

文章编号: 1674—8247(2021)04—0034—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.04.007

减隔震支座及黏滞阻尼器减震效果分析研究

李晓波

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

摘 要:本文基于高烈度震区某(72+128+72)m大跨连续梁桥,采用非线性时程分析方法,研究了铁路连续梁常用双曲面球型减隔震支座的减震效果及减震机理,并采用黏滞阻尼器控制结构过大的地震位移响应。结果表明:(1)双曲面球型减隔震支座均可大幅减小结构地震内力响应,纵桥向墩底弯矩减震率在90%左右,横桥向墩底弯矩减震率在85%左右,墩梁相对位移呈非线性增大趋势;(2)在不影响双曲面球型减隔震支座减震效果的情况下,黏滞阻尼器可有效控制墩梁相对位移,但当地震高烈度较高且场地类别较差时,建议适当增大位移限值。研究结果为高速铁路大跨连续梁桥减隔震设计提供了依据。

关键词:大跨度连续梁桥;双曲面球型减隔震支座;黏滞阻尼器;减震效果

中图分类号:U442.5⁺5 文献标志码:A

Analysis of the Damping Effect of Seismic Mitigation and Isolation Bearings and Fluid Viscous Dampers

LI Xiaobo

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: Based on a (72+128+72) m long-span continuous girder bridge in a high-intensity earthquake zone, this paper studies the damping effect and mechanism of hyperboloid spherical seismic isolation bearings commonly used in railway continuous girders by using nonlinear time history analysis method, and fluid viscous dampers are used for controlling the excessive seismic displacement response of the structure. The results show that: (1) Hyperboloid spherical seismic isolation bearings can greatly reduce the structural internal force response, and the bending moment damping rate at the pier bottom is about 90% in the longitudinal direction of the bridge, and about 85% in the transverse direction of the bridge, and the relative displacement of piers and girders increases nonlinearly. (2) Fluid viscous dampers can effectively control the relative displacement of piers and girders without affecting the damping effect of hyperboloid spherical bearings. However, it is suggested that an appropriately larger displacement limit should be taken for the sites of lower category in high-intensity earthquake areas. The results provide a basis for the seismic isolation design of long-span continuous girder bridges of high-speed railways.

Key words: long-span continuous girder bridge; hyperbolic spherical seismic isolation bearing; fluid viscous damper; damping effect

收稿日期:2020-10-27

作者简介:李晓波(1992-),男,工程师。

基金项目:中国铁路设计集团有限公司科技开发课题(2020YY340641)

引文格式:李晓波. 减隔震支座及黏滞阻尼器减震效果分析研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(4):34-38.

LI Xiaobo. Analysis of the Damping Effect of Seismic Mitigation and Isolation Bearings and Fluid Viscous Dampers[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4):34-38.

1 研究背景

高速铁路大跨连续梁桥抗震设计目前主要还是以强度设计为主,当地震烈度过大或场地条件等导致设计方案难以实施时,则转向减隔震设计。GB 50111-2006《铁路工程抗震设计规范》(2009年版)^[1]中规定:“条件允许时,可采用隔震、耗能装置,减小构筑物的地震反应”,但对于减隔震设计方法以及减隔震设计桥梁地震响应规律缺乏必要的描述。减隔震设计原则是通过引入减隔震装置来延长结构的自振周期,以避免地震能量集中的周期范围,从而降低结构的地震响应。但是,通过延长结构周期来减小地震力,必然伴随着结构位移的增大,可能会造成结构设计上的困难。为了控制过大变形,可通过在结构中引入阻尼耗能装置,以增加结构的阻尼来耗散输入的地震能量,从而减小结构的位移响应^[2-5]。

本文结合高烈度震区某(72+128+72)m大跨度连续梁桥,采用非线性时程分析方法,研究了铁路连续梁常用双曲面球型减隔震支座的减震效果以及减震机理,分析了不同地震设防烈度以及场地类别对于减隔震支座减震效率以及支座位移的影响,针对减隔震支座地震位移响应较大的情况,推荐采用黏滞阻尼器的滞回耗能来控制墩梁相对位移,为高烈度区大跨连续梁桥抗震设计提供参考。

2 减隔震装置简介

铁路桥梁常用减隔震装置有双曲面球型减隔震支座、钢阻尼器、黏滞阻尼器、速度锁定器以及减震隼等。其中速度锁定器只能用于连续梁桥纵向减震,且自身没有耗能能力,主要是通过地震力重新分配来降低纵向固定墩墩底响应。钢阻尼器在高烈度震区往往吨位较大,安装和布置都有难度,这制约了它在高烈度震区的应用。由于减震隼单个杆件耗能有限,一个墩位处往往需要很多个减震隼,给布置带来了很大难度,且多用于简支梁桥,对于大跨连续梁桥则适用性较差。综上,对于铁路连续梁桥,双曲面球型减隔震支座和黏滞阻尼器是较为常用和适用的减隔震装置^[6-7]。

2.1 双曲面球型减隔震支座

摩擦摆减隔震支座是同济大学范立础院士最先从国外引进中国的,铁路双曲面球型减隔震支座是在摩擦摆支座的基础上增加了平面摩擦副,用来满足在正常使用条件下梁体不抬高的使用要求。地震荷载作用下,双曲面球型减隔震支座的本构模型如图1所示,相

关参数确定应查询支座生产手册。

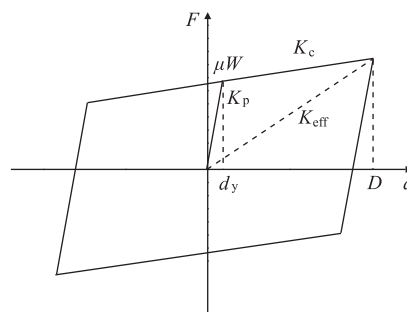


图1 双曲面球型支座本构模型图

2.2 黏滞阻尼器

黏滞阻尼器的原理是地震动迫使缸中的流体(如硅油等)产生运动,受到挤压的流体就会在通过孔隙或缝隙时产生阻尼力,从而耗散能量。但黏滞阻尼器不会改变结构的自振特性,因此不能为结构提供足够的恢复力机制,因此常作为一种阻尼耗能装置与其它减隔震装置配合使用,多用于控制结构地震位移响应。黏滞阻尼器典型滞回曲线如图2所示。

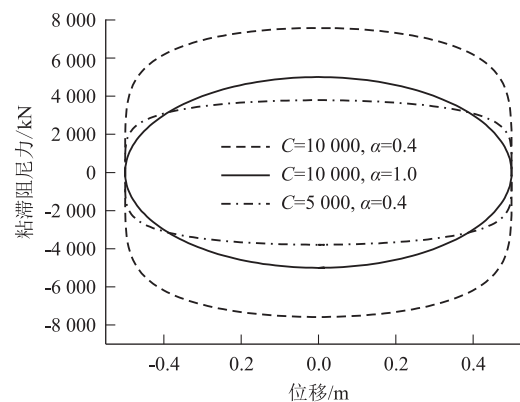


图2 黏滞阻尼器典型滞回曲线图

3 工程背景、地震动输入及计算模型

3.1 工程背景

选取华北地区高烈度震区近断层(72+128+72)m连续梁桥(如图3所示),P2墩为固定墩,其余桥墩均为活动墩。梁体为单箱单室截面,采用C50混凝土,跨中梁高5.632m,中支点处梁高9.632m,梁高按二次抛物线变化。桥墩均为圆端形变截面实体单柱墩,采用C35混凝土,基础采用钻孔灌注桩。双曲面球型减隔震支座设计参数为:两中墩减隔震支座吨位为70 000 kN,曲面半径6.3m,两边墩减隔震支座吨位为10 000 kN,曲面半径2.5m,减隔震支座摩擦系数均为0.06。

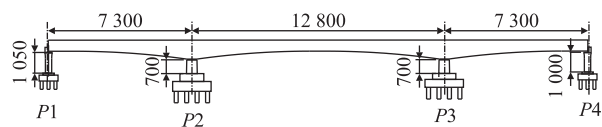


图3 连续梁桥立面布置图 (cm)

3.2 地震动输入

桥址处罕遇地震动峰值加速度为 0.38 g,特征周期为 0.45 s。以规范设计反应谱为目标,拟合了 3 条人工波时程曲线,如图 4 所示。人工波与规范反应谱保持一致性。

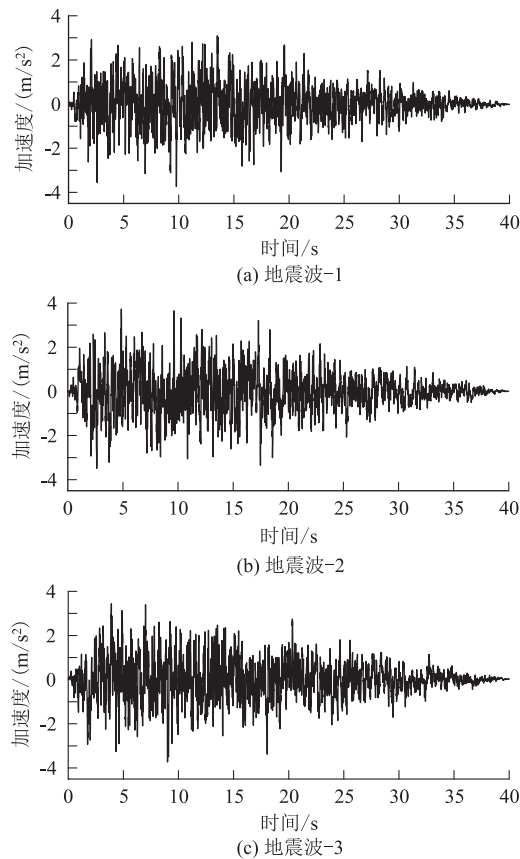


图4 人工波时程曲线图

3.3 计算模型

基于 MIDAS/Civil 平台建立全桥三维有限元模型,如图 5 所示。减隔震支座采用非线性连接单元实现支座的本构关系,黏滞阻尼器则采用 Maxwell 模型模拟,同时采用普通支座模型作为对照组。

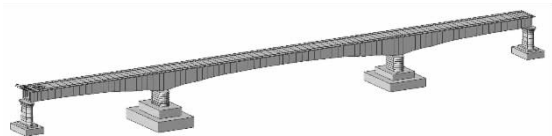


图5 全桥空间有限元模型图

4 减隔震设计研究

4.1 减隔震效果分析

对减隔震支座桥梁模型进行非线性时程反应分析,得到罕遇地震下桥梁结构墩底内力响应和减隔震支座的位移响应如表 1、表 2 所示,以普通支座桥梁罕遇地震下地震响应结果作为对照。本文引入墩底弯矩减震率 P 的概念来反映减震效果,减隔震支座模型计算的墩底弯矩为 M_j ,普通支座模型线性时程计算得到的墩底弯矩为 M_p ,减震率为: $P = 1 - M_j/M_p$,由于纵桥向活动墩墩底地震内力响应主要由墩身贡献且纵桥向抗震设计主要由固定墩控制,因此表 1 纵向只列出了固定墩墩底内力响应进行对比研究。

表1 墩底内力响应对比结果表

墩号	普通支座墩底弯矩 / (kN · m)		减隔震支座墩底弯矩 / (kN · m)		减震率 P / %	
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
P1	-	305 662	-	28 757	-	91
P2	882 928	458 409	85 838	69 188	90	85
P3	-	479 427	-	68 110	-	86
P4	-	253 698	-	24 952	-	90

表2 支座地震位移响应表

墩号	普通支座位移/mm		减隔震支座位移/mm	
	纵向	横向	纵向	横向
P1	72	-	242	151
P2	-	-	237	145
P3	63	-	238	150
P4	77	-	240	161

由表 1 可知,罕遇地震作用下,与采用普通支座相比,双曲面球型减隔震支座可大幅减小连续梁桥纵、横向墩底地震内力响应,其中纵桥向固定墩墩底弯矩减震率为 90%,横桥向边墩减震率要大于中墩减震率,但各桥墩横向墩底弯矩减震率均在 85% 以上。由表 2 可知,同普通支座相比,双曲面球型减隔震支座显著增加了墩、梁相对位移,固定墩处减隔震支座在纵、横向产生的位移分别为 237 mm、145 mm,减隔震支座在各个桥墩处地震位移响应基本一致,但减隔震支座纵桥向位移明显大于横桥向位移。

为进一步研究地震设防烈度和场地类别对于减隔震支座减震效果以及支座位移的影响。对比研究了设计地震动峰值加速度分别为 0.15 g、0.2 g、0.3 g 共 3 个设防烈度以及 II、III、IV 3 种场地类别(对应场地特

征周期分别为 0.45 s、0.65 s、0.90 s)下固定墩墩底弯矩减震率以及减隔震支座位移响应,结果如表 3、表 4 所示。

表 3 不同设防烈度下固定墩地震响应结果对比表				
墩号	减震率 $P/\%$		减隔震支座位移/mm	
	纵向	横向	纵向	横向
0.15 g	89	83	184	94
0.2 g	90	85	237	145
0.3 g	90	85	550	355

表 4 不同场地类别下固定墩地震响应结果对比表				
墩号	减震率 $P/\%$		减隔震支座位移/mm	
	纵向	横向	纵向	横向
Ⅱ	90%	85%	237	145
Ⅲ	93%	83%	270	201
Ⅳ	92%	82%	376	310

由表 3 可知,随着地震设防烈度增加,固定墩墩底弯矩减震率基本保持不变,纵向弯矩减震率在 90% 左右,横向弯矩减震率在 85% 左右,表明减隔震支座在不同地震设防地震烈度下均可以显著减小结构的地震内力响应;但随着设防烈度增加,减隔震支座纵、横向地震位移呈显著增大的趋势。由表 4 可知,随着场地类别增加,场地条件变差,特征周期增大,固定墩纵、横向墩底弯矩减震率呈略微减小趋势,但纵、横向减震率仍然分别保持在 90%、80% 以上。随着场地类别的增加,减隔震支座位移增大,尤其是对于Ⅳ类场地,减隔震支座位移增幅较大。

4.2 地震位移控制

综上可得,双曲面球型减隔震支座可以大幅减小桥梁结构的地震内力响应,但同时会大大增加墩、梁相对位移。太大的支座位移会增加支座尺寸且需要设置大位移伸缩缝来满足梁体位移需求,导致造价增加且影响线路的平顺性,因此需控制减隔震支座地震位移响应。本文拟利用黏滞阻尼器的滞回耗能来减小结构的地震位移响应以达到控制减隔震支座位移的目的。通常建议将减隔震支座的地震位移控制在 150 mm 以下,这样即可通过增加梁缝值来满足梁体位移要求^[8]。以 0.2 g、Ⅱ类场地模型为例,支座纵向最大位移发生在 P1 墩处,为 242 mm,大于 150 mm;横向除 P4 墩位处支座位移略大于 150 mm,其它墩位处减隔震支座横向位移基本均小于 150 mm,因此只考虑在纵向增设黏滞阻尼器来控制墩、梁相对位移。通过试算,

在 P2、P3 墩位处纵向分别布置 4 个最大出力 15 00 kN 的黏滞阻尼器即可将墩、梁纵向位移控制在 150 mm 以内,如表 5 所示,黏滞阻尼器的滞回曲线如图 6 所示。

表 5 增设黏滞阻尼器前后时程分析结果对比表				
墩号	减隔震支座		减隔震支座 + 阻尼器	
	减震率 $P/\%$	支座位移/mm	减震率 $P/\%$	支座位移/mm
P1	—	242	—	147
P2	90	237	89	140
P3	—	238	—	141
P4	—	240	—	150

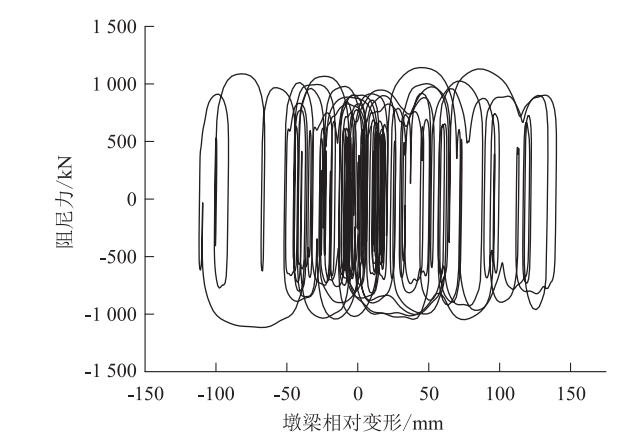


图 6 黏滞阻尼器滞回曲线

由图 6 可知,黏滞阻尼器利用自身滞回耗能,减小了墩梁相对位移,但同时也增加了阻尼力。纵向固定墩墩底弯矩为 95 536 kN·m,较之前 85 838 kN·m 增大了 11%,但固定墩纵向墩底弯矩减震率仍有 89%,表明增设黏滞阻尼器会略微增加墩底地震内力响应,但并未明显影响减隔震支座的减震效果。

当地震烈度较高且场地类别较差导致减隔震支座位移较大时,要把墩、梁位移控制到 150 mm 范围内,则需要增设更多的黏滞阻尼器。以 0.3 g、Ⅱ类场地模型为例,纵、横向减隔震支座位移分别达到 550 mm、355 mm,通过试算,需在两个中墩分别纵向布置 4 个最大出力 2 500 kN、横向布置 4 个最大出力 2 000 kN 的黏滞阻尼器,边墩横向布置 2 个最大出力 1 000 kN 的黏滞阻尼器才可以将纵、横向支座位移控制在 150 mm 以内,但连续梁桥墩墩顶空间显然不能满足该方案的布置要求,且大大提高了整体的造价。因此,对于高烈度震区且场地条件较差时,当减隔震支座位移较大时,可以将墩、梁相对位移的限值适当提高,以减少阻尼器的数量,优化墩顶阻尼器的布置,降低整体造

价,但应注意伸缩缝以及防落梁的配套设计,使结构的减隔震体系在地震荷载作用下能够协调工作。

5 结论

本文针对高烈度震区某大跨连续梁工点开展了非线性时程反应分析,重点对双曲面球型减隔震支座的减震效果以及黏滞阻尼器的位移控制进行了分析研究,得到以下结论:

(1)双曲面球型减隔震支座在不同设防烈度以及场地类别下均可大幅减小墩底地震内力响应,纵向墩底弯矩减震率在90%左右,横向墩底弯矩减震率在85%左右,减震效果显著,但会增加墩梁相对位移,纵横向墩梁相对位移随着设防烈度的增大和场地条件变差呈非线性增大趋势。

(2)黏滞阻尼器在不影响双曲面球型减隔震支座减震效果的情况下可有效控制墩梁相对位移达到设计要求,但对于高烈度震区且场地条件较差时,为了优化阻尼器配置且控制造价,可以考虑增大减隔震支座的位移限值,但要注意对伸缩缝和防落梁进行配套设计。

参考文献:

[1] GB 50111-2006 铁路工程抗震设计规范[S].
GB 50111-2006 Code for Seismic Design of Railway Engineering [S].
[2] 吴陶晶,李建中,管仲国. 减隔震装置作用机理及其在大跨度连续梁桥中的应用[J]. 结构工程师, 2009, 25(4): 102-107.
WU Taojing, LI Jianzhong, GUAN Zhongguo. Mechanism of Seismic Isolation Devices and Applications in a Long-Span Continuous Bridge

[J]. Structural Engineers, 2009, 25(4): 102-107.
[3] 彭天波,李建中,范立础. 双曲面球型减隔震支座的开发及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 176-180.
PENG Tianbo, LI Jianzhong, FAN Lichu. Development and Application of Double Spherical Aseismic Bearing[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(2): 176-180.
[4] 李晓波. 高速铁路连续梁纵向减震装置机理性研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(12): 50-56.
LI Xiaobo. Research on the Mechanism of Longitudinal Seismic Mitigation Devices for High-speed Railway Continuous Bridges[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(12): 50-56.
[5] 叶爱君,管仲国. 桥梁抗震[M]. 2版. 北京:人民交通出版社, 2011.
YE Aijun, GUAN Zhongguo. Seismic Design of Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
[6] 全伟,王东升. 高烈度震区高速铁路简支梁抗震体系研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(5): 838-846.
QUAN Wei, WANG Dongsheng. Earthquake Resistance System Research of High-speed Railway Simply Supported Bridge under High-Intensity Seismic Region[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, 33(5): 838-846.
[7] 王志强,葛继平. 粘滞阻尼器和 Lock-up 装置在连续梁桥抗震中应用[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(1): 5-9.
WANG Zhiqiang, GE Jiping. Application of Viscous Damper and Lock-up Devices in the Seismic Design of Continuous Girder Bridges [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19(1): 5-9.
[8] 罗登发,郭占元,戴胜勇,等. 双曲面球型减隔震支座在铁路桥梁上的应用[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(1): 53-55.
LUO Dengfa, GUO Zhanyuan, DAI Shengyong, et al. Application of Hyperboloid Spherical Isolation Bearing on Railway Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(1): 53-55.



(上接第42页)

[17] 冯照平,禹雷. 玄武岩纤维金属复合筋增强 CRTS II 型轨道板的试验研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(8): 10-14.
FENG Zhaoping, YU Lei. Study on the Test of the CRTS II Slab Reinforced with Basalt-Fiber-Steel-Tendon [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(8): 10-14.
[18] 陈鲤波. 高速铁路用高强高韧性水泥基复合材料人行道盖板设计与应用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
CHEN Libo. Study on the Design and Application of High Strength

and High Toughness Cement Base Material Pavement[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
[19] 林红松,张雷,颜华. 弹条 II 型扣件系统综合性能提升措施研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(10): 61-64.
LIN Hongsong, ZHANG Lei, YAN Hua. Research on the Comprehensive Property Promotion Measures of Type II Elastic Fastening System[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(10): 61-64.