

近断层地震动作用下山区隔震桥梁地震损伤分析

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: 针对山区连续梁桥的特点和近断层地震动的特殊性, 设计全联采用板式橡胶支座、全联采用铅芯橡胶支座和较矮墩处采用铅芯橡胶支座而较高墩处采用板式橡胶支座的3种山区桥梁隔震方案, 研究了具有向前方向性效应和永久位移效应的近断层地震动对其地震损伤影响。研究结果表明: 向前方向性效应对铅芯橡胶支座隔震桥梁桥墩损伤的影响大, 永久位移效应对铅芯橡胶支座隔震桥梁的桥墩残余位移角和支座残余剪应变影响要大; 对山区墩高差异较大的连续桥梁, 在较矮墩处采用铅芯橡胶支座和较高墩处采用板式橡胶支座是较为合适的隔震设计方案。

关键词: 隔震桥梁; 近断层地震动; 地震损伤; 向前方向性效应; 永久位移效应

中图分类号: TU352.1; U442.5+5; U443.36

文献标志码: A

Seismic damage analysis of isolated bridges in mountainous area under near fault ground motions

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: According to the layout features of bridges in mountainous area and velocity pulse characteristics of near fault ground motions, 3 designing schemes for isolated bridges, including bridge isolated with lead rubber bearings (LRBs) on all piers, with rubber bearings (RBs) on all piers, and bridge isolated with LRBs on high piers and RBs on short piers, are proposed. The influence of near fault ground motions with forward rupture directivity effect and fling-step effect on seismic damage to isolated bridges is investigated. Results show that forward rupture directivity effect has greater effects on piers damage of isolated bridges with LRBs, but fling-step effect has greater effects on residual displacement of piers and residual shear strain of bearings; for bridge with large height difference of piers, the isolated scheme with LRBs on high piers and RBs on short piers is feasible.

Key words: isolated bridges; near fault ground motions; seismic damage; forward rupture directivity effect; fling-step effect

引言

在美国北岭地震、日本阪神地震和台湾集集地震中, 近断层地震动(含向前方向性效应、永久位移效应

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

等)对包括桥梁在内的各类工程结构物的强烈破坏性引起了广泛的关注与思考。回溯至国内,1976年唐山大地震滦河大桥发生严重落梁震害,现有研究表明强烈近断层地震动可能是主要外因^[1]。2008年汶川大地震中发生严重落梁破坏的高原大桥、北川龙尾大桥等距离主发震断层约几百米,也认为与近断层地震动有很大关联^[2]。自上世纪70年代隔震技术开始应用于桥梁工程领域,其有效性在一些地震中得到了证明,如日本的Miyagawa桥、Matsunohama桥,美国的Eel River桥等^[3],但经受过断层地震动考验的隔震桥梁还为数不多。2000年6月17日和21日在冰岛南部两次走滑断层地震中,两次地震距离Thjorsa河桥(主跨为钢桁拱)距离分别为16km和5.3km,该桥主跨在1991年采用铅芯橡胶隔震技术加固并安装了强震仪,在两次地震中分别记录到0.53g和0.84g的峰值地面加速度,但该桥都没有任何严重损坏,震后很快恢复交通^[4];2008年5月29日发生在冰岛南部 M_w 6.3地震,临近断层的Oseyrar桥是一座370m的8跨混凝土连续双梁桥,在地震中梁体发生了很大位移,所有墩上的混凝土挡块严重破碎,桥台翼墙也严重破坏,但上部结构、支座和桥墩并未发生严重破坏^[5];这两座隔震桥梁的表现一定程度上说明了隔震桥梁在近断层地震动下的有效性。

1999年台湾集集地震后,学者们结合获得的大量具有速度脉冲波形的近断层地震动对隔震桥梁抗震有效性进行了较多研究。Liao等^[6]研究发现近断层地震动PGV/PGA是影响隔震桥梁反应的一个重要因素。江辉等^[7]认为铅芯橡胶支座在近断层地震动作用下仍然适用,但对于个别脉冲型强震记录隔震效果可能不够明显。魏红一等^[8]认为近断层地震动对隔震简支梁桥的作用比远场地震作用下大,但仍具有较好的减震效果。Halldórsson等^[9]认为通过采用被动黏性阻尼器、主导和半主动控制装置来减小近断层地震作用下结构的反应。郭红锋等^[10]研究了近断层地震动作用对组合隔震桥梁的影响,认为采用黏滞阻尼器和磁流变阻尼器可提高隔震桥梁的安全性,与黏滞阻尼器相比,采用磁流变阻尼器的智能模糊控制方案效果好。另外,近断层地震动可能会显著放大隔震支座的位移,Dicleli和Karalar等^[11,12]提出采用附加弹性刚度和附加耗能装置来减小隔震装置的位移。

近断层地震动具有向前方向效应、永久位移效应、上下盘效应等多个特征,其中向前方向性效应和永久位移效应都可致近断层地震动具有明显的速度和位移脉冲,使其特性与远场地震动及无脉冲的近(发震)断层地震动有明显的差别^[13,14]。本文以一座典型的山区连续梁桥为背景,为适应地形因素其立面设计墩高一般相差较大,为此设计了全联采用板式橡胶支座、全联采用铅芯橡胶支座和较矮墩采用铅芯橡胶支座而较高墩采用板式橡胶支座的3种隔震设计方案,利用非线性时程法分析了近断层地震动的向前方向性效应、永久位移效应对山区隔震桥梁地震损伤的影响,以及针对山区桥梁特点提出的较矮墩采用铅芯橡胶支座而较高墩采用板式橡胶支座的隔震方案的可行性。

1 山区桥梁隔震设计方案及计算模型

以一典型的山区连续梁桥(5×30m)作为工程背景,上部结构为7片T形截面梁,桥面宽16.5m;下部结构为钢筋混凝土双柱墩,为适应地形因素墩高依次为14.9m、21.3m、24.5m和15.7m,如图1所示。1#和4#墩截面相同,尺寸为150cm×170cm;2#和3#墩截面相同,尺寸为160cm×170cm。

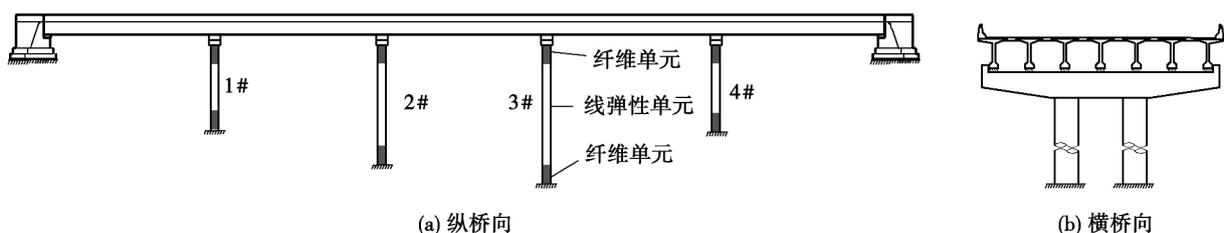


图1 桥梁模型图

Fig. 1 Layout of bridges

共设计3种隔震方案。方案1:各墩上都采用板式橡胶支座(RB,GYZ600×110),也是目前国内桥梁常见的支座布置方式;方案2:各墩上采用铅芯橡胶支座(LRB),较矮墩(1#和4#墩)上为LRB670×670×217,

较高墩(2#和3#墩)上为 LRB670×670×183; 方案3: 较矮墩(1#和4#墩)采用铅芯橡胶支座(LRB670×670×217), 而较高墩上(2#和3#墩)采用板式橡胶支座(GYZ600×110)。这是考虑到山区桥梁为适应地形因素其立面设计墩高一般相差较大, 而高墩相对矮墩有较大柔性, 当桥梁发生(纵桥向)整体地震反应时高墩上的支座相对于矮墩上支座变形较小, 高墩上的铅芯橡胶支座耗能及减震能力将得不到有效发挥。其次考虑尽管单个隔震桥梁将铅芯橡胶支座部分替换为板式橡胶支座, 经济效益有限, 但考虑强震区大量隔震桥梁建设时, 则经济效益将是可观的。另外, 桥梁在桥台处均采用四氟滑板支座, 分析中不考虑其水平刚度的贡献。分析中支座采用具有双线性特性的弹簧模拟, 具体的参数见表1。

表1 支座参数

Table1 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

采用 Newmark- β 法进行非线性动力时程分析, 结构的阻尼比取 5%, 并采用瑞利阻尼。不考虑桩-土-结构的相互作用, 即在墩底固结; 上部梁体采用线弹性梁单元, 墩柱采用纤维截面单元。纤维截面中, 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^[15], 该模型亦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 模型^[16], 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^[17]。分析软件采用日本 UC-win/FRAME(3D) 分析软件。

为了研究近断层地震动向前方向性脉冲效应和永久位移效应引起的两种速度脉冲运动对减隔震桥梁地震反应的影响, 选择 1999 年台湾集集地震中具有向前方向性效应、永久位移效应和无速度脉冲效应的各 3 个近断层地震动(表2)作为输入地震动。示例桥梁按 8 度抗震设防, 在 E_2 地震下, 取重要性系数(或地震调整系数) 1.7, PGA 调整为 0.51g, 沿纵桥向输入。

表2 集集地震的近断层地震记录

Table 2 Near fault ground motions during Chi-Chi earthquake

脉冲类型	台站及分量	断层距(km)	场地类别	PGA(g)	PGV($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	PGD(cm)
向前方向性效应	TCU054-EW	6.64	C	0.146	45.96	121.47
	TCU082-EW	4.47	C	0.226	51.54	152.35
	TCU102-EW	1.19	C	0.304	87.16	163.13
永久位移效应	TCU052-EW	1.84	C	0.356	182.96	506.73
	TCU065-EW	2.49	C	0.789	132.29	194.31
	TCU067-EW	1.11	C	0.499	97.26	186.16
无速度脉冲效应	TCU071-EW	4.88	C	0.528	69.83	170.6
	TCU072-EW	7.87	C	0.476	85.51	223.86
	TCU078-EW	8.27	C	0.442	42.14	98.88

2 近断层地震动对隔震桥梁地震损伤影响

以全联采用板式橡胶支座的设计方案 1 和全联采用铅芯橡胶支座的设计方案 2 为例, 研究了近断层地震动作用下隔震桥梁地震损伤性能。桥梁损伤评价指标主要考虑为: (1) 桥墩损伤, 包括桥墩侧移角、墩底截面曲率延性系数和墩顶残余侧移角(以及核心混凝土最大压应变、钢筋最大拉应变, 限于篇幅, 未给出图); (2) 支座反应: 取支座最大位移; (3) 梁体相对桥墩的残留位移, 以支座残余剪应变描述。说明一点, 墩顶残余侧移角和梁体相对桥墩的残留位移指标对确定桥梁震后可修复性及维持震时应急通行功能具有较大

价值。采用 3 条地震动计算平均结果作为隔震桥梁地震损伤的讨论依据。

图 2 ~ 图 4 给出了采用板式橡胶支座和铅芯橡胶支座(方案 1 和 2)时,桥梁在不同脉冲类型的近断层地震动作用下桥墩损伤指标比较。可以看出,与无速度脉冲地震动相比,不论采用何种设计方案,脉冲型近断层地震动作用下桥墩损伤都远远加大。从桥墩最大侧移角和塑性铰区曲率延性系数来看,采用铅芯橡胶支座的桥梁,向前方向性效应的作用比永久位移效应更为显著;而采用板式橡胶支座桥梁,向前方向性效应对高墩的影响比永久位移效应明显,矮墩情况则反之。由图 5 所示桥墩残余侧移角可以看出,永久位移效应将比向前方向性效应产生更大的残余位移角,尽管对铅芯橡胶支座桥梁向前方向性效应使桥墩产生了更大的侧移反应。

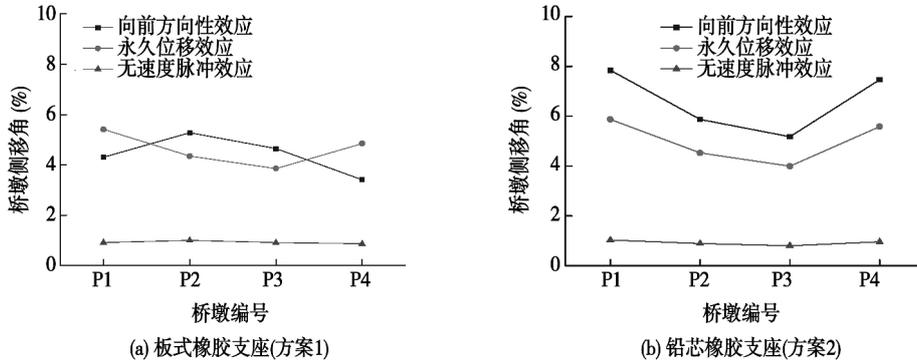


图 2 桥墩侧移角

Fig. 2 Drift ratio of piers

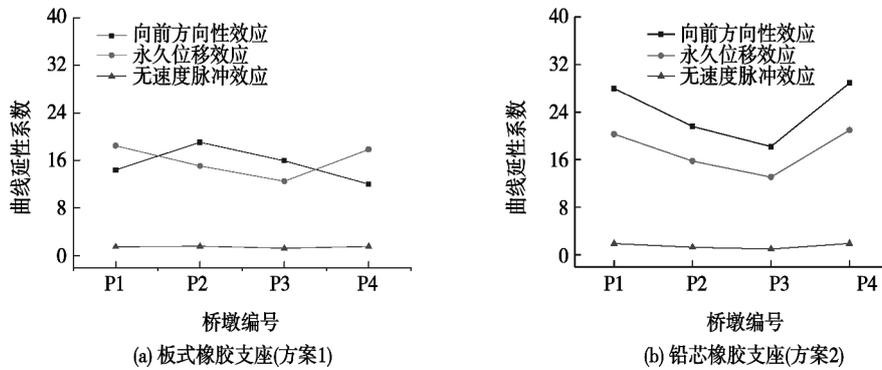


图 3 曲率延性系数

Fig. 3 Curvature ductility coefficient

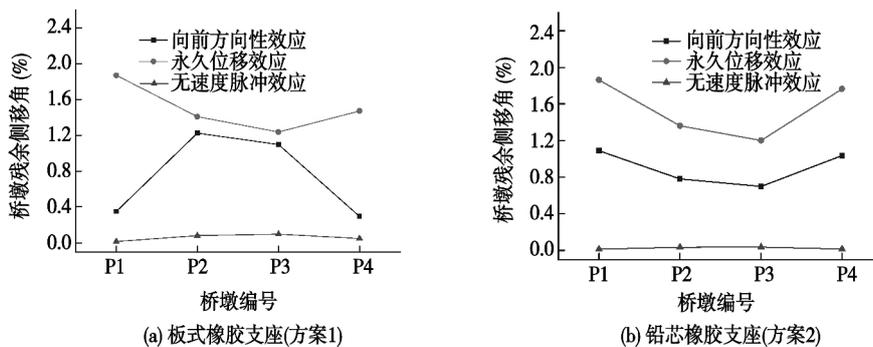


图 4 桥墩残余侧移角

Fig. 4 Residual drift ratio of piers

图 5 给出了板式橡胶支座和铅芯橡胶支座的残余剪应变,定义为支座震后相对初始位置的残余位移与支座高度之比,在物理上可理解为墩梁震后的相对残留位移,可见板式橡胶支座的残余剪应变明显地大于铅

芯橡胶支座。对板式橡胶支座,在较矮墩处及向前方向性效应近断层地震动作用下其将产生更大的残余位移,即墩梁震后将留下更大的位移,而铅芯橡胶支座这方面受永久位移效应影响更显著。

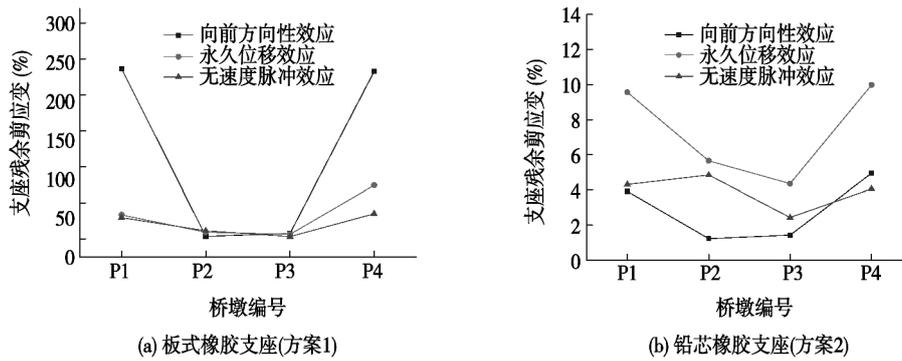


图5 支座残余剪应变

Fig. 5 Residual shear strain of bearings

3 不同隔震设计方案桥梁损伤比较

图6~图8比较了不同脉冲类型近断层地震动作用下3种隔震设计(支座布置)方案桥梁的地震损伤性能。从桥墩侧移角、墩底截面曲率延性系数、桥墩残余侧移角(以及核心混凝土最大压应变、钢筋最大拉应变)等指标看,总体上可认为:全联采用铅芯橡胶支座桥梁(方案2)和仅在较矮墩处设置铅芯支座桥梁(方案3)在近断层地震动作用下桥墩的损伤性能很是接近,且基本都大于板式橡胶支座桥梁。进一步从图9支座残余剪应变来看,震后墩梁残留位移在高墩处会有所增大,但未超过支座厚度的30%,可以接受。板式橡胶支座和铅芯橡胶支座山区桥梁地震损伤性能更详细的比较可参考文献[18],不再赘述。

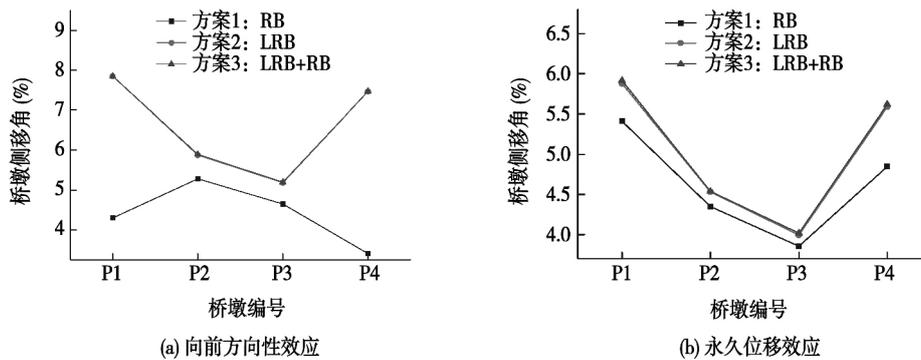


图6 桥墩侧移角

Fig. 6 Drift ratio of piers

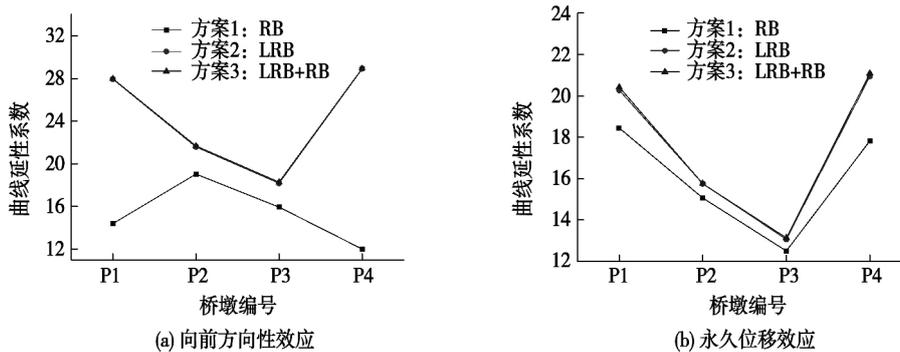


图7 曲率延性系数

Fig. 7 Curvature ductility coefficient

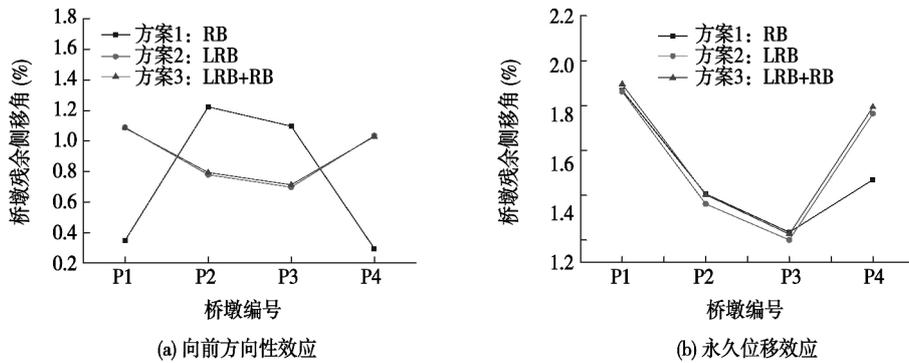


图 8 桥墩残余侧移角

Fig. 8 Residual drift ratio of piers

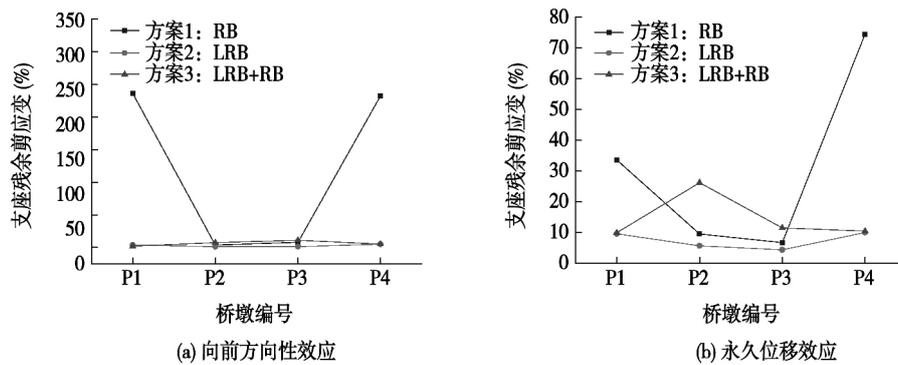


图 9 支座残余剪应变

Fig. 9 Residual shear strain of bearings

4 结论

针对全联采用板式橡胶支座、全联采用铅芯橡胶支座和较矮墩处采用铅芯橡胶支座而较高墩处采用板式橡胶支座的 3 种山区隔震桥梁设计方案,研究了近断层地震动的向前方向性效应、永久位移效应对其地震损伤影响问题,以及分析针对山区桥梁特点提出的较矮墩处采用铅芯橡胶支座而较高墩处采用板式橡胶支座的隔震方案的可行性。限于研究的诸多局限性,初步获得如下认识:

(1) 从反映桥墩损伤的最大侧移角、墩底截面曲率延性系数、核心混凝土最大压应变、钢筋最大拉应变指标看,向前方向性效应对铅芯橡胶支座隔震桥梁影响要大;而从反映桥梁震后可修性及维持应急交通功能的桥墩残余位移角和支座残余剪应变指标看,永久位移效应对铅芯橡胶支座隔震桥梁的影响更大些。

(2) 对山区墩高差异较大的连续桥梁,在较矮墩处采用铅芯橡胶支座和较高墩处采用板式橡胶支座是较为合适的隔震设计方案。

致谢: 大连理工大学工程力学系杨迪雄教授提供了集集地震近断层地震动记录,谨致谢意。

参考文献:

[1] 王东升, 杨海红, 王国新. 考虑邻梁碰撞的多跨长筒支梁桥落梁震害分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 54-59.
WANG Dongsheng, YANG Haihong, WANG Guoxin. Seismic analysis of girders falling down in multi-span long simply supported bridges with adjacent pounding effects[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 54-59. (in Chinese)

[2] 王东升, 孙治国, 郭迅, 等. 汶川地震桥梁震害经验及抗震研究若干新进展[J]. 公路交通科技, 2011, 28(10): 44-53.
WANG Dongsheng, SUN Zhiguo, GUO Xun, et al. Lessons learned from wenchuan seismic damages and recent research on seismic design of highway bridges[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(10): 44-53. (in Chinese)

[3] Lee GC, Kitane Y, Buckle IG. Literature review of the observed performance of seismically isolated bridges[R]. Research Progress and Accomplishments, 2001: 51-62, New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.

- [4] Bessason B, Hafliðason E. Recorded and numerical strong motion response of a base-isolation bridge [J]. *Earthquake Spectra* 2004, 20(2): 309-32.
- [5] Jónsson MH, Bessason B, Hafliðason E. Earthquake response of a base-isolated bridge subjected to strong near-fault ground motion [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(6): 447-455.
- [6] Liao WI, Loh CH, Lee BH. Comparison of dynamic response of isolated and non-isolated continuous girder bridges subjected to near-fault ground motion [J]. *Engineering Structures*. 2004: 2173-2183.
- [7] 江辉, 朱晞. 近断层强震速度脉冲效应及连续梁桥减隔震特性分析 [J]. *中国安全科学学报* 2003, 13(12): 57-62.
JIANG Hui, ZHU Xi. Velocity pulse effects of near-fault earthquakes and isolation characteristic of continuous girder bridge [J]. *China Safety Science Journal* 2003, 13(12): 57-62. (in Chinese)
- [8] 魏红一, 遯宗典, 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 Hongyi, LU Zongdian, WANG Zhiqiang. Isolation characteristic analysis of simple supported bridge to near fault ground motions [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science* 2010, 38(1): 39-44. (in Chinese)
- [9] Halldórsson B, Ólafsson S, Sigbjörnsson R. A fast and efficient simulation of the far-fault and near-fault earthquake ground motions associated with the June 17 and 21, 2000, earthquakes in south Iceland [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2007(11): 343-370.
- [10] 郭红锋, 宁响亮, 谭平, 等. 近断层地震动作用下桥梁结构的组合隔震分析 [J]. *地震工程与工程振动* 2011, 31(5): 172-177.
GUO Hongfeng, NING Xiangliang, TAN Ping, et al. Hybrid isolation analysis of bridge structure excited by near-fault ground motion [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2011, 31(5): 172-177. (in Chinese)
- [11] Dicleli M. Supplemental elastic stiffness to reduce isolator displacements for seismic-isolated bridges in near-fault zones [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(5): 763-775.
- [12] Karalar M, Padgett J E, Dicleli M. Parametric analysis of optimum isolator properties for bridges susceptible to near-fault ground motions [J]. *Engineering Structures*, 2012(40): 276-287.
- [13] YANG Dixiong, PAN Jianwei, LI Gang. Non-structure-specific intensity measure parameters and characteristic period of near-fault ground motions [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2009(38): 1257-1280.
- [14] YANG Dixiong, PAN Jianwei, LI Gang. Interstory drift ratio of building structures subjected to near-fault ground motions based on generalized drift spectral analysis [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010(30): 1182-1197.
- [15] 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.
- [16] Sakai J, Kawashima K. Unloading and reloading stress-strain model for confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(1): 112-122.
- [17] Sakai J, Kawashima K. Modification of the Giuffrè, Menegotto and Pinto model for unloading and reloading paths with small strain variations [J]. *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, 2003, No. 738/I-64: 159-169.
- [18] 石岩, 王进, 王东升, 等. 采用板式橡胶和铅芯橡胶支座的山区桥梁地震损伤评价 [J]. *地震工程与工程振动* 录用.
SHI Yan, WANG Jin, WANG Dongsheng, et al. Seismic damage evaluation of bridges with RBs and LRBs in mountainous area [J]. accepted. (in Chinese)