

文章编号:1001-8360(2013)02-0099-07

地震作用下高速铁路简支箱梁桥横向 偏心碰撞反应分析

石 岩^{1,2}, 王军文^{3,4}, 王东升^{1,2}, 李建中⁵

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 大连海事大学 辽宁省公路工程重点实验室, 辽宁 大连 116026; 3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 4. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043; 5. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘 要:随着高速铁路的快速发展,越来越多的高速铁路桥梁修建于地震区。我国高速铁路 32 m 简支箱梁桥通常设置型钢挡块作为横向防落梁措施,强震作用下,桥梁上、下部结构由于动力特性的不同而发生不同相振动,从而引起挡块与垫石间的非线性碰撞。本文针对这种横向碰撞现象,建立考虑上部结构与垫石间偏心距、支座非线性和墩柱弹塑性的横向碰撞模型,通过非线性地震反应时程分析,评估防落梁措施的抗震性能,并研究二期恒载、桥墩线刚度、垫块类型及墩柱弹塑性等参数对结构地震响应的影响。结果表明:目前高铁桥梁中采用的防落梁措施对横向限位起到重要作用,强震作用下型钢挡块与垫石之间的碰撞可能引起桥墩破坏,在其间设置硬木垫块可以适当降低碰撞力,有效改善高铁桥梁体系的横向抗震性能。

关键词: 高速铁路; 简支箱梁桥; 偏心碰撞效应; 防落梁措施

中图分类号:U442.55 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2013.02.015

Analysis on Eccentric Pounding Responses of Simply-supported Box Girder Bridges on High-speed Railways under Transverse Earthquake

SHI Yan^{1,2}, WANG Jun-wen^{3,4}, WANG Dong-sheng^{1,2}, LI Jian-zhong⁵

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 5. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Along with rapid development of high-speed railways, more and more bridges have been built in earthquake zones. 32m simply-supported box girder (SSBG) bridges structures have been adopted widely in construction of high-speed railways in China, and installation of steel shear keys has taken as the lateral falling-off prevention measure. Earthquakes induce out-of-phase vibrations between superstructures and substructures due to differences in dynamic characteristics, which results in nonlinear pounding between steel shear keys and bearing bases of reinforced concrete if their relative displacements exceed their initial gaps. In this paper, in view of the pounding phenomenon between steel shear keys and bearing bases under transverse ground motions, an eccentric pounding model considering nonlinear behavior of bearing and elasto-plastic behavior of piers was developed. Through time-history analysis on nonlinear seismic responses, the anti-seismic effect of the falling-off prevention measure was evaluated, and the effects of secondary permanent loads, linear stiffness of piers, types of

收稿日期:2011-06-29; 修回日期:2012-11-06
基金项目:河北省自然科学基金(E2010001066, E2011210028)
作者简介:石 岩(1985—),男,甘肃通渭人,博士研究生。
E-mail:syky86@163.com
通讯作者:王军文(1971—),男,山西天镇人,教授,博士。
E-mail:wjunwen2901@163.com

cushioning block and elasto-plastic behavior of piers on seismic pounding responses were investigated. The results show as follows: The falling-off prevention measure of SSBG bridges plays an important role in limiting lateral dis-

placements; under strong seismic motions, pounding between steel shear keys and bearing bases generates high-magnitude impact forces that may lead to piers damages; cushioning blocks of hardwood may be installed between steel shear keys and bearing bases to appropriately reduce the pounding forces, and effectively improve the lateral seismic performance of SSBG bridges

Key words: high-speed railway; simply-supported box girder (SSBG) bridge; eccentric pounding response; falling-off prevention measure

近年来,随着我国高速铁路建设的快速发展,越来越多高速铁路桥梁修建于地震区,其抗震性能也受到重视。基于纵横向刚度大、抗扭性能好、结构整体性强的特点,箱梁成为高速铁路简支桥梁中的主要结构形式。为了防止地震作用下梁体发生过大横向位移,我国高速铁路桥梁通常在梁底安装焊接成型的钢制挡块作为防落梁措施,同时也起到保护支座的作用。强震作用下,箱梁与下部结构由于动力特性的不同而发生不同相振动,会引起挡块与垫石间的非线性横向碰撞。而高速铁路简支梁桥独特的结构形式和构造措施使其横向地震响应不同于其他桥梁:①顶板在箱梁总重中所占的比重较大,且二期铺装后上部结构质心到梁底板下缘的距离较大,型钢挡块与垫石之间的横向碰撞实质上是偏心碰撞;②采用栓接在箱梁底的型钢挡块作为防落梁措施,有别于公路桥梁中的混凝土抗震挡块。

目前,国内外一些学者^[1-3]研究了横桥向地震的碰撞效应及其相关参数的影响。Maleki^[1]研究认为挡块与梁体之间的初始间隙对横桥向的地震反应影响十分明显,忽略间隙会导致非常不保守甚至错误的结果;聂利英等^[2]发现接触单元刚度变化对于碰撞响应影响很大,不存在使结构产生最不利撞击的初始间隙;邓育林等^[3]提出忽略碰撞过程中的能量损失会高估碰撞反应,最大撞击力总体上随跨径的增大而增大。上述研究皆为针对公路桥梁抗震挡块与梁体间的对心碰撞研究,而文献^[4]研究认为:考虑结构偏心增强了梁体与混凝土挡块间的碰撞非线性,也可能放大横向碰撞响应。对于铁路桥梁地震碰撞效应,孟宪锋、朱晞等^[5]研究了高速铁路箱梁简支梁桥邻梁间的碰撞行为,发现碰撞对固定铰支座的影响很不利;钟铁毅等^[6]通过对铁路隔震连续梁桥地震碰撞响应的研究,认为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。可见,现有的桥梁结构地震碰撞研究主要集中于公路桥梁,而少数的铁路桥梁碰撞研究也仅限纵向邻梁间的碰撞响应分析,针对高速铁路桥梁横桥向挡块与梁体的碰撞研究尚属少见。另外,在强震作用下,碰撞作用可能使桥墩进入弹塑性阶段,其恢复力与结构的变形呈非线性,地震响应与线弹性响应明显

不同^[7]。因此,本文针对偏心高速铁路桥梁的特点和偏心碰撞问题,以高速铁路通用 32 m 简支箱梁桥为背景,建立考虑结构偏心、防落梁措施、支座非线性和桥墩弹塑性的三维空间碰撞模型,通过非线性地震反应时程分析,评估防落梁措施在地震中的作用和抗震性能,并探讨二期恒载、桥墩线刚度、垫块类型和墩柱弹塑性等对结构偏心碰撞地震效应的影响。

1 横向偏心碰撞计算模型

高速铁路中典型的 32 m 简支箱梁桥宽 12.0 m, 梁长 32.6 m, 计算跨度为 31.1 m, 横桥向支座中心距为 4.5 m。高速铁路桥梁防落梁装置的构造与其桥址烈度(或 PGA)相关,本文采用设计地震动加速度为 0.2 g 时的横向防落梁措施,即 I 型钢挡块的高度为 0.6 m, 钢板厚度为 0.032 m, 翼缘宽 0.38 m, 腹板高 0.368 m, 挡块与垫石之间间隙 Δ_G 为 0.03 m, 并填充硬木垫块,其构造图如图 1 所示。桥墩采用流线型圆端型实体墩, 支座采用 PZ-5500 型盆式橡胶支座, 单个支座的水平剪切刚度为 $K=4\ 709\text{ kN/m}$, 恢复力模型如图 2 所示, 其力-位移关系式^[8]为

$$Kx_y = F_{\max} = fN \quad (1)$$

式中: F_{\max} 为临界摩擦力; x_y 为临界位移; f 为滑动摩擦系数; N 为支座所受竖向作用力。

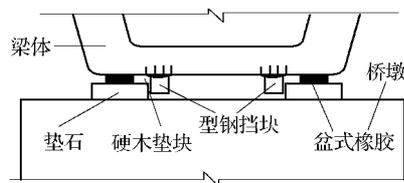


图 1 横向防落梁措施构造图

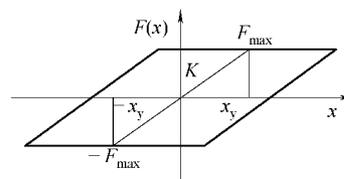


图 2 盆式橡胶支座的恢复力模型

考虑到邻跨的影响,建立三跨简支箱梁桥横向偏心碰撞空间模型,其横向梁端碰撞体系如图 3 所示,由

于整个碰撞体系关于中跨跨中对称,在分析时只考察中墩处的地震响应。图 3 中, M 为上部结构质量; m 为下部结构碰撞体系质量; e 为偏心距离(梁底到质心的距离); k_0 表示桥墩刚度; c_0 为结构阻尼; k 为碰撞刚度; c 为碰撞阻尼; Δ_G 为型钢挡块与垫石之间的初始间隙。碰撞过程中的能量损失采用阻尼器代表,其大小与碰撞过程的恢复系数 r 有关,对于混凝土材料 r 取 0.65。根据能量守恒定律,可以建立阻尼系数 c 的计算公式为^[9]

$$c = 2\xi\sqrt{k\left(\frac{mM}{m+M}\right)} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{-\ln r}{\sqrt{\pi^2 + (\ln r)^2}} \quad (3)$$

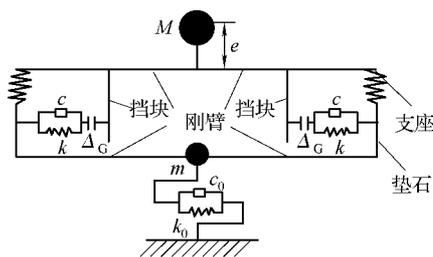
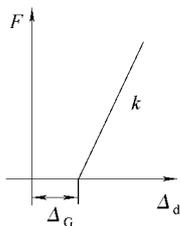


图 3 横向碰撞体系



接触单元恢复力模型

应用结构分析软件 SAP2000,沿横桥向输入加速度峰值为 0.2g 的 3 条地震波(El-Centro、Taft 和汶川地震波)进行非线性时程反应分析,梁体采用线弹性梁单元,墩柱采用带塑性铰的弹塑性梁单元。分析中不考虑桩-土-结构的相互作用,即在墩底固结^[6,10],盆式橡胶支座采用 Wen 非线性 Link 单元模拟^[6,11-12]。假定不考虑挡块与垫石的屈服和破坏,结构的阻尼比取 5%,并采用瑞利阻尼。碰撞是复杂的非线性问题,常采用接触单元法模拟,即在单元中设置一定的间隙,当其变形超过间隙值时,接触单元会被激活而发生碰撞^[6,10-11]。时程分析采用 SAP2000 的非线性 GAP 连接(Link)模拟碰撞(接触)单元^[1,6,10-11],接触单元的恢复力模型如图 4 所示,其非线性力-位移关系为

$$F = \begin{cases} k(\Delta_d - \Delta_G) & \Delta_d - \Delta_G > 0 \\ 0 & \Delta_d - \Delta_G \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Δ_d 为地震作用下垫石与型钢挡块间的横向相对位移。

2 横向偏心碰撞响应分析

2.1 偏心对碰撞响应的影响

为了考察结构偏心对型钢挡块与垫石的碰撞效应,假设二期恒载为 140 kN/m,对应上部结构质量为 1 336.77 t,偏心距为 2.42 m,碰撞刚度 $K_w = 3.375 \times 10^5$ kN/m(硬木垫块拉压刚度),墩高为 6 m。分析得到偏心碰撞与对心碰撞响应之比,如图 5 所示。

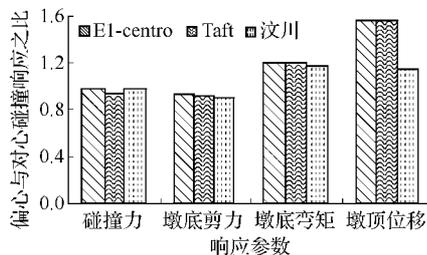


图 5 偏心对碰撞响应的影响

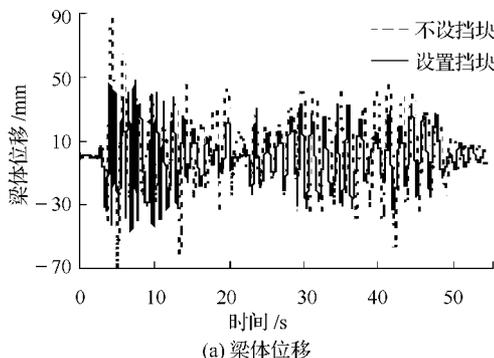
从图 5 可以看出,结构偏心放大了墩顶位移和墩底弯矩,减小了碰撞力和墩底剪力。可见,结构偏心对结构碰撞响应的影响较大,因此在后续分析中均考虑结构偏心的影响,若无特别说明,其模型参数相同。

2.2 防落梁措施的作用

为了解设置型钢挡块对横桥向抗震性能的影响,通过非线性时程分析得到 El-Centro 波作用下梁体位移与墩梁相对位移时程曲线,如图 6 所示。设置型钢挡块后,挡块与垫石在强震作用下发生碰撞,图 7(a)表示左右挡块的碰撞力时程曲线,图 7(b)为 El-Centro 波作用下考虑碰撞与不考虑碰撞时的墩顶位移时程曲线,图 7(c)表示碰撞对墩底最大剪力的影响。在考虑墩柱弹塑性的情况下,考虑碰撞和不考虑碰撞时墩底截面塑性转角峰值见表 1。

表 1 墩底塑性转角峰值

地震波	不考虑碰撞 /($\times 10^{-3}$ rad)	考虑碰撞 /($\times 10^{-3}$ rad)
El-Centro	0	0.492
Taft	0	0.149
汶川	0	0.128



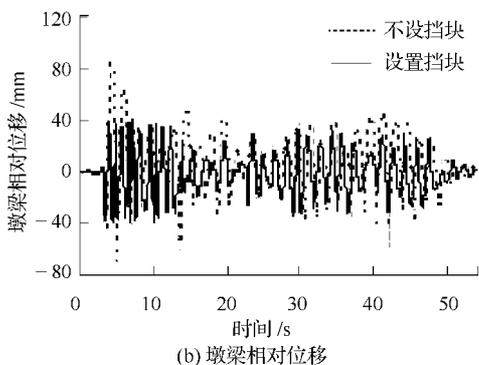


图 6 横向位移时程曲线

由图 6 可见,高速铁路简支箱梁桥不设置横向防落梁措施时,桥梁上部结构会发生较大的横向位移,过大的梁体位移不仅会使梁体移位,支座失效,丧失行车功能,严重时还会引起横向落梁。设置型钢挡块防落梁措施后,可有效降低梁体横向位移和相对位移,对横向限位和防落梁起到重要作用。

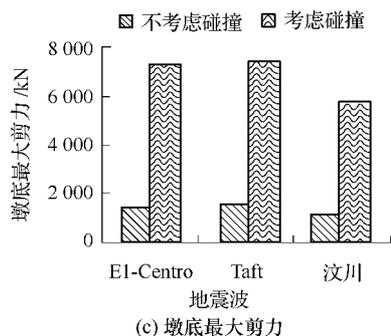
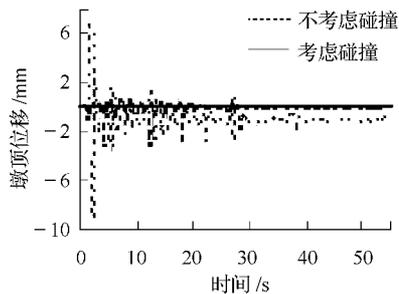
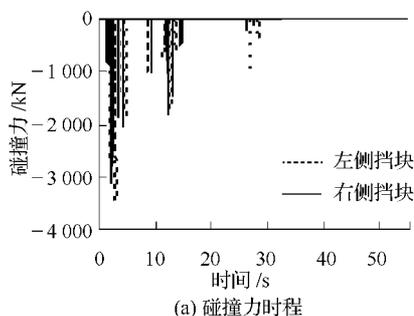


图 7 碰撞对地震响应的影响

由图 7 和表 1 可见,地震作用下可能发生不同相振动,导致型钢挡块与混凝土垫石之间发生碰撞,产生较大的碰撞力,该碰撞力放大了桥墩的地震需求。当

不考虑挡块与垫石间偏心碰撞时,墩底截面保持在弹性范围内,但考虑碰撞之后墩底截面则进入弹塑性范围,强烈的地震动导致墩顶产生一定的残余位移。可见,桥墩可能因为碰撞而遭到剪切或弯曲破坏。

3 横向偏心碰撞参数分析

3.1 二期恒载的影响

由于目前高速铁路桥上无砟轨道结构类型种类较多以及受是否设置声屏障的影响,设计中通常将二期恒载划分为 4 档(100~120 kN/m、120~140 kN/m、140~160 kN/m、160~180 kN/m)。考虑到二期铺装质量对结构动力特性的影响,分别取 4 档二期恒载的中间值作为分析的二期铺装质量,求得对应上部结构的质量和质心,见表 2。

表 2 不同二期荷载对应的分析参数

设计档 /(kN·m ⁻¹)	计算取值 /(kN·m ⁻¹)	上部结构 质量/t	偏心距 e/m
100~120	110	1236.97	2.34
120~140	130	1303.50	2.39
140~160	150	1370.03	2.45
160~180	170	1436.56	2.51

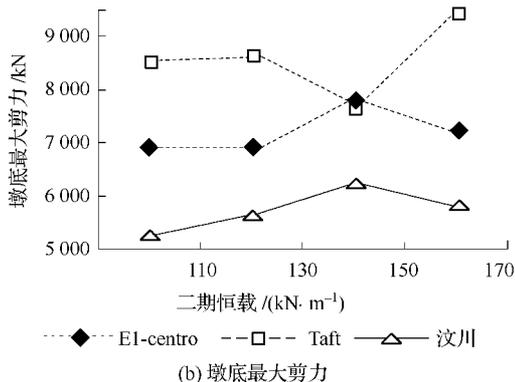
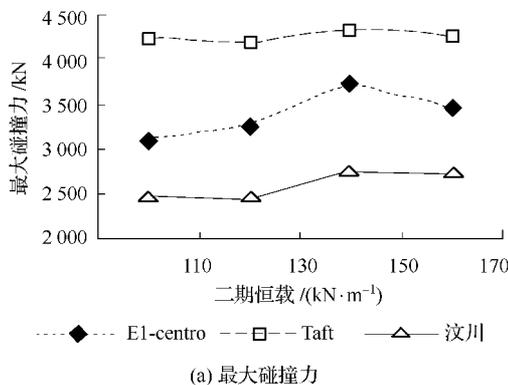


图 8 二期恒载对碰撞效应的影响

为分析二期恒载对横向偏心碰撞效应的影响,选用表 2 所示的二期恒载及其相关参数进行时程分析,得到二期恒载对最大碰撞力和墩底剪力变化的影响,

如图 8 所示。文献[4]初步研究认为:随着上部结构质量的增大,碰撞力、墩底剪力随之单调递增。从图 8 可以看出,随着二期铺装质量的增大,型钢挡块与垫石之间的碰撞力和墩底剪力的变化与之总体符合,但呈现较大波动,这主要是由于二期恒载增大的同时,结构质心随之上移,偏心距也随之增大的耦合作用所致。

3.2 桥墩线刚度的影响

为适应地形等需求,通常需要设置不同高度和截面的桥墩,桥墩线刚度随之变化。高速铁路桥梁通用图设计过程中,桥墩的几何尺寸和配筋与其高度和所处场地的烈度相关,故设计时根据高度划分为若干段(1.5~9.5 m、10~12.5 m、13~15.5 m、16~22 m),同一烈度下某个墩高段的配筋和截面尺寸一致。为了考察桥墩线刚度对碰撞效应的影响,在不同墩高段选择一墩高作为该段的代表值,假设墩高 21 m 时的线刚度为 i_0 进行分析。通过改变桥墩的线刚度,分析得到桥墩线刚度对碰撞力和墩底剪力的影响,如图 9 所示。

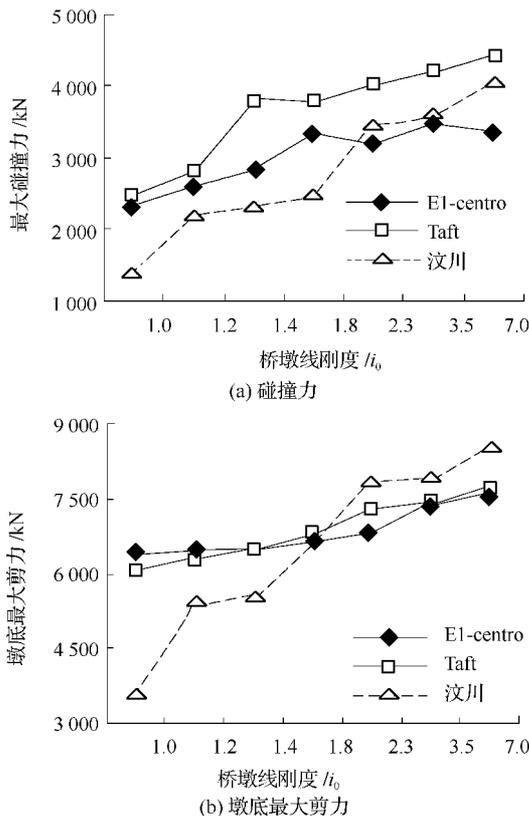


图 9 桥墩线刚度对地震碰撞效应的影响

从图 9 可以看出,随着桥墩线刚度的增大,碰撞力变化存在小范围的波动,但总体呈增大趋势。墩底剪力随线刚度的增大而增大,说明墩身线刚度越大,碰撞引起的撞击和冲剪作用越大,桥墩越容易剪坏,即低矮刚性墩容易受到冲剪破坏。

3.3 垫块类型的影响

为了考察垫石与挡块间垫块类型对横向碰撞反应的影响,假设设置橡胶垫块、硬木垫块(K_w)和无垫块(挡块抗推刚度: 7.17×10^5 kN/m)3 种情况进行对比分析,其中,橡胶垫块为两块文献[13]中实验采用的厚 100 mm、截面面积为 $250 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的矩形垫块,刚度为 1.25×10^4 kN/m。图 10 为随着垫块刚度的变化,碰撞力、墩底剪力和梁体位移的变化趋势图。

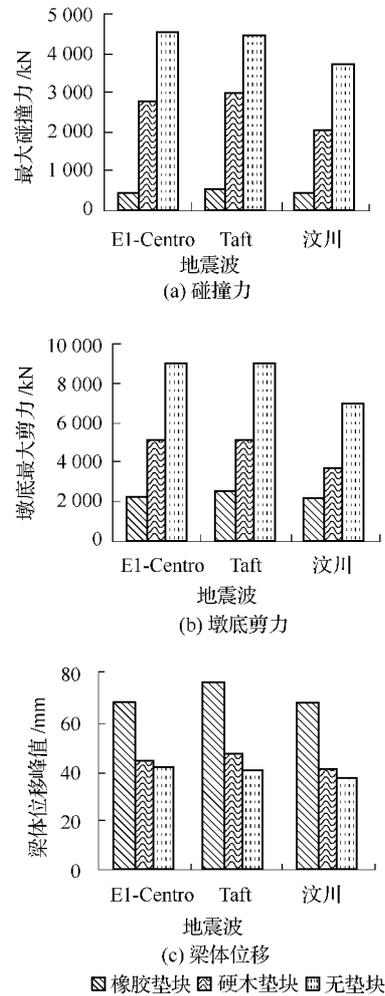


图 10 垫块刚度对地震效应的影响

由图 10 可见,型钢挡块与垫石之间设置垫块明显减小了接触点的碰撞力和墩底剪力,当采用缓冲效果较好的橡胶垫时,其碰撞力和墩底剪力减小的非常明显。但是,随着刚度的降低,梁体的位移相对增大,可能超出支座的变形范围而使其受到破坏。采用刚度相对较大的硬木垫块不仅可以适当降低碰撞力,还能够增强横向的限位作用,达到保护桥墩和支座以及防落梁的效果,可有效改善高铁桥梁的横向抗震性能。

3.4 桥墩弹塑性的影响

为了分析墩柱弹塑性的影响,假设桥墩高度为

9 m,且塑性铰发生于墩底截面,墩底截面的 $M-\phi$ 曲线采用 UCFyber 软件计算得到。通过横桥向时程分析,

得到墩柱弹塑性对最大碰撞力、墩底最大剪力和墩顶位移的影响,见表 3。

表 3 墩柱弹塑性的影响

地震波	最大碰撞力/kN			墩底最大剪力/kN			墩顶位移峰值/mm		
	考虑 (a)	不考虑 (b)	(a)/(b)	考虑 (c)	不考虑 (d)	(c)/(d)	考虑 (e)	不考虑 (f)	(e)/(f)
El-Centro	2767.6	3193.7	0.87	7499.6	7797.3	0.96	9.12	3.77	2.42
Taft	3644.9	4015.9	0.91	6009.0	9275.5	0.65	4.71	4.09	1.15
汶川	2561.5	3441.8	0.74	5659.5	7795.6	0.73	3.84	3.01	1.27

从表 3 可以看出,考虑墩柱的弹塑性变形时,最大碰撞力和墩底最大剪力较不考虑墩柱弹塑性时都有所减小,而墩顶位移则相对增大。可见,在强震作用下,挡块与梁体间的碰撞可能使桥墩截面进入塑性变形范围,极大地改变了桥墩的位移需求,由于墩柱的弹塑性滞回耗能作用,使碰撞效应有所减小。

4 结论

目前高速铁路桥梁中采用的横向防落梁措施对横向限位和防落梁能够起到重要作用。随着二期恒载的增大,碰撞偏心距随之上移,在其耦合作用下,横向地震碰撞效应总体随二期铺装质量增大,但呈现较大波动;桥墩线刚度越大,碰撞引起的撞击和冲剪作用越大,故应重视碰撞作用对低矮刚性墩的冲剪破坏。型钢挡块和垫石之间设置硬木垫块可以适当降低碰撞力,增强限位效果,有效改善高铁桥梁的横向抗震性能。强震作用下型钢挡块与垫石之间的碰撞作用可能引起桥墩的剪切、弯曲破坏,但当桥墩进入弹塑性范围,由于墩柱的滞回耗能作用使碰撞效应有所减小。

参考文献:

[1] MALEKI S Effect of Side Retainers on Seismic Response of Bridges with Elastomeric Bearings [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(1): 95-100.

[2] 聂利英,李建中,范立础. 地震作用下结构碰撞的模型参数及其影响分析[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 143-146.

NIE Li-ying, LI Jian-zhong, FAN Li-chu. Selection of Pounding Analysis Parameters and Its Effects on Structure under Earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 143-146.

[3] 邓育林,彭天波,李建中. 地震作用下桥梁结构横向碰撞模型及参数分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(9): 104-107.

DENG Yu-lin, PENG Tian-bo, LI Jian-zhong. Pounding Model of Bridge Structures and Parameter Analysis under Transverse Earthquakes [J]. Journal of Vibration and

Shock, 2007, 26(9): 104-107.

[4] 石岩. 地震作用下简支梁桥横向碰撞反应分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2011.

[5] 孟宪锋,朱晞. 近场地震作用下高速铁路简支梁桥的碰撞行为[J]. 北京交通大学学报, 2006, (4): 73-76.

MENG Xian-feng, ZHU Xi Pounding Behavior of High-speed Railway Simple Supported Bridges under the Near-fault Earthquakes [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2006, (4): 73-76.

[6] 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, LÜ Ji-ying, ZHANG Chang-yong. Study on the Seismic Pounding Responses of Seismically Isolated Railway Continuous Beam Bridge [J]. China Railway Science, 2012, (3): 16-20.

[7] 王军文,李建中,范立础. 连续梁桥纵向地震碰撞反应参数研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 42-47.

WANG Jun-wen, LI Jian-zhong, FAN Li-chu. Parametric Study of Longitudinal Seismic Pounding Response for Continuous Girder Bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 42-47.

[8] 范立础,胡世德,叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[9] ANAGNOSTOPOULOS S A. Pounding of Buildings in Series During Earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1988, (16): 443-456.

[10] 江辉,李宇,杨庆山,等. 浅源强震下 RC 梁式桥横向碰撞参数研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(4): 53-59.

JIANG Hui, LI Yu, YANG Qing-shan, et al. Parameter Study on Transverse Pounding of RC Girder Bridge under Typical Strong Earthquake from Shallow Source [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(4): 53-59.

[11] 何健,叶爱君. 连续斜交梁桥地震下碰撞效应分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(4): 1475-1481.

HE Jian, YE Ai-jun. Seismic Response of Continuous Skew Bridges with Pounding Effect [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(4): 1475-1481.

[12] WEN Y K. Method for Random Vibration of Hysteretic

Systems[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1976, 102(2): 249-263.

a Strong Ground Motion[C]//12wcee, 2000.

[13] KAWASHIMA K, SHOJI G. Effect of Restrainers to Mitigate Pounding Between Adjacent Decks Subjected to

(责任编辑 洪学英)

《铁道学报》论文参考文献著录格式要求

作者在撰写论文时,要将自己的成果和他人的成果区别开来,即,只要在文中引用了他人文献,就要在文内的适当位置进行标注,并将所引用文献按引用的先后顺序在文后以一定的著录格式依次列出。文后参考文献要求采用文献本身的文字进行著录,但中文期刊要求采用中英文两种文字进行著录。详细说明如下。

本刊执行国家标准《文后参考文献著录规则》(GB/T 7714-2005)、《科学技术期刊编排格式》(GB/T 3179-92)及《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范》,并采用顺序编码标注制。

1 引用的文献在文内标注格式

(1)对论文所引用的文献,要按它们在文中出现的先后,在文献的著者或成果叙述文字的右上角用方括号标注序号,或者作为语句的组成部分。例如:

• 1981年日本仅给出了扁平车轮冲击钢轨的垂直冲击速度公式^[1],……

- 薛杜普等^[2]指出棉酚从体内排泄缓慢。
- 文献^[2]指出,棉酚从体内排泄缓慢。
- 定理的证明见文献^[3]。

(2)引用多篇文献或同一著者多篇文献时,只需将各篇文献的序号在方括号内全部列出,各序号间用“,”分开;如遇连续序号,可用“-”连接,略去中间序号。例如:

• 早期的研究结果^[2,4,6-9]表明,……

(3)多次引用同一著者的同一篇文章时,在正文中标注首次引用该文献的文后参考文献序号,并在该序号的“[]”外著录引文页码。例如:

• 由于“思想”的内涵是“……的结果”^{[2]194},……。
……“……方向和目标”^{[2]354},……

2 文后参考文献著录格式及示例

2.1 专著及专著中的析出文献

“专著”是以单行本或多卷册形式,在限定期限内出版的非连续性出版物。主要包括图书、学位论文、技术报告、标准、会议文集、汇编、多卷书、丛书等。“专著的析出文献”是指专著中析出的具有独立篇名的文献。为方便读者,建议图书、学位论文、科学技术报告、标准、多

卷书、丛书等采用“专著”的著录格式;会议文集、论文集、汇编等采用“专著的析出文献”著录格式。

2.1.1 专著

其著录项目和格式为:

[序号]主要责任者.题名:其他题名信息[文献类型标志].其他责任者.版本(第1版不标注).出版地:出版者,出版年:引文所在的起止页码。

(1)图书

[1]翟婉明.车辆-轨道耦合动力学[M].北京:中国铁道出版社,1997:74-80.

(2)学位论文

[1]党建武.神经网络方法求解组合优化问题的研究[D].成都:西南交通大学,1996:20-25.

(3)科学技术报告

[1]朱家荷,韩调.铁路区间通过能力计算方法的研究[R].北京:铁道部科学研究院运输及经济研究所,1989:34.

(4)技术标准

[1]全国文献工作标准化技术委员会第七分委员会. GB/T 5795-1986 中国标准书号[S].北京:中国标准出版社,1986.

2.1.2 专著中的析出文献

其著录项目和格式为:

[序号]析出文献主要责任者.析出文献题名[文献类型标志]//专著主要责任者.专著题名:其他题名信息.版本项.出版地:出版者,出版年:析出文献的页码。

(1)会议文集、论文集、汇编

[1]张玉心.重载货车高摩擦系数合成闸瓦的研制和应用[C]//中国铁道学会.国际重载运输协会制动专题讨论会论文集.北京:中国铁道学会,1988:242.

[2]HUNNINGHAKS G W, GADEK J B, SZAPIEL S V, et al. The Human Alveolar Macrophage [C]// HARRIS C C ed. Cultured Human Cells and Issues in Biomedical Research. New York: Academic Press, 1980: 54-56.

(下转第 114 页)