

基于分项系数和并行组合模拟退火算法的重力坝抗滑稳定有限元分析

吴余生, 高志芹

(中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 昆明 650051)

摘要: 本文将分项系数引入重力坝坝基抗滑稳定有限元分析中, 将影响坝基抗滑稳定的荷载、材料参数等基本变量的不确定性因素以分项系数的形式计入有限元计算中, 并推导出与分项系数相匹配的抗滑稳定安全系数和相应的稳定判断准则。最后基于该方法计算的应力场, 应用并行组合模拟退火算法搜索坝基最危险滑动模式及相应的最小安全系数。通过工程实例分析, 证明该方法是可行和实用的。

关键词: 水工结构; 抗滑稳定分析; 有限元法; 重力坝; 分项系数; 最危险滑动模式

中图分类号: TV64

文献标识码: A

FEM analysis of anti-sliding stability of gravity dams based on partial coefficient and parallel recombination simulated annealing algorithm

WU Yusheng, GAO Zhiqin

(Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, CHECC, Kunming 650051)

Abstract: Partial coefficient is introduced into the anti-sliding stability analysis of gravity dams in this paper. The uncertain complication of basic variables such as loads and material parameters is accounted into the FEM analysis as partial coefficients. Based on these coefficients, the anti-sliding factor of gravity dams and the corresponding stability criterion are derived. Finally, based on the stress fields of FEM analysis, the most dangerous sliding mode and the minimum anti-sliding factor are searched by parallel recombination simulated annealing algorithm. The feasibility and practicality of the proposed method are demonstrated by applying the anti-sliding stability analysis to an actual engineering case.

Key words: hydraulic structure; anti-sliding stability analysis; finite element method; gravity dam; partial coefficient; the most dangerous sliding mode

重力坝坝基抗滑稳定分析评价是重力坝设计中的一项重要内容, 关系到大坝的整体稳定安全性, 历来倍受相关设计人员和研究者的关注。目前, 有限单元法已普遍应用于重力坝抗滑稳定分析中, 它能够模拟坝体和坝基材料的非线性本构关系, 考虑施工过程中和各种荷载作用, 能给出坝体及坝基各部位的应力、位移和破坏形态。有限元法具有一些明显的优点, 但缺乏与之相适应的标准。建立一套简洁、可操作性强的评价标准, 使坝工设计人员能够便捷地应用有限元法分析评价坝基稳定性是一个急待解决的难题。本文基于分项系数对这一问题进行初步探讨。

现行电力行业规范^[1]规定采用概率极限状态设计原则, 以分项系数极限状态设计表达式进行重力坝抗滑稳定分析, 但作用效应和抗力效应的计算仍然采用刚体极限平衡法, 没有提出针对有限元法的极限状态验算表达式。本文尝试将分项系数引入坝基抗滑稳定有限元分析中, 定义基于分项系数的抗滑稳定安全系数, 以该安全系数为目标函数, 应用并行组合模拟退火算法搜索坝基最不利滑动模式及相应的最小安全系数, 最后通过工程实例验证该方法的可行性。

收稿日期: 2008-01-31

作者简介: 吴余生(1980-), 男, 硕士, 工程师. E-mail: yushwu@163.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 安全系数的定义

按照现行电力行业规范^[1]要求, 核算坝基浅层及深层抗滑稳定的极限状态表达式为(基本组合):

$$\gamma_0 \phi S(\gamma_G G_k, \gamma_Q Q_k, \alpha_k) \leq \frac{1}{\gamma_{dl}} R\left(\frac{f_k}{\gamma_m}, \alpha_k\right) \quad (1)$$

式中, 各符号意义详见规范^[1]。

该方法以概率极限状态分项系数的形式计入各种荷载、材料参数和设计状态的不确定性因素。概率极限状态分项系数是根据目标可靠度和基本变量(荷载、材料性能等)的统计参数计算的, 取值比较科学^[2]。但作用效应函数 $S(\bullet)$ 和抗滑稳定抗力函数 $R(\bullet)$ 的计算式是按照极限平衡法导出的。下面介绍在有限元分析中基于分项系数的抗滑稳定安全系数。

分析滑动面上的作用效应和抗力, 作用效应函数 $S(\bullet)$ 表征滑动面上的破坏能力(滑动力)表达如下:

$$S(\bullet) = \int_A \tau_s dA \quad (2)$$

采用莫尔-库仑准则, 抗力函数 $R(\bullet)$ 表征滑动面上的抵抗能力(抗滑力)表达如下(抗剪断强度):

$$R(\bullet) = \int_A \sigma_n \frac{f'}{\gamma_{mf}} dA + \int_A \frac{c'}{\gamma_{mc}} dA \quad (3)$$

因此, 式(1)可表达为:

$$\gamma_0 \phi \int_A \tau_s dA \leq \frac{1}{\gamma_{dl}} \left[\int_A \sigma_n \frac{f'}{\gamma_{mf}} dA + \int_A \frac{c'}{\gamma_{mc}} dA \right] \quad (4)$$

式中: γ_{mf} 、 γ_{mc} 分别为材料摩擦系数和粘聚力的分项系数, f' 、 c' 为材料抗剪断强度参数。 σ_n 、 τ_s 分别为滑动面上各点的法向应力和切向应力。式(4)变形可得:

$$\frac{\int_A \sigma_n \frac{f'}{\gamma_{mf}} dA + \int_A \frac{c'}{\gamma_{mc}} dA}{\int_A \tau_s dA} \geq \gamma_0 \phi \gamma_{dl} \quad (5)$$

由抗滑稳定安全系数

$$K = \frac{\int_A \sigma_n \frac{f'}{\gamma_{mf}} dA + \int_A \frac{c'}{\gamma_{mc}} dA}{\int_A \tau_s dA} \quad (6)$$

可得:

$$K \geq \gamma_0 \phi \gamma_{dl} = [K_L] \quad (7)$$

式中, γ_0 、 ϕ 、 γ_{dl} 分别为结构重要性系数、设计状态系数和基本组合结构系数。它为同时计入荷载、材料参数和设计状态的不确定性因素组合情况下, 坝基系统极限状态下抵抗能力与破坏能力的比值。

这样, 在抗滑稳定有限元分析中, 可以用一种基于分项系数的安全系数来衡量重力坝坝基的抗滑稳定性能。具体方法为: 将作用于坝体坝基系统的各种荷载的标准值乘以荷载分项系数, 其结果作为有限元法的荷载计算值; 同时将材料参数的标准值除以材料分项系数, 其结果作为有限元法的材料参数计算值。在这套荷载和参数的组合下, 用有限元法计算坝体坝基系统的应力场, 然后用式(6)计算安全系数 K 值, 并用式(7)进行稳定判断, 如果 $K \geq \gamma_0 \phi \gamma_{dl}$ 则表明坝基抗滑稳定可满足规定的目标可靠度, 认为坝基满足抗滑稳定的要求。在抗滑稳定有限元分析中, 对各分项系数的取值, 目前还没有更多深入的研究, 暂可参照现行电力行业规范^[1]取值使用。

特别注意的是: 用式(6)计算安全系数时, 其中的应力成果必须是基于分项系数的有限元计算而得, 这样才能与式(7)的稳定判别准则相适应。而传统的常规有限元法分析坝基抗滑稳定时, 是用荷载和材料参数的标准值作为计算值输入计算应力场及抗滑稳定安全系数。因此, 二者的稳定判别准则是不一样的。

对于平面有限元分析, 式(6)表达为:

$$K = \frac{\int_l \sigma_n \frac{f'}{\gamma_{mf}} dl + \int_l \frac{c'}{\gamma_{mc}} dl}{\int_l \tau_s dl} \quad (8)$$

在实际工程中,往往要事先假定若干个可能的滑动模式,再计算各滑动模式的安全系数,安全系数最小者即为最危险滑动模式。这种事先假定滑动模式再试算寻找最小安全系数的方法受一些人为因素影响,有可能漏掉最危险滑动模式且费时。

近年来,人工智能方法(如遗传算法、模拟退火算法、人工神经网络等方法)迅速发展,具有高度非线性映射、自组织、自适应等优势,对解决局部或全局最优问题有更高的效率,为求解复杂系统优化问题提供通用框架。本文将应用并行组合模拟退火算法搜索坝基最危险滑动模式,下面简要介绍并行组合模拟退火算法的基本原理。

2 并行组合模拟退火算法

2.1 基本原理

1983年,Kirkpatrick等成功地将固体退火思想引入组合优化领域,提出一种全局最优化方法——模拟退火算法SA^[3,4](Simulated Annealing)。模拟退火算法用于优化问题的出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般优化问题的相似性,它能够以随机搜索技术从概率的意义上寻找目标函数的全局最优点。理论上已经证明,只要模拟足够充分,这种算法就能以概率1收敛于全局最优解。事实上对固体退火过程模拟得足够充分需要很长的时间,特别是对于自由度很多的目标函数来说,其退火收敛的过程很长,寻优的效率不高。为加速模拟退火算法收敛于全局最优解,可以借鉴遗传算法的内在并行性,从多个初始点开始并行模拟退火搜索。并行组合模拟退火算法PRSA(Parallel Recombination Simulated Annealing)就是借鉴遗传算法的内在并行性,在模拟退火算法中融入遗传算法的思想,即在模拟退火算法的运行过程中融入遗传算法中的群体和交叉的概念,从而并行组合模拟退火搜索,形成更有效率的全局最优化方法。

并行组合模拟退火算法的具体计算过程可分为以下一些步骤:

- (1) 将求解对象(群体)用一定的字符串编码表示,如二进制编码、十进制编码、实数编码等;
- (2) 随机产生若干个个体(初始解)构成初始群体 $P(0)$,以它作为当前群体,并计算个体的目标函数值。
- (3) 设置初始温度: $T \leftarrow T_0$,
- (4) 设置循环计数器初值: $r \leftarrow 1$;
- (5) 对当前群体 $P(t)$ 中的各个个体进行随机配对,对其中的一对个体组作如下处理:
 - ① 进行交叉和变异运算,由两个父代个体 p_1, p_2 生成两个子代个体 c_1 和 c_2 。
 - ② 对由父代个体和子代个体组成的两个个体组 p_1 和 c_1, p_2 和 c_2 ,以概率 ρ 接受父代个体为下一代群体中的个体,以概率 $1-\rho$ 接受子代个体为下一代群体中的个体。

其中,

$$\rho = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{f_p - f_c}{T}\right)} \quad (9)$$

式中, f_p 和 f_c 分别为父代个体和子代个体所对应的目标函数值。

- (6) 如果 $r <$ 终止步数 S ,则, $r \leftarrow r + 1$,并转向第(5)步;

(7) 如果未达到冷却状态,则进行退火降温: $T \leftarrow T(t)$,转向第(4)步,如果已达到冷却状态,则输出最优解,计算结束。

上述第(5)步中的交叉和变异运算分别采用单点交叉算子和高斯变异算子^[4],第(7)步中的退火降温方式采用快速退火降温方式,假定时刻 t 的温度用 $T(t)$ 表示,则:

$$T(t) = \frac{T_0}{1 + t} \quad (10)$$

2.2 目标函数

对于平面问题,将坝基滑动模式曲线用 n 个点离散,也就是将此 n 个点用直线或光滑的曲线连起来近似模拟此曲线,一旦连接的方式确定,在应力场已知的情况下,安全系数 K 即可表达成此 n 个控制点坐标的函数。采用分段线性来模拟任滑动模式曲线,即用直线段连接 n 个离散点近似表示坝基滑动模式曲线。在应力场已确定的条件下,优化搜索的目标函数[即抗滑稳定安全系数式(8)]可表示为控制点坐标的函数:

$$K = K(x_1, y_1, x_2, y_2 \dots x_n, y_n) \quad (11)$$

上式中的自变量序列 $x_1, y_1, x_2, y_2 \dots x_n, y_n$ (滑动模式控制点坐标序列)构成并行组合模拟退火算法中的群体,其

编码方式采用实数编码。

在具体优化过程中, 这 n 个控制点中有一些点可能只沿某一设定方向(如软弱夹层, 断层破碎带等)移动, 或者不规定方向任其自由移动, 也有一些点可能由于问题本身的要求可以固定。

2.3 交叉和变异运算

在并行组合模拟退火算法运行过程中, 对个体进行交叉运算和变异运算, 是为了丰富群体的多样性, 使算法更有效地跳出局部极值的陷阱, 收敛于全局最优解。本文采用单点交叉算子和高斯变异算子, 相关理论可参见文献[4]。交叉概率和变异概率的选取依不同的问题而异, 通常是根据经验结合实际优化问题进行试算而定。

2.4 最优保存策略

由于交叉、变异运算的随机性, 它们可能破坏当前群体中的优良个体, 这对算法的运行效率和收敛性都不利。可以采用最优保存策略来进行优胜劣汰操作, 即当前群体中目标函数值最小(当前最优)的个体不参与交叉和变异运算, 而用它替换本代群体中经过交叉和变异运算后所产生的目标函数值最大(当前最差)的个体。最优保存策略的相关理论和具体操作过程可参见文献[4]。

3 工程实例分析

下面以某大(1)型一等水电站的溢流坝段为例, 采用上述方法进行平面抗滑稳定分析, 采用基于分项系数的有限元法计算坝基应力场, 应用并行组合模拟退火算法搜索坝基最危险滑动模式及相应的最小安全系数。

3.1 计算荷载和材料参数

计算工况为正常工况: 上游正常蓄水位 365.00m, 下游水位 291.00m, 淤沙高程为 321.00m, 计算荷载包括坝体和坝基岩体的自重、静水压力、泥沙压力和渗透荷载作用, 参照《荷载设计规范》^[5] 要求, 各计算荷载考虑如下。

(1) 坝体和坝基岩体自重: 根据坝体和岩体容重计算。

(2) 水压力: 根据上游正常蓄水水位以面力形式施加: $\gamma_w \Delta h_i = 9.81 \Delta h_i$ 。

(3) 泥沙压力: 以面力的形式施加: $\gamma_s \Delta h_s = \gamma_{sb} \tan^2 \left[45^\circ - \frac{\phi}{2} \right] \Delta h_s = 5.633 \Delta h_s$ 。

(4) 渗透荷载: 根据工况给定的上下游水位值对计算模型进行有压渗流场计算, 得到坝体和基岩各结点的水头值, 由此计算出坝体和岩基单元所受的渗透力, 以体力形式施加。

坝体和坝基的材料参数见表 1。

表 1 坝体和坝基的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of the dam and its foundation

材料	物理力学参数					渗透系数 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
	容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	变形模量/ GPa	泊松比	强度参数		
				c'/MPa	$\tan \phi$	
坝体混凝土	24.00	22.00	0.167	1.30	1.27	3×10^{-7}
坝底与基岩的接触面(建基面)	24.00	22.00	0.167	1.10	1.10	3×10^{-7}
坝基岩体(微风化)	27.00	8.50	0.260	1.20	1.10	5×10^{-5}
软弱夹层	27.00	2.80	0.320	0.15	0.45	1×10^{-4}
大坝上游大断层(强风化)	27.00	0.80	0.270	0.02	0.25	1×10^{-2}
大坝上游大断层(微风化)	27.00	2.50	0.270	0.10	0.45	1×10^{-4}
灌浆帷幕	24.00	22.00	0.167	1.30	1.27	3×10^{-7}

3.2 抗滑稳定分析

按以下步骤计算(荷载计算值为荷载标准值乘以相应的荷载分项系数, 材料参数计算值为材料参数标准值除以相应的材料分项系数):

(1) 选取溢流坝段的典型剖面进行适当简化, 建立平面有限元模型, 如图 1 所示。

(2) 对计算模型进行渗流场的计算, 得到各结点的水头, 由此计算渗透荷载。

(3) 对计算模型施加计算荷载, 计算得到整个模型的应力场。

(4) 基于上述应力场应用并行组合模拟退火算法搜索坝基最危险滑动模式及相应的最小安全系数, 得到的最危险滑动模式如图 2 中的折线段 $A_1-A_2-A_3-A_4$ 相应的最小抗滑稳定安全系数为 1.95。

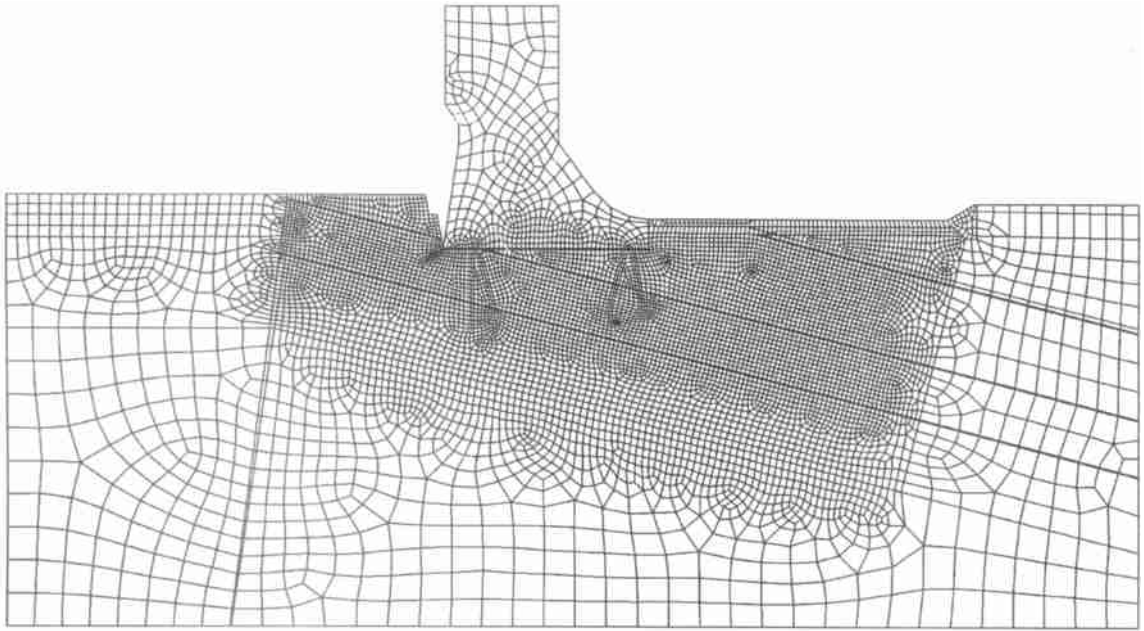


图1 溢流坝段剖面有限元网格

Fig. 1 The FEM grids of overflow dam

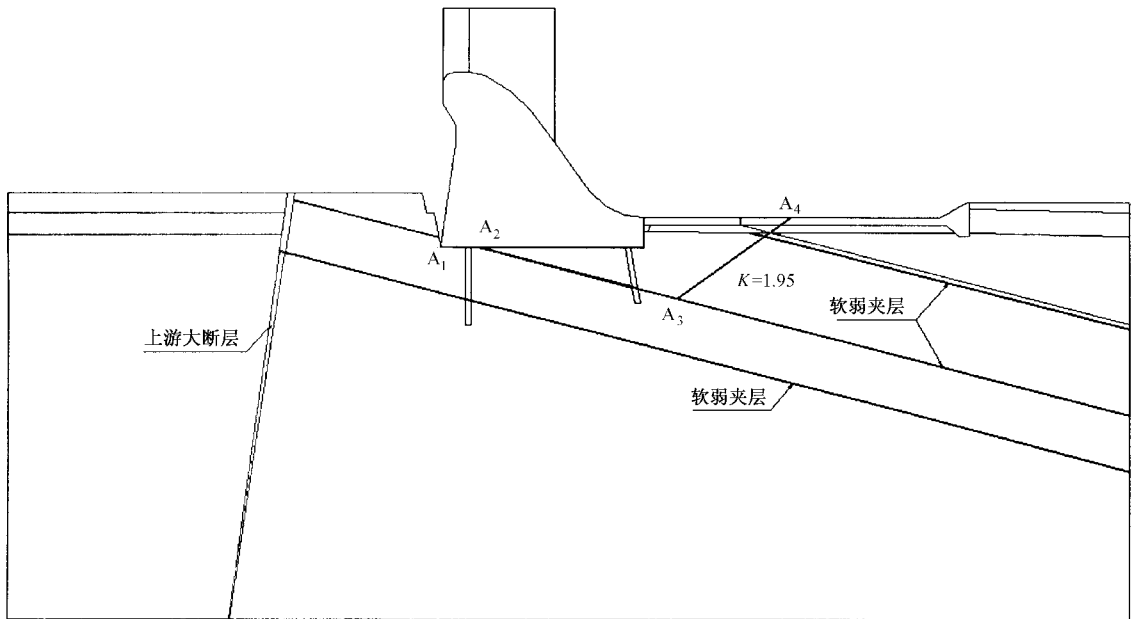


图2 溢流坝段的最危险滑动模式

Fig. 2 The most dangerous sliding mode of overflow dam

该工程等别为一等,按持久设计状态考虑,结构重要性系数 $\gamma_0 = 1.1$ 、设计状态系数 $\phi = 1.0$ 、结构系数 $\gamma_{d1} = 1.2$,则 $K_L = \gamma_0 \phi \gamma_{d1} = 1.32$ 。同时采用传统的常规有限元法(荷载和材料参数均以标准值作为计算值)计算整个模型应力场,并分别用剪力比例法^[6]和强度折减法计算滑动模式 $A_1 - A_2 - A_3 - A_4$ 的安全系数,计算结果见表2。

表2 不同方法计算安全系数比较

Table 2 Comparison of safety factors computed by different methods

计算方法	计算值	容许值	备注
本文方法	1.95	1.32	容许值为本文推导而得
常规有限元法(剪力比例法,抗剪断公式)	3.91	3.0	容许值参照混凝土重力规范 ^[7] 规定
常规有限元法(强度折减法)	4.40	3.0	容许值参照混凝土重力规范 ^[7] 规定

从表2可知,各方法计算结果都大于容许值,并有一定的安全裕度,坝基满足抗滑稳定要求。由于各计算方法的原理不同,相应的稳定评判标准也不同,因此安全系数计算结果有差异,它们之间不具有可比性。

4 结语

(1) 将影响坝基抗滑稳定性的荷载、材料参数等基本变量的不确定性因素以分项系数的形式计入抗滑稳定有限元分析中,综合考虑了超载因素和材料强度弱化,并基于应力场定义与分项系数相匹配的抗滑稳定安全系数,力学概念清晰,稳定判断准则简单实用。

(2) 以抗滑稳定安全系数为目标函数,基于应力场搜索坝基最危险滑动模式,不需要假定若干滑动面试算,能较快地找到坝基的薄弱部位,方便坝工设计人员快捷地评价重力坝抗滑稳定性,通过工程实例验证该方法是可行的,对于快速评价重力坝基抗滑稳定性具有优越性。

(3) 现行电力行业规范^[1]正推行基于可靠度理论的分项系数设计方法,但由于缺乏系统的理论研究和大量的工程实践应用,在坝基抗滑稳定有限元分析中对分项系数的采用还没有明确的规定。本文对分项系数在重力坝抗滑稳定分析评价中的应用进行初步探讨,希望推动分项系数设计方法在坝基抗滑稳定有限元分析中的应用。

参考文献:

- [1] DL5108-1999 混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
DL5108-1999 Design specification for concrete gravity dams [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2000. (in Chinese).
- [2] 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, 24(2): 90~94.
HUANG Dongjun, NIE Guangming. Research on several problems in the safety evaluation of stability against deep slide of gravity dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(2): 90~94. (in Chinese).
- [3] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by Simulated Annealing [J]. Science, 1983, 220: 671~680.
- [4] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
ZHOU Ming, SUN Shudong. Genetic algorithms: theory and applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [5] DL5077-1997. 水工建筑物荷载设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
DL5077-1997. Specification for load design of hydraulic structures [S]. Beijing: China Electric Power Press, 1997. (in Chinese).
- [6] 陈进, 黄薇. 混凝土重力坝抗滑稳定安全系数与安全度探讨[J]. 长江科学院院报, 1995, 12(3): 1~7.
CHEN Jin, HUANG Wei. Inquiry to safety coefficient and safety degree of stability against sliding of concrete gravity dams [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1995, 12(3): 1~7. (in Chinese).
- [7] SL319-2005 混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
SL319-2005. Design specification for concrete gravity dams [S]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese).