

文章编号: 1002-0268 (2009) 02-0073-06

# 粘滞阻尼器参数对大跨度桥梁抗震性能影响研究

方志<sup>1</sup>, 王飞<sup>1</sup>, 张志田<sup>1</sup>, 王成启<sup>2</sup>, 瞿星<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051)

**摘要:** 基于流体粘滞阻尼器的力学特性, 以荆岳长江大桥为工程背景, 研究了附加非线性粘滞阻尼器对大跨度桥梁抗震性能的影响。利用动力非线性时程分析方法, 对非线性粘滞阻尼器的阻尼系数和阻尼指数进行了参数敏感性分析, 讨论了阻尼器布置位置对减震效果的影响, 并与不设阻尼器情况的地震响应结果进行了比较。分析表明: 通过在适当的位置设置纵向粘滞阻尼器, 可以有效地降低结构在地震作用下关键部位的位移, 改善结构构件的地震力; 减震效果取决于阻尼器参数; 同时, 设置阻尼器避免了相邻主梁可能发生碰撞引起的结构损坏。

**关键词:** 桥梁工程; 大跨度桥梁; 抗震性能; 敏感性分析; 粘滞阻尼器

中图分类号: U442.5<sup>+</sup>5

文献标识码: A

## Effects of Viscous Damper Parameters on Anti-seismic Performance of Long-span Bridge

FNAG Zhi<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, ZHANG Zhitian<sup>1</sup>, WANG Chengqi<sup>2</sup>, DING Wangxing<sup>2</sup>

(1 School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

2 Hubei Provincial Communications Planning and Design Institute, Wuhan Hubei 430051, China)

**Abstract:** Based on the mechanical characteristics of fluid viscous damper, the anti-seismic performance of the long-span bridge with non-linear viscous dampers was investigated. Taking Jingyue Yangtze River Bridge for example, the sensitivity analysis on damping coefficient  $C$  and damping exponent of viscous damper was performed using non-linear dynamic time-history method, and the effect of seismic response control on viscous dampers placed in different positions was discussed. It indicates that (1) setting dampers in longitudinal direction of bridge can reduce the displacement of key positions and the seismic response of the bridge significantly; (2) vibration-suppressing effectiveness depends on damper parameters; (3) the local damage of components due to the potential collision caused by neighboring members of bridge can be eliminated.

**Key words:** bridge engineering; long-span bridge; anti-seismic performance; sensitivity analysis; viscous damper

## 0 引言

近年来, 通过引入减震、隔震装置来提高桥梁结构的抗震性能正成为一个研究和应用的热点, 引入阻尼器来改善桥梁结构的抗震性能就是一个方面<sup>[1-3]</sup>。有不少学者对斜拉桥的合理抗震结构体系进行了研

究<sup>[4-8]</sup>, 从斜拉桥的地震反应来看, 采用飘浮体系, 主塔的内力反应较小, 但梁端、塔顶纵向位移大; 而塔梁固结体系能减小梁端、塔顶位移, 但会显著增大主塔的内力反应。如果在飘浮体系斜拉桥的塔梁间增设纵向约束装置, 则能大大改善斜拉桥的静力、动力性能。对连续梁桥而言, 由于连续梁桥一般只设一个

收稿日期: 2007-11-28

作者简介: 方志 (1963-), 男, 湖北黄冈人, 教授, 博士生导师, 研究方向为桥梁与结构工程. (fangzhi@hnu.cn)

固定墩,在地震作用下,纵桥向的地震荷载绝大部分均由设置在固定墩上的固定支座来承受,因此,固定墩处于十分不利的受力状态。如果一味要求固定墩满足强度要求,在弹性范围内,不仅是不经济的,而且没有必要。可以对连续梁桥墩柱进行延性设计或采用一些减震措施,来减小连续梁桥的地震反应<sup>[9]</sup>。近年来国内外学者提出在桥梁结构中设置阻尼器来改善结构的抗震性能,其中,应用较为成熟且适用于大跨度桥梁的主要是流体阻尼器,通过对结构提供额外的耗散地震输入能量的能力来减小地震反应。将粘滞阻尼器首次应用于桥梁的是美国金门大桥的抗震加固工程<sup>[10]</sup>。此外建设中的希腊 Rion-Antirion 大桥和美国 Oakland 海湾桥西跨悬索桥加固,都使用了油阻尼器。重庆鹅公岩大桥和上海卢浦大桥等也安装了阻尼器<sup>[5]</sup>。

本文基于流体粘滞阻尼器的力学特性,以荆岳长江大桥为工程背景,从地震响应控制的原理出发,优化阻尼器的参数,以期得到该桥减震控制的综合最优方案。

## 1 工程背景

荆岳长江公路大桥主要由双塔3跨双索面半漂浮体系的混合梁斜拉桥以及7跨预应力混凝土连续梁桥组成,斜拉桥桥跨布置为(100+298)+816+(80+75+75)m,在2个边跨内设置辅助墩,桥面宽38.5m,主塔选用简捷的双柱式桥塔,滩桥桥跨布置为(100+5×154+100)m。根据桥梁结构的总体布置及其结构特点,本文建立了包括滩桥和主桥的地震反应分析的三维有限元模型。其中桥面系采用脊梁模式,通过三维梁单元模拟,将桥面系的刚度及质量都集中在中间节点上,节点和斜拉索之间采用刚臂连接<sup>[9]</sup>;斜拉索采用空间杆单元进行离散,考虑垂度效应和恒载引起的几何刚度的影响;桥塔、滩桥桥墩以及交界墩采用空间梁单元进行离散;桩基础土弹簧采用释放抗弯刚度而只有抗拉压与抗扭转刚度的空间梁单元模拟,土弹簧刚度的确定采用“m”法来计算;阻尼器的力学特性采用专门的单元模拟。由于结构构件及粘滞阻尼器的非线性特性,本文通过非线性时程分析方法来确定粘滞阻尼器的合理参数。

## 2 结构的动力特性及地震输入

根据该桥桥区的地震环境及《荆岳长江公路大桥工程场地地震安全性评估报告》给出的相应概率水平下的地震动参数,考虑到本桥是公路主要干线上的特大桥梁,采用《荆岳长江公路大桥工程场地地震安全

性评估报告》提供的3组100a超越概率5%水平下的人工地震波来进行地震反应分析,由这些地震波作用下结构关键部位响应的平均值来确定粘滞阻尼器的合理参数。地震波沿水平向和竖向输入,竖向加速度取水平向加速度的 $2/3$ ,图1绘出了其中1条水平向地震波加速度时程。根据上述动力计算模型,表1给出了结构在不设阻尼器下的典型自振特性。

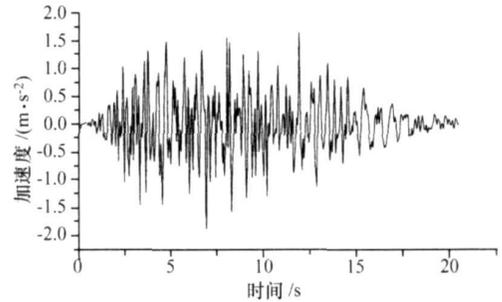


图1 水平向地震加速度时程

Fig 1 Longitudinal earthquake acceleration time history

表1 结构典型动力特性

Tab 1 Typical dynamic characteristic of bridge

振型阶数	频率/Hz	振型特征	振型阶数	频率/Hz	振型特征
1	0.081 5	主桥纵飘	4	0.229 8	北塔侧弯
2	0.206 4	主梁1阶侧弯	5	0.243 3	主梁1阶竖弯
3	0.214 5	滩桥纵飘	6	0.278 7	南塔侧弯

从表1可以看出,结构的第1阶和第2阶振型分别为主桥和滩桥的纵飘,过大的纵向位移可能导致主梁相互碰撞,造成地震中结构的损坏。针对结构动力响应的特点,通过比选,确定了沿纵向设置粘滞阻尼器的解决方案。

## 3 非线性粘滞阻尼器

### 3.1 粘滞阻尼器的力学特性

粘滞阻尼器一般由活塞、油缸及节流孔组成,是利用活塞前后压力差使油流过节流孔产生阻尼力的一种减震装置。当阻尼力与相对变形的速度成比例时是线性的,当阻尼力与速度不成比例时,是非线性的。因此,其一般关系可表达为:

$$F = CV^{\xi}, \quad (1)$$

式中, $F$ 为阻尼力; $C$ 为阻尼系数; $V$ 为阻尼器冲程速度; $\xi$ 为阻尼指数,其值范围在0.1~2.0,从抗震角度看,常用值一般在0.2~1.0。

阻尼系数 $C$ 的增加意味着阻尼力和耗能能力的增加,而速度指数 $\xi$ 对阻尼力和耗能能力的影响与速度 $V$ 有关。通常速度指数越小,粘滞阻尼器耗能能力越强。

### 3.2 粘滞阻尼器设置位置的确定

设该桥桥墩由北到南编号为 1<sup>#</sup> ~ 14<sup>#</sup>, 其中 1<sup>#</sup> ~ 8<sup>#</sup> 墩为滩桥桥墩, 8<sup>#</sup> ~ 14<sup>#</sup> 为主桥桥墩。针对本桥的结构特点, 阻尼器设置位置的方案有 2 种: (1) 对滩桥而言, 除 1<sup>#</sup> 墩及 4<sup>#</sup> 墩 (固定墩) 墩顶不设阻尼器外, 其他墩顶沿纵桥向均设置 2 个阻尼器。对主桥而言, 仅在塔梁结合处沿纵桥向布置阻尼器, 在辅助墩及交界墩顶不设阻尼器。(2) 滩桥阻尼器设置位置不变, 主桥还在辅助墩处设置阻尼器 (没有考虑在交界墩处设置阻尼器, 是因为此处构造复杂, 阻尼器实际设置起来比较困难)。

### 4 粘滞阻尼器参数的确定

粘滞阻尼器参数的确定从式 (1) 可知, 粘滞阻尼器参数  $C$ 、 $\xi$  选取的不同, 其对结构响应的影响也不同。因此, 需对结构引入粘滞阻尼器的情况进行结构响应分析, 主要考虑对阻尼器参数  $C$ 、 $\xi$  进行参数

敏感性分析, 研究这些参数变化对结构响应影响的变化规律, 为粘滞阻尼器设计参数的确定提供依据。

### 4.1 滩桥阻尼器参数的确定

针对滩桥只设一个固定墩 (4<sup>#</sup> 墩), 1<sup>#</sup> 墩和 8<sup>#</sup> 墩墩顶设置滑动支座, 其他墩墩顶设置滑动支座和阻尼器的结构特点, 通过对阻尼器进行参数分析, 从而为连续梁桥减隔震设计中阻尼器参数的选取提供参考。表 2 给出了滩桥阻尼器参数敏感性分析工况。

表 2 滩桥参数分析工况

Tab. 2 Cases of parameter analysis for continuous bridge

$\xi$	$C / (\times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$						
	2	3	4	5	6	7	8
0.2	2	3	4	5	6	7	8
0.3	2	3	4	5	6	7	8
0.5	2	3	4	5	6	7	8
0.7	2	3	4	5	6	7	8
0.8	2	3	4	5	6	7	8
1.0	2	3	4	5	6	7	8

图 2 ~ 图 6 给出了滩桥在不同阻尼器参数下的结构地震响应规律。

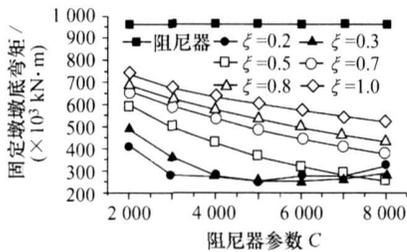


图 2 阻尼器参数  $C$  对固定墩墩底纵向弯矩的影响

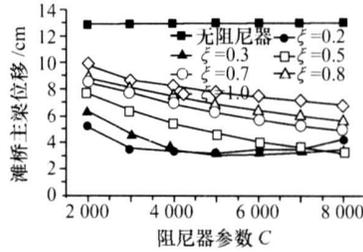


图 3 阻尼器参数  $C$  对滩桥主梁纵向位移的影响

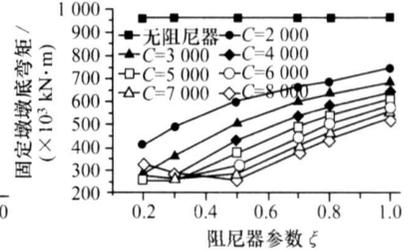


图 4 阻尼器参数  $\xi$  对固定墩墩底弯矩的影响

Fig 2 Effect of damper parameters  $C$  on longitudinal moment of the pier bottom

Fig 3 Effect of damper parameter  $C$  on longitudinal displacement of the main girder

Fig 4 Effect of damper parameter  $\xi$  on longitudinal moment of the pier bottom

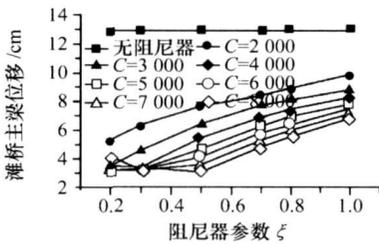


图 5 阻尼器参数  $\xi$  对滩桥主梁位移的影响

较小值, 同时兼顾阻尼器的阻尼力尽可能小, 故对滩桥而言, 比较合适的阻尼器参数值为:  $C = 5\,000$ ,  $\xi = 0.3$ 。

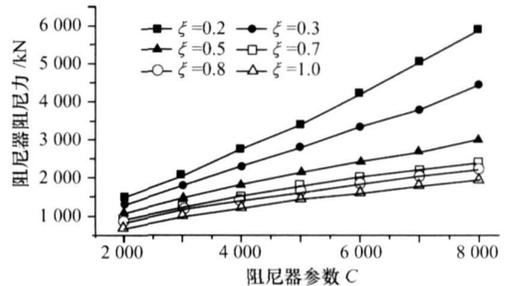


图 6 阻尼器参数对滩桥主梁位移的影响

Fig 6 Effect of damper parameter on longitudinal displacement of the main girder

由图 2 ~ 图 6 可以看出, 通过设置阻尼器, 滩桥固定墩墩底弯矩及主梁位移都显著减小。固定墩墩底弯矩及滩桥主梁位移基本上都随阻尼器系数  $C$  增大而减小, 随阻尼指数  $\xi$  增大而增大。阻尼器阻尼力随阻尼器系数增大而增大, 随阻尼指数增大而减小。因此阻尼系数  $C$  宜取较大值, 阻尼指数  $\xi$  倾向于取

图 7、图 8 进一步比较了工况 1 (4<sup>#</sup> 墩为固定墩, 其他各墩顶设置滑动支座不设阻尼器) 及工况 2 (4<sup>#</sup>

墩设置固定支座, 1<sup>#</sup>墩和 8<sup>#</sup>墩设置滑动支座, 其他各墩顶设置滑动支座和阻尼器 ( $C=5\ 000$ ,  $\xi=0.3$ ) 时) 各桥墩受力和变形结果。可以看出, 与不设阻尼器相比, 设置阻尼器后, 墩梁纵向相对位移减小了 70% 左右, 固定墩的纵桥向弯矩减小了 66.5%, 各墩受力更趋均匀, 表明阻尼器的减震效果明显。

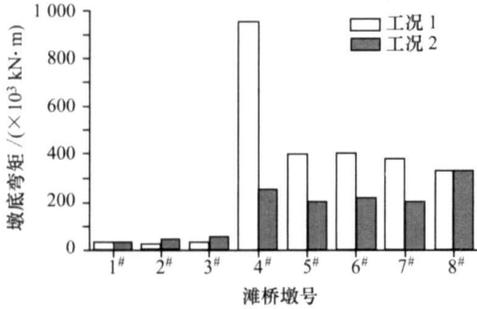


图 7 阻尼器参数对阻尼力影响

Fig 7 Effect of damper parameter on damper force

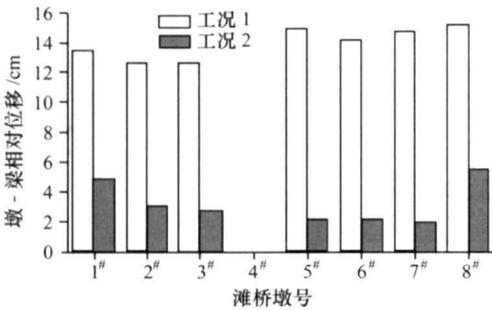


图 8 2 种工况下各墩底弯矩

Fig 8 Moments of bottom of pier in two cases

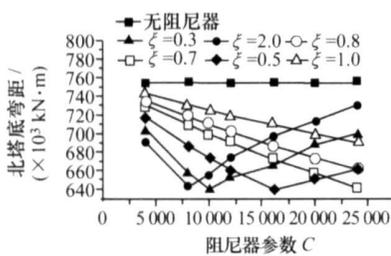


图 9 阻尼器参数 C 对北塔底纵向弯矩的影响

Fig 9 Effect of damper parameters C on longitudinal moment of the northern tower bottom

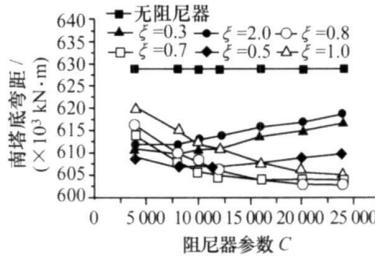


图 10 阻尼器参数 C 对南塔底纵向弯矩的影响

Fig 10 Effect of damper parameters C on longitudinal moment of the southern tower bottom

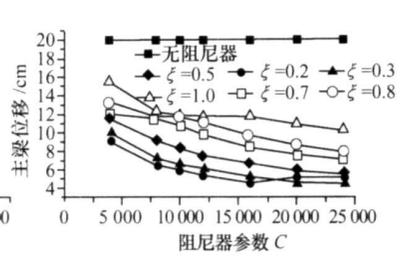


图 11 阻尼器参数 C 对主梁纵向位移的影响

Fig 11 Effect of damper parameters C on longitudinal displacement of the main girder

小, 而塔底弯矩的变化与  $\xi$  的大小有关, 当  $\xi$  较小时, 塔底弯矩随着  $C$  的增加有一个低谷, 低谷后随着阻尼系数的增大而增大, 当  $\xi$  较大时, 在相当大的范围内, 塔底弯矩随着  $C$  的增加单调减小。从控制结构的位移响应来看, 阻尼器系数  $C$  宜取较大值, 阻尼指数  $\xi$  取小值。从减小塔底的弯矩来看, 阻尼器系数  $C$  在 10 000、16 000 左右, 阻尼指数比较合适的范围在 0.3、

## 4.2 主桥阻尼器参数的确定

通过非线性时程反应分析, 对粘滞阻尼器设置位置的 2 种方案进行了结构地震响应分析, 以不设阻尼器时结构响应为比较标准。综合考虑结构各个关键部位的位移, 如主塔顶部和塔梁间的位移, 同时考虑利用阻尼器降低结构关键部位的受力, 如主塔底部、辅助墩底等部位的轴力、剪力和弯矩等的响应值 (本文仅给出主塔底的受力结果), 通过分析这些响应值来确定粘滞阻尼器的合理参数。

### 4.2.1 仅布置在塔-梁处阻尼器参数的确定

对粘滞阻尼器仅设置在塔-梁处的情况进行了结构地震响应分析, 分析工况见表 3。具体计算的相应结果随粘滞阻尼器参数变化的规律见图 9~图 16。

表 3 主桥参数分析工况

Tab 3 Case of parameter analysis for cable-stayed bridge

$\xi$	$C / (\times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^\xi)$						
0.2	4	8	10	12	16	20	24
0.3	4	8	10	12	16	20	24
0.5	4	8	10	12	16	20	24
0.7	4	8	10	12	16	20	24
0.8	4	8	10	12	16	20	24
1.0	4	8	10	12	16	20	24

从图 9~图 16 可以看出, 设置阻尼器后, 可以显著减小梁端位移及塔梁的相对位移, 对桥塔底的弯矩也有所减小。对北塔底弯矩的减小在 15% 以内, 对南塔底的弯矩减小在 5% 以内。当阻尼器指数  $\xi$  一定时, 随着  $C$  的增加梁端位移及塔-梁相对位移单调减

0.5 左右。

另一方面, 当阻尼器参数  $C$  一定时, 梁端位移随着阻尼器的速度指数  $\xi$  的增加而增加, 阻尼器阻尼力随着阻尼器的速度指数  $\xi$  的增加而减小, 而塔底弯矩随速度指数  $\xi$  的变化趋势与阻尼系数有关, 当阻尼系数  $C$  较小时, 塔底弯矩随  $\xi$  增大而增大, 而当阻尼系数  $C$  较大时, 则先减小后增大。

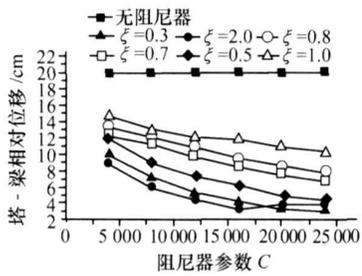


图 12 阻尼器参数  $C$  对塔-梁纵向相对位移的影响

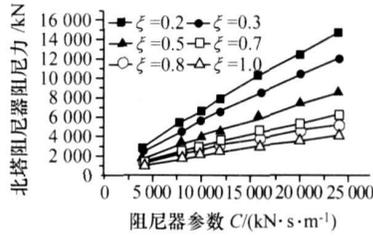


图 13 阻尼器参数  $C$  对阻尼力的影响

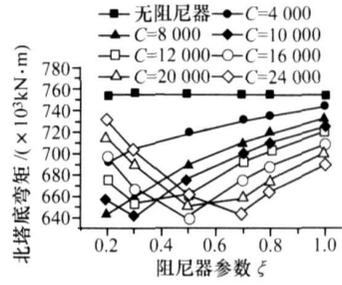


图 14 阻尼器参数  $\xi$  对北塔底纵向弯矩的影响

Fig 12 Effect of damper parameters  $C$  on longitudinal relative displacement between tower and girder

Fig 13 Effect of damper parameters  $C$  on damper force

Fig 14 Effect of damper parameters  $\xi$  on longitudinal moment of the northern tower bottom

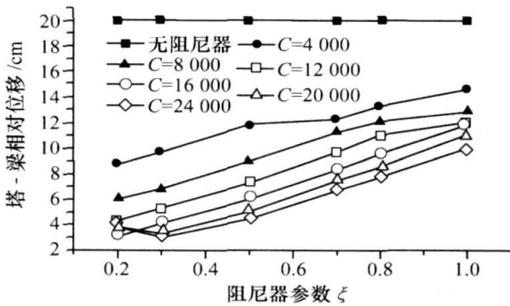


图 15 阻尼器参数  $\xi$  对塔-梁相对位移的影响

Fig 15 Effect of damper parameters  $\xi$  on longitudinal relative displacement between tower and girder

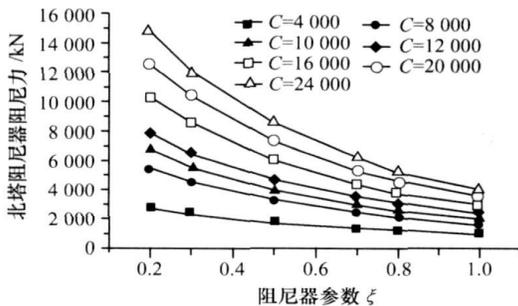


图 16 阻尼器参数  $\xi$  对阻尼力的影响

Fig 16 Effect of damper parameters  $\xi$  on damper force

对该桥而言, 设置阻尼器后, 梁端位移, 塔-梁相对位移响应值已不大, 完全可以通过伸缩缝的长度加以控制, 因此建议以降低主塔弯矩为主要目标, 同时兼顾使阻尼器的阻尼力和梁端位移尽可能小, 根据这一原则, 建议主桥粘滞阻尼器参数取  $C=16\ 000$ ,  $\xi=0.5$  或者  $C=10\ 000$ ,  $\xi=0.3$ 。

4.2.2 布置在塔-梁处和辅助墩处阻尼器参数的确定

参考仅在塔-梁处设置阻尼器参数分析的变化规律, 该方案确定的分析工况与表 3 基本类似。根据计算的结果, 结构关键部位响应值随粘滞阻尼器参数变化规律与仅在塔-梁处设置阻尼器的情况相似。该方案下主桥阻尼器参数合理的取值范围为: 主塔处  $C_{塔}=12\ 000$ ,  $\xi_{塔}=0.5$  左右, 辅助墩处设 2 个阻尼器时,  $C_{墩}=4\ 000$ ,  $\xi_{墩}=1.0$  左右。此处仅给出选定合理参数的计算结果, 并与不设阻尼器的情况进行了比较, 如表 4、表 5 所示。

表 4 控制截面的内力响应

分析工况	$C_{塔}=12\ 000$			减震效果		
	不设阻尼器	$C_{塔}=16\ 000$ $\xi_{塔}=0.5$	$C_{墩}=4\ 000$ $\xi_{墩}=0.5$			
				$\xi_{墩}=1.0$	工况 1	工况 2
北塔底	轴力/kN	$6.13 \times 10^4$	$6.07 \times 10^4$	$6.08 \times 10^4$	0.990	0.992
	剪力/kN	$2.28 \times 10^4$	$2.09 \times 10^4$	$2.11 \times 10^4$	0.917	0.925
	弯矩/(kN·m)	$7.55 \times 10^5$	$6.40 \times 10^5$	$6.38 \times 10^5$	0.848	0.845
辅助墩底	轴力/kN	$1.90 \times 10^4$	$1.92 \times 10^4$	$1.93 \times 10^4$	1.011	1.016
	剪力/kN	$1.52 \times 10^4$	$1.52 \times 10^4$	$1.29 \times 10^4$	1.000	0.849
	弯矩/(kN·m)	$3.68 \times 10^5$	$3.68 \times 10^5$	$2.70 \times 10^5$	1.000	0.734

表 5 控制截面最大位移响应值

分析工况	$C_{塔}=12\ 000$			减震效果		
	不设阻尼器	$C_{塔}=16\ 000$ $\xi_{塔}=0.5$	$C_{墩}=4\ 000$ $\xi_{墩}=0.5$			
				$\xi_{墩}=1.0$	工况 1	工况 2
塔顶	位移/cm	32.5	23.7	23.7	0.729	0.729
塔梁	相对位移/cm	19.1	6.0	6.0	0.314	0.314
主桥主梁与滩桥	主梁相对位移/cm	27.7	6.2	6.0	0.224	0.217
主梁与辅助墩	相对位移/cm	20.9	9.0	7.6	0.431	0.364
阻尼器阻	塔	/	6 084	4 079	/	/
尼力/kN	辅助墩	/	/	1 298	/	/

注: 工况 1 为仅在塔-梁处设置阻尼器, 工况 2 为在辅助墩顶也设置阻尼器; 减震效果=设阻尼器时关键部位响应值/不设阻尼器时关键部位响应值。

表4、表5仅列出了选定参数情况下北塔和9<sup>#</sup>辅助墩的响应值及减震效果。从表4、表5可知：在辅助墩处也设置阻尼器，既可以保证其他部位的减震效果，又可以有效地改善辅助墩的受力情况，同时降低了辅助墩处墩梁的相对位移。

与不设阻尼相比，设置纵向阻尼器可以显著减小塔顶纵向位移，塔—梁相对位移及相邻主梁的相对位移，避免或减轻了相邻主梁碰撞可能引起的结构局部破坏，同时还可以减小塔底纵向弯矩，从而显著地改善整个斜拉桥的地震反应。

## 5 结论

本文以荆岳长江大桥为背景，研究了附加粘滞阻尼器对大跨桥梁抗震性能的影响，得到了以下主要结论：

(1) 在斜拉桥塔梁间及连续梁桥墩梁间设置纵向粘滞阻尼器可以有效地减小大跨度桥梁关键部位的位移，同时适当改善了结构的受力，避免或减轻了滩桥主梁与主桥主梁碰撞可能引起的结构损坏，减震效果取决于阻尼系数  $C$  和指数  $\xi$  的取值。

(2) 通过对该桥阻尼器设置位置的2种方案比较来看，在辅助墩处也设置阻尼器，既可以保证其他部位的减震效果，又可以较明显地改善辅助墩的地震响应，还能减小塔梁处阻尼器吨位。仅从抗震角度考虑，后一方案优于前一方案。但具体采用哪一方案，应结合桥梁的实际情况综合考虑。

(3) 对主桥而言，设置阻尼器后，梁端位移，塔—梁相对位移响应值已不大，因此建议以降低主塔弯矩为主要目标，根据这一原则，仅在塔—梁处设一个阻尼器，阻尼器参数合理取值为  $C=16\ 000$ ， $\xi=0.5$ ，或者  $C=10\ 000$ ， $\xi=0.3$ ；如果在辅助墩处也设置阻尼器，则较合理的阻尼器参数为：主塔处  $C_{塔}=12\ 000$ ， $\xi_{塔}=0.5$ ，辅助墩处  $C_{墩}=4000$ ， $\xi_{墩}=1.0$ 。

(4) 对设一个固定墩的连续梁桥而言，设置阻尼器后，固定墩墩底弯矩，其他墩墩梁相对位移都比不设阻尼器情况显著减小；各墩受力更趋均匀，表明阻尼器的减震效果明显。从参数优化结果可知，对该桥的滩桥而言，墩顶设2个阻尼器，比较合理的阻尼器参数值为： $C=5\ 000$ ， $\xi=0.3$ 。

参考文献：

- References.**
- [1] VADER T, MCDANIEL C C. Influence of Dampers on Seismic Response of Cable-Supported Bridge Towers [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2007, 12 (3): 373—379.
- [2] MCDANIEL C C, SEIBLE F. Influence of Inelastic Tower Links on Cable-Supported Bridge Response [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2005, 10 (3): 272—280.
- [3] 王浩, 李爱群, 郭彤. 超大跨悬索桥地震响应的综合最优控制研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33 (3): 6—10.
- WANG Hao, LI Aiqun, GUO Tong. Composite Optimal Control of the Seismic Response for Super-long-span Suspension Bridges [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2006, 33 (3): 6—10.
- [4] 吴斌暄, 王磊, 王歧峰. 使用非线性粘滞阻尼器的桥梁在地震反应中的响应分析 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (10): 76—80.
- WU Binxuan, WANG Lei, WANG Qifeng. A Method of Seismic Response Analysis for Bridge with Nonlinear Viscous Damper [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (10): 76—80.
- [5] 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 Edition, 2006, 34 (7): 859—863.
- [6] 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 Zhiqiang, HU Shide, FAN Lichu. Research on Viscous Damper Parameters of Donghai Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18 (3): 37—42.
- [7] 叶爱君, 胡世德, 范立础. 超大跨度斜拉桥的地震位移控制 [J]. 土木工程学报, 2004, 37 (12): 38—43.
- YE Aijun, HU Shide, FAN Lichu. Seismic Displacement Control for Super-long Span Cable-stayed Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37 (12): 38—43.
- [8] 徐秀丽, 刘伟庆, 李龙安, 等. 斜拉桥结构减震设计优化研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26 (2): 119—124.
- XU Xiuli, LIU Weiqing, LI Long'an, et al. Optimized Earthquake Reduction Design of Cable-stayed Bridges [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26 (2): 119—124.
- [9] 范立础. 桥梁抗震 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- FAN Lichu. Seismic Analysis of Bridge [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.
- [10] SEIM C. The Seismic Retrofit of the Golden Gate Bridge [C] // PRC-US Workshop on Seismic Analysis and Design of Special Bridges Shanghai, 2002.