

柔性拦截结构中减压环动态力学性能试验研究

齐 欣^{1,2}, 许 浒¹, 余志祥¹, 赵 雷¹, 孟庆成³

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

3. 西南石油大学土木工程与建筑学院, 成都 610500)

摘 要: 减压环是柔性拦截结构中的重要耗能部件, 对结构的能量耗散及过载保护有着重要作用。该文分别开展GS-8002型单减压环和减压环组的拟静力拉伸试验、重物下落动力试验和足尺冲击试验。分析不同试验条件下减压环的变形和受力特征。试验表明: 动荷载作用下, 启动荷载增大, 并联减压环组增幅最大; 减压环的拉力曲线具有明显的脉冲特性, 串联减压环组的脉冲效应更为突出, 且靠近整体系统一侧的减压环变形较大, 靠近固定端一侧的减压环变形较小, 并联减压环组和单减压环的脉冲效应相近。提出考虑动力特性的减压环四折线力学模型, 该模型能够较好的反映减压环的工作性能特点。基于该分析模型, 给出不同试验工况下GS-8002型减压环性能指标的等代关系, 便于实际工程中的设计与应用。

关键词: 柔性拦截结构; 减压环; 试验研究; 力学模型; 等代关系

中图分类号: P642.22; TU761.1+9 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.06.0438

DYNAMIC MECHANICAL PROPERTY STUDY OF BREAK RINGS IN FLEXIBLE PROTECTIVE SYSTEM

QI Xin^{1,2}, XU Hu¹, YU Zhi-xiang¹, ZHAO Lei¹, MENG Qing-cheng³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Break rings are important energy dissipation components in a flexible protective system, which plays a key role in energy dissipation and over-load protection for the system. The single break ring and the break rings groups of GS-8002 are conducted on quasi-static tests, on the dynamic tests based on weights, and on full-scale impact tests. And then the deformation and mechanical characteristics of the break rings in different test conditions are analyzed. It is shown that: under the influence of the dynamic load, the starting force increases, the parallel break rings group had the largest increase. The tensile strength curve of the break rings has obvious pulse characteristics. The series break rings group is more prominent. The deformation of break ring near the side of the whole system is relatively large, and which near the fixed end is small. The pulse characteristics of parallel break rings groups is similar to that of the single. Then a four-line mechanical model of the break ring considering the dynamic characteristics is proposed, which can better reflect the working performance characteristics of break

收稿日期: 2017-06-06; 修改日期: 2017-09-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51678504); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2016K013); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682017CX006)

通讯作者: 余志祥(1976—), 男, 四川人, 副教授, 博士, 主要从事防护结构研究(E-mail: yzxzrq@126.com).

作者简介: 齐 欣(1981—), 女, 辽宁本溪人, 讲师, 博士, 主要从事结构防灾减灾研究(E-mail: qixin_117@126.com);

许 浒(1985—), 男, 江西南昌人, 讲师, 博士, 从事结构抗震和新型防护结构研究(E-mail: xuhu@swjtu.edu.cn);

赵 雷(1990—), 男, 湖北荆州人, 博士后, 从事结构工程相关研究(E-mail: zhaolei@my.swjtu.edu.cn);

孟庆成(1980—), 男, 四川成都人, 博士, 从事结构监测与监测研究(E-mail: cdmengqc_0_0@163.com).

rings. Based on those analysis models, the equivalent relation is developed between the performance indexes of GS-8002 in different test conditions, which is convenient for the design and application in pertinent practical engineering.

Key words: flexible protective system; break ring; test study; mechanical model; equivalent relation

柔性拦截网结构是地质灾害防治中常见的系统之一,由钢丝绳、拦截网片、钢柱以及大量的耗能器组成(图1)。关于系统中耗能器的作用,Muraishi等^[1]对相同配置的防护网结构进行足尺试验,没有设置耗能器的拦截结构的最大拦截能力仅为100 kJ,配置耗能器后,其拦截能量达到了300 kJ。崔廉明^[2]对同一结构进行数值仿真计算,配置了耗能器的系统可大幅度的提高结构的柔性、改善作用部位的性能,并显著提高被动柔性防护网的耗能能力。同时欧洲落石防护技术认可指导(ETAG)^[3]以及我国的防护网结构技术规程^[4-5]中均明确指出在防护网系统中需要设置耗能器。可见,耗能器是防护网结构的不可或缺的部分。



图1 柔性拦截结构的构成

Fig.1 The composition of flexible protective system

耗能器的研究方法以试验为主。Fresno等^[6]采用试验测试了耗能器的耗能能力,并基于数值仿真开展了参数分析。Gentilini等^[7]开展了耗能器试验,给出了耗能器的工作曲线,并进行简化,简化后的模型用于数值仿真分析。Bertrand等^[8]基于试验得到了耗能器的启动力以及极限耗能能力。Lambert等^[9]对不同几何尺寸的耗能器进行了试验,研究了耗能器尺寸对其耗能能力的影响。虽然各国学者均采用了试验进行研究,但试验方法各不相同。

1 耗能器的试验方法

1.1 拟静力拉伸试验

现有的试验研究大多以文献[3]中规定的拟静力拉伸试验为指导。试验时将耗能器一端固定,使用水平或竖直牵引机拉动另一端(图2(a))。采用拉力传感器测量施加的荷载值,位移传感器用于测量耗能

器两端的相对位移,得到耗能器的工作曲线^[6-7]。

1.2 动力拉伸试验

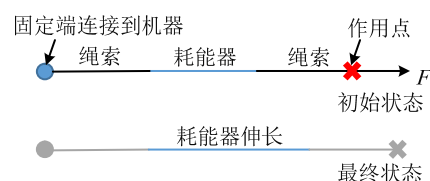
拟静力试验由于拉伸速度有限,与实际的减压环工作情况不尽相同。近几年的实际工程中,耗能器无法正常启动工作的现象频频出现,耗能器的动力拉伸试验逐渐增多,但尚未编入规程规范。试验方法主要为重物下落动力试验、足尺冲击试验两大类。

1) 重物下落动力试验。

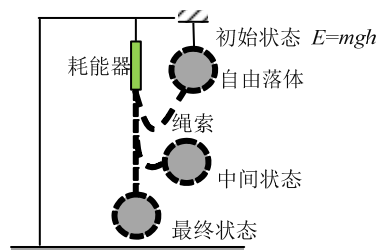
将连接耗能器的钢丝绳一端固定于预设高度,另一端与重物相连,重物自由下落(图2(b)),通过改变重物质量与初始高度控制施加给耗能器的速度,同时通过拉力传感器采集耗能器的拉力^[8-9]。

2) 足尺冲击试验。

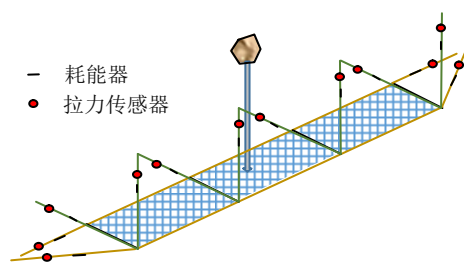
在完整的柔性拦截网冲击试验中,记录每个耗能器的受力大小,并观察其变形情况^[10](图2(c))。



(a) 拟静力拉伸试验



(b) 重物下落动力试验



(c) 足尺冲击试验

图2 耗能器试验方法

Fig.2 Test methods for energy dissipating devices

三种试验方法各有利弊, 目前的研究成果显示, 动力试验中的耗能器工作情况与准静力拉伸时差异较大^[11]。拟静力试验最容易开展, 基于重物的动力拉伸试验考虑了动荷载的作用, 但无法精确测量减压环的位移变化; 足尺的冲击试验能够测试出真实防护网受到冲击时耗能器的变形行为, 最为真实可靠, 但需要有冲击试验场的配合且花费巨大。

2 减压环构成及工作原理

2.1 减压环的构成

目前, 国内外的柔性拦截结构中大量采用的耗能器为减压环(图 3), 其外形呈圆状, 主要构件为钢管和铝套筒, 钢管交叉处用铝管套筒结合, 使用时直接将钢丝绳穿过钢管。

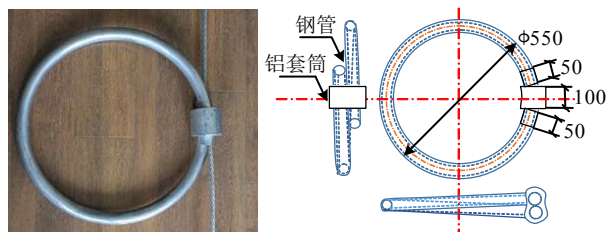


图 3 减压环外形及尺寸

Fig.3 shape and dimensions of brake ring

2.2 减压环的工作原理

减压环工作时, 随着相连钢丝绳的拉力加大, 钢管内的钢丝绳由松弛转为紧绷。当拉力增大到一定程度后, 钢丝绳与钢管之间的摩擦带动钢管的环径逐渐减小, 减压环启动。随着钢管被拉直伸长, 钢丝绳的拉力维持在一个较稳定的拉力范围。当冲

击能量在设计范围内时, 能多次承受冲击从而实现过载保护功能。钢管的拉伸长度约为圆环周长后, 减压环变形达最大值, 减压环退出工作, 钢丝绳的拉力进一步的增大。

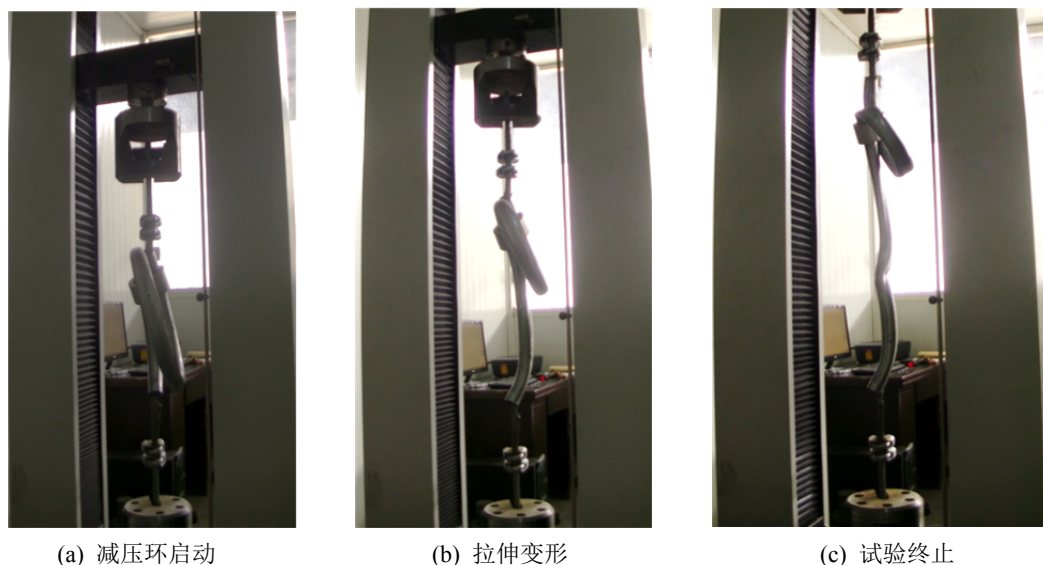
减压环的能量吸收主要来自两个方面: 1) 减压环启动时, 需要克服铝管套筒与钢管之间的摩擦, 该力不仅与两者之间的摩擦系数有关, 而且与套筒对钢管的预紧力有关; 2) 钢管的形变, 通过钢管的变形耗散能量。整体上钢管的环径由大到小, 截面上由圆形转变为椭圆形。

我国的铁路^[4]和公路^[5]规程中对减压环的测试和耗能进行了简单的规定, 但关于减压环的试验研究, 国内仅个别学者开展了拟静力拉伸试验^[12], 动力试验尚属空白。

本文以 GS-8002 型减压环为研究对象, 镀锌钢管为 20 号钢, 屈服强度为 245 MPa, 钢管壁厚 4.2 mm, 其余尺寸见图 3。试验时, 将直径为 22 mm 的钢丝绳穿过减压环。进行单减压环和减压环组的拟静力拉伸试验、重物拉伸动力试验和基于足尺冲击试验。结合 3 种试验条件下该类减压环的受力和变形特点, 分析在动力荷载作用下的力学行为, 为柔性拦截网结构设计及工程应用提供依据。

3 拟静力拉伸试验

试验在拉伸试验机上开展。减压环一端固定于拉力机, 另一端通过上部钢架的移动控制速度, 拉伸速率为 1 mm/s, 共进行 3 组试验。



(a) 减压环启动

(b) 拉伸变形

(c) 试验终止

图 4 拟静力拉伸试验过程

Fig.4 The quasi-static test processes

结合试验过程(图 4)以及试验曲线(图 5)可将拟静力拉伸试验分为以下三个阶段。第一个阶段为荷载施加的初始阶段,拉伸荷载变化很大,位移变化较小。这一阶段尚未克服摩擦力,主要为结构承力,启动力均值约为 43 kN。第二个阶段,拉力足够克服钢管与铝套筒之间的摩擦力,且大于钢管的结构抗力,钢管相对铝套筒滑动。钢管环径逐渐缩小,拉伸位移明显增大,拉力缓慢增大,该阶段刚度明显小于初始阶段。且工作拉力基本保持平稳,工作拉力均值为 50 kN。第三个阶段,当钢管环径缩小到一定程度后,钢管的扭曲变形,增大了铝套筒与钢管之间的接触力,同时钢丝绳的拉伸荷载显著增大,而位移增加缓慢,直到减压环破坏,停止施加荷载。临界的破断力的均值为 60 kN。

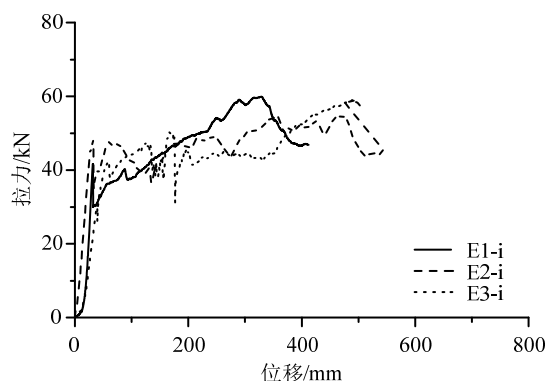


图 5 拟静力拉伸试验曲线

Fig.5 Force-displacement curve of quasi-static test

实际工作中,减压环的拉伸的速率远大于 1 mm/s。拟静力试验结果的有效性有待考量,因此以下开展减压环的动力拉伸试验。

4 动力拉伸试验

4.1 重物下落动力试验

减压环一端通过拉力传感器固定于反力墙,另一端连接落石(图 6(a)),试验中将 0.5 t 的落石提升至距减压环 16 m 的高度,通过释放落石,施加给减压环 25 m/s 的拉伸速度。试验原理如图 2(b)所示。

4.1.1 单减压环试验

试验的过程如图 6(b)~图 6(d)所示,减压环骤然受到重物拉伸后,迅速的拉伸变形,最终完全拉直,整个试验历时约为 0.2 s。共进行了 2 组试验,试验所得的拉力曲线如图 7 所示。

动荷载作用下,使得: 1) 减压环的启动力明显增大,与拟静力试验结果相比启动力从 43 kN 增大到 67 kN,增大了 1.7 倍; 2) 减压环启动后,由于钢管暂时失去铝套筒的套箍作用,短暂的松弛使得拉力形成了一个明显的凹陷,拉力下降,最低点拉力值仅为 24 kN。与启动力相比,降幅已超过 50%。随后拉力快速回升,工作拉力保持在 70 kN 左右。动力荷载作用下,减压环的工作性能与拟静力拉伸明显不同,体现出启动力增大和拉力的脉冲效应。

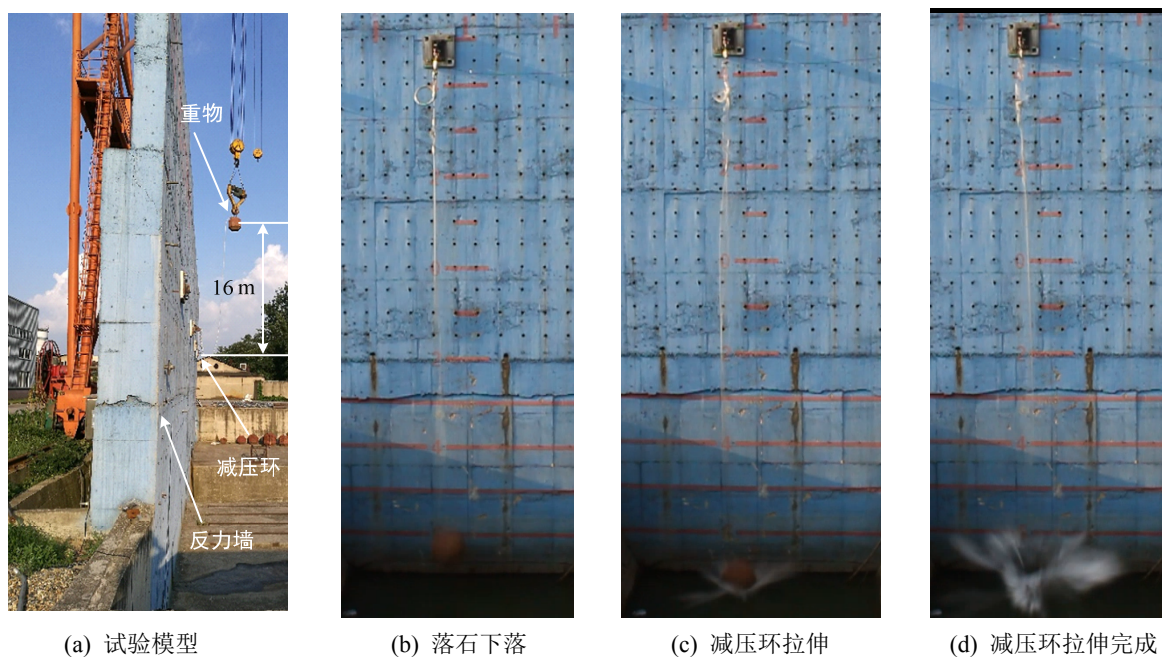


图 6 落石作用动力试验模型及试验过程

Fig.6 Test model of free falling block test and test process

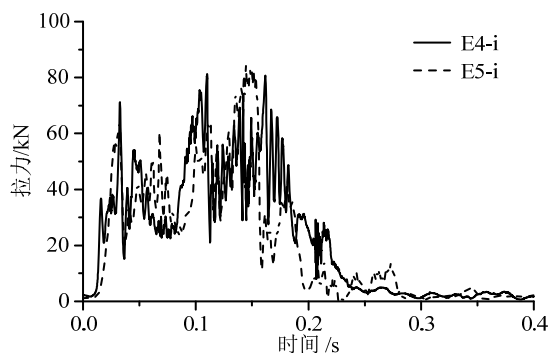


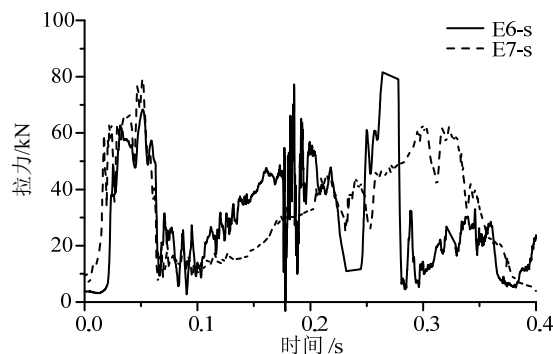
图7 单减压环重物下落拉力曲线

Fig.7 Force-time curve of free falling block test for single break ring

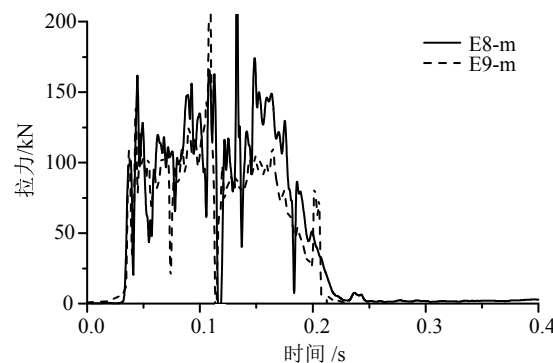
4.1.2 减压环组试验

高能级的防护网中,为增大耗能,采用串联减压环组增大拉伸长度或采用并联减压环组增大启动力。减压环组的设置虽然在实际工程中大量应用,但无论是欧洲的 EATG^[3]还是我国相关规程^[4-5],均未提及减压环组的规定及测试方法,因此对减压环组开展动力拉伸试验,明确其力学特性。共设置 4 组试验,其中 2 组为 2 个减压环串联 E6-s、E7-s, 2 组为 2 个减压环并联 E8-m、E9-m。试验方法与前述一致。试验后的减压环组的变形如图 8 所示,测得的拉力曲线如图 9 所示。

减压环组的拉力曲线的形状与单减压环的拉力曲线基本一致。无论是串联还是并联减压环组,均体现出启动力增大和拉力的脉冲效应。与单减压环的重物拉伸试验的结果对比,串联减压环组的启



(a) 串联



(b) 并联

图9 减压环组重物下落拉力曲线

Fig.9 Force-time curve of free falling block test for break rings groups

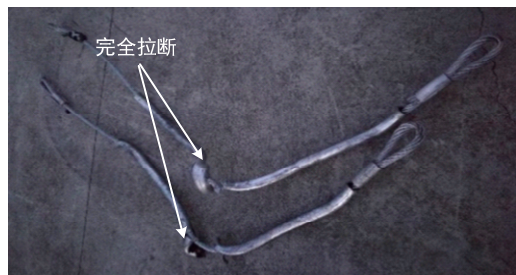
动力略小,平均的启动力约为 65 kN;串联减压环组的可拉伸的位移增大,使得脉冲效应更加明显,达到启动力后,拉力值瞬间降低到 13 kN,且拉力回升较缓。并联减压环组的启动力明显增大,启动力从 67 kN 增大到 150 kN,近似为单减压环启动力的 2 倍。随后拉力降低到 61 kN,降幅达到 60%,略大于单减压环的降幅。试验后从减压环的变形来看,串联减压环组中靠近重物一侧的减压环已完全拉直,而靠近传感器一侧的减压环仍有一定地伸长储备。其原因在于靠近重物一侧的减压环一旦受到重物的拉伸即刻启动进入工作,形成了对后一个减压环的缓冲和保护作用,同时随着串联减压环组的可拉伸长度增加,冲击力作用时间延长至 0.4 s;并联减压环组由于钢丝绳的长度偏差,并联的两个减压环受力不完全一致,但最终均全部拉断。

4.2 足尺冲击试验

以 RXI-2000 被动柔性拦截网结构的足尺冲击试验为基础,考察减压环的工作特性。系统各构件的配置见表 1,试验原理如图 2(c)。试验中将重为 6 t 的落石提升至距网片 33 m,落石自由落体,落石与网片接触时刻速度为 25 m/s,冲击能量为 2000 kJ。



(a) 串联减压环组



(b) 并联减压环组

图8 减压环组重物下落拉伸试验结果

Fig.8 Test results of free falling block test for break rings group

试验模型为 3 跨，每跨跨度为 10 m，钢柱柱高 5 m。每根钢丝绳上设置一个拉力传感器记录拉力历程。通

过足尺冲击试验，测试出真实条件下防护网受到落石冲击时减压环的工作性能，如图 10 所示。

表 1 系统配置

Table 1 System configuration

支撑绳主绳	2Φ22	减压环	GS-8002 串联	环形网	R12/3/300
支撑绳辅绳	1Φ22	减压环	GS-8002 串联	钢柱	HW200×200×8×12
上拉锚绳	1Φ22	减压环	GS-8002 并联		
端支撑绳	1Φ22	减压环	GS-8002 单		

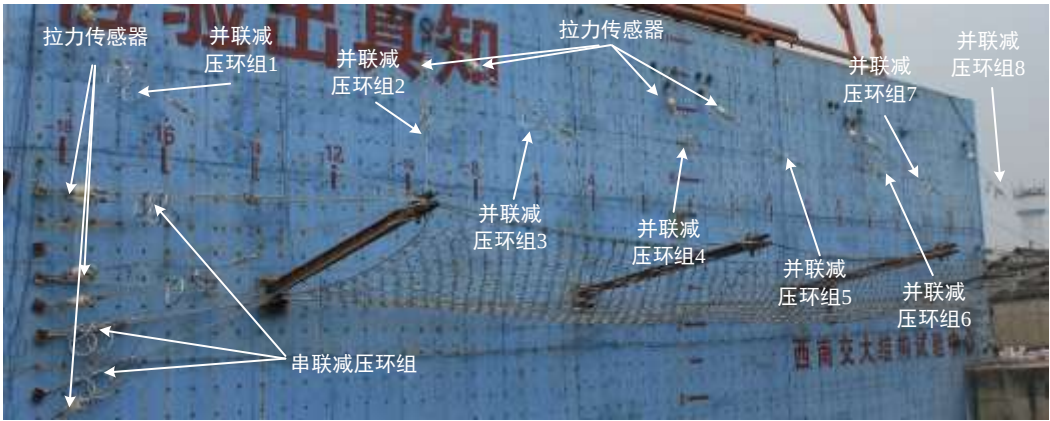
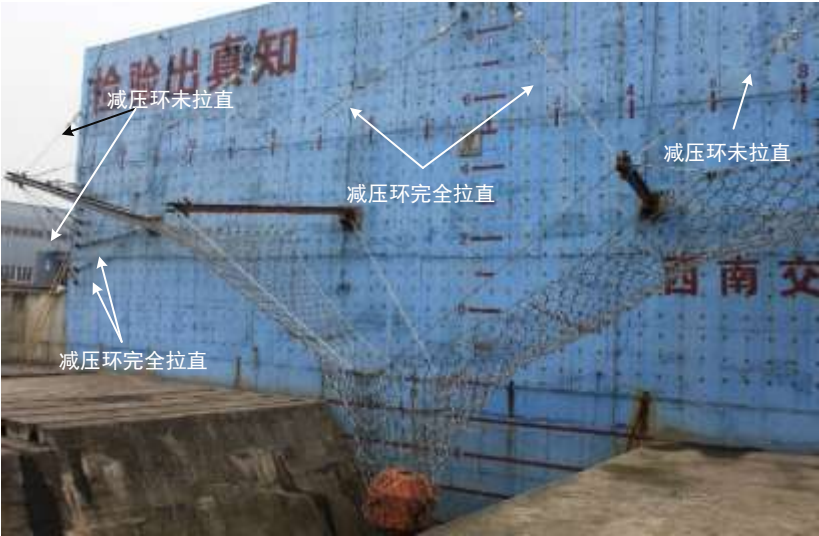


图 10 足尺试验模型及减压环布置图

Fig.10 Full scale test model and the layout of break rings

试验后的系统整体变形如图 11 所示。图 12 给出了试验中测得的并联、串联减压环组的拉力历程曲线。该曲线与重物下落试验曲线形状相似，同样体现启动力增大和拉力的脉冲效应。结合试验结果来看(图 11(b)),位于端支撑绳上的单减压环已启动，但仍有一定的拉伸储备，其启动力约为 67 kN，由于脉冲效应的影响，拉力短暂回落到 50 kN 后迅速回到 60 kN，平稳增长到 75 kN。

串联的减压环组分以下两组情况：1) 辅绳上的串联减压环组，由于辅绳受力较小，试验后减压环尚未完全拉直，减压环仍具有工作能力，启动力约为 50 kN，脉冲作用下拉力回落到 15 kN 后快速回到 50 kN，减压环继续稳定工作，试验结束时拉力稳定在 60 kN。同时可以看出，与主体结构直接相连的减压环已完全拉直，与墙体相连的减压环尚有一定的拉伸富余。2) 主绳的串联减压环组，由于受



(a) 整体变形



(b) 端绳单减压环



(c) 主绳串联减压环



(d) 上拉锚绳并联减压环组 4

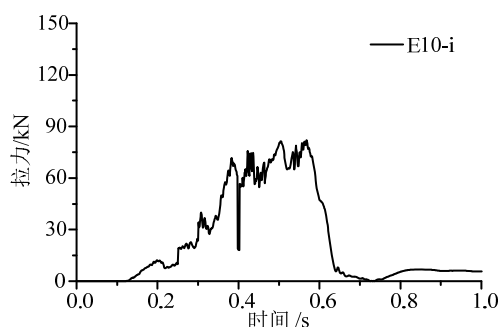
图 11 足尺试验后减压环变形

Fig.11 The deformation of break rings after full scale test

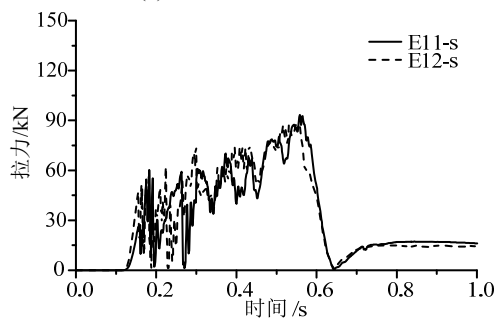
力较大, 试验后减压环已完全拉直(图 11(c)), 但从拉力曲线来看, 启动力约为 50 kN, 脉冲作用下拉拉力回落到 10 kN, 而后经过震荡回到 50 kN, 0.5 s 拉力增大到 90 kN, 拉力曲线未出现明显的峰值突变, 表明主绳的串联减压环组直到试验结束才退出工作。串联减压环的启动力略有降低, 约为单减压环启动力的 85%。

并联减压环组可分为以下三组。1) 中柱外侧上拉锚绳并联减压环组 3、6, 试验后减压环尚未完全拉直, 减压环的耗能仍有一定的储备。其拉力曲线表明, 启动力约为 120 kN, 小幅的回落到 70 kN, 而后的工作拉力基本保持在 110 kN。2) 中柱内侧上拉锚绳并联减压环组 4、5, 该两组减压环已完全拉直(图 11(d)), 启动力仍为 120 kN, 脉冲效应导致拉力的小幅震荡, 随后迅速回到 120 kN, 而后缓慢的增大到 150 kN。0.4 s 该两组减压环工作拉力骤然增大到 300 kN, 表明 0.4 s 后该两组减压环退出工作。减压环退出工作后, 钢丝绳拉力骤然上升。3) 边柱上拉锚绳的并联减压环组 1、2、7、8, 试验后减压环基本保持原状, 变形量很小, 拉力曲线体现出相同的特征, 拉力值持续增大到 130 kN, 仍具有一定的脉冲效应拉力值降低到 50 kN, 而后力回升至 128 kN 随之试验结束, 减压环尚未启动试验已结束。

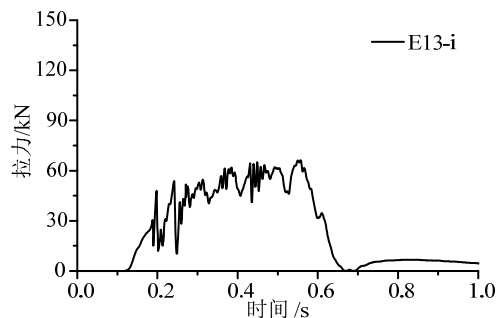
其中并联减压环组 4、5 的相连钢丝绳拉力骤然增大, 为防止过载引起钢丝绳的破断, 建议钢丝绳的破断力应至少为启动力的 2 倍。



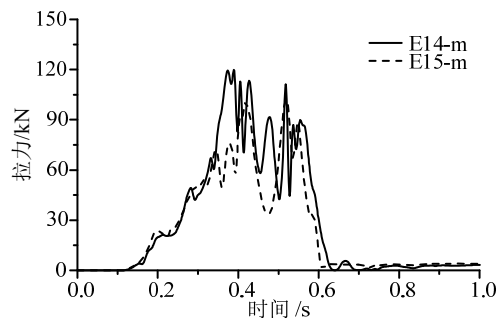
(a) 端支撑绳单减压环



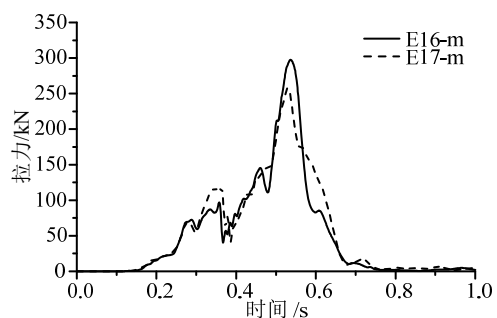
(b) 主支撑绳串联减压环组



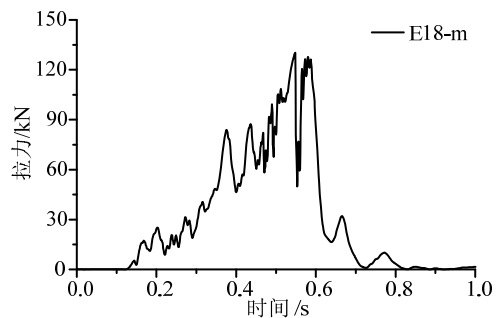
(c) 辅支撑绳串联减压环组



(d) 中柱外侧上拉锚绳并联减压环组 3、6



(e) 中柱内侧上拉锚绳并联减压环组 4、5



(f) 边柱上拉锚绳并联减压环组 8

图 12 足尺试验中减压环组拉力时程曲线

Fig.12 Force-time curve of full scale test for break rings groups

5 试验结果分析

5.1 四段式荷载-位移曲线模型

考虑了减压环脉冲效应后所得的荷载曲线呈 4 段式, 如图 13 所示, 即启动、拉力骤减, 拉力回升以及强化段。

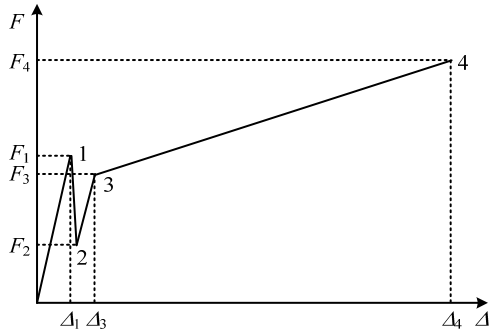


图 13 四段式荷载-位移曲线

Fig.13 Four-stage load-displacement curves

将前述各试验测得启动力 F_1 、回落力 F_2 、工作拉力 F_3 以及拉力的极值 F_4 整合于表 2。其中试验模型中, i 代表单减压环, s 代表串联减压环组, m 代表并联减压环组。试验方法中, Q 代表拟静力拉伸试验, W 代表重物下落拉伸试验, R 代表足尺冲击试验。

表 2 各工况下不同减压环各阶段拉力

Table 2 The forces with different stages under various working conditions

试验模型	F_1/kN	F_2/kN	F_3/kN	F_4/kN	试验方法
E1-i	41	33	44	60	Q
E2-i	47	42	50	58	Q
E3-i	41	39	44	59	Q
E4-i	70	23	68	80	W
E5-i	64	25	62	84	W
E6-s	62	10	45	62	W
E7-s	67	15	49	80	W
E8-m	161	52	125	174	W
E9-m	139	69	102	198	W
E10-i	67	19	72		R
E11-s	60	18	59	68	R
E12-s	58	12	59	86	R
E13-s	54	15	64		R
E14-m	118	84	111		R
E15-m	117	64	107		R
E16-m	92	47	87	142	R
E17-m	99	35	78	101	R
E18-m	129	50	128		R

从表 2 可以看出, 静力试验(E1-i~E3-i)所得的 $F_1 \sim F_4$ 比较接近。基于重物试验以及足尺试验所得的结果(E4~E18), F_2 为最小值, F_4 为最大值, F_1 与 F_3 较为接近。其中, 单减压环以及并联减压环组的 $F_2 \approx 0.5F_1$, $F_4 \approx 1.1F_1$ 。对于串联减压环组, 由于脉冲效应更为明显 $F_2 \approx 0.3F_1$, $F_4 \approx 1.2F_1$ 。

由荷载-位移曲线的四折线模型图所包围的面积积分即为减压环的耗能 E (式(1)), 将各特征力的关系式代入式(1), 可得减压环的耗能 E 与启动力

F_1 和 Δ_4 之间的关系(式(2)), 可以采用该式快速的估算出 GS-8002 型减压环耗能, 为工程设计及应用提供参考。

$$E = \int_0^{\Delta_{\max}} F d\Delta \quad (1)$$

$$E = \begin{cases} 0.965F_1\Delta_4 & (\text{单个或并联减压环组}) \\ 0.996F_1\Delta_4 & (\text{串联减压环组}) \end{cases} \quad (2)$$

5.2 不同试验条件下减压环性能指标等代

静力试验开展较容易, 动力冲击试验需要有试验场配合, 为了将拟静力试验中所得数据有效的应用于实际结构的设计中, 考察不同试验条件下的减压环性能指标的等代关系。以单减压环的静力试验的结果 F_{1-Q} 、 F_{2-Q} 、 F_{3-Q} 、 F_{4-Q} 为基准值。根据表 2, 可得 GS-8002 型减压环不同试验工况的近似关系。

单减压环:

$$\begin{cases} F_{1-R-i} = F_{1-W-i} = 1.6F_{1-Q-i} \\ F_{2-R-i} = F_{2-W-i} = 0.6F_{2-Q-i} \\ F_{3-R-i} = F_{3-W-i} = 1.5F_{3-Q-i} \\ F_{4-R-i} = F_{4-W-i} = 1.3F_{4-Q-i} \end{cases} \quad (3)$$

串联减压环组:

$$\begin{cases} F_{1-R-s} = F_{1-W-s} = 0.9F_{1-W-i} \\ F_{2-R-s} = F_{2-W-s} = 0.9F_{2-W-i} \\ F_{3-R-s} = F_{3-W-s} = 0.9F_{3-W-i} \\ F_{4-R-s} = 0.9F_{4-W-s} = 0.8F_{4-W-i} \end{cases} \quad (4)$$

并联减压环组:

$$\begin{cases} F_{1-R-m} = 0.7F_{1-W-m} = 1.6F_{1-W-i} \\ F_{2-R-m} = F_{2-W-m} = 1.5F_{2-W-i} \\ F_{3-R-m} = 0.9F_{3-W-m} = 1.5F_{3-W-i} \\ F_{4-R-m} = 0.7F_{4-W-m} = 1.6F_{4-W-i} \end{cases} \quad (5)$$

由式(3)~式(5)可以看出, 动荷载作用下 GS-8002 型减压环的各项指标与静力拉伸时均不尽相同。当采用静力拉伸所得的测试数据进行设计与分析时, 容易造成设置不合理, 减压环无法正常启动的现象。因此采用更接近于真实条件的动力试验效果要优于静力试验。当无条件开展动力试验时, 可采用式(3)~式(5)对静力试验所得到的结果进行修正。例如, 基于静力拉伸试验得到了单减压环的 F_{1-Q-i} 、 F_{2-Q-i} 、 F_{3-Q-i} , 实际工程中的单减压环进行设计时, 根据方程组 1, 可得 $F_{1-R-i}=1.6F_{1-Q-i}$, $F_{2-R-i}=0.6F_{2-Q-i}$, $F_{3-R-i}=1.5F_{3-Q-i}$, $F_{4-R-i}=1.3F_{3-Q-i}$; 对于串联减压环组进行设计时, 根据式(3)和式(4), 可得相应的启动力 $F_{1-R-s}=1.4F_{1-Q-i}$, 考虑脉冲效应后 $F_{2-R-s}=0.5F_{2-Q-i}$, $F_{3-R-s}=1.4F_{3-Q-i}$, $F_{4-R-s}=F_{3-Q-i}$; 对

于并联减压环组进行设计时,根据式(3)和式(5),可得相应的启动力 $F_{1-R-m}=2.5F_{1-Q-i}$, 考虑脉冲效应后 $F_{2-R-m}=0.9F_{2-Q-i}$, $F_{3-R-m}=2.2F_{3-Q-i}$, $F_{4-R-m}=2F_{3-Q-i}$ 。

6 结论

本文针对 GS-8002 型减压环,开展了三种不同试验条件下该型号减压环的试验研究,得到了以下的主要结论:

(1) 从拟静力拉伸试验、重物下落动力试验和足尺冲击试验三种试验结果来看,基于重物试验所得的工作曲线脉冲效应最明显,足尺的落石冲击试验所得的减压环的脉冲效应略有降低,拟静力拉伸试验所得的脉冲效应基本可以忽略。串联减压环组的脉冲效应最为明显,且靠近整体系统一侧的减压环变形较大,靠近固定端一侧的减压环变形较小。并联减压环组和单减压环的脉冲效应相近。

(2) 动力荷载作用下,减压环启动力明显增大。与单个减压环静力启动力相比,并联减压环组动力启动力增幅最大,其次为单减压环,串联减压环组的启动力增幅相对较小。

(3) 根据试验结果,提出了考虑脉冲效应的 4 段式减压环力学模型,并给出了不同试验工况下所得结果的等代关系,采用该等代关系,可用于指导 GS-8002 型减压环的实际工程应用。

参考文献:

- [1] Muraishi H, Samizo M, Sugiyama T. Development of a flexible low-energy rockfall protection fence [J]. Quarterly Report of Rtri, 2005, 46(3): 161—166.
- [2] 崔廉明. 被动防护系统中消能件的力学性能研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2014.
Cui Lianming. Study on the mechanical properties of the energy dissipator used in the passive protection system [D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2014. (in Chinese)
- [3] EOTA(2008). Guideline for the European technical approval of falling rock protection kits [S]. Tech. Rep. European Organization for Technical Approvals (ETAG

- 27) February, Brussels, 2008.
- [4] TB/T 3089—2004, 铁路沿线斜坡柔性安全防护网[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
TB/T 3089—2004, The flexible safety net for protection of slope along the line [S]. Beijing: China Railway Publish House, 2004. (in Chinese)
- [5] JT/T 528—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/T 528—2004, Component of flexible system for protecting highway slope [M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [6] Castro-Fresno, Díaz D D C, Nieto J J, et al. Comparative analysis of mechanical tensile tests and the explicit simulation of a brake energy dissipater by FEM [J]. International Journal of Nonlinear Sciences & Numerical Simulation, 2009, 10(8): 1059—1085.
- [7] Gentilini C, Gottardi G, Govoni L, et al. Design of falling rock protection barriers using numerical models [J]. Engineering Structures, 2013, 50(3): 96—106.
- [8] 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(5): 885—900.
- [9] Lambert S, Nicot F. Multi-scale analysis of an innovative flexible rockfall barrier [M]// Rockfall Engineering. John Wiley & Sons, Inc. 2013: 303—342.
- [10] Fulde M, Müller M. Development of a modular brake element for the use in modern rockfall catchment fences [C]. North Conway, United States: 64th Highway Geology Symposium, 2013: 297—314.
- [11] Castanon Jano L, Blanco Fernandez E, Castro Fresno D, et al. Energy dissipating devices in falling rock protection barriers [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2016: 1—17.
- [12] 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 Shichun, Yu Zhixiang, Zhao Lei, et al. Damage mechanism of rockfall barriers under strong impact loading. [J], Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 24—34. (in Chinese)