

# 大跨连续梁桥纵向减震机理和减震效果分析

毛玉东, 李建中

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 基于一座实际大跨度连续梁桥, 分析比较了采用动力锁定装置、黏滞阻尼器和双曲面减隔震支座的减震机理和减震效果, 讨论了这些减震装置的适用范围. 结果表明: 动力锁定装置不耗散地震能量, 在活动墩处设置该装置, 可以合理分配梁体的地震惯性力, 但同时结构周期减小, 可能增加梁体总的惯性力; 黏滞阻尼器不改变结构的周期、振型等动力特性, 主要通过阻尼力消耗地震能量, 减小结构动力反应; 采用双曲面减隔震支座后结构的周期延长, 阻尼耗能能力增加, 相对于基准模型, 显著减小了固定墩的内力, 但同时增加了活动墩墩梁相对位移.

**关键词:** 大跨度连续梁桥; 减震装置; 减震机理; 减震效果; 梁体惯性力

**中图分类号:** U448.14

**文献标志码:** A

## Analysis of Seismic Mitigation Mechanism and Effect on Longitudinal Direction of Long-Span Continuous Bridges

MAO Yudong, LI Jianzhong

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on an actual long-span continuous bridge, the seismic mitigation mechanism and effect of Lock-up device, fluid viscous damper and double spherical seismic bearing were investigated and the applicable condition of these seismic mitigation devices are discussed. The results show that lock-up devices do not dissipate seismic energy and can reasonably distribute the seismic inertial force of girder, but may increase the total inertial forces of girder. Fluid viscous dampers, which do not change the structural dynamic characteristics such as structural period and vibration shape, mainly dissipate the seismic energy and reduce structural dynamic response by damping force. Double spherical seismic bearings provide flexibility to lengthen the natural period of the bridge and increase the energy dissipation capacity.

However, compared with the response of corresponding non-isolated bridges, the relative displacements between girder and pier increase while decreasing seismic forces of the fixed pier.

**Key words:** long-span continuous bridge; seismic mitigation devices; seismic mitigation mechanism; seismic mitigation effect; inertia force of girder

对于大跨度预应力混凝土连续梁桥结构, 梁体自重大、结构刚度大, 而且纵桥向支座布置一般在每联设置一个固定支座, 其余墩上均设置活动支座, 在纵桥向地震输入下, 由于活动支座发生滑动, 固定墩将承受大部分上部结构传递下来的惯性力, 使得各桥墩地震力分配严重不均匀, 如何减小固定墩纵桥向地震反应是减震设计的关键<sup>[1-2]</sup>. 工程中可以采用两种方式: ①在活动墩处附加动力锁定装置(以下简称 Lock-up 装置)或黏滞阻尼器. 由于阻尼器和 Lock-up 装置的特有性能在温度作用下, 活动支座处梁-墩之间纵桥向的约束很弱, 不影响活动支座的滑动; 纵向地震作用下, 梁-墩之间有较强的约束, 各墩共同承受水平地震荷载, 以减小固定墩所承受的地震力. ②采用减隔震支座. 双曲面球型减隔震支座由于具有较高的竖向承载能力在大跨度连续梁桥中得到广泛应用, 该支座主要通过结构自重提供所需的自复位能力, 帮助上部结构回到原来的位置, 利用钟摆机理延长结构的自振周期, 通过球型面滑动摩擦耗能.

文献[3-7]对减隔震桥梁的地震反应和不同减隔震装置的效果进行研究, 对比分析了桥墩和桥面的柔性对减隔震桥梁地震反应的影响. 文献[8-14]分析了不同减震装置的分析模型和减震效果, 研究了连续梁桥固定墩减震设计的不同方法. 研究结果

收稿日期: 2015-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(51278371)

第一作者: 毛玉东(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁抗震和结构动力学. E-mail: 1310200@tongji.edu.cn

通讯作者: 李建中(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震和结构动力学. E-mail: lijianzh@tongji.edu.cn

表明,通过合理的减隔震设计,减震装置或改变结构局部构件间的传力方式和途径、或增加结构的阻尼耗能能力、或延长结构的基本周期,避开地震能量集中的范围,从而使下部结构关键构件保持弹性,在预期地震荷载作用下达到较好的抗震性能.上述研究多针对中小跨度桥梁,且只分析了不同减震装置的减震效果,对大跨度连续梁桥,缺乏从减震机理上对比分析不同减震装置的减震效果.

本研究以高烈度区某大跨度连续梁桥为工程背景,结合大跨度连续梁桥结构地震反应特点,从减震装置对结构基本周期的变化和阻尼耗能的角度分析动力 Lock-up 装置、黏滞阻尼器及双曲面球型减隔震支座的减震机理,研究减震装置对大跨度连续梁桥的减震效果,并讨论各减震装置的适用范围,为工程设计提供了重要的参考.

## 1 计算模型、地震动输入和分析工况

### 1.1 背景工程和基准模型

图 1 为 100 m+160 m+100 m 的三跨变截面连续梁桥, $P_1, P_2, P_4$  墩为活动墩, $P_3$  墩为固定墩,主梁采用 C50 混凝土,跨中梁高 3.5 m,支点截面高 9.5 m,主梁重 45 773 t,边、主墩均为钢筋混凝土矩形实体桥墩,C40 混凝土,主墩( $P_2, P_3$ )和边墩( $P_1, P_4$ )墩高均为 20 m,边墩和主墩墩身厚度分别为 3.2, 4.0 m,墩身宽度均为 12.6 m; $P_1, P_4$  墩均为分离式承台,承台截面长度和宽度分别为 18.3, 6.6 m,高度为 2.5 m, $P_2, P_3$  墩承台均为整体式承台,承台高度均为 5 m,长度均为 41.5 m,承台宽度分别为 24.4 和 29.6 m,桩基础为群桩基础,边墩、主墩处桩径分别为 1.5, 2.0 m.

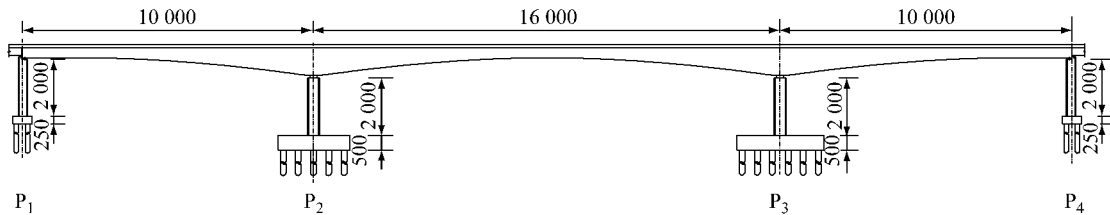


图 1 连续梁桥立面布置图(单位:cm)

Fig.1 Elevation of a three-span continuous bridge (unit: cm)

计算采用美国加州大学伯克利分校的动力非线性反应程序 SAP 2000,主梁、桥墩采用梁单元模拟,梁单元质量堆聚在杆端相应的节点上,承台近似按刚体模拟,其质量堆聚在承台质心,墩底与承台中心及桩顶中心节点主从相连,二期恒载以均布质量形式加在主梁单元上.基准模型的  $P_1, P_2, P_4$  墩顶端横桥向与主梁固结,纵桥向采用活动支座, $P_3$  墩纵桥向与横桥向固结.活动支座的摩擦作用效应可采用双线性理想弹塑性弹簧单元模拟,其恢复力模型见图 2.图中, $F_{\max}$  为活动支座临界滑动摩擦力, $x_y$  为活动支座临界滑动时的位移.计算分析时假定桥墩和主

梁保持弹性,采用线性单元模拟,固定支座在地震作用下不发生破坏.在承台底加 6 个方向的弹簧来模拟桩基础的作用.

### 1.2 地震动输入

桥梁抗震设防烈度为 8 度,Ⅲ类场地,采用《城市桥梁抗震设计规范(CJJ 166—2011)》中 50 年 2% 超越概率下的加速度反应谱(E2 地震作用)作为目标谱生成 7 条人工加速度波,生成人工加速度时程波时,阻尼比取为 0.05,加速度峰值  $A$  为 0.4g,采用非线性时程方法计算桥梁地震反应,最终结果取 7 条波计算结果的平均值.图 3 为 7 条人工地震波加速度反应谱与目标谱.

### 1.3 分析工况

在基准模型的活动支座处附加 Lock-up 装置、黏滞阻尼器或采用双曲面减隔震支座分别形成 Lock-up 模型、黏滞阻尼器模型和双曲面支座模型,如表 1 所示.本文中主要研究纵桥向地震作用下连续梁桥的减隔震问题,故表 1 中墩-梁之间的约束方式均为纵桥向的约束,横桥向梁与墩之间为固结.

为了进一步分析结构周期的改变对减震效果的

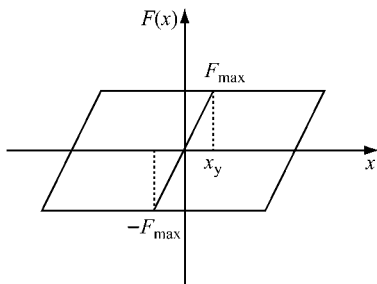


图 2 活动支座滑动支座的滞回模型

Fig.2 Hysteretic model of sliding bearing

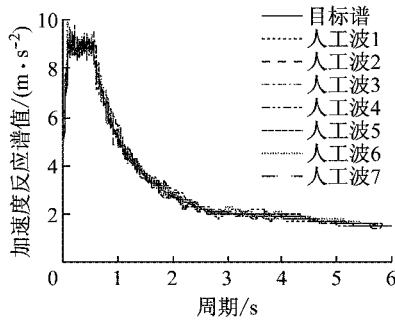


图 3 7 条人工波加速度反应谱

Fig.3 Acceleration response spectrum for seven simulated earthquake waves

表 1 分析模型及墩梁连接关系

Tab.1 Analysis models and pier-girder connection relations

分析模型	连接方式	
	P <sub>3</sub> 墩-主梁	P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>4</sub> 墩-主梁
基准模型	固定支座	活动支座
Lock-up 装置模型	固定支座	活动支座+Lock-up 装置
黏滞阻尼器模型	固定支座	活动支座+黏滞阻尼器
双曲面支座模型	双曲面减隔震支座	双曲面减隔震支座

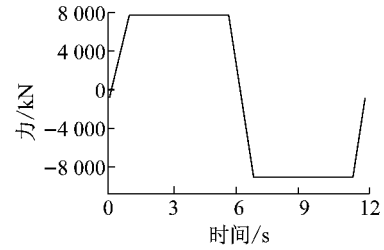
影响,通过改变桥墩的高度来改变桥梁的纵向基本振动周期,在上述 20 m 墩高模型的基础上将桥墩高度分别变为 5 m 和 40 m,分别形成 5 m 和 40 m 墩高的基准模型和减震模型。

图 4a 为动力荷载作用下 Lock-up 装置随时间的变化曲线,当受到突加动力荷载时,在很短的时间内 Lock-up 装置就起到了固结作用,将荷载传给相连接的构件,各部分结构共同承受水平地震荷载。因此,在模型中采用墩顶节点与其对应主梁节点主从约束模拟 Lock-up 装置的作用。

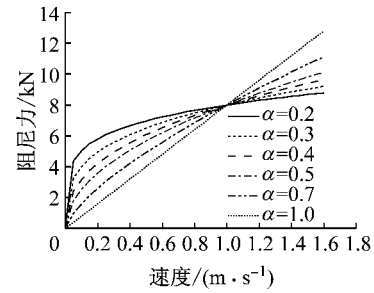
黏滞阻尼器的阻尼力与活塞运动速度之间的关系可表示为: $F=CV^\alpha$ 。其中, $F$  为阻尼器阻尼力, $C$  为阻尼系数, $V$  为活塞运动速度, $\alpha$  为速度指数。阻尼系数  $C$  的增加意味着阻尼力和耗能能力的增加, $\alpha$  表征流体黏滞阻尼器的非线性特性, $\alpha$  对阻尼力和耗能能力的影响与速度  $V$  有关(图 4b)。本文阻尼系数和阻尼指数分别取  $C=8\ 000\ \text{kN}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{-0.2}$ , $\alpha=0.2$ 。

双曲面球型减隔震支座的滞回特性是非线性的,通常情况下采用双线性模型模拟该支座的恢复力模型,见图 4c。图中, $F_y$  为屈服强度, $F_y=\mu_d W$ ;  $K_0$  为初始刚度, $K_0=\mu_d W/\delta_y$ ;  $F_d$  为屈后刚度, $F_d=W/R$ ,其中, $W$  为上部结构的竖向荷载,本文边墩、主墩处上部结构竖向荷载分别为 10 800, 83 800 kN;  $\delta_y$  为支座的屈服位移,本文取 0.002 m;  $R$  为滑动球面与转动球面之间的球心距,本文取 3 m;  $\mu_d$  为滑动球

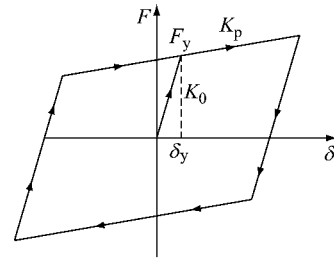
面的摩擦因数,本文取 0.02。



a Lock-up 装置



b 黏滞阻尼器



c 双曲面减隔震支座

图 4 不同减震装置的恢复力特性曲线

Fig.4 Hysteretic characteristics of different seismic mitigation devices

## 2 不同减震装置的减震效果与机理分析

以下分析均以基准模型的纵向地震响应为基准,采用减震装置模型地震响应与基准模型地震响应之差除以基准模型地震响应为指标,分析不同减震装置的减震效果与减震机理。

### 2.1 Lock-up 减震效果与机理分析

根据上节定义的地震动输入,对不同墩高的基准模型、Lock-up 模型进行非线性时程分析。表 2 给出了不同墩高模型设置 Lock-up 装置前后结构的纵向一阶周期、活动墩墩梁纵向相对位移、各墩墩顶纵向剪力和梁体水平惯性力的变化。

由表 2 中数据可知,活动墩设置 Lock-up 后,地震荷载作用下装置锁定,活动墩与固定墩一起共同分担梁体地震水平惯性力,活动墩墩梁相对位移减小为零,但活动墩墩顶纵向剪力增加。固定墩墩顶纵

向剪力有不同程度减小,其减小程度与墩高有关.5 m 墩高模型减小最多,达 43%;40 m 墩高模型其次,为 22%;20 m 墩高模型减小最少,为 12%.其主要原因是活动墩设置 Lock-up 装置后,相当于增加了固定墩的数量,提高了桥梁纵向刚度,桥梁结构纵向一阶周期缩短,梁体总水平地震惯性力增加,且其增加

程度与结构一阶周期的减小有关.5 m 墩高模型梁体总水平惯性力增加最少,为 21%;40 m 墩高模型其次,为 36%;20 m 墩高模型增加最多,达 55%.因此,相对于基准模型,设置 Lock-up 装置后梁体总水平地震惯性力增加较少时固定墩墩顶纵向剪力减小较多,对固定墩内力的改善效果较好.

表 2 不同墩高模型的纵向最大地震响应(基准模型和 Lock-up 模型)

Tab.2 Longitudinal peak seismic responses for different heights of pier (reference model and Lock-up model)

墩高/m	模型	纵向一阶周期/s	墩梁相对位移/m			墩顶剪力/kN				梁体水平惯性力/kN
			P <sub>1</sub> 墩	P <sub>2</sub> 墩	P <sub>4</sub> 墩	P <sub>1</sub> 墩	P <sub>2</sub> 墩	P <sub>3</sub> 墩	P <sub>4</sub> 墩	
5	基准模型	0.55	0.075	0.072	0.052	1 475	3 889	185 220	1 450	189 550
	Lock-up 模型	0.38	0	0	0	22 599	85 842	105 844	21 484	229 442
20	基准模型	1.26	0.230	0.180	0.214	3 728	4 176	103 879	3 732	103 449
	Lock-up 模型	0.86	0	0	0	10 606	80 152	91 791	11 207	160 415
40	基准模型	3.24	0.408	0.371	0.407	2 109	7 875	36 494	2 113	52 823
	Lock-up 模型	2.20	0	0	0	8 542	30 905	28 293	8 857	71 819

图 5 给出了 3 种不同墩高模型设置 Lock-up 装置前后反应谱谱值的变化.

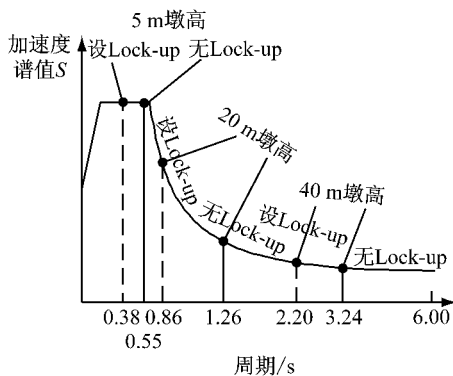


图 5 设置 Lock-up 装置前后反应谱谱值变化

Fig.5 Changes of response spectrum value with and without Lock-up devices

从图中可以看出,设置 Lock-up 装置前后,桥梁的基本周期变化位于反应谱曲线平缓段(图中的 5 m 墩高和 40 m 墩高模型),桥梁结构基本周期的减

小没有引起梁体总的地震惯性力的显著增加,活动墩与固定墩共同承担梁体地震惯性力,可以有效减小固定墩所受的地震水平力;设置 Lock-up 装置前后,桥梁结构基本周期的变化位于设计反应谱的加速下降段(如 20 m 墩高模型),梁体地震惯性力显著增加,尽管分担梁体惯性力的桥墩数量增加,但由于梁体总的地震惯性力也增加较多,不能达到有效降低固定墩所受的地震水平力.因此,设置 Lock-up 前后桥梁的基本周期位于反应谱平缓段(墩高较矮处于平台段或墩高较高处于长周期段,如 40 m 以上桥墩)的桥梁结构,Lock-up 装置可以起到较好的减震效果.

2.2 黏滞阻尼器的减震效果与机理分析

根据上节定义的地震动输入,对不同墩高的黏滞阻尼器模型进行非线性时程分析.表 3 给出了不同墩高模型设置黏滞阻尼器前后活动墩墩梁纵向相对位移、各墩墩顶纵向剪力和梁体水平惯性力的变化.

表 3 不同墩高模型的纵向最大地震响应(基准模型和黏滞阻尼器模型)

Tab.3 Longitudinal peak seismic responses for different heights of pier (reference model and fluid viscous damper model)

墩高/m	模型	墩梁相对位移/m			墩顶剪力/kN				梁体水平惯性力/kN
		P <sub>1</sub> 墩	P <sub>2</sub> 墩	P <sub>4</sub> 墩	P <sub>1</sub> 墩	P <sub>2</sub> 墩	P <sub>3</sub> 墩	P <sub>4</sub> 墩	
5	基准模型	0.075	0.072	0.052	1 475	3 889	185 220	1 450	189 550
	黏滞模型	0.043	0.049	0.025	8 261	10 578	125 362	7 314	151 192
20	基准模型	0.230	0.180	0.214	3 728	4 176	103 879	3 732	103 449
	黏滞模型	0.038	0.100	0.035	7 212	13 368	63 105	6 870	84 689
40	基准模型	0.408	0.371	0.407	2 109	7 875	36 494	2 113	52 823
	黏滞模型	0.055	0.220	0.059	6 487	14 076	30 576	6 555	46 232

由表 3 中数据可知,设置黏滞阻尼器后,活动墩墩梁相对位移减小,P<sub>1</sub>,P<sub>4</sub> 墩墩梁相对位移减小程度

相同.相对基准模型,5,20 和 40 m 黏滞阻尼器模型的 P<sub>1</sub> 墩墩梁相对位移分别减小 42%,83%和 87%,

而  $P_2$  墩墩梁相对位移分别减小 32%, 45% 和 41%。其原因是由于  $P_1$  和  $P_2$  墩的截面特性不同, 两墩自身的动力特性相差较大, 如 40 m 墩高模型,  $P_1$  墩自身的纵向基本振动周期(假设为单悬臂)为 0.782 s,  $P_2$  墩为 1.464 s, 地震荷载作用下  $P_1$  墩与主梁发生同向振动, 而  $P_2$  墩与主梁发生非同向振动, 所以两者的墩梁相对位移相差较大。同时活动墩墩顶纵向剪力增加, 固定墩墩顶纵向剪力减小, 3 种墩高模型的固定墩墩顶纵向剪力分别减小了 32%, 39% 和 16%。

活动墩处设置黏滞阻尼器不改变桥梁结构的周期、振型等动力特性, 活动墩所受地震水平力增加,

固定墩所受的地震水平力减小。一方面原因是活动墩分担了固定墩所承受的地震水平力, 两者共同承担梁体水平地震惯性力; 另一方面黏滞阻尼器主要通过阻尼力消耗地震能量, 梁体总的水平地震惯性力减小, 5, 20 和 40 m 黏滞阻尼器模型的梁体水平地震惯性力分别减小 20%, 18% 和 12%。

### 2.3 双曲面减隔震支座的减震效果与机理分析

根据上节定义的地震动输入, 对不同墩高的双曲面支座模型进行非线性时程分析。表 4 给出了不同墩高模型设置双曲面支座前后活动墩墩梁纵向相对位移、各墩墩顶纵向剪力和梁体水平惯性力的变化。

表 4 不同墩高模型的纵向最大地震响应(基准模型和双曲面支座模型)

Tab.4 Longitudinal peak seismic responses for different heights of pier (reference model and double spherical bearing model)

墩高/m	模型	墩梁相对位移/m				墩顶剪力/kN				梁体水平惯性力/kN
		$P_1$ 墩	$P_2$ 墩	$P_3$ 墩	$P_4$ 墩	$P_1$ 墩	$P_2$ 墩	$P_3$ 墩	$P_4$ 墩	
5	基准模型	0.075	0.072	0	0.052	1 475	3 889	185 220	1 450	189 550
	双曲面模型	0.343	0.342	0.342	0.344	2 095	11 639	11 620	2 089	31 309
20	基准模型	0.230	0.180	0	0.214	3 728	4 176	103 879	3 732	103 449
	双曲面模型	0.324	0.323	0.324	0.325	4 362	12 196	12 432	4 358	32 088
40	基准模型	0.408	0.371	0	0.407	2 109	7 875	36 494	2 113	52 823
	双曲面模型	0.465	0.376	0.375	0.468	2 871	14 537	14 682	2 886	33 461

由表 4 中数据可知, 相对基准模型, 采用双曲面减隔震支座后, 活动墩墩梁相对位移增大, 墩高越矮墩梁相对位移增加越多。5, 20 和 40 m 双曲面支座模型的  $P_1$  墩( $P_4$  墩)墩梁相对位移分别增加 360% (562%), 41% (52%) 和 14% (15%),  $P_2$  墩墩梁相对位移分别增加 373%, 79% 和 1.3%; 活动墩墩顶纵向剪力显著增加,  $P_1$ ,  $P_4$  墩增加幅度相近, 3 种墩高模型墩顶纵向剪力分别增加 42% (44%), 17% (17%), 36% (37%),  $P_2$  墩墩顶纵向剪力分别增加 199%, 192% 和 85%。固定墩墩顶产生较大的墩梁相对位移, 固定墩墩顶纵向剪力显著减小, 其减小程度与墩高有关, 墩高越矮固定墩墩顶剪力减小越多, 如 5, 20 和 40 m 3 种墩高模型固定墩墩顶纵向剪力分别减小了 94%, 88% 和 60%。其主要原因是采用双曲面减隔震支座后, 梁体总的水平地震惯性力减小, 5 m 墩高模型梁体总水平惯性力减小最多, 为 83%; 20 m 墩高模型其次, 为 69%; 40 m 墩高模型减小最少, 达 37%。

图 6 给出了桥梁结构采用双曲面减隔震支座后加速度反应谱值随结构基本振动周期、等效阻尼的变化。图中  $T_g$  为加速度反应谱的特征周期。由图 6 可以看出, 采用减隔震支座前加速度谱值为  $S_1$ , 采用减隔震支座后, 随结构周期的增加, 加速度谱值减小

至  $S_2$ , 同时由于减隔震支座的耗能, 桥梁结构的等效阻尼比增大, 加速度反应谱值进一步减小至  $S_3$ 。

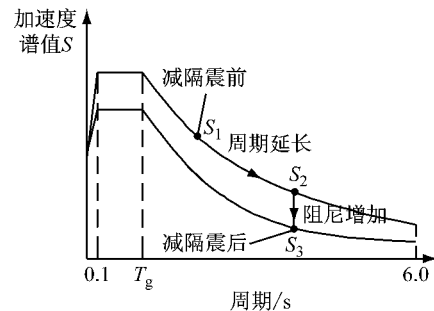


图 6 采用双曲面减隔震支座后反应谱谱值的变化

Fig.6 Changes of response spectrum value with and without double spherical seismic bearing

## 3 三种减震装置的减震效果对比分析

根据不同墩高减震装置模型的计算结果, 对比分析 3 种减震装置对各桥墩的墩梁纵向相对位移和墩顶纵向剪力的影响。图 7 给出了基准模型和不同减震装置模型的地震响应对比情况。

由图 7 可知, 相对于基准模型, 设置 Lock-up 装置后各活动墩墩梁相对位移减小为零, Lock-up 装置对活动墩墩梁相对位移的减小效果最优, 黏滞阻尼

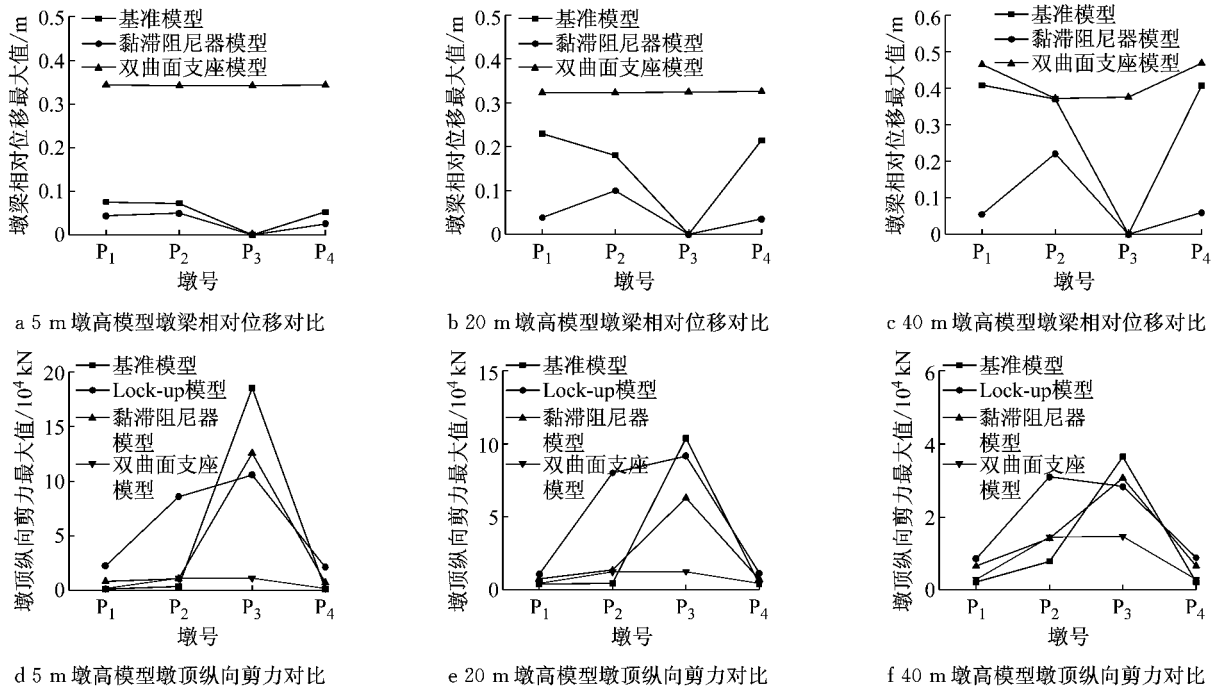


图 7 基准模型和不同减震装置模型的地震响应对比

Fig. 7 Seismic response comparison between reference model and different seismic mitigation device models

器也显著减小了活动墩墩梁相对位移,而双曲面支座增加了活动墩墩梁相对位移,原固定墩处出现较大的墩梁相对位移.采用双曲面支座后,原固定墩墩顶纵向剪力大幅减小,其对固定墩墩顶纵向剪力的减小效果最优,黏滞阻尼器也显著减小了固定墩墩顶纵向剪力,而 Lock-up 装置对固定墩内力的减小程度与墩高有关,当桥梁结构的纵向一阶周期处于反应谱曲线的平台段或长周期段时,对固定墩内力的改善较显著.

## 4 结论

强震作用下,连续梁桥的固定墩将承受较大的地震力,对下部结构的设计造成较大的困难.针对这一问题,对一座大跨度连续梁桥采用减震装置后的抗震性能进行对比分析,得出以下结论:

(1) 设置 Lock-up 装置或黏滞阻尼器改变了结构的内力分配和传力路径,活动墩与固定墩一起共同承担地震荷载,可以同时降低固定墩内力和活动墩墩梁相对位移,但其对固定墩内力的改善效果不如双曲面减隔震支座.

(2) Lock-up 改变了结构的动力特性,增加了上部结构总的惯性力,其本身并不耗散能量,且当桥梁结构的纵向一阶周期处于反应谱曲线的平台段或长周期段时,对固定墩内力的改善较显著;在考虑采用

Lock-up 装置时,一定要结合桥梁结构的自身特点,分析后再选用.

(3) 黏滞阻尼器并不改变结构的周期、振型等动力特性,主要通过活塞与油缸之间发生相对运动产生阻尼力,消耗地震能量,减小结构动力反应.

(4) 相对于基准模型,采用双曲面减隔震支座后结构的整体刚度降低,纵向基本周期延长,结构的阻尼增加,固定墩内力得到显著改善,却增加了活动墩墩梁相对位移.

## 参考文献:

- [1] 范立础, 王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
FAN Lichu, WANG Zhiqiang. Bridge seismic damping or isolation system design [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [2] 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 bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [3] Kunde M C, Jangid R S. Effects of pier and deck flexibility on the seismic response of isolated bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(1): 109.
- [4] Jangid R S. Seismic response of isolated bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(2): 156.
- [5] Jangid R S. Stochastic response of bridges seismically isolated by friction pendulum system [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(4): 319.

- [6] Tsopelas P, Constantinou M C. Study of elastoplastic bridge seismic isolation system [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 1997, 123(4): 489.
- [7] Imbsen R A. Use of isolation for seismic retrofitting bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, 6(6): 425.
- [8] 汤虎, 张洁, 李建中. 近断层区桥梁组合使用板式橡胶支座和黏滞阻尼器方法探讨[J]. *结构工程师*, 2012, 28(5): 89. TANG Hu, ZHANG Jie, LI Jianzhong. Study on application of viscous dampers installed in continuous bridges on elastomeric pad bearings in near-fault regions [J]. *Structural Engineers*, 2012, 28(5): 89.
- [9] 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. TANG Hu, LI Jianzhong. Displacement control method for continuous bridge on laminated rubber bearings under earthquake excitation [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(3): 110.
- [10] 汤虎, 李建中. 连续梁桥固定墩减震设计方法研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(12): 64. TANG Hu, LI Jianzhong. Study of earthquake-reduction design for the fixed pier of continuous bridges [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(12): 64.
- [11] 焦驰宇, 胡世德, 管仲国. FPS抗震支座分析模型比较研究[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(10): 113. JIAO Chiyu, HU Shide, GUAN Zhongguo. Comparison study on analysis models of FPS seismic isolation support [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(10): 113.
- [12] 张永亮, 陈兴冲, 颜志华. Lock-up装置在连续梁桥上的减震性能研究[J]. *世界地震工程*, 2010, 26(2): 48. ZHANG Yongliang, CHEN Xingchong, YAN Zhihua. Research on seismic reduction performance of Lock-up device applied to continuous girder bridge [J]. *World Earthquake Engineering*, 2010, 26(2): 48.
- [13] 吴陶晶, 李建中, 管仲国. 减隔震装置作用机理及其在大跨度连续梁桥中的应用[J]. *结构工程师*, 2009, 25(4): 102. WU Taojing, LI Jianzhong, GUAN Zhongguo. Mechanism of seismic isolation devices and applications in a long-span continuous bridge [J]. *Structural Engineers*, 2009, 25(4): 102.
- [14] 王志强, 葛继平. 黏滞阻尼器和Lock-up装置在连续梁桥抗震中应用[J]. *石家庄铁道学院学报*, 2006, 19(1): 5. WANG Zhiqiang, GE Jiping. Application of viscous damper and Lock-up devices in the seismic design of continuous girder bridges [J]. *Journal of Shijiazhuang Railway Institute*, 2006, 19(1): 5.
- (上接第184页)
- [3] 张世冀, 税银平. 不良地质下桥梁桩基脱空的应对措施及模拟分析[J]. *交通科技*, 2015(1): 20. ZHANG Shiji, SHUI Yiping. Response and simulation analysis of the bridge pile foundation's void under the bad geological conditions [J]. *Transportation Science & Technology*, 2015(1): 20.
- [4] 周玉民. 水混凝土路面脱空状态下的结构分析[D]. 上海: 同济大学, 2004. ZHOU Yumin. Structural analysis of concrete pavement within cavity [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [5] 孙朝云. 现代道路交通测试技术——原理与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000. SUN Chaoyun. The modern road traffic measurement technology—theory and application [M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [6] 赵军. 刚性路面板底脱空检测评定的理论与方法[D]. 上海: 同济大学, 2006. ZHAO Jun. The theory and method of cavity detection and evaluation under rigid pavements [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [7] 姬亦工, 王复明, 郭忠印. 基于落锤式弯沉仪(FWD)动态数据的路面模量反演方法[J]. *土木工程学报*, 2002, 35(3): 31. JI Yigong, WANG Fuming, GUO Zhongyin. The inversion correcting method of pavements modules based on dynamic data derived from FWD [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, 35(3): 31.
- [8] Davis A G, Dunn C S. From theory to field experience with the nondestructive vibration testing of piles [J]. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, 1974(12): 867.
- [9] Davis A G, Evans J G, Hertlein B H. Nondestructive evaluation of concrete radioactive waste tanks [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1997, 11(4): 161.
- [10] Vivek K, Michael A M, Gerald A M. Impulse response dynamic stiffness decay in aging general aviation airfield pavements [J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2012, 2304: 119.
- [11] Davis A G, Lim M K, Petersen C G. Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods [J]. *Independent Nondestructive Testing and Evaluation*, 2005, 38(3): 181.
- [12] Gucunski N, Maher A, Jackson H. Verification of pavement undersealing by impulse response method [C] // *Nondestructive testing in environmental protection*. Cavtat-Dubrovnik: Matest, 2001: 81-86.
- [13] Hola J, Sadowski L, Schabowicz K. Nondestructive evaluation of the concrete floor quality using impulse response method and impact-echo method [J]. *Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*, 2009, 14(3): 55.
- [14] Papworths Construction Testing Equipment. Slab impulse response-voids under slab [DB/OL]. [2015-04-01]. <http://www.pcte.com.au/slab-impulse-response>.