

文章编号:1673-9469(2026)01-0033-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.01.005

## 冲击位置对半刚性防护网失效能量的影响研究

艾庆华,严鑫,马文芳,胡佳欢

(石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室,河北 石家庄 050043)

**摘要:** 针对目前半刚性落石防护网的失效能量与冲击位置之间的关系缺乏确切研究的现状,采用LS-DYNA软件建立了半刚性防护网的有限元模型,研究了不同冲击位置处防护网的失效能量,得到了钢绞线和钢柱的耗能规律,分析了各种冲击条件下防护网的破坏模式。研究表明:钢柱和钢绞线是主要的耗能构件,摩擦和阻尼耗能占比不大。落石冲击中跨跨中时,防护网的失效能量大于冲击边跨时的失效能量;落石冲击中跨跨中且纵向位置较高时,防护网的失效能量最大,落石冲击中柱底部时防护网的失效能量最小;落石冲击中跨跨中和钢柱上时,钢柱容易破坏;冲击边跨跨中底部时边柱容易破坏,冲击其他纵向位置较低时,边柱也容易破坏;冲击其他纵向位置较高时,钢绞线容易断裂。

**关键词:** 半刚性防护网;LS-DYNA;数值分析;失效能量;破坏模式

中图分类号:U417.1

文献标识码:A

## Effect of Impact Position on Failure Energy of Semi-rigid Protection Barriers

AI Qinghua, YAN Xin, MA Wenfang, HU Jiahuan

(State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** In view of the current situation that the relationship between the failure energy of semi-rigid rockfall protection barriers and impact positions has not been accurately studied, LS-DYNA was used to establish a finite element model of semi-rigid protection barriers. The failure energy of the protection barriers at different impact positions was studied, and the energy dissipation laws of steel strands and steel columns were obtained. The damage modes of the protection barriers under various impact conditions were analyzed. Research shows that steel columns and steel strands are the main energy-dissipating components, and friction and damping account for a small proportion of energy consumption. When the rockfall impacts the center of mid-span, the failure energy of the protection barriers is greater than that when impacting the side span; when the rockfall impacts the center of mid-span and at a high longitudinal position, the failure energy is the maximum, and when the rockfall impacts at the bottom of the center column, the failure energy is the minimum. The steel columns are easily damaged when rockfall impacts the center of mid-span and the steel columns; the side columns are easily damaged when the rockfall impacts the bottom of the side spans or other low longitudinal positions; the steel strands break easily when the rockfall impacts other high longitudinal positions.

**Key words:** semi-rigid protection barriers; LS-DYNA; numerical analysis; failure energy; damage modes

收稿日期:2024-02-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600605,2021YFB2600600);河北省重点研发计划项目(22346101D)

第一作者:艾庆华(1977—),男,山东夏津人,博士,副教授,主要从事桥梁抗震与加固研究工作。

我国是一个山区广布的国家,山体崩塌、滑坡等地质灾害频繁发生,给公路、铁路等基础设施带来安全隐患。目前已研发的道路防护产品包括拦石墙、钢轨栅栏、棚洞和防护网等<sup>[1-2]</sup>。拦石墙对地基要求高,建造维护成本高,逐渐被钢轨栅栏取代。钢轨栅栏耐久性差,且抗冲击性能不理想,而增加的侧向支撑等加固措施又降低了其经济性<sup>[3]</sup>。防护网分为主动防护网和被动防护网,主动防护网以钢丝绳网覆盖在斜坡上,防止坡面危岩崩塌,而被动防护网则置于坡底,用以拦截落石。被动防护网可分为柔性防护网和半刚性防护网两种。柔性防护网变形大、拦截能力强,常用于能级较高的场景中<sup>[4-5]</sup>,对于拦截能级较低的落石,采用柔性防护网并不经济。半刚性防护网结构形式简单,经济性好于柔性防护网,拦截能力满足常见的低能级落石冲击,得到广泛应用<sup>[6]</sup>。

目前对于半刚性防护网的研究较少,亦没有相应的行业规范。半刚性防护网的研究方法主要有足尺试验和数值仿真两种。De Miranda 等<sup>[7]</sup>采用 ABAQUS 对半刚性防护网进行了数值模拟,研究了四种防护网的失效机制,分别是纵向钢索变形过大、次级网片中央破裂、钢柱柱底破坏、次级网片边缘破裂,并且得到了每种防护网的极限性能;Buzzi 等<sup>[8]</sup>开展了两种低能级落石防护网的试验,根据荷载-变形曲线估算了系统的刚度,并得出去除中间钢索可以使次级网片更好地发挥作用,更容易将荷载传递到钢柱和基础上的结论;Mentani 等<sup>[9]</sup>通过数值分析,研究了落石尺寸、冲击角度、冲击位置对半刚性防护网性能的影响,提出了一种基于概率的描述半刚性防护网失效的方法,但是关于落石冲击位置变化对防护网性能的影响,作者只研究了中跨中心及相邻的四个位置,没有研究冲击边跨的情形,因此对半刚性防护网的总体性能和破坏模式缺乏全面了解;齐欣等<sup>[10]</sup>提出了一种半刚性防护网防护能量的计算方法,并与实验和模拟结果进行了对比;齐欣等<sup>[11]</sup>还使用 LS-DYNA 进行了数值分析并与试验相对照,研究

了半刚性防护网的变形特征和两阶段工作状态,第一阶段钢绞线冲击变形较大,系统主要靠钢绞线吸收能量;第二阶段钢柱受力增大并逐渐屈服,此时钢柱吸收更大的能量。

落石冲击半刚性防护网的位置具有很大的随机性,目前尚缺乏落石冲击不同位置处防护网破坏模式和耗能状况的研究。本文拟采用 LS-DYNA 有限元软件建立三跨半刚性防护网受落石冲击的数值模型,系统研究冲击位置不同时防护网的破坏模式和耗能,以期类似工程设计提供依据。

## 1 半刚性防护网的有限元模型和理论分析

### 1.1 有限元模型

#### 1.1.1 半刚性防护网基本参数

本文所采用的防护网共三跨,每一跨长度为 4 m,高度为 2.5 m,均匀布置有 8 根钢绞线,间距为 0.3 m,通过锁具拉紧固定于边柱,钢柱、斜撑均与基础固结。

#### 1.1.2 材料特性

纵向钢索采用  $\phi 12$  mm 的钢绞线,中柱采用 HN125 mm $\times$ 60 mm $\times$ 6 mm $\times$ 8 mm,边柱采用矩形管 150 mm $\times$ 70 mm $\times$ 5 mm $\times$ 7 mm,其材料均为 Q235,材料阻尼比取 2%,材料特性如表 1 所示。

#### 1.1.3 单元

采用 LS-DYNA 软件,对半刚性落石防护网进行有限元动力数值仿真分析,钢绞线采用索单元,只承受拉力,不承受弯矩,钢柱采用横截面积分的 Hughes-Liu 梁单元,间距保持板也采用梁单元,落石采用实体单元。半刚性防护网的有限元模型如图 1 所示。

#### 1.1.4 接触

钢绞线与中柱使用 U 型卸扣连接,使得钢绞线可以在中柱上滑动,故与中柱相邻的钢绞线采用安全带单元,中柱上相对应的点设置为滑环单元。

表 1 材料特性

Tab. 1 Material properties

材料	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹性模量 /MPa	屈服强度 /MPa	切线模量 /MPa	抗拉强度 /MPa
钢绞线	7 800	0.3	$2 \times 10^5$	—	—	1 860
钢柱	7 800	0.3	$2 \times 10^5$	235	$6.1 \times 10^3$	370
间距保持板	7 800	0.3	$2 \times 10^5$	235	$6.1 \times 10^3$	370
落石	3 000	0.2	$2 \times 10^4$	—	—	—

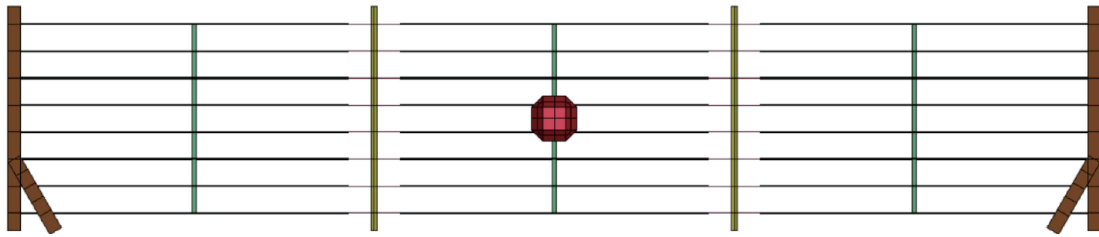


图 1 半刚性防护网模型

Fig. 1 Model of semi-rigid protection barrier

落石与防护网的接触类型采用自动点面接触,接触算法为对称罚函数法<sup>[12]</sup>。罚函数法是将部件之间的接触假设成两个节点之间通过弹簧连接,通过式(1)来求解两个接触面之间的接触力。

$$F_{\text{Normal}} = K_{\text{Normal}} x_{\text{penetration}} \quad (1)$$

式中,  $F_{\text{Normal}}$  为接触力, kN;  $K_{\text{Normal}}$  为两个接触面之间的接触刚度, kN/mm;  $x_{\text{penetration}}$  为两个接触面之间的穿透量, mm。

1. 1. 5 加载

根据欧洲规程(ETAG 027)<sup>[13]</sup>,落石为二十六面体,密度取 2 500 kg/m<sup>3</sup>。落石与防护网的动摩擦因数为 0. 4。通过赋予落石一定初速度来模拟落石冲击能量,初速度方向垂直于防护网平面。

1. 1. 6 验证

以能量为 25 kJ 的落石冲击防护网,试验结果与仿真结果对比如表 2 所示。试验和数值仿真 1 来自文献[6],数值仿真 2 为本文计算结果。由表 2 可知,本文所作仿真结果与试验相差较小,证明本文有限元模型无误。

表 2 试验结果与仿真结果对比

Tab. 2 Comparison of test results and simulation results

模型特征点	试验结果/m	数值仿真 1/m	误差 1/%	数值仿真 2/m	误差 2/%
冲击点位移	0. 68	0. 79	14	0. 776	12
柱 2 自由端位移	0. 25	0. 30	17	0. 302	17
柱 3 自由端位移	0. 20	0. 30	33	0. 300	33

1. 2 计算工况

赋予落石不同的初速度,使其冲击防护网的不同位置直至破坏,得到防护网在不同冲击位置处的失效能量和破坏模式,以及防护网破坏时钢绞线吸收的能量、钢柱吸收的能量、落石与钢绞线的摩擦耗能、钢绞线在钢柱上的滑移摩擦耗能和阻尼耗能。以中跨跨中底部为原点,钢绞线延伸方向为  $x$  轴,钢柱延伸方向为  $y$  轴, $z$  轴按右手定则垂直于  $xy$  平面,建立如图 2 所示直角坐标系。冲击位置如图 2 所示,各相邻冲击位置的水平距离为

1 m,纵向距离为 0. 6 m。

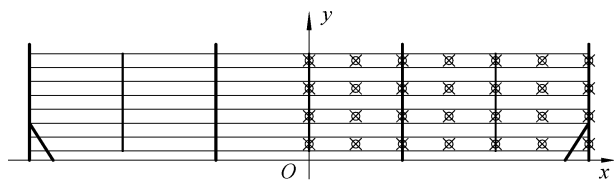


图 2 半刚性防护网的直角坐标系

Fig. 2 Rectangular coordinate system of semi-rigid barrier

1. 3 半刚性防护网破坏模式

半刚性防护网常见的破坏模式有钢绞线断裂、钢柱弯曲破坏和基础破坏等。基础破坏会导致钢柱倒塌,防护网整体失效,故基础设计强度宜大于其他构件破坏时的基础内力,以防发生破坏。故本文只研究前两种破坏模式。

1. 3. 1 钢绞线断裂

防护网在承受冲击时,若钢绞线承受拉力大于极限抗拉承载力,钢绞线被拉断,防护网失效。

$$F_N > \sigma_u A \quad (2)$$

式中,  $\sigma_u$  为材料的抗拉强度, MPa;  $A$  为钢绞线的截面面积, mm<sup>2</sup>。

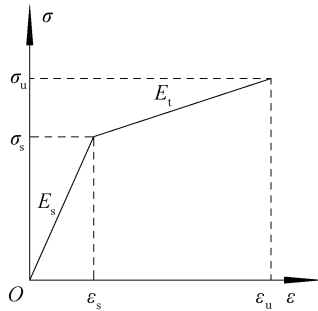
1. 3. 2 钢柱弯曲破坏

防护网在承受冲击时,由于钢绞线变形,边柱承受  $x$  向(面内)和  $z$  向(面外)两个方向的弯矩,中柱主要承受  $x$  向弯矩。假定钢材本构关系为线性强化弹塑性,如图 3 所示,根据弹塑性力学原理<sup>[14]</sup>,钢柱截面达到极限弯矩时截面应力分布如图 4 所示,应力表达式如式(3)所示。

$$\sigma = \begin{cases} -\sigma_s \left[ 1 + \frac{E_1}{E} \left( \frac{y}{y_s} - 1 \right) \right] & \left( -\frac{h}{2} < y < -y_s \right) \\ \sigma_s \frac{y}{y_s} & \left( -y_s < y < y_s \right) \\ -\sigma_s \left[ 1 + \frac{E_1}{E} \left( \frac{y}{y_s} - 1 \right) \right] & \left( y_s < y < \frac{h}{2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\sigma$  为梁截面上任意一点的正应力, MPa;  $h$  为梁截面的高度, m;  $y$  为梁截面上任意一点和中性轴

的距离, m;  $\sigma_s$  为屈服强度, MPa;  $y_s$  为梁截面上弹性区高度, mm;  $E_s$  为材料的弹性模量, MPa;  $E_t$  为材料的切线模量, MPa。



注:  $\epsilon_s$  为屈服应变;  $\epsilon_u$  为极限应变;  $\sigma_u$  为极限强度, MPa;

$E_s$  为弹性模量, MPa;  $E_t$  为切线模量, MPa。

图3 线性强化弹塑性材料的  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线

Fig.3  $\sigma$ - $\epsilon$  curve of linearly strengthened elastic-plastic materials

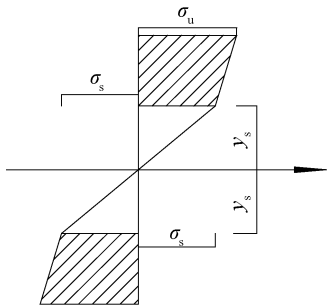


图4 梁截面应力分布图

Fig.4 Stress distribution diagram of beam section

则钢柱截面极限弯矩表达式为

$$M_u = \sigma_s \left[ \frac{I_e}{y_s} + \left( 1 - \frac{E_1}{E} \right) S_p + \frac{E_1 I_p}{E y_s} \right] \quad (4)$$

式中,  $I_e$  为弹性区对中性轴的惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;  $S_p$  为塑性区对中性轴的静矩,  $\text{mm}^3$ ;  $I_p$  为塑性区对中性轴的惯性矩,  $\text{mm}^4$ 。

当钢柱的最大弯矩大于极限弯矩时, 即如式(5)所示, 钢柱发生塑性破坏, 防护网失效。

$$\left( \sqrt{M_x^2 + M_z^2} \right)_{\max} > M_u \quad (5)$$

式中,  $M_x$  为  $x$  方向的弯矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ;  $M_z$  为  $z$  方向的弯矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ;  $M_u$  为合弯矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

## 2 计算结果分析

### 2.1 冲击不同点位时防护网的破坏模式

防护网在冲击不同点位时的损伤位置和破坏模式如表3所示, 其中  $L_x$  为冲击点与原点的横向距离,  $L_y$  为冲击点与原点的纵向距离。

落石冲击在中跨跨中时, 两中柱柱底发生面外弯曲破坏。落石冲击在中跨边缘时, 钢绞线断裂。落石冲击在中柱时, 中柱发生破坏; 冲击位置低时, 中柱柱底面外弯曲破坏; 冲击位置高时, 中柱承受冲击处面外弯曲破坏。落石冲击在边跨跨中, 冲击位置低时, 钢绞线断裂; 冲击位置高时, 边柱柱底面内弯曲破坏。落石冲击在边跨边缘时, 钢绞线断裂。落石冲击在边柱且冲击位置低时, 钢绞线断裂; 冲击位置高时, 边柱承受冲击处面外弯曲破坏。

### 2.2 防护网的失效能量

防护网在冲击不同位置时的失效能量  $E$  如图5所示。落石冲击在中跨跨中 ( $L_x = 0 \text{ m}$ ) 时, 防护网的失效能量最大, 因为冲击中跨跨中时, 钢绞线、中柱、边柱都能充分受力变形, 所以防护网的失效能量大; 而冲击边跨时, 中柱受力较小, 冲击钢柱时, 钢绞线和其他钢柱受力小, 所以此时防护网的失效能量小。

落石冲击在边跨跨中 ( $L_x = 4 \text{ m}$ ) 时, 防护网的失效能量比冲击在边跨边缘 ( $L_x = 3 \text{ m}$ 、 $L_x = 5 \text{ m}$ ) 时大, 因为冲击位置在中柱附近 ( $L_x = 3 \text{ m}$ 、 $L_x = 5 \text{ m}$ ) 时, 钢绞线容易断裂, 钢柱变形不充分, 所以防护网的失效能量小。冲击位置在边跨靠近中柱时, 防护网的失效能量比冲击在边跨靠近边柱时大,

表3 冲击不同点位时的损伤位置和破坏模式

Tab.3 Damage locations and failure modes at different impact positions

纵向距离 $L_y/\text{m}$	横向距离 $L_x/\text{m}$						
	0	1	2	3	4	5	6
0.35	中柱柱底面外破坏	钢绞线断裂	中柱柱底面外破坏	钢绞线断裂	钢绞线断裂	钢绞线断裂	钢绞线断裂
0.95	中柱柱底面外破坏	钢绞线断裂	中柱冲击处面外破坏	钢绞线断裂	边柱柱底面内破坏	钢绞线断裂	边柱冲击处面外破坏
1.55	中柱柱底面外破坏	钢绞线断裂	中柱冲击处面外破坏	钢绞线断裂	边柱柱底面内破坏	钢绞线断裂	边柱冲击处面外破坏
2.15	中柱柱底面外破坏	钢绞线断裂	中柱冲击处面外破坏	钢绞线断裂	边柱柱底面内破坏	钢绞线断裂	边柱冲击处面外破坏

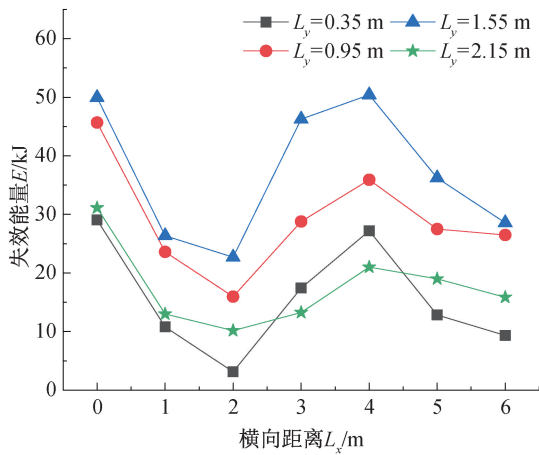


图 5 不同冲击位置的失效能量

Fig. 5 Failure energy at different impact positions

因为此时两中柱的变形更大,所以防护网的失效能量更大。

落石冲击在边柱 ( $L_x = 6\text{ m}$ ) 时,防护网的失效能量比冲击在中柱 ( $L_x = 2\text{ m}$ ) 时大。因为边柱比中柱刚度大,抗冲击性能更强。

落石冲击的纵向位置在中部 ( $L_y = 0.95\text{ m}$ 、 $L_x = 1.55\text{ m}$ ) 时,防护网的失效能量比冲击在顶部和底部 ( $L_y = 0.35\text{ m}$ 、 $L_x = 2.15\text{ m}$ ) 时大,因为冲击纵向位置在中部时,钢绞线和钢柱的变形比较充分,而冲击在顶部时,钢柱受力大,钢绞线受力小,失效能量小,冲击在底部时,钢柱受力变形小,失效能量小。

### 2.3 钢绞线吸收的能量

防护网失效时钢绞线吸收的能量  $E_1$  如图 6 所示。落石冲击在中跨跨中时,钢绞线吸收的能量比冲击在边跨时大。落石冲击在中柱时,钢绞线吸收的能量比冲击在边柱时大。落石冲击的纵向位置在中部 ( $L_y = 0.95\text{ m}$ 、 $L_x = 1.55\text{ m}$ ) 时,钢绞线吸收的能量比冲击在其他位置时大。落石冲击在钢柱上时,钢绞线吸收的能量比冲击在钢绞线上时小。

### 2.4 钢柱吸收的能量

防护网失效时钢柱吸收的能量  $E_2$  如图 7 所示。落石冲击的纵向位置在中部 ( $L_y = 0.95\text{ m}$ 、 $L_x = 1.55\text{ m}$ ) 时,钢柱吸收的能量比冲击在顶部和底部 ( $L_y = 0.35\text{ m}$ 、 $L_x = 2.15\text{ m}$ ) 时大。落石冲击在跨中 ( $L_x = 0\text{ m}$ 、 $L_x = 4\text{ m}$ ) 时,钢柱吸收的能量比冲击在边缘 ( $L_x = 1\text{ m}$ 、 $L_x = 3\text{ m}$ 、 $L_x = 5\text{ m}$ ) 时大。落石冲击在边柱时钢柱吸收的能量大于冲击中柱时吸收的能量。

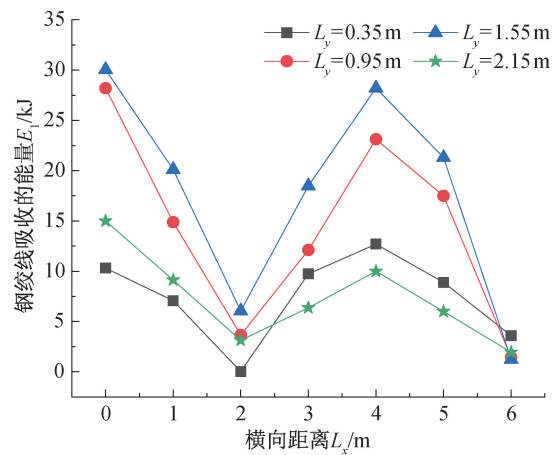


图 6 不同冲击位置钢绞线吸收的能量

Fig. 6 Energy absorbed by steel strands at different impact positions

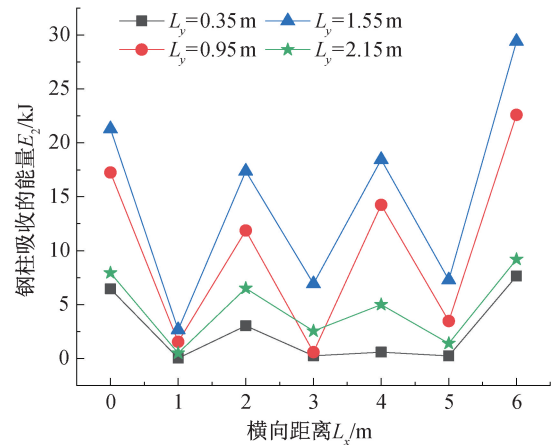


图 7 不同冲击位置钢柱吸收的能量

Fig. 7 Energy absorbed by steel columns at different impact positions

### 2.5 各部件吸收能量比例

半刚性防护网吸收的能量主要包括钢绞线被拉伸储存的弹性应变能、钢柱塑性变形消耗的能量和其他能量,如摩擦耗能、阻尼耗能等。各部件吸收能量比例如表 4 所示。

表 4 各部件吸收能量比例

Tab. 4 Energy absorption ratio of each component

冲击位置	各部件吸收能量占比/%		
	钢绞线	钢柱	其他部件
$L_x = 0\text{ m}, L_y = 1.55\text{ m}$	56.97	40.38	2.65
$L_x = 1\text{ m}, L_y = 1.55\text{ m}$	76.29	10.14	13.58
$L_x = 2\text{ m}, L_y = 1.55\text{ m}$	26.06	71.96	2.98
$L_x = 2\text{ m}, L_y = 0.35\text{ m}$	1.14	96.73	2.13
$L_x = 4\text{ m}, L_y = 1.55\text{ m}$	48.08	31.46	20.46
$L_x = 6\text{ m}, L_y = 1.55\text{ m}$	3.79	90.08	6.13

由表4可知,落石冲击在钢柱时,此时钢柱承受冲击处面外弯曲破坏,钢柱吸收的能量远大于钢绞线;落石冲击在跨中时,此时钢柱柱底发生破坏,钢绞线吸收的能量略大于钢柱;落石冲击在中跨边缘时,此时钢绞线断裂,钢绞线吸收的能量远大于钢柱。落石冲击在中跨跨中和边柱时,摩擦和阻尼吸收的能量远小于冲击其他位置时。

### 3 结论

本文基于半刚性防护网系统的数值仿真分析,研究了不同冲击位置处防护网的失效能量和破坏模式,以及防护网各构件的耗能占比,得出以下结论:

1)落石冲击在中跨跨中和钢柱上时,钢柱容易破坏;冲击边跨跨中底部时边柱容易发生面内弯曲破坏;冲击其他纵向较低位置时,边柱容易破坏,冲击其他纵向较高位置时,钢绞线容易断裂。

2)落石冲击在中跨跨中时,防护网的失效能量大于冲击边跨时的失效能量;落石冲击在中跨跨中且纵向较高位置时防护网的失效能量最大;落石冲击在中柱底部时防护网的失效能量最小。

3)防护网系统的总耗能以钢柱、钢绞线的耗能为主,二者为核心耗能构件;而摩擦和阻尼耗能占比不大。落石冲击在中跨跨中时,钢绞线吸收的能量大于冲击在边跨时的失效能量;落石冲击在中柱时,钢绞线吸收的能量最小;落石冲击在中跨跨中和边跨跨中时,钢柱吸收的能量分别大于冲击在中跨边缘和边跨边缘时吸收的能量。

4)钢柱承受冲击处破坏时,钢柱吸收的能量远大于钢绞线;钢柱柱底发生破坏时,钢绞线吸收的能量略大于钢柱;钢绞线断裂时,钢绞线吸收的能量远大于钢柱。

5)通常的研究仅考虑落石冲击防护网中心,而落石的能级和冲击位置是随机的,这可能导致防护网的能力被高估,因此半刚性防护网设计应考虑冲击位置的影响。

6)防护网系统在纵向只有边柱和斜撑受力,边柱的面内破坏会导致防护网整体失效,故设计时应尽量避免此类破坏。

### 参考文献:

[1] 赵世春,余志祥,赵雷,等. 被动防护网系统强冲击作用下的传力破坏机制[J]. 工程力学,2016,33(10):24-34.

ZHAO S C, YU Z X, ZHAO L, et al. Damage mechanism of rockfall barriers under strong impact loading[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 24-34.

[2] 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.

[3] 王智猛,褚宇光,魏永幸. 高速铁路防异物入侵半刚性防护网技术[J]. 西南交通大学学报,2012,47(S):275-280.

WANG Z M, CHU Y G, WEI Y X. Semi-rigid protective net technology for foreign body intrusion in high speed railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(S): 275-280.

[4] 齐欣,余志祥,许浒,等. 被动柔性防护网结构的累计抗冲击性能研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(11):2788-2797.

QI X, YU Z X, XU H, et al. Cumulative impact resistance of passive flexible protective structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11): 2788-2797.

[5] 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.

[6] 齐欣,孟庆成,李自名,等. 半刚性防护系统试验与多跨模型数值分析[J]. 铁道学报,2020,42(10):136-143.

QI X, MENG Q C, LI Z M, et al. Experimental tests and multi-span model numerical analysis of semi-rigid protection barriers[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(10): 136-143.

[7] DE MIRANDA S, GENTILINI C, GOTTARDI G, et al. Virtual testing of existing semi-rigid rockfall protection barriers[J]. Engineering Structures, 2015, 85: 83-94.

[8] 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: 701-712.

[9] MENTANI A, GOVONI L, GOTTARDI G, et al. A new approach to evaluate the effectiveness of rockfall barriers[J]. Procedia Engineering, 2016, 158: 398-403.

[10] 齐欣,韦韬,余志祥. 防落石冲击低能级刚性防护网

- 系统防护能量计算方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(2): 91-96+113.
- QI X, WEI T, YU Z X. Energy calculation method of the rigid protective system for low level rockfall[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(2): 91-96+113.
- [11] 齐欣, 韦韬, 余志祥. 高速铁路防零星落块刚性防护系统试验与数值分析[J]. 铁道标准设计, 2013(10): 31-35.
- QI X, WEI T, YU Z X. Test research and numerical analysis of rigid protection system against sporadic rock falling on high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2013(10): 31-35.
- [12] 辛春亮. 由浅入深精通 LS-DYNA[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 73-76.
- XIN C L. Master LS-DYNA from shallow to deep[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019: 73-76.
- [13] European Organisation for Technical Approvals. ETAG 027: Guideline for European technical approval of falling rock protection kits[M]. Brussels: European Organisation for Technical Approvals, 2013: 37-38.
- [14] 张宏. 应用弹塑性力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011: 136-143.
- ZHANG H. Applied elastic-plastic mechanics [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2011: 136-143.
- (责任编辑 王利君)
- 
- (上接第 24 页)
- [23] 李波, 余建飞. 基于 PHC 管桩现场静载试验的基桩承载特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(10): 96-102.
- LI B, YU J F. Research on bearing characteristics of foundation piles based on on-site static load tests of PHC pipe piles[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(10): 96-102.
- [24] 赵飞涛, 窦斌, 钱进中, 等. 粘性土层中 PHZ 方桩荷载检测数据异常分析[J]. 工程勘察, 2022, 50(10): 37-42.
- ZHAO F T, DOU B, QIAN J Z, et al. Analysis of abnormal data of loading test on hollow square pile in clay [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2022, 50(10): 37-42.
- (责任编辑 王利君)
- 
- (上接第 32 页)
- [17] 王龙, 陈国兴, 胡伟, 等. 基于拟动力法抗滑桩加固非饱和土边坡稳定性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6): 1386-1394.
- WANG L, CHEN G X, HU W, et al. Seismic stability of unsaturated soil slopes stabilized by anti-slide piles based on pseudo-dynamic approach[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1386-1394.
- [18] 王振, 孙志彬, 杨胜宇, 等. 三维加筋边坡抗震稳定性的拟动力上限分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47(9): 1288-1296.
- WANG Z, SUN Z B, YANG S Y, et al. Seismic stability analysis of three-dimensional reinforced slope based on pseudo-dynamic method[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2024, 47(9): 1288-1296.
- [19] PAN Q J, QU X R, WANG X. Probabilistic seismic stability of three-dimensional slopes by pseudo-dynamic approach[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7): 1687-1695.
- [20] 李春立, 李东贤, 李亮, 等. 地震对边坡失稳滑动面积的影响研究[J]. 青岛理工大学学报, 2023, 44(4): 19-27.
- LI C L, LI D X, LI L, et al. Study of the influence of earthquake on slope failure sliding area[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2023, 44(4): 19-27.
- (责任编辑 王利君)