

透镜体对尾矿坝安全性影响的参数敏感性分析

袁维, 白冰, 李小春, 汪海滨

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430071)

摘要: 透镜体在坝体中的大小、位置、形状以及抗剪强度参数和变形参数皆为坝体安全性的影响因素, 其影响主要体现在坝体的浸润线深度、坝顶位移和安全系数。本研究基于正交试验设计法和熵权决策法, 对透镜体进行参数敏感性进行分析。研究表明: 透镜体的垂直位置和面积比率是最关键的几何影响因素, 而黏聚力(c)和摩擦角(φ)则是最关键的材料影响因素; 透镜体面积比率越小, 坝体安全性高; 透镜体处于坝体顶部和后缘时, 坝体安全性越高; 透镜体的 c , φ 以及渗透系数 K_s 与破坏比 R_f 越大, 坝体安全性越高; 在评价坝体稳定时, 建议综合坝顶位移与安全系数 2 个指标对其进行稳定性分析。

关键词: 透镜体; 敏感性分析; 熵权决策法; 正交试验设计法

中图分类号: TD211

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2013)03-1174-10

Parameters sensitivity analysis of lenticles impacting on tailings dam safety

YUAN Wei, BAI Bing, LI Xiaochun, WANG Haibing

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Lenticles impacting on tailings dam safety is always reflected in the depth of saturation line, the displacement of dam crest and the safety factor. The influencing factors consist of lenticles' size, location, shape, parameters of shear strength and deformation, however, not all of these are critical factors. Based on the method of orthogonal test design and entropy weight decision, the sensitivity analysis of parameters of the lenticle was performed. It has been found that the vertical position and the area ratios of lenticles are the most significant geometric elements, and the cohesion and friction angle of lenticles are the most pivotal material factors. The smaller the ratio of lenticle is, the safer the dam is; meanwhile, the top and rear of dam are the better places for the safety of dam than other location. The larger the cohesion, friction angle, osmotic coefficient and break ratio of lenticle are, the securer the dam is. In addition, it is suggested that the displacement of dam crest and the safety factor should be all considered to evaluate the safety of dam.

Key words: lenticle; sensitivity analysis; entropy weight decision; orthogonal decision

尾矿坝是尾矿库构筑物的主体, 影响其稳定性的因素较多, 大致与以下几个方面相关^[1]: 坝体内浸润线高度、沉积滩长度、尾矿砂密实度、尾矿沉积层的

抗剪强度、堆积坝的高度、库水位的高度、排洪系统的有效性等。在理想状态下, 在矿浆由坝前向库内流动的过程中, 由于挟砂能力的变化, 矿浆中的尾矿根

收稿日期: 2012-01-05; 修回日期: 2012-04-29

基金项目: 中国科学院事业费专项重大重要方向性项目(KZCX2-YW-T12)

通信作者: 李小春(1964-), 男, 重庆开县人, 博士, 研究员, 从事岩土工程安全性监测与评价、二氧化碳地质埋存地层稳定性评价与工程设计理论方面的研究; 电话: 027-87198967; E-mail: xcli@whrsm.ac.cn

据其粒径按粗、中、细、泥依次沉积,形成尾矿沉积滩,此沉积滩构成尾矿堆积坝的坝体^[1-3]。然而,在向尾矿库排放尾矿时,由于受尾矿粒度、矿浆浓度、流速、排放方法、尾矿池水位及大气降水等诸多因素影响,尾矿在库中的沉积过程非常复杂,尾矿堆积坝在形成的过程中会含有许多夹层,以透镜体的形式存在,在空间上表现出不连续性,破坏了堆积坝的正常沉积规律,给坝体带来安全隐患,影响主要表现在以下2个方面:(1)相互穿插以及不同大小、不同位置 and 不同形状的透镜体改变了坝体内的渗透路径;(2)大量的透镜体影响了沉积层土体的抗剪强度参数以及变形参数等^[4-7]。因此,在对坝体进行稳定性评价时,不能忽略透镜体对其稳定性的影响。在透镜体所具有的众多影响因素中,存在一些关键因素值得注意,在工程实践中,应重点研究这些关键因素对尾矿坝安全性的影响。本研究拟把浸润线深度、坝顶位移和安全系数作为尾矿坝稳定性的3个评价指标,拟把透镜体参数分为几何参数(透镜体面积比率、上下位置、形状)和材料参数(渗透系数、泊松比、邓肯-张模型7个参数),采用耦合正交试验设计法与熵权决策法对透镜体进行参数敏感性分析,寻求透镜体对坝体稳定性影响的关键因素,以便为尾矿坝安全性分析与评价提供参考。

1 正交试验设计法与熵权决策法的基本原理

1.1 正交试验设计法

正交试验设计^[8-10]是用于多因素试验的一种方法,它是从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,具有很高的效率。试验中把要考察的对象称为指标,把有可能影响指标结果的因子称为因素,把每个因素在试验中要比较的具体条件称为水平。

设 A, B, \dots 表示不同的因素, r 表示各因素水平数; A_i 表示因素 A 的第 i 水平 ($i=1, 2, \dots, r$); X_{ij} 表示因素 j 的第 i 水平的值 ($i=1, 2, \dots, r; j=A, B, \dots$)。在 X_{ij} 下进行试验得到因素 j 第 i 水平的试验结果指标 Y_{ij} , Y_{ij} 是服从正态分布的随机变量。在 X_{ij} 下做 n 次试验得到 n 个试验结果,分别为 Y_{ijk} ($k=1, 2, \dots, n$), 则得到如下计算式:

$$K_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_{ijk} \quad (1)$$

式中: K_{ij} 表示因素 j 在 i 水平下的统计参数。

评价因素显著性的参数为极差 R_j , 其计算公式为

$$R_j = \max \{K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{rj}\} - \min \{K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{rj}\} \quad (2)$$

极差越大说明该因素的水平改变对试验结果影响也越大,因此可根据极差的大小把各个因素对指标的影响程度排序。

1.2 熵权决策法

信息熵可以用来度量不同指标的信息效用值,采用熵权决策法^[11-14]可以使评价结果更为合理。具体计算过程如下:

(1) 假定评价指标有 m 个,每个评价指标的影响因子有 n 个,则每个评价指标的影响因子可构成判断矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)。

(2) 对判断矩阵进行归一化处理,从而得到归一化矩阵 B , B 的元素为:

$$b_{ij} = \frac{r_{ij} - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (3)$$

式中 r_{\min} 和 r_{\max} 分别表示同一影响因子下不同评价指标中的最小和最大值。

(3) 按照传统的熵的概念,定义影响因子的熵为:

$$H_j = -(\sum_{i=1}^m f_{ij} \cdot \ln f_{ij}) / \ln m \quad (4)$$

式中:将 f_{ij} 定义为

$$f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{i=1}^m (1 + b_{ij})} \quad (5)$$

因此,第 j 个指标的熵权 X_j 定义为

$$X_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (6)$$

根据上述定义,就可以把熵权决策法原理应用到尾矿坝的安全评价中来,各影响因子的熵权值具有以下意义:

(1) 被评价指标在影响因子 j 上的熵值较小、熵权较大时,说明该影响因子对评价指标的影响较大,各评价指标在该影响因子上有明显的差异,应作为重点考察对象。

(2) 影响因子的熵权值满足 $0 < X_j < 1$,且同时满足

$$\sum_{j=1}^n X_j = 1 \tag{7}$$

(3) 根据影响因子熵权值，可判断各个影响因子对评价指标影响的敏感程度。

(4) 考虑熵权后的归一化判断矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 b_{11} & \cdots & X_n b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ X_1 b_{m1} & \cdots & X_n b_{mn} \end{bmatrix} \tag{8}$$

(5) 理想点 P 为： $P=(p_1, p_2, \dots, p_n)$ ，式中 p_j 为 A 中每列的最大值。

(6) 被评价对象与理想点的贴近度为

$$T_i = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} p_j}{\sum_{j=1}^n (p_j)^2} ; i=1, 2, \dots, m \tag{9}$$

贴近度越小，则说明该评价指标越优。

2 计算模型与参数的选取

为了研究透镜体对尾矿坝稳定性的影响，选取某尾矿坝的主坝剖面为研究对象。该尾矿坝坝体材料主要为尾粉砂，透镜体为尾粉质黏土，初期坝为透水堆石坝，坝基为灰岩。初期坝内外坡比为 1:2，初期坝高为 29 m，堆积坝平均坡比为 1:5.5，坝高为 75 m，沉积滩平均坡率为 2%，计算正常水位情况在自重荷载作用下的稳定性。计算模型及网格如图 1 所示。

透镜体与堆积坝采用邓肯-张 7 参数模型^[15]，初期坝与坝基破坏准则采用摩尔库伦模型，基准计算参数如表 1 所示。

表 1 材料基准参数

Table 1 Parameters of material benchmarks

材料名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi/(\text{°})$	K	η	K_b	M	R_f	ν	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	k_2/k_1
尾粉砂	18.9	16.0	28	242.73	0.622	140.97	0.244	0.67	0.254	1.4×10^{-3}	0.26
尾粉质黏土	19.7	30.5	18	114.15	0.672	157.69	0.075	0.70	0.285	3.35×10^{-5}	0.125
初期坝	22.0	13.0	40						0.28	1.202×10^{-2}	1.0
基岩	24.5	200.0	46						0.20	9.6×10^{-8}	0.86

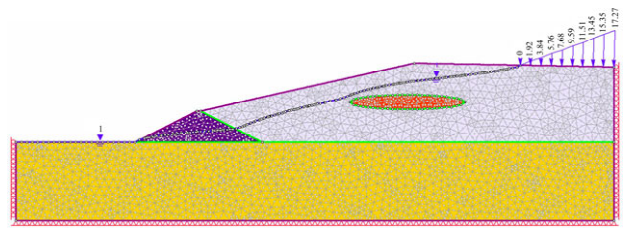


图 1 网格模型图

Fig.1 Picture of grid model

3 透镜体几何参数敏感性分析

透镜体对坝体安全性产生影响的几何参数可归结为以下 4 个因素：透镜体在坝体剖面中的面积比率(A)、透镜体的上下位置(B)、透镜体的左右位置(C)和透镜体的形状(D)。4 个因素的不同水平如下所述：

A 表示剖面中透镜体面积除以坝体总面积，取 5%、12.5%、20% 3 个水平值。

B 表示透镜体在坝体中的垂直位置，取上(透镜体靠近沉积滩)、中(透镜体处于沉积滩表面与基岩面的正中部)和下(透镜体靠近基岩)3 个水平值。

C 表示透镜体在坝体中的水平位置，取左(透镜体靠近坝体坡面)、中(透镜体处于坡面与右端的正中部)和右(透镜体靠近数值模型的最右端)3 个水平值。

D 表示透镜体长轴与短轴的比值(透镜体用椭圆来描述)取 12、8 和 4 共 3 个水平值。

综上所述，选择 $L_9(3^4)$ 正交表构建试验方案，表示用该正交表可安排 4 个因素，每个因素均为 3 水平，总共要做 9 次试验。试验方案表如 2 所示。

采用有限元法对上述 9 个试验进行数值模拟，把计算结果进行极差分析，3 个评价指标的不同影响因子的极差分别如表 3 所示。

表2 几何敏感性分析试验方案

Table 2 Table of experiment program for analysis of geometrical sensitivity

试验号	A	B	C	D
1	5%	上	左	12
2	5%	中	中	8
3	5%	下	右	4
4	12.5%	上	中	4
5	12.5%	中	右	12
6	12.5%	下	左	8
7	20%	上	右	8
8	20%	中	左	4
9	20%	下	中	12

表3 几何参数敏感性分析极差计算结果

Table 3 Results of range analysis of geometrical parameter sensitivity

因素	计算项	水平数	A	B	C	D
浸润线深度(h)/m	平均值	1	20.463	26.080	15.330	20.663
		2	21.063	15.590	21.456	20.066
		3	18.800	18.656	23.540	19.596
		极差 R	2.263	10.490	8.210	1.066
坝顶位移(u)/m	平均值	1	3.926	3.786	4.793	3.953
		2	5.266	6.700	5.726	5.926
		3	6.786	5.493	5.460	6.100
		极差 R	2.860	2.913	0.933	2.146
安全系数(f)	平均值	1	2.18	2.196	2.063	2.183
		2	2.313	2.160	2.283	2.290
		3	2.133	2.270	2.280	2.153
		极差 R	0.180	0.110	0.220	0.136

由表3可得出如下结论。

(1) 对评价指标浸润线深度而言, 4个因子的极差排序如下:

$$R_B > R_C > R_A > R_D$$

其中: R_B 和 R_C 比 R_A 和 R_D 大得多, 这表明透镜体的垂直位置和水平位置比透镜体的形状和面积率对浸润线深度的影响要大得多, 而垂直位置对其的影响最大, 透镜体形状对其影响最小。将4个因素的3水平平均浸润线深度绘于同一图上, 如图2所示。

由图2可以看出: 在当前因素水平下, 浸润线深度最浅的因素水平组合应该是 $A_3B_2C_1D_3$, 即面积比率

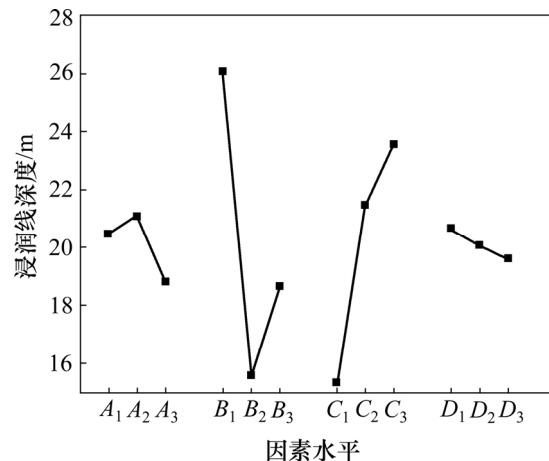


图2 浸润线深度与4因素关系图

Fig.2 Graph for relation between depth of saturation line and four elements

取20%, 垂直位置取中部, 水平位置取左部, 长短轴比值取4。

(2) 对评价指标坝顶位移而言, 4个因子的极差排序如下:

$$R_B > R_A > R_D > R_C$$

这表明垂直位置对坝顶位移影响最大, 透镜体面积比率次之, 水平位置对坝顶位移的影响最小。将4个因素的3水平平均坝顶位移绘于同一图上, 如图3所示。

由图3可以看出: 在当前因素水平下, 坝顶位移最大的因素水平组合应该是 $A_3B_2C_2D_3$, 即面积比率取20%, 垂直位置取中部, 水平位置取中部, 长短轴比值取4。但是, 坝顶位移在面积比率和长短轴比值的影响下呈单调变化趋势, 意味着随着面积比率的增大

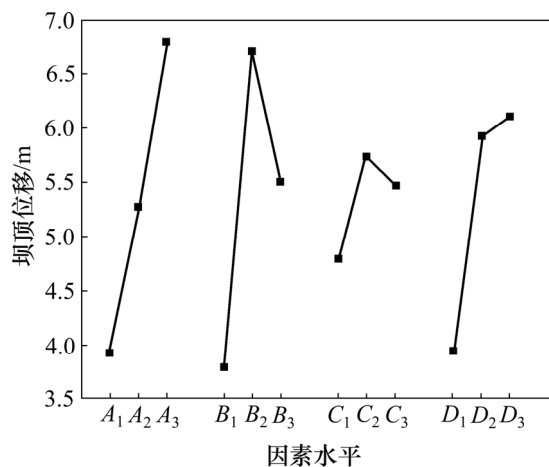


图3 坝顶位移与4因素关系图

Fig.3 Graph for relation between displacement of dam crest and four elements

和长短轴比值的减小,坝顶位移有可能存在继续增大的趋势。

(3) 对评价指标安全系数而言,4 个因子的极差排序如下:

$$R_C > R_A > R_D > R_B$$

这表明水平位置对安全系数影响最大,透镜体面积比率次之,垂直位置影响最小。将 4 个因素的 3 水平平均安全系数绘于同一图上,如图 4 所示。

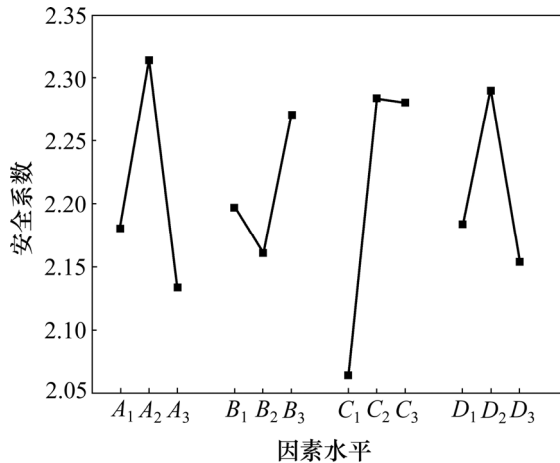


图 4 安全系数与 4 因素关系图

Fig.4 Graph for relation between safety factor and four elements

由图 4 可以看出:在当前因素水平下,安全系数最小的因素水平组合是 $A_3B_2C_1D_3$,即面积比率取 20%、垂直位置取中部、水平位置取左部、长短轴比值取 4。

对表 3 分析可知:在当前因素水平下,虽然 3 种评价指标的最不利因素水平组合极为接近(浸润线深度与安全系数为 $A_3B_2C_1D_3$ 、坝顶位移为 $A_3B_2C_2D_3$),但是,对不同评价指标而言,其各自的显著影响因子却不尽相同。因此,需要综合以上 3 个评价指标的几何影响因子,找出尽量能同时反映 3 个指标的显著几何影响因子,并且优选出在几何敏感性分析条件下最佳的评价指标。本研究采用熵权决策法进行求解,计算结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 信息熵与熵权值

Table 4 Comentropy and entropy weight

因素	熵(H)	熵权(X)
A	0.964 299	0.246 796
B	0.960 229	0.274 933
C	0.964 864	0.242 890
D	0.965 951	0.235 379

表 5 3 个评价指标的贴近度

Table 5 Approach degree of three evaluation factors

评价指标	贴近度(T)
浸润线深度(h)	0.520 479 667
坝顶位移(u)	0.235 140 522
安全系数(f)	0.535 875 974

由表 4 可得:

$$H_D > H_C > H_A > H_B; X_B > X_A > X_C > X_D$$

根据熵权决策法原理,这表明 4 个影响因子中,垂直位置对评价指标的影响最大,透镜体面积比率次之,长短轴比值对评价指标的影响最小。

由表 5 可得:

$$T_f > T_h > T_u$$

根据熵权决策法原理,表明透镜体的几何因子产生的影响最主要体现在坝顶位移上。

4 透镜体材料参数敏感性分析

拟针对以下 9 个参数进行透镜体参数敏感性进行分析:渗透系数(K_s)、刚度参数(K, η, K_b, m, R_f)、泊松比(ν)、强度参数(c, φ)。为表示方便,透镜体 9 个参数与 A~I 共 9 个字母依次呈对应关系,如表 6 所示。

表 6 参数与字母对应关系

Table 6 Corresponding relationship between factors and letters

参数	K_s	K	η	K_b	m	R_f	ν	c	φ
字母	A	B	C	D	E	F	G	H	I

假设“透镜体参数/周围土体参数= k ”,把 k 作为基准值,通过调整透镜体参数构建以下 4 个因素水平:

$$k_i = k + \lambda_i$$

式中:水平 $i=1, 2, 3, 4$; $\lambda_i (i=1, 2, 3, 4)$ 分别为 -20%, -10%, 10%, 20%; k_i 表示调整后的参数比值。

综上所述,选择 $L_{32}(4^9)$ 正交表构建试验方案,表示用该正交表可安排 9 个因素,每个因素均为 4 水平,总共要做 32 次试验。

采用有限元法对上述 32 个试验进行数值模拟,把计算结果进行极差分析,3 个评价指标的不同影响因子的极差分别如表 7 所示。

由表 7 可得出如下结论:

(1) 对评价指标浸润线深度而言, 9 个因子的极差排序为

$$R_A > R_B = R_C = R_D = R_E = R_F = R_G = R_H = R_I = 0$$

其中: 只有 $R_A \neq 0$, 其他各项极差皆为 0, 表明只有渗透系数对浸润线深度产生影响。将 9 个因素的 4 水平平均浸润线深度绘于同一图上, 如图 5 所示。

由图 5 可以看出: 在当前因素水平下, 浸润线深度最浅的因素水平组合是“ A_1 +任意其他因素水平”。浸润线深度随着透镜体渗透系数增大而单调增大, 这

表明, 透镜体渗透系数越大, 则浸润线深度越大, 坝体越安全。

(2) 对评价指标坝顶位移而言, 9 个因子的极差排序如下:

$$R_B > R_D > R_G > R_C = R_E = R_F = R_H = R_I > R_A$$

将 9 个因素的 4 水平平均坝顶位移绘于同一图上, 如图 6 所示。

9 个因子对坝顶位移均产生一定程度的影响, 其中 k_5 产生的影响最小, K 产生的影响最大。由图 6 可见: 随着 K 增大, 坝顶位移呈单调减小趋势, 其他

表 7 材料参数敏感性分析极差计算结果

Table 7 Results of range analysis for analysis of material parameter sensitivity

因素	计算项	水平数	A	B	C	D	E	F	G	H	I
浸润线深度(h)/m	平均值	1	8.931 25	9.005 13	9.005 63	9.006 13	9.006 00	9.006 50	9.010 50	9.009 88	9.006 25
		2	8.964 13	9.005 13	9.005 63	9.006 13	9.006 00	9.006 50	9.010 50	9.009 88	9.006 25
		3	9.034 13	9.005 13	9.005 63	9.006 13	9.006 00	9.006 50	9.010 50	9.009 88	9.006 25
		4	9.101 00	9.005 13	9.005 63	9.006 13	9.006 00	9.006 50	9.010 50	9.009 88	9.006 25
	极差	R	0.169 75	0	0	0	0	0	0	0	0
坝顶位移(u)/m	平均值	1	0.568 75	0.652 50	0.568 75	0.555 00	0.565 00	0.575 00	0.565 00	0.570 00	0.570 00
		2	0.568 75	0.595 00	0.566 25	0.560 00	0.570 00	0.570 00	0.580 00	0.575 00	0.575 00
		3	0.571 25	0.525 00	0.576 25	0.580 00	0.570 00	0.570 00	0.560 00	0.565 00	0.565 00
		4	0.571 25	0.507 50	0.568 75	0.585 00	0.575 00	0.565 00	0.575 00	0.570 00	0.570 00
	极差	R	0.002 50	0.145 00	0.010 00	0.030 00	0.010 00	0.010 00	0.020 00	0.010 00	0.010 00
安全系数(f)	平均值	1	1.118 75	1.213 75	1.185 00	1.217 50	1.210 00	1.119 00	1.208 75	1.081 75	1.087 50
		2	1.202 50	1.187 50	1.236 25	1.176 25	1.223 75	1.197 50	1.167 50	1.188 75	1.187 50
		3	1.200 00	1.215 00	1.208 75	1.193 75	1.208 75	1.202 50	1.227 50	1.207 50	1.216 25
		4	1.207 50	1.192 50	1.178 75	1.221 25	1.166 25	1.223 75	1.210 00	1.228 75	1.217 50
	极差	R	0.088 75	0.027 50	0.057 50	0.045 00	0.057 50	0.104 75	0.060 00	0.147 00	0.130 00

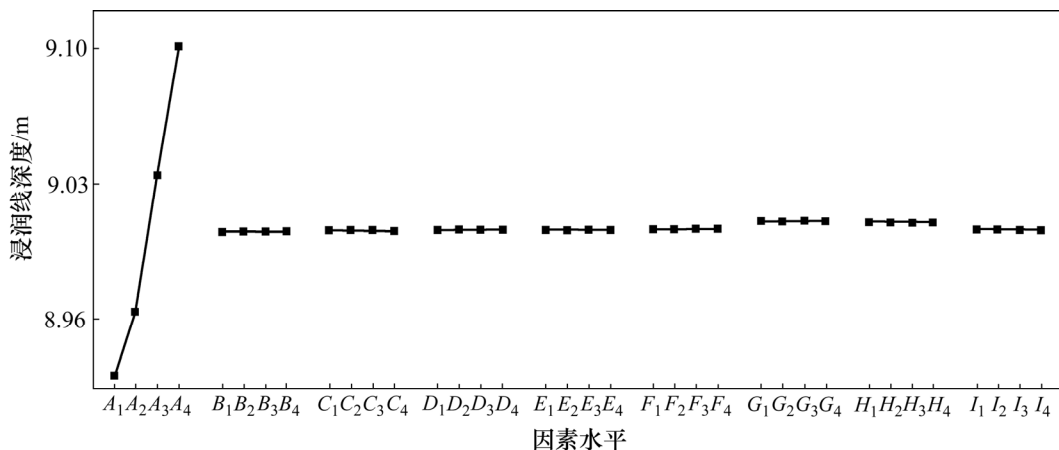


图 5 浸润线深度与 9 因素关系图

Fig.5 Graph of relation between depth of saturation line and nine elements

参数对坝顶位移有一定的影响，但远小于 K 对其的影响。

(3) 对评价指标安全系数而言，9 个因子的极差排序如下：

$$R_H > R_I > R_F > R_A > R_G > R_C = R_E > R_D > R_B$$

将 9 个因素的 4 水平平均安全系数绘于同一图上，如图 7 所示。

由图 7 可见：9 个因子对安全系数皆有一定程度的影响，其中强度参数 c 与 φ 对安全系数的影响最明显， k_s 与 R_f 次之，其余参数则对安全系数的影响不太

明显。由图 7 可以看出：安全系数是 c, φ, R_f 和 k_s 的单调递增函数，此 4 个因素水平值越大，则安全系数越大。

由表 7 可见：3 个评价指标的显著影响因子各不相同，表现出的规律亦存在一定差异。因此，需要综合以上 3 个评价指标的参数影响因子，找出尽量能同时反映 3 个指标的显著参数影响因子，并且优选出在参数敏感性分析条件下最佳的评价指标。本研究采用熵权决策法进行求解，计算结果如表 8 和表 9 所示。由表 8 可得：

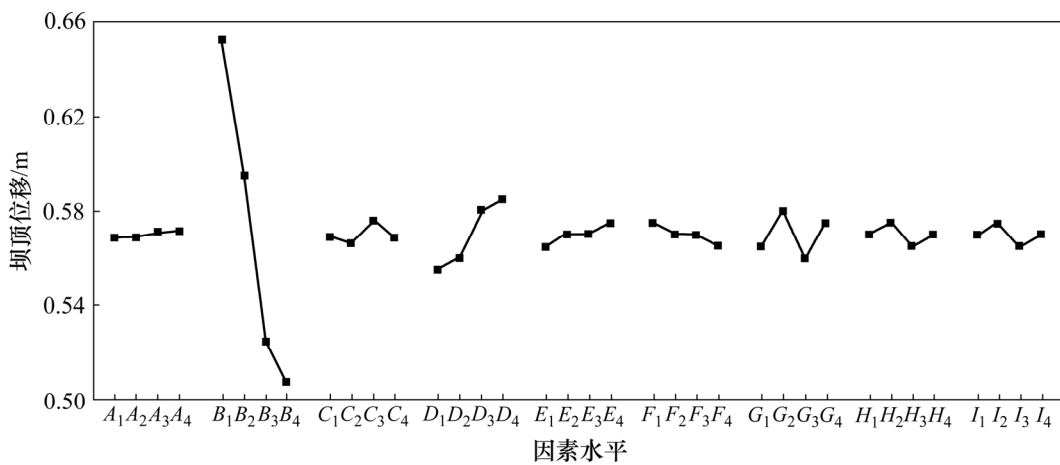


图 6 坝顶位移与 9 因素关系图

Fig.6 Graph of relation between displacement of dam crest and nine elements

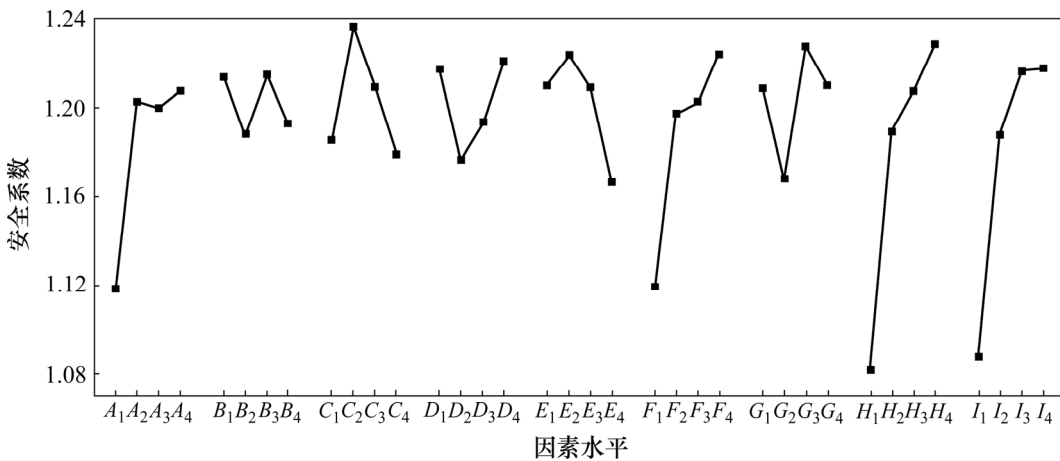


图 7 安全系数与 9 因素关系图

Fig.7 Graph of the relation between the safety factor and nine elements

表 8 信息熵与熵权值

Table 8 Comentropy and entropy weight

因素	A	B	C	D	E	F	G	H	I
熵(H)	0.965 72	0.960 39	0.968 82	0.964 86	0.968 82	0.958 15	0.965 15	0.950 26	0.950 85
熵权(X)	0.088 58	0.102 36	0.080 57	0.090 82	0.080 57	0.108 15	0.090 06	0.128 53	0.127 01

表 9 3 个评价指标的贴近度

Table 9 Approach degree of three evaluation factors

评价指标	浸润线深度(h)	坝顶位移(u)	安全系数(f)
贴近度(T)	0.931 16	0.755 03	0.335 66

$$H_C = H_E > H_A > H_G > H_D > H_B > H_F > H_I > H_H,$$

$$X_H > X_I > X_F > X_B > X_D > X_G > X_A > X_C = X_E$$

根据熵权决策法原理, 表明 c 与 φ 是显著影响因子, 而 η 与 m 则对评价指标的影响最小, 其他影响因子亦有一定程度的影响。

由表 9 可得:

$$T_h > T_u > T_f$$

根据熵权决策法原理, 表明透镜体的参数因子产生的影响最主要体现在安全系数上。

5 补充实验

由前面分析可知: 透镜体的垂直位置、面积比率、 c 和 φ 是透镜体 4 个对坝体稳定性影响较大的参数, 为了进一步明晰其各自对坝体稳定性的影响, 作进一步的数值实验。

选取坝顶位移和安全系数作为评价指标, 透镜体垂直位置、面积比率、 c 和 φ 作为影响因子的 3 水平如下所述: A 为垂直位置(上、中、下); B 为面积比率(5%, 12.5%, 20%); C 为黏结力($k-20\%$, k , $k+20\%$); D 为摩擦角($k-20\%$, k , $k+20\%$)。式中: k 的取值同于第 4 节中的取值。

由此可选取 $L_9(3^4)$ 正交表构建实验方案, 正交表如表 10 所示, 2 个评价指标不同影响因子的极差如表 11 所示。坝顶位移和安全系数与影响因子关系图如图 8 和图 9 所示。

由表 11 可见: 坝顶位移与安全系数的极差分析结果相同:

$$R_B > R_A > R_D > R_C$$

这表明: 此处 4 个影响因子对这 2 个指标的影响呈现相同的规律, 即面积比率对其影响最大, 垂直位置次之, 黏结力影响最小。

由图 8 可见: 透镜体的 c 和 φ 对坝顶位移影响较小, 远小于垂直位置与面积比率的影响; 另外, 随着面积的增大, 坝顶位移增大, 而对于垂直位置而言, 当透镜体处于剖面中部时, 坝顶位移最大。

表 10 补充正交试验方案表

Table 10 Table of supplementary experiment program

试验号	A	B	C	D
1	上	5%	$k-20\%$	$k-20\%$
2	上	12.5%	k	k
3	上	20%	$k+20\%$	$k+20\%$
4	中	5%	k	$k+20\%$
5	中	12.5%	$k+20\%$	$k-20\%$
6	中	20%	$k-20\%$	k
7	下	5%	$k+20\%$	k
8	下	12.5%	$k-20\%$	$k+20\%$
9	下	20%	k	$k-20\%$

表 11 补充方案敏感性分析极差计算结果

Table 11 Results of range analysis for supplementary sensitivity analysis

因素	计算项	水平数	A	B	C	D
坝顶位移 (u/m)	平均值	1	0.463 333	0.431 666	0.498 333	0.488 333
		2	0.558 333	0.510 000	0.500 000	0.503 333
		3	0.480 000	0.560 000	0.503 333	0.510 000
		极差 R	0.095 000	0.128 333	0.005 000	0.021 666
安全系数 (f)	平均值	1	1.969 333	1.976 666	1.970 333	1.965 333
		2	1.966 333	1.978 000	1.971 000	1.973 000
		3	1.979 000	1.960 000	1.973 333	1.976 333
		极差 R	0.012 666	0.018 000	0.003 000	0.011 000

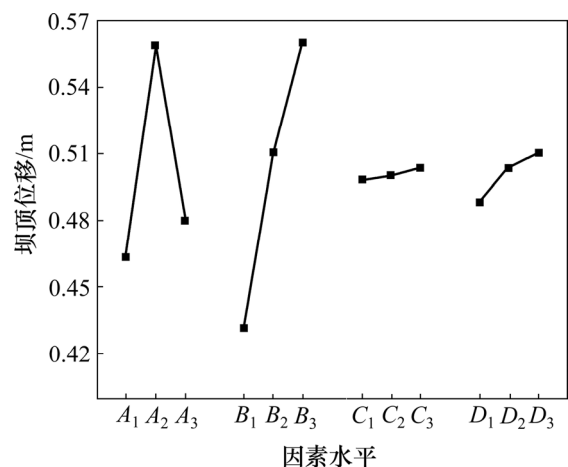


图 8 坝顶位移与 4 因素关系图

Fig.8 Graph of relation between displacement of dam crest and four elements

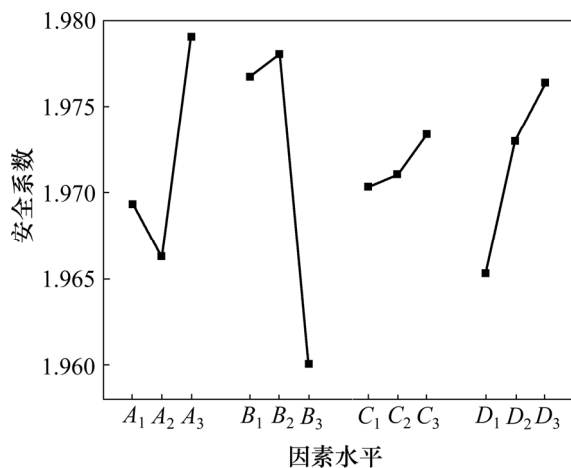


图 9 安全系数与 4 因素关系图

Fig.9 Graph of relation between safety factor and four elements

由图 9 可见：透镜体的 c 和 φ 对安全系数的影响仍小于垂直位置与面积比率的影响，且随着 c 和 φ 的增大，坝体的安全系数有一定程度的提高；另外，在趋势上，面积比率越大，安全系数越小，而对垂直位置而言，安全系数最小的位置亦为剖面中部。

6 结论

(1) 评价坝体稳定性的指标较多，透镜体的几何参数产生的影响主要体现在坝顶位移上，材料参数产生的影响主要体现在安全系数上，几何参数产生的影响要明显大于材料参数的影响。

(2) 几何参数中，2 个最大的影响因子是透镜体的垂直位置和面积比率；材料参数中，2 个最大的影响因子是透镜体的 c 和 φ 。

(3) 针对 2 个影响最大的几何参数而言，透镜体面积比率越大，则浸润线深度越浅，坝顶位移越大，安全系数越小，坝体安全性越不利；透镜体处于顶部时坝体安全性最好，处于底部时安全性次之，而处于中部时，坝体安全性最差；另外，针对透镜体水平位置而言，透镜体处于左部靠近坝体前缘时，坝体安全性最差，处于中部时次之，处于右部时最好。

(4) 针对 2 个影响最大的材料参数而言， c 和 φ 越大，坝体安全性越好。另外，渗透系数 K_s 与破坏比 R_f 亦对安全系数有一定程度的影响， K_s 越小，则浸润线深度越浅，故安全系数越小； R_f 越小，则表明土体的抗压强度越难达到极限值，故安全系数越小。

(5) 上述敏感性分析结果具有重要的工程意义。

首先，尾矿坝在放矿时，尽量把尾矿砂往沉积滩方向疏排，尽量让透镜体远离坝体前缘而在坝体后缘沉积；其次，在坝体加高过程中，要处理好滩面的尾矿砂，以免在坝体上缘产生过多透镜体；此外，在判断坝体的稳定性时，安全系数不应作为唯一的评价指标，建议结合坝顶位移值综合评价其稳定性。在对坝体进行监测时，要重视对坝顶及坝体前缘各处的位移监测。

参考文献：

- [1] 陈守义. 浅议上游法细粒尾矿堆坝问题[J]. 岩土力学, 1995, 16(3): 70-76.
CHEN Shouyi. Some superficial views on the problem of building fine grain tailings fill dams by means of up-stream method[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(3): 70-76.
- [2] 李夕兵, 蒋卫东, 贺怀建. 尾矿堆坝透镜体分布状态研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 947-949.
LI Xibing, JIANG Weidong, HE Huaijian. Study on distributing state of lenticle in tailings fill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 947-949.
- [3] 王跃飞, 徐志胜, 董陇军. 尾矿坝稳定性分析的模糊随机可靠度模型及应用[J]. 岩土工程学报. 2008, 30(11): 1600-1605.
WANG Yuefei, XU Zhisheng, DONG Longjun. Stability model of tailing dams based on fuzzy random reliability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(11): 1600-1605.
- [4] 蒋卫东. 尾矿坝非线性系统混沌与安全研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2003: 54-55.
JIANG Weidong. Research on chaos and safety of nonlinear system for tailings dam[D]. Changsha: Central South University. School of Resource and Safety Engineering, 2003: 54-55.
- [5] 胡明鉴, 陈守义, 郭爱国, 等. 某上游法尾矿坝抗滑稳定性浅析[J]. 岩土力学, 2003, 23(增刊): 254-258.
HU Mingjian, CHEN Shouyi, GUO Aiguo, et al. Opinions on the gangue-dam anti-slide stability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 23(supplement): 254-258.
- [6] 颜学军. 上游法尾矿堆筑坝坝体沉积规律探讨[J]. 稀有金属与硬质合金, 2008, 36(2): 54-58.
YAN Xuejun. Investigation on the depositing law of tailings dam by upstream damming[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2008, 36(2): 54-58.
- [7] 路荣博, 王涛. 上游法尾矿库溃坝事故致因分析及安全管理技术研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(增刊): 112-117.
LU Rongbo, WANG Tao. Safety management technique and accident causing analysis of dam failure in upstream tailings pond[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26: 112-117.
- [8] 张旭辉, 龚晓楠, 徐日庆. 边坡稳定影响因素敏感性正交法计算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 36-39.
ZHANG Xuhui, GONG Xiaonan, XU Riqing. Orthogonality

- analysis method of sensitivity on factor of slope stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 36-39.
- [9] 田浩, 王宇, 余宏明. 基于耦合分析法的边坡稳定性影响因素敏感性研究验证[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(2): 112-115. TIAN Hao, WANG Yu, YU Hongming. Coupled analysis of slope stability based on the sensitivity affecting factors[J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18(2): 112-115.
- [10] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 35-50. FANG Kaitai, MA Changxing. Design of experiment based on orthogonality and orthogonality[M]. Beijing: Science Press, 2001: 35-50.
- [11] 闫文周, 顾连胜. 熵权决策法在工程评标中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2004, 36(1): 98-100. YAN Wenzhou, GU Liansheng. Application of the method of entropy proportion in the engineering mark[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2004, 36(1): 98-100.
- [12] 黄书岭, 冯夏庭, 张传庆. 岩体力学参数的敏感性综合评价分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1): 95-100. HUANG Shuling, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing. Study of method of comprehensive evaluation for parameters of constitutive model of rock mass[J]. 2008, 27(supplement 1): 95-100.
- [13] 冯夏庭, 周辉. 雅砻江锦屏二级水电站招标设计阶段引水隧洞围岩稳定性及结构设计研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006. FENG Xiating, ZHOU Hui. Study on stability of surrounding rock and structure design of hydropower tunnels on stage of bidding design for Jinping- hydropower station of Yalong River[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [14] 苏国韶, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下地下工程稳定性分析与优化的局部能量释放率新指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2453-2460. SU Guoshao, FENG Xiating, JIANG Quan, et al. Study on new index of local energy release rate for stability analysis and optimal design of underground rock mass engineering with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2453-2460.
- [15] 郑颖人, 孔亮. 岩土塑性力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 233-237. ZHENG Yingren, KONG Liang. Geotechnical plastic mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010: 233-237.
- [16] 颜永国, 陈建. 基于条分模式的边坡可靠度近似计算方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(3): 315-319. YAN Yongguo, CHEN Jian. Approximate calculation method of slope reliability degree based on slide mode[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(3): 315-319.
- [17] 彭振斌, 李俊, 彭文祥. 基于 bishop 条分法的边坡可靠度应用研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 31(3): 668-672. PENG Zhenbin, LI Jun, PENG Wenxiang. Application anlysis of slope reliability based on bishop analytical method[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 31(3): 668-672.
- [18] 黄高峰, 李宗利, 眸声远. Hoek-Brown 准则参数在边坡工程中的敏感性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2163-2167. HUANG Gaofeng, LI Zongli, MOU Shengyuan. Sensitivity analysis of Hoek-Brown failure criterion parameters on slope projects[J]. Rock and soil Mechanics, 2009, 30(7): 2163-2167.

(编辑 何运斌)