

1. はじめに

岩盤の力学定数は種々の不確実な要因を含むため、たとえ同じ等級の岩盤に対しても、それらを確定量として唯一に定めることは困難である。したがって、これらは確定量としてではなく、不確定量として考えねばならない。ファジィ理論は不確実な力学定数を取り扱うのに有効な方法論であると考えられる。

岩盤斜面の安定解析では、特に、力学特性の不確実性が解析結果に大きく影響するため、不確実性を考慮できる解析方法が必要である。そこで、確率論を用いるアプローチが考えられる。しかし、これを岩盤力学に導入する場合、解析のインプットデータである岩盤の力学定数の確率分布を現場で求めることは、他の材料（鋼、コンクリートなど）に比べて、はるかに困難である。

一方、ファジィ理論では、現場技術者の経験的、あるいは、工学的判断に基づいて解析のインプットデータを与えることが可能である。近年、岩盤工学の分野においても、ファジィ理論が注目され、いくつかの研究が発表されている^{1)~5)}。

そこで、本研究では岩盤の力学定数の不確実性を、確率論におけるランダムネス (randomness) ではなく、ファジィネス (fuzzyness) として取り扱う。ここで言う“ファジィネス”とは“対象があまりにも複雑で理解できないため、あるいは、知識が不十分なために生じる不確実性”である⁶⁾。本報告では、ファジィ理論を用いて、不確実性を有する岩盤の強度定数を求める方法と、その結果を用いた岩盤斜面の安定性の一評価法を述べる。

2. ファジィ化された岩盤分類による岩盤の強度定数の推定法

(1) ファジィ化岩盤分類

著者らは、ファジィ理論を用いた岩盤分類を提案している⁵⁾。これは、まず、①岩盤分類の分類パラメータの判定のあいまいな表現、たとえば、“強度は大きい”や“不連続面の間隔は非常にせまい”などをファジィ集合で表現し、そして、②ファジィ積分や他のファジィ演算を用いて、各分類パラメータの判定結果を総合的に取りまとめるものである。この岩盤分類は、各岩盤等級に対する“ファジィ期待値”の分布を与える。この“ファジィ期待値”は、対象とする岩盤が各等級にどの程度の期待度で属するかを表すものである。分類パラメータと判定の結果の一例を Table 1 および Fig. 1 に示す。

(2) 岩盤の内部摩擦角と粘着力の推定

岩盤の強度定数、すなわち、内部摩擦角および粘着力、は岩盤の各等級に対して、不確定ではあるが、概略値が与えられる⁷⁾。本研究では、このようなあいまいな数値を“ファジィ数 (fuzzy number)”として表現する。

ファジィ数とは、“だいたい～”という数を表すファジィ集合である。たとえば、“だいたい2”は、Fig. 2 に示されるメンバーシップ関数 (membership function) で定義される。メンバーシップ関数は、集合の要素値がそのファジィ集合に属する度合を与えるものである。つまり、2はファジィ数；“だいたい2”に属す度合が1であり、1.7の場合、その度合は0.7である (Fig. 2 参照)。本研究では、

Fig. 3 に示す4パラメータによる表現を用いる。すなわち、“だいたいM” ($\underline{M}$ と表す) は次のように表現する。

$$\underline{M} = [m_1, m_2, m_3, m_4]$$

内部摩擦角と粘着力とを各岩盤等級に対し、ファジィ数 ϕ および c として Fig. 4 のように与える。たとえば, "悪い (poor)" 岩盤に対して, 粘着力は次のように与える。

$$c = [25, 40, 60, 75] \text{ (kPa)}$$

ファジィ化岩盤分類⁵⁾ (2. (1) 参照) で得た各岩盤等級のファジィ期待値を重みと考え, Fig. 4 に示すファジィ数 ϕ および c をそれぞれ独立に合成する。ファジィ数の合成には文献[8] に示された方法を若干修正して用いる。Fig. 1 の例に対して, 内部摩擦角と粘着力はファジィ数として, Fig. 5 のように求められる。

3. 岩盤斜面の安定性の一評価法

(1) ファジィ化された安全率

Fig. 6 の岩盤斜面の平面すべり破壊に対して, 通常の極限平衡解析では, 安全率は次のように与えられる。

$$F = \frac{K_1 c + K_2 K_3 \gamma \tan \phi}{K_2 K_4 \gamma} \quad (1)$$

ただし, $K_1 = (H-z)/\sin \phi_p$, $K_2 = \{(H^2 - z^2) \cot \phi_p - H^2 \cot \phi_r\}/2$, $K_3 = \cos \phi_p$, $K_4 = \sin \phi_p$, ϕ = 内部摩擦角, c = 粘着力, γ = 岩盤の単位体積重量, H = 斜面高さ, z = 引張り亀裂の深さ, ϕ_r = 斜面角度, ϕ_p = すべり面角度である。

いま, c , ϕ , γ をファジィ数, $c = [c_1, c_2, c_3, c_4]$, $\phi = [\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4]$, $\gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4]$ とすると, ファジィ化された安全率は式(1) から, Fast computation formul⁹⁾ を用いて, 近似的に次のように求められる。

$$F = \left[\frac{K_1 c_1 + K_2 K_3 \gamma_1 \tan \phi_1}{K_2 K_4 \gamma_4}, \frac{K_1 c_2 + K_2 K_3 \gamma_2 \tan \phi_2}{K_2 K_4 \gamma_3}, \frac{K_1 c_3 + K_2 K_3 \gamma_3 \tan \phi_3}{K_2 K_4 \gamma_2}, \frac{K_1 c_4 + K_2 K_3 \gamma_4 \tan \phi_4}{K_2 K_4 \gamma_1} \right] \quad (2)$$

例題として, $H=60\text{m}$, $z=20\text{m}$, $\phi_p=35^\circ$, $\gamma=[23.5, 24.5, 25.5, 26.5] \text{ (kN/m}^3\text{)}$ の斜面を考える。Fig. 5 の強度を用いれば, ファジィ化された安全率は, 斜面角度 $\phi_r=40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ に対して Fig. 7 のように求められる。

(2) 斜面の安定性の評価

ファジィ化された安全率 $F = [f_1, f_2, f_3, f_4]$ の分布に対し, 安定性の評価等級は Fig. 8 のように分類できる。すなわち, "unstable ($f_3 < 1.0$)", "poor ($f_2 < 1.0 \leq f_3$)", "fair ($f_1 < 1.0 \leq f_2$)" および "stable ($1.0 \leq f_1$)" である。一般に, "fair" と判定される斜面が多いと考えられるため, fair の斜面の安定性をさらに比較できるように, "安全性指標 (Stability Index)", S. I. を定義する。

$$S. I. = (f_2 - 1) / (f_2 - f_1) \quad (3)$$

式(3)は, "必然性測度 (necessity measure)"⁹⁾ の定義から導いたもので, "斜面は安定する" と判断される必然性の度合を表している。3. (1) の例題に対して, 斜面の安定性は Table 2 のように評価される。

4. むすび

本報告では、まず、ファジィ化岩盤分類から岩盤の内部摩擦角および粘着力を求める方法を概説した。この方法を用いれば、強度定数は不確実性を含んだファジィ数として求められる。そして、この力学定数を用いた斜面の安定性の一評価法を述べた。本研究では岩盤の力学定数の不確実性を、ランダムネスとしてではなく、ファジィネスとして取り扱ったところに特徴がある。

付記：本研究の一部は、文部省の科学研究費補助金を受けて行った。

参考文献

- 1) Fairhurst, C & D. Lin, Proc. 26th US Sympo. on Rock Mech., Vol.1, pp.269-278, 1985.
- 2) Nguyen, V.U. & E. Ashworth, 1) と同, Vol.2, pp.937-945, 1985.
- 3) Nguyen, V.U., Soils & Foundations, Vol.25, No.4, pp.8-18, 1985.
- 4) Nguyen, U.V., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, No.6, pp.369-379, 1985.
- 5) 清水・桜井, 土木学会論文集, No.370/III-5, pp.225-232, 1986.
- 6) 古田, 第55回材料セミナーテキスト, 材料学会, 1986.
- 7) Bieniawski, Z.T., Proc. 4th Int. Cong. on Rock Mech., Vol.2, pp.41-48, 1979.
- 8) 西村・藤井・宮本・富田, 建設工学研究所報告, No.28, 1986.
- 9) Dubois, D. & H. Prade, Fuzzy Sets and System, Academic Press, 1980.

Table 1. Descriptions of the judgements for each parameter of the fuzzified rock mass classification

Parameter	Descriptions for the judgements				
Strength of intact rock material*	Very high	High	Medium	Low	Very low
Drill core quality RQD*	Excellent	Good	Fair	Poor	Very poor
Spacing of discontinuities*	Very wide	Wide	Moderate	Close	Very close
Condition of discontinuities*	Very good	Good	Fair	Poor	Very poor
Ground water*	Completely dry*	Damp*	Wet*	Dripping*	Flowing*

----: example

* Taken in part from Bieniawski's RMR system (1979)

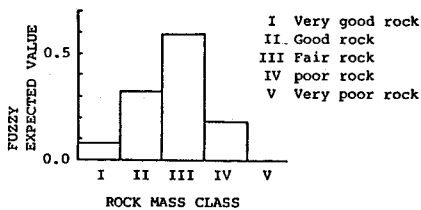


Figure 1. Results of the fuzzified rock mass classification

Table 2. Results of evaluation of slope stability

Slope angle	Class	Stability Index
40°	Stable	/
50°	Fair	0.51
60°	Fair	0.19
70°	Fair	0.02
80°	Poor	/

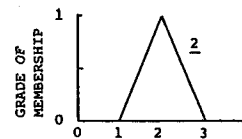


Figure 2. Membership function of fuzzy number "approximately 2"

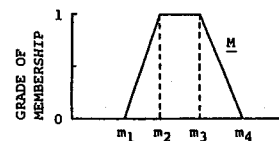


Figure 3. Membership function of fuzzy number M represented by the 4-parameter $[m_1, m_2, m_3, m_4]$

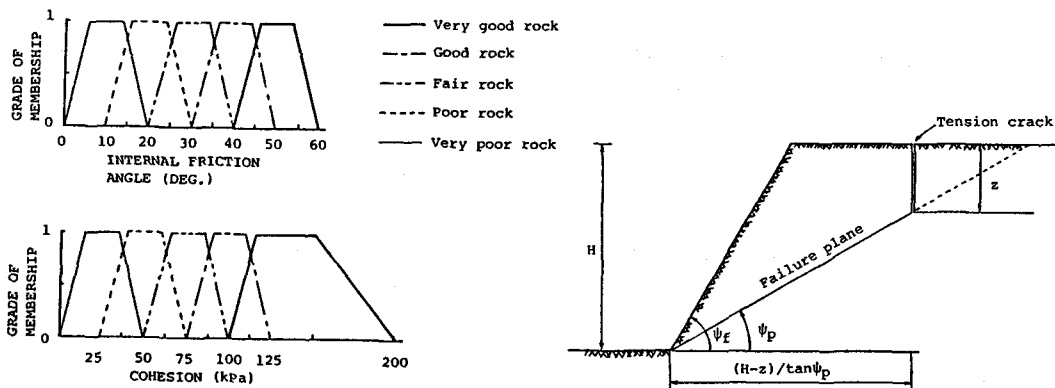


Figure 4. Membership function of internal friction angle and cohesion expressed by fuzzy numbers

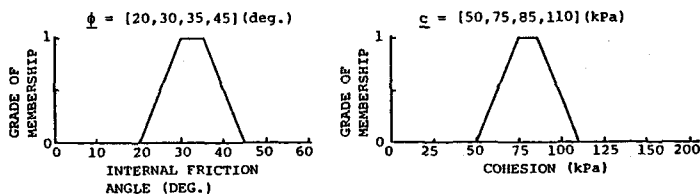


Figure 5. Membership function of ϕ and c of rock mass obtained by the proposed method

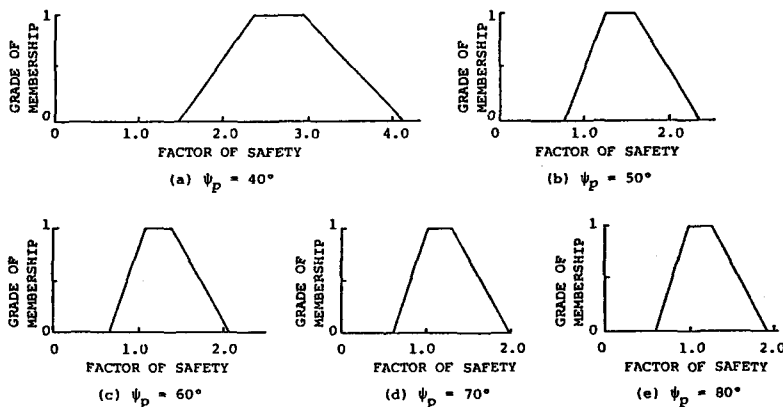


Figure 7. Membership function of the fuzzified factor of safety ($H = 60m$, $z = 20m$, $\psi_p = 35^\circ$)

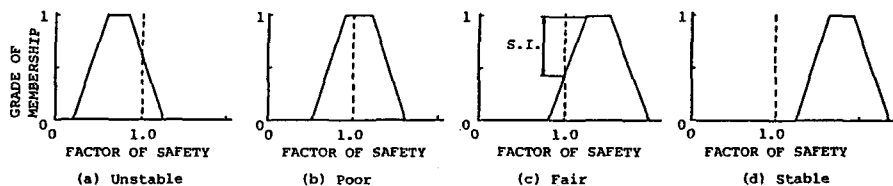


Figure 8. Class of slope stability

(102) ASSESSMENT OF ROCK SLOPE STABILITY BY USING FUZZY SET THEORY

N. Shimizu & S.Sakurai
Kobe University , Kobe 657, Japan

Mechanical characteristics of rock masses contain various types of uncertainties. These uncertainties cause great difficulty in the determination of mechanical constants as definite values, even for the same grade classification of rock masses. In order to overcome this difficulty, the Fuzzy Set Theory is a useful tool, which allows us to consider the mechanical constants to be uncertain values. Thus, when analyzing rock engineering problems, the Fuzzy Set Theory must be adopted.

In this paper, the authors have proposed a method for determining internal friction angle and cohesion as fuzzy numbers by using the fuzzified rock mass classification. According to this method, it is relatively easy to determine the distribution of internal friction angle and cohesion of rock mass, which contain uncertainties. Rock slope stability problems are taken into account as an example in geotechnical engineering. A method of evaluating the stability of slope has been proposed through the use of internal friction angle and cohesion as fuzzy numbers. The special feature of the proposed method of evaluating the slope stability is that the strength parameters of rock masses are dealt with as fuzziness instead of randomness in probability theory.