

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.12.010

地震作用下高速铁路多联大跨连续梁桥 碰撞效应研究

刘正楠, 陈兴冲, 张永亮, 马华军, 刘尊稳
(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为研究采用支座隔震设计的高速铁路多联大跨连续梁桥在地震作用下的邻梁碰撞效应, 选取某铁路三联12跨预应力混凝土连续梁为实际工程背景, 采用SAP2000分别建立考虑CRTS II型板式无砟轨道体系的线桥一体化模型和考虑轨道约束的传统模型, 基于PEER强震数据库, 选取近远场共7条地震波, 考虑地震波纵向和纵向+竖向两种输入模式, 首先以碰撞力峰值及碰撞次数作为评价指标, 讨论了两模型伸缩缝处的响应规律, 并揭示其机理, 然后考虑伸缩缝不同间隙, 对两种模型的碰撞响应进行对比, 最后引入碰撞影响因子, 对碰撞引起的固定支座的剪力变化情况进行了分析。结果表明: 不同地震波激励下碰撞特征为一次碰撞激发巨大碰撞力和多次连续碰撞; 轨道系统的存在使得远场地震动下碰撞消失, 近场地震动下碰撞减弱; 无论邻梁碰撞反应还是碰撞对下部结构的影响, 相比远场地震动, 脉冲特性使得近场地震动作用效应更剧烈; 考虑竖向地震动时, 双曲面隔震支座动反力变化可能引起支座滑移位移增大导致碰撞效应增大; 碰撞对传统模型固定墩的影响较隔震体系更明显。建议位于高烈度区以支座为隔震设计的桥梁考虑邻梁碰撞进行减隔震设计计算。

关键词:桥梁工程; 碰撞效应; 数值分析; 连续梁桥; 双曲面减隔震支座; 脉冲特性; 轨道约束

中图分类号: U442.5⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2018)12-0063-09

Study on Pounding Effect of Multi-unit Long-span Continuous Girder Bridge in High-speed Railway under Earthquake

LIU Zheng-nan, CHEN Xing-chong, ZHANG Yong-liang, MA Hua-jun, LIU Zun-wen
(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: In order to study the pounding effect of adjacent beams of high-speed railway multi-unit long-span continuous beam bridge under earthquake effect, by using bearing isolation design, a 3-unit 12-span PC continuous beam on railway is taken as the actual engineering background. The integrated model considering the CRTS II -type ballastless track system and the traditional model without considering the track constraint are established by using SAP2000. Based on PEER strong earthquake database, 7 seismic waves which in near and far field with horizontal input and horizontal + vertical input modes are selected. First, using the peak impact force and the number of poundings as the evaluation indexes, the response rules of the expansion joints of the 2 models are discussed and the mechanism is revealed. Then, the pounding responses of the 2 models are compared considering the different clearances of the expansion joints. Finally, by introducing the pounding influencing factor, the change of shear force of the fixed support caused by the pounding is analyzed. The result shows that (1) the characteristic of pounding under the excitation of different seismic waves is a large pounding and a number of successive poundings; (2) the pounding of the far-field ground

收稿日期: 2017-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51468031, 51768037); 兰州交通大学青年科学基金项目(2015030)

作者简介: 刘正楠(1993-), 男, 甘肃会宁人, 博士研究生. (zhengnan_liu@sina.com)

motion disappears and the pounding in the near-field ground motion is weakened considering track constraint; (3) whether the pounding of adjacent beams or the influence of pounding on substructure, the pulse characteristic makes the near-field seismic effect more intense compared to the far-field seismic waves; (4) considering the vertical ground motion, the change of the dynamic reaction force of the double spherical aseismic bearing may cause the bearing slip increasing and then cause the increase of pounding effect; (5) the impact of pounding on the traditional model fixed pier is more obvious than that on the isolated system. It is suggested that for the bridges which using bearing as the isolation design in the high seismic intensity area, the pounding effect of adjacent beams should be considered in the design and calculation of seismic isolation.

Key words: bridge engineering; pounding effect; numerical analysis; continuous girder bridge; double spherical aseismic bearing; pulse characteristic; track constraint

0 引言

以桥代路是新建高速铁路的普遍特征,从实现线路平直和平顺,尽量减少线路的沉降出发,多联多跨连续梁桥应运而生。位于高烈度区桥梁通常采用减隔震设计来减小地震反应,其中支座隔震技术最为常用,国内外相继研发了高阻尼橡胶支座、摩擦摆支座、双曲面支座、非线性阻尼幅支座等^[1]主要用于大跨度桥梁的减隔震支座。

以支座隔震设计的桥梁,是通过增大墩梁间的相对位移或支座阻尼耗能来确保桥墩的内力储备,因此,在罕遇地震下的邻梁碰撞可能性会大大增加。1994年美国北岭地震中,洲际5号道和14号道桥梁的伸缩缝及桥台均发生剧烈的碰撞,造成严重的破坏;1995年日本阪神地震中,碰撞使得阪神高速公路桥桥面纵向位移达到0.3m;2008年汶川地震中,庙子坪大桥引桥由于碰撞使得第5跨在伸缩缝处坠落,可见碰撞带来的破坏是巨大的^[2]。目前,关于碰撞的分析主要是基于刚体碰撞理论,王东升等^[3]在P. K. Malhotra^[4]研究的基础上引入表征邻梁碰撞的弹簧,采用解析和数值结合方法对于刚体碰撞理论深入研究,得到邻梁碰撞刚度的取值方法。而关于碰撞效应的研究主要体现在:(1)碰撞简化模型的提出,何健等^[5]基于一座三跨连续斜交桥提出一种带碰撞单元并考虑竖向、水平扭转的简化模型,并与精细化模型对比探讨其准确性;(2)参数敏感性分析,包括伸缩缝间隙,碰撞刚度等^[6-10]对各种类型桥梁碰撞的影响,结果表明碰撞刚度的增大会增大碰撞效应,伸缩缝宽度增大则减弱等结论;(3)碰撞振动台试验研究^[11-12],对可能影响碰撞效应的参数进行试验并与数值模拟结果对比,验证数值模拟的准确性;(4)针对震害现象结合几种纵向连接装置的性能,对防碰撞与防落梁有效措施进行

研究^[13-14]。

目前,关于铁路桥梁碰撞方面研究相对薄弱,大多以公路简支梁桥为主,同时由于铁路桥梁上部结构质量较公路桥大很多,地震作用下一旦梁端发生碰撞反应,造成梁端损伤,落梁等风险不可估量。为此,本研究以某高速铁路三联12跨预应力混凝土连续梁桥为工程背景,其中一联为减震体系,分别建立考虑邻梁碰撞效应的传统模型和轨道约束体系模型,输入近远场共7条地震波,研究邻梁碰撞效应及考虑碰撞效应的地震反应。

1 动力分析模型

1.1 工程背景

本研究选取某高速铁路三联(60+100+60)m,(60+4×106+60)m,(60+100+60)m预应力混凝土连续梁桥进行相关研究。主梁截面采用单箱单室变高度变截面直腹板形式,箱梁顶宽12.6m,底宽6.7m。中支点梁高7.85m,跨中及边跨直线段梁高4.85m,梁底下缘按二次抛物线变化。主梁采用C55混凝土。桥墩采用重力式桥墩,桩基均采用钻孔灌注桩。墩身及桩基均采用C35混凝土。二期恒载为140kN/m。其中第二联(60+4×106+60)m连续梁桥采用双曲面减隔震支座,即减震体系,第一、三联均采用普通盆式橡胶支座,即传统体系。主梁截面尺寸见图1,桥墩相关参数见表1。

1.2 非线性单元力学模型

研究碰撞效应时,着重考虑两个方面的非线性因素:(1)双曲面减隔震支座;(2)邻梁碰撞效应。

双曲面减隔震支座采用双线性本构。其中活动支座恢复力模型与摩擦摆减隔震支座相同,固定支座由于螺栓的存在,剪断前类似盆式橡胶支座,剪断后为摩擦摆支座。其中 K_0 为屈服前刚度; K_1 为屈

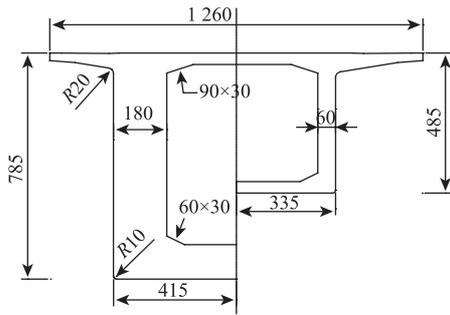


图 1 主梁横截面 (单位: cm)

Fig. 1 Cross-section of main girder (unit: cm)

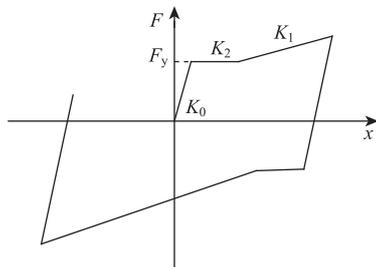
表 1 桥墩相关参数

Tab. 1 Related parameters of piers

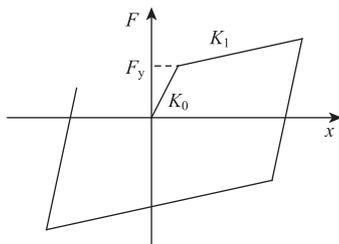
墩号	墩高/m	截面尺寸 (B×H)
P1/P4/P10/P13	24	4.12 m×9.12 m
P2/P3/P11/P12	25	4.83 m×10.32 m
P5/P9	27	5.82 m×10.82 m
P6/P8	27	5.98 m×10.98 m
P7	27	7.00 m×11.00 m

注: B 为纵桥向, H 为横桥向。

服后刚度; K_2 为开始滑动刚度; F_y 为屈服力。滞回曲线见图 2。



(a) 活动支座



(b) 固定支座

图 2 双曲面滞回曲线

Fig. 2 Hysteretic curve of double spherical

接触单元法为抗震分析中较为常用的方法^[8]。其中 Kelvin 模型为一个刚度为 K_k 的线性弹簧与阻尼器 C_k 并联来模拟碰撞, 接触力 F_c 的计算式如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} F_c = K_k(u_1 - u_2 - d_0) + C_k(\dot{u}_1 - \dot{u}_2), & u_1 - u_2 - d_0 \geq 0 \\ F_c = 0, & u_1 - u_2 - d_0 < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中, K_k 为接触刚度; d_0 为间隙; u_1, u_2 为接触单元的两质点位移; \dot{u}_1, \dot{u}_2 为接触单元连接的两个质点速度; C_k 为阻尼系数, 阻尼器模拟碰撞能量损失, 阻尼大小与碰撞过程恢复系数 e 有关, 对于混凝土材料 e 取 0.65。阻尼系数的计算式见式 (2)。

$$C_k = 2\xi\sqrt{K_k\left(\frac{m_1m_2}{m_1+m_2}\right)}, \quad \xi = \frac{-\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}}, \quad (2)$$

式中, m_1 和 m_2 为接触单元连接的两个质点质量; ξ 为振型阻尼比。碰撞单元及接触力关系见图 3, 图 4。

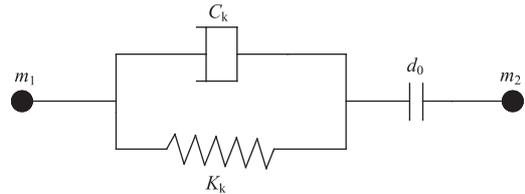


图 3 碰撞单元

Fig. 3 Pounding element

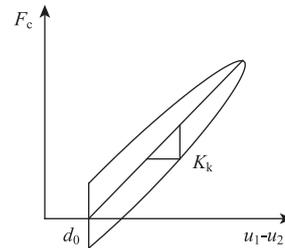


图 4 接触力关系

Fig. 4 Relationship of contact forces

1.3 CRTS II 型板式无砟轨道

桥上常见的无砟轨道主要有双块式和板式两种类型。文中研究基于 CRTSII 型板式无砟轨道, 其主要由钢轨、扣件、轨道板、CA 砂浆调整层、底座板、两布一膜滑动层及侧向挡块等构成。其断面图见图 5。

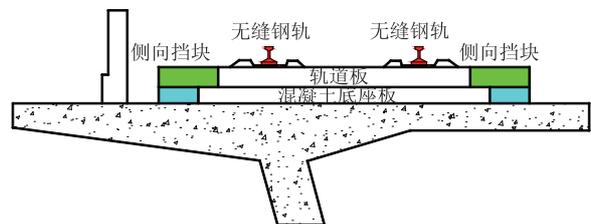


图 5 无砟轨道断面

Fig. 5 Cross-section of ballastless track

1.4 有限元模型

本研究采用 Sap2000 Nonlinear 程序分别建立传统模型（模型1）和考虑 CRTS II 型板式无砟轨道（模型2）的全桥三维空间有限元模型，顺桥向为 X 轴，横桥向为 Y 轴，竖向为 Z 轴。主梁，桥墩，采用 Frame 单元模拟，承台以集中质量形式堆积于墩底，双曲面减隔震支座采用 Friction Isolator 单元模拟，普通盆式橡胶支座依据活动类型采用 Wen 单元模拟，考虑近场地震作用下桥墩可能进入弹塑性，在传统体系第一、三联墩底设置非线性弹簧单元模拟塑性铰，该单元滞回特性采用 Takeda 模型，并采用 XTRACT 程序计算得到桥墩的弯矩 - 曲率关系如表2所示。桩土作用采用六弹簧模拟并施加于承台底，计算中取 $m = 20\ 000\ \text{kN/m}^4$ 。其中，模型2中按

实际尺寸将钢轨单独建模，轨道板和底座板（道床板）整体建模，钢轨和道床板同样也采用 Frame 单元模拟，在固定支座上方梁体设剪力齿槽，剪力齿槽采用水平刚性连接模拟，扣件的纵向阻力取 $6.5\ (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}) / \text{线}$ ，竖向动刚度取 $50\ \text{kN/mm}$ ，底座板与主梁的摩擦效应纵向非线性弹簧刚度通过单元间纵向阻力换算得到为 $125.62\ \text{MN/mm}^{[15]}$ ，均采用理想的弹塑性模型模拟。模型1及模型2示意图见图6。

表2 桥墩的弯矩 - 曲率关系

Tab. 2 Moment - curvature relationship of piers

桥墩	曲率/ $(\times 10^{-3}\ \text{m})$		弯矩/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	
	屈服	极限	屈服	极限
P1 (P4, P10, P13)	0.83	29.75	146 700	172 800
P2 (P3, P11, P12)	0.91	28.96	254 900	319 600

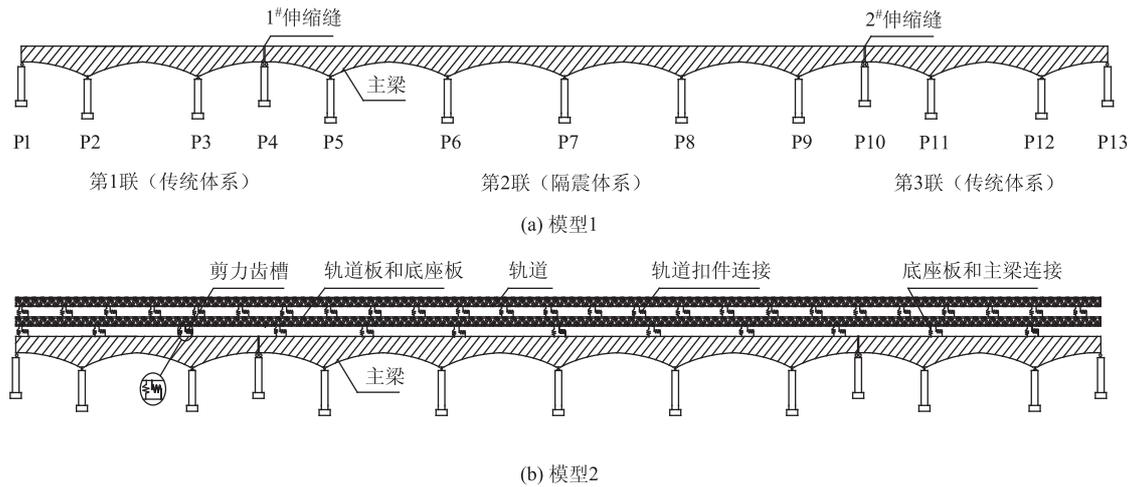


图6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

1.5 地震动输入

该桥位于8度区，设计地震加速度峰值 $0.2g$ ，罕遇地震加速度峰值 $0.38g$ 。Loh 等^[16]指出，当 $PGV/PGA > 0.2\ \text{s}$ 时近场效应明显，本研究中，罕遇地震下，非线性时程分析从 PEER 数据库选出7条实测加速度时程见表3，并采用式(3)将加速度峰值

统一调至 $0.38g$ 。

$$\alpha(t)' = \frac{A'_{\max}}{A_{\max}} \alpha(t), \quad (3)$$

式中， $\alpha(t)$ 和 $\alpha(t)'$ 分别为调整前后地震加速度曲线； A_{\max} 和 A'_{\max} 分别为调整前后地震加速度峰值。其中

表3 选取地震波资料

Tab. 3 Selected seismic wave parameters

No.	地震记录	台站	震级	$V_s/(30\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$PGV/(m \cdot \text{s}^{-1})$	$PGA/(m \cdot \text{s}^{-2})$	$\frac{PGV}{PGA}/\text{s}$
1	Imperial Valley	Chihuahua	6.53	242.05	0.248	2.699	0.09
2	Kern County	Taft Lincoln School	7.36	385.43	0.152	1.589	0.10
3	San Fernando	Palmdale Fire Station	6.61	452.86	0.137	1.121	0.12
4	Whittier Narrows	Santa Fe Springs - E. Joslin	5.99	339.06	0.344	4.686	0.07
5	Northridge	Jensen Filter Plant	6.69	373.07	1.114	4.105	0.27
6	Chi - Chi_Taiwan (China)	TCU068 - EW	7.62	487.34	2.800	5.050	0.55
7	Chi - Chi_Taiwan (China)	TCU051 - EW	7.62	350.06	0.538	1.602	0.34

注：No. 1~4 为远场地震波；No. 5~7 为近场地震波； $V_s/(30\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 为 30 m 深度土层的剪切波速。

近场地震波的速度时程见图 7, 3 条波均具有明显的速度脉冲。

2 地震激励下连续梁桥的碰撞效应

碰撞刚度、碰撞间隙、隔震支座的参数等直接影响着碰撞力及碰撞次数^[16]。文中研究碰撞效应, 碰撞刚度取较短主梁轴向刚度^[17-18], 经计算 $K_k = 4.2 \times 10^6$ kN/m; 分别取碰撞间隙 $d_0 = 0.10, 0.13,$

0.16, 0.20 m, 双曲面减隔震支座设计参数: P4, P10 墩支座 (第 2 联侧) 竖向承载力为 $W = 8\ 000$ kN, 球心距 $H = 2.3$ m, 其余各墩其余支座竖向承载力 $W = 45\ 000$ kN, 球心距 $H = 5.3$ m, 摩擦系数均取 $\mu = 0.08$, 普通盆式橡胶支座设计参数: P1, P13 墩支座, P4, P10 墩支座 (第 1、3 联侧) 竖向承载力为 $W = 6\ 000$ kN, 其余各墩竖向承载力 $W = 45\ 000$ kN, 顺桥向设计位移为 0.25 m, 摩擦系数均取 $\mu = 0.02$ 。

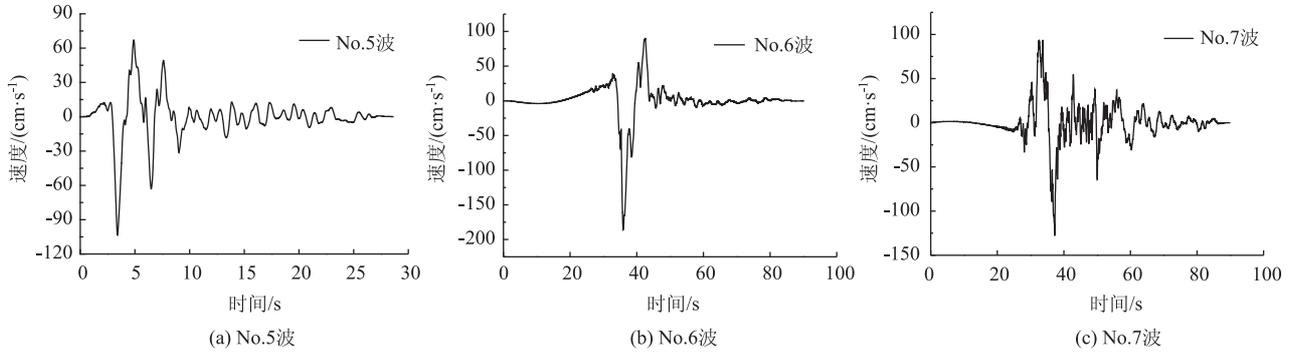


图 7 近场地震波速度时程

Fig. 7 Time histories of near-field seismic wave speed

2.1 分析工况

研究显示^[19]近断层的竖向地震动是比较剧烈的。鉴于文中研究对象第 2 联采用双曲面减隔震支座, 竖向地震作用下产生的支座竖向动反力直接影响隔震支座的性能^[20], 因此考虑竖向地震动, 取水平地震基本加速度值的 65% 进行动力计算, 针对两种模型按表 4 工况分别进行非线性分析。

表 4 分析工况

Tab. 4 Analysis cases

地震波输入方式	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
纵向	不考虑碰撞	考虑碰撞	—	—
纵向 + 竖向 (0.65 × 纵向)	—	—	不考虑碰撞	考虑碰撞

2.2 模型 1 伸缩缝处碰撞力响应

图 8、图 9 给出碰撞间隙取 0.10 m 时模型 1 对应 No. 1, No. 5 波激励下伸缩缝处碰撞力时程曲线。图 10 给出各地震波激励下 1#, 2# 伸缩缝处碰撞力峰值及碰撞次数比较图。

从图 8~10 可得: (1) 在 No. 1, No. 5 地震波激励下, 1#, 2# 伸缩缝处均发生了不同程度的碰撞, 且同一条波作用下碰撞发生的时间区段大致相同, 即与地震波幅值最大波动范围相吻合。(2) 无论是否考虑竖向地震动, 从碰撞力时程曲线可看出碰撞具有两大特征, 即一次碰撞激发较大的碰撞力和多次连续碰撞。(3) 从碰撞力峰值和次数图可以看出

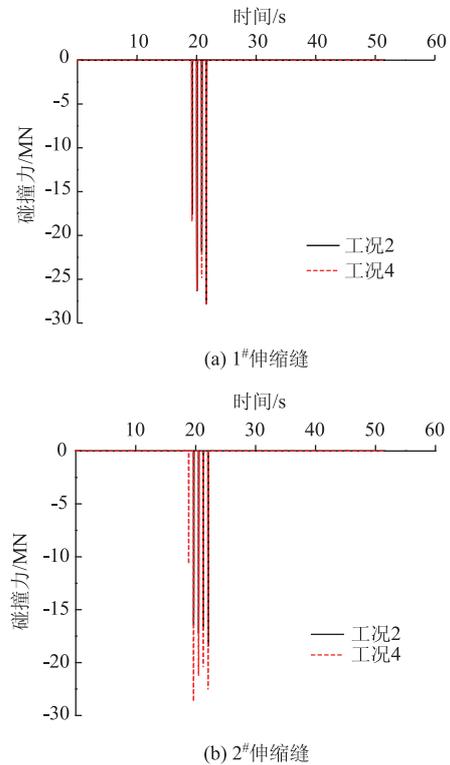


图 8 碰撞力时程曲线 (No. 1 波)

Fig. 8 Time history curves of pounding forces (wave No. 1) No. 4 地震波激励下, 1#, 2# 伸缩缝均未发生碰撞。(4) 对于 1#, 2# 伸缩缝, 不同地震波激励下的碰撞效应不同, No. 1~No. 4 (远场) 弱于 No. 5~No. 7 (近场) 地震波激励下碰撞效应。(5) 无论近远地

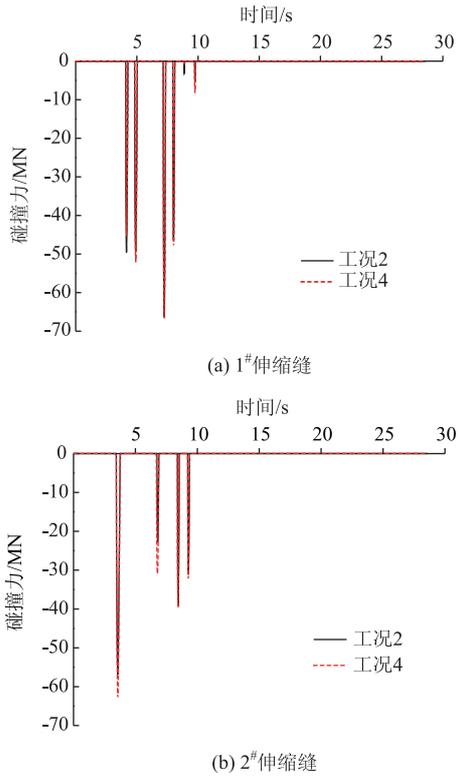


图9 碰撞力时程曲线 (No. 5 波)

Fig. 9 Time history curves of pounding forces (wave No. 5)

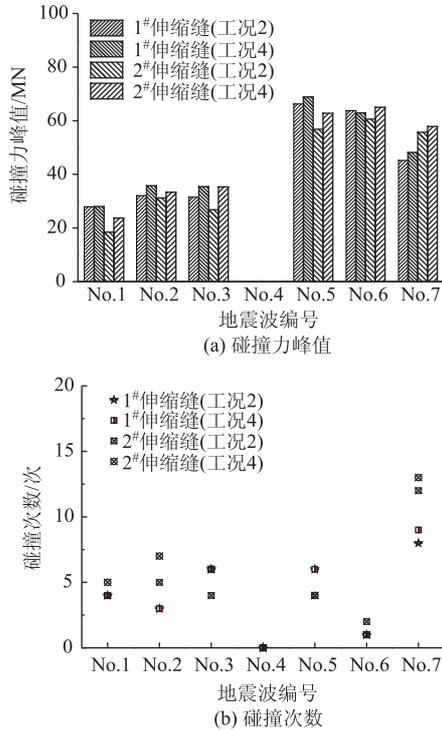


图10 碰撞力峰值及碰撞次数

Fig. 10 Peak pounding forces and pounding numbers
震动, 考虑竖向地震动后碰撞力峰值呈现出一定的放大作用。

产生上述情况的原因在于: PGV/PGA 越大, 表明地震动可能含有较长特征周期的速度脉冲, 在相同的地震动强度 (PGA) 下, No. 5 ~ No. 7 (近场) 波作用下碰撞效应更为显著, 而在 No. 1 ~ No. 3 (远场) 波作用下较弱, 其中 No. 4 地震波 ($PGV/PGA = 0.07$) 作用下未发生碰撞, 相比远场地震动, 近场地震动脉冲幅值大, 脉冲持时长, 导致结构产生更剧烈的地震反应, 可见碰撞效应与地震波的频谱特性有直接的关系。而考虑竖向地震动对碰撞的放大效应主要是双曲面减隔震支座在竖向地震动作用下, 支座动反力的变化对支座的滑动位移有较大的影响, 支座滑动位移增大导致碰撞效应的放大。

2.3 模型2 伸缩缝处碰撞力响应

图 11 给出模型 2 对应各地震动激励下 1#, 2# 伸缩缝处碰撞力峰值及碰撞次数比较图。

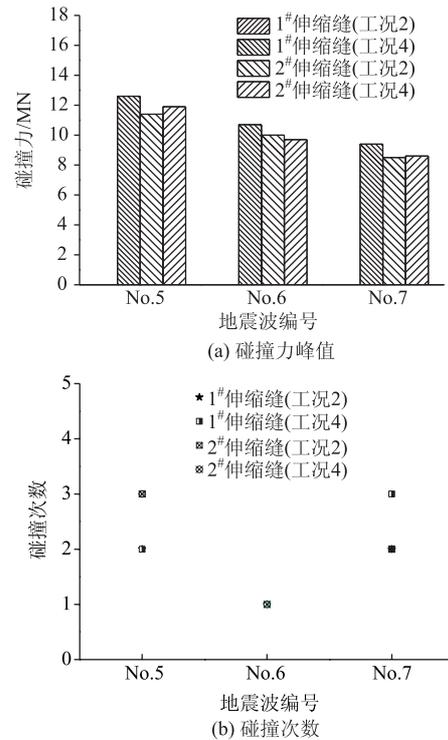


图11 碰撞力峰值及碰撞次数

Fig. 11 Peak pounding forces and pounding numbers

模型 2 对应地震波激励下碰撞力时程曲线与模型 1 相似, 不再描述。从碰撞力峰值及碰撞次数来看, 由于考虑轨道约束时, 在远场地震动 (No. 1 ~ No. 4) 激励下伸缩缝处均未发生碰撞, 即也只有轨道约束对结构地震反应存在影响, 而近场地震动 (No. 1 ~ No. 4) 激励下碰撞效应大幅减小, 由于轨道系统提高了全联纵桥向约束, 在一定程度上削弱了墩梁相对位移, 另外罕遇地震下扣件、两布一膜

滑动层进入非线性进行耗能, 导致远场地震波下邻梁均未发生碰撞, 近场地震波下碰撞力及碰撞次数均减小, 由此可得考虑轨道约束对高速铁路多联大跨连续梁桥的碰撞有一定的遏制作用。

2.4 不同间隙对邻梁碰撞的影响

为探究碰撞间隙对本研究背景桥梁的影响, 针对模型 1, 2 取不同碰撞间隙 (0.10, 0.13, 0.16, 0.20 m) 时的碰撞力峰值及碰撞次数进行对比, 图 12 仅给出伸缩缝 1 处的碰撞计算结果, 计算结果取 7 条地震波的平均值。

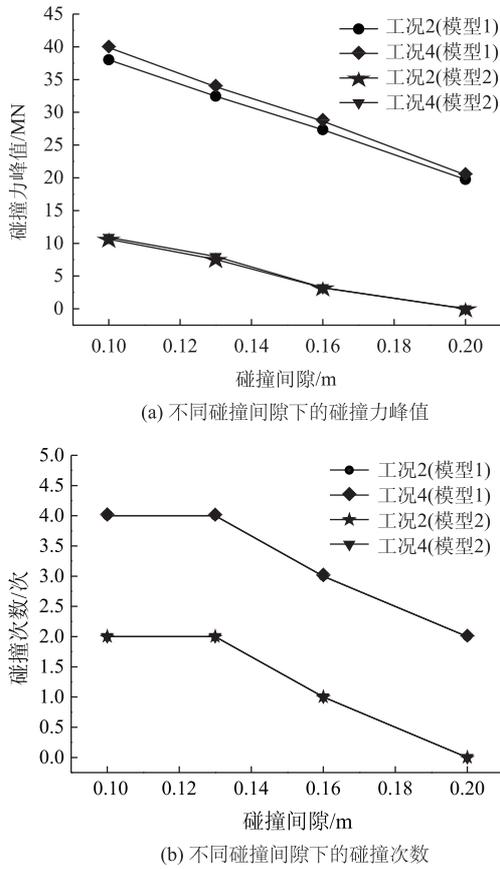


图 12 不同间隙的碰撞计算结果

Fig. 12 Calculation results of pounding with different gaps

从不同间隙下的碰撞计算结果可以得到, 随着碰撞间隙的增大, 碰撞力峰值呈现递减的趋势, 碰撞次数总体上也呈现递减趋势, 当碰撞间隙为 0.20 m 时, 考虑轨道约束模型计算得到邻梁之间不会发生碰撞。这是由于地震作用下, 当墩梁相对位移一定时, 增大碰撞间隙在一定程度上增大梁体纵向活动的范围。

2.5 不同工况对桥梁结构地震响应的影响

为了解碰撞效应对结构地震反应的影响, 本研究在分析时程反应结果时, 通过引入如下指标式

(4) 来评价碰撞对桥梁结构地震响应的影响, 即:

$$\text{碰撞影响因子}(\mu) = \frac{\text{考虑碰撞效应的结果}}{\text{未考虑碰撞效应的结果}}, \quad (4)$$

式中, 当 $\mu > 1$ 时, 碰撞不利; 当 $\mu < 1$ 时, 碰撞有利; 当 $\mu = 1$ 时, 不受影响。

经计算, 在各条地震波作用下, 第 1、3 联的固定墩均未进入塑性阶段耗散能量, 因此各工况下固定支座的剪力变化与墩底内力变化呈正相关, 图 13、图 14 分别给出当间隙取 0.10 m 时模型 1 和模型 2 的固定支座剪力碰撞影响因子图, 图 15 分别给出了模型 1 碰撞对第 1、2、3 联固定墩 (P3, P7, P12) 墩底内力的碰撞影响因子图, 模型 2 规律一致不在赘述。

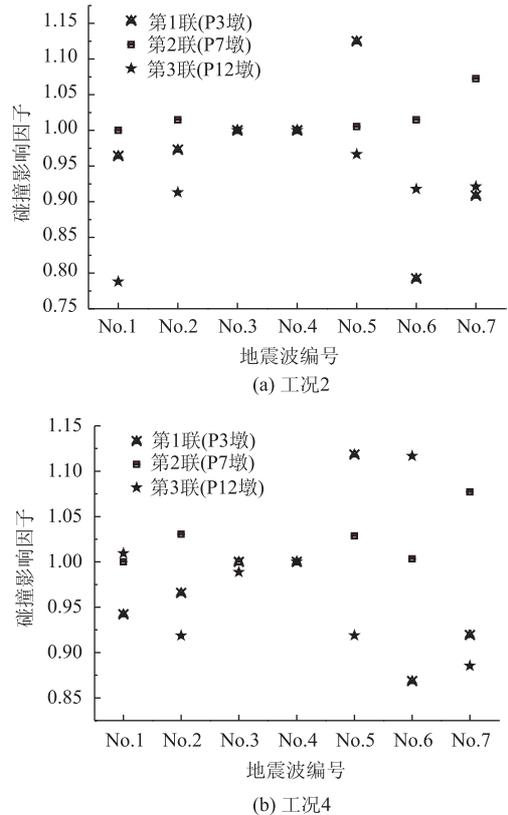


图 13 固定支座剪力影响因子 (模型 1)

Fig. 13 Influencing factors of fixed bearing shear (model 1)

从图 13 ~ 图 15 碰撞影响因子图可以看出, 考虑碰撞后: (1) 各联连续梁固定墩支座剪力和墩底内力受到不同程度的影响, 其中模型 1 远场地震波对其影响低于近场地震波, 近场地震波作用下墩底内力碰撞影响因子 μ 接近 1.2, 模型 2 由于只存在近场地震动下的邻梁碰撞, 因此远场地震波下 $\mu = 1$ 。(2) 相对隔震体系 (第 2 联), 传统体系 (第 1、3 联) 固定支座剪力和墩底内力受碰撞的影响程度均

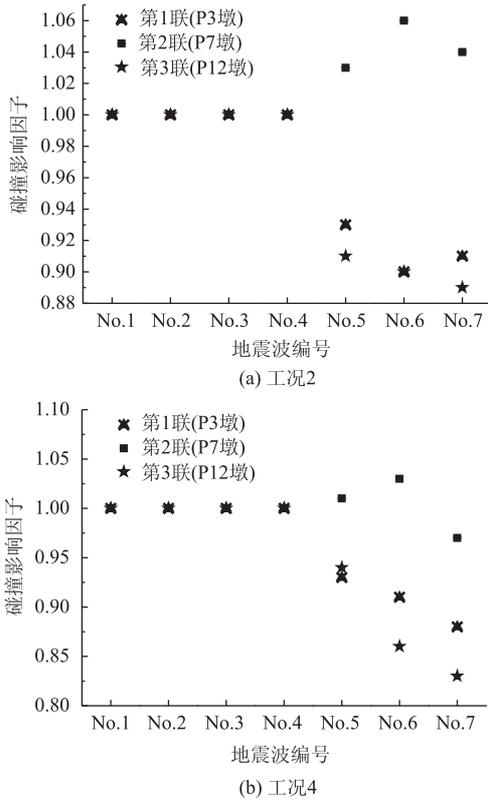


图14 固定支座剪力影响因子(模型2)

Fig. 14 Influencing factors of fixed bearing shear (model 2)

较大,碰撞影响因子浮动范围较大。

产生上述现象的原因在于发生碰撞时,碰撞力先由碰撞梁体承担,再通过支座传递给下部结构。在传递过程中,梁体的碰撞力与该梁体地震作用产生的惯性力方向一致,会增大对固定墩墩底的内力需求,表现为 $\mu > 1$,即碰撞不利,反之,碰撞有利。另外,由于支座隔震体系采用柔性支承,在罕遇地震下全桥进入隔震模式,不同于传统体系的固定支座传力,相应地对下部结构的内力需求也较小。

3 结论

本研究通过建立传统模型(模型1)和考虑CRTS II型板式无砟轨道(模型2)的全桥动力分析模型,针对高速铁路三联12跨铁路连续梁桥进行碰撞效应及碰撞对结构地震反应的影响分析,得到如下结论。

(1) 伸缩缝处的碰撞效应受地震波频谱特性的影响很大。脉冲特性使得近场地震波碰撞效应强于远场地震波,碰撞特征主要表现为一次碰撞激发很大碰撞力和多次连续碰撞。

(2) 考虑轨道约束对桥梁的碰撞效应有所减弱,

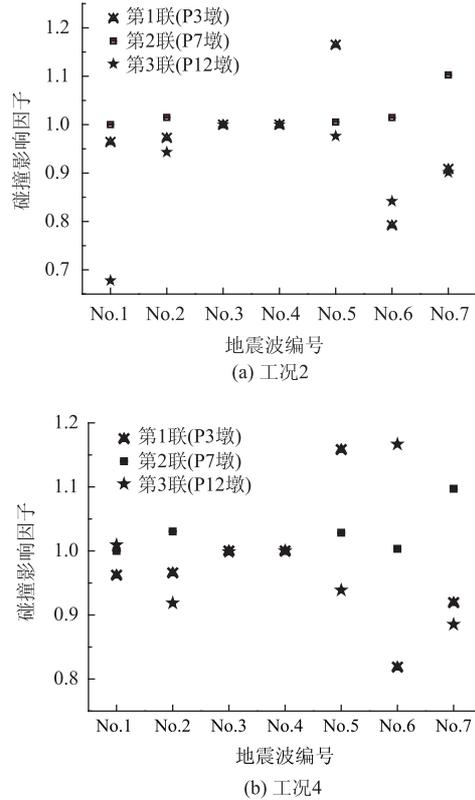


图15 固定墩墩底弯矩影响因子(模型1)

Fig. 15 Influencing factors of bending moment at fixed pier bottom (model 1)

由于轨道系统提高了全联纵向约束,加之扣件和两布一膜非线性耗能,使得远场地震动下邻梁碰撞消失,近场地震动下碰撞减弱。

(3) 无论传统模型还是轨道约束模型,由于双曲面隔震支座在竖向地震动下支座动反力变化,可能导致支座滑动位移增大从而使结构的碰撞效应强于未考虑竖向地震动。

(4) 考虑碰撞对隔震体系桥梁固定支座剪力及墩底内力的影响程度小于传统体系,且当碰撞力与地震作用下梁体惯性力一致时,会增大固定支座的剪力,即碰撞不利,反之,碰撞有利。

(5) 位于高烈度区以支座为隔震设计的桥梁除了考虑自身的减隔震性能,还需考虑邻梁碰撞效应,从减少碰撞力的角度,依据场地条件选用多条地震波进行设计计算。

参考文献:

References:

[1] 刘博伦. 采用不同隔震方案的隔震连续梁桥地震响应分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.

LIU Bo-lun. Seismic Response Analysis of Isolated

- Continuous Girder Bridge Using Different Seismic Isolation Schemes [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [2] 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.
SHI Yan. Analysis of Seismic Response of Pounding on Simple-supported Bridges under Transverse Earthquake [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2011.
- [3] 王东升, 冯启民, 王国新. 基于直杆共轴碰撞理论的桥梁地震反应邻梁碰撞分析模型 [J]. 工程力学, 2004, 21 (2): 157-166.
WANG Dong-sheng, FENG Qi-min, WANG Guo-xin. Analysis Model of Pounding between Adjacent Bridge Girders during Earthquakes Based on Collinear Impact between Rods [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21 (2): 157-166.
- [4] MALHOTRA P K. Dynamics of Seismic Pounding at Expansion Joints of Concrete Bridges [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124 (7): 794-802.
- [5] 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 Edition, 2012, 43 (4): 1475-1481.
- [6] 陈彦江, 于连杰, 刘良, 等. 简支梁桥纵向地震碰撞响应研究 [J]. 自然灾害学报, 2016, 25 (2): 159-166.
CHEN Yan-jiang, YU Lian-jie, LIU Liang, et al. Study on Longitudinal Seismic Pounding Response of Simply-supported Girder Bridges [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25 (2): 159-166.
- [7] 冯亚成, 雷晓峰. 碰撞刚度与间隙对大跨减隔震铁路连续梁桥防落梁设计的影响分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34 (增1): 879-884.
FENG Ya-cheng, LEI Xiao-feng. Analysis of Effect of Pounding Stiffness and Gap for the Design of Collapse-proof Systems in Large Span Isolated Railway Continuous Girder Bridges [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34 (S1): 879-884.
- [8] 邓育林, 雷凡, 何雄君. 地震作用下大跨斜拉桥主桥与多联引桥伸缩缝处连锁碰撞效应研究 [J]. 土木工程学报, 2015, 48 (2): 87-95.
DENG Yu-lin, LEI Fan, HE Xiong-jun. Study on Effects of Pounding at Expansion Joints on Seismic Responses of Long-span Cable-stayed Bridges between Main Span and Multiple Approach Spans under Earthquakes [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48 (2): 87-95.
- [9] MADANI B, BEHNAMFAR F, RIAHI H T. Dynamic Response of Structures Subjected to Pounding and Structure-soil-structure Interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 78 (8): 46-60.
- [10] 张文学, 鲍艳, 王景景. 伸缩缝间隙及纵向阻尼器对斜拉桥的碰撞影响 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (8): 60-63.
ZHANG Wen-xue, BAO Yan, WANG Jing-jing. Influence of Expansion Joint Gap and Longitudinal Damper on Collision of Cable-stayed Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (8): 60-63.
- [11] 李青宁, 尹俊红, 张瑞杰, 等. 桥梁碰撞振动台实验及参数敏感性分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2016, 36 (4): 58-65.
LI Qing-ning, YIN Jun-hong, ZHANG Rui-jie, et al. Shaking Table Test of Bridge Pounding and Analysis on Parameter Sensitivity [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016, 36 (4): 58-65.
- [12] NAVA F, NOBILI C, FERLA G, et al. Experimental Investigation of Inelastic Bridge Response under Spatially Varying Excitations with Pounding [J]. Engineering Structures, 2014, 79 (54): 106-116.
- [13] 高玉峰, 蒲黔辉, 李晓斌. 梁式桥地震碰撞响应及防碰撞与落梁措施研究进展 [J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31 (1): 80-88.
GAO Yu-feng, PU Qian-hui, LI Xiao-bin. State-of-arts of Earthquake-induced Pounding Responses of Girder Bridges and Measures for Preventing Pounding and Span Collapse [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31 (1): 80-88.
- [14] 孟宪锋, 朱晞. 梁式桥防止地震碰撞及落梁装置与措施的研究进展 [J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27 (2): 71-75, 80.
MENG Xian-feng, ZHU Xi. State-of-the-art of Aseismic Restrainers and Countermeasures for Reduction of Pounding Effects and Prevention of Beam Collapsing in Beam Bridges [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2005, 27 (2): 71-75, 80.
- [15] 高建强, 张永亮, 陈兴冲, 等. 无砟轨道系统对铁路减隔震桥梁地震响应的影响 [J]. 世界地震工程, 2017, 33 (1): 202-208.
GAO Jian-qiang, ZHANG Yong-liang, CHEN Xing-chong, et al. Effect of Ballastless Track System on Seismic Response of Seismic Isolated Railway Bridges [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33 (1): 202-208.

- Seismic Design of Highway Bridges of Small or Medium Spans [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45 (9): 115 - 121.
- [11] BILLAH A H M, ALAM M S, BHUIYAN A R. Seismic Performance of a Multi-span Bridge Fitted with Superelastic SMA-based Isolator [C] // IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering - II. Dhaka: IABSE, 2010: 8 - 10.
- [12] PADGETT J E, DESROCHES R. Three-dimensional Nonlinear Seismic Performance Evaluation of Retrofit Measures for Typical Steel Girder Bridges [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30 (7): 1869 - 1878.
- [13] 邓开来, 潘鹏, 冉田苒, 等. 耗能型桥梁抗震挡块试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33 (22): 7 - 12.
DENG Kai-lai, PAN Peng, RAN Tian-ran, et al. Experimental Study on Energy Dissipation Stopper for Bridge [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33 (22): 7 - 12.
- [14] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design [S]. Washington, D. C.: AASHTO, 2009.
- [15] 朱柏洁. 轴力作用下剪切钢板阻尼器力学性能试验研究 [C] // 第26届全国结构工程学术会议论文集 (第III册). 长沙: [出版者不详], 2017: 384 - 388.
ZHU Bai-jie. Experimental Study on Mechanical Behavior of Steel Shear Panel Dampers under Axial Loads [C] // The 26th National Conference on Structure Engineering (Volume 3). Changsha: [s. n.], 2017: 384 - 388.
- [16] 朱柏洁. 形状优化的菱形开孔剪切型金属阻尼器减震性能研究 [C] // 第十届全国结构减震控制学术会议. 大连: [出版者不详], 2017: 333 - 341.
ZHU Bai-jie. Study on Mechanical Behavior of Steel Shear Panel Dampers with Optimized Diamond Hole [C] // Proceeding of 10th National Conference on Structural Vibration Control. Dalian: [s. n.], 2017: 333 - 341.
- [17] 田芳, 刘财喜, 刘芳, 等. Q235 钢真实应力 - 应变曲线研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31 (4): 182 - 186.
TIAN Fang, LIU Cai-xi, LIU Fang, et al. Research on the True Stress-strain Curves of Q235 Steel [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2011, 31 (4): 182 - 186.
- [18] American Institute of Steel Construction. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings [R]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
-
- (上接第71页)
- [16] LOH C H, WAN S, LIAO W. Effects of Hysteretic Model on Seismic Demands Consideration of Near-fault Ground Motions [J]. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2010, 11 (3): 155 - 169.
- [17] 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, 33 (3): 16 - 19.
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, 33 (3): 16 - 19.
- [18] 李建中, 范立础. 非规则梁桥纵向地震反应及碰撞效应 [J]. *土木工程学报*, 2005, 38 (1): 84 - 90.
LI Jian-zhong, FAN Li-chu. Longitudinal Seismic Response and Pounding Effects of Girder Bridges with Unconventional Configurations [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38 (1): 84 - 90.
- [19] KARALAR M, PADGETT J, DICLELI M. Parametric Analysis of Optimum Isolator Properties for Bridges Susceptible to Near-fault Ground Motions [J]. *Engineering Structures*, 2012, 40 (7): 276 - 287.
- [20] 周正华, 周雍年, 卢滔, 等. 竖向地震动特征研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23 (3): 25 - 29.
ZHOU Zheng-hua, ZHOU Yong-nian, LU Tao, et al. Study on Characteristics of Vertical Ground Motion [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23 (3): 25 - 29.