

文章编号: 1007-2993(2026)03-0384-09

落石冲击下高边坡柔性防护网系统力与变形演化规律

章宇彬¹ 郎晓明² 瞿鑫¹ 白亮³

(1. 浙江甬舟复线一期高速公路有限公司, 浙江舟山 316100; 2. 舟山市大桥建设管理中心, 浙江舟山 316100;
3. 浙江大学建筑工程学院, 浙江杭州 310058)

【摘要】 柔性防护网作为高边坡落石灾害的主要防护手段, 具有施工快速、安装便捷、防护能力突出等优点。以某高速公路改扩建工程为实例, 基于离散元方法, 对柔性防护网、边坡及落石进行数值仿真建模, 并对高边坡落石冲击防护网的全过程进行模拟, 探究了落石从崩落到冲击防护网过程的运动轨迹和速度变化规律, 并详细分析了落石冲击防护网过程的动力学响应。研究表明: 柔性防护网通过耗能器逐步吸收落石动能, 可以大幅降低落石速度, 并有效拦截高速落石; 落石冲击被动防护网时, 有两个变形峰值区, 对应落石首次冲击和落石从防护网中段落至底部的二次冲击, 最大形变量发生在首次冲击; 防护网锚绳受力分析表明, 不同位置的锚绳受力不同, 受冲击位置影响较大。本研究证实了柔性防护网在应对高边坡落石灾害中的关键作用, 为高边坡落石防护提供了理论依据和实践指导。

【关键词】 离散元模拟; 落石防护; 柔性防护网; 高边坡

【中图分类号】 P642.21

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0576

Evolution of forces and deformations of flexible protective net system of a high slope under rockfall impacts

ZHANG Yubin¹ LANG Xiaoming² QU Xin¹ BAI Liang³

(1. Zhejiang Ningbo-Zhoushan Duplex Line Phase I Highway Co., Ltd., Zhoushan 316100, Zhejiang, China; 2. Zhoushan Bridge Construction Management Center, Zhoushan 316100, Zhejiang, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

【Abstract】 Flexible protective nets are the primary means of protection against rockfall disasters on high slopes, characterized by rapid construction, easy installation, and outstanding protective capabilities. This paper takes a highway reconstruction project as an example and employs the discrete element method to numerically simulate the flexible protective net, slope, and falling rocks, simulating the entire process of high slope rockfall impacting the protective net. The study investigates the motion trajectory and velocity change patterns of rocks from detachment to impact with the protective net and provides a detailed analysis of the dynamic response during the rock impact on the protective net. The results show that flexible protective nets can significantly reduce the velocity of falling rocks and effectively intercept high-speed rocks by gradually absorbing their kinetic energy through energy dissipaters. The research finds that there are two deformation peak areas when rocks impact the passive protective net, corresponding to the first impact and the second impact when the rock falls from the net to the bottom. The maximum deformation occurs during the first impact. Analysis of the forces on the protective net's anchor ropes indicates that the forces on anchor ropes at different positions vary, with significant influence from the impact location. This study confirms the key role of flexible protective nets in dealing with rockfall disasters on high slopes, providing important theoretical basis and practical guidance for high slope protection.

【Key words】 discrete element simulation; rockfall protection; flexible protective net; high slope

0 引言

高速公路工程中存在大量人工边坡或高陡自然边坡, 在施工扰动或自然因素的作用下易发生边坡落

石灾害, 制约了工程的安全性和经济性, 严重影响工程建设的投资效益和人员安全^[1-3]。柔性防护网凭借其施工快速、安装便捷、防护能力突出等优势被广泛

基金项目: 浙江省交通运输重大研发项目(ZJXL-JTT-202201A)

作者简介: 章宇彬, 男, 1989年生, 大学本科, 正高级工程师, 主要从事边坡防护研究。E-mail: 759239713@qq.com

通信作者: 白亮, 男, 2001年生, 在读硕士研究生, 主要从事边坡防护研究。E-mail: bailiang7852@163.com

用于边坡落石灾害防护^[4-5]。

落石冲击防护网过程包括大变形等多种非线性力学行为, 动态力学行为复杂。国内外学者通过理论分析、试验研究和数值模拟等方法对该过程开展了大量研究。理论方法^[6-9]可以计算出规则边界条件下简单柔性被动网的变形和极限承载力, 但无法解决复杂边界条件下的复杂落石-柔性被动网相互作用问题。试验方法^[10-13]可以通过高速摄像机和传感器设备研究复杂的岩落-柔性被动网的相互作用, 但存在成本高、可重复性低、测试过程存在风险等缺点, 不便于广泛实施。数值模拟技术的进步和发展为落石冲击被动防护网过程的研究开辟了新的途径, 逐渐成为广泛采用的研究落石冲击被动防护网过程的方法。Hambleton 等^[14]考虑“子弹效应”提出被动柔性防护网临界动能的数值模型; Yu 等^[15]针对落石几何形状的影响, 采用球形度对落石几何形状进行标定, 通过有限元模拟发现小球形度落石在高速冲击下可能会出现子弹效应, 为应对该类冲击, 提出加强环网局部阻力的建议; Koo 等^[16]针对冲击荷载类型, 建立了碎石与落石冲击的数值模型, 讨论了面荷载与集中荷载冲击下系统动力响应的变化; Moon 等^[17]研究了钢柱坡面夹角对防护性能的影响, 结果显示钢柱的倾斜角度在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 时能为系统提供更好的工作能力; 郑成成等^[18]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; 刘成清等^[19-23]和 Yang 等^[24]研究了柔性被动防护网的整体变形以及减压环、钢柱等关键构件的耗能及其破坏机理。

传统有限元方法(FEM)在模拟防护网这类强非线性系统时存在一定局限性。在冲击载荷下, 防护网网格的剧烈变形易使 FEM 网格畸变, 导致计算收敛困难, 且 FEM 难以精确捕捉防护网在动态冲击中的细观力学行为。相比之下, 离散元方法(DEM)凭借其独特的非连续介质处理机制, 能够通过颗粒单元间的动态接触, 精准模拟防护网在冲击下的结构变化, 更适应冲击中的大变形计算。因此, 本文以某高速公路改扩建工程为背景, 运用离散元方法对实际边坡、落石和柔性防护网进行建模, 旨在研究高边坡落石冲击下柔性防护网的防护效用, 捕捉落石轨迹与速度, 探究防护网受冲击时的力学与变形行为, 为高边坡落石防护提供理论和实践指导。

1 柔性防护网建模方法

1.1 DEM 数值方法

离散元方法(Discrete Element Method, DEM)适用于研究由大量离散体组成的系统的动态力学行为。

通过模拟单个颗粒的运动和相互作用, 来计算整个系统的宏观力学行为。本文利用 DEM 方法在 Particle Flow Code(PFC)颗粒程序上对柔性防护网的各个部件进行建模。该方法核心原理基于牛顿第二定律:

$$\begin{cases} m_i \frac{dU_i^p}{dt} = \sum_{j=1}^{n_c} F_{ij}^c + F_i^g \\ I_i \frac{d\omega_i^p}{dt} = \sum_{j=1}^{n_t} (M_{ij}^t + M_{ij}^r) \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_i 和 I_i 分别为颗粒 i 的质量和转动惯量; U_i^p 和 ω_i^p 分别为颗粒 i 的平动速度和转动角速度; n_c 为颗粒 i 的总接触数; F_{ij}^c 为作用在颗粒 i 上由颗粒 j 或墙面产生的接触力; F_i^g 为作用在颗粒 i 上的重力; M_{ij}^t 和 M_{ij}^r 分别为由切向力和滚动摩擦力作用在颗粒 i 上的力矩。

颗粒间相互作用通过颗粒间接触模型实现。本研究中, 颗粒间相互作用采用平行黏结接触模型(见图 1)。接触黏结可以视作一组弹簧, 法向与切向刚度保持为常数, 均匀地分布在接触面和中心接触点, 这些弹簧与线性元件弹簧平行。如图 1 所示, 当平行黏结键产生后, 在接触处发生的相对运动使黏结材料内部产生力和力矩。接触颗粒间的相互作用力与力矩作用于两个接触颗粒上, 其大小取决于平行黏结键周边材料中的应力分布, 当最大正应力或剪应力达到临界值时即引发断裂。此时, 该黏结键及其所承载的力、力矩贡献均被完全移除。

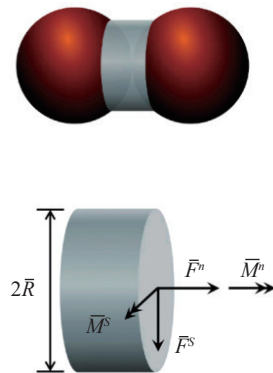


图 1 平行黏结接触模型

Fig. 1 Parallel bonding contact model

1.2 柔性防护网建模

柔性防护网由网面、锚绳、耗能器和钢柱 4 部分组成。当边坡产生的崩塌落石下落冲击防护网时, 首先接触到网面, 网面承受冲击后变形并把冲击力传递给布置于网上下边的锚绳, 当力达到一定程度, 激活和锚绳连接的耗能器, 耗能器通过弹塑性变形消耗能量。锚绳、网面及耗能器均与钢柱在连接点处锚固。

为了实现准确模拟柔性防护网的目的,采用平行黏结接触模型,并用键合颗粒来模拟柔性防护网的所有组件。具体包括以下3个步骤:

(1)颗粒位置和颗粒性质的确定。根据防护网组件的几何形状,将颗粒排列成所需的形状。一组颗粒沿网面中每个网元的中心线放置。所有这些颗粒的直径都假定是相同的,并根据网元的厚度进行估计。由于颗粒之间相互接触,网面可能需要大量的颗粒,这会导致很高的计算成本。在这种情况下,可能需要调整颗粒大小。在确定颗粒大小后,可以通过约束所有颗粒的总质量等于网元的总质量来计算颗粒的密度。对于锚绳的模拟,可以执行类似的过程,其中颗粒沿直线分布。对网元和锚绳的形状进行精确建模可以恢复网元之间以及网元与索之间的摩擦滑动,这可能有助于防护网以符合物理实际的合理方式重新分配防护网内的载荷。对于耗能器,以捕捉到它的功能性为准,而不需要考虑它的原始形状。使用两个结合的颗粒来模拟嵌入在锚绳中的能量耗散器。控制模拟耗能器机械响应的是两个颗粒之间的键,而不是

颗粒本身。

(2)施加平行黏结键。为了与步骤(1)中的颗粒形成完整组件,采用平行黏结键来连接颗粒。与只能维持力的接触键不同,平行键可以维持力和力矩。在本研究中,通过考虑轴向力 F_n 与平行黏结体的轴向变形 U_n 之间的线性关系,假定用于钢柱、网元和锚绳建模的平行黏结体的法向刚度为常数(见图2(a))。为了捕捉能量耗散器的行为,进一步实施了三线性定律,也即平行黏结键的正常刚度在三个阶段是不同的(见图2(b))。如图2所示,当耗能器的轴向力 F_n 小于激活力 F_{n1} 时,第一阶段捕获耗能器的弹性变形,当轴向力 F_n 达到激活力 F_{n1} 后,第二阶段模拟耗能器的最大塑性变形,耗能器在这一阶段的刚度通常比第一阶段小。一旦轴向力达到 F_{n2} ,耗能器就会加强,它的行为就像锚绳一样。本研究将三线性模型简化为双线性模型,方法是给 F_{n2} 赋一个极大的值,这样就永远不会达到第三阶段。当力和力矩作用在平行黏结键上时,如果最大拉应力超过黏结的抗拉强度或最大剪应力超过黏结的剪切强度,平行黏结将断裂。

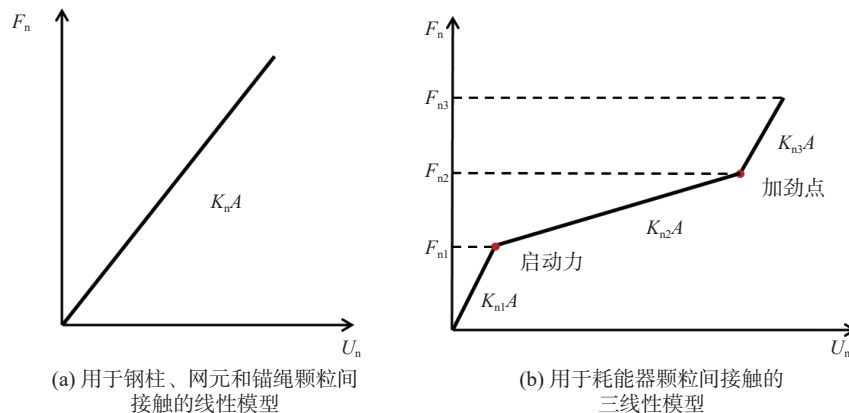


图2 平行黏结键的两种施加形式
Fig. 2 Two forms of application of parallel bonding bonds

(3)模型参数标定。建模过程中,需要先仔细校准与颗粒和并行黏结键相关的两组参数,然后才能用于模拟。在模拟落石对柔性防护网的冲击时,防护网颗粒的参数控制着落石对网的物理相互作用,包括摩擦,碰撞以及阻力。并行黏结键的性质控制着防护网对物理相互作用的响应,例如防护网的变形和载荷的转移分配。

应用 DEM 模拟柔性环网屏障,可以真实地捕捉到防护网部件的关键几何和力学特性。网面和锚绳的形状可以用结合的颗粒模拟,便于对网面和锚绳之间的扭曲和碰撞进行建模。耗能器的弹塑性加劲行为可用两线性定律再现(将三线性模型简化)。同时,

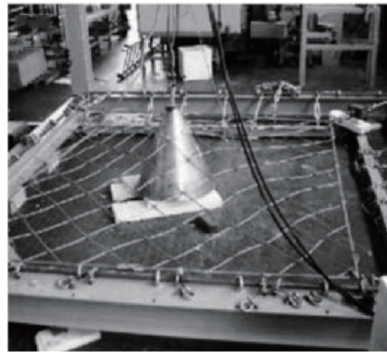
颗粒-颗粒重叠产生的接触力不受键模型的影响。如果两个颗粒通过键连接,并且同时有重叠,则键合力和接触力都适用。当键断裂时,结合力将停止施加,而如果颗粒间仍有重叠,则接触力将保持不变。

1.3 防护网参数标定

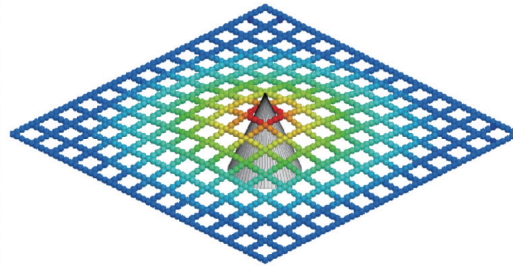
离散元方法通过设定模型中的细观参数来模拟目标材料的宏观力学特性,细观参数一般通过数值试验和物理试验进行标定。本研究根据 Albaba^[25]提到的四边形防护网冲孔试验对参数进行标定(见图3),该试验将柔性网面(3 m × 3 m)四边固定在金属框架上(见图3(a)),冲孔元件从网板中心推出,记录网面的负载-位移行为,构建的数值模型再现了网格的几

何形状和载荷条件(见图 3(b)), 通过测试不同的弹性模量值, 直到获得良好的校准结果。参数标定后,

物理试验与数值模拟的对比情况如图 4 所示。



(a) 物理试验模型



(b) DEM模型

图 3 冲孔试验

Fig. 3 Punching test

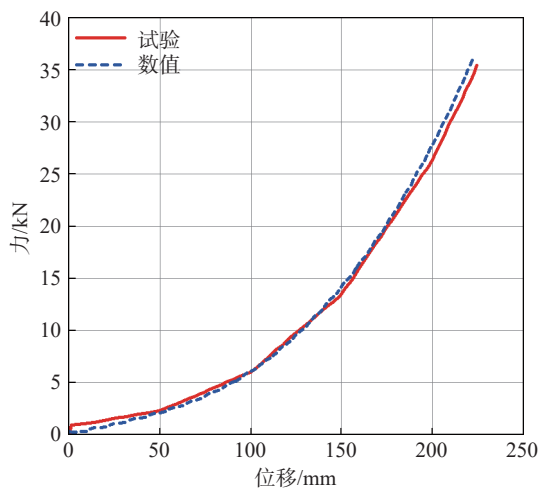


图 4 冲孔试验^[25]与离散元数值模拟对比

Fig. 4 Comparison of punching test values^[25] and discrete element numerical modeling

2 数值模型设置

数值模型由边坡、落石和被动柔性防护网三部分组成。为了贴近工程实际, 以某高速公路改扩建工程典型边坡为背景建立边坡模型, 如图 5 所示, 该边坡最大坡高 43 m, 按 5 级放坡开挖, 自下而上各级边坡坡比分别为 1 : 0.50, 1 : 0.75, 1 : 0.75, 1 : 1.00, 1 : 1.25, 各级之间设置碎落平台, 宽度 2.0 m。

落石以单个球形颗粒模拟, 防护网由大量颗粒以平行黏结键互相胶结组成。在计算域中, 将半径为 0.63 m 的球形落石置于坡顶, 施加重力, 使之从坡顶自由下落, 最终在重力作用下落至坡底并与布置于此处的柔性防护网接触。

防护网几何模型如图 6 所示, 防护网宽 10 m, 高 5 m, 布置在最下方一级边坡坡脚。防护网由网面、锚绳、耗能器、钢柱组成, 网面钢丝半径 0.03 m, 即离

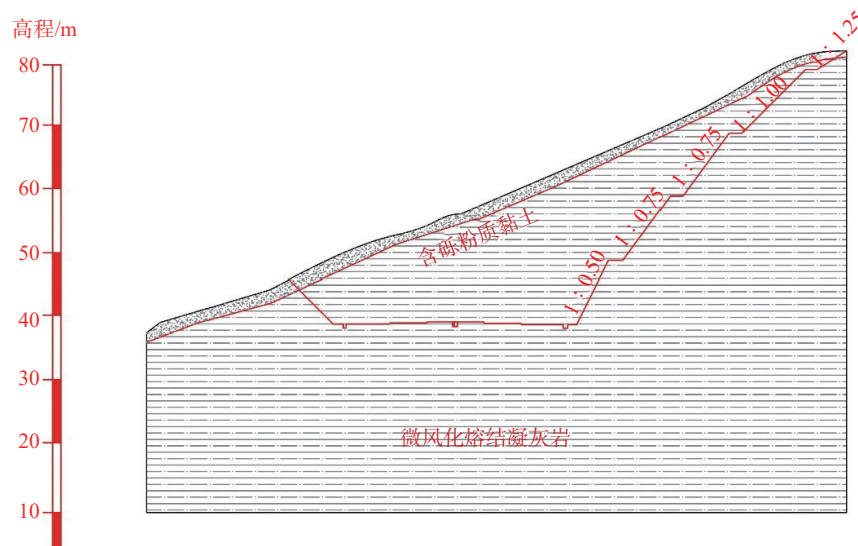


图 5 某高速公路改扩建工程典型边坡

Fig. 5 Typical slope in a highway reconstruction and expansion project

散元颗粒半径为 0.03 m, 锚绳半径与钢丝半径相同。耗能器内嵌于锚绳中, 布置在锚绳边缘接近钢柱处,

钢柱底部固定。防护网网格间隔为 0.294 m, 锚绳间隔为 1 m。防护网各部件接触模型参数见表 1。

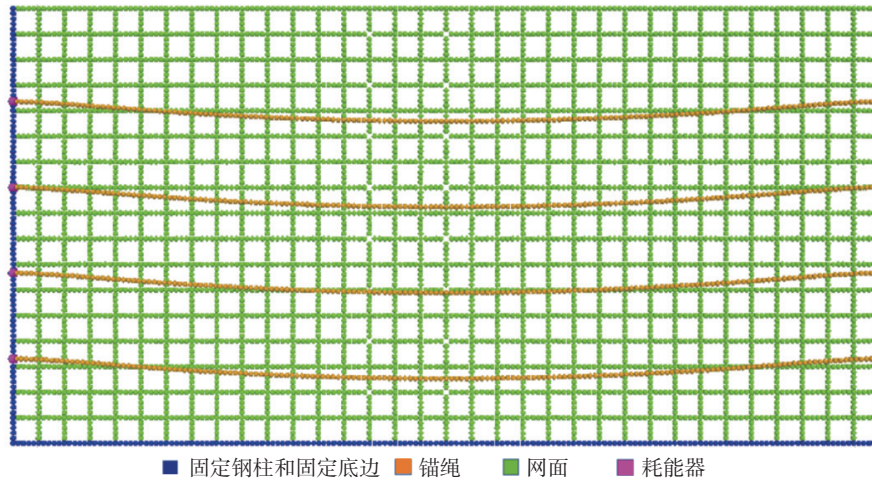


图 6 边坡防护网的离散元建模

Fig. 6 Discrete element modeling of slope protection net

表 1 防护网各部件接触模型参数表

Tab. 1 Contact model parameter table of each component of protective net

模型	参数类型	参数名称/单位	取值
落石	基本参数	颗粒半径/m	0.63
		颗粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2500
		时间步长/s	0.0001
	线性接触模型	法向刚度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	5.0×10^3
		切向刚度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	5.0×10^3
防护网网面及锚绳	基本参数	颗粒半径/m	0.03
		颗粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2000
		摩擦系数	0.5
	平行黏结模型	线性有效模量/MPa	5
		黏结法向刚度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	4.8×10^5
		黏结抗拉刚度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	4.8×10^5
		黏聚力/MPa	31
耗能器	三阶段激活力/kN	0, 50, 80	
		2.0×10^6	
		各阶段刚度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	1.3×10^5 3.2×10^5
边坡	线性接触参数	法向刚度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	5.0×10^3
		切向刚度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	5.0×10^3
		摩擦系数	0.3

3 结果分析

3.1 落石轨迹及速度分析

图 7 展示了落石从坡顶崩落的典型运动轨迹。落石从高达 43 m 的坡顶无初速度掉落, 首先沿五级坡面滑移到级间碎落平台上, 在四级边坡上发生垂直

坡面的弹动和平行坡面的滑动。在到达三级碎落平台时落石已有极大的动能, 在巨大的动能作用下, 落石发生弹跳, 直接落至一级边坡并与边坡防护网发生碰撞, 最终被防护网拦截停止。

图 8 为落石体在整个崩落和冲击防护网过程的

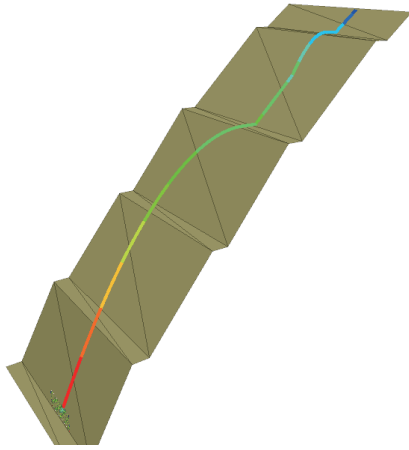


图7 落石在边坡滚落的运动轨迹

Fig. 7 The motion trace of falling rock falling on the slope

速度时程曲线。由图8可以观察到,落石在下落过程中重力势能转化为动能,落石总体速度在不断增加,在约3.3 s时速度发生突降是由于落石撞击四级碎落平台产生的动能损失所致,在第6 s时落石与防护网开始接触,防护网功能启动,承受冲击力并消耗落石动能,落石速度从25.5 m/s急速降至0,根据动能计算公式可计算出落石最大动能为812.8 kJ。观察到速度在降低到0之前有一个回升段,这是因为球状落石被网面中段拦截,此时落石距离地面还有数米高度,在从网中段下落至坡面过程中重力势能再度转化为动能,使落石速度短暂增加,在防护网底部发生二

次冲击,最终被完全拦截。

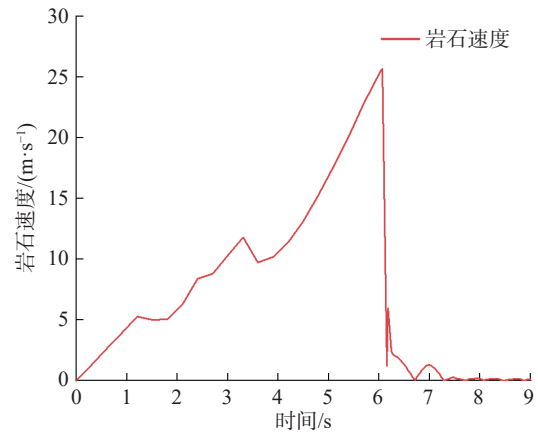


图8 落石崩落过程的速度时程曲线

Fig. 8 Velocity-time history curve of rockfall process

采用逐步增大冲击能量直至网体破坏的方法,对防护网参数进行极限承载能力数值模拟分析,结果表明该防护网系统的最大防护能级为904.6 kJ。该工况的落石冲击动能(812.8 kJ)在极限值的90%以内,符合一般的工程安全裕度要求。

3.2 防护网变形和应力分析

为探究防护网是否会遭到破坏或产生较大变形影响道路安全,选取两个防护网截面作为特征断面,每个截面提取8个测点研究被动防护网的形变情况(见图9)。

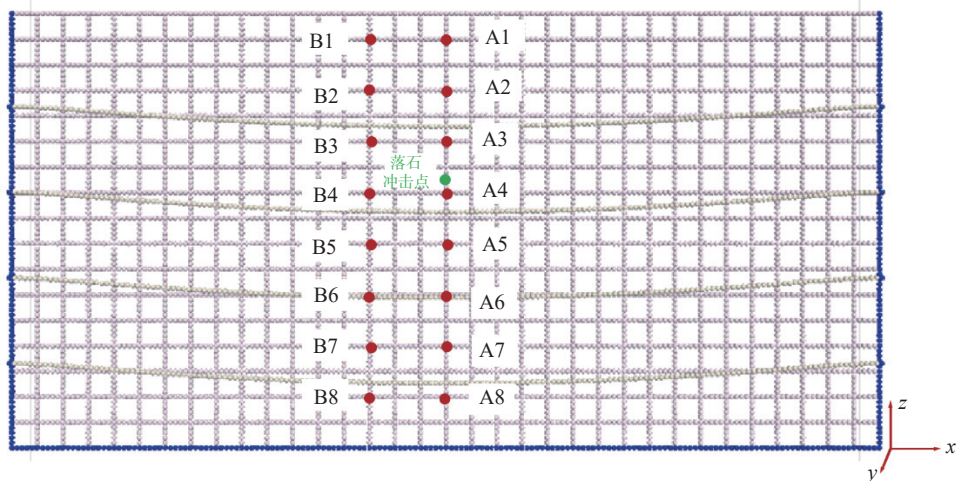


图9 防护网特征截面(A截面和B截面)及截面测点分布

Fig. 9 Distribution of characteristic sections (section A and section B) and measurement points of the protective net

A截面是整个防护网的中心截面,B截面偏离中心截面一定距离。图10(a)、图10(b)显示了两个截面各测点的形变时程曲线。可以看出,落石在6 s首次冲击被动防护网时,中心截面A在Y方向(顺坡向)形变最大值为1.1 m,表明落石冲击点在防护网

测点A4附近。随后在防护网的弹性作用下恢复部分形变量,最后落石从网面中段落至坡底,滚动至防护网底部,造成二次冲击,被动防护网底部测点的形变增大,最大形变处为防护网靠底部的A7测点。而后所有测点形变小幅度震荡变化并趋于稳定。B截

面则在二次冲击时,靠近防护网底部的B7测点达到最大形变值 0.46 m。图 10(c)绘制了中心截面(A截

面)首次受到冲击各测点的形变值,可以看出形变最大处为落石冲击部位,越靠近防护网边缘,形变越小。

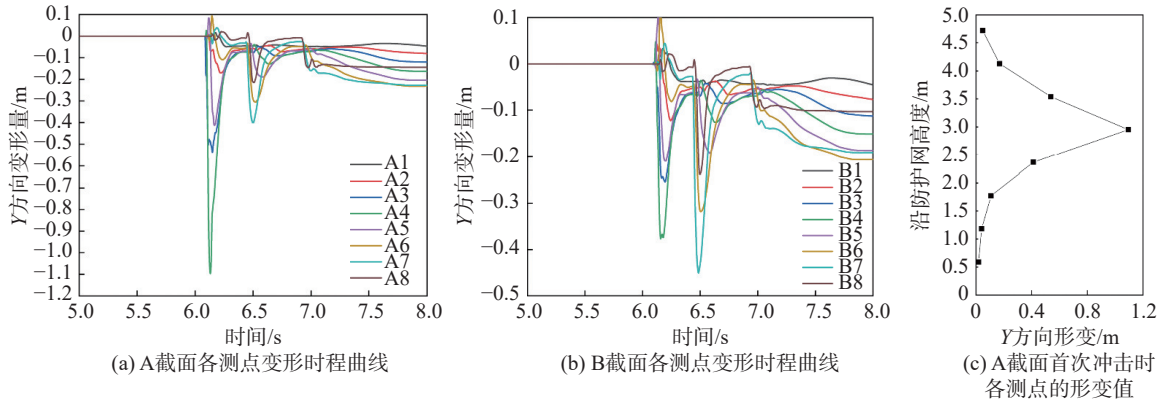


图 10 防护网特征截面及测点形变

Fig. 10 Deformation of characteristic sections and measurement points of the protective net

图 11 是两个特征截面处各测点受落石冲击后的应力时程曲线,图中对防护网首次受冲击时的应力响应特征进行了放大展示。如图 11(a)所示,由于冲击点和 A4 测点接近,故 A4 测点先于其他测点监测到应力波动,其应力值于 6.08 s 时迅速攀升至

863 kPa,其余测点从冲击点处由近及远依次监测到应力响应,相应的峰值应力也逐渐降低。B 截面各测点应力响应如图 11(b)所示,B3 测点先于 B 截面其他测点监测到了应力响应,但监测到最大的峰值应力的是 B4 监测点,应力峰值达到 149 kPa。

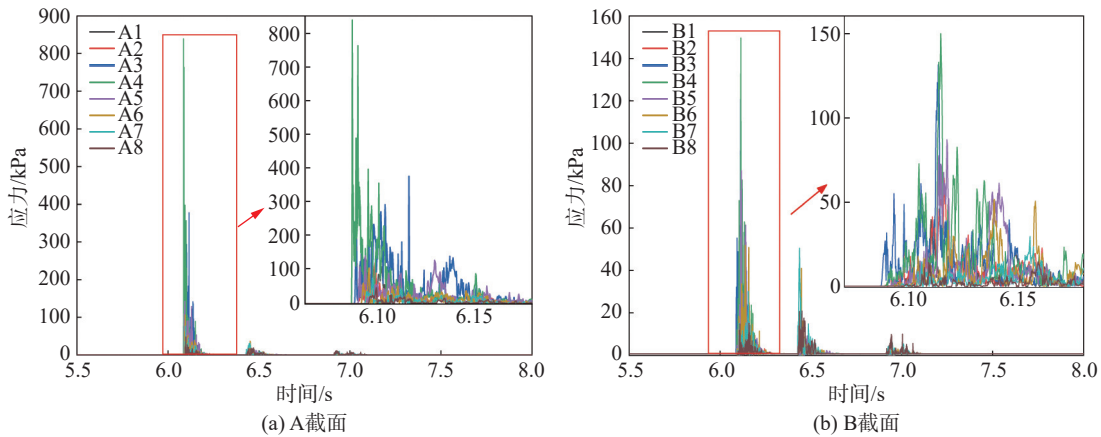


图 11 防护网特征截面各测点应力时程曲线

Fig. 11 Stress-time history curves of each measuring point on characteristic sections of the protective net

通过综合观察防护网形变时程曲线(见图 10)和应力时程曲线(见图 11),发现防护网形变峰值和应力峰值同时出现。具体而言,网面监测点最大形变量 1.1 m 出现在 A4 点处,该点在同一时间具有最大峰值应力 863 kPa;其他各监测点的最大形变量和最大峰值应力出现时间也表现出一致性。从模拟结果看,为避免防护网变形影响道路通行,背景边坡工程防护网与路堤间的距离应大于 1.1 m。本研究数值分析得出的落石冲击防护网的整体变化趋势、变形规律与张飞云等^[26]研究的滚石被动防护网离散元数值分析结果基本相同,截面形变体型亦相似,表明本文所建立的被动防护网离散元模型及数值分析结果

具有较高的可信度,可为边坡落石灾害防治及被动防护网选型提供参考。

3.3 防护网锚绳受力分析

在落石冲击防护网过程中,冲击力会由网面传递给锚绳,再由锚绳经过耗能器最终传递给钢柱。锚绳是被动防护网的重要传力部件,为研究其在冲击过程中的受力特性,本次模拟中设置了四条锚绳均匀纵向分布在网面上(见图 12(a)),分别监测各锚绳在落石冲击防护网过程中的受力时程变化,各锚绳受力时程曲线如图 12(b)所示。可以观察到在第 6 s 落石刚接触到防护网时,由于冲击点在防护网中上部,所以锚绳 1 和锚绳 2 都呈现出短时冲击的力学行为,锚

绳 2 离冲击点更近, 其峰值力达到 1600 N 左右, 锚绳 1 的峰值力达到 200 N 左右。当落石二次冲击到防护网下部时, 锚绳 3 和锚绳 4 也各存在一个较小

的峰值力。6.7 s 后落石被防护网完全拦截后, 锚绳内力完全由落石的重力分量产生。

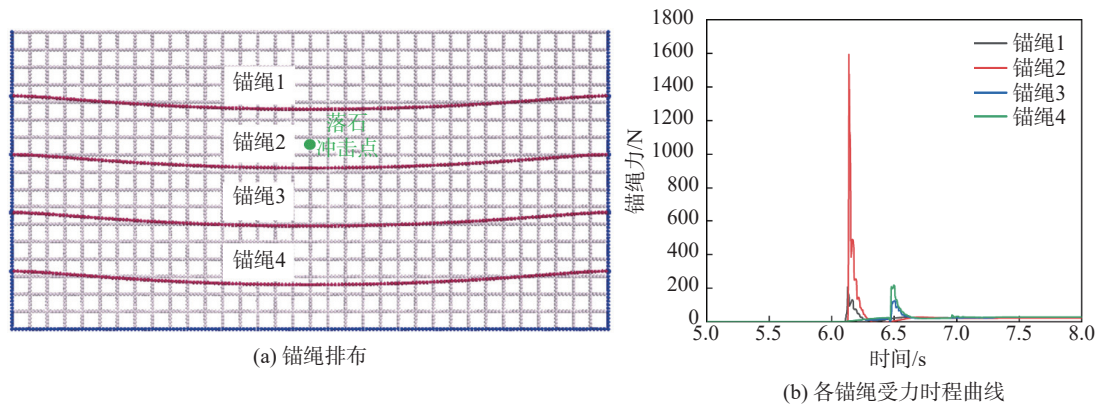


图 12 防护网各锚绳受力情况
Fig. 12 Force conditions of each anchor cable in the protective net

4 结论

以某公路高边坡落石灾害防护工程为背景, 针对落石冲击被动防护网的过程开展离散元数值模拟分析, 得到以下结论:

(1) 高陡边坡落石的动力学模拟表明, 通过在边坡坡脚合理布置柔性防护网, 可快速降低落石速度, 有效地拦截落石。被动柔性防护网能够承受落石的高速冲击, 并通过耗能器逐步吸收落石的动能, 直至完全停止。背景工程落石的最大冲击动能为 812.8 kJ, 该数据可为被动防护网选型提供依据。

(2) 被动防护网在落石冲击过程中存在两个变形峰值区, 分别对应落石首次冲击和落石从防护网中段落至底部的二次冲击。最大形变量发生在首次冲击, 落石冲击点处防护网变形最大, 其他部位变形随距冲击点距离增加而减小。由于柔性防护网具有一定的弹性, 最终变形会得到一定程度恢复。

(3) 落石冲击防护网过程中, 不同位置的锚绳受力情况不同。首次冲击时, 冲击点附近的锚绳受力会急剧上升, 而远离冲击点的锚绳受影响较小。二次冲击时, 底部两根锚绳存在受力峰值, 而上部两根锚绳基本不受力。

参 考 文 献

[1] 崔鹏, 陈晓清, 张建强, 等. “4·20” 芦山 7.0 级地震次生山地灾害活动特征与趋势 [J]. 山地学报, 2013, 31(3): 257-265. (CUI P, CHEN X Q, ZHANG J Q, et al. Activities and tendency of mountain hazards induced by the Ms7.0 Lushan earthquake, April 20, 2013[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(3): 257-265. (in

Chinese))

- [2] 李滨, 殷跃平, 高杨, 等. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 5-13. (LI B, YIN Y P, GAO Y, et al. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of Southwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 5-13. (in Chinese))
- [3] 武中鹏, 刘宏, 董秀群, 等. 单体危岩崩塌灾害危险性评价——以贵州威宁县新发乡樊家岩为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 30-34. (WU Z P, LIU H, DONG X Q, et al. Hazard assessment of rockfall disaster of a dangerous rock: a case study at Fanjiayan, Xinfa Township, Weining County of Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(2): 30-34. (in Chinese))
- [4] BOURRIER F, LAMBERT S, BAROTH J. A reliability-based approach for the design of rockfall protection fences[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(1): 247-259.
- [5] COULIBALY J B, CHANUT M A, LAMBERT S, et al. Toward a generic computational approach for flexible rockfall barrier modeling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(11): 4475-4496.
- [6] FOX J W, GOULBOURNE N C. On the dynamic electromechanical loading of dielectric elastomer membranes[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2008, 56(8): 2669-2686.
- [7] FOX J W, GOULBOURNE N C. Electric field-induced surface transformations and experimental dynamic characteristics of dielectric elastomer membranes[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2009, 57(8): 1417-1435.

- [8] KAPOOR H, CHUN S, KAPANIA R K, et al. Nonlinear response of highly flexible structures to air blast loads: application shelters[J]. *Aiaa Journal*, 2006, 44(9): 2034-2042.
- [9] SUHIR E, VUJOSEVIC M, REINIKAINEN T. Nonlinear dynamic response of a 'flexible-and-heavy' printed circuit board (PCB) to an impact load applied to its support contour[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(4): 045506.
- [10] BUZZI O, SPADARI M, GIACOMINI A, et al. Experimental testing of rockfall barriers designed for the low range of impact energy[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(4): 701-712.
- [11] GAO Z W, AL-BUDAIRI H, STEEL A. Experimental testing of low-energy rockfall catch fence meshes[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 10(4): 798-804.
- [12] GOTTARDI G, GOVONI L. Full-scale modelling of falling rock protection barriers[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(3): 261-274.
- [13] PEILA D, PELIZZA S, SASSUDELLI F. Evaluation of behaviour of rockfall restraining nets by full scale tests[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1998, 31(1): 1-24.
- [14] HAMBLETON J P, BUZZI O, GIACOMINI A, et al. Perforation of flexible rockfall barriers by normal block impact[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(3): 515-526.
- [15] YU Z X, LUO L R, LIU C, et al. Dynamic response of flexible rockfall barriers with different block shapes[J]. *Landslides*, 2021, 18(7): 2621-2637.
- [16] KOO R C H, KWAN J S H, LAM C, et al. Dynamic response of flexible rockfall barriers under different loading geometries[J]. *Landslides*, 2017, 14(3): 905-916.
- [17] MOON T, OH J, MUN B. Practical design of rockfall catchfence at urban area from a numerical analysis approach[J]. *Engineering Geology*, 2014, 172: 41-56.
- [18] 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. (ZHENG C C, LONG X G, HU G Z, et al. Failure process simulation of a high and steep rockfill slope based on discrete element method[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(6): 92-98. (in Chinese))
- [19] 刘成清, 陈林雅, 陈 驰, 等. 被动柔性防护网中减压环力学试验及有限元分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6): 1245-1254. (LIU C Q, CHEN L Y, CHEN C, et al. Full scale test and fem simulation to ring-type brake energy dissipater in falling rock protection[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(6): 1245-1254. (in Chinese))
- [20] 刘成清, 陈林雅, 陈 驰, 等. 柔性钢棚洞结构在落石灾害防治中的应用研究 [J]. *西南交通大学学报*, 2015, 50(1): 110-117. (LIU C Q, CHEN L Y, CHEN C, et al. Application of flexible shed-tunnel structure to rock-fall hazard prevention[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(1): 110-117. (in Chinese))
- [21] 刘成清, 陈林雅, 陈 驰, 等. 落石冲击作用下被动柔性防护网整体结构试验 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2014, 25(4): 37-44. (LIU C Q, CHEN L Y, CHEN C, et al. Experimental study on the passive flexible protection under the rock-fall impact[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2014, 25(4): 37-44. (in Chinese))
- [22] 刘成清, 陈林雅, 齐 欣. 落石冲击作用下不同连接方式被动防护网的受力分析 [J]. *中国铁道科学*, 2016, 37(2): 17-25. (LIU C Q, CHEN L Y, QI X. Force analysis of passive protection nets with different connection modes under rockfall impact[J]. *China Railway Science*, 2016, 37(2): 17-25. (in Chinese))
- [23] LIU C Q, WEI X D, LU Z, et al. Studies on passive flexible protection to resist landslides caused by the May 12, 2008, Wenchuan earthquake[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2017, 26(11): e1372.
- [24] YANG J J, DUAN S L, LI Q F, et al. A review of flexible protection in rockfall protection[J]. *Natural Hazards*, 2019, 99(1): 71-89.
- [25] ALBABA A, LAMBERT S, KNEIB F, et al. DEM modeling of a flexible barrier impacted by a dry granular flow[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(11): 3029-3048.
- [26] 张飞云, 冯德敏, 胥 杨, 等. 基于离散元的滚石灾害被动防护网设计方法研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(4): 175-182,190. (ZHANG F Y, FENG D M, XU Y, et al. Design of passive protection net for rockfall disasters using discrete element method[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2023, 34(4): 175-182,190. (in Chinese))

收稿日期: 2024-12-07