

# 滑动支座摩擦效应对连续梁桥地震响应影响

贾毅<sup>1</sup>, 赵人达<sup>1</sup>, 廖平<sup>1</sup>, 李福海<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 陆地交通地质灾害防治技术国家工程实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 以 1 座跨度为(55+4×90+55) m 的预应力混凝土变截面连续梁桥为研究对象, 采用 ANSYS 软件建立桥梁动力分析模型, 选取 3 条人工地震波作为地震动输入, 基于动力非线性分析方法, 考虑摩擦效应, 分析盆式橡胶支座连续梁桥非固定墩的地震响应和支座的滞回性能, 并与未考虑摩擦效应的地震响应进行比较。结果表明: 非固定墩处的盆式橡胶支座在地震作用下形成了规则、饱满的滞回曲线, 形状近似为矩形; 相对未考虑盆式橡胶支座摩擦效应的模型, 考虑支座滑动后, 固定墩墩底顺桥向弯矩、剪力分别降低了 25.91%、27.41%, 固定墩墩顶顺桥向位移和非固定墩墩梁相对位移分别降低了 26.15%、25.59%; 对于多跨长联连续梁桥, 滑动支座数量多且反力大, 若不考虑滑动支座的摩擦耗能, 桥梁结构地震响应结果偏大, 抗震设计偏于保守。

**关键词:** 桥梁工程; 连续梁桥; 非线性时程分析法; 盆式橡胶支座; 摩擦效应; 地震响应; 有限元法

中图分类号: U448.215; U442.55

文献标志码: A

## Influence of Friction Effect of Sliding Bearings on Seismic Response of Continuous Beam Bridge

JIA Yi<sup>1</sup>, ZHAO Renda<sup>1</sup>, LIAO Ping<sup>1</sup>, LI Fuhai<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. National Engineering Laboratory for Technology of Geological Disaster Prevention in Land Transportation, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A variable cross-section prestressed concrete continuous girder bridge with a span of (55+4×90+55) m as the research object was analyzed, and the dynamic analysis model of the bridge was established by using the software ANSYS. Three artificial seismic waves were selected as seismic input. Based on dynamic nonlinear analysis method, the seismic response of the bridge and the hysteresis performance of the bearing considering friction effect for non-brake piers were analyzed. Then, the seismic response of the

bridge considering friction effect was compared with that without considering friction effect. The results indicate that the basin rubber bearing at non-brake pier has a regular and full hysteresis curve under seismic action, and the shape of the hysteresis curve is approximately rectangular. After considering the friction effect of the basin rubber bearing, the longitudinal bending moment and the shear force were reduced by 25.91% and 27.41% respectively at the bottom of non-brake pier. The longitudinal displacement at the top of brake pier and the pier-beam relative displacement of non-brake pier were reduced by 26.15% and 25.59% respectively. If the friction energy dissipation of sliding bearings is not considered for the multi-span and long-unit continuous beam bridge with multiple sliding bearings whose reaction force is large, the seismic response of bridge structure will be larger and the seismic design will be too conservative.

**Key words:** bridge engineering; continuous girder bridge; nonlinear time history analysis; basin rubber bearings; friction effect; seismic response; finite element method

支座作为桥梁上下部结构的传力连接部位, 是桥梁结构的重要组成部分之一。由于支座受力的特殊性, 因此支座成为桥梁结构最易损坏的构件。支座破坏的主要原因是支座设计未充分考虑抗震性能要求<sup>[1-4]</sup>。盆式橡胶支座具有构造简单、承载能力高、水平滑移能力强以及价格低廉等优点, 在我国公路和铁路中小跨径梁桥中得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。普通盆式橡胶支座在地震作用时会发生一定的变形和滑移, 从而减小了桥墩的水平地震力, 降低了桥梁结构损伤程度<sup>[6]</sup>。

Steelman 等<sup>[7]</sup>、Carr 等<sup>[8]</sup>、李冲等<sup>[9-10]</sup>、杨喜文等<sup>[11]</sup>、汤虎等<sup>[12]</sup>、李建中等<sup>[13]</sup>对考虑支座摩擦滑移

收稿日期: 2017-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(51308471); “十三五”国家重点研发计划(2016YFB1200401); 广东省科技厅科技计划(2014-02-015)

第一作者: 贾毅(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁抗震。E-mail: jiaiyi0715vip@sina.com

通讯作者: 李福海(1979—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构及材料耐久性。E-mail: qixingye2003@163.com

的桥梁结构地震响应进行了研究. 结果表明,地震作用下支座的滑动不仅会改变结构的动力性能,同时还会降低结构的地震响应,提高桥梁整体抗震能力. 然而,上述研究主要针对中小跨径的简支梁桥,支座也主要为板式橡胶支座,对采用盆式橡胶支座的多跨长联连续梁桥非固定墩的地震响应研究却鲜有文献报道.

为进一步研究地震作用下盆式橡胶支座的抗震性能,本文以 1 座多跨长联预应力混凝土连续梁桥为研究对象,采用动力非线性时程分析方法,研究考虑摩擦耗能的盆式橡胶支座连续梁桥的地震响应特点以及支座的滞回性能,并对比分析了考虑支座摩擦效应对固定墩的减震效果,为多跨长联连续梁桥抗震设计提供参考.

## 1 工程背景与地震动输入

### 1.1 工程概况

韩江特大桥主桥为(55+4×90+55) m 的六跨预应力混凝土连续梁桥,如图 1 所示. 上、下行分离,单幅桥宽 12.5 m,混凝土主梁采用单箱单室直腹板箱型断面. 主墩采用薄壁箱型墩,主墩横桥向宽 6.5 m,顺桥向长 2.5 m,⑨~⑮号墩高分别为 18.86、14.97、23.93、24.56、25.19、25.82、22.57 m. 全桥支座均采用盆式橡胶支座,其中⑪~⑬号桥墩处设置固定支座,其他均为单向滑动支座.

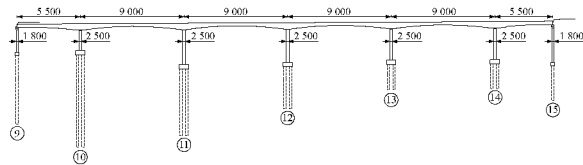
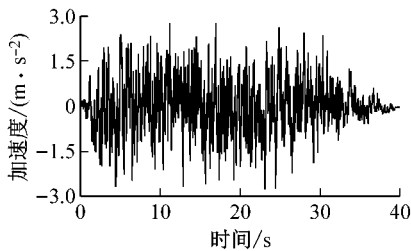


图 1 韩江特大桥总体布置(单位:cm)

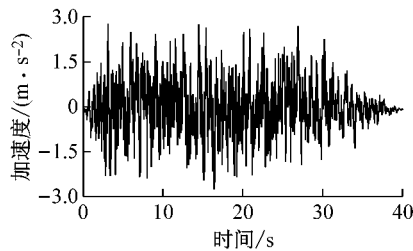
Fig.1 General layout of Hanjiang Bridge(unit:cm)

### 1.2 有限元模型

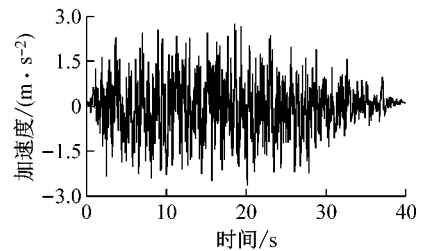
采用大型通用有限元软件 ANSYS 建立了韩江特



a 地震波 1



b 地震波 2



c 地震波 3

图 3 3 条人工拟合地震波

Fig.3 Three artificial seismic waves

大桥有限元计算模型,如图 2 所示. 主梁、桥墩、承台和桩基础均采用 BEAM188 单元模拟. 全桥模型中,桥面铺装等二期恒载转化为集中质量单元附加在主梁的节点上,集中质量单元采用 MASS21 单元模拟,分析时考虑 3 个平动方向的质量. 桥梁主梁采用单主梁模型模拟,通过竖向刚臂连接支座,刚臂上端与主梁节点刚性主从,刚臂下端为支座顶端节点<sup>[14-15]</sup>.

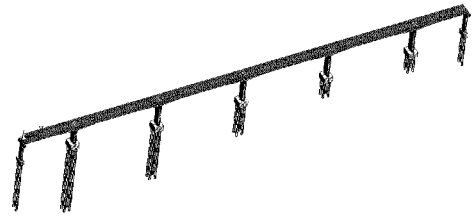


图 2 有限元计算模型

Fig.2 Finite element calculation model

### 1.3 地震动输入

本次计算选用 50 年超越概率 2.5% 的设计反应谱为期望反应谱,设计反应谱如式(1)所示,其阻尼比为 5%,参数如表 1 所示. 采用反应谱转人工波 SIMQKE\_G 软件生成人工波时程曲线,得到 3 条 50 年超越概率 2.5% 的人工地震波,如图 3 所示,同时得到基于人工地震波时程曲线的反应谱与设计规范加速度反应谱对比曲线<sup>[15-16]</sup>,如图 4 所示.

$$S(T) = \begin{cases} S_{\max}(0.435 + 5.65T), & 0 < T \leq T_0 \\ S_{\max}, & T_0 < T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T)^\gamma, & T_g < T \leq 10.0 \text{ s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_{\max}$ 为最大地震影响系数,与超越概率和阻尼有关; $g$ ;  $T$ 为结构自振周期,s; $T_g$ 为场地的特征周期,s; $\gamma$ 为衰减指数; $T_0$ 为设计加速度反应谱对应的结构最小周期.

表 1 加速度反应谱参数

Tab.1 Parameters of acceleration response spectrum

超越概率	$T_0/s$	$T_g/s$	$\beta_{\max}$	$\gamma$	$S_{\max}/g$
50年2.5%	0.10	0.85	2.30	1.0	0.65

注: $\beta_{\max}$ 为动力放大系数最大值.

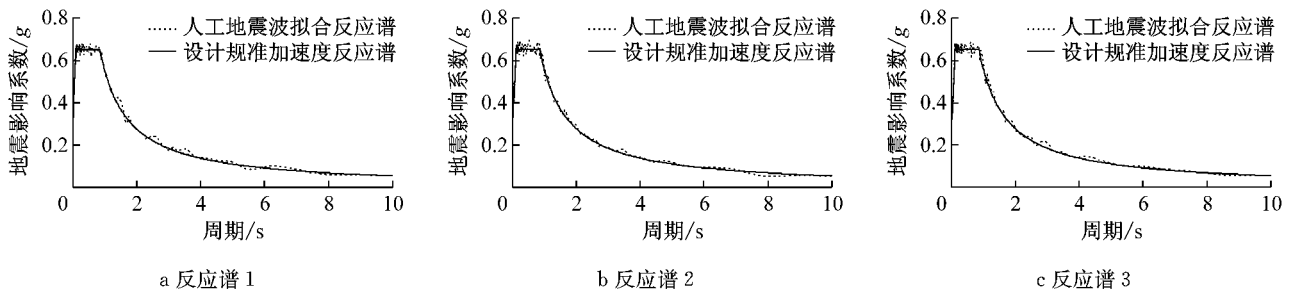


图 4 人工地震波拟合反应谱与设计规范加速度反应谱比较

Fig.4 Comparison between response spectrum of artificial seismic wave and design response spectrum

## 2 分析模型与支座模拟

### 2.1 分析模型

为研究多跨长联连续梁桥采用的普通盆式橡胶支座是否具有减震耗能作用,本文共建立 2 个模型,支座均采用盆式橡胶支座且其他建模参数相同.区别在于模型一不考虑盆式橡胶支座在地震作用时的滑动摩擦耗能效应,而模型二考虑盆式橡胶支座的滑动摩擦耗能效应.

### 2.2 盆式橡胶支座模拟

固定墩处设置固定盆式橡胶支座,通过墩梁节点的 3 个平动自由度和绕纵轴的转动自由度耦合,其余 2 个自由度释放来模拟;非固定墩处设置单向滑动盆式橡胶支座,对于模型一不考虑滑动摩擦支座的摩擦效应,通过墩梁节点竖向和横桥向的平动自由度及绕纵轴的转动自由度耦合,其余 3 个自由度释放来模拟<sup>[17]</sup>,对于模型二考虑滑动摩擦支座的摩擦效应,采用双线性理想弹塑性连接单元模拟,滞回模型如图 5 所示<sup>[15,18]</sup>.图 5 中, $D$  为支座的位移,临界摩擦力  $Q_y$  (滑动起始摩擦力)取单个支座承受的竖向荷载  $W$  乘以动摩擦因数  $\mu$ ,初始刚度  $K_u$  为临界摩擦力  $Q_y$  与支座屈服位移  $\delta_y$  (滑动起始静位移)之比,  $D_y$  为支座的屈服位移,  $K_d$  为支座滑动后的恢复力刚度(屈后刚度),对于普通盆式橡胶支座建议取零.本次模型中动摩擦因数取为 0.02,支座的屈服位移取为 3 mm<sup>[19]</sup>.

在 ANSYS 软件中,盆式橡胶支座的力学特性可由 2 个水平非线性弹簧单元和 1 个竖向线性弹簧单元组合来模拟,3 个弹簧不相交的各节点约束所有自由度,交点处节点约束转动自由度<sup>[20]</sup>,如图 6 所示.水平纵、横 2 个方向的刚度模拟均采用 COMBIN40 单元,其力学模型如图 7 所示.盆式橡胶支座水平方向的基本参数对应 COMBIN40 单元中的实参数,即  $K_1=K_u, K_2=K_d=0$ . 竖向单元采用

COMBIN14 单元模拟,单元实常数取盆式橡胶支座的竖向刚度值.图 7 中, $C$  为等效阻尼比换算的阻尼系数,盆式橡胶支座的阻尼系数为零.通过计算得到韩江特大桥非固定墩(⑨、⑩、⑭、⑮号桥墩)盆式橡胶支座的参数,如表 2 所示.

表 2 盆式橡胶支座力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of basin rubber bearing

桥墩号	$W/$ ( $10^3$ kN)	$K_u/$ ( $10^4$ kN·m <sup>-1</sup> )	$Q_y/$ kN	$K_1/$ ( $10^4$ kN·m <sup>-1</sup> )
⑨	2.198	1.465	43.96	1.465
⑩	17.252	11.501	345.04	11.501
⑭	17.252	11.501	345.04	11.501
⑮	2.198	1.465	43.96	1.465

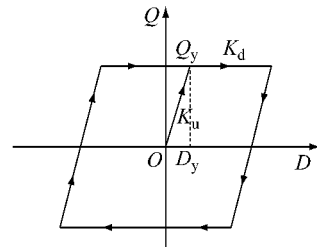


图 5 滑动摩擦支座的滞回模型

Fig.5 Hysteretic model of sliding friction bearing

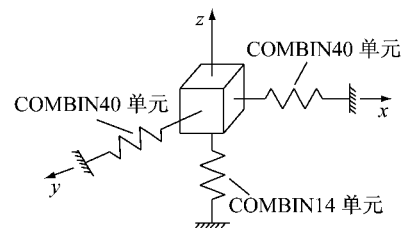


图 6 盆式橡胶支座简化模型

Fig.6 Simplified model of basin rubber bearing

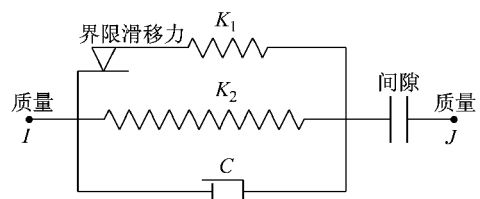


图 7 COMBIN40 单元力学模型

Fig.7 Mechanical model of COMBIN40 unit

### 3 地震响应结果及分析

#### 3.1 盆式橡胶支座滞回曲线

通过查看非固定墩处盆式橡胶支座的滞回曲线可以了解该支座的变形情况、水平剪力、耗能能力以及支座的时间历程<sup>[21]</sup>. 图 8 给出了⑨号、⑩号、⑭号、⑮号 4 个非固定墩处盆式橡胶支座在地震作用下的滞回曲线.

由图 8 可知,非固定墩处单向(顺桥向)滑动支座在地震作用下都形成了规则、饱和的滞回曲线,曲线形状为矩形. 滑动支座通过滑动摩擦耗散地震能量,有效降低了结构的地震响应. ⑩号、⑭号桥墩处滑动支座的位移最大值分别为 322 mm、281mm,⑨

号、⑮号桥墩处滑动支座的位移最大值分别为 370 mm、377 mm,过渡墩处滑动支座的顺桥向位移大于紧靠过渡墩处滑动支座的顺桥向位移. ⑩号、⑭号桥墩处滑动支座的顺桥向剪力最大值与该处滑动支座本身的滑动摩擦力相等,为 345.04 kN;⑨号、⑮号桥墩处滑动支座的顺桥向剪力最大值与该处滑动支座本身的滑动摩擦力相等,为 43.96 kN. 由此可知,在地震作用下所有滑动支座都发生了滑动,滑动支座的顺桥向剪力与临界滑动摩擦力相等,但过渡墩处滑动支座的顺桥向剪力远小于紧靠过渡墩处滑动支座的剪力. 综合比较可知,紧靠过渡墩处滑动支座的滞回曲线面积比过渡墩处滑动支座的的大,因此相应滑动支座的耗能能力也大些.

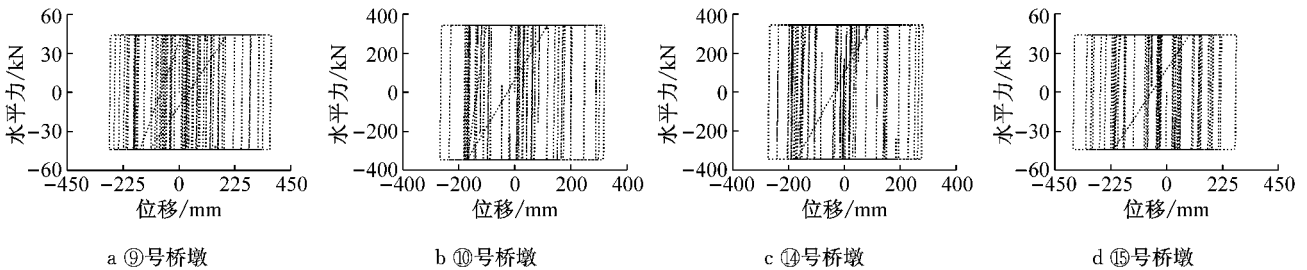


图 8 非固定墩处滑动支座的滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curve of sliding bearing at non-brake pier

#### 3.2 内力结果及分析

多跨长联连续梁桥上部结构质量大,地震作用时将产生巨大的水平惯性力,这些水平惯性力将由各个桥墩共同承担. 因此,研究桥梁在罕遇地震作用下桥墩的受力情况意义较大. 由于该桥主跨布置为对称结构,对称的桥墩在地震作用下的受力基本一致,因此本文仅研究⑨~⑫号桥墩受力情况. 在地震作用下模型一与模型二的⑨~⑫号桥墩墩底顺桥向弯矩、剪力时程曲线如图 9 和图 10 所示.

由图 9 和图 10 分析可知,模型一和模型二的固定墩墩底内力时程曲线变化规律是一致的,非固定

墩中⑩号桥墩墩底内力时程曲线变化规律有一定的差异. 这主要是由于滑动支座的摩擦耗能延长了结构的振动周期,使得模型二的桥墩墩底内力在一定时间内保持不变. 对比模型一和模型二的时程曲线可知,当盆式橡胶支座考虑摩擦耗能时,在地震作用下,各个桥墩的墩底顺桥向弯矩和剪力都有一定的降低,对固定墩墩底的内力减小更加显著.

表 3 给出了模型一和模型二在地震作用下桥墩墩底顺桥向内力最大值. 本文以模型一为基准模型,定量分析了考虑滑动支座摩擦效应后的减震效果,定义了相对基准模型的减震率  $\eta$ <sup>[15]</sup>,如下所示:

表 3 内力响应最大值及相对减震率

Tab.3 Maximum internal force response and its relative seismic isolation rate

桥墩号	墩底顺桥向弯矩/(10 <sup>3</sup> kN·m)		相对减震率/%	墩底顺桥向剪力/(10 <sup>4</sup> kN)		相对减震率/%
	模型一	模型二		模型一	模型二	
⑨	0.431	0.332	22.97	0.284	0.213	25.00
⑩	0.230	0.275	-19.57	0.256	0.261	-1.95
⑪	3.430	2.560	25.36	1.470	1.070	27.21
⑫	3.660	2.710	25.96	1.520	1.100	27.63
⑬	3.900	2.870	26.41	1.570	1.140	27.39
⑭	0.638	0.573	10.19	0.402	0.301	25.12
⑮	0.465	0.397	14.62	0.245	0.190	22.45

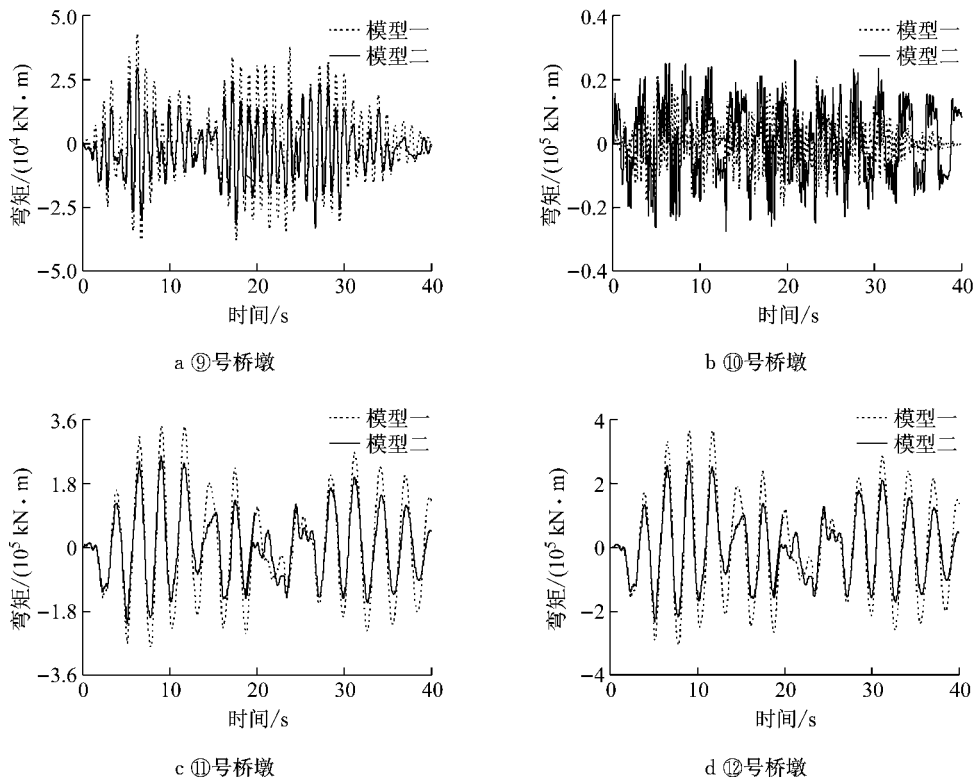


图 9 桥墩墩底顺桥向弯矩时程曲线

Fig.9 Longitudinal bending moment's time history curves at the bottom of pier

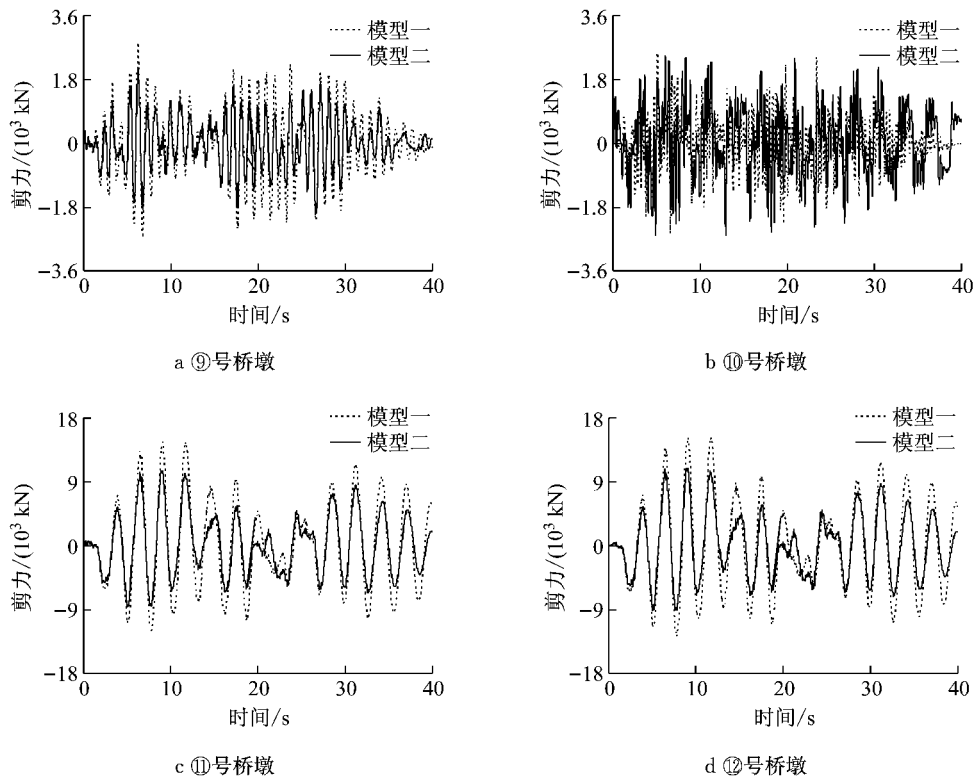


图 10 桥墩墩底顺桥向剪力时程曲线

Fig.10 Longitudinal shear force's time history curves at the bottom of pier

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

式中:  $A$  为模型一的地震响应值;  $B$  为模型二的地震响应值.

通过表 3 可知,未考虑滑动支座摩擦效应时,⑪~⑬号固定墩墩底顺桥向弯矩分别为  $3.430 \times 10^5$  kN·m、 $3.660 \times 10^5$  kN·m、 $3.900 \times 10^5$  kN·m;考虑滑动支座摩擦效应时,⑪~⑬号固定墩墩底顺桥向弯矩分别为  $2.560 \times 10^5$  kN·m、 $2.710 \times 10^5$  kN·m、 $2.870 \times 10^5$  kN·m;模型二相对模型一固定墩的弯矩减震率分别为 25.36%、25.96%、26.41%。未考虑滑动支座摩擦效应时,⑪~⑬号固定墩墩底顺桥向剪力分别为  $1.470 \times 10^4$  kN、 $1.520 \times 10^4$  kN、 $1.570 \times 10^4$  kN;考虑滑动支座摩擦效应时,⑪~⑬号固定墩墩底顺桥向剪力分别为  $1.070 \times 10^4$  kN、 $1.100 \times 10^4$  kN、 $1.140 \times 10^4$  kN;模型二相对模型一固定墩的剪力减震率分别为 27.21%、27.63%、

27.39%。通过上述数据分析可知,盆式橡胶支座在地震作用下,如果考虑滑动摩擦耗能作用,将会降低结构的内力响应,具有一定的减震效果。

### 3.3 位移结果及分析

地震作用下,多跨长联连续梁桥墩顶的顺桥向位移不能超过桥墩容许变形,否则桥墩将会发生弯曲或失稳破坏。各支座处梁墩顺桥向相对位移过大将会造成支座的脱落,甚至发生严重的落梁破坏。因此,对于多跨长联连续梁桥除了要满足强度的设计外,还要求桥梁墩柱不能发生过大的弯曲变形和墩梁相对位移。⑨~⑫号桥墩墩顶顺桥向位移时程曲线如图 11 所示,⑨号和⑩号桥墩墩梁顺桥向相对位移时程曲线如图 12 所示。

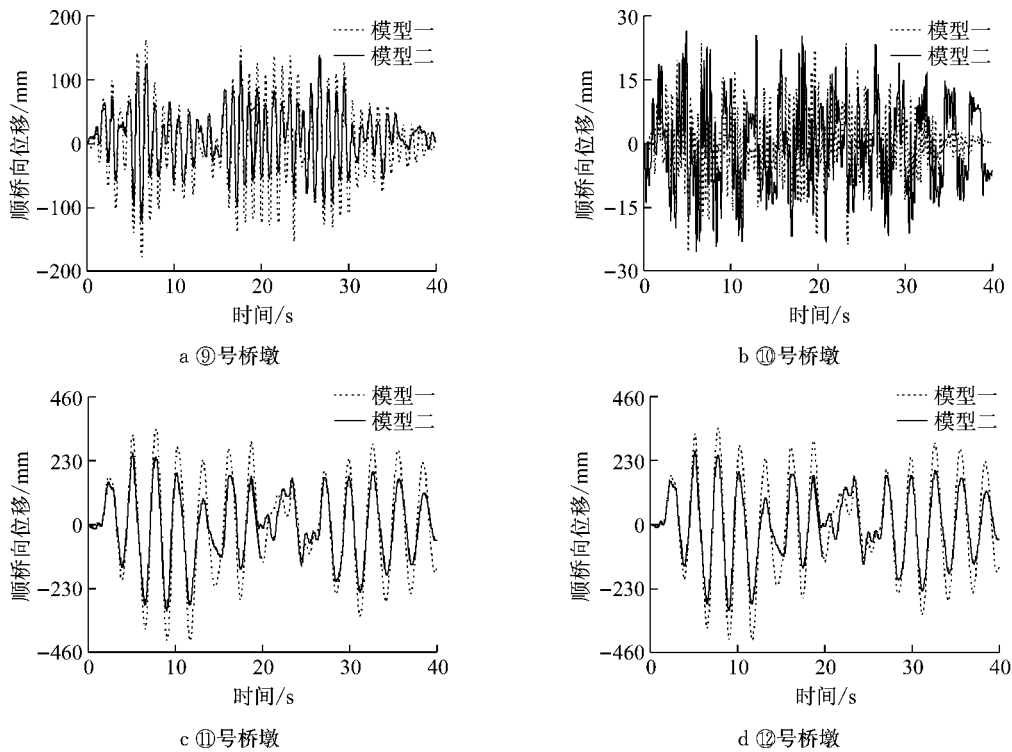


图 11 桥墩墩顶顺桥向位移时程曲线

Fig. 11 Longitudinal displacement's time history curves at the top of pier

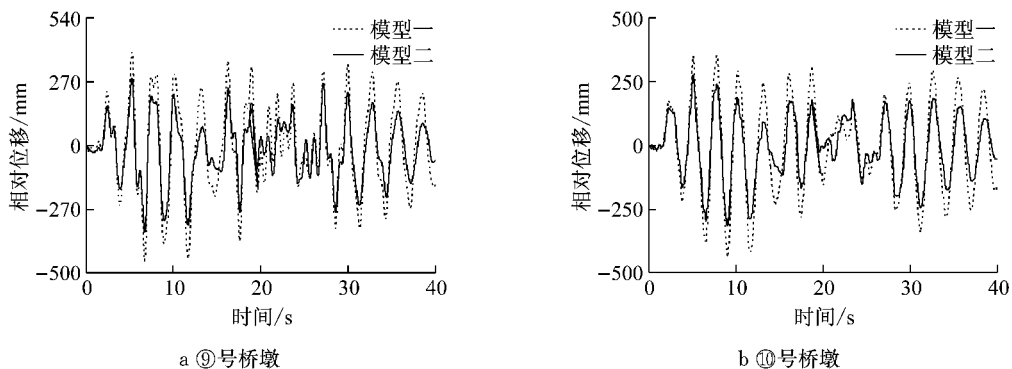


图 12 桥墩墩梁相对位移时程曲线

Fig. 12 Time history curves of pier-beam's relative displacement

由图 11 和图 12 分析可知,当考虑或不考虑多跨长联连续梁桥活动墩的摩擦效应时,各墩墩顶顺桥向位移和墩梁相对位移时程曲线变化规律是一致的,但位移响应的峰值有一定差别.对比模型一和模型二的位移时程曲线发现,模型二的位移时程曲线峰值均小于模型一的位移时程曲线峰值,说明考虑

滑动支座的滑动摩擦作用,可以有效降低结构的地震响应,具有一定的减震效果.

表 4 给出了多跨长联连续梁桥在罕遇地震作用下,模型一和模型二各桥墩墩顶位移和墩梁相对位移最大值以及相对减震率.

表 4 位移响应最大值及相对减震率

Tab.4 Maximum displacement response and its relative seismic isolation rate

桥墩号	墩顶顺桥向位移/mm		相对减震率/%	墩梁相对位移/mm		相对减震率/%
	模型一	模型二		模型一	模型二	
⑨	178	139	21.91	488	368	24.59
⑩	25	27	-8.00	438	317	27.63
⑪	419	310	26.01	0	0	
⑫	414	306	26.09	0	0	
⑬	410	302	26.34	0	0	
⑭	65	59	9.23	442	287	35.07
⑮	254	218	14.17	462	374	19.05

由表 4 可知,当不考虑滑动支座的摩擦效应时,模型一中⑪~⑬号固定墩墩顶顺桥向位移分别为 419、414、410 mm;当考虑滑动支座的摩擦效应时,模型二中⑪~⑬号固定墩墩顶顺桥向位移分别为 310、306、302 mm;模型二相对模型一的墩顶顺桥向位移减震率分别为 26.01%、26.09%、26.34%;非固定墩中除⑩号桥墩外其他桥墩墩顶位移也有一定降低.当不考虑滑动支座的摩擦效应时,模型一中⑨号、⑩号、⑭号、⑮号活动墩墩梁相对位移分别为 488、438、442、462 mm;当考虑滑动支座的摩擦效应时,模型二中⑨号、⑩号、⑭号、⑮号活动墩墩梁相对位移分别为 368、317、287、374 mm;模型二相对模型一的墩梁相对位移减震率分别为 24.59%、27.63%、35.07%、19.05%.通过上述数据分析可知,对于多跨长联连续梁桥,在地震作用下滑动支座的摩擦耗能可以降低结构的位移响应,具有一定的减震效果.

## 4 结论

(1) 在地震作用下,活动墩处盆式橡胶支座形成了规则、饱满的矩形滞回曲线,说明盆式橡胶支座具有较高的耗能能力.

(2) 与未考虑摩擦效应相比,考虑摩擦效应时,固定墩墩底顺桥向弯矩、剪力平均减震率为 25.91%、27.41%.对于支反力和滑动支座数量较多的多跨长联连续梁桥而言,若忽略滑动支座的摩擦耗能,计算分析结果偏大,下部结构设计过于保守.

(3) 相对未考虑摩擦效应情况,地震作用下固定墩墩顶顺桥向位移和活动墩墩梁相对位移分别降

低了 26.15%、26.59%.盆式橡胶支座的摩擦耗能可有效降低结构位移,减震效果明显.因此,在多跨长联连续梁桥抗震设计时建议考虑滑动支座的摩擦效应.

## 参考文献:

- [1] 王克海. 桥梁抗震研究[M]. 北京:中国铁道出版社, 2014. WANG Kehai. Seismic research of bridge[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.
- [2] PRIESTLY M J N, SEIBLE F, CALVI G M. Seismic design and retrofit of bridge [M]. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [3] TOBIAS DANIEL H, ANDERSON RALPH E, HODEL CHAD E, *et al.* Overview of earthquake resisting system design and retrofit strategy for bridges in Illinois [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2008, 13(3): 147.
- [4] AASHTO. AASHTO guide specifications for LRFD seismic bridge design [S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
- [5] 庄军生. 桥梁支座[M]. 3 版. 北京:中国铁道出版社, 2008. ZHUANG Junsheng. Bridge bearing [M]. 3rd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [6] 王克海, 李冲, 李茜, 等. 考虑支座摩擦滑移的中小跨径桥梁抗震设计方法[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 85. WANG Kehai, LI Chong, LI Qian, *et al.* Seismic design method of small and medium span bridge considering bearing friction slipping[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 85.
- [7] STEELMAN J S, FAHNESTOCK L A, FILIPOV E T, *et al.* Shear and friction response of nonseismic laminated elastomeric bridge bearings subject to seismic demands [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(7): 612.
- [8] CARR A J, COOKE N, MOSS P J. Compression behavior of bridge used for seismic isolation[J]. Engineering Structures,

- 1996, 18(5): 351.
- [9] 李冲, 王克海, 惠迎新, 等. 考虑摩擦滑移的板式橡胶支座连续梁桥地震反应分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(3): 73.  
LI Chong, WANG Kehai, HUI Yingxin, *et al.* Seismic response of continuous girder bridge with laminated rubber bearing considering friction sliding [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(3): 73.
- [10] 李冲, 惠迎新, 吴刚. 考虑摩擦滑移的板式橡胶支座桥梁位移设计方法[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增1): 148.  
LI Chong, HUI Yingxin, WU Gang. Displacement-based design method for bridges with laminated rubber bearing considering friction slipping[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S1): 148.
- [11] 杨喜文, 李建中, 雷昕弋. 多孔大跨度连续梁桥减隔震技术应用研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 58.  
YANG Xiwen, LI Jianzhong, LEI Xinyi. Research on application of seismic isolation techniques to multiple and large-span continuous girder bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 58.
- [12] 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 bridges on laminated rubber bearings under earthquake excitation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 110.
- [13] 李建中, 汤虎, 管仲国. 中小跨径板式橡胶支座梁桥新型隔震系统[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 35.  
LI Jianzhong, TANG Hu, GUAN Zhongguo. A new isolation system for small and medium span bridges on laminated rubber bearings[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 35.
- [14] 许莉, 祁皓. 多跨混凝土连续梁桥隔震措施研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(2): 32.  
XU Li, QI Ai. Study of seismic isolation measures for multi-span concrete continuous girder bridge [J]. Bridge Construction, 2014, 44(2): 32.
- [15] 贾毅, 赵人达, 廖平, 等. 高烈度地区多跨长联连续梁桥抗震体系研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(5): 41.  
JIA Yi, ZHAO Renda, LIAO Ping, *et al.* Research on seismic system for multi-span and long-unit continuous girder bridge in high intensity region [J]. Bridge Construction, 2017, 47(5): 41.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG/T B02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [17] 王浩, 王春锋, 李爱群, 等. 高烈度区新型减隔震连续梁桥的抗震性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(4): 793.  
WANG Hao, WANG Chunfeng, LI Aiqun, *et al.* Seismic performance of new isolated continuous bridge in high intensity region[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(4): 793.
- [18] 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.  
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.
- [19] 毛玉东, 李建中. 大跨度连续梁桥延性和减隔震设计 [J]. 桥梁建设, 2016, 46(3): 92.  
MAO Yudong, LI Jianzhong. Ductility and seismic mitigation and isolation design of long span continuous girder bridges[J]. Bridge Construction, 2016, 46(3): 92.
- [20] 屈文俊, 陆霆寰, 刘扬明. 通信机房走线架结构隔震方法的可行性分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(1): 36.  
QU Wenjun, LU Tinghuan, LIU Yangming. Feasibility analysis of seismic isolation method on cable tray structure in communication room [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(1): 36.
- [21] 张常勇, 王志英, 王宏博. 长联大跨连续钢桁梁桥减隔震设计研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32(8): 80.  
ZHANG Changyong, WANG Zhiying, WANG Hongbo. Study on seismic mitigation and isolation design for a long-span continuous steel truss beam bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(8): 80.