

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S2.076

降雨入渗对板岩边坡稳定的影响及加固措施研究

乔 兰¹, 姜 波², 庞林祥^{1, 3}, 崔 明¹

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国电力工程顾问集团 华北电力设计院工程有限公司, 北京 100120;
3. 武警水电部队 第一总队第一支队, 河北 唐山 063000)

摘 要: 板岩边坡在国内边坡工程中较为常见, 常伴有倾倒变形, 在其特有的结构性质影响下边坡失稳频发。通过对苗尾水电站右坝基板岩边坡失稳现象分析, 研究了板岩边坡在降雨入渗情况下的变形特征, 在该基础之上运用稳定理论探讨降雨入渗影响边坡失稳机制, 结合实例分析提出了板岩边坡失稳加固关键措施, 并通过现场实际检验效果。研究结果表明, 板岩边坡的节理特性、开挖坡比、降雨入渗是造成板岩边坡失稳的关键因素, 进行加固必须从防雨下渗和束腰加固着手。苗尾水电站右坝基板岩边坡加固后经受住了汛期和炮震的影响, 说明边坡失稳认识及加固措施较为准确, 对于类似工程具有一定的参考价值。

关 键 词: 板岩边坡; 暂态水压力; 苗尾水电站; 失稳机制; 倾倒变形

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)增2-0545-06

Research on influence of rainfall infiltration on slate slope stability and reinforcement measures

QIAO Lan¹, JIANG Bo², PANG Lin-xiang^{1, 3}, CUI Ming¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. North China Power Engineering Co., Ltd., China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China;
3. The First Team of the No.1 General Team, Armed Police Hydropower Troops, Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract: Instability of slate slope, that is more common in slope engineering, often accompanied by toppling deformation, occurred frequently due to the unique structure of slate. The instability characteristics of slate slope subject to rainfall infiltration are studied by analyzing the instability phenomenon of the right dam foundation slate slope in Miaowei hydropower station; then the stability theory is used in the instability mechanism of slate slope, and combining the engineering practice with stability theory subsequently. Finally, the key measures for preventing instability phenomenon are proposed and used in the subsequent engineering. The results show that the slate joint characteristics, slope excavation ratio and rainfall infiltration are the key factors influencing the stability of slate slope; reinforcement is needed first to prevent rainfall infiltration and, have a good design of waist reinforcement. The slate slope in Miaowei hydropower station after reinforcement is safe and withstand the impact of flood and blasting, so as to prove that the instability causes of slate slope and reinforcement measure are well analyzed. That are useful for the similar slopes when they are need to reinforcement or deal with the instability.

Keywords: slate slope; transient water pressure; Miaowei hydropower station; instability mechanism; toppling deformation

1 引 言

板岩在边坡工程中大量存在, 在体内大量纵横交错的节理切割下形成具有独特的块裂层状岩体系统。在降雨下渗的作用下加之部分岩层性质软弱, 出现了大量边坡变形和崩塌破坏^[1-2]。国内外学者对此进行了大量研究, Tohari 等^[3-4]对降雨入渗模型

和原位试验进行了研究。周家华等^[5]采用 Mohr-Coulomb 破坏准则, 对降雨作用下形成的非饱和边坡的抗剪强度进行了计算。王冠等^[6]研究了考虑非饱和区强度变化及饱和区渗透力影响的降雨过程边坡稳定性强度折减分析法, 并应用于元磨公路 K261 段典型滑坡体工程边坡计算。许建聪等^[7]对降雨作用下碎石土滑坡的变形解体破坏过程进行了研究,

收稿日期: 2014-04-15

第一作者简介: 乔兰, 女, 1965 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土方面的教学与研究。

通讯作者: 庞林祥, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事岩土、防灾减灾等方面研究。E-mail: plinx2011@sina.com

揭示了降雨作用下中深层碎石土滑坡变形解体破坏的主要机制和一般的力学机制。White 等^[8]对板岩边坡的降雨下渗过程及边坡稳定进行了分析, 得出降雨停止后一段时间边坡稳定性最差。Cai 等^[9]对降雨下渗的岩质边坡稳定进行了研究。

对于倾倒变形板岩边坡, 由于其特有的倾倒变形及层理结构, 下渗的雨水会在非饱和区上形成滞水和形成饱和渗流模型无法考虑到的排水不利影响因素^[10], 增加了暂态水压力^[11], 其常成为边坡失稳的控制性因素。因此, 了解暂态水在板岩边坡中的变化规律以及对板岩边坡失稳的影响具有重要意义。对于库岸边坡, 因其地下水位随着库区蓄水急剧上升, 在进行变形加固过程中与常规边坡相比有其特殊性。

本文以云南苗尾水电站右坝基边坡为工程实例, 进行板岩边坡失稳演化分析、降雨入渗对于板岩边坡作用机制以及板岩边坡失稳加固措施研究。该边坡高差大、边坡陡, 是倾倒-弯曲型变形板岩边坡, 在边坡工程中具有代表性, 本研究成果对于指导类似工程具有重要参考价值。

2 板岩边坡失稳实例分析

2.1 板岩边坡失稳实例

苗尾水电站右坝基边坡位于坝轴线至小溜槽沟之间, 坡度为 $50^{\circ} \sim 65^{\circ}$, 局部为陡崖。边坡主要为绢云板岩, 遇水极易软化, 强度降低约 18%。边坡在小溜槽沟下游, 为倾倒-弯折型变形边坡, 在 1 410 m 高程以上分布水平深度为 0~67 m 的极强倾倒变形岩体。在倾倒变形的作用下岩体内部出现了较多张拉节理。2013 年 5 月 14 日, 开挖完成以后, 典型地质剖面及体型如图 1 所示。

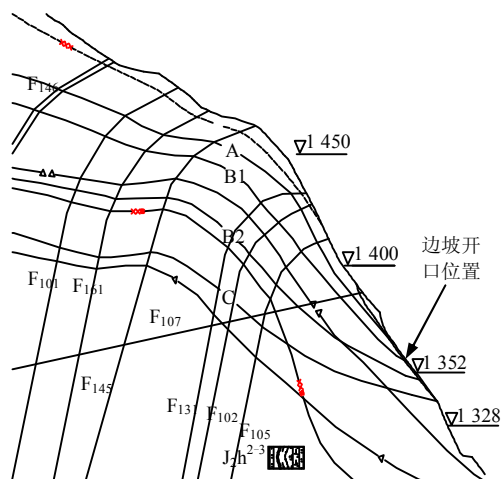


图 1 典型地质剖面及开挖后体型图 (单位: m)

Fig.1 Typical geological section and figure chart after excavation (unit: m)

2013 年 5 月 27 日, 在汛期降雨下渗的作用下 1 384~1 340 m 高程发生最大厚度为 3 m 的浅层滑动, 同时在 1 390~1 410 m 和 1 450~1 490 m 高程出现了大量入岩裂缝, 见图 2。由此可以判断, 裂缝是在下部滑坡的张拉变形作用下引起的后缘张拉裂缝。裂缝走向与反倾节理走向基本一致, 因此边坡极为不稳, 随时都有可能产生滑崩。如果发生崩塌, 将引起上部边坡高差约 300 m 的边坡垮塌, 其经济损失难以估量。



图 2 滑塌及裂缝分布

Fig.2 Slump and crack distribution

2.2 失稳成因分析

综合工程地质条件及现场施工情况, 认为引起滑坡的成因有以下几点。

(1) 边坡岩体特性的影响

边坡岩体特性对于滑坡及裂缝发展具有显著的影响。岩层为薄层状板岩, 反倾斜极强倾倒, 卸荷强烈, 稳定性差。在向外倾角结构面和分布的 7 条顺层断层的切割作用下岩体被分裂成许多大小不一的岩块, 呈现明显的块裂层状结构, 具有独特的“砌块式”结构特征^[12], 其失稳破坏趋势符合拉裂-崩塌模型^[13]。同时, 1~2 m 的层内错动填充泥质充填物, 岩石强度及层间结合强度都比较低, 抗滑阻力降低, 增加了破坏的趋势。

(2) 降雨入渗的影响

根据实测资料可知, 5 月电站工区最大降雨为 50.9 mm/d。板岩缓倾角节理产状为 $N10^{\circ} \sim 20^{\circ} W$ $NE \angle 10^{\circ} \sim 35^{\circ}$, 连通率为 39.1%~56.2%, 降雨下渗严重。雨水经板岩裂隙下渗, 岩块层间不连通, 雨水停留于缓倾角节理之间, 无法流动, 在非饱和区形成上层滞水。从坡顶开始形成暂态非饱和区, 再向边坡内部扩展, 影响范围逐渐扩大^[14], 在坡脚部位形成饱和区逸出点, 在暂态水的作用下坡脚部位的崩坡积碎石土开始滑动。下渗的雨水在节理裂

隙间流动的过程中层间结合物被带走, 进一步降低了边坡岩体的完整性及岩体强度。降雨入渗增加了裂隙张开的趋势, 反之, 裂隙张开度越大, 降雨入渗越严重, 两者相互促成。

(3) 削坡切脚的影响

心墙槽(见图 2)与坝坡面的开挖(从 1 333 m 高程开口, 见图 1), 在上游坝壳区至小溜槽沟范围内(图 2 裂缝分布位置)形成凸出的三面临空状态的“倒三角”体, 导致底部岩体应力集中, 加剧了坡脚岩体的挤压破损。加之坝基开挖切脚影响, 降低边坡护脚支撑作用。

(4) 边坡失稳演化分析

根据以上分析, 边坡失稳受岩体自身特性、降雨入渗和开挖参数等影响, 如果防雨措施得当、开挖参数合理, 边坡失稳可以避免。边坡失稳演化过程主要表现为: 坡脚开挖导致应力集中→产生后缘张拉裂缝→降雨入渗增加额外荷载、降低层间连接→局部滑崩、裂隙扩展→具有崩塌趋势。

具体过程为: (1) 开挖形成的悬臂“倒三角”体, 如一“悬臂梁”, 其最大拉应力出现在梁根顶面, 最大压应力出现在梁根底面, 由于层状板岩力学指标及层间连接较低, 应力集中增加了层间错动, 在“倒三角”体顶面产生张拉裂缝、底部出现挤压破坏; (2) 过多、过宽的裂缝加剧降雨入渗, 增加暂态水压力作用, 降低了岩体抗剪强度^[15], 从而首先在坡脚出现了浅层滑坡; (3) 以上过程基本同时发生, 但又相互促成。如果该趋势得不到有效治理, 该边坡随时都有崩塌的可能。

3 板岩边坡失稳机制

由以上分析可以得出板岩边坡的失稳必须依据降雨入渗形成的暂态水压力的变化情况, 分析岩体失稳机制。

3.1 暂态水压在板岩边坡中的变化规律

在工程及科研中应用最为广泛的是等效连续介质模型, 即根据流量相等原则把岩块-裂隙系统等效成连续介质, 其控制方程^[16]为

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K(h)_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} (h + x_3) \right] + R = [C(h) + \beta S] \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: h 为非饱和区基质势, 饱和区为压力水头; $K(h)_{ij}$ 为 h 的函数, 饱和区为渗透系数; $C(h)$ 为容水度; R 为源项; S 为贮水系数; 非饱和区 $\beta = 1$, 饱和区 $\beta = 0$; x_1 、 x_2 、 x_3 为笛卡尔坐标系中的 x 、 y 、 z 坐标。

对于式 (1) 进行代数离散化后, 采用 Picard 迭代法^[14]进行编程计算电站工区 7 d 降雨情况下的暂态水变化规律, 其峰值计算结果如图 3 所示。板岩岩层基本参数见表 1。

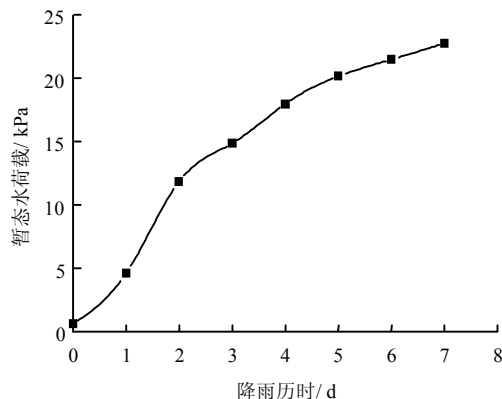


图 3 暂态水压力与降雨历时的关系
Fig.3 Relationship between rainfall duration and transient water pressure

表 1 板岩岩层参数
Table 1 Parameters of slate

序号	岩层	渗透系数/(cm/s)	备注
1	饱和带	9.3×10^{-4}	
2	非饱和带	$9.3 \times 10^{-4} [h]^{-1.047}$	
3	绢云板岩	6.7×10^{-5}	饱和带中

从图 3 中可以看出, 随着降雨的不断下渗, 暂态饱和区内出现影响边坡稳定的裂隙水压力, 即暂态水压力。降雨开始的近 2 d, 暂态水压力上升速度较快, 随着降雨历时的不断延长, 暂态水压力出现继续增长的趋势, 7 d 达到的最大暂态水压力达到 22.75 kPa (相当于 2.275 m 压力水头), 可知边坡顶部出现的裂缝, 除了下部坍塌引起的拉裂以外, 雨水下渗引起的暂态水压力也是关键, 为防止裂缝的继续扩展, 必须做好表面的覆盖。

3.2 板岩边坡失稳机制

从章节 3.1 的分析中可知, 降雨入渗引起的暂态水压力是非常明显的, 对于板岩边坡, 降雨下渗时必须综合考虑降雨入渗的影响。在降雨下渗的作用下板岩层间强度几乎为 0。根据其“砌块式”结构, 选取具有张拉裂隙的明显“砌块”作为研究对象, 忽略分析对象周边应力差, 简化后的模型如图 4 所示(图 2 裂隙分布位置)。图中, U 、 V 为暂态水压; W 为单位长度岩块重度; $Z_1 \sim Z_4$ 为尺寸参数; θ 、 β 为岩块倾角参数; r_w 为水的重度。暂态水压力在坡面线附近数值较小, 在暂态饱和区下缘与非饱和区接触的地带为 0, 最大值出现在非饱和

区中部偏上部位^[14]。

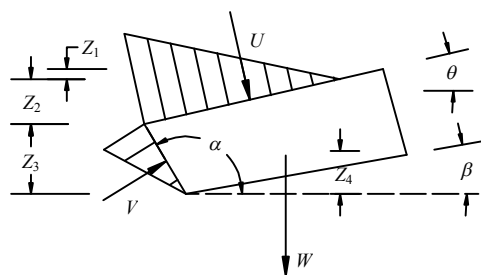


图4 力学模型图
Fig.4 Mechanical model

根据力学模型, 裂隙间产生的垂直于裂隙面的暂态水压力为

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \gamma_w Z_2^2 \sin \theta \\ V &= \frac{1}{2} \gamma_w Z_2 Z_3 \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

则抗滑力 R 和下滑力 F 分别为

$$\left. \begin{aligned} R &= [W \cos \beta + U \cos(\theta - \beta) - V \cos(\beta - \alpha)] \cdot \\ &\quad \tan \varphi + W \sin \beta + c \frac{Z_4}{\sin \beta} \\ F &= U \sin(\theta - \beta) + V \sin(\beta - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: c 、 φ 为黏聚力和内摩擦角。

将式(2)代入式(3), 可得板岩边坡的稳定控制方程:

$$\begin{aligned} \omega &= [W \cos \beta + \frac{1}{2} \gamma_w Z_2^2 \sin \theta \cos(\theta - \beta) - \frac{1}{2} \gamma_w Z_2 Z_3 \cdot \\ &\quad \sin \alpha \cos(\beta - \alpha)] \tan \varphi + W \sin \beta + c \frac{Z_4}{\sin \beta} - \frac{1}{2} \gamma_w Z_2^2 \cdot \\ &\quad \sin \theta \sin(\theta - \beta) + \frac{1}{2} \gamma_w Z_2 Z_3 \sin \alpha \sin(\beta - \alpha) \end{aligned} \quad (4)$$

当 $\omega > 0$ 时, 边坡稳定; $\omega = 0$ 时, 边坡为临界状态; $\omega < 0$ 时, 边坡不稳。

若张拉裂隙为垂直裂隙 ($\theta = 90^\circ$), 断层方向与岩层倾向一致 ($\alpha = \beta$, $Z_4 = Z_3$), 则结果 (见式(7)) 与文献[17]计算的三边形板岩结果一致。

$$\begin{aligned} \omega &= \left[W \cos \alpha - \frac{1}{2} \gamma_w Z_2^2 \cos \alpha - \frac{1}{2} \gamma_w Z_2 Z_3 \sin \alpha \right] \tan \varphi + \\ &\quad W \sin \alpha + c \frac{Z_3}{\sin \alpha} - \frac{1}{2} \gamma_w Z_2^2 \cos \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

从式(4)、(5)可以看出, 有降雨入渗的板岩边坡的稳定主要受以下几因素影响: (1) 板岩自身性质与强度是影响板岩边坡稳定的内在因素, 结构

面黏聚力与内摩擦角越大, 稳定性越好; (2) 裂隙张开度越大, 降雨入渗越严重, 稳定性越差; (3) 对于裂隙切割形成的三角形板岩单元, 式(7)反映出暂态水压起直接降低边坡稳定性的作用。

将苗尾水电站右坝基板岩边坡参数 $c = 0.1$ MPa, $\varphi = 21.8^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\alpha = 120^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $Z_2 = Z_3$ 代入式(4), 计算得到控制函数 $\omega = 0.85W + 1.3Z_2 - 17.55Z_2^2$ 。层间错动带间距约 2.0 m, 条带长度为 1.0 m, 岩石相对重度为 2.7 kN/m^3 , $\omega = 183.61 + 1.3Z_2 - 17.55Z_2^2$, 对应的曲线关系如图5所示。从图中可以看出, 降雨入渗的影响下边坡的稳定性下降速度非常快。没有雨水下渗的情况下, 稳定性较好; 当 $Z_2 = 2.271 \text{ m}$ (相当于 22.71 kPa 的暂态水压力) 时, 边坡处于临界状态。根据章节 3.1 分析, 7 d 的暂态水压力已经达到 22.75 kPa。因此, 为了控制板岩边坡的继续变形首先应防止雨水入渗。

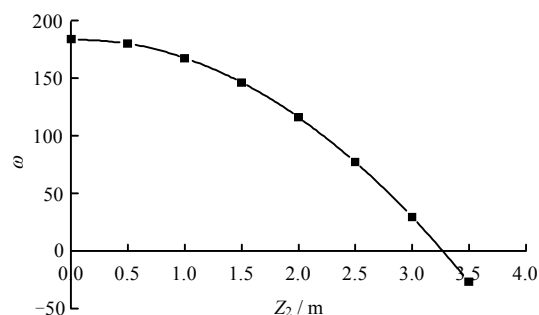


图5 暂态水头 Z_2 与稳定控制函数 ω 之间的关系
Fig.5 Relationship between transient water pressure Z_2 and stability control function ω

4 板岩边坡失稳加固措施

4.1 降雨入渗边坡变形加固原则

边坡稳定对于施工安全、经济、工期等都有很大影响, 对板岩边坡采取“底部先行填渣护脚, 锚拉板或框梁+预应力锚索”的加固方式是合理的。分析总结苗尾水电站右坝基板岩边坡失稳的演化过程及失稳机制得出以下加固经验: (1) 进行详细地质勘查, 深入了解板岩边坡的岩性、层理结构。(2) 做好板岩边坡监测与跟踪, 根据勘查与监测结果, 形成对板岩边坡稳定的综合判断, 进行合理的加固设计。加固设计是防止边坡失稳加剧的关键。对于板岩边坡, 首先必须做好边坡的“束腰”设计, 常采用锚索束腰以控制边坡的进一步变形。其他部位的加固措施, 以锚拉板或框梁+预应力锚索为主, 有断层部位最好穿过断层。(3) 在加固施工过程中做

苗尾水电站右坝基边坡, 通过采取截水、镇脚、深层支护等一系列措施后, 变形及应力监测结果满足规范要求, 有效保证了变形边坡的稳定。

参考文献

- [1] 王兰生. 意大利瓦依昂水库滑坡考察[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 145—145.
WANG Lan-sheng. Investigation of land slide for Vajont reservoir in Italy[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2007, 18(3): 145—145.
- [2] 陈志坚. 层状岩质边坡工程安全监控建模理论及关键技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [3] TOHARI A, NISHIGAKI M, KOMATSU M. Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(5): 575—587.
- [4] ZHANG J, JIAO J J, YANG J. In-situ rainfall infiltration studies at a hillside in Hubei Province, China[J]. **Engineering Geology**, 2000, 57(1/2): 31—38.
- [5] 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 Jia-wen, XU Wei-ya, DENG Jun-ye, et al. Stability analysis of slope under the condition of rainfall infiltration[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2008, 39(9): 1066—1073.
- [6] 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 Si-jing, WANG En-zhi, et al. Stability analysis of Yuanmo highway slope under intensive rainfall[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(4): 704—711.
- [7] 许建聪, 尚岳全. 降雨作用下碎石土滑坡解体变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 109—113.
XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Study on mechanism of disintegration deformation and failure of debris landslide under rainfall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 109—113.
- [8] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry(PIV) and photogrammetry[J]. **Geotechnique**, 2003, (53): 619—631.
- [9] CAI F, UGAI K. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2004, 4(2): 69—78.
- [10] ZHAN T L T, NG C W W. Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in unsaturated soils[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2004, 4(4): 273—284.
- [11] 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 fracturednet networks due to the percolation of rainfall[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(2): 104—111.
- [12] 张子新, 徐营, 黄昕. 块裂层状岩质边坡稳定性极限分析上限解[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 656—663.
ZHANG Zi-xin, XU Ying, HUANG Xin. Upper bound solution of limit analysis for stability of block-layered rock slope[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 2010, 38(5): 656—663.
- [13] 刘宏, 宋建波, 向喜琼. 缓倾角层状岩质边坡小危岩体失稳破坏模式与稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1606—1611.
LIU Hong, SONG Jian-bo, XIANG Xi-qiong. Failure model and stability evaluation of small instable rocks distributed in low-angled stratofabric rocks slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1606—1611.
- [14] 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 Guo-qing, HUANG Run-qiu, SU Bao-yu, et al. Numeric simulation on rainfall infiltration on rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(4): 625—629.
- [15] 胡云进, 速宝玉, 周维垣. 有地表入渗的岩坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1112—1116.
HU Yun-jin, SU Bao-yu, ZHOU Wei-yuan. Analysis of the stability of rock slope with surface infiltration[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1112—1116.
- [16] DYKHUIZEN R C. Transport of solutes through unsaturated fractured media[J]. **Water Research**, 1987, 21(12): 1531—1539.
- [17] 西北勘测设计研究院. DL/T 5353—2006 水电水利工程边坡设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.