

一种新型阻尼器的研究

资道铭¹ 张欣心² 张建经²

(1 柳州东方工程橡胶制品有限公司 广西柳州 545005)

(2 西南交通大学土木学院 四川成都 610031)

摘要:桥梁横向振幅超限一直是困扰铁路桥梁的一个重要问题。在全国铁路全面提速的大环境下,这个问题益发突出,列车速度的提高势必造成更大的桥梁横向位移,进而给行车安全造成不利的影 响。传统的桥梁横向振动控制方法主要是通过改变桥梁自身刚度,达到减小桥梁振动响应的目的,但成本较高,经济性较差。耗能减振思想的提出为桥梁横向振动控制提供了一种新的思路,即用阻尼器加固桥梁。阻尼器的安装能够将输入桥梁的能量转化为阻尼器的滞回能,通过阻尼器的往复加卸载循环,先于结构消耗输入能量。这种方法的优势在于经济节省,易于更换,但目前国内缺乏该类型阻尼器产品及相关的应用研究。本文研究的正是这种新型阻尼器。

关键词:横向振动控制 铅橡胶阻尼器 拉压循环试验 疲劳试验

1 前言

1.1 桥梁车致振动简介

桥梁在车辆荷载的作用下产生三个方向的振动:竖向振动,纵向振动和横向振动。竖向振动是桥梁在重力方向上随时间的往复位移,其特点是振幅较大但危害相对较小;纵向振动是指桥梁在顺桥方向上的振动,这种经常由车辆冲击和地震作用引起,强地震作用能造成桥梁过大的纵向位移,甚至导致桥梁(特别是简支梁桥)上部结构的整体掉落,造成严重的桥梁破坏;桥梁的横向振动是指桥梁在水平方向上,垂直于桥梁走向的振动,这种振动可以由风荷载,地震荷载或者列车荷载引起。超过规范要求的桥梁振动是危害在桥梁上行驶车辆安全的重要因素之一,因此必须严格的控制。

传统的桥梁横向振动控制方法主要是通过改变桥梁自身刚度,达到减小桥梁振动响应的目的,但成本较高,经济性较差。作为一种新兴的减振方法,阻尼器由于具有较好经济性,广阔的适用范围以及便于拆换等优势,目前已经越来越多的被应用于结构的减振设计中^{[1][6]}。阻尼器是一种耗能的结构构件,通过消耗输入结构的能量来减小在动力荷载作用下结构自身的动力响应,从而达到减振的效果。本文研究的是用于铁路桥梁横向振动的新型阻尼器。

1.2 阻尼器的型式

耗能阻尼器主要包括粘滞阻尼器^[2]、摩擦耗能阻尼器^[3]、金属耗能阻尼器^[4]以及粘弹性阻尼器^[5]等四种类型。

2 新型铅橡胶阻尼器的研制

2.1 铅橡胶阻尼器的特点

本新型阻尼器—铅橡胶组合式阻尼器是利用金属铅和粘弹性材料橡胶两者的优点,设计出的一种新型阻尼器。铅橡胶阻尼器的性能非常稳定,基本不受环境的影响,具有较大的阻尼值和初始水平刚度,即使在几毫米的水平位移下也有较高的阻尼参数,是一种理想的耗能阻尼器,能适用于控制幅值较小的位移超限。

铅橡胶阻尼器外形类似于铅芯橡胶隔震垫,但是内部构造和材料性能指标不同,这是因为两者的设计要求不同。铅芯橡胶隔震垫要求能够承受较大的竖向压力,因此需提供较大的竖向刚度,而在水平方向要求有较大的柔度;铅橡胶阻尼器的要求刚好相反,它需要提供较大的水平刚度和阻尼,但是由于其所受竖向压力较小,所以竖向强度和刚度的要求较低。

一般的铅橡胶阻尼器由铅橡胶阻尼器元件,中间板,侧向连接板组成。在剪切作用下,铅和橡胶共同作用,提供饱满的耗能滞回圈,消耗输入结构的能量。铅在工作中能

提供足够的初始刚度,使得阻尼器在微小的变形作用下即能提供相当大的反力。铅还具有体积绝对不变,且能自动恢复的性能(记忆性),在发生塑变形后,能通过材料内部晶体的重新组合,恢复到受力前的形状。橡胶是一种稳定的粘弹性材料,它不仅可以通过自身的剪切滞回变形提供耗能,更因为其性能稳定和耐久性好的优点,能为铅提供足够的外侧保护。

洗巧玲等人^[7]对不同铅芯直径的铅橡胶阻尼器进行了试验研究,得出了铅芯直径,初始刚度,屈服刚度和阻尼比的关系;周云等人对其自行研发的铅橡胶阻尼器进行了力学性能和疲劳性能试验^{[8]-[12]},主要研究了加荷频率、应变幅值和铅芯直径对阻尼器性能的影响以及阻尼器的疲劳性能,得到了与洗巧玲等所做试验的类似结果。

2.2 金属材料铅的基本性能特点^[13]

铅是一种理想的弹塑性材料,在小变形下就可获得良好的耗能能力,具有密度大、熔点低、塑性高、强度低、线膨胀系数大、电阻率高、导热率小、耐腐蚀、润滑能力强等特点。

铅的低刚度及自身的晶体结构特征,使其具有较高的柔性和延展性,因此在变形过程中可以吸收大量的能量,并具有好的变形跟踪能力。铅在变形中会发热、融化、再结晶,铅的熔点低,再结晶温度在室温以下。铅在室温条件下变形,将会同时发生动态恢复,即动态再结晶过程,通过恢复和再结晶过程,应变硬化将消失,铅的组织 and 性能将恢复到变形前的状态。因此,在理论上铅是一种仅有的室温下作塑性循环时不会发生累计疲劳现象的普通金属。铅的物理性质中,高密度、低刚度和高阻尼的结合使其成为减振的极好材料。此外,纯度较高的铅易于得到,荷载的频率、循环次数对其性能影响较小,从而保证了其稳定的力学性能。

2.3 粘弹性材料高阻尼橡胶的特性

橡胶作为一种主要的粘弹性材料,已经被广泛的运用于航空航天、机械和建筑领域,它是一种高分子聚合物,其性质介于粘性液体和弹性固体之间,同时具备流体和弹簧的性能。一方面,

它可以迅速的回复到原来的形状,具有弹性性能,另外一方面具有一定的抗剪能力,却又不像弹簧一样储存能量,而以热能的形式耗散。

2.4 两种材料结合时的特性

铅和橡胶的结合可以发挥两者各自的优点,两种材料结合后的阻尼器,利用铅剪切变形和挤压变形以及橡胶的剪切滞回耗能。其滞回曲线形状依然比较饱满,几乎为一菱形,基本保留了铅的力学特性,而橡胶的加入,不仅提供了粘弹性材料的耗能,更为铅提供了外层保护,增强了阻尼器的耐久性。

2.5 新型铅橡胶阻尼器LRD阻尼器及其配合设计

新式的铅橡胶阻尼器LRD阻尼器是在借鉴Robinson Seismic Ltd生产的200kN PVD阻尼器的基础上(图1(a))设计研发的。

这种新式阻尼器在最终应用到工程之前,经历了多次设计和调整,在最终确定了阻尼器的设计方案后,对其进行了疲劳试验。

阻尼器的设计包括了阻尼器铅芯橡胶元件与配合板的设计。

阻尼器的铅芯橡胶元件如图1(b)所示:

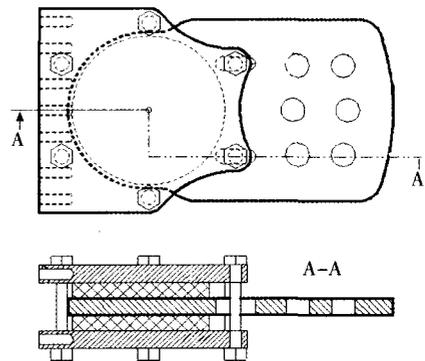


图1(a) PVD阻尼器参考图



图1(b) 阻尼器实图

阻尼器设计中的另外一项任务是设计阻尼器板,使之与铅芯橡胶元件配合。阻尼器配合板的设计参照Robinson公司的方案,采取了类似的配合设计,即与阻尼器配合的板包括一个上盖板,一个下盖板和两个中间板。设计中,首先假定施加在阻尼器上的剪切力为250kN,然后根据机械连接设计原理,螺纹连接设计规则以及钢结构设计原理^{[14][15]},对板及配合的螺栓进行设计。见图2。



图2 已组装完成的阻尼器

3 新型铅橡胶阻尼器的试验

3.1 铅橡胶阻尼器的循环试验

阻尼器的拉压循环试验以及疲劳试验在一台MTS810 500kN的试验机上进行,该试验机见图3(a)。



图3(a) MTS 810 500kN疲劳试验机

图3(b)是控制位移为1.4mm下阻尼器的拉压滞回曲线。

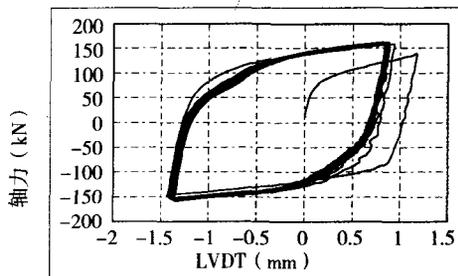


图3(b) 控制位移为1.4mm

由图可见滞回曲线的第一圈与其后各圈之间有明显的错动,通过观察不难发现其位移控制下真实的位移是1mm左右。

为了配合随后进行的阻尼器疲劳试验,进一步改进了夹具,并作出了控制位移为3.0mm的滞回曲线,见图3(c)。

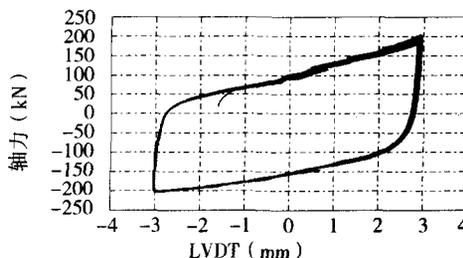


图3(c) 控制位移为3.0mm时阻尼器的滞回曲线

从表1中可以看出,阻尼器的屈服强度稳定在135kN左右,而最大的轴力也随着最大位移的增加而增加,这与试验前的预期是一致的。

3.2 加载频率对试验结果的影响

为了验证加载频率对试验结果的影响,对前期制作的阻尼器做了3次不同频率的试验,试验表明加载频率对阻尼器性质的试验结果影响有

表1 阻尼器循环试验数据表

控制位移 D_c (mm)	屈服强度 f_y (kN)	最大轴力 f_{max} (kN)	屈服位移 D_y (mm)	最大位移 D_{max} (mm)	初始刚度 K_1 (kN/mm)	屈服刚度 K_2 (kN/mm)
0.7	118	N/A	N/A	N/A	1050	24
1.4 (1.0)	133	163/-156	0.17	1.4	1339	28
2.3 (2.0)	134	177/-175	0.18	2.3	1141.6	20
2.7 (2.5)	139	192/-192	0.17	2.7	1250	26
3.0	130	195/-203	0.19	3.0	1461	67.32

限,但加载的频率越高,试件的不稳定性越高,滞回曲线中出现的波动毛刺也越强。见图4(a)(b)和(c)。

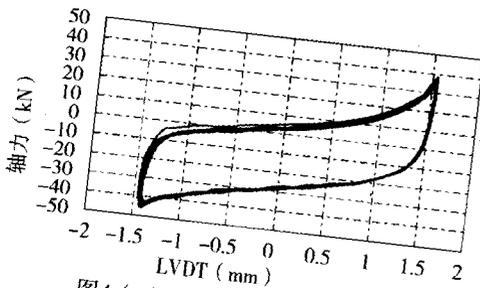


图4(a) 1.5mm, 频率0.3Hz

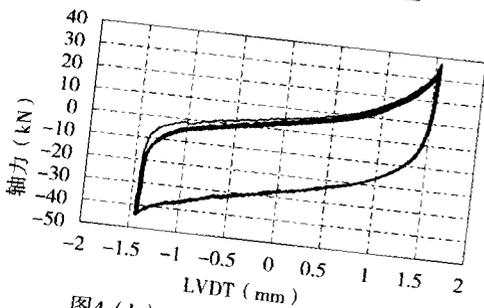


图4(b) 1.5mm, 频率0.6Hz

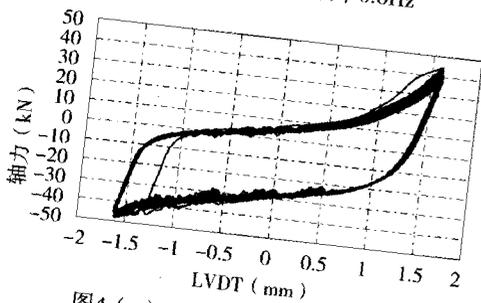


图4(c) 1.5mm, 频率1.0Hz

阻尼器疲劳试验

在实际工程中,阻尼器将被应用于控制桥梁于列车过桥引起横向振幅,因此阻尼器需要长时间往复作用。我们对减振阻尼器按位移方式进行拉压疲劳试验,试验次数:20万次在两台MTS 810 500N疲劳试验机上进行

试验过程

试验采用LVDT位移控制方式,在试验件上D规测量试验件与试验夹具之间的位移,频率定为0.667Hz,加载波形:三角波。试验采用LVDT量,使得COD规测得的变形量在

试验在进行到38886次循环时,试验夹具发生破坏,在更换夹具后继续进行,在进行到74000次左右时试验夹具又发生破坏。在对夹具进行部分重新设计后继续试验,试验情况良好,完成了20万次循环。

3.3.2 试验数据的采集

试验过程中需采集载荷和COD测得的变形量。在第一次夹具破坏前,按要求,应对每个循环进行采集。但是由于采集的数量巨大,对此部分试验,只能提供试验原始采集数据,无法提供试验载荷-变形曲线。在更换夹具破坏后,采集的间隔改为在1~10周之间,采集每周的载荷-变形曲线;在10~100周之间,每隔10周采集一周的载荷-变形曲线;在100~1000周之间,每隔100周采集一周的载荷-变形曲线;在1000~10000周之间,每隔1000周采集一周的载荷-变形曲线;一万周以后,每隔5000周采集最后三周的载荷-变形曲线。

从图5(a)(b)(c)和(d)可以看出,在试验初始阶段,阻尼器的滞回曲线非常稳定,阻尼器在经历了20万次拉压疲劳试验之后,整个曲线还是较为饱满,仍然具有非常大的耗能能力。在10万次以后,出现尖角,并且在20万次的时候,尖角越来越明显。

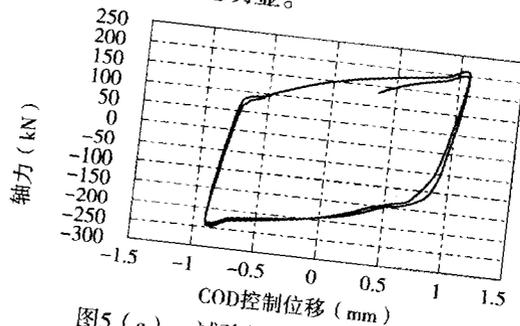


图5(a) 试验前两次循环滞回曲线

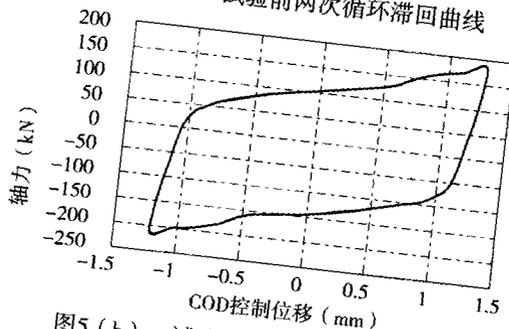


图5(b) 试验第5000周循环滞回曲线

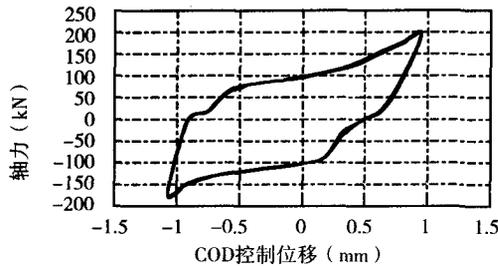


图5 (c) 试验第10万周循环滞回曲线

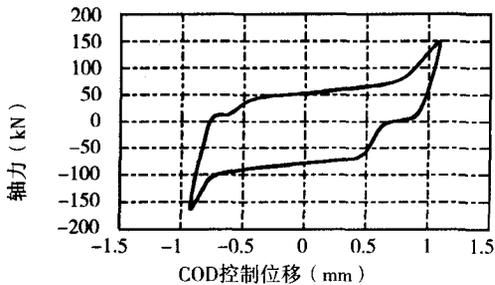


图5 (d) 试验最后两周循环滞回曲线

4 总结

通过各项试验,可得到以下几点结论:

(1) 铅芯橡胶阻尼器能在极小的位移状态下具有饱满的滞回曲线,是一种理想的耗能阻尼器。

(2) 铅芯橡胶阻尼器元件中铅芯大小将直接影响阻尼器的力学性质。

(3) 阻尼器在小位移条件下,试验加载频率对结果影响不大,但是随着频率的增大,阻尼器滞回曲线会出现更多的毛刺;

(4) 阻尼器能够长时间地在拉压作用下工作。

新研发的铅橡胶阻尼器结合了两种材料—铅和橡胶—的特点,具有比较稳定、灵敏的工作能力,能够在适用于铁路横向小位移振动条件下的能量消耗。

参考文献

- [1] 周云. 耗能减振加固技术与设计方法[M]. 北京:科学出版社, 2006
Zhou Yun. The strengthening technology and design method of passive energy dissipation system. Beijing: science Press, 2006(in Chinese)
- [2] 周云. 粘滞阻尼减振结构设计[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2006.11
Zhou Yun. Vibration Reduction Design of structure with Viscous Damper Energy Dissipation. Wuhan: Wuhan University Of Technology Press, 2006(in Chinese)
- [3] 周云. 摩擦耗能减振结构设计[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2006.11
Zhou Yun. Vibration Reduction Design of structure with Friction Energy Dissipation. Wuhan: Wuhan University Of Technology Press, 2006(in Chinese)
- [4] 周云. 金属耗能减振结构设计[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2006.11
Zhou Yun. Vibration Reduction Design of structure with Metal Energy Dissipation. Wuhan: Wuhan University Of Technology Press, 2006(in Chinese)
- [5] 周云. 粘弹性阻尼减振结构设计[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2006.11
Zhou Yun. Vibration Reduction Design of structure with Viscoelastic damper Energy Dissipation. Wuhan: Wuhan University Of Technology Press, 2006(in Chinese)
- [6] Soong T.T, Dargush G.F. Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering[M]; 董平译. 北京:科学出版社, 2005
- [7] 洗巧玲, 周福霖. 铅-橡胶阻尼器的试验研究[J]. 地震工程与工程振动. 2001年12月,第21卷第4期
Xi Qiao-ling, Zhou Fu-lin. Study of the lead-rubber dampers. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, (4)(in Chinese)
- [8] 周云, 徐赵东, 邓雪松, 李良. 组合式铅橡胶复合阻尼器的性能试验研究[J]. 世界地震工程. 2006年6月,16卷2期
Zhou Yun, Xu Zhao-dong, Deng Xue-song, Li Liang. Experimental study on properties of combined lead rubber dampers[M]. World Information on Earthquake Engineering, 2006,(2)
- [9] 刘季, 周云. 结构抗震控制研究与应用状况(上):基础隔震、耗能减振及吸振减振[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1995. 28(4)
Liu Ji, Zhou Yun. State-Of-The Art and State-Of-The Practice in earthquake response control of structures (I). Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1995,(4)
- [10] 周云, 徐彤. 耗能减振技术研究与应用的新进展[J]. 地震工程与工程振动. 1999.19(2)
Zhou Yun, Xu Xing. State-Of-The-Art of research and application on seismic energy dissipation[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999,(2)
- [11] 周云, 徐赵东, 赵鸿铁. 粘弹性阻尼结构的性能. 分析方法及工程应用[J]. 地震工程与工程振动. 1998.18(3)
Zhou Yun, Xu Zhao-dong, Zhao Hong-tie. Study on Behavior, Analytical Methods and Application of Viscoelastic Structure. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998,(3)
- [12] 周云, 刘季. 新型耗能阻尼器的研究与开发[J]. 地震工程与工程振动. 1998.18(1)
Zhou Yun, Liu Ji. Development and study of new energy dissipaters(Dampers)[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998,(1)
- [13] 李松瑞. 铅及铅合金[M]. 长沙:中南大学出版社, 1996
Li Song-de. Lead and lead alloys. Changsha: Central South University of Technology Press, 1996(in Chinese)
- [14] 卜炎编. 螺纹联接设计与计算[M]. 北京:高等教育出版社, 1995.7
Pu Yan. Design and calculation of thread connection. Beijing: Higher Education Press, 1995
- [15] 赵风华, 黄金林. 钢结构设计原理[M]. 北京:高等教育出版社, 2005
Zhao Feng-hua, Huang Jin-lin. The designing principle of steel structure. Beijing: Higher Education Press, 2005