランダム方形	2.柱状	3.層状、片状、板状	4.土砂状、細片状板状当初より未固結
⑩	湧水	1.なし、滲水程度	2.湧水程度	3.集中湧水	4.全面湧水
⑪	水による劣化	1.なし	2.緩みを生ず	3.軟弱化	4.崩壊・流出

図-3 切羽観察記録表

観測方向(切羽面)をみて	縦断方向	1. 水平 ($10^\circ > \theta > 0^\circ$)	2. さし目 ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ, 80^\circ > \theta \geq 60^\circ$)
	横断方向(切羽面)をみて	3. さし目 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$)	4. 流れ目 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$)
観測方向(切羽面)をみて	縦断方向	1. 水平 ($10^\circ > \theta > 0^\circ$)	2. 右から左へ ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ, 80^\circ > \theta \geq 60^\circ$)
	横断方向(切羽面)をみて	3. 右から左へ ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$)	4. 左から右へ ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$)

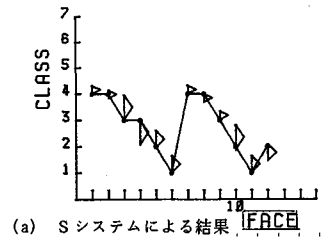


(a) Sシステムによる結果

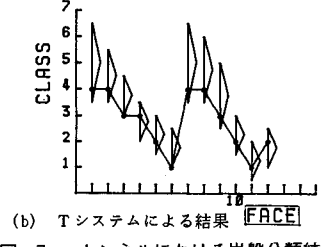


(b) Tシステムによる結果

図-5 a トンネルにおける岩盤分類結果

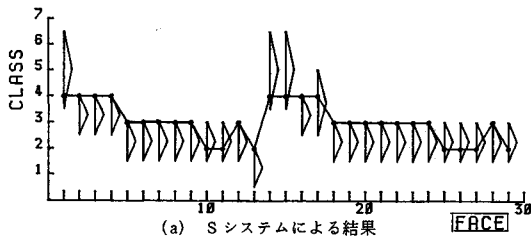


(a) Sシステムによる結果

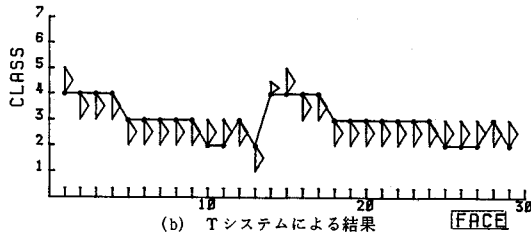


(b) Tシステムによる結果

図-7 c トンネルにおける岩盤分類結果

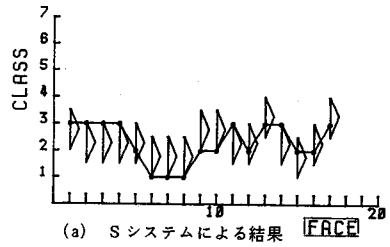


(a) Sシステムによる結果

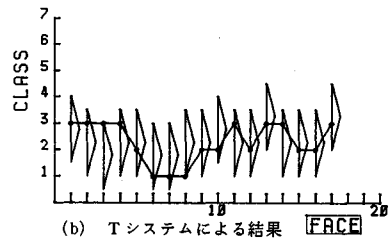


(b) Tシステムによる結果

図-6 b トンネルにおける岩盤分類結果



(a) Sシステムによる結果



(b) Tシステムによる結果

図-8 d トンネルにおける岩盤分類結果

表-1 入力データ例

切羽観察項目									観測岩盤等級	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	y	標記
2	3	3	2	2	3	3	3	2	3	(C)
1	2	2	3	3	2	1	3	1	4	(D)
1	2	2	2	2	1	2	1	2	(B)	
2	2	4	4	3	2	1	3	1	4	(D)

表-2 トンネルデータ

Tunnel	データ数
a	39
b	29
c	12
d	17

式 (11) のモデル化は式 (10) に従い次式で表わせる。

$$\min_{a,c} \sum_{i=1}^m C^i X_i \dots \dots \dots (12)$$

subject to

$$(1-h)C^i X_i + X_i^i \beta \geq y_i$$

$$(1-h)C^i X_i - X_i^i \beta \geq -y_i$$

ここに、 $X_i = (X_A, X_B, X_C, X_D, X_E, X_F, X_G, X_H, X_I)^t$

y_i : 専門技術者による観測岩盤等級

本研究で対象としたトンネルと切羽観察記録数を表-2に示す。システムの同定は、1) a~dの各トンネルごと

のデータのみを用いた場合、2) 全トンネルのデータを用いた場合の2通りを行った。なお、本研究においてはメンバーシップ関数が限界値を含めて正の値であれば良いとして扱い $h=0$ とした。また、式 (12) の最小化においてはシンプレックス法を用いた。結果を以下に示す。

a トンネル: $Y = (.5, 0.) X_C + (.25, .083) X_D + (.167, 0.) X_E + (.292, .208) X_H \dots \dots \dots (13)$

b トンネル: $Y = (1., 0.) X_D + (.25, .25) X_H \dots \dots \dots (14)$

c トンネル: $Y = (.4, 0.) X_C + (.083, 0.) X_E + (.469, 0.) X_F + (.083, 0.) X_G + (.02, .159) X_H \dots \dots \dots (15)$

d トンネル: $Y = (1., 0.) X_E + (.25, .25) X_G \dots \dots \dots (16)$

全トンネル: $Y = (1., 0.) X_D + (.25, .25) X_G + (0., .5) X_I \dots \dots \dots (17)$

図-5~8は式 (13)~(16) (以下、Sシステムと総称

する)と式(17)(以下、Tシステムという)を用いたときの各トンネルにおける予測値である。縦軸は岩盤等級、横軸は対象切羽であり、黒丸は施工時に判定された岩盤等級を示す。

ここで、可能性線形システムの出力値に対する考え方を示す。式(13)~(17)から得られる岩盤等級の予測値は式(6)のファジィ数であるので、下限値、中心値、上限値で与えられ、おのおの図-2における $\beta-C$ 、 β 、 $\beta+C$ に対応する。たとえば、図-5(b)の切羽データ番号10での予測値は下限値=1.5、中心値=2.25、上限値=3.0である。これは、日本道路公団の段階式等級に従って表現すれば「B等級からC等級の間であるが、B等級の可能性が大きい」という分類を与えている。この意味において、可能性線形システムは岩盤分類における数値的な分類基準を与えるものと考えられる。ただし、前述のように、解析においては岩盤等級A~Dを1~4の数値に対応させている。このため、解析上は予測値の幅も含めて5以上の等級を与えることもある。日本道路公団の岩盤等級では実際にE等級が定義されており¹⁵⁾、上記数値上の対応関係によれば予測値 $Y=5$ はE等級、6はそれ以上となる。ところが、実際には分類等級Eは掘削直後に鏡面が崩壊するような軟弱地山であり、一般に花崗岩地山においては適用されない特殊な地山であると考えられ、A~D等級とは区別して扱う必要がある。この点では、専門技術者においてもD等級を1つの水準値として、これ以上はすべてD等級に含める判定を行っている。したがって、システムの予測岩盤等級においては中心が4以上の場合はすべてD等級を提示するものと判断して良い。

次に、SシステムおよびTシステムの差異について考察を加える。まず、システムに採用された分類項目に着目すると、すべての可能性線形システムにおいて(A)、(B)項目が含まれておらず、システムに及ぼす影響が小さいか、もしくは他の項目に従属するものと考えられる。また、Tシステムでは、(D)、(G)、(I)項目のみが係数に含まれ、Sシステムに含まれていくつかの項目が削除されている。この理由としてデータ数の多少も考えられるが、Sシステムが各地山の特殊性を具体的に表現していると考えられるべきであろう。

この点について、図-5~8よりTシステムによる予測値の幅がSシステムに比し大きくなっているのがわかる。本来、可能性線形システムの同定は式(10)の線形計画問題で与えられるように、可能性の幅を最小にする操作を行っている。そのため、Sシステムにみられるようにデータが少なく、ばらつきが小さい場合には可能性幅が小さく、かつ専門技術者による判定結果は可能性の限界値にくる傾向になる。これに対してTシステムは異

表-3 評価関数値

Tunnel	J_s	J_T	K_s	K_T	L_s	L_T
a	0.653	0.987	0.278	0.463	0.471	0.53
b	0.491	0.845	0.0	0.2	0.491	0.676
c	0.292	0.979	0.139	0.442	0.251	0.546
d	0.75	1.25	0.275	0.541	0.544	0.574
全	-	0.99	-	0.395	-	0.599

なる条件下のトンネルを含めて多数のデータを用いているため幅は大きくなるが判定結果は比較的中心値に近くなる。このことは換言すればSシステムが個々のトンネルの特性を顕著に表わしているためであるといえることができる。

そこで、SシステムとTシステムの特性を具体的に比較検討するために次の評価関数を用いる。

$$J = (1/N) \sum_{i=1}^N C^i X_i \dots \dots \dots (18)$$

$$K = (1/N) \sum_{i=1}^N \mu_n(y_i) \dots \dots \dots (19)$$

ここに、 N ：切羽数

関数 J は予測値の平均幅であり、 J が小さいほどシステムのあいまいさが小さく、各地山の特性に適応していると考えられる。これに対して関数 K は観測値 y_i が予測値 Y_i に含まれる割合の平均値であり、 K の値が大きいほど観測値が予測値の中心に近いことを示す。表-3にSシステムおよびTシステムを用いた各トンネルにおける予測値に対する評価値を示す。表中、 J 、 K の下付き添字 S 、 T はおのおのSシステム、Tシステムによる評価値であることを示す。

表-3の全トンネルにおいて $J_s < J_T$ であるのは前記の理由によるものである。同様に全トンネルにおいて $K_s < K_T$ となっているのは、Tシステムが可能性の幅を広げたために予測値のメンバーシップ関数値が高くなったためである。なお、bトンネルの K_s 値が零となっているのは、式(14)においてすべての観測値が予測値の限界点であったためである。このようにSシステムの方が、Tシステムよりおのおのトンネルの特性を具体的に表現していることがわかる。すでに述べたようにSおよびTシステムはおのおのファジィシステムとして個々あるいは全体からみた岩盤分類を表わすものであり、その優劣の評価は困難である。しかし、ここで参考のために観測値と予測中心値との平均的な差を表現する関数として、(平均可能性幅)×(中心値からの平均離れ)の和を考え、

$$L = J(1-K) \dots \dots \dots (20)$$

として両システムを比較する。このとき、 L 値が小さいほどシステムの中心値は判定された結果に近いといえる。表より全トンネルにおいて L_s は L_T に対して小さい値をとっており、個々のトンネルを対象に考える限り

ではSシステムの中心値が判定結果と近い値を与えるのはうなづけるところである。また、図—5—図—8において観測値が三角形の上側にあるときは区間内の安全側、下側にある場合は危険側の評価がなされたと考えられる。

6. 可能性線形システムに対する考察

ここでは、Tシステムである式 (17) に採用された項目および係数値についての考察を行う。

1) 採用された項目に着目すると、花崗岩トンネルの岩盤分類を支配する可能性線形システムは、風化変質 (D)、割れ目の形態 (G)、水による劣化 (I) によって構成されており、その他の項目は影響が小さいため現われてこない。これは、各項目が次のような従属関係にあると考えることで理解できる。

- 風化変質 (D) ε 圧縮強度 (C)
- 割れ目の形態 (G) ε 割れ目の頻度 (E),
割れ目の状態 (F)
- 水による劣化 (I) ε 湧水 (H)

また、切羽の状態 (A)、素掘面の状態 (B) については (D)、(G)、(I) の各項目の総合的結果として表わされるものであろう。

2) 式 (17) の係数については図—3の切羽観察記録の内容との検討を行うと、その意味が明解である。まず、式 (17) 中の (D) 項目の係数 A_D の中心は 1.0 であり、トンネルにおける岩盤分類を工学的な切羽の自立性の観点から考えたとき、岩盤強度を表わす代表項目の評価ランクで等級がほぼ決定されていると考えることは可能である。特に、(D) 項目の評価ランクが 4 であれば図—3より、切羽が土砂状、粘土状、破碎あるいは、当初より未固結な状態であるので、岩盤としての自立性を期待できず、明らかに D 等級に特定できる。同様に (G) 項目の係数 A_G が (0.25, 0.25) となっているのは、割れ目は岩盤強度を表わす重要な要因ではあるが、亀裂が発達していても岩盤自身が強固で十分な自立性を有する場合もあり、分類を決定的にするものではないことを示す。このことから、(G) 項目の評価ランクが 4 であったとしても、予測値中心の増加が 1、幅の増加が 1 にとどまっているのは合理的であると考えられる。さらに、(I) 項目では係数の幅のみに 0.5 という比較的大きな値が現われる。(I) 項目の評価ランクが 4 であるときは、図—3から切羽の崩壊、流出状態にある。この場合、(I) 項目による推定値の増加は 2 であるが、このような状況下で (D) 項目が 2 以下の評価ランクであることは考えにくく、明らかに D 等級を与えると考えられる。また、(I) 項目の評価ランクは、岩盤そのものの工学的強度を表わすというより、あくまでも水による影響であるので可能性としてのみシステムに取り込むことは妥当であ

ると考えられる。

3) 予測値の可能性はその幅で示される。予測値の幅はデータによって異なるが、式の上からは (G) 項目、(I) 項目の評価ランクに起因するものである。これはまた施工性に直結した評価であるともいえる。すなわち、割れ目、湧水による施工性への影響である。割れ目の性状は、支保の軽重に大きな影響を与え、湧水は施工全般にわたって影響を及ぼす。たとえば、図—6(b) の 1, 14, 15 切羽では特に幅が大きいが、このとき (G) 項目の評価ランクが 4 となっており、割れ目の性状が施工性に及ぼす可能性を評価したものと考えられる。

7. 従来の統計解析手法による予測式との比較

本文で提案した可能性線形システムとの比較のために従来から多く行われてきた統計解析手法による分析を行った。本来、統計的手法による予測値はクリस्प値であり、確定的な岩盤等級を与えるものである。これに対し可能性線形システムは可能性の幅と度合を含んだ形で岩盤等級を与える。この意味において、可能性線形システムとの直接の比較は困難であるが、定性的な比較は可能である。比較した解析法は、通常用いられる重回帰分析と数量化理論 I 類である。また、データは全トンネルのデータを用いている。

(1) 重回帰分析による予測

得られた回帰式は

$$Y = 1.328 + 0.186 X_A - 0.414 X_C + 0.561 X_D + 0.228 X_E + 0.235 X_G \dots \dots \dots (21)$$

であり、重相関係数 $R = 0.726$ 、分散比 $F_0 = 20.3$ であつ

表—4 偏相関係数

項目	重回帰	数量化
(A)	0.194	0.576
(B)	-0.011	0.427
(C)	-0.225	0.234
(D)	0.438	0.55
(E)	0.207	0.37
(F)	-0.133	0.301
(G)	0.359	0.563
(H)	0.053	0.319
(I)	-0.098	0.284

表—6 基準カテゴリーウェイト

RANK	1	2	3	4
(A)	-0.208	0.12	2.355	0.952
(B)	-0.499	0.124	-0.313	-0.499
(C)	0.330	-0.053	-0.081	0.348
(D)	0.056	-0.169	0.565	0.056
(E)	0.405	-0.152	0.168	0.217
(F)	-0.286	0.106	0.018	-0.558
(G)	-0.196	-0.607	0.410	0.988
(H)	-0.236	0.032	0.350	-0.377
(I)	0.058	-0.319	0.058	0.058

表—5 重回帰分析における相関係数

項目	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)	分類
(A)	1.0									
(B)	.69	1.0								
(C)	.63	.71	1.0							
(D)	.63	.67	.80	1.0						
(E)	.49	.65	.81	.77	1.0					
(F)	.60	.77	.83	.75	.80	1.0				
(G)	.43	.25	.26	.16	.09	.33	1.0			
(H)	-.17	.00	.13	.12	.10	.07	-.56	1.0		
(I)	.25	.19	.17	.17	.01	.06	-.08	.31	1.0	
分類	.54	.43	.45	.61	.47	.46	.43	-.18	.0	1.0

表一七 数量化I類における相関係数

項目	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)	分類
(A)	1.0									
(B)	-0.33	1.0								
(C)	0.44	-0.34	1.0							
(D)	0.16	-0.16	0.0	1.0						
(E)	0.15	-0.31	0.44	0.17	1.0					
(F)	-0.45	0.58	-0.69	-0.09	-0.45	1.0				
(G)	0.23	-0.38	0.42	0.0	0.24	-0.54	1.0			
(H)	-0.24	0.08	-0.20	0.12	-0.09	0.28	-0.48	1.0		
(I)	-0.10	-0.01	0.20	-0.34	0.11	-0.18	0.12	-0.36	1.0	
分類	0.48	-0.04	0.42	0.42	0.38	-0.26	0.4	-0.09	0.0	1.0

た。偏相関係数を表一四、相関係数を表一五に示す。表一四によれば (D), (G), (C), (E) 項目の順に寄与率が高く、素掘面の状態に関する (B) 項目および湧水に関する (H), (I) 項目の相関が非常に低いため回帰係数として採用されていないことがわかる。ところで、式 (21) における X_c の係数が負の値をとっているのは岩盤等級と (C) 項目との間に負の相関があることを示している。これは圧縮強度が減少すると岩盤が良好になると判定されるという工学的に理解しがたい関係を与えている。この理由として、重回帰分析が与えられたデータに対する予測値との誤差を最小にするという条件から成り立っているためである。この点については式 (21) には現われていないが表一四に示す偏相関係数中の (B), (F), (I) の項目についても同様である。

(2) 数量化理論I類による予測

ここでは、分類項目をアイテム、項目内の4段階の評価をカテゴリーとし、岩盤分類の観測値を外的基準とした。基準カテゴリーウェイトを表一六に示す。重回帰係数は $R=0.827$ であった。予測値は、次式で得られる。

$$Y = \sum_{j=1}^9 \sum_{k=1}^4 a_{jk} b_i(jK) \dots \dots \dots (22)$$

ここで、 $b_i(jK)$ はダミー変数であり、 j のカテゴリーに反応するとき 1.0、その他は 0.0 となる。 a_{jk} は基準カテゴリーウェイトである。偏相関係数を表一四、相関係数を表一七に示す。表一四によれば (A), (G), (D), (B) 項目の寄与率が高く、(H), (I) 項目は、ほとんど予測に考慮されていないことがわかる。なお、この手法においても基準カテゴリーウェイトに負の値が多数現われており、工学的に不合理な関係を与えている。これも、重回帰分析と同様な理由によると思われる。

以上より、統計解析と可能性線形回帰との比較において次のことがいえる。

1) 3種の解析に共通に (D), (G) 項目の寄与が大きいため、明らかにこの2項目が岩盤分類における重要な役割を担うと思われ

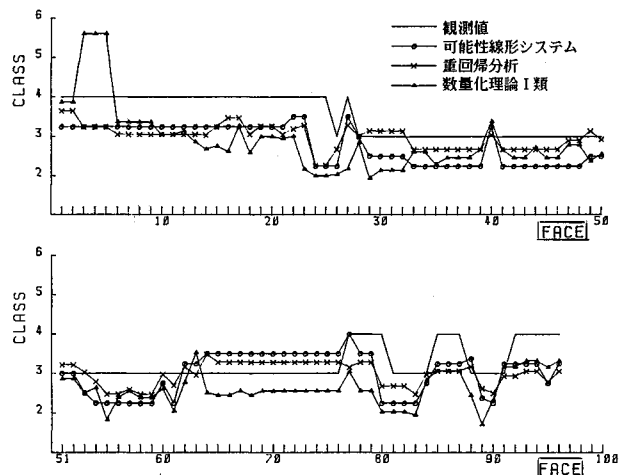
る。

2) 統計解析では (A) 項目の影響が比較的大きいが、可能性線形システムでは除外されている。

3) 統計解析では (I), (H) 項目の影響度が非常に小さい。特に重回帰分析においては回帰式から全く除外されている。これは、統計解析では相関係数を指標としたクリスピーな予測値を得ようとするところから、相関の低い湧水に関する項目が無視されたためと考えられる。これに対し、可能性線形システムでは湧水の影響をシステムの可能性において比較的大きな要因として扱っている。このように統計上、相関の低い湧水に関する項目についても、その影響の重大さを評価している点において可能性線形システムの合理性が示されている。

4) 統計解析では、式 (21)、表一六にみられるように、予測式の係数に負の値が現われる。これは、対応する切羽観察項目の評価が不良になると、その総合としての岩盤良好度が高くなるという不合理な関係を与え、工学的な意味において理解しがたい。これに対し、可能性線形システムでは定式化上、負の相関はありえずこのような不都合を生じない。

次に、可能性線形システムが予測システムとして、どの程度、統計解析に追従できるかを調べるために、これまでに得られた3種の予測式を用いて実際に分類基準値の予測を行う。ここで採用したトンネルも花崗岩地山に施工されたものである。図一九は重回帰分析による予測式 (21)、数量化理論I類による予測式 (22)、可能性線形回帰モデルによる予測式 (17) より得た予測値、および観測値を示したものである。ただし、式 (21)、(22) と式 (17) では出力値の意味が異なるので厳密には比較することが困難である。そこで、簡単のために式 (17) については出力の中心値をもって非ファジィ化した。図



図一九 予測値の比較

—9における予測値と観測値の誤差の絶対値の平均をとったところ重回帰 (0.5173), 数量化 (0.7595), 可能性 (0.6536) であった。この結果から可能性線形システムが統計解析とほぼ同程度の予測能力をもつといえる。

8. 可能性線形システムにおける適応修正

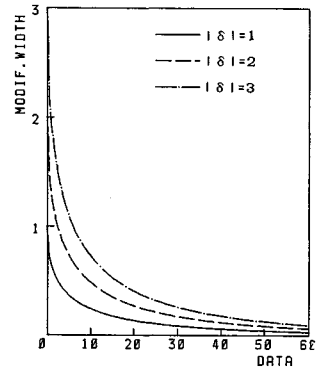
前節までで、花崗岩地山における岩盤分類式を可能性線形システムで与えることの妥当性を示した。提案式はすべての花崗岩地山に施工されるトンネルに対して岩盤分類基準式として適用しようとするものである。しかしながら、花崗岩で形成された地山であってもおのおののトンネルにはおのおのの特徴があり、何らかの特殊条件により、ここで与えたシステムが甚だしく馴染まない可能性も否定できない。このような場合に基本システム(式(17)をいう)に対する適応修正の方法を定義しておけば、岩盤分類法としての一貫性を損なうことなく幅広い適用ができる。文献16)においても、地山分類案の適用における留意点の1つとして、現状に適応しない場合の変更の可能性について示してあり、このような準備をしておくことは必要であろう。

適応修正においても基本システムと同様な簡易性が要求される。このため、1) システム自体が未知のあいまいさを許容している、2) 分類項目の従属関係はすべての花崗岩地山に共通である、という仮定のもとに式(17)に含まれるデータ項目、ファジィ係数は不変とし、ファジィ修正項を付加することによって出力に対する変動の可能性を考える。これは、5. のシステム同定で用いた9種のデータだけでは処理し得なかった地山の特殊条件に対する修正項である。ここで与えるべきファジィ修正項は次の条件を満たすものでなければならない。1) 中心値は、トンネル掘削の初期段階においては切羽の進行に伴い変化するが、ある程度切羽が進行した時点で一定値に収束してゆく。2) 幅は、トンネル掘削の初期段階においては、ある大きさをもつが、切羽の進行に伴い零に収束してゆく。

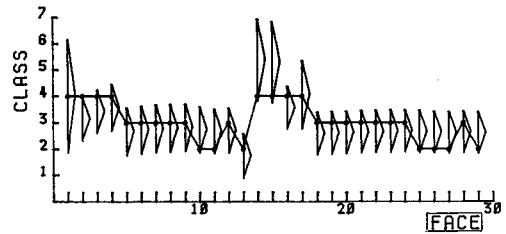
上記の条件を満たすファジィ修正項として、たとえば次のようなファジィ数を考える。いま、システムからの出力は (β_r, C_r) のファジィ数で与えられており、現場での技術者が与えられた予測値を当該地山に甚だしく適合しないものと判断し、これを y と修正した場合を考える (y はクリスプ数である)。このとき予測中心値に対する変動量の切羽進行に伴う平均値は、第 N 番目の切羽において

$$\delta = 1/N \sum_{i=1}^N y_i - \beta_r \dots \dots \dots (23)$$

のように与えられ、これをファジィ修正項の中心値とする。次に、幅を



図—10 修正量の幅関数



図—11 b トンネルにおける適応修正結果

$$\epsilon = |\delta| \exp(-\sqrt{N}/5) \dots \dots \dots (24)$$

とする。式(24)は図—10に示すように中心値の変動が大きいくほど修正項の幅が大きく、切羽数が多くなるほど修正項の幅が小さくなる関数である。また、ファジィ修正項は基本システムのファジィ係数と同様に対称な三角形ファジィ数とする。このときファジィ修正項のメンバーシップ関数は次のように表わせる。

$$\mu(X) = 1 - |X - \delta| / \epsilon \dots \dots \dots (25)$$

以上より、目的のトンネルにおける修正システムは (ϵ, δ) をファジィ修正項として基本システムに付加することで得られ、修正出力 Z はファジィ数の演算規則に従い、

$$Z = (\beta_r, C_r) + (\delta, \epsilon) = (\beta_r + \delta, C_r + \epsilon) = (\beta_z, C_z) \dots \dots (26)$$

となる。式(26)によれば、修正の初期段階では、基本システムとの変動量の予測におけるあいまいさにより幅は増大するが、目的とするトンネルでのデータが蓄積されるに従って縮小し、基本システムのもつ最大幅に収束する。

一例として、図—11は本文5. で用いたトンネルデータのうち、最も適応性が悪かったbトンネルに対して適応修正を行ったものである。この結果、基本システムでの L_r 値が0.676であったものが、修正システムでは0.494となり、適合度が大きく向上している。

同様に、本文7. で用いたトンネルデータに対して適応修正を行ったところ、修正前 $L_r = 0.718$ であったものが修正後 $L_r = 0.324$ であった。また、前述の平

均誤差は0.334となり、統計解析手法より優れた予測を与えている。なお、この例ではファジィ修正項を初期30切羽のデータを用いて決定した。

9. おわりに

本研究では、広島型花崗岩地山におけるトンネル施工時の岩盤分類法としてファジィ理論を基礎とした可能性線形システム的应用による分類式を提案した。また、分類式におけるファジィ係数の工学的意味を明らかにし、その有効性を示した。提案式は、切羽観察記録、岩質判定記録という専門技術者による信頼性の高い記録を分析することによって、花崗岩地山に施工されるトンネルの切羽に対して専門技術者が行ってきた岩盤分類を次のように集約し、数量的に表現したものと考えることができる。

1) 花崗岩地山に施工されたトンネルにおける岩盤分類は、基本的に切羽の自立性に着目して行われている。

2) 岩盤の挙動を記述する要因を細かく検討すると非常に多くの項目が挙げられるが、花崗岩トンネルでの岩盤分類においては、風化変質、割れ目の形態、水による劣化の3項目における状況判断で実用的に十分である。

3) 切羽の自立性は主に風化変質の程度によって判定でき、割れ目の状況によって、ある程度推移する。また、湧水は二次的に影響するが、影響の度合は割れ目の状況に比し大きい。

以下に、提案式の特徴を列記する。

1) 提案式に対する入力データが切羽観察項目における風化変質、割れ目の形態、水による劣化の3項目のみであるため、工学的意味付けが簡潔、明瞭に行え、切羽状態の把握が技術者の知識、経験によらず容易に行える。さらに、計算自体が非常に簡単であるため現場での適用性に優れる。

2) 岩盤等級は連続した区間値で与えられ、さらに区間値に対する重要度が数値で与えられるため、たとえば支保工選定等、施工面への反映が容易に行える。

3) 提案式は、システム同定によって得られたものであるから予測式としての側面ももつ。この点においてシステムへの入力データが少なく、簡単であるにもかかわらず、予測誤差を最小とするように設計された重回帰分析、数量化理論Ⅰ類を用いた予測式とほぼ同程度の予測が可能である。

なお、本研究では、切羽観察記録の評価ランクを現状において客観的な評価であると考えた。同様に、専門技術者の判定等級についても確定値として扱ったが、実際にはファジィ値として扱うべきであろう。この点について

では現行の切羽観察記録、判定結果の記載方法からは評価が困難であるため将来の課題としたい。また、本研究で用いた可能性線形回帰モデルでは、人間の主観に基づく制約条件を同定時に与えることも可能であり、専門技術者の一般的な認識を導入すればさらに優れた分類システムの同定も可能であると思われる。

本論文をまとめるにあたり、京都大学工学部土木工学科 古田 均助教授から多くの助言を頂いた。また、データ整理、図面作成において松山貴之氏(元・山口大学生)の助力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本応用地質学会編：岩盤分類，日本応用地質学会，1984。
- 2) Bieniawski, Z. T. : Geomechanics Classification of Rock Masses and Its Application in Tunneling, Proc. 3rd Int. Congress on Rock Mechanics, Vol. II-A, 1974.
- 3) Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. : Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mechanics, Vol. 6, No. 4, 1974.
- 4) 土木学会：トンネルの地質調査と岩盤計測，1988.7。
- 5) 土木学会：トンネルにおける調査・計測の評価と利用，1987.9。
- 6) たとえば、川本 茂・五月女隆・亀甲谷義高：第三紀層泥岩地帯における NATM の計測管理，トンネルと地下，第18巻，第3号，1987.3。
- 7) Zadeh, L. A. : Fuzzy Sets, Information and Control, Vol. 8, 1965.
- 8) 白石成人・古田 均・橋本光行：構造物の健全度評価へのファジィ数量化理論の応用，第30回構造工学シンポジウム論文集，pp. 277~284，1984。
- 9) 古川浩平・古田 均・山田善一・白石成人：満足度最大化を目的とする骨組構造の最適耐震設計，日本建築学会論文報告集，第342号，pp. 30~38，1984.8。
- 10) 吉松弘行・三井宏人・青木隆典・大浦二郎：ファジィ理論による地震時斜面崩壊危険度の判定，土木技術資料31-4，pp. 39~44，1989。
- 11) 田中英夫：可能性モデルとその応用，システムと制御，Vol. 28, No. 7, pp. 447~451, 1984.
- 12) 清水則一・桜井春輔：ファジィ理論を用いた岩盤分類の構成方法に関する研究，土木学会論文集，第370号/Ⅲ-5，pp. 225~232，1986.6。
- 13) 岩盤力学委員会第二分科会：トンネル岩盤分類の考え方，土木学会誌，Vol. 64, No. 11, pp. 49~56，1979.11。
- 14) Dubois, D. and Prade, H. : Fuzzy Real Algebra : Some Results, Fuzzy Sets and Systems 2, pp. 327~348, 1979.
- 15) 日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル，pp. 34, 1985.10。
- 16) (社)日本トンネル技術協会：地山評価のあり方に関する研究，1985.2。

(1989.9.11・受付)