

文章编号: 1000-7598-(2008) 00-368-05

岩质路堑深边坡稳定性评价的模糊概率方法

刘章军, 陈 飞, 周宜红

(三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 边坡工程是一个动态的、模糊的、开放的复杂系统, 影响边坡稳定性的因素复杂且具有随机性和模糊性, 传统的分析方法难以对复杂边坡的稳定性作出符合实际的评价。运用模糊概率的基本原理, 建立了岩质路堑深边坡稳定性评价的模糊概率模型。在此模型中, 综合选取了边坡岩体质量系数 $SRQC$ 、边坡结构系数 SSC 、坡高系数 SHC 、坡角系数 SCC 、工程因素影响系数 $EFEC$ 等 5 个评价指标因子; 同时将边坡稳定性评价等级划分为很不稳定、不稳定、基本稳定、稳定以及很稳定 5 个等级。利用模糊概率模型对 20 个典型的边坡工程进行了稳定性评价分析, 结果表明: 该方法具有明显的合理性和可靠性, 为边坡工程的预测与防治提供了新的途径。

关 键 词: 边坡工程; 岩质边坡; 稳定性评价; 模糊概率方法

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Stability evaluation of depth cutting slope in rock mass based on fuzzy probability method

LIU Zhang-jun, CHEN Fei, ZHOU Yi-hong

(College of Civil & Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Slope engineering is a dynamic, fuzzy, open and complicated system, and the factors which control and affect slope stability are random and fuzzy variables. It is difficult to evaluate the stability of complicated slopes by traditional analysis method. Based on the basic theory of fuzzy probability, the fuzzy probability model of stability evaluation of depth cutting slope is proposed. Some main control factors of rock slope, such as slope rock quality coefficient, slope structure coefficient, slope height coefficient, slope angle coefficient and engineering factor effect coefficient etc. are selected. At the same time, the slope stability grades are classified as the very instable, instable, basically stable, stable and very stable in the prediction model. 20 typical slope engineering are performed by this model. The prediction results agree well with the practical records. It indicates that the fuzzy probability model is reasonable and effective to evaluate the stability of depth cutting slope in rock mass, and provides scientific basis for reducing and preventing of the instability of rock slope.

Key Words: slope engineering; rock slope; stability evaluation; fuzzy probability method

1 引 言

边坡稳定性问题一直是岩土工程的一个重要研究内容, 边坡稳定性评价结果的正确与否直接关系到边坡工程的成败。目前, 边坡稳定性评价方法多种多样, 但由于边坡的稳定受多方面因素影响, 而各因素具有不确定性(模糊性、随机性、信息不完全性和未确定性)和复杂性, 使得边坡稳定性问题表现为多因素综合作用的动态复杂系统。近年来, 许多研究者进行了大量的探索, 尝试应用模糊数学

方法、人工神经网络方法、灰色系统理论、综合指标法、投影寻踪模型、有限元分析方法、层次分析法、混合学习方法等数学工具进行综合评价^[1]。在这些方法中, 人工神经网络方法则自身存在收敛速度慢等弱点; 用灰色理论进行预测, 当原始数据序列波动较大且信息过于分散时, 则预测精度将会降低; 投影寻踪模型受原始资料数据代表性、准确性的影响较大; 而模糊综合评判法常要对各指标赋予不同的权重, 而权重的确定不可避免地会带有一定的主观性和随意性。然而, 影响边坡稳定性的基本

收稿日期: 2008-07-25

作者简介: 刘章军, 男, 1973 年生, 副教授, 博士后, 主要从事土木工程的教学与研究。E-mail: liuzhangjun73@yahoo.com.cn

要素之间存在着复杂性和不确定性,这种不确定性,有的属于随机范畴,有的属于模糊范畴。对边坡这一集模糊性与随机性为一体的地质现象,采用模糊概率方法进行综合评判更为合理。文献[2, 3]在模糊数学的基础上,提出了模糊概率评价模型,在这一模型中,提出了模糊权重的概念,可充分考虑权重的模糊性。本文尝试将模糊概率模型应用于岩质路堑深边坡稳定性评价中,为边坡稳定性问题的研究提供了新的途径。

2 模糊概率评价模型

模糊和概率是两个不同的概念,由于它们都具有不确定性,因而又有联系。模糊概率是指事件及其概率都是模糊的,因此也称为模糊事件的模糊概率,或称为模糊事件的语言概率^[4]。根据模糊概率理论,可以给出其预测模型的主要步骤:

(1) 建立评价影响因子集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 和评价等级集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。

(2) 对 U 中的每个评价影响因子 u_i 作单因素评判,即根据 u_i 与评价等级 v_j 的模糊关系,确定或选择其隶属函数 $v_j(u_i)$ 。从而建立了评价影响因子集 U 与评价等级 V 的隶属度关系矩阵 R :

$$R = (r_{ji})_{m \times n} \quad (1)$$

式中:元素 r_{ji} 即为隶属度 $v_j(u_i)$ 。

(3) 确定每个评价影响因子 u_i 的模糊权重 π_i ,即把权重看成为模糊数:

$$\pi_i = \text{"近似于 } \lambda_{i,0} \text{"}$$

$$\frac{\beta_{i,1}}{\lambda_{i,1}} + \dots + \frac{\beta_{i,k}}{\lambda_{i,k}} + \frac{1}{\lambda_{i,0}} + \frac{\beta_{i,k+1}}{\lambda_{i,k+1}} + \dots + \frac{\beta_{i,2k}}{\lambda_{i,2k}} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{i,0}$ 为相对权重值,应满足 $\sum_{i=1}^n \lambda_{i,0} = 1$; 系数 $\beta_{i,l} (i=1, 2, \dots, n, l=1, 2, \dots, 2k)$ 可取为 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 中的某个数; $\lambda_{i,l} (l=1, 2, \dots, 2k)$ 的值由 $\lambda_{i,0}$ 值来确定。

在式(2)中,模糊权重 π_i 为论域 $\{\lambda_{i,1}, \dots, \lambda_{i,k}, \lambda_{i,0}, \lambda_{i,k+1}, \dots, \lambda_{i,2k}\}$ 上的一个模糊子集,系数 $\beta_{i,l} (l=1, 2, \dots, 2k)$ 及 1 分别为相应的隶属度。

(4) 利用模糊事件的语言概率式(3),即^[4]

$$(a_1\pi_1 + a_2\pi_2 + \dots + a_n\pi_n)(p) \triangleq \left(\bigvee_{\substack{a_1p_1 + \dots + a_np_n = p \\ p_1 + \dots + p_n = 1}} (\pi_1(p_1) \wedge \dots \wedge \pi_n(p_n)) \right) / \mu \quad (3)$$

式中: $\mu = \bigvee_{p_1 + \dots + p_n = 1} (\pi_1(p_1) \wedge \dots \wedge \pi_n(p_n))$; π_i 为第 i 个评价影响因子的模糊权重; p_i 为相应论域 $\{\lambda_{i,1}, \dots, \lambda_{i,k}, \lambda_{i,0}, \lambda_{i,k+1}, \dots, \lambda_{i,2k}\}$ 上的任意取值; a_i 为任

意评价等级的第 i 个隶属度。对于第 j 个评价等级而言, a_i 即为隶属度 $v_j(u_i)$ 。

在式(3)中,算子 " $\vee$ " 表示“加”的运算,算子 " $\wedge$ " 表示“取小”。事实上,可以用其他算子来取代 " $\wedge$ " 算子,本文采用“平均”来取代 " $\wedge$ " 算子,则更符合实际。

(5) 求出各评价等级 v_j 的模糊概率 $P(v_j)$, 即

$$P(v_j) = v_j(u_1)\pi_1 + v_j(u_2)\pi_2 + \dots + v_j(u_n)\pi_n \quad (4)$$

从式(4)可以看出,评价等级的概率是 $[0, 1]$ 上的一个模糊集,代表一个模糊值。

(6) 由信息集中原则,即可获得综合评价。

信息集中原则:若记评价等级 v_j 的模糊概率 $P(v_j)$ 为

$$P(v_j) = \frac{\alpha_{j1}}{x_{j1}} + \frac{\alpha_{j2}}{x_{j2}} + \dots + \frac{\alpha_{jp}}{x_{jp}} \quad (5)$$

$$\sigma_j = \sum_{l=1}^p \alpha_{jl} x_{jl}, \quad j=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中: α_{jl} 为 x_{jl} 的隶属度 ($l=1, 2, \dots, p$)。

对式(6)进行归一化处理,即

$$\bar{\sigma}_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^m \sigma_j}, \quad \bar{\sigma}_N = \max_{1 \leq j \leq m} [\bar{\sigma}_j] \quad (7)$$

若某一评价等级的 $\bar{\sigma}_M$ 与 $\bar{\sigma}_N$ 值满足下式,则评价等级可定为 $M \sim N$ 级,否则评价等级为 N 级。

$$\frac{\bar{\sigma}_N - \bar{\sigma}_M}{\bar{\sigma}_N} \leq 5\% \quad (8)$$

上述运算过程易于用 Matlab 语言编程来实现,从而获得预测结果。

需要指出的是,模糊概率模型与经典模糊综合评判法既有联系,又相互区别。事实上,模糊概率模型不仅继承了经典模糊综合评判法的思想和优点,同时也克服了其在实际应用中评价影响因子权重取值的局限性;若不考虑权重的模糊性,则模糊概率模型可退化为经典的模糊综合评判法。

3 岩质边坡稳定性评价的指标体系

岩体边坡的变形、破坏的实质就是边坡岩体在各种营力和工程因素的作用下,岩体强度的弱化过程;岩体强度和边坡结构是控制边坡岩体稳定性的关键。对水电、公路、冶金等各类工程岩质边坡岩体稳定性统计表明^[5],边坡岩体稳定性状况是多种因素综合作用的结果,其中岩石强度特性、岩体结构、岩体风化作用和坡高是影响边坡岩体稳定性的基本因素,而水的作用、环境条件、工程因素等构成了边坡岩体稳定性的诱发因素。

为了科学地评价岩质边坡的稳定性,文献[6]根据影响因素的特征及其内在联系,将其归纳为5类综合因素:边坡岩体质量系数、边坡结构系数、结构面力学特性(c 值和 φ 值)、坡高、坡角及工程环境因素等。

3.1 边坡岩体质量系数 $SRQC$

边坡岩体质量综合反映了岩体结构完整性、岩石强度、结构面发育特征以及地下水效应等岩体的基本地质属性,是综合反映边坡岩体稳定性的综合指标。根据Bieniawski提出的岩体基本质量评价系统RMR值^[7],进行修正的边坡岩体质量系数为

$$SRQC = RMR / 100 \quad (9)$$

式中: RMR 为岩体基本质量。

3.2 边坡结构系数 SSC

岩体结构面和结构面的组合以及与边坡面的组合关系是边坡岩体变形破坏的最主要因素,主要表现为结构面或结构面间交线的倾向、倾角与边坡面倾向、倾角的相互关系。根据SMR分类系统中有关指标的修正^[8],综合确定路堑岩体边坡结构的系数为

$$SSC = S_1 S_2 S_3 / 60 \quad (10)$$

式中: S_1 为与结构面(线)的走向关系; S_2 为结构面(线)倾角的影响; S_3 为边坡角与结构面倾角的相互关系。

3.3 坡高系数 SHC

高边坡岩体的稳定性与岩体本身的自稳高度有密切的关系,岩体自稳高度值本身就反映了岩体质量的优劣。根据大量的统计得出修正后的坡高系数为

$$SHC = 0.57 + 33.8 / H \quad (11)$$

式中: H 为边坡高度。

3.4 坡角系数 SCC

岩质边坡的稳定性与岩体优势结构面的内摩擦角 φ 及坡角 α 有密切的关系,因二者对稳定性影响方向相反,故可将二者的比值作为一个综合因素来加以考虑。所以,坡角对边坡稳定性的影响系数为

$$SCC = 1 - \varphi / \alpha \quad (12)$$

式中: φ 为边坡岩体优势结构面的内摩擦角; α 为边坡坡角。

3.5 工程因素影响系数 $EFEC$

工程因素对边坡稳定性的影响较大,对岩质边坡而言,主要是施工方式、坡形以及支护方式,不同的施工开挖方式,对边坡岩体的应力分布、岩体完整性的影响程度是不同的,从而对边坡工程稳定性的影响程度不同。工程因素主要考虑爆破方式和

坡形,工程因素影响系数为爆破方式影响系数和坡形影响系数之和。

爆破方式影响系数 K_e 取值为: 自然边坡时取1.00, 周边预爆时取0.75, 常规爆破时取0.60, 光面爆破时取0.20, 缺陷爆破时取0.00。

坡形(边坡台阶的宽高比)影响系数 K_s 取值为: 坡形为0.75时, $K_s = 1.00$; 坡形为0.50时, $K_s = 0.75$; 坡形为0.30时, $K_s = 0.50$; 坡形为0.20时, $K_s = 0.20$; 坡形为0.10时, $K_s = 0.00$ 。

工程因素对边坡工程稳定性的综合影响系数为

$$EFEC = K_e + K_s \quad (13)$$

4 岩质路堑深边坡稳定性评价

4.1 隶属函数的确定

根据岩质路堑深边坡稳定性评价的指标体系,本文采用上述评价指标体系,即评价指标因子 u_i ($i=1,2,3,4,5$),如表1所示。同时,将评价等级划分为5级,即 v_j ($j=1,2,3,4,5$),其中 v_1 表示很不稳定, v_2 表示不稳定, v_3 表示基本稳定, v_4 表示稳定, v_5 表示很稳定,如表1所示。表1给出了边坡稳定性评价指标因子与评价等级的模糊关系,即边坡稳定性评价因子的等级划分标准。

表1 边坡稳定性评价指标与评价等级关系
Table 1 Relationship between slope stability evaluation indexes and grades

评价指标因子	等级 v_1	等级 v_2	等级 v_3	等级 v_4	等级 v_5
边坡岩体质量系数 u_1	<0.20	0.20~0.40	0.40~0.60	0.60~0.80	≥0.80
边坡结构系数 u_2	>0.70	0.30~0.70	0.04~0.30	0.01~0.04	<0.01
坡高系数 u_3	<0.60	0.60~0.80	0.80~1.0	1.0~1.20	≥1.20
坡角系数 u_4	>0.80	0.60~0.80	0.40~0.60	0.20~0.40	<0.20
工程因素影响系数 u_5	<0.20	0.20~0.75	0.75~1.30	1.30~1.75	≥1.75

根据表1给出的评价指标因子 u_i ($i=1,2,3,4,5$)与评价等级 v_j ($j=1,2,3,4,5$)之间的模糊关系,可选择或确定各评价指标因子对于各评价等级的隶属函数。常见的隶属函数主要有线性型(如三角形分布、梯形分布)和非线性型(如正态分布、岭形分布)等类型。考虑到实际运算的简单性以及岩质边坡稳定性评价指标的工程背景,对于递增型指标因子,可选用如下的隶属函数形式^[3]:

$$v_1(u_i) = \begin{cases} 1 & u_i \leq a_{i,1} \\ \frac{1.618a_{i,1} - u_i}{1.618a_{i,1} - a_{i,1}} & a_{i,1} < u_i \leq 1.618a_{i,1} \\ 0 & u_i > 1.618a_{i,1} \end{cases} \quad (14)$$

$$v_j(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq 0.382a_{i,j-1} \\ \frac{u_i - 0.382a_{i,j-1}}{a_{i,j-1} - 0.382a_{i,j-1}} & 0.382a_{i,j-1} < u_i \leq a_{i,j-1} \\ 1 & a_{i,j-1} < u_i \leq a_{i,j} \\ \frac{1.618a_{i,j} - u_i}{1.618a_{i,j} - a_{i,j}} & a_{i,j} < u_i \leq 1.618a_{i,j} \\ 0 & u_i > 1.618a_{i,j} \end{cases} \quad (15)$$

$$v_5(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i \leq 0.382a_{i,4} \\ \frac{u_i - 0.382a_{i,4}}{a_{i,4} - 0.382a_{i,4}} & 0.382a_{i,4} < u_i \leq a_{i,4} \\ 1 & u_i > a_{i,4} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $j=2,3,4$ ； $a_{i,k}$ 为评价指标因子 u_i 的等级划分标准值($i=1,3,5$ ； $k=1,2,3,4$)，如表1所示。对于递减型评价指标因子 u_2 和 u_4 的隶属函数可仿照式(14)~(16)进行倒推，这里就不再赘述了。

4.2 模糊权重的确定

目前，对于各种综合评价方法而言，评价指标因子的权重取值是一个重要而难于确定的问题，现有的各种确定权重的方法，均为一种确定性的描述方式。在本质上，权重具有模糊性，应该采用模糊语言的方式来描述，即模糊权重。

首先，确定相对权重 $\lambda_{i,0}$ 值，这可采用已有的确定性方法来获得，如层次分析法(AHP)等。本文在参考文献[6]的基础上，建议相对权重的取值如下：

$$\lambda_0 = (\lambda_{1,0}, \lambda_{2,0}, \lambda_{3,0}, \lambda_{4,0}, \lambda_{5,0}) = (0.25, 0.25, 0.15, 0.15, 0.20) \quad (17)$$

在相对权重的基础上，根据模糊概率理论，可建议各评价影响因素的模糊权重为

$$\pi_1 = \text{“接近于 } 0.25\text{”} = \frac{0.8}{0.20} + \frac{1}{0.25} + \frac{0.8}{0.30} \quad (18)$$

$$\pi_2 = \text{“接近于 } 0.25\text{”} = \frac{0.8}{0.20} + \frac{1}{0.25} + \frac{0.8}{0.30} \quad (19)$$

$$\pi_3 = \text{“接近于 } 0.15\text{”} = \frac{0.8}{0.10} + \frac{1}{0.15} + \frac{0.8}{0.20} \quad (20)$$

$$\pi_4 = \text{“接近于 } 0.15\text{”} = \frac{0.8}{0.10} + \frac{1}{0.15} + \frac{0.8}{0.20} \quad (21)$$

$$\pi_5 = \text{“接近于 } 0.20\text{”} = \frac{0.8}{0.15} + \frac{1}{0.20} + \frac{0.8}{0.25} \quad (22)$$

通过分析可知，本文给定的模糊权重可以覆盖一般用确定性方法所给定权重取值的波动范围，这表明模糊权重在本质上反映了权重的不确定性，具有明显的合理性。

至此，可利用模糊事件的模糊概率式(3)、式(4)求出各评价等级的模糊概率，再由归一化的信息集中最大原则来确定其评价等级。

5 实例分析

为了说明本文方法的合理性与有效性，现以文献[6]中的20个典型边坡实例进行评价分析，其中各评价指标因子的取值如表2所示。利用模糊概率评价模型，可获得20个岩质边坡稳定性评价的结果(如表2所示)。从表2可以看出，本文方法的评价结果与实际情况十分吻合，除第17例的评价结果与实际情况稍有偏差外，其他评价结果与实际情况一致，表明本文方法是十分有效的。此外，本文给出的评价结果更为精细化，这为更好地评价边坡稳定性提供了理论依据。

表2 评价指标因子实测值和本文预测结果
Table 2 Evaluation index factor of measured and predictive values

序号	SRQC	SSC	SCC	SHC	EFEC	本文评价结果	实际情况
1	0.473	0.500	0.025	0.640	1.10	很稳定 v_5	稳定
2	0.710	0.013	0.191	0.683	0.95	很稳定 v_5	稳定
3	0.350	0.023	0.196	0.662	0.80	稳定 v_4	稳定
4	0.510	0.083	0.300	0.689	0.40	稳定 v_4	稳定
5	0.477	0.023	0.257	0.686	1.35	基本稳定 v_3	稳定
6	0.419	0.126	0.200	1.246	1.50	不稳定 v_2	破坏
7	0.378	0.213	0.200	1.246	1.50	很不稳定 v_1	破坏
8	0.470	0.012	0.217	1.133	1.75	不稳定 v_2	破坏
9	0.755	0.072	0.276	0.820	1.10	稳定 v_4	稳定
10	0.530	0.023	0.025	0.642	1.10	稳定 v_4	稳定
11	0.357	0.077	1.000	1.305	1.25	很不稳定 v_1	破坏
12	0.471	0.077	0.218	0.687	0.70	基本稳定 v_3	稳定
13	1.000	0.000	0.914	0.768	0.70	不稳定 v_2	破坏
14	0.530	0.023	0.914	0.763	0.20	基本稳定 v_3	稳定
15	0.710	0.013	0.857	0.549	0.20	基本稳定 v_3	稳定
16	0.477	0.023	0.800	1.237	0.30	基本稳定 v_3	稳定
17	0.419	0.120	0.728	1.367	1.00	基本稳定 v_3	破坏
18	0.350	0.023	0.847	0.678	1.25	不稳定 v_2	破坏
19	0.700	0.058	0.914	1.138	0.70	很稳定 v_5	稳定
20	0.900	0.700	1.000	1.056	0.60	很稳定 v_5	稳定

6 结 语

运用模糊概率理论,建立了岩质路堑深边坡稳定性评价的模糊概率模型,在此模型中考虑了权重取值的模糊性。利用模糊概率模型对 20 个典型的岩质路堑深边坡稳定性进行了评价分析,获得了客观合理的评价结果。研究表明,模糊概率模型在继承模糊综合评判法的思想和优点的同时,也克服了其在实际应用中评价指标因子权重取值的不确定性,从而为进行有效的岩质边坡稳定性评价提供了科学依据。

参 考 文 献

- [1] 夏元友,李梅. 边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1 087—1 091.
- [2] 刘章军,叶燎原. 基于模糊概率的震害预测模型及其应用[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 115—120.
- [3] 刘章军,叶燎原,彭刚. 砂土地震液化的模糊概率评判方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 876—880.
- [4] 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
- [5] 陈昌彦,王思敬,沈小克. 边坡岩体稳定性的人工神经网络预测模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 157—161.
- [6] 包惠明,胡长顺. 基于 ANN 下的岩质路堑深边坡稳定性评价[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(3): 52—56.
- [7] BIENIAWSKI Z T. The geomechanics classification in rock engineering applications[C]// Proceedings of the 4th International Congress in Rock Mechanics. [S.l.]: International Society for Rock Mechanics, 1979, 2: 41—48.
- [8] ROMANA M. SMR classification[C]// Proceedings of the 7th International Congress in Rock Mechanics. [S.l.]: International Society for Rock Mechanics, 1992: 78—84.