

王冰, 谭平, 马安财, 等. 黏滞阻尼器在某大跨度钢桁架铁路梁桥中的应用研究[J]. 华南地震, 2016, 36(4): 104–110. [WANG Bing, TAN Ping, MA Ancai, et al. Application of Fluid Viscous Dampers in a Long Span Steel Truss Girder Railway Bridge[J]. South china journal of seismology, 2016, 36(4): 104–110.]

黏滞阻尼器在某大跨度钢桁架铁路梁桥中的应用研究

王冰, 谭平, 马安财, 周福霖

(广州大学 减震控制与结构安全国家重点实验室培育基地, 广州 510405)

摘要: 以某大跨度的铁路钢桁架连续梁桥为工程背景, 基于有限元软件 SAP2000 建立其三维有限元模型, 采用非线性动力时程分析方法分析了在罕遇地震作用下黏滞阻尼器对大跨度高墩连续钢桁架梁桥的减震效果, 研究了黏滞阻尼器参数对减震效果的影响规律。研究表明: 通过对黏滞阻尼器的合理布置和参数优化可以有效减小大跨铁路桥梁的主梁位移和墩底内力, 显著改善其强震下的抗震性能。

关键词: 大跨钢桁架梁桥; 铁路桥; 消能减震; 黏滞阻尼器; 参数优化

中图分类号: TU352.12 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2016) 04-0104-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.04.016

Application of Fluid Viscous Dampers in a Long Span Steel Truss Girder Railway Bridge

WANG Bing, TAN Ping, MA Ancai, ZHOU Fulin

(Cultivation Base for State Key Laboratory of Seismic Control and Structural Safety, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: This paper systematically studied a long span steel truss continuous railway bridge, which is a practical engineering, and built a 3D finite element model for this bridge within the environment of SAP2000. A non-linear dynamic time-history analysis method was conducted to investigate the control effectiveness of the installed viscous dampers upon this long span continuous steel truss girder railway bridge. Parameter optimization of viscous dampers is carried out to economically improve the performance of the railway bridge. The research results show that the displacement of girder and the internal force responses of pier bottom of the bridge can be reduced significantly by fluid viscous dampers on condition that the fluid viscous devices are of optimal placement and parameters, thus greatly enhance the safety of the high pier large span steel truss continuous

收稿日期: 2016-08-26

基金项目: 973 计划(2011CB013606), 国家自然科学基金重点项目(1334209)

作者简介: 王冰 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事结构减震控制研究。

E-mail: bing_ce@163.com.

bridge under rare earthquakes.

Key words: Long span steel truss bridge; Railway bridge; Energy dissipation system; Fluid viscous dampers; parameter optimization

0 引言

随着我国钢材产量的增加以及施工技术的提高,在铁路桥梁设计中开始较多的采用钢结构桥梁。由于钢材具有强度高、材质均匀、塑性及韧性良好和可焊性好等诸多优点,因此,用钢材建造的桥梁具有跨越能力大、适合工业化制造以及安装速度快等特点。其中钢桁架桥以其布置灵活,结构稳定等特点也较多的应用到铁路桥梁建设中^[1]。大跨度桥梁比较明显的特点是整体结构刚度较柔,阻尼较低,对地震、风及行车荷载较为敏感,因此需要振动控制。在各种振动控制技术中,阻尼器能够针对大跨度桥梁阻尼低的特点,显著提高结构的阻尼,减震效果较好,得到广泛的应用。

液体黏滞阻尼器^[2]是在工程中应用比较广泛和成熟的速度相关型阻尼器。黏滞阻尼器在桥梁工程中首次应用于美国金门大桥的抗震加固^[3],此后国内外科研人员开始从事这方面的研究,并在一些实际桥梁中进行了应用与总结^[4-6]。韩万水^[7]等通过对设置黏滞阻尼器斜拉桥纵向非线性地震反应的分析,讨论了黏滞阻尼器各参数对结构地震响应的影响。宋子威^[8]等以杭州钱江铁路新桥主桥为工程背景,研究了黏滞阻尼器在高速铁路长联大跨连续梁中的应用。张超^[9]等以一座悬索桥为工程背景,研究了黏滞阻尼器参数 C 和 α 的不同组合对该桥的关键部位内力及变形影响规律并做了参数优化。从以上也可以看出黏滞阻尼器在大跨度斜拉桥、悬索桥、混凝土连续梁桥中应用较多,而在大跨度钢桁架梁桥中则应用的较少。

本文以某实际大跨高墩钢桁架连铁路续梁桥工程为背景,通过在墩顶与桥面之间设置黏滞阻尼器来增强该铁路桥梁在大震下的地震安全性,研究黏滞阻尼器对大跨度铁路桥梁的抗震性能影响规律,得到的相关结论对铁路桥梁的设计具有重要的参考价值。

1 工程背景

该工程为跨度(108m+152m+249m+152m+108m)的钢桁架桥,主桥从左向右依次为1#~4#墩,墩高分别为53m、149m、153m、53m。桥墩为C40混凝土空心双柱式桥墩,双柱之间设有交

叉斜撑。该桥为变高度钢桁架桥,跨中及边支点处桁高16m,中支点处桁高36.0m,主桁中心间距为16m。主桁采用N型及K型桁架。车行道桥面板布置主桁上方,每个节间设置钢横梁5道,主桁下弦杆节间设置交叉式平联。

地震波选取了一条人工波和两条天然波,其中人工波由地震安全性评价工作报告给出,天然波选取的是较为典型的EL Centro波和Taft波。地震波的时程和功率谱曲线如图1所示。三条波的能量在频率上分布都较为集中,主要分布在8Hz

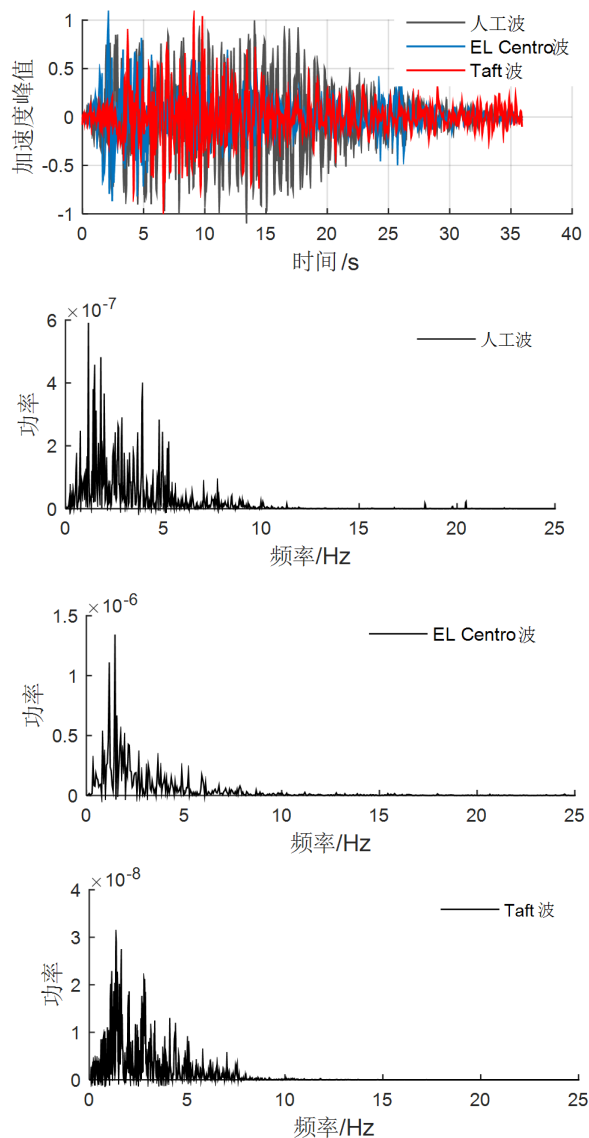


图1 地震波的时程和功率谱曲线

Fig.1 Time-histories and power spectra curve of earthquake records

之内。该桥梁的抗震设防烈度为 7 度，场地类型为 II 类，罕遇地震波加速度峰值统一调整为 0.227g。考虑阻尼器的非线性对结构地震反应的影响，采用非线性时程分析方法对结构的地震响应进行有限元分析。地震激励采用纵向+横向+竖向组合的输入方式，其中竖向地震作用取水平地震作用值的 0.65 倍。

2 有限元模型及动力特性分析

2.1 有限元模型

采用通用有限元软件 SAP2000 建立该大跨钢桁架桥梁结构的有限元模型，其中上、下弦杆，斜撑，桩及墩柱均采用三维空间梁单元模拟，桥面板采用壳单元模拟。黏滞阻尼器采用 Damper 单元的 Maxwell 模型模拟。二期恒载等效为线荷载均匀施加在主梁上，其动力分析模型如图 2 所示。常规的抗震设计方案中，主梁与桥墩台之间的约束形式平面图如图 3 所示。

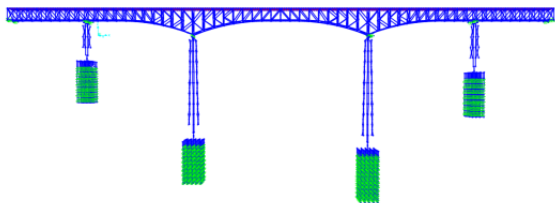
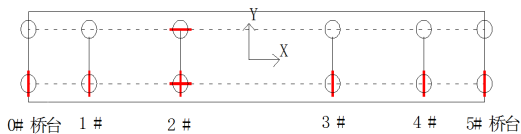


图 2 动力分析模型
Fig.2 Dynamic analysis model



注：⊕表示 X 和 Y 方向约束，⊙表示 Y 方向约束，⊖表示 X 方向约束

图 3 支座布置示意图
Fig.3 Sketch map of bearings arrangement

考虑桩-土-结构的相互作用，用 Spring 单元模拟桩结构周围土的抗力影响。根据 m 法^[10]确定 Spring 单元的位置及刚度，桩基础底部固结。

2.2 结构动力特性分析

桥梁有限元模型采用 SAP2000 内置的子空间迭代法进行结构动力特性分析，获得了桥梁前 100 阶自振频率。限于篇幅，仅列出前 10 阶结构自振

频率及其对应的振型说明，如表 1 所示。桥梁结构的基本自振周期为 5.35 s，属于长周期类结构。其自振频率分布较均匀且密集，无跳跃现象。第一阶振型为主梁纵飘，纵飘对桥梁结构的纵向地震反应贡献比较大。

表 1 桥梁自振频率及振型特点
Table 1 Natural frequencies and vibration modes of the bridge

阶数	频率/Hz	周期/s	振型特点
1	0.186 8	5.35	主梁纵飘
2	0.268 3	3.73	主梁一阶横向振动
3	0.404 9	2.47	3# 墩纵向振动
4	0.416 4	2.40	主梁一阶反对称横向振动
5	0.640 7	1.56	主梁二阶横向振动
6	0.765 4	1.31	主梁扭转
7	0.768 3	1.30	主梁对称竖向振动
8	0.842 8	1.19	主梁横向振动
9	1.026	0.97	主梁扭转
10	1.049	0.95	4# 墩纵向振动

3 阻尼器布置及参数优化

液体黏滞阻尼器是通过高黏性的液体（如硅油）中活塞的运动来耗能，这种阻尼器能在较大的频率范围内都呈现出比较稳定的阻尼特性。典型的液体黏滞阻尼器的力学特性可由下式表述：

$$F=C \cdot V^{\alpha} \quad (1)$$

式 (1) 中，F：阻尼力；C：阻尼系数； α ：阻尼指数；V：阻尼器两端相对运动速度；阻尼力和最大冲程是阻尼器的主要指标，而阻尼系数和阻尼指数是阻尼器控制作用大小的两个关键参数^[11]。阻尼指数 α 的取值一般在 0.3~1.0 之间，且 α 取值越小，滞回曲线越饱满，耗能效果越明显。阻尼系数 C 的取值则对阻尼力 F 的影响较大。

3.1 阻尼器布置方案

钢桁架桥在水平地震动作用下的主梁纵向位移和制动墩墩底内力是桥梁抗震设计的主要控制目标。在大跨度桥梁中，一般在活动墩墩顶和主梁之间设置阻尼器^[12]，可使阻尼器获得最大的变形。考虑到桥墩为非规则高墩，在每个活动墩处各设置两个黏滞阻尼器，桥台处各设置两个黏滞阻尼器，共设置 10 个黏滞阻尼器，其布置方案如图 4 所示。

3.2 阻尼器参数

从抗震的角度出发，实际工程应用中一般取

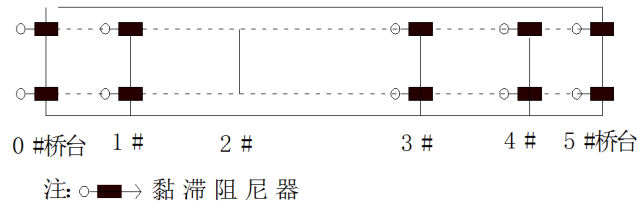


图 4 黏滞阻尼器布置方案
Fig.4 Arrangement scheme of fluid viscous dampers

阻尼指数 $\alpha=0.3\sim0.5$ ，再选取阻尼系数 $C=2500\sim5000\text{ kN}\times(\text{s/m})$ α 进行试算，在此范围内可根据减震的具体目标确定阻尼指数和阻尼系数。结合本例工程，阻尼指数 α 取值 0.3、0.35、0.4、0.45、0.5，阻尼系数 V 取值 2 500、3 000、3 500、4 000、4 500、5 000，共 30 个工况。在进行钢桁架桥梁非线性时程分析中，选取以下构件的内力及位移响应作为减震效果的评价依据：主要评估主梁的位移反应，1~4# 墩底的内力反应，以及黏滞阻尼器自身的阻尼力和变形。

4 结构地震反应分析及参数优化

4.1 未设黏滞阻尼器

5 跨连续钢桁架桥，2# 墩设置固定支座，其余墩设置滑动支座，不设阻尼器，顺桥向罕遇地震作用下的结构关键截面的动力响应如表 2 所示：表 2 罕遇地震作用下结构动力响应。由表 2 可知：顺桥向罕遇地震作用下，2# 制动墩和 3# 滑动墩均承受了较大的内力，与一般规则连续梁桥地震作用主要由制动墩承担不太一样，应特别重视。由于 3# 滑动墩墩身较高，3# 墩底弯矩和剪力和墩顶

位移均较大，也需重点关注。1# 和 4# 墩承受的地震作用则相差不大。此桥为铁路桥，对桥梁的纵向位移要求较高且桥梁的一阶模态为主梁纵飘，因此对纵桥向采取减震措施是非常有必要的。

4 设置黏滞阻尼器

由原桥抗震分析可知不同地震波对结构的动力反应差别较大，其中人工波作用下结构的动力响应最大。以下为输入人工波时黏滞阻尼器各参数对结构地震响应的影响曲线。

由图 5~10 可知：当阻尼指数 α 一定时，2# 固定墩墩底弯矩和剪力均随着阻尼系数增大而减小且减小的幅值越来越小；3# 滑动墩墩底弯矩和墩顶位移也是随阻尼系数的增大而减小且减小的趋势变缓，但剪力则减小到一定程度后又有上升的趋势，说明阻尼器对剪力的控制效果下降；主梁位移则随着阻尼系数的增大呈现先减小后增大的规律。

4.3 参数优化

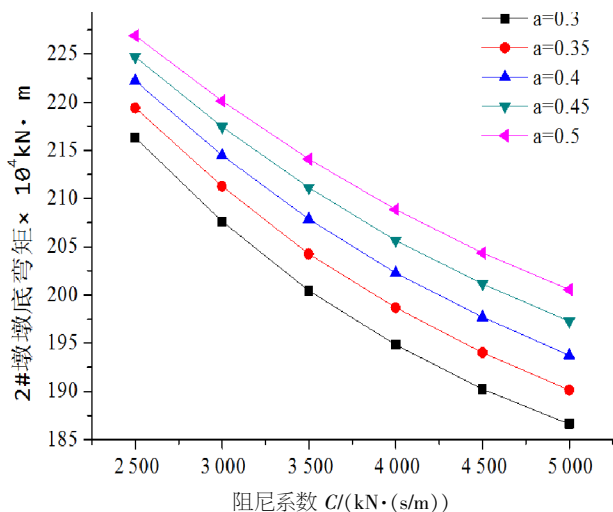
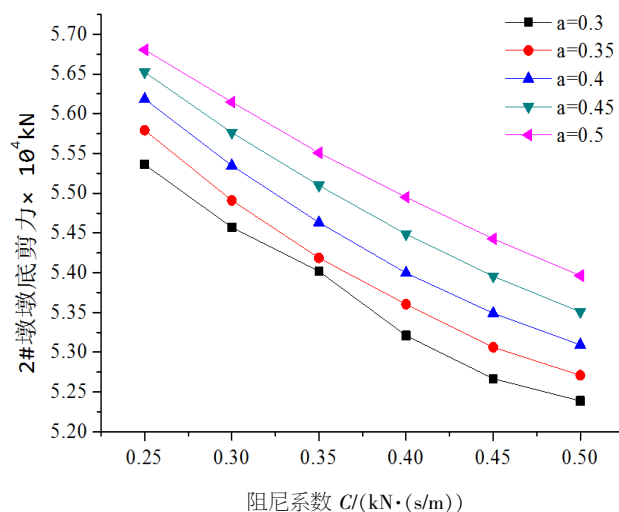
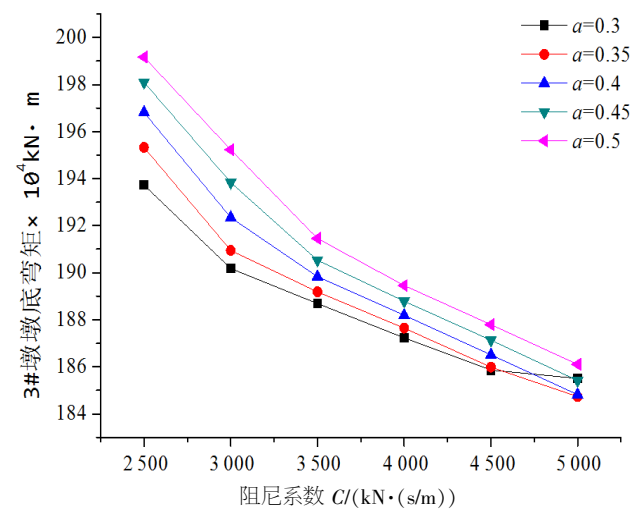
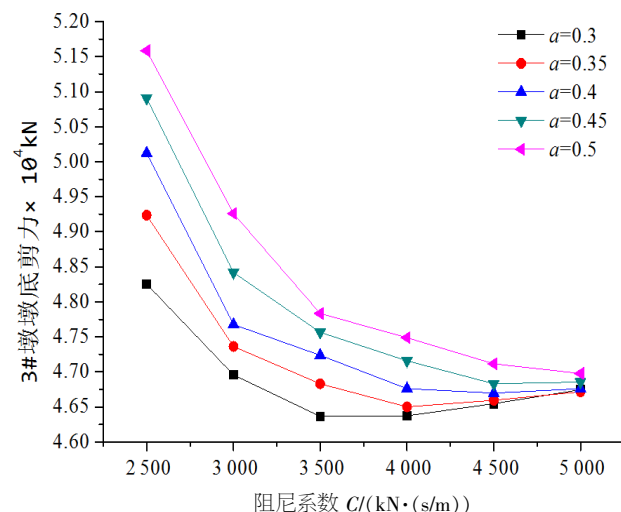
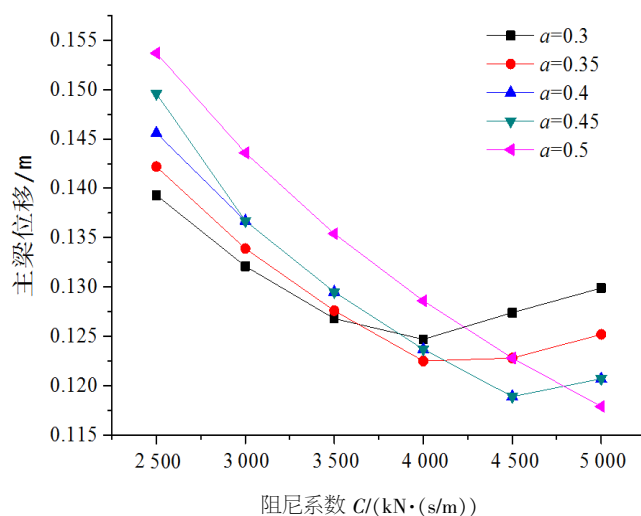
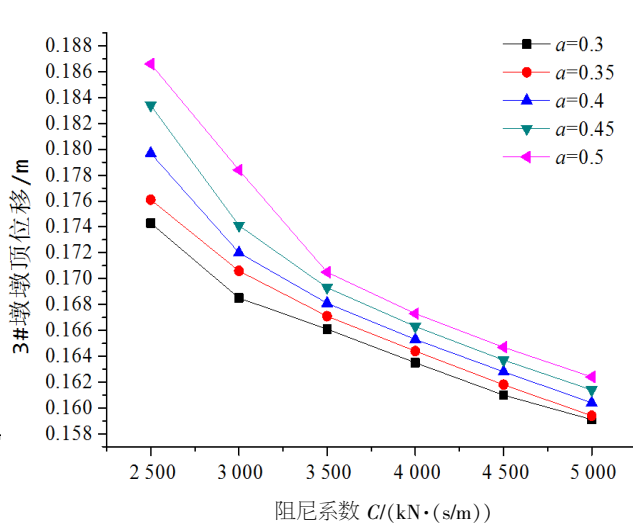
由于地震动具有随机的特性，且不同的地震波对结构的影响较大，输入三条地震波，取主梁结构反应的包络值，以此来确定最终的阻尼器参数。从大震作用关键构件位移和内力情况可以得出：2# 和 3# 高墩墩底的内力在给定阻尼指数 α 下随着阻尼系数 C 的增大而减小，但减小的幅值不再明显；主梁位移则在给定阻尼指数 α 下，存在一个最优的阻尼系数 C 使得主梁位移最小。综合主梁位移的大小、阻尼器的制作成本以及 2#、3# 墩底的内力情况最终本规程推荐黏滞阻尼器参数为 $\alpha=0.35$ ， $C=4\ 000$ 。

5 减震效果

由于该桥在人工波作用下的动力响应较两条天然波的大很多，所以减震效果主要看人工波这

表 2 罕遇地震作用下结构动力响应
Table 2 Dynamic responses of structures under rare earthquakes

动力响应	荷载工况		
	人工波	ELCentro	Taft
主梁位移/m	0.402 5	0.135 8	0.128 6
3# 墩顶位移/m	0.325 0	0.327 0	0.177 9
1# 墩底剪力/kN	35 328	24 550	25 730
2# 墩底剪力/kN	62 984	47 490	39 300
3# 墩底剪力/kN	78 820	60 790	45 850
4# 墩底剪力/kN	28 535	21 380	18 640
1# 墩底弯矩/(kN·m)	1 288 304	792 800	831 100
2# 墩底弯矩/(kN·m)	4 024 778	2 603 000	1 485 000
3# 墩底弯矩/(kN·m)	3 436 629	2 444 000	1 681 000
4# 墩底弯矩/(kN·m)	1 338 204	917 100	799 600

图5 2#墩墩底弯矩与阻尼系数 C 关系Fig.5 Moment of bottom of 2# pier vs damper coefficient C 图6 2#墩墩底剪力与阻尼系数 C 关系Fig.6 Base shears of 2# pier vs damper coefficient C 图7 3#墩墩底弯矩与阻尼系数 C 关系Fig.7 Moment of bottom of 3# pier vs damper coefficient C 图8 3#墩墩底剪力与阻尼系数 C 关系Fig.8 Base shears of 3# pier vs damping coefficient C 图9 主梁位移与阻尼系数 C 关系Fig.9 Displacement of girder vs damping coefficient C 图10 3#墩墩顶位移与阻尼系数 C 关系Fig.10 Top displacement of of 3# pier vs damping coefficient C

一荷载工况。纵桥向罕遇地震人工波作用下 3# 墩顶处黏滞阻尼器的滞回曲线如图 11 所示,曲线较为饱满,耗能效果良好。该桥在顺桥向人工波作

用下减震前后的主梁位移时程如图 12 所示。3 种地震波工况下主梁顺桥向减震前后位移如表 3 所示,位移减震效果较好。

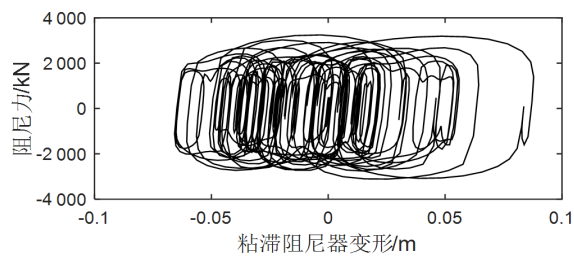


图 11 黏滞阻尼器滞回曲线
Fig.11 Hysteresis curves of fluid viscous damper

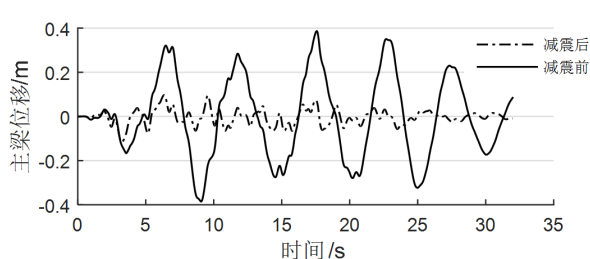


图 12 主梁顺桥向位移时程
Fig.12 Longitudinal displacement histories of girder

从表 3 可以看出:2 条天然波作用下主梁的位移相差不大,但与人工波相比则相差较大。在以上地震荷载工况下,设置黏滞阻尼器后的结构减震率为分别为 71%、53%、47%,显著减小了主梁在顺桥向罕遇地震作用下的位移,效果比较明显。

图 13-14 列出了纵桥向各桥墩减震前后的墩底内力,可以看出未设阻尼器时,2# 制动墩和 3# 滑动墩墩底弯矩和剪力均较大,设置黏滞阻尼器后 1#、2#、3#、4# 墩底弯矩减震率分别为 55%、52%、46%、44%,墩底剪力减震率分别为 55%、15%、41%、45%,显著减小了 2#、3# 高墩的地震响应。

图 13-14 列出了纵桥向各桥墩减震前后的墩

表 3 减震前后主梁位移
Table 3 Displacement of girder of bridge with or without viscous dampers

主梁位移/m	人工波	EL Centro	Taft
减震前	0.402 5	0.135 8	0.128 6
减震后	0.116 9	0.063 3	0.067 9
减震率	71%	53%	47%

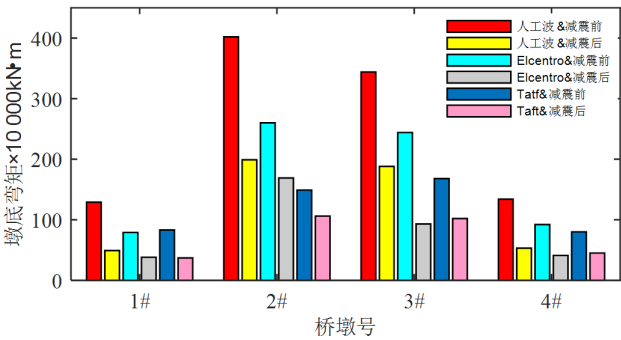


图 13 减震前后墩底弯矩
Fig.13 Pier bottom moments of bridge with or without viscous dampers

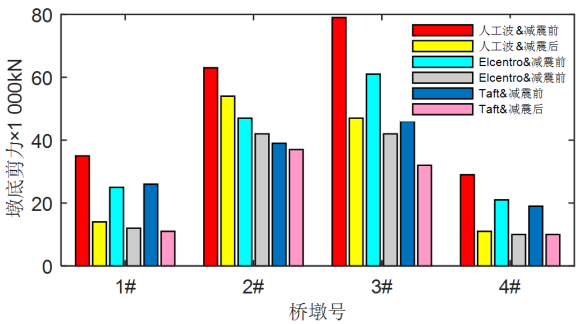


图 14 减震前后墩底剪力
Fig.14 Pier base shears of bridge with or without viscous dampers

6 结语

(1) 大跨度高墩连续钢桁架铁路桥强震下顺桥向地震反应较大, 通过在墩台与桥面之间设置黏滞阻尼器后可有效增强铁路桥梁在大震下的地震安全性。

(2) 研究得到了黏滞阻尼器的阻尼指数 α 和阻尼系数 C 的不同组合对大跨高墩连续钢桁架铁路桥梁关键构件位移及内力的响应规律。在 α 一定时, 2# 和 3# 墩底内力随着阻尼系数 C 的增大而减小, 但减小的幅值逐渐变小; 主梁位移则随着阻尼系数 C 的增大先减小后增大。

(3) 大跨度高墩连续钢桁架铁路桥当合理设置黏滞阻尼器后, 顺桥向大震作用下主梁位移最大减震率为 71%; 2# 和 3# 墩底弯矩最大减震率分别为 52% 和 46%; 2# 和 3# 墩底剪力最大减震率分别为 15% 和 41%, 有效减小了该桥的主梁和高墩地震响应。

参考文献:

- [1] 苏彦江. 钢桥构造与设计[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- [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] Charles Seim P. E. The Seismic Retrofit of the Golden Gate Bridge[C]//PRC-US Workshop on seismic analysis and design of special bridges, Shanghai, October 2002.
- [4] 陈永祁, 马良喆. 结构保护系统的应用与发展[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [5] CASAROTTI C. Bridge Isolation and Dissipation Devices: State of the Art Review of Seismic Response and Modelling of Modern Seismic Isolation and Dissipation Devices [D]. Pavia: University of Pavia and ROSE School, 2004.
- [6] Summary of Evaluation findings for the testing of seismic isolation and energy dissipating devices[R]. ASCE, 1999.
- [7] 韩万水, 黄平明, 兰燕. 斜拉桥纵向设置黏滞阻尼器参数分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25 (6): 146-151.
- [8] 宋子威, 蔡小陪. 黏滞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): 1 102-1 105.
- [9] 张超, 房贞政. 独塔自锚式悬索桥纵向设置黏滞阻尼器参数分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29 (2): 118-123.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [11] 段玉凤. 液体黏滞阻尼器的研究和试验 [C] //中国公路学会桥梁和结构工程分会 2005 年全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [12] HWANG J S, TSENG Y S. Design Formulations for Supplemental Viscous Dampers to Highway Bridge [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34 (13): 1 627-1 642.