

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.01.18

主被动混合式柔性防护网联合作用效果初步分析

赵雅娜, 齐 欣, 余志祥, 赵世春
(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:主被动混合式柔性防护网在拦截落石后可使其低速逸出,首先对现有结构进行梳理。之后为研究其结构性能,首先对基本构件环网网环与减压环进行了材性试验,建立了两段式网片等待模型与三段式减压环等待模型,并利用 LS-dyna 构建数值仿真平台,对主被动混合式落石防护网结构体系进行落石冲击拦截与缓冲全过程研究,最终结果表明此类结构有稳定的耗能能力,对落石动能的吸收达 90% 以上,落石最终低速逸出。研究也发现系统以网片为主要耗能构件,耗能装置启动并不充分,且各主要构件耗能分配构成不合理,需进一步进行研究。

关键词:落石;柔性防护网;主被动混合网;数值仿真

中图分类号: TU311.41

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)01-0111-06

Preliminary study of hybrid flexible rockfall protection net

ZHAO Yana, QI Xin, YU Zhixiang, ZHAO Shichun
(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Hybrid is a state-of-the-art type of rockfall flexible protective structures in recent years. In this case, the upper part of the structure use steel columns to form an opening to receive the rockfall, and there is no constraints or anchor ropes on the bottom. So the stone hit the impact-zone ring-net and then roll aside the drape-net, finally fell out of the structure with a low speed. Literature study were taken out at first, followed by main elements mechanic test. Equivalent models of ring-net and breaking were set up based on the tests results, then the simulation numerical simulation models were build up used by LS-Dyna. Numerical simulations of the whole process of rockfall impact hybrid barrier has carried out to study the impact process and energy absorption of the structure. Results show this type of structure has a stable energy dissipation capacity, and the absorbing of kinetic energy of falling rocks up to 90%. The stone fell out of the structure with a fairly low speed. Further research should focus on the irrational proportion of energy absorption of the members.

Keywords: rockfall; flexible protective structures; hybrid barrier; numerical simulation

0 引言

落石灾害严重威胁人员车辆安全,造成道路中断,阻碍交通设施的正常运转,造成巨大的经济损失,通常采取安装柔性防护网作为应对措施^[1-4]。虽然常用的被动柔性防护网防御能级已达 8000kJ,但是拦截后落石堆积于结构内部,且对应于高冲击能级往往意味着

落石质量与体积的增大,后续清理工作难度大,费用高,且清理不及时可能造成系统失效以及二次灾害(图 1)。

近年来兴起另一种兼具主动网限制落石运动范围与被动防护网拦截落石特征的新型柔性防护网体系,系统上部利用支撑钢柱形成开口,应对落石冲击并消耗其动能,下部开口,使落石得以逸出。其设计理念

收稿日期: 2015-04-15; 修订日期: 2015-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(51408498);高等学校博士学科点专项科研基金博导类资助(20130184110009)

第一作者: 赵雅娜(1981-),女,博士研究生,主要从事结构冲击与结构防灾减灾研究。E-mail:analy_ana@126.com

为,在落石冲击结构时,耗散落石动能,并通过较长的网片管控落石与碎片的运动轨迹,并使其通过结构运行至预设收集区域,并不留存于系统内部。由此大大降低了清理堆积落石等常规维护难度与维护费用,有着显著的使用与经济优势,在欧美与日本已有一些工程案例。以下统称此类具有“拦而不截”特点的防护

网系统为主被动结合式落石防护网体系。

为分析其工作原理与耗能方式,本文首先梳理了相关参考文献,详述其发展过程与各自的特点。之后通过构件力学性能试验建立等代模型,并基于此构建数值仿真平台,对典型主被动混合网进行了防护全过程模拟计算,进行详细分析,以研究其耗能与工作要点。

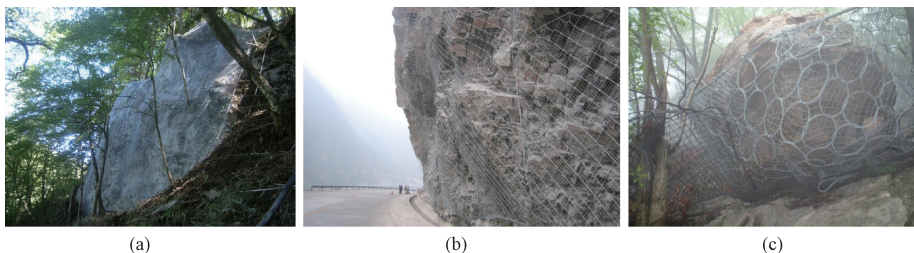


图 1 落石堆积于系统内

Fig. 1 Stones piled up inside the structure

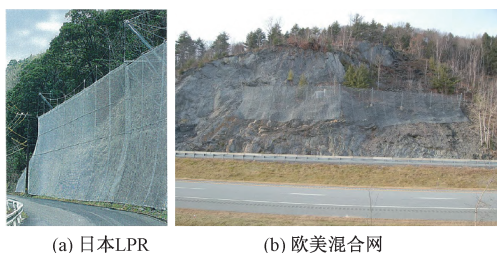


图 2 各地主被动结合式防护

Fig. 2 Hybrid barrier all around the world

1 主被动结合式落石防护网的发展概况

目前世界上现有的主被动结合式柔性防护系统根据地区主要为两大类:日本的大跨度口袋式(long-span pocket-type)后简称为 LPR,图 2a)以及口袋式落石防护网;美国和欧洲(主要是瑞士)的混合式(hybrid rockfall barrier)或缓冲系统(attenuator system)(图 2b),均具有相似的外形构造特征:利用钢柱与悬挂索形成支撑系统,将网片一端连接于悬挂索上,另一端自然下垂至地面或与斜坡面接触,并延伸一定长度。工作时,落石首先冲击金属网后沿网滚落坡面。

日本的主被动结合式落石防护网由早前口袋式落石防护网演化而来。口袋式落石防护网属于覆盖式柔性防护系统,具有主被动结合式防护网的工作特点,同样利用上部支撑钢柱形成开口以接纳上方落石,并限制落石运动范围^[5]。但由于系统配置原因,防护能级低,导致安装高度高,由此引发材料消耗大,安装费用高。且钢柱间距小(仅 3 m、5 m 两种柱距),易重复遭受落石冲击造成损坏,工作性能较差。新型的日本主

被动结合式防护网称为“大跨度口袋式落石防护网”^[6],它在口袋式防护网的基础上通过改换网片形式,增设纵横向加强钢丝绳以及增设消耗能量装置的方式提高系统防护能级。另一种已知的日本主被动结合式防护网为 TSK 公司的高能量窗帘网(CN),其工作原理与结构构造方式均与 LPR 相似,且通过增密网片上的竖向与横向加强绳(间距为 1 m),防护能级有所提高,其原理在于增大系统撞击等效质量,以达到增大耗能的目的。这两种系统均通过增大柱距的方式直接降低支撑钢柱受上方落石直接撞击的可能性,目前的最大跨度已达 30 m。LPR 第一次用于实际工程是在日本高知县,其使用效果令人满意,目前已经在日本推广使用。由于日本本土遭受的落石灾害普遍能级不高,LPR 所针对的能级也多在 1000kJ 以内^[7]。

早期欧美的主被动结合式防护网从标准无固定式帘状防护网(standard unsecured drapery)演化而来,称为 hybrid barrier 或 rockfall attenuator。已查得的最早研究是 1988 - 1993 年美国科罗拉多州运输部(Colorado Department of Transportation)^[8],对 Rockfall attenuator 的产品的试验与检验。由柔性钢丝网或者钢索网,支撑钢柱与悬挂绳构成,柔性网顶端悬挂于由钢柱或锚绳支撑的悬挂钢索上形成上部开口,下端自由垂放于山体斜坡表面。网片上通常并不设置内部或边角以及底部锚固,且不设置任何耗能制动单元,完全依靠网片发生变形以对落石进行制动或者减速控制落石运行轨迹。此系统主要针对低能级($\leq 500\text{kJ}$),多用于落石频发地区,或作为补充耗能防御措施弥补现有防护网的能级不足。实际工程中,有单独使用的,也

有在落石下落运行轨迹上设置多重系统,使落石逐步减速,最后以防石沟或低能级被动网拦截。此类系统在美国已有数十年的使用历史,许多实地调查研究证实了其在长期遭受重复落石冲击作用下的有效性与耐久性。但防御能级低限制了其适用范围。欧美随后出现的新型混合网,其结构是撤掉被动网的下支撑绳,并连接一片帘状网(drape-net),使落石在与网片产生初次碰撞之后沿后缀帘状网通过系统(图2)。形成了更为明显的初始碰撞与后期轨迹管控的两阶段工作形式。初始碰撞耗能原理与被动网类似,后期减速均通过帘状网控制。且在悬挂绳上设置消能装置的系统形式以提高初次碰撞耗能能力,此系统在实际工程中已查询到的最大防护能级为2000kJ^[9]。提高初次碰撞耗能能力除覆盖能级范围增大之外,最明显的好处是结构的安装高度得以降低,以方便施工安装。但此工程仅进行了原位剥落落石试验,并未记录撞击体的质量或速度,其实际耗能能力或整体变形能力并未见报道。

纵向来看,无论是日本还是美国的主被动结合式防护网,其发展的明显标志就是耗能元件的增加,提高了防护能级。横向比较来说,这两大类主被动结合式防护网对落石起到一定程度上的拦截作用,随之限制其运动范围,但并不将落石残存在系统内部,其结构形式与耗能原理新颖,能灵活适用多种地形,布置方式多

样,在正常工作状态时几乎无需额外维护,低维护难度与低维护费用的特点有着明显的经济优势,非常适合在我国推广使用。

2 主被动网防护过程数值模拟

为阐述主被动网的防护过程与耗能模式,以下进行构件性能试验并构建数值仿真平台,使用显式动力学有限元计算软件 LS-dyna 对一典型结构进行数值模拟计算,结合前期大量被动网理论与试验研究^[10],计算模型采用基于被动网且防御能级较高的欧美落石混合网。

2.1 模型概述

网片采用 ROCCO 环形网,规格为 r16/3/300。支柱截面为 H 型钢。减压环 GS8002。取 3 跨标准跨作为计算模型。其中上支撑绳两端各配置 4 个减压环,上拉锚绳每根配置 1 个减压环。柱高 5 m,柱距 10 m,计算模型取 3 跨。拖尾网片为 ROCCO 环形网,12/3/300,长度为 30 英尺。依据参数建立其几何模型,并进行网格划分后仿真模型见图 3。

冲击石块采用 ETAG 推荐多面体试块,质量约为 6.2 t,冲击速度为 25 m/s,速度方向垂直于网片,折合冲击能量约为 2000kJ。坡面夹角 45°,由于旨在研究系统初次碰撞耗能能力,故并未考虑坡面不平整度。

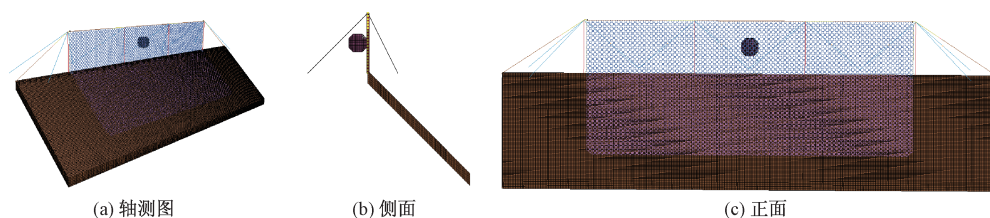


图3 欧美新型混合网有限元模型

Fig.3 Finite element model of hybrid barrier

2.2 构件性能试验与数值仿真平台的构建

其中网环采用梁单元,非线性材料模型(MAT_071),环横截面积通过破断力相等的原则进行简化,工程应力应变曲线通过前期五环拉伸试验所得两段式 P-Δ 关系插值后简化为两段式等代模型(图4)。柱采用梁单元、线弹塑性各项同性硬化模型,屈服应力为 300 MPa,硬化参数为 0.1。支撑绳与拉锚绳采用索单元,cable 材料模型。撞击石块采用单点积分实体单元,刚体材料模型,质量约为 6.2 t。系统在上支撑绳两侧与上拉锚绳端设置减压环作为消能制动装置,在计算中采用梁单元与弹塑性材料进行简化模拟,应力-

应变曲线由前期减压环拉伸试验曲线简化为三段式等代模型(图5)。折合每个减压环的极限耗能能力为 50 kJ。地面使用刚性材料以考虑系统不利因素,地面摩擦参数设置为 0.3。

对于边界,由于环网与支撑绳之间采用卸扣连接,使得网片能沿之发生滑动,在模拟时采用可滑移接触对进行模拟(图6),其中环网与绳索间的支撑力可完全传递,环网可沿绳索单元轴向滑动,摩擦系数设置为 0.1。此外,支撑绳与柱端也采用同类型滑动接触,以模拟绳索与柱端的可滑移连接模式,摩擦系数同样设置为 0.1。撞击石块与网片以及拖尾部分网片与斜坡

坡面之间采用普通接触进行模拟。柱脚铰接的约束方式采用释放相应约束自由度模拟,释放自由度为沿冲击向的转动。

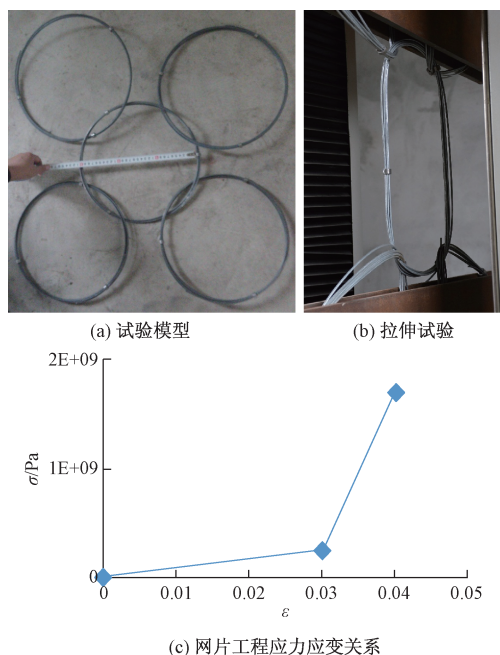


图 4 五环拉伸试验与结果

Fig. 4 Net-ring test and result

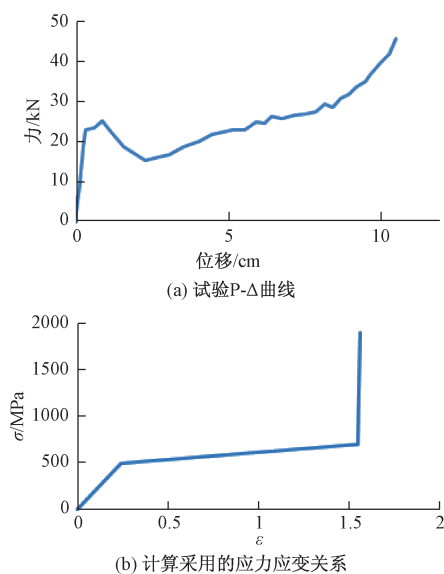


图 5 减压环试验结果与计算本构关系

Fig. 5 Break-ring test result

2.3 计算结果及分析

冲击全过程逐步图像解析如图 7,可大致分为以下几部分:落石与防护网发生接触,网片变形并引发系统各部分构件发生运动与变形,落石冲击至极限位移,之后沿网片发生滚动并下落,最终逸出系统。整个防

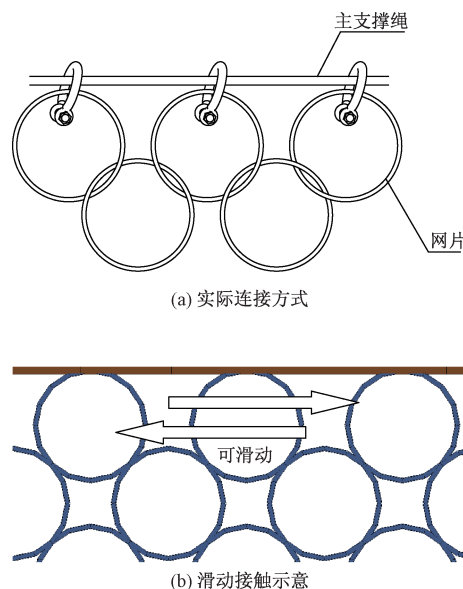


图 6 环网与绳索连接方式与模拟

Fig. 6 Connections of ring-net and support rope

护拦截过程历时 1s,(落石与网片发生接触至冲击力为零时刻)。拦截防护中的最大冲击向位移为 9 m。落石逸出时的速度为 5 m/s,折合动能 77.5kJ,此时在实际工程中可通过低能级的刚性栅栏或设置人工拦石沟拦截并收集落石,实现易清理的目的。

落石对结构的冲击力时程曲线呈明显三段式,如图 8(a)中虚线所示,属于典型的一类耗能结构,平台段冲击力约为 285 kN,这表明整体结构有稳定的变形耗能能力。提取撞击点冲击向水平位移与冲击力做整体性能曲线(图 8b),有与冲击力曲线相似的三阶段特征。

由落石速度与动能时程计算结果可知(图 8d、e),落石的速度呈先衰减后增长的趋势。在整个冲击历时过程中,并未降至零,这也是与被动网体系的最大不同,由此,并不能直接将冲击能量等同于系统耗能,也就是系统的防御能级≠系统耗能能力,在这里,本文选用落石初始动能与冲击速度最小时刻的动能差为系统耗能。由图 8(c),落石在 $t=0.645\text{s}$ 时到达最低速度,速度最低点与水平撞击位移最大时相对应(在图中已由竖直虚线表示),此时可认为系统能力到达最大耗能时刻,此时系统消耗能量为:

$$E_0 - E_{\min} \approx 1852\text{kJ}$$

可见在初始撞击时,系统对落石动能的吸收达到 90% 以上。系统最大耗能时刻各主要构件的耗能见表 1,系统主要耗能构件为网片,网片整体耗能比例占 72%。拉锚绳减压环总耗能能力为 400kJ,实际耗能达整体耗能能力的 96%。支撑绳减压环总耗能能力

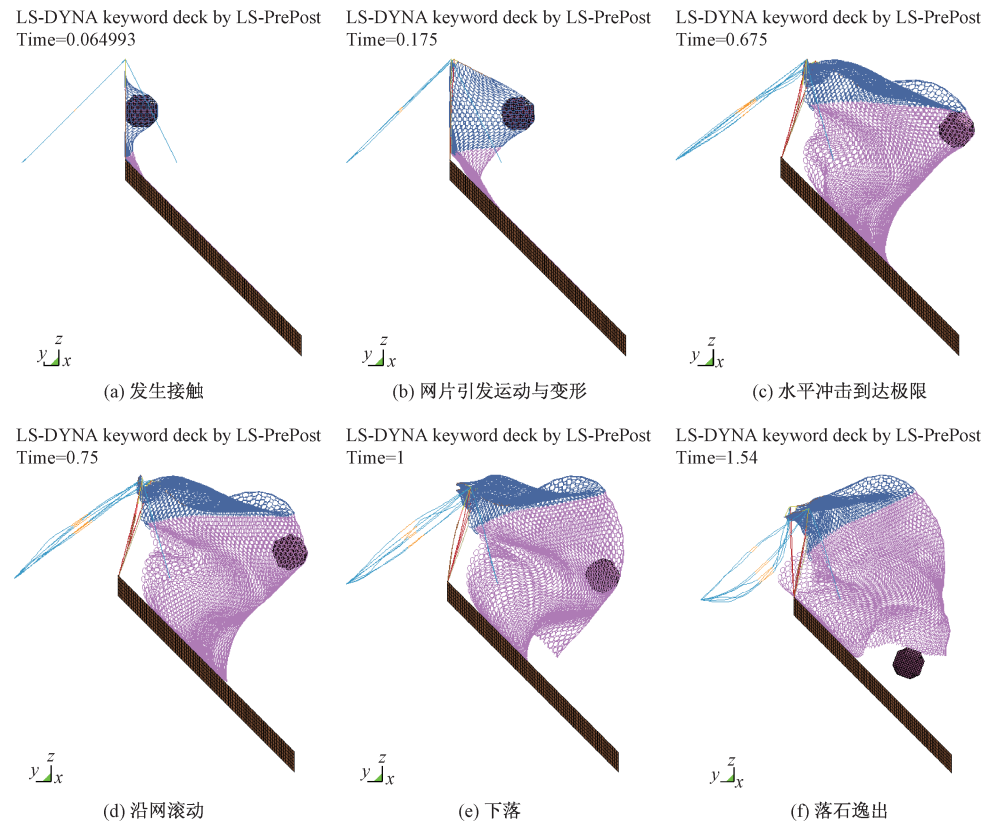


图 7 防护全过程示意

Fig. 7 Schematic of the whole process of protection

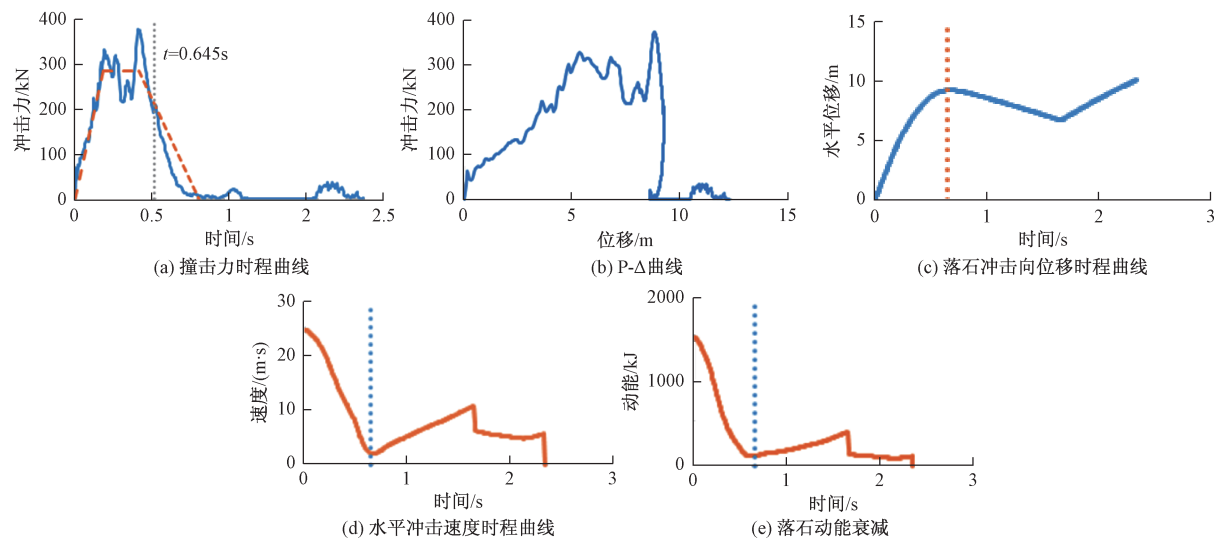


图 8 主要结果时程曲线

Fig. 8 Time history of main results

为 800kJ,实际耗能仅为 30% (表 1)。由此可见,系统的减压环配置并不合理,上拉锚绳减压环几乎已到达极限,而支撑绳减压环启动不足 30%,富余量较大,且上拉锚绳减压环耗能大于上拉锚绳,与被动网的耗能构成区别较大。

表 1 t = 0.645 时刻构件耗能

Table 1 Energy absorption of main member (t = 0.645)

构件	撞击区网片	拖尾网片	拉锚绳减压环	支撑绳减压环
能量/J	8.07E + 05	6.46E + 05	3.84E + 05	2.37E + 05
耗能/结构总耗能	39%	31%	19%	11%
耗能/耗能能力	—	—	97%	27%

3 结论

(1)主被动混合网结构形式新颖,“拦而不截”的防护理念使得落石不会留存于系统内部,由此最大限度的降低了正常使用过程中的维护难度与维护费用,极其适合在我国山区铁路、公路沿线推广使用。

(2)早期主被动混合网耗能形式单一,防御能级低,适用范围受限,近期能级有所提高,日本及美国已有工程案例,但是整体性能研究罕见报道,国内尚无对其进行系统化的研究,无相关规范进行设计,选材的指导,结构性能需进行针对性研究。

(3)通过五环相套拉伸试验所得数据,可建立两段式等代模型;通过减压环拉伸试验数据,可建立三段式等代模型。

(4)通过对主被动混合网的仿真计算研究可以发现,结构能圆满的完成拦截防护任务,落石终以低速逸出,达到了设计初衷。系统在拦截过程中,有平稳耗能的能力。

(5)落石对系统的作用可分为初次撞击与后续作用,结构在初次撞击时吸收大部分落石动能,耗能可达90%以上。

(6)系统的耗能主要通过网片达成,网片预计出现较大面积的塑性变形;上拉锚绳的减压环耗能比支撑绳减压环耗能高,直接沿用被动网的耗能装置配置方法并不合理。下一步的研究目标应是通过合理的构件配置方法,减小网片的耗能,提高耗能装置耗能能力,并针对主被动网的拦截方式重新提出耗能装置配置方案。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国铁道行业标准. TB/T 3089—2004 铁路沿线斜坡柔性安全拦截网[S]. 北京:中国铁道出版社,2004.
Professional Standard of the People's Republic of China. TB/T 3089—2004 The flexible safety net for protection of slope along the line[M]. Beijing: China Railway Publish House, 2004
- [2] 中华人民共和国交通行业标准. 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.
Professional Standard of the People's Republic of China. JT/T528—2004 Component of flexible system for protecting highway slope [S]. Beijing: China

Communications Press, 2004

- [3] 闫宝杰,杨珠江,亓晓贵,等. 公路岩质边坡地质灾害防治及SNS柔性防护系统的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(2):81-85.
YAN Baojie, YANG Zhujiang, YUAN Xiaogui, et al. Preventing and controlling geological hazard on rock side slope of road and the application of SNS flexibility protecting system[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(2):81-85.
- [4] 李有志,彭伟,阳友奎,等. 论SNS边坡柔性防护工程实践中的几个问题[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004(S1):47-50.
LI Youzhi, PENG Wei, YANG Youkui, et al. Some problems concerned with the practice of SNS slopeflexible protection system [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(S1):47-50.
- [5] 日本道路協會,落石對策便覽[S],日本:丸善出版株式会社,2000.
Japan Road Association, Rockfall countermeasures Handbook[S], Japan: Maruzen Publishing Co. 2000.
- [6] Kinoshita N (2009). Development of long-span pocket-type rock-net. In: Proceedings of annual meeting of ministry of land, infrastructure, transport and tourism, Shikoku Regional Development Bureau, July, pp 11:1-4.
- [7] Muraishi H, Samizo M, Sugiyama T (2005) Development of a flexible low-energy rockfall protective fence. Q Rep RTRI 46(3):161-166.
- [8] Barrett, R. K.; Bowen, T. D.; Higgins, J. D.; and Pfeiffer, T., 1991, Rockfall Modeling and the Colorado Rockfall Simulation Program; Version 2.1 Users Manual; Report No. CDOT-DTD-ED3/CSM-89-2B, Colorado Department of Transportation, Denver, CO and Colorado School of Mines, Golden, CO, 164 p.
- [9] Pfeiffer, T. J., 1989, Rockfall Hazard Analysis Using Computer Simulation of Rockfalls; Master of Engineering Report, Colorado School of Mines, Golden, CO, 103 p.
- [10] 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[J]. 土木工程学报,2013, 46(5):122-128.
ZHAO Shichun, YU Zhixiang, WEI Tao, et al. Test study of force mechanism and numerical calculation of safety netting system [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(5):122-128.