

滑坡防治工程效果的模糊综合后评价研究

郑明新¹, 殷宗泽², 吴继敏², 杜宇飞¹, 栾宇¹

(1. 华东交通大学道桥与岩土工程研究所, 江西 南昌 330013; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过现场调研比较, 筛选出滑坡防治效果的 11 项后评价因子, 包括滑坡本体因子和防治工程因子两大类。进而分析了国内外各种综合评价方法, 由于人们对滑坡及治理工程的认识存在不确定性和模糊性, 故尝试采用模糊数学方法进行定量或半定量描述, 根据滑坡及防治工程特征对后评价效果的影响程度确定其隶属度, 并提出修正的功能重要度系数权重确定法来确定权重, 初次建立了模糊综合评价模型。

关键词: 后评价因子; 隶属度; 修正权重确定法; 模糊综合后评价模型

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)10-1224-06

作者简介: 郑明新(1966-), 男, 教授, 博士, 从事地质与岩土工程的教学, 主研滑坡与路基病害防治。

Post-fuzzy comprehensive evaluation of effectiveness of landslide control

ZHENG Ming-xin¹, YIN Zong-ze², WU Ji-min², DU Yu-fei¹, LUAN Yu¹

(1. Institute of Bridge & Road and Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Geotechnical Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the analysis of a great deal of field investigation data, 11 factors, which include the landslide itself and controlling measurements, were selected. Then, comparing with the current evaluation methods, fuzzy mathematics is adopted since there were difference and fuzzy about the landslide and the effectiveness of its controlling. Furthermore, according to the affecting degree of the factors, subordinate degree of the 11 factors were described quantitatively or half-quantitatively, and the revising weight determination method of forced decision was proposed. Finally, the post-fuzzy comprehensive evaluation model of effectiveness of landslide control was set up. The model, which had been certified preliminarily, was useful and effective.

Key words: post-evaluation factors; subordinate degree; revising weight determination method; post-fuzzy comprehensive evaluation model

0 引言

对滑坡防治工程效果的后评价实质上就是收集、分析和反馈防治工程本身信息的过程, 是对已经完成的工程项目的目标、施工过程、经济效益进行系统、客观的分析。通过分析防治目标与功效是否达到、工程措施是否经济、合理, 以便总结经验教训, 及时有效的反馈信息, 为滑坡防治工程设计提供依据, 使滑坡防治更经济、合理。

那么, 采用什么方法评价最有效呢? 目前国内外常用的综合评价方法主要有: 专家评价法、经济分析法、运筹学和其它数学方法、灰色决策、可拓决策。其中专家评价法简单方便, 易于使用, 但是主观性太强, 往往用于一些不太复杂的对象的评价; 经济分析法含义明确, 便于不同对象的对比, 但计算公式或模型不易建立, 对于涉及较多因素的评价对象, 很难给

出一个统一于一种量纲的公式; 运筹学^[1]比较严谨, 要求评价对象的描述清楚, 而对于某些模糊因素却难于确切表达。

由于滑坡系统是一个开放的复杂系统, 其稳定性受地质因素和工程因素的综合影响, 加上防治工程的设计、施工多边, 评价因素多具模糊性, 人们对其认识不尽相同, 很难直接用统计学的方法具体判断。而 20 世纪 60 年代提出的模糊数学理论可运用模糊变换基本原理和累计隶属度原则, 可考虑与被评价事物相关的各种因素, 对方案进行综合评价。特别是模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation)可对模糊对象系统进行综合评价(comprehensive evaluation), 适宜于评价因素多、结构层次多的对象系统, 适于指

基金项目: 教育部高等学校骨干教师资助项目(65A)

收稿日期: 2005-08-23

标值不易统计量化的对象。但其缺陷是隶属函数的确定还没有系统的方法。

目前模糊综合评判被广泛应用于各个领域,如用于区域地质稳定性评价^[2]、探讨节理岩体强度指标的选取^[3]、优化滑坡相似试验材料^[4]、预测公路冻土路基沉降^[5]、边坡稳定性综合评价^[6]与潜在破坏分析^[7]。而对于滑坡防治工程效果的综合评价尚未见到有关报道。本文尝试采用模糊数学方法进行定量与半定量描述,通过分析筛选出滑坡防治效果的后评价因子,找出各影响因素相互关系,详细给出各评价指标的层次结构,进而建立模糊综合后评价模型,从整体上把握滑坡防治工程的效果。

1 防治工程效果后评价因子的选择

防治工程效果评价模型的可靠性,很大程度取决于评价因子的选择。与滑坡防治有关的因素很多,大体上可分为滑坡本体因子和防治工程因子两大类。

1.1 滑坡本体因子

滑坡本体因素指滑坡体本身的特征,包括滑坡体复杂程度(坡体结构、滑动面几何形状、水文地质条件)、滑坡规模(滑坡体长度、厚度)、滑带土强度参数 c 和 ϕ 取值的合理性、对滑带土强度变化及滑坡性质的认识程度等。

(1) 坡体岩性和结构:坡体结构控制着滑动面的形成,坡体岩性决定着滑带土的强度特征。坡体岩性和结构特征在很大程度上决定了滑坡的性质,对防治工程方案的制订及防治效果起着举足轻重的作用。

(2) 水文地质条件:水的存在使坡体容重增大、孔隙水压力增大甚至产生动水压力,同时软化滑带土造成滑坡下滑力增大,抗滑力减小,直接影响着防治工程方案的选择和工程规模。

(3) 滑动面的几何形状:滑动面几何形状在很大程度上控制着滑坡的运动特性,是滑坡稳定性分析、推力计算、整治工程设计的重要依据,控制着防治工程的类型、规模和抗滑结构设防位置。

(4) 滑坡规模:一般滑体厚度、长度大者,则滑坡体体积大,不稳定,具有较大的滑动势能、推力较大,防治工程量大,滑坡防治难度较大。

(5) 对滑坡的认识程度:包括对滑坡成因、变形破坏机制、空间的分条、分级、分层情况,以及控制性滑面位置的认识程度,它们直接影响着滑坡防治工程的设计。

(6) 滑带土强度参数 c 和 ϕ 取值的合理性:合理选择 c 和 ϕ 值则可能充分发挥地质体内在抗滑能力,其大小决定着滑坡推力的大小,在很大程度上控制了防治工程的类型和规模。同时 c 、 ϕ 值在整治前后会发生

一定的变化,其变化在很大程度上取决于滑坡的发生机制和运动状态,影响了工程设计中安全系数的大小,是制约滑坡防治安全经济的重要因子,故合理选取 c 和 ϕ 是防治效果后评价的重要因子。

1.2 防治工程因子

防治工程因子反映治理前的防治思路与防治方案的合理性(即是否针对滑坡成因优先考虑了排水、减重与反压、轻型结构等措施)、设防位置、结构受力的合理性、防治后的结构受力测试与位移监测情况等,可概括为:

(1) 工程规模(造价等):防治工程量是制约滑坡防治费用的重要因子。主要从滑坡治理方案、工程规模、总造价是否与滑坡的规模、复杂程度相适应程度来分析,分析是否针对滑坡成因优先考虑排水、减重与反压轻型结构等较为经济的措施。

(2) 施工工期与难度:分析研究滑坡治理的工期(施工质量)、抗滑结构复杂程度是否与滑坡的规模、滑坡性质复杂程度相对应。

(3) 结构受力的合理性:分析抗滑结构受力的合理性,依此分为:①采用预应力锚索抗滑桩、预应力锚索(框架)等新型结构,或钻孔为主的地下排水措施;②采用普通抗滑桩,或钢筋混凝土挡土墙,或以支撑渗沟为主的措施;③抗滑挡墙,或刷(消)方减载与反压措施,或以排水盲洞为主的工程;④以重型抗滑沉井,或抗滑明洞与抗滑桩相结合为主的防治措施。

(4) 抗滑结构位置选择的合理性:分析抗滑结构布置位置的合理性。分为:①抗滑结构布置在抗滑地段,即利用滑动面反坡地段,或排水工程恰好分布在地下水集中部位;②抗滑结构布置在抗滑地段,但剩余推力仍然偏大,或排水工程接近于地下水集中部位;③抗滑结构布置牵引段或主滑段与抗滑段连接部位,滑坡推力较大,或排水工程接近于地下水集中部位;④抗滑结构布置在主滑地段,滑坡推力巨大,或排水工程布置在地下水贫水地带。

(5) 排水效果:分析排水工程结构、位置的合理性及排除地下水、地表水的情况依此分类。

(6) 结构受力与设计值之比:根据“滑坡推力实测比 R_t ”^[8],即抗滑结构实际受力 T 与设计值 E_T 之比来评价抗滑结构设计是否合理。将 $R_t = T/E_T$ 分为4类:0.60~1.0、0.40~0.60、0.15~0.40、<0.15或>1.0。认为 $R_t = T/E_T$ 实测达到0.60防治效果很好。小于界限0.15说明防治太保守。

(7) 滑坡及抗滑结构位移状况:依据滑坡及抗滑结构位移量是否在被保护对象的容许范围之内,以及变形对抗滑结构本身安全的影响来分析滑坡防治的效果。

(8) 被保护对象的重要性: 鉴于对滑坡整治均要投入大量工程, 被保护对象均视为重要。

(9) 防治工程环境效应: 鉴于生物防护多用于边坡防护, 对大中型滑坡仅是一种辅助措施, 归并在工程规模及结构受力合理性中。

(10) 抗滑结构实施后抗拒外在因素的能力, 如受到地震、降雨、河流冲刷以及人类工程活动作用等, 鉴于排水效果、抗滑结构合理性等考虑了外在因素的影响, 暂不列入。

从而, 防治工程效果后评价因子可归结为滑坡复杂程度、滑坡规模、对滑坡性质的认识程度、防治工程规模、施工工期与难度、结构受力合理性、 c 和 φ 取值的合理性、抗滑结构位置选择的合理性、排水效果、结构受力与设计值之比及滑坡及抗滑结构位移状况等 11 项。

2 防治工程效果的模糊综合评判

2.1 模糊综合评判的原理和方法

2.1.1 基本原理

模糊综合评判是针对上述评价因子建立后评价模型, 从整体上把握滑坡性质与整治措施特征以便做出客观的后评价。具体思路是:

(1) 将研究程度较高、防治效果为大家所公认的滑坡工点作为典型工点, 根据各工点特征划分出不同的等级。

(2) 找出可能影响其防治效果的诸相关因素 (或称变量), 并按照滑坡防治效果的程度进行排序, 建立模型工点与诸变量之间的关系——后评价模糊综合评判模型。

(3) 开展对其它防治工程效果的后评价。

2.1.2 数学模型

判断某一滑坡工点的防治效果, 需选用若干评判因素 (或称变量) $U_1, U_2, \dots, U_n$, 构成评判因素论域 $U: U=\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 。

而评判结果 $V_1, V_2, \dots, V_n$ 构成结论论域 $V: V=\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 。

对某一具体滑坡工点而言, 若能求出各因素对每一种评价结果的隶属度, 则可得出模糊矩阵 R

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2m} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \dots & r_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

再考虑各个因素对滑坡防治效果评价的作用, 给出各因素 (变量) 一个权重, 组成论域 U 上的另一个

模糊向量——权向量 A

$$A=\{a_1,a_2,a_3,\cdots,a_n\} \quad (2)$$

从而可据 R 、 A 对未知区段进行预测, 即对某区段的评判结果为: $B=A \cdot R$

B 是由 m 个数据构成的集合, 按最大隶属度原则, 便可判定该滑坡工点防治效果的优劣程度。

2.2 防治效果优劣等级的划分

按照习惯并考虑现场易于分辨和掌握, 防治效果分为 4 级: 很好、良好、一般、过于保守或失败, 详见表 1。

表 1 滑坡防治效果分级一览表

Table 1 The effectiveness of landslide control	
防治效果分级	滑坡防治效果特征
很 好	滑坡已稳定, 抗滑结构受力合理、经济: ①防治后滑坡稳定性达到要求, 已经稳定; ②整治后滑坡及抗滑结构各种位移均在容许范围之内; ③各个抗滑结构受力合理, 实测推力与设计推力较为一致, 充分发挥了抗滑结构的作用; ④充分调动了岩土自稳能力, 整治后滑带土强度得到提高 (抗滑结构位置合理、 c 和 φ 取值合理、排水效果好); ⑤效益显著 (工程治理规模对滑坡规模而言偏轻型, 或工程费用与滑坡体积之比偏小)。
	已基本消除危害, 抗滑结构受力基本合理。 ①防治后滑坡稳定性达到要求, 已经稳定; ②整治后各种位移在容许范围之内; ③各个抗滑结构受力合理, 实测推力与设计推力有一定出入; ④整治后滑带土强度得到提高; ⑤效益一般 (工程治理规模对滑坡规模而言偏重型, 或工程费用与滑坡体积之比偏大)。
良 好	已收到一定防灾效果, 抗滑结构受力不尽合理, 或滑坡尚存在一定威胁。 ①防治后滑坡稳定性初步达到要求; ②整治后各种位移尚在容许范围之内; ③各个抗滑结构受力尚合理, 实测推力与设计推力有较大出入; ④未充分调动岩土的自稳能力, 整治后滑带土强度未得到提高, 个别地段甚至有降低趋势。
一 般	滑坡尚未完全根治, 威胁较大, 需继续整治。 ①整治后滑坡稳定性不能达到要求; ②位移尚在不断发展中, 威胁被保护者的安全; ③不能调动岩土的自稳能力, 滑坡后滑带土强度不断恶化; ④各个抗滑结构受力不尽合理, 未充分发挥抗滑结构的作用。
过于保守, 或失败	

2.3 评价因子隶属度的确定

针对上述 11 项评价因子, 参照后评价结果分级表 1, 结合现场情况将每项评价因子又被分成 4 种情况。其中 Y 表示隶属函数, 以 I、II、III、IV 分别表示防治效果很好、良好、一般、失败或过于保守。依此给出 11 项因子相应的隶属函数 (略)。例如对滑坡及抗滑结构位移状况 (X11) 的隶属函数可根据滑坡及抗滑结构位移量是否在被保护对象的容许范围之内, 以及变形对抗滑结构本身安全的影响可分为: K1 位移量

在被保护对象的容许范围之内, 变形对抗滑结构本身安全无影响; K2: 位移量在被保护对象的容许范围之内, 变形对抗滑结构本身安全稍微有影响; K3: 滑坡及抗滑结构位移量接近被保护对象的容许值, 变形对抗滑结构本身安全有影响; K4: 滑坡及抗滑结构位移量已超出被保护对象的容许范围, 变形对抗滑结构本身安全构成威胁。相应隶属函数为:

$$Y_1 \begin{cases} 1.00, x_{11} \in k_1 \\ 0.75, x_{11} \in k_2 \\ 0.50, x_{11} \in k_3 \\ 0.01, x_{11} \in k_4 \end{cases}, Y_2 \begin{cases} 0.70, x_{11} \in k_1 \\ 0.90, x_{11} \in k_2 \\ 0.50, x_{11} \in k_3 \\ 0.20, x_{11} \in k_4 \end{cases}, Y_3 \begin{cases} 0.25, x_{11} \in k_1 \\ 0.50, x_{11} \in k_2 \\ 0.70, x_{11} \in k_3 \\ 0.50, x_{11} \in k_4 \end{cases}, Y_4 \begin{cases} 0.01, x_{11} \in k_1 \\ 0.30, x_{11} \in k_2 \\ 0.60, x_{11} \in k_3 \\ 0.99, x_{11} \in k_4 \end{cases}$$

取值主要依据专家经验的调查并结合现场调研得到, 若防治措施密切结合滑坡性质、结构越轻型、越利于岩土体自身强度的发挥, 或滑坡趋于稳定、抗滑结构位移量在容许范围之内, 而滑坡体越复杂、越难于治理, 则赋值越趋于防治效果好的方向。滑坡及抗滑结构位移状况若处于 K1 情况, 治理效果很好的隶属度赋值 1.0; 处于 K2 情况, 治理效果很好的隶属度赋值 0.75; 处于 K3 情况, 治理效果很好的隶属度赋值 0.50; 处于 K4 情况, 治理效果很好的隶属度赋值 0.01。其它赋值类似。

2.4 权重的确定——修正的特尔菲法功能重要度系数法

在确定了各单因素评语构成的模糊矩阵 R 之后, 还需确定一个权向量以表征各因素对滑坡防治效果评估所起的作用。本文采用特尔菲法和层次分析法并结合专家咨询法来综合确定。

特尔菲法利用功能重要度系数法^[9]针对子因素功能进行评价。一个上位功能通常有若干个下位功能, 而每一个下位功能对上位功能的作用是不相等的。按照“按劳分配”的原则, 认为作用大的功能有较大的能, 但由于考虑按“0-1”方法存在“某一因子均不比其他因子功能重要, 则总分为 0, 意味着其权重为 0 的可能”, 加上该方法的缺陷, 如有的因子功能明显比其他因子重要, 而有的则不明显。因此, 本文对“功能重要度系数”确定权重进行了改进, 将重要度系数改进为“0-0.5-1”评分法来计算, 以免将因子权重人为夸大而造成评价失误。即在评分时, 用功能与其他各功能依次比较, 若相对某功能明显重要便得 1 分; 相对某功能重要性不明显则得 0.5 分(模糊性); 相对某功能不重要便得 0 分; 自己与自己相比不得分, 以“空白”划去。得到各个因子权重系数的确定见表 2。

3 模糊综合评判的计算

3.1 评判单元

针对相对独立的滑坡, 开展了滑坡工程地质勘察、治理工程设计和施工、完工后滑坡的受力、位移监测, 结合其工程规模及地质体内在抗滑能力的发挥程度等, 可作为一个评价单元进行后评价。表 3 中 6 处滑坡^[10]分别作为单独的单元, 根据滑坡勘察、设计、监测资料, 结合现场调研进行分析, 并对各个单元的评价因子据上述方法 2.3 确定, 见表 3。

表 2 专家“0-0.5-1”评分及各因子权重系数一览表
Table 2 Evaluation and weighing of factors

一级因子	滑坡体特征 0.265			防治工程特征 0.18			质体本身强度发挥程度 0.275			抗滑结构受力 和位移 0.28		功能 得分	权重 系数
	滑坡 复杂 程度	滑坡 规模	对滑坡 的认识 程度	防治 工程 规模	施工工 期与难 度	结构受力 合理性	c 和 ϕ 取 值的合 理性	抗滑 结构 位置	排水 效果	实测 结构 受力	滑坡或抗 滑结构位 移状况		
滑坡复杂程度		0.5	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0	1	0.5	0	5	0.09
滑坡规模	0.5		0	0.5	0.5	0.5	0	0	0.5	0	0	2.5	0.045
对滑坡的认识程度	0.5	1		0.5	1	1	0.5	0.5	1	0.5	0.5	7	0.13
防治工程规模	0.5	0.5	0.5		1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	5	0.09
施工工期与难度	0	0.5	0	0		0.5	0	0	0.5	0	0	1.5	0.03
结构受力合理性	0.5	0.5	0	0.5	0.5		0.5	0	0.5	0.5	0	3.5	0.06
c 和 ϕ 取值的合理性	0.5	1	0.5	0.5	1	0.5		0.5	1	0.5	0	6	0.11
抗滑结构位置	1	1	0.5	0.5	1	1	0.5		0.5	0.5	0	6.5	0.12
排水效果	0	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0	0.5		0	0	2.5	0.045
实测结构受力	0.5	1	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	1		0.5	6.5	0.12
滑坡或抗滑结构位移状况	1	1	0.5	1	1	1	1	1	1	0.5		9	0.16

表 3 部分滑坡及防治工程综合评判结果

Table 3 Some landslides and fuzzy comprehensive evaluation of their result control

单元 编号	滑坡名称	滑坡复 杂程度	滑坡 规模	对滑坡 的认识 程度	防治工 程规模	施工工 期与难 度	结构受 力合理 性	c 和 ϕ 取值的 合理性	抗滑结构 位置选择 合理性	排水 效果	结构受力 与设计值 之比	滑坡或抗 滑结构位 移量	评判 结果
1	甘洛 1 号滑坡	A3	B2	C1	D3	E3	F1	G3	H1	I1	J1	K1	很好
2	甘洛 2 号滑坡	A3	B3	C2	D2	E2	F3	G2	H2	I3	J2	K1	良好
3	小楚坝滑坡	A2	B3	C3	D3	E2	F2	G4	H1	I2	J2	K1	一般
4	八渡车站滑坡 (早期治理)	A4	B2	C3	D1	E1	F2	G3	H3	I3	J4	K4	失败
5	二郎山 K2730 段 #1 滑坡	A4	B1	C2	D1	E1	F1	G2	H2	I2	J3	K2	良好
6	锋王村滑坡	A3	B2	C1	D3	E4	F1	G4	H1	I2	J2	K1	很好

3.2 防治工程效果模糊评判分析

首先通过试算，确定典型单元 1，2，3，4 分别为滑坡防治效果很好、良好、一般和失败标准单元，符合目前滑坡防治公认情况。进而对其它滑坡防治工程的效果开展了综合模糊后评价。以下针对川藏公路 K2730 段# I 滑坡防治工程效果开展模糊综合评判，依据前述后评价因子及隶属度的确定方法，结合滑坡本体特征及治理状况得到其隶属度如下：

(1) 滑坡体复杂程度：二郎山 K2730 段#1 滑坡滑面属于折线形，总体上是一个两条、2~3 层、前后两级、多块的牵引式切层复杂(A4)特大型(B1)滑坡，相应隶属度为(0.60, 0.75, 0.70, 0.40)。

(2) 滑坡规模：相应隶属度为(0.60, 0.65, 0.70, 0.70)。

(3) 对滑坡的认识程度：是一性质基本查明(C2)，相应隶属度为(0.80, 0.75, 0.70, 0.10)。

(4) 防治工程规模：滑坡防治工程推力计算应以中层滑坡为关键，兼顾浅层与深层滑坡稳定的防治思路。经过方案比较，确定采用以预应力锚索抗滑桩、锚索框架梁为主体工程，结合排水工程综合治理(D1)，相应隶属度为(0.50, 0.60, 0.80, 0.50)。

(5) 施工工期与难度：防治工程难度较大且要求分期施工的特大型滑坡(E1)，相应隶属度为(0.50, 0.60, 0.80, 0.50)。

(6) 结构受力的合理性：以预应力锚索抗滑桩、锚索框架梁为主体工程，结构受力基本合理(F1)，相应隶属度为(0.35, 0.30, 0.20, 0.20)。

(7) c 和 ϕ 选定的合理性：后缘滑面(已产生拉裂面)， $c=0$ 、 $\phi=45^\circ$ ， $\gamma=21\text{ kN/m}^3$ ；前缘滑面： $c=10\text{ kPa}$ 、 $\phi=20^\circ$ ， $\gamma=21\text{ kN/m}^3$ ；主滑段： $c=10\text{ kPa}$ ，滑坡处于挤压变形阶段，通过反算综合选取主滑段 $\phi=30^\circ$ 基本合理(G2)，相应隶属度为(0.35, 0.30, 0.25,

0.25)。

(8) 抗滑结构位置选择的合理性：抗滑结构位置，由于考虑公路交通的安全，设桩位置偏上，推力较大(H2)，相应隶属度为(0.75, 0.80, 0.60, 0.25)。

(9) 排水效果：由于地表水是促成滑动的主要因素，故采取了地表排水等综合治理工程，有效拦截了地表水的入渗(I2)，相应隶属度为(0.75, 0.80, 0.60, 0.25)。

(10) 抗滑结构受力与设计值之比： $R_t = T/E_T = 0.15\sim 0.40$ ，初评效果一般(稍显保守 J3)，相应隶属度为(0.50, 0.60, 0.80, 0.60)。

(11) 滑坡或抗滑结构位移量：滑坡防治工程实施后，监测结果表明滑坡基本稳定(K2)，相应隶属度为(0.75, 0.90, 0.50, 0.30)。

形成 R' 后尚需归一化形成矩阵 R 如下：

$$R' = \begin{bmatrix} 0.60 & 0.75 & 0.70 & 0.40 \\ 0.60 & 0.65 & 0.70 & 0.70 \\ 0.80 & 0.75 & 0.70 & 0.10 \\ 0.50 & 0.60 & 0.80 & 0.50 \\ 0.50 & 0.60 & 0.80 & 0.50 \\ 0.35 & 0.30 & 0.25 & 0.20 \\ 0.35 & 0.30 & 0.25 & 0.25 \\ 0.75 & 0.80 & 0.60 & 0.25 \\ 0.70 & 0.80 & 0.60 & 0.50 \\ 0.50 & 0.60 & 0.80 & 0.60 \\ 0.75 & 0.90 & 0.50 & 0.30 \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow R = \begin{bmatrix} 0.2449 & 0.3061 & 0.2857 & 0.1633 \\ 0.2264 & 0.2453 & 0.2642 & 0.2642 \\ 0.3404 & 0.3191 & 0.2979 & 0.0426 \\ 0.2083 & 0.2500 & 0.3333 & 0.2083 \\ 0.2083 & 0.2500 & 0.3333 & 0.2083 \\ 0.3182 & 0.2727 & 0.2273 & 0.1818 \\ 0.3043 & 0.2609 & 0.2174 & 0.2174 \\ 0.3125 & 0.3333 & 0.2500 & 0.1042 \\ 0.2692 & 0.3077 & 0.2308 & 0.1923 \\ 0.2000 & 0.2400 & 0.3200 & 0.2400 \\ 0.3031 & 0.6373 & 0.2041 & 0.1224 \end{bmatrix}.$$

再考虑各个因素对滑坡防治效果后评价的作用，结合表 2 给出各因素的权重，形成一个模糊向量——权向量 A ： $A=\{0.09\ 0.045\ 0.13\ 0.09\ 0.03\ 0.06\ 0.11\ 0.12\ 0.045\ 0.12\ 0.16\}$ 。

从而可据 R 、 A 对滑坡防治效果进行评价，评判结果为

$$B=A \cdot R=\{0.2766, 0.2965, 0.2653, 0.1493\}.$$

B 是由 4 个数据构成的集合，按最大隶属度原则，便可判定该滑坡工点防治工程效果为良好。对锋王村

滑坡评价类似, 治理效果很好。

总体上看, 该评估结果与实际情况相符, 说明模糊综合评判用于滑坡防治效果后评价可行。

4 结 论

(1) 提出了滑坡防治效果后评价的 11 项因子, 包括滑坡本体因子和防治工程因子两大类。

(2) 采用模糊数学理论, 依据上述 11 项后评价因子, 首次初步建立了滑坡整治效果的后评价模糊综合评判模型。将防治效果进行分级, 据实践和专家经验确定了各单因素的隶属函数及权系数, 进而编制运算程序开展模糊综合评判计算, 并对其它滑坡防治效果进行了综合评判。结果与实际较为相符, 初步说明模糊数学用于滑坡防治效果后评价可行, 所建后评价模型正确。

(3) 利用系统工程中的“特尔菲法功能重要度系数法”, 将传统重要度系数“0-1”评分法改为“0-0.5-1”评分法来计算, 考虑了专家咨询中两两因子相对重要模糊现象, 提出了修正的评价因子功能重要度系数权重确定法, 取得了较好的评价结果。

参考文献:

- [1] VAGAS L G. An overview of the analytic hierarchy process and its applications[J]. Eur J Opl Res, 1990:120 - 131.
- [2] VAN Uu Nguyen. Overall evaluation of geotechnical hazard based on fuzzy set theory [J]. Soils and Foundations, 1985, 25(4): 8 - 18.
- [3] 王 龙. 节理岩体强度指标取值的探讨[J]. 中国矿业, 1999, 8(专刊): 7 - 10.(WANG Long. Discussion on the index selection of joint rock's strength[J]. China Mining Magazine, 1999, 8(Special): 7 - 10.)
- [4] 程圣国. 滑坡相似材料试验结果优化分析研究[J]. 水力发电, 2003, 29(1): 14 - 15.(CHENG Sheng-guo. Optimization of the test results of similar materials for landslide[J]. Hydro Generator, 2003, 29(1): 14 - 15.)
- [5] 李祝龙, 章金钊. 青藏公路冻土路基沉降的模糊综合评判[J]. 公路, 2000(2): 21 - 24. (LI Zhu-long, ZHANG Jin-zhao. Fuzzy comprehensive evaluation of frozen subgrade's settlement along Qingzang highway [J]. Highway, 2000(2): 21 - 24.)
- [6] 靳泽先. 模糊数学在边坡稳定性评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 1987, 12(6): 13 - 15. (JIN Ze-xian. Fuzzy mathematics using in slope stability evaluation [J]. Hydro Geology and Engineering Geology, 1987, 12(6): 13 - 15)
- [7] JUANG, C H, LEE DH, SHEU C. Mapping slope failure potential using fuzzy sets[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(3): 475 - 494.
- [8] 郑明新. 滑坡推力特征及其对抗滑效果的评价[J]. 中国矿业, 2003, 12(8): 58 - 61.(ZHENG Ming-xin. Study on the characteristics of landslide thrust and evaluation the effectiveness of landslide control [J]. China Mining Magazine, 2003, 12(8): 58 - 61)
- [9] CLEMENCIA Morales-Montejo. Systems study of the scope and significance of evaluation methodologies in the management of organizations in Colombia[C]//Proceedings of the Thirty-ninth Annual Meeting, 1995: 234 - 236.
- [10] 郑明新. 滑坡防治工程效果的后评价研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.(ZHENG Ming-xin. Study on the post evaluation of the effectiveness of landslide control [D]. Nanjing: Hohai University, 2005.)