

文章编号:1671-8879(2015)02-0091-06

防落石冲击低能级刚性防护网系统 防护能量计算方法

齐 欣, 韦 韬, 余志祥

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:针对目前低能级刚性防护网系统的防护能力无明确计算方法的现状,基于防护网的工作状态,提出了防落石冲击刚性防护网系统的计算模型,应用能量计算理论和力学分析方法,推导了在不同工况下系统中各耗能构件的能量计算公式。采用 LS-DYNA,对刚性防护网受到落石冲击作用下的能量分布进行了数值模拟分析,获得刚性防护网动态响应特征,并与试验进行检验比较。研究表明:理论计算与试验所得结果基本一致,理论解偏于保守;能较好地预测低能级刚性防护网吸收的最大能量,该公式是确定低能级刚性防护系统能量的有效办法。

关键词:岩土工程;刚性防护网;力学分析;能量计算;数值仿真;试验检验

中图分类号:U411

文献标志码:A

Energy calculation method of the rigid protective system for low level rockfall

QI Xin, WEI Tao, YU Zhi-xiang

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Based on the present situation that there is no definite design method for the protective ability of rigid protective system, this paper proposed the calculation model of rigid protective system according to the actual work condition, and derived the energy calculation formula of consuming members by using the energy calculation theory and mechanics analysis. FEM software LS-DYNA was used to conduct numerical simulation analysis for energy distribution under rockfall and the analysis results were compared with test results. The results show that theoretical calculation results is basically identical to the test results from the finite element program and test, which demonstrates the former is a conservative approach. The method can better predict the maximum energy of low level rigid protective system. The theoretical formula is an effective approach to determine the energy of rigid protective system for low level rockfall. 2 tabs, 12 figs, 14 refs.

Key words: geotechnical engineering; rigid protective system; mechanics analysis; energy calculation; numerical simulation; experiment verification

收稿日期:2014-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51408498);高等学校博士学科点专项科研基金项目(博士研究生导师类 20130184110009,新教师类 20130184120002)

作者简介:齐 欣(1981-),女,河北玉田人,讲师,工学博士,E-mail:qixin_117@126.com。

0 引言

近年来,地质灾害频发,公路、铁路、矿山、景区边坡工程中的地质灾害防治进一步凸显为热点问题。其中,被动防护结构技术获得了广泛应用^[1]。目前,中国常用的结构性防护技术措施主要是防护能级 250 kJ 以上的柔性防护网系统,由于其网片本身呈镂空状,实际使用时,对粒径小,能量低的落石、碎石块的防护效果往往有限,甚至无法防护。但实际工程当中,10~30 kJ 的落石却非常常见,因此有必要开展低能级防护结构技术的研究^[9-15]。目前中国常见的低能级防护结构系统主要是刚性格栅。其基本结构形式是采用角钢支柱与角钢横撑作为主受力骨架,并在其上焊接钢筋网片后挂钢丝格栅网,该系统存在着防护能级低,被撞后变形不易恢复、结构耐久性差以及不美观等缺陷。

近两年,为了适应实际工程的需求,一种新型的低能级刚性防护网系统逐渐在实际重大工程中获得应用,目前已经在兰青线,成兰线等多条铁路沿线实际应用。该系统由端柱、钢绞线、中间柱以及间距保持板构成,耗能构件主要为钢柱和钢绞线。与刚性格栅相比较,工字钢代替了角钢,钢绞线替代了普通钢筋,U 型卡扣连接代替刚接,整个系统变形能力加大,吸收能量的能力更强,稳定性更好。该结构体系施工要求低,适应复杂地形能力强,受到了青睐。但由于目前行业规范都只是针对柔性防护网,刚性防护系统没有正式的行业规范,因此面临着计算理论不完善、防护能量级别不明确等问题,实际应用中理论指导不足,存在安全隐患^[2-3]。

对于刚性防护系统的研究,许建平对栅栏的设置位置以及立柱材料的强度、基础的埋深尺寸要求进行了试验和数值模拟^[4]。由于现场试验的花费巨大,以及测试设备和条件的限制,模型试验得到的数据比较有限,往往不能对防护系统的性能进行全面的了解。为此,有不少学者采用了数值模拟的方法来研究被动防护系统的性能。周晓宇等对被动防护网在落石冲击下的动力响应进行了模拟^[5];Philippe 等设计了专门的程序,来模拟被动防护系统在落石冲击下的作用^[6];Nicot 等采用离散元的方法来模拟落石冲击,研究被动防护系统在落石冲击下的反应^[7];Muhunthan 等采用 ABAQUS 软件对防护网进行了数值模拟,并与试验结果进行对比^[8]。从已有文献范围来看,研究成果集中在冲击后各组成构件的性能分析,缺少系统的整体性研究,同时均没有

涉及到防护能量的研究^[9-13]。为此,本文依据该防护网系统的受力特点,推导了其防护能量理论计算方法,为实际设计及应用提供理论依据。

1 能量计算

典型的刚性防护网系统及实际应用如图 1、图 2 所示。

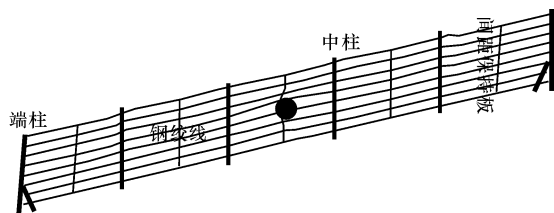


图 1 典型刚性防护网构成

Fig. 1 Typical rigid protection system



图 2 兰青线刚性防护网应用

Fig. 2 Application of rigid protection system along Lanqing line

为计算刚性防护网在受到落石撞击时整个结构所能吸收的能量,首先需要确定落石撞击防护网的位置。在落石能够被拦截的前提下,撞击有很多种可能,对整个系统而言主要耗能构件为钢柱和钢绞线,因此区别在于撞击在钢柱还是钢绞线。为研究各部分的受力及结构的能量分配,分别建立 2 种工况,一是落石撞击钢柱,二是落石撞击钢绞线。

1.1 落石撞击钢绞线

在落石冲击时,可碰撞多根钢绞线,由于刚性防护网主要拦截下落频率高,质量较小的石块^[4],故需确定两项计算假定:①落石撞击位置在两柱间的钢绞线上;②落石撞击在 2 根钢绞线上。

如下页图 3 所示,取一个柱间距的钢绞线进行分析,令跨长为 L ,钢柱高为 H ,落石撞击位置与柱脚距离为 h_2 。取半结构隔离体, T_0 、 T_1 为钢绞线受力, F_1 为钢柱受力,得到计算简图如下页图 4 所示。

令钢绞线变形后,产生角位移为 θ_1 ,钢绞线变形为 ΔL_1 ,位移示意图如下页图 5 所示。依据虚功原理和几何变形特征,得到式(1)、式(2)为

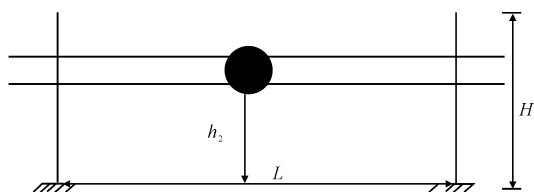


图3 击打钢绞线

Fig. 3 Hit steel strand

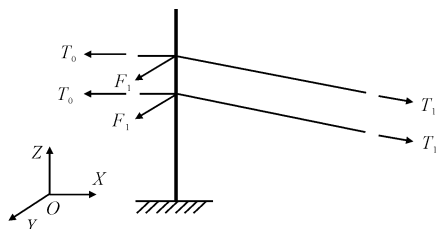


图4 计算简图

Fig. 4 Calculation diagram

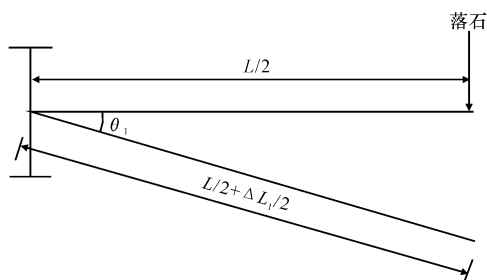


图5 变形俯视图

Fig. 5 Planform of deformation

$$\Delta L_1 = \frac{TL}{E_w A} \quad (1)$$

$$\cos(\theta_1) = \frac{L/2}{L/2 + \Delta L_1/2} \quad (2)$$

式中: A 为钢绞线截面面积; E_w 为钢绞线的弹性模量。

由式(1)、式(2)整理得

$$\frac{L}{2} = \cos(\theta_1) \left(\frac{L}{2} + \frac{TL}{2E_w A} \right) \quad (3)$$

当钢绞线屈服时 $T = T_y$, 则有

$$\frac{L}{2} = \cos(\theta_1) \left(\frac{L}{2} + \frac{T_y L}{2E_w A} \right) \quad (4)$$

令钢柱受到的水平力为 R , 根据力的平衡有

$$R = 2T_y \sin(\theta_1) \quad (5)$$

设钢柱达到塑性铰时, 钢柱承受钢绞线的合力为 F_y , 底部弯矩为 M , 依据计算简图以及截面应力可得

$$M = F_y h_2 \quad (6)$$

$$F_y = \frac{M}{h_2} = \frac{\sigma_y W}{h_2} \quad (7)$$

式中: σ_y 为钢柱屈服应力; W 为抗弯截面模量。

综合钢柱受力, 可得当 $R \geq F_y$ 时, 即钢绞线未屈服时, 钢柱已经屈服。当 $R < F_y$ 时, 钢绞线屈服时, 钢柱还未进入到屈服段。

刚性防护网的防护能量等级, 可认为是刚性防护网系统中各个构件吸收的能量总和。为简化计算偏于安全, 未考虑间隔保持板的能量吸收。依据以上分析, 需要考虑钢柱和钢绞线进入屈服的先后次序。

当钢柱先屈服, 钢绞线未屈服时, 即 $R \geq F_y$ 。一跨内共有2根钢柱, 可以得到钢柱总耗能 E_p 为

$$E_p = 2E_{pl} = 2F_y \Delta L \quad (8)$$

落石撞击在2根钢绞线, 且钢绞线未进入屈服, 则钢绞线受力吸收的能量 E_r 为

$$E_r = 2 \times \frac{1}{2} T \Delta L = \frac{LT^2}{E_w A} \quad (9)$$

设钢绞线受力为 T , 钢绞线水平转角为 θ , 钢柱已经达到屈服 F_y , 所以同时满足

$$\begin{cases} F_y = 2T \sin(\theta) \\ \frac{L}{2} = \cos(\theta) \left(\frac{L}{2} + \frac{TL}{2E_w A} \right) \end{cases} \quad (10)$$

当钢绞线屈服, 钢柱不屈服时, 即 $R < F_y$ 。计算中共考虑2根钢绞线, 则钢绞线吸收的能量为

$$E_r = 2E_{r1} = 2T_y \Delta L = 2T_y (L\epsilon) =$$

$$2T_y \left(L \frac{\sigma}{E_w} \right) = 2T_y \left(L \frac{T_y}{E_w A} \right) \quad (11)$$

钢柱未屈服, 由单位荷载法可得到钢柱变形 ΔL 为^[3]

$$\Delta L = \frac{Rh_2^3}{3E_w I} \quad (12)$$

式中: E_{pl} 1根钢柱的耗能; E_{r1} 为1根钢绞线吸收的能量; ϵ 为应变; σ 为应力; I 为惯量。

2根钢柱的总耗能为

$$E_p = 2E_{pl} = 2 \times \left(\frac{1}{2} R \Delta L \right) = \frac{R^2 h_2^3}{3E_w I} \quad (13)$$

1.2 落石撞击在钢柱顶端

当落石击打在钢柱上时, 钢柱截面最大弯矩为 $M_{\max} = Fh$, F 为撞击力, h 为撞击点到柱脚的距离, 显然当落石撞击钢柱顶端时, 弯矩最大。因此, 以下分析基于落石撞击钢柱顶端, 击打位置见下页图6。

落石击打钢柱后, 钢柱随即发生变形, 带动钢绞线发生变形。令钢柱变形后, 产生角位移为 θ_2 , 纵向线位移为 ΔL_c , 钢索变形为 ΔL_1 (下页图7), 依据虚功原理和几何变形特征, 得到式(14)~式(16)

$$\tan(\theta_2) = \frac{\Delta L_c}{L} \quad (14)$$

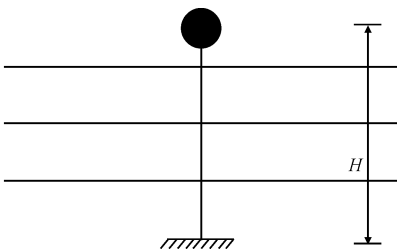


图 6 击打钢柱
Fig. 6 Hit steel column

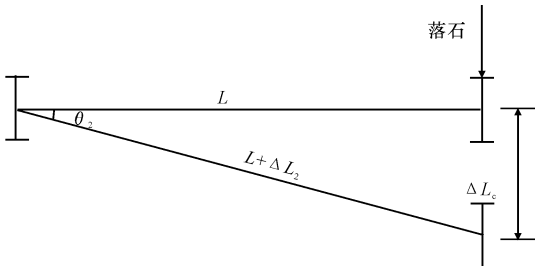


图 7 体系变形俯视图
Fig. 7 Planform of deformation

$$\cos(\theta_2) = \frac{L}{L + \Delta L_2} \tag{15}$$

$$\Delta L_2 = \frac{TL}{E_w A} \tag{16}$$

设钢柱达到塑性铰时,钢柱的碰撞力为 F_y ,底部弯矩为 M ,由材料力学得^[5]

$$M = F_y H \tag{17}$$

$$F_y = \frac{M}{H} = \frac{\sigma_y W}{H} \tag{18}$$

令此时钢索受力为 T ,由力的平衡可得

$$T = F_y / \sin(\theta_2) \tag{19}$$

由式(15)、式(16)整理得

$$T = \left(\frac{1}{\cos(\theta_2)} - 1 \right) E_w A \tag{20}$$

钢绞线屈服时 $T = T_y$,则有

$$T_y = \left(\frac{1}{\cos(\theta_2)} - 1 \right) E_w A \tag{21}$$

当 $T \geq T_y$ 时,钢绞线先屈服;当 $T < T_y$ 时,钢

柱先屈服。钢绞线与钢柱耗能计算,需要分别考虑钢柱先屈服和后屈服 2 种情况下,钢绞线和钢柱吸收的能量。

当钢柱先屈服,钢绞线未屈服,即 $T < T_y$ 时,令钢柱达到屈服力 F_y 。则钢柱耗能为

$$E_p = E_{p1} = F_y \Delta L \tag{22}$$

钢绞线受力吸收的能量为

$$E_r = \frac{1}{2} T \Delta L = \frac{L T^2}{2 E_w A} \tag{23}$$

钢绞线未屈服,设钢绞线受力为 T ,钢绞线水平转角为 θ ,钢柱已经达到屈服 F_y ,所以同时满足

$$\begin{cases} F_y = T \sin(\theta) \\ L = \cos(\theta) \left(L + \frac{TL}{E_w A} \right) \end{cases} \tag{24}$$

当钢绞线先屈服,钢柱未屈服时,即 $T < T_y$,则钢绞线吸收的能量为

$$E_r = E_{r1} = T_y \Delta L = T_y (L \epsilon) = T_y \left(L \frac{\sigma}{E_w} \right) =$$

$$T_y \left(L \frac{T_y}{E_w A} \right) \tag{25}$$

钢柱没有屈服,此时,钢绞线拉力为 T_y ,则钢柱受力为 $F = T_y \sin(\theta)$,由单位力法得钢柱变形为

$$\Delta L = \frac{F H^3}{3 E_w I} \tag{26}$$

式中: σ 为应力; I 为惯量。

钢柱耗能为

$$E_p = \frac{F \Delta L}{2} = \frac{F^2 H^3}{3 E_w I} \tag{27}$$

无论在何种工况下,防护网总的防护能级为

$$E = E_r + E_p \tag{28}$$

2 设计方法

在实际应用中,该计算方法可用于构件规格的初选,确定了构件材料及几何参数后,按上述方法可求得体系所能吸收的最大能量。具体流程见图 8。

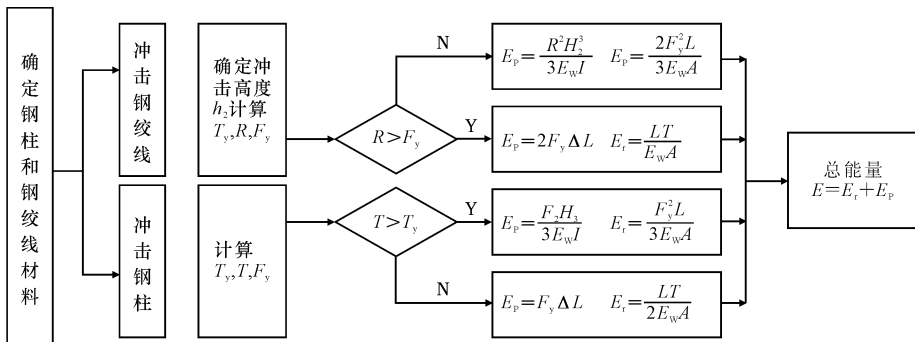


图 8 设计流程

Fig. 8 Design flow

3 算例分析

设定系统高度为 2.5 m, 钢柱为 $125\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, 钢材为 Q235。钢绞线采用 $\Phi 14$, 弹性模量为 $2 \times 10^5\text{ MPa}$ 。柱间距为 4 m, 取 3 跨为例。

当落石击打在钢绞线上时, 击打位置设定为柱高的 $2/3$ 处, 通过计算得到, $F_y = 12.77\text{ kN}$, $T_y = 136.2\text{ kN}$, $R = 70.27\text{ kN}$, $R > F_y$, 表示钢柱先屈服。钢绞线最大拉力为 $T = 47.76\text{ kN}$, 转角为 8.4° 。计算可得钢柱耗能 $E_p = 23.82\text{ kJ}$, 钢绞线耗能为 $E_r = 7.84\text{ kJ}$, 系统的总能量 $E = E_p + E_r = 31.66\text{ kJ}$ 。

当落石击打在钢柱顶端时, $T_y = 328.61\text{ kN}$, $T = 51.60\text{ kN}$, $T_y > T$, 表示钢柱先屈服。计算可得钢柱耗能 $E_p = 30.96\text{ kJ}$, 钢绞线耗能为 $E_r = 23.98\text{ kJ}$, 系统的总能量 $E = E_p + E_r = 54.94\text{ kJ}$ 。

计算可得, 2 种工况下, 系统吸收的能量均大于 25 kJ, 因此该系统设定的能级为 25 kJ 是可行。

4 数值仿真与试验验证

通过计算算例可知, 当落石冲击在钢绞线时, 系统吸收的能量相对较小, 可作为控制工况。

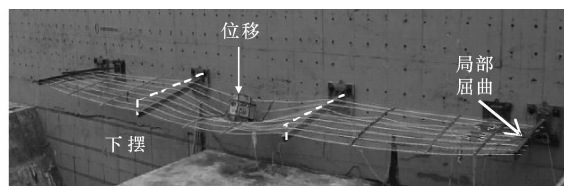
采用 LS-DYNA, 对落石冲击在钢绞线的工况进行有限元动力数值仿真分析, 并在西南交通大学陆地交通地质灾害防治技术国家工程实验室的落石冲击试验场, 进行落石冲击刚性防护网系统的验证性试验。

刚性防护网模型参数与算例保持一致。仿真分析中采用的单元^[14]: 钢绞线采用索单元 (cable beam), 只考虑材料受拉, 不承担弯矩。钢柱采用 Hughes-Liu 壳全积分单元。落石为 Solid 实体。

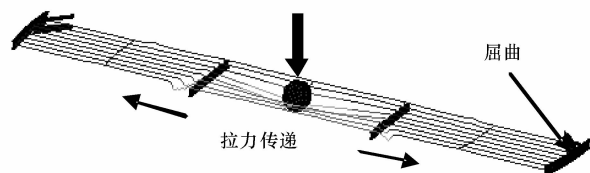
数值模拟分析时的材料模型: 落石为刚体, 密度为 $3\,000\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 $2E10$, 泊松比为 0.2。钢柱采用塑性随动强化材料 (plastic kinematic), 密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 2×10^{11} , 泊松比为 0.3, 屈服强度为 $2.35 \times 10^8\text{ N/m}^2$ 。钢绞线采用 cable discrete beam, 密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$, 泊松比为 0.3。冲击位置水平为跨中, 竖向为距柱脚 2.67 m, 落石以 $v = 14\text{ m/s}$ 的初速度冲击刚性防护网。为了与计算保持一致, 冲击能量设定为 32 kJ。

冲击试验中将质量为 250 kg 的落石, 提升至 13 m, 自由落体下落。试验仿真结果见下页表 1、表 2。

系统的变形如图 9 所示。试验和仿真都体现了钢绞线呈凹型, 中柱自由端下摆, 端柱自由端基本保持水平的变形特点, 同时端柱在承受落石冲击的 2 根钢绞线固定处局部屈曲。钢柱位移见下页图 10。钢绞线拉力峰值对比如下页表 1 所示, 钢绞线拉力时程如下页图 11 所示, 结果较接近, 试验与数值仿真略大于计算值, 在于计算中没能考虑动力效应。在数值仿真中, 可以明显地看到钢绞线的拉力传递呈现波的效应, 中跨拉力逐步向左右两跨传递。数值仿真较好地反映了落石冲击刚性防护网的过程。



(a) 试验模型变形



(b) 仿真模型变形

图 9 结构变形

Fig. 9 Structure deformation

钢柱转角变异系数略大, 主要是由于落石冲击后, 由于钢绞线未屈服, 仍处于弹性工作段, 当结构稳定后钢绞线的变形会产生一定的回缩。有限元计算取的是峰值转角, 而试验结果为试验结束结构稳定后的数值, 转角偏小。

有限元模拟得到的能量分配如下页图 12 所示。一旦落石与钢绞线接触, 钢绞线随即发生变形, 此时钢绞线为主要的耗能构件, 同时钢绞线的向下运动, 给钢柱以向下的作用力, 从而带动钢柱发生转动, 钢柱转角的逐步加大, 钢绞线和钢柱协同工作, 钢绞线吸收的能量达到最大值为 13.29 kJ , 钢柱继续发生转动, 钢柱吸收的能量增加, 钢绞线吸收的能量降低, 最终稳定状态钢柱吸收的能量为 24.82 kJ , 钢绞线吸收了 4.88 kJ , 同时间距保持板吸收了 2.31 kJ 。

能量吸收的结果对比见下页表 2, 可以看出钢柱吸收能量结果非常接近, 钢绞线能量吸收有差异。计算得到结果略小于有限元的结果。其原因主要还是由于动力效应和弹性回缩引起的。因此, 取峰值平均值与计算结果再次进行对比, 其结果相差较小。计算结果偏于保守。

表 1 试验验证
Tab. 1 Experimental verification

类别	试验	数值仿真	计算
拉力峰值/kN	49.0	54.0	47.7
钢柱转角/(°)	7.60	9.09	8.40

注:拉力峰值变异系数为 6%;钢柱转角变异系数为 9%。

表 2 能量对比
Tab. 2 Energy comparison

类别	计算/kJ	数值仿真/kJ		误差/%	
		峰值	均值	峰值	均值
钢柱吸收能量	23.82	24.80	24.51	4	3
钢绞线吸收能量	7.84	13.29	9.08	44	13

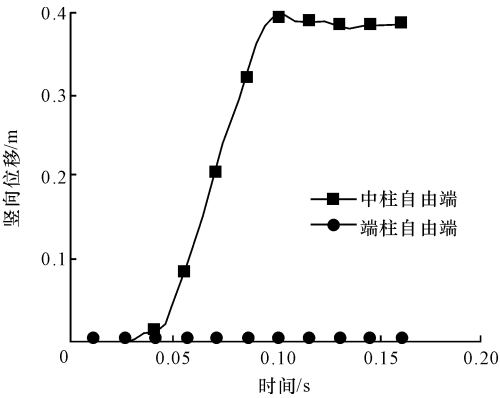


图 10 钢柱位移
Fig. 10 Displacement of steel column

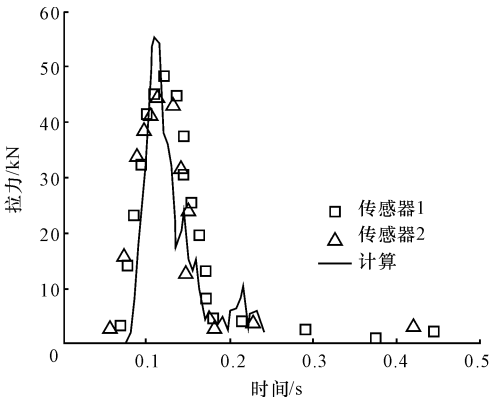


图 11 钢绞线拉力历程
Fig. 11 Tension force history

5 结 语

(1)建立了低能级刚性防护网系统的计算模型,推导了低能级刚性防护网系统在不同工况下的能量计算公式。通过算例分析落石冲击刚性防护网,当落石冲击在钢绞线上时,系统所能吸收的能量相对较少,可作为系统设计的控制工况。

(2)采用 LS-DYNA,建立了刚性防护系统的数值仿真模型。针对刚性防护网受到落石冲击下的力

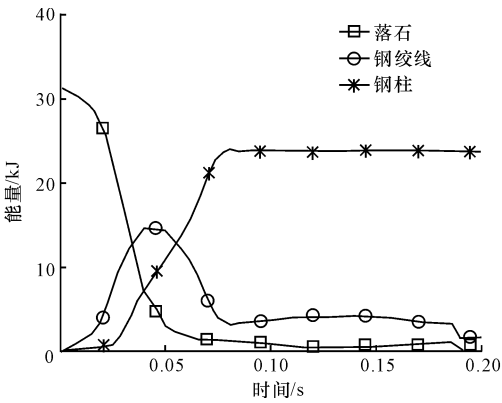


图 12 能量分配
Fig. 12 Energy distribution

学性能进行了数值模拟,并通过试验验证,与计算结果较一致,计算理论解结果略小。

(3)建立了刚性防护网系统设计的流程。该计算方法简便快捷,能较好地预测刚性防护网所能吸收的最大能量,因此在实际中可以根据具体工程防护能级的需求,作为结构部件的初选依据,从而确定具体的刚性防护网系统的各个部件,为设计人员提供参考。

参考文献:

References:

[1] 贺咏梅,彭 伟,阳友奎. 边坡柔性防护网的典型工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (2): 323-328.
HE Yong-mei, PENG Wei, YANG You-kui. Typical cases of slope flexible protection system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (2): 323-328. (in Chinese)
[2] TB/T 3089—2004, 铁路沿线斜坡柔性安全防护网[S].
TB/T 3089—2004, The flexible safety net for protection of slope along the line[S]. (in Chinese)
[3] JT/T 528—2004. 公路边坡柔性防护系统构件[S].
JT/T 528—2004, Component of flexible system for protecting highway slope[M]. (in Chinese)
[4] 许建平. 钢轨栅栏在崩塌落石病害整治中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2005.
XU Jian-ping. The effect research of rail bar in the dealing with rock collapse and stone fall disease[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese)
[5] 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): 61-66.