



多层浅埋煤层开采触发岩溶坡体动力崩滑机制研究

崔芳鹏 武强 李滨 熊晨 刘新荣 李江山 刘小瑜

引用本文:

崔芳鹏, 武强, 李滨, 等. 多层浅埋煤层开采触发岩溶坡体动力崩滑机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 317-333.
CUI Fangpeng, WU Qiang, LI Bin. Dynamic formation mechanism of a karst landslide triggered by mining of multiple-layer & shallow-seated coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 317-333.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地下资源开采诱发的一种滑坡模式研究——以采空触发滑坡为例

Study on landslide model induced by underground resources exploitation:taking mining-triggered landslide as an example
煤炭科学技术. 2021, 49(8): 181-187 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2fe19354-280e-42b4-8bb4-3b1320991bdf>

浅埋煤层过沟开采覆岩破坏特征及裂隙演化规律研究

Study on overburden failure characteristics and fracture evolution law of shallow buried coal seam through trench mining
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 185-192 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d749e872-e15c-4dff-b196-aa45fb971793>

黄土沟谷区浅埋煤层开采覆岩破坏与地表损伤特征研究

Study on overburden and surface damage characteristics of shallow-buried coal seam mining in loess gully area
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e2e70fbd-d9b8-40b4-993b-4015877a7e95>

陕北浅埋煤层似膏体充填条带开采参数研究及应用

Study and application of paste-like filling mining parameters of shallow buried coal seam in Northern Shaanxi
煤炭科学技术. 2021, 49(7): 63-70 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5cfd9688-585f-4857-9aa9-b5af68cbc22d>

顺层蠕滑型露天矿土质边坡滑距预测方法研究

Study on prediction method for sliding distance of soil slope bedding creeping in open pit mine
煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5bad5714-8874-42dd-9f61-8e8785e7e82b>

浅埋深厚煤层高强度开采地表沉陷规律研究

Research on surface subsidence law in high-intensity mining of shallow buried with thick coal seam
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 11-20 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0821>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

崔芳鹏, 武 强, 李 滨, 等. 多层浅埋煤层开采触发岩溶坡体动力崩滑机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 317–333.

CUI Fangpeng, WU Qiang, LI Bin, *et al.* Dynamic formation mechanism of a karst landslide triggered by mining of multiple-layer & shallow-seated coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 317–333.

多层浅埋煤层开采触发岩溶坡体动力崩滑机制研究

崔芳鹏^{1,2}, 武 强^{1,2}, 李 滨³, 熊 晨^{1,2}, 刘新荣⁴, 李江山^{1,2}, 刘小瑜^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 北京 100083; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 4. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 因内外动力地质作用活跃和人类工程活动频繁致使我国西南岩溶山区坡体灾害频发, 进行该类灾害防控的相关研究必要而迫切。采用原位地质详查、全域块体离散元数值模拟和工程地质力学理论分析, 选择贵州纳雍张家湾普洒滑坡为研究对象, 系统提出了该类“井工开采诱发型”滑坡的致灾特征、主控触发因素和动力成灾机制。结果表明: ①该滑坡动力崩滑的影响因素包括高陡坡体微地貌、“上硬下软”岩性组合、斜坡岩体结构和物理化学风化等主导因素和多层浅埋采空区、强降雨和采掘爆破振动等触发因素, 其中前者的存在或长期作用较为明显地降低了原始坡体的稳定性, 而后者存在或短期作用急剧地劣化了坡体地质条件并最终触发了坡体的“临界崩滑”; ②该滑坡在采空区和强降雨作用下形成的“渐进变形”具有明显的“整体下座”和“顺时针旋转”特征, 其中“整体下座”为“井工开采诱发型”滑坡的典型特征, 其为受区内井工开采引起的地表开采沉陷所致; ③邻近坡体的采掘爆破振动最终触发该滑坡形成“临界崩滑”后, 其后续动力响应可细化为“解体破碎→铲刮滑床→碎屑流动→堆积稳定”4个阶段。最后, 基于分析驱动该滑坡各阶段动力响应的力学作用类型及其效应, 即: 坡体岩溶裂隙渗透压力、竖向和水平爆破振动应力、坡脚处剪切应力、采空区边界卸荷应力和采空区中冒落岩块压实过程产生的侧向膨胀应力等及其岩体破裂效应, 系统提出了考虑其崩滑全程力学模式演变的动力崩滑机制。

关键词: 多层浅埋煤层开采; 岩溶坡体; 动力崩滑; 普洒滑坡; 主控触发因素

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)02-0317-17

Dynamic formation mechanism of a karst landslide triggered by mining of multiple-layer & shallow-seated coal seams

CUI Fangpeng^{1,2}, WU Qiang^{1,2}, LI Bin³, XIONG Chen^{1,2}, LIU Xinrong⁴, LI Jiangshan^{1,2}, LIU Xiaoyu^{1,2}

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Controlling, Beijing 100083, China; 3. Institute of Geo-mechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 4. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Catastrophic geo-hazards have occurred frequently in the karst areas of Southwestern China for these years because of internal, external geologic processes and human engineering activities, which makes it urgently necessary to reveal their triggering mechanisms for their consequences controlling. Detailed site geological investigation, full-scale block distinct-element-code modeling and related engineering geological analysis were conducted to recognize main characteristics, controlling factors and dynamic formation mechanism of a so-called underground mining-induced landslide. Results on the Pusa landslide show its dynamic formation is influenced by micro-landform, rock strata types, rock mass structure, weathering, goaf, heavy rainfall and, especially blasting vibration during underground developing and mining, i.e. controlling factor. Based on the numerical modeling, whole subsidence and clock-wise rotation are obvious characteristics of deformation caused by the goaf and the heavy rainfall during pre-failure of the landslide. What's more, the whole subsidence which was

收稿日期: 2022-01-01

责任编辑: 周子博

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0002

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(42272335); 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1504802)

作者简介: 崔芳鹏(1979—), 男, 河南新乡人, 副教授, 博士生导师。E-mail: cuijp@cumt.edu.cn

通讯作者: 熊 晨(1995—), 女, 江西宜春人, 博士研究生。E-mail: xiongcs@student.cumt.edu.cn

caused by the goaf is one of the key characteristics of the underground mining-induced landslide. After the landslide behaves its critical failure, following dynamic responses include shattering, scraping off part top of the bed, debris flowing and final depositing. Finally, the dynamic formation mechanism is proposed based on evolution of main forces contributing the Pusa landslide. The forces are actuated by the seepage stress, vertical and horizontal blasting stresses, shear stress, unloading stress and dilation stress caused by the caved rock mass.

Key words: mining of multiple-layer & shallow-seated coal seam; karst slope; dynamic failure; Pusa landslide; key controlling factor

0 引言

我国西南岩溶山区内外动力活跃地质作用,加之频繁的人类工程活动,致使区内地质环境十分脆弱,常形成坡体崩滑流地质灾害并时而造成重大群死群伤事故,严重威胁区内的人类活动^[1-4],因此旨在实现区内地质灾害防控目的的相关研究方兴未艾^[5-8]。据相关研究,新构造运动强烈地重塑着区内山地地貌,致使区内山体因断层和褶皱等主控而结构较为破碎,这种效应使区内坡体稳定性较差;同时,区内山体因其岩性组成多为微晶灰岩和泥灰岩等而使得喀斯特地貌广为发育,故岩溶裂(孔)隙也在较大程度上降低了区内坡体的稳定性。此外,强降雨、地震和人类工程活动(如矿业开采和基础设施建设等)也强烈地劣化了区内坡体的稳定性,使得特大地质灾害频发^[9-12]。

区内频发且致灾性强的特大地质灾害加速了国内相关研究蓬勃进展,其研究内容多体现在区内滑坡灾害形成条件、分布规律、致灾特征、主控因素和成灾机制上,所采用技术方法与工作手段主要包括野外地质详查与测绘、理论计算、室内与原位测试、物理/数值模拟和空天地一体化监测等,如李腾飞等^[13]分析了造成 284 人死亡的湖北盐池河滑坡的形成机制,认为地下采矿形成的坡体不均匀沉降是引起该滑坡的主要原因;殷跃平等^[14-15]对造成 46 人死亡的云南赵家沟滑坡和造成 99 人死亡的贵州关岭大寨滑坡进行了综合研究,认为其触发因素为持续降雨和地下采煤,并对该类滑坡的早期识别和风险管理提出了建议;黄润秋^[16]总结了我国 20 世纪以来的大型滑坡及其发生机制,提出了包括地下采矿等因素造成的大型滑坡的成灾力学模式;唐川^[17]分析了造成 216 人死亡的云南头寨沟滑坡致灾特征,认为其主要触发因素为强降雨;郑光等^[18]对造成 43 人遇难的贵州鸡场镇滑坡进行了致灾特征系统分析,认为强降雨和工程切坡是其主要触发因素。此外,国内诸多学者均对含地下采矿因素造成的大型滑坡进行了系统研究,以期为其预防提供技术支持^[19-24]。国外方面,英国、澳大利亚、捷克、巴西、土耳其、泰国和印度等国的诸多学者也对地下矿产开采引起的

诸多滑坡进行了研究,以揭示其形成机制与主控因素并为其防控提供技术支持^[25-35]。以上相关成果为本文进行的后续深入研究提供了技术方法借鉴。

经深入分析可知,目前相关研究较多集中在揭示区内坡体失稳的影响因素及其作用下坡体的崩滑机制,即:微地貌、岩性与构造、岩体结构、地下水作用和岩溶风化作用等主导因素和地震、强降雨、切坡和采矿等工程活动为代表的触发因素以及上述因素的作用机制^[36-37]。然而,据野外地质详查和相关勘查资料与文献分析,区内较频繁的地下矿产开采强烈地影响着矿山地质环境,时而诱发强致灾性的崩、滑、流坡体灾害,究其本质原因初步可知是区内的地下矿产开采所具有的较浅开采深度和落后回采工艺(如爆破采煤工艺)等特征,较浅的开采深度使得区内采空塌陷较为发育,而当采空塌陷发育至坡体附近时,将引起坡体较大渐进损伤与变形^[38-40];另一方面,近坡体浅埋煤层的爆破回采形成的振动波也对坡体的稳定性有较强劣化作用^[41]。遗憾的是,考虑浅埋煤层爆破回采时形成的振动荷载对邻近坡体的崩滑效应研究相对较少且其成果不够深入和系统,如崔芳鹏等^[41]在揭示采掘振动对区内典型坡体的影响时,未系统分析坡体破坏后的长距离运动响应。总之,涉及浅埋煤层开采形成的采空区和爆破振动荷载触发坡体崩滑动力机制的相关研究尚待系统和完善。

因此,选择我国西南岩溶山区井工开采诱发型滑坡的典型代表:贵州张家湾普洒滑坡为研究对象,基于野外地质详查、离散单元法数值模拟和工程地质力学综合分析等技术方法揭示该滑坡在采空区、强降雨和回采爆破等触发因素作用下的动力崩滑机制和全过程响应,其成果对完善区内岩溶坡体的崩滑动力机制、崩滑影响因素体系的系统建立和坡体崩滑防控意义重大。

1 滑坡概况

模拟的滑坡地处贵州省纳雍县张家湾镇普洒村,其于 2017 年 8 月 28 日形成坡体崩滑并摧毁了该村 2 处居民区(图 1),造成 35 人遇难,8 人受伤,据其致灾伤亡人员数量将其定为特大型滑坡。另据野外地质详查,该滑坡沿其主滑方向(约 310°)最长约 720 m,

中部宽 360~380 m, 堆积体平均厚度约 4 m, 体积约 $82.3 \times 10^4 \text{ m}^3$, 据其体积将其定为中型滑坡。

普洒原始坡体地层岩性自下而上为: ①上二叠统龙潭组 (P_3l) 发育的粉砂质泥岩、碳质泥岩、泥质粉砂岩和煤层等; ②长兴-大隆组 (P_3c+d) 发育的泥质灰岩、泥质粉砂岩夹煤线; ③下三叠统夜郎组 (T_1y) 发育的灰岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩等。构造方面, 滑坡区位于贵州织金三塘向斜北西翼西南段, 地层呈单斜产出, 所含煤层产状和地层产状一致, 受断裂构造影响(区内发育逆断层 F_1 和 F_2 与其主滑向相交), 地层产状($138^\circ \sim 187^\circ \angle 7^\circ \sim 10^\circ$)变化较大。该滑坡工程地质剖面图(沿主滑向)如图 2 所示。



图 1 贵州纳雍张家湾普洒滑坡全貌
Fig.1 A full-view picture of the Pusa landslide in Zhangjiawan Town, Nayong County, Guizhou Province

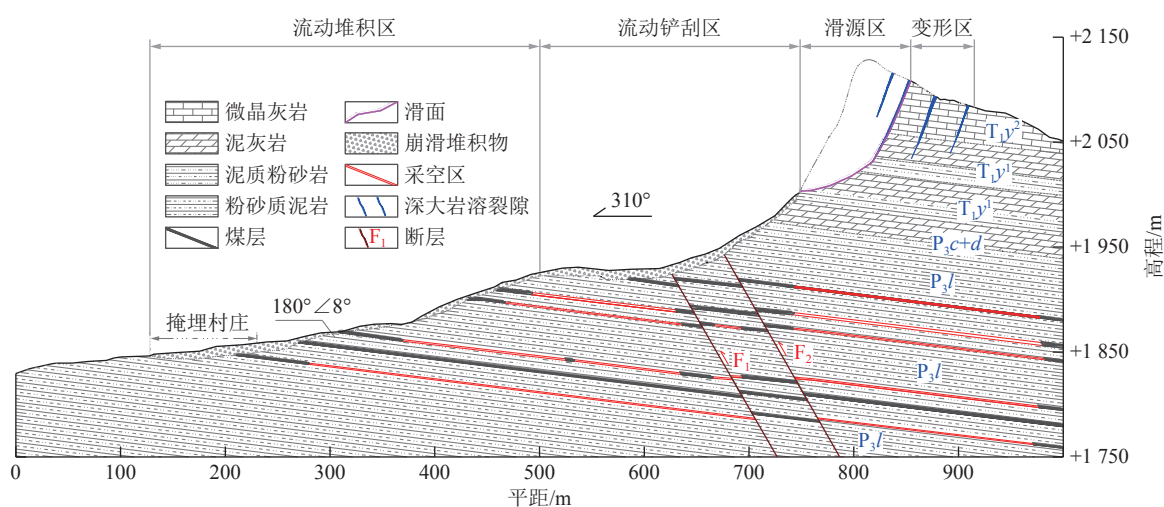


图 2 贵州张家湾普洒滑坡工程地质剖面图(沿主滑方向)

Fig.2 Geological profile of the Pusa landslide in Zhangjiawan Town, Guizhou Province along the main sliding direction

2 坡体稳定性影响因素

据原位地质详查与相关分析, 为系统、层次性地分析影响区内坡体稳定性的诸因素, 将研究区内影响普洒原始坡体稳定性的因素分为主导因素(长期起作用的因素, 如岩土体类型、地质构造和岩体结构等)和触发因素(临时起作用的因素, 如地震动、强降雨和人类工程活动等)2 种类型^[42], 分述如下:

2.1 主导因素

2.1.1 微地貌

据野外地质详查, 普洒滑坡所处的原始坡体坡高且陡, 坡高约 200 m, 坡角均约 45° (坡脚处约 30° , 坡肩处约 60°), 这种高陡断崖微地貌所具有的近直立临空面(图 3)为坡体后续崩滑提供了良好的前提环境, 同时也为紧邻坡脚处分布的村舍和农田等形成了致命威胁。

2.1.2 岩性组合

该滑坡原始坡体在岩性上总体自上而下表现出明显的“上硬下软”特征, 即: 坡体上部和中部分发育的

下三叠统夜郎组微晶灰岩与上二叠统长兴-大隆组泥灰岩整体较硬, 而坡脚以下为上二叠统龙潭组较软



图 3 贵州张家湾普洒滑坡的孕灾微地貌环境
Fig.3 Micro topography where the Pusa landslide originated in Zhangjiawan Town, Guizhou Province

的粉砂质泥岩、碳质泥岩、泥质粉砂岩和煤层等(图 4 和图 5),这种“上硬下软”的岩性组合对坡体整体稳定性降低较大。

其次,由图 6 可知,在天然状态下,位于坡体中下部的粉砂质泥岩风化程度明显较上覆的泥灰岩风化程度严重,坡体中粉砂质泥岩的优先和较重程度的风化也在一定程度上降低了原始坡体的稳定性。

最后,由图 2 和图 4 可知,坡体中岩层层面与坡向相反,该特性不利于原始坡体中地下水的顺层排泄而使得其在岩层层面中汇集,坡体中下部粉砂质泥岩相对坡体中上部微晶灰岩和泥灰岩的低渗透性加剧了地下水在层面的汇集而致使坡体中上部的微晶灰岩和泥灰岩长期遭受坡体中所汇集地下水的溶蚀,并在坡体中上部岩层中形成规模逐渐扩大的岩溶溶穴(隙),较大程度上降低了原始坡体的整体稳定性。

2.1.3 坡体构造与结构

据原位地质详查,坡脚处有 2 条逆断层穿越(图 4 和图 7),断层两侧岩层被高陡断层面(倾角约 60°)错断,致使坡体下伏的煤层开采受到一定影响;同时,

因断层力学性质为受压错断,故推测断层压应力场对紧邻的坡体有一定影响而使得坡体整体完整性降低,即受断层挤压致使坡体岩层形成了一定程度碎裂化,这在一定程度上加剧了坡体中结构面的发育并降低了其稳定性。

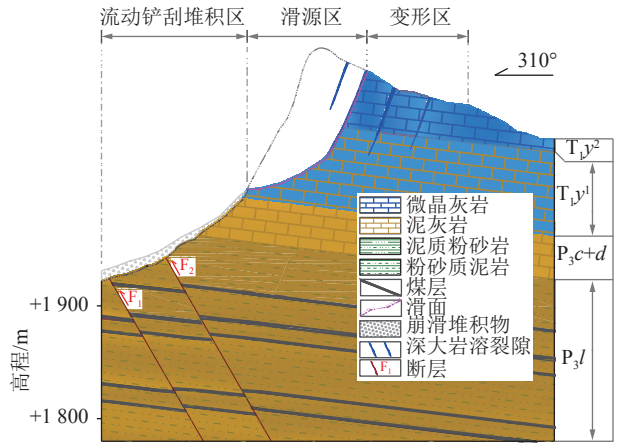


图 4 贵州张家湾普洒原始坡体组成岩性的“上硬下软”特征
Fig.4 The “hard upper & soft lower” lithology composition of the original Pusa slope in Zhangjiawan Town, Guizhou Province



①—微晶灰岩; ②—泥灰岩; ③—粉砂质泥岩

图 5 贵州张家湾普洒原始坡体中发育岩层

Fig.5 The microcrystalline limestone the marl and the silty mudstone composing the original Pusa slope in Zhangjiawan Town, Guizhou Province



(a) 泥灰岩

(b) 粉砂质泥岩

图 6 贵州张家湾普洒原始坡体中泥灰岩与粉砂质泥岩的物理风化
Fig.6 Physical weathering of the marl and the silty mudstone in the original Pusa slope in Zhangjiawan Town, Guizhou Province

其次,据原位详查,普洒原始坡体岩层内部近竖向节理(图 8)发育普遍,其最大长度 30~50 m,大多穿越 2~3 层岩层面,密度 2~3 条/10 m。这些遍布存在的节理极易在风化作用、岩溶水流和采动应力(含回采爆破振动荷载)的协同影响下进一步发育,使原始坡体(尤其是坡肩部位)的岩体结构从中-厚层状向碎裂状演变,从而进一步劣化原始坡体的稳定性。

再者,滑坡区内普遍发育规模较大的岩溶裂隙(图 2),其对原始坡体稳定性影响显著。据原位详查,滑坡区原始坡体中自约海拔 2110 m 向下发育 4 组深大岩溶裂隙(图 9),其深度 50~80 m,其宽度约 1~2 m,其对原始坡体肩部甚至更大范围的稳定性



图 7 贵州张家湾普洒滑坡坡脚处岩层中存在的断层面(带)擦痕与阶步

Fig.7 Striations and steps on the fault planes at the slope toe of Pusa slope in Zhangjiawan Town, Guizhou Province

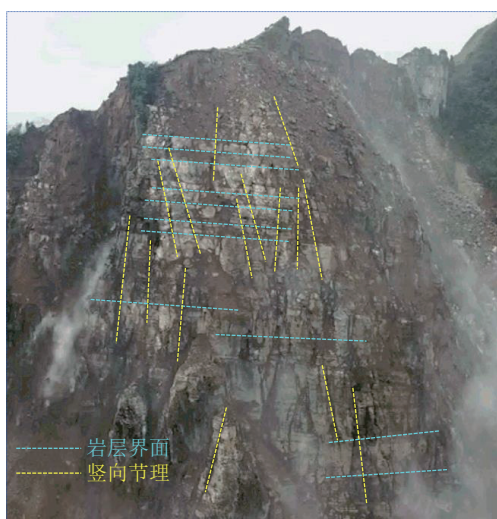


图 8 贵州张家湾普洒滑坡原始坡体中发育的结构面

Fig.8 Discontinuities in the original Pusa slope in Zhangjiawan Town, Guizhou Province

形成控制影响。

2.1.4 风化作用

对该原始坡体稳定性产生影响的风化作用主要有以下 2 个方面：①物理风化作用(图 6)：因环境温度变化形成的斜坡岩体热胀冷缩作用和坡体结构面中裂隙水流的冻融作用，此 2 种作用致使坡体结构面进一步发育(从无到有或规模扩大)甚至使局部岩层碎裂，从而降低该原始坡体的稳定性；②岩溶化学

风化作用：该作用为大气中 CO_2 溶解于结构面中渗透水流后形成的弱酸性水流对流经结构面两侧岩体中 CaCO_3 的溶解而产生，使原始坡体结构面规模进一步发育，甚至形成贯通性控制结构面(图 10)，从而较大程度地降低原始坡体的稳定性。

2.2 触发因素

据野外地质详查与相关分析，滑坡区内触发该滑坡最终形成崩滑的主要因素有煤炭井工开采形成的采空区作用、强降雨作用和回采爆破产生的振动波作用等，详述如下：

2.2.1 采空区作用

普洒滑坡下伏上二叠统龙潭组 (P_3l) 煤层，其主采煤层(均厚 1.60 m)自上而下依次为 C6、C10、C14、C16、C18 和 C20，C6 煤层距离该崩滑体坡脚最小距离仅约 50 m(图 2)，该煤层在坡脚处有煤线出露(图 11)，这充分显示了坡体下伏煤层的“多层浅埋”特性，而正是该特性造成了其紧邻地表坡体的强致灾性。原位地质详查时可见该煤层开始前在坡脚处修筑的斜井入口(图 12)。据开采资料，1995—2012 年，区内主采煤层依次为 C20 和 C16，2013—2017 年，区内主采煤层依次为 C14 和 C10，而 C6 煤层被部分开采(推测)，以上开采形成的采空区如图 2 所示。其开采采用斜井开拓和走向长壁后退式采煤法，掘进与回采均采用炮采工艺，全部垮塌法管



图 9 贵州张家湾普洒滑坡原始坡体中发育的岩溶深大裂隙

Fig.9 The large-scale karst fissures developed in the original Pusa slope in Zhangjiawan Town, Guizhou Province



图 10 贵州张家湾普洒滑坡原始坡体中发育的岩层化学风化(岩溶微地貌)

Fig.10 Karst chemical weathering in the original Pusa slope in Zhangjiawan Town, Guizhou Province(karst microtopography)



图 11 贵州张家湾普洒滑坡原始坡体坡脚处出露的煤线
Fig.11 Outcrop of the coal seam at the slope toe the original Pusa slope in Zhangjiawan Town, Guizhou Province



图 12 贵州张家湾普洒滑坡原始坡体坡脚处修筑的斜井入口

Fig.12 The entrance of the inclined shaft at the toe of the original Pusa slope in Zhangjiawan Town, Guizhou Province

理顶板,掘进工艺为炮掘。

2.2.2 强降雨作用

贵州普洒滑坡所处的贵州纳雍属亚热带季风性湿润气候,年均降雨量 1 243.5 mm,70% 左右的降水集中在 5—9 月。2017 年 6 月,区内进入雨季,累积

雨量由 6 月底的 147.9 mm 陡增至 7 月底的 522.2 mm,这对已受采空区、岩溶裂隙和风化作用等影响而较为破碎的原始坡体稳定性形成进一步劣化效应。

2.2.3 采掘爆破振动

贵州普洒滑坡发生前,其下伏浅埋煤层的采掘均采用爆破工艺,而主采煤层 C6 距坡脚的最小距离仅为约 50 m,C10 和 C14 主采煤层距坡脚的最小距离为约 80 m。此时煤层采掘爆破形成的振动波(图 13)会对坡体稳定性形成较大影响,其具体表现为振动波穿越坡体时对其的周期拉压和剪切效应,其对已较为破碎的坡体稳定性将形成较大劣化^[43-44]。

据野外详查时普洒村原居民口述,煤层井工采掘时采用的爆破工艺常引起地面明显振动,该振动效应常引起紧邻原始坡体的局部小范围滚石和小规模崩塌(图 14),可见该作用对普洒原始坡体的明显影响。

3 坡体崩滑离散元数值模拟

3.1 数值模型

据普洒滑坡主滑向工程地质剖面(图 2)建立其二维离散元数值模型(图 15),该模型底部边界高程为 1 750 m、长 1 100 m,其左、右两侧边界最高高程分别为 1 824.60 m 和 2 042.67 m,即数值模型左、右两侧边界分别高 74.60 m 和 292.67 m。坡体中自上而下下伏 6 层主采煤层,即 C6、C10、C14、C16、C18 和 C20。

由该数值模型可看出,普洒原始坡体左侧和中下部分单元采用三角形(连续变形区域 A),而中上、右中部分单元采用长方形,用以模拟正交节理发育的层状岩体(煤系地层,非连续变形区域 B),而右上部分采用泰森多边形单元,用以模拟风化严重而呈碎裂或散体结构的坡肩(潜在滑体部分,非连续变形区域 C),而模型下部、右侧单元又采用三角形(连续变形区域),用以方便其在动荷载作用下时速度边界的施加。同时,在模型 B 区域近地表和 C 区域坡肩部位设置了监测点,用以监测坡体在不同触发因素作用下的位移、速度和加速度等特征值的演变趋势。

3.2 本构模型与边界条件

据该滑坡实际崩滑特征,其崩滑从坡肩处开始至普洒村结束,破碎后的滑体最远碎屑流动距离达近 800 m,因此对数值模型中组成滑体的最基本单元(不可再细分的网格)来说,彼此间的相对位移远大于其自身的弹塑性变形,故该部分在数值模型中被视为离散化刚体(图 15 中 C 点网格类型),即采用刚体本构模型,重在揭示该部分单元之间的相对位移

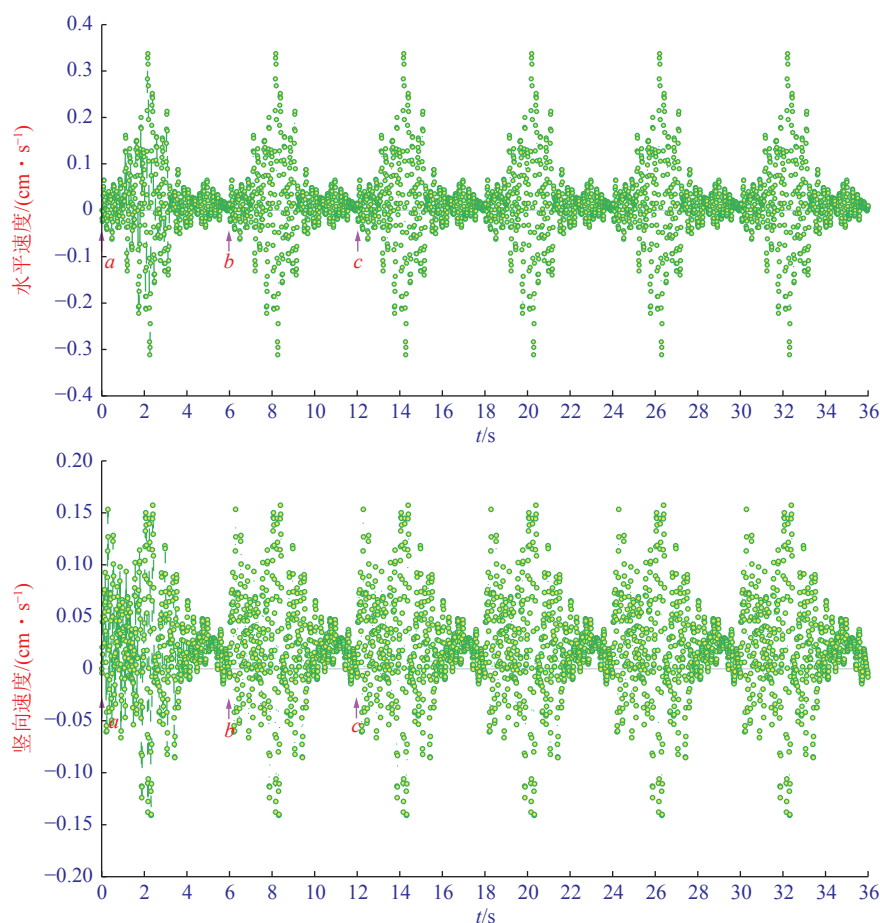


图 13 贵州张家湾普洒滑坡附近煤层采掘延时爆破于地面形成的水平与竖向速度时程曲线

Fig.13 The horizontal and vertical velocity histories triggered by the delay blasting during the underground coal mining of Pusa slope in Zhangjiawan Town, Guizhou Province



图 14 贵州张家湾普洒村煤矿日常爆破回采引起紧邻坡体形成的小规模崩塌和滚石

Fig.14 Some minor blasting-induced rock falls occurred near the original slope before its critical failure in Pusa Village, Zhangjiawan Town, Guizhou Province

而忽略其相对较小的自身变形;同时,为便于滑体破碎后组成其基本单元的长距离碎屑流动,该部分用泰森多边形网格。此外,对于煤层上覆岩层的最基本单元,垮落带、裂隙带和弯曲下沉带将发育其中,故该部分强调的仍然是最基本单元的离散后相对位移,而非其自身变形,故该部分的最基本单元依然被视为离散化刚体(图 15 中 B 点网格类型),即采用刚体本构模型。最后,对采空区下伏岩层,因其最基本单元在煤层开采后主要发生连续的弹塑性变形,故该部分被视为弹塑性体,采用塑性本构模型(图 15 中 A 点网格类型)和 Mohr-Coulomb 屈服准则。

文中的离散元数值模型在进行因采空区、深大岩溶裂隙和强降雨作用时的静力计算时,模型左右两侧约束水平位移,底部约束竖向位移。在随后进行因采掘爆破振动触发的坡体动力响应计算时,模型左右两侧采用粘滞(内侧)+自由场(外侧)边界,底部采用粘滞边界。

3.3 岩土体与结构面参数

为平衡计算效率与精度,对组成坡体的岩性进

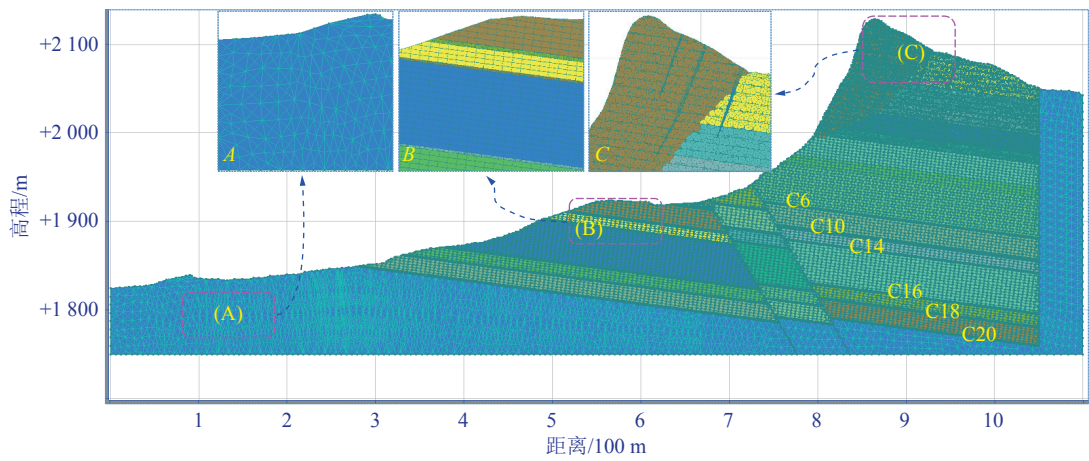


图 15 贵州张家湾普洒原始坡体 UDEC 离散元数值模型
Fig.15 A discrete element model of the original slope

行了简化,即主要由微晶灰岩、泥灰岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、煤层、岩溶裂隙充填物和坡肩风化带(图 15 中 C 点附近区域,或潜在滑体部分)组成,结构面分为岩层面、各代表岩性节理面和断层面,以上岩性与结构面物理力学参数建议取值见表 1 和表 2。

3.4 数值模型校验

在采用数值模型进行坡体崩滑全过程动态响应

模拟时,必须对该模型进行校验,以证明数值模拟结果的有效性。依据野外地质详查时在坡脚处地表实测的阶梯形沉陷差值(该阶梯形沉陷差值为坡体经过采空区作用、滑坡发生前雨季强降雨作用和煤层井工采掘时爆破振动作用的协同效应所致,但未经过破碎滑体的压实作用),将之与坡体数值模型经过上述同样作用影响后的同地点沉陷差值对比,以校验数值模型对坡体动力响应全过程的有效性。

表 1 坡体主要岩性物理力学参数建议取值

Table 1 Recommended physical and mechanical parameters of main lithology of slope

岩性	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
微晶灰岩	2 700	36.58	20.32	5.60	36	3.00
泥灰岩	2 500	29.86	16.98	4.26	32	1.60
泥质粉砂岩	2 600	25.22	14.12	4.86	35	2.20
粉砂质泥岩	2 400	13.30	8.78	3.23	28	1.18
煤层	1 300	3.20	1.98	2.80	26	0.48
岩溶裂隙充填物	1 800	1.20	0.82	1.20	20	0.22
坡肩风化带	(天然)2 620	18.10	12.08	3.98	30	1.30
	(饱和)2 680					

表 2 坡体结构面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of structural planes in slope

结构面类型	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
断层面	68	9.60	2.0×10 ⁴	46	2.0×10 ⁴
微晶灰岩节理	26	0.60	3.00	32	0.20
泥灰岩节理	28	0.50	2.30	28	0.10
泥质粉砂岩节理	36	0.60	2.80	30	0.18
粉砂质泥岩节理	42	0.46	2.00	24	0.08
煤层节理	38	0.42	1.70	20	0.04
坡肩风化带节理	(天然)26	0.12	0.80	16	0.003
	(饱和)23	0.10	0.60	13	0.002
岩溶裂隙充填物节理	22	0.40	1.60	22	0.02

据野外详查,在坡脚处地表形成的阶梯形开采沉陷差值为4~5 m(图16),这与坡体数值模型在同响应阶段同地点的开采沉陷差值(地表竖向位移差值,图17)几近相同,由图17可知,坡脚处阶梯形沉陷差为4~5 m(阶梯上部沉陷绝对值为约1 m,阶梯下部沉陷绝对值为5~6 m,其差值为4~5 m),地表开采沉陷差实测值与数值模拟的定量计算结果相吻合直接校验了数值模型在整个计算过程中的有效性。

3.5 采空区作用的上覆岩层与坡体变形模拟分析

据开采资料,1995—2012年,区内主采煤层依次为C20和C16,2013—2017年,区内主采煤层依次为C14和C10,而C6煤层被部分开采(推测),以上开采形成的采空区如图18所示。由图18可见,形成采空区的煤层含C20、C16、C14、C10和C6(煤层C18未开采),依据上述开采资料,其开采顺序为C20→C16→C14→C10→C6煤层,开采后煤层上覆岩层与坡体的变形特征如图19、图20所示,分述如下:

1)煤层上覆岩层响应特征。随着普洒原始坡体下伏煤层的依次开采,煤层上覆岩层因应力重分布

逐渐形成变形和破坏,且随着开采范围扩大,煤层上覆岩层的变形与破坏范围逐渐增大(图19a—图19e中红色虚线区域),当煤层C6开采后,煤层上覆岩层已出现明显的垮落带、裂缝带和弯曲下沉带(图19e中A、B、C点),且在“三带”中明显发育“离层带”(图19e中D点)。当煤层C6开采后,其引起的“弯曲下沉带”已触及坡脚部位(图19e中C点),而坡肩部位位移监测点(图19中红色十字圆)曲线中的竖向位移最大值已达-0.883 m(图20中A点)。

煤层上覆岩层不同程度破坏和坡体变形充分说明地下煤层开采对地表坡体具有直接影响。

2)地表坡体变形特征。当煤层C6开采后,相对于煤层上覆岩层的明显变形与破坏,普洒原始坡体中并未见明显破坏,然已形成较大程度的渐进变形,该变形为其下伏“多层浅埋煤层”开采影响所致。

首先,从图20中阶段V对应的R、M和L簇竖向位移(Y-Dis簇)曲线可见,坡肩右侧竖向位移最大值达-0.883 m(图20中A点),其中部竖向位移最大值达-0.638 m(图20中B点),而左侧竖向位移最大值达-0.380 m(图20中C点),可见坡肩右侧竖向位



图16 原位实测的坡脚处地表阶梯形开采沉陷差值

Fig.16 The stepped mining subsidence difference at the toe of the slope

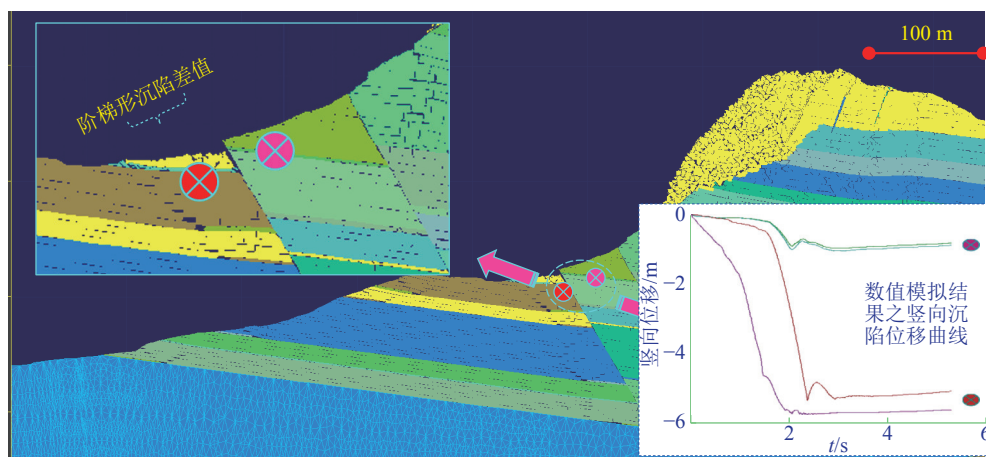


图 17 数值模型计算的坡脚处地表阶梯状沉陷差值

Fig.17 Stepped mining subsidence difference at toe of the slope in numerical model

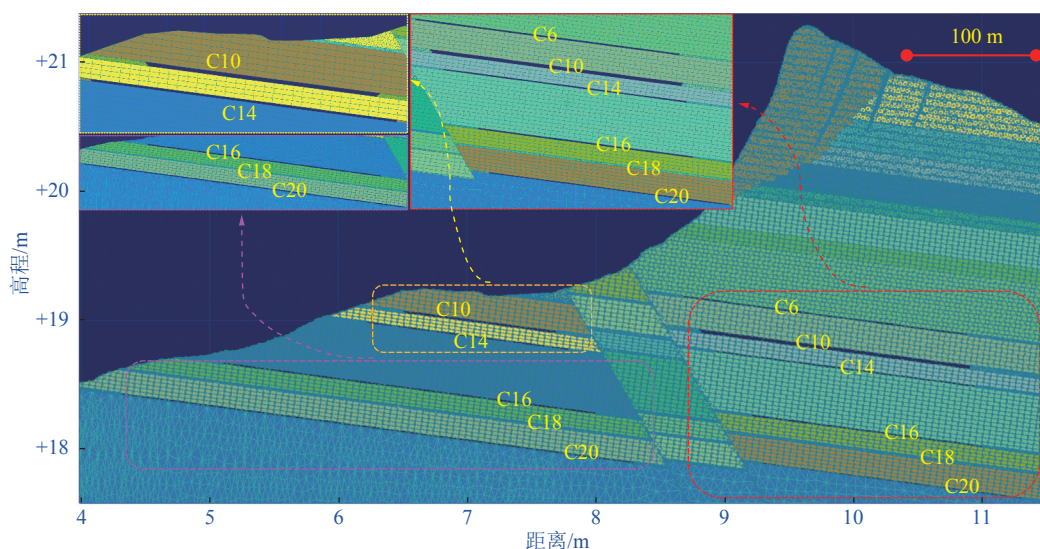


图 18 贵州张家湾普洒坡体下伏主采煤层开采形成的采空区示意

Fig.18 A sketch of mined-out areas in the numerical model of Pusa slope in Zhangjiawan Town, Guizhou Province

移最大。由图 20 中 I→II→III→IV→V 阶段对应的 R、M 和 L 簇竖向位移曲线还可看出,随煤层开采层数增加,坡肩左侧、中部和右侧竖向位移逐渐增大,揭示了煤层逐层开采对坡肩部位竖向位移的渐进影响效应。上述竖向位移演变曲线揭示原始坡体在其下伏 5 层煤层开采后已形成明显“整体下座”变形(采空塌陷所致),这是井工开采诱发型滑坡在坡体渐进变形阶段的典型特征。其次,由图 20 中 I~V 阶段对应的 X-Dis 簇坡肩水平位移曲线可知,随开采层数增加,坡肩各监测点水平位移绝对值逐渐增大,但坡顶部位水平位移为正值(X 轴正向),而其中、下部为负向水平位移(X 轴反向),说明此过程坡肩的整体变形除具有“整体下座”特征外,还具有明显的“顺时针旋转”效应(图 19e 中顺时针箭头),即其宏观变形特征为“整体下座”过程中伴随趋向坡体的“旋转”

效应。

3.6 强降雨作用的坡体变形模拟分析

2017 年 6 月,区内进入雨季,月累积雨量剧增,这对已受采空区、岩溶裂隙和风化作用等影响而较为破碎且已形成明显“整体下座”和“旋转”变形的坡体形成了进一步劣化影响。

在坡体受强降雨作用时,因坡体已较为破碎,故坡体内部的人渗水流可快速沿裂隙溢出,此时强降雨对坡体的瞬态影响主要表现为坡体自重的增加和裂隙力学参数的降低,因此此时的数值模拟并未采用流固耦合计算,而采用加大坡体材料密度和降低其裂隙力学参数的等效方法来进行。此工况下所用坡体材料与裂隙物理、力学参数见表 1 与表 2。

其模拟结果如图 19f 和图 20 中阶段 VI 所示。结果表明,该工况下作用下的坡肩水平和竖向位移

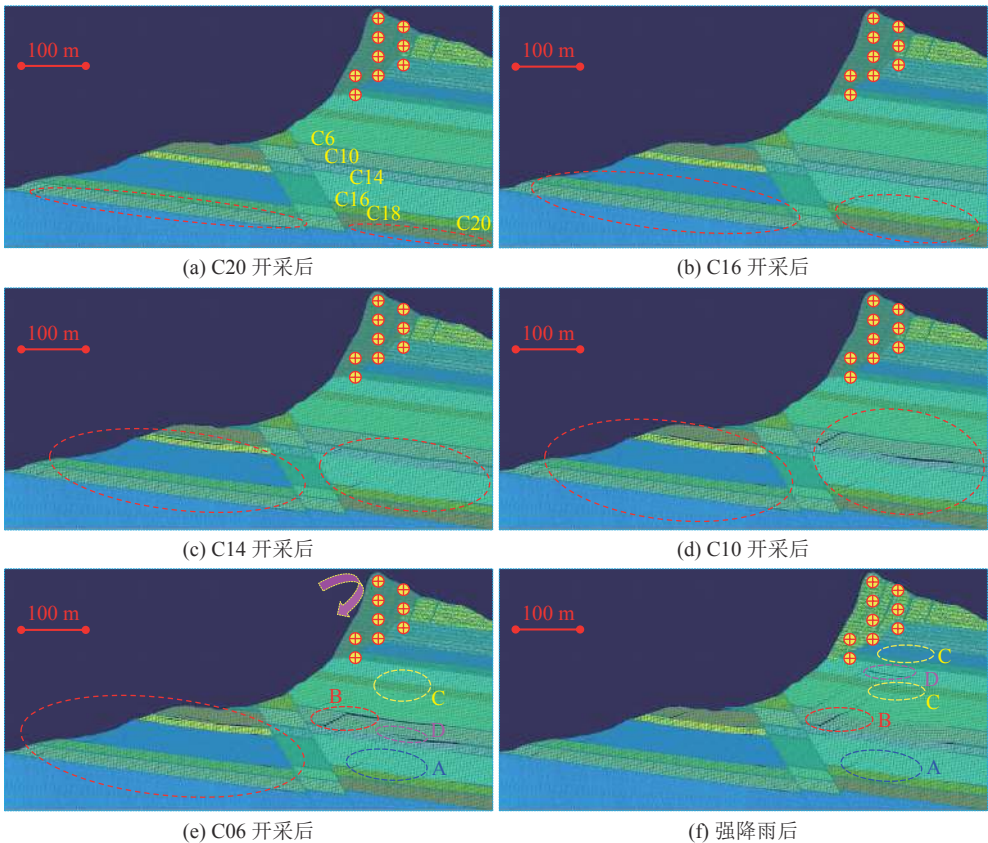


图 19 坡体下伏煤层开采和强降雨引起的上覆岩层和坡体变形特征

Fig.19 Deformation of the overlying strata and the slope triggered by coal mining and heavy rainfall

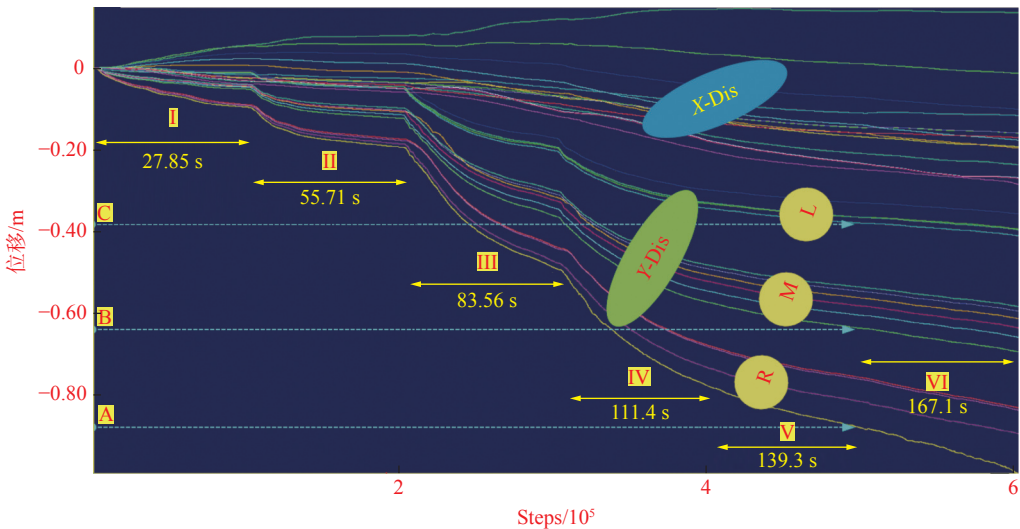


图 20 坡体下伏煤层开采和强降雨引起的坡肩各部位位移演变曲线

Fig.20 Displacement evolutions of the slope shoulder caused by coal mining and heavy rainfall

进一步增大,即坡肩竖向位移绝对值(负值)继续增加,水平位移绝对值继续加大(坡顶正向水平位移,坡肩中、下部负向水平位移),延续着坡肩“整体下座”和“旋转”变形的已有特征。

3.7 采掘爆破振动触发的坡体崩滑模拟分析

据开采资料,区内煤层采掘均采用延时爆破工

艺,爆破产生的振动波会对邻近斜坡岩土体形成周期拉压和剪切作用,而主采煤层 C6 距坡脚最小距离仅为约 50 m,故振动波将对已形成明显变形的坡体产生更严重的动力影响,这种影响因坡体下伏煤层的“多层浅埋”特性而愈加明显。

爆破振动作用下坡体响应采用离散元数值模型

中的 Dynamic Analysis 模块进行,该模拟以已有上述工况模拟结果为初始条件,其采用的地表实测水平与竖向速度时程曲线如图 13 所示,单次爆破持时 6 s,其水平速度峰值为 0.337 5 cm/s 和 -0.311 5 cm/s,竖向速度峰值为 0.157 3 cm/s 和 -0.141 0 cm/s,在采空区和强降雨作用后的离散元数值模型中输入 6 次爆破振动(总持时 36 s),以揭示普洒原始坡体(尤其是坡肩风化带或潜在滑体)在该动力作用触发下的响应特征与机制。

3.7.1 采掘爆破振动触发的坡体临界崩滑模拟分析

据离散元数值模拟结果,普洒原始坡体在经受持时约 6 s(图 13 中的 B 点,1 个延时爆破循环)的采掘爆破振动作用后形成整体临界崩滑,潜在滑带附近位移监测点结果表明,此时潜在滑体(图 21 中 A、B 和 C 点左侧)与滑床(图 21 中 A、B 和 C 点右侧)的水平位移监测曲线出现了明显分叉,即表明潜在滑体与滑床形成了明显的分离,这是普洒原始坡体形成临界崩滑的直接证据。从该水平位移监测曲线还可看出,A 点(坡脚,同时为潜在滑带前缘)处潜在滑体与滑床形成明显分离的时间早于 B 点(潜在滑带中部),而 B 点处的潜在滑体与滑床分离时间明显早于 C 点(坡肩,同时为潜在滑带后缘),潜在滑带不同部位临界破坏的空间顺序表明,该滑坡形成的临界崩滑始于坡脚,而后沿潜在滑带向坡体中间和后缘发展,即从坡体临界崩滑形成空间位置的先后顺序看,该滑坡为明显的牵引式滑坡,即坡体前缘先破

坏,进而对坡体中部和后缘形成牵引而致其整体破坏。此外,因该坡体在经受持时约 6 s 的采掘爆破振动作用后形成临界崩滑,可判定触发普洒坡体形成临界崩滑的主控因素为采掘爆破形成的岩层振动效应。

3.7.2 采掘爆破振动触发的坡体崩滑全过程模拟分析

离散元数值模拟结果表明,普洒原始坡体经历临界崩滑后,便进入了其后续解体破碎→铲刮滑床→碎屑流动→堆积稳定的动力响应全过程(图 22)。由图 22a 同样可知,当普洒坡体数值模型经受采掘爆破振动作用约 6 s 后,开始形成临界崩滑。其后续动态响应各阶段分述如下:

1)解体破碎阶段,由图 22b—图 22e 可知,即该原始坡体形成临界崩滑后采掘爆破振动作用持续影响失稳坡体的 6~32 s 内,滑体的动态力学响应特征主要表现为进一步碰撞解体破碎,滑体的岩体结构由原块状、层状结构演变为碎裂和散体结构,该演变是因滑体受采掘爆破振动持续作用时下滑过程中与滑床剧烈碰撞所致;同时,已破裂滑体不同部分之间的相互碰撞也加速了其破碎化。

2)铲刮滑床阶段,由图 22e—图 22f 可知,当采掘爆破振动作用于滑体的 32~36 s 内,已呈散体状的滑体持续沿滑床急速下滑,其前缘已滑移至坡脚并开始对坡脚处的地表岩层形成铲刮效应。在数值模型运行 36 s 后,采掘爆破振动作用撤除,滑体进入了在振动惯性和自重耦合作用下的持续动态响应阶段。由图 22f—图 22h 可知,持续下滑的散体化滑体在数值模型运行的 36~42 s 内,散体状滑体对坡脚地表岩层形成了较强的铲刮效应,被铲刮起的坡脚处部分地表碎裂岩块被散体状滑体冲击而随之形成共同碎屑流动,如图 22i 所示。随后,当散体状滑体碎屑流动至紧邻坡脚的小山丘时,对该山丘岩层又形成了剧烈的铲刮效应,如图 22j—图 22n 中的红色虚线所圈范围(数值模型运行的 110~220 s 内)。该阶段的散体状滑体碎屑流动速度明显放缓,一是与爆破振动作用撤除有关,二是因散体状滑体对坡脚处地表岩层和紧邻坡脚的山丘岩层的铲刮所造成的动能耗散有关。

3)碎屑流动阶段,当散体状滑体碎屑流动越过山丘后,其动力响应便进入了碎屑流动为主的阶段(图 22o),直至顺滑床表面流动至普洒村边缘。

4)堆积稳定阶段,由图 22o—图 22p 可知,当数值模型运行的 240~300 s 内,散体状滑体进入了最后的堆积至最终稳定阶段,该阶段最终形成了强致

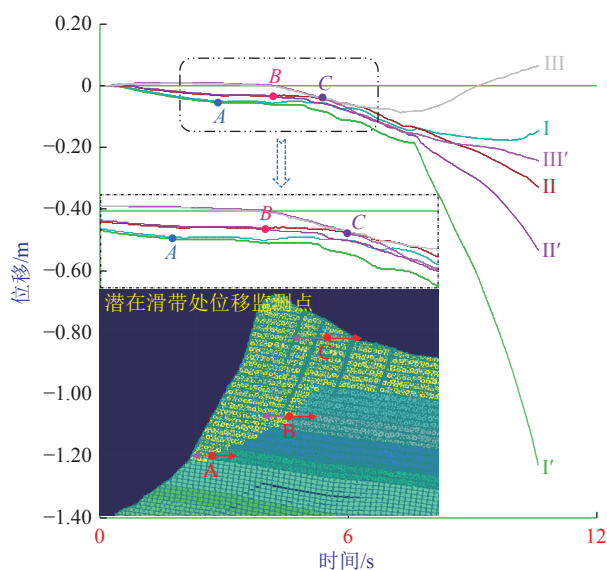


图 21 采掘爆破振动作用 6 s 后坡体形成整体临界崩滑时的滑体/床水平位移监测曲线

Fig.21 Horizontal displacement histories of the slide body and slide bed at the time of the overall critical collapse

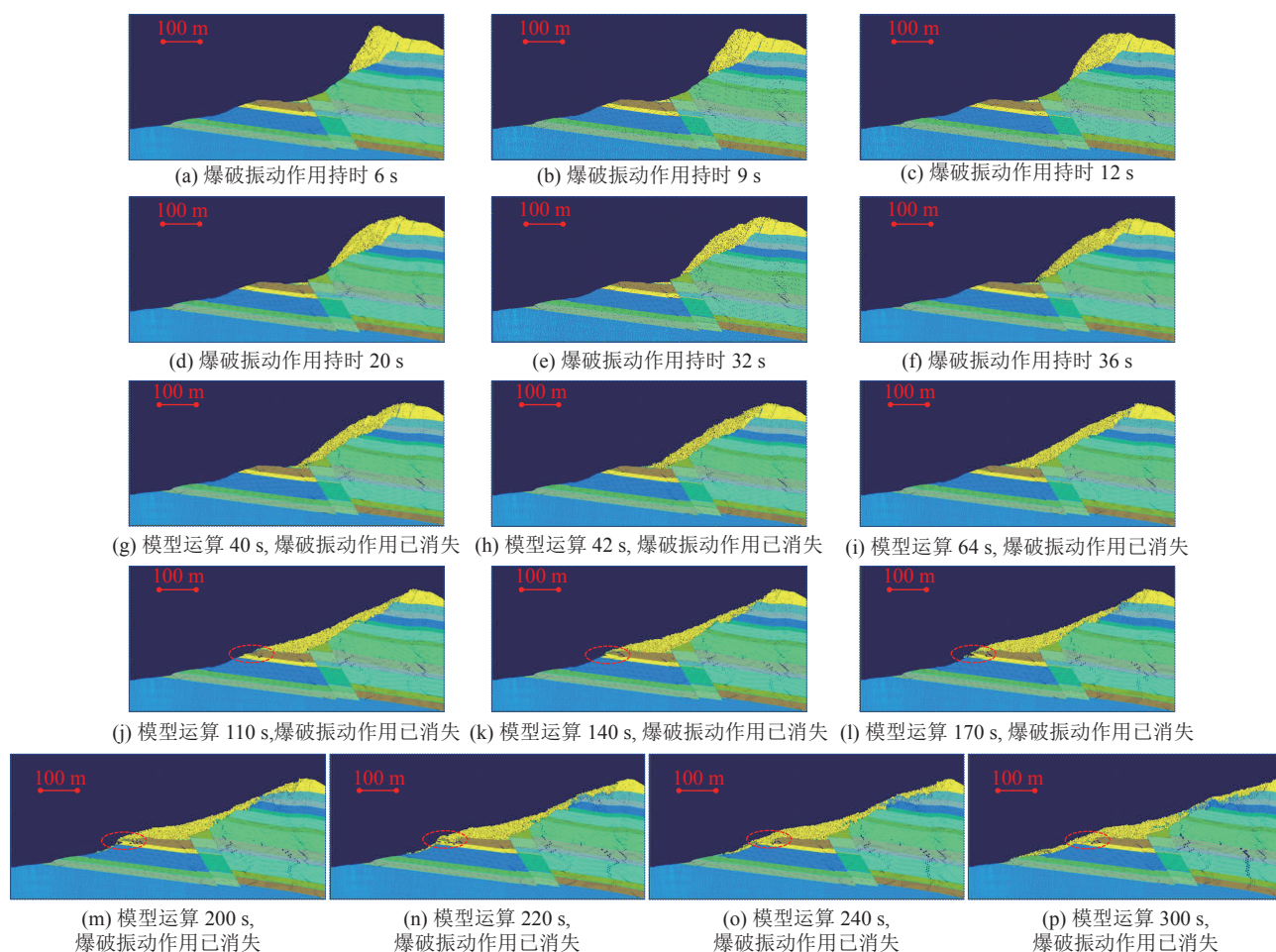


图 22 采掘爆破振动所致的普洒滑坡动力崩滑演变全过程

Fig.22 The dynamic evolution of the Pusa slope caused by mine blasting vibrations

灾性,即摧毁了普洒村的一部分,并造成 35 名村民遇难。

4 坡体崩滑演变力学模式

据野外地质详查、离散元数值模拟成果与相关分析论证,将文中研究的普洒滑坡的成灾演化力学模式分析如下,以期揭示其动力崩滑机制。事实上,从其形成机制讲,煤炭井工开采引起的坡体崩滑效应与其引起的采空塌陷类似,诸多学者在相关研究上已取得积极进展。如 E. F. Salmi 等分析了澳大利亚的一处开采诱发型滑坡,并简要分析了其形成力学模式^[38],赵建军等^[39-41]分析了我国贵州省的若干典型开采诱发型滑坡并提出了其变形破坏模式,然包含爆破动荷载触发因素的开采诱发型滑坡相关研究尚需继续深入。

总体而言,文中研究的普洒滑坡动力崩滑机制从其演变的力学模式讲分为以下主要阶段:

1)坡体渐进变形阶段。如图 23a 所示,随着煤层井工开采范围的扩大和层数的增加,其开采形成的采空区和岩层松动范围逐渐增大,采空区底板形

成明显的鼓胀区,采空区上覆岩层中明显发育垮落带、裂隙带和弯曲下沉带以及由其组成的岩层松动圈,松动圈周围存在明显的卸荷裂隙带;同时,受到(深大)岩溶裂隙、采空区、强降雨和爆破振动影响的坡脚部位形成明显的范围逐渐扩大的剪切破坏带。参与该阶段的力学作用类型包括:坡体自重应力、坡体中岩溶裂隙渗透压力、竖向和水平爆破振动应力、坡脚处剪切应力、松动圈周围卸荷应力和采空区中冒落岩块压实形成的侧向膨胀力。

2)坡体临界崩滑阶段。如图 23b 所示,随着煤层井工开采范围的扩大和层数的增加,普洒原始坡体在(深大)岩溶裂隙、采空区、强降雨和爆破振动的影响下达到临界崩滑状态。首先,因规模逐渐扩大的煤层开采导致煤层上覆岩层中松动圈及其周围的卸荷裂隙带范围逐渐扩大,该扩大的卸荷裂隙带对坡脚处剪切破坏带的形成产生一定影响;同时,该松动圈范围内的部分弯曲岩层中发育的拉张裂隙(该图中松动圈的左上侧拉张裂隙)对坡脚处剪切破坏带的形成也产生一定影响;其次,采空区中逐渐

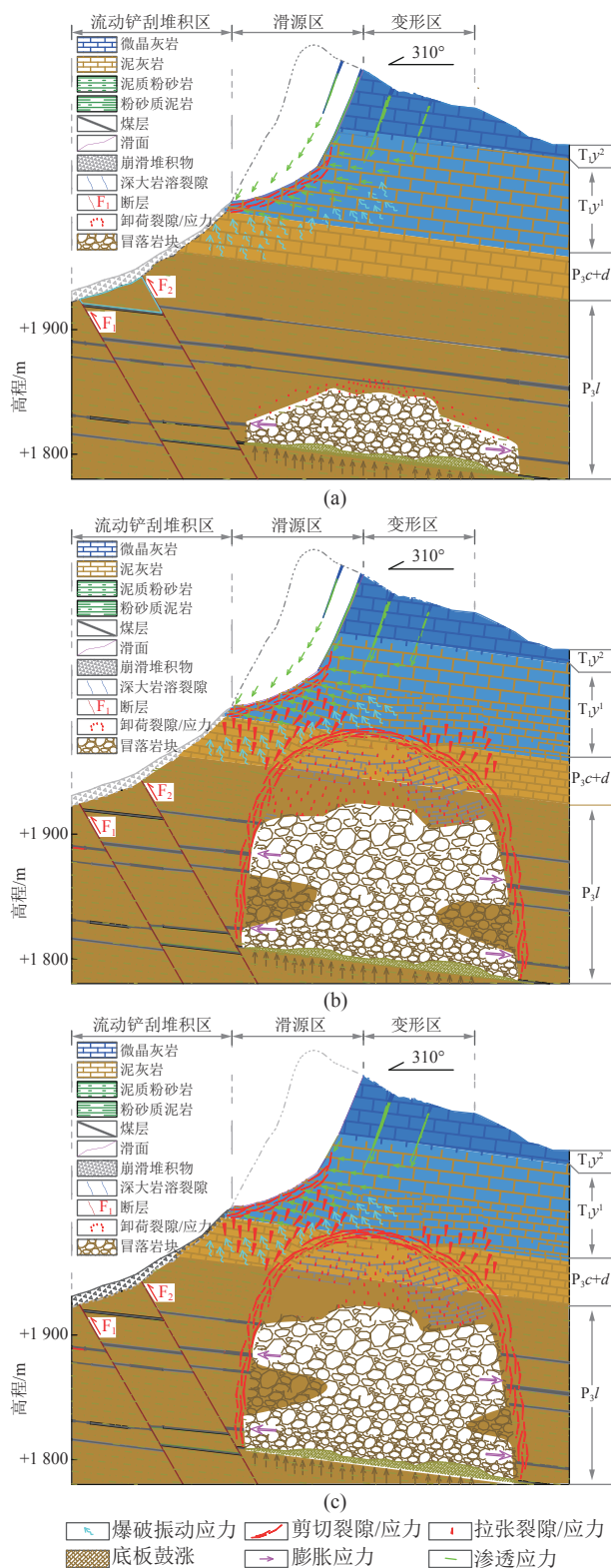


图23 贵州张家湾普洒滑坡动力崩滑演变的力学模式

Fig.23 Mechanical-mode evolution of Pusa landslide in Zhangjiawan Town, Guizhou Province

压实的冒落岩块对松动圈边缘卸荷裂隙带再次产生明显的膨胀力,进而加剧了该卸荷裂隙带的范围扩大,其在松动圈左上部与坡脚邻近处对该处剪切破

坏带的进一步散体化和范围扩大产生一定影响;再者,强降雨作用加剧了坡体内部孔隙水压力的发育,该过程同时加剧了坡脚处剪切破坏带的发展;最后,距离坡脚愈近的爆破振动形成的竖向和水平应力对坡脚处剪切破坏带的进一步散体化和范围扩大产生主控作用。

3) 坡体碎屑流动阶段。如图23c所示,普洒坡体经历临界崩滑后,滑体在其自重、爆破振动等作用下形成了后续解体破碎→铲刮滑床→碎屑流动→堆积稳定的动力响应全过程,其中爆破振动作用对滑体的更长距离碎屑流动起到了促进作用。

5 讨论

综合以上野外地质详查与离散元数值模拟及相关分析成果,可知文中分析的普洒滑坡除具有一般滑坡的典型特征外,还具有“开采诱发型”滑坡的独有特征,即其变形是在煤层井工开采形成的地面开采沉陷基础上发生的,其坡体临界崩滑之前的渐进变形具有明显的“整体下座”特征(地面开采沉陷所致)。

1) 在坡体崩滑动力机制分析中,最终确定了采掘爆破振动作用为触发该滑坡的主控触发因素,并提出了该类滑坡动力崩滑演变的力学模式,该结论是对“开采诱发型”滑坡相关研究的重要发展。

2) 文中的离散元模拟突破了目前坡体动态崩滑全过程数值仿真分析中大多将滑床视为连续变形的局限,实现了坡体(含滑体与滑床)绝大部分单元的非连续变形,进而更加直观地宏观再现了破碎滑体对滑床的“铲刮效应”和地下煤层开采引起的覆岩宏观破坏等非连续响应行为。

3) 文中采用的块体离散元模型中的多边形单元准确刻画了原始坡体中层状岩体及遍布其中的正交节理,故据其建立的数值模型与坡体实际结构更吻合,该模型相比目前常用的擅长刻画碎屑流动的颗粒离散元模型效率偏低,但无疑弥补和突破了后者所建模型中圆/椭圆形单元无法准确刻画斜坡岩体结构的局限。

4) 文中坡体仅经受一次延时爆破振动即形成整体临界崩滑破坏,这与实际开采过程中频繁的爆破作用不完全吻合,但实际开采时其爆破作用的实际位置多为距该坡体较远位置,此时的爆破振动因其衰减而对文中模拟的坡体影响不大,对坡体稳定性影响较大的即为邻近坡体的爆破振动,故文中相关

结论在准确判定爆破振动作用为该滑坡动力崩滑的主控因素外,对临近坡体的煤层井工开采设计优化(如可进一步根据实际地质与开采条件定量计算出井工开采工作面远离坡体的最小水平距离)具有重要参考作用。

6 结 论

1)系统提出了贵州张家湾普洒滑坡动力崩滑的影响因素,即主导因素为微地貌、“上硬下软”岩性组合、坡体结构和风化作用等,触发因素为浅埋多层采空区、强降雨和采掘爆破振动等,主控触发因素为采掘爆破振动作用。

2)该滑坡临界崩滑前的“渐进变形”具有明显的“整体下座”和“顺时针旋转”特征,其中“整体下座”为“井工开采诱发型”滑坡的独有特征,究其原因该滑坡发生前的“渐进变形”受到煤层井工开采形成的地面开采沉陷影响(这种影响因坡体下伏煤层的“多层浅埋”特性而愈加明显)所致。

3)采掘爆破振动触发该滑坡形成“临界崩滑”后,其后续动力响应可细化为“解体破碎→铲刮滑床→碎屑流动→堆积稳定”4个阶段。

4)提出了基于该滑坡崩滑全程演变力学模式的滑坡动力形成机制,即坡体自“渐进变形”“临界崩滑”至“碎屑流动”各阶段演化的力学模式。

致 谢

感谢中国地质环境监测院殷跃平研究员对本文相关工作的悉心指导和倾力帮助,感谢贵州地质环境监测院贵阳分院罗伟院长在滑坡野外地质详查时提供的帮助。

参考文献(References):

- [1] YIN Y P, SUN P, ZHU J L, *et al.* Research on catastrophic rock avalanche at Guanling, Guizhou, China[J]. *Landslides*, 2011, 8(4): 517–525.
- [2] YIN Y P, SUN P, ZHANG M, *et al.* Mechanism on apparent dip sliding of oblique inclined bedding rockslide at Jiweishan, Chongqing, China[J]. *Landslides*, 2011, 8(1): 49–65.
- [3] FAN X M, XU Q, SCARINGI G, *et al.* The “long” runout rock avalanche in Pusa, China, on August 28, 2017: a preliminary report[J]. *Landslides*, 2019, 16(1): 139–154.
- [4] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究: 以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 217–226.
YIN Yueping. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide—a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 217–226.
- [5] 李 滨, 殷跃平, 高 杨, 等. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 5–13.
LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, *et al.* Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 5–13.
- [6] 杨忠平, 蒋源文, 李 滨, 等. 采动作用下岩溶山体深大裂隙扩展贯通机理研究[J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 459–470.
YANG Zhongping, JIANG Yuanwen, LI Bin, *et al.* Study on the mechanism of deep and large fracture propagation and transfixion in karst slope under the action of mining[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(4): 459–470.
- [7] 熊 飞, 刘新荣, 冉 乔, 等. 采动-裂隙水耦合下含深大裂隙岩溶山体失稳破坏机理[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3445–3458.
XIONG Fei, LIU Xinrong, RAN Qiao, *et al.* Instability failure mechanism of karst mountain with deep and large fissures under the mining-fissure water coupling [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3445–3458.
- [8] 崔芳鹏, 李 滨, 杨忠平, 等. 贵州纳雍普洒滑坡动力触发机制离散元模拟分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 524–534.
CUI Fangpeng, LI Bin, YANG Zhongping, *et al.* Discrete element modelling on dynamic triggering mechanism of the Pusa landslide in Nayong county, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 524–534.
- [9] 刘新荣, 许 彬, 刘永权, 等. 频发微小地震下顺层岩质边坡累积损伤及稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4): 632–641.
LIU Xinrong, XU Bin, LIU Yongquan, *et al.* Cumulative damage and stability analysis of bedding rock slope under frequent microseisms[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(4): 632–641.
- [10] 李 军, 褚宏亮, 李 滨, 等. 西南煤系地层山区采动型崩滑灾害研究关键问题[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 453–466.
LI Jun, CHU Hongliang, LI Bin, *et al.* Key scientific issues in research on landslide hazard induced by underground mining in mountainous areas with coal-bearing strata of southwestern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 453–466.
- [11] LI B, FENG Z, WANG G Z, *et al.* Processes and behaviors of block topple avalanches resulting from carbonate slope failures due to underground mining[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(8): 694.
- [12] 李 滨, 冯 振, 张 勤, 等. 岩溶山区特大崩滑灾害成灾模式与早期识别研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
LI Bin, FENG Zhen, ZHANG Qin, *et al.* Study on the formation pattern and early identification of mega landslides in karst mountains [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [13] 李腾飞, 陈洪涛, 王瑞青. 湖北宜昌盐池河滑坡成因机理分析[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 578–583.
LI Tengfei, CHEN Hongtao, WANG Ruiqing. Formation mechanism of Yanchihe landslide in Yichang city, Hubei Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(4): 578–583.
- [14] 殷跃平, 刘传正, 陈红旗, 等. 2013年1月11日云南镇雄赵家沟特大滑坡灾害研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 6–15.
YIN Yueping, LIU Chuanzheng, CHEN Hongqi, *et al.* Investigation on catastrophic landslide of January 11, 2013 at Zhaojiagou,

- Zhenxiong county, Yunnan Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(1): 6–15.
- [15] 殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡—碎屑流研究[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(4): 445–454.
- YIN Yueping, ZHU Jiliang, YANG Shengyuan. Investigation of a high speed and long run-out rockslide-debris flow at Dazhai in Guanling of Guizhou Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(4): 445–454.
- [16] 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 Runqiu. 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.
- [17] 唐川. 昭通头寨沟特大型灾害性滑坡研究[J]. *云南地理环境研究*, 1991, 3(2): 64–71.
- TANG Chuan. A study on large-scale catastrophic landslide at Touzhai gully of Zhaotong[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1991, 3(2): 64–71.
- [18] 郑光, 许强, 刘秀伟, 等. 2019年7月23日贵州水城县鸡场镇滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(3): 541–556.
- ZHENG Guang, XU Qiang, LIU Xiuwei, *et al.* The Jichang landslide on July 23, 2019 in Shuicheng, Guizhou: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(3): 541–556.
- [19] 殷坤龙, 姜清辉, 汪洋. 新滩滑坡运动全过程的非连续变形分析与仿真模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(7): 959–962.
- YIN Kunlong, JIANG Qinghui, WANG Yang. Numerical simulation on the movement process of Xintan landslide by DDA method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(7): 959–962.
- [20] 周迎庆, 雷明堂, 徐金台. 四川巫溪南门湾崩滑的形成机制探讨[J]. *成都地质学院学报*, 1989, 16(1): 102–107.
- ZHOU Yingqing, LEI Mingtang, XU Jintai. The formation mechanism of Nanmenwan toppling-slide in Wuxi county, Sichuan[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1989, 16(1): 102–107.
- [21] 满作武. 四川巫溪中阳村滑坡发生机制分析[J]. *地质灾害与防治*, 1991, 2(1): 73–79.
- MAN Zuowu. Analysis of the mechanism of landslide taken place in Zhongyang village, Wuxi district, Sichuan Province[J]. *Journal of Geological Hazard and Control*, 1991, 2(1): 73–79.
- [22] 姜云, 尹金平. 华蓥山溪口滑坡—碎屑流[J]. *地质灾害与环境保护*, 1992, 3(2): 51–58.
- JIANG Yun, YIN Jinping. Rock avalanche of Xikou in Huayinshan[J]. *Geological Hazards and Environment Preservation*, 1992, 3(2): 51–58.
- [23] 王国章, 李滨, 冯振, 等. 重庆武隆鸡冠岭岩质崩滑-碎屑流过程模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(5): 101–106.
- WANG Guozhang, LI Bin, FENG Zhen, *et al.* Simulation of the process of the Jiguanling rock avalanche in Wulong of Chongqing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(5): 101–106.
- [24] 金德山. 云南元阳老金山滑坡[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1998, 9(4): 81, 99–102.
- JIN Deshan. Laojinshan landslide in Yuanyang county, Yunnan Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, 9(4): 81, 99–102.
- [25] JONES D B, SIDDLE H J, REDDISH D J, *et al.* Landslides and undermining: slope stability interaction with mining subsidence behavior [C]//*Proceedings of the 7th International Society of Rock Mechanics Congress*. Aachen: Rotterdam, 1991: 893–898.
- [26] DONNELLY L J, CRUZ H D L, Asmar I, *et al.* The monitoring and prediction of mining subsidence in the Amaga, Angelopolis, Venecia and Bolombolo Regions, Antioquia, Colombia. *Engineering Geology* [J]. 2001, 59(1/2): 103–114.
- [27] ZAHIRI H, PALAMARA D R, FLENTJE P, *et al.* A GIS-based weights-of-evidence model for mapping cliff instabilities associated with mine subsidence[J]. *Environmental Geology*, 2006, 51(3): 377–386.
- [28] ERGINAL A E, TÜRKES M, ERTEK T A, *et al.* Geomorphological investigation of the excavation - induced dünder landslide, bursa-turkey[J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2008, 90(2): 109–123.
- [29] SINGH R, MANDAL P K, SINGH A K, *et al.* Upshot of strata movement during underground mining of a thick coal seam below hilly terrain[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(1): 29–46.
- [30] FUENKAJORN K, ARCHEEPLOHA S. Prediction of cavern configurations from subsidence data[J]. *Engineering Geology*, 2010, 110(1/2): 21–29.
- [31] MARSCHALKO M, YILMAZ I, BEDNÁRIK M, *et al.* Influence of underground mining activities on the slope deformation genesis: Doubrava Vrchovec, Doubrava Ujál and Staric case studies from Czech Republic[J]. *Engineering Geology*, 2012, 147/148: 37–51.
- [32] YILMAZ I, MARSCHALKO M. A leaning historical monument formed by underground mining effect: an example from Czech Republic[J]. *Engineering Geology*, 2012, 133/134: 43–48.
- [33] UNLU T, AKCIN H, YILMAZ O. An integrated approach for the prediction of subsidence for coal mining basins[J]. *Engineering Geology*, 2013, 166: 186–203.
- [34] LANA S M. Numerical modeling of failure mechanisms in phyllite mine slopes in Brazil[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24(6): 777–782.
- [35] SALMI E F, NAZEM M, KARAKUS M. The effect of rock mass gradual deterioration on the mechanism of post-mining subsidence over shallow abandoned coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 91: 59–71.
- [36] FENG Z, LI B, YIN Y P, *et al.* Rockslides on limestone cliffs with sub horizontal bedding in the southwestern calcareous area of China[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(9): 2627–2635.
- [37] CHEN L Q, ZHAO C Y, LI B, *et al.* Deformation monitoring and failure mode research of mining-induced Jianshanying landslide in karst mountain area, China with ALOS/PALSAR-2 images[J].

- [Landslides](#), 2021, 18(8): 2739–2750.
- [38] SALMI E F, NAZEM M, KARAKUS M. Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence[J]. [Engineering Geology](#), 2017, 217: 141–152.
- [39] ZHAO J J, XIAO J G, LEE M L, *et al.* Discrete element modeling of a mining-induced rock slide[J]. [SpringerPlus](#), 2016, 5(1): 1633.
- [40] ZHAO J J, WAN X, SHI Y B, *et al.* Deformation behavior of mining beneath flat and sloping terrains in mountainous areas [J]. *Geofluids*, 2021.<https://doi.org/10.1155/2021/6689966>.
- [41] FANGPENG CUI, BIN LI, CHEN Xiong, *et al.* Dynamic triggering mechanism of the Pusa mining-induced landslide in Nayong County, Guizhou Province, China[J]. [Geomatics, Natural Hazards and Risk](#), 2022, 13(1): 123–147.
- [42] 李智毅, 杨裕云. 工程地质学概论[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.
- LI Zhiyi, YANG Yuyun. Introduction to engineering geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994.
- [43] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Mining pressure and strata control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.
- [44] 康永华, 黄福昌, 席京德. 综采重复开采的覆岩破坏规律[J]. [煤炭科学技术](#), 2001, 29(1): 22–24.
- KANG Yonghua, HUANG Fuchang, XI Jingde. Overburden failure law of fully mechanized repeated mining[J]. [Coal Science and Technology](#), 2001, 29(1): 22–24.