

岩石边坡稳定性和 Fuzzy 综合评判法*

刘端伶¹ 谭国焕² 李启光² 徐 钺² 王元汉¹

(¹华中理工大学土木工程系 武汉 430074) (²香港大学土木工程系岩石工程研究中心 香港)

摘要 采用 Fuzzy 数学方法, 充分考虑工程实际经验, 建立了 Fuzzy 综合评判模型。根据不同的稳定状态, 将边坡划分为五个等级; 综合分析影响边坡稳定的各种作用因素, 根据它们作用程度的不同, 赋予不同的权值; 采用二级综合评判, 使评判结果更符合实际。

关键词 综合评判, 隶属函数, 权值, 岩石边坡

分类号 TD854.6

1 引言

边坡稳定性分析是不确定性问题, 不仅具有随机性, 也具有模糊性。传统的分析方法多为定值分析法, 没有考虑实际存在的不确定性, 所给的安全系数, 并不能反映分析对象真实的安全度和可靠性。对于这类具有模糊性的事件可以采用模糊数学方法。Fuzzy 综合评判法^[1-3]是从多目标决策中分划出来的一门新的数学方法, 当影响事物的因素较多, 又具有很强的模糊性时, 尤其具有明显的优势。

2 边坡的分类和作用因素的选取

边坡稳定性的分类, 国内外学者皆有不同的标准。考虑本方法的需要, 本文将边坡划分为 5 个等级, 即稳定、较稳定、一般、不稳定和极不稳定, 分别用符号表示为 , , , 和 。

岩石边坡是完全不同于土质边坡的, 它的稳定与否, 不仅取决于岩体内部地质结构, 也取决于外部环境因素的影响, 是多种因素的综合作用。根据已有的研究成果^[4, 5]以及国家规范标准^[6], 遵循重要性、独立性和易测性的原则, 同时考虑实际工程经验^[7, 8], 最后选取 15 个主要的作用因素, 见表 1。

3 隶属函数的构造

表 1 的等级评定标准是“一刀切”的确定性标准, 没有考虑等级间的边界模糊性。而 Fuzzy 综合评判法的优势即在于此, 它通过取隶属函数, 充分考虑等级间的中间过渡状态。遵循文[1, 2]所给出的确定隶属函数的原则, 采用岭形隶属函数, 构建如下的隶属函数。

边坡总坡度:

$$u_I(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 15 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{1}{5}(x - 17.5) & 15 < x < 20 \\ 0 & x > 20 \end{cases} \quad u_{II}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 15 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{1}{5}(x - 17.5) & 15 < x < 20 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{1}{10}(x - 25) & 20 < x < 30 \\ 0 & x > 30 \end{cases}$$

1998年3月2日收到初稿, 1998年4月8日收到修改稿。

* 香港研究资助局(RCC)和国家教委博士点基金资助项目。

作者 刘端伶 简介: 女, 28岁, 硕士, 1989年毕业于镇江船舶学院工业管理工程系, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。

$$u_{III}(x) = \begin{cases} 0 & x < 20 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{10}(x - 25) & 20 < x < 30 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{10}(x - 35) & 30 < x < 40 \\ 0 & x > 40 \end{cases}$$

$$u(x) = \begin{cases} 0 & x < 30 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{10}(x - 35) & 30 < x < 40 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{5}(x - 42.5) & 40 < x < 45 \\ 0 & x > 45 \end{cases}$$

$$u(x) = \begin{cases} 0 & x < 40 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{5}(x - 42.5) & 40 < x < 45 \\ 1 & x > 45 \end{cases}$$

边坡总坡度隶属函数曲线见图 1。

表 1 作用因素等级表
Table 1 The classification table of the effect factors

因素		边坡等级				
		I	II	III	IV	V
地形地貌	边坡总坡度/(°)	< 15	15 ~ 25	25 ~ 35	35 ~ 45	> 45
	切割深度/m	< 30	30 ~ 45	45 ~ 60	60 ~ 80	> 80
地质结构及地质作用	地形	平坦	介于 ,	丘陵	介于 ,	高陡
	岩性	很好	较好	一般	较差	很差
	坡向与岩层产状关系	很有利	有利	一般	不利	很不利
	内摩擦角/(°)	> 37	37 ~ 29	29 ~ 19	19 ~ 13	< 13
	粘聚力/MPa	> 0.22	0.22 ~ 0.12	0.12 ~ 0.08	0.08 ~ 0.05	< 0.05
	地表水体影响	无	微	较明显	较强烈	强烈
	岩体透水性能	很好	好	一般	较差	差
	风化作用	无	微	弱	较强	强
	坡脚冲刷特征	无	微	弱	较强	强
	气候因素	日最大降雨量/mm	< 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80
温度影响		无	微	弱	较强	强
其他因素	最大地震烈度	< 3	3 ~ 5	5 ~ 7	7 ~ 8	> 8
	人为因素影响	无	微	弱	较强	强

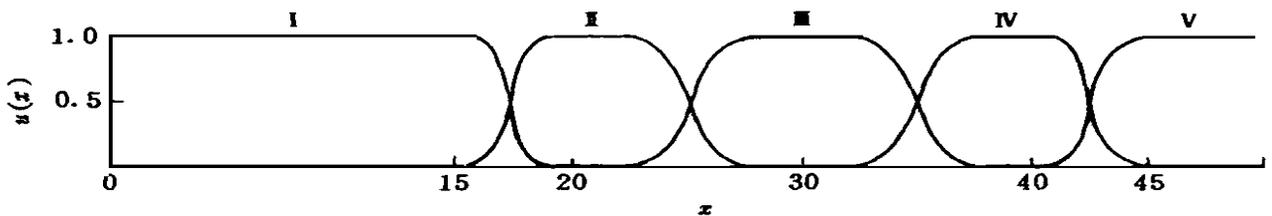


图 1 边坡总坡度隶属函数曲线

Fig. 1 Subordination function curves of slope inclined angles

对切割深度等因素仅画出隶属函数曲线, 函数表达式可由函数曲线直接写出, 见图 2~6。

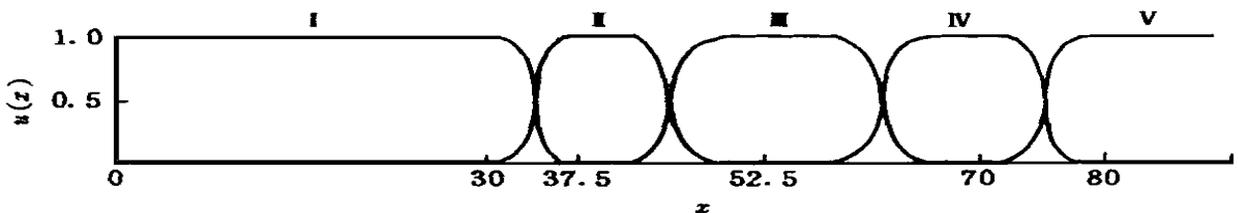


图 2 切割深度隶属函数曲线

Fig. 2 Subordination function curves of surface crack depths

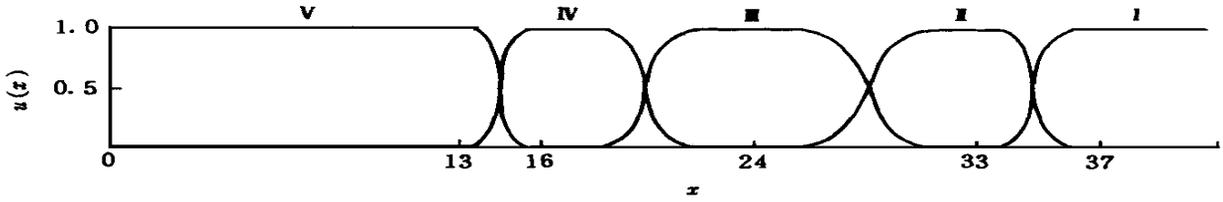


图 3 内摩擦角隶属函数曲线

Fig. 3 Subordination function curves of internal friction angles

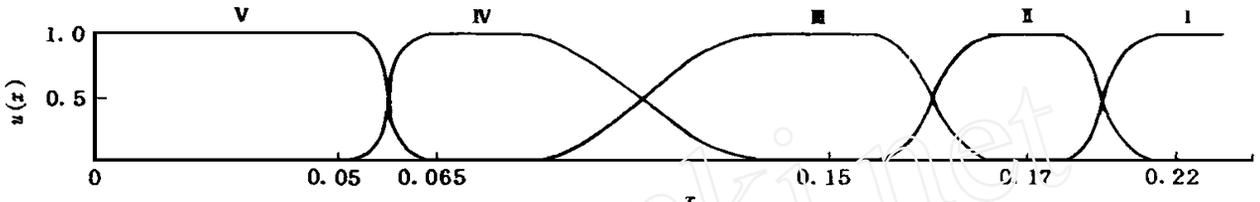


图 4 粘聚力隶属函数曲线

Fig. 4 Subordination function curves of cohesion

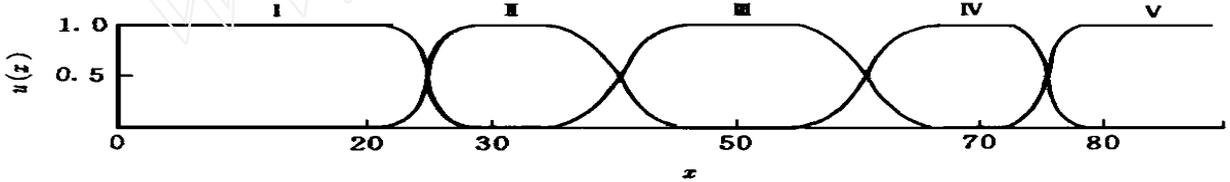


图 5 日最大降雨量隶属函数曲线

Fig. 5 Subordination function curves of the maximum daily rainfall

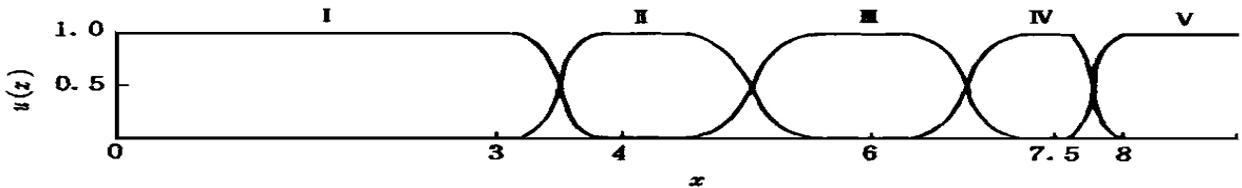


图 6 最大地震烈度隶属函数曲线

Fig. 6 Subordination function curves of the maximum earthquake intensity

从表 1 可以看到，所取因素指标有两种：定量指标和定性指标^[9]。定量指标前面已建立了代表其隶属度的隶属函数；对定性指标可按一定准则作数量化处理。本文采用分级法^[1]来评定它们的模糊矩阵 R 。即将因素分成 5 个等级：优(0.9)、良(0.7)、中(0.5)、差(0.3)、劣(0.1)，并按赋值标准给出评定值。再采用梯形隶属函数，构建隶属函数如下：

$$u(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.15 \\ 2.5 - 10x & 0.15 < x < 0.25 \\ 0 & x > 0.25 \end{cases} \quad u(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.15 \\ 10x - 1.5 & 0.15 < x < 0.25 \\ 1 & 0.25 < x < 0.35 \\ 4.5 - 10x & 0.35 < x < 0.45 \\ 0 & x > 0.45 \end{cases}$$

$$u(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.35 \\ 10x - 3.5 & 0.35 < x < 0.45 \\ 1 & 0.45 < x < 0.55 \\ 6.5 - 10x & 0.55 < x < 0.65 \\ 0 & x > 0.65 \end{cases} \quad u(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.55 \\ 10x - 5.5 & 0.55 < x < 0.65 \\ 1 & 0.65 < x < 0.75 \\ 8.5 - 10x & 0.75 < x < 0.85 \\ 0 & x > 0.85 \end{cases}$$

$$u(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.75 \\ 10x - 7.5 & 0.75 < x < 0.85 \\ 1 & x > 0.85 \end{cases}$$

隶属函数曲线见图 7。

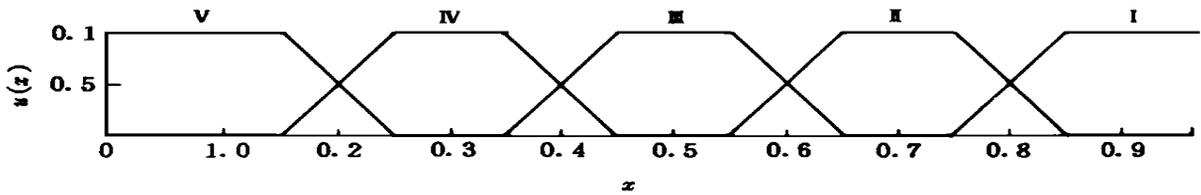


图 7 隶属函数曲线

Fig. 7 Subordination function curves

4 数学模型

当按表 1 所列考虑的 5 个等级和 4 类因素时, 则

等级论域为 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{ , , , , \}$

因素论域为 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$

U_1 是地形地貌因素, 包括 3 个子因素; U_2 是地质因素, 包括 8 个子因素; U_3, U_4 分别为气候因素和其他因素, 均包括两个子因素。

根据每类、每项因素的重要性, 赋予一相应的权值, 确定权重集合 A 。权值的选取方法很多, 本文采用判断矩阵法^[10]确定各权值, 见表 2。

表 2 作用因素的两级权值

Table 2 The two stage index values of the effect factors

各因素指标及代号		作用因素的两级权值	
		一级评判 权值分配	二级评判 权值分配
地形地貌 (U_1)	边坡总坡度 (u_{11})	0.32 (a_{11})	0.13 (a_1)
	切割深度 (u_{12})	0.32 (a_{12})	
	地形 (u_{13})	0.36 (a_{13})	
		1	
地质结构及地质作用 (U_2)	岩性 (u_{21})	0.48 (a_{21})	0.62 (a_2)
	坡向与岩层产状关系 (u_{22})	0.13 (a_{22})	
	内摩擦角 (u_{23})	0.04 (a_{23})	
	粘聚力 (u_{24})	0.04 (a_{24})	
	地表水体影响 (u_{25})	0.11 (a_{25})	
	岩体透水性能 (u_{26})	0.11 (a_{26})	
	风化作用 (u_{27})	0.04 (a_{27})	
	坡脚冲刷特征 (u_{28})	0.05 (a_{28})	
		1	
气候因素 (U_3)	日最大降雨量 (u_{31})	0.75 (a_{31})	0.15 (a_3)
	温度影响 (u_{32})	0.25 (a_{32})	
		1	
其他因素 (U_4)	最大地震烈度 (u_{41})	0.45 (a_{41})	0.10 (a_4)
	人为因素影响 (u_{42})	0.55 (a_{42})	
		1	
		1	

5 工程实例

边坡位于走向北东—南西向的单斜丘陵之南东翼。地表自然坡度呈北陡(约 70°)南缓(约 35°)状。地形切

割深 70 ~ 100 m, 坡脚处已被开挖为主干公路。

组成岩性以泥岩为主夹泥灰岩, 有少量灰岩薄层; 其上被厚 0.5 ~ 1.2 m 的第四系松散层覆盖。岩层倾向与地表坡向一致。倾角 25 ~ 36°。地下水类型主要为层间裂隙水。

该区地震活动较频繁, 平均每 5 ~ 10 a 发生一次中强地震。历史上最大地震震级及烈度分别为 5.75 级及 7 度强。

区内降水丰富。多年最大日降水量达 171.0 mm, 连续降雨日 13 d, 其间总降雨量 304.1 mm, 大雨过后, 常有诱发滑坡发生。

综合评判步骤如下:

(1) 单因素评判

对所有的子因素按前面的隶属函数评定, 即可得出各单因素评判结果。见表 3。

表 3 单因素评判结果
Table 3 The evaluation results of single factor

因素	等级隶属度					
	1	2	3	4	5	6
U ₁	u ₁₁	0	0	0.5	0.5	0
	u ₁₂	0	0	0	0.5	1.0
	u ₁₃	0	0.5	1.0	0.5	0
U ₂	u ₂₁	0	0.35	0.7	0.9	0
	u ₂₂	0	0	0.8	1.0	0
	u ₂₃	0	0	0.9	0.3	0
	u ₂₄	0	0	0.2	0.9	0
	u ₂₅	1.0	0.9	0	0	0
	u ₂₆	0	0.6	0.8	0	0
	u ₂₇	1.0	0	0	0	0
	u ₂₈	0	0.6	0.8	0.3	0
U ₃	u ₃₁	0	0	0	1.0	0
	u ₃₂	0	0.9	0	0	0
U ₄	u ₄₁	0	0	0.5	0.5	0
	u ₄₂	0	0	0	1.0	0

(2) 一级综合评判

分别按每个因素子集进行综合评判, 求出相应的子集等级模糊向量 B_k。

$$b_{11} = (0.32 \quad 0.32 \quad 0.36) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1.0 \\ 0 & 0.5 & 1.0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} = (0 \quad 0.18 \quad 0.52 \quad 0.5 \quad 0.32)$$

$$b_{12} = (0.48 \quad 0.13 \quad 0.04 \quad 0.04 \quad 0.11 \quad 0.11 \quad 0.04 \quad 0.05) \begin{bmatrix} 0 & 0.35 & 0.7 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.9 & 0 \\ 1.0 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.8 & 0 & 0 \\ 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.8 & 0.3 & 0 \end{bmatrix} = (0.15 \quad 0.363 \quad 0.612 \quad 0.625 \quad 0)$$

$$b_{13} = (0.75 \quad 0.25) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0 \quad 0.225 \quad 0 \quad 0.75 \quad 0)$$

$$b_{14} = (0.45 \quad 0.55) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \end{bmatrix} = (0 \quad 0 \quad 0.225 \quad 0.775 \quad 0)$$

(3) 二级综合评判

将四类因素作为四个单因素那样进行总的二级评判。

$$\underline{B} = (\underline{b}_1 \quad \underline{b}_2 \quad \underline{b}_3 \quad \underline{b}_4 \quad \underline{b}_5) = \underline{A} \cdot \underline{R}$$

$$\underline{B} = (0.13 \quad 0.62 \quad 0.15 \quad 0.10) \begin{bmatrix} 0 & 0.18 & 0.52 & 0.5 & 0.32 \\ 0.15 & 0.363 & 0.612 & 0.625 & 0 \\ 0 & 0.225 & 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0.225 & 0.775 & 0 \end{bmatrix} = (0.09 \quad 0.28 \quad 0.47 \quad 0.64 \quad 0.04)$$

(4) 评价指标的处理

根据最大隶属度原则,在 \underline{B} 矩阵中择其最大者,相对应的稳定等级就是该边坡综合评判的最终结果。 $b_{\max} = 0.64$,说明该边坡稳定性差,目前处于不稳定状态。事实正如此,该边坡近年来在雨季曾多次产生滑动。

6 结 语

边坡工程具有很强的综合性,它的稳定性受到众多因素的影响。有很多因素既难以确定,又难以定量估计。Fuzzy 综合评判法原则上能容纳一切影响因素信息,对于多因素的综合评判问题具有明显的优势。通过工程实例分析表明,本文理论模型是正确的,方法合理可行。

参 考 文 献

- 1 张 跃. 模糊数学方法及其应用. 北京: 煤炭工业出版社, 1992
- 2 李彰明. 模糊分析在边坡稳定性评价中的应用. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 490 ~ 495
- 3 王元汉, 李卧东, 李启光等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 493 ~ 501
- 4 Vanmarcke E H. Probabilistic modeling of soil profiles. ASCE J. Geotech. Eng. Div., 1977, 103(11): 1227 ~ 1246
- 5 Kandel A, Byatt W J. Fuzzy processes. Fuzzy Sets and Systems, 1980, 4: 117 ~ 152
- 6 董学晟. 工程岩体分级标准的研究. 长江科学院院报, 1992, 9(4): 1 ~ 9
- 7 Schuster R L [美]. Landslides Analysis and Control. 铁道部科学研究院西北研究所译. 北京: 中国铁道出版社, 1987
- 8 温特科恩 H F, 方晓阳 [美] 主编. 基础工程手册. 钱鸿缙, 叶书麟译校. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983
- 9 胡毓达. 实用多目标最优化. 上海: 上海科学技术出版社, 1990
- 10 乔伊科奇 A [美]. 多目标决策分析. 王寅初译. 北京: 航空工业出版社, 1987

THE STABILITY OF ROCK SLOPE AND FUZZY COMPREHENSIVE EVALUATION METHOD

Liu Duanling¹ Tham L G² Lee P K K² Tsui Y² Wang Yuanhan¹

⁽¹⁾ Department of Civil Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

⁽²⁾ Rock Engineering Research Centre, Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong)

Abstract In order to get more practical uncertain results, according to different stability states, common slopes are divided into five kinds. Every kind of slopes is assigned a value of certain classified standard. A fuzzy assemblage analysis model is obtained based on the relationship of fuzzy equivalency. Because there are many influence factors for the stability of rock slope, the two-stage comprehensive evaluation model and different distribution of index values are adopted. Combined with practical examples, it may be seen that the results of analysis can more fully represent the assessment of the degree of slope stability, and are in good coincidence with the field observation values.

Key words integrative evaluation, subordination functions, index values, rock slope