

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.04.21

基于离散元的滚石灾害被动防护网设计方法研究

张飞云¹, 冯德敏², 胥杨¹, 兰月¹, 李金霖³, 赵天豪³, 马春辉³

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130; 2. 中铁十一局集团第五工程有限公司, 重庆 400000;
3. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 被动防护网是边坡滚石灾害的有效防治措施, 如何有效、精准和经济地设计被动防护网, 对提升抵御自然灾害的综合防范能力具有重大意义。针对频发的滚石灾害, 构建了基于离散元的边坡滚石灾害被动防护网设计方法。通过建立精细的边坡、滚石和被动防护网离散元模型, 分析滚石运动轨迹、拦截滚石数目以及拦截效率等指标, 以确定高度、长度等被动防护网参数; 通过监测滚石的速度、冲击能变化为被动防护网选型提供建议; 通过分析被动防护网撞击断面上不同位置的形变变化规律, 确定最佳防护工况下被动防护网的最大形变位置。以某大型水电站的库区道路建设为例, 采用被动防护网离散元设计方法对滚石灾害进行定量分析, 确定被动防护网尺寸为长度 30 m、高度 5 m 时较为适宜, 该设计能够使碎石拦截效率达到 92%, 防护网材料应能抵御 108.5 kJ 的冲击能。根据上述分析可知, 基于离散元的边坡滚石灾害被动防护网设计方法能够定量评估滚石灾害的影响范围与影响程度, 从而为水利水电、道路、桥梁等工程建设中的滚石防控措施设计提供方法与经验。

关键词: 边坡滚石灾害; 被动防护网; 离散元; 能量分析; 被动防护网设计

中图分类号: U418.5+5; P642.2 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2023)04-0175-08

Design of passive protection net for rockfall disasters using discrete element method

ZHANG Feiyun¹, FENG Demin², XU Yang¹, LAN Yue¹, LI Jinlin³, ZHAO Tianhao³, MA Chunhui³

(1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 611130, China; 2. The Fifth Engineering Branch, China Railway 11th Bureau Group Corporation Limited., Chongqing 400000, China; 3. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The installation of passive protection nets is an effective measure for preventing and controlling rockfall disasters on slopes. Designing passive protection nets that are effective, accurate, and economical is of great significance for enhancing the comprehensive disaster prevention and mitigation capabilities of the society as a whole. To address frequent rockfall disasters, a discrete element-based design method of passive protection nets for slope rockfall disasters is developed. By establishing the detailed discrete element models of the slope, rockfall, and passive protection net, indicators such as rock movement trajectory, number of intercepted rocks, and interception efficiency are analyzed to determine the parameters of the passive protection net, such as height and length. Then the type suggestion of the passive protection net is put forward based on the monitoring of the speed and impact energy changes of the rockfall. According to the analysis of the deformation variation of the protection net on various positions of the impact cross-section, the maximum deformation position of the passive protection net under the best protective condition is determined. Taking the construction of a reservoir road at a large hydropower station as an example, the discrete element-based design method for passive protection nets is used to quantitatively analyze rockfall disasters, and it is determined that the optimal length of the passive protection net is 30 m and the height is 5 m, with which the

收稿日期: 2022-10-26; 修回日期: 2023-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279140); 陕西省自然科学基金基础研究计划-引汉济渭联合基金项目(2019JLM-55); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2018JZ5010)

作者简介: 张飞云(1992—), 男, 四川达州人, 学士, 工程师, 主要从事公路工程管理工作。

通讯作者: 马春辉(1993—), 男, 山西左权人, 博士, 师资博士后, 主要从事水工结构数值模拟与安全监测方面的研究。

gravel interception efficiency can reach 92% and the slope material is capable of withstanding an impact of 108.5 kJ. Based on the above analysis, the discrete element-based design method for passive protection nets for slope rockfall disasters can quantitatively evaluate the impact scope and degree of rockfall disasters, so it can provide a new approach and some reference for the design of rockfall prevention and control measures in engineering projects such as water conservancy and hydropower stations, roads, and bridges.

Key words: slope rockfall disaster; passive protective net; discrete element; energy analysis; design of passive protective net

1 研究背景

随着水利、交通、旅游开发等基础设施建设的快速发展,在高山峡谷中新建的大坝、库区道路、输气管道等大型工程常面临着高陡边坡等建设环境。这些边坡在自重、风化、水压力、作业扰动等载荷和外部因素的作用下,原有山体极易发生滚石灾害。滚石灾害通常具有泛生性、突发性、随机性的特点^[1],对工程的运营维护造成安全隐患。

随着数值仿真技术的快速进步,以离散元方法为代表的非连续数值仿真方法在散粒体系统的细观相互作用、边坡滑坡、危岩体崩塌和滚石运动等大变形问题的数值模拟中展现出较大的优势。围绕边坡滑坡、崩塌和滚石灾害及其防护措施,国内外众多专家学者做了大量的研究:戎泽鹏等^[2]建立了中武山危岩体离散元模型,分析了危岩体的三维运动轨迹和冲击能量;Ma等^[3]在准确标定堆石料离散元模型细观参数的基础上,精确模拟了堆石边坡的破坏过程;石崇等^[4]通过模拟水电站陡岩边坡的卸荷裂隙发育和断层,分析了地震荷载作用下危岩崩塌机制和坍塌程度;李新坡等^[5]利用离散元模型模拟节理岩质边坡的破坏过程,分析了颗粒粘结强度对堆积体堆积形态和运动距离的影响。围绕滚石灾害,郑成成等^[6]构建了高陡边坡离散元模型,研究了石笼挡墙和混凝土挡墙对滚落块石的拦截效果;张睿骁等^[7]利用离散元方法,分析了滑坡碎屑流经过凹型圆弧、直线型和凸型圆弧3种导引结构后,对拦挡结构的冲击效应;Thoeni等^[8]提出了帘式防护网的离散元模拟方法,并从数值模拟角度验证了其对滚石的阻滑作用;王玉锁等^[9]运用离散元方法明确了大体积落石产生的冲击力,并分析了落石高度、重力及回填土厚度对冲击力的影响规律;Bourrier等^[10]建立了考虑目标场数据收集方法的随机冲击模型,并开发了模拟结果较好的回弹计算程序;Song等^[11]研究了碎屑流冲击作用下,柔性防护结构的减载机理;Toe等^[12]采用离散元方法分析了滚石对树木的冲击作用,并采用敏感性分析方法确定了影响滚石

运动的主要参数。

综上所述,基于离散元的研究大多为滑坡灾害,对滚石灾害尤其是不规则滚石破碎的研究较少,且传统的滚石数值模拟方法大多基于二维地形剖面,将滚石简化为质点而不考虑滚石在运动中的破碎情况,对防护措施的模拟也较为简单,以上因素均会影响数值模拟的仿真效果。

因此本文基于三维离散元方法,提出了滚石灾害防灾减灾工程设计的理论方法,模拟不规则滚石在三维地形中的运动破碎情况和被动防护网对碎石的拦截情况,并基于滚石运动特征参数,对滚石的破碎情况、滚石冲击防护网的动力响应过程和不同尺寸被动防护网的防护效果进行研究,从而对被动防护网的设计提出优化建议和设计理论依据。

2 基于离散元的边坡滚石灾害被动防护网设计方法

离散元方法能够模拟岩石及其内部节理的不连续性和节理特性,使用显式积分迭代算法允许有大的位移和转动,从而实现更好的滚石灾害和被动防护网的模拟效果^[13-15]。以往滚石灾害以及防护措施的数值模拟方法较多,但多集中于滚石灾害与防护网的细观机理研究^[16],未构建基于离散元的边坡滚石灾害被动防护网设计方法框架,未能有效指导被动防护网的优化设计。

因此,本文构建了基于离散元的边坡滚石灾害被动防护网设计方法,主要分为3步:(1)建立离散元模型,构建原始工况和防护工况;(2)模拟滚石灾害过程,实现被动防护网防护效果评价;(3)优化被动防护网设计,确定防护效果最佳的防护网设计参数。在基于离散元的边坡滚石灾害被动防护网设计优化过程中,不同的防护网长度、高度和材料参数下的防护网防护效果存在明显不同。当防护网出现防护效果不佳、防护网存在破坏等情况时,可通过调整被动防护网参数优化设计,直至确定出满足防护要求的防护网参数,从而优化和指导防护措施的设计和布设方案,被动防护网设计方法流程如图1所示。

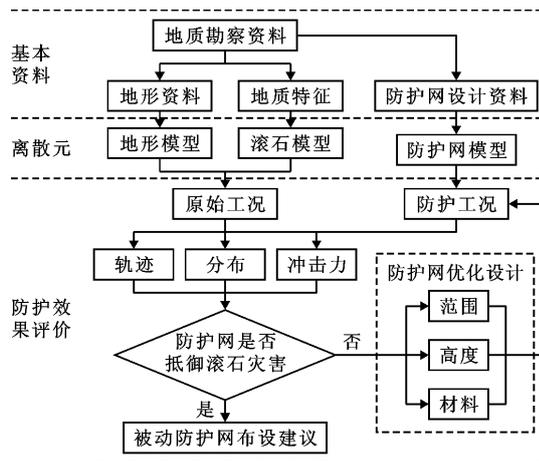


图1 基于离散元的边坡滚石灾害被动防护网设计方法流程图

在基于离散元的边坡滚石灾害被动防护网设计中,需要模拟的工况包括原始工况和防护工况,原始工况主要由地形离散元模型和滚石离散元模型组成,防护工况主要增加了防护网的离散元模型。地形、滚石和防护网的离散元模型建立方法如下:

(1)地形离散元模型。通过工程地质勘察查明 的地形和地质特征,确定可能发生的滚石灾害部位 及其影响范围,据此采用墙面(wall)构建地形的三 维离散元模型。

(2)滚石离散元模型。根据地勘资料、现场实 验等相关资料,明确工程面临的主要滚石灾害发生 位置、尺寸、岩性和规模,并据此采用平行粘结模型 形成滚石离散元模型,并标定颗粒的线性组和平行 粘结组参数。此外,设置滚石与墙面间的接触为线 性接触模型。

(3)防护网离散元模型。根据防护网设计资 料,生成一定粒径且网状排列的颗粒,运用平行粘结

模型将颗粒粘结成防护网,并标定参数,从而完成防 护网的离散元模拟。

为检验防护工况下的滚石拦截效果,在滚石运 动模拟过程中,通过监测滚石及其碎片的滚落轨迹, 分析被动防护网高度设计的合理性;根据滚石碎片 在路面的堆积分布情况,分析被动防护网布置长度 的合理性;通过监测滚石的速度、冲击能变化,为被 动防护网选型提供建议;监测防护网主要部位的形 变情况,分析被动防护网的安全性。

针对边坡滚石离散元数值仿真过程中存在的多 工况、多参数、大批量等问题,本研究二次开发了参 数化滚石被动防护网建模程序,使复杂的离散元数 值模型构建转化为参数化的批量计算。该技术通过 简单的参数设定即可完成大批量、多工况的离散元 数值仿真计算,具有较强的实用性。

3 滚石灾害离散元模型实例

3.1 工程概况

我国西部某混凝土双曲拱坝具有拦沙、防洪、改 善下游航运的作用,水库总库容为 $122.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 坝顶高程为 610 m,正常蓄水位为 600 m,最大坝高 为 278 m。为恢复库区道路,需在库区沿岸复建 7 条公路,全长 137.061 km。水库蓄水后,受库水浸泡、 淘蚀以及库水位升降作用等的影响,库区道路的 松散堆积层岸坡及岩质岸坡发生了规模不等的塌 岸、滑坡、岸坡变形,严重影响了公路的正常通行。 以滚石灾害多发、需设置被动防护网的 K14 + 860 路段为研究对象,采用基于离散元的边坡滚石灾害 被动防护网设计方法,确定该路段的被动防护网设 计参数。该工程滚石多发模拟路段概况见图 2。

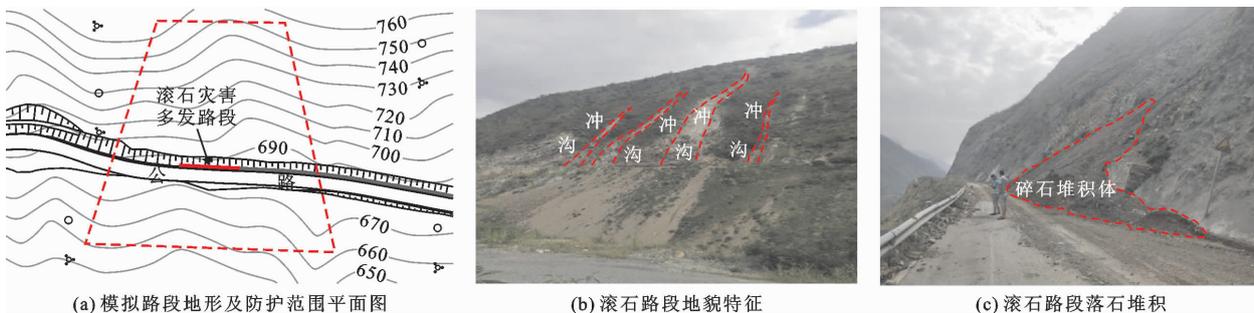


图2 实例工程滚石多发模拟路段概况

该路段基岩岩性为古生界奥陶系中统巧家组与 宝塔组,岩体节理裂隙发育,含少量燧石结核。边坡 岩体极破碎,结构面发育、结合一般,呈碎裂状结构, 属反倾岩质边坡,整体处于稳定状态。边坡分布有 长约 30 ~ 40 m,宽约 0.1 ~ 0.5 m,深约 0.3 ~ 0.5 m

的小冲沟(图 2(b))。滚石主要来源于岩体强风化 层,该层深度为 8 ~ 10 m,强风化强卸荷岩体风化崩 解形成块石及碎石,冲沟上的滚石沿冲沟沟道滚落 至公路路面,堆积形成小型岩堆。目前,已形成的岩 堆沿公路长约 6 ~ 8 m,厚约 3 ~ 5 m(图 2(c))。

3.2 边坡滚石及其防护措施离散元模型构建

本文采用三维离散元模型对工程滚石灾害进行模拟与计算,边坡、滚石及被动防护网的离散元模型如图3所示。公路及边坡均由离散元程序的 wall 构

建,边坡总高度为 144 m,其离散元模型包含 13 547 个面,公路路段长 120 m。根据实地勘察报告,确定坡面和路面法向刚度 $k_n = 20 \text{ MN/m}$,切向刚度 $k_s = 10 \text{ MN/m}$,摩擦系数 $\mu = 0.1$ 。

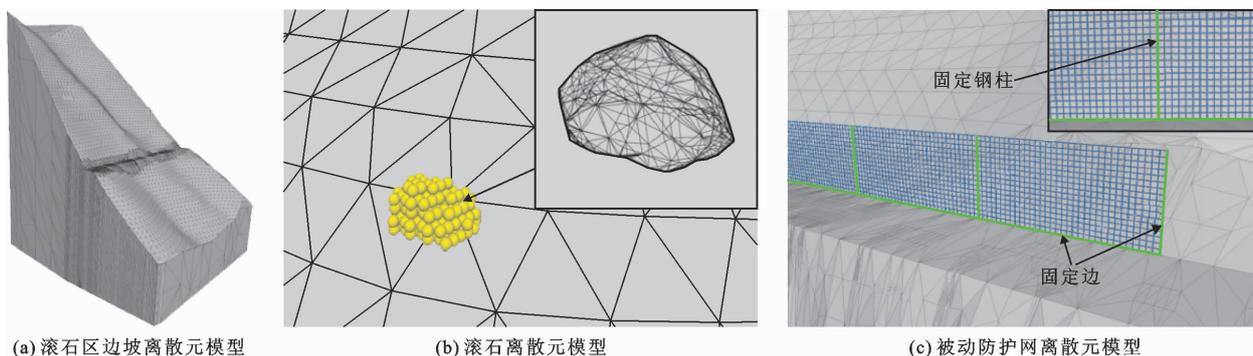


图3 实例工程边坡、滚石及被动防护网的离散元模型示意图

根据现场勘察,确定滚石的初始尺寸为 $2.8 \text{ m} \times 2.2 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$,滚石体积为 4.07 m^3 ,并采用 Cluster 技术生成可破碎的滚石离散元模型。根据实地工程概况确定滚石初始位置位于公路 K14 + 810 自路面沿坡面向上 40 m 处,滚石内部颗粒数目为 182 个,颗粒半径 $r_1 = 0.15 \text{ m}$,并采用平行粘结模型将颗粒胶结在一起组成不规则滚石^[17],如图 3(b)所示。根据地质勘察资料与相关研究资料^[18-19],确定离散元模拟中的滚石颗粒密度 $\rho_1 = 2500 \text{ kg/m}^3$,阻尼系数为 0.3,滚石颗粒间的 ball-ball 平行粘结模型参数标定如表 1 所示。

根据被动防护网体型数据,通过对原有程序进行二次开发,利用循环控制命令构造相邻排列的颗粒模型,再利用平行粘结模型粘结颗粒实现矩形被动防护网离散元模型的构造。对被动防护网的两侧边和底边施加固定约束,并每隔 10 m 固定一竖列颗粒以模拟每隔 10 m 布置的固定钢柱,被动防护网离散元模型如图 3(c)所示。构成被动防护网的颗粒半径 $r_2 = 0.03 \text{ m}$,颗粒的密度 $\rho_2 = 2000 \text{ kg/m}^3$,被动防护网颗粒间 ball-ball 平行粘结模型参数标定如表 1 所示。

4 基于离散元的被动防护网设计分析

被动防护网的设计依据如下:(1)滚石的致灾范围。在沿边坡滚落的过程中,滚石会破碎为大小不一的碎石,碎石的相互碰撞导致滚石的致灾范围扩大,而滚石的致灾范围直接决定了被动防护网的设计长度;(2)滚石的弹跳高度。滚石的弹跳高度直接决定了被动防护网的设计高度;(3)滚石的动能。在已知

滚石质量的前提下,滚石的运动速度越高,冲击防护网的能量就越大,防护网产生的形变也越大,相应对防护网的强度要求就越高,因此滚石的运动速度直接决定了被动防护网的设计强度和形变情况。

表 1 离散元模型参数及取值

模型	参数类型	参数名称	取值
滚石	基本参数	颗粒数目	182
		颗粒半径/m	0.15
		颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2500
		时间步长/s	0.0001
	平行粘结模型	摩擦系数	0.8
		有效模量/MPa	95
		法向刚度/MPa	8
		刚度比	1
		抗拉强度/MPa	3.5
		黏聚力/MPa	350
防护网	基本参数	摩擦角/($^\circ$)	50
		颗粒半径/m	0.03
		颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2000
		时间步长/s	0.0001
边坡	线性接触模型	摩擦系数	0.5
		有效模量/MPa	150
		法向刚度/MPa	8
		刚度比	0.5
		抗拉强度/MPa	553
		黏聚力/MPa	315
防护网	线性接触模型	法向刚度/MPa	20
		切向刚度/MPa	10
		摩擦系数	0.1

被动防护网已广泛应用于崩塌、泥石流、雪崩等

自然灾害的防护工程中^[20-22],目前柔性网防护所能承受的最大冲击能量为12 000 kJ(落石冲击),可防护的泥石流最大冲击体积超过2 000 m³^[23],可防护的碎屑流最大冲击速度约为5~6 m/s^[24]。但若防护网高度不足和防护材料选型不恰当,则存在滚石弹跳越过或绕过防护网的可能性或造成防护网冲击破坏、防护网堆积挤压破坏等风险。分析被动防护网对滚石及其碎片的拦截效果、破坏冲击力和因滚石堆积形成的形变,对拟定、优化被动防护网设计方案至关重要。

4.1 被动防护网长度设计

依据滚石运动特征参数的计算结果,以滚石滚落道路的中心点为起点,分别向两侧建立被动防护网,拟定被动防护网长度分别为10、20和30 m,研究不同长度被动防护网对滚石的拦截效果,如图4所示。

分析图4可知,破碎滚石的溅落范围长度为28.6 m,当被动防护网长度为10 m时,能防护约35%灾害范围的路段;当被动防护网长度为20 m时,能防护约70%灾害范围的路段;当被动防护网长度达到30 m时,已能够拦截最大范围的滚石碎片。因此,基于项目地形资料和路段信息,确定被动防护网的设置位置在路段桩号为K15+205~K15+235路段,长度30 m,以滚石滚落位置为中心布设。

4.2 被动防护网高度设计

根据现场实际地质地貌,拟定该工程被动防护网高度分别为3、4、5 m,研究不同高度被动防护网对滚石的拦截效果。

结果表明,当被动防护网高度为3和4 m时,大量碎石飞跃被动防护网,滚落至公路路面上,如图5(a)、图5(b)所示。跃过被动防护网的碎石会损坏路面、威胁车辆与行人安全,并对坡下区域造成安全隐患,因此高度为3和4 m的被动防护网不满足要求。当被动防护网加高至5 m时,仅有少量碎石越过防护网,原无法拦截的滚石在撞击被动防护网上缘后能量急剧减小,随后在防护网和坡面之间多次碰撞,最终堆积在被动防护网上侧,如图5(c)所示。滚石破碎后的较大碎块也滚落堆积在被动防护网上侧,如图5(d)所示。

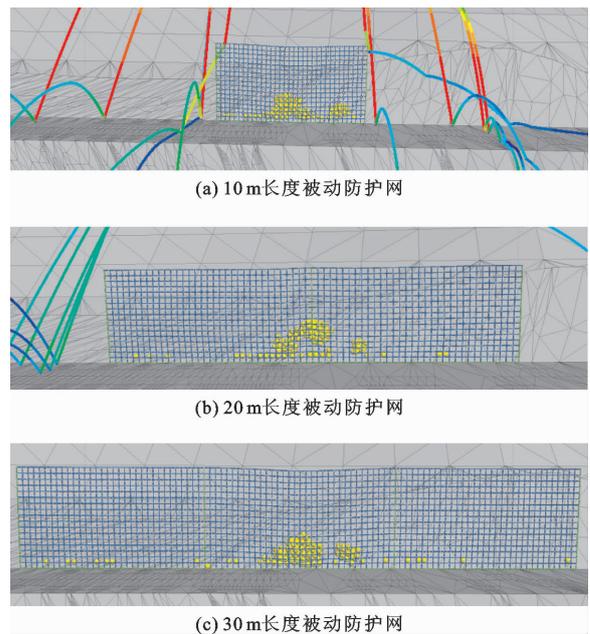


图4 不同长度被动防护网对滚石的拦截效果

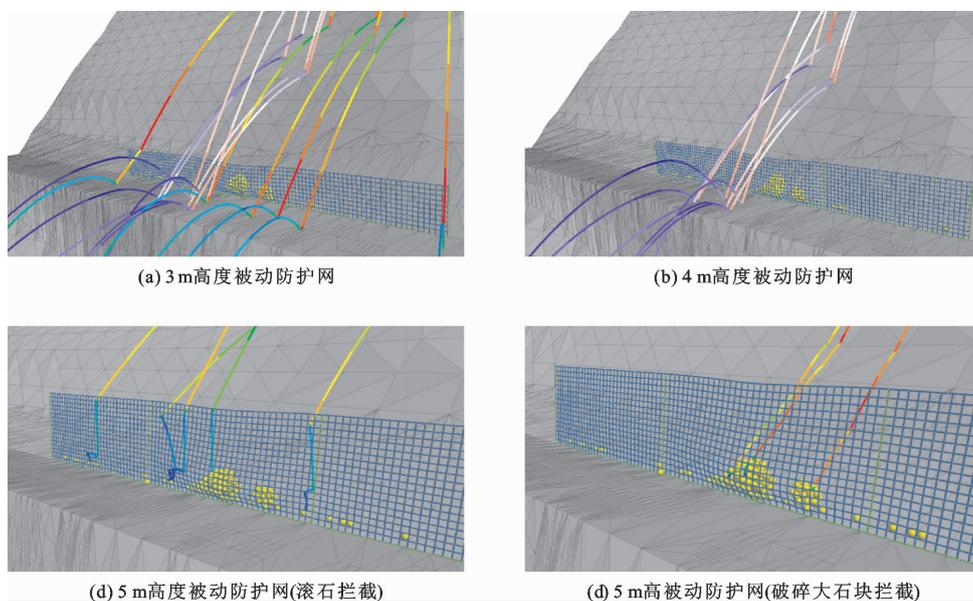


图5 不同高度被动防护网对滚石和破碎石块的拦截效果

为进一步对比不同高度被动防护网的拦截效果,统计计算3、4和5 m高度被动防护网的拦截碎石数目及拦截效率,如图6所示。由图6可知,相比于4 m高度被动防护网,5 m高度被动防护网的拦截碎石数目和防护效率显著提高,拦截石块数目由32增至45,拦截效率由65%提高至92%。因此,5 m高度被动防护网可显著提升滚石防护效果,已能够拦截绝大多数的滚石,仅有少量碎石越过防护网,该高度基本能够满足道路防护要求。

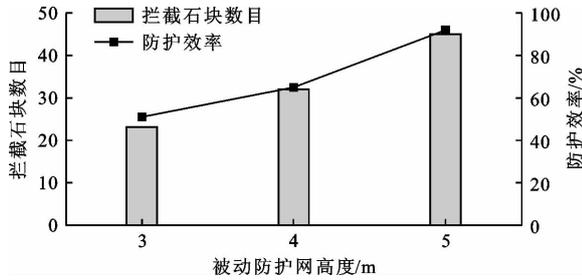


图6 不同高度被动防护网对滚石的拦截效果对比

4.3 被动防护网承受的冲击力分析

滚石破碎后体积最大的3块碎石滚落过程中速度时程曲线如图7所示。由图7可知,滚石碎块在滚落过程中的速度总体不断增大。具体来看,当滚石碎块撞击坡面时,速度减小;当滚石碎块腾空时,速度持续减小,直到达到空中最高点;滚石碎块从空中下落时,速度持续增大,以此循环状态直至撞击到防护网。3块碎石在撞击被动防护网之前速度总体呈现波动增长趋势,主要是因为滚石沿边坡滚落,由重力势能转变为动能,速度总体呈现增长趋势。约92 s时,滚石碎块首次撞击被动防护网,速度陡然发生大幅降低,随后在防护网的阻挡作用下其速度小幅度波动并逐渐趋于零。

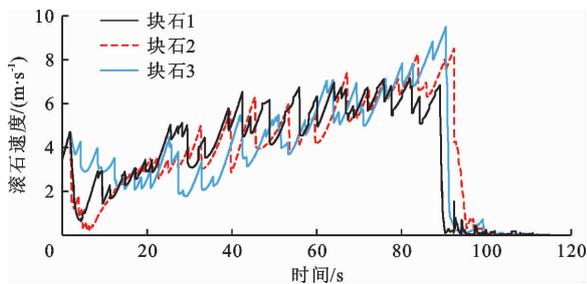


图7 最大3块破碎块石的滚落速度时程曲线

在块石将要撞击到被动防护网时,其基本达到滚落过程的最大速度,具有较大的动能。将滚石动能近似为滚石撞击能,3块滚石碎块的质量分别为812.9、848.3和2403.4 kg,计算出其撞击能分别为

19.4、38.3和108.5 kJ。因此,建议被动防护网应选择至少能够拦截108.5 kJ撞击能的型号,目前大多数型号的被动防护网均能达到此要求。

4.4 被动防护网形变分析

由以上分析可知,该工程长度为30 m、高度为5 m的被动防护网对滚石有较好的拦截效果,为研究防护网是否会遭到破坏或产生过大形变而影响道路安全,对防护网工况下被动防护网的形变情况进行分析。选择最大3块滚石碎块的撞击部位,通过提取被动防护网3条竖直颗粒构成的形变特征断面上的各9个测点(测点A~I)研究被动防护网的形变情况,如图8所示。

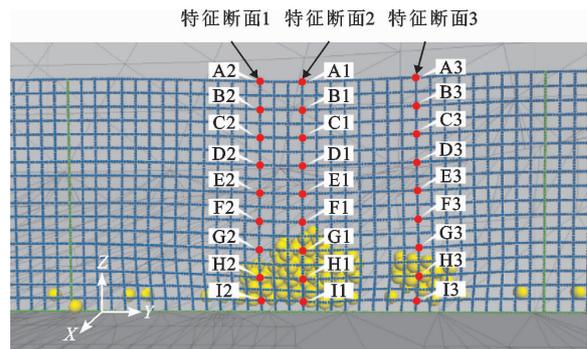


图8 被动防护网形变监测特征断面

被动防护网形变特征断面沿Y方向(道路方向)的位移微小,无需进一步分析研究,其各测点沿X方向(顺坡向)和Z方向(竖直向)形变过程曲线如图9~11所示。由图9~11可以看出,滚石碎片在92 s首次撞击被动防护网时,各特征断面在X和Z方向均达到最大形变,随后防护网在弹性作用下恢复了部分形变量,最后在滚石的回弹挤压作用下被动防护网X和Z方向形变呈现振幅逐渐减小的小幅度震荡变化并趋于稳定。

具体而言:(1)3个特征断面在X方向的最大形变分别为0.68、0.63和0.48 m,且X方向最大形变处均为块石的撞击部位(G1、G2、G3测点)。(2)3个特征断面在Z方向的最大形变分别为-0.28、-0.24和-0.15 m。在Z方向上由于被动防护网颗粒之间的牵扯作用,最大形变处为被动防护网的上缘部位(A1、A2、A3测点),且上缘部位在首次撞击时是向逆坡方向形变,与其他部位位移方向不同,其原因是被动防护网整体具有一定刚度,撞击部位靠近防护网下缘,因而未固定的上缘部位产生逆坡方向的形变。(3)被动防护网X方向形变受碎石撞击的影响比Z方向更大。

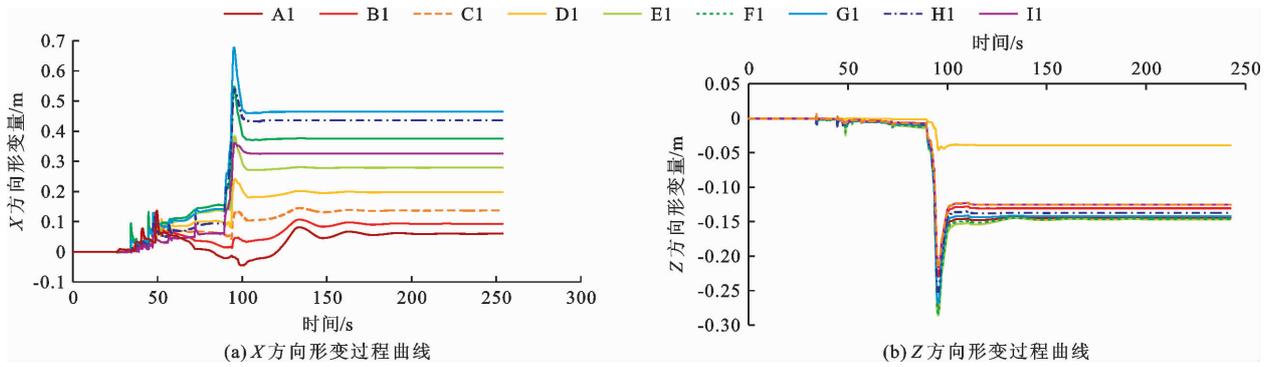


图 9 特征断面 1 的 X、Z 方向形变过程曲线

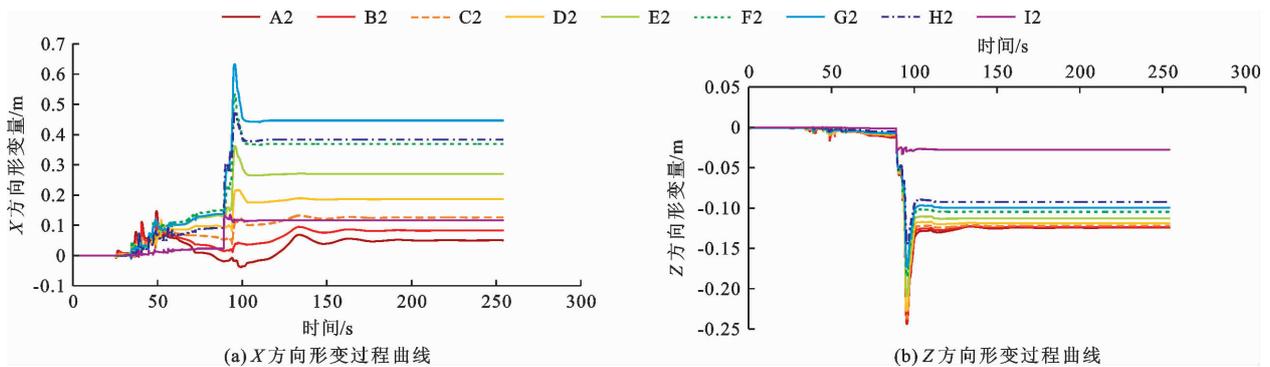


图 10 特征断面 2 的 X、Z 方向形变过程曲线

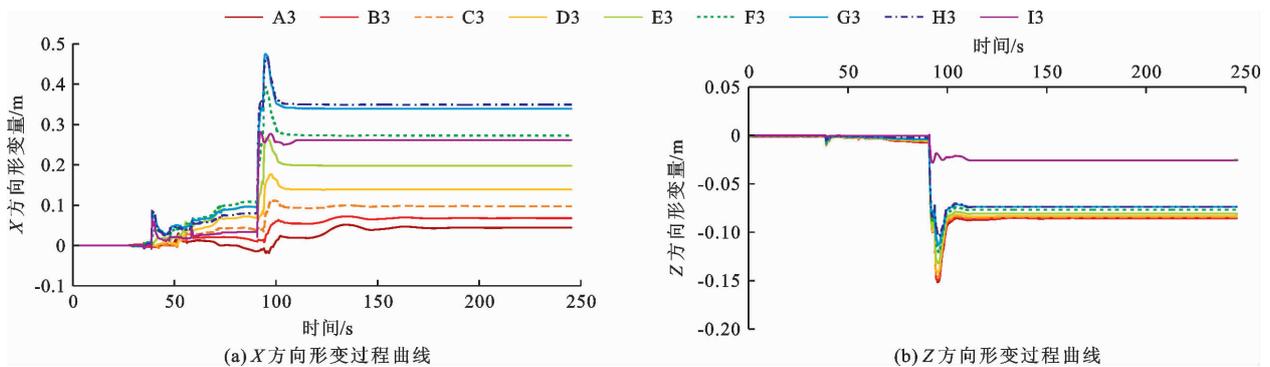


图 11 特征断面 3 的 X、Z 方向形变过程曲线

根据 3 个特征断面各测点的形变值,绘制 3 个断面的被动防护网体型数据曲线,如图 12 所示。

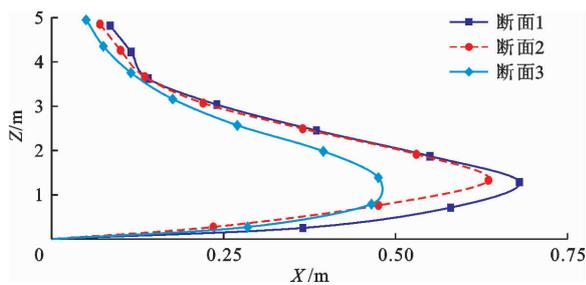


图 12 3 个特征断面的形变体型数据曲线

由图 12 可知,3 块碎石均未撞破被动防护网, X 方向最大形变控制在 0.6 m 左右可基本满足防护要

求。撞击被动防护网的块石质量越大,则防护网形变程度越大,形变最大处为碎石撞击部位,越靠近被动防护网上、下缘形变越小。

5 讨论

在滚石冲击被动防护网的过程中,各个测点沿滚石冲击方向的变形规律大致可分为冲击前、冲击中和冲击后 3 个阶段。冲击前阶段各测点位移无变化,此时滚石尚未撞击被动防护网,滚石本身的速度保持为初始速度;滚石冲击时,被动防护网沿滚石运动方向的位移突然增大,此时滚石的运动方向仍保持原本的冲击方向,但滚石的速度会随着被动防护网位移的增大而逐渐减小;冲击后阶段,滚石与被动

防护网脱离接触,被动防护网失去了外力的冲击,各测点的位移开始发生不同幅度的波动,并且逐渐趋向稳定。这种被动防护网在受到外力冲击前后的变形及其变化规律符合一般被动防护网的物理特性。有专家学者同样使用离散元的建模方法建立了碎屑流被动防护网的离散元模型,模型受到外力冲击的整体变化趋势与本文所建立模型的变形规律相同^[25],因此本研究建立的被动防护网离散元模型有较高的可信度,可对离散元法在滚石灾害工程中的应用及被动防护网的选型提供参考。

目前在滚石问题的研究中,考虑滚石的不规则性以及运动过程中破碎情况的研究成果较少。本文基于离散元法,在参考之前专家学者的建模方法以及结论的同时,考虑了石块的不规则性和可破碎性,建立了不规则可破碎石块冲击被动防护网的离散元模型,并通过相关成果验证了模型的可行性。

6 结 论

本文构建了基于离散元的边坡滚石灾害被动防护网设计方法,通过建立滚石灾害频发的实例工程道路边坡模型、滚石模型和被动防护网模型,模拟了滚石灾害的三维运动过程,定量分析了不同被动防护网方案下的滚石运动情况,主要结论如下:

(1)当被动防护网长度增加到30 m时,能够较好地防护受滚石碎片影响的路段,当高度增加到5 m时,滚石拦截率能够达到92%,能够满足道路防护要求。

(2)滚石撞击被动防护网后速度大幅陡降,随后速度小幅度波动并逐渐趋于零。滚石碎块的最大冲击能为108.5 kJ,该数据可为工程被动防护网选型提供依据。

(3)滚石首次撞击被动防护网时,被动防护网的变形量达到最大,且滚石质量越大被动防护网的变形越大,随后变形得到一定程度恢复,并呈小幅度波动变化,最终达到稳定。

参考文献:

[1] SILVEIRA L R C, LANA M S, ALAMEDA - HERNANDEZ P, et al. A new methodology for rockfall hazard assessment in rocky slopes[J]. *Mining*, 2022, 2(4): 791 - 808.

[2] 戎泽鹏,范宣梅,董远峰,等. 基于PFC^{3D}和Rockfall的中武山危岩体数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(8): 3203 - 3210.

[3] MA Chunhui, YANG Jie, ZENZ G, et al. Calibration of the microparameters of the discrete element method using a

relevance vector machine and its application to rockfill materials[J]. *Advances in Engineering Software*, 2020, 147: 102833.

- [4] 石崇,王盛年,刘琳. 地震作用下陡岩崩塌颗粒离散元数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S1): 2798 - 2805.
- [5] 李新坡,何思明. 节理岩质边坡破坏过程的PFC2D数值模拟分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(S1): 70 - 75.
- [6] 郑成成,龙小刚,胡广柱,等. 基于离散元的高陡堆石边坡失稳过程模拟[J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(6): 92 - 98.
- [7] 张睿骁,樊晓一,姜元俊,等. 滑坡-碎屑流冲击导引结构的离散元模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 161 - 168.
- [8] THOENI K, GIACOMINI A, LAMBERT C, et al. A 3D discrete element modelling approach for rockfall analysis with drapery systems [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 68: 107 - 119.
- [9] 王玉锁,李俊杰,李正辉,等. 落石冲击力评定的离散元颗粒流数值模拟[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(1): 22 - 29.
- [10] BOURRIER F, DORREN L, NICOT F, et al. Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model[J]. *Geomorphology*, 2009, 110(3 - 4): 68 - 79.
- [11] SONG Dongri, CHIO C E, NG C W W, et al. Load-attenuation mechanisms of flexible barrier subjected to bouldery debris flow impact [J]. *Landslides*, 2019, 16: 2321 - 2334.
- [12] TOE D, BOURRIER F, OLMEDO I, et al. Analysis of the effect of trees on block propagation using a DEM model: implications for rockfall modelling [J]. *Landslides*, 2017, 14: 1603 - 1614.
- [13] 孙超,刘芳,蒋明镜. 不同厚度及边界胶结颗粒抗压特性离散元分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(1): 70 - 76 + 83.
- [14] 徐泳,孙其诚,张凌,等. 颗粒离散元法研究进展[J]. *力学进展*, 2003, 33(2): 251 - 260.
- [15] LIU Jia, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Numerical simulation of failure behavior of brittle heterogeneous rock under uniaxial compression test [J]. *Materials*, 2022, 15(19): 7035.
- [16] 齐欣,赵世春,韦韬,等. 防落石冲击柔性被动拦截网试验与数值分析[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(S2): 62 - 68.
- [17] HUANG Chenchen, ZHU Cheng, MA Yifei, et al. Investigating mechanical behaviors of rocks under freeze - thaw cycles using discrete element method [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55: 7517 - 7534.

(下转第190页)

- 价研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- [5] GUTIERREZ F, PARISE M, DE WAELE J, et al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. *Earth - Science Reviews*, 2014, 138:61 - 88.
- [6] ZHANG Ke, CAO Ping, MA Guowei. et al. A new methodology for open pit slope design in karst-prone ground conditions based on integrated stochastic-limit equilibrium analysis[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 2737 - 2752.
- [7] 孙平安,李秀存,于爽,等. 酸雨溶蚀碳酸盐岩的源汇效应分析——以广西典型岩溶区为例[J]. *中国岩溶*, 2017,36(1):101 - 108.
- [8] 陈小婷,黄波林,李滨,等. 三峡水库碳酸盐岩区岩溶作用与斜坡破坏[J]. *中国岩溶*,2020,39(4):567 - 576.
- [9] 张凤. 观音岩水电站左岸坝后高边坡岩体稳定性研究[D].成都:成都理工大学,2013.
- [10] 武亚遵,林云,万军伟,等. 碳酸盐岩单裂隙渗流-溶蚀耦合模型及其参数敏感性分析[J]. *中国岩溶*,2016,35(1):81 - 86.
- [11] 邓华锋,齐豫,李建林,等. 水-岩作用下断续节理砂岩力学特性劣化机理[J]. *岩土工程学报*,2021,43(4):634 - 643.
- [12] 王志文,赵海军,马凤山,等. 非均质共面断续节理岩体拉伸剪切破裂机制研究[J]. *工程地质学报*,2019,27(5):989 - 999.
- [13] 周子涵,陈忠辉,包敏,等. 顺倾断续节理岩质边坡的稳定性突变[J]. *煤炭学报*,2020,45(S1):161 - 172.
- [14] 陈洪凯,唐红梅. 危岩主控结构面疲劳断裂寿命计算方法[J]. *应用数学和力学*,2007,28(5):575 - 580.
- [15] 简文彬,樊秀峰,彭军,等. 交通荷载下岩坡疲劳劣化及其服役寿命研究[J]. *水利与建筑工程学报*,2014,12(1):1 - 5.
- [16] 李珣. 酸雨作用下边坡失稳机理的试验研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [17] 陈卫昌,李黎,邵明申,等. 酸雨作用下碳酸盐岩类文物的溶蚀过程与机理[J]. *岩土工程学报*,2017,39(11):2058 - 2067.
- [18] 毛亮,于青春,王敬霞,等. 降雨对裂隙型岩溶含水系统演化影响的数值模拟研究[J]. *中国岩溶*,2017,36(1):42 - 48.
- [19] 孔祥芝,陈改新,李曙光,等. 渗漏溶蚀作用下碾压混凝土层(缝)面抗剪强度衰减规律试验研究[J]. *水力学学报*,2017,48(9):1082 - 1088.
- [20] 常锦,杨和平,肖杰,等. 酸雨入渗对膨胀土抗剪强度的影响及微观试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*,2019,50(1):206 - 213.
- [21] 程平. 考虑应力-化学作用的峡江段危岩破坏机制[D].重庆:重庆交通大学,2021.

(上接第182页)

- [18] 高军军,汤雷,刘斯宏,等. 土工袋双轴压缩的离散元数值模拟[J]. *水利水电科技进展*,2019,39(1):39 - 45.
- [19] 张小勇,李晓军. 高速公路滑坡稳定性离散元模拟研究[J]. *地下空间与工程学报*,2016,12(S11):380 - 385 + 403.
- [20] HE Fan, LIU Ze, SHI Keyou, et al. Lateral pullout tests and modeling failure modes for nongrouted anchor nails in flexible protection system[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, 22(4): 06022001.
- [21] WENDELER C, VOLKWEIN A, ROTH A, et al. Hazard prevention using flexible multi-level debris flow barrier[C]// 11th Interpraevent Conference Proceedings, 2008:547 - 554.
- [22] 贺咏梅,成铭. 柔性防护技术在泥石流防护中的应用及研究进展[J]. *水土保持研究*,2007,14(3):292 - 294 + 299.
- [23] XUN Huang, ZHANG Zhijian, XIANG Guoping. Sensitivity analysis of a built environment exposed to the synthetic monophasic viscous debris flow impacts with 3-D numerical simulations[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2023, 23(2): 871 - 889.
- [24] WU Shunchuan, XU Xueliang. A study of three intrinsic problems of the classic discrete element method using flat-joint model[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 1813 - 1830.
- [25] 肖思友,苏立君,姜元俊. 碎屑流冲击柔性网的离散元仿真研究[J]. *岩土工程学报*,2019,41(3):526 - 533.