

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.04.001

引用格式:张泰丽,孙强,李绍鹏,等. 浙江飞云江流域玄武岩残积土滑坡降雨入渗柱状实验研究[J]. 华东地质,2021,42(4): 367-372.

浙江飞云江流域玄武岩残积土滑坡 降雨入渗柱状实验研究

张泰丽¹,孙强¹,李绍鹏²,伍剑波¹,张明³,张晨阳³

(1.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016;2.贵州能源产业研究院有限公司,贵州 贵阳 550025;3.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:浙江飞云江流域广泛发育玄武岩残积土,土体松散,具有膨胀性、可塑性,在人类工程活动及强降雨作用下极易引发滑坡地质灾害。为掌握玄武岩残积土滑坡的成灾机理,选择玄武岩残积土典型滑坡——马济头滑坡,设计了降雨入渗柱状实验,模拟ABA和BAA两种降雨工况条件下土体内地下水入渗规律。结果表明:降雨期,土柱内土体体积含水率逐渐增大至最大值;间歇期,土柱内土体体积含水率减小幅度与土柱深度呈反比。ABA和BAA两种降雨工况的湿润锋入渗曲线形状均为直线型,湿润锋入渗速度不随深度发生变化,且湿润锋入渗速度与降雨强度呈正比。不同降雨工况下,土体体积含水率响应速度差异较明显。

关键词:玄武岩残积土;滑坡;入渗;柱状实验

中图分类号:P694

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2021)04-367-06

飞云江流域位于浙江省东南沿海地区,常年遭受台风暴雨袭击,引发大量的地质灾害^[1],造成严重的财产损失和人员伤亡。2004年,第14号“云娜”台风在浙江乐清引发21处地质灾害,造成42人死亡,288间房屋倒塌^[2-3];2005年,“泰利”台风在浙江省引发20处地质灾害,导致17人死亡,经济损失高达2000万元^[4-5];2015年,13号台风“苏迪罗”在浙江省引发200多处地质灾害,造成4人死亡,台风伴随的暴雨是诱发滑坡灾害的主要因素^[6-7]。因此,基于降雨入渗规律研究飞云江流域滑坡灾害特征,对相关管理部门防灾减灾工作具有重要的指导意义^[8-10]。

飞云江流域广泛发育玄武岩残积土,该类土体松散,具有膨胀性、可塑性^[11],在人类工程活动及强降雨作用下极易引发滑坡灾害^[12]。近年来,随着极端气候频发和基础设施的快速建设,玄武岩残积层

滑坡灾害风险与日俱增。我国玄武岩滑坡研究始于20世纪90年代,目前,针对台风暴雨引发的玄武岩残积土滑坡灾害相关研究较少^[13]。为掌握玄武岩残积土滑坡的成灾机理,本文选择玄武岩残积土典型滑坡——马济头滑坡,设计了降雨入渗柱状实验,模拟ABA和BAA不同降雨工况条件下土体内地下水的入渗规律^[14],对此类滑坡的防治及预警预报具有重要意义。

1 马济头滑坡概况

马济头滑坡位于浙江省温州市文成县大岙镇城中村,受2014年9月“凤凰”台风影响,诱发群发性的滑坡3处。该滑坡前缘高程476 m,后缘高程500 m,高差约24 m,水平投影长约52 m,宽18~20 m,厚2~3 m,规模约3010 m³,主滑方向67°。滑坡地形上缓下陡,坡度约27°,滑坡前后缘均为民房。滑

* 收稿日期:2021-02-19 修订日期:2021-07-05 责任编辑:谭桂丽

基金项目:中国地质调查局“浙江丽水地区灾害地质调查(编号:DD20190648)”和“浙江飞云江流域地质灾害调查(编号:DD20160282)”项目联合资助。

第一作者简介:张泰丽,1980年生,女,教授级高级工程师,博士,主要从事环境地质、灾害地质调查及研究工作。Email:674802878@qq.com。

体物质主要为呈散裂结构和碎裂结构的全风化-强风化玄武岩及其残坡积物(图1),呈黄色、棕黄色、灰绿色,松散,具可塑性,厚0.5~8.0 m。

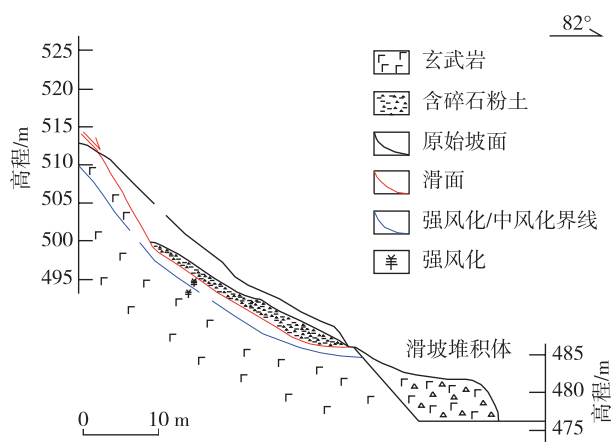


图1 马济头滑坡工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering geological section of Majitou landslide

2 柱状实验设计

2.1 实验设置

设计的实验装置主要包括降雨模拟系统、土柱和数据采集系统(图2)。

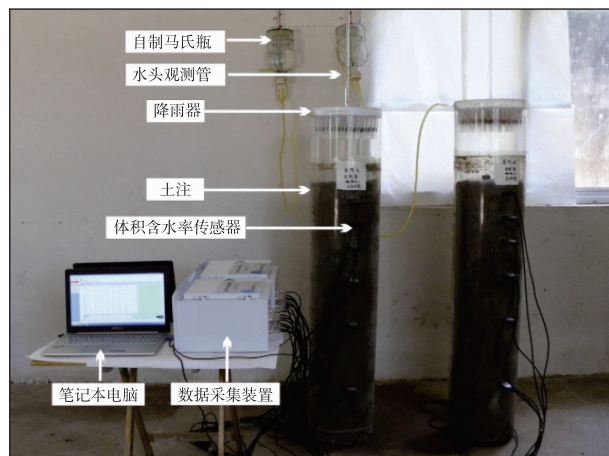


图2 设计实验装置照片

Fig. 2 Photo of designed experimental equipment

(1)降雨模拟系统。包括供水装置、降雨器和水头观测管。供水装置采用自制的马氏瓶,降雨器使用厚5 mm的有机玻璃板制成,均匀分布80个医用注射器与针头。实验时,通过调整供水器的悬挂高度控制降雨强度。经过拟定,降雨强度与供水器

高度之间存在的关系式^[15-16]为

$$y = 0.025x^2 - 8.35x + 686.5, \quad (1)$$

式中: y 为降雨强度, mm/h; x 为降雨容器底部距地面高度, cm。

(2)土柱。容器为直径30 cm,高150 cm的圆形有机玻璃筒,筒壁预设7个间隔分别为5 cm、10 cm、10 cm、10 cm、15 cm、20 cm和30 cm的小孔,放置土壤含水率传感器(图3)。玻璃筒中模拟样品为现场采集原装土,土柱高130 cm。

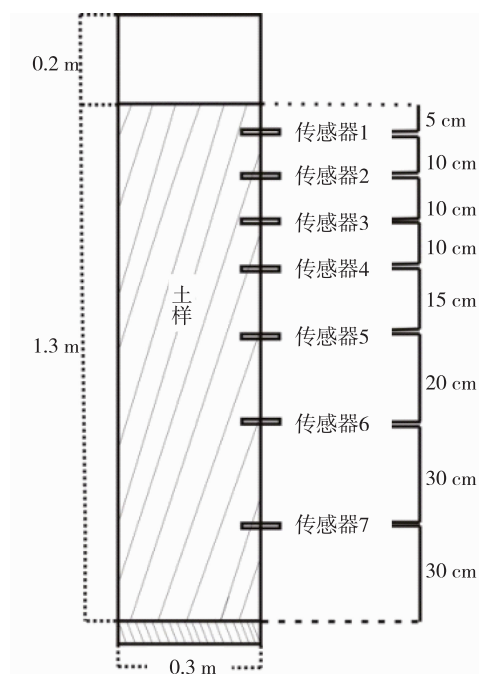


图3 实验土柱设计图

Fig. 3 Design drawing of experimental soil column

(3)数据采集系统。包括体积含水率传感器、数据采集装置和笔记本电脑。体积含水率传感器插入预设的7个小孔,定时监测土柱不同深度的体积含水率,通过数据采集装置实时传输到笔记本电脑中。

2.2 降雨模拟工况

据统计,飞云江流域约90%的残积土滑坡发生在台风暴雨期^[6]。台风期过境降雨量特征为:一次降雨事件持续时间约3天;台风暴雨降雨中,降雨峰值一般在第二天到来,少数降雨峰值在第一天到来^[17],该天平均降雨量可达300 mm,第一天及第三天降雨量较小,平均降雨量约50 mm^[18-21]。根据上述特征,本实验设置了ABA及BAA两种降雨工况(表1)。

表 1 台风期降雨工况
Table 1 Rainfall conditions in typhoon period

降雨类型	降雨量/mm		
	第一天	第二天	第三天
ABA	50	300	50
BAA	300	50	50

注:A 工况,5 h 降雨期,17 h 间歇期;B 工况,10 h 降雨期,14 h 间歇期。

3 样品采集

实验所取原状土样位于玄武岩残积土滑坡体上,表层保留顶部土层根系。取土时,将玻璃柱直接压进土层中,从四周挖掘,用塑料膜密封土柱样品,运输过程中在车厢内铺设稻草,防止破损(图 4)。



图 4 取土过程照片

Fig. 4 Photos of soil sampling process

4 数据采集及处理

降雨期间隔 1 min,降雨间隙期间隔 10 min 采集一次体积含水率数据。绘制深 10 cm、20 cm、30 cm、45 cm、65 cm 和 95 cm 的土体体积含水率随时间变化曲线及不同工况 3 天降雨的湿润锋深度与时间关系曲线。

5 实验结果

5.1 ABA 降雨工况

5.1.1 土体体积含水率变化规律

ABA 降雨工况下土体体积含水率变化曲线如图 5 所示。10~20 cm 处表层土体在降雨初期含水率达 55%~60%,含水率迅速增加,与降雨强度相

关性较低;间歇期,土体含水率迅速下降,10 cm 处表层土体在第一天与第二天间隙期下降为 38%,第三天下降为 47%;20 cm 处土体第一天与第二天间隙期下降为 44%,第三天下降为 55%;降雨周期内,10 cm 和 20 cm 处表层土体含水率变化率近似相同。30 cm 和 45 cm 处,降雨期内土体含水率增加至 40%~45%,含水率增加不随降雨强度的变化而变化。含水率反应速率与降雨强度密切相关,第一天降雨期(50 mm/d),30 cm 和 45 cm 处土体降雨 1~3 h 后,土体含水率快速增长,迅速达到稳定状态;第二天峰值降雨期(300 mm/d),土体在降雨初期含水率迅速达稳定状态;第三天降雨期(50 mm/d),土体含水率反应缓慢,上升幅度较小。65 cm 和 100 cm 处土体含水率变化与降雨强度密切相关,第一天和第三天降雨期内土体含水率增加存在一定的滞后性,第二天暴雨期土体含水率快速上升至 65%。

综上所述,在 ABA 降雨工况下,65 cm 以下土体含水率的增加速率、比率与降雨强度、深度呈正比,在 50 mm/d 降雨期内土体含水率随深度增加而降低,在 95 cm 处土体含水率出现异常,接近或超过表层土体,与“台风暴雨诱发的滑坡厚度一般 < 1 m”^[15,21]的结论一致。

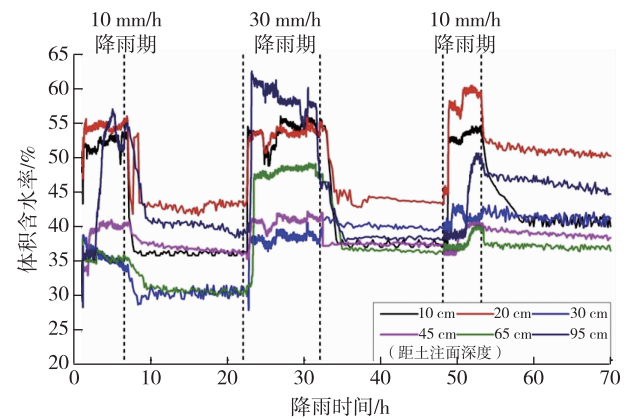


图 5 ABA 降雨工况下土体体积含水率变化曲线

Fig. 5 Variation curves of soil volumetric water content under ABA rainfall conditions

5.1.2 湿润锋变化规律

ABA 降雨工况下 3 次降雨期湿润锋入渗曲线如图 6 所示。3 天的湿润锋曲线呈直线,入渗速度随时间变化不明显。第一天与第三天湿润锋曲线几乎重合,200 min 左右入渗到土体 95 cm 深度,入

渗透率为 10 mm/h。第二天峰值降雨入渗时,湿润锋在 70 min 即入渗到 95 cm 深度,入渗速率为 30 mm/h,是第一天入渗速率的 3 倍。因此,推测 ABA 降雨工况下,玄武岩残积土入渗速度与降雨强度呈正相关。

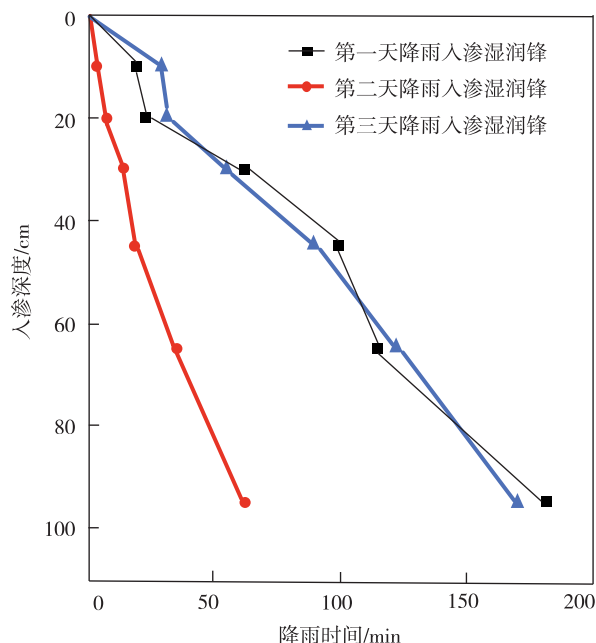


图 6 ABA 降雨工况下湿润锋入渗曲线

Fig. 6 Infiltration curves of wetting front under ABA rainfall conditions

5.2 BAA 降雨工况

5.2.1 土体体积含水率变化规律

BAA 降雨工况下的土体体积含水率变化曲线如图 7 所示。第一天降雨期土体含水率接近 50%,且随深度的增加,含水率逐渐增加;第二天和第三天降雨期内含水率与第一天降雨期内含水率基本一致,但存在 1~3 h 的滞后性。间歇期内,土体含水率下降幅度较小,一般为 3%~5%,30 cm 以浅土体含水率下降幅度大于下部土体。

5.2.2 湿润锋变化规律

BAA 降雨工况下 3 次降雨期湿润锋入渗曲线如由图 8 所示。3 天湿润锋曲线呈直线,入渗速度随时间变化不明显。第一天降雨期湿润锋速度最大,60 min 之后湿润锋达土柱 95 cm 深度;第二天降雨 160 min 时,湿润锋入渗到 95 cm 深度;第三天降雨 130 min 时,湿润锋入渗到 95 cm 的。第一天降雨入渗速度是后第二天和第三天入渗速度的 2~

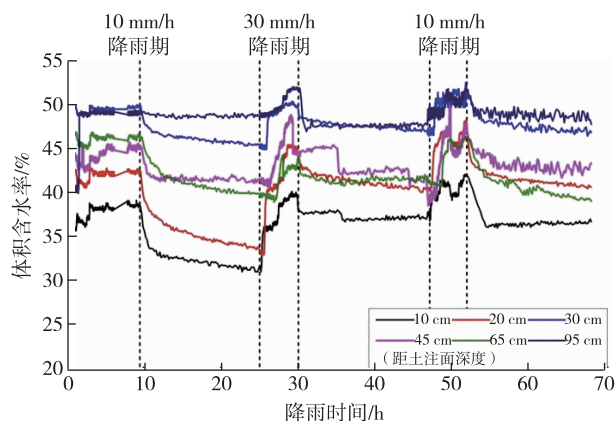


图 7 BAA 降雨工况下土体体积含水率变化曲线

Fig. 7 Variation curves of soil volumetric water content under BAA rainfall conditions

3 倍,与降雨强度的变化呈线性相关。

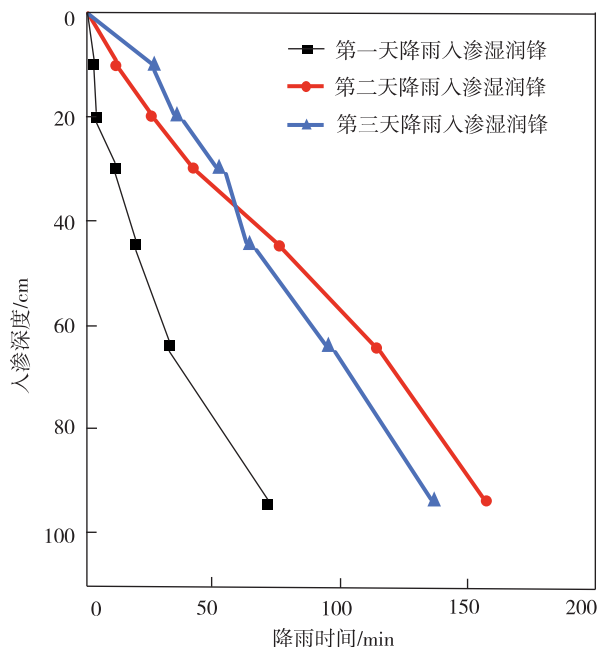


图 8 BAA 降雨工况下湿润锋入渗曲线

Fig. 8 Infiltration curves of wetting front under BAA rainfall conditions

6 结论

(1)降雨入渗柱状实验表明,玄武岩残积土土质松散,孔隙发育,极有利于降雨入渗,降雨入渗的深度和速率与降雨量呈正比,体积含水率最大达 60%。随着降雨入渗,玄武岩残积土体积含水率迅速增大至最大值,保持饱和状态;随着降雨停止,玄武岩残积土体积含水率迅速回落。土柱越深,土体

体积含水率减小幅度越小,土柱越浅,体积含水率减小幅度越大。

(2)高强度降雨分布时段不同,玄武岩残积土体积含水率差异明显。ABA 工况下,降雨峰值期土体体积含水率响应速度比 BAA 降雨工况快;其余 2 天降雨期,BAA 降雨工况下土体体积含水率响应速度比 ABA 降雨工况快。ABA 降雨工况下,土体最大体积含水率为 62%,BAA 降雨工况下,土体最大体积含水率为 52%。

(3)不同降雨工况,玄武岩残积土滑坡成灾机理不同。ABA 降雨工况下,降雨期及间隙期土体含水率变化较大,干湿交替明显,在暴雨期不同深度土体含水率相差较大,形成了差异性界面,为边坡土体的启动提供了滑动面。滑面深度一般约 1 m,为飞云江流域玄武岩残积土常发的滑坡类型。BAA 型降雨工况下,不同深度土体含水率匀速增加,间隙期内土体含水率变化不明显,在突发暴雨情况下,玄武岩残积土滑坡启动的深度>1 m。

参考文献

- [1] 韩晖. 近 50 年中国台风暴雨研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- [2] 施素芬, 赵利刚. 强台风“云娜”灾害特征及其评估[J]. 气象科技, 2006, 34(3): 315-318.
- [3] 薛根元, 俞善贤, 何凤翔, 等. 云娜台风灾害特点与浙江省台风灾害初步研究[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 39-47.
- [4] 陈光平. 台风引发温州市斜坡地质灾害的发育分布及影响因素研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [5] 刘明军, 周明浪, 张育志, 等. 浙江泰顺县台风“苏迪罗”期间地质灾害发育特征[J]. 华东地质, 2018, 39(1): 66-72.
- [6] 姜伟平, 吴利红, 邓盛蓉, 等. 0513 号台风“泰利”灾害成因及特征分析[J]. 灾害学, 2006, 21(2): 85-89.
- [7] 李鹤. 东娜沿海残积土地区降雨型滑坡预警预报体系的研究也应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [8] BRAND E W, PREMEHITT J, PHILLIPSON H B. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong [J]. BlTeeh Publishers, 1984: 377-384.
- [9] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 44-47.
- [10] 许旭堂, 简文彬. 滑坡对降雨的动态响应及其监测预警研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 203-209.
- [11] WATER T R, TROLL V R, Cailleau B, et al. Rift zone reorganization through flank instability in ocean island volcanoes: an example from Tenerife, Canary Islands [J]. Bulletin of Volcanology, 2005, 67(4): 281-291.
- [12] 刘晶晶, 张文居, 韩俊, 等. 米易县 D07 号地块玄武岩残坡积膨胀土滑坡成因机制分析及稳定性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2016, 27(2): 26-30.
- [13] 刘庭杰, 施能, 顾骏强. 浙江省台风灾害的统计分析[J]. 灾害学, 2002, 17(4): 64-71.
- [14] 李秀珍, 何思明. 基于 Mein-Larson 入渗模型的浅层降雨滑坡稳定性研究[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 16-20.
- [15] 韩俊. 温州地区台风滑坡形成机理物理模拟研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [16] 孔维伟, 赵其华, 韩俊, 等. 台风滑坡变形破坏机制模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 297-303.
- [17] 曾欣欣, 黄新晴, 腾代高. “罗莎”台风造成浙江特大暴雨的过程分析[J]. 海洋学研究, 2010, 28(1): 62-70.
- [18] 邱文玉. 我国东南沿海台风极端降水特征及成因初探[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [19] 常金源, 包含, 伍法权, 等. 降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 995-1002.
- [20] 刘云, 康卉君. 2002—2019 年江西省省级地质灾害气象预警分析[J]. 华东地质, 2020, 41(4): 416-424.
- [21] 张泰丽, 孙强, 伍剑波, 等. 助力提升台风暴雨影响区重大地质灾害识别精度[J]. 华东地质, 2020, 41(1): 26.

Columnar experimental study on rainfall infiltration of basalt residual soil landslide in Feiyun River Basin of Zhejiang Province

ZHANG Taili¹, SUN Qiang¹, LI Shaopeng², WU Jianbo¹, ZHANG Ming³, ZHANG Chenyang³

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*

2. *Guizhou Energy Industry Research Institute CO.,Ltd, Guiyang 550025, Guizhou, China;*

3. *College of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)*

Abstract: Basaltic residual soil is widely developed in Feiyun river basin, which is loose, plastic and expandable. Landslides are easily induced by heavy rainfall and action of human engineering in this basaltic residual soil stratum. In order to understand the disaster mechanism of basaltic residual soil slopes, this paper chose a typical basaltic residual soil slope in Majitou landslide to study the laws of groundwater infiltration in soil under two rainfall conditions of ABA and BAA by soil column tests. The results show that the volumetric moisture content of soil column gradually increases to the maximum value during the rainfall period and the decrease of volume moisture content is inversely proportional to the depth of soil column during the intermittent period. The shape of wetting front infiltration curve is linear under the two rainfall conditions and the velocity of wetting front does not change with depth but directly proportional to rainfall intensity. The response rates of soil volumetric water content are markedly different under various rainfall conditions. The conclusions obtained in this paper have important significance for the prevention and early warning of basaltic residual soil landslides.

Key words: basaltic residual soil; landslide; infiltration; soil column test