

危岩崩塌防治技术体系及工程选型分析

周云涛^{1,2}, 吴波^{*1,3}, 蔡强^{1,2}, 梁炯^{1,2}

- (1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;
2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 四川 成都 611734;
3. 成都华建地质工程科技有限公司, 四川 成都 611734)

摘要: 危岩崩塌防治技术是保障危岩工程安全稳定的关键。通过对危岩崩塌防治技术的优缺点、适用条件、工程设置原则以及选型程序的分析, 认为危岩崩塌防治技术可分为主动防治技术、被动防治技术和辅助防治技术, 各项防治技术设计时应充分考虑其适用条件, 按照工程设置原则采纳使用, 适时选择多种技术组合方式的治理措施进行危岩崩塌工程防治; 危岩崩塌防治技术选型应遵循查清危岩体基本情况→评价危岩体状态→选择危岩防治技术→分析防治技术选型结果的基本程序, 确定危岩崩塌防治技术选型程序各环节的关键参数, 以确定合适的崩塌防治技术。研究成果可为危岩崩塌防治工程设计提供理论依据和关键技术支持。

关键词: 危岩崩塌; 防治技术体系; 选型程序; 主动防治技术; 被动防治技术; 辅助防治技术

中图分类号: P642.21; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)02-0108-11

Analysis of control and prevention technology system and engineering selection for unstable-rock

ZHOU Yuntao^{1,2}, WU Bo^{*1,3}, CAI Qiang^{1,2}, LIANG Jiong^{1,2}

- (1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;
2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, MNR, Chengdu Sichuan 611734, China;
3. Chengdu Huajian Geological Engineering Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: The control and prevention technology for unstable-rock is the key to guarantee the safety and stability of unstable-rock. This paper analyzed the merit and demerit, application condition, engineering setting principle and selection program of the control and prevention technology, which is divided into three kinds, i.e., active technology, passive technology and assisted technology. Application conditions of each technology should be considered when these technologies were designed. Each technology should be selected based on the engineering setting principle, and the treatment measure with multiple technologies to control and prevent unstable-rock should be duly selected. The selection of technology for unstable-rock engineering should follow such process of checking the basic information of unstable-rock → evaluating the state of unstable-rock → selecting technology → analyzing the result of selected technology, thus the key parameters of each part of this process were confirmed to select the suitable technology. This research achievement could provide the theoretical foundation and key technology support for unstable-rock engineering.

Key words: unstable-rock collapse; control and prevention system; selection process; active technology; passive technology; assisted technology

收稿日期: 2023-07-22; 修回日期: 2023-11-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.02.015

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“高陡碎屑坡生态治理技术应用示范”(编号: DD20230450); 国家重点研发计划专项项目“膨胀土滑坡和工程边坡防护工程健康诊断和快速修复技术”(编号: 2019YFC1509904)

第一作者: 周云涛, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 地质工程专业, 博士, 从事岩土与地质工程减灾机理及防控技术研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, zhouyuntao_13@sina.com。

通信作者: 吴波, 男, 汉族, 1981年生, 工程师, 钻探工程专业, 从事钻探技术和水工环研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 43187097@qq.com。

引用格式: 周云涛, 吴波, 蔡强, 等. 危岩崩塌防治技术体系及工程选型分析[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 108-118.

ZHOU Yuntao, WU Bo, CAI Qiang, et al. Analysis of control and prevention technology system and engineering selection for unstable-rock[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 108-118.

0 引言

危岩崩塌是我国山区三大地质灾害之一,据国土资源部2013—2017年全国地质灾害通报情况,我国每年发生崩塌灾害平均1500起,约占地质灾害总数的1/3,同时造成人员伤亡200余人,直接经济损失达1亿元。如2017年1月20日,湖北南漳发生“1·20”大型崩塌灾害,造成12人死亡,3人受伤,直接经济损失180万元;2017年8月28日,贵州纳雍县发生山体崩塌地质灾害,造成17人死亡,8人受伤,18人失联,倒塌民房34户170间,直接经济损失510余万。崩塌灾害具有突发性、多发性、强致灾性等特点,一旦灾害发生,其社会影响较大。因此,开展有效的危岩崩塌防治工作迫在眉睫。

危岩崩塌防治技术发展至今,已基本形成了较为完善的体系。目前,危岩崩塌防治技术主要有主动防治技术、被动防治技术以及辅助防治技术^[1],多数学者对各项技术的设计及应用做出了重要贡献。如主动防治技术,夏元友等^[2]采用“清除+锚固”支护方案治理了黄石市板岩山危岩体;刘传正等^[3]对长江三峡链子崖危岩采用“锚固+排水”的防治效果进行了评价,认为链子崖危岩工程是稳定的;宋章等^[4]对成渝铁路崩塌灾害提出了清除、锚固、岩腔封填的建议;王延宁等^[5]采用小直径钢管排桩提高了边坡挡墙的抗倾覆能力。对于被动防治技术,叶四桥等^[6]提出了基于落石运动特性分析的拦石网设计理念,为拦石网设计提供了较好的理论依据;贾自力^[7]将布鲁克拦石网成功应用于铁路落石灾害。对于辅助防治技术,多数学者对排水、封填及注浆、插别、刚性栅栏、落石槽、避让带等防治技术做了大量研究^[8-10],提供了较好的防治技术设计思路。

研究发现^[11-12],危岩崩塌防治工程往往不是单一的主动防治技术、被动防治技术或辅助防治技术,而是各个技术的综合利用。同时,危岩崩塌防治技术与危岩类型、基本条件、赋存条件、威胁等级、稳定状态、防治等级、施工条件等因素相关,因此,其工程选型问题较为复杂,工程选型时面临的问题也较多。笔者结合自身工程经验、文献分析、规范等内容,分别阐述主动防治技术、被动防治技术和辅助防治技术优缺点,并提出适用条件和工程设置原则,提出适用于危岩崩塌防治技术的选型程序,研究成果可为危岩工程设计提供关键支撑。

1 危岩崩塌防治技术体系

通过现场调查、工程案例资料、规范以及文献等内容分析,主动防治技术指增强危岩体稳定性的结构措施或方法,包括锚固、支撑柱、墙、清除、主动防护网等;被动防治技术指为危岩崩落后防止落石砸损威胁对象在一定范围设置的结构措施,包括拦石网、拦石墙、堤、棚洞、明洞等;辅助防治技术指工程设计中难以量化仅依靠构造或工程经验设计的增强危岩稳定性或减轻对威胁对象的辅助性措施或方法,包括排水、封填及注浆、插别、刚性栅栏、落石槽、避让带等。

1.1 主动防治技术

1.1.1 锚固工程

锚固工程是利用锚索、锚杆对潜在危岩体主动提供抗滑力的一种技术(见图1)。通过施加锚固力,增强危岩体主控结构面的法向力和减少下滑力,可有效地增强危岩体的稳定性,是目前危岩防治工程最常用技术之一。

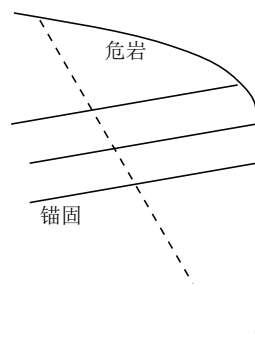


图1 锚固工程示意

Fig.1 Sketch map of anchor engineering

1.1.1.1 适用条件

适用于岩质较为坚硬的危岩体工程,尤宜于主控结构面倾角较陡的危岩;适用于后缘裂隙较为发育尤其以多组结构面控制的危岩;预应力锚索(杆)与竖肋、格构组合,可用于岩体较为破碎的危岩;不宜用于破碎或严重破碎的危岩;不宜用于对锚杆(索)具有腐蚀性工程环境的危岩。

1.1.1.2 工程设置原则

锚固工程宜布置在危岩体中上部,危岩岩体较为破碎时,应与竖肋、格构组合布置,全范围覆盖危岩体;当危岩主控结构面较陡、危岩厚度较大时,可采用预应力锚杆(索)工程;危岩裂隙较为发育时锚

固工程应与注浆技术联合布置,封填裂隙,防止锚固工程漏浆及锚杆钢筋腐蚀;锚杆(索)应穿过危岩体所有主控裂隙,锚固段应超过后缘最后一条主控裂隙1~2 m布置;锚杆(索)锚固段长度 ≤ 4 m,锚杆(索)总长度为6~8 m;锚杆(索)布置间距宜为4~8 m;预应力锚索设计时应进行现场拉拔试验,进一步确定锚固段长度、砂浆配合比、拉拔时间等参数;若危岩体规模较大,且具有支撑条件,锚固工程可与支撑工程联合使用。

1.1.2 支撑柱、墙

支撑是通过修建钢筋混凝土柱或砌体墙支撑体增强危岩体稳定性的一种防治技术(见图2)。支撑柱通过其抗压与抗弯强度提供支撑力,支撑墙通过抗压强度提供支撑力,对于有岩腔条件与基座稳定的危岩体,效果显著,应用较为广泛。

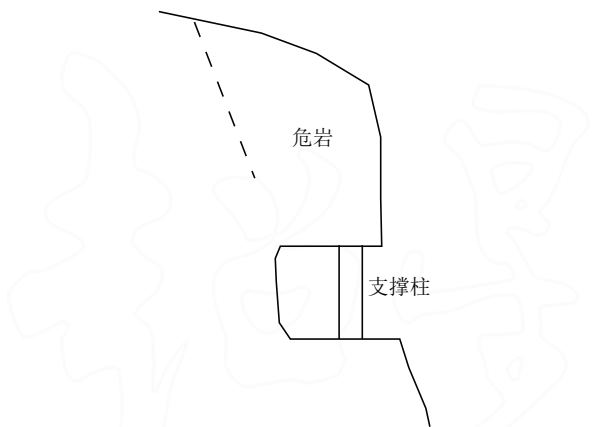


图2 支撑柱示意

Fig.2 Sketch map of shore

1.1.2.1 适用条件

适用于具有支撑条件且岩腔高度2~20 m、基座强度 >200 kPa的危岩体;适用于危岩岩体较完整,不宜用于岩体较为破碎的危岩;支撑柱、墙可与锚固工程联合适用,可用于危岩体积较大的危岩。

1.1.2.2 工程设置原则

支撑柱、墙离基座临空面或危岩临空面距离 ≤ 0.5 m,基座强度应满足地基承载力条件,不满足条件时应对地基进行加固;支撑柱布置间距宜为4~6 m;支撑柱、墙沿危岩滑动方向宽度 ≤ 0.3 m;支撑柱、墙应埋设于稳定基座内,深度 ≤ 0.5 m;支撑柱、墙顶0.5~1.0 m范围内应采用膨胀混凝土,防止支撑体与岩腔顶面脱空,同时可应对支撑体在温差效

应下产生的伸缩性;支撑柱、墙应验算抗压、抗弯强度,确定合适的截面面积、配筋等参数。

1.1.3 清除

危岩体清除是传统应用较为广泛的一类防治技术,一般采用爆破方式开挖剥离岩体。近几十年来,总结危岩清除工程经验发现,爆破清除危岩体并不是一劳永逸的解决办法,其产生的母岩扰动与长期风化问题将诱发新的危岩体产生。因此,爆破清除危岩体技术在选型时应综合对比,合理选用。

1.1.3.1 适用条件

适用于单体、外悬且规模不大的危岩体以及后缘主控裂隙贯通且岩质较为完整的危岩体;对于岩体较为破碎的危岩体,应谨慎采用;对于城镇聚集地或下方有密集建筑物或居民区的危岩,不宜采用。

1.1.3.2 工程设置原则

根据危岩规模、裂隙发育、岩体质量等条件,合理选择人工、爆破与药剂清除方式;对于危岩厚度 < 2 m且体积 > 10 m³的危岩,宜采用人工清除方式,其他可采用爆破与药剂清除方式;宜采用控制爆破技术,避免飞石、爆尘造成人员伤亡,降低对后部母岩的损伤;对于有严格噪音控制的地区,可采用静态爆破清除方式;加强控制施工期的人身安全与财产安全,危岩体清除完毕后应及时挂网喷浆处理,防止危岩体母岩的长期风化。

1.2 被动防治技术

1.2.1 拦石网

拦石网广泛应用于铁路、公路、水利等危岩落石工程,表现出了显著的经济性与适用性。拦石网由柔性网、支撑系统、锚拉连接系统和减压环4个部分组成。目前,拦石网被动防护系统在拦截能力、设计施工标准化与防腐能力等方面得到了长足发展,其拦截能力覆盖50~5000 kJ,实现了工厂化生产,防腐能力较传统镀锌防腐提高了3倍。

1.2.1.1 适用条件

当陡崖或山坡坡度 $> 35^\circ$,且缺乏一定宽度的平台时,可采用柔性拦石网;危岩下方有重要建(构)筑物,可采用被动防护网防护。

1.2.1.2 工程设置原则

柔性防护网布置前应预测落石运动路径并计算落石冲击力,选择合理的拦石网宽度、高度、能级;柔性防护网宜采用型钢立柱,立柱外倾角与水平面 $\leq 70^\circ$;型钢立柱应嵌固在稳定基岩内,嵌固深度 ≤ 0.5

m;对于落石数量多、冲击能量大的群发性危岩,可采用多级防护网。

1.2.2 拦石墙、堤

拦石墙、堤通常为粘土、砌体结构或钢筋混凝土结构,布置较为灵活,对地形适应性较强,结合缓冲土堤设计,抗冲击能力强,是目前落石工程较为常用的技术之一(见图3)。

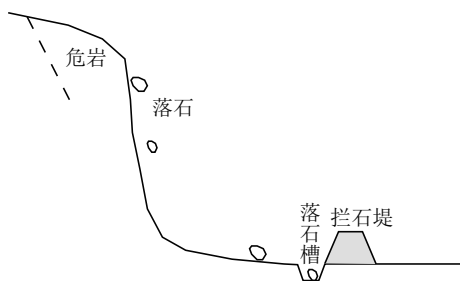


图3 拦石堤、落石槽示意

Fig.3 Sketch map of embankment and stone falling channel

1.2.2.1 适用条件

拦石墙、堤一般适用于坡度 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 且有一定宽度的地表平台的危岩地段;危岩下方有重要建(构)筑物,可采用拦石墙、堤防护。

1.2.2.2 工程设置原则

拦石墙、堤可用块石砌筑,也可用桩板式结构,其顶宽 $\leq 2\text{ m}$;背部缓冲堤应分层填筑,压实度 $\geq 85\%$,并应保证自身稳定;必要时可用加筋土,表面可用片石护坡;拦石墙、堤厚度及高度,由危岩块落石弹跳轨迹及落石冲击力确定,必要时应进行专项设计;对于弹跳高度较大的落石,拦石墙、堤可与拦石网、拦室栅栏配合使用。

1.2.3 棚洞、明洞(遮挡工程)

棚洞、明洞一般为隧道结构的一部分,在隧道洞口受落石威胁地段可为首选被动防护措施,近年来,也发展为道路落石集中段防护结构(见图4)。棚洞与明洞的优势是直接确保被保护对象不被砸毁。棚洞与明洞一般投资较大,后期需要定期维护,抗冲击能力有限,适用于防护小型落石威胁的隧道洞口或道路人形集中段,也可与其他被动落石防治技术联合使用。

1.2.3.1 适用条件

适用于隧道洞口、人行道路受落石威胁的集中区域。

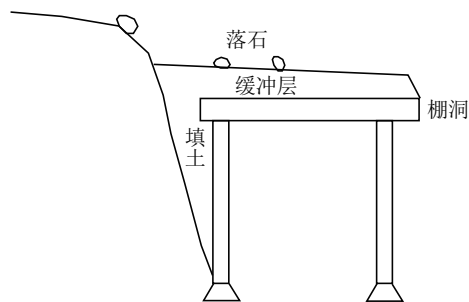


图4 棚洞示意

Fig.4 Sketch map of hangar tunnel

1.2.3.2 工程设置原则

棚洞、明洞应设置范围应包含被保护对象所有区域;施工开挖时有塌方的危险和趋势,开挖难以一次开挖到位,不宜设置棚洞、明洞;内外墙底基础软硬差别较大时,不适宜修建明洞;棚洞、明洞结构顶板厚度、支撑柱(墙)截面面积应根据落石冲击力进行计算;棚洞、明洞顶板上方应覆盖缓冲层,厚度由落石冲击力确定;棚洞、明洞墙体上应预设渗水孔,在分层回填棚洞体两侧填土时,及时设置渗水管,渗水管位置和墙体预留渗水孔衔接,渗出水按预设管道流入棚洞、明洞预设边沟内。

1.3 辅助防治技术

1.3.1 排水

排水是危岩防治工程必须采用的辅助措施,排水包括危岩体外围的截水与危岩体内的排水。外部可设置截排水沟,阻止地表水进入危岩区域并渗入,危岩体内部排水可通过打仰斜孔,尤其对危岩体内部裂隙水发育的情况必须设置排水孔。

1.3.1.1 适用条件

适用于有地表径流或地下裂隙水的危岩工程。

1.3.1.2 工程设置原则

地表排水首先设置外围截水沟拦截危岩体以外的地表水;截水沟应修建在危岩体可能发展的边界以外 $5\sim 10\text{ m}$;截水沟断面大小应根据回流面积和流量计算确定;排水沟应设置在由陡变缓位置,排水沟应充分利用天然沟谷或加以改造;危岩体内地下水比较丰富是,宜在危岩体中、下部或支撑体内钻设排水孔,坡度 $>5\%$,排水孔应穿越渗透结构面。

1.3.2 封填及注浆

封填及注浆对于含有裂隙及岩腔的危岩体治理效果显著,也是危岩工程必须的防治措施。

1.3.2.1 适用条件

适用于含明显节理裂隙或岩腔的危岩体。

1.3.2.2 工程设置原则

当危岩体顶部存在较显著裂隙时;宜采用灌浆封闭措施进行防治;当危岩体底部出现比较明显的岩腔等缺陷时,宜采用填充措施进行防治;注浆是于陡崖顶部设置钻孔,钻孔要求穿过裂隙密集发育的

卸荷带,注浆液通常为水泥浆液、水泥砂浆和化学浆液等固化材料;不宜采用高压注浆。

2 危岩崩塌防治技术选型程序

危岩崩塌防治技术选型基本遵循查清危岩体基本情况→评价危岩体状态→选择危岩防治技术→分析防治技术选型结果的程序,见图5。

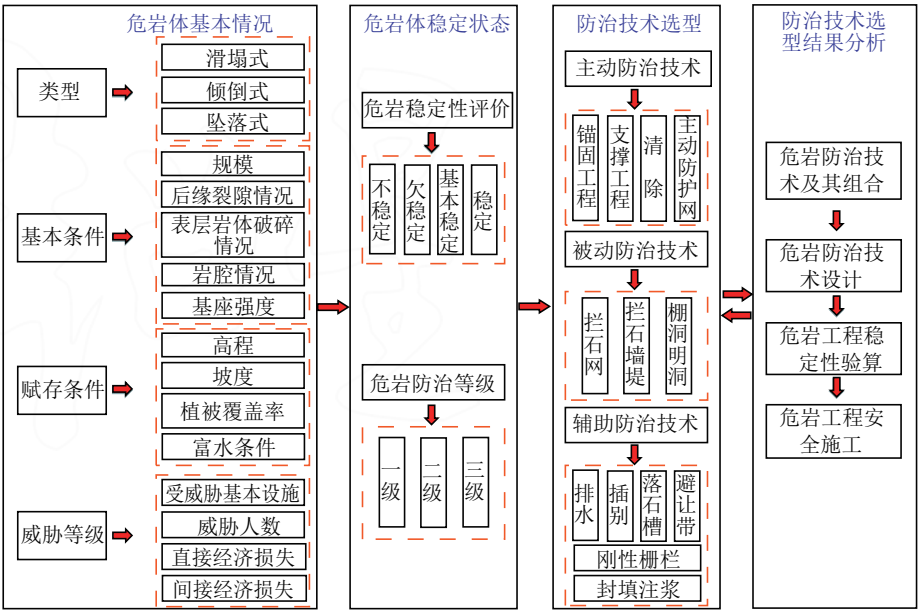


图5 危岩工程防治技术选型程序

Fig.5 Selection process of control and prevention technology of unstable-rock engineering

2.1 查清危岩体基本情况

危岩体基本情况包括危岩类型、基本条件、赋存条件、威胁等级等4种。危岩体根据其破坏力学模式,可分为滑塌式、倾倒式以及坠落式3类^[13],危岩体类型是确定危岩防治安全系数的基本条件。

危岩体基本条件是危岩自身的基本情况,包含危岩体规模、后缘裂隙发育情况、表层岩体破碎情况、岩腔以及基座强度等。危岩体规模可按危岩单体体积与危岩带体积分别划分,均可分为小型、中型、大型和特大型,见表1与表2^[13];后缘裂隙发育情况涵盖主控结构面与次要节理裂隙,查清裂隙产状、长度、宽度等关键参数,绘制裂隙玫瑰图,查明危岩控制裂隙;表层岩体破碎情况主要是表征危岩岩体的完整性,是判定防治技术的重要指标,可采用边坡岩体质量指标[BQ]系统分级标准进行判定^[14];岩腔是软硬互层岩体长期风化特有的地质现象,岩腔的发育情况将直接影响上覆危岩体的稳定性。首先

应查明岩腔内软岩类型,浸水及在自然条件下的风化速度,预测岩腔发展趋势,同时查明岩腔现状深度、厚度等参数,其是确定岩腔是否采用填充、支撑等防治技术的关键;基座强度是判定采用支撑柱、墙防治技术的先决指标,若基座强度较低,无法支撑危岩体稳定性,则支撑工程不适宜,但可通过改良地基方法满足支撑条件,因此,应通过室内力学试验获取基座强度参数,支撑工程设置前应对地基稳定性进行验算。

表1 危岩单体按体积分类

Table 1 Unstable-rock classification based on volume

危岩单体体积 V/m^3	危岩单体类型
$V \leq 10$	小型危岩体
$10 < V \leq 50$	中型危岩体
$50 < V \leq 100$	大型危岩体
$V > 100$	特大型危岩体

表 2 危岩带按体积分类
Table 2 Unstable-rock group based on volume

危岩带体积 V/m^3	危岩带类型
$V \leq 500$	小型危岩带
$500 < V \leq 1000$	中型危岩带
$1000 < V \leq 5000$	大型危岩带
$V > 5000$	特大型危岩带

赋存条件指危岩体发育的基本环境条件,包括危岩体相对高度、坡度、植被覆盖率以及富水条件。危岩体按相对高度可分为低位、中位、高位以及特高位,见表 3^[13]。危岩体的相对高度限制了大型机械的使用,决定了工程施工的难易程度,同时也影响了危岩主动防治技术与被动防治技术的选型,如危岩若处于特高位,在危岩顶部无平台条件下,钻机等设备难以抵达,采用脚手架工程既不安全也不经济,因此,锚固工程防治技术难以实现。若危岩下方人口、建构筑物不密集,对于特高位危岩,可采用拦石网等被动防治技术,显然,拦石网的施工安全性较锚固工程高,经济性也较为合理;坡度是指危岩体所处边坡的平均坡角,在危岩工程中,锚固工程、支撑工程、主动防护网等防治技术基本不受坡度限制,而拦石网、拦石墙、堤等防治技术却受到坡度制约,如拦石墙、堤一般设置于坡度 $<35^\circ$ 的边坡,而拦石网对于坡度 $>35^\circ$ 的边坡较为适宜;边坡按植被覆盖率大小分为低、中、较高、高等 4 个等级,见表 4。边坡上生长的灌、草、木等植被可有效拦截和缓冲落石,是下方保护对象的天然屏障,边坡植被覆盖率越高,拦截和缓冲落石的效果越好。危岩防治工程中,也常采用种

植防护林方式保护居民、交通要道、建构筑物等;富水条件指危岩体所处的水文条件,危岩体大多处于高位,以降雨形成的地表径流入渗居多。危岩工程设计时,应合理选择 50 年一遇与 100 年一遇极端降雨工况,计算危岩裂隙水压力,评价其对危岩稳定性的影响,从而合理选择排水、注浆等防治技术。

表 3 危岩体按所处相对高度分类
Table 3 Unstable-rock classification based on relative height

危岩体相对高度 H/m^3	危岩类型
$H \leq 15$	低位危岩
$15 < H \leq 50$	中位危岩
$50 < H \leq 100$	高位危岩
$H > 100$	特高位危岩

表 4 边坡按植被覆盖率分类
Table 4 Slope classification based on the rate of vegetation coverage

边坡植被覆盖率 $VC/\%$	边坡类型
$VC \leq 20$	低覆盖率
$20 < H \leq 50$	中覆盖率
$50 < H \leq 70$	较高覆盖率
$H > 70$	高覆盖率

危岩威胁等级可根据受威胁基本设施、受威胁人数、破坏后直接经济损失以及破坏后间接经济损失分为一级、二级、三级 3 个等级,见表 5。危岩威胁等级直接决定了防治工程安全等级,威胁等级越高,设防标准越高,危岩工程对防治技术的要求也越高。

表 5 危岩威胁等级
Table 5 Threat level of unstable-rock

等 级	一 级	二 级	三 级
受威胁基本设施	重要:危及县及县级以上城市、大型工矿企业、交通枢纽及重要公共设施,破坏后后果特别严重	较重要:危及一般城镇、居民集中区、重要交通干线、一般工矿企业等,破坏后果严重	一般:危及农村、居民居住地、乡村公路等,破坏后影响较小
受威胁人数 TN	损失大: $TN \geq 1000$ 人	损失中等: $100 \text{ 人} \leq TN < 1000$ 人	损失小: $TN < 100$ 人
破坏后直接经济损失 DEL	损失大: $DEL \geq 1000$ 万元	损失中等: $500 \text{ 万元} \leq DEL < 1000$ 万元	损失小: $DEL < 500$ 万元
破坏后间接经济损失 PI	损失大: $PI \geq 10000$ 万元	损失中等: $5000 \text{ 万元} \leq PI < 10000$ 万元	损失小: $PI < 5000$ 万元

注:若表中数据判定为不同等级时,按最高等级评定危岩威胁等级。

2.2 危岩体稳定状态评价

危岩体稳定性评价方法可分为定性评价与定量评价。定性评价包括工程地质类比法、极射赤平投影^[15]等方法,定量评价包括极限平衡法^[16-17]、数值模拟^[18]等,近年来危岩稳定性评价也发展起来模糊综合评价^[19]、概率统计分析^[20]等方法。在危岩防治工程设计时,若同地区有类似危岩工程,工程地质类比法将具有较大优势,若无类似危岩工程,建议采用极射赤平投影与极限平衡相结合的方法对危岩稳定性进行判别。《重庆地质灾害防治工程勘察规范》(DB50/143—2003)^[13]提供了滑移式、倾倒式、坠落式危岩的极限平衡计算方法,采用此方法可获得危岩现状稳定系数,并可通过表6判定危岩稳定状态。

表6 危岩稳定状态
Table 6 Stability state of unstable-rock

危岩类型	危岩稳定状态			
	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
滑移式危岩	$F < 1.0$	$1.00 \leq F < 1.15$	$1.00 \leq F < F_t$	$F \geq F_t$
倾倒式危岩	$F < 1.0$	$1.00 \leq F < 1.25$	$1.00 \leq F < F_t$	$F \geq F_t$
坠落式危岩	$F < 1.0$	$1.00 \leq F < 1.35$	$1.00 \leq F < F_t$	$F \geq F_t$

注: F_t 是危岩防治工程安全系数,由表7确定。

稳定系数是危岩现状稳定情况,在危岩工程设计时,受危岩环境改变、计算方法精度等影响应考虑安全储备问题,即根据安全等级确定危岩工程防治安全系数,表7^[21]给出了滑移式、倾倒式、坠落式3类危岩体的安全系数取值标准。

表7 危岩工程防治安全系数
Table 7 Safety coefficient of unstable-rock engineering

破坏模式	安全等级系数		
	一级	二级	三级
滑移式危岩	1.40	1.30	1.20
倾倒式危岩	1.50	1.40	1.30
坠落式危岩	1.60	1.50	1.40

注:地震工况安全系数,滑移式取1.0;倾倒式取1.15;坠落式取1.2。

2.3 防治技术选择

防治技术选择是危岩防治工程的关键环节,选型时应综合分析危岩类型、基本条件、赋存条件、威胁等级等因素,根据危岩稳定性评价结果,确定危岩工程防治安全等级,按照技术先进、经济合理的原则

选择主动防治技术、被动防治技术与辅助防治技术,拟定2~3套危岩防治技术及其组合进行方案比选,最后选择效益较高的方案对危岩进行防治。

2.4 防治技术选型结果分析

危岩防治技术选型确定了防治技术及其组合后,应对防治技术进行详细设计,确定相关参数,然后开展危岩工程稳定性验算,若危岩工程验算安全,可进行工程施工,若验算不安全,需重新设计。

现有的危岩防治技术设计大多是参考《建筑边坡工程技术规范》^[22]、《重庆市地质灾害防治工程设计规范》^[21]规定危岩防治技术设计内容多为定性设计,不能满足危岩设计的现实需求,因此,危岩防治技术的设计方法及标准仍待进一步研究。笔者根据规范理解、文献分析以及工程经验总结,对危岩防治技术设计作如下建议:

在主动防治技术中,锚固工程可参考《建筑边坡工程技术规范》^[22],同时可参考陈洪凯等^[23-24]提出的设计方法;支撑柱、墙可参考《钢筋混凝土结构设计规范》^[25]进行抗弯与抗压设计;对于锚固-支撑联合支护技术,可参见陈洪凯等^[26]设计内容;关于危岩清除技术,采用爆破清除手段可参考《爆破安全规程》^[27],爆破对母岩的损伤应开展专项研究,建议采用现场试验或数值模拟方法;主动防护网的设计可按照《建筑边坡工程技术规范》^[22]进行构造设计。

对于被动防治技术,拦石网设计可参考叶四桥等^[6]与阳友奎等^[28]提出的方法,其提供了拦石网详细设计内容;拦石墙、堤设计可参考唐红梅等^[29]提出的方法;棚洞、明洞设计可参考《公路隧道设计规范》^[30]与冉利刚等^[31]设计方法,其中落石冲击力计算可参考叶四桥等^[32]提出的方法。

在危岩辅助防治技术中,目前多个规范及文献均未形成定量设计方法,可根据相关规范及文献进行构造设计。其中排水设计可参考《建筑边坡工程技术规范》^[22],封填及注浆设计参见《水工建筑物化学灌浆施工规范》^[33],插别及刚性栅栏设计参考陈洪凯等^[34]提出的方法,落石槽及避让带参考《重庆市地质灾害防治工程设计规范》^[21]。

3 案例分析

3.1 重庆市万州区首立山危岩治理工程

3.1.1 工程概况

首立山危岩属重庆市万州区地质灾害之一,位

于万州区天城经济开区,分布于棉花地居委会、都历村两个自然村内(东经:108°23'2.2",北纬:30°49'33.31")。危岩发育于都力山陡崖上,在自重、暴雨和一些不利因素的作用下,危岩脱离母岩,产生崩塌,直接威胁着陡崖以下约8258人的生命及财产安全,造成的直接经济损失约3.7336亿元。首立山危岩在西侧谢家园子段已产生过一次崩塌,体积约50 m³,造成2人受伤,2间房屋受到破坏,并且在该处未崩塌的危岩稳定性极差,处于极不稳定状态,详见图6。2005年9月13日,在麻柳坪东侧产生一次崩塌,方量约6 m³左右,未造成人员伤亡。因此,对万州首立山危岩进行及时有效治理十分必要。



图6 谢家园子崩落的滚石

Fig.6 Rockfall in Xiejiayuanzi

3.1.2 防治技术选型分析

根据图5危岩工程防治技术选型程序,分别从危岩体基本情况、危岩稳定状态评价、防治技术选择以及防治技术选型结果分析进行工程技术选型。

3.1.2.1 危岩体基本情况

万州首立山发育于都力陡崖上,勘查共发现145个危岩体(带),危岩总体积85883.33 m³,均属小型危岩。破坏模式为坠落式、倾倒式和滑移式。危岩由砂岩块体组成,岩体较为完整,下覆泥岩夹层,与砂岩的差异风化,易形成岩腔,岩腔高1~3 m,深度0.5~3.0 m。危岩后部发育卸荷带,卸荷带宽度4.1~10.0 m,裂隙间距1.5~5.0 m,张开度0.5~15 cm,贯通性较好,受降雨影响较大,为危岩主控裂隙。

危岩落差10~25 m,属中位危岩。危岩陡崖顶部植被发育,植被覆盖率为75%,陡崖较为光滑,基本无植被覆盖,陡崖坡脚植被覆盖率为35%。危岩基座为砂岩,饱和抗压强度为27.77 MPa,强度较高。危岩威胁预计总人数8258人,房屋建筑面积163768 m²,总经济指标3.7336亿元,威胁等级为一级。

3.1.2.2 危岩稳定状态评价

万州首立山基本稳定的危岩体20处,占危岩总数的13.79%;欠稳定的危岩113处,占危岩总数的77.93%;不稳定的危岩12处,占危岩总数的8.28%。危岩防治等级为一级。

3.1.2.3 防治技术选择

根据危岩基本情况与稳定状态评价结果,结合各危岩防治技术的优缺点,综合选择“锚固+支撑+封闭岩腔+SNS被动防护网+排水”支护方案。危岩完整性较好,呈块状结构,采用锚固可主动防护危岩,增强危岩稳定性。万州首立山危岩多发育泥岩岩腔,采用封闭岩腔措施可防止泥岩进一步风化,岩腔底部为砂岩,基座强度较高,可采用支撑柱或支撑墙增强危岩稳定性。该区危岩较多,呈带状分布,危岩落差较大,同时陡崖底部多为房屋、道路,难免存在漏勘、误勘情况,因此,采用SNS被动防护网减轻对下方建、构筑物以及人员的威胁。

3.1.2.4 防治技术选型结果分析

万州首立山危岩治理工程于2006年完成施工,治理段至今未发生再次崩落事件,表明该“锚固+支撑+封闭岩腔+SNS被动防护网+排水”支护方案有效。施工完成危岩工程见图7和图8。



图7 锚固工程

Fig.7 Anchor engineering



图8 支撑墙+锚固+排水

Fig.8 Supporting wall+anchor+drainage

3.2 巴中市巴州区玉山镇玉山中学危岩治理工程

3.2.1 工程概况

玉山中学危岩位于四川省巴中市巴州区玉山镇后山中心小学后方(东经:106°22'13",北纬:31°30'07"),受“5·12”汶川特大地震作用影响,玉山镇后山危岩体裂隙有所扩张,形成了多处危岩和危石。5·12地震后,伴随着余震的不断发生及局部强降雨的冲刷影响,斜坡体内的节理裂隙在5·12地震的基础上不断的进行扩展延伸贯通,一旦条件再次成熟,小规模崩塌将不可避免,其变形破坏的概率更大。而一旦其成灾,将对斜坡下方的中学、道路和上方的供水站等设施造成严重威胁。为切实保证威胁范围内学生的生命财产安全和道路、供水站等设施安全,保障当地居民的正常生产生活创造良好的环境,对该隐患点进行工程治理是必要的。

3.2.2 防治技术选型分析

3.2.2.1 危岩体基本情况

该危岩发育于玉山镇后山陡崖上,陡崖高20~25 m,发育3个危岩带,分别为WY01危岩带、WY02危岩带、WY03危岩带,体积分别为460、180和192 m³,均为小型危岩带。破坏模式分别为坠落式、滑移式和坠滑式。危岩岩体呈碎裂状,裂隙较为发育,有粘性土填充。危岩落差约10 m,偶有小块崩落。危岩体所在斜坡较为陡峭,距离玉山镇居民居住点较近。危岩体下方为玉山镇街道,威胁对象包括其下方的52户居民(共计220人)、玉山中学和以及上方的玉山镇供水站,威胁等级为三级。

3.2.2.2 危岩稳定状态评价

危岩WY01处于欠稳定状态,WY02为欠稳定,WY03为基本稳定。危岩防治等级为三级。

3.2.2.3 防治技术选择

鉴于危岩规模较小,危岩威胁等级与防治等级均为三级,采用被动防护措施与辅助措施进行工程治理,支护方案为“局部清危+拦石堤+落石槽+排水”。局部清危可清除陡崖表面的突起孤石,拦石堤可防治落石滚落至下方道路及玉山中学,落石槽为危岩块体聚集地,排水可增强危岩稳定性。

3.2.2.4 防治技术选型结果分析

玉山镇玉山中学崩塌治理工程完成施工后,有效拦截了上方崩落的落石,保障了下方玉山中学及道路的安全,表明该“局部清危+拦石堤+落石槽+排水”支护方案有效。施工完成的危岩工程见图9,

拦截落石见图10。



图9 拦石堤、落石槽

Fig.9 Embankment for intercepting rockfalls and stone falling channel



图10 拦截的落石

Fig.10 Intercepted rockfalls

4 结语

通过对危岩崩塌防治技术的优缺点、适用条件、工程设置原则以及选型程序的分析,得到以下认识:

(1)危岩崩塌防治技术可分为主动防治技术、被动防治技术和辅助防治技术,各项防治技术设计时应充分考虑其适用条件,按照工程设置原则采纳使用,适时选择多种技术组合方式的治理措施进行危岩崩塌工程防治;

(2)危岩崩塌防治技术选型应遵循查清危岩体基本情况→评价危岩体状态→选择危岩防治技术→分析防治技术选型结果的基本程序,确定危岩崩塌防治技术选型程序各环节的关键参数,以确定合适的崩塌防治技术;

(3)危岩崩塌防治技术较多,其工程稳定性验算方法目前较为欠缺,尚应加强该方面的研究工作;

(4)生态环境对危岩崩塌防治工程提出了越来越多的要求,应加强危岩崩塌防治技术创新,兼顾生态环境的基本需求。

参考文献(References):

- [1] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅.危岩落石防治技术体系及其特点[J].公路,2010(7):80-85.
YE Siqiao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Rockfall mitigation techniques and its characteristics[J]. Highway, 2010(7): 80-85.
- [2] 夏元友,朱瑞赓.黄石市板岩山危岩体防治方案决策分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(4):498-500.
XIA Yuanyou, ZHU Ruigeng. Analysis on control decision-making of unstable rockmass in Banyan mountain, Huangshi City [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4):498-500.
- [3] 刘传正,张明霞.长江三峡链子崖危岩体防治工程效果研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(11):2171-2179.
LIU Chuanzheng, ZHANG Mingxia. Study on control engineering effect about Lianziya dangerous rock-body in Three Gorges Reservoir of Yangtze River[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(11):2171-2179.
- [4] 宋章,赵平,陈明浩.既有成渝铁路线地质灾害特性及防治对策分析[J].铁道工程学报,2017,34(8):16-21.
SONG Zhang, ZHAO Ping, CHEN Minghao. Analysis of the characteristics of geological disasters and its prevention methods along the Chengdu-Chongqing Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017,34(8):16-21.
- [5] 王延宁,王丰,张祥恒.小直径钢管灌注排桩在边坡抢险工程应用探讨[J].钻探工程,2022,49(4):152-157.
WANG Yanning, WANG Feng, ZHANG Xiangheng. Application of small-diameter steel tube soldier piles in slope emergency works[J]. Drilling Engineering, 2022,49(4):152-157.
- [6] 叶四桥,唐红梅,祝辉.基于落石运动特性分析的拦石网设计理念[J].岩土工程学报,2007,29(4):566-571.
YE Siqiao, TANG Hongmei, ZHU Hui. Design conception of safe net system based on analysis of motion trace of rockfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 566-571.
- [7] 贾自力.布鲁克拦石网在山区铁路中的应用[J].铁道建筑,2005(10):32-34.
JIA Zili. Application of Geobrug's rockfall-intercepted net in mountain railway[J]. Railway Engineering, 2005(10):32-34.
- [8] 赵云峰,张涛,刘文清,等.北京某景区崩塌灾害隐患点治理方案设计思路[J].钻探工程,2021,48(5):96-105.
ZHAO Yunfeng, ZHANG Tao, LIU Wenqing, et al. Design of the treatment plan for rockfall hazards in a scenic spot in Beijing [J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):96-105.
- [9] 张彬,李亚玲,慎乃齐,等.三峡库区凤城危岩稳定性评价与防治对策研究[J].地学前缘,2009,16(6):113-119.
ZHANG Bin, LI Yaling, SHEN Naiqi, et al. A study of the stability assessment and treatment of dangerous rock in Fengcheng Town of the Three Gorges Reservoir area [J]. Earth Science Frontiers, 2009,16(6):113-119.
- [10] 叶四桥,唐良琴,陈洪凯,等.重庆市云阳县磨子岭危岩研究与治理[J].地质灾害与环境保护,2005,16(1):17-22.
YE Siqiao, TANG Liangqin, CHEN Hongkai, et al. Study on mozilling unstable rock and it and control in Yunyang County, Chongqing City[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005,16(1):17-22.
- [11] 陈洪凯,鲜学福,唐红梅,等.三峡库区危岩群发性机理与防治——以万州太白岩为例[J].重庆大学学报,2008,31(10):1178-1184.
CHEN Hongkai, XIAN Xuefu, TANG Hongmei, et al. A massive development mechanism and countermeasures for perilous rocks in the Three Gorges Reservoir area of P. R. China: The example of the Taibaiyan cliff at Wanzhou [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2008,31(10): 1178-1184.
- [12] 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 Jiaotong University (Natural Science), 2014,33(3):92-97.
- [13] DB 50/143—2003,重庆地质灾害防治工程勘察规范[S].
DB 50/143—2003, Chongqing geological disaster prevention engineering survey code[S].
- [14] GB/T 50218—2014,工程岩体分级标准[S].
GB/T 50218—2014, Engineering rock mass classification standard[S].
- [15] 陈维.普洱渡危岩高边坡稳定性研究[D].昆明:昆明理工大学,2013.
CHEN Wei. Study on stability of high slope of dangerous rock in Puerdu[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [16] 周云涛.三峡库区危岩稳定性断裂力学计算方法[J].岩土力学,2016,37(S1):495-499.
ZHOU Yuntao. A method for calculating the stability of unstable rocks on Three Gorges Reservoir by fracture mechanics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,37(S1):495-499.
- [17] 周云涛,石胜伟,张勇,等.岩腔后退近水平砂-泥岩互层危岩稳定性研究[J].工程地质学报,2017,25(5):1220-1229.
ZHOU Yuntao, SHI Shengwei, ZHANG Yong, et al. Stability of unstable rock in nearly-horizontal sandstone-mudstone stratum due to enlarged rock-cell [J]. Journal of Engineering Geology, 2017,25(5):1220-1229.
- [18] 唐乐人.基于FLAC 3D的危岩体高陡边坡稳定性分析[J].公路工程,2014,39(2):265-268.
TANG Leren. Research on the stability of high and steep slope composed by potential unstable rock mass base on FLAC 3D [J]. Highway Engineering, 2014,39(2):265-268.

- [19] 叶四桥,唐红梅,祝辉.基于AHP-Fuzzy方法的危岩危险度评价[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2006,30(5):800-803.
YE Siqiao, TANG Hongmei, ZHU Hui. Dangerous degree estimation of perilous rock based on AHP-fuzzy method[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2006,30(5):800-803.
- [20] 许强,陈伟.单体危岩崩塌灾害风险评价方法——以四川省丹巴县危岩崩塌体为例[J].地质通报,2009,28(8):1039-1046.
XU Qiang, CHEN Wei. Risk assessment method for single rockfall geo-disaster: A case study on the rockfall in Danba County, Sichuan, China [J]. Geological Bulletin of China, 2009,28(8):1039-1046.
- [21] DB 50 5029—2004,重庆市地质灾害防治工程设计规范[S].
DB 50 5029—2004, Code for engineering design of geological disaster prevention in Chongqing[S].
- [22] GB 50330—2002,建筑边坡工程技术规范[S].
GB 50330—2002, Technical code for construction slope engineering[S].
- [23] 陈洪凯,王蓉.三峡库区危岩体锚固计算方法及应用[J].中国地质灾害与防治学报,2002,13(4):59-62.
CHEN Hongkai, WANG Rong. The method of anchor calculation of dangerous rock mass and its application in the Three Gorges Reservoir[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002,13(4):59-62.
- [24] 陈洪凯,唐红梅,胡明,等.危岩锚固计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1321-1327.
CHEN Hongkai, TANG Hongmei, HU Ming, et al. Research on anchorage calculation method for unstable rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(8):1321-1327.
- [25] GB 50010—2010,钢筋混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for design of reinforced concrete structures[S].
- [26] 陈洪凯,唐红梅,刘光华,等.危岩支撑及支撑-锚固联合计算方法研究[J].岩土工程学报,2004,26(3):383-388.
CHEN Hongkai, TANG Hongmei, LIU Guanghua, et al. Researches on calculation method of support and support-anchor union to unstable rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004,26(3):383-388.
- [27] GB 6722—2003,爆破安全规程[S].
GB 6722—2003, Safety regulation for blasting[S].
- [28] 阳友奎,原振华,杨涛.柔性防护系统及其工程设计与应用[M].北京:科学出版社,2015.
YANG Youkui, YUAN Zhenhua, YANG Tao. Flexible Protection System and Its Engineering Design and Application [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [29] 唐红梅.危岩拦石墙计算方法研究[J].中国地质灾害与防治学报,2005,16(3):12-15.
TANG Hongmei. Research on calculation method of volley-unstable rock retaining wall[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005,16(3):12-15.
- [30] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].
JTG D70—2004, Code for design of highway tunnels[S].
- [31] 冉利刚,陈赤坤.高速铁路棚洞设计[J].铁道工程学报,2008,25(6):61-66.
RAN Ligang, CHEN Chikun. The design of the hangar tunnel of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008,25(6):61-66.
- [32] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅.落石冲击力计算方法[J].中国铁道科学,2010,31(6):56-62.
YE Siqiao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. The calculation method for the impact force of the rockfall[J]. China Railway Science, 2010,31(6):56-62.
- [33] DL/T 5406—2010,水工建筑物化学灌浆施工规范[S].
DL/T 5406—2010, Construction code for chemical grouting of hydraulic buildings[S].
- [34] 陈洪凯.地质灾害理论与控制[M].北京:科学出版社,2011.
CHEN Hongkai. Theory and Control of Geological Hazards [M]. Beijing: Science Press, 2011.

(编辑 王文)