

大跨度斜拉桥阻尼约束体系减震优化研究

赵人达,许智强,邹建波,贾毅

(西南交通大学土木工程学院,四川 成都 610031)

摘要 目的 研究在辅助墩和桥塔沿纵桥向布置液体黏滞阻尼器的墩、塔阻尼体系对大跨斜拉桥地震响应的影响,优化同类型大跨斜拉桥的减震体系. 方法 选取西固黄河大桥主桥为研究对象,基于非线性时程分析法对比4种约束体系下大跨度斜拉桥地震响应的特点,并通过参数分析确定了较为合理的黏滞阻尼器参数. 结果 辅助墩处的液体黏滞阻尼器分担部分桥塔阻尼器的阻尼力,使总阻尼力减小17.8%,桥塔阻尼器控制结构响应与辅助墩阻尼器控制结构响应基本不耦合;辅助墩与桥塔处液体黏滞阻尼器减震耗能明显,可以避免墩顶支座在纵桥向发生剪切破坏;综合考虑结构的内力和位移响应,西固黄河大桥合理阻尼器参数为:桥塔阻尼系数取12 000 $\text{kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{0.4}$,辅助墩阻尼系数取8 000 $\text{kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{0.4}$. 结论 墩、塔阻尼体系可以有效控制大跨斜拉桥的地震响应,相比单独在桥塔处布置液体黏滞阻尼器,墩、塔阻尼体系改善了桥塔和过渡墩的内力.

关键词 斜拉桥;布置优化;减隔措施;液体黏滞阻尼器

中图分类号 TU997;U442.55;U448.27

文献标志码 A

Study of Optimal Seismic Mitigation of Damping Restraint Systems for Long-Span Cable-Stayed Bridge

ZHAO Renda, XU Zhiqiang, ZOU Jianbo, JIA Yi

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031)

Abstract: In order to study the influence of the pier and tower damping system on the seismic response of the large span cable-stayed bridge with the liquid viscous dampers arranged on the longitudinal bridge, the damping system of the large span cable-stayed bridge was optimized, and Xigu Yellow River Bridge was selected as the research object. Besides, the seismic response of long-span cable-stayed bridge under four kinds of restraint systems was compared based on nonlinear time-history analysis, and the parameters of viscous dampers were determined by parameter analysis. The results showed that the liquid viscous dampers at the auxiliary pier share the damping force of the partial tower damper, reducing the total damping force by 17.8%, and the structural

收稿日期:2017-11-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB1200401, 2017YFB1201204);广东省科技厅科技计划项目(2014-02-015)

作者简介:赵人达(1961—),男,教授,博士研究生导师,主要从事大跨桥梁抗震与减隔震方面研究.

response of the bridge tower damper control is substantially not coupled to the structural response of the auxiliary damp damper control. The shear failure of the pier top support in the longitudinal bridge can be avoided by the liquid viscous dampers on the auxiliary pier and the bridge tower. The appropriate seismic response is gained when the damping parameters are taking as damping coefficient of bridge tower $C = 12\,000\text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{0.4}$, damping coefficient of auxiliary pier $C = 8\,000\text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{0.4}$. The results of the analysis indicate that the damping system of pier and tower can effectively control the seismic response of the long-span cable-stayed bridge. Compared with the liquid viscous dampers arranged at the bridge tower alone, the damping system of pier and tower further reduces the internal force of the pylon and the transition pier.

Key words: cable-stayed bridge; arrangement optimization; anti-seismic measures; fluid viscous damper

我国位于环太平洋地震带和欧亚地震带之间,是地震多发国家^[1]. 近年来的地震均对大跨度桥梁等生命线工程造成毁坏,给震后灾区救援工作带来巨大的困难,关于大跨斜拉桥的减隔震设计以及合理约束体系的研究受到了越来越多人的关注^[2-6]. 目前在大跨度斜拉桥减隔震设计中应用较多的是液体黏滞阻尼器,国内外学者针对近年来建成的大跨度斜拉桥阻尼约束体系进行了深入的研究^[7-10],姜冲虎等^[11-12]研究了液体黏滞阻尼器和减隔震专用支座配合使用对桥墩受力的影响;张常勇等^[13]对比分析了使用E型钢阻尼器和液体黏滞阻尼器的阻尼约束体系对斜拉桥减震的影响,得出使用液体黏滞阻尼器是较好地选择,但会使得塔底内力增大. 研究主要是针对桥塔处布置液体黏滞阻尼器体系与传统体系的对比分析,而关于大跨斜拉桥中如何合理布置液体黏滞阻尼器以取得最优的减震效果研究较少. 笔者以西固黄河大

桥主桥为研究对象,基于非线性时程分析法对比了4种约束体系下大跨度斜拉桥地震响应的特点,并通过参数分析确定了较为合理的黏滞阻尼器参数,为今后同类型桥梁的减隔震设计提供参考.

1 工程概况及有限元模型

1.1 工程概况

西固黄河大桥是一座跨径布置为(67 + 110 + 360 + 110 + 67)m的双塔双索面半漂浮体系结合梁斜拉桥,左右边跨各设置一个辅助墩,主梁采用Q370qD工字钢叠合C55混凝土板构成,中心梁高2.67 m,桥面宽25.5 m. 单塔28对斜拉索对称布置,斜拉索采用镀锌低松弛平行钢丝束. 桥塔采用C50混凝土,承台以上塔高151 m,是西北地区在黄河上跨度最大、塔身最高的斜拉桥. 西固黄河大桥总体布置图如图1所示.

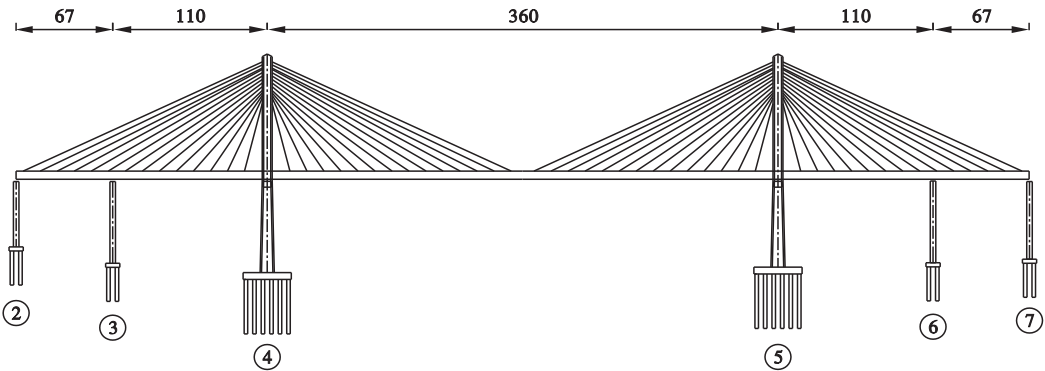


图1 西固黄河大桥总体布置

Fig. 1 General arrangement of xigu yellow river bridge

根据文献[14]提供的资料,桥址处场地类型为Ⅱ类,抗震设防烈度为8度,地震动峰值加速度为0.2g.该桥E2地震为50年超越概率2%的地震作用.利用反应谱转人工波程序将E2地震水平加速度反应谱转化为人工地震(见图2).基于人工波时程曲线转换成加速度反应谱与设计加速度反应谱的对比如图3所示,由图3可见两者较为吻合,可用于抗震计算.

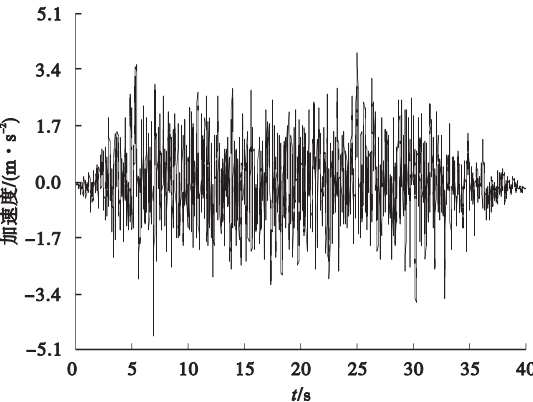


图2 人工地震波时程曲线

Fig.2 Time-history curve of artificial seismic wave

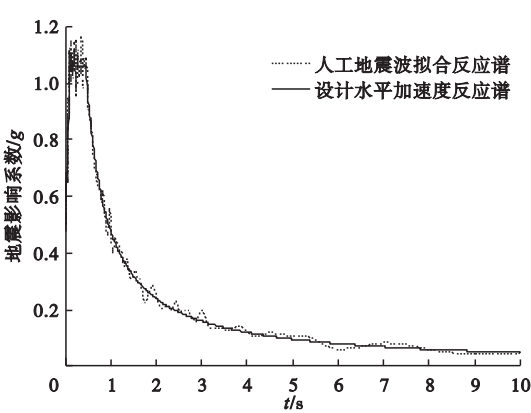


图3 人工地震波拟合反应谱与设计加速度反应谱对比

Fig.3 Comparison between curve fitting spectra based on artificial seismic wave and acceleration response spectrum of design standard

1.2 有限元模型

笔者采用有限元软件 ANSYS 建立全桥空间模型(见图4).桥塔、桥墩、主梁及桩基础采用空间梁单元 BEAM188 模拟,斜拉索单向受拉采用桁架单元 LINK10 模拟,考虑斜拉索的垂度效应使用Ernst公式对其弹性

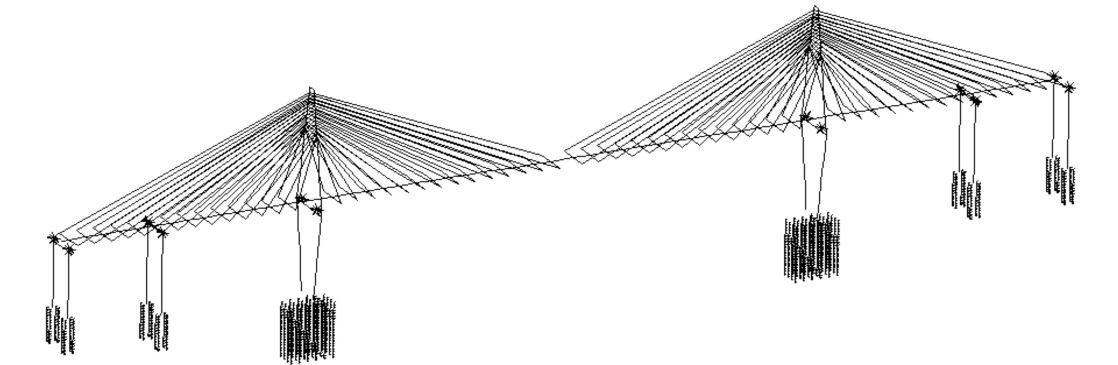


图4 西固黄河大桥有限元模型

Fig.4 Finite element model for xigu yellow river bridge

模量进行修正,桥面二期恒载以集中质量添加到主梁节点上,集中质量采用 MASS21 模拟,桩土相互作用采用 COMBIN14 模拟土弹簧,土弹簧的刚度采用 m 法计算,模型中承台与墩底、承台与桩顶采用刚性连接.

1.3 液体黏滞阻尼器

常用的液体黏滞阻尼器主要由耳环、缸体、活塞、黏滞阻尼材料和导杆等部分组成,

液体黏滞阻尼器通过密封构造中的黏性流体介质和孔缩效应产生黏滞阻尼力,以此减小结构本身的振动响应^[15-16].根据液压阻尼器的阻尼力与相对速度的比例关系可以分为线性阻尼器和非线性阻尼器,其关系式为^[17]

$$F = CV^\xi.$$
 (1)

式中: F 为阻尼力; C 为阻尼系数; V 为阻尼器相对速度; ξ 为速度指数,桥梁中一般取

0.2~1.

液体黏滞阻尼器的控制参数包括阻尼系数和阻尼指数. 阻尼器恢复力特性如图 5 所示^[17], 当 $\xi=1$ 时, 其恢复力曲线形状近似椭圆, 当 $\xi<1$ 时, 其恢复力曲线形状趋近于矩形^[18].

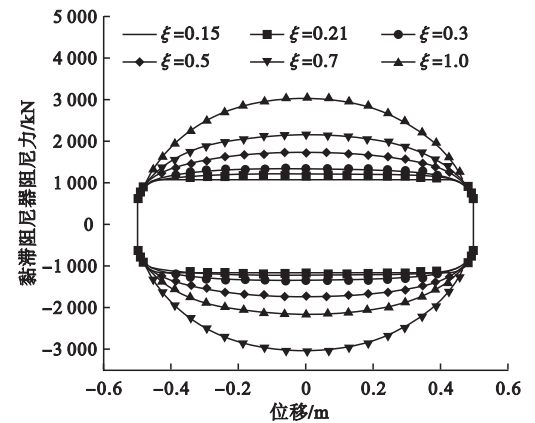


图 5 阻尼器滞回曲线与速度指数关系

Fig. 5 Relationship between hysteresis curve and velocity index of damper

采用 COMBIN37 单元来模拟黏滞阻尼器, COMBIN37 单元称为控制单元, 是一种具有开关功能的单向单元^[19], 可用速度的函数控制阻尼, 该单元为非线性一维单元, 有 2 个活动节点和 2 个控制节点, 整个单元的非线性行为主要由控制节点产生, 笔者以控制节点的相对位移作为阻尼器的冲程.

2 约束体系研究

为寻求相对最优的纵向约束体系, 选择半漂浮体系、刚构体系、桥塔阻尼体系及墩、塔阻尼体系 4 种结构体系进行比选. 半漂浮体系未布置减隔震装置; 刚构体系中斜拉桥墩、塔、梁三者固接, 结构刚度大; 桥塔阻尼体系仅在桥塔下横梁与主梁间沿纵桥向布置液体黏滞阻尼器, 每个桥塔布置 2 个液体黏滞阻尼器, 全桥共布置 4 个; 墩、塔阻尼体系中理论上可在每个主塔、桥墩处布设黏滞阻尼器, 由于主梁端部需布置伸缩缝, 构造相对复杂, 因此, 笔者分析不考虑在过渡墩与主梁间

布设黏滞阻尼器, 仅考虑在辅助墩和主塔处布设黏滞阻尼器, 全桥共布置 8 个. 各液体黏滞阻尼器阻尼系数 C 取 $10\,000\text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^\alpha$, 速度指数 α 取 0.4.

2.1 动力特性分析

利用结构动力分析中的多重 Ritz 向量法计算 3 种模型的动力特性, 表 1 为计算模型的振动频率及第一阶振型特征. 由表 1 可知, 对于半漂浮体系, 由于纵向无约束, 结构纵向刚度较小, 一阶振型为主梁的纵飘和竖弯; 刚构体系中, 结构刚度较大, 频率明显增大, 一阶振型主梁正对称侧弯, 说明结构横向刚度小于纵向刚度; 桥塔阻尼体系在桥塔纵向布置黏滞阻尼器后结构振动频率略微增大, 一阶振型没有改变, 墩、塔阻尼体系在辅助墩处增设了液体黏滞阻尼器, 振动频率和振型基本与桥塔阻尼体系一致, 说明液体黏滞阻尼器仅增大了结构的阻尼, 对结构动力特性影响较小.

表 1 模型动力特性

Table 1 Dynamic characteristics of model		
约束方式	自振频率/ Hz	1 阶振型特征
半漂浮体系	0.192	主梁纵飘 + 反对称竖弯
刚构体系	0.370	主梁正对称侧弯
桥塔阻尼体系	0.194	主梁纵飘 + 反对称竖弯
墩、塔阻尼体系	0.194	主梁纵飘 + 反对称竖弯

2.2 地震响应分析

采用非线性时程分析法对 4 种结构体系进行纵桥向地震响应分析. 计算中地震波沿纵向 + 竖向输入, 竖向地震动取 0.65 倍的水平向地震动, 笔者分析暂不考虑行波效应影响. 4 种约束体系内力最大响应如表 2 所示. 从表 2 可以看出, 刚构体系中过渡墩及塔底内力相比半漂浮体系都有较大幅度增加, 显然, 刚构体系对过渡墩和桥塔的内力控制不利; 桥塔阻尼体系的塔底弯矩较半漂浮体系减小 7.6%, 剪力增大了 39.7%, 辅助墩底内力大幅减小, 过渡墩底内力增大约 10%, 表

明桥塔阻尼体系并不能很好的控制结构的内力响应;而墩、塔阻尼体系在辅助墩和桥塔处均布置液体黏滞阻尼器后全面减小了桥塔阻

尼体系的内力响应,特别是过渡墩底弯矩相较桥塔阻尼体系有明显减小,有效改善了安装阻尼器引起的过渡墩底内力的增大。

表 2 关键截面最大内力响应
Table 2 Maximum force response of key sections

减震方式	剪力/kN			弯矩/(kN·m)		
	过渡墩底	辅助墩底	塔底	过渡墩底	辅助墩底	塔底
半漂浮体系	91.9	645	9 090	645.4	7 048.1	567 000
刚构体系	945.4	389.1	15 620	15 570	3 737	729 100
桥塔阻尼体系	102.1	370.4	12 660	846.3	3 987	524 400
墩、塔阻尼体系	99.2	333.9	12 610	794.6	3 607	511 900

4种结构体系主梁及塔顶位移最大响应如表3所示.从表3可以看出,半漂浮体系的主梁跨中位移、塔顶位移及主梁与墩顶相对位移响应最大,刚构体系结构各位移响应最小;桥塔阻尼体系位移响应约为半漂浮体系位移响应的一半,墩、塔阻尼体系在桥塔阻尼体系的基础上进一步减小了结构的位移响应.此外,辅助墩处的液体黏滞阻尼器分担了一部分桥塔阻尼器的阻尼力,使得阻尼器总阻尼力减小了17.8%,这对阻尼器的安装制

作较为有利.
对于大跨斜拉桥,纵桥向约束体系如采用半漂浮体系对主梁位移控制不利;采用刚构体系对主塔及过渡墩内力控制不利;而相比单一的桥塔阻尼体系,墩、塔阻尼体系显著降低了结构各部位的内力及位移,尤其是改善了桥塔和过渡墩底内力.综合考虑结构在地震作用下的整体变形及内力响应,墩、塔阻尼体系是大跨斜拉桥抗震设计的较优选择.

表 3 关键截面最大位移响应
Table 3 Maximum displacement response of key sections

减震方式	跨中位移/cm	塔顶位移/cm	主梁与过渡墩 相对位移/cm	主梁与辅助墩 相对位移/cm	主梁与主塔 相对位移/cm	阻尼力/kN
半漂浮体系	58.8	55.3	54.3	52.4	46.7	—
刚构体系	11.1	13.8	11.1	8.7	0	—
桥塔阻尼体系	28.9	31.8	25.9	25.4	26.2	6 796
墩、塔阻尼体系	25.6	28.1	23.3	4.6	16.91	塔:3 478;辅助墩:2 107

3 黏滞阻尼器参数的确定

为使墩、塔阻尼体系达到最佳的减震效果,需要对其进行参数分析.对于大跨斜拉桥液体黏滞阻尼器速度指数一般取0.2~0.5,假定所有黏滞阻尼器速度指数 α 为0.4.参考文献[20]中附加阻尼器阻尼系数取值,经前期试算后,主塔处黏滞阻尼系数 C_1 和辅助墩处黏滞阻尼系数 C_2 分别取8 000、10 000、12 000、16 000、20 000 kN/(m·s⁻¹)^{0.4}进行组合分析,共计25个工况.

3.1 黏滞阻尼器参数分析

结构弯矩响应随黏滞阻尼器系数变化规律如图6所示.过渡墩底弯矩响应随桥塔阻尼系数的增大而减小,随辅助墩阻尼系数的增大而增大;辅助墩底弯矩响应随辅助墩阻尼系数的增大呈增大的趋势,但变化幅度较小,而桥塔阻尼系数的改变对其弯矩响应基本没影响,塔底弯矩响应随桥塔阻尼系数的增大而增大,而辅助墩阻尼系数的变化并不能改变其弯矩响应,说明桥塔阻尼器与辅助墩阻尼器对于结构内力响应基本不耦合.

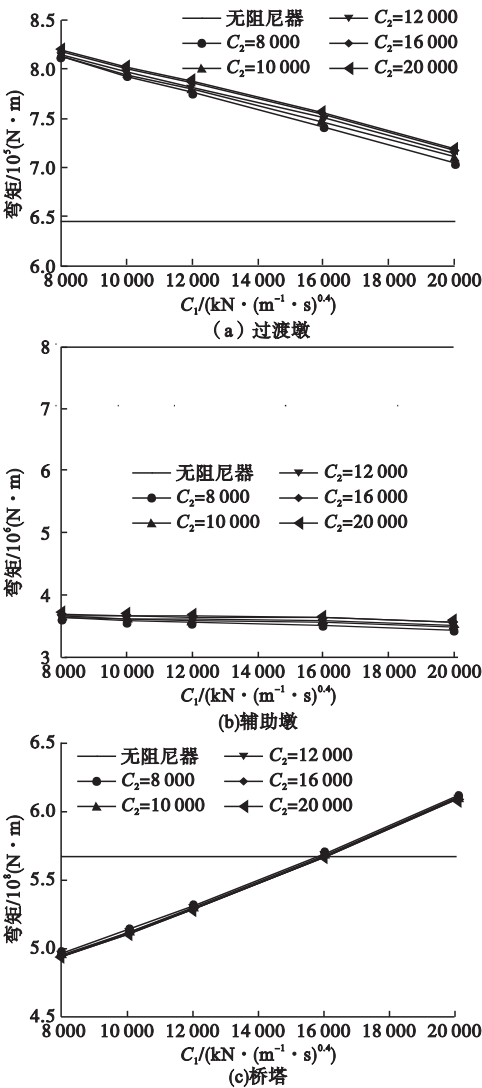


图6 墩(塔)底弯矩与阻尼参数间的关系

Fig. 6 Relationship between bottom bending moment and damping parameters

结构位移响应随黏滞阻尼器系数变化规律如图7所示。从图7可以看出,主梁与过渡墩、主梁与主塔的相对位移响应均与辅助墩阻尼系数的变化关系不大,而只与桥塔阻尼系数有关,且随着桥塔阻尼系数的增大而减小;主梁与辅助墩的相对位移响应随辅助墩阻尼系数的增大而减小,而桥塔阻尼系数的改变对其相对位移响应基本没影响,说明桥塔阻尼器与辅助墩阻尼器对于结构位移响应基本不耦合。

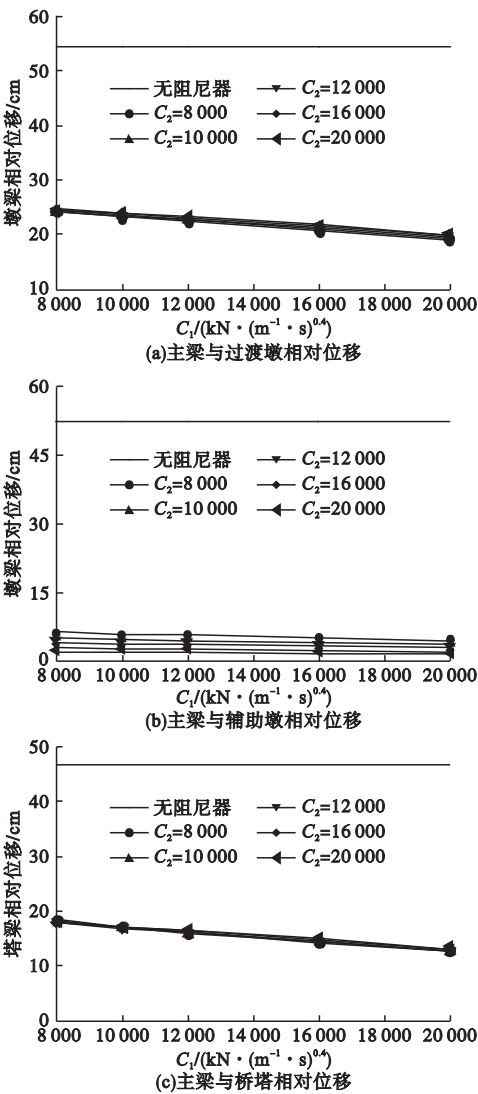


图7 结构位移与阻尼器参数间的关系

Fig. 7 Relationship between structural displacement and damper parameters

阻尼器阻尼力随阻尼系数变化规律如图8所示。从图8可以看出,桥塔阻尼器的最大阻尼力与辅助墩阻尼系数变化关系不大,而随着桥塔阻尼系数的增大而显著增大,辅助墩阻尼器的最大阻尼力随着辅助墩阻尼系数增大而显著增大,可见,阻尼器的阻尼力只与其安装位置的阻尼器参数有关。考虑到过大的阻尼力会降低结构的寿命并对结构的设计制作带来一定的困难,因此不宜选择阻尼力过大的阻尼系数。

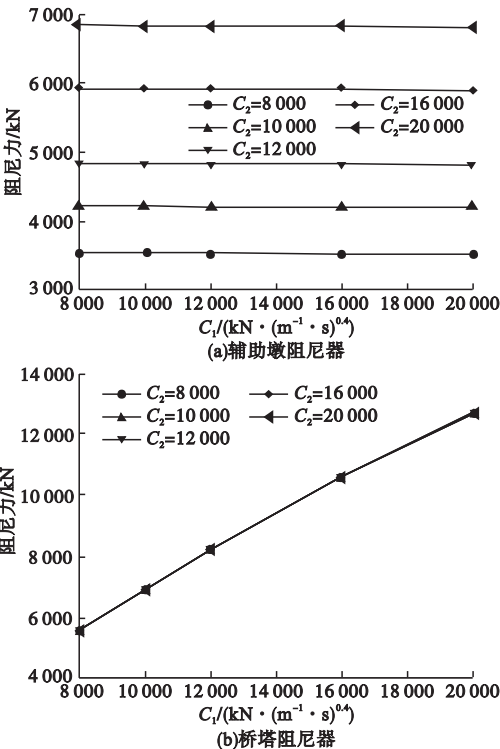


图8 阻尼力与阻尼器参数间的关系

Fig. 8 Relationship between damping force and damper parameters

综合考虑桥塔阻尼器和辅助墩阻尼器参

数对结构内力和位移响应的影响,当桥塔阻尼系数为 $12\,000\text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{0.4}$,辅助墩阻尼系数为 $8\,000\text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{0.4}$ 时,墩、塔阻尼体系可以取得较好的减震效果.

3.2 减震效果分析

为了更加直观地体现2种阻尼体系对大跨斜拉桥的减震效果,以无阻尼器的半漂浮体系为基准模型,定义减震率 η 为

$$\eta = \frac{A - B}{B} \times 100\% . \tag{2}$$

式中: A 和 B 分别为阻尼体系和半漂浮体系地震响应峰值.

表4给出了2种阻尼体系在E2地震作用下的减震率.由表4可知,在辅助墩与桥塔处增设液体黏滞阻尼器后,各墩底弯矩进一步减小,辅助墩底弯矩显著降低,减震率达49.4%,并以过渡墩底弯矩的增大为代价,但其弯矩未超过屈服强度,仍然处于弹性工作范围内.此外,墩、塔阻尼体系有效控制了主梁与各墩顶相对位移,可以有效避免墩顶支座在纵桥向发生剪切破坏.

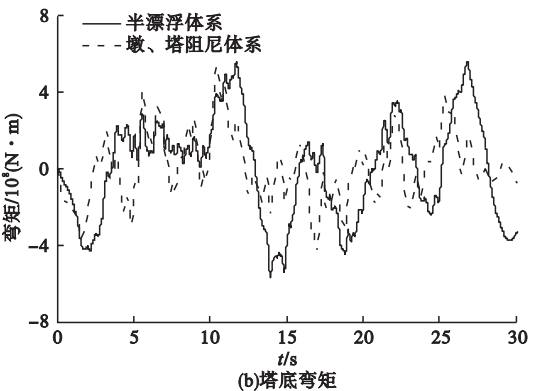
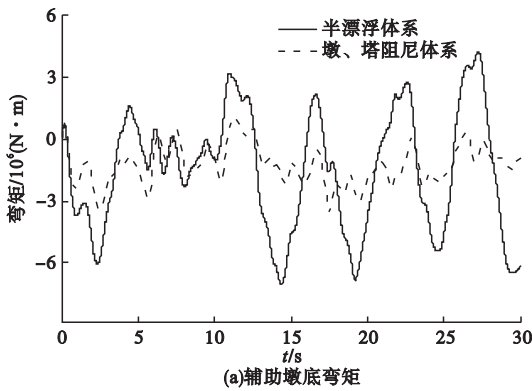
表4 结构地震响应减震率

Table 4 Response shock absorption rate of sructural seismic %

减震方式	墩底弯矩减震率			相对位移减震率		
	过渡墩	辅助墩	桥塔	主梁与过渡墩	主梁与辅助墩	主梁与桥塔
桥塔阻尼体系	31.2	-43.4	-7.6	-52.3	-51.5	-43.9
墩、塔阻尼体系	20.3	-49.4	-9.7	-58.7	-89.3	-65.7

图9为墩、塔阻尼体系与半漂浮体系辅助墩底、塔底弯矩以及塔梁相对位移的地震

时程曲线.液体黏滞阻尼器滞回曲线如图10所示.



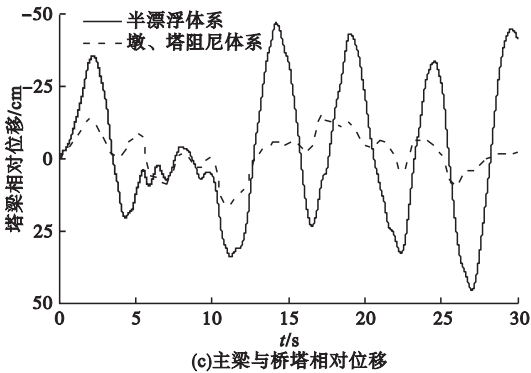


图 9 地震响应时程曲线对比

Fig. 9 Comparison of time-history curves of seismic response

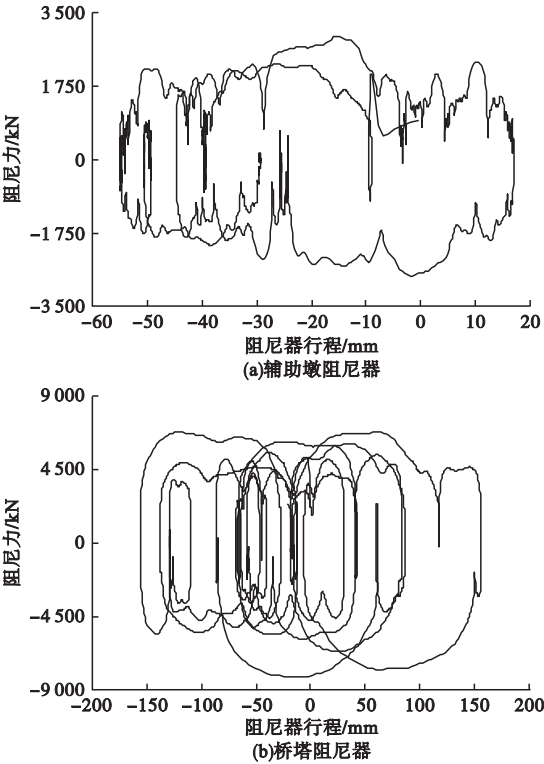


图 10 液体黏滞阻尼器滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curves of fluid viscous damper

由图 9 可知,两种体系地震响应时程曲线变化规律基本一致,墩、塔阻尼体系的辅助墩底弯矩与主梁桥塔相对位移峰值显著降低,塔底弯矩峰值也小于半漂浮体系,从而提高了结构的抗震性能。

墩、塔阻尼体系的辅助墩与桥塔处液体黏滞阻尼器在地震作用下的滞回曲线如图

10 所示.由图可知,辅助墩与桥塔处液体黏滞阻尼器滞回曲线形状近似椭圆且面积饱满,与文中分析一致,说明辅助墩与桥塔处液体黏滞阻尼器协同作用,减震耗能明显。

4 结 论

(1)在辅助墩和桥塔沿纵桥向布置液体黏滞阻尼器的墩、塔阻尼体系可以有效控制大跨斜拉桥的地震响应,相比单独在桥塔处布置液体黏滞阻尼器,墩、塔阻尼体系进一步降低了结构各部位的内力及位移,尤其是改善了桥塔和过渡墩的内力。

(2)辅助墩处的液体黏滞阻尼器分担了一部分桥塔阻尼器的阻尼力,使得阻尼器总阻尼力减小了 17.8%,此外,桥塔阻尼器控制结构响应与辅助墩阻尼器控制结构响应基本不耦合。

(3)辅助墩与桥塔处液体黏滞阻尼器滞回曲线形状近似椭圆且面积饱满,说明辅助墩与桥塔处液体黏滞阻尼器减震耗能明显,可以避免墩顶支座在纵桥向发生剪切破坏.综合考虑结构的内力和位移响应,西固黄河大桥桥塔阻尼系数取 $12\,000\text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{0.4}$,辅助墩阻尼系数取 $8\,000\text{ kN}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{0.4}$ 时,可以取得较好的减震效果。

参考文献

[1] 叶爱君,管仲国.桥梁抗震[M].北京:人民交通出版社,2011.
(YE Aijun, GUAN Zhongguo. Seismic design of bridge[M]. Beijing: China Communication Press, 2011.)
[2] CAMARA A. Fundamental mode estimation for modern cable-stayed bridges considering the tower flexibility[J]. Journal of bridge engineering, 2014, 19(6): 213-226.
[3] 叶爱君,胡世德,范立础.斜拉桥抗震结构体系研究[J].桥梁建设,2002(4):1-4.
(YE Aijun, HU Shide, FAN Lichu. Research on aseismatic structural system of cable-stayed bridge[J]. Bridge construction, 2002 (4): 1-4.)
[4] 管仲国,李建中.城市高架桥合理抗震体系选择与经济性对比[J].地震工程与工程振动,2011,31(3):91-98.

- (GUAN Zhongguo, LI Jianzhong. Structural performance and cost comparison of different seismic resisting systems for urban express way viaducts[J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2011, 31(3):91-98.)
- [5] MITOULIS S A, TEGOS I A, STYLIANIDIS K C. Cost-effectiveness related to the earthquake resisting system of multi-span bridges[J]. Engineering structures, 2010, 32(9):2658-2671.
- [6] CAMARA A, ASTIZ M A. Pushover analysis for the seismic response prediction of cable-stayed bridges under multi-directional excitation[J]. Engineering structures, 2012, 41(3):444-455.
- [7] 燕斌, 杜修力, 韩强, 等. 减隔震混合装置在独塔斜拉桥抗震设计中的应用[J]. 桥梁建设, 2014, 44(6):101-106.
(YAN Bin, DU Xiuli, HAN Qiang, et al. Application of hybrid seismic mitigation and isolation device to seismic design of single-pylon cable-stayed bridge[J]. Bridge construction, 2014, 44(6):101-106.)
- [8] DENG K, PAN P, WANG C. Development of crawler steel damper for bridges[J]. Journal of constructional steel research, 2013, 85(5):140-150.
- [9] PENG pan, HONG Yan, WANG Hong, et al. Development of Steel dampers for bridges to allow large displacement through a vertical free mechanism[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2014, 13(3):375-388.
- [10] 聂利英, 李建中, 胡世德, 等. 任意荷载作用下液体黏滞阻尼器在桥梁工程中减震作用探讨[J]. 计算力学学报, 2007, 24(2):197-202.
(NIE Liying, LI Jianzhong, HU Shide, et al. Investigation of decreasing vibration effects of fluid viscous damper in engineering under random loads[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2007, 24(2):197-202.)
- [11] 姜冲虎, 李德建. 大跨度连续梁桥 SSAB 与 FVD 组合应用减隔震技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(6):28-32.
(JIANG Chonghu, LI Dejian. Seismic isolation technology research of long-span continuous beam bridge with SSAB and FVD[J]. Journal of railway science and engineering, 2013, 10(6):28-32.)
- [12] 姜冲虎, 杨博闻, 李德建, 等. 独塔斜拉桥抗震分析及其合理约束体系研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(6):6-12.
(JIANG Chonghu, YANG Bowen, LI Dejian, et al. Seismic analysis and its restraint system feasibility of single pylon cable-stayed bridge[J]. Journal of railway science and engineering, 2014, 11(6):6-12.)
- [13] 张常勇, 王文斌, 姚宗健. 大跨度斜拉桥顺桥向阻尼约束体系研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(6):75-80.
(ZHANG Changyong, WANG Wenbin, YAO Zongjian. Study of longitudinal damping restraint systems for a long span cable-stayed bridge[J]. Bridge construction, 2014, 44(6):75-80.)
- [14] 唐学军. 连霍国道主干线兰州南绕城高速公路两阶段施工图设计桥梁涵洞设计说明[R]. 兰州: 甘肃省交通规划勘察设计院有限责任公司, 2014.
(TANG Xuejun. Even the main line of Huo Guo Road, Lanzhou south ring expressway two-stage construction drawing design bridge culver design description[R]. Lanzhou: Gansu Province Transportation Planning Survey and Design Institute Co. Ltd., 2014.)
- [15] 金靖, 江晓峰. 黏滞阻尼器与金属屈服耗能器的设计参数与性能比较[J]. 浙江工业大学学报, 2008, 36(1):102-107.
(JIN Jing, JIANG Xiaofeng. Design parameters and performance comparison of viscous dampers and metallic yield dampers[J]. Journal of Zhejiang university of technology, 2008, 36(1):102-107.)
- [16] 周云. 黏滞阻尼减震结构设计[M]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
(ZHOU Yun. Viscous dampers structure design[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2006.)
- [17] 姜锋. 大跨度斜拉桥阻尼器参数分析[J]. 世界地震工程, 2015, 1(31):129-133.
(LOU Feng. Viscous damper parameter analysis on a long-span cable-stayed bridge[J]. World earthquake engineering, 2015, 1(31):129-133.)
- [18] 董胜利, 亓兴军. 大跨斜拉桥减震控制分析[J]. 铁道工程学报, 2007(7):47-51.
(DONG Shengli, QI Xingjun. Seismic response control analysis of long-span cable-stayed bridge[J]. Journal of railway engineering society, 2007(7):47-51.)
- [19] 李小珍, 谭清泉, 肖林, 等. 大跨度三塔斜拉桥减震措施研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 9(33):70-75.
(LI Xiaozhen, TAN Qingquan, XIAO Lin, et al. Research on the anti-seismic measures for long-span three-pylon cable-stayed bridges[J]. Journal of railway engineering society, 2016, 33(9):70-75.)
- [20] 叶爱君, 范立础. 附加阻尼器对超大跨度斜拉桥的减震效果[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(7):859-863.
(YE Aijun, FAN Lichu. Seismic response reduction of a super-long-span cable-stayed bridge by adding dampers[J]. Journal of tongji university (natural science), 2006, 34(7):859-863.)