

考虑暴雨入渗的覆盖层滑坡体渗流特性及稳定性评价

陈丽丽^a, 何江达^a, 谢红强^a, 肖明砾^{a,b}

(四川大学 a. 水利水电学院; b. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 为了分析雅砻江流域卡拉水电站上游库区上田镇滑坡体受暴雨影响程度, 选取了上田镇滑坡体典型断面, 建立二维饱和-非饱和渗流计算模型, 采用有限元法模拟了暴雨入渗过程。根据模拟结果分析了在暴雨入渗条件下蓄水前后的工程边坡的渗流特性及应力分布, 并对边坡稳定性和边坡防护措施效果进行评价, 结果表明, 暴雨入渗会引起边坡的稳定性降低, 并可能引起边坡失稳。有限元法对分析边坡稳定性有实际的指导意义。

关键词: 暴雨入渗; 边坡; 渗流特性; 应力分布; 稳定性评价; 有限元法

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0147-04

Seepage Characteristics and Stability Evaluation of Landslide Cover Considering Rain Infiltration

CHEN Lili^a, HE Jiangda^a, XIE Hongqiang^a, XIAO Mingli^{a,b}

(a. School of Water Conservancy and Hydropower Engineering;

b. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Rain infiltration is an important factor on the stability of slope in the reservoir area. In order to analyze the effects of rain infiltration on the Shangtianzhen landslide body in the upstream reservoir area of Kala hydropower station in the Yalong River Basin, a two-dimensional unsaturated and saturated seepage field model was developed based on a typical profile of the Shangtianzhen landslide body. The finite element method was used to simulate the rain infiltration process. The simulation results were used to analyze the seepage characteristics and stress distribution of the landslide body under heavy rain infiltration before and after impounding, and to evaluate the stability and effect of protective measures of the slope. The results indicated that rain infiltration can reduce the slope stability and may even cause slope instability.

Key words: rain infiltration; slope; seepage characteristics; stress distribution; stability evaluation; finite element method

降水、泄洪雾化、水位骤降等都是引起边坡失稳破坏的主要因素。尤其在强降雨情况下, 水的大量入渗使边坡土体饱和度增加、非饱和区基质吸力降低、土体抗剪强度下降。当雨水的强度和持续时间超过一定程度时, 便可能导致边坡失稳。目前国内外一些专家学者分别从土体渗透性和抗剪强度、非饱和土基质吸力、降水强度、土坡坡度和植被等方面对该问题进行过相应的研究^[1-3]。其中, 有限单元法是数值模拟方法在边坡稳定评价中应用得最早的方法, 也是目前应用最广泛的数值方法^[4-6]。

卡拉水电站是四川省凉山彝族自治州木里藏族自治县境内雅砻江中游河段中的第6级水电站, 装机容量980 MW, 是以发电为主要任务的二等大(2)型工程。工程所在区域属松潘-甘孜地槽褶皱系(Ⅰ)之雅江褶皱带(Ⅰ2)的南部, 与扬子准地台相邻。坝址周围150 km范围内主要有安

宁河-则木河断裂带、大凉山断裂带、龙门山断裂带等, 区域稳定性差。上田镇滑坡体位于坝址上游右岸约370~910 m处。滑坡体边坡坡度30°~40°, 在高程2 080 m、2 180 m一带分布缓坡地带。上游库区的滑坡体工程地质条件复杂, 由于暴雨入渗作用会降低边坡稳定性, 由此造成的库区边坡稳定性问题十分突出, 威胁水电站运行的安全。本文以卡拉水电站坝址区域的上田镇滑坡体为研究对象, 采用有限单元法对暴雨入渗下蓄水前后的滑坡体进行渗流和稳定性分析, 对滑坡体发生滑动的可能性进行评价^[7-9], 并为进一步研究暴雨入渗对边坡稳定的影响及安全性评价提供依据。

1 基本方程及计算方法

饱和状态下, 非稳定渗流微分方程式为:

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial H}{\partial z}) = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

收稿日期: 2012-12-03 修回日期: 2013-05-02 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1744.024.html>

作者简介: 陈丽丽(1989-), 女, 重庆人, 在读硕士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: chenlilisu@163.com。

通讯作者: 何江达(1961-), 男, 四川达州人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: yantu110@163.com

非饱和土的达西定律:

$$v = -k \frac{dH}{dy} \quad (2)$$

三维问题非饱和土体水流运动的基本方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x(\theta) \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y(\theta) \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}) \quad (3)$$

方程求解的变量是总水头 H 。在用数值求解的每一时步计算出压力水头 h 后再求出基质吸力或体积含水量 θ_w ，从而计算非饱和渗透系数 k 与体积含水量变化参数 m_s^2 。如果通过试验实测了详尽的关于体积含水量与压力水头 h_c 、非饱和渗透系数 h 的关系数据，那么在数值求解方程时可以通过线性内插的方法求得解出来的压力水头对应的体积含水量和渗透系数。但如果实测数据有限就只能通过拟合土水特征曲线模型，然后在数值求解过程中利用这些模型计算 θ_w 和 k [10-12]。

2 计算模型

2.1 计算原型及有限元离散模型

滑坡体边坡静力有限元计算本文以雅砻江流域卡拉水电站上游库区上田滑坡体典型剖面作为对象，进行滑坡体边坡静力有限元计算。有限元模型计算域底面选至 1 669.70 m 高程，向上延伸至地表；模型宽度 850 m。离散中岩(土)体采用八节点等参实体单元，各类断层以及堆积体或松动体与基岩接触带等采用夹层单元。

2.2 计算参数

各类岩土体材料的物理力学参数见表 1。滑坡体岩土体渗透参数值见表 2。

表 1 岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

材料	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E / MPa	μ	c / MPa	$\varphi / (^\circ)$
Q_4^{al}	19.0	30	0.4	0.00	40.1
Q_3^{al}	19.0	30	0.4	0.00	40.1
$Q_3^{\text{de}+1}$	21.5	40	0.4	0.10	37.3
$Q_3^{\text{de}+2}$	23.0	1000	0.4	0.18	44.7
$Q_4^{\text{col}+d1}$	22.0	30	0.4	0.13	34.4

表 2 滑坡体岩土渗透率

Table 2 Permeability of the landslide

编号	材料	渗透率/Lu	编号	材料	渗透率/Lu
1	$Q_4^{\text{col}+d1}$	120	10	$T_{3/2}^2-4$	1.00
2	Q_4^{al}	250	11	$T_{3/2}^2-3$	1.00
3	Q_3^{al}	250	12	$T_{3/2}^2-2$	0.50
4	$Q_3^{\text{de}+2}$	250	13	$T_{3/2}^2-1$	0.50
5	$Q_3^{\text{de}+1}$	250	14	$T_{1/2}$	0.25
6	$T_{3/2}^8$	1.00	15	f57	270
7	$T_{3/2}^7$	1.00	16	J41	270
8	$T_{3/2}^6$	1.00	17	Lc38	270
9	$T_{3/2}^5$	1.00	18	Lc39	270

3 计算结果及分析

一般来说，降雨入渗主要影响边坡浅层岩土体的含水量和基质吸力，而边坡内部土体受雨水的影响较小 [13-15]。考虑到影响边坡稳定的主要因素为滑带土饱和区大小及分布和

表层暂态饱和区的大小及分布，综合考虑以上两种因素并根据渗流场边坡稳定分析成果，本文采用 24 h 典型暴雨分配法暴雨曲线作为边坡渗流场及稳定性分析的暴雨曲线。

3.1 暴雨入渗条件下天然及工程边坡(蓄水后)渗流场分布

图 1、图 2 给出了 50 年一遇 24 h 设计暴雨入渗条件下天然及工程边坡(蓄水后)不同降雨时刻孔隙水压分布。蓄水位以下坡体均处于饱和状态。天然边坡蓄水条件下降雨前滑带土饱和区均位于蓄水位以下，约为 20%；降雨过程中滑带土饱和区最大可达 75%。由于滑坡体浅表层 Q_3 和 Q_4 材料渗透参数均较大且采取了排水洞等工程措施，故暴雨前后边坡地下水位差异较小。受排水设施的影响，地下水位线较低且饱和区有所减小。降雨前滑带土饱和区位于蓄水位以下，约为 20%；降雨过程中滑带土饱和区最大可达 45%。

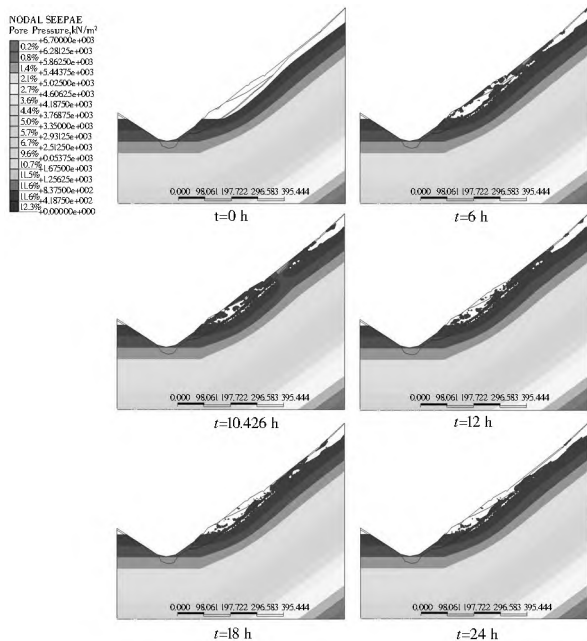


图 1 暴雨工况蓄水条件下自然边坡不同时刻孔隙水压分布示意图

Fig. 1 Pore water pressure distribution of the natural slope under the impounding and heavy rain conditions

3.2 基于静力有限元法的暴雨入渗条件下天然及工程边坡(蓄水后)稳定性评价

暴雨入渗条件下天然及工程边坡(蓄水后)应力场等值线分布见图 3、图 4。暴雨工况下，自然边坡蓄水后滑带土以上范围内最大主应力约 0~ 6.3 MPa，最小主应力约 0~ 3.4 MPa；基岩范围内最大主应力约 2.4~ 14.0 MPa，最小主应力约 0.7~ 6.1 MPa；工程边坡蓄水后滑带土以上范围内最大主应力约 0~ 2.9 MPa，最小主应力约 0~ 0.7 MPa；基岩范围内最大主应力约 2.5~ 14.0 MPa，最小主应力约 0.5~ 6.1 MPa。工程边坡中下部应力水平较中上部明显增加，并向山底部逐渐过渡。受结构面分布的影响，边坡岩土体大、小主应力均在抗剪洞、锚固洞及岩层分界部位出现突变现象，这主要是由于力学参数差异较大所致。

暴雨入渗条件下滑坡体剖面天然及工程边坡(蓄水后)有限元法安全系数结果见表 3。从表中可知暴雨入渗条件下

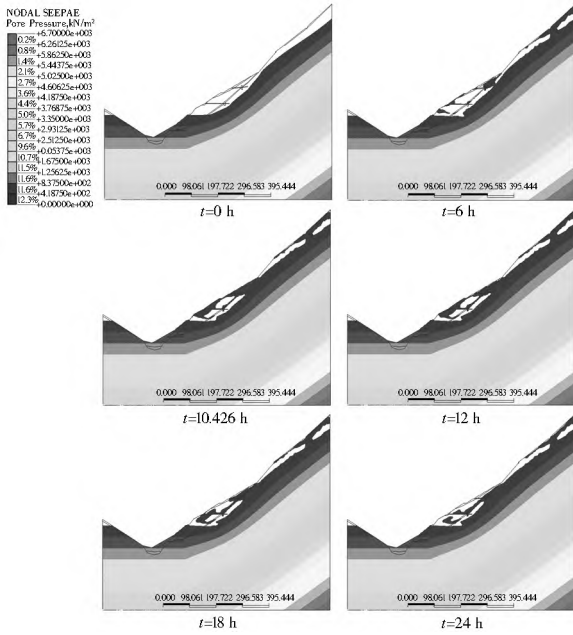


图2 暴雨工况蓄水条件下工程边坡不同时刻孔隙水压分布示意图

Fig. 2 Pore water pressure distribution of the engineering slope under the impounding and heavy rain conditions

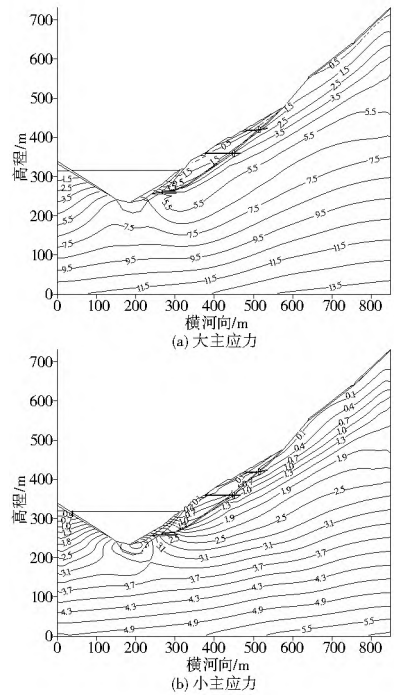


图4 正常运行期暴雨工况下工程边坡(蓄水后)应力等值线分布(单位:MPa)

Fig. 4 Stress isoline distribution of the engineering slope under the heavy rain condition after impounding in the normal operation period (unit: MPa)

表3 暴雨工况条件下天然、工程边坡稳定性计算成果

Table 3 The calculated stabilities of natural and engineering slopes under heavy rain condition

计算工况	荷载	安全系数	规范允许值
暴雨工况蓄水后(天然边坡)	自重+暴雨地下水压力+正常蓄水位岸坡水压力	1.185	1.10
暴雨工况蓄水后(工程边坡)	自重+暴雨地下水压力+支护措施+正常蓄水位岸坡水压力	1.602	1.10

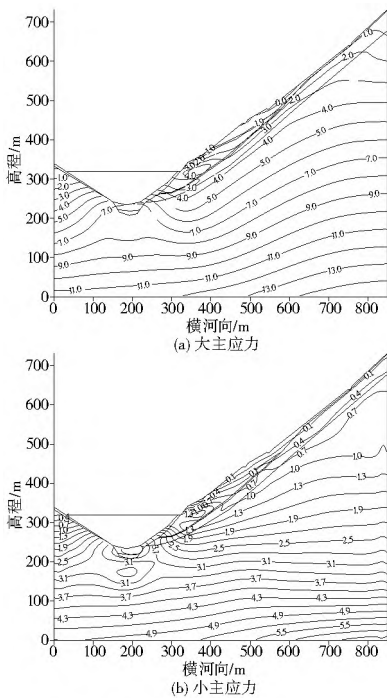


图3 暴雨工况下自然边坡(蓄水后)应力等值线分布(单位:MPa)

Fig. 3 Stress isoline distribution of the natural slope under the heavy rain condition after impounding (unit: MPa)

天然边坡(蓄水后)安全系数为 1.185,工程边坡(蓄水后)安全系数为 1.602。

4 结论

(1) 卡拉水电站上游库区的上田镇滑坡体自然边坡滑带土倾角随高程的增加增大,表明自然边坡上部稳定性较差,而下部稳定性相对较好。暴雨工况下蓄水后,自然边坡在各工况下的安全系数处于规范允许临界值,安全储备较低,

存在较大失稳可能或处于临滑状态。暴雨入渗会引起边坡的稳定性降低,安全系数减小,并可能引起边坡失稳。因此,必须对自然边坡采取必要的工程处理措施,才能确保蓄水后边坡的长期稳定性。

(2) 卡拉水电站上游库区上田镇滑坡体工程边坡由于砂砾料分布范围较广而黏性料分布相对较少以及采取了排水洞等工程措施,孔隙水压力消散较快,地下水位受暴雨入渗的影响而有所提高。暴雨工况正常运行期的工程边坡抗滑稳定安全系数比自然边坡有明显提升,表明工程边坡采用的工程措施是必要且有效的。

(3) 对于暴雨入渗过程下的饱和非饱和渗流过程的模拟,以及滑坡渗流特性、稳定性分析主要采用了平面有限元法。此种方法能更准确地反映滑坡体边坡的实际状态,应力场、渗流场分布能得到比较真实的反映。因此,利用有限元法能为进一步研究暴雨入渗对边坡稳定的影响及安全性评价提供依据。

参考文献(References):

[1] 张家发. 三维饱和非饱和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 Jiafa. 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. (in Chinese))
- [2] 周家文, 徐卫亚, 邓俊晔, 等. 降雨入渗条件下边坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1066-1073. (ZHOU Jiawen, XU Weiyu, DENG Junye, et al. Stability Analysis of Slope under the Condition of Rainfall Infiltration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1066-1073. (in Chinese))
- [3] 黄润秋, 戚国庆. 非饱和渗流基质吸力对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2002, (4): 343-348. (HUANG Runqiu, QI Guoqing. The Effect of Unsaturated Soil Suction on Slope Stability[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, (4): 343-348. (in Chinese))
- [4] Zhang Qiangyong, Zhang Xutao. Stability Analysis Method of Rockmass Slopes under Atomized Rain Infiltration and Its Application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1572-1576.
- [5] Liu Liling, Yin Kunlong. Analysis of Rainfall Infiltration Mechanism of Rainstorm Landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1061-1066.
- [6] 周桂云. 饱和-非饱和和非稳定渗流有限元分析方法的改进[J]. 水利水电科技进展, 2009, (1): 5-8. (ZHOU Guiyun. Improvement of Finite Element Analysis of Unstable Saturated-unsaturated Seepage[J]. Engineering and Architecture of Jinling Institute of Technology, 2009, (1): 5-8. (in Chinese))
- [7] Crosta, Giovanni. Regionalization of Rainfall Thresholds: An Aid to Landslide Hazard Evaluation[J]. Environmental Geology, 1998, 35(2-3): 131-145.
- [8] 廖红建, 姬建, 曾静. 考虑饱和非饱和渗流作用的土质边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3229-3234. (LIAO Hongjian, JI Jian, ZENG Jing. Stability Analysis of Soil Slopes Considering Saturated and Unsaturated Seepage Effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3229-3234. (in Chinese))
- [9] 荣冠, 王思敬, 王恩志, 等. 强降雨下元磨公路典型工程边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 704-711. (RONG Guan, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. Stability Analysis of Yuanmo Highway Slope under Intensive Rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 704-711. (in Chinese))
- [10] Yin, Xiaotao; Ran, Changguo; Wang, Shulin. Transient stability analysis of Dishuiya Landslide No. 1 under rainfall condition. Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics, v29, n2, p501-506, February 2008.
- [11] 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): 333-336. (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): 333-336. (in Chinese))
- [12] 戚国庆, 黄润秋, 速宝玉, 等. 岩质边坡降雨入渗过程的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 625-629. (QI Guoqing, Huang Runqiu, SU Baoyu, et al. Numeric Simulation on Rainfall Infiltration on Rock Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 625-629. (in Chinese))
- [13] 刘小文, 耿小牧. 降雨入渗对土坡稳定性影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2006, (6): 40-42. (LIU Xiaowen, GENG Xiaomu. Stability Analysis of Soil Slope under Rainfall Seepage Influence[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, (6): 40-42. (in Chinese))
- [14] 徐晗, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1957-1961. (XU Han, ZHU Yiwen, CAI Yuanqi, et al. Stability Analysis of Unsaturated Soil Slopes under Rainfall Infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1957-1961. (in Chinese))
- [15] 朱岳明, 龚道勇, 罗平平. 三维饱和-非饱和降雨入渗渗流场分析[J]. 水利学报, 2003, 34(12): 66-70. (ZHU Yue ming, GONG Daoyong, LUO Pingping. Analysis of 3D Saturated-unsaturated Raining Infiltration Seepage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(12): 66-70. (in Chinese))

(上接第 91 页)

- [10] Brujan, E. A. The equation of bubble dynamics in a compressible linear viscoelastic liquid[J]. Fluid Dyn. Res., 2001, 29: 287-294.
- [11] Paris, F., Canas, J. Boundary Element Method Fundamentals and Applications[J]. Oxford University Press, 1997.
- [12] Abramowitz, M., Stegun, I. A. Handbook of Mathematical Functions[M]. New York, 1965.
- [13] Li, J. General explicit difference formulas for numerical differentiation[J]. Comput. Appl. Math, 2005, 183: 29-52.
- [14] Brujan, E. A. Shock wave emission from laser-induced cavitation bubbles in polymer solutions[J]. Ultrasonics 2008, 48: 423-426.
- [15] Brujan, E. A., Ikeda, T., Matsumoto, Y. Dynamics of ultrasound-induced cavitation bubbles in non-Newtonian liquids and near a rigid boundary[J]. Phys. Fluids, 2004, 16: 2401-2410.