

文章编号:1673-2049(2015)01-0089-07

# 长周期地震动作用下大跨径斜拉桥响应分析

赵国辉<sup>1</sup>, 郭华东<sup>2</sup>, 刘建新<sup>1</sup>

(1. 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 广西壮族自治区交通规划勘察设计研究院, 广西 南宁 530011)

**摘要:**为研究长周期地震动对大跨径桥梁地震响应的影响,分别选取了若干长周期地震波和普通地震波进行频谱特性对比;以某特大跨径斜拉桥为例,建立了有限元模型,采用非线性时程分析方法对比分析了2类地震动作用下该桥的地震响应。为控制大跨径斜拉桥在2类地震动激励下梁端的位移响应,选用了弹性连接装置和液体粘滞阻尼器2种措施对比研究了其减震效果。结果表明:长周期地震动对大跨径桥梁的位移及内力响应影响显著;在长周期地震动作用下,弹性连接装置的位移控制效率较低,并会导致结构内力的大幅增加;参数合理的液体粘滞阻尼器的控制效果具有较好的广谱性,即在普通地震动和长周期地震动作用下均有较好的减震效果。

**关键词:**长周期地震动;大跨径斜拉桥;地震响应;弹性连接装置;液体粘滞阻尼器

**中图分类号:**U442.5

**文献标志码:**A

## Analysis on Response of Long Span Cable-stayed Bridge Under Long-period Ground Motion

ZHAO Guo-hui<sup>1</sup>, GUO Hua-dong<sup>2</sup>, LIU Jian-xin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064,

Shaanxi, China; 2. Guangxi Communications Planning Surveying and Designing Institute,

Nanning 530011, Guangxi, China)

**Abstract:** In order to study the influence of long-period ground motion on seismic response of long span bridges, some long-period ground motions and conventional ground motions were selected, and the comparative analysis on spectral characteristics of these motions were carried out. A long span cable-stayed bridge was taken as an example to analyze the seismic response of the bridge under two types of ground motions by using nonlinear time-history method. Elastic connection device and fluid viscous damper were used to mitigate the seismic response of the bridge under two types of the ground motions. In addition, the effects of the two kinds of devices were analyzed. The results show that long period ground motions have great influence on seismic response of the bridge. Elastic connection device has lower efficiency and will introduce more seismic force into the bridge under long-period ground motion. While, the effect of fluid viscous damper is broad-spectrum, that is, it has wonderful and stable effect under both long-period ground motion and conventional ground motion with proper damping parameters.

**Key words:** long-period ground motion; long span cable-stayed bridge; seismic response; elastic link device; fluid viscous damper

收稿日期:2014-06-21

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(0009-2014G1211006)

作者简介:赵国辉(1978-),男,河北邯郸人,副教授,工学博士,E-mail:zgh@gl.chd.edu.cn。

0 引言

地震的破坏力影响范围随震级的增加而扩大,强震发生时,由于断层破裂尺度大且持续时间长,地震动中包含了较丰富的长周期成分,随着传播距离的增加,地震波中的短周期成分迅速衰减,而长周期成分由于其穿透能力强,不但衰减缓慢,而且在土质软弱、土层深厚的局部场地条件下还会进一步放大<sup>[1-5]</sup>。尽管目前记录到的典型长周期地震动峰值加速度较低,但此类地震动造成的震害却不容忽视,如 1977 年罗马尼亚 7.2 级地震,导致距震中 300 多千米的 Sofia 市和 Svishtov 市高层建筑破坏严重;1985 年墨西哥 8.1 级地震使得距震中约 400 km 的墨西哥城内高层建筑产生了严重的倒塌<sup>[6]</sup>;2003 年日本北海道十胜冲 8.0 级地震,距震中 225 km 的苦小牧港内多个大型储油罐发生石油液面晃动、溢流并引发火灾,大火持续数日才被扑灭;2008 年中国汶川 8.0 级地震,距震中 1 800 km 的上海甚至更远的台北、曼谷的超高层建筑都出现了剧烈的晃动,造成了极大的恐慌<sup>[7]</sup>。上述震害表明:长周期地震动对高层、超高层建筑、大跨径桥梁及大型储油设备等长周期柔性结构影响显著。

早期的模拟式强震记录仪只能记录到高频为主的短周期成分,而无法获取精度可靠的长周期成分,随着近年来数字式强震记录仪的大量使用,才逐渐记录到了一些长周期地震波,但其数量还不足以形成可靠的长周期地震反应谱<sup>[8-10]</sup>,因此目前针对长周期地震动特性及其对结构的影响研究相对较少。臧明明等<sup>[11]</sup>、张振炫等<sup>[12]</sup>分别研究了长周期地震动作用下大跨桥梁和高层建筑的地震响应,并由此得到了长周期地震动下的响应大于普通地震动的初步结果。

为进一步探讨长周期地震动特性并研究其对大跨径桥梁的影响,本文选取若干普通地震波和长周期地震波进行频谱特性对比,并以某大跨径斜拉桥为例分析 2 类地震动作用下结构地震响应特点,对 2 种纵向减震措施在不同类型的地震动作用下的减震效果进行对比分析。

1 地震波频谱特性对比

本文选取的 2 条普通地震波为某场地人工地震波(重现期 2 475 年,以下简称人工波)和 Taft 波;选取的长周期地震波为日本十胜冲地震中苦小牧记录的地震波(以下简称苦小牧波)和汶川地震中西安

草滩地震台记录到的地震波(以下简称西安波)。表 1 为 4 条地震波的基本信息,其加速度时程如图 1 所示。相对于普通地震波,长周期地震波具有峰值加速度低、振动持时长的特点。

表 1 地震波基本信息  
Tab. 1 Basic Characteristics of Seismic Waves

地震波	峰值加速度/(cm·s <sup>-2</sup> )	持时/s	震级	发生时间
人工波	189.47	25.60		
Taft 波	175.95	54.38	7.7	1952-07-21
西安波	54.32	274.00	8.0	2008-05-12
苦小牧波	72.92	290.00	8.0	2003-09-26

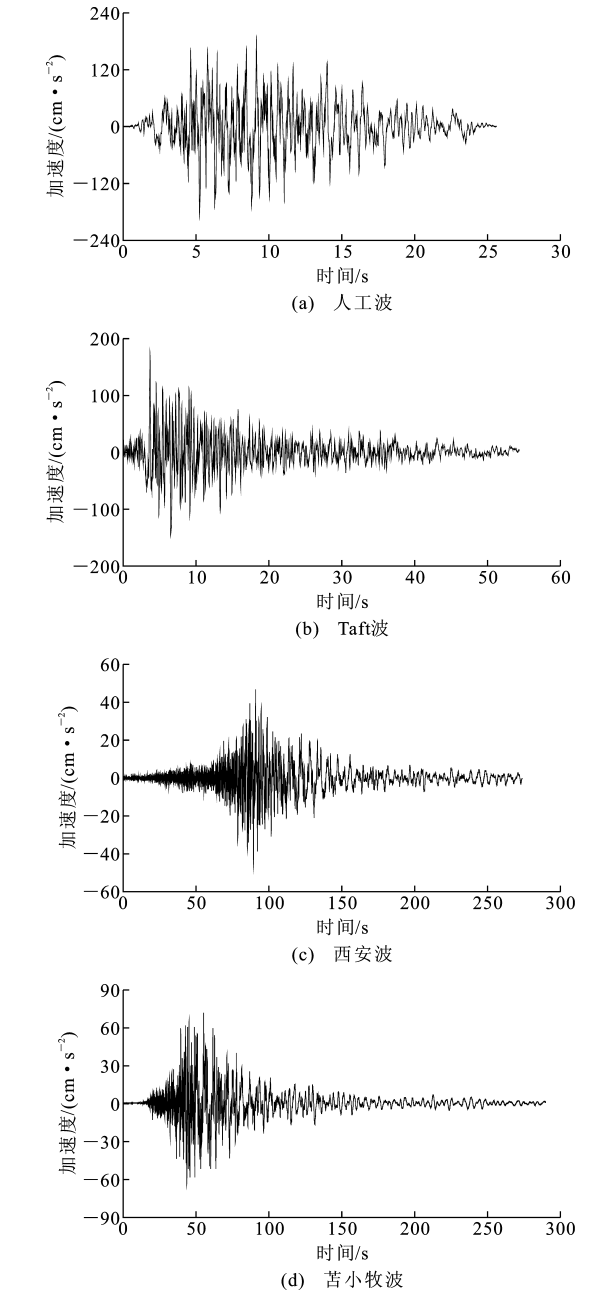
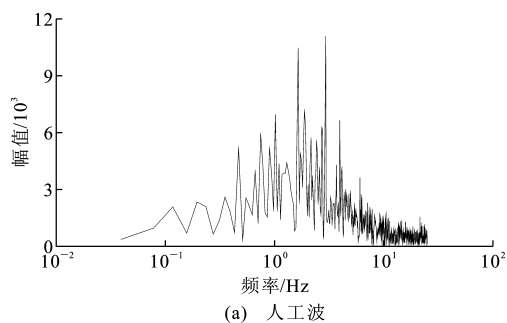


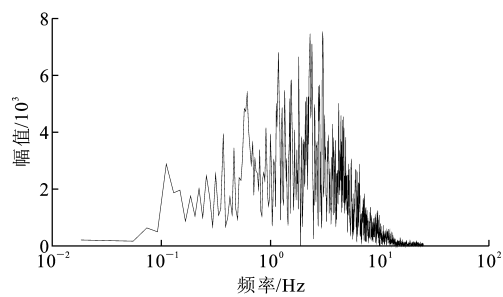
图 1 地震波加速度时程  
Fig. 1 Acceleration Time-history Curves of Seismic Waves

傅里叶幅值谱反映了地震动能量在频域内的分布,即反映了不同频率的正弦波所携带能量多少<sup>[13]</sup>。随着距震中距离的增大,高频部分的衰减比低频部分显著,其卓越频率也逐渐向低频方向推移。

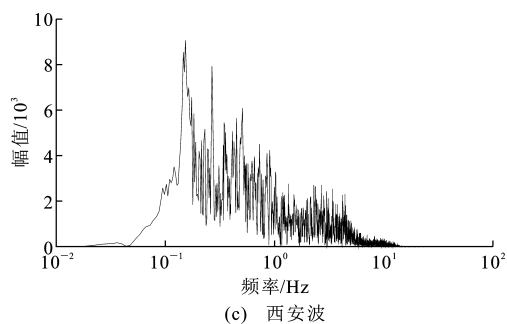
图 2 为地震波傅里叶幅值谱。从图 2 可以看出:普通地震波在高频带能量丰富,且卓越频率也分布在较高的频率范围,如人工波和 Taft 波基本分布在 1.0~5.0 Hz 之间;长周期地震波在低频带的能量较大,且卓越频率主要分布在较低的频率范围,如西安波及苦小牧波主要分布在 0.1~1.0 Hz 之间。



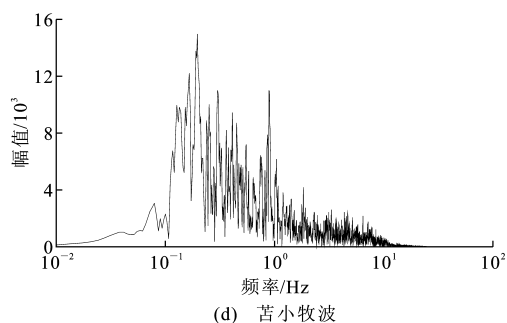
(a) 人工波



(b) Taft波



(c) 西安波

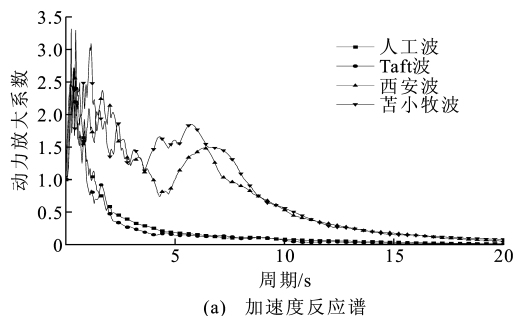


(d) 苦小牧波

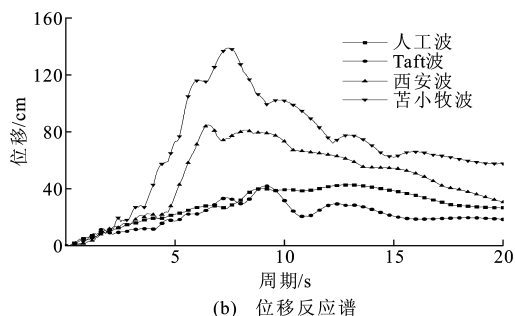
图 2 地震波的傅里叶幅值谱

Fig. 2 Fourier Amplitude Spectrums of Seismic Waves

反应谱是利用一系列单自自由度过滤器的响应来间接反映地震的频谱特性,可表征结构地震动响应峰值与其动力特性间的关系,进而了解地震波频谱特性对结构地震响应的影响。为了进一步比较普通地震动和长周期地震动的频谱差异,本文计算了 4 条地震波的加速度和位移反应谱(图 3)。在计算位移反应谱及后续的地震响应分析时,将普通地震波的峰值加速度统一调整为人工波的峰值加速度,考虑到长周期地震波的远场性及记录场地土层的特殊性,对峰值加速度不做调整,而直接采用原始记录值。



(a) 加速度反应谱



(b) 位移反应谱

图 3 地震波加速度和位移反应谱

Fig. 3 Acceleration and Displacement Response Spectrums of Seismic Waves

从图 3 可以看出:普通地震波的加速度响应在 0~1 s 的区间内比较大,而在特征周期平台后,动力放大系数值迅速下降,在 2 s 时已经降到了峰值的 20% 以下;长周期地震波加速度反应谱不但特征周期长且衰减缓慢,动力放大系数在 8 s 后才开始缓慢下降,直至 20 s 时,其值仍为普通地震波的 2 倍左右。从位移反应谱可以看出:对于短周期(周期小于 2.0 s)结构,2 类地震波的位移响应相差不大,而在周期超过 2.0 s 后,长周期地震波的位移响应大幅增加,并在 7.5 s 左右达到峰值,之后才开始缓慢下降,但仍高于普通地震波 1 倍以上。可见,长周期地震波对柔性结构的加速度(内力)及位移响应的影响非常大。

## 2 有限元建模及模态分析

本文以某特大跨径斜拉桥方案为算例,该桥为

双塔双索面半飘浮体系混合梁斜拉桥,跨径组合为  $5\times 60\text{ m}+70\text{ m}+1\ 200\text{ m}+70\text{ m}+5\times 60\text{ m}$ ,承台以上塔高  $300\text{ m}$ ,桥塔呈钻石型,边跨各设置了  $5$  个辅助墩和  $1$  个边墩;跨中主梁采用钢箱梁,边跨主梁采用混凝土箱梁,梁高  $4\text{ m}$ ,桥面宽度  $35.5\text{ m}$ ;标准索距  $15\text{ m}$ ,全桥共设  $312$  根拉索。

本文采用大型通用有限元软件 ANSYS 建立了全桥有限元分析模型(图 4)。模型主梁、主塔采用空间梁单元模拟;桥面铺装及附属设施的质量及质量惯性矩效应采用空间质量单元模拟;斜拉索采用空间桁架单元模拟,并考虑了拉索的垂度效应和成桥索力对拉索刚度的影响;主梁、桥塔与斜拉索之间主从连接;桥塔下横梁与主梁及桥墩与主梁均在横桥向、竖向和绕桥轴向扭转建立主从关系,其余自由度放开,塔底与墩底固接,不计桩基础的作用。

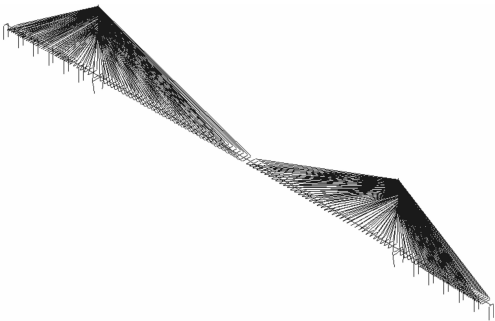


图 4 斜拉桥有限元模型

Fig. 4 Finite Element Model of Cable-stayed Bridge

基于上述有限元模型,对结构进行模态分析,结果如表 2 所示。由模态分析结果可见:该桥的一阶

表 2 模态分析结果

Tab. 2 Modal Analysis Results

阶次	频率/Hz	周期/s	振型描述
1	0.066 69	14.99	主梁纵飘
2	0.110 34	9.06	主梁一阶正对称侧弯
3	0.189 70	5.27	主梁一阶正对称竖弯
4	0.234 39	4.27	主梁一阶反对称竖弯
5	0.241 93	4.13	主塔反向侧弯
6	0.243 30	4.11	主塔向同向侧弯
7	0.295 84	3.38	主梁一阶反对称侧弯
8	0.303 90	3.29	主梁二阶正对称竖弯
9	0.366 33	2.73	主梁二阶反对称竖弯
10	0.413 39	2.42	主梁三阶正对称竖弯

振型为主梁纵飘,周期达  $14.99\text{ s}$ ,主梁一阶侧弯和竖弯振动周期分别达到了  $9.06\text{ s}$  和  $5.27\text{ s}$ ,桥塔的横向侧弯周期也达到了  $4.11\text{ s}$ 。因此该桥是典型长周期结构。

3 结构地震响应分析

分别对结构进行时程分析,2 类地震动作用下结构关键的位移及内力响应如表 3、4 所示。

表 3 位移响应

Tab. 3 Displacement Response cm

地震动类型	地震波	顺桥向位移		横桥向位移	
		塔顶	梁端	塔顶	跨中
普通	人工波	55.58	48.89	45.98	63.82
地震动	Taft 波	30.58	26.07	39.12	67.31
长周期	西安波	74.39	64.32	60.02	119.75
地震动	苦小牧波	99.71	85.96	98.39	174.93

表 4 塔底内力响应

Tab. 4 Force Response at Foot of Tower

地震动类型	地震波	顺桥向			横桥向		
		轴力/MN	剪力/MN	弯矩/(MN·m)	轴力/MN	剪力/MN	弯矩/(MN·m)
普通地震动	人工波	10.4	25.6	1 610.1	172.1	67.5	2 370.0
	Taft 波	4.7	31.2	1 130.0	181.4	88.9	3 070.4
长周期地震动	西安波	11.5	11.8	1 670.2	169.7	61.6	2 130.7
	苦小牧波	14.8	17.5	2 200.0	340.5	107.4	3 630.6

从结构的位移及内力响应分析结果可知:

(1)在长周期地震动作用下,主梁及桥塔关键位置处的地震位移响应明显高于普通地震波激励下的结果。

(2)尽管长周期地震动峰值加速度仅为普通地震动的  $28\%\sim 36\%$ ,但在长周期区段,其加速度反应谱值衰减缓慢,塔底的地震内力响应与普通地震动激励下的响应基本处于同一水平。可见,长周期地震动不仅对大跨径斜拉桥的位移响应影响十分显

著,其对结构内力的影响也不可忽视。

4 纵向减震措施的效果研究

由于大跨径斜拉桥主梁为漂浮体系、自振周期长、阻尼比较低,导致梁端的地震位移响应较大,容易发生支座和伸缩缝损坏甚至危及引桥的安全,因此,必须控制地震激励下斜拉桥主梁的纵向位移响应。目前常用的位移控制措施主要有弹性连接装置(如大型橡胶支座、钢绞线成品拉索等)及液体粘滞

阻尼器两大类<sup>[14]</sup>。本文选取人工波和苦小牧波作为输入,分析长周期地震波和普通地震波激励下 2 类纵向减震装置的减震效果。

#### 4.1 弹性连接装置

弹性连接装置主要提供连接刚度而不提供附加阻尼,该类装置主要有大型橡胶支座、钢绞线成品索,其主要作用是改变塔梁间的传力路径并提高结构刚度和降低主梁纵向振动周期来控制位移。弹性连接装置所受的力  $F$  是塔梁相对位移  $u$  的线性函数,即

$$F = Ku \quad (1)$$

式中: $K$  为弹性连接刚度。

本文选取了弹性连接刚度  $K = 0, 2.5, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$  共 10 个等级进行计算(其中  $K = 0$  即为不设弹性连接装置的原结构体系),研究 2 类地震波激励下弹性连接装置的减震效果。

在 2 类地震波激励下,弹性连接刚度  $K$  对大跨径斜拉桥梁端位移和塔底弯矩的影响见图 5、6。

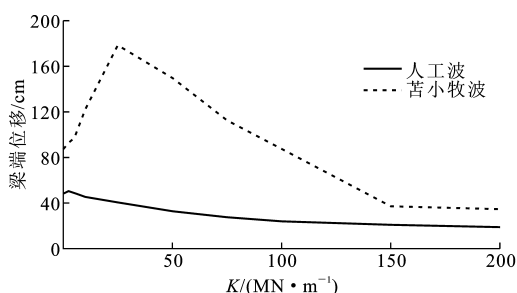


图 5 梁端位移随刚度  $K$  的变化规律

Fig. 5 Displacement of Beam End Versus Stiffness  $K$

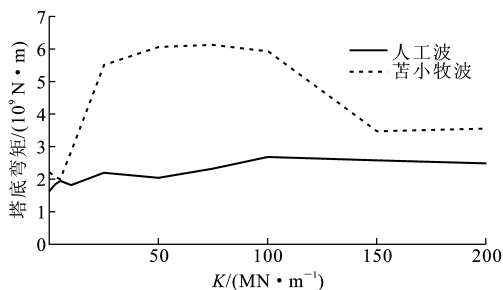


图 6 塔底弯矩随刚度  $K$  的变化规律

Fig. 6 Bending Moment at Base of Tower Versus Stiffness  $K$

在普通地震波作用下,随着弹性连接刚度  $K$  的增大,结构体系整体刚度增加,结构振动周期缩短,弹性连接装置对梁端位移的控制效果比较明显且塔底弯矩增幅稳定,当位移降低到原体系的 50% 左右时,内力响应增加约为 25%。这主要是因为普通地震波的反应谱值随着周期减小,加速度响应稳步增

大而位移响应则稳步降低。

在长周期地震波激励下,随着弹性连接刚度  $K$  的增大,结构的内力及位移响应会急剧增大,之后逐渐减小,只有当  $K$  值很大时,位移才减小到原结构体系的 50% 左右,但塔底弯矩却增大了 75% 左右。

由此可见,在长周期地震波激励下,弹性连接装置控制大跨径斜拉桥梁端位移响应的效率较低,还会大幅度增加结构的地震内力响应。这主要是因为:苦小牧波(包括西安波)的加速度及位移反应谱在 5~10 s 区段幅值很高,结构纵向刚度增加和自振周期减小,导致结构“迎合”了长周期地震波的能量集中区段。

#### 4.2 液体粘滞阻尼器

液体粘滞阻尼器由活塞、油缸及阻尼孔组成,其工作原理是利用活塞前后压力差使液体流过阻尼孔而产生阻尼力(图 7)<sup>[15]</sup>。液体粘滞阻尼器的阻尼力与运动速度的关系为<sup>[16-17]</sup>

$$F' = C\dot{u}^\xi \quad (2)$$

式中: $F'$  为阻尼力; $C$  为阻尼系数; $\dot{u}$  为速度; $\xi$  为阻尼指数(一般取 0.2~1.0)。

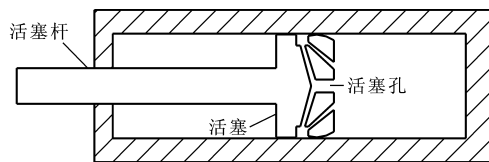


图 7 液体粘滞阻尼器

Fig. 7 Liquid Viscous Damper

阻尼指数  $\xi$  取不同值时的液体粘滞阻尼器滞回曲线如图 8 所示。当阻尼指数  $\xi = 0.2$  时,阻尼力-位移滞回曲线形状趋近于矩形,阻尼器出力对速度变化敏感,即在较小的速度下就可产生较大的阻尼力。当阻尼指数  $\xi = 1$  时,即为线性阻尼器,阻尼力随运动速度的增加线性增大,阻尼力-位移滞回曲线为椭圆形;当位移最大时,阻尼器的阻尼力最小,接近于零;当速度最大时,阻尼器的阻尼力达到最大,而此时结构的内力与变形最小。液体粘滞阻尼器的阻尼力和结构的内力与变形之间有 90° 的相位差,这种速度粘滞型阻尼器则不会显著增加结构的内力响应<sup>[18-19]</sup>。

为了研究 2 类地震动作用下液体粘滞阻尼器的减震效果,本文对阻尼器进行了参数敏感性分析。阻尼器参数选取范围:阻尼指数  $\xi$  取 0.3, 0.4, 0.5, 阻尼系数  $C$  取 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6  $\text{MN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ , 其中,  $C = 0$  即为原结构体系。

图 9、10 分别为 2 类地震波激励下,阻尼器参数

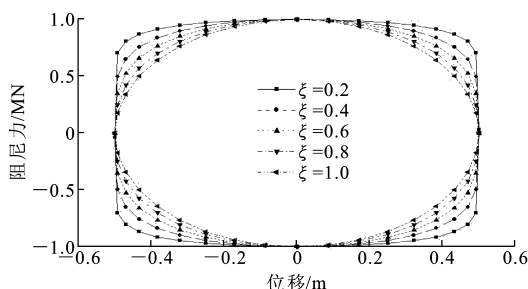


图8 不同阻尼指数  $\xi$  时的阻尼器滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis Curves for Damper Under Different Damping Indexes  $\xi$

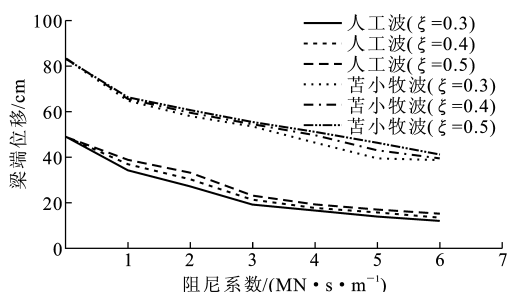


图9 梁端位移随阻尼系数的变化

Fig. 9 Effect of Damping Parameters on Displacement of Beam End

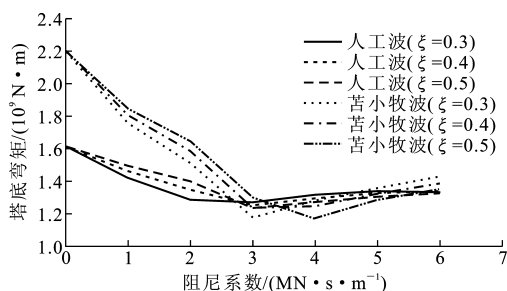


图10 塔底弯矩随阻尼系数的变化

Fig. 10 Effect of Damping Parameters on Bending Moment at Base of Tower

对梁端位移和塔底弯矩的影响。从分析结果可知：在2类地震波激励下，液体粘滞阻尼器均对梁端位移起到了明显的控制效果，当阻尼指数  $\xi$  一定时，梁端位移随阻尼系数  $C$  的增加而减小；当阻尼系数  $C$  一定时，较小的阻尼指数可以获得更好的位移控制效果。

塔底弯矩响应随着阻尼系数  $C$  先减小后增大。在拐点  $C=3 \text{ MN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$  之前，塔底弯矩与阻尼指数成正比；在拐点之后，塔底弯矩与阻尼指数成反比。由此可见，只要选择合理的阻尼参数，液体粘滞阻尼器在2类地震波作用下均可同时减小结构的位移和内力响应。

## 5 结语

(1)长周期地震动对大跨径斜拉桥梁端位移响应的的影响十分显著，应结合工程场地条件及远场地震特性充分考虑此类地震动的影响。

(2)尽管远场长周期地震动的峰值加速度较低，但其对大跨径斜拉桥的地震内力响应却不容忽视。因此，在对中低烈度区大跨径桥梁抗震设计时，应结合工程场地条件适当补充长周期地震动作用下的地震响应分析。

(3)在长周期地震动作用下，采用弹性连接装置控制大跨径斜拉桥梁端纵向位移的效率较低，而且会导致结构内力的大幅增加。因此，在可能遭遇到远场长周期地震动的桥梁不宜采用此类限位装置。

(4)参数合理的液体粘滞阻尼器具有较好的广谱性，即在普通地震动和长周期地震动作用下均有较好的减震效果。

## 参考文献:

## References:

- [1] 谢开仲, 吕文高, 覃乐勤, 等. 钢管混凝土拱桥地震破坏评估研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 53-59.  
XIE Kai-zhong, LU Wen-gao, QIN Le-qin, et al. Research on Seismic Damage Evaluation of CFST Arch Bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 53-59.
- [2] 焦常科, 李爱群. 非弹性连接对三塔悬索桥地震响应的影响[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 98-105.  
JIAO Chang-ke, LI Ai-qun. Influence of Inelastic Connection on Seismic Response of Triple-tower Suspension Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 98-105.
- [3] 汤虎, 李建中. 板式橡胶支座桥梁地震位移控制方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 110-116.  
TANG Hu, LI Jian-zhong. Displacement Control Method for Continuous Bridges on Laminated Rubber Bearings Under Earthquake Excitation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 110-116.
- [4] 董建华, 马巍, 朱彦鹏. 土钉墙地震动力分析及抗震设计方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 34-41.  
DONG Jian-hua, MA Wei, ZHU Yan-peng. Seismic Analysis and Design Method for Soil Nailing Retaining Wall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 34-41.
- [5] 魏标, 崔睿博, 戴公连, 等. 橡胶支座对非规则连续梁桥地震反应的影响[J]. 中国公路学报, 2013, 26

- (6):110-117.  
WEI Biao, CUI Rui-bo, DAI Gong-lian, et al. Impact of Laminated Rubber Bearings on Seismic Response of Irregular Continuous Bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6):110-117.
- [6] 李春锋, 张 旻. 长周期地震动衰减关系研究的迫切性[J]. 地震地磁观测与研究, 2006, 27(3):1-8.  
LI Chun-feng, ZHANG Yang. Urgency of the Study of Long-period Ground Motion[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2006, 27(3):1-8.
- [7] 杨伟林, 朱升初, 洪海春, 等. 汶川地震远场地震动特性及其对长周期结构影响的分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(4):473-478.  
YANG Wei-lin, ZHU Sheng-chu, HONG Hai-chun, et al. Characteristics of Far-field Ground Motion of Wenchuan Earthquake and the Effect on Long-period Structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(4):473-478.
- [8] KOKETSU K, MIYAKE H. A Seismological Overview of Long-period Ground Motion[J]. Journal of Seismology, 2008, 12(2):133-143.
- [9] YAMADA N, IWATA T. Long-period Ground Motion Simulation in the Kinki Area During the MJ 7.1 Foreshock of the 2004 off the Kii Peninsula Earthquakes[J]. Earth Planets and Space, 2005, 57(3):197-202.
- [10] IWAKI A, IWATA T. Simulation of Long-period Ground Motion in the Osaka Sedimentary Basin; Performance Estimation and the Basin Structure Effects[J]. Geophysical Journal International, 2010, 181(2):1062-1076.
- [11] 臧明明, 陈清军. 长周期地震动的场地效应与大跨桥梁结构的动力响应分析[J]. 结构工程师, 2010, 26(1):118-125.  
ZANG Ming-ming, CHEN Qing-jun. Site Effect of Long-period Ground Motion and Dynamic Analysis of Long-span Bridge Structures[J]. Structural Engineers, 2010, 26(1):118-125.
- [12] 张振炫, 陈清军. 高层建筑结构长周期地震反应的比较研究[J]. 结构工程师, 2009, 25(4):78-84.  
ZHANG Zhen-xuan, CHEN Qing-jun. A Comparative Study on Long-period Seismic Responses for High-rise Structures[J]. Structural Engineers, 2009, 25(4):78-84.
- [13] 熊 辉, 李正良, 晏致涛, 等. 地震反应谱、功率谱以及傅里叶谱关系探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2011, 37(2):171-179.  
XIONG Hui, LI Zheng-liang, YAN Zhi-tao, et al. The Relation Between the Earthquake Response Spectrum, Power Spectrum and Fourier Spectrum[J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(2):171-179.
- [14] 焦驰宇, 李建中, 彭天波. 塔梁连接方式对大跨斜拉桥地震反应的影响[J]. 振动与冲击, 2009, 28(10):179-184.  
JIAO Chi-yu, LI Jian-zhong, PENG Tian-bo. Effects of Different Connecting Styles Between Towers and Deck on Seismic Responses of a Long-span Cable-stayed Bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(10):179-184.
- [15] LEE D, TAYLOR D P. Viscous Damper Development and Future Trends[J]. Structural Design of Tall Buildings, 2001, 10(5):311-320.
- [16] LIU W, TONG M, LEE G C. Optimization Methodology for Damper Configuration Based on Building Performance Indices[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(11):1746-1756.
- [17] 王志强, 胡世德, 范立础. 东海大桥粘滞阻尼器参数研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3):37-42.  
WANG Zhi-qiang, HU Shi-de, FAN Li-chu. Research on Viscous Damper Parameters of Donghai Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3):37-42.
- [18] 聂利英, 李建中, 胡世德, 等. 任意荷载作用下液体粘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 Li-ying, LI Jian-zhong, HU Shi-de, et al. Investigation of Decreasing Vibration Effects of Fluid Viscous Damper in Bridge Engineering Under Random Loads[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(2):197-202.
- [19] 卢桂臣, 胡雷挺. 西堠门大桥液体粘滞阻尼器参数分析[J]. 世界桥梁, 2005(2):43-45.  
LU Gui-chen, HU Lei-ting. Analysis of Parametric Sensitivity of Fluid Viscous Dampers for Xihoumen Bridge[J]. World Bridges, 2005(2):43-45.