

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230529005

全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨关系分析*

刘红军¹, 武闻禹¹, 耿林^{2,3}, 刘良^{2,3}, 张国良^{2,3}, 孙文雨^{2,3}, 于鹏^{2,3}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266100; 2. 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室, 山东青岛 266100; 3. 青岛地质工程勘察院(青岛地质勘查开发局), 山东青岛 266100)

摘要: 降雨是滑坡诱发的主要因素, 当前我国防灾工作理念从注重灾后救助向注重灾前预防转变、从减少灾害损失向减轻灾害风险转变, 因此明晰降雨诱发机理并建立合理的预警机制, 对做好地质灾害防灾减灾工作至关重要。针对降雨型全风化花岗岩滑坡稳定性问题, 以青岛崂山风景区全风化花岗岩返岭滑坡为实例, 进行了不同含水率原状土剪切试验与大型物理相似模型试验。揭示了边坡的降雨响应规律, 探究了全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨关系, 并拟合相关量化公式。同时采用ABAQUS建立边坡流固耦合三维数值模型, 基于强度折减法验证了公式的合理性。研究表明: (1) 降雨型全风化花岗岩滑坡的破坏模式分为浸润侵蚀→表层变形→破坏加深→整体失稳4个阶段, 变形期间坡体存在“鼓状凸起”与“片状溜滑”现象, 最终发生推移式破坏; (2) 边坡对降雨入渗的响应规律在水平及竖向空间上存在差异, 降雨强度越大, 含水率与孔压增速越大; (3) 基于试验结果推导了滑坡含水率、安全系数与降雨强度、降雨持时之间的影响关系公式, 数值模拟验证误差率较小, 能够较好的描述全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨之间的定量关系。研究结果为类似强~全风化花岗岩地区滑坡的预警与防治提供参考。

关键词: 全风化花岗岩; 降雨诱发滑坡; 物理模型试验; 数值模拟; 定量研究

中图分类号: P694 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0322-11

Analysis of the Relationship Between Stability of Fully Weathered Granite Landslides and Rainfall

LIU Hongjun¹, WU Wenyu¹, GENG Lin^{2,3}, LIU Liang^{2,3}, ZHANG Guoliang^{2,3}, SUN Wenyu^{2,3}, YU Peng^{2,3}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Geological Safety of Coastal Urban Underground Space, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266100, China; 3. Qingdao Geo-Engineering Surveying Institute, Qingdao Geological Exploration Development Bureau, Qingdao 266100, China)

Abstract: Rainfall is the primary trigger for landslides. With China's disaster prevention efforts changing from post-disaster relief to pre-disaster prevention, and from disaster loss reduction to disaster risk mitigation, it is crucial to understand the triggering mechanisms for rainfall-induced disasters and establish effective early warning systems for geological disaster prevention and mitigation. To address the stability issues of rainfall-induced landslides in fully weathered granites, shear tests on in-situ soils

* 收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-08-22

基金项目: 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室开放基金(BHKF2021Z11)项目、青岛地质工程勘察院科研基金项目(2022-QDDZYKY06)资助

作者简介: 刘红军(1965—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事工程地质研究。E-mail: hongjun@ouc.edu.cn

通讯作者: 于鹏(1992—), 男, 高级工程师, 博士。主要从事地质灾害评价研究。E-mail: 13210276328@163.com

with different moisture contents and large-scale physical similarity model tests were carried out in Qindao's Lao Mountain area as an example. The slope's response to rainfall was revealed, the relationship between the stability of fully weathered granite landslides and rainfall was explored, and relevant quantitative formulas were fitted. Additionally, ABAQUS was used to establish a three-dimensional flow-solid coupled numerical model for the slope, validating the equations through the strength reduction method. The research results showed that: (1) Rainfall-induced fully weathered granite landslides failure progressed through four stages: infiltration and erosion → surface deformation → damage deepening → overall instability. The slope exhibited the phenomena of "drum-like bulge" and "sheet-like slipping" during the deformation period, and ended up with a translational slipping. (2) The slope's response to rainfall infiltration showed spatial variability, with greater rainfall intensity leading to faster increases in moisture content and pore pressure. (3) Based on the experimental results, formulas describing the relationship between landslide moisture content, safety factors, and rainfall intensity and duration were derived. Numerical simulation confirmed the accuracy of these formulas with minor deviation, accurately describing the quantitative relationship between landslide stability and rainfall. The results of the study provide insights on early warning and prevention strategies for landslides in areas with similar strongly to fully weathered granite.

Keywords: fully weathered granite; rainfall-induced landslides; physical model tests; numerical simulation; quantitative studies

0 引言

滑坡作为最常见的地质灾害,降雨是其诱发的主要因素^[1]。降雨诱发滑坡的机理十分复杂,经常涉及侵蚀^[2]、土体软化^[3]、渗流^[4]、应力重分布^[5]和多种破坏模式等^[6]因素。随着极端天气的增多,我国防灾工作理念从注重灾后救助向注重灾前预防转变、从减少灾害损失向减轻灾害风险转变。因此,针对不同的地质条件,明晰降雨诱发机理,评估滑坡稳定性,建立合理的预警机制,对做好地质灾害防灾减灾工作至关重要。

相关专家学者针对降雨与滑坡关系做了大量研究,模型试验和数值模拟是最常用的手段^[7]。其中物理模型试验主要包括渗水力模型试验^[8]、底面摩擦模型试验^[9]、框架式模型试验^[10]和土工离心模型试验^[11]等,其都需要明确原模型的物理、力学作用过程,分析降雨入渗规律。针对不同的滑坡类型及地质条件,相关学者各自构建了不同的滑坡物理模型。如马坤等^[12]针对路堑滑坡建立了多传感器数据融合的物理模型,根据统计学概率分析了含水率变化曲线与累计降雨量之间的关系;钟源等^[13]建立了不同降雨强度下厚层堆积层滑坡物理模型,探究了其强降雨触发机制;曾昌禄等^[14]设计了室内边

坡降雨模型箱和人工降雨系统,研究了黄土边坡降雨入渗规律以及基质吸力的变化特征。数值模拟方法常应用于滑坡敏感性识别、稳定性分析及位移预测中。如姚杰等^[15]将三维斜坡稳定性分析模型(Scoops3D)与降雨入渗模型(TRIGRS)结合,对川藏铁路潜在滑坡进行了数值动态识别研究;张晗等^[16]建立了高位远程滑坡的两相耦合计算模型,基于光滑粒子流体动力学(SPH)方法,模拟了强降雨条件下滑坡的两相运动过程;陈大伟等^[17]结合物探数据与极限平衡法,模拟分析了降雨条件下滑坡最大剪应变区域分布及斜坡稳定性规律。另外,近年来人工智能AI和机器学习方法也被应用于滑坡的数值分析中,如C.Zhou等^[18]结合ABC人工蜂群、WT小波变换、和基于核的KELM极限学习机算法,构建了滑坡位移预测程序;A.Novellino等^[19]基于深度学习和基准机器学习算法建立了滑坡风险评估模型;M.X.Chen等^[20]则使用基于GIS的Bayes网络、hoeffding树和logistic模型树等人工智能方法评价了滑坡敏感性。

当前,有关滑坡与降雨关系的研究已取得进展,降雨诱发滑坡机理逐渐明确。然而,针对降雨型全风化花岗岩滑坡的研究较少,其稳定性与降雨的定量、半量化关系有待进一步确定。花岗岩类滑坡的滑坡面大多位于抗剪强度较低的全风化带,

全风化花岗岩呈现已经完全风化成砾质黏性土状,工程力学条件差,在降雨条件下,土体内饱和度变化进易引发失稳。基于此,以崂山风景区全风化花岗岩返岭滑坡为实例,采用模型试验和数值模拟手段,深入探究全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨关系,拟合相关量化公式,以期为类似强~全风化花岗岩地区滑坡的预警与防治提供参考。

1 滑坡概括

本文研究对象返岭滑坡位于青岛市崂山风景区,中心经纬度为东经 $120^{\circ}40'49.31''$,北纬 $36^{\circ}50'50.11''$,地貌类型为构造剥蚀的低山区(图1)。区内山脉纵横、群峰峭立,以坚硬块状侵入岩亚区为主,花岗岩风化程度高。降雨集中在汛期6~8月,根据已发地质灾害分析,研究区地质灾害发生的时间规律与降雨量的时间规律大致相同,一般发生于一次强降雨过程或降雨结束3 d内,降雨尤其是大暴雨,是引发区内地质灾害的主要因素之一。

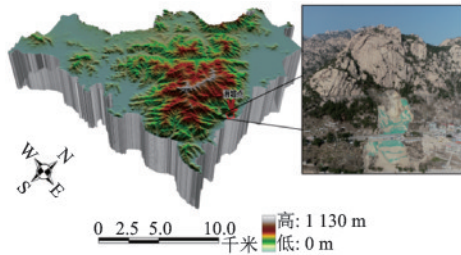


图1 返岭滑坡概况

Fig.1 Overview of Fanling landslide

受强降雨影响,返岭斜坡分别与2007年8月和2020年7月发生滑塌,造成一名社区居民死亡,道路被冲毁。分析2020年现场踏勘资料(图2),返岭滑坡属于第四纪及近代松散堆积层古滑坡,为类土质滑坡,具有软弱滑动面、前缘鼓包、后缘拉裂明显等

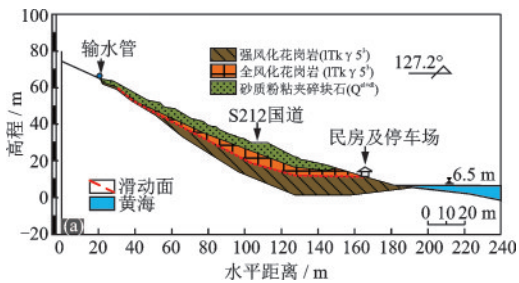


图2 返岭滑坡地质剖面

Fig.2 Geological section of Fanling landslide

特点。滑面在全风化花岗岩中,破坏模式为推移式折线形滑移破坏。长约175~228 m,宽约65~85 m,平面面积约 $1.95 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体平均厚度12 m,体积约 $23.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,为中型滑坡。前缘高程3~5 m,距离海面5~10 m;后缘高程55~85 m,顺公路长度290 m。滑坡整体坡度较陡,平均坡度为 23° ,坡向与滑坡方向均为 $130^{\circ} \sim 140^{\circ}$ 。滑坡后缘为基岩与第四系分界线,剪出口为残坡积边界。

根据降雨资料,2020年7月22日滑坡发生时单日降雨175.96 mm(图3),为典型的降雨诱发滑坡,以此滑坡为研究对象,开展室内试验、模型试验及数值模拟,定量评判全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨关系,对类型地区降雨型滑坡防灾减灾具有重要意义。

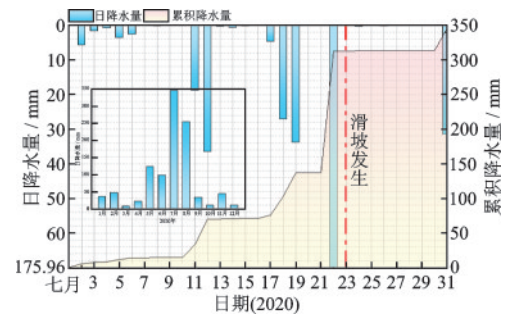


图3 降雨-滑坡时序

Fig.3 Rainfall-landslide time series diagram

2 室内试验及模型试验

2.1 室内试验

全风化花岗岩抗剪强度低,为获取滑坡岩土体物理力学特性,探究含水率与其抗剪强度参数关系,取滑坡原状土进行不排水直剪试验(图4)。

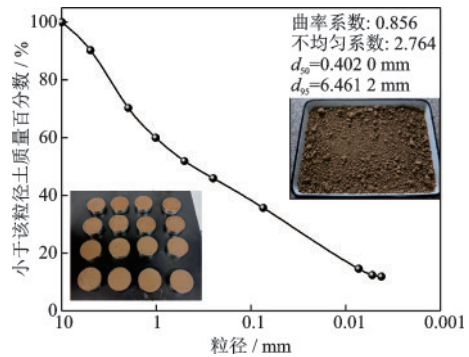


图4 原状土粒径曲线及剪切试样

Fig.4 In-situ soil particle size curve and shearing samples

控制干密度 $\rho_d = 1.9 \text{ g/cm}^3$ 制备不同含水率的重塑土样,含水率设置为 12%、16%、20%、24%。试样步骤如下:①取过 2 mm 筛的土按照 40%~70% 饱和度制成土样;②根据要求的试样干密度和试样体积称取每个试样所需的风干砂样质量,准确至 0.1g;③对准剪切容器上下盒,插入固定销,放干透水板和干滤纸。试样装样并拂平,控制试样为预定干密度;④安装垂直加压框架,施加垂直压力,试样的剪切速度为 0.8 mm/min,使试样在 3~5 min 内剪损。

2.2 模型试验

进一步设置大尺寸物理模型试验,探究含水率与降雨强度及历时之间的关系。试验箱为 8 m × 3.5 m × 0.8 m 的钢架强化模型箱(图 5),试验箱上方安装定水头降雨装置用于模拟不同的降雨强度,其强度大小通过调节水阀压强及流量大小进行控制。

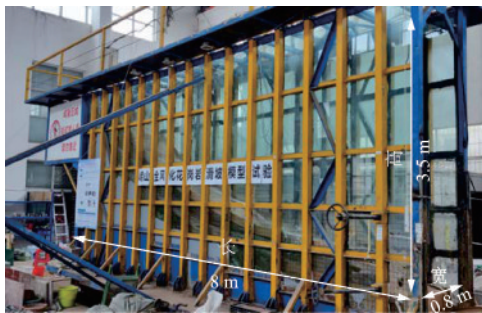


图 5 试验模型箱

Fig.5 Test model box

2.2.1 相似比与相似材料

根据原型滑坡尺寸与模型箱尺寸,确定几何相似比 $C_l = 1:30$,根据相似定理,其余试验参数见表 1。

考虑到原型滑坡表层残积土和全风化花岗岩地层水土特性相似,本次模拟中将其考虑为相同滑体,根据相关学者研究^[13-14]及模型参数,选择滑体相似材料为小石(1~3 mm)、河沙、重晶砂、黏土、双飞粉、膨润土、水,进行剪切试验、无侧限单轴压缩试验及渗透试验,最终确定滑带材料配比为 48%:16%:16%:5%:5%:5%:5%。原型滑坡滑床为不透水的强风化花岗岩层,滑带土材料及配比选择玻璃珠(0.6~0.8 mm):玻璃珠(1.0~1.5 mm):滑体土:水=40%:20%:30%:10%。滑床则采用方砖与

表 1 试验模型参数与相似比

Table 1 Experimental model parameters and similarity ratios

参数	比尺	原型	模拟
长度/m	$C_l = l_p/l_m = 30$	$l_p = 210$	$l_m = 7$
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$C_\rho = \rho_p/\rho_m = 1$	$\rho_p = 1.9$	$\rho_m = 1.9$
黏聚力/kPa	$C_c = c_p/c_m = 30$	$c_p = 19$	$c_m = 0.63$
内摩擦角	$C_\varphi = \varphi_p/\varphi_m = 1$	$\varphi_p = 24$	$\varphi_m = 24$
变形模量/GPa	$C_E = E_p/E_m = 30$	$E_p = 5.4$	$E_m = 0.18$
泊松比	$C_\mu = \mu_p/\mu_m = 1$	$\mu_p = 0.25$	$\mu_m = 0.25$
渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	$C_K = K_p/K_m = \sqrt{30}$	$K_p = 4$	$K_m = 0.73$
雨强/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	$C_q = q_p/q_m = \sqrt{30}$	q_p	q_m
降雨时间/h	$C_t = t_p/t_m = \sqrt{30}$	t_p	t_m
应力	$C_\sigma = \sigma_p/\sigma_m = 30$	σ_p	σ_m
位移	$C_u = u_p/u_m = 30$	u_p	u_m

C30 水泥混凝土堆砌。

2.2.2 传感器布设

试验过程中所用各类传感器布设如图 6 所示。共有 3 个主监测面,2 个副监测面,实时监测试验过程中的坡体位移变形、土压力、孔隙水压力、土体含水率及基质吸力情况。需要说明的是,本文研究中只记录了 9 个含水率与 9 个孔隙水含水率传感器数据,其他数据将另篇说明。

2.2.3 试验方案与过程

根据降雨相似比,分析原型滑坡所在区域降雨资料,确定极端降雨(N1)、大暴雨(N2)、暴雨(N3)三种降雨工况,具体数值见表 2。

试验过程中实时记录边坡的变形过程,如图 7 所示,全风化花岗岩滑坡破坏模式可分为 4 个阶段:浸润侵蚀→表层变形→破坏加深→整体失稳。降雨伊始,坡面被雨水不断浸湿,表层呈现侵蚀、冲蚀坑。随着降雨的进行,雨水冲刷带走表层松散物质,水流发生下蚀与侧蚀,坡体孔隙水压力增大,应力重分布致使表层呈现裂缝与边裂纹。雨量持续增大,优势流入渗作用增强,土体逐渐饱和,坡体由稳定向不稳定状态转变,此时在渗流与冲刷作用下,前缘沟头垮塌,中缘拉裂缝贯通,后缘发生流土破坏,在推力作用和滑动速度差异影响下,坡体出现“鼓状凸起”与“片状溜滑”现象。在试验最后阶段,随着雨量增大坡体地下水位形成,坡体抗滑力进一步减小,潜在滑动面形成,坡体发生整体失稳,后缘崩解,坡脚有效临空面出现,最终发生推移式破坏。

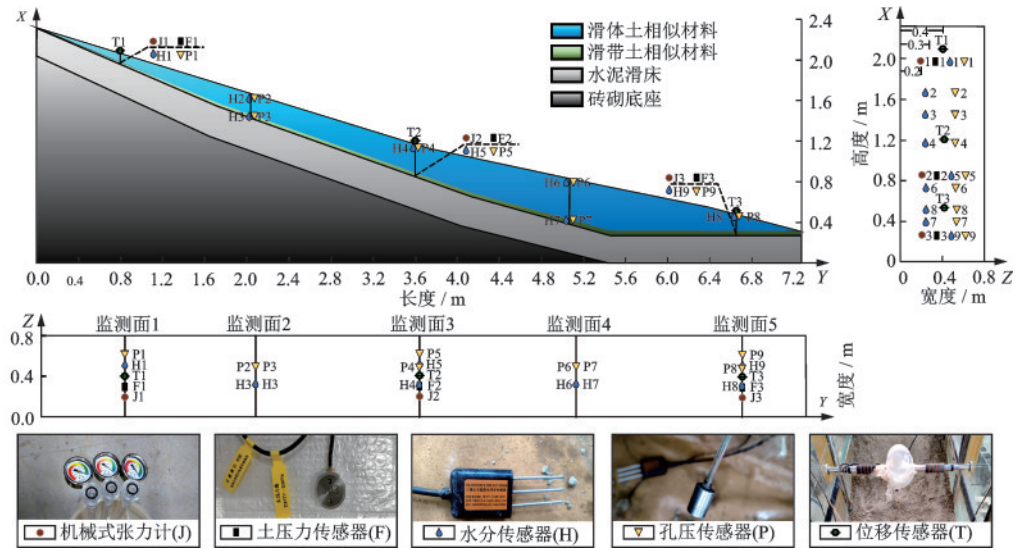


图6 传感器布设

Fig.6 Sensor layout diagram

表2 模型降雨方案

Table2 Modeled rainfall scenarios

分组	降雨强度/(mm·h ⁻¹)		降雨时长/h		降雨量/mm	
	R	S	R	S	R	S
N1	32	5.8	24	2.2	768	12.76
N2	20	3.6	24	2.2	480	7.92
N3	10	1.8	24	2.2	240	3.96



(a) 浸润侵蚀阶段 (b) 表层变形阶段 (c) 破坏加深阶段 (d) 整体失稳阶段

图7 破坏模式

Fig.7 Destruction mode diagram

3 试验结果分析

为了得到全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨之前的定量关系,分别分析室内试验结果与物理模型试验结果,选取坡体含水率与安全系数为关系因子,拟合相关关系公式。

3.1 室内试验结果

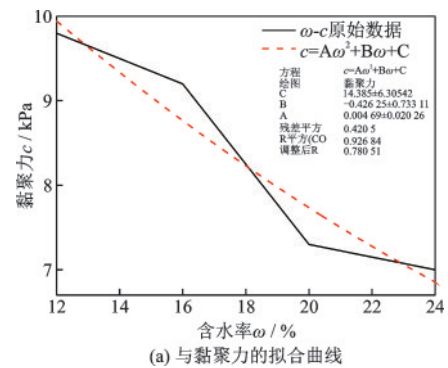
根据室内剪切试验数据,换算得到含水率与抗剪强度参数的影响关系。

3.1.1 含水率与黏聚力关系

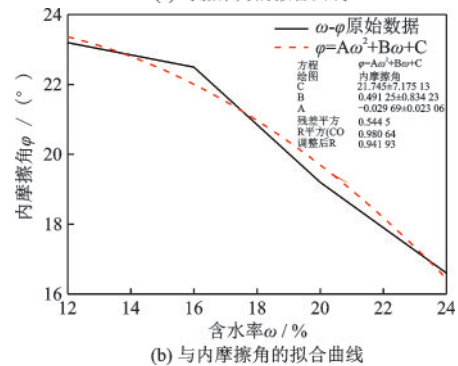
全风化花岗岩黏聚力对含水率的变化较为敏感,当含水率从12%增加到24%时,黏聚力从9.8 kPa降低到7.0 kPa,二者呈负相关关系。基于二次多项式 $c=A\omega^2+B\omega+C$ 对数据进行拟合,得到全风化花岗岩与黏聚力关系公式(式1),拟合值与试验值较为吻合(图8(a))。

$$c=0.0047\omega^2-0.4263\omega+14.3850 \quad (1)$$

式中, c 表示土体的黏聚力, kPa; ω 表示土体含水率, 用百分数表示。



(a) 与黏聚力的拟合曲线



(b) 与内摩擦角的拟合曲线

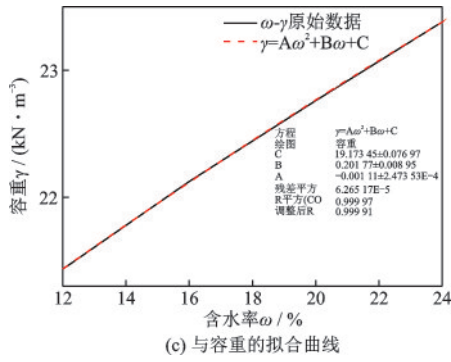


图8 含水率与土体各参数之间的拟合曲线

Fig.8 Fitting curves between moisture content and soil parameters

3.1.2 含水率与内摩擦角关系

当全风化花岗岩含水率从12%增加到24%时,其内摩擦角从23.2°降低到16.6°,二者呈负相关关系。采用相同方法,拟合内摩擦角公式(式2),拟

合值与试验值较为吻合(图8(b))。

$$\varphi = -0.0297\omega^2 + 0.4913\omega + 21.7450 \quad (2)$$

式中, φ 表示土体的内摩擦角,(°)。

3.1.3 含水率与容重关系

相同的,进一步拟合全风化花岗岩含水率与容重关系(式3)(图8(c))。

$$\gamma = -0.0011\omega^2 + 0.2018\omega + 19.1735 \quad (3)$$

式中, γ 表示土体的容重, kN/m^3 。

3.2 模型试验结果

3.2.1 降雨响应规律

提取物理模型试验含水率与孔隙水压力共18个监测点数据,对其进行平滑降噪处理和归一化处理^[12],绘制降雨时程曲线(图9),以此分析边坡对降雨入渗的响应规律。

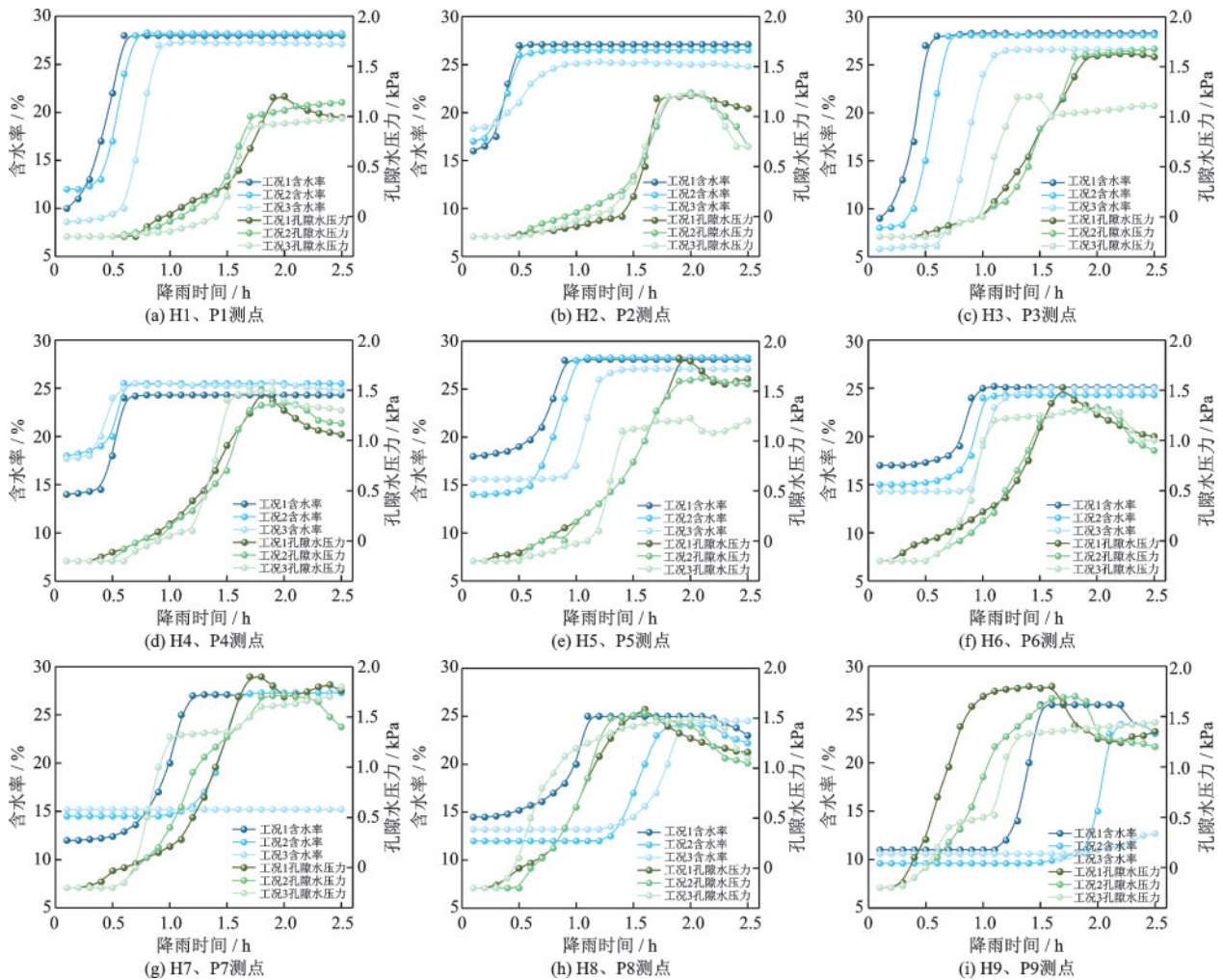


图9 各测点含水率和孔隙水压力降雨时程

Fig.9 Rainfall time series diagrams of moisture content and pore water pressure at each measurement point

(1)各测点处含水率与孔隙水压力在不同降雨工况下曲线趋势基本一致,均经历三个过程。试验初期,降雨通过表层孔隙入渗,土体内渗流作用增大,当湿润锋到达监测点时含水率和孔隙水压力缓慢增大。随着降雨的进行,坡体变形所致的拉裂缝为雨水入渗提供优势渗流通道,坡体内部含水率迅速上升;土体变形挤压致使排水不及时,孔隙水压力也迅速上升。不同的是,当土体逐渐饱和后,含水率变化为动态稳定,而孔隙水压力随着坡体的破坏快速消散得以下降。

(2)在水平空间规律上,边坡入渗速度在不同位置处存在差异,且含水率与孔隙水响应规律也不尽相同。对于含水率而言,坡体后缘(H1、H2、H3)响应更为迅速,这是因为后缘较陡较薄,随着降雨的垂直入渗很快达到饱和;而孔隙水压力则是前缘(P8、P9)和中部(P4、P5、P6、P7)响应时间较短,这是因为雨水在坡体中前部汇集,地下水位形成,孔压率先累积。

(3)在竖向空间规律上亦存在差异。在相同的监测剖面,对于含水率,坡体深部大于表层,随着雨水沿裂隙入渗,当到达滑带附近时聚集并饱和(H1、H3、H5、H7、H9),而表层含水率逐渐平衡并稳定(H2、H4、H6、H8);对于孔隙水压力,坡体表层(P2、P4、P6、P8)孔压变化幅度大于深部(P1、P3、P5、P7、P9),在降雨结束后,表层孔压迅速衰减,而内部孔压继续上升,存在滞后效应。

(4)降雨强度越大,渗流作用增强,入渗速率提高,含水率与孔压响应时间越短,增速越大。

3.2.2 滑坡稳定性与降雨定量关系

基于模型试验数据,结合室内试验结果,进一步推导含水率、滑坡安全系数与降雨强度、降雨持时的定量关系。

(1) 含水率与降雨强度、降雨持时关系

通过分析,降雨强度 R ,降雨持时 T 都对含水率 ω 有影响,故采用曲面拟合方程的形式来建立三者之间的关系。设距坡表 20 cm 处和 40 cm 处的拟合公式形式一致: $\omega_i = a + bR^2 + cR + dT^2 + eT + fRT$ 共有 7 个参数,拟合公式如下(图 10):

$$\omega_{20} = -16.7498 - 0.4920R^2 + 7.1459R - 11.1825T^2 + 40.8607T - 1.6458RT \quad (4)$$

$$\omega_{40} = 5.7305 - 0.0420R^2 + 1.7573R - 3.2724T + 17.1651T - 0.5186RT \quad (5)$$

式中, ω_{20} 表示距坡表下 20 cm 处的含水率,用百分

数表示; ω_{40} 表示距坡表下 40 cm 处的含水率,用百分数表示; R 表示降雨强度,用单位时间内降雨高度表示,mm/h; T 表示降雨持时, h 。拟合公式的曲面如图 10 所示,由结果可以看出真值曲线与计算值曲线较为吻合。

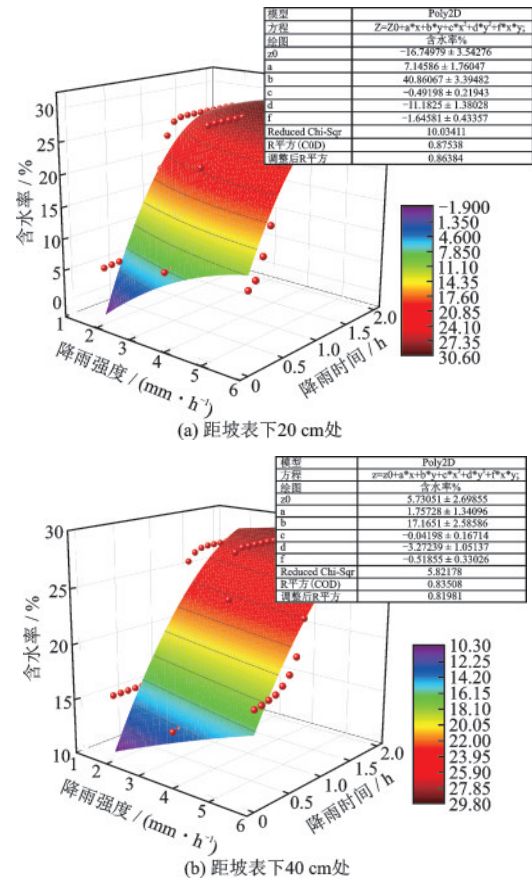


图 10 含水率、降雨强度与降雨时间之间的拟合曲面
Fig.10 Fitting surfaces of the relationship between moisture content, rainfall intensity, and rainfall duration

(2) 滑坡安全系数与降雨强度、降雨持时关系

滑坡安全系数采用毕肖普条分法^[21],假设每土条在其滑移面上的抗滑系数一致,且等于整个滑面的平均安全系数。毕肖普条分法公式如下:

$$F = \frac{\sum (cs + \gamma tg\phi) \frac{1}{m_a}}{\sum \gamma \sin \alpha} \quad (6)$$

$$m_a = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot tg\phi}{F} \quad (7)$$

式中, F 为基于剩余滑体下滑力计算的安全系数; s 为土条宽度, m ; α 为土条重力线和底面中心点半径间的夹角, ($^\circ$); γ 为土条重力, kN/m^3 。

因为 c , ϕ 和 γ 还随深度变化,设:

$$a_1 l + b_1 = c \quad (8)$$

$$a_2 l + b_2 = \varphi \quad (9)$$

$$a_3 l + b_3 = \gamma \quad (10)$$

式中, l 表示距坡表向下的距离, cm, 此处依次取为 20 cm 和 40 cm 并代入方程; a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 和 b_3 均为量纲为 1 的参数。

将式(4~5)代入式(1), 根据式(8)联立方程组, 解得:

$$a_1 = -0.000 1R^4 + 0.001 6R^3 - 0.024 9R^2 + 0.175 8R - 0.026 9T^4 + 0.188 4T^3 - 0.588 6T^2 + 0.8730T - 0.161 4RT + 0.014 2R^2T + 0.062 3RT^2 - 0.003 1R^2T^2 - 0.000 4R^3T - 0.007 9RT^3 - 0.537 4 \quad (11)$$

$$b_1 = 0.002 3R^4 - 0.065 4R^3 + 1.024 3R^2 - 7.688 3R + 1.125 1T^4 - 8.062 2T^3 + 26.146 2T^2 - 41.311 9T + 6.934 1RT - 0.583 7R^2T - 2.628 8RT^2 + 0.126 3R^2T^2 + 0.015 0R^3T + 0.330 0RT^3 + 33.591 7 \quad (12)$$

将式(4~5)代入式(2), 根据式(9)联立方程组, 解得:

$$a_2 = 0.000 4R^4 - 0.010 2R^3 + 0.107 5R^2 - 0.517 8R + 0.169 8T^4 - 1.190 2T^3 + 2.848 1T^2 - 2.906 9T + 0.896 0RT - 0.089 8R^2T - 0.393 5RT^2 + 0.019 6R^2T^2 + 0.002 3R^3T + 0.049 6RT^3 + 0.920 1 \quad (13)$$

$$b_2 = -0.014 3R^4 + 0.413 3R^3 - 4.397 6R^2 + 20.975 8R - 7.109 8T^4 + 50.946 1T^3 - 123.169 1T^2 + 118.867 1T - 37.710 1RT + 3.688 5R^2T + 16.612 0RT^2 - 0.798 4R^2T^2 - 0.094 9R^3T - 2.085 6RT^3 - 13.218 5 \quad (14)$$

将式(4~5)代入式(3), 根据式(10)联立方程组, 解得:

$$a_3 = -0.000 4R^3 + 0.008 1R^2 - 0.068 6R + 0.006 3T^4 - 0.044 1T^3 + 0.178 1T^2 - 0.325 2T + 0.043 5RT - 0.003 3R^2T - 0.014 6RT^2 + 0.000 7R^2T^2 + 0.000 1R^3T + 0.001 8RT^3 + 0.369 0 \quad (15)$$

$$b_3 = -0.000 5R^4 + 0.015 3R^3 - 0.335 8R^2 + 3.078 3R - 0.263 3T^4 + 1.886 9T^3 - 8.067 3T^2 + 16.255 3T - 1.905 8RT + 0.136 6R^2T + 0.615 3RT^2 - 0.029 6R^2T^2 - 0.003 5R^3T - 0.077 2RT^3 + 8.104 3 \quad (16)$$

将参数 a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 和 b_3 代入式(6), 最终可得式(17), 从而得出全风化花岗岩滑坡安全系数与降雨持时、降雨强度的关系。

$$F = \frac{\left\{ \left[(a_1 \cdot l + b_1) b + (a_2 \cdot l + b_2) \operatorname{tg}(a_3 \cdot l + b_3) \right] \frac{1}{m_a} \right\}}{\left[\sum (a_3 \cdot l + b_3) \sin \alpha \right]} \quad (17)$$

4 数值模拟验证

采用 ABAQUS 软件, 基于强度折减法 (SRM) 建立降雨条件下的三维流固耦合边坡模型, 计算滑坡安全系数, 以此验证拟合公式的可靠性与适用性。

4.1 数值模型建立

由于该模型中包含了雨水引起的地下渗流, 所以必须考虑该模型中的渗透与应力并进行耦合处理。利用 Abaqus 软件中的流体/位移单元, 可以将土体中的应力场和渗流场进行直接耦合, 并利用强度折减方法进行土体中的数值模拟计算。所谓有限元强度折减法, 即在理想弹塑性有限元计算过程中, 将边坡岩土体的抗剪强度参数逐步地减小, 直至其到达破坏的程度。在此过程中, 程序能够从弹塑性的计算结果中, 自动得出破坏滑动面, 并得出边坡的强度储备安全系数。

根据原型滑坡地质剖面, 进行滑坡主滑动面的三维降雨流固耦合模拟, 首先建立边坡模型和材料赋值, 分为滑体和滑带两部分。模型整体长 240 m, 高 85 m, 宽 2.4 m, 坡高 54 m, 坡脚 $\beta = 20.43^\circ$, 滑体尺寸与主画面剖面图相拟合, 模型参数见表 3。

表 3 模型材料参数

参数	滑体	滑带
重度/(kN·m ⁻³)	19	26
弹性模量/kPa	50 000	1 000 000
泊松比	0.25	0.2
内摩擦角/(°)	20	37
黏聚力/kPa	25	1 000
渗透系数/(mm·h ⁻¹)	0.08	0.000 01

对模型进行网格划分。网格单元类型采用 C3D8P, 八结点六面体单元, 三向线性位移, 三向线性孔隙压力, 并进行结构化, 单元数 11 192 个。

在 x 方向上施加 x 向位移约束, z 方向上施加 z

向位移约束,底部施加 xyz 三向位移约束。 X 方向两边界面上施加孔压边界,用以模拟原始工况下的孔隙水压力及饱和度。整个模型受自重作用和浸水两侧静水压力的影响。在模型滑体表面施加表面孔隙流以模拟降雨。

从坡脚至坡顶设置5个监测点,用于提取模拟数据进行分析,如图11所示。共设置了4种降雨强度(10、20、30、40 mm/h),3种降雨持时(16、24、32 h)共12组工况进行模拟。

4.2 数值模拟分析

4.2.1 模拟过程分析

图12分别为不同工况下的位移、孔压、饱和度、塑性应变响应图。由此分析:

在坡体不同部位的对雨水动力引起的位移响应有显著的区别,滑坡顶端部位的位移响应量较为

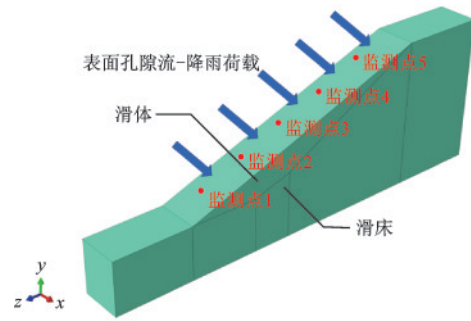


图11 降雨荷载及监测点布置示意

Fig.11 Diagram of rainfall loading and monitoring point layout

显著,高于其他部位的位移响应量。由于土体饱和和含水率、弹性模量等岩土特性的差异,薄土体相对于厚土体遇到降雨动力增载反应更敏感,而土体弹性模量值与变形响应量呈负相关。

边坡发生失稳时,其塑性应变区的发展在不同

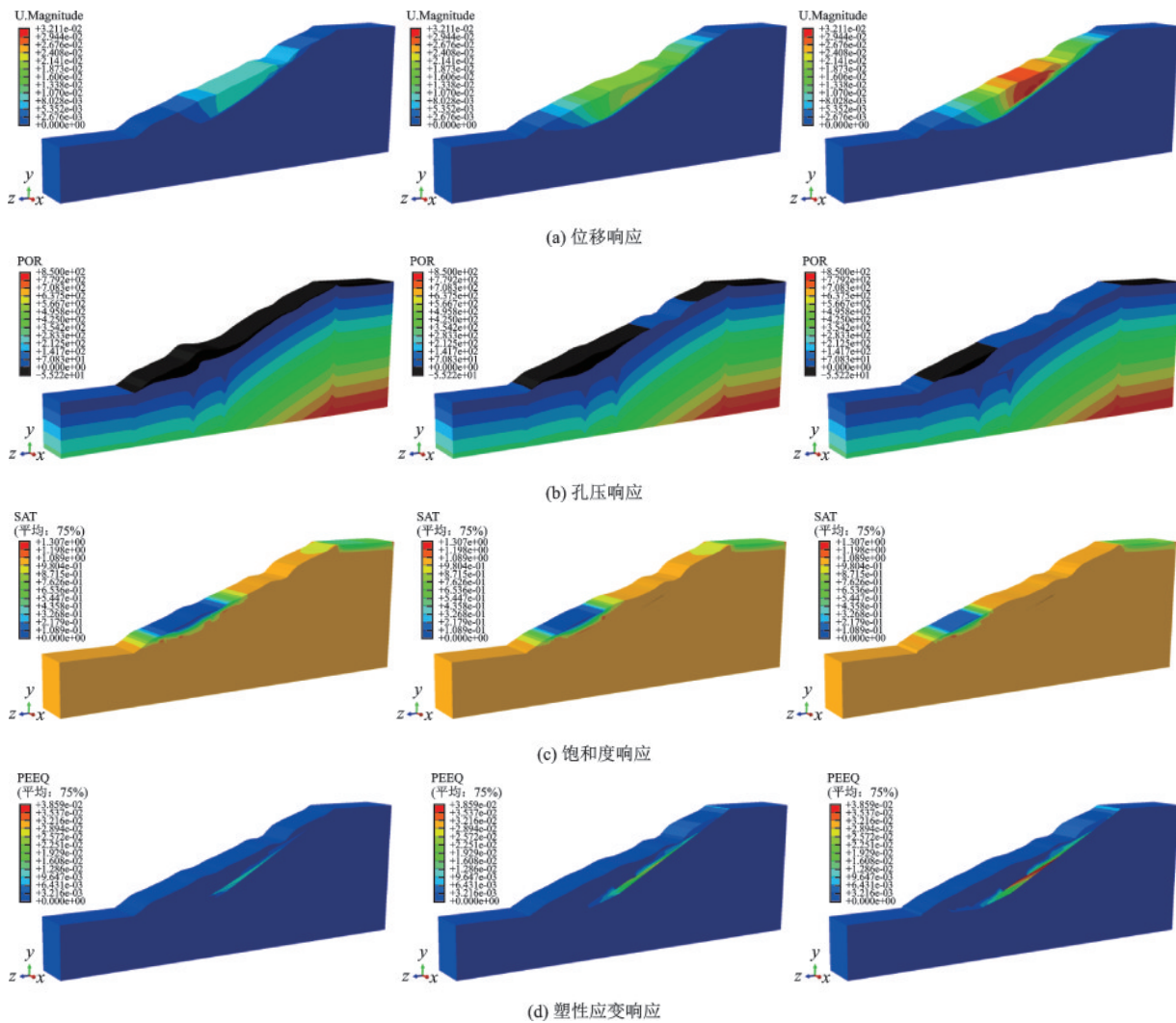


图12 不同降雨工况数值模拟响应

Fig.12 Response plots of numerical simulation under different rainfall conditions

的雨强条件下是有差异的。有别于常规滑坡的由坡脚产生至坡顶结束的塑性应变区,本例中塑性应变区从边坡中部产生,在边坡底部和边坡顶部双向扩展,且向边坡顶部扩展速度更迅速,表明坡中上部首先发生了变形,并与坡顶部构成连续型圆弧滑动面,进而引发整体滑坡,可推断该滑坡为推移式滑坡,这与物理模型试验结果一致。

4.2.2 滑坡安全系数F的验证对比分析

通过拟合的公式(17)计算得到的滑坡安全系数与数值模拟出来的安全系数作对比,见表5。其中N为工况编号,R为模拟降雨强度(mm/h),T为模拟降雨持时(h), F_1 为拟合公式求出的滑坡安全系数, F_2 为数值模拟出的滑坡安全系数,误差率 $\frac{|F_1 - F_2|}{F_1}$ 为100%。

对比可知,数值模拟技术结果与拟合公式技术结果误差率较小,证明拟合公式(式17)能较好的刻画实际工况中全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨之间的关系。

表4 安全系数对比

Table 4 Comparison of safety factors

N	R	T	F_1	F_2	误差率/%
1	40	16	1.376 8	1.250 7	9.16
2	30	16	1.464 7	1.386 4	5.34
3	20	16	1.563 1	1.483 0	5.12
4	10	16	1.647 5	1.536 2	6.76
5	40	24	1.127 9	1.047 8	7.10
6	30	24	1.290 7	1.261 6	2.25
7	20	24	1.425 3	1.417 9	0.52
8	10	24	1.568 1	1.502 5	4.18
9	40	32	0.938 2	0.828 5	11.69
10	30	32	1.147 5	1.131 3	1.41
11	20	32	1.369 7	1.348 4	1.56
12	10	32	1.549 3	1.466 7	5.33

5 结 论

本文以崂山风景区全风化花岗岩滑坡为研究对象,采用室内土工试验、物理模型试验、数值模拟等方法,探究了全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨之间的定量关系,为同类地区降雨型滑坡的防灾减灾提供一定指导。主要结论如下:

(1)降雨型全风化花岗岩滑坡破坏模式可分为

4个阶段:浸润侵蚀→表层变形→破坏加深→整体失稳,坡体出现“鼓状凸起”与“片状溜滑”现象,最终发生推移式破坏。

(2)边坡对降雨入渗的响应规律在空间上存在差异,含水率与孔隙水响应规律也不尽相同。降雨强度越大,含水率与孔压响应时间越短,增速越大。

(3)基于室内剪切试验、物理模型试验结果推导了滑坡含水率、安全系数与降雨强度、降雨持时影响关系公式,通过流固耦合数值模拟验证,拟合公式能够较好的描述全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨之间的定量关系。

(4)后续将进一步分析物理模型试验与数值模拟结果,推导相关的滑坡位移预测预警公式,并结合实际工程进行验证。

参考文献:

- [1] 张卫雄,丁保艳,张文纶,等.舟曲江顶崖大型滑坡成因及破坏机制分析[J].防灾减灾工程学报,2022,42(4):714-722.
Zhang W X, Ding B Y, Zhang W L, et al. Analysis of the causes and damage mechanisms of a large landslide at Zhouqu Jiangding Cliff[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4): 714-722.
- [2] Liu X, Wang Y. Probabilistic simulation of entire process of rainfall-induced landslides using random finite element and material point methods with hydro-mechanical coupling [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 132: 103989.
- [3] Chen H, Qin S, Xue L, et al. Why the Xintan landslide was not triggered by the heaviest historical rainfall: Mechanism and review [J]. Engineering Geology, 2021, 294: 106379.
- [4] Luo S, Huang D, Peng J, et al. Influence of permeability on the stability of dual-structure landslide with different deposit-bedding interface morphology: the case of the three Gorges Reservoir area, China [J]. Engineering Geology, 2022, 296: 106480.
- [5] Tao H, Zhang M, Gong L, et al. The mechanism of slope instability due to rainfall-induced structural decay of earthquake-damaged loess [J]. Earthquake Research Advances, 2022, 2(3): 100137.
- [6] Nguyen T S, Yang K, Wu Y, et al. Post-failure process and kinematic behavior of two landslides: Case study and material point analyses [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 148: 104797.

- [7] 王彦东, 梁靖, 裴向军. 九寨沟震后核心景区崩滑堆积体冲刷启动机制研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1048-1060.
Wang Y D, Liang J, Pei X J. Study on the initiation mechanism of scouring of avalanche-slip accumulation in the core scenic area after Jiuzhaigou earthquake [J]. Geotechnics, 2022, 43(4): 1048-1060. (in Chinese)
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] Chang C, Wang G. Creep of clayey soil induced by elevated pore-water pressure: Implication for forecasting the time of failure of rainfall-triggered landslides [J]. Engineering Geology, 2022, 296: 106461.
- [10] Coppola L, Reder A, Tarantino A, et al. Pre-failure suction-induced deformation to inform early warning of shallow landslides: Proof of concept at slope model scale [J]. Engineering Geology, 2022, 309: 106834.
- [11] Miao F, Zhao F, Wu Y, et al. A novel seepage device and ring-shear test on slip zone soils of landslide in the Three Gorges Reservoir area [J]. Engineering Geology, 2022, 307: 106779.
- [12] 马坤, 张永谋, 吴红刚, 等. 基于多传感器数据融合分析的路堑滑坡模型试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(4): 653-663.
Ma K, Zhang Y M, Wu H G, et al. Experimental study of a road graben landslide model based on multi-sensor data fusion analysis [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4): 653-663. (in Chinese)
- [13] 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 Y, Li Y Y, Yin K L, et al. Mechanisms for triggering intense rainfall on thick mounded landslides based on physical model tests [J]. Earth Sciences, 2023, 48(10): 3912-3924. (in Chinese)
- [14] 曾昌禄, 李荣建, 关晓迪, 等. 不同雨强条件下黄土边坡降雨入渗特性模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增1): 111-115.
Zeng C L, Li R J, Guan X D, et al. Experimental study of rainfall infiltration characteristics of loess slopes under different rainfall intensities [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup1): 111-115. (in Chinese)
- [15] 姚杰, 李秀珍, 徐瑞池. 降雨条件下拟建川藏铁路典型段潜在滑坡三维稳定性动态识别研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 422-431.
Yao J, Li X Z, Xu R C. Study on the dynamic identification of potential landslides in a typical section of the proposed Sichuan-Tibet Railway under rainfall conditions [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 422-431. (in Chinese)
- [16] 张哈, 高杨, 李滨, 等. 复合型滑坡固液耦合过程数值模拟分析——以无山坪滑坡为例 [J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 1104-1114.
Zhang H, Gao Y, Li B, et al. Numerical simulation analysis of the solid-liquid coupling process of composite landslide -taking the Wushanping landslide as an example [J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 1104-1114. (in Chinese)
- [17] 陈大伟, 吴志坚, 梁超, 等. 通渭黄土滑坡变形特征及致灾机理分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 24-33.
Chen D W, Wu Z J, Liang C, et al. Deformation characteristics and disaster-causing mechanism of the Tongwei loess landslide [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 24-33. (in Chinese)
- [18] Zhou C, Shao W, Yin K, et al. Estimating the properties of weathered bedrock and pile-rock interaction from the geological strength index [J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(8): 1757-1776.
- [19] Novellino A, Cesarano M, Cappelletti P, et al. Slow-moving landslide risk assessment combining Machine Learning and InSAR techniques [J]. CATENA, 2021, 203: 105317.
- [20] Chen M X, Huang D, Jiang Q H. Slope movement classification and new insights into failure prediction based on landslide deformation evolution [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 141: 104733.
- [21] 姬猛, 李文菊, 郭涛, 等. 黄土滑坡与降雨关系的模型试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(12): 2585-2592.
Ji M, Li W J, Guo T, et al. Experimental model study on the relationship between loess landslides and rainfall [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(12): 2585-2592. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)