

滑坡灾害防治工程效果评价方法初探

宋军^{1,2}, 尉壮岩^{2,3}, 程英建^{2,4}, 张勇^{2,4}

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734)

摘要: 滑坡防治工程效果评价是一项综合判断与分析的系统工程。通过开展大量滑坡灾害防治工程现场调研, 建立了包括滑坡基本要素、治理设计、施工组织、稳定状况、治理效益 5 项一级评价指标和 11 项二级指标的评价体系。基于综合模糊层次评价法确定各指标权重并计算防治效果最大隶属度。以三峡库区刘家包滑坡为例, 计算表明防治工程效果为优秀, 与实际情况相符, 验证了此方法的可靠性。

关键词: 地质灾害; 滑坡; 防治工程; 评价体系; 综合模糊层次理论; 隶属度; 效果评价

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)04-0080-05

Study on Evaluation Approach to the Effect of Landslide Hazards Prevention and Control Engineering/SONG Jun^{1,2}, YU Zhuang-yan^{2,3}, CHENG Ying-jian^{2,4}, ZHANG Yong^{2,4} (1. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: The evaluation of the effect of landslide hazards prevention and control is a systematic project. Based on a great deal of field survey, an evaluation index system including 5 first-level indexes (basic element of landslide, control design, construction organization, stability and treatment benefit) and 11 second-level indexes are established. Based on the comprehensive fuzzy hierarchy estimation, the weight of each index is determined and the maximum subordinate degree of control effect is calculated. Taking the case of Liujiabao landslide in the Three Gorges Reservoir as an example, the calculation shows that the effect of control engineering is excellent; this is consistent with the actual situation, and the reliability of this method is verified.

Key words: geological hazard; landslide; prevention and control engineering; evaluation system; comprehensive fuzzy hierarchy theory; subordinate degree; effect assessment

0 引言

滑坡是最普遍的地质灾害之一。在地质条件复杂、气象环境恶劣地区为了避免滑坡造成的人民生命财产损失, 通常采取防治工程开展滑坡治理。目前, 我国滑坡的防治工程多依赖于实际经验辅以计算, 理论发展滞后于工程实践^[1], 大多数规范和报告在防治工程设计和施工方面的内容较多, 针对滑坡防治工程的适宜性、有效性研究较少^[2]。并且国内外学者主要采用模糊数学、效果评估指数法、层次分析法等对滑坡治理工程进行效果评价^[3-6], 评价指标的选取集中在防治工程的工程结构、现场监测手段、工程试验等方面^[7-9], 针对滑坡从灾害基本要素到设计、施工、监测及后期效益的全面性效果评价

的研究较少。

影响滑坡稳定性的因素很多, 加上防治工程设计、施工的复杂性以及后期的工程效益难以准确计算, 导致评价因素具模糊性, 从而影响人们使用直接的统计方法进行具体判断。采用模糊数学理论, 运用模糊变换原理和隶属度的原则, 考虑评价因素与目标的联系, 结合层次分析法将滑坡防治工程效果的评估问题分解成不同层次的组合问题, 进行定量或半定量的描述, 能够很好的反应评价指标的估计结果, 从而解决评价指标的模糊性问题。

本文以三峡库区的滑坡治理工程为研究对象, 通过大量现场调研, 总结滑坡防治工程特点, 建立了

收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目专题“三峡库区特大滑坡灾害防治技术与示范”(编号: 2012BAK10B02-3)

作者简介: 宋军, 男, 汉族, 1963年生, 教授级高级工程师, 成都理工大学在读博士, 长期从事地质钻探技术和地质灾害防治技术研究工作, 四川省成都市郫县成都现代工业港港华路139号, songjun801@163.com。

一套从勘察、设计、施工、监测、效益分析的各阶段滑坡防治效果评价体系,利用综合模糊层次理论原理为指导,进而根据各子项的评价结果建立综合评价模型。基于 AHP(层次分析法)法确定各指标权重,由最大隶属原则确定防治效果分级,对滑坡防治工程效果从整体上进行评价。

1 防治工程效果评价体系

地质灾害防治工程效果的评价目标是判断防治工程的合理性、适宜性,使防治工程最大程度地满足人类工程活动。而防治工程效果评价的可靠性首先取决于评价因子的选择,因此首先需要建立一套全面、有效的防治工程评价指标体系。通过对三峡库区滑坡的现场调查和资料分析,构建了三峡库区滑坡灾害防治工程资料库。选取以“滑坡基本要素”、“治理设计”、“施工组织”、“稳定状况”,“治理效益”作为一级指标,并将五大方面因子按评价内容选取 11 项具体影响因素作为二级指标,建立防治工程效果评价结构图(见图 1)。

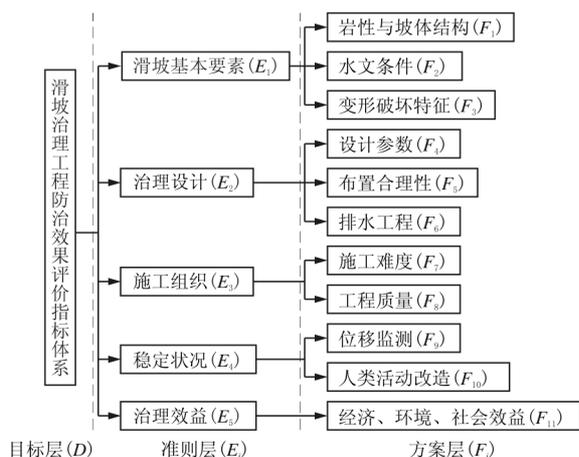


图 1 滑坡防治效果评价指标体系层次结构图

根据建立的结构图,结合多个滑坡防治工程现场调研和资料分析的结果,参考前人研究^[2-6,10-14],将防治效果分为 4 个等级:优秀、良好、一般、差,并且对每一项二级指标提出分级标准,其中经济效益常利用相对收益比来表征, $F = \sum f_c / \sum f_y$ ($\sum f_c$ 为防治工程在有效期内成本投入, $\sum f_y$ 为在有效期内的各种收益)。详见表 1。

2 滑坡灾害防治效果评价模型

2.1 研究思路

综合模糊层次理论是针对上述评价指标建立层次结构模型,确定各指标权重,结合专家评分与实践调研给出各指标隶属函数,根据最大隶属度原则,完成工程效果评判,从整体上把握滑坡性质、防治工程与经济效益,对防治工程效果做出客观评价,总体思路如图 2 所示。

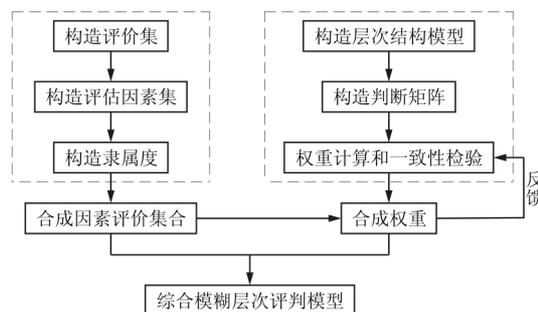


图 2 综合模糊层次原理结构图

2.2 评价数学模型

2.2.1 建立模糊集合

(1) 设评价集合(防治效果等级)为 V :

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{I, II, III, IV\}$$

式中: V_1 ——优秀; V_2 ——良好; V_3 ——一般; V_4 ——差。

(2) 确定参评要素(评价指标)集 U :

$$U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5\}$$

式中: U_1 ——滑坡基本要素; U_2 ——治理设计; U_3 ——施工组织; U_4 ——稳定状况; U_5 ——治理效益。

(3) 选择参评要素的评价因子集:

$$\begin{cases} C(U_1) = \{F_1, F_2, F_3\} \\ C(U_2) = \{F_4, F_5, F_6\} \\ C(U_3) = \{F_7, F_8\} \\ C(U_4) = \{F_9, F_{10}\} \\ C(U_5) = \{F_{11}\} \end{cases}$$

2.2.2 隶属函数与模糊矩阵的确定

(1) 隶属函数的确定。隶属度的确定实际上是单因素评判问题。评价指标根据它的数据特征可分为定量因素和定性因素。针对评价体系中的 11 项评价指标,针对每项指标的不同评价标准依次给出各项因子的相应的隶属函数。以 F_{11} 经济、环境、社会效益为例, k_1 : 经济效益突出, $F < 0.2$, 顺应区内经济建设开展, 达到社会生态环境和谐; k_2 : 有较好的经济效益, $0.2 \leq F < 0.5$, 有利于区内经济建设,

表1 防治效果评价体系

防治效果等级	优秀(I)	良好(II)	一般(III)	差(IV)
岩性与坡体结构(F ₁)	其他类型(横向坡、切向坡)	逆向坡(如黄蜡石滑坡)	崩塌堆积体、膨胀岩、层状碎裂岩体	平缓软硬岩互层结构、顺层边坡、溶塌角砾岩、滑坡堆积体
水文条件(F ₂)	不涉水滑坡;最大日降雨量 H ₂₄ < 150 mm	不涉水滑坡;最大日降雨量 H ₂₄ ≥ 150 mm	涉水滑坡;最大日降雨量 H ₂₄ < 150 mm	涉水滑坡;最大日降雨量 H ₂₄ ≥ 150 mm
变形破坏特征(F ₃)	防治后,坡表无明显变形位移特征	防治后,坡表较小变形	防治后,局部发生较大规模垮塌	坡体变形持续,防治效果差或工程失效
设计参数(F ₄)	采用滑带分段取值,采用现场大剪试验取值	采用滑带分段取值,采用室内试验取值、反算、工程类比综合取值	针对主滑段采用室内试验,并综合反算、工程类比综合取值	针对主滑段采用反算和工程类比法取值
布置合理性(F ₅)	抗滑结构布置在阻滑段(滑动面反坡地段);排水工程恰好分布在地下水富集或地表水集中入渗部位;护坡(岸)工程布设在坡脚扰动带能很好护脚护坡起到防止风化剥落和冲刷侵蚀的作用	抗滑结构布置在阻滑段(滑动面平缓地段);排水工程设置在地下水富集处或附近,能大量减少地表水入渗;护坡(岸)工程布设较为合理,能有效防止风化剥落、冲刷侵蚀	抗滑结构布置在主滑段(滑动面较陡地段);排水工程未分布在地表水集中部位,但能一定程度上减少地表水入渗;护坡(岸)工程未完全布设于坡脚扰动带,仅对风化剥落或库水冲刷掏蚀有一定减缓作用	抗滑结构布置在主滑段(滑动面较陡地段);排水工程布置在地下水贫瘠段,不能有效排水;护坡(岸)工程未布设于坡脚扰动带或存在工程缺陷,致使工程失效或护坡作用较小
排水工程(F ₆)	排水结构合理,位置布置合理,可及时排除地下水、地表水	排水结构设置较合理,基本可保证排除地下水、地表水	排水结构设置不尽合理或局部结构遭受破坏,可部分排除地下水、地表水	排水结构设置不合理或结构破坏,致使排水不佳
施工难度(F ₇)	施工困难,技术要求高,分期分批施工,施工周期长	施工难度大,且要求分期施工	施工难度较大,工期较长	施工简单,工期短
工程质量 ^[16] (F ₈)	工程结构完好,抗滑主体项目均达到优秀标准;允许偏差项目全部达标;档案资料齐全、准确	工程结构完好,抗滑主体项目优秀率 < 50%;允许偏差项目达标率 > 90%;档案资料齐全	抗滑主体结构满足防治要求(均达到基本标准);允许偏差项目达标率 > 70%;档案资料基本齐全	工程质量不合格
位移监测 ^[17] (F ₉)	滑坡及抗滑结构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	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无影响	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	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
人类活动改造(F ₁₀)	滑坡区域内无明显人类活动痕迹	滑坡区域仅地表存在轻微的农耕放牧	滑坡区域存在小规模的人类工程活动,仅为坡表地形的改变,岩土体结构未遭受破坏	滑坡区域内人类改造明显,地形变化较大,致使岩土体结构、地下水赋存情况均向不利滑坡稳定方向发展
经济、社会效益(F ₁₁)	经济效益突出, F < 0.2;顺应区内经济开展建设,达到社会生态环境和谐	有较好的经济效益, 0.2 ≤ F < 0.5;有利于区内经济建设,施工带来社会环境影响较小	有一定的经济效益, 0.5 ≤ F < 1;不影响区内经济建设,可能存在施工噪声、弃渣和一定生态破坏	可能存在工程浪费, F ≥ 1;防治工程设置有碍经济建设和社会发展,存在较大生态破坏

施工带来社会环境影响较小; k_3 : 有一定的经济效益, $0.5 \leq F < 1$, 不影响区内经济建设, 可能存在施工噪声、弃渣和一定生态破坏; k_4 : 可能存在工程浪费, $F \geq 1$, 防治工程设置有碍经济建设和社会发展, 存在较大生态破坏。给出隶属函数:

$$V_1 = \begin{cases} 1 & F_{11} \in k_1 \\ 0.7 & F_{11} \in k_2 \\ 0.2 & F_{11} \in k_3 \\ 0.1 & F_{11} \in k_4 \end{cases} \quad V_2 = \begin{cases} 0.7 & F_{11} \in k_1 \\ 0.8 & F_{11} \in k_2 \\ 0.4 & F_{11} \in k_3 \\ 0.3 & F_{11} \in k_4 \end{cases}$$

$$V_3 = \begin{cases} 0.3 & F_{11} \in k_1 \\ 0.6 & F_{11} \in k_2 \\ 0.8 & F_{11} \in k_3 \\ 0.7 & F_{11} \in k_4 \end{cases} \quad V_4 = \begin{cases} 0.1 & F_{11} \in k_1 \\ 0.2 & F_{11} \in k_2 \\ 0.7 & F_{11} \in k_3 \\ 0.9 & F_{11} \in k_4 \end{cases}$$

式中: V_1 ——优秀; V_2 ——良好; V_3 ——一般; V_4 ——差。

对隶属函数的取值依据防治工程点的专家经验结合现场调研, 防治工程若经济效益突出、利于当地经济建设, 施工、维护成本低, 与人居环境融为一体, 则取值偏向于防治效果优秀的方面。

(2) 因子集与评价集(评价标准)之间的模糊关系可以用模糊关系矩阵 R 来表示:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix}$$

(3) 综合隶属度矩阵的确定。考虑各个因素对滑坡防治工程效果评价的作用, 给出一个各因素的权重, 由权向量与模糊矩阵进行运算得到综合隶属度: $B = A \cdot R$, 求出模糊集 $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ ($0 \leq b_j \leq 1$), 最终, 根据最大隶属度准则, $b_{i_0} = \max_{1 \leq j \leq n} \{b_j\}$ 对应的分级即为滑坡防治效果等级 i_0 。

2.2.3 权重的确定

在确定评估体系后,还需要确定一个权向量表示各因子对评价目标所起的作用。依照分层体系,根据专家打分,构造相关判断矩阵,经过计算其特征向量、归一法处理、一致性检验得到标准特征向量,即可作为该层次指标的权重向量。

以 $D - E$ 层次为例,由专家评分,两两因素比较,各层中的因子对上一层次目标的相对重要性进行两两比较,构造判断实对称矩阵:

$$D = \begin{matrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1/3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1/3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1/2 & 4 \\ 3 & 3 & 2 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

经归一法处理后得,标准特征向量 $\omega_{DE}' = (0.17, 0.17, 0.19, 0.41, 0.06)$,通过计算,满足一致性检验。

针对每一层建立一系列比较判断矩阵,最终得到所有指标权重。本文利用此方法求出防治工程效果评价的 11 项评价因素权重指标见表 2。

3 应用实例

以三峡库区刘家包滑坡为例,应用该评价模型进行评价,并与现场传统定性判定的结果相对比,以验证模型的可靠性。

刘家包滑坡为库区不涉水堆积层滑坡,位于奉节县城三马山社区李家大沟右岸,呈南北向展布,滑坡范围约 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,规模约 $235 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。由于滑坡所处移民安置重点区域,紧邻交通局、环卫局、老干局等政府职能机构,灾害危险性突出。

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \begin{bmatrix} 0.1 & 0.7 & 1 & 0.2 & 0.75 & 0.75 & 0.4 & 0.85 & 0.9 & 0.3 & 1 \\ 0.2 & 0.6 & 0.7 & 0.3 & 0.8 & 0.8 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.4 & 0.7 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.6 & 0.6 & 0.7 & 0.6 & 0.45 & 0.8 & 0.2 \\ 0.4 & 0.3 & 0.01 & 0.1 & 0.5 & 0.5 & 0.9 & 0.5 & 0.1 & 0.6 & 0.1 \end{bmatrix}^T$$

由表 2 可知,特大滑坡灾害防治后效果评价的 11 项评价因素权向量:

$$A = \omega_{DF}' = (0.043, 0.043, 0.085, 0.065, 0.029, 0.075, 0.063, 0.127, 0.275, 0.135, 0.060)$$

因此, $B = A \cdot R = (0.6656, 0.6055, 0.5186,$

表 2 各项因子权重表

层次 F	层次 D					层次 F 各项权重
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	
	0.17	0.17	0.19	0.41	0.06	
岩性、坡体结构 F_1	0.25					0.043
水文条件 F_2	0.25					0.043
变形破坏特征 F_3	0.50					0.085
设计参数 F_4		0.38				0.065
布置合理性 F_5		0.17				0.029
排水工程 F_6		0.44				0.075
施工难度 F_7			0.33			0.063
工程质量 F_8			0.67			0.127
监测位移 F_9				0.67		0.275
人类活动改造 F_{10}				0.33		0.135
经济环境效益 F_{11}					1	0.060

该滑坡防治工程为了顺应城市建设,以“坡改梯”的设计思想,选择了“削坡回填 + 多级护坡工程 + 地表系统排水”的防治方案;坡体前缘按 1: 2 的坡比分层碾压回填;斜坡中上部坡面按 1.75 的坡比平整,每 10 m 高差为一级台坎,共 7 级,台坎间设 2 m 宽马道。土方回填工程完成后,坡面采用浆砌块石格构护坡和地表截排水系统。通过走访调查,防治工程布置较为合理,与城市建设相协调(未影响到下部交通道路和房产开发),工程主体结构(护坡格构和排水系统)完整、无破坏,仅滑坡后缘和两侧边沟砼梁受潮表面有轻微腐蚀。现今坡体上部修路建房(后缘加载),人类工程活动频繁,但位移监测未见异常(在合理波动范围内),滑坡灾害治理至今坡表未发现明显变形迹象。

为了验证本模型的可靠性,根据现场调查和查阅设计施工资料、监测位移数据后,运用本文构筑的评价模型,通过隶属函数求出每一个评价结果相对应的各个评判因素对的隶属度,可得 $R(U \times V$ 上的模糊子集):

$$0.3274)$$

由模糊判断最大隶属原则可知,刘家包特大滑坡防治工程防治效果为优秀。与现场传统定性判别结果相吻合,说明该模型具有较好的适用性,为三峡库区类似特大滑坡灾害的防治工程效果的评价提供了一定的参考作用。

4 结论

(1)结合三峡库区滑坡地质灾害特点,提出了滑坡防治工程效果评价的11项指标因子与评价体系,包括滑坡基本要素、治理设计、施工组织、稳定状况、治理效益5大方面,并将评价结果分为优秀、良好、一般、差4个等级。

(2)构建了防治工程效果评价模型,采用AHP法确定了各评价指标权重,并且利用综合模糊评价方法获取模糊关系矩阵,由权向量与模糊矩阵进行“合成”得到综合隶属度。

(3)以三峡库区刘家包滑坡防治工程为典型实例,采用上述评价模型,得出滑坡防治效果为优秀,与现场判别相吻合。

滑坡防治工程效果评价是一个涉及多门学科的系统研究课题,并且开展滑坡防治效果评价方法的研究还是一个探索的过程,尤其在评价模型的建立以及隶属函数的选择方面还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] 王恭先. 滑坡防治研究的回顾与展望[J]. 中国铁路, 1995, (7): 18 - 22.
- [2] 张勇, 石胜伟, 宋军. 三峡库区特大滑坡灾害防治工程评价方法初探[J]. 地质通报, 2013, (12): 2015 - 2020.
- [3] 黄健, 巨能攀. 滑坡治理工程效果评估方法研究[J]. 工程地质学报, 2012, (2): 189 - 194.
- [4] 郑明新, 殷宗泽, 吴继敏, 等. 滑坡防治工程效果的模糊综合后评价研究[J]. 岩土工程学报, 2006, (10): 1224 - 1229.
- [5] 郑明新. 滑坡防治工程效果的后评价研究[D]. 江苏南京: 河海大学, 2005.
- [6] 郭长宝, 张永双, 周能娟, 等. 地震地质灾害防治工程运行效果评价: 以汶川震区平武县魏坝滑坡为例[J]. 现代地质, 2014, (2): 419 - 428.
- [7] Khazin V I, Bondar E G, Golub V P, et al. Criteria for evaluating different aspects of effectiveness of rock [J]. Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 1979, 16(5): 118.
- [8] Bruce D A, Juran I, Benslimace A. Slope stabilization by micro-pile reinforcement [J]. Landslides, 1996, (5): 1718 - 1726.
- [9] Ginxburg L K. Effectiveness of anti-landslide retaining structures [C] // Senneset K. Proceedings of the seventh International Symposium on Landslides. Trondheim: A A Balkema Publishers, 1996.
- [10] 袁宏川, 段跃芳. 三峡库区地质灾害防治效果的评价与分析[J]. 数学的实践与认识, 2009, (14): 65 - 70.
- [11] 刘传正. 长江三峡复杂斜坡成因问题[J]. 水文地质工程地质, 2005, (1): 1 - 6.
- [12] 王念秦, 韩波, 庞琦, 等. 泥石流防治工程效果后评价初探[J]. 工程地质学报, 2015, (2): 219 - 226.
- [13] 王朝阳. 滑坡监测预报效果评估方法研究[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2012.
- [14] 田欢欢. 公路滑坡处治效果评价研究[D]. 湖南长沙: 中南大学, 2009.
- [15] DZ/T 0219—2006, 滑坡防治工程设计与施工技术规范[S].
- [16] GB 50204—2002, 混凝土结构工程施工质量验收规范[S].