

# 花岗岩残积土坡对短历时强降雨的水文响应

赖增荣<sup>1,2</sup>, 简文彬<sup>1,2</sup>, 林昀昭<sup>1,2</sup>, 朱祖腾<sup>1,2</sup>, 吴宜龙<sup>1,2</sup>

(1.福州大学 紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108; 2.福州大学 福建省地质灾害重点实验室, 福建 福州 350108)

**摘要:** [目的] 探究短历时强降雨条件下边坡土体的入渗规律, 揭示地质灾害的成因和机理, 为该地区地质灾害的形成机理和预警预报工作提供科学依据。[方法] 针对2022年5月26—27日福建省龙岩市武平地区因强降雨诱发的浅层流态型滑坡事件, 在地灾点典型滑坡处开展原位人工模拟降雨入渗试验, 采用土壤水分计、张力计、孔隙水压力传感器和雨量计等监测装置进行系统观测, 同时, 结合有限元软件模拟不同降雨强度下水入渗过程, 以深化对入渗规律的理解。[结果] 在靠近坡体表面的位置, 土体的体积含水率增加幅度较大, 随着埋深的增加, 增加幅度逐渐减小; 边坡各处入渗速度大小表现为: 坡顶 < 坡中 ≈ 坡脚; 在短历时强降雨作用下, 孔隙水压力呈现逐渐增大并达到峰值后稳定的趋势, 值得注意的是, 在距离坡表120 cm处的孔隙水压力值较其他两个深度的孔隙水压力值大, 这可能是由于该处的土层渗透性较低, 形成了一个相对滞留的水位, 数值模拟结果也较好地反映了这一规律。[结论] 在短历时强降雨的情况下, 边坡土体的入渗过程极为复杂, 且对地质灾害的触发起着关键作用。其入渗特性受降雨强度、土层深度及渗透性等多重因素的综合影响。

**关键词:** 原位模拟降雨; 水文响应; 入渗; 数值模拟

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)04-0135-08

**中图分类号:** TU413, P642.2

**文献参数:** 赖增荣, 简文彬, 林昀昭, 等. 花岗岩残积土坡对短历时强降雨的水文响应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 135-142. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.014; Lai Zengrong, Jian Wenbin, Lin Yunzhao, et al. Hydrological response of granite residual soil slope to short-duration heavy rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 135-142.

## Hydrological Response of Granite Residual Soil Slope to Short-Duration Heavy Rainfall

Lai Zengrong<sup>1,2</sup>, Jian Wenbin<sup>1,2</sup>, Lin Yunzhao<sup>1,2</sup>, Zhu Zuteng<sup>1,2</sup>, Wu Yilong<sup>1,2</sup>

(1. Zijin College of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Fujian Key Laboratory of Geohazard Prevention, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

**Abstract:** [Objective] The infiltration laws of slope soil bodies under short-duration heavy rainfall were investigated to reveal the causes and mechanisms of geological disasters in order to provide a scientific basis for the formation mechanism, early warning, and prediction of geological disasters in the region. [Methods] Regarding the shallow flow-type landslide event induced by heavy rainfall in Wuping area, Longyan City, Fujian Province, on May 26—27, 2022, an in-situ artificial rainfall infiltration test was conducted at the typical landslide site of the geological disaster area. Systematic observations using monitoring devices such as soil moisture meters, tensiometers, pore water pressure sensors, and rain gauges were conducted. At the same time, finite element software was used to simulate the rainwater infiltration process under different rainfall intensities to deepen the understanding of the infiltration law. [Results] The increase in volumetric water content of the soil was greater near the surface of the slope and decreased with increasing burial depth. The infiltration rate of the slope was fastest at the foot and middle of the slope and slowest at the top of the

收稿日期: 2024-03-28

修回日期: 2024-04-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“台风暴雨型滑坡多级监测预警系统研究”(NO.41861134011), “闽台高植被覆盖区台风暴雨型滑坡孕灾环境、成灾机制与动态预警”(U2005205)。

第一作者: 赖增荣(1999—), 男(汉族), 福建省宁化县人, 硕士, 研究方向为边坡工程。Email: lzt17606089883@163.com。

通信作者: 简文彬(1963—), 男(汉族), 福建省龙岩市人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与工程地质方面的研究。Email: jwb@fzu.edu.cn。

slope. Under the impact of short-term intense rainfall, the pore water pressure increased gradually, peaked, and then stabilised. Notably, the pore water pressure at a distance of 120 cm from the slope surface was higher than that at the other two depths. This may be attributed to the lower permeability of the soil layer at this location, which resulted in a relatively stable water level. The numerical simulation results reflected this pattern effectively. [Conclusion] The infiltration process of the slope soil is extremely complex in the case of short-duration heavy rainfall and plays a crucial role in triggering geological disasters. Its infiltration characteristics are comprehensively influenced by multiple factors such as rainfall intensity, soil layer depth, and permeability.

**Keywords: in-situ rainfall simulation; hydrological response; infiltration; numerical simulation**

中国东南沿海地区地质灾害频发,降雨是诱发岩土体灾变最典型、最重要的气候条件之一<sup>[1-4]</sup>。为了减少降雨诱发滑坡的发生,许多学者进行边坡现场降雨试验的研究,一方面,有些学者探究了在降雨条件下边坡的变形破坏模式,例如,王力等<sup>[5]</sup>通过对模拟降雨现场含水率和孔隙水压力的监测结果结合边坡变形规律分析,得出含水率增速和孔隙水压力增幅是该类变质岩土体破坏的主要判据。孙萍等<sup>[6]</sup>研究了3种不同雨强条件下黄土边坡变形过程和模式,探究该类边坡的变形机理。谭建民等<sup>[7]</sup>基于降雨条件下孔压、含水率和变形的变化规律,得出该类边坡的破坏模式为:先局部坡面滑塌,随后出现裂缝,最后整体大范围垮塌。Hu等<sup>[8]</sup>通过构建室内模型箱试验,分析了两种不同类型降雨和4种不同强度降雨强度下边坡的降雨入渗规律、竖向应力特征、孔隙水压力变化特征和变形破坏模式,表明降雨强度对碎石土边坡的影响主要体现在冲刷程度上。另一方面,还有部分学者研究降雨条件下边坡的入渗规律,其中,Rahardjo等<sup>[9]</sup>开展天然和模拟降雨条件下的试验研究,得出总降雨量小的降雨比总降雨量大的降雨能贡献更大的入渗百分比,入渗率通常随总降雨量的增大而减小。Bai等<sup>[10]</sup>开展黄土地区双层土质边坡的野外降雨试验研究,较好的实现了双层黄土边坡渗流场随雨水入渗的变化过程。张本卓<sup>[11]</sup>基于不同降雨强度,不同场地分类下吸力的变化,研究有无植被下尾矿坝的降雨入渗特征。李雄威等<sup>[12]</sup>根据膨胀土边坡中土体含水率的监测结果,认为土体含水率的变化主要取决于降雨的历时,而不是降雨强度。崔博等<sup>[13]</sup>基于现场试验和调查结果,探究了强降雨作用下孔隙气压对高阶排土场湿润锋、孔隙水压力和边坡安全系数的影响。霍志涛等<sup>[14]</sup>通过野外现场监测、现场模型试验和室内土柱试验综合分析土体含水率和降雨型滑坡的相关性。刘佳意等<sup>[15]</sup>对滑坡地开展现场降雨入渗监测、相关性分析和力学分析,构建了基于降雨量和地下水位埋深的浅层滑坡稳定性预测模型,并通过该预测模型确定了该滑坡失稳的临界降雨阈值。

此外还有学者通过室内试验和数值模拟的方式来研究降雨条件下的边坡。例如,何忠明等<sup>[16]</sup>揭示了降雨入渗作用下路堤边坡暂态饱和区发展变化规律。黄晓虎等<sup>[17]</sup>通过无限边坡模型,分析不同深度裂隙引起的优势流入渗过程,在此基础上,通过无限边坡模型,厘清优势流入渗透发浅层滑坡破坏机理。Li等<sup>[18]</sup>根据现场调查和数值模拟的结果,得出土壤含水量受环境因子影响显著,尤其是降雨量和蒸发量。石爱红等<sup>[19]</sup>采用Geo-studio耦合计算不同降雨工况下滑坡的渗流场、应力场、位移场的变化,并得出高强度短历时的降雨使浅表层坡体快速饱和,容易发生浅层滑坡,而低强度长历时的降雨使坡体浸润较深,容易造成深部的变形破坏。曾铃等<sup>[20]</sup>基于不同降雨入渗参数下粗粒土路堤边坡雨水入渗过程进行数值模拟,揭示了降雨强度和饱和渗透系数的比值是决定路堤内部雨水入渗方式和暂态饱和区形成的关键因素。胡庆国等<sup>[21]</sup>根据降雨强度和土体渗透系数的关系,建立了多层结构土质边坡雨水入渗深度理论计算公式。Zhong等<sup>[22]</sup>介绍了3个人渗特征参数来表征非饱和土的入渗特性。前人关于边坡的现场模拟降雨试验研究大多模拟小雨一大雨的降雨强度,且降雨时间多超过24h。为了更符合龙岩武平地区滑坡发生期间的降雨条件。

本试验设计了降雨强度为60mm/h,降雨时长4h的现场模拟降雨,探究在该降雨强度下边坡的降雨入渗机理和入渗深度,研究结果对降雨瞬态渗流作用下边坡稳定性分析方法的合理建立有一定的启示作用。

## 1 现场降雨模型试验

### 1.1 位置及降雨气候条件

研究区位于福建省武平县中和村境内,地处福建省西南部,北纬 $24^{\circ}47'$ — $25^{\circ}29'$ ,东经 $115^{\circ}51'$ — $116^{\circ}23'$ 。地形属于丘陵地貌单元,山体坡面呈半圆状,坡顶标高约434m;坡脚标高为394~395m,山坡自然坡度在 $28^{\circ}$ ~ $36^{\circ}$ 左右,局部存在 $40^{\circ}$ 的坡度。山体表层为

残积砂质黏性土出露;坡面植被发育,主要为松树,树木密集;山坡坡脚处地形平缓,现为居民区。

武平县属亚热带海洋性季风气候。温暖湿润,雨量充沛,雨热同期,降雨相对集中,干湿季节明显,四季分明,夏长冬短,年平均降雨量 1 768.6 mm,3—6 月为雨季,平均降雨量 927.51 mm,占全年总降水的 52.44%,是地质灾害易发期(图 1)。研究区地下水补给来源主要为大气降水,其径流方向受地形控制,流向总体自山顶流向坡脚方向,水力坡向与原始地形坡向基本一致但较地形坡度缓。其水位变化及幅度受季节、气候及地形的影响较大,勘查期间,处于枯水季,钻孔深度范围内未见地下水;不排除场地内存在地下水的情况,强降雨期间,坡面地表水及地下水向坡脚方向流动,在场地坡脚处有水流出。

### 1.2 试验边坡概况

试验边坡的尺寸为:边坡高度约为 1.2 m,宽度约为 2 m,坡体长度约为 3 m,边坡的坡度为 40°。现场降雨试验的传感器均埋设于残积砂质黏性土层,取该层原状土进行室内试验,获得其基本物理力学性质指标,测得的参数详见表 1,残积砂质黏性土的干密度和孔隙比随深度变化的曲线如图 2 所示。



图 1 福建省龙岩市武平县 2022 年 5 月群发性滑坡航拍图  
Fig.1 Aerial photos of group landslide in Wuping County, Longyan City, Fujian Province in May 2022

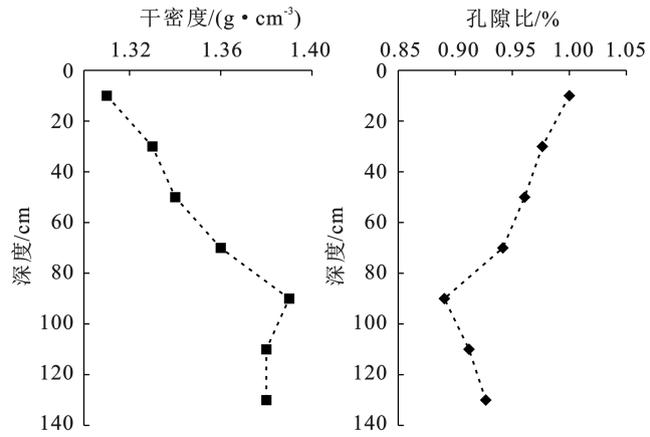


图 2 残积砂质黏性土干密度和孔隙比随深度变化特征  
Fig.2 Variation characteristics of dry density and void ratio of residual sandy clayey soil with depth

### 1.3 降雨模拟及监测系统

现场试验所用的仪器包括野外人工降雨模拟装置、传感器和数据采集仪 3 部分。为进行野外边坡降雨模拟试验,设计了一套操作简便、易于运输和组装、均匀性良好的野外人工降雨模拟装置。降雨模拟装置主要由喷头、输水管路、水压表、流量计、流量调节阀、水泵、水箱、降雨支架等组成。为了便于运输、安装和拆卸,降雨支架采用万能角钢进行组合,并将输水管路固定在降雨支架上。该降雨模拟装置可以通过调节流量调节阀和喷嘴尺寸控制降雨强度,雨滴喷洒范围则由降雨支架的高度和雨强大小决定。本次降雨试验所用的传感器为土壤水分传感器、孔隙水压力传感器、张力计。土壤水分传感器、孔隙水压力传感器、张力计共埋设了 3 个不同深度(各传感器参数详见表 2),分别为 40,80 和 120 cm,并分别配套一个数据采集仪。埋设好后分层填埋土体,监测传感器读数结果,待所有传感器读数均趋于稳定后,即可开始试验。

表 2 现场试验仪器使用情况一览表

Table 2 List of instrument usage in field test

仪器名称及型号	测量物理值	个数	精度
土壤水分计(TDR-310H)	体积含水率/%	9	0.1
孔隙水压力传感器(DMKY)	孔隙水压力/kPa	9	0.005 kPa
张力计(JC-SF-05)	基质吸力/kPa	9	0.1 kPa
雨量计(JC-YL-06)	降雨量/mm	1	0.1 mm

### 1.4 试验方案

根据当地气象站关于 2022 年 5 月 26 日 12:00 至 27 日 9:00 的降雨数据显示(图 3)。该时段内,降雨呈现历时短、降雨强度大的特点,在 2022 年 5 月 26 日 12:00 至 27 日 9:00 降雨量高达 205.7 mm,其

表 1 残积砂质黏性土的物理力学参数  
Table 1 Physical and mechanical parameters of residual sandy clayey soil

物理力学参数	数值
天然含水率/%	17.8
天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.57
干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.33
黏聚力/kPa	19.57
内摩擦角/(°)	29.27
塑限/%	43.0
液限/%	50.0

中 22:00—24:00 的 3 h 内降雨量高达 142.4 mm,超过了暴雨橙色预警临界值(50 mm/3 h),单小时最大降雨强度高达 61.2 mm/h(图 3)。为了研究土体在该降雨强度下的降雨入渗规律,采用大暴雨降雨方案,在地灾点典型地点进行 4 h,降雨强度为 60 mm/h 的人工模拟降雨。模拟降雨期间的实际降雨强度由雨量计来记录。

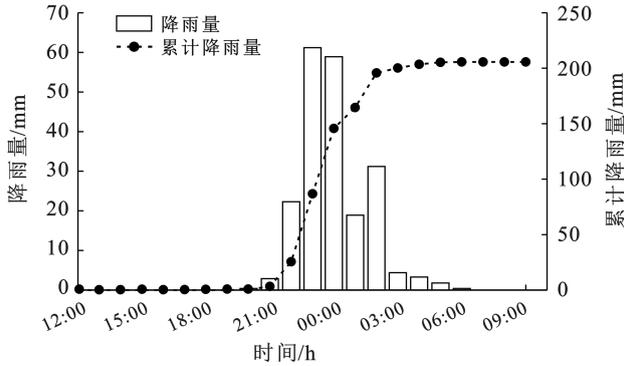


图 3 福建省龙岩市武平县 2022 年 5 月滑坡发生期间降雨数据

Fig.3 Rainfall data during landslides in Wuping County, Longyan City, Fujian Province in May 2022

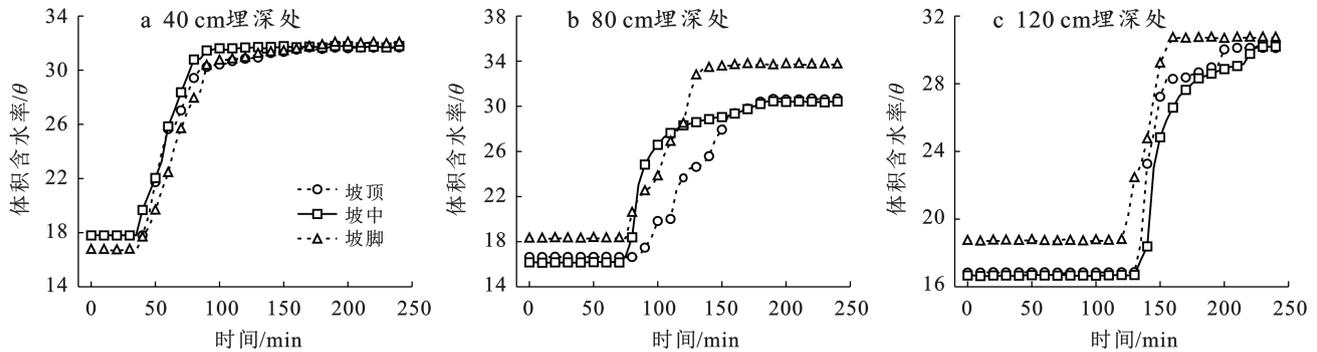


图 4 试验各测点体积含水率

Fig.4 Volumetric water content of each measuring point

## 2.2 土体基质吸力与降雨响应关系

由图 5 可知,40 cm 深度处张力计读数自降雨开始后 35 min 首先减小,这与对应测点处体积含水率增大所需时间一致,将图 5 与图 4 对比可以看出,坡顶处张力计读数响应会比体积含水率快,可能的原因是 120 cm 张力计埋深处回填土的密实度较小,雨水在此处更易渗入。图 5c 坡脚处张力计读数比同一深度其余张力计读数响应更快,推测是坡顶和坡中雨水有一部分顺着边坡入渗到坡脚处。对比图 5 和图 4 其他深度传感器发现,不同埋深处基质吸力响应时间与体积含水率响应时间基本一致,表明基质吸力与体积含水率成负相关关系,当含水率增大时,基质吸力

## 2 试验过程及数据分析

### 2.1 土体含水率与降雨响应关系

模拟降雨试验下斜坡土体含水率变化如图 4 所示。由图 4 可以看出,40 cm 埋深处体积含水率随降雨的变化曲线。从坡体表面体积含水率在 35~40 min 内开始响应,且在 90 min 时含水率曲线均逐渐趋于平稳,边坡各处入渗速度大小为:坡顶<坡中≈坡脚,其对应的体积含水率开始变化所需时间顺序为:坡脚≈坡中<坡顶。图 4 中 40,80 和 120 cm 埋体积含水率开始响应时间分别为 40~45 min,80 min,135 min。表明随着深度增加,土体的入渗速率逐渐减小,这是因为随着深度的增加,土体的密度也随之增加,土体水分在土壤中的流动更加缓慢和困难。此外,从图 4 可以看出,坡脚处土体趋于稳定时的体积含水率高于坡体其他部位的体积含水率,这可能是由于土体不均匀和回填两种传感器的土体密实度不完全相同导致。由图 4 可知,边坡各处土体体积含水率的变化趋势基本相同,边坡土体各位置的平均入渗深度可超过 120 cm。越靠近坡体表面,土体体积含水率增大幅度越大,随着埋深的加深,其增大幅度逐渐减小。

减小,含水率减小时,基质吸力增大。

### 2.3 孔隙水压力与降雨响应关系

在降雨发生后,坡体内不同深度处孔隙水压力和降雨的响应图如图 6 所示。由图 6 可以看出,刚开始降雨时,各个监测点的孔隙水压力均未发生变化,在降雨 70 min 时坡脚处的孔隙水压力传感器率先开始响应,并在约 85 min 时趋于稳定,变化幅值在 0.08 kPa 左右。坡中和坡顶处孔隙水压力各在 80 和 75 min 后开始变化,变化幅值在 0.04 和 0.02 kPa 左右,表层土体孔隙水压力变化较小,该孔隙水压力变化可能是雨水入渗过程产生的渗流力。从不同埋深处孔隙水压力变化情况可以看出,120 cm 深度处孔

隙水压力变化最大,将其与室内试验测得的干密度和孔隙比数据进行对比,发现该处的孔隙比较小,干密度较大,可能由于渗透系数较低而形成一个相对的滞留水位。从同一深度,不同坡体位置来看,坡脚处的孔隙水压力值始终比其他位置高,可能是坡顶和坡中雨水有一部分顺着边坡入渗到坡脚处。以上试验结果表明:①在降雨初期,由于土体渗透系数较低,

各点的孔隙水压力均未发生变化。随着降雨的进行,土体含水率开始逐渐增大,土体内的渗流作用开始加强,并且逐渐形成稳定的渗流通道,孔压开始呈现增加的趋势,最后达到峰值并趋于稳定。②120 cm 埋深处的孔隙水压力变化幅值大于另外两个深度,可能是该处的土层渗透性比较低,形成了一个相对的滞留水位。

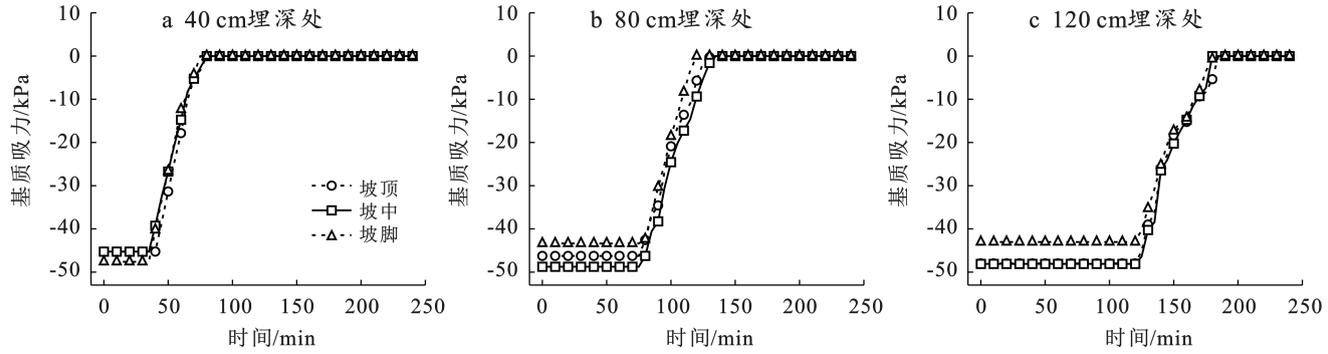


图 5 试验各测点基质吸力

Fig.5 Matric suction of each measuring point

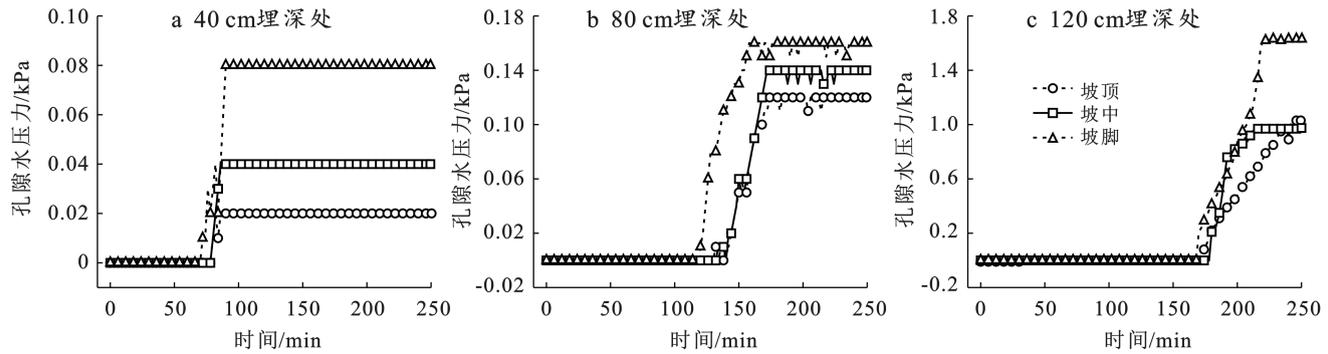


图 6 试验各测点孔隙水压力

Fig.6 Pore water pressure of each measuring point

### 3 降雨入渗数值模拟

由于现场试验对于观测时间和深度的局限性,可以通过数值模拟对现场试验结果进行复现,还可以进行不同降雨强度下的多个试验,节约大量的成本。

#### 3.1 非饱和和渗流基本微分方程

适用于饱和土体的达西定律也同样适用于非饱和土体的流动,将质量守恒定律和达西定律相结合得到用于描述非饱和土壤渗流的基本微分方程。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}[k(\theta)\nabla H] \quad (1)$$

式中: $\theta$  为体积含水率; $H$  为总水势; $t$  为时间; $k(\theta)$  为非饱和渗透系数。

通常情况下,土水特征曲线描述的是基质吸力和体积含水率之间的关系,则有:

$$-\frac{\partial \theta}{\partial [u_a - u_w]} = \frac{\partial \theta}{\rho_w g \partial h} \quad (2)$$

式中: $u_a$  为孔隙气压力; $u_w$  为孔隙水压力; $h$  为压力水头; $g$  为重力加速度; $\rho_w$  为水的密度。

定义比水容重  $m_z^w$  为体积含水率  $\theta$  对于基质吸力  $(u_a - u_w)$  的偏导数的负值,则  $m_z^w$  表示为土水特征曲线斜率的绝对值。故:

$$m_z^w = -\frac{\partial \theta}{\partial (u_a - u_w)} \quad (3)$$

将公式(3)代入公式(2):

$$\frac{\partial \theta}{\partial h} = \rho_w g m_z^w \quad (4)$$

由于  $H = h + z$ ,  $\frac{\partial z}{\partial t} = 0$ , 则有  $\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial t}$ 。将公式

(4)代入公式(1)中可以得出:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k_x(h) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_y(h) \frac{\partial H}{\partial y} \right] = \rho_w g m_z^w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

式中:  $k_x, k_y$  分别为  $x, y$  方向的渗透系数。

### 3.2 土水特征曲线和渗透系数函数

在现场降雨试验开挖过程中,取 20 cm 和 120 cm 深度处原状土样,室内采用压力板仪测定

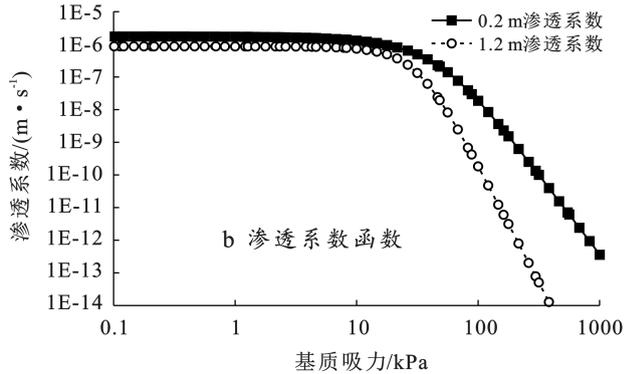
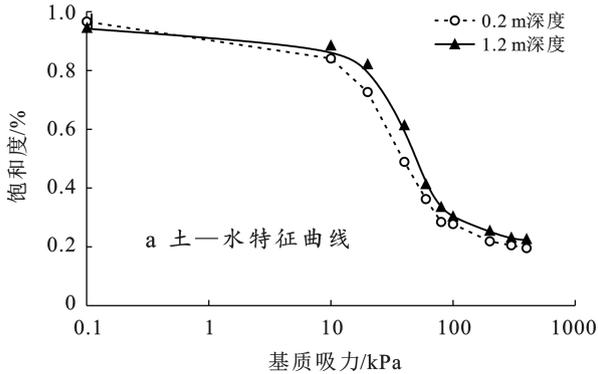


图7 土—水特征曲线图和渗透系数函数

Fig.7 Soil-water characteristic curve and permeability coefficient function

### 3.3 渗流模型建立

根据研究区工程地质图,建立数值模型尺寸(长×宽)为 37.8 m×18.8 m,将模型的有限元网格划分为四边形,全局单元尺寸设置为 0.3 m,由于研究区地下水位埋深较深,地下水对浅层土体含水率和孔隙水压力无影响,为了便于建模,将地下水位设置在地表以下 18.8 m 处。鉴于现场试验结果结合室内测得的土体基本物理力学参数,发现 120 cm 深度处土体干密度较大,孔隙比较小,在模型中将土层按 120 cm 为界限进行划分,两层土体拥有不同的渗透系数。模型上部边界设置为入渗边界,分别设置降雨强度为 0.02,0.04 和 0.06 m/h,将左侧边界设置为排水面边界,其余边界均为不透水边界。

### 3.4 数值模型结果与分析

图 8 所示分别为现场观测和数值模拟得到基质吸力随时间变化曲线。从图 8 可以看出,数值模拟结果与现场监测结果较为一致。不同降雨条件下土体的水文响应如图 9 所示,只有当降雨量足够大时,浅层土壤孔隙水压力才会在其背景趋势上产生骤升,降雨量越大,增幅越大,其影响深度也越深,如在 20 和 40 mm/h 降雨强度下,由于土体的渗透性较低,雨水还未渗到较深的土层,未处观测到正孔隙水压力,在 60 mm/h 降雨强度下观测到正孔隙水压力。从 3 个降雨强度下土体含水率影响深度来看,在不同降雨强度下,较短的时间内坡体表层附近的含水率、孔隙水压力变化最大,底层变化最小,这揭示了降雨诱发的土坡破坏容易出现在浅层的原因。

原状土样的土水特征曲线。不同深度处残积砂质黏性土的土水特征曲线如图 7a 所示。根据现场测得 20 cm 深度和 120 cm 深度处饱和渗透系数分别为  $1.75 \times 10^{-6}$  m/s 和  $8.63 \times 10^{-7}$  m/s,选用 Van,Genuchten 模型生成完整的渗透系数函数(图 7b 所示)。

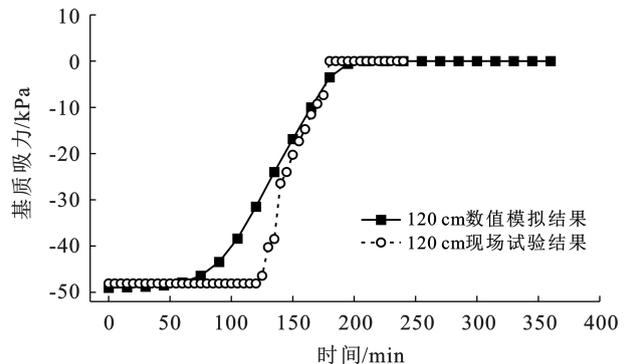


图8 现场观测和数值模拟的基质吸力随时间变化特征  
Fig.8 Characteristics of matric suction changing with time curve of field observation and numerical simulation

降雨对滑坡的作用是一个动态的过程,雨水进入岩土体内部,增加岩土体的含水量,增大岩土体容重,软化岩土,降低岩土体的抗剪强度,从而导致滑坡的发生。在短时强降雨作用下,雨水在较短的时间内入渗到土层渗透性较差处,并在该处形成一个相对的滞留层,产生正孔隙水压力。

## 4 讨论

本研究通过现场降雨模型试验和数值模拟,深入探讨了短历时强降雨对花岗岩残积土坡的水文响应。所得结果不仅深化了对边坡在极端气候条件下水文响应的理解,也为边坡稳定性分析提供了新的视角。首先,观测到边坡浅层土体的体积含水率在降雨过程中迅速达到稳定状态,这反映了花岗岩残积土对降雨的快速响应。这种快速的响应速度可能与土体的物

理特性有关,如颗粒大小、形状和分布,以及其与水的相互作用。快速达到稳定状态意味着在短历时强降雨事件中,边坡浅层土体的含水量可能迅速接近其最大容水能力,从而增加了边坡失稳的风险。此外,降雨类型是显著影响土体入渗特征的重要因素,显著影响土壤水分的入渗深度。研究表明,极端暴雨类型和长历时降雨类型入渗深度最深,短历时中雨强度次之,短历时小雨强降雨入渗深度最浅<sup>[23]</sup>。可见,随着降雨强度的增大,促进土壤水分向深层入渗。较大的雨强加剧了近地表水流的运动,增强土壤入渗性能,进一步促进水分向深层土壤运动。其次,研究还发现短历时强降雨作用下,土体孔隙水压力逐渐增大到峰值后趋于稳定,且在120 cm深度处测得的正孔隙水压力,可

能与该位置的土层渗透性较低有关。了解土层渗透性的变化有助于评估边坡在不同降雨条件下的稳定性。低渗透性区域更容易形成滞留水位,这增加了边坡失稳的风险。因此,这一发现为边坡稳定性分析提供了重要依据。数值模拟和现场降雨试验的结果表明,短历时强降雨作用下,边坡浅层土体迅速饱和,形成暂态饱和区,并产生孔隙水压力。饱和区所产生的渗流力和静水压力是诱发滑坡的主要因素。这一发现与现有的滑坡理论相一致,但本研究通过具体的试验数据进一步证实了这一机制在实际边坡中的重要作用。这一发现对于边坡工程设计和施工具有重要的指导意义,提示我们需要在设计时充分考虑降雨对边坡稳定性的影响,并采取有效的排水和防护措施来降低滑坡风险。

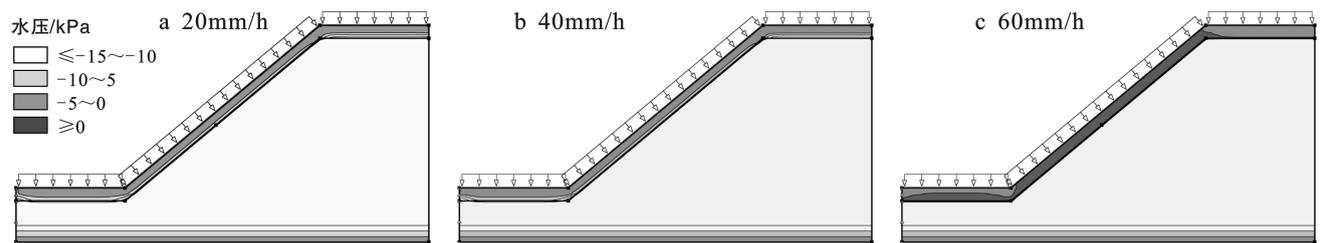


图9 不同降雨强度条件下孔隙水压力云图

Fig.9 Pore water pressure cloud diagram under different rainfall intensity conditions

总的来说,本研究成果不仅揭示了边坡在极端气候条件下的行为表现,也为边坡稳定性分析提供了新的视角和方法。然而,由于实际边坡的复杂性,仍有许多因素需要进一步研究和探讨,如不同土壤类型、地形条件、植被覆盖等因素对边坡稳定性的影响。未来的研究可以围绕这些因素展开,以更全面地理解边坡在短历时强降雨作用下的稳定性和响应机制。

## 5 结论

(1) 在降雨过程中,边坡浅层土体的体积含水率表现出较快的响应速度,较早达到稳定状态。边坡不同部位的入渗速度存在显著差异,具体而言,坡脚和坡中的入渗速度相对较快,而坡顶的入渗速度则较慢。在此降雨条件下,雨水的入渗深度可超过120 cm,对边坡稳定性产生显著影响。

(2) 短历时强降雨作用下,土体孔隙水压力随着降雨的进行逐渐增大到峰值后趋于稳定,且都在120 cm处的测得正孔隙水压力,可能是该处的土层渗透性比较低,形成了一个相对的滞留水位。

(3) 数值模拟和现场降雨试验结果显示,由于土体不同的物理力学性质,在短时强降雨作用下,边坡浅层土体迅速饱和,形成暂态饱和区,并产生孔隙水

压力,饱和区所产生的渗流力和静水压力是诱发滑坡的主要因素。

## 参考文献 (References)

- [1] Ng C W W, Zhan Liangtong, Bao Chenggang, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration [J]. *Geotechnique*, 2003,53(2):143-157.
- [2] Tsaparas I, Rahardjo H, Toll D G, et al. Controlling parameters for rainfall-induced landslides [J]. *Computers and Geotechnics*, 2002,29(1):1-27.
- [3] Wang Gonghui, Zhang Dexuan, Furuya G, et al. Pore-pressure generation and fluidization in a loess landslide triggered by the 1920 Haiyuan earthquake, China: A case study [J]. *Engineering Geology*, 2014,174:36-45.
- [4] Cho S E, Lee S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration [J]. *Computers and Geotechnics*, 2001,28(3):185-208.
- [5] 王力,李高,陈勇,等.赣南地区人工切坡降雨致灾机制现场模型试验[J].*岩土力学*,2021,42(3):846-854.  
Wang Li, Li Gao, Chen Yong, et al. Field model test on failure mechanism of artificial cut-slope rainfall in Southern Jiangxi [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021,42(3):846-854.
- [6] 孙萍,王刚,李荣建,等.降雨条件下黄土边坡现场试验研究[J].*工程地质学报*,2019,27(2):466-476.

- Sun Ping, Wang Gang, Li Rongjian, et al. Study on field test of loess slope under the artificial rainfall condition [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(2):466-476.
- [7] 谭建民, 伍寒浪, 王世梅, 等. 强降雨作用下花岗岩全风化土坡致灾现场模型试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(28):12307-12314.
- Tan Jianmin, Wu Hanlang, Wang Shimei, et al. Field model test of disaster caused by granite completely weathered soil slope under heavy rainfall [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(28):12307-12314.
- [8] Hu Yanran, Sun Shaorui, Sun Yuyong. Model test study of rainfall factors on failure process of Xiashu loess slope with gravel layer [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2024, 2024(1):5564418.
- [9] Rahardjo H, Lee T T, Leong E C, et al. Response of a residual soil slope to rainfall [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(2):340-351.
- [10] Bai Weishi, Li Rongjian, Pan Junyi, et al. Measured rainfall infiltration and the infiltration interface effect on double-layer loess slope [J]. *Water*, 2023, 15(14):2505.
- [11] 张本卓. 降雨作用下尾矿坝的性状分析[D]. 黑龙江哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- Zhang Benzhuo. Analysis on the behavior of tailings-dam subjected to rainfall infiltration [D]. Harbin, Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [12] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国. 膨胀土筑坡雨水入渗速率的影响因素与相关性分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5):1291-1296.
- Li Xiongwei, Kong Lingwei, Guo Aiguo. Effects and correlation analysis of infiltration velocity of expansive soil cut slope [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5):1291-1296.
- [13] 崔博, 王光进, 刘文连, 等. 强降雨条件下孔隙气压作用的高台阶排土场渗流与稳定性[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(3):365-375.
- Cui Bo, Wang Guangjin, Liu Wenlian, et al. Seepage and stability analysis of pore air pressure on a high-bench dump under heavy rainfall [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(3):365-375.
- [14] 霍志涛, 李高, 王力, 等. 降雨型滑坡浅层滑动对土体含水率变化的响应[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(7):110-117.
- Huo Zhitao, Li Gao, Wang Li, et al. Response of shallow sliding of rainfall-induced landslide to the change of soil moisture content [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(7):110-117.
- [15] 刘佳意, 陈春利, 付昱凯, 等. 降雨诱发的浅表堆积层滑坡成因机理与稳定性预测模型[J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(2):183-191.
- Liu Jiayi, Chen Chunli, Fu Yukai, et al. Mechanism of rainfall-induced shallow landslide and stability prediction model [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(2):183-191.
- [16] 何忠明, 周功科, 张力, 等. 降雨条件下粗粒土高路堤渗流特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(1):262-268.
- He Zhongming, Zhou Gongke, Zhang Li, et al. Seepage characteristics of high grained soil embankment under rainfall condition [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(1):262-268.
- [17] 黄晓虎, 魏兆亨, 易武, 等. 裂隙优势流入渗透发堆积层滑坡浅层破坏机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(6):1136-1145.
- Huang Xiaohu, Wei Zhaoheng, Yi Wu, et al. Study on shallow failure mechanism of colluvial landslide induced by preferential seepage of cracks [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(6):1136-1145.
- [18] Li Ping, Li Tonglu, Vanapalli S K. Influence of environmental factors on the wetting front depth: A case study in the Loess Plateau [J]. *Engineering Geology*, 2016, 214:1-10.
- [19] 石爱红, 李国庆, 丁德民, 等. 考虑非饱和和土基质吸力的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(6):141-151.
- Shi Aihong, Li Guoqing, Ding Demin, et al. Deformation mechanism and stability evaluation of Dingjiapo landslide considering the matric suction of unsaturated soil [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6):141-151.
- [20] 曾铃, 付宏渊, 周功科. 降雨入渗参数对粗粒土路堤暂态饱和区影响的数值模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(3):250-256.
- Zeng Ling, Fu Hongyuan, Zhou Gongke. Numerical simulation of effects of rainfall infiltration parameters on transient saturated areas of coarse-grained soil embankment [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(3):250-256.
- [21] 胡庆国, 袁宁, 刘登生, 等. 多层结构土质边坡降雨入渗过程及稳定性影响分析[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(2):67-74.
- Hu Qingguo, Yuan Ning, Liu Dengsheng, et al. Analysis of rainfall infiltration process and stability of soil slope with multilayer structure [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(2):67-74.
- [22] Zhong Lijia, Wang Bo, Zhao Xuguang, et al. Study on rainfall infiltration characteristic parameters of unsaturated soil [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11:1251765.
- [23] Wang Fengjiao, Wang Jinman. Effects of rainfall intensity and compaction on water transport from opencast coal mine soils: An experimental study [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(2):258-269.