

文章编号:1003-4722(2014)03-0019-06

近断层地震动下减隔震桥梁地震反应分析

石 岩^{1,2}, 王东升^{1,2}, 孙治国^{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)

摘要: 为了解采用减震榫和拉索限位器的连续梁桥在近断层地震动下减震系统的减震效果,以1座(40+64+40)m高速铁路预应力混凝土连续梁桥为背景,采用结构分析软件SAP2000建立了考虑邻梁碰撞效应的动力弹塑性计算模型,通过输入具有速度脉冲特性的近断层地震动和无速度脉冲地震动进行非线性时程反应分析。结果表明:在具有速度脉冲效应的近断层地震动下,采用减震榫和拉索限位器的组合减震系统可以起到较好的减震效果,其减震率可以达到60%以上;具有速度脉冲效应的近断层地震动对减震桥梁会产生更强烈的地震反应,也更容易引起邻梁碰撞,忽略碰撞效应将会高估减震效果。

关键词: 高速铁路桥;连续梁桥;减震;减震榫;拉索限位器;近断层地震动;碰撞效应;地震反应分析

中图分类号:U442.55;U448.23 文献标志码:A

Analysis of Seismic Response of Seismically Mitigated and Isolated Bridge Subjected to Near-Fault Ground Motion

SHI Yan^{1,2}, WANG Dong-sheng^{1,2}, SUN Zhi-guo^{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)

Abstract: To have an understanding of the seismic mitigation effect of the continuous girder bridge used with the combined seismic mitigation system of shock absorbers and cable restrainers subjected to the near-fault ground motion, a high-speed railway prestressed concrete continuous girder bridge with span arrangement (40+64+40)m was taken as an example, the structural analysis software SAP2000 was used to set up the dynamic elastic-plastic calculation model considering the pounding effect of the adjacent girders and the nonlinear time-history response analysis of the model was carried out by inputting the near-fault ground motion with velocity pulse characteristic and the ground motion without the characteristic. The results of the analysis demonstrate that under the near-fault ground motion with the velocity pulse effect, the utilization of the combined seismic mitigation system of the shock absorbers and cable restrainers can achieve good effect of the seismic mitigation and the seismic mitigation ratio can exceed 60%. The near-fault ground motion with the velocity pulse effect may cause the seismically mitigated and isolated bridge to have stronger seismic response and also may easily cause the adjacent girders to pound.

收稿日期:2013-11-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51178071);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资助项目(3132014326)

Project of National Natural Science Foundation of China (51178071); Project Funded by Program of Ministry of Education for New Century Excellent Talents in Universities (NCET-12-0751); Project Supported by Fundamental Research Funds for Central-Level Universities and Institutes (3132014326)

作者简介:石 岩,博士生,E-mail:syky86@163.com。研究方向:桥梁抗震理论与减隔震技术。

The ignoring of the pounding effect will result in overestimation of the seismic mitigation effect.

Key words: high-speed railway bridge; continuous girder bridge; seismic mitigation; shock absorber; cable restrainer; near-fault ground motion; pounding effect; seismic response analysis

1 引言

自从认识到近断层区域与较远区域获得的地震动有较大差别以来,关于近断层地震动及其对结构影响的研究一直受到关注^[1]。近断层地震动区别于远场地震动的最突出特点是具有速度脉冲特性,其主要表现为向前方向性效应和滑冲效应^[2]。我国高速铁路向西部(山区)强震区延伸时,将面对临近地震断层问题,应在设计分析中考虑具有速度脉冲效应的近断层地震动。

近年来,减震设计已逐渐发展成为一种常用的防震减灾技术,在近断层地震动下也较为有效^[3]。由于支座在地震中受力复杂且易于损坏,日本学者提出了“功能分离”设计理念,李承根和高日^[4]基于此理念发明了一种适合于高速铁路桥梁的减震装置——减震棒,它具有较大初始刚度,符合铁路桥梁的正常运营要求,地震作用下具有明显的减震效果。但是,在近断层地震作用下,减震系统的减震效果可能会降低,速度脉冲作用也会使减震棒的变形显著增大^[5,6]。如果减震系统的位移能力和恢复力不足,则可能失效,如土耳其的博卢(Bolu)高架桥^[5]。因此,本文在李承根等^[4]的研究基础上,提出了同时采用减震棒和拉索限位器的组合减震系统,减震棒用于减小地震作用,限位器用于控制减震棒的过大变形。

目前,对近断层地震作用下减震桥梁地震反应的研究相对薄弱,且大都针对于公路桥梁^[7,8]。为此,本文以高速铁路连续梁桥为工程背景,通过建立考虑邻梁碰撞效应和墩柱弹塑性的减震桥梁模型,输入无速度脉冲、具有向前方向性效应和滑冲效应特征的3组近断层地震动进行非线性时程反应分析,研究了在这3类地震动作用下桥墩的地震反应、

邻梁的碰撞效应和组合减震系统的减震效果。

2 组合减震系统及分析模型

以一座(40+64+40)m的高速铁路预应力混凝土连续梁桥为主要研究对象进行地震反应分析,为考虑邻跨的影响和邻梁间的碰撞效应,在连续梁两端各设1孔32m标准简支箱梁(图1),连续梁和相邻简支梁上部结构均为预应力混凝土双线变截面箱梁。全桥下部结构为双流线型圆端实体墩,桥墩高度如图1所示。桥址位于8度区,设计地震加速度峰值加速度为0.2g,罕遇地震为0.38g。

2.1 组合减震系统

李承根等^[4]基于支座功能分离的减震设计理念开发的减震棒一般选用低屈服点钢材制成,在桥梁结构中的构造形式如图2所示。棒的下端(锚固段,长0.6m)嵌固于墩顶,棒顶呈圆球形并伸入梁底的预埋装置中,变形段为圆形截面,有效变形长度为0.85m。使用减震棒时原有的固定支座被活动支座取代,实现支座的功能分离。减震棒的恢复力模型呈现双线性特性,根据文献^[4]推荐的减震棒力学性能参数并结合该桥的情况,单根减震棒的滞回参数取值如下:屈服位移 $d_y=0.006$ m,屈服荷载 $F_y=325$ kN,最大塑性变形 $d_u=0.072$ m,极限荷载 $F_u=383$ kN。

在正常使用阶段,减震棒应承担列车制动力等水平向荷载作用并控制梁体的水平位移,故在正常使用阶段的组合荷载应小于减震棒的屈服强度,可初步确定减震棒的数量。但是,在正常使用阶段的水平荷载作用通常较小,故需在多遇地震下通过强度验算来确定减震棒的数量,即要求在多遇地震下不屈服。对于该桥,当在边墩(2号和5号)和中墩

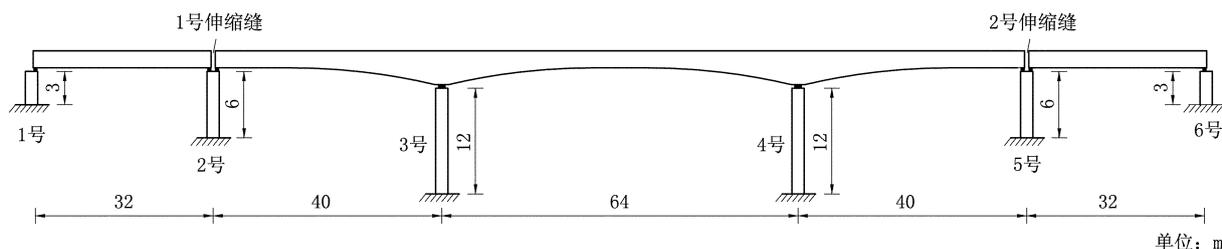


图1 桥梁结构示意图

Fig. 1 Sketch of Bridge Structure

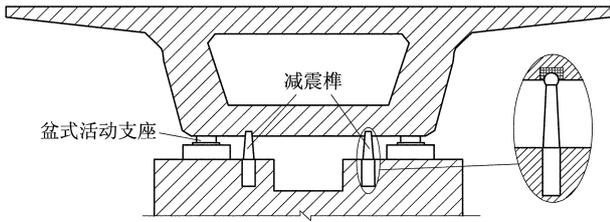


图2 桥梁结构及减震棒构造
Fig. 2 Bridge Structure and Shock Absorber

(3号 和 4号)分别设置 6根 和 8根 减震棒时,采用多振型分解反应谱法以减震棒弹性刚度验算减震棒的强度,可以满足要求。

为了防止减震棒在近断层地震动下发生过大变形,本文在主墩(3号 和 4号墩)上安装了只受拉型拉索限位器,其构造和力学模型示意如图 3 所示。松弛长度 e 和刚度 k_1 是限位器设计中的 2 个关键参数^[9]。本文限位器的松弛长度 e 取减震棒在设计地震下的位移值(30 mm)。由于限位器发挥作用时,减震棒已经屈服,加上在近断层脉冲地震下结构的反应非常复杂,即很难通过静力方法确定限位器的刚度,故只能通过动力分析试算的方法确定。初次试算的刚度取值建议借鉴“AASHTO 隔震设计指南”^[10]中关于减震装置恢复力的要求。经过多次设计和试算发现:当减震棒的变形从限位器开始发挥作用到减震棒的极限位移(72 mm)时,拉索限位器与减震棒的恢复力增量之和不低于上部结构重量的 0.05 倍才能保证减震棒的安全性,推出限位器的刚度 k_1 为 45 000 kN/m。

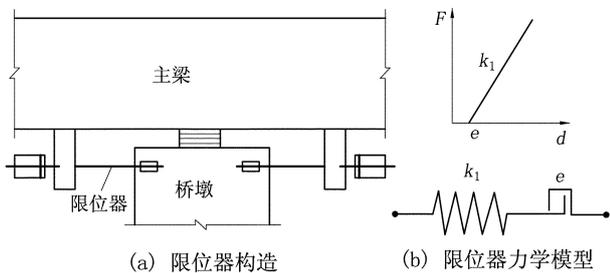


图3 限位器构造和力学模型
Fig. 3 Restrainer and Mechanical Model

2.2 分析模型及其参数

应用结构分析软件 SAP2000 进行非线性时程反应分析,桥梁结构的阻尼比取 5%,并采用瑞利阻尼,梁体和墩柱采用 Frame 单元模拟,减震棒采用非线性连接单元中的 Kinematic 模型模拟,盆式橡胶支座采用 Wen 非线性连接单元模拟,拉索限位器

采用 Hook 单元模拟。近断层地震动作用可能使桥墩进入弹塑性阶段,在桥墩底部形成塑性铰,其恢复力与结构的变形呈非线性;为模拟塑性铰的非线性力学行为,在桥墩底部设置非线性弹簧单元,该单元的滞回特征采用 Takeda 模型模拟,弯矩~曲率关系如表 1 所示。不考虑桩-土-结构的相互作用,即在墩底固结。减震支座在延长桥梁结构周期的同时也增大了梁体的位移需求,使得相邻梁体发生碰撞的概率增大。钟铁毅等^[11]研究了铁路隔震(LRB)连续梁桥与邻梁的碰撞效应,建议在进行隔震桥梁设计时,应综合考虑隔震支座的隔震效果和碰撞响应,以便确定合理的设计参数。邻梁碰撞作用采用非线性 Gap 单元来模拟。

表 1 桥墩的弯矩~曲率关系
Tab. 1 Moment~Curvature Relationship of Piers

桥墩	曲率/ $\times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$		弯矩/kN·m	
	屈服	极限	屈服	极限
1号(6号)	7.95	93.43	37 340	37 840
2号(5号)	7.18	88.37	30 920	31 370
3号(4号)	8.08	86.01	62 520	64 170

为了分析连续梁桥中采用组合减震系统的减震效果,做如下规定:① 不考虑盆式支座破坏等产生的耗能作用;② 邻跨的简支梁不采用减震设计,1号和 6号墩上设置固定支座;③ 未采用减震装置的连续梁中,3号墩安装固定支座,其余安装滑动支座;④ 采用减震装置时,将中墩(3号)的固定支座改为滑动支座,并在所有墩上安装减震棒。

2.3 近断层地震动

本文采用文献[12]给出的 30 条具有向前方向性效应、滑冲效应及无脉冲效应的地震动记录沿顺桥向输入进行时程分析。为了反映出结构地震反应随地震动强度的变化情况,本文在地震反应分析中将地震动强度从多遇地震到罕遇地震分为 4 级,即地震动峰值加速度分别为 0.07g、0.2g、0.3g、0.38g。

3 近断层作用下的减震桥梁地震反应

3.1 减震效果分析

在分析时程反应结果时,为了更清楚地表达减震装置的减震效果,采用减震率来表示,即定义为非减震桥梁结构的地震响应峰值和对应减震桥梁的地震响应峰值之差与非减震桥梁的地震响应峰值之比,表示为:

$$\eta = (e_n - e_i) / e_n \quad (1)$$

式中, η 为减震率, 减震率越大, 表明减震效果越好; e_n 为非减震桥梁的地震响应峰值; e_i 为减震桥梁的地震响应峰值, 本文以非隔震时的固定墩(3号)墩顶位移作为考察的地震响应。

减震桥梁在设计地震水准下, 不同脉冲类型地震动对组合减震系统减震效果的影响如表 2 所示, 表 2 还给出了考虑碰撞(η_p)和不考虑碰撞(η_{np})时, 在不同类型地震动作用下的平均减震率, 以及二者的对应比值(η_{np}/η_p)。由表 2 可以看出, 不论考虑相邻梁体间的碰撞与否, 采用组合减震系统可以达到较好的减震效果, 不同类型地震动作用下的减震率都在 60% 以上, 且脉冲型近断层地震动比无脉冲地震动要高, 都达到了 80%, 这主要是因为减震樰能够发生较大的塑性变形所致。对于具有向前方向性效应和滑冲效应的脉冲型地震动而言, 不考虑碰撞会高估减震率, 最大可能会高估 12% (滑冲效应), 因此, 在考察结构受脉冲型近断层地震动的减震率时, 碰撞作用的影响不宜忽视。

表 2 减震率 η
Tab. 2 Seismic Mitigation Ratio η

地震动类型	减震率		比值(η_{np}/η_p)
	碰撞(η_p)	无碰撞(η_{np})	
向前方向性	0.80	0.84	1.06
滑冲效应	0.80	0.90	1.12
无速度脉冲	0.67	0.68	1.01

3.2 桥墩反应与地震动强度指标

为了研究 3 种类型的地震动及其地震动强度指标对桥墩地震反应的影响, 通过非线性时程反应分析得到了减震桥梁的地震反应, 以 3 号桥墩为例, (平均) 墩顶位移和墩底弯矩随着峰值加速度 (PGA) 的变化趋势见图 4。另外, 在考察近断层地震动下结构的地震反应时, 常关注地震动的峰值速度与峰值加速度之比 (PGV/PGA)。一般情况下, PGV/PGA 值越大, 表明地震动可能含有较长特征周期的速度脉冲。本文输入的地震动中, 含有滑冲效应地震动的 PGV/PGA 值最大, 大多为 0.36~0.8 s, 而无脉冲地震动记录的 PGV/PGA 值较小, 大多小于 0.15 s, 特征周期也较短; 具有向前方向性效应的地震动记录通常呈现双向往复的速度脉冲, 其脉冲峰值弱于滑冲效应, PGV/PGA 值为 0.15~0.32 s。为了解 PGV/PGA 值对减震桥梁地震反应的影响, 分析减震设计桥梁在 0.38g (罕遇地震) 峰值加速度 (各条) 近断层地震动作用下 3 号桥墩位移与 PGV/PGA 值的关系, 如图 5 所示。

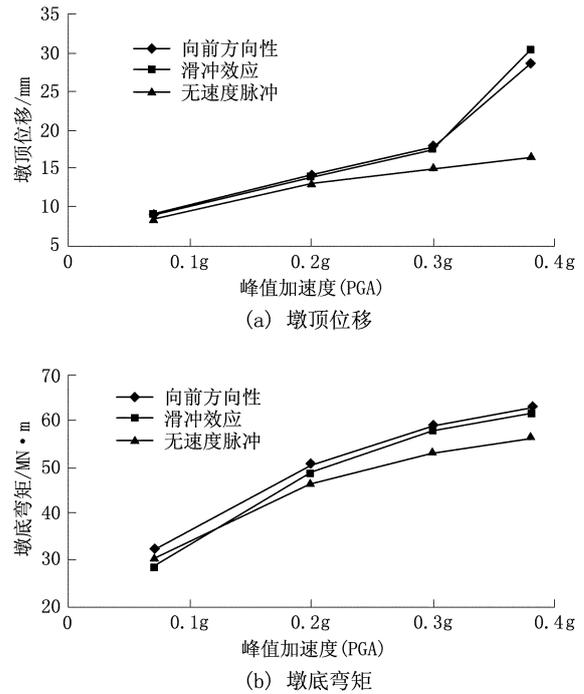


图 4 桥墩墩顶位移、墩底弯矩与峰值加速度 (PGA) 的关系
Fig. 4 Relationship between Pier Top Displacement, Pier Footing Moment and Peak Ground Acceleration (PGA)

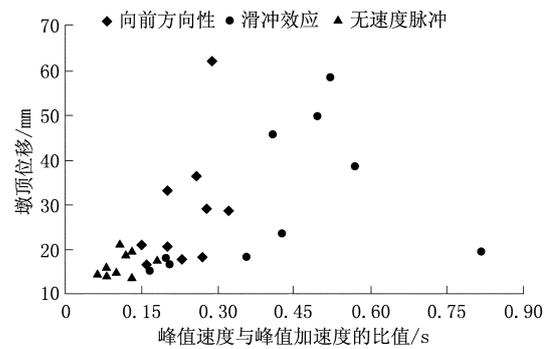


图 5 桥墩墩顶位移与峰值速度/峰值加速度 (PGV/PGA) 的关系
Fig. 5 Relationship between Pier Top Displacement and Peak Ground Velocity (PGV) and PGA

从图 4 可以看出, 减震桥梁在 2 种脉冲型近断层地震动作用下的地震反应基本相当, 且都比无脉冲作用的反应强烈, 近断层地震动的速度脉冲特性是使结构反应强烈的关键因素。从图 4(b) 和表 1 可以看出, 当 PGA 增大到 0.38g 时, 脉冲型近断层地震动对应的平均墩底弯矩接近屈服弯矩 (64 170 kN·m), 实际在部分地震动下桥墩已经屈服, 但塑性变形相对有限, 屈服曲率均未达到极限值, 在可接受范围之内。

从图 5 可以看出, 对于具有向前方向性效应和

滑冲效应的脉冲型地震动,除个别点外,3号桥墩的地震反应与PGV/PGA值具有一定的相关趋势,PGV/PGA值可以作为近断层地震动强度指标;随着PGV/PGA值的增大,桥墩的地震反应越强烈。

3.3 碰撞效应

研究表明:相邻桥跨的非同向运动及碰撞增大了下部结构的地震需求,是引起结构破坏的重要原因之一。而碰撞效应与地震动特性有关,尤其在具有不同脉冲特征的近断层作用下,其碰撞效应可能与远断层地震动存在较大差异。为此,本文研究了3类地震作用下2号伸缩缝处的最大碰撞力平均值,如图6所示。在0.38g峰值加速度近断层地震动作用下,2号伸缩缝处最大碰撞力与PGV/PGA值的关系如图7所示。

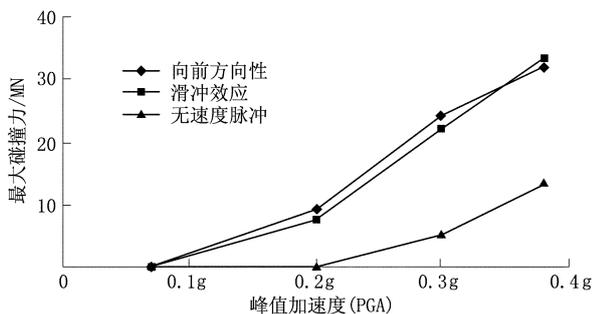


图6 最大碰撞力与峰值加速度(PGA)的关系
Fig. 6 Relationship between Maximum Pounding Force and PGA

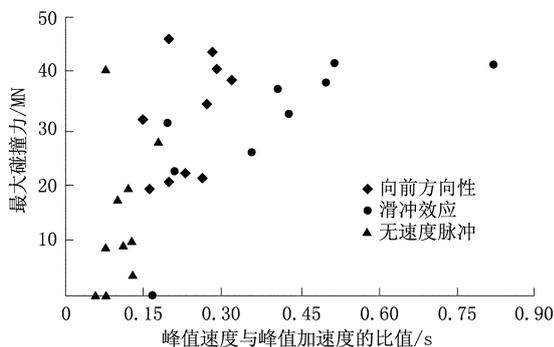


图7 最大碰撞力与峰值速度/峰值加速度(PGV/PGA)的关系
Fig. 7 Relationship between Maximum Pounding Force and PGV and PGA

从图6可以看出,在不同强度地震动作用下,具有向前方向性效应和滑冲效应的脉冲型近断层地震动作用下的邻梁碰撞效应明显比无脉冲地震动作用显著,向前方向性效应略大于滑冲效应,这种趋势随着地震动强度的增加而愈加显著。例如,在多遇地

震下,均未发生碰撞;在设计地震下,具有向前方向性效应和滑冲效应地震动作用的平均碰撞力接近10 000 kN,而无速度脉冲作用下的碰撞力只有61 kN,故对减震率的影响也较小(表2)。同时,从图7可以看出,最大碰撞力与PGV/PGA值具有一定的相关性,随着PGV/PGA值的增大,碰撞反应越强烈。可见,脉冲型近断层地震动比无脉冲地震动明显更易引起碰撞。

由于减隔震装置本身柔性较大,地震下的梁体位移需求一般会增大,故增大了相邻结构间的碰撞几率,实际工程中通常可通过调整伸缩缝宽度及设置防撞缓冲装置等措施来减小碰撞作用。

4 结论

(1) 采用基于功能分离理念的减震棒与拉索限位器的组合减震系统具有较好的减震效果,在设计地震下,这种组合减震系统的减震率可以达到60%以上。

(2) 减震桥梁在具有向前方向性效应和滑冲效应的近断层地震动作用下的反应明显大于无速度脉冲地震动作用下的反应,速度脉冲特性是使结构反应强烈的关键因素,PGV/PGA可做为其地震动强度指标。

(3) 具有向前方向性效应和滑冲效应的脉冲型近断层地震动比无速度脉冲地震动更易引起邻梁碰撞,不考虑碰撞会高估减震设计桥梁的减震效果。

参考文献(References):

- [1] 李爽,谢礼立. 近场问题的研究现状与发展方向[J]. 地震学报,2007,29(1):102-111.
(LI Shuang, XIE Li-li. Current Research and Development Trend of Near-Field Problems in Civil Engineering[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 102-111. in Chinese)
- [2] Kalkan E, Kunnath S K. Effects of Fling Step and Forward Directivity on Seismic Response of Buildings[J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(2): 367-390.
- [3] 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.
- [4] 李承根,高日. 高速铁路桥梁减震技术研究[J]. 中国工程科学,2009,11(1):81-86.
(LI Cheng-gen, GAO Ri. Study on the Shock Absorb-

- ing Technique of High-Speed Railway Bridges[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(1): 81-86. in Chinese)
- [5] 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 and Structural Dynamics, 2004, 33(13): 1 249-1 270.
- [6] 王 炎, 谢 旭, 申永刚. 近场地震作用下铁路减震桥梁地震响应研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(12): 102-109.
(WANG Yan, XIE Xu, SHEN Yong-gang. Seismic Response of Isolated Railway Bridge Subjected to Near-Fault Ground Motion[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(12): 102-109. in Chinese)
- [7] Liao W I, Loh C H, Lee B H. Comparison of Dynamic Response of Isolated and Non-Isolated Continuous Girder Bridges Subjected to Near-Fault Ground Motions[J]. Engineering Structures, 2004, 26(14): 2 173-2 183.
- [8] 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, (1): 39-44.
(WEI Hong-yi, LU Zong-dian, WANG Zhi-qiang. Isolation Characteristic Analysis of Lead Core Rubber Bearings for Near-Field Simply-Supported Girder Bridges[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, (1): 39-44. in Chinese)
- [9] 许 祥, 刘伟庆, 徐秀丽, 等. 考虑限位器影响的山区连续梁桥地震响应分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2012, (3): 1-7.
(XU Xiang, LIU Wei-qing, XU Xiu-li, *et al.* Earthquake Response Analysis of Continuous Girder Bridges in Mountain Area Considering Effect of Restrainers [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2012, (3): 1-7. in Chinese)
- [10] AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design (3rd Edition)[S].
- [11] 钟铁毅, 吕吉应, 张常勇. 铁路隔震连续梁桥地震碰撞响应研究[J]. 中国铁道科学, 2012, (3): 16-20.

(ZHONG Tie-yi, LU Ji-ying, ZHANG Chang-yong. Study on the Seismic Pounding Response of Seismically Isolated Railway Continuous Beam Bridge[J]. China Railway Science, 2012, (3): 16-20. in Chinese)

- [12] Yang D, Pan J, Li G. 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(11): 1 182-1 197.



SHI Yan

石 岩

1985-，男，博士生

2008年毕业于华北科技学院土木工程
工程专业，工学学士，2011年毕业于
石家庄铁道大学桥梁与隧道工程
专业，工学硕士。研究方向：桥梁抗
震理论与减隔震技术

E-mail: syky86@163.com



WANG Dong-sheng

王东升

1974-，男，教授

1995年毕业于武汉水利电力大学
土木工程专业，工学学士，1998年
毕业于中国地震局工程力学研究所
防灾减灾及防护工程专业，工学硕
士，2002年毕业于中国地震局工程
力学研究所防灾减灾及防护工程专
业，工学博士。研究方向：桥梁及结
构工程抗震

E-mail: dswang@dlmu.edu.cn



SUN Zhi-guo

孙治国

1980-，男，讲师

2003年毕业于青岛建筑工程学院
土木工程专业，工学学士，2006年
毕业于大连理工大学结构工程专
业，工学硕士，2012年毕业于中国
地震局工程力学研究所结构工程专
业，工学博士。研究方向：桥梁及结
构工程抗震

E-mail: szg_1999_1999@163.com

(编辑: 王 娣)