

公路边坡灾害危险性预测模糊综合评判法

邱向荣¹, 袁仁茂², 许伟文³

(1. 广东省华南工程物探技术开发总公司, 广州 510080;
2. 北京大学环境学院, 北京 100871; 3. 广东省公路管理局, 广州 510080)

摘要: 根据建设用地地质灾害危险性评估的特点, 由影响公路边坡危险性的主要因素建成两层次指标体系, 利用模糊综合评判方法建立边坡危险性预测模型, 并通过实例说明其评估结果可以满足地灾评估的精度要求。文章指出, 模糊综合评判预测边坡危险性结果的可靠性主要取决于评判因素的选取是否有代表性, 以及因素权重、单因素评判和模糊合成模型的选择是否科学合理, 文中的一些方法仍有待完善。

关键词: 地质灾害预测; 公路斜坡稳定性; 模糊综合评判

中图分类号: P694 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2003) 03-0026-03

Fuzzy Mathematics Method for Evaluation
of Slope Stability

QIU Xiang-tong¹, YUAN Ren-mao², XU Wei-wen³

(1. Guangdong South China Engineering Geophysics Technology Development Co., Guangzhou 510080, China;
2. College of Environmental Sciences of Peking University, Beijing 100871, China;
3. Bureau of Road Management of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China)

Abstract: According to the evaluation characteristics of the geological disasters for constructed ground, the major factors that affect the slope stability was divided into two indexes systems, and constructed the evaluation model by the method of fuzzy mathematics. The result of practicing showed that the method satisfied the request of the geological disasters evaluation for constructed ground. The dependability of evaluation result depends mainly on the degree of factors representation and the rationality of the every factor value and the models.

Key words: geological disaster forecast; road slope stability; synthetically fuzzy evaluation

1 前言

建设用地地质灾害危险性评估(下称“地灾评估”)是一种处于可行性研究勘察至初步勘察阶段间、带有协助设计方案风险性决策的勘查类型, 其工作手段主要是收集区域地质环境资料 and 进行野外地质灾害调查, 因此, 地灾评估中是不可能掌握边坡全面而具体的评价要素, 可供使用的量化指标更是非常有限。由于这些客观因素的限制, 造成目前边坡地质灾害危险性预测工作仍处于定性评估阶段, 定量-半定量评估方法仍有待于不断探索。为了提高地灾评估结果的科学性, 尽量减少评判的主观性和随意性, 本文试图以模糊综合评判法从定量的角度来探讨公路路堑边坡的危险性评估方法, 并本着简便、实用但也满足地灾评估精度要求的思想来论述。

2 模糊综合评判数学模型^[1]

设有两个论域, 因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ (u_i 为评判因素) 和评判集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ (v_j 为评判等级), 如果对 U 中的每一个元素 u_i 单独作一个评判 $f(u_i)$, 就可以看作是从 U 到 V 的模糊映射, 通过模糊映射 f , 可以诱导出模糊矩阵 R :

$$R = (r_{ij})_{n \times m} \quad 0 \leq r_{ij} \leq 1$$

称 R 为从 U 到 V 的单因素评判矩阵。

若存在一个集合 U 上的模糊子集 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, A 以向量表示, 且 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$, 其中 a_i 为第 i 种因素的权重, 则可惟一确定一个从 U 到 V 的模糊变换 B , B 为模糊合成结果。

$$B = A \circ R = (b_1, b_2, \dots, b_m)$$

其中 b_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 反映了第 j 种评判 v_j 与模糊集 B

¹ 收稿日期: 2003-04-25
作者简介: 邱向荣(1973-), 男, 工程师, 研究方向为岩土工程、地质环境灾害、工程勘察等, 已发表论文多篇。

的隶属度。

3 边坡稳定性影响因素的选择

3.1 因素的选择原则

地质灾害危险性的大小取决于地质灾害的发育程度和危害程度。就公路边坡而言, 边坡失稳的规模和发育程度直接影响到其危险性, 故就其本质, 评估边坡的危险性问题仍然是评估边坡的稳定性问题。但是, 这种稳定性评估却带有明显的地灾评估的特色, 其原因是地灾评估面对的是众多的路堑边坡, 不是个别边坡, 边坡间的环境地质条件存在很大的变化, 且不可能掌握每个边坡详细的岩土层特征及岩土参数, 边坡失稳的主导因素也较难分辨。由此决定了边坡稳定性影响因素的选择也带有地灾评估的特色, 其选择原则为: (1) 选择宏观因素, 避开具体的物理力学性质指标和岩、土体结构类型; (2) 全面性与代表性协调, 突出代表性因素, 但也尽可能涵盖主要影响因素; (3) 因素的独立性越大越好, 关联性强的因素宜合并, 以避免模糊合成模型选择的困难; (4) 将边坡附近已发地质灾害现状作为一个因素进行工程地质类比。

3.2 因素体系

影响斜(边)坡稳定性的因素主要有地形地貌、岩土性质、边坡的构造环境、坡体结构特征、水文地质条件、地震地质环境、气候因素、风化作用、植被条件以及人为因素等^[2~5]。

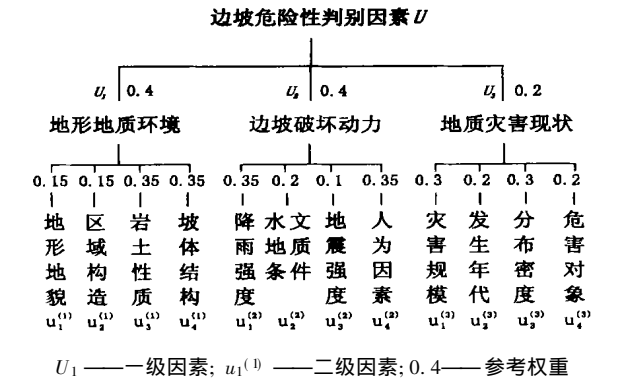


图 1 综合评判两层次指标体系

根据因素选择的原则, 上述因素有些需合并概化。如气候因素和风化作用, 气候因素主要通过降雨作用、风化作用、风蚀作用及高寒地区的冻融作用来影响边坡稳定性, 故气候因素涵盖了风化作用, 且风化作用在短时期内主要对软岩边坡及边坡的软夹层影响较大, 对硬岩边坡影响较小, 但这些影响在边坡的岩土性质和坡体结构特征中已反映出来, 而风蚀作用及冻融作用对多数地区而言代表性较小, 故气候因素和风化作用可概化为降雨强度。植被对边坡的影响表现为水文地质效应和力学效应, 水文地质效应方面对边坡稳定性是有利的, 但力学效应中, 就植物根系的锚固作用来说, 对边坡稳定性有利, 但树木的自重及其传递风的动力荷载这些因素

则不利于边坡稳定, 故植被与边坡稳定性的关系较难分辨, 且边坡开挖破坏了原有植被, 故该因素不予考虑。根据上述分析, 通过归纳合并, 可建立边坡危险性评判的两层次指标体系(图 1)。

4 模糊综合评判模型及其实现步骤

(1) 确定评判指标, 建立因素集 U 。根据前文分析的结果, 将影响边坡稳定性的 3 个一级因素为一级因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3\}$, 由 12 个二级因素构成 3 个二级因素集 $U_1 = \{u_1^{(1)}, u_2^{(1)}, u_3^{(1)}, u_4^{(1)}\}$ 、 $U_2 = \{u_1^{(2)}, u_2^{(2)}, u_3^{(2)}, u_4^{(2)}\}$ 、 $U_3 = \{u_1^{(3)}, u_2^{(3)}, u_3^{(3)}, u_4^{(3)}\}$ 。

(2) 确定每个二级因素的评判论域, 形成评判集 V 。根据国土资源部有关技术文件¹的规定, 地质灾害的危险性共分为危险性大、中等和危险性小三个等级, 由此可得出评判集 $V = \{v_1, v_2, v_3\}$, 其中 v_1 对应危险性大, v_2 对应危险性中等, v_3 对应危险性小。

(3) 单因素评判, 得出各二级因素的单因素模糊矩阵 R_k 。单因素评判实际上就是要确定评判因素与评判等级间的定量关系, 通常是通过隶属函数来刻画两者间的隶属度, 也就是某因素为定值时, 待判样本在仅考虑该因素时有多大程度属于某一类别。

由于地灾评估的特点决定着评判因素必须以宏观因素为主, 造成概化后的二级因素仍然是多因素组合的因素集, 因此这些二级因素多为定性指标, 定量-半定量指标少, 所以, 隶属函数显然很难合理确定。但是, 客观上存在这样几个事实:¹ 地灾评估精度要求不是很高; ④参与评估的人员属专业技术人员, 具有相应的专业知识和工程实践经验; ④对于各二级因素, 若给定相应的条件, 根据工程经验, 是可以分辨该条件与评判等级的侧重关系, 如对于降雨强度而言, 降雨量越大, 边坡失稳的可能性就越大, 出现较大规模的失稳可能也越大, 因此降雨强度大边坡就更偏向于危险性大; ^{1/4} 许多情况下, 即使给定某个特定条件, 对于该条件到底属于那种评判等级, 我们也并不能绝对地肯定或否定, 如: 反向坡一般较顺向坡稳定, 其危险性一般较小, 但我们并不能肯定反向坡就一定属于危险性小。上述分析说明, 对于地灾评估, 单因素评判可采用经验赋值法来确定, 由专业技术人员根据边坡的具体条件对因素与各评判等级的隶属度进行赋值 (r_{ij})。这些量值反映因素与各评判级别的相对隶属度, 当 $r_{ij} = 1$ 表示该因素完全隶属于对应评判等级度, 与其他评判等级无关, $r_{ij} = 0$ 表示隶属度最小, 即与该评判等级无关。考虑到每项地灾评估工作一般有多名技术人员参与, 故可让多位技术人员共同参与单因素评判, 则综合评判结果会更加可靠。对 12 个二级评判因素进行逐个评判便可得出单因素评判矩阵 R_k 。

表 1 提供了每种评判因素对应不同危险性等级的基本参考条件, 评判时若没有把握, 则可根据边坡的具体特征参

¹ 1 国土资源部文件, 建设用地地质灾害危险性评估技术要求(试行), 1999。

照该表进行确定。

表 1 因素危险性评判标准及权值参考表

二级因素	危险性大	危险性中等	危险性小
地形地貌	坡角大于 30°;相对高差大于 100 m	坡角 20~30°;相对高差 50~100 m	坡角小于 20°;相对高差 50 m
区域构造	全新活动性断裂影响范围;断裂破碎带或褶皱核部,且构造线与坡向近垂直	一般断裂破碎带或褶皱核部影响范围,构造线与坡向近平行	无断裂或断裂破碎带外缘,位于单斜构造中
岩土性质	松软的坡残积土层;膨胀性岩土;全-强风化的煤系地层	中密(硬塑)以上的坡残积土;各类破碎的岩层	各类弱风化-微风化完整、较完整的岩层
坡体结构	岩土界面清晰,界面物性差异大;顺向坡层面(主节理面)倾角小于坡度;软硬夹层发育	岩土界面不甚清晰,界面物性差异较大;顺向坡层面(主节理面)倾角大于坡度;软硬夹层较发育	岩土界面呈渐变关系;切向或反向坡;无或很少软硬夹层分布
降雨强度	一次降雨量大于 250 mm,最大日降雨量大于 100 mm	一次降雨量 150~250 mm,最大日降雨量 50~100 mm	一次降雨量小于 150 mm,最大日降雨量小于 50 mm
水文地质条件	地表水对坡脚侵蚀强烈,地表水补给地下水;坡脚泉水众多	地下水补给地表水,坡中或坡脚有泉水、湿地分布	地下水埋深大于边坡开挖深度,坡面无水出露
地震强度	地震动峰值加速度大于等于 0.2 g	地震动峰值加速度 0.1 g	地震动峰值加速度 0.05 g
人为因素	岩质边坡坡高大于 30 m,坡角大于 65°;土质边坡坡高大于 20 m,坡角大于 55°	岩质边坡坡高 20~30 m,坡角 55~65°;土质边坡坡高 10~20 m,坡角 45~55°	开挖深度小于 10 m,坡角 45°
灾害规模	大型、巨型	中型	小型、微型
发生年代	近期发生	早期发生	古滑坡、古崩塌等
分布密度	边坡失稳现象很多	边坡失稳现象较多	边坡失稳现象少
危害对象	评估线路	乡镇或人口较密集区	居民点极分散区

注:因素的危险性等级参考标准是参考西南铁路边坡危险性判别指标量化原则整理而成。

(4) 确定权重系数,构成权重矩阵 A 。在各级评判因素中,每个因素在该级中的作用是不同的,故应对不同层次的因素分别赋予权重。从地灾评估的实际工作出发,可采用专家调查法或德尔菲法^[9]组织专家或专业技术人员进行评判,得出权重系数。图 1 是根据工程实践给出的一组参考权值。

(5) 模糊综合评判。根据边坡危险性预测模型的特点,选用两个层次的评判模型。考虑到边坡危险性预测模型的因素及权重较多,为避免丢失有效信息,降低综合评判的分辨率,因此采用加权平均模型 $M(\cdot, +)$ 进行合成。首先合成二级因素的综合评判

$$B_k = A_k R_k = (a_1^{(k)}, a_2^{(k)}, a_3^{(k)}), \\ a_4^{(k)} \quad (r_{ij}^{(k)})_{4 \times 3} \quad (k = 1, 2, 3)$$

式中: A_k ——各二级因素的权重, R_k ——相应的单因素模糊矩阵。由此便可构成边坡危险性综合评判的模糊变换 $R = \{B_1, B_2, B_3\}$, 将其与一级评判因素的权重矩阵 A 进行合成, 便可得到边坡的模糊综合评判

$$B = A R = (a_1, a_2, a_3) \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}$$

根据综合评判 B 和最大隶属度原则便可综合评判边坡的危险性。

4 应用实例

某岩质高边坡在开挖过程中多次发生严重的崩塌、落石现象,造成右侧河道堵塞,后进行削坡处理,形成高度约 80~100 m 的人工边坡。边坡目前仍继续处于不太稳定状态,但仍未出现大规模的失稳现行,现正在治理中。其基本地质

条件如下:边坡位于低山“V”形河谷左岸,相对高差 200~300 m,自然坡度 25~45°;边坡前缘河谷为一区域性逆断层(非全新活动断层);地表覆盖薄层松散状碎石夹亚黏土,下伏为中泥盆统桂头群变质砂岩,以弱风化为主,岩质坚硬,但很破碎;斜坡属顺向坡,岩层倾角从坡脚的 8~15°过渡为坡顶的 25~40°。该区雨量充沛,雨季日最大降雨量在 80 mm 以上;坡脚见有下降泉,流量小;地震基本烈度为小于Ⅱ度区;原设计坡度 45~60°;开挖高度 30~50 m。该段边坡失稳现象较多,多为近期发生,规模以中型—大型为主,危害对象主要为拟建公路,少数为沿线村庄。

表 2 边坡危险性评判因素评估表

U	A	U_k	A_k	v_1	v_2	v_3
U_1	0.4	$u_1^{(1)}$	0.20	0.8	0.2	0.0
		$u_2^{(1)}$	0.10	0.8	0.2	0.0
		$u_3^{(1)}$	0.35	0.0	0.8	0.2
		$u_4^{(1)}$	0.35	0.8	0.2	0.0
U_2	0.4	$u_1^{(2)}$	0.35	0.5	0.5	0.0
		$u_2^{(2)}$	0.20	0.2	0.8	0.0
		$u_3^{(2)}$	0.10	0.0	0.0	1.0
		$u_4^{(2)}$	0.35	0.4	0.6	0.0
U_3	0.2	$u_1^{(3)}$	0.30	0.4	0.5	0.1
		$u_2^{(2)}$	0.20	0.7	0.2	0.1
		$u_3^{(2)}$	0.30	0.3	0.7	0.0
		$u_4^{(2)}$	0.20	0.7	0.1	0.2

根据上述条件,可建立边坡危险性预测的模糊综合评判模型(表 2),表中的因素权值采用本文提供的参考值。通过模型 $M(\cdot, +)$ 进行合成可得:

$$B_1 = (0.530, 0.400, 0.070) \\ B_2 = (0.425, 0.475, 0.100) \quad (\text{下转第 36 页})$$

坡体将处于滑动状态,但现状上这些滑坡并没有在滑动。其原因是极限平衡法计算滑坡稳定系数时,均隐含着与计算剖面垂直的滑动面无限延伸这一条件,是不考虑条块与其两侧

滑体之间的摩擦力的,故此 F_s 偏小。由此说明,表中的 F_s 基本上是合理的,即当 F_s 接近 1 时,该滑坡处于临滑状态,若受雨水影响,则可继续下滑。

表 2 黏性土滑坡稳定系数

滑坡编号	H1	H2	H4	H5	H 6	H7	H8	H9
滑体 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	18. 5	18. 5	18. 5	18. 5	18. 5	18. 5	18. 5	18. 5
滑动带 c/kPa	30	28	25	18	18	20	20	30
滑动带 $\varphi/^\circ$	22	20	21	15	15	18	18	20
稳定系数 F_s	1. 26	1. 12	1. 13	0. 96	0. 98	1. 01	1. 04	1. 12

滑坡编号	H10	H11	H12	H 13	H14	H15	H16	H17
滑体 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	18. 5	18. 7	18. 7	18. 7	18. 5	18. 5	18. 7	18. 7
滑动带 c/kPa	30	18	18	20	20	25	25	25
滑动带 $\varphi/^\circ$	23	15	15	18	15	20	22	22
稳定系数 F_s	1. 29	0. 97	0. 99	1. 03	0. 98	1. 15	1. 23	1. 27

4 结 语

上(陵)埔(前)高速公路沿线滑坡以黏性土浅层滑坡为主,个别为岩层滑坡。产生黏性土滑坡的内因主要是土体抗软化能力差,且处于侵蚀作用较强烈的微地貌环境中,外因主要是降雨强度较大、不利的地下水动力条件和人为破坏坡

体结构;岩层滑坡主要是受不利的结构面组合所控制。经评估,沿线滑坡目前处于不稳定—基本稳定状态。另外,基于建设用地质灾害危险性评估的研究深度,目前仍无法全面提供滑坡防治设计所需参数。故建议对有关滑坡的稳定性及危害性进行深入的勘察和论证,以便对症下药,采取有效的防治措施。

参考文献:

[1] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册(第三版)[M] . 北京: 建筑工业出版社, 1992.
[2] 张咸恭, 等. 中国工程地质学[M] . 北京: 科学出版社, 2000.
[3] GB 50330— 2002 . 建筑边坡工程技术规范[S].

(上接第 28 页)

$$B_3 = (0.490, 0.390, 0.120)$$
$$B = A \quad R = (0.480, 0.428, 0.092)$$

根据最大隶属度原则,可综合判定该边坡属于危险性大(V_1)的边坡。另外可以看出该边坡同时也较接近危险性中等,但不可能属于危险性小,这与实际情况是比较吻合的。

5 结 论

(1) 模糊综合评判决策是对受多因素影响的事物做出全面评价的一种十分有效的多因素决策方法,适合于边坡这类由多因素控制其危险性的工程项目。在地灾评估中采用模糊综合评判方法可以将本来模糊的、主观性很大的定性评估转

变为定量评判,其思路清晰、评判结果直观,且能够满足地灾评估的精度要求,是提高评估结果科学性的一种有效方法。

(2) 按本文所论述的方法来建立的评判模型, 可以从宏观上预测边坡地质灾害危险性的总体趋势,但对于某一因素起主导作用的边坡,该预测模型可能会失效,但这种“个例”问题并不是地灾评估的主要目的。

(3) 边坡危险性预测的模糊综合评判法关键是评判因素的选取是否有代表性,以及因素的权重、单因素评判及模糊合成模型的选择是否科学合理。本文在提出模糊综合评判定量评估边坡危险性这一思路的同时,也相应地介绍上述问题的一些解决方法,但更为完善的评判体系仍需不断完善。

参考文献:

[1] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用(第二版)[M] . 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.
[2] 崔政权, 李宁. 边坡工程—— 理论与实践最新发展[M] . 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
[3] 张咸恭,王思敬, 张倬元, 等. 中国工程地质学[M] . 北京: 科学出版社, 2000.
[4] 张倬元,王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M] . 北京: 地质出版社, 1994.
[5] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册(第三版)[M] . 北京: 建筑工业出版社, 1992.
[6] 同济大学. 注册岩土工程师基础考试复习教程(下)[M] . 北京: 建筑工业出版社, 2002.