

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.03.012

基于正交设计的大坝深层抗滑稳定敏感性分析

王 雯¹, 顾中明¹, 杨 杰¹, 李 婷¹, 马春辉¹, 郭志辉²

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 基于双滑动面的刚体极限平衡法在重力坝深层抗滑稳定分析中运用广泛,但目前关于刚体极限平衡法中各参数对安全系数影响的敏感性研究还不够深入。为此,本文采用正交设计,依托工程实例,以安全系数作为评价指标,分别采用极差方法和方差方法对双斜失稳模型中的参数对于试验指标敏感性进行了分析。结果表明,对于安全系数而言,参数敏感性由大到小为:滑动体抗剪断摩擦系数 f'_1 、抗力体 BC 面与水平面的夹角 β 、抗力体凝聚力系数 c'_2 、滑动体凝聚力系数 c'_1 、抗力体抗剪断摩擦系数 f'_2 。其中因素 f'_1 、 β 、 c'_1 、 c'_2 对抗滑稳定安全系数具有高度显著影响,敏感性高;而因素 f'_2 对指标具有显著影响。针对坝基问题提出相对经济合理的处理措施,为实际工程提供参考。

关键词: 深层抗滑稳定; 正交设计; 影响因素; 敏感性分析

中图分类号: TV311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2018)03-0321-05

Sensitivity analysis of deep anti-sliding stability of dam based on orthogonal design

WANG Wen¹, GU Zhongming¹, YANG Jie¹, LI Ting¹, MA Chunhui¹, GUO Zhihui²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering,

Handan 056038, China)

Abstract: The rigid body limit equilibrium method based on double sliding surface is widely used in the analysis of deep sliding stability of gravity dam. Currently, the study on sensitivity of safety factor impact is not sufficient. Therefore, this paper adopts the orthogonal design based on the engineering examples to use the safety coefficient as the evaluation index for the analysis of the parameter sensitivity by the method for range analysis and variance analysis. The results show that for the safety coefficient, the order of parameter sensitivity in the sequence of descending is: the shear friction coefficient of sliding body f'_1 , with the angle between the BC inclined plane and horizontal surface of the resistance body, resistance coefficient c'_2 , sliding body cohesion coefficient c'_1 and shear resistance coefficient f'_2 . In addition, the parameters f'_1 , β , c'_2 and c'_1 have a high significant influence on the safety coefficient, and the parameters f'_2 have a significant influence. The article proposed relatively economic and reasonable treatment methods for the dam foundation stability problem, which can serve as a reference for practical application.

Key words: stability against deep sliding; orthogonal design; impact factor; sensitivity analysis

重力坝具有对地形、地质条件适应能力强、安全可靠等优点^[1],在国内外水利工程中应用广泛。重力坝设计中,常遇见坝基内存在不利软弱结构面等情况,使重力坝的稳定难以保证,核算大坝的深层抗

滑稳定便成为设计过程中的重要任务^[2]。因此,进行重力坝深层抗滑稳定影响因素敏感性分析^[3],确定对安全系数影响程度最高的因素,具有一定的工程实际应用背景^[4]。

收稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0504700);国家自然科学基金重点资助项目(41731289);国家自然科学基金资助项目(51609198);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2017JQ5063);省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室自主研究课题资助项目(2016ZZKT-13);西安理工大学青年科技团队资助项目(104-451217015);河北省教育厅青年科学基金资助项目(QN2015253)

作者简介: 王雯,男,讲师,博士,研究方向为环境流体力学、水工结构工程。E-mail: Wangwen1986@xaut.edu.cn

关于重力坝深层抗滑稳定影响因素的敏感性研究前人做了大量工作, Yuan^[5]结合模型试验研究了不同软弱结构面下抗剪断参数对抗滑稳定安全系数的敏感性; 李美蓉等^[6]进行了断层混凝土置换深度对大坝抗滑稳定安全系数的敏感性分析; 曹其光等^[7]分析了分界面角度、抗力角、抗力体角度的变化对安全系数的影响; 张博^[8]研究了坝体重量、拉预应力锚索对安全系数的影响趋势。以上研究主要采用传统的敏感性分析方法, 即以安全系数作为评判指标, 计算中固定其它参数取值而改变某一参数取值, 分析安全系数随这一变动参数的变化规律, 提出其敏感性大小。这种方法未考虑到各参数变化过程中的相互影响, 因此与实际情况存在差异^[9]。

针对传统的深层抗滑稳定敏感性研究都是基于单因素变化的特点, 本文基于正交试验法, 以抗滑稳定安全系数作为试验评价指标, 研究在多因素作用下重力坝抗滑稳定, 分析各因素对大坝深层抗滑稳定影响的敏感程度和显著程度, 为重力坝设计中深层抗滑稳定计算提供一定参考。

$$K_1 = \frac{f'_1[(W + G_1)\cos\alpha - H\sin\alpha - Q\sin(\varphi - \alpha) - U_1 + U_3\sin\alpha] + c'_1A_1}{(W + G_1)\sin\alpha + H\cos\alpha - U_3\cos\alpha - Q\cos(\varphi - \alpha)} \quad (1)$$

式中, W 为坝体所受全部荷载(不包括扬压力)的垂向分力; H 为坝体所受水平荷载; G_1 为基岩 ABD 重量的垂直作用力; U_1 、 U_3 为 AB 、 BD 面上的扬压力; Q 为 BD 面上的抗力; f'_1 为 AB 滑动面的抗剪断摩擦系数; AB 面抗剪凝聚力系数为 c'_1 ; AB 面面积为 A_1 ; α 为 AB 面倾角; φ 为 BD 面上抗力 Q 与水平面夹角。

将抗力体 BCD 所受的全部作用力投影至滑动面 BC 上, 则沿滑动面 BC 的抗剪断安全系数表达式为:

$$K_2 = \frac{f'_2[G_2\cos\beta + Q\sin(\varphi + \beta) - U_2 + U_3\sin\beta] + c'_2A_2}{Q\cos(\varphi + \beta) - G_2\sin\beta + U_3\cos\beta} \quad (2)$$

式中, G_2 为基岩 BCD 重力; β 为 BC 面倾角; U_2 为 BC 面受到的扬压力; f'_2 为 BC 面抗剪断摩擦系数; c'_2 为 BC 面抗剪断凝聚力系数; BC 面面积为 A_2 。

通过刚体极限平衡法中等安全系数法, 对重力坝深层抗滑稳定进行分析, 令滑动体和抗力体同时处于极限平衡状态, 即 $K_1 = K_2$, 求得安全系数, 并将其作为大坝稳定的评价指标。

2 正交试验设计方法

2.1 正交试验设计

试验方案选取各参数具有代表性的组合, 根据“正交表”设计试验^[9], 通过这一过程可减少具体的

1 重力坝深层抗滑稳定分析

重力坝坝基软弱结构面多形成双滑动面。本文以双滑动面为计算模型, 双滑动面示意图如图 1 所示。

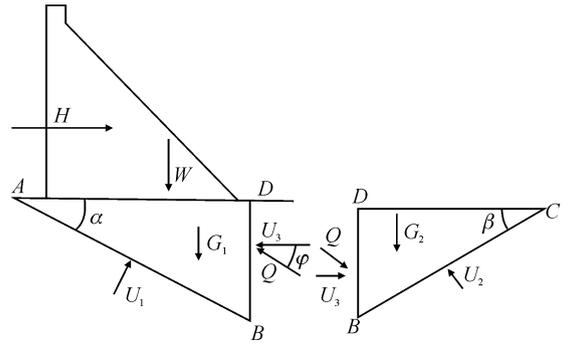


图 1 双滑动面示意图

Fig. 1 Calculating diagram of three sliding planes

根据图 1 失稳模型, 重力坝沿 AB 滑裂面形成滑动时, 可将其上全部受力投影至 AB 面上。根据莫尔-库伦准则, AB 面上抗剪断安全系数为:

试验组次。试验中将对考察指标 G_2 具有影响的参数称为因素, 针对因素进行比较的试验条件称为水平。正交表 $L_n(m^k)$ 中: L 为正交表; n 为试验次数; m 为因素的水平数; k 为因素个数。

2.2 正交试验结果分析

正交试验结果的数值分析主要有极差分析和方差分析两种方法: 极差分析通过考察各影响因素的极差, 由极差差异评价各因素影响的敏感性; 方差分析主要对各影响因素的变异对总变异的贡献率进行分析, 通过 F 检验来评价各因素对安全系数影响的显著性。

2.2.1 极差分析

假设 $j = A, B, \dots$ 代表对考察指标有影响的各个因素; $i = 1, 2, \dots, r$ 为各因素的水平数; A_i 表示因素 A 的第 i 水平; X_{ij} 表示影响因素 j 的第 i 水平值。在 X_{ij} 下进行试验, 得到正态分布的随机变量 Y_{ij} ; 在 X_{ij} 下进行 n 次试验得到 n 个试验结果 $Y_{ijk} (k = 1, 2, \dots, n)$, 统计参数 K_{ij} 为^[10]:

$$K_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_{ijk} - \bar{Y} \quad (3)$$

式中, K_{ij} 、 Y_{ijk} 分别为因素 j 在 i 水平的试验结果平均值、第 k 个试验值; \bar{Y} 为所有试验结果的平均值。

极差分析法, 即通过求出各因素在不同水平下指标值的最大值和最小值之间的差值(极差)来评价

各个因素影响程度的大小,极差越大,表明该因素水平变化对考察指标影响越大,为主要因素;反之,则为次要或者不重要因素。其计算公式为:

$$R_j = \max\{K_{1j}, K_{2j}, \dots\} - \min\{K_{1j}, K_{2j}, \dots\} \quad (4)$$

式中, R_j 为第 j 列因素的极差。

2.2.2 方差分析

1) 方差计算过程

各因素的偏差平方和与随机误差平方和构成试验结果的总偏差平方和。对各因素的偏差平方和与随机误差平方和进行对比,作 F 检验,判断因素影响是否显著。其计算过程为:

① 计算总偏差平方和 Q_T :

$$Q_T = \sum_{i=1}^r Y_{ijk}^2 - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^r Y_{ijk} \right]^2 \quad (5)$$

② 计算各因素偏差平方和 Q_{ij} :

$$Q_{ij} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^r K_{ij}^2 - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^r Y_{ijk} \right]^2 \quad (6)$$

③ 计算各因素均方差 M_j :

$$M_j = Q_{ij} / (r - 1) \quad (7)$$

④ 计算误差均方差 M_T :

$$M_T = Q_T - \sum_{j=1}^s Q_{ij} \quad (8)$$

⑤ 计算各因素对应 F_j 值:

$$F_j = M_j / M_T \quad (9)$$

式中, s 为因素的个数,即试验总次数 n 与因素水平数 r 的比值;自由度 h 为因素的水平数减 1,即 $h = r - 1$ 。

2) 显著性检验

对于给定的显著性水平 α (一般取 $\alpha = 0.025$ 或 $\alpha = 0.01$),先从 F 分布表中查出临界值 $F_\alpha (F_{0.025}, F_{0.01})$,将计算得出的 F_j 和与 F_α 进行对比:若 $F_j > F_{0.01}$,则称因素 j 对试验结果敏感性高,影响效果高度显著;若 $F_{0.025} < F_j < F_{0.01}$,则该因素敏感性中等,影响效果较为显著;否则 $F_j < F_{0.025}$,为无显著影响因素。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

某重力坝工程的地勘结果表明,非溢流坝段 24# 位于断层结构处,其走向 NE30~40°,倾向 NW58~65°,构成主要为破碎正长斑岩,区域地质平面图如图 2 所示。

由于坝址区断层的存在,可能引起重力坝坝基失稳,因此核算坝基深层抗滑稳定是本工程的重要任务。具体坝基力学参数如表 1 所示。

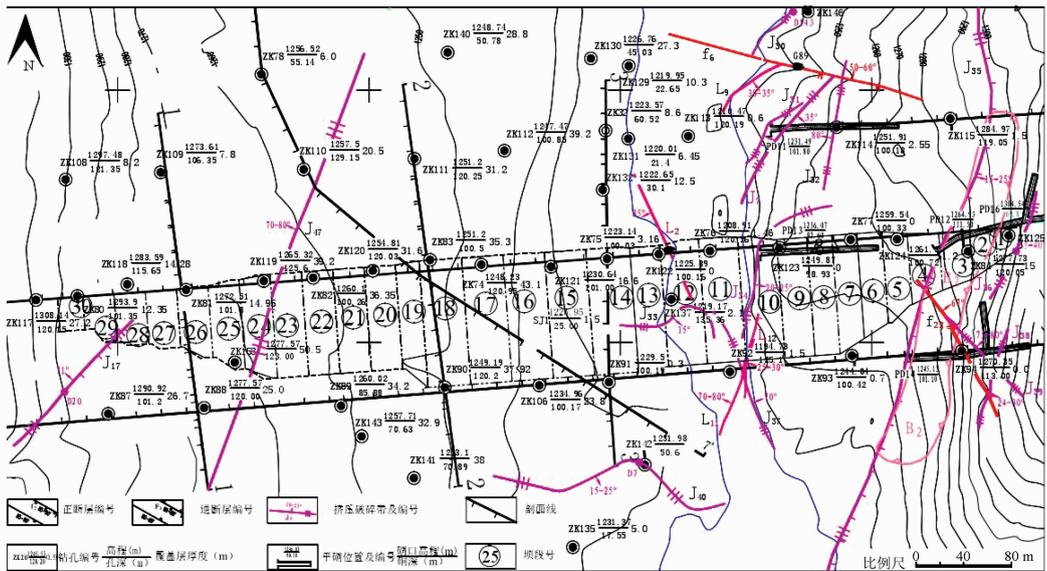


图 2 坝址区工程地质平面图

Fig. 2 Engineering geological plan of dam site area

表 1 坝基力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of dam foundation

力学参数	大小	力学参数	大小	力学参数	大小
$\Sigma H / \text{kN}$	47 562	U_2 / kN	38 797	f'_1	0.70
$\Sigma W / \text{kN}$	136 144	U_3 / kN	12 050	c'_1 / MPa	0.45
G_1 / kN	47 884	$\alpha / (^\circ)$	11.80	f'_2	0.71
G_2 / kN	42 014	$\beta / (^\circ)$	26.00	c'_2 / MPa	0.46
U_1 / kN	41 873	$\varphi / (^\circ)$	4.00		

3.2 正交试验设计

根据工程实际情况,采用刚体极限平衡法对大坝的抗滑稳定进行评价,选取的参数包括:滑动体抗剪断摩擦系数 f'_1 、AB面抗剪断凝聚力系数 c'_1 、BC面抗剪断摩擦系数 f'_2 、BC面抗剪断凝聚力系数 c'_2 、抗力体与水平面的夹角 β 等。对各参数均制定5个水平,各水平取值如表2所示。

表2 各水平因素值
Tab.2 Value and level of each factor

水平	f'_1	c'_1/MPa	f'_2	c'_2/MPa	$\beta/(\text{°})$
1	0.490	0.314	0.497	0.321	22
2	0.595	0.381	0.604	0.390	24
3	0.700	0.448	0.710	0.459	26
4	0.805	0.515	0.817	0.528	28
5	0.910	0.582	0.923	0.597	30

根据正交设计并考虑误差项,制定 $L_{25}(5^6)$ 正交表。采用刚体极限平衡法,分别计算各工况下大坝抗滑稳定安全系数,研究在多因素共同作用下大坝的稳定性。 K 为双斜面失稳模式下安全系数,试验结果如表3所示。

表3 试验方案及安全系数结果
Tab.3 Experimental scheme and safety factor results

试验组次	试验方案编号					误差	安全系数 K
	β	f'_1	c'_1	f'_2	c'_2		
1	1	1	1	1	1	1	2.00
2	1	2	2	2	2	2	2.43
3	1	3	3	3	3	3	2.86
4	1	4	4	4	4	4	3.29
5	1	5	5	5	5	5	3.72
6	2	1	2	3	4	5	2.58
7	2	2	3	4	5	1	3.03
8	2	3	4	5	1	2	2.91
9	2	4	5	1	2	3	3.20
10	2	5	1	2	3	4	3.15
11	3	1	3	5	2	4	2.65
12	3	2	4	1	3	5	2.91
13	3	3	5	2	4	1	3.37
14	3	4	1	3	5	2	3.33
15	3	5	2	4	1	3	3.21
16	4	1	4	2	5	3	3.11
17	4	2	5	3	1	4	2.98
18	4	3	1	4	2	5	2.94
19	4	4	2	5	3	1	3.43
20	4	5	3	1	4	2	3.70
21	5	1	5	4	3	2	3.11
22	5	2	1	5	4	3	3.21
23	5	3	2	1	5	4	3.43
24	5	4	3	2	1	5	3.30
25	5	5	4	3	2	1	3.81

3.3 敏感性分析

目前,关于大坝深层抗滑稳定影响因素的敏感性研究主要集中于单因素分析,单因素分析法能直观反映出单个因素对指标的影响趋势,但无法明确表明某个因素变化对抗滑稳定安全系数影响的大小,存在一定的局限性。鉴于此,本文基于正交试验法,对重力坝深层抗滑稳定具有影响的因素进行敏感性分析及显著性检验。

3.3.1 极差分析

依据表3的试验结果,采用刚体极限平衡法下安全系数作为评价指标,对各影响因素进行极差分析,分析结果如表4所示。

表4 极差分析表
Tab.4 Table of the range analysis

参数	各参数对应的极差					极差 误差
	β	f'_1	c'_1	f'_2	c'_2	
K_{1j}	14.30	13.45	14.63	15.24	14.40	15.64
K_{2j}	14.87	14.56	15.08	15.36	15.03	15.48
K_{3j}	15.47	15.51	15.54	15.56	15.46	15.59
K_{4j}	16.16	16.55	16.03	15.58	16.15	15.50
K_{5j}	16.86	17.59	16.38	15.92	16.62	15.45
R_j	2.56	4.14	1.75	0.68	2.22	0.19

$$f'_1 > \beta > c'_2 > c'_1 > f'_2$$

3.3.2 方差分析

极差分析具有简单直观、计算量小等优点,但是无法估计试验误差大小,无法精确地评价各因素对指标的影响程度,为提高评价准确性,进一步采用方差分析来对因素敏感性进行分析。

当显著性水平 α 为 0.01、0.025 时,有 $F_{0.025}(4,4) = 9.6$ 、 $F_{0.01}(4,4) = 16.0$ 。当 $F_j < F_{0.025}(4,4)$,表明 j 对坝体稳定性影响不显著;当 $F_{0.025}(4,4) < F_j < F_{0.01}(4,4)$,则表明因素 j 显著影响坝体稳定性;当 $F_j > F_{0.01}(4,4)$,表明因素 j 对坝体抗滑稳定性具有高度显著影响。各参数方差如表5所示。

以上结果表明, f'_1 、 β 、 c'_1 、 c'_2 具有高度显著影响,其变化可以显著影响抗滑稳定安全系数; f'_2 有显著影响。

实际工程中,针对存在软弱夹层的地质条件,可采取混凝土回填、固结灌浆、混凝土塞、预应力锚索等措施对可能存在的滑裂面和软弱夹层进行处理。浅层处理可直接挖除后进行混凝土回填,深层滑裂面则通常采用混凝土塞的方式或设置混凝土深齿墙^[11],通过增大抗剪断能力或改变滑裂面形式来提高滑动体的抗剪断系数。

表5 方差分析表
Tab.5 Table of the variance analysis

因素	各参数对应的方差					方差误差
	β	f'_1	c'_1	f'_2	c'_2	
偏差平方和 Q_{1j}	204.49	180.90	214.04	232.26	207.36	244.61
偏差平方和 Q_{2j}	221.12	211.99	227.41	235.93	225.90	239.63
偏差平方和 Q_{3j}	239.32	240.56	241.49	242.11	239.01	243.05
偏差平方和 Q_{4j}	261.15	273.90	256.96	242.74	260.82	240.25
偏差平方和 Q_{5j}	284.26	309.41	268.30	253.45	276.22	238.70
均方差 M_j	0.824	2.110	0.397	0.053	0.621	0.005
自由度 h	4	4	4	4	4	4
统计量 F_j	164.80	422.00	79.40	10.60	124.20	
显著性	高度显著	高度显著	高度显著	显著	高度显著	

4 结 论

1) 正交试验极差分析结果表明,对重力坝深层抗滑稳定安全系数而言,参数敏感性由大到小为:滑动体抗剪断摩擦系数 f'_1 、抗力体 BC 面与水平面的夹角 β 、抗力体凝聚力系数 c'_2 、滑动体凝聚力系数 c'_1 、抗力体抗剪断摩擦系数 f'_2 。

2) 方差分析结果表明, f'_1 、 β 、 c'_1 、 c'_2 对重力坝稳定具有高度显著影响; f'_2 对大坝稳定有显著影响,与极差分析结果的趋势一致。

3) 浅层处理可直接挖除后进行混凝土回填,深层滑裂面可采用混凝土塞的方式或设置混凝土深齿墙,通过增大地基抗剪断能力或改变滑裂面形式来提高滑动体的抗剪断系数。

参考文献:

- [1] 周伟,常晓林,徐建强. 基于分项系数法重力坝深层抗滑稳定分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 315-320. ZHOU Wei, CHANG Xiaolin, XU Jianqiang. Analysis of anti-sliding stability in deep foundation of gravity dam based on partial coefficient [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 315-320.
- [2] 周泽,周峰,潘军校,等. 重力坝深层抗滑稳定计算探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1719-1722. ZHOU Ze, ZHOU Feng, PAN Junxiao, et al. Study on stability against deep sliding of gravity dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1719-1722.
- [3] 苏龙,孙建生,王刚. 基于分项系数极限状态法与突变理论的重力坝深层抗滑稳定分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12): 78-80. SU Long, SUN Jiansheng, WANG Gang. Deep anti-sliding stability analysis of gravity dam based on partial coefficient limit state method and catastrophe theory [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(12): 78-80.
- [4] 王瑞骏,李阳,丁占峰. 堆石料流变模型参数敏感性分析的正交试验法[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 245-252. WANG Ruijun, LI Yang, DING Zhanfeng. The sensitivity analysis of seven-parameter rockfill rheological

- model based on the orthogonal test method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 245-252.
- [5] CHEN Y, ZHANG L, YANG G X, et al. Anti-sliding stability of a gravity dam on complicated foundation with multiple structural planes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 55: 151-156.
- [6] 李美蓉,陈媛,张林,等. 复杂地质条件下多结构面对重力坝坝基稳定性的影响及处理[J]. 岩土力学, 2014, 35(Z1): 328-333. LI Meirong, CHEN Yuan, ZHANG Lin, et al. Impacts of multi-structural planes on gravity dam foundation stability and treatment under complex geological conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Z1): 328-333.
- [7] 曹其光,苏怀智,王帅,等. 重力坝深层抗滑稳定计算中各参数的敏感性分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(5): 63-66. CAO Qiguang, SU Huaizhi, WANG Shuai, et al. Parameters sensitivity analysis of deep anti-slide stability for gravity dam [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(5): 63-66.
- [8] 张博,李娟娟,曹媛,等. 基于可视化编程的混凝土重力坝深层抗滑稳定分析及影响因素探讨[J]. 西北水电, 2010, (4): 90-94. ZHANG Bo, LI Juanjuan, CAO Yuan, et al. Discussion on stability against deep sliding and influence factors analysis of concrete gravity dam based on visual programming [J]. Northwest Hydropower, 2010, (4): 90-94.
- [9] 李炎隆,李守义,丁占峰,等. 基于正交试验法的邓肯-张 E-B 模型参数敏感性分析研究[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 873-879. LI Yanlong, LI Shouyi, DING Zhanfeng, et al. The sensitivity analysis of Duncan-Chang E-B model parameters based on the orthogonal test method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 873-879.
- [10] 陈希孺. 数理统计引论[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [11] YU X, ZHOU Y F, PENG S Z. Stability analyses of dam abutments by 3D elasto-plastic finite-element method: a case study of Houhe gravity-arch dam in China [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(3): 415-430.

(责任编辑 周 蓓)