

模糊数学在岩体质量综合评价中的应用

袁 开 先

(湖北省电力学校)

岩体质量评价定量化,是工程地质学研究的一个重要课题。裂隙岩体是硬块和软面的集合体,是不均质、各向异性的不连续介质,其性状远较岩石复杂,因此岩体的工程地质性质的正确评价,是一个值得商讨的问题〔1〕。

大家知道,岩体是指那些与工程作用有关的、存在于一定自然地质环境的地质体。这些地质体不仅经历过复杂的地质历史变迁,以及现代各种内、外地质营力的作用,兼以人类工程活动的影响,给岩体质量评价定量化带来困难。“不相容原理”告诉人们,当一个系统复杂性增大时,我们使它精确化的能力减少。在达到一定阈值之上时,复杂性和精确性将相互排斥。影响岩体质量的各种因素的复杂性,迫使人们采用模糊概念来描述它。例如,岩体质量“很好”、“好”、“一般”、“差”、“很差”的分类就是一些模糊概念(因为这些概念并没有明确的外延)。以往采用某项指标或指标连乘的经典数学函数表达式对岩体质量进行工程地质分类的方法,虽具有简明的特点,但不能很好地反映和利用地质人员在野外获取的信息,且这些分类的界限值与分类概念的模糊性相是悖的。用数学方法研究和处理具有模糊现象的模糊数学,为我们解决上述问题提供了有力的工具。

利用模糊数学的方法对岩体进行工程地质分类,已见诸某些文献〔3、4〕。本文在参考这些文献的基础上,应用模糊数学的方法对岩体质量评价提出一个以因素隶属度为基础的分类表(表1),现就表略述如下。

一、影响岩体质量的主要因素

影响岩体质量的因素是复杂的,主要取决于岩体结构类型和结构特征(如岩体完整程度、结构面性状、岩块坚强性),以及岩体所处的环境条件(如地下水、地温及地应力状况等)。

对于岩体的完整性,一般采用R、Q、D值或裂隙间距大小作为评定指标。也可借助岩体完整性系数 K_F 来评定,该系数是岩体与岩石的纵波速度的平方比。

结构面的性状主要包括结构面的力学特性,结构面间充填物的性质(如颗粒组成、物理与水理性质),形态(如粗糙度、起伏度、张开度、连续性等)以及产状等。以上除摩擦系数可直接测试外,其余大多只能凭地质人员的野外观察分析所描述的。表1中给出了这些描述性语言的评分标准。主要结构面的产状若不利于工程稳定,则岩体质量将降低,其降低数值视不利于稳定的程度而定。作为建议,取结构面摩擦系数的评分值 F 乘以 $a=0.9\sim 0.7$ (相当于降低类别约0.5—1级)。

表1 岩体质量评价

V U	很好 (v ₁)		好 (v ₂)		一般 (v ₃)	
	评分	隶属函数	评分	隶属函数	评分	隶属函数
岩体完整性 (u ₁)	L: 95	$\mu_{11}^L = \frac{L-90}{10}$	L: 95-60	$\mu_{12}^L = \min(\frac{100-L}{10}, \frac{L-50}{20})$	L: 60-30	$\mu_{13}^L = \min(\frac{70-L}{20}, \frac{L-20}{20})$
	Q: 100-90	$\mu_{11}^Q = \frac{Q-85}{10}$	Q: 90-75	$\mu_{12}^Q = \min(\frac{95-Q}{10}, \frac{Q-70}{10})$	Q: 75-50	$\mu_{13}^Q = \min(\frac{80-Q}{10}, \frac{Q-45}{10})$
	均值	$\bar{\mu}_{11} = \frac{\mu_{11}^L + \mu_{11}^Q}{2}$	均值	$\bar{\mu}_{12} = \frac{\mu_{12}^L + \mu_{12}^Q}{2}$	均值	$\bar{\mu}_{13} = \frac{\mu_{13}^L + \mu_{13}^Q}{2}$
结构面性状 (u ₂)	F: 100-85.5	$\mu_{21}^F = \frac{F-71}{29}$	F: 85.5-57.0	$\mu_{22}^F = \min(\frac{100-F}{29}, \frac{F-50}{14})$	F: 57-43	$\mu_{23}^F = \min(\frac{64-F}{14}, \frac{F-40}{6})$
	S: 100-90	$\mu_{21}^S = \frac{S-85}{10}$	S: 90-75	$\mu_{22}^S = \min(\frac{95-S}{10}, \frac{S-70}{10})$	S: 75-50	$\mu_{23}^S = \min(\frac{80-S}{10}, \frac{S-45}{10})$
	S评分依据	结构面闭合, 不连续, 无夹泥, 且坚硬	S评分依据	结构面闭合、连续, 一般无夹泥, 结合力一般	S评分依据	结构面微张 (1-3毫米), 连续性好, 夹少量泥, 面粗糙
	均值	$\bar{\mu}_{21} = \frac{\mu_{21}^F + \mu_{21}^S}{2}$	均值	$\bar{\mu}_{22} = \frac{\mu_{22}^F + \mu_{22}^S}{2}$	均值	$\bar{\mu}_{23} = \frac{\mu_{23}^F + \mu_{23}^S}{2}$
岩块坚强性 (u ₃)	R: 95	$\mu_{31}^R = \frac{R-90}{10}$	R: 95-55	$\mu_{32}^R = \min(\frac{100-R}{10}, \frac{R-46}{18})$	R: 55-27.5	$\mu_{33}^R = \min(\frac{64-R}{18}, \frac{R-23}{9})$
地下水情况 (u ₄)	W: 95	$\mu_{41}^W = \frac{W-90}{10}$	W: 95-75	$\mu_{42}^W = \min(\frac{100-W}{10}, \frac{W-70}{10})$	W: 75-55	$\mu_{43}^W = \min(\frac{80-W}{10}, \frac{W-50}{10})$
	W评分依据	干燥、无水	W评分依据	稍湿, 有滴水	W评分依据	潮湿, 多处滴水

[注] 隶属函数中, min表示取最小值, 其值大于1取1, 小于0取0。

岩块的坚强性一般用岩块饱和极限抗压强度值来表征。

地下水情况主要指岩体是处于包气带还是饱水带, 地下水类型, 水头大小及涌水量等。地下水对岩体的影响不仅表现在压力上, 还表现在物理、化学作用上。

对于深埋或高地应力区的地下建筑物, 应考虑地温及地应力的影响, 本文暂未考虑。

二、岩体质量评价的模糊数学方法

1. 岩体质量综合评价

在经典数学中, 一个元素 x 和一个集合 B 的关系, 用特征函数 $C_B(x)$ 表示:

$$C_B(x) = \begin{cases} 1 & x \in B \\ 0 & x \notin B \end{cases} \quad (1)$$

模糊数学中把上述只能取 $\{0, 1\}$ 二值的特征函数, 推广为在 $(0, 1)$ 闭区间取全部

评分及分类表

差 (v ₄)		很差 (v ₅)		说 明
评 分	隶属函数	评 分	隶属函数	
L: 30-10	$\mu_{14}^L = \min \left(\frac{40-L}{20}, \frac{L-5}{10} \right)$	L < 10	$\mu_{15}^L = \frac{15-L}{10}$	评分公式: $L = \frac{100l}{1}$ l—裂隙间距、米 评分公式: $Q = R, Q, D, (\%)$ 当仅有L或Q时, $\mu_{1i} = \mu_{1i}^L$ 或 $\mu_{1i} = \mu_{1i}^Q$
Q: 50-25	$\mu_{14}^Q = \min \left(\frac{55-Q}{10}, \frac{Q-20}{10} \right)$	Q < 25	$\mu_{15}^Q = \frac{30-Q}{10}$	
均 值	$\mu_{14} = \frac{\mu_{14}^L + \mu_{14}^Q}{2}$	均 值	$\mu_{15} = \frac{\mu_{15}^L + \mu_{15}^Q}{2}$	
F: 43-28.5	$\mu_{24}^F = \min \left(\frac{46-F}{6}, \frac{F-21}{15} \right)$	F: < 28.5	$\mu_{25}^F = \frac{36-F}{15}$	评分公式: $F = \frac{f}{0.7} \times 100$ f—结构面摩擦系数 评分由野外观察决定, 其值: [0, 100] 当结构面产状不利于工程稳定时, 可将F值乘系数 α , 以降低级别, $\alpha = 0.9 \sim 0.7$ 当仅有F或S时, $\mu_{2i} = \mu_{2i}^F$ 或 $\mu_{2i} = \mu_{2i}^S$
S: 50-25	$\mu_{24}^S = \min \left(\frac{55-S}{10}, \frac{S-20}{10} \right)$	S < 25	$\mu_{25}^S = \frac{30-S}{10}$	
S 评分依据 结构面张开, 连续夹泥, 泥中偶夹沙石		S 评分依据 结构面张开, 连续夹泥, 面光滑, 泥细而滑		
均 值	$\mu_{24} = \frac{\mu_{24}^F + \mu_{24}^S}{2}$	均 值	$\mu_{25} = \frac{\mu_{25}^F + \mu_{25}^S}{2}$	
R: 27.5-13.5	$\mu_{34} = \min \left(\frac{32-R}{9}, \frac{R-9}{9} \right)$	R < 13.5	$\mu_{35} = \frac{18-R}{9}$	评分公式: $R = \frac{R_w}{1100} \times 100$ R_w = 岩块饱和极限抗压强度, 暂用工程单位: 公斤/厘米 ²
W: 55-20	$\mu_{44} = \min \left(\frac{60-W}{10}, \frac{W-10}{20} \right)$	W < 20	$\mu_{45} = \frac{30-W}{20}$	评分由野外观察或测量决定, 其值: [0, 100]
W 评分依据 有流水, 水量每10米20-100升/分		W 评分依据 严重滴水, 水量每10米大于100升/分或为承压水		

连续实数值的隶属函数 $\mu_B(x): (0, 1)$ 。B 记为 $\underline{B}$, 表示 B 是一个模糊集合。 x 完全属于 $\underline{B}$, $\mu_B(x) = 1$, 完全不属于 $\underline{B}$, $\mu_B(x) = 0$; x 部分属于 $\underline{B}$ 时, $\mu_B(x)$ 取 $(0, 1)$ 中某一实数值, 隶属程度愈大其值愈接近于 1。我们采用模糊数学中综合评判法, 对岩体质量进行评价。

设岩体质量评价分为五个子集, 它们构成一个模糊集合 $V, V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 。这五个子集的级序依次是: “很好”、“好”、“一般”、“差”、“很差”。

又设影响岩体质量的因素为四个子集, 它们构成一个普通集合 $U, U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$, 这四个子集依次是: 岩体完整程度、结构面性状、岩块强度、地下水情况。

对于每一个因素 (u_K), 都可以用隶属函数给出它隶属于某一质量级序 (v_i), 记为 $\mu_{Ki}: (0, 1)$, ($K=1, 2, 3, 4, i=1, 2, 3, 4, 5$), 于是形成一个 $U \rightarrow V$ 的模糊关系矩阵。

$$R = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} & \mu_{15} \\ \mu_{21} & \vdots & \vdots & \vdots & \mu_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{41} & \mu_{42} & \vdots & \vdots & \mu_{45} \end{pmatrix} \quad (2)$$

表2 不同岩体结构类型权分配表

岩体结构类型	影响因素 (U)			
	u ₁	u ₂	u ₃	u ₄
整体块状	0.20~0.15	0.15~0.10	0.50~0.45	0.20~0.15
层状	0.30~0.25	0.50~0.45	0.20~0.15	0.15~0.10
碎裂	0.25~0.20	0.55~0.50	0.15~0.10	0.20~0.15
散体	0.55~0.50	0.15~0.10	0.20~0.15	0.25~0.20

注：岩体结构类型按文献[1]分类。

鉴于不同的岩体结构类型，控制其质量优劣的因素亦不相同，于是存在着各因素的权分配问题。显然，某一岩体结构类型或某个影响因素对质量的控制作用大，则所占权亦大，相反亦然。作为初步建议，权值分配如表2。

各因素 u_k 所占的权重表示为在 U 上的一个模糊集合 $A: \{\mu_{AK}\}$ ，且使 $\sum_{k=1}^4 \mu_{AK} = 1$ 。于是借助线性代数中矩阵相乘的线性变换，将乘法换为“ $\wedge$ ”（取最小值），加法换为“ $\vee$ ”（取最大值），有模糊变换： $\underline{A} \circ R = \underline{Z}$ 结果为： $\underline{Z} = \{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5\}$ ，其中：

$$Z_i = \vee \{\mu_{AK} \wedge \mu_{Ki}\} \quad (i=1, 2, 3, 4, 5) \quad (3)$$

最后用最大隶属度原则进行综合评判：

$$\underline{Z}_j = \vee \{Z_i\} \quad (j: i \text{ 中隶属度最大的元素}) \quad (4)$$

于是认为该岩体以 $\underline{Z}_j$ 的隶属度隶属 v_j 类。

以上就是模糊数学中综合评判的基本方法。值得注意的是，在综合评判过程中，评判人员的若干心理因素和智能因素对评判结果会产生影响，一般都要求具有实践经验的专门人员来进行评定，但这种要求实际上也具有模糊性，从而进一步提出质量评价结果的检验问题。

2. 质量评价结果检验

为了比较不同的评价对象，我们常将综合评判结果 $\underline{Z}$ 进行归一化处理，下述检验问题都是基于 $\underline{Z}$ 经归一化处理这一前提。设想若 $\underline{Z}$ 退化为经典集合 $Z = \{Z_i\}$ (Z_i 取 0 或 1)，则判别结果是清晰的；若 $\underline{Z}$ 为模糊集合，其中 Z_i 又相互接近，则 $\underline{Z}$ 的模糊性大，判别困难，即使勉强进行判别，其结果置信度也很低，也可认为不能接受判别。由此看来质量评价结果的检验是必要的，这种检验实质上是对 $\underline{Z}$ 的模糊度判定。下面我们提出一种关于有限可数论域的模糊结合的模糊度判别准则，作为检验岩体质量综合评价中的依据：

(1) 一个模糊集合 $\underline{Z}$ 与一个经典集合 Z_0 的贴近度： $\eta(\underline{Z}, Z_0)$

设 $Z_0 = \{1, 0, 0, 0, 0\}$ ，显然，按质量分类它是属于“很好”的一类。另一实际的评价结果 $\underline{Z} = \{Z_i\}$ 。从 Z_i 与 Z_0 中的 $Z_1 = 1$ 的隔离程度比较可知， Z_i 与 Z_1 为同一级序，

Z_2 比 Z_1 低一级序, …… Z_5 比 Z_1 低 4 个级序。质量级序愈低则与“很好”类隔离愈大。这种级序的隔离可以认为是一种“权”, 即 $W_i = i - 1$ 。则定义隔离度 $D(\underline{Z} Z_0)$ 为:

$$D(\underline{Z} Z_0) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n W_i Z_i \quad (5)$$

式中 n —— $\underline{Z}$ 中元素的个数(本文 $n=5$);

W_i —— $\underline{Z}$ 中元素 Z_i 与 Z_0 元素 Z_1 隔离度的权 ($i=1, 2, 3, 4, 5$)。

于是贴近度定义为:

$$\eta(\underline{Z} Z_0) = 1 - D(\underline{Z} Z_0) \quad (6)$$

设有五个经典结合: $Z_1 = \{1\ 0\ 0\ 0\ 0\}$, $Z_2 = \{0\ 1\ 0\ 0\ 0\}$, $Z_3 = \{0\ 0\ 1\ 0\ 0\}$, $Z_4 = \{0\ 0\ 0\ 1\ 0\}$, $Z_5 = \{0\ 0\ 0\ 0\ 1\}$, 按上式计算贴近度得:

$$\eta(Z_1 Z_0) = \beta_1 = 1, \quad \eta(Z_2 Z_0) = \beta_2 = 0.75, \quad \eta(Z_3 Z_0) = \beta_3 = 0.5,$$

$$\eta(Z_4 Z_0) = \beta_4 = 0.25, \quad \eta(Z_5 Z_0) = \beta_5 = 0$$

$$\text{显然} \quad 0 \leq \eta(\underline{Z} Z_0) \leq 1$$

对于判别一个模糊集合 $\underline{Z}$ 属于 v_i 类, 其贴近度应在 β_i 附近, 愈远离 β_i 其判别的置信度愈低。因此接受判别的区间应为 $(\beta_i \pm \alpha)$, 即

$$\eta(\underline{Z} Z_0): \quad (\beta_i \pm \alpha) \quad (7)$$

式中 β_i ——综合评判 $\underline{Z}$ 隶属于 v_i 类质量系数;

α ——精度系数, 其值视要求精度而定, 其值愈小, 要求精度愈高。作为建议, 一般 $\alpha \leq 0.2 \sim 0.15$; 若 $\beta_i = \beta_1$ 时, α 值仅取负号, $\beta_i = \beta_5$ 时, α 值仅取正号。

有时模糊集合中的元素可能高度分散, 如 $\underline{Z} = \{0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2\}$, 经计算知, $\eta(\underline{Z} Z_0) = 0.5$, 这里由于 Z_i 值相同, 最大隶属度原则评判失效, 它表明 $\underline{Z}$ 的模糊度最大。然而贴近度计算结果却可以判其属于“一般” (v_3) 类。因此有必要再选定一个检验准则, 即元素密集度准则。

(2) 模糊集合 $\underline{Z}$ 的元素密集度 $E(\underline{Z})$ 定义为:

$$E(\underline{Z}) = \frac{\bar{Z}_i - Z_i}{C_{x_i}} \quad (8)$$

式中 $\bar{Z}_i$ ——模糊集合 $\underline{Z}$ 的上模, $\bar{Z}_i = \bigvee \{Z_i\}$;

Z_i ——模糊集合 $\underline{Z}$ 的下模, $Z_i = \bigwedge \{Z_i\}$;

C ——元素分布系数, 其值为除去 $\underline{Z}$ 中两端为零的元素, 剩余元素的个数(包括非零元素中间所夹的零元素)。

$$\text{显然} \quad 0 \leq E(\underline{Z}) \leq 1$$

当 $E(\underline{Z}) = 1$ 时, 元素高度集中, $\underline{Z}$ 退化为 Z ;

当 $E(\underline{Z}) = 0$ 时, 元素高度分散, 最大隶属度原则失效。作为检验准则, 可定某一界限值 γ

当 $E(\underline{Z}) \geq \gamma$ 时, 接受判别结果;

当 $E(\underline{Z}) < \gamma$ 时, 拒绝判别结果。

γ 值视精度要求而定, 作为建议一般可取 $\gamma \geq 0.3 \sim 0.2$ 。(注意, 当 $\eta(\underline{Z}, \underline{Z}_0) = 0.5$, 且 $E(\underline{Z}) = 0$ 时, $\underline{Z}$ 最模糊: $\eta(\underline{Z}, \underline{Z}_0) = \beta_i$, $E(\underline{Z}) = 1$ 时, $\underline{Z}$ 退化为普通集合 Z), 所以综合评判结果必须同时满足贴近度和元素密集度的要求, 否则拒绝判定类别的归属结果。

当判别结果被拒绝时, 应当查明原因, 重新进行判定。发生这种情况的原因可能是:

- 1) 参与评判的人员缺乏专门知识或经验;
- 2) 各影响因素的权取值不当;
- 3) 岩体结构类型划分不当, 甚至未进行划分, 致使不同的岩体结构类型混合, 使评分或测试指标高度分散;
- 4) 测试指标代表性不好, 或试验差错等。

三、岩体质量评价的具体方法

1. 隶属函数的确定

隶属函数及隶属度的确定, 是质量评价中首先遇到的问题。

设第 K 个影响因素 u_K , 从 $v_1 \rightarrow v_5$ 有评分 (100 0)。对 v_i 评分的分布, 设 v_1 呈升半梯形, v_5 呈降半梯形, $v_2 \sim v_4$ 呈不对称梯形 (图 1)。根据图形隶属函数如下:

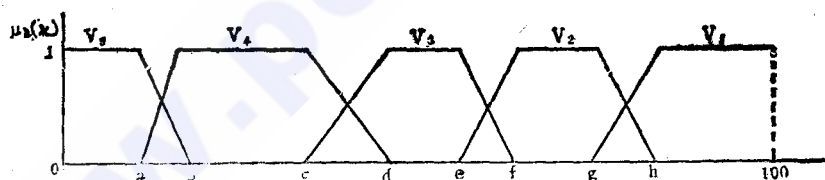


图1 隶属函数图示

$$\mu_{v_5}(x) = \frac{b-x}{b-a} \quad (0 \leq x \leq b) \quad (9)$$

$$\mu_{v_4}(x) = \min \left(\frac{d-x}{d-c}, \frac{x-a}{b-a} \right) \quad (a \leq x \leq d) \quad (10)$$

$$\mu_{v_3}(x) = \min \left(\frac{f-x}{f-e}, \frac{x-c}{d-c} \right) \quad (c \leq x \leq f) \quad (11)$$

$$\mu_{v_2}(x) = \min \left(\frac{h-x}{h-g}, \frac{x-e}{f-e} \right) \quad (e \leq x \leq h) \quad (12)$$

$$\mu_{v_i}(x) = \frac{x-g}{h-g} \quad (g \leq x \leq 100) \quad (13)$$

具体的影响因素评分的隶属函数公式见表1。在利用隶属函数求 x 的隶属度时， $\min$ 表示最小值，且其值小于零时取零，大于1时取1。

对于无适当指标的因素，如结构面特征、地下水情况等，可在野外调查中直接评定分数。

对于有测试指标的影响因素，每一个测试值，按附表1评分公式求出评分，再按隶属函数求出该评分值隶属于 v_i 的隶属度 $\mu_{v_i}(x)$ ，称为元素隶属度。

针对每段岩体的 μ_K ，其测试指标或经验评分所求得元素隶属度是一集合 $\{\mu_{v_i}(x)\}_n$ 。第 K 个因素隶属于 v_i 级的隶属度称为因素隶属度，并定义为：

$$\mu_{Ki} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{p'} \mu_{v_i}(x) \quad (14)$$

式中 p ——在 N 个元素隶属度中落入 v_i 级的个数；

$\mu_{v_i}(x)$ ——属于 v_i 级的元素隶属度，简记为 μ_{v_i} 。

表3 f值隶属度计算表

顺序	区 间	$\bar{x}_i$	m_i	M_i	评 分 (F)	μ_{v1}	$M_i\mu_{v1}$	μ_{v2}	$M_i\mu_{v2}$	μ_{v3}	$M_i\mu_{v3}$	μ_{v4}	$M_i\mu_{v4}$	μ_{v5}	$M_i\mu_{v5}$
1	0.35-0.40	0.375	4	0.10	53.57	0	0	0.255	0.0255	0.745	0.0745	0	0	0	0
2	0.40-0.45	0.425	5	0.125	60.71	0	0	0.766	0.0958	0.235	0.0294	0	0	0	0
3	0.45-0.50	0.475	7	0.175	67.86	0	0	1.00	0.1750	0	0	0	0	0	0
4	0.50-0.55	0.525	9	0.225	75.00	0.138	0.0311	0.862	0.1939	0	0	0	0	0	0
5	0.55-0.60	0.575	7	0.175	82.14	0.384	0.0672	0.616	0.1078	0	0	0	0	0	0
6	0.60-0.65	0.625	5	0.125	89.29	0.631	0.0789	0.369	0.0461	0	0	0	0	0	0
7	0.65-0.70	0.675	2	0.05	96.43	0.877	0.0439	0.123	0.0061	0	0	0	0	0	0
8	0.70-0.75	0.725	1	0.025	100.00	1.00	0.025	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ			40	1.00			0.246		0.650		0.104		0		0

当试验数据较多或评分值较多时，可先用分组法将其分为 n 个小区间，并用统计频率法求得 μ_{Ki} ，即

$$\mu_{Ki} = \sum_{i=1}^n M_i \mu_{v_i} \quad (15)$$

式中 M_i —— n 个区间中第 i 个区试验数据或评分值的频率；其余符号的意义同前。

当各影响因素都求得因素隶属度后，就可建立 R 关系矩阵，再根据岩体结构类型确定权值 A ，即可按(3)，(4)进行综合评判，最后作综合评判检验。

2. 岩体质量综合评价举例

(1) 单因素评价：已知某区段主要结构面摩擦系数 f 值，如表3。表1中已列出

了各区间中值 $\bar{x}_i$, 频数 m_i , 频率 M_i , 试进行单因素评价。

解: 依表 1 中的 f 评分公式: $F = \frac{f}{0.7} \times 100$ 求 $\bar{x}_i$ 的评分, 如 $\bar{x}_1 = 0.375$, $F_1 = \frac{0.375}{0.7} \times 100 = 53.57$, 将其填入表 3 评分栏; 再依表 1 中元素隶属度公式求得 μ_{vi} , 将各列 $M_i \mu_{vi}$ 的和求出即得因素隶属度如下:

$$\mu_{2i} = \{0.246, 0.650, 0.104, 0, 0\}$$

从上述结果看出, 该段岩体主要结构面的摩擦系数属于“好”类, 按“好”类评分区间 85.5~57.0 反算 f 值为 (0.4 0.6)。

按贴近度计算得 $\eta(\mu_{2i}, Z_2) = 0.785 > \beta_2 = 0.75$, 故建议指标值当考虑在 (0.5 0.6) 内取值。

(2) 综合评价: 以文献(1)中“岩体质量指标的应用”一节所载某地下洞室三段实际资料为例。第一段为块状结构中厚层状大理岩化灰岩; 第二段为层状结构中厚层状白云质灰岩; 第三段为断层破碎带及层间错动带。各段资料参见文献(1)第 257 页, 各段取值按表 4 (代号按表 1)。

表 4

因素	第 一 段	第 二 段	第 三 段
Q	R. Q. D=70%	43%	10%
f	取 0.7~0.47 均值: $f=0.585$	取 0.7~0.37 均值: $f=0.535$	0.325
S	70 分	50 分	
R _w	950 (公斤/厘米 ²)	800 (公斤/厘米 ²)	100 (公斤/厘米 ²)
W	100 分	75 分	50 分

根据上述资料, 按表 1 求元素隶属度, 并等于因素隶属度 (μ_K)。计算如表 5:

表 5-1

第 一 段	μ_{v1}	μ_{v2}	μ_{v3}	μ_{v4}	μ_{v5}
岩体完整程度 Q=70	0	0	$\mu_{13}^Q =$ $= \min(\frac{80-70}{10}, \frac{70-45}{10})$ $= 1$	0	0
结构面性状: $f=0.585$ $F=83.57$ $S=70$	$\mu_{21}^f = \frac{F-71}{29} = 0.433$ 0	$\mu_{21}^f = 0.567$ 0	0	0	0
平均值:	$\mu_{21} = 0.2165$	$\mu_{22} = 0.2835$	$\mu_{23}^S =$ $= \min(\frac{80-70}{10}, \frac{70-45}{10})$ $= 1$ $\mu_{23} = 0.5$	0	0
岩体坚强性 $R_w=950$	0	1	0	0	0
地下水情况 $W=100$	1	0	0	0	0

表 3-2

第 二 段	μ_{v1}	μ_{v2}	μ_{v3}	μ_{v4}	μ_{v5}
$\mu_1 (Q=43)$	0	0	0	1	0
$\mu_2 (f=0.535, S=50)$	0.0935	0.4065	0.25	0.25	0
$\mu_3 (Rw=800)$	0	1	0	0	0
$\mu_4 (W=75)$	0	0.5	0.5	0	0

表 3-3

第 三 段	μ_{v1}	μ_{v2}	μ_{v3}	μ_{v4}	μ_{v5}
$\mu_1 (Q=10)$	0	0	0	0	1
$\mu_2 (f=0.325)$	0	0	1	0	0
$\mu_3 (Rw=100)$	0	0	0	0	1
$\mu_4 (W=50)$	0	0	0	1	0

对各段按 $Z = A \circ R$ 进行合成计算:

第一段: 取权值 $A_I = \{ 0.15, 0.2, 0.5, 0.15 \}$

$$R_I = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.2165 & 0.2835 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

结果得

$$Z_I = \{ 0.2 \ 0.5 \ 0.2 \ 0 \ 0 \}$$

归一化后 $Z_I = \{ \frac{0.2}{0.9} \ \frac{0.5}{0.9} \ \frac{0.2}{0.9} \ 0 \ 0 \} = \{ 0.22 \ 0.56 \ 0.22 \ 0 \ 0 \}$

第二段: 取权值 $A_{II} = \{ 0.25 \ 0.5 \ 0.15 \ 0.1 \}$

$$R_{II} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.0935 & 0.4065 & 0.25 & 0.25 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

结果得

$$Z_{II} = \{ 0.094, 0.4065, 0.25, 0.25, 0 \}$$

归一化后

$$Z_{II} = \{ 0.1 \ 0.40 \ 0.25 \ 0.25 \ 0 \}$$

第三段: 取权值

$$A_{III} = \{ 0.55 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.15 \}$$

同理计算结果为:

$$Z_{III} = \{ 0 \ 0 \ 0.1 \ 0.15 \ 0.55 \}$$

归一化后

$$Z_{III} = \{ 0 \ 0 \ 0.125 \ 0.188 \ 0.687 \}$$

按最大隶属度原则进行归类:

第一段: 以 $Z_2=0.56$ 的隶属度属于“好”类;

第二段: 以 $Z_2=0.40$ 的隶属度属于“好”类;

第三段: 以 $Z_5=0.687$ 的隶属度属于“很差”类。

下面进行质量评价检验:

$$\eta(Z_I, Z_0) = 1 - \frac{1}{5-1} (1 \times 0.56 + 2 \times 0.22) = 0.75$$

$$\eta(Z_{II}, Z_0) = 1 - \frac{1}{5-1} (1 \times 0.4 + 2 \times 0.25 + 3 \times 0.25) = 0.59$$

$$\eta(Z_{III} Z_0) = 1 - \frac{1}{5-1} (2 \times 0.125 + 3 \times 0.188 + 4 \times 0.68) = 0.11$$

上述结果表明, 三个区段比较, 第一段质量最好, 第三段质量最差。

$$E(Z_I) = \frac{0.56}{3 \times 0.56} = 0.33$$

$$E(Z_{II}) = \frac{0.4}{4 \times 0.4} = 0.25$$

$$E(Z_{III}) = \frac{0.687}{3 \times 0.687} = 0.33$$

上述结果表明, 除第二段元素较分散外, 其余都较集中。

给定 α 、 γ 值: 取 $\alpha=0.15$, $\gamma=0.2$

第一段: $\eta(Z_I Z_0) = 0.75$ $[\beta_1 \pm 0.15] = (0.6 \quad 0.9)$, 接受判定;

第二段: $\eta(Z_{II} Z_0) = 0.59$ $[\beta_2 \pm 0.15] = (0.6 \quad 0.9)$, 拒绝判定;

第三段: $\eta(Z_{III} Z_0) = 0.11$ $[\beta_3 \pm 0.15] = (0 \quad 0.15)$, 接受判定。

元素密集度皆满足要求。

综合上述检验, 除第二段外, 其余都接受原综合评判。本方法所得结果与文献(1)中的结果一致。从资料上分析, 第二段为岩溶化岩层, 沿层面及节理面溶蚀严重并有夹泥, 挖掘隧洞时有塌方现象, 因此本段应进一步工作, 将质量较差的地段划出, 重新进行评定。

四、结 语

1. 模糊集理论是L. A. Zadeh于1965年首创的, 它的产生是适应传统数学方法无法恰当地模拟复杂现象的需要。因为这些现象或是很难给予确切定义, 或是它们包含着实质上是模糊的相互关系。模糊集理论主要是用来获得对现实世界一些过程的深入认识。地质科学中存在着大量的模糊现象, 也为模糊数学在地学领域提供了广阔的应用前景。本文提出的岩体质量综合评价方法, 是一个初步尝试, 特别是质量评价的实用性尚待实践检验。文中的贴近度概念从几何意义上看是反映元素分布重心与 Z_0 的距离, 元素密集度则是表明元素分布范围的大小。

2. 文中提出以岩体结构类型作为给定权值的依据, 给出了权值的建议值。权值的大小对综合评判结果的影响是较大的, 究竟如何给定权值还值得讨论。

参 考 文 献

- [1] 谷德振: 《岩体工程地质力学基础》, 北京, 科学出版社, 1979年
- [2] 曹立明: 《Fuzzy集及其运算》, H. L. 齐默曼贺词, 《模糊数学创刊号》, 1981年
- [3] 王靖涛: 模糊集合论在岩体综合评价和工程分类上的应用, 《岩土力学》, 1982(2)
- [4] 陶振宇, 彭祖贻: 模糊数学在岩石工程分类中的应用, 《岩土工程学报》, 1980(1)
- [5] 贺仲雄编: 《模糊数学及其应用》, 天津科学技术出版社, 1983