

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201130001

滑坡地质灾害应急处置技术研究进展*

裴振伟¹, 年廷凯¹, 吴昊¹, 张彦君², 张超锋³, 王瑞³

(1. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;
3. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘要: 滑坡在我国分布范围广、发生频率高, 严重威胁人民的生命财产安全和国家重大工程建设及其长期运营。为减轻滑坡地质灾害, 实现防灾减灾救灾效益最大化, 亟需开发更有效的滑坡地质灾害应急处置技术。对滑坡地质灾害应急处置技术的研究现状进行系统总结, 包括应急抢险技术、应急治理技术、特殊工程应急处置技术和应急监测预警技术, 指出当前存在的主要问题和进一步发展方向, 以期推动我国滑坡地质灾害应急处置技术的快速发展和行业工作的规范化, 为防灾减灾救灾工作提供有益参考。

关键词: 滑坡; 地质灾害; 应急抢险技术; 应急治理技术; 应急监测预警

中图分类号: P694 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1382-13

Research Progress on Emergency Treatment Techniques for Landslide Geological Hazards

PEI Zhenwei¹, NIAN Tingkai¹, WU Hao¹, ZHANG Yanjun², ZHANG Chaofeng³, WANG Rui³

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China; 3. Yalong River Hydropower Development Co., LTD., Chengdu 610051, China)

Abstract: In China, landslide geological hazards with the characteristics of wide distribution and high frequency constantly pose serious threats to the safety of people's lives and property, and the construction and long-term operation of national key projects. In order to effectively mitigate the landslide disaster and maximize the benefit of disaster preventions, mitigations and relieves, it is urgent to develop more efficient emergency disposal technologies for landslide geological hazards. This paper systematically summarizes the state-of-the-art of emergency disposal technologies for landslide geological disasters, including emergency rescue technologies, emergency treatment technologies, emergency disposal technologies for special engineering, and emergency monitoring and warning technologies. Subsequently, the paper indicates the major problems at present and further development trends in the hope of promoting the rapid development and standardization of emergency disposal technologies for

* 收稿日期:2020-11-30;修回日期:2021-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51879036,U1765107)、辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC2002036)资助

作者简介:裴振伟(1992—),男,博士研究生。主要从事边(滑)坡稳定性分析及防治技术研究。

E-mail: pzwxb@mail.dlut.edu.cn

通讯作者:年廷凯(1971—),男,教授,博导。主要从事山区地质灾害与海洋岩土工程减灾领域的教学和科研工作。

E-mail: tknian@dlut.edu.cn

landslide geological disasters, and providing useful suggestions for disaster relief work.

Keywords: landslides; geological hazards; emergency rescue technology; emergency treatment technology; emergency monitoring and warning

引言

我国是一个多山的国家,山区面积占全国陆地面积的 $2/3$ ^[1],地质灾害广泛发育,且发生频率高、强度大。近十多年,我国滑坡灾害占比达半数以上(图1),严重威胁基础设施的建设和长期安全运营^[2-5],如西南山区地震、降雨或冰碛土滑坡-堰塞湖-溃坝洪水灾害链问题,川藏铁路/公路沿线的滑坡地质灾害问题,三峡库区滑坡-涌浪及其与船舶、码头相互作用问题等。因此,针对滑坡地质灾害的应急处置技术研究,已成为土木、水利和交通等基础设施建设中的重大关切,也是当前岩土工程与地质工程专业领域的研究热点。

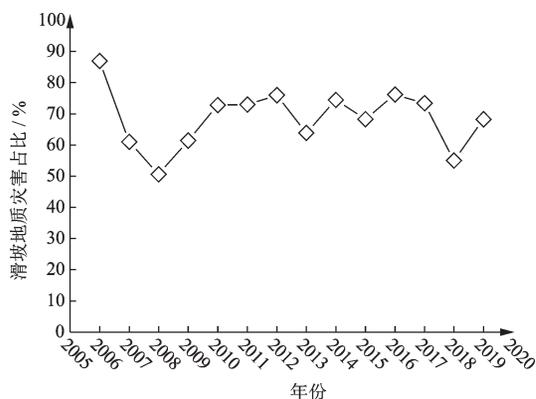


图1 近十余年滑坡地质灾害占比

Fig.1 The proportion of landslide disasters in the past decade

滑坡地质灾害应急处置,是滑坡地质灾害治理体系的重要组成部分,包括非工程措施和工程措施。其中非工程措施涉及:(1)滑坡防治安全等级评定、危险区划分;(2)人员疏散、交通管制或引导通行等措施;(3)安全标示牌(地质灾害警示牌、安全通行警示牌等)设置;(4)人工哨岗、人员巡查、连续监测等;(5)成立应急抢险工作组或领导小组,编制应急预案等。有效的非工程措施(应急处置管理)是滑坡地质灾害应急处置的基础。工程措施包括应急抢险技术与应急治理技术等,具有难度大、工期紧、场地受限等特点。尽管工程界有一定的滑坡地质灾害治理经验,但应急处置体系和治理技术仍不够完善。本文系统梳理滑坡地质灾害应急抢

险技术、快速治理技术和应急监测预警技术等工程措施的现状,指出当前存在的主要问题和未来发展方向,以期防灾减灾救灾工作提供支持。

1 滑坡地质灾害应急抢险技术

滑坡地质灾害应急抢险技术主要是对边(滑)坡体进行快速有效处置,是防止边坡失稳或滑坡体的进一步变形,为人员疏散及应急部署争取时间的临时性处置技术^[6],是滑坡地质灾害应急处置过程的重要步骤。滑坡地质灾害应急抢险处置通常是在缺少详细勘察资料的情况下,基于经验与现场调绘所开展的工作,主要包括对险情、灾情的应急抢险处置^[7],具有快速、扰动小、针对性强、方案保守等特点。

1.1 险情应急抢险技术

针对潜在滑坡、蠕变滑坡,需进行防滑的应急抢险处置,常用措施包括封水防护与削坡防护,如针对南方富水区域雨季和汛期的边坡防护,通常采用坡面铺设塑料薄膜的方式减少雨水下渗,搭配(截)排水沟或充气截排水方法^[8]对地表径流或雨水进行疏导、排泄,填充坡体后缘裂缝,防止雨水下渗;采用削坡方式对坡体进行减载处理,降低下滑力,减缓变形趋势。此外,采用坡面修整或被动防护网等方式防止落石,采用钢筋笼填充块石对坡体进行压脚防护,保证受影响范围内的道路等基础设施正常运行,保障救援人员安全,为进一步治理提供时间与空间。

1.2 灾情应急抢险技术

针对已致灾滑坡或突发性滑坡,首先需对已滑塌的部分进行快速清除处理,同时建议采用爆破等技术,对滑后遗留的倒悬体、错落式、孤立式危岩进行定点爆破清除^[9],或采用素喷混凝土、高聚物注浆等对滑后松散的表层坡体进行临时性加固,搭配防护网,以期迅速恢复交通,减小受灾损失^[10]。

目前,滑坡应急抢险技术相对单一,主要通过物理方法进行快速治理,且需人工配合,即时作用的处置技术相对匮乏。因此,开发即时作用,无扰

动的轻型、快速抢险的方法,如液氮冷冻加固^[11]或钻地弹锚杆(索)发射技术^[12],将是滑坡地质灾害应急抢险工作下一阶段的重要内容。

2 滑坡地质灾害应急治理技术

滑坡灾害应急治理技术是滑坡地质灾害应急处置的核心内容,是进行应急抢险处置后,对坡体进行快速治理的永久性的治理技术,适用于潜在滑坡体、蠕变滑坡、已发生的滑坡或极端气候影响下的边坡应急处置。所谓的快速治理,是指比目前常规措施提高效率50%以上的新技术、新方法,其内容涉及广泛,核心关键技术应兼具快速勘察、快速评估和快速支护三方面^[5],需具有轻型、经济、快速等特点,体现在加固结构的轻型化、机械化、可预制等方面。

2.1 常规治理方法

滑坡应急治理技术可围绕降低下滑力来进行,如削方减载和排水等方法;此外,也可提高抗滑力,如坡脚堆载、固体、支挡和锚固等常规治理措施,见表1。支挡措施属于人为增加坡体抗滑力的工程措施,通过在坡体中前部或滑动区设置支挡结构,增强坡体抗滑力。

2.2 轻型应急治理技术

常见的轻型支挡结构主要包括微型抗滑桩(群)、快速锚固与注浆锚固技术、格构锚固结构、桩键结构和组合挡土墙等结构,适用于面积分散、构型复杂和地层不均等边(滑)坡的快速治理。轻型

表1 常规治理措施^[13-14]

Table 1 Conventional treatment measures^[13-14]

措施名称	基本原理	适用范围	主要特点
削方工程	对坡体后缘不稳定部分进行削方处理,降低下滑力	适用于中小型推移式滑坡,而分级削方则适用于渐进后退式滑坡	原理简单、施工方便、经济、工期短、见效快,但扰动大,工程量大
堆载工程	采用土石材料堆填于坡体前缘或滑动面剪出口附近,人为增加坡体抗滑力	坡脚具备较大空间的中小型、牵引式的潜在滑坡的应急治理	无法保证坡体后缘变形,或张裂缝变形等情况,需注意土石堆载不会影响坡体原有排水口。工程量大,需大量土石,可搭配削方技术使用
排水工程	于坡面或坡体内部设置明暗沟、截水渠,虹吸管等进行地表排水和地下排水	适用于涉及地表水、地下水的滑坡治理工程,或受降雨、地表径流及雨雪冻融影响的边坡	排水工程具备地域性特点,且地表排水往往利用自然地形进行排水
支挡措施	传统桩	桩体嵌固于稳定地层,利用土拱效应及桩体抗弯性能,将上部滑坡推力传递到下部稳定地层	适用于中大型推移式、渐进后退式滑坡,适用于整体性较强的岩质边坡或土质边坡
	抗滑挡墙	在坡脚或滑动面剪出口位置设置格挡,来增强边坡抗滑力,属于局部连续型抗滑措施	布置灵活、施工方便、阻滑效果好、可验证地质资料。但施工扰动大、需大型机械、成本较高,不适用于松散堆积状、流塑状和富水滑坡
	锚索	利用柔性结构将岩体稳定层与不稳定地层连接,将下滑力转化为锚杆(索)的拉力	抗滑效果显著,挡墙前部可形成较大空地,可分级设置挡墙,但工程量大,且一般需设置于稳定地层上,对坡脚前缘扰动较大,需在边坡未变形前设置,且需考虑排水
加筋土	利用加筋材料的摩擦加筋原理或准粘聚力原理改善土体力学性能与稳定性,使得砂土具备一定的粘性土特征	尤其适用于高陡边坡,或存在软弱夹层或松散围岩边坡,且存在稳定地层的滑坡	快速、经济、简单、安全、施工位置灵活、锚固装置体积小、操作简便、适应性强
固体工程	坡体内部注射混凝土浆,通过自凝特性、劈裂缝形成树根桩,增强滑动区坡体整体性	适用于无粘性砂土边坡或交通、市政、水运边坡或路堑、路堤边坡工程	结构简单、造型美观、技术简单、施工方便、经济适用、施工速度快、工期短,且可搭配植被防护进行长期治理
固体工程	坡体内部注射混凝土浆,通过自凝特性、劈裂缝形成树根桩,增强滑动区坡体整体性	适用于中小型的松散堆积体或中浅层破碎岩土体边坡加固工程	操作简单,成本较低,扰动小,但加固效果一般,适用性有限

支挡结构通常为“空间型”布置结构,通过各部件组合连接,将坡体下滑力传递到稳定地层或采用自身重力抵消,因此结构具有轻型、可预制和扰动小等特点。

2.2.1 微型抗滑桩(群)

微型抗滑桩(群)由意大利Lizzi于20世纪50年代提出,随着钻探技术成熟,被广泛应用于边坡的应急处置工程^[15]。微型桩设计主要通过解析方法($p-y$ 曲线法和弹性地基梁法)^[16-18]与数值方法进行^[19-20]。目前,微型桩(群)加固边坡的推力传递机制、桩身内力变形机制及桩土协调变形原理等尚缺少系统研究,加固过程易存在隐患或资源浪费,且国内缺少微型桩(群)工程的指导规范,上述问题都限制了微型桩(群)的推广应用。

微型桩为小口径、柔性钻孔灌注桩,桩身通常采用钢筋、钢管混凝土制成^[21-22]。微型桩桩身细长,加固过程中允许桩身有较大变形^[23],通过桩土协调变形,承受桩后主动土压力,因桩群单桩间距较小,钻孔注浆与周围土体形成桩土复合体,利用桩间与桩群间土拱效应使土应力重分布,将滑坡推力传递至桩土复合体(图2)。

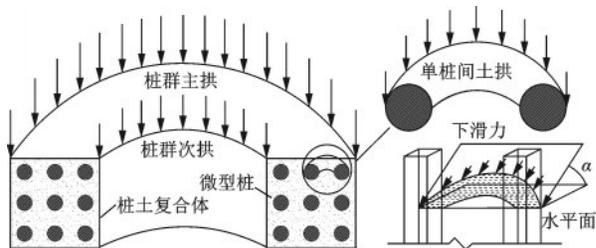


图2 微桩群土拱效应

Fig.2 Soil arching effect of micro-piles group

微型桩种类繁多,常见为独立型、框架型、顶板型及空间网状型^[18](图3)。由于单桩抗弯能力有限,独立型通常采用梅花联排的方式布置;框架型增加顶部连梁^[24],单桩应力重分布,使得整体抗弯能力增强,且可与土体形成整体进行抗滑;顶板型由于顶部刚性约束,前排桩发挥性能更加充分,因此抗弯效果进一步提升;空间网状型微型桩群又称为树根桩,由于桩身倾斜,使得部分剪应力转化为拉压应力,大大提升了单桩的抗滑能力,因此抗滑效果最优。

微型抗滑桩(群)具有形式多样、施工方便、扰动小、作业面小、机械化程度高、工期短、见效快、成本低且可有效揭露地质资料等优点,有助于准确判

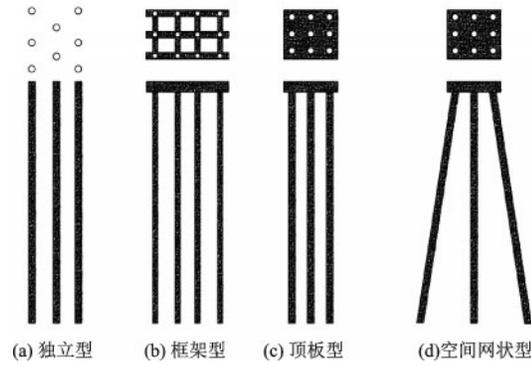


图3 微型桩空间结构类型

Fig.3 Spatial structure types of micro-piles

断滑动面位置,并且微型桩应用灵活,可搭配其他轻型支挡结构混合使用。

微型抗滑桩(群)适用于各驱动类型的中小型边(滑)坡的快速治理,尤其适用于松散堆积型土石混合边坡或碎裂型岩质边坡^[15],如京珠高速、三门峡高速的边坡治理工程^[25-26]。但需要注意的是,微型抗滑桩(群)由于结构呈柔性,且需钻孔灌注,因此不适用于岩质边坡或大块石较多不易钻孔的混合边坡,且因桩群抗剪切能力有限,不可单独应用于超深层、下滑力大的大型和巨型滑坡治理。

2.2.2 快速锚固与注浆锚固技术

快速锚固技术又称自适应深层锚固技术,是利用新型潜孔锤跟管钻具进行快速钻探成孔^[27],同时搭配锚索安装系统的孔内、外装置实现快速下锚,并通过改善注浆外加剂实现快速注浆的改进锚固结构^[6]。注浆锚固技术是通过深层注浆形成劈裂,增强锚固结构的抗滑力^[28],形成空间型加固结构(表2),适用于高陡边坡应急处置,目前有效应用于软弱或松散围岩边坡中。随着干式螺旋钻机、风动型自进式缝管安装机等多用途钻孔及便捷型的安装机械的研制,锚固工程正朝着快速化、轻型化、便捷化的方向迅捷发展^[5]。

2.2.3 格构锚固技术

格构锚固技术是利用浆砌块石、现浇钢筋混凝土梁或预制装配式的预应力格构梁,搭配挂网、喷浆、植被等进行坡面防护,并将下滑力分配于节点处的锚索(杆)的一种边坡加固技术^[29]。格构锚固技术分为坡面加固与坡体加固两部分,通过锚索将坡体剩余下滑力传递到下部稳定地层,而上部格构梁用于加固坡面,可有效连接锚索,增强加固区域的整体性^[30](图4)。

表 2 快速锚固与注浆锚固技术^[27-28]

Table 2 Fast anchoring and grouting anchoring technology^[27-28]

类型	作用原理	适用范围	主要特点
快速锚固	将锚索头尾扩大,在滑体、基岩中分别设置锚固段,于滑面处设置自由段产生预应力	适用于高陡、深层边坡,尤其适用软弱或松散围岩的边坡锚固	机械化高、扰动小,适用高位边坡,地形适应性强
注浆锚固	钢筋笼搭配高压注浆形成劈裂式锚固结构防滑,对滑体有抗滑	适用浅层残积土边坡、风化碎石边坡或平面分布较广的边坡	
竖向钢花管注浆锚固	钢花管与浆体形成微桩进行抗滑,同时注浆可提高岩土体强度	适用岩质边坡与浅层坍塌体,及变形范围大的洪积边坡加固	工艺先进、持久可靠,结构轻便,注浆位置可控,适用多破裂面边坡,施工后可恢复绿化
预应力钢花管多级注浆锚杆框架	注浆与锚固机理结合进行抗滑	适用松散堆积边坡加固或软弱结构带位置未知的边坡加固	

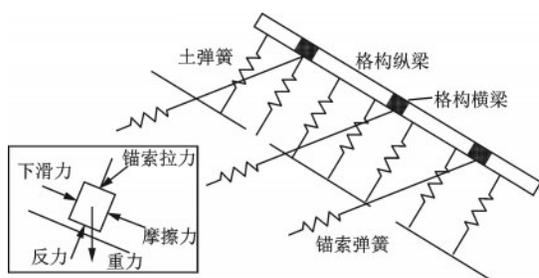


图 4 格构锚固结构^[30]

Fig.4 Structure of lattice anchorage^[30]

格构梁平面布置通常采用方形、菱形、人字形及弧形等形式(图 5)^[31]。随着格构锚固领域研究的深入,新型格构,如非预应力的榫卯搭接格构梁结构,适用于非预应力、预应力锚固结构的钢节点连接装配式格构,具有轻型、可预制^[32]、施工快速、应用即时性的特点,且具有可快速修复与替换等优点^[29]。

为达到快速治理的目的,格构梁通常采用预制组装方式,可最大限度节省时间,布置灵活、结构轻巧、形式多样、地形适应性强,具有良好抗震性,适用于坡度大或稳定性较差的边坡应急处理^[14]。

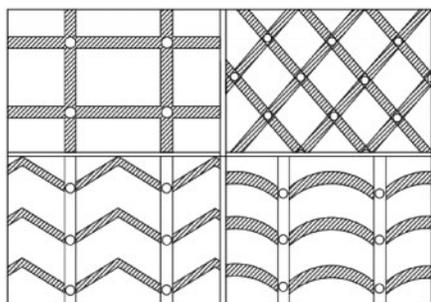


图 5 格构梁平面分布形式

Fig.5 Planar distribution forms of lattice beam

格构锚固技术适用于松散、碎裂土层等表层剥落或风化严重,但存在稳定地层的路基路堑边坡治理工程,且适用于平面分布较广或分散的浅层边(滑)坡治理工程。格构锚固技术结构轻便,且为空间型布置,紧贴地形,适用于坡度较陡、中高位的中浅层边坡,搭配植被护坡时,具有美观、安全且环境友好的特点^[29]。格构锚固技术具有一定的局限性,不适用于深层、大型和巨型滑坡治理,大范围布置会增加坡表荷载;采用现浇混凝土时具有一定扰动,而采用浆砌块石时,格构梁刚性较大,容易断裂,大面积铺设时,除成本较高外,还会对坡面排水产生影响,因此需要额外设置排水措施。

2.2.4 桩键改良结构

桩键结构是采用抗滑桩与阻滑键组合形成的抗滑结构,通过多级开挖平洞与竖井穿过滑带至稳定地层,形成由多级平肢和竖肢交叉相连的“台阶”状阻滑结构,将坡体下滑力转化为竖肢抗弯能力与平肢拉力,平肢端部扩大或设置横向锁固键加强“销榫”作用,且对桩顶或桩身存在一定约束作用,显著提高结构的抗滑能力^[33]。复合式梯键结构与连续型桩键结构(图 6),抗滑能力出众,适用于有明

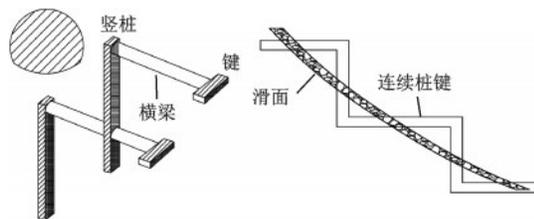


图 6 复合梯键结构与连续桩键结构^[33]

Fig.6 Compound ladder-plug structure and continuous pile-plug structure^[33]

显滑带、下滑力巨大、坡体深厚的边坡,但由于平洞开挖,需避免坡体坍塌,因此不适用于松散和软弱坡体,目前桩键结构已成功应用于三峡库区猴子石滑坡等工程的治理^[33]。

桩键结构横梁与竖桩截面尺寸较大,工序复杂,成本高,对地层扰动大,因此可对设计进行一定的改良,采用微桩-锚索组合结构^[34],形成空间型“树根桩”,具备快速施工、扰动小、经济安全等特点,尤其适用于松散、软弱坡体,且适用于较大下滑力的滑坡治理,目前已被广泛应用于中小型滑坡快速治理与应急处置工程。

2.2.5 轻型挡土墙

组合式轻型挡土墙属于“半封闭”式支挡结构,通常设置于坡脚处,可有效隔绝墙后坡体,适用于墙前构建人类活动区域的边坡加固工程,如路堑、路堤和桥台边坡等中小型边坡的应急治理。组合式轻型挡土墙主要包括:锚杆挡土墙、锚钉板挡土墙、加筋土挡土墙、土钉墙、卸荷板挡土墙、桩板式挡土墙等,组合式轻型挡土墙主要通过挡土墙承受土压力,然后通过锚杆(索)、锚钉和桩等结构传递至稳定地层,联合挡土墙形成空间三维支挡措施,不同于传统重力式挡土墙,因此具有轻型、经济和施工快速的优点(表3)。

表3 不同类型组合式挡土墙^[35-37]

Table 3 Different types of combined retaining walls^[35-37]

挡墙类型	组成及原理	适用类型或特点
锚杆挡墙	将土压力传递到稳定地层,抗拔力主要来自锚杆(索)、砂浆、孔壁地层之间的摩擦力	适用于坡度较大,挖掘困难,具备锚固条件的地区,多用于路堑边坡治理
加筋土挡墙	由墙面板、填土、筋材及表面砌块组成,通过筋材与土体摩擦力,改善土体性质来平衡墙后水平土压力	适用于开阔填方路段边坡,造价低、施工快、占地少,适用路基沉降边坡
土钉墙	由土钉和土体组成复合体,搭配承压板、加强筋和面板,将土压力通过土钉传递到深部土层	适用于平坦,坡度较小的边坡,可多级设置,尤其适用破碎软岩地段边坡
卸荷板挡墙	由卸荷板、上墙和下墙组成,通过卸荷板减小墙背土压力,利用填土重量和墙体自重抵抗土侧压力	适用于地基强度大,墙高大于6 m的路肩边坡加固工程
树根桩挡墙	通过树根桩与挡土墙组成,通过树根桩将上部土压力传递到下部稳定地层,于滑面剪出位置处设置挡土墙	适用于具备稳定地层、适宜钻孔灌注的中小型边坡

组合式轻型挡土墙造型简单、形式多样、布置灵活(图7),如树根桩挡土墙被应用于福银高速边坡应急处置工作,并取得了良好效果。挡土墙设置通常采用开挖或填土方式布置,其中,为有效降低

墙后土压力以及挡土墙自重,部分填土可采用聚苯乙烯颗粒轻量土,其具有轻质、高强、隔振等特点,有利于边坡治理与基础工程的修建。

2.3 组合型快速治理技术

滑坡灾害成因复杂,受多种外营力影响,如地震伴随强降雨、土体裂缝遭遇雨雪冻融等,单一的支挡措施通常难以满足滑坡灾害快速治理的实际需求,空间网状组合治理结构相比传统点状、面状治理结构,具有因地制宜、针对性强的特点。因此,针对性地采用常规治理方法与轻型治理技术协同使用的形式(图8),对滑坡进行应急处置。如采用削方、排水工程与微桩加固组合措施的形式,对推移式、松散的滑坡进行快速治理^[38];采用削方、堆载、锚拉工字钢加固与土工布坡面防雨等空间防治体系,对连续降雨条件下滑坡进行应急处置;采用清方、微型桩群加固、坡面处理与裂缝注浆等措施处理已滑动的降雨型推移式滑坡^[6]。

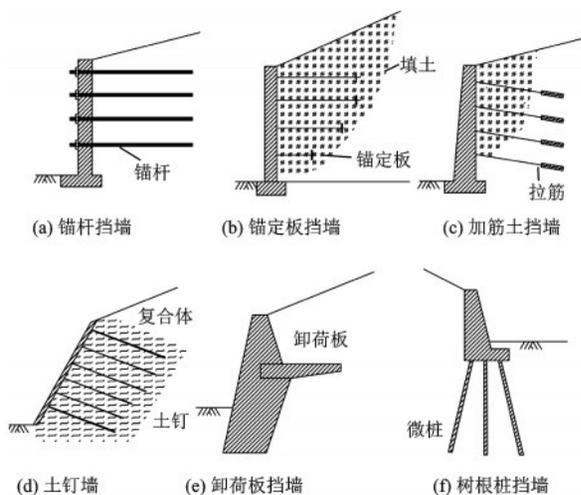


图7 不同类型挡土墙

Fig.7 Different types of retaining walls

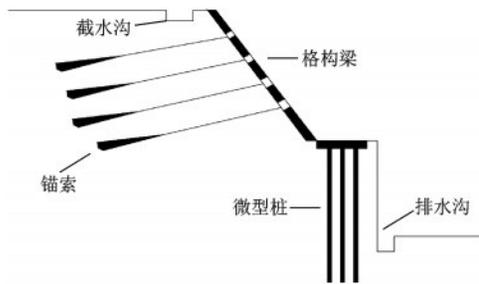


图8 组合型快速治理措施

Fig.8 Combined measures of treatment

3 特殊工程应急处置技术

3.1 堰塞坝应急处置技术

堰塞坝作为常见的滑坡次生灾害,通常由滑坡体或崩塌体等堆积阻塞河道后形成,堰塞坝物质组成的复杂性和几何形态的不确定性极大程度上增

加了溃坝风险^[39-40]。堰塞坝根据其成因通常可以分为滑坡型堰塞坝、崩塌型堰塞坝和泥石流型堰塞坝。

堰塞坝形成时间短,突发性强,蓄水后溃决危害大,需及时进行应急处置。常用应急处置方式为泄流、渗流控制、坝体加固等。有效降低堰塞湖水位、防止堰塞坝溃决是应急处置的首要任务(表4)。对于可自然留存或危险程度较小的堰塞坝,通常作留存处置,只需加强监测即可。

针对2014年云南昭通红石岩堰塞湖,应急管理部门基于天-空-地应急抢险监测方法采集数据,搭配机械开挖泄流槽、拆除调压井施工支洞检修门等应急抢险技术(图9),9天内完成应急抢险处置,成功化解险情。针对主汛期洪水溃坝风险,采用引水隧洞及库区连通泄洪等手段快速降低水位,于2020年将其改造为世界首座集防洪、供水、灌溉和发电等功能于一体的大型综合水利枢纽^[42]。

表4 不同成因类型堰塞坝的应急处置方法^[41]

Table 4 Emergency controlling method of different types of landslide dam^[41]

成因	特征及破坏方式	坝体特点	防渗或降低水位方法
滑坡型堰塞坝	以土石混合为主,物质松散,胶结不良,破坏方式为漫顶、潜蚀和管涌	中型,可自然过流 大型,难自然过流	拓宽过流断面 开挖泄流+渗流控制+坝体加固
崩塌型堰塞坝	以大块石、块石、碎石为主,结构松散,级配不良,破坏方式为渗流、漫顶、溃决	多大块石,渗流严重的坝体 蓄水量少、坝体稳定	机械泄流+爆破泄流+下游避险 黏土或注浆防渗+固堰成坝+抽水或倒虹吸降低水位
泥石流型堰塞坝	体积小、存留时间短、流动性强,破坏方式以淤积为主	可自然过流的淤积坝体 方量大,难过流坝体	机械清淤,或爆破清除漂浮物 开挖泄流渠或拓宽过流断面

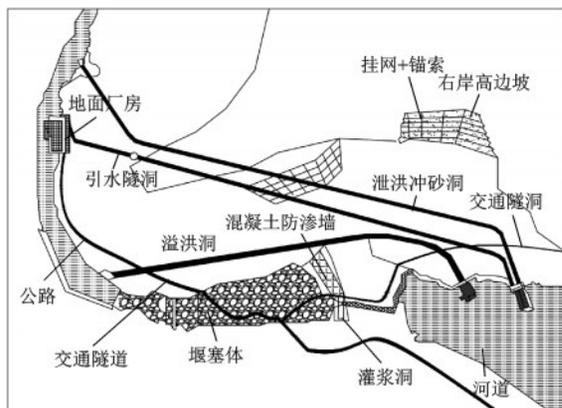


图9 红石岩堰塞湖处置平面透视^[42]

Fig.9 The perspective of Hongshiyuan treatment engineering^[42]

3.2 尾矿坝与排土场应急处置技术

尾矿坝与排土场是矿山生产的重要部分,作为体量庞大、长期性的人为堆积坡体,其稳定与否直接关系到矿山生产安全及下游居民生命财产安全。

大量尾矿堆积及内部储水导致坝体拥有较高的势能^[43],其中受调查的2233座尾矿坝中,稳定尾矿坝仅26.8%左右,近半数以上尾矿坝下游为居民活动区域,对人民生命财产安全有较大的威胁^[44]。

尾矿坝的处置通常采用闭库复垦、恢复生态或加高扩容等处理方式。尾矿坝处置过程面临诸多环境风险,其诱发因素与应急处置措施见表5。尾矿坝破坏的根本原因主要可归结为外部扰动和水的影

响,如雨季汛期来临前的排洪防渗、扩容过程中的坡体加固等(图10)。
排土场土体单一、形式简单,失稳模式与均质边坡类似,失稳因素主要为降雨与地震等,快速治理主要归纳为“上截中排下拦内导”^[47-48],利用截水沟、裂缝灌浆和渗流通道等技术解决降水下渗问题;采用坡率法、挡土墙加固和排土工艺改良等方法,解决因地震、构型设计、地基软化等因素导致的排土场失稳问题。

表 5 尾矿坝环境风险与应急治理措施^[45-46]

Table 5 Environmental risks and emergency treatment measures of tailing reservoir^[45-46]

风险类别	坝体滑塌、裂缝	漫顶	溃坝	渗漏污染
诱发因素	汛期、地震	排洪系统异常	坝体管涌、裂缝	防渗系统异常
应急治理措施	坝体加固,主要通过裂缝灌浆、分级模袋法、碎石桩或砂桩进行加固	清淤,疏通排洪系统	堆载预压法、换填法、振冲碎石桩法、排水固结法,深层喷浆搅拌法、真空预压排水法等	降低浸润线进行排渗:水平排渗孔法、水平垂直联合排渗法、辐射井法、盲沟盲井法、水板法、砂井法、轻型井点降水法、排水褥垫法等

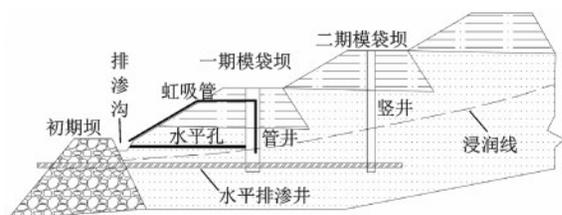


图 10 尾矿坝治理剖面^[47]

Fig.10 Profile of tailing dam treatment^[47]

4 应急监测预警技术

滑坡地质灾害应急处置阶段的监测主要通过设备或人工获得现场数据,而预警则是基于预警模型和判据进行数据整理、分析,并传递警示信息。当前滑坡地质灾害监测预警方法分为三类:(1)基于群测群防的专人巡查;(2)技术人员点式监测或测量仪器的全面性监测;(3)基于自动化监测设备,搭配具有数据记录与分析功能的系统平台与专家评测。

监测预警在灾前预防、灾中监测与灾后重建均起着重要作用,通过实时采集相关特征指标,分析滑坡时空演变规律,预测滑坡发展趋势,评价处置效果,为应急处治的动态调整提供依据,具备快速、有效、易布置等特点。

群测群防、专群结合与信息报送强化是应急监测预警的重要内容。基于传统物探监测^[14]、GNSS技术、无人机技术、物联网监测等早期识别、监测技术,人工智能、机器学习算法等大数据处理及专家综合评定的“设备-平台-专家”^[49]监测预警机制成为当前应急调查、监测预警的主流方法,可有效对灾害进行前期预防和识别、定期监测、现场勘查及灾后监控等工作。

4.1 长期性、大范围滑坡灾害早期识别与快速应急监测预警技术

需求牵引、问题导向、多学科交叉融合推动了

滑坡地质灾害快速监测预警技术和方法体系的蓬勃发展,特别是针对长期性、大范围滑坡地质灾害的早期识别与应急监测预警技术,如基于多技术协同应用的天-空-地一体化“三查”早期识别与监测预警体系(图 11)^[1],适用于大范围、连续、高位、高隐蔽性边坡的早期识别与滑坡灾害的应急监测预警。目前该监测预警体系已经在四川、贵州等地广泛应用,并取得了良好监测效果,如 2017 年 6 月 24 日的茂县高位滑坡的成功预警,为滑坡的快速治理争取了足够时间^[1]。

滑坡地质灾害的应急处置通常采用临时监测与长期监测结合的策略。此外,在中小型滑坡灾害的应急监测预警方面,基于 3S 技术的监测手段、边坡雷达(S-SAR)、无人机(UAV)多期影像^[50]或探测仪等便携式、临时性监测预警设备则具有突出优势^[51]。多技术融合的监测预警体系适用于正在变形、历史变形及潜在滑坡的识别与监测,但在突发性滑坡灾害监测预警方面存在局限性。

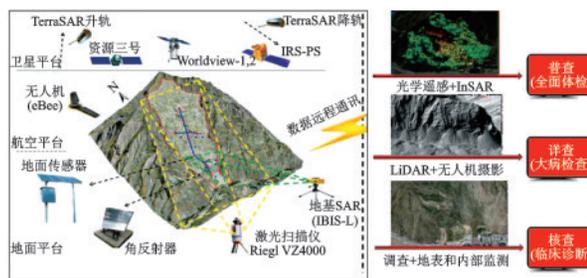


图 11 天-空-地一体化的“三查”监测预警体系^[1]

Fig.11 Integrated space-air-ground monitoring and warning system for early detection^[1]

4.2 突发性滑坡灾害识别与应急监测预警技术

突发性滑坡灾害,如高陡岩质边坡的瞬时崩滑,具有瞬时性、高破坏性等特点,且堆积松散容易形成二次滑坡灾害。基于动力学指标、静力学指标和环境变量指标,建立三位一体的边坡失稳动力学早期预警体系,通过引入固有振动频率、阻尼比等

动力学监测指标作为滑体与滑床分离前兆的主要识别指标,可实现对岩质边坡初期脆性破坏的有效监测预警^[52]。

通过微型监测设备点布置成面,形成区域性监测;采用基于边坡失稳动力学的快速监测与预警平台分析;通过与手机端、电脑端智能互联,实现分阶段分级预警的信息报送,形成“设备-平台-专家”协同工作的预警体系,目前已在黄藏寺大坝边坡、四川S211省道公路边坡、深圳大鹏新区边坡等监测预警中发挥作用,准确率达100%。

5 存在的主要问题和未来研究方向

国内外专家学者及工程技术人员从理论分析与工程应用的角度,对滑坡地质灾害应急处置技术进行了较为深入地研究,取得了一些成果,但仍然面临着艰巨的任务。

(1) 应急抢险处置技术研发

滑坡地质灾害应急处置技术主要为降水排水和轻型支挡,对于正在变形或人员、机械无法到达的滑坡,目前尚缺少行之有效的处置手段,只能采用紧急避险措施减少或规避灾害损失。因此,基于学科交叉融合开发新型应急抢险处置技术,如基于化学冷冻原理的微扰动快速处置技术、锚索发射远程处置技术等,将是滑坡灾害应急抢险工程未来的研究热点。

(2) 基于协同原理的应急处置技术规范编制

滑坡灾害应急处置技术联合使用时,其过程涉及岩土体、结构物和地下水之间的多场多相耦合作用,协同工作机制相当复杂^[53]。此外,部分新型应急处置技术措施仍处于半经验半理论阶段,缺少统一的行业技术标准或规范,导致其推广应用受到限制。因此,开展基于滑坡体-支挡结构-地下水等多场多相耦合作用的精细化机理研究及多方法协同工作效用分析,并以此制定严密、统一的技术标准和规范,是提升滑坡地质灾害应急处置能力的重要手段。

(3) 基于数理统计及模拟的时效分析与动态灾变控制研究

滑坡地质灾害从变形萌发、蠕变发育到崩滑的时间轨迹,使滑坡灾害的规模、变形趋势等得到精确预测、险情判断并采取对应处置措施,对滑坡灾害能防患于未然,搭配滑坡灾害监测预警。当前边

(滑)坡变形机理、稳定性分析^[54-56]研究相对完善,对真实边坡宏观变形迹象、稳定性动态灾变控制研究相对较少。因此,基于数理统计(大数据采集)与机理(模型试验、数值模拟或现场监测)的时效分析与灾变控制研究,是当下滑坡地质灾害稳定性分析的热点内容。

(4) 群测群防体系建设

我国虽已通过全国性地质灾害普查建立联通国家、省、市、县四级的监测预警体系,但整体上仍存在调查监测精度不足、灾害风险评估滞后、实时数据动态更新不及时和偏远地区通信不畅等问题。因此,统筹协调监测预警设备、技术指导力量和政府管控能力,形成集技防和人防于一体的群测群防、专群结合体系是提升滑坡灾害应急处置能力的有效途径。

(5) 滑坡地质灾害应急处置标准化建设

科学严谨、先进实用的滑坡地质灾害应急处置工程标准化建设是其广泛推广应用的先决条件,而当前应急处置还存在流程不够规范、从业人员素质参差不齐、科学研究和生产实践的有机衔接不够紧密、行业领域理论技术交流缺乏统一语言^[57]等问题。因此,关注滑坡灾害监测预警、应急处置到长期治理的全过程,构建简明实用、先进可靠的滑坡地质灾害应急处置流程的标准化体系,将是滑坡地质灾害应急处置质量控制的重点内容。

(6) 智能化应急处置体系建设

滑坡地质灾害应急处置应具有快速、精准的特点,但现行应急处置存在数据资源整合繁琐、数据处理模块分散、信息整合质量低下和应急预警响应迟滞等问题。因此,结合5G通信、BIM(建筑信息模型)、区块链信息共享、北斗卫星定位和导航、大数据与云计算等新兴技术,建立集滑坡地质灾害数据信息收集、风险动态评价、处置方案设计和综合效用评价于一体的智能化应急处置体系,将是防灾减灾救灾最具前景的研究内容。

6 结 语

(1) 滑坡地质灾害应急处置包括险情灾情的应急抢险处置和后期快速治理两方面,其关键之处在于根据滑坡特征,针对性地选择常规治理技术与轻型支挡结构组合形式。

(2) 我国滑坡地质灾害应急处置体系建设已初

见成效,但仍需精进不休,从加强防灾减灾意识、提高基层人员素质,到技术-理论-应用层面的创新与互馈,仍是当前亟需开展的重点工作。

参考文献:

- [1] 许强,董秀军,李为乐.基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):957-966.
Xu Q, Dong X J, Li W L. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966. (in Chinese)
- [2] Yin Y P, Cheng Y L, Liang J T, et al. Heavy-rainfall-induced catastrophic rockslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, after the Wenchuan M_s 8.0 earthquake[J]. Landslides, 2016, 13(1): 9-23.
- [3] Xu C, Tian Y Y, Zhou B G, et al. Landslide damage along Araniko highway and Pasang Lhamu highway and regional assessment of landslide hazard related to the Gorkha, Nepal earthquake of 25 April 2015[J]. Geoenvironmental Disasters, 2017, 4(1): 14.
- [4] Li H Y, Tan Y H, Li E B. Sensitive factors analysis of stability of Tiansan landslide at carla hydropower station [J]. Journal of Hohai University, 2012, 40(4): 420-425.
- [5] 吴树仁,王涛,石菊松,等.工程滑坡防治关键问题初论[J].地质通报,2013,32(12):1871-1880.
Wu Sh R, Wang T, Shi J S, et al. A review of engineering landslide prevention and control[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(12): 1871-1880. (in Chinese)
- [6] 李振江,孙少锐,宋京雷,等.连续暴雨状态下蜀土滑坡失稳机制分析及应急处置[J].河南科学,2016,34(7):1140-1147.
Li Zh J, Sun Sh R, Song J L, et al. The failure mechanism analysis and emergency disposal of Xiashu loess landslide under the condition of continuous rainstorm [J]. Henan Science, 2016, 34(7): 1140-1147. (in Chinese)
- [7] 刘传正.重大突发地质灾害应急处置的基本问题[J].自然灾害学报,2006,15(3):24-30.
Liu Ch Zh. Basic problem on emergency disposition of abrupt heavy geological disaster[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(3): 24-30. (in Chinese)
- [8] 杜丽丽.滑坡治理的充气截排水方法研究[D].杭州:浙江大学,2014.
Du L L. Research of intercepting groundwater with compressed air for landslide treatment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [9] 黄润秋.关于芦山地震地质灾害应急处置的建议[J].四川统一战线,2013(5):12.
Huang R Q. Suggestions on emergency disposal of Lushan earthquake geological disaster[J]. Sichuan United Front, 2013(5): 12. (in Chinese)
- [10] 陈兴泽,赵连锐,廖勇,等.大岗山水电站库区郑家坪变形体应急处置[J].四川水力发电,2019,38(2):103-106.
Chen X Z, Zhao L R, Liao Y, et al. Emergency treatment for Zhengjiaping deformation body in reservoir area of Dagangshan hydropower project[J]. Sichuan Water Power, 2019, 38(2): 103-106. (in Chinese)
- [11] 钱波,张凯,陈俊.一种边坡施工液氮冷凝锚固支护装置:中国,CN205669208U[P].2016-11-02.
Qian B, Zhang K, Chen J. The utility model relates to a slope construction liquid nitrogen condensation anchor supporting device: China, CN205669208U [P]. 2016-11-02. (in Chinese)
- [12] 刘汉龙,顾东明,丁选明,等.一种山体滑坡快速应急防治方法:中国,CN110468854A[P].2019-11-19.
Liu H L, Gu D M, Ding X M, et al. The invention relates to a quick emergency prevention and control method for landslides: China, CN110468854A [P]. 2019-11-19. (in Chinese)
- [13] 成永刚.滑坡的区域性分布规律与防治方案研究[D].成都:西南交通大学,2013.
Cheng Y G. Study on regional distribution discipline of landslides and prevention programme [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [14] 肖进.重大滑坡灾害应急处置理论与实践[D].成都:成都理工大学,2009.
Xiao J. Theory and practice of the treatment of vital landslide hazard[D]. Chengdu: Chengdu Univerisity of Technology, 2009. (in Chinese)
- [15] 孙书伟.微型桩结构加固边坡受力机制和设计计算理论研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2009.
Sun Sh W. Study on loaded mechanism and design calculation theory of micropile structures for slope stabilization[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2009. (in Chinese)
- [16] 张丹丹.微型组合抗滑桩的作用机制研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
Zhang D D. Mechanism of anti-sliding composite micropiles[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese)

- [17] 王庭勇. 微型抗滑桩组合结构模型试验及设计方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
Wang T Y. The study on model experiment and design method of the anti-sliding micro-pile with composite [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [18] 周德培, 王唤龙, 孙宏伟. 微型桩组合抗滑结构及其设计理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1353-1362.
Zhou D P, Wang H L, Sun H W. Micro-pile composite structure and its design theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1353-1362. (in Chinese)
- [19] 孙书伟, 陈冲, 王卫, 等. 微型桩组合结构加固边坡稳定性耦合分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(10): 3774-3781.
Sun Sh W, Chen Ch, Wang W, et al. Coupled stability analysis for slope reinforced by micropile composite structure [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(10): 3774-3781. (in Chinese)
- [20] 万驰. 基于BIM技术的微型抗滑桩群加固边坡设计方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Wan Ch. Design method of slope reinforced with micropiles group against landslide based on BIM Technology [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [21] Sun S W, Zhu B Z, Tan D S. Application and analysis of micropiles for reinforcing a expressway cutting slope [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(3): 6-10, 28.
- [22] 胡毅夫, 王庭勇, 马莉. 微型抗滑桩双排单桩与组合桩抗滑特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1499-1505.
Hu Y F, Wang T Y, Ma L. Research on anti-sliding characteristics of single double-row and composite anti-slide micropiles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1499-1505. (in Chinese)
- [23] 陈正, 梅岭, 梅国雄. 柔性微型桩水平承载力数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2219-2224.
Chen Zh, Mei L, Mei G X. Numerical simulation of lateral bearing capacity of flexible micropile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2219-2224. (in Chinese)
- [24] 年廷凯, 吴昊, 张彦君, 等. 基于协同工作原理的堆积型滑坡-微型抗滑桩群组合结构: 中国, CN107816049A [P]. 2018-03-20.
Nian T K, Wu H, Zhang Y J, et al. Based on the principle of cooperative work, the stacking type landslide - micro anti - slide pile group composite structure: China, CN107816049A [P]. 2018-03-20. (in Chinese)
- [25] 张智超, 陈育民. 微型桩-加筋土挡墙的模型试验和数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 987-996.
Zhang Zh Ch, Chen Y M. Model test and numerical analysis of micropile-MSE wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 987-996. (in Chinese)
- [26] 石世刚. 黄土滑坡中抗滑微型桩工作机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
Shi Sh G. Study on micropiles for loess landslide stabilization working mechanism [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015. (in Chinese)
- [27] 吴树仁, 宋军, 王涛, 等. 重大工程扰动区特大滑坡灾害综合防治理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Wu Sh R, Song J, Wang T, et al. Theory and technology of integrated prevention and control of catastrophic landslide in disturbed area of major engineering [M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [28] 向成. 边坡病害快速治理新结构体系及其适用性[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
Xiang Ch. New quick treatment system of slope failure and its applicability [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [29] 秦宇. 装配式格构梁护坡结构研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Qin Y. Research on slope protection structure of fabricated lattice beam [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [30] 许英姿, 唐辉明. 滑坡治理中格构锚固结构的解析解分析[J]. 地质科技情报, 2002(3): 89-93.
Xu Y Z, Tang H M. Analysis on analytic solution of lattice frame anchor structure of landslide control [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2002(3): 89-93. (in Chinese)
- [31] 武焕焕. 预应力锚杆(索)格构梁在边坡工程中的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
Wu H H. Study on the application of pre-stressed anchor (cable) with lattice beam in the slope project [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [32] 刘华. 预制混凝土格构锚固体体系的设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
Liu H. Study on the PC frame anchor system and the design method research [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)

- [33] 王富强. 新型复合式梯键抗滑结构研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
Wang F Q. Study on the new type of compound ladder-plug anti-slip structure[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [34] 孔德刚, 张世径, 玄超群, 等. 非开挖式抗滑桩快速治理山区公路滑坡[J]. 施工技术, 2018, 47(增4): 884-886.
Kong D G, Zhang Sh J, Xuan Ch Q, et al. Non-excavation anti-slide pile to quickly control the landslide of mountain roads[J]. Construction Technology, 2018, 47(Sup 4): 884-886. (in Chinese)
- [35] 朱凯, 段鸿川, 许文博, 等. 浅谈几种轻型支挡结构物的构造和适用条件[J]. 科技与企业, 2011(15): 155.
Zhu K, Duan H Ch, Xu W B, et al. A brief discussion on the structure and applicable conditions of several light retaining structures[J]. Technology & Business, 2011(15): 155. (in Chinese)
- [36] 杨广庆, 吕鹏, 张保俭, 等. 整体面板式土工格栅加筋土挡墙现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2077-2083.
Yang G Q, Lyu P, Zhang B J, et al. Research on geogrids reinforced soil retaining wall with concrete rigid face by field test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2077-2083. (in Chinese)
- [37] 胡荣华, 齐明柱, 余海忠, 等. 卸荷板挡墙的设计实践[J]. 铁道建筑, 2010(11): 87-90, 122.
Hu R H, Qi M Zh, Yu H Zh, et al. Design practice of unloading plate retaining wall[J]. Railway Engineering, 2010(11): 87-90, 122. (in Chinese)
- [38] 肖进. 杨柳埡滑坡应急处置工程实践[J]. 地质灾害与环境, 2011, 22(2): 65-70.
Xiao J. Engineering practice in the emergency treatment of Yangliuya landslide[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2011, 22(2): 65-70. (in Chinese)
- [39] 年廷凯, 吴昊, 陈光齐, 等. 堰塞坝稳定性评价方法及灾害链效应研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1796-1812.
Nian T K, Wu H, Chen G Q, et al. Research progress on stability evaluation method and disaster chain effect of landslide dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(8): 1796-1812. (in Chinese)
- [40] 殷跃平. 西藏波密贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. 水文地质工程地质, 2000(4): 8-11.
Yin Y P. Study on the characteristics and disaster mitigation of high-speed giant landslide in Bomiyigong, Xizang province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000(4): 8-11. (in Chinese)
- [41] 邓宏艳, 孔纪名, 王成龙. 不同成因类型堰塞湖的应急处置措施比较[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 505-510.
Deng H Y, Kong J M, Wang Ch L. The comparison of emergency treatment on dammed lakes caused by different types geologic hazards[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(4): 505-510. (in Chinese)
- [42] 张宗亮, 程凯, 杨再宏, 等. 红石岩堰塞坝应急处置与整治利用关键技术[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(2): 1-10, 25.
Zhang Z L, Cheng K, Yang Z H, et al. Key technology of emergency remedy and treatment for Hongshiyuan barriers lake dam[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2020, 6(2): 1-10, 25. (in Chinese)
- [43] 阮修莉. 尾矿库环境风险与应对措施[J]. 世界有色金属, 2019(1): 291-292.
Ruan X L. Environmental risk and countermeasure of tailings reservoir[J]. World Nonferrous Metals, 2019(1): 291-292. (in Chinese)
- [44] 李元奇, 曹磊芳. 尾矿库边坡失稳原因及处理措施[J]. 东北水利水电, 2019, 37(8): 23-24, 29.
Li Y Q, Cao L F. Instability reason and treatment measure of slope for tailing reservoir[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2019, 37(8): 23-24, 29. (in Chinese)
- [45] 曹进海, 胡军. 地震荷载下尾矿坝加固措施研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(10): 76-81.
Cao J H, Hu J. Research on strengthen measures of tailings dam under seismic load[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(10): 76-81. (in Chinese)
- [46] 徐嘉辰, 朱君星, 寿震宇, 等. 尾矿库闭库再利用工程关键技术探讨[J]. 现代矿业, 2017, 33(4): 173-177.
Xu J Ch, Zhu J X, Shou Zh Y, et al. Discussion of key technologies of reuse engineering of the tailing ponds after closing[J]. Modern Mining, 2017, 33(4): 173-177. (in Chinese)
- [47] 董翠兰, 季学培. 尾矿坝治理技术[J]. 世界地质, 2003(2): 172-175, 180.
Dong C L, Ji X P. Discussions on technologies for protection of tailing dams[J]. Global Geology, 2003(2): 172-175, 180. (in Chinese)
- [48] 栾婷婷. 露天矿排土场滑坡预警方法的研究及应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
Luan T T. Research and application on early-warning methods of waste dump landslide in open pit mine[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2015.

2015. (in Chinese)
- [49] 刘汉龙,马彦彬,仇文岗.大数据技术在地质灾害防治中的应用综述[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):710-722.
- Liu H L, Ma Y B, Zhang W G. State-of-the-art review of big data application in geo-hazard prevention and control[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021,41(4):710-722. (in Chinese)
- [50] 黄海宁,黄健,周春宏,等.无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用[J].水文地质工程地质,2019,46(6):149-155.
- Huang H N, Huang J, Zhou Ch H, et al. Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 149-155. (in Chinese)
- [51] 郭延辉,王国贤,李靖.一种便携式滑坡崩塌灾害应急监测装置:中国,CN209197745U[P].2019-08-02.
- Guo Y H, Wang G X, Li J. The utility model relates to a portable emergency monitoring device for landslide collapse disaster :China, CN209197745U[P]. 2019-08-02. (in Chinese)
- [52] 杜岩,谢谟文,蒋宇静,等.基于动力学监测指标的崩塌早期预警研究进展[J].工程科学学报,2019,41(4):427-435.
- Du Y, Xie M W, Jiang Y J, et al. Research progress on dynamic monitoring index for early warning of rock collapse[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 427-435. (in Chinese)
- [53] 年廷凯.桩-土-边坡相互作用数值分析及抗滑桩设计计算方法[M].北京:中国建材工业出版社,2014.
- Nian T K. A study on numerical analysis of pile-soil-slope interaction and design procedure of stabilizing piles against landslide[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2014. (in Chinese)
- [54] Chen L, Zhang W, Zheng Y, et al. Stability analysis and design charts for over-dip rock slope against bi-planar sliding[J]. Engineering Geology, 2020, doi: 10.1016/j.enggeo.2020.105732.
- [55] Wang Z, Zhang W, Gao X, et al. Stability analysis of soil slopes based on strain information [J]. Acta Geotechnica, 2020,15(1):1-14.
- [56] Wang L, Wu C, Tang L, et al. Efficient reliability analysis of earth dam slope stability using extreme gradient boosting method[J]. Acta Geotechnica, 2020, doi: 10.1007/s11440-020-00962-4.
- [57] 刘传正.地质灾害防治标准化建设的思考[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(3):1-5.
- Liu Ch Zh. Discussion on the standardization of science and technology in geological hazards prevention and control[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019,30(3): 1-5. (in Chinese)

(本文责编:池营营)