

# 落石冲击作用下被动柔性防护网整体结构试验

刘成清 陈林雅 陈 驰 韦 韬

(西南交通大学土木工程学院 四川 成都 610031)

**摘要:** 针对被动柔性防护网受力系统,介绍了被动柔性防护网在国内外的应用和研究现状,阐明了被动柔性防护网的构成和传力机理,揭示其抵抗落石冲击的基本原理。为分析被动柔性防护网整体受力机理和响应特点,进行了在落石作用下被动柔性防护网足尺模型的冲击试验,分析了被动柔性防护网受到冲击之后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,为被动柔性防护网的结构计算分析与设计提供一定的参考依据。

**关键词:** 被动柔性防护网; 耗能机理; 试验系统; 落石冲击

文章编号: 1003-8035(2014)04-0037-08

中图分类号: P694

文献标识码: A

被动柔性防护网于20世纪50年代开发,对各类斜坡坡面崩塌落石、风化剥落和雪崩等灾害起到了良好的防护效果,在国内外已得到广泛应用<sup>[1-7]</sup>。在国外,典型的如日本立山町边坡、美国霍姆斯特煤矿、南非开普海滨公路等处(图1)。我国自1995年引入,如黔桂铁路南丹至河池段、北京八达岭高速公路、金温铁路沿线等处均利用被动柔性防护网对落石进行防护(图2)。被动柔性防护网在适用性、安全性、经济性和环保性等方面体现出了显著优越性。



图1 日本被动柔性防护网工程

Fig. 1 Passive flexible protection in Japan



图2 中国被动柔性防护网工程

Fig. 2 Passive flexible protection in Chinese

目前,一些学者利用理论、试验及数值模拟等方法研究被动柔性防护网,主要涉及崩塌落石、系统组

件及整体受力性能研究三个方面。其中,Cazzani等<sup>[8]</sup>数值模拟了落石撞击被动柔性防护网过程,关注了冲击点及落石尺寸对整体性能的影响;而Gentilini等<sup>[9]</sup>研究了数值模拟中三维模型石块对系统性能的影响;Thoenia等<sup>[10]</sup>通过准静态和动态试验研究,提出了伴随有扭曲变形的钢绳网离散接触模型,但未考虑钢绳网的局部弯曲变形;del Coz Díaz等<sup>[11]</sup>进行了新型减压环显式非线性分析及受力行为研究,但文中一些处理方式有待进一步研究,如单元类型及失常数的选择;Bertrand等<sup>[12]</sup>对落石冲击被动柔性防护网进行了试验研究和数值模拟分析,提出“窗帘效应”的概念,即金属网沿支撑绳滑动的现象。在国内,叶四桥等<sup>[13-14]</sup>试验研究了落石运动规律并对比分析了5种常用落石冲击力算法;任鑫<sup>[15]</sup>参考Giacominia等<sup>[16]</sup>的研究成果,考虑碎石影响,进行现场试验,基于正交试验分析法分析了多种因素的综合作用;汪敏等<sup>[17-18]</sup>先后研究了减压环和锚杆的受力性能;刘运涛<sup>[19]</sup>和周晓宇等<sup>[20]</sup>分别数值模拟了被动柔性防护网,不过,两者在数值模拟时均未设置减压环,前者通过适当降低系统抗冲击能量来考虑减压环的影响,而后者直接忽略,且均忽略了落石破碎的影响。

尽管被动柔性防护网应用广泛,但并不是所有工

收稿日期: 2014-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(51278428); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682014CX066)

作者简介: 刘成清(1976—)男,博士,副教授,主要从事工程抗震及抗冲击研究。

E-mail: lcqj@qq.com

程技术人员对其系统的构成、特点、基本原理等方面,有明确而系统的认识;而且,落石冲击动能、防护网结构特性、减压环及钢绳网等系统构件的受力性能对作用于结构上的冲击力和变形以及耗能的影响较为复杂,为此,有必要进行足尺模型落石冲击试验以研究结构响应及耗能特点,为被动柔性防护网的结构设计及分析提供一定的参考依据。

## 1 被动柔性防护网的构成及原理

### 1.1 被动柔性防护网的构成

被动柔性防护网是指由金属柔性网(钢丝绳网、格栅网等)、固定系统(锚杆、拉锚绳、基座和支撑绳等)、减压环和钢柱四部分构成,利用组件之间的拉压平衡形成弱张力集成体系,并以拦截形式来防护地质灾害的柔性安全防护系统技术和产品<sup>[21]</sup>,其常见构成形式如图3所示。

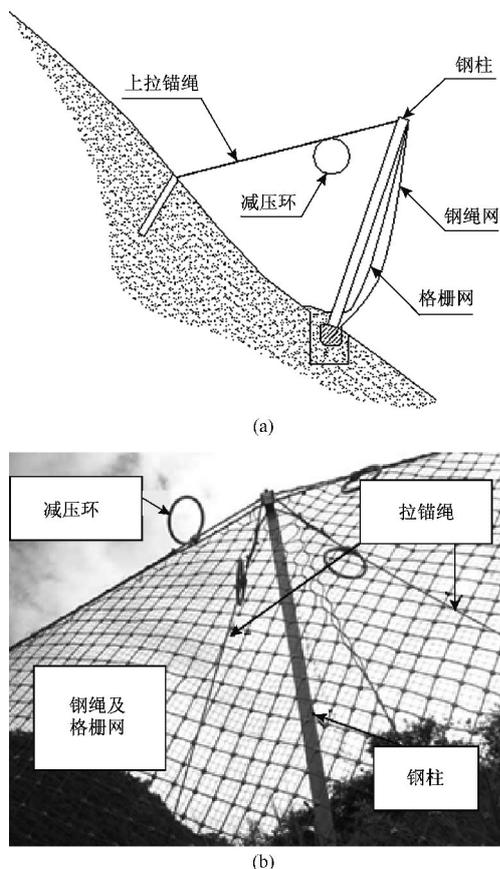


图3 被动柔性防护网断面图

Fig.3 Sectional drawing of passive flexible protection

(1) 金属柔性网: 包括钢丝绳网、格栅网等,是系统的主要特征构成部分,且往往是遭受冲击的第一部

分,把来自于落石的冲击荷载传递到支撑绳、拉锚绳、减压环等部件,并最终传递给锚杆。金属柔性网常用热镀锌的高强度钢绳加工而成(分为菱形和环形网孔,其中环形网亦可由钢绞线加工而成),以达到防腐目的。

(2) 固定系统: 包括锚杆、拉锚绳、基座和支撑绳等,是系统主要传力构件,实现结构整体协调变形。其中,柔性双股钢丝绳锚杆与各拉锚绳相连,采用套管的环型设计,能很好地吸收高冲击荷载,同时柔韧性良好,并可通过调节拉锚绳张紧程度和张拉长度来调节系统的倾斜角度。

(3) 减压环: 减压环对称布置在支撑绳及拉锚绳上,对系统起过载作用,可以避免金属柔性网、钢柱等其他部件发生严重破坏。当与减压环连接的构件所受拉力达到某一阈值时,减压环启动并通过位移变形来吸收能量,从而有效提高被动柔性防护网系统的防护能力。

(4) 钢柱: 钢柱的主要作用是作为系统的直立支架,钢柱与基座间的可动连接确保了钢柱遭受直接冲击时基座地脚螺栓免遭破坏。

### 1.2 被动柔性防护网的基本原理

被动柔性防护网是金属柔性网、固定系统、减压环及钢柱组成的统一整体。其中,系统的柔性主要来自于金属柔性网和减压环,并通过不断优化各单元组件的连接以达到系统的柔性匹配,通过合理的计算和设计使系统具有足够的强度和柔性,以承受并扩散落石冲击力,形成拦截屏障,利用系统的变形能力,延长落石对拦截系统的作用时间,来削弱冲击力,同时不断吸收和消化冲击动能,达到防护落石的目的。

当落石冲击被动柔性防护网时,系统变形过程可分为三个阶段: 第一阶段,冲击力首先通过金属柔性网消散,由初始平衡状态转换为绷紧状态,主要体现为网片由松弛状态被拉紧,并将剩余荷载从冲击点向绳网系统周边逐级传递; 第二阶段,富余的作用力传递至边沿的支撑绳,并拉动支撑绳沿着钢柱端部的鞍座滑动,冲击变形及支撑绳中拉力逐步增大,当支撑绳上作用力超过减压环的启动力阈值时,支撑绳上减压环启动,开始耗散冲击能量,此时,钢柱也受到作用力的影响,但其变形很小; 第三阶段,随着冲击作用进一步加大,支撑绳进一步滑动,金属柔性网变形更加明显,支撑绳传递给钢柱的竖向力分量急剧增大,拉锚绳减压环启动,钢柱产生下摆而使系统获得新的耗

能力, 最终将系统内作用力传递到锚固基岩和地层, 作用力的传递方式如图 4 所示。

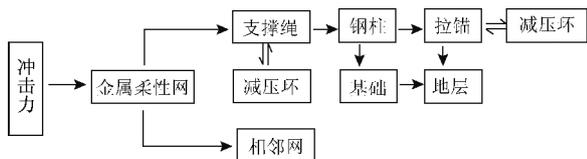


图 4 被动柔性防护网作用力传递方式图

Fig. 4 Force transfer diagram of passive flexible protection

## 2 被动柔性防护网在落石冲击作用下力学性能的试验研究

目前, 美国以及欧盟等国规范对防护网进行了较为细致的规定<sup>[22]</sup>。我国仅有的两部标准中<sup>[21 23]</sup>, 对产品的检验, 如锚绳、减压环等给出了静力检验的方法和要求, 但对系统整体性能检验方法及系统设计方法的规定则是空白, 被动柔性防护网的设计和施工有待进一步规范。因此, 有必要进行落石作用下被动柔性防护网足尺模型的冲击试验, 以研究系统受到冲击之后的整体变形及减压环、钢柱等关键构件的耗能和破坏机理。

### 2.1 被动柔性防护网足尺模型冲击试验

图 5 所示为落石冲击试验装置, 由反力墙、冲击池和测试设备等组成。其中, 反力墙高度和宽度方向均匀布设有定位孔, 用于安装被动柔性防护网试验模型; 冲击池具有足够空间能满足系统变形的需求; 使用龙门吊提升冲击石块, 以获得试验所需冲击动能, 并设置各类检测仪器, 用于监测试验模型的动力响应。

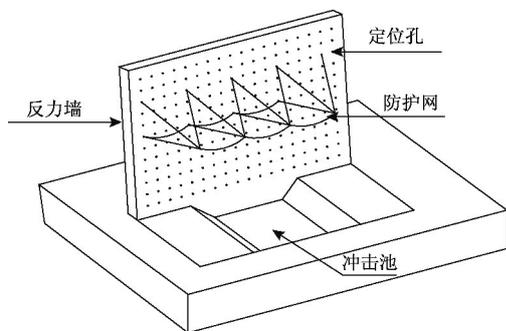


图 5 落石冲击试验装置

Fig. 5 Rock fall impact tester

以 RX 型被动柔性防护网为原型, 标准试验模型为 3 跨, 每跨间距为 10m, 钢柱高度为 5m, 通过调节

拉锚绳张紧程度和张拉长度来调节钢柱的倾斜角度, 使其与落石轨迹接近垂直。模型详细参数如表 1 所示。为更好的模拟实际落石块体, 落石模型选用切角的二十六面体(图 6)。由于落石的尺寸和冲击速度对系统的破坏方式会产生影响<sup>[24-25]</sup>, 为防止“子弹效应”的发生, 我们采用动能-势能转换方程来控制落石的冲击能量和冲击速度。其中, 被动柔性防护网的系统布置及构件编号如图 7 所示。

表 1 RX 型防护系统构件表

Table 1 Details of RX

| 构件名称   | 规格型号         | 构件名称  | 规格型号      |
|--------|--------------|-------|-----------|
| 钢丝绳网   | DO/08/200    | 上支撑绳  | 2φ16      |
| 双绞六边形网 | GA/2.2/50×60 | 下支撑绳  | 2φ16      |
| 上拉锚绳   | φ14          | 钢丝绳锚杆 | 2φ16      |
| 侧拉锚绳   | φ16          | 钢柱    | GZ-20b-5  |
| 缝合绳    | φ8           | 减压环   | GS-8000 型 |

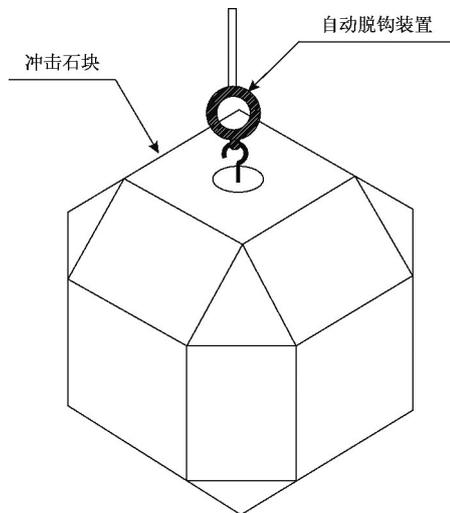


图 6 落石模型

Fig. 6 Rock fall model

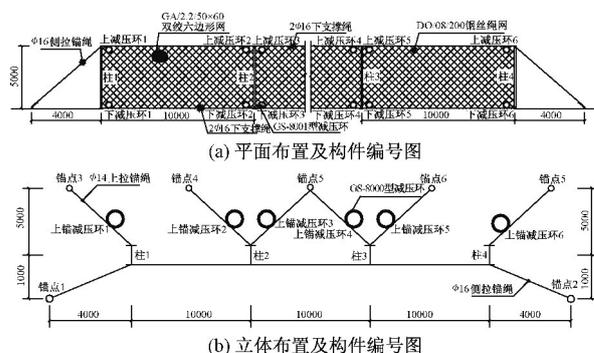


图 7 被动柔性防护网模型布置及构件编号图

Fig. 7 Model layout and component number diagram of the passive flexible protection

试验时,按照正确的施工顺序将被动柔性防护网试验模型安装于反力墙上,试验模型安装如图 8~10 所示。使用龙门吊将冲击石块提升到一定高度,校准位置后,自动脱钩释放石块,冲击测试防护网模型的中跨中心位置处。在相同模型、相同试块及释放高度的条件下,先后进行两次冲击试验 T-1 和 T-2,以研究被动柔性防护网在连续落石冲击作用下的动力响应,落石冲击试验值如表 2 所示。

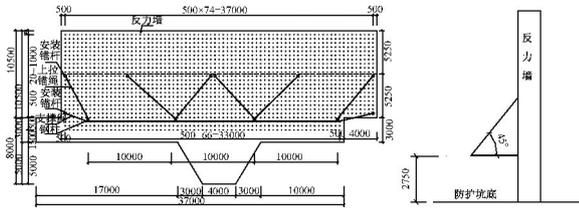


图 8 试验模型安装示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the test model

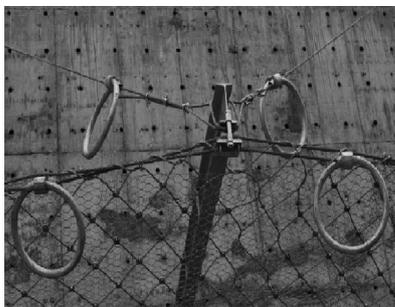


图 9 钢柱顶部系统构件安装图

Fig. 9 The component installation diagram on the top of the steel column

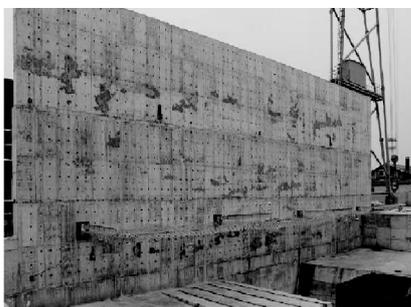


图 10 试验模型安装完成图

Fig. 10 The installation diagram of the test model

表 2 落石冲击试验值

Table 2 The impact test value

| 试验编号 | 能量设计值(kJ) | 试验能量值(kJ) | 结果   |
|------|-----------|-----------|------|
| T-1  | 500       | 170       | 拦截成功 |
| T-2  | 500       | 170       | 拦截成功 |

## 2.2 落石冲击试验现象与结果分析

T-1 冲击试验后,冲击试块被防护网成功拦截,整体结构变形不大。跨 2 防护网发生较大变形;柱 2、柱 3 和柱 4 分别向落石冲击作用位置方向发生偏移,变形量较小。柱 4 稍向上翘曲;下支撑绳多个减压环已经启动,上拉锚绳减压环个别已经启动,而上支撑绳减压环未见动作,整体变形如图 11(a) 所示。

T-2 冲击试验后,冲击试块也被成功拦截,但整个结构变形较大,4 根钢柱发生较明显的弯曲及变形,同时出现钢柱 3 的柱脚处用于安装下支撑绳的部件在焊接位置断裂的情况,防护系统已经无法再承受落石冲击,整体变形如图 11(b) 所示。



(a) T-1冲击试验



(b) T-2冲击试验

图 11 冲击试验 T-1 和 T-2 整体变形图

Fig. 11 The deformation diagram after T-1 impact test (a) and T-2 impact test (b)

### 2.2.1 被动柔性防护网变形结果分析

两次落石冲击试验后,冲击试块均被被动柔性防护网成功拦截,且试验 T-2 较 T-1 的结构变形大,不能继续承受落石冲击。分别统计两次落石冲击后被动柔性防护网变形情况的两种变形结果。示意如图 12、图 13 所示,其具体的变形值如表 3 所示。

可知,落石冲击防护网前后两次最大垂直变形  $H_n$  的变化率分别为 312% 和 10%,说明钢绳网是最主要的耗能构件,通过变形能力耗散落石能量,且具有很高的强度和弹塑性内能吸收能力,其中塑性变形能力不可忽视;而前后两次的上下支撑绳之间的最小

距离  $H_r$  的变化率分别为 39% 和 14% ,说明上下支撑绳对钢绳网竖向变形影响很大 ,同时 ,由于上支撑绳能直接将冲击力传递至斜拉锚绳 ,是影响三阶段变形理论的关键。

分析表 3 及各传感器数据 ,发现落石冲击发生后 ,防护网伴随微幅振动 ,但由于系统充分耗能 ,两次试验均未见落石二次弹起现象 ,说明现在大多数研究者在数值模拟过程中忽略二次回弹效应对被动柔性防护网整体受力性能的影响是合适的。另外 ,在落石冲击作用下 ,被动柔性防护网由初始的平衡状态变成紧绷状态 ,如图 14( a) 所示 ,随后 ,支撑绳、减压环、钢柱等系统构件充分发挥耗能作用 ,如图 14( b) 所示 ,很好的体现了三阶段变形理论及作用力传递方式。

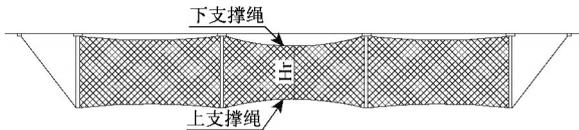


图 12 跨 2 上下支撑绳间的最小距离(  $H_r$  )

Fig. 12 The minimum distance between longitudinal ropes in the second cross(  $H_r$  )

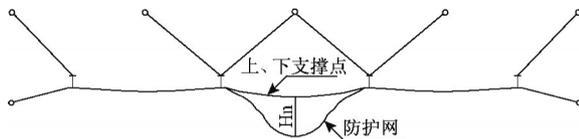


图 13 跨 2 防护网的最大垂直变形(  $H_n$  )

Fig. 13 The maximum vertical deformation in the second cross(  $H_n$  )

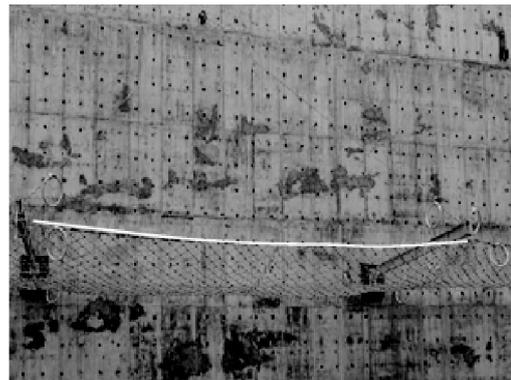
表 3 防护系统变形值( mm)

Table 3 The deformation value of the passive flexible protection

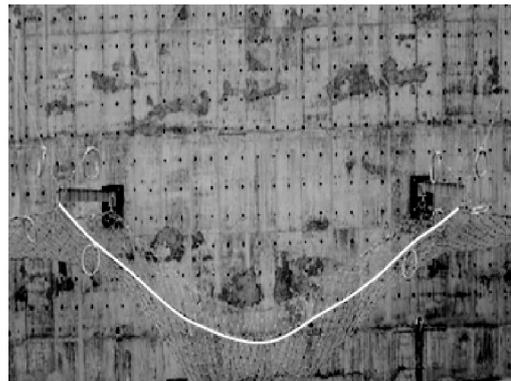
| 次数                  |     | T-1  | T-2  |
|---------------------|-----|------|------|
| 参数                  |     |      |      |
| 上下支撑绳间最小距离( $H_r$ ) | 冲击前 | 4750 | 2900 |
|                     | 冲击后 | 2900 | 2500 |
| 防护网的最大垂直变形( $H_n$ ) | 冲击前 | 530  | 2180 |
|                     | 冲击后 | 2180 | 2390 |

### 2. 2. 2 减压环变形结果分析

T-1 冲击试验后 ,下支撑绳减压环均已启动且发生明显变形 ,上拉锚绳减压环仅 2 号和 5 号启动 ,但上支撑绳减压环均未启动; T-2 冲击试验后 ,减压环启动情况与 T-1 相似 ,区别在于此次拉伸的长度较 T-1 大 ,且此次上支撑绳减压环有 4 个启动并发挥耗能作用。



(a) 初始受力状态



(b) 最终受力状态

图 14 落石冲击作用下被动柔性防护网变形图

Fig. 14 Deformation of the passive flexible protection against rock-fall impact

说明 T-1 冲击试验中下支撑绳拉力超过了减压环的启动力阈值 ,使得下支撑绳减压环启动 ,开始耗散冲击能量 ,而上支撑绳减压环在 T-2 冲击试验中才达到启动力阈值 ,我们发现虽然上下支撑绳的工作状态具有相似性 ,但由于支撑刚度不同 ,下支撑绳拉力更大 ,使得下支撑绳减压环启动更早且更充分 ,且上支撑绳减压环在拉锚绳减压环启动后基本不再伸长 ,耗能能力未完全发挥。

同时 ,根据试验中减压环的变形情况 ,减压环的变形过程经历了两个阶段: 第一阶段 ,预启动阶段 ,即钢管克服铝管套筒摩擦做功阶段 ,与两者之间的静动态摩擦系数和铝管套筒对钢管的预紧力有关; 第二阶段 ,变形阶段 ,即突破启动力阈值进入变形阶段 ,表现为圆环从大到小 ,管截面由圆变扁( 图 15) 。

### 2. 2. 3 钢柱变形结果分析

T-1 冲击试验后 ,钢柱没有明显的水平和竖向变形 ,只是伴随有轻微扭转变形。而在 T-2 冲击试验后 ,柱 1 在水平方向发生明显的弯曲变形( 图 16) ; 柱



图 15 T-2 冲击试验后上锚减压环 5 变形图

Fig. 15 The deformation diagram of the ring-break energy dissipater 5 on the uphill cables after T-2 impact test

2、3、4 均发生较大水平和竖向位移,并伴有轻微弯曲变形,且在钢柱 3 的柱脚处用于安装下支撑绳的构件在焊接位置断裂,使得防护系统已经无法再次承受落石冲击(图 17)。



图 16 T-2 冲击试验后钢柱 1 变形图

Fig. 16 The deformation diagram of Steel column 1 after T-2 impact test



图 17 T-2 冲击试验后钢柱 3 柱脚脱落图

Fig. 17 The exfoliated column base diagram after T-2 impact test

由于钢柱是被动柔性防护网系统中唯一的受压构件,依托钢柱与支撑绳、钢绳网的拉压平衡,系统处于拉压平衡状态,且钢柱一般以销铰固定于基础上,在铅垂面内具有充分的转动能力,因此,正常条件下钢柱始终处于轴压状态,但 T-2 冲击试验后,柱 1 的面外转动受到了约束,支撑绳在柱端鞍座位置由于受到较大摩擦或者滑移卡阻,钢柱受力状态由轴压转变为压弯,导致钢柱 1 发生压溃破坏;落石冲击作用下,钢绳网带动支撑绳发生较大水平滑移,即 Bertrand 等<sup>[12]</sup>提出的“窗帘效应”,系统发生内力重分布,又由于支撑刚度不同,下支撑绳拉力更大,造成钢柱 3 柱脚处发生了剪切破坏。

### 3 结论

通过足尺模型落石冲击试验,详细介绍了被动柔性防护网系统的传力机理和冲击响应,得出以下几点结论:

(1) 与传统的圪工防护结构相比,被动柔性防护网已实现产品的标准化,耗能效果显著,建设及维修成本较低,并最大限度地保护了周边环境,在适用性、安全性、经济性和环保性等方面具有显著优越性,值得推广和应用。

(2) 由于被动柔性防护网整体结构性能检验和设计方法等方面研究的匮乏,开展落石冲击作用下被动柔性防护网结构模型试验,有利于探索其受力传递机理、冲击响应分析,可为研究并提出落石冲击作被动柔性防护网结构整体结构的设计理论做基础数据的积累和准备。

(3) 落石冲击试验表明:钢绳网是最主要的耗能构件且上下支撑绳对钢绳网的竖向变形影响很大;虽然上下支撑绳的工作性态具有相似性,但由于支撑刚度不同,下支撑绳拉力更大;落石冲击试验发生后,防护网伴随微幅振动,在数值模拟过程中忽略二次回弹效应对系统整体受力性能的影响是合适的。

(4) 目前被动柔性防护网研究和设计多基于高度简化的理论模型,使得构件耗能性能未能得到充分发挥或局部构件不能满足均衡化要求,导致材料浪费甚至因局部破坏而丧失承载能力,因此,实现系统组件的优化设计是下一步研究的重点。

参考文献:

[1] Andrea R, Andreas K, Thomas FV. Debris flow mitigation

- by means of flexible barriers [C]//Interpraevent 2004-RIVA/TRIENT.
- [2] Volkwein A, Meis L, Haller B, et al. Protection from landslides and highspeed rockfall events reconstruction of Chapman 'peak drive [J]. IMIESA, 2003, 28(11): 29-39.
- [3] Muhunthan B, Shu H Z, Sasiharan, et al. Analysis and design of wire mesh/cable net slope protection [R]. Washington State University 2005.
- [4] 贺咏梅, 彭伟, 阳友奎. 边坡柔性防护系统的典型工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 323-328.  
HE Yongmei, PENG Wei, YANG Youkui. Typical cases of slope flexible protection system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 323-328.
- [5] 刘亚伶, 于保华. SNS 柔性防护网在八达岭高速公路上的应用[J]. 市政技术, 2009, 27(3): 227-232.  
LIU Yaling, YU Baohua. Application of SNS flexible safety barrier in Badaling freeway work [J]. Municipal Engineering Technology 2009 27(3): 227-232.
- [6] 陈江, 夏雄. 金温铁路危岩落石中柔性防护技术应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 312-317.  
CHEN Jiang, XIA Xiong. Research on application of flexible protection technique Jinhua-Wenzhou railway rock fall treatment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006 25(2): 312-317.
- [7] 贺咏梅, 成铭. 柔性防护技术在泥石流防护中的应用及研究进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 292-294, 299.  
HE Yongmei, CHENG Ming. Research on the application of flexible system to mitigation of mudflow [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 292-294, 299.
- [8] Cazzani A, Mongiovì L, Frenez T. Dynamic finite element analysis of interceptive devices for falling rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2002, 39(3): 303-321.
- [9] Gentilini C, Govoni L, Miranda S D, et al. Three-dimensional numerical modelling of falling rock protection barriers [J]. Computers and Geotechnics, 2012, 44: 58-72.
- [10] Thoenia K, Lambert C, Anna Giacomina A et al. Discrete modelling of hexagonal wire meshes with a stochastically distorted contact model [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49: 158-169.
- [11] Del Coz Díaz J. J, García Nieto P. J, Castro-Fresnoc D, et al. Nonlinear explicit analysis and study of the behaviour of a new ring-type brake energy dissipator by FEM and experimental comparison [J]. Applied Mathematics and Computation 2010, 216: 1571-1582.
- [12] Bertrand D, Trad A, Limam A, et al. Full-scale dynamic analysis of an innovative rockfall fence under impact using the discrete element method: from the local scale to the structure scale [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering 2012, 45: 885-900.
- [13] YE Siqiao, CHEN Hongkai, XU Jiang. Rockfalls movement mode and movement features by field tests [J]. Journal of Civil Architectural and Environmental Engineering 2011, 33(2): 18-23.
- [14] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石冲击力计算方法的比较研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 59-64.  
YE Siqiao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Comparative research on impact force calculation methods for rockfalls [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(2): 59-64.
- [15] 任鑫. 柔性防护技术在硬质岩石边坡崩塌落石灾害治理中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.  
REN Xin. The application and research of flexible protection technology in the rock slope collapse and rockfall hazard management project [D]. Beijing: China University of Geosciences 2011.
- [16] Giacomina A, Buzzia O, Renard B, et al. Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2009, 46: 708-715.
- [17] 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 Min, SHI Shaoqing, YANG Youkui. Static tensile test and FEM dynamic simulation for a ring-brake energy dissipator [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(4): 188-193.
- [18] 汪敏, 石少卿, 阳友奎. 柔性防护系统中钢丝绳锚杆性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 2593-2599.  
WANG Min, SHI Shaoqing, YANG Youkui. Experimental study of cable anchors for flexible protection systems [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 2593-2599.
- [19] 刘运涛. 危岩落石被动防护数值仿真分析[D]. 成都:

- 西南交通大学 2011.
- LIU Yuntao. Numerical simulation of passive protection for rock fall [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University 2011.
- [20] 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 2012, 32(6): 59-66.
- ZHOU Xiaoyu, CHEN Airong, MA Rujin. Numerical simulation of energy dissipation mechanism on falling rocks protection nets[J]. Journal of Chang'an University, 2012, 32(6): 59-66.
- [21] 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]. Ministry of Railways of the people's Republic of China 2004.
- [22] EOTA. Guideline for European technical approval of falling rock protection kits (ETAG 027) [S]. Eur Organisat Techn Appr 2008.
- [23] JT/T528-2004. 公路边坡柔性防护系统构件[S]. 北京: 人民交通出版社 2004.
- JT/T528-2004. The component of the flexible system for protection of slope along highway [S]. Beijing: China Communication Press 2004.
- [24] 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: 131-144.
- [25] 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: 515-526.

## Experimental study on the passive flexible protection under the rock-fall impact

LIU Cheng-qing, CHEN Lin-ya, CHEN Chi, WEI Tao

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

**Abstract:** In order to study the passive flexible protection, the application and research status of passive flexible protection at home and abroad were presented, in order to reveal the basic principle of rock-fall impact resistance of the passive flexible protection, the structure and force transfer mechanism were clarified. For the analysis of passive flexible protective stress response mechanism and characteristics, two full-scale model impact tests were carried out, the whole deformation were studied, as well as the energy dissipation and failure mechanism of the ring-break energy dissipater, steel columns and other key component. The conclusion can provide a reference for the computational analysis and structural design of the passive flexible protection.

**Key words:** passive flexible protection; energy dissipation mechanism; test system; rock-fall impact

### 《中国地质灾害与防治学报》编辑部网络采编办公系统运行通知

各位作者:

您好! 为提高稿件处理和办公效率,《中国地质灾害与防治学报》编辑部已从 2013 年 3 月开始启用网络采编办公系统。

作者投稿采用新的网络平台(<http://zgdzhyfz.paperopen.com/>),不再使用原电子邮件投稿系统,特此公告,望作者们予以支持与合作。

在使用网络系统中您有任何疑问、意见和建议,请您电话 010-62170025 或者发邮件到 [nitx@mail.cigem.gov.cn](mailto:nitx@mail.cigem.gov.cn)。

注意: 投稿作者请仔细阅读首页导航栏——投稿须知!

期刊编辑部