

文章编号:1671-8879(2012)06-0059-08

# 滚石柔性防护网耗能规律数值模拟

周晓宇,陈艾荣,马如进

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**从滚石运动轨迹确定出发,基于数值模拟方法对云南省澜沧江沿岸某在建桥梁桥址区滚石高发边坡进行滚石滚落数值模拟,确定滚石运动特征。基于获得的滚石运动特征,使用 Ls-dyna 对滚石撞击柔性防护结构响应进行分析,获得拦石网动态响应特征。分析结果表明:滚石运动特征与边坡形式及覆盖层特征相关,在模拟假设条件下,与滚石质量相关性并不明显;重点关注的 3 个撞击参数拦石网最大变形、冲击力峰值和接触时间均表现出与撞击速度和滚石半径较好的线性相关性;柔性防护网在对不同半径滚石撞击下表现出明显的“子弹效应”,小半径滚石穿透拦石网所需动能明显小于大半径滚石。

**关键词:**桥梁工程;滚石;数值模拟;耗能机理;柔性防护网;“子弹效应”

**中图分类号:**U417.12 **文献标志码:**A

## Numerical simulation of energy dissipation mechanism on falling rocks protection nets

ZHOU Xiao-yu, CHEN Ai-rong, MA Ru-jin

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the method of dynamic finite element analysis, Rockfall was used to simulate the rockfall trajectory at a slope of Lancang River in Yunnan province, China. The obtained rockfall motion characteristics were introduced to analyze the dynamic response of the flexible protection nets with the Ls-dyna. The results show that the motion characteristics of falling rocks are related with the form and surface layer characteristics of slope, but their relation with falling rocks mass is not obvious. The maximum deformation, the maximum impact force and the contact time are strongly correlated with the impact velocity and the dimensions of rocks. At the same time, the so-called “bullet effect” is accurately verified. A small rock needs less kinetic energy than the relatively large rocks when it penetrates the rockfull protection nets. 1 tab, 15 figs, 12 refs.

**Key words:** bridge engineering; rockfall; numerical simulation; energy dissipation mechanism; flexible protection net; bullet effect

## 0 引言

山区铁路、公路沿线等滚石多发区域需采取滚

石防护措施,柔性被动防护网以其结构简洁、传力明确而被大量使用,但对其安装位置的确定和受力机理研究却非常少,致使部分被动防护结构安装之后

拦截效果不佳。因此,确定边坡滚石运动轨迹以及拦石网撞击的动力响应对于拦石网设计是必要的。Spadari 等通过数值模拟分析,研究了影响网结构承载能力的因素<sup>[1]</sup>;Gottardi 等对滚石冲击被动防护网进行了现场试验研究,获得了冲击力峰值与滚石质量、速度的关系<sup>[2]</sup>;Cazzani 等对滚石撞击被动防护网的过程进行了数值模拟研究<sup>[3-4]</sup>;Peila 等对滚石撞击被动防护进行了足尺试验研究<sup>[5]</sup>。在中国,黄雨等对落石的滚落过程运用方程进行了理论推导<sup>[6]</sup>;杨海清等考虑滚石撞击地面的弹塑性变形,对运动方程进行了修正<sup>[7]</sup>;孙波等对落石撞击拦石网过程的能量耗散进行了数值模拟<sup>[8]</sup>;叶四桥等对目前中国拦石网的设计理念进行了适当优化<sup>[9]</sup>。但从已有文献范围来看,研究成果均为脱离拦石网所在地的地质、地形特征,撞击参数的选取有很大盲目性。考虑到不同边坡可能发生滚石撞击被动防护结构撞击参数的差异,本文从边坡滚石的数值模拟出发,研究了不同半径滚石滚落的运动参数变化规律,使用这些运动参数对被动防护结构进行动态分析,提出了在可能发生冲击的动能范围内,网结构响应与撞击参数的关系,并对拦石网撞击过程表现出的尺寸效应进行了数值模拟,以期为拦石网设计理论的优化提供一定的参考。

## 1 基本原理

### 1.1 滚石运动特征

滚石沿坡表的主要运动形式包括,滚动、滑动、腾跃和冲击回弹,对滚石运动特征的分析方法,有现场试验、模型试验和数值模拟,现场试验和模型试验由于可重复性差,对于随机事件的模拟,往往无法获得其统计规律,相反数值模拟方法对于重复试验优势明显,鉴于此优势,数值模拟已成为滚石运动特征分析的主流手段。目前广泛使用的滚石运动特征模拟软件中对滚石滚落过程做了如下假设:

- (1) 简化滚石为刚性球体,忽略运动过程中的破碎。
- (2) 简化边坡为一系列首尾相连的边坡单元。
- (3) 忽略运动过程中空气阻力的影响。
- (4) 以恢复系数方法考虑滚石与边坡撞击回弹。
- (5) 从二维空间分析滚石滚落,或以偏移系数的手段将二维结论扩展至三维。

根据运动学原理,滚石的各种运动形态可由下述运动方程描述。

#### 1.1.1 滚石的自由下落或飞落

滚石能否发生自由下落与边坡剖面的形状、滚石的初始运动形式等有关。在边坡坡角变化(陡坡向缓坡过渡)的地方,以及碰撞发生后,往往形成滚石的飞落。在重力作用下,滚石的重力势能转化为动能。运动过程中忽略空气阻力的影响,滚石的自由飞落为牛顿运动学的抛体运动,运动的主要参数为矢量初速度,运动轨迹为一系列抛物线。

滚石做斜坡运动时,运动曲线如图 1 所示。

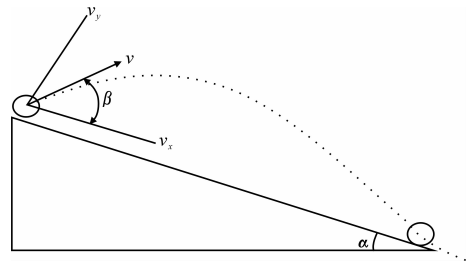


图 1 抛体运动

Fig. 1 Projectile motion

设  $\beta$  为块石开始腾跃速度  $v$  的方向与边坡坡面的夹角,由运动学基本原理,滚石任意时刻的速度为

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_0 \cos(\beta) + gt \sin(\alpha) \\ v_y &= v_0 \cos(\beta) - gt \sin(\alpha) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为坡角( $^\circ$ ); $v_0$  为腾跃初始速度(m/s); $v_x$ 、 $v_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的速度分量(m/s); $g$  为重力加速度(m/s); $t$  为时间(s)。

从滚石腾跃开始至与坡面碰撞阶段,滚石体运动轨迹方程为

$$\left. \begin{aligned} x &= v_0 t \cos(\beta) + 0.5gt^2 \sin(\alpha) \\ y &= v_0 t \sin(\beta) - 0.5gt^2 \sin(\alpha) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $x$ 、 $y$  分别为块石体沿坡面方向和垂直于坡面方向的位移分量。

#### 1.1.2 滚石的滚动

近球形、柱形、饼状块石在速度不高的条件下,沿平整缓坡发生滚动。滚动过程滚石体速度与角速度分别为

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2[gH - fgL \cos(\alpha)] \frac{r^2}{r^2 + d^2}} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (4)$$

式中: $H$  为滚石沿坡面运动垂直距离(m); $L$  为滚石沿坡面运动的水平距离(m); $f$  为滚动摩擦因数; $r$  为球体半径(m); $d$  为球形滚石半径(m)。

#### 1.1.3 滚石碰撞回弹

从滚石斜抛运动的运动方程中,得出滚石与坡

面碰撞前的速度为

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_0 \cos(\beta) + gt \sin(\alpha) \frac{2v_0 \sin(\beta)}{g \cos(\alpha)} \\ v_y &= v_0 \cos(\beta) - gt \sin(\alpha) \frac{2v_0 \sin(\beta)}{g \cos(\alpha)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

采用两参数恢复系数,法向恢复系数  $R_n$  和切向恢复系数  $R_t$  分别为

$$R_n = \frac{v'_{1n}}{v_{1n}}, R_t = \frac{v'_{1t}}{v_{1t}} \quad (6)$$

由此,碰撞后块石速度为

$$\begin{cases} v'_{1n} = v_y R_n \\ v'_{1t} = v_x R_t \end{cases} \quad (7)$$

式中: $v_{1n}$ 、 $v'_{1n}$  分别为滚石第  $n$  次撞击前后法向速度分量(m/s); $v_{1t}$ 、 $v'_{1t}$  分别为滚石第  $n$  次撞击前后切向速度分量(m/s)。

#### 1.1.4 滚石的滑动

滚石运动的开始和结束阶段,特别是在边坡坡度较缓且坡面光滑的坡段上,可能会发生滚石的滑动,根据功能原理,滚石滑动阶段速度为

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gH[1 - f \cos(\alpha)]} \quad (8)$$

### 1.2 有限元分析算法

接触问题存在多个工程领域,在桥梁工程领域具有代表性的包括船舶与桥梁下部结构的接触碰撞;汽车与桥梁护栏等附属设施的接触碰撞;以及山区桥梁下部结构遭遇泥石流的接触碰撞。在冲击荷载作用下,结构可能发生大变形,材料可能进入塑性状态,撞击物体与被撞击物体接触的同时,由于塑性变形,被撞击物体的各个表面可能发生接触,因此接触问题是一个涉及到几何非线性、材料非线性和边界条件非线性的难题<sup>[10]</sup>。由于碰撞问题的高度复杂性给理论求解带来的很大困难,与此同时,有限单元法作为一种高效的工程数值分析方法在处理该类问题上显示出了足够的优越性。

接触碰撞有限元分析是一个复杂的系统工程,涉及到以下 5 个方面的主要内容:①连续介质问题的变分原理;②材料的本构模型;③有限元单元模型;④时间积分算法;⑤接触算法<sup>[11]</sup>。

对于撞击分析系统建立的二阶常微分方程组,通常有隐式和显式 2 种基本算法。隐式算法是无条件稳定的,但由于分析模型具有很强的非线性特性,为保证隐式分析足够的精度,需要采用足够小的时间步长,这将使得计算量十分巨大<sup>[12]</sup>。相比而言,条件稳定的显式分析算法处理该类问题上优势明显,当质量矩阵采用对角阵时,无需建立和求解联立

方程组,所占内存空间小,计算速度快。本文分析使用的 Ls-dyna 软件对撞击分析积分算法主要采用显式分析方法。

结构动力学的基本方程可以写为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{p}(t) \quad (9)$$

式中: $\mathbf{M}$  为质量矩阵; $\mathbf{C}$  为阻尼矩阵; $\mathbf{K}$  为刚度矩阵, $\mathbf{x}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 、 $\ddot{\mathbf{x}}(t)$  分别为位移向量、位移向量一阶导数,位移向量二阶导数; $\mathbf{p}(t)$  为胁迫力向量。

显式积分方法中用的较多的是中心差分法,该方法假设  $t - (\Delta t/2)$  和  $t + (\Delta t/2)$  时刻速度可以表示为如下的差分形式

$$\dot{\mathbf{x}}^{t-(\Delta t/2)} = \frac{\mathbf{x}^t - \mathbf{x}^{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{x}}^{t+(\Delta t/2)} = \frac{\mathbf{x}^{t+\Delta t} - \mathbf{x}^t}{\Delta t} \quad (11)$$

时刻的加速度由下面差分表达式表示

$$\ddot{\mathbf{x}}^t = \frac{\dot{\mathbf{x}}^{t+(\Delta t/2)} - \dot{\mathbf{x}}^{t-(\Delta t/2)}}{\Delta t} \quad (12)$$

将式(10)和式(11)代入式(12)得

$$\ddot{\mathbf{x}}^t = \frac{1}{\Delta t^2} (\mathbf{x}^{t+\Delta t} - 2\mathbf{x}^t + \mathbf{x}^{t-\Delta t}) \quad (13)$$

由式(9)可知

$$\ddot{\mathbf{x}}^t = \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{p}^t - \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}^t - \mathbf{K}\mathbf{x}^t) \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)中可得

$$\mathbf{x}^{t+\Delta t} = \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{p}^t - \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}^t - \mathbf{K}\mathbf{x}^t) \Delta t^2 + 2\mathbf{x}^t - \mathbf{x}^{t-\Delta t} \quad (15)$$

式(15)中的  $\mathbf{x}^{t-\Delta t}$  可从下式求解

$$\dot{\mathbf{x}}^t = \frac{\mathbf{x}^{t+\Delta t} - \mathbf{x}^{t-\Delta t}}{2\Delta t} \quad (16)$$

即

$$\mathbf{x}^{t-\Delta t} = \mathbf{x}^{t+\Delta t} - 2\dot{\mathbf{x}}^t \Delta t \quad (17)$$

将式(17)代入式(15)中,即可得到  $t + \Delta t$  时刻的位移

$$\mathbf{x}^{t+\Delta t} = \mathbf{x}^t + \Delta t \dot{\mathbf{x}}^t + \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{p}^t - \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}^t - \mathbf{K}\mathbf{x}^t) \Delta t^2 / 2 \quad (18)$$

$t + \Delta t$  时刻的速度可由下式得

$$\frac{1}{2} (\dot{\mathbf{x}}^t + \dot{\mathbf{x}}^{t+\Delta t}) = \frac{\mathbf{x}^{t+\Delta t} - \mathbf{x}^t}{\Delta t} \quad (19)$$

由此得到

$$\dot{\mathbf{x}}^{t+\Delta t} = \frac{2}{\Delta t} (\mathbf{x}^{t+\Delta t} - \mathbf{x}^t) - \dot{\mathbf{x}}^t \quad (20)$$

对于发生碰撞的 2 个物体,相互之间需要定义接触,而要定义接触,则需要首先定义发生接触的面,面的定义是通过确定处于面上的单元的表面来实现的。单元的每一个表面,称为一个面段,它是组成面的基本单位。面段的形状可以是四边形也可以

是三角形。

相互接触的2个面,一个称为主面,另一个称为从面,进行接触计算时,对于从面而言,其上的节点称为从节点;对于主面上的节点称为主节点,两物体的接触即为主面与从面之间的接触。

在计算的每个时间步中,程序将会对每一个节点进行检查,搜索距离该点最近的主面段,并判断该从节点是否穿透了主面段,若没有则不对该从节点进行任何处理,计算继续进行,如果发生穿透,则在从节点与主面段之间引入一个比较大的接触力,该力的大小与从节点的穿透深度和接触界面刚度成正比,本文分析采用 Ls-dyna 软件分析过程使用接触算法使用该方法。

### 1.3 被动防护结构基本原理

以钢丝绳网为主要构件的柔性防护系统,在国际上已在崩塌、落石、风化剥落、碎落和泥石流等坡面以坡面或浅层破坏为特征的坡面地质灾害以及雪崩、岸坡冲刷、爆破飞石、坠物等灾害防护中得到了广泛应用;在中国 1995 年引入边坡地质灾害防治领域,经过十几年的发展,做为该项新技术载体的柔性防护系统在国内铁路、公路、水电站、矿山、市政、及景区边坡防护工程中得到应用,如图 2 所示。



图 2 拦石网现场

Fig. 2 Falling rocks protection nets

被动防护柔性网主要包括拉锚绳、上下支撑绳、钢丝绳网、钢梁和消能环组成。其中钢丝绳网是主要的消能构件,AX-150 型被动防护构件,钢丝绳网采用  $\Phi 6$  高强钢丝编制,在遇落石撞击时,落石动能大部分转化为钢丝绳网变形能,少部分通过钢梁和拉锚绳传至基础。拉锚绳和上下支撑绳作用是将冲击能量转移到钢梁进一步传递到基础。

## 2 数值计算模型和参数选择

### 2.1 边坡模型基本参数

使用 Rocfall 软件进行滚石滚落数值模拟试验,将上述边坡按垂直高度 1 m 进行离散,共离散坡面单元 60 个,覆盖层选用软件材料库中基岩出露的坡表材料,法向和切向恢复系数分别为 0.35 和 0.85。

为了获得不同质量滚石滚落至坡底动能的变化规律,模拟过程分别对坡顶处发生 10、30、50、80、100 kg 滚石进行 100 次滚落试验。

### 2.2 撞击滚石基本参数

滚石与拦石网的撞击过程,大体积滚石与网结构接触面积大,高应力区域大,相比于小体积滚石高应力区峰值相对较小。为了获得撞击特性与滚石尺寸及动能的相关性,模拟过程中,简化球体块石半径分别取 0.2、0.3、0.4、0.5 m,块石速度分别取为 7、9、11、13、15 m/s。在 Ls-dyna 中,使用 SOLID164 单元和刚体材料模型模拟。“子弹效应”模拟时,对半径分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m 的块石进行分析,搜索穿透动能。

### 2.3 拦石网基本参数

柔性防护结构按照 AX-150 型标准图参数选取。柱间距为 10 m,拦截高度 4 m,拉锚绳锚固点据相邻钢梁 6 m,钢丝绳网采用  $\Phi 6$  高强钢丝编制,正方形网格边长为 0.2 m,上下支撑绳采用  $\Phi 12$  高强钢丝,左右拉锚绳采用  $\Phi 16$  高强钢丝,钢梁材料选用 18 号工字钢。在 LS-DYNA 中,钢丝绳网和拉锚绳采用 link160 单元模拟,钢梁采用 beam161 单元模拟。为模拟冲击过程中材料强度的率相关特性,使用 Cowper-symonds 材料模型,对应为 Ls-dyna 中 3 号材料模型模拟高强钢丝材料,该材料能够较好的模拟弹塑性材料在高应变率时的塑性硬化效应。该本构模型中通过 2 个应变率参数  $C$ 、 $P$  模拟应变率效应,本构方程为

$$\sigma_y = [1 + (\frac{\dot{\epsilon}}{C})^{\frac{1}{P}}] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (21)$$

式中: $\sigma_y$  为考虑应变率效应的屈服应力(MPa); $\sigma_0$  为初始屈服应力(MPa); $\dot{\epsilon}$  为应变率( $s^{-1}$ ); $\epsilon_p^{eff}$  为等效塑性应变; $E_p$  为塑性应变模量; $C$ 、 $P$  为应变相关参数。

## 3 实例地形

对云南省澜沧江沿岸某滚石多发段进行模拟,桥址所在区段澜沧江河道较顺直,基本为南北流向,河床坡降 3%~5%,江面宽 70~90 m,河谷深切,呈“V”型,桥位左岸岸坡陡峭,坡度 42°~46°,边坡基岩大面积裸露。高程 1 931~2 015 m 段边坡表部覆盖有厚 5~10 m 的崩坡积碎石土层;1 942 m 以上边以碎石土层为主;1 942 m 高程以下至 1 931 m 高程,边坡表部分布有厚为 2~6 m 碎石土层及边坡开挖弃碴。右岸为澜沧江三级基座阶地,基岩出

露高程 1 850~1 860 m。阶地地形平坦,平台坡度  $3^{\circ}\sim 7^{\circ}$ ,阶地前缘坡度  $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。阶地上部覆盖层厚度较大,呈二元结构,上部为耕植含砾土层,下部为冲洪积砂卵石土层,局部间夹透镜体状砂土层及大块石,桥址地形如图 3 所示。



图 3 桥址地形

Fig. 3 Topography of the bridge site

由于左侧边坡坡度大,且上层坡表覆盖层以碎石土层为主,同时德维二级路的修建对该边坡进行了大范围的切削,使得岩体更加不稳定。根据现场勘查显示,桥址左岸滚石灾害已发生多次。因此,桥址左岸为滚石灾害防护的重点位置,同时,该桥施工过程中对边坡滚石进行了初步防护,已在 1 942 m 高度处平行布置了 SNS150 型柔性防护网。

## 4 数值模拟方法及结果分析

为获得滚石下落沿坡面的运动特征和到达拦石网区域的动能,选取其中坡度最大坡面作为代表坡面进行分析,截取剖面如图 4 所示。

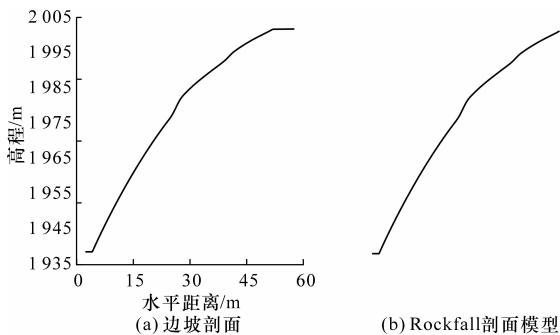


图 4 边坡剖面及 Rocfall 剖面模型

Fig. 4 Slope profile and rocfall profile model

### 4.1 滚落过程数值模拟

模拟过程分别对坡顶处发生 10、30、50、80、100 kg 滚石进行 100 次滚落试验。同时,在桥址区设置柔性拦石网区域设置的数据收集器,收集滚石撞击拦石网瞬间的运动参数。

由数值模拟可见,不同质量滚石下落过程运动形式相似,以沿坡表滚落为主,在海拔 1 984 m 处,

由于缓坡向陡坡过渡,且滚石经过一段下落具有一定动能,在该段发生飞跃,之后经过数次弹跳后在坡度较缓坡段,开始沿坡面滚落。

在坡底滚石可能撞击范围内设置数据收集器单元,收集滚石着陆瞬间的运动参数。对不同质量的滚石各 100 次滚落数据进行统计分析,分别获得其平动动能和转动动能。以平动动能和转动动能之和为滚石的瞬间总动能,对不同质量的 100 次试验进行平均,获得滚石到达坡底平均动能与滚石质量关系,如图 5 所示。

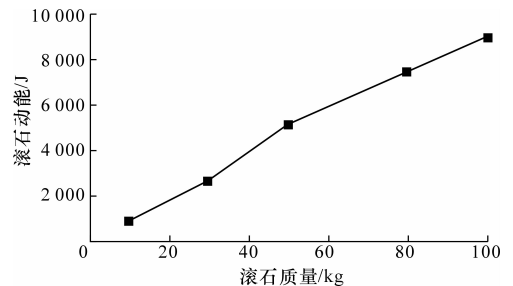


图 5 滚石动能与质量的关系

Fig. 5 Relation between kinetic energy and mass of the rockfall

对每组质量落石 100 次滚落试验数据进行汇总分析,提取滚石到达坡底瞬间总动能数据进行分析,得出如下结论:滚石到达坡底动能随滚石质量增大而增加,二者大致符合线性关系。对于质量在一定范围内的滚石而言,从坡顶滚落至坡底过程,势能转化动能比例几乎相等(对该边坡而言约为 14%),亦即滚石到达坡底获得速度大致相等(对该边坡而言约为 12.8 m/s)。该结论对于滚石防护结构设计荷载估算是有益的。

该边坡的防护采用的是 AX-150 型被动柔性防护网,最大设计拦截动能为 150 kJ。根据上述结论,估算该柔性网可拦截从坡顶滚落滚石的最大质量为 1.68 t,可拦截滚石最大体积约为  $0.68 \text{ m}^3$ 。

### 4.2 撞击过程数值模拟

滚石与钢丝绳网的碰撞过程,滚石刚度远大于钢丝绳网刚度,因而在模拟过程忽略滚石的破碎,简化滚石为球形刚体,在 Ls-dyna 中使用 SOLID164 单元模拟,取滚石直径为 0.3 m,质量为 294 kg。模型建立如下页图 6 所示。

滚石与防护网的碰撞过程,是一个材料非线性、接触非线性的大变形过程。由于碰撞时间较短,一般在 1 s 以内,机械能与热能的转化可以忽略,得到拦石网变形如下页图 7 所示。

从图 7 可以看出滚石接触拦石网开始,参与变

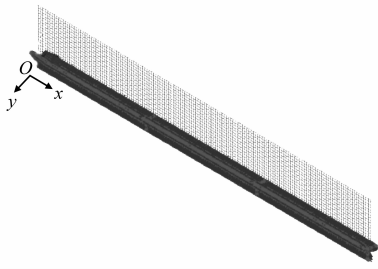


图6 拦石网有限元模型

Fig. 6 Finite element model of protection nets

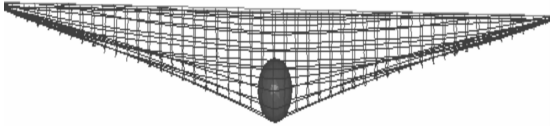


图7 拦石网变形

Fig. 7 Deformation of rocks protection nets

形网区域不断增加,滚石动能转化为拦石网变形能不断增加,当滚石速度降为0,拦石网变形达到最大时发生反弹,但反弹速度较之冲击速度较小。同时,由于网结构的大变形也显著的延长了接触时间,从而减小了滚石冲击力。图8为滚石冲击力曲线。

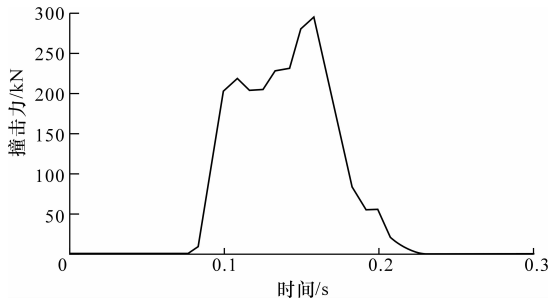


图8 滚石冲击力曲线

Fig. 8 Impact force curve of falling rock

由冲击力曲线可见,滚石与拦石网接触时间在0.3~0.6 s之间,相比于滚石撞击刚性拦石墙防护结构已有显著的增加,从而显著的减小了冲击力峰值。

为获得冲击力峰值、接触时间最大嵌入深度对尺寸和速度的关系,设计数值模拟试验如下,球体块石半径分别取0.2、0.3、0.4、0.5 m,滚石速度分别取为7、9、11、13、15 m/s。处理分析结果数据绘制变化曲线如图9~图12和下页图13~图14所示。

从简化的球体滚石撞击拦石网模拟结果可见,拦石网最大拉伸变形与滚石撞击速度满足线性关系,最大变形随滚石撞击速度的增加而线性增大。且对于相同撞击速度下,拦石网最大变形随滚石半径增大而线性增加。

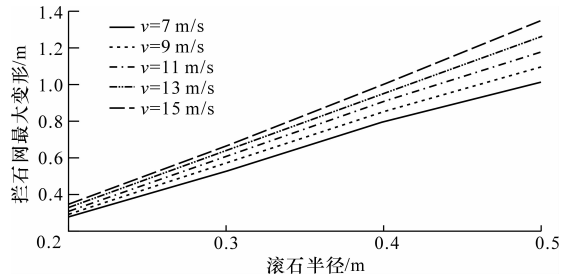


图9 拦石网最大变形与滚石半径的关系

Fig. 9 Maximum deformation vs falling rock dimensions curve

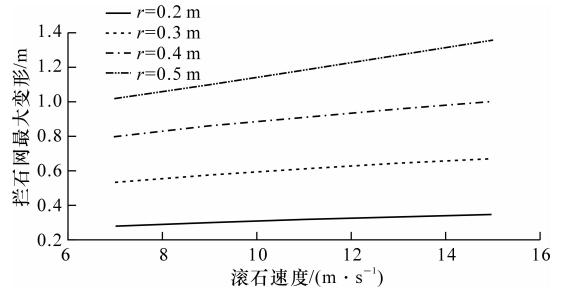


图10 拦石网最大变形与撞击速度的关系

Fig. 10 Maximum deformation vs falling rock impact velocity curve

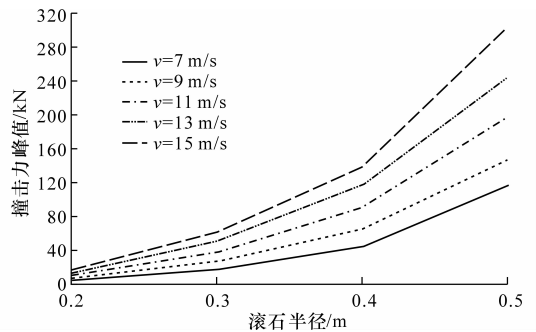


图11 冲击力峰值与滚石半径的关系

Fig. 11 Maximum impact force vs falling rock dimensions curve

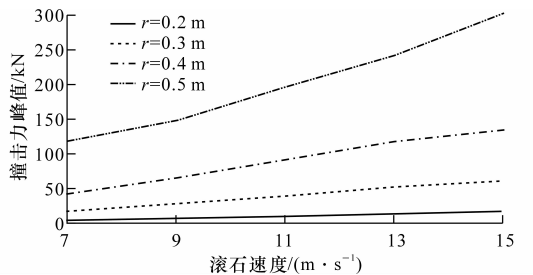


图12 冲击力峰值与撞击速度的关系

Fig. 12 Maximum impact force vs rockfall impact velocity curve

滚石撞击过程的最大冲击力是拦石网设计关注的重要参数,由图9可见,在数值模拟试验范围内,滚石撞击拦石网冲击力极值随撞击速度的增大而增

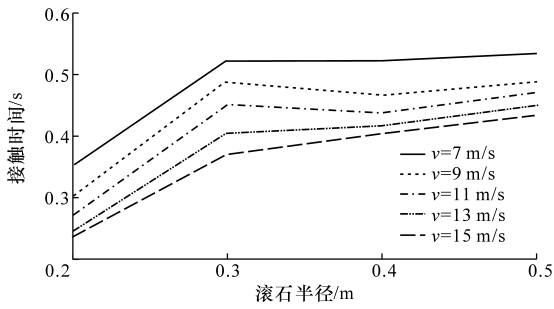


图 13 接触时间与滚石半径的关系

Fig. 13 Contact time vs falling rock dimensions curve

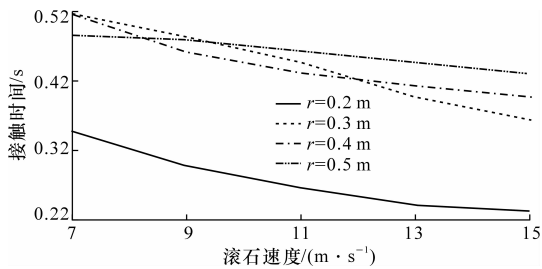


图 14 接触时间与撞击速度的关系

Fig. 14 Contact time vs falling rock impact velocity curve

大,同时,冲击力极值也与滚石半径表现出良好的正相关关系。

在滚石与拦石网的撞击过程中,由冲量定理可知,滚石与拦石网的接触时间将直接影响到冲击力的大小,同时也体现拦石网拦截滚石能力以及吸收能量的效率。从模拟结果可见,接触时间随滚石撞击速度的增大呈减小趋势,而随滚石半径的增加呈增大趋势,但在块石尺寸较小时,受尺寸影响较为显著。

## 5 “子弹效应”模拟

分析接触时间随滚石半径变化规律表现出明显的非线性特征,其原因可能为小半径滚石与拦石网撞击过程表现出明显的“子弹效应”,即由于撞击过程中,滚石半径较小而导致撞击区域小范围内应力集中明显,甚至在拥有相同动能的大体积滚石撞击安全的情况下,小体积滚石撞击发生穿透。为验证上述假设,重新建立被动防护结构中间区域模型。

拦石网尺寸为  $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ ,网格尺寸为  $0.2\text{ m}$  正方形网格。网体使用 Link160 单元划分网格,块石为圆形刚体,使用 Solid164 退化四面体单元划分网格。网体边界条件为四周固定,滚石刚体模型保留撞击方向自由度,同时释放转动自由度。为模拟冲

击荷载作用钢丝绳网的相关效应,网体材料模型选用 Ls-dyna 材料库 3 号材料模型。滚石及拦石网材料力学性能参数见表 1。

表 1 滚石及钢丝绳材料力学性能参数

Tab. 1 Mechanics performance parameters of rocks and steel wire ropes

材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松比	屈服强 度/MPa	极限 应变
滚石	2 600	3 000	0.3		
钢丝绳	7 850	1 770	0.3	1 770	0.05

分析过程中使用递推逼近的计算方式,搜索计算不同尺寸滚石穿透拦石网时的速度值,进而获得滚石的穿透动能。

通过对半径为  $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.3$ 、 $0.4$ 、 $0.5$  和  $0.6\text{ m}$  的 6 种块石进行分析,递推逼近取值获得其穿透拦石网的动能,如图 15 所示。

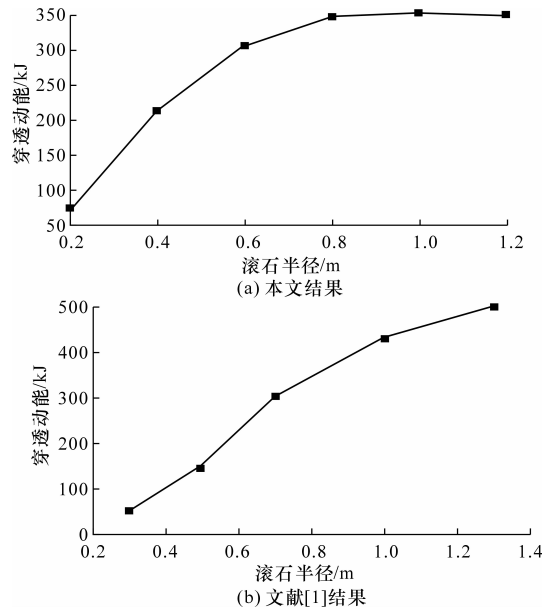


图 15 不同半径的滚石穿透能量曲线与文献[1]的结果对比

Fig. 15 Comparison of experimental penetrating energy of falling rocks with dimensions and that of reference

由图 15 可以看出,滚石半径较小时,穿透拦石网所需的动能明显小于大体积滚石,而当滚石半径达到  $0.8\text{ m}$  之后的 3 个工况,滚石穿透拦石网所需动能基本一致。由于文献[1]中的网体尺寸较大,故对于块石尺寸在  $1.4\text{ m}$  范围内的滚石均表现出局部效应。

分析文献[1]结论与本文结果差异,为块石与拦石网的相对尺寸,当块石尺寸与拦石网尺寸相差较大时,撞击过程中将表现出显著的“子弹效应”,局部高应力区域相对于拦石网尺寸很小;而当块石尺寸

接近拦石网尺寸时,由于边界条件的影响,局部高应力区应力峰值相比于边界区并不明显,局部效应被削弱。同时,在“子弹效应”的计算结果中可以看出,可拦截具有 350 kJ 动能的半径为 1.2 m 滚石的拦石网,在遭遇具有 75 kJ 动能的半径为 0.2 m 的滚石撞击时发生穿透。因此,对于目前拦石网设计过程仅考虑拦截动能的设计理念尚有待改进。

## 6 结 语

(1) 滚石滚落动能与滚石质量相关性不明显,而较强的依赖于边坡形状,即对于数值模拟边坡而言,不同质量滚石滚落坡底具有的平均动能为滚落初滚石具有势能的固定百分比(本文实例的边坡约为 14%)。

(2) 滚石冲击被动防护网过程中,拦石网最大变形与滚石冲击速度线性相关,随滚石速度的增加而增大,同时与滚石半径正相关。

(3) 滚石与拦石网相互作用时间,随滚石撞击速度的增大呈减小趋势,而随滚石半径的增加呈增大趋势,但在块石尺寸较小时,受尺寸影响较为显著。

(4) 滚石撞击拦石网冲击力峰值随撞击速度的增大而增大,同时,冲击力极值也与滚石半径表现出良好的正相关关系。

(5) 滚石撞击拦石网,发生穿透所需能量与滚石半径密切相关。小半径滚石穿透拦石网所需能量远小于大半径滚石,即所谓的“子弹效应”。因此,目前拦石网设计仅考虑拦截动能的方法仍有待于改进。

### 参考文献:

### References:

- [ 1 ] Spadari M, Giacomini A, Buzzi O, et al. Prediction of the bullet effect for rockfall barriers: a scaling approach[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(10): 131-144.
- [ 2 ] Gottardi G, Govoni L. Full-scale modelling of falling rock protection barriers[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(3): 261-274.
- [ 3 ] Cazzani A, Mongiovi L, Frenez T. Dynamic finite ele-

ment analysis of interceptive devices for falling rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(3): 303-321.

- [ 4 ] Nicot F, Cambou B, Mazzoleni G. Design of rockfall restraining nets from a discrete element modelling [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2001, 34(2): 99-118.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] 黄雨,孙启登,许强. 滚石运动特性研究新进展[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(10): 31-35.  
HUANG Yu, SUN Qi-deng, XU Qiang. New development of rockfall kinematics study[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(10): 31-35. (in Chinese)
- [ 7 ] 杨海清,周小平. 边坡落石运动轨迹计算新方法[J]. *岩土力学*, 2009, 30(11): 3411-3416.  
YANG Hai-qing, ZHOU Xiao-ping. A new approach to calculate trajectory of rockfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3411-3416. (in Chinese)
- [ 8 ] 孙波,石少卿,汪敏. 落石冲击被动防护系统能量衰减规律分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2010, 21(4): 34-38.  
SUN Bo, SHI Shao-qin, WANG Min. Analysis of the rhythm of energy attenuation when rockfalls impact on the passive protection[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2010, 21(4): 34-38. (in Chinese)
- [ 9 ] 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.  
YE Si-qiao, CHEN Hong-kai, XU Jiang. Rockfalls movement mode and movement features by field tests [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(2): 18-23. (in Chinese)
- [10] Bittencourt E, Creus G J. Finite element analysis of three-dimensional contact and impact in large deformation problems[J]. *Computers & Structures*, 1998, 69(2): 219-234.
- [11] Pollock G, Noor A K. Sensitivity analysis of the contact/impact response of composite structures [J]. *Computers and Structures*, 1996, 61(2): 251-269.
- [12] Hunek I. Explicit calculations of highly non-linear contact-impact problems[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1994, 150(2-3): 207-214.