

降雨条件下顺层边坡稳定性分析

徐海涛¹, 梁超²

(1. 中铁二院重庆勘察设计院有限责任公司, 重庆 400023; 2. 中国市政工程西南研究总院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了研究顺层边坡在降雨条件下的稳定性, 以某铁路路堑顺层边坡为研究对象, 采用饱和-非饱和理论建立了降雨入渗条件下的流-固耦合模型, 得到了顺层边坡在不同降雨历时条件下暂态饱和区与应力场的分布情况, 并分析了顺层边坡在持续降雨条件下的破坏机制, 得到了边坡对应的安全系数。研究表明: 持续降雨条件下, 降雨主要沿软弱夹层下渗, 并在坡顶局部形成暂态饱和区, 导致坡顶岩土体容重增大, 软弱夹层力学性质降低; 边坡浅表小主应力逐渐减小, 并在深部沿软弱层面形成小主应力较小的条带, 最终导致边坡稳定系数降低, 造成边坡沿深层软弱层面整体下滑。

关键词: 顺层边坡; 降雨; 稳定性分析; 铁路路堑

中图分类号: TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2013)05-0073-04

Stability analysis of bedded slopes under rainfall conditions//XU Haitao¹, LIANG Chao² (1. CREEC (Chongqing) Survey, Design & Research Co., Ltd., Chongqing 400023, China; 2. Southwest Municipal Engineering Design and Research Institute of China, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to study the instability of the bedded slope of a railway cutting in raining conditions, a saturation-instaurantion theory was applied to develop the fluid-solid coupling model under rainfall infiltration conditions. The transient saturated zone and the stress field distribution of the bedded slope in different rainfall durations were obtained. The failure mechanism of bedded slope in continuous rainfall conditions was analyzed, and the corresponding safety factor was obtained. The results show that under continuous rainfall conditions, most rainfall infiltrates through the weak intercalated layer, and a transient saturated zone forms locally at the top of the slope. The weight of the rock and soil on the top of the slope increases, and the mechanical property of the weak intercalated layer decreases accordingly. The minor principal stress at the superficial layer of the slope reduces gradually and strips of small minor principal stress form along the deep of the weak intercalated layer, resulting in a decrease of the stability coefficients and the gliding down of the slope along the weak intercalated layer.

Key words: bedded slope; rainfall; stability analysis; railway cutting

顺层边坡是指岩层走向和倾向与边坡走向和倾向一致的边坡,在实际工程中,通常把走向与岩层走向夹角小于20°、倾向接近的边坡视为顺层边坡^[1]。在铁路边坡工程中,路堑顺层边坡的稳定性问题普遍而突出,特别是在降雨强度大、历时长的情况下。顺层边坡中夹杂有比较软弱的岩层面或软弱夹层面,当坡体前缘开挖形成临空面后,在降雨条件下,地表水通过孔隙大量浸入软弱面,直接导致强风化岩体及软弱夹层容重增大,软弱面不断软化、泥化,强度指标进一步降低,渗透压力进一步增大,最终导致滑面抗滑力迅速减小,边坡沿某一软弱层面整体向下滑动^[2-3]。

非饱和土强度理论主要是由摩尔-库仑抗剪强

度理论引入基质吸力而发展起来的^[4], Fredlund等^[5]提出了以正应力与吸力作为变量的非饱和土抗剪强度公式, Vanapalli等^[6]在非饱和土微观分析的基础上提出了非饱和土抗剪强度的经验模型。在非饱和土的流-固耦合方面, Thomas等^[7]提出了考虑非饱和土变形的热、气、水运动耦合理论, Wong等^[8]进行了非饱和土的固结耦合数值计算研究。

本文在有限元方法的基础上,引入饱和-非饱和渗流理论,即考虑非饱和坡体中基质吸力对边坡稳定的影响,以重庆某铁路路堑顺层边坡为研究对象,建立了降雨入渗条件下的流-固耦合模型,得到了边坡在不同降雨历时条件下暂态饱和区与应力场的分布情况,并分析了边坡在降雨条件下的破坏机制^[9-10],

得到了边坡的安全系数,可为边坡设计提供参考。

1 计算参数及计算模型

1.1 工程概况

某铁路路基段位于重庆境内缓丘地带,地面高程468~498 m,相对高差2~30 m。沿线地形波状起伏,岸坡坡度为15°~30°,基岩多裸露。路基以挖方为主,中心最大挖方深度约19 m。该段地层上覆第四系坡洪积层(Q_4^{dl+pl}),下伏为侏罗系中统上沙溪庙组(J_2s)泥岩夹砂岩,泥岩呈灰绿、紫红色,泥质结构,薄~中厚层状,质软;砂岩呈灰黄色、青灰色,中~细粒结构,泥质胶结。岩层产状N53°E/30°NW,岩层走向与铁路走向夹角6°~9°,在横断面视倾角约30°,线路右侧为顺层边坡。段内基岩以泥岩为主,隔水性较好,基岩裂隙水不发育,水量甚微。总体地下水较不发育,对混凝土结构无侵蚀性,计算剖面地质状况如图1所示。

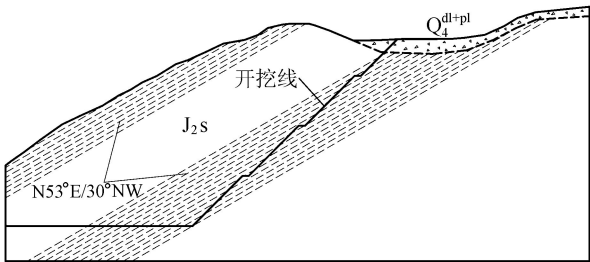


图1 计算区域顺层边坡地质剖面

1.2 计算模型

根据现场边坡工程地质条件及边坡开挖布置,有限元计算模型宽度(x 方向)为93.7 m,铅直高度(y 方向)为55.0 m。根据层状边坡岩层产状及厚度,建模时取岩层厚度0.6 m,夹层厚度0.1 m,共设置3级马道,整个模型单元数5 035个,节点数为5 019个;沿岩层软弱夹层滑动的破坏模式是顺层边坡发生最多、规模很大的一种破坏模式^[4],计算模型中从上至下共指定12条沿软弱夹层分布的潜在滑动面,计算模型及潜在滑动面位置如图2所示。

1.3 计算参数

区内降雨量充沛,主要集中在5—9月,多年平均降雨量约1 238.3 mm,计算时考虑降雨量150 mm/d,总历时96 h。开挖坡面设有防水措施,所以只考虑坡顶降雨入渗,不考虑开挖坡面降雨入渗;

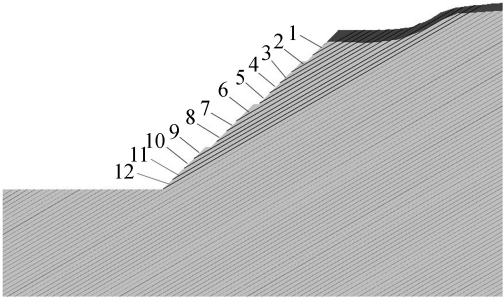


图2 顺层边坡计算模型及滑弧编号

开挖坡面设有排水措施,为降雨入渗潜在逸出面。由于该路段内地下水不发育,所以在计算时不考虑地下水作用。计算模型中共涉及3种岩土体材料,各材料属性见表1。

2 稳定性分析

2.1 计算理论

降雨条件下顺层边坡的入渗过程是一个饱和-非饱和和渗流过程^[11],可用Richard's方程来描述降雨的入渗过程:

$$(C + S_e S) \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \left[- \frac{k_s k_r}{\mu} \nabla (p + \rho g D) \right] = F \quad (1)$$

式中: C 为容水系数; S_e 为饱和度; S 为储水系数; p 为渗透压力; k_s 为饱和透水系数; k_r 为相对渗透系数; μ 为运动黏性系数; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; D 为扩散率; F 为源汇项。

降雨的入渗同时满足达西定律:

$$v = - \frac{k_s k_r}{\mu} \nabla (p + \rho g D) \quad (2)$$

式中: v 为渗透速度。

在有效应力原理的基础上联立固体颗粒运动连续性方程,即可得到降雨入渗条件下的流-固耦合模型^[12]:

$$- \frac{k_s}{\mu S_e} \nabla (k_r \nabla p) + L \frac{\partial p}{\partial t} + \left(1 - \frac{1}{S_e} \right) \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

其中
$$L = \frac{2 \left(\frac{\theta}{S_e} - 1 \right)}{g(1 + v)} + \beta_w \theta + \beta_s \left(1 - \frac{\theta}{S_e} \right)$$

式中: θ 为体积含水率; β_w 为孔隙流体压缩系数; β_s 为骨架压缩系数。

抗剪强度准则采用非饱和土抗剪强度的经验模型:

表1 顺层边坡各岩土体计算参数

岩土类别	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/kPa	泊松比	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	饱和体积 含水率/%	残余体积 含水率/%
覆盖层	2 000	5	15	0.15	0.40	8.85×10^{-5}	35.8	10
夹 层	2 300	30	20	2.50	0.35	3.12×10^{-5}	26.4	8
岩 层	2 700	2 000	38	2 000	0.22	2.56×10^{-10}	13.5	4

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tan \varphi' \tag{4}$$

式中: c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; u_a 为孔隙气压力; u_w 为孔隙水压力; σ 为正应力; θ_r 为残余体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率。

由于研究中边坡潜在滑动面为沿软弱层面的直线滑面,采用简单条分法计算边坡稳定系数:

$$F_s = \frac{\sum \tau_{li}}{\sum W_i \sin a} \tag{5}$$

式中: τ_{li} 为第*i*条土体抗剪强度; l_i 为第*i*条底面长度; W_i 为第*i*条土体自重; a 为底滑面与水平面的夹角。

2.2 边坡稳定性分析评价

在持续降雨作用下,坡体内岩土体含水量不断升高,坡顶局部开始形成暂态饱和区,暂态饱和区在不同降雨历时条件下的分布情况如图3所示。根据暂态饱和区的分布可知:降雨首先沿渗透系数较大的软弱层面下渗,然后向周围岩层扩展,暂态饱和区面积也随着降雨历时的增长而不断扩大。

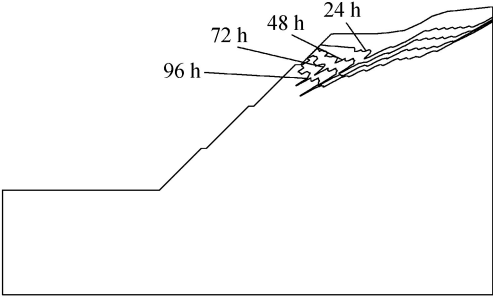


图3 不同降雨历时条件下的坡顶暂态饱和区分布

降雨引起了地下渗流场的变化,改变了顺层边坡原有的应力状态,导致边坡应力重分布,图4和图5给出了顺层边坡在天然状态和不同降雨历时条件下的小主应力分布,可以看出:天然状况下边坡浅表小主应力小于50 kPa,在局部沿软弱层面形成小主应力较小的条带;随着降雨的进行,边坡浅表小主应力逐渐减小,并在深部沿软弱层面形成小主应力较小的条带,此种应力状态不利于边坡稳定,边坡可能

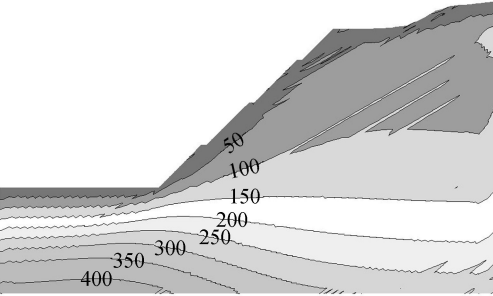
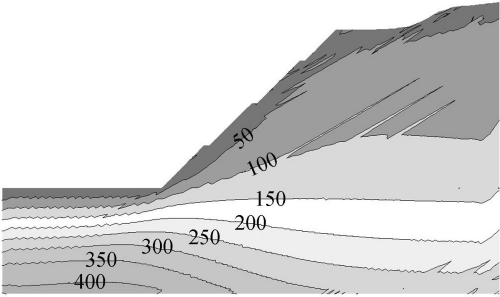
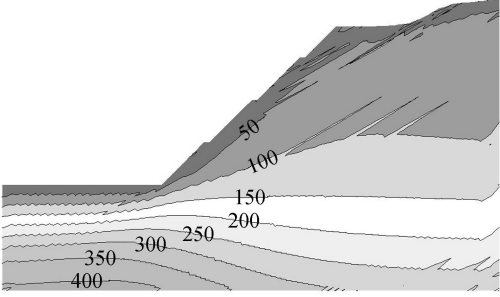


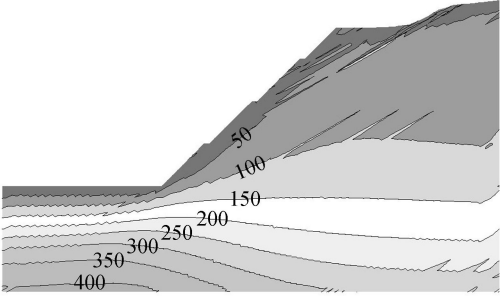
图4 天然状况下顺层边坡小主应力分布(单位:kPa)



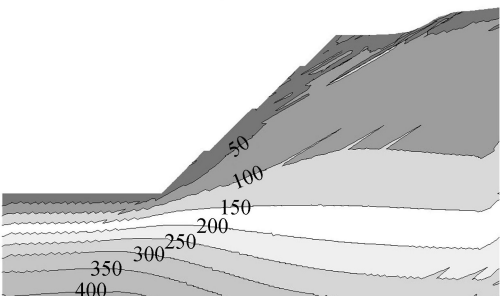
(a) 24 h



(b) 48 h



(c) 72 h



(d) 96 h

图5 顺层边坡在不同降雨历时条件下的小主应力分布(单位:kPa)

沿深部软弱层面整体向下滑动。

图6给出了整个边坡在不同降雨历时条件下的稳定系数,表2给出了各滑弧在不同降雨历时条件下对应的稳定系数。

由图6可以看出:本顺层边坡的稳定性明显受降雨过程的影响,随着降雨历时的增长,边坡的稳定系数逐渐减小。在天然状况下边坡稳定系数为1.154,处于基本稳定状态;在降雨60 h后边坡稳定系数为1.027,处于欠稳定状态;在降雨72 h后边坡稳定系数为0.998,处于不稳定状态,有可能发生失稳破坏。

由表2可以看出:随着降雨历时的增长,边坡各

表 2 各滑弧在不同降雨历时条件下的稳定系数

滑弧编号	不同降雨历时条件下的稳定系数								
	0 h	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h	84 h	96 h
1	2.353	2.402	2.366	2.29	2.358	2.075	2.127	2.138	2.192
2	2.561	2.597	2.624	2.505	2.515	2.432	2.436	2.245	2.121
3	1.952	1.963	1.951	1.909	1.914	1.860	1.785	1.826	1.739
4	1.693	1.703	1.700	1.667	1.632	1.620	1.587	1.517	1.467
5	1.548	1.540	1.541	1.504	1.438	1.410	1.370	1.303	1.282
6	1.487	1.489	1.437	1.412	1.384	1.365	1.327	1.283	1.252
7	1.359	1.333	1.285	1.275	1.242	1.204	1.172	1.139	1.109
8	1.285	1.252	1.226	1.207	1.178	1.153	1.119	1.092	1.067
9	1.258	1.177	1.119	1.12	1.096	1.075	1.052	1.027	1.007
10	1.243	1.166	1.134	1.096	1.064	1.037	1.009	0.981	0.956
11	1.196	1.198	1.170	1.099	1.064	1.027	0.998	0.970	0.946
12	1.154	1.144	1.137	1.115	1.090	1.047	1.015	0.977	0.949

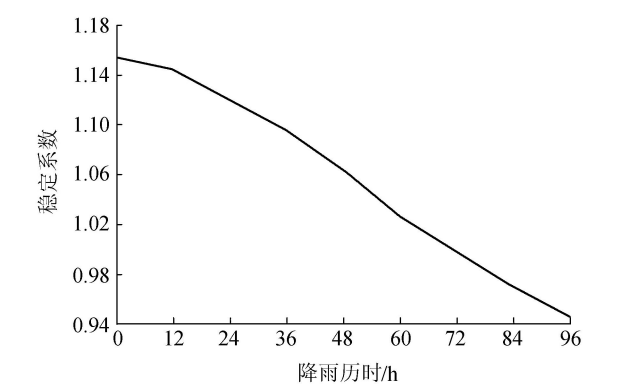


图 6 顺层边坡在不同降雨历时条件下的稳定系数

滑弧对应的稳定系数逐渐减小;本顺层边坡最危险滑弧主要为深层滑弧,最可能发生深层滑动,所以在边坡支护时要注意采取适当的支护深度。天然状况下位于最下部的 12 号滑弧稳定系数最小,为 1.154,随着降雨的进行,所有滑弧对应的稳定系数均有所降低,但最危险滑弧在 36h 后上移至 11 号滑弧,但与 12 号滑弧稳定系数差别不明显。

通过对本铁路路堑顺层边坡在降雨条件下的稳定分析可知:在降雨入渗条件下,降雨主要沿渗透系数较大的软弱夹层下渗,然后向周围岩层扩散,在坡顶局部形成暂态饱和区,直接导致坡顶岩土体容重增大,软弱夹层力学性质降低;随着降雨历时的增长,暂态饱和区域面积不断扩大,边坡深层沿软弱层面小主应力值逐渐降低,形成不利应力状态,进一步导致边坡稳定系数降低,最终造成边坡沿深层软弱层面整体下滑。

3 结 论

- a. 在持续降雨作用下,降雨首先沿渗透系数较大的软弱层面下渗,然后向周围岩层扩展,坡顶暂态饱和区面积不断扩大。
- b. 降雨导致边坡应力重分布,随着降雨的进行,边坡浅表小主应力逐渐减小,并在深部沿软弱层

面形成小主应力较小的条带,此种应力状态不利于边坡稳定。

c. 降雨影响边坡的稳定性,随着降雨历时的增长,边坡的稳定系数逐渐减小。边坡最可能发生深层滑动,在边坡支护时要注意采取适当的支护深度。天然状况下边坡处于基本稳定状态,在降雨 72 h 后边坡处于不稳定状态。

参考文献:

[1] 吕美君,晏鄂川. 顺层边坡岩体结构稳定性分析[J]. 地球与环境,2005,33:285-288. (LÜ Meijun, YAN Echuan. Structure stability analysis for rock mass consequent slope [J]. Earth and Environment, 2005, 33: 285-288. (in Chinese))

[2] 曹平,林杭,李江腾,等. 竹城公路层状岩质边坡的稳定性研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2009,40(3): 774-780. (CAO Ping, LIN Hang, LI Jiangteng, et al. Stability of stratified rock slope in Zhu-Cheng road[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(3): 774-780. (in Chinese))

[3] 石露,李小春,白冰,等. 降雨条件下露天平台边坡的稳定性研究[J]. 岩土力学,2012,33(5): 1519-1526. (SHI Lu, LI Xiaochun, BAI Bing, et al. Research on open-pit platform slope stability under rainfall condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (5): 1519-1526. (in Chinese))

[4] 林鸿洲,李广信,于玉贞,等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学,2007,28(9): 1931-1936. (LIN Hongzhou, LI Guangxin, YU Yuzhen, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, , 2007, 28(9): 1931-1936. (in Chinese))

[5] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15: 313-321.

(下转第 88 页)

- 2006(8):31-33. (in Chinese))
- [18] 蔡为武. 白山拱坝钻孔取芯试验成果分析与探讨[J]. 水电站设计, 1998(1):77-82. (CAI Weiwu. Test result analysis and discussion on boring for core at baishan arch dam [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1998(1):77-82, 97. (in Chinese))
- [19] 李承木. MgO 混凝土自生体积变形的长期试验研究成果[J]. 水力发电学报, 1999(2):11-19. (LI Chengmu. An experimental study of the autogenous volume deformation of the MgO concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999(2):11-19. (in Chinese))
- [20] 袁明道, 李承木, 扬光华. MgO 微膨胀混凝土自生体积变形的长期温度效应研究与仿真计算模型的探讨[C]//第18届(2002年度)科研成果学术论文报告文集. 广州:广东省水利水电科学研究院, 2003:214-223.
- [21] 李承木. MgO 微膨胀混凝土的基本性能研究[C]//陈其武, 李晓新. 氧化镁混凝土筑坝技术文集. 北京:水利水电规划设计总院, 1994:46-68.
- [22] 李承木. 铜头拱坝外掺氧化镁混凝土的基本性能研究[C]//铜头拱坝建设文集. 成都:水利水电混凝土坝信息网, 2004:71-84.
- [23] 李晓勇, 李万军, 李承木. 关于对混凝土压蒸安定性试验若干影响因素的研究[J]. 水电站设计, 2013(1):104-109. (LI Xiaoyong, LI Wanjun, LI Chengmu. Study of several factors affecting concrete compression steaming stability testing [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2013(1):104-109. (in Chinese))
- [24] 李承木. 论我国 MgO 混凝土筑坝技术的发展历史与现状[J]. 广东水利水电, 2012(9):1-7. (LI Chengmu. Development and status of MgO concrete dam technology [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2012(9):1-7. (in Chinese))
- (收稿日期:2012-10-15 编辑:熊水斌)

(上接第14页)

- [11] 姚成, 纪益秋, 李致家, 等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2012, 40(1):42-47. (YAO Cheng, JI Yiqiu, LI Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(1):42-47. (in Chinese))
- [12] YAO Cheng, LI Zhijia, YU Zhongbo, et al. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xinanjiang model using geographically based information [J]. Journal of Hydrology, 2012, 468/469:47-62.
- [13] ANDERSON R, KOREN V, REED S. Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates [J]. Journal of Hydrology, 2006, 320:103-106.
- [14] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京:水利电力出版社, 1984.
- [15] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6):2-9. (ZHAO Renjun, WANG Peilan. Analysis of the parameters of the Xinanjiang model [J]. Journal of China Hydrology, 1988(6):2-9. (in Chinese))
- [16] KOREN V, SMITH M, WANG D, et al. Use of soil property data in the derivation of conceptual rainfall-runoff model parameters[C]//Proceedings of the 15th Conference on Hydrology. Long Beach:AMS, 2000:103-106.
- [17] 中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台. SRTM 90 米分辨率数字高程原始数据[EB/OL]. [2012-09-28]. <http://datamirror.csdb.cn>.
(收稿日期:2012-11-28 编辑:熊水斌)

(上接第76页)

- [6] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33:379-392.
- [7] THOMAS H R, HE Y. Coupled heat-moisture transfer theory for deformable unsaturated soil and its algorithmic implementation [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40(18):3421-3441.
- [8] WONG T T, FREDLUND D G, KRAHN J. Numerical study of coupled consolidation in unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6):926-937.
- [9] 路为, 白冰, 陈从新. 岩质顺层边坡的平面滑移破坏机制分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2):204-207. (LU Wei, BAI Bing, CHEN Congxin. Analysis of mechanism of plane sliding failure for bedded rock slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2):204-207. (in Chinese))
- [10] 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]. 岩土力学与工程学报, 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))
- [11] 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))
- [12] 刘俊新, 刘育田, 胡启军. 非饱和地表径流-渗流和流固耦合条件下降雨入渗对路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3):903-910. (LIU Junxin, LIU Yutian, HU Qijun. Stability of embankment slope subjected to rainfall infiltration considering both runoff-underground seepage and fluid-solid coupling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3):903-910. (in Chinese))
- (收稿日期:2012-10-15 编辑:熊水斌)