

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.016

某水电站左岸边坡泄洪雾化防护措施比选

王 劲¹, 罗玉龙¹, 殷 亮², 詹美礼¹, 盛金昌¹

(1, 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 根据泄洪雾化范围的估算式, 参照二滩电站等重大水电工程设计所采用的雾化范围, 确定所研究水电站的泄洪雾化范围; 结合电站的主要结构面性质, 确定其左岸下游潜在的滑坡体。基于考虑泄洪雾化作用的饱和-非饱和非稳定渗流理论, 研究了左岸下游边坡潜在滑坡体周界上的扬压力随泄洪雾化过程的演变规律, 在设计防护方案的基础上提出3种防护比较方案, 通过对不同方案的防护效果比较, 最终确定了最优的泄洪雾化防护方案。

关键词: 泄洪雾化; 边坡稳定; 非饱和渗流; 扬压力; 防护措施; 梯级水电站

中图分类号: TV139.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2014)06-0553-06

Comparison and selection of protection schemes for left-bank slope at a hydropower station during flood discharge atomization

WANG Jin¹, LUO Yulong¹, YIN Liang², ZHAN Meili¹, SHENG Jinchang¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

Abstract: According to the estimation formula of flood discharge atomization, and with reference to the atomization range of major hydropower engineering projects such as the Ertan Hydropower Station, we determined the range of the flood discharge atomization of the chosen hydropower station. Based on the main properties of the structural plane of the hydropower station, we determined the potential landslide downstream the left bank of the station. Based on saturated and unsaturated unstable seepage theory, and with consideration of the function of flood discharge atomization, we analyzed the evolution of the uplift pressure on the structural surfaces of the potential landslide, and we propose three protection schemes based on the design scheme. Through comparison of the effects of the three schemes, we have selected the optimum scheme.

Key words: flood discharge atomization; slope stability; unsaturated seepage; uplift pressure; protection schemes; cascade hydropower station

某水电站位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县境内, 上接乌东德电站, 下邻溪洛渡电站。电站装机容量16 000 MW。拦河坝为混凝土双曲拱坝, 坝顶高程834.0 m, 最大坝高289.0 m。

泄洪雾化作用对电站左岸边坡的抗滑稳定性不利, 是影响大坝安全的控制因素。一方面, 由于泄量巨大、河道狭窄, 且采用挑流、空中碰撞等消能方式, 泄洪雾化的强度大, 影响范围广, 为左岸边坡的滑动提供了动力条件; 另一方面, 左岸下游边坡存在强卸荷发育区、缓倾层间、层内错动带等软弱结构面(见图1), 为左岸下游边坡的变形和失稳提供了地质条件。

笔者基于考虑泄洪雾化作用的饱和-非饱和非稳定渗流理论, 探讨泄洪雾化过程中左岸下游边坡潜在滑坡块体周界上扬压力的演变规律, 通过对比不同的泄洪雾化防护设计方案的应用效果, 确定最优防护方案, 以便指导工程设计。

收稿日期: 2013-11-08
基金项目: 国家自然科学基金(51009053); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100094120004)
作者简介: 王劲(1987—), 男, 江苏邳州人, 硕士研究生, 主要从事岩土体渗流控制理论研究。E-mail: wangjin3559@126.com
通信作者: 罗玉龙, 副教授。E-mail: lyl8766@126.com

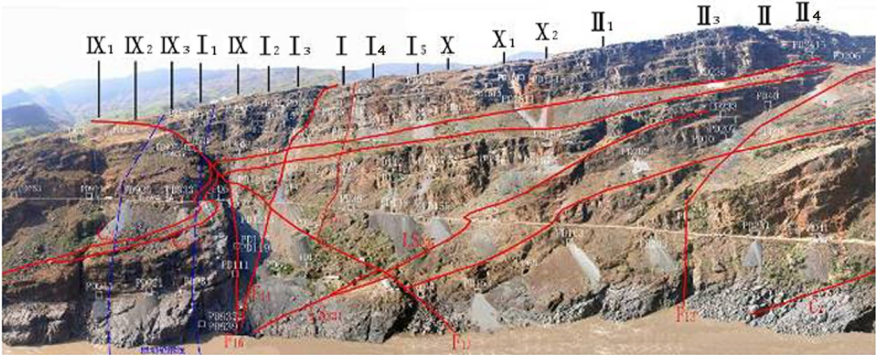


图1 坝址左岸下游边坡

Fig. 1 Downstream slope on left bank of dam site

1 泄洪雾化范围及潜在滑坡体的确定

1.1 泄洪雾化范围

参照二滩、小湾、锦屏等水电站的泄洪原型观测数据^[14],确定该电站泄洪雾化范围(如图2所示, q 表示降雨强度):雨溅区纵向延伸至坝下800 m,横向宽度约为460 m,左岸岸边高程至800 m,右岸岸边高程至850 m;浓雾区纵向延伸至坝下900 m,横向宽度约550 m,左岸岸边高程至坝顶834 m,右岸岸边高程至925 m;薄雾区纵向延伸至坝下1 500 m,横向宽度约为860 m。

1.2 潜在滑坡体

勘探表明,块体1-1和块体4-1是左岸下游2个主要的潜在滑坡体。其中,块体1-1位于左岸勘I线—勘X线,以层内错动带 LS_{337} 为底滑面、裂隙 J_{110} (J_{139})为后缘面、断层 f_{114} 为侧滑面边界;块体4-1位于左岸勘 I_2 线—勘 X_1 线,以层间错动带 C_{3-1} 为底滑面、断层 f_{101} (裂隙 J_{101})为后缘面、断层 f_{114} 为侧滑面边界,如图3所示。块体1-1和块体4-1的体积分别约为203.9万 m^3 、125.5万 m^3 。

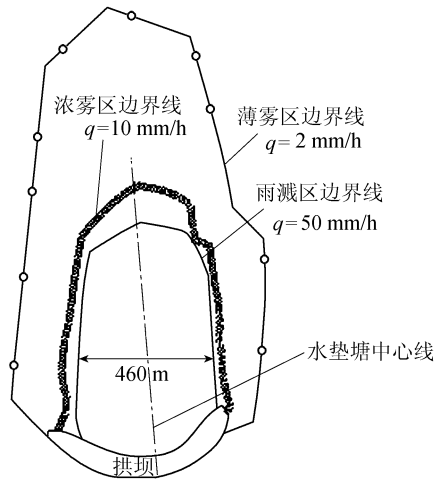


图2 泄洪雾化区范围

Fig. 2 Range of flood discharge atomization

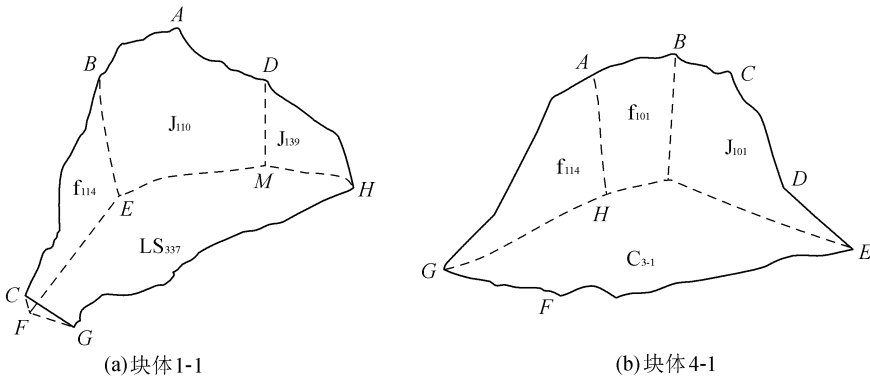


图3 左岸边坡下游潜在滑坡体

Fig. 3 Potential landslide of downstream left-bank slope

2 饱和-非饱和非稳定渗流理论

考虑入渗的饱和-非饱和非稳定渗流方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) + \frac{\partial k_z}{\partial z} + \omega = c(h_c) \frac{\partial h}{\partial t}$$

(1)

其中 $\omega = \mu r$

式中: k_x, k_y, k_z —— x, y, z 方向的渗透系数; h ——压力水头; h_c ——毛细管压力水头; $c(h_c)$ ——溶水度, 当 $h_c > 0$ 时 $c(h_c) = 0$; ω ——降雨入渗量; μ ——入渗系数; r ——降雨量。

对非饱和状态, 采用 VG 模型^[5]描述非饱和渗流规律, 负压水头与含水率的关系为

$$-t(\theta) = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{-\frac{1}{m}} - 1 \right]^{1-m}$$

(2)

式中: t ——岩体基质势; θ ——含水率; θ_r ——残余含水率; θ_s ——饱和含水率; α, m ——非线性回归系数。

非饱和渗透系数采用 Mualem 的统计模型, 计算公式为

$$k(t) = \frac{\{1 - (\beta t)^{a-1} [1 + (\beta t)^a]^{-b}\}^2}{[1 + (\beta t)^a]^{\frac{b}{2}}} k_s$$

(3)

式中: a, b, β ——拟合参数; k_s ——饱和渗透系数。

对于泄洪雾化过程的模拟, 属于动态边界问题, 这里考虑 2 种可能的边界条件:

a. 入渗流量补给, 最大入渗能力为

$$f_p = k_s \left(1 + \frac{H - \psi}{l} \right)$$

(4)

式中: H ——坡面水深; ψ ——入渗湿润锋面处的基质势; l ——坡面入渗点至湿润锋面的距离。

有效入渗量取最大入渗能力与实际降雨可能入渗量 ω 二者中的小值, 按第 2 类已知入渗流量边界模拟。

b. 在形成地表径流后则以地表径流水深为第 1 类边界条件。

基于上述理论开发出的考虑泄洪雾化作用的饱和-非饱和非稳定渗流有限元程序参见文献[6]。

3 防护方案设计

3.1 设计方案

为减小泄洪雾化对边坡稳定性的影响, 需对左岸下游边坡进行防护处理。设计的防护方案如下: (a) 水垫塘高程 635 m 以下为水垫塘结构与河道衬护。 (b) 断层 F_{14} 上游高程 635 ~ 730 m 混凝土衬护 30 ~ 50 cm; 高程 730 m 以上喷混凝土 12 cm。 (c) 断层 $F_{14} \sim f_{320}$ 之间, 勘 X_1 线上游开挖边坡混凝土衬护 30 ~ 50 cm; 勘 X_1 线下游高程 830 m 以下为混凝土衬护 30 ~ 50 cm、高程 830 m 以上喷混凝土 12 cm。 (d) 断层 f_{320} 下游开挖边坡喷混凝土 12 cm 保护。 (e) 下游雾化区边坡高程 730 m 以下喷混凝土 12 cm 保护。

3.2 有限元模型及计算参数

为了充分反映枢纽区的地形、地貌特征, 考虑到水库、泄洪雾化对左岸边坡渗流场的影响, 选取有限元模型范围如下^[7-8]: 取上游侧边界距大坝左岸顶拱拱端约 1 000 m, 下游侧取至电站尾水出口再向下游延伸 500 m, 山体内侧边界距河床中心线约 2 000 m, 外侧边界取至河床中心线, 底边界取至 250 m 高程。整个模型上下游边界相距约 2 500 m, 左右边界相距约 2 000 m, 高程方向相差约 600 m。图 4、图 5 分别给出了左岸边坡

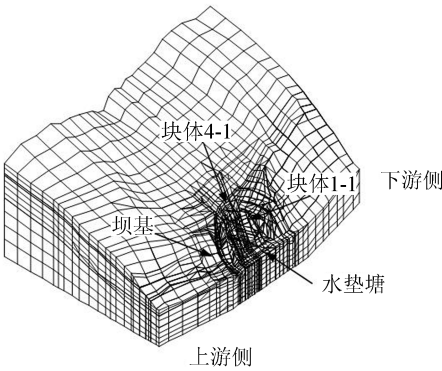


图 4 左岸边坡有限元模型网格

Fig. 4 Finite element model of left-bank slope

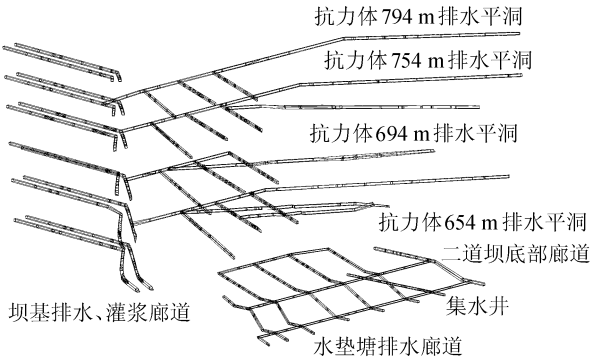


图 5 左岸边坡主要排水系统有限元网格

Fig. 5 Finite element model of main drainage system for left-bank slope

有限元模型网格和主要排水系统的有限元网格。

模型中模拟的主要岩层有 $P_2\beta_2$ 、 $P_2\beta_3$ 、 $P_2\beta_4$ 玄武岩;断层有 F_{14} 、 F_{16} 、 F_{17} 、 F_{33} 、 f_{101} 、 f_{108} 、 f_{114} 、 f_{320} ;裂隙有 J_{101} 、 J_{110} 、 J_{139} ;层间错动带有 C_2 、 C_3 、 C_{3-1} ;层内错动带有 LS_{331} 、 LS_{3319} 、 LS_{337} ;此外还有编号为 1-1、4-1 的潜在滑坡块体,厂坝区帷幕、排水廊道、排水孔幕,抗力体排水水平洞及排水孔幕,水垫塘排水廊道、排水孔幕,二道坝排水廊道、集水廊道,水垫塘混凝土衬砌等^[9-10]。

表 1 给出了岩体及结构面的渗透参数。岩体入渗系数是非饱和降雨入渗分析中一个重要的计算参数,但是由于目前对岩体入渗系数的研究欠缺,只能根据已有的研究资料、该水电站坝址区多年平均降雨量、表层岩体渗透性参数、地表坡度等信息综合近似确定岩体入渗系数。参考文献[11-12]中提供的多年平均年降雨入渗补给系数表,确定岩体入渗系数为 0.2;混凝土衬护 30~50 cm 及喷混凝土 12 cm 区域的入渗系数在岩体入渗系数的基础上做不同程度的折减,分别取为 0.02、0.08。

3.3 泄洪雾化过程

假设上游水位为正常蓄水位 825.0 m、下游水位为 621.56 m 时形成稳定渗流场。以该稳定渗流场作为后续泄洪雾化研究的初始条件。整个饱和-非饱和非稳定的泄洪雾化过程包括:泄洪之前持续 2 d 的天然降雨(雨强 20 mm/h),随后,泄洪 15 d,最后停止泄洪 5 d。其中,2 d 天然降雨的入渗范围为整个模型区域,后续的泄洪过程降雨入渗范围仅为泄洪雾化区。需要说明的是,对于本工程而言,在工程服役期内发生上述泄洪雾化过程的概率极小,但考虑到该工程的重要性及施工等其他不确定因素,本文考虑这种最危险的泄洪雾化过程。

3.4 结果分析

在天然降雨—泄洪—停止泄洪的过程中,潜在滑坡块体边界面上的扬压力是不断变化的,当扬压力的合力达到某一临界值时将诱发潜在滑坡块体发生失稳滑坡。

表 2 给出了块体 1-1 底滑面 LS_{337} 上的扬压力合力,显示了其变化过程。在天然降雨 2 d 及泄洪 15 d 的过程中,块体 1-1 底滑面 LS_{337} 上的扬压力合力逐渐增大,由稳定渗流期的 0 N 增大到泄洪 15 d 时的 1.04×10^9 N。在停止泄洪后,合力又迅速减小至 5.74×10^6 N。这种变化规律是由 LS_{337} 与泄洪雾化区的相对位置决定的。底滑面 LS_{337} 大部分位于雨溅区,一小部分位于浓雾区。因此,经过 2 d 降雨量为 20 mm/h 的强降雨后,在泄洪雾化降雨过程中,降雨入渗量仍然处于继续增大的过程,扬压力会继续增大,待 15 d 泄洪过程结

表 1 岩体及主要结构面渗透系数

岩体及结构面	主渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	
	水平向	竖向
断层 F_{14} 、 F_{16} 、 F_{33} 、 f_{101} 、 f_{108} 、 f_{114} 、 f_{320}	1.50×10^{-3}	1.50×10^{-3}
断层 F_{17} , 裂隙 J_{101} 、 J_{110} 、 J_{139}	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}
层间错动带 C_2	1.50×10^{-2}	5.00×10^{-5}
层间错动带 C_3 、 C_{3-1}	7.50×10^{-3}	5.00×10^{-5}
层内错动带 LS_{331} 、 LS_{3319} 、 LS_{337}	7.50×10^{-5}	2.50×10^{-5}
$P_2\beta_2$ 层玄武岩	1.00×10^{-5}	0.30×10^{-5}
$P_2\beta_3$ 层玄武岩	1.16×10^{-5}	0.26×10^{-5}
$P_2\beta_4$ 层玄武岩	3.92×10^{-5}	0.66×10^{-5}
河床及两岸弱风化带以上及卸荷带	8.00×10^{-4}	5.00×10^{-4}
水垫塘混凝土衬砌	1.00×10^{-7}	1.00×10^{-7}
防渗帷幕	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-6}

表 2 块体 1-1 的底滑面 LS_{337} 扬压力合力变化

Table 2 Evolution of uplift pressure on LS_{337} of total landslide 1-1			
累计时间/d	扬压力合力/N	饱和区面积/ m^2	泄洪雾化过程
0	0	0	稳定渗流
2	5.74×10^6	202.3	天然降雨
6.5	3.83×10^8	21 279.9	泄 洪
11	4.42×10^8	16 357.6	泄 洪
17	1.04×10^9	20 563.3	泄 洪
18	7.14×10^8	20 578.1	停止泄洪
19	4.20×10^8	14 777.0	停止泄洪
22	5.74×10^6	721.0	停止泄洪

表 3 块体 4-1 的底滑面 C_{3-1} 扬压力合力变化

Table 3 Evolution of total uplift pressure on C_{3-1} of landslide 4-1			
累计时间/d	扬压力合力/N	饱和区面积/ m^2	泄洪雾化过程
0	0	0	稳定渗流
2	0	0	天然降雨
5	2.62×10^8	7 942.4	泄 洪
6.5	6.76×10^8	18 380.2	泄 洪
11	2.97×10^8	7 534.8	泄 洪
17	2.67×10^8	7 114.1	泄 洪
17.5	4.07×10^8	12 687.3	停止泄洪
18	2.57×10^8	8 400.2	停止泄洪
19	1.41×10^8	6 026.0	停止泄洪
22	6.80×10^7	3 585.0	停止泄洪

束后扬压力才会减小。

表 3 给出了块体 4-1 底滑面 C_{3-1} 上的扬压力合力,显示了其变化过程。块体 4-1 底滑面 C_{3-1} 大部分位于浓雾区及薄雾区内,很少部分位于雨溅区。因此,经过 2 d 降雨量为 20 mm/h 的强降雨后,在泄洪雾化过程中,降雨入渗量处于逐渐减小的过程,当泄洪 4.5 d 时扬压力合力达到最大(为 6.76×10^8 N)之后扬压力缓慢减小,随着泄洪降雨的入渗补给,待 15 d 泄洪过程结束后,扬压力在停止泄洪的 0.5 d 小幅度增大到 4.07×10^8 N,随后再次逐渐减小。

4 防护方案比较

为了获得防护效果好、综合造价低的最优防护方案,在设计方案的基础上,给出如下 3 种方案进行比较。(a) 比较方案 1:全喷混凝土。除水垫塘 635 m 以下范围仍为混凝土衬护外,其他均喷混凝土。(b) 比较方案 2:全混凝土衬砌。(c) 比较方案 3:高程 760 m 以下混凝土衬砌,以上喷混凝土。

表 4 给出了各方案下主要块体底滑面渗透压力合力最大值的对比情况。与设计方案相比,比较方案 1 中深层地下水位基本没有变化,仅浅层饱和区的范围有较大差别。在天然降雨 2 d 及泄洪过程中,浅层饱和区的面积明显大于设计方案,而在停止泄洪的过程中 2 种方案下浅层饱和区的面积差别不大。比较方案 1 中,块体 1-1 底滑面 LS_{337} 上的扬压力合力在泄洪 15 d 时达到最大(为 1.15×10^9 N),块体 4-1 底滑面 C_{3-1} 上扬压力合力在泄洪 3 d 时达到最大(为 1.49×10^9 N)。

表 4 各方案下重点块体底滑面渗透压力合力最大值比较

防护方案 名称	块体 1-1,底滑面 LS_{337}			块体 4-1,底滑面 C_{3-1}		
	泄洪达最大渗透 压力合力时间/d	最大渗透压力 合力/N	饱和区 面积/ m^2	泄洪达最大渗透 压力合力时间/d	最大渗透 压力合力/N	饱和区 面积/ m^2
设计方案	15	1.04×10^9	20 563.308	4.5	6.76×10^8	18 380.205
比较方案 1	15	1.15×10^9	25 046.512	3	1.49×10^9	19 990.663
比较方案 2	15	5.84×10^8	15 909.242	6	4.97×10^8	10 261.528
比较方案 3	15	1.08×10^9	25 484.240	6	9.14×10^8	16 765.565

与设计方案相比,比较方案 2 中山体深层地下水位基本不变。在天然降雨 2 d 及泄洪过程中,浅层饱和区的面积明显小于设计方案的面积。在停止泄洪的过程中,2 种方案下浅层饱和区的面积差别不大。比较方案 2 中,块体 1-1 底滑面 LS_{337} 上的扬压力合力在泄洪 15 d 时达到最大(为 5.84×10^8 N),块体 4-1 底滑面 C_{3-1} 上扬压力合力在泄洪 6 d 时达到最大(为 4.97×10^8 N)。

与设计方案相比,比较方案 3 中山体深层地下水位基本不变。在天然降雨 2 d 及泄洪过程中,浅层饱和区的面积明显大于设计方案的面积。而在停止泄洪过程中,浅层饱和区的面积差别不大。比较方案 3 中,块体 1-1 底滑面 LS_{337} 上的扬压力合力在泄洪 15 d 时达到最大(为 1.08×10^9 N),块体 4-1 底滑面 C_{3-1} 上扬压力合力在泄洪 6 d 时达到最大(为 9.14×10^8 N)。

5 结 论

a. 几种防护方案相比,全喷混凝土方案中,块体 1-1 和块体 4-1 底滑面上的扬压力合力相对较大,其中,块体 4-1 底滑面 C_{3-1} 上扬压力合力的最大值为 1.49×10^9 N,高于设计方提出的控制值 1.02×10^9 N。从这一角度分析,全喷混凝土方案不能满足工程安全性要求,而其他防护方案均能满足安全性要求。

b. 设计方案及比较方案 3 均属于喷混凝土、混凝土衬砌综合使用的处理方案,相对比较经济合理。这 2 个方案在块体 1-1 的底滑面 LS_{337} 上最大扬压力合力差别不大,前者为 1.04×10^9 N,后者为 1.08×10^9 N,均低于设计控制值 1.58×10^9 N,即 2 种方案下块体 1-1 的底滑面 LS_{337} 上最大扬压力合力分别为设计值的 65.8% 和 68.4%;而块体 4-1 的底滑面 C_{3-1} 上最大扬压力合力相差较大,前者为 6.76×10^8 N,后者为 9.14×10^8 N,均低于设计方提出的设计控制值 1.02×10^9 N,即 2 种方案下块体 4-1 的底滑面 C_{3-1} 上最大扬压力合力分别占设计控制值的 66% 和 90%。

c. 从几种防护方案的对比结果可以看出,设计方案和比较方案 3 均能满足工程安全性要求,但考虑到实际防护方案施工中可能存在的质量缺陷,以及工程运行过程中不确定性因素的影响等,建议选择设计防护

方案作为实际的防护方案,以保证工程具有一定的安全储备。

参考文献:

[1] 苏建明,李浩然. 二滩水电站泄洪雾化对下游边坡的影响[J]. 水文地质工程地质, 2002(2): 22-24. (SU Jianming, LI Haoran. The effects of atomization by flood discharge on downstream slope of Ertan Hydroelectric Station[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002(2): 22-24. (in Chinese))

[2] 陈慧玲. 小湾水电站泄洪雾化研究[J]. 云南水力发电, 1998, 14(4): 51-55. (CHEN Huiling. Study of flood discharging atomization for Xiaowan Hydropower Project [J]. Yunnan Water Power, 1998, 14(4): 51-55. (in Chinese))

[3] 徐佩华,黄润秋,陈剑平,等. 锦屏一级水电站左岸IV#~VI#山梁稳定性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1023-1028. (XU Peihua, HUANG Runqiu, CHEN Jianping, et al. Study of the stability analysis and three dimensional numerical simulation of #IV-#VI ridges in left bank at Jinping First Hydropower Station [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1023-1028. (in Chinese))

[4] 刘宣烈,安刚,姚仲达. 泄洪雾化机理和影响范围的探讨[J]. 天津大学学报, 1991, 37(增刊1): 30-36. (LIU Xuanlie, AN Gang, YAO Zhongda. The investigation on the mechanism and sphere of influence of atomization by discharge flow [J]. Journal of Tianjin University, 1991, 37(Sup1): 30-36. (in Chinese))

[5] van GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.

[6] 胡云进,速宝玉,詹美礼. 裂隙岩体非饱和渗流研究综述[J]. 河海大学学报:自然科学版,2000,28(1): 40-46. (HU Yunjin, SU Baoyu, ZHAN Meili. Review of the research on unsaturated seepage flow in fractured rockmasses [J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2000,28(1): 40-46. (in Chinese))

[7] 胡云进,速宝玉,詹美礼. 雾化雨入渗对溪洛渡水垫塘区岸坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 8-12. (HU Yunjin, SU Baoyu, ZHAN Meili. Influence of atomized rain infiltration on stability of cushion pool slope of Xiluodu Project [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 8-12. (in Chinese))

[8] 郑文棠,徐卫亚,张治亮,等. 复杂楔形体组合下的岩质高边坡稳定分析[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(5): 115-119. (ZHENG Wentang, XU Weiya, ZHANG Zhiliang, et al. Stability of high rock slope formed by complex wedge[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008,25(5): 115-119. (in Chinese))

[9] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346. (ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(3): 343-346. (in Chinese))

[10] 郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388. (ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Application of strength reduction fem in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381-3388. (in Chinese))

[11] 张蔚榛,沈荣开. 地下水文与地下水调控[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1998.

[12] 金光炎. 地下水文学初步与地下水资源评价[M]. 南京:东南大学出版社, 2009.