

# 基于模糊一致矩阵理论的边坡稳定性评价

陈文玲, 赵法锁

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 根据地质灾害调查中边坡稳定性评价的特点, 建立了边坡稳定性评价的指标体系, 并将模糊数学理论与层次分析法结合起来, 构建地质灾害调查中边坡稳定性评价的模糊一致矩阵数学模型。实例分析表明, 用该方法对地质灾害调查中边坡稳定性评价是可行的、有效的。

**关键词:** 地质灾害调查; 边坡; 稳定性评价; 模糊一致矩阵

**中图分类号:** P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)04-0404-04

## Stability Evaluation of Slope in Geological Hazard Survey Based on Fuzzy Consistent Matrix Theory

CHEN Wen-ling, ZHAO Fa-suo

(School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract** According to the characteristics of stability evaluation of slope in geological hazard survey, using the theory of fuzzy mathematic and AHP(analytic hierarchy process), a fuzzy consistent matrix mathematic model is established to evaluate the stability of slope in geological hazard survey. A case study shows that the method is reasonable and effective to evaluate the stability of slope in geological hazard survey.

**Key words:** geological hazard; survey; stability evaluation slope; fuzzy consistent matrix

## 0 引言

在中国, 由于地理和地质条件的复杂性和巨大的区域差异性, 地质灾害问题历来较为严重。目前, 国土资源部全国范围内的“县(市)地质灾害调查与区划”已全面展开。在地质灾害调查中, 要对不稳定的斜坡、已发生的滑坡、崩塌、泥石流、地裂缝等地质灾害问题进行调查。查清其分布范围、规模、特征、影响因素和诱发因素等, 并初步评价其稳定性和灾害性。

早期对边坡稳定性的研究主要是借用土力学中极限平衡的概念, 由静力平衡条件计算边坡极限状态下的稳定性和从边坡所处的地质条件以及失稳现象上对滑坡发生的环境以及机理进行单因素定性分析。20世纪80年代以来, 定量的数值模拟

技术广泛应用于边坡稳定性的研究, 同时系统论、模糊数学、信息论、分形理论等新理论方法引入边坡稳定性的研究中, 大大提高了边坡稳定性研究的理论和应用水平。

当工程对象是一个比较复杂的大系统、涉及因素较多、而且各个因素还可能隶属于不同的层次及类别, 尤其当评价对象包含有较多的定性指标时, 用模糊一致矩阵理论处理此类问题可谓得天独厚<sup>[1]</sup>。

目前, 在地质灾害调查中对边坡稳定性评价是根据灾害学、地质灾害学的理论方法, 通过查清地质灾害现状和发育规律, 来定性评价边坡稳定性。由于缺乏计算参数, 也无法对每一个边坡进行稳定性计算, 因此人为因素较多, 评价方法缺乏系统性、科学性和全面性。边坡稳定性影响因素中既有自

然地质条件因素, 又有社会属性的人类活动因素, 不仅因素之间的相互关系极为复杂, 而且, 因素的量化也很困难。要对边坡稳定性进行定量评价, 必须正确地综合分析其众多影响因素, 选出代表性的指标, 并合理量化。因为是初步评价, 要求该定量方法计算简单、适用范围广且评价结果客观可靠。如果将定量和定性评价相结合, 那么对边坡的稳定性评价将更为准确。笔者根据地质灾害调查中边坡稳定性评价的特点, 构建了影响边坡稳定性的指标体系, 建立了边坡稳定性评价的模糊一致矩阵数学模型, 通过实例分析表明, 用该方法进行边坡稳定性评价是合理、有效的。

# 1 数学模型的建立

在模糊一致矩阵法<sup>[2-4]</sup>中, 可针对每一目标  $U_k$ , 通过两两比较的方法建立方案论域上的模糊优先关系矩阵  $B_k = (b_{ij}^k)_{m \times m} (k = 1, 2, \dots, n)$ , 其中  $b_{ij}^k$  表示在目标  $U_k$  下, 方案  $A_i$  优于  $A_j$  的程度, 然后对各个方案进行优劣比较即可。模糊一致矩阵法的优点是将思维进行量化, 由定性向定量转化。设模糊优先关系矩阵  $B$  是方案论域  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  上的一个  $m$  值矩阵  $B = (b_{ij})_{m \times m}$ , 其中, 当  $b_{ij} = 1$  时, 表示  $A_i$  优于  $A_j$ ; 当  $b_{ij} = 0.5$  时, 表示  $A_i$  同于  $A_j$ ; 当  $b_{ij} = 0$  时, 表示  $A_i$  劣于  $A_j$ 。

## 1.1 建立模糊优先关系矩阵

设一目标决策问题有  $n$  个目标  $U_k$ , 其相应的权重为  $w_k (k = 1, 2, \dots, n)$ , 并拟定了  $m$  个方案  $A_i (i = 1, 2, \dots, m)$ , 方案  $A_i$  在目标  $U_k$  下按模糊优先关系矩阵取值为  $b_{ik} (i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n)$ , 其中  $(b_{ik} = 1, 0.5, 0)$ , 于是得到模糊优先关系矩阵

$$B_k = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mm} \end{bmatrix}_{m \times m}$$

## 1.2 将模糊优先关系矩阵转换为模糊一致矩阵

(1) 对模糊优先关系矩阵  $B_k = (b_{ij}^k)_{m \times m}$  按行求和, 即  $r_i = \sum_{j=1}^m b_{ij}^k, (i = 1, 2, \dots, m)$ 。

(2) 确定  $F_k$  中的元素  $f_{ij}^k, f_{ij}^k = \frac{r_i - r_j}{2m} + 0.5$ 。  
 $f_{ij}^k$  反映了在目标  $U_k$  下, 方案  $A_i$  与方案  $A_j$  的相对优越性程度。 $f_{ij}^k = 0.5$  表示方案  $A_i$  与  $A_j$  等优; 0

$\leq f_{ij}^k \leq 0.5$  表示方案  $A_i$  优于  $A_j$ , 且  $f_{ij}^k$  越大,  $A_i$  越优于  $A_j$ ;  $0.5 \leq f_{ij}^k \leq 1$  表示方案  $A_i$  劣于  $A_j$ , 且  $f_{ij}^k$  越大,  $A_i$  越劣于  $A_j$ 。

## 1.3 计算优度值

根据模糊一致矩阵  $F_k = (f_{ij}^k)_{m \times m}$ , 运用方根法计算方案  $A_i$  在目标  $U_k$  下的优度值  $S_i^k = \bar{S}_i \sqrt[m]{\sum_{j=1}^m \bar{S}_j}$ ,  
 $\bar{S}_i = (\prod_{j=1}^m f_{ij}^k)^{\frac{1}{m}}, (j = 1, 2, \dots, m)$ 。

将  $S_i^k (i = 1, 2, \dots, m)$  从大到小排列就得到各方案在目标  $U_k$  下的单目标优劣次序, 然后计算各方案的整体优度值  $T_i = \sum_{k=1}^n w_k S_i^k$ , 即多目标总排序, 按  $T_i$  的大小对各方案进行比较, 就得到最优方案。

# 2 实例

## 2.1 地质灾害概况

陕西省韩城市位于西安市的东北部, 由于其复杂的地质、地形地貌、气象水文条件和强烈的地形构造运动及人为工程活动, 使得该区地质灾害较为发育, 出现显著的地形和地域分布差别。

从地质灾害地形分布上看, 地质灾害主要分布于黄土台塬区、河川谷道区低山地貌区和煤矿区。从地质灾害的地域分布上看, 在韩城市 16 个乡镇中, 由于所处地理位置和地形地貌不同, 地质条件和岩土特征不一, 其地质灾害分布不均匀。

## 2.2 确定评价指标体系及拟评价的边坡

由于影响边坡稳定性的因素较多, 应充分利用在地质灾害调查中获得资料, 评价应选择影响边坡稳定性较大的因素, 略去次要的、影响小的因素, 而且选择的指标因素应具普遍性, 避免单一的边坡稳定性评价因素带来的局限性。根据韩城市地质灾害调查报告和边坡稳定性自身的特点, 通过查阅相关资料并征求专家意见, 确定地质灾害调查中边坡稳定性评价指标 (因素) 集为:  $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\} = \{\text{岩体结构类型、地形坡度、地下水、工程地质岩组、人类工程活动强度、月平均降雨量}\}$ 。拟评价的边坡有: 方案一 ( $p_1$ ): 崖岔村三组滑坡; 方案二 ( $p_2$ ): 段堡村滑坡; 方案三 ( $p_3$ ): 韩城电厂滑坡; 方案四 ( $p_4$ ): 高台村斜坡。

根据韩城市地质灾害调查的报告得出各个指标因素的逻辑评语集 (表 1)。

表 1 各边坡的逻辑评语

Tab. 1 Logic Judgments of Different Slopes

边坡稳定性 评价因素	崖岔村三 组滑坡( $p_1$ )	段堡村 滑坡( $p_2$ )	韩城电厂 滑坡( $p_3$ )	高台村 斜坡( $p_4$ )
岩体结构类型( $U_1$ )	差	差	较好	较好
地形坡度( $U_2$ )	好	好	好	差
地下水( $U_3$ )	无	有	有	有
工程地质岩组( $U_4$ )	一般	差	差	一般
人类工程活动强度( $U_5$ )	弱	较强	强	弱
月平均降雨量( $U_6$ )	一般	一般	一般	一般

2.3 建立模糊优先关系矩阵

据以上分析,拟评价的 4 个边坡(方案) $p_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )在 6 个目标  $U_k$  ( $k=1, 2, 3, 4, 5, 6$ )下进行多目标决策方案优选,因此有 6 个模糊优先关系矩阵  $B_k=(b_{ij}^k)_{4\times 4}$ , ( $k=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ),通过比较可以得到优先关系矩阵

$$B_1=\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.0 & 0.0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 1.0 & 0.5 & 0.5 \\ 1.0 & 1.0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$B_2=\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$B_3=\begin{bmatrix} 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$B_4=\begin{bmatrix} 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.0 \\ 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$B_5=\begin{bmatrix} 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \\ 0.0 & 0.5 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.5 & 0.0 \\ 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$B_6=\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

2.4 将模糊优先关系矩阵改造成模糊一致矩阵

利用上述算法将模糊优先关系矩阵  $B_k$  改造成模糊一致矩阵  $F_k$

$$F_1=\begin{bmatrix} 0.500 & 0.500 & 0.188 & 0.312 \\ 0.500 & 0.500 & 0.188 & 0.312 \\ 0.812 & 0.812 & 0.500 & 0.625 \\ 0.688 & 0.688 & 0.375 & 0.500 \end{bmatrix}$$

$$F_2=\begin{bmatrix} 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.75 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.75 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.75 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$F_3=\begin{bmatrix} 0.50 & 0.75 & 0.75 & 0.75 \\ 0.25 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \\ 0.25 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \\ 0.25 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$F_4=\begin{bmatrix} 0.50 & 0.75 & 0.75 & 0.50 \\ 0.25 & 0.50 & 0.50 & 0.25 \\ 0.25 & 0.50 & 0.50 & 0.25 \\ 0.50 & 0.75 & 0.75 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$F_5=\begin{bmatrix} 0.500 & 0.688 & 0.812 & 0.500 \\ 0.312 & 0.500 & 0.625 & 0.312 \\ 0.188 & 0.375 & 0.500 & 0.188 \\ 0.500 & 0.688 & 0.812 & 0.500 \end{bmatrix}$$

$$F_6=\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

2.5 单目标排序

利用方根法计算各方案在目标  $U_k$  下的优越值,结果如表 2。

表 2 各方案在目标  $U_k$  下的优越值

Tab. 2 Optimization Value of Different Projects According to  $U_k$

优越值方案	$S_i^1$	$S_i^2$	$S_i^3$	$S_i^4$	$S_i^5$	$S_i^6$
$p_1$	0.183	0.283	0.350	0.317	0.317	0.25
$p_2$	0.183	0.283	0.217	0.183	0.217	0.25
$p_3$	0.317	0.283	0.217	0.183	0.148	0.25
$p_4$	0.317	0.152	0.217	0.317	0.317	0.25

2.6 各因素权重的确定及多目标总排序

对于各指标权重的确定,可用 AHP 法<sup>[5]</sup>,按照各指标对边坡稳定性的重要程度进行比较判断,构造判断矩阵。相容性检验式为

$$CR=\frac{\lambda_{\max}-N}{RI(N-1)}$$

式中:  $CR$  为判断矩阵的随机一致性比率;  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值;  $N$  为判断指标个数;  $RI$  为判

断矩阵的平均一致性指标,对于5~11阶判断矩阵,其 $RI$ 值分别为1.12、1.24、1.32、1.41、1.45、1.49、1.51。当 $CR < 0.10$ 时,即认为判断矩阵具有较好的一致性,说明权重分配是合理的;否则,就需要调整判断矩阵,直到满足 $CR < 0.10$ 为止。根据各因素对设计方案影响的重要程度,建立各因素之间的两两比较判断矩阵 $R$ (略),对 $R$ 归一化并通过一致性检验后得其权重: $w = (0.160\ 3, 0.101\ 7, 0.064\ 9, 0.380\ 0, 0.250\ 2, 0.043\ 0)^T$ ,然后利用 $T_i = \sum_{k=1}^n w_k S_i^k$ 计算出总体优度值, $T_1 \sim T_4$ 分别为0.291 3、0.206 8、0.211 0、0.290 9。

由此可知4个边坡的稳定性由好到坏排序为:崖岔村三组滑坡 $T_1 >$ 高台村斜坡 $T_4 >$ 韩城电厂滑坡 $T_3 >$ 段堡村滑坡 $T_2$ ,并且 $T_1$ 、 $T_4$ 的值接近, $T_3$ 、 $T_2$ 的值接近。通过地质灾害调查<sup>[9]</sup>,对4个边坡的稳定性评价为崖岔村三组滑坡和高台村斜坡的稳定性较差,韩城电厂滑坡和段堡村滑坡的稳定性差。由此可见,模糊一致矩阵理论得出的定量评价和已有的定性评价的结论吻合,并且还可以对定性评价的结果进行进一步细化。由优度值可知,对稳定性较差的2个边坡,崖岔村三组滑坡的稳定性比高台村斜坡稍好;对稳定性差的2个边坡,韩城电厂滑坡的稳定性比段堡村滑坡稍好。

如果要将更多的边坡稳定性进行评价,只需要知道其中一边坡的稳定性评价,其他边坡的稳定性评价可以通过优度值和它比较得出。对选作参照的边坡,应选择重要的边坡,对它的稳定性评价越准确,则对其他边坡的稳定性评价就越准确。另外,对于已有量化数据的因素,选择其中对边坡稳定性影响大的,如岩土体的内聚力、内摩擦角值,作为稳定性评价因素,并且通过数据间的比较给出它们的逻辑评语,然后和其他因素一起重新

建立模糊一致矩阵。各边坡稳定性评价只适合于小区域内。

### 3 结语

(1)利用模糊数学的一些理论及方法能很快得出较理想、客观的定量评价结果。

(2)运用模糊数学方法时,评价指标因素集的确定对最终结果影响很大,因此,必须根据地质灾害调查区域边坡稳定性情况和特点,有重点的选择一些对边坡稳定性影响较大的因素,略去那些非重要的因素。

(3)实例分析表明:研究建立的边坡稳定性评价模糊一致矩阵模型,具有概念清晰、理论严密、计算简便且评价结果客观可靠等优点。在地质灾害调查中,将该方法获得的边坡稳定性定量评价与已有的定性评价相结合,可使评价结果更全面、可信。

(4)由于该理论与方法得出的边坡稳定性定量评价是对各个边坡的优度值相比较而得出的,因此它是各个边坡的相对稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 姚敏,张森.模糊一致矩阵及其在决策分析中的应用[J].系统工程理论与实践,1998,18(5):78-81.
- [2] 张跃,邹寿平,宿芬.模糊数学方法及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1992.
- [3] 杨伦标.模糊数学原理及应用[M].广州:华南理工大学出版社,1995.
- [4] 戴佑斌,张尚根,周早生,等.模糊一致矩阵理论在地铁深基坑支护方案优选中的应用[J].岩土工程学报,2005,27(10):1162-1165.
- [5] 石碧波.区域地质环境质量评价的GIS系统研究[D].西安:长安大学,2005.
- [6] 林斌,宋飞.陕西省韩城市地质灾害调查与区划报告[R].西安:长安大学,2003.