

环形弹簧阻尼器的滞回性能试验研究*

徐蒙¹ 庄鹏^{1,2,3†} 韩森^{1,2,3}

(1.北京建筑大学 土木与交通工程学院,北京 100044)(2.北京建筑大学 北京未来城市设计高精尖创新中心,北京 100044)
(3.北京建筑大学 工程结构与新材料北京高等学校工程研究中心,北京 100044)

摘要 环形弹簧是一种在机械工程领域中应用广泛的减振部件.将环形弹簧用于土木工程结构的减震控制,设计了一种具有自复位功能的环形弹簧阻尼器(Ring spring damper, RD),通过往复荷载作用下的性能试验,研究了 RD 的滞回性能.首先,提出 RD 的构造设计和工作原理.进而,设计加工了 RD 试件,对其进行了滞回性能试验,研究了位移幅值、加载频率对 RD 试件滞回特性的影响规律.最后,利用 ABAQUS 软件,对 RD 试件的滞回性能进行了数值模拟.研究表明, RD 在往复荷载作用下的滞回性能稳定,且具有良好的耗能与复位特性; RD 的有限元模拟滞回曲线与试验曲线较为接近,表明所建立的有限元模型可较为准确地描述该阻尼器的滞回行为.

关键词 环形弹簧阻尼器, 减震控制, 自复位, 耗能, 滞回性能

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-066

引言

环形弹簧因为其强度较高、方便调节负载、安装空间较小、具有较好的减振和缓冲能力等特点,被广泛应用于航空、船舶等领域^[1,2].近年来,包括环形弹簧在内的多种摩擦元件开始应用于建筑结构的被动耗能减震研究. Filiatrault 等^[3]提出了一种环形弹簧减震器,并基于振动台试验考察了该阻尼器的减震性能. 颜学渊等^[4]通过试验对比分析了环形弹簧用于三维隔震支座的可行性. Khoo 等^[5]采用环形弹簧阻尼器设计了自复位梁柱节点. Djojo 等^[6]将两组串联的环形弹簧应用于摇摆剪力墙中,研究其在对称和非对称荷载作用下的动力响应. Fang 等^[7,8]使用 SMA 作为环形弹簧的外环,形成 SMA 环形弹簧自复位装置,将其用于钢框架结构的自复位连接. Issa 等^[9]利用环形弹簧提出了一种自复位耗能支撑,研究了此新型自复位支撑用于框架结构减震的有效性. 朱琳等^[10]研究了摩擦阻尼器设计参数对单自由度及双自由度体系动力响应的影响机理.

尽管国内外学者对基于环形弹簧的结构减震控制开展了初步的研究,但是,环形弹簧耗能器的

研究基础仍然十分薄弱,特别是缺乏经过试验验证的 RD 有限元模型,从而不利于此阻尼器的工程应用. 鉴于此,本课题组设计加工了一种环形弹簧阻尼器(Ring spring damper, RD)试件,对其进行了往复荷载作用下的滞回性能试验,研究了不同工况下 RD 滞回特性的变化规律.在此基础上,基于 ABAQUS 软件建立了 RD 的三维实体有限元模型,并利用试验数据对该模型的合理性和有效性进行了验证. 本文建立的 RD 有限元模型为该阻尼器的设计和分析奠定了基础.

1 RD 的构造和工作原理

环形弹簧是一种由内外多对带有锥面的钢制圆环装配而成的压缩型弹簧. 环形弹簧的截面及三维示意图如图 1 所示. 该弹簧适用于空间尺寸受限而又需要吸收大量能量,以及需要强力缓冲的场所,因此,其在大型管道吊架、振动部位的支撑和缓冲场合得到广泛的应用. 当承受轴向压力时,环形弹簧各圆环沿圆锥面相向运动产生轴向变形而起到弹簧作用,并通过内外圆环接触面之间的滑动摩擦进行耗能,上述工作状态的示意图如图 2 所示.

2019-08-25 收到第 1 稿,2019-11-26 收到修改稿.

* 北京市自然科学基金资助项目(8182016),北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心资助项目(UDC2016030200),北京建筑大学高校基本科研业务费专项资金资助项目(X18150)

† 通讯作者 E-mail: zhuang_peng@sina.com

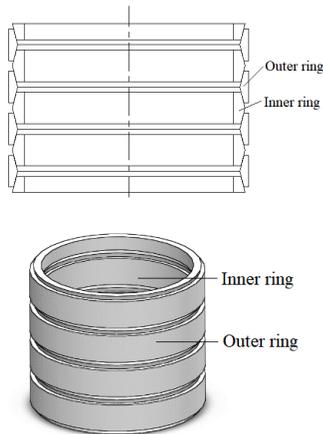


图1 环形弹簧构造示意图

Fig.1 Schematic diagram of configuration of ring spring

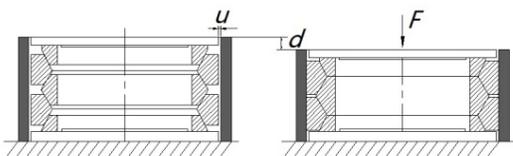


图2 环形弹簧的工作状态

Fig.2 Operation state of ring spring

RD主要由环形弹簧、中心轴、两侧垫板以及外侧套筒组成.其中,环形弹簧及其两侧垫板通过外侧套筒的内部卡环进行定位,而穿过两侧垫板的中心轴与外侧套筒之间留有间隙,以便容纳RD的工作行程.同时,中心轴带有螺母,通过调整螺母,可将中心轴固定在RD内部.在轴力作用下,RD的中心轴可带动垫板实现环形弹簧的压缩.此外,RD外筒顶部设计为可开启式盖板,以便装卸环形弹簧.RD的构造如图3所示.

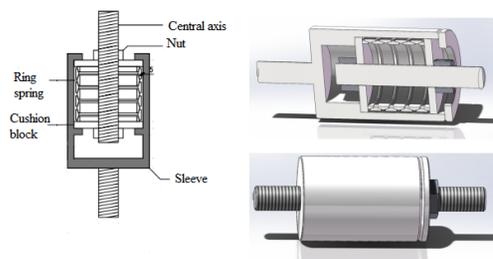


图3 RD的构造示意图

Fig.3 Schematic diagram of configuration of RD

2 环形弹簧的设计参数

环形弹簧的允许应力包括外环允许应力、内环允许应力和平均允许应力^[11].其中,外环允许应力最小.本文研究中,将环形弹簧的外环最大应力 σ_{1max} 作为设计RD的控制参数.文献[11]给出了确

定 σ_{1max} 的流程,为求得该允许应力,首先,需计算环形弹簧的工作荷载 P ,其计算公式为:

$$P = \frac{2\pi EK_c \tan\beta}{n_0 \left(\frac{D_{m1}}{A_1} + \frac{D_{m2}}{A_2} \right)} \quad (1)$$

式中, β 为圆锥面斜角; n_0 为接触面对数; D_{m1} 为环形弹簧外圆环截面中心直径; D_{m2} 为环形弹簧内圆环截面中心直径; A_1 和 A_2 分别为外圆环和内圆环截面积; f 为弹簧的变形量.进而,计算轴向加载时外环的应力 σ_1 ,其表达式为:

$$\sigma_1 = \frac{P}{\pi A_1 K_c} \quad (2)$$

式中, K_c 为计算系数, $K_c = \tan(\beta + \rho)$,其中 ρ 表示摩擦角.得到 σ_1 之后,即可进一步求得外环最大应力,具体的计算公式为:

$$\sigma_{1max} = \sigma_1 \left[1 + \frac{2A_1}{\mu D_0 (h - \delta_0) (1 - \mu \tan\beta)} \right] \quad (3)$$

式中, μ 为泊松比,其值为0.3; δ_0 为自由状态下两相邻外环的间距; D_0 为圆锥接触面平均直径.

3 RD试件设计

为检验RD的滞回特性及自复位性能,设计了用于往复加载试验的RD试件.该阻尼器试件采用了60Si2MnA钢材制作的单组环形弹簧,除了环形弹簧之外的部件均采用Q345钢材加工而成.

RD试件中的环形弹簧由外径为200mm的外环与内径为173.8mm的内环组合而成,外环和内环共有4组,其锥面夹角均为 16° ,各个外环之间的间隙均为10mm.外环的最大厚度和最小厚度分别为10mm和5.5mm,内环的最大厚度和最小厚度分别为9mm和4.5mm.上述环形弹簧的自由高度为168mm,除了顶部与底部的内环高度均为16mm之外,其余内环和外环的高度均为32mm.环形弹簧周边护筒的侧壁厚度为20mm,顶板和底板的厚度分别为20mm和30mm,环形弹簧两端垫板的厚度均为20mm,中心轴的直径为60mm,RD试件的尺寸如图4所示.利用以上环形弹簧的材料参数和几何参数,并将内外环接触面的摩擦角取为 7° ,可计算轴压作用下RD试件的外环最大应力.经计算可知,当RD试件的轴向压缩位移幅值达到20mm时,环形弹簧的外环最大应力为922MPa,其已经超过外环允许应力的90%.基于这一理论计算结果,可将20mm作为控制RD轴向压缩位移的界限值.

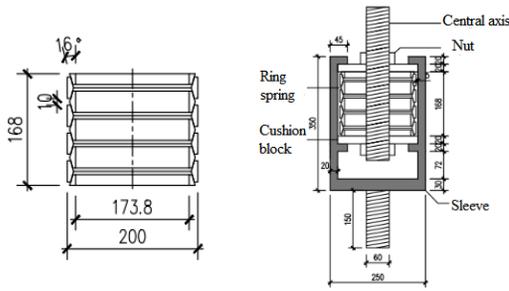


图 4 RD 试件尺寸图 (单位: mm)

Fig.4 Dimensions of RD specimen (unit: mm)

4 试验概况

4.1 试验装置

本试验的研究目的是测试 RD 的滞回性能. 采用输出力为 3000kN 的卧式电液伺服加载装置进行 RD 试件的性能试验研究, 如图 5 所示. 试验开始前, 先将 RD 两端与试验机的两端通过连接板连接, 采用销钉固定. 试验过程中, 由电脑记录试验装置施加的力和位移. 安装于试验装置的 RD 试件实物照片如图 6 所示.

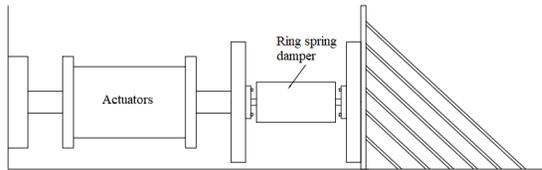


图 5 RD 试件的试验装置图

Fig.5 Experimental device for RD specimen

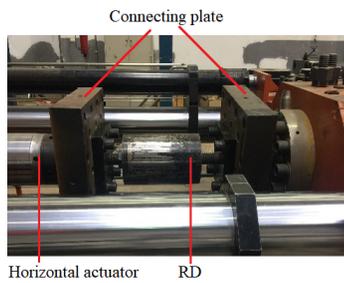


图 6 RD 试件实物照片

Fig.6 Photo of RD specimen

4.2 试验工况

在试验过程中, 基于位移控制对 RD 试件进行轴向往复拉压试验, 采用三角波进行加载, 具体试验工况如下: ①位移幅值分别为 5mm、10mm、15mm 和 20mm, 加载频率均为 0.2Hz; ②加载频率分别为 0.05Hz、0.1Hz、0.25Hz 和 0.5Hz, 位移幅值均为 20mm.

4.3 性能参数

RD 的主要力学性能性能参数包括等效刚度、单位循环耗能、等效阻尼比.

RD 的等效刚度 K_{eq} 按照如下公式进行计算:

$$K_{eq} = \frac{F_{max} - F_{min}}{D_{max} - D_{min}} \quad (4)$$

式中, F_{max} 和 F_{min} 分别表示单次加载中的最大输出力和最小输出力, D_{max} 和 D_{min} 分别表示单次加载中的最大输出位移和最小输出位移.

RD 在一次水平往复荷载作用下所形成的滞回曲线面积为单位循环消耗的能量. 利用上述单位循环耗能和等效刚度可计算等效阻尼比 ζ_{eq} , 即:

$$\zeta_{eq} = \frac{W_d}{2\pi K_{eq} D_{max}^2} \quad (5)$$

式中, W_d 表示单位循环所消耗的能量.

5 试验结果分析

四种位移工况下 RD 试件的滞回曲线如图 7 所示, 可以看出, RD 试件的滞回曲线在正向和反向加载阶段均呈基本对称的三角形, 且在不同位移工况下的运行轨迹基本吻合. 表 1 列出了不同位移幅值下环形弹簧的力学性能参数, 其中包括 RD 试件的等效刚度、单位循环耗能和等效阻尼比. 结果表明, 随着位移幅值的增大, RD 试件等效刚度的变化幅度小于 5%, 等效阻尼的变化范围在 15% 以内, 单位循环耗能随位移幅值增加而逐步增大.

不同加载频率工况下 RD 试件的滞回曲线如图 8 所示. RD 试件在四种加载频率工况下的性能参数数值如表 2 所示. 由试验结果可见, 在保证荷

表 1 不同位移幅值下的 RD 试件性能参数取值

Table 1 Numerical values of performance parameters of RD specimen under various displacement amplitudes

Displacement amplitude (mm)	Equivalent stiffness (kN/mm)	Energy dissipation per cycle (kN·mm)	Equivalent damping ratio ($\times 10^{-2}$)
5	10.33	106.28	6.55
10	10.22	480.75	6.37
15	10.48	1039.98	7.02
20	10.56	1732.94	6.53

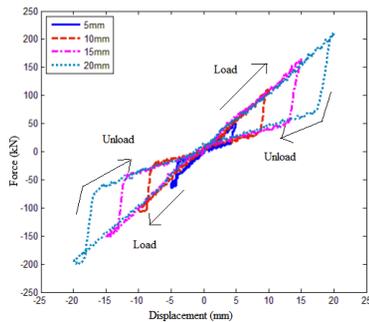


图7 不同位移工况下RD试件的滞回曲线

Fig.7 Hysteresis curves of RD under different displacement cases

载的位移幅值不变的情况下, RD试件在不同加载频率下的滞回曲线均保持为三角形, 且恢复力-位移曲线基本吻合, 随着频率的增大, RD试件的等效刚度略有增加, 单位循环耗能和等效阻尼比均有所减少, 其降低幅度分别为6.88%和15.09%。由此证明, 加载频率对于RD的承载能力影响较小, 但对于RD的耗能能力有一定影响, 较大的加载频率不

利于RD发挥减震功能, 这主要是由于随着加载频率的增加, 环形弹簧的内、外环之间接触面的温度有所上升, 导致摩擦属性的小幅退化, 从而降低了该阻尼器的单位循环耗能水平。总体上, 在本文的加载频率区间内, RD试件的耗能水平并未出现颠覆性的变化。

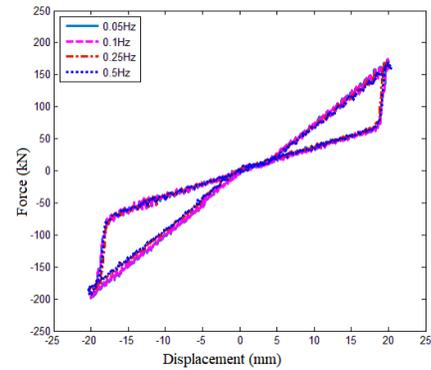


图8 不同加载频率下的RD试件滞回曲线

Fig.8 Hysteresis curves of RD specimen under different loading frequencies

表2 不同加载频率下的RD试件性能参数取值

Table 2 Numerical values of performance parameters of RD specimen under various loading frequencies

Loading frequency (Hz)	Equivalent stiffness (kN/mm)	Energy dissipation per cycle (kN·mm)	Equivalent damping ratio ($\times 10^{-2}$)
0.05	9.98	1810.74	7.22
0.1	10.18	1812.05	7.08
0.25	10.27	1724.51	6.71
0.5	10.13	1687.32	6.63

6 有限元模拟

根据上文中RD试件的设计方案, 采用ABAQUS软件建立了该试件的有限元模型。考虑到RD试件在拉伸和压缩状态下, 其中的环形弹簧始终处于压缩状态, 且在相同的拉压位移幅值下的滞回曲线基本对称, 因此, 有限元模拟时采用简化的分析方式, 仅模拟了RD试件在压缩状态下的加卸载过程, 而拉伸状态下的滞回曲线可由对称性得到。建模时, 环形弹簧内外环的弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 泊松比为0.3, 屈服应力为1000MPa。RD中的钢制部件均采用C3D8R单元。定义内环和外环相互接触属性时, 其法向为硬接触, 切向选用罚函数法, 摩擦系数取为0.12。在设置边界条件时, 固定底部垫板, 并将RD的上部垫板表面与中心加载点设置为耦合约束。上述RD试件的有限元模型如图9所示。

利用上述有限元模型, 进行位移控制下的数值

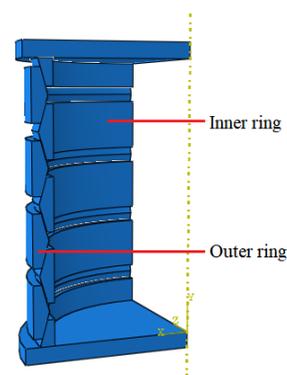


图9 RD试件的有限元模型

Fig.9 Finite element model of RD specimen

模拟, 可得到不同位移幅值下RD试件的恢复力-位移滞回曲线, 其与试验所得滞回曲线的对比如图10所示。由图10可见, 通过有限元模拟得到的滞回曲线与试验所得滞回曲线基本吻合。根据数值模拟所得的滞回曲线, 可进一步计算得到RD试件的性能参数, 其与试验结果的对比如表3所示。可以发现, RD试件的等效刚度的模拟结果与试验结果最

为接近,各个工况下的误差均在 5% 以内;单位循环耗能、等效阻尼比的模拟值与试验值之间的误差相对较大,个别工况的误差接近 15%.导致上述误差的因素包括:①RD 试件内部的环形弹簧与其它部件存在少许间隙,使得环形弹簧在加卸载过程中

发生微小的晃动;②环形弹簧内外环的加工存在一定的误差;③RD 试件端部与加载装置端部的连接存在少量偏差.总体上,基于 ABAQUS 软件的 RD 试件有限元模型可以较好地模拟该阻尼装置的滞回性能.

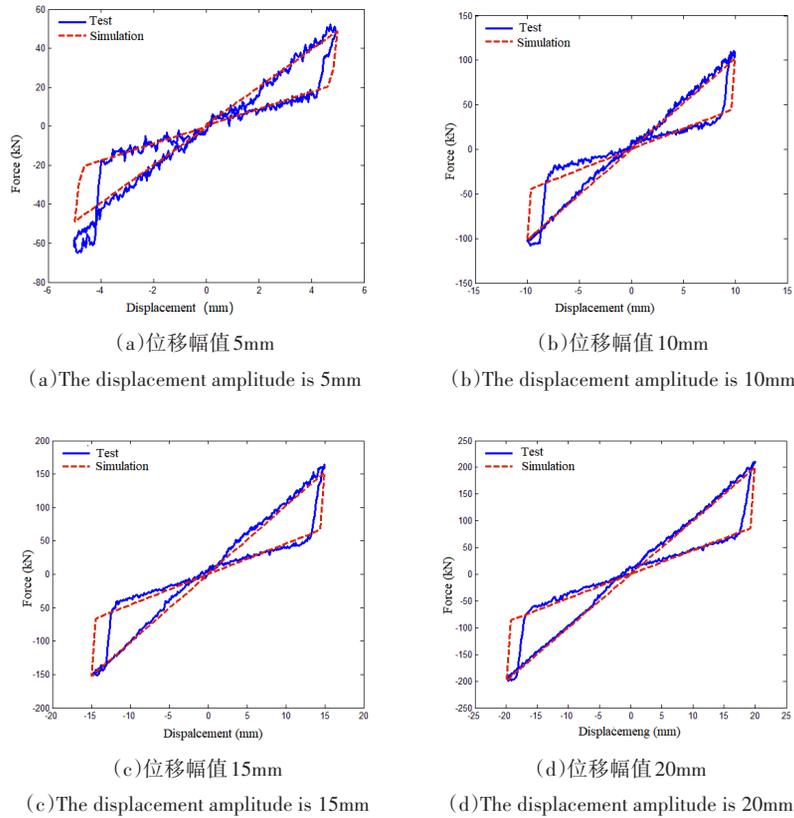


图 10 RD 试件的试验和模拟滞回曲线

Fig.10 Experimental and simulated hysteresis curves of RD specimen

表 3 RD 试件性能参数试验值和模拟值的对比

Table 3 Comparison between experimental and simulated values of performance parameters of RD specimen

Displacement amplitude (mm)	Equivalent stiffness			Energy dissipation per cycle			Equivalent damping ratio		
	(kN/mm)		Error (%)	(kN·mm)		Error (%)	(×10 ⁻²)		Error (%)
	Test	Simulation		Test	Simulation		Test	Simulation	
5	10.33	10.21	1.16	106.28	121.40	14.23	7.22	7.88	9.14
10	10.22	10.20	0.20	480.75	492.68	2.45	7.08	7.69	8.61
15	10.48	10.25	2.19	1039.98	1098.46	11.39	6.71	7.58	12.97
20	10.56	10.26	2.84	1791.24	1893.53	5.71	6.75	7.34	8.74

注:Error=|test value - simulation value| / test value × 100%

7 结论

设计了一种由环形弹簧加工制作而成的环形弹簧耗能器(RD),加工了RD试件,对其进行了滞回性能试验和数值模拟,得到了如下结论:

(1) RD 的滞回曲线在正向和反向加载呈基本

对称的三角形,卸载完毕后无残余位移,具有良好的自复位特性.

(2) 在不同的位移幅值下,RD 试件的等效刚度与等效阻尼比变化较小,单位循环耗能随着位移幅值的增加而显著增加;加载频率对 RD 试件的等效刚度影响较小,单位循环耗能和等效阻尼比随加

载频率的增加有所下降。

(3) 基于ABAQUS软件,建立了RD试件的有限元模型,通过模拟结果与试验结果的对比分析,可以发现该数值模型的精度较好,有限元模拟结果可较为准确地描述RD的滞回性能,可用于后续RD的设计与分析。

参 考 文 献

- 1 魏立新,陈延伟,刘明敏.基于ADAMS的环形弹簧后坐缓冲运动仿真.舰船科学技术,2018,40(3):154~157 (Wei L X, Chen Y W, Liu M M. Simulation of recoiling buffer with annular spring based on ADAMS. *Ship Science and Technology*, 2018, 40 (3): 154~157 (in Chinese))
- 2 薛瑞娟,郭敬彬,王君,等.环形弹簧静刚度与冲击性能有限元分析.舰船科学技术,2018,40(10):67~71 (Xue R J, Guo J B, Wang J, et al. Finite element analysis of static stiffness and shock performance of ring spring. *Ship Science and Technology*, 2018, 40 (10): 67~71 (in Chinese))
- 3 Filiatrault A, Trembley R, Kar R. Performance evaluation of friction ring spring seismic damper. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 17(7): 972~997
- 4 颜学渊,张永山,王焕定,等.三类三维隔震抗倾覆支座力学性能试验研究.振动与冲击,2009,28(10):49~53 (Yan X Y, Zhang Y S, Wang H D, et al. Experimental study on mechanical properties of three kinds of three-dimensional base isolation and overturn-resistance devices. *Journal of Vibration and Shock*. 2009, 28 (10): 49~53 (in Chinese))
- 5 Khoo H, Clifton C, Butterworth J, et al. Experimental study of full-scale self-centering sliding hinge joint connections with friction ring springs. *Journal of Earthquake Engineering*, 2013, 17(7): 972~997
- 6 Djojo G, Clifton C, Henry R, et al. Experimental testing of a double acting ring spring system for use in rocking steel shear walls. In: International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015: 369~370
- 7 Fang C, Yam M C H, Lam A C C, et al. Feasibility study of shape memory alloy ring spring systems for self-centering seismic resisting devices. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24 (7): 075024
- 8 Wang W, Fang C, Yang X, et al. Innovative use of a shape memory alloy ring spring system for self-centering connections. *Engineering structures*, 2017, 153: 503~515
- 9 Issa A S, Alam S. Seismic performance of a novel single and double spring-based piston bracing. *Journal of Structural Engineering*, 2019, 145 (2): 04018261
- 10 朱琳,王琪,张润森.含摩擦阻尼器非光滑振动系统的建模与数值仿真.动力学与控制学报,2017,15(2):172~177 (Zhu L, Wang Q, Zhang R S. Modelling and simulation of the non-smooth vibration systems with friction dampers. *Journal of Dynamic and Control*, 2017, 15 (2): 172~177 (in Chinese))
- 11 秦大同,谢里阳.弹簧设计.北京:化学工业出版社,2013 (Qin D T, Xie L Y. Design of springs. Beijing: Chemical Industry Press, 2013 (in Chinese))

EXPERIMENTAL STUDY ON HYSTERETIC PERFORMANCE OF RING SPRING DAMPER *

Xu Meng¹ Zhuang Peng^{1,2,3†} Han Miao^{1,2,3}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

(2. Beijing University of Civil Engineering and Architecture Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China)

(3. Beijing University of Civil Engineering and Architecture Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Structural Engineering and New Materials, Beijing 100044, China)

Abstract Ring spring is a kind of vibration reduction component that is widely used in mechanical engineering field. In this investigation, the ring spring was introduced to seismic control of civil engineering structures, and a re-centering damper with the ring spring (Ring spring damper, RD) was designed. A set of cyclic loading test was conducted to investigate hysteretic behavior of the RD. Firstly, the configuration and working principle of the RD was described. Furthermore, the RD specimen was designed and fabricated. The influence of displacement amplitude and loading frequency on the hysteretic performance of the RD was studied. Finally, based on ABAQUS software, the hysteresis behavior of the RD specimen was simulated. The results show that the RD has a stable hysteretic performance and provides good energy dissipation and excellent re-centering capacity. Besides, the simulated results closely match the experimental data, indicating the validity of the established finite element model of the RD.

Key words Ring spring damper, seismic control, re-centering, energy dissipation, hysteretic performance

Received 25 August 2019, revised 26 November 2019.

* The project supported by the Beijing Natural Science Foundation (8182016), the Beijing Future Urban Design Innovation Center of Beijing University of Civil Engineering and Architecture (UDC2016030200), the Special Fund for Basic Scientific Research Business Expenses of Beijing University of Civil Engineering and Architecture (X18150)

† Corresponding author E-mail: zhuang_peng@sina.com