

文章编号: 1001-1986(2010)03-0041-05

滇西典型膨胀土滑坡稳定性分析

李向全, 周志超, 刘玲霞, 侯新伟

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要: 滇西山前地带广泛分布着一层具有弱膨胀性的粉质粘土, 在降雨条件下常诱发滑坡灾害, 成为当地一种典型的滑坡灾害类型。从土体非饱和特性出发, 通过土体吸力测试, 提出了基质吸力-含水量土水特征关系, 确定了饱和含水量在 37% 左右, 残余含水量约 3.5%, 进气值约 190 kPa; 三轴力学试验取得了非饱和土强度参数, 土体吸力内摩擦角为 4.3° ; 建立了饱和—非饱和渗流数值模型, 对不同雨强条件下的滑坡失稳过程、机制进行了模拟。模拟结果为: 强降雨引起滑坡稳定性明显降低的时间效应为 2 d 左右, 雨强 16 mm/d 以上, 持续降雨 3 d 后滑坡失稳滑动, 雨强 6 mm/d 以下的降雨对滑坡稳定性没有明显影响。为该类型滑坡灾害的防治提供了重要科学依据。

关键词: 膨胀土; 滑坡; 稳定性; 滇西

中图分类号: P642.22 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.010

Stability analysis of the typical expansive soil landslide in western Yunnan Province

LI Xiangquan, ZHOU Zhichao, LIU Lingxia, HOU Xinwei

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: There is wide distribution of silty clay layers with weak expansion in piedmont area of western Yunnan in China. The rainfall-induced landslides are so frequent that huge losses occur in relevant traffic routes and construction facilities. It becomes one of the most typical landslide hazard in the area. Based on the study of the characteristics of the unsaturated soil, important progress has been made. The soil-water characteristics between matrix suction and water content was proposed by the soil suction test. The saturated water content is about 37%, the residual water content about 3.5%, the air entry value about 190 kPa. The suction internal friction angle 4.3° of the unsaturated clay was achieved by the triaxial mechanical test. The saturated-unsaturated seepage numerical model has been established to simulated the courses and mechanisms of this kind of landslide instability under the conditions of different rainfall intensities. The time effect of the instability during the heavy rain is about 2 day when the landslide stability is significantly reduced. The landslide may become unstable and slide after three days of the continuous heavy rain at 16 mm/day. There is no significant impact on the landslide stability at the rain less than 6 mm/day. The results can be taken as the important scientific basis for prevention of this type of landslide disaster.

Key words: expansive soil; landslide; stability; western Yunnan Province

连续性降雨是滑坡活动最重要的触发因素。由此引发的降雨型滑坡灾害成为当前最主要地质灾害类型之一。随着滑坡诱发机理研究的不断深入, 饱和—非饱和土体渗流及强度特征对边坡稳定性影响的研究越来越受到重视。包承纲等^[1]对浅层膨胀土滑坡形成的非饱和土力学机制进行了研究; 黄润秋等^[2]开展了非饱和土边坡渗流场、应力场的原位观测试验研究; 廖红建^[3]、章广成等^[4]应用饱和—非饱和渗流理论对水库型滑坡稳定性进行了研究; 吴宏伟等^[5]研究了香港地区的非饱和土斜坡的稳定性。这些研究的一个共识就是土体基质吸力的变化

是非饱和土边坡失稳的重要因素。针对土体非饱和力学特性研究, 近年来 Fredlund 等^[6]提出了双应力变量理论, 在此基础上发展了饱和土的抗剪强度理论, 并引进了基质吸力强度, 这一研究得到广泛应用。目前本领域的研究热点集中于两个方面: 在基础理论技术方面, 注重于渗流与强度参数测试与观测技术的研究, 含水量与渗流及强度特性之间的非线性变化关系的探索^[7-13]; 在实际应用方面, 广泛应用于各类型非饱和土边坡的稳定性分析, 以及不同气候条件下的地质灾害防治。

本文以滇西弱膨胀土滑坡为例, 从土体非饱和

收稿日期: 2009-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40672169); 所基本科研业务费资助项目(sk07025)

作者简介: 李向全(1966—), 河北乐亭人, 博士, 研究员, 从事地质灾害与矿山环境研究。

特性出发,通过土体吸力测试,提出了基质吸力-含水量土水特征关系,三轴力学试验取得了非饱和土强度参数,建立了饱和-非饱和渗流数值模型,并结合当地降雨模式,对不同雨强条件下的滑坡失稳过程、机制进行了模拟。这为该类型滑坡灾害的防治提供了重要科学依据。

1 非饱和土边坡稳定性分析理论方法

1.1 饱和-非饱和渗流基本方程

基于质量守恒原理和非饱和土 Darcy 定律,各向异性多孔介质的饱和-非饱和渗流微分方程可写为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_r(h) k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h) \right] + Q = [C(h) + \beta S_s] \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 h 为压力水头(饱和区为正值,非饱和区为负值); $k_r(h)$ 为相对渗透系数,且 $0 < k_r(h) < 1$; k_{ij} 为饱和和渗透系数; S_s 为单位贮水系数; $C(h)$ 为容水度,且 $C(h) = d\theta/dh$, θ 为体积含水率; β 为特征系数(非饱和区为 0,饱和区为 1; t 为时间; Q 为源汇项。

式(1)的定解条件为:

初始条件

$$h(x_i, t)|_{t=0} = h_0(x_i); \quad (2)$$

边界条件

$$\left. \begin{aligned} h(x_i, t)|_{\Gamma_1} &= h_0(x_i, t) \\ - \left[k_r(h) k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_i(h) \right] n_i \Big|_{\Gamma_2} &= q_n \\ - \left[k_r(h) k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_i(h) \right] n_i \Big|_{\Gamma_3} &= 0 \quad (h|_{\Gamma_3} = 0) \\ - \left[k_r(h) k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_i(h) \right] n_i \Big|_{\Gamma_4} &= q_n \quad (h|_{\Gamma_4} \leq 0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $n_i(i=1,2,3)$ 为方向余弦; Γ_1 为水头边界; Γ_2 为流量边界; Γ_3 为饱和溢出边界; Γ_4 为非饱和溢出边界; q_n 为边界法向流量,向外为正。

1.2 降雨入渗边界

降雨条件下,雨水的入渗量与土体的渗透性、干湿度及降雨强度、降雨持续时间等因素有关。可采用 Darcy 定律计算垂直地表的最大渗透能力:

$$R(t) = - \left[k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i + k_{i3} \right] n_i. \quad (4)$$

设 $q(t)$ 为降雨强度 $Q(t)$ 在入渗面上的分量,且有 $q(t) = Q(t) n_i$ 。当 $q(t) < R(t)$ 时,全部入渗,即 $R(t)|_{\Gamma} = q(t)$; 当 $q(t) > R(t)$ 时,坡面形成定水头饱和入渗,即

$$h(x_i, t)|_{\Gamma} = z(x_i)。$$

1.3 非饱和土渗透系数预测模型

随着对非饱和土的研究,大量的非饱和土渗透系数预测模型被提出,常用模型有 Van Genuchten 模型和 Fredlund 模型。

Van Genuchten 模型

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (a\psi)^n]^m}, \quad (5)$$

式中 θ_r 、 a 、 n 和 m 为优化参数, m 通常认为等于 $1-n^{-1}$, θ_r 为残余含水率, ψ 为基质吸力。基于式(5)的土水模型,渗透性函数可表达为

$$k_w = k_s \frac{\{1 - (a\psi)^{n-1} [1 + (a\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (a\psi)^n]^{m/2}}, \quad (6)$$

式中 k_w 为一定土壤含水量条件下的渗透系数; k_s 为土壤饱和渗透系数。

1.4 边坡稳定性分析模型

当土体中最大剪应力达到极限状态时,土体将发生破坏而导致失稳。为此,可采用应力极限平衡法分析土坡稳定性问题。为考虑基质吸力对饱和-非饱和土体中剪应力的影响,运用 Fredlund 修正 Mohr-Coulomb 准则:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b. \quad (7)$$

式中 c' 为有效凝聚力; $(\sigma_n - u_a)$ 为破坏面上的净法向应力; u_a 为破坏面上的孔隙气压力; ϕ' 为与静法向应力状态变量 $(\sigma_n - u_a)$ 有关的内摩擦角; $(u_a - u_w)$ 为破坏时在破坏面上的基质吸力; ϕ^b 是强度随基质吸力而增加的速率,称之为吸力内摩擦角。

以极限平衡状态理论为基础,可得到边坡失稳时安全系数为

$$F_s = \frac{\int_{\Gamma} \tau_f d\Gamma}{\int_{\Gamma} \tau_i d\Gamma}. \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_f &= c' + \sigma_n^* \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \\ \tau_i &= 0.5(\sigma_x^* - \sigma_y^*) \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha \\ \sigma_n^* &= 0.5(\sigma_x^* + \sigma_y^*) + 0.5(\sigma_x^* - \sigma_y^*) \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 α 为坡面外法线与水平面的夹角; σ^* 为坡面处净应力。

2 思铺滑坡稳定性分析

2.1 工程地质条件

思铺滑坡位于云南永平县初一铺村西山坡(图 1),其北面是大瑞铁路建设线路。坡体上覆地层为第四系更新统冲洪积(Q_3^{al+pl})粉质粘土,厚 10~30 m,

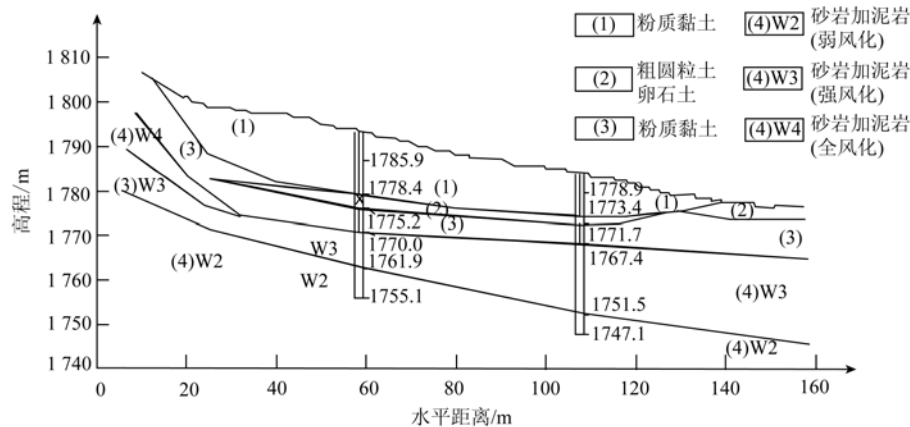


图1 思铺滑坡地质剖面图

Fig. 1 Geological section of Sipu landslide

表1 土体物理力学参数统计表
Table 1 Parameters of two kinds of soils

岩土类型	干重度 /kN·cm ⁻³	饱和重度 /kN·cm ⁻³	凝聚力 C/kPa	内摩擦角 /(°)	吸力内摩擦角 φ ^b /(°)	孔隙比	饱和渗透系数 /m·s ⁻¹
弱膨胀土	17.06	20.59	12.4	6.2	4.3	0.633	1.62 × 10 ⁻⁷
卵石土	17.86	20.98	9.1	35		0.53	1.24 × 10 ⁻⁴

属弱膨胀土。下伏白垩系下统景新组下段(K_{1j}¹)地层,为砂岩夹泥岩。粉质粘土和基岩之间含有一层卵砾石层。平面上滑坡体略呈“椭圆”形,大致垂直线路发育,周界清晰,前缘舌状伸入河床,后沿呈“圈椅状”。轴向长约 123 m,最大宽度 100 m,滑坡体平均厚约 12 m,总体积约 1.5×10⁵ m³。滑坡体上植被不发育,均垦为农田,自然坡面 10~20°,后缘达 35°。滑动迹象明显,滑体中后缘地表见多条横向裂缝,裂缝宽 3~10 cm。研究区平均降水量 1 092.1 mm/a。地下水以第四系地层孔隙潜水和基岩裂隙水为主,其中卵砾石层为主要富水地段,粘性土层中含水量甚微;砂岩、泥岩存在一定量的基岩裂隙水,含水量不大,水位埋藏较深。由于滑坡体直接影响下方大瑞铁路初一铺站房的建设,因此深入开展滑坡稳定性分析至关重要。

2.2 膨胀土非饱和力学试验

除进行常规试验外,重点开展系列非饱和土力学试验。包括吸力测试和三轴强度试验。本次室内吸力量测,高吸力部分(4.2~309 MPa)采用气相法;低吸力部分(小于 2 MPa)采用渗析(液相)方法。得到相关参数(表 1)和土水特征曲线(图 2)。

从土水特征曲线看出滇西弱膨胀土进气值在 190 kPa 左右;残余含水量在 3.5%左右。基质吸力随体积含水量变化过程具有明显的阶段性,可分为边界效应段、过渡段和非饱和残余段。饱和含水量在 37%左右。根据该土水特征曲线运用 Van Genuchten 模型建立渗透系数与土体吸力关系方程。

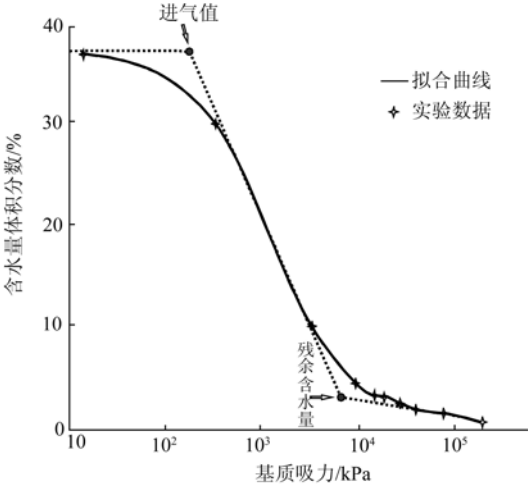


图 2 土水特征曲线

Fig. 2 Soil-water characteristic curve of the expansive soil

为获取膨胀土非饱和强度参数,采用英国 GDS 仪器设备有限公司生产的标准非饱和土三轴试验系统,开展试验工作。试验包括吸力平衡、等吸力固结和剪切 3 个阶段。共完成不同吸力、净平均应力情况下的剪切实验 9 组,控制吸力分别为 200 kPa、300 kPa、400 kPa;围压条件分别为 100 kPa、200 kPa、400 kPa。通过这些实验,获得了滑坡弱膨胀土的主要非饱和强度参数(图 3)。

2.3 模型方案

本文采用 GeoStudio 2004 岩土工程数值分析软件开展模拟计算。首先应用 Seep 模块模拟滑坡渗流场变化情况,然后依据渗流场变化应用 Slope 模块

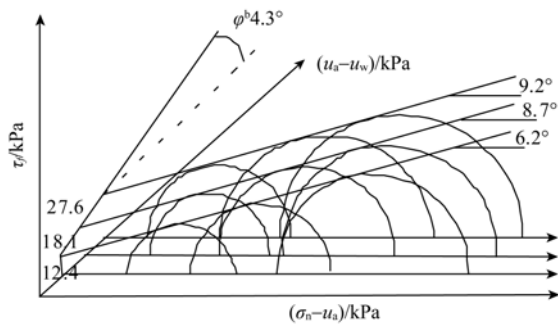


图 3 膨胀土的 Mohr-Coulomb 破坏包络面

Fig. 3 Mohr-Coulomb's failure envelope of expansive soils

对滑坡进行稳定分析计算。从而分析在不同雨强条件下的中深层、浅层滑坡稳定性及其时间效应。

根据试验所得土水特征参数曲线,应用 Van Genuchten 模型建立基本吸力与渗透系数关系曲线,作为输入的渗流参数。根据土体物理力学试验所得参数指标,作为输入的物理、强度参数。滑坡上游截面和底面设为隔水边界条件,下游设为定水头边界条件,表面为雨水入渗边界条件。根据研究区全年气候资料,建立为期 1 a 渗流模型,所得渗流场作为模型初始条件。设计两套模拟方案:a. 考虑到研究区 9 月份全年雨量最为充沛,选择 2007 年 9 月降雨条件(图 4),作为典型降水模式进行模拟,得到每天渗流场变化情况,进而分析该降雨模式下滑坡的稳定状况,以及时间演化效应;b. 选择 3 个典型雨强量级 43 mm/d、16 mm/d 和 6 mm/d,作为输入雨量,进行模拟计算,分析滑坡失稳的极限时间。

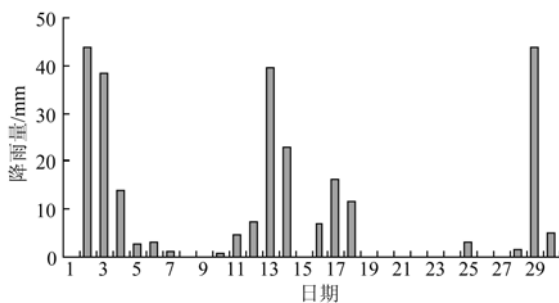


图 4 2007 年 9 月降雨量统计图

Fig. 4 Rainfall in September of 2007 in Yongping

2.4 计算结果与讨论

通过滑坡压力水头对比分析看出(图 5、图 6、图 7、图 8),强降雨 2 d 后潜水面明显抬高,非饱和区缩小,且潜水面于地表相交,出现涌水区段,滑坡表层出现饱和区带,这时滑坡稳定性显著降低。

易滑面深度在 3~10 m,主要沿弱膨胀土层与卵砾石土界面发育(图 9、图 10)。由于坡度较缓,在当前降水条件下,浅层滑坡不发育,表层土体稳定性较好,2~3 m 深浅层滑面,稳定系数在 1.6 以上。

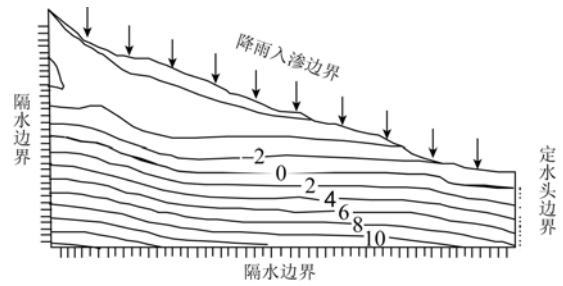


图 5 滑坡初始压力水头分布图(单位:m)

Fig. 5 Distribution of initial water pressure (meter)

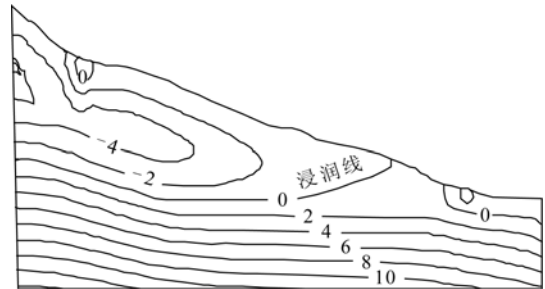


图 6 第 3 天压力水头分布图(单位:m)

Fig. 6 Distribution of water pressure on the third day (meter)

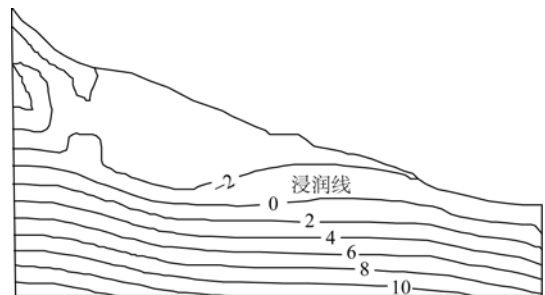


图 7 第 16 天压力水头分布图(单位:m)

Fig. 7 Distribution of water pressure on the sixteenth day (meter)

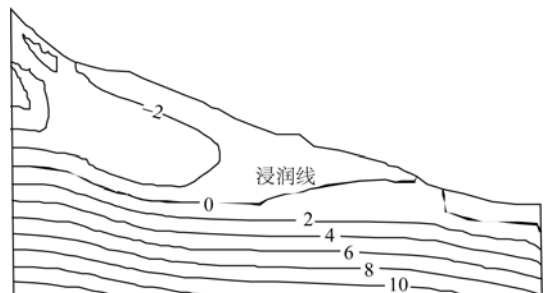


图 8 第 17 天压力水头分布图(单位:m)

Fig. 8 Distribution of water pressure on the seventeenth day (meter)

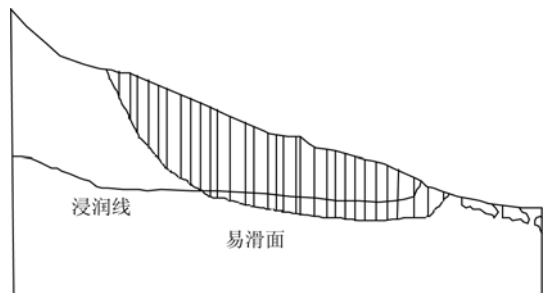


图 9 第 3 天滑坡易滑面分布图

Fig. 9 Distribution of the slip surface of the landslide on the third day

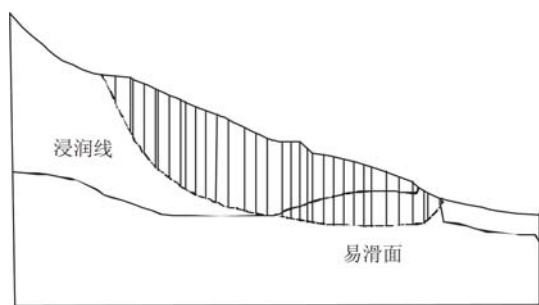


图10 第17天滑坡易滑面分布图

Fig. 10 Distribution of the slip surface of the landslide on the seventeenth day

从稳定系数-时间关系图来看(图11),滑坡稳定系数明显降低出现在3个时段,分别是当月3-4日、14日、17-18日,也正是当月3次降雨高峰出现时段,第1次峰值期为2日43.8 mm和3日的38.5 mm;第2次峰值期为13日39.6 mm和14日的22.7 mm;第3次峰值期为17日16.3 mm和18日的11.5 mm;分析看出,从强降雨开始到滑坡稳定性明显降低的时间效应为2 d左右。由于29日43.9 mm降雨只持续1 d,所以滑坡稳定性没有明显降低。

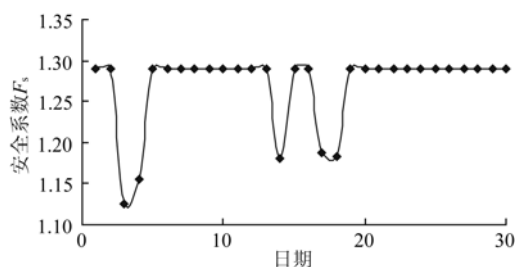


图11 2007年9月份滑坡稳定系数曲线图

Fig. 11 The slope stability curves in September 2007

通过第2套方案模拟计算,分别以雨强43 mm/d、16 mm/d持续降雨,在2 d后稳定性明显降低,第3天后稳定系数降到0.928,滑坡失稳滑动。而以雨强6 mm/d持续降雨,滑坡没出现稳定性明显降低的现象(图12)。

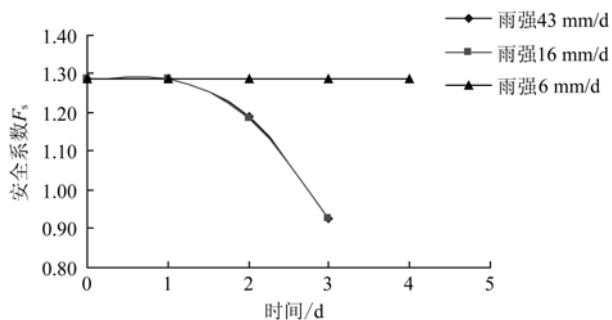


图12 不同雨强条件下的滑坡稳定系数曲线

Fig. 12 The slope stability curves at the different rainfall intensities

3 结论

通过上述研究分析,针对降雨条件下思铺滑坡力学性质及稳定性形成以下几点认识:

a. 滇西弱膨胀土基质吸力随体积含水量变化过程具有明显的阶段性,可分为边界效应段、过渡段和非饱和残余段。饱和含水量37%左右,残余含水量3.5%左右,进气值约190 kPa;土体吸力内摩擦角为4.3°。

b. 强降雨引起滑坡稳定性明显降低的时间效应应在2 d左右。雨强16 mm/d以上的持续降雨,3 d后滑坡失稳滑动。雨强6 mm/d以下的降雨对滑坡稳定性没有明显影响。

c. 当潜水面明显抬高,非饱和区缩小,且潜水面于地表相交,出现涌水区段,滑坡表层出现饱和区带时,滑坡稳定性显著降低。

d. 滑坡易滑面深度在3~10 m,主要沿弱膨胀土层与卵砾石土界面发育。当前降水条件下,浅层滑坡不发育,表层土体稳定性较好。

参考文献

- [1] 包承纲. 南水北调中线工程膨胀土渠坡稳定问题及对策[J]. 人民长江, 2003, 34(5): 4-6.
- [2] 黄润秋, 吴礼舟. 基于一种新强度理论的非饱和土边坡稳定性分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(1): 57-60.
- [3] 廖建建, 姬建, 曾静. 考虑饱和-非饱和和渗流作用的土质边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3229-3234.
- [4] 章广成, 唐辉明, 胡斌. 非饱和和渗流对滑坡稳定性的影响研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 965-969.
- [5] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 1-14.
- [6] FREDLUND D G, RAHARDJO. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, INC. 1993.
- [7] 叶为民, 唐益群, 崔玉军. 室内吸力量测与上海软土土水特征[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 347-349.
- [8] 马少坤, 黄茂松, 范秋雁. 基于饱和土总应力强度指标的非饱和土强度理论及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 635-640.
- [9] 韩华强, 陈生水, 郑澄锋. 非饱和膨胀土强度及变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1872-1876.
- [10] GERSCOVICH D M, VARGAS E A, DE CAMPOS T M. On the evaluation of unsaturated flow in a natural slope in Rio de Janeiro, Brazil[J]. Engineering Geology, 2006, 88: 23-40.
- [11] GAVIN K, XUE J F. A simple method to analyze infiltration into unsaturated soil slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35: 223-230.
- [12] JEONG S, KIM J, LEE K. Effect of clay content on well-graded sands due to infiltration[J]. Engineering Geology, 2008, 102: 74-81.
- [13] FITYUS S, BUZZI O. The place of expansive clays in the framework of unsaturated soil mechanics[J]. Applied Clay Science, 2009, 43: 150-155.