

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231030004

基于 Rockfall 数值模拟的边坡落石防护网 修复加固方案研究*

陈媛¹, 刘然¹, 罗常炜¹, 孙涛^{1,2}, 覃壮恩³, 侯争军^{1,4}, 杨宝全¹

(1. 四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 3. 中国安能集团第三工程局有限公司, 四川 成都 611130; 4. 成都星景智能科技有限公司, 四川 成都 610073)

摘要:某水电站尾水支洞边坡多次发生落石灾害,原被动防护网已发生局部破损,严重威胁着尾水支洞施工期和运行期的安全,需对原防护网进行修复加固。由于山体陡峭、地貌复杂,人工调查无法确定落石源,采用高精度无人机航拍初步排查出四处可疑危险源区域,利用 Rockfall 软件进行落石轨迹模拟计算,通过对比分析计算成果与观测到的落石落点位置与威胁区域分布情况,反分析确定了两处落石源。在此基础上,根据落石源的落石运动特征,复核分析了原防护能力不足的原因,发现原防护网的能级和高度不足是导致落石灾害发生的主要原因。通过提高防护网的能级和高度,提出了原位修复和增高加固两种方案。研究表明:两种方案均能有效减小落石威胁区域面积、降低落石率、改善运动特征参数。其中增高加固方案的防护效果更加显著,落石被全部拦截,落石弹跳高度和动能的最大值分别降低了69.64%、66.02%。对被动防护网破损部位的修复加固,综合考虑现场实际情况与落石模拟计算成果进行修复方案设计更为科学合理。研究成果可为该工程的落石防护方案提供科学依据,为类似工程设计与落石分析提供参考。

关键词:落石灾害;被动防护网;落石轨迹模拟;落石源确定;修复加固效果

中图分类号: P642.21; TU94+3.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0313-09

Study on Repair and Reinforcement Strategies for Rockfall Passive Protective Network Based on Rockfall Numerical Simulation

CHEN Yuan¹, LIU Ran¹, LUO Changwei¹, SUN Tao^{1,2}, QIN Zhuangen³,
HOU Zhengjun^{1,4}, YANG Baoquan¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 3. The Third Engineering Bureau Co., Ltd. of China An'eng Construction Group, Chengdu 611130, China; 4. Chengdu Xingjing Intelligent Technology Co., Ltd., Chengdu 610073, China)

Abstract: Rockfall disasters frequently occur in the tailrace branch tunnel slope of a hydropower station, leading to partial damage to the original passive protection network and posing severe risk to the safety of the tunnel exit area during the construction and operation period. It is very urgent and necessary to repair and reinforce the original passive protection network. Given the steep and complex land-

* 收稿日期:2023-10-30;修回日期:2024-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51609163);西藏自治区重点研发计划(XZ202301ZY0037G)资助

作者简介:陈媛(1973—),女,教授,博士,硕导。主要从事水工结构与岩土工程方面的教学与研究工作。

E-mail:chenyuan@scu.edu.cn

通讯作者:杨宝全(1985—),男,副教授,博士,硕导。主要从事水工结构工程的教学与研究。E-mail:yangbqscu1019@163.com

form, the rockfall sources could not be identified through manual survey. Therefore, high-precision UAV aerial imagery was utilized to preliminarily identify four potential hazard areas. Rockfall software was used for trajectory simulation calculations. By comparing and analyzing the simulated results with the observed rockfall landing positions and the distribution of the threatened areas, two rockfall sources were identified through inverse analysis. Based on this, by analyzing the movement characteristics of these sources, a review was conducted on the reasons behind the insufficient original protection capacity. It was discovered that the primary causes for rockfall disasters were the low energy level and inadequate height of the existing protection network. Two schemes were proposed to enhance the network's energy level and height: in-situ repair and heightening reinforcement. The analysis results indicated that both schemes could effectively reduce the area threatened by rockfalls, lower the rockfall occurrence rate, and improve movement characteristic parameters. Among them, the heightening reinforcement scheme had a more significant protection effect, with all rockfalls being intercepted. The maximum values of rockfall's kinetic energy and bouncing height were reduced by 66.02% and 69.64%, respectively. The scheme of in-situ repair and reinforcement of the network's damaged sections would be more logical and scientific when the actual site conditions and rockfall simulation results were taken into consideration. The research results provide a scientific basis for rockfall protection measures of this project and serve as a reference for similar rockfall analysis and engineering design.

Keywords: rockfall disaster; passive protective network; rockfall trajectory simulation; rockfall source determination; repair and reinforcement effect

0 引 言

危岩是我国西南山区三大自然灾害之一,已成为我国西南地区开发建设的重要制约因素^[1-2]。危岩体落石具有分布零散、隐蔽性强、突发性高、致灾性强等特征,近年来由于极端天气频发,落石灾害发生频率也随之升高。落石运动速度可达到每秒数十米,因此即使落石体积很小,其冲击能量也可以在短时间内达到极高水平并造成重大人员伤亡事故^[3],严重威胁着西南山区人民的生命财产安全。

作为一种广泛存在的地质灾害,落石灾害研究取得了丰硕的研究成果,主要聚焦于落石源区确定、落石运动特性研究、落石风险评估以及落石防治措施研究等领域^[4-8]。落石源区决定了落石运动轨迹及威胁范围,因此确定落石源是落石风险评估以及防护方案设计的第一步。由于山区地形高陡、植被茂密,潜在落石源分布广泛且多属于中高位危岩体,传统人工接触式勘测方法往往受到限制。针对传统方法存在的局限性,已有众多学者采用无人机摄影、卫星遥感、三维激光扫描等非接触式技术进行落石源的早期识别^[9-10],取得了丰硕的研究成果。落石的运动特性以及轨迹预测是落石灾害研究的重点,也是科学合理制定防护方案的重要理论依据^[11]。落石运动特性研究主要采用理论推导、现场试验及数值模

拟等手段进行,其中数值模拟能够较为真实的还原落石运动过程,成果准确可靠且省时省力,因此应用最为广泛。在实践中通常采用二维或三维软件进行落石模拟,三维落石模拟可以在不考虑横向约束的情况下模拟落石轨迹^[12],使得落石运动更接近实际情况,模拟成果更加全面且更具参考价值。落石风险评估包括落石失稳概率评估和落石威胁程度评估^[13],从而有针对性的提出防治措施。风险评估已成为工程选址和防灾减灾工作开展的重要前提^[14]。

为了减少落石灾害发生概率或降低落石灾害对承灾体产生的威胁,工程中往往采取多种防护手段。其中被动防护网作为一种轻量化的落石防护柔性结构^[15],因布置简便灵活、效果显著且经久耐用而被广泛应用于落石灾害防治工程。实践中通常根据工程经验或者简单的二维计算来确定防护网的设计参数和安装位置,这种半经验半理论的方法常常会导致防护网防护能力不足,造成被动防护网破损、落石灾害频发。针对被动防护网破损情况,工程实践中缺乏科学指导与理论依据,往往根据工程经验直接修复,导致落石高发区的落石灾害防治效果欠佳,同时提高了工程成本。因此有必要针对落石高发区防护网修复方案开展研究,以期工程提供科学指导,同时为其他类似工程落石灾害治理工作提供参考和借鉴。

四川省某电站尾水支洞边坡存在多处不明落石源,频繁发生落石灾害,原被动防护网已发生局部破损,为了确保尾水支洞边坡附近的工作区在施工期和运行期的安全,需对原防护网开展修复加固工作。本文以该工程为例,首先基于无人机航摄技术建立高精度三维边坡模型,利用Rockfall软件进行落石轨迹仿真模拟计算,反分析确定出落石灾害的危险源,在此基础上,根据危险源的落石运动特征,对原防护网进行复核,分析其防护能力不足的原因,针对性地提出有效的修复加固方案。研究成果可为该工程边坡落石灾害治理提供科学依据。

1 工程概况

1.1 厂区地质条件

某水电站位于四川省甘孜藏族自治州境内,电站厂房为地下厂房,地下厂房厂区自然边坡包含开关站自然边坡、进排风洞及尾水支洞等洞室出口自然边坡,范围大且边坡高陡。尾水支洞口处山体雄厚、地形完整,坡高700 m。坡面为基岩岸坡,植被较为发育,零星分布有崩坡积物,洞口上方还有一条约6 m宽的冲沟。尾水支洞出口附近边坡覆盖层较薄,可见处大部分基岩裸露,支洞口边坡物理地质现象主要有风化、卸荷、落石等。

尾水洞施工支洞及主厂房进风洞在施工期间主要是尾水支洞、尾闸室开挖支护和混凝土浇筑的主要施工通道,两洞口之间的道路是施工人员及设备进洞前的主要集中位置。为保障尾闸室施工及运行期间尾水支洞口处道路交通及工作人员安全,在进风洞及尾水支洞上方处设置了主动与被动防护网(图1)。其中被动防护网为RX-050型,位于高程1160~1180 m范围内,与道路高差约30 m,防护网高度4 m,张拉长度80 m(8跨,每跨10 m)。

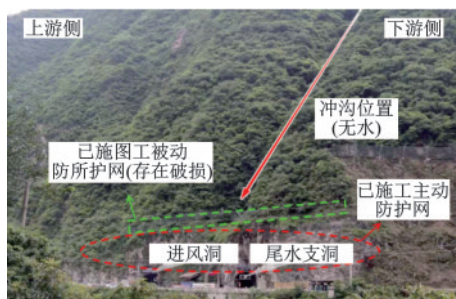


图1 边坡防护现状

Fig.1 Present status of slope protection measures

1.2 边坡落石灾害

2021年3月至8月期间尾水支洞边坡多次发生落石灾害,造成洞口处车辆及道路受损,严重威胁着尾水支洞工作人员的生命财产安全。通过无人机航摄及现场人工勘查发现,冲沟处第6、7跨防护网存在两处面积较大的破损(图2),表明原有被动防护网防护能力不足。由于原防护网大部分保存完好,且对坡脚处人员集中位置保护较好,因此拟定在原有防护网基础上进行修复加固。

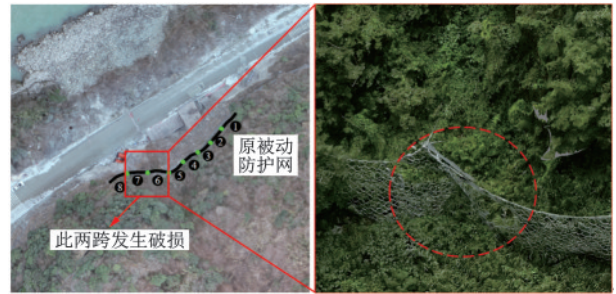


图2 原被动防护网破损情况

Fig.2 Damaged sections of original passive protective network

危岩体勘察是治理落石灾害的必要手段。由于该处边坡地形陡峭、植被密集,人工勘察路线有限且危险性高,因此未能确定危险源。为了准确掌握边坡危险源分布的空间位置,对尾水支洞边坡进行大范围无人机航拍,获取高精度三维图像。重点搜寻裸露断面为新鲜破碎岩体的危岩体(表明近期发生了落石崩塌),经搜查共发现了四处可疑危险源区域。四处可疑危险源区域空间位置如图3所示,具体情况见表1,四处可疑危险源区域与尾水支洞边坡道路相对高差为46~84 m,属于中高位危岩体^[16]。为进一步确定近期落石灾害源头,对四处可疑危险源区域进行落石模拟,对比计算出的落石威胁区与现场观测到的实际落石区,反分析确定出落石源。

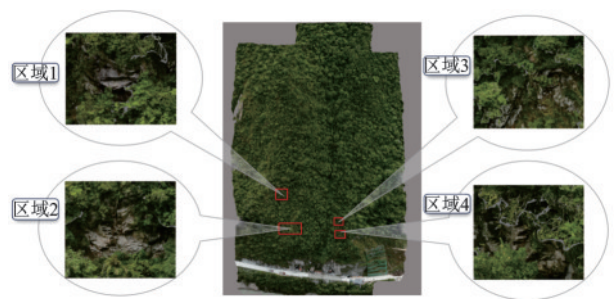


图3 四处可疑危险源区域空间分布

Fig.3 Space distribution of four potential rockfall sources

表1 四处可疑危险源区域基本情况

Table 1 Basic information of four potential rockfall sources

落石源	位置描述	高程/m	面积/m ²
区域1	冲沟上游侧46 m处	1 211~1 214	21.0
区域2	冲沟上游侧63 m处	1 177~1 182	6.6
区域3	冲沟下游侧12 m处	1 189~1 195	20.0
区域4	冲沟下游侧12 m处	1 176~1 181	10.0

2 边坡模型构建与参数选取

落石灾害模拟采用RAMMS中的Rockfall模块进行。该软件基于概率统计原理,可以模拟大量落石在斜坡上的运动轨迹及运动特征,计算成果具有的随机性可以实现对落石运动不确定性的模拟,从而为防护方案设计提供数据支撑。

受落石与地面间相互作用的影响,落石运动轨迹计算不仅需考虑落石的形状、重力和回弹力,还需要考虑落石与地面间的接触力、摩擦力、反弹力和植被阻力等因素,而落石的动能、弹跳高度、速度、旋转速度、弹跳距离等运动特征参数则基于落石的6个运动变量(3个方向的平移速度和3个方向的旋转速度)进行推求。

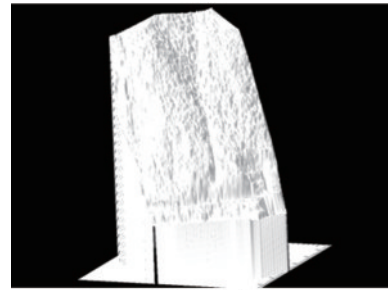
2.1 边坡模型建立

边坡计算模型的高程在1 100~1 220 m范围内,边坡剖面呈现“上缓下陡”的特点,上部斜坡坡度在45°~60°之间,下部近坡脚处斜坡坡度在75°~90°之间。准确模拟落石区边坡地形特征是实现落石灾害模拟的先决条件。采用无人机三维倾斜摄影技术获取研究区边坡的影像资料及三维点云坐标数据,构建危岩体区域边坡的高精度三维空间模型,利用ArcGIS将其转化为RAMMS软件支持的ASCII导入格式。尾水支洞边坡模型及网格划分如图4所示。

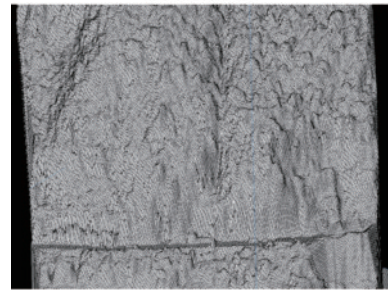
2.2 模型参数选取

根据现场落石情况,判断落石形状为体积较小的柱状块体,考虑到岩体下落过程中会发生碎裂,选定落石形状为Long1.5型、体积为0.1~0.2 m³的柱状岩体。

尾水支洞边坡典型剖面如图5所示。根据岩体类别、植被覆盖情况及含水量差异将边坡分为危



(a) 模型建立



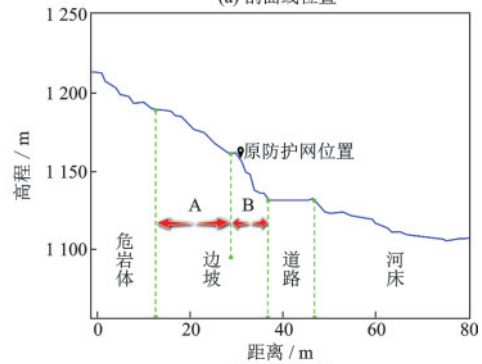
(b) 网格划分

图4 尾水支洞边坡模型

Fig.4 Slope model of tailrace branch tunnel



(a) 剖面线位置



(b) 边坡剖面

图5 边坡典型剖面位置及剖面示意

Fig.5 Locations and cross-section profiles of typical slopes

岩体段、边坡A段、边坡B段、道路以及河床段,并将其地形类别分别设置为中度硬、中度硬、硬、特别硬。落石运动过程中涉及的主要物理力学参数包括摩擦系数 μ_{\min} 、 μ_{\max} ,接触时间系数 κ 、非接触时间系数 β ,恢复系数 ϵ 以及粘塑性阻力系数 $Drag$ 等,不

同地形类别下的参数设置见表2。据此在四处可疑危险源区域进行落石模拟,判断近期落石灾害最可能的落石源头。模拟时对防护网简化,将破损位置处的第6、7跨防护网视为未设置防护网。

表2 边坡各区域地形类别及物理力学参数

Table 2 Terrain types and physic-mechanical parameters of slope regions

区域	地形类别	物理力学参数					
		μ_{min}	μ_{max}	β	κ	ϵ	Drag
危岩体段	中度硬	0.40	2.00	175	2.5	0	0.5
边坡A段	中度硬	0.40	2.00	175	2.5	0	0.5
边坡B段	硬	0.55	2.00	185	3.0	0	0.4
道路及河床	特别硬	0.80	2.00	200	4.0	0	0.3

3 落石源的反分析确定

将初步排查出的四处可疑危险源区域分别设置为落石释放区,进行落石灾害模拟。计算各危险源区落石的威胁区域如图6所示,图中色谱颜色表示落石动能变化情况。区域1与区域2的落石威胁区域主要位于进风洞边坡上游侧20~40 m、8~18

m公路段,与实际落石分布区相距较远,因此区域1和区域2是近期落石源的可能性较小。区域3和区域4落石威胁区域主要分布在尾水支洞边坡上游侧8 m至下游侧2 m公路段、上游侧5 m至下游侧5 m公路段,模拟落石威胁区域与实际落石分布区域基本重合,落石模拟成果与实际情况较为吻合,由此确定区域3和区域4是近期落石灾害的主要落石源。联合区域3和区域4作进一步的落石灾害模拟,分析其落石运动特征,以复核原被动防护网的防护能力,查明导致落石灾害的具体原因,提出相应的修复加固方案。

4 原防护能力复核分析

4.1 落石率复核

将区域3和区域4同时设为落石释放区,落石运动轨迹及威胁区域如图7所示,图中色谱颜色深表示落石弹跳高度变化情况。由图7可知,部分落石被植被及防护网拦截而滞留在边坡上,这部分落石对尾水支洞处道路交通及工作人员生命安全不构成威胁,另外部分落石未停积在边坡上而到达道路及河道区域,构成落石灾害的威胁区域。为了

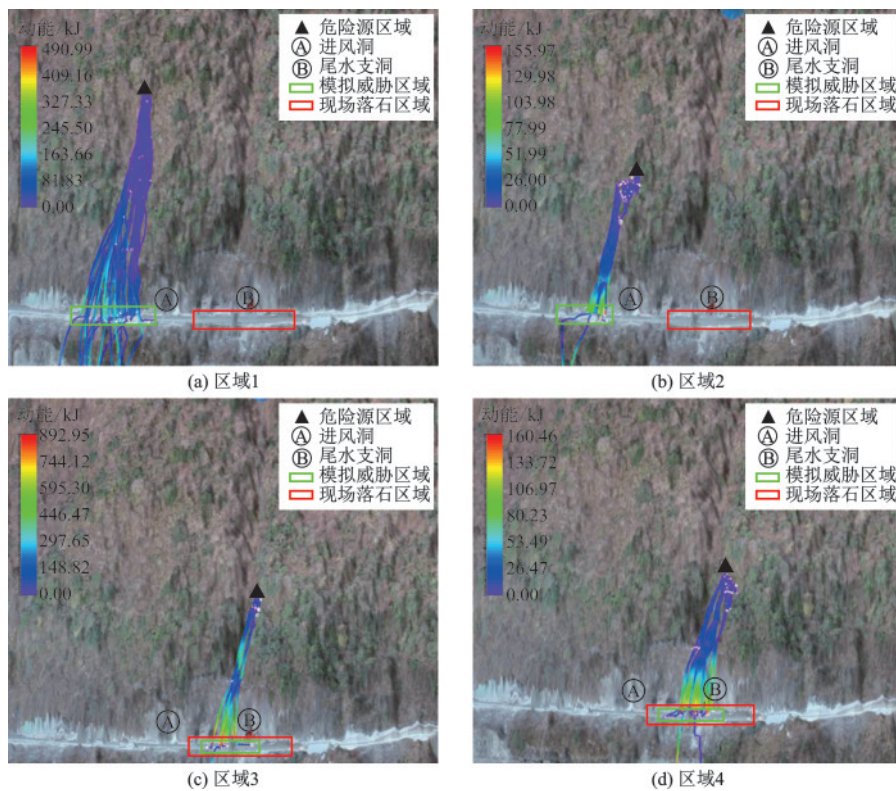


图6 可疑危险源区域落石灾害模拟

Fig.6 Rockfall disaster simulation of potential rockfall sources

对原防护网的防护能力进行定量评估,本研究将到达道路及河道区域的落石数量占落石总数的比率定义为落石率。落石率越低,防护网防护能力越好。对不同区域落石停积数量进行统计,可知落石停积在边坡或防护网前的概率为93.33%,到达道路及河道区域的落石概率为6.67%。其中道路与河道处落石占比分别为80%、20%,道路为主要承灾体,这与现场落石灾害的实际情况较吻合。

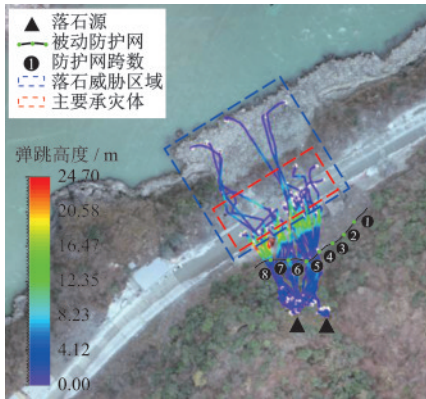


图7 确定落石源的运动轨迹及威胁区域

Fig.7 Rockfall trajectory and threatened area of determined rockfall sources

除停积在边坡及防护网前的落石外,落石轨迹均位于原防护网张拉区域,表明原防护网张拉长度合理,其中落石轨迹主要分布在第5~8跨,是防护网受落石冲击的重点区域。原防护网方案下的落石率为6.67%,即有6.67%的落石越过防护网落入道路及河道区域构成威胁,表明原防护网防护能力存在不足。

4.2 防护网能级与高度复核

落石动能和速度是衡量落石灾害等级及防护网能级、道数设置的关键指标,落石弹跳高度是防护网高度设置的重要依据。选取防护网沿线上落石的最大动能、弹跳高度和速度等运动特征参数进行分析,以复核原防护网高度、能级及道数设置是否合理。

防护网沿线落石的动能、弹跳高度以及速度的概率密度函数曲线和累积分布函数曲线如图8所示。由图8(a)可知,防护网沿线落石动能主要分布在0.23~205.83 kJ范围内。综合考虑现场实际调查及数值模拟结果的相关性,落石对防护网产生的冲击能通常是落石动能的1.32~2.03倍^[17]。根据落

石模拟成果,防护网位置处落石冲击能整体处于较低水平,原防护网位置处落石产生的最大冲击能为417.68 kJ,处于原防护网防护能级500 kJ范围之内。但由于第6、7跨防护网已发生破损,表明防护网能级不足是导致落石灾害的关键原因,因此后续修复或加固处理时须对防护网能级进行一定程度的提高,作为此处落石灾害治理的安全储备。

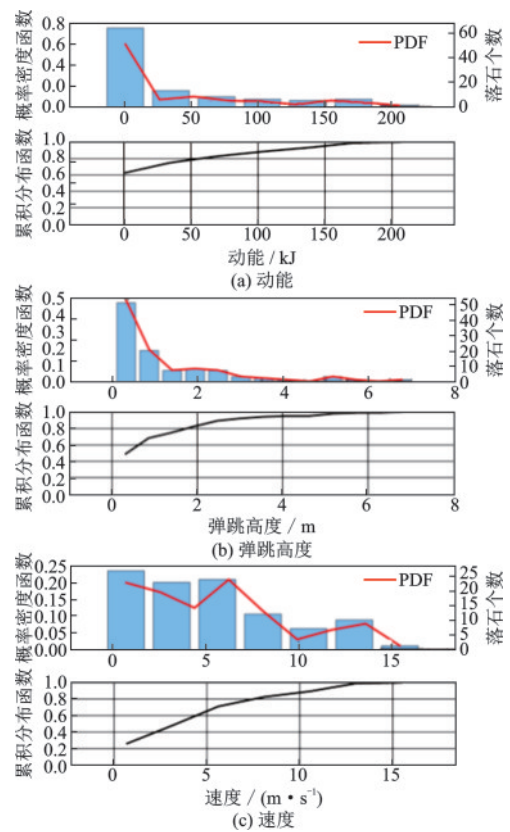


图8 防护网位置处落石运动特征参数概率密度函数及累积分布函数曲线

Fig.8 Probability density function and cumulative distribution function curves of characteristic parameters of rockfall movement at the location of protective network

由图8(b)可知,防护网沿线落石弹跳高度主要分布在0.32~6.78 m范围内。由于落石释放区坡度较缓,部分落石未到达防护网时就因植被阻力而停积在边坡上,此处仅分析能够到达防护网处的落石弹跳高度分布情况。在能够到达防护网的落石中,弹跳高度低于防护网高度的概率为90.29%,表明防护网能够有效拦截大部分落石,但仍有9.71%的落石越过被动防护网冲击道路和河道区域。因此,原防护网高度不足也是导致落石灾害发生的原因之一。

由图8(c)可知,落石速度主要分布在0.70~

15.45 m/s范围内。落石最大速度小于 30 m/s,不会出现“子弹效应”^[18],因此不必增设多道防护网,仅在原防护网基础上进行修复加固即可。

5 防护网修复加固方案及防护效果

5.1 防护网修复加固方案设计

根据现场防护网破损情况可知,原防护网防护能力不足的主要原因是防护网能级不足。由于落石整体动能处于较低水平,因此修复加固方案考虑采用比原防护网防护能级高一级的RX-075型防护网。据此拟定原位修复方案(方案1):修复第6、7两跨防护网,防护网高度保持不变,防护网能级由原来的RX-050型提升为RX-075型。

根据上述防护网防护能力复核结果可知,原防护网高度不足也是导致此处落石成灾的原因之一。防护网位置处落石弹跳高度高于4 m的概率为9.71%,高于6 m的概率仅为0.5%,据此可考虑将防护网高度提升至6 m。且落石运动轨迹主要分布在第5~8跨,需要对此区域重点关注。综合考虑现场防护网破损情况与落石模拟成果,拟定增高加固方案(方案2):将原防护网第5~8跨替换为高度6 m的RX-075型防护网。两种方案防护网设置如图9所示,对两种方案进行模拟并分析其防护效果,以确定最佳防护方案。

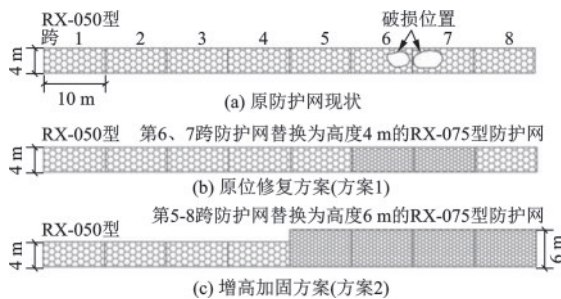


图9 防护网修复加固方案示意

Fig.9 Schematic diagrams of protection network repair and reinforcement schemes

5.2 修复加固方案效果评价

5.2.1 落石率的降低

两种修复方案下落石威胁区域见图10。与原防护网方案相比,方案1情况下落石威胁区域范围显著减小,落石率由6.67%下降至2.78%,主要承

灾体即道路区域的落石数量减少了约4/5。方案2情况下危险源区域落石均被边坡植被和防护网拦截,道路及河道区域均内无落石坠落。



图10 修复加固后的落石威胁区域

Fig.10 Rockfall threatened area after repair and reinforcement

5.2.2 运动特征参数的改善

选取落石运动特征参数中的五项典型值(最大值、Q99、Q95、Q90、平均值)的变化情况进行对比分析,落石弹跳高度及动能典型值的变化情况见图11。

对防护网进行修复加固后,两种方案下落石动能与弹跳高度的各项典型值均呈下降趋势,表明修复防护网可显著改善落石的运动特征。原方案、方案1和方案2情况下,落石弹跳高度的最大值分别为24.70、22.23、7.44 m,落石动能的最大值分别为650.12、526.60、220.89 kJ。与原防护方案相比,两方案下落石弹跳高度的最大值分别下降了10.83%、69.64%,动能最大值分别下降了23.09%、66.02%。落石运动特征参数的最大值表征着落石灾害的致灾等级,两种方案下落石弹跳高度及动能的最大值

均呈现显著的下降趋势,有效降低了此处落石灾害对承灾体造成的威胁。

6 结 论

本文采用无人机航摄技术与 Rockfall 软件数值模拟相结合的研究方法,对某电站尾水支洞边坡落石灾害开展被动防护网的修复加固方案研究,获得了以下主要研究成果:

(1) 落石源的反分析确定:利用无人机航摄图像初步排查出四处可疑危险源,通过落石轨迹模拟计算,对比计算出的落石威胁区与现场实际落石区,反分析确定出两处落石源。

(2) 原防护能力复核:对落石源进行落石灾害模拟,经复核分析原被动防护网设置的张拉长度与道数较合理,但其防护能力存在不足,防护网局部区域发生破损,且有 9.71% 的落石弹跳高度高于防护网高度,表明原防护网的能级与高度不足是导致落石灾害发生的主要原因。

(3) 修复加固方案与效果评价:根据防护网的现场破损情况和落石模拟计算结果,提出了原位修复和增高加固两种方案。原位修复方案将破损的第 6、7 跨防护网更换为 4 m 高的 RX-075 型,增高加固方案将第 5~8 跨防护网更换为 6 m 高的 RX-075 型。其中增高加固方案的防护效果更加显著,修复加固后落石被全部拦截,落石弹跳高度和动能的最大值分别降低了 69.64%、66.02%。

(4) 对被动防护网破损部位的修复加固,综合考虑现场实际情况与落石模拟计算成果进行修复方案设计更为科学合理,其可行性较好。

参考文献:

- [1] 王星.隧道洞口落石冲击风险评价及耗能减震棚洞结构研究[D].西安:长安大学,2019.
Wang X. Study on risk assessment of rockfall impact at tunnel entrance section and energy dissipation shed tunnel structure[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)
- [2] 景晶晶,吴志坚,丁万鹏,等.藏南聂拉木镇地质灾害和河岸工程病害调查分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(1):32-40.
Jing J J, Wu Z J, Ding W P, et al. Investigation and analysis of geological disasters and bank protection damage in Nyalam town, south Tibet[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1): 32-40. (in Chinese)
- [3] Jiang N, Li H B, Zhou J W. Quantitative hazard analysis

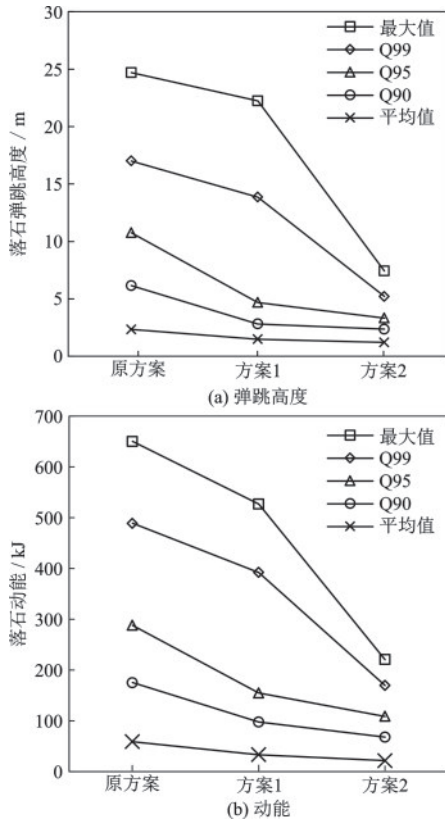


图 11 落石运动特征参数典型值变化情况

Fig11 Variation of typical characteristic parameters of rockfall movement

5.2.3 方案选择及效果评价

两种方案下防护网防护能力变化情况见表 3。由表 3 可知,方案 2 防护能力显著高于方案 1。方案 2 对第 5~8 跨防护网进行增高加固后,落石被全部拦截,使得道路区域免受落石灾害威胁,保障了尾水支洞附近车辆和人员聚集和施工活动开展。另外,方案 2 显著改善了落石的运动特征参数,有效降低了落石灾害等级及对主要承灾体的威胁,防护效果更好。因此推荐采用增高加固方案对原防护网进行修复加固。

表 3 不同修复方案防护效果对比

Table 3 Comparison of protective effects under different repair schemes

修复加固方案	落石率/%	运动特征参数最大值下降幅度/%	
		弹跳高度/m	动能/kJ
方案 1	2.78	10.83	23.09
方案 2	0	69.64	66.02

- and mitigation measures of Rockfall in a high-frequency Rockfall region[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80: 3439-3456.
- [4] 王翔, 牌立芳, 吴红刚. 拉林铁路变坡面倾角崩塌落石对桥梁结构破坏作用的模拟分析与试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(8): 1622-1633.
Wang X, Pai L F, Wu H G. Simulation analysis and experimental study on the damage of bridge structure caused by tilt collapse and rockfall on the slope of Lalin railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(8): 1622-1633. (in Chinese)
- [5] 黄维, 艾东, 胡胜华, 等. 鄂西山区崩塌落石运动特征及危险性分析—以远安县瓦坡崩塌区为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(6): 37-43.
Huang W, Ai D, Hu S H, et al. Characteristics of rockfall trajectory and hazard assessment in western Hubei Province: A case study of the Wapo collapse area in Yuan'an County[J]. *Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention*, 2022, 33(6): 37-43. (in Chinese)
- [6] 张晓勇, 谢谟文, 张磊, 等. 基于固有频率的坠落危岩体稳定系数计算模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(3): 585-593.
Zhang X Y, Xie M W, Zhang L, et al. Study on calculation model of stability coefficient of falling dangerous rock mass based on natural frequency[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(3): 585-593. (in Chinese)
- [7] 徐锦宏, 黄波林, 聂邦亮, 等. 三峡库区棺木岭危岩体涌浪风险防控研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(6): 1395-1404.
Xu J H, Huang B L, Nie B L, et al. Study on risk prevention and control for impulse wave generated by the gunguling dangerous rock mass in the three gorges reservoir area[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(6): 1395-1404. (in Chinese)
- [8] Qi X, Yu Z X, Zhao L, et al. A new numerical modelling approach for flexible Rockfall protection barriers based on failure modes [J]. *Advanced Steel Construction*, 2018, 14(3): 479-495.
- [9] 赵鹏辉, 李俊杰, 叶唐进, 等. 轻小型无人机遥感在高山峡谷区山地灾害应急监测中的应用[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(3): 448-454.
Zhao P H, Li J J, Ye T J, et al. Application of micro-UAV remote sensing in emergency mountain hazards monitoring of alpine valley region[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(3): 448-454. (in Chinese)
- [10] Robiati C, Eyre M, Vanneschi C, et al. Application of remote sensing data for evaluation of rockfall potential within a quarry slope[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(9): 367.
- [11] 张治平, 夏志雄, 金昶睿, 等. 基于摄影测量的落石路径获取及被动防护网服役性能评估[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(增2): 3274-3283.
Zhang Z P, Xia Z X, Jin C R, et al. Acquisition of rockfall path and service performance analysis of passive protective net based on photogrammetry[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(Sup2): 3274-3283. (in Chinese)
- [12] 刘国阳, 孟海怡, 宁宝宽, 等. 基于三维非连续变形分析的巨石崩塌运动研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(1): 246-256.
Liu G Y, Meng H Y, Ning B K, et al. Study on collapse and movement of a boulder based on 3D discontinuous deformation analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(1): 246-256. (in Chinese)
- [13] 张继旭, 王林峰, 夏万春. 基于模糊失效准则的危岩稳定可靠度计算[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(4): 695-704.
Zhang J X, Wang L F, Xia W C. Reliability calculation of perilous rock stability based on Fezzy failure criterion [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(4): 695-704. (in Chinese)
- [14] 汪晓锋, 朱圻, 向波. 九寨沟地震生态敏感区评估与道路重建方案论证[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(5): 70-78.
Wang X F, Zhu Q, Xiang B. Evaluation of Jiuzhaigou earthquake ecological sensitive area and demonstration of road reconstruction plan[J]. *Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention*, 2020, 31(5): 70-78. (in Chinese)
- [15] Yang Q L C. A review of flexible protection in rockfall protection[J]. *Natural Hazards*, 2019, 99(1): 71-89.
- [16] 崩塌防治工程勘查规范(试行): T/CAGHP 011—2018[S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
- [17] 罗安民, 周凯. 超高能级被动防护网在公路危岩崩塌灾害防护中的应用[C]//第十三届全国边坡工程技术大会论文集. 林芝: 中国建筑学会工程勘察分会, 中国水利学会勘测专业委员会, 2021: 226-234.
Luo A M, Zhou K. Application of ultra-high energy level passive protection network in highway hazardous rock collapse disaster protection[C]//Proceedings of the 13th National Conference on Slope Engineering Technology. Linzhi: Engineering Survey Branch, Architectural Society of China, Survey Specialized Committee of China Water Conservancy Society, 2021: 226-234. (in Chinese)
- [18] 王庆瀚. 下穿隧道边坡危岩崩塌滚石运动机理及安全防护[D]. 济南: 山东大学, 2015.
Wang Q H. Movement mechanism and safety protection of rockfall on the slope with tunnel below [D]. Jinan: Shandong University, 2015. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)