

文章编号: 1674—8247(2023)06—0094—07

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 06. 018

## 高速铁路大跨连续梁桥减震方案比较

季翔<sup>1</sup> 张永亮<sup>1</sup> 周友权<sup>2</sup> 陈兴冲<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学, 兰州 730070;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

**摘要:**以某高速铁路(60+100+60)m大跨连续梁桥为研究对象,引入阻尼器和速度锁定器(Lock-up)减震装置,通过有限元软件建立减震体系模型,采用非线性动力时程法研究分析两种减震装置、4种布置方案在不同墩高下结构内力的分布规律及减震效果。研究结果表明:(1)在10~40 m墩高内,阻尼器减震方案下墩底内力减震率随墩高增加而增大,整体布置方案下固定墩底减震率为37.1%~56.9%,较局部布置方案高出10%~18%;(2)Lock-up装置是以增大活动墩底内力来降低连续梁固定墩底内力的,且受墩高影响显著;(3)从各墩内力总和来看,阻尼器方案下各墩底内力总和减震率为17.1%~52.1%,而Lock-up方案仅当墩高大于30 m时各墩底内力总和才低于抗震体系;(4)对于墩高相对较矮的三跨铁路连续梁,阻尼器的减震效果明显优于Lock-up装置。

**关键词:**铁路连续梁桥;减震效果;动力时程分析;阻尼器;Lock-up装置

中图分类号:U442.55

文献标志码:A

## Comparison of Vibration Reduction Schemes for Large-span Continuous Girder Bridge on High-speed Railway

JI Xiang<sup>1</sup> ZHANG Yongliang<sup>1</sup> ZHOU Youquan<sup>2</sup> CHEN Xingchong<sup>1</sup>

(1. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

**Abstract:** For a large-span (60+100+60) m continuous girder bridge on a high-speed railway as the object of this study, the dampers and lock-up devices were introduced for vibration reduction. Then a vibration reduction system model was established through finite element software, and the nonlinear dynamic time-history method was used to analyze the distribution patterns of structural internal forces under different pier heights and vibration reduction effects for the two vibration reduction devices and four deployment schemes. The study results show: (1) Within a pier height of 10 ~ 40 m, the vibration reduction rate of the base of the pier with dampers increases with the height of the pier. The vibration reduction rate of the fixed pier base under the overall layout scheme is 37.1% ~ 56.9%, which is 10% ~ 18% higher than that under the partial arrangement scheme. (2) The lock-up devices reduce the internal force of the fixed pier base at the expense of increasing the internal force of the active pier base, and it is significantly affected by the pier height. (3) From the perspective of the total internal force of each pier, the vibration reduction rate of the total internal force at the base of each pier with damper is 17.1% ~ 52.1%, while the total internal force at the base of each pier with lock-up device only falls below the seismic system when the pier height is greater than 30 m. (4) For three-span continuous girder railway

收稿日期:2022-10-18

作者简介:季翔(1995-),男,硕士研究生。

引文格式:季翔,张永亮,周友权,等.高速铁路大跨连续梁桥减震方案比较[J].高速铁路技术,2023,14(6):94-100.

JI Xiang, ZHANG Yongliang, ZHOU Youquan, et al. Comparison of Vibration Reduction Schemes for Large-span Continuous Girder Bridge on High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 94-100.

bridge with relatively low pier height, the damper has a noticeably better vibration reduction effect than the lock-up device.

**Key words:** continuous girder railway bridge; vibration reduction effect; dynamic time history analysis; damper; lock-up device

大跨度连续梁桥由于跨越能力大,受力合理,刚度大,结构简单,伸缩缝少且施工工艺成熟等优点,在高速铁路桥梁中应用较为广泛。然而,多次地震灾害表明,大多数连续梁桥一般只设置1个固定墩,地震荷载作用下上部结构产生的地震力几乎全部由固定墩承担,固定墩抗震性能难以满足设计要求,特别是对于高烈度地区的大跨连续梁桥。因此,提高固定墩在地震作用下的抗震性能在桥梁抗震设计中显得尤为重要。

近年来,工程中常采用一系列减震装置来提高桥梁的抗震性能,其中粘滞阻尼器(Viscous damper)和速度锁定器(Lock-up device)由于构造简单,在温度和徐变变形下不会对结构产生附加力,可显著改善桥梁结构在地震作用下的受力性能,在桥梁抗震设计中得到了广泛应用。文献[1-4]主要研究了连续梁桥固定墩在不同减隔震装置下纵桥向减震效果的对比分析;文献[5-9]研究了减隔震装置的减震机理、减震效果分析以及在大跨连续梁桥中的应用;文献[10-11]针对高速铁路大跨连续梁常用的减隔震装置粘滞阻尼器、Lock-up装置以及双曲面球型减隔震支座减震性能进行研究讨论。

目前研究多侧重于某一特定桥在固定墩高下不同减震装置减震效果的研究分析,针对常用的大跨连续梁桥在不同墩高下结构内力分布规律及减震效果的系统性研究分析较少<sup>[12-13]</sup>。本文以某高速铁路

(60+100+60)m典型跨径连续梁桥为研究对象,引入粘滞阻尼器和Lock-up两种减震装置,4种布置方案,对比分析各减震方案在不同墩高下结构内力的分布规律及减震效果,确定其合理适用范围,为高速铁路大跨连续梁桥的抗震设计提供参考。

## 1 工程概况及计算模型

### 1.1 工程概况

选取某铁路一联(60+100+60)m预应力混凝土连续梁桥为抗震分析对象,上部结构为三跨双线单箱单室变高度直腹板箱形截面,材料为C50混凝土。中支点4.0m范围内梁高7.85m,跨中及现浇段梁高4.85m,梁底曲线为二次抛物线,箱梁顶宽12.2m,底宽6.7m,梁重(自重+二期)为14 180.9t。桥墩截面形式与墩高有关,桥墩类型及截面尺寸如图1所示, $H_1$ 、 $H_2$ 分别为10m、20m桥墩,采用C35混凝土等截面圆端型实体墩(图中虚线所示), $H_3$ 、 $H_4$ 分别为30m、40m桥墩,采用C40混凝土变截面薄壁空心墩(图中实线所示),其中墩高30m、40m的空心墩(中墩)壁厚 $\delta_1$ 分别为86.7cm、95.1cm,空心墩(边墩)壁厚 $\delta_2$ 分别为76.7cm、87.6cm,内外坡度比为1/30、1/40;每个桥墩上均设置2个球形钢支座,粘滞阻尼器、Lock-up装置的约束方向相同且通过外连杆端与主梁和桥墩相连,沿桥梁中心线纵桥向布置,支座及各减震装置布置如图2所示,其中3号墩为固定墩,其余均为活动墩。

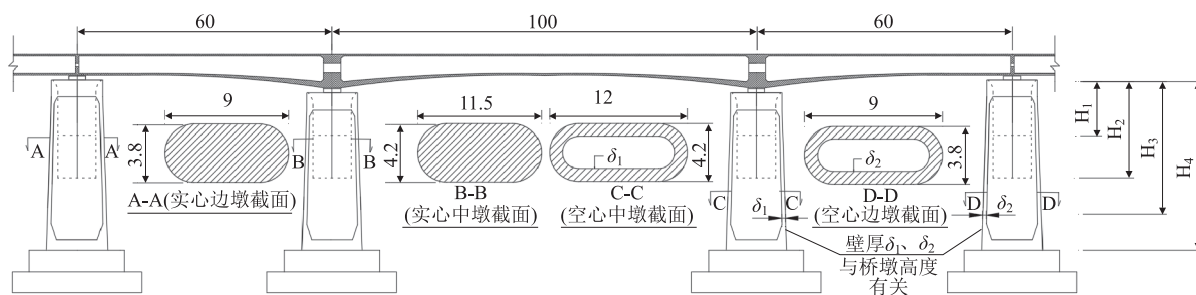


图1 桥梁立面布置图(m)

### 1.2 减震方案及计算模型

为研究两种减震装置在不同墩高下连续梁桥内力的分布规律及减震效果,共制定了4种减震方案:方案一、方案二采用粘滞阻尼器,方案三、方案四采用Lock-up装置。其中方案一、方案三为整体布置方

式,方案二、方案四为局部布置方式,布置方案如表1所示。

采用有限元分析软件Midas Civil建立(60+100+60)m连续梁桥抗震体系和减震体系动力分析模型。主梁、桥墩及承台均采用弹性梁单元模拟,二期恒载

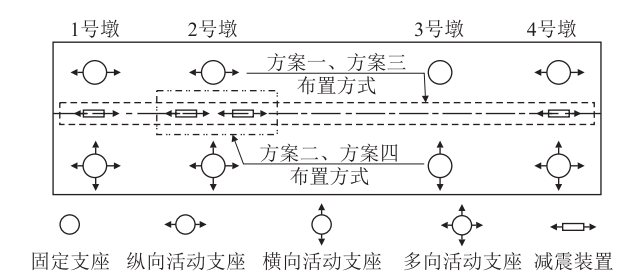


图2 支座及减震装置布置图

表1 阻尼器、Lock-up 装置布置方案表

墩号	1号墩	2号墩	3号墩	4号墩
抗震体系	无	无	固定	无
方案一	1个	2个	固定	1个
方案二	无	2个	固定	无
方案三	1个	2个	固定	1个
方案四	无	2个	固定	无

为 150 kN/m 以均布荷载的形式施加在主梁单元上。桩-土效应通过在承台底施加集中弹簧模拟(弹簧刚度采用“m”法计算),支座的约束作用根据其活动类型采用主从自由度方式模拟,空间有限元模型如图 3 所示。

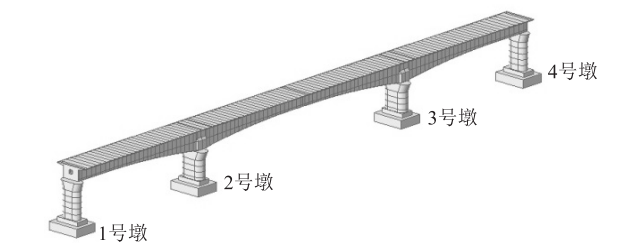


图3 有限元模型图

粘滞阻尼器的力学特性可表达为:

$$F = CV^\alpha \tag{1}$$

式中:  $C$ ——阻尼系数;  
 $V$ ——相对速度;  
 $\alpha$ ——阻尼指数。根据其力学特性采用一般连接中的粘弹性消能器来进行模拟。

Lock-up 装置应用于桥梁抗震设计时,针对具体工程设置速度阈值,其力学模型为:

$$F = \begin{cases} 0 & V \leq V_0 \\ 0 \sim F_{\max} & V > V_0 \end{cases} \tag{2}$$

式中:  $F_{\max}$ ——最大锁定力;  
 $V_0$ ——速度阈值。

Lock-up 装置的工作状态主要取决于墩梁相对速度,仅当  $V > V_0$  时,作为刚性连杆锁定桥墩与主梁。通常桥梁锁定速度为 0.127 ~ 0.25 mm/s,5 条地震波下

各活动墩墩梁相对速度的最大值为 529 ~ 1 966 mm/s,且基本处于锁定状态,故本文采用刚性连杆进行模拟。

场地类别为 II 类,场地特征周期 0.45 s,选取 2 条强震记录波和 3 条人工合成波。将 5 条波的地震动峰值加速度(PGA)均调整为 0.38 g,分别沿纵桥向输入到不同墩高下抗震体系模型和减震体系模型中进行非线性时程反应分析。假设各桥墩均保持弹性,仅考虑粘滞阻尼器的非线性进行分析,其地震响应计算结果取 5 条波的峰值平均值。

2 阻尼器方案分析结果

方案一(整体布置方式):在 1 号、4 号活动墩处沿桥梁中心线各设置 1 个粘滞阻尼器,2 号活动墩处设置 2 个粘滞阻尼器;方案二(局部布置方式):仅在 2 号活动墩处设置 2 个粘滞阻尼器。结构内力的减震效果与粘滞阻尼器的力学参数  $C$ 、 $\alpha$  取值有关,从工程常用的阻尼系数  $C(1\,000 \sim 7\,000) \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^\alpha$ ,阻尼指数  $\alpha(0.3 \sim 0.7)$  范围内分析结构的地震响应,确定其最优参数取值。从结构内力的局部与整体分布规律 2 个指标评价减震效果。

指标 1:单墩内力减震率。以 3 号固定墩底内力减震率  $\eta$  为主要考察指标,同时兼顾其他活动墩内力  $\eta$  值。指标 2:各墩底弯矩总和减震率。其中减震率  $\eta$  的定义式为:

$$\eta = \frac{A - B}{A} \times 100\% \tag{3}$$

式中:  $A$ ——抗震体系墩底内力的峰值平均值或各墩底峰值弯矩之和的平均值;

$B$ ——减震体系墩底内力的峰值平均值或各墩底峰值弯矩之和的平均值。

以 10 m 墩高模型为例进行分析,因固定墩底剪力的变化规律与弯矩相似,仅给出弯矩变化规律图,如图 4 所示。由图 4 可知,两种方案不同阻尼器力学参数下墩底弯矩的变化规律,同抗震体系相比:

(1) 当  $\alpha$  不变时,两种方案固定墩底弯矩随着  $C$  的增大而减小,当  $C > 3\,000 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^\alpha$  时,墩底弯矩变化趋于平缓;当  $C$  不变时,墩底弯矩随着  $\alpha$  的减小而减小。

(2) 综合考虑减震效果及阻尼器输出力 2 个因素,两种方案中阻尼器力学参数最优取值为  $C = 3\,000 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^\alpha$ ,  $\alpha = 0.3$ ,此时方案一、方案二固定墩底弯矩对应的减震率分别为 37.1%、26.7%,可见方案一优于方案二。

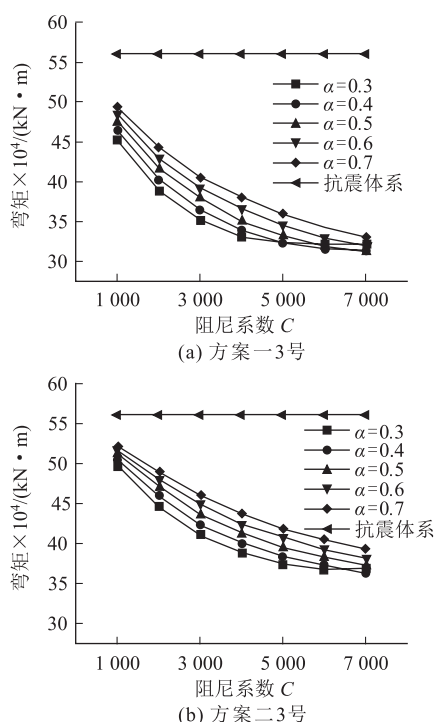


图4 固定墩底弯矩图

为研究不同墩高下阻尼器对桥梁地震响应的减震规律,将墩高分别调整至20 m、30 m、40 m,墩身截面尺寸也随之调整,但阻尼器的布置方案保持不变。通过大量数值统计分析发现,不同墩高下,阻尼器的

力学参数  $C$ 、 $\alpha$  对桥梁地震反应的影响规律相近,最终统一取  $C = 3\,000 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^\alpha$ ,  $\alpha = 0.3$ 。相应的计算结果如图5、表2所示,从中得到如下结论:

(1)随着墩高增加,方案一、方案二下固定墩底内力与抗震体系下的变化规律相同,即墩高增加,固定墩底剪力先显著降低,后平缓变化;而墩底弯矩先平缓变化,后明显增大,但活动墩底内力呈线性增加趋势。

(2)随着墩高增加,两种方案下的结构内力  $\eta$  值均增大。当墩高从10 m变化至40 m时,方案一3号固定墩底弯矩  $\eta$  值分别为37.1%、43.7%、56.9%、55.4%。但方案二的  $\eta$  值均明显低于方案一,降低范围10%~18%。条件许可时,宜优先采用方案一。

(3)墩高为10 m时,固定墩底内力  $\eta = 37.1\%$ ,但各活动墩底内力均增加,  $\eta$  值均为负值(说明减震体系结构内力大于传统抗震体系),2号墩  $\eta$  值增加最明显,为-118.6%。墩高大于20 m时,固定墩及各活动墩的墩底内力  $\eta$  值均为正值,表明所有桥墩的墩底内力均降低。

(4)从各墩底内力总和角度评价,两种方案下  $\eta$  值为17.1%~52.1%,表明粘滞阻尼器具有良好的耗能能力,降低了地震动输入结构体系的能量。

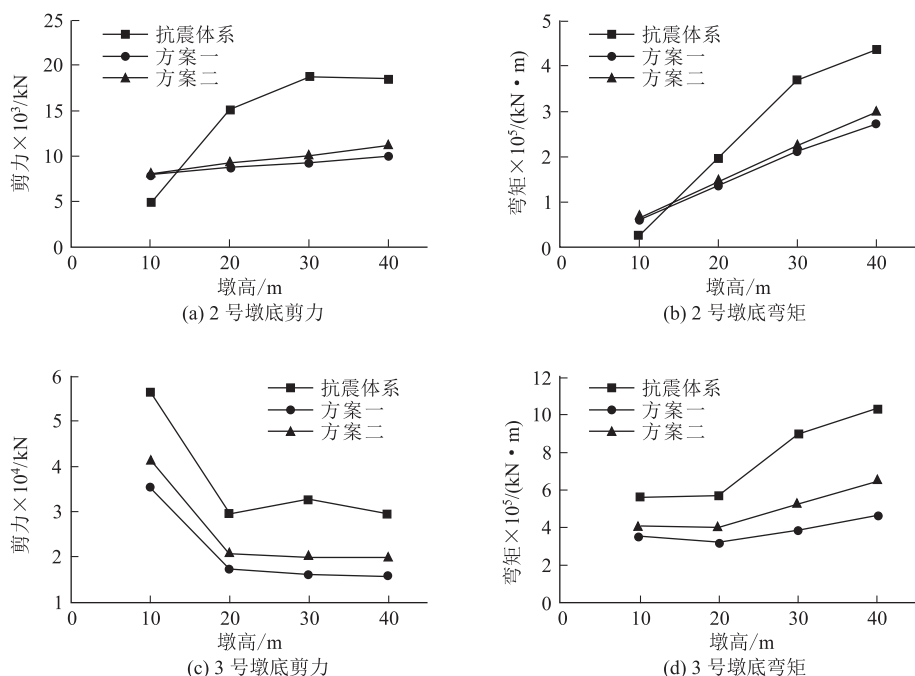


图5 不同墩高2号、3号墩底内力图

### 3 Lock-up 装置方案分析结果

为探究 Lock-up 装置的减震效果,方案三、方案四

仅将方案一、方案二的阻尼器换为 Lock-up 装置。分别在10 m、20 m、30 m、40 m 4个墩高下,对比 Lock-up 装置的两种减震方案与抗震体系各墩底内力的减



表2 不同墩高墩底内力减震率表

墩高	模型	墩底剪力 $\eta/\%$				墩底弯矩 $\eta/\%$				墩底弯矩合计 $\eta/\%$
		1号墩	2号墩	3号墩	4号墩	1号墩	2号墩	3号墩	4号墩	
10 m	方案一	-19.8	-59.1	37.1	-16.8	-460.6	-118.6	37.1	-43.7	20.9
	方案二	0.0	-60.8	26.7	0.0	0.0	-121.7	26.7	0.0	17.1
20 m	方案一	57.5	41.8	41.9	57.2	54.0	29.6	43.7	54.0	44.9
	方案二	0.0	38.7	29.7	0.0	0.0	25.1	30.0	0.0	18.8
30 m	方案一	54.7	50.6	50.7	54.7	50.4	42.7	56.9	50.6	52.1
	方案二	0.0	46.8	38.3	0.0	0.0	38.9	41.9	0.0	28.6
40 m	方案一	48.2	46.0	47.0	47.4	45.9	38.0	55.4	46.0	48.9
	方案二	0.0	39.8	33.0	0.0	0.0	31.6	37.4	0.0	24.7

震效果来研究其变化规律。墩高不同方案下2号墩、3号墩底内力的变化规律如图6、图7及表3所示。由图表可以看出：

(1)从各墩底内力分布规律看, Lock-up 装置对连续梁固定墩底内力的降低是以增大其他活动墩底内力为代价的,且两者关系受墩高的影响较为显著。

(2)当墩高低于20 m时,两种方案下固定墩底弯矩  $\eta$  值为12~26%,减震效果并不明显。墩高为10 m时,1号、2号活动墩底弯矩显著增大,  $\eta$  值分别达到-579.8%、-1172.9%。这是因为当墩高较低时,下部结构刚度较大,而设置 Lock-up 装置后,结构动力特性变化较大,结构纵向1阶周期由传统抗震体系0.79 s变为0.44 s。可见当墩高较低时,不宜采用 Lock-up 装置。

(3)当墩高大于30 m时, Lock-up 装置对连续梁固定墩底内力的减震效果较明显。墩高为30 m时,两种方案下连续梁固定墩底弯矩  $\eta$  值分别为42.3%、37.2%,表明方案四也可起到较好的减震效果。墩高为40 m时,方案三的  $\eta=53.9\%$  明显高于方案四的  $\eta=30.3\%$ ,实际工程中应优先选用方案三。

(4)从各墩底内力总和的角度评价,只有当墩高大于30 m时,设置 Lock-up 装置的连续梁各墩底内力总和才低于抗震体系,这也表明 Lock-up 装置不具备耗能能力,在结构体系中仅起到了改变结构动力特性以及重新分配结构惯性力的作用。

4 方案一、方案三墩底内力典型时程曲线比较

10 m、40 m墩高下阻尼器的滞回曲线如图8所示,40 m墩高下方案一、方案三在其中1条地震波作用下的墩底典型内力时程曲线如图9所示。从墩底内力峰值与振动周期2个角度考察,可得出如下结论：

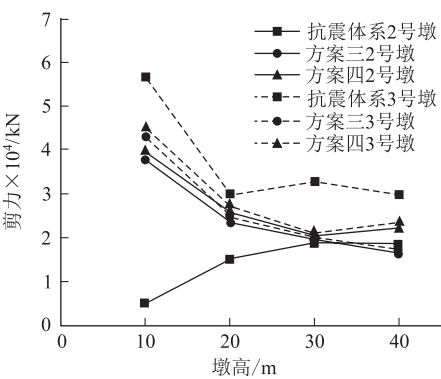


图6 不同墩高下2号、3号墩底剪力图

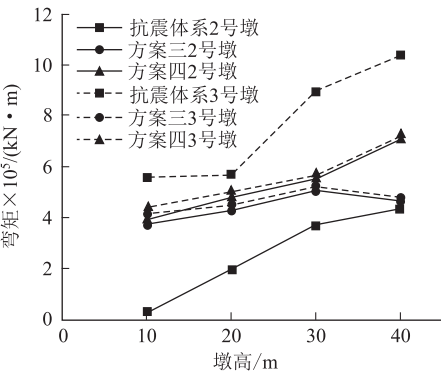


图7 不同墩高下2号、3号墩底弯矩图

由图8和图9(a)、图9(b)可知,2号墩底剪力、弯矩振动周期在方案一、方案三时较为接近,且明显小于抗震体系,这表明粘滞阻尼器通过阻尼力起到 Lock-up 装置的作用,使2号墩振动周期变小。通过比较还发现方案一的墩底弯矩峰值明显小于方案三,且高墩较矮墩滞回曲线面积变大,充分体现出粘滞阻尼器滞回耗能的重要作用。

由图9(c)、图9(d)可知,在方案一、方案三下3号墩底剪力、弯矩振动周期均小于抗震体系,且方案一、方案三的峰值较为接近,明显小于抗震体系的峰

表3 不同墩高各墩底内力减震率表

墩高	模型	墩底剪力 $\eta/\%$				墩底弯矩 $\eta/\%$				墩底弯矩合计 $\eta/\%$
		1号墩	2号墩	3号墩	4号墩	1号墩	2号墩	3号墩	4号墩	
10 m	方案三	-343.1	-656.4	24.0	-336.7	-579.8	-1 172.9	25.8	-571.7	-95.3
	方案四	-79.4	-688.9	20.6	-79.4	-85.4	-1 242.3	21.4	-85.4	-46.8
20 m	方案三	7.5	-55.2	17.3	7.1	-23.8	-119.1	21.5	-23.7	-17.7
	方案四	5.0	-69.4	8.6	5.0	5.6	-144.6	12.3	5.6	-16.3
30 m	方案三	0.4	-3.5	38.9	-1.3	-26.5	-37.1	42.3	-26.5	5.3
	方案四	4.7	-6.9	35.9	4.7	5.0	-49.3	37.2	5.0	9.9
40 m	方案三	11.7	10.7	41.8	12.5	-2.1	-7.2	53.9	-2.1	24.2
	方案四	2.0	-21.4	20.9	2.0	3.5	-62.4	30.3	3.5	3.0

值,表明两种方案均起到了增加结构刚度、有效降低固定墩地震反应的作用。

以上墩底内力时程曲线很好地体现了粘滞阻尼器与 Lock-up 装置的力学特征,也间接验证了本文分析结果的正确性。

5 结论

以某高速铁路(60+100+60)m 连续梁桥为研究对象,采用两种减震装置、4种布置方案分析了不同墩高下结构内力的分布规律及减震效果,得到主要结论

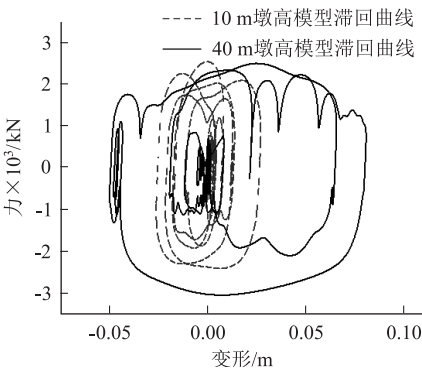


图8 方案一阻尼器滞回曲线图

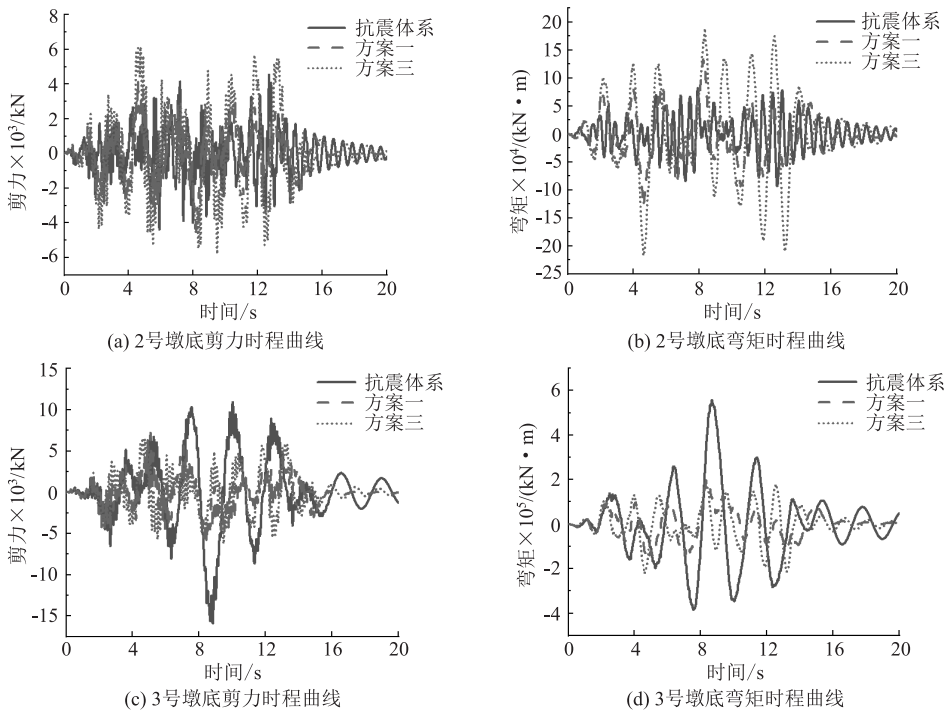


图9 40 m 墩高下方案一、方案三墩底典型内力时程曲线图

如下：

(1)随墩高增加,粘滞阻尼器减震方案下的墩底内力减震率增大。当墩高从 10 m 变化至 40 m 时,固定墩底弯矩减震率分别为 37.1 %、43.7 %、56.9 %、55.4 %。局部布置方案较整体布置方案下的减震率降低范围为 10 % ~ 18 %。

(2) Lock-up 装置对连续梁固定墩底内力的降低是以其他活动墩底内力的增大为代价的,两者关系受墩高影响显著。当墩高为 30 m、40 m 时,固定墩底弯矩减震率分别为 42.3%、53.9%。活动墩底弯矩相应的减震率为 -62.4%~5.0%。

(3) 从各墩底内力总和角度评价,当墩高大于 30 m 时,设置 Lock-up 装置的连续梁各墩底内力总和才低于抗震体系的值,这也表明 Lock-up 装置不具备耗能能力,在结构体系中仅起到了改变结构动力特性及重新分配结构惯性力的作用。设置粘滞阻尼器方案下的各墩底内力总和减震率为 17.1%~52.1%,表明粘滞阻尼器具有良好的耗能能力。

(4) 从总体上看,对于三跨铁路连续梁而言(尤其墩高相对较矮时),粘滞阻尼器的减震效果优于 Lock-up 装置。

## 参考文献:

- [1] 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): 64-72.  
TANG Hu, LI Jianzhong. Study of Earthquake-reduction Design for the Fixed Pier of Continuous Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(12): 64-72.
- [2] 李侠. 长联大跨连续梁桥减隔震设计方案比选[J]. 铁道建筑, 2014, 54(6): 43-46.  
LI Xia. Comparison and Selection of Seismic Reduction and Isolation Design Schemes for Long-span Continuous Beam Bridges [J]. Railway Engineering, 2014, 54(6): 43-46.
- [3] 上官萍,马海滨,卓卫东. 多跨 RC 连续梁桥抗震与减隔震设计方案比选[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 677-681.  
SHANGGUAN Ping, MA Haibin, ZHUO Weidong. Seismic and Isolation Design Schemes Comparison for a Multi-span Continuous RC Girder Bridge [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 677-681.
- [4] 冯亚成. 高速铁路大跨连续梁桥减隔震方案讨论[J]. 地震研究, 2015, 38(1): 167-172, 182.  
FENG Yacheng. Discussion on Seismic Mitigation and Isolation Schemes for High-speed Railway Large-span Continuous Girder Bridges [J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(1): 167-172, 182.
- [5] 彭天波,李建中,范立础. 双曲面球型减隔震支座的开发及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 176-180.  
PENG Tianbo, LI Jianzhong, FAN Lichu. Development and Application of Double Spherical Aseismic Bearing [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(2): 176-180.
- [6] 颜志华,马良喆,陈永祁. 速度锁定装置在津秦客运专线减震设计中的应用[J]. 桥梁建设, 2014, 44(1): 95-100.  
YAN Zhihua, MA Liangzhe, CHEN Yongqi. Applying of Speed Lock-up Devices to Seismic Mitigation Design of a Continuous Girder Bridge on Tianjin-Qinhuangdao Passenger Dedicated Railway [J]. Bridge Construction, 2014, 44(1): 95-100.
- [7] 毛玉东,李建中. 大跨连续梁桥纵向减震机理和减震效果分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 185-191.  
MAO Yudong, LI Jianzhong. Analysis of Seismic Mitigation Mechanism and Effect on Longitudinal Direction of Long-span Continuous Bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(2): 185-191.
- [8] 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): 102-107.  
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): 102-107.
- [9] 夏修身,崔靛波,陈兴冲,等. 长联大跨连续梁桥隔震技术应用研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(4): 39-45.  
XIA Xiushen, CUI Liangbo, CHEN Xingchong, et al. Study of Application of Seismic Isolation Techniques for Long Span and Long Unit Continuous Beam Bridge [J]. Bridge Construction, 2015, 45(4): 39-45.
- [10] 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): 48-52.  
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): 48-52.
- [11] 秦煜,杨超华,吴多,等. 速度锁定器理论模型及铁路桥梁抗震适用性分析[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(2): 5-8, 32.  
QIN Yu, YANG Chaohua, WU Duo, et al. Theoretical Model of Lock-up Device and Applicability Analysis of Seismic Design of Railway Bridge [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(2): 5-8, 32.
- [12] 王志强,葛继平. 粘滞阻尼器和 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): 5-9.  
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): 5-9.
- [13] 宋子威,蔡小培. 粘滞性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): 1102-1105.  
SONG Ziwei, CAI Xiaopei. Application of Viscous Damper Devices in the Seismic Design of Long Span and Long Unit Continuous Girder Bridges on High Speed Railway [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(8): 1102-1105.