

ファジー理論を用いた岩盤分類の構成方法に関する研究

A STUDY ON ROCK MASS CLASSIFICATION BY FUZZY SET THEORY

清水 則一*・桜井 春輔**

By Norikazu SHIMIZU and Shunsuke SAKURAI

This paper presents a method of constituting a rock mass classification, which is capable of representing an engineer's subjectivity on engineering judgement and thought process by using the fuzzy set theory. The method is composed of three parts; (1) description of judging classification parameters by fuzzy sets, (2) grading of importance of each parameter, (3) total evaluation of judgement of all parameters by fuzzy integral. The classification provides a distribution of "fuzzy expected values" covering all the rock mass classes (five classes, i. e. "very good", "good", "fair", "poor" and "very poor", are adopted in this paper). An example is shown to illustrate the constitution of rock mass classification by the proposed method.

1. ま え が き

岩盤分類は、岩盤の工学的特性を特徴付ける地質・力学的要因を現位置において観察あるいは計測し、一定の規準に従って岩盤を類別し、岩盤の良好度を評価するものである。そして、分類結果は岩盤物性、あるいは、標準施工法などに対応付けられ、設計・施工における技術的判断のために利用される。

現在、数々の優れた岩盤調査法、および、解析法が開発されている。しかし、現段階において、岩盤内の応力や岩盤の工学的特性を定量的に求めることは技術的・経済的な制限から困難であり、また、現場観察や計測結果の評価法、および、設計における解析手法についても、信頼できる方法がまだ確立されていないことを考えると、岩盤分類は、岩盤構造物の設計・施工において、欠くことのできない重要なものである。このような状況のもとで、国の内外においてこれまでに、ダム・橋梁などの基礎、トンネル・地下空洞、および、斜面など、構造物別に多数の岩盤分類が提案されている¹⁾。

しかし、分類要因の評価基準や、岩盤の区分または等級の境界が明確でないこと、および、岩盤に対する評価の程度が個人によって異なることから、岩盤分類の結果は技術者の個人的な感覚・主観に左右されるとの指摘がある。もちろん、結果に個人的な差異が生じないように、分類要因の判定区分を定量的に表示し、分類結果を客観的に点数などで与える分類法も提案されている^{2),3)}。

しかし、分類要因が岩盤の評価に及ぼす影響の程度や、判定結果の総合的評価において、それらを客観的かつ定量的に表わせるほど岩盤力学の理論が確立しているわけではない。実際には、定量的表現であっても、それらは岩盤分類を作成する技術者の経験に基づいた主観的な判断に負うところが大きい。したがって、岩盤分類には分類作成者の主観が本質的に含まれているものと考えられる。

そこで、岩盤分類を構成するとき、従来の分類のように、主観性を排除して、すべてにおいて客観的に評価する方向を目指すのではなく、工学的に有用な主観については、これを利用する立場をとることがよいと考える。

本論文では、このような立場から、岩盤分類を“ファジー（あいまい）理論”を利用して構成する方法を提案する。なお、ファジー理論とは、人間の主観にかかわるあいまいさを数学的に表現するために提案されたファ

* 正会員 工修 神戸大学助手 工学部土木工学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)

** 正会員 工博, Ph. D. 神戸大学教授 工学部土木工学科
(同上)

ジー集合論, および, これを基礎において考案されたファジー推論, ファジー関係, ファジー代数, および, ファジー積分などの総称である。

2. ファジー集合とファジー積分

ファジー理論については多くの解説文⁵⁾やテキスト^{5), 6)}があるので, ここでは, 本論文で用いるファジー集合, および, ファジー積分についてのみ簡単に述べておく。

(1) ファジー集合

ファジー集合は, 人間の主観にかかわるあいまいさを数学的に表現するために Zadeh⁷⁾によって提案されたものである。

通常の集合論では, 個々の要素がその集合に属すか属さないかは明確に規定される。すなわち, ある全体集合 U の要素 $u (u \in U)$ が集合 $H (H \subset U)$ に属するかどうかは, 特性関数 $\chi_H(u)$ によって規定される。

$$\chi_H(u) = \begin{cases} 1 & u \in H \\ 0 & u \notin H \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

一方, ファジー集合論では, $u \in U$ が集合 A に属する程度を, $[0, 1]$ の値をとる帰属度関数 (membership function) $\mu_A(u)$ を用いて表わす。

$$\mu_A(u) : U \rightarrow [0, 1] \dots\dots\dots (2)$$

ただし, $\mu_A(u)$ は, 1 に近ければ, u が A に属する程度が大きく, 0 に近ければ, 逆に小さいことを意味する。このような集合 A をファジー集合という。つまり, ファジー集合は, ある要素がそれに属するかどうかの程度が $[0, 1]$ の値で規定される境界のぼやけた, あいまいな集まりのことである。なお, 式 (1) および (2) より明らかのように, 通常の集合はファジー集合に含まれる。

また, 帰属度関数は集合 A のあいまいさを定量表現するものと解釈できる。帰属度関数の形は主観的に定めるものであるが, 標準となる関数も与えられている⁸⁾。

ファジー集合 A は, 要素 u が連続, あるいは, 離散の場合について, 一般に, それぞれ, 次のように表現される⁴⁾。

$$A = \int_U \mu_A(u) | u \dots\dots\dots (3)$$

$$A = \sum_i \mu_A(u_i) | u_i \dots\dots\dots (4)$$

(2) ファジー積分

ファジー積分は, 菅野⁹⁾によって提案されたもので, 次式によって定義される。

$$\int h \circ g \equiv \bigvee_{i=1}^N [h(u_i) \wedge g(F_i)] \dots\dots\dots (5)$$

ただし, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$, $F_i = \{u_1, u_2, \dots, u_i\}$ である。被積分関数 $h(u_i)$ は $[0, 1]$ の値をとり, $h(u_1) \geq h(u_2) \geq \dots \geq h(u_N)$ とする。なお, 記号 \bigvee , および, \wedge はそれぞれ最大値および最小値を取ることを意味する。ま

た, $g(F_i)$ はファジー測度⁹⁾で次の性質をもつ。

$$(i) \quad g(\phi) = 0, \quad g(U) = 1 \dots\dots\dots (6)$$

$$(ii) \quad F_i \subset F_j \rightarrow g(F_i) \leq g(F_j) \dots\dots\dots (7)$$

ただし, ϕ は空集合である。

ファジー積分は, あいまいな問題の主観的総合評価に利用される。

3. ファジー理論による岩盤分類の構成

技術者の主観を取り入れることのできる岩盤分類を構成するには, 主観の導入箇所, および, その表現方法を明確にすることが重要である。本論文では, 主観の導入箇所を明確にするため, 岩盤分類を次の三段階に分けて構成する。

- (1) 分類要因の判定区分の設定——各分類要因について, 評価のための言語変数や区分の境界を設定する。
- (2) 分類要因の重要度の設定——分類結果に及ぼす影響の程度に応じて, 分類要因の重要度を設定する。
- (3) 総合評価——分類要因の判定結果と重要度に基づき, 岩盤分類を行うための総合的な評価方法を定める。

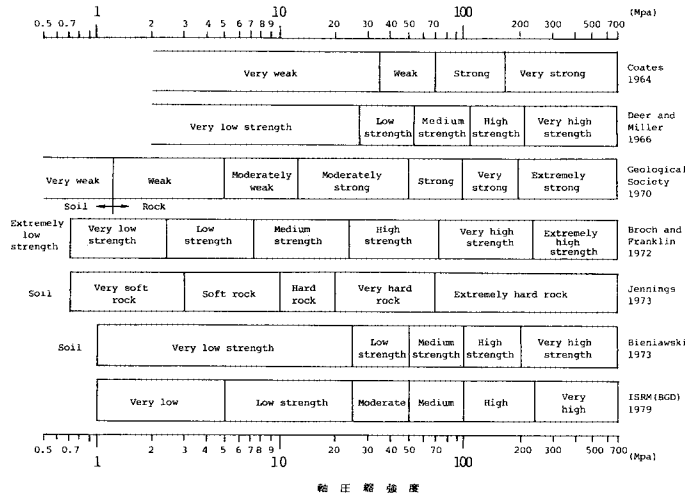
これらの各段階において導入される主観性を表現するためファジー理論を用いる。本章では, 以上の考えに基づく岩盤分類の構成方法について述べる。なお, 完全な岩盤分類を構成するためには, 分類要因の選定方法や分類結果と設計・施工との対応について考察する必要があるが, 本論文は岩盤分類を構成するための方法を論ずることが目的なので, ここではこれらについて言及しない。

(1) 分類要因の判定区分の設定

現行の岩盤分類では, 主に表-1 に示すような分類要因が用いられている。これらの要因の判定区分は定性的あるいは定量的に, また, 両者を併記して表現される。しかし, 定性的区分はもちろんのこと, 定量的区分においても, 区分の境界は明確でなく, その設定根拠はあいまいである。図-1 に新鮮な岩石の一軸圧縮強度の数々の評価基準¹⁰⁾を示すが, 同じ表現でも提案者によって, かなりばらつきのあることがわかる。このことは, 評価基準の言語 (たとえば, “strong” や “high” など) の定義が技術者によって異なることを示している。したがって, 判定区分の設定は, これを明確に設定できる理論や基準がない現状では, 最終的に岩盤分類の作成者の主観に依存することになる。

表-1 主な分類要因

定性的表現	定量的表現
岩石の種類	弾性波速度
ハンマー打撃	一軸圧縮強度
割れ目状態	割れ目間隔
風化の程度	R Q D
湧水の程度	湧水量



図一 新鮮な岩石の一軸圧縮強度¹⁰⁾

以上の理由によって、ここでは、分類要因の判定区分の境界はあいまいなものとして、判定区分を区間 [1, 5] のファジー集合として表現する。ただし、本研究では、簡単のため [1, 5] を N 等分し、次のように全体集合を定める。

$$C_N = \{1, 0, 1.0+h, 1.0+2h, \dots, 1.0+(N-2)h, 5.0\} \quad (N \geq 2) \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $h=4/(N-1)$ である。全体集合 C_N の要素は岩盤の状態の良い悪いを表わすグレード (grade) を意味する。すなわち、1.0 および 5.0 は、それぞれ、岩盤の最も悪いグレード、および、最も良いグレードである。また、これらの中間の要素値は、両極の中間の状態を表わすグレードである。

次に、分類要因の判定区分をファジー集合として定義する。まず、分類要因を記号 $X_i (i=1, 2, \dots, M; M$ は分類要因の数) と表わしておく。各分類要因について、5段階の評価区分を設定し、これらをファジー集合 $X_{ik} (k=I, II, III, IV, V)$ と書く。ただし、 X_{ik} の帰属関数を $\mu_{X_{ik}}(c_n) (c_n \in C_N; c_n=1.0+(n-1)h)$ と表わす。また、判定区分を表わす添字 k は、岩盤の性質に良い影響を与えると考えられるものから順に I, II, III, IV, V と付けるものとする。

たとえば、分類要因 X_j を「割れ目間隔」として、この判定区分をファジー集合として表現すると次のようになる。判定区分の言語変数 (目安として数値も併記) を、「非常に広い(約 200 cm 以上)」、「広い(約 60~200 cm)」、「中程度 (約 20~60 cm)」、「狭い (約 6~20 cm)」、「非常に狭い (約 6 cm 以下)」で表わす。 $N=9$ の場合、これらの判定区分は次のようにファジー集合として定義できる。

$$\begin{aligned} X_{jI} &= \text{「I. 非常に広い」} = 0.5|4.5+1.0|5.0 \\ X_{jII} &= \text{「II. 広い」} = 0.5|3.5+1.0|4.0+0.5|4.5 \\ X_{jIII} &= \text{「III. 中程度」} = 0.5|2.5+1.0|3.0+0.5|3.5 \\ X_{jIV} &= \text{「IV. 狭い」} = 0.5|1.5+1.0|2.0+0.5|2.5 \\ X_{jV} &= \text{「V. 非常に狭い」} = 1.0|1.0+0.5|1.5 \end{aligned}$$

以上のように、ファジー集合を用いれば、境界のあいまいな判定区分が定量的に表現される。帰属度関数は岩盤分類作成者の主観によって定められるものであり、この関数によって、作成者の考えを分類要因の判定区分に反映させることができる。

(2) 分類要因の重要度の設定

岩盤分類の結果に及ぼす分類要因の影響の程度は、各分類要因の判定区分ごとに異なると考えられる。たとえば、同じ「中程度」の判定であっても、「岩石強度」と「割れ目間隔」とでは分類結果への影響度は異なる。さらに、影響度は同じでも、分類要因の判定結果の信頼度が異なる場合も考えられる。ここでは、これらの影響度、および、信頼度を総合して分類要因の重要度とよび、分類要因の判定区分ごとに重要度係数として [0, 1] の値を与える。重要度係数は分類作成者の主観に基づいて定められるものである。なお、分類要因 X_i の判定区分 k に対する重要度係数は W_{ik} と表わしておく。

(3) 総合評価

各分類要因の判定結果から最終的な岩盤分類に至る過程には、分類作成者の主観が関与するが、一般に、この過程は岩盤分類に明記されていない。そのため、岩盤分類を利用する技術者にとって、分類表あるいはその注釈から分類作成者の思考過程を読み取ることは難しく、したがって、岩盤分類を適用する際、苦慮する場合もある。

ここでは、この過程を明確に表現するために、ファジー

積分を用い、数式によって岩盤の総合評価を行う方法を示す。

a) ファジー集合としての“対象岩盤”

まず、分類要因の判定結果と重要度係数を用いて、分類しようとする岩盤を“対象岩盤”というファジー集合として表現する。すなわち、全体集合 C_N の各要素 c_n が“対象岩盤”に属している程度を表わす帰属度関数 $\mu_R(c_n)$ を、 $\mu_{X_i k}(C_n)$ と W_{ik} を用いた演算式によって定める。たとえば、各分類要因について、5段階に分けた判定区分の帰属度関数を各分類要因に対して共通とすれば、次のような演算式によって $\mu_R(c_n)$ を定めることができる。

$$\mu_R(c_n) = \bigvee_{k=1}^V (W_k/W) \mu_{X_i k}(c_n) \dots\dots\dots (9)$$

ただし、

$$W_k = \sum_{i=1}^M W_{ik} \delta(k, k_i),$$

$$W = \bigvee_{k=1}^V W_k$$

である。また、 $\delta(k, k_i)$ は $k=k_i$ のとき 1、 $k \neq k_i$ のとき 0 とする。なお、 k_i は分類要因 X_i の判定結果の区分番号 (I, II, III, IV, V のいずれか) である。もちろん、 $\mu_R(c_n)$ を定める演算式は上式が唯一のものではなく、分類作成者の感覚および経験になじむように主観的に定めればよい。

b) 評価尺度

総合評価の評価尺度として、 λ -ファジー測度^{4),11)}を用いる。 λ -ファジー測度は、 λ をパラメーターとして、次のように構成される¹¹⁾。

$$g_\lambda(F_i) = g^i$$

$$g_\lambda(F_i) = g^i + g_\lambda(F_{i-1}) + \lambda g^i g_\lambda(F_{i-1})$$

$$(-1 < \lambda < \infty) \quad (i=2, 3, \dots, N) \dots\dots (10)$$

ただし、 $F_i = \{c_1, c_2, \dots, c_i\}$ である。また、 g^i はファジー密度⁴⁾ ($0 \leq g^i \leq 1$) であり、適当に与えることができるが、次の式を満足しなければならない¹¹⁾。

$$1 = \begin{cases} \sum_{i=1}^N g^i & (\lambda=0) \\ (1/\lambda) \left[\prod_{i=1}^N (1 + \lambda g^i) - 1 \right] & (\lambda \neq 0) \end{cases} \dots\dots (11)$$

上式は λ と g^i の制限式であり、 λ を与える場合、式 (11) を満足するように g^i に適当な定数を乗じて、 g^i を規格化する必要がある。

いま、 g^i を、岩盤のグレード c_i を重視する度合と考えれば、式 (10) によって構成される $g_\lambda(F_i)$ は、 λ をパラメーターとし、 F_i を重視する度合を表わす評価尺度となる。この評価尺度においては、 λ の値を変化させて、主観性を次のような意味で導入できる。つまり、 $\lambda > 0$ のとき、 $g_\lambda(F_i) \geq g^i + g_\lambda(F_{i-1})$ となり、 F_i を重視

する度合は F_{i-1} 、および、 c_i をそれぞれ重視する度合の和より大きいことを意味し、 $\lambda < 0$ のときはその逆である。 $\lambda = 0$ のとき、 $g_\lambda(F_i) = g^i + g_\lambda(F_{i-1})$ となり、重視する度合は加法的で、 λ -ファジー測度は確率測度に一致する。

c) ファジー積分による総合評価

岩盤の総合評価は、岩盤の評価区分の帰属度関数を被積分関数とするファジー積分によって行う。すなわち、岩盤の評価区分を“非常に良い”、あるいは“悪い”などという言語変数によって表現し、それぞれの評価区分を C_N におけるファジー集合 Z_j ($j=1, 2, \dots, J$; J は評価区分の数) として定め、これらの帰属度関数 $\mu_{Z_j}(c_n)$ をファジー積分の被積分関数とする。ただし、 $\mu_{Z_j}(c_1^{(j)}) \geq \mu_{Z_j}(c_2^{(j)}) \geq \dots \geq \mu_{Z_j}(c_N^{(j)})$ となるように c_n の順番を並べ換え、 $C_N^{(j)} = \{c_1^{(j)}, c_2^{(j)}, \dots, c_N^{(j)}\}$ を定めておく必要がある。

λ -ファジー測度 $g_\lambda(F_i)$ を求めるために、ファジー密度 g^i を次式のように定める。

$$g^i = \alpha^{(j)} \mu_R(c_i^{(j)}) \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 $\alpha^{(j)}$ は g^i を規格化する定数で、パラメーター λ を与えた後、式 (11) より求められる。

総合評価のためのファジー積分を $j=1, 2, \dots, J$ に対して、次のように定義する。

$$FI(j) = \int \mu_{Z_j} \circ g_\lambda = \bigvee_{i=1}^N [\mu_{Z_j}(c_i^{(j)}) \wedge g_\lambda(F_i^{(j)})] \dots\dots (13)$$

ただし、 $F_i^{(j)} = \{c_1^{(j)}, c_2^{(j)}, \dots, c_i^{(j)}\}$ である。ここで、 $FI(j)$ は、 λ を小さくすると、 $c_n^{(j)}$ の中で n の小さい値 (岩盤の評価区分 Z_j の帰属度関数の値が大きいグレード) に対応する $\mu_R(c_n^{(j)})$ を重視する結果を与える。逆に、 λ を大きくすると、 $c_n^{(j)}$ の n の大きい値に対応する $\mu_R(c_n^{(j)})$ を重視する結果を与える。

ファジー積分 $FI(j)$ は、分類要因の判定結果と重要度係数から定めるファジー測度を主観的な評価尺度として、対象岩盤が各評価区分 j に属するファジー的な期待度 (その値をファジー期待値とよぶ) を表わすものと考えられる。最終的な岩盤分類の結果は、各岩盤の評価

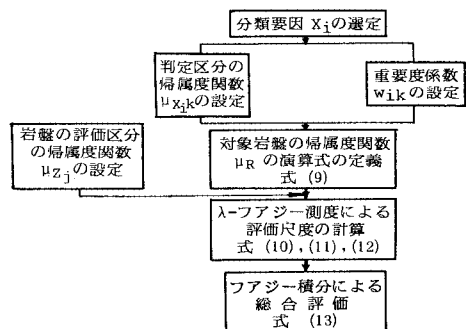


図-2 提案する岩盤分類の構成手順

区分に対するファジー期待値の分布として求められる。

図-2は、ここで提案した岩盤分類の構成手順である。なお、本岩盤分類をファジー岩盤分類 (Rock Mass Classification by Fuzzy Set Theory; RMCFT) とよぶことにする。

4. ファジー岩盤分類の具体例

前章で示した岩盤分類の構成方法の具体例として、Bieniawskiの Geomechanics Classification (RMR システム：表-2参照)^{2),12)}を参考にしてトンネルのファジー岩盤分類を図-2の手順に従って作成する。

1) 分類要因 X_i の選定：ファジー岩盤分類の分類要因としてRMRシステムと同じ要因を用いる (表-3, $X_1 \sim X_6$ 参照)。

2) 判定区分の帰属度関数 μ_{Xik} の設定：まず、各分類要因の判定区分をそれぞれ、5段階の言語変数によって表わす (表-3参照)。次に、判定区分 I ~ V に対して帰属度関数を与え、これらをファジー集合とする。帰属度関数は岩盤分類作成者の経験や知識に基づき主観的に定めるものであるが、ここでは、標準関数⁸⁾を用いて、図-3のように定める。なお、図-3には、全体集合を $C_9 (N=9)$ とした場合の帰属度関数を \circ で示している。

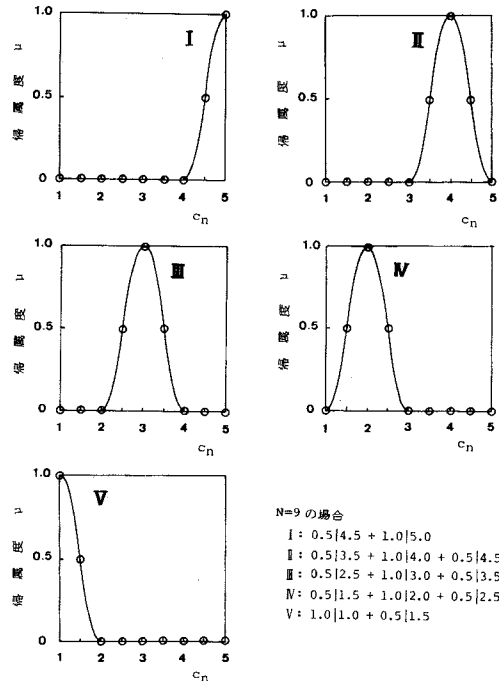
3) 重要度係数 W_{ik} の設定：重要度係数は原位置岩盤の性状に基づき、岩盤分類作成者の経験や知識によって主観的に定めるものであるが、ここでは、割れ目状態の重要度が最も高いとして、表-4のように与えられたものとする。なお、各分類要因において重要度係数は一定とした。

4) 岩盤の評価区分の帰属度関数 μ_{Zj} の設定：岩盤の評価区分は“Ⅰ. 非常に良い”, “Ⅱ. 良い”, “Ⅲ. 普通”, “Ⅳ. 悪い”, “Ⅴ. 非常に悪い”の5段階とする。そして、これらをファジー集合 $Z_j (j=1, 2, 3, 4, 5)$ と定義する。

帰属度関数 $\mu_{Zj}(c_n)$ は、 $j=1, 2, 3, 4, 5$ について、それぞれ、図-3で示したⅠ~Ⅴと同じ関数を用いる。

表-3 ファジー岩盤分類の分類要因と判定区分

要因 \ 判定区分	I	II	III	IV	V
X_1 新鮮な岩石の一軸圧縮強度 (Mpa)	非常に大きい (>250)	大きい (100-250)	中程度 (50-100)	小さい (25-50)	非常に小さい (>25)
X_2 R Q D (%)	非常に良い (90-100)	良い (75-90)	普通 (50-75)	悪い (25-50)	非常に悪い (>25)
X_3 割れ目間隔 (cm)	非常に広い (>200)	広い (60-200)	中程度 (20-60)	狭い (6-20)	非常に狭い (>6)
X_4 割れ目状態	非常に広い	良い	普通	悪い	非常に悪い
X_5 湧水状況	乾燥	湿った	ぬれた	滴水	流水
X_6 構造物と割れ目の方向の関係	非常に有利	有利	普通	不利	非常に不利



N=9の場合
 I: 0.5|4.5 + 1.0|5.0
 II: 0.5|3.5 + 1.0|4.0 + 0.5|4.5
 III: 0.5|2.5 + 1.0|3.0 + 0.5|3.5
 IV: 0.5|1.5 + 1.0|2.0 + 0.5|2.5
 V: 1.0|1.0 + 0.5|1.5

図-3 帰属度関数

表-2 RMR システム (Bieniawski¹²⁾ より一部抜粋)

A. 分類要因とその評点							
1	新鮮岩の強度	点	> 10 Mpa	4~10 Mpa	2~4 Mpa	1~2 Mpa	
	一軸圧縮強度	点	>250 Mpa	100~250Mpa	50~100Mpa	25~50Mpa	5~25 1~5 1Mpa
2	R Q D	点	90~100	75~90	50~75	25~50	25 >
	(%)	点	20	17	13	8	3
3	不連続面の間隔	点	> 200	60~200	20~60	6~20	6 >
	(cm)	点	20	15	10	8	5
4	不連続面の状態	点	非常に粗い表面 分離せず 未風化 連続せず	わずかに粗い表面 分離<1mm わずかに風化	わずかに粗い表面 分離<1mm 極めて風化	スリッケンサイド または 断層粘土の厚さ<5mm または 分離幅1~5mm 連続	軟質断層粘土の厚さ >5mm または 分離幅>5mm 連続
	湧水状況	点	30	25	20	10	0
5	トンネル10m当りの湧水量	点	なし	< 10 l/min	10~25 l/min	25~125 l/min	125 l/min <
	断層内水圧/最大主応力	点	0	0.0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	0.5 <
6	一般的状況	点	完全に乾燥	湿った	ぬれた	滴水	流水
	状況	点	15	10	7	4	0
B. 不連続面の方向に対する補正評点							
距離の方向・傾斜		点	非常に有利	有利	普通	不利	非常に不利
7	トンネル	点	0	-2	-5	-10	-12
	掘削面	点	0	-2	-7	-15	-25
8	掘削面	点	0	-5	-25	-50	-60
	掘削面	点	0	-5	-25	-50	-60
C. 総合評点から決められる岩盤等級							
9	総合評点	点	100~81	80~61	60~41	40~21	20 >
	岩盤等級	点	I	II	III	IV	V
10	岩盤等級	点	非常に良好な岩盤	良好な岩盤	普通の岩盤	悪い岩盤	非常に悪い岩盤
	岩盤等級	点	非常に良好な岩盤	良好な岩盤	普通の岩盤	悪い岩盤	非常に悪い岩盤

表-4 重要度係数

i \ k	I	II	III	IV	V
1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
3	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

表-5 例題(1)

(a) 分類要因		(b) RMRシステム	(c) RMCF
分類要因	判定	評点	ファジー岩盤分類のための判定
1 新鮮な岩石の軸圧縮強度	150 Mpa	12	Ⅱ・大きい
2 R Q D	70 %	13	Ⅱ・普通
3 割れ目間隔	50 cm	10	Ⅲ・中程度
4 割れ目状態	わずかに粗い表面 分離1mm以下 わずかに風化	25	Ⅱ・良い
5 湧水状況	滴水	4	Ⅳ・滴水
6 構造物と割れ目の方向の関係	不利	-10	Ⅳ・不利
		RMR 評価	Fair

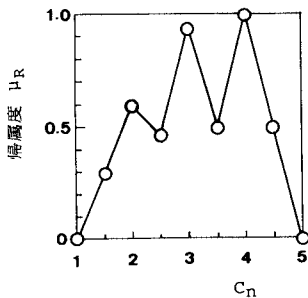


図-4 “対象岩盤”の帰属度関数

いま、例題(1)として、表-5のように判定された岩盤⁽¹⁾に対してファジー岩盤分類を適用する。なお、全体集合は、 $C_9(N=9)$ とする。

5) “対象岩盤”の帰属度関数 μ_R ：ファジー集合としての“対象岩盤”の帰属度関数 μ_R を式(9)によって求めれば図-4のようになる。

6) ファジー積分による総合評価：4)で与えた岩盤の評価区分の帰属度関数と5)において求めた“対象岩盤”の帰属度関数(図-4)を用いてファジー積分を行う。図-5は $\lambda=0$ の場合のファジー積分である。図中実線は岩盤の評価区分の帰属度関数(ファジー積分の定義に従って値の大きい順に記入されている)であり、点線は式(10)~(12)を用いて計算された λ -ファジー測度である。ファジー積分の値は式(13)に従えば、図中の矢

注) この例題は、文献13)から引用した。ただし、そこでは、当時の分類表¹³⁾を用いているため、69点(Good)と評価されているが、本論文では新しい分類表(本文の表-2)を用いて評点を算出した。

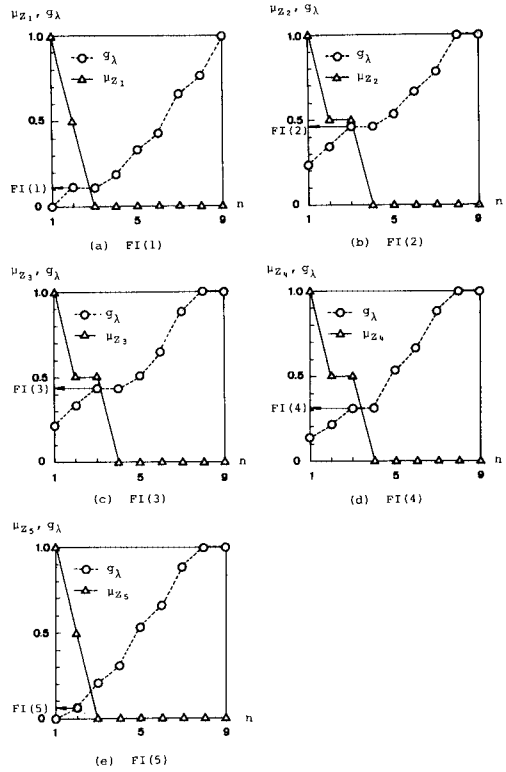


図-5 ファジー積分 ($\lambda=0$ の場合)

印の位置の縦軸の読みとして求められる。

結局、例題(1)に対して、本ファジー岩盤分類の結果は、図-6に示すように岩盤の評価区分に対するファジー期待値の分布として求められる。図-6から、対象岩盤は“Ⅱ・良い”、および、“Ⅲ・普通”に属する期待度がほぼ同程度であることが示される。しかし、岩盤が他の評価区分に属する可能性が全くないわけではなく、その程度がファジー期待値によって表わされている。また、 λ を小さくすると、前に述べたように、岩盤の評価

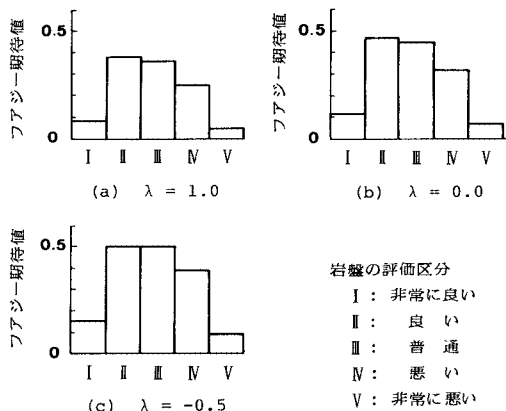


図-6 例題(1)に対するファジー岩盤分類の結果

区分の帰属度関数の値が大きいグレードを重視することになり、ファジー期待値の値が全体に大きくなっている。なお、ここでは $\lambda=1.0, 0.0, -0.5$ の3ケースの結果を示したが、実際の適用においては、原位置の岩盤の状態を最も適切に表現する分類結果を与える λ の値を採用すればよい。

5. 考 察

提案したファジー岩盤分類において、技術者の主観は

- ① 分類要因の判定区分
- ② 分類要因の重要度
- ③ 岩盤の評価区分
- ④ 総合評価

の各設定段階において導入される。①～④に含まれる主観性は、ファジー集合、および、ファジー積分を用いることで、定量的、あるいは、数式によって表現できる。

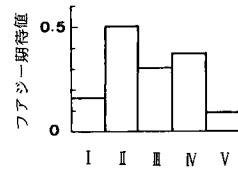
3. において、これらの設定について述べたが、そこで述べた設定の方法は唯一ではない。唯一ではないからこそ、自由に主観を導入することができるのである。ただし、本論文でいうところの主観は、技術者の十分な知識、経験、実績、および、考察に裏付けられたものでなければならぬことはいうまでもない。

①～④を定量的あるいは数式を用いて表現すれば、岩盤分類を構成する思考の過程が客観的に定式化されることになる。一般に、岩盤分類は、岩盤の成因・産状・種類、および、構造物の種類・規模などに対して適用範囲があるにもかかわらず、その範囲が明確でないため、提案されている分類方法をそのまま適用すると、対象岩盤に必ずしもなじまない場合がある。しかし、岩盤分類を構成する際の思考過程が客観的な形で表現されていると、状況に応じて、岩盤分類を利用する技術者の手で修正することが可能となる。ファジー岩盤分類は、そのような分類の枠組みを与えるものである。たとえば、判定区分の帰属度関数や重要度係数などを適当に与え、実際に適用しながら、個々の現場になじむように修正することができる。

現行の岩盤分類の大部分では、分類結果は1つの評点あるいは等級として与えられるので、分類結果において対象岩盤の特徴が平均化される。これに対して、本岩盤分類では、分類結果は、図—6に示すように評価区分に対するファジー期待値の分布として求められ、分類要因の判定結果が直接、分類結果に反映される。たとえば、表—6に示す岩盤の場合(例題(2))、分類要因の判定は“良い”側と“悪い”側に分散しているが、RMRは55となる。つまり、RMRシステムの判定結果は、分類要因の判定結果を平均したものとなっている。一方、本ファジー岩盤分類では、図—7のようなファジー期待

表—6 例題(2)

(a) 分類要因	(b) RMRシステム	(c) RMCF	ファジー岩盤分類のための判定
1 新鮮な岩石の一軸圧縮強度	30 Mpa	4	Ⅳ. 小さい
2 RQD	80 %	17	Ⅱ. 良い
3 割れ目間隔	100 cm	15	Ⅱ. 広い
4 割れ目状態	わずかに粗い表面 分離 1mm 以下 わずかに風化	25	Ⅱ. 良い
5 湧水状況	滴水	4	Ⅳ. 滴水
6 構造物と割れ目の方向の関係	不利	-10	Ⅳ. 不利
		RMR 55	
		評価 Fair	



図—7 例題(2)に対するファジー岩盤分類の結果 (λ=0の場合)

値の分布を得る。この結果は、分類要因の判定結果を直接反映したものとなっており、岩盤の評価において多面的な情報を与えるものと考えられる。

6. む す び

本論文では、技術者の主観や思考過程を取り扱うことのできる岩盤分類の構成方法を提案した。ここで得た知見を以下にまとめる。

(1) 岩盤分類の構成を①分類要因の判定区分の設定、②分類要因の重要度の設定、③総合評価の方法の設定の三段階に分け、それぞれの段階において、ファジー理論を用いれば、岩盤分類は定量的あるいは数式表現される。

(2) ファジー理論を用いれば、岩盤分類の構成の思考過程を数式化することができ、岩盤分類に内在する主観性を客観的に示すことができる。

(3) 本ファジー岩盤分類において、技術者の主観によって設定するものは、①分類要因の判定区分の帰属度関数、②分類要因の重要度係数、③岩盤の評価区分の帰属度関数、④対象岩盤を表現する帰属度関数を導く演算式、⑤評価尺度におけるパラメーターλである。このように、分類作成者が決定できる自由度が多いため、ファジー岩盤分類は、幅広い岩盤の種類、および、構造物に適用できる可能性がある。

(4) ファジー岩盤分類の分類結果は、岩盤の各評価区分に対するファジー期待値の分布として与えられるため、情報量の多い分類結果となる。

岩盤分類は実務に結び付いてこそ価値があるのはいうまでもない、本岩盤分類の現場への適用性を調査すると同時に、分類結果と設計・施工の結び付けを行うことが今後の課題となろう。

なお、ファジー理論は、技術者（専門家）の主観的な判断や思考過程を定量的に表現できる新しい方法論として、多くの分野で注目されている¹⁴⁾。土木工学において、ファジー理論は、構造工学などの分野においてすでに適用され、成果を上げているが^{15)~17)}、岩盤工学においては、研究の緒についたばかりである^{18),19)}。岩盤工学では、技術者の十分な実績に基づいた主観的判断は特に重要であり、主観性を取り扱えるこの新しい方法論の活躍の場は非常に広いと考える。

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, pp. 27 ~32, 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, pp. 189~236, 1974.
- 4) 菅野道夫：あいまい理論 [I]~[IV]，計測と制御，Vol. 22, No. 1, pp. 171 ~ 174, No. 4, pp. 380 ~ 384, No. 5, pp. 454~458, No. 6, pp. 554~559, 1983.
- 5) 浅居喜代治・C.V. Negoida 編：あいまいシステム理論入門，オーム社，1978.
- 6) 西田俊夫・竹田英二：ファジィ集合とその応用，森北出版，1978.
- 7) Zadeh, L. A. : Fuzzy Sets, Information and Control, Vol. 8, pp. 338~353, 1965.
- 8) 水本雅晴：最近の Fuzzy 集合理論，数理学，No. 191, pp. 15~20, 1979.
- 9) 菅野道夫：Fuzzy 測度と Fuzzy 積分，計測自動制御学会論文集，第 8 巻，第 2 号，pp. 218~226, 1972.
- 10) Bieniawski, Z. T. : Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, Balkema, pp. 100, 1984.
- 11) 菅野道夫：Fuzzy 測度の構成と Fuzzy 積分によるパターンの類似度評価，計測自動制御学会論文集，第 9 巻，第 3 号，pp. 361~368, 1973.
- 12) 文献 10)，pp. 112~120，ただし，和訳は文献 1) pp. 169 を参考にした。
- 13) Hoek, E. and Brown, E. T. : Underground Excavations in Rock, The MAA Publishing Company, pp. 27, 1981.
- 14) 浅居喜代治・田中英夫：ファジィシステム分野の発展と現状，計測と制御，Vol. 24, No. 5, pp. 465~467, 1985.
- 15) Brown, C. B. and Yao, J. T. P. : Fuzzy Sets and Structural Engineering, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 5, pp. 1211~1225, 1983.
- 16) 白石成人・古田 均：ファジィ集合論の構造工学への応用，土木学会誌，Vol. 69, No. 6, pp. 63~67, 1984.
- 17) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂：道路橋 RC 床版の診断と評価に関する基礎的研究，材料，第 34 巻，第 376 号，pp. 40~46, 1985.
- 18) Fairhurst, C. and Lin, D. : Fuzzy Methodology in Tunnel Support Design, Proc. 26 th US Symposium on Rock Mechanics, Vol. 1, pp. 269~278, 1985.
- 19) Nguyem, V. U. and Ashworth, E. : Rock Mass Classification by Fuzzy Sets, 文献 18)，pp. 937~945. (1985. 12. 4・受付)