

文章编号: 1000-7598-(2012) 09-2845-06

乌东德水电站水垫塘边坡雾化雨入渗数值分析

王金龙^{1,2}, 张家发^{1,2}, 李少龙^{1,2}, 崔皓东^{1,2}

(1.长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010; 2.长江科学院 国家大坝安全工程技术研究中心, 武汉 430010)

摘 要: 高坝泄洪雾化雨入渗是影响其水垫塘边坡稳定的关键因素之一。为分析乌东德水电站水垫塘边坡受泄洪雾化雨影响程度, 选取水垫塘边坡典型断面, 建立二维非饱和、非稳定渗流计算模型, 采用有限元法模拟泄洪雾化雨入渗过程, 分析雾化雨入渗条件下坡体饱和区范围及压力水头的变化规律, 同时对比研究坡面防护措施的效果。结果表明, 对于坡体内部渗透性上强、下弱的部位, 随着入渗补给量的持续增加, 在阻水部位压力水头会逐渐升高; 当坡面采取弱透水材料防护后, 可显著减少坡面雾雨入渗量, 从而显著降低雾化雨入渗对坡体渗流场的影响。

关 键 词: 雾化雨入渗; 非饱和渗流; 水垫塘边坡

中图分类号: TV 223

文献标识码: A

Numerical analysis of infiltration of atomized rain into plunge pool slope in Wudongde hydropower project

WANG Jin-long^{1,2}, ZHANG Jia-fa^{1,2}, LI Shao-long^{1,2}, CUI Hao-dong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. National Research Center for Dam Safety Technology, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Infiltration of atomized rain by flood releasing is an important factor to the stability of slope by plunge pool for high dam. In order to analyze the effect of atomized rain infiltration in Wudongde hydropower station, the two-dimensional unsaturated and unsteady seepage field is modeled for a typical profile of plunge pool slope, and is simulated with the FEM. The range of the saturated zone and the pressure head of the groundwater in the slope during the infiltration is analyzed under different slope protection conditions. It is shown that for the slope formation with high permeable layer overlying relatively low permeable layer, the pressure head in the resistivity water layer will raise gradually with the increase of infiltration recharge. Application of impermeable material to the slope surface as protection treatment can largely decrease the infiltration of atomized rain into the slope, thus the influence of atomized rain on the seepage field of slope is significantly reduced.

Key words: atomized rain infiltration; unsaturated seepage; plunge pool slope

1 引 言

乌东德水电站是金沙江下游河段 4 个水电梯级中的最上游一级, 坝址地处川滇交界处, 电站上距攀枝花市 213.9 km。电站水库总库容为 $74.05 \times 10^8 \text{ m}^3$, 总装机容量为 10 200 MW, 最大坝高为 263 m。大坝为混凝土双曲拱坝, 采用坝身泄洪为主, 岸边泄洪洞为辅的方式, 坝后采用水垫塘消能, 泄洪洞出口采用挑流消能。高水头、大流量泄洪的高坝, 泄洪时会产生雾化雨, 通常情况下, 雾化雨的暴雨强度要比自然暴雨强度大得多。雨水的入渗导致岩(土)

体中地下水位以上非饱和区压力水头的暂时升高, 甚至抬高坡体内的地下水位, 产生附加水荷载。此外, 地下水作用也降低了岩(土)体力学强度指标, 使边坡运行环境恶化, 从而增加了边坡整体及局部失稳的可能性。

从大量已建工程泄洪时暴露出的严重问题来看^[1-3], 雾化雨导致边坡失稳事件时有发生, 甚至严重威胁厂坝区的安全。本文针对乌东德水电站工程, 选取水垫塘边坡代表性剖面, 研究雾化雨入渗引起的水垫塘岸坡非饱和带内暂态压力水头的变化以及边坡地下水分布, 为进一步研究雾化雨入渗对

收稿日期: 2012-05-07

基金项目: 国家“十二五”支撑计划课题(No. 2011BAB10B04); 国家大坝安全技术研发中心课题(No. 2011NDS003); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助项目(No. CKSF2010017)。

第一作者简介: 王金龙, 男, 1978 年生, 硕士, 工程师, 主要从事地下水环境及岩土工程渗流方面的研究工作。E-mail: 52523070@qq.com

岸坡稳定的影响及采取针对性的控制和防治措施提供依据。

2 计算模型

雾化雨入渗是一个饱和-非饱和、非稳定渗流过程。在进行泄洪雾化雨入渗的边坡渗流分析时,涉及到模型选择、参数确定、边界和初始条件等方面的问题。

2.1 基本方程

根据达西定律和质量守恒连续性原理,以压力水头为未知量,二维饱和-非饱和渗流的基本方程为

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_r(h) k_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} (h + x_2) \right] - [C(h) + \beta S_s] \frac{\partial h}{\partial t} - S = 0 \quad (1)$$

式中: k_r 为相对渗透率; k_{ij} 为饱和渗透张量; h 为压力水头; x_2 为正向向上的铅直坐标; C 为比容水度; β 为系数,非饱和区 $\beta=0$, 饱和区 $\beta=1$; S_s 为单位贮存量; t 为时间; S 为源汇项。

定解条件包括初始条件和边界条件。

初始条件由压力水头描述:

$$h(x_i, 0) = h_0(x_i) \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

式中: h_0 为 x_i 的给定函数。

已知压力水头边界为

$$h(x_i, t) = h_c(x_i, t) \quad (i=1, 2) \quad (3)$$

式中: h_c 为 x_i 和 t 的给定函数。

已知流量边界为

$$k_r \sum_{i=1}^2 \left(\sum_{j=1}^2 k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i2} \right) n_i = -v(x_i, t) \quad (4)$$

式中: n_i 为边界面法向矢量的第 i 个分量; v 为 x_i 和 t 的给定函数。

2.2 数值模型范围及网格划分

依据金沙江乌东德水电站泄洪雾化预测计算成果^[4]和水垫塘工程地质资料^[5-6],选取距坝轴线 392 m 的水垫塘右岸边坡为代表性坡面,该坡面相对平缓,表层存在卸荷带,地表水更易入渗,并且位于雾化雨中心,坡面雾化雨分布范围和雾化雨强均较大。

通过先期模型试算,工况对比研究时采用的计算模型范围为:河床中界为左边界,600 m 高程为底边界,模型宽度为 600 m,上边界为地表。渗流数值模型范围见图 1。

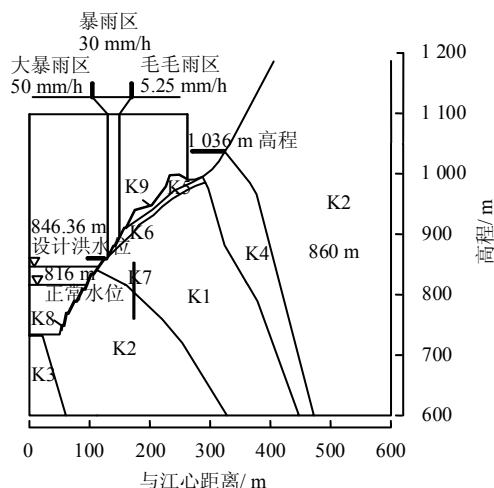


图 1 渗流计算模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of seepage model

采用长江科学院 US3D 软件进行有限元网格划分,共划分为 4 401 个节点、4 244 个四边形单元。有限元网格如图 2 所示。

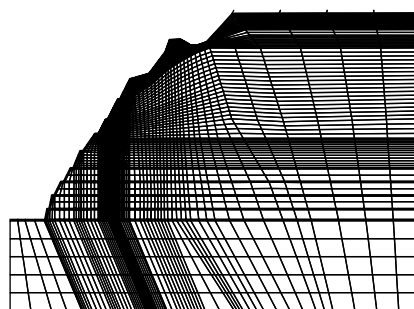


图 2 渗流模型有限元网格

Fig.2 FEM mesh of seepage model

2.3 渗透性分区及其计算参数

依据本工程地勘资料,模型渗透性分区见图 1,饱和渗透参数取值见表 1。除依据地勘资料可以确定部分岩层的饱和渗透系数、饱和含水率外,对于防渗帷幕和混凝土护坡材料的渗透特性参数,参照工程经验进行取值^[7-9]。

非饱和渗流除了需要确定饱和渗流参数外,还需要确定土-水特征曲线(吸力 φ 与饱和度 S_e 关系)以及非饱和和相对渗透系数 k_r 与饱和度 S_e 的对应关系。

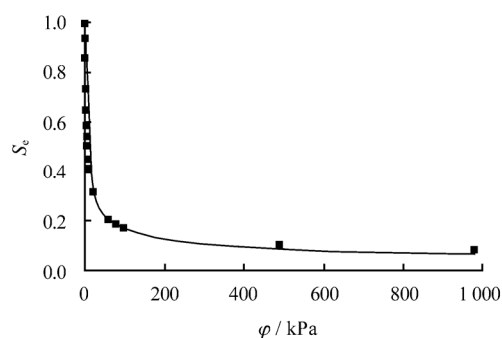
目前对于 $\varphi-S_e$ 及 k_r-S_e 的试验研究对象主要限于非饱和土,为了计算和分析的需要,常将试验数据拟合为经验公式。

由于缺乏实测数据,本次计算分析采用的非饱和和渗流参数取值方法依据日本西恒诚等^[9]的泥岩非饱和试验数据,选用目前最具代表性的 Van Genuchten

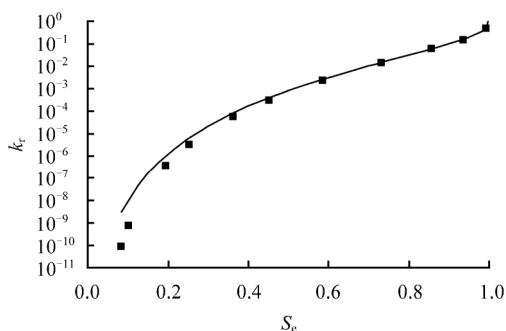
模型^[10], 通过非线性拟合得到非饱和渗流参数, 拟合后采用的 $\varphi-S_e$ 、 k_r-S_e 曲线如图 3 所示。

表 1 水垫塘边坡渗透分区概化及参数取值
Table 1 Permeability partition and values of the slope of plunge pool

渗透性分区	地层岩性	K_s /(cm/s)	饱和含水率 θ_s / %	贮水率 S_s / 10 ⁻⁶
K1	薄层大理岩化白云岩 pt _{2L} ⁴	5.0×10^{-5}	2.35	1.0
	厚层白云岩 pt _{2L} ³⁻⁴			
K2	中厚层灰岩 pt _{2L} ³⁻⁵ 、pt _{2L} ⁶	3.0×10^{-5}	1.27	1.0
	薄层灰岩 pt _{2L} ⁷			
K3	厚层灰岩 pt _{2L} ³⁻³	1.0×10^{-3}	0.68	1.0
K4	千枚岩 pt _{2L} ⁵	1.0×10^{-5}	2.24	1.0
K5	强卸荷带, 第四系 Q	1.0×10^{-3}	8.10	1.0
K6	弱卸荷带	1.0×10^{-4}	2.70	1.0
K7	防渗帷幕	1.0×10^{-5}	0.54	1.0
K8	860 m 以下混凝土护坡	1.0×10^{-6}	0.54	1.0
K9	860 m 以上混凝土护坡	1.0×10^{-5}	0.54	1.0



(a) $\varphi-S_e$ 关系曲线



(b) k_r-S_e 关系曲线

图 3 岩体非饱和和渗流 $\varphi-S_e$ 、 k_r-S_e 关系曲线
Fig.3 Curves of $\varphi-S_e$, k_r-S_e for unsaturated seepage

2.4 初始条件

坝址处于金沙江干热河谷, 多年平均降水量为 825 mm (巧家站), 主要分布在 6~10 月, 降水量占全年降水量的 81%。多年平均水面蒸发量为 2 593 mm, 库区陆面蒸发量为 698 mm。

依据乌东德水电站坝基及厂房区渗控措施研究成果^[11], 取正常蓄水位条件下厂坝区三维稳定渗

流场计算得到的该部位潜水面作为初始地下水位。

由于非饱和渗流场分布受降雨、蒸发等气候条件影响, 实测资料较少, 很难通过实测获取非饱和区渗流场分布, 本次模型研究中地下水潜水面以上的非饱和区初始负压取为 0.5 m。

2.5 边界条件

坝址区气象条件较复杂, 本次数值模型分析对于天然气象条件下的降雨和蒸发不做考虑, 主要分析泄洪雾化雨入渗的影响。

水垫塘边坡江侧为金沙江中心线, 取为隔水边界; 选取边坡山体侧边界处正常蓄水位运行条件下的稳定渗流场水位作为山体侧定水头边界; 百年一遇下游设计洪水位为 846.36 m, 泄洪期间水垫塘边坡 846.36 m 以下坡面取为定水头边界; 坡面依据雾化雨分布和坡面岩体渗透性可分为出逸边界、定水头或者定流量边界; 模型底部取至 600 m 高程, 考虑为隔水边界。

参照雾化雨预测成果^[4], 从金沙江江面往后缘边坡依次分为 3 个雨强区, 雨强条件见表 2, 边坡雨强分布范围见图 1。

表 2 雾化雨分布
Table 2 Distribution of atomized rain

雨强分区	雨强/(mm/h)		分布高程
	范围	计算取值	
大暴雨区	≥ 50.00	50.00	862.7 m 以下坡面
暴雨区	50.00~10.00	30.00	862.7~895.5 m 高程坡面
毛毛雨区	10.00~0.50	5.25	895.5~994.4 m 高程坡面

模型中对雾化雨入渗边界的处理如下: 当降雨强度小于地表岩土体的饱和和渗透系数时, 边界条件取为第 2 类流量边界条件, 计算时单宽入渗通量取为降雨强度; 当降雨强度大于地表岩土体饱和和渗透系数时, 边坡表面形成径流, 边坡表面含水率保持接近于饱和含水率, 边界条件为第 1 类边界条件; 降雨过程中或者雨停时, 坡面地表为潜在出逸边界。

3 计算方案及成果分析

3.1 计算方案

依据调洪设计, 洪水下泄过程最多持续约 18 d。非饱和、非稳定渗流模拟总时间为 30 d, 其中 0~18 d 为泄洪雾化雨入渗时段, 18~30 d 无入渗, 设定每间隔 0.5 d 输出计算结果。

针对不同坡面防护措施开展雾化雨入渗对比研究, 计算方案包括: 基本工况 (天然开挖坡面, 无任何防护)、半坡防护方案 (860 m 高程以下设

2 m 厚混凝土护坡, 860 m 以上为开挖坡面)、全坡防护方案(860 m 高程以下设 2 m 厚混凝土护坡, 860 m 以上雾化雨区采取混凝土喷护)。

根据上述基本方程和定解条件, 以有限元法为模拟手段, 通过 GeoStudio 系统软件建立数值模型

并开展上述方案的计算。

3.2 天然坡面非饱和入渗成果分析

无坡面防护措施条件下, 泄洪雾化雨入渗 3、6、10、18 d, 以及入渗停止 12 d 后坡体饱和区和区扩算范围及饱和区压力水头分布如图 4 所示。

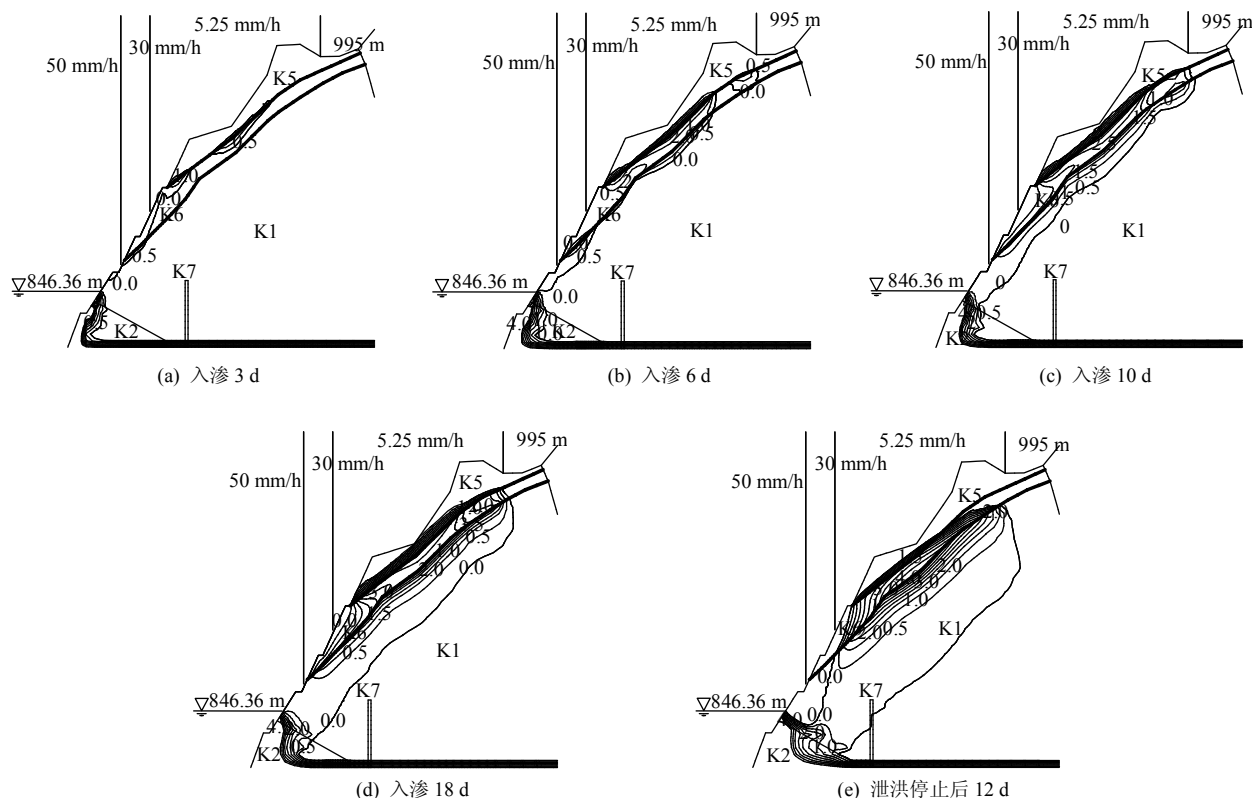


图 4 天然坡面雾化雨入渗饱和区及压力水头分布图(单位: m)

Fig.4 Distribution of saturated area and waterhead pressure (unit:m)

(1) 饱和区扩散范围

雨强小于地表入渗能力时, 在表层为非饱和入渗, 雾化雨全部进入坡体, 当入渗水流遇下部渗透性较弱岩体时, 产生超渗现象, 沿弱透水层面开始形成饱和区, 并且随着超渗水流的不断积累, 饱和区逐渐以弱透水层面为界向两侧扩散; 雨强大于坡面岩体饱和渗透系数时, 地表处于饱和状态, 随着降雨入渗的不断补给, 饱和区由坡面逐渐向坡体内部范围不断扩大; 边坡开挖平台顶靠外侧由于降雨补给面积大最先饱和; 泄洪雾化雨连续入渗 18 d 后, 饱和湿润锋扩散至边坡内部大概 20~50 m 左右的深度; 泄洪停止后, 饱和区仍然会向坡体内部扩散。

(2) 入渗饱和区压力水头

右岸边坡表层为大倾角顺坡向分布, 受卸荷风化影响, 地层渗透性表层强于内部。从图 4 可以看出, 雾化雨入渗受雨强和地层渗透性影响, 并非简单的自由入渗, 在不同渗透性岩层界面处出现较大

的暂态饱和和压力水头。

选取如图 5 中所示典型部位的代表性节点, 各节点位置描述见表 3, 各节点压力水头变化过程曲线见图 6。

节点 7 为坡体中 K5、K6 (K5 区饱和渗透系数是 K6 区的 10 倍) 地层分界面上的节点, 随着入渗时间的持续, 该处暂态饱和和压力水头逐渐升高, 入渗 18 d 时压力水头达 4.1 m, 雾化雨停后, 饱和区继续向坡内扩散, 该处压力水头逐渐降低。节点 9 同样处于渗透性上强、下弱的 K6、K1 地层分界面上, 从图 6 中可以看出, 随着雾化雨从表层向坡体内部入渗, 该点压力水头逐渐升高, 当泄洪停止, 表层不再接收雾化雨入渗补给时, 上部饱和区压力水头逐渐降低, 对于下部坡体的入渗补给仍在继续, 即使泄洪停止 12 d, 该点的饱和压力水头仍在升高, 达到 4.7 m。

节点 6 同为 K5、K6 (K5 区饱和渗透系数是

K6 区的 10 倍) 地层分界面上的节点, 由于靠近坡面无压区, 随着雾化雨持续入渗, 该处压力水头迅速升高到 1.6 m 后不再持续升高。

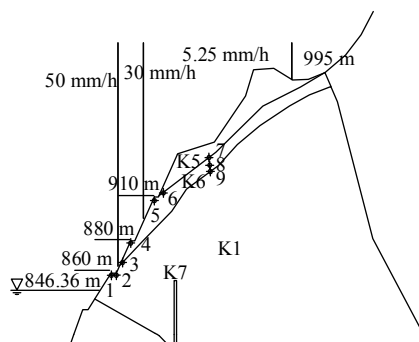


图 5 典型部位节点位置示意图

Fig.5 Location of typical points in slope of plunge pool

表 3 代表性节点位置

Table 3 Location of the typical points

节点编号	所在岩层 渗透性分区	位置说明
1	K1	860 m 平台坡外侧
2	K1	860 m 平台坡内侧
3	K1、K6	K1、K6 界面
4	K6	880 m 平台坡外侧
5	K6	910 m 平台坡外侧
6	K5、K6	K5、K6 界面
7	K5、K6	坡体中 K5、K6 界面
8	K6	坡体 K6 中
9	K6、K1	坡体中 K6、K1 界面

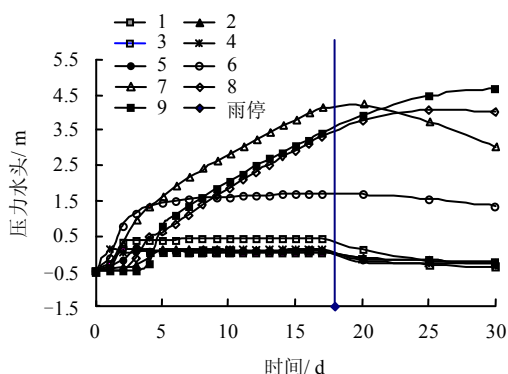


图 6 典型部位压力水头非稳定变化过程

Fig.6 Changes of waterhead pressure of typical points

3.3 坡面防护效果分析

860 m 高程以下坡面采用混凝土防护时, 雾化雨入渗 18 d 时坡体饱和区及压力水头分布见图 7, 由于大部分坡面仍受雾化雨入渗补给, 上部坡体压力水头分布规律与天然开挖坡面工况相同。

当雾化雨入渗范围内坡面全坡防护时, 防护层渗透性较原位卸荷带岩体的渗透性显著降低, 从而使坡面雾雨入渗量显著减少, 泄洪 18 d 时, 坡体饱和区和区非常小。

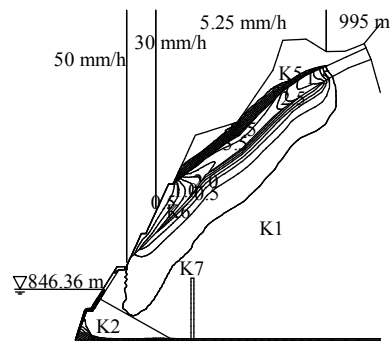


图 7 半坡防护雾化雨入渗 18 d 时坡体饱和区及压力水头分布图(单位: m)

Fig.7 Distribution of saturated area and waterhead pressure at 18 day base on atomized rain infiltration (unit:m)

4 结 论

(1) 对于坡体内部渗透性上强、下弱的部位随着入渗补给量的持续增加, 由于没有内部排泄条件, 在阻水部位压力水头会逐渐升高; 受上部饱和区继续扩散的影响, 某些部位在地表入渗补给停止后, 压力水头仍会继续升高。

(2) 裸露的缓坡(如平台外侧)更利于雾化雨入渗。当坡面采取弱透水材料防护后, 可显著减少坡面雾雨入渗量, 从而显著降低雾化雨入渗对坡体渗流场的影响。

(3) 根据需要在渗透性上强、下弱界面布置排水孔, 可降低岩体内饱和区压力水头, 且有利于地下水排出。

参 考 文 献

- [1] 李瓚. 龙羊峡水电站挑流水雾诱发滑坡问题[J]. 大坝与安全, 2001, (3): 17-20.
- LI Zan. On landslide induced by water fog from ski-jump energy dissipation of Longyangxia hydropower station[J]. Dam & Safety, 2001, (3): 17-20.
- [2] 韩建设. 李家峡水电站坝前滑坡体的变形特性及处理措施[J]. 水力发电, 1997, (6): 35-37.
- [3] 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, 29(2): 22-25.

- 1952.
- [3] 汪洋, 殷坤龙. 水库库岸滑坡初始涌浪叠加的摄动方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 717—720.
- WANG Yang, YIN Kun-long. Perturbation method of superposing initial surge height of landslide along reservoir shoreline[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(5): 717—720.
- [4] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems[C]//Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics. Nancy: [s. n.], 1971.
- [5] ITASCA Consulting Group, Inc. 3DEC—3 Dimensional distinct element code (version3.0), user's manual[R]. Minneapolis: ITASCA Consulting Group, Inc., 2007.
- [6] 焦玉勇, 葛修润, 刘泉声, 等. 三维离散单元法及其在滑坡分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 101—104.
- JIAO Yu-yong, GE Xiu-run, LIU Quan-sheng, et al. Three-dimensional discrete element method and its application in landslide analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(1): 101—104.
- [7] LEMOS J A. A distinct element model for dynamic analysis of jointed rock with application to dam foundation and fault motion[D]. St. Paul: University of Minnesota, 1987.
- [8] 周晓青, 王元汉, 哈秋龄. 离散单元法与边界单元法的外部耦合计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 231—235.
- ZHOU Xiao-qing, WANG Yuan-han, HA Qiu-ling. External coupling computation between distinct element method and boundary element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1996, 15(3): 231—235.
- [9] 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.
- [10] 张楚汉. 岩石和混凝土离散-接触-断裂分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [11] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定与滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [12] SCHEIDEGGER A E. On the predication of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. **Rock Mechanics**, 1973, 5(4): 231—236.
- [13] NODA E. Water waves generated by landslides[J]. **Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE**, 1970, 96(4): 835—855.
- [14] 庞明勇. 基于离散模型的二维水波实时动态模拟方法[J]. 水利学报, 2007, (11): 1358—1363.
- PANG Ming-yong. Realtime dynamic simulation of 2D water waves based on discrete model[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, (11): 1358—1363.
-
- 上接第 2849 页
- SU Jian-ming, LI Hao-ran. The effects of atomization by flood discharge on down stream of Ertan hydroelectric station[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2002, 29(2): 22—25.
- [4] 练继建, 刘昉. 金沙江乌东德水电站工程泄洪雾化数学模型研究[R]. 天津: 天津大学, 2006.
- [5] 李伟, 胡清义, 余昕卉, 等. 金沙江乌东德水电站可行性研究阶段坝线选择和枢纽布置方案专题研究报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究院有限责任公司, 2010.
- [6] 王团乐, 向家菠, 翁金望, 等. 金沙江乌东德水电站坝址区岩溶与水文地质专题研究报告[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究院有限责任公司, 2011.
- [7] 张家发. 三维饱和和非饱和稳定/非稳定渗流场的有限元模拟[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(3): 35—38.
- ZHANG Jia-fa. Simulation of 3D saturated unsaturated and steady/unsteady seepage field by FEM[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 1997, 14(3): 35—38.
- [8] 张家发, 徐春敏, 王满兴, 等. 三峡坝址区花岗岩全风化带渗流参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 705—709.
- ZHANG Jia-fa, XU Chun-min, WANG Man-xing, et al. Seepage parameters of the completely weathered granite at Three Gorges dam site[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(5): 705—709.
- [9] 西垣诚, 竹下祐二. 室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究[R]. 岡山: 岡山大学工学部土木工学科, 1993.
- [10] 吴礼舟, 黄润秋. 非饱和土渗流及其参数影响的数值分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1): 94—98.
- WU Li-zhou, HUANG Run-qiu. A numerical analysis of the infiltration and parameter effects in unsaturated soil[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2011, 38(1): 94—98.
- [11] 朱国胜, 崔皓东, 张家发. 乌东德水电站右岸坝肩及厂房区渗流控制措施研究[R]. 武汉: 长江科学院, 2011.