

近断层脉冲型地震作用下高速铁路 桥梁-轨道系统响应分析

喻梅^{1,2},吕佳伟^{1,2},贾宏宇^{3†},贾康³,郑史雄³,赵灿晖³

(1. 省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室(重庆交通大学),重庆 400074;

2. 山区桥梁结构与材料教育部工程研究中心(重庆交通大学),重庆 400074;

3. 西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 为了研究在近断层脉冲型地震作用下高速铁路桥梁-轨道系统的动力响应规律,针对高速铁路线上最常用的简支梁形式结构,以某 8×32.7 m 高速铁路简支箱梁桥为例. 建立了考虑简支梁与 CRTS I 型板式无砟轨道之间相互作用的桥梁-轨道模型,讨论了具有破裂前方脉冲、滑冲脉冲、无脉冲型近断层地震动对桥梁-轨道系统的影响及扣件阻力改变时桥梁-轨道系统动力响应的变化. 结果表明:三种脉冲类型地震动作用下钢轨的受力和变形规律保持一致,脉冲型地震动较无脉冲型地震动增加了约 20% 钢轨应力和位移. 相对于轨道系统,桥墩对脉冲类型更为敏感,在破裂前方脉冲和滑冲脉冲地震作用下,桥墩的墩顶最大位移比无脉冲地震动分别增大了 106.6% 和 148.6%,墩底弯矩和剪力也有明显增大,在进行高速铁路桥梁抗震设计时应考虑脉冲类型对桥梁结构的影响. 扣件纵向阻力从 5 kN/组增大到 15 kN/组时,墩顶最大位移降低了 10%,但钢轨应力和位移峰值约为原来的 2 倍.

关键词: 近断层地震动;高速铁路;CRTS I 型板式无砟轨道;脉冲效应;桥梁-轨道系统

中图分类号: U24

文献标志码: A

Response Analysis of High-speed Railway Bridge-rail System Subjected to Near-fault Pulse-type Earthquake

YU Mei^{1,2}, LÜ Jiawei^{1,2}, JIA Hongyu^{3†}, JIA Kang³, ZHENG Shixiong³, ZHAO Canhui³

(1. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering(Chongqing Jiaotong University), Chongqing 400074, China;

2. Engineering Research Center of Bridge Structure and Material in the Mountainous Area of

Ministry of Education(Chongqing Jiaotong University), Chongqing 400074, China;

3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To study the dynamic response law of high-speed railway bridge-rail system subjected to the action of near-fault impulse earthquake, an 8×32.7 m high-speed railway simply supported box girder bridge is taken as an ex-

* 收稿日期:2020-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178169), National Natural Science Foundation of China(52178169); 中国铁路总公司重大系统工程项目(P2018G007), China Railway Corporation Major System Project(P2018G007); 四川省科技计划资助项目(2019YJ0243, 2019YFG0460), Sichuan Science and Technology Plan(2019YJ0243, 2019YFG0460)

作者简介: 喻梅(1968—), 女, 云南昭通人, 重庆交通大学副教授, 博士

† 通信联系人, E-mail: Hongyu1016@swjtu.edu.cn

ample for the simple-supported beam form structure most commonly used on high-speed railway line. A bridge-rail model considering the interaction between simply supported beams and CRTS I type slab ballastless track is established. The effects of near-fault ground pulses with rupture front pulses, sliding pulses, and pulse-free near-fault on the bridge-rail system are discussed, as well as the changes of bridge-rail system dynamic response when fastener resistance changes. The results show that the stress and deformation rules of the track under the action of the three pulse types of ground motion are consistent. The pulse-type ground motion increases the track stress and displacement by about 20% when compared with the pulse-free ground motion. Compared with the track system, the pier is more sensitive to the type of pulse. Under the action of pulse and slip pulse before the rupture, the maximum displacement of the pier top is increased by 106.6% and 148.6%, respectively, when compared with the non-pulse ground motion. The bending moment of the pier bottom and the shear force are also increased significantly, and the impact of the pulse type on the bridge structure should be considered in the seismic design of high-speed railway bridges. When the longitudinal resistance of the fastener is increased from 5 kN/group to 15 kN/group, the maximum displacement of the pier top is reduced by 10%, but the peak stress and displacement of the track are about twice the original values.

Key words: near-fault ground motion; high-speed rail; CRTS I plate-type ballastless track; pulse effect; bridge and rail system

高速铁路是国家重要的交通基础设施,对我国经济发展具有重大的意义.为了保证行车平顺性和旅客舒适性,也为了减小路基带来的沉降影响.一般路段,高速铁路采用以桥带路的方式修建,从而使得桥梁总里程数不断增加,也导致了高速铁路桥梁修建临近断层或跨越断层.另外,已有地震灾害表明速度脉冲作用会对近断层区域的建筑物造成更为严重的破坏,如1994年美国的Northridge地震、1995年日本的Kobe地震、1999年中国台湾的Chi-Chi地震、2008年中国的汶川地震.特别是近断层地震动的速度脉冲作用对结构的影响已经日益引起了国内外学者的关注. Liao等^[1]以高速公路连续梁桥为研究对象,分析了近远场地震动对结构的影响,指出近断层地震动对结构的延性要求更高. Shrestha^[2]研究了近断层竖向地震动对斜拉桥的影响. 张凡等^[3-4]研究了近断层脉冲效应和SSI效应对大跨斜拉桥地震响应的影响. Chouw等^[5-6]研究了空间变化的近断层地震动和土与结构相互作用对悬臂梁桥的影响. 陈昉健等^[7]研究了近场地震对锈蚀的钢筋混凝土桥墩的影响. 左焯等^[8]对近断层地震动作用下曲线梁桥碰撞效应进行了研究,指出近断层脉冲型地震动较远场地震对曲线梁桥碰撞效应的影响更为显著. Sevim等^[9-10]通过数值模拟和试验的方法,研究了近、远断层地震动对拱桥抗震性能的影响. 李宇等人^[11-13]研究了近断层

地震作用下隔震结构的响应及隔震效果. Brown等^[14]通过振动台试验研究了近断层地震动对桥墩的影响,结果表明近断层地震动将导致更大的应变、曲率和残余位移. 丁幼亮等^[15]研究了多塔悬索桥近断层地震作用下的地震反应特点. 国内外学者对近断层脉冲效应对桥梁结构的响应有一定的研究,但是几乎都集中在桥梁结构本身,而在高速铁路线上的桥梁结构本身与轨道为一个整体,地震作用下会相互影响. 在近断层修建高速铁路桥梁越来越多的情况下,研究近断层脉冲地震作用对桥梁-轨道系统的动力响应是非常必要的.

综上所述,本文以高速铁路CRTS I型板式无砟轨道简支梁桥为研究对象,考虑了梁-轨相互作用下的桥梁和轨道系统的动力响应,建立了能考虑桥梁与无砟轨道相互作用以及路基段对钢轨刚度和边界条件影响的精细化模型,分析了不同脉冲类型近断层地震动对桥梁-轨道系统动力响应的影响,并对轨道设计参数进行了分析. 研究结论可为高速铁路桥梁抗震设计提供理论依据.

1 高速铁路桥梁-轨道模型

1.1 桥梁概况

以桥跨布置为 8×32.7 m的高速铁路双线简支

梁为例,主梁为单箱单室截面,桥面宽度 12.6 m,箱梁高度 3.035 m,主梁材料为 C50 混凝土.轨道结构采用 CRTS I 型板式无砟轨道,由钢轨、扣件、轨道

板、CA 砂浆、底座板、填充树脂、凸形挡台构成.支座采用盆式橡胶支座,桥墩使用墩高 12 m 圆端型实体桥墩.全桥结构如图 1 所示.

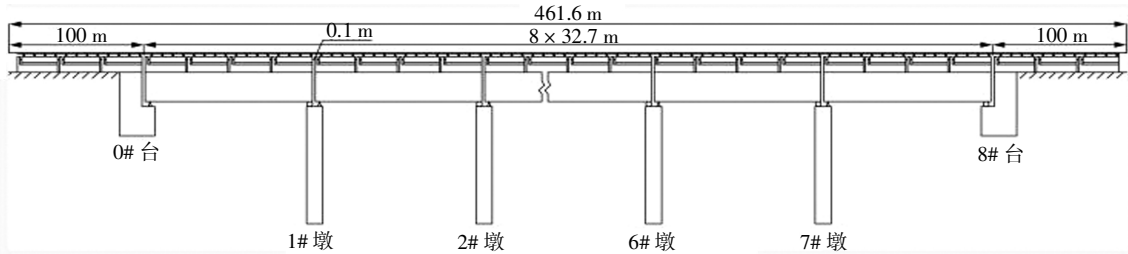


图 1 CRTS I 型板式无砟轨道简支梁桥模型

Fig.1 Model of simply supported beam bridge with CRTS I slab ballastless track

1.2 有限元模型

CRTS I 型无砟轨道桥梁系统构造如图 2 所示,钢轨为 CHN60 型标准钢轨,采用 Beam188 梁单元模拟.桥上扣件使用 WJ-7 型小阻力扣件,间距 0.629 m,采用非线性弹簧单元 Combin39 模拟扣件纵向阻力,其本构模型为理想弹塑性模型,线性弹簧单元 Combin14 模拟扣件的横向和垂向刚度,横向刚度取 50 kN/mm,垂向刚度取 35 kN/mm^[6].根据中铁第四勘察设计院对扣件阻力进行现场测试的结果,WJ-7 型小阻力扣件的纵向滑移阻力在 3~5 kN 之间,弹塑性临界点在 0.5~1 mm 之间.本文扣件纵向阻力取 5 kN/组,弹塑性临界点取 0.5 mm.路基地段的扣件采用常阻力扣件,线路纵向阻力按式(1)取值^[7]:

$$r = \begin{cases} 12.0x, & x \leq 2 \text{ mm} \\ 24.0, & x > 2 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

式中: r 为线路纵向阻力,kN/m; x 为轨道相对扣件的纵向位移,mm.

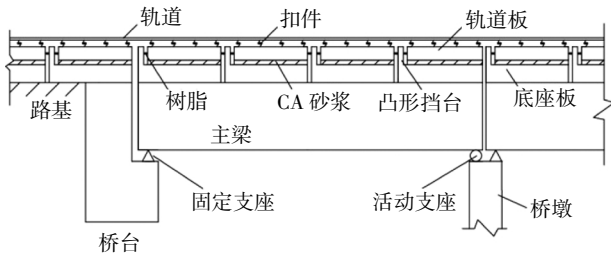


图 2 桥梁-轨道系统构造图

Fig.2 Structural drawing of bridge and rail system

采用 Beam188 梁单元模拟轨道板和底座板,轨道板为 C60 混凝土预制构件,宽度为 2.4 m,设计厚度为 0.19 m,板与板之间设有 70 mm 板缝.底座板厚

0.2 m,宽 2.8 m,C35 混凝土现浇而成,底座板与主梁之间视为刚性连接,相邻底座板之间留有 20 mm 的伸缩缝.CA 砂浆层尺寸与轨道板相同,厚度 50 mm,CRTS I 型板式无砟轨道砂浆弹性模量约为 300 MPa.根据抗推实验结果^[8],CA 砂浆摩擦系数约为 0.55,转换成纵向阻力为 6.5 kN/m,采用 Combin39 非线性弹簧单元模拟.

凸形挡台和树脂对轨道板主要起约束限制位移的作用,将凸形挡台及树脂对轨道板约束作用视为板端线性弹簧^[9],弹簧刚度为 80 kN/mm.支座采用 KTPZ5500 型盆式橡胶支座,固定支座采用线性弹簧单元 Combin14 模拟,活动支座的力学模型可视为理想弹塑性恢复力模型如图 3 所示,采用非线性弹簧单元 Combin39 模拟,设计摩擦系数取 0.03^[9],盆式橡胶支座屈服位移一般为 2~5 mm,本文取 3 mm.

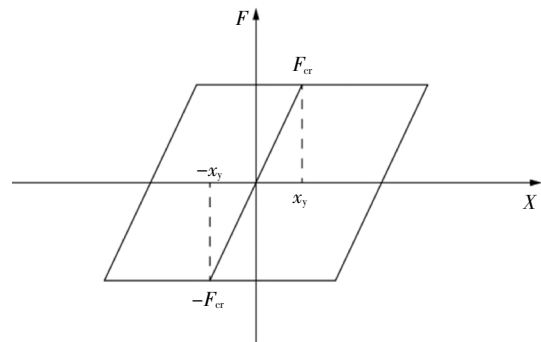


图 3 支座恢复力模型

Fig.3 Bearing hysteretic model

主梁为预制 C50 预应力混凝土箱梁,桥墩采用圆端型实体桥墩,截面尺寸为 6 m × 2.3 m,混凝土采用 Mander 本构模型,钢筋为双折线模型.在强震作

用下桥墩可能进入塑性,假设桥墩塑性铰存在于墩底,墩底截面弯矩曲线利用 Xtract 软件计算分析得到,截面属性见表 1.

表 1 墩底截面属性

Tab.1 Section properties of pier bottom

截面方向	屈服曲率/ (10^{-3} m^{-1})	屈服弯矩/ ($10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	极限曲率/ (10^{-3} m^{-1})	极限弯矩/ ($10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
纵桥向	1.24	50.62	50.43	62.13
横桥向	0.56	109.60	11.26	130.50

采用非线性弹簧单元 Combin40 模拟桥墩塑性铰区域的转动功能,墩底固结,不考虑土与结构相互作用.在桥梁两端各模拟 100 m 路基上的钢轨,以消除边界条件对桥梁结构的影响^[20].根据上述模拟方式,采用通用有限元软件 ANSYS 建立 $8 \times 32 \text{ m}$ 高速铁路简支梁模型,有限元模型如图 4 所示.

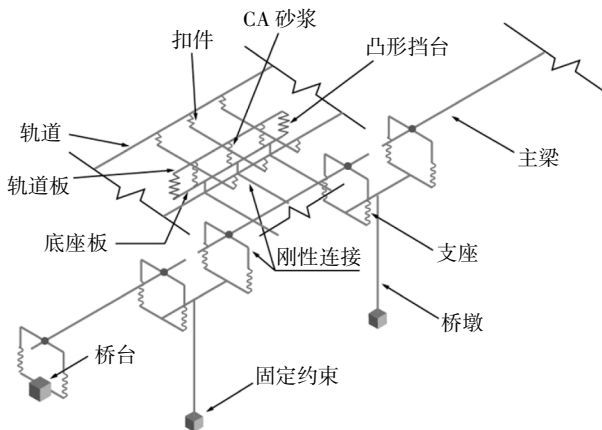


图 4 三维有限元分析模型

Fig.4 Three-dimensional FE analytical model

对有限元模型进行模态分析,表 2 列出模型的前 5 阶自振频率及其振型特点.由表可知高速铁路简支梁的自振周期小于 0.6 s,为短周期结构.

表 2 模型自振特性

Tab.2 Model natural vibration characteristics

模态阶数	频率/Hz	周期/s	振型描述
1	1.731	0.577	梁体纵向非对称振动
2	2.252	0.443	梁体纵向对称振动
3	2.517	0.397	梁体横向对称振动
4	2.561	0.390	梁体横向非对称振动
5	2.753	0.363	梁体横向对称振动

2 地震动的选取及频谱特性分析

2.1 地震动的选取

近断层地震动的速度脉冲作用主要来源于 2 种形式^[21],一是由破裂的方向性效应引起的双向或多向速度脉冲,二是由滑冲效应地面永久位移引起的单向速度脉冲.本文仅考虑近断层地震动的脉冲类型对高速铁路简支梁桥的影响,未考虑近断层地震动其他特性,如果综合考虑上盘效应、滑冲效应、破裂方向效应和脉冲效应对结构的影响,这些效应之间的相互影响难以区分,反而效果不佳.基于 PEER 强震库(美国太平洋地震工程研究中心),从 Chi-Chi 地震和 Northridge 地震中选取具有破裂前方脉冲、滑冲脉冲、无脉冲型的近断层地震动各 6 条.其中, Northridge 地震只有破裂前方脉冲地震动,地震动的详细参数见表 3.地震动的断层距均在 20 km 以内,由于场地条件对桥梁结构的地震响应影响明显,因此,选取符合桥址所在地的场地类别为 C 类或 D 类的地震动. PGA、PGV 和 PGD 分别代表地面运动加速度峰值、速度峰值和位移峰值,当 $\text{PGV}/\text{PGA} > 0.2$ 时有明显脉冲现象, $\text{PGV}/\text{PGA} < 0.2$ 时脉冲现象不明显.

2.2 近断层地震动反应谱分析

3 种脉冲类型地震动具有明显不同的特征,为了了解近断层地震波的频谱特性,采用阻尼比为 0.05 的单自由度体系,计算出 3 组地震动作用下的加速度反应谱平均值和速度反应谱平均值.

由图 5 可知,对于单自由度加速度反应谱,当体系周期 $T < 0.4 \text{ s}$ 时,近场无脉冲地震谱加速度平均值明显大于脉冲型地震动;当体系周期 $0.4 \text{ s} < T < 0.8 \text{ s}$ 时,3 组地震动谱加速度平均值数值上下波动比较接近;当体系周期 $T > 0.8 \text{ s}$ 时破裂前方脉冲和滑冲脉冲地震动的谱加速度平均值明显大于无脉冲地震动.图 6 为谱速度平均值,其变化规律和谱加速度平均值的变化规律类似.高速铁路简支梁桥为短周期结构,自振周期在 0.6 s 以内,此区间内地震响应变化较为复杂,无脉冲型地震动主要影响结构自振周期小于 0.4 s 的高阶振型,而 3 种脉冲类型地震动都会对结构的基本振型产生较大的影响.

表3 地震动脉冲类型及其特征参数

Tab.3 Pulse types and characteristic parameters of ground motion

脉冲类型	地震名称	台站分量	断层距/km	PGA/(cm·s ⁻²)	PGV/(cm·s ⁻¹)	PGD/cm	PGV/PGA	场地类别	T _p /s
破裂前方脉冲	Chi-Chi	TCU051-E	7.64	153.2	51.6	64.8	0.33	C	8.94
	Chi-Chi	TCU054-E	5.28	136.7	47.7	93.12	0.35	C	8.00
	Chi-Chi	TCU056-E	10.48	156.0	43.3	49.9	0.28	C	10.38
	Northridge	JEN022	5.43	402.3	111.3	44.6	0.28	C	2.98
	Northridge	SCS052	5.35	610.6	115.8	39.3	0.19	D	3.16
	Northridge	RRS228	6.50	856.6	147.2	42.1	0.17	D	1.25
滑冲脉冲	Chi-Chi	TCU052-E	0.66	345.2	150.9	225.0	0.44	C	11.96
	Chi-Chi	TCU052-N	0.66	417.0	170.1	234.1	0.41	C	11.96
	Chi-Chi	TCU068-E	0.32	479.5	246.4	306.1	0.51	C	12.28
	Chi-Chi	TCU075-E	0.89	321.8	105.2	105.4	0.33	C	4.99
	Chi-Chi	TCU087-N	6.98	106.7	40.2	36.4	0.38	C	10.39
	Chi-Chi	TCU068-N	0.32	319.1	238.3	491.3	0.75	C	12.28
无脉冲	Chi-Chi	TCU071-E	5.80	517.9	52.4	15.1	0.11	C	—
	Chi-Chi	TCU078-E	8.20	438.2	39.9	28.1	0.09	C	—
	Chi-Chi	TCU089-E	9.00	342.4	34.9	18.1	0.11	C	—
	Northridge	UCL090	13.81	272.3	21.5	3.5	0.08	C	—
	Northridge	TAR360	0.37	970.4	77.9	32.2	0.08	D	—
	Northridge	KAT090	13.42	507.5	43.9	4.6	0.09	C	—

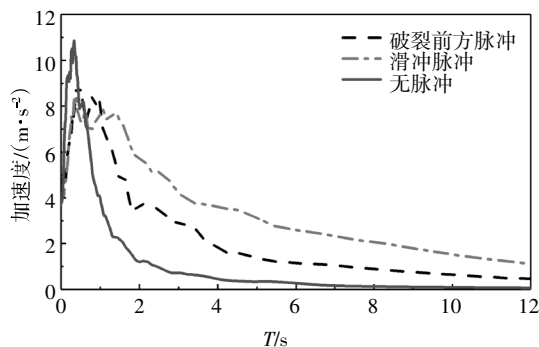


图5 加速度反应谱平均值

Fig.5 Average value of acceleration response spectrum

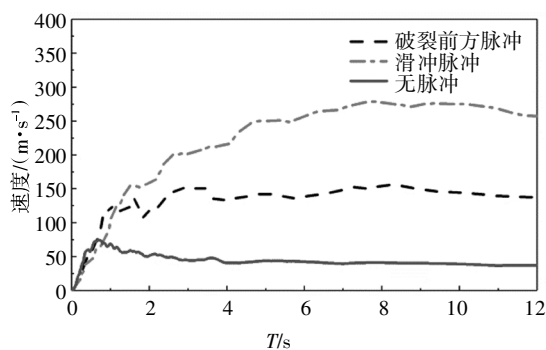


图6 速度反应谱平均值

Fig.6 Average value of velocity response spectrum

3 地震响应分析

桥梁设防烈度为8度, II类场地, 将3组地震波的加速度峰值调至罕遇地震加速度0.38g, 通过调幅地震波的频谱特征不会改变, 仅考虑地震的一致激励, 时程分析采用Rayleigh阻尼, 阻尼比h为0.05, 阻尼系数α和β为

$$\alpha = 2h \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2}, \beta = 2h \frac{1}{\omega_1 + \omega_2}$$

式中: ω₁和ω₂为结构的前两阶振型对应的圆频率。

3.1 桥梁-轨道系统振动方程

地震作用下高速铁路桥梁-轨道系统振动方程如下:

$$\begin{bmatrix} M_r & M_{rb} \\ M_{br} & M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_r \\ \ddot{X}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_r & C_{rb} \\ C_{br} & C_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_r \\ \dot{X}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_r & K_{rb} \\ K_{br} & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_r \\ X_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_r \\ P_b \end{Bmatrix}$$

式中: M_r、C_r和K_r分别为轨道子系统的质量、阻尼和

刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{X}}_r, \dot{\mathbf{X}}_r$ 和 \mathbf{X}_r 分别为轨道子系统节点自由度的加速度、速度和位移向量; $\mathbf{M}_b, \mathbf{C}_b$ 和 \mathbf{K}_b 分别为桥梁子系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{X}}_b, \dot{\mathbf{X}}_b$ 和 \mathbf{X}_b 分别为桥梁子系统节点自由度的加速度、速度和位移向量; $\mathbf{M}_{rb}, \mathbf{C}_{rb}$ 和 \mathbf{K}_{rb} 分别为轨道子系统和桥梁子系统自由度之间相互影响的质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{P}_r 为作用在轨道上的力向量, 此处为 0; \mathbf{P}_b 为作用在桥梁支撑处的地震力向量. 采用 Newmark- β 法进行方程求解, 根据初始条件和地震荷载, 可计算桥梁-轨道系统动力响应.

3.2 轨道结构响应

为考察近断层地震动对轨道结构的影响, 计算纵向地震激励作用下钢轨的动力响应, 其应力包络曲线和位移包络曲线见图 7 和图 8, 钢轨坐标以第一跨筒支梁最左侧的梁端为原点. 在三类近断层地震动作用下, 钢轨应力包络曲线和位移包络曲线规律基本一致, 钢轨应力在左侧第一跨筒支梁的末端和右侧桥台处取得极值. 远离桥台后钢轨应力逐渐降低, 这是因为桥台处刚度大而桥墩的刚度较小, 在墩台过渡位置需要较大的内力来协调变形. 桥上的钢轨应力在整座桥梁的中间桥跨区域应力最小, 路基上钢轨应力在距离桥台 40 m 范围内仍有较大值, 距离桥台 80 m 后钢轨应力趋于稳定接近于 0. 钢轨的绝对位移在桥跨中间部分最大, 越靠近桥梁两侧路基段越小并逐渐趋近于 0. 相对于近场无脉冲型地震动, 在破裂前方脉冲和滑冲脉冲地震作用下钢轨产生了更大的应力和位移, 但两者之间数值较为接近, 约比无脉冲型地震动增加了 20% 的应力和位移峰值.

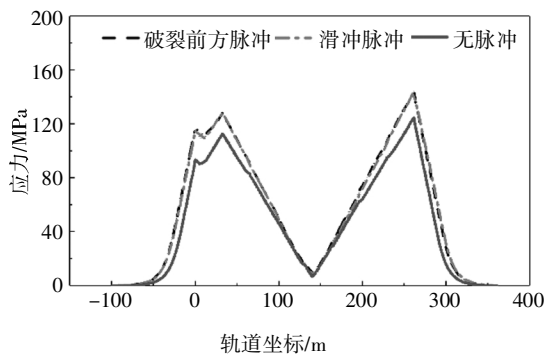


图 7 钢轨应力包络曲线平均值

Fig.7 Average value of rail stress envelope

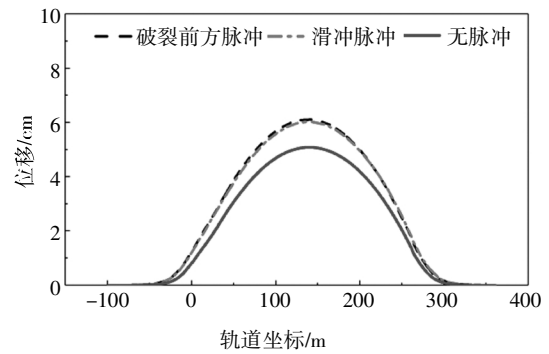


图 8 钢轨位移包络曲线平均值

Fig.8 Average value of rail displacement envelope

3.3 桥梁结构响应

表 4 至表 6 为不同脉冲类型近断层地震动作用下第四跨桥梁地震响应情况. 结果表明: 桥墩的内力变形规律保持一致, 均为滑冲脉冲地震作用下最大, 破裂前方脉冲次之, 无脉冲最低. 相比于无脉冲型地震动, 脉冲型近断层地震动明显增加了桥墩的内力和变形. 在罕遇地震作用下桥墩已经屈服进入塑性状态, 结构周期已经改变, 而脉冲型地震动包含较多的长周期成分, 此时桥梁对低频成分更敏感, 将产生更剧烈的反应, 因此, 滑冲脉冲和破裂前方脉冲地震作用下桥墩的内力、位移、转角均大于无脉冲型地震动. 尽管脉冲型近断层地震动增加了桥墩的内力和变形, 但墩底形成塑性铰后, 墩底弯矩和剪力增加有限而塑性变形大大增加. 破裂前方脉冲地震作用下的墩顶最大位移平均值和墩底转角平均值较无脉冲地震动分别增大了 106.6% 和 115%; 滑冲脉冲地震作用下的墩顶最大位移平均值和墩底转角平均值较无脉冲地震动分别增大了 148.6% 和 168.9%, 这意味着桥墩需要更大的延性变形能力. 滑冲脉冲地震动的 PGV/PGA 范围在 0.32~0.75, 而破裂前方脉冲地震动 PGV/PGA 范围在 0.18~0.35, 滑冲脉冲在同一方向的加速度持续时间更长, 有更大的瞬时能量输入, 使结构产生的反应较破裂前方脉冲地震更大. 主梁纵向最大位移与墩顶最大位移规律相同, 地震发生后, 作用力通过桥墩传至主梁使主梁变形规律与桥墩类似, 而高速铁路轨道为无缝焊接钢轨, 其位移受到纵向相邻位置处钢轨的约束限制了钢轨的位移导致钢轨位移不同于桥墩与主梁. 相对于轨道结构, 近断层地震动的脉冲类型对桥墩与主梁的影响更为显著, 在进行近断层区域高速铁路简支梁桥抗震设计时, 应该对近断层地震动脉冲类型加以区分考虑其对结构的影响, 以免低估结构的反应, 造成过大的结构变形而导致碰撞落梁或倒塌.

表4 破裂前方脉冲地震动作用下桥墩响应

Tab.4 The response of the pier under the action of pulsed ground motion in front of the rupture

地震波编号	主梁位移/m	墩底转角/(10^{-3} rad)	墩顶位移/m	墩底弯矩/(10^3 kN·m)	墩底剪力/(10^2 kN)
TCU051-E	0.080 4	5.23	0.083 7	52.04	50.48
TCU054-E	0.134 9	10.99	0.137 7	53.58	53.15
TCU056-E	0.096 7	7.58	0.098 6	52.24	52.36
JEN022	0.142 1	8.05	0.146 0	52.33	52.48
SCS052	0.100 2	11.72	0.103 9	53.12	52.44
RRS228	0.152 4	13.19	0.163 9	53.43	52.87
平均	0.117 8	9.46	0.122 3	52.79	52.29

表5 滑冲脉冲地震动作用下桥墩响应

Tab.5 Response of the pier under sliding impulse ground motion

地震波编号	主梁位移/m	墩底转角/(10^{-3} rad)	墩顶位移/m	墩底弯矩/(10^3 kN·m)	墩底剪力/(10^2 kN)
TCU052-E	0.170 6	14.14	0.173 8	53.63	53.28
TCU052-N	0.202 7	16.96	0.206 2	54.19	53.69
TCU068-E	0.188 5	15.89	0.193 9	55.20	54.03
TCU075-E	0.065 4	7.70	0.071 2	52.20	51.03
TCU087-N	0.133 9	5.23	0.138 2	52.72	50.82
TCU068-N	0.098 1	11.04	0.099 9	52.97	52.14
平均	0.143 2	11.83	0.147 2	53.49	52.50

表6 无脉冲地震动作用下桥墩响应

Tab.6 Response of the pier under no pulse ground motion

地震波编号	主梁位移/m	墩底转角/(10^{-3} rad)	墩顶位移/m	墩底弯矩/(10^3 kN·m)	墩底剪力/(10^2 kN)
TCU071-E	0.049 6	3.49	0.051 5	51.82	50.47
TCU078-E	0.077 1	7.24	0.078 4	52.88	50.63
TCU089-E	0.051 5	3.55	0.052 2	51.38	49.23
UCL090	0.041 8	2.73	0.042 9	51.54	49.59
TAR360	0.059 4	4.26	0.060 5	51.73	49.34
KAT090	0.067 9	5.10	0.069 9	52.06	50.62
平均	0.057 9	4.40	0.059 2	51.90	49.98

4 扣件阻力的影响

扣件纵向阻力是高铁桥梁重要的设计参数,为使研究具有普遍性,本节研究不同扣件阻力对轨道结构和桥墩地震响应的影响.纵桥向输入具有滑冲脉冲的TCU052-E台站近断层地震动进行一致激励.讨论扣件纵向阻力分别为5 kN/组(小阻力扣件)、7.5

kN/组、10 kN/组、15 kN/组时桥梁-轨道系统的地震响应情况,扣件纵向阻力本构模型均采用理想弹塑性模型.

图9和图10给出了扣件纵向阻力改变时钢轨的应力包络曲线和位移包络曲线.随着扣件纵向阻力的增加,钢轨对桥梁的约束能力增强,将从桥梁上获得更多的能量,使钢轨的应力和位移大幅度增加.当扣件纵向阻力增加到15 kN/组时,钢轨应力和位移约为小阻力扣件的2倍.

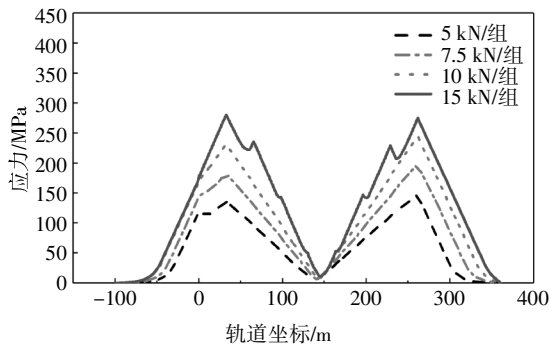


图 9 钢轨应力包络曲线

Fig.9 Rail stress envelope curve

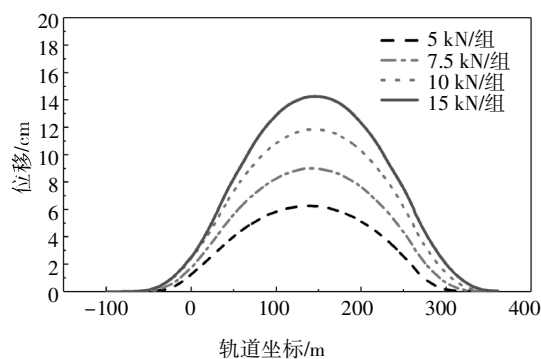


图 10 钢轨位移包络曲线

Fig.10 Rail displacement envelope curve

对桥墩而言,扣件纵向阻力改变时桥墩的位移情况如图 11 所示.随着扣件纵向阻力增加,墩顶位移有一定程度的降低,当扣件纵向阻力为 15 kN/组时墩顶位移约为小阻力扣件的 90%.虽然增大扣件纵向阻力可以降低桥墩的响应对桥梁抗震有利,但同时也会显著增加钢轨的应力和位移.扣件纵向阻力过大,可能导致轨道结构先于桥墩结构破坏,若此时列车在桥上运行,可能会有列车脱轨从桥上掉落的风险,因此,通过增大扣件阻力来改善桥梁的抗震性能并不是一个合理的办法.

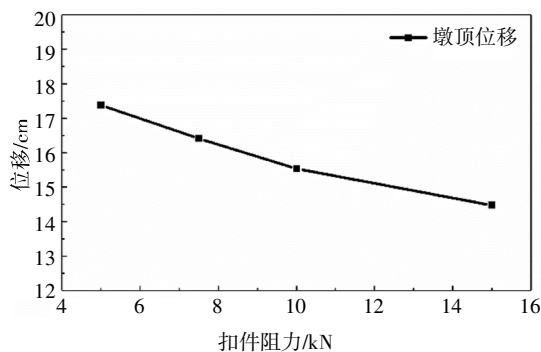


图 11 不同扣件阻力墩顶位移

Fig.11 Displacement of top of pier with different fastener resistance

5 结 论

本文基于通用有限元软件 ANSYS,建立了考虑桥梁和轨道结构之间相互作用的梁-轨模型,分析了不同脉冲类型近断层地震动对桥梁-轨道系统动力响应的影响及不同扣件阻力对桥梁结构地震响应规律的影响,结论如下:

1)三类近断层地震动作用下,钢轨的受力和变形规律保持一致,钢轨应力在桥台附近出现极值,远离桥台应力逐渐减小,钢轨位移在桥跨中间区域位移较大,越靠近路基段越小逐渐趋近于 0.相比于无脉冲型地震动,脉冲型地震动作用下钢轨的应力和位移峰值增大了约 20%.

2)脉冲型近断层地震动明显增加了桥墩的内力和位移,对桥墩的延性提出了更高的要求.滑冲脉冲地震动作用下主梁与桥墩的响应大于破裂前方脉冲地震动大于无脉冲地震动,说明主梁与桥墩比轨道结构更容易受到脉冲类型的影响.因此在进行近断层区域的高铁桥梁抗震设计时应采用不同脉冲类型的近断层地震验算.

3)当扣件纵向阻力从 5 kN/组增大到 15 kN/组时桥墩的最大位移降低了约 10%,对高铁桥梁抗震有利,但钢轨的应力和位移峰值约为原来的 2 倍.扣件纵向阻力的增加显著放大了轨道结构的响应,可能会对轨道结构造成严重破坏,不利于震后修复.因此,在近断层区域桥梁设计中,不宜选用过大阻力的钢轨扣件.

参考文献

[1] LIAO W I, LOH C H, WAN S, *et al.* Dynamic responses of bridges subjected to near-fault ground motions [J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2000, 23(4): 455-464.

[2] SHRESTHA B. Seismic response of long span cable-stayed bridge to near-fault vertical ground motions [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015, 19(1): 180-187.

[3] 张凡, 李帅, 颜晓伟, 等. 近断层脉冲型地震动作用下大跨斜拉桥地震响应分析 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(21): 163-172.

ZHANG F, LI S, YAN X W, *et al.* Effects of near-fault pulse-type ground motions on the seismic responses of a long-span cable-stayed bridge [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(21): 163-172. (In Chinese)

[4] LI S, ZHANG F, WANG J Q, *et al.* Seismic responses of super-span cable-stayed bridges induced by ground motions in different sites

- relative to fault rupture considering soil-structure interaction [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 101: 295-310.
- [5] CHOUW N, HAO H. Significance of SSI and non-uniform near-fault ground motions in bridge response I: Effect on response with conventional expansion joint [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(1): 141-153.
- [6] CHOUW N, HAO H. Significance of SSI and non-uniform near-fault ground motions in bridge response II: Effect on response with modular expansion joint [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(1): 154-162.
- [7] 陈昉健, 易伟建. 近场地震作用下锈蚀钢筋混凝土桥墩的 IDA 分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(3): 1-8.
CHEN F J, YI W J. Incremental dynamic analysis of corroded reinforced concrete bridge columns subjected to near-field earthquake [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(3): 1-8. (In Chinese)
- [8] 左焯, 孙广俊, 王志鹏, 等. 近断层地震动下曲线梁桥碰撞效应研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(21): 52-60.
ZUO Y, SUN G J, WANG Z P, *et al.* Pounding effect of curved bridges subjected to near-fault seismic ground motions [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(21): 52-60. (In Chinese)
- [9] SEVIM B, ATAMTURKTUR S, ALTUNISIK A C, *et al.* Ambient vibration testing and seismic behavior of historical arch bridges under near and far fault ground motions [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016, 14(1): 241-259.
- [10] XIN L F, LI X Z, ZHANG Z T, *et al.* Seismic behavior of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge subjected to near-fault fling-step motions [J]. *Engineering Structures*, 2019, 180: 148-159.
- [11] 李宇, 李琛. 近断层地震作用下隔震梁桥地震响应参数影响研究[J]. *桥梁建设*, 2019, 49(5): 68-72.
LI Y, LI C. Influence of seismic response parameters on seismically-isolated girder bridge under near-fault ground motions [J]. *Bridge Construction*, 2019, 49(5): 68-72. (In Chinese)
- [12] 张强, 贾俊峰, 何子钊. 三维隔震连续梁桥近断层地震响应数值分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2015, 35(5): 105-112.
ZHANG Q, JIA J F, HE Z Z. Seismic responses of three-dimensionally isolated continuous girder bridges under near-fault ground motions [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2015, 35(5): 105-112. (In Chinese)
- [13] 颜学渊, 毛会敏, 吴应雄, 等. 近断层激励下子结构组合隔震的巨-子结构试验 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(11): 23-30.
YAN X Y, MAO H M, WU Y X, *et al.* Experimental study on mega-sub structures with combined isolation under near-fault ground motion [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(11): 23-30. (In Chinese)
- [14] BROWN A, SAIIDI M S. Investigation of effect of near-fault motions on substandard bridge structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2011, 10(1): 1-11.
- [15] 丁幼亮, 谢辉, 耿方方, 等. 近断层地震动作用下多塔悬索桥的地震反应分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(7): 38-46.
DING Y L, XIE H, GENG F F, *et al.* Seismic response analysis of a multi-tower suspension bridge subjected to near-fault ground motions [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(7): 38-46. (In Chinese)
- [16] 曲村. 高速铁路长大桥梁无砟轨道无缝线路设计理论及方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013: 41-42.
QU C. Study on the design theory and method of ballastless continuous welded rail on long-span bridge in high-speed railway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013: 41-42. (In Chinese)
- [17] 铁路无缝线路设计规范: TB 10015-2012 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2013: 6-8.
Code for design of railway continuous welded rail: TB 10015-2012 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2013: 6-8. (In Chinese)
- [18] 谢铠泽, 王平, 徐井芒, 等. 桥上单元板式无砟轨道无缝线路的适应性[J]. *西南交通大学学报*, 2014, 49(4): 649-655.
XIE K Z, WANG P, XU J M, *et al.* Adaptability of continuous welded rail of unit slab non-ballast track on bridges [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2014, 49(4): 649-655. (In Chinese)
- [19] 铁路桥梁盆式支座: TB/T 2331-2013 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2013: 3-4.
Pot bearing for railway bridges: TB/T 2331-2013 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2013: 3-4. (In Chinese)
- [20] YAN B, DAI G L, ZHANG H P. Beam-track interaction of high-speed railway bridge with ballast track [J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(5): 1447-1453.
- [21] 刘启方, 袁一凡, 金星, 等. 近断层地震动的基本特征[J]. *地震工程与工程振动*, 2006, 26(1): 1-10.
LIU Q F, YUAN Y F, JIN X, *et al.* Basic characteristics of near-fault ground motion [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, 26(1): 1-10. (In Chinese)