

文章编号:1672-6561(2012)04-0088-07

降雨条件下花岗岩残坡积土路堑边坡稳定性研究

邓通发^{1,2}, 桂 勇³, 罗嗣海¹, 周军平⁴

(1. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006;
3. 江西理工大学 应用科学学院, 江西 赣州 341000; 4. 赣州高速公路有限责任公司, 江西 赣州 341000)

摘 要:基于多孔介质饱和—非饱和渗流理论和非饱和土抗剪强度理论,采用极限平衡法与降雨渗流有限元相结合的方法,选取大庆—广州高速公路江西里仁—龙南段某典型高路堑边坡,利用岩土仿真软件 GeoStudio 建立模型,研究降雨条件下花岗岩残坡积土路堑边坡失稳破坏的形态和机理。结果表明:随着降雨的进行,边坡中地下水位从坡脚处开始抬升,边坡坡脚处容易产生“小弧”滑动破坏;土体体积含水量的增加使得基质吸力下降,从而降低土体强度和边坡的安全系数,且基质吸力与安全系数的下降幅度基本同步;降雨强度对边坡的安全系数有较大影响,小雨阶段,安全系数降幅较缓,而暴雨阶段,安全系数降幅加剧,降幅达 24.4%;在强降雨条件下,滑面基质吸力大部分丧失,失稳边坡发生了从整体失稳向局部失稳、从深层失稳向浅层失稳的转变,即强降雨是浅层滑坡的主要外在因素。

关键词:边坡;稳定性;滑坡;渗流;基质吸力;极限平衡法;有限元法;残坡积土

中图分类号:P642;U416.1⁺4 **文献标志码:**A

Study on Slope Stability of Granite Residual Soil Cutting Excavation with Rainfall

DENG Tong-fa^{1,2}, GUI Yong³, LUO Si-hai¹, ZHOU Jun-ping⁴

(1. School of Architectural and Surveying and Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China; 3. School of Applied Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 4. Ganzhou Expressway Co., Ltd., Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Based on saturated-unsaturated seepage theory and unsaturated soil shear strength theory, a typical high cutting excavation slope in Jiangxi Liren-Longnan Section of Daqing-Guangzhou Expressway was selected, the model was built by the simulation software GeoStudio, and the shape and mechanism of slope instability of granite residual soil cutting excavation with rainfall were studied by the means of limit equilibrium method and finite element method of rainfall infiltration. The results showed that groundwater table rose from the bottom of slope and “small arc” instability easily happened in the bottom with rainfall; the increase of volumetric moisture content decreased the matric suction, and thereby decreased soil strength and safety factor of slope, and the decreases of matric suction and safety factor were synchronized; rainfall intensity had significant effect on safety factor of slope, safety factor decreased slowly with light rain and decreased quickly with rainstorm, and the most decrease was 24.4%; matric suction of slide surface mostly lost with heavy rain, slope instability happened from whole to local instability and from deep to shallow instability, so that the strong rainfall was main extrinsic factor of

收稿日期:2012-06-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51264008);江西省科技厅科技项目(2012C0003,2011H0023)

作者简介:邓通发(1980-),男,江西兴国人,江西理工大学讲师,广州大学工学博士研究生,E-mail:dbdtf@163.com。

shallow landslide.

Key words: slope; stability; landslide; seepage; matric suction; limit equilibrium method; finite element method; residual soil

0 引言

降雨是影响土质边坡稳定性以及导致边坡失稳破坏的最主要和最普遍的环境因素^[1-5],降雨诱发的滑坡约占滑坡总数的90%。降雨入渗时,边坡稳定性是一个牵涉到饱和—非饱和状态下水的渗流、土中含水量变化及土体强度变化的复杂问题^[6-9]。雨水入渗会对岩土体产生静水压力和动水压力,破坏边坡的应力平衡,减小斜坡的抗滑力,增大下滑力;同时,含水量增加会降低边坡土体的基质吸力和抗剪强度,容易导致滑坡发生^[10]。

Ng等利用数值模拟方法分析瞬态渗流对非饱和土质边坡稳定性的影响,指出降雨强度、初始地下水位、渗透性的各向异性与前期降雨历时均会影响边坡的安全系数^[11]。Rahardjo等也认为前期降雨量对边坡的稳定具有重要影响,并通过某案例研究,指出在持续5d的前期降雨量下将会造成滑坡^[12]。Ng等分析了不同雨型对边坡土体内部孔隙水压力分布变化的影响^[13]。Tsaparas等研究了不同渗透系数条件下降雨诱发滑坡的控制参数,指出在前期降雨均匀分布的情况下对边坡安全系数的影响^[14]。但针对花岗岩残坡积土路堑边坡的研究较少^[15]。大庆—广州高速公路江西里仁—龙南段高路堑边坡较多,其特有的花岗岩残坡积土风化程度高,主要呈现砂土状,在地表水作用下,边坡极易失稳。笔者以该工程为例,基于多孔介质饱和—非饱和渗流理论和非饱和土抗剪强度理论,采用极限平衡法与有限元渗流分析所得的渗流场相结合的方式,利用岩土仿真软件GeoStudio建立模型,研究降雨条件下花岗岩残坡积土路堑边坡失稳的形态和机理,为类似边坡工程的设计与防治提供参考。

1 理论基础

1.1 非饱和土抗剪强度理论

Fredlund等提出以净应力与基质吸力为变量的双变量非饱和土抗剪强度公式,得到了广泛应用^[16]。其表达式为

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

式中: τ_f 为非饱和土抗剪强度; c' 为有效内聚力; σ 为破坏面法向应力; u_a 为孔隙空气压力; $(\sigma - u_a)$ 则为破

坏面净法向应力; u_w 为孔隙水压力, $(u_a - u_w)$ 则为破坏面基质吸力; φ' 为与破坏面净法向应力 $(\sigma - u_a)$ 有关的内摩擦角; φ^b 为破坏面基质吸力 $(u_a - u_w)$ 引起的内摩擦角; $\tan \varphi'$ 为抗剪强度随基质吸力增加的速率。

然而, φ^b 不是常数。研究表明, φ^b 与基质吸力之间存在着非线性关系^[17],它一般都会随着吸力的增加而减少,且不易测定,造成实际应用的困难;基于实用目的, φ^b 可以取值为 $1/2\varphi'^{[18]}$ 。

1.2 饱和—非饱和渗流理论

根据质量守恒原理和广义达西定律,可得出饱和—非饱和渗流控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (2)$$

式中: H 为总水头; k_x 为 x 方向渗透系数; k_y 为 y 方向渗透系数; Q 为施加的边界流量; θ_w 为体积含水量; t 为时间。

若假定式(2)右边为0,则该表达式为稳态渗流情况。

体积含水量的改变依赖于应力状态的改变和土的性质。若假定土体没有加载卸载(即总应力不变)且气压保持为恒定的大气压,则体积含水量为孔隙水压力的函数

$$\partial \theta_w = m_w \partial u_w \quad (3)$$

式中: m_w 为储水曲线的斜率。

总水头定义为

$$H = u_w / \gamma_w + h \quad (4)$$

式中: γ_w 为水的重度; h 为高程(常量)。

将式(3)、(4)代入(2)可得

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

求解式(5)需先确定土水曲线(m_w 为其斜率)和渗透系数,而渗透系数由于变化很大且不易直接量测,通常采用经验公式、理论模式或数学统计模型加以预测^[19]。笔者采用Fredlund等推荐的公式来预测土水特征曲线(SWCC)和渗透系数^[20],表达式为

$$\theta_w = C_\psi \theta_s / \{ \ln[e + (\psi/a)^n] \}^m \quad (6)$$

其中

$$m = 3.67 \ln(\theta_s / \theta_i)$$

$$n = 1.31^{m+1} \times 3.72 s \psi_i / m \theta_s$$

$$s = \theta_i / (\psi_p - \psi_i)$$

式中: θ_s 为饱和体积含水量; C_ψ 为修正系数; ψ 为负孔

隙水压力; ϕ_i 为土水特征曲线转折点时的负孔隙水压力; θ_i 为土水特征曲线转折点时的体积含水量; a, n, m 为拟合参数; s 为体积含水量函数通过转折点的切线斜率; ϕ_0 为切线在负孔隙水压力轴上的截距。

对于大部分边坡稳定性问题, 渗透系数函数可以根据饱和时土体的渗透系数和土水特征曲线估算

$$k_w = k_s \left[\frac{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^z) - \theta(\phi_i)}{e_i^z} \theta'(e_i^z)}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^z) - \theta_s}{e_i^z} \theta'(e_i^z)} \right] \quad (7)$$

式中: k_w 为计算所得渗透系数; k_s 为测得的饱和渗透系数; ϕ_j 为对应第 j 步的负孔隙水压力; z 为负孔隙水压力对数积分的虚拟变量; $\theta'(e_i^z)$ 为方程起始值; $i=1, 2, 3, \dots, N$, 其中 N 为个数。

1.3 边坡稳定性分析方法

非饱和土质边坡稳定性有限元分析方法发展的 3 个主要阶段为与时间无关的定性分析阶段、与时间相关的渗流与变形的不耦合分析阶段和与时间相关的非饱和土流固耦合分析阶段^[21]。

笔者采用与时间相关的渗流与变形的不耦合计算方法。其基本思路是: 先采用非饱和土的渗流分析得到某一时刻的稳态或瞬态渗流场, 然后基于此渗流场再采用极限平衡法中考虑了力平衡和力矩平衡的 Morgenstern-Price 方法来分析边坡的稳定性, 在分析中考虑基质吸力影响^[22-30]。

2 算例分析

2.1 工程概况

大庆—广州高速公路江西里仁—龙南段地形起伏较大, 路线切割山体较深, 沿线深挖方路堑边坡较多。根据野外地质调查及工程地质钻探资料和区域地质资料分析, 该区地质构造不发育, 地层发育出露严重缺失, 主要地层以燕山期花岗岩为主, 岩性主要为花岗岩残坡积土、全(强)风化土、中风化土, 主要呈现砂土状, 在地表水作用下, 边坡极易失稳。具体地层分布为: ①耕表土, 为黄色, 湿, 松散, 含少量植物根系, 厚度 0.5~0.6 m, 土石分级为 II 级; ②含砾粉质黏土, 为黄色—红褐色, 稍湿, 硬塑, 由花岗岩风化残坡积而成, 组织结构全部被破坏, 含少量粗砂、砾砂颗粒, 厚度 0.5~2 m, 遇水易崩解, 土石分级为 II 级, 约占 12%; ③全强风化花岗岩, 为灰褐色, 组织结构基本被破坏, 遇水易崩解, 土石分级为 III、IV 级, 约占 88%。

工程经过地区属亚热带季风气候区, 气候温暖、

湿润, 雨量充沛。多年平均降雨量为 1 510.8 mm, 年最高降雨量 2 595.5 mm, 年最低降雨量 938.5 mm, 每年 3 月至 6 月为雨季, 降雨量占全年 56.4% 左右。边坡开挖施工中, 在降雨的影响下该工程曾发生过多起边坡浅层滑塌现象(图 1)。笔者选取某一典型边坡进行简化, 建立有限元渗流模型(图 2), 其中竖线 A 和 B 处用于监测。边坡分为 4 阶, 每一阶坡度为 1:1, 前两阶坡度为 1:1, 后两阶坡度为 1:1.25, 网格划分在边坡浅层加密, 共计 19 454 个单元和 14 996 个节点。



图 1 边坡浅层滑塌

Fig. 1 Shallow Layer Slippage of Slope

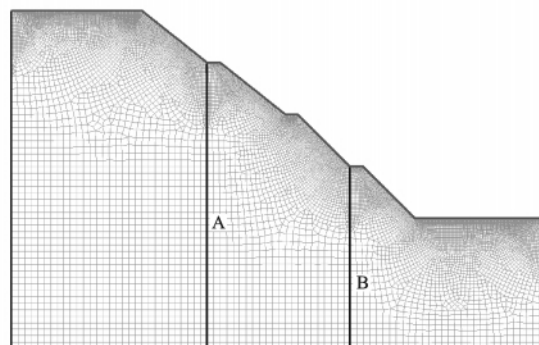


图 2 边坡剖面及有限元网格

Fig. 2 Slope Profile and FEM Grids

2.2 边界条件

(1) 左右两侧边界: 左侧为分水岭, 设为零流量边界; 右侧设为远场边界, 左右边界远离边坡, 对边坡影响较小。

(2) 上部边界: 当孔隙水压力小于 0 时为第 2 类边界条件, 又称为 Newman 类型边界条件, 即流量边界; 反之, 为第 1 类边界条件, 又称为 Dirichlet 边界条件, 即水头边界。

(3)模型底面假设为不透水边界。

(4)降雨共7 d,降雨工况见图3,其中第3天到第5天雨强最大,为 $128 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,第7天停雨。斜坡处的降雨强度考虑了坡度折减(取垂直坡面分量),坡面不产生积水。

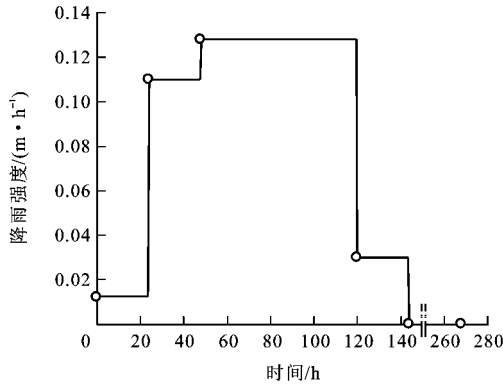


图3 降雨强度随时间的变化曲线

Fig. 3 Curve of Rainfall Intensity with Time

(5)考虑该区年均降雨及降雨分布情况,取 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 流量的稳态渗流分析结果作为后续降雨工况的初始状态。

2.3 材料参数

边坡岩土体为全风化花岗岩,等效为各向同性连续介质。根据钻孔资料和室内试验资料,饱和渗透系数取 $2.1 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,饱和含水量取0.375,残余含水量取0.192,重度取 $19.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,内聚力取21 kPa,内摩擦角取 24° ,采用莫尔-库伦本构模型,根据Fredlund等推荐的公式得到土水特征曲线(图4)。

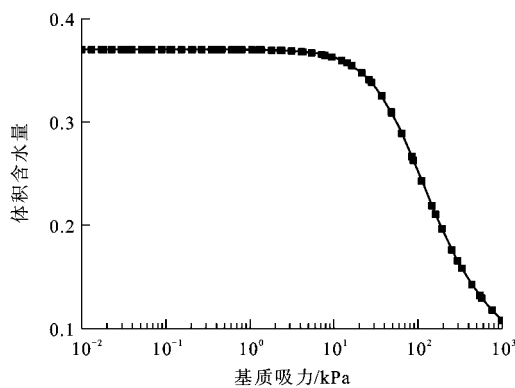


图4 土水特征曲线

Fig. 4 Soil Water Characteristic Curve

3 结果分析

3.1 边坡瞬态渗流分析

通过边坡降雨有限元瞬态渗流分析,可以得出边坡土体中孔隙水压力、体积含水量和渗透系数等

参数在不同时间和空间的分布。图5为不同降雨时刻边坡水位线变化图。从图5可以看出,降雨对地下水位有较大影响,随着降雨的进行,地下水位从坡脚处开始抬升,最高抬升13.8 m,停雨后水位线有所回落;同时,降雨入渗后在边坡坡脚大量积聚,使得土体的抗剪强度指标大幅度降低,在坡角处有出现“小弧”滑动的可能,从而容易产生局部失稳。对路堤边坡现场开挖测试也证实了雨水在坡角积聚的现象^[31]。

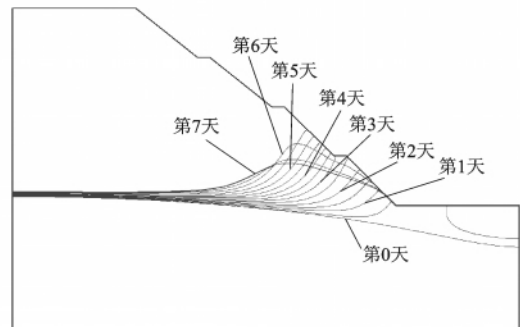


图5 降雨条件下不同时刻的水位线

Fig. 5 Water Tables in Different Times with Rainfall

图6为图2竖线A外观测的不同降雨时刻含水量随深度的变化曲线。从图6可以看出,降雨入渗对边坡表层体积含水量均有较大影响,随着降雨的进行,表层土体接近饱和并向内部渗透,最大影响深度达12 m,饱和带垂直厚度最大达3.6 m,停雨后表层土体体积含水量很快下降。体积含水量增加会降低土体的有效抗剪强度,从而降低土质边坡的安全系数。

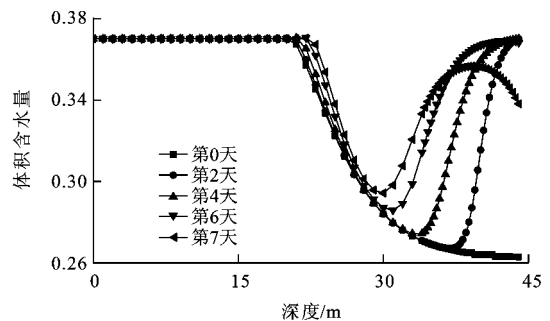


图6 体积含水量随深度的变化曲线

Fig. 6 Curves of Volumetric Moisture Content with Depth

3.2 边坡稳定性分析

在边坡降雨有限元瞬态渗流分析的基础上,采用极限平衡法与有限元渗流分析所得的渗流场相结合的方式,研究降雨条件下花岗岩残坡积土路堑边坡在不同时刻的安全系数及基质吸力。

从图7可以看出,降雨对边坡的安全系数有较

大影响,其下降幅度跟降雨强度密切相关。 AB 段雨量较小,曲线降幅较缓; BC 段为暴雨,曲线降幅加剧,最大降幅达 24.4%; CD 段为停雨阶段,安全系数有所回升。结合图 8、9,暴雨开始后,滑体体积突然明显变小,体积降低率为 28.4%;再结合图 10,在第 4 天时(降雨量最大),潜在滑动面发生了较大的形状改变,主要体现在滑动面的长度和厚度均有较大幅度的变小,由此可以推断失稳边坡发生了从整体失稳向局部失稳、从深层失稳向浅层失稳的转变。由此可见,土质边坡浅层滑坡主要由强降雨引起,并在强降雨之初就会发生,当降雨量减小时,滑坡体积变大,破坏转为深层。

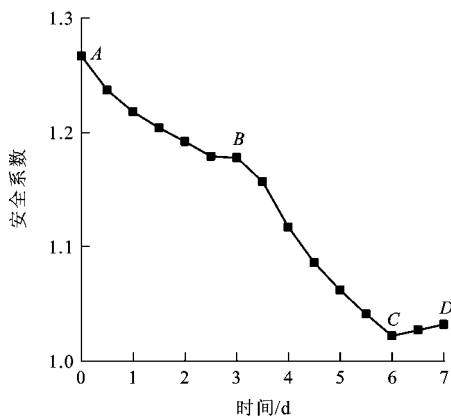


图 7 安全系数随时间的变化曲线

Fig. 7 Curve of Safety Factor with Time

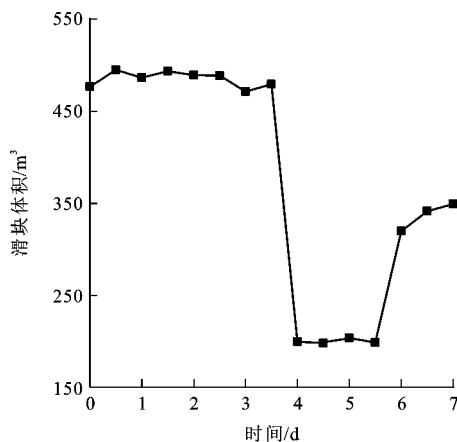


图 8 滑块体积随时间的变化曲线

Fig. 8 Curve of Slippage Volume with Time

从式(1)可知,基质吸力对土体强度有很大的贡献,在降雨过程中安全系数下降正是由于基质吸力的丧失所致。从图 10 可以看出,随着降雨的进行,滑坡体基质吸力下降幅度较大,且基质吸力与安全系数的下降基本同步,暴雨对基质吸力的下降具有决定性的影响。

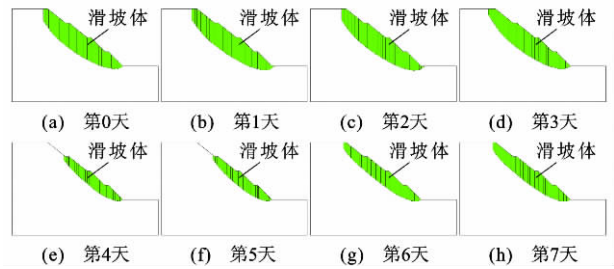


图 9 降雨条件下不同时刻滑坡体的形状

Fig. 9 Shapes of Landslide Mass in Different Times with Rainfall

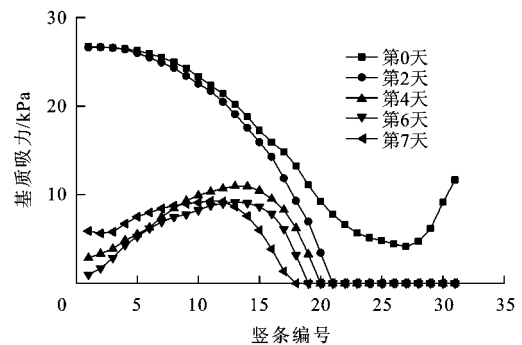


图 10 滑体范围基质吸力

Fig. 10 Curve of Matrix Suction with Slice

4 结 语

(1)随着降雨的进行,地下水位从坡脚处开始抬升,雨水在边坡坡脚大量积聚,使得土体的抗剪强度指标大幅度降低,在坡角处有出现“小弧”滑动的可能,从而容易产生局部失稳。

(2)随着降雨的进行,表层土体接近饱和并向内部渗透,最大影响深度达 12 m,饱和带垂直厚度最大达 3.6 m,停雨后表层土体体积含水量很快下降。体积含水量增加会降低土体的有效抗剪强度,从而降低土质边坡的安全系数。

(3)降雨对边坡的安全系数有较大影响,其下降幅度跟降雨强度密切相关。强降雨开始后,失稳边坡发生从整体失稳向局部失稳、从深层失稳向浅层失稳的转变,即土质边坡浅层滑坡主要由强降雨引起,并在强降雨之初就会发生,当降雨量减小时,滑坡体积变大,破坏转为深层。

(4)随着降雨的进行,滑面基质吸力下降幅度较大,且基质吸力与安全系数的下降基本同步,强降雨对基质吸力的下降具有决定性的影响。

(5)花岗岩残坡积土风化程度强,主要呈现砂土状,在地表水作用下,边坡极易失稳,因此在边坡设计和施工过程中,应注意做好防排水措施。

参考文献:

References:

- [1] 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, 10(4): 343-348.
HUANG Run-qiu, QI Guo-qing. The Effect of Unsaturated Soil Suction on Slope Stability[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4): 343-348.
- [2] 王福恒,李家春,田伟平. 黄土边坡降雨入渗规律试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(4): 20-24.
WANG Fu-heng, LI Jia-chun, TIAN Wei-ping. Test on Rainfall Filtration in Loess Slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 20-24.
- [3] 付宏渊,曾 铃,蒋中明,等. 降雨条件下公路边坡暂态饱和区发展规律[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 59-64.
FU Hong-yuan, ZENG Ling, JIANG Zhong-ming, et al. Developing Law of Transient Saturated Areas of Highway Slope Under Rainfall Conditions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 59-64.
- [4] 杨 娇,王 宇,雷富宏,等. 降雨入渗下残坡积土边坡的稳定性模拟研究[J]. 安全与环境工程, 2012, 19(4): 5-10.
YANG Jiao, WANG Yu, LEI Fu-hong, et al. Research on the Residual Soil Slope Stability Simulation Under Rainfall Infiltration[J]. Safety and Environmental Engineering, 2012, 19(4): 5-10.
- [5] 王 强,刘仰韶,傅旭东,等. 砂土路基湿化变形和稳定性的可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 7-12.
WANG Qiang, LIU Yang-shao, FU Xu-dong, et al. Reliability Analysis for Wetting Deformation and Stability of Sand Soil Roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 7-12.
- [6] 王学武,许尚杰,党发宁,等. 水位骤降时的非饱和坝坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2760-2764.
WANG Xue-wu, XU Shang-jie, DANG Fa-ning, et al. Analysis of Stability of Dam Slope During Rapid Drawdown of Reservoir Water Level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2760-2764.
- [7] 王协群,张有祥,邹维列,等. 降雨入渗条件下非饱和路堤变形与边坡的稳定数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3640-3644.
WANG Xie-qun, ZHANG You-xiang, ZOU Wei-lie, et al. Numerical Simulation for Unsaturated Road-embankment Deformation and Slope Stability Under Rainfall Infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3640-3644.
- [8] 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 Jun-xin, LIU Yu-tian, HU Qi-jun. 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.
- [9] 雷胜友,李志远,王吉庆,等. 含水量对非饱和黄土强度的影响[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 1-5.
LEI Sheng-you, LI Zhi-yuan, WANG Ji-qing, et al. Effect of Water Content on Strength of Unsaturated Loess[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 1-5.
- [10] LAM L, FREDLUND D G, BARBOUR S L. Transient Seepage Model for Saturated-unsaturated Soil Systems: A Geotechnical Engineering Approach[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(4): 565-580.
- [11] NG C W W, SHI Q. Influence of Rainfall Intensity and Duration on Slope Stability in Unsaturated Soils[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1998, 31: 105-113.
- [12] RAHARDJO H, LI X W, TOLL D G, et al. The Effect of Antecedent Rainfall on Slope Stability[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2001, 19: 371-399.
- [13] NG C W W, WANG B, TUNG Y K. Three-dimensional Numerical Investigations of Groundwater Responses in an Unsaturated Slope Subjected to Various Rainfall Patterns[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(5): 1049-1062.
- [14] TSAPARAS I, RAHARDJO H, TOLL D G, et al. Controlling Parameters for Rainfall-induced Landslides[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(1): 1-27.
- [15] 谭捍华,孟庆山. 千枚岩残坡积土大型直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增1): 360-363.
TAN Han-hua, MENG Qing-shan. Experimental Study of Large Scale Direct Shear Test of Phyllite Residual Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 360-363.
- [16] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The Shear Strength of Unsaturated Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [17] GAN J K M, FREDLUND D G, RAHARDJO H. Determination of Shear Strength Parameters of an Unsaturated Soil Using the Direct Shear Test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(3): 500-510.
- [18] KRAHN J. Seepage Modeling with SEEP/W 2007; An

- Engineering Methodology[M]. 4th Ed. Calgary: Geoslope International Ltd., 2009.
- [19] 王俊梅, 刘海宁, 李维朝. 基于土水特征曲线的渗流控制措施研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 614-620.
- WANG Jun-mei, LIU Hai-ning, LI Wei-chao. Seepage Control of Unsaturated Soil Based on the SWCC[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 614-620.
- [20] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the Soil-water Characteristic Curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [21] 陈曦, 刘春杰. 逐步完善的非饱和土边坡稳定性有限元分析方法[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增1): 380-384.
- CHEN Xi, LIU Chun-jie. Staged Development of Finite Element Methods for Stability of Unsaturated Soil Slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 380-384.
- [22] 张菊连, 沈明荣. 高速公路边坡稳定性评价新方法[J]. 岩土力学, 2011, 31(12): 3623-3629.
- ZHANG Ju-lian, SHEN Ming-rong. A New Approach to Expressway Slope Stability Assessment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 31(12): 3623-3629.
- [23] 李炜. 边坡稳定性联合评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 8-11.
- LI Wei. Combined Evaluation Method of Slope Stability[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 8-11.
- [24] 李炜, 康海贵. 边坡稳定性模糊随机可靠度分析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1): 19-23.
- LI Wei, KANG Hai-gui. Fuzzy-random Reliability Analysis of Slope Stability[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 19-23.
- [25] 康海贵, 李炜. 基于安全系数解析式的边坡稳定评价体系研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 1-5.
- KANG Hai-gui, LI Wei. Research on Evaluated System for Slope Reliability Based on Calculation Formulae of Safety Factor[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 1-5.
- [26] 王思长, 折学森, 李毅, 等. 基于尖点突变理论的岩质边坡稳定性分析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(3): 23-27.
- WANG Si-chang, SHE Xue-sen, LI Yi, et al. Stability Analysis of Rock Slope Based on Cusp Catastrophe Theory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3): 23-27.
- [27] 陈鹏, 徐博侯. 基于因素敏感性的边坡稳定可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 42-48.
- CHEN Peng, XU Bo-hou. Reliability Analysis of Slope Stability Based on Factors Sensitivity[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4): 42-48.
- [28] 陈鹏, 徐博侯. 顺层岩质路堑边坡稳定性数值极限分析[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 38-45.
- CHEN Peng, XU Bo-hou. Numerical Limit Analysis of Stability for Bedding Rock Cutting Slope[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 38-45.
- [29] 苏永华, 赵明华, 李志勇, 等. 基于虚拟试验的边坡失稳概率分析方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 14-19.
- SU Yong-hua, ZHAO Ming-hua, LI Zhi-yong, et al. Instability Probability Analysis Method of Slope Based on Dummy Test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 14-19.
- [30] 于德海, 彭建兵, 孙治国. 黑河水库坝肩岩质边坡变形破坏特征及失稳判据[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6): 64-68.
- YU De-hai, PENG Jian-bing, SUN Zhi-guo. Deformation Failure Characters and Instability Criterion of Abutment Rock Slope in Heihe Reservoir[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 64-68.
- [31] 王瑞钢, 闫澍旺, 邓卫东. 降雨作用下高填土质路堤边坡的渗流稳定分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 25-30.
- WANG Rui-gang, YAN Shu-wang, DENG Wei-dong. Analysis of Seepage Stability of High-filled Embankment Slope Due to Rainfall Infiltration[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 25-30.