

文章编号:1674-2869(2015)08-0013-07

改进层次分析法在滑坡稳定性评价中的应用

杨 阳¹,尚文猛²,肖超超²,张冬冬³

1. 武汉工程大学资源与土木工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 上海勘测设计研究院, 上海 453500; 3. 中国地质大学(武汉)研究生院, 湖北 武汉 430074

摘 要:为了提高滑坡稳定性评价结果的合理性和可靠性,在确定滑坡稳定性影响因素集的基础上,将模糊互补一致性判断矩阵引入层次分析法并扩展到模糊环境中,得到改进层次分析法,运用其建立了基于半定量-半定性指标的滑坡稳定性评价模型.以达县虎盘山滑坡为例,利用该评价模型对暴雨加地震、暴雨和自然工况下的滑坡稳定性进行了分析,并将上述评价方法与传统刚体极限平衡法进行比较.结果表明:在暴雨加地震和暴雨条件下,坡体均处于不稳定状态,必须采取必要的工程措施对滑坡进行防治;在自然工况条件下,坡体则处于稳定状态,无需采取防治措施.

关键词:改进层次分析法;模糊综合评价法;稳定性评价

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2015.08.003

0 引 言

20 世纪以来随着人类工程活动不断加剧,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害也接踵而至.其中滑坡作为最重要的地质灾害类型之一,影响其稳定性的因素众多而复杂,长久以来滑坡稳定性分析成为一个难以妥善解决的难题.目前广泛运用的评价方法主要有传统的经验分析方法、解析法以及数值模拟法等,但是以上各种方法都存在其局限性.例如经验分析法过度依赖于主观经验;解析法受限于难以建立与复杂工况条件相符的模型和与之对应的目标函数;而数值模拟方法,最为核心的是边坡的力学强度参数的选取,边坡内部岩土体结构的复杂性以及空间对内部强度变化影响较大,导致力学强度参数获取较为困难.

鉴于此,许多学者提出采用各因素对斜坡稳定性影响程度的相对量化,于是权向量确定成为该方法的关键.直到 20 世纪 70 年代,由美国著名运筹学家萨蒂教授提出了层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, 简称 AHP 法),它是一种综合定量计算与定性分析、能够有效解决资源分配的重要方法,适应了该类问题的需要.本文运用在模糊环境下的改进层次分析法,以达县虎盘山滑坡为工程背景,建立了基于半定量—半定性指标的滑坡稳定性评估体系,并将最终评价结果与传统方法的结果,证明二者具有良好的一致性.

1 改进层次分析法

层次分析法(AHP)的主要特点是在深入分析决策问题的本质、各级影响因素及其内在联系的基础上,系统化、数学化整个决策过程,在进行多因素和多目标选优排序等方面得到了较多的应用.但由于传统的专家打分通过因素两两比较得到的结果,带有了人为判断的片面性,往往不一定与客观事实相符,在传统的层次分析法运用过程中,主观性太强是一个致命弱点^[1].

为了克服这一问题,本文将模糊互补一致性判断矩阵引入层次分析法扩展到模糊环境中,得到改进层次分析法,同时介绍了模糊互补判断矩阵的构造方法及权重、判断矩阵相容性和一致性检验的方面可行的判断公式,并把它应用于滑坡稳定性评价.改进层次分析法同萨蒂所提出的 AHP 相比,二者不同点在于^[2]:

a.在 AHP 中判断矩阵主要是通过元素的两两比较直接来构造,而在改进层次分析法中构造模糊一致判断矩阵;

b.由一般判断矩阵求各元素相对重要性权重方法与由模糊一致判断矩阵的权重的求解方法不同.

1.1 模糊互补判断矩阵的构造

要构造模糊互补判断矩阵^[3],首先给出有关的定义:

定义 1 设矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$,若有:

收稿日期:2015-03-15

作者简介:杨 阳(1992-),女,湖北当阳人,在读研究生.研究方向:工程地质.

$0 \leq r_{ij} \leq 1, (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$

则称矩阵 R 为模糊矩阵.

定义 2 设模糊矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$, 若有:

① $r_{ii}=0.5, i=1, 2, \dots, n$;

② $r_{ij}+r_{ji}=1, i=1, 2, \dots, n$

则称矩阵 R 为模糊互补矩阵.

定义 3 设模糊互补矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$, 对于 $\forall i, j, k$ 若有:

$r_{ij}=r_{ik}-r_{jk}+0.5$, 则称模糊矩阵 R 是模糊互补一致性矩阵.

在改进层次分析法中, 通过比较一个因素相对于另一个因素的重要程度得到模糊判断矩阵, 一般是采用表 1 所示的 0.1~0.9 数量标度^[4].

表 1 0.1~0.9 数量标度

Table 1 The number of 0.1~0.9 scale

标度	意义
0.5	元素 a_i 与元素 a_j 同等重要
0.6	元素 a_i 比元素 a_j 稍重要
0.7	元素 a_i 比元素 a_j 明显重要
0.8	元素 a_i 比元素 a_j 重要得多
0.9	元素 a_i 比元素 a_j 极端重要
0.1, 0.2, 0.3, 0.4	若元素 a_i 与元素 a_j 比较得到判断 r_{ji} , 则 a_j 与元素 a_i 比较得到判断 $r_{ij}=1-r_{ji}$

对因素 a_1, a_2, \dots, a_n 重要性相互进行比较, 可得到如下模糊互补判断矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix}$$

1.2 模糊互补判断矩阵的权重公式

定义 4 设模糊互补矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$ 对于 $\forall i, j, k$, 若有

$$r_{ij}=r_{ik}-r_{jk}+0.5$$

则称模糊矩阵 R 是模糊互补一致性矩阵.

徐泽水等^[5]给出了另一种求解模糊互补矩阵权重的简便公式.

对模糊互补矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 按行求和 $b_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}, (i=1, 2, \dots, n)$, 并进行如下数学代换 $r_{ij} = \frac{b_i - b_j}{2(n-1)} + 0.5$ 得到模糊一致性矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$, 对矩阵 R 采用行和归一化得到权重向量

$$W=(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$$

$$\text{满足 } w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)}, (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

该方法与定义 4 中的基本公式相比从很大程度上简化了计算过程, 便于实际分析.

1.3 模糊互补判断矩阵的一致性检验方法

由式(1)可知权重向量, 但还需要验证其合理性. 下面是一些用模糊判断矩阵的相容性来检验其一致性原则的常用方法^[6].

定义 4 令全体阶模糊互补判断矩阵构成的集合为 G_n . 设 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 和 $B=(b_{ij})_{n \times n}$, 用范数 $A-B = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} - b_{ij}|$ 表示 A, B 之间的距离, 记为 $\rho(A, B) = A - B$.

定义 5 设 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 和 $B=(b_{ij})_{n \times n} \in G_n$, 称 A, B 是完全相容的; 特别地, 若 $\rho(A, B)=0$, 即 $\forall i, j \in (i=1, 2, \dots, n)$, 有 $a_{ij}=b_{ij}$.

定义 6 设 $A, B \in G_n$, 则为 A 和 B 的相容性指标.

定义 7 设 $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 为模糊判断矩阵 A 的权重向量, 其中 $\sum_{i=1}^n w_i=1, w_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, n)$,

令 $w_i = \frac{w_i}{w_i + w_j} (\forall i, j=1, 2, \dots, n)$, 则称 n 阶矩阵 $W^* = (w_{ij})_{n \times n}$ 为模糊判断矩阵 A 的特征矩阵.

于是 $I(A, W^*) = \frac{1}{n^2} \rho(A, W^*)$ 称为 A 的一致性指标. 若 $I(A, W^*)=0$, 则 A 为模糊一致性判断矩阵; 若 $I(A, W^*) \leq 0.1$, 则称 A 为一致性可接受的.

在一般实际问题中, 都是由多个 [设 k 个, $k=(1, 2, \dots, m)$] 专家通过对因素重要性相互作出比较, 而得到一组模糊互补判断矩阵 $A_k=(a_{ij}^{(k)})_{n \times n}, k=1, 2, \dots, m$ 分别求到权重向量 $W^k=(w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_n^{(k)})$, $k=1, 2, \dots, m$ 在这种情况下, 检验模糊互补判断矩阵的一致性, 主要包括检验 m 个矩阵 A_k 的可接受一致性和判断矩阵间的可接受相容性, 即要同时满足:

$$I(A_k, W^k) \leq 0.1, k \neq 1, k, l=1, 2, \dots, m$$

$$I(A_k, W_l) \leq 0.1, k \neq 1, k, l=1, 2, \dots, m$$

已经证明, 综合判断矩阵一致性取决于组成的各个模糊互补判断矩阵是否是一致可接受的. 若满足上述两个条件, 则可以把 m 个权重的均值作为实际权重, 其表达式为:

$$W=(w_1, w_2, \dots, w_n)^T, \quad (2)$$

$$\text{式(2)中: } w_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m w_i^{(k)} = 1, 2, \dots, n$$

2 改进层次分析法评价模型的建立

2.1 确定因素集

因素集 U 是指影响评判对象的各种因素组成的集合.

主因素集 $U=\{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5\}$

其中, U_1 为地质条件; U_2 为地形地貌; U_3 为气象水文条件; U_4 为植被条件; U_5 为人类活动.

$U_1=\{u_1, u_2, u_3\}$; $U_2=\{u_4, u_5, u_6\}$; $U_3=\{u_7, u_8, u_9\}$;

$U_4=\{u_{10}\}$; $U_5=\{u_{11}, u_{12}\}$ 子因素集

其中, u_1 为地层岩性; u_2 为地质构造; u_3 为地震烈度; u_4 为坡度; u_5 为坡向; u_6 为坡面形态; u_7 为降雨强度; u_8 为岩土层透水性; u_9 为地下水埋深; u_{10} 为植被指数; u_{11} 为人类活动强度; u_{12} 为非合理开挖程度.

本文采用的滑坡稳定性评价因素体系如图 1 所示^[4,7-8]:

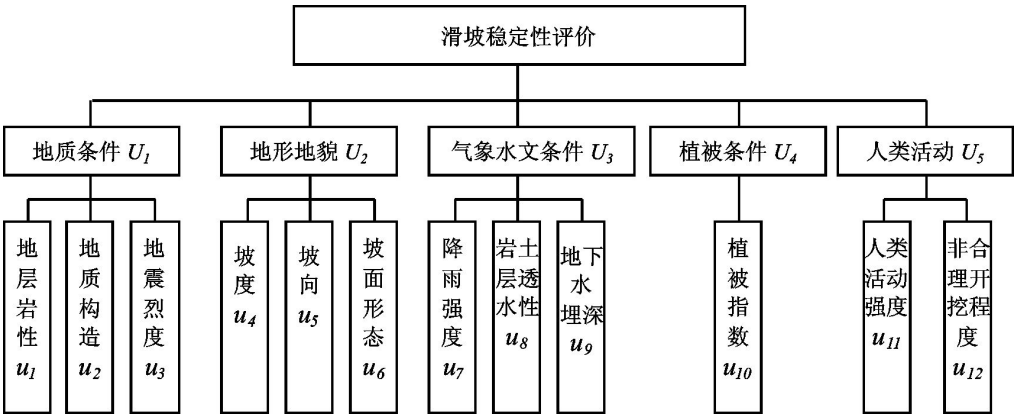


图 1 滑坡稳定性评价因素体系

Fig.1 The landslide stability evaluation index system

2.2 建立评判集

评价集 V 是指以评判对象可能出现的各种评判结果为元素组成的集合.

按照《建设用地地质灾害危险性评估技术要求》(国土资源部)的规定,本文选择由 5 个评价等级组成的一个评价集以便于更精确地对滑坡稳定性进行评价,即 $V=\{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$. 具体评判等级的含义详见表 2^[9].

表 2 滑坡稳定性评判集

Table 2 The landslide stability evaluation set

评价集	极端稳	稳定	欠稳定	不稳定	极端不稳
V	定 V_1	V_2	V_3	V_4	定 V_5
分数 S	≥ 90	75	55	35	≤ 20

2.3 确定隶属度

要确定隶属度^[10-12],具体到滑坡的稳定性来说,也即是各种影响因依据表 2 给出的稳定性评判集,各因素统一采用三角形和梯形分布函数,计算公式如下:

$$\text{绝对稳定: } V_1(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0.8 \\ 10x-8 & 0.8 \leq x < 0.9 \\ 1 & 0.9 \leq x < 1 \end{cases}$$

$$\text{稳定: } V_2(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0.6 \\ 10x-6 & 0.6 \leq x < 0.7 \\ 1 & 0.7 \leq x < 0.8 \\ 9-10x & 0.8 \leq x < 0.9 \\ 0 & 0.9 \leq x < 1 \end{cases}$$

$$\text{欠稳定: } V_3(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0.4 \\ 10x-4 & 0.4 \leq x < 0.5 \\ 1 & 0.5 \leq x < 0.6 \\ 7-10x & 0.6 \leq x < 0.7 \\ 0 & 0.7 \leq x < 1 \end{cases}$$

$$\text{不稳定: } V_4(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0.2 \\ 10x-3 & 0.2 \leq x < 0.3 \\ 1 & 0.3 \leq x < 0.4 \\ 5-10x & 0.5 \leq x < 0.5 \\ 0 & 0.5 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

$$\text{极端不稳定: } V_5(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0.2 \\ 3-10x & 0.2 \leq x < 0.3 \\ 1 & 0.3 \leq x < 1 \end{cases}$$

其中 $V_1(x), V_2(x), V_3(x), V_4(x), V_5(x)$ 为隶属度函数; x 为评价因素的取值.

2.4 构造模糊关系矩阵

根据上两节中确定的各隶属度函数和评价因素,从而计算各评价因素对稳定性等级的隶属度,

得到模糊关系矩阵. 一级评价模糊矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times 5}$

其中, r_{ij} 为 i 因素对于评价等级的 V_i 的隶属度; n 为评价因素个数.

二级评价模糊矩阵 B 由一级评价模糊矩阵经过模糊变换得到.

2.5 模糊综合评判

采用模糊算子 $M(\cdot, \oplus)$ 对一级综合评价模糊矩阵进行变换, 则一级综合评价为

$$B_i = W_i \times R \quad (3)$$

式(3)中, W_i 为子因素集的权重向量.

把得到的矩阵 B 作为二级综合评判模糊矩阵, 进行二级模糊变换

$$A = W \times B \quad (4)$$

式(4)中, W 为主因素集的权重向量.

最后依据最大隶属度原则, 评判滑坡所属的稳定性等级.

3 工程实例

3.1 工程概况

达县地处亚热带湿润季风气候区, 区内四季分明, 气候温和, 平均气温 $16 \sim 17^\circ\text{C}$, 最高气温 41.2°C , 最低气温 -4.5°C . 近年的年平均降水量为 $1075 \sim 1260\text{ mm}$, 年最大降水量为 2732.3 mm (1983 年), 最小降水量为 594.5 mm (1969 年), 降水强度大, 暴雨时有发生, 是许多地质灾害的诱发因素. 勘察场地位于构造剥蚀中低山丘陵地貌区, 地势西高东低. 地下水类型主要是松散岩类裂隙水和基岩裂隙水, 补给方式主要有大气降水、地表水体入渗及周边区域基岩裂隙水. 研究区位于税家场背斜北倾覆端北东翼, 岩体构造裂隙不发育, 地表主要以风化裂隙为主, 无大规模裂隙密集带通过. 根据有关地震资料记载, 达州地区地震震级小, 地震基本烈度为 VI 度, 属弱震区.

据工程地质测绘及钻探揭露, 场地内地层自上而下分布为人工填土层 (Q4ml)、第四系全新统残坡积层 (Q4el+dl), 侏罗系上统蓬莱镇组 (J3P) 泥岩组成. 滑坡主要位于 5~6 级台阶, 总体宽约 145 m , 纵长约 $45 \sim 50\text{ m}$. 后缘位于六级台阶后缘, 地面高程 324 m , 前缘位于五级台阶坡底, 高程. 底部人工开挖陡坡坡脚, 高程约 312 m , 前后缘高差约 12 m . 滑体物质成分主要为松散至稍密状的人工填土、粉质粘土层组成, 土体平均厚度 3.5 m . 滑床前后缘为软塑状的残坡积粉质粘土, 中段为软化的强风化泥岩. 潜在滑动面的位置为前后缘位于土体的中下部, 中段接近基覆界面.

3.2 运用模糊互补判断矩阵计算评价因素的权重

根据图 1 中所给出的滑坡稳定评价因素体系, 运用表 1 中 $0.1 \sim 0.9$ 标度法分别建立各子因素对主因素及各主因素对滑坡稳定性的判断矩阵, 再据此计算各评价因素的权重.

为了减小人为误差, 本文中是由 6 位专业领域专家依据表 1 对模糊互补判断矩阵打分的方法分别对各影响因素作两两相互比较得到的, 并将权重的均值作为最终权重的取值. 由于篇幅所限, 下面以两个子因素 u_1, u_2, u_3 对主因素 U_1 的模糊互补判断矩阵为例来具体说明计算方法:

设专家 1, 2 给出的判断矩阵分别为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.6 \\ 0.3 & 0.5 & 0.6 \\ 0.4 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

根据式(1)计算得到权重向量分别为

$$W_1 = (0.383, 0.317, 0.300)$$

$$W_2 = (0.366, 0.317, 0.317)$$

根据定义 7, A_1, A_2 的特征矩阵分别为

$$W_1^* = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.547 & 0.561 \\ 0.453 & 0.5 & 0.514 \\ 0.439 & 0.486 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$W_2^* = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.536 & 0.536 \\ 0.464 & 0.5 & 0.5 \\ 0.464 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

根据定义 4 和定义 6, 得

$$I(A_2, W_2^*) = 0.02844 < 0.1,$$

$$I(A_1, W_1^*) = 0.06178 < 0.1.$$

所以模糊互补判断矩阵 A_1, A_2 是一致可接受的, 权重向量 W_1, W_2 也是合理的.

根据式(2), 权重向量 W 可平均 W_1, W_2 得到,

$$W = \frac{1}{2}(W_1 + W_2) = (0.375, 0.317, 0.308)$$

当多位专家参与评判矩阵打分时, 可采用上述方法来计算各评价因素的权重, 具体见表 3.

3.3 评判因素取值及隶属度计算

根据达县虎盘山滑坡实际情况对各评价因素取得基础数据, 同时根据改进层次分析法的计算要求转化为计算数据. 为了验证该研究方法的准确性, 选择在 3 种不同工况下进行分析来分别进行计算. 表 3 给出的是滑坡在暴雨+地震工况 (工况 I) 下的数据, 在暴雨工况 (工况 II) 下需将地震数据改

为 1.00,在天然工况(工况Ⅲ)下需将地震数据改为 1.00,同时还需将降雨强度改为 0.75. 根据各评判因素的计算数据及隶属度函数,可以确定相应的隶属度取值,见表 4.

表 3 各影响因素权重及计算数据
Table 3 The weight of each evaluation index and computation data

主因素	权重	子因素	权重	数据来源	计算数据
地质条件	0.302	地层岩性	0.416	土力学实验测定	0.47
		地质构造	0.308	达州市 1:50 000 地质图	0.68
		地震烈度	0.276	地形图	0.55
地形地貌	0.209	坡度	0.496	现场实测	0.44
		坡向	0.275	现场实测	0.69
		坡面形态	0.229	现场实测	0.67
气象水文条件	0.338	年降雨量	0.344	历史气象资料	0.29
		岩土层透水性	0.337	岩土体渗透性测试	0.45
		地下水埋深	0.319	地下水环境背景图	0.42
植被条件	0.065	植被指数	1.000	卫星航片资料	0.82
人类活动	0.086	人类活动强度	0.583	现场调查	0.43
		非合理开挖程度	0.417	现场调查	0.68

表 4 各影响因素隶属度
Table 4 The membership degree of each influence index

主因素	子因素	极端稳定	稳定	危险	极端危险
地质条件	地层岩性	0	0	0.3	0
	地质构造	0	0.8	0	0
	地震烈度	0	0	0	0
地形地貌	坡度	0	0	0.6	0
	坡向	0	0.9	0	0
	坡面形态	0	0.7	0	0
气象水文条件	年降雨量	0	0	0.9	0.1
	岩土层透水性	0	0	0.5	0
	地下水埋深	0	0	0.8	0
植被条件	植被指数	0.2	0.8	0	0
人类活动	人类活动强度	0	0	0.7	0
	非合理开挖程度	0	0.8	0	0

3.4 滑坡稳定性综合评价

根据式(3),分别对地质条件、地形地貌、气候水文条件、植被条件、人类活动主因素中的子因素进行一级综合评价:

地质条件一级综合评价:

$$B_1=W_1 \times R_1=(0.416 \ 0.308 \ 0.276) \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}=(0 \ 0.246 \ 0.629 \ 0.125 \ 0)$$

地形地貌一级综合评价:

$$B_2=W_2 \times R_2=(0.496 \ 0.275 \ 0.229) \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \end{bmatrix}=(0 \ 0.408 \ 0.294 \ 0.298 \ 0)$$

气象水文条件一级综合评价:

$$B_3=W_3 \times R_3=(0.344 \ 0.337 \ 0.319) \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.9 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{bmatrix}=(0 \ 0 \ 0.232 \ 0.734 \ 0.034)$$

植被条件一级综合评价:

$$B_4=W_4 \times R_4=\{1\} \times (0.2 \ 0.8 \ 0 \ 0 \ 0)=(0.2 \ 0.8 \ 0 \ 0 \ 0)$$

人类活动一级综合评价:

$$B_5=W_5 \times R_5=(0.583 \ 0.417) \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}=(0 \ 0.334 \ 0.258 \ 0.408 \ 0)$$

由此根据式(4),得到二级综合评价:

$$A=W \times B=(0.302 \ 0.209 \ 0.338 \ 0.065 \ 0.086) \times$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.246 & 0.629 & 0.125 & 0 \\ 0 & 0.408 & 0.294 & 0.298 & 0 \\ 0 & 0 & 0.232 & 0.734 & 0.034 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.334 & 0.258 & 0.408 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$(0.013 \quad 0.240 \quad 0.352 \quad 0.384 \quad 0.011)$$

最大隶属度与滑坡稳定性等级 V_4 相对应,故依据最大隶属度原则,可知滑坡在暴雨+地震工况下处于不稳定状态。

同理可以在天然工况和暴雨工况下对滑坡稳定性进行二级综合评价:

天然工况:

$$A=(0.096 \quad 0.240 \quad 0.269 \quad 0.384 \quad 0.011)$$

暴雨工况:

$$A=(0.096 \quad 0.357 \quad 0.267 \quad 0.279 \quad 0.011)$$

因此,滑坡在暴雨工况下处于不稳定状态,在天然工况下处于稳定状态。

为了验证该研究方法的准确性,将运用传统刚体极限平衡法计算结果与上述达县虎盘山滑坡稳定性的评价结果进行对比分析(见表5)。已知滑坡安全系数为 1.25,结合滑坡稳定性评价集,可知该模型同传统刚体极限平衡法在 3 种不同工况下滑坡稳定性的判别结果具有较好的一致性,且与实际情况相符。对于暴雨+地震(工况 I)和暴雨(工况 II)条件下,坡体均处于不稳定状态,必须采取必要的工程措施进行防治。对于工况 III(自然工况)条件下,坡体则处于稳定状态,无需采取额外措施。

表 5 与刚体极限平衡法对比分析

Table 5 Comparative analysis of the rigid limit equilibrium method

计算方法	工况 I	工况 II	工况 III
稳定性综合评价等级(本文方法)	不稳定	不稳定	稳定
稳定性系数(刚体极限平衡法)	0.894	0.963	1.272

注:FS<1 不稳定,1≤FS<1.05 欠稳,1.05≤FS<1.05 基本稳定,FS≥1.25 稳定。

4 结 语

a. 达县虎盘山滑坡的稳定性受到多种复杂因素的影响,运用传统方法计算时,对勘察质量和勘察成本要求都较高,且计算模型自身具有局限性。本文方法建立在正确筛选影响滑坡稳定性的重要因素组成评价因素体系基础上,从而使滑坡稳定性评价建立在易获得的部分定量、部分定性的指标之上。

b. 运用 0.1~0.9 标度法得到模糊互补判断矩阵,进而计算各评判因素的权重向量,能够有效地减少传统专家打分所带有的主观性。同时将改进层析分析法(AHP)与模糊评价方法相结合,使用梯形分布函数来计算评判因素对稳定性等级的隶属度,最后进行多级综合评价。根据巨大隶属度原则得到滑坡所属的稳定性等级。

c. 通过将层次分析法得到的计算结果与工程勘察中滑坡的实际情况相比较,二者具有较好的一致性。从而证明了该方法的合理性同时该评价方法简单易于掌握,研究结果对解决滑坡治理的实际问题具有一定的应用价值。

致 谢

感谢中国地质大学(武汉)工程学院任垒硕士在本文层次分析中给予的指导和帮助,同时也对向本文提供工程案例及监测数据的上海勘测设计研究院地质所相关成员表示感谢。

参考文献:

- [1] 张卫中,陈从新,张敬东.改进的 AHP 及其在地灾易发程度分区中的实践[J]. 土木建筑与环境工程, 2009,31(2):85-89.
ZHANG Wei-zhong, CHEN Cong-xin, ZHANG Jing-dong. Improved AHP assessment model and its practice in geological hazard susceptibility zoning[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009,31(2):85-89.(in Chinese)
- [2] Parameshw Aranr, Srinvasans S, Punniy Amoothy M, et al. Integrating fuzzy analytical hierarchy process and data envelopment analysis for performance management in automobile repair shops[J]. European Journal of Industrial Engineering, 2009,3(4):450-467.
- [3] 陶余会.如何构造模糊层次分析法中模糊一致判断矩阵[J]. 四川师范学院学报,2002,23(3):281-285.
TAO Yu-hui. How to make fuzzy consistent judgement matrix of the FAHP[J]. Journal of Sichuan Teachers College, 2002,23(3):281.(in Chinese)
- [4] 樊晓一,乔建平,陈永波.层析分析法在典型滑坡危险度评价中的应用[J]. 自然灾害学报,2004,13(1):72-76.
FAN Xiao-yi, QIAO Jian-ping, CHEN Yong-bo. Application of analytic hierarchy process in assessment of typical landslide danger degree[J]. Journal of Natural Disasters, 2004,13(1):72-76.(in Chinese)
- [5] 徐泽水.模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报,2001,16(4):311-314.

- XU Ze-shui. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgement matrix [J]. Journal of Systems Engineering, 2001,16(4):311-314.(in Chinese)
- [6] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵的相容性及一致性研究[J].解放军理工大学学报,2003,3(2):94-97.
- XU Ze-shui. Research on compatibility and consistency of fuzzy complementary judgement matrices[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2003,3(2):94-97. (in Chinese)
- [7] 黄锦林,赵吉国,张婷,等.基于层次分析法库岸高速滑坡危险度评价[J].自然灾害学报,2011,20(5):95-99.
- HUANG Jin-lin, ZHAO Ji-guo, ZHANG Ting. AHP-based hazard degree assessment of high-speed landslide of reservoir bank [J]. Journal of Natural Disasters, 2011,20(5):95-99.(in Chinese)
- [8] 张彩香,张兆年.模糊综合评价法在水质评价中的应用[J].三峡大学学报:自然科学版,2002,24(5):426-428.
- ZHANG Cai-xiang, ZHANG Zhao-nian. Application of fuzzy comprehensive evaluation in water quality assessment[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2002,24(5):426-428.(in Chinese)
- [9] 刘莉,余宏明,程江涛.层次分析-模糊综合评价法在滑坡工程中的应用[J].三峡大学学报:自然科学版,2008,30(2):43-47.
- LIU Li, YU Hongming, CHENG Jiangtao. Application of analytic hierarchy process -fuzzy comprehensive evaluation method to landslide engineering [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2008,30(2):43-47. (in Chinese)
- [10] 解传银.基于权重模型的滑坡灾害敏感性评价[J].中南大学学报:自然科学版,2011,42(16):1772-1779.
- XIE Chuan-yin. Landslides hazard susceptibility evaluation based on weighting model [J]. Journal of Central South University: Natural Sciences, 2011,42(16):1772-1779. (in Chinese)
- [11] 彭祖赠,孙韞玉.模糊数学及其应用[M].武汉:武汉大学出版社,2007.
- PENG Zu-zeng, SUN Yun-yu. Fuzzy mathematics and its application[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. (in Chinese)
- [12] 杨策.基于改进 AHP 的 FCE 法在地质灾害预警中的应用[D].长春:长春工业大学,2010.
- YANG Ce. Application of geological disaster warning based on improved AHP and PCE [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2010. (in Chinese)

Application of landslide stability evaluation based on improved analytic hierarchy process

YANG Yang¹, SHANG Wen-meng², XIAO Chao-chao², ZHANG Dong-dong³

1.School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Shanghai Investigation and Design Institute, Shanghai 453500, China;

3.Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: To improve the rationality and reliability of stability evaluation results, on the basis of determining landslide stability influence index set, the consistency of fuzzy complementary judgment matrix analytic was applied into hierarchy process and extended into fuzzy environment, the improved analytic hierarchy process was finally developed. Then a stability evaluation model based on semi-quantitative and semi-qualitative indexes was established by using this method. Taking Hupan mountain landslide located in Daxian as a case, the evaluation system was applied to analyze the landslide stability under the conditions of heavy rain and earthquake, heavy rain only and natural condition and the result was compared with that of the traditional rigid limit equilibrium method. The results show that under the condition of heavy rain and earthquake or heavy rain only, the slope is unstable and the necessary engineering measures must be taken to prevent and control landslide; under the natural condition, the slope stays stable.

Keywords: improved analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation; stability evaluation.

本文编辑:龚晓宁