

## 乔灌木对台风暴雨型滑坡稳定性影响

于鑫, 聂闻, 简文彬, 谢伟, 芦松, 叶春阳

### Influence of trees and shrubs on the stability of landslides induced by typhoon rainstorm

YU Xin, NIE Wen, JIAN Wenbin, XIE Wei, LU Song, and YE Chunyang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202111004>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响——以湖南安化春风滑坡群为例

Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example

贺小黑, 彭鑫, 谭建民, 裴来政 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 96-103

#### 甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文纶, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7-14

#### 基于普适型仪器的滑坡监测预警初探——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例

Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: a case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province

侯圣山, 李昂, 陈亮, 冯振, 王立朝, 曹鹏, 刘军友, 郑浩, 李阳光, 黄鑫, 郭伟, 魏新平 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 47-53

#### 地理探测器在判别滑坡稳定性影响因素中的应用

Application of geographic detector in identifying influencing factors of landslide stability: A case study of the Jiangda County, Tibet

支泽民, 陈琼, 张强, 周强, 刘峰贵, 赵富昌, 陈永萍 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 19-26

#### 基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59

#### 基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202111004

于鑫, 聂闻, 简文彬, 等. 乔灌木对台风暴雨型滑坡稳定性影响 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 17-29.

YU Xin, NIE Wen, JIAN Wenbin, et al. Influence of trees and shrubs on the stability of landslides induced by typhoon rainstorm[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 17-29.

## 乔灌木对台风暴雨型滑坡稳定性影响

于鑫<sup>1,2</sup>, 聂闻<sup>1,2</sup>, 简文彬<sup>1</sup>, 谢伟<sup>2</sup>, 芦松<sup>2</sup>, 叶春阳<sup>2</sup>

(1. 福州大学紫金矿业学院, 福建福州 350108; 2. 泉州装备制造研究所, 福建泉州 362216)

**摘要:** 在降雨工况下, 乔灌木通过其根系对边坡体的加筋锚固和茎叶减少坡体被雨水冲刷, 对边坡稳定性产生了积极作用。然而台风暴雨季节, 台风又通过植被的摇曳使地表开裂, 强化了降雨入渗效果, 进一步使土体的基质吸力、黏聚力下降, 使边坡的稳定性降低。为了探索台风暴雨季节乔灌木对边坡起到正向作用还是反向作用, 文章通过室内模型试验和数值模拟进行量化分析, 比较有无台风作用和不同强度台风作用对边坡稳定性的影响。结果表明: 随着台风从无到有、由弱变强的过程中, 边坡体内孔隙水压力和含水率发生突变的时间不断提前; 同时施加台风暴雨耦合作用的滑坡相对于单纯降雨作用的滑坡, 其滑坡破坏的面积与体积更大, 且台风等级越强, 坡体的破坏的面积体积区域越大。通过 Geostudio 数值模拟软件进行验证, 比较模拟边坡的稳定性发现: 在无台风作用下初始稳定性系数最大且下降速度最慢, 台风作用次之, 强台风作用下最差。

**关键词:** 台风暴雨; 安溪县; 滑坡; 乔灌木; 图像识别; 稳定系数

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)01-0017-13

## Influence of trees and shrubs on the stability of landslides induced by typhoon rainstorm

YU Xin<sup>1,2</sup>, NIE Wen<sup>1,2</sup>, JIAN Wenbin<sup>1</sup>, XIE Wei<sup>2</sup>, LU Song<sup>2</sup>, YE Chunyang<sup>2</sup>

(1. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China; 2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou, Fujian 362216, China)

**Abstract:** Under the condition of rainfall, trees and shrubs' leaves can reduce the slope being washed and anchoring the slope by their roots, which had a positive effect on the slope stability. However, in typhoon rainstorm season, typhoon cracks the ground through swaying vegetation, strengthens the effect of rainfall infiltration, and further reduces the matrix suction and cohesion of soil, to reduce the stability of slope. In order to explore whether trees and shrubs have a positive or negative effect on slope during typhoon rainstorm season, this paper conducted quantitative analysis through indoor model experiment and numerical simulation, comparing the influence of no typhoon, typhoon and typhoon with different intensity on slope stability. It was found that the abrupt change time of pore water pressure curve and water content curve was advanced with the typhoon developing from nothing and becoming stronger from weak. At the same time, the effect of landslide with typhoon coupled rainstorm compared the simple rainfall, the area and volume of landslide damage were larger, and the stronger the typhoon

收稿日期: 2021-11-02; 修订日期: 2022-02-07

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41861134011)

第一作者: 于鑫(1996-), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治、灾害监测预警方面的工作。

E-mail: 1849902604@qq.com

通讯作者: 聂闻(1982-), 男, 重庆人, 研究员, 博士研究生, 主要从事地质灾害防治、灾害监测预警、尾矿坝预警预测等方面的研究。

E-mail: wen.nie@vip.tom.com

grade was, the larger the area and volume of landslide damage were. Compared the stability coefficient of simulated slope by Geo-Studio numerical simulation software verifying, the initial stability coefficient was the largest and the decline speed was the slowest under the effect of no typhoon, the typhoon was bad and under the strong typhoon condition was the worst.

**Keywords:** typhoon rainstorm; Anxi County; landslide; trees; landslide identification; safety margin

## 0 引言

在众多自然灾害中,滑坡已经成为了一种威胁人类生存的自然问题,其引起的危害仅次于地震,成为第二大自然灾害。2020 年全国共发生地质灾害 7 840 起,其中滑坡灾害 4 810 起<sup>[1]</sup>。台风暴雨型滑坡又是众多滑坡中一种典型性的滑坡。台风暴雨型滑坡主要发生在东南沿海尤其是闽东南地区<sup>[2]</sup>,台风暴雨天气将带来地区性的强降雨与大风<sup>[3]</sup>,降雨因素是导致滑坡发生的重要因素,而强台风作用又增加了滑坡的发生<sup>[4]</sup>。因此,台风暴雨型滑坡往往比降雨型滑坡具有更强的突发性和破坏性。而对于台风暴雨型滑坡的研究,部分的研究局限于台风引起的大降雨对滑坡的稳定性影响,而忽略了台风因素对滑坡的其他影响。台风主要通过作用于植被间接影响滑坡的发生,为探究台风暴雨季节植被对滑坡发生的作用,部分学者展开了台风暴雨季节植被对坡体影响的研究。李凯等<sup>[5]</sup>通过 ArcGIS 遥感技术对不同植被覆盖率下的滑坡进行统计,发现降雨型滑坡在植被覆盖率越高的地区滑坡的发生频率越低,植被覆盖越低的地区滑坡发生频率越高;李国旗等<sup>[6]</sup>对海岸边坡防护林进行研究,计算植被在不同高度下风的应力分布情况,研究在台风作用下,这些植被所受的应力情况;闫金凯等<sup>[7]</sup>通过研究台风作用下,边坡产生的裂缝对边坡稳定性影响,发现产生裂缝越严重边坡稳定性越差;王照财<sup>[8]</sup>等人通过室内模拟试验,对台风暴雨工况下的草本,乔木,灌木覆盖的滑坡展开研究,发现在同一种台风暴雨工况下,乔木覆盖条件下滑坡破坏最严重。

文章拟研究在台风暴雨季节条件下,研究台风作用对滑坡稳定性影响,并分别评估台风作用下植被根茎对滑坡土体加筋锚固以及对土体的破坏效果。为实现研究目的,研究选取了福建省泉州市安溪县尧山村的残积土浅层滑坡为研究对象,设置了室内模拟试验对不同工况条件下的边坡展开研究,通过图像识别、设备监测等手段,探究乔灌木在台风暴雨型滑坡演化中的作用,为闽东南台风暴雨型滑坡的防治提供可靠的依据。

## 1 区域概况

福建省位于太平洋西岸,属于亚热带季风气候,降雨量充沛,光热条件充足,7—9 月受热带气旋影响显

著,台风暴雨灾害频发。且福建省多山地丘陵地区且岩体风化严重,土层分布多为残积性土,这大大增加了滑坡发生的概率<sup>[9-10]</sup>。

文章选取泉州市安溪县尧山村作为研究对象,监测地区土层由上到下依次为崩坡积碎石土、残积性黏土、砂土状强风化凝灰岩、中风化凝灰岩。岩土参数见表 1。该地区灾害发生频率高,影响范围大,尤其是在 2016 年,受 14 号台风“莫兰蒂”和 17 号台风“鲇鱼”的影响,滑坡变形迹象更加明显。尧山村滑坡主要发生在坡积碎石土和残积黏性土的土层之间,该土层结构疏松,渗透性大,渗透系数为  $2.61 \times 10^{-4} \sim 2.97 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ,下层为风化的凝灰岩,结构性稳定。滑坡所在区域,坡度为  $26^\circ \sim 35^\circ$ ,地下水丰富,滑坡所在区域的地理位置如图 1 所示,图 2 为滑坡体地质剖面,表 1 为滑坡体的岩土力学参数。

表 1 岩土力学参数

Table 1 The geotechnical mechanical parameters

岩石性质	重度 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗剪强度		渗透系数 ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	泊松比	杨氏模量 ( $\text{kPa}$ )
		黏聚力/ $\text{kPa}$	内摩擦角/ $(^\circ)$			
坡积土	18.5	14.5	27.8	$1.5 \times 10^{-4}$	0.32	$5.1 \times 10^3$
残积土	17.7	17.0	26.2	$1.01 \times 10^{-5}$	0.41	$3.2 \times 10^3$
强风化凝灰岩	21.0	35.0	32.0	$7.52 \times 10^{-5}$	0.28	$4.2 \times 10^4$
中风化凝灰岩	23.0	70.0	35.0	—	0.25	$1.5 \times 10^6$

## 2 台风暴雨型滑坡模拟试验

### 2.1 相似性模拟试验设计

为了研究台风暴雨因素在滑坡演化过程中所起的作用<sup>[11-12]</sup>,本文根据相似性原理进行室内滑坡模拟试验,室内设备包括:模型箱,可调控降雨模拟设备,孔隙水压力传感器,含水量传感器,三目相机,造风机等设备。

根据实际工况的滑坡区域大小、勘察资料、岩土性质等信息<sup>[13]</sup>,本文选取的最佳相似比为  $1:100$ ,即  $n=100$ 。其中模型尺寸相似比为  $1/n$ ,降雨强度相似比为  $\sqrt{n}$ ,内摩擦角相似比为  $1$ ,降雨历时相似比为  $1/n$ ,黏聚力的相似比为  $n$ ,参数对比见表 2。通过多组复杂的配比试验,最终确定用 48% 的黏性红土,24% 的河砂,24% 的标准砂,2% 的石粉,2% 的膨胀土配制相似性材料(含水率 15%)。地质勘察报告中一条长度为 135 m,厚度为 20 m

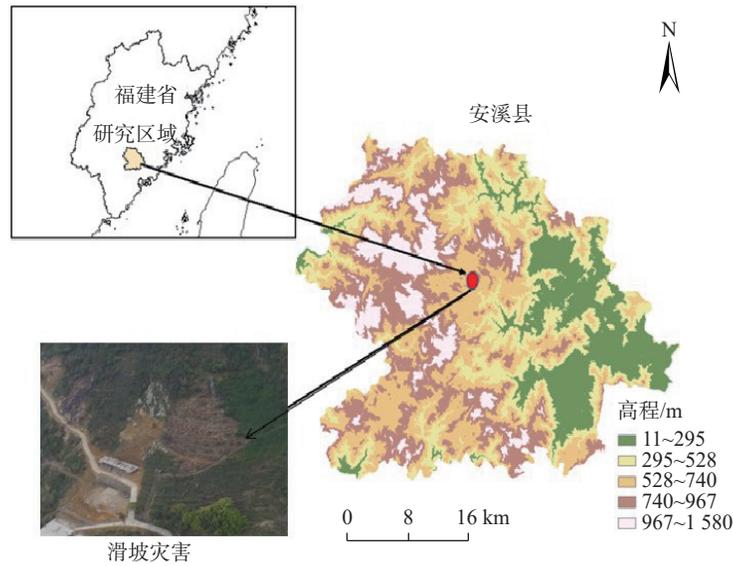


图 1 安溪县尧山村滑坡区位

Fig. 1 Landslide location in Anxi County, Yaoshan Village

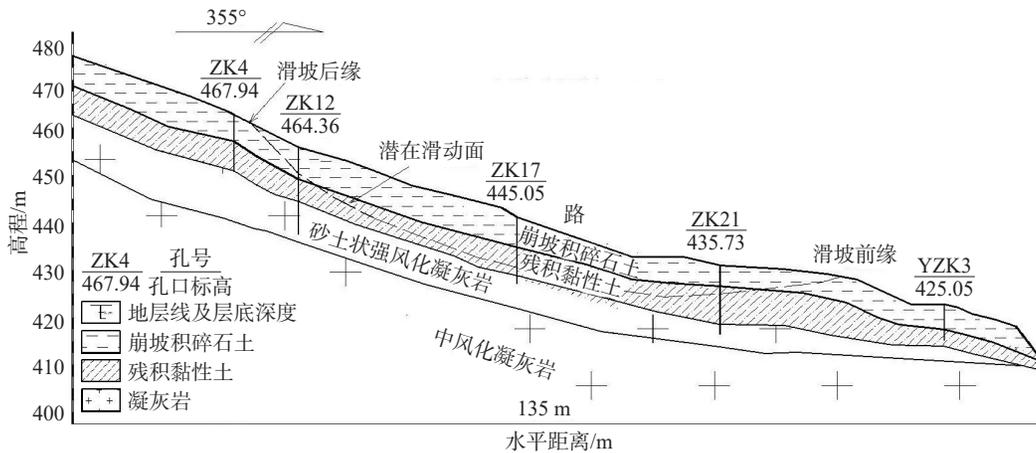


图 2 滑坡地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of landslide

的稳定中风化凝灰岩层, 而滑坡的发生主要在坡积土和残积土层, 以及考虑节约试验成本和试验难度的问题, 故将凝灰岩层最厚处考虑为 40 m, 因此相似模型中最厚的基岩层设定为 0.4 m, 滑坡发生的相似性土层厚度为 0.22 m, 设置模型长度和高度为 1.35 m×0.62 m。然后对模型进行分层压实, 并分别在土体的上、中、下坡

三个位置布置了含水率传感器 A、B、C, 以及孔压传感器 A1、B1、C1。然后将堆载模型静置 12 h, 保证土体含水率均匀分布。试验前在土坡的前方放置了一台高精度的三目相机设备, 用于监测滑坡的面积体积变化情况, 室内模拟试验装置如图 3 所示。

表 2 材料参数对比

Table 2 Comparison of material parameters

物理力学参数	原型材料	相似材料
重度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.77 ~ 1.85	1.84
渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	1.01×10 <sup>-5</sup> ~ 1.5×10 <sup>-4</sup>	8.5×10 <sup>-4</sup>
黏聚力/kPa	14.5 ~ 17.0	4.5
内摩擦角/(°)	26.2 ~ 27.8	30.2

## 2.2 试验工况

东南沿海地区台风暴雨灾害频发, 该地区深受台风暴雨型滑坡灾害影响<sup>[14-15]</sup>。本次物理模型试验, 选取福建省过境台风作用比较强烈的 2016 年的“莫兰蒂”台风进行模拟。该台风登陆风速为 15 级, 过境安溪县时, 风速范围为 12 ~ 13 级, 在安溪境内影响时间为 4 ~ 5 个小时, 降雨强度为 300 mm/d 左右, 给安溪县带来了 2 ~ 3 d 的强降雨天气。本次试验所模拟的关键在于台风作

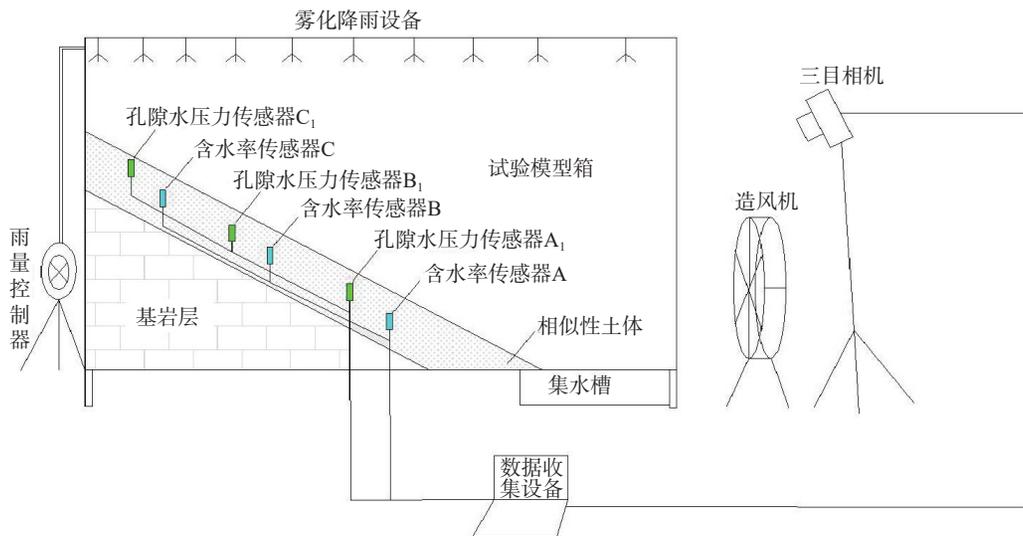


图 3 模型装置布置

Fig. 3 Layout of model device

用对植被的摇曳作用使边坡土体松动,加速了降雨的入渗,从而导致土体稳定性降低。

对于风荷载的施加,选取了位于模型槽外 0.5 m 处放置大功率造风机<sup>[11]</sup>,模拟迎风面施加强风作用,在坡面范围内作用风荷载,评估有无台风作用对滑坡发生的影响,以及不同等级台风对滑坡发生的影响。本研究分别考虑了无风作用、台风作用、强台风作用三种试验工况,其中台风作用时间为 45 min(从试验可行性、有效性等方面考虑,在试验过程中对施加风速,时长均有适当的调整)。在模型箱中模拟降雨强度为 60 mm/h,持续降雨时间为 3 h 左右。对于坡体的植被选择,根据查阅资料显示,安溪县植被分布情况为:乔木、灌木、草本植物、藤本植物、禾本植物各占植物总数的 31.04%, 24.83%, 37.93%, 3.45%, 2.76%, 其中乔木以马尾松为主,马尾松的高度为 18 ~ 20 m<sup>[16]</sup>。根据模型相似性原理选取植被的平均高度为 0.2 m 左右的小型灌木(接骨木),该种植物茎叶发达,根系发育较好<sup>[17]</sup>,用该植被模拟安溪县的植被,具体的试验工况见表 3 所示。

表 3 试验工况参数

Table 3 Parameters of experimental conditions

工况	降雨强度 /(mm·h <sup>-1</sup> )	风速 /(m·s <sup>-1</sup> )	降雨持续时间 /h	风力持续时间 /min	植被情况
I	60	0	3	45	接骨木
II	60	5.6 ~ 5.8	3	45	接骨木
III	60	7.3 ~ 7.6	3	45	接骨木

### 2.3 图像识别技术的应用

近年来,三维图像识别技术在滑坡的识别监测过程

中已经得到了应用<sup>[18-19]</sup>。本次试验中使用三目相机作为图像识别的关键性设备,用于记录边坡在整个试验过程中随时间的变化情况<sup>[20]</sup>。三目相机的工作原理是通过激光进行测距,对坡面每一个点进行扫描处理,转换计算将物体表面点映射到三维坐标系上,坐标系统 A-xyz(图 4)任意一点的三维坐标系可以表示为:(x, y, z)<sup>[21]</sup>,表达式为公式(1),而三目相机识别技术是基于时间测量原理的,可以记录坡体随时间的变形和蠕动,通过三目相机对坡体变化地记录,可以识别滑坡的变形区域,以及通过点云的位移变化,计算出滑坡在整个发生过程中面积和体积随时间的变化量。

$$\begin{cases} x = l \cos \varphi \cos \theta \\ y = l \sin \varphi \cos \theta \\ z = l \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $l$ ——相机对目标体的测距;

$\theta$ ——纵向扫描角度值;

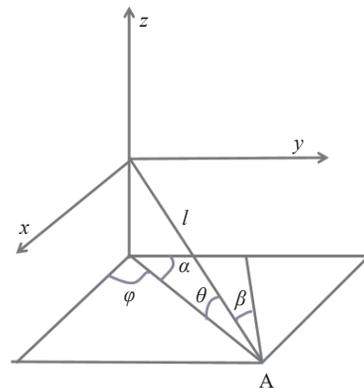


图 4 三维坐标系

Fig. 4 Three-dimensional coordinate system

$\varphi$ ——横向扫描角度值;  
 $x, y, z$ ——象限坐标。

通过三目相机进行点云数据记录如图 5(a), 在滑坡发生过程中点云数据会有两个显著的变化: 1) 滑坡发生破坏与未破坏区域颜色发生变化; 2) 点云的深度信息会

发生变化。通过这两种变化, 实现在滑坡破坏过程中, 有效区分破坏和未破坏区域, 并量化了破坏区域面积和体积。滑坡的面积体积计算中, 将滑坡分为上、中、下三个部分分别对应图中的  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ , 进行滑坡变化量的统计, 如图 5(b) 所示。

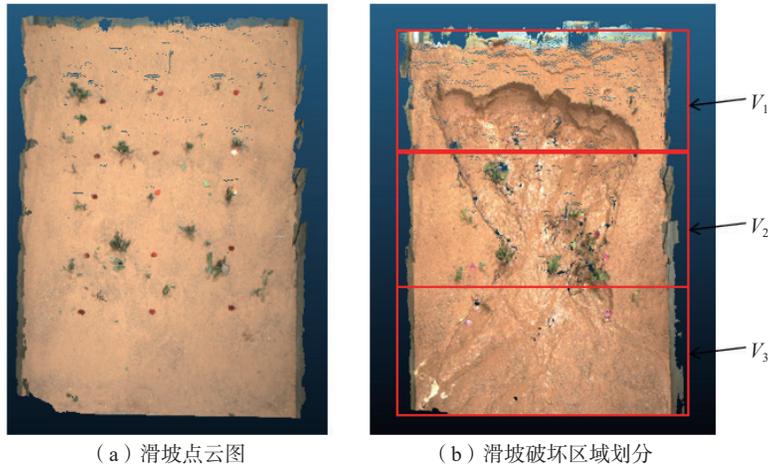


图 5 滑坡点云图和滑坡破坏区域划分

Fig. 5 Landslide point cloud map and division of landslide damage area

### 3 试验结果分析

#### 3.1 滑坡发生中湿润峰的演化过程

以工况 I 为例, 如图 6 所示, 最初的降雨以垂直入渗为主, 入渗量较大且地表层最先出现饱和区域;

12 min 后湿润峰向坡体内部延伸, 此时坡面径流量减少; 25 min 后坡脚开始饱和; 38 min 后坡脚完全饱和, 此时水继续向坡体内部渗透, 坡体含水量越来越大; 62 min 后坡体仅有坡顶处有一小部分未达到饱和, 坡脚区域出现失稳状态; 70 min 后坡体完全饱和。

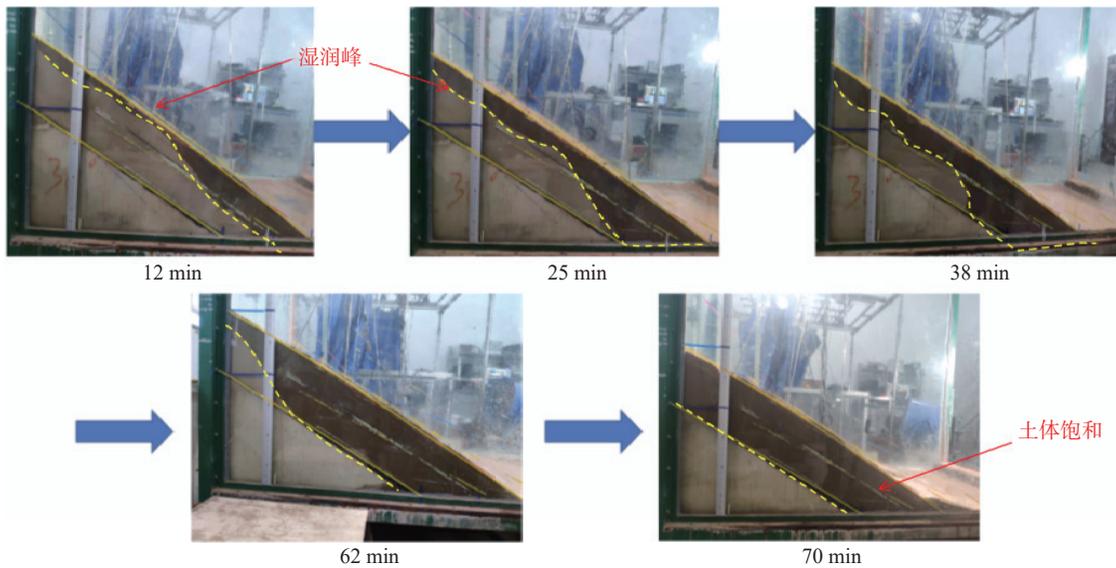


图 6 滑坡湿润峰变化情况

Fig. 6 Change of wet peak of landslide

#### 3.2 无台风作用下的滑坡演化过程

试验只在降雨为 60 mm/h 的工况条件下进行的(工

况 I), 如图 7 所示。滑坡整个过程可以划分为第一阶段的缓慢破坏, 第二阶段的加速破坏和第三阶段破坏完

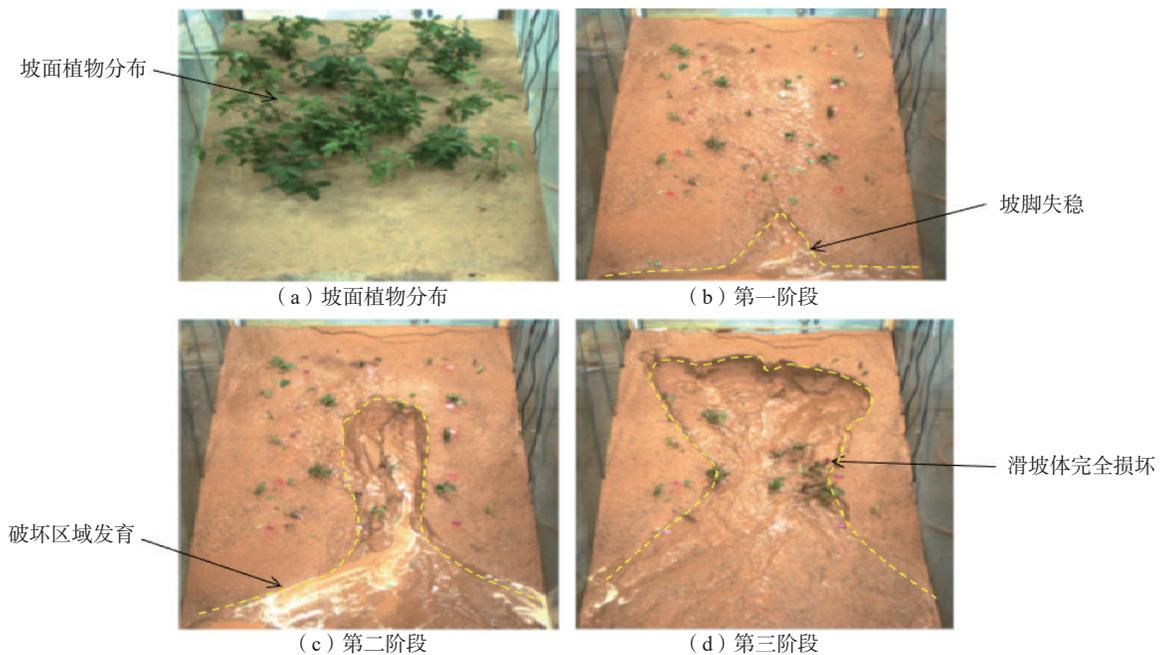


图 7 暴雨条件下滑坡演化过程

Fig. 7 Evolution process of landslide under rainstorm condition.

成阶段。

在缓慢破坏阶段, 试验初期以垂直入渗为主, 地表径流较少。通过孔隙水压力曲线图 8(c) 可以看到在试验中位于坡脚和坡中的 A1, B1 孔隙水压力值要明显要大于坡顶 C1 处, 且差距有进一步变小的趋势。含水率曲线 8(a) 可以看出, 这一阶段土体含水量变化小。通过滑坡破坏体积变化曲线图 8(b) 可以看出, 前期滑坡的破坏区域比较小。

在加速破坏阶段, 随着降雨过程继续, 破坏区域首先出现在坡脚, 随后破坏区域不断扩大并逐渐蔓延到整个滑坡体。从孔隙水压力曲线图 8(c) 可以看出在 12:00 左右孔隙水压力值开始增长, A1, B1 孔压迅速增加, C1 孔压缓慢的增加。含水量曲线图 8(a) 可以看出试验在进行到 11:50 的时候坡体含水率从 15% 迅速变为 43%, 发生这一变化的原因是坡体大面积破坏导致雨水涌入坡体内部, 到 12:42 之后保持稳定, 整个坡体基本饱和。孔隙水压力和含水率变化基本保持一致, 在变化最为明显的 12:00—13:00 左右滑坡破坏最为明显, 破坏规模也是最大的, 通过对应的滑坡破坏体积累计变化图 8(b) 可以看出, 该时期滑坡中、上部位变化量最大。

在滑坡完成阶段, 含水率曲线, 孔隙水压力变化基本保持稳定, 滑坡破坏的增量也很少, 滑坡破坏基本完成。

### 3.3 台风作用下的滑坡演化过程

为了评估植被在台风暴雨耦合作用下对边坡的影

响(工况 II), 在物理试验边坡中栽种 20 cm 左右高度的接骨木, 均匀分布在试验滑坡上, 以相似工况中的乔木。在距离模型箱 50 cm 左右放置造风机, 先模拟台风作用, 然后用模型箱内的雾化喷头模拟降雨作用。在整个台风暴雨期间可以观察到, 植被在风的作用下剧烈摇晃, 坡体表面形成了明显的地裂缝, 如图 9 所示。在后期图像处理中, 为了减少后期植被在点云计算面积体积过程中造成较大的误差, 在施加风条件结束后将植被地上部分剪除只保留地下根茎。

缓慢破坏阶段如图 10(a) 所示早期土体的含水量变化微小, 图 10(c) 中孔隙水压力曲线表明孔隙水压力在降雨之后维持一个缓慢增加的过程, 直到滑坡破坏开始增加。通过图 10(b) 中体积累计曲线可以看出坡体破坏体积累量相对较小。

加速破坏阶段, 由于台风影响, 植被根系附近的土体有明显的开裂, 土体破坏主要沿植被摇曳产生的裂缝发展。与之前的无台风暴雨耦合作用的滑坡比较发现, 台风暴雨耦合作用的滑坡发生更加迅速, 范围更加广泛。图 10(c) 中未施加台风作用的滑坡的孔压监测曲线从平稳状态到达迅速变化的过程大约用时为 1 h 40 min 左右, 而施加台风作用的滑坡的孔压完成这个过程仅需 50 min 左右。通过图 10(a) 中含水率曲线比较可以发现明显的变化, 三个传感器测的含水率是依次达到饱和, 坡脚含水率传感器 A 是最先感应, 接着是坡中传感器 B, 最后是坡顶的传感器 C。通过图 10(b) 中体

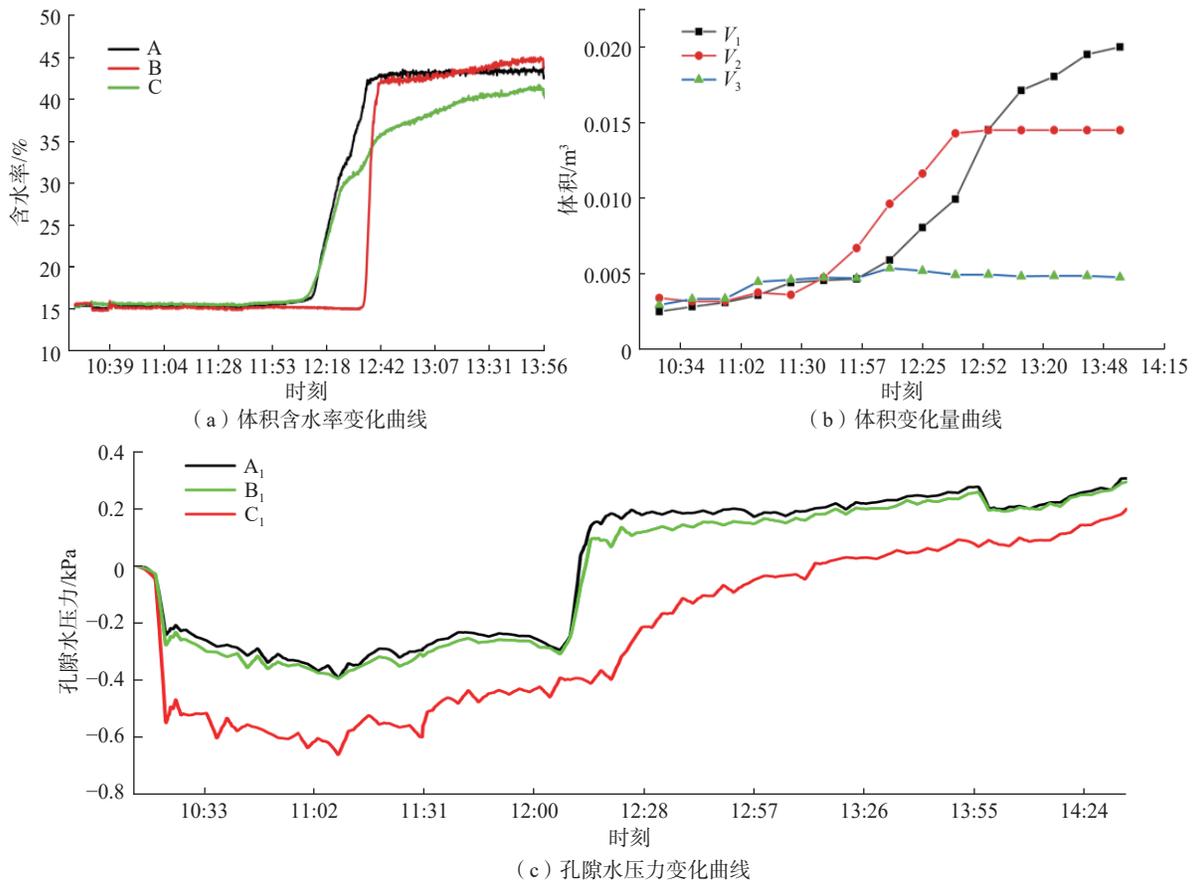


图 8 暴雨作用下滑坡试验监测数据图

Fig. 8 Monitoring data of landslide experiment under rainstorm condition



图 9 台风暴雨作用下的滑坡演化过程

Fig. 9 Evolution process of landslide under typhoon and rainstorm condition

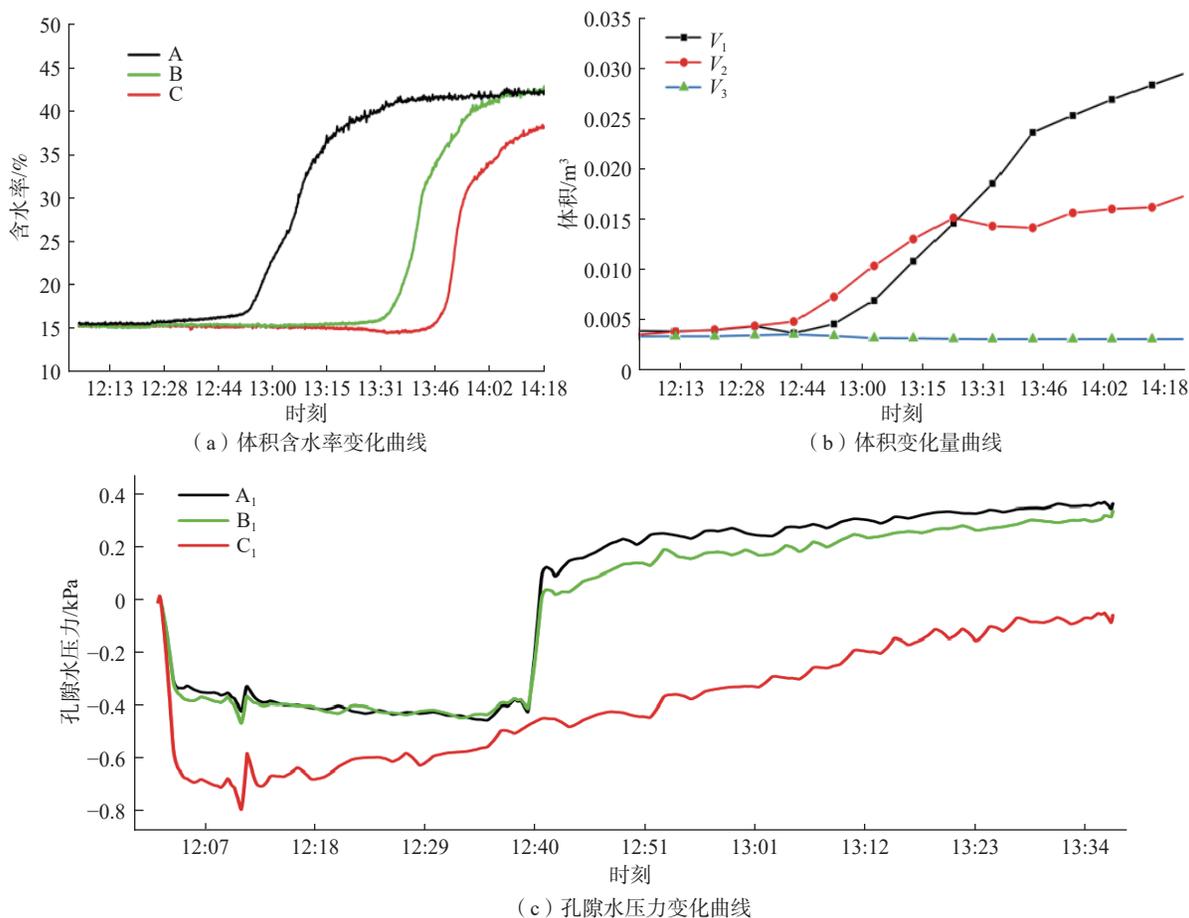


图 10 台风暴雨作用下滑坡试验监测数据图

Fig. 10 Monitoring data of landslide experiment under typhoon and rainstorm condition

积变化曲线可以看出,施加台风作用的滑坡体积变化  $V_1$ 、 $V_2$  线的增长速率比未施加台风的  $V_1$ 、 $V_2$  速率明显增加,且  $V_1$  的体积变化量明显要大于之前未施加台风因素的  $V_1$ 。

滑坡完成阶段,随着时间的推移,可以发现孔隙水压力曲线、含水率曲线、累计体积变化曲线基本保持在一个相对稳定的状态。通过观察试验情况发现,台风暴雨因素共同作用的滑坡,在相同的作用时间内滑坡破坏的范围更大,破坏更严重。

### 3.4 强台风作用下的滑坡演化过程

在强台风作用下的滑坡模拟试验过程如图 11 所示(工况 III)。

缓慢破坏阶段,强台风作用与台风作用工况条件下比较图 12(c)中孔隙水压力变化曲线,图 12(a)中体积含水量变化曲线,图 12(b)中体积变化量曲线三者的变化的情况基本相同,维持在一个相对稳定的状态,但强台风作用对植被摇曳的更加剧烈。

加速破坏阶段,强台风作用下,植被附近产生更多的裂缝,裂缝扩张的范围更广程度更大,如图 11(d)。

图 12(c)中孔隙水压力曲线从开始的相对稳定的状态到进入急速变化状态的过度时间更短了,从平稳到进入急速变化的时间大约为 30 min 左右,相比于之前的台风作用影响的这段时间缩短了约 20 min 左右。含水率曲线图 12(a)显示含水率变化时间提前,累计体积变化曲线图 12(b)体积变化曲线速率骤增且体积的变化量较之前更大。

滑坡完成阶段,随着时间的推移,可以发现孔隙水压力曲线、含水率曲线、累计体积变化曲线三者基本保持在一个相对稳定的状态。相比较于台风降雨因素共同作用的滑坡,在相同的作用时间内强台风作用下的滑坡破坏的范围更广,破坏程度更大。

### 3.5 不同工况滑坡破坏面积体积比较

通过图像识别技术对滑坡发生过程中破坏的面积和体积随时间变化量进行统计如图 13、图 14 所示,其中  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  和  $V_a$ 、 $V_b$ 、 $V_c$  分别代表无台风作用,台风作用,强台风作用下的滑坡的面积和体积破坏变化量。结果显示在整个降雨过程中,施加台风暴雨耦合作用的滑坡相对于单纯降雨作用的滑坡,其滑坡破坏的面积与体



图 11 强台风作用下的滑坡演化过程

Fig. 11 Evolution process of landslide under strong typhoon condition

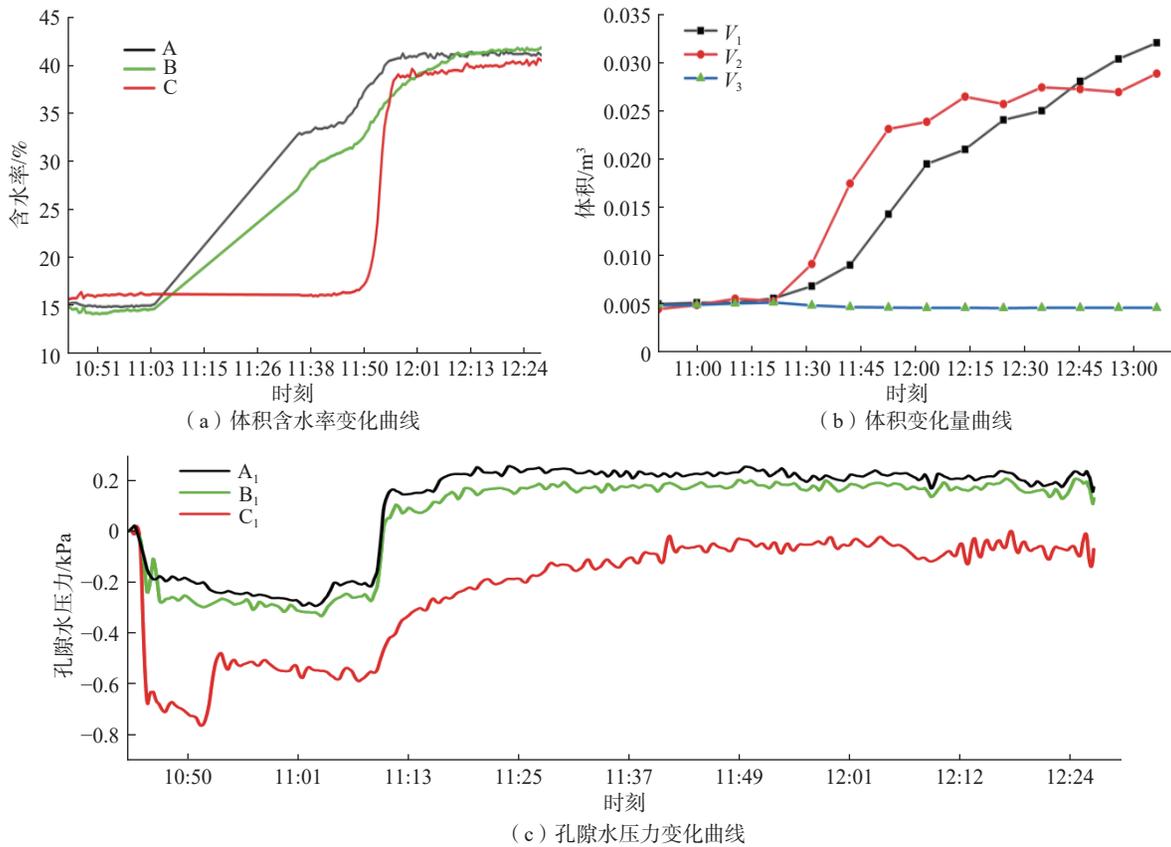


图 12 强台风作用下滑坡试验监测数据图

Fig. 12 Monitoring data of landslide experiment under strong typhoon condition

积破坏量更大。这表明在台风暴雨耦合作用下, 植被在滑坡发生过程中对滑坡体的加固作用要明显弱

于植被对坡体的破坏作用。比较了不同等级的台风作用可以发现, 台风等级越强, 坡体的破坏的面积体积区

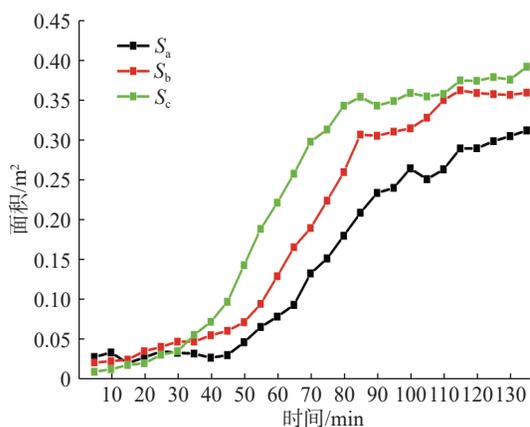


图 13 累计面积变化曲线

Fig. 13 Variation curve of cumulative area

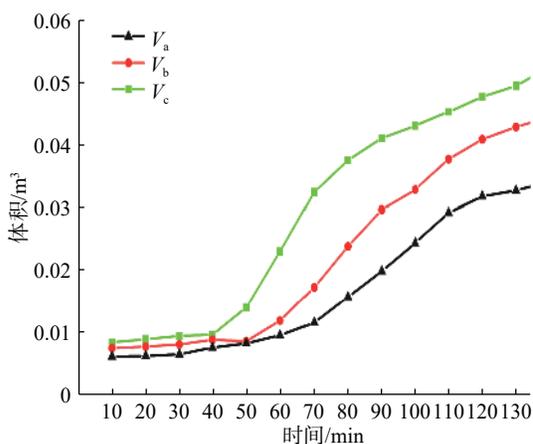


图 14 累计体积变化曲线

Fig. 14 Cumulative volume change curve

域越大,说明台风因素加剧滑坡的发生。

### 4 数值模拟结果

#### 4.1 研究思路

台风通过摇曳坡体上的植被使坡体产生地裂缝。这些裂缝大大增加了降雨入渗的速度和入渗量,直接导致坡体水含量增加,使孔隙水压力持续快速增加,进一步使得土体基质吸力、土体黏聚力和抗剪强度降低。但台风作用使坡体产生的地裂缝往往深度大,延伸长,分布范围广,具有一定的随机性,而在数值建模中是很难将这些裂缝模拟出来的,所以本文考虑将坡体产生的裂缝等效成土体的强度的降低和渗透性的增加。

#### 4.2 模型构建

应用 Geo Studio 有限元软件进行建模,选取基于 Van Genuchten 法的饱和-非饱和渗流模型进行计算,基于工程报告等相关资料,试验分析各土层的强度参数信息以及工程经验获取了土层的渗透率,物理力学参数

等。对于在台风破坏作用下土的渗透性等参数设置,通过查询相关文献,经验值和不断的调试得到的<sup>[22-29]</sup>。对台风暴雨型滑坡试验的数值模拟,进行以下的设定:(1)采用真实边坡尺寸,长为 135 m,高度为 80 m,土层分布由上到下依次为:坡积土,残积土以及强风化和中风化凝灰岩层,其中上层为 8~9 m 的坡积土,中间层为 12~13 m 的残积土,下层为强风化凝灰岩和 中风化凝灰岩层(图 15)。(2)对无台风工况,台风工况,强台风工况三种条件下的土层设定了相应的土体饱和渗透系数,分别为  $8.5 \times 10^{-4}$  cm/s、 $4.05 \times 10^{-3}$  cm/s、 $9.05 \times 10^{-3}$  cm/s, C 值分别为 14.5 kPa、11.8 kPa、9.3 kPa。(3)降雨工况模拟了 300 mm/d 的特大暴雨,时间为 72 h,作用于边坡表面。

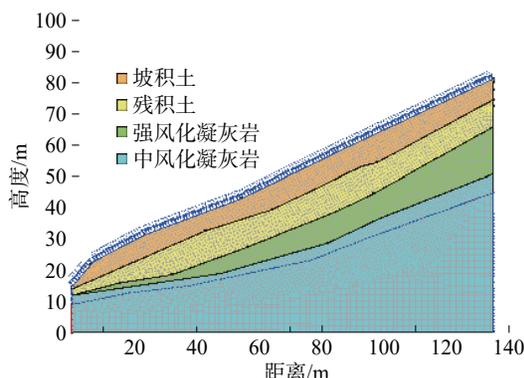


图 15 边坡数值模拟模型

Fig. 15 Numerical simulation model of slope

#### 4.3 滑坡体积含水量模拟

以工况 II 为例展示模拟效果,降雨进行到 3.6 h 土体表面出现饱和,如图 16(a);当降雨持续进行,雨水不断渗透,使土体含水率逐渐升高,17.8 h 坡脚饱和,如图 16(b);随着降雨持续土体饱和度越来越高,当模拟进行到 72 h 后可以发现边坡土体基本饱和,地下水位线升高,如图 16(c),该结果与降雨模拟边坡试验的效果基本一致。

#### 4.4 滑坡稳定系数分析

通过数值模拟生成的边坡稳定性系数如图 17,因为台风作用导致土体的表层破坏,使得边坡的初始稳定系数不同。三种工况下的边坡在开始时稳定系数都是大于 1 的,在 27 h 前稳定系数是稳定不变的,在 27 h 之后稳定系数开始降低,无台风作用下的滑坡的稳定系数从 1.309 降低到 0.968,台风暴雨耦合作用下的滑坡稳定系数从 1.269 降低到 0.856,强台风暴雨耦合作用下的滑坡稳定系数从 1.235 降低到 0.820。通过稳定系数可以看出,强台风作用下的滑坡稳定性是最差的,实

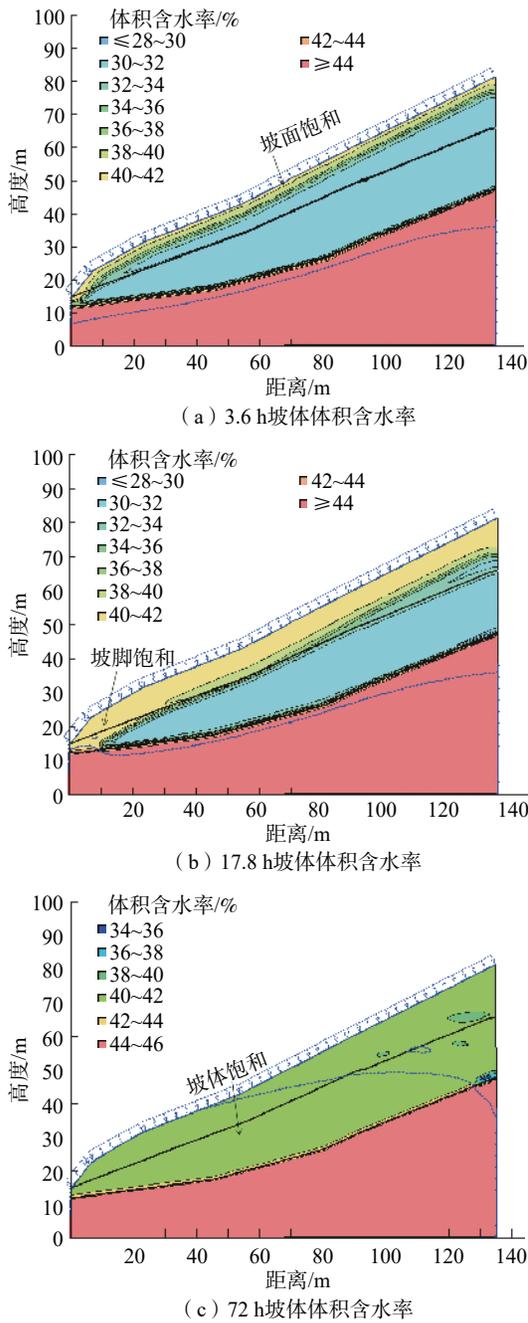


图 16 在台风暴雨条件下的土体体积含水量随时间的变化过程图  
 Fig. 16 The variation process of soil water content with time under typhoon rainstorm condition

际模型试验中, 强台风作用下的滑坡破坏也是最严重的, 其次为台风作用下的滑坡, 无台风作用下的滑坡破坏程度是最低的。

### 5 模型试验与数值模拟比较分析

通过比较无台风作用、台风作用、强台风作用的暴雨条件下的滑坡试验, 通过图像识别对滑坡的面积与体积进行计算, 可以发现强台风作用下的滑坡破坏面积体

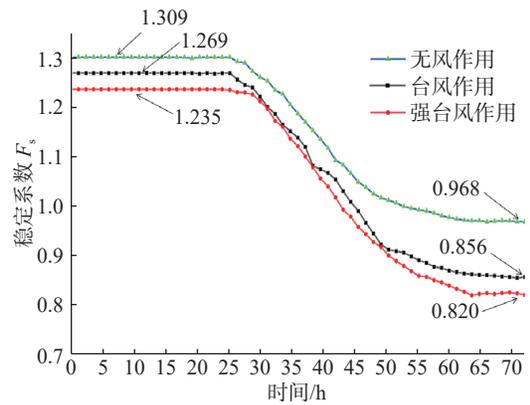


图 17 稳定系数变化曲线

Fig. 17 Safety factor variation curve

积是最大的, 台风作用次之, 无台风作用最小, 监测的孔隙水压力曲线与含水率曲线也可以很好的符合这一现象。

利用数值模拟对滑坡试验的现象进行分析, 数值模拟中滑坡的体积含水率可以很好的吻合试验中降雨入渗的过程土体的含水变化。生成的不同条件下的滑坡稳定系数的变化情况能较好的与模型试验中不同条件下滑坡破坏情况匹配。

通过查阅相关文献<sup>[30-33]</sup>可以发现, 在台风暴雨工况下坡体产生的裂缝会加速滑坡的发生, 裂缝破坏越严重滑坡发生的规模也越大, 本文的试验也正好验证了这一现象。

### 6 结论

本文通过物理模型试验与数值模拟对台风暴雨型滑坡进行研究得出以下结论:

(1) 通过模型试验的现象, 可以发现在降雨初期, 降雨以垂直入渗为主, 地表的径流量较少, 坡体的破坏量很少; 随着降雨的持续进行, 在坡脚处首先出现破坏失稳, 随之向整个坡体发展, 可以发现坡脚失稳之后边坡的破坏速度要明显加快。

(2) 通过试验监测数据, 有台风和无台风作用的滑坡的孔隙水压力监测数据和含水率监测数据发现, 有台风作用的滑坡孔隙水压和含水率曲线发生突变的时间要明显早于无台风作用的滑坡, 说明台风作用加剧了滑坡的发生; 通过比较强台风和台风作用的滑坡发现, 强台风作用下的孔隙水压力和含水率曲线发生突变的时间要明显早于台风作用下的滑坡, 说明台风等级越强, 越能加剧滑坡的发生。

(3) 通过图像识别与数值模拟结果, 比较不同工况下滑坡体积和面积随时间的变化情况, 发现滑坡破坏过程中强台风作用下的滑坡破坏速度最快, 破坏量最大,

台风作用和无台风作用耦合的滑坡破坏速度和规模依次减弱。对数值模拟计算的三种工况的稳定性系数也可以很好的吻合这一现象。

### 参考文献(References):

- [1] 2020全国地质灾害灾情2021年趋势预测 [R]. 自然资源部. 2021. [Trend prediction of national geological disasters in 2020 and 2021 [R]. Ministry of Natural Resources. 2021. (in Chinese)]
- [2] 陈香, 陈静. 福建台风灾害风险分布的初步估计 [J]. 自然灾害学报, 2007, 16(3): 18-23. [CHEN Xiang, CHEN Jing. Preliminary estimation of risk distribution of typhoon disaster in Fujian [J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(3): 18-23. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 庄希澄. 福建省台风暴雨特性分析 [J]. 水资源研究, 2005, (1): 31-32. [ZHUANG Xicheng. Characteristic analysis of typhoon and rainstorm in Fujian Province [J]. Study on Water Resources, 2005, (1): 31-32. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 黄俊宝. 闽东南台风暴雨型滑坡成灾临界降雨量研究. “资源保障环境安全—地质工作使命”华东六省一市地学科技论坛 [C]. 2011. [HUANG Junbao. Study on critical rainfall of typhoon-rainstorm landslide in southeast Fujian. "Resources Guarantee and Environmental Safety-Geological Work Mission", Geoscience Science and Technology Forum of Six Provinces and One City in East China [C]. 2011. (in Chinese)]
- [5] 李凯, 孙悦迪, 江宝骅, 等. 基于像元二分法的白龙江流域植被覆盖度与滑坡时空格局分析 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 376-382. [LI Kai, SUN Yuedi, JIANG Baohua, et al. Analysis on spatial-temporal patterns of the vegetation coverage and landslides in Bailongjiang River Basin based on the Dimidiate Pixel Model [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(3): 376-382. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李国旗, 安树青, 张纪林, 吕跃凯, 陈兴龙, 程晓莉, 季永华, 沈邦勤. 海岸带防护林4种树木的风压应力分析 [J]. 南京林业大学学报, 1999, 23(4): 76-80. [LI Guoqi, AN Shuqing, ZHANG Jilin, et al. The bending stress analysis of 4 species of woods caused by wind pressure in coastal shelter forest [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 1999, 23(4): 76-80. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 闫金凯, 黄俊宝, 李海龙, 等. 台风暴雨型浅层滑坡失稳机理研究 [J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 481-491. [YAN Jinkai, HUANG Junbao, LI Hailong, et al. Study on instability mechanism of shallow landslide caused by typhoon and heavy rain [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(4): 481-491. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王照财, 赵其华, 韩俊, 等. 台风作用下植被对斜坡稳定性影响的物理模拟 [J]. 自然灾害学报, 2013, 22(4): 145-152. [WANG Zhaocai, ZHAO Qihua, HAN Jun, et al. Physical modeling of the effect of vegetation on slope stability under typhoon [J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(4): 145-152. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 蔡泽宏. 基于监测数据的台风暴雨型土质滑坡预警判据研究 [D]. 福州: 福州大学, 2015. [CAI Zehong. Research on early warning criterion of soil landslides using monitoring data [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 沈佳, 董岩松, 简文彬, 等. 台风暴雨型土质滑坡演化过程研究 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(6): 1290-1299. [SHEN Jia, DONG Yansong, JIAN Wenbin, et al. Study on evolution process of landslides triggered by typhoon rainstorm [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(6): 1290-1299. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王照财. 风荷载作用下植被对边坡稳定性影响研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014. [WANG Zhaocai. Study on the effect of vegetation on slope stability under the wind load [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 文海家, 张岩岩, 付红梅, 等. 降雨型滑坡失稳机理及稳定性评价方法研究进展 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 15-29. [WEN Haijia, ZHANG Yanyan, FU Hongmei, et al. Research status of instability mechanism of rainfall-induced landslide and stability evaluation methods [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 15-29. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 苏燕, 邱俊炳, 兰斯梅, 等. 基于室内试验的降雨型滑坡机理研究 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 118-122. [SU Yan, QIU Junbing, LAN Simei, et al. Research on mechanism in rainfall landslides based on laboratory test [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 118-122. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张泰丽. 浙江省东部台风暴雨诱发滑坡变形特征和成因机制研究 [D]. 中国地质大学. 2016. [ZHANG Taili. Research on deformation characteristics and genetic mechanism of landslide induced by typhoon rainstorm in eastern Zhejiang Province [D]. China University of Geosciences. 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [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. [HAN Jun. Physical simulation study on the formation mechanism of typhoon landslide in Wenzhou region [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘胡玫, 顾延生, 葛继稳, 等. 福建省安溪县崩岗区植物资源分析 [J]. 湖北林业科技, 2016, 45(3): 15-18. [LIU Humei, GU Yansheng, GE Jiwen, et al. Analysis on plant resources around collapsing gullies in Anxi County of Fujian Province [J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2016, 45(3): 15-18. (in Chinese with English abstract)]

- [ 17 ] 张丹,李传荣,许景伟,等.沙质海岸黑松分枝格局特征及其抗风折能力分析 [ J ]. *植物生态学报*, 2011, 35(9): 926-936. [ ZHANG Dan, LI Chuanrong, XU Jingwei, et al. Branching pattern characteristics and anti-windbreakage ability of *Pinus thunbergii* in sandy coast [ J ]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(9): 926-936. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 张国丽,魏传喜.三维激光扫描技术在小区域滑坡体变形监测中的应用 [ J ]. *海河水利*, 2018(4): 62-64. [ ZHANG Guoli, WEI Chuanxi. Application of 3D laser scanning technology in landslide deformation monitoring in small area [ J ]. *Haihe Water Resources*, 2018(4): 62-64. (in Chinese) ]
- [ 19 ] 宋书亮.基于三目视觉技术的人工降雨型滑坡监测分析 [ D ].成都:西南石油大学, 2019. [ SONG Shuliang. Monitoring and analysis of artificial rainfall landslide based on binocular vision technology [ D ]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 任帅.基于三维激光扫描技术的滑坡表面形变特征分析 [ D ].绵阳:西南科技大学, 2017. [ REN Shuai. Analysis of characteristics of landslide deformation using 3D laser scanning technique [ D ]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 叶春阳,许传华,孙国权,等.机器视觉技术估算边坡连续形变体积 [ J ]. *金属矿山*, 2021(9): 60-64. [ YE Chunyang, XU Chuanhua, SUN Guoquan, et al. Estimation of continuous deformation volume of slope using machine vision technique [ J ]. *Metal Mine*, 2021(9): 60-64. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] 丁少林.福建省台风降雨型滑坡渗流场规律及流—固耦合分析 [ D ].武汉:中国地质大学, 2016. [ DING Shaolin. Seepage characteristics and fluid-solid couple analysis of typhoon precipitation-induced land slide in Fujian Province [ D ]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] 彭书生.植被护坡对土质边坡浅层稳定性影响研究 [ D ].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2007. [ PENG Shusheng. Research on the effect of the biotechnical slope protection on the shallow stability [ D ]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 24 ] 罗建林,田鑫,钟文,等.基于Geo-Slope的凝灰岩岩质边坡稳定性分析 [ J ]. *化工矿物与加工*, 2020, 49(12): 9-13. [ LUO Jianlin, TIAN Xin, ZHONG Wen, et al. Slope stability analysis of tuff rock based on Geo-Slope [ J ]. *Industrial Minerals & Processing*, 2020, 49(12): 9-13. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 25 ] 伍宇明,兰恒星,高星,等.台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究——以福建地区为例 [ J ]. *工程地质学报*, 2014, 22(2): 255-262. [ WU Yuming, LAN Hengxing, GAO Xing, et al. Rainfall threshold of storm-induced landslides in typhoon areas: a case study of Fujian Province [ J ]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(2): 255-262. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 26 ] XU J W, UEDA K, UZUOKA R. Evaluation of failure of slopes with shaking-induced cracks in response to rainfall [ J ]. *Landslides*, 2022, 19(1): 119-136.
- [ 27 ] 李晨,徐卫卫.关于土体裂缝对边坡稳定性影响的讨论 [ J ]. *中国港湾建设*, 2018, 38(5): 28-31. [ LI Chen, XU Weiwei. Influence of cracks in soil on slope stability [ J ]. *China Harbour Engineering*, 2018, 38(5): 28-31. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 28 ] 刘华磊,徐则民,张勇,等.降雨条件下边坡裂缝的演化机制及对边坡稳定性影响——以云南省双柏县丁家坟滑坡为例 [ J ]. *灾害学*, 2011, 26(1): 26-29. [ LIU Hualei, XU Zemin, ZHANG Yong, et al. Evolutionary mechanism of slope fissures during rainfall and their effect on slope stability: A case study of Dingjiafen landslide in Shuangbo County, Yunnan [ J ]. *Journal of Catastrophology*, 2011, 26(1): 26-29. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 29 ] 杨阳.黄土滑坡裂缝发育特征及其对滑坡孕灾模式的影响——以泾阳南塬黄土滑坡为例 [ D ].西安:长安大学, 2016. [ YANG Yang. Crack characteristics of loess landslides and its influence on landslides geo-hazard model: Illustrated by the south Jingyang Plateau landslides [ D ]. Xi'an: Changan University, 2016. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 30 ] 李永益,黄大庭.后缘开裂对斜坡稳定性影响的有限元分析 [ J ].四川科学技术出版社, 1989. [ Li Yongyi, Huang Dating. Finite element analysis of the influence of trailing edge cracking on slope stability [ J ]. Sichuan Science and Technology Press, 1989. (in Chinese) ]
- [ 31 ] 樊建利.裂缝充水对土质滑坡稳定性影响的试验研究 [ D ].成都:成都理工大学, 2008. [ FAN Jianli. The test research on soil landslide's stability influenced by crack water [ D ]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 32 ] 李洪建,洪五华,史文兵,等.贵州惠水鑫朋滑坡变形破坏机制 [ J ]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 19-26. [ LI Hongjian, HONG Wuhua, SHI Wenbing, et al. Deformation and failure mechanism of Xinpeng Landslide in Huishui County, Guizhou Province [ J ]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 19-26. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 33 ] 郭斌,贾燕,梁彧,等.四川宝轮服务区降雨型滑坡活动过程分析 [ J ]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(4): 45-51. [ GUO Bin, JIA Yan, LIANG Yu, et al. Analysis on process of rainfall-induced landslide in Baolun service area, Sichuan Province [ J ]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 45-51. (in Chinese with English abstract) ]