

雾化雨入渗影响下的岩体边坡稳定性分析方法及其应用

张强勇¹, 张绪涛^{1,2}

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

摘要: 根据 SARMA 法的基本原理, 考虑非饱和带基质吸力和暂态附加水荷载对岩体边坡安全稳定的影响, 提出了能考虑雾化雨入渗效应的边坡稳定性分析方法—改进 SARMA 法。将提出的方法和编制的程序应用于紫坪铺#2 导流洞出口高边坡工程, 进行了边坡在泄洪雾化雨入渗影响下的安全稳定性计算与评价分析。计算结果表明: 雾化雨入渗和入渗形成的暂态饱和区是影响边坡安全稳定的重要因素, 边坡安全系数随雾化雨入渗显著下降。同时有效加强坡面防渗、最大限度减少坡面雨水的入渗, 能有效提高和增强边坡的安全稳定性。

关键词: 雾化雨入渗; 基质吸力; 暂态饱和区; 边坡安全稳定性评价与分析

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)10-1572-05

作者简介: 张强勇(1967-), 男, 湖北应城人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与结构工程的教学与科研。

E-mail: qiangyongz@yahoo.com.cn。

Stability analysis method of rockmass slopes under atomized rain infiltration and its application

ZHANG Qiang-yong¹, ZHANG Xu-tao^{1,2}

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center of Shandong University, Jinan 250061, China; 2. School of Architecture Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

Abstract: Based on the basic principle of SARMA method, a slope stability analysis method modified SARMA method which could take the influence of atomized rain infiltration into account, was put forward after considering the matrix suction of unsaturated zone and the temporary additional water load. This method and correlative program were applied to the stability evaluation analysis for the high slope of Zipingpu Hydropower Station under the influence of atomized rain Infiltration. It was shown that the atomized rain infiltration and temporary saturation zone were important factors influencing the safety of slope, and the safety factor of slope would greatly decrease due to the atomized rain infiltration. At the same time, reinforcing the seepage control of slope and reducing the infiltration of rain on slope could effectively improve the stability of slope.

Key words: atomized rain infiltration; matrix suction; temporary saturation zone; safety stability evaluation analysis for slope

0 引言

滑坡与泄洪雾化雨关系非常密切是早为人所知的事实, 但人们对这种关系的认识和研究仍很不充分。雾化雨入渗会导致边坡非饱和区中出现暂态饱和区, 产生暂态的附加水荷载。张有天、刘中^[1]提出降雨渗入岩体裂隙是饱和非饱和、非恒定的渗流过程, 并且总结了国内外大型边坡工程暂态附加水荷载的确定方法。汪溢敏、陈页开^[2]采用线弹性有限元以及 Mohr-Coulomb 准则对降雨入渗影响下的边坡进行了稳定性分析, 并且得出了一些有益的结论。宋晓晨、徐卫亚^[3]应用有限元方法研究了雾化雨作用下的非饱和和边坡的稳定性, 并且得到了一些初步成果。河海大学的胡云进、速宝玉等^[4]通过不平衡推力法和有限元相结合的方法研究了雾化雨入渗影响下边坡的稳定

性。目前, 国内外学者虽然对雾化雨入渗影响下的边坡稳定性进行了一些研究并取得了一些的进展^[5-8], 但是在进行雾化雨入渗影响下的岩体边坡稳定性分析时, 暂态附加水荷载大都是假设的, 并且没有考虑非饱和带基质吸力对岩体抗剪强度的影响, 这样做的结果不是造成浪费, 就是潜伏着隐患。因此, 深入研究雾化雨入渗引发岩体边坡失稳的机制, 并建立有效的分析方法对于库岸岩体滑坡的预测有着很重要的指导意义。基于此, 本文将有限元与改进 SARMA 结合, 首先在 ABAQUS 有限元程序求得的岩体边坡饱和非饱和和渗流场计算结果的基础上, 再运用本文提出的考虑非饱和带基质吸力和暂态附加水荷载影响的改进 SARMA 法, 对紫坪铺#2 导流洞出口高边坡进行了泄洪

雾化雨入渗影响下的边坡安全稳定性评价与分析, 获得了具有工程指导意义的建议和结论。

1 雾化雨入渗引发岩体边坡失稳机制

在雾化雨入渗影响下, 对坡体表面存在较厚全、强风化带的裂隙岩体边坡来讲, 边坡沿浅表层滑动是最常见的失稳破坏形式, 其失稳破坏的物理力学机制可归纳如下: 雾化雨入渗前, 边坡内非饱和带的基质吸力较大, 边坡岩土介质的凝聚力较大、抗剪强度较高, 边坡较为稳定; 随着雾化雨入渗的不断进行, 坡体内非饱和带的基质吸力将逐渐减小, 并在非饱和带中形成一些暂态的饱和区。非饱和带基质吸力的减小和暂态饱和区的形成不仅导致岩体抗剪强度显著降低, 而且也增加了边坡的下滑力, 导致边坡安全系数不断降低, 当边坡抗滑安全系数随着雾化雨的入渗降至某一值时, 岩体边坡就将沿滑裂面产生滑移破坏或失稳。

根据上述边坡的失稳破坏机制, 本文引入非饱和土的抗剪强度理论^[8], 其非饱和全、强风化带的抗剪强度可写为

$$\tau_f = c' + \sigma \tan \varphi' - u_w \tan \varphi^b \quad (1)$$

式中 c' 为有效黏聚力; σ 为法向总应力; φ' 为与净法向应力有关的内摩擦角; u_w 为结构面上的孔隙水压力 (当值小于零时, 称之为基质吸力); 在非饱和区, φ^b 是与基质吸力有关的内摩擦角, 在饱和区, φ^b 与 φ' 相同。由式 (1) 可知, 雾化雨入渗前, 由于基质吸力的存在增大了岩体的凝聚力, 从而会提高岩体边坡的稳定性。但随着雾化雨入渗的不断进行, 边坡内基质吸力将不断降低, 并在坡体内形成暂态饱和区, 因而导致岩体抗剪强度降低, 边坡稳定性减弱。

2 改进 SARMA 法

根据 SARMA 法的基本原理^[9-10], 考虑非饱和带基质吸力对岩体抗剪强度的影响和暂态附加水荷载的不利作用, 本文提出了一种能够考虑雾化雨入渗效应的岩体边坡稳定性分析方法—改进 SARMA 法, 其具体分析方法见下述。

2.1 改进 SARMA 法的基本公式

改进 SARMA 法是在 SARMA 法基本原理的基础上提出的, 将滑裂面以上的岩体分成若干条块, 条块上的作用力如图 1 所示。图中: K_c 为临界加速度系数; R_{xi} , R_{yi} 分别为第 i 个滑体单元结构面上锚杆锚固力的水平和竖直分量; W_i 为第 i 个滑体单元的重量; α_i 为第 i 个滑体单元结构面的倾角; δ_i , δ_{i+1} 分别为第 i 个滑体单元左、右侧面与垂直面的夹角; N_i 为作用在第 i 个滑体单元结构面上的正压力; T_i 为作用在第 i 个滑体单元结构面上的剪切力; E_i , E_{i+1} 分别为作用在第 i 个滑

体单元左、右侧面上的正压力; X_i , X_{i+1} 分别为作用在第 i 个滑体单元左、右侧面上的剪切力; b_i 为第 i 个滑体单元的结构面在水平面上的投影长度。

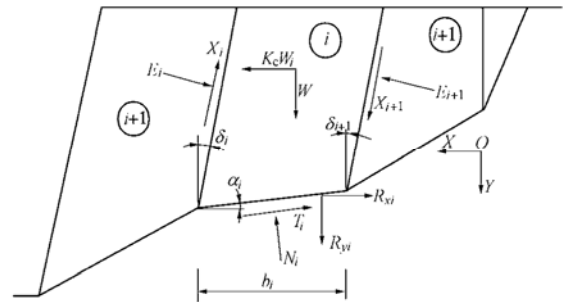


图 1 改进 SARMA 法第 i 滑体单元的受力示意图

Fig. 1 Sliding block of modified SARMA method

改进 SARMA 法水平方向和竖直方向上的平衡方程与 SARMA 法的平衡方程相同, 而结构面的破坏条件由于考虑了非饱和带的基质吸力发生了变化, 分别如下:

竖直方向的平衡方程为

$$N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i + X_i \cos \delta_i - E_i \sin \delta_i -$$

$$X_{i+1} \cos \delta_{i+1} + E_{i+1} \sin \delta_{i+1} = W_i + R_{yi} \quad (2)$$

水平方向的平衡方程为

$$-N_i \sin \alpha_i + T_i \cos \alpha_i + X_i \sin \delta_i + E_i \cos \delta_i -$$

$$X_{i+1} \sin \delta_{i+1} - E_{i+1} \cos \delta_{i+1} = K_c W_i + R_{xi} \quad (3)$$

结构面强度破坏条件为

$$T_i - N_i \tan \varphi_i + U_i \tan \varphi_i^b - C_i l_i = 0 \quad (4)$$

$$X_i - E_i \tan \varphi_i' + P_{wi} \tan \varphi_i^b - C_i' d_i = 0 \quad (5)$$

式中 l_i 为第 i 个滑体单元结构面的长度; c_i 为第 i 个滑体单元结构面的黏聚力; φ_i 为第 i 个滑体单元结构面的内摩擦角; U_i 为作用在第 i 个滑体单元结构面上的水压力; d_i 分别为第 i 个滑体单元左侧面的长度; c_i' 分别为第 i 个滑体单元左侧面的黏聚力; φ_i' 分别为第 i 个滑体单元左侧面的内摩擦角; P_{wi} 分别为作用在第 i 个滑体单元左侧面上的水压力; φ_i^b 为单元 i 中结构面与基质吸力有关的内摩擦角, φ_i^b 为单元 i 左侧面与基质吸力有关的内摩擦角。

2.2 改进 SARMA 法边坡稳定性分析程序

根据上述计算公式, 在边坡饱和和非饱和渗流场计算结果的基础上, 将有限元与极限平衡分析法结合, 运用 Fortran90 语言编制了能考虑泄洪雾化雨入渗影响的改进 SARMA 法边坡极限平衡稳定性分析程序, 该程序的基本计算步骤如下:

(1) 应用有限元分析软件 ABAQUS 首先计算出雾化雨入渗作用下边坡各个时刻的饱和和非饱和渗流场;

(2) 根据有限元计算所得的边坡饱和和非饱和渗

流场的分布,把岩体边坡的非饱和带划分为几层,在非饱和区,取上下相邻两个层面孔隙水压力的平均值作为每层的基质吸力值,并应用式(1)来考虑基质吸力对滑裂面抗剪强度的影响。

(3)从上到下输入上述各层面的位置信息和各层的物理力学参数及孔隙水压力(非饱和区为基质吸力)。同时根据暂态饱和区的水头场分布,把暂态附加水荷载等效为表面水压力作用于条块周边上。

(4)输入其它信息,如滑裂面上的物理力学参数、条块数、水平向地震加速度系数以及锚杆支护参数。

(5)计算随雾化雨入渗历时变化的边坡抗滑稳定安全系数。

3 工程应用

3.1 工程概况

紫坪铺水利枢纽工程是西部大开发的十大重点工程之一,其#2导流洞出口高边坡的开挖高度近180 m,边坡地层岩性为含煤中细砂岩和煤质页岩互层,边坡分布有宽达40 m的F3软弱大断层和规模不等的地质结构面,坡体地质条件十分复杂。施工期间边坡曾发生过4次比较大的滑坡,经过治理,边坡得以稳定。

目前,紫坪铺水利枢纽工程已下闸蓄水,导流洞出口边坡也已投入使用,但紫坪铺水电站的最大坝高为156 m,其泄洪产生的雾化雨入渗对下游边坡的影响十分突出,因此,为评价泄洪雾化对边坡安全稳定的影响,本文提出的考虑雾化雨入渗的改进SARMA法对该边坡进行了安全稳定性计算与评价分析。

3.2 计算工况和计算参数

(1) 计算剖面 and 雾化雨分区

选取边坡雾化雨分布强度最大的II号断面作为计算剖面,由于缺乏雾化雨的现场实测资料,本文根据工程类比经验对雾化雨的强度进行了分区,如图2所示,把边坡按高程分为4个雾化雨区:①高程790 m以下的区域,雨强为600 mm/h;②高程790~824 m区域,雨强为300 mm/h;③高程824~850 m区域,雨强为50 mm/h;④高程850 m以上区域,雨强为20 mm/h。

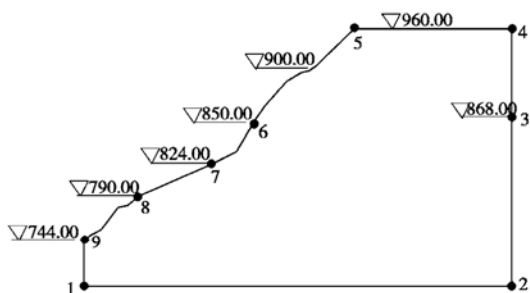


图2 边坡计算剖面 and 雾化雨分区图

Fig. 2 Computed section of the slope and atomized rain zone

根据纵II剖面的地质剖面、裂隙发育情况以及层间错动带的位置,把纵II剖面的滑动体分为6块,边坡滑动面与滑块分布见图3。

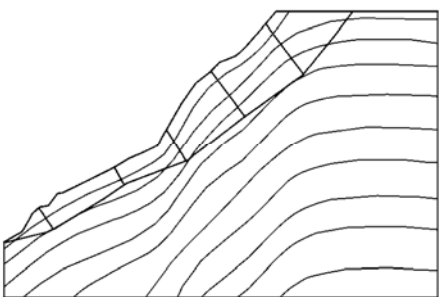


图3 边坡的滑动面与滑块分布

Fig. 3 Distribution of slide plane and sliding blocks of slope

(2) 计算工况

在进行雾化雨入渗分析时,考虑坡面防渗措施,入渗强度分别取雾化雨强度的10%、25%和50%来做敏感性分析。依据雾化雨入渗强度的不同,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	入渗强度
1	3	10%
2	3	25%
3	3	50%

(3) 计算参数

a) 边坡岩体的物理力学参数

边坡岩体的物理力学计算参数取值见表2。

表2 边坡岩体的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rockmass slope

岩性	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	渗透系数 $k/(10^{-6}\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	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

b) 锚杆参数

边坡采用系统锚杆支护,支护参数为2φ32高强度螺纹钢,采用梅花型布置,布置间距为2 m,锚杆长度20 m,入射角为8°。

c) 地震裂度

坝区抗震设防烈度按7度考虑。

3.3 计算结果分析

首先应用ABAQUS有限元程序计算出3种入渗工况下,边坡在各个时刻的饱和和非饱和渗流场,由于篇幅所限,本文仅列出了第三种工况在3个关键时刻($t=0\text{ h}$,初始状态即在自然地下水位868 m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) 的边坡 II 号计算剖面的孔隙水压力分布, 如图 4~6 所示 (图中孔隙水压力单位为 Pa)。

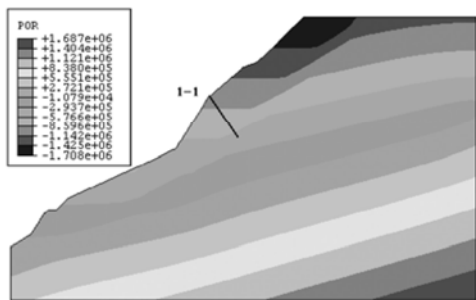


图 4 $t=0\text{ h}$ 时刻计算剖面的孔隙水压力分布
Fig. 4 Distribution of pore water pressure of computed section at the time of 0 h

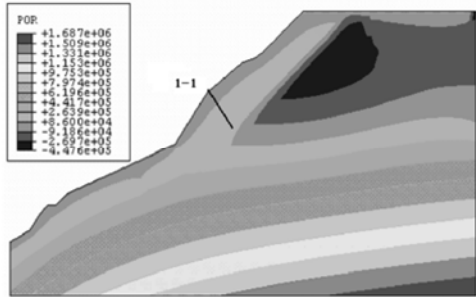


图 5 $t=72\text{ h}$ 时刻计算剖面的孔隙水压力分布
Fig. 5 Distribution of pore water pressure of computed section at the time of 72 h

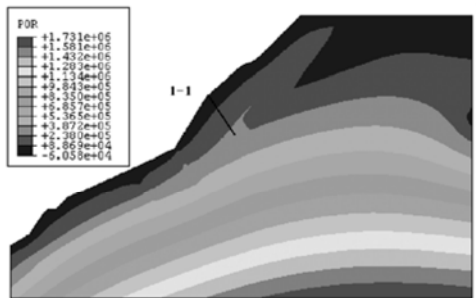


图 6 $t=192\text{ h}$ 时刻计算剖面的孔隙水压力分布
Fig. 6 Distribution of pore water pressure of computed section at the time of 192 h

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 II 号剖面中布置了一典型断面 (见图中 1-1 线), 并且画出了 1-1 断面在不同时刻压力水头与埋深 (即离地表的垂直距离) 的关系曲线, 如图 7。

由图 4~7 可以看出: 在雾化雨入渗之前, 即在自然地下水位 (868 m) 渗流作用下, 坡体以地下水位为分界面被分为两部分, 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。然而随着泄洪

雾化雨的入渗, 入渗的雨水会在坡体的上部形成暂态饱和区。如在雾化雨入渗 24 h 后, 在坡体上部开始出现暂态饱和区, 随着雨水的进一步渗入, 坡体上部暂态饱和区的范围逐渐变大; 入渗结束时 (即 $t=72\text{ h}$), 暂态饱和区距地表的最大垂直深度大约为 10~15 m; 入渗结束之后, 暂态饱和区中的雨水将逐步下渗, 因此坡体上部暂态饱和区的范围将逐渐减小直至完全消散, 同时坡体内的地下水位也会随着雨水的不断下渗而逐步升高。

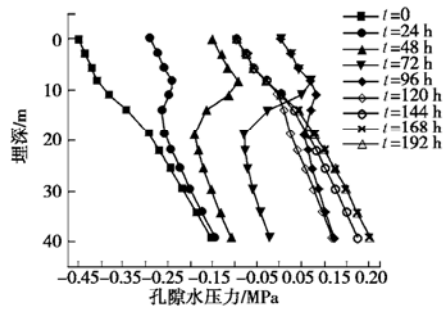


图 7 不同时刻 1-1 断面的孔隙水压力分布
Fig. 7 Distribution of pore water pressure of section 1-1 at different time

在上述 ABAQUS 饱和非饱和渗流场计算结果的基础上, 应用改进 SARMA 法边坡极限平衡稳定性分析程序计算得到在上述 3 种入渗工况下, 边坡各个时刻的抗滑稳定安全系数 (见图 8、表 3)。

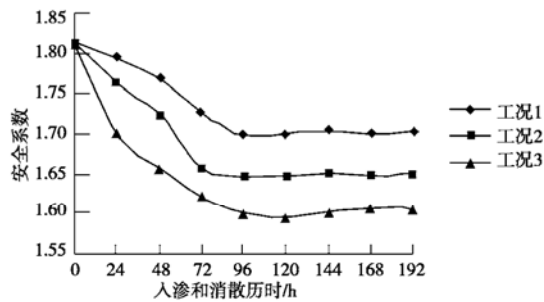


图 8 边坡安全系数与雾化雨入渗和消散历时的关系曲线
Fig. 8 Relationship between the safety factor of slope and the infiltration time of atomized rain

由表 3 和图 8 知:

(1) 雨水入渗和入渗形成的暂态饱和区对边坡安全稳定影响很大, 边坡安全系数随雾化雨的下渗和暂态饱和区的形成而显著降低。在入渗结束和暂态饱和区完全形成但还未来得及及时消散的时刻 (即 $t=72\text{ h}$ 时刻), 边坡安全系数降至了最低。此后, 在入渗结束、暂态饱和区消散阶段, 边坡安全系数略有变化但变化不甚明显。导致边坡安全系数降低主要有以下两个方面的原因, 一是由于雨水入渗, 边坡内的基质吸力逐

表 3 3 种入渗工况下边坡在各个历时的安全系数

Table 3 The safety factors of slope at different time under three infiltration conditions

工况	各历时的安全系数								
	0 h	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h	192 h
工况 1	1.813	1.795	1.770	1.727	1.700	1.701	1.703	1.702	1.704
工况 2	1.813	1.765	1.724	1.659	1.647	1.648	1.652	1.650	1.651
工况 3	1.813	1.703	1.659	1.622	1.601	1.596	1.602	1.607	1.606

注： $t=0$ 为自然地下水位渗流作用下的状态； $t=0\sim72\text{ h}$ 为雾化雨入渗阶段； $t=72\sim192\text{ h}$ 为暂态饱和区消散阶段。

渐降低、引起滑裂面处孔隙水压力增加，导致滑裂面的抗剪强度降低；二是由于暂态饱和区的形成，增大了边坡下滑力。

(2) 坡面防渗措施能有效增加边坡的安全系数，提高边坡的稳定性。边坡安全系数随雨水入渗强度的增加而显著减小，故有效加强坡面防渗、最大限度减少坡面雨水的入渗，能有效提高和增强边坡的安全稳定性。

4 结 语

本文依据 SARMA 法的基本原理，结合非饱和土的抗剪强度理论，提出了能考虑非饱和带基质吸力和暂态附加水荷载对裂隙岩体边坡安全影响的改进 SARMA 法，与有限元结合，编制了能考虑雾化雨入渗影响的边坡极限平衡稳定性分析程序。计算结果表明：

(1) 雾化雨入渗和入渗形成的暂态饱和区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，并在非饱和带中会形成暂态饱和区，这不仅降低了岩体边坡的抗剪强度、而且也增大了边坡的下滑力，导致边坡稳定安全系数显著降低。

(2) 边坡抗滑稳定安全系数随雨水入渗强度的增加而显著减小，因此有效加强坡面防渗、最大限度减少坡面雨水的入渗，能有效提高和增强边坡的安全稳定性。

参考文献：

[1] 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. (in Chinese))

[2] 汪益敏, 陈页开. 降雨入渗对边坡稳定影响的实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 920 - 924. (WANG Yi-min, CHEN Ye-kai. Case study on influence of rainfall permeation on slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 920 - 924. (in

Chinese))

[3] 宋晓晨, 徐卫亚. 雾雨作用下的非饱和边坡稳定性研究[J]. 河海大学(自然科学版), 2002, 30(6): 16 - 20. (SONG Xiao-chen, XU Wei-ya. Stability analysis of unsaturated soil slope under atomized rain[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2002, 30(6): 16 - 20. (in Chinese))

[4] 胡云进, 速宝玉, 周维垣. 有雾化雨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 on the stability of rock slope with surface infiltration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1112 - 1116. (in Chinese))

[5] 张强勇, 刘大文, 蔡德文. Sarma 法在加锚岩质高边坡安全稳定性评价分析中的应用[M]. 2005, 24(18): 3368 - 3372. (ZHANG Qiang-yong, LIU Da-wen, CAI De-wen. Application of Sarma method to stability evaluation analysis of a large anchored rockmass slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3368 - 3372. (in Chinese))

[6] 崔政权, 李 宁. 边坡工程—理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (CUI Zheng-quan, LI Ning. Slope engineering — recent advances in theory and practice[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))

[7] 陈祖煜. 岩质边坡稳定分析—原理.方法.程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (CHEN Zu-yu. Rock slope stability analysis—theory methods and programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))

[8] 弗雷德隆德 R G, 拉哈尔佐 H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. Chen Zhong-yi, translator, Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))

[9] SARMA S K. Stability analysis of embankments and slopes[J]. Geotechnique, 1973, 23(3): 423 - 433.

[10] HUTCHISON J N, SARMA S K. Discussion on three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1985(35): 215 - 225.