

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.05.004

前期降雨作用下边坡滑坡模型试验

李卓^{1,2}, 何勇军^{1,2}, 李宏恩^{1,2}, 徐海峰^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 为研究前期降雨对边坡稳定性的影响, 基于云南省龙江水电站近坝库岸边坡滑坡区实测降雨资料, 通过自行研制模型试验装置, 进行前期降雨作用下室内边坡滑坡模型试验, 分析前期降雨作用下的边坡滑坡特性。研究表明: 前期降雨作用是引起边坡滑坡的主要因素, 由于前期降雨作用下水在边坡坡面进行了充分入渗, 导致边坡土体强度减小, 引起非饱和土中基质吸力丧失或减小, 再次降雨极易引起边坡滑坡; 前期降雨作用引起边坡滑坡类型为浅层牵引式滑坡。

关键词: 前期降雨; 边坡滑坡; 模型试验; 土压力; 基质吸力; 孔隙水压力; 龙江水电站

中图分类号: TV32

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)05-0400-06

Model test on slope landslides under antecedent rainfall

LI Zhuo^{1,2}, HE Yongjun^{1,2}, LI Hongen^{1,2}, XU Haifeng^{1,2}

(1. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the rainfall profile in the landslide-prone area on the reservoir bank slope near the dam of the Longjiang Hydropower Plant in Yunnan Province, the slope stability under antecedent rainfall was investigated. By using the self-developed experimental apparatus, laboratory model tests were conducted to simulate landslides under antecedent rainfall, and the characteristics of landslides were analyzed. Research shows that antecedent rainfall is a major factor in landslides. Antecedent rainfall infiltrates the slope from the surface, reducing the soil strength and leading to a loss or reduction of the matrix suction in the unsaturated soil. Thus, the subsequent rainfall can easily generate landslides. Landslides induced by antecedent rainfall are categorized as shallow retrogressive landslides.

Key words: antecedent rainfall; slope landslide; model test; earth pressure; matrix suction; pore water pressure; Longjiang Hydropower Plant

滑坡的主要影响因素包括降雨、库水位、地震和人为不当开发等, 其中, 降雨是滑坡失稳的主要诱发因素。据统计, 20 世纪 80 年代以来, 我国大陆发生的大型灾害性滑坡中, 约 50% 由强降雨诱发^[1], 降雨型滑坡是一种发生频率高、分布范围广、破坏形式复杂的滑坡类型。大量滑坡灾害事件让“降雨是诱发滑坡的主要因素”成为众多专家学者的共识^[2-4]。有关前期降雨引起边坡滑坡的研究较少, 且观点有所不同, Brand 等^[5-6]、Pitts^[7]、Corominas 等^[8]、Aleotti^[9] 分别对香港、意大利、新加坡、庇里牛斯山等地区的滑坡与前期降雨的关系进行了研究, 认为滑坡与前期降雨无直接关系。Tan 等^[10] 对新加坡滑坡进行了研究, 认为前期降雨是导致滑坡的关键因素阈值, 其中最有说服力的证据是 Bukit Batok 滑坡^[11]。唐栋等^[12] 基于三峡库区实测资料, 研究了前期降雨对不同土体边坡稳定性的影响, 研究表明滑坡与前期降雨存在一定关系。有关前期降雨作用引起的滑坡研究较少且存在不同观点。

为研究前期降雨对滑坡稳定性的影响, 笔者以前期降雨作用引起云南省龙江水电站边坡滑坡为例, 通过

收稿日期: 2015-09-29

基金项目: 南京水利科学研究院基金 (Y714001, Y716009); 国家科技支撑计划 (2012BAK10B04); 国家自然科学基金 (51309164, 51579154); 水利部公益性行业科研专项 (201301033); 江苏省自然科学基金 (BK20130072); 水利部“984”项目 (201501)

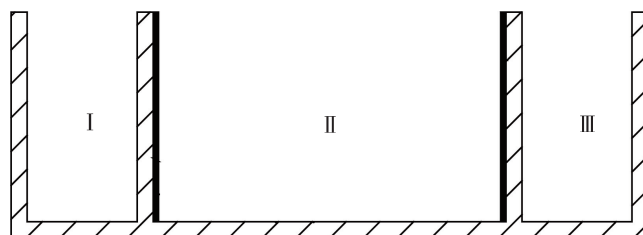
作者简介: 李卓(1979—), 男, 宁夏隆德人, 高级工程师, 博士, 主要从事土石坝工程、水工建筑物防冻胀等研究。E-mail: zhuoli@nhri.cn

模型试验研究了前期降雨作用引起边坡滑坡的特性。

1 试验内容及方法

1.1 模型试验设计

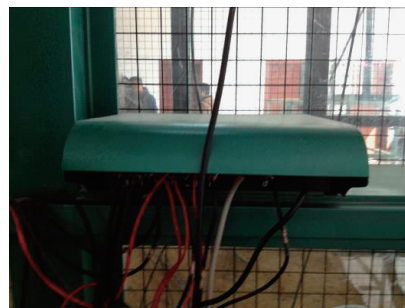
降雨模型试验箱为自行研制,由主体模型箱、降雨系统(图1(c))、供水系统、多物理量测试系统(包括孔隙水压力、土压力、基质吸力)、数据采集系统(图1(b))和高速摄像采集等组成(图1)。为了便于观察边坡体的变形和滑坡过程,在模型箱的两侧侧面设置高透明有机钢化玻璃可视窗口,可以实时观测试验过程中边坡内部和侧向的变形、位移情况。模型箱尺寸为700 cm×200 cm×200 cm(长×宽×高),模型箱分为3个部分,Ⅰ用于排水,Ⅱ为制作边坡,Ⅲ为模拟地下水位。



(a) 试验模型箱示意图



(b) 降雨系统



(c) 数据采集系统

图1 前期降雨作用边坡滑坡模型试验装置

Fig. 1 Experimental apparatus for testing slope landslides under antecedent rainfall

1.2 试验仪器布置及埋设

试验仪器主要有孔隙水压力计、张力计、土压力计、高速摄像机、取土器。土压力计分别埋设在模型箱Ⅱ底部四边形的4个点和对角线交点处(图2中T1~T5),土压力计分别与采集系统连接,采集系统每10 min 收集一次数据,土压力计埋深为170 cm;试验仪器埋深0 cm、170 cm 对应的边坡高度分别为170 cm、0 cm。在模型试验箱底部埋设了9支孔隙水压力计,其埋深为170 cm,另外2支埋深为120 cm;11支孔隙水压力计(图3中S1~S11)分别与采集系统连接,采集系统每10 min 收集一次数据。张力计共5支(图4中Z1~Z5),在边坡顶部埋设2支,边坡表面埋设3支,3支张力计沿着边坡表面排列在一条线上;5支张力计Z1、Z2、Z3、Z4、Z5埋深分别为150 cm、120 cm、20 cm、20 cm、60 cm,张力计Z5埋深为60 cm(60 cm 对应为边坡模型坡顶位置)。试验中根据模型试验情况对边坡进行土体含水率数据采集;高速摄像机布置在模型试验箱一侧的正前方,进行实时图像采集。模型箱顶部为高速摄像机位置。埋设的各类仪器及其有关细节汇总见表1。

1.3 试验方案

试验模型根据云南龙江水电站近坝库岸边坡滑坡模型按照一定比例设计而成。试验用黏土为云南省龙

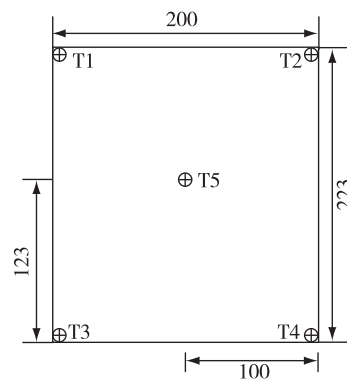


图2 土压力计布置示意图(单位:cm)

Fig. 2 Layout of earth pressure gauges (units: cm)

江水电站近坝库岸边坡滑坡土体,渗透系数为 1.686×10^{-5} cm/s。模型试验边坡为均质边坡,边坡坡角为 50° ,边坡物理模型尺寸如图3(a)所示。为了保持模型试验与云南省龙江水电站近坝库岸边坡滑坡体有较好的相似比,模型试验边坡的含水率、密度、降雨强度与现场滑坡体均相同:含水率为19.5%,密度为 1.70 g/cm^3 ,降雨强度为 70 mm/h 。

首先在模型箱Ⅱ内壁和底部涂上一定厚度的凡士林,以减小模型箱内壁摩擦,然后在模型箱Ⅱ中装入密度为 1.70 g/cm^3 、含水率19.5%的黏土。

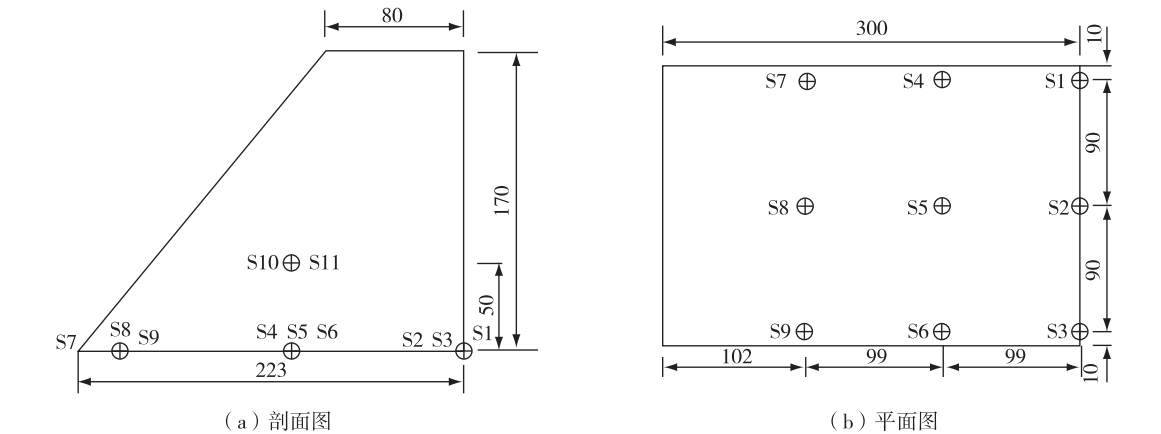


图3 孔隙水压力计布置示意图(单位:cm)
Fig. 3 Layout of pore-water pressure gauges (units: cm)

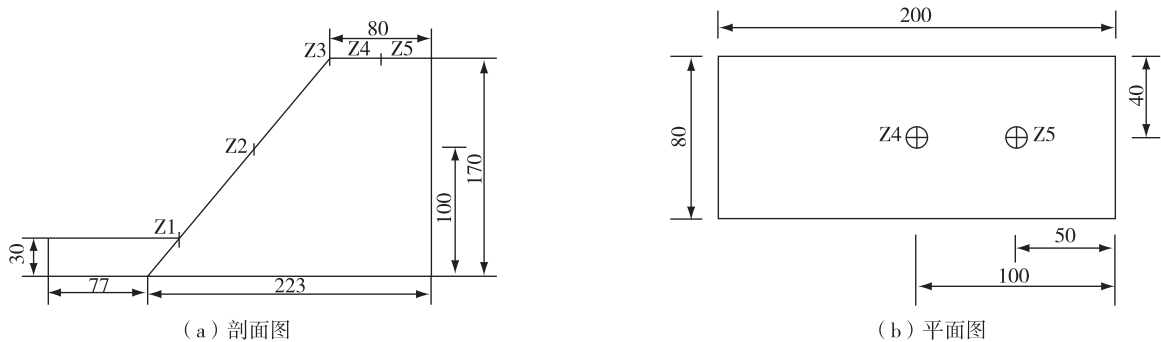


图4 张力计布置示意图(单位:cm)
Fig. 4 Layout of tonometers (units: cm)

表1 试验仪器汇总
Table 1 Summary of instruments

仪器	仪器类型	数量	精度/%	测量范围
张力计	电阻式	7 支	± 0.1	$<90\text{ kPa}$
孔隙水压力计	振弦式	11 支	± 0.1	$0\sim 350\text{ kPa}$
土压力计	振弦式	5 个	± 0.1	$0\sim 350\text{ kPa}$
SK-100 水分仪探头		1 个	± 0.1	$0\sim 50\%$
自动记录雨量计		1 个	± 3	$0.01\sim 4\text{ mm/m}$

2 前期降雨作用下边坡滑坡模型试验

降雨是诱发滑坡的主要因素之一,研究表明,天然边坡、水电、铁路、公路等开挖边坡产生的滑坡以及岩体中地下洞室的塌方多发生在雨季^[13-14]。降雨过程对滑坡造成的影响宏观上会在坡体内产生一定的水力作用,微观上则会改变坡体内物质的物理化学性质,是一个非常复杂的随机过程。降雨过程中,滑坡体内的物质经历由干到湿,再由湿到干这样一个从非饱和到饱和再到非饱和的过程。

对于由降雨因素导致的边坡失稳机理,目前较为普遍的认识是:降雨入渗使边坡坡体内的地下水位升

高,滑面土体软化,从而降低了边坡的稳定性,导致滑坡的发生^[15]。笔者通过模型试验对前期降雨引起的滑坡进行研究,分析了前期降雨作用下边坡滑坡的特性。试验中的边坡滑坡过程如图5所示。

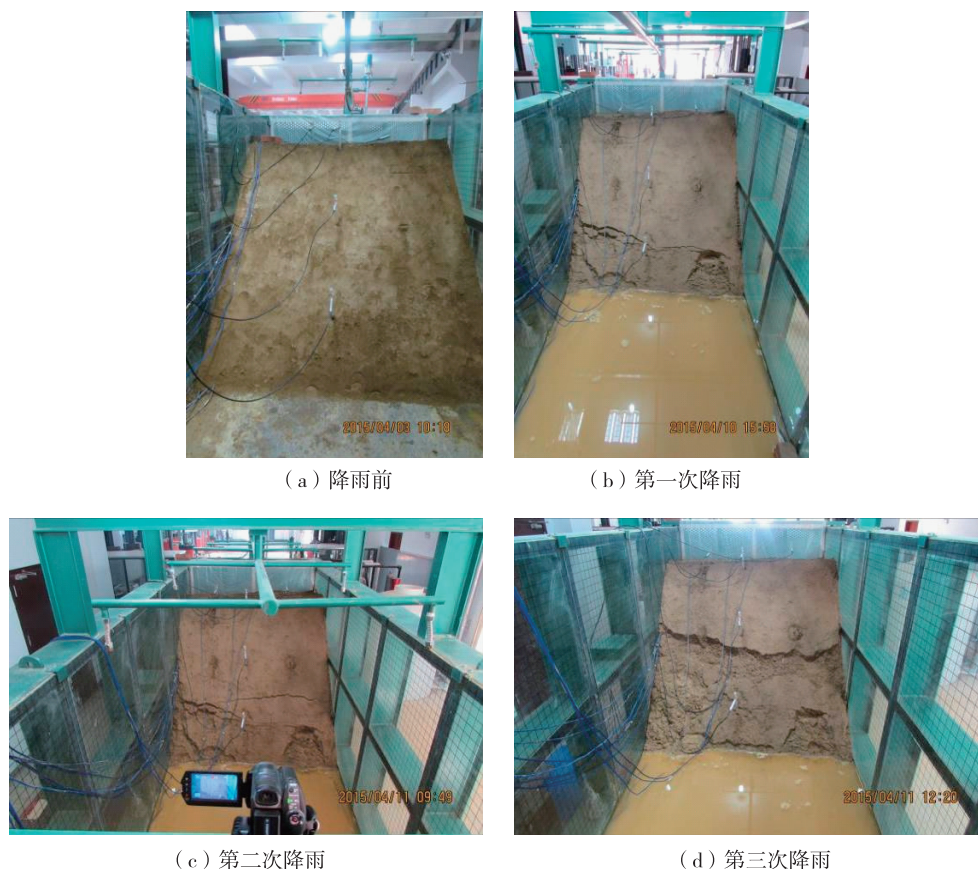


图5 边坡滑坡过程

Fig. 5 Slope landslide caused by antecedent rainfall

2.1 边坡土压力变化

土压力传感器 T1、T4、T5 沿对角线方向布设,选取 T1、T4、T5 为代表点进行土压力分析。从图6可知,降雨前 58 h 土压力保持不变,58 h 时开始前期降雨,前期降雨强度为 70.0 mm/h,前期降雨历时 0.5 h,降雨后 T1、T4、T5 土压力增加,T5 增加幅度较大;103 h 时进行第2次前期降雨,降雨强度为 70.0 mm/h,降雨历时 0.25 h,降雨后土 T1、T4、T5 土压力均增加,是由于前期降雨入渗引起边坡自重增大;153 h 时进行第3次降雨,降雨强度为 70.0 mm/h,降雨历时 2 h,降雨后边坡产生了滑坡;第3次降雨后 T4 土压力增加,T1、T5 土压力减小,T4 土压力增加主要是由边坡滑坡引起;180 h 后 T1、T4、T5 土压力随着时间增加而减小,是由于进行了模型试验土样清理。

2.2 边坡孔隙水压力变化

前期降雨作用下引起边坡滑坡时仅 S7、S8 和 S9 有变化,其他 6 支孔隙水压力计无变化,由于孔隙水压力计 S7、S8 和 S9 变化相同,因此对 S8 进行孔隙水压力分析。由图7可知,120 h 后孔隙水压力发生了变化,2次前期降雨入渗引起了 S8 孔隙水压力变化,但孔隙水压力变化较小。

2.3 边坡基质吸力变化

降雨诱发滑坡的关键因素是湿润锋下移导致边坡坡体的基质吸力降低,进而导致抗滑力减小,下滑力增大,直至失稳。基质吸力丧失和湿润锋推移过程受坡体内入渗特征的控制,降雨诱发滑坡的评价准确与否,取决于对降

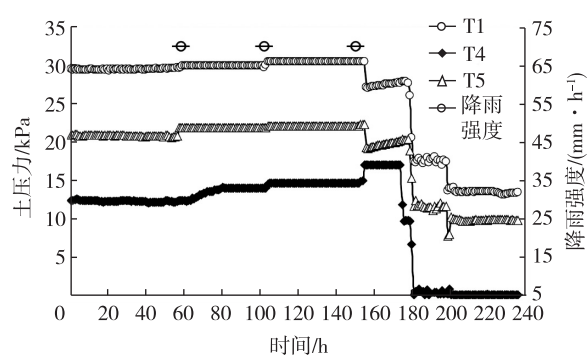


图6 前期降雨作用下边坡土压力变化

Fig. 6 Variations of earth pressure caused by antecedent rainfall

雨入渗过程的刻画能力^[16],降雨后坡体含水率的分布是一个复杂的过程,一直以来备受研究者的关注。

前期降雨作用下边坡的基质吸力变化如图8所示。基质吸力开始采集时间与土压力计、孔隙水压力计开始采集时间不同,由于基质吸力数据采集是从边坡制成后开始,为便于试验分析将张力计采集时间与土压力计和孔隙水压力计采集时间统一,58 h 为边坡前期降雨开始时间。由图8可知,降雨前5支张力计基质吸力均为-41 kPa,前期降雨10 h后Z1基质吸力随着时间增加而减小,其他4支张力计基质吸力不变,说明基质吸力变化滞后于降雨,即降雨后10 h 张力计Z1基质吸力减小,Z1布置于边坡坡脚处,前期降雨作用下的水分的入渗引起Z1基质吸力减小。105 h 时Z2、Z3、Z4基质吸力随时间增加而减小,Z5基质吸力保持不变,主要是因为47 h 时进行了第2次降雨;第3次降雨作用,154 h 时张力计Z1~Z5基质吸力均减小,张力计Z1、Z2、Z3基质吸力快速减小为0,是由于边坡发生了滑坡,而Z5基质吸力达到-5 kPa。

2.4 边坡含水率变化

滑坡后对滑坡体从边坡坡顶向下开挖一个垂直剖面分别进行不同深度含水率测量,为提高边坡土体含水率测量的准确度,分别采用SK-100水分仪和烘干法进行了滑坡体含水率测量。图9中纵坐标深度0点对应的实际边坡顶部170 cm处,纵坐标170 cm处为实际边坡坡脚处。由图9可知,降雨前边坡0~170 cm的含水率均为19.5%,前期降雨作用引起边坡滑坡后滑坡体0~40 cm含水发生了变化,边坡0 cm、20 cm、40 cm、60 cm处含水率分别为24.9%、23.8%、21.1%、19.5%,60~170 cm处坡体含水率与降雨前含水率相同,说明降雨入渗深度最大为40 cm。

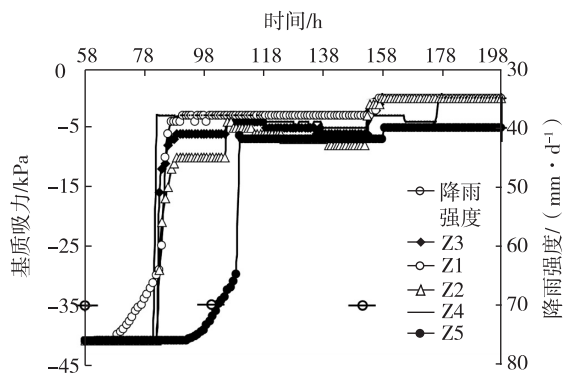


图8 前期降雨作用下边坡基质吸力变化
Fig. 8 Variations of matrix suction caused by antecedent rainfall

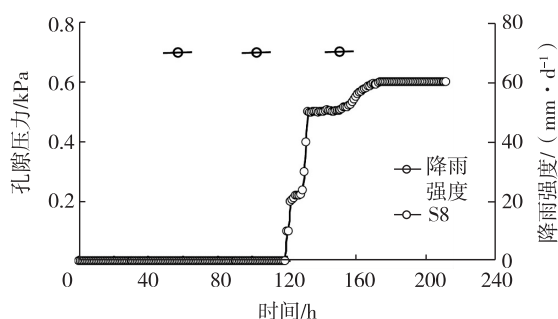


图7 前期降雨作用下边坡孔隙水压力变化
Fig. 7 Variations of pore-water pressure caused by antecedent rainfall

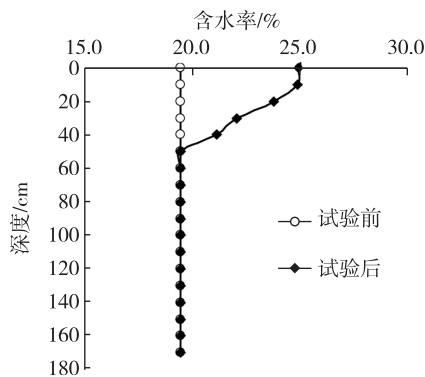


图9 前期降雨作用下边坡含水率变化
Fig. 9 Variations of slope water content caused by antecedent rainfall

2.5 边坡滑坡破坏

前期降雨作用下边坡滑坡过程及裂缝见图5、图10,前期降雨作用下边坡的滑坡发展过程基本上属于浅层滑动,试验开始时边坡滑动以块体破坏为主,随着降雨进行,滑坡过程以流滑破坏为主,在降雨一定时间后,边坡坡顶土体处于饱和状态进而产生流滑破坏。前期降雨时,坡脚处产生微小裂缝,随着降雨入渗持续,坡脚处产生不连续裂缝增加;第2次降雨时,坡脚不连续裂缝宽度增加,不连续裂缝贯通形成较大裂缝,随着降雨时间增加,坡脚1/3高处土体产生初始滑动,该滑坡以块体滑坡为主;随着降雨入渗的进行,降雨中一部分雨水以径流形式从边坡表面向坡脚处流动,次滑动重复发生,边坡滑动破坏不断向坡顶延伸发展,该过程边坡滑动以流滑为主。

3 结 论

a. 前期降雨作用是引起边坡滑坡的主要因素,降雨使得雨水在边坡定边和坡面进行了充分的入渗,从

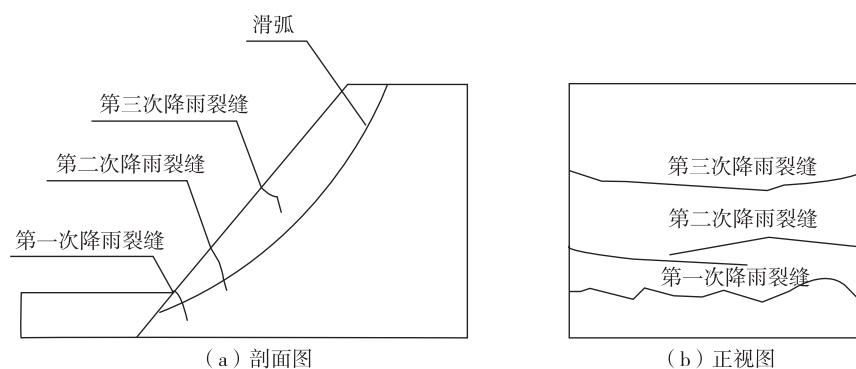


图10 前期降雨作用下边坡裂缝及滑弧示意图

Fig. 10 Slope cracks and slipping arc caused by antecedent rainfall

而导致了边坡土体强度减小,再次降雨时极易引起边坡滑坡。

b. 前期降雨作用下水入渗引起非饱和土中基质吸力的丧失或减小是降雨引起边坡稳定性降低的主要原因。

c. 前期降雨作用下边坡滑坡模型试验的滑坡属于浅层牵引式滑坡。

参考文献:

- [1] AU S W C. Rain-induced slope instability in Hong Kong[J]. Engineering Geology, 1998, 51(1):1-36.
- [2] 李媛, 孟晖, 董颖, 等. 中国地质灾害类型及其特征: 基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 29-34. (LI Yuan, MENG Hui, DONG Ying, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in China-Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(2):29-34. (in Chinese))
- [3] 李焯芬, 陈虹. 雨水渗透与香港滑坡灾害[J]. 水文地质工程地质, 1997(4): 34-38. (LI Zhuofeng, CHEN Hong. Rainfall and hazard of Hong Kong [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1997(4):34-38. (in Chinese))
- [4] 常晓军, 王德伟, 唐业旗. 中国滑坡降雨试验的研究现状与发展趋势[J]. 沉积与特提斯地质, 2010, 30(1): 98-102. (CHANG Xiaojun, WANG Dewei, TANGYeqi. Simulation experiments of the rainfall-induced landslides in China: insights and foresights[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30(1):98-102. (in Chinese))
- [5] BRAND E W, PREMCHITT J, PHILLIPSON H B. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong[C]//Anon. Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides. Toronto: Canadian Geotechnical Society, 1984: 377-384.
- [6] BRAND E W. Slope instability in tropical areas[C]//Anon. Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides. Christchurch: A. A. Balkema, 1992: 2031-2051.
- [7] PITTS J. An investigation of slope stability on the NTI campus, Singapore[R]. Singapore: Nanyang Technological Institute, 1985.
- [8] COROMINAS J, MOYA J. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain[J]. Geomorphology, 1999, 30(12): 79-93.
- [9] ALEOTTI P. A warning system for rainfall-induced shallow failures[J]. Engineering Geology, 2004, 73(3):247-265.
- [10] TAN S B, TAN S L, LIM T L. Landslide problems and their control in Singapore[C]//Anon. Proceedings of the 9th Southeast Asian Geotechnical Conference. Bangkok: Southeast Asian Geotechnical Society, 1987: 25-36.
- [11] WEI J, HENG Y S, CHOW W C, et al. Landslide at Bukit Batok sports complex[C]//Anon. Proceedings of the 9th Asian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Bangkok: Rotterdam, 1991: 445-448.
- [12] 唐栋, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3240-3248. (TANG Dong, LI Dianqing, ZHOU Chuangbing, et al. Slope stability analysis considering antecedent rainfall process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11):3240-3248. (in Chinese))
- [13] 白福青. 土工袋处理膨胀土渠坡的试验研究与数值解析[D]. 南京: 河海大学, 2011.
- [14] 严绍军. 渗流对滑坡稳定性与变形影响过程研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2007.
- [15] 王世梅. 基于非饱和土理论的滑坡稳定性分析方法及过程应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
- [16] 马崇武. 边坡稳定性与滑坡预测预报的力学研究[D]. 兰州: 兰州大学, 1999.