

模糊数学方法在滑坡稳定性评价中的应用

霍张丽, 梁收运

(兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:针对滑坡发生系统的复杂性和不确定性,用模糊数学方法从地层岩性、地质构造、地形地貌、地下水和降雨5个方面,分2个层次9个因素建立了滑坡稳定性评价的模糊综合评判模型,确定了各因素等级标准和权重。以G212线陇南段沿线的6个主要滑坡为例进行了稳定性综合评价。结果表明,秦峪滑坡的稳定性最差,凤安山和石院子滑坡次之,清水子、固水子和鲁班崖滑坡稳定性相对较好。

关键词:模糊数学; 滑坡稳定性; 综合评价

中图分类号: P642.22; O159

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2007)01-0035-05

Application of Fuzzy Mathematics Method on Landslide Stability Assessment

HUO Zhang-li, LIANG Shou-yun

(College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: For the complexity and uncertainty of landslide system, the fuzzy synthetic judgment model of landslide stability assessment is set up using fuzzy mathematics method, which is composed of 5 aspects (lithology, geologic structure, landform, groundwater, and rainfall) in 2 levels with 9 factors. The grading standard of each factor, as well as the proportion, is put forward. As the examples, 6 main landslides along G212 highway in Longnan, Gansu province, are assessed. The results of assessment show that the worst one is at Qinyu, the next are Feng'an Shan and Shi'ezi, and the relatively better ones are Qingshuizi, Gushuizi and Lubanya.

Key words: Fuzzy mathematics; Landslide stability; Synthetic assessment

0 前言

滑坡稳定性分析与评价是滑坡防治的基本依据,也是研究滑坡发展演化过程的重要内容。滑坡稳定性评价方法除了传统的经验分析方法之外,有解析法、数值模拟法和综合评价法等多种方法,各种方法都有一定的适用条件和局限性,绝大多数方法的使用一般都是结合具体的滑坡和稳定性评价的目的。由于影响滑坡演化趋势的因素众多,各因素之间的关系复杂,因此,滑坡稳定性评价所采用的方法还很不统一,也难以统一。

综合评价方法用于地质灾害和滑坡稳定性评价是一个热点的研究领域^[1-3],模糊数学方法作为综合评价方法之一,具有数学模型简单,容易掌握,对

多因素、多层次的复杂问题评判效果比较好的特点,已应用于滑坡稳定性评价等相关领域^[4-6],在以区划为目的的地质灾害和滑坡稳定性评价中有较大的应用前景^[7-9]。本文采用模糊数学方法,试图建立较为规范的滑坡稳定性评价的模糊综合评判模型,并以G212线陇南段沿线的主要滑坡为例进行验证。

1 模糊数学方法

1.1 模糊综合评判的基本原理

模糊综合评判是应用模糊关系合成的原理,将一些边界不清,不易量化的因素定量化,多个因素对被评价事物隶属等级状况进行综合性评价的一种方

收稿日期:2006-05-12

基金项目:交通部西部交通建设科技项目(2002 318 000 36)

作者简介:霍张丽(1983-),女(汉族),河北武安人,硕士研究生,主要从事岩土工程研究。

法。该方法把普通集合论只取0或1两个值的特征函数推广到 $[0,1]$ 区间上取值的隶属函数,把绝对的属于或不属于的“非此即彼”扩展为更为灵活的渐变关系,因而把“亦此亦彼”中过渡的模糊概念用数学方法处理。根据所给的条件,给每个对象赋予一个非负实数——评判指标,再据此排序择优^[6,10]。

1.2 模糊判断矩阵的确定^[10]

先对每个滑坡的稳定性进行单因素 $u_i (i=1,2,\dots,m)$ 评判,从因素 u_i 着眼该事物对抉择等级 $v_j (j=1,2,\dots,n)$ 的隶属度为 v_{ij} ,可以得到第 i 个因素 u_i 的单因素评判集 $r_i=(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$,构造出一个总的评价矩阵 R ,显示从因素集 U 到评语集 V 的模糊关系:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix},$$

$$(i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$$

引入权重模糊子集 $A, A=(a_1, a_2, \dots, a_m)$,其中 $a_i \geq 0$,且 $\sum a_i = 1$,表示评价因素集中的各因素在“评价目标”中有不同的地位和作用。引入评语模糊子集 $B, B=(b_1, b_2, \dots, b_n)$,一般 $B=A * R$ (*为算子符号),表示该被评事物总体上来看对各等级模糊自己的隶属程度。

为了充分利用 B 所带来的信息,把各种等级的评级参数和评判结果 B 进行综合考虑,设相对于各等级 v_j 规定的参数列向量为

$$C = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$$

则得出等级参数评判结果为

$$B * C = P$$

其中, P 是一个实数,反映了由等级模糊自己 B 和等级参数型量 C 所带来的综合信息,让每个因素都对综合评价有所贡献,比较客观的反映了对对象的全貌。

2 滑坡稳定性综合评价

2.1 确定模糊综合评判因素集

影响滑坡稳定性的因素主要决定于滑坡区的环境条件,以滑坡详细野外调查的实际资料为基础,综合分析已有滑坡稳定性评价所选因素^[4,6,11],把影响滑坡的因素概括为地层岩性、地质构造、地形地貌、地下水和降雨量5个方面($u_1 u_2 u_3 u_4 u_5$),这几个方面进一步分为9个指标。

(1) 地层岩性(u_1)

已有滑坡体的岩性特征、下伏岩体的岩性特征及其之间的关系显著影响到滑坡的类型、滑坡的演化趋势等滑坡多方面的特征。如软硬相间的岩石其物理力学性质及水理性性质相差较大,在适宜的条件下容易沿着较软弱的岩层发生滑动而形成滑坡。同样,已有滑坡的滑带土岩性及地球化学特征从环境变化的角度反映了滑坡的发展演化过程^[12-13]。

(2) 地质构造(u_2)

地质构造对滑坡的主要控制作用表现在以下方面:①在断层破碎带或节理裂隙密集处构成软弱带,滑坡的分布多沿断裂带成带状分布^[14];②当地层产状与坡向一致时,容易沿层面发生滑动而形成滑坡,特别是地层倾角小于坡角时,滑坡灾害将会更严重,而当地层倾向坡内时不容易发生滑坡。

(3) 地形地貌(u_3)

一般江、河、湖(水库)、海、沟的岸坡,前缘开阔的山坡、铁路、公路和工程建筑物边坡等都是易发生滑坡的地貌部位。①具有一定规模,且坡度大于 10° 、小于 45° 、下陡中缓上陡、上部成环状的坡形是产生滑坡的有利地形。选取体积/面积/坡度,即单位面积的下滑力来评判这个因素^[15]。②冲沟的沟蚀作用导致土地劣化,甚至形成“土林”,它的规模大小可以反映该区滑坡的构造和活动强度和历史^[16]。③后壁及侧壁是滑坡区物质的主要来源,一般为较坚硬岩体,有的含软弱夹层,地貌上表现为圈椅状。由于有较大面积的临空面和受构造运动、风化作用的影响,岩体比较破碎。④不同成因类型的裂缝所处地质环境、裂缝力学性质及组合关系均不相同。滑坡区的裂缝可以判定滑坡规模,分析滑坡形成机制,预测滑坡发展趋势,为滑坡监测、治理提供依据^[17]。

(4) 地下水(u_4)

地下水的作用表现在:增大土体含水量,减小抗滑力;增大土体的重度,加大浸湿范围,加剧浸湿程度,降低粘聚力;促使土的潜蚀作用,破坏山坡的稳定性。由于泉水是滑坡区地下水排泄的主要方式,与地下水关系密切,因此用泉水可以表示地下水情况。

(5) 降雨(u_5)

在具备滑坡的地形、地质条件下,降雨在很大程度上是滑坡发生的诱发因素。降雨类型的滑坡约占滑坡总数的70%。大多数的滑坡是发生在降雨期间或降雨后,一个地区的滑坡发育程度有随降雨强

度增大而增大的规律^①。

上5个方面可进一步分为几个不同的评价指标。评价指标再分成两个层次:第一层,总目标因素集 $u=(u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5)$;第二层,子目标因素集 $u_2=(u_{21} \ u_{22})$, $u_3=(u_{31} \ u_{32} \ u_{33} \ u_{34})$ (图1)。

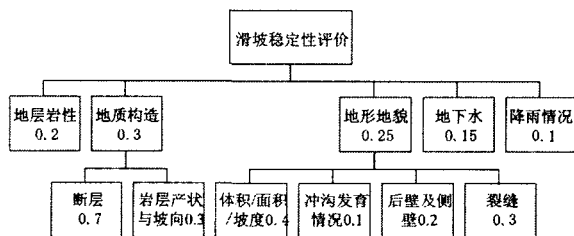


图1 滑坡稳定性评价的模糊综合评判模型

Fig.1 Fuzzy synthetic judgment model of landslide stability assessment.

2.2 建立综合评判的评语集

评语集是对各层次评价指标的一种语言描述,它是评审人对各评价指标所给出的评语的集合。本模型的评语分为四个等级,不同等级确定的依据标准见表1。

$V=(v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4)=(\text{严重} \ \text{比较严重} \ \text{一般} \ \text{微弱})$

设相对于各等级 v_j 规定的参数列向量为

$C=(c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4)^T=(0.4 \ 0.3 \ 0.2 \ 0.1)^T$

2.3 权重的确定

进行模糊综合评价时,权重对最终的评价结果会产生很大的影响。确定权重的方法有多种,如专家估计法、层次分析法等,不管采用那种方法,权重确定的合理与否主要取决于对滑坡赋存环境调查了解的详细程度和专家的经验。本文在详细野外滑坡

表1 各因素的等级确定标准

	严重	比较严重	一般	微弱
地层岩性	软岩夹层含量多	含软岩夹层	岩性较单一	坚硬完整
断层	规模大且从中穿过	近距离通过	距离较远	规模小且远距
地层产状	倾向与坡面一致	倾向与坡面小角度斜交	倾向与坡面大角度斜交	倾向与坡面垂直或相反
体积/面积/坡度	大于1.1	1.1~0.95	0.95~0.85	小于0.85
冲沟发育情况	大规模或成泥石流沟	中等规模或新冲沟	规模较小	规模微小
后壁及侧壁部位	软岩多或松散强风化物	含软岩	岩性较单一	岩石坚硬完整
裂缝	极其发育且有新生出现	数量较多	前缘有裂缝	不明显
地下水	大规模泉水涌出	泉眼较多	1~4个泉眼	无
最大降雨/[mm·d ⁻¹]	大于80	80~75	74~65	小于65

调查的基础上,采用专家估计法来确定权重,结果如下(图1):

$$u=(0.2 \ 0.3 \ 0.25 \ 0.15 \ 0.1);$$

$$u_2=(0.7 \ 0.3);$$

$$u_3=(0.4 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3);$$

2.4 等级参数评判结果 P 的计算

(1) 将选取的六个滑坡决策集设为 $B^1 \ B^2 \ B^3 \ B^4 \ B^5 \ B^6$

(2) 将这六个决策集组建成一个矩阵 B'

$$B'=(B^1 \ B^2 \ B^3 \ B^4 \ B^5 \ B^6)^T$$

(3) 求各个滑坡的综合参评结果 P'

$$P'=B' \times C = \begin{bmatrix} B_1^1 & B_2^1 & B_3^1 & B_4^1 \\ B_1^2 & B_2^2 & B_3^2 & B_4^2 \\ B_1^3 & B_2^3 & B_3^3 & B_4^3 \\ B_1^4 & B_2^4 & B_3^4 & B_4^4 \\ B_1^5 & B_2^5 & B_3^5 & B_4^5 \\ B_1^6 & B_2^6 & B_3^6 & B_4^6 \end{bmatrix} \times C = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix}$$

表2 各滑坡稳定性的单因素模糊评判

坡点	等级	岩性	断层	产状	体积/面积/坡度	冲沟发育情况	后壁与侧壁	裂缝	地下水	降雨
鲁班崖	严重	0	1	8	0	0	3	0	0	4
	比较严重	4	3	7	3	5	5	3	2	5
	一般	11	11	4	10	12	10	8	13	10
	微弱	5	5	1	7	3	2	9	5	1
秦峪	严重	6	10	5	10	9	6	9	11	5
	比较严重	9	8	4	4	7	7	7	5	6
	一般	4	1	9	4	3	6	2	4	7
	微弱	1	1	2	2	1	1	2	0	2
石阙子	严重	8	8	7	0	3	7	7	2	6
	比较严重	9	8	8	6	4	8	6	6	7
	一般	2	3	3	10	10	4	5	10	5
	微弱	1	1	2	4	3	1	2	2	2
清水子	严重	6	7	4	2	8	7	2	3	3
	比较严重	8	7	4	5	6	7	8	3	4
	一般	6	4	10	10	5	4	9	12	12
	微弱	0	2	2	3	1	2	1	2	1
凤安山	严重	8	6	4	8	9	11	12	4	5
	比较严重	8	6	3	5	6	5	5	9	6
	一般	3	6	9	4	5	3	3	5	8
	微弱	1	2	4	3	0	1	0	2	1
固水子	严重	7	4	3	0	2	4	5	0	8
	比较严重	6	7	4	6	4	8	6	1	7
	一般	5	7	11	10	11	6	7	9	4
	微弱	2	2	2	4	3	2	2	10	1

① 谢剑明. 降雨对滑坡灾害的作用规律研究. 武汉:中国地质大学硕士学位论文, 2004

3 应用实例

G212线(兰州—重庆)陇南段地处青藏高原东北缘,地质条件复杂,是我国遭受滑坡等地质灾害最为严重的路段之一。随着我国经济飞速发展和西部大开发战略的实施,G212线甘肃段拟改建为高速公路,为了公路的正常施工和安全运营,其沿线滑坡的稳定性评价就成为现阶段工作的重中之重^[18]。下面将在野外详细调查基础上,采用模糊数学方法,对该路段沿线的鲁班崖、秦峪、石阙子、清水子、凤安山、固水子6个主要滑坡进行稳定性评价。

滑坡的影响因素中除降雨量来自相关报告^②之外,其余皆是基于野外实际调查资料。

(1) 各滑坡单因素模糊评判

根据各因素的等级确定标准(表1),以20分为总分给每个因素进行打分,评判结果如表2。

(2) 评语集的计算

① 鲁班崖滑坡

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.15 & 0.55 & 0.25 \\ 0.4 & 0.35 & 0.2 & 0.05 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.15 & 0.5 & 0.35 \\ 0 & 0.25 & 0.6 & 0.15 \\ 0.15 & 0.25 & 0.5 & 0.1 \\ 0 & 0.15 & 0.4 & 0.45 \end{bmatrix}$$

那么由 $A_2 = (0.7 \ 0.3)$, $A_3 = (0.4 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3)$ 可得到地质构造和地形地貌的评价向量:

$$B_2 = A_2 \times R_2 = (0.155 \ 0.21 \ 0.455 \ 0.190)$$

$$B_3 = A_3 \times R_3 = (0.030 \ 0.180 \ 0.480 \ 0.310)$$

所以

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.55 & 0.25 \\ 0.155 & 0.21 & 0.445 & 0.19 \\ 0.03 & 0.18 & 0.48 & 0.31 \\ 0 & 0.1 & 0.65 & 0.25 \\ 0 & 0.1 & 0.65 & 0.25 \\ 0.2 & 0.25 & 0.5 & 0.05 \end{bmatrix}$$

再由 $A = (0.2 \ 0.3 \ 0.25 \ 0.15 \ 0.1)$ 就可以得到“滑坡稳定性”的综合评价向量:

$$B = A \times R = (0.074 \ 0.188 \ 0.511 \ 0.227)$$

同理计算剩下的5个滑坡,结果如下:

② 秦峪滑坡 $B = A \times R = (0.405 \ 0.332 \ 0.20225 \ 0.061)$

③ 石阙子滑坡 $B = A \times R = (0.288 \ 0.370 \ 0.255 \ 0.087)$

④ 清水子滑坡 $B = A \times R = (0.234 \ 0.294$

$0.397 \ 0.075)$

⑤ 凤安山滑坡 $B = A \times R = (0.340 \ 0.318 \ 0.256 \ 0.087)$

⑥ 固水子滑坡 $B = A \times R = (0.213 \ 0.274 \ 0.351 \ 0.163)$

(3) 综合评判结果

由于各等级 v_j 规定的参数列向量为: $C = (0.4 \ 0.3 \ 0.2 \ 0.1)^T$, 各滑坡评判结果为

$$P' = B' \times C = \begin{bmatrix} 0.211 \\ 0.308 \\ 0.286 \\ 0.269 \\ 0.291 \\ 0.254 \end{bmatrix}$$

从计算结果可看,6个滑坡稳定性从差到好的排序为:秦峪滑坡,凤安山滑坡,石阙子滑坡,清水子滑坡,固水子滑坡,鲁班崖滑坡。

4 结论

滑坡稳定性评价是滑坡防治与研究的重要内容。本文在野外滑坡详细调查和前人研究工作的基础上,采用模糊数学方法,对多个滑坡的相对稳定性进行了综合评价。

(1) 总结提出了影响滑坡稳定性的因素主要是地层岩性、地质构造、地形地貌、地下水和降雨量5个方面。建立了滑坡稳定性评价的二级模糊综合评判模型,给出了确定各因素等级的依据标准。

(2) 以G212线陇南段沿线的6个主要滑坡为例,得到了滑坡稳定性从差到好的相对顺序依次是秦峪滑坡、凤安山滑坡、石阙子滑坡、清水子滑坡、固水子滑坡、鲁班崖滑坡。评价结果与实际吻合。

(3) 模糊数学方法用于滑坡稳定性综合评价是可行的,该方法所得到的评价结果可有效用于滑坡区划和滑坡稳定性的相对排序。

(4) 滑坡稳定性评价方法较多,其中,模糊综合评判作为一种定性定量相结合的方法,理论上讲,针对单个滑坡稳定性的量化评价,在确定了合理的评语集等级标准值后,模糊综合评判结果可以与数值计算结果进行对比,该方面有待进一步研究。

② 兰州大学. 国道212公路陇南段修筑技术研究专题报告: 区域自然环境与滑坡泥石流区划研究(初稿). 2004年3月

[参考文献]

- [1] 全佳,王玲珍,黄成敏. 基于信息扩散理论的云南省地震风险评估及管理研究[J]. 西北地震学报,2006,28(2):180-183.
- [2] 武安绪,吴培稚,张丽芳. 基于模糊 Modular 神经网络的官厅水库及邻区的地震危险性评估[J]. 西北地震学报,2005,27(增刊):65-71.
- [3] 谢礼立. 城市防震减灾能力的定义及评估方法[J]. 西北地震学报,2005,27(4):296-30.
- [4] 陈情来. 模糊综合评判地质灾害的危险性[J]. 油气储运,2000,19(5):38-43.
- [5] 王新民,段瑜,彭欣. 采空区灾害危险度的模糊综合评价[J]. 矿业研究与开发,2005,25(2):83-85.
- [6] 于远祥,杨梅忠,孙学阳. 黄陵矿区滑坡的稳定性评价与防治[J]. 矿业安全与环保,2004,31(4):4-7.
- [7] 闫满存,王光谦,李保生,等. 基于模糊数学的广东沿海陆地地质环境区划[J]. 地理学与国土研究,2000,16(4):41-48.
- [8] 曹恺,孟高头,陈亮. 浙江省仙居县地质灾害调查与区划[J]. 地球科学,2002,27(2):217-221.
- [9] 钟敦伦,谢洪,韦方强. 长江上游泥石流危险度区划研究[J].

山地学报,1994,12(2):65-70.

- [10] 杜栋,庞庆华. 现代综合评价方法案例精选[M]. 北京:清华大学出版社. 2005:34-61.
- [11] 杨淑贤,刘俊英,周明礼,等. 湖北及邻区的斜坡类型及变形、破坏机理[J]. 西北地震学报,2006,28(3):258-262.
- [12] 郑国东,徐胜,郎煜华,等. 日本富山县中田浦滑坡滑带内的黄铁矿[J]. 地球化学,2006,35(2):201-210.
- [13] 郑国东,徐胜,郎煜华,等. 滑坡面粘土中铁元素的化学种变化[J]. 科学通报,2002,47(24):1889-1893.
- [14] 王学究,梁收运. 212 国道陇南段滑坡分布特征及主要因素探讨[J]. 西部探矿工程,2005,5(9):96-98.
- [15] 李金华,刘涛. 公路滑坡的稳定性评价与治理措施[J]. 西部探矿工程,2005,9:212-214.
- [16] 余宏明,袁宏成,唐辉明. 巴东县新城区冲沟泥石流危险度评价[J]. 水文地质工程地质,2004,增刊:47-49.
- [17] 金德山. 滑坡裂缝的识别与分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2002,6(2):50-52.
- [18] 王君国,梁收运. G212 线陇南段玉皇滑坡的基本特征及成因探讨[J]. 西部探矿工程,2005,9(9):224-225.

(上接 17 页)

[参考文献]

- [1] E L Matyas, H S Radhakrishna. Volume change characteristics of partially saturated soils[J]. Geotechnique, 1968, 12(4):432-448.
- [2] V Escario, J Sáez. Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction[A]//Proc. 3rd International Conference on Expansive Soil[C]. Haifa, Israel: [s. n], 1973:195-200.
- [3] A Lloret, E E Alonso. Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behavior[J]. Geotechnique, 1980,30(4):449-477.
- [4] Dijkstra I J Smalley, C D F Rogers. Particle packing in loess deposit and the problem of structure collapse and hydroconsolidation[J]. T. A. Engineering Geology, 1995, 40:49-64.
- [5] A M Assallay, I F Jefferson, C D F Rogers, et al.. Fragipan

formation in loess soils: development of the Bryant hydroconsolidation hypothesis[J]. Geoderma, 1998,83:1-16.

- [6] A A 穆斯塔伐耶夫. 湿陷性黄土土地基与基础的计算(中译本)[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- [7] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报,1990,12(4):2-10.
- [8] D G Fredlund, H Rahardjo. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐,张在明,等译. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [9] 扈胜霞. 吸力对原状黄土强度、变形和水分变化的影响及其应用[D]. 西北农林科技大学,2002:30-32.
- [10] J Carlos Santamarina. Soil behavior at the microscale: particle forces[A]//Proc. Symposium on Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd[C]. Massachusetts Institute of Technology,2001.