

抗剪断参数对抗滑稳定可靠度指标的影响

李 斌^{1,2},周兴波^{1,2},孙 平²

(1. 西安理工大学水利水电学院,陕西 西安 710048; 2. 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所,北京 100044)

摘要:为确定抗剪公式和抗剪断公式的适用工况,研究了岩体抗剪断参数不同均值、不同概率分布以及摩擦系数的变异系数对建筑物可靠度指标的影响;利用规范规定的岩体抗剪断参数对国内已建混凝土坝进行相应的可靠度指标计算和评价,并分别计算抗剪安全系数和抗剪断安全系数;按照规范规定黏聚力取对数正态分布,摩擦系数取正态分布,证明两者取值范围能够计算出合理的可靠度指标或安全系数,摩擦系数的变异系数对可靠度指标影响极大;建议岩体力学参数取值采用SL319—2005《混凝土重力坝设计规范》的规定值,黏聚力和摩擦系数的概率分布均选择对数正态分布为宜,抗剪公式和抗剪断公式适用于不同的工程地质条件。

关键词:抗剪强度;抗滑稳定;变异系数;概率分布;可靠度指标;重力坝;岩体

中图分类号:TV642.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)06-0031-05

Influence of shear parameters on the reliability index of anti-sliding stability//LI Bin^{1,2}, ZHOU Xingbo^{1,2}, SUN Ping² (1. Xi'an University of Technology, Department of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Xi'an 710048, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to determine the applicability of the shear formula and anti-cut formula, we present the studies of the impact of shear parameters of rock mass at different mean, probability distribution, and variation coefficient of friction coefficient f on buildings reliability index. Additionally, we calculate and evaluate the reliable indicator of domestic built concrete dam with shear parameters of rock works. In accordance with the specification, the coefficient c takes a lognormal distribution and the distribution f ranges of both institutions reasonably provide reliability index or safety factor, and the shear coefficient of variation of the parameter f has a great impact on the reliability index. The results show that the rock mass mechanics parameters should conform to specified value in the *Design Specification for Concrete Gravity Dam* (SL319-2005), and the probability distribution of c and f appropriately take a lognormal distribution model. Further, the shear formula and anti-cut formula are suitable for different operating conditions.

Key words: shear strength; anti-sliding stability; coefficient of variation; probability distribution; reliability index; concrete gravity dam; rock

各种类型大坝的坝基和坝肩抗滑稳定是大坝整体稳定的关键,而在抗滑稳定计算过程中抗剪断参数的取值直接影响大坝的安全和效益^[1],因而确定坝基和坝肩岩体抗剪断参数的离散特征至关重要。为掌握已建大坝工程岩体、结构面的抗剪断参数对安全系数和可靠度指标的影响程度,本文从风险分析^[2]的角度对国内已建的11个具有典型意义的大坝进行抗滑稳定计算,研究抗剪断参数黏聚力 c 和摩擦系数 f 的不同取值、不同概率分布、不同变异系数对可靠度指标 β 的影响^[3],并探讨按照抗剪断公式和抗剪公式计算 β 的不同。

1 可靠度分析方法

如图1所示的典型重力坝断面,假定其高度为

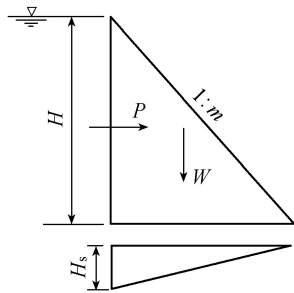


图1 典型重力坝断面示意图

基金项目:国家重点基础研究计划(973计划)(2013CB036403)
作者简介:李斌(1984—),男(满族),河北承德人,博士研究生,主要从事水工结构研究。E-mail:lee_binbin@163.com
水利水电科技进展,2014,34(6) Tel:025-83786335 E-mail:jz@hhu.edu.cn http://kkb.hhu.edu.cn

h 且上游面作用高度为 H 的水压力, 计算时 $H=h$, 作用于坝基的扬压力呈三角形分布。则安全系数可由下式确定:

$$K = \frac{f\left(\frac{1}{2}m\rho gh^2 - \frac{1}{2}m\rho_w ghH_s\right) + cmh}{\frac{1}{2}\rho_w gH^2} = \frac{Af + Bc}{C} \tag{1}$$

其中 $H_s = \alpha\rho_w gH$ $A = \frac{1}{2}m\rho gh^2 - \frac{1}{2}m\rho_w ghH_s$

$B = mh$ $C = \frac{1}{2}\rho_w gH^2$

式中: ρ 、 ρ_w 分别为坝体混凝土和水的密度; m 为下游坝面坡度; α 为扬压力折减系数; H_s 为扬压力; c 、 f 分别为沿建基面的黏聚力和摩擦系数。

构筑的功能函数为

$$G = K - 1 = \frac{A}{C}f + \frac{B}{C}c - 1 \tag{2}$$

或 $G = K - 1 = K(x_1, x_2, \dots, x_n) - 1 \geq 0$

此时 G 为 Ax_1+Bx_2+C 的形式, 令 G 的均值和标准差分别为 μ_G 和 σ_G , 则:

$$\begin{cases} \mu_G = A\mu_{x_1} + B\mu_{x_2} + C \\ \sigma_G^2 = A^2\sigma_{x_1}^2 + B^2\sigma_{x_2}^2 \end{cases} \tag{3}$$

根据定义, 可靠度指标 β 计算公式为

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{A\mu_{x_1} + B\mu_{x_2} + C}{\sqrt{A^2\sigma_{x_1}^2 + B^2\sigma_{x_2}^2}} \tag{4}$$

式(4)为计算重力坝深层抗滑稳定分析的可靠度指标计算公式。

2 抗剪断参数对可靠度指标的影响

2.1 参数均值对可靠度指标的影响

自 20 世纪 90 年代开始, 我国水利水电设计规范在混凝土坝坝基岩体抗剪断强度的标准值、设计值方面相继出台了一系列的规定。鉴于水利、水电属于不同的行政主管部门, 相应的规范在保持已有

条文和框架下出现了不一致的地方, 给设计分析工作带来诸多不便。如 SL319—2005《混凝土重力坝设计规范》和 DL5108—1999《混凝土重力坝设计规范》所建议的坝基岩体力学参数值都来源于 GB50287—1999《水利水电工程地质勘察规范》, DL5108—1999 认为 GB50287—1999 中表 D.0.3 和表 D.0.5 的数值为抗剪强度的实验均值, 则标准值为将该数值进行 0.2 分位数折减后得到的相应值; 而 SL319—2005 则认为表 D.0.3 和表 D.0.5 的数值为经过统计修正或考虑保证率、强度破坏准则等经验修正后确定的实验值, 即为标准值。

应用水利和电力两套规范建议的岩体力学参数, 对图 1 所示三角形重力坝按照沿建基面抗滑稳定进行可靠度分析, 对于不同坝高下的抗剪断安全系数、材料分项系数折减后的可靠度指标进行了计算, 结果见表 1 和表 2。需要指出的是, 表中 f 和 c 均值的计算是取 $m=0.7$, $\alpha=0.3$, $\rho=2.3\text{ t/m}^3$, $\rho_w=1.0\text{ t/m}^3$, 按照 f 和 c 服从正态分布 $\delta=\mu-0.842V$ (δ 为标准值, μ 为均值、 V 为变异系数), 取均值的 0.8 分位数为标准值进行计算得到。

从表 1 和表 2 可知, 按照 SL319—2005 规定的建议值, I 类岩体相同的 f 和 c 取值条件下, 150 m 坝高求得的 β 值比 50 m 坝高求得的降低了 33.6% ~ 35.9%; 150 m 坝高情况下, I 类岩体 β 值比 II 类岩体大 5.6% ~ 12.3%。按照 DL5108—1999 规定的建议值, I 类岩体相同的 f 和 c 取值条件下, 150 m 坝高求得的 β 值比 50 m 坝高求得的降低了 36.3% ~ 40.2%; 150 m 坝高情况下, I 类岩体 β 值比 II 类岩体大 7.9% ~ 12.3%。

分别按照 SL319—2005 和 DL5108—1999 规定的建议值, 在相同坝高、相同工况条件下, 以 I 类岩体 50 m 坝为例, 按 SL319—2005 求出的 β 值比 DL5108—1999 大 9.95% ~ 12.95%。以 II 类岩体 50 m 坝为例, 按 SL319—2005 求出的 β 值比

表 1 按 SL319—2005 建议的参数计算可靠度指标

岩体分类	f			c			H/m	β
	均值	标准值	变异系数	均值/MPa	标准值/MPa	变异系数		
I	1.80 ~ 1.56	1.50 ~ 1.30	0.20	2.11 ~ 1.83	1.50 ~ 1.30	0.35	50	6.52 ~ 6.28
							100	5.42 ~ 5.16
							150	4.88 ~ 4.62
II	1.56 ~ 1.32	1.30 ~ 1.10	0.20	1.83 ~ 1.55	1.30 ~ 1.10	0.35	50	6.28 ~ 5.97
							100	5.16 ~ 4.82
							150	4.62 ~ 4.26
III	1.32 ~ 1.10	1.10 ~ 0.90	0.22	1.64 ~ 1.04	1.10 ~ 0.70	0.40	50	5.38 ~ 4.58
							100	4.37 ~ 3.61
							150	3.86 ~ 3.14
IV	1.10 ~ 0.89	0.90 ~ 0.70	0.25	1.04 ~ 0.78	0.70 ~ 0.50	0.45	50	4.00 ~ 3.43
							100	3.13 ~ 2.54

表2 按 DL5108—1999 建议的参数计算可靠度指标

岩体 分类	<i>f</i>			<i>c</i>			<i>H</i> /m	β
	均值	标准值	变异系数	均值/MPa	标准值/MPa	变异系数		
I	1.50 ~ 1.30	1.25 ~ 1.08	0.20	1.50 ~ 1.30	1.05 ~ 0.91	0.35	50	5.93 ~ 5.65
							100	4.86 ~ 4.55
							150	4.35 ~ 4.03
II	1.30 ~ 1.10	1.08 ~ 0.92	0.20	1.30 ~ 1.10	0.91 ~ 0.77	0.35	50	5.65 ~ 5.27
							100	4.55 ~ 4.14
							150	4.03 ~ 3.59
III	1.10 ~ 0.90	0.90 ~ 0.73	0.22	1.10 ~ 0.70	0.74 ~ 0.47	0.40	50	4.67 ~ 3.78
							100	3.67 ~ 2.82
							150	3.20 ~ 2.36
IV	0.90 ~ 0.70	0.71 ~ 0.55	0.25	0.70 ~ 0.50	0.45 ~ 0.32	0.45	50	3.29 ~ 2.48
							100	2.44 ~ 1.58

按 DL5108—1999 求出的大 11.2% ~ 13.3%。以Ⅲ类岩体 50 m 坝为例,按 SL319—2005 求出的 β 值比按 DL5108—1999 求出的大 15.2% ~ 21.2%。

按规范规定,在 *c* 和 *f* 分别为对数正态分布和正态分布的情况下,虽然根据 SL 319—2005 和 DL 5108—1999 建议的不同参数,在典型重力坝剖面条件下都取得了符合规范要求的安全系数和可靠度指标,但从表 1 和表 2 的计算结果看,DL 5108—1999 建议的坝基岩体力学参数过于保守,用分项系数方法求解安全系数时参数需要再经过两次折减,导致安全系数和可靠度指标计算结果偏低。建议坝基岩体力学参数取值采用 SL 319—2005 的规定值,或者将 DL 5108—1999 建议的坝基岩体力学参数均值看作标准值进行计算,这样既符合规范要求又避免了两个规范之间的不一致。

2.2 *f* 和 *c* 不同概率分布函数对可靠度指标的影响

对三峡^[4-5]、百色^[6]、安康、大化、葛洲坝^[7-9]、金安桥、武都^[10-11]、岩滩、宝珠寺等工程在正常蓄水位工况下按抗剪断公式求出计算部位的安全系数 *k'* 和 β 值,结果见表 3,并进行抗剪断强度下 *c* 和 *f* 不同概率分布函数对 β 值的影响分析。

表3 9个工程的可靠度分析成果

工程 名称	计算部位	<i>k'</i>	β			
			分布 1	分布 2	分布 3	分布 4
宝珠寺	21 号坝段	2.584	3.995	6.085		8.041
百 色	10 号溢流坝段	3.294	3.689	6.252	3.679	8.609
	12 号挡水坝段	3.802	4.238	6.242	4.258	9.972
安 康	7 号右非坝段	3.170	3.702	6.278	3.697	9.529
大 化	4 号坝段	2.145	3.731	3.847	4.639	6.088
葛洲坝	夹层高程 18 m	2.267	4.284	4.466	5.164	6.915
	夹层高程 12 m	3.172	4.913	5.067	6.343	9.128
金安桥	8 号坝段	5.516	5.823	6.404	5.399	15.185
武 都	17 号坝段	2.444	4.263	5.096	4.485	7.611
岩 滩	16 号坝段	5.440	6.484	7.989	6.695	16.658
三 峡	3 号坝段	2.315	4.028	5.158	4.055	7.241

注:分布 1 表示 *f*、*c* 均为正态分布;分布 2 表示 *f* 为正态分布,*c* 为对数正态分布;分布 3 表示 *f* 为对数正态分布,*c* 为正态分布;分布 4 表示 *f*、*c* 均为对数正态分布。

在可靠度分析中,工程岩体与混凝土接触面 *c* 的变异系数取 0.35,*f* 的变异系数取 0.2;结构面 *c* 的变异系数取 0.40,*f* 的变异系数取 0.25。为研究方便,本文 *c* 和 *f* 的概率分布函数分别取正态分布和对数正态分布。

从表 3 可知:①当正常蓄水位工况下重力坝深层抗滑稳定的 *k'*>3.0 时,其相应的 β 值都大于规范建议值 4.2;②在 *c* 和 *f* 不同概率分布组合下 β 值基本存在 $\beta_{\text{分布3}} < \beta_{\text{分布1}} < \beta_{\text{分布2}} < \beta_{\text{分布4}}$ 的规律;安全系数或者可靠度指标计算时,*f* 和 *c* 概率分布的选择应尊重试验结果;③根据不同概率分布条件下的安全系数和可靠度指标的关系,建议 *c* 和 *f* 的概率分布应选择对数正态分布为宜;④用抗剪断公式求安全系数及 β 值时,*f* 概率分布一定的情况下,*c* 概率分布取对数正态分布时对应的 β 值较大;而当 *c* 概率分布一定的情况下,*f* 概率分布取正态分布时对应的 β 值较大。

2.3 *f* 变异系数对可靠度指标的影响

针对官地和葛洲坝自然状态下的深层抗滑稳定问题,采用抗剪公式和抗剪断公式分别计算安全系数,按照抗剪强度和抗剪断强度选取的摩擦系数分别用 *f* 和 *f'* 表示,抗剪公式计算得到的安全系数用 *k* 表示,抗剪断公式计算得到的安全系数用 *k'* 表示^[12]。考虑 *f* 变异系数 *V_f*=0.1 和 *V_f*=0.2 的情况并计算 β 值,对它们之间的关系进行研究。

2.3.1 官地水电站坝基深层抗滑稳定计算

雅砻江官地水电站工程枢纽挡水建筑物为混凝土重力坝,最大坝高 168 m。根据坝址区缓倾角错动带分布状况,溢流坝深层抗滑稳定属于以 f-h01 为第一滑面、坝趾下游岩体作为抗力体第二滑面的双滑面滑移模式。计算示意如图 2 所示,计算结果见表 4。

2.3.2 葛洲坝水利枢纽坝基深层抗滑稳定计算

葛洲坝水利枢纽的泄水建筑物包括二江的 27

表 4 官地水电站深层抗滑稳定计算成果

岩体或错 动带类型	抗剪断参数			安全系数		β			
	f	f'	c/kPa	k	k'	正态分布		对数正态分布	
						$V_f=0.2$	$V_f=0.1$	$V_f=0.2$	$V_f=0.1$
第一滑面	0.66	0.81	0.66	1.65	3.03	2.789	4.943	3.838	6.575
第二滑面	0.62	0.75	0.52						

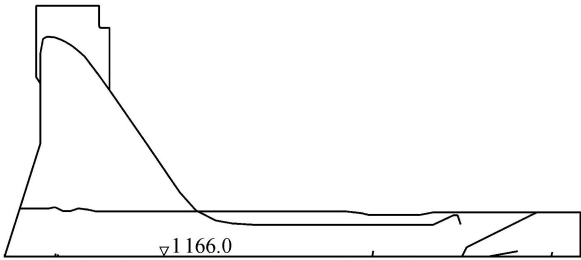


图 2 官地重力坝抗滑稳定计算示意图(单位:m)

孔泄水闸、大江的 9 孔和三江的 6 孔冲沙闸 3 个部分。二江泄水闸的闸基为黏土质粉砂岩、砂岩互层,岩性软弱,基岩内有层面裂隙、软弱夹层等薄弱面;软弱夹层中有的已经泥化或局部泥化,其中以 202 号泥化夹层分布范围最广,软弱夹层的摩擦系数低至 0.150~0.178,因此沿软弱夹层的深层滑动是二江泄水闸安全稳定的一个重要问题,坝体深层抗滑属于双滑面滑动,抗滑稳定和坝基扬压力示意如图 3 所示。将 202 号泥化夹层摩擦系数不同取值作为不同工况进行深层抗滑稳定计算,计算结果如表 5 所示。

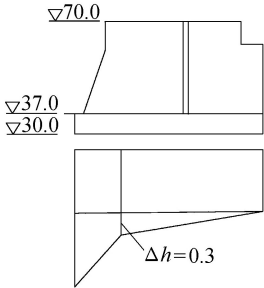


图 3 葛洲坝水利枢纽坝基抗滑稳定和扬压力
计算示意图(单位:m)

2.3.3 结果分析

对两工程实例的计算结果进行综合分析,结果

如图 4 所示。

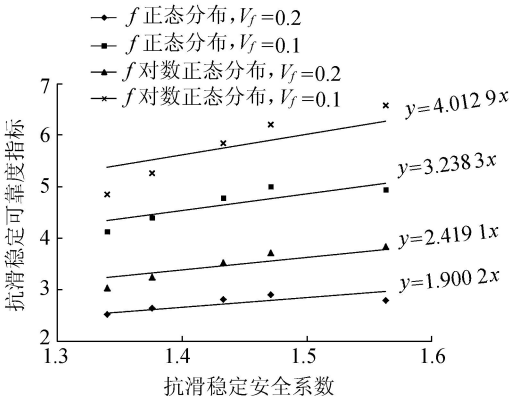


图 4 不同 f 变异系数对可靠度指标的影响

从表 4、表 5 和图 4 可以得到以下结果:①当 f 的概率分布取规范建议的正态分布且 $k>1.3$,对于 $V_f=0.1$ 时 β 值都大于 4.1;而对于 $V_f=0.2$ 时 β 值在 2.5~3.0 之间。②用抗剪强度公式求 β 值,抗剪强度指标 f 取对数正态分布时, β 值较大。基于抗剪强度指标计算的 β 值随安全系数的增大而增大; f 的变异系数减小导致可靠度指标大幅增加,也从另一方面证明变异系数对 β 值影响较大; f 为对数正态分布且 $V_f=0.1$ 时, β 值大于规范建议值 4.2。③ $V_f=0.1$ 时的 β 值大于 $V_f=0.2$ 时的 β 值;相同变异系数情况下, f 取对数正态分布时 β 值大于 f 取正态分布时的 β 值,以葛洲坝工程工况 1 为例,增大幅度约 33%。④本文工程采用抗剪断公式与抗剪公式计算所得的安全系数如表 4 和表 5 所示。从表 4 和表 5 可以看出,当滑动面的 c 值较低时,2 种公式计算得到的 k' 和 k 相差不大,如葛洲坝, $k>1$,而 k' 远小于 3.0。随着滑动面 c 值的增加, k' 和 k 相差逐步

表 5 葛洲坝抗滑稳定计算成果

工况	滑面	抗剪强度		抗剪断强度		安全系数		β			
		f	c/kPa	f'	c/kPa	k	k'	正态分布		对数正态	
								$V_f=0.2$	$V_f=0.1$	$V_f=0.2$	$V_f=0.1$
1	202 泥化夹层	0.15	0	0.188	5	1.34	1.65	2.52	4.13	3.03	4.85
	抗力体滑出面	0.35	0	0.350	0						
2	202 泥化夹层	0.16	0	0.198	5	1.38	1.71	2.64	4.40	3.24	5.26
	抗力体滑出面	0.35	0	0.350	0						
3	202 泥化夹层	0.17	0	0.213	5	1.43	1.80	2.81	4.78	3.53	5.84
	抗力体滑出面	0.35	0	0.350	0						
4	202 泥化夹层	0.18	0	0.223	5	1.47	1.843	2.91	5.00	3.71	6.21
	抗力体滑出面	0.35	0	0.350	0						

加大,如官地, k' 为3.0左右时, k 为1.6左右。 k' 和 k 均满足规范规定的允许安全系数取值3.0和1.14。因此,当坝基存在软弱夹层时,对于不同的地质条件,应采用不同的计算公式。当滑动面 c 值较低时,采用抗剪公式较合适,当滑动面 c 值较高时,采用抗剪断公式较合适。

3 结 论

a. 采用SL319—2005《混凝土重力坝设计规范》和DL5108—1999《混凝土重力坝设计规范》所建议的坝基岩体力学参数,都能得到规范规定的安全系数,并在相同坝高、相同工况条件下,SL319—2005比DL5108—1999所取计算参数大20%,计算得到的 β 值大10%~13%。

b. 考虑随机变量和分布的再生性质、安全系数和可靠度指标的拟合程度,建议 c 和 f 的概率分布都选择对数正态分布为宜。

c. 同一工程同一工况条件下, f 变异系数取值对于可靠度指标的计算结果影响明显;变异系数减少50%,其可靠度指标增加60%。

e. 对于抗剪断强度公式和抗剪强度公式算出的可靠度指标 β 值差异很大,建议坝基潜在滑移面由硬性结构面和岩桥组成时,按抗剪断公式进行抗滑稳定计算较合适;当坝基中存在着连续分布的软弱结构面(单滑面或双滑面均为软弱结构面),且结构面强度参数较低,采用抗剪断公式难以满足要求时,采用抗剪公式计算较合适。

参考文献:

- [1] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等. 岩质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:2016-2018.
- [2] 陈祖煜,陈立宏,孙平. 非线性强度指标边坡稳定安全系数取值标准的研究[J]. 水力发电,2004,30(2):17-20. (CHEN Zuyu, CHEN Lihong, SUN Ping. An investigation on the allowable factors of safety in slope stability analysis using nonlinear strength parameters[J]. Hydropower,2004,30(2):17-20. (in Chinese))
- [3] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003:273-306.
- [4] 戴会超,苏怀智. 三峡大坝深层抗滑稳定研究[J]. 岩土力学,2006,27(4):643-647. (DAI Huichao, SU Huaizhi. Stability against sliding in intake dam section of Yangtze River Three Gorges Project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(4):643-647. (in Chinese))
- [5] 葛修润,任建喜,李春光,等. 三峡左厂3#坝段深层抗滑稳定三维有限元分析[J]. 岩土工程学报,2003,25(4):389-394. (GE Xiurun, REN Jianxi, LI Chunguang, et

- al. 3D-FEM analysis of deep sliding stability of 3# dam foundation of left power house of the Three Gorges Project [J]. Geotechnical Engineering, 2003, 25 (4): 389-394. (in Chinese))
- [6] 徐千军,李旭,陈祖煜. 百色水利枢纽主坝坝基三维抗滑稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(3):533-538. (XU Qianjun, LI Xu, CHEN Zuyu. Three-dimensional stability analysis of dam foundation of baise hydro-junction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 533-538. (in Chinese))
- [7] 林伟平. 葛洲坝基岩202号泥化夹层强度选取的探讨[J]. 水利学报,1982(10):68-72. (LIN Weiping. Gezhouba Dam bedrock 202 mud of interlayer strength selection [J]. Journal of Water Resources, 1982(10): 68-72. (in Chinese))
- [8] 涂劲,周立本. 重力坝深层抗滑稳定研究[J]. 水利学报,2003(10):96-100. (TU Jin, ZHOU Liben. Gravity dam stability against sliding [J]. Hydraulic Engineering, 2003(10):96-100. (in Chinese))
- [9] 田野. 葛洲坝水利枢纽大江岩体力学性质报告[R]. 武汉:长江科学院,1981.
- [10] 唐成建,张全,潘杰. 武都水库大坝河床坝基深层抗滑稳定分析[J]. 四川水利,2007,28(6):34-38. (TANG Chengjian, ZHANG Quan, PAN Jie. Analysis of stability against sliding for deep slide of bed dam base in Wudu Reservoir [J]. Sichuan Water, 2007, 28(6): 34-38. (in Chinese))
- [11] 彭明亮. 武都水库坝址区岩体力学特性试验研究[J]. 四川水力发电,2003,22(2):45-46. (PENG Mingliang. Experiment study on rock mechanical property in dams site area at Wudu Reservoir [J]. Sichuan Hydropower, 2003, 22(2): 45-46. (in Chinese))
- [12] 苏怀智,刘红萍. 高重力坝抗滑稳定安全度分析[J]. 水利水电科技进展,2011,31(4):20-23. (SU Huaizhi, LIU Hongping. Stability safety degree against sliding in high gravity dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 20-23. (in Chinese))

(收稿日期:2013-11-13 编辑:胡新宇)

