

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230901005

考虑滚石转动效应的被动柔性防护系统设计方法*

雷凡¹, 彭武¹, 胡阳¹, 程洋²

(1. 江西省公路科研设计院有限公司, 江西南昌 330006; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031)

摘要: 为揭示滚石转动动能对被动柔性防护网系统力学响应的影响程度, 完善既有的设计和检测方法, 基于LS-DYNA对被动柔性防护网结构建立了非线性动力数值模型, 通过与足尺冲击试验对比, 验证了数值模型参数的有效性。基于此, 分析了转动动能比例系数 λ 对系统变形和内力响应的影响规律, 提出了各构件内力峰值与 λ 之间的拟合关系式, 并给出了考虑转动效应后各构件内力的设计修正系数 ζ 。研究表明, 施加转动动能后, 滚石最大竖向位移随着 λ 值增大而减小, 滚石在水平方向上具有明显外滚趋势, 上支撑绳变形明显增大; 滚石冲击力和各构件的内力峰值随 λ 的变化规律皆可采用二次多项式表达, 其中网片、钢柱、上支撑绳和拉锚绳的内力均呈现先增大再减小的趋势, 当 $\lambda=0.2$ 时达到最大值; 随着 λ 值增大, 耗能器耗能呈非线性降低, 同时滑移耗能呈非线性增加。因此, 滚石的转动效应会增大被动柔性防护系统中主要构件的冲击响应, 设计时应充分考虑此不利影响。建议可按照既有规范中的内力放大系数赋予各构件安全储备, 同时补充了钢柱的设计内力放大系数, 建议取值1.3。

关键词: 柔性防护网; 数值模拟; 转动动能; 动态响应特征; 设计方法

中图分类号: U417.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1030-11

Design Method of Passive Safety Net System Considering the Angular Velocity Effect of Rolling Boulders

LEI Fan¹, PENG Wu¹, HU Yang¹, CHENG Yang²

(1. Jiangxi Highway Research and Design Institute Co. Ltd., Nanchang 330006, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To reveal the influence of angular kinetic energy of rolling boulders on the mechanical response of passive safety net systems and to improve existing design and testing methods, a nonlinear dynamic numerical model of passive safety net system was established using LS-DYNA. The effectiveness of the numerical model parameters was verified through comparison with full-scale impact tests. On this basis, the influence of the proportional coefficient of angular kinetic energy (λ) on the system deformation and internal force was analyzed. A fitting relationship between the peak internal forces of various components and λ was proposed, and a design amplification coefficient (ζ) for the internal force considering the rotational effect was provided. The results showed that after applying rotational kinetic energy, the maximum vertical displacement of the boulders decreased as the λ value increased,

* 收稿日期:2023-09-01;修回日期:2023-11-06

基金项目:江西省交通运输厅科技项目(2020H0005)资助

作者简介:雷凡(1981—),男,高级工程师。主要从事公路工程设计。E-mail:36331121@qq.com

and the boulders exhibited a clear outward rolling motion in the horizontal direction, with a significant increase in deformation of the upper support rope. The impact force of the boulders and the peak internal force of the components followed a quadratic polynomial relationship with λ . The internal force of the netting, steel column, upper support rope, and anchor rope initially increased and then decreased, reaching their maximum when $\lambda=0.2$. As λ increased, the energy absorption of both netting and dissipators decreased linearly, while the energy dissipated by sliding and friction increased linearly. Therefore, the angular velocity effect of rolling boulders increased the impact response of the main components in the passive safety net system, and this adverse effect should be fully considered in design. It was suggested to apply the internal force amplification coefficients specified in existing standards to provide safety reserves for the components, while also adding a design internal force amplification coefficient for the steel posts, with a recommended value of 1.3.

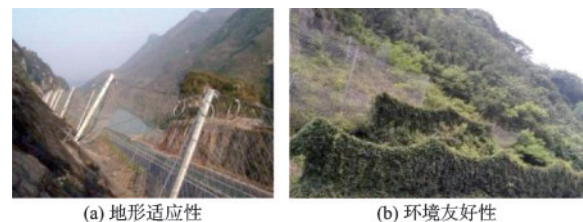
Keywords: passive safety net system; numerical simulation; angular kinetic energy; dynamic response characteristics; design method

0 引言

2022年底,我国公路总里程已达535万公里,铁路总里程达15.5万公里,其中山区交通线路占比约为2/3。山区交通线路大多沿山腰线、山脊线修建,或开挖隧道穿山而过,沿线范围的路基边坡及隧道洞口等区域极易发生地质灾害。由于山区交通路线条件复杂、规模大、数量多,难以及时预警灾害位置,更易导致严重后果。根据国家统计局发布的《中国统计年鉴2023》^[1]数据统计,2020~2022年发生地质灾害共18260起,造成287人死亡、179人受伤,直接经济损失97.2亿元。其中滑坡11064起、崩塌4909起、泥石流1475起,共占比高达95.6%。在灾害发生时常伴随着不同数量和大小的滚石坠落而造成伤亡损失^[2],因此滚石灾害的防治对山区公路和铁路的建设与营运至关重要。

现有的滚石防治技术手段有刚性栅栏、混凝土明洞、拦石墙、拦石堤、沟渠、落石槽、防护林和柔性防护系统等^[3-4],其中柔性防护系统在发展中又产生了多种形式,如主动柔性防护网、被动柔性防护网、柔性棚洞、主动消能柔性防护网^[5-6]。被动柔性防护网是当前应用范围最广、技术最为成熟的柔性防护系统,与其他防护措施相比,具有滤水沉渣^[7]、防护能级高、施工安装周期短、地形适应性强、可维护性能好、环境影响小等优点,如图1所示。

被动柔性防护网由柔性网片(钢丝绳网、环形网、格栅网)、固定系统(锚杆、拉锚绳、基座和支撑



(a) 地形适应性 (b) 环境友好性

图1 被动柔性防护网的应用

Fig.1 Application of passive safety net system

绳)、耗能器和钢柱四个主要部分构成^[8],主要靠网片张拉变形、钢柱下摆、耗能器变形耗能对滚石进行拦截。当滚石冲击防护网时,网片由松弛状态转变为张紧变形状态,将力传递至上下支撑绳,再通过支撑绳将力传递至钢柱,钢柱受压且在转动平面内下摆,拉锚绳受拉。当内力达到一定限值,上下支撑绳与拉锚绳上的耗能器启动,达到耗能效果^[5]。

当前,世界各国先后制定了被动柔性防护网的工程技术标准,其中以欧洲标准(ETAG027)^[9]和美国标准^[10]最具代表性。然而上述标准均为典型的产品标准,即只对产品的组配、型号、包装及检验等内容予以规定。我国当前采用的交通运输行业标准《边坡柔性防护网系统》^[11]和全国性团体标准《被动柔性防护网结构工程技术规范》^[12]亦参考了上述发达国家标准,对被动柔性防护网的试验检验给出了明确建议。其中滚石冲击动能由其自由落体产生的动能提供,忽略了转动分量产生的动能,此外,被动柔性防护网系统同时在设计计算中,既有研究往往参考试验检验工况^[6,13],未充分考虑滚石转动的不利影响。

实际工程中滚石由较陡边坡上的单个或局部岩体,在地质作用以及外界作用的综合影响下,失稳脱离边坡,以坠落、跳跃、滚动或滑动等运动方式中的一种或几种的组合快速向下运动形成^[14]。P. Asteriou等^[15]认为石块在下落过程中与斜坡的碰撞反弹会导致滚动、滑动或其他形式的运动轨迹。G. B. Crosta等^[16]将岩石下落运动模式分为自由下落、跳跃、滚动和滑动。O. Hungr等^[17]将岩石下落整个过程定义为脱离、坠落、滚动和弹跳。叶四桥等^[18]认为落石运动状态均以滚动和弹跳下落为主,且滚动过程中以绕长轴滚动为主。罗刚等^[19]在模拟危岩崩塌后落石的运动轨迹中,考虑到了落石碰撞后平动能量与转动能量的分配。俞棠荣等^[20]在研究 TECCO 网斜向受落石冲击特性时,提及了落石运动过程中伴随着平动与转动,但在试验中直接忽略转动,仅让落石发生平动。宋道国等^[21]在对边坡防护网受到落石冲击进行有限元模拟时,对滚石的动能分析计算中考虑到了转动动能。王东坡等^[22]在研究滚石冲击土体的最大冲击力计算方法时,考虑到转动动能,引入了能量比例系数。左明宇^[23]针对不考虑转动效应及考虑转动效应的抛体冲击被动柔性防护系统的整体变形、构件受力变化等问题进行研究。

综上所述,公路沿线边坡滚石在下落过程中极大概率伴有转动分量且转动分量对滚石动能及冲击力的计算有显著影响。但是在被动柔性防护网的设计和研究中滚石的转动分量往往被忽略,这可能导致设计计算或者检测中的防护系统内力响应与实际工程存在较大差异,因此滚石转动分量对滚石防护系统内力响应的影响亟待研究。

为此,本文在既有规范建议的自由落体冲击工况基础上,增加转动动能分量,引入滚石转动动能与平动动能之比 λ ,保证冲击总动能不变。基于 LS-DYNA 开展了被动柔性防护网在不同冲击动能作用下的数值模拟,分析滚石转动效应对各构件受力、位移与耗能的影响。最终采用最小二乘法进行拟合,得到各个构件最大内力与 λ 之间的关系,计算求得各构件内力极值点,给出考虑转动效应的内力放大系数,并对现行标准设计方法提出改进建议。

1 被动防护网数值计算模型

1.1 足尺冲击试验

1.1.1 试验模型

为了验证数值模型的准确性和精度,针对被动柔性防护网的抗冲击能力进行了足尺冲击试验。根据 EATG027 标准,试验采用由四根钢柱构成的标准 3 跨模型,整体结构如图 2 所示。

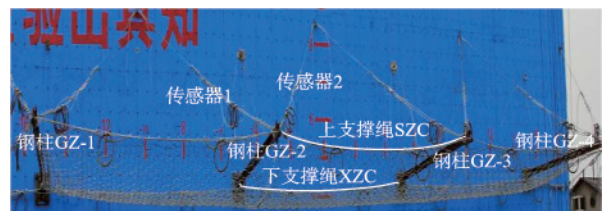


图2 试验模型

Fig.2 Test model

钢柱采用 Q235 碳素钢,截面尺寸为 $200 \times 176 \times 12 \times 8$ mm,柱间距为 10 m,拦截高度为 5 m。网片由 12 圈直径为 3 mm 钢丝缠绕成外径为 300 mm 的网环组成,选用支撑绳直径为 22 mm。拉锚绳直径为 18 mm,上拉锚绳为“人”字形布置,在左侧中柱的上拉锚绳上分别设置 1 个拉力传感器。耗能器选择采用减压环^[24],分别在支撑绳的每跨每根及上拉锚绳的每根上均布置一个。

冲击试块由普通钢筋混凝土外包钢板制作而成,其形状为 26 面体,质量为 5 t。试验模型安装在混凝土反力墙上,钢柱呈水平状态与冲击试块轨迹的夹角为 90° ,钢柱柱脚采用平面销轴进行铰接约束,确保在竖向平面的充分转动及水平面的有限转动。上下支撑绳两端均锚固在反力墙上,支撑绳可绕柱端自由滑动,拉锚绳一端固定在柱端,一端锚固在反力墙上。

1.1.2 试验方案

试验在位于四川广汉的西南交通大学试验平台进行,装置及仪器主要包括混凝土反力墙、龙门吊起重机、冲击试块、高速图像采集分析系统、拉力传感器及数据采集仪等。试验时,用龙门吊将冲击试块提升至 20 m 后自由落体释放,满足试块接触网片时的动能达到 1 000 kJ,并保证其冲击位置点在中间跨的正中。由高速摄像机以 500 fps 记录整个

冲击过程,由数据采集系统以 1 kHz 的采样频率记录拉力传感器测量所得的内力。

1.1.3 试验结果描述

试验结束后,冲击试块被系统成功拦截,冲击跨网片出现了漏斗状的明显变形,整个系统工作过程中伴随着巨大的形变,如图 3 所示。中间跨网片在竖直方向的最大位移达 7.5 m,垂直方向上中柱发生了明显的向下偏摆,尤其是柱 2 自由端向下偏摆量达到 1.5 m,边柱向下偏摆量较小,水平方向上中柱向冲击网片方向发生偏移。下支撑绳、上支撑绳和拉锚绳减压环均已经启动,其中个别减压环的铝管套筒发生断裂,这意味着减压环达到了其极限工作行程,各锚固点和钢柱基座均未发生变形和破坏。

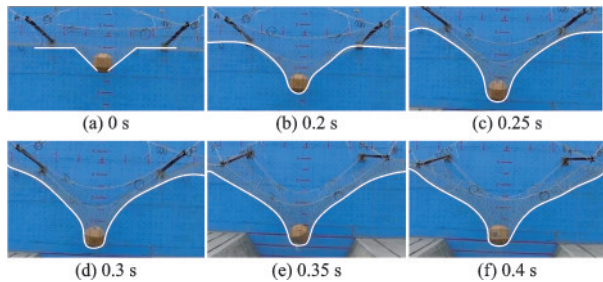


图 3 冲击过程分析

Fig.3 Analysis of the impact process

1.1.4 冲击过程分析

为研究防护网系统的反应及冲击试块的运动特征,选取了高速摄像机记录过程中的几个关键时刻,如图 3 所示。0 s 时刻(图 3(a)),冲击试块与网片接触,该阶段的网片有少量的滑移,支撑绳基本保持不动,网片逐渐张紧,左右边跨的自然下垂基本耗尽,中跨在冲击试块冲击位置处呈现“V”形特征。随着冲击过程的继续,在 0.2 s 时(图 3(b))冲击网片逐渐形成完整的漏斗状,且变形持续加剧(图 3(c)),该阶段伴随着网片的大规模滑移,支撑绳的形变由水平转变为抛物线,冲击试块的竖向位移快速加大,在 0.3 s 时(图 3(d)),支撑绳的变形足够大,带动中柱下摆,由此引起冲击试块在网片中发生滚动(图 3(e)),直至滚动到最低点整个系统稳定(图 3(f))。在该阶段,网片的滑移速度减慢,钢柱的下摆加快,冲击试块在网面内持续向前滚动,网片的竖向变形仍在加大但速率降低,整个结构体系呈现前倾状态。

1.2 有限元模型

通过对被动柔性防护系统的足尺冲击试验,探明了防护系统工作过程及其动力响应。但由于足尺冲击试验存在成本高、周期长等诸多限制,难以多次开展不同工况下的试验研究,因此可采用有限元仿真计算对被动柔性防护系统进行参数化分析,从而进一步明确不同因素对系统内力响应的影响。

防护网与滚石接触碰撞的有限元分析涉及到几何非线性、材料非线性和边界条件非线性的复杂问题,LS-DYNA 作为一种功能强大的显式动力分析软件,能够很好地解决这三类非线性问题。

有限元模型参数与试验模型参数保持一致,基本构造及各构件编号如图 4 所示。滚石采用 solid 实体单元模拟,网片和钢丝绳采用索单元模拟,减压环采用弹簧单元,钢柱采用 shell163 壳单元能较好模拟其破坏,相较于实体单元分析节省大量的时间。

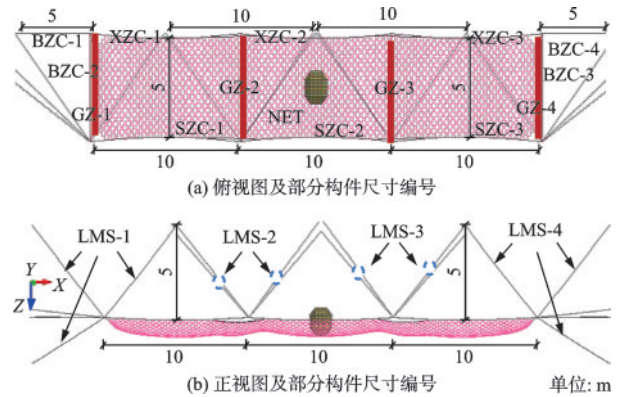


图 4 有限元模型构成

Fig.4 Configuration of the finite element model

滚石和绳网为动力接触边界,钢柱底部边界在铅垂面内可视作理想铰接,面外约束可视作有限自由转动的弯曲弹簧^[25]。支撑绳滑移边界的构建主要包括两部分:支撑绳沿柱端滑移以及网片沿支撑绳滑移。支撑绳在柱端的滑移模拟要保证其平滑性,故在计算中引入 SeatBelt 安全带单元,将柱端支撑点视为定滑轮,两侧支撑绳可保证一致的运动方向绕滑轮运动,以安全带单元来构建柱端附近的滑移索单元。网片在支撑绳上的滑移是网片受冲击后收缩聚拢,然后带动自身及连接卸扣的滑移运动,其数值模拟主要通过滑移点来实现,将卸扣简化设置为梁单元,卸扣与网片连接的一端为共节

点,另一端节点为滑移点集,并与支撑绳连接,通过设置引导滑移接触模拟卸扣沿支撑绳的滑移运动。主要构件材料特性见表1。

表1 主要构件材料特性

Table 1 Material properties of main components

构件	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa
试块	2 515	20	0.3	—
减压环	7 900	150	0.3	—
网片	7 900	150	0.3	1 770
钢柱	7 900	200	0.3	235
钢丝绳	7 900	150	—	—

1.3 试验与模拟结果对比

1.3.1 系统变形对比

系统的变形能力能直观体现出系统的防护能力,也是对试验结果与模拟结果进行对比的首要特征。所以对试验及模拟的整个防护过程进行解构,可明显对比出两者同样存在如图5所示的三个阶段。

第1阶段(图5(a)、5(d)):系统变化主要体现在网片由平衡松弛状态转变为张紧状态,该阶段变形量较小,产生一定的摩擦耗能。第2阶段(图5(b)、5(e)):支撑绳在网片的滑动牵引下沿着钢柱端部滑动,当支撑绳的拉力超过其上设置的减压环启动时,减压环开始启动。上拉锚绳的形变量很小,减压环未启动,钢柱也基本维持初始状态,网片呈现明显的漏斗状变形。第3阶段(图5(c)、5(f)):支撑绳沿钢柱柱端的滑动继续增大,上拉锚绳上设置的减压环启动,钢柱柱端两侧支撑绳的夹角变小,传递给钢柱的竖直分量急剧增大,导致钢柱下摆,网片漏斗状变形增大,系统呈现整体前倾状态。

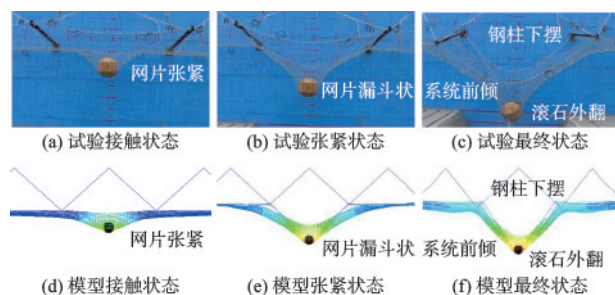


图5 系统变形对比

Fig.5 Comparison of system deformation

1.3.2 特征点位移对比

针对四根钢柱柱端GZ1-GZ4、中跨网片上下支撑绳SZC和XZC以及跨中网片中心MD等特征点位移,将试验与模拟的结果进行对比,具体的构件位置和编号如图3所示,位移对比如图6所示。由图6可看出两者的吻合度较高,仿真的结果略大于试验结果,因为仿真结果是冲击过程中的最大值,而试验结果则为滚石冲击网片稳定后的值。由于网片并未完全进入塑性,仍有部分弹性,所以当冲击达到最大位移后,滚石还有个回弹过程,由此稳定后的位移值比最大位移值偏小。此外,试验时对于滚石冲击位置的控制存在偏差,不能精确保证其位于跨中心,导致试验结果两侧不完全对称,而数值模拟则无该项偏差,所以边柱自由端的位移偏差较大。

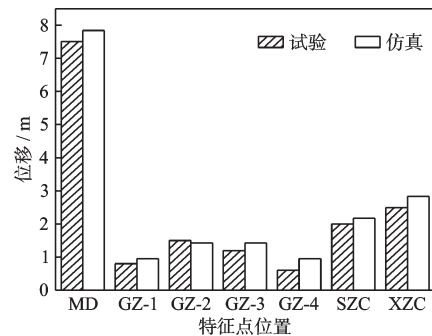


图6 特征点位移对比

Fig.6 Comparison of key points' displacement

1.3.3 拉锚绳拉力对比

钢丝绳内力是被动柔性防护网系统最重要的内力响应指标之一,直接影响系统的极限承载能力。因此,将试验实测的上拉锚绳的拉力时程与数值模拟所得的结果进行对比,进一步说明模型的可靠性,如图7所示。传感器1和传感器2测得的拉力值分别为85 kN和114 kN,由于拦截过程中钢柱在水平方向上相对于跨中发生向外侧的偏摆,故与传感器2相连的上拉锚绳内力峰值更大,实测数据的平均值为98.5 kN,与计算得到的内力峰值99 kN吻合较好,且峰值且拉力峰值出现在0.3~0.4 s内,符合试验中出现的系统最大变形特征规律。此外,在系统达到最大变形后的回弹阶段,传感器还捕捉到多个拉锚绳的内力峰值,计算模型中也很好的还原了这一现象,且拉力大小和变化趋势也与试验结果保持一致。由此可见,计算结果能够有效地再现系

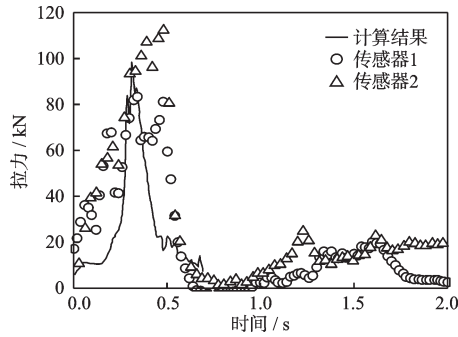


图7 拉锚绳拉力对比

Fig.7 Comparison of tension in anchor ropes

统中高强钢丝绳的内力峰值和变化规律。

上述通过对比试验和数值模拟结果中的系统整体变形、特征点位移以及拉锚绳拉力,可知两者的构件变形规律几乎一致,所以可认为选取的有限元模型精度较高,能继续进行后续的研究分析。

2 考虑转动分量的冲击工况

2.1 滚石初始运动状态特征

本文将滚石运动轨迹与分布问题简化,仅考虑滚石与防护网接触时刻的运动状态。以滚石与山体发生碰撞,忽略摩擦阻力的转动式为基本模型,下落过程中,滚石将重力势能转化为平动动能和绕防护网长轴方向的转动动能。令滚石冲击动能恒定为 $E=1\ 000\ \text{kJ}$,其计算速度,可用任意形状物体滚动的公式^[26](7)、(8)计算:

$$V = \mu \sqrt{2gH} = \mu V_0 \quad (7)$$

$$\mu = \sqrt{1 - Kctg\alpha} \quad (8)$$

式中, H 为石块坠落高度(m); g 为重力加速度(m/s^2); V_0 为腾跃初始速度(m/s); α 为山坡坡度角($^\circ$); K 为石块沿山坡运动所受一切有关因素综合影响的阻力特性系数。

滚石总能量为 E , E_{va} 为滚石平动动能, E_{ra} 为滚石转动动能。假设滚石损耗的能量全部转化为转动动能,将以上公式带入动能公式,则有式(9)、(10),引入参数 λ 表示转动动能与平动动能之比 (E_{ra}/E_{va}),带入式(11)、(12)则有(13):

$$E = \frac{1}{2} m V_0^2 \quad (9)$$

$$E_{va} = \frac{1}{2} m V^2 \quad (10)$$

$$E_{ra} = E - E_{va} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (11)$$

$$\frac{E_{ra}}{E_{va}} = \lambda \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{1 - \mu^2}{\mu^2} \quad (13)$$

令滚石为图8所示多面体,质量为 $m=6\ 180\ \text{kg}$,积分求得转动惯量为 $J=1\ 791\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。为便于计算,在 $0\sim 0.4$ 内取不同 λ 值,根据式(13)与文献[27]中对应查找得到山坡坡度角为 $79^\circ\sim 90^\circ$,该范围涵盖了容易发生危险的最不利坡度角。

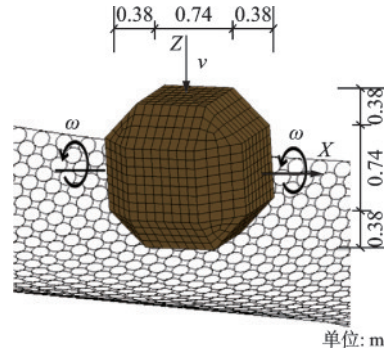


图8 滚石初始速度

Fig.8 Initial velocity of the boulders

2.2 各工况中滚石初始运动速度

基于同一防护网模型共设置5个工况,各工况冲击动能均为 $E=1\ 000\ \text{kJ}$,在施加竖向初速度的同时,使滚石绕其质心沿防护网长轴方向转动(图8)。

将 λ 值代入式(13)后,计算得到不同 λ 值对应的滚石平动动能与转动动能,再由式(10)、(11)计算得到其初始角速度与线速度,见表2。

表2 各工况对应的滚石初始速度

Table 2 Initial velocities of rolling boulders for each case

工况	λ	μ	坡度角/ ($^\circ$)	$E_{va}/$ kJ	$E_{ra}/$ kJ	$\omega/$ ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	$V/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
I	0	1	90	1 000	0	0.0	18.0
II	0.1	0.95	87	909	91	10.1	17.2
III	0.2	0.91	84.5	833	167	13.6	16.4
IV	0.3	0.88	82	769	231	16.1	15.8
V	0.4	0.85	79	714	286	17.9	15.2

3 计算结果分析

5种工况的冲击过程基本保持一致。图9对比

了 $\lambda=0$ 与 $\lambda=0.4$ 时,整个冲击过程中防护网整体响应的差异。0.1 s时,滚石与防护网接触较为充分;0.5 s时,钢柱偏摆位移达到最大;1.5 s时,滚石达到最大竖向位移后开始小幅度回弹,2 s时计算终止。

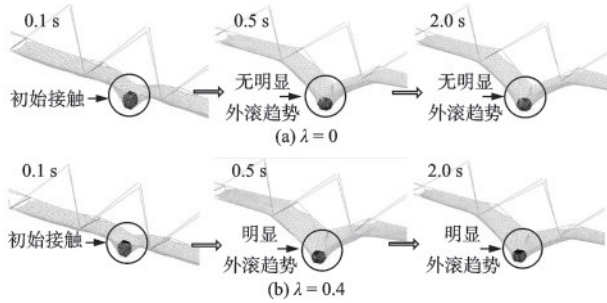


图9 转动动能对拦截过程的影响

Fig.9 Effect of angular kinetic energy on the interception process

3.1 被动柔性防护网整体响应

相对于滚石无转动($\lambda=0$)情况,施加转动速度后,滚石有明显外滚趋势,上支撑绳变形增大,如图9(b)所示。在5个工况下,滚石质心距离跨中拉锚绳锚固点水平距离为2.43、2.71、2.76、2.77、2.77 m,以工况Ⅱ为分界点增大后基本保持不变;竖向平面内滚石下表面至上支撑绳最低端的竖向距离为2.17、1.44、1.45、1.47、1.47 m,以工况Ⅱ为分界点减小后基本保持不变;滚石竖向最大位移为6.28、6.22、6.08、5.96、5.85 m,随着冲击力减小而不断减小。钢柱与网片、拉锚绳共同形成拉压平衡,可以在竖直面内自由转动,计算表明:边柱自由端位移远小于中跨钢柱自由端位移,因此,此处仅给出中跨钢柱位移时程曲线,如图10所示,在0.5 s左右,中跨钢柱自由端位移几乎都达到峰值。随着 λ 增大,钢柱自由端最大位移先增大后减小,在 $\lambda=0.2$ 时,几乎同时达到最大值。

0~0.1s,滚石与网片接触,由于系统初始刚度作用,滚石冲击力增大缓慢。0.25 s~0.75 s,滚石与网片共同运动,滚石冲击力逐步增大并达到峰值,0.75 s后,冲击力小幅回弹震荡。 λ 值对应的最大冲击力如图11所示。随着 λ 值增大,滚石的竖向最大冲击力呈递减趋势。当 $\lambda=0$ 时,最大冲击力为563.4 kN,当 $\lambda=0.4$ 时,最大冲击力减少为500.6 kN,相对减小了11%。

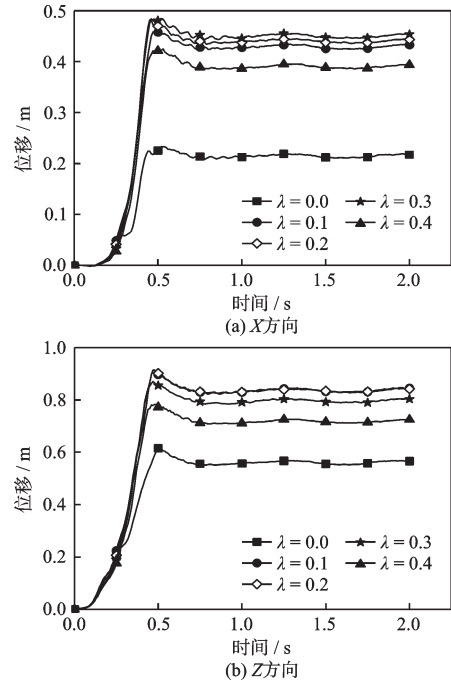


图10 中跨钢柱端部位移

Fig.10 Displacements of the middle column head

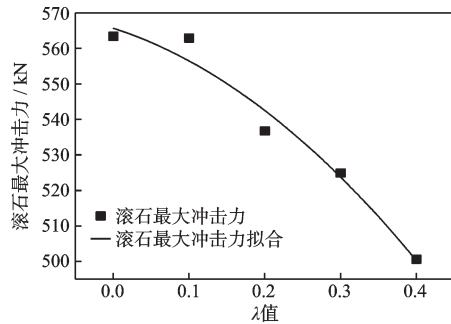


图11 滚石最大冲击力

Fig.11 Maximum impact force of the rolling boulders

3.2 关键部件内力响应

当滚石冲击网片时,网片会发生大变形,延长冲击力的接触作用时间,对冲击动能的分散缓释起着关键作用。滚石旋转下落与防护网相互作用,竖向冲击力与摩擦力使网片受力增大,与滚石接触的冲击跨网片内力显著提升,两侧未与滚石接触的网片内力变化较小,如图12。 $\lambda=0.2$ 时,网片单元内力最大,相较无转动时,增幅最大为20%。

当滚石与防护网网片接触后,网片连同支撑绳因滚石旋转外滚而整体向内产生位移并拉紧,因此支撑绳在沿钢柱轴线方向对钢柱的作用力增大,导致钢柱在工作中的轴向压力及二阶弯矩提升。如

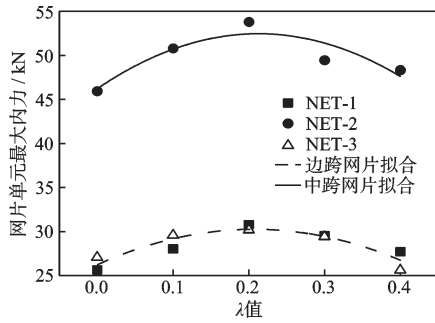


图 12 网片单元最大内力

Fig.12 Maximal internal force of the netting units

图 13 所示,中跨网片两侧钢柱 2、3 轴力较大,而边跨钢柱 1、4 轴力较小,且在 $\lambda=0.2$ 时钢柱轴力均达到峰值,最大增幅为 29%,且钢柱 3 轴力最大。

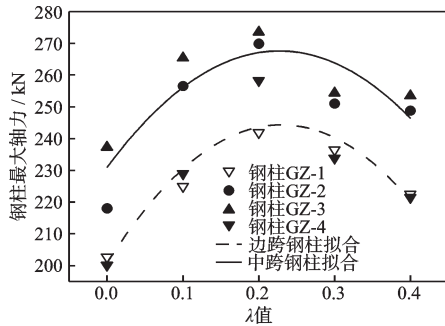


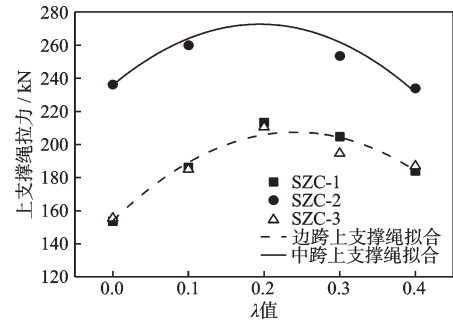
图 13 钢柱最大轴力

Fig.13 Maximum axial force of steel columns

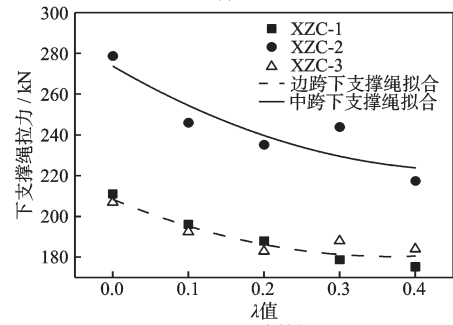
中跨钢柱与边跨钢柱最大轴力单元的峰值都出现在 $0.25\text{ s}\sim 0.75\text{ s}$,施加转动后中跨钢柱轴力增大,且随着 λ 值的增大,钢柱的最大轴力值呈先上升后下降的趋势。

支撑绳直接与网片相连,形成网片的边界。由于滚石外滚,网片受力点随着 λ 值增大而不断向上支撑绳偏移,上支撑绳的拉力随之增大,并在 $\lambda=0.2$ 时均达到峰值,最大增幅达到 39%,如图 14(a)所示。下支撑绳与边支撑绳内力大致呈现下降趋势,分别如图 14(b)、14(c)所示,最大减幅分别为 22% 和 12%。

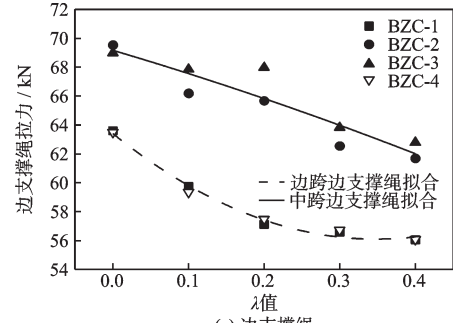
拉锚绳受力情况则与其所连接的钢柱趋势一致,冲击跨两侧钢柱所连拉锚绳在滚动工况下受力显著增大,而边跨钢柱的拉锚绳拉力较小,如图 15 所示。当 $\lambda=0.2$ 时,LMS-2、LMS-3 的拉力值均达到峰值,增幅分别为 36% 和 39%。而边跨拉锚绳 LMS-1、LMS-4 拉力则变化不大,最大增幅仅为 14%。



(a) 上支撑绳



(b) 下支撑绳



(c) 边支撑绳

图 14 支撑绳拉力

Fig.14 Internal force in support ropes

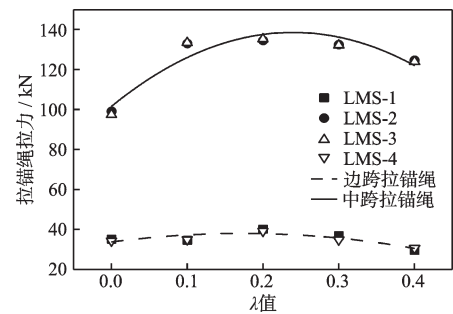


图 15 拉锚绳内力

Fig.15 Internal force in anchor ropes

3.3 系统能量

防护网结构以能量进行区分,系统中的部件除网片、耗能器外,其余构件耗能、摩擦耗能、滑移耗能等非常小。耗能器在系统中作用非常明显,几乎占据了总耗能的 80%,随着 λ 值增大,其与网片耗能几乎呈线性下降,滑移与摩擦耗能则几乎

呈线性增加(图16)。分析可知,滚石绕长轴方向外滚,与网片接触面积增大,故摩擦耗能增加;网片受力点向上支撑绳移动,滑移增大,这与耗能情况一致。

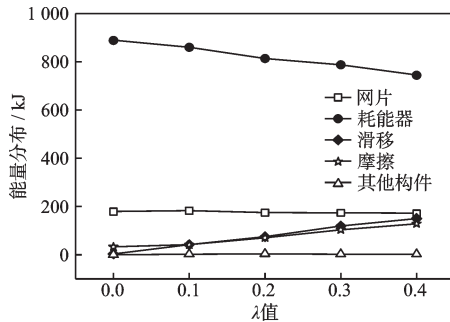


图16 耗能分布

Fig.16 Distribution of energy dissipation

3.4 放大系数

由构件内力图的实际数据点观测可看出各点分布近似抛物线。所以为更好地分析各个构件受力情况与 λ 之间的关系,将 λ 作为自变量,各构件内力极值作为因变量,基于最小二乘法,以二次多项式进行拟合,如式(14)所示,其中,拟合式系数取值及相关系数 R^2 见表3,拟合曲线如图10~13所示。

表3 各构件拟合公式中的系数取值

Table 3 Coefficients in the fitting formulas for each component

构件		A	B	C	R^2
滚石冲击力		-238.4	-68.3	6.0	0.98
网片	边跨	-94.2	39.0	26.2	0.79
	中跨	-138.1	58.7	46.2	0.63
钢柱	边跨	-824.4	379.1	200.8	0.85
	中跨	-709.8	322.6	230.9	0.65
上支撑绳	边跨	-921.9	444.5	153.9	0.93
	中跨	-974.0	378.6	235.8	0.77
下支撑绳	边跨	207.0	-152	208.0	0.87
	中跨	228.0	-216	274.0	0.63
边支撑	边跨	60.2	-41.9	63.4	0.99
	中跨	-6.0	-15.5	69.2	0.83
拉锚绳	边跨	-144.4	49.7	33.7	0.68
	中跨	-644.5	308.7	101.6	0.87

$$F = A\lambda^2 + B\lambda + C \quad (14)$$

为了更好地用于指导设计,提出考虑滚石转动效应后的内力放大系数 ζ 。其定义如下:

$$\zeta = \frac{F_m}{F_0} \quad (15)$$

其中, F_0 表示 $\lambda=0$ 时所对应的各构件最大内力。对拟合公式求导得到驻点 λ ,将驻点 λ 带回拟合公式,即可计算出各构件的最大内力的极值 F_m 。在计算时只需考虑内力放大分量指标,不需考虑变小的分量。由图14(b)、14(c)可看出随着 λ 增大,下支撑绳和边支撑绳的内力呈减小趋势,所以计算放大系数时不予考虑,即只需计算出网片、钢柱、上支撑绳和拉锚绳的 ζ 值,结果见表4。然后将构件放大系数与国内现行执行标准[11]中的放大系数进行对比,如图17所示。

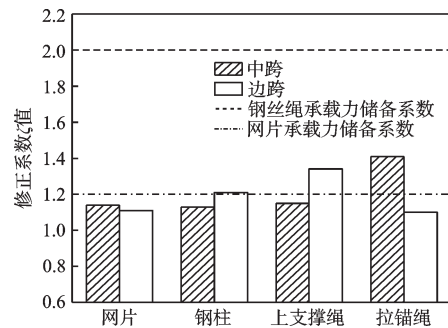


图17 构件放大系数

Fig.17 Amplification coefficients for components

通过表4可以看出,考虑了滚石转动效应后,通过拟合公式得到的各构件内力极值中,中跨拉锚绳拉力的增幅最大,其放大系数已达到1.41,其余构件内力放大系数达到1.2左右,大于仅考虑平动的计算结果。因此在防护网结构的实际设计及计算中,宜考虑滚石转动效应的影响,以对计算结果进行修正。当前国内外技术标准[9-12]中均未考虑滚石转动效应造成的构件内力相应增大,但在我国标准[11]中则对被动柔性防护网系统中关键构件定义了储备系数,该系数从一定程度上反映了各种不利因素对构件内力的影响。从图17中可知,网片内力的放大系数达到1.14,而标准中对网片的储备系数取值要求为不小于1.2,满足计算分析提出的要求;同时,上支撑绳和拉锚绳的内力放大系数分别达到1.34和1.41,而标准中对钢丝绳的储备系数取值要求为不小于2.0,亦能够满足转动效应造成的不利影响。然而,标准中未对钢柱承载力提出储备系数的要求,根据计算分析结果,建议应取值不低于1.3。

表4 放大系数 ζ Table 4 Amplification coefficient ζ

构件		λ	F_m/kN	F_0/kN	ζ
网片	边跨	0.207	30.2	27.1	1.11
	中跨	0.213	52.4	45.9	1.14
钢柱	边跨	0.230	244.4	202.7	1.21
	中跨	0.227	267.6	237.3	1.13
上支撑绳	边跨	0.241	207.5	154.6	1.34
	中跨	0.194	272.6	236.3	1.15
拉锚绳	边跨	0.172	38.0	34.7	1.10
	中跨	0.239	138.6	98.4	1.41

4 结 论

通过引入参数 λ 来表示滚石转动动能与平动动能之比,基于数值仿真,计算分析了不同转速的滚石对柔性防护网系统各构件响应的影响,得到以下结论:

(1)滚石转动效应对结构主要构件均有不利影响,随着 λ 值增大,钢柱自由端最大竖向位移、钢柱及网片内力、上支撑绳及拉锚绳拉力均先增大再减小,且均在 $\lambda=0.2$ 时达到最大增幅值,分别为47%、29%、20%、39%、39%。且随着 λ 值增大,网片和耗能器耗能呈线性下降,滑移和摩擦耗能呈线性增加。

(2)通过各构件最大内力与 λ 值之间的拟合公式可求得最不利的 λ 值及对应极值,并显示出考虑转动效应后各构件内力放大系数 ζ 均明显大于1,因此在防护网试验与构件设计时宜考虑滚石转动效应对结构响应的影响,以保证足够的安全余量。

(3)在对被动柔性防护系统进行设计计算时,网片、支撑绳和拉锚绳的取值当参照标准《被动柔性防护网结构工程技术规范》中的规定赋予安全储备系数时,其设计承载力则能够满足实际工程中因滚石转动分量而产生的柔性防护系统内力放大效应,从而保证工程安全。此外,作为对既有标准的补充,对钢柱的放大系数也应当有所考虑,可参考取值1.3。

参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023, 257.

[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] 崔廉明, 石少卿, 汪敏, 等. 多位置分布配重下引导式落石缓冲系统冲击防护性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 332-342.
Cui L M, Shi S Q, Wang M, et al. Research on the impact protection performance of the rockfall attenuator system under multiposition distributed counterweights conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 332-342. (in Chinese)

[4] Ng C W W, Song D, Choi C E, et al. A novel flexible barrier for landslide impact in centrifuge[J]. Geotechnique Letters, 2016, 6(3): 221-225.

[5] 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, 55(7): 80-85.
Ye S Q, Chen H K, Tang H M. Rockfall mitigation techniques and its characteristics[J]. Highway, 2010, 55(7): 80-85. (in Chinese)

[6] 赵世春, 余志祥, 韦韬, 等. 被动柔性防护网受力机理试验研究与数值计算[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 122-128.
Zhao S C, Yu Z X, Wei T, et al. Test study of force mechanism and numerical calculation of safety netting system[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(5): 122-128. (in Chinese)

[7] 赵雷, 张丽君, 余志祥, 等. 泥石流柔性防护系统耦合作用数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(3): 606-613.
Zhao L, Zhang L J, Yu Z X, et al. Coupled numerical simulation of flexible debris flow barrier[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 606-613.

[8] 铁路沿线斜坡柔性安全防护网: TB/T 3089—2016[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2016.

[9] Guideline for European technical approval of falling rock protection kits: EOTA, ETAG 27[S]. EU: European Organisation for Technical Approvals, 2012.

[10] Higgins J D. Recommended procedure for the testing of rock-fall barriers [R]. Washington: AASHTO Technical Report, 2003.

- [11] 边坡柔性防护网系统:JT/T 1328—2020[S].北京:中华人民共和国交通运输部,2020.
- [12] 被动柔性防护网结构工程技术规程:T/CECS 824—2021[S].北京:中国计划出版社,2021.
- [13] Gentilini C, Gottardi G, Govoni L, et al. Design of falling rock protection barriers using numerical models[J]. *Engineering Structures*, 2013, 50: 96-106.
- [14] 章广成,唐辉明,吕庆,等.斜坡落石研究[M].北京:科学出版社,2017.
- [15] Asteriou P, Tsiambaos G. Empirical model for predicting rockfall trajectory direction[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(3): 927-941.
- [16] Crosta G B, Agliardi F, Frattini P, et al. Key issues in rock fall modeling, hazard and risk assessment for rockfall protection[J]. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2015, 2: 43-58.
- [17] Hungr O, Leroueil S, Picarelli L. The varnes classification of landslide types, an update[J]. *Landslides*, 2014, 11(2): 167-194.
- [18] 叶四桥,陈洪凯,许江.落石运动模式与运动特征现场试验研究[J].*土木建筑与环境工程*, 2011, 33(2): 18-23,44.
Ye S Q, Chen H K, Xu J. Rockfalls movement mode and movement features by field tests[J]. *Journal of Civil Architectural and Environmental Engineering*, 2011, 33(2): 18-23,44. (in Chinese)
- [19] 罗刚,程谦恭,沈位刚,等.高位高能岩崩研究现状与发展趋势[J].*地球科学*,2022, 47(3): 913-934.
Luo G, Cheng Q G, Shen W G, et al. Research status and development trend of the high-altitude extremely-energetic rockfalls[J], *Earth Science*, 2022, 47(3): 913-934. (in Chinese)
- [20] 俞棠荣,汪敏,王高胜. TECCO 格栅网斜向受落石冲击试验与数值模拟[J].*重庆理工大学学报(自然科学)*,2018, 32(11): 86-92.
Yu T R, Wang M, Wang G S. Test study and numerical analysis of rockfall oblique on the TECCO net[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2018, 32(11): 86-92. (in Chinese)
- [21] 宋道国,徐建平,唐黎明.滚石转动动能背景下的柔性防护网结构有限元探究[J].*建材与装饰*,2021, 17(1): 243-244.
Song D G, Xu J P, Tang L M. Finite element exploration of flexible barrier under the background of rolling stone rotational kinetic energy [J]. *Building Materials and Decoration*, 2021, 17(1): 243-244. (in Chinese)
- [22] 王东坡,张鸿雁,李伟,等.基于能量比例系数的滚石冲击力计算方法研究[J].*岩石力学工程学报*,2023, 42(2): 317-326.
Wang D P, Zhang H Y, Li W, et al. Study on calculation method of rockfall impact force based on proportional coefficient of energy[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(2): 317-326. (in Chinese)
- [23] 左明宇.考虑转动效应的抛体冲击环形被动柔性结构性能分析及优化设计[D].四川:四川师范大学,2021: 28-44.
Zuo M Y. Performance research and optimization of passive flexible barrier with ring-net under projectile impact considering rotating effects[D]. Sichuan: Sichuan Normal University, 2021: 28-44. (in Chinese)
- [24] 汪敏,石少卿,阳友奎.减压环耗能性能的静力试验及动力有限元分析[J].*振动与冲击*, 2011, 30(4): 188-193.
Wang M, Shi S Q, Yang Y K. Static tensile test and FEM dynamic simulation for a ring-brake energy dissipater [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(4): 188-193. (in Chinese)
- [25] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003: 323-329.
- [26] 周晓宇,陈艾荣,马如进.滚石柔性防护网耗能规律数值模拟[J].*长安大学学报(自然科学版)*,2012, 32(6): 59-66.
Zhou X Y, Chen A R, Ma R J. Numerical simulation of energy dissipation mechanism on falling rocks protection nets [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2012, 32(6): 59-66. (in Chinese)
- [27] 胡厚田.崩塌与落石[M].北京:中国铁道出版社,1989: 85-90.

(本文编辑:周小潭)