

基于模糊综合评判的边坡稳定性分析

洪海春¹, 徐卫亚¹, 叶明亮²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098 2. 贵州大学资源与环境学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 在考虑影响边坡稳定性的 10 个主控因素基础上, 进行模糊数学分析并建立一级模糊综合评判模型和二级模糊综合评判模型, 最后采用可视化的编程语言 Visual FoxPro 6.0 编程, 根据具体边坡的实际情况将主控因素的隶属度输入到主界面上, 得到该边坡的稳定性评判结果。研究表明, 两种模糊综合评判模型的评价结果与现场情况吻合, 并且二级模糊综合评判模型优于一级模糊综合评判模型。

关键词: 模糊综合评判, 边坡稳定性, 评判结果

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2005)05-0557-06

在边坡稳定性分析中, 模糊数学分析的意义在于它能使研究人员、生产者、管理者对工程有更全面的认识和把握, 为工程决策提供更为重要、直观和有效的参考依据, 合理控制工程造价和工程风险。

最早将模糊数学引入岩石力学与工程研究领域借以分析天然岩石不确定性的是我国学者陶振宇^[1]和王靖涛^[2], 他们将模糊数学中的模糊评判系统应用于岩石工程分类之中, 提出了建立在 Q 系统分类基础上, 考虑岩体物理力学参数不确定性的岩石分类方法。日本的樱井春埔等也利用模糊数学对岩石分类进行了研究, 同时将模糊数学用于处理边坡问题^[3]。Habibagahi 等^[4]重点考虑了几何参数的模糊性对岩石边坡稳定性分析的影响, 并提出了确定模糊安全系数的方法。

近年来, 我国岩土工程界在应用模糊数学方法研究一些具有模糊性和非确定性的岩土工程问题方面进展较快, 许多学者将模糊数学应用于边坡稳定性分析。李彰明^[5]针对边坡稳定性的普遍问题, 根据国家标准、行业规范、前人有关研究, 遵循重要性、独立性和易测性原则, 建立了边坡稳定性分析的模糊综合评价模型, 并构造了相关因素边界值矩阵。汪益敏^[6]在考虑影响边坡稳定性因素模糊性的基础上, 采用多指标因素模糊综合评价方法, 对边坡岩体稳定质量进行了多级模糊综合评判研究。刘端伶等^[7]采用模糊数学方法, 充分考虑工程实际经验, 建立了二级模糊数学综合评判模型。张永波等^[8]根据对古交市炉峪口煤矿斜坡工程的地质调查研究, 确定了影响该斜坡稳定性的 4 类 20 项主要影响因素, 并应用两级模糊综合评判法对炉峪口煤矿斜坡稳定性进行了综合评价, 结果较好地反映了该斜坡的实际稳定程度。徐卫亚^[9]通过对边坡稳定性分析中模糊因素的研究, 提出了一种新的边坡模糊稳定性分析方法, 建立了边坡稳定性分析的模糊数学模型, 并给出了相应的求解方法。其他相关问题文献 [10, 11] 中也有介绍。

本文对影响贵阳—遵(义)高等级公路边坡稳定性的 10 个主控因素进行模糊数学分析并建立一级模糊综合评判模型和二级模糊综合评判模型, 最后采用可视化编程语言 Visual FoxPro 6.0 编程, 根据具体边坡的实际情况将主控因素的隶属度输入到主界面上可得到该边坡的稳定性评判结果。

1 一级模糊综合评判模型

1.1 主控因素集和评价集^[12, 13]

模糊综合评判是应用模糊变换原理和最大隶属度原则, 综合考虑被评价事物或其属性的主控因素, 进而对其进行等级或类别评判。首先先确定两个模糊子集, 一个是模糊数学综合评判等级决策评价集:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} = \{\text{危险}, \text{比较危险}, \text{比较稳定}, \text{稳定}\}$$

式中 n 为评价等级数,此处 $n = 4$. 另一个是评价对象的主控因素集:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\} = \{\text{设计坡高, 原始地形坡度, 岩层倾角, 设计开挖角, 开挖角与倾角关系, 边坡结构, 软弱面影响, 降雨强度, 植被覆盖情况, 岩土风化程度}\}$$

式中 m 为评价因子数,此处 $m = 10$.

1.2 隶属度的确定

在模糊数学中是以隶属度来描述事物的模糊界限的. 根据隶属度的建立原则,本文针对变量的不同类型,分别采用专家评定法和公式法确定隶属度^[14].

1.2.1 离散型变量的隶属度

对开挖角 γ 与倾角 α 关系、边坡结构、软弱面影响、降雨强度、植被覆盖情况和岩土风化程度 6 个离散型变量,采用专家评定法确定,其值见表 1.

表 1 离散型变量的隶属度取值

Table 1 Value of membership grades of discrete variables

离散型变量	变量特征	(5) α 与 γ 关系		(6) 边坡结构				(7) 软弱面影响				(8) 降雨强度			
		$\alpha < \gamma$ (A)	$\alpha > \gamma$ (B)	顺倾 向(A)	反倾 向(B)	斜交 (C)	垂直 (D)	强 (A)	较强 (B)	一般 (C)	无 (D)	大 (A)	较大 (B)	较小 (C)	小 (D)
隶属度 μ	危险(I)	0.75	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.80	0.30	0.00	0.00	0.75	0.25	0.00	0.00
	比较危险(II)	0.25	0.00	0.25	0.00	0.30	0.00	0.20	0.50	0.20	0.00	0.25	0.55	0.20	0.00
	比较稳定(III)	0.00	0.25	0.00	0.25	0.50	0.25	0.00	0.20	0.50	0.00	0.00	0.20	0.55	0.10
	稳定(IV)	0.00	0.75	0.00	0.75	0.20	0.75	0.00	0.00	0.30	1.00	0.00	0.00	0.25	0.90
离散型变量	变量特征	(9) 植被覆盖情况				(10) 岩土风化程度									
		不发育(A)	发育差(B)	较发育(C)	发育(D)	强烈风化(A)	中等风化(B)	微风化(C)	未风化(D)						
隶属度 μ	危险(I)	0.70	0.25	0.00	0.00	0.85	0.15	0.00	0.00						
	比较危险(II)	0.30	0.65	0.10	0.00	0.15	0.80	0.05	0.00						
	比较稳定(III)	0.00	0.10	0.65	0.30	0.00	0.05	0.80	0.15						
	稳定(IV)	0.00	0.00	0.25	0.70	0.00	0.00	0.15	0.85						

1.2.2 连续型变量的隶属度

对边坡设计坡高、原始地形坡度、岩层倾角和设计开挖角 4 个连续型变量,采用公式法确定其隶属度,建立隶属度与指标数值之间的函数关系,即隶属函数. 隶属函数的种类很多,有正态型、戒上型、戒下型和降半型等. 本文根据各因子数据的分布特征,采用“降半梯形”分布、“升半梯形”分布和“梯形”分布来描述连续型变量的隶属函数,给出便于编程的计算公式如下.

1.2.2.1 设计坡高 h

$$\mu_{1I} = \begin{cases} 0 & h \leq 50 \\ \frac{h-50}{10} & 50 < h < 60 \\ 1 & h \geq 60 \end{cases} \quad \mu_{1II} = \begin{cases} 0 & h \leq 30 \\ \frac{h-30}{10} & 30 < h < 40 \\ 1 & 40 \leq h \leq 50 \\ \frac{60-h}{10} & 50 < h < 60 \\ 0 & h \geq 60 \end{cases}$$

$$\mu_{1III} = \begin{cases} 0 & h \leq 10 \\ \frac{h-10}{10} & 10 < h < 20 \\ 1 & 20 \leq h \leq 30 \\ \frac{40-h}{10} & 30 < h < 40 \\ 0 & h \geq 40 \end{cases} \quad \mu_{1IV} = \begin{cases} 1 & h \leq 10 \\ \frac{20-h}{10} & 10 < h < 20 \\ 0 & h \geq 20 \end{cases}$$

1.2.2.2 原始地形坡度 β

$$\mu_{2\text{I}} = \begin{cases} 0 & \beta \leq 45 \\ \frac{\beta - 45}{5} & 45 < \beta < 50 \\ 1 & \beta \geq 50 \end{cases}$$

$$\mu_{2\text{II}} = \begin{cases} 0 & \beta \leq 30 \\ \frac{\beta - 30}{5} & 30 < \beta < 35 \\ 1 & 35 \leq \beta \leq 45 \\ \frac{50 - \beta}{5} & 45 < \beta < 50 \\ 0 & \beta \geq 50 \end{cases}$$

$$\mu_{2\text{III}} = \begin{cases} 0 & \beta \leq 15 \\ \frac{\beta - 15}{5} & 15 < \beta < 20 \\ 1 & 20 \leq \beta \leq 30 \\ \frac{30 - \beta}{5} & 30 < \beta < 35 \\ 0 & \beta \geq 35 \end{cases}$$

$$\mu_{2\text{IV}} = \begin{cases} 1 & \beta \leq 15 \\ \frac{20 - \beta}{5} & 15 < \beta < 20 \\ 0 & \beta \geq 20 \end{cases}$$

1.2.2.3 岩层倾角 α

$$\mu_{3\text{I}} = \begin{cases} 0 & \alpha \leq 30 \\ \frac{\alpha - 30}{5} & 30 < \alpha < 35 \\ 1 & 35 \leq \alpha \leq 45 \\ \frac{50 - \alpha}{5} & 45 < \alpha < 50 \\ 0 & \alpha \geq 50 \end{cases}$$

$$\mu_{3\text{II}} = \begin{cases} 0 & \alpha \leq 45 \\ \frac{\alpha - 45}{5} & 45 < \alpha < 50 \\ 1 & \alpha \geq 50 \end{cases}$$

$$\mu_{3\text{III}} = \begin{cases} 0 & \alpha \leq 15 \\ \frac{\alpha - 15}{5} & 15 < \alpha < 20 \\ 1 & 20 \leq \alpha \leq 30 \\ \frac{35 - \alpha}{5} & 30 < \alpha < 35 \\ 0 & \alpha \geq 35 \end{cases}$$

$$\mu_{3\text{IV}} = \begin{cases} 1 & \alpha \leq 15 \\ \frac{20 - \alpha}{5} & 15 < \alpha < 20 \\ 0 & \alpha \geq 20 \end{cases}$$

1.2.2.4 设计开挖角 γ

$$\mu_{4\text{I}} = \begin{cases} 0 & \gamma \leq 50 \\ \frac{\gamma - 50}{10} & 50 < \gamma < 60 \\ 1 & \gamma \geq 60 \end{cases}$$

$$\mu_{4\text{III}} = \begin{cases} 0 & \gamma \leq 10 \\ \frac{\gamma - 10}{10} & 10 < \gamma < 20 \\ 1 & 20 \leq \gamma \leq 30 \\ \frac{40 - \gamma}{10} & 30 < \gamma < 40 \\ 0 & \gamma \geq 40 \end{cases}$$

$$\mu_{4\text{II}} = \begin{cases} 0 & \gamma \leq 30 \\ \frac{\gamma - 30}{10} & 30 < \gamma < 40 \\ 1 & 40 \leq \gamma \leq 50 \\ \frac{60 - \gamma}{10} & 50 < \gamma < 60 \\ 0 & \gamma \geq 60 \end{cases}$$

$$\mu_{4\text{IV}} = \begin{cases} 1 & \gamma \leq 10 \\ \frac{10 - \gamma}{10} & 10 < \gamma < 20 \\ 0 & \gamma \geq 20 \end{cases}$$

1.3 权重的确定

确定各评价因素在边坡稳定性评价中所起作用的大小或重要程度(权重)有多种方法 ,本文主要采用层次排序法(AHP 法) ,经计算得

$A = \{a_1 ,a_2 ,\cdots ,a_{10}\} = \{0.055 \ 0.093 \ 0.093 \ 0.093 \ 0.147 \ 0.149 \ 0.093 \ 0.197 \ 0.025 \ 0.055 \}$

1.4 综合评判结果

评价对象的主控因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 和等级决策评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 的模糊关系用综合评判的变换矩阵 R 表示:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

(1)

由权向量与模糊关系矩阵进行“合成”,得到综合隶属度 B ,通过模糊运算

$$B = A \circ R$$

(2)

模糊评判矩阵 B 求出后,根据最大隶属度原则进行评价,即 $b_{j_0} = \max_{1 \leq j \leq 4} \{b_j\}$ 在 V 中所对应的位置为所求的稳定性等级 v_{j_0} .

2 二级模糊综合评判模型

在复杂的边坡稳定性分析系统中,需要考虑的因素往往很多,如果仅仅采用一级模糊综合评判模型,很难比较系统中事物之间的优劣次序,评判结果可能会有一定的偏差.为了更好地将模糊综合评判运用于边坡稳定性分析,本文同时建立二级模糊综合评判模型,将一级模糊综合评判模型和二级模糊综合评判模型得出的结果进行比较,使模糊综合分析方法更完善.

首先通过一级模糊综合评判求出边坡各大类的稳定性分级模糊向量,组成一个 4×4 阶矩阵,作为二级评判的模糊关系矩阵,再通过二级模糊综合评判,根据最大隶属度原则进行评价.二级模糊综合评判的一般步骤如下.

2.1 划分主控因素集 U

划分因素集 U 得到第 2 级因素集.本文把主控因素集分为 4 大类($N=4$),即 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$. U_1 是地形地貌及人类工程活动因素,包括 5 个子因素($K_1=5$); U_2 是工程地质因素,包括 2 个子因素($K_2=2$); U_3 是气象因素,包括雨水一子因素($K_3=1$); U_4 是其他因素,包括 2 个子因素($K_4=2$).

2.2 初级评判和二级评判

对每个因素子集中的 $K_i (i=1, 2, 3, 4)$ 个因素,按初始模型 $M(\cdot, \oplus)$ 进行综合评判.变换矩阵中单因素的判别,可以参照一级模糊综合评判中的取值来确定.

二级模糊综合评判模型是根据每一大类中每项因素的重要性,赋予某一相应的权值,确定权重集.本文的权重采用试算法并且结合专家意见确定.首先对各评判因子估计一个权重,通过大量边坡实例的试算,检验二级模糊综合评判的结果是否与实际相吻合.如果吻合程度低,再对数值进行调整,直至得到比较满意的结果,最后确定各评判因子的权重,如表 2 所示.从表 2 可以看出: $A_{11} = \{0.25, 0.20, 0.20, 0.20, 0.15\}$, $A_{12} = \{0.65, 0.35\}$, $A_{13} = \{1.00\}$, $A_{14} = \{0.60, 0.40\}$, 而 $A = \{W_1, W_2, W_3, W_4\} = \{0.50, 0.20, 0.20, 0.10\}$.

表 2 主控因素权值

Table 2 Weight of main factors

类别	因素	一级权重分配	二级权重分配
地形地貌及人类工程活动	(1) 设计坡高 h	$a_{11} = 0.25$	$W_1 = 0.50$
	(2) 原始地形坡度 β	$a_{12} = 0.20$	
	(3) 岩层倾角 α	$a_{13} = 0.20$	
	(4) 边坡设计开挖角 γ	$a_{14} = 0.20$	
	(5) 开挖角与倾角关系	$a_{15} = 0.15$	
工程地质	(6) 边坡结构	$a_{21} = 0.65$	$W_2 = 0.20$
	(7) 软弱面影响	$a_{22} = 0.35$	
气象(雨水)	(8) 降雨强度	$a_{31} = 1.00$	$W_3 = 0.20$
其他因素	(9) 植被覆盖情况	$a_{41} = 0.60$	$W_4 = 0.10$
	(10) 岩土风化程度	$a_{42} = 0.40$	

3 模糊综合评判实现

3.1 数据库设计

利用 Visual FoxPro 6.0 实现模糊综合评判.在该系统只有 1 个 1.dbc 数据库,库里只有 1 个 mima.dbf 表,包含次数和密码 2 个字段.次数字段用来记录在密码界面输入密码的次数,密码字段用以存放管理员修改后的最终密码.

3.2 用户表单设计

用户表单设计包括设计开始表单、密码表单、口令表单、运行表单、结果表单 5 个组成部分。

4 工程应用实例

贵(阳)—遵(义)高等级公路是“西南出海大通道”上的骨干路段,线路地质条件复杂,在典型的喀斯特地形地貌条件下建设高等级公路,所遇到的岩土工程问题比较多,其中工程边坡安全问题尤为突出,工程边坡是否稳定对地质环境的影响愈来愈大。本文选取贵(阳)—遵(义)高等级公路有代表性的边坡(设计高度 $h \geq 10\text{ m}$),沿线进行现场勘查和地质测绘工作,对所调查的 35 个边坡的资料进行整理,利用前面建立的一级模糊综合评判模型和二级模糊综合评判模型,在编制的 Visual FoxPro 6.0 程序中根据具体的边坡情况输入相应的隶属度,得出稳定性评价结果,见表 3。从表 3 可以看出,大多数边坡是稳定(7 个)和比较稳定(12 个)的,少数是危险(4 个)和比较危险(12 个)的。经过加固处理以后,稳定和比较稳定的边坡为 28 个,其余 7 个属比较危险或危险边坡。结果与现场稳定性评价基本吻合。工程实践分析表明,二级模糊综合评判模型优于一级模糊综合评判模型。建议有针对性地采取锚固、喷浆、支挡、植被或削方减载中的某一措施或多种措施相结合加固边坡。

表 3 评价结果

Table 3 Evaluated results										
边坡 编号	设计 高度/m	地形坡度 (°)	岩层 倾角(°)	边坡开 挖角(°)	边坡 结构	软弱面 控制	降雨 强度	植被覆 盖情况	岩土风 化程度	危险 级别
GZ01	22	35	9	63	切向坡	C	B	B	C	Ⅱ
GZ02	11	25	18	40	顺向坡	C	B	B	D	Ⅱ
GZ03	26	50	59	55	反向坡	D	B	B	D	Ⅳ
GZ04	19	25	17	76	反向坡	C	B	B	A	Ⅲ
GZ05	24	30	12	80	反向坡	C	B	C	C	Ⅲ
GZ06	20	30	12	85	斜向坡	D	B	C	C	Ⅲ
GZ07	20	60	71	85	斜向坡	C	B	B	D	Ⅱ
GZ08	29	60	75	85	切向坡	B	A	C	B	I
GZ09	11	15	18	70	顺向坡	C	B	C	B	I
GZ10	20	40	18	80	切向坡	C	B	D	B	Ⅱ
GZ11	19	40	25	73	切向坡	B	B	B	C	Ⅱ
GZ12	10	20	31	80	切向坡	C	B	C	D	Ⅳ
GZ13	19	35	25	70	反向坡	B	B	B	C	Ⅱ
GZ14	12	30	43	85	切向坡	B	B	C	B	I
GZ15	10	20	36	80	切向坡	D	B	C	D	Ⅳ
GZ16	15	15	27	87	切向坡	D	C	A	D	Ⅳ
GZ17	15	50	10	86	切向坡	D	B	C	C	Ⅳ
GZ18	10	65	40	74	斜向坡	C	B	D	C	Ⅲ
GZ19	15	20	29	75	反向坡	C	C	B	C	Ⅲ
GZ20	18	20	16	80	顺向坡	C	B	B	D	I
GZ21	10	20	15	70	反向坡	C	C	B	C	Ⅲ
GZ22	20	20	17	80	切向坡	C	C	B	B	Ⅲ
GZ23	10	30	6	70	反向坡	C	B	C	B	Ⅲ
GZ24	15	25	32	60	斜向坡	D	B	D	C	Ⅲ
GZ25	20	45	5	80	切向坡	C	B	C	B	Ⅱ
GZ26	15	25	11	85	反向坡	B	B	C	C	Ⅲ
GZ27	15	40	10	80	切向坡	B	B	C	B	Ⅱ
GZ28	25	40	5	70	切向坡	C	B	B	B	Ⅱ
GZ29	18	40	31	75	斜向坡	B	B	B	B	Ⅱ
GZ30	20	40	57	67	斜向坡	C	B	D	C	Ⅲ
GZ31	20	30	67	65	反向坡	D	B	B	A	Ⅳ
GZ32	20	35	63	80	反向坡	C	B	B	B	Ⅱ
GZ33	15	50	46	80	斜向坡	C	B	C	B	Ⅱ
GZ34	12	20	61	60	顺向坡	D	B	D	B	Ⅳ
GZ35	15	75	22	80	斜向坡	D	B	C	C	Ⅲ

注:表中的 A、B、C、D 与表 1 中的 A、B、C、D 相对应。

5 结 论

在考虑影响边坡稳定性的 10 个主控因素基础上,进行模糊数学分析并建立相应的一级模糊综合评判模型和二级模糊综合评判模型,最后采用可视化的编程语言 Visual FoxPro 6.0 编程.结合贵(阳)—遵(义)高等级公路工程边坡进行实例分析,两种模糊综合评判模型的评价结果与现场实际情况都比较吻合,但是,二级模糊综合评判模型优于一级模糊综合评判模型.

参考文献:

- [1] 陶振宇,彭祖赠.模糊数学在岩石工程中的应用[J].岩土工程学报,1981,3(1):36—45.
- [2] 王靖涛.模糊集合论在岩体的综合评价和工程分类上的应用[J].岩土力学,1980,3(1):25—30.
- [3] 蒋中明.重大工程岩石力学模糊分析理论与方法研究[D].南京:河海大学,2003.
- [4] HABIBAGAH G, SHAHGHOLIA R. Reliability analysis of rock slope using theory of fuzzy sets[A]. In: Proc 8th Int Symp On Numerical Models in Geomechanics[C]. Rome: Balkema Press, 2002. 547—551.
- [5] 李彰明.模糊分析在边坡稳定性评价中的应用[J].岩石力学与工程学报,1997,16(5):490—495.
- [6] 汪益敏.边坡岩体稳定质量的模糊评判[J].华南理工大学学报,1997,15(4):110—115.
- [7] 刘端伶,谭国焕,李启光,等.岩石边坡稳定性和 Fuzzy 综合评判法[J].岩石力学与工程学报,1999,18(2):170—175.
- [8] 张永波,时红.斜坡稳定性两级模糊综合评判[J].工程地质学报,2000,8(1):31—34.
- [9] 徐卫亚,蒋中明,石安池.基于模糊集理论的边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2003,25(4):409—413.
- [10] 殷正钢,唐礼忠.岩基稳定性的模糊综合评判[J].山西建筑,2005,31(2):47—49.
- [11] 刘春,白世伟.岩体风化程度两级模糊综合评判研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):252—256.
- [12] 肖位枢.模糊数学基础及应用[M].北京:航空工业出版社,1992. 121—195.
- [13] 张跃,邹寿平,宿芬.模糊数学方法及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1992. 146—180.
- [14] 洪海春.关(岭)—兴(义)高等级公路工程边坡稳定性分析与危险性预测[D].贵阳:贵州工业大学,2004.

Slope stability analysis based on fuzzy comprehensive assessment

HONG Hai-chun¹, XU Wei-ya¹, YE Ming-liang²

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Resources and Environment, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract The one-level fuzzy comprehensive assessment model and the two-level fuzzy comprehensive assessment model were developed for slope stability analysis based on fuzzy mathematics analysis with 10 main influencing factors taken into account. With the help of Visual FoxPro 6.0, the result of slope stability analysis was displayed after the membership grades of main influencing factors were input into the main interface according to the reality of the slope. The research shows that the results from the two comprehensive assessment models are in good agreement with field situation, and that the two-level fuzzy comprehensive assessment model is superior to the one-level fuzzy comprehensive assessment model.

Key words fuzzy comprehensive assessment; slope stability; result of assessment