

文章编号:1673-9469(2024)06-0018-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.003

## 降雨入渗下强风化泥岩高边坡失稳模型试验研究

齐向阳<sup>1,2</sup>, 苏成<sup>1,2</sup>, 宋宏芳<sup>1,2,3\*</sup>, 王莉苹<sup>1,2</sup>, 赵泽源<sup>1,2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 以简阳市龙泉湖高速公路强风化泥岩路堑边坡为研究对象, 基于相似原理的边坡缩尺模型, 开展了不同降雨强度和历时下的边坡试验, 通过对边坡降雨全过程监测, 分析不同降雨条件对边坡稳定性的影响。研究表明: 强风化泥岩大孔隙性和亲水性是边坡失稳的物质基础, 降雨后边坡基质吸力快速消散是失稳的本质原因; 降雨初期, 强降雨使坡体体积含水率、孔隙水压力急剧增加, 基质吸力骤降, 其骤降时间与降雨强度成反比; 前期强降雨会加速边坡破坏, 缩短边坡的破坏时间, 而降雨历时长短直接决定边坡是否会发生破坏; 边坡表面变形以坡顶张拉裂隙为主, 连带发展至上坡表面及内部深度, 坡顶处体积含水率和孔隙水压力分布变化大于上下坡, 这导致坡顶最先发生破坏, 逐渐发展至上坡。

**关键词:** 强风化泥岩; 降雨条件; 基质吸力; 模型试验; 二级边坡

**中图分类号:** U416

**文献标识码:** A

## Model Tests of Instability of Highly Weathered Mudstone High Slope Under Rainfall Infiltration

QI Xiangyang<sup>1,2</sup>, SU Cheng<sup>1,2</sup>, SONG Hongfang<sup>1,2,3\*</sup>, WANG Liping<sup>1,2</sup>, ZHAO Zeyuan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University,

Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang,

Hebei 050043, China; 3. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic

Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** Taking the highly weathered mudstone cutting slope of Longquanhu Expressway in Jianyang City as the research object, a slope scaling model based on the principle of similarity was used to conduct slope tests under different rainfall intensities and durations. By monitoring the entire process of slope rainfall, the influence of different rainfall conditions on slope stability was analyzed. The research results indicate that the large porosity and hydrophilicity of strongly weathered mudstone are the material basis for slope instability, and the rapid dissipation of slope matrix suction after rainfall is the essential reason for instability. In the early stage of rainfall, heavy rainfall causes a sharp increase in the volumetric moisture content and pore water pressure of the slope, and a sudden drop in matric suction, which is inversely proportional to the intensity of rainfall. Early heavy rainfall will accelerate slope failure and shorten the time for slope failure, and the duration of rainfall directly determines whether slope failure will occur. The surface deformation of the slope is mainly caused by tension cracks at the top of the slope, which develop to the surface and internal depth of the uphill slope. The distribution of volumetric water content and pore water pressure at the top of the slope changes more than that of the uphill slope, leading to the first failure of the top of the slope and gradually developing to the uphill slope.

收稿日期: 2023-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378453); 中铁建设集团有限公司资助项目(2018169QT2022001)

作者简介: 齐向阳(1998-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事边坡降雨方面的研究。

\* 通信作者: 宋宏芳(1987-), 女, 河北石家庄人, 博士, 讲师, 主要从事路基、边坡方面的研究。

**Key words:** strongly weathered mudstone; rainfall conditions; matrix suction; model test; secondary slop

我国西南地区多发降雨,降雨引发的边坡失稳、泥石流等地质灾害数不胜数,进而导致严重的人员伤亡和经济损失。西南地区地表基本上是强风化泥岩,目前对于该地区路堑高边坡的研究存在变形机理研究不深入、边坡稳定性研究方法不完善、无针对性治理措施等问题。因此,亟需开展一系列针对西南多雨地区公路路堑高边坡稳定性的研究。

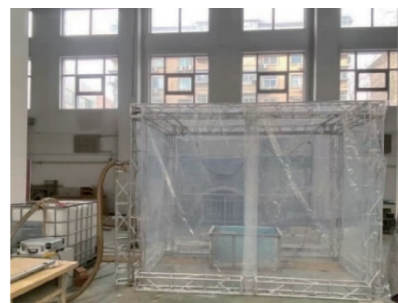
多项研究揭示了降雨是造成边坡失稳的关键诱因<sup>[1-4]</sup>,因此,国内外学者开展了一系列降雨入渗条件下的边坡稳定性研究,主要集中在现场监测、数值仿真和模型试验三方面。现场监测周期长、花费大,相关研究较少,而数值仿真与模型试验因周期短、可以改变试验条件等优势,成为广泛使用的研究方法。在数值仿真方面,Wang等<sup>[5]</sup>指出在降雨过程中土体基质吸力的减少会引起表层土的抗剪强度降低,进而诱发边坡失稳;朱志男等<sup>[6]</sup>通过有限元软件进行渗流分析,得出降雨时边坡变形主要为沉降,最大变形产生在坡顶位置;在模型试验方面,周峙等<sup>[7]</sup>通过自主研发的足尺模型试验系统对降雨入渗下裂土边坡水分运移时空特征进行探究,揭示了降雨入渗作用下裂土边坡的变形和破坏演变模式;王永等<sup>[8-12]</sup>聚焦于室内边坡模型的稳定性分析,在模拟降雨试验中,通过实时监控坡面位移、体积含水率、孔隙水压力等关键指标,深度解析了降雨条件下边坡稳定性的响应机制;曾铃等<sup>[13]</sup>开展了不同裂隙带红黏土边坡在降雨影响下的室内模型试验,分析边坡表面体积含水率和湿润锋的变化规律。

前人研究主要以单一降雨条件对边坡展开物理模型试验研究,边坡模型较为单一,边坡平缓,对于西南地区强风化泥岩路堑高边坡的研究不够深入且没有适用于针对西南多雨山区路堑高边坡的稳定性治理措施。为了探究多种降雨条件对强风化泥岩高边坡稳定性的影响,本文利用人工模拟的降雨装置,进行了4组不同降雨强度和历时条件下的边坡模型试验。监测边坡不同位置土体的体积含水率、孔隙水压力和基质吸力,待降雨结束后对边坡土体进行取样,测得边坡抗剪强度,总结不同降雨作用下的边坡对降雨入渗的响应规律、边坡破坏过程和破坏模式。

## 1 原型边坡与模型试验

### 1.1 原型边坡概况与模型设计

试验原型边坡位于成都市简阳市龙泉湖高速公路K12+500处,坡体为路堑高边坡,总高为21.6 m,坡比为1:0.75。边坡模型试验采用尺寸相似比为1:40的缩尺模型,试验系统主要由模型槽、金属框架、人工模拟降雨系统组成。其中,模型槽尺寸为1.2 m×0.7 m×0.6 m(长×宽×高)。人工模拟降雨设备主要由雨强控制器、水箱、水泵、电机、旋转下喷式喷头、调节器、水软化器、雨量计和铝合金钢架组成。旋转下喷式喷头设计了3种不同的口径,分别为1.5、3.2和5 mm,基于降雨均匀度原理均匀地布置喷头,可以保证降雨的均匀程度在90%以上;雨强控制器可以控制喷头模拟出不同的雨强,并在计算机上显示出当前的降雨强度,记录全部降雨变化过程,边坡模型试验系统见图1。



(a) 模型试验系统



(b) 模型边坡

图1 边坡模型试验系统

Fig. 1 Test system of slope model

### 1.2 模型设置与降雨参数的确定

模型边坡填土取自原型边坡,强风化泥岩土体物理力学参数见表1。由于天然状态下的土体

表 1 土体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil

基本物理指标	天然干密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	天然质量 含水率/%	最大干密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	最优质量 含水率/%	液限/%	塑限/%	峰值 粘聚力/kPa	内摩 擦角/( $^{\circ}$ )
实测值	1.56	16.9	1.65	20.7	42.5	26.3	46.9	24.1

很难达到最大干密度和最优的含水率状态,为了更符合实际情况,模型填土按天然干密度进行计算,分6层进行填筑,每层填土压实度控制在90%,边坡采用分层填筑,填筑后静置24 h后进行削坡,削坡过程中保持坡面平整。

当前的边坡模型主要是基于相似原理的缩尺边坡模型<sup>[14-15]</sup>,本次试验从模型尺寸和材料特性角度出发,边坡模型的尺寸相似比为1:40,原型边坡高度为23 m,确定模型边坡高度为0.6 m。本次试验的人工模拟降雨系统需满足降雨条件要求,降雨相似准则采用韦伯  $W_e$  准则<sup>[16]</sup>。

$$W_e = \frac{\rho \mu^2 l}{\sigma} \quad (1)$$

式中: $W_e$  为韦伯数,无量纲; $\rho$  为水的密度, $kg/m^3$ ; $\mu$  为特征流速, $m/s$ ; $l$  为特征长度, $m$ ; $\sigma$  为水的表面张力系数, $N/m$ 。

若原型与模型水流  $\rho$ 、 $\sigma$  相等,可推导雨强比尺  $\lambda_u$  与模型比尺  $\lambda_l$  的关系<sup>[14]</sup>:

$$\lambda_u = \lambda_l^{-1/2} \quad (2)$$

本次模型试验尺寸相似比为1:40,代入可得试验的雨强相似比为1:0.158。根据中国气象给出的降雨强度降雨量范围,结合本次试验的雨强相似比,确定各雨强模拟降雨量取值为31.6、94.9和221.5 mm/d。

### 1.3 试验方案和传感器的布设

图2为坡体内部传感器布设,主要布设传感器包括7个水分传感器、7个孔隙水压力传感器和1个土壤张力计,布设的水分传感器编号为W1—W7,W1、W2、W3分别布置在坡顶深10、20、30 cm处,W4、W5分别布置在上坡深10、20 cm处,W6、W7分别布置在下坡深10、20 cm处;布设的孔隙水压力传感器编号为F1—F7,其位置和水分传感器各编号的位置相同。通过DT80数据采集仪和4G采集模块进行数据采集,在整个降雨过程中准确监测边坡土体的数据变化情况,并在如图2所示位置进行取样,测定降雨结束后的边坡抗剪强度。

本文主要从不同降雨历时和不同降雨强度进行试验研究,研究边坡孔隙水压、基质吸力、土压力和抗剪强度的变化过程,找到不同降雨条件下

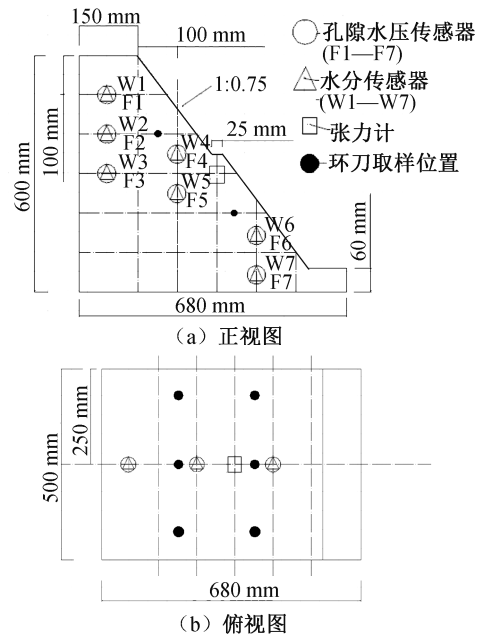


图 2 传感器布设图

Fig. 2 Layout diagram of sensors

边坡变形影响机理,具体试验安排见表2。

表 2 试验方案

Tab. 2 Test plan

试验次数	试验条件	实际雨量/ ( $mm \cdot d^{-1}$ )	模拟雨量/ ( $mm \cdot d^{-1}$ )
第1组	小雨 1 h	5.0	31.6
	小雨 2 h	5.0	31.6
	小雨 3 h	5.0	31.6
第2组	中雨 1 h	15.0	94.9
	中雨 2 h	15.0	94.9
	中雨 3 h	15.0	94.9
第3组	大雨 1 h	35.0	221.5
	大雨 2 h	35.0	221.5
	大雨 3 h	35.0	221.5
第4组	大雨 (边坡破坏)	35.0	221.5

## 2 试验结果分析

### 2.1 体积含水率变化规律

不同降雨历时和降雨强度下的边坡体积含水率变化曲线见图3,坡顶、上坡、下坡的体积含水率

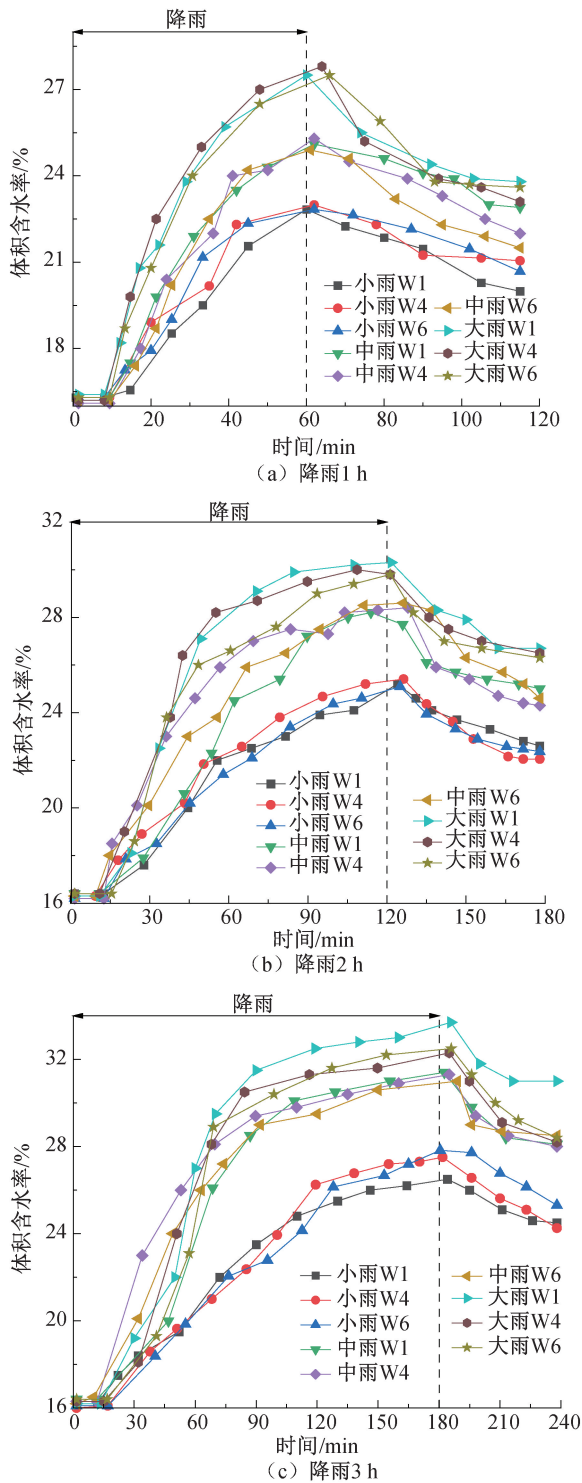


图 3 边坡不同降雨历时和强度下的体积含水率变化规律

Fig. 3 Variation of volumetric moisture content of slopes under different rainfall durations and intensities

分别基于水分传感器 W1、W4、W6。在降雨 1、2 和 3 h 的过程中,不同降雨强度下的边坡体积含水率表现出波浪式的变化,在降雨 3 h 过程中,坡顶的体积含水率峰值最大,为 34.5%,高于上坡、下坡的 32.1%、31.8%。并且随着雨强的递增,含水率快速增长的趋势大概在 120 min(小雨)、90 min

(中雨)和 70 min(大雨)的时候结束。结束时小雨、中雨和大雨条件下的坡顶体积含水率分别为 27.1%、29.8%和 31.4%,与降雨结束后的峰值相差仅 5.5%、4.6%和 3.3%,可见雨强越大,差值越小。

降雨初期强风化泥岩边坡内部体积含水率较低,初始含水率仅为 16.9%,土体具有大孔隙性、亲水性,在强降雨条件下,雨水的入渗速率较大,降雨过程中边坡内部含水率直线升高。湿润锋后的土体饱和度升高,雨水入渗速率减慢,体积含水率的增长速率放缓。雨水在重力势的作用下继续入渗,上坡、下坡含水率分别为 28.7%、28.8%(小雨),31.3%、30.9%(中雨),32.5%、32.1%(大雨),坡面内部水分均表现出层状结构。

### 2.2 孔隙水压力变化规律

边坡不同降雨历时和降雨强度下的孔隙水压力变化曲线见图 4—6,坡顶、上坡、下坡孔隙水压力分别来自于孔隙水压传感器 F1、F4、F6,随着降雨时间和强度的增加,降雨 3 h 的孔隙水压力值分别为 0.73、1.06 和 1.31 kPa,远大于降雨 1、2 h,随着降雨时间的延长,强降雨导致的高孔隙水压力和较小雨强间的孔隙水压力差值越来越小;相同降雨条件下,孔隙水压力的大小与降雨强度呈正相关,其增长的速率也随雨强的变大而加快,不同雨强下孔隙水压力快速增长的时间同样大致在 120 min(小雨)、90 min(中雨)和 60 min(大雨)。

初始状态下的土体较为干燥,土体中的孔隙水压力小于大气压,因此初始孔压为负孔隙水压力。降雨初期,强降雨使雨水迅速下渗,坡体孔隙内水体积增加、水压快速升高。雨强的大小对边坡稳定性的影响较大,随着降雨历时的延长,各雨强下的边坡内部孔隙水压力增长速率变缓,降雨历时长短对最终边坡是否破坏至关重要。

### 2.3 边坡基质吸力和抗剪强度变化规律

边坡降雨 3 h 基质吸力变化曲线见图 7(a),随着降雨的进行,基质吸力逐渐减小,同样表现出“先急后缓”的变化趋势,降雨 3 h 后,小雨、中雨和大雨条件下的基质吸力由最初的 119.7 kPa 分别下降至 68.8、56.4 和 45.4 kPa,下降了 42.5%、52.9%和 62.1%,并且下降速率越来越快。随着降雨时间的延长,边坡饱和度随体积含水率的升高而增加,使土体的基质吸力发生变化。降雨结束后,体积含水率开始下降,基质吸力开始升高,由

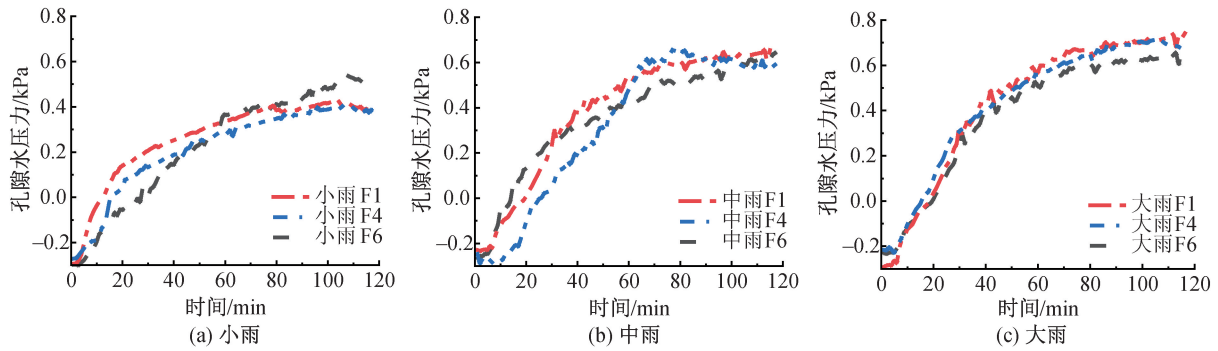


图4 边坡降雨1 h不同降雨强度下孔隙水压力变化规律

Fig. 4 Variation of pore water pressure on slope under different rainfall intensities after 1 hour

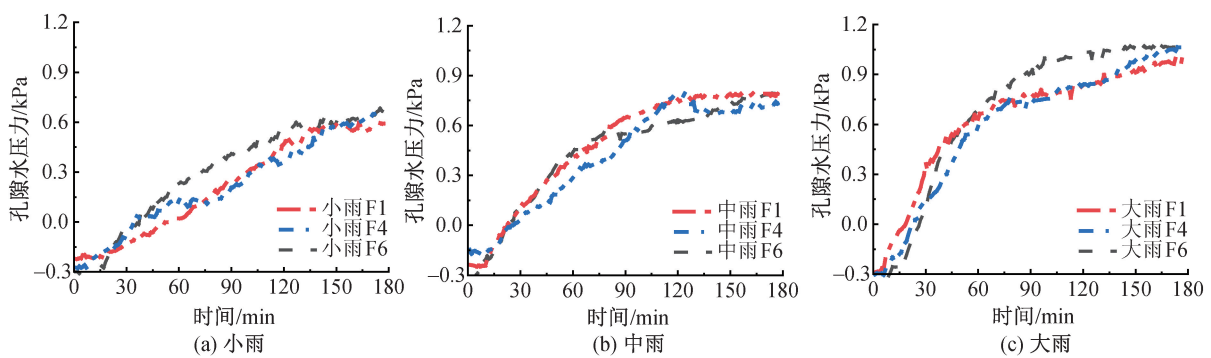


图5 边坡降雨2 h不同降雨强度下孔隙水压力变化规律

Fig. 5 Variation of pore water pressure on slope under different rainfall intensities after 2 hours

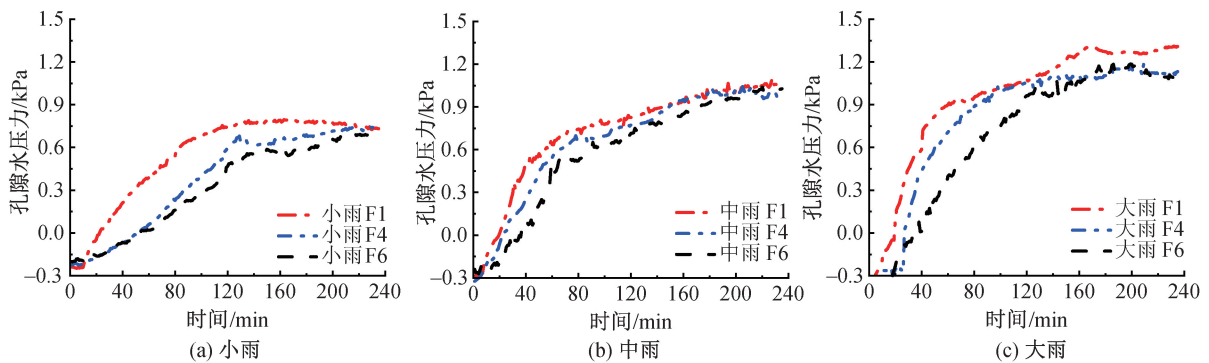


图6 边坡降雨3 h不同降雨强度下孔隙水压力变化规律

Fig. 6 Variation of pore water pressure on slope under different rainfall intensities after 3 hours

于颗粒间的孔隙水分减小,孔隙气压力逐渐增加,即坡体内部的基质吸力逐渐增加。

图7(b)为施加300 kPa竖向应力下的直剪试验得出的边坡内部抗剪强度随降雨历时的变化曲线,随着降雨的进行,边坡基质吸力减小,由基质吸力贡献的抗剪强度也不断减小。降雨初期,抗剪强度下降速率较快,雨强越大,下降速率越快;上坡、下坡定点处的抗剪强度由最初的168 kPa下

降至82、89 kPa,分别下降了51.2%、47%。随着时间的推移,抗剪强度下降速率逐渐变缓,最终降至56、64 kPa,仅下降了15.4%、14.9%。初期强降雨使坡体水分快速升高,基质吸力骤降,降雨初期抗剪强度下降程度远大于后期,边坡在突遇大雨或暴雨后失稳的风险增大。因此,边坡防护不仅要考虑最终的边坡稳定性,还要对降雨前期的边坡进行监测和防护,防止失稳破坏。

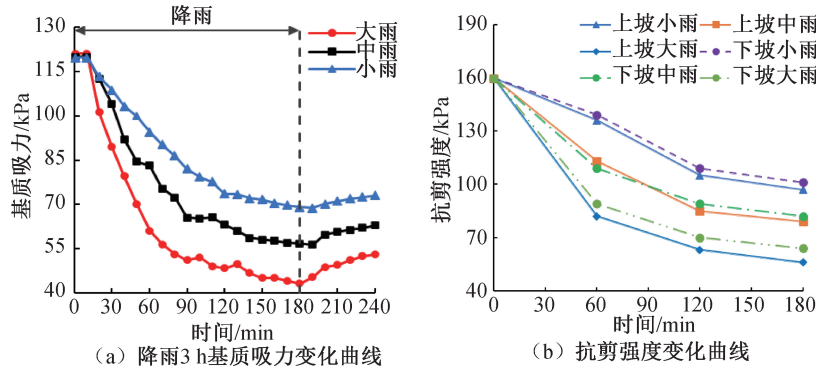


图 7 降雨 3 h 基质吸力和抗剪强度变化曲线

Fig. 7 Variation curve of matric suction and shear strength after 3 hours of rainfall

### 3 边坡破坏变化曲线及破坏特征

边坡破坏变化曲线如图 8 所示,降雨初期,边坡体积含水率迅速增加至 35.1%,随着土体饱和度的增加,体积含水率上升速率逐渐变缓;6 h 后坡顶体积含水率又加快上升,之后上坡体积含水率也快速升高;在接近 8 h 的降雨后坡顶基本饱和,下坡体积含水率缓慢上升,没有再出现快速升高的趋势。分析孔隙水压力变化可以发现,前期的孔隙水压力上升速率和体积含水率响应一致,上升速率较快,随着降雨的进行,入渗速率逐渐放缓。在 6 h 左右,坡顶孔隙水压力骤降至 1.1 kPa,之后又快速升高,各位置孔隙水压力差值逐渐减小。

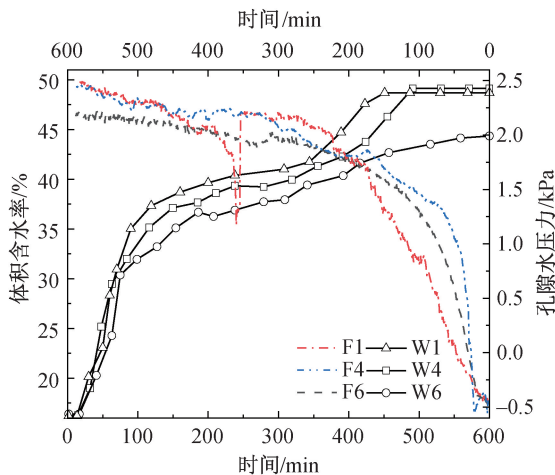


图 8 边坡破坏变化曲线

Fig. 8 Variation curve of slope failure

为了探究风化泥岩土质边坡破坏形式,进行了一组强降雨破坏试验,边坡破坏特征如图 9 所示,图 9(a)为边坡坡顶和上坡出现的张拉裂隙,裂隙较小,图 9(b)为降雨 8 h 后坡顶张拉裂隙逐渐扩大延伸并出现部分坍塌,图 9(c)为降雨 10 h 后



(a) 张拉裂隙



(b) 裂隙延伸和部分



(c) 边坡崩塌破坏

图 9 边坡破坏特征

Fig. 9 Failure characteristics of slope

边坡发生破坏。结合图 8 可知,降雨初期,内部体积含水率迅速升高,基质吸力骤降,产生了张拉裂

隙,裂隙逐渐向上移动,最后导致边坡表面出现裂缝,进一步加快了雨水的下渗,此时水在裂隙中形成优势流,导致裂隙下部土体迅速饱和,基质吸力消散,抗剪强度下降,进而加快了边坡破坏,最后导致贯通式崩塌的发生。

#### 4 结论

本文在室内开展了不同降雨历时和强度下的强风化泥岩边坡模型试验,分析了不同降雨条件下的强风化泥岩边坡对降雨入渗的响应规律,同时进行了边坡降雨破坏模型试验,初步获得了边坡破坏特征。主要结论如下:

1)降雨引发的强风化泥岩边坡内部基质吸力消散是失稳的本质原因,特定的降雨历时和强度是诱发边坡失稳的影响因素。

2)降雨强度主要对前期边坡的稳定性影响较大,降雨强度越大,前期边坡发生破坏的风险越高,会缩短边坡破坏的发生时间。

3)随着降雨的持续进行,降雨历时对边坡的影响越来越大,无论哪种降雨强度,边坡是否发生失稳破坏主要与降雨历时的长短有关。

4)边坡表面变形以坡顶张拉裂隙为主,连带发展至坡面,径流和冲沟不明显,边坡破坏形式为突然式贯通崩塌。

#### 参考文献:

- [1] 蒋明镜, 江华利, 廖优斌, 等. 不同形式节理的岩质边坡失稳演化离散元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 167-174.
- [2] 汪丁建, 唐辉明, 李长冬, 等. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 439-445.
- [3] PENG J, WANG S, WANG Q, et al. Distribution and genetic types of loess landslides in China[J]. Journal of

Asian Earth Sciences, 2018, 170(23): 329-350.

- [4] BHARDWAJ A, WASSON R J, ZIEGLER A D, et al. Characteristics of rain-induced landslides in the Indian Himalaya: A case study of the Mandakini Catchment during the 2013 flood[J]. Geomorphology, 2019, 330(11): 100-115.
- [5] WANG B, VARDON P J, HICKS M A. Rainfall-induced slope collapse with coupled material point method[J]. Engineering Geology, 2018, 239: 1-12.
- [6] 朱志男, 李慧亭, 陈羽, 等. 基于PFC-Geostudio耦合的边坡降雨变形破坏研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(4): 92-99+112.
- [7] 周峙, 张家铭, 宁伏龙, 等. 降雨入渗下裂土边坡水分运移时空特征与失稳机理[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 107-113.
- [8] 王永. 黄土边坡降雨条件下破坏机理室内模型试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [9] 武彩萍. 人工降雨条件下黄土边坡的室内模型试验研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2013.
- [10] 王宇. 降雨入渗诱发黄土边坡失稳室内试验及数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
- [11] 胡乾亮. 降雨对固化黄土边坡稳定性的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [12] 吕雷. 不同降雨条件下黄土边坡入渗规律研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
- [13] 曾铃, 陈佳艳, 刘杰, 等. 基于荧光示踪法的含裂隙带红黏土边坡渗流特性研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(3): 136-146.
- [14] 李卓, 何勇军, 李宏恩, 等. 前期降雨作用下边坡滑坡模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 400-405.
- [15] 许旭堂, 简文彬, 吴能森, 等. 降雨诱发残积土坡失稳的模型试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 270-279.
- [16] 孙三祥, 张云霞. 降雨及坡面径流模拟试验相似准则[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 93-98.

(责任编辑 张爱丽)