

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0763-06

雾化雨入渗影响下岩质边坡的流固耦合分析

张绪涛^{1, 2}, 李 勇², 张强勇²

(1. 聊城大学 建筑工程学院, 山东 聊城 252000; 2. 山东大学 岩土与结构工程中心, 济南 250061)

摘 要: 借鉴不饱和渗流的研究方法, 参考考虑雾化雨入渗的数学模型和应用有限元软件 ABAQUS, 分析了雾化雨入渗影响下边坡位移场和渗流场的变化, 以及雾化雨入渗对岩体高边坡稳定性的影响。将该方法应用于某水电站大型岩体高边坡工程, 得到具有重要工程指导意义的结论和建议。结果表明, 雾化雨入渗使得坡体发生了较为明显的变形, 且入渗量越大边坡的变形越大, 应加强坡面的保护, 最大限度地减小雨水入渗, 降低雾化雨入渗对边坡的影响。

关 键 词: 边坡工程; 雾化雨入渗; 暂态饱和区; 流固耦合; 边坡安全稳定性评价

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

The fluid-structure coupling analysis of rock slope under the influence of atomized rainfall infiltration

ZHANG Xu-tao^{1,2}, LI Yong², ZHANG Qiang-yong²

(1. School of Architecture and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, 252000, China;

2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Referring to the research method of unsaturated seepage and the mathematical model due to atomized rainfall infiltration, using the finite element program ABAQUS, the change of slope's seepage field and displacement field under the influence of atomized rainfall infiltration is analyzed. The stability of high rock slope due to atomized rainfall infiltration is analyzed, and this method is used in rock slope of a certain hydropower station; the instructional conclusion is gained. Computed results show that slope's distortion is big because of atomized rainfall infiltration; and the distortion is bigger the infiltration quantity is bigger. So, we should reinforce the protection of slope and try my best to reduce rainfall infiltration and reduce the influence of atomized rainfall infiltration.

Key words: slope engineering; atomized rainfall infiltration; temporary saturation zone; fluid-structure coupling; safety stability evaluation for slope

1 引 言

泄洪雾化是泄水建筑物泄洪时伴随的一种物理现象。不管泄水建筑物采用哪种泄洪方式, 下泄水流以何种流态与下游连接均会出现雾化现象, 尤其是空中消能充分的高坝, 泄洪雾化问题尤为突出。从大量已建工程泄洪时暴露出的严重问题来看, 泄洪雾化雨导致岩坡滑坡时常发生, 是一种损失重大的灾害, 例如, 1989年龙羊峡水电站底孔泄流时造成右岸山体滑坡, 经济损失巨大; 1986年白山水电站泄洪导致局部山体发生滑坡; 1992年东江水电站泄洪造成两岸风化岩体及土体滑落。

某水电站是一座大型水电工程, 最大坝高 156 m, 河谷狭窄, 泄流量大, 泄洪水头大, 空中泄流落差也大, 空中消能采用频繁, 泄洪雾化问题尤为突出。该水电站的岩体高边坡最大开挖高度近 200 m, 边坡分布有厚达 40 m 的 F3 大断层, 边坡地层结构松散, 地质条件十分复杂, 施工期间该边坡曾发生过 4 次比较大的滑坡。泄洪时产生的雾化雨会直接影响高边坡的稳定性, 因此研究雾化雨入渗引起的边坡非饱和带内暂态孔隙水压力的升高, 继而研究雾化雨入渗对边坡稳定性的影响, 并提出针对性的控制和防治措施非常必要。

从国内外的研究成果来看, 在雾化雨入渗分析

收稿日期: 2006-05-16

作者简介: 张绪涛, 男, 1980 年生, 硕士, 主要从事岩土与结构工程方面的教学与研究工作。E-mail: zxt1980@mail.sdu.edu.cn。

在实际工程问题中的应用目前的研究成果还比较少, 张有天等^[1, 2]应用裂隙网络模型对某岩体边坡进行了非恒定渗流分析; 张家发等^[3]对某山体高边坡的饱和和非饱和渗流场进行了初步分析; 胡云进、速宝玉^[4, 5]建立了雾化雨入渗的数学模型并且编制了相应的程序, 对溪洛渡水垫塘区岸坡进行了雾化雨入渗分析, 虽然已经取得了上述的研究成果, 但是研究主要是针对渗流场进行的, 没有关注雾化雨入渗影响下的边坡位移场的变化, 即没有进行流固耦合分析, 本文采用大型有限元软件ABAQUS对雾化雨影响下的高边坡进行了流固耦合分析, 获得了具有重要工程指导意义的计算结论。

2 雾化雨入渗的数学模型

雾化雨入渗同降雨入渗一样, 是一个饱和和非饱和、非恒定渗流过程, 最大的差别在于雾化雨入渗在整个入渗边界上的雨强是不相等的。进行雾化雨入渗分析时可借鉴降雨入渗的分析方法, 但需根据雾化雨强度分布把整个入渗边界分为几部分。雾化雨入渗边界是一个流量边界, 只是这个入渗流量是变化的, 在计算过程中需要根据介质含水率的变化和雾化雨强度的变化不断地调整入渗流量, 从而实现雾化雨入渗问题的数值模拟。

2.1 基本方程

以压力水头为未知量, 描述雾化雨入渗过程的基本方程^[4, 6]可写为

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_r(h) k_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} (h + x_3) \right] - [C(h) + \beta S_s] \frac{\partial h}{\partial t} - S = 0 \quad (1)$$

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_i 为位置坐标; C 为比水容度; 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。

2.2 定解条件

初始条件由压力水头描述:

$$h(x_i, 0) = h_0(x_i), \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中 h_0 为 x_i 的给定函数。

已知压力水头边界为

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

式中 h_c 为 x_i 和 t 的给定函数。

已知流量边界为

$$k_r \sum_{i=1}^3 \left(\sum_{j=1}^3 k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} \right) n_i = -v(x_i, t) \quad (4)$$

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。

雾化雨入渗边界为已知流量边界或已知水头边界, 在迭代计算过程中需不断加以调整, 具体处理方法见文^[7]。

3 ABAQUS 中的流固耦合分析

ABAQUS 有限元软件由美国 HKS 公司(Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC.)研制开发, 在国际上被公认为是功能最强的有限元软件之一, 可以分析各种固体力学、结构力学系统, 特别是能够处理非常复杂的问题和模拟高度非线性问题。ABAQUS 由两个主分析模块 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 构成; ABAQUS 分析模型通常由若干不同的部分组成, 如离散化的几何形体、单元特性、材料数据、载荷和边界条件、分析类型和输出要求等。

由于流固耦合问题的复杂性, 研究它自然需要综合运用多种物理的、数学的方法和原理, 如宏观连续介质原理、有效应力原则、虚功原理、Darcy 定律等, 就是建立流固耦合数学模型必备的基础。在 ABAQUS 中公式的表示方法与通常的表示方法有些差别, 由应力场平衡方程和渗流场连续方程共同组成 ABAQUS 中流固耦合问题的控制方程组^[8]为

$$\left. \begin{aligned} I^N - P^N &= 0; \\ \int_V \delta u_w \frac{1}{J} \frac{d}{dt} (J \rho_w n_w) dV + \\ \int_V \delta u_w \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_w \left(-k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] dV \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据式(5)流固耦合的控制方程组, 结合相应的边界条件, 应用大型有限元软件 ABAQUS 对雾化雨入渗影响下的岩体高边坡进行了流固耦合分析。

4 工程应用

4.1 工程概况

某水电站岩体高边坡开挖高度约 150 m, 坡体地质条件十分复杂, 边坡在施工期间曾发生过比较大的滑坡, 经过治理, 边坡得以稳定。边坡地层岩性为含煤中细砂岩和煤质页岩互层, 边坡分布有规模不等的断层和地质结构面。为评价雾化雨入渗对

治理后边坡安全稳定的影响,应用有限元软件 ABAQUS 分析了雾化雨入渗影响下边坡位移场和渗流场的变化,继而分析了雾化雨入渗对岩体高边坡稳定性的影响。

4.2 计算参数和计算断面

4.2.1 雾化雨分区

选取雾化雨强度最大处的剖面作为计算断面,如图 1 所示。由于缺乏雾化雨的实测资料,本文根据工程类比经验对雾化雨的强度进行了分区,图 1 将边坡按高程分为下述 4 个雾化雨区:①高程为 790 m 以下的区域雨强为 600 mm/h;②高程为 790~824 m 区域雨强为 300 mm/h;③高程为 824~850 m 区域雨强为 50 mm/h;④高程为 850 m 以上区域雨强为 20 mm/h。

4.2.2 计算断面

边坡稳定分析的典型计算断面如图 1 所示。

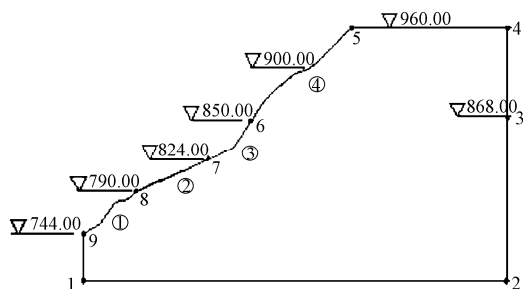


图 1 边坡的计算剖面及雾化雨分区(单位: m)

Fig.1 Computation section of the slope and atomized rain zone (unit: m)

4.2.3 雾化雨入渗的计算工况

边坡的坡面保护方式为喷 10 cm 厚的混凝土护坡,并相应设置地面排水沟。由于缺乏混凝土护坡和排水沟对减少雾化雨入渗的定量资料,故本文在进行雾化雨入渗分析时,对经过处理的坡面区域入渗的强度取雾化雨强度的 10%, 25% 和 50% 来做敏感性分析。根据入渗强度的不同,拟定了 3 种工况见表 1。

表 1 计算工况
Table1 Calculation conditions

工况	雾化雨入渗时间 / d	入渗量占雾化雨强度 的百分比/%
1	3	10
2	3	25
3	3	50

4.2.4 边坡岩体的物理力学参数

边坡岩体的物理力学参数见表 2。

表 2 边坡岩体的物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical and mechanical parameter of slope rockmass

岩性	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	渗透系数 / $10^{-6} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	抗剪(断)强度		
			$\phi' / (^{\circ})$	$\phi'_b / (^{\circ})$	c / MPa
基岩	26.5	0.50	50.19	25.10	1.1
弱卸荷带	26.5	1.00	34.99	17.50	0.40
强卸荷带	25.0	2.00	25.64	12.82	0.32
层间破碎带	25.0	1.00	19.29	9.65	0.09
F3 断层带	25.0	0.70	19.80	9.90	0.08
混凝土护坡	26.5	0.01	47.70	23.85	1.2

4.2.5 地震裂度

坝区抗震设防烈度按 7 度考虑。

4.3 计算结果与分析

4.3.1 入渗对渗流场的影响

运用有限元程序 ABAQUS 对 3 种工况下的岩体高边坡进行了雾化雨入渗的流固耦合分析。计算所得的不同时刻的孔隙水压力分布见图 2~4。由于篇幅所限,本文中仅给出了工况 3 在 3 个关键时刻($t = 0 \text{ h}$, 初始状态即在自然水位渗流作用下的状态; $t = 72 \text{ h}$, 雾化雨入渗结束的时刻; $t = 192 \text{ h}$, 雾化雨入渗结束 5 d 以后)的孔隙水压力分布图。为了清晰地表示出地下水位以上区域压力水头随雾化雨入渗的变化情况,特在计算剖面中布置了一典型断面(断面位置见孔隙水压力分布图中的 1-1 剖面),并且画出了 1-1 剖面在不同时刻孔隙水压力与埋深(单位: m, 即离地表的垂直距离)的关系曲线。

由图 2~5 可以看出,①由于岩体的渗透性由表及里逐渐减弱,雾化雨入渗 24 h 后坡体中出现暂态饱和区,随着入渗的进一步进行,暂态饱和区的范围逐渐变大,入渗结束时暂态饱和区的最大深度(距地表的垂直距离)大约为 10~15 m,雨停之后暂态饱和区将逐步下移,直至完全消散。②随着入渗

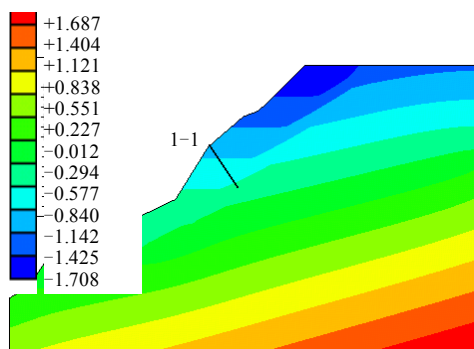


图 2 $t = 0 \text{ h}$ 时刻计算剖面的孔隙水压力分布(单位: MPa)

Fig.2 Distribution of pore water pressure of computation section at the time of 0h(unit: MPa)

的进行, 初始的地下水位将被抬高; 地下水位的增幅与雾化雨区护面的防渗措施有关。③由于弱卸荷带岩体和基岩的渗透性弱于强卸荷带岩体的渗透性, 渗入到强卸荷带岩体中的雨水相当部分沿着强卸荷带和弱卸荷带的分界面和层间错动带渗出, 因此暂态饱和区主要存在于强卸荷带岩体中, 即主要在坡体的上部。

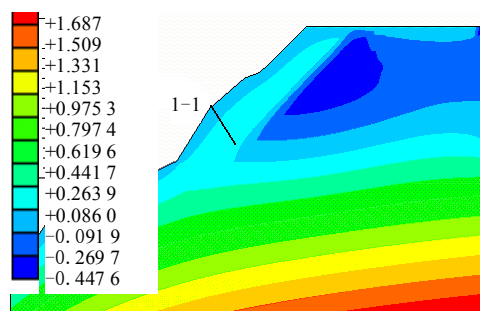


图3 $t = 72$ h 时刻计算剖面的孔隙水压力分布(单位: MPa)
Fig.3 Distribution of pore water pressure of computation section at the time of 72 h(unit: MPa)

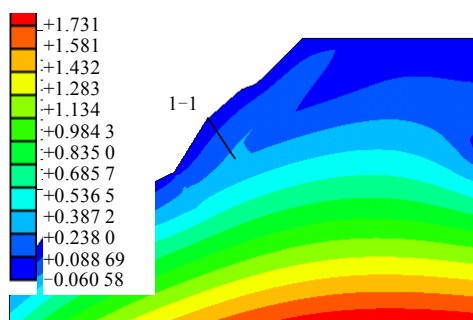


图4 $t = 192$ h 时刻计算剖面的孔隙水压力分布
(单位: MPa)
Fig.4 Distribution of pore water pressure of computation section at the time of 192 h(unit: MPa)

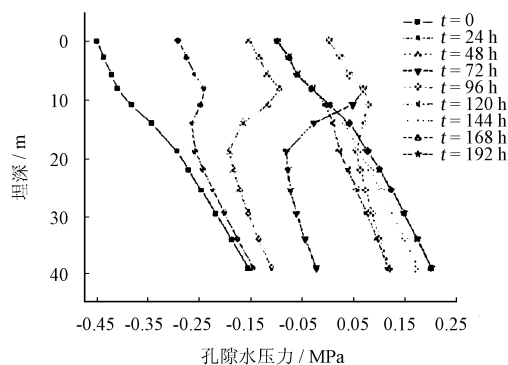


图5 1-1 断面工况 3 时不同时刻的
孔隙水压力与埋深的关系
Fig.5 Relation of 1-1 section between pore water pressure and depth under the third condition at any time

由图 5 可知, 在雾化雨入渗之前坡体以地下水位为分界面可以被分为两部分, 地下水位以上的部分为非饱和区, 地下水位以下的部分为饱和区。然而随着雨水的入渗, 由于坡体上部的渗透系数相对于坡体下部来说要大, 从而入渗的雨水会在坡体上部形成暂态饱和区。随着雨水的进一步渗入, 坡体上部的暂态饱和区的范围会越来越大, 如图 5 中的 $t = 72$ h 时刻。雾化雨入渗结束后, 坡面的入渗会逐渐停止, 同时暂态饱和区中雨水也会逐步下渗, 因此坡体上部的暂态饱和区的范围会逐渐减小直至完全消失, 如图 5 中的 $t = 192$ h 时刻。地下水位也会由于雨水的渗入而升高。

4.3.2 入渗对位移场的影响

运用有限元程序 ABAQUS 对 3 种工况下的岩体高边坡进行了雾化雨入渗的流固耦合分析。计算所得不同时刻的位移场见图 6~8。由于篇幅所限, 本文只给出了工况 3 在 3 个关键时刻($t = 0$ h, 初始状态即在自然水位渗流作用下的状态; $t = 72$ h, 雾化雨入渗结束的时刻; $t = 192$ h, 雾化雨入渗结束 5 d 以后)的位移场分布图。表 3 为 3 种工况下计算剖面的最大位移值。图 9 为 3 种工况下坡体最大位移值随时间的变化规律, $t = 0 \sim 72$ h 为雾化雨入渗阶段, $t = 72 \sim 192$ h 为暂态饱和区的消散阶段。

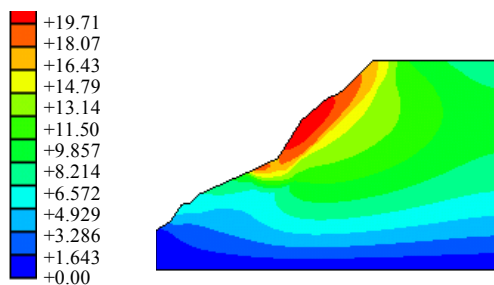


图6 $t = 0$ h 时刻计算剖面的位移场分布(单位: 10^{-3} m)
Fig.6 Distribution of displacement field of computation section at the time of 0h(unit: 10^{-3} m)

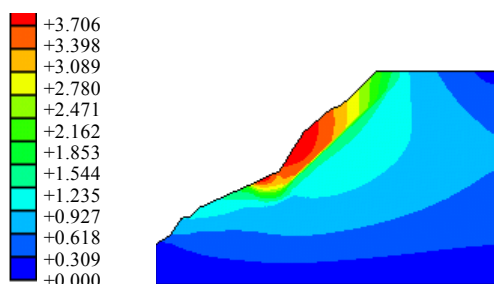


图7 $t = 72$ h 时刻计算剖面的位移场分布(单位: 10^{-2} m)
Fig.7 Distribution of displacement field of computation section at the time of 72 h(unit: 10^{-2} m)

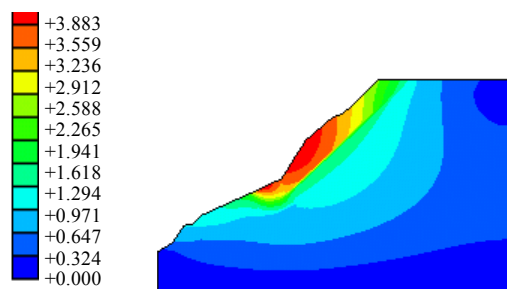


图 8 $t = 192$ h 时刻计算剖面的位移场分布(单位: 10^{-2} m)
Fig.8 Distribution of displacement field of computation section at the time of 192h(unit: 10^{-2} m)

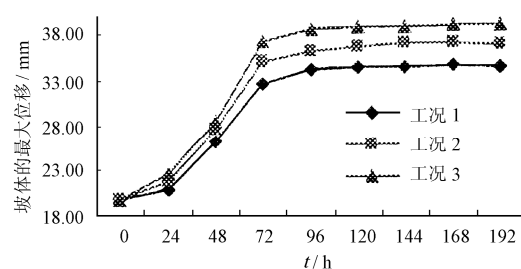


图 9 3 种工况下坡体的最大位移值对比
Fig.9 Comparison between the biggest displacement of slope under three conditions

表 3 3 种工况下各个时刻坡体的最大位移值
Table 3 The biggest displacement of slope under three conditions at any time (mm)

(mm)									
工况	时刻 / h								
	0	24	48	72	96	120	144	168	192
1	19.71	20.81	26.14	32.60	34.10	34.29	34.29	34.48	34.20
2	19.71	21.65	27.36	34.97	36.07	36.44	36.87	36.85	36.79
3	19.71	22.52	28.29	37.06	38.40	38.78	38.78	38.85	38.83

注: $t = 0 \sim 72$ h 为雾化雨入渗阶段, $t = 72 \sim 192$ h 为暂态饱和区消散阶段。

由上述计算结果分析可知, 在自然水位渗流作用下, 由于地下水在坡体中的流动带走了部分细颗粒以及在岩体裂隙中的流动, 降低了岩体的抗剪强度, 使得边坡出现了变形。雾化雨入渗后坡体上部由于水的渗入而出现了暂态饱和区, 坡体上部的重量逐渐变大, 使得坡体上部的变形更为明显。在雾化雨结束后暂态饱和区的消散阶段, 坡体上部的孔隙水逐渐下渗, 由于坡体下部基岩的渗透系数比较小, 坡体上部中的水会沿着坡面流动, 在坡体上部重量减小和动水压力的双重因素的影响下坡体的最大位移量变化不大。变形较大的部位出现在边坡的

上部, 坡脚处变形相对较小; 渗流引起的边坡变形方向为顺坡面向下变形。

在自然水位渗流作用下($t = 0$ h)坡体的最大位移为 19.17 mm, 在雾化雨入渗结束时($t = 72$ h)坡体的最大位移是 37.06 mm, 位移的最大值增大了近一倍, 雾化雨结束 5 d 后($t = 192$ h)的最大位移是 38.83 mm, 位移增大不明显, 可见雾化雨的入渗对坡体位移的影响很大, 在雾化雨入渗的影响下坡体的最大位移较之以前增大了近一倍; 对比 3 种工况可知, 入渗量对坡体位移的影响比较明显, 入渗量越大坡体的位移越大, 因此应设法加强坡体表面的保护, 并做好坡体表面积水的疏导, 以减小雾化雨入渗对坡体稳定的影响。

5 结 语

本文借鉴考虑地表入渗影响的非饱和土坡稳定性的研究方法, 参考了考虑雾化雨入渗的数学模型, 应用有限元软件 ABAQUS 分析了雾化雨入渗影响下边坡位移场和渗流场的变化, 继而分析了雾化雨入渗对岩体高边坡稳定性的影响, 得出了具有重要工程指导意义的结论和建议。计算分析结果表明, 雾化雨入渗是影响边坡安全稳定的重要因素, 随着雾化雨的不断入渗, 边坡内非饱和带的基质吸力将逐渐减小, 甚至在原先的非饱和带中会出现暂态饱和区, 这不仅增加了促使岩坡滑动的力, 同时也使得岩体的抗剪强度不断降低, 此外水还会软化岩体, 降低岩体的有效凝聚力和内摩擦角。上述三个方面的不利因素使得坡体发生了较为明显的变形, 由计算得知入渗量越大坡体的位移越大。为了减小雾化雨入渗对边坡稳定的影响, 应加强坡面的保护, 最大限度地减小雨水入渗, 降低雾化雨入渗对边坡的影响。

参 考 文 献

- [1] 张有天, 王镭, 陈平. 有地表入渗的岩体渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(2): 103—111.
ZHANG You-tian, WANG Lei, CHEN Ping. Analysis of water percolation in rockmass due to surface infiltration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(2): 103—111.
- [2] 张有天, 刘中. 降雨过程裂隙网络饱和/非饱和、非恒定渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 104—111.
ZHANG You-tian, LIU Zhong. Saturated/Unsaturated,

- unsteady seepage analysis of rock fractured networks due to the percolation of rainfall[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(2): 104—111.
- [3] 张家发, 李思慎, 叶自桐. 高边坡山体饱和和非饱和渗流场的初步分析[J]. 人民长江, 1998, 29(1): 44—46.
- ZHANG Jia-fa, LI Si-shen, YE Zi-tong. Primary analysis of hgh slope rockmass saturated unsaturated seepage field[J]. **Yangtze River**, 1998, 29(1): 44—46.
- [4] 胡云进, 速宝玉, 詹美礼. 溪洛渡水垫塘区岸坡雾化雨入渗数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 291—1 296.
- HU Yun-jin, SU Bao-yu, ZHAN Mei-li. Numerical analysis on atomized rain infiltration into cushion pool slope in Xiluodu Project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(8): 1 291—1 296.
- [5] 胡云进. 裂隙非饱和渗流试验研究及有地表入渗的裂隙岩体渗流数值分析[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [6] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M] (第二版). 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [7] 胡云进, 速宝玉, 仲济刚. 有地表入渗的裂隙岩体渗流数值分析及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 1 019—1 022.
- HU Yun-jin, SU Bao-yu, ZHONG Ji-gang. Numerical analysis of water flow in fractured rockmass due to surface infiltration and application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Supp.): 1 019—1 022.
- [8] 张欣. 基于 ABAQUS 流固耦合理论的库岸滑坡稳定性分析[硕士学位论文 D]. 济南: 山东大学, 2005.