

采用板式橡胶和铅芯橡胶支座的山区桥梁 地震损伤评价

石岩^{1,2}, 王进³, 王东升^{1,2}, 沈永林³, 刘锡媛^{1,2}

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 辽宁省公路工程重点实验室, 辽宁 大连 116026;
3. 云南省交通规划设计研究院, 云南 昆明 650011)

摘要: 针对山区桥梁的结构特点, 构造了7组代表性的示例桥梁作为研究对象, 通过基于纤维单元的桥梁模型进行非线性时程动力分析, 考察了采用板式橡胶支座(RB)和铅芯橡胶支座(LRB)的山区桥梁在强震作用下的地震损伤情况。研究表明, 虽然铅芯橡胶支座桥梁在桥墩侧移角、曲率延性系数、混凝土最大压应变和钢筋最大拉应变等地震反应方面与板式橡胶支座桥相比略有增加或相近, 但铅芯隔震橡胶支座桥梁可以有效地控制墩梁的相对残留位移, 有利于震后修复和维持应急交通功能。

关键词: 减隔震桥梁; 地震损伤; 板式橡胶支座; 铅芯橡胶支座; 残留位移
中图分类号: U442.5⁺5; TU352.1 文献标志码: A

Seismic damage evaluation of bridges with RBs and LRBs in mountainous areas

SHI Yan^{1,2}, WANG Jin³, WANG Dongsheng^{1,2}, SHEN Yonglin³, LIU Xiyuan^{1,2}

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering of Liaoning Province, Dalian 116026, China; 3. Communications Planning and Design Institute of Yunnan Province, Kunming 650011, China)

Abstract: Based on the layout features of bridges in mountainous areas, 7 sets of continuous bridges were constructed, which were taken as examples. Fiber element models for bridges were built. Seismic damage to isolated bridges with rubber bearings (RBs) and with lead rubber bearings (LRBs) was evaluated by time history response analysis. Results show that the seismic damage to bridges with LRBs compared with RBs has a slight increase, such as drift ratio of piers, curvature ductility coefficient, maximum compressive strain of confined concrete, and the maximum tensile strain of reinforced steel bars; but bridges with LRBs can effectively control the relatively residual displacement between pier and beam, which is favorable to the repair and recovery of emergency traffic function after earthquakes.

Key words: isolated bridges; seismic damage; rubber bearings; lead rubber bearings; residual displacement

引言

我国西部地震危险性较高, 地形以山区为主。近些年随着西部地区建设快速进展, 山区桥梁越来越多。受地形、地貌以及地质条件等诸多因素限制, 西部山区桥梁平、立面设计一般与平原地区不同, 在立面上往往

收稿日期: 2013-06-28; 修订日期: 2013-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178071, 51008041); 云南省科技厅科技课题(2011(B)04-b); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0751); 中央高校基本科研业务费(3132013315)

作者简介: 石岩(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事桥梁抗震研究. E-mail: syky86@163.com

通讯作者: 王东升(1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁及结构抗震研究. E-mail: dswang@dlmu.edu.cn

桥墩高差较大,为典型的不规则桥梁,在地震作用下这类不规则桥梁的地震响应与规则桥梁具有很大差异。2008年5月12日在我国四川省汶川地震中,震区大量的山区公路桥梁遭到不同程度的破坏,其桥型主要为桥面连续简支梁桥,支座采用直接搁置于梁底的板式橡胶支座,地震时主梁与桥墩易发生滑移,主梁更多地发生横、纵向移位以至落梁。但这种滑移一定程度降低了桥墩的地震荷载,总体上看桥墩震害较轻^[1-3]。汶川地震后有学者认为采用板式橡胶支座是较好的桥梁减隔震形式,不太主张采用相对较贵的铅芯橡胶支座。

桥梁减隔震设计的目的在于控制桥梁结构的地震损伤及维持震后的(应急)通车功能,除保持桥墩及下部结构弹性或有限损伤外,还涉及墩梁间(震后)残留位移的控制。为此,本文结合山区桥梁的特征构造了桥墩高度不同的7组示例桥梁,以纤维梁柱单元描述桥墩非线性地震反应行为,利用时程分析方法研究了强震作用下,采用板式橡胶支座和铅芯橡胶支座的山区桥梁的地震损伤性能,以期对其抗震问题获得全面的认识。分析中考虑了桥墩地震损伤和主梁震后的残留位移,其损伤评价分别采用了桥墩侧移角、墩底截面曲率延性系数和墩梁震后残留位移等多个指标。

1 计算模型及其参数

以一五跨预应力混凝土连续梁桥(5×30 m)为基本工程背景,上部结构由7片T形梁组成,如图1所示。桥墩采用双柱墩,1#和4#墩高度相同,截面尺寸为150 cm×170 cm;2#和3#墩高度相同,截面尺寸为160 cm×170 cm。为了研究山区桥梁桥墩高度变化对隔震桥梁动力响应的影响更具普遍性,本文根据墩高的不同,构造了7组桥梁,桥墩具体高度变化及桥梁编号见表1。

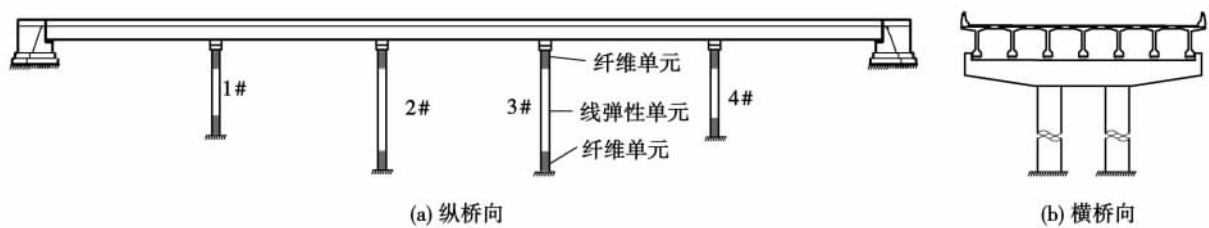


图1 桥梁模型图

Fig. 1 Layout of bridges

表1 各组桥梁墩高

Table 1 Pier heights of bridges

桥梁编号	A	B	C	D	E	F	G
1#(4#) 墩高(m)	5	10	10	15	10	15	20
2#(3#) 墩高(m)	10	15	20	20	25	25	25

板式橡胶支座(RB)具有加工生产容易、用钢量少、成本低廉、构造简单、安装和更换方便等特点,在我国的公路桥梁中的应用非常广泛。通常,板式橡胶支座直接放置在支座垫石上,然后将梁体直接搭在支座上,支座与梁体和垫石之间一般不设连接措施,主要依靠接触面的摩擦力来提供水平抗力。当外力一旦超过其摩擦力,则会发生滑动而丧失恢复力。铅芯橡胶支座(LRB)是在板式橡胶支座中嵌插铅棒,上、下部外连接钢板通过焊接或栓接与梁体、垫石。它通过铅的塑性变形来延长结构周期、同时增加阻尼,从而达到耗能减震的目的。图1所示的桥梁模型中,在1#~4#墩上分别全部采用板式橡胶支座(RB)或铅芯橡胶支座(LRB),其中LRB支座设计位移为300 mm,不同墩高设置的LRB支座型号不同以考虑桥梁各墩处二者组合刚度较一致,对较矮的1#和4#墩采用LRB670×670×217支座,对较高的2#和3#墩采用LRB670×670×183支座。数值分析时橡胶支座采用双线型弹簧单元模拟,不同支座基本分析参数见表2。所有桥梁的桥台处采用四氟滑板支座,分析中不考虑其摩擦耗能的影响,以更好地比较板式橡胶支座(RB)或铅芯橡胶支座(LRB)的减隔震效果。

桥墩采用纤维梁柱单元模拟,其保护层混凝土采用的是Hoshikuma无约束混凝土模型,核心混凝土采用

Hoshikuma 约束混凝土模型^[4], 该模型由骨架曲线和滞回曲线组成, 骨架曲线考虑了横向约束的滞后现象, 内部滞回关系采用的是 Sakai/Kawashima 本构模型^[5]。钢筋的本构采用是双折线骨架曲线, 内部滞回关系为考虑包辛格效应的 Sakai/Kawashima 模型^[6]。

表 2 支座分析参数

Table 2 Parameters of rubber bearings and lead rubber bearings

支座类型	屈服前刚度 k_1 (kN/mm)	屈服后刚度 k_2 (kN/mm)	屈服位移 δ_y (mm)	屈服力 F_y (kN)
RB	13.56	0.00	16.50	223.6
LRB670 × 670 × 183	13.60	2.10	15.90	216.0
LRB670 × 670 × 217	10.80	1.70	20.00	216.0

应用日本 UC-win/FRAME(3D) 分析软件进行非线性动力时程分析。选择的输入地震动为 2 个经典的 El Centro、Taft 波和 1 个台湾 Chi-Chi 地震获得的 TCU045 波。示例桥梁按 8 度抗震设防, 在 E2 地震下, 取重要性系数(或地震调整系数) 1.7, PGA 调整为 0.51 g, 沿纵桥向输入。

2 不同桥梁损伤指标及比较分析

桥梁损伤指标主要考虑为: (1) 桥墩损伤, 包括桥墩侧移角、墩底截面曲率延性系数、核心混凝土最大压应变、钢筋最大拉应变 4 类, 文献[7-8]对此有详细介绍, 不再赘述; (2) 支座反应: 取为支座最大位移; (3) 梁体残留位移。

图 2 ~ 图 5 给出了 3 个地震动作用(取为平均值)下分别采用板式橡胶支座和铅芯橡胶支座的各个桥梁的桥墩损伤情况。可以看出: 对于桥墩侧移角、墩底截面曲率延性系数、核心混凝土最大压应变和钢筋最大拉应变等桥墩损伤评价指标, 采用铅芯橡胶支座和板式橡胶支座的桥梁相差不大, 采用板式橡胶支座桥梁与采用铅芯橡胶支座桥梁相比, 前者桥墩损伤程度总体略轻, 尤其当桥墩高度较低时(如桥梁 A ~ C)。其主要原因是虽然示例桥梁中板式和铅芯橡胶支座的屈服力都在 220 kN 左右, 但前者屈服后刚度接近于零, 屈服后不再传递地震荷载, 而后者屈服后仍有一定的刚度。

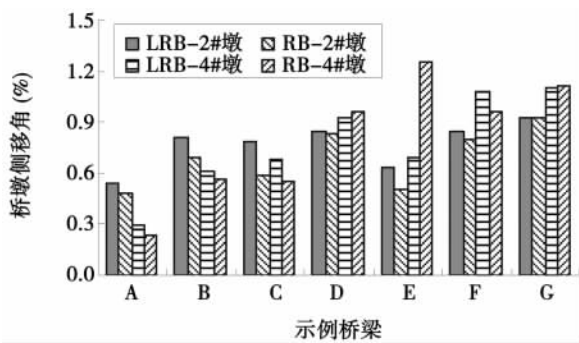


图 2 桥墩侧移角

Fig. 2 Drift ratios of piers

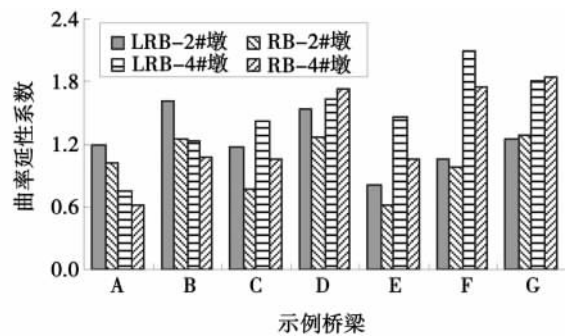


图 3 曲率延性系数

Fig. 3 Curvature ductility coefficients

图 6 ~ 图 7 给出了 3 个地震动作用(取为平均值)下分别桥梁支座的最大位移反应和震后梁体(相对桥墩)残留位移。可以看出: 板式橡胶支座的位移反应明显大于铅芯橡胶支座, 并且震后板式橡胶支座桥梁在墩梁间将存在很大的残留位移, 对桥墩相对较矮的桥梁则更为明显。可以想到板式橡胶支座上梁体发生滑动后, 复位刚度将接近于零, 从而导致较大的梁体位移和残留位移发生, 这点已被汶川地震桥梁震害所证实^[1-3]。而铅芯橡胶支座屈服后仍具有一定的刚度, 可以提供适当的恢复力, 故降低了震后墩梁间的残留位移。本文分析的采用铅芯橡胶支座的示例桥梁, 梁体的最大残留位移未超过 23.0 mm, 满足文献[9]建议的不大于 10% 设计位移的要求。文献[10]采用不考虑滑动的板式橡胶支座和非线性铅芯橡胶支座, 进行了与本文类似的地震响应对比研究。

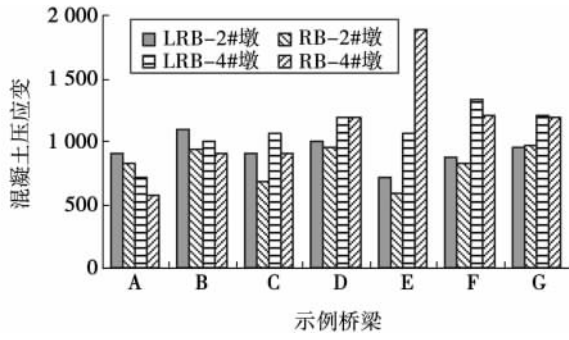


图4 核心混凝土压应变

Fig.4 Maximum compressive strains of confined concrete

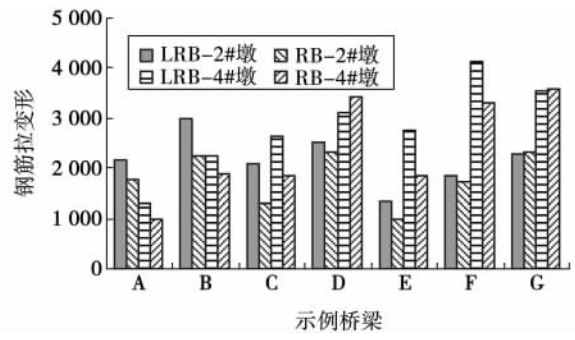


图5 钢筋拉应变

Fig.5 Maximum tensile strains of reinforced steel bars

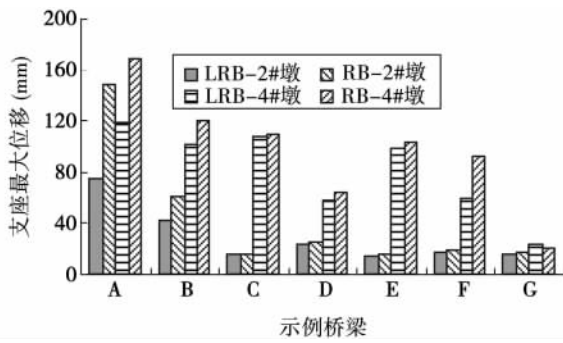


图6 支座最大位移

Fig.6 Maximum displacements of bearings

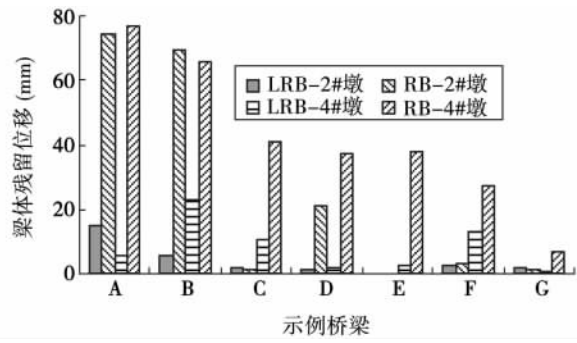


图7 梁体残留位移

Fig.7 Relatively residual displacements between pier and beam

图8给出了El Centro地震动作用下桥梁B较高墩(2#)和较矮墩(4#)上支座的位移反应情况,较高墩处采用LRB支座和RB支座时的最大支座位移分别为56 mm和81 mm,而地震后墩梁残留位移分别为4 mm和68 mm;较矮墩处采用LRB支座和RB支座时的最大支座位移分别为125 mm和145 mm,残留位移分别为19 mm和105 mm。上述数据充分说明,采用铅芯隔震橡胶支座可以有效地控制梁体震后残留位移,从而减小地震下落梁的风险及增加震后可修复性及维持应急交通功能的可能。而采用板式橡胶支座尽管在保护桥墩方面略有优势,但是必须考虑增加限制墩梁过大位移反应及降低其残留位移的辅助(工程)措施。

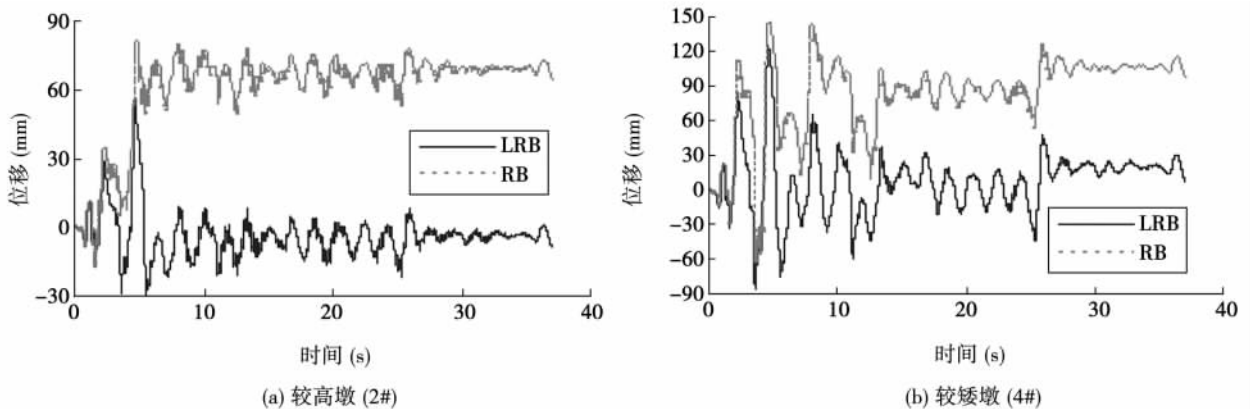


图8 支座位移时程曲线(桥梁B, El Centro)

Fig.8 Time-history curves of bearings (bridge B, under El Centro)

3 结论

在考虑桥墩地震损伤条件下比较了采用铅芯橡胶支座和板式橡胶支座的山区桥梁抗震性能差异,表明:

虽然铅芯橡胶支座在桥墩地震反应方面,如最大侧移角、曲率延性系数、混凝土最大压应变和钢筋最大拉应变等方面与板式橡胶支座相比略有增加或相近,但板式橡胶支座桥梁在震后存在较大的墩梁间残留位移,故在使用中须辅以限制墩梁过大相对位移及降低其残留位移的工程措施;而铅芯橡胶支座桥梁可以有效地控制墩梁间的相对残留位移,这对震后修复和应急交通功能的维持较为有利。

参考文献:

- [1] 杜修力, 韩强, 李忠献, 等. 5.12 汶川地震中山区公路桥梁震害及启示[J]. 北京工业大学学报, 2008(12): 1270-1279.
DU Xiuli, HAN Qiang, LI Zhongxian, et al. The Seismic damage of bridges in the 2008 Wenchuan earthquake and lessons from its damage[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008(12): 1270-1279. (in Chinese)
- [2] 王东升, 郭迅, 孙治国, 等. 汶川大地震公路桥梁震害初步调查[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(3): 84-94.
WANG Dongsheng, GUO Xun, SUN Zhiguo, et al. Damage to highway bridges during Wenchuan earthquake[J]. EARTHQUAKE ENGINEERING AND ENGINEERING DYNAMICS 2009, 29(3): 84-94. (in Chinese)
- [3] LI Jianzhong, PENG Tianbo, XU Yan. Damage investigation of girder bridges under the Wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2008, 7(4): 337-344.
- [4] Hoshikuma J, Kawashima K, Nagaya K., et al. Stress-strain model for confined reinforced concrete in bridge piers[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(5): 624-633.
- [5] Sakai J, Kawashima K. Unloading and reloading stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(1): 112-122.
- [6] Sakai J, Kawashima K. Modification of the Giuffre, Menegotto and Pinto model for unloading and reloading paths with small strain variations[J]. Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, 2003, No. 738/1-64: 159-169.
- [7] 艾庆华, 王东升, 李宏男, 等. 基于塑性铰模型的钢筋混凝土桥墩地震损伤评价[J]. 工程力学, 2009(4): 158-166.
AI Qinghua, WANG Dongsheng, LI Hongnan, et al. Seismic damage evaluation of RC bridge columns based on plastic hinge model[J]. Engineering Mechanics, 2009(4): 158-166. (in Chinese)
- [8] 艾庆华, 王东升, 向敏. 基于纤维单元的钢筋混凝土桥墩地震损伤评价[J]. 计算力学学报, 2011(5): 737-742.
AI Qinghua, WANG Dongsheng, XIANG Min. Seismic damage evaluation of RC bridge columns based on fiber elements[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011(5): 737-742. (in Chinese)
- [9] 胡兆同, 李子青, 刘健新. 桥梁铅芯橡胶支座设计参数的研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998(4): 43-46.
HU Zhaotong, LI Ziqing, LIU Jianxin. The study of design parameters of the lead rubber bearing for bridge[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998(4): 43-46. (in Chinese)
- [10] 马涌泉, 陈水生. 基于汶川地震的 LRB 与 RB 隔震连续梁桥地震响应对比研究[J]. 世界地震工程, 2012(1): 130-134.
MA Yongquan, CHEN Shuisheng. Comparative research on seismic response of isolated continuous bridges with IRB and RB based on wenchuan earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2012(1): 130-134. (in Chinese)