

含板状根边坡入渗特征与失稳机理的降雨离心模型

缪杰蔚^{1,2}, 张崇磊^{1,2}

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: [目的] 强降雨引发的中国山地群发性浅层滑坡事件频发,且多位于植被覆盖山区,严重威胁公共基础设施和人类活动安全。然而,目前对根系结构与蒸腾作用影响边坡失稳的机理认识尚不充分,以及根系在降雨过程中的失稳特征、渗流特征、土压力参数之间的协同作用不明确。[方法] 针对中国云南麻栗坡县的板状根型树种在边坡中作用机制不明的问题,采用降雨离心模型试验装置,模拟5次连续间歇降雨作用下含板状根边坡的失稳破坏过程,重点分析含板状根边坡的失稳演化特征,并探究蒸腾作用对坡内水分运移路径的影响。通过建立坡内含水率、土压力、失稳特征参数之间的关系,揭示含板状根边坡的失稳演化机制。[结果] 经历5次间歇降雨作用后,含板状根边坡的坡面滑塌范围超过90%,最大破坏深度达到板状根深的2.89倍,仅坡面左侧局部区域仍保持原始形态。而在降雨入渗过程中,蒸腾作用在含板状根边坡坡表形成以根系为中心的低含水率区,其形态随降雨阶段的进行由“水杯状”逐渐演化为“半椭圆状”和“三角形”。5次降雨结束后,边坡低含水率区完全消失。同时,土压力变化主要受上覆土体体积含水率变化影响,在坡表土体达到先增后减的动态波动时,土压力受坡内水量变化呈现阶段性“升-降-升”的特征。[结论] 研究结果可为山区含板状根的生态护坡工程设计与实施提供宝贵参考。

关键词: 离心模型试验; 根系形态; 失稳演化特征; 渗流路径; 降雨

中图分类号: X43; S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0392-10

Rainfall Centrifuge Model for Infiltration Characteristics and Instability Mechanisms of Slopes with Plank Roots

MIAO Jiewei^{1,2}, ZHANG Chonglei^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Shallow landslides caused by heavy rainfall occur frequently in the mountainous areas of China, particularly in areas with vegetation cover, posing a serious threat to the safety of public infrastructure and human activities. However, the mechanisms by which root structure and transpiration affect slope instability are still not fully understood, and the synergistic effects between root instability characteristics, seepage characteristics, and soil pressure parameters during rainfall remain unclear. [Methods] To address the unclear mechanisms of tree species with plank roots on slopes in Malipo County, Yunnan Province, this study employed a rainfall centrifuge model test system to simulate the instability and failure process of a slope with plank roots subjected to five intermittent rainfall events. The instability evolution characteristics of the slope with plank roots were analyzed, and the impact of transpiration on water migration paths within the slope was investigated. By establishing relationships between water content, soil pressure, and instability characteristic parameters within the slope, the instability evolution mechanisms of the slope with plank roots were revealed. [Results] After five intermittent rainfall events, more than 90% of the slope surface with plank roots collapsed, and the maximum

收稿日期: 2025-10-22

修回日期: 2025-11-24

录用日期: 2025-12-15

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-21

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3012701)

第一作者: 缪杰蔚(2001—),女,硕士研究生,主要从事植被覆盖边坡失稳机制研究。E-mail: miaojiewei@imde.ac.cn

通信作者: 张崇磊(1985—),男,博士,副研究员,主要从事山地灾害形成演化机制与减灾关键技术研究。E-mail: zhangchonglei@imde.ac.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

failure depth reached 2.89 times the plank root depth. Only a local area on the left side of the slope surface retained its original morphology. During the rainfall infiltration process, transpiration led to the formation of a low-water-content zone centered on the root system on the surface of the slope with plank roots. The shape of this zone evolved gradually from a "cup-shaped" pattern to "semi-elliptical" and "triangular" patterns as the rainfall stages progressed. After the five rainfall events, the low-water-content zone on the slope completely disappeared. Meanwhile, changes in soil pressure were primarily affected by changes in the volumetric water content of the overlying soil. When the soil on the slope surface experienced a dynamic fluctuation characterized by first increasing and then decreasing, the soil pressure exhibited a phased "increase-decrease-increase" pattern in response to the changes in water content within the slope. [Conclusion] The findings of this study can provide valuable references for the design and implementation of ecological slope protection projects with plank roots in mountainous areas.

Keywords: centrifuge model test; root morphology; instability evolution characteristics; seepage path; rainfall

Received: 2025-10-22

Revised: 2025-11-24

Accepted: 2025-12-15

Online(www.cnki.net): 2026-01-21

在中国南部地区由降雨诱发的滑坡事件中,通过实地调查和航空摄影监测发现,这些浅层滑坡大多发生在植被茂密的山坡区域。如2024年6月16日闽粤赣边区极端强降雨诱发的群发滑坡^[1]、2024年7月26日台风“格美”诱发的湖南资兴大规模滑坡灾害^[2]。这些滑坡灾害直接威胁数百万居民的生命安全,并造成重大经济损失。深入探究极端降雨事件下植被覆盖边坡的失稳机制,对预防和减轻边坡失稳具有重大意义。

根系固土护坡的机制主要涵盖植物水文效应和根系力学效应2个方面^[3-5]。在力学加固方面,植物根系的拉伸强度及根-土界面摩擦有助于约束土体,阻止剪切破坏的发生^[6]。同时,根系与土体相互作用形成根-土复合体,进而增强含根土体的抗剪强度,提高深层土体的抗滑力^[7-8]。在水文方面,根系利用蒸腾作用调整坡内渗流环境,降低坡内孔隙水压力,在降雨时抵消一部分入渗水所造成的孔压,以此提高边坡稳定安全系数^[9-11]。然而,目前关于根系影响边坡稳定的研究多分别侧重于力学或水文单方面,缺乏对根系结构与蒸腾作用耦合机制下的边坡失稳机理的深入探讨。

天然条件下边坡植被-降雨相互作用过程十分复杂,因此离心机模型试验成为重要的研究手段。通过在小型物理模型中重建原型应力水平,可深入观察植被根系和土体在降雨条件下的水文响应与失稳模式^[12]。SONNENBERG等^[13]较早地采用离心机模型试验,研究坡内水位变化引发的柳树枝加固边坡的破坏行为发现,含根边坡的失稳模式从素坡的渐进式块体破坏转变为整体块体滑动破坏。KAMCHOOM等^[14]采用离心机模型试验模拟强降雨

条件下黏土砂坡的失稳行为,探究活杆的水力加固效果。PRASETYANINGTIYAS等^[15]运用离心机模型试验研究强降雨条件下香根草(天然根)对边坡稳定性的水力贡献,从微观角度验证根系与土颗粒缠绕机制。

然而,中国西南部山林中广泛生长着杉木、松树等树种,草本和灌木根系对边坡稳定的贡献微乎其微。相比之下,山林中广泛分布的树木根系更能提供实质性的加固^[16]。同时不同根系形态的树根对边坡的机械加固和水文效应存在差异。NG等^[17-18]使用醋酸纤维素材料制作直根、心形根、板状根3种人工根系,通过离心机模型试验测量根系蒸腾作用对边坡孔隙水压力影响发现,心形根支撑的边坡在根深范围内保持着最高吸力使得边坡安全系数最大。而板状根由于深度相对较浅,在降雨过程中吸力消散,坡内孔隙水压力增加显著。SONG等^[19]在草本植物覆盖的坡面上开展降雨试验,对比研究均匀型、倒三角形和纺锤形3种含草根边坡的颗粒轨迹和滑动面特征,从微观尺度分析根形态变化和单根在坡面临界破坏时接触力的实时变化。然而,关于根系加固边坡的失稳演化特征研究十分匮乏,导致难以从渗流、应力与形变协同演化的多尺度视角,揭示不同根系类型的固坡机制差异。

本文采用降雨离心模型试验装置,系统分析云南林地山区典型含板状根系边坡在降雨作用下的失稳破坏过程。试验全程监测边坡失稳形态变化、体积含水率及应力应变等参数的动态响应。引入坡面崩滑失稳区面积比(a_f)和坡体崩滑深度比(d_f)2个特征指标,定量描述边坡的失稳演化特征。结合边坡入渗速率、体积含水率变化,揭示间歇降雨过程中坡

内水分运移路径和分布规律。进一步融合含板状根边坡在入渗-应力-失稳特征的响应规律,阐明含板状根边坡在间歇降雨作用下的失稳演化机制。

1 离心机建模和测试程序

1.1 现场原型工点条件

本研究工点位于中国云南省麻栗坡县猛洞乡(22°50′~22°56′N,104°38′~104°46′E)(图1)。该区域地形以山地为主,大部分边坡被中国冷杉覆盖。边坡表层土体由全风化花岗岩组成,并夹杂着厚度1~5 m的黏土砂层。在2018年9月2日的降雨滑坡事件中,猛洞乡日降雨量峰值达229.6 mm,对应约五十年一遇的重现期。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图绘制。

图1 云南省麻栗坡县猛洞乡地理位置

Fig.1 Geographical location of Mengdong Township, Malipo County, Yunnan Province

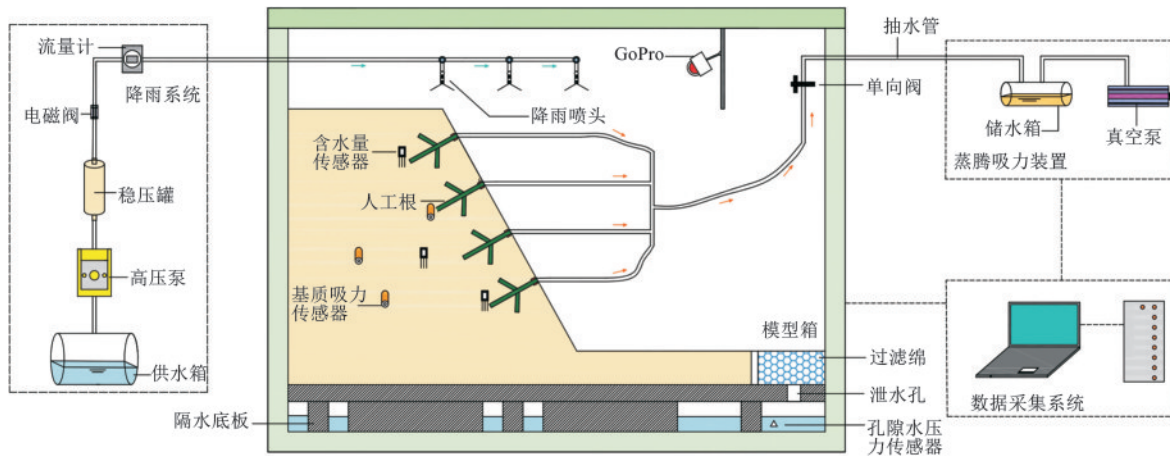


图2 含根边坡降雨离心模型试验装置工作原理与组成

Fig.2 Working mechanism and components of rainfall centrifuge model test system for slope with roots

人工根系的蒸腾吸力装置由高进气值陶土头、单向阀、小型储水罐(3 L)及真空泵等主要部件构成。人工根端部采用具备只透水不透气的特性的高进气值陶土材料。利用真空泵施加0.098 MPa负压,从而在高进气值陶土头表面产生压差,实现根系的蒸腾作用。

结合离心机模型箱尺寸,并参照已有研究对模型相似比 N 的取值^[12-19],本模型试验相似比 N 取15。

对研究区域中冷杉覆被边坡的坡面进行开挖取样。取样点土样主要由砂粒和粉粒组成,属粉土质砂土。土样黏聚力为9.8~14.6 kPa,内摩擦角分布在22°~29°。在饱和条件下,土体黏聚力显著降低,而内摩擦角变化较小。

1.2 降雨离心模型试验装置及相似比

常规物理模型难以复现原型边坡的真实应力水平,使得根系-土体相互作用机理难以真实体现。而离心机可以提供高重力场,使缩尺模型内部产生与原型完全一致的应力,保证边坡失稳过程中土体开裂、水分运移、根系阻滑等物理现象的力学相似性。试验采用西南交通大学TLJ-2型土工离心试验机,离心模型试验的模型箱内边界尺寸为长×宽×高为0.8 m×0.6 m×0.6 m。

图2为含根边坡降雨离心模型试验装置的工作原理与组成。该装置主要由模型箱、降雨系统和人工根蒸腾吸力系统组成。降雨系统由雾化组件和流量控制组件共同构成。雾化喷头组件包括9个喷头和3根撑杆。流量控制组件由容量20 L的水箱、高压泵、稳压罐、电磁阀以及流量计组成。通过调节水流流速控制降雨强度,并借助流量积算仪反馈水流的累积流量和瞬时流量,保证降雨强度的稳定。为避免坡面径流水分在坡脚处累积,模型底部安装厚20 mm的铝合金架空底板。

原型边坡尺寸为12 m×9 m×6.15 m,换算模型尺寸为800 mm×600 mm×410 mm(长×宽×高)。表1总结了模型和原型尺度中相关的缩放定律。本研究的几何、密度、应力比尺关系为:

$$C_l = l_m / l_p = 1/N \quad (1)$$

$$C_\rho = \rho_m / \rho_p = 1 \quad (2)$$

$$C_\sigma = \sigma_m / \sigma_p = C_\rho C_g C_l = 1 \quad (3)$$

式中: C_l 为几何比尺; C_ρ 为密度比尺; C_σ 为应力比尺。

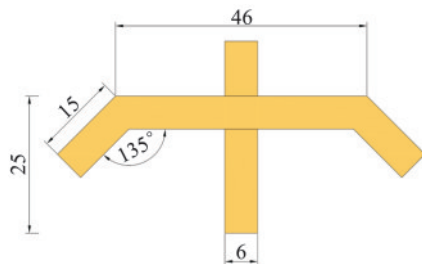
表 1 本研究相关物理量的缩放比例

Table 1 Scaling ratios of relevant physical quantities in this study

物理量	比例因子	物理量	比例因子
长度	1/N	重度	N
截面面积(A)	1/N ²	密度	1
第二惯性矩(I)	1/N ⁴	孔隙比	1
抗拉强度(σ_b)	1	进气值	1
弹性模量(E)	1	降雨强度	N
轴向刚度(EA)	1/N ²	吸力	1
抗弯刚度(EI)	1/N ⁴	渗流时间	1/N ²
黏聚力(c)	1	渗流坡降	1
内摩擦角	—	渗流速度	N

1.3 人工根系制作及土壤类型

研究区现场树种主要是中国冷杉,板状根是其中主要的根型之一。板状根以较粗壮的水平根为主,同时伴有细小竖向根,其扎根深度相对较浅。板状根的概化模型见图 3。板状根加固深度 30 mm,加固半径 30.7 mm。根系材料选用聚酰胺(PA),聚酰胺的抗拉强度(σ_b)为 44.05 MPa,弹性模量(E)为 175.99 MPa,对应原型根的抗拉强度区间 10~155 MPa^[20]。图 4 统计本试验与已有研究^[21-23]人工板状根的 RAR 分布(根横截面积与穿过根部的土体面积的比值),验证本研究板状根设计的合理性。



注:图中尺寸单位为 mm。下同。

图 3 板状根概化模型

Fig.3 Conceptual model of plank roots

采用标准砂与伊利石粉 8:2 比例混合制作试验用土,本次试验配制土为粉土质砂(GB/T 50145—2007)^[24]。土体的初始体积含水率为 8.7%,干密度为 1.68 g/cm³,黏聚力为 9.83 kPa,内摩擦角为 28.12°。

1.4 传感器布置与加载流程

图 5 为降雨条件下含根边坡离心模型的尺寸及传感器布置。模型采用从下往上分层填筑,模型从下往上分为 10 层,最底层厚度 50 mm,其余 9 层每层厚度为 40 mm,总高度为 410 mm。坡表共布置 12 根人工根,按照正六边形分布。人工根共布置 4 行,每行 3 根,水平向间距为 171.4 mm。

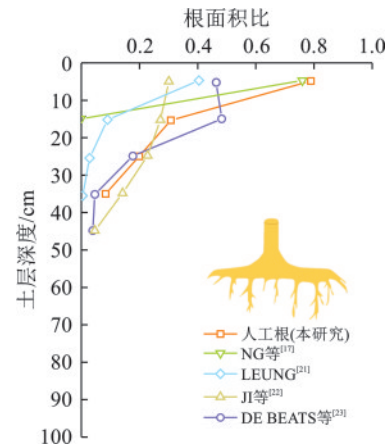


图 4 板状根的 RAR 分布

Fig.4 RAR distribution of plank roots

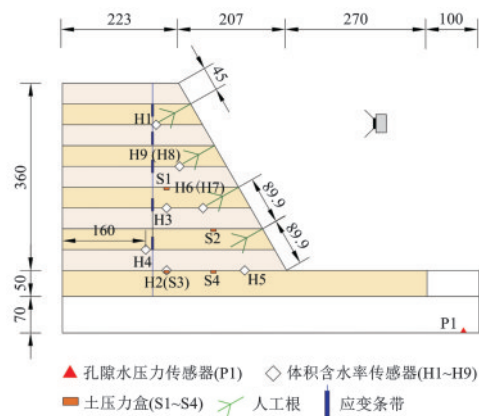


图 5 降雨条件下边坡模型传感器布置

Fig.5 Sensor arrangement in slope model under rainfall conditions

模型内安装 9 个体积含水率传感器,按照距离坡面的远近,将传感器分别布置在坡表(H1、H6、H7、H9、H10)、坡内(H3)、坡后(H4)及坡底(H2)部位,用于研究坡内不同位置的体积含水率分布。架空层底部安装 P1,用于计算坡面径流和坡内渗流出的水量。考虑滑面可能存在位置,在坡内沿竖向布置 2 列土压力盒,用于监测坡内上覆应力的变化,反演失稳特征。在坡内设置 1 条应变监测条带,用于分析边坡不同深度的弯曲应变。在坡面和侧面安装了 GoPro 运动相机和无线网络摄像机,全程记录斜坡表面和侧面的裂缝扩展、崩滑失稳区及堆积区的规模等特征。

离心机试验分 3 个阶段进行,降雨加载流程见图 6。在第 1 阶段,将离心机运行至 15 g 加速度,使离心机保持转速稳定运转 1 h,以此对模型进行初始固结和应力平衡。在此期间不开启降雨系统和蒸腾系统,模型仅靠坡体内部毛细管吸力保持稳定。第 2 阶段,开启蒸腾吸力装置和降雨系统,进入 5 次间歇降雨过程(阶段 I~阶段 V),整个过程持续 6.25 h。第 3 阶段,停止离心机运转,拆模并测量形变特征参数等。

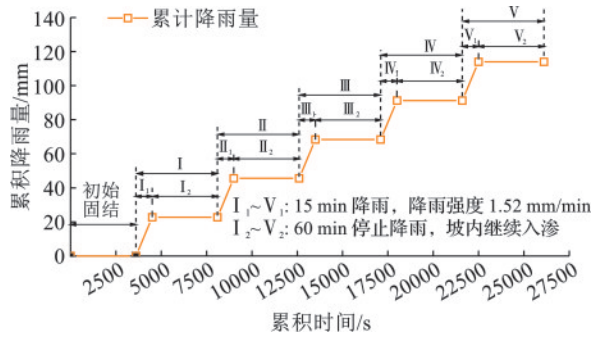


图 6 边坡累积降雨量随时间 t 的变化

Fig.6 Variation of cumulative rainfall on slope with time (t)

其中,间歇降雨过程分为阶段 I~阶段 V 5 个阶段,每个阶段持续 75 min,用于模拟西南山区 60 d 的雨季情况。降雨过程中,先将降雨系统运行 15 min ($I_1 \sim V_1$),并设定降雨强度为 1.52 mm/min。以此模拟 $R_{24}=145.92$ mm 的大暴雨雨强和持续 2.34 d 的原型工况。之后,关闭降雨系统 1 h ($I_2 \sim V_2$),模拟原型 9.5 d 的坡内入渗过程。降雨强度有效性验证见图 7。

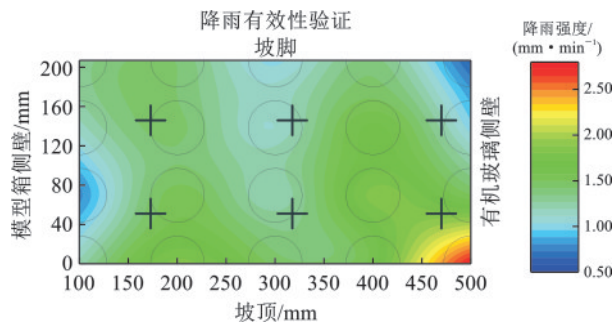


图 7 降雨有效性验证的降雨强度云图

Fig.7 Rainfall intensity contour map for verification of rainfall effectiveness

在每个降雨阶段,板状根的蒸腾吸力时间为 45 min/h,采用开启真空泵 25 min(O_1),关闭 5 min(C_1),再开启 20 min(O_2),再关闭 10 min(C_2)的真空泵启停流程。

2 离心模型试验成果分析

2.1 含根边坡失稳演化特征

边坡变形监测与模型试验中常关注坡面失稳特征及滑面位置^[25-27]。为定量描述边坡失稳破坏程度,本研究定义 2 个失稳特征指标:坡面崩滑失稳区面积比(a_f)、坡体崩滑深度比(d_f)。 a_f 定义为坡面失稳区面积(a_i)与坡面总面积(a_0)之比; d_f 定义为边坡滑塌最大深度(d_i)与根深(d_0)之比。

由图 8、图 9 可知,在降雨初期($t=3\ 900$ s),雨水在坡面形成径流,坡面土体强度降低发生局部剥落。当 $t=4\ 500$ s 时,阶段 I 降雨结束,边坡坡面 0.67~0.91 L_x 位置处发展多条竖向和水平拉裂缝。此过程中,坡表剥落区逐渐向坡顶、坡后方向延伸,坡顶形成倒三角形的坍塌。此时,边坡的最大破坏深度达 55 mm (1.84 d_0),第 2 行人工根($R_{21} \sim R_{23}$)和第 1 行左边人工根($R_{11} \sim R_{12}$)从坡面脱落。

进入阶段 II ($t=8\ 700$ s),坡面左部 0.17 L_x 处形成侵蚀沟,宽度约 17 mm。此时边坡坡面崩滑失稳区面积比(a_f)超过 80%,仅坡面左部($\leq 0.2 L_x$)及右下角(0.68~0.93 L_x , 0.07~0.54 L_y)保留部分原始形态。当 $t=9\ 000$ s 时,阶段 II 的降雨结束,仅坡面左缘($\leq 0.16 L_x$)维持原始坡面形态。此时坡顶累积沉降约 24 mm,坡脚堆积体积占比约 13%。之后在阶段 III~V,边坡未出现更大范围的破坏。

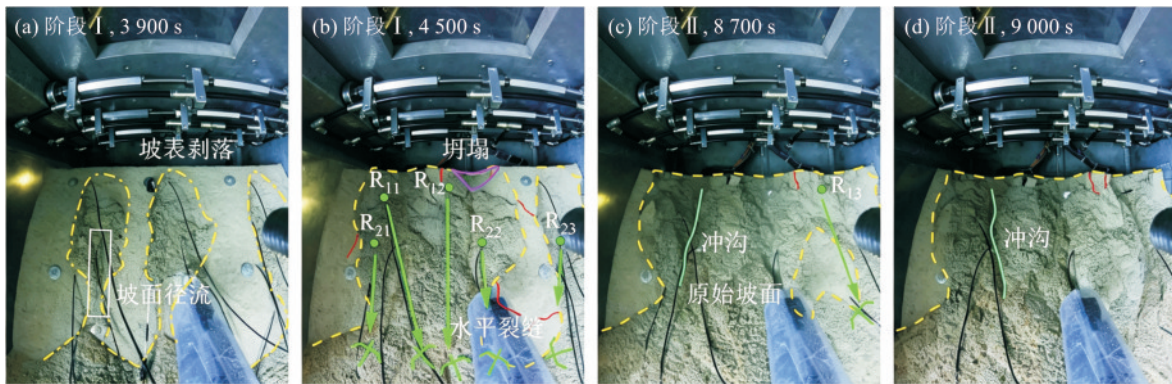


图 8 板状根加固边坡的失稳图像及演化特征

Fig.8 Instability patterns and evolution characteristics of slopes reinforced with plank roots

图 10 为阶段 I~III 降雨过程中边坡模型的失稳特征参数(a_f, d_f)随累积降雨量的变化特征。由图 10 可知,崩滑失稳区面积比(a_f)、崩滑深度比(d_f)随累积降雨量的增加呈现增速先快后慢的阶段增长特征。在降雨初期(累积降雨量 $< 4\ 500$ mL),2 个失稳

特征指标迅速增长,此时超过 60% 的坡面发生侵蚀剥落,破坏深度逐渐超过根系加固深度($d_f > 1.5$)。在阶段 II (累积降雨量在 4 500~9 000 mL),失稳特征指标增速开始减缓。在此阶段,坡面失稳区域超过 80%。边坡的失稳滑塌区主要向坡内延伸,破坏

深度逐渐达到根深的 2.7 倍。进入阶段 III(降雨量超过 9 000 mL), 2 个特征指标增长趋于平稳状态。至阶段 III 结束时, 边坡的 a_f 、 d_f 分别为 92.4%、2.89。

根系形成的网状结构能限制裂缝的延伸和贯

通, 阻止破坏深度、范围的进一步扩大, 因此边坡仍保留部分未破坏的原始坡面。所以板状根虽然加固深度浅, 但由于加固范围更广, 覆盖较多浅层滑动面区域, 直接增加滑动面的抗剪阻力^[28]。

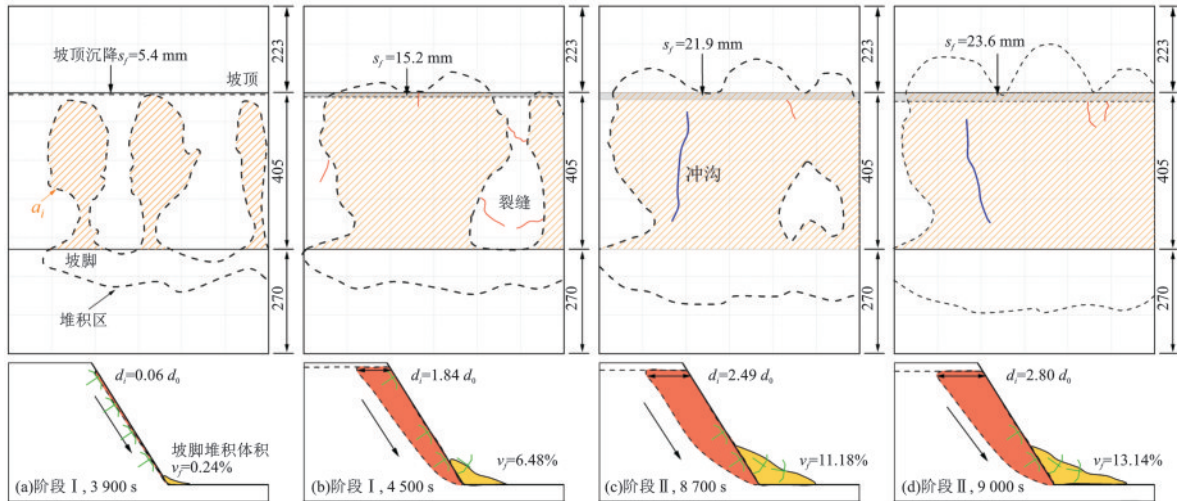


图 9 不同降雨阶段模型边坡的坡面和侧面的失稳破坏形态概化

Fig.9 Generalized failure modes on surface and side of slope model during different rainfall stages

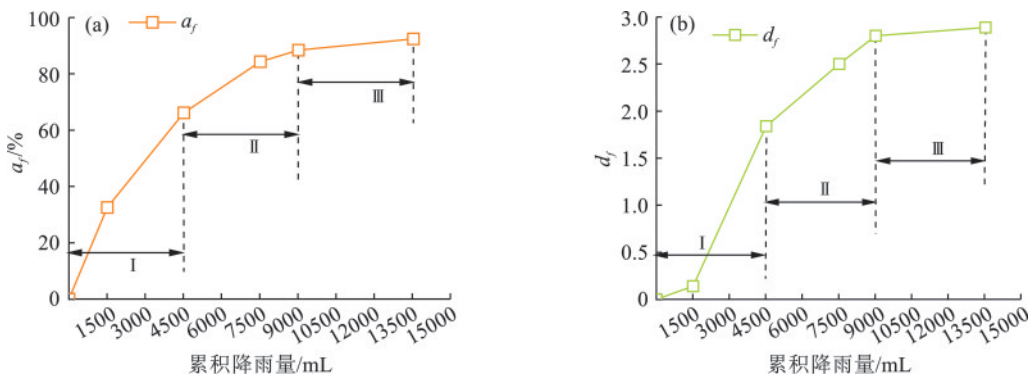


图 10 降雨阶段 I~III 过程边坡失稳特征参数随累积降雨量的变化特征

Fig.10 Variation characteristics of slope instability parameters with cumulative rainfall during rainfall stages I-III

2.2 含根边坡渗流路径

结合降雨量及边坡底部的储水量, 反向计算坡内降雨入渗水量的体积。由图 11a 可知, 在各个阶段的降雨期间($I_1 \sim V_1$)入渗水量呈快速上升趋势。而在各个阶段的降雨间歇期间($I_2 \sim V_2$), 坡内入渗水量先快速下降再缓慢降低。以阶段 IV 为例, 每个阶段的入渗水量由初始上升水量(V_1)、快速下降水量(V_2)和最终的缓慢下降水量(V_3)组成。利用入渗水量体积(V)除以对应的渗流时间(t), 得到边坡的入渗速率(v_i)。

图 11b 为边坡的入渗速率(v_i)随时间(t)的变化。由图 11b 可知, 从阶段 $I_1 \sim V_1$, 边坡的入渗速率(v_i)呈现阶段性降低。在降雨 I_1 期间, 边坡的 v_i 值最高, 可达 4.6 mL/s。相比 I_1 期间, 在降雨 II_1 期间, v_i 快速降低 1.6 mL/s。至 $III_1 \sim IV_1$ 期间, 边坡的 v_i 降低速率逐渐减缓, 基本保持在 2.0 mL/s。

在降雨间歇期间($I_2 \sim V_2$), 此时降雨已停止, 而坡体底部的储水量却逐渐增加, 说明坡内的水分逐渐向坡外渗流, 使得 v_i 表现为负值。在各降雨阶段的间歇期初期, 边坡的 v_i 值均较高, 在 I_2 期间边坡的 v_i 最高达 -4.3 mL/s。进入降雨间歇期 100 s 后, 边坡 v_i 迅速下降。至降雨间歇期的后期, 边坡 v_i 稳定在 -0.1 mL/s。因为在降雨间歇期的初期, 水分通过坡内颗粒孔隙结构快速排出。而在降雨间歇期的后期, 坡内水分主要受土壤吸附力和毛细力束缚, 渗出速率减缓^[29]。

不同降雨阶段模型边坡的体积含水率(w_v)的时程变化曲线见图 12。边坡在降雨前($t=3\ 600$ s)的体积含水率(w_v)分布在 7.5%~8.7%。H6、H3 测点位于坡内同一高度, 其中 H6 测点距坡表 80 mm、H3 测点距坡表 140 mm。在阶段 I~阶段 II 中期, 边坡坡表(H6)

的 w_v 缓慢增加,在阶段 II 后期坡表 w_v 略微下降。在阶段 III ~ V,坡表体积含水率呈现出在降雨期间增长、在间歇期下降的响应特征。而坡内(H3)的 w_v 在阶段 I ~ II 表现出缓慢增加的规律,在阶段 II 结束时 w_v 接

近 12%。在阶段 III ~ V 坡内(H3)的 w_v 响应规律与坡表(H6)一致。与坡表、坡内 w_v 响应规律不同,阶段 I 降雨开始后,边坡坡后、坡底(H4、H2)的 w_v 缓慢增长到阶段 V。试验结束后,边坡坡底 w_v 值最大,可达 18.2%。

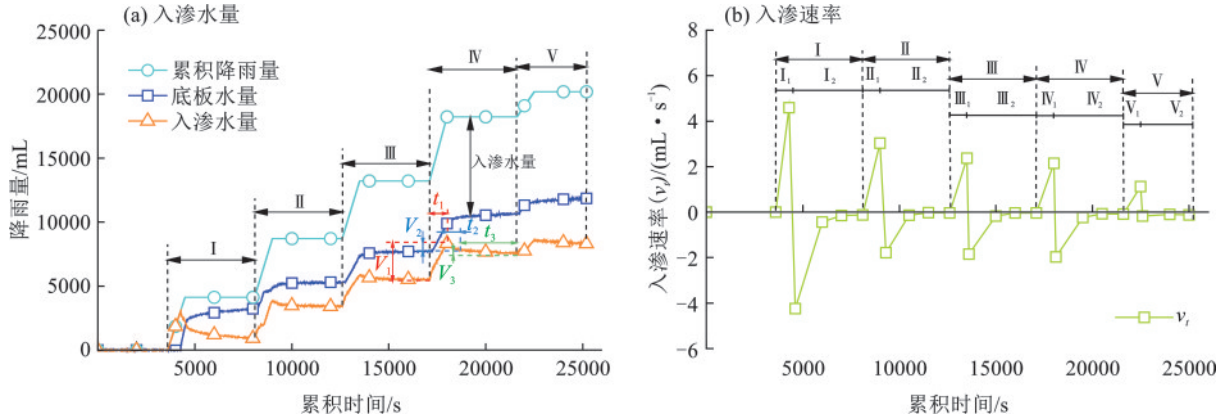


图 11 降雨 I ~ V 阶段模型边坡的入渗水量和入渗速率变化特征

Fig.11 Variation characteristics of infiltrated water volume and infiltration rate in slope model during rainfall stages I - V

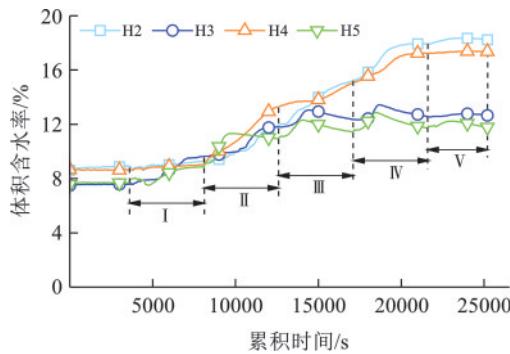


图 12 不同降雨阶段模型边坡体积含水率 (w_v) 的变化

Fig.12 Variations in volumetric water content (w_v) in slope model during different rainfall stages

图 13 为不同降雨阶段模型边坡的体积含水率分布云图。由图 13a 可知,在阶段 I ($t=3\ 600\ s$),随坡高增加,边坡体积含水率 (w_v) 呈递减的分布特征, w_v 均低于 9%。进入阶段 II ($t=8\ 100\ s$),边坡的 w_v 均值较阶段 I 提升约 2%。由图 13b 可知,在此阶段,坡内形成以坡脚、坡肩及坡后竖向边界为外轮廓的“水杯”形低含水区域 ($w_v \leq 9.5\%$)。将 $w_v \leq 9.5\%$ 的低含水率区深度定义为 d_w ,该阶段中边坡的 d_w 为 285 mm ($9.5\ d_0$)。进入阶段 III ($t=12\ 600\ s$),边坡中上部的水分逐渐向坡底运移,坡底区域的 w_v 最大值超过 13% (图 13c)。在边坡第 2、3 行根系 ($R_{21} \sim R_{23}$ 、 $R_{31} \sim R_{33}$) 周围形成“半椭圆”状的低含水率区, d_w 为 42 mm ($1.4\ d_0$)。由图 13d 可知,至阶段 IV ($t=17\ 100\ s$),边坡坡底的 w_v 达到 16%。此时边坡在第 3 行根 ($R_{31} \sim R_{33}$) 的根深内形成“三角形”的低含水率区,此时 d_w 值约 24 mm ($0.8\ d_0$)。

降雨初期,边坡坡表 w_v 值较低,水分主要以毛细水的形态存在。此阶段根系蒸腾作用可以直接从土

体中排出水分,影响范围可以延伸至根系以外的区域。因此,边坡内部形成以根系为中心、向根周扩展的低含水率影响区。然而,随着降雨的持续,水分不断下渗和积累,坡内 w_v 持续增加,土体逐渐向饱和状态过渡。此时,土壤中的空气被排出,基质势趋近于零,毛管力作用基本消失。在这种状态下,根系蒸腾吸水虽然可以产生低水势,但其影响根区外水分的能力显著减弱。此阶段,坡内的水分运移主要受制于整体的压力梯度和土壤的饱和导水率,而非根系局部的吸水点。所以根系加固区内与根区外部的含水率差值逐渐减小,低含水率区范围逐渐向坡表收缩^[30-31]。

2.3 入渗-变形-失稳演化协同作用

图 14 为边坡内部竖向应变条带上不同测点的弯曲应变随时间变化特征。由图 14 可知,在阶段 I ~ V,边坡上部测点(B5)的弯曲应变 (ϵ_b) 呈现缓慢增长-陡增-不变的增长特征。在阶段 I 前期,边坡上部的 ϵ_b 缓慢增加至 $-920\ \mu\epsilon$ 。而阶段 II 上部 ϵ_b 陡降至 $-2\ 580\ \mu\epsilon$ 后不再发生变化。边坡上部测点 B4 的 ϵ_b 在阶段 I 前期快速下降至 $-2\ 000\ \mu\epsilon$,在阶段 I 后期稳定。在阶段 II ~ IV,边坡中部 ϵ_b 一直保持较高的增长速率。阶段 IV 结束后,中部 ϵ_b 达到 $-7\ 035\ \mu\epsilon$,由于受降雨影响边坡坡面土体逐渐剥落,上部弯曲应变逐渐增大。在阶段 II 降雨期间,前 2 行根系脱落,坡面失稳面积比 (a_f) 逐渐超过 80%,边坡上部弯曲应变出现陡增。此过程中失稳破坏面破坏深度已经越过 B5 测点,并继续向坡内发展。

而边坡下部 B1、B2 测点的 ϵ_b 增长可分为在阶段 I 缓慢增加、在阶段 II ~ IV 趋于稳定 2 个阶段。值得注意的是,越靠近坡底, ϵ_b 增长量越小。

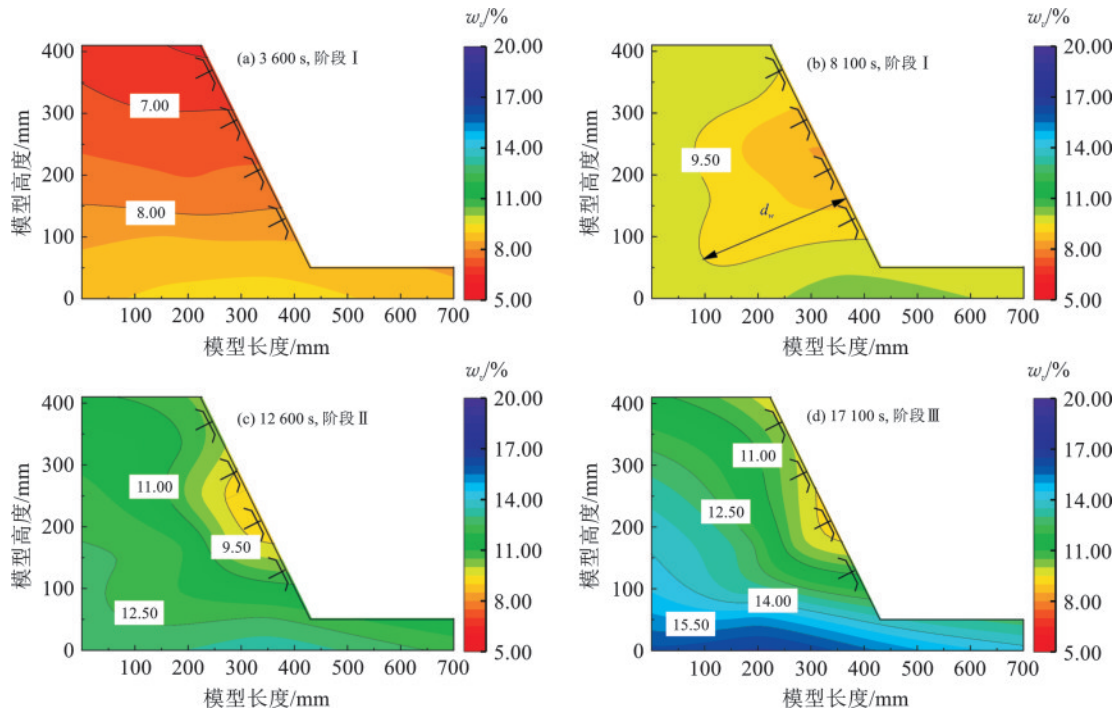


图 13 不同降雨阶段模型边坡的体积含水率 (w_v) 分布云图

Fig.13 Distribution contour map of volumetric water content (w_v) in slope model during different rainfall stages

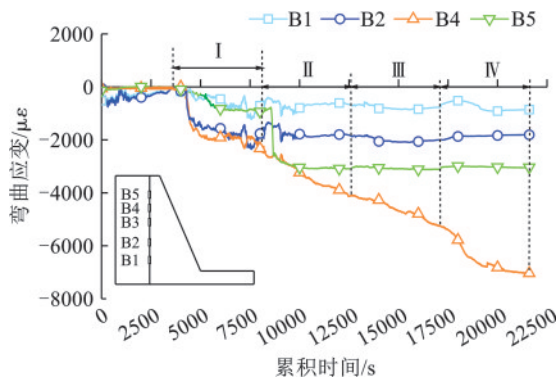
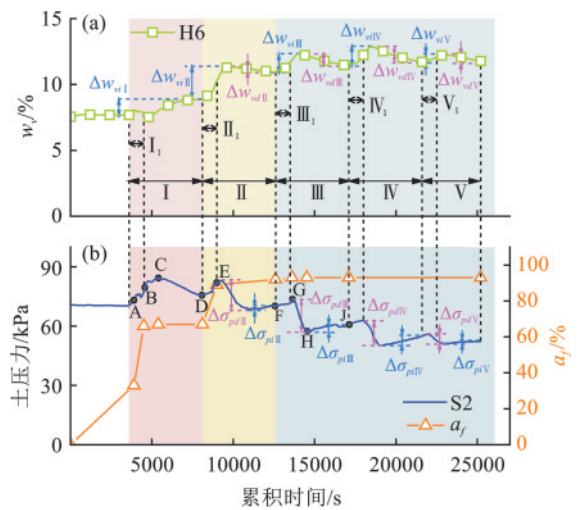


图 14 边坡内部竖向应变条带上不同测点的弯曲应变 (ϵ_b) 随时间变化特征

Fig.14 Temporal variation characteristics of bending strain (ϵ_b) at different measurement points on vertical strain strip within slope

图 15 为板状根边坡 H6 测点的体积含水率 (w_v)、S2 测点土压力 (σ_p) 及坡表失稳特征参数 (a_f) 曲线随降雨时间 t 变化曲线。由图 14 可知,边坡中 H6 测点 w_v 在阶段 I 缓慢增长,在阶段 II ~ V 呈现先增加后降低的特征。S2 测点土压力 σ_p 在阶段 I 先升后降,在阶段 II ~ V 各阶段表现为先增后减再增的变化特征。

在阶段 I 的降雨期间,边坡坡表失稳剥落,坡面失稳面积比 a_f 逐渐扩展超过 60%。但降雨入渗引起的土压力上升量超过失稳剥落引起的土压力下降,所以 S2 测点的 σ_p 逐渐上升。在降雨间歇期(点 B~D),T4 边坡 a_f 未发生改变,至阶段 I 降雨结束后(点 B) σ_p 为 80.6 kPa。在降雨间歇期(点 B~D),边坡内雨水逐渐向坡外渗流, σ_p 下降 8.9 kPa。



注:图 a 为 H6 测点 w_v 时程;图 b 为 S2 测点 σ_p 时程以及 a_f 时程。

图 15 边坡 H6 测点体积含水率 (w_v)、S2 测点土压力 (σ_p) 及坡表失稳特征参数 (a_f) 随降雨时间 (t) 变化特征

Fig.15 Variation characteristics of volumetric water content (w_v) at measurement point H6, soil pressure (σ_p) at measurement point S2, and slope surface instability parameter (a_f) with rainfall time (t)

在阶段 II ~ V 的降雨期间(点 D~E、F~G),H6 测点 w_v 增长是造成 S2 测点 σ_p 增大的主因。这期间 H6 测点 w_v 增幅为 0.5%~2.4%,S2 测点 σ_p 增幅为 0.9~7.5 kPa。在阶段 II ~ V 的间歇期间(例点 E~F、G~J),H6 测点 w_v 先增大后减小,对应 S2 测点 σ_p 先减后增。因为在各降雨阶段的间隙期初期(点 G~H),坡表水分继续向 H6 测点入渗,这使其 w_v 继续上升。这期间 H6 测点周围形成高饱和区,此时 w_v 超过

12%, S2测点上部土体的有效重度降低,其上覆荷载减小, S2测点 σ_p 出现短暂下降。而在降雨间歇期的后期(点H~J), H6测点 w_v 下降,其下部土体有效重度增大, σ_p 逐渐增长。

但值得注意的是,在阶段Ⅲ~Ⅴ期间 σ_p 虽然在波动,但各阶段开始时和试验结束时的 σ_p 呈现下降趋势。可能是因为在阶段Ⅱ土体结构遭受严重破坏、土颗粒间的胶结作用减弱的情况下,板状根对土体的加固作用基本失效。同时板状根加固深度较浅,蒸腾作用范围有限,对深层土体水分运移影响较小,使得边坡无法及时排除内部水分,导致测得的土压力下降。

3 讨论

在间歇性强降雨作用下,板状根边坡呈以浅层滑塌为先导、向深部渐进扩展的失稳模式。降雨初期,雨水入渗导致土体孔隙水压力升高、有效应力降低,表层粉土质砂迅速软化发生剥落。然而,板状根的蒸腾作用中和部分降雨,且根系与周围土体形成根土复合体,在一定程度上抑制坡表破坏的进一步发展。但随着降雨的持续进行,失稳破坏逐渐向坡内延伸。坡顶拉裂、侵蚀沟依次出现,滑塌深度迅速超越板状根的浅层加固范围,滑塌面在根网未覆盖的区域逐渐贯通。至降雨后期,板状根脱落导致蒸腾作用失效,间歇降雨作用下坡表的暂态饱和带反复出现,土压力随之呈现“上升-下降-上升”的循环变化,边坡进入“松动-压实-再松动”的渐进疲劳状态。

根据已有研究^[32]可知,直根凭借其垂直深扎的特性,在增强土体抗拉强度及锚固深层土壤方面表现突出,尤其适用于潜在深层滑移面的边坡稳定。心型根则以其多级侧根构成的网状结构,在浅中层土体中提供较为均匀分散应力及较强的蒸腾吸力作用,增强土体整体性^[33-34]。相比之下,板状根因其水平延伸的形态,在近地表处形成水平阻隔作用的复合加固体系,其加固机制更侧重于抵抗表层土体的滑移与侵蚀^[35-36]。这种形态优势使得板状根树种特别适用于表层土壤松散、易发生浅层滑坡或水土流失严重的生态脆弱区。实际应用中,单一根系形态难以覆盖复杂边坡需求。可针对性引入板状根树种,与深根性树种形成立体防护网络,从而在更大范围内提升生态系统的稳定性和抗干扰能力。

4 结论

1) 间歇降雨作用下,板状根加固边坡失稳主要发生在前2个降雨阶段。5个降雨阶段结束后,边坡的崩滑失稳区面积比(a_f)、坡体崩滑深度比(d_f)分别为92.4%、2.89。

2) 在降雨入渗过程中,板状根加固边坡坡表形成以根为中心、并向根周扩展的低含水率区($w_v \leq 9.5\%$)。随着降雨阶段的进行,低含水率区由“水杯形”向“半椭圆形”和“三角形”转变。

3) 在间歇降雨作用下,板状根边坡坡内土压力响应呈现的阶段性的增减特征。在阶段Ⅰ,土体较干燥,雨水逐渐填充土体孔隙,边坡土压力呈现出在降雨期间上升、在降雨间歇期下降的规律。在阶段Ⅱ~Ⅴ,坡表土体逐渐湿润,坡表体积含水率达到先增后减的动态波动。此过程,土压力受坡内水位浮动表现“上升-下降-上升”的循环变化。且由于坡内水分无法及时排除,浮重度增加,坡内土压力整体呈下降趋势。

参考文献:

- [1] 冯文凯,赵家琛,易小宇,等. 闽粤赣边区“6·16”强降雨诱发群发滑坡特征与驱动因素[J]. 地球科学, 2025, 50(10):4111-4124.
FENG W K, ZHAO J C, YI X Y, et al. Characteristics and drivers of clustered landslides induced by extreme rainstorm on June 16 in Fujian-Guangdong-Jiangxi junction area[J]. Earth Science, 2025, 50(10):4111-4124.
- [2] 刘瑞阳,许强,蒲川豪,等. 湖南资兴市2024年7月台风“格美”诱发滑坡特征及其地质控制作用[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, <https://doi.org/10.13203/j.whugis20250027>.
LIU Ruiyang, XU Qiang, PU Chuanhao, et al. Characteristics of landslides induced by Typhoon; 'Gaemi' in Zixing, Hunan, July 2024, and Their Geological Control Factors [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, <https://doi.org/10.13203/j.whugis20250027>.
- [3] DENG Z C, LAN H X, LI L P, et al. Vegetation-induced modifications in hydrological processes and the consequential dynamic effects of slope stability [J]. Catena, 2025, 251:e108793.
- [4] DING H, XUE L, SHANG J S, et al. Study on synergistic action of tap-like arbor root system and anti-slide piles by physical model experiment of landslides [J]. Landslides, 2024, 21(7):1707-1717.
- [5] FENG L Q, CHEN Y L, GUO M M, et al. Effect of dominant vegetation under long-term natural and artificial vegetation restoration modes on gully slope stability considering rainfall and topography interactions [J]. Catena, 2025, 256:e109067.
- [6] PHAN T N, LEUNG A K, NGUYEN T S, et al. Modelling root decomposition effects on root reinforcement and slope stability [J]. Computers and Geotechnics, 2025, 179:e107024.
- [7] 吴锐斌,及金楠,杨彧哲. 不同生长阶段香根草根土复合体的邓肯-张本构模型[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6):97-104.

- WU R B, JI J N, YANG Y Z. Duncan-Chang constitutive model of vetiver root and soil matrix at different growth stages [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(6):97-104.
- [8] 蒋希雁,董长震,李明洋,等.根土复合体抗剪特性变化特征及强度预估研究[J].*河北建筑工程学院学报*,2024,42(3):22-29. JIANG X Y, DONG C Z, LI M Y, et al. Study on the change characteristics of shear resistance and strength prediction of root soil composite[J]. *Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering*, 2024, 42(3):22-29.
- [9] 廖田婷,蒋关鲁,张崇磊,等.考虑水文效应的不同植被根系护坡效果数值分析[J].*长江科学院院报*, 2022, 39(9):102-108. LIAO T T, JIANG G L, ZHANG C L, et al. Numerical analysis of slope protection effect of root system of different plants considering hydrological effect[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(9):102-108.
- [10] CHENG P, WU L Z, ZHANG H, et al. Inclusion of root water absorption and reinforcement in upper bound limit stability analysis of vegetated slopes [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 169:e106227.
- [11] GAO X G, WANG J P, LI X W, et al. Combined effects of tree canopy and root systems on soil hydraulic properties: A field monitoring of a *Populus alba* [J]. *Rhizosphere*, 2025, 35:e101123.
- [12] DE SOUSA R B A, LEUNG A K, ZHU J. Centrifuge modelling of vegetated soils: A review [J]. *Ecological Engineering*, 2024, 206:e107319.
- [13] SONNENBERG R, BRANSBY M F, HALLETT P D, et al. Centrifuge modelling of soil slopes reinforced with vegetation [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47(12):1415-1430.
- [14] KAMCHOOM V, LEUNG A K. Hydro-mechanical reinforcements of live poles to slope stability [J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(6):1423-1434.
- [15] PRASETYANINGTIYAS G A, KAMCHOOM V, LEUNG A K, et al. Hydromechanical behaviour of a slope reinforced by grass roots under rainfall conditions [J]. *Ecological Engineering*, 2024, 209:e107427.
- [16] 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-Science Reviews*, 2017, 167:88-102.
- [17] NG C W W, KAMCHOOM V, LEUNG A K. Centrifuge modelling of the effects of root geometry on transpiration-induced suction and stability of vegetated slopes [J]. *Landslides*, 2016, 13(5):925-938.
- [18] NG C W W, LEUNG A K, YU R W, et al. Hydrological effects of live poles on transient seepage in an unsaturated soil slope: Centrifuge and numerical study [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(3):e04016106.
- [19] SONG X H, TAN Y, LU Y. Microscopic analyses of the reinforcement mechanism of plant roots in different morphologies on the stability of soil slopes under heavy rainfall [J]. *Catena*, 2024, 241:e108018.
- [20] SONNENBERG R, BRANSBY M F, BENGOUGH A G, et al. Centrifuge modelling of soil slopes containing model plant roots [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(1):1-17.
- [21] LEUNG T Y. The use of native woody plants in slope upgrading in Hong Kong [D]. Hong Kong, China: The University of Hong Kong, 2014.
- [22] JI J N, KOKUTSE N, GENET M, et al. Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability. A case study on black locust (*Robinia pseudoacacia*) and arborvitae (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2012, 92:139-154.
- [23] DE BAETS S, POESEN J, REUBENS B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength [J]. *Plant and Soil*, 2008, 305(1):207-226.
- [24] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准 [S]. 北京:中国计划出版社, 2007. Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 50145—2007 Standard for engineering classification of soil [S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [25] 杨成,王田龙,韩力,等.贵州地区软硬互层岩质边坡滑面勘查与稳定性分析研究 [J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2025, 42(5):97-105. YANG C, WANG T L, HAN L, et al. Research on the slide surface investigation and stability analysis of interbedded soft and hard slopes in Guizhou [J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2025, 42(5):97-105.
- [26] 赵智辉,杨金虎,康跃明,等.降雨影响条件下滑坡滑移面深度力学机理研究 [J]. *能源与环境*, 2024, 46(3):264-269. ZHAO ZH, YANG JH, KANG Y M, et al. Study on depth mechanical mechanism of the sliding surface of the landslide under the influence conditions of rainfall [J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2024, 46(3):264-269.
- [27] 黄晓虎,胡禹龙,郭飞,等.降雨及库水联合作用下膨胀土滑坡变形机理研究 [J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(2):109-122. HUANG X H, HU Y L, GUO F, et al. Study on the mechanism of landslide promotion of expansive soil under the combined action of rainfall and reservoir water [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(2):109-122.
- [28] WANG S, IDINGER G, WU W. Centrifuge modelling of rainfall-induced slope failure in variably saturated soil [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(9):2899-2916.