

模糊数学在岩石工程分类中的应用

陶振宇 彭祖赠

(武汉水利电力学院)

提 要

由于岩石的物理-力学参数的不确定性的特征,本文基于模糊数学的概念,提出了一个岩石工程分类的新方法。首先把岩石分为最好岩石、好的岩石等 k 类,每一类分别对应一模糊集 $(\lambda_i, i = 1, 2, \dots, k)$ 。对一项实际工程所涉及的岩石,先就抗压强度、地下水等 n 个方面作单因素评价,并统一转换成分数,获得 n 个模糊集。再拟定 m 组权数,说明以上各个因素在综合评价中所占比例的各种可能性,因此对每一组权数即可得一综合评价。最后得出岩石的工程分类。

在工程实践中,经常需要进行岩石工程分类。这是因为,在通过一定的勘测试验逐步认识岩石的基本特性的基础上,再进一步对岩石的性状进行综合分析,划分等级和一定的类别,可以反映介质的力学属性的质的区别和相应的量的概念,又能反映构成这些不同质的各种因素的内在联系。这将有利于对不同类型岩石的工程特性进行深入的研究,并建立与之相应的计算模型和施工工艺及处理措施,从而使有关的工程设计和施工更加经济合理。因此,对于岩石的工程分类的研究,在国内外都很引人注目^[1-5]。

从岩石工程分类的现有研究趋势来看,大体是从单一指标参数的分类转向多个参数的综合分类,从定性到定量,从感性(经验的)到理性(科学的)方向发展。

但是,对岩石进行科学的、定量的综合评价,是一个很复杂的问题。这里有几个问题需要合理的解决,例如:影响岩石工程性质的因素是很多的,在岩石分类中应该考虑那些最基本的因素?这些因素用什么指标参数来反映?以及如何综合评价?等等。

本文想从两方面作一些探讨:首先在国内对外对岩石工程特性研究的基础上,建议了应该考虑的一些最基本的因素;其次,探索应用模糊数学对岩石进行综合评价。

一、岩石工程分类中的基本因素

关于这个问题,国内外不少人作过工作。人们对岩石工程分类的主要因素考虑是各种各样的,但也有一些共同点,现作如下归纳:

首先,对岩石的坚硬程度,常用饱和抗压强度指标来表示。早期的岩石分类常用它作为单一指标的分类,虽然现在已逐渐淘汰了这种分类方法,但仍然是岩石综合分类中最重要的指标之一。

其次,对岩石的完整程度,在不少分类中已上升为第一位因素,这不是没有道理的。但若以此作为单因素分类,却是不合适的。因为这与岩性坚硬程度和初始应力状态有关。如果岩性坚硬,一般可以认为其完整性(裂隙发育状态)是岩体稳定的基本因素;但如岩性软弱,或在高的围压力作用下,结构面的影响会降低或消失。此外,不完整的岩石的稳定性受地质

结构面的产状与岩体中的初始应力主向(大主应力 σ_1 的方向)的相对关系所控制。

第三,现有的许多分类普遍注意了水的作用和风化的影响。应该指出,这两个因素其实并不是完全独立的。为了工程的目的,由于风化的影响在岩石抗压强度指标中已有所反映,所以主要考虑水的作用是更相宜些,因为工程场地的被利用的岩体,大抵处于地下水位以下。

第四,在现有的岩石工程分类中,几乎没有一种是认真考虑了岩体中的初始应力状态和温度的影响。当然,一般工程建设多在地表和浅层岩石中进行,这两个因素的影响或许可以忽略而不产生大的偏差吧!但在深埋工程中,情况将会有所不同。例如2 m直径的洞室在10 m和500 m埋深的条件下,其初始应力状态可能很不相同。一般说来,前者也许只受自重应力场的作用,而后者除自重应力场外,肯定还有构造应力场的作用。因而对地下洞室围岩的稳定性的影响便很不相同了。这两个因素在岩石工程分类中如何考虑,还缺乏实践经验,但在一定的条件下,看来是需要注意的。不过温度这个因素在现有的建设深度范围内,只有个别地点有这个问题,实践中遇到的机率较少,这一点与初始应力状态有所不同,暂且不作考虑。

最后,统一的岩石的工程分类是为各种不同的工程建设服务的。但是,同一岩体地质条件对不同的建筑物的适应性是不尽相同的。所以,统一的岩石工程分类只能按照岩体本身的特性加以划分,为不同工程建筑物的设计和施工提供一个客观基础。因此,对于专门的岩石工程分类可按其服务对象的特点和需要,作一些补充和变化,这是必要的。

考虑到上述情况,对在岩石的工程分类中需要考虑的主要因素的代表性指标,我们建议是:

- (1) 饱和抗压强度($R_w, kg/cm^2$)
- (2) 岩石的纵波速度($v_p, m/s$)
- (3) 节理的状态
- (4) 地下水的情况
- (5) 地应力(初始应力)主向与节理系方位的关系

这里,第一项考虑了岩石的坚固性,兼及水的软化作用和风化程度;第二项也与岩石的质地优良与否有关,又与其完整性及其风化情况有关;第三项考虑节理的数量、规模及其组合情况;第四项考虑地下水的情况;第五项考虑节理系的产状与地应力主向的关系。因为在这里只探讨岩石工程分类的一般情况,如前所述,对其具体工程的特点和要求没有考虑。

国内外若干分类中对上述因素中的前四项所考虑的情况,见表1~4,第五项因尚未见到考虑的实例,故从阙。从这些资料中,我们可以看出如下几点:

第一,许多分类的区间划分,常带人为性。因为在分界点的前后,并不发生质变。因此,有的分类的分界区间,有一定的搭接,例如表2中所列举的原水利电力部岩石试验规程(征求意见稿,1978)对纵波速度的分类规定,就是如此。这就是说,分界点是缺乏明晰性的。这也反映了岩石的各项物理-力学性质指标的分散性很高这一特点。

第二,虽然各个分类的提出者,对各单因素的划分类别颇不一致,考虑的情况也有所不同,但从总体看,似仍有一定的趋势。例如岩石的抗压强度,这是许多岩石分类中的一个重要指标,初看起来,各个分类是不一样的,但如果注意到我国的许多岩石分类多带有本部门的工程建设的特点而拟定的,则可以认为,就岩石作为各种工程建设服务对象的总体来说,许多分类却有其大体的一致性。这种情况说明,对每个单因素的指标来说,有可能予以标准化。

因此,我们初步按上述五项因素具体化(如表5所示),作为进一步综合评价的基础。

况情的度强抗压抗的考中线分程工石考干若

抗压强度, R_w (kg/cm^2)																
作者 (年份)	国家 建委 (1975)	姜达校 等	空軍工 程學院 (1975)	水电部 勘测所 調量	水电部 勘测所 調量	水电部 勘测所 調量	冶金部 建設 研究院	工程兵 煤炭部 (1978)	89003 部队 (1972)	陶振宇 (1976)	C. Jaeger	H. Habe- nicht	D. U. Deere等 (1966)	D. H. Laube- rer	D. F. Coates (1973)	日本岩 石力学 委员会 (1968)
I	—	>1200	>800	>1000	>1000	>1200	—	>800	—	>2000	>1000	>2500	>2240	>2000	—	—
I	>800	$800 \sim 1200$	$600 \sim 800$	$800 \sim 1050$	$850 \sim 1200$	$800 \sim 1200$	>800	$600 \sim 800$	$600 \sim 800$	$1000 \sim 2000$	$500 \sim 1000$	$1000 \sim 2500$	$1120 \sim 2240$	$1000 \sim 2000$	>1750	>1000
II	$300 \sim 800$	$400 \sim 800$	$300 \sim 600$	$300 \sim 400$	$400 \sim 850$	$300 \sim 400$	$300 \sim 800$	$300 \sim 600$	$300 \sim 600$	$500 \sim 1000$	$200 \sim 500$	$500 \sim 1000$	$560 \sim 1120$	$500 \sim 1000$	$350 \sim 1750$	$500 \sim 1000$
III	<300	<400	$150 \sim 300$	$50 \sim 200$	$150 \sim 400$	$50 \sim 400$	$100 \sim 300$	<300	<300	$100 \sim 500$	$100 \sim 200$	$300 \sim 500$	$280 \sim 560$	$250 \sim 500$	<350	$100 \sim 500$
V	—	—	<150	<50	<150	<50	<100	<150	—	<100	$20 \sim 100$	<300	<280	<250	—	<100

足性的度要成以應考中幾分題工石若干

纵波速度, v_p (km/s)												
作者 (年份)	铁道部 西南所 (1978)	王恩敬等 (1979)	国家建委 (1975)	水电部 勘测研究所 (1973)	水电部 工程地质研究所 (1978)	水电部 原305部队 王宗标等 (1972)	龙羊峡花 岗闪长岩 实测值 (1978)	铜街子玄 武岩实测 值 (1978)	太平溪石 英闪长岩 实测值 (1979)	日本岩石 力学委员 会 (1968)	日本四 国联桥岩 基分类 (1978)	保加利亚G. Iliev等长 岩基测值 (1966)
I	4.0~6.0	—	—	>5.5	>5.5	>5.5	>6.0	—	5.5~6.0	>5.0	>5.5	>5.0
II	3.0~4.0	4.0~5.0	4.0~5.0	4.5~5.5	4.5~5.5	4.0~5.0	4.0~6.0	4.0~5.0	5.0~5.5	4.0~5.0	4.5~5.5	4.0~5.0
III	2.0~3.5	3.0~4.0	2.0~4.0	3.5~5.0	3.5~5.0	3.0~4.0	3.0~4.0	3.0~4.0	4.0~5.0	3.0~4.0	3.5~4.5	3.0~4.0
IV	1.0~2.5	2.0~3.5	1.2~2.0	2.0~3.5	2.0~4.0	2.0~3.0	2.0~3.0	2.0~3.0	3.0~4.0	2.0~3.0	2.5~3.5	2.0~3.0
V	<1.0	<2.0	<1.2	<2.0	2.0~2.5	<2.0	—	1.0~2.0	2.5~3.0	<2.0	<2.5	<2.0

表5 岩石工程分类的单因素评价

级 别	I (很好的)	II (好的)	III (较好的)	IV (差的)	V (很差的)	附 注
岩石饱和 抗压强度	R_w (kg/cm^2)	>2000	$1000\sim2000$	$500\sim1000$	$100\sim500$	<100
岩石的纵 波速度	v_p (km/s)	>5	$4\sim5$	$3\sim4$	$2\sim3$	<2
节理状 态, 以 块度模 数 M_k 及间距 表之	M_k	>4	$3\sim4$	$2\sim3$	$1\sim2$	<1
	间 距 (m)	1.0	$0.5\sim1.0$	$0.3\sim0.5$	裂隙密集	岩石破碎
	评 分	100	80	65	30	10
地下水 情 况	状 态	干 燥	稍湿润, 略有滴水	湿润, 有滴水现象, 局部有线渗现象	滴水, 渗湿, 局部有小股流	渗湿, 股流, 涌水
	渗 流 量 (l/min)	<0.001	$0.001\sim1$	$1\sim50$	$50\sim500$	>500
	评 分	100	90	75	40	10
地应力主 向与节理 系产状 的关系	情 况	很 有 利	有 利	一 般	不 利	很 不 利
	评 分	100	100	60	30	0

*见陈德基等, 岩体质量评价的新指标——块度模数, 中国地质学会首届工程地质学术会议论文, 1979年11月。

二、岩石工程分类的模糊数学方法

虽然现有的岩石工程分类都是以明确的指标参数作为分界线, 但实际上, 不论采用何种指标对岩石作分类鉴别, 都必然是模糊的。大家知道, 岩石的各项参数的测量值很分散, 同一地点同一名称的岩石的数据离散性很大。这里的原因很多, 如目前对岩石的物理力学性质的知识尚少, 还不能给出精确的岩石本构关系; 地质因素的调查也不很准确, 还具有一定的主观推断性; 岩石力学的测试技术也还不完善; 总之我们不能给出准确的定量评价, 这是一方面。另一方面, 岩石本身在给定的名称下, 即使其他地质条件是相同的, 也存在一定的不确定性。因此, 一般说来只能说明它以多大程度(或叫资格度)取得某个项目的某一具体指标, 这正是模糊数学的概念^[5,7]。因此, 我们试图将模糊集合论中模型识别的基本理论用于岩石工程类型的识别。我们建议的岩石工程分类的这种新方法叙述如下**。

设 U 是基本集(或称论域)。映射 $\mu: U \rightarrow [0, 1]$, μ 称为 U 上的模糊集, U 上模糊集的全体记作 $F(U)$ 。例如:

设某工程的岩石抗压强度界于 a, b 之间, 在区间 $[a, b]$ 中插入 $n-1$ 个分点($a = a_0 < a_1 < \dots < a_{n-1} < a_n = b$, 其中 $a_i - a_{i-1} = h, i = 1, 2, \dots, n$), 分 $[a, b]$ 为 n 等份。设抗压强度在 $[a_{i-1}, a_i]$

**这部分内容, 本文第二作者曾在华中工学院举办的模糊数学讨论会上报告过, 见《模糊数学论文汇编(摘要)》, 华中工学院, 1980年4月。

内的试件共 m_i 个, 又 $m = \max\{m_i\}$, 令 $\mu\left(\frac{a_{i-1}+a_i}{2}\right) = \frac{m_i}{m}$, 且当 $x \neq \frac{a_{i-1}+a_i}{2}$ 时用线性内插或其他方式内插, 从而得映射 $\mu: [a, b] \rightarrow [0, 1]$, μ 是一个模糊集。类似地可以获得岩石其他指标所对应的模糊集。

所谓模型识别, 即设有某个固定模型, 将它表示为一个确定的模糊集 μ 。今给出若干模糊集, 全体记作 T , 故 $T \subseteq F(U)$ 。我们的问题是要求识别 T 中那些模糊集 γ 与 μ 最贴近, 即 γ 表示的模型与 μ 表示的固定模型最相似, 以及他们相似(贴近)的程度。为此必需建立模糊集的贴近度概念。

记 $\bar{\mu} = \bigvee_{u \in U} \mu(u)$, $\underline{\mu} = \bigwedge_{u \in U} \mu(u)$ 分别称为 μ 的上模与下模。

设 $\mu, \gamma \in F(U)$, 记 $\mu \circ \gamma = \bigvee_{u \in U} \{\mu(u) \wedge \gamma(u)\}$

$$\mu \oplus \gamma = \bigwedge_{u \in U} \{\mu(u) \vee \gamma(u)\}$$

分别称为 μ 与 γ 的内积和内和。

又若 $\forall u \in U$ 都有 $\mu(u) \geq \gamma(u)$, 称 γ 小于 μ , 记作 $\gamma \leq \mu$, 显然

1°. 对确定的 $\mu \in F(U)$ 和一切 $\gamma \in F(U)$ 都有

$$\mu \circ \gamma \leq \bar{\mu}, \quad \mu \oplus \gamma \geq \underline{\mu}.$$

2°. 若 $\mu \leq \gamma$ 则 $\mu \circ \gamma = \bar{\mu}$,

若 $\gamma \leq \mu$ 则 $\mu \oplus \gamma = \underline{\mu}$ 。

从而当 $\gamma = \mu$ 时, $\bar{\mu} - \underline{\mu} - (\mu \circ \gamma - \mu \oplus \gamma) = 0$ 。

因此, 我们定义

$$d_{\gamma}^{\mu} = 1 - (\bar{\mu} - \underline{\mu}) + (\mu \circ \gamma - \mu \oplus \gamma), \quad (1)$$

称为 γ 与 μ 的贴近度。显然

1°, 若 $\gamma = \mu$, 则 $d_{\gamma}^{\mu} = 1$ 。

2°, 若最少有一个 $u_0 \in U$, 使得 $\gamma(u_0) = \mu(u_0) = \underline{\mu}$, 则因 $\mu \oplus \gamma = \underline{\mu}$, 从而

$$d_{\gamma}^{\mu} = 1 - (\bar{\mu} - \mu \circ \gamma). \quad (2)$$

3°, 若最少有一个 $u_0 \in U$, 使得 $\gamma(u_0) = \mu(u_0) = \bar{\mu}$, 则 $\mu \circ \gamma = \bar{\mu}$, 从而

$$d_{\gamma}^{\mu} = 1 - (\mu \oplus \gamma - \underline{\mu}). \quad (3)$$

4°, 若有 $u_0, u_1 \in U$, 使得 $\gamma(u_0) = \mu(u_0) = \bar{\mu}$, $\gamma(u_1) = \mu(u_1) = \underline{\mu}$, 则

$$d_{\gamma}^{\mu} = 1.$$

现在来讨论对岩石的综合评价方法。

先对所讨论岩石进行单因素评价,测定出具体指标及其取得该指标的资格度。具体方法是将各评定内容中的指标统一转换成分数。以抗压强度为例,将 R_w 超过 2000kg/cm^2 的记作100分, 1500kg/cm^2 的记作75分, 750kg/cm^2 的记作37.5分, 300kg/cm^2 的记作20分, 100kg/cm^2 记作5分(见表5), 界于这些数值之间的按某种方式(例如直线)内插。

对各项评价因素都给出计分标准和进行实地量测后即可对第 i 项评价因素获得 $\mu_i: [0, 100] \rightarrow [0, 1]$, 对每个 $x \in [0, 100]$ (x 表示被评定的分数), $\mu_i(x)$ 表示第 i 个因素获得分数 x 的资格度。 $\mu_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 是模糊集。

再选取若干组权数 $W_i^{(j)}, i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, \dots, m$, 且 $\sum_{i=1}^5 W_i^{(j)} = 1 (j = 1, 2, \dots, m)$ 。为使计算简单易行可不再考虑这 m 组权数各自的资格度, 而认为它们是实际可能被取得的(即都具有资格度1)。对此 m 组权数即可计算出 m 个综合评价。计算方法如下:

假定 $\mu_i(x)$ 是单峰平顶的, 对每个 $\alpha \in [0, 1]$, 设 $x_i^* = \max\{x: \mu_i(x) = \alpha\}$, $x_i^{**} = \min\{x: \mu_i(x) = \alpha\}$ 。再算出第 j 组权数 $W_1^{(j)}, W_2^{(j)}, \dots, W_5^{(j)}$, 记 $x_{(j)}^* = \sum_{i=1}^5 W_i^{(j)} x_i^*$, $x_{(j)}^{**} = \sum_{i=1}^5 W_i^{(j)} x_i^{**}$, 则定义 $\mu^{(j)}(x_{(j)}^*) = \mu^{(j)}(x_{(j)}^{**}) = \alpha$, 因此, $\mu^{(j)}: [0, 100] \rightarrow [0, 1]$ 是在第 j 组权数下的综合评价。显然 $\mu^{(j)}, j = 1, 2, \dots, m$ 是模糊集。

如前所述,我们将岩石分为五类(级),见表5,但它们都是模糊集,其资格函数如图1所示。图1中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ 分别表示 I、II、III、IV、V 类(级)岩石所对应的模糊集。

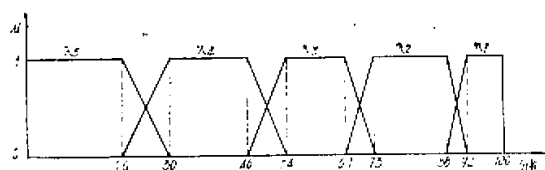


图1 资格函数

由公式(1), 令

$$d_k^j = 1 - (\bar{\lambda}_k - \underline{\lambda}_k) + (\lambda_k \circ \mu^j - \mu^j \oplus \lambda_k), \quad (4)$$

$$j = 1, 2, \dots, m; \quad k = 1, 2, \dots, 5.$$

因为一般情况都有 $x_0 \in [0, 100]$, 使 $\lambda_k(x_0) = \mu^j(x_0) = \lambda_k$, 故由公式(2), 有

$$d_k^j = 1 - (\bar{\lambda}_k - \lambda_k \circ \mu^j) \quad (5)$$

$$j = 1, 2, \dots, m; \quad k = 1, 2, \dots, 5.$$

定义

$$d_k = \bigvee_{j=1}^m d_k^j, \quad k = 1, 2, \dots, 5 \quad (6)$$

为被评价岩石对于第 k 类岩石的隶属度, 由此可获得该项岩石的综合评价。

现在用一个实例说明上述计算方法。

四川省某工程坝基砂岩(层位 $J_1 4-1$), 它的湿抗压强度为 $457 \sim 1113 \text{ kg/cm}^2$, 平均为 615 kg/cm^2 ; 没有实测纵波波速的资料, 但从其静力弹性模量为 3.0 (垂直层面)到 3.8 (平行层面) $\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 来看, 估计 v_p 约等于 $2500 \sim 4000 \text{ m/s}$ 左右; 有层间错动现象, 产生层面裂隙, 但不甚发育, 且多闭合; 构造裂隙主要有三组, 平面裂隙率为 0.63% , 大约 $0.5 \sim 1.0$ 条/米, 微张, 无充填。没有块度模数的资料。但从总体看, 裂隙发育, 且透水性强, 渗透系数为 $4.58 \sim 14.28 \text{ m/d}$, 故按其节理状态和地下水情况看, 大体都属于表 5 中的第 IV 类。没有地应力的实测资料, 从其层理平缓的情况看, 属于第 III 类, 估计主要是重力场的作用。

现参照前述坝基资料拟定一个例题: 根据实测值, 岩石最低湿抗压强度为 457 kg/cm^2 , 最高为 1113 kg/cm^2 , 平均为 615 kg/cm^2 , 便可整理出模糊集如图 2 (已按表 5 折合成分数, 下同); 岩石的纵波速度, 无实测值, 估计为 $v_p \approx 2500 \sim 4000 \text{ m/s}$, 拟定(假定是实测值)模糊集如图 3; 节理状态, 地下水情况和地应力等, 也可以拟定其模糊集如图 4、图 5 及图 6。然

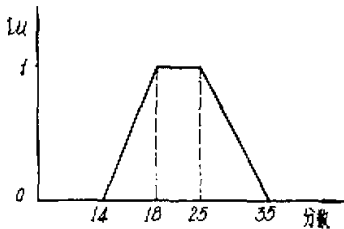


图2 岩石饱和抗压强度模糊集

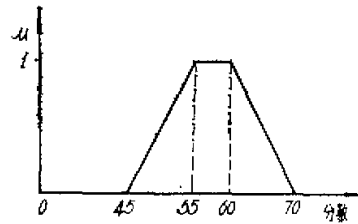


图3 岩石的纵波速度模糊集

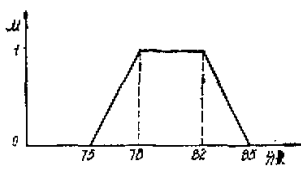


图4 节理状态模糊集

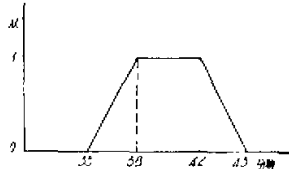


图5 地下水情况模糊集

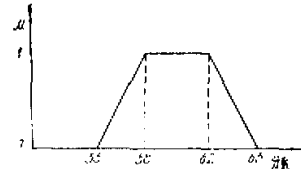


图6 地应力模糊集

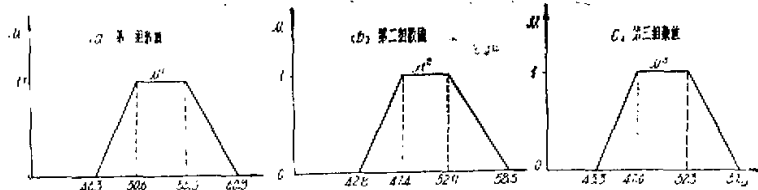


图7 不同权值的综合评价

后考虑如下三种可能的权数分配:

第一组,	0.20,	0.15,	0.30,	0.25,	0.10
第二组,	0.25,	0.20,	0.20,	0.20,	0.15
第三组,	0.20,	0.15,	0.20,	0.30,	0.15

由此可以获得三组评价如图 7 所示。由公式(5), 立即可得:

$$d_k^1 = \begin{cases} 0 & k = 1, 2 \\ 1 & k = 3 \\ 0.63 & k = 4 \\ 0 & k = 5 \end{cases},$$

$$d_k^2 = \begin{cases} 0 & k = 1, 2 \\ 0.89 & k = 3 \\ 0.89 & k = 4 \\ 0 & k = 5 \end{cases},$$

$$d_k^3 = \begin{cases} 0 & k = 1, 2 \\ 0.87 & k = 3 \\ 0.87 & k = 4 \\ 0 & k = 5 \end{cases}.$$

再由式(6)算得:

$$d_k = \begin{cases} 0 & k = 1, 2, 5 \\ 1 & k = 3 \\ 0.89 & k = 4 \end{cases},$$

即得到, 以资格度 1 属于较好的岩石(Ⅲ类), 而 0.89 的资格度属于差的岩石(Ⅳ类), 即在Ⅲ、Ⅳ类之间。

三、简单的结论

综上所述, 我们得到如下的简单结论:

第一、对于岩石的工程分类, 看来完全可以引用模糊数学方法来处理。因为岩石各项指标的测定值并不完全是清晰的, 同一岩石在不同的位置或选用不同试件可能有不同的结果, 这就使我们无法完全肯定某项工程所涉及的岩石的某项物理-力学性质的精确指标值。这正是模糊数学所应用的领域。

第二、但是本文所作的处理, 仅仅是初步的。因为, 一则对影响岩石工程分类的基本因素是那些, 可能存在不同的认识而需要作进一步的论证; 二则模糊数学有多种可供选择的方法, 究竟那一种方法更适合于岩石的情况, 也需要作工作。但是, 如果能引起人们对模糊数学应用于岩石力学领域中的注意, 则本文的目的就达到了。

第三、本文所建议的五项分类指标, 多是工程建设, 特别是水利水电建设中在工程地质勘测过程中容易取得的, 而所采用分类方法, 计算简单。因此, 如能在实践过程中予以检验、丰富和发展, 似有可能使岩石的工程分类工作定量化和标准化。

参 考 文 献

- [1] 隧道译丛(岩石分类专辑), 第 4 期, 1972。
- [2] 陶振宇, 水工建设中的岩石力学问题, 水利电力出版社, 1976。
- [3] 谷德振, 岩体工程地质力学基础, 科学出版社, 1979。
- [4] Stagg, K. G. and Zienkiewicz, O. C., Rock Mechanics in Engineering Practice, New York, 1968.
- [5] Bieniawski, Z. T., Geomechanics Classification of Rock Masses and It's Appli-

cation in Tunneling, Proc. 3rd Cong ISRM, 1974.

[6] Zahch, L. A., Fuzzy Sets, Information and Control, No. 8, 1965, pp. 338~353.

[7] 刘来福, 模糊数学在小麦亲本识别上的应用, 北京师范大学学报(自然科学版), 第 3 期, 1979.

Application of Fuzzy Mathematics to the Engineering Classification of Rocks

Tao Zhen-yu and Peng Zu-zeng

(Institute of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan)

Abstract

Because the uncertainty of physicommechanical parameters is characteristic of rocks, based on the concept of the fuzzy mathematics, a new method to classification of the rock engineering are proposed. First the rock are divided into k kinds, e. g., the excellent one, the very good one, etc. Each kind corresponds to a fuzzy set λ_i , $i=1, 2, \dots, k$, respectively. For the rock used in a practical engineering, the n aspects of the compressive strength, ground water, etc as a single factor are evaluated. After transferring them into fraction unitedly, n fuzzy sets are found. Then we set m series of the weighted numbers and explains the various probabilities of the proportion of different factors in the comprehensive evaluation. Finally we can obtain a comprehensive evaluation for each series of the weighted numbers and engineering classification of rocks.