

石岩,李军,秦洪果,等.减隔震桥梁设计方法及抗震性能研究综述[J].地震工程学报,2019,41(5):1121-1132.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1121

SHI Yan, LI Jun, QIN Hongguo, et al. Review on Design Methods and Seismic Performances of Seismically Isolated Bridges[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1121-1132. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1121

减隔震桥梁设计方法及抗震性能研究综述

石岩^{1,2}, 李军¹, 秦洪果¹, 钟正午¹, 王玉玲¹

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 桥梁作为交通系统中的生命线工程,其抗震性能问题尤为重要。桥梁减隔震技术主要通过减隔震装置来降低结构的地震损伤,目前已发展成为提高强震区桥梁抗震能力的重要措施。为促进减隔震技术在中国桥梁工程领域的进一步发展,首先总结减隔震桥梁的设计方法,归纳其地震反应和震害情况,对采用不同减隔震装置桥梁的非线性动力性能、减隔震效果、地震随机响应、易损性及性能优化方法等研究情况进行梳理;其次,概述减隔震技术在斜交桥、曲线桥及铁路桥梁中的应用情况与研究进展,并介绍新型韧性抗震设计理念在桥梁工程领域中的应用情况和发展前景;最后,总结减隔震桥梁的试验研究情况,指出目前减隔震桥梁研究中的不足和发展趋势。

关键词: 桥梁工程; 减隔震桥梁; 抗震设计方法; 地震反应; 韧性

中图分类号: U442.5⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1121-12

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1121

Review on Design Methods and Seismic Performances of Seismically Isolated Bridges

SHI Yan^{1,2}, LI Jun¹, QIN Hongguo¹, ZHONG Zhengwu¹, WANG Yuling¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: As a lifeline project in transportation systems, the seismic performance of bridges is particularly important. Seismic isolation technology is mainly used to reduce structural seismic damages through seismic isolation devices, and it has become an important measure to improve the seismic capacity of bridges in strong earthquake areas. To promote the further development of seismic isolation technology in the field of bridge engineering in China, first, the design methods of seismic isolation bridges are summarized; the seismic response and damage of seismic isolation bridges are generalized; and the studies on the nonlinear dynamic performance, seismic isolation effect, seismic random response, vulnerability, and performance optimization methods of bridges with different seismic isolation devices are examined. Second, the application and research progress of seismic isolation technology in skewed bridges, curved bridges, and railway bridges are outlined. According to the relevant research results of the seismic performance of bridges, the ap-

收稿日期: 2018-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768042, 51868048); 红柳优秀青年人才资助计划(04-061810)

第一作者简介: 石岩(1985-), 男, 甘肃通渭人, 博士, 副教授, 从事桥梁抗震研究。E-mail: syky86@163.com。

通信作者: 秦洪果(1983-), 女, 河北南宫人, 博士生, 工程师, 从事桥梁抗震研究。E-mail: qinhg27@163.com。

plication and development prospects of the new post-earthquake resilience design concept in the field of bridge engineering are introduced. Finally, the experimental research on the seismic isolation bridge is summarized, and the shortages and development tendencies of existing seismically isolated bridges are pointed out.

Keywords: bridge engineering; seismically isolated bridge; seismic design method; seismic response; resilience

0 引言

地震是对人类生产活动有着重大影响的自然灾害之一,土木工程结构是地震灾害的最主要载体,通过技术创新提升工程结构的抗震性能也是“基于性能的地震工程”的最重要支撑。在过去二三十年间,隔震技术和耗能减震技术在全世界得以推广应用并成为地震工程领域技术创新的成功典范^[1-5]。20世纪70年代,在日本、美国、意大利等国家率先将减隔震技术应用于桥梁工程;20世纪末,减隔震技术在国内桥梁工程中开始推广使用。2008年汶川大地震以后,我国大震频发,国内工程界进一步加强了对减隔震技术的关注。尤其是2013年芦山地震中,采用普通隔震橡胶支座和铅芯橡胶支座的芦山县人民医院门诊大楼表现良好^[6],给我国减隔震技术的推广和发展带来了更大的信心。发展至今,已经有近6 500幢减隔震建筑、1 350座减隔震桥梁。为促进减隔震技术在中国桥梁工程领域的进一步发展,本文总结了减隔震桥梁的设计方法,统计了15次地震中18座减隔震桥梁的地震反应和震害情况,对采用各类减隔震装置桥梁的减隔震效果及其非线性地震反应研究情况进行了梳理,对减隔震桥梁的地震随机响应分析、地震易损性分析以及减隔震系统的性能优化设计做了归纳与分析,概述了斜交桥与曲线桥梁中减隔震技术的应用与研究现状,指出了斜交桥减隔震研究中存在的主要问题,并分析了减隔震铁路桥梁的实际工程应用及其抗震性能研究,特别介绍了新型韧性抗震设计理念在桥梁工程领域的应用情况和发展前景,总结了减隔震桥梁的试验研究情况,进一步指出了目前减隔震桥梁研究的不足和发展趋势。

1 减隔震桥梁设计方法

1989年美国Loma Prieta地震后,为了控制结构破坏所造成的巨大经济损失,基于性能的抗震设计理论(Performance-based Seismic Design, PBSD)逐渐形成。基于性能的抗震设计方法包括:基于位移的设计方法(Displacement-based Seismic De-

sign, DBSD)、基于可靠度的设计方法等。基于位移的设计方法用位移作为设计过程的控制指标,针对不同地震设防水准,制定相应的目标位移,并且通过设计使得结构在指定地震水准下达到预先设定的目标位移,从而实现对结构地震行为的控制。20世纪90年代,Kowalsky等^[7]最早给出了基于位移的抗震设计方法的基本思路,但主要针对传统非减隔震桥梁。随着减隔震技术的发展及其应用的增多,减隔震桥梁的设计方法越来越受到重视;Calvi等^[8]最早提出了隔震桥梁的概念设计和基于位移的抗震设计方法。Dolce等^[9]基于能力谱法提出了一个设计过程,但其设计目标只是针对隔震支座的最大位移能力,同时也考虑不同类型的减隔震装置,但仅针对于单个桥墩-支座体系。张永亮等^[10]采用非线性时程反应分析法研究BRB(Buckling-Restrained Braces, BRB)的设置方式及参数取值对桥梁地震反应的影响规律,揭示了BRB在双柱式桥墩中优良的耗能减震作用。Jara等^[11]给出了采用铅芯橡胶支座LRB(Lead-Rubber Bearing, LRB)桥梁的抗震设计过程,但整个过程着重关注LRB的设计及等效阻尼比的计算,且只适合于桥墩高度规则的桥梁。Cardone等^[12]通过“加速度-位移反应谱”(Acceleration-Displacement Response Spectrum, ADRS)来估计结构的目标位移,给出了采用不同形式隔震支座的新建桥梁和旧桥加固的抗震设计方法。李帅等^[13]基于简化的两自由度分析模型,发展了设置钢、FRP(Fiber-Reinforced Polymer, FRP)或SMA(Shape Memory Alloy, SMA)拉索限位器减隔震桥梁的基于位移设计方法并验证了其有效性。在国内学者中,黄建文等^[14]最早发展了减隔震桥梁的抗震设计方法,王常峰等^[15]基于双线性系统的最大位移与弹性系统的最大位移关系,提出了一种适于隔震桥梁设计的非迭代计算方法。

2008年汶川地震中,强震区的公路桥梁遭到严重破坏,这些桥梁大都为狭义上的非减隔震桥梁。之后,颁布执行的《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)、《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ

166-2011)对减隔震技术的重视明显增强,相继纳入了减隔震技术。《公路桥梁铅芯隔震橡胶支座》(JT/T 822-2011)、《公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座》(JT/T 842-2012)、《公路桥梁摩擦摆式减隔震支座》(JT 852-2013)等不同的减隔震装置(支座)标准也随之出台。当前,我国已经有 1 000 多座的减隔震桥梁,抗震设计和减隔震设计便成为桥梁工程设计中的一项重要工作。现有文献[7-11]给出的减隔震桥梁设计方法都是针对国外桥梁和规范,其过程也需设计具体的支座。但是,我国减隔震支座一般为参数标准化的工业化产品,若每个工程都设计具体支座将极不利于减隔震技术的应用、发展。因此,石岩等^[16]结合中国的抗震设计规范和减隔震支座技术标准,提出一种适用于新建减隔震桥梁设计和既有桥梁减隔震加固设计的基于位移抗震设计方法。另外,隔震支座力学特性随使用时间的推移和环境改变而发生变化,时效与环境因素(温度、老化、速率、行程、污染、扰动等)对隔震支座力学特性的影响较大,研究表明^[17]:时效与环境因素对隔震桥梁地震反应的影响较大,对于采用铅芯、高阻尼和超高阻

尼橡胶支座的隔震桥梁,不考虑其影响则可能低估较低墩的 10%、50%和 100%及以上的墩顶位移需求。随着国内桥梁工程界对桥梁减隔震技术的推广,在减隔震桥梁设计过程中引入时效与环境因素,并结合我国隔震橡胶支座的特点进行力学特性的修正显得至关重要。

2 减隔震桥梁地震反应与抗震性能研究

2.1 隔震桥梁地震反应研究

2.1.1 减隔震桥梁的实际地震反应特点

减隔震技术在世界范围内的桥梁工程中已广泛应用,也有数十座经受过实际地震的考验。表 1 给出了 18 座经受过地震的减隔震桥梁的地震反应和震害情况。可以看出:(1)对于设计合理的减隔震桥梁,减隔震装置能较好地改善桥梁结构的抗震性能、提高其抗震能力,是减小桥梁地震灾害的一种有效方式;(2)减隔震桥梁的地震响应对边界约束比较敏感,如 Bai-Ho 桥、Yama-age 桥和 Sierra Point 立交桥^[18],故需在减隔震设计中重视构造细节,注意支座变形能力和设计位移与间隙大小的合理匹配,模

表 1 隔震桥梁在地震中的震害情况

Table 1 Earthquake damage of isolated bridges during earthquake

桥名	桥型与支座	地震事件	震害情况
Te Teko 桥	桥墩上铅芯橡胶支座,桥台处板式橡胶支座	1987 年新西兰艾吉科母地震	桥梁损害轻微,上部结构移位
Sierra Point 立交桥	斜交简支梁桥,铅芯橡胶支座	1989 年美国 Loma Prieta 地震	隔震支座的变形受限,上部结构的地震反应被显著放大
Miyagawa 桥	连续钢梁桥,铅芯橡胶支座	1991 年日本 4.9 级地震	支座未屈服
Eel River 桥	简支钢桁架,铅芯橡胶隔震支座	1992 年美国加州地震	桥梁震害很轻
Yama-age 桥	高阻尼橡胶支座	1994 年日本 Hokkaido-toho-oki 地震	支座未进入非线性状态
Maruki-bashi 桥	预应力混凝土梁桥,铅芯橡胶支座	1994 年日本 Sanriku-haruka-oki 地震	支座进入弹塑性状态
Matsunohama 桥	铅芯橡胶支座	1995 年日本阪神大地震	支座达到最大屈服位移
Bolu 高架桥	混凝土连续箱梁桥,滑动支座	1999 年土耳其西部迪兹杰大地震	主梁移位较大,隔震支座几乎完全失效
Bai-Ho 桥	变截面连续梁,铅芯橡胶支座	1999 年台湾集集地震	桥梁完好,但由于桥台侧向挡块约束了主梁的横向运动,其加速度被放大 2.5 倍
Thjorsa 河桥	主跨为钢桁拱,铅芯橡胶支座	2000 年冰岛南部地震	桥梁支座未发生严重损坏
南疆布谷孜大桥	简支梁桥,铅芯橡胶支座	2003 年中国新疆伽师地震	桥梁完好
Oseyrar 桥	混凝土连续梁桥,铅芯橡胶支座	2008 年冰岛南部地震	主梁移位较大,挡块严重破碎,桥台翼墙也严重破坏,但上部结构和支座并未发生严重破坏
Marga-Marga 桥	连续梁桥,橡胶隔震支座	2010 年智利大地震	桥梁完好,未发生破坏
Tobu 高架桥	橡胶支座	2011 年东日本大地震	支座破坏严重,出现橡胶层断裂、分层钢板剥离现象
Rifu 高架桥	橡胶支座	2011 年东日本大地震	支座破坏较严重,且主要集中在伸缩缝处
Asahi 高架桥	铅芯橡胶支座	2011 年东日本大地震	桥台处支座破坏
Kinko JCT 高架桥	板式橡胶支座	2011 年东日本大地震	挡块被毁,板式橡胶支座移位
Okirihata 桥	连续钢梁桥,橡胶支座	2016 年日本熊本地震	桥台处的橡胶支座全部破坏,桥墩被破坏,支座和桥墩的破坏导致桥面向横桥向偏移

拟计算时需重视边界条件的模拟方法,以便正确衡量结构的反应;(3)近断层地震动通常具有速度脉冲强、能量高、脉冲周期长等特点,使得输入结构的地震能量难以在短时间内被减隔震装置耗散,其减震效果可能因此受限,减隔震装置的位移能力也要求更高,如土耳其 Bolu 高架桥^[19]的减震系统几乎尽毁,但桥墩并没有发生严重损伤,也没有发生落梁,其严重破坏主要是由于设计缺陷和异常强烈的地震动;尽管临近或穿过断层的桥梁减隔震仍有诸多挑战,但只要设计合理还是有信心实现减隔震目标,如冰岛的 Thjorsa River 桥和 Oseyrar 桥^[20]都经历过强烈的近断层地震动,但它们所表现出的隔震和减震性能都比较理想;另外,不是所有的跨断层桥梁都需要进行针对性的抗震设防,而应就断层活动性、破裂特性等因素进行综合考量,合理制定设防策略^[21-22]。

2.1.2 采用各类减隔震装置桥梁的非线性动力性能及减隔震效果

20世纪八九十年代,国外学者开始对桥梁减隔震技术及其非线性地震反应进行研究,21世纪初有了比较系统的认识。Tsopelas等^[23]对采用E型钢阻尼器的隔震桥梁进行研究,发现隔震装置对脉冲型地震动特别敏感。Wilde等^[24]将形状记忆合金(SMA)和板式橡胶支座结合起来用于减隔震桥梁,SMA可以控制橡胶支座的位移同时增加耗能。Jangid^[25]研究了水平双向耦合的LRB隔震桥梁的力学特性,讨论了桥墩柔性、支座刚度和屈服强度等重要因素的影响,发现:双向耦合对隔震桥梁的地震反应影响较大,忽略耦合会低估支座的其最大位移。Kunde等^[26]研究了采用高阻尼橡胶支座、铅芯橡胶支座和摩擦摆支座隔震桥梁在双向实测地震记录下的地震反应及桥墩和主梁柔性的影响,通过不同数值模型的精确性和有效性验证其参数,提出的单自由度系统可获得较好的模拟结果。台湾学者Lin等^[27]提出了采用磁流变阻尼器和滚动摆的混合隔震体系,分析表明该隔震体系可以有效减小桥梁的加速度。杨喜文等^[28]将摩擦支座并联阻尼器和双曲面球型减隔震支座两种减隔震方案应用 in 多孔大跨度连续梁桥,表明:两种减震方案均可减小固定墩的地震反应,采用双曲面球型减隔震支座效果更优,支座摩擦力和阻尼器阻尼力存在 90° 的相位差是摩擦支座并联阻尼器方案减震效果不佳的主要原因。

2.1.3 隔震桥梁地震随机响应、易损性及性能优化

随机振动法用于结构抗震设计理论上具有一定的优越性,可以从概率意义上对反应进行描述,所得到的反应统计值可用于定量评价结构的动力可靠性。Ates等^[29]研究了FPS(Friction Pendulum Systems,FPS)隔震桥梁在空间变异性地震动下(空间不相干效应、行波效应和局部场地效应)的随机响应,表明FPS对随机响应影响较大,局部场地效应对隔震桥梁的随机响应具有重要的影响。Marano等^[30]基于建立了Bouc-Wen模型的双自由度模型对隔震桥梁进行随机响应参数分析,证明隔震装置通过改变自振周期和减小输入能力来减小地震响应。Jangid^[31]对比了FPS和LRB隔震桥梁非平稳和平稳随机地震响应的差异,研究了隔震周期、频谱特性和地震强度对随机地震响应的影响,提出了支座特性与随机响应的解析表达式供减隔震优化设计。Li^[32]研究了采用橡胶支座和阻尼器的隔震桥梁主要参数的随机响应敏感性,为隔震系统设计优化。江宜城等^[33]研究了LRB隔震桥梁考虑地震动空间变异性的随机响应,表明对于LRB隔震大跨连续梁桥,地震动空间变异性不容忽视,一致激励会对结构产生不安全的估计。地震易损性分析可以比较全面地评估结构的抗震性能,目前主要针对于传统非隔震桥梁的地震易损性研究较多,减隔震桥梁还相对较少。Karim等^[34]提出一种简化的易损性分析方法,该方法对日本及类似结构特征的桥梁非常有效。Zhang等^[35]基于易损性分析对隔震桥梁隔震装置进行优化设计,给出了优化参数。Jara等^[36]认为断层类型对桥梁的易损性影响显著。Siqueira等^[37]通过试验和数值分析对加拿大东部魁北克省采用隔震技术加固的桥梁进行易损性研究。唐永久等^[38]通过宽界限法建立桥梁系统的地震易损性曲线,提出了新的平均损伤水平值计算公式并结合易损性曲线评估了连续梁桥的震后通行能力。总体来看,国外学者对隔震桥梁地震随机响应、易损性分析的研究较多,通过随机响应分析、易损性分析实现对减隔震系统的优化设计,而国内研究主要集中在建筑结构领域,在桥梁结构领域相对较少,故尚有较大的可研究空间。

2.2 减隔震斜交桥研究

道路选线规划时为满足地形和线路需要,许多桥梁必须横跨既有桥梁、平面道路及山谷河道,因此桥墩的布置方向往往无法与桥轴方向一致,这种支

承线方向与桥轴方向不垂直的桥梁即称为“斜交桥”。斜交桥由于其不规则的结构形式使其受力规律与规则桥梁相比具有特殊性和复杂性,在地震作用下梁体的平动与转动存在弯扭耦合效应,导致结构动力响应分析复杂且较为难以预测^[39]。在历次破坏性地震中,斜交桥的震害都比较突出:1994 年美国北岭地震中的 Gavin 峡谷立交桥也发生落梁^[40];2008 年汶川大地震中,南坝大桥、映秀岷江大桥、兴文坪大桥、渔子溪 1 号桥等斜交桥均遭受了不同程度的破坏^[41];2010 年智利地震中斜交桥的破坏亦非常严重^[42]。纵观斜交桥的震害情况,主要表现为落梁、梁体平面内旋转并与桥台、挡块的碰撞破坏。目前,对斜交桥的研究基本都是针对于非隔震斜交桥梁,在斜交桥中采用减隔震技术也非常重要,如美国的 Sierra Point 立交桥为隔震斜交桥,在 1989 年的 Loma Prieta 地震中表现良好^[4]。石岩等^[43]以 1 座采用铅芯橡胶隔震支座的斜交连续梁桥为例,分析了桥墩位移、墩底反力、碰撞力及梁体旋转度与斜交桥斜度的关系及梁端碰撞力分布规律,还讨论了隔震斜交桥梁地震反应与环境温度及斜度的关系。张智^[44]研究了对斜交桥的减隔震措施进行了较多研究,探索了铅芯橡胶支座、橡胶缓冲材料与弹性撞索组合、橡胶缓冲材料与线性黏滞阻尼器组合等措施对斜交桥地震效应的减震效果。姚凯等^[45]研究了板式橡胶支座的设计参数对斜交桥地震响应和抗震性能的影响。斜交桥损伤地震控制和减隔震问题的研究尚处于发展阶段,需关注的主要问题有:(1)选择合理的减隔震装置,该装置能够适应桥面旋转效应引起支座和桥墩的扭转等;(2)结合性能抗震设计理论,发展考虑斜交桥特殊性的抗震设计方法;(3)分析中建立合理的计算模型,获取斜交桥的复杂地震反应和破坏机理,适当考虑宽跨比、(端)横梁刚度、台后填土、桩土作用、时效及环境等因素对桥墩内力和变形、梁体旋转、碰撞效应等的影响。

2.3 减隔震曲线桥研究

曲线桥能很好地克服地形、地物的限制,满足路线整体线形的连续性,建筑上具有平顺、流畅的线条,因此在国内城市高架桥、立交桥以及高速公路中得到了广泛应用。但曲线梁桥由于其平面不规则性导致结构在地震激励下产生弯扭耦合效应,使得隔震曲线梁桥的地震响应更加复杂^[46]。在 2008 年汶川大地震中,百花大桥、回澜立交匝道桥 2 座小半

径曲线梁桥(通常认为 $R < 100$ m)发生垮塌、桥墩毁损等严重破坏,受到学者们广泛关注^[47-48]。曲线梁桥桥体形复杂,采用常规的拟静力试验、拟动力试验和振动台试验开展整体结构地震倒塌研究都将面临较大困难,而近年快速发展起来的基于物理试验-数值分析混合模拟技术的子结构拟动力试验则提供了很好的解决方案。周绪红等^[49]认为铅芯橡胶支座具有很好的减隔震效果,多维地震荷载作用下,曲线箱梁桥的受力更为不利。陈树刚等^[50]研究了曲率半径变化对曲线梁桥黏滞阻尼器减震效果的影响,为黏滞阻尼器在不同半径曲线梁桥上的应用提供建议。夏修身等^[51]发现输入地震动维数引起的耦合效应对隔震曲线桥梁的地震反应有重要影响。王煦等^[52]研究了采用直梁法、梁格法和多段直梁法建立各种斜交桥分析模型的适用范围,发现碰撞可增大装有 FPS 支座的曲线桥中跨桥墩地震响应,而对边跨桥墩地震响应几乎无影响。Julian 等^[53]研究了隔震和非隔震曲线高架桥采用拉索限位器时的抗震性能,表明加设适当的限位器可减小伸缩缝间的碰撞力,降低落梁的可能性,但限位器参数的确定应考虑支座的特性和能力。Ates 等^[54]采用时程分析和反应谱分析研究了设置双曲面摩擦支座曲线桥梁考虑土-结构相互作用时的地震反应,证明隔震技术可以明显减低桥面板的地震反应。橡胶类隔震支座在剪压力学特性都已经有了较为系统的研究,但由于曲线桥梁独特的结构特点,其部分减隔震支座在运营或地震作用下可能处于受拉状态。在拉伸作用下支座的橡胶层内部可能会产生空腔,从而发生脱空现象,脱空后支座的刚度等力学特性将发生较大变化。2011 年日本 3·11 地震中,Tobu(东武)高架桥、Rifu(利府町)高架桥上的叠层橡胶发生了严重破坏,支座受拉是其破坏的原因之一^[55]。目前对支座受拉脱空问题的研究较少,Kumar 等^[56]在拉伸加载历程对脱空的影响及脱空对临界屈曲载荷能力的影响等方面进行了理论和试验研究。

2.4 铁路桥梁减隔震技术研究

减隔震技术通常通过变形耗能和柔性隔震来减小地震作用,而铁路桥梁往往对下部结构刚度的要求较高,使得减隔震技术在铁路桥梁中的应用与公路桥梁差异较大。实际工程中刚度较大的支座和纯耗能减震装置也有采用,如南京江心洲大桥上采用 E 型钢阻尼支座和 E 型钢阻尼器^[57]。理论研究上,杨风利等^[58]在铁路桥梁中采用铅芯橡胶支座,分析

表明具有较好的减震效果。陈兴冲等^[59]对比研究了采用铅芯橡胶支座、盆式橡胶支座和双曲面支座时的减震效果,发现双曲面支座的减震效果较好、自恢复能力强,但建议铁路桥梁采用减震装置时须考虑列车正常行车的安全和舒适性,其适用性得到充分验证后方可使用。温留汉·黑沙等^[60]认为铁路桥梁采用常规隔震设计方法的铅芯橡胶支座在横桥向的初始刚度和屈服强度均不能满足要求,设置限位器后各项指标均满足列车运行安全性和平稳性要求。张永亮等^[61]针对高速铁路大跨连续梁桥的结构特点,结合三水准的抗震设防目标,给出了各水准下桥梁的抗震验算指标。杨华平等^[62]采用快速非线性分析方法分析对比了摩擦摆、阻尼器、速度锁定器等减隔震方案在各种装置参数下的减震效率,研究了适用于大跨铁路钢桁连续梁桥的减隔震方案及合理优化参数。夏修身^[63]将摩擦摆支座应用在铁路连续梁拱组合桥;谢旭等^[64]将摩擦摆支座和 E 型钢支座应用在铁路桥梁并考虑轨道约束对地震反应的影响。鉴于铁路桥梁的特殊性,特别是快速发展中的高速铁路桥梁,采用“功能分离”支座理念是一种比较有效的方法,在满足正常使用要求的同时能达到减震效果,据此孟兮等^[65]提出了钢棒式减震榀,通过数值分析和试验研究表明可以取得较好的减震效果;针对近断层地震动显著放大减震装置的位移效应,石岩等^[66]提出了盆式橡胶支座+减震榀+拉索限位器的组合减震系统及性能设计方法,试图解决高速铁路桥梁的减隔震及临近断层问题。可以看出:(1)在地震反应理论分析时,橡胶类隔震支座(LRB、HDRB 等)亦然适用于铁路桥梁,但是否能达到正常使用要求,是否考虑列车正常行车的安全性和舒适性还有待进一步检验,如南疆铁路布谷孜铁路桥采用了铅芯橡胶支座,在使用过程中支座横向变形明显,影响了列车的正常运营;(2)控制关键构件的地震损伤程度是铁路桥梁抗震一个重要方面,但确保震后能尽快恢复通车显得更为关键,这对桥墩和减震系统的损伤程度和可恢复功能提出了更高要求;当前关于桥梁自复位性能的研究主要集中在桥墩,而铁路桥梁多采用重力式桥墩,其刚度和强度都较高,地震中往往需要保持弹性,这样铁路减隔震桥梁的变形、减震和自复位特性可能主要集中在墩梁之间。减隔震装置中,摩擦摆支座具有较好的减隔震效果和自复位能力,但其变形时的竖向位移不可忽略^[67],尤其是铁路桥梁对轨道平整性要求较

高;这样,基于“功能分离”设计理念发展的减震和自复位系统可能是一种较好的选择,台湾高速铁路桥梁中采用的“支座+限位剪力键”^[68]支承体系就是例证。

2.5 新型韧性桥梁研究

我国桥梁抗震设计的基本准则为“小震不坏、中震可修、大震不倒”,但按照基于位移与延性的传统设计方法建造的桥梁,在历次大地震中主梁及桥墩的残余位移过大,其地震损伤得不到有效的控制和修复,而桥墩残余位移是衡量震后桥梁韧性的主要指标,故对于桥墩的损伤控制尤为重要。在此背景下,基于新型韧性抗震设计理念的减隔震桥梁研究成为目前桥梁工程领域的热点课题。自 Priestley 等^[69]正式提出摇摆结构并应用于实际工程以来,摇摆及自复位结构在桥梁韧性抗震设计中得到了较好的应用与研究,表现出了良好的发展前景。El-Gawady 等^[70]基于拟静力试验开展了对自复位双柱墩抗震性能的研究;Guo 等^[71]基于已有研究成果,在传统摇摆及自复位桥墩中增设了耗能装置,并进行抗震性能试验研究,研究表明,配有耗能装置的摇摆桥墩在地震作用下产生的残余位移明显减小,具有很好的抗震性能。到目前为止,国外学者已经开展了摇摆及自复位结构的一系列研究,而我国在这一领域的研究甚少。相关研究表明,后张拉预应力和消能减震等多种技术的联合应用,以及基于地震可恢复性的桥梁减震隔震措施的研究,将是摇摆及自复位结构未来发展的重要方向^[72-73]。夏修身等^[74]基于某铁路高墩桥梁,用 2 个弹簧模拟桥墩的脱离摇摆并考虑限位钢筋的影响,研究了高墩自复位隔震机理,研究表明,脱离弹簧刚度、基础宽度等参数对高墩的地震响应影响很大。韩强等^[75]为发展具有损伤控制和自复位性能的摇摆结构体系,研究了自复位式双柱墩摇摆桥梁的抗震设计方法与实际工程应用效果。管仲国等^[76]为了研究可脱离式群桩基础桥梁的抗震性能,设计和制作了大比例尺的可脱离式群桩基础和普通群桩基础单墩桥梁试验模型。研究表明,可脱离式桩基础桥梁的残余位移仅为普通群桩基础的桥梁 10%,表明其具有较好的自复位性能。随着工程结构抗震设计理念的转变,桥梁结构的抗震设计目前也正从单纯的结构抗震、减震设计向震后桥梁功能快速恢复的性能设计转变,基于损伤控制和韧性的摇摆及自复位体系是新型桥梁研究的热点和重点^[77]。可以预见,“快速恢

复”是地震工程的下一个挑战,已经受到越来越多学者的关注和探索^[78]。将“自复位、低损伤、可控制及震后快速恢复”的设计理念运用于减隔震桥梁,通过对桥梁墩柱的损伤控制和韧性抗震设计,并结合减隔震装置来提高桥梁结构的整体抗震性能,对我国减隔震桥梁的应用与发展具有重要意义。另外,以结构生命周期中的整体可靠性设计为主体,以现代固体力学理论、结构动力灾变分析理论和耐久性设计理论、工程随机系统分析理论为支撑,以结构全生命周期中的服役功能可靠为目标的“第三代结构设计理论”,将是新型韧性桥梁研究的必然选择^[79]。

3 减隔震桥梁试验研究

隔震桥梁结构多采用振动台试验来研究隔震装置对桥梁地震力响应的影响及其隔震效果,并可以校核分析模型和计算结果的正确性等。Tsopelas等^[80]对采用FPS的隔震桥梁和相应的非隔震桥梁进行了试验研究,证明FPS可以明显提升桥梁的抗震性能,使得桥梁在各个激励工况都处于弹性。张俊平等^[81]以南疆铁路布谷孜大桥为工程背景,对分别采用传统支座、天然橡胶支座和滑板支座的桥梁隔震体系进行了振动台试验研究,分析了隔震构造、橡胶支座水平刚度、地震输入频谱特性和方向、地震烈度、桥墩高度和桥墩嵌固程度等因素对隔震效果的影响,同时揭示了隔震体系耗散地震能量输入的机理,并归纳了隔震桥梁的设计方法与设计流程。Iemura等^[82]对两座公路隔震桥梁进行了一系列的振动台试验,考察了水平和竖向激励下滑动复位隔震系统的抗震性能,并采用非线性模型分析了原型桥梁,认为简化的模型试验可以较准确地预测原型桥梁结构的地震反应。Sahasrabudhe等^[83]提出了半主动独立变刚度装置用于控制滑动隔震桥梁的地震反应,并通过试验和理论分析证明了该装置在近断层地震动作用下的有效性。Tsai等^[84]对采用滑动隔震支座的1/7.5缩尺桥梁模型进行了振动台测试,证明了该隔震系统的有效性。李忠献等^[85]采用振动台试验分析了邻梁间隙、邻梁质量比和支座特性对隔震简支梁桥碰撞反应的影响。韩强等^[86]通过振动台试验研究了不同烈度下及多维地震作用下隔震桥梁的地震反应,研究表明:地震动的幅度和频谱成分、场地类别、地震烈度、断层等因素对隔震桥梁体系的隔震效果有很大影响,多维输入与单向输入的地震反应存在一定的差异。袁涌等^[87]通过实

时子结构拟动力试验研究了地震作用下天然橡胶支座(Natural Rubber Bearing, NRB)、高阻尼橡胶支座和超高阻尼橡胶支座对桥梁减隔震效果的影响,对比发现超高阻尼隔震橡胶支座对隔震桥梁结构具有优良的隔震减震效果。郭安薪等^[88]对采用磁流变阻尼器的减隔震桥梁以1:20的缩尺进行振动台试验研究邻梁间的碰撞响应,结果表明:碰撞导致主梁的加速度显著增大,采用磁流变阻尼器可以有效地防止碰撞。Dion等^[89]通过实时动力子结构试验研究了采用黏滞抗震保护系统桥梁的地震反应,试验结果与非线性分析结果进行了对比,认为其简化数值模型技术具有较高的精度。目前,振动台试验多以验证减隔震装置的有效性及其隔震效果为主,可以校核分析模型和计算结果的正确性。而振动台试验多采用缩尺模型,对减隔震支座缩尺相似率问题认识还不够完善。随着试验和数值模拟技术的发展,实时动力子结构试验可被应用于减隔震桥梁的研究。

4 结语

(1) 汶川地震后,减隔震技术在国内桥梁工程领域得到大力发展,相关规范和技术标准也正在逐步完善。随着新型减隔震装置和韧性结构(构件)的发展,提出基于性能的抗震设计方法并考虑时效及环境效应对支座力学特性的影响至关重要。

(2) 减隔震设计中应该重视构造细节,注意支座变形能力和设计位移与间隙大小的合理匹配,数值模拟计算时需重视边界条件的模拟方法,以便正确衡量结构的地震反应。

(3) 减隔震技术在铁路桥梁中的应用有别于公路桥梁,铁路桥梁对下部结构刚度的要求更高,控制关键构件的地震损伤、确保震后快速恢复通车是铁路桥梁抗震的重要方面,鉴于铁路桥梁的特殊性,可基于“功能分离”设计理念发展减震和自复位系统;斜交桥和曲线桥的结构特征和动力特性不同于规则桥梁,其地震反应相对复杂,且橡胶类隔震支座抗拉问题需要得到重视。

(4) 基于“自复位、低损伤、可控制及震后快速恢复”的设计理念,结合第三代结构设计理论,发展新型韧性桥梁结构体系成为工程抗震的主要趋势;减隔震装置在全生命周期内力学特性随时间和环境变化、健康监测、震后损伤探测与评估等问题也需同时兼顾考虑与研究。

参考文献(References)

- [1] 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 Lichu, WANG Zhiqiang. Isolated Design of Bridges[M]. Beijing: China Communication Press, 2001.
- [2] BUCKLE I G, CONSTANTINOU M, DICLELI M, et al. Seismic Isolation of Highway Bridges(MCEER 06-SP07)[R]. Buffalo: University at Buffalo, 2006.
- [3] LEE G C, KITANE Y, BUCKLE I G. Literature Review of The Observed Performance of Seismically Isolated Bridges[R]. NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Research Progress and Accomplishments, 2001: 51-62.
- [4] CONSTANTINOU M C, WHITTAKER A S, KALPAKIDIS Y, et al. 桥梁地震保护系统[M]. 陈永祁, 马良喆 译. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
CONSTANTINOU M C, WHITTAKER A S, KALPAKIDIS Y, et al. Earthquake Protective System for Bridges[M]. CHEN Yongqi, MA Liangzhe, Tr. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.
- [5] 石岩, 王东升, 韩建平, 等. 桥梁减隔震技术的应用现状与发展趋势[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(5): 118-128.
SHI Yan, WANG Dongsheng, HAN Jianping, et al. Application Status of Seismic Isolation for Bridges and Its Development Tendency[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(5): 118-128.
- [6] 周云, 吴从晓, 张崇凌, 等. 芦山县人民医院门诊综合楼隔震结构分析与设计[J]. 建筑结构, 2013, 43(24): 23-27.
ZHOU Yun, WU Congxiao, ZHANG Chonglingz, et al. Analysis and Design of Seismic Isolation Structure in Outpatient Building of the Lushan County People's Hospital[J]. Building Structure, 2013, 43(24): 23-27.
- [7] KOWALSKY M J, PRIESTLEY M J N, MACRAE G A. Displacement-Based Design of RC Bridge Columns in Seismic Regions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1995, 24(12): 1623-1643.
- [8] CALVI G M, PAVESE A. Conceptual Design of Isolation Systems for Bridge Structures[J]. Journal of Earthquake Engineering, 1997, 1(1): 193-218.
- [9] Dolce M, Carcone D, Croatto f, et al. Performances of a Class of Isolation Systems for the Protection of Bridges and Viaducts in Seismic Areas[C]//13WCEE, 2004.
- [10] 张永亮, 董阳, 张磊, 等. BRB在双柱式桥墩抗震体系中的工作机理分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 957-962.
ZHANG Yongliang, DONG Yang, ZHANG Lei, et al. Working Mechanism of Buckling-Restrained Braces in the Seismic System of Double-Column Bridge Piers[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 957-962.
- [11] JARA M, CASAS J R. A Direct Displacement-Based Method for the Seismic Design of Bridges on Bi-Linear Isolation Devices[J]. Engineering Structures, 2006, 28(6): 869-879.
- [12] CARDONE D, DOLCE M, PALERMO G. Direct Displacement-Based Design of Seismically Isolated Bridges[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2009, 7(2): 391-410.
- [13] LI S, HEDAYATI DEZFULI F, WANG J Q, et al. Displacement-Based Seismic Design of Steel, FRP, and SMA Cable Restrainers for Isolated Simply Supported Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(6): 04018032.
- [14] 黄建文, 朱晞. 隔震连续梁桥结构以位移为基础的抗震设计方法[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(1): 65-70.
HUANG Jianwen, ZHU Xi. Displacement-Based Anti-Seismic Design for Base-Isolated Continuous Girder Bridges[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(1): 65-70.
- [15] 王常峰, 朱东生, 陈兴冲. 基于位移的隔震桥梁非迭代设计方法研究[J]. 世界地震工程, 2005, 21(3): 35-39.
WANG Changfeng, ZHU Dongsheng, CHEN Xingchong. Research on Displacement-Based Non-Iterative Design Method for the Isolated Bridge[J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(3): 35-39.
- [16] 石岩, 王东升, 孙治国. 基于位移的中等跨径减隔震桥梁抗震设计方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 71-81.
SHI Yan, WANG Dongsheng, SUN Zhiguo. Displacement-Based Seismic Design Method for Medium Span Bridges with Seismic Isolation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(2): 71-81.
- [17] 石岩, 王东升, 陈宝魁, 等. 时效及环境因素对隔震连续梁桥地震反应的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(4): 827-839.
SHI Yan, WANG Dongsheng, CHEN Baokui, et al. Effects of Aging and Environmental Conditions on Seismic Response of Continuous Beam Bridges with Seismic Isolation[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(4): 827-839.
- [18] LEE G C, KITANE Y, BUCKLE I G. Literature Review of the Observed Performance of Seismically Isolated Bridges [R]. Research Progress and Accomplishments, New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2001: 51-62.
- [19] PARK S W, GHASEMI H, SHEN J, et al. Simulation of the Seismic Performance of the Bolu Viaduct Subjected to Near-Fault Ground Motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2004, 33(13): 1249-1270.
- [20] JÓNSSON M H, BESSASON B, HAFLIDASON 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.
- [21] 惠迎新, 台玉吉, 王克海, 等. 跨断层桥梁抗震若干问题探讨[J]. 地震工程学报, 2017, 39(5): 870-875, 889.
HUI Yingxin, TAI Yuji, WANG Kehai, et al. Discussion about Earthquake Resistance of the Bridges Crossing the Active Fault [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 870-875, 889.

- [22] 尹海权,徐玉健,徐东卓,等.跨断层形变监测场地布设研究[J].地震工程学报,2018,40(增刊1):35-39.
YIN Haiquan, XU Yujian, XU Dongzhuo, et al. Site Layout of the Across-Fault Deformation Measurement[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(Supp1): 35-39.
- [23] TSOPELAS P, CONSTANTINOU M C. Study of Elastoplastic Bridge Seismic Isolation System[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(4): 489-498.
- [24] WILDE K, GARDONI P, FUJINO Y. Base Isolation System with Shape Memory Alloy Device for Elevated Highway Bridges[J]. Engineering Structures, 2000, 22(3): 222-229.
- [25] JANGID R S. Seismic Response of Isolated Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(2): 156-166.
- [26] KUNDE M C, JANGID R S. Effects of Pier and Deck Flexibility on the Seismic Response of Isolated Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(1): 109-121.
- [27] LIN P Y, LIN T K. Control of Seismically Isolated Bridges by Magnetorheological Dampers and a Rolling Pendulum System[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2012, 19(2): 278-294.
- [28] 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):58-65.
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): 58-65.
- [29] ATES S, BAYRAKTAR A, DUMANOGLU A A. The Effect of Spatially Varying Earthquake Ground Motions on the Stochastic Response of Bridges Isolated with Friction Pendulum Systems[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(1): 31-44.
- [30] MARANO G C, SGOBBA S. Stochastic Energy Analysis of Seismic Isolated Bridges[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(8): 759-773.
- [31] JANGID R S. Stochastic Response of Bridges Seismically Isolated by Friction Pendulum System[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(4): 319-330.
- [32] LI X M. Optimization of the Stochastic Response of a Bridge Isolation System with Hysteretic Dampers[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1989, 18(7): 951-964.
- [33] 江宜城,杨德喜,李黎,等.LRB隔震桥梁空间变异性地震随机响应分析[J].振动与冲击,2007,26(1):104-107,120.
JIANG Yicheng, YANG Dexi, LI Li, et al. Stochastic Response Analysis of Seismically Isolated Bridges with LRB to Spatially Varying Earthquake Ground Motions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(1): 104-107, 120.
- [34] KARIM K R, YAMAZAKI F. Effect of Isolation on Fragility Curves of Highway Bridges Based on Simplified Approach[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(5): 414-426.
- [35] ZHANG J, HUO Y L. Evaluating Effectiveness and Optimum Design of Isolation Devices for Highway Bridges Using the Fragility Function Method[J]. Engineering Structures, 2009, 31(8): 1648-1660.
- [36] JARA J M, MADRIGAL E, JARA M, et al. Seismic Source Effects on the Vulnerability of an Irregular Isolated Bridge[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 105-115.
- [37] SIQUEIRA G H, SANDA A S, PAULTRE P, et al. Fragility Curves for Isolated Bridges in Eastern Canada Using Experimental Results[J]. Engineering Structures, 2014.
- [38] 唐永久,方圣恩.桩土作用对隔震梁桥地震易损性及震后通行能力影响[J].地震工程学报,2018,40(4):721-727.
TANG Yongjiu, FANG Sheng'en. Influence of Pile-Soil Interaction on the Seismic Fragility and Post-Earthquake Traffic Capacity of an Isolated Bridge[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 721-727.
- [39] 孙元帝,王贵和,苏强,等.双向地震作用下互通式斜交桥梁地震响应及碰撞效应分析[J].地震工程学报,2016,38(5):693-700.
SUN Yuandi, WANG Guihe, SU Qiang, et al. Seismic Response and Pounding Effect of an Interchange Skewed Bridge under Bi-Directional Earthquake Motions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5): 693-700.
- [40] MITCHELL D, BRUNEAU M, SAATCIOGLU M, et al. Performance of Bridges in the 1994 Northridge Earthquake[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22(2): 415-427.
- [41] 陈乐生,庄卫林,赵河清,等.汶川地震公路震害调查:桥梁[M].北京:人民交通出版社,2012.
CHEN Lesheng, ZHUANG Weilin, ZHAO Qinghe, et al. Report on Highways' Damage in the Wenchuan Earthquake: Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [42] KAWASHIMA K, UNJOH S, HOSHIKUMA J I, et al. Damage of Bridges Due to the 2010 Maule, Chile, Earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2011, 15(7): 1036-1068.
- [43] 石岩,王东升,孙治国,等.隔震斜交连续梁桥地震反应及环境温度影响研究[J].振动与冲击,2014,33(14):118-124.
SHI Yan, WANG Dongsheng, SUN Zhiguo, et al. Seismic Response of Isolated Continuous Skew Bridge and the Effect of Ambient Temperature on Seismic Behavior of Bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14): 118-124.
- [44] 张智.斜交宽梁桥地震效应及减震策略研究[D].济南:山东建筑大学,2015.
ZHANG Zhi. Seismic Effect and Mitigation Measures of Wide Skew Beam Bridge[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2015.
- [45] 姚凯,徐略勤,李建中,等.采用板式橡胶支座的连续斜梁桥横向抗震行为研究[J].地震工程学报,2018,40(2):265-272.
YAO Kai, XU Lueqin, LI Jianzhong, et al. Transverse Seismic Behavior of Continuous Skewed Girder Bridges with Elastomeric Pad Bearings[J]. China Earthquake Engineering Jour-

- nal, 2018, 40(2): 265-272.
- [46] 李喜梅, 杜永峰. 非平稳地震激励下隔震曲线梁桥振动控制研究[J]. 地震工程学报, 2016, 38(1): 103-108, 115.
LI Ximei, DU Yongfeng. Vibration Control of Isolated Curved Girder Bridges under Nonstationary Seismic Excitation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1): 103-108, 115.
- [47] 蒋劲松, 庄卫林, 刘振宇, 等. 汶川地震百花大桥震害调查分析[J]. 桥梁建设, 2008, 38(6): 41-44, 52.
JIANG Jinsong, ZHUANG Weilin, LIU Zhenyu, et al. Investigation and Analysis of Seismic Damage to Baihua Bridge in Wenchuan Earthquake[J]. Bridge Construction, 2008, 38(6): 41-44, 52.
- [48] 孙治国, 王东升, 郭迅, 等. 汶川大地震绵竹市回澜立交桥震害调查[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 132-138.
SUN Zhiguo, WANG Dongsheng, GUO Xun, et al. Damage Investigation of Huilan Interchange in Mianzhu after Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 132-138.
- [49] 周绪红, 戴鹏, 狄谨, 等. 曲线箱梁桥空间预应力效应分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 63-68.
ZHOU Xuhong, DAI Peng, DI Jin, et al. Effect of Spatial Prestressing for Curved Box Girder Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 63-68.
- [50] 陈树刚, 亓兴军, CHEN Shugang, 等. 曲率半径变化对曲线梁桥黏滞阻尼器减震效果的影响[J]. 公路交通科技, 2012, 29(8): 56-59, 86.
CHEN Shugang, QI Xingjun, CHEN Shugang, et al. Influence of Variation of Radius of Curvature on Seismic Mitigation Effectiveness of Viscous Dampers for Curved Girder Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(8): 56-59, 86.
- [51] 夏修身, 王希慧, 陈兴冲. 输入地震动维数对 FPB 隔震曲线桥地震反应的影响[J]. 公路交通科技, 2012, 29(11): 69-74.
XIA Xiushen, WANG Xihui, CHEN Xingchong. Effect of Input Ground Motion Dimension on Seismic Response of FPB Isolation Curved Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(11): 69-74.
- [52] 王煦, 董军, 焦驰宇. 纵向碰撞下 FPS 隔震曲线桥地震响应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(2): 115-120, 107.
WANG Xu, DONG Jun, JIAO Chiyu. Seismic Response Analysis of FPS Isolated Curved Bridge with Longitudinal Collision[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(2): 115-120, 107.
- [53] RUIZ JULIAN F D, HAYASHIKAWA T, OBATA T. Seismic Performance of Isolated Curved Steel Viaducts Equipped with Deck Unseating Prevention Cable Restraints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(2): 237-253.
- [54] ATE S, CONSTANTINOU M C. Example of Application of Response History Analysis for Seismically Isolated Curved Bridges on Drilled Shaft with Springs Representing Soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(3): 334-350.
- [55] Takahashi Y. Damage of Rubber Bearings and Dampers of Bridges in 2011 Great East Japan earthquake[C]//Tokyou, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, 2012.
- [56] KUMAR M, WHITTAKER A S, CONSTANTINOU M C. Experimental Investigation of Cavitation in Elastomeric Seismic Isolation Bearings[J]. Engineering Structures, 2015, 101: 290-305.
- [57] 秦顺全, 瞿伟廉. 天兴洲公铁两用斜拉桥主梁纵向地震、列车制动及行车移动荷载响应的混合控制[J]. 桥梁建设, 2008, 38(4): 1-4, 9.
QIN Shunquan, QU Weilian. Hybrid Control of Longitudinal Vibration Responses in Deck of Tianxingzhou Rail-Cum-Road Cable-Stayed Bridge Caused by Earthquake, Train Braking and Vehicle Moving Loads[J]. Bridge Construction, 2008, 38(4): 1-4, 9.
- [58] 杨风利, 钟铁毅, 夏禾. 铁路简支梁桥减隔震支座设计参数的优化研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(3): 128-132.
YANG Fengli, ZHONG Tieyi, XIA He. Study on Optimization of the Design Parameter of Seismic Absorption and Isolation Bearing for Railway Simple Supported Beam Bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(3): 128-132.
- [59] 陈兴冲, 商耀兆, 张永亮, 等. 高墩大跨度铁路简支桁架梁桥的减震性能分析[J]. 世界地震工程, 2008, 24(1): 6-11.
CHEN Xingchong, SHANG Yaozhao, ZHANG Yongliang, et al. Analysis of Seismic Reduction Performance on the High Pier and Long Span Railway Simply-Supported Steel Truss Girders[J]. World Earthquake Engineering, 2008, 24(1): 6-11.
- [60] 温留汉 · 黑沙, 于芳, 周福霖, 等. 设置限位器双向隔震铁路桥梁车桥耦合动力响应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(6): 616-621.
WENLIUHAN · Heisha, YU Fang, ZHOU Fulin, et al. Analysis of Dynamic Coupling Response between Railway and Bridge of Railway with Seismic Isolation Equipment Displacement Restraint[J]. Journal of Disaster Prevent and Mitigation Eng, 2011, 31(6): 616-621.
- [61] 张永亮, 孙建飞, 徐家林, 等. 高速铁路大跨连续梁桥地震反应分析及抗震校核[J]. 西北地震学报, 2013, 35(2): 226-231.
ZHANG Yongliang, SUN Jianfei, XU Jialin, et al. Analysis of Seismic Response and Seismic Checking in a Long-Span Continuous Beam Bridge on a High-Speed Railway[J]. Northwestern Seismological Journal, 2013, 35(2): 226-231.
- [62] 杨华平, 钱永久, 樊启武, 等. 大跨铁路钢桁连续梁桥减隔震方案比较研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(6): 1097-1104.
YANG Huaping, QIAN Yongjiu, FAN Qiwu, et al. Comparative Study on Seismic Mitigation and Isolation Schemes for a

- Long-Span Railway Steel Truss Continuous Beam Bridge[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1097-1104.
- [63] 夏修身. 铁路连续梁拱组合桥基于摩擦摆支座的减隔震研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(4): 350-354.
- XIA Xiushen. Seismic Isolation of Combined System of Continuous Girder-Arch Railway Bridge Using Friction Pendulum Bearing[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(4): 350-354.
- [64] 谢旭, 王炎, 陈列. 轨道约束对铁路减隔震桥梁地震响应的影响[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 75-82.
- XIE Xu, WANG Yan, CHEN Lie. Effect of Rail Restraints on Seismic Responses of Cushioning Railway Bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 75-82.
- [65] 孟兮, 倪燕平. 减震榫设计及试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(3): 103-106.
- MENG Xi, NI Yanping. Design and Experimental Study of Shock Absorber[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(3): 103-106.
- [66] 石岩, 王东升, 孙治国. 近断层地震动下的高速铁路桥梁减震设计[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(6): 34-40.
- SHI Yan, WANG Dongsheng, SUN Zhiguo. Seismic Isolation Design for High Speed Railway Bridge under Near-Fault Ground Motions[J]. China Railway Science, 2014, 35(6): 34-40.
- [67] 彭天波, 李建中, 范立础. 双曲面球型减隔震支座的竖向位移分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(9): 1181-1185.
- PENG Tianbo, LI Jianzhong, FAN Lichu. Analysis of Vertical Displacement of Double Spherical Aseismic Bearing[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2007, 35(9): 1181-1185.
- [68] 杨文武. 台湾高速铁路 C₂₇₀ 标段高架桥设计概述[J]. 铁道学报, 2007, 29(3): 132-136.
- YANG Wenwu. A Brief Overview of C₂₇₀ Viaduct Design of Taiwan HSR Project[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(3): 132-136.
- [69] Priestley M J N, Evison R J, Carr A J. Seismic Response of Structures Free to Rock on Their Foundation[J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1978, 11(3): 141-150.
- [70] ELGAWADY M A, SHA'LAN A. Seismic Behavior of Self-Centering Precast Segmental Bridge Bents [J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(3): 328-339.
- [71] GUO T, CAO Z L, XU Z K, et al. Cyclic Load Tests on Self-Centering Concrete Pier with External Dissipators and Enhanced Durability [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(1): 04015088.
- [72] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 1-10.
- ZHOU Ying, LÜ Xilin. State-of-the-Art on Rocking and Self-Centering Structures[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 1-10.
- [73] 黄勇, 张良, 乐威杰, 等. 桥梁抗震研究的近期进展[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(3): 166-174.
- HUANG Yong, ZHANG Liang, LE Weijie, et al. Recent Development of Seismic Research on Bridge[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, 37(3): 166-174.
- [74] 夏修身, 陈兴冲, 李建中. 高墩自复位隔震机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(7): 2549-2557.
- XIA Xiushen, CHEN Xingchong, LI Jianzhong. Isolation Mechanism of Self-Centering Tall Pier[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(7): 2549-2557.
- [75] 韩强, 贾振雷, 何维利, 等. 自复位双柱式摇摆桥梁抗震设计方法及工程应用[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 169-177.
- HAN Qiang, JIA Zhenlei, HE Weili, et al. Seismic Design Method and Its Engineering Application of Self-Centering Double-Column Rocking Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 169-177.
- [76] 管仲国, 杨彬, 董凯, 等. 可提离式群桩基础桥梁滞回性能模型试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 62-68.
- GUAN Zhongguo, YANG Bin, DONG Kai, et al. Experiment on Hysteretic Properties of Bridges with Pile-Group Foundations Allowing Rocking and Uplift of Pile Cap[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 62-68.
- [77] 李建中, 管仲国. 桥梁抗震设计理论发展: 从结构抗震减震到震后可恢复设计[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 1-9, 59.
- LI Jianzhong, GUAN Zhongguo. Research Progress on Bridge Seismic Design: Target from Seismic Alleviation to Post-Earthquake Structural Resilience [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 1-9, 59.
- [78] 王兰民, 夏坤, 董林, 等. 第 16 届世界地震工程大会有关报告研究进展综述[J]. 地震工程学报, 2017, 39(2): 381-394.
- WANG Lanmin, XIA Kun, DONG Lin, et al. Summarization of the Related Research Progress of the 16th World Conference on Earthquake Engineering [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(2): 381-394.
- [79] 李杰. 论第三代结构设计理论[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 617-624.
- LI Jie. On the Third Generation of Structural Design Theory [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(5): 617-624, 632.
- [80] TSOPELAS P, CONSTANTINOU M C, KIM Y S, et al. Experimental Study of Fps System in Bridge Seismic Isolation [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1996, 25(1): 65-78.
- [81] 张俊平, 周福霖, 廖蜀樵. 桥梁隔震体系振动台试验研究(III): 测试结果分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(2): 136-142.
- ZHANG Junping, ZHOU Fulin, LIAO Shuqiao. Shaking Table

- Test Study of Bridge Isolation System (Ⅲ)-An Analysis of Measured Results[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2002,22(2):136-142.
- [82] IEMURA H, TAGHIKHANY T, TAKAHASHI Y, et al. Effect of Variation of Normal Force on Seismic Performance of Resilient Sliding Isolation Systems in Highway Bridges[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 34(15):1777-1797.
- [83] SAHASRABUDHE S, NAGARAJAIAH S. Effectiveness of Variable Stiffness Systems in Base-Isolated Bridges Subjected to Near-Fault Earthquakes; An Experimental and Analytical-Study[J].Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2005,16(9):743-756.
- [84] TSAI M H, WU S Y, CHANG K C, et al. Shaking Table Tests of a Scaled Bridge Model with Rolling-Type Seismic Isolation Bearings[J]. Engineering Structures, 2007, 29(5): 694-702.
- [85] 李忠献,张勇,岳福青,等.地震作用下隔震简支梁桥碰撞反应的振动台试验[J].地震工程与工程振动,2007,27(2):152-157.
- LI Zhongxian, ZHANG Yong, YUE Fuqing. Shaking Table Test on Pounding Isolated Bridges under Responses of Simply Supported Earthquake Excitation[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2007,27(2):152-157.
- [86] 韩强,杜修力,刘文光,等.不同地震烈度下隔震连续梁桥模型振动台试验[J].中国公路学报,2008,21(6):50-56.
- HAN Qiang, DU Xiuli, LIU Wenguang, et al. Shaking Table Test of Isolated Continuous Girder Bridge Model under Different Earthquake Intensity Excitations[J].China Journal of Highway and Transport,2008,21(6):50-56.
- [87] 袁涌,熊世树,朱宏平.隔震桥梁地震反应速度控制型实时子结构试验[J].华中科技大学学报(自然科学版),2008,36(8):117-120.
- YUAN Yong, XIONG Shishu, ZHU Hongping. Real-Time Substructure Hybrid Test System for Earthquake Response of Isolated Bridge Using Velocity Control[J].Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2008,36(8):117-120.
- [88] GUO A X, LI Z J, LI H, et al. Experimental and Analytical Study on Pounding Reduction of Base-Isolated Highway Bridges Using MR Dampers[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2009,38(11):1307-1333.
- [89] DION C, BOUAANANI N, TREMBLAY R, et al. Real-Time Dynamic Substructuring Testing of Viscous Seismic Protective Devices for Bridge Structures[J].Engineering Structures, 2011,33(12):3351-3363.

(上接第 1120 页)

- [13] 崔堃鹏,夏超逸,刘炎海,等.高速铁路桥墩汽车撞击力的数值模拟与特性分析[J].桥梁建设,2013,43(6):57-63.
- CUI Kunpeng, XIA Chaoyi, LIU Yanhai, et al. Numerical Simulation and Characteristic Analysis of Vehicle Collision Forces in High-Speed Railway Bridge Pier[J].Bridge Construction, 2013,43(6):57-63.
- [14] Bridge Design Specifications : AASHTO LRFD 2012[S]. Washington D. C. : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [15] 铁路桥涵设计基本规范:TB 1002.1-2005[S].2010.
- Basic Code for Design of Railway Bridges and Culverts: TB 1002.1-2005[S].2010.
- [16] Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings;FEMA356[S].Washington D.C.:Federal Emergency Management Agency,2000.