

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.04.08

引用格式: 孙强,张泰丽,伍剑波,等.植被对台风暴雨型滑坡发育的促进作用[J].中国地质调查,2022,9(4):66-73.(Sun Q,Zhang T L,Wu J B,et al.Promoting effect of vegetation on the landslide induced by typhoon rainstorm[J].Geological Survey of China,2022,9(4):66-73.)

植被对台风暴雨型滑坡发育的促进作用

孙强,张泰丽,伍剑波,韩帅,赵阳

(中国地质调查局南京地质调查中心,江苏南京 210016)

摘要:植被在世界各地被广泛用于防止滑坡,但在我国东南沿海的台风季节,植被覆盖较好的地区受台风暴雨诱发常有大量滑坡发生。为了研究台风暴雨条件下植被对滑坡发育的促进作用,通过风洞物理模拟实验研究了风荷载和植被摇曳对滑坡稳定性的影响。结果表明:台风通过植被对边坡施加的荷载不容忽视,在超强台风条件下(风速 ≥ 17 m/s),风荷载可使潜在滑坡体的下滑力增加10%以上;由于台风的风荷载,植被会通过根部对土壤施加强大的扭矩,导致土壤出现裂缝,这些裂缝为雨水渗透提供了快速通道,土壤的渗透系数会增加10倍以上。因此在东南沿海地区的台风季节,应注意植被、特别是高大乔木对滑坡稳定性的不利影响。

关键词:台风暴雨;滑坡;植被;东南沿海地区

中图分类号: P694; X43

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2022)04-0066-08

0 引言

我国是全球遭受滑坡灾害影响最为严重的国家之一。据全国地质灾害通报统计,2015—2021年间,我国发生地质灾害34 602起,因灾死亡1 337人,直接经济损失134.9亿元,其中滑坡是最主要的地质灾害类型,约占地质灾害总数的70%^[1]。

在台风及期间强降雨的耦合作用下,我国的东南沿海地区常发生大规模的山体滑坡,直接或间接地给群众生命和经济财产造成重大损失。例如:1996年7月31日至8月1日,台风“贺伯”在台湾省触发滑坡1 315处、泥石流20多处,致使73人死亡、463人受伤,财产损失达10亿美元^[2];2016年9月27日至28日,台风“鲑鱼”在浙江省和福建省诱发大量的山体滑坡、崩塌和泥石流,造成32人死亡、3人失踪^[3]。近年来台风暴雨诱发滑坡的数量呈增加趋势^[4-5]。

台风暴雨型滑坡的影响因素除了台风风向、风速、风强变频、暴雨强度、降雨时长、总雨量等,还有

山体坡度、坡向、岩组结构、构造、植被、高程等特征^[6-7]。植被通常被认为对防止滑坡的发生具有积极作用,植被的覆盖率越低,滑坡越发育^[8]。前人研究普遍认为植被对边坡稳定性的影响主要与根系有关,根系加固增加了浅层土壤的抗剪强度^[9]。同时,植被冠层有利于降雨截留,减少雨水的入渗,增加蒸发,抑制土壤含水率的增加,降低土壤抗剪强度的衰减程度,有利于斜坡的稳定性^[10-11]。然而,植被对滑坡发育的影响,目前存在较大的争议^[12]。部分研究成果显示,许多滑坡上的植被根部没有生长至滑动面,因此植被反而增加了坡体重量^[13],乔木根-土间隙和根系腐烂后形成的大孔隙也会促进降雨入渗,对滑坡产生不利影响^[14-16],同时台风的风荷载还会通过植被对滑坡的浅部结构产生不利影响^[17]。但由于在台风暴雨作用下植被与土壤之间复杂的耦合关系,前人研究尚未明确台风暴雨条件下植被促进滑坡发育的具体模式及其影响程度。

为了深入分析植被与台风暴雨型滑坡的关系,本文研究了东南沿海飞云江流域由台风暴雨诱发

收稿日期:2022-04-19;修订日期:2022-07-14。

基金项目:中国地质调查局“浙闽沿海台风暴雨型地质灾害精细调查与风险管控(编号:DD20221742)”“浙江丽水地区灾害地质调查(编号:DD20190648)”项目联合资助。

第一作者简介:孙强(1983—),男,高级工程师,主要从事地质灾害调查与评价工作。Email: huiqiangsun@foxmail.com。

的255处滑坡,分析了滑坡的物质结构、形态特征、植被覆盖类型等。在此基础上开展了风洞物理模拟实验,初步揭示了台风暴雨诱发滑坡过程中植被的促进效应。

1 研究区概况

飞云江流域位于我国浙江省东南部,发源于浙江省景宁县洞宫山白云尖,在瑞安市流入东海,流域面积约3 252 km²,域内最高海拔1 050 m,是该省八大水系之一(图1)。流域多年平均年降雨

量1 850 mm,降雨集中分布在4—10月。流域大地构造单元属华南褶皱系,浙东南褶皱带泰顺—祖州断拗的中部,广泛分布着中生代火山岩,燕山期地质构造、火山喷发、岩浆侵入活动强烈,酸性、中酸性侵入岩较发育。区内断裂构造十分发育,影响流域地貌格局的大断裂有温州—镇海大断裂、泰顺—黄岩NE向大断裂及松阳—平阳NW向大断裂。流域属于亚热带常绿阔叶林植被带,主要植被群落有常绿阔叶林、针阔混交林、常绿落叶阔叶混交林、毛竹林、毛竹针叶混交林、毛竹常绿混交林和针叶林等^[17]。

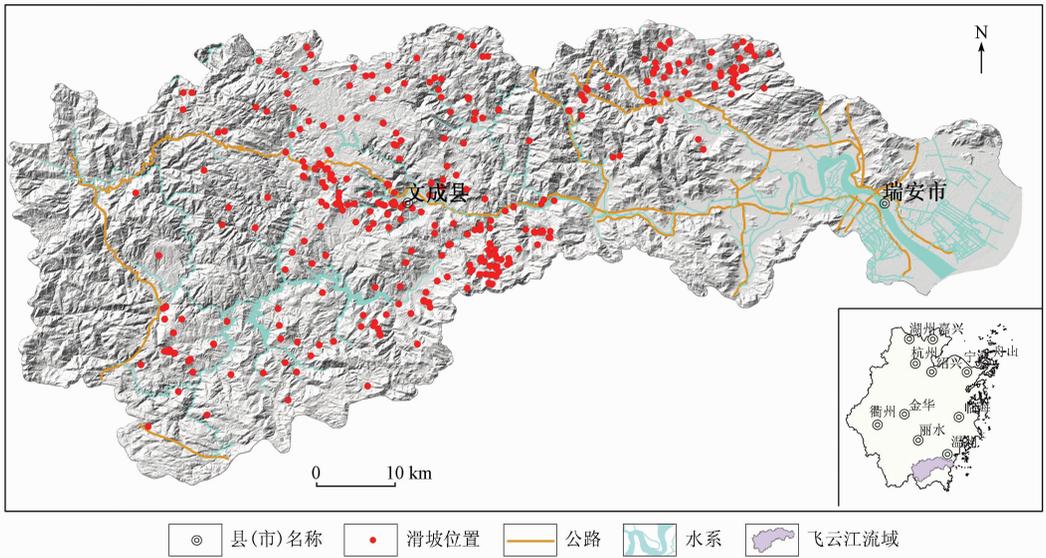


图1 飞云江流域地理位置

Fig.1 Geographical location of Feiyun River

本文收集分析了飞云江流域台风暴雨诱发滑坡的调查资料。滑坡的规模整体较小,大多在1 000 m³以内,属于典型的小型浅层土质滑坡。发生在台风期间的滑坡结构具有明显的二元特征,即下部为基岩岩层,上部覆盖了一定厚度的松散层,厚度大部分小于5 m,处于1~2 m之间。滑体总体上是由基岩原地风化而成的含黏土、砂质黏土、粉土、亚砂土、碎石砂土等的第四系残坡积层或全风化层组成。滑坡多沿松散层与下伏基岩的接触界面或沿土层内部软弱面发生。滑坡面坡度集中在20°~50°之间,约占70%,其中在30°附近的分布最为集中(图2)。滑坡面形态主要为平直状。从时间上看,台风暴雨诱发的滑坡发生时间与台风的大风、强降雨过程大致同步,无明显的滞后现象。

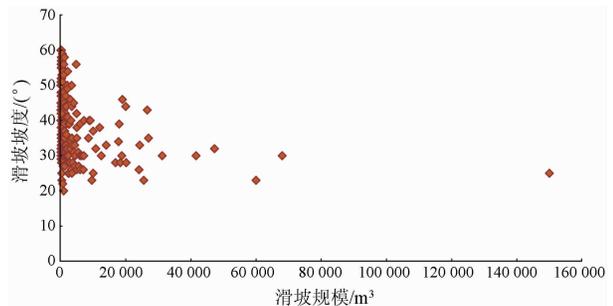


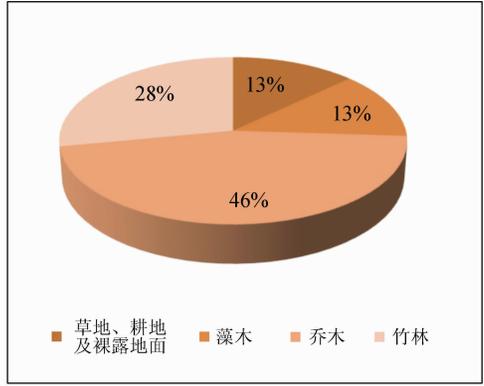
图2 滑坡面规模与坡度特征

Fig.2 Scale and slope characteristics of landslide surfaces

滑坡发生地坡面生长的植被类型多样,多为毛竹、灌木、乔木、草以及果树、农作物等的集合体,本研究将其划分为乔木、灌木、竹类及草地4种主要类型。据不完全统计,台风暴雨诱发的滑坡发生地坡面上的植被类型以乔木、竹类居多,草地、灌木次之(图3),且坡面植被整体覆盖较好。



(a) 滑坡发生地植被分布野外照片



(b) 滑坡发生地坡面植被占比

图3 滑坡发生地坡面植被类型

Fig.3 Vegetation types of sliding surface in landslide sites

2 技术方法

为分析验证台风条件下植被对滑坡发育的影响,本文进行了风荷载下植被对斜坡的结构损伤实验。实验平台采用中南大学风洞实验室。风洞洞体为全钢结构,实验段宽 12 m、高 3.5 m、长 18 m,风速范围 0 ~ 20 m/s,湍流度小于 1%,并配备有高频电子压力扫描阀、微型压力传感器和动态数据采集分析系统等仪器设备。

2.1 相似条件

本研究根据台风暴雨型滑坡的规模、物质结构、气象条件和实验设备条件等因素,综合确定相似比和模型参数。模型的设计比例为 1:16,即相似系数 n 的取值为 16。实验设计的三维物理模型中,主要参数的相似系数满足以下条件:

几何相似系数 $C_l = n = 16$; 容重相似系数 $C_\gamma = 1$; 风速相似系数 $C_v = \sqrt{n} = 4$; 黏聚力相似系数 $C_c = n$; 内摩擦角相似系数 $C_\phi = 1$; 含水率相似系数 $C_\omega = 1$ 。

2.2 材料制作

坡体材料采用河砂、膨胀土、黏土、重晶石粉进行配比调制,力学参数参考区域内的经验值^[19]。在实验室内进行若干组土工实验,直到材料各项参数接近经验值,最终确定河砂、膨胀土、黏土、重晶石粉的质量比例为 39:10:39:12。坡体模型材料各项物理力学参数见表 1。

表 1 坡体模型材料物理力学参数

Tab.1 Physical mechanical of materials from slope models

| 密度/ ($g \cdot cm^{-3}$) | 含水率/% | 黏聚力/ kPa | 内摩擦 角/($^\circ$) | 渗透系数/ ($m \cdot s^{-1}$) |
|------------------------------|-------|-------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1.8 | 15 | 2 | 27.8 $^\circ$ | 1.06×10^{-5} |

2.3 模型植被

乔木高度高,风荷载作用更加明显,飞云江流域的乔木类型多为中乔,树高多在 10 m 左右,主根系深度一般在 3 m 以内,因此本次实验选择高度 0.6 m,根系深度约 0.15 m 的植被模型。根据乔木的外形特征,制作了满足要求的模型树。模型树的树干和树叶为塑料材质,树根采用细钢丝制作,树叶尺寸约 2 cm × 3 cm,树冠的直径约 30 cm; 树干的直径约 2 ~ 4 cm,模型树根部两侧各有 4 条根系(共 8 条根系),根系的展布范围约 15 cm。

2.4 模型搭建

模型箱为钢制结构,长 × 宽 × 高为 1.38 m × 1.00 m × 0.80 m。侧壁采用有机玻璃板,底部为建筑木板,设置模型斜坡坡度为 35 $^\circ$ 。斜坡模型上布置了 12 棵模型树,从坡顶到坡脚共 4 排,每排 3 棵,编号见图 4。模型树之间左右间隔 0.4 m,前后间隔 0.3 m。将植被模型固定在模型箱后,从下往上逐渐填入坡体材料,并逐层击实(图 4)。完成后的植被模型覆盖度(植被的叶、茎、枝在地面的垂直投影面积占坡体总面积的百分比)约 77%,与飞云江流域的植被覆盖度基本相符。

风洞实验室内不能产生任何颗粒物,因此,实验前用塑料薄膜覆盖滑坡模型表面,防止因风速过大及植被破坏导致颗粒物的产生。

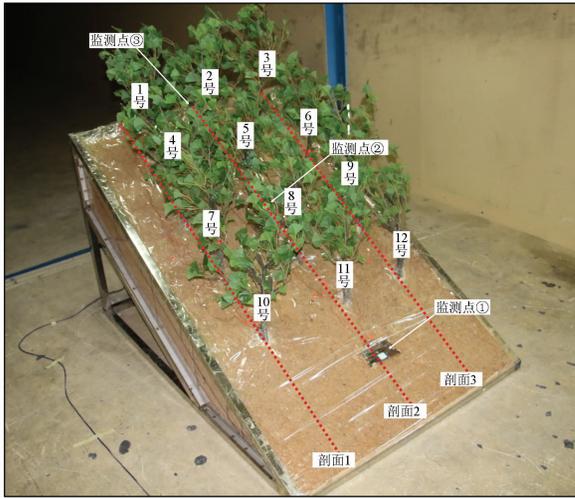


图4 建成后的坡体模型

Fig.4 Slope model after construction

为监测不同风速作用下坡面和植被上的风压值,模型中共安装42处风压监测管。在滑坡模型的坡脚、坡面中部以及坡顶位置分别布置3处风压监测点(图5);模型中共有12棵模型树,每棵树的树干底部、中部和树冠处分别布置3处风压监测管,离坡面高度分别为0.1 m、0.2 m、0.35 m,以此来监测实验过程中植被不同高度受到的风压(图5)。

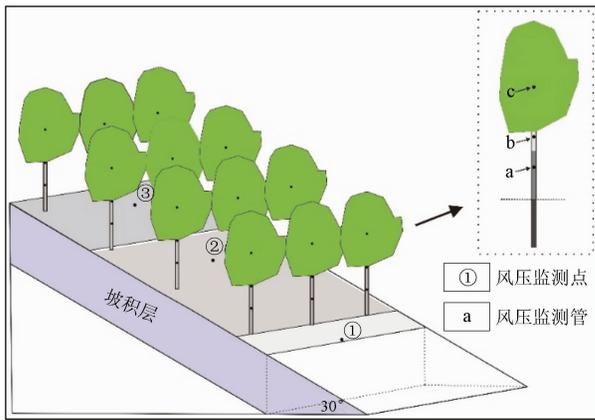


图5 模型风压监测点设置

Fig.5 Monitoring points setting of modelling wind pressure

2.5 实验工况

根据飞云江流域历次台风的风速统计资料,本次实验设置4种等级的台风工况,分别为8~9级(热带风暴)、12~13级(台风)、16级(超强台风)以及超过16级台风的极端工况。根据风速相似比确定实验风速分别为8.3 m/s、10.3 m/s、13.4 m/s和17 m/s。由于风洞实验室的限制,每种工况的实

验时间为1 h。台风与坡体模型坡向的夹角设为0°。每种工况结束后,重新夯实土体,并将坡体植被重新恢复至原样,4种台风工况见表2。

表2 实验台风工况

Tab.2 Operating conditions of testing typhoon

| 台风等级 | 实际风速/ (m·s ⁻¹) | 实验风速/ (m·s ⁻¹) | 台风与坡体模型走向之间的夹角/(°) | 实验时间/h | |
|------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|--------|---|
| 工况一 | 8~9级 | 33 | 8.3 | 90° | 1 |
| 工况二 | 12~13级 | 41 | 10.3 | 90° | 1 |
| 工况三 | 16级 | 53 | 13.4 | 90° | 1 |
| 工况四 | 极端 | 65 | 17.0 | 90° | 1 |

3 实验结果分析

3.1 风荷载对斜坡推力的影响

受限于风洞实验室的安全要求,模型设置为迎风坡,即风力是作用于下滑力的反方向。但是通过分析风荷载的大小,同样能反映实际条件下顺风坡风荷载对斜坡下滑力的贡献。

按照传统的剩余推力法(不考虑降雨、地下水位及其他外部荷载)仅考虑滑体自重导致的下滑力、摩阻力以及滑面黏聚力的作用,在不同风荷载作用下,模型斜坡稳定性系数的计算公式为

$$F_s = \frac{W_H \cdot \cos \alpha \cdot \tan \varphi + c \cdot L}{W_H \cdot \sin \alpha + f_p} \quad (1)$$

式中: F_s 为稳定性系数; W_H 为滑体自重, N; α 为斜坡坡度, (°); c 为滑带黏聚力, Pa; φ 为滑带内摩擦角, (°); L 为斜坡长度, m; f_p 为植被的风荷载(顺坡向为正,逆坡向为负), N。

无风条件下,斜坡原始的抗滑力为1394 N,下滑力为942 N, f_p 为0 N,斜坡稳定性系数为1.48。

当风速为8.3 m/s时,树冠的平均风压为50 Pa,树干中部平均风压为36 Pa,根部底部平均风压为32 Pa(图6)。将每棵树上不同高度处受到的风压值乘以其对应的宽度,可得到随高度变化的风荷载曲线。从植被的风荷载曲线看,在台风作用下,树冠处受到的风荷载远大于树干部位(图7)。

植被受风荷载作用于斜坡的推力为41 N,占抗滑力的2.9%。假设风向为顺风坡(不考虑风力角度的影响),下滑力将增大至983 N,稳定系数下降至1.38。

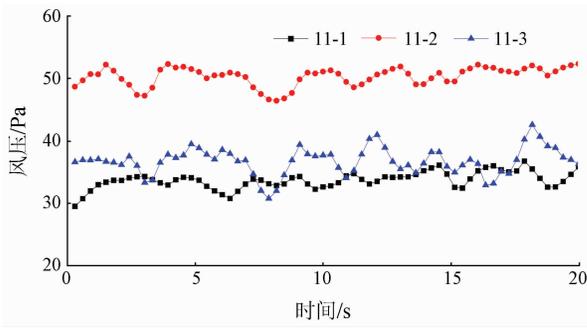


图6 风速 8.3m/s 时 11 号树的风压变化
Fig.6 Wind pressure change of No.11 tree under speed of 8.3m/s

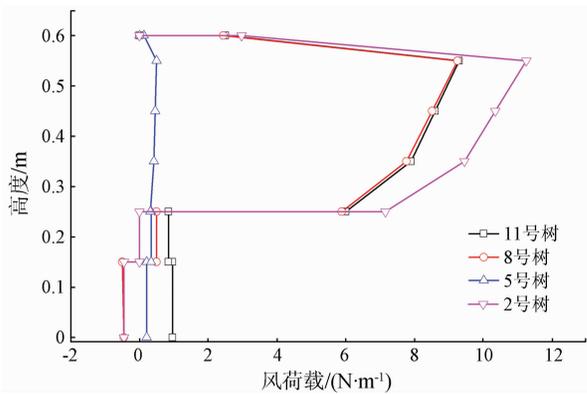


图7 风速 8.3m/s 时植被模型的风荷载变化
Fig.7 Vegetation models wind load change under speed of 8.3m/s

同理,当实验风速分别为 10.3 m/s、13.4 m/s 和 17 m/s 时,植被受风荷载作用于斜坡的推力分别增大至 75 N、110 N 和 186 N,达到斜坡抗滑力的 5.4%、7.9% 和 13.3%,稳定性系数降至 1.34、1.24 和 1.17。

3.2 斜坡结构的破坏情况

在工况一、工况二和工况三条件下,随着风速的增大,虽然植被的摇摆程度逐渐增强,但实验结束后,坡体和植被未见明显的损伤特征。在工况四条件下,当风速达到 17 m/s 时,坡体结构发生了变形和破坏,主要表现为植被倾倒、土体隆起、裂缝产生。实验结束后对植被的倾倒角度进行了测量,斜坡的 12 棵模型树中倾倒的树木共 7 棵,模型的前两排树和最后一排的 3 号树均发生了明显的倾倒,其中第一排树的倾倒角度更大(约 10°),第二排树的倾倒角度稍小(约 5°),最后一排的 3 号树树冠处受到的风压较大,向后倾倒的角度为 8°(图 8、表 3)。



图8 第 4 组实验后植被模型倾倒状况
Fig.8 Vegetation models dumping after the fourth group of experiments

表 3 植被模型倾倒角度统计

Tab.3 Inclination angle statistics of vegetation models

| 模型树编号 | 向后倾倒角度/(°) |
|-------|------------|
| 3 | 8 |
| 7 | 6 |
| 8 | 5 |
| 9 | 4 |
| 10 | 10 |
| 11 | 8 |
| 12 | 12 |

部分植被模型下部的坡面发生隆起,隆起位置在第 1 排 10 号和 11 号树的根系附近,这两棵树的根土结构被破坏,隆起高度约 2 cm,根系即将被拔起(图 9)。这种现象与实际情况相符,野外调查过程中,在强大的风力作用下,高大的乔灌木往往被连根拔起^[20]。



图9 10~12 号树根部裂缝分布
Fig.9 Distribution of root cracks around No.10~12 trees

坡体模型上第一排的 10 号、11 号、12 号树和最后一排的 3 号树的根部土体附近出现了裂缝,

裂缝长约 5 ~ 12 cm, 宽 0.2 ~ 0.5 cm (图 10)。与斜坡失稳变形导致的拉裂缝、膨胀裂缝具有平行排列的特征不同, 台风作用下植被撕拽导致的裂缝以树的根部为中心, 主要分布在树的前侧, 向四周呈放射状。



图 10 3 号树附近的裂缝分布

Fig. 10 Distribution of root cracks around No. 3 tree

从上述变形破坏的现象中不难发现, 斜坡的前排和最后排坡顶位置的植被根部土体最容易发生破坏。出现以上现象是由于前排植被在台风过程中首当其冲, 受到的风荷载也较大, 作用于根部土体的力矩更大, 容易造成土体的拉裂。实验过程中发现与前 3 排植被相比, 坡顶植被枝叶摆动剧烈, 摇晃幅度更大, 可能与位置较高, 后部无其他物体阻挡而产生复杂的空气扰动有关。

3.3 斜坡材料渗透系数变化特征

在每种工况实验结束后, 在坡顶 2 号树和 3 号树之间的位置取原状土样进行渗透系数的测试。圆筒的直径 15 cm, 高 20 cm, 每次取样深度为 15 cm, 获取的渗透系数能够较好地代表坡体材料的渗透能力 (图 11)。

与原始状况相比, 在 8.3 m/s、10.3 m/s、13.4 m/s 的风速条件下, 坡体材料的渗透系数无较大变化, 在 17 m/s 以上的风速条件下, 由于斜坡植被发生了明显倾斜, 根部土体产生了大量裂缝, 土体结构发生了明显破坏, 渗透性急剧增大至原来的 10 倍以上。受限于实验条件, 无法观察到植被风荷载造成了坡体结构性损伤, 进而导致降雨入渗加剧的现象, 但研究表明斜坡岩土体裂缝的增加和渗透系数的增大对斜坡的稳定性会产生显著的影响^[21-23]。

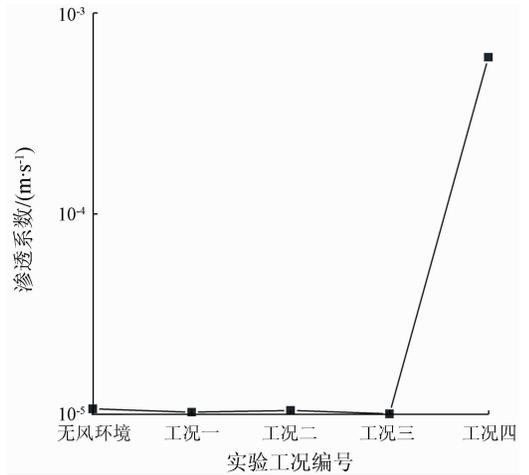


图 11 渗透系数变化曲线

Fig. 11 Permeability coefficients curve

本文通过风洞实验初步揭示了台风、植被耦合作用对斜坡的稳定性影响。台风暴雨对滑坡的诱发可以分为两个方面: 一方面台风、植被摇曳导致土体松动、裂缝产生和渗透性增加, 进一步增加了降雨入渗软化土体的作用; 另一方面台风荷载通过植被作用影响斜坡附加的下滑推力, 实验证明了在强烈的台风作用下, 不能忽视台风-植被-斜坡的力学机制。

5 结论与现存问题

5.1 结论

(1) 飞流江流域台风暴雨型滑坡基本上是第四系残坡积层的浅层土质滑坡, 坡度多在 30°左右, 规模较小, 发生时间与台风的大风、暴雨过程密切相关, 无明显的滞后性。

(2) 研究区台风暴雨诱发的滑坡坡面植被类型以乔木、竹类居多, 草本、灌木次之, 且坡面植被整体覆盖较好。

(3) 在台风和植被的耦合作用下, 风荷载最大可达滑坡抗滑力的 13%, 对滑坡稳定性有直接影响。当风向和滑向一致时, 强台风条件下风荷载通过植被作用会导致斜坡稳定系数下降 0.28, 超强台风条件下会导致斜坡稳定性下降 0.31。

(4) 台风期间, 植被摆动撕拽会导致植被根部产生大量裂缝, 破坏根部土体的结构, 造成土体物理力学指标的变化, 渗透系数会增大至原来的 10 倍以上。

5.2 现存问题

本文对台风暴雨型滑坡的演化机制研究仅是初步的和尝试性的。植被对台风风荷载的传导过程是非常复杂的,如台风过程中存在脉冲风力、风振等情况。本次实验将风荷载简化为简单的静力作用,未对风荷载的力矩做进一步分析,而植被力矩是影响土体拉裂的重要因素。同时,受限于实验条件,实验中没有模拟台风伴随的降雨过程,对风、雨对滑坡的耦合作用机制缺乏讨论。因此,要阐明台风、暴雨、植被对滑坡的耦合作用,仍需进行深入的理论分析和大量的实验工作。

参考文献 (References):

[1] 章诗芳,王玉芬,贾蓓,等. 中国2005—2016年地质灾害的时空变化及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报,2017,19(12):1567-1574.
Zhang S F, Wang Y F, Jia B, et al. Spatial-temporal changes and influencing factors of geologic disasters from 2005 to 2016 in China[J]. J Geo- Inform Sci, 2017, 19(12): 1567-1574.

[2] 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.
Kong W W, Zhao Q H, Han J, et al. Model experiments for deformation and failure mechanism of typhoon induced landslide[J]. J Eng Geol, 2013, 21(2): 297-303.

[3] 杨寅,包红军,彭涛. 台风“鲇鱼”强降水引发的地质灾害气象风险预警检验与分析[J]. 暴雨灾害,2019,38(3):221-228.
Yang Y, Bao H J, Peng T. Verification and analysis of meteorological early warning of geological hazards during precipitation of Typhoon “MEGI”[J]. Torr Rain Dis, 2019, 38(3): 221-228.

[4] 张泰丽,周爱国,孙强,等. 台风暴雨条件下滑坡地下水渗流特征及成因机制[J]. 地球科学,2017,42(12):2354-2362.
Zhang T L, Zhou A G, Sun Q, et al. Characteristics of the groundwater seepage and failure mechanisms of landslide induced by typhoon rainstorm[J]. Earth Sci, 2017, 42(12): 2354-2362.

[5] 杨峰,薛桂澄,柳长柱,等. 海南省澄迈县福山镇高铁站前道路土体滑坡的 GEO5 数值模拟研究[J]. 中国地质调查,2020,7(4):104-111.
Yang F, Xue G C, Liu C Z, et al. GEO5 numerical simulation research on the soil landslide in the front road of Fushan high-speed railway station in Chengmai County of Hainan Province[J]. Geol Surv China, 2020, 7(4): 104-111.

[6] 王国民,黄俊宝. 闽东南地区台风暴雨型地质灾害变形监测分析[J]. 福建地质,2010,29(S1):17-24.
Wang G M, Huang J B. The monitoring and deformation analysis on the model of typhoon rainstorm geological disaster in the south-east of Fujian Province: A case study of Shangji landslide Dehua County[J]. Geol Fujian, 2010, 29(S1): 17-24.

[7] 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 J, Dong Y S, Jian W B, et al. Study on evolution process of landslides triggered by typhoon rainstorm[J]. J Eng Geol, 2020, 28(6): 1290-1299.

[8] 刘传正. 论地质灾害风险识别问题[J]. 水文地质工程地质, 2017,44(4):1-7.
Liu C Z. Research on the risk recognition of geological disasters[J]. Hydrogeol Eng Geol, 2017, 44(4): 1-7.

[9] Pollen N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture[J]. CATENA, 2007, 69(3): 197-205.

[10] Vergani C, Giadrossich F, Buckley P, et al. Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review[J]. Earth - Sci Rev, 2017, 167: 88-102.

[11] Scheidl C, Heiser M, Kamper S, et al. The influence of climate change and canopy disturbances on landslide susceptibility in headwater catchments[J]. Sci Total Environ, 2020, 742: 140588.

[12] Rickli C, Graf F. Effects of forests on shallow landslides - case studies in Switzerland [J]. For Snow Landscape Res, 2009, 82(1): 33-44.

[13] Glade T. Modelling landslide triggering rainfall thresholds at a range of complexities [C]//Proceedings of the Landslides in Research, Theory and Practice. London: Thomas Telford Ltd., 2000.

[14] 张家明,徐则民,李峰,等. 植被发育斜坡土体大孔隙结构多尺度特征[J]. 山地学报,2019,37(5):717-727.
Zhang J M, Xu Z M, Li F, et al. Multi-scale features of macropore structures in soil of well vegetated slopes[J]. Mt Res, 2019, 37(5): 717-727.

[15] 郭丽丽,曾强,徐则民,等. 马卡山不同植被群落斜坡土体中根土环隙导流特性[J]. 土壤,2017,49(1):196-202.
Guo L L, Zeng Q, Xu Z M, et al. Flow characteristics of root-soil annulus in slope soil under different vegetation communities[J]. Soils, 2017, 49(1): 196-202.

[16] Guo W Z, Chen Z X, Wang W L, et al. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 2020, 350: 106879.

[17] 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 J K, Huang J B, Li H L, et al. Study on instability mechanism of shallow landslide caused by typhoon and heavy rain[J]. J Geomech, 2020, 26(4): 481-491.

[18] 盛海燕,陈伟杰,李伟成. 铜铃山国家森林公园不同林型群落及植被多样性研究[J]. 杭州师范大学学报:自然科学版, 2019,18(4):402-410.
Sheng H Y, Chen W J, Li W C. On community diversity of different forest types and vegetation in Tonglingshan national forest park[J]. J Hangzhou Norm Univ: Nat Sci Ed, 2019, 18(4): 402-410.

- [19] 孙强,张泰丽,伍剑波,等. 浙南花岗岩残积土物质结构及工程地质特性研究[J]. 地质论评,2020,66(S1):163-166.
Sun Q,Zhang T L,Wu J B,et al. Material structure and engineering geological characteristics of granite residual soil in southern Zhejiang Province[J]. Geol Rev,2020,66(S1):163-166.
- [20] 郑志颖.“莫兰蒂”强台风对闽南沿海马尾松林下植物多样性的影响[J]. 防护林科技,2019(1):3-6,91.
Zheng Z Y. Effects of strong typhoon “Meranti” on plant diversity of undergrowth of *Pinus massoniana* along the coast of Southern Fujian Province[J]. Prot For Sci Technol,2019(1):3-6,91.
- [21] 楼平,程鹏,金国亮,等. 非饱和土边坡降雨入渗特征及其对斜坡稳定性的影响[J]. 人民珠江,2019,40(2):45-50,69.
Lou P,Cheng P,Jin G L,et al. Rainfall infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on slope stability[J]. Pearl River,2019,40(2):45-50,69.
- [22] 兰恒星,周成虎,李焯芬,等. 瞬时孔隙水压力作用下的降雨滑坡稳定性响应分析:以香港天然降雨滑坡为例[J]. 中国科学 E 辑:技术科学,2003,33(S1):119-136.
Lan H X,Zhou C H,Li Z F,et al. Stability response analysis of rainfall induced landslides under instantaneous pore water pressure:A case study of natural rainfall induced landslides in Hong Kong[J]. Sci China Ser E: Technol Sci,2003,33(S1):119-136.
- [23] 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.
Zhang T L,Sun Q,Li S P,et al. Columnar experimental study on rainfall infiltration of basalt residual soil landslide in Feiyun River Basin of Zhejiang Province [J]. East China Geology, 2021, 42(4):367-372.

Promoting effect of vegetation on the landslide induced by typhoon rainstorm

SUN Qiang, ZHANG Taili, WU Jianbo, HAN Shuai, ZHAO Yang
(Nanjing Center, China Geological Survey, Jiangsu Nanjing 210016, China)

Abstract: Vegetation is widely used for preventing landslides around the world. However, an amount of rainstorm - induced landslides occurred frequently on vegetation - covered slopes during the typhoon season in the coast of Southeastern China. In order to investigate the effect of vegetation on the development of landslide under the condition of typhoon and rainstorm, the authors in this paper simulated the effect of wind load and vegetation swaying on stability of landslide through wind tunnel physical simulation tests. The results show that the load exerts on the slope by typhoon through vegetation shouldn't be ignored. The wind load can increase the sliding force by more than 10% under super typhoon (with wind speed of 17 m/s). Meanwhile, the strong torque was loaded the on soil via the vegetation root, resulting in cracks in the soil. These cracks provide fast paths for rainwater infiltration, and the permeability coefficient of soil increased more than ten times later. Therefore, special attention should be paid to the potential implications of vegetation in the future, especially the high trees, which have disadvantages on landslides during typhoons.

Keywords: typhoon and rainstorm; landslide; vegetation; southeast coastal area

(责任编辑:魏昊明)