桥梁用液体粘滞阻尼器检测方法探讨

冯亚成　岳迎九　杨少军　雷晓峰
（中铁第一勘察设计院集团有限公司桥隧处　陕西西安　710043）

摘　要:近年来随着减隔震技术在桥梁中的应用日益增多，液体粘滞阻尼器作为一种减隔震措施的重要装置在桥梁工程尤其是大跨特殊桥梁中应用越来越多。国内外阻尼器的生产厂家数量众多，参差不齐，我国目前对于阻尼器质量的检测尚无成熟系统的规范可循。本文以目前世界上较为先进的美国AASHTO中对于锁定装置的规定和欧洲规范EN15129中对速度型阻尼器的规定为基础，结合工程实际应用，探讨了桥梁用液体粘滞阻尼器的相关规定和检测方法，可为设计时桥梁上使用的阻尼器质量控制提供参考。

关键词:减隔震　桥梁　阻尼器　检测方法

1 引言

阻尼器作为一种定量的消能减振产品应用到桥梁工程中，在发生地震特别是罕遇地震时起到对桥梁的保护作用，其重要性不言而喻。性能优异、质量可靠的液体粘滞阻尼器可在地震中有效减小结构的地震响应，保障结构安全，而质量低劣的阻尼器在平时正常使用状态就可能发生漏油等质量事故，地震中不仅起不到设计要求的减隔震作用，很可能改变结构刚度、引起桥梁的扭转附加力等不利后果。因此对于设计者，在设计阶段对于阻尼器的参数规格的设计及业主和施工单位在招标时对于桥梁用粘滞阻尼器质量的控制就显得尤为重要。

2 液体粘滞阻尼器工作原理

液体粘滞阻尼器是一种看上去很像车辆减震器的活塞筒状装置，由高强度结构钢制成，内设硅油，在活塞的往复运动中液体起粘滞作用，耗散地震能量，对结构起到耗能、减震的控制作用。这种内置硅油的速度型阻尼器，性能相对可靠稳定，在国外已经发展成从规范、设计规程到分析计算程序、产品检验的完整的体系[1]

粘滞阻尼器一般由活塞、油缸及节流孔组成，是利用活塞前后压力差使油流过节流孔产生阻尼力的一种减震装置。当阻尼力与相对变形的速度成比例时是线性的，当阻尼力与速度不成比例时，是非线性的。

液体粘滞阻尼器对结构的效用是能够精确计算的，因此产品的选择一定要经过精确的计算分析。目前Maxwell模型是较为常用的计算模型，其一般关系可表达为：

$$F=CV^{\alpha} \qquad (1)$$

式中，F为阻尼力；C为阻尼系数；V为阻尼器的速度；α为阻尼指数，其值范围在0.1~2.0，从抗震角度看，常用值一般在0.2~1.0。



图1　液体粘滞阻尼器在桥梁中的应用

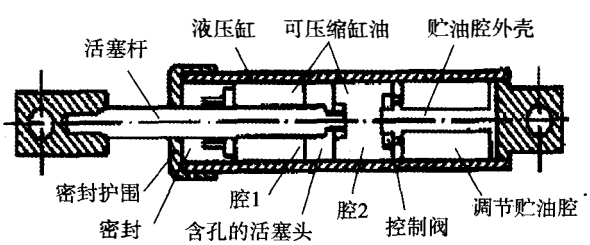


图2　粘滞阻尼器构造示意图

3 阻尼器的发展及应用

3.1 阻尼器的发展

最初的阻尼器选用胶泥状的硅胶“putty”作为缸体内的填充材料，这种阻尼器可作为一次性

减振且没有很高参数要求的缓冲器。但在随后的使用过程中，工程师逐渐发现了一系列的问题：①硅胶的性能受温度变化影响大，在受冷（如-10℃时，硅胶变成很硬的固体，丧失活动性，起不了粘滞作用；当加热时（如30℃）时，硅胶会变得很稀，流动性很大，粘滞性能也会丧失；②导热性差，当局部受热，温度会上升得很快，但其它地方温度却变化不大，使装置内的固液不均。因为胶泥是由橡胶粉和硅液组成，这种局部热量会使硅胶分解成原来的固液两部分，导致了不均匀的物理特性；③长期使用性能差，在最初使用的1~2个受力循环内，硅胶作填充材料的锁定装置，看上去还可以工作，但经过几个循环后，填充材料发热，就会产生硅胶变质和材料分离的现象，其滞回曲线迅速变化，阻尼器处于失控状态。

使用这种硅胶材料，最初生产出的产品不存在漏油问题，但用一段时间后，在冷热环境下油固分离，原来的密封设计不合理，同样会产生漏油。韩国高速铁路上使用的Colebrand Device的产品在安装不久后就发生漏油问题（见图3）。



图3　韩国高铁Colebrand Device的锁定装置使用后漏油

由于硅胶这种材料的温度稳定等性能极差，无法达到高精度的要求。随着硅油及密封材料及方法的研究成功，生产厂家将胶泥改为无色透明的液体硅油材料。相比较硅胶材料，硅油在温度稳定性、材料均质性及导热和使用性能上有很大程度的提升，通过阻尼器内部控制阀的精细设计达到预先设计的阻尼器本构关系。

3.2 桥梁用液体粘滞阻尼器在国内外工程中的应用

阻尼器自问世以来，由于其良好的消能减振作用，得到了诸多研究者的重视，从军事应用很快的扩展到工程应用，并得到了快速的发展。表1是阻尼器在国内外大跨度桥梁上应用的部分工程实例。

表1　阻尼器在国内外应用部分实例

项目	最大阻尼力/kN	最大冲程/mm	桥梁类型
江苏江阴长江大桥	1000	±1000	双塔锚碇式悬索桥主跨385m
舟山西喉门大桥	1000	±1100	双塔锚碇式悬索桥主跨650m
重庆鱼嘴长江大桥	1500	±550	双塔悬索桥主跨616m
乌锡黄河铁路特大桥	2000	±450	7孔108m连续梁
杭州江东大桥2000	2000	±300	双塔自锚式悬索桥主跨260m
美国Richmond桥	1000	±965	悬索桥
Maysville斜拉桥	1300	1300	斜拉桥

4 阻尼器检测方法

阻尼器的检测方法可分为型式检验和出厂检验两大类[2-4]。型式检验又称为例行检验，当新设计的阻尼器出力与已有的已鉴定的阻尼器出力差别超出±20%，或设计速度更高时，需进行型式检验。新设计的阻尼器设计思路和材料与原设计相同时，原先的检验才继续有效。出厂检验用以评定已通过型式检验的产品在出厂时是否具有型式检验中确认的质量，产品经出厂检验合格才可作为合格品交付，可选择几项指标进行检验。

结合相关规范及工程应用的实践经验，阻尼器的检验项目可按下面的检验项目来进行[1-3]

（1）外观检验

每个阻尼器必须经过外观检测，确保符合所有工艺要求。装配零部件标识必须整洁。油漆表面整洁。机加工表面应光滑无瑕疵。所有部件不允许有任何可见的结构损害、损坏、变形或泄漏等有损于设备正常功能运行的现象。

（2）静压测试

在150%的设计最大名义阻尼力对应的计算

内压下持荷3分钟以检测在高压边缘时结构的完整性。阻尼器在整个测试过程中进行加压并密封。记录最初和最终的压力读数。

验收要求：该过程中不允许有任何可见的结构损害、损坏、变形或泄漏。测试过程中压力下降不超过5%。

（3）慢速测试

在一个恒定的绝对速度$v_1 \leqslant 0.1$mm/s的速度下，施加一个从0到d_{th}，再到$-d_{th}$，最后回到0的轴向位移的完全的往复循环，d_{th}可由工程师指定，但不得小于10mm，一般可取最高温度下对应的最大位移。试验应在（23±5）℃下完成。连续的记录轴向位移-时间及力-位移滞回曲线并绘制图形。

验收要求：在整个位移循环过程中，阻尼器产生的力不得超过其设计最大名义阻尼力的10%。

（4）本构关系试验

加载历程应由下面各部分组成：分别施加设计最大速度的1%，25%，50%，75%和100%，对每个速度，施加3个轴向位移的完全往返循环，从0到$+d_{bd}$到$-d_{bd}$，再回到0，d_{bd}为地震设计位移。试验应在最高温度和最低温度之间重复进行，以评估周围环境温度对装置产生反力的影响。如试验结果由第三方实验室保证或相似的装置在相同的温度或更宽的温度范围内试验过则可不进行重复试验。

验收要求：阻尼力特征曲线上的所有试验点均应落在满足本构关系计算的阻尼力的依15%包络范围内。

（5）减震效率试验

加载历程如下：加载5个形如$d_{(t)}=d_0*\sin(2\pi*f_0*t)$简谐完整位移循环，频率$f_0$=0.05~2Hz，控制最大位移在阻尼器最大行程或设备最大速度范围内。

验收要求：每个循环下由本构关系确定的阻尼力应在设计允许值内，耗能能力应大于最小设计值。

（6）密封磨损试验

阻尼器在冲程d_{th}下循环测试10000次。

验收要求：循环测试完成后，阻尼器将按照阻尼系数试验完成测试，仍能满足阻尼系数试验的各项要求。

（7）冲程验证试验

给阻尼器施加一个满冲程的循环。

验收要求：阻尼器至少要能适应设计冲程，公差在1mm内。

（8）缸底过载试验

将阻尼器慢速推进至阻尼器冲程位置（最大位移$\pm d_{bd}$处）后，对阻尼器施加相当于阻尼器设计最大阻尼力的1.5倍的荷载。

验收要求：阻尼器不应出现任何粘合、屈服、永久变形、泄漏或部件屈曲。

（9）阻尼器转动角度试验

将阻尼器与连接件预组装，一端固定，一端连同锚固装置在阻尼器销轴轴线与阻尼轴线构成的平面内从$-\theta$旋转到θ，θ为阻尼器设计的容许旋转角度。

验收要求：阻尼器能灵活转动。

上述检测项目对确保阻尼器的质量性能至关重要，但阻尼器的本构关系试验尤为重要，检测时需严格按照试验规程进行，确保阻尼器按照设计发挥作用。某客运专线大跨铁路桥梁采用两种类型阻尼器，阻尼器最大出力分别为4000kN和1500kN，速度指数均为0.3，设计速度为1m/s，所提阻尼器技术检验项目内容如表2：

型式检验随机抽取两种不同型号的阻尼器各一个，进行表1所列的各项试验；出厂检验每个

表2　某铁路桥型式检验和出厂检验的试验项目

检验项目	外观检测	静压试验	慢速测试	本构关系试验	阻尼系数试验	密封磨损试验	冲程验证试验	缸底过载试验	转动角度试验
型式检验	○*	○*	○*	○*	○*	○*	○*	○*	○*
出厂检验	○*	○*	○*	○*	○*				

备注：带*号处表示在环境温度下进行试验

阻尼器均需进行表1所列试验项目，且两种不同型号的阻尼器随机抽取各一个进行密封磨损试验。

按照国外的惯例，所有的检验项目均应在工程师在场的情况下进行或由工程师认可的独立第三方试验室进行。并且建设方和业主在阻尼器的招标时应根据检测的试验项目评估生产厂商提供的检测试验方案及试验设备的能力，这些对于出力较小的阻尼器较容易满足，从实际工程经验来看，当阻尼器速度大于4000kN且阻尼器的速度大于0.5m/s时，对阻尼器的检测试验设备要求很高，目前国内试验设备的能力略显不足，设计者在选用阻尼器型号时需考虑这方面的影响。

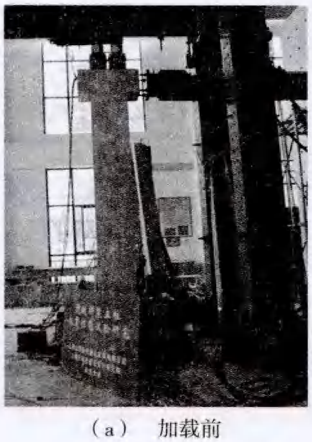
5 结语

阻尼器作为一种减振消能产品在国内工程上得到了广泛应用，但目前我国现行的相关设计、检测规范，都没对阻尼器的质量控制进行明确的说明和规定以方便使用者的查取和业主的决断，达不到对阻尼器质量控制的目的。结合国外规范及某客运专线大跨铁路桥梁所用阻尼器实际工程提出的检验项目，探讨了阻尼器应进行的相关型式检验和出厂检验，可为以后阻尼器的质量控制及检验测试相关规范的建立提供参考。

参考文献

[1] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. 高烈度地震区大跨桥梁抗震关键技术研究[R]. 西安院中铁第一勘察设计院集团有限公司，2014,3.
[2] UNIEN15129，Anti-seismicdevices，Novemeber，2009.
[3] AASHTOLRFDBridgeConstructionSpecifications，Section32-ShockTransmissionUnits，Interim，2002.
[4] 马良喆，陈永祁. 江阴长江大桥用液体粘滞阻尼器的测试鉴定和结果初分析[J]. 建筑结构，2007，37（增刊）：31-34.

（上接第17页）



（a） 加载前



（b） 加载后

图8 试件实际加载图及加载变形后的图





图9 试件的破坏形态

试验结果表明，采用套筒（Coupler）、波纹管（Duct）预制拼装连接构造的桥墩与传统现浇混凝土桥墩相比，具有相近的抗震性能，可满足预期抗震性能的要求，有粘结预应力筋连接预制拼装桥墩具有现浇混凝土桥墩相近的变形能力，但耗能能力较弱。此外，通过计算分析、连接装置试验、整批试件的制作和运输过程的研究表明，套筒（Coupler）和波纹管（Duct）两种预制拼装连接方式，从立柱总体受力、构造连接、抗震性能和整个施工工艺细节可以满足当前设计和施工的要求，可用于工程实践；

4 结论

全预制化桥梁施工技术，不仅能很好的控制工程质量，而且能加快施工速度、减少现场污染，同时也符合低碳化、和谐社会的发展要求，将是一套高效、低碳、环保的桥梁建造技术。全预制化桥梁施工技术的提出，将为全行业低碳化的推广打下坚实的基础。

参考文献

[1] 周良. 城市高架桥设计施工技术及工程实例[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.
[2] 李国平. 全预制混凝土桥梁技术概论[C]. 第十八届全国桥梁学术会议论文集. 2008.
[3] Walter, P.J. and Muller, J.M., Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges [M]. 1982: Wiley Interscience publication.
[4] 裘伯永，盛兴旺. 桥梁工程[M]. 北京：中国铁道出版社，2001.
[5] 赵霞. 预制节段体外预应力混凝土梁桥设计中有关问题的研究[D]. 武汉理工大学，2006
[6] 成昆铁路技术总结委员会. 成昆铁路[M]. 北京：人民铁道出版社，1980.