

大跨连续梁黏滞阻尼器的失效影响分析

江 鹏

(四川交投设计咨询研究院有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘 要: 近年来,黏滞阻尼器广泛应用于高烈度地区大跨桥梁的减震设计中,但其平均寿命远小于桥梁结构的设计使用年限,在桥梁全寿命周期内,来不及检测或未被发现的失效的黏滞阻尼器可能仍在使用,给桥梁抗震带来隐患。结合某新建高速铁路大跨连续梁,对黏滞阻尼器失效的多种工况进行了有限元分析,得出了不同工况下的墩顶剪力及墩梁相对位移。分析认为:全部或单个阻尼器变为类似刚体或全部阻尼器完全失去阻尼作用,将对连续梁结构安全造成严重影响,应在阻尼器的设计、制造、安装和使用等过程中避免发生;单个阻尼器的阻尼折减或失去阻尼作用,不会对连续梁抗震产生较大影响。

关键词: 桥梁;失效影响;数值计算;黏滞阻尼器;大跨连续梁;抗震

中图分类号: U448.21

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0308-04

Analysis on Failure Effects of Viscous Dampers for Long-span Continuous Beams

JIANG Peng

(Sichuan Jiaotou Design Consulting Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: In recent years, viscous dampers have been widely used in the seismic design of long-span bridges in high seismic intensity areas, but the average service life of viscous dampers is far less than the design service life of bridge structures. In the whole life cycle of the bridge, the failed viscous dampers that are not detected in time or undiscovered may still be in use, which will cause a hidden danger to the earthquake resistance of the bridge. The finite element analysis is carried out for a long-span continuous beam of a new high-speed railway under various failure conditions of viscous dampers, and the shear force at the top of the pier and the relative displacement between the pier and the beam under different working conditions are obtained. The analysis is considered that all dampers or single damper becoming a similar rigid body or all dampers completely losing damping effect will seriously affect the safety of continuous beam structures, which should be avoided during the processes of design, manufacture, installation and use of the dampers. The damping reduction or loss of damping effect of a single damper will not have a significant impact on the seismic resistance of continuous beams.

Keywords: bridge; failure effects; numerical calculation; viscous dampers; long-span continuous bridge; seismic resistance

0 引 言

高烈度地区大跨桥梁减隔震的设计目标一般是:在合理控制墩梁相对位移的条件下减少墩顶所受水平力。目前,工程中采用的常用方法有设置柔性支撑装置、设置阻尼装置^[1-2],其中,采用液体黏滞阻尼器的方法广泛应用于近几年的大跨铁路桥梁抗震设计中,如宝兰客专、包银高铁、天津至秦皇岛客

专^[3]等工程。

液体黏滞阻尼器具有减震功能,早期广泛应用于工业、制造业,而后逐步应用于工程领域。大量学者集中研究了黏滞阻尼器的优越性及其相关控制技术^[4-10],少有学者关注它可能导致的新问题^[11-15]。文献[11]是国内较早关注阻尼器减振失效的文献,该文献所涉及的阻尼器主要应用于航空领域。后续有学者分析了结构阻尼器的可靠性^[12]、管道阻尼器的失效形式^[13]等,提出了阻尼器对结构可能的负面影响^[14]。文献[15]关注了桥梁用阻尼器的耐久性问题,对阻尼器的技术发展、检测监测、质量控制进行了深入分析。文献[16]从速度指数、密封性、结构设

收稿日期: 2025-01-26

基金项目: 中铁第一勘察设计院集团有限公司计算机软件开发项目(2021RJ21)

作者简介: 江鹏(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

计等角度出发,探索开发新型耐久型黏滞阻尼器。

综上,既有文献均未从结构安全的角度分析阻尼器失效的工况及其影响。本文依托高烈度地区大跨铁路连续梁的抗震设计项目,分析了多种阻尼器失效工况条件下的结构安全,阐述了阻尼器设计、制造、安装和使用等过程中应该避免的失误,对黏滞阻尼器在桥梁抗震中的应用具有一定指导意义。

1 引发阻尼器失效的潜在因素

早期,黏滞阻尼器缸内填充物采用硅胶(胶泥)。由于高寒高温等极端环境作用,填充物的物理性质发生改变。其一,填充物可能在低温下变硬,丧失活性,阻尼器起不了黏滞作用,墩梁间形成刚性连接;其二,填充物可能在高温下变稀,流动性增加,阻尼系数变小,不同桥墩的地震水平力分布产生变化。

目前,黏滞阻尼器缸内填充物广泛采用硅油。阻尼器漏油(渗油)是文献报道较多的失效方式^[14]。在结构服役寿命周期内,黏滞阻尼器耐久性不足,存在性能减退或逐步失效的可能性。阻尼器缸筒锈蚀、意外机械损伤、材料疲劳性能不达标等瑕疵可能使阻尼介质泄漏,空气灌入阻尼器缸内,地震来临时,缸内往复压缩气油混合物,阻尼器部分或完全失去阻尼作用。

此外,黏滞阻尼器可能发生多种较小概率的失效方式。安装中违规操作,如采用在动力设备中禁止的焊接技术、安装误差超过容许值等,导致阻尼器失效。强震发生后,一种可能是前几个压缩循环阻尼器正常使用,阻尼器散耗动能,动能转换为填充材料内能,温度快速上升,填充物的物理指标可能迅速变化,阻尼器失控;另一种可能是非金属密封材料在高温高压下软化,最终导致漏油。大震下,阻尼器中部或端部出现弯折变形、活塞杆锁死、连接埋件破坏等情况,导致阻尼器未能如期发挥作用。

2 黏滞阻尼器失效的工况分类

黏滞阻尼器失效大致可假定为3种情况:阻尼器变为类似刚体、阻尼器部分失去阻尼作用、无阻尼。本文将模拟这3类情况对结构造成的影响,其中阻尼器部分失去阻尼作用的情况假定为按折减50%的阻尼考虑。实际工程中,一座连续梁桥一般包含多个黏滞阻尼器,且一般为同一厂家产品,其原材料、工艺流程、制造水平均相同,使用中的阻尼器所处自

然环境接近,系统性的质量缺陷可假定为阻尼器同时失效,偶发情况可假定为某单个阻尼器失效。本文将模拟单个阻尼器失效、阻尼器同时全部失效这两大类情况。综上,本文整理出9种失效工况(见表1)。

表1 连续梁内黏滞阻尼器失效工况分类及命名

失效位置	失效类型		
	变为刚体	失去50% 阻尼作用	完全失去 阻尼作用
同时全部失效	工况刚-全	工况半-全	工况活-全
主墩单个失效	工况刚-主	工况半-主	工况活-主
边墩单个失效	工况刚-边	工况半-边	工况活-边

3 工程背景

该桥为某新建高速铁路线路跨越既有高速公路而设,桥梁为80 m+128 m+80 m预应力混凝土连续箱梁,大、小里程端分别接24、32 m的简支梁桥,双线箱梁为单箱直腹板变截面箱梁。三跨连续梁主墩墩高8.5~9 m,边墩墩高21 m。墩身采用圆端形实体桥墩。主、边墩基础均采用钻孔摩擦桩基础。

根据桥址处地质资料,桥位处地层主要为第四系全新统人工堆积层、冲积层,第四系覆盖层较厚,未发现地质构造发育。土质从松散到密实,层序稳定。工点区不良地质主要为地震液化。桥址处的地震基本烈度为8度,地震动峰值加速度为0.20g,反应谱特征周期为0.4 s。

4 数值模拟

主桥上、下部结构均采用空间梁单元建立有限元模型,其中,二期恒载、边墩支墩、两侧简支梁的作用考虑为质量附属于节点上,在建立质量矩阵时将这些荷载转化成质量。桥梁支座通过耦合作用实现,不考虑滑动支座摩擦力对抗震的影响,罕遇地震作用下,主墩固定支座按剪断处理。桥墩考虑为弹性体,不考虑其塑性发展。承台、桩、土的相互作用简化为承台底的节点弹性支撑,根据实际桩基布置及地质资料计算每个基础对应的节点弹性支撑的6个自由度的约束刚度。黏滞阻尼器采用黏性体模拟,其力学本构为 $F = CV^\alpha$,其中: F 为阻尼力, C 为阻尼系数, V 为活塞与缸筒之间的相对运动速度, α 为速度指数。阻尼器参数见表2。连续梁每个主墩布置4个黏滞阻尼器,每个边墩布置2个黏滞阻尼器。黏滞阻尼器轴线与连续梁纵桥向交角均为20°。

表2 黏滞阻尼器参数

名称	主墩	边墩
阻尼系数/[kN·(m·s ⁻¹) ^{-0.3}]	4 000	1 500
速度指数	0.3	0.3
额定阻尼力/kN	4 000	1 500
阻尼力安全系数	1.5	1.5
额定最大行程/mm	±350	±350
使用温度/℃	-25 ~ 49	-25 ~ 49
阻尼器最大外径/mm	476	267
阻尼器行程中点销轴中心距/mm	3 016	2 565

5 分析结果

本文采用非线性直接积分法计算不同地震波下连续梁桥的墩梁时变相对顺桥向位移、墩顶时变顺桥向水平力作用,分析时间步长设定为 0.01 s,各振型阻尼比均假定为 0.05,地震波选取两条典型过去强震记录及一条人工波,并按现行铁路规范 8 度(0.2g)下罕遇地震的要求对真实地震波峰值进行放大或折减调整。主墩、边墩在不同地震波下的墩顶水平力及墩梁相对位移的时变最大值与正常工作条件下的时变最大值比值见表 3、表 4。

表3 主墩在阻尼器失效条件下与正常条件下的指标最大值比值

工况	地震波	效应指标	黏滞阻尼器失效类型		
			变为刚体	失去 50% 阻尼作用	完全失去阻尼作用
同时全部失效	人工波	水平力	7.260	0.555	0.150
		位移	—	1.432	超限
	Elc 波	水平力	6.380	0.635	0.150
		位移	—	1.938	超限
	s_m 波	水平力	7.935	0.650	0.150
		位移	—	1.156	超限
主墩单个失效	人工波	水平力	3.905	0.945	0.895
		位移	—	0.991	1.006
	Elc 波	水平力	5.760	1.110	1.040
		位移	—	1.073	1.142
	s_m 波	水平力	3.910	0.960	0.920
		位移	—	1.039	1.060
边墩单个失效	人工波	水平力	1.055	1.000	1.010
		位移	—	1.014	1.046
	Elc 波	水平力	1.050	1.180	1.180
		位移	—	1.081	1.151
	s_m 波	水平力	1.075	1.010	1.015
		位移	—	1.039	1.050

结果显示:当全部阻尼器变为类似刚体而失效时,主墩与边墩所受水平力均显著增加,主墩所受水平力是阻尼器正常工作状态的 6~8 倍,边墩则为 1~2 倍;当单个桥墩阻尼器变为类似刚体而失效时,同样会使失效阻尼器对应的桥墩的水平力相应增加,主

表4 边墩在阻尼器失效条件下与正常条件下的指标最大值比值

工况	地震波	效应指标	黏滞阻尼器失效类型		
			变刚体	失去 50% 阻尼作用	完全失去阻尼作用
同时全部失效	人工波	水平力	1.950	1.195	0.055
		位移	—	1.432	超限
	Elc 波	水平力	1.935	1.200	0.055
		位移	—	1.938	超限
	s_m 波	水平力	1.590	1.080	0.055
		位移	—	1.156	超限
主墩单个失效	人工波	水平力	1.140	0.990	0.990
		位移	—	0.991	1.006
	Elc 波	水平力	1.455	1.100	1.100
		位移	—	1.073	1.142
	s_m 波	水平力	1.075	1.120	1.115
		位移	—	1.039	1.060
边墩单个失效	人工波	水平力	1.930	1.060	1.120
		位移	—	1.014	1.046
	Elc 波	水平力	1.460	1.140	1.160
		位移	—	1.081	1.151
	s_m 波	水平力	1.485	1.105	1.090
		位移	—	1.039	1.050

墩所受水平力为正常条件下的 4~8 倍,边墩为正常条件下的 1~2 倍。

当全部阻尼器失去 50% 阻尼作用时,主墩所受水平力显著降低,边墩所受水平力略有增加,梁墩相对位移则增加 1~2 倍;当单个阻尼器失去 50% 阻尼作用时,各墩的水平力和梁墩相对位移有增有减,但变化幅度不大。

当全部阻尼器完全失去阻尼作用时,桥墩所受水平力锐减,但梁墩间完全失去相对水平约束;当个别阻尼器完全失去阻尼作用时,各墩的水平力和梁墩相对位移变化均处于可控范围。

6 结 语

阻尼器变为类似刚体而失效,往往造成墩梁相对固结,全部或单个桥墩水平受力急剧增加,桥墩可能在地震作用下超出其设计承载力,进入塑性状态甚至破坏,造成严重的后果。当全部阻尼器完全失去阻尼作用时,梁墩间无水平约束,梁体将直接撞击防落梁装置,由于实际地震作用的不规则性,梁体可能扭转变形,甚至撞坏防落梁混凝土而落梁,同样造成严重后果。这两大类情况应当在阻尼器的设计、制造、安装和使用等过程中完全避免。

当阻尼器失去 50% 阻尼作用或单个阻尼器完全失去阻尼作用时,梁墩相对位移有增有减,如果设计

中考虑了足够冗余量,则对桥梁安全无影响。即使梁墩相对位移增加且超越设计限值,但由于超限较小,可能造成桥面伸缩装置破坏,在防落梁装置约束下,桥梁保证安全的概率较高。

图 1 展示了不同原因可能造成的阻尼器失效工况及其对应的后果严重程度。

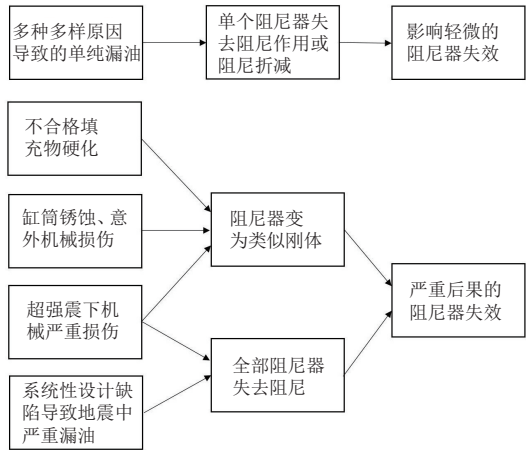


图 1 失效原因、失效工况及后果严重程度的逻辑关系图

单个阻尼器由于密封材料的损耗或老化等原因发生单纯性漏油的概率较高,但这对结构的安全影响并不大。不合格填充物的硬化、缸筒锈蚀、机械变形损伤以及系统性设计缺陷等则可能造成严重后果,需要着力避免。一方面,我们应该从设计、制造的源头保证阻尼器缸筒材料的耐久性、机械强度的可靠性、填充物的稳定性等,规避严重后果发生的可能性;另一方面,也应该注重阻尼器使用中的定期检测监测,及时处理或更换有缺陷的阻尼器,使阻尼器在桥梁抗震中发挥其设计作用。

参考文献:

[1] 范立础,王志强.桥梁减隔震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.

[2] 陈永祁.桥梁工程液体黏滞阻尼器设计与施工[M].北京:中国铁道出版社,2012.

[3] 陈彬.阻尼器在客专大跨度连续梁中的运用[J].上海铁道科技,2016(4):114-116.

[4] 向文腾.调谐惯质阻尼器的动力性能及对连续梁桥减震性能研究[D].北京:北京交通大学,2016.

[5] 李健宁,虞庐松.液体粘滞阻尼器配合双曲面球型支座在大跨连续梁桥中的减隔震研究[J].兰州交通大学学报,2016,35(1):94-99.

[6] 夏修身,崔靛波,陈兴冲,等.长联大跨连续梁桥隔震技术应用研究[J].桥梁建设,2015,45(4):39-45.

[7] 张常勇,王志英,王宏博.长联大跨连续钢桁梁桥减隔震设计研究[J].公路交通科技,2015,32(8):80-88.

[8] 狄生奎,刘军泉,王周峰,等.基于粘滞阻尼器的连续梁桥在地震反应中的响应分析[J].甘肃科学学报,2014,26(5):50-54.

[9] 宋子威,蔡小培.粘滞性阻尼器在高速铁路长联大跨连续梁中的应用[J].清华大学学报(自然科学版),2012,52(8):1102-1105.

[10] 栗恒斌.粘滞阻尼器在长联大跨连续梁桥抗震设计中的应用[J].国防交通工程与技术,2010,8(3):52-54.

[11] 陈照波,蒋书运,夏松波,等.挤压油膜阻尼器的减振失效分析[J].哈尔滨工业大学学报,1997(4):26-29.

[12] 孙广俊,李爱群.粘滞阻尼减震结构抗震可靠度简化分析[J].防灾减灾工程学报,2010,30(S1):50-57.

[13] 范文韬.核电厂管道阻尼器失效形式分析[J].科技视界,2017(6):162.

[14] 朱冬飞.黏滞阻尼器失效分析及其对结构性能影响研究[D].广州:广州大学,2016.

[15] 陈永祁,马良喆.大型桥梁用液体黏滞阻尼器的耐久性研究[J].工程抗震与加固改造,2017,39(1):109-115.

[16] 李冲,王亚东,贾维君,等.耐久型黏滞阻尼器的研发及性能试验研究[J].公路,2023,68(5):117-123.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!
欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

