

模糊数学方法在边坡稳定性评价中的应用

靳泽先 (甘肃省科学院地质自然灾害研究协调中心)

李坤 (甘肃省地矿局水文地质一队)

提 要

作者根据对甘肃黄土地区的滑坡研究,确定了影响黄土边坡稳定性的六种主要因素。试用模糊数学方法对这些因素逐项进行分析,找出促使边坡变形的“有害成份”。在单项评价的基础上再进行了综合评价。

目前,在评价边坡稳定性方面多采用极限平衡理论,花费大量勘探试验费用,计算出稳定性系数(或安全系数),然后根据给定的边坡分级临界值,评价边坡的稳定程度。边坡分级界限实际上是一个模糊概念,但为了进行分类,不得不将稳定系数相近的边坡划到不同的等级中去,这显然是不尽合理的。

另外,山体边坡变形是多变量、多维因素长期作用的结果,因而沿用过去传统方法进行计算评价,往往得不到满意的答案。

近年来,甘肃省境内黄土地区不时有较大规模的滑坡发生,作者有幸参与了滑坡工程地质调查研究工作。现根据有关滑坡的实际资料,试用模糊数学的方法,对黄土地区边坡稳定性进行初步评价。有不妥之处,渴望指教。

一、黄土地区影响边坡稳定性的主要因素及其数值化

采用模糊数学方法计算前,我们首先根据甘肃庆阳、天水、兰州、东乡以及陕西等地三十二份统计资料,找出影响黄土边坡稳定性的主要因素:(1)地形地貌 (2)岩性 (3)地震 (4)大气降水 (5)地下水 (6)构造。

对上述六种主要因素逐一找出它促进边坡变形的“有害成份”,采用数理统计的方法,制定单因素“有害成份”的各级(I、II、III)边坡初步标准,现列表如下:

各影响因素“有害成份”的确定及其各级边坡划分的意见说明如下:

(一)地形地貌 地形坡度是产生边坡变形的主要因素。据统计资料 $>20^\circ$ 的地形坡角视为“有害成份”,这样将边坡分为三级:1.稳定边坡:坡角 $<20^\circ$; 2.危险边坡:坡角 35° ; 3.极危险边坡:坡角 50° 。

表 1

因素 \ 级别边坡	I	II	III
地形地貌	0.4	0.7	1
岩性	0.3	0.5	1
地震	0.5	0.80	1
大气降水	0.32	0.80	1
地下水	0.17	0.34	1
构造	0.4	0.7	1

注: I级边坡为稳定边坡。 II级边坡为危险边坡。 III级边坡为极危险边坡。

(二)岩性 在黄土高原地区,通过对大量滑坡调查资料表明: 80%以上滑坡床产生在第三系粘土岩及中、下更新统重亚粘土层位之中(其他滑床也多产于粘土成份层位中),故考虑粘土颗粒(粒径 ≤ 0.005 mm)为“有害成份”,按组成边坡岩土体所含粘土颗粒百分数,将边坡分为三级: 1.粘土颗粒含量 $\leq 18\%$ 为I级边坡; 2.粘土颗粒含量30%为II级边坡; 3.粘土颗粒含量 $>60\%$ 为III级边坡。

(三)地震 从该地区历史时期地震最大烈度及各级烈度边坡变形破坏的实际情况出发,一般将边坡分为三级: 1.地震烈度五度以下为I级边坡; 2.地震烈度介于五—八度间为II级边坡; 3.地震烈度八度以上为III级边坡。

(四)大气降水 我们采用丰水年降水量高出率(高出平水年百分数)来表示“有害成份”,据此将边坡分为三级: 1.高出率8%为I级边坡; 2.高出率20%为II级边坡; 3.高出率25%为III级边坡。

(五)地下水 “有害成份”的边坡分级按单泉流量和天然含水量分为: 1.无泉水,天然含水量10%为I级边坡; 2.泉水流量0.001升/秒,天然含水量20%,为II级边坡; 3.泉水流量 >0.1 升/秒,天然含水量30%,为III级边坡。

(六)构造 “有害成份”考虑两个方面:当地侵蚀基准面切割深度和黄土边坡下伏第三系泥岩剥蚀面倾角,将边坡分为: 1.切割深度100米,倾角 20° 为I级边坡; 2.切割深度200米,倾角 30° 为II级边坡; 3.切割深度 >300 米,倾角 40° 为III级边坡。

为了便于统一计算和输入计算机进行电算处理,我们将上述六种影响因素“有害成份”在划分三级边坡时所取的最高值(视为1),用它去除以各级边坡取值,得出一个无量纲的系数,列入上述初步标准表1中。

二、模糊数学方法

模糊数学方法,须先对各单项影响因素指标进行评价,在此基础上再进行综合评价。

(一) 各单项指标评价

模糊数学中,是以隶属度来刻画事物中的模糊界限的。隶属度以隶属函数来表达。为便于计算,本文采用三相的线性隶属函数。

取 U 为影响因素的模糊集合,设 V 为边坡分级的模糊集合,即 U {地形地貌、岩性、地震、降水、地下水、构造}; V {I、II、III}。

根据边坡三个分级标准,写出各影响因素的线性隶属函数。

1. 地形地貌对 I、II、III 级边坡的隶属函数:

$$Y_I = \begin{cases} 0 & x \geq 0.7 \\ -3.3(x-0.7) & 0.4 < x < 0.7 \\ 1 & x \leq 0.4 \end{cases}$$

$$Y_{II} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.4 \quad x \geq 1 \\ 3.3(x-0.4) & 0.4 < x < 0.7 \\ -3.3(x-1) & 0.7 < x < 1 \end{cases}$$

$$Y_{III} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.7 \\ 3.3(x-0.7) & 0.7 < x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases}$$

2. 岩性对 I、II、III 级边坡的隶属函数:

$$Y_I = \begin{cases} 0 & x \geq 0.5 \\ -5(x-0.5) & 0.3 < x < 0.5 \\ 1 & x \leq 0.3 \end{cases}$$

$$Y_{II} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.3 \quad x \geq 1 \\ 5(x-0.3) & 0.3 < x < 0.5 \\ -2(x-1) & 0.5 < x < 1 \end{cases}$$

$$Y_{III} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.5 \\ 2(x-0.5) & 0.5 < x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases}$$

3. 地震对 I、II、III 级边坡的隶属函数:

$$Y_I = \begin{cases} 0 & x \geq 0.8 \\ -3.3(x-0.8) & 0.5 < x < 0.8 \\ 1 & x \leq 0.5 \end{cases}$$

$$Y_{II} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.5 \quad x \geq 1 \\ 3.3(x-0.5) & 0.5 < x < 0.8 \\ -5(x-1) & 0.8 < x < 1 \end{cases}$$

$$Y_{III} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.8 \\ 5(x-0.8) & 0.8 < x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases}$$

4. 大气降水对 I、II、III 级边坡的隶属函数:

$$Y_I = \begin{cases} 0 & x \geq 0.8 \\ -2.08(x-0.8) & 0.32 < x < 0.8 \\ 1 & x \leq 0.32 \end{cases}$$

$$Y_{II} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.32 \quad x \geq 1 \\ 2.08(x-0.32) & 0.32 < x < 0.8 \\ -5(x-1) & 0.8 < x < 1 \end{cases}$$

$$Y_{III} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.8 \\ 5(x-0.8) & 0.8 < x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases}$$

5. 地下水对 I、II、III 级边坡的隶属函数:

$$Y_I = \begin{cases} 0 & x \geq 0.34 \\ -5.88(x-0.34) & 0.17 < x < 0.34 \\ 1 & x \leq 0.17 \end{cases}$$

$$Y_{II} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.17 \quad x \geq 1 \\ 5.88(x-0.17) & 0.17 < x < 0.34 \\ -1.51(x-1) & 0.34 < x < 1 \end{cases}$$

$$Y_{III} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.34 \\ 1.51(x-0.34) & 0.34 < x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases}$$

6. 构造对 I、II、III 级边坡的隶属函数:

$$Y_I = \begin{cases} 0 & x \geq 0.7 \\ -3.3(x-0.7) & 0.4 < x < 0.7 \\ 1 & x \leq 0.4 \end{cases}$$

$$Y_{II} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.4 \quad x \geq 1 \\ 3.3(x-0.4) & 0.4 < x < 0.7 \\ -3.3(x-1) & 0.7 < x < 1 \end{cases}$$

$$Y_{III} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.7 \\ 3.3(x-0.7) & 0.7 < x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases}$$

根据上述各影响因素的隶属函数和其实测值 x 可以分别求出对于 I、II、III 级边坡的隶属度。由此得出某地边坡每个影响因素以隶属度进行单项评价的结果。

我们以甘肃东乡县巴谢河流域内石拉泉山分水岭南侧边坡为例,将计算结果列表如下(表2):

每个因素的三个隶属度依次排列组成 6×3 矩阵,称为模糊矩阵,用 R 表示:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.33 & 0.66 \\ 0 & 0.80 & 0.20 \\ 0 & 0.65 & 0.35 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.906 & 0.091 \\ 0.33 & 0.66 & 0 \end{bmatrix}$$

表 2 石拉泉山边坡各影响因素隶属度

隶属度 各影响因素 实测值	Y_I	Y_{II}	Y_{III}
地形地貌: $x=0.9$	0	0.33	0.66
岩性: $x=0.6$	0	0.80	0.2
地震: $x=0.87$	0	0.65	0.85
大气降水: $x=1$	0	0	1
地下水: $x=0.4$	0	0.906	0.091
构造: $x=0.6$	0.33	0.66	0

(二) 权重计算

对各因素赋予不同的权数。计算权重的方法采用下列公式:

$$W_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中: C_i — i 种影响因素的实测值。

S_i — i 种影响因素的边坡分级标准,

对 S_i 可以取三个级别的均值即 $S_i = \frac{1}{3}(I + II + III)$ 。

为了进行运算,各单项权重还必须归一化,即

$$\bar{W}_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) / \left(\sum_{i=1}^6 \frac{C_i}{S_i} \right)$$

将石拉泉山边坡模糊集合 U 中各因素给予权重,计算结果列表3:

表 3

项 目	地形地貌	岩性	地震	大气降水	地下水	构造
C_i	0.9	0.60	0.87	1	0.4	0.60
S_i	0.70	0.60	0.76	0.707	0.508	0.7
W_i	1.285	1	1.14	1.41	0.795	0.857
$\bar{W}_i$	0.198	0.154	0.175	0.217	0.122	0.182

根据上表各影响因素指标权重和归一化后,组成一个 1×6 模糊矩阵,用 A 表示:

$$A = (0.198, 0.154, 0.175, 0.217, 0.122, 0.182)$$

(三) 综合评价

在对石拉泉山边坡各影响因素进行单项评价和权重计算后,得到上述两个模糊矩阵 A 和 R ,将 A 和 R 进行复合运算,以 AOR 表示。运算时,符号“ $\vee$ ”系指两数中取大数,“ $\wedge$ ”为两数中取小数。复合运算和综合评价如下:

$$AOR = (0.198, 0.154, 0.175, 0.217,$$

$$0.122, 0.182)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.33 & 0.66 \\ 0 & 0.80 & 0.20 \\ 0 & 0.65 & 0.35 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.906 & 0.091 \\ 0.33 & 0.66 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} &= \{(0.198 \wedge 0) \vee (0.154 \wedge 0) \vee (0.175 \wedge 0) \vee (0.217 \wedge 0) \\ &\quad \vee (0.122 \wedge 0) \vee (0.132 \wedge 0.33), \\ &\quad (0.198 \wedge 0.33) \vee (0.154 \wedge 0.8) \vee (0.175 \wedge 0.65) \vee \\ &\quad (0.217 \wedge 0) \vee (0.122 \wedge 0.906) \vee (0.132 \wedge 0.66), \\ &\quad (0.198 \wedge 0.66) \vee (0.154 \wedge 0.2) \vee (0.175 \wedge 0.35) \vee \\ &\quad (0.217 \wedge 1) \vee (0.122 \wedge 0.091) \vee (0.132 \wedge 0)\} \\ &= \{(0 \vee 0 \vee 0 \vee 0 \vee 0.132), (0.198 \vee 0.154 \vee 0.175 \\ &\quad \vee 0 \vee 0.122 \vee 0.132), (0.198 \vee 0.154 \vee 0.175 \vee \\ &\quad 0.217 \vee 0.091 \vee 0)\} \\ &= \{0.132, 0.198, 0.217\} \end{aligned}$$

对I、II、III级边坡的隶属度分别是: 0.132、0.198、0.217, 因对III级边坡的隶属度最大, 故石拉泉南侧边坡就其稳定性而言属III级边坡, 即极危险边坡。

巴谢河流域内石拉泉山(距洒勒山4公里)分水岭自1978年秋季产生裂缝以来, 山体变形日趋明显。1985年5月以来又在分水岭南侧斜坡地带(古滑坡壁)出现三条弧形裂缝和其相垂直的南北向裂缝, 发展迅速, 整个山体斜坡正处于蠕动变形阶段, 危险性是极其明显的。

实践证明, 用模糊数学方法预测边坡的稳定性在区域性滑坡调查中是可行的, 在详查阶段也可与其他方法对比运用。同时, 这一方法的试尝, 为滑坡多变量、多维因素的复杂计算输入电脑, 进行电算处理和评价奠定了基础。它的不足之处是前述各级边坡的初步标准和此方法在时间方面的准确预报有待进一步完善、修改。

参 考 文 献

- [1] 王克三, 1984年, 模糊数学方法在地下水水质污染综合评价中的尝试, 水文地质工程地质第1期。
- [2] 《工程地质手册》编写组, 1982年, 工程地质手册, 中国建筑工业出版社。
- [3] 汪培庄, 1983年, 模糊集合论及其应用, 上海科学技术出版社。
- [4] 中国科学院西北水土保持研究所, 1983, 水土保持通报, 第三期, 陕西省科技出版社。

(下转第16页)

- 1959年 工程地质讲座 (《水文地质工程地质》第4期)
- 1959年 中国综合工程地质图 (初稿) 的编制 (比例尺 1:4,000,000) (姜达权、朱平、许贵森)
(《水文地质工程地质》第7期)
- 1959年 中国综合工程地质图的编制 (英文) (姜达权、朱平、许贵森) (《中国科技成果》外文)
- 1959年 南水北调的几个工程地质问题 (《水文地质工程地质》第9期)
- 1962年 华北盆地的水利工程地质和水文地质分带特性的探讨
(地质学会32届学术年会宣读论文,《中国地质》第4期)
- 1962年 水利工程地质分带性 (姜达权、籍传茂) (《地质学会32届学术年会论文集》)
- 1962年 鲁西湖泊群的成因及水文地质和工程地质特性的探讨 (姜达权、孙昌仁)
(《地质学会32届学术年会论文集》)
- 1964年 从地质条件出发试谈黄淮海平原的综合治理问题 (《中国地质》第4期)
- 1978年 黄河的工程地质特性和开发治理黄河的途径 (1979年10月黄河中下游治理规划学术会议大会宣读;
1979年11月工程地质首届学术会议大会宣读,《人民黄河》1980年第1期)
- 1978年 黄河现代地质作用的一些基本特征和开发治理黄河的途径
(1978年第四纪冰川及第四纪地质学术会议大会宣读,《中国第四纪研究》1980年第1期)
- 1979年 从工程地质条件出发谈谈开发治理黄河有关技术经济的几个问题
(技术经济现代化规划会议大会报告,《会议简报》)
- 1979年 近代河流的地质作用与水利工程地质 (第三届第四纪地质学术会议论文集,会议宣读)
- 1979年 多砂河流的地质作用和工程地质特性的初步探讨 (首届工程地质学术会议论文摘要汇编)
- 1980年 调整自然作用与人类生产活动的关系,保持水土开发治理黄土高原
(国家科委、国家农委、中科院:黄土高原水土保持综合治理学术讨论会,大会报告,会议文件)
- 1980年 从地质条件谈中线南水北调 (水利部南水北调查勘会议发言,《会议简报》)
(历年的各项工作报告、技术管理工作中各项调查报告、规程、规范、总结、文章从略)

(边 斋)

在专业日历上

(上接第33页)

APPLICATION OF FUZZY MATHEMATICS IN SLOPE STABILITY EVALUATION

Jin Zexian Li Kun

Abstract

Majority of Slope Stability Evaluation up to Now is Based on the Theory of Limit Equilibrium, so as to get a Factor of Stability But in Fact, the Boundary Line of the Classification of the Factors is in a fuzzy Area. Therefore, There is some Unreasonableness in Evaluating the Slope Stability Rigidly by Several given Classified Values of the Factors, That is, Assigning Slopes with Similar Stability Factors into Different Classes for the Sake of Classification.

According to Fuzzy Mathematics, the Major Factors in all Respects that Control the Slope Development should be taken in First Consideration and Exp-

ressed in Numerical Values. Then, by Means of Sample Statistics, the Standard of the Classification of Slope Stability can be set up with Three Grades of Stability Confined on it.

The Slave Degree of each Factor to Grades I, II, III Depends on Slave Function and Real Value X.

Matrix R Consists of the Degrees Lined up in Order and can be Turned into Matrix A by Weighing and Unifying the Values of every Factor.

The Slave Degree of a given Slope to each Grade comes as a Result of the Compound Calculation of Matrix R and A and the Grade that has its Maximum with the Slave Degree should be Considered as the Level of the Stability.

An Example is taken to Demonstrate the above Mentioned Method and Predict the Stability of a Natural Slope.