

文章编号:1000-582X(2010)09-098-06

# 改进模糊层次分析法在滑坡治理方案优化中的应用

康钦容<sup>1</sup>, 唐建新<sup>1</sup>, 张卫中<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 中南财经政法大学 信息与安全学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**在考虑技术指标和其他影响因素进行滑坡治理方案优化的基础上,运用治理方案优化结合监测信息反馈的滑坡综合治理思路,通过对多项实际工程的分析,建立了滑坡灾害治理方案分层递阶结构综合评价指标系;并给出了模糊层次分析法权重及判断矩阵一致性检验方法,提出了基于改进的模糊层次分析法的多目标决策问题解决方案。以向家坡滑坡治理方案的优选为应用实例,结果表明建立的方法简便可行、可靠性好,为施工决策者提供了一种科学有效的评判方法。

**关键词:**模糊层次分析法;滑坡;治理方案;综合评价指标;多目标决策

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

## Application of improved FAHP in schemes optimization about landslide treatment

KANG Qin-rong<sup>1</sup>, TANG Jian-xin<sup>1</sup>, ZHANG Wei-zhong<sup>2</sup>

(1. College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. School of Information and Safety Engineering, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan, Hubei 430070, P. R. China)

**Abstract:**Based on the landslide control scheme optimized by considering technical index and other factors, a landslide comprehensive control thought of “treating scheme optimization combined monitoring information feedback” is put forward. The multi-level hierarchical comprehensive evaluation index on landslide control scheme is set up on the basis of analyzing many engineering examples, and formula of weight, fuzzy complementary judgment matrix and the consistency check method of judgment matrix of fuzzy analytical hierarchy process are given, the solution of multi-objective decision problems based on improved fuzzy analytical hierarchy process is developed, too. Validity and reliability of this method is proved through the scheme selection for Xiangjiapo landslide control. It provides an effective method for construction decision makers.

**Key words:** fuzzy analytic hierarchy process (FAHP); landslides; treating scheme; comprehensive evaluation index; multi-objective decision

中国在边坡灾害的系统研究和治理方面起步较晚,但在大量的各种类型的边坡治理实践中,已经总结出了绕避、排水、支挡、减重、反压等治理边坡的原

则和方法。随着中国高速公路等大型工程项目建设在地形、地质复杂区域的迅速发展,不可避免会遇到高填、深挖边坡防护的问题,必须考虑边坡性质、结

收稿日期:2010-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50874124)

作者简介:康钦容(1980-),女,重庆大学博士研究生,主要从事岩土工程与矿山灾害方面的研究。

唐建新(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)jxtang@cqu.edu.cn.

构、形成机理、规模大小、滑体厚度等对工程的影响,才能提出相应的治理方案。

鉴于工程地质发展水平及治理经验的不足,在滑坡治理措施上,国内外有许多问题尚待解决<sup>[1]</sup>。如本不该治理或仅需简单的加固措施就能保持稳定的边坡,得到了“感冒动手术”式的花费太高的工程加固,造成不必要的浪费;有的因对地质原型认识不清或方案选择失误,造成了滑坡治理失败;更值得提出的是:目前滑坡灾害治理方案优化研究主要集中在单个方案的优化设计上,减灾方案选择基本上是基于定性的人为凭经验选取,造成选择的方案不一定合理和经济,有时会造成巨大的浪费。

目前,滑坡治理方案研究从技术层面上讲,滑坡治理方案较多,但是对方案的评估及优化选择研究较少。在治理方案优选方面,目前主要优化方法有综合评分法<sup>[2]</sup>、熵权决策法<sup>[3]</sup>、案例分析法<sup>[4]</sup>等,这些方法各有优劣,均受主观影响较大,只能通过多位专家综合打分才能降低主观臆断的影响。据此,改进的模糊层次分析法不失为一种解决上述缺点的决策方法。

基于滑坡治理方案优化结合监测信息反馈的滑坡综合治理思路,考虑层次分析法存在的问题,提出了基于改进模糊层次分析法的滑坡治理方案决策方法:依据模糊层次分析法的基本原理建立数学模型,得到了模糊层次分析法权重以及判断矩阵一致性检验的简单可行方法,提出了基于改进的模糊层次分析法的多目标决策问题的解决方案,通过向家坡滑坡治理方案优选的应用,证明该方法可行,研究结果对综合滑坡治理具有较大的工程意义。

### 1 滑坡综合治理的方案优化结合信息反馈思路

在实际工程中,往往同时存在几个治理方案可供选择,这时就必须对它们进行优化评价,从中选择较满意的方案,进行施工图设计和施工。目前,在强调滑坡治理方案优化的同时,越来越强调信息化施工在滑坡治理中的作用。同时借助于监测系统信息反馈实现优选治理方案的优化、修正以及信息化施工。滑坡治理方案优化结合信息反馈治理滑坡思路见图 1。

### 2 滑坡灾害治理方案的优化决策——改进模糊层次分析法及应用

#### 2.1 滑坡治理方案优选指标体系和方案集

##### 2.1.1 影响滑坡灾害方案的指标体系

对滑坡灾害治理方案选择的影响因素概括起来一般包括经济指标和社会指标<sup>[4]</sup>,通过对多项实际工程的分析和分类,建立的滑坡灾害治理方案综合

评价指标分层递阶结构见图 2。该体系克服了以往方案仅考虑技术层面的缺点,对治理方案综合考虑。

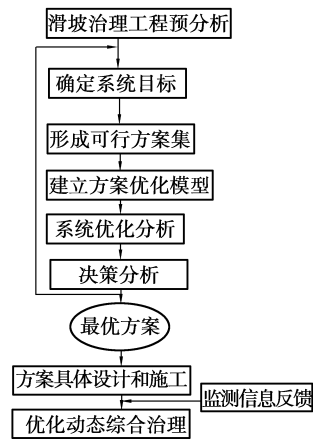


图 1 滑坡优化动态综合治理步骤

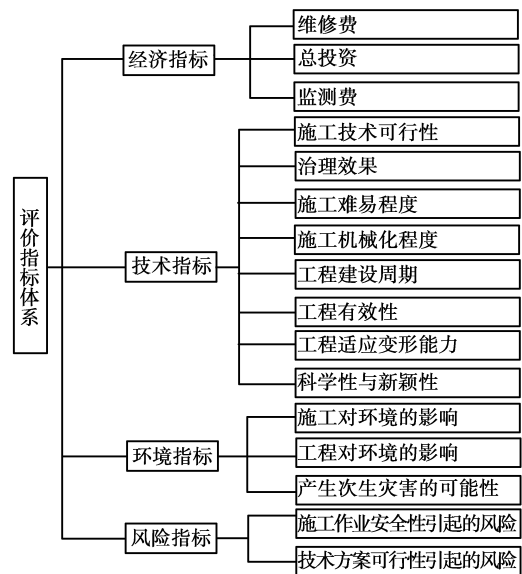


图 2 滑坡灾害治理方案评价指标体系

##### 2.1.2 滑坡灾害治理的可行方案集

一个滑坡灾害治理的可行方案一般不止一个,最终方案选取是以可行方案为基础,可行方案集是否包括了“最优”方案是其关键。因此,可行方案集应尽可能地全面。就目前滑坡灾害治理的研究水平,滑坡灾害治理可行方案的选择是基于专家或工程经验而确立的。首先着眼于特定的滑坡灾害条件,重视实践经验,分析研究滑坡灾害的内外环境特性等多方面因素,提出各种设想方案,然后通过比较和筛选,提出若干可行方案。

#### 2.2 模糊层次分析法

层次分析法是在进行多目标、多判据的系统设

计方案选优排序中应用得比较广泛的一种方法,但由于人为判断的片面性,两两比较结果不一定具有客观的一致性,且没有考虑人为判断的模糊性<sup>[6-8]</sup>。

将 AHP 扩展到模糊环境<sup>[9-10]</sup>中,得到模糊层次分析法,并对模糊层次分析法中模糊互补判断矩阵一致性方法进行了改进,给出了模糊层次分析法权重以及判断矩阵一致性检验的简单可行的判断公式,并应用于滑坡治理多方案优选。

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

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

则称  $R$  为模糊矩阵。

模糊层次分析法的步骤和 AHP 的步骤基本一致,都包括:问题概念化、建立层次结构、互补判断矩阵的建立、权重的求解、判断矩阵的一致性检验等,仅有 2 点不同<sup>[11-12]</sup>。

1) 在 AHP 中通过元素的两两比较构造判断矩阵,而在 FAHP 中构造模糊一致判断矩阵;

2) 由模糊一致矩阵求各元素相对重要性的权重的方法与由判断矩阵求权重方法不同。

### 2.2.1 模糊互补判断矩阵的构造

在模糊层次分析中,做因素间的两两比较判断,采用一个因素比另一个因素的重要程度来定量表示,则得到模糊判断矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ , 如满足:

$$1) a_{ii} = 0.5, i = 1, 2, \dots, n;$$

$$2) a_{ij} + a_{ji} = 1, i = 1, 2, \dots, n.$$

则称为模糊互补判断矩阵。通常采用表 1 所示的 0.1~0.9 标度法给予数量标度。

表 1 0.1~0.9 标度法及其意义

标度	定义	说明
0.5	同等重要	两因素相比较,同等重要
0.6	稍微重要	两因素相比较,一个因素比另一个稍微重要
0.7	明显重要	两因素相比较,一个因素比另一个明显重要
0.8	重要得多	两因素相比较,一个因素比另一个重要得多
0.9	极端重要	两因素相比较,一个因素比另一个极端重要
0.1, 0.2, 0.3, 0.4	反比较	若因素 $a_i / a_j = r_{ij}$ , 则 $a_j / a_i$ 与相比较 $r_{ji} = 1 - r_{ij}$

对因素  $a_1, a_2, \dots, a_n$  相互进行比较,则得到如下模糊互补判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

### 2.2.2 模糊互补判断矩阵的权重公式

**定义 2** 设模糊互补矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$  满足  $\forall i, j, k$

$$r_{ij} = r_{ik} - r_{jk} + 0.5, \quad (2)$$

则称模糊矩阵  $R$  是模糊互补一致性矩阵。

定义 2 给出了模糊互补矩阵一致性判断的一般公式,但计算量较大。文献[13]推导出了求解模糊互补判断矩阵权重的一种通用公式。

**定理 1** 设模糊判断矩阵  $A = (r_{ij})_{n \times n}$ , 对矩阵

$A$  按行求和  $r_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 并实施如下数学代换

$$r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2(n-1)} + 0.5, \quad (3)$$

得到模糊一致性矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$ , 该公式计算量小且便于计算机编程实现。

由矩阵  $R$  采用行和归一化求得排序向量

$$W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$$

$$\text{满足 } W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

式(4)为求解模糊互补判断矩阵权重的公式。

### 2.2.3 模糊互补判断矩阵的一致性检验方法

由式(4)得到的权重值是否合理,还应该进行比较判断的一致性检验。文献[14]推导出了用模糊判断矩阵的相容性来检验其一致性原则的方法。

令全体  $n$  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  $B = (b_{ij})_{n \times n} \in G_n$ , 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 3** 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  $\forall i, j \in N$ , 有  $a_{ij} = b_{ij}$ 。

**定义 4** 矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  和  $B = (b_{ij})_{n \times n}$  均为模糊判断矩阵,称

$$FC_{(AB)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} + b_{ji} - 1|, \quad (5)$$

为  $A$  和  $B$  的相容度。

**定义 5** 当  $A$  和  $B$  是模糊判断矩阵,令

$$I(A, B) = \frac{1}{n^2} FC_{(AB)}, \quad (6)$$

为  $A$  和  $B$  的相容性指标。

**定义 6**  $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$  是模糊判断矩阵  $A$

的权重向量,其中  $\sum_{i=1}^n W_i = 1, \omega_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n)$ , 令

$$\omega_{ij} = \frac{\omega_i}{\omega_i + \omega_j} (\forall i, j = 1, 2, \dots, n), \text{ 则称 } n \text{ 阶矩阵}$$

$$W^* = (W_{ij})_{n \times n}, \quad (7)$$

为判断矩阵  $A$  的特征矩阵。

对于决策者的态度  $\alpha$ , 当相容性指标  $I(A, W^*) \leq \alpha$  时, 认为判断矩阵为满意一致性的。 $\alpha$  越小则表明决策者对模糊判断矩阵的一致性要求越高, 一般可取  $\alpha = 0.1$ 。

对于实际问题, 一般都是由多个(设  $k$  个,  $k = 1, 2, \dots, m$ ) 专家给出同一因素集  $x$  上的两两比较判断矩阵

$$A_k = (a_{ij}^{(k)})_{n \times n}, k = 1, 2, \dots, m$$

他们均是模糊互补判断矩阵, 则可分别得到权重集的集合

$$W^k = (W_1^{(k)}, W_2^{(k)}, \dots, W_n^{(k)}), k = 1, 2, \dots, m$$

则进行模糊互补判断矩阵的一致性检验, 要做以下两个方面的工作:

1) 检验  $m$  个矩阵  $A_k$  的满意一致性

$$I(A_k, W^{(k)}) \leq \alpha, k = 1, 2, \dots, m$$

2) 检验判断矩阵间的满意相容性

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

可以证明, 在模糊互补判断矩阵  $A_k (k = 1, 2, \dots, m)$  是一致可接受的情况下, 它们的综合判断矩阵也是一致可接受的。即只要当 1) 和 2) 满足时,  $m$  个权重集的均值作为因素集  $X$  的权重分配向量是合理和可靠的, 权重向量表达式

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n), \quad (8)$$

$$\text{式中: } W_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m W_i^{(k)}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

### 3 向家坡滑坡治理方案优选

在本次治理方案优化决策之前, 向家坡滑坡发生明显位移, 引起各有关部门的足够重视, 多次召集中铁勘察设计院西北分院、重庆大学、重庆交通大学、长江勘察设计院、重庆大地滑坡治理有限公司等单位专家、学者对治理方案进行了多次论证与修改。以向家坡滑坡治理工程为例, 用改进的模糊层次分析法进行治理方案优选。

#### 3.1 影响治理方案的因素分析

据向家坡滑坡实际情况, 选取经济指标和社会指标, 经济指标主要选投资总额(经济性  $X_1$ )、工程收益( $X_2$ )、社会指标选风险性( $X_3$ )和治理效果( $X_4$ )。

#### 3.2 向家坡滑坡治理方案集分析

根据向家坡滑坡的特点、地勘调查结构、监测情况以及专家和管理者的咨询, 提出了 4 种可行的治理方案: 抗滑桩+排水工程+监测系统(简称设计方案  $M_1$ )、锚喷锁固+排水工程+监测系统(方案  $M_2$ )、消方减载+排水工程+监测系统(简称设计方案  $M_3$ )和局部清方+排水工程+监测系统(简称设

计方案  $M_4$ ) 4 种治理方案<sup>[15-18]</sup>。

#### 3.3 向家坡滑坡治理方案的层次结构模型

通过系统分析, 建立向家坡滑坡治理方案决策层次结构模型(图 3), 第 1 层为总目标层, 中间层为准则层( $X$ ), 最下层为方案层( $M$ ), 共 4 种备选方案。

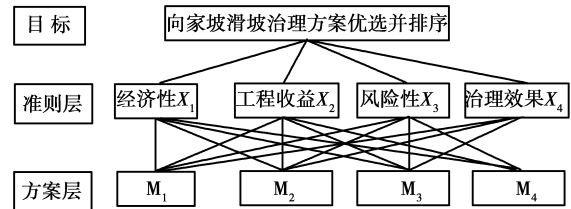


图 3 向家坡滑坡治理方案评价体系层次结构模型

#### 3.4 权重矩阵的确定

相对于前面 4 个评价准则。假设由 2 个(或多个, 本次方案优选中推荐 2 个)领域专家依据表 1 打分的方法分别对各因素作两两比较判断, 得到权重模糊互补判断矩阵为

$$A_1 = \begin{matrix} \text{准则 } X & X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ X_1 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.4 \\ X_2 & 0.4 & 0.5 & 0.4 & 0.3 \\ X_3 & 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ X_4 & 0.6 & 0.7 & 0.6 & 0.5 \end{matrix},$$

根据式(4), 可得其权重向量为

$$W_1 = (0.250 \quad 0.217 \quad 0.250 \quad 0.283)$$

根据式(7),  $A_1$  的特征矩阵计算结果为:

$$W_1^* = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.535 & 0.5 & 0.469 \\ 0.465 & 0.5 & 0.465 & 0.434 \\ 0.5 & 0.535 & 0.5 & 0.469 \\ 0.531 & 0.566 & 0.531 & 0.5 \end{bmatrix}.$$

根据式(5)和(6),  $A_1$  与  $W_1^*$  的相容性指标为:  $I(A_1, W_1^*) = 0.05038 < 0.1$ , 故可以认为模糊判断矩阵  $A_1$  是满意一致的, 故其权重  $W_1$  分配是合理的。

设专家 2 给出的权重模糊互补判断矩阵  $A_2$  为

$$A_2 = \begin{matrix} \text{准则 } X & X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ X_1 & 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.5 \\ X_2 & 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.3 \\ X_3 & 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ X_4 & 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.5 \end{matrix},$$

同理, 可计算其权重向量为

$$W_2 = (0.275 \quad 0.208 \quad 0.242 \quad 0.275)$$

$A_2$  的特征矩阵计算结果为

$$W_2^* = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.569 & 0.532 & 0.5 \\ 0.431 & 0.5 & 0.462 & 0.431 \\ 0.468 & 0.538 & 0.5 & 0.468 \\ 0.5 & 0.569 & 0.532 & 0.5 \end{bmatrix}。$$

$A_2$  与  $W_2^*$  的相容性指标为:  $I(A_2, W_2^*) = 0.05713 < 0.1$ , 故认为模糊判断矩阵  $A_2$  是满意一致的, 其权重  $W_2$  分配是合理的。

同时, 检验判断矩阵  $A_1$  和  $A_2$  的满意相容性:  $I(A_1, A_2) = 0.075 < 0.1$ 。故可以认为模糊判断矩阵是满意相容的。

采用式(8)、式(9)的计算公式, 则综合两个专家的意见后, 权重向量  $W$  可表示为

$$W = \left( \frac{1}{2}(0.250 + 0.275) \quad \frac{1}{2}(0.217 + 0.208) \right. \\ \left. \frac{1}{2}(0.250 + 0.242) \quad \frac{1}{2}(0.283 + 0.275) \right) \\ = (0.263 \quad 0.213 \quad 0.246 \quad 0.279)$$

可采用类似的方法对有多个专家参与的评判进行模糊判断矩阵的一致性与相容性检验。

对4种备选设计方案建立模糊互补判断矩阵。

由专家依据表1打分的方法, 经过对各因素作两两比较判断, 得到模糊矩阵  $R$ 。为论述方便, 这里仅给出一个专家评判矩阵。

经济性  $X_1$  模糊判断矩阵

$$R_{X_1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{方案} & 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.4 & 0.6 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix} \end{matrix}。$$

工程收益  $X_2$  模糊判断矩阵

$$R_{X_2} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{方案} & 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.7 & 0.6 \\ 0.7 & 0.5 & 0.9 & 0.8 \\ 0.3 & 0.1 & 0.5 & 0.6 \\ 0.4 & 0.2 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix} \end{matrix}。$$

风险性  $X_3$  模糊判断矩阵

$$R_{X_3} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{方案} & 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.8 \\ 0.4 & 0.5 & 0.4 & 0.7 \\ 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.8 \\ 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix} \end{matrix}。$$

治理效果  $X_4$  模糊判断矩阵

$$R_{X_4} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{方案} & 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.4 \\ 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0.3 \\ 0.6 & 0.8 & 0.7 & 0.5 \end{bmatrix} \end{matrix}。$$

根据上述4个模糊判断矩阵, 由式(8)得各个因

素上4个设计方案的排列向量

$$X_1 = (0.242 \quad 0.275 \quad 0.275 \quad 0.208), \\ X_2 = (0.258 \quad 0.325 \quad 0.192 \quad 0.225), \\ X_3 = (0.283 \quad 0.250 \quad 0.283 \quad 0.208), \\ X_4 = (0.267 \quad 0.200 \quad 0.233 \quad 0.300)。$$

对上述4个向量进行比较判断的满意一致性检验。将其作为决策依据是可靠的。

由排序向量组成评判矩阵

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{方案} & 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.4 & 0.6 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix} \end{matrix}。$$

方案总排序计算结果为

$$B = W \oplus R = [0.236 \quad 0.213 \quad 0.246 \quad 0.279] \times \\ \begin{bmatrix} 0.242 & 0.275 & 0.275 & 0.208 \\ 0.258 & 0.325 & 0.192 & 0.225 \\ 0.283 & 0.250 & 0.283 & 0.208 \\ 0.267 & 0.200 & 0.233 & 0.300 \end{bmatrix} \\ = [0.263 \quad 0.259 \quad 0.248 \quad 0.237]$$

按最大隶属度原则, 备选方案优选序为: 方案1 > 方案2 > 方案3 > 方案4, 最终治理方案选用抗滑桩(附以预应力锚索)+排水工程+监测系统综合治理方案。该方案已在向家坡滑坡治理中取得好的效果。

## 4 结 语

针对目前滑坡治理方案确定存在的一系列问题, 提出了基于治理方案优化结合监测信息反馈的滑坡综合治理思路; 考虑技术指标和其它因素, 通过对多项实际工程的分析, 建立了滑坡灾害治理方案综合评价指标分层递阶结构; 考虑层次分析法存在的问题, 详细介绍了模糊层次分析法的基本原理并建立了相应的数学模型, 给出了模糊层次分析权重以及判断矩阵一致性检验的简单可行方法, 提出了基于改进的模糊层次分析法的多目标决策问题的解决方案, 通过向家坡滑坡治理方案优选的应用, 证明该方法可行, 研究结果对综合滑坡治理具有较大的工程意义。

## 参考文献:

- [1] 李东升, 刘东燕. 边坡可靠度风险评价分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 150-153.  
LI DONG -SHENG, LIU DONG -YAN. Analysis of slope reliability and damage risk evaluation approach[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(2): 150-153.
- [2] 张玉清, 宓永宁, 王铁良, 等. 综合评分法在护坡方案优选中的应用[J]. 中国水土保持, 2008, 22(2): 8-10.

- ZHANG YU-QING, MI YONG-NING, WANG TIE-LIANG, et al. Application of synthesis grading law in slope protection plan[J]. Soil and Water Conservation of China, 2008, 22(2):8-10.
- [3] 王念秦,姚勇,罗东海. 滑坡综合治理方案比选评价模型[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1):111-114.  
WANG NIAN-QIN, YAO YONG, LUO DONG-HAI. Comparison and choice of integrated control schemes for landslide [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(1):111-114.
- [4] 谢全敏,丁保艳,吴定洪. 基于案例的边坡治理方案选择决策支持系统研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5):1351-1353, 1360.  
XIE QUAN-MIN, DING BAO-YAN, WU DING-HONG. Study on case-based decision support system for selection of slope treatment schemes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5):1351-1353, 1360.
- [5] 谢全敏. 滑坡灾害风险评价及其治理决策方法研究[D]. 湖北:武汉理工大学, 2004.
- [6] 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
- [7] ERCANOGLU M, KASMER O, TEMIZ N. Adaptation and comparison of expert opinion to analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2008, 67(4): 565-578
- [8] LULSEGEDL A, HIROMITSUL Y, HIDEAKI M, et al. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications [J]. Engineering Geology, 2005, 81(4):432-445
- [9] 张吉军. 模糊层次分析法[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2): 80-88.  
ZHANG JI-JUN. Fuzzy analytical hierarchy process [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(2):80-88.
- [10] 姬东朝,宋笔锋,喻天翔. 模糊层次分析法及其在设计方案选优中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(11):1692-1694.  
JI DONG-CHAO, SONG BI-FENG, YU TIAN-XIANG. FAHP and its application in the selection of design scheme [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(11):1692-1694.
- [11] ZAREL N M, REZAL M, AMOHAMMAD T. The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(4): 8218-8226.
- [12] PARAMESHWARAN R, SRINIVASAN P S S, PUNNIYAMOOTHY 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.
- [13] 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.
- [14] 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, 2002, 3(2):94-97.  
XU ZE-SHUI. Research on compatibility and consistency of fuzzy complementary [J]. Judgement Matrices Journal of PLA University of Science and Technology, 2002, 3(2):94-97.
- [15] 张卫中,尹光志,李东伟. 向家坡滑坡综合治理[J]. 岩土力学, 2006, 27(增2):379-383.  
ZHANG WEI-ZHONG, YIN GUAN-ZHI, LI DONG-WEI. Characters and mechanisms of Xiangjiapo Landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 379-383.
- [16] 尹光志,张卫中,康钦容. 滑坡动态综合治理各阶段的监测信息反馈[J]. 岩土力学, 2006, 27(增1):661-664.  
YIN GUANG-ZHI, ZHANG WEI-ZHONG, KANG QIN-RONG. Monitoring information feedback during comprehensive dynamical control about landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S1):661-664.
- [17] XIE Q M, XIA Y Y. Multi-objective decision-making method for the treatment scheme of landslide hazard[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing: Minerals Metallurgy Materials. Eng Ed, 2004, 11(2): 101-105.
- [18] DHAKAL A S, AMADA T, ANIYA M. Landslide hazard mapping and its evaluation using GIS: an investigation of sampling schemes for a grid-cell based quantitative method[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(8): 981-989.

(编辑 赵 静)