

降雨诱发滑坡的NPR锚索控制机理及临滑预警

陶志刚^{1,2}, 史广诚^{1,2}, 杨晓杰^{1,2}, 何满潮^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为研究降雨滑坡的控制及临滑预警技术,以熊家山滑坡为原型,通过分析边坡变形的时空特征,设计了相似模型试验.以普通预应力锚索(简称PR锚索)和NPR锚索为加固材料,运用高速摄像机、孔压、土压和锚索力传感器,分析了降雨诱发的滑坡规律和锚索控制机理,并结合现场试验探究了滑坡牛顿力变化规律.结果表明:孔隙水压力突降与边坡局部滑塌近似同步;NPR锚索力突降,边坡内部产生局部变形;PR锚索因无法承受大变形被拉断失效,而NPR锚索凭借恒阻大变形特性产生高应力吸能控制功能,促使边坡达到二次平衡状态;NPR锚索在滑坡前表现出明显的“先突增,后突降”的变形-临滑动力学规律;现场试验揭示了滑坡全过程牛顿力演变规律,提前7.5 h发出临滑预警.

关键词: 滑坡;降雨;NPR锚索;控制机理;监测预警

中图分类号: P 694 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)04-0573-11

Control Mechanism and Early Warning of Rainfall-Induced Landslide Based on NPR Anchor Cable

TAO Zhi-gang^{1,2}, SHI Guang-cheng^{1,2}, YANG Xiao-jie^{1,2}, HE Man-chao^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China. Corresponding author: SHI Guang-cheng, E-mail: shiguangcheng1990@163.com)

Abstract: In order to study the control and the early-warning prediction technology for rainfall-induced landslide, the similar model test was designed by analyzing the spatial and temporal characteristics of slope deformation of Xiongjia Mountain landslide. Using ordinary Poisson's ratio (PR) anchor cable and negative Poisson's ratio (NPR) anchor cable as reinforcement materials, the law of rainfall-induced landslide and control mechanism of anchor cable were analyzed by using high-speed photography, pore pressure, earth pressure and anchor cable force sensors, and the evolution law of the Newtonian force during landslide was explored based on field tests. The results show that the sudden drop in pore water pressure is approximately synchronized with the local collapse of slope. NPR anchor force drop abruptly, causing local deformation in slope. The PR anchor cables fail because they cannot withstand large deformation, while the NPR anchor cables have high-stress energy absorption control functions due to the constant resistance and large deformation characteristics, enabling the slope to reach a secondary equilibrium state. The NPR anchor cable exhibits a significant deformation-slip dynamic law characterized by a first sudden increase followed by a sudden drop before the landslide. The field test revealed the Newtonian force evolution law in the whole process of the landslide, and obtained the early-warning time parameters of the Xiongjia Mountain landslide 7.5 h in advance.

Key words: landslide; rainfall; negative Poisson's ratio (NPR) anchor cable; control mechanism; monitoring and early-warning

收稿日期: 2022-12-09

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2022M713385); 国家自然科学基金资助项目(41941018).

作者简介: 陶志刚(1981-),男,河北邯郸人,中国矿业大学(北京)教授,博士生导师;杨晓杰(1968-),男,山西万荣人,中国矿业大学(北京)教授,博士生导师;何满潮(1956-),男,河南灵宝人,中国矿业大学(北京)教授,博士生导师,中国科学院院士.

降雨诱发的滑坡灾害是常见地质灾害之一,严重制约着国家重大工程建设和民生安全^[1].研究降雨型滑坡灾害的控制和临滑预警,实现边坡工程的加固-监测-预警一体化功能尤为重要,尤其是在对滑坡灾害有效控制的同时提出临滑预警时间,对于评价和提高边坡稳定性具有重大的防灾减灾意义.

目前,降雨型滑坡的控制措施主要包括锚固^[2]、混凝土抗剪结构^[3]和排水结构等.其中,预应力吸能锚索作为一种主动加固措施,能有效改善岩土体应力状态,提升边坡稳定性^[4],但是这些锚索的轴力随变形而变化,吸能变形量不能适应滑坡大变形^[5],且无法满足滑坡灾害预警需求.常见的降雨型滑坡预警内容包括降雨量^[6]、边坡位移^[7]、深部形变等相关物理力学指标^[8-9],虽然随着技术的发展,预警水平不断提升,但仍难以实现精准预报.主要原因是目前的监测指标主要针对滑坡发生的必要条件,而非滑坡运动产生的充分必要条件,因此如何精准预报滑坡并控制滑坡灾变仍是一个亟待解决的问题.为了实现滑坡大变形的控制,何满潮^[10]研发了具有负泊松比效应的NPR锚索,提出滑动面上的“牛顿力突降”是滑坡发生的充分必要条件,并基于双体灾变力学理论,研发了滑坡地质灾害牛顿力远程智能监测预警系统,成功预报了16次滑坡灾害^[11],而且在NPR锚索控制下,滑坡在产生局部变形后快速达到二次稳定状态.该技术有效提高了滑坡灾害的预报成功率,但是目前的预警案例主要为开挖扰动引起的硬岩滑坡^[12-13].而对于强风化松散边坡,降雨诱发的滑坡具有机理复杂性、滑坡体流动性和灾变前兆信息多变性的特点,因此基于NPR锚索的降雨型滑坡控制、全生命周期监测和临滑预警研究就显得十分迫切.

本文以云南腾冲熊家山采石场工程边坡为例,在现场精细化勘察和长期观测的基础上,分析降雨诱发工程滑坡的变形规律和破坏特征.通过人工降雨诱发边坡失稳的物理模型试验,对降雨型滑坡的NPR锚索与PR锚索加固机理及控制效果进行对比研究,探究了NPR锚索对降雨型滑坡的监控优势;最后,将NPR锚索牛顿力监测预警系统进行了现场试验,并成功预报了熊家山采石场工程边坡的降雨型滑坡灾害,为该类工程边坡的加固-预警-监测一体化控制提供了参考.

1 工程边坡原型

1.1 工程地质条件

采石场边坡位于高黎贡山南部西侧,边坡地形坡度 $15^{\circ}\sim 40^{\circ}$,分布高程1 835~1 985 m,为浅切割低中山地形,采石场面积约 $3.69\times 10^4\text{ m}^2$.采石场的地貌特征如图1所示.边坡上覆第四系含碎石砂质黏土,下覆石英片岩、变质石英砂岩.边坡发育两组陡倾角构造节理,节理1产状:走向为 $N67^{\circ}E, NW73^{\circ}$,节理面平直;节理2产状:走向为 $S26^{\circ}E, NE77^{\circ}$.边坡的典型剖面如图2所示.

根据边坡的变形破坏时空演化规律分析,熊家山滑坡与连续强降雨有着密切的相关性,且主要集中在每年的6月至9月,雨季的月平均降雨量超过500 mm,因此边坡位移在雨季会产生显著的增长趋势^[14].



图1 边坡地貌特征

Fig. 1 Geomorphology of the slope

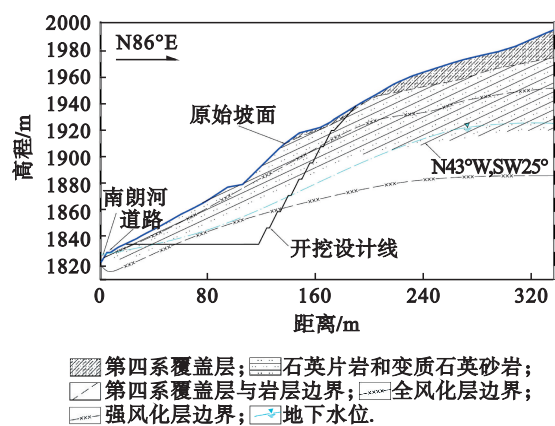


图2 边坡纵向剖面图

Fig. 2 Longitudinal profile of the slope

1.2 边坡变形破坏特征

采石场于2017年5月开工,共设计8级台阶,台阶坡度比为1:0.5,台阶高度12 m,平台宽度2 m,开挖高度100.5 m(图2).

1) 第一次滑坡.2018年2月9日,边坡发生第

一次滑坡. 滑坡破坏特征如图 3 所示. 滑坡体呈“圈椅状”, 后缘高程 1 963 m. 滑坡体垂直高度约 53 m, 最大横向宽度约 92 m (图 3). 图 4 为滑坡沿纵向的典型剖面.

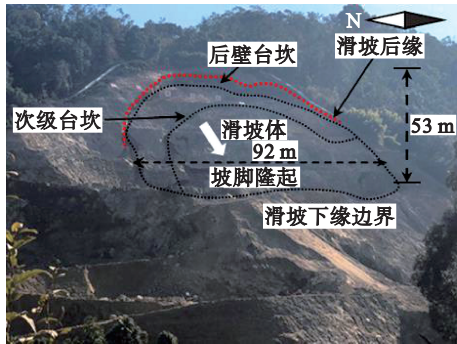


图 3 第一次滑坡后的边坡概况

Fig. 3 Slope condition after the first landslide

2) 第二次滑坡. 第一次滑坡后对边坡原开挖方案进行了调整, 在高程 1 948~1 953 m 和 1 968~1 973 m 之间各增加了两排预应力锚索, 锚索预应力为 1 000 kN. 调整后的开挖与锚索支护方案如图 4 所示.

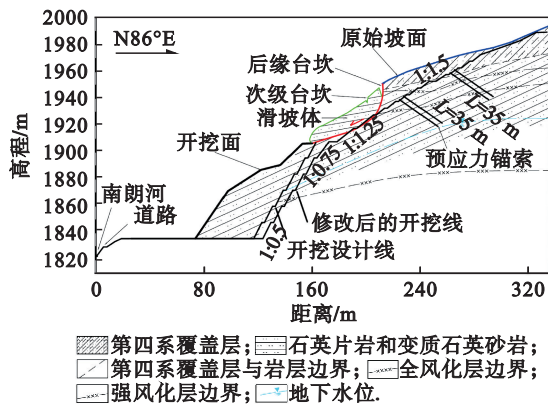


图 4 滑坡纵向剖面图

Fig. 4 Longitudinal profile of landslide

2019 年 7 月 28 日, 受到连续强降雨影响, 边坡再次发生滑坡, 滑坡体垂直高度约 82 m、最大横向宽度约 200 m, 如图 5 所示. 在高程 1 968~1 973 m 之间, 两排混凝土格构梁错动, 破坏区内 6 个锚墩被拉入滑坡体内, 埋在松散的岩土体下 (图 5 中 I 区域). 滑坡后缘形成高差约 2 m 的陡坎.

由于方案调整后仍发生滑坡, 因此亟须采用 NPR 锚索对边坡的控制和临滑预警进行试验和应用研究.

2 模型试验设计

2.1 模型相似比设计

在构建边坡模型时, 几何形状、模型材料及

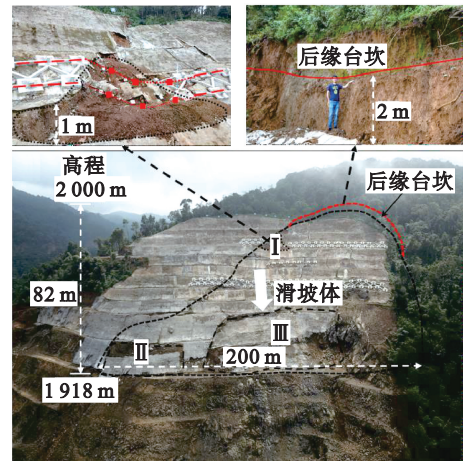


图 5 第二次滑坡后的边坡概况

Fig. 5 Slope condition after the second landslide

其物理力学参数均需满足基本的相似理论, 才能保证试验结果和规律与工程原型的规律相似. 因此, 边坡模型和边坡原型在几何和应力条件等方面需满足一定的相似关系, 即

$$C_L = \frac{L_p}{L_m}, C_\sigma = \frac{\sigma_p}{\sigma_m}, C_\gamma = \frac{\gamma_p}{\gamma_m}, C_c = \frac{c_p}{c_m}, C_\phi = \frac{\phi_p}{\phi_m}, C_E = \frac{E_p}{E_m}.$$

式中: 下标 m 和 p 分别表示模型和原型; $L, \sigma, \gamma, c, \phi$ 和 E 分别表示几何尺寸、应力、容重、黏聚力、内摩擦角和弹性模量; $C_L, C_\sigma, C_\gamma, C_c, C_\phi$ 和 C_E 分别表示几何尺寸、应力、容重、黏聚力、内摩擦角和弹性模量的相似系数.

此外, 这些相似系数需满足以下的相似准则:

$$\frac{C_\sigma}{C_\gamma C_L} = 1, C_\sigma = C_c = C_E.$$

选取破坏严重的左侧边坡为研究区, 该区域平均宽度约 100 m, 高差约 160 m, 选取几何尺寸相似系数 $C_L=100$. 为了保证岩土体在重力场作用下产生的下滑力与实际情况相似, 容重相似系数取 $C_\gamma=1$, 则应力相似系数为 $C_\sigma=C_\gamma \times C_L=100$.

2.2 边坡模型试验材料研制

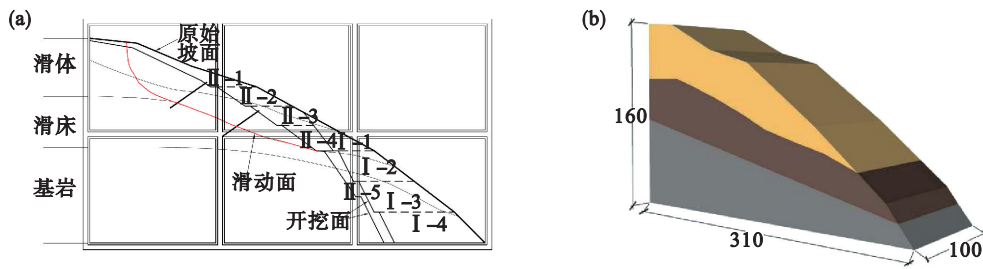
2.2.1 边坡地质条件

根据边坡地质特征和破坏现象, 为便于模型试验的实施, 将边坡的地层岩性简化为滑体、滑床和基岩三类, 边坡物理模型如图 6 所示. 边坡岩体的主要物理力学参数如表 1 所示.

2.2.2 相似材料的研制

通过制作标准试样进行试验, 得到工程边坡原型的相似材料配比. 滑体、滑床和基岩模拟材料的重晶石粉、沙子、黄土、石膏粉和水的质量比分别为 1.7:1.4:3:0.5:1, 2.0:1.1:3.8:0.8:1, 2.6:0.8:4.3:1.2:1. 模拟材料的主要物理力学参

数如表 2 所示.



注: I-1~I-4, II-1~II-5均是边坡的开挖步骤.

图 6 物理模型设计图(单位:cm)

Fig. 6 Design drawing of physical model (unit:cm)

(a)一模型剖面图;(b)一三维模型图.

表 1 边坡岩体的主要物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the slope rocks

材料 类型	容重/(kN·m ⁻³)		单轴抗压强度/MPa		黏聚力/kPa		摩擦角/(°)		泊松比	弹性模量 GPa
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和		
滑体	21.3	22.6	1.1	0.8	5.4	2.5	33.1	26.5	0.35	2.2
滑床	24.9	25.4	80.7	60.3	493.4	451.3	35.6	33.8	0.29	25.5
基岩	26.2	26.4	109.1	103.9	3 126.9	3 045.5	36.8	35.4	0.27	35.4

表 2 物理模型相似材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of similar materials in physical model

材料 类型	容重/(kN·m ⁻³)		单轴抗压强度/MPa		黏聚力/kPa		摩擦角/(°)		泊松比	弹性模量 MPa
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和		
滑体	19.6	21.3	0.03	0.01	0.06	0.03	26.7	20.3	0.38	17
滑床	22.4	23.5	0.92	0.71	4.5	3.9	30.3	28.5	0.26	246
基岩	25.9	26.2	1.05	0.93	30.2	27.6	34.1	30.4	0.23	341

2.2.3 模型尺度 NPR 锚索的研制

工程应用 NPR 锚索结构包括预应力钢绞线、恒阻体、恒阻套筒等结构^[11],结构示意图如图 7a 所示.在 850 kN 恒阻力作用下允许产生 1.5 m 的变形量.

根据 NPR 锚索的结构特点,结合相似理论,制作模型尺度的 NPR 锚索,如图 7b 所示.包括:恒阻套筒、螺母、托盘和恒阻体,通过测试得到模型尺度 NPR 锚索的恒阻力约 22 N,恒阻力下允许变形量为 5 cm.试验结果如图 8 所示.选取 1.5 mm 的铅丝作为 PR 锚索,其屈服强度约为 25 N.

2.3 试验设备及监测系统

2.3.1 试验系统

试验系统主要包括:模型框架、人工降雨模拟系统和数据监测系统.图 9 为降雨滑坡试验模型示意图.

试验模型采用刚性框架式模型箱,模型箱尺寸:长×高×宽=3.2 m×2 m×1 m,模型箱两侧和后

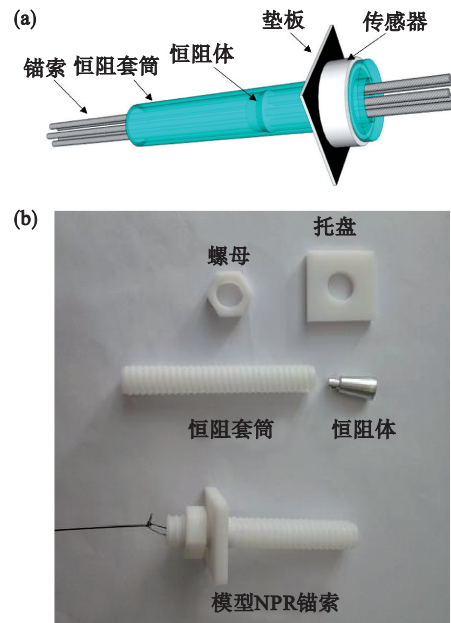


图 7 NPR 锚索结构组成

Fig. 7 Structure of NPR anchor cable

(a)一宏观 NPR 锚索;(b)一模型 NPR 锚索.

侧由 10 cm 厚的透明钢化玻璃作为边界。

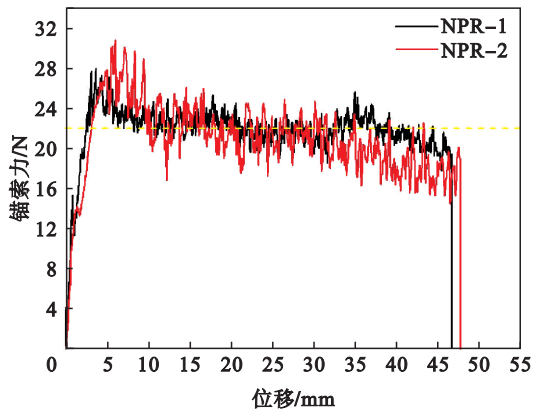


图 8 模型 NPR 锚索力测试曲线

Fig. 8 Constant resistance test curves of model NPR anchor cable

人工降雨模拟系统主要由降雨框架、降雨喷头、水泵、流量计以及供水设备组成。设计了 3 条供水线路,共计 28 个喷头,喷头采用相互交错的方式布置。

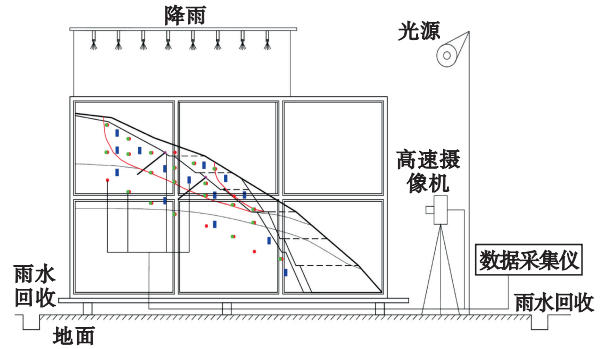
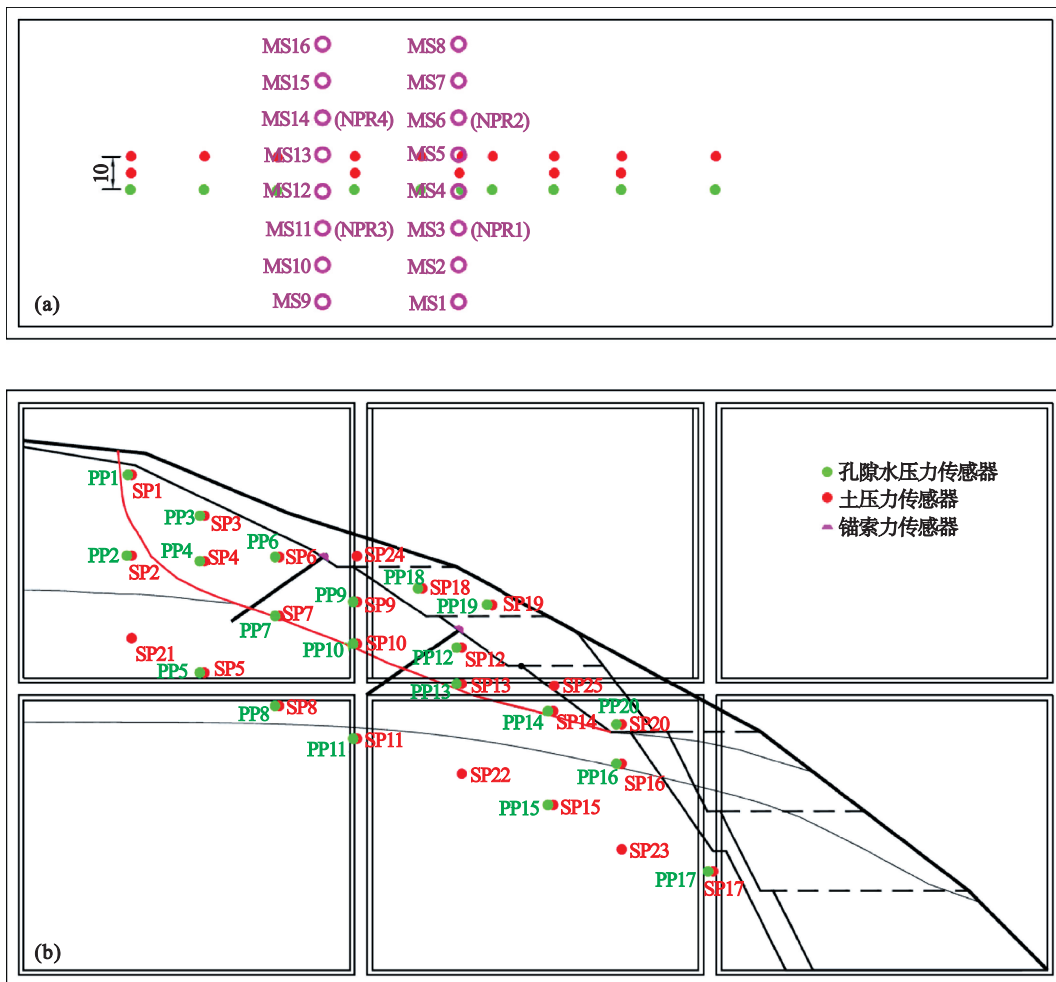


图 9 降雨滑坡试验模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of test model for rainfall-induced landslide

2. 3. 2 监测系统

试验监测系统包括:土压力传感器、孔隙水压力传感器和锚索力传感器。试验布设 16 根锚索,其中,PR 锚索 12 根,NPR 锚索 4 根。传感器及锚索的位置和编号如图 10 所示。搭建好的边坡模型如图 11 所示。



注: PP, SP 和 MS 分别表示孔隙水压力传感器、土压力传感器和锚索力传感器。

图 10 传感器分布图

Fig. 10 Distribution diagram of sensors

(a) — 传感器平面分布及编号; (b) — 传感器侧视图及编号。



图 11 边坡模型

Fig. 11 Slope model

(a)—侧视图; (b)—主视图.

2.3.3 降雨设计

采石场年平均降雨量超过 2 500 mm, 2018 年更是达到 3 400 mm. 为研究边坡在连续暴雨作用下的变形和控制, 选取模拟暴雨的降雨强度为 60 mm/h, 每次降雨时长 60 min, 之后静置 60 min, 反复循环 2 次.

2.4 试验过程

根据边坡工程的设计方案和施工过程, 将试验分为 4 个阶段:

1) 第 I 阶段开挖. 按照四级台阶、四步开挖, 开挖剖面如图 6 所示.

2) 第 I 阶段降雨. 共进行了 2 次降雨, 具体的降雨时间统计如表 3 所示.

3) 第 II 阶段开挖. 按照六级台阶、五步开挖,

开挖剖面如图 6 所示. 锚索测力计随开挖同步安装.

表 3 模型边坡第 I 阶段降雨时间

Table 3 Duration of rainfall in stage I min

阶段	降雨时间	静置时间
I-1	60	76
I-2	60	60

4) 第 II 阶段降雨. 共进行 2 次降雨, 具体的降雨时间统计如表 4 所示.

表 4 模型边坡第 II 阶段降雨时间

Table 4 Duration of rainfall in stage II min

阶段	降雨时间	静置时间
II-1	64	70
II-2	59	边坡失稳

3 模型试验结果分析

由于开挖对边坡的扰动较小, 本文只对两阶段降雨过程的边坡变形破坏特征和第 II 阶段降雨监测参数进行分析.

3.1 边坡变形破坏特征与破坏模式分析


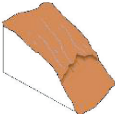



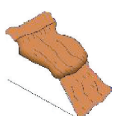
2 个降雨阶段边坡的变形破坏模式如表 5 所示.

表 5 降雨诱发边坡变形破坏模式

Table 5 Deformation failure mode of slope induced by rainfall

阶段	破坏模式	成因分析	破坏特征	典型图片	示意图
第 I 阶段降雨过程	坡表冲蚀	降雨导致坡体形成局部饱和状态	主要位于边坡浅表层		
	局部滑塌	边坡开挖回弹变形, 雨水入渗形成局部饱和状态	主要位于开挖边坡, 扩展速度快		
	滑塌扩展	滑塌为破坏扩展提供了空间, 降雨降低了破坏区的抗剪强度	主要位于开挖边坡区域, 扩展速度快		
	冲蚀沟	边坡局部饱和, 呈流动状态, 在边坡表面形成冲沟	主要位于边坡中上部, 冲蚀沟的规模与降雨时间成正比		
	坡顶平台张拉裂隙	坡顶平台产生干缩裂隙, 随边坡变形不断扩展	产生于静置期, 后期雨水汇入内部的主要通道		

续表

阶段	破坏模式	成因分析	破坏特征	典型图片	示意图
第 II 阶段降雨过程	局部滑塌	边坡开挖回弹变形,雨水渗入形成局部饱和状态	主要位于开挖边坡区域,因为坡度较缓,所以范围较小		
	冲蚀沟	局部滑塌的扩展受到锚索的控制,在坡表径流作用下形成	集中于加固薄弱区,深度较大		
	滑坡	边坡下滑力增大,PR 锚索被拉断失效	边坡达到二次平衡,NPR 锚索起主要控制作用		

3.2 孔隙水压力变化规律

图 12 为第 II 阶段降雨过程孔隙水压力变化曲线.在 II-1 降雨阶段,随着湿润锋达到孔隙水压力传感器附近,PP12 和 PP3 处孔隙水压力率先产生变化;PP14 降雨 35 min 后连续产生三次突降,孔隙水压力降为 0,导致该现象的原因为边坡发生局部滑塌,传感器暴露于空气中.在 II-1 静置阶段,孔隙水压力随着雨水的渗流逐渐降低.在 II-2 降雨阶段,孔隙水压力增长速率明显小于 II-1 降雨阶段,之后保持稳定,其中,PP12 在 II-2 降雨约 40 min 时突降为 0,之后波动式上升,产生该现象的原因为 PP12 传感器位于锚索下方,局部滑塌在锚索间形成冲蚀沟,造成 PP12 下降,随着

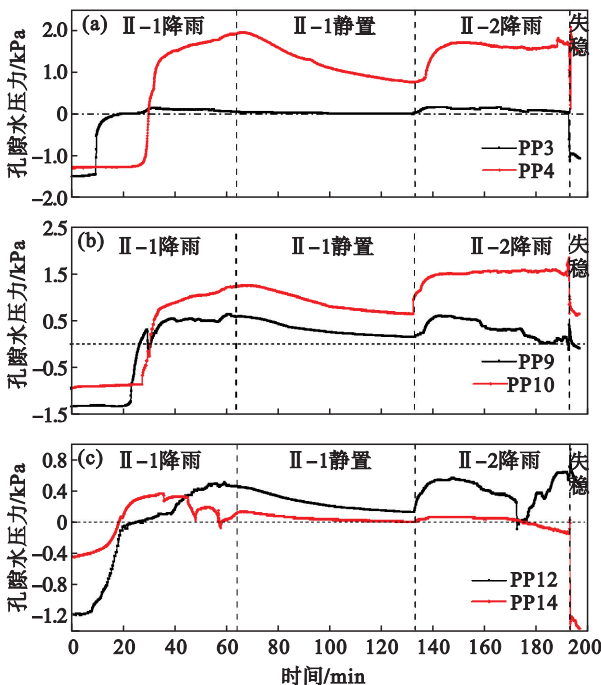


图 12 第 II 阶段降雨过程孔隙水压力变化曲线

Fig. 12 Pore water pressure variation curves during stage II rainfall

(a)一边坡上部;(b)一边坡中部;(c)一边坡下部.

冲蚀沟被上部土体多次覆盖而波动上升.在边坡失稳阶段,孔隙水压力均产生了突变,但是孔隙水压力的突变规律因位置不同而存在明显差异,如 PP3 产生突降,而 PP10 先突增后突降.

由此可得,孔隙水压力变化规律能很好地反映边坡内部的应力和变形规律,但由于其受埋设位置和外界环境影响较大,导致边坡临滑前的变化规律不统一,且突变几乎与滑坡同时发生,甚至存在滞后.

3.3 土压力的变化规律

图 13 为第 II 阶段降雨过程土压力的变化曲线.土压力在 II-1 降雨阶段达到最大值后保持着相对的稳定状态,直至滑坡发生.位于锚索附近

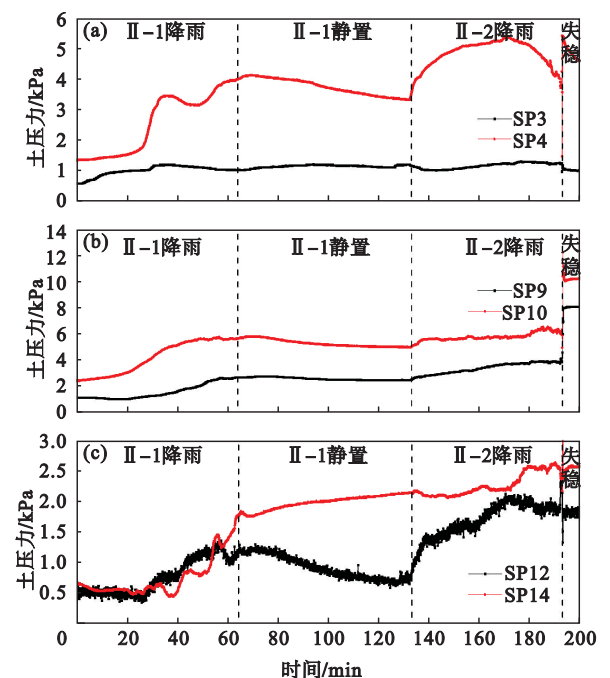


图 13 第 II 阶段降雨过程土压力变化曲线

Fig. 13 Soil pressure variation curves during stage II rainfall

(a)一边坡上部;(b)一边坡中部;(c)一边坡下部.

的SP9和SP10土压力传感器,由于受到锚索的加固作用,土压力的变化较小.SP4产生较大的波动,主要是降雨引起坡顶产生张拉裂隙所导致的.对于SP12和SP14,边坡出现局部滑塌和再次覆盖,导致土压力产生明显的波动现象.在边坡失稳前,除了SP4土压力产生了明显减小,其他的土压力均保持稳定状态,直至边坡发生滑动,土压力均产生突变.

由此可得,土压力变化规律能够较好地体现边坡内部的应力变化和裂隙扩展,但是在滑坡发生前,土压力未产生明显的变化规律.虽然在滑坡发生时,土压力均产生了突增,但是几乎与滑坡同时发生,甚至略滞后于滑坡,所以从时间角度难以满足临滑预报的需求.

3.4 锚索力变化规律

第II阶段降雨过程中锚索力监测曲线如图14~15所示.

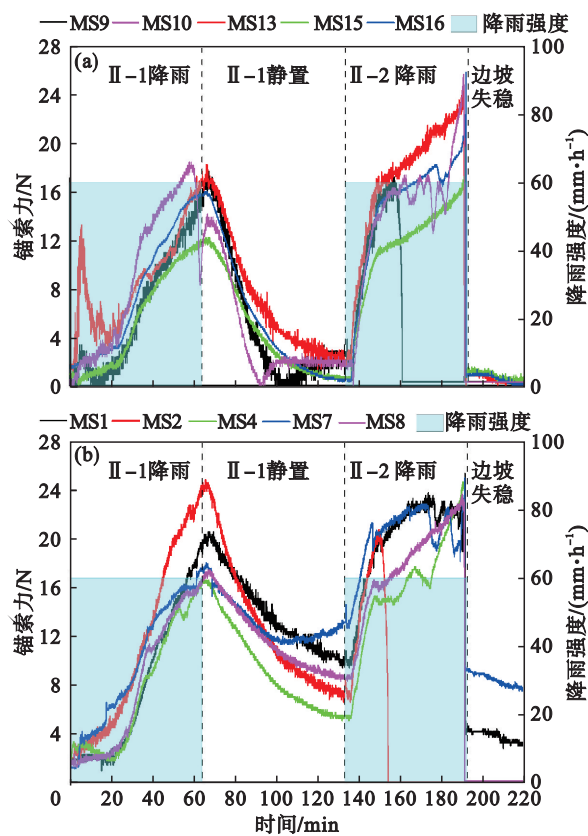


图 14 PR 锚索力演化规律
Fig. 14 Evolution law of PR anchor cable force
(a) —上排锚索; (b) —下排锚索.

图 14 为 PR 锚索力监测曲线,由图可得:

1) II-1 降雨阶段.锚索经过应力调整后,在 22 min 后以恒定的速率增长.在降雨约 38 min 时,部分锚索力产生波动.在降雨 50 min 后,下排锚索的 MS4 产生突降,之后 MS2 和上排锚索的

MS10 产生波动,其中 MS10 产生约 10 N 的突降.结合孔隙水压力和土压力监测数据,锚索力的波动是边坡内部局部变形所致,并未对边坡整体稳定性产生明显影响.

2) II-1 静置阶段.锚索力持续增长约 5 min 后达到最大值,随后以恒定的速率减小,上排锚索力降低速率明显大于下排锚索力降低速率.随着雨水的渗流和边坡应力调整,在静置约 30 min 后上排锚索力降至初始值,而下排锚索力明显大于上排锚索力.

3) II-2 降雨阶段.降雨约 5 min 后锚索力均迅速增长,且增长速率明显大于 II-1 降雨阶段.在降雨约 10 min 和 20 min 时,下排和上排锚索依次产生波动,之后锚索力增长速率明显降低.MS2 和 MS9 锚索力分别在 20 min 和 25 min 时突降为 0,说明这 2 根锚索被拉断失效.而 MS4 和 MS10 则呈波动式增长,在降雨约 40 min 后,MS1, MS7 和 MS16 也产生波动,直至滑动发生,PR 锚索均因大变形而被拉断失效,说明边坡内部的变形是从局部到整体的变化趋势.

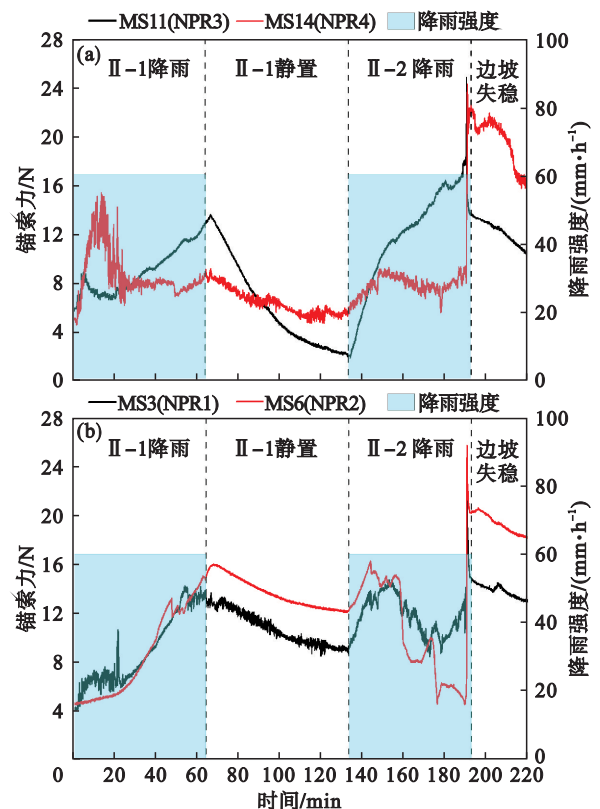


图 15 NPR 锚索力演化规律
Fig. 15 Evolution law of NPR anchor cable force
(a) —上排锚索; (b) —下排锚索.

图 15 为 NPR 锚索力监测曲线.通过对比发现,II-1 阶段的 NPR 锚索力变化趋势与 PR 锚索力一致,这里不再赘述,主要分析 II-2 降雨阶段

NPR锚索力的变化规律.尤其是下排2根NPR锚索对边坡内部变形和应力调整的敏感性更大.

1) NPR1.在降雨约10 min后,锚索力波动式增加至14 N,随后波动式下降;在降雨40 min后,锚索力在一次较大的突增与突降后开始呈波动式增长.

2) NPR2.在降雨约10 min后,锚索力波动式缓慢降低,在降雨约28 min时,产生第一次突降,从15 N突降至8 N,维持约5 min后,再次增加至10 N,随后产生第二次突降,从10 N突降至5 N.两次突降说明该锚索加固的边坡内部产生了局部滑动面的贯通,但并未在边坡表面产生明显的破坏现象.

对比图14和图15发现,锚索力达到恒阻力22 N之前,PR锚索力和NPR锚索力监测曲线表现出相似的变化趋势,这时主要表现为锚索自身的弹性变形.在锚索力达到恒阻力值附近时,PR锚索因接近其屈服强度,会随着边坡内部应力调整而产生较大幅度波动,或因局部受力较大而被拉断失效,但最终所有PR锚索皆因滑坡大变形而失效(图16),无法实现对边坡变形全过程的持续监测和控制.NPR锚索力虽然也因边坡内部应力调整产生了小幅波动,但是在滑坡前,NPR锚索均表现出显著的“先突增,后突降”的变形-临滑动力学规律,而且该现象的发生在时间上略早于边坡滑动时间.在边坡发生滑动时,NPR锚索凭借恒阻大变形特性产生高应力吸能控制功能,促使边坡达到二次平衡状态,且边坡整体平均滑移量小于5 cm(图16).在边坡达到二次平衡状态后,所有的NPR锚索力均保持较大的值.

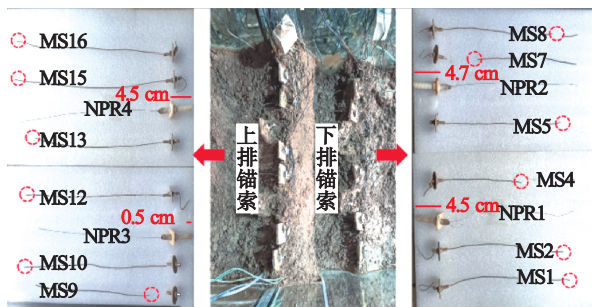


图16 锚索变形破坏特征

Fig. 16 Deformation and failure characteristics of anchor cable

综上所述,降雨引起边坡表面产生多种变形和破坏特征,这些特征很难与滑坡的发生建立对应关系,而且这些特征的成因复杂,因此边坡表面变形作为降雨诱发滑坡的预警方法具有一定

的局限性;孔隙水压力和土压力虽然能够反映边坡内部应力的变化特征,但两者在临滑前的监测数据变化规律不统一、受环境影响较大、突变时间略滞后于滑坡,因此预警准则较难统一;NPR锚索力虽然因边坡表面变形或内部应力调整产生波动变化,但滑坡前产生了统一的力学变化规律,突变时间略早于滑坡发生时间,而且在滑坡时NPR锚索会产生大变形吸能控制特性,使边坡达到二次稳定,产生大变形控制效果.因此,模型试验结果表明NPR锚索对于降雨型滑坡的控制和临滑预警具有独特的优势.

根据模型试验结果,在工程边坡进行了基于NPR锚索的控制特性和临滑预警的现场应用.

4 工程应用

4.1 监测设计

对采石场边坡进行变形分区,采用基于NPR锚索的滑坡牛顿力远程监测预警系统,在变形严重的A区按照由点到线、由线到面的原则布设了4个监测点,监测点的分布如图17所示.

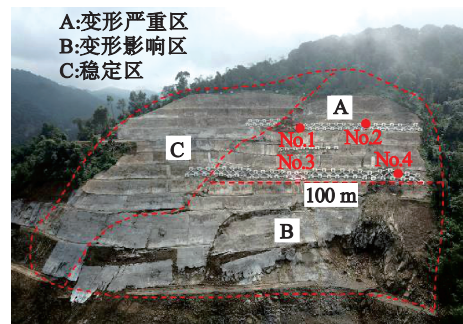


图17 边坡分区及监测点分布

Fig. 17 Slope zoning and monitoring points distribution

4.2 牛顿力监测系统及预警准则

滑坡牛顿力远程监测预警系统由现场监测系统 and 室内监测系统两部分组成^[11].基于大量的监测数据和现场应用,根据牛顿力变化斜率和增量建立了4级监测预警等级,分别为临滑预警、短期预警、中期预警和稳定预警,具体的预警准则如表6所示.

4.3 滑坡监测结果分析

由于连续强降雨的影响,从2020年6月1日开始,No.4监测曲线出现6次显著的特征点,如图18所示.

7月1日19时6分,牛顿力累计增加220 kN.根据牛顿力监测预警等级,发出了中期预警(A点).监测区边坡表面产生裂隙(图19b).

表 6 牛顿力监测预警等级及预警准则
Table 6 Newtonian force monitoring early-warning levels and early-warning criteria

预警等级	一级准则: 曲线斜率 dF/dt	二级准则: 牛顿力增量 $\Delta F/kN$
稳定预警	0	20~50 升至黄色
中期预警	大于 0	50~100 升至橙色
短期预警	大于 0 到小于 0 的转折点	>100 升至红色
临滑预警	小于 0	牛顿力突降

注: 牛顿力监测曲线的斜率 dF/dt ; 牛顿力 $F=F_n-F_0$; 牛顿力增量 $\Delta F=F_n-F_{n-1}$; 牛顿力实时监测值 F_n ; 牛顿力初始值 $F_0=300$ kN.

7月4日21时3分, 牛顿力累计增加408 kN, 发布了短期预警(B点).

7月5日1时39分, 牛顿力产生第一次突降, 突降值为223 kN, 发布了第一次临滑预警(C点). 坡面裂隙规模有所扩展, 边坡坡脚左侧发生小规模滑塌(图19c).

7月6日13时45分, 牛顿力产生第二次突降, 突降值为111 kN, 发布了第二次临滑预警(D点). 边坡左侧陡崖第四纪覆盖层发生了滑坡, 并滑至南朗河左岸堆积(图19d).

7月9日12时26分, 牛顿力产生第三次突降, 突降值为435 kN, 发布了第三次临滑预警(E点).

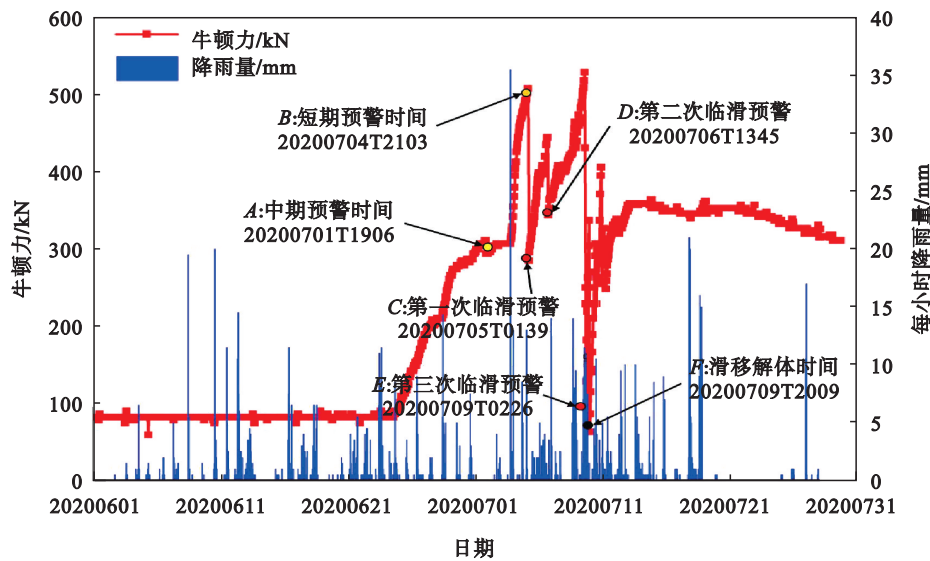


图 18 No. 4 监测点牛顿力监测曲线

Fig. 18 Newtonian force monitoring curves of No. 4 monitoring point

7月9日20时9分, 牛顿力在短暂突增后产生突降, 在第三次临滑预警后7.5 h, 边坡发生滑移解体(F点). 滑坡体顶部平台产生裂隙和下沉(图19e), 边坡坡脚左侧解体垮塌, 呈散体状(图19f).

综上所述, 受到连续强降雨影响, 牛顿力监测曲线产生三次突降, 揭示了边坡内部滑动面的贯通特征, 并提前7.5 h发出临滑预警信息. 根据滑坡后的边坡破坏特征可知, NPR 锚索的恒阻力控制特性有效地吸收了滑坡产生的能量, 使边坡产生局部变形后达到二次平衡状态, 且 NPR 锚索仍保持较大的锚索力, 避免了破坏性灾变现象的发生.



图 19 边坡变形破坏特征

Fig. 19 Deformation and failure characteristics of slope

5 结 论

1) 孔隙水压力的增加降低了边坡岩土体的有效应力, 增加了边坡岩土体的饱和容重, 在潜在滑动面附近产生浮托力, 同时降低了滑动面的抗剪强度, 从而造成了边坡的大变形失稳.

2) NPR 锚索对降雨诱发边坡变形的内部应力场变化更为敏感, 呈现出边坡内局部变形、

锚索力突降的变化规律.

3) PR锚索因无法承受滑坡大变形而全部被拉断失效,而NPR锚索凭借恒阻大变形特性产生高应力吸能控制功能,促使边坡达到二次平衡状态,边坡整体滑移量小于5 cm.

4) 在边坡失稳前,NPR锚索力表现出显著的“先突增,后突降”的变形-临滑动力学规律.

5) 采用基于NPR锚索的滑坡牛顿力远程预警系统对现场边坡进行实时监测,成功揭示了滑坡全过程牛顿力变化曲线和演变规律,提前7.5 h发出临滑预警信息.

6) 通过物理模型试验和现场试验发现,NPR锚索表现出显著的加固-监测-预警一体化控制目标,为类似的边坡防治提供了科学依据.

参考文献:

- [1] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.
(Huang Run-qiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433-454.)
- [2] Xu M, Tang Y F, Liu X S, et al. A shaking table model test on a rock slope anchored with adaptive anchor cables [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 201-208.
- [3] Li C D, Wu J J, Tang H M, et al. Model testing of the response of stabilizing piles in landslides with upper hard and lower weak bedrock [J]. *Engineering Geology*, 2016, 204: 65-76.
- [4] Yang G H, Zhong Z H, Zhang Y C, et al. Optimal design of anchor cables for slope reinforcement based on stress and displacement fields [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(4): 411-420.
- [5] He M C, Gong W L, Wang J, et al. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 67: 29-42.
- [6] Li C L. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(3): 396-404.
- [7] 贺可强, 郭璐, 陈为公. 降雨诱发堆积层滑坡失稳的位移动力评价预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(sup2): 4204-4215.
(He Ke-qiang, Guo Lu, Chen Wei-gong. Research on displacement dynamic evaluation and forecast model of colluvial landslides induced by rainfall [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(sup2): 4204-4215.)
- [8] Yang Z J, Cai H, Shao W, et al. Clarifying the hydrological mechanisms and thresholds for rainfall-induced landslide: in situ monitoring of big data to unsaturated slope stability analysis [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(4): 2139-2150.
- [9] Yang Z J, Qiao J P, Uchimura T, et al. Unsaturated hydro-mechanical behaviour of rainfall-induced mass remobilization in post-earthquake landslides [J]. *Engineering Geology*, 2017, 222: 102-110.
- [10] 何满潮. 基于界面牛顿力测量的双体灾变力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2161-2173.
(He Man-chao. Research on the double-block mechanics based on Newton force measurement [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(11): 2161-2173.)
- [11] 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 Man-chao, Ren Shu-lin, Tao Zhi-gang. 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.)
- [12] He M C, Tao Z G, Zhang B. Application of remote monitoring technology in landslides in the Luoshan mining area [J]. *Mining Science and Technology (China)*, 2009, 19(5): 609-614.
- [13] Tao Z G, Wang Y, Zhu C, et al. Mechanical evolution of constant resistance and large deformation anchor cables and their application in landslide monitoring [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78: 4787-4803.
- [14] Shi G C, Yang X J, Chen W, et al. Characteristics of failure area and failure mechanism of a landslide in Yingjiang County, Yunnan, China [J]. *Landslides*, 2021, 18: 721-735.