研究论文|Research Article
热带海岛工程|Tropical Island Engineering

引用格式:范乔峰, 孙欢, 孟子敏, 等. 热带海岛水工边坡风化过渡带稳定性监测试验 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(1): 108−120.

Citation: FAN Qiaofeng, SUN Huan, MENG Zimin, et al. Stability monitoring test of weathering transition zone of hydraulic slopes in tropical island[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(1): 108−120.

Open Access

热带海岛水工边坡风化过渡带稳定性监测试验

范乔峰[1], 孙　欢[1,2] ✉, 孟子敏[1], 王永康[1]

(1. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228;
2. 清华大学 水圈科学与水利水电工程全国重点实验室, 北京 100084)

摘　要: 针对气旋降雨环境下水工边坡破坏的监测理论与技术问题, 开展了气旋降雨环境岩质边坡风化过渡带稳定性监测物理模型试验。结果表明: 气旋降雨环境下水−气作用造成坡面侵蚀, 强−弱风化过渡带的地下水压力波动是导致边坡显著变形的主要原因; 降雨入渗时期边坡风化过渡带的孔隙水压力和降雨强度呈正相关, 同时强−弱风化过渡带锚杆轴力损失加剧; 地下水压力波动时期边坡锚固系统智能端部结构产生卸荷响应; 基于锚杆轴力和孔隙水压力间的非线性关系提出了边坡风化过渡带稳定性监测判据。

关键词: 气旋降雨; 风化过渡带; 裂隙岩质边坡; 边坡监测; 智能端部结构

中图分类号: TU458+.4　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004-1729(2026)01-0108-13

DOI: 10.65658/j.hndk.2025022001　　CSTR: 32403.14.hndk.2025022001

Stability monitoring test of weathering transition zone of hydraulic slopes in tropical island

FAN Qiaofeng[1], SUN Huan[1,2] ✉, MENG Zimin[1], WANG Yongkang[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China;
2. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the report, aimed at the problems about the monitoring theory and technology of the hydraulic slopes failure under cyclone rainfall, a physical model test on the stability monitoring of weathering transition zone in hydraulic slopes was carried out. The results indicated that the surface erosion was caused by water-air interaction under cyclone rainfall, and the groundwater pressure fluctuation in the strong-weak weathering transition zone was the main cause of slope deformation. The pore water pressure of the slope weathering transition zone was positively correlated with rainfall intensity during rainfall infiltration, while the axial force loss of rock bolts in the weathering transition zone was intensified. The unloading response of the Intelligent Terminal Structure of the slope anchoring system was significant during the period of groundwater pressure fluctuation. Moreover, based on the nonlinear relationship between the axial force of the rock bolt and the pore water pressure, the stability monitoring criterion of weathered transition zone was proposed.

Keywords: cyclone rainfall; weathered transition zone; fractured rock slopes; slope monitoring; intelligent terminal structure

Received: 2025−02−20; **Revised:** 2025−03−19; **Accepted:** 2025−03−24; **Available online:** 2025−07−02

✉ **Corresponding author(s):** SUN Huan, E-mail: sunhuan@hainanu.edu.cn

0 引 言

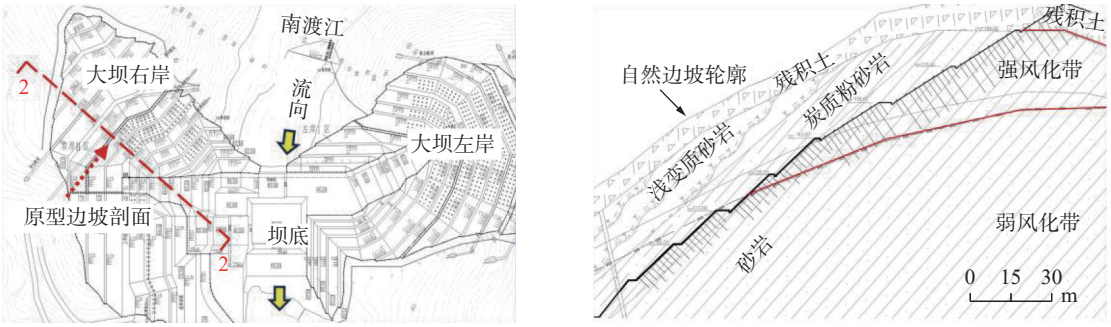
近年来极端气旋降雨频发和工程扰动增多等因素导致海南省地质灾害风险持续升高[1]。热带季风气候下岩石风化作用强烈，海南岛地表广泛分布呈残积土至基岩过渡特征的厚层风化壳[2]。气旋降雨引起的强烈水力作用可显著降低边坡风化过渡带稳定性[3]。因此，研究气旋降雨下岩质边坡风化过渡带监测技术对于保障水工结构稳定运行具有重要意义。

目前关于降雨条件下边坡失稳机理取得的共识是降雨模式、入渗边界和岩体结构面是影响边坡稳定性的重要因素[4−7]。此外，风荷载通过扰动植被根系加速雨水入渗是诱发台风型滑坡的重要因素[8]。鉴于大部分以变形和应力为要素的监测方法不能满足精准预测灾害的需求，何满潮等[9]提出了单一滑动力要素的边坡监测方法，此后许多学者致力研究支护结构响应反馈地质灾害的方法[10]。物理模型试验是研究边坡锚固、监测机理的重要方法[11]。陈友东等[12]通过模型试验验证了韧性锚杆有效减少了边坡位移变形。朱彦鹏等[13]研究显示框锚加固后黄土边坡由深层滑坡转变为侵蚀破坏。

现有研究多聚焦均质边坡或含单一结构面边坡致灾机理与监测方法，而针对边坡风化过渡带稳定性监测研究较少。强度大、持时长的气旋降雨常引发强烈的地下水效应[14]，水力作用下渗流裂隙可演化为不利结构面诱发边坡失稳[15]。因此，本研究以海南某水利枢纽为原型开展模型试验研究，分析边坡强−弱风化过渡带锚杆轴力和孔隙水压力演化规律，提出边坡稳定性监测判据，可为水工边坡安全监测提供参考。

1 海岛型水利工程与地质环境

为保障中国特色自由贸易港高质量建设，海南省计划在“十四五”规划时期建成以大型水利枢纽为节点的海岛型水利设施网络。然而，极端气旋降雨可对水工边坡造成显著侵蚀破坏与地下水压力波动效应，水利枢纽安全受到严重威胁。为研究气旋降雨下水工边坡风化过渡带稳定性监测技术，选择海南省某重大水利枢纽工程的右岸库坝边坡 2-2 剖面作为工程地质背景开展研究（如图 1 所示）。



a 平面设计　　b 2-2剖面

图 1 海南省某重大水利工程库坝边坡开挖设计图

边坡地层按风化程度划分为残积土、强风化带、弱风化带和基岩，残积土层厚度区间为（3.00~37.70）m。强风化带顶板高程范围为（55.70~131.70）m，原岩已风化为碎石夹土状。弱风化带基岩面高程（28.90~102.30）m，以砂岩和浅变质砂岩为主，节理裂隙基本呈闭合状。强−弱风化过渡带分布于（39.95~121.82）m 高程范围内，以砂岩、浅变质砂岩等硬质岩为主。

2 库坝岩质边坡模型试验设计

2.1 相似理论与相似材料 物理模型试验是一种基于相似原理的研究方法，要求模型与原型的相关物理量满足量纲推导式[16]。试验中考虑的物理量包括：几何尺寸、密度、重力加速度、弹性模量、抗剪强度、时间和渗透率。根据模型箱尺寸（1.70 m×0.45 m×0.80 m）与原型边坡尺寸（坡高 142.00 m）确定几何相似系数 C_L=200，参考 Tao 等[17]研究取密度相似系数 C_ρ=1.3，重力加速度系数 C_g=1.0，其余相似系数可根据量纲守恒推导并汇总于表 1。

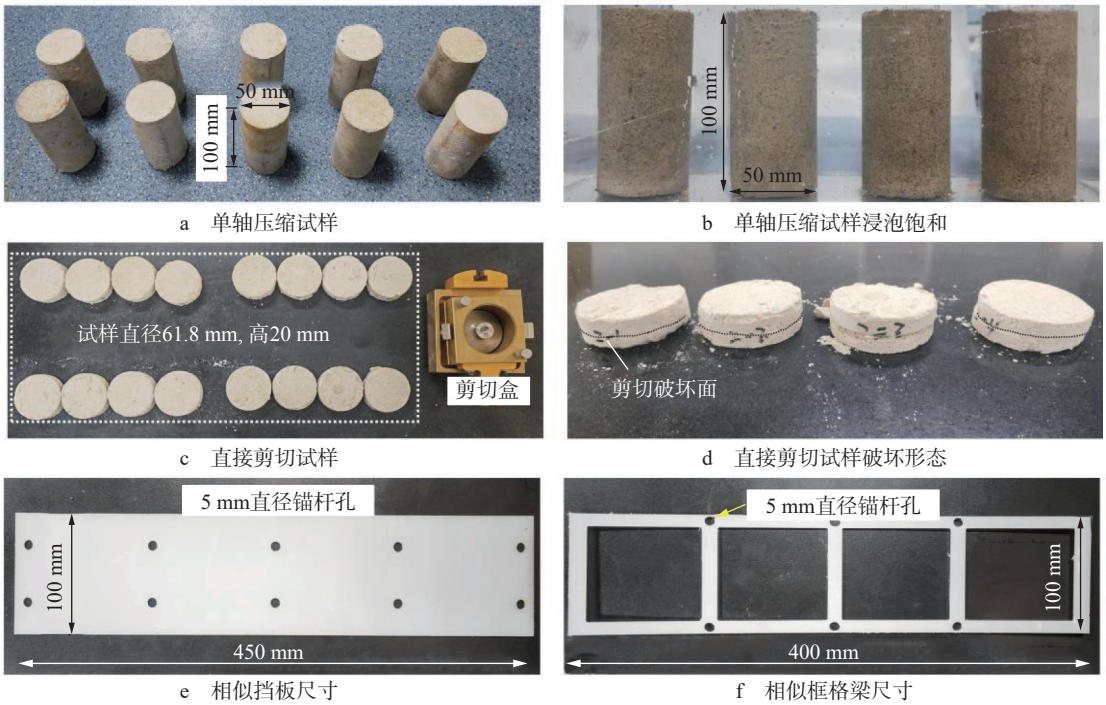
表1 模型试验导出物理量的相似系数

物理量	应力σ	粘聚力c	弹性模量E	内摩擦角φ	时间t	渗透率k
相似关系	$C_\sigma=C_\rho C_g C_L$	$C_c=C_\rho C_g C_L$	$C_E=C_\rho C_g C_L$	$C_\varphi=1$	$C_t=C_L^{0.5}C_g^{-0.5}$	$C_k=(C_L C_g)^{0.5}$
相似系数值	260.0	260.0	260.0	1.0	14.1	14.1

参考Nian等[18]研究成果,本试验选择重晶石粉、细河砂(35目,0.50 mm)、粗河砂(18目,1.00 mm)和石膏制作地质力学模型,地质模型材料物理力学参数如表2所示。如图2a~图2d所示,通过单轴压缩试验、直接剪切试验和变水头渗透试验确定的材料物理参数汇总于表2,对应配比汇总于表3。相似框格梁和相似挡板使用2 mm厚聚丙烯板材切割制作(图2e~图2f)。

表2 原位岩土体与相似材料物理力学参数

岩性	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	密度/(g·cm^{-3})	渗透系数/(cm·s^{-1})
弱风化岩石	90.00	4.00×10^4	2.50×10^4	45	2.50	1.00×10^{-7}
强风化岩石	45.00	1.00×10^4	9.00×10^3	35	2.40	2.00×10^{-6}
风化残积土	—	—	10.00	35	2.10	5.00×10^{-3}
相似材料–1	0.37	143.61	121.50	46	1.93	2.53×10^{-8}
相似材料–2	0.19	35.01	30.53	32	1.79	3.11×10^{-7}
相似材料–3	—	—	6.63	34	1.66	8.13×10^{-4}



a 单轴压缩试样 b 单轴压缩试样浸泡饱和

c 直接剪切试样 d 直接剪切试样破坏形态

e 相似挡板尺寸 f 相似框格梁尺寸

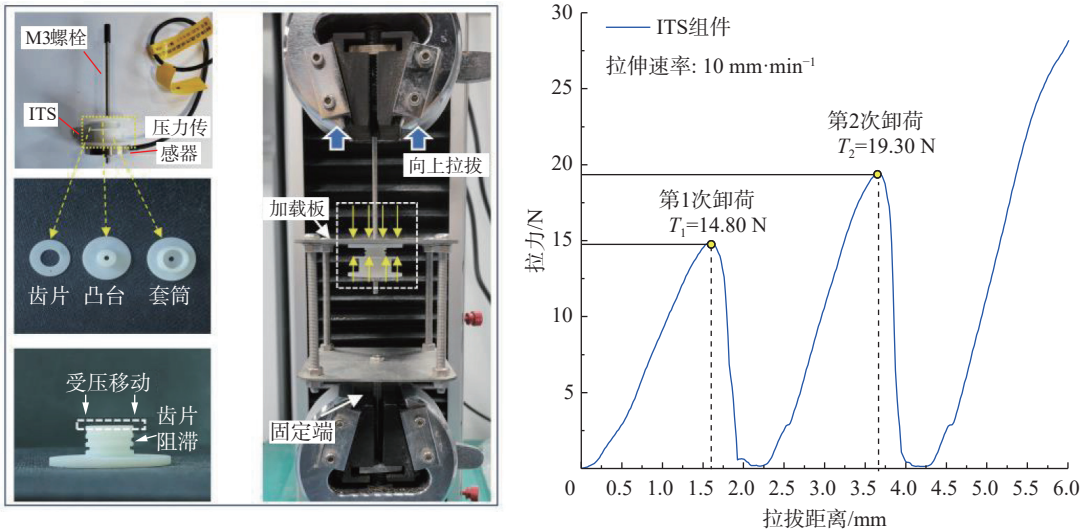
图2 岩土体试验材料制备与模型支护结构设计尺寸

表3 相似材料配比 单位:%

材料名称	重晶石粉比例	细河砂比例	粗河砂比例	石膏比例	水比例
相似材料–1	31.1	43.7	8.7	6.8	9.7
相似材料–2	29.8	45.5	7.8	4.2	12.7
相似材料–3	20.2	57.8	8.1	0.5	13.4

使用支护结构的力学响应反馈边坡表面和内部的变形是模型试验中的常用方法[11,13]。Sun等[19]研发了安装在裂隙岩体锚固系统的智能端部结构(intelligent terminal structure, ITS),能够感知加锚节理岩体的

扰动应力与变形传递过程。研究中将 3D 打印的 ITS 和螺栓组装为 ITS 组件监测边坡破坏[19]。如图 3a 所示，ITS 由环片、凸台和套筒组成，凸台最大外径与环片内径均为 12.0 mm，凸台含 3 个环槽，由上至下外径分别为 11.9、11.8 和 11.7 mm。环片初始位于最上环槽，当轴向压力大于限值时环片脱离并移动至下一环槽，该过程轴力骤降，因此 ITS 的卸荷响应与轴向变形量存在定量关系。为获取 ITS 响应特征进行了拉拔试验，图 3b 显示两次卸荷响应的轴力峰值分别为 14.80 和 19.30 N，对应拉拔距离分别为 1.6 和 3.7 mm。



a ITS组件结构与拉拔试验　　b ITS响应特征曲线

图 3 ITS 详细结构与拉拔响应特征曲线

2.2 试验平台设计 极端降水期间强烈的地下水波动效应是引发边坡失稳的重要原因[20]，因此试验平台需考虑暴雨引发的地下水波动效应，试验平台设计如图 4 所示。参考模型试验中常用的降雨装置[13,21]，本研究中的降雨装置由不锈钢支架和降雨管网组成。借鉴已有强风模拟方法使用 12 台风扇制作风速可控制的强风模拟装置[22]。为提供水动力场，使用预先埋设在强、弱风化过渡带的导流管对边坡风化过渡带提供持续的水力波动效应，地下水流量通过调节水泵功率控制。

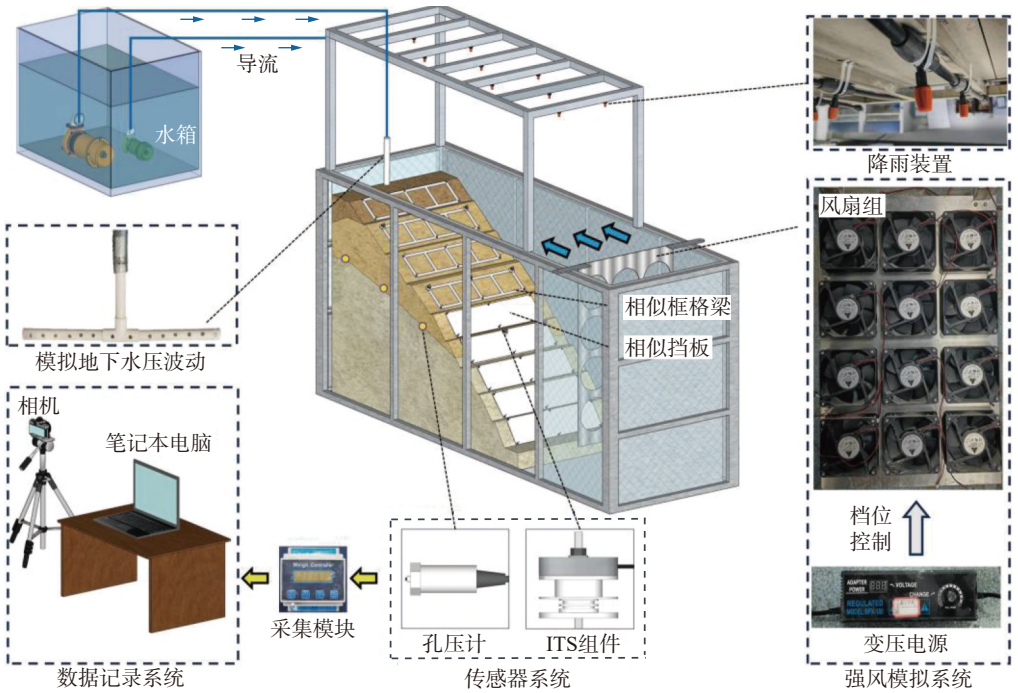


图 4 试验平台设计

2.3 试验方案设计 如图5所示,为准确地还原库坝边坡天然裂隙和节理组发育的特征,模型采用分层压实铺装和预制砌块堆叠结构模拟原始地层沉积序列。弱风化带使用分层压实法铺设,岩层倾角50°,每层厚2.0 cm并使用云母片模拟层间结构面。强风化带用尺寸为2.5 cm×2.5 cm×2.0 cm的预制岩块铺装模拟破碎岩体,为满足裂隙优先渗流原则使用渗透系数较大的相似材料–3粘结岩块,填平坡面。碎石土层采用分层压实法铺装以符合原型边坡特点。

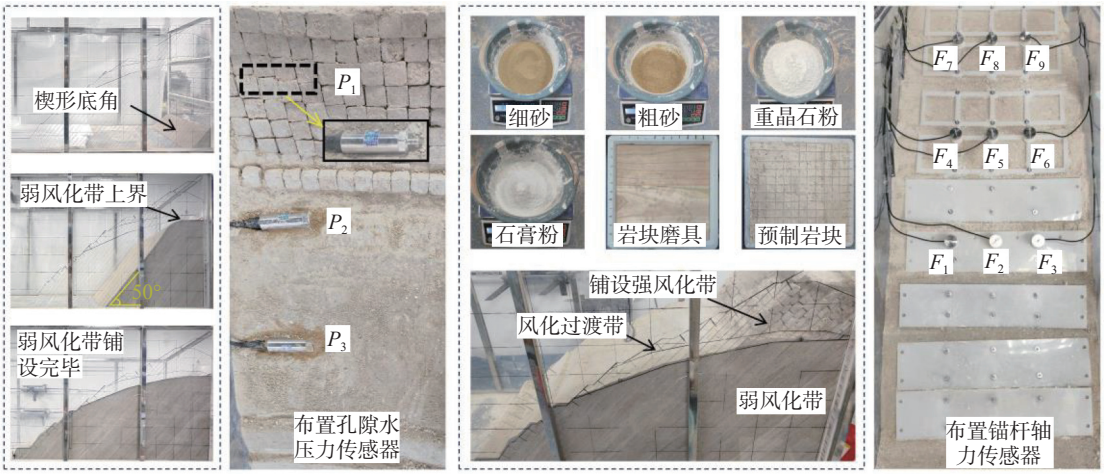


图5 模型铺装与传感器布置过程

如图5所示,为监测不同上覆岩层厚度处水力响应,弱风化带铺设完毕后在强–弱风化过渡带区域布置3个孔隙水压力传感器(编号P_1~P_3,采集频率1.0 Hz、精度0.1 kPa)。试验中通过ITS组件的卸荷响应反馈坡面变形,考虑裂隙发育的强风化带易发生失稳,将ITS组件安装在强–弱风化过渡带界面出露的第4级坡和强风化带组成的第6、8级坡锚杆(编号F_1~F_9)上。

锚杆采用端部锚固并施加20.00 N左右预紧力,杆体锚固段长2.0 cm,自由段长4.0 cm,使用环氧树脂胶作为锚固剂。轴力传感器采集频率1.0 Hz、精度0.1 N。图6展示了模型剖面与平面视角传感器具体布置位置。试验采用梯度增强的风力和降雨强度模拟气旋降雨环境,达到风速和降雨强度最大值后使用地下水导流装置模拟地下水动力场。参考已有研究的试验设计方法[6],根据研究区域的历史降雨情况设计了35、65和105 mm·h^{-1}的梯度降雨强度。为模拟气旋降雨的强风环境,基于速度相似比设计了1、3和5 m·s^{-1}的梯度风速条件,模型试验加载条件如表4所示。

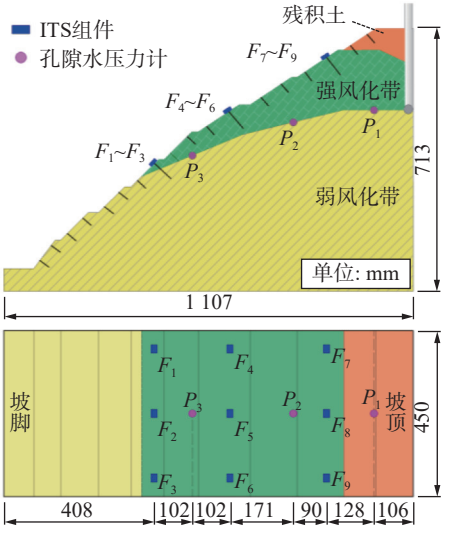


图6 传感器详细点位

表4 模型试验加载条件

阶段名称	降雨强度/(mm·h^{-1})	风速/(m·s^{-1})	地下水装置	持续时间/min
降雨–1	35	1	关闭	10
降雨–2	65	3	关闭	10
降雨–3	105	5	关闭	30
地下水波动	105	5	开启	40

降雨–1 阶段使用 35 mm·h^{-1} 降雨强度和 1 m·s^{-1} 风速模拟气旋降雨生成时期，持续 10 min。降雨–2 阶段使用 65 mm·h^{-1} 降雨强度和 3 m·s^{-1} 风速模拟气旋雨带接近时期，持续 10 min。降雨–3 阶段使用 105 mm·h^{-1} 降雨强度和 5 m·s^{-1} 风速模拟极端气旋降雨，持续时间 30 min。地下水波动阶段使用预埋的导流管模拟气旋降雨引起的地下水压力波动效应，持续时间 40 min。

3 库坝边坡风化层过渡带稳定性监测试验结果

3.1 边坡风化层过渡带的水力特性 监测点 P_1~P_3 孔隙水压力时程曲线如图 7 所示，降雨入渗时期孔隙水压力呈现梯度增加，水力波动阶段孔隙水压力波动频率增加。降雨–1 阶段测点 P_3 处孔隙水压响应明显，降雨–2 阶段测点 P_1 和 P_3 处孔隙水压力显著增大，其中测点 P_3 孔隙水压力峰值较降雨–1 增大了 287.5 %。降雨–3 阶段测点 P_1、P_3 处孔隙水压力梯度增加并分别在 45、30 min 达到稳定。测点 P_1 处渗流路径较长，因此达到渗流稳定用时较长。地下水波动加载 30 s 后，测点 P_1、P_3 处孔隙水压力分别上升至 0.16、2.10 kPa。地下水渗流导致贯通裂隙持续增加，渗透率增大可能是导致 50~60 min 期间测点 P_3 处值呈下降趋势的原因。59~60 min 期间破碎岩块整体下滑时岩体内部结构面逐渐扩张引起测点 P_3 处孔隙水压力显著降低。60 min 后岩块位置趋于稳定，地下水在贯通裂隙网络中流动使测点 P_3 孔隙水压力波动明显。测点 P_1 处原位应力较大使原有结构面在水力波动下保持稳定，因此 55~90 min 测点 P_1 处孔隙水压力维持平稳。

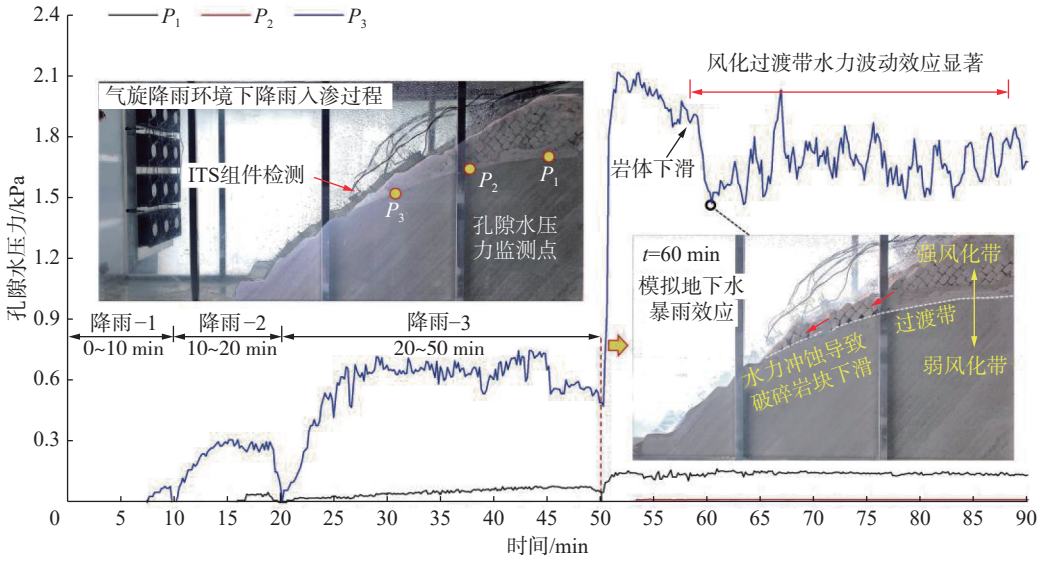


图 7 测点孔隙水压力时程曲线及边坡破坏特征

3.2 边坡锚固系统的 ITS 响应机制 如图 8 所示为测点 F_1~F_3 处锚杆轴力随时间变化规律，测点 F_1~F_3 的锚杆轴力均出现 ITS 卸荷特征。降雨–1 至降雨–2 阶段锚杆轴力持续降低，20 min 时刻测点 F_1~F_3 处锚杆轴力较初始值分别减小了 24.7 %、20.4 % 和 40.2 %，雨水溅蚀和径流冲刷破坏了支护结构与坡体接触面，铺设的不均匀性导致测点 F_3 处锚杆轴力降低较明显。降雨–3 阶段轴力基本稳定，50 min 时刻测点 F_1~F_3 处锚杆轴力较 20 min 时刻变化率较小。锚杆轴力变化表明降雨–1 至降雨–2 阶段以侵蚀破坏为主，降雨–3 阶段随饱和度提高岩土体自重应力增大导致边坡产生侧向位移[13]。地下水波动持续 5 min 后锚杆轴力降低，可能是由土–锚摩擦力降低引起。孔隙水压力骤升引起了渗透力增大，当下滑力大于抗滑力时破碎岩块整体下滑并造成 59~60 min 测点锚杆轴力显著增大，其中测点 F_1 处锚杆轴力峰值接近拉拔试验中测得的 ITS 响应值，图 8 可见支护挡板发生扭转变形引起了 ITS 的卸荷响应。60~90 min 岩块下滑速率逐渐降低，径流冲刷使测点 F_1~F_3 处锚杆轴力持续波动。

如图 9 所示为测点 F_4~F_6 处锚杆轴力变化规律，其中测点 F_4 与 F_5 的锚杆轴力出现 ITS 卸荷特征。降雨–1 阶段持续 10 min 后，测点 F_4~F_6 处轴力较初始值分别减小了 19.7 %、70.2 % 和 31.7 %，表明测点

F_5 处受到雨水溅蚀作用较强，图 9 中可见坡面形成侵蚀凹陷[23]。降雨–2 与降雨–3 阶段锚杆轴力均持续降低，50 min 时刻测点 F_4~F_6 处锚杆轴力相对 10 min 时刻分别减小了 23.8 %、20.2 % 和 21.3 %。图 9 显示 50 min 时侵蚀破坏扩大，雨水入渗导致锚–土摩擦力减小是导致锚杆轴力降低的主要因素[13]。地下水波动持续 9 min 后各测点锚杆轴力略有增大，由于锚杆端部锚固段的岩块发生滑动导致测点 F_4~F_6 处锚杆支护效果减弱。

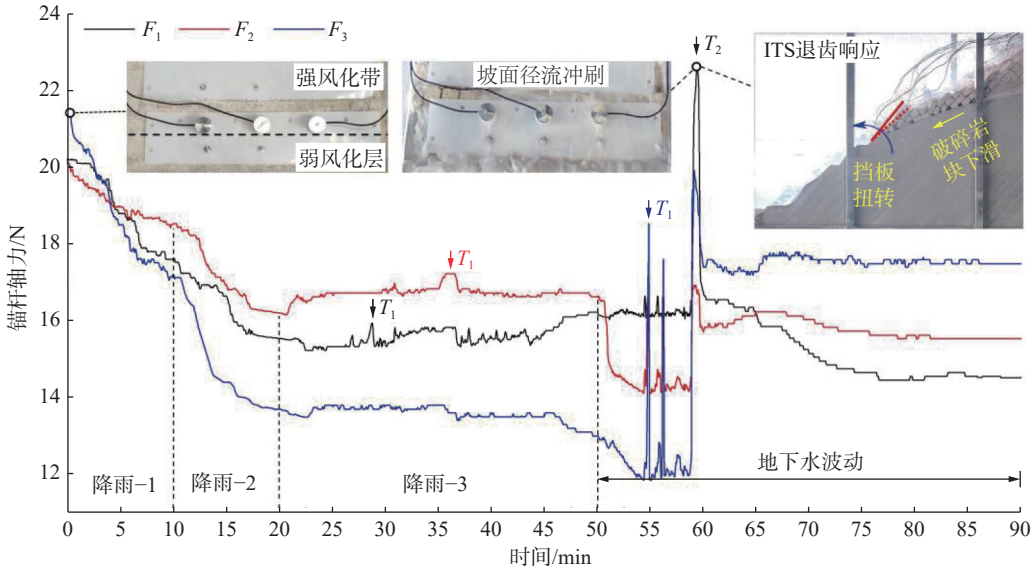


图 8　测点 F_1~F_3 处锚杆轴力时程曲线及边坡破坏特征

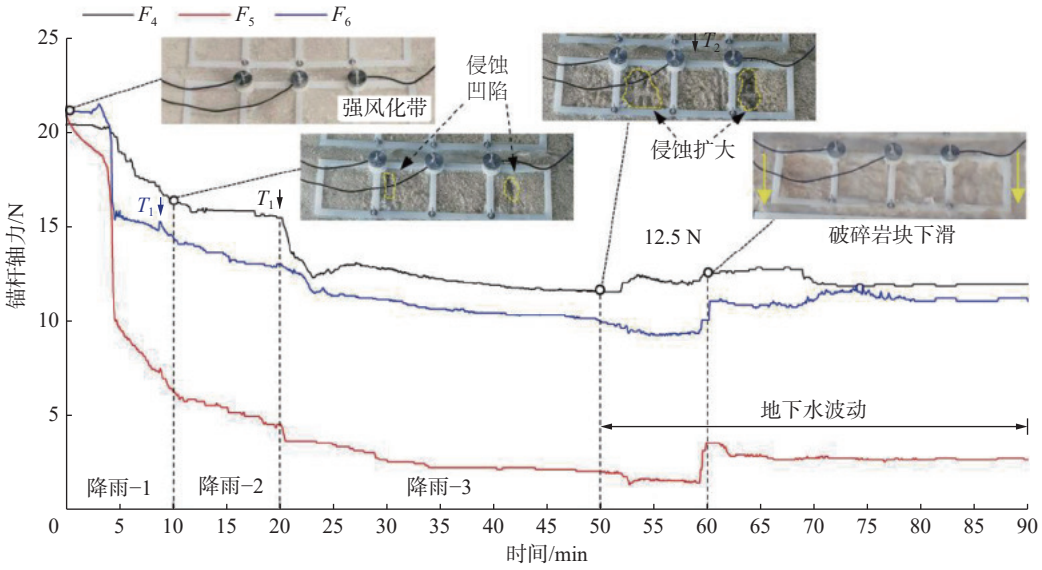


图 9　测点 F_4~F_6 处锚杆轴力时程曲线及边坡破坏特征

如图 10 所示为测点 F_7~F_9 处锚杆轴力变化规律，3 个测点均出现 ITS 卸荷特征。降雨–1、降雨–2、降雨–3 阶段锚杆轴力均呈先降后增趋势，降雨软化坡面引起了预紧力的损失，雨水持续入渗导致结构面受到侵蚀破坏不断加强，因此岩体发生松动下滑力增大，此时支护结构发挥作用导致测点锚杆轴力增大，图 10 中可见 50 min 时刻坡面产生浅层裂缝。地下水波动阶段前 5 min 测点锚杆轴力持续减小，结合试验中浅层拉裂缝扩展现象，可知此时地表径流造成的侵蚀和冲刷破坏较强，而强风化带的变形相对较小，因此锚杆轴力总体呈降低趋势。55~60 min 期间测点锚杆轴力均增大，该时期破碎岩块整体下滑引起锚杆提供的抗滑力增加，60~90 min 边坡变形趋于稳定，降雨与地表径流侵蚀坡面导致锚杆轴力持续降低。

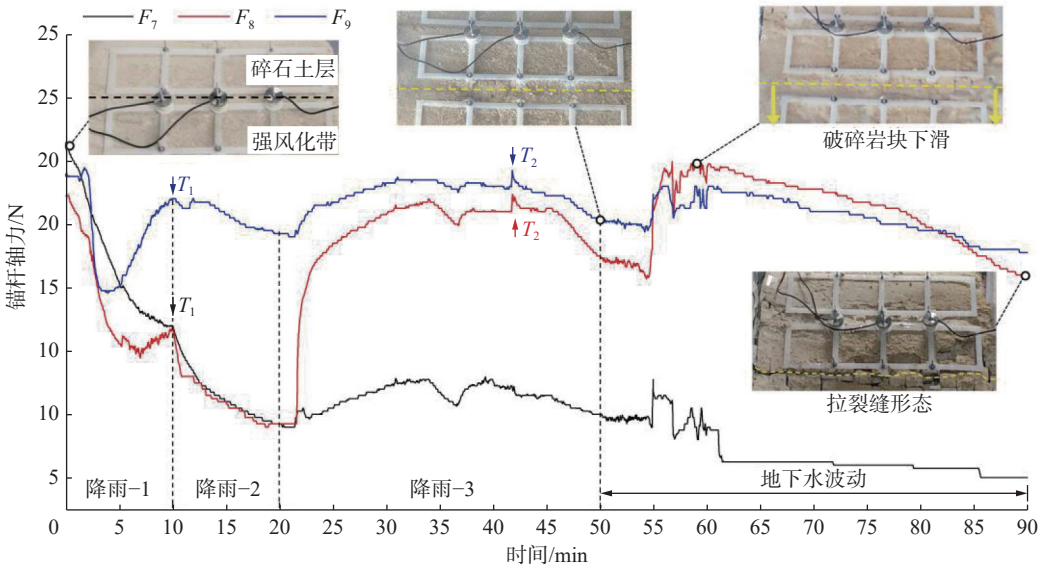


图 10　测点 F_7~F_9 处锚杆轴力时程曲线及边坡破坏特征

3.3　风化过渡带稳定性监测判据　试验结果显示锚杆轴力与孔隙水压力演化呈现明显的阶段性特征，本节尝试建立极端气旋降雨条件下风化过渡带稳定性监测判据。由于模型试验采集的传感器数据存在较多噪声，选取了窗口数为 5 的移动平均法进行降噪，公式为

$$y(n)=\frac{1}{5}\times\sum_{i=n-2}^{n+2}x(i) \tag{1}$$

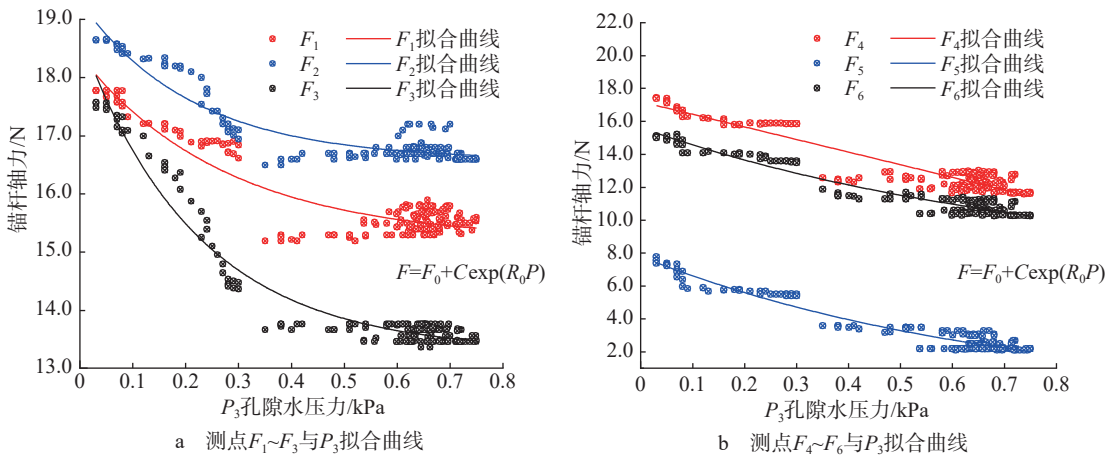
式中：$y(n)$为移动平均后数据集；$x(i)$ 为原传感器数据集；n 为数据点的时间序列编号。

降雨−1 至降雨−3 阶段孔隙水压力呈现上升趋势而锚杆轴力呈下降趋势，经过分析发现指数增长函数拟合效果较好，得出降雨入渗时期稳定性监测判据为

$$F=F_0+C\exp(R_0P) \tag{2}$$

式中：F为锚杆轴力，N；P 为风化过渡带处的孔隙水压力，kPa；F_0为锚杆轴力变化的上限值或下限值，N；R_0为与孔隙水压力相关的参数，kPa^{-1}；C 为待定参数，N。

如图 11 所示为基于测点 F_1~F_6 处锚杆轴力与测点 P_3 处孔隙水压力建立的稳定性监测判据，锚杆轴力与孔隙水压力呈负相关，对应拟合曲线参数汇总于表 5。



a　测点F_1~F_3与P_3拟合曲线　　b　测点F_4~F_6与P_3拟合曲线

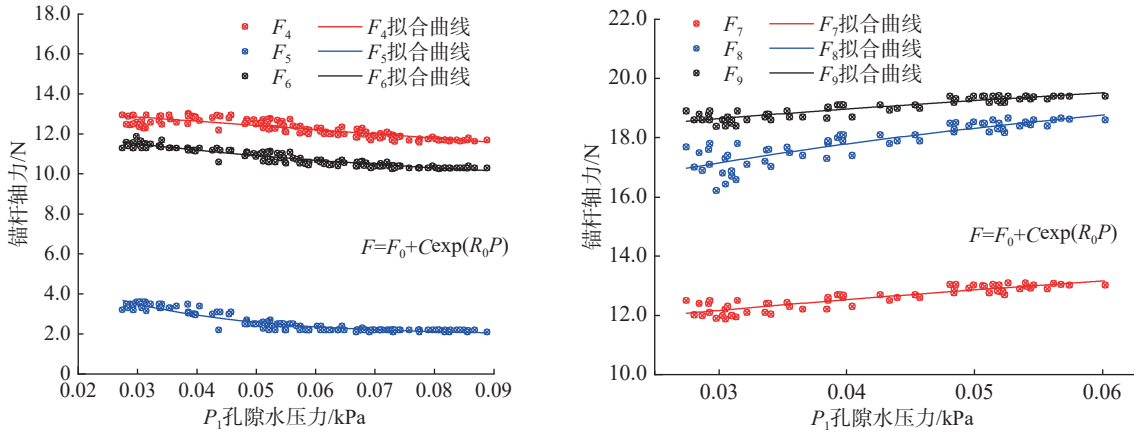
图 11　降雨入渗时期 F_1~F_6 轴力与 P_3 孔隙水压力拟合结果

如图 12 所示为基于测点 F_4~F_9 处锚杆轴力与测点 P_1 处孔隙水压力建立的稳定性监测判据，入渗引起的岩体结构松动使第 8 级坡处产生了浅层拉裂缝，支护力提高导致轴向压力数据增大，因此锚杆轴力

与孔隙水压力为负相关趋势,拟合参数汇总于表6。

表5 测点 F_1~F_6 与 P_3 的拟合曲线参数

F数据集取自	P数据集取自	模型参数			R^2
		F_0/N	R_0/kPa^{-1}	C/N	
F_1	P_3	15.52	−5.91	3.59	0.87
F_2	P_3	16.63	−5.63	2.56	0.90
F_3	P_3	13.36	−5.70	5.76	0.96
F_4	P_3	54 848.45	0	−54 831.24	0.87
F_5	P_3	−0.93	−1.44	8.73	0.94
F_6	P_3	7.03	−1.30	8.60	0.93



a 测点F_4~F_6与P_1拟合曲线　　b 测点F_7~F_9与P_1拟合曲线

图12 降雨入渗时期 F_4~F_9 轴力与 P_1 孔隙水压力拟合结果

表6 测点 F_4~F_9 与 P_1 的拟合曲线参数

F数据集取自	P数据集取自	模型参数			R^2
		F_0/N	R_0/kPa^{-1}	C/N	
F_4	P_1	−1 114.60	−0.019	1 128.10	0.74
F_5	P_1	1.94	−43.82	5.79	0.90
F_6	P_1	9.21	−14.80	3.58	0.90
F_7	P_1	15.97	−9.99	−5.13	0.78
F_8	P_1	20.79	−19.48	−6.54	0.76
F_9	P_1	21.77	−10.78	−4.32	0.81

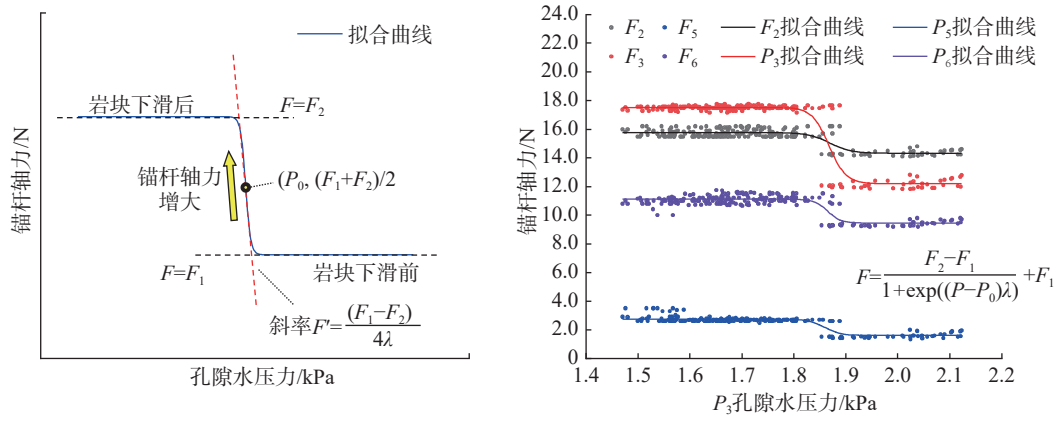
地下水压力波动时期风化过渡带产生显著变形,部分测点锚杆轴力呈梯度变化特征。对比后发现Boltzmann函数拟合效果较好,对应的风化过渡带稳定性监测判据为

$$F=\frac{F_2-F_1}{1+\exp((P-P_0)/\lambda)}+F_1 \tag{3}$$

式中:F为锚杆轴力,N;P为风化过渡带测得孔隙水压力,kPa;F_1与F_2分别是与岩块下滑前后稳定状态锚杆轴力值相关的参数,N;λ为控制函数骤变部分切线斜率的参数,kPa;P_0为ITS轴向压力转变段上分割点对应的孔隙水压力,kPa。

边坡渗透破坏的监测参数见图13a,函数图像经过分割点$\left(P_0,\frac{F_1+F_2}{2}\right)$。基于测点$F_2$、$F_3$、$F_5$和$F_9$处锚杆轴力与$P_3$处孔隙水压力的拟合结果见图13b,拟合参数汇总于表7。岩块下滑前孔隙水压力维持较

高数值，同时期坡面侵蚀作用导致锚杆预紧力持续损失。岩块下滑后形成大量贯通裂隙，地下水渗流总量不变时压力水头降低，而锚杆需提供更大抗滑力引起轴力上升。岩块下滑过程伴随孔隙水压力的梯度降低和锚杆轴力的梯度增大。



a Boltzmann函数判据　　b 部分测点轴力与P_3孔隙水压力拟合曲线

图 13　地下水波动时期稳定性监测判据及拟合结果

表 7　基于 Boltzmann 函数的拟合曲线参数

F数据集取自	P数据集取自	模型参数				R^2
		F_1/N	F_2/N	P_0/kPa	λ/kPa	
F_2	P_3	14.33	15.75	1.87	2.03×10^{-2}	0.74
F_3	P_3	12.18	17.51	1.87	1.62×10^{-2}	0.89
F_5	P_3	1.59	2.74	1.86	1.63×10^{-2}	0.76
F_6	P_3	9.43	11.09	1.87	1.26×10^{-2}	0.78

4　结　论

通过开展气旋降雨环境下水工边坡物理模型试验，分析气旋降雨作用下强−弱风化过渡带锚杆轴力和孔隙水压力演化规律，得到以下结论：

（1）在降雨入渗时期风化过渡带的孔隙水压力和降雨强度呈正相关。在地下水压力波动时期孔隙水压力显著升高，渗透力增大引发强−弱风化过渡带破碎岩块整体下滑。

（2）在降雨初期，雨水溅蚀与径流冲刷导致强风化带中、下部的锚杆轴力快速降低，当拉裂缝形成时靠近坡顶的锚杆轴力增大。在地下水压力波动时期，锚杆轴力呈先降低，随后增大，最终趋于稳定的变化规律，靠近风化过渡带的测点出现了明显的 ITS 卸荷特征。

（3）基于锚杆轴力与风化过渡带孔隙水压力的演化规律，建立水工边坡风化过渡带稳定性监测判据，指数增长函数可描述降雨入渗时期的坡面侵蚀，Boltzmann 函数可反映地下水压力波动时期边坡风化过渡带的显著变形。

参考文献：

[1] 海南省人民政府. 海南省人民政府关于进一步规范地质灾害防治工作的意见 [J]. 海南省人民政府公报，2024(7)：17−23.

[2] 海南省地质矿产勘查开发局. 海南省岩石地层 [M]. 北京：中国地质大学出版社，1997.

[3] 赵晓彦，肖典，罗改，等. 强降雨条件下碎裂岩质边坡锚墩式主动网加固机理模型试验 [J]. 工程地质学报，2021，29(2)：365−374.

ZHAO X Y, XIAO D, LUO G, et al. Model testing of anchored active net for cataclastic rock slope stabilizing under heavy rainfall[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 365−374.

[4] LI L Q, LI Y L, XU Y G. Instability evolution of expansive soil slope due to short duration-varying intensities of rainfall[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 161: 108313.

[5] CHEN R M, DOU H Q, LIN Y Z, et al. In-situ infiltration-runoff characterization of slopes under the influences of different rainfall patterns and slope gradients[J]. CATENA, 2024, 247: 108519.

[6] 陶志刚, 许闯, 刘淞源, 等. 降雨条件下含近水平弱层边坡的破坏机理物理模型试验研究 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 4671−4686.
TAO Z G, XU C, LIU S Y, et al. Physical modelling of damage mechanism of slopes containing near horizontal weak layers under rainfall conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12): 4671−4686.

[7] LI K, SUN P, WANG H J, et al. Insight into failure mechanisms of rainfall induced mudstone landslide controlled by structural planes: from laboratory experiments[J]. Engineering Geology, 2024, 343: 107774.

[8] 林滨强, 章德生, 简文彬, 等. 风驱雨作用下植被斜坡稳定性响应研究 [J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2765−2774.
LIN B Q, ZHANG D S, JIAN W B, et al. Response of vegetated slope stability under wind-driven rain conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(9): 2765−2774.

[9] 何满潮, 任树林, 陶志刚. 滑坡地质灾害牛顿力远程监测预警系统及工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2161−2172.
HE M C, REN S L, TAO Z G. Remote monitoring and forecasting system of Newton force for landslide geological hazards and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2161−2172.

[10] WANG J, ZHU Z M, LIU Z M, et al. Indoor tests of sensor-enabled piezoelectric geocable–geogrid composite structure for slope rehabilitation and monitoring[J]. Engineering Geology, 2024, 343: 107780.

[11] 陶志刚, 任树林, 郝宇, 等. 层状反倾边坡破坏机制及 NPR 锚索控制效果物理模型试验 [J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 976−990.
TAO Z G, REN S L, HAO Y, et al. Physical model experiment on failure mechanism and NPR anchor cable control effect of layered counter-tilt slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 976−990.

[12] 陈友东, 周昌, 张凯恒. 韧性锚杆对边坡支护作用的模型试验研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(4): 1418−1428.
CHEN Y D, ZHOU C, ZHANG K H. Model test of supporting effect of resilient anchor ca-bles on slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(4): 1418−1428.

[13] 朱彦鹏,王澳,黄安平,等.降雨作用下框锚加固黄土边坡破坏机理试验研究 [J/OL].金属矿山, 1-13[2024-12-07]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20240605.1322.002.html.
ZHU Y P, WANG A, HUANG A P, et al. Study on failure mechanism of loess slope reinforced by frame prestressed anchors under the action of rainfall[J]. Metal Mine, 1-13[2024-12-07]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20240605.1322.002.html.

[14] QIANG Y J, HE J, XIAO T, et al. Coastal town flooding upon compound rainfall-wave overtopping-storm surge during extreme tropical cyclones in Hong Kong[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 37: 100890.

[15] 豆红强, 谢森华, 简文彬, 等. 球状风化花岗岩类土质边坡土-岩界面优势流潜蚀特性研究 [J]. 岩土力学, 2024, 45(4): 950−960.
DOU H Q, XIE S H, JIAN W B, et al. Characteristics of preferential flow suffosion of soil-rock interface in spherical weathered granite slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(4): 950−960.

[16] 李晓红. 岩石力学实验模拟技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 16−24.

[17] TAO Z G, ZHU C, HE M C, et al. A physical modeling-based study on the control mechanisms of Negative Poisson's ratio anchor cable on the stratified toppling deformation of anti-inclined slopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104632.

[18] NIAN G Q, CHEN Z H, ZHU T Y, et al. Experimental study on the failure of fractured rock slopes with anti-dip and strong weathering characteristics under rainfall conditions[J]. Landslides, 2024, 21(1): 165−182.

[19] SUN H, LIU H, LIU X L, et al. Mechanical testing and numerical simulation of intelligent terminal structure of rockbolt used as a deformable support and for safety monitoring in rock engineering[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 148: 105769.

[20] 易连兴. 负压水动力场对岩溶滑坡的作用——以威宁猴场滑坡为例 [J]. 山地学报, 2020, 38(5): 691−698.
YI L X. Influence of negative hydrodynamic pressure field on landslide: a case study of Houchang Landslide in Weining, China[J]. Mountain Research, 2020, 38(5): 691−698.

[21] 原泽, 晏长根, 陶悦, 等. 骨架防护黄土边坡坡面冲蚀模型试验研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 1989−1998.
YUAN Z, YAN C G, TAO Y, et al. Erosion model test of loess slope with framework pro-tection[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 1989−1998.

[22] 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.

[23] 黄少平, 陈俊毅, 肖衡林, 等. 不同坡度植被边坡降雨入渗和径流侵蚀规律的试验研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3435−3447.
HUANG S P, CHEN J Y, XIAO H L, et al. Test on rules of rainfall infiltration and runoff erosion on vegetated slopes with different gradients[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3435−3447.

作者贡献说明

范乔峰: 负责试验设计和铺装, 参与初稿撰写、修订稿件。孙 欢: 负责论文初稿撰写、初稿修订、经费支持。孟子敏: 参与试验设计和铺装。全体作者均参与结果讨论。

利益冲突声明

作者声明, 不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文未使用人工智能(AI)协助撰写。

伦理声明

不适用: 本文不涉及人类或动物研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025022001。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据, 可向通信作者提出申请。

致谢 (Acknowledgements)

本文得到国家自然科学基金项目(52109120)、海南省重点研发项目(ZDYF2024 SHFZ060)、清华大

学水圈科学与水利水电工程全国重点实验室开放基金项目(sklhse-2024-D-01)支持。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52109120), the Hainan Province Science and Technology Special Fund (ZDYF 2024SHFZ060), the Open Research Fund Program of State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering (sklhse-2024-D-01).

作者简介

范乔峰(2000—),男,湖南郴州人,海南大学土木工程专业2022级硕士研究生,E-mail: fanqiaofeng_jole@foxmail.com

孙 欢(1990—),男,陕西澄城人,副教授,博士,研究方向:岩石力学与海岛工程、海洋岩土工程、工程地质灾害等,E-mail: sunhuan@hainanu.edu.cn

(责任编辑:张秀梅,英文校对:王凤阳)

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.