

重力坝抗滑稳定设计表达式及分项系数研究

常晓林¹, 黄东军², 蒋春艳¹, 曹去修³

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014;
3. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 对电力行业现行重力坝规范中的抗滑极限状态设计方法进行了探讨, 通过对传统刚体极限平衡法的剖析, 明确了极限状态设计中作用和抗力函数的表达形式及矢量方向, 提出了一种新的等 K' 法, 使坝基双滑面上下游块体具有同等安全系数和同等可靠概率的内涵。根据对多组方案可靠指标的试算比较, 提出了具有定量标准的安全系数 K' 的计算公式及相应的允许指标, 建议了一套相应分等分级的分项系数, 并对其合理性进行了验证。

关键词: 混凝土重力坝; 抗滑稳定; 可靠度; 等安全度; 分项系数

中图分类号: TV64

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)08-1219-05

作者简介: 常晓林(1963-), 男, 湖北随州人, 教授, 主要从事高坝结构设计理论研究。E-mail: changxl@whu.edu.cn。

Researches on expression and partial coefficients of anti-sliding stability of gravity dams

CHANG Xiao-lin¹, HUANG Dong-jun², JIANG Chun-yan¹, CAO Qu-xiu³

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. East China Investigation and Design Institute, Hangzhou 310014, China; 3. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The wedge stability analysis method specified in the Gravity Dam Design Code of China was discussed. Based on the mechanical mechanism of the traditional rigid limit equilibrium method, the correct expressions of action and resistance were deduced and the directions of vectors were presented. A new approach of equal safety degree was proposed for the calculation of reliability index of gravity dams. Then, a safety formula and its allowable index were presented, and a set of corresponding partial coefficients, whose rationality were proven were also proposed.

Key words: concrete gravity dam; anti-sliding stability; reliability; equal safety degree; partial coefficient

0 引言

重力坝基础抗滑稳定是一个传统课题, 目前的设计主要以刚体极限平衡法为准。以往刚体极限平衡法安全度多以定值安全系数取值, 以同类工程类比来进行判断分析。现行的电力行业标准《混凝土重力坝设计规范》^[1]采用了与此不同的设计思想: 基于国家标准《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》^[2]对结构可靠度的要求, 该规范以分项系数作为概率极限状态设计实用方法, 对以往的经验性定值安全系数进行套改, 据此提出了混凝土重力坝典型的单、双滑面深层抗滑稳定计算公式和设计安全指标。

规范颁布后, 针对规范给出的深层抗滑稳定设计验算式和设计参数, 一些设计单位和研究者提出了不同的看法: ①结构荷载中的作用和抗力是无法截然分开的^[3]; ②结构承载能力验算的表达式中作用和抗力

中的力均为向量, 无法直接比较大小^[3]; ③采用不等式, 无法进行参数敏感性研究和优化设计, 没有提出评价安全度的定量标准^[3]; ④设计表达式抗力、作用转化为了水平方向, 滑动机理不明确^[4]; ⑤建议由ABD、BCD块各自的抗力、作用函数分别构成极限状态方程, 采用等 K 法的思想, 以前后两个块体安全储备程度等同的原则进行迭代计算^[4]; ⑥坝体的抗滑稳定性必须沿已知的滑动面方向验算, 则极限状态方程应该由沿主滑面的抗力和作用函数表达式来构成^[5]。

本文将针对这些疑问, 综合分析各方观点, 以典型的双斜滑动面模型作为讨论计算的基本剖面, 通过多种计算方案对抗滑稳定设计式以及相应分项系数进行探讨和合理的改进。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50579055)

收稿日期: 2006-09-25

1 关于分项系数实用设计方法的应用

坝基稳定问题总是数据相对有限, 且存在较大随机性, 传统的单一安全系数 K 以一个倾向保守的 3.0~3.5 包括所有计算设计中的模糊不确定因素和失误可能, 但这个数值本身并不能表达坝基实际可靠度和失事风险, 其计算公式中隐含的摩擦系数和凝聚力对稳定具有同等贡献这一点, 也是较为明显的缺陷。某些存在显著软弱夹层的实际工程中, 传统安全系数法往往难以达到要求, 基础加固处理不仅工程量巨大, 加固设计也很难过关, 如伊泰普大坝坝基处理和龙羊峡拱坝坝肩处理^[6], 最终这两个工程不得不通过专项研究, 采取了分项系数原则完成了基础稳定加固的校核。

分项系数极限状态设计避免了直接计算失效概率的繁琐过程, 前苏联 20 世纪 80 年代的水工结构设计规范、90 年代加拿大地基基础设计手册以及我国水工抗震手册都纳入了这一实用方法。由于系统利用了各变量的二阶矩信息, 相比较以往的单一安全系数方法 (主要利用均值信息) 无疑是技术上的一大进步, 也获得了大多数同行的认可^[7]。现阶段我们还很难准确计算出结构失效概率, 分析系数设计法与传统定值系数法必须互补共存, 但随着工程数据的积累, 它不失为一种可行的趋势。

2 抗滑稳定极限状态方程

现行分项系数设计式是由传统刚体极限平衡法套改而来, 传统方法主要有被动抗力法、剩余推力法、等 K 法 3 种。回顾一下这 3 种方法, 我们可以知道, 传统刚体极限平衡法的物理意义是假定滑动面岩层达到极限状态, 因此, 沿已知的滑动面方向验算坝体的抗滑稳定性是比较符合工程人员习惯的。第 1 节列出的各文献对规范建议公式的矢量方向问题都有所提及, 这些意见是合理的。

为此, 分别对块体 ABD 和 BCD 建立极限状态方程:

$$ABD \text{ 块: } Z_1 = R_1(\bullet) - S_1(\bullet), \quad (1)$$

$$R_1(\bullet) = f_1[(\sum W + G_1) \cos \alpha - \sum P \sin \alpha - Q \sin(\varphi - \alpha) + U_3 \sin \alpha - U_1] + C_1 A_1, \quad (2)$$

$$S_1(\bullet) = (\sum W + G_1) \sin \alpha + \sum P \cos \alpha - Q \cos(\varphi - \alpha) - U_3 \cos \alpha, \quad (3)$$

$$BCD \text{ 块: } Z_2 = R_2(\bullet) - S_2(\bullet), \quad (4)$$

$$R_2(\bullet) = f_2[G_2 \cos \beta + Q \sin(\varphi + \beta) + U_3 \sin \beta - U_2] + C_2 A_2, \quad (5)$$

$$S_2(\bullet) = Q \cos(\varphi + \beta) - G_2 \sin \beta + U_3 \cos \beta, \quad (6)$$

BD 面上的抗力夹角为已知值, 抗力 Q 值在传统等 K 法中由 $K_1 = K_2$ 求得。基于这一思想的启发, 本文提出了双滑面等 K' 的计算方法。

定义安全系数 K' 如式 (7) 所示, 滑动块体与抗力体具有同等的安全度 K' , 此时滑动体系达到极限平衡, 即

$$K'_i = \frac{R_i(\frac{f_k}{\gamma_m}, \alpha_k)}{\gamma_0 \gamma_{d1} \psi S_i(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k)}, \quad (7)$$

$$K'_1 = K'_2, \quad (8)$$

通过上式可以求解得到 Q 值。其中 $\gamma_0, \gamma_{d1}, \psi, \gamma_m, \gamma_G, \gamma_Q$ 为分项系数, 其取值将在第 6 节详细分析, 此处假定为已知定值。对于同一坝基断面 $\gamma_0, \gamma_{d1}, \psi$ 三值数值相同, 则式 (8) 可简化得

$$\frac{R_1(\frac{f_k}{\gamma_m}, \alpha_k)}{S_1(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k)} = \frac{R_2(\frac{f_k}{\gamma_m}, \alpha_k)}{S_2(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k)}. \quad (9)$$

由于出现了式 (1)、(4) 两个极限状态方程, 则存在两个可靠度指标 β_{z1} 和 β_{z2} , 理论上当抗力 Q 夹角明确后, 坝基整体滑动体系已成为静定结构, 整个体系的可靠度应该是唯一的, 即存在 $\beta_{z1} = \beta_{z2} = \beta$ 。据此, 在可靠度指标计算过程中, 可以将两个滑动面等 β 作为约束条件, 推求出抗力 Q , 通过迭代求解 $\beta_{z1} = \beta_{z2}$ 。此时, 该指标 β 即为整个坝基体系稳定的可靠指标值。

3 计算剖面和基本变量参数

基本计算剖面如图 1 所示。

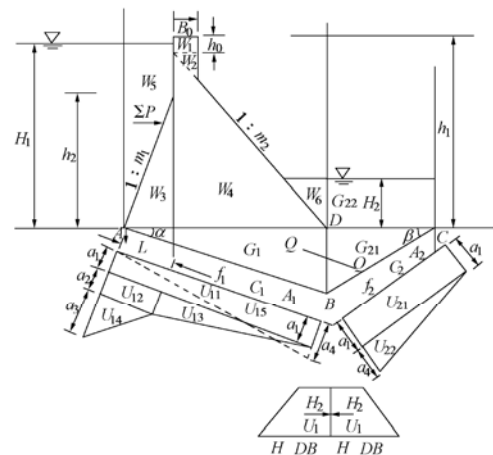


图 1 坝基典型双滑面示意图

Fig. 1 Typical double slide mode of a gravity dam

计算了坝高为 190, 150, 90, 50 m 四种情况, 上游边坡取 1:0, 1:0.05, 1:0.1, 下游边坡同一坝高对应最低级别基础时下游边坡。主滑动面 AB 与水平夹角 α 研究了 14.04° 和 20° 两种情况, ABD 块和 BCD 块交接面 BD 之间合力夹角 φ 研究了 0° 的情况。基本变量参数见表 1。

表 1 基本变量参数特性
Table 1 Characteristics of basic variables

变量名称	级别	均值	变异系数	概率分布模型
重力坝水深/m	上游	正常蓄水位	0.0	正态
	下游	0.0	0.0	正态
软弱夹层摩擦系数		0.4	0.3	正态
重力坝基础岩石摩擦系数	I	1.2	0.24	正态
	II	1.0	0.26	正态
	III	0.8	0.26	正态
凝聚力软弱夹层/MPa		0.07	0.4	对数正态
重力坝基础岩石凝聚力/MPa	I	1.2	0.40	对数正态
	II	0.9	0.42	对数正态
	III	0.6	0.44	对数正态
坝体混凝土重度/($\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)		2.4	0.02	正态
基础岩石重度/($\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)		2.7	0.02	正态
排水孔处扬压力系数		0.25	0.3	正态

等 K' 法只是满足静力平衡关系, 其安全系数对 BD 界面上夹角 φ 的敏感度很高。总体上来说, 在 BD 界面上存在非水平向作用力是符合实际的, 但夹角数值一直难以得到有效验证, 国内的设计经验通常偏于安全取为 0° 。对于提高抗滑稳定的加固措施, 本文以提高软弱夹层的抗剪强度指标和下游压重来模拟。可靠度指标的计算采用一次二阶矩法, 滑出面与水平向夹角 β 以对应于等 K' 法最小安全系数的角度取值, 由程序自动搜索得到。

4 可靠度计算成果初步分析

多组计算成果表明, 坝基可靠指标受基岩类别影响明显, 抗力体强度增加能有效提高坝基体系可靠度(坝基岩体加固的标准是以达到传统等 K 法安全系数 3.0 为准)。由于计算方案较多, 计算成果难以一一列出, 现选用 190 m 高重力坝, 计算得到的可靠指标绘入图 2, 3 中。

上游边坡 m_1 对可靠指标的影响较小, 随着坡度变缓, 可靠指标稍有降低。 α 角较小, 即倾向下游的软弱层较缓时, 可靠度比较低。对于 190 m 高坝的 18 种计算情况, 未加固时可靠指标范围在 0.401~2.909, 加固后坝基可靠指标为 3.936~4.971。

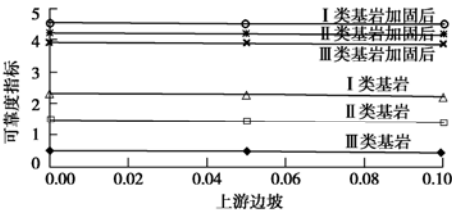


图 2 α 角为 14.04° 时重力坝坝基加固前后稳定可靠指标
Fig. 2 Reliability indices of the gravity dam before and after reinforcement ($\alpha = 14.04^\circ$)

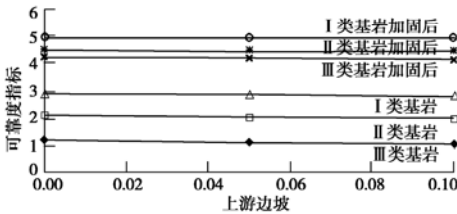


图 3 α 角为 20° 时重力坝坝基加固前后稳定可靠指标
Fig. 3 Reliability indices of the gravity dam before and after reinforcement ($\alpha = 20^\circ$)

此外, 从多组计算方案还可以看出, 抗滑稳定可靠指标与等 K 法安全系数的变化趋势是一致的。对应于传统等 K 法同样的安全系数如 3.0, 低坝所具有的可靠指标远远高于高坝, 也就是说传统安全系数法对于低坝而言安全度储备有余, 而对于高坝则可能不足。

《水工统标》建议的承载能力极限状态目标可靠指标为: I 级、II 级、III 级大坝目标可靠指标 β 分别为 4.2, 3.7, 3.2, 当规定传统安全系数达到 3.0 时, 对于 190, 150, 90, 50 m 坝高计算得到的可靠指标基本都达到了要求, 说明水工统标建议的目标可靠指标是可以适用于深层抗滑稳定的。

5 混凝土重力坝深层抗滑稳定极限状态设计表达式和分项系数

《水工统标》规定, 水工结构承载能力极限状态基本组合的设计式可统一写为

$$\gamma_0 \psi S(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k) \leq \frac{1}{\gamma_{d1}} R(\frac{f_k}{\gamma_m}, \alpha_k) \quad (10)$$

式 (10) 可变为

$$\frac{R_i(\frac{f_k}{\gamma_m}, \alpha_k)}{\gamma_0 \gamma_{d1} \psi S_i(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k)} \geq 1 \quad (11)$$

可以发现不等式左边即为上文中定义的安全系数 K' ,

则可以得到设计允许值为 $K' \geq 1$ 。其中 $R_1()$, $S_1()$, $R_2()$, $S_2()$ 表达式分别见式 (2)~(6), Q 由 $K'_1 = K'_2$ 求得。

本文采用试算法选定分项系数, 计算方案主要针对正常持久工况进行研究, 最终计算得到的作用和材料分项系数与现行规范推荐值一致, 而结构系数与之不同。

设置结构系数 γ_{dl} 的目的是使按极限状态设计式设计的重力坝的可靠度水平与目标可靠指标总体上误差最小。以 150 m 高坝为例, 结构系数详细计算情况见表 2。

表 2 结构系数计算表 (150 m 坝高)

Table 2 Coefficients of the limit equilibrium of the gravity dam

序号	以目标可靠指标 β_T 进行设计			定值分项系数设计		
	目标可靠指标	满足 β_T 的结构系数	相当于等 K 法安全系数	结构系数	计算可靠指标	相当于等 K 法安全系数
	β_T	γ_{dl}			β_{cal}	
1	4.2	1.127	3.100	1.2	4.330	3.298
2	4.2	0.975	2.731	1.2	4.658	3.349
3	4.2	0.876	2.469	1.2	5.456	3.378
4	4.2	1.013	2.792	1.2	4.577	3.309
5	4.2	0.913	2.549	1.2	4.900	3.355
6	4.2	0.875	2.429	1.2	5.337	3.367
7	4.2	1.144	3.133	1.2	4.298	3.285
8	4.2	0.987	2.753	1.2	4.625	3.334
9	4.2	0.890	2.481	1.2	4.938	3.334
10	4.2	1.036	2.816	1.2	4.524	3.263
11	4.2	0.929	2.556	1.2	4.849	3.305
12	4.2	0.880	2.428	1.2	5.311	3.334
13	4.2	1.176	3.168	1.2	4.241	3.233
14	4.2	1.011	2.781	1.2	4.568	3.288
15	4.2	0.896	2.498	1.2	4.903	3.325
16	4.2	1.048	2.844	1.2	4.494	3.255
17	4.2	0.932	2.571	1.2	4.821	3.305
18	4.2	0.879	2.424	1.2	5.311	3.327

根据上文中拟定的 72 种计算剖面和设计式 (11), 计算出每一种情况的结构系数 γ_{dl} , 列于表 2 第 (2) 栏, 及相当于等 K 法的安全系数 (此时恰好满足目标可靠指标)。通过对计算成果的分析, 针对不同等级的大坝选定了不同的定值结构系数, I 级 γ_{dl} 为 1.20, II 级 γ_{dl} 为 1.10, III 级 γ_{dl} 为 1.0。

结构系数确定后, 利用已选定的定值分项系数进行试设计, 可靠度校核结果列于表 2 第 (6) 栏, 同时用等 K 法校核的安全系数计算成果也列于第 (7) 栏。

从计算结果可知, 190 m 坝高剖面按定值分项系数设计法, 计算可靠指标为 4.004~5.160, 有三种情况计算可靠指标小于 4.2, 最小为 4.004, 按照计算可靠指标小于目标可靠指标的差值不超过 0.25 的标准, 这几种情况是满足要求的。等效等 K 法安全系数在 3.104~3.208 之间; 坝高 150 m, 计算可靠指标为 4.241~5.456, 均大于目标可靠指标 4.2, 等效等 K 安

全系数在 3.233~3.378 之间; 坝高为 90 m, 计算可靠指标为 4.397~5.540, 均大于目标可靠指标 3.7, 等效等 K 安全系数在 2.971~3.079 之间; 坝高 50 m, 计算可靠指标为 4.012~4.729, 均大于目标可靠指标 3.2, 等效等 K 安全系数在 2.660~3.274 之间。

根据以上分析, 采用上述定值分项系数设计时, 均能满足目标可靠指标的要求, 虽然低坝有部分情况等 K 法安全系数低于 3.0, 但计算可靠指标已超过目标值, 已经具有足够的安全度了。

6 本文建议的设计表达式及相应分项系数

综合分析后本文提出, 对基本组合, 采用下列基于等安全度的极限状态设计式^[5, 8]:

$$K' = \frac{R(\frac{f_k}{r_m}, \alpha_k)}{\gamma_0 \gamma_{dl} \psi S(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k)} \quad (12)$$

$K' \geq 1$ 即为满足设计抗滑稳定要求。其中 γ_{dl} 为承载能力极限状态基本组合的结构系数, 对应于结构安全级别分别为 I, II, III 的结构, 分别取为 1.2, 1.1, 1.0; 其他分项系数和参数详见规范^[1], 与之一致。

与现行规范相比, 本文提出的分项系数设计表达式区别在于: 设计表达式以定值方式给出, 避免了不等式不便于定量比较的问题; 通过 γ_0 , γ_{dl} , ψ 这几个分项系数对应于不同安全级别的不同取值, 实现了大坝安全系数的分等级; 给出了合理的作用和抗力函数表达式, 解决了函数矢量方向问题; 提出结构系数分别对应于 I, II, III 级的结构取值为 1.2, 1.1, 1.0, 而规范为统一取值 1.2, 这样对低坝而言经济性更强。本文所做的这些修正较好地解决了第一节所列出的各方意见。

7 两个问题的补充

7.1 校核洪水位的偶然状况下的深层抗滑稳定

上文提出的抗滑稳定设计式和相应分项系数是由正常持久工况校准得到的, 重力坝断面设计一般要求以正常持久工况作为控制工况, 短暂状况、偶然状况作为复核。由于偶然状况出现几率很小, 目标可靠度要求有所降低。针对上文拟定的 72 种计算方案的校核洪水位工况进行了校核计算, 计算成果表明: 在这一套分项系数框架下, 若以 3.7, 3.2, 3.2 分别作为对应 I, II, III 级结构的偶然工况目标可靠度, 各计算方案的计算可靠指标都已达到要求。因此可以认为这一套分项系数同样适用于偶然工况组合。

7.2 与传统方法相比重力坝断面设计的变化

通过对各计算情况及工程实例的验算, 根据本文提出的设计式进行重力坝断面设计, 总体来说, 断

面设计面积同过去的传统方法比较接近。

而对于已经确定的同一断面, 分别采用传统方法与本文建议的等 K' 法进行抗滑稳定分析, 结果表明: 在上文拟定的 72 种坝体断面和参数取值情况下, 与传统等 K 法相比, 本文推荐采用的等 K' 法设计验算式, 对于高坝的坝基深层稳定校核略严, 加固工程量稍大; 而对于中、低坝校核相对宽松, 加固工程量减少较多。部分成果如表 3 所示 (加固措施简化为洞塞处理)。当然, 由于计算断面过于简化, 参数取值保守, 这种比较并不能代表所有重力坝工程个案。在参数取值稍高或者抗力夹角有一定角度的情况下, 本文采用的安全系数验算式过关更为容易一些。

表 3 150 m 坝高的两种校核方法的比较

Table 3 Comparison between two methods ($h_1 = 150$ m)

序号	未加固 K	$n_1 = \frac{K'}{3.0}$	未加固 K'	$n_1 = \frac{K'}{1.0}$	洞塞长度/m	
					$K=3.0$	$K'=1$
1	1.134	0.378	0.464	0.351	55.351	63.628
2	1.401	0.467	0.561	0.425	49.206	59.095
3	1.667	0.556	0.671	0.508	42.760	53.747
4	1.292	0.431	0.537	0.407	58.416	68.195
5	1.618	0.539	0.656	0.497	48.949	60.486
6	1.943	0.648	0.789	0.598	38.975	51.333

8 结 论

在文献[8]的基础上, 本文参考相关文献提出的意见, 针对重力坝深层抗滑稳定典型双滑面模式进行了可靠度分析和分项系数的研究, 得出以下结论。

(1) 基于块体 ABD 和块体 BCD 抗滑储备程度相当, 提出了新的等 K' 法这一概念, 实现了两块体等安全系数并等可靠指标的要求, 从而获得了坝基体系的整体可靠度指标。

(2) 本文给出了合理的作用和抗力函数计算式, 提出了具有定量标准的安全系数计算公式, 并给出相应的允许指标。经过多次试算优化, 建议了一套分等分级的分项系数 (含结构系数), 可用于重力坝深层抗滑稳定极限状态设计中。这些修正较好地解决了第一节所列出的各文献对现行规范提出的意见。

(3) 在已有的统计参数基础上, 现有的自变量参数取值已是偏于保守, 且这一极限状态设计式是由传统的单一安全系数法等同的可靠度套改而来, 因此不存在基础不可靠, 比单一安全系数法偏于危险的问题。此外, 传统的等 K 法安全系数存在着对于低坝安全储备过高, 而对于高坝安全储备不足的问题, 相对的, 针对不同等级大坝实行分级分项系数的极限状态设计方法更为科学合理。

参考文献:

[1] GB 50199—94 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994. (GB 50199—94 Unified

design standard for reliability of hydraulic engineering structures[S]. Beijing: China Planning Press, 1994. (in Chinese))

- [2] 陈祖煜, 陈立宏. 对重力坝设计规范中双斜面抗滑稳定分析公式的讨论意见[J]. 水力发电学报, 2000(2): 101 - 108. (CHEN Zu-yu, CHEN Li-hong. Discussions on the wedge stability analysis method specified in the Gravity Dam Design Code[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000(2): 101 - 108. (in Chinese))
- [3] 曹去修, 柏宝忠, 王贵明. 重力坝深层抗滑稳定极限状态设计式探讨[J]. 人民长江, 2003(7): 40 - 42. (CAO Qu-xiu, BO Bao-zhong, WANG Gui-ming. Discussions on the limit equilibrium check formula of the gravity dam[J]. Renming Changjiang, 2003(7): 40 - 42. (in Chinese))
- [4] 周 伟, 常晓林, 袁林娟. 对重力坝设计规范中双斜面抗滑稳定的补充讨论[J]. 水力发电学报, 2005, 3(5): 95 - 99. (ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, YUAN Lin-juan. Supplement discussion on the wedge stability analysis method specified in the Gravity Dam Design Code[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 3(5): 95 - 99. (in Chinese))
- [5] 李 璠, 龙云霄. 重力坝、拱坝基础岩体抗滑稳定分析中的一些问题的探讨[J]. 水利学报, 2000(8): 39 - 45. (LI Zan, LONG Yun-xiao. Discussion on sliding stability analysis of dam foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(8): 39 - 45. (in Chinese))
- [6] 黄东军, 聂广明. 重力坝深层抗滑稳定安全评价若干问题的思考[J]. 水力发电学报, 2005, 3(4): 90 - 94. (HUANG Dong-jun, NIE Guang-ming. Research on several problems in the safety evaluation of stability against deep slide of gravity dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 3(4): 90 - 94. (in Chinese))
- [7] 蒋春艳, 常晓林, 周 伟. 用于重力坝抗滑稳定分析的分项系数有限元方法[J]. 水力发电学报, 2006, 4(2): 16 - 20. (JIANG Chun-yan, CHANG Xiao-lin, ZHOU Wei. Partial coefficient FEM for gravity dam anti-sliding stability analysis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 4(2): 16 - 20. (in Chinese))
- [8] 电力部上海、华东勘测设计研究院. 混凝土重力坝深层抗滑稳定可靠度分析和分项系数研究专题报告[R]. 1996. (Shanghai Investigation and Design Institute, East China Investigation and Design Institute. Special report on the anti-sliding reliability and partial coefficient analysis of gravity dam[R]. 1996. (in Chinese))