

高铁矮塔斜拉桥减隔震装置性能对比研究

全伟^{1,2},白士杰¹,包龙生¹

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 黄山学院建筑工程学院,安徽 黄山 245041)

摘要 目的 研究不同减隔震装置如黏滞阻尼器、速度锁定器和双曲面球型减隔震支座的减震机理和减震效果,为高铁矮塔斜拉桥减隔震设计提供依据. 方法 以某高铁矮塔斜拉桥为背景,建立 Midas 有限元模型,分别采用不同连接单元模拟黏滞阻尼器、速度锁定器及双曲面球型减隔震支座,输入人造地震波,进行各装置的参数优化及减震效果对比. 结果 黏滞阻尼器减震率为 27% ~ 59%;双曲面球型减隔震支座减震率为 34% ~ 48%,但却使墩梁相对位移增加 32%;速度锁定器减震率为 12% ~ 39%,但却使相邻塔墩内力增加 18% ~ 39%. 结论 双曲面球型减隔震支座减震率高但是增加了墩梁相对位移;速度锁定器减震率较弱,并且提高了结构刚度,增加了桥梁对地震的反应;黏滞阻尼器减震率高,副作用小,并且可以消耗地震能量,对内力和位移均有较好的减震效果,在实际应用中优先推荐使用.

关键词 高铁矮塔斜拉桥;黏滞阻尼器;速度锁定器;双曲面球型减隔震支座;减隔震

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Study on Seismic Mitigation and Isolation Design of High-speed Railway Extradosed Bridge

QUAN Wei^{1,2}, BAI Shijie¹, BAO Longsheng¹

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Architecture and Engineering, Huangshan University, Huangshan, China, 245041)

Abstract: In order to provide basis for seismic isolation design of high speed railway extradosed bridge. It is necessary to study the mechanism and effect of different isolation devices such as viscous dampers, lock-ups and hyperbolic spherical isolators. Based on a extradosed bridge, Midas finite element model is established in this paper. Different connecting elements are used to simulate viscous dampers, lock-ups and hyperboloid spherical isolators, and then artificial seismic waves are inputted. The parameters of each device are optimized and the effects of shock absorption are compared. The damping rate of viscous dampers is 27% ~ 59%, The shock absorption rate of hyperboloid spherical bearing is 34% ~ 48%, But it increases the relative displacement of the pier

收稿日期:2019-01-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51478074);辽宁省自然科学基金计划重点项目(20170540762);沈阳建筑大学科学研究项目(2017040);黄山学院2019年度校级人才启动项目(2019xkj009)

作者简介:全伟(1979—),男,副教授,博士,主要从事桥梁设计理论及桥梁抗震设计理论等方面研究.

and beam by 32%. The lock-up absorbs 12% ~ 39%, but increases the internal force of adjacent tower piers 18% ~ 39%. The hyperboloid spherical bearing has a high damping rate but increases the relative displacement of the pier and beam. The lock-up has a weak damping rate and increases the stiffness of the structure and the response of the bridge to the earthquake. The viscous damper has the advantages of high shock absorption rate, small side effect, and can consume seismic energy. It has a better effect on both internal force and displacement, so it is preferred to be used in practical application.

Key words: high-speed railway extradosed bridges; viscous damper; lock-up; hyperbolic spherical isolation bearings; isolation

我国高速铁路发展迅速,其中桥梁占总线路的比例高达40%。矮塔斜拉桥作为一种新兴桥型,因为其刚度较大而适合高铁桥梁的需要,同时其具有梁高较小、后期徐变变形小、造型美观且经济指标好等优点,在高速铁路大跨桥梁中受到了越来越多设计者的青睐。矮塔斜拉桥适用跨度在100~300 m,已经成为高铁大跨桥梁中重要的选择桥型。

为了满足高铁矮塔斜拉桥上的列车在高速运行中的安全性和舒适性要求,通常采用扩大桥墩尺寸和提高桥墩刚度的方法,但是这会扩大桥梁结构对地震效应的响应。所以采用传统的延性抗震设计理论常常不能满足抗震设计的需求,需采用减隔震装置。为了增强桥梁结构的抗震能力,一直致力于研究改变结构周期及消耗地震能量的方法。刘昊苏等^[1]研究了不同设计参数对矮塔斜拉桥在地震下的抗震特性,提出了改善矮塔斜拉桥抗震性能的结构参数。蔺鹏臻等^[2]提出“矮塔斜拉桥动力特征参数”和“斜拉索动力荷载效应影响度”这两个概念,同时为矮塔斜拉桥提供参数参考价值。陈兴冲等^[3]研究了矮塔斜拉桥采用摩擦滑动支座、黏滞阻尼器和lock-up装置的减隔震效果。贾志强^[4]建立了独塔斜拉桥有限元模型,研究其在多遇及罕遇地震下应用反应谱法的抗震性能,为实际工程中的斜拉桥减震提出理论建议。

目前针对高速铁路矮塔斜拉桥,还缺少不同种类减隔震装置对比分析的研究成果^[5]。针对此状况,笔者对比研究了黏滞阻

尼器、速度锁定器和双曲面球型减隔震支座等三种减隔震装置的减震机理和减震效果,为高速铁路矮塔斜拉桥减隔震装置在不同情况下的选取及应用提供指导建议。

1 研究背景

1.1 工程概况

笔者以某高铁矮塔斜拉桥为工程背景作为研究,该桥为双塔双索面预应力混凝土连续梁体系的矮塔斜拉桥,跨径为(94.2+220+94.2)m。主梁截面形式采用单箱双室截面,跨中处梁高为6.5 m,桥墩支点处梁高为11.5 m。桥梁采用塔墩固结,塔梁分离,桥墩上设置支座的结构形式。斜拉索为横向双索面体系。桥塔柱高67.5 m,桥面以上塔高35 m,塔高主跨比为1:6.29,每个桥塔对称设8对斜拉索,主墩墩身采用板式墩,塔墩基础采用钻孔灌注桩基础,桥址的场地类别为Ⅱ类场地,抗震设防烈度为7度。

1.2 有限元模型建立

采用有限元分析软件Midas Civil建立矮塔斜拉桥计算模型。主梁、桥塔采用空间梁单元模拟,斜拉索采用桁架单元模拟。支座处根据减隔震装置的不同采用不同的连接单元进行模拟^[6-7],桥梁空间有限元分析模型见图1(从左到右分别为1#墩、2#塔墩、3#塔墩和4#墩)。在重力处理方面,桥面布置轨道采用满布荷载方式,桥梁横隔板按照采用集中节点荷载模拟,二期恒载按照梁单元均布荷载施加在主梁。

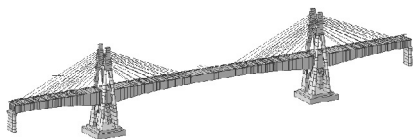


图1 矮塔斜拉桥有限元模型

Fig.1 Finite element model of extradosed bridge

1.3 地震波的输入

为了研究各减隔震装置的减隔震性能,分别输入两种人工地震波^[8](见表1),其中M波为多遇地震波,N波为罕遇地震波.图2和图3为安评报告给出的罕遇地震加速度时程曲线.

表1 两种地震波的属性

Table 1 Parameters of two seismic waves

地震波	加速度峰值/(m·s ⁻²)	持续时间/s
M波	0.30	40.94
N波	1.61	40.94

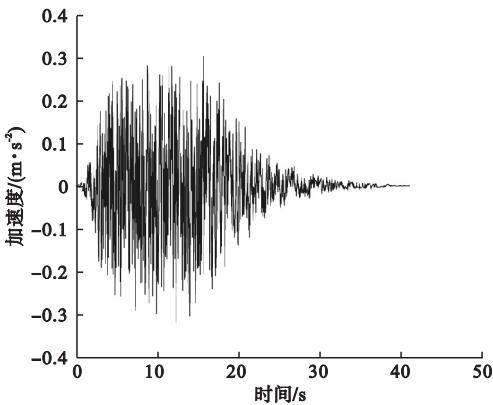


图2 M波时间加速度关系

Fig.2 Time and acceleration curve of M wave

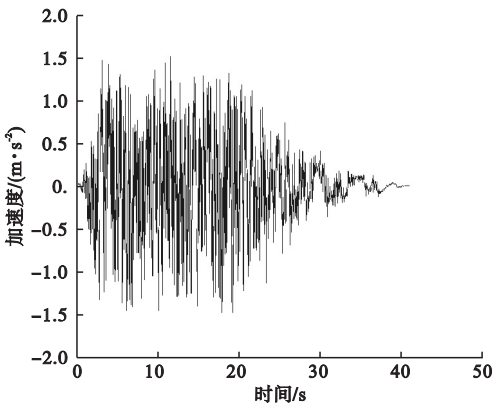


图3 N波时间加速度关系

Fig.3 Time and acceleration curve of N wave

2 减隔震设计及模拟方法

2.1 黏滞阻尼器

黏滞阻尼器的原理为流体运动原理^[9-10],桥梁在发生热膨胀、缓慢蠕动等缓慢荷载作用下黏滞阻尼器不会对结构产生作用,当发生台风及地震等剧烈荷载时,黏滞阻尼器活塞随结构运动,阻尼介质在流经活塞的预留孔时,将地震动输入的能量转化为其他能量消耗掉^[11-14].黏滞阻尼器的阻尼力表达式为

$$F=Cv^\zeta$$
(1)

式中: F 为阻尼力; C 为阻尼系数; v 为速度; ζ 为阻尼指数.

在模型中,选择桥梁主体与塔墩相接处用Midas 软件中的阻尼器单元建立连接,进行模拟.为了选取合适的阻尼系数及阻尼指数,输入表1中的M波和N波.笔者选择的非线性速度指数为0.2、0.3、0.4、0.5.为了比较阻尼系数对结构的影响,设阻尼指数0.3为参考值,阻尼系数以4 000为步长,从4 000 kN/(m·s⁻¹)^{0.3}增加到20 000 kN/(m·s⁻¹)^{0.3},中2[#]、3[#]塔墩与主梁连接处分别设置4个阻尼器进行对比.在两种地震波作用对黏滞下,阻尼器阻尼系数优化,结果见图4所示.

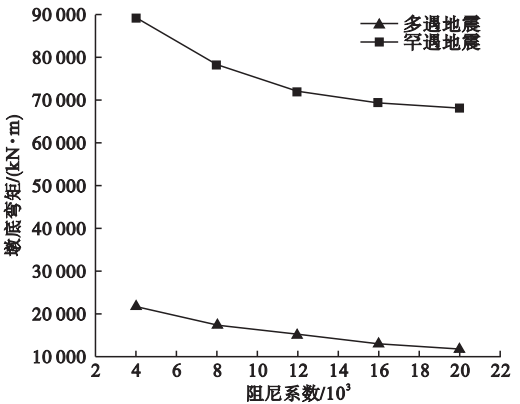


图4 阻尼系数优化

Fig.4 Optimization results of damping coefficient

由图4可知,相同条件下,阻尼系数越大的阻尼器减震效果越好,当阻尼系数超过16 000 kN/(m·s⁻¹)^{0.3}时,随着阻尼系数的

增加,墩底弯矩减小的速度减缓,考虑到桥梁结构规模、减震效率及经济指标等因素,所以选取阻尼系数为 $C=4\,000\text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^\xi$ 的阻尼器,阻尼器一端连接梁底板,一端连接塔墩。

在阻尼系数为 $C=4\,000\text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^\xi$ 的条件下,研究不同阻尼指数下的减震效果,结果见图5。由图可知:阻尼指数在 $0.2\sim0.3$ 时减震效果在增强,但阻尼指数在 $0.3\sim0.5$ 时减隔震效果几乎相同。

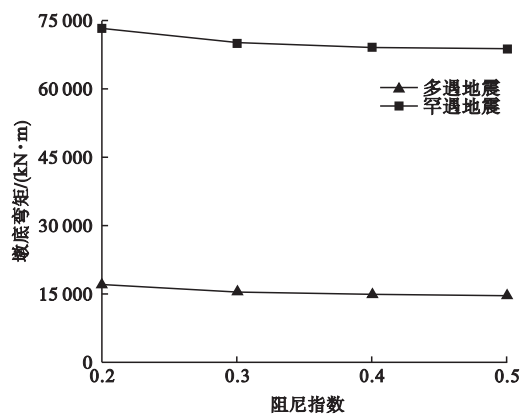


图5 阻尼指数优化

Fig. 5 Optimization results of damping index

考虑到阻尼系数跟阻尼指数对墩梁相对位移的影响,分别采用不同参数设置阻尼器,结果见图6。由图可看出:阻尼系数越大,阻尼指数越小,墩梁相对位移越小,但是当阻尼系数超过12 000后,墩梁相对位移减小速度变缓,不同阻尼指数对墩梁位移影响也越来越小。

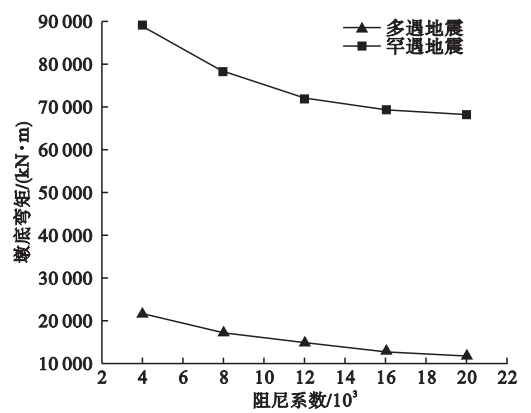


图6 不同阻尼参数下2#墩墩梁相对位移

Fig. 6 Relative displacement of 2# pier beam with different damping parameters

综合以上计算结果,模型中2#塔墩、3#塔墩分别采用4个阻尼系数为 $C=4\,000\text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{0.3}$,阻尼指数为0.3的黏滞阻尼器。黏滞阻尼器的其他参数如下:阻尼器出力3 500 kN;阻尼器最大冲程: $\pm 250\text{ mm}$;阻尼系数 $C=4\,000\text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{0.3}$;速度指数为0.3;安全系数为1.5;数量为8。

2.2 双曲面球型减隔震支座

双曲面球型减隔震支座^[15-16]主要是由上座板、球冠衬板、螺栓、下座板、下套筒、上套筒、螺杆、平面滑板、密封装置和球面滑板等结构组成(见图7)。在地震水平力作用下,支座在发生正常位移时会受其限位装置的约束,当承载力大于限位装置极限承载力后限位装置约束解除,支座产生减隔震效果。双曲面球型减隔震支座的理论见式(2)~(4),滞回模型见图8所示。

等效刚度为

$$K_{\text{eff}} = \frac{W}{R} + \mu_d \frac{W}{D_d} \tag{2}$$

支座屈服后刚度为

$$K_d = \frac{W}{R} \tag{3}$$

等效阻尼比为

$$\zeta_{\text{eff}} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu_d}{D_d/R + \mu_d} \tag{4}$$

式中: W 为恒载作用下支座竖向反力; R 为滑动曲面的曲率半径; D_d 为支座设计水平位移; μ_d 为滑动摩擦系数。

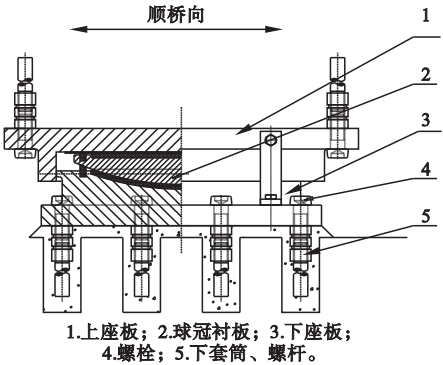


图7 支座顺桥向图

Fig. 7 Support diagram along the bridge

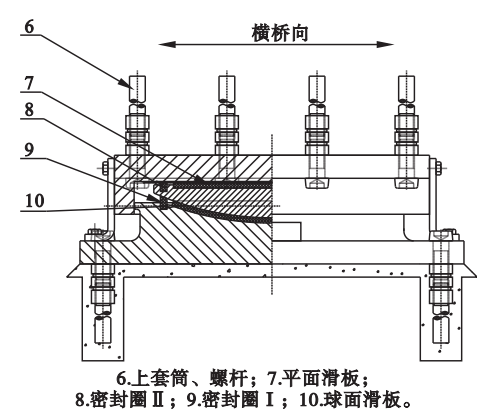


图8 支座横桥向图

Fig. 8 Cross-bridge diagram of support

在 Midas 模型中,双曲面球型减隔震支座由一个平面摩擦副和两个曲面摩擦副组成,其中平面摩擦副在有限元软件中由钩单元、弹性连接及间隙单元并联模拟,曲面摩擦副由摩擦摆单元模拟。

根据双曲面球型减隔震作用原理可知其性能跟曲率半径和摩擦系数相关.为了选取合适的曲率半径及摩擦系数,在支座吨位为 10 000 t 的背景下,输入地震波 N 波,在 2[#]及 3[#]塔墩分别设置双曲面球型减隔震支座,曲率半径分别采取 1.6 m、2.8 m、4.0 m、5.2 m 及 6.4 m.摩擦系数 μ 分别取 0.02、0.03、0.04 三种常用的数值组合下对比得出结构响应规律.其中 2[#]塔墩墩底弯矩数值变化见图 9.

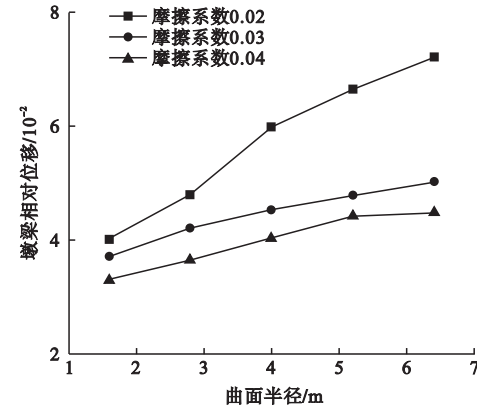


图9 不同曲率半径及摩擦系数下减震性能

Fig. 9 Performance of shock absorption with different parameters

由图 9 可看出,在摩擦系数一定时,随着曲面半径增大,墩底弯矩越来越小,支座减震性能越好.当曲面半径一定时,摩擦系数越大,支座减震性能越好.支座在摩擦系数在 0.02 ~ 0.03 时减震性能变化比较明显,摩擦系数在 0.03 ~ 0.04 时减震性能变化较缓。

考虑不同参数的曲率半径和摩擦系数对墩梁相对位移的影响,分别采取不同的参数输入双曲面球型支座模型中,分析比较 2[#]塔墩的墩梁相对位移(见图 10).由图 10 可看出曲面半径越大,摩擦系数越小,墩梁相对位移越大,摩擦系数为 0.02 时墩梁相对位移变化比较明显,摩擦系数为 0.03 和 0.04 时墩梁相对位移随着半径增大而增大的速度减慢。

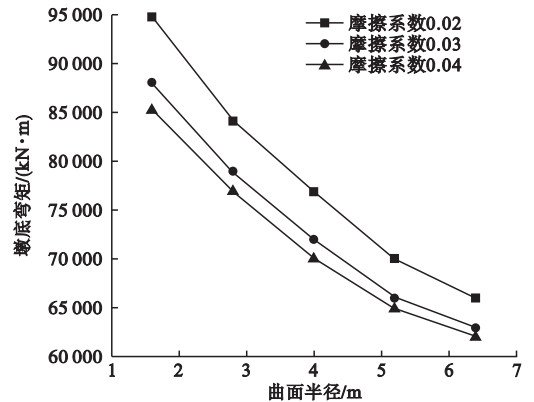


图10 不同支座参数下2[#]墩的墩梁相对位移

Fig. 10 Relative displacement of 2[#] pier beam with different bearing parameters

根据桥梁大小、支座吨位以上得出的曲率半径及摩擦板摩擦系数的规律,在模型中双曲面球型减隔震支座滑板摩擦系数取 0.03,曲面半径取 6.4 m.

2.3 速度锁定器的设置

速度锁定器的原理类似黏滞阻尼器,它由油缸、传力杆、活塞等装置连接而成.油缸内含有特殊的减震介质^[17],在结构收缩徐变或温度等缓慢因素作用下,速度锁定器不工作^[18-20].而在地震荷载作用下,介质会激活连接装置,锁定器变成刚性连接,转换成一种锁定装置,使相邻的桥墩分担荷载.通常情况

下,速度锁定器的规格只跟阻尼力和最大位移量有关,根据前文对黏滞阻尼器的参数研究,该模型在3#塔墩与活动支座连接处设置4个速度锁定器,在Midas模型中采用固定连接单元模拟,每个锁定器阻尼力为1 500 kN,最大位移量为50 mm,其在有限元模型中用刚性连接模拟,输入地震波N,其力与时间关系见图11所示。

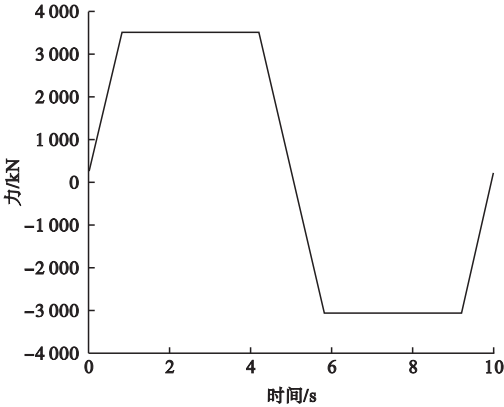


图11 速度锁定器力与时间关系

Fig. 11 Force and time curve of the lock-up

3 减隔震效果对比分析

在该矮塔斜拉桥有限元模型塔梁交接处分别设置三种减隔震装置.普通支座、黏滞阻尼器、速度锁定器、双曲面球型减隔震支座方案分别用基准、I、II、III代替.在地震波N波的作用下,分析出各个方案的斜拉索索力、墩底及承台的内力在各减隔震装置的减震率.首先分析各装置下的索力见图12,索力结果见表2.

根据表2可以看出,布置三种减隔震装置后矮塔斜拉桥索力有一定程度上的减小,黏滞阻尼器减震率在36%~52%,速度锁定器后减震率在12%~17%,双曲面球型减隔震支座后减震率在34%~46%.数据表明,黏滞阻尼器跟双曲面球型减隔震支座都能一定程度上的消耗地震能量,所以索力减震率较高;速度锁定器减震率较低,因为其不能消耗地震能量。

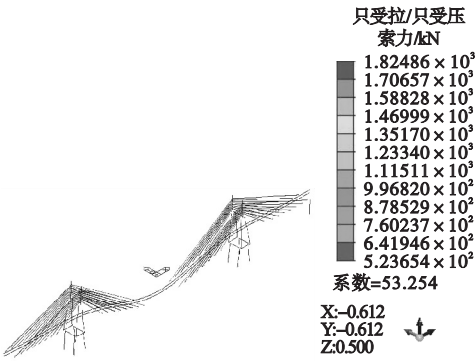


图12 黏滞阻尼器下的索力

Fig. 12 Cable force with viscous damper

表2 索力减隔震效果

Table 2 Isolation performance of cable force kN				
工况	2#边跨索力	2#中跨索力	3#中跨索力	3#边跨索力
基准	761	1 794	1 821	779
I	428(44%)	861(52%)	1 165(36%)	490(37%)
II	631(17%)	1 578(12%)	1 566(15%)	662(14%)
III	464(39%)	968(46%)	11 072(34%)	62 228(35%)

注:括号内数据为减震率.

进一步研究其中一个塔墩的墩底和承台内力值(见图13),其结果见表3.

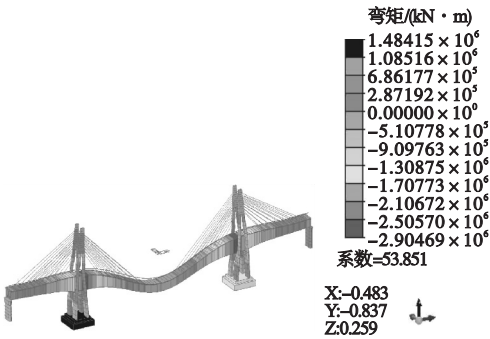


图13 黏滞阻尼器在N波下的弯矩

Fig. 13 Bending moment of viscous damper when applying N wave

表3 各装置减隔震效果

Table 3 Seismic reduction performance of each support				
工况	承台剪力/kN	承台弯矩/(kN·m)	墩底剪力/kN	墩底弯矩/(kN·m)
基准	41 682	124 570	21 000	95 878
I	23 392(41.5%)	82 491(33.8%)	13 836(34.1%)	70 318(26.6%)
II	25 279(39.3%)	85 236(31.5%)	15 297(27.1%)	76 492(20.2%)
III	21 703(47.9%)	77 832(37.5%)	11 072(47.2%)	62 228(35.9%)

注:括号内数据为减震率.

通过分析表3可知:

(1)黏滞阻尼器的承台底及墩底剪力减震率分别为41.5%和34.1%,承台底和墩底的弯矩减震率达33.8%和26.6%.说明黏滞阻尼器的应用有效减少了桥塔墩底关键部位对地震的反应.

(2)设置速度锁定器后,3#塔墩的内力有显著降低,承台及墩底剪力减震率分别为39.3%和27.1%,承台及墩底弯矩减震率分别为31.5%和20.2%.另外模型中2#塔墩的内力数值发现:设置固定支座的2#塔墩的墩底剪力增加了17.7%,弯矩增加38.6%,承台剪力增加了23.2%,弯矩增加36.2%.说明速度锁定器会使结构的整体刚度变大,使相邻桥墩分担一定的内力.

(3)双曲面球型减隔震支座承台及墩底剪力减震率为47.9%和47.2%,承台及墩底弯矩减震率达37.5%和35.9%.

在分析剪力弯矩的基础上,整理模型上各减震方案中的2#、3#塔墩的墩梁相对位移和塔顶位移,汇总分析见表4.

表4 墩梁的相对位移

Table 4 The relative displacement of pier beam

工况	墩梁相对位移/cm		塔顶位移/cm	
	2#塔墩	3#塔墩	2#塔顶	3#塔顶
基准	0.02	6.21	0.21	6.82
I	2.52	2.54	3.32	3.21
II	1.29	1.98	3.17	2.81
III	5.22	8.22	9.54	8.92

由表4可以看出,因为普通支座中2#塔墩设置固定支座,3#塔墩设置活动支座,所以2#塔墩几乎不发生位移.黏滞阻尼器的墩梁相对位移因为其消耗地震产生能量而有一定比例的减小,减少约59%,速度锁定器因为其发生作用后处于锁死状态,形成一个刚性连接,所以墩梁相对位移非常小,减少约68%.双曲面球型减隔震支座墩梁相对位移有所增大,因为在摩擦板发生位移后才会发挥作用,所以产生的滑动位移比普通支座有

所增大,增加了约32%.

4 结 论

(1)黏滞阻尼器通过消耗地震能量进行减震;其减震率为27%~59%.相同的条件下,阻尼器阻尼系数越大,阻尼指数越大,阻尼器的减隔震效果越好,针对本矮塔斜拉桥,当阻尼系数超过16 000 kN/(m·s⁻¹)^ξ时,阻尼指数超过0.3时,黏滞阻尼器减震效果的改善不再明显.

(2)双曲面球型减隔震支座减震率为34%~48%,其主要依靠改变桥梁的地震周期进行隔震,同时在摩擦板作用下一一定程度上消耗地震能量,但是因为其发生一定位移才起作用,所以它会使墩梁相对位移增加.增加约32%,对于双曲面减隔震支座,在相同条件下,其曲面半径越大,耗能越多,减隔震效果越好;摩擦系数越大,减隔震效果越好.但是当摩擦系数超过0.03时,减隔震效果变化不再显著.

(3)速度锁定器减震率约12%~39%,它通过把地震动荷载分担给相邻的塔墩来实现减震,相邻塔墩内力增加约18%~39%.另外速度锁定器不能消耗地震能量,并且降低了桥梁的地震周期,使桥梁对地震动反应扩大.

(4)三种减隔震装置减震机理不同,各有优缺点,应综合减震效果和装置造价合理进行选用.黏滞阻尼器跟双曲面球型减隔震支座的内力减震率都较高,但双曲面球型减隔震支座发挥作用前需要发生一定位移,所以在实际应用中要考虑桥梁设计的位移.速度锁定器减震率较低,对相邻桥墩刚度要求较高,所以应用有限.综合考虑,黏滞阻尼器的减震率高,副作用小,在高铁矮塔斜拉桥应用中优先推荐使用.

参考文献

[1] 刘昊苏,董军,杨昀.不同设计参数下矮塔斜拉桥的抗震动力学分析[J].工程力学,2013,

- 30;137-141.
(LIU Haosu, DONG Jun, YANG Yun. Seismic response for an extradosed cable-stayed curved bridge with different design parameters [J]. Engineering mechanics, 2013, 30;137-141.)
- [2] 蔺鹏臻, 周世军, 刘凤奎, 等. 单索面矮塔斜拉桥的动力特征参数研究[J]. 振动与冲击, 2006(6):150-153.
(LIN Pengzhen, ZHOU Shijun, LIU Fengkui, et al. Study on dynamic characteristic parameters of an extradosed cable-stayed bridge with single cable plane [J]. Journal of vibration and shock, 2006(6):150-153.)
- [3] 陈兴冲, 张永亮, 李子奇. 矮塔斜拉桥的减震方案对比研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(3):16-21.
(CHEN Xingchong, ZHANG Yongliang, LI Ziqi. Research on seismic response reduction of a cable-stayed bridge with low tower [J]. World earthquake engineering, 2010, 26(3):16-21.)
- [4] 贾志强, 杨娜. 独塔斜拉桥动力特性及抗震分析[J]. 城市道桥与防洪, 2012(12):75-78.
(JIA Zhiqiang, YANG Na. Dynamic characteristics and seismic analysis of single pylon cable-stayed bridges [J]. Urban roads bridges & flood control, 2012(12):75-78.)
- [5] XU Xiuli, LI Zhijun, LIU Weiqing, et al. Investigation of the wind-resistant performance of seismic viscous dampers on a cable-stayed bridge [J]. Engineering structures, 2017, 145:283-292.
- [6] SHEN X, WANG X, YE Q. Seismic performance of transverse steel damper seismic system for long span bridges [J]. Engineering structures, 2017, 141:14-28.
- [7] AHMAD S H, FATIMAH M N, ARMAN Z M S, et al. Efficacy of chitosan derivative films versus hydrocolloid dressing on superficial wounds [J]. Journal of Taibah university medical sciences, 2018(1):1-9.
- [8] 张永亮, 陈兴冲, 郭永强. 刚构连续梁体系铁路矮塔斜拉桥的减震研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(10):79-85.
(ZHANG Yongliang, CHEN Xingchong, GUO Yongqiang. Research on damping of seismic responses of extradosed cable-stayed bridge with the rigid continuous beam system [J]. Journal of the China railway society, 2011, 33(10):79-85.)
- [9] 周友权. 黏滞阻尼器在金水沟特大桥中的应用研究[J]. 铁道标准设计, 2012(2):66-69.
(ZHOU Youquan. Application and research about viscous damper on Jinshuiou bridge [J]. Railway standard design, 2012(2):66-69.)
- [10] 奚灵智, 李小刚, 韦华. 黏滞阻尼器在全漂浮体系斜拉桥抗震设计中的功效分析[J]. 中外公路, 2012, 32(2):103-110.
(XI Lingzhi, LI Xiaogang, WEI Hua. Effect analysis of viscous dampers in seismic design of fully floating extradosed bridges [J]. Journal of China & foreign highway, 2012, 32(2):103-110.)
- [11] KURTULUS S, HAYRETTIN K. Near-fault and far-fault ground motion effects on cable-supported bridges [J]. Procedia engineering, 2017, 199:3077-3082.
- [12] SUN Ceshi, ZHAO Yaobing, PENG Jian, et al. Multiple internal resonances and modal interaction processes of a cable-stayed bridge physical model subjected to an invariant single-excitation [J]. Engineering structures, 2018, 172:938-955.
- [13] SHEHATA E, ABDEL R, TOSHIRO H, et al. Ground motion spatial variability effects on seismic response control of cable-stayed bridges [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2011, 10(1):37-49.
- [14] ZHOU Ying, LU Xilin, WENG Dagen, et al. A practical design method for reinforced concrete structures with viscous dampers [J]. Engineering structures, 2012, 39:187-198.
- [15] 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(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(2):176-180.)
- [16] STERGIOS A, IOANNIS A, KOSMAS C, et al. Cost-effectiveness related to the earthquake resisting system of multi-span bridges [J]. Engineering structures, 2010, 32(9):2658-2671.
- [17] 颜志华, 马良喆, 陈永祁. 速度锁定装置在津秦客运专线减震设计中的应用[J]. 桥梁建设, 2014, 44(1):95-100.
(YAN Zhihua, MA Liangzhe, CHEN Yongqi. Application of speed lock-up devices to seismic mitigation design of a continuous girder bridge on Tianjin-Qinhuangdao passenger dedicated railway [J]. Bridge construction, 2014, 44(1):95-100.)
- [18] ZHAO Haiqin. Asymptotic behavior of traveling waves for a nonlocal epidemic model with delay [J]. Electronic journal of differential equations, 2017(160):1-19.
- [19] SIMON E. A heteroclinic orbit connecting traveling waves pertaining to different nonlinearities [J]. Journal of differential equations, 2018, 265(3):804-829.
- [20] 余小华, 窦胜谭. 速度锁定器在桥梁抗震中的有限元模拟[J]. 铁道标准设计, 2015(2):56-59.
(YU Xiaohua, DOU Shengtian. Finite element simulation of shock transmission unit in bridge seismic system [J]. Railway standard design, 2015(2):56-59.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)