

# 基于层次分析法的抗滑桩治理方案优化

祝启坤,周伟

(武汉工程大学环境与城市建设学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**基于层次分析法对最优方案进行结构层次划分,运用模糊数学理论,对结构层次定性指标给予定量评价,对比既定方案对定性指标予以定量评价,定量指标直接沿用,分别求出各指标元素组合权重,再对方案指标元素归一化求得优属矩阵,从而求出各方案的对优隶属度,得出结论,结合工程实际,优选方案,为工程提供指导。

**关键词:**滑坡;抗滑桩;层次分析法;方案优化

**中图分类号:**U416.1

**文献标识码:**A

## 0 引言

抗滑桩整治方案根据桩的形式不同分析普通抗滑桩、桩身预应力抗滑桩、深埋抗滑桩、预应力锚索抗滑桩等<sup>[1]</sup>。根据桩排的不同分为单排抗滑桩、双排抗滑桩、h型抗滑桩等。如何根据具体工程实际选取最优的抗滑桩治理方案其涉及因素众多,包括方案安全性、经济性、环境影响等,其中有些属性是模糊的,运用多目标决策模糊集理论,结合层次分析法,能够较好地优选出具有多种属性和模糊特性的抗滑桩整治方案。

## 1 层次分析法方案优选

### 1.1 层次分析法简介

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP), 是美国运筹学家 T. L. Saaty 教授于 20 世纪 70 年代初期提出的一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法, 此方法巧妙地把定性分析和定量分析结合了起来。

层次分析法是通过分析复杂问题包含的各种因素及相互关系, 将问题分解为不同的要素, 再把这些要素分为不同的层次, 建立一个多层次的的分析结构模型。在每一层次中按一定的准则, 对该层各要素进行逐对比较, 建立成判断矩阵, 通过计算判断矩阵的最大特征值及相应的特征向量, 得出该层要素对于上一层某一要素的权重, 进而计算出各层要素对总体目标的组合权重, 从而得出不同设计方案的权值, 为选择最优方案提供依据。

### 1.2 层次分析法主要步骤

层次分析法主要步骤为: 划分结构层次及各

层指标元素→确定各层指标元素的相对权重及组合权重→各方案指标元素确定及归一指标→各方案的对优隶属度确定。

#### 1.2.1 划分结构层次及各层指标元素

根据层次分析方法, 划分总目标层、分目标层、分目标层中指标元素。其中, 总目标层即为设计最优方案; 分目标及分目标中指标元素即为决定最优隶属度的考虑因素。分目标及其中各指标元素的选取根据具体工程确定。

#### 1.2.2 各层指标元素的相对权重及组合权重

a. 假设总目标分为三个层次。总目标为 A; 分目标为 B, B 中包括 B1、B2、B3; 分目标中指标为 C, C 中包括 C1、C2、C3、C4、C5、C6、C7、C8, C1 对应 B1, C2、C3、C4、C5 对应 B2, C6、C7、C8 对应 B3。

b. 从 A—B1、B2、B3, B1—C1, B2—C2、C3、C4、C5, B3—C6、C7、C8 建立判断矩阵, 同一层中各元素的取值根据各元素的相对重要性确定。应用和积法或方根法计算相对权重, 继而求出组合权重。本文采用和积法来分析, 计算过程依照如下公式:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{ik}} \quad w_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}$$
$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \lambda_{\max} = \sum_{n=1}^l \sum_{i=1}^n \frac{(\bar{A}w)_i}{w_i}$$
$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad CR = \frac{CI}{RI}$$

其中  $a_{ij}$  为判断矩阵 A 的元素,  $a_{ij}$  的取值是根

据资料、统计数据、征求专家意见以及系统分析员的经验而确定的。层次分析法采用1~9标度法,使两要素的比较得以定量描述。1表示同样重要,3表示稍重要,5表示明显重要,7表示重要得多,9表示极端重要,2、4、6、8为上述相邻判断的折中<sup>[2]</sup>;  $b_{ij}$  为计算中间元素;  $w_i$  即为所求相对权重; CI 为一致性指标; RI 为平均随机一致性指标,可以通过查表获得; CR 为一致性指标。当  $CR < 0.1$  时,认为层次单排序结果具有满意一致性,否则需调整判断矩阵元素取值。

c. 确定各相对权重后,根据相对权重求得各指标元素对总目标的组合权重。

### 1.2.3 各方案指标元素值确定及归一指标

方案各指标元素值的确定有两种途径。对于定性指标,一般采用专家评分,根据程度的不同以0.1为单位在0~1之间进行评分;对于定量指标直接沿用数据。指标元素值的归一化处理分两类进行,分别为效益型指标、成本型指标。效益型指标越大越好;成本型指标越小越好,它们的计算遵循:

$$\text{效益型: } r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}$$

$$\text{成本型: } r_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}$$

完成指标归一之后,即可求优属矩阵  $R$ 。

### 1.2.4 各方案对优隶属度确定

根据前两步求得的各元素组合权重及优属矩阵,结合  $U_j$  的多目标模糊综合评判计算公式如下:

$$U_j = \frac{1}{1 + \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i | r_{ij} - 1 |)^p}{\sum_{i=1}^n (\omega_i r_{ij})^p} \right]^{2/p}}$$

$p$  为距离参数,  $p$  取1或2,分别代表海明距离和欧式距离。本文取  $p=2$ 。即可求得各方案的对优隶属度  $U_j$ 。

## 2 抗滑桩方案优选的结构层次划分

分别从经济性、安全性、支挡理论、施工条件、环境影响来考虑抗滑桩方案的优劣,进而建立方案层次结构图(图1)。

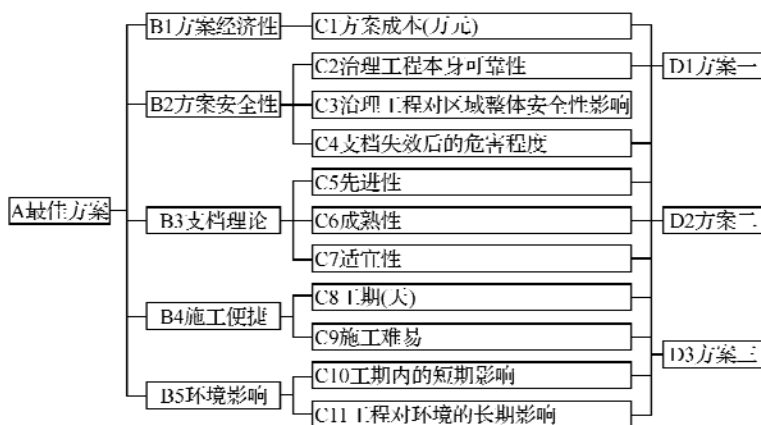


图1 方案层次结构图

Fig. 1 Level-structural diagram of program

## 3 工程应用

### 3.1 工程概况

根据工程地质勘察报告,经初步论证某滑体适宜采用抗滑桩治理工程方案。滑体各岩层结构如图2所示,基岩地层为侏罗系上统蓬莱镇组( $J_3p$ );滑体地层为第四系崩坡积土( $Q^{col+dl}$ )。滑体岩土物理力学参数如下:

第四系碎块土:内聚力  $C_1 = 40.0$  kPa,内摩擦角  $\varphi_1 = 18.0^\circ$ ,重度  $\gamma_1 = 20.5$  kN/m<sup>3</sup>(天然状态);内聚力  $C_2 = 32.0$  kPa,内摩擦角  $\varphi_2 = 14.4^\circ$ ,重度  $\gamma_2 = 21.5$  kN/m<sup>3</sup>(暴雨状态)。

滑体结构面(强风化层):内聚力  $C_1 = 27.5$  kPa,

内摩擦角  $\varphi_1 = 16.0^\circ$ ,重度  $\gamma_1 = 20.5$  kN/m<sup>3</sup>(天然状态);内聚力  $C_2 = 22.0$  kPa,内摩擦角  $\varphi_2 = 12.8^\circ$ ,重度  $\gamma_2 = 21.5$  kN/m<sup>3</sup>(暴雨状态)。

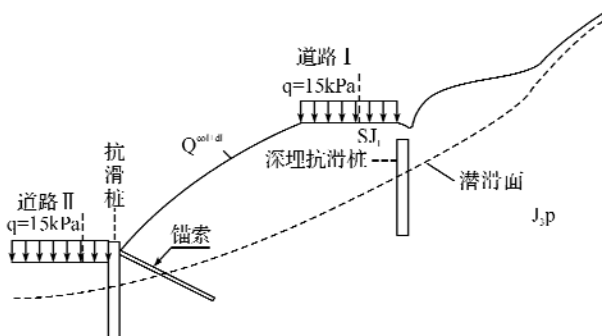


图2 滑体纵剖面

Fig. 2 Vertical section of slip mass

基岩地层(中风化层):内聚力  $C=180$  kPa,内摩擦角  $\varphi=35^\circ$ ,重度  $\gamma_2=25.2$  kN/m<sup>3</sup>,地基土比例系数  $m=200$  MN/m.

道路荷载  $q$  按 15 kPa 计算,由稳定性分析计算结果可知,该滑体天然和暴雨两种工况条件下的安全系数分别为: $K_1=1.35$ (天然); $K_2=1.04$ (暴雨).暴雨状态下安全储备不足<sup>[8]</sup>,故需进行工程治理.

### 3.2 方案选取及成本计算

a. 根据该滑坡工程地质条件,经分析论证,该滑坡选用抗滑桩工程治理方案,其中可选的 3 种抗滑桩方案型式<sup>[4-6]</sup>:

方案一:深埋抗滑桩+普通抗滑桩方案,即在道路 I 上缘设置 3 根深埋抗滑桩,桩间距为 8 m,承担 300 kN/m 的抗滑力,桩顶埋深 1 m;在道路 II 上缘设置 5 根普通抗滑桩,桩间距为 6 m,承担 300 kN/m 抗滑力,桩顶出露 0.5 m. 抗滑桩滑面以上 4 m,滑面以下 4 m.

方案二:锚索抗滑桩,即在道路 II 上缘设置 6 根锚索抗滑桩,桩间距为 6 m,抗滑桩设计抗滑力为 800 kN/m,抗滑桩上锚索拉力为 400 kN/m,桩出露地面 1 m,锚固深度 4 m;设置 3 孔预应力锚索,锚索长度为 10 m,与水平面倾角为  $30^\circ$ ,锚固段长度 4 m,自由段长度 6 m;设计孔径为 130 mm,采用 9 根  $\Phi 15.24$  mm 钢绞线.

方案三:普通抗滑桩,即在道路 II 上缘设置 9 根抗滑桩,桩间距为 4 m,承担 600 kN/m 的下滑力,桩出露 0.5 m,滑面以上 4 m,滑面以下 4 m.

为方便比较,单桩的抗滑力均取值 800 kN/m,截面和锚固深度均一致. 抗滑桩截面: $b \times a=2.0$  m $\times$ 1.5 m,锚固深度  $h=4$  m. 深埋抗滑桩滑坡推力重心较普通抗滑桩低,故桩身最大弯矩值较普通抗滑桩小,最大剪力不变<sup>[7]</sup>,锚索抗滑桩在上端锚索力的作用下,桩身应力也较普通抗滑桩小,故成本估算时,工程单桩抗滑桩的配筋设计按普通抗滑桩设计能满足结构要求.

#### b. 各方案成本的计算.

经工程预算计算结果可知 3 种抗滑桩工程造价如下:

方案一: $M_1=22.05$  万元

方案二: $M_2=23.40$  万元

方案三: $M_3=26.57$  万元

### 3.3 层次分析法计算各指标权重

表 1 A—B 判断矩阵及权重计算表

Table 1 Comparison matrix and proportion from A to B

A	B1	B2	B3	B4	B5	$\overline{w_i}$
B1	1	2	3	3	7	0.433
B2	1/2	1	3/2	3/2	7/2	0.217
B3	1/3	2/3	1	1	7/3	0.144
B4	1/3	2/3	1	1	7/3	0.144
B5	1/7	2/7	3/7	3/7	1	0.062
$\lambda_{\max}=5.0001, CI=0, RI=1.12, CR=0<0.1$						

表 2 B2—C2、C3、C4 判断矩阵及权重计算表

Table 2 Comparison matrix and proportion from B2 to C2, C3, C4

B2	C2	C3	C4	$\overline{w_i}$
C2	1	3	5	0.652
C3	1/3	1	5/3	0.217
C4	1/5	3/5	1	0.131
$\lambda_{\max}=3.0022, CI=0.0011, RI=0.52, CR=0.002<0.1$				

表 3 B3—C5、C6、C7 的判断矩阵及权重计算表

Table 3 Comparison matrix and proportion from B3 to C5, C6, C7

B3	C5	C6	C7	$\overline{w_i}$
C5	1	2	3	0.545
C6	1/2	1	3/2	0.273
C7	1/3	2/3	1	0.182
$\lambda_{\max}=3.0012, CI=0.0006, RI=0.52, CR=0.001<0.1$				

表 4 B4—C8、C9、B5—C10、C11 的判断矩阵及权重计算表

Table 4 Comparison matrix and proportion from B4 to C8, C9 and from B5 to C10, C11

B4	C8	C9	$\overline{w_i}$
C8	1	2	0.667
C9	0.5	1	0.333
B5	C10	C11	$\overline{w_i}$
C10	1	1/3	0.25
C11	3	1	0.75

根据表 1~4, 可得各指标值相对于最优方案的组合权重如表 5。

表 5 各指标值组合权重

Table 5 Proportion about indicators in whole program

A	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
B1	0.433	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B2	0.217	0	0.652	0.217	0.131	0	0	0	0	0	0
B3	0.144	0	0	0	0.545	0.273	0.182	0	0	0	0
B4	0.144	0	0	0	0	0	0	0.667	0.333	0	0
B5	0.062	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.75
$\overline{w_i}$	0.433	0.142	0.047	0.028	0.078	0.039	0.026	0.096	0.048	0.016	0.047

### 3.6 归一化处理及对优隶属度计算

经专家讨论综合分析,3种支护方案指标值如表6。

表6 3种方案指标值表

Table 6 Umcrical valuc about Indicators among the three plans

方案	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
1	22.05	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	1	30	0.7	0.9	0.6
2	23.40	1	1	1	1	0.7	0.8	40	1	1	0.8
3	26.57	0.8	0.9	0.9	0.6	1	1	35	0.9	0.8	1

归一化后的优属矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0.7 & 0 \\ 0.5 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0.5 \\ 1 & 0 & 0.67 \\ 0.5 & 0 & 1 \\ 1 & 0.5 & 0 \end{pmatrix}$$

经计算,3种方案对优隶属度分别为: $U_1 = 0.953$ ,  $U_2 = 0.790$ ,  $U_3 = 0.026$ 。

因此,方案一的对优隶属度最高,为最优方案。

## 4 结 语

与普通抗滑桩比较,深埋抗滑桩减少了桩长,一方面节约了成本,另一方面保护了环境;而锚索

抗滑桩受力则更合理,能够承受更大的下滑力,由于锚索作用,桩顶变位也更小。本文拟设3种方案,通过分析知此滑坡剩余下滑力较小,属小型滑坡,采取深埋抗滑桩+普通抗滑桩最为得当。对于滑坡推力较大的滑坡,锚索抗滑桩的结构合理性、经济性将更突出,更符合治理最优方案。

本文通过层次分析法,对3种抗滑桩方案进行了分析对比,给出了比较合理的判断。基于层次分析法的抗滑桩方案优选是结合考虑了安全、经济、环境、施工等条件的设计方法。它对滑坡的整体防治具有指导性作用,本文给出了一套抗滑桩治理方案优选方法。

参考文献:

- [1] 王伟超,周珉,郭玉峰.抗滑桩在滑坡治理中的应用[J].重庆工业高等专科学校学报,2004,19(6):45-46.
- [2] 赵焕臣,许树柏,和金生.层次分析法[M].北京:科学出版社,1986:12-34.
- [3] GB50330-2002,建筑边坡工程技术规范[S].
- [4] 刘新荣,梁宁慧,黄金国,等.抗滑桩在边坡工程中的研究进展及应用[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(1):57-62.
- [5] 吕美君,晏鄂川.埋入式双排抗滑桩滑坡推力分配研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增1):4867-4871.
- [6] 李凯玲,门玉明.锚索抗滑桩与岩土体相互作用研究[J].水文地质工程地质,2006,(1):20-26.
- [7] 魏国安.深埋抗滑桩在滑坡治理中的应用[J].科技交流,2006,152:177-180.

## Optimization of anti-slide pile based on AHP

ZHU Qi-kun, ZHOU Wei

(School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Using of AHP, the author carried out the program level division for the best structure, and using fuzzy math theory, the paper gave the evaluation points for qualitative indicators of the structure of the levels, and the evaluation points for qualitative indicators compared to the programs that are scheduled to be evaluated, making the direct use of quantitative indicators. The indicator elements were calculated. Relative weights of the best program, and elements of the program targets are normalized to achieve an excellent matrix, and their rates relative to the optimal program and obtained. and draw a conclusion. Combined with practical engineering, optimization program, provide practical guidance for the project.

**Key words:** landslide; piles; AHP; scheme optimization

本文编辑:萧 宁