

# 模糊分析在边坡稳定性评价中的应用\*

李彰明

(广东工业大学土木系 广州 510090)

**摘要** 构造了边坡稳定性分析的模糊综合评价模型及关联因素边界值矩阵,通过对某一大型露天矿边坡工程地质条件调查与物理力学性质测试研究,得到各关联因素的实测值,进而评价了该边坡的稳定性。结果表明该评价方法能更全面地考虑实际边坡问题的非确定性属性,评价结果合理。

**关键词** 模糊分析, 边坡稳定性, 评价模型, 工程实例

## 1 引言

岩土质边坡是一种自然地质体,其工程性质因时间、空间而异,十分复杂。这种变异性与复杂性容易造成人们对边坡性质及稳定性认识上的差异,给边坡稳定性分析带来很大困难。大量的力学试验与工程实践表明,边坡性质及稳定性的界限实际上不是很清楚,具有相当的模糊性。

本文基于模糊综合评价基本方法<sup>[1, 2]</sup>,针对边坡稳定性的普遍问题,建造模糊综合评价模型并构造稳定性边界值矩阵,进而结合某大型化工露天矿边坡稳定性的实际问题,测取关联因素实际值,进行稳定性模糊综合评价,以对露天开采的优化设计、滑坡防治提供依据。

## 2 模糊综合评价法<sup>[1, 2]</sup>

模糊综合评价是应用模糊变换原理和最大隶属度原则,综合考虑被评事物或其属性的相关因素,进而进行等级或类别评价。

先确定两个模糊子集。一个是模糊综合评价等级决择评价集合  $V$  :

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\} \quad (1)$$

式中:下标  $n$  为评价等级数;另一个是评价对象的关联因素集  $U$  :

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\} \quad (2)$$

式中:下标  $m$  为关联因素个数。

$u_i$  的单因素评价子集为

1996年11月11日收到初稿,1996年12月13日收到修改稿。

\* 属湖北省“九五”重点科技发展指导性计划项目17号(成果登记号:EK950411)。

$$r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}) \quad (3)$$

$m$  个关联因素的评价子集的集合构成总的评价矩阵  $\underline{R}$  :

$$\underline{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

由  $(U, V, \underline{R})$  构成了一个综合评价模型, 或称综合评价空间。

各关联因素对于所评价的事物或其属性具有不同的重要程度, 可用模糊子集  $\underline{A}$  表示:

$$\underline{A} = (a_1, a_2, \dots, a_m) \quad 0 \leq a_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中:  $a_i$  为  $u_i$  对  $\underline{A}$  的隶属度, 是单因素  $u_i$  在总评价中影响程度的度量, 作为权系数, 需满足

$$\sum_{i=1}^m a_i = 1。$$

于是, 可进行模糊综合评价  $\underline{B}$  :

$$\underline{B} = \underline{A} \circ \underline{R} \quad (6)$$

记  $\underline{B} = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ , 它是  $V$  上的一个模糊子集。式中,  $\circ$  为广义模糊运算,  $b_j (j = 1, 2, \dots, m)$  简记为模型  $M(\dot{*}, \dot{*})$ , 其中  $\dot{*}$  为广义模糊“与”运算,  $\dot{+}$  为广义模糊“或”运算,  $M(\dot{*}, \dot{*})$  可表为无穷多具体的形式, 但在实际运用中通常用主因素突出型  $M(\bullet, V)$ ,  $M(\bullet, \oplus)$ , 加权平均型  $M(\bullet, \oplus)$ ,  $M(\bullet, +)$ , 主因素决定型  $M(\bullet, V)$  以及极小型  $M(\text{乘幂}, \bullet)$ 。其中前 5 个模型按最大隶属度原则选择最大的  $b_j$  所对应的等级  $V_j$  就得到各自的评价结果。

在进行二级指标评价中, 可将前一级评价矩阵  $\underline{R}$  中各因素  $r_{ij}$  特性指标分别取最大值、最小值和平均值作为评判指标, 从而形成二级评价矩阵  $\underline{R}_1$ , 再与相应的因素重要程度模糊子集  $\underline{A}_1$  (一般可取对应的隶属度均为  $1/3$ ) 进行合成运算, 同样亦可得二级综合评价结果。

### 3 边坡稳定性模型综合评价模型

边坡稳定性程度组成一个集合, 用 5 个等级的决择评价集合  $V$  表示, 即  $V_1$ : 很好,  $V_2$ : 较好,  $V_3$ : 基本稳定,  $V_4$ : 较差,  $V_5$ : 很差。

根据国家标准<sup>[3]</sup>、行业规范<sup>[4]</sup>、前人有关研究<sup>[5-7]</sup>以及我们的实践与分析, 确定出与边坡稳定性相关联的主要因素为 10 个, 由式(2), 即有  $u_1$ : 地形,  $u_2$ : 坡面与主要结构面夹角,  $u_3$ : 岩体完整性, 其指标为 节理裂隙间距或 龟裂系数  $K_v$ ,  $u_4$ : 岩体基本质量指标  $Q$ ,  $u_5$ : 渗水压力,  $u_6$ : 爆破时质点振动速度,  $u_7$ : 风化程度,  $u_8$ : 自然安息角与边坡角之差,  $u_9$ : 边坡角,  $u_{10}$ : 初始地应力; 并得到这些关联因素的边界值, 如表 1 所示。该表即构成了边界值矩阵。

由表 1 中界面值  $C_{i,j}$  以及各关联因素的实测值  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 即可按线性插值待定系数法计算出评价矩阵  $\underline{R}$  中各元素  $r_{ij}$ , 本文给出便于编程的计算公式如下:

表 1 边坡稳定性关联因素边界值  $C_{i,j}$

Table 1 The boundary values of the relative factors in stability analyses of slopes

$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$	$u_9$	$u_{10}$	
	/°	/m		/kPa	/cm · s <sup>-1</sup>		/°	/°	MPa	
V <sub>1</sub> 1(平坦)	90	1.0	0.76	551	0	0	1(未风化)	10	30	0
V <sub>2</sub> 2(介于 1, 3)	75	0.4	0.55	450	10	5	2(微风化)	5	45	5
V <sub>3</sub> 3(中陡丘陵)	50	0.3	0.35	350	20	13	3(弱风化)	0	60	10
V <sub>4</sub> 4(介于 3, 5)	25	0.2	0.15	250	40	22	4(强风化)	-4	75	15
V <sub>5</sub> 5(陡峭孤立)	5	0.1	0.08	125	50	50	5(全风化)	-10	90	20

对于  $i = 1, 2, \dots, m$  有  
当  $j = 1$  时,

$$r_{i1} = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & x_i < C_{i,1} \\ \frac{x_i - C_{i,2}}{C_{i,1} - C_{i,2}} & C_{i,1} < x_i < C_{i,2} \\ 0 & x_i > C_{i,2} \end{array} \right. \quad (7.1)$$

当  $j = 2, 3, \dots, n - 1$  时, 有

$$r_{ij} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{x_i - C_{i,j-1}}{C_{i,j} - C_{i,j-1}} & C_{i,j-1} < x_i < C_{i,j} \\ \frac{x_i - C_{i,j+1}}{C_{i,j} - C_{i,j+1}} & C_{i,j} < x_i < C_{i,j+1} \\ 0 & x_i < C_{i,j-1} \text{ 或 } x_i > C_{i,j+1} \end{array} \right. \quad (7.2)$$

当  $j = n$  时, 有

$$r_{in} = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & x_i < C_{i,n} \\ \frac{x_i - C_{i,n-1}}{C_{i,n} - C_{i,n-1}} & C_{i,n-1} < x_i < C_{i,n} \\ 0 & x_i > C_{i,n-1} \end{array} \right. \quad (7.3)$$

重要程度模糊子集  $\underline{A}$  中各系数  $a_i (i = 1, 2, \dots, 10)$  通常可用专家评议法、专家调查法与判断矩阵分析法确定。本文综合后两种方法, 得到关联因素重要程度系数  $a_i$ , 即由式(5)有

$$\underline{A} = (0.05, 0.15, 0.10, 0.12, 0.10, 0.10, 0.05, 0.20, 0.08, 0.05) \quad (8)$$

由式(7)得出各元素  $r_{ij}$ , 归一化处理便得到评价矩阵  $\underline{R}$ , 进而根据式(6)与式(8)即可得出  $M(\bullet, V), M(\bullet, \oplus), M(\bullet, \ominus), M(\bullet, +)$  与  $M(\bullet, V)$  5 个一级模型的评价结果  $\underline{B}(\bullet, V), \underline{B}(\bullet, \oplus), \underline{B}(\bullet, \ominus), \underline{B}(\bullet, +)$  与  $\underline{B}(\bullet, V)$ , 并按模糊数学理论提供的如下方法选择其中的一个结果: 当  $\underline{B}(\bullet, V)$  和  $\underline{B}(\bullet, \oplus)$  值偏小时, 选用  $\underline{B}(\bullet, \oplus)$ ; 当  $\underline{B}(\bullet, V)$  和  $\underline{B}(\bullet, \oplus)$  值偏大时, 选用  $\underline{B}(\bullet, V)$ 。

通过得出的评价矩阵 $R$ , 按前述方法可形成二级评价矩阵 $R_1$ 及重要程度模糊子集 $A_1$ , 从而得出边坡稳定性的二级综合评价结果。

作者已将上述 5 个一级模型、1 个二级模型以及 1 个极小型模型共 7 个模型用 Fortran 语言编制成一个计算机软件子系统<sup>[8]</sup>, 使用者只需提供上述关联因素的值, 运行 FUZZYO 执行程序, 便可立即得到边坡稳定性评价结果。

## 4 工程实例分析

某在建的大型化工矿山, 露采规模每年为 100~120 万吨, 其东南段设计边坡最大垂高达 240m, 坡顶高程 264.5m, 最终边坡角 44°, 台阶坡面角 70°。我们对该边坡进行了工程地质及物理力学条件调查与测试, 相关的主要结果如下述。

该边坡为大磊山变质核杂岩构造盖层——褶皱层之一部分, 区域地质环境不利于边坡稳定。由软硬相间的岩层组成工程地质岩组, 由北往南依次分布着磷灰岩、绿片岩、绿色片麻岩、花岗岩等构造片岩与构造片麻岩, 总体呈典型的层状——碎裂结构, 风化程度高, 水文地质结构亦呈层状, 已开挖的上部边坡主要受地表降水影响, 断层不发育, 台阶走向与岩层有约 40° 夹角, 边坡上部位于一孤立的 山包上, 在边坡开挖过程中, 已出现局部滑坡现象。与关联因素相应的物理力学条件见表 2; 需说明的是: (1) 表中各值均为自然含水状态下实测值的均值; (2) 表中所示性质较差的值为绿片岩的实测值。

表 2 边坡岩体物理力学条件

Table 2 The physical and mechanical properties of slope rocks

自然安息角/°	岩体波速 /m · s <sup>-1</sup>	岩石纵波 速/m · s <sup>-1</sup>	岩体完整 性系数 K <sub>v</sub>	节理密度 /条 · m <sup>-1</sup>		单轴抗 压强度 /MPa	软化系数	基本质量 指标 Q	爆破质点振 速/cm · s <sup>-1</sup>
				走向	倾向				
37~40	900.0 (均值)	1069~ 2784	0.11~ 0.36	2~5	2~8	8.31~ 56.44	0.12~0.63	四级~ 五级	0.72~3.46 (距离 27~140m)

根据上述工程地质条件与表 2 所示条件, 经分析处理得出各关联因素实测值  $x_i$ , 见表 3。该表中各量的单位与表 1 对应量的单位一致。需指出的是, 表 3 中  $x_1, x_4, x_5, x_8$  与  $x_{10}$  给出的是一个数值区间, 这与不同的岩层性质实际情况相对应; 在后面的模糊综合评价中将考虑其极限情况, 即取相应区间的两端值, 用 2 组  $x_i$  分别评价, 将可能的情况均纳入考虑的范围。

表 3 关联因素实测值

Table 3 The measured values of the relative factors

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$
3~4	40	0.25	200~260	10~20	4	4	-4~-7	44	5~10

如前述，将表 3 的值形成两个对应的数据文件 DS1 DAT 与 DS2 DAT (前者中  $x_1 = 3, x_4 = 260, x_5 = 10, x_8 = -4, x_{10} = 5$ ; 后者中  $x_1 = 4, x_4 = 200, x_5 = 20, x_8 = -7, x_{10} = 10$ )。运行前述自编的模糊分析软件子系统，即可得到模糊综合评价结果，见表 4。

表 4 边坡稳定性评价结果  
Table 4 The assessment results of the slope stability

文件名	一级评价模型					二级评价模型
	$M(, V)$	$M(\cdot, V)$	$M(, \ominus)$	$M(\cdot, \ominus)$	$M(\cdot, +)$	
DS1 DAT	$V_4$	$V_3$	$V_3$	$V_3$	$V_3$	$V_3$
DS2 DAT	$V_4$	$V_4$	$V_4$	$V_4$	$V_4$	$V_4$

从模型评价结果可看出:

(1) 采用第一组实测数据 DS1 DAT，边坡稳定性等级倾向于  $V_3$ ，总体上处于基本稳定状态; 采用第二组数据 DS2 DAT，等级为  $V_4$ ，则稳定性较差，反映出该边坡部分岩层的不稳定性，评价结果为边坡逐步开挖后状况所印证，与实际情况相当吻合。这也表明了本模糊分析模型的实用价值。

(2) 利用第一组数据，模型  $M(, V)$  评价等级为  $V_4$ 。这是由于该模型为主因素决定型，表现了安息角与边坡角差值、基本质量指标  $Q$  主要因素的决定性影响。如前述，更为客观的模型为  $M(, \ominus)$ ， $M(\cdot, V)$  以及二级模型，其评价结果均为  $V_3$ ; 而  $M(\cdot, \ominus)$ ， $M(\cdot, +)$  评价结果亦为  $V_3$ ，结论是一致的。利用第二组数据，所有模型评价结果均为  $V_4$ 。上述情况表明关联因素对稳定性的评价等级的贡献有较大的相似性。

以上研究分析表明，该边坡段存在着不稳定因素，若要在该段边坡往下开采形成新的边坡台阶，就需进一步优化开采设计，同时对已形成的边坡进行必要的治理，采取必要的护坡措施。至于采取何种具体方案措施，我们将结合其它途径的研究<sup>[9]</sup>再另文讨论之。

## 5 讨论与结语

(1) 岩土质边坡是一种自然地质体，其稳定性在很大程度上是不确定性问题，具有模糊性，因而模糊数学分析是边坡稳定性分析的有效途径之一，值得推广运用。

(2) 本文仅讨论影响边坡稳定性的 10 个主要关联因素，这些因素都是边坡稳定性调查研究的基本对象，其值便于确定，一般情况下，已能较好地刻划边坡稳定性状况。对于十分特殊的问题，可适当增加考虑的关联因素，扩展边界值矩阵，即可进行模糊综合分析。

(3) 关联因素的边界值是在广泛调查及研究的基础上得出的，有较为扎实的基础; 关联因素重要程度模糊子集  $A$  是由专家调查法与判断矩阵分析法综合确定的，其科学性也具有相当的基础。

(4) 本文针对具体的边坡工程实例而开展模糊分析应用，在大量的现场调查及测试工作的基础上，通过模糊综合分析得出了该边坡的稳定性等级以及会出现滑坡等不稳定情况的结论，与实际情况十分吻合，为露采边坡的优化设计及治理提供了依据。

(5) 已根据本文模糊综合分析模型编制成计算机软件, 使用者只需根据具体边坡的实际情况输入关联因素原始数据, 即可得到该边坡的稳定性评价结果, 快速、简捷而准确, 实用与推广价值是显而易见的。

**致谢** 罗宝瑞高工、张电吉副主任、李先福副教授、左志宏、任昂、丁立玉等工程师参加了现场调查与测试工作, 总工严发真高级工程师、湖北省科委有关同志一直热情关心与大力支持该工作的展开, 在此一并致谢!

## 参 考 文 献

- 1 肖位枢 模糊数学基础及应用 北京: 航空工业出版社, 1992
- 2 张跃, 邹寿平, 宿芬 模糊数学方法及其应用 北京: 煤炭工业出版社, 1992
- 3 中华人民共和国国家标准: 《工程岩体分级标准》1995
- 4 劳动部矿山安全监察局 露天矿场边坡稳定检测 北京: 劳动出版社, 1992
- 5 舒斯特 R L, 克利泽克 R J 编 铁科院西北研究所译 滑坡的分析与防治 北京: 中国铁道出版社, 1987
- 6 山田刚二, 渡正亮, 小桥澄治著 《滑坡和斜坡崩塌及其防治》翻译组译 滑坡和斜坡崩塌及其防治 北京: 科学出版社, 1980
- 7 罗国煜, 吴浩 工程勘察中的新构造——优势面分析原理 北京: 地质出版社, 1991
- 8 李彰明 露天矿边坡实用型专家系统 PESOPS V 1. 0 的设计与应用 岩土力学, 1996, 17(4): 48~ 55
- 9 李彰明 层状结构岩体边坡滑坡分析 化工矿山技术, 1996, 25(5): 6~ 8

## APPLICATION OF FUZZY ANALYSIS IN SLOPE STABILITY EVALUATION

Li Zhangming

(Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090)

**Abstract** The fuzzy evaluation model and related matrix of boundary values are constructed for slope stability analysis, and the practical values of the relative factors are also obtained through the investigation of engineering geology and the tests of physical and mechanical properties of a practical slope. Thereupon, the stability of the slope is evaluated by the fuzzy method. The result shows that the uncertain characteristics of practical slope problems can be described more comprehensively by the method and the fuzzy analysis result is reasonable.

**Key words** fuzzy analysis, slope stability, evaluation model, engineering example