

FAST保护区地质灾害发育特征及形成机理与防治建议

翟龙象^{1,2}, 宋小庆^{1,2}, 朱博勤³, 王虎^{1,2}, 严召进^{*1,2}

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局111地质大队, 贵州 贵阳 550081;

2. 贵州地质工程勘察设计院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州射电天文台, 贵州 贵阳 550081)

摘要:FAST(中国天眼)保护区内地质灾害发育,目前共有在册地质灾害132处,属地质灾害高易发区域,区内地质灾害隐患已对FAST工程的安全运行构成威胁。本文以FAST保护区现有地质灾害为研究对象,采用实地调查、资料收集、数理统计等方法,对保护区内地质灾害的发育特征进行分析,建立地质灾害关联模型,研究区内地质灾害孕灾条件及影响因素之间的耦合关系,并对区内地质灾害成因机理进行分析研究,提出了防治措施及监测预警建议。FAST保护区滑坡地质灾害主要有“牵引式”、“推移式”两种破坏力学模式,其中小型滑坡多呈“牵引式”破坏,中型、大型滑坡多呈“推移式”破坏;区内崩塌危岩体的主要破坏模式有“倾倒式”、“坠落式”、“滑移式”。区内地质灾害主要诱发因素是强降雨和人类工程活动,因此,强降雨前后应做好地质灾害巡查防控,区内开展岩土工程活动前需做好科学评估和规划,避免人为引发地质灾害。

关键词:FAST保护区;地质灾害;发育特征;影响因素;形成机理;防治措施;监测预警

中图分类号:P642.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)05-0052-08

Characteristics of the development, formation mechanism and prevention suggestions of the geological disasters in FAST protected areas

ZHAI Longxiang^{1,2}, SONG Xiaoqing^{1,2}, ZHU Boqin³, WANG Hu^{1,2}, YAN Zhaojin^{*1,2}

(1. 111 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang Guizhou 550081, China;

2. Guizhou Geological Engineering Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang Guizhou 550081, China;

3. Guizhou Radio Observatory, Guiyang Guizhou 550025, China)

Abstract: Geological disasters are development in the FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope) protected area which is geological disasters prone area where 132 registered geological disasters exist. Hidden hazards of geological disasters in this area have posed threats to the safe operation of the FAST project. In this paper, the existing geological disasters in the FAST protected area are taken as the research objects, methods of field investigation, data collection and mathematical statistics are adopted to analyze the development characteristics of geological disasters in the protected area. The correlation model of geological disasters is established to study the coupling relationship between the disaster-breeding conditions and influencing factors of geological disasters, the formation mechanism is analyzed and studied, and the prevention and control measures and monitoring suggestions are also put forward. As a result, the landslides in FAST protected area are mainly divided into two mechanical failure modes, namely, “traction type” and “push type”. Small landslides are mostly “traction type”, and medium and large landslides are mostly “push type”. The main failure modes of dangerous rock mass in the area are “toppling”, “falling”

收稿日期:2023-05-21; 修回日期:2023-07-10 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.05.008

基金项目:贵州省科技厅科技支撑计划(编号:黔科合支撑[2020]4Y022号、黔科合支撑[2022]一般245)

第一作者:翟龙象,男,汉族,1986年生,工程师,硕士,主要从事地质灾害防治、自动化监测方面的工作,贵州省贵阳市观山湖区石林西路171号贵州地质科技园5号楼,545039812@qq.com。

通信作者:严召进,男,仡佬族,1973年生,副队长,高级工程师,主要从事水工环地质及地质测绘研究工作,贵州省贵阳市观山湖区石林西路171号贵州地质科技园5号楼,1017831147@qq.com。

引用格式:翟龙象,宋小庆,朱博勤,等.FAST保护区地质灾害发育特征及形成机理与防治建议[J].钻探工程,2023,50(5):52-59.

ZHAI Longxiang, SONG Xiaoqing, ZHU Boqin, et al. Characteristics of the development, formation mechanism and prevention suggestions of the geological disasters in FAST protected areas[J]. Drilling Engineering, 2023,50(5):52-59.

and "sliding". Heavy rainfall and human engineering activities are the main inducing factors of geological disasters in the area. therefore, geological disaster inspection and prevention should be carried out before and after heavy rainfall. Scientific assessment and planning should be made before carrying out geotechnical engineering activities to avoid man-made geological disasters.

Key words: FAST protected area; geological disaster; developmental characteristics; influencing factors; formation mechanism; prevention and control measures; monitoring and early warning

0 引言

FAST(中国天眼)保护区指以直径500 m射电望远镜台址为中心,半径30 km的无线电宁静区域。保护区内峰丛、洼地、落水洞、天坑群等喀斯特地貌发育,台址区地形起伏大,溶蚀峰林、大型岩堆、大型溶沟、溶槽、溶蚀裂隙密布,各种岩溶不良地质现象发育集中,地质环境条件极为复杂^[1]。保护区内喀斯特地貌的形成过程伴随着地质灾害的演化与发展,地质灾害是制约保护区内工程建设的关键因素之一^[2-3]。由于FAST工程对无线电静默及地形的特殊要求,决定了该工程无法“绕避”不良地质地带^[4]。FAST工程建设初期面临严重的崩塌、滑坡等地质灾害威胁^[5]。FAST工程建设期间,对台址区及进场道路排查出的200余处崩塌危岩体、滑坡等不良地质体,进行过系统治理^[4,6]。

地质灾害的孕育及发生是一个动态的过程,尤其是在喀斯特地貌峰丛洼地区域,因其地形高陡、切割强烈,具备良好的崩塌灾害孕灾环境^[7]。区内降雨丰沛植被较为发育,部分崩塌危岩体受树木遮挡排查难度较大,此类崩塌危岩分布位置高,具有隐蔽性强、突发性强的特点,排查、治理难度大^[1]。既有地质灾害,尤其是潜在高位、隐蔽性地质灾害已对FAST工程安全运行构成威胁,也影响到当地以“中国天眼”为核心的旅游业发展^[6]。对FAST保护区地质灾害的发育特征、形成机理进行研究,对防控地质灾害、保护FAST工程安全运行具有重要意义。

1 保护区地质环境条件

1.1 地形地貌

FAST保护区位于贵州高原山地向广西丘陵过渡的斜坡地带,总体地势北高南低^[1],地貌以峰丛洼地及峰丛槽谷为主,岩溶峰丛及岩溶槽谷高程变化悬殊,峰顶标高多在800~1200 m,峰洼相对高差300~500 m,局部达600~700 m。槽谷狭窄,坡面较陡峻,河谷深切,岩溶峰丘、洼地、落水洞极为发育,

地形起伏不平呈锯齿状。

1.2 气象与水文

FAST保护区属中亚热带季风气候区,年均降雨量1259 mm,5~10月为雨季,集中了全年降水量的75.16%,11月至次年4月份仅占全年降水量的24.84%。降水强度随季节变化,雨季降水多而集中,降水强度大。

保护区属珠江流域的红水河水系,地表河流有摆郎河、羡塘河、曹渡河、蒙江,区内岩溶地下河管道发育,属大、小井地下河系统。区内河流表现为典型的山区性河流特征,上游河谷开阔,水量小,水流平缓;中游河谷束放相间,水流湍急;下游河谷深切狭窄,水量大^[1]。

1.3 地层岩性及地质构造

FAST台址位于贵州省平塘县克度向斜轴部近东翼,轴部地层为三叠系,以轴部为核心两翼(向东、向西)分别出露二叠系和石炭系;保护区北侧自克度以北开始出露二叠系、石炭系、泥盆系,南侧自董当以南开始出露二叠系、石炭系。区内碳酸盐岩广泛分布,局部有砂岩、泥岩、页岩等地层出露,第四系零星分布、主要为残坡积红粘土、冲(洪)积砂砾层,厚度一般小于5 m,洼地底部以及斜坡地带有成层崩塌块石堆积层分布,厚度变化大。

保护区地处江南复合造山带——黔南拗陷区—都匀南北向隔槽式褶皱变形区,南侧局部跨江南复合造山带——右江裂谷—前陆盆地区—望漠北西向褶断带,横跨两处五级构造单元分区^[8]。主要褶皱有克度向斜、西关背斜、雅水背斜、砂厂背斜、董当向斜、沫阳背斜等。区内主要断裂有平塘—开花寨断裂带、惠水—边阳断裂带、罗甸—八茂断裂带,延伸长度35~98 km,属压扭性断裂,呈南北、北东走向;次一级断裂有董当断层、店塘断层、董架断层、腾子冲断层等,延伸长度1~20 km,走向近南北,以张性正断层为主,其中董当断层直接贯穿FAST台址大窝凼

洼地,呈南北向展布。

2 地质灾害发育特征

2.1 地质灾害类型与规模

FAST保护区内主要发育崩塌、滑坡、不稳定斜坡3种地质灾害类型,有现状地质灾害132处。其中,崩塌94处,占灾害总数的71%;滑坡31处,占灾害总数的24%;不稳定斜坡7处,占灾害总数的5%。区内地质灾害以崩塌为主。其中,大型12处,占灾害总数的9.1%,中型10处,占灾害总数的7.6%,小型110处,占灾害总数的83.3%。区内地质灾害规模以小型为主。详见表1、图1。

表1 FAST保护区地质灾害发育类型、数量及规模统计

Table 1 development type, quantity and scale of geological disasters in FAST protected area

类 型	数量/处	规 模		
		大型	中型	小型
滑坡	31	2	1	28
崩塌	94	10	16	77
不稳定斜坡	7	0	2	5
合计	132	1	21	110

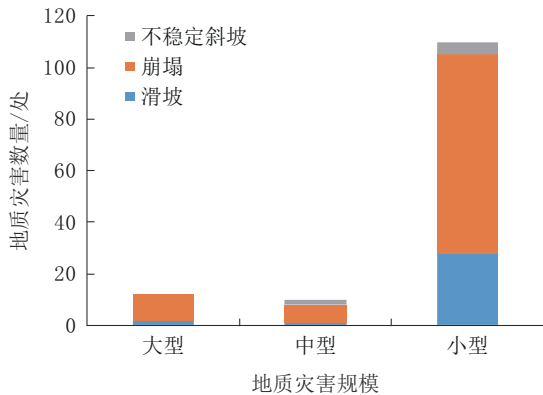


图1 FAST保护区地质灾害类型及规模直方图

Fig.1 Type and scale histogram of geological disasters in FAST Protected area

2.2 地质灾害分布

地质灾害的发育类型、密度及空间分布与地层岩性、地形地貌关系密切^[9-12]。FAST保护区内崩塌地质灾害主要分布于中部及北西侧的碳酸盐岩出露区域,地形切割深度较大,整体呈片状散点式分布,局部沿构造呈带状集中分布,分布位置较高;滑坡、不稳定斜坡地质灾害主要分布于南侧、西侧软质岩

类出露区域,地形起伏较小,呈散点状分布,主要沿槽谷冲沟及河流两岸分布,分布位置较低(见图2)。

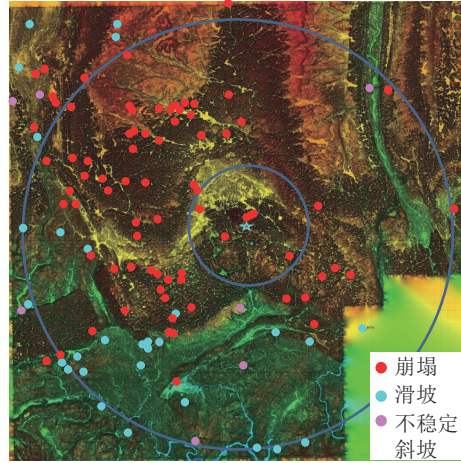


图2 FAST保护区地质灾害分布

Fig.2 Geological disaster distribution map of FAST Protected area

2.3 地质灾害与断裂构造之间的关系

FAST保护区内地质灾害与断裂构造有关联,如图3所示。有9处滑坡分布在断层及其影响带上,占滑坡总数的29%;有46处崩塌分布在断层及其影响带上,占崩塌总数的48.9%;有2处不稳定斜坡分布在断层及其影响带上,占不稳定斜坡总数的28.6%。断层对区内地质灾害的发育及分布有影响,其中又以崩塌地质灾害发育与断层关系最为密切,受断裂构造影响,断裂带及两侧影响区域内节理裂隙发育,岩体较为破碎,更容易受到风化、侵蚀,从而在地形上形成深大沟槽,沟槽两侧容易孕育崩塌、滑坡等地质灾害。

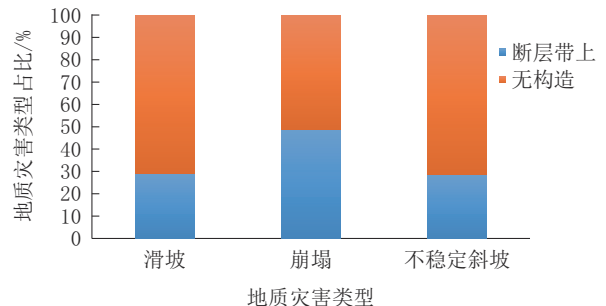


图3 FAST保护区地质灾害发育与断层关系

Fig.3 Relationship between geological disaster development and faultage in FAST Protected area

2.4 地质灾害发育与地层岩性之间的关系

FAST保护区内地质灾害发育类型与地层岩性之间有密切关联,所有崩塌地质灾害均发育在碳酸盐岩为主的地层中,有73处发育在以灰岩为主的地层中,有21处发育在以白云岩为主的地层中;有27处滑坡、5处不稳定斜坡地质灾害发育在以泥岩、砂岩、粘土岩为主的地层中,分别占滑坡、不稳定斜坡地质灾害总数的87.1%和71.4%。如图4所示,地层岩性对区内地质灾害发育类型控制作用明显。地层岩性控制灾害类型作用机制是灰岩、白云岩属硬质岩类,其自身坚硬抗风化能力强,与硬质岩相比软质岩类抗风化能力较弱,更容易受到风化侵蚀,软硬相间或上硬下软的地层组合在地质演化过程中容易形成高陡斜坡^[9-10],陡斜坡是发生崩塌地质灾害的必要条件^[13-14]。泥岩、砂岩、粘土岩等属软质岩类,其岩质较软,抗风化能力弱,容易受到风化侵蚀,不容易形成高陡的斜坡,在风化、降雨、河流侵蚀等地质营力作用下孕育滑坡、不稳定斜坡等地质灾害。

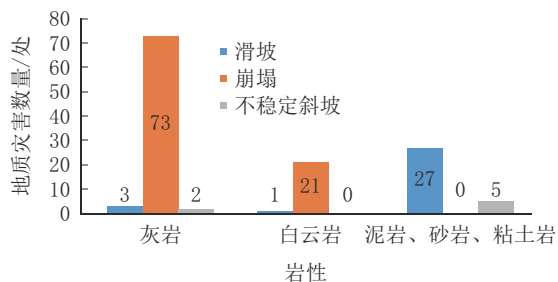


图4 FAST保护区地质灾害发育与岩性关系

Fig.4 Relationship between geological disaster development and lithology in FAST Protected area

2.5 地质灾害发育与地形坡度之间的关系

FAST保护区内滑坡不稳定斜坡地质灾害主要发育在 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的斜坡内,分别占其总数的97%和100%;崩塌地质灾害主要发育在 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 的斜坡内,占其总数的94.7%。如图5所示,地形坡度直接控制地质灾害发育类型,崩塌地质灾害一般发育在大于 45° 的岩质斜坡中,滑坡、不稳定斜坡一般发育在小于 45° 的岩土混合斜坡中。

2.6 地质灾害发育与岩层倾角之间的关系

FAST保护区内有86处崩塌地质灾害发生在岩层倾角 30° 以下的地层中,占区内崩塌总数的91.5%;有20处滑坡地质灾害发生在倾角 $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 的岩层中,占区内滑坡地质灾害总数的77.4%;7处

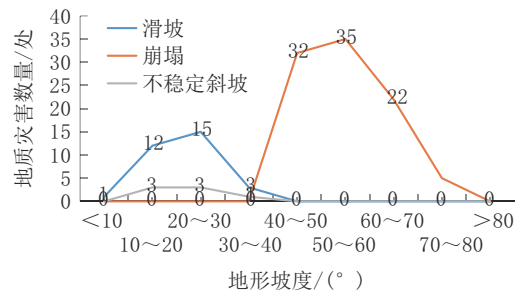


图5 FAST保护区地质灾害发育与地形坡度关系

Fig.5 Relationship between geological disaster development and topographic slope in FAST Protected area

不稳定斜坡地质灾害均发生在 $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 的岩层中。区内地质灾害发育数量与岩层倾角有关联性,如图6所示。缓倾岩层容易孕育崩塌地质灾害,与岩体结构面发育与应力分布有关,碳酸盐岩一般发育两组垂直岩层面的优势节理面,在缓倾岩层中节理面容易拉应力集中发展成卸荷裂隙,从而形成崩塌地质灾害; $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 的岩层更有利于滑坡和不稳定斜坡的发育,因为一般岩体软弱结构面的内摩擦角介于 $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间,岩层倾角大于软弱面内摩擦角的斜坡不稳定会很快失稳消失,岩层倾角小于内摩擦角的斜坡属稳定结构不容形成滑坡。因此,岩层倾角与软弱结构面内摩擦角接近的斜坡更容易因外界因素干扰,打破坡体原有平衡状态,孕育滑坡地质灾害。

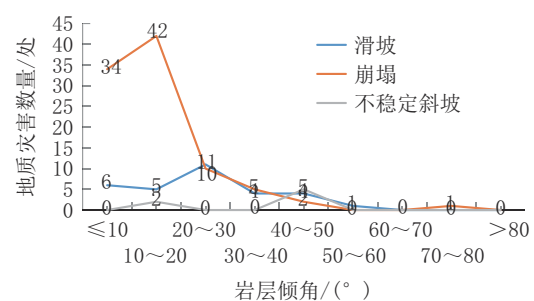


图6 FAST保护区地质灾害发育与岩层倾角关系

Fig.6 Relationship between geological disaster development and strata dip angle in FAST Protected area

2.7 地质灾害发育与高程之间的关系

FAST保护区发育在海拔800 m以上区域的崩塌有88处,占区内崩塌地质灾害总数的94%,发生在海拔800 m以下区域的滑坡有19处,占滑坡总数的61.3%。海拔高程大小主要与地形地貌相关,地

形地貌又是控制地灾发育类型的重要因素,区内平均海拔高度在800 m左右。高海拔区域多是碳酸岩盐分布区,河谷深切,坡面陡峻,主要发育崩塌地质

灾害;低海拔区域多是泥岩、砂岩、粘土岩等软质岩类分布区域,地形坡度较缓,主要发育滑坡、不稳定斜坡地质灾害。如图7所示。

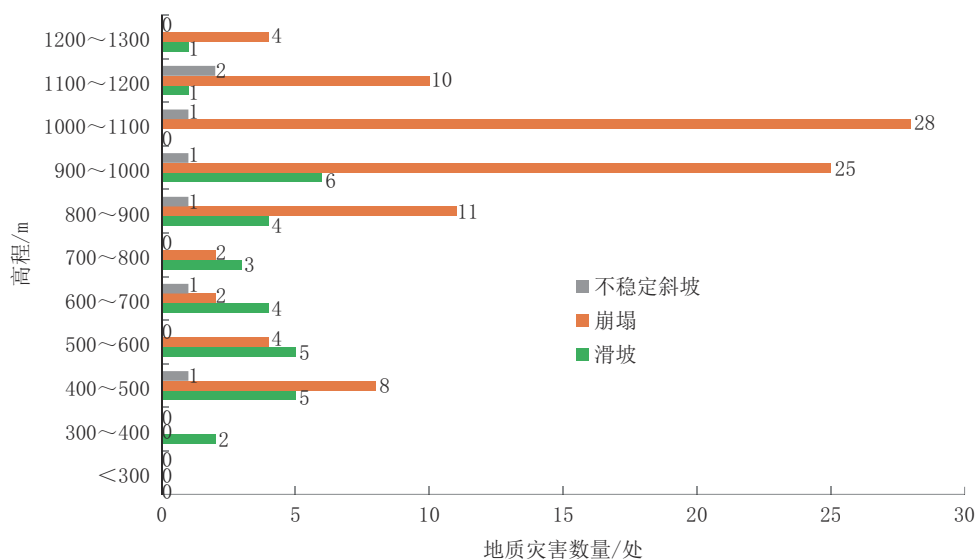


图7 FAST保护区地质灾害发育与高程关系

Fig7 Relationship between geological disaster development and elevation in FAST Protected area

3 地质灾害成因机理与防治建议

3.1 地质灾害关联模型

地质灾害的发育类型及规模主要受地层结构、地形地貌、地下水等孕灾条件控制。降雨、融雪、人类工程活动、地震等是触发或诱发地质灾害的常见影响因素^[15]。孕灾条件与影响因素之间的耦合关系控制着地质灾害的发育类型、规模及发生时间^[16]。建立地质灾害孕灾条件、影响因素关联模型,深入剖析其在孕育地质灾害过程中的关联程度及相互作用关系,是准确认识地质灾害形成机理的有效途径^[17]。

地质灾害形成受内动力地质作用、易滑地质条件、外动力作用及工程扰动等因素相互影响。内动力地质作用包含构造运动、活动断裂、地震等因素;易滑地质条件包含地形地貌、地层结构、水文地质等因素;外动力作用及工程扰动包含降雨、融雪、工程扰动等因素。其耦合关系是内动力地质作用控制易滑地质条件与外动力作用相互影响,可直接触发地质灾害;易滑地质条件受内动力地质作用控制,受外动力作用及工程活动扰动,孕育地质灾害;外动力作用及工程扰动诱发地质灾害^[18-21]。地质灾害孕灾条

件、影响因素耦合关系关联模型如图8所示。根据关联模型分析,FAST保护区内地质灾害的主要诱发因素是人类工程活动和强降雨。

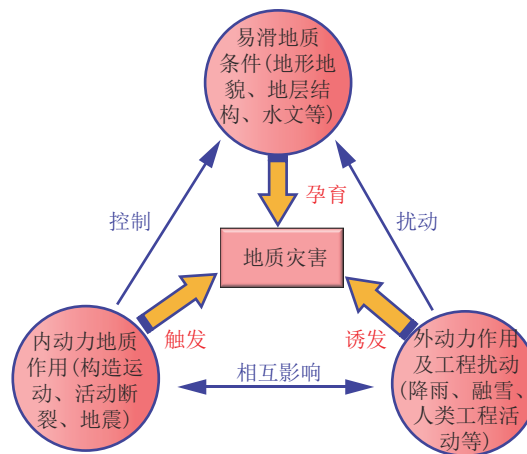


图8 地质灾害影响因素关联模型

Fig.8 Correlation model of influencing factors of geological disasters

3.2 地质灾害成因机理

3.2.1 滑坡成因机理

滑坡的形成条件是存在有利地形地貌(如切割

较深的沟谷、河流岸坡或具有一定坡度的斜坡地形)为滑坡发育提供临空条件;存在易滑地层结构(如较厚的覆盖层,平行坡面的基覆界面,顺向含软弱夹层的岩质边坡或岩土混合边坡)为滑坡产生提供易滑界面;雨水及坡面水流深入滑坡体起软化和潜蚀作用,长期的渗流使易滑界面不断被软化,强度显著降低,形成软弱层或面,是滑坡形成的诱发因素^[7]。强降雨的入渗对滑坡的产生起着催化作用,其不但使滑体饱和容重增加,并且水的浮托作用导致滑体有效应力降低,抗滑力减小,在渗流力、重力作用下加速滑坡的发生。在相对高差较小,坡度下陡上缓的凸形斜坡上,其前缘更容易应力集中,先产生变形滑动,进而牵引后部滑体滑动,形成“牵引式”滑坡;在相对高差较大,上陡下缓的凹形斜坡,斜坡的上部更容易形成应力集中,先产生破坏变形,进而推动前部滑体滑动,形成“推移式”滑坡。

FAST保护区内滑坡的演化过程复杂,每处滑坡形成的地质环境条件有其独特性,也存在共性特征,区内滑坡滑面的形成及贯穿均呈现出累进破坏特征,小型滑坡,滑面主要为基覆界面,其破坏力学模式主要为“牵引式”;中型、大型滑坡滑面主要为层间软弱面,其破坏力学模式主要为“推移式”。区内滑坡地质灾害的主要诱发因素是人类工程活动和强降雨。

3.2.2 崩塌成因机理

FAST保护区内的崩塌地质灾害主要发生在溶蚀洼地、峰丛槽谷等喀斯特地貌分布区域,崩塌危岩体多发育于陡崖面或其顶部。其形成机理:陡崖岩体在卸荷作用下,其临空面附近主应力迹线发生偏转,表层陡崖岩体内产生应力集中带,在临空面下部附近形成剪应力增高带,从而产生平行坡面的拉裂面;崖顶附近容易形成张应力集中带,岩体容易被沿竖向节理拉裂,形成与坡面近似平行的拉裂面。在长期雨侵蚀与卸荷作用下,岩体竖向裂隙进一步扩展,逐渐形成陡崖卸荷裂隙带。陡崖卸荷裂隙带的形成为陡崖岩体进入时效变形破坏创造条件^[7],受长期溶蚀、风化等作用,陡倾裂隙进一步发展,最终使陡崖岩体与母岩分离形成崩塌危岩体。在降雨、植物根劈、爆破震动及重力作用下,危岩体的受力平衡被打破,进而脱离母岩产生崩塌地质灾害。

根据统计分析,FAST保护区崩塌危岩体的主要变形破坏模式有“倾倒式”、“坠落式”、“推移式”,

其主要诱发因素是人类工程活动和强降雨。

3.3 地质灾害防治措施建议

FAST保护区内各处地质灾害因其孕灾环境、发育规模、成因机理、破坏模式等的不同均有其独特性。因此,建议工程技术人员开展地质灾害防治工作时,应在充分认识地质灾害发育特征基础上,深入分析其成因机理及可能的变形破坏模式,科学计算其稳定性,采用针对性的治理措施进行防治。除搬迁避让外常见的地质灾害防控措施有工程治理及监测预警。

3.3.1 工程治理

以FAST工程台址区崩塌地质灾害综合治理工程为例,该工程采用了“清理、支撑、锚固、防护、拦截、封填、灌浆、抗滑桩、排水”等综合治理措施,对台址区排查出的危岩及崩塌堆积体进行了有效治理^[1]。各种治理措施的适用性如下:

(1)清除:对陡崖带上规模较小危险性较大的浮石、松动的块石可采用清除方式,一劳永逸。

(2)支撑:对于鹰嘴岩状体积较大的危岩体,可考虑采用钢筋混凝土支撑。

(3)锚固:对体积大不易清除,裂隙较发育的危岩体可以用锚杆(索)将其锚固在稳定的岩体上。

(4)防护:对结构较为破碎,容易在风化侵蚀作用下发生小规模掉块的危岩带,可考虑在危岩带区域安装主动防护网进行防护,或挂网喷浆对易受风化侵蚀坡面进行封闭防护。

(5)拦截:对坡面具备条件的危岩带,可考虑采用落石槽或被动防护网进行拦截。

(6)封填:对于基座存在凹岩腔的危岩体,可采用混凝土将凹岩腔进行封填。

(7)灌浆:用水泥砂浆等胶结材料将危岩体后缘裂隙进行封闭,防止雨水进入,抑制裂隙进一步扩展。

(8)抗滑桩:对体量较大的崩塌堆积体,可以采用抗滑桩支挡。

(9)排水:在危岩区或崩塌堆积体内外设置截、排水系统。

在实际工程应用中,应综合比选各种治理方式的优劣及适用性,对于一种处理方式不能有效解决的问题,可以考虑采用多种措施综合应用^[6]。

3.3.2 监测预警

地质灾害监测预警是防控地质灾害、降低地质

灾害风险及损失的一种有效手段,具有投资规模小、见效快、可长期实施等优点。通过专业监测可以及时掌握地质灾害动态发展规律及变形特征,实现地质灾害的实时预警预报,达到防灾减灾的目的^[22]。地质灾害监测又可分为“群测群防”和“专业监测”两种形式,对于FAST保护区内成因机理简单、稳定性较好、危害性较小的地质灾害建议采用“群测群防”监测即可;对于成因机理复杂、稳定性较差、危害性较大的地质灾害点建议采用“专业监测+群测群防”进行监测。FAST保护区内的地质灾害在未纳入治理范围前均建议开展地质灾害监测预警工作。

4 结论

(1)FAST保护区滑坡地质灾害主要有“牵引式”、“推移式”两种力学破坏模式,其中小型滑坡多呈“牵引式”破坏,中、大型滑坡多呈“推移式”破坏。

崩塌危岩体的主要破坏模式有“倾倒式”、“坠落式”、“滑移式”。

(2)FAST保护区内地质灾害成因机理、破坏模式复杂多变,各处地质灾害均有其独特性。区内地质灾害防治工作应根据地质灾害特点,因地制宜且有针对性的采取措施。同时,地质灾害防治方案不应是单一的,应是多种防治措施的有效组合。

(3)FAST保护区内地质灾害主要诱发因素是强降雨和人类工程活动,因此,强降雨期间或雨后是地质灾害高发期,强降雨前后应做好地质灾害巡查防控,加强监测。另外,区内开展岩土工程活动前需做好科学评估和规划,避免人为引发地质灾害。

参考文献(References):

- [1] 朱博勤,严召进,白文胜,等.FAST工程勘察技术理论与实践[M].武汉:湖北科学技术出版社,2021.
ZHU Boqin, YAN Zhaojin, BAI Wensheng, et al. Theory and Practice of FAST Engineering Survey Technology [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2021.
- [2] 南仁东.500m球反射面射电望远镜FAST[J].中国科学G辑, 2005,35(5):449-466.
NAN Rendong. 500m spherical radio telescope FAST [J]. Science in China Ser G., 2005,35(5):449-466.
- [3] 陈婷.贵州省高位隐蔽性地质灾害特征及防治措施探究[J].冶金与材料,2020(5):62.
CHEN Xu. Probe into the Characteristics and prevention measures of hidden geological hazards in high-level areas in Guizhou Province [J]. Metallurgy and Materials, 2020(5):62.

- [4] 沈志平,孙洪,吴斌,等.岩溶洼地地区典型地质灾害与防治对策建议[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):137-144.
SHEN Zhiping, SUN Hong, WU Bin, et al. Study on typical geologic hazard in karst depressions and its countermeasures [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2):137-144.
- [5] 杨志刚.FAST台址岩土工程危岩与崩塌堆积体专项勘察报告[R].贵阳:贵州地质工程勘察设计院,2010.
YANG Zhigang. Special investigation report on dangerous rock and collapse accumulation body of geotechnical engineering at FAST astronomical site [R]. Guiyang: Guizhou Institute of Geological Engineering Investigation and Design, 2010.
- [6] 余永康,李振庆.FAST工程台址区危岩综合治理技术及应用[J].科学技术创新,2019(7):83-85.
YU Yongkang, LI Zhenqing. Comprehensive treatment technology and application of dangerous rock in FAST astronomical site [J]. Science and Technology Innovation, 2019(7):83-85.
- [7] 黄青能.滑坡、崩塌和危岩地质灾害的发育特征及形成机制[J].中国资源综合利用,2020,38(7):158-165.
HUANG Qingneng. Development characteristics and formation mechanism of landslides, collapses and dangerous rock geological disasters [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020,38(7):158-165.
- [8] 戴传固,王雪华,陈建书,等.中国区域地质志·贵州志[M].北京:地质出版社,2013.
DAI Chuangu, WANG Xuehua, CHEN Jianshu. Editorial Board of the Regional Geology of China, Guizhou Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [9] 白永健,铁永波,孟铭杰,等.川西地区地质灾害发育特征与时空分布规律[J].沉积与特提斯地质,2022,42(4):666-674.
BAI Yongjian, TIE Yongbo, MENG Mingjie, et al. Characteristics and temporal-spatial distribution of geohazards in western Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(4):666-674.
- [10] 铁永波,张宪政,龚凌枫,等.西南山区典型地质灾害链成灾模式研究[J].地质力学学报,2022,28(6):1071-1080.
TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, GONG Lingfeng, et al. Research on the pattern of typical geohazard chains in the southwest mountainous region, China [J]. Journal of Geomechanics, 2022,28(6):1071-1080.
- [11] 吴瑞安,郭长宝,杜宇本,等.川藏铁路加查—朗县段地质灾害发育特征研究[J].现代地质,2017,31(5):956-964.
WU Ruian, GUO Changbao, DU Yuben, et al. Research on geohazard developing characteristics in Jiacha to Langxian section of Sichuan-Tibet Railway [J]. Geoscience, 2017, 31(5):956-964.
- [12] 闫金凯,马娟,冯春.FAST台址巨石混合体边坡开挖稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2012,23(2):25-29.
YAN Jinkai, MA Juan, FENG Chun. Stability analysis of

- large rock mixture slope under excavation in FAST location [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2): 25-29.
- [13] 邓珊珊, 陈洪凯, 游来凤. 喀斯特山区危岩崩塌形成机制研究——以三峡库区巫溪海螺湾危岩为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012, 29(6): 35-39.
DENG Shanshan, CHEN Hongkai, YOU laifeng. Developing mechanics for perilous in karst area: Taking the Hailuo bay in the Three Gorges as an example[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2012, 29(6): 35-39.
- [14] 王林峰, 唐红梅, 陈洪凯. 陡崖上群发性危岩崩塌机理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(6): 1-5.
WANG Linfeng, TANG Hongmei, CHEN Hongkai. Research on the mechanism of multiple rocks on the cliff collapse [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(6): 1-5.
- [15] 王运生, 程万强, 刘江伟. 川藏铁路廊道泸定段地质灾害孕育过程及成灾机制[J]. 地球科学, 2022, 47(3): 950-958.
WANG Yunsheng, CHENG Wanqiang, LIU Jiangwei. Forming process and mechanisms of geo-hazards in Luding section of the Sichuan-Tibet Railway [J]. Earth Science, 2022, 47(3): 950-958.
- [16] 李芳, 梅红波, 王伟森, 等. 降雨诱发的地质灾害气象风险预警模型: 以云南省红河州监测示范区为例[J]. 地球科学, 2017, 42(9): 1637-1646.
LI Fang, MEI Hongbo, WANG Weisen, et al. Rainfall-induced meteorological early warning of geo-hazards model: Application to the monitoring demonstration area in Honghe prefecture, Yunnan Province [J]. Earth Science, 2017, 42(9): 1637-1646.
- [17] 李海如. 福建平和县西环路滑坡防治工程勘察实践与稳定性分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(12): 72-78.
LI Hairu. Site investigation and stability analysis for landslide control along Xihuan Road, Pinghe County, Fujian Province [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(12): 72-78.
- [18] 张田田, 杨为民, 万飞鹏. 浑河断裂带地质灾害发育特征及其成因机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(1), 149-161.
ZHANG Tiantian, YANG Weimin, WAN Feipeng. Characteristics and formation mechanism of geohazards in Hunhe Fault Zone [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(1): 149-161.
- [19] 李洪梁, 高波, 张佳佳, 等. 内外动力地质作用耦合的崩塌形成机理研究: 以藏东昌都地区上三叠统石灰石矿山采场崩塌为例[J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 995-1011.
LI Hongliang, GAO Bo, ZHANG Jiajia, et al. Mechanism of rock fall coupled with endogenic and exogenic geological processes: A case study in the upper Triassic Limestone mines in the Qamdo area, eastern Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 995-1011.
- [20] 叶振南, 杨强, 李强, 等. 燕子河流域地质灾害发育特征与危险性评价[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 145-151.
YE Zhennan, YANG Qiang, LI Qiang, et al. Landslide characteristics and hazard assessment in Yanzi River Basin [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2020, 39(2): 145-151.
- [21] 崔华丽, 杨东旭, 杨栋, 等. 狭陡型泥石流成灾特征与防治对策研究——以阿坝州金川县刘家沟泥石流为例[J]. 钻探工程, 2022, 49(6): 122-129.
CUI Huali, YANG Dongxu, YANG Dong, et al. Disaster characteristics and prevention measures of narrow-steep debris flow—A case study of Liujia gully in Jinchuan County, Aba Prefecture, Sichuan Province [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 122-129.
- [22] 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 Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. 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.

(编辑 荐华)