

吴国斌, 谭平, 王冰, 等. 高速铁路桥梁的隔震研究[J]. 华南地震, 2016, 36(2): 32–40. [WU Guobin, TAN Ping, WANG Bing, et al. Study on Isolated High-Speed Railway Girder Bridge[J]. South china journal of seismology, 2016, 36(2): 32–40.]

## 高速铁路桥梁的隔震研究

吴国斌, 谭平, 王冰, 马安财

(广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405)

**摘要:** 以某高速铁路桥梁为工程背景, 开展了高铁桥梁的隔震研究。针对该工程现已应用的摩擦摆支座的不足, 研发了适用于高铁桥梁的四铅芯橡胶隔震支座, 并与我国高速铁路常用的盆式橡胶支座进行了对比分析。采用 ABAQUS 软件对该工程中典型五跨简支高铁梁桥建立了三维精细化有限元分析模型, 分析模型中摩擦摆式支座与四铅芯橡胶隔震支座均采用双线性来模拟, 盆式橡胶支座采用水平刚度较大的线弹性模型, 桥墩中混凝土和钢筋采用纤维模型。对比分析了高铁桥梁当分别采用摩擦摆式支座、四铅芯橡胶隔震支座与盆式橡胶支座时的地震响应。研究结果表明: 采用的四铅芯橡胶隔震支座的高铁桥梁在大震下支座没有破坏且桥墩墩顶位移、墩底弯矩、墩底曲率均得到显著降低, 能确保高铁桥梁在强震下的安全性。

**关键词:** 高速铁路; 高速铁路梁桥; 隔震; 桥梁隔震; 铅芯橡胶隔震支座

**中图分类号:** U442.55      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8662 (2016) 02-0032-09

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2016.02.006

## Study on Isolated High-Speed Railway Girder Bridge

WU Guobin, TAN Ping, WANG Bing, MA Ancai

(Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510504, China)

**Abstract:** In order to improve the seismic safety of high-speed railway, the paper studies the typical practical high-speed railway girder bridge, introduces the seismic isolation technology. This paper presents a new isolation system, namely, rubber bearing with 4 lead cores, for the high-speed railway girder bridge. And different types of bearings are considered and simulated for comparison of seismic responses of high-speed railway girder bridge, including friction pendulum bearings and pot rubber bearings. The refined finite element model of a high-speed railway girder bridge with five spans is developed within the environment of ABAQUS. The bilinear model in analysis is used for friction pendulum bearings and lead rubber bearings, and the elastic model of large

**收稿日期:** 2015-08-21

**基金项目:** 国家自然科学基金高铁联合基金重点项目(U1334209); 教育部创新团队项目(IRT13057)

**通信作者:** 谭平(1973-), 男, 博士、研究员、博士生导师, 主要从事工程抗震研究。

**E-mail:** ptan@foxmail.com.

**作者简介:** 吴国斌(1988-), 男, 硕士研究生, 从事桥梁减隔震研究。

**E-mail:** 986937398@qq.com.

horizontal stiffness is used for pot rubber bearings. Fiber model is used for concrete and steels. Responses of isolated high-speed girder bridge to a set of earthquake records are compared with those of the corresponding bridge with ordinary pot rubber bearings. The shear deformations of the presented LRBs are compared with those of the friction pendulum bearings. Research results show that the peak displacement of the pier-top, shear deformation, bending moment and curvature of the bottom of the bridge piers are reduced significantly in comparison with the bridge with ordinary pot rubber bearing. The presented isolation system can ensure the safety of high-speed railway girder bridge.

**Keywords:** High-speed railway; High-speed railway girder bridge; Isolation; Bridge isolation; Lead rubber bearings

## 0 引言

高速铁路作为一种新时代的运输方式, 相比于其他运输方式具有高速行驶、高安全保障、高舒适性及高密度连续运营等特点。由于高铁对行车轨道的平顺性和稳定性要求相当严格, 因此高架桥、长大桥比例高成为高速铁路的主要特征。为满足高速铁路的高速行驶、高舒适性、高稳定性的特点, 高铁桥梁的箱梁和桥墩质量及尺寸较普通桥梁大得多, 从而也使高铁桥梁的整体刚度较普通桥梁大很多, 因此地震反应也较普通桥梁大<sup>[1]</sup>。强震作用下, 桥梁结构抗震能力有限是导致高铁桥梁出现震害的主要原因<sup>[2]</sup>。我国地处环太平洋地震带与欧亚地震带之间, 是一个地震多发的国家<sup>[3-4]</sup>。为了确保高速铁路在强震下的安全性, 将在建筑与普通桥梁中已应用得成熟的隔震技术引入到高速铁路桥梁中具有重要的现实意义。

近年来, 国内外研究者对公路隔震桥梁及普通铁路隔震桥梁等进行了深入的研究, 并取得了大量研究成果<sup>[5-8]</sup>。Anderson<sup>[9]</sup>进行了基于性能的隔震桥梁研究, Warn Whittaker<sup>[10]</sup>进行了减隔震简支梁桥原型试验和时程分析, 阎贵平<sup>[11]</sup>和张贞阁<sup>[12]</sup>进行了 LRB 支座铁路桥梁减隔震性能研究, 进行了 LRB 支座动力参数对桥梁动力响应规律的研究, 摩擦摆式支座在国外桥梁隔震设计中得到了广泛的应用<sup>[13-14]</sup>, 土耳其 Bolu Viaduct 高速公路高架桥及旧金山海湾地区的 Benicia-Martinez 桥震后采用摩擦摆支座进行加固、加州福尔松的美洲河桥以及密西西比河都采用了摩擦摆支座进行抗震加固。陈令坤等<sup>[15]</sup>进行了采用铅芯橡胶支座的高铁桥梁的隔震研究, 夏修身等<sup>[16]</sup>进行了采用摩擦摆式支座的高铁桥梁的隔震研究。到目前为止, 高铁桥梁的隔震研究尚处于起步阶段, 在高铁桥梁中还没有使用隔震技术的工程实例, 因此还需要对高铁隔震桥梁的地震反应进行更深入的研究, 对高铁桥

梁的隔震应用作进一步的探索。

本文将以某实际高铁桥梁工程为研究对象, 在该工程中实际应用的桥梁支座是摩擦摆式支座。本文将针对该典型工程展开高铁桥梁的隔震研究, 将研发适用于高铁桥梁的新型隔震支座, 并与在我国铁路桥上常用的盆式橡胶支座的地震响应进行对比分析。

## 1 工程概况

从某高速铁路桥梁实际工程中选取一段 5 跨等高等跨的简支梁桥段, 每个桥墩的形状尺寸配筋都相同, 桥墩顶部对称布置四个支座。桥墩墩高为 22.5 m, 墩身截面为实心圆端形且长和宽分别为 6.8 m 和 2.8 m 同时墩身高为 18.5 m, 墩身的横截面形状与配筋如图 1, 桥墩墩顶为长和宽为 7.6 m 和 3 m 的实心矩形且高度为 3 m, 桥墩墩底为实心矩形长和宽为 7.6 m 和 4.2 m 高度为 1 m, 其中承台高度为 2.5 m 长和宽是 11.3 m 和 8.7 m 的实心矩形。高铁桥梁的跨度为 32.1 m, 简支箱梁长为 32 m, 简支梁之间的缝宽为 10 cm, 主梁为单箱单室预应力箱梁, 箱梁截面尺寸及形状如图

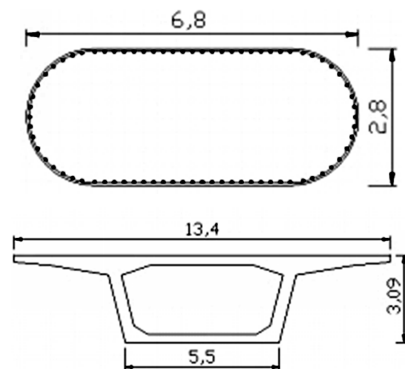


图 1 桥墩墩身与主梁截面形状(单位:m)

Fig.1 The cross section shape of pier body and main girder  
(unit: m)

1。桥墩墩身为现浇混凝土 C35, 主梁为预应力混凝土 C50, 其余混凝土都为 C40, 支座为摩擦单摆式阻尼支座 TJGZ-FPB-5000-0.3 g, 该高铁桥梁的抗震设防烈度 8 度(0.3 g), 场地特征周期 0.45 s, 场地类别为 III 类。

本文分析中除采用该工程已在应用的摩擦摆式支座外, 还考虑将在建筑与普通桥梁中已应用成熟的铅芯橡胶隔震支座应用到高铁桥梁中。铅芯橡胶支座具有优越的隔震性能、较强极限剪切变形能力、阻尼比大、耗能强, 铅芯橡胶支座剪切位移是水平移动, 适应了高速铁路高平顺的特点。铅芯橡胶隔震支座在建筑、公路桥及普通铁路桥已经取得成功的应用, 在高铁桥梁中应用铅芯橡胶支座是一种有意义的尝试。

盆式橡胶支座具有结构紧凑、技术成熟、传力可靠的特点, 对梁体不发生附加约束, 转动和滑动灵活是我国高速铁路常用的桥梁支座之一<sup>[17]</sup>。本文在研究中对比采用盆式橡胶支座的地震响应, 以作为隔震桥梁的对比。

## 2 高铁桥梁分析模型

桥墩墩身单元弹性模量取  $3.15 \times 10^4$  MPa, 主梁单元弹性模量取  $3.45 \times 10^4$  MPa。其余单元弹性模量取  $3.25 \times 10^4$  MPa。混凝土的泊松比都为  $\nu=0.2$ , 密度取  $2\ 450\text{ kg/m}^3$ 。该高铁桥梁采用 ABAQUS 大型通用有限元软件进行建模计算分析。桥墩墩身纤维截面需用 ABAQUS 中的用户子程序文件 PQ-

Fiber 定义材料, 摩擦摆式支座、铅芯橡胶支座均采用 CONN3D2 连接单元模拟, 盆式支座采用弹性 CONN3D2 连接单元, CONN3D2 连接单元既能模拟弹性连接单元也能模拟塑性变形的连接单元, 其他构件采用 TimoshenkoB31 梁单元模拟。在进行计算分析时在梁面加入  $184\text{ kN/m}$  的二期恒荷载, 本文分析模型中未考虑桩基的影响。

### 2.1 摩擦单摆式支座

#### 2.1.1 摩擦单摆式支座计算分析模型

根据摩擦摆式支座在地震中的滞回特性, 其计算分析采用双线性模型。摩擦摆单摆式支座在 ABAQUS 中采用 CONN3D2 连接单元, ABAQUS 软件中的 CONN3D2 连接单元可以通过设定屈服力以及屈服力后的塑性运动的比值来反应屈服后刚度, 而屈服前刚度可以在 CONN3D2 连接单元中的弹性刚度进行设定。

#### 2.1.2 摩擦单摆式支座参数

该高铁桥梁已在应用的支座是摩擦单摆式阻尼支座 TJGZ-FPB-5000-0.3 g, 该支座的球面曲率半径为  $1.5\text{ m}$ , 球面摩擦系数为  $0.03$ , 竖向设计承载力为  $5\ 000\text{ kN}$ , 设计极限位移为  $80\text{ mm}$ 。

摩擦摆式支座的等效刚度为:  $K_{\text{eq}}=W/R+\mu \times W/D$ , 屈服力为:  $Q_1=\mu W$ , 屈服后刚度:  $K_2=W/R$ 。

摩擦摆式支座的初始刚度  $K_1$ , 根据美国经验, 可取  $2.5\text{ mm}$  位移时的等效刚度。

经过上述的计算公式可以得到摩擦单摆式隔震支座参数, 其参数如表 1 所示。

表 1 摩擦单摆式隔震支座的参数表

Table 1 Parameters list of FRP

支座类型	曲率半径/ m	摩擦系数	屈服力/kN	设计竖向 承载力/kN	等效刚度/ (kN/mm)	屈服前刚度/ (kN/mm)	屈服后刚度/ (kN/mm)	支座极限 变形/mm
TJGZ-FPB-5000-0.3g	1.5	0.03	150	5 000	5.208	63.3	3.3	80

### 2.2 铅芯橡胶隔震支座

本文根据该高铁桥梁的工程使用情况设计了一种带有四铅芯高铁桥梁橡胶隔震支座。

#### 2.2.1 铅芯橡胶隔震支座计算分析模型

铅芯橡胶支座在达到屈服力之前具有较大的水平刚度, 屈服之后具有较小水平刚度, 该支座的计算分析模型选用双线性模型, 该支座跟摩擦摆式座一样, 在 ABAQUS 中采用 CONN3D2 连接单元进行模拟。

#### 2.2.2 铅芯橡胶隔震支座设计

橡胶隔震支座已在建筑与普通桥梁的隔震中取得了巨大的成功。本文针对我国的高铁桥梁, 提出一种四铅芯橡胶隔震支座。铅芯橡胶支座的设计流程通常为确定橡胶支座的剪切模量, 支座本体形状, 设计竖向承载力, 设计剪切位移量, 校核计算或优化设计, 若不满足要求, 可重复上述步骤。

本研究中设计竖向承载力为  $5\ 000\text{ kN}$ 、设计剪切位移量为  $210\text{ mm}$ 。由于受面压值的限制, 设计成较大的橡胶剪切模量  $1\text{ MPa}$ , 面压为  $10\text{ MPa}$ ,

铅芯剪应力为 8.5 MPa。铅芯橡胶支座选用直径 800 mm，支座总高为 195 mm，加入的 4 个直径为 80 mm 的铅芯(如图 2)，单层橡胶厚度 15 mm，加劲钢板厚度 5 mm，封钢板厚 20 mm，铅芯高度与直径之比为 1.5，支座含铅量为 4.4%，第一、二形状系数分别为 13 和 6.5。根据上述数据可以计算出该支座的动力参数，如表 2 所示。支座的极限剪切变形为 300 mm。

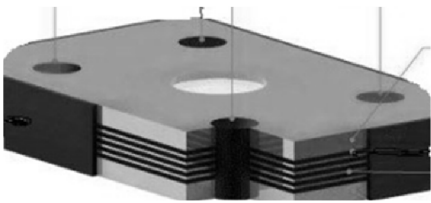


图 2 铅芯橡胶隔震支座  
Fig.2 LRB

表 2 LRB 支座的参数表  
Table 2 Parameters list of LRB

支座类型	支座外径/mm	屈服力/kN	等效刚度/(kN/mm)	屈服前刚度/(kN/mm)	屈服后刚度/(kN/mm)	橡胶总厚度/mm	支座极限变形/mm
LRB	800	150	4	22.4	3.2	120	300

2.3 盆式橡胶支座

盆式橡胶支座是高速铁路常用的一种桥梁支座，在 ABAQUS 软件中采用 CONND3D2 连接单元，与两种隔震支座不同的是 CONND3D2 连接单元中只设定弹性刚度，其水平刚度取  $2\times10^9\text{ N/m}^{[18]}$ 。

2.4 高铁桥墩

桥墩的模拟是采用 ABAQUS 软件中的用户子程序，该用户子程序既可以考虑桥墩中的混凝土也可以考虑桥墩中的钢筋。桥墩中混凝土和钢筋都是选用用户子程序中的纤维模型，桥墩使用纤维模型进行模拟对高铁桥墩进行非线性时程分析能取得很好的效果。

2.4.1 桥墩中钢筋纤维模型

ABAQUS 软件中的纤维梁单元是在用户子程

序中定义的材料。由于地震是往复的水平运动，所以该桥墩中钢筋纤维模型采用的滞回模型为再加载刚度按 Clough 本构退化的随动硬化单轴本构模型。其应力应变关系如图 3 所示。

2.4.2 桥墩中混凝土纤维模型

为了能够真实客观地计算分析该桥梁的地震响应，所以该桥墩混凝土纤维模型采用考虑抗拉强度的混凝土骨架曲线的混凝土模型。此模型的特点是：受拉骨架线为全曲线；受拉卸载时指向原点；受压骨架线为全曲线；卸载刚度随历史最大压应变的增大而减小，且不小于达到极限压应变时的卸载刚度。混凝土往复加载时的单轴应力应变关系如图 4 所示。

ABAQUS 的全桥空间分析模型如图 5。从左到右 1 至 10 为支座号，1# 至 6# 为桥墩墩号。

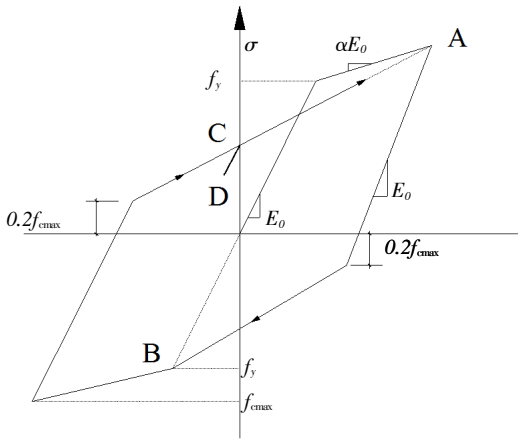


图 3 往复加载时的单轴应力应变关系  
Fig.3 Uniaxial stress-strain relationship with reciprocating loading

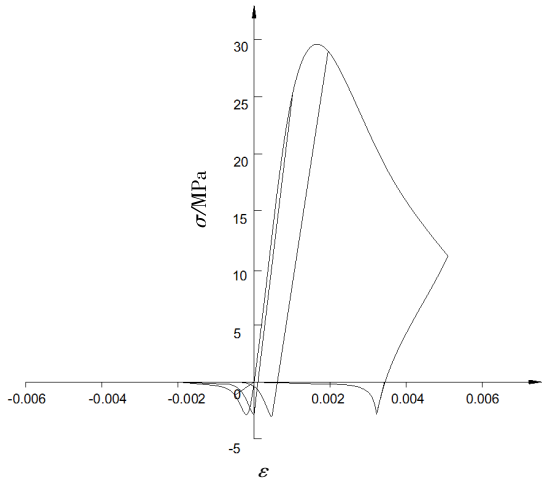


图 4 往复加载时的单轴应力应变关系  
Fig.4 Uniaxial stress-strain relationship with reciprocating loading

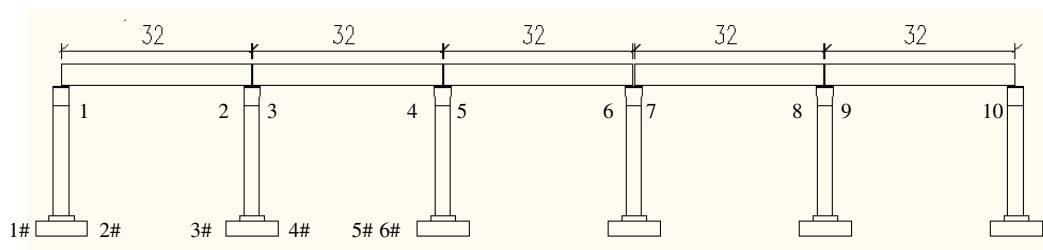


图5 高铁桥梁三维有限元模型(单位:m)

Fig.5 Finite element model of high-speed railway girder bridge (unit: m)

### 3 高铁桥梁动力特性

了解高铁桥梁的自振特性是对桥梁进行动力分析的重要前提,对铅芯橡胶支座桥梁、摩擦摆式支座桥梁、盆式橡胶支座桥梁进行模态分析,得出对应不同支座高铁桥梁的自振周期及振型。高铁桥梁的前十阶自振周期如表3所示。高铁桥梁采用铅芯橡胶支座与盆式支座的振型图分别如图6和图7所示。摩擦摆式支座的前十阶振型与铅芯橡胶支座类似,故不再累述。

由表3可知,普通盆式支座桥梁的自振周期为0.664 1 s,铅芯橡胶支座与摩擦摆式支座桥梁的自振周期分别为1.563 8 s、1.398 4 s,使用隔震

表3 自振周期(单位:s)

Table 3 Natural vibration period of bridge (unit: s)

模态号	LRB	FRP	盆式支座
1	1.561 9	1.396 2	0.664 1
2	1.540 8	1.371 9	0.664 0
3	1.512 6	1.339 6	0.659 1
4	1.485 2	1.308 5	0.654 9
5	1.465 6	1.286 4	0.649 8
6	0.675 7	0.670 6	0.647 0
7	0.670 2	0.664 3	0.333 6
8	0.662 3	0.657 9	0.330 3
9	0.653 2	0.649 4	0.329 1
10	0.636 9	0.632 9	0.329 0



图6 铅芯橡胶隔震支座桥梁振型图

Fig.6 Mode shape of isolated bridge using LRB



图7 盆式支座桥梁振型图

Fig.7 Mode shape of bridge using pot bearing

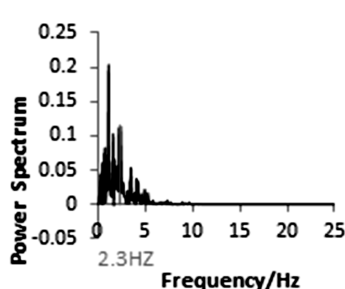
支座后桥梁的自振周期变长。随着阶数的增大桥梁振动周期越来越接近,说明隔震支座主要影响桥梁前几阶模态对于高阶振型影响较小。铅芯橡胶支座桥梁的振型分别为第一阶纵桥向一致平动,第二阶纵桥向向中间跨平动,第三、四、五阶纵桥向非一致平动。盆式支座桥梁的振型分别为第一阶整桥向上竖弯,第二至第四阶非整桥竖弯、

竖弯方向非一致,第五阶整桥竖弯、相邻跨依次反向竖弯。高速列车对横向的位移非常敏感,考虑到高铁桥梁上行车的安全性,故将高铁桥墩横行位移锁住,在动力分析中,采用三种类型支座的桥梁的振型都没有横向的变化,铅芯橡胶支座与摩擦摆支座的振型主要是梁体的纵向平动、桥墩纵弯,盆式支座桥梁主要与梁体的弯曲为主。

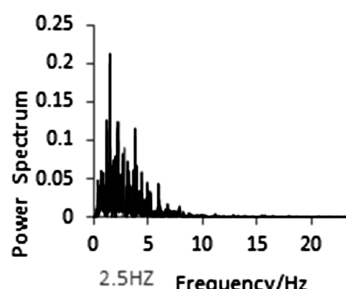
## 4 地震响应分析

### 4.1 地震波的选取

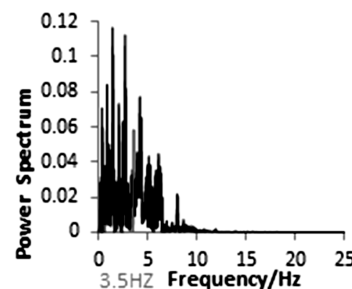
结构的地震响应,取决于结构本身的动力特性以及输入地震波的特性,因此选择合理的地震波是进行动力时程分析的基础。本文中选取天津波、El Centro 波以及一条人工波。3条地震波功率谱如图6所示。如图8可知,天津波、El Centro 波、人工波主频分别为 2.3 Hz、2.5 Hz、3.5 Hz,天津波的能量在频率上主要分布在 [0,5] Hz、El Centro 波的能量在频率上主要分布在 [0,7] Hz、人工波的能量在频率上主要分布在[0,9] Hz,三条地震波的能量在频率上主要分布的范围都包含了三种支座的前十阶模态。



(a)天津波



(b) El Centro 波



(c) 人工波

图8 3条地震波的功率谱

Fig.8 The power spectrum of three earthquake records

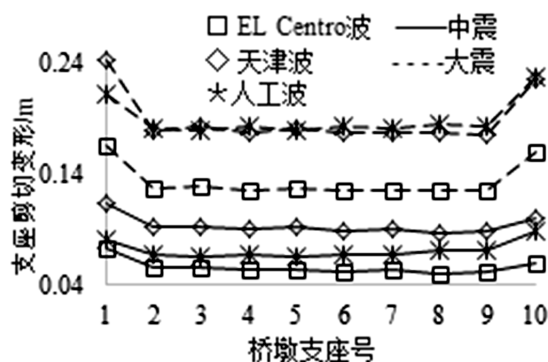


图9 摩擦摆式支座剪切位移峰值图

Fig.9 FRP's peak shear displacement

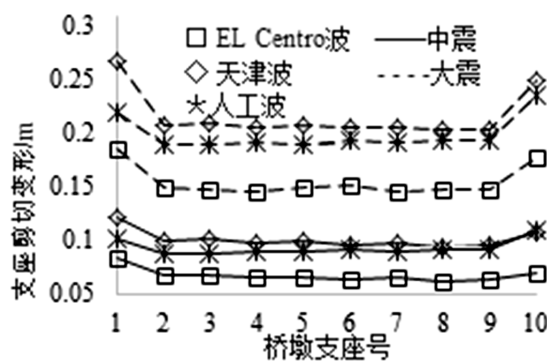


图10 铅芯橡胶支座剪切位移峰值图

Fig.10 LRB's peak shear displacement

较难满足高铁桥梁的平顺性要求,因此在高铁桥梁中选用本文所提出的四铅芯橡胶隔震支座是更为合适的方案。

### 4.2.2 高铁桥梁隔震支座滞回耗能

本文选取该高铁桥梁 3# 桥墩内测的铅芯橡胶支座为例,在顺桥向的各条地震波作用下该支座

## 4.2 高铁桥梁隔震支座地震响应

### 4.2.1 高铁桥梁隔震支座剪切变形

在顺桥向地震波作用下,各桥墩上隔震支座的剪切变形峰值分别如图9~10所示,边墩支座的剪切变形都大于中间墩。如图9可知,大震时三条地震波作用下摩擦摆支座的剪切变形都超过了极限变形(80 mm)。如表4可知,中震时天津波作用下摩擦摆支座的剪切变形超过了极限变形(80 mm),人工波作用下边支座剪切变形也超过了极限变形(80 mm)。如图10所示,无论在大震还是中震作用下,铅芯橡胶支座的剪切变形都没有超过其极限变形(300mm),故高速铁路桥梁中采用铅芯橡胶隔震支座相对更加安全。此外,摩擦摆支座滑动面材料易老化、变形能力差、水平移动时

的滞回曲线如图11所示。铅芯橡胶支座在三条地震波作用下,滞回曲线饱满,说明铅芯橡胶支座具有优越的耗能性能,铅芯橡胶支座对于高铁桥梁的抗震能够发挥巨大的作用。从图9中亦可知,不同的地震波作用下,支座的耗能不同,El Centro 波的耗能较其他地震波小,天津波和人工波的耗

表4 中震时摩擦摆支座剪切位移峰值表 (单位: mm)

Table 4 FRP's peak shear displacement under mediate-earthquake(unit:mm)

支座号	El Centro 波	天津波	人工波
1	73	114	82
2	56	93	68
3	57	93	66
4	54	91	68
5	55	92	65
6	52	89	68
7	54	91	68
8	51	87	71
9	53	89	71
10	59	101	89

能相近。天津波、El Centro 波、人工波作用下支座的剪切位移峰值分别达到了 105 mm、70 mm、90 mm, 剪切变形分别达到了 87.5%、58.3%、75%。

### 4.3 高铁桥梁桥墩地震响应

#### 4.3.1 桥墩墩顶位移

对高铁桥梁纵向地震波输入进行动力时程分析, 得到顺桥向桥梁的桥墩墩顶位移峰值如图 10 所示。由图 12 可知, 顺桥向地震力作用下, 采用盆式支座的桥墩墩顶位移峰值比采用铅芯橡胶支座明显大很多, 其中采用盆式支座的桥墩墩顶位移峰值最大为 190 mm, 采用铅芯橡胶支座的桥墩

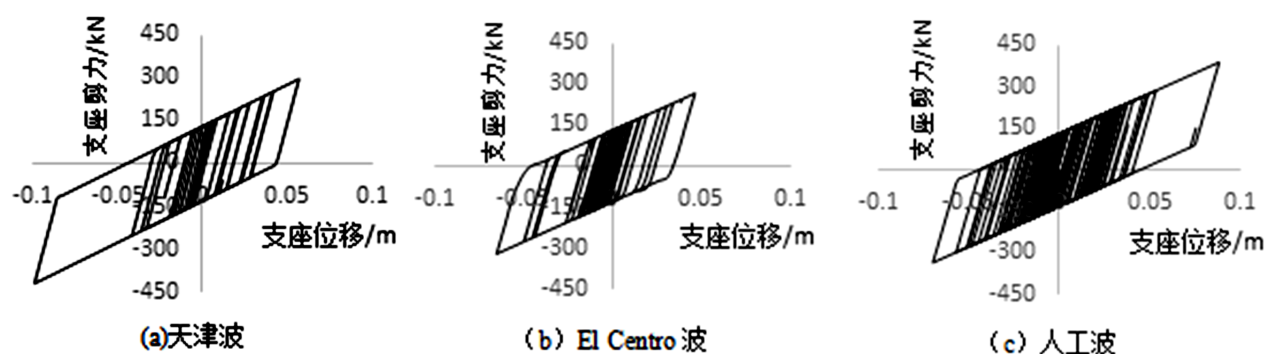


图 11 地震作用下隔震支座的滞回曲线

Fig.11 Hysteresis curve of LRB under the action of earthquake

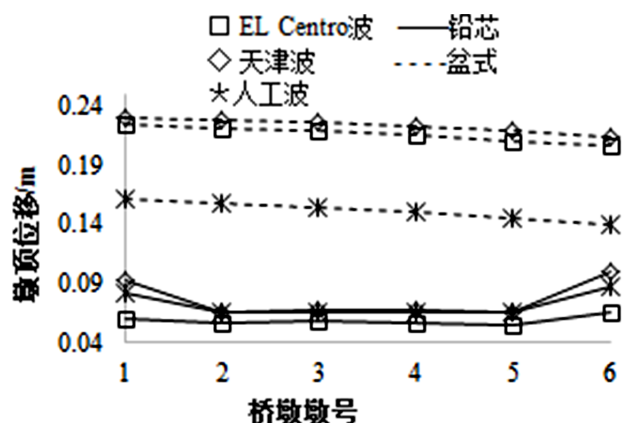


图 12 桥墩墩顶位移

Fig.12 Pier top displacement of the piers

墩顶位移峰值最小为 90 mm。说明隔震后桥梁能够大大减少桥墩墩顶位移, 大大提高了高铁桥梁在使用中的安全性。对于采用隔震支座的高铁桥梁墩顶位移来说, 边墩的墩顶位移大于中间墩的墩顶位移, 不同的地震波具有不同的隔震效果, El

Centro 波最大的隔震效果达到了 74.7%, 最小的隔震效果达到了 68.3%。天津波最大的隔震效果达到了 71.4%, 最小的隔震效果达到了 53.1%。人工波最大的隔震效果达到了 58.4%, 最小的隔震效果达到了 38.3%。

#### 4.3.2 桥墩弯矩与曲率

考虑顺桥向地震动作用下, 高铁桥梁桥墩墩底弯矩曲率的地震响应。桥墩墩底因为在地震力作用下易出现塑性变形, 因此分析不同地震波作用下桥墩墩底的弯矩曲率的滞回曲线是有必要的。在三条地震波的大震作用下 4# 桥墩墩底的弯矩曲率曲线如图 13 所示。

如图 13 中可知, 隔震桥梁桥墩的弯矩曲率曲线是一个极细的滞回曲线, 近似一条斜直线, 说明大震时隔震桥梁的桥墩保持基本弹性。大震时采用盆式支座的高铁桥梁桥墩弯矩-曲率滞回环饱满, 说明桥墩进入耗能塑性发展阶段。对于盆式支座, 大震人工波和 El Centro 波作用下桥墩最大



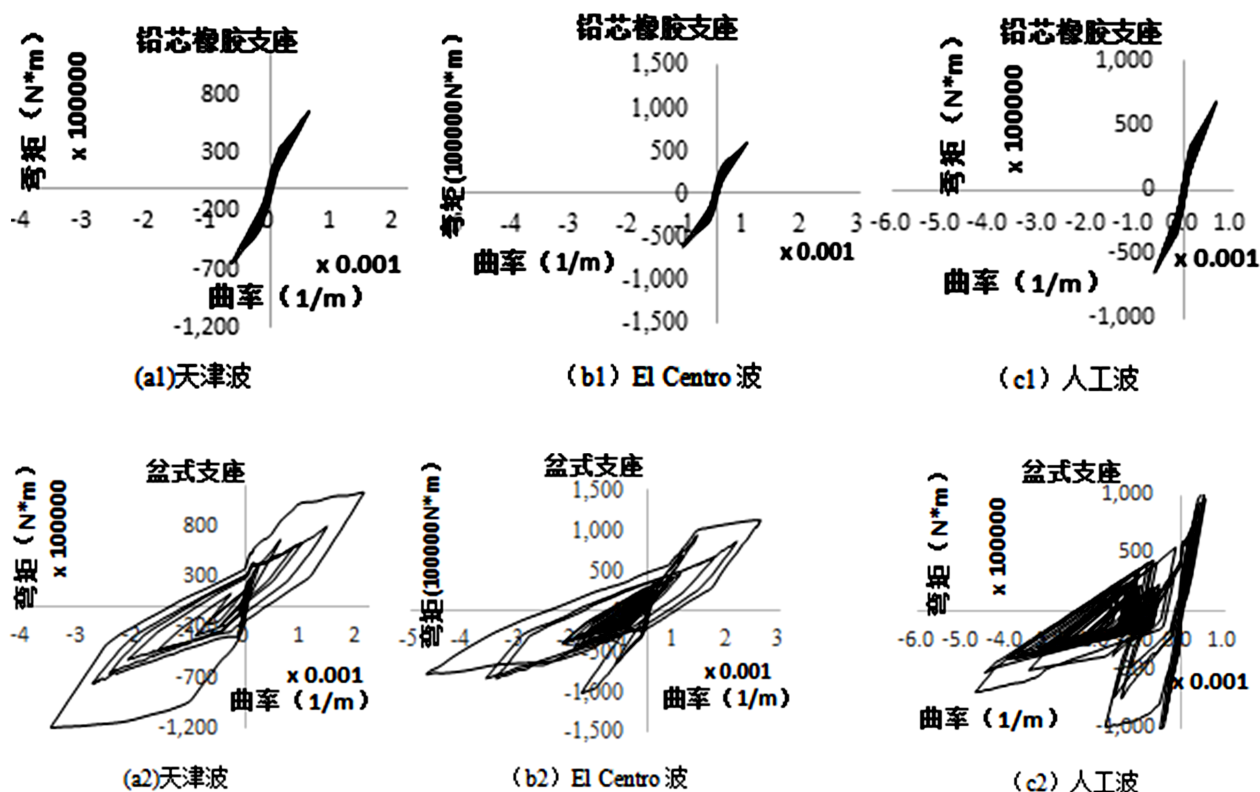


图 13 大震时 3# 桥墩弯矩曲率曲线

Fig.13 Moment-curvature curve of the 3rd pier under strong earthquakes

的曲率都达到了 0.005, 大震天津波作用下桥墩最大曲率达到了 0.003 8, 而采用铅芯橡胶支座的桥墩在天津波和人工波作用下曲率还没有达到 0.001, EL Centro 波也支座刚达到 0.001。隔震效果高达 80%。不同的地震波对采用盆式橡胶支座的桥墩墩底弯矩-曲率滞回曲线的形状影响非常大, 如图 11(a2)、(b2)可知, 两个滞回曲线的形状差异在第三象限较大, El Centro 波作用下滞回曲线在第三象限相比于天津波其弯矩较小、曲率较大。如图 11(a2)、(b2)、(c2)可知, 人工波作用下桥墩墩底弯矩-曲率滞回曲线的形状与天津波、El Centro 波作用下的滞回曲线形状差异非常大, 人工波作用下的滞回曲线形状中第一象限近似一条直线、第三象限滞回曲线饱满、滞回环有往左侧跑的趋势, 由此可知在人工波作用下 4# 桥墩顺桥向的一侧没有损坏, 而另一侧损坏严重, 天津波和 El Centro 波作用下, 桥墩两侧都有塑性变形但由于两个滞回曲线的形状都是不对称故桥墩两侧塑性变形程度不一样。

## 5 结语

(1) 使用隔震支座后桥梁的自振周期变长,

铅芯橡胶支座与摩擦摆支座的振型主要是梁体的纵向平动、桥墩纵弯, 盆式支座桥梁主要与梁体的弯曲为主。

(2) 现有高铁桥梁所采用的摩擦摆支座在强震下支座剪切变形容易超限, 其抗震能力明显不足, 难以确保高速铁路桥梁在强震下的安全性。

(3) 采用盆式支座的高铁桥梁在强震下其桥墩处于进入大范围的塑性耗能阶段。

(4) 本文建议采用铅芯橡胶支座, 针对高铁桥梁设计的四铅芯橡胶隔震支座, 在地震作用下, 支座滞回曲线饱满, 具有良好的减震性能, 可望在高速铁路桥梁的隔震中得到广泛应用。

(5) 采用本文建议的铅芯橡胶支座后, 即便在大震下高铁桥梁的桥墩仍能保持基本弹性, 高铁桥梁墩顶位移、墩底弯矩与曲率较非隔震高铁桥梁均大幅度减少, 高铁桥梁的地震安全性得到大大改善。

## 参考文献:

- [1] 孙树礼. 高速铁路桥梁设计与实践[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [2] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997
- [3] 任镇寰, 罗振暖, 秦乃岗, 等. 华南地震区地震活动基



- 本特征与地震大形势再研究[J]. 华南地震, 1998, 18 (1): 40-49.
- [4] 崔鑫. 华南地区地震烈度衰减模型的建立[J]. 华南地震, 2010, 30 (2): 61-66.
- [5] 杨凤利. 铁路桥梁减隔震设计方法及设计参数研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [6] 范立础, 王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [7] Hwang J S, Sheng L H. Equivalent elastic seismic analysis of base isolated bridges with lead-rubber bearings[J]. Engineering Structures, 1994, 16 (3): 201-209.
- [8] Naeim F, Kelly J M. Design of seismic isolated structures: from theory to practice[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1999
- [9] Anderson E L. Performance-based design of seismically isolated bridges [D]. Berkley: University of California, 2003.
- [10] Warn C P, Whittaker A S. Performance estimates in seismically isolated bridge structure [J]. Engineering Structures, 2004, 26: 1261-1278
- [11] 王丽, 阎贵平, 方有亮. 隔震桥梁非线性地震反应分析[J]. 北方交通大学学报, 2002, 26 (1): 80-84.
- [12] 张贞阁, 钟铁毅, 王丽. 铁路连续桥梁铅芯橡胶支座的减隔震研究[J]. 中国安全科学学报, 2003, 3 (5): 41-45.
- [13] 陈永祁, 杨凤利, 刘林. 摩擦摆隔震桥梁的设计及应用[J]. 工业建筑, 2009, 39 (增刊): 256-261
- [14] 庄军生. 桥梁减震、隔震支座和装置[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
- [15] 陈令坤, 蒋丽忠, 王丽萍. 高速铁路铅芯橡胶支座桥梁隔震研究[J]. 华中科技大学学报, 2012, 40 (1): 77-81.
- [16] 夏修身, 赵会东, 欧阳辉来. 高速铁路桥梁基于摩擦摆支座的减隔震研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 36 (3): 21-26.
- [17] 胡斌. 基于灵敏度分析的模型修正方法在隔震桥梁的运用[J]. 华南地震, 2014, 34 (Supp. I): 53-56.
- [18] 吴华平, 王立新, 刘智. 东莞松山湖区既有桥梁震害预测[J]. 华南地震, 2015, 35 (4): 37-42.