

水利水电工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

滑坡生态-支护结构联合防护机理研究

林程, 张桂荣, 孔洋, 汪璋淳, 张贤, 李欣然

Study on the joint protection mechanism of ecological-supportive structures for landslides

LIN Cheng, ZHANG Guirong, KONG Yang, WANG Zhangchun, ZHANG Xian, LI Xinran

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240517001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240517001

林程, 张桂荣, 孔洋, 等. 滑坡生态-支护结构联合防护机理研究 [J]. 水利水运工程学报. (LIN Cheng, ZHANG Guirong, KONG Yang, et al. Study on the joint protection mechanism of ecological-supportive structures for landslides[J]. Hydro-Science and Engineering(in Chinese))

滑坡生态-支护结构联合防护机理研究

林程¹, 张桂荣², 孔洋², 汪璋淳², 张贤², 李欣然²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 考虑三峡库区典型堆积层滑坡的滑坡体物质组成, 以黏性土与砂土混合物为滑体介质制作滑坡模型, 人工设置软弱滑面, 研究降雨入渗导致的滑坡变形过程中生态-支护结构联合防护体系的受力、变形与桩身弯矩分布规律, 以及边坡渗流场变化, 揭示浅表层生态植被防护结构与深层抗滑桩等支挡结构之间的受力分配模式。结果表明: 在持时为 8 h、降雨强度为 18 mm/h 的连续降雨条件下, 采用生态-支护结构联合防护体系的生态边坡相较于仅采用抗滑桩的边坡更晚达到整体饱和, 边坡上植被的截留作用与“薄膜”排水作用削弱了坡面雨水入渗, 延缓边坡变形进程; 滑带附近孔隙水压力增大、滑带处土体力学性能降低是降雨中后期引起边坡变形(表现为桩顶位移、桩身弯矩)的主要因素; 纯桩边坡中桩顶最终位移远大于生态边坡中抗滑桩桩顶位移, 同时生态边坡最大弯矩值相较于纯桩边坡明显减小, 表明边坡植被承担了部分由降雨引起的下滑力, 与深层抗滑桩结构形成双重防护作用, 提高了边坡整体稳定性。在极端降雨冲刷试验中, 两种边坡的承受能力与破坏机制不同: 纯桩边坡历时 60 min 完全破坏, 表现为暴雨冲刷引起的局部浅层滑动破坏; 生态边坡历时 150 min 局部破坏, 表现为边坡下部崩塌破坏。

关键词: 堆积层滑坡; 降雨; 生态-支护结构

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号:

三峡库区因其独特的地质构造作用及地质环境特征导致滑坡大量发育^[1], 其中堆积层滑坡是三峡库区最为主要的滑坡类型^[2]。降雨是影响堆积层滑坡稳定性的关键因素之一^[3-4]。降雨对边坡的危害表现在: 雨水入渗改变坡体内部渗流场使得土体含水率增加^[5]、重度增大, 抬高地下水位, 进而导致下滑力增大^[6]; 雨水渗透至滑体与滑床相接的滑带处, 浸润软化滑带, 降低滑带岩土体的力学性能; 暴雨对边坡表面的侵蚀冲刷作用等。目前, 针对降雨作用下诱发的滑坡, 研究人员从模型试验^[7]、数值模拟^[8]等角度展开了一系列研究。王斌等^[9]围绕强降雨下堆积体边坡的破坏机制开展了相关试验研究, 探究了不同颗粒级配及含石量分布对堆积体边坡破坏模式的影响规律; 钟源等^[10]以三峡库区燕子滑坡为原型, 通过开展室内物理模型实验, 并结合数值模拟与滑坡动力学理论分析, 研究了强降雨作用下滑坡变形特征与破坏规律; Miao 等^[11]为揭示水位波动与降雨耦合作用下的破坏模式和变形机理, 以三峡库区两水井滑坡为研究对象开展离心模型试验, 认为边坡破坏过程分为微裂纹出现与扩展阶段、逆冲式破坏阶段、倒退式破坏阶段和整体破坏阶段四个阶段; 张强等^[12]通过离心模型试验模拟了复杂水库调度和降雨条件下堆积体滑坡的行为, 研究认为在降雨和库水位骤降耦合效应下, 降雨对堆积体边坡的滑动起到加速作用。

三峡库区滑坡防治常用结构包括抗滑桩、锚杆、抗滑挡墙等, 生态防护技术主要包括纯植被护坡、植被与土工合成材料结合的方式^[13]。抗滑桩作为固坡“硬”措施的代表, 因其支挡效果显著, 施工方便, 已成为

收稿日期: 2024-05-17

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学联合研究基金资助项目(U2240221, U2340227); 国家自然科学基金资助项目(51979174)

作者简介: 林程(1999—), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 主要从事岩土力学试验研究。

E-mail: 1678219246@qq.com 通信作者: 张桂荣(E-mail: grzhang@nhri.cn)

库区库岸防护、崩滑体防治的首选方案。目前抗滑桩支护边坡的研究大多针对无雨情况^[14],关于降雨所诱发滑坡对抗滑桩的影响研究相对较少,研究方法主要是理论计算^[15]与数值模拟^[16]。植被或植被与工程措施相结合的绿色生态护坡技术有助于解决强降雨作用下边坡失稳和水土流失等环境问题,被称为活性物质固坡的“软”措施。生态-结构联合护坡体系是指将边坡传统防治结构与绿色生态防护相融合的体系,这种“软”“硬”措施相结合的新技术更有利于边坡稳定。因此,有必要开展更为系统的研究,以深入了解植被对抗滑桩稳定性和边坡防护效果的综合作用,提高边坡防护的有效性和可靠性。本文以三峡库区典型堆积层滑坡为研究对象,以有无植被为关键变量,设计降雨作用下抗滑桩支护边坡的室内物理模型试验,分析降雨过程中纯桩边坡与生态边坡的体积含水率、孔隙水压力、桩顶位移、桩身弯矩的演化规律,以及生态-支护结构联合护坡体系的抗滑特性、协调变形机制与调控降雨入渗能力。通过对比极端降雨作用下纯桩边坡与生态边坡的变形破坏过程,探讨生态-支护结构联合护坡体系的护坡效果,为滑坡生态防护工程设计提供技术支撑。

1 抗滑桩支护边坡物理模型

1.1 物理模型概化

三峡库区堆积体滑坡由滑体、滑带、滑床三部分组成^[17]。滑体主要由第四系或近代松散堆积物组成。滑带物质组成以粉质黏土、含砾黏土等为主,力学性能较差,是上部堆积层与下部基岩的接触带。滑带形态以弧形为主,一般具有前部缓、后部陡的形态特征。为简化分析,将弧形滑带简化为前缓后陡的四段折线式滑带。滑床为基岩,以三叠系、侏罗系地层为主。三峡库区中堆积体滑坡大多发育于坡度为 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的斜坡,但考虑小比尺模型试验的边坡安全系数高于实际边坡,故在本次试验中设置坡度为 45° 。抗滑桩布置在边坡中下部(图1)。

1.2 试验装置

本试验的试验平台为带有智能人工降雨系统的河流库地质灾害预测预报与防治研究系统。室内模型试验装置主要包括边坡外框架、智能降雨模拟系统和测量系统。具体如下:

(1)边坡外框架。在大型物理模型试验平台的降雨槽中搭建边坡外框架。外框架长、宽、高分别为4.0、1.8、2.0 m。整体框架由砖块砌筑而成,水泥抹面。

(2)智能降雨模拟系统。由降雨控制终端、抽水泵送系统、降雨喷头三部分组成。顶部降雨喷头离地面约5.0 m,采用喷嘴直径1.0、1.5、2.5、3.2、5.0 mm的喷头组合降雨,可模拟微雨、小雨、中雨、大雨、暴雨雨型。模拟降雨强度为15~150 mm/h,降雨调节精度为3 mm/h。经试验,降雨均匀度均大于85%。

(3)测量系统。包括TDR土壤水分传感器和MPM-160B水分测定仪、CYY23型基质吸力传感器、CYY2型孔隙水压力传感器、YWC型应变式位移传感器、微型电阻式应变片。数据采集系统采用YBY-4010应变分析系统与DX485采集器。

1.3 相似材料与模型材料

相似原理是开展物理模型试验的理论基础。结合本次试验条件,选取几何相似比 $C_l=30$,密度相似比 $C_p=1$,重力加速度相似比 $C_g=1$ 作为基本量纲。无量纲的物理量相似比都取1,即: $C_\phi=C_\epsilon=C_\mu=C_\theta=1$,进而可根据 π 方程及相似判据推导其他参数的相似比如表1所示。

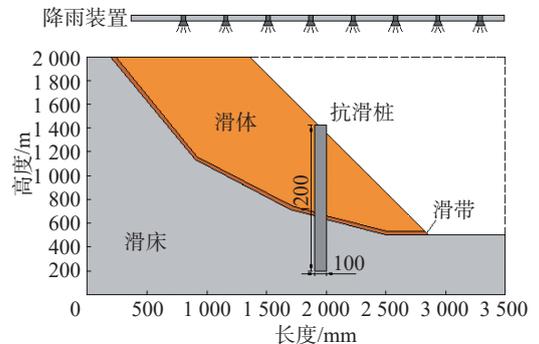


图1 滑坡生态-支护结构概化物理模型(单位:mm)

Fig. 1 Ecological-supportive structure physical model for landslides (unit: mm)

表 1 相关物理量相似比
Tab. 1 Similar ratios of each parameter

物理量	相似比	物理量	相似比
密度(ρ)	1	重力加速度(g)	1
长度(l)	30	时间(t)	$\sqrt{30}$
泊松比(μ)	1	黏聚力(c)	30
内摩擦角(φ)	1	降雨强度(q)	$\sqrt{30}$
变形模量(E)	30	应力(σ)	30

滑床采用多段式前缓后陡结构, 采用水泥浇筑而成。滑体与滑带的相似材料参照三峡库区八字门堆积层滑坡^[18]的工程地质特征建立。滑体由黏性土与砂土混合制作而成。有学者采用双重塑料膜来模拟滑带, 但在本试验中不透水的双重塑料膜对渗流场的影响较大, 故并未使用该方法。本试验中, 采用 60% 玻璃珠与 40% 滑体土的混合材料模拟滑带, 既能模拟滑带的透水性, 又能模拟滑带较低的抗剪强度。滑带厚设为 2 cm, 滑带与滑体的力学参数如表 2 所示。参考相关文献^[19], 抗滑桩采用聚氨酯材料, 由简支梁法测定其弹性模量。滑坡模型中共布设 6 根模型桩, 间隔 20 cm。模型桩断面尺寸为: 长度 \times 宽度=100 mm \times 70 mm, 桩长为 1 200 mm。

表 2 土体物理力学参数
Tab. 2 Physical and mechanical parameters of soil

介质	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
滑体-原型	19.4	21.0	30.0
滑体-模型	18.9	12.0	30.7
滑带-原型	19.9	17.6	17.0
滑带-模型	17.5	0	20.0

2 物理模型试验方案

模型试验中采用孔压计、基质吸力计、含水率计等仪器监测坡体渗流场变化; 通过埋设位移计监测桩顶位移, 观察滑坡体的变形过程; 通过在抗滑桩桩身上粘贴应变片, 监测桩身应变规律。从坡脚、坡底、坡中、坡顶沿深度分别布设 9 支体积含水率计、4 支孔隙水压力计、4 支基质吸力计、1 支位移计。位移计布置在抗滑桩桩顶, 实时监测抗滑桩桩顶位移。传感器埋设位置如图 2(a) 所示。桩身应变片粘贴位置如图 2(b) 所示。

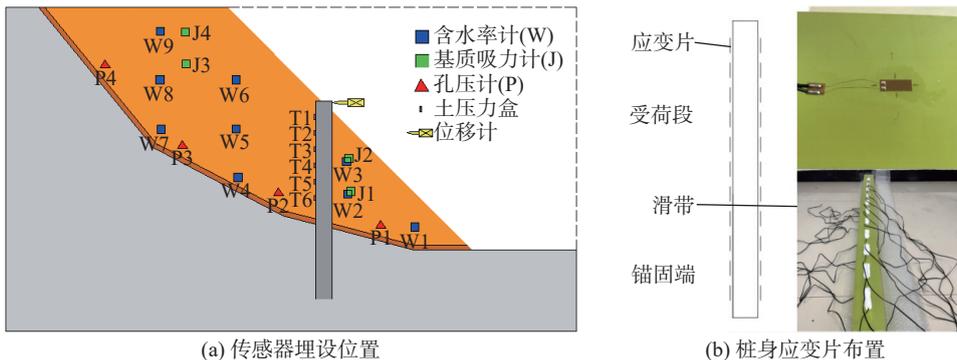


图 2 监测传感器布置方案
Fig. 2 Monitoring sensor layout scheme

根据各测点的应变值, 采用如下公式计算桩身弯矩,

$$M = EI(\varepsilon_{\text{拉}} - \varepsilon_{\text{压}})/d \quad (1)$$

式中: M 为桩身弯矩; EI 为抗滑桩的抗弯刚度; $\varepsilon_{\text{拉}}$ 、 $\varepsilon_{\text{压}}$ 为桩身各测点的拉、压应变; d 为同一截面处拉压测点距离。

本试验降雨强度设为 18 mm/h, 根据相似条件, 对应原型为 100 mm/h 的极端降雨条件。试验步骤如下: (1) 在模型框架两侧贴上一层塑料薄膜, 减少土体与框架之间的摩擦。在薄膜上按照事先确定的边坡尺寸、仪器埋放位置做好标记。(2) 将试验所用的土料与水混合进行机器搅拌, 将初始含水率控制在 13% 左右。为保证边坡质地均匀, 采用分层夯实法填筑岸坡。以每压实 10 cm 高度为 1 层共分 15 层填筑至设计坡高。采用木锤击实仪击实方法^[20], 进行了木锤击实的预试验, 并采用环刀法进行检验。通过多次实践, 得到合理的木锤击实方案, 可控制每层压实度 90% 以上。(3) 依据传感器埋设方案进行仪器埋设, 当填筑到预设高度后, 埋入传感器并轻轻压实, 之后再依次进行上部填筑。(4) 调试数据采集系统, 判断传感器是否正常工作。(5) 根据设计方案削坡至所需几何尺寸, 将边坡模型静置一段时间, 使其在自身重力下固结、土体内部水分扩散均匀。(6) 进行降雨试验, 降雨持续 8 h。试验开始前再次检查传感器读数是否正常, 并采用短历时微雨工况对试验系统的整体性及连通性进行检验, 确保降雨系统正常工作。试验开始后每隔 10 min 记录 1 次含水率读数, 孔隙水压力、基质吸力等每隔 1 min 记录 1 次读数。

本次试验所用植被为香根草, 预先在试验田中培育后移植至室内边坡上, 移植后养护 6 周。室内模型试验进行两组: 试验一, 降雨作用下抗滑桩支护结构物理模型试验(纯桩边坡); 试验二, 降雨作用下抗滑桩-植被联合支护物理模型试验(生态边坡)。两组试验采用相同的滑坡模型(图 3)。



(a) 纯桩边坡



(b) 生态边坡

图 3 室内模型试验

Fig. 3 Indoor model test

3 物理模型试验结果与机理分析

3.1 桩顶位移

通过安装在桩顶的位移计实时监控降雨过程中抗滑桩桩顶位移的变化。从图 4 可以看出, 纯桩边坡与生态边坡的桩顶位移-降雨历时曲线总体可分为 3 个阶段。第一阶段为降雨入渗阶段, 此阶段抗滑桩受力很小, 桩顶位移基本为 0。第二阶段为位移显著增大阶段, 随着降雨的持续渗入, 桩顶位移曲线斜率显著增大, 呈现上凹的增长趋势, 该阶段位移量明显增大。第三阶段为桩顶位移缓慢增长阶段, 该阶段桩顶位移曲线斜率与前一阶段相比有所减小, 呈缓慢增长趋势。

在纯桩边坡中, 第一阶段(降雨 150 min 前)桩顶位移变化不大, 仅在 100 min 开始缓慢增加。降雨 150 min 后进入第二阶段, 此时桩顶位移急剧增加, 由 0.32 mm 增至 7.20 mm。第三阶段(300—500 min), 桩顶位移缓慢增加, 在降雨 500 min 后达到最大值 9.89 mm。与纯桩边坡相比, 生态边坡二、三阶段开始时间

均滞后于纯桩边坡。降雨 220 min 后,生态边坡中桩顶位移开始迅速增大,进入第二阶段。第二阶段持续至降雨 350 min 后进入第三阶段(350—500 min),生态边坡桩顶位移在降雨 500 min 后达到最大值 2.89 mm。纯桩边坡的最大桩顶位移远大于生态边坡,且纯桩边坡桩顶位移的响应时间早于生态边坡。这是由于植被根系的加筋锚固作用增强了土体的力学性能,提高了边坡的稳定性,进而使抗滑桩桩顶位移减小。同时,植被茎叶的截留作用与“薄膜”排水作用使生态边坡的降雨入渗速度慢于纯桩边坡,因而在生态边坡中桩顶位移的响应时间晚于纯桩边坡。

3.2 体积含水率

体积含水率可以实时反应边坡内部渗流场变化。本次试验选取坡脚(W1)、坡底(W2、W3)、坡中(W4、W5、W6)、坡顶(W7、W8、W9) 4 个断面,通过 9 支体积含水率计追踪边坡体积含水率变化(图 5)。从图 5 可以看出,生态边坡与纯桩边坡的初始体积含水率均在 20% 左右。其中生态边坡中位于坡脚位置的体积含水率计(W1)由于植被浇水养护,水分在坡脚汇聚,因此该位置的初始含水率较高,接近 30%。经过一定时间的降雨后,边坡各位置体积含水率为 40%~45%。

3.2.1 降雨期间体积含水率变化 由图 5(a)可见,对于纯桩边坡,降雨初期(降雨历时 50 min),W1 至 W9 各测点的体积含水率保持稳定,表明此时降雨入渗作用尚未到达传感器位置。随着降雨历时继续增加,降雨入渗陆续达到监测点,监测点处的土体体积含水率开始急剧增大,但不同位置监测点的响应时间不同。具体而言,降雨湿润锋最先到达靠近坡体表面 W9(50 min)、W1(60 min)、W3(80 min)、W6(90 min) 测点,响应时间由坡顶、坡脚、坡底、坡中逐渐滞后,且深度越深,响应速度越慢。降雨入渗湿润锋最晚到达边坡 W4 处测点,用时 210 min,此时代表降雨已入渗至整个边坡。生态边坡降雨试验的体积含水率变化如图 5(b)所示。降雨入渗湿润锋依次抵达 W1、W9、W3 测点,分别用时 60、70、100 min。降雨入渗湿润锋最晚到达边坡 W5 处测点,用时 230 min。

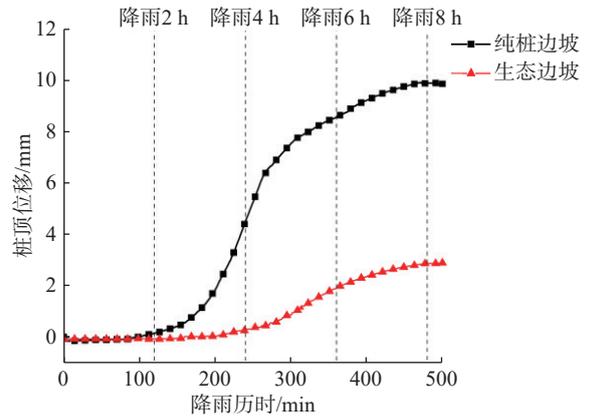


图 4 桩顶位移变化过程

Fig. 4 The process of pile top displacement change

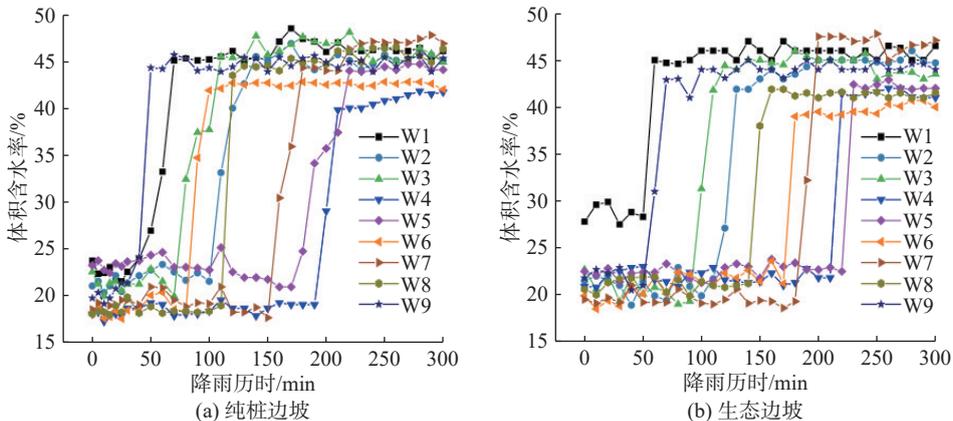


图 5 体积含水率变化过程

Fig. 5 The process of change in volumetric moisture content

3.2.2 降雨响应差异分析 通过对比生态边坡与纯桩边坡中渗流场随降雨历时的变化可以发现,生态边坡中各测点的体积含水率响应时间明显晚于纯桩边坡。这是由于植物茎叶能够截留降雨、抑止地表径流、削

弱溅蚀等,部分雨水降落在植被茂密的茎叶上并被短暂性地储存起来,而未直接渗入土壤内,之后待蒸发返回到空气中或者沿着叶片搭接所形成的天然“薄膜”排至坡底^[21]。与纯桩边坡相比,生态边坡中“薄膜”发挥排水作用,雨水在坡脚处聚集,致使坡脚 W1 处体积含水率先于 W9 处响应。边坡深处,纯桩边坡的体积含水率的响应次序为 W7→W5→W4,而生态边坡中 W4 测点处的体积含水率先于 W5,响应次序为 W7→W4→W5。表明在纯桩边坡中,雨水沿坡面垂直入渗占据主导地位。在生态边坡中,由于植被截留作用与“薄膜”排水作用削弱了坡面雨水的垂直入渗,雨水除了垂直入渗外,还存在坡内水分沿滑带运移的情况。

雨水入渗导致土体重度增加而引起的下滑力增大,以及滑带遇水软化引起的阻滑力降低是导致边坡变形(表现为桩顶位移)的直接原因。结合桩顶位移-降雨历时曲线变化的 3 个阶段分析,在纯桩边坡中,降雨 100 min 后边坡达到临界状态,桩顶位移开始缓慢增加,此时降雨入渗湿润锋抵达 W8 处,桩顶位移-降雨历时曲线位于第一阶段。降雨 150 min 后,进入第二阶段,桩顶位移明显增加,此时降雨入渗湿润锋抵达 W7 处。降雨 210 min 后, W4 处体积含水率响应,边坡整体饱和,此时桩顶位移曲线斜率达到最大、桩顶位移变化最快。生态边坡中,降雨自坡表入渗至浸润整个边坡的过程中(前 220 min),桩顶位移几乎没有变化。降雨 220 min 后, W4 处体积含水率响应,意味着雨水已经浸润整条滑带,水分沿滑带运移,此时桩顶位移-降雨历时曲线进入第二阶段。由此可见,生态边坡相较于纯桩边坡有着更高的安全系数,生态植被的力学加筋作用与“薄膜”排水作用共同提高了边坡整体稳定性。

3.3 孔隙水压力

图 6 为孔隙水压力-桩顶位移变化过程。由图 6 可以看出,在纯桩边坡中,降雨 190 min 后, P1 测点处孔隙水压力率先响应,随后是 P3、P2 处孔隙水压力依次响应,分别用时 225 和 250 min。在生态边坡中, P3、P2、P1 处的孔隙水压力依次响应,响应时间分别为降雨后 220、260、290 min。这表明边坡降雨的渗透路径在纯桩边坡和生态边坡中存在差异。在两种边坡中并非是单一的垂直入渗,生态边坡中,沿着滑带入渗的水分运移占主导地位,而在纯桩边坡中,垂直入渗占主导地位。在本次试验中, 18 mm/h 的降雨强度无法在土体孔隙中迅速形成连续水柱,导致孔隙水压力响应较体积含水率存在一定的滞后性。

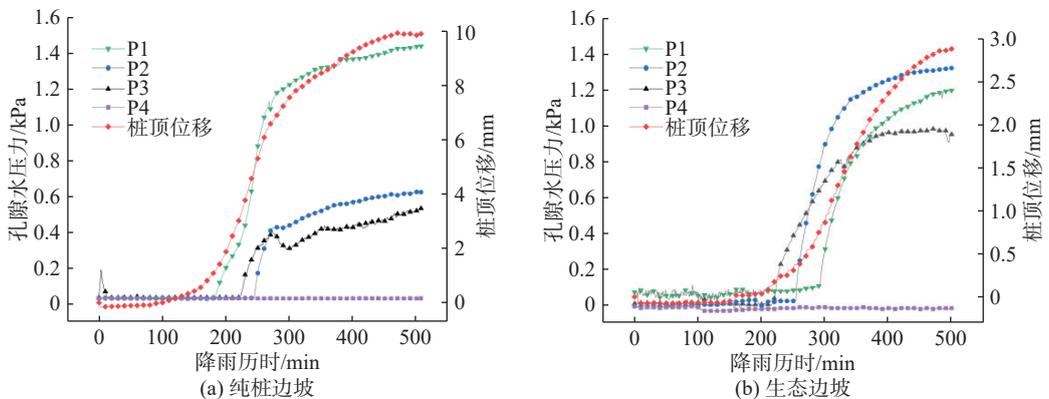


图 6 孔隙水压力-桩顶位移变化过程

Fig. 6 Pore water pressure and pile top displacement variation process

由图 6 进一步可以看出,滑带附近的孔隙水压力与桩顶位移之间存在很强的相关性。根据 Terzaghi 提出的有效应力原理,饱和土体内任意平面上受到的总应力可分为有效应力和孔隙水压力两部分,即在总应力不变的情况下,孔隙水压力和有效应力之间可相互转化。降雨水分渗透入土体中,填充土体孔隙空间,使得孔隙水压力上升,这将导致土体内部有效应力减小,进而降低土体抗剪强度,增加边坡滑移风险。此外,孔隙水压力的增大也降低了土体颗粒间的摩擦阻力,进一步促进边坡的滑动。孔隙水压力的增大还导致水分的集中流动或渗透,水分沿滑带运移,可加速边坡土体的松动和位移过程。

3.4 基质吸力

基质吸力变化规律如图 7 所示, 纯桩边坡中基质吸力初始值为 1.20~1.70 kPa, 而在生态边坡中, 靠近坡表的 J2 与 J4 的初始基质吸力初始值分别为 2.19 和 2.70 kPa, 明显高于 J1、J3 处的基质吸力初始值 (1.38 和 1.33 kPa)。这是由于 J2 与 J4 位于表层含根区, 植物根系的蒸腾作用增大了基质吸力, 进而提高了生态边坡表层土体的抗剪强度。从响应时间看, 基质吸力响应 (表现为曲线陡降) 与体积含水率响应时间一致, 降雨入渗湿润锋抵达后, 土体的含水率增加, 基质吸力随之减小。基质吸力的消散发生在降雨入渗阶段, 此阶段抗滑桩受力很小, 桩顶位移基本为 0。抗滑桩-生态联合防护体系可充分发挥植被固坡的水文效应, 提高边坡整体稳定性。

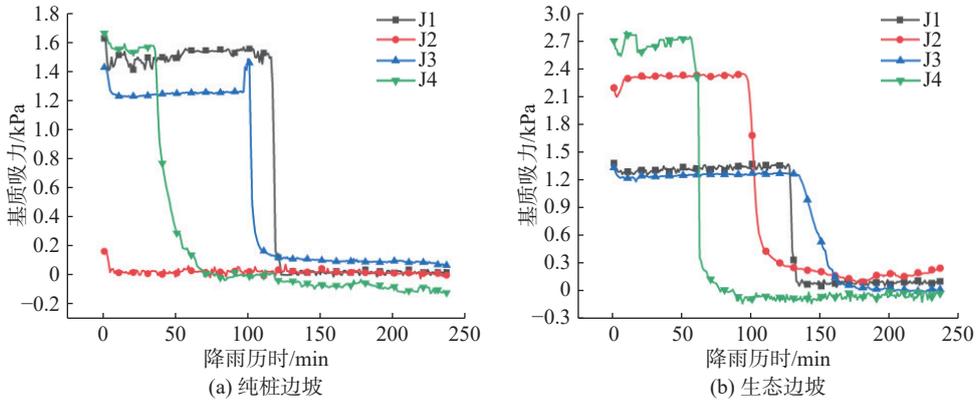


图 7 基质吸力变化过程

Fig. 7 The process of matrix suction change

3.5 桩身弯矩

桩身弯矩能直接反应抗滑桩的受力变形特征。桩身弯矩如图 8 所示, 桩后受拉为正, 桩前受拉为负。虚线标注处为边坡滑动带位置, 滑带以上为抗滑桩受荷段, 滑带以下为抗滑桩锚固段。在纯桩边坡与生态边坡中, 桩身弯矩均呈“S”形分布, 桩身弯矩随着降雨时间累计逐渐增大。受荷段最大负弯矩出现在距桩顶 50 cm 处, 锚固段最大正弯矩出现在距桩顶 90 cm 处。在滑带附近弯矩绝对值较小, 趋近于 0。

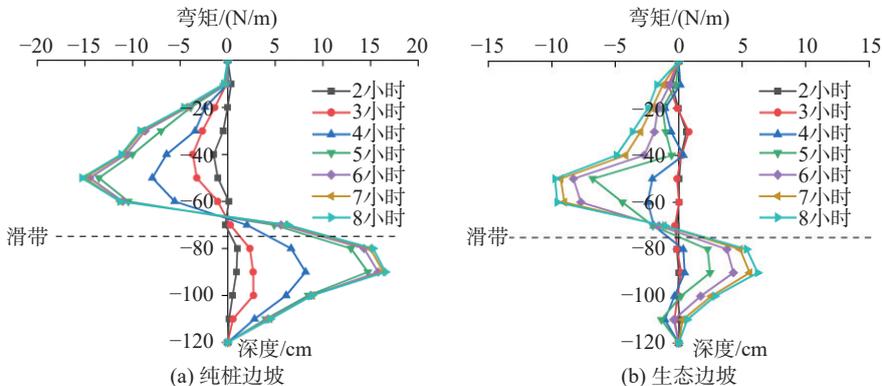


图 8 桩身弯矩变化过程

Fig. 8 The process of pile bending moment variation

3.5.1 降雨期间弯矩变化分析 降雨前 3 h 内, 纯桩边坡抗滑桩的弯矩出现了一定程度的变化, 而在有植被覆盖的生态边坡中, 抗滑桩的弯矩则保持相对稳定。纯桩边坡中, 桩身最大负弯矩由 2h 的 $-1.47 \text{ N}\cdot\text{m}$ 提升至 $-3.67 \text{ N}\cdot\text{m}$, 对应桩顶位移由 0.15 mm 增加至 1.06 mm 。此时, 最大负弯矩出现在距桩顶 40 cm 处。而生态边坡中, 降雨前 3 h 桩身弯矩无明显变化, 此时对应桩顶位移曲线的第一阶段, 桩顶位移几乎为 0。降

雨 4 h 时, 纯桩边坡的最大负弯矩($-7.91 \text{ N}\cdot\text{m}$)移至距桩顶 50 cm 处, 表明滑坡推力的合力作用位置发生下移。这可能是由于滑带整体软化、孔隙水压力逐步升高所导致的滑坡推力重新分布。此时生态边坡的桩身弯矩才发生明显变化, 最大负弯矩出现在距桩顶 60 cm 处($-2.44 \text{ N}\cdot\text{m}$)。纯桩边坡在 3—5 h 间弯矩增长最为迅速, 在降雨 8 h 后达到最大值, 此时最大负弯矩为 $-15.31 \text{ N}\cdot\text{m}$, 最大正弯矩为 $15.26 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。生态边坡在 4—6 h 间弯矩变化最为明显, 并在降雨 8 h 后达到最大值, 此时最大负弯矩为 $-9.74 \text{ N}\cdot\text{m}$, 最大正弯矩为 $6.22 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。采用抗滑桩-生态联合防护体系的生态边坡最大弯矩值相较于纯桩边坡减少了 36.4%(负弯矩)、59.2%(正弯矩)。

3.5.2 受力分配模式与防护效应 浅表层生态植被防护结构和深层抗滑桩等支挡结构在受力分配模式上有明显差异。纯桩边坡中降雨导致的滑坡推力增加直接作用于抗滑桩, 降雨 100 min 后即边坡开始变形(表现为桩顶位移与桩身弯矩变化)。在生态边坡中, 植被的根系能够穿透一定深度的土层, 与深层抗滑桩结构产生一定的力学耦合作用, 表层植被承担了部分由降雨引起的下滑力, 因而生态边坡所能抵抗的降雨时间更长, 降雨 220 min 后桩顶位移方才响应。可见深层抗滑桩等支挡结构提供了土体深部的锚固能力, 而生态植被防护结构则在浅表层地表提供了加筋作用与减蚀效应。这种双重防护作用可以有效地分散和吸收荷载, 增强边坡的整体稳定性。在极端天气条件下, 如暴雨、洪水等, 浅表层生态植被防护结构可以发挥更强的保护作用, 减少土体的侵蚀和冲刷, 有助于减轻深层抗滑桩等支挡结构的荷载, 从而提高边坡的防灾减灾能力。

4 暴雨冲刷试验过程

为探究突发性强降雨作用下, 单一支护结构护坡与生态-支护结构联合护坡的破坏机制, 进行了降雨强度为 120 mm/h 的极端降雨冲刷试验。

纯桩边坡破坏发展过程如图 9 所示。降雨初期, 由于在 120 mm/h 降雨强度下的雨水来不及完全入渗, 局部形成坡面浊流, 浊流带动土颗粒绕过抗滑桩在坡脚形成三角堆积区(图 9(b))。随着降雨的持续, 坡面发生冲蚀破坏在边坡右侧区域形成冲蚀沟, 冲蚀沟由坡脚向坡顶扩展(图 9(c))。降雨在冲蚀沟处汇聚形成集中水流不断向下、向两侧淘蚀, 坡脚堆积区不断扩大, 同时坡脚处出现拉裂缝(图 9(d))。降雨 40 min 后, 坡顶冲蚀区不断扩大, 同时雨水在坡脚处侵蚀造成小弧面, 弧面上方形成拉裂面, 促使坡脚处小型滑坡的产生(图 9(e))。随着降雨的持续, 坡面下部逐级形成多个拉裂面, 为雨水入渗提供优势通道, 坡面崩塌进一步向上扩展; 边坡左侧也逐渐形成冲蚀沟并不断加深, 抗滑桩逐渐裸露((图 9(f))、(图 9(g)))。降雨历时 60 min, 最终破坏状态见图 9(h)。

根据试验现象及数据, 强降雨作用下单一支护结构护坡(纯桩边坡)破坏模式为: 暴雨冲蚀引起的局部浅层滑动破坏^[22], 同时坡脚处破坏呈现一定多级后退式破坏规律。具体为: 径流面蚀→冲蚀沟不断加深→拉裂缝形成、坡面崩塌→边坡破坏。

生态边坡破坏过程如图 10 所示。降雨前期(60 min 以内), 边坡无明显变化, 未出现明显侵蚀痕迹(图 10(a))。降雨持续入渗, 边坡逐渐饱和, 在坡体右侧形成坡面径流带动土颗粒运动, 在右侧坡脚形成三角堆积区(图 10(b))。坡脚土体长时间积水软化, 进而导致抗滑桩桩前土体坍塌(图 10(c))。生态边坡降雨历时 150 min, 最终破坏状态见图 10(d)。

根据试验现象及数据, 强降雨作用下生态-支护结构联合护坡(生态边坡)破坏模式为: 边坡下部(抗滑桩前)崩塌破坏。具体为: 浊流形成堆积区→坡脚土体软化→桩前土体坍塌→边坡破坏。

通过对比分析两种护坡结构在强降雨条件下的破坏机制, 发现单一支护结构护坡与生态-支护结构联合护坡在破坏过程和破坏模式上存在显著差异。在降雨持续过程中, 纯桩边坡表面迅速被侵蚀, 形成冲蚀沟和拉裂缝, 进而导致坡脚处发生多级后退式破坏和边坡整体失稳。而生态边坡由于植被的存在, 大大削弱

了降雨的侵蚀作用,边坡饱和后仅在抗滑桩前发生局部崩塌,破坏形式较为集中且进展缓慢。这是因为单一支护结构的纯桩边坡在面对强降雨时,其防护效果主要依赖于桩体的抗滑能力,而坡面土体的抗冲蚀能力较弱。相比之下,生态-支护结构联合护坡的生态边坡不仅依赖于抗滑桩的支护作用,还结合了生态措施,显著增强了坡面土体的抗冲蚀和抗软化能力。这表明生态-支护结构联合护坡在应对长时间强降雨方面具有更好的耐久性和稳定性,能够显著延缓边坡失稳时间,提供更长的防护效应。

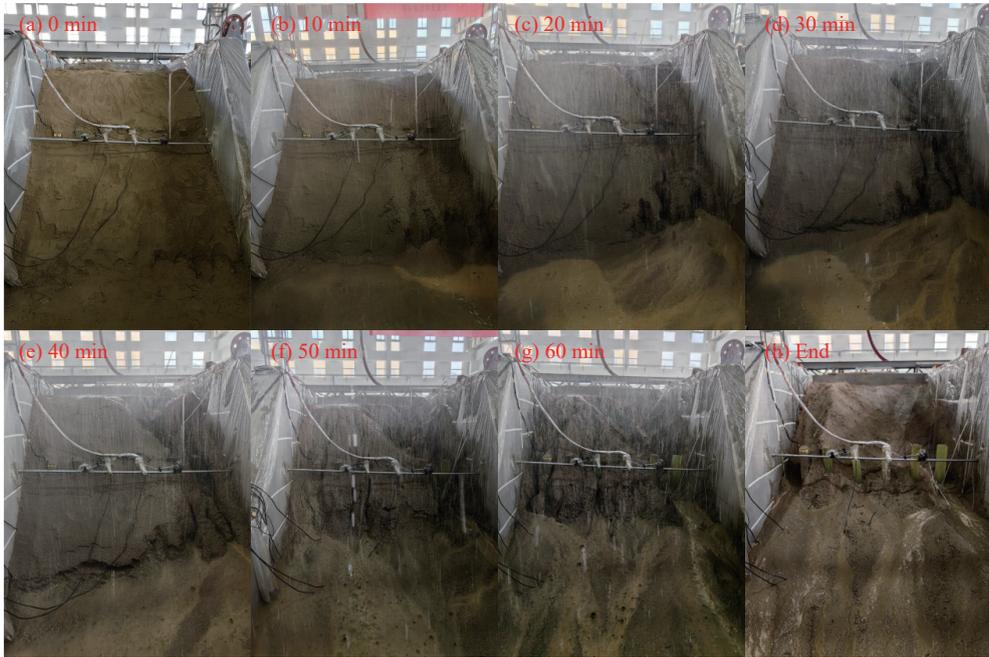


图9 纯桩边坡破坏过程

Fig. 9 The failure process of bare soil slopes



图10 生态边坡破坏过程

Fig. 10 The failure process of ecological slope

5 结 语

基于三峡库区典型堆积层滑坡,建立室内大型边坡模型,对比分析了单一支护结构体系(纯桩边坡)与生态-支护结构联合护坡体系(生态边坡)在降雨入渗过程中的边坡渗流场变化规律与抗滑桩受力、变形和桩身弯矩分布规律,得出以下结论:

(1) 植被发挥截留作用与“薄膜”排水作用,调控降雨入渗,生态边坡体积含水率与孔隙水压力响应时

间均滞后于纯桩边坡。生态边坡中雨水除了垂直入渗之外,还存在坡内水分沿滑带运移的情况。

(2)纯桩边坡的最大桩顶位移值(9.89 mm)远大于生态边坡(2.89 mm),且纯桩边坡的桩顶位移的响应时间早于生态边坡。滑带土体在孔隙水的作用下逐渐软化,土体孔隙水压力上升、有效应力降低,导致滑坡推力增加,这是滑带处孔隙水压力与桩顶位移呈正相关的主要原因。

(3)两种边坡中抗滑桩桩身弯矩均呈“S”形分布,桩身弯矩随着降雨时间累积逐渐增大。降雨历时相同的情况下,纯桩边坡中抗滑桩最大弯矩(15.26 N·m)大于生态边坡(6.22 N·m),表明生态-支护结构联合护坡体系相较于单一支护结构体系而言更具优势。

(4)120 mm/h强降雨冲刷下,纯桩边坡与生态边坡破坏形式有所差异。纯桩边坡主要表现为暴雨冲蚀引起的局部浅层滑动破坏,同时坡脚处破坏呈现一定多级后退式破坏规律;生态边坡表现为边坡下部(抗滑桩前)崩塌破坏。生态边坡坡面未见明显侵蚀现象,表明植被能很大程度上削弱坡面侵蚀、抑制岸坡土体流失。

参 考 文 献:

- [1] 汤罗圣. 三峡库区堆积层滑坡稳定性与预测预报研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013. (TANG Luosheng. Research on stability and prediction for the colluvial landslide in the Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese))
- [2] 夏金梧, 郭厚桢. 长江上游地区滑坡分布特征及主要控制因素探讨[J]. 水文地质工程地质, 1997(1): 19-22, 32. (XIA Jinwu, GUO Houzhen. Exploration into the distribution characteristics and main control factors of landslides in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1997(1): 19-22, 32. (in Chinese))
- [3] 张桂荣, 程伟. 降雨及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 476-482. (ZHANG Guirong, CHENG Wei. Stability prediction for Bazimen landslide of Zigui County under the associative[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Suppl1): 476-482. (in Chinese))
- [4] LIU X, WANG Y, LEUNG A K. Numerical investigation of rainfall intensity and duration control of rainfall-induced landslide at a specific slope using slope case histories and actual rainfall records[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(8): 333.
- [5] 吴冰, 张桂荣, 池诚, 等. 降雨作用下砂土河道岸坡稳定试验研究[J]. *水利水电工程学报*, 2023(5): 113-122. (WU Bing, ZHANG Guirong, CHI Cheng, et al. Physical model study on the bank slope of thick sandy soil under rainfall[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(5): 113-122. (in Chinese))
- [6] ZHANG L L, ZHANG J, ZHANG L M, et al. Stability analysis of rainfall-induced slope failure: a review[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2011, 164(5): 299-316.
- [7] 罗崎峰, 唐豪, 涂国祥, 等. 发育两类夹层堆积体的降雨入渗试验研究[J]. *水利水电工程学报*, 2023(4): 98-106. (LUO Qifeng, TANG Hao, TU Guoxiang, et al. Experimental study on the rainfall infiltration process in the accumulation with two interlayers[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(4): 98-106. (in Chinese))
- [8] 马鹏飞, 夏栋, 许文年, 等. 基于 ABAQUS 的降雨条件下鄂东南崩岗侵蚀分析[J]. *水利水电工程学报*, 2020(2): 46-57. (MA Pengfei, XIA Dong, XU Wennian, et al. Analysis of collapsing gully erosion mechanism in southeast Hubei under rainfall conditions based on ABAQUS software[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(2): 46-57. (in Chinese))
- [9] 王斌, 李洁涛, 王佳俊, 等. 强降雨诱发堆积体滑坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增刊 1): 234-248. (WANG Bin, LI Jietao, WANG Jiajun, et al. Model tests on accumulation landslides induced by extreme rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(Suppl1): 234-248. (in Chinese))
- [10] 钟源, 李远耀, 殷坤龙, 等. 基于物理模型试验的厚层堆积层滑坡强降雨触发机制[J]. 地球科学, 2023, 48(10): 3912-3924. (ZHONG Yuan, LI Yuanyao, YIN Kunlong, et al. Failure mechanism of thick colluvium landslide triggered by heavy rainfall based on model test[J]. Earth Science, 2023, 48(10): 3912-3924. (in Chinese))
- [11] MIAO F S, WU Y P, TÖRÖK Á, et al. Centrifugal model test on a riverine landslide in the Three Gorges Reservoir induced by

- rainfall and water level fluctuation[J]. *Geoscience Frontiers*, 2022, 13(3): 101378.
- [12] 张强, 郑艳妮, 贾朝军, 等. 复杂水库调度及降雨条件下堆积体滑坡离心试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(10): 2427-2440. (ZHANG Qiang, ZHENG Yanni, JIA (ChaoZhao)(Jun), et al. Centrifugal experimental study on accumulation body landslides under complex reservoir operation and rainfall conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(10): 2427-2440. (in Chinese))
- [13] 李欣然, 张桂荣, 林程, 等. 三峡库区滑坡工程加固和生态护坡措施研究进展[J]. *人民长江*, 2024, 55(1): 127-134. (LI Xinran, ZHANG Guirong, LIN Cheng, et al. Research progress on landslide engineering reinforcement and ecological slope protection measures in Three Gorges Reservoir area[J]. *Yangtze River*, 2024, 55(1): 127-134. (in Chinese))
- [14] 李宁, 刘冠麟, 许建聪, 等. 降雨条件下抗滑桩边坡三维稳定性分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(3): 38-46. (LI Ning, LIU Guanlin, XU Jiancong, et al. 3D numerical analysis of the stability of a slope einforced with piles under rainfall conditions[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(3): 38-46. (in Chinese))
- [15] 李龙起, 巨能攀. 光栅测试技术在顺层边坡降雨模型试验中的应用研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(7): 2119-2127. (LI Longqi, JU Nengpan. Model test on bedding rock slope under rainfall conditions based on fiber grating technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(7): 2119-2127. (in Chinese))
- [16] 张治国, 毛敏东, 朱正国, 等. 间歇性强降雨诱发滑坡对抗滑桩非线性力学响应分析[J]. *岩土力学*, 2023, 44(7): 2073-2094. (ZHANG Zhiguo, MAO Mindong, ZHU Zhengguo, et al. Analysis of nonlinear mechanical response of anti-slide pile induced by landslides with intermittent heavy rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(7): 2073-2094. (in Chinese))
- [17] 李新志. 降雨诱发堆积层滑坡加卸载响应比规律的物理模型试验及其破坏机理研究——以长江三峡库区堆积层滑坡为研究基础[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2008. (LI Xinzhi. The research on physical model experiment of the load-unload response ratio pattern and its failure mechanism of debris landslide induced by rainfall: selecting the debris landslides in Three Gorges reservoir region of the Yangtze River as the research foundation[D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2008. (in Chinese))
- [18] 邓茂林, 易庆林, 卢书强, 等. 三峡库区靠椅状土质滑坡变形规律及机理——以秭归八字门滑坡为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(2): 135-143, 151. (DENG Maolin, YI Qinglin, LU Shuqiang, et al. Study on the deformation law and mechanism of chair-shaped soil landslide in Three Gorges Reservoir area: Taking the landslide of Baguamen in Zigui as an example[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(2): 135-143, 151. (in Chinese))
- [19] 王贵华, 李长冬, 贺鑫, 等. 不同布锚方式对锚索抗滑桩受力与变形影响的物理模型试验研究[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(6): 262-277, 315. (WANG Guihua, LI Changdong, HE Xin, et al. Physical model test on the effect of different anchoring methods on the mechanical and deformation characteristics of anchored slide-resistant piles[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 46(1): 262-277, 315. (in Chinese))
- [20] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (LUO Xianqi, GE Xiurun. Theory and application of model test on landslide[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008. (in Chinese))
- [21] 邓通发, 桂勇, 罗嗣海. 植被-边坡系统稳定性分析方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (DENG Tongfa, GUI Yong, LUO Sihai. Stability analysis method for vegetation slope system[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))
- [22] 左自波, 张璐璐, 王建华. 降雨触发不同级配堆积体滑坡模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(7): 1319-1327. (ZUO Zibo, ZHANG Lulu, WANG Jianhua. Model tests on rainfall-induced colluvium landslides: effects of particle-size distribution[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(7): 1319-1327. (in Chinese))

Study on the joint protection mechanism of ecological-supportive structures for landslides

LIN Cheng¹, ZHANG Guirong², KONG Yang², WANG Zhangchun², ZHANG Xian², LI Xinran²

(1. *Institution of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Considering the typical material composition of accumulated deposit landslides in the Three Gorges Reservoir area, landslide models were created using a mixture of cohesive soil and sand as the sliding medium, with artificially introduced weak sliding surfaces. The study investigates the stress distribution, deformation, and moment distribution patterns of the ecological-supportive joint protection system during the deformation process induced by rainfall infiltration-triggered landslides. It also examines changes in the slope seepage field to elucidate the stress allocation mode between surface-level ecological vegetation protection structures and deep-seated anti-sliding pile support structures. Under continuous rainfall conditions with a duration of 8 hours and an intensity of 18 mm/h, ecological slopes protected by the joint protection system of ecological-supportive structures reached overall saturation later compared to pure pile slopes protected solely by anti-sliding piles. The vegetation interception and "film" drainage effect on the slope surface weakened rainfall infiltration, thereby delaying slope deformation. Increased pore water pressure near the slip surface and reduced mechanical properties of the slip surface were identified as the dominant factors causing slope deformation (manifested as pile-top displacement and pile bending moments) in the later stages of rainfall. The final displacement of the pile top in pure pile slopes was significantly greater than that in ecological slopes protected by anti-sliding piles. Moreover, the maximum bending moment in ecological slopes was significantly reduced compared to that in pure pile slopes, indicating that slope vegetation mitigated part of the sliding forces induced by rainfall and formed a dual protection mechanism with deep-seated anti-sliding pile structures, thereby enhancing overall slope stability. In extreme rainfall erosion experiments, the tolerance and failure mechanisms of the two types of slopes differed: pure pile slopes experienced complete failure after 60 minutes, exhibiting localized shallow sliding failures caused by torrential rain erosion, while ecological slopes experienced partial failure after 150 minutes, manifested as collapse failures in the lower part of the slope.

Key words: accumulated deposit landslide; rainfall; ecological-supportive structures