

文章编号:1673-2049(2014)03-0124-08

## 简支梁桥铅芯橡胶支座减震特性研究

刘新华<sup>1</sup>, 李加武<sup>2</sup>, 周 琴<sup>2</sup>, 黄森华<sup>2</sup>

(1. 中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430056;

2. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:**以一座 $4\times 40$  m简支T形梁桥为例,对常规非隔震设计的板式橡胶支座和减隔震设计的铅芯橡胶支座(LRB)进行对比分析,比较了2种支座设计下桥梁结构的动力特性以及采用隔震设计后桥梁结构内力、位移响应与非隔震设计的差别。在其他条件一致前提下,研究了铅芯橡胶支座的力学参数对减隔震效果的影响。研究表明:铅芯橡胶支座较板式橡胶支座设计的桥梁可以延长结构的周期;设计的铅芯橡胶支座具有明显的减震效果,铅芯橡胶支座可以大幅度减小各墩墩底剪力及墩底弯矩,各墩所受地震力重新合理分配且受力趋于平衡;同时在减隔震设计中,只考虑增大铅芯橡胶支座的型号反而会给桥梁下部结构带来不利的影响。

**关键词:**桥梁工程;简支梁桥;铅芯橡胶支座;减隔震设计;减震率;动力特性

中图分类号:U442.55

文献标志码:A

## Research on Seismic Isolation Characteristics of LRB for Simply Supported Beam Bridge

LIU Xin-hua<sup>1</sup>, LI Jia-wu<sup>2</sup>, ZHOU Qin<sup>2</sup>, HUANG Sen-hua<sup>2</sup>

(1. CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd, Wuhan 430056, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Bridge Detection Reinforcement Technology, Ministry of Communications, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Taking a  $4\times 40$  m simply supported T-girder bridge as example, comparative analysis of non-isolated design by conventional plate type elastomeric pad bearings and seismic isolation design by lead rubber bearing (LRB) was done, and the bridge structure dynamic characteristics of the two bearing design were compared. Furthermore, the structural internal force and displacement response differences between isolation design bridge and non-isolation design were also compared. In other conditions consistent with the premise, the influence of mechanical parameters of LRB on seismic isolation was studied. Study results show that plate type elastomeric pad bearings design of LRB can extend the period of bridge structure; the designed LRB has obvious damping effect, and LRB can greatly reduce shear and moment at the pier bottom, and each pier again tends to balance and reasonably distributes the seismic forces. In seismic isolation design, the blind pursuit of increasing LRB models will give the bridge substructure adversely affected.

**Key words:** bridge engineering; simply supported bridge; LRB; seismic isolation design; damping rate; dynamic characteristics

收稿日期:2014-03-09

作者简介:刘新华(1981-),男,山东潍坊人,工程师,工学硕士,E-mail:601446430@qq.com。

# 0 引 言

近年来,铅芯橡胶支座(LRB)作为一种减隔震支座得到了广泛的研究<sup>[1-4]</sup>。刘健新等<sup>[5]</sup>通过计算统计分析,确定了在Ⅰ,Ⅱ类场地土地基条件下可供新建或旧桥改造采用减震设计时选择铅芯橡胶支座使用的标准规格。魏红一等<sup>[6]</sup>研究表明,采用铅芯橡胶隔震技术后,在近场地震作用下,减震效果仍有效。郭磊等<sup>[7]</sup>研究表明,在固定墩上采用活动盆式支座与弹塑性减震耗能装置并联,能够有效地减小固定墩所受的地震力,改善结构的抗震性能。张骏等<sup>[8]</sup>分析表明,铅芯橡胶支座可以有效地降低结构的位移和内力响应,改善结构的抗震性能。钟铁毅等<sup>[9]</sup>研究表明,是否考虑双向恢复力的耦合作用对铅芯橡胶支座的位移-恢复力曲线存在较大差别。

为了研究板式橡胶支座和铅芯橡胶支座这 2 种支座设计对简支梁桥抗震性能的影响,本文中笔者以一座 4×40 m 简支 T 形梁桥为例,对常规非隔震设计的板式橡胶支座和减隔震设计的铅芯橡胶支座进行对比分析,比较了 2 种支座设计下桥梁结构的动力特性以及采用隔震设计后桥梁结构内力、位移响应与非隔震设计的差别;同时在其他条件一致前提下,研究了铅芯橡胶支座的力学参数对减隔震效果的影响。

## 1 基本计算理论

### 1.1 减隔震原理

减隔震的基本原理为<sup>[10]</sup>:①利用减隔震装置的柔性来延长周期,减小结构地震反应;②利用阻尼器或耗能装置,来控制由于周期延长而导致的过大的墩、梁相对位移;③必须能够支撑整个结构,保证结构在正常使用荷载作用下具有足够的刚度。图 1 为加速度反应谱,图 2 为位移反应谱。

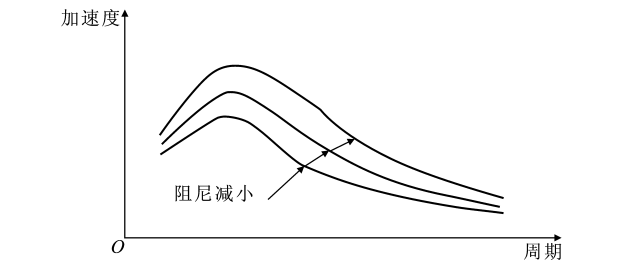


图 1 加速度反应谱  
Fig. 1 Acceleration Response Spectrum

### 1.2 地震时程分析

一致地震输入下,多质点体系的地震振动方程

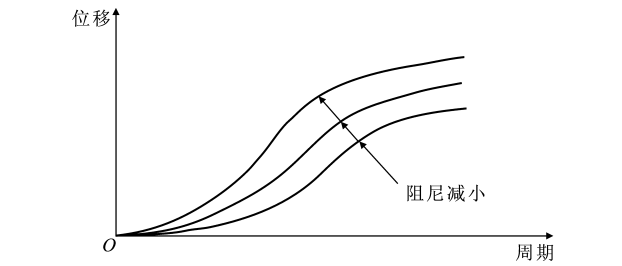


图 2 位移反应谱  
Fig. 2 Displacement Response Spectrum

式为

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = -MI\ddot{\delta}_g(t) \tag{1}$$

式中: $M, C, K$  分别为结构的质点体系的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\ddot{\delta}, \dot{\delta}, \delta$  分别为质点对地面的加速度矢量、速度矢量和位移矢量,均为时间  $t$  的函数; $I$  为惯性力影响矩阵; $\ddot{\delta}_g(t)$  为地震动加速度时程列向量<sup>[11]</sup>。

可见,桥梁结构的地震反应与地面运动的加速度、结构的质量及其分布、阻尼和刚度有关。一般情况下不易改变桥梁结构的质量及分布,但是利用结构自身的延性或在桥梁中设置减震装置改变桥梁结构的阻尼、刚度,则会改变桥梁结构自身的动力特性、振动形态或使桥梁上下部结构之间、桥梁与地基之间产生动力互相干涉,减小地震作用,从而达到桥梁结构减震的目的<sup>[12-13]</sup>。

## 2 工程算例分析

### 2.1 工程概况

本文中以一座一联 4×40 m 简支转连续 T 形梁桥为例,高速公路引桥设计中较多采用这一类型桥梁。该桥上部为每幅 6 片 T 形梁,下部结构为框架墩、群桩基础,墩高为 6.9~10.3 m,桥型布置如图 3 所示,其中,P 表示支座墩,数字代表墩号。

### 2.2 有限元分析模型

采用有限元分析软件 MIADS/Civil 建立全桥空间有限元模型,主梁、桥墩和桩基础均采用三维梁单元,横隔板荷载和二期恒载作为梁单元附加质量;主梁与桥墩分别采用板式橡胶支座(常规设计方案)和铅芯橡胶支座(隔震设计方案)建立连接;采用表征土介质弹性值的  $m$  参数计算的等代土弹簧刚度模拟桩-土作用,桩底固接;以非线性弹簧单元模拟铅芯橡胶支座的非线性力学行为。有限元计算简化模型如图 4 所示,桥梁地震动力分析有限元模型如图 5 所示。

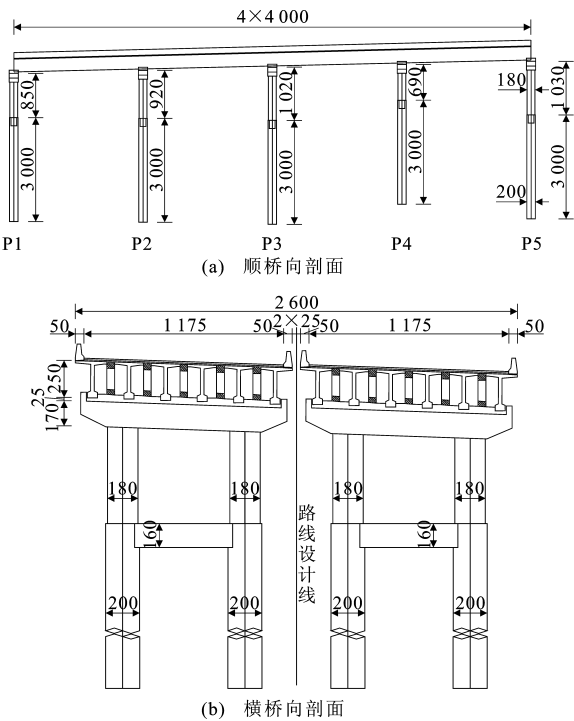


图3 桥型布置(单位:cm)  
Fig.3 Bridge Layout (Unit:cm)

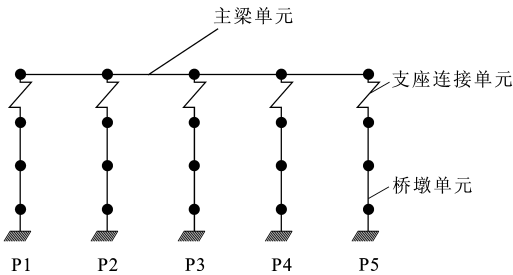


图4 有限元计算简化模型  
Fig.4 Finite Element Calculation Simplified Model

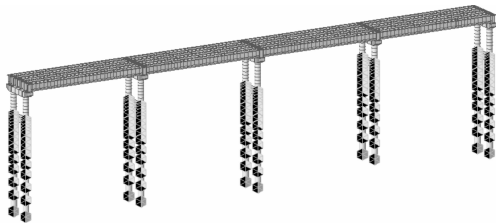


图5 桥梁地震动力分析有限元模型  
Fig.5 Finite Element Model of Seismic  
Dynamic Analysis of Bridge

2.3 2种支座模型设计

为进行对比研究,分析计算工况包括板式橡胶支座非隔震桥梁地震动力时程分析和铅芯橡胶减隔震桥梁地震动力时程分析。2种模型支座设计采用如下形式。

2.3.1 模型1:板式橡胶支座

对于板式橡胶支座,大量试验结果表明,其滞回

曲线呈狭长形,可以近似做线性处理<sup>[14]</sup>。板式橡胶支座主要是靠增加结构柔性、延长结构周期来达到减震的效果,但是其减小桥墩地震荷载的同时,也增加了梁体与墩台之间的相对位移。因此,地震反应中,恢复力模型可化为线性方程,即

$$F=Kx$$
 (2)

式中: $F$ 为恢复力; $x$ 为上部结构与墩顶的相对位移; $K$ 为支座的等效剪切刚度, $K=\frac{GA}{\sum t_0}$ , $G$ 为支座的动剪切模量,按现行《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)中的建议取1.2 MPa, $A$ 为支座的剪切面积, $\sum t_0$ 为橡胶片的总厚度。

该桥 P1~P5 墩板式橡胶支座选取 GJZ 650×550×150,支座 2 个平动方向上的等效剪切刚度为

$$K=\frac{GA}{\sum t_0}=4\,085.7\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$
 (3)

选取  $u_1=1\times10^8\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,  $u_2=u_3=4\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,  $u_1, u_2, u_3$  分别为竖向平动自由度、顺桥向平动自由度和横桥向平动自由度。

2.3.2 模型2:铅芯橡胶减隔震支座

铅芯橡胶支座采用 Park 等在 1986 年提出的双向恢复力-位移滞回理论模型(图 6)。图 6 中,  $K_b$  为铅芯橡胶支座的水平刚度。利用 2 个正交的水平非线性弹簧来模拟铅芯橡胶支座的双向工作性状,并采用屈服前刚度  $K_1$ 、屈服后刚度  $K_2$  和屈服强度  $Q$  作为铅芯橡胶支座的力学控制参数,将非线性模型简化为双线性模型(图 7)进行分析计算。实际计算时,假定铅芯橡胶支座的滞回性能符合双线性模型,且支座在 2 个正交方向的恢复力模型相同。图 7 中,  $K_B$  为铅芯橡胶支座的水平等效刚度,  $u_y, Q_y$  均为铅芯橡胶支座的屈服点,  $u_B$  为铅芯橡胶支座的极限点,  $u$  为铅芯橡胶支座的有效设计变位。

铅芯有良好的力学特性、较小的屈服剪力(约为 10 MPa)、足够大的初始剪切刚度(约为 130 MPa)

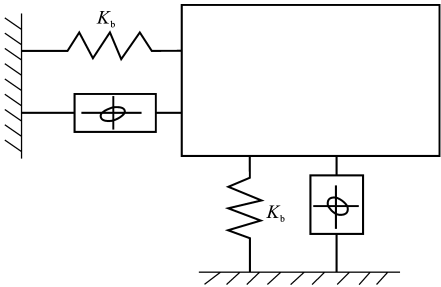


图6 双向隔震支座模型  
Fig.6 Two-way Isolation Bearing Model

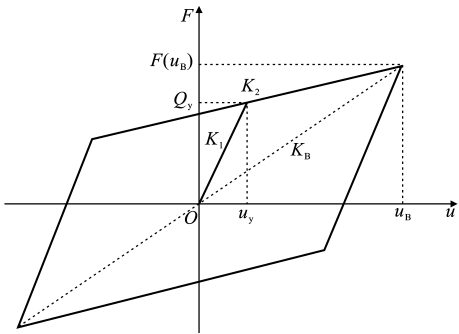


图 7 LRB 双线性滞回模型

Fig. 7 Bilinear Hysteretic Model of LRB

及理想的弹塑性性能,且对于塑性循环具有很好的耐疲劳性能。铅芯能够提供地震作用下的耗能能力和静力荷载下所必需的刚度,因此由铅芯和分层橡胶支座结合的铅芯橡胶支座能够满足一个良好减隔震装置所应具备的要求:在较小的水平力作用下,具有较大的初始刚度,变形较小;在地震作用下,铅芯屈服刚度降低,延长了结构周期,并且消耗了地震能量。

铅芯橡胶支座的初始剪切刚度可以超过普通板式橡胶支座的 10 倍,其屈服后的刚度接近于普通板式橡胶支座的刚度。该桥 P1~P5 墩设置的铅芯橡胶支座型号为 J4Q-570×570×172-G1.0。铅芯橡胶支座的相关参数见表 1。

表 1 铅芯橡胶支座相关参数

Tab. 1 Related Parameters of LRB

屈服力/ kN	屈服前刚度 $K_1/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	屈服后刚度 $K_2/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	水平等效刚 度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	阻尼比 $\xi/\%$
171	13 000	2 000	2 900	18.20

2.4 地震动加速度时程

在结构地震反应时程分析中,如何选择输入的地震波,是一个很重要的问题。当选择地震波时,应该考虑地震动三要素,即地震动强度、地震动谱特性、地震动持续时间<sup>[15]</sup>。

根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)和《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2001),该桥梁属于 B 类桥梁,基本地震动峰值加速度为 0.20g,g 为重力加速度,特征周期为 0.40 s,Ⅱ类场地,场地系数为 1.0,E1 地震波抗震重要性系数为 0.5,E2 地震波抗震重要性系数为 1.7。根据该桥梁地震烈度和场地土类别,采用和场址、场地土条件相近的天然地震波,经调整得到和设计加速度反应谱兼容的一组地震波,计算采用的地震波时程曲线如图 8 所示。表 2 中给出了地震波分析工况。

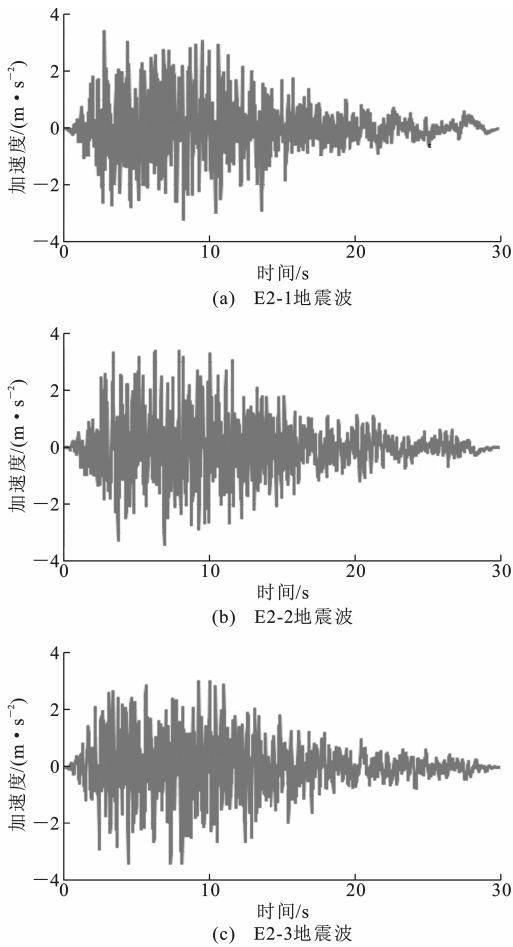


图 8 地震波时程曲线

Fig. 8 Time History Curves of Seismic Waves

表 2 地震波分析工况

Tab. 2 Analysis Cases of Seismic Waves

工况编号	地震波编号	加载方向
1	E2-1	顺桥向+横桥向
2	E2-2	顺桥向+横桥向
3	E2-3	顺桥向+横桥向

2.5 非隔震桥梁与隔震桥梁动力特性比较

分别计算板式橡胶支座和铅芯橡胶支座对应模型的动力特性,2 种模型前 10 阶的计算结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出:模型 2 较模型 1 延长了结构的周期。模型 1 和模型 2 在切向和径向 2 个平动方向上支座的刚度较小,结构动力特性以侧弯的振型为主,第 8 阶才表现为竖弯振型。2 种模型振型出现的先后顺序是一致的,第 7 阶以后 2 种模型的周期相等。

2.6 2 种模型的内力响应、位移响应比较

为评价隔震桥梁的性能,对采用铅芯橡胶支座的隔震桥梁与采用板式橡胶支座的非隔震桥梁进行

表 3 2 种模型动力特性对比

Tab. 3 Comparison of Dynamic Characteristics of Two Models

阶次	周期/s		振型描述
	模型 1	模型 2	
1	1.76	1.92	纵飘
2	1.51	1.72	一阶正对称侧弯
3	1.35	1.45	一阶反对称侧弯
4	1.05	1.08	二阶正对称侧弯
5	0.80	0.82	二阶反对称侧弯
6	0.62	0.63	三阶正对称侧弯
7	0.47	0.47	三阶反对称侧弯
8	0.38	0.38	一阶反对称竖弯
9	0.37	0.37	一阶正对称扭转
10	0.34	0.34	一阶正对称竖弯

了比较。

减震率  $\eta$  定义为采用铅芯橡胶支座时的地震反应与采用板式橡胶支座时的地震反应相比降低的百分比,地震反应参数包括墩顶位移、墩底剪力和墩底弯矩。 $\eta$  可表示为<sup>[16]</sup>

$$\eta=\frac{S_{\text{LRB}}-S}{S}$$

式中: $S_{\text{LRB}}$  为铅芯橡胶支座地震时的地震反应; $S$  为板式橡胶支座地震时的地震反应。

分析计算结果取 3 个工况作用下结构最大响应,分别比较 2 种模型的内力响应、位移响应。

2.6.1 内力响应最大值比较

分别计算 3 个工况作用下 2 种模型对应的桥墩内力响应和减震率,墩底剪力和墩底弯矩的计算结果分别如表 4,5 所示。

表 4 2 种模型墩底剪力对比

Tab. 4 Comparison of Shears at Pier Bottom of Two Models

墩号	顺桥向剪力/kN		顺桥向减震率/%	横桥向剪力/kN		横桥向减震率/%
	模型 1	模型 2		模型 1	模型 2	
P1	727	586	−19	723	519	−28
P2	1 216	939	−23	1 167	911	−22
P3	1 137	886	−22	1 396	872	−38
P4	1 444	1 051	−27	1 192	882	−26
P5	720	579	−20	671	540	−20

由表 4,5 可以看出:模型 2 的桥墩内力响应均较模型 1 小,铅芯橡胶支座的减震效果优于板式橡胶支座,设计的铅芯橡胶支座具有明显的减震效果;顺桥向剪力最大减震率达到 −27%,横桥向剪力最大减震率达到 −38%,顺桥向弯矩最大减震率达到 −28%,横桥向弯矩最大减震率达到 −41%;设计中

表 5 2 种模型墩底弯矩对比

Tab. 5 Comparison of Moments at Pier Bottom of Two Models

墩号	顺桥向弯矩/(kN·m)		顺桥向减震率/%	横桥向弯矩/(kN·m)		横桥向减震率/%
	模型 1	模型 2		模型 1	模型 2	
P1	5 811	4 587	−21	2 320	1 677	−28
P2	10 999	8 399	−24	4 506	3 398	−25
P3	11 341	8 770	−23	6 064	3 608	−41
P4	9 777	7 023	−28	3 213	2 247	−30
P5	6 611	5 469	−17	2 696	2 193	−19

采用铅芯橡胶支座可以大幅度减小各墩墩底剪力及墩底弯矩,各墩所受地震力重新合理分配且受力趋于平衡。

2.6.2 位移响应最大值比较

分别计算 3 个工况作用下 2 种模型对应的位移响应,主梁位移、墩顶位移和支座位移的计算结果分别如表 6,7 所示。

表 6 2 种模型纵向位移对比

Tab. 6 Comparison of Longitudinal Displacements of Two Models

墩号	主梁纵向位移		墩顶纵向位移		支座纵向位移	
	模型 1	模型 2	模型 1	模型 2	模型 1	模型 2
P1	0.145	0.123	0.022	0.017	0.133	0.116
P2	0.145	0.123	0.044	0.034	0.094	0.087
P3	0.145	0.123	0.052	0.040	0.088	0.083
P4	0.145	0.123	0.029	0.021	0.106	0.098
P5	0.145	0.123	0.031	0.025	0.130	0.112

表 7 2 种模型横向位移对比

Tab. 7 Comparison of Transverse Displacements of Two Models

墩号	主梁横向位移		墩顶横向位移		支座横向位移	
	模型 1	模型 2	模型 1	模型 2	模型 1	模型 2
P1	0.103	0.093	0.005	0.004	0.096	0.091
P2	0.118	0.092	0.011	0.009	0.106	0.085
P3	0.139	0.083	0.016	0.010	0.122	0.075
P4	0.117	0.091	0.007	0.005	0.109	0.086
P5	0.103	0.089	0.007	0.006	0.100	0.085

由表 6,7 可以看出:模型 2 主梁、墩顶和支座的纵向位移及横向位移均较模型 1 小;相对于常规板式橡胶支座设计,采用铅芯橡胶支座可以减小主梁、墩顶和支座的位移;墩顶的位移小于主梁和支座的位移,桥墩的位移均较小,在 E2 地震波作用下,桥墩结构能够处于弹性受力阶段,保证了桥墩的安全;采用铅芯橡胶支座,减小了墩顶的位移,但是主梁和

支座的位移均较大,因此桥梁上部结构设计时应该设置防落梁装置和防撞挡块,以确保结构的安全。

## 2.7 铅芯橡胶支座力学参数对减震效果的影响

在其他条件一致前提下,通过改变铅芯橡胶支座的力学参数(屈服强度、初始刚度)来研究铅芯橡胶支座的减震效果。

### 2.7.1 屈服强度对减震效果的影响

在其他条件一致前提下,通过改变铅芯橡胶支座的屈服强度进行研究。下面分别计算铅芯橡胶支座初始刚度为  $13\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$  时,屈服强度分别为 67,96,171,267,363 kN 这 5 种情况下桥墩弯矩、位移以及主梁位移,计算结果见图 9~11。

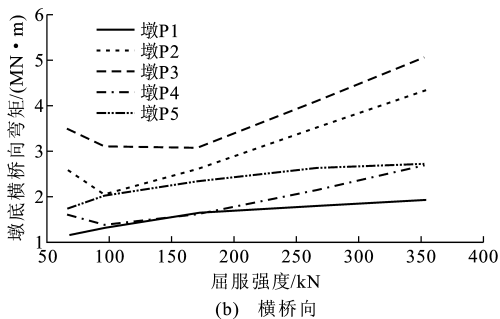
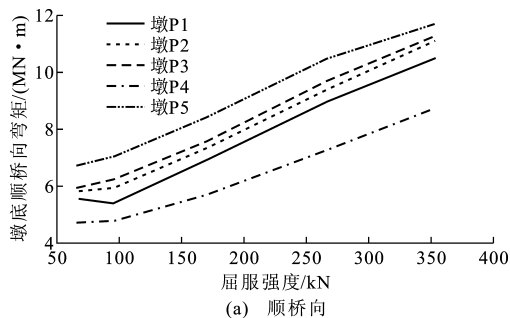


图 9 工况 1 墩底顺桥向和横桥向弯矩随屈服强度的变化

Fig. 9 Longitudinal Moments and Transverse Moments at Pier Bottom Varying with Yield Strength in Case 1

由图 9~11 可以看出:在其他条件一致前提下,墩底顺桥向弯矩、墩顶顺桥向位移随着铅芯橡胶支座的屈服强度的增大而增大;墩 P1, P2, P4 墩底横桥向弯矩、墩顶横桥向位移随着铅芯橡胶支座的屈服强度的增大先减小后增大,墩 P3, P5 墩底横桥向弯矩、墩顶横桥向位移随着铅芯橡胶支座的屈服强度的增大而增大;主梁顺桥向位移和横桥向位移随着铅芯橡胶支座的屈服强度的增大而减小。

### 2.7.2 初始刚度对减震效果的影响

在其他条件一致前提下,通过改变铅芯橡胶支座的初始刚度进行研究。下面分别计算铅芯橡胶支座屈服强度为 171 kN 时,初始刚度分别为 9.6,13,19.6,24.7,28.4  $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$  这 5 种情况下的桥墩弯

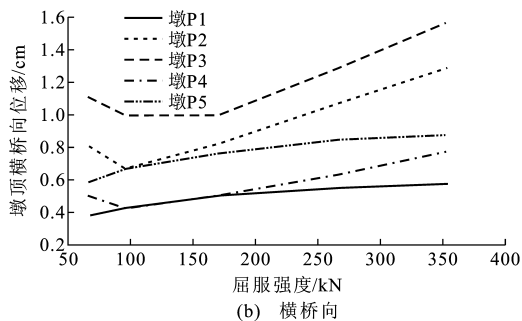
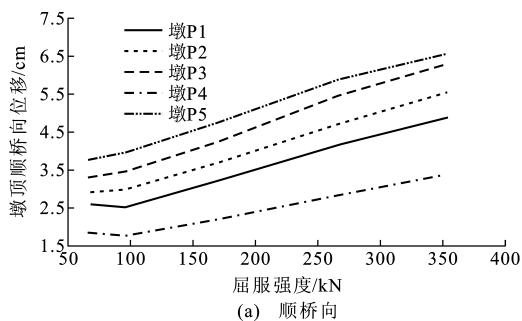


图 10 工况 1 墩顶顺桥向和横桥向位移随屈服强度的变化

Fig. 10 Longitudinal Displacements and Transverse Displacements at Pier Top Varying with Yield Strength in Case 1

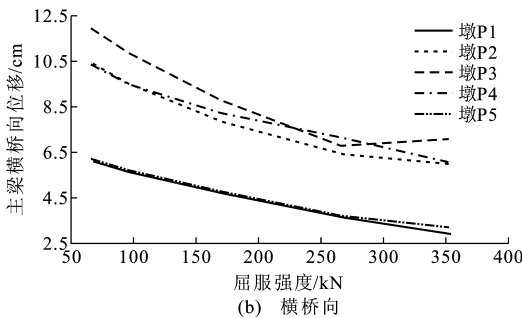
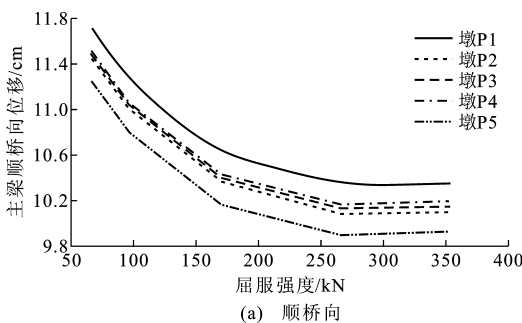


图 11 工况 1 主梁顺桥向和横桥向位移随屈服强度的变化

Fig. 11 Longitudinal Displacements and Transverse Displacements at Main Beam Varying with Yield Strength in Case 1

矩、位移以及主梁位移,计算结果如图 12~14 所示。

由图 12~14 可以看出:在其他条件一致前提下,墩底弯矩、墩顶位移响应随着铅芯橡胶支座初始刚度的增大而增大;主梁顺桥向位移和横桥向位移

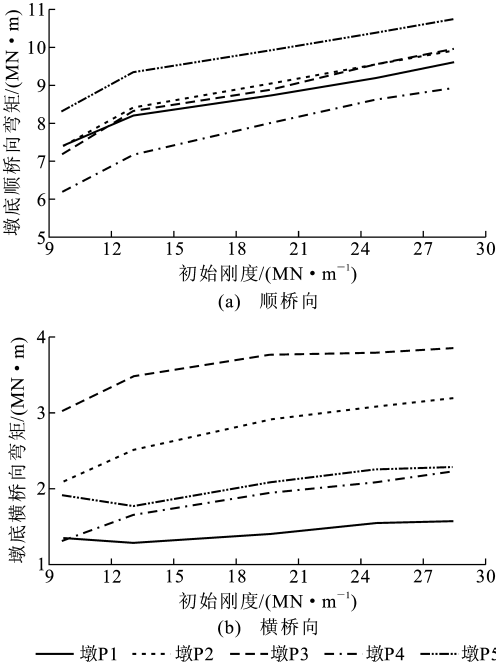


图 12 工况 2 墩底顺桥向和横桥向弯矩随初始刚度的变化  
Fig. 12 Longitudinal Moments and Transverse Moments at Pier Bottom Varying with Initial Stiffness in Case 2

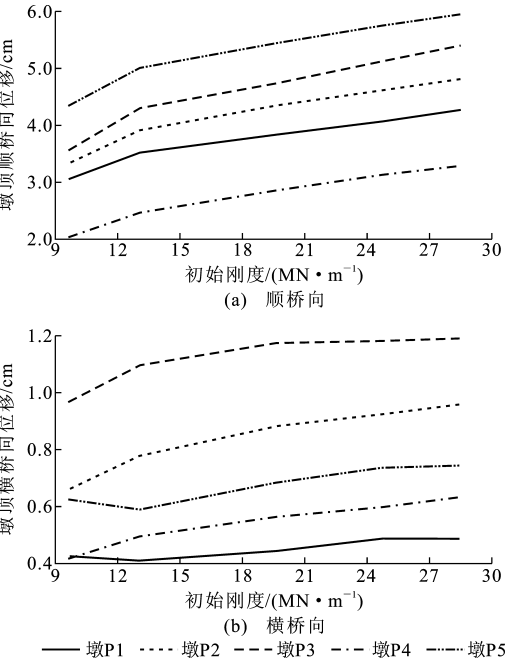


图 13 工况 2 墩顶顺桥向和横桥向位移随初始刚度的变化  
Fig. 13 Longitudinal Displacements and Transverse Displacements at Pier Top Varying with Initial Stiffness in Case 2

随着铅芯橡胶支座初始刚度的增大先增大后减小。

3 结 语

(1)铅芯橡胶支座较板式橡胶支座设计的桥梁可以延长结构的周期。板式橡胶支座和铅芯橡胶支

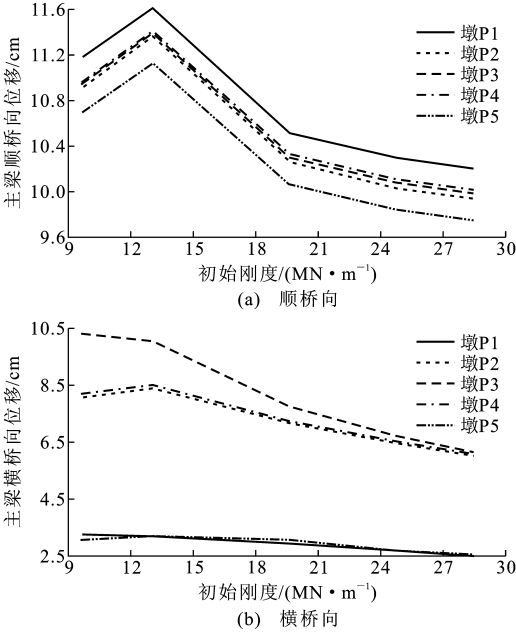


图 14 工况 2 主梁顺桥向和横桥向位移随初始刚度的变化  
Fig. 14 Longitudinal Displacements and Transverse Displacements at Main Beam Varying with Initial Stiffness in Case 2

座设计的桥梁结构动力特性均以侧弯的振型为主,而竖向振型出现较晚,2 种模型振型出现的先后顺序是一致的。

(2)铅芯橡胶支座的减震效果优于板式橡胶支座,设计的铅芯橡胶支座具有明显的减震效果;设计中采用铅芯橡胶支座可以大幅度减小各墩墩底剪力及墩底弯矩,各墩所受地震力重新合理分配且受力趋于平衡。

(3)较常规板式橡胶支座设计,采用铅芯橡胶支座,可以减小主梁、墩顶和支座的位移;墩顶的位移小于主梁和支座的位移,桥墩的位移均较小,在 E2 地震作用下,桥墩结构能够处于弹性受力阶段,保证了桥墩的安全;采用铅芯橡胶支座,减小了墩顶的位移,但是主梁和支座的位移较大,因此上部结构设计时应该设置防落梁装置和防撞挡块,以确保结构的安全。

(4)在其他条件一致前提下,增大铅芯橡胶的某个力学参数(屈服强度或初始刚度)虽然可以减小主梁的位移,但是增大了墩顶的位移和墩底的内力。因此在减隔震设计中,只考虑增大铅芯橡胶支座的型号反而会给桥梁下部结构带来不利的影响。

参考文献:

References:

[1] 范立础,袁万城. 桥梁橡胶支座减、隔震性能研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,1989,17(4):447-455.

- FAN Li-chu, YUAN Wan-cheng. Seismic Isolation and Energy Absorption Properties of Elastomeric Pad Bearing for Bridges[J]. Journal of Tongji University; Natural Science, 1989, 17(4): 447-455.
- [2] SAHDI M, MARAGAKIS E, GRIFFIN G. Effect of Base Isolation on the Seismic Response of Multi-column Bridges[J]. Structural Engineering and Mechanics, 1999, 8(4): 411-419.
- [3] HWANG J S, SHENG L H. Equivalent Elastic Seismic Analysis of Base-isolated Bridges with Lead-rubber Bearing[J]. Engineering Structures, 1994, 16(3): 201-209.
- [4] 胡兆同, 刘健新. 桥梁铅销橡胶支座性能的试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(2): 1-4.  
HU Zhao-tong, LIU Jian-xin. Test and Study on Behaviors of the Lead Rubber Bearing for Bridges[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, 18(2): 1-4.
- [5] 刘健新, 胡兆同. 公路桥梁铅销橡胶支座的标准化[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(3): 56-59.  
LIU Jian-xin, HU Zhao-tong. Standardization of Lead Rubber Bearing (LRB) for Highway Bridge[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2003, 23(3): 56-59.
- [6] 魏红一, 逯宗典, 王志强. 近场简支梁铅芯橡胶支座隔震特性分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(1): 39-44.  
WEI Hong-yi, LU Zong-dian, WANG Zhi-qiang. Isolation Characteristic Analysis of Simple Supported Bridge to Near Fault Ground Motions[J]. Journal of Tongji University; Natural Science, 2010, 38(1): 39-44.
- [7] 郭磊, 李建中, 范立础. 大跨度连续梁桥减隔震设计研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 81-85.  
GUO Lei, LI Jian-zhong, FAN Li-chu. Research on Seismic Isolation Design for Long-span Continuous Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 81-85.
- [8] 张骏, 阎贵平. 减隔震支座对梁式桥抗震性能的影响[J]. 中国公路学报, 2002, 15(1): 38-43.  
ZHANG Jun, YAN Gui-ping. Effects of Isolation Bearing on Anti-seismic Performance of RC Beam Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(1): 38-43.
- [9] 钟铁毅, 杨风利, 吴彬. 铅芯橡胶支座隔震铁路简支梁桥双向地震响应分析[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 38-43.  
ZHONG Tie-yi, YANG Feng-li, WU Bin. Analysis of the Bidirectional Seismic Responses for Seismically Isolated Railway Simple Supported Beam Bridge by Lead Rubber Bearing [J]. China Railway Science, 2007, 28(3): 38-43.
- [10] 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 Li-chu, WANG Zhi-qiang. Bridge Seismic Isolation Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [11] 范立础, 胡世德, 叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
FAN Li-chu, HU Shi-de, YE Ai-jun. Seismic Design of Long-span Bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [12] 刘健新, 胡兆同, 李子青. 桥梁结构减震设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2000, 13(2): 73-75, 79.  
LIU Jian-xin, HU Zhao-tong, LI Zi-qing. Design Method for Seismic Absorption of Bridge Structures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(2): 73-75, 79.
- [13] 朱文正, 刘健新. 铅销橡胶支座对桥梁抗震性能的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(1): 48-51.  
ZHU Wen-zheng, LIU Jian-xin. Influence of Lead Rubber Bearing on Earthquake Resisting Behavior of Bridges[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2004, 24(1): 48-51.
- [14] 黄艳, 阎贵平, 鞠彦忠. 采用减隔震支座提高桥梁结构的安全性[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(5): 71-75.  
HUANG Yan, YAN Gui-ping, JU Yan-zhong. Effects of Isolation Bearings on the Seismic Response of Bridges[J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(5): 71-75.
- [15] 王丽, 阎贵平, 孙立. LRB隔震桥梁减震效果分析[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 124-129.  
WANG Li, YAN Gui-ping, SUN Li. Analysis of Seismic Response of Isolated Bridges with LRB[J]. Engineer Mechanics, 2003, 20(5): 124-129.
- [16] 周亚栋, 朱文正, 胡兆同, 等. 连续梁桥铅销橡胶支座减震效果的评定方法[J]. 铁道学报, 2008, 30(4): 59-64.  
ZHOU Ya-dong, ZHU Wen-zheng, HU Zhao-tong, et al. Evaluation Method of Aseismic Effect of Lead Rubber Bearing Used in Continuous Beam Bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(4): 59-64.