

# 强度参数的不确定性对土石坝坝坡失稳概率的影响

陈群<sup>1</sup>, 唐岷<sup>1</sup>, 朱分清<sup>2</sup>

(1. 四川大学水利水电学院山区河流开发与保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 目前对土石坝坝坡的稳定性, 主要是在坝料特性的确定参数基础上, 采用极限平衡方法求出的坝坡抗滑稳定安全系数来评价。但实际的坝料特性参数往往是具有一定变化范围的变量, 因此, 安全系数大的坝坡不一定就比安全系数小的坝坡的失稳概率小。在分析研究 12 座均质土坝坝料强度参数统计特性的基础上, 采用蒙特卡罗法对坝坡最危险滑裂面进行失稳概率分析, 研究土石坝坝料强度参数的均值、变异性和相关性对坝坡失稳概率的影响。结果表明: 强度参数的不确定性对坝坡的失稳概率有较大的影响, 失稳概率随强度参数的均值的增大而减小, 随变异系数的增大而增大。两个强度参数的相关性对坝坡的失稳概率也有显著的影响。由此可知, 土石坝坝坡稳定性评价中, 在确定性分析的同时, 若能够考虑强度参数的不确定性, 给出坝坡失稳概率, 有利于更科学合理的评价土石坝的安全。

**关键词:** 土石坝; 强度参数; 不确定性; 失稳概率

中图分类号: TV641 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2008)11-1594-06

作者简介: 陈群(1972-), 女, 副教授, 从事土石坝和土坡的渗流和稳定性研究。E-mail: chenqun@scu.edu.cn。

## Influence of uncertainty of strength parameters on instability probability of embankment dam slopes

CHEN Qun<sup>1</sup>, TANG Min<sup>1</sup>, ZHU Fen-qing<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** At present, the safety factor of sliding resistance determined by the limit equilibrium method based on the determinate property parameters of soils is used to evaluate the stability of the dam slopes. However, the property parameters of practical soils are variables with in a certain changeable range, so the instability probability of the dam slopes with a larger factor of safety is not always less than that with a less factor of safety. Based on studies on the statistical properties of soil strength parameters of 12 uniform earth dams, using the Monte-Carlo method to perform the dam slope instability probability analysis for the critical slipping surface, the influence of the mean value, variability and correlation of strength parameters of the fill materials of the dams on the instability probability of the dam slopes was studied. The results show that the uncertainty of strength parameters has significant influence on the instability probability of the dam slopes. The instability probability of the dam slopes decreases with the increase of the mean values and increases with the increase of the coefficients of variability of the strength parameters. The correlation between the two strength parameters also has evident influence on the instability probability. Therefore, during the evaluation of the stability of the embankment dam slopes, based on the deterministic analysis, if the uncertainty of strength parameters can be considered and the instability probability of the dam slopes can be calculated, the assessment of dam safety can be more scientific and reasonable.

**Key words:** embankment dam; strength parameter; uncertainty; instability probability

## 0 前言

我国不断兴建的高坝中有很多是土石坝, 在已建坝体中土石坝也占有相当的比例, 无论是在建的还是已建成的土石坝, 坝坡的稳定性都是保证大坝安全必须考虑的问题。目前, 我国的土石坝设计规范<sup>[1]</sup>中对坝坡的稳定性分析仍推荐使用确定性的极限平衡方法, 此方法有简单实用的优点, 但不能考虑不确定因

素对坝坡稳定性的影响。然而, 影响坝坡稳定性的各种因素都存在一定不确定性, 因此即使坝坡的抗滑稳定安全系数较大, 坝坡仍存在失稳风险。坝坡的稳

基金项目: 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金(2007B036); 国家自然科学基金面上项目(50709022)

收稿日期: 2008-09-08

定安全系数越大, 并不一定意味着坝坡就越安全。这就有必要考虑各种影响坝坡稳定性因素的不确定性, 对坝坡的稳定性进行不确定性分析。

国外较早就将风险和可靠性理论用于边坡的稳定性分析<sup>[2-4]</sup>。近些年, 国内外研究者开始利用可靠性理论分析坝坡的稳定性。Liang等<sup>[5]</sup>利用可靠性和概率理论, 提出了多层坝体的边坡可靠性指标和破坏概率的计算方法, 并编程对King Talal土石坝的坝坡稳定性进行分析。Rahhal等<sup>[6]</sup>对均质土坡和两层土体组成的分层土坡的稳定性进行可靠性分析, 研究了相关系数对可靠性指标的影响。周江平等<sup>[7]</sup>用Monte-Carlo方法计算可靠度, 对复杂地基上兴建的高土石坝的坝体稳定性及坝体—地基稳定性进行了分析研究。栾茂田等<sup>[8]</sup>在结合已有试验数据对堆石料的抗剪强度参数进行统计分析的基础上, 对面板堆石坝下游坝坡的稳定性进行了可靠性分析, 并进行了抗剪强度参数的统计量的敏感性分析。张明等<sup>[9]</sup>以概率统计和结构可靠度理论为基础, 对土石坝抗剪强度参数黏聚力和摩擦角的统计方法和统计特性、土石坝边坡稳定可靠度分析方法、设计表达式中标准值和分项系数的取值等问题进行了分析研究。李清富等<sup>[10]</sup>针对土石坝坝坡失稳概率模型, 详细讨论了模型中各有关参数的取值及随机变量的统计分析问题, 建议以坝坡最危险滑裂面为基础采用蒙特卡罗法进行坝坡失效风险的计算。

以上研究对坝坡的失稳概率或可靠性指标的求取提供了思路和计算方法。但目前可靠性方法在实际工程中应用仍较少, 有待推广。对于土石坝坝坡的稳定性分析, 坝料的强度参数取值是非常关键的, 而强度参数在空间和时间上都存在不确定性, 因此, 在坝坡稳定性分析时考虑强度参数的不确定性是非常必要的。本文利用GeoStudio2007中的SLOPE/W土坡分析软件, 考虑坝料强度参数的均值、变异性以及两个强度参数 $c$ ,  $\varphi$ 之间的相关性的变化, 对坝坡稳定性进行失稳概率分析。探讨了这些参数的变化对坝坡失稳概率的影响, 对坝坡稳定性分析方法提出了建议。

## 1 坝坡失稳概率的分析方法

本文进行坝坡的失稳概率分析的主要思路是先利用极限平衡方法求出坝坡的最小抗滑稳定安全系数, 然后针对最小抗滑安全系数对应的最危险滑弧采用Monte-Carlo方法对坝坡的稳定性进行概率分析, 求出坝坡的失稳概率。

### 1.1 抗滑稳定安全系数的计算

坝坡稳定性分析采用毕肖普方法计算坝坡的抗滑稳定安全系数, 安全系数

$$F_s = \frac{\sum [c'_i b_i + W_i \tan \varphi'_i] \frac{1}{\tan \varphi'_i \sin \alpha_i / F_s + \cos \alpha_i}}{\sum W_i \sin \alpha_i}, \quad (1)$$

式中,  $c'_i$  和  $\varphi'_i$  分别为土的有效黏聚力和有效内摩擦角,  $W_i$  和  $b_i$  分别为土条的重量和宽度,  $\alpha_i$  为土条滑面的倾角。

### 1.2 Monte-Carlo 抽样方法

Monte-Carlo 方法是通过随机模拟和统计试验来求解结构可靠性的近似数值方法。用此方法求某一事件发生的概率时, 可以通过抽样试验的方法, 得到该事件出现的频率, 将其作为问题的解。SLOPE/W<sup>[11]</sup> 利用随机数生成函数来进行随机抽样。由此函数生成的随机数均匀地分布于 0~1。为了将此均匀分布的随机数用于具有不同分布类型的输入参数, 必须将均匀分布的随机数转化为与输入参数相同分布类型的随机数  $N$ 。进而可求出每次抽样所得的确定性分析所需的参数

$$P = \mu + N\sigma, \quad (2)$$

式中,  $\mu$  为参数的均值,  $\sigma$  为参数的标准差。

理论上说, Monte-Carlo 方法的抽样次数越多, 计算的精度就越高, 但所需的计算时间越长。抽样次数随计算结果所需的可信程度和变量数成几何增长。大多数情况下, 当抽样次数大于几千次以上时, 它对计算结果的影响就较小了。在实际计算时, 可用试验法确定抽样次数, 即采用一定的抽样次数进行多次计算, 计算结果之间的差异满足所需的精度时, 抽样次数就不需增大了。

### 1.3 失稳概率的计算

失稳概率  $P_f$  就是采用抽样参数进行安全系数计算时安全系数小于 1.0 的概率。它可通过对安全系数小于 1.0 的概率密度函数之下的面积进行积分求得。数值分析时为

$$P_f = n_f / n, \quad (3)$$

式中  $n_f$  为安全系数小于 1.0 的计算次数  $n$  为抽样次数。

## 2 土石坝坝料强度参数的统计特性

为了研究坝料的强度参数的不确定性对坝坡失稳概率的影响, 收集了 12 座均质土坝坝料原状非饱和固结快剪的强度参数的试验值, 每座坝体坝料的试验值均为 6 组。对其统计特征参数进行计算分析, 计算结果列于表 1 中。由表中数据可知, 不同坝体的坝料进行强度试验所得的强度参数的均值、标准差和变异系数都不同。内摩擦角  $\varphi$  的均值为  $16.2^\circ \sim 28.3^\circ$ , 变异系数为 0.023~0.157, 平均值为 0.074, 黏聚力  $c$  的均值为 16.5~40.0 kPa, 变异系数为 0.034~0.289, 平均值为 0.143。

表1 12座均质土坝坝料强度参数的统计特性

Table 1 Statistical characteristics of the strength parameters of soils from 12 uniform earth dams

序号	水库名称	内摩擦角 $\varphi$			黏聚力 $c$			相关系数 $r$
		均值 $\mu/(\circ)$	标准差 $\sigma/(\circ)$	变异系数 $\delta$	均值 $\mu/\text{kPa}$	标准差 $\sigma/\text{kPa}$	变异系数 $\delta$	
1	太平	16.2	1.979	0.122	40.0	2.558	0.064	0.202
2	兴隆	20.7	1.198	0.058	38.2	1.302	0.034	-0.564
3	庆丰	21.2	2.411	0.114	32.0	1.812	0.057	0.958
4	百丈	20.5	2.532	0.124	24.0	2.944	0.123	-0.259
5	观音桥	21.0	0.998	0.048	24.3	2.475	0.102	-0.343
6	高中#4坝	28.3	1.171	0.041	19.5	5.328	0.273	-0.887
7	高中#5坝	27.4	0.895	0.033	16.5	1.889	0.114	-0.909
8	团结	25.0	2.331	0.093	34.3	9.888	0.289	-0.047
9	鹅项颈	22.5	0.624	0.028	27.6	4.103	0.149	0.263
10	石龙	23.2	1.151	0.050	28.1	4.560	0.162	0.925
11	五一	19.1	2.991	0.157	20.5	3.500	0.171	-0.791
12	猫洞沟	22.0	0.499	0.023	29.9	5.396	0.180	0.991
所有坝料均值		22.3	1.565	0.074	27.9	3.813	0.143	-0.038

可见,黏聚力 $c$ 的变异性要明显大于内摩擦角 $\varphi$ 。内摩擦角 $\varphi$ 与黏聚力 $c$ 之间的相关系数变化范围也较大,为-0.909~0.991,出现负相关的情况多于出现正相关的情况。

由于每座坝体坝料的强度试验组数偏少,直接由试验数据获得内摩擦角 $\varphi$ 和黏聚力 $c$ 的分布函数很困难。一些研究者<sup>[12-14]</sup>的研究结果表明,强度参数 $c$ , $\varphi$ 值的概率分布多为正态分布,也有少数为对数正态分布。因此本次分析假设强度参数 $c$ , $\varphi$ 的概率分布都服从正态分布。

### 3 计算方案

在12座均质土坝最大坝剖面基础上,抽象出如图1所示的均质土坝剖面进行分析。此坝坝高40 m,坝顶宽5 m。上游坝坡坡比为1:2.0和1:2.5,下游坝坡坡比为1:1.5和1:1.8。以此坝竣工期下游坝坡的稳定性为研究对象。在进行概率分析时抽样次数取为 $2 \times 10^5$ 次。

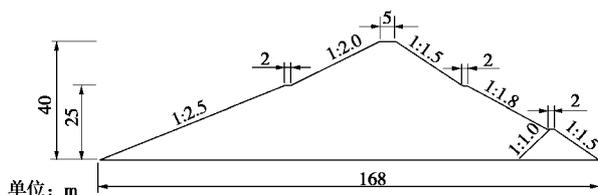


图1 均质土坝计算剖面

Fig. 1 Profile of a uniform earth dam

为了研究强度参数的均值、变异系数以及黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 之间的相关性对坝坡失稳概率的影响,共设计3组计算方案。具体的概率分析方案和工况列于

表2中。第1组方案分别考虑黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 的均值的影响,保持 $c$ 或 $\varphi$ 的变异系数不变,分别改变各自的均值进行概率分析。参考表2中所有坝料试验值的均值,选择一个基准均值 $\mu_0$ ,在此基础上分别减小1倍、2倍和3倍标准差,增大1倍标准差 $\sigma$ 共获得5组不同的均值。如表2所示,黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 的基准均值分别为27.0 kPa和21.0°。第2组方案分别考虑黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 的变异性的影响,保持 $c$ 和 $\varphi$ 的均值不变,分别改变各自的变异系数进行概率分析。第3组方案则是考虑黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 的相关性,在均值和变异系数不变的情况下,改变 $c$ 和 $\varphi$ 的相关系数进行概率分析。

### 4 计算结果及分析

#### 4.1 均值的影响

坝坡的失稳概率随黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 均值的变化曲线见图2(对应表2中第1组方案的计算结果)。由图可知,当 $c$ 和 $\varphi$ 的变异系数不变时,坝坡的失稳概率随 $c$ 或 $\varphi$ 的均值的增大而减小。内摩擦角 $\varphi$ 的均值对坝坡失稳概率的影响比黏聚力 $c$ 的均值的影响大。当 $c$ 或 $\varphi$ 的均值小于某个值(可称为临界均值)时,坝坡的失稳概率随均值的减小而非线性加速增大。当变异系数都为0.2时, $\varphi$ 和 $c$ 的临界均值分别为基准均值 $\mu_0$ 和基准均值 $\mu_0$ 减去2倍标准差 $\sigma$ ,即 $\mu_0 - 2\sigma$ 。当均值大于临界均值时,其变化对坝坡的失稳概率的影响较小。

由表2中数据可知,黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 均值对概率分析所得的安全系数的均值影响较大,安全系

表 2 分析方案、工况及其计算结果表

Table 2 Analysis schemes, cases and results

方案 分组	工况	内摩擦角 $\varphi$			黏聚力 $c$			相关 系数 $r$	均值安全 系数	失稳概率 $P_f$ /%	
		均值 $\mu/(\circ)$	标准差 $\sigma/(\circ)$	变异系数 $\delta$	均值 $\mu/\text{kPa}$	标准差 $\sigma/\text{kPa}$	变异系数 $\delta$				
均值 不同	1	13.1 ( $\mu_0-3\sigma$ )	2.63						0.915	80.049	
	2	15.0 ( $\mu_0-2\sigma$ )	3.00						0.991	53.142	
	3	17.5 ( $\mu_0-\sigma$ )	3.50	0.2	27.0	0	0		1.088	23.379	
	4	21.0 ( $\mu_0$ )	4.20						1.208	4.663	
	5	26.3 ( $\mu_0+\sigma$ )	5.25						1.393	0.499	
	6				16.9 ( $\mu_0-3\sigma$ )	3.38				1.085	4.439
	7				19.3 ( $\mu_0-2\sigma$ )	3.86				1.117	0.885
	8	21.0	0	0	22.5 ( $\mu_0-\sigma$ )	4.50	0.2			1.156	0.189
	9				27.0 ( $\mu_0$ )	5.40				1.207	0.029
	10				33.8 ( $\mu_0+\sigma$ )	6.75				1.281	0.004
变异 系数 不同	1		0	0					1.207	0.000	
	2		2.1	0.1					1.207	0.041	
	3	21	4.2	0.2	27	0	0		1.208	4.663	
	4		6.3	0.3					1.207	13.218	
	5		8.4	0.4					1.208	20.018	
	6					0	0		1.207	0.000	
	7					2.7	0.1		1.207	0.000	
	8	21.0	0	0	27.0	5.4	0.2		1.207	0.029	
	9					8.1	0.3		1.208	1.052	
	10					10.8	0.4		1.209	4.088	
相关 系数 不同	1						-0.75	1.207	0.000		
	2						-0.50	1.207	0.000		
	3						-0.25	1.207	0.001		
	4	21.0	2.1	0.1	27.0	2.7	0.1	0.00	1.208	0.124	
	5							0.25	1.207	0.069	
	6							0.50	1.208	0.120	
	7							0.75	1.208	0.394	
	8							-0.75	1.207	0.000	
	9							-0.50	1.207	0.038	
	10							-0.25	1.208	1.605	
	11	21.0	4.2	0.2	27.0	5.4	0.2	0.00	1.208	6.545	
	12							0.25	1.208	5.426	
	13							0.50	1.209	6.350	
	14							0.75	1.208	9.160	
15							-0.75	1.207	0.095		
16							-0.50	1.208	1.263		
17							-0.25	1.208	7.688		
18	21.0	6.3	0.3	27.0	8.1	0.3	0.00	1.209	15.468		
19							0.25	1.209	14.146		
20							0.50	1.208	15.441		
21							0.75	1.209	18.443		
22							-0.75	1.207	1.034		
23							-0.50	1.208	4.669		
24							-0.25	1.208	14.187		
25	21.0	8.4	0.4	27.0	10.8	0.4	0.00	1.212	21.899		
26							0.25	1.210	20.866		
27							0.50	1.211	21.948		
28							0.75	1.212	24.602		

数的均值随  $c$  和  $\varphi$  的均值的增大而增大。

4.2 变异性的影响

坝坡的失稳概率随黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  的变异系数的变化曲线见图 3 (对应表 2 中第 组方案的计

算结果)。由图可知,当  $c$  和  $\phi$  的均值不变时,坝坡的失稳概率随黏聚力  $c$  或内摩擦角  $\phi$  的变异系数的增大而增大。内摩擦角  $\phi$  的变异系数对坝坡失稳概率的影响比黏聚力  $c$  的变异系数的影响大。当变异系数小于某个值(可称为临界变异系数)时,其变化对坝坡的失稳概率的影响较小。当  $c$  和  $\phi$  的均值分别为 27.0 kPa 和 21.0° 时,  $c$  和  $\phi$  的临界变异系数分别约为 0.2 和 0.1。当变异系数大于临界变异系数时,坝坡的失稳概率随变异系数的增大而非线性加速增大。且坝坡的失稳概率随  $\phi$  的变异系数的增大而增大的速率比随  $c$  的变异系数的增大快。

由表 2 中数据可知,黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\phi$  的变异系数对概率分析所得的安全系数的均值影响很小,当  $c$  和  $\phi$  的均值不变时,安全系数的均值基本不变。

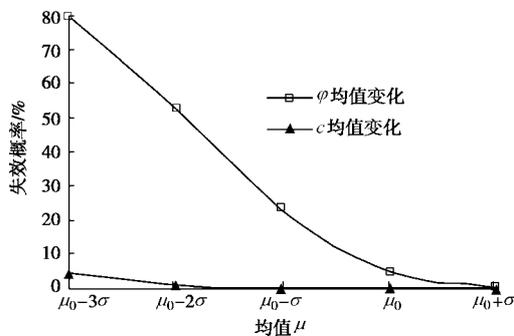


图 2 失稳概率随强度参数的均值的变化曲线

Fig. 2 Curves of the instability probability changing with the mean values of the strength parameters

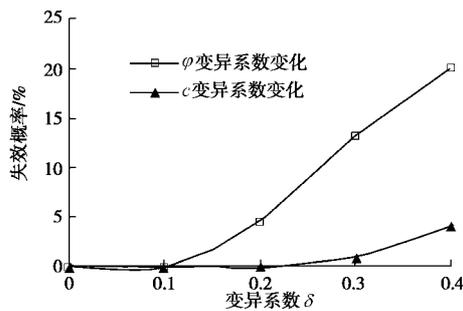


图 3 失稳概率随强度参数的变异系数的变化曲线

Fig. 3 Curves of the instability probability changing with the coefficients of variation of the strength parameters

### 4.3 相关性的影响

在不同的变异系数情况下,坝坡的失稳概率随黏聚力  $c$  与内摩擦角  $\phi$  的相关系数的变化曲线见图 4(对应表 2 中第 组方案的计算结果)。由图可知,在各种变异系数情况下,当  $c$  与  $\phi$  的相关系数为负时,坝坡的失稳概率随相关系数的增大而增大。当  $c$  与  $\phi$  之间为正相关时,坝坡的失稳概率随相关系数非单调变化。当正相关系数较小,小于 0.25 时,坝坡的失稳概率随

相关系数的增大而减小。但当相关系数大于 0.25 时,坝坡的失稳概率则随之增大而近似线性地增大。可见,当  $c$  与  $\phi$  为正相关时,相关系数存在一个临界值,相关系数小于此值时,坝坡的失稳概率随相关系数的增大而减小;相关系数大于此值时,坝坡的失稳概率随相关系数的增大而增大。由不同变异系数对应的曲线的对比可进一步说明变异系数越大,坝坡的失稳概率也越大。

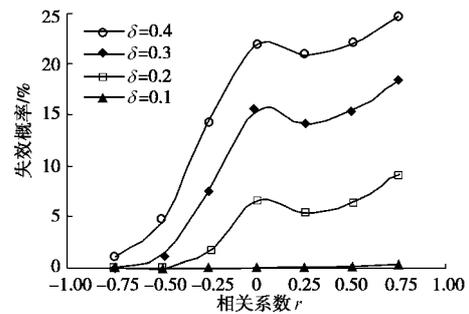


图 4 失稳概率随两个强度参数的相关系数的变化曲线

Fig. 4 Curves of the instability probability changing with the coefficients of correlation of the strength parameters

由表 2 中数据可知,黏聚力  $c$  与内摩擦角  $\phi$  的相关系数对概率分析所得的安全系数的均值影响很小,当  $c$  和  $\phi$  的均值和变异系数相同时,  $c$  与  $\phi$  的相关系数为负时安全系数的均值比相关系数为正时稍小。

## 5 结 论

在分析研究 12 座均质土坝坝料强度参数的统计特性的基础上,通过改变强度参数的均值、变异系数以及强度参数  $c$  与  $\phi$  之间的相关系数,对坝坡稳定性进行 48 种工况的失稳概率分析后可得出以下 4 点结论:

(1) 强度参数  $c$  和  $\phi$  的均值,尤其是  $\phi$  的均值对坝坡的失稳概率有较大的影响。坝坡的失稳概率随  $c$  和  $\phi$  的均值的增大而减小。且  $c$  和  $\phi$  的均值小于某一临界值时,坝坡的失稳概率将随  $c$  和  $\phi$  的均值的减小而非线性加速增大。

(2) 强度参数  $c$  和  $\phi$  的变异性对坝坡的失稳概率也有较大的影响。坝坡的失稳概率随  $c$  和  $\phi$  的变异系数的增大而增大。 $c$  和  $\phi$  的变异系数超过某一临界值后,坝坡的失稳概率将随  $c$  和  $\phi$  的变异系数的增大而非线性加速增大。并且失稳概率随  $\phi$  的变异系数的增大明显比随  $c$  的变异系数快。

(3) 强度参数  $c$  与  $\phi$  的相关性对坝坡的失稳概率有明显的影 响。当  $c$  与  $\phi$  为负相关或者为正相关且相关系数大于某一临界值时,坝坡的失稳概率随相关系数的增大而增大。但当  $c$  与  $\phi$  为正相关时且相关系数

小于此临界值时, 坝坡的失稳概率随相关系数的增大而减小。

(4) 坝坡的稳定性安全系数的均值随强度参数  $c$  和  $\phi$  的均值的增大而增大, 基本不受  $c$  和  $\phi$  的变异系数和两者之间的相关系数的影响。但  $c$  和  $\phi$  的变异系数及其相关系数对坝坡的失稳概率有明显的影响。只考虑强度参数均值的坝坡稳定性的确定性分析不能评估坝坡可能的失稳风险, 而坝坡的稳定性安全系数较大并不意味着坝坡更安全。因此, 在坝坡的稳定性分析时, 有必要考虑强度参数的变异性和相关性, 更科学合理地评价坝坡的安全性。

#### 参考文献:

- [1] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S]. 2001. (SL274—2001 Design code for rolled earth-rock fill dams[S]. 2001. (in Chinese))
- [2] ALONSO E E. Risk analysis of slopes and its application to slopes in canadian sensitive clays[J]. Geotechnique, 1976, 26(3): 453 – 472.
- [3] BERGADO D T, ANDERSON L R. Stochastic analysis of pore pressure uncertainty for the probabilistic assessment of the safety of earth slopes[J]. Soils and Foundations, 1985, 25(2): 87 – 105.
- [4] LI K S, LUMB P. Probabilistic design of slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(4): 520 – 535.
- [5] LIANG R Y, NUSIER O K, MALKAWI A H. Reliability based approach for evaluating the slope stability of embankment dams[J]. Engineering Geology, 1999, 54(3): 271 – 285.
- [6] RAHHAL M E, SHERFANE J, ABOU RACHED Z. Reliability theory in slope stability analysis[C]// 9th ASCE Joint Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, New Mexico, 2004.
- [7] 周江平, 彭雄志, 赵善锐. 复杂地基上高土石坝坝体稳定可靠度分析[J]. 西南交通大学学报, 1998, 33(5): 544 – 549. (ZHOU Jiang-ping, PENG Xiong-zhi, ZHAO Shan-rui. Stability reliability of earth-rock filled high dams on complex foundations[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1998, 33(5): 544 – 549. (in Chinese))
- [8] 栾茂田, 辛军霞, 赵尚传. 面板堆石坝边坡稳定性可靠性分析及其应用[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(4): 467 – 471. (LUAN Mao-tian, XIN Jun-xia, ZHAO Shang-chuan. Reliability analysis of concrete-faced rockfill dam's slope stability and its application[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2002, 42(4): 467 – 471. (in Chinese))
- [9] 张 明, 刘金勇, 麦家焯. 土石坝边坡稳定可靠度分析与设计[J]. 水力发电学报, 2006, 25(2): 103 – 107. (ZHANG Ming, LIU Jin-yong, MAI Jia-xuan. Reliability analysis and design of slope stability of earth-rock dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(2): 103 – 107. (in Chinese))
- [10] 李清富, 龙少江. 土坝坝坡失稳概率风险分析[J]. 水利水电技术, 2006, 37(5): 41 – 44. (LI Qing-fu, LONG Shao-jiang. Analysis on risk from instability of earth-fill dam slope[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(5): 41 – 44. (in Chinese))
- [11] GEO-SLOPE International Ltd. Stability modeling with SLOPE/W 2007[R]. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd., 2007.
- [12] 范明桥. 黏性填筑土强度指标  $\phi$ ,  $c$  的概率特征[J]. 水利水运科学研究, 2000 (1): 49 – 53. (FAN Ming-qiao. Probabilistic property of shear strength parameters  $\phi$ ,  $c$  of refilled clay[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000 (1): 49 – 53. (in Chinese))
- [13] 陈立宏, 陈祖煜, 刘金梅. 土体抗剪强度指标的概率分布类型研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 37 – 40, 45. (CHEN Li-hong, CHEN Zu-yu, LIU Jin-mei. Probability distribution of soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 37 – 40, 45. (in Chinese))
- [14] 李远耀, 殷坤龙, 柴 波, 等. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的统计规律研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1419 – 1424, 1429. (LI Yuan-yao, YIN Kun-long, CHAI Bo, et al. Study on statistical rule of shear strength parameters of soil in landslide zone in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1419 – 1424, 1429. (in Chinese))