

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.02.22

岩溶洼地地区典型地质灾害与防治对策建议

沈志平^{1,2}, 孙 洪¹, 吴 斌^{1,2}, 王 鸿^{1,2}, 付君宜^{1,2}

- (1. 贵州正业工程技术投资有限公司, 贵州 贵阳 550003;
2. 贵州省岩溶地基工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550003)

摘要: FAST 台址位于岩溶洼地内,地质环境复杂,地质灾害密布。本文结合 FAST 工程治理中的 128 处典型地质灾害,在分析其成因机制、破坏模式及稳定状态的基础上,提出了包括清除、锚固、支挡、支撑、拦截及裂隙封闭等一种或几种相结合的针对性的防治措施,成功解决了岩溶洼地复杂的地质灾害治理难题,确保了 FAST 工程的安全运行,为岩溶地区复杂环境下的地质灾害治理提供了参考和借鉴。

关键词: 岩溶洼地;地质灾害;防治措施

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)02-0137-08

Study on typical geologic hazard in karst depressions and its countermeasures

SHEN Zhiping^{1,2}, SUN Hong^{1,2}, WU Bin^{1,2}, WANG Hong^{1,2}, FU Junyi^{1,2}

- (1. Zhengye Engineering & Investment Incorporation Limited, Guiyang, Guizhou 550003, China;
2. Guizhou Karst Foundation Engineering Technology Research Center, Guiyang, Guizhou 550003, China)

Abstract: The FAST site is in the Karst depressions with complex geological environment and geological disasters. In this paper, combining with the 128 typical geological disaster of the FAST project, it had proposed the combination of one or several specific protective measures though analyzing the cause, failure mode and stable state, which had included clear, anchoring, retaining, support, intercept and protection, fracture closed, etc. The Karst depressions complex geological disaster management problems had been successfully solved, ensuring the safe operation of the FAST project, and providing reference for geological disaster governance of complex environment in Karst regions.

Keywords: karst depressions; geological disasters; prevention and control measures

0 引言

中国科学院国家天文台 500 m 口径球面射电望远镜工程 (Five hundred meters Aperture Spherical Telescope, 简称 FAST) 是一个利用天然岩溶洼地作为望远镜台址的国家天文台“天字号”工程,位于贵州省黔南克度镇大窝凼洼地中^[1-2]。整个基地南北长约 1000 m,东西宽约 700 m,建成后拥有 30 个标准足球

场大的接收面积。FAST 作为世界最大的单口径射电望远镜,建成后将在未来 20 ~ 30 年保持国际领先地位。

然而,由于 FAST 台址位于岩溶洼地内,场区地形地貌复杂,峰洼之间高差大,洼地不良地质作用强发育,四周遍布危岩、崩塌堆积体和岩溶裂隙。再加上区内危岩大多分布于地形坡度大于 45° 的陡崖地段,一旦发生地质灾害,将会对望远镜设备带来严重的甚至

收稿日期: 2015-06-19; 修订日期: 2016-01-17

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合 SY 字(2014)3086)

第一作者: 沈志平(1960-)男,研究员,从事岩土工程、地质工程方面的技术和管理工作。E-mail: 290992077@qq.com

是致命的破坏。因此,能否做好 FAST 工程的地质灾害治理工作,将直接影响到工程的工期与投入,甚至关系到工程的成与败。

一般情况下,工程人员在遇到类似上述复杂的岩土工程难题时,通常采取“避让”的策略,场地类别划分为不适宜建筑场地,以从根本上避免后期复杂的岩土工程治理。因此,国内目前并无成熟的类似工程环境下的标准、规范及经验,岩溶洼地独特的地质条件决定了 FAST 地质灾害治理是一个前所未有的难题。鉴于此,本文针对岩溶洼地存在的工程地质灾害问题展开了详细的分析和讨论,提出了具体的具有针对性的防治对策,成功的应用于 FAST 工程一期的开挖建设,取得了较好的实用效果。本文旨在抛砖引玉,希望能为类似复杂环境下的岩溶洼地工程的开发建设提供行业经验。

1 地质灾害环境及灾害类型

1.1 地形地貌

场地总体位于贵州高原向广西丘陵过渡的斜坡地带,地势总体上北高南低,区域内碳酸盐岩广泛分布,岩溶峰丘、洼地、落水洞极为发育,地形起伏不平呈锯齿状。洼地四周共有 5 个较大山峰,最高峰位于洼地南东侧,峰顶高程 1201.2 m,地形最大高差 360.3 m。原始地貌图见图 1。

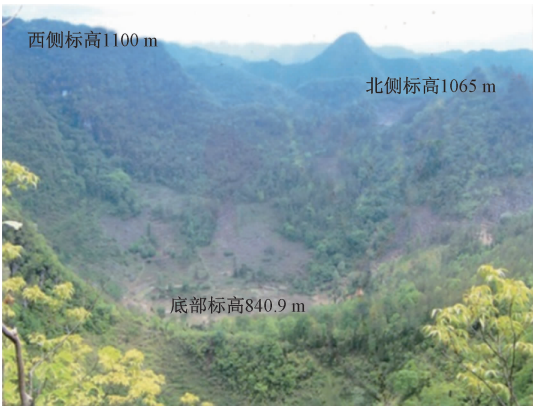


图 1 FAST 工程原始地貌图

Fig.1 Original relief map of FAST

1.2 场地地层

场地为 U 字型岩溶洼地,地层岩性由粘土、崩塌块石堆积体、场地基岩岩性分别为三叠系中统凉水井组上、中、下三段,即 T_2l^1 白云质灰岩、 T_2l^2 含泥灰岩和 T_2l^3 白云质灰岩。

粘土仅分布于洼地底部,厚度一般 3 ~ 5 m;崩塌块石堆积体分布于斜坡地带及下伏于洼地底部粘土层

之下,厚度一般 5 ~ 50 m,平均约 30 m,浅表未胶结,中下部半胶结、胶结为主,均匀性差; T_2l 白云质灰岩、含泥灰岩出露于洼地上部陡坡地段,中至厚层状,属较软至较硬岩,岩体较破碎至较完整。

1.3 地质构造

场地处于克渡向斜东翼,褶皱构造不发育。董当断层(F1)从场地中部南北向贯穿,该断层为张性正断层,断距不清,断层产状为 $270^\circ \angle 60^\circ$,断层破碎带宽约 30 m,断层角砾岩和断层泥均发育,角砾岩大小不等,被钙质胶结,局部有钙质浸染和后期溶蚀现象。断层两盘岩层产状变化较大,东盘岩层倾向 $40^\circ \sim 120^\circ$,倾角 $4^\circ \sim 12^\circ$,西盘岩层产状较陡,总体倾向为 $290^\circ \sim 320^\circ$,倾角 $18^\circ \sim 35^\circ$ 。

此外,在 F1 断层东盘发育有一条次级断层(F2),该断层规模较小,向北延伸于场地南部被 F1 断层阻切,为一倾向东的高角度张性断层。

受区域构造应力场的影响,区内走向 $10^\circ \sim 40^\circ$ 及 $290^\circ \sim 320^\circ$ 的 X 剪节理发育,节理间距 0.05 ~ 0.30 m,宽度 1 ~ 3 mm,长 0.5 ~ 2 m,部分裂隙被粘土充填、半充填。受所处山体斜坡临空条件及断裂构造条件的影响,上述两组节理在工作区不同区段内分别演化为倾向相反的两组节理(表 1)。

表 1 场地节理裂隙发育情况表

Table 1 Development situation of joint fissure				
走向	产状	平均间距/m	宽度/mm	延伸长度/m
$10^\circ \sim 40^\circ$	$100^\circ \sim 130^\circ$	0.1 ~ 1.0	0.5 ~ 4	0.2 ~ 1.2
	$\angle 50^\circ \sim 75^\circ$			
	$280^\circ \sim 310^\circ$	0.05 ~ 0.5	1 ~ 5	0.2 ~ 1.2
	$\angle 65^\circ \sim 85^\circ$			
$290^\circ \sim 320^\circ$	$20^\circ \sim 50^\circ$	0.05 ~ 1.5	0.5 ~ 3	0.2 ~ 1.2
	$\angle 60^\circ \sim 80^\circ$			
	$200^\circ \sim 230^\circ$	0.05 ~ 0.6	1 ~ 4	0.2 ~ 1.2
	$\angle 60^\circ \sim 80^\circ$			

1.4 典型的地质灾害类型

根据《中科院国家天文台 500 m 口径球面射电望远镜(FAST)台址详勘岩土工程勘察报告》及《FAST 台址岩土工程危岩与崩塌堆积体专项勘察报告》,FAST 台址的斜坡中上部至洼地底部均有成层分布、厚度变化较大、形态各异的危岩及崩塌堆积体。台址四周共有大小不一、形态各异的危岩或崩塌堆积体 128 处,危岩地质灾害分布见图 2,图中等高线间距为 5 m。各处地质灾害的范围和规模大小不一,其破坏类型可能是崩塌、倾倒、滑塌、滚落等一种方式或几种方式的组合(图 3)。

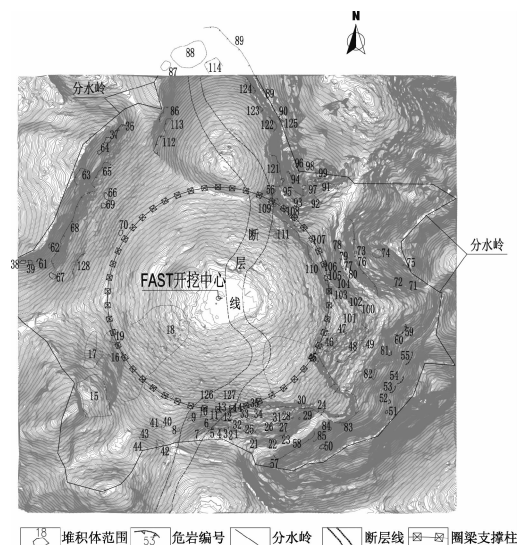


图2 FAST典型地质灾害分布平面图

Fig. 2 Typical geo-hazards distribution in the plane of FAST



图3 FAST典型地质灾害照片

Fig. 3 Typical geo-hazards in the study area

2 地质灾害的成因分析^[3-10]

2.1 特殊地形地貌

FAST台址区属于典型的峰丛洼地地貌结构,是由锥状峰林正地形与似倒锥状(漏斗状)洼地负地形共同组成的正负地形组合系统。根据FAST台址特殊的地形条件,根据地貌分区分为陡崖区、陡(斜)坡区和洼地区。陡崖区主要为基岩和危岩体;陡(斜)坡区主要为崩塌堆积体,局部有基岩出露;洼地区表层为耕植土、粘土和有机质粘土,下层为块石崩塌堆积体,基岩埋深较厚。陡崖区和陡(斜)坡区危岩失稳后无明显的缓冲地段,并在洼地区形成块石堆积。特殊地形地貌为地质灾害提供了有利的地形条件。

2.2 地质构造及岩性条件

岩性对岩石的抗拉抗剪强度、风化能力等有着决定性的作用,也决定着岩体结构面的性质。FAST台址地质构造较复杂,两组主要发育的区域性节理裂隙即 $10^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 及 $290^{\circ} \sim 320^{\circ}$,发育较好,贯穿性强。受地形临空条件及断裂构造的影响,上述两组节理发展成了外倾的卸荷裂隙或溶蚀裂隙,为危岩的形成提供了条件。

受节理、卸荷裂隙、溶蚀裂隙的切割及树木根劈作用的影响,区内多数陡崖表层岩体较为破碎,加上陡崖面起伏不平及岩石差异性风化形成的顺层凹腔和悬空等原因,陡崖体上形成了大量的松动危岩。陡崖上岩体被节理裂隙切割,脱离母体而产生崩塌,堆积于场地四周及中心地势低洼和相对平缓地带,有的则在陡崖上形成危岩体。

2.3 外部诱因

大量存在的岩体结构面卸荷裂缝宽张,在暴雨、人工爆破或地震等外部因素的激励下,极易诱发危岩脱离母体,产生地质灾害。FAST斜坡岩堆体上搭载的松散自由危石(危岩崩塌体),地表坡度多大于 45° ,在与陡崖区基岩接触地段地表坡度大于 60° ,这些危石基本上处于临界运动状态,在外部因素的诱导下也极易引发失稳。洼地区表层堆积体虽然坡度较缓,但由于胶结程度差,在外因的诱导下也容易发生沿软弱面的滑移及表层松散块体的滚落。

3 危岩详细特征

FAST危岩分布范围广,此处针对勘察报告中提到的128处地质灾害分别论述。由于洼地地形地质复杂多变,地质灾害特征千变万化,部分危岩具有相似的危害特征(表2),而其余危岩则具有独特的灾害特点(表3)。当然,由于地质环境的复杂多异性,各处灾害特征的界定和划分并不是绝对的。表中危岩的稳定性状态分析引用了《FAST台址岩土工程危岩与崩塌堆积体专项勘察报告》的结论,分析方法^[11]限于篇幅,不一详述。

4 治理措施

4.1 治理原则

FAST工程为国家重大科学项目,工程充分利用岩溶洼地建设500 m口径、张角约 120° 的球面射电望远镜,同时洼地内还建有观测基地及各项公用配套设施,因此其破坏后果十分严重。总结起来,FAST台址危岩失稳破坏具有以下特点:

- (1) 突发性;
- (2) 岩块运动速度快,冲击大;

表 2 具有相似地质灾害特征危岩表

Table 2 The perilous rock which have similar characteristics of the geological hazards

危岩编号	规模/m ³	灾害特征	危岩状态
WY5、21、22、26、44、50、52、57、59、71、72、78、80、90、100、103~105、111、122	0.5~100	可能失稳方式为倾倒,危岩体重心在倾覆点内侧,受底部岩体抗拉强度控制,部分岩体内部节理裂隙发育	WY50、58、71、72、100 基本稳定;其余不稳定
WY2、13、43、54、81、86、89、121、123、124			
WY35、45、46、58、110、125			
WY3、6、8、51、66、67、109、112	0.5~100	堆积体结构松散,无胶结充填,坡度大,在强降雨及人为开挖情况下易产生崩塌	WY91 整体稳定,局部不稳;WY3、51、66、67、75、109、112、127 基本稳定;其余不稳定
WY7、9、10、75、91、113、114、127、128	100~2000		
WY107	50	堆积体上块石处于基本稳定状态,局部分布堆积体及零星块石有滚落现象。在人为切坡开挖及强降雨情况下易再次发生崩塌	WY19、74 整体稳定,局部不稳;WY107 基本稳定
WY19、74	1000~2100		
WY82、84、88	0.5~100	崩塌块石成舌形状堆积于斜坡顶部,顶部岩体架空堆积,强降雨情况下容易塌落,影响施工安全	WY87 整体稳定,局部不稳;84、88 基本稳定;82 不稳定
WY87	1500		
WY102、106	2~100	危岩体节理裂隙发育、破碎,局部已形成崩塌,局部陡岩段形成临空面,受降雨和风化作用容易失稳	均不稳定
WY14、65	1500~3500		
WY1、16、47、53、61、62、63、79、101	0.5~100	危岩体受裂隙切割,与母岩分离,下部掏空形成孤立石块,在降雨、风化、卸荷等作用下易失稳滑落	WY23、61 基本稳定;其余不稳定
WY23、55、99	300~2500		
WY4、20、27、29、30、31、33、36、37~39、40、49、64、69、70、73、77、126	1~100	危岩体为块状孤石,零星分布于斜坡,在降雨、震动等作用下易丧失稳定而滚落	WY4、40、64、73、77 不稳定;其余基本稳定

表 3 具有独特地质灾害特征危岩表

Table 3 The perilous rock which have unique characteristics of the geological hazards

危岩编号	规模/m ³	灾害特征	危岩状态
WY15	45900	由碎、块石组成,结构松散,多处架空。崩塌堆积体可能破坏方式为沿基岩面产生滑动及前缘陡坡地带的崩塌块石产生崩落	WY15 天然状态整体稳定,饱水状态部分稳定;WY17 整体稳定、局部不稳定
WY17	8000		
WY18	16000	崩塌堆积体主要由粘土及碎石、块石组成,有可能产生圆弧状滑动或沿基岩面产生整体滑动	饱水状态不稳定
WY42	300	坡顶后缘有裂隙,危岩可能产生滑移式破坏	不稳定
WY48	10000	分布范围较大,散体危岩较多,易形成滚落灾害	不稳定
WY60	3	该危岩块石由上下两块石架空成蘑菇石,开挖扰动中可能发生滑动	不稳定
WY68	3000	可能失稳方式为倾倒,危岩体重心在倾覆点内侧,受底部岩体抗拉强度控制;部分危岩伸出成悬状危岩,节理裂隙发育	不稳定
WY76	20000	WY76-1 号危岩因裂隙发育从母岩剥离,易因降雨、爆破振动等原因失稳倾倒破坏;WY76-2 危岩体位于陡崖下部平台,平台坡度较缓,稳定	不稳定
WY85	40	危岩块石中上部已脱离基岩,产生倾斜,下部为软弱基座,呈不稳定,强降雨情况下容易塌落	基本稳定

备注:WY11~12、WY24~25、WY28、WY32、WY34、WY41、WY56、WY83、WY92~98、WY108、WY115~120 由于在台址开挖过程中为满足开挖需求而被清除,故上述危岩不再分析。

- (3)岩块在运动过程中有翻倒、跳跃、滚动、滑动、坠落、相互撞击等各种运动形式;
- (4)垂直位移大于水平位移。
由于各处危岩所处的位置不同,规模和形态不同,

破坏模式也不尽相同,因此需要针对不同危岩采取相对的有效治理措施。常见的处理方式有清除、锚固、裂隙灌浆、设置拦石坝、镶补、撑顶、抗滑桩(针对大型危岩堆积体)等,但对于地质环境极为复杂的 FAST 工程,有时单纯的一种处理方式并不能有效的解决危岩问题,而需要采取一种或几种方式的结合。对于危岩状态为不稳定的危岩,必须采取措施;对于基本稳定的危岩,为了保障工程后期的安全使用,也需要采取基本的拦防方案^[12-16]。综上,FAST 台址地质灾害治理综合考虑和遵循了以下原则:

- (1)安全第一、方便施工、不留安全隐患的原则;
- (2)因地制宜、最大限度不破坏生态环境、就地加固的原则;
- (3)体积较大的危岩谨慎爆破、避免大开挖的原则;
- (4)体积较小的危岩首选直接清除,以彻底消除安全隐患的原则;
- (5)信息化施工的原则。

4.2 治理措施

根据以上原则提出针对性的防治措施如下:

(1)清除处理

A、直接清除

WY3、WY6 ~ 10、WY16、WY20、WY23、WY27、WY29 ~ 31、WY33、WY36 ~ 40、WY43、WY44、WY47、WY49 ~ 51、WY53、WY55、WY60 ~ 62、WY64、WY66、WY67、WY69 ~ 73、WY75、WY77 ~ 79、WY82、WY85、WY86、WY99 ~ 107、WY109、WY111 ~ 113、WY121、WY126 ~ 128,由于体积较小,位于陡坡之上,不适宜加固,故直接清除处理。WY19、WY74、WY91 崩塌堆积体虽然方量较大,但由于坡度大,整体稳定性很差,如整体加固不易施工,对崩塌堆积体下部馈源塔危害很大,故也清除处理。

B、局部清除加裂隙灌浆封闭处理

主要针对 WY1、WY2、WY4、WY5、WY13、WY14、WY21、WY 22、WY35、WY45、WY46、WY54、WY63、WY84,危岩体表面或后缘存在节理裂隙,采取最大限度不破坏生态环境的原则,避免大开大挖,故对裂隙灌浆封闭,只清除局部不易加固的不稳定崩塌块体。

其中 WY1、WY4、WY14 危岩体较破碎,存在局部崩塌,故对不稳定岩块进行清除,同时为防治节理裂隙的进一步风化,对节理裂隙进行灌浆封闭。WY63 清除悬空部分危岩,再对危岩体节理裂隙进行灌浆封闭。其他几处危岩为倾倒式危岩,后缘有张拉裂隙,故对危

岩体表面的不稳定岩块作清除处理,对后缘张裂隙进行灌浆封闭。

C、局部清除加局部锚固

针对 WY48、WY110,对局部不稳定块体进行清除处理,由于体积较大,经过专项勘察和讨论,认为该两处危岩整体稳定性较好。故采取谨慎爆破开挖的原则,只对局部不稳定岩块进行清除或锚固的措施。

(2)锚固加灌浆措施

针对 WY26、WY42、WY52、WY57 ~ 59、WY80、WY81,上述危岩后缘存在张拉裂隙,前部危岩体有倾倒或滑移的可能。故采取最大限度不破坏生态环境、就地加固的原则,对前方危岩体加固,对后缘张拉裂隙进行灌浆封闭。

(3)微型桩

针对 WY17 崩塌堆积体,由于体积较大,采取谨慎爆破开挖的原则,就地加固。但堆积体为块石,不适宜于普通的锚固措施;如采取抗滑桩工程,又大大增加了施工工作量。故采取的加固措施为将微型桩群穿过危岩堆积体,锚固于下部基岩中,采用 C25 混凝土灌注裂隙,在堆积体上部形成承台,承台沿地形浇注,使微型桩、承台与大块岩堆体形成统一整体,以达到加固块石堆积体的目的(图 4)。

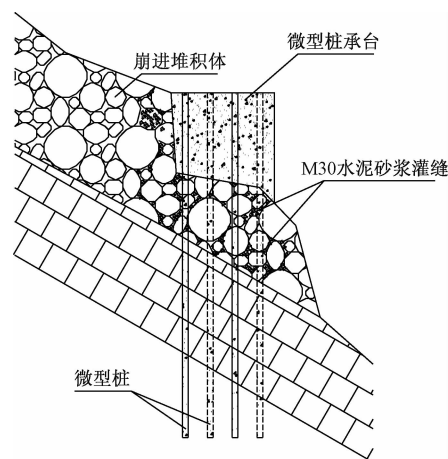


图4 WY17 防护剖面图

Fig.4 Sectional drawing of WY17 treatment

(4)支撑处理

主要针对 WY65 崩塌堆积体。由于 WY65 前沿形成一个鹰嘴似的岩腔,遵循因地制宜、就地加固的原则,对岩腔突出部分采取撑顶处理(图 5)。撑顶处理后的危岩避免了因前方危岩体的拉裂破坏而带来的后缘危岩大规模滑塌。

(5)拦石沟

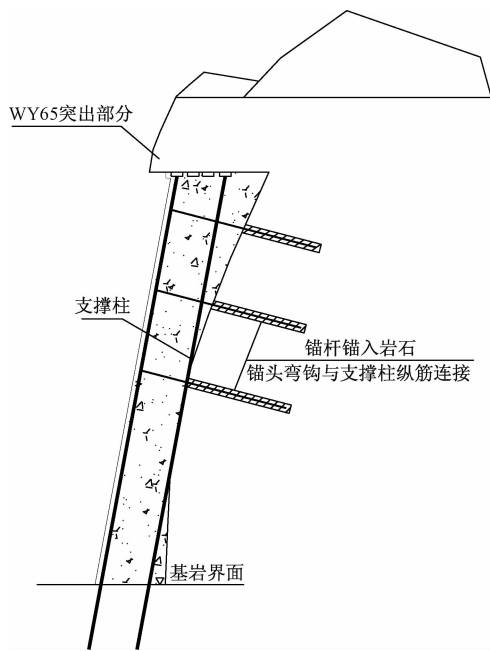


图5 WY65 支撑剖面图

Fig. 5 Sectional drawing of WY65 treatment with support

针对 WY87、WY88、WY89、WY90、WY114、WY122、WY123、WY124、WY125, 由于该部分危岩离 FAST 反射面及开挖中心较远, 危岩失稳后可通过设置在陡崖与反射面之间的拦石沟拦截。拦石沟为填方边坡的坡脚, 填方边坡坡顶为一个 10000 m^2 的大型拼装平台, 详情可参见文献 17。

(6) 复杂或大型危岩堆积体经过专项讨论后的处理措施

WY15: 危岩崩塌堆积体共 45900 m^3 , 处于 7H 馈源塔上方, 破坏性极大。如采用锚杆(索)加固, 由于坡面为松散堆积体, 可能会面临后期锚杆(索)应力松弛的问题, 且锚孔难以成孔和注浆, 增加了施工难度。如全部清除, 开挖量太大, 严重影响工期, 对生态环境的破坏也较大。故遵循谨慎爆破、避免大开挖的原则。最终采取了逐级放坡开挖, 只清除表面堆积体的处理措施, 边坡放坡坡率为 $1:1.15$ 。为不留安全隐患, 对开挖以后的坡面, 视其完整情况再决定是否进行加固(图 6)。

WY18: 危岩崩塌堆积体共 16000 m^3 , 有道路通过, 同时 WY18 的稳定性也关系到洼地内反射面系统的安全。遵循安全第一的原则, 通过稳定性计算, 对 WY18 崩塌堆积体采取了锚索抗滑桩加挡土墙支护的措施(图 7)。

WY68: WY68 危岩体分布较广, 破坏形式复杂, 危岩体内部出现溶蚀空洞。遵循谨慎爆破、避免大开挖

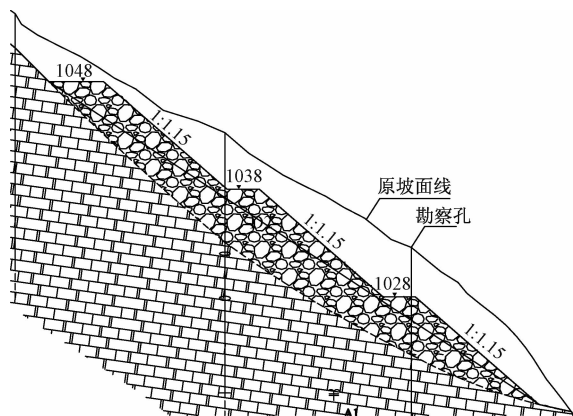


图6 WY15 清方剖面图

Fig. 6 Sectional drawing of WY65 treatment with cut

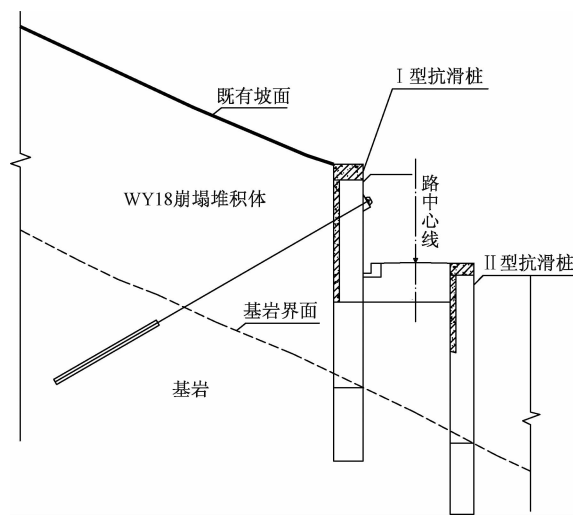


图7 WY18 抗滑桩剖面图

Fig. 7 Sectional drawing of WY65 treatment with anti-sliding pile

的原则, 采取了空洞注浆、局部爆破清除、锚喷清除及裂隙灌浆相结合的处理措施(图 8)。

WY76: WY76 规模大, 范围广, 整体稳定性较好。在经过认真勘察后, 遵循谨慎爆破、避免大开挖的原则, 决定只对局部不稳定块体进行加固和支挡, 并对裂隙灌浆, 对水平方向因风化差异形成的溶蚀槽进行镶补处理。

5 结论

(1) FAST 台址由于危岩分布范围广, 且大多处于陡坡、石崖上, 破坏模式复杂多变, 因此, 必须因地制宜, 针对不同危岩采取相对应的治理措施。同时, 治理方案不是单一的, 而是一种或几种方式的有效组合。总体而言, 台址危岩以清除结合其他防护措施的治理方式为主。但对于一些体积较大的危岩崩塌堆积体,

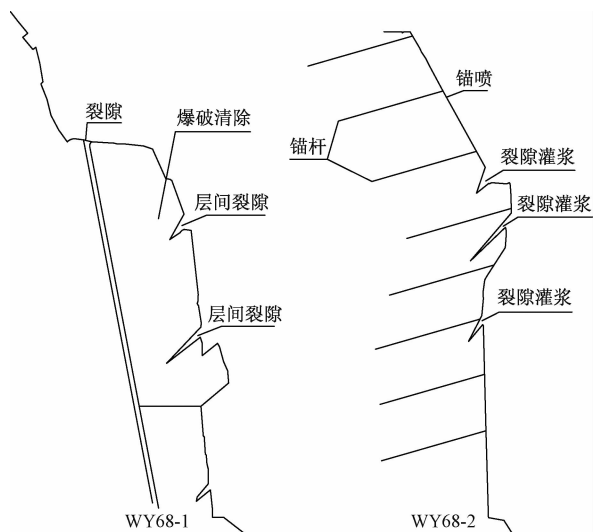


图8 WY68 防护剖面图

Fig.8 Sectional drawing of WY68 treatment

如贸然采用清除处理,除了影响工期之外,还会给生态环境带来较大的破坏,同时也可能带来新的危岩防护问题。如 WY76、WY48、WY110 就采取了较好的整治措施。

(2) 由于 FAST 岩溶洼地地质环境复杂,不确定因素大量存在,加上工程地质勘察工作量有限,使得各处危岩的地质条件不一定能完全查清,因此务必采用信息施工法,让施工成为一个再勘察的过程,以便及时调整原方案以采取合理的整治措施。WY15、WY18 均是在施工过程中发现了新的地质问题而作了专项施工勘察,及时的调整了原治理方案。

(3) FAST 台址地形陡峻,施工作业场地有限,上下垂直交叉作业相互干扰大。为保证施工期间的安全,施工时务必采取由上到下,有序开挖的施工方法^[18]。对于因开挖爆破新产生的岩块,需要及时处理,以防止产生新的安全隐患。

(4) FAST 台址的开挖爆破会扰动原山体的自然状态,山体为达到新的平衡必然会产生一定的调整和变形,甚至产生新的危岩体。同时由于岩溶裂隙、差异风化等自然原因,也可能使洼地产生新的地质灾害。因此,FAST 工程在后期投入使用的过程中必须加强地质灾害的巡视、监测及预防工作,以确保 FAST 工程后期的正常安全运行。

致谢:本文引用了贵州省建筑工程勘察院及贵州省地质工程勘察院的相关勘察资料,特此感谢!

参考文献:

[1] 宋建波,刘宏,王文俊,等.大射电望远镜贵州选址

理论与方法[M].北京:地质出版社,2006.

SONG Jianbo, LIU Hong, WANG Wenjun, et al. Theory and methods of selecting sites for spherical telescope in Guizhou [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.

[2] 南仁东.500 m 球反射面射电望远镜 FAST[J].中国科学 G 辑,2005,35(5):449-466.

NAN Rendong. 500 m spherical radio telescope FAST [J]. Science in China Ser. G 2005, 35 (5): 449-466.

[3] 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.

[4] 陈洪凯,鲜学福,唐红梅,等.危岩稳定性分析方法[J].应用力学学报,2009,26(2):278-284.

CHEN Hongkai, XIAN Xuefu, TANG Hongmei, et al. Frequency capture of vibration system with two-motor drives rotating in same direction [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009, 26 (2): 278-284.

[5] 乔良,郭鹏,曾润强,等.甘肃省冶力关国家森林公园地质灾害隐患分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2014,50(4):477-483.

QIAO Liang, GUO Peng, ZENG Runqiang, et al. Analysis of unstable slopes in the Yeligan National Forest park, Gansu province [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 2014, 50 (4): 477-483.

[6] 王敬勇,石豫川,王伍洲,等.雅鲁藏布江街需水电站巨型危岩体基本特征及防治措施[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S1):2635-2640.

WANG Jingyong, SHI Yuchuan, WANG Wuzhou, et al. Basic features and prevention measures of a giant unstable rock mass at Jiexu hydropower station, Yarlung zangbo river [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (S1): 2635-2640.

[7] 缪世贤,黄敬军,武健强,等.镇江大杨林岩溶塌陷及地裂缝灾害机理分析[J].防灾减灾工程学报,2013,33(6):679-685.

MIAO Shixian, HUANG Jingjun, WU Jianqiang, et al. Mechanism analysis of karst collapse and ground

- fissures disasters in Dayanglin[J]. Journal of Disaster and Mitigation Engineering, 2010, 32(2): 205-210.
- [8] 件拨云, 滕宏泉, 李勇, 等. 陕西镇安县地质灾害特征及其危险性分区[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4): 81-89.
- WU Boyun, TENG Hongquan, LI Yong, et al. Characteristics and the risk zoning of geological hazards in Zhen'an county, Shaanxi, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4): 81-89.
- [9] 金福喜, 罗滔, 李杰. 湘东南某市地形地貌对地质灾害发育规律的控制作用分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 115-118.
- JIN Fuxi, LUO Tao, LI Jie. The analysis of the control action of geography of the development rule of geological hazard in a city of the South-east of Hunan province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(2): 115-118.
- [10] 唐红梅, 王林峰, 陈洪凯, 等. 软弱基座陡崖上危岩崩落序列[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 205-210.
- TANG Hongmei, WANG Linfeng, CHEN Hongkai, et al. Collapse sequence of perilous rock on cliffs with soft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 205-210.
- [11] 常士骠, 张苏民. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- CHANG Shibiao, ZHANG Sumin. Handbook of engineering geology[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006.
- [12] 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.
- [13] 廖云平, 王小委. 重庆万盛区刀子岩危岩稳定性分析及防治[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(3): 92-97.
- LIAO Yunping, WANG Xiaowei. Stability evaluation and control strategy for Daoziyan unstable rock in Wansheng district of Chongqing[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2014, 33(3): 92-97.
- [14] 肖进, 付顺. 玉印山危岩带稳定性评价及其加固措施[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2012, 26(2): 213-216.
- XIAO Jin, FU Shun. Yuyingshan dangerous rock stability evaluation and reinforcement measures[J]. Journal of University of Jinan (Sci. and Tech.), 2012, 26(2): 213-216.
- [15] 朱晓斌, 张艳聪, 刘建伟. 永蓝高速公路荷叶塘危岩体成因分析与防治措施[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(4): 29-32.
- ZHU Xiaobin, ZHANG Yancong, LIU Jianwei. Cause analysis and prevention measure of heyetang dangerous rock body of Yonglan expressway[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2014, 35(4): 29-32.
- [16] 王萌, 何思明, 张小刚. S210线芦山-宝兴段崩塌灾害危险性分析及防治对策建议[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 101-106.
- WANG Meng, HE Siming, ZHANG Xiaogang. Study on S210 line Lushan-Baoxing segment collapse hazard assessment and control measures[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(3): 101-106.
- [17] 沈志平, 杨振杰, 余能彬, 等. 一种岩溶洼地陡崖崩塌防治结构[P]. 中国专利: ZL201420099639, 2014-07-30.
- SHEN Zhiping, YANG Zhenjie, YU Nengbin, et al. One control structure to prevent cliff collapse in the karst depressions [P]. China Patent: ZL201420099639, 2014-07-30.
- [18] 中华人民共和国国家标准. 建筑边坡工程技术规范[S]. 重庆: 重庆市城乡建设委员会, 2013.
- People's Republic of China national standard. Technical code for building slope engineering[S]. Chongqing: Chongqing Urban and Rural Construction Commission, 2013.