中国科学: 技术科学 2024 年 第 54 卷 第 5 期: 924 ~ 939
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

论 文

多维地震作用下桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道系统动力响应

张鹏飞*, 蔡科, 王承隆, 雷晓燕, 陈华鹏

华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 南昌 330013
*E-mail: zhangpf@ecjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-09-09; 接受日期: 2023-03-13; 网络版发表日期: 2023-09-08
国家重点研发计划(编号: 2022YFB2602200)、国家自然科学基金(批准号: 52178425)和2022年江西省科技专项(国家科技奖后备培育项目)(编号: 20223AEI91004)资助项目

摘要 为研究多维地震作用下桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道系统的动力响应, 基于有限元法和梁-轨-板相互作用原理, 建立了桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道无缝线路精细化空间模型, 分析了El-Centro波与天津宁河波多维地震作用下系统的受力与变形规律及其影响因素. 结果表明: 与El-Centro波相比, 天津宁河波对系统动力响应有显著的增强效应; 多维地震作用下桥梁轨道结构将产生较大的纵横向位移, 且结构所受的纵、竖、横向力均较单向地震作用时大; 同一地震波下多维地震激励得到的轨道各结构纵向受力与位移响应分布规律与纵向地震激励时一致; 钢轨应力曲线均关于跨中呈反对称分布; 各层间构件受力与变形曲线均关于桥梁纵向呈轴对称分布; 轨道板、自密实混凝土层、底座板纵向位移随桥跨数的增加呈阶梯增减变化, 最大值出现于最中间跨桥, 轨板相对位移在最右侧梁缝处达到最大, 极易导致轨下胶垫窜出引发扣件失效, 同时左侧桥台与相邻固定支座墩顶最大位移差值显著, 增加了落梁风险; 采用小阻力扣件能有效减小地震作用下钢轨、固定支座墩/台顶的受力, 但会显著增加轨板纵向相对位移, 建议桥上扣件纵向刚度大小取值不低于10 kN/组; 为有效保证地震发生时桥上高速列车行车安全, 同时各部件不至于产生较大的位移, 建议桥上固定支座墩/台顶纵向刚度宜采用不低于1.0倍系数值.

关键词 地震荷载, CRTS Ⅲ型板式无砟轨道, 桥上无缝线路, 一致激励, 动力响应

1 引言

CRTS Ⅲ型板式无砟轨道作为我国自主研发的新型轨道结构, 以其优良的性能在高速铁路建设中得到广泛应用[1]. 我国地理环境复杂, 线路难免穿越多震地带[2], 地震一经发生, 将对轨道、桥梁结构及行车安全造成严重威胁. 国内外学者对地震作用下桥上无砟轨道结构系统动力响应进行了较为广泛的研究. Shaban等人[3]和魏峰等人[4]通过试验与仿真方法, 分析并评估了不同地震激励对车辆安全性能的影响. Ettouney等人[5]对比了直接频域法和一致输入下地震对结构的影响. Mylona等人[6]研究了多种组合地震激励下桥梁结构的动力响应. Toyooka等人[7]、谢旭等人[8]研究了铁路减隔震桥梁下轨道约束作用对自振频率的影响.

引用格式: 张鹏飞, 蔡科, 王承隆, 等. 多维地震作用下桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道系统动力响应. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 924–939
Zhang P F, Cai K, Wang C L, et al. Dynamic response of the China Railway Track System III slab track system on a bridge under multidimensional seismic actions (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 924–939, doi: 10.1360/SST-2022-0287

© 2023 《中国科学》杂志社

Xiang等人[9]和Paraskeva等人[10]研究了垂向地震作用下系统结构的响应规律. 国巍等人[11]建立了地震作用下车-轨-桥系统精细化模型, 并运用联合仿真程序对行车安全性进行分析. Jin等人[12]和Xiao等人[13]运用桥面加速度作为评估行车安全性指标, 分析了简支梁桥列车系统在竖向地震下的动力响应. Dumanoglu等人[14]探讨了大跨悬索桥在考虑行波效应下不同视波速和竖向激励下的动力规律. Jiang等人[15]和闫斌等人[16]分别通过试验与仿真方法研究了多维地震作用下常见轨道桥梁结构的响应规律. Cavdar[17]通过对概率敏感性概念的研究, 分析了近场地震动中长周期放大系数对悬索桥响应的影响. Kim等人[18]研究单轨桥类型在地震作用下的动力响应规律. 闫斌等人[19]建立了考虑不同墩高的无砟轨道桥上CRTS Ⅱ型板式轨道模型, 分析了罕遇地震下轨道系统的地震响应. 段佳宏等人[20]研究了波形钢腹板横梁悬索桥在不同近地场地震下的结构响应规律. 郭恩栋等人[21]基于车轨耦合动力学, 研究了考虑不同轨道谱特征对地震作用下高速列车行车安全的影响. 张永亮等人[22]和刘尊稳[23]提出了一种考虑无砟轨道纵向约束的线-桥一体化地震分析模型, 并与不考虑轨道约束的传统模型进行对比, 研究了轨道约束对桥梁动力特性和地震响应的影响. 冯玉林等人[24]基于能量变分原理, 提出了地震作用下轨道-桥梁系统结构损伤与轨道不平顺的对应关系, 并利用现场实测及数值模拟进行了验证. 雷虎军等人[25]引入接触偏移量、车轮抬升量作为评判行车安全性指标, 分析了地震强度对各指标的影响, 并提出列车安全性评判方法. 于向东等人[26]认为震前温度效应对大跨简支钢桁梁桥-轨道系统动力特性有较大影响, 在地震分析时应予以考虑. 魏标等人[27]建立了4种考虑不同CRTS Ⅱ板式无砟轨道结构建模精细化程度的连续梁桥地震易损模型, 研究了轨道结构简易程度对系统各部件的影响. 杨孟刚等人[28]分析了轨道约束、不同地震动强度、频谱特性下各结构参数对高铁简支梁横向碰撞效应的影响, 并提出了合理取值. 赵国辉等人[29]研究了斜拉桥横向支承体系关键力学参数对结构地震响应的影响. 刘小璐等人[30]推导了非一致地震激励下大跨度桥梁弹塑性动力响应的时域显式表达式, 并联合蒙特卡罗法得到非一致地震激励下大跨度桥梁的弹塑性随机响应. 江辉等人[31]考虑了地震动和结构参数不确定性的影响, 进行了结构的非一致激励增量动力分析, 研究了跨断层简支钢箱梁桥桥墩的概率性地震损伤特性.

现有文献中关于多维地震作用下桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道的研究还相对较少, 其结构地震响应特征、轨道系统变形规律尚不明确. 地震动是复杂的空间多维运动, 仅对桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道结构做单维地震作用下的研究不能描述桥上无砟轨道结构在真实环境中地震作用下的系统动力响应. 本文以双线11×32 m标准简支梁桥为例, 运用有限元法和梁-轨-板相互作用原理, 建立桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道精细化空间模型, 探讨不同地震波以及多维地震作用对轨道桥梁结构动力响应的影响规律及其影响因素, 研究结果可为震区桥上无砟轨道结构的设计、运营安全提供理论参考.

2　桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道模型

2.1　桥梁

简支箱梁为预应力混凝土结构, 混凝土强度等级为C50, 采用实体单元建模, 参数见表1. 桥梁固定支座墩/台顶刚度采用弹簧单元模拟, 大小按文献[32]取值,

表 1　各结构参数

Table 1　Structural parameters

结构名称	混凝土强度等级	弹性模量 (Pa)	密度 (kg/m^3)	泊松比
钢轨	–	2.1×10^{11}	7830	0.3
轨道板	C60	3.65×10^{10}	2500	0.2
自密实混凝土层	C40	3.40×10^{10}	2500	0.2
凸台	C40	3.40×10^{10}	2500	0.2
弹性垫层	–	2.50×10^{7}	1900	0.2
底座板	C40	3.40×10^{10}	2500	0.2
梁体	C50	3.55×10^{10}	2500	0.2

并假设其能限制梁体与墩顶的相对位移，活动支座采用双折线模型[19]. 分别在桥梁两侧建立100 m路基[33]，以消除边界效应对计算结果的影响. 桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道无缝线路(continuously welded rail, CWR)梁-板-轨相互作用示意图如图1所示，桥梁标准截面尺寸如图2所示, 路基有限元模型如图3(a)所示.

2.2 钢轨及扣件

CHN60钢轨用BEAM188梁单元模拟，参数见表1, 扣件选用WJ-8型常阻力扣件系统，间距为630 mm，其无载时纵向阻力变形关系见式(1)[34]，采用COMBIN39非线性弹簧单元进行模拟；扣件横向、垂向刚度大小分别为50和35 kN/mm，采用COMBIN14线性弹簧单元模拟[35].

$$r=\begin{cases}12x, & (x\leqslant 2\ \text{mm}),\\ 24.0, & (x>2\ \text{mm}),\end{cases} \tag{1}$$

式中, r为扣件纵向阻力, kN/(m 轨); x为钢轨相对扣件纵向位移, mm.

2.3 轨道板

轨道板为预制预应力钢筋混凝土结构，混凝土强度等级为C60, 用实体单元模拟, 参数见表1, 简支梁跨中设置4块尺寸为5600 mm(长)×2500 mm(宽)×200 mm(厚)的轨道板，两端分别设置1块长为4925 mm的梁端轨道板，板间设置70 mm板缝，轨道板模型如图3(b)所示.

2.4 自密实混凝土层

自密实混凝土层的强度等级为C40，采用实体单元模拟，参数见表1，长度及宽度与轨道板相同，厚度为100 mm，并在靠近端部附近向下设置混凝土凸台与底座板上凹槽相互咬合进行限位，轨道板下预留工作门型筋与自密实混凝土层上表面紧密相连，故模型中未考虑轨道板、自密实混凝土层与底座板之间的层间滑动. 自密实混凝土层模型如图3(c)所示.

2.5 底座板

底座板为钢筋混凝土结构，混凝土强度等级为C40, 采用实体单元建模, 参数见表1, 梁端和跨中分别设置长度为4950和5650 mm的底座板，其宽度为2900 mm、厚度为184 mm，相邻底座板间缝宽20 mm; 单块底座板设有2个凹槽，尺寸均为700 mm(长)×1000 mm(宽)×100 mm(深)[36], 凹槽内设置弹性垫层(树脂材料，采用实体单元SOLID45建模，参数见表1). 底座板与自密实混凝土层间设置4 mm的“土工布”隔离层, 采用COMBIN39非线性弹簧单元模拟, 最大摩擦系数取0.7. 底座板及限位凹槽模型如图3(d)所示.

3 模型加载与验证

3.1 地震荷载

分析设计地震作用下El-Centro波和天津宁河波对桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道作用规律时，需将地震波水平最大峰值加速度按式(2)调至0.30g，得到调幅后的地震波如图4所示，并根据《建筑抗震设计规范》中规定将地震波按照主水平:次水平:垂向为1:0.85:0.65的比例进行调整, 地震波采用直接加速度法输入, 一致激励于模拟桥墩带刚度的弹簧单元下部, 考虑从模型三个方向输入，持续时间包含地震动峰值前后19 s.

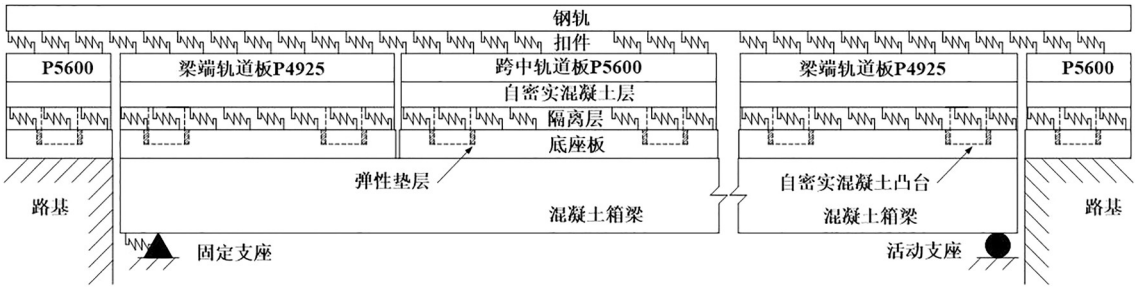


图 1 桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道无缝线路梁-板-轨相互作用示意图

Figure 1 Diagram of the beam-slab-rail interaction of CRTS Ⅲ slab track CWR on the bridge.

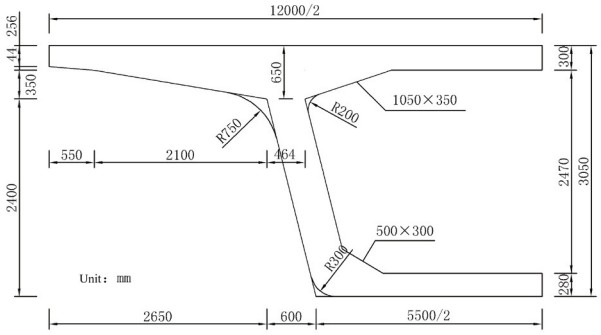


图 2　桥梁标准截面

Figure 2　Standard section size of the bridge.

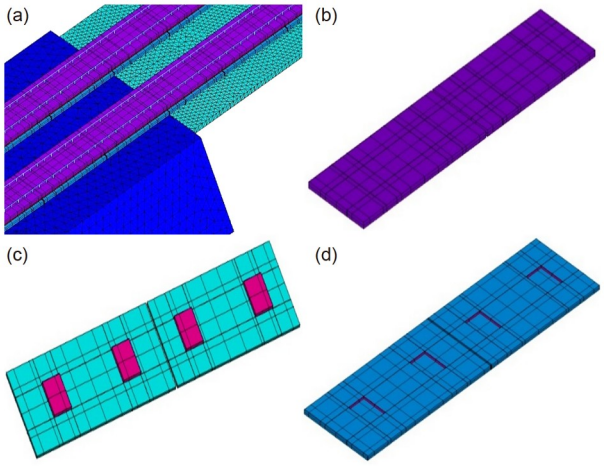


图 3　有限元模型图. (a) 路基模型; (b) 轨道板模型; (c) 自密实混凝土层模型; (d) 底座板及限位凹槽模型

Figure 3　The finite element models. (a) Model of subgrades; (b) model of track slab; (c) model of self-compacting concrete layer; (d) model of bed plate and restricted groove.

$$a'(t)=\frac{A'_{\max}}{A_{\max}}a(t), \tag{2}$$

式中，$a'(t)$和$A'_{\max}$分别为调整后地震加速度曲线及峰值，$a(t)$和$A_{\max}$分别为原纪录地震加速度曲线及峰值. 结构采用Rayleigh阻尼，取阻尼比ξ为0.05，阻尼系数α和β按文献[16]计算得出.

3.2　模型验证

鉴于现有文献对桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道地震响应研究较少，选取与所建结构相互作用规律相似的桥上无砟轨道进行对比验证. 文献[16]建立了16×32 m标准简支梁桥上CRTS Ⅰ型双块式(模型Ⅰ)和CRTS Ⅱ板式(模型Ⅱ)无砟轨道系统模型, 沿顺桥向输入0.57g El-Centro波，得到钢轨应力极值分别为188.086 MPa (模型Ⅰ)和141.100 MPa (模型Ⅱ). 同等工况下, 本文模型计算得到的钢轨应力极值为147.878 MPa. 钢轨应力包络曲线如图5所示.

由图5可知, 本模型中钢轨应力极值变化规律与模型Ⅰ一致，其数值与模型Ⅱ相差6.778 MPa，考虑到本文所建CRTS Ⅲ型板式与模型Ⅱ无砟轨道在结构以及部分参数取值上存在一定差异，结果在可接受范围内，故本文模型准确、可靠.

4　不同地震波作用下系统动力响应

4.1　纵-横-竖向受力分布

El-Centro波和天津宁河波作用下各构件受力包络图(除固定支座墩/台顶)如图6所示, 构件受力极值见表2, 文中轨道板、自密实混凝土层、底座板应力提取数据均为对应钢轨处相应结构的上表面、中层面以及下表面.

由图6和表2分析可知，两种地震波作用下钢轨纵向应力包络图均关于跨中呈反对称分布，在梁缝处发生突变波动，且最大值均出现在最右侧简支梁活动支座及第一跨梁的梁缝附近. 天津宁河波作用下，各轨道结构纵向受力均较El-Centro波作用时大，表明各构件受力特性受地震波影响较大. 钢轨纵向应力增加了85.9%，除扣件竖向力(上拔力)超出限值外，各轨道结构的各向应力值均未达到其开裂强度. 在设计地震烈度，多维地震作用下结构不会因为较大的拉应力而破坏, 但会因扣件上拔力超限, 引起系统整体的不稳定.

两种地震波作用下，轨道板、底座板、自密实混凝土层纵向应力包络图均关于桥梁纵向呈轴对称分布的波动曲线，是由于桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道中底座板、自密实混凝土层及轨道板为单元板式结构，存在纵向不连续性. 底座板、自密实混凝土层应力峰值均出现于各跨简支梁中部附近，轨道板最大应力出现在左侧桥台，值均较小. 由于固定支座桥台刚度比其余墩顶支座刚度大，故在桥台处固定支座承受较大的纵向力, 分别为1525.5 kN (El-Centro波)和3513.0 kN (天津宁河波), 其他墩顶受力较为均衡.

4.2　纵-横-竖向变形分布

El-Centro波和天津宁河波作用下轨道板、自密实

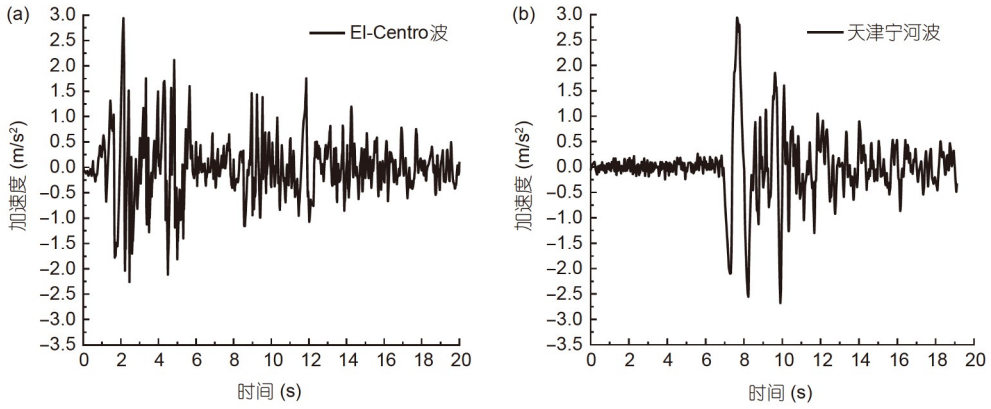


图 4 调幅后的地震波加速度时程曲线. (a) El-Centro波; (b) 天津宁河波

Figure 4 Time history curves of seismic wave acceleration after amplitude modulation. (a) El-Centro seismic wave; (b) Ninghe seismic wave in Tianjin.

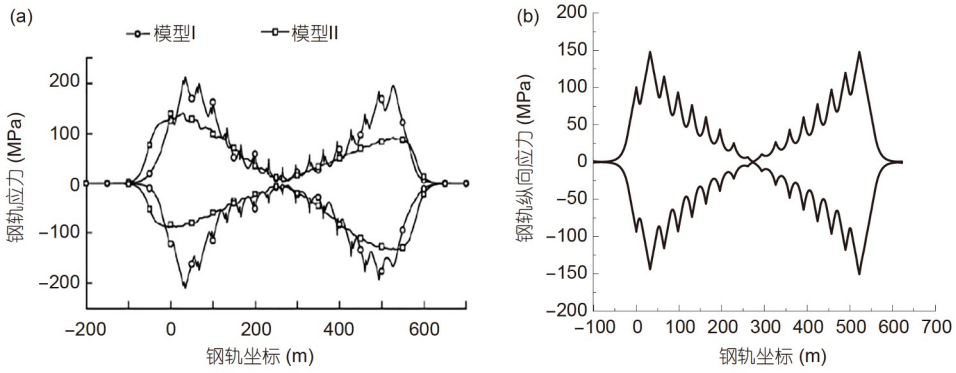


图 5 钢轨应力包络曲线. (a) 文献中的钢轨应力曲线; (b) 本文所建立模型的钢轨应力曲线

Figure 5 Maximum stress envelope curves of rail. (a) Rail stress in the former study; (b) rail stress in this study.

表 2 构件受力极值

Table 2 Extreme values of stress on components

参数	El-Centro波			天津宁河波		
	纵向	竖向	横向	纵向	竖向	横向
钢轨应力 (MPa)	103.8	–	–	193.1	–	–
轨道板应力 (MPa)	0.6	1.1	0.8	0.6	1.7	1.2
自密实混凝土层应力 (MPa)	0.3	0.4	0.4	0.4	0.7	0.6
底座板应力 (MPa)	0.5	0.2	0.3	0.8	0.4	0.4
墩台顶力 (kN)	1525.5	–	–	3513.0	–	–
扣件力 (kN)	15.0	49.4	179.2	15.0	93.1	257.9

混凝土层、底座板纵向位移变化规律基本一致, 且数值相差不大, 故图7只给出了轨道板变化规律图(下同). 各构件变形包络图(除固定支座墩/台顶)如图7所示, 构件变形极值见表3.

由图7和表3可知, 钢轨、钢轨与轨道板相对(以下简称“轨板相对”)、轨道板、自密实混凝土层、底座板的位移包络曲线均关于桥梁纵向呈轴对称分布. 钢轨纵向位移曲线较为平滑, 于中跨简支梁靠右侧1/3附

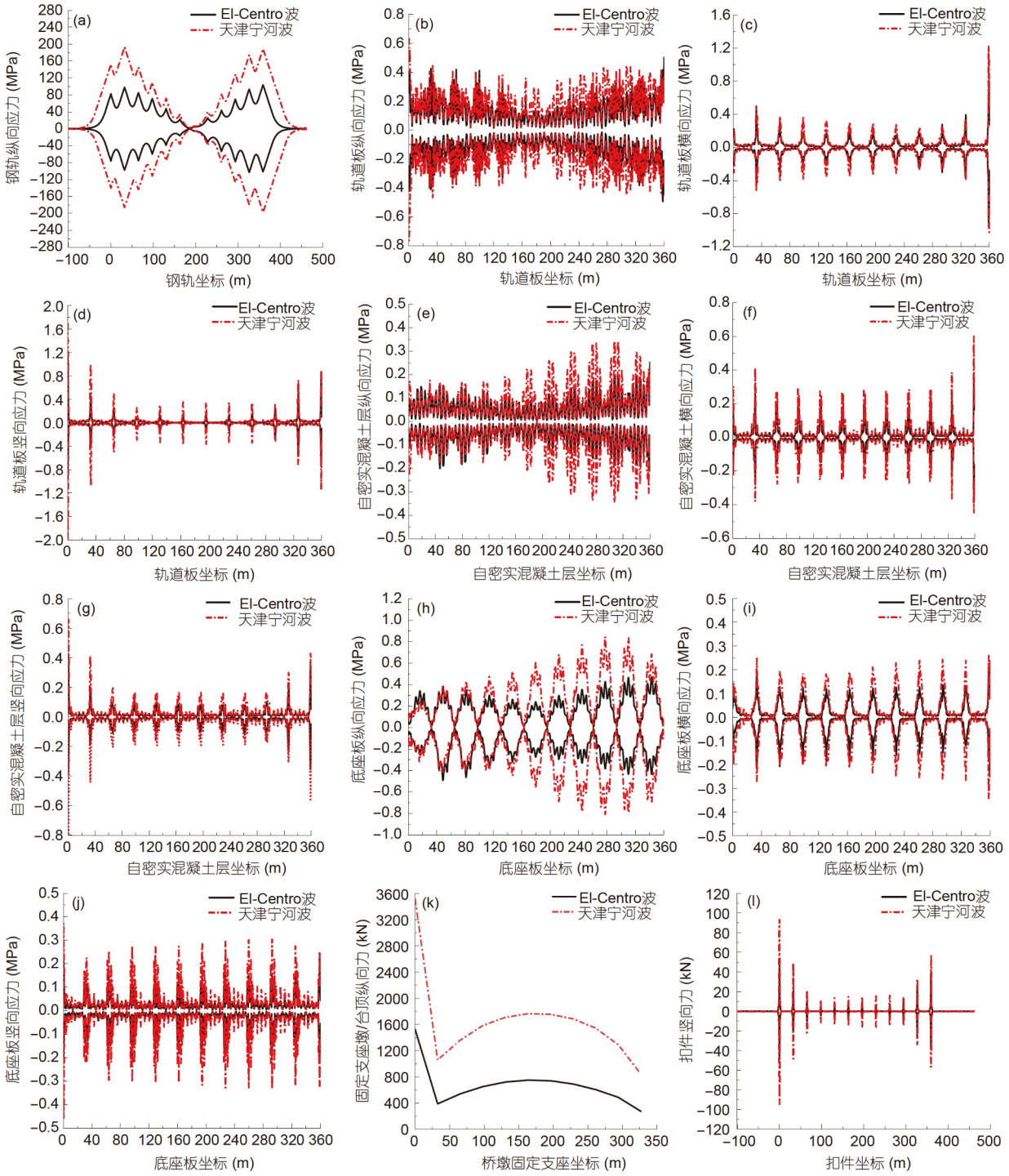


图 6　各构件受力变化规律. (a) 钢轨纵向应力; (b) 轨道板纵向应力; (c) 轨道板横向应力; (d) 轨道板竖向应力; (e) 自密实混凝土层纵向应力; (f) 自密实混凝土层横向应力; (g) 自密实混凝土层竖向应力; (h) 底座板纵向应力; (i) 底座板横向应力; (j) 底座板竖向应力; (k) 固定支座墩/台顶纵向力; (l) 扣件竖向力

Figure 6　Stress variation of each component. (a) Longitudinal stress of rail; (b) longitudinal stress of track slab; (c) lateral stress of track slab; (d) vertical stress of track slab; (e) longitudinal stress of self-compacting concrete layer; (f) lateral stress of self-compacting concrete layer; (g) vertical stress of self-compacting concrete layer; (h) longitudinal stress of base plate; (i) lateral stress of base plate; (j) vertical stress of base plate; (k) longitudinal force of fixed support on pier top; (l) vertical force of fastener.

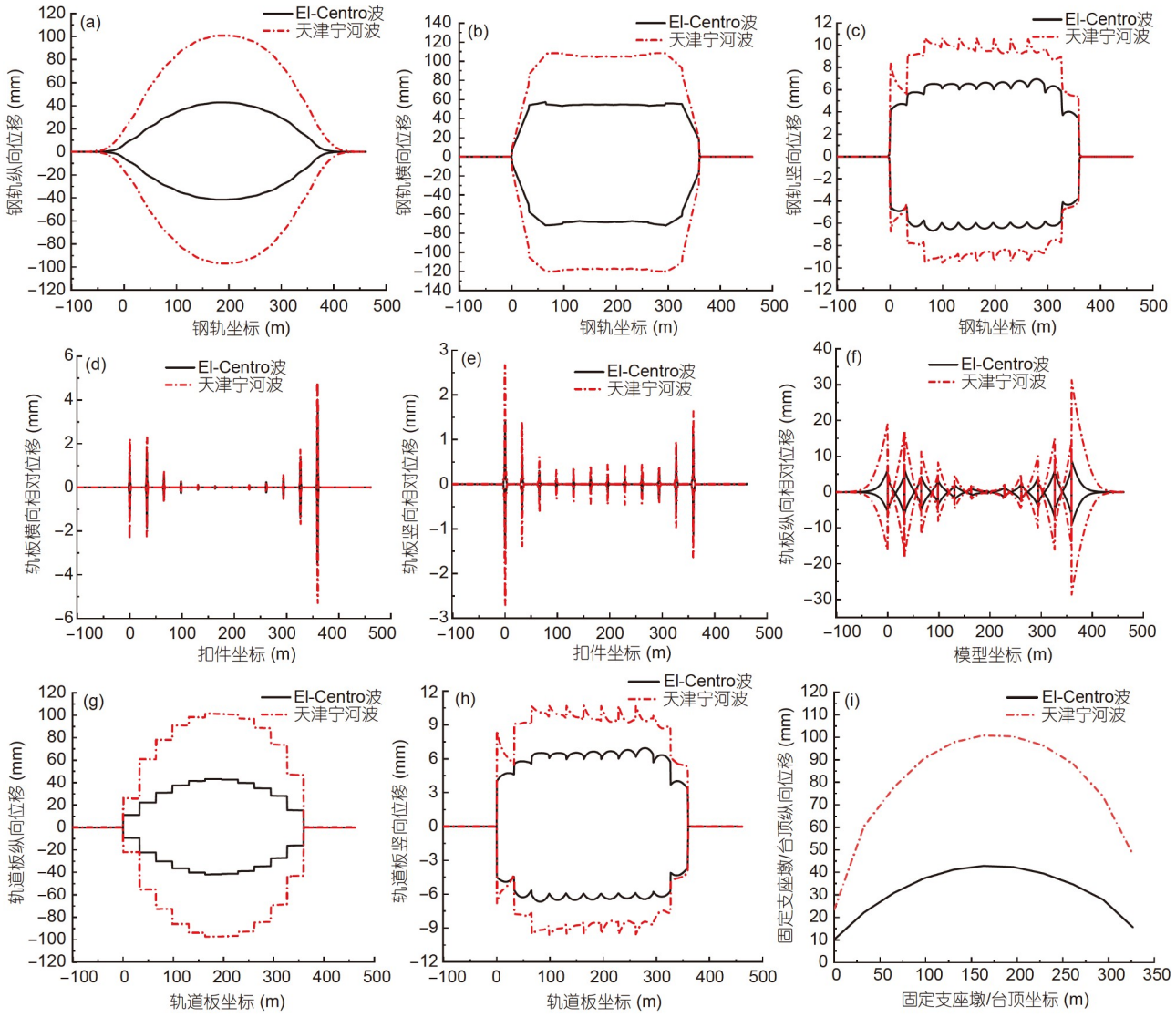


图 7 各构件变形规律. (a) 钢轨纵向位移; (b) 钢轨横向位移; (c) 钢轨竖向位移; (d) 轨板横向相对位移; (e) 轨板竖向相对位移; (f) 轨板纵向相对位移; (g) 轨道板纵向位移; (h) 轨道板竖向位移; (i) 固定支座墩/台顶纵向位移

Figure 7 Deformation of each component. (a) Longitudinal displacement of rail; (b) lateral displacement of rail; (c) vertical displacement of rail; (d) lateral relative displacement of rail-slab; (e) vertical relative displacement of rail-slab; (f) longitudinal relative displacement of rail-slab; (g) longitudinal displacement of track slab; (h) vertical displacement of track plate; (i) longitudinal displacement fixed bearing pier top.

近达到最大，桥上结构在多维地震作用下会产生较大的横向位移. 轨下各层板结构位移包络图为阶梯状折线，均在梁缝处突然增大. 同一跨桥上各层板纵向位移值基本相同，并在最中间跨桥出现最大值，表明在此纵向地震作用下轨道板、自密实混凝土层、底座板整体性较强.

各构件位移在不同类型下的地震激励响应具有较大差异，天津宁河波作用下各构件的最大位移较El-Centro波大. 钢轨的最大纵向位移增加了135.4%，为100.9 mm，固定支座墩/台顶最大位移增加了135.0%，为100.8 mm. 各板件结构纵向位移在梁缝处发生突变，且位移最大值与同等荷载下钢轨最大位移无异，表明在纵向地震作用时，各构件能够通过凸台与凹槽相互咬合共同承受作用力，实现整体纵向变形. 梁缝的存在

表 3　构件变形极值(单位: mm)

Table 3　Extreme values of component deformation (unit: mm)

参数	El-Centro波			天津宁河波		
	纵向	竖向	横向	纵向	竖向	横向
钢轨位移	42.9	7.0	72.1	100.9	10.6	120.4
轨道板位移	43.2	7.0	72.3	101.4	10.7	120.5
轨板相对位移	8.9	1.4	3.6	31.2	2.7	5.2
自密实混凝土层位移	43.2	7.0	71.9	101.9	10.7	119.7
底座板位移	43.2	7.0	71.9	101.4	10.7	119.7
墩台顶位移	42.9	–	–	100.8	–	–

导致钢轨和轨道板变形不一致，两者相对位移在此处产生突变，极值出现于最右侧梁梁缝处，为31.2 mm，故需要加强对该处轨道结构的监测与养护，以免较大的轨板相对位移带动轨下胶垫滑出导致扣件失效.

5　多维地震作用下系统受力与变形规律

基于不同地震波下桥上CRTS Ⅲ型板动力响应结果，选用对系统响应影响显著的天津宁河波作为激励，分析系统在天津宁河波纵向、竖向及三向地震下的动力响应.

5.1　纵-横-竖向受力分布

各构件纵向受力规律包络图(除固定支座墩/台顶)如图8所示，构件受力与变形极值见表4.

由图8和表4可知，同一地震下，多维地震作用与施加纵向地震激励时，钢轨、扣件、轨道板、自密实混凝土层、底座板纵向受力响应分布规律一致，钢轨、轨道板、自密实混凝土层、底座板纵向应力曲线数值有所差异. 多维地震激励下，扣件、轨道板、自密实混凝土层、底座板的横向和竖向受力最大值均出现在左/右桥台处，并在梁缝位置出现较大的突变，呈现出两边大中间小的分布规律. 同种结构在不同多维地震波作用下，同方向应力变化规律无异同，与纵向、竖向天津宁河波激励相比，多维天津宁河波作用下轨道板、自密实混凝土层、底座板所受纵向、竖向应力更大，最大竖向应力为1.7, 0.7, 0.4 MPa，表明在多维地震作用下这三种结构更容易由于较大的竖向拉应力而发生破坏. 多维地震波会产生相较于纵向、竖向地震波更大的墩顶纵向力，天津宁河波作用下桥台所受纵向力是El-Centro波的2倍，为3513.0 kN，较大的纵向力使得桥台发生纵向位移.

5.2　纵-横-竖向变形分布

各构件纵向变形规律包络图(除固定支座墩/台顶)如图9所示，构件受力与变形极值见表5.

由图9和表5可知，多维地震作用下钢轨、轨道板、自密实混凝土层、底座板、固定支座墩/台顶纵向位移响应曲线与仅有纵向地震激励时大致重合，轨板纵向相对位移曲线变化规律基本一致，仅数值略有不同；而在施加多维El-Centro波下钢轨、轨道板、自密实混凝土、底座板竖向位移响应包络图变化规律与仅施加El-Centro竖向地震激励时一致，且各结构竖向位移最大值均是只考虑竖向地震作用时的2倍以上. 与天津宁河波多维地震作用相比，纵向地震激励下轨板纵向相对位移更大，最大纵向位移为34.7 mm，增加了10.8%，而轨板横向、竖向相对位移则相反. 多维地震作用下钢轨、轨道板、自密实混凝土层、底座板会发生较大的纵、竖、横向位移，而横向位移为三者最大. 相较于竖向地震，多维地震激励时有更大的横向位移，且变化规律不同. 横向位移包络曲线在梁缝处较为平滑，未见波动，这与竖向地震激励时有显著差别，且横向位移最大值出现在模型50和300 m附近，大部分钢轨位移均在110 mm以上，天津宁河波激励时，可达120.4 mm，El-Centro波激励时，为72.0 mm，钢轨出现严重的扭转变形.

综上所述，在进行震区桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道参数设计，考虑地震对结构的受力变形影响时，采用多维地震激励相比于只施加单一方向的地震激励得到结构更安全，具有更大的安全限值.

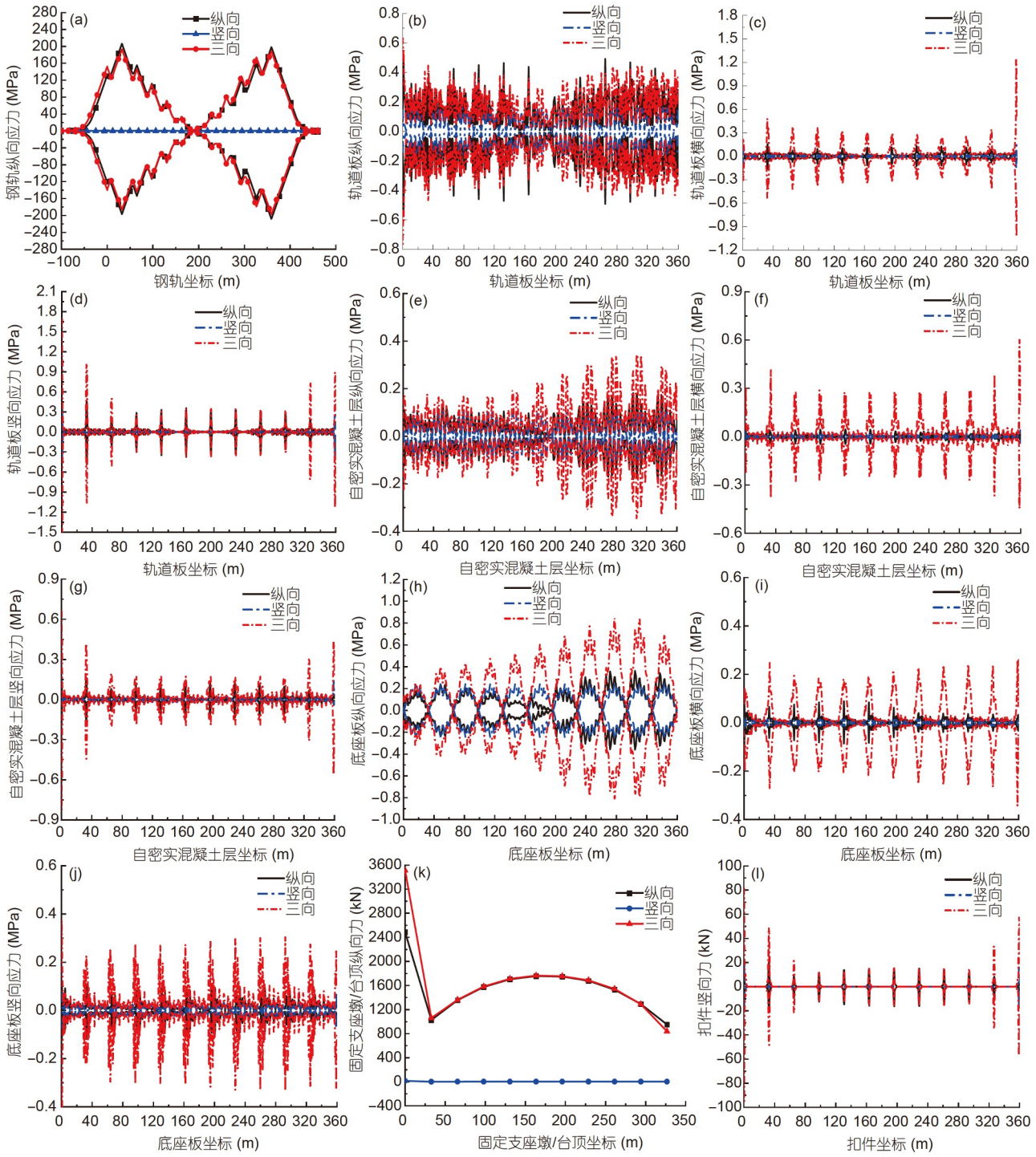


图 8 各构件受力变化规律. (a) 钢轨纵向应力; (b) 轨道板纵向应力; (c) 轨道板横向应力; (d) 轨道板竖向应力; (e)自密实混凝土层纵向应力; (f) 自密实混凝土层横向应力; (g) 自密实混凝土层竖向应力; (h) 底座板纵向应力; (i) 底座板横向应力; (j) 底座板竖向应力; (k) 固定支座墩/台顶纵向力; (l) 扣件竖向力

Figure 8 Stress variation law of each component. (a) Longitudinal stress of rail; (b) longitudinal stress of track slab; (c) lateral stress of track slab; (d) vertical stress of the track slab; (e) longitudinal stress of self-compacting concrete layer; (f) lateral stress of self-compacting concrete layer; (g) vertical stress of self-compacting concrete layer; (h) longitudinal stress of base plate; (i) lateral stress of base plate; (j) vertical stress of base plate; (k) longitudinal force of fixed support on pier top; (l) vertical force of fastener.

表 4　构件受力极值

Table 4　Extreme value of stress on components

参数	天津宁河波纵向输入			天津宁河波竖向输入			天津宁河波三向输入		
	纵向	竖向	横向	纵向	竖向	横向	纵向	竖向	横向
钢轨应力 (MPa)	206.4	–	–	1.6	–	–	193.1	–	–
轨道板应力 (MPa)	0.5	0.5	0.2	0.2	0.4	0.1	0.6	1.7	1.2
自密实混凝土层应力 (MPa)	0.2	0.2	0.1	0.1	0	0.04	0.4	0.7	0.6
底座板应力 (MPa)	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.02	0.8	0.4	0.4
墩台顶力 (kN)	2471.2	–	–	15.8	–	–	3513.0	–	–
扣件力 (kN)	15.0	20.3	0.1	0.02	18.4	0.9	15.0	93.2	258.0

表 5　构件变形极值(单位: mm)

Table 5　Extreme value of component deformation (unit: mm)

参数	天津宁河波纵向输入			天津宁河波竖向输入			天津宁河波三向输入		
	纵向	竖向	横向	纵向	竖向	横向	纵向	竖向	横向
钢轨位移	100.8	1.8	0.007	0.2	−2.8	0.005	100.9	10.6	120.4
轨道板位移	101.3	1.7	0.006	0.2	−2.8	0.005	101.4	10.7	120.5
轨板相对位移	34.7	0.6	0.001	0	−0.5	0	31.2	2.7	5.2
自密实混凝土层位移	101.2	1.7	0.006	0.2	−2.8	0.003	101.9	10.7	119.7
底座板位移	101.2	1.7	0.005	0.2	2.8	0.004	101.4	10.7	119.7
墩台顶位移	100.3	–	–	0.2	–	–	100.9	–	–

6　多维地震作用下系统受力与变形规律影响因素分析

选取多维天津宁河波(0.3*g*)进行激励, 分析扣件纵向阻力、固定支座墩/台顶纵向刚度、弹性垫层模量对系统结构受力与变形规律的影响. 由于改变参数对结构受力与变形影响有限(弹性垫层模量的改变对计算结果没有影响), 故在进行数据处理时, 选取了改变扣件纵向阻力以及固定支座墩/台顶纵向刚度下的计算结果. 不同扣件纵向阻力下各构件受力变形包络图(除固定支座墩/台顶)如图10所示, 构件受力极值见表6.

扣件纵向阻力的改变对多维地震激励下桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道系统的受力响应具有一定的影响, 但轨道结构各方向受力均比较小, 不能对结构造成破坏; 当扣件纵向阻力为4.1 kN/组时, 钢轨纵向位移为83.857 mm, 轨板纵向相对位移相比于扣件阻力为15 kN/组时增加了约1倍, 达到60.720 mm, 较大的轨板纵向相对位移会极大地降低结构的稳定性, 影响列车的行驶; 当扣件阻力为15 kN/组和10 kN/组时, 结构的位移响应基本相同; 从结构的受力与变形角度出发, 桥上扣件选用不低于10 kN/组的扣件对减小轨板纵向相对位移, 保证结构整体稳定性更加有利.

不同固定支座墩/台顶纵向刚度下, 各构件受力变形包络图(除固定支座墩/台顶)如图11所示, 构件受力极值见表7.

当固定支座墩/台顶纵向刚度由0.5倍增加到2.0倍时, 墩/台顶最大纵向力分别增加了19.2%%和37.1%, 钢轨最大纵向应力分别减少了28.1%和56.7%, 各结构纵向位移均减小了约43.2%和75.7%, 进行震区桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道参数设计, 为有效保证地震发生时桥上高速列车行车安全, 同时不至于产生较大的位移, 建议桥上固定支座墩/台顶纵向刚度宜采用不低于1.0倍系数值.

7　结论

针对目前桥上无砟轨道在地震荷载作用下, 轨道-

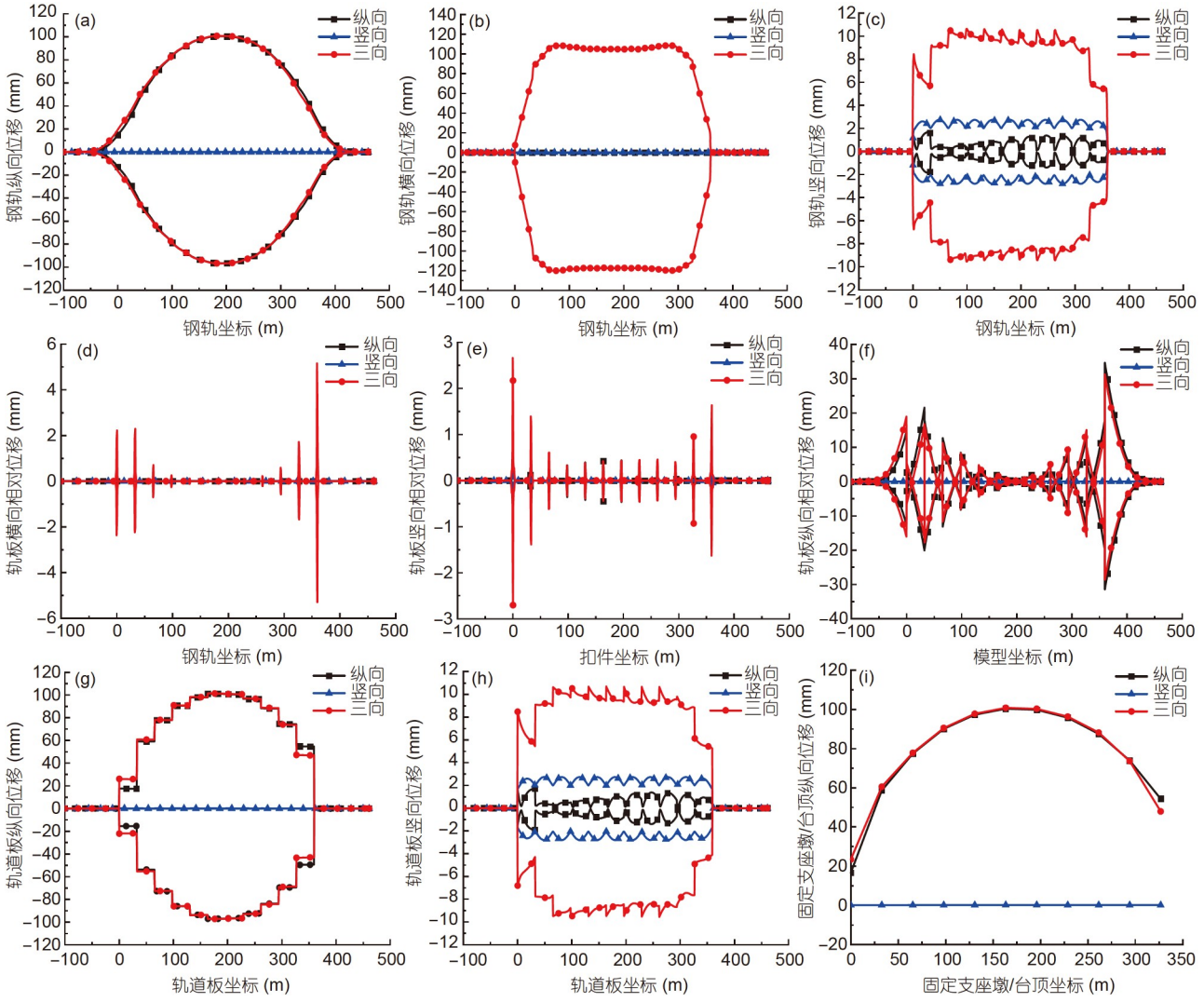


图 9 各构件变形规律. (a) 钢轨纵向位移; (b) 钢轨横向位移; (c) 钢轨竖向位移; (d) 轨板横向相对位移; (e) 轨板竖向相对位移; (f) 轨板纵向相对位移; (g) 轨道板纵向位移; (h) 轨道板竖向位移; (i) 固定支座墩/台顶纵向位移

Figure 9 Deformation law of each component. (a) Longitudinal displacement of rail; (b) lateral displacement of rail; (c) vertical displacement of rail; (d) transverse relative displacement of rail-slab; (e) vertical relative displacement of rail-slab; (f) longitudinal relative displacement of rail-slab; (g) longitudinal displacement of track slab; (h) vertical displacement of track plate; (i) longitudinal displacement of fixed bearing pier top.

桥梁响应特征、系统变形规律尚不明确等问题, 本文基于有限元法和梁-轨-板相互作用原理, 建立了桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道无缝线路精细化空间模型, 分析了El-Centro波与天津宁河波多维地震作用下轨道-桥梁系统的受力与变形规律及其影响因素, 主要结论如下.

(1) 在设计地震作用下, 与El-Centro波相比, 天津宁河波对系统的动力响应影响更为显著, 各结构最大受力、变形值增加约1倍, 最右侧活动支座及第一跨简支梁梁缝附近钢轨拉压应力增加约85.9%; 钢轨应力包络图关于跨中呈反对称分布, 各结构受力、变形包络图(除固定支座墩/台顶)关于模型纵向呈轴对称分布, 轨板相对位移峰值出现在梁缝处, 于最右侧达到极值; 各层板最大拉应力较小, 未达到各自开裂强度.

(2) 同种地震波下钢轨、轨道板、自密实混凝土层、底座板最大位移值基本相同, 均出现在中跨桥; 除钢轨位移曲线较平滑外, 各层板位移随桥跨增加呈阶梯增减变化趋势; 固定支座墩/台顶纵向力最大值出

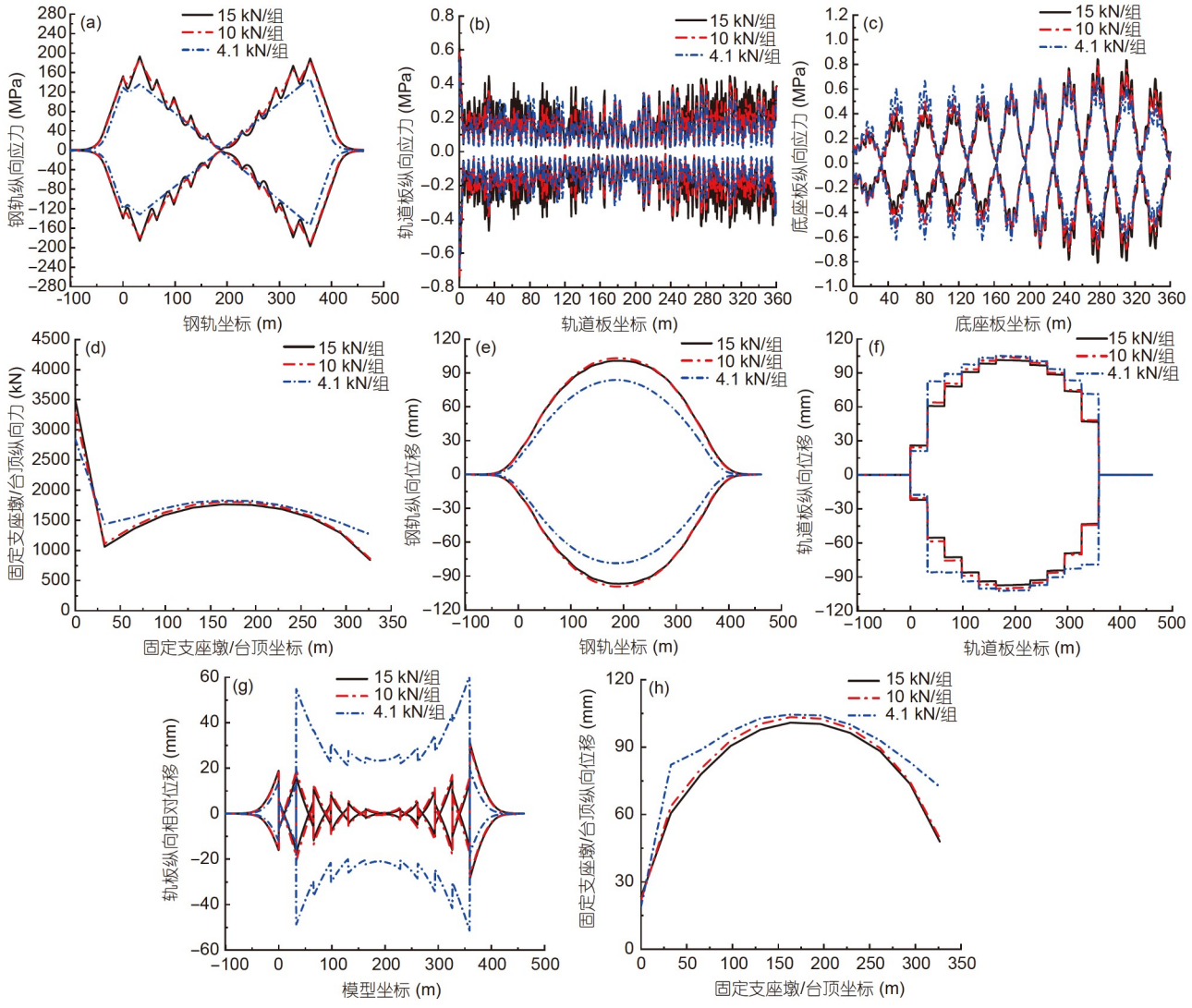


图 10　各构件变形规律. (a) 钢轨纵向应力; (b) 轨道板纵向应力; (c) 底座板纵向应力; (d) 固定支座墩/台顶纵向力; (e) 钢轨纵向位移; (f) 轨道板纵向位移; (g) 轨板纵向相对位移; (h) 固定支座墩/台顶纵向位移

Figure 10　Deformation law of each component. (a) Longitudinal stress of rail; (b) longitudinal stress of track slab; (c) longitudinal stress of base plate; (d) longitudinal force of fixed support on pier top; (e) longitudinal displacement of rail; (f) longitudinal displacement of track slab; (g) longitudinal relative displacement of rail-slab; (h) longitudinal displacement of fixed support on pier top.

表 6　不同扣件纵向阻力情况下各构件受力极值

Table 6　Extreme value of the stress and force on components under the condition of different longitudinal stiffness of fasteners

参数	15 kN/组			10 kN/组			4.1 kN/组		
	纵向	竖向	横向	纵向	竖向	横向	纵向	竖向	横向
钢轨应力 (MPa)	193.1	–	–	186.7	–	–	146.9	–	–
轨道板应力 (MPa)	0.6	1.7	1.2	0.6	1.6	1.2	0.5	1.5	1.2
自密实混凝土应力 (MPa)	0.4	0.7	0.6	0.4	0.6	0.6	0.4	0.6	0.6
底座板应力 (MPa)	0.8	0.4	0.4	0.8	0.4	0.4	0.7	0.3	0.4
墩/台顶力 (MN)	3.5	–	–	3.3	–	–	2.9	–	–

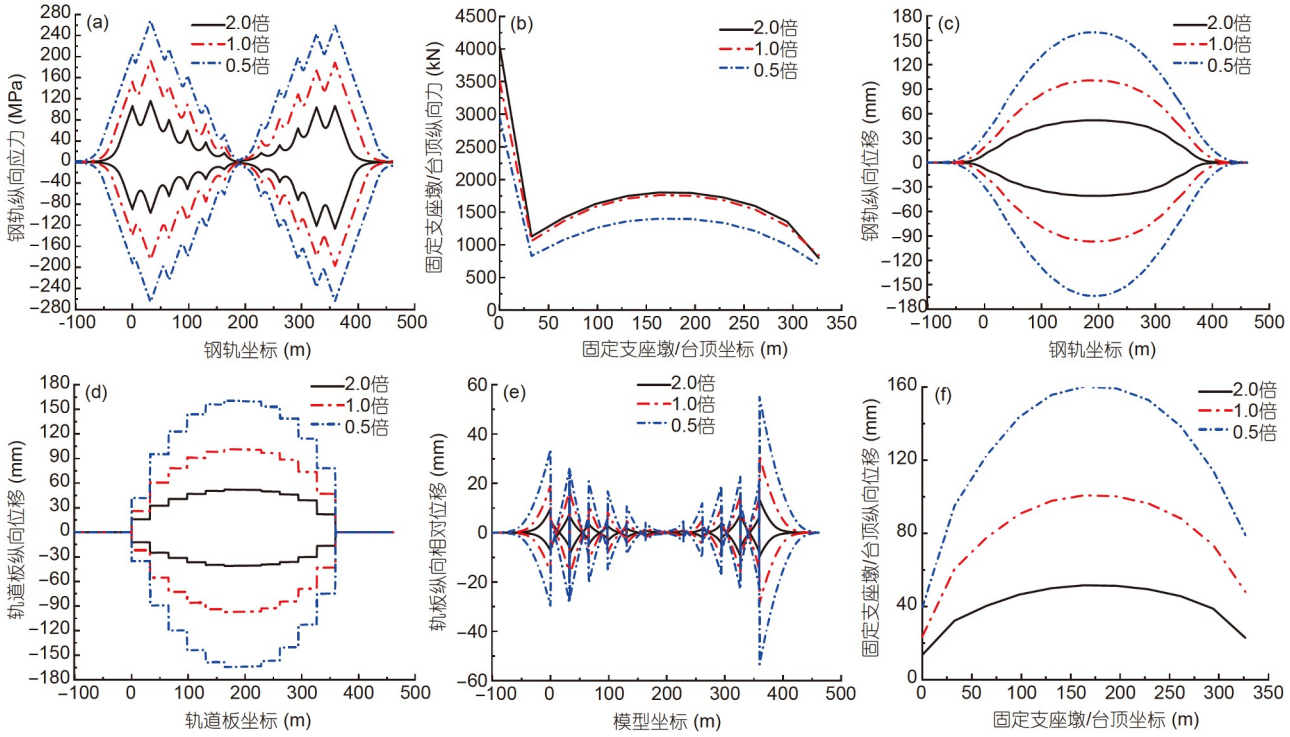


图 11 各构件受力变形规律. (a) 钢轨纵向应力; (b) 固定支座墩/台顶纵向力; (c) 钢轨纵向位移; (d) 轨道板纵向位移; (e) 轨板纵向相对位移; (f) 固定支座墩/台顶纵向位移

Figure 11 Force and deformation law of each component. (a) Longitudinal stress of rail; (b) longitudinal force of fixed support on pier top; (c) longitudinal displacement of rail; (d) longitudinal displacement of track slab; (e) longitudinal relative displacement of rail-slab; (f) longitudinal displacement of fixed support on the pier top.

表 7 不同固定支座墩/台顶纵向刚度情况下各构件受力极值

Table 7 The extreme values of the stress and force on components under the condition of different longitudinal stiffness of fastener

参数	2.0倍			1.0倍			0.5倍		
	纵向	竖向	横向	纵向	竖向	横向	纵向	竖向	横向
钢轨应力 (MPa)	116.3	–	–	193.1	–	–	268.7	–	–
轨道板应力 (MPa)	0.6	1.7	1.3	0.6	1.7	1.2	0.6	1.6	1.2
自密实混凝土应力 (MPa)	0.4	0.7	0.6	0.4	0.7	0.6	0.4	0.6	0.6
底座板应力 (MPa)	0.7	0.4	0.5	0.8	0.4	0.4	0.8	0.4	0.5
墩/台顶力 (MN)	4.0	–	–	3.5	–	–	2.9	–	–

现在固定支座桥台处, 在左侧桥台与相邻桥墩固定支座处出现最大相邻墩/台顶位移差值, 需密切关注其出现位置与大小.

(3) 天津宁河波和El-Centro波多维地震激励时, 结构所受的纵、竖、横向力会大于地震单独作用时, 且将发生较大的横向位移; 相同地震波在多维地震和纵向地震激励下, 钢轨、轨道板、自密实混凝土层、底座板纵向受力与纵向位移响应分布规律一致, 且位移响应曲线基本重合.

(4) 以天津宁河波多维地震对系统进行激励时, 采用小阻力扣件能够有效地降低地震作用下钢轨、固定支座墩/台顶的受力, 但会显著增加轨板纵向相对位移, 建议桥上扣件阻力大小不低于10 kN/组; 固定支座墩/台顶纵向刚度越大, 钢轨应力减小幅度较固定支座墩/

台顶纵向力的增加幅度大，且各结构位移响应能得到不同程度降低，为有效保证地震发生时桥上高速列车行车安全，同时不至于产生较大的位移，建议桥上固定支座墩/台顶纵向刚度宜采用不低于1.0倍系数值；改变弹性垫层模量几乎不对结构受力与变形产生影响.

(5) 在地震频发区域设计、运营桥上无缝线路时，需综合选取合理的地震波类型，考虑多维地震作用，分析结构的动力响应特征，进而采取有效的减隔震设计，同时还应加强对易受损部位的监测及养护.

参考文献

1 Wang J J, Wang M, Liu W B, et al. Technology of CRTS Ⅲ ballastless track system (in Chinese). China Railway, 2017, 8: 11–15 [王继军, 王梦, 刘伟斌, 等. CRTS Ⅲ型板式无砟轨道系统技术. 中国铁路, 2017, 8: 11–15]

2 Ren J, Deng S, Zhang K, et al. Design theories and maintenance technologies of slab tracks for high-speed railways in China: A review. Transp Saf Environ, 2021, 3: tdab024

3 Shaban N, Caner A, Yakut A, et al. Vehicle effects on seismic response of a simple-span bridge during shake tests. Earthq Engng Struct Dyn, 2015, 44: 889–905

4 Wei F, Zhang Z F, Gao L. Study on shaking table array test of HSR train-track bridge system under seismic action and velocity threshold of earthquake early warning (in Chinese). J China Railway Soc, 2018, 40: 101–106 [魏峰, 张志方, 高亮. 地震作用下车辆-轨道-桥梁系统振动台台阵试验与列车预警速度阈值研究. 铁道学报, 2018, 40: 101–106]

5 Ettouney M, Hapij A, Gajer R. Frequency-domain analysis of long-span bridges subjected to nonuniform seismic motions. J Bridge Eng, 2001, 6: 577–586

6 Mylona E K V, Sextos A G, Mylonakis G E. Rotational seismic excitation effects on CIDH pile-supported bridge piers. Eng Struct, 2017, 138: 181–194

7 Toyooka A, Ikeda M, Yanagawa H, et al. Effects of track structure on seismic behavior of isolation system bridges. QR RTRI, 2005, 46: 238–243

8 Xie X, Wang Y, Chen L. Effect of rail restraints on seismic responses of cushioning railway bridges (in Chinese). J China Railway Soc, 2012, 34: 75–82 [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. 铁道学报, 2012, 34: 75–82]

9 Xiang Y, Luo Y, Zhu Z, et al. Estimating the response of steel structures subjected to vertical seismic excitation: Idealized model and inelastic displacement ratio. Eng Struct, 2017, 148: 225–238

10 Paraskeva T S, Dimitrakopoulos E G, Zeng Q. Dynamic vehicle-bridge interaction under simultaneous vertical earthquake excitation. Bull Earthq Eng, 2017, 15: 71–95

11 Guo W, Li J L, Liu H Y. The analysis of running safety of high-speed-train on bridge by using refined simulation considering strong earthquake (in Chinese). Eng Mech, 2018, 35(S1): 259–264, 277 [国巍, 李君龙, 刘汉云. 强地震下高速铁路桥上行车精细化模拟及行车安全性分析. 工程力学, 2018, 35(增1): 259–264, 277]

12 Jin Z, Pei S, Li X, et al. Effect of vertical ground motion on earthquake-induced derailment of railway vehicles over simply-supported bridges. J Sound Vib, 2016, 383: 277–294

13 Xiao X, Ling L, Jin X. A study of the derailment mechanism of a high speed train due to an earthquake. Vehicle Syst Dyn, 2012, 50: 449–470

14 Dumanoglu A A, Brownjohn J M W, Severn R T. Seismic analysis of the Fatih Sultan Mehmet (second Bosporus) suspension bridge. Earthq Engng Struct Dyn, 1992, 21: 881–906

15 Jiang L, Kang X, Li C, et al. Earthquake response of continuous girder bridge for high-speed railway: A shaking table test study. Eng Struct, 2019, 180: 249–263

16 Yan B, Liu S, Dai G L, et al. Nonlinear interaction between CRTS II ballastless track and bridges due to multi-dimensional earthquake (in Chinese). J China Railway Soc, 2016, 38: 74–80 [闫斌, 刘施, 戴公连, 等. 多维地震作用下桥梁-无砟轨道非线性相互作用. 铁道学报, 2016, 38: 74–80]

17 Cavdar O. Probabilistic sensitivity analysis of suspension bridges to near-fault ground motion. Steel Compos Struct, 2013, 15: 15–39

18 Kim C W, Kawatani M, Kanbara T, et al. Seismic behavior of steel monorail bridges under train load during strong earthquakes. J Earthq Tsunami, 2013, 07: 1350006

19 Yan B, Huang J, Liu S, et al. Seismic responses of CRTS Ⅱ track system on bridge under complex geography conditions (in Chinese). J Traffic

Transp Eng, 2018, 18: 43–50 [闫斌, 黄杰, 刘施, 等. 复杂地形条件下桥上CRTS Ⅱ型轨道系统地震响应. 交通运输工程学报, 2018, 18: 43–50]

20 Duan J H, Cao F H, Lin F, et al. Seismic response of a suspension bridge tower installed with composite beam subjected to near-field earthquake (in Chinese). J Vib Shock, 2020, 39: 221–228, 253 [段佳宏, 曹发辉, 林帆, 等. 近场地震作用下组合横梁桥塔的悬索桥地震响应研究. 振动与冲击, 2020, 39: 221–228, 253]

21 Guo E D, Zhang S Q, He Q. Seismic safety evaluation of high-speed trains considering the characteristics of track spectrum (in Chinese). J Railway Eng Soc, 2017, 34: 32–37 [郭恩栋, 张树强, 贺芊. 考虑轨道谱特征的高铁列车地震安全性评估. 铁道工程学报, 2017, 34: 32–37]

22 Zhang Y L, Yang S J, Chen X C. Analysis of seismic responses of high-speed railway bridges based on integrated track and bridge model (in Chinese). Bridge Construct, 2016, 46: 23–28 [张永亮, 杨世杰, 陈兴冲. 基于线桥一体化模型的高速铁路桥梁地震反应分析. 桥梁建设, 2016, 46: 23–28]

23 Liu Z W. Research on seismic performance and design method for high-speed railway bridges based on track-bridge integrated model (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 2020, 39: 1080 [刘尊稳. 基于线桥一体化模型的高速铁路桥梁抗震性能及设计方法研究. 岩石力学与工程学报, 2020, 39: 1080]

24 Feng Y L, Jiang L Z, Chen M C, et al. Corresponding relationship between track bridge system damage and track irregularity under seismic action (in Chinese). J Traffic Transp Eng, 2021, 21: 203–214 [冯玉林, 蒋丽忠, 陈梦成, 等. 地震作用下轨道-桥梁系统损伤与轨道不平顺的对应关系. 交通运输工程学报, 2021, 21: 203–214]

25 Lei H J, Huang B K, Liu W. Evaluation method for running safety of train on a high-speed railway bridge based on geometric indexes (in Chinese). J Vib Shock, 2020, 39: 57–63 [雷虎军, 黄炳坤, 刘伟. 基于几何指标的高速铁路桥上列车地震安全性评判方法. 振动与冲击, 2020, 39: 57–63]

26 Yu X D, Yin X Q, Yan B. Seismic response characteristics of beam track system of large-span simply-supported steel truss girder bridge with continuously welded rail (in Chinese). J China Railway Soc, 2017, 39: 111–116 [于向东, 尹兴权, 闫斌. 大跨简支钢桁梁桥-轨道系统地震响应特性研究. 铁道学报, 2017, 39: 111–116]

27 Wei B, Yang T H, Jiang L Z. The effects of model refinement of ballastless tracks on the seismic vulnerability of a continuous bridge on a high-speed railway (in Chinese). Eng Mech, 2018, 35: 16–23, 51 [魏标, 杨添涵, 蒋丽忠. 轨道结构建模精细化程度对高速铁路连续梁桥地震易损性的影响. 工程力学, 2018, 35: 16–23, 51]

28 Yang M G, Meng D L, Dai L Y. Transverse seismic pounding effect for simply-supported girder bridges of high-speed railway considering track constraint (in Chinese). J Central South Univ (Sci Tech), 2018, 49: 916–924 [杨孟刚, 孟栋梁, 戴良缘. 考虑轨道约束的高铁简支梁桥横向地震碰撞效应. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49: 916–924]

29 Zhao G H, Pan Y D. Joint optimization of mechanical parameters of lateral support system of cable stayed bridge under earthquake excitation (in Chinese). J Vib Shock, 2021, 40: 234–241 [赵国辉, 潘佑东. 地震激励下斜拉桥横向支承体系力学参数联合优化. 振动与冲击, 2021, 40: 234–241]

30 Liu X L, Su C, Nie M. Inelastic random response analysis of long-span bridges under non-uniform seismic excitation (in Chinese). J Vib Shock, 2021, 40: 297–304, 310 [刘小璐, 苏成, 聂铭. 非一致地震激励下大跨度桥梁弹塑性随机响应分析研究. 振动与冲击, 2021, 40: 297–304, 310]

31 Jiang H, Zhang P, Huang L, et al. Probabilistic seismic damage characteristics of simply supported steel box girder bridge across fault (in Chinese). J Vib Shock, 2021, 40: 253–262 [江辉, 张鹏, 黄磊, 等. 跨断层简支钢箱梁桥的概率性地震损伤特性研究. 振动与冲击, 2021, 40: 253–262]

32 Ministry of Railways of the PRC. Code for Design of Railway Continuous Welded Rail (TB10015-2012). Beijing: China Railway Publishing House, 2013 [中华人民共和国铁道部. 铁路无缝线路设计规范(TB10015-2012). 北京: 中国铁道出版社, 2013]

33 Yan M, Wei X K, Wang P, et al. Research on longitudinal seismic responses of continuous welded rails on large-span bridges (in Chinese). J China Railway Soc, 2014, 36: 96–102 [严猛, 魏贤奎, 王平, 等. 大跨桥上无缝线路纵向地震响应研究. 铁道学报, 2014, 36: 96–102]

34 Yan B, Dai G, Guo W, et al. Longitudinal force in continuously welded rail on long-span tied arch continuous bridge carrying multiple tracks. J Cent South Univ, 2015, 22: 2001–2006

35 Zhang P F, Gui H, Lei X Y, et al. Deflection force and displacement of CRTS Ⅲ slab track on bridge under train load (in Chinese). J Traffic Transp Eng, 2018, 18: 61–72 [张鹏飞, 桂昊, 雷晓燕, 等. 列车荷载下桥上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道挠曲力与位移. 交通运输工程学报, 2018, 18: 61–72]

36 Gao L, Zhao L, Qu C, et al. Analysis of design scheme of CRTS Ⅲ slab track structure on roadbed (in Chinese). J Tongji Univ (Nat Sci), 2013, 41: 848–855 [高亮, 赵磊, 曲村, 等. 路基上CRTS Ⅲ型板式无砟轨道设计方案比较分析. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41: 848–855]

Dynamic response of the China Railway Track System III slab track system on a bridge under multidimensional seismic actions

ZHANG PengFei, CAI Ke, WANG ChengLong, LEI XiaoYan & CHEN HuaPeng

State Key Laboratory of Performance Monitoring Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China

This study investigated the dynamic response characteristics of the China Railway Track System (CRTS) III slab ballastless track system on bridges under multidimensional earthquakes. According to the finite element method and the beam-rail-slab interaction principle, we built a refined spatial coupling model of the CRTS III slab ballastless track seamless line on a bridge. The two common seismic waves, the El-Centro wave and the Tianjin Ninghe wave, were used to analyze the stress and deformation laws of the system under the coupling action of multidimensional earthquakes and to explore the influencing factors of the stress and deformation. The results showed that the bridge track structure featured larger longitudinal and lateral displacements under the action of multidimensional waves from the earthquakes and that the longitudinal, vertical, and lateral stresses in the structure were larger than those under the action of one-directional wave earthquakes. Moreover, the distributions of the responding longitudinal stress and the corresponding longitudinal displacements of the track structures induced by the earthquakes were the same under the multidimensional coupling seismic excitation and longitudinal seismic excitation. The distributions of longitudinal stress and the displacements of the track structures were the same under multidimensional seismic excitation and longitudinal seismic excitation of the same seismic wave. As for the midspan, the stress-distance graphs of the rail were all distributed antisymmetrically. The stress and deformation curves of the structures were distributed axially symmetrical for the longitudinal direction of the bridge. The displacement of the track slab, the concrete layer, and the base slab changed in a step-like manner with the increase or decrease in bridge spans, and the maximum values occurred in the middle of the model span. The relative displacements of the rail and track slab were maximum at the rightmost beam joint. The use of low-resistance fasteners can reduce the stress on the rails and the fixed support piers/platform tops under the action of earthquakes, but it will increase the relative longitudinal displacement of the rail and the slab. Therefore the resistance of the fasteners on the bridge should not be less than 10 kN for each pair. Moreover, to ensure the safety of high-speed trains on the bridge under an earthquake and ensure that each component does not suffer large displacements, the longitudinal stiffness of the fixed bearing piers/platform tops on the bridge should not be less than 1.0 times the coefficient value.

seismic action, CRTS III slab track, CWR on bridge, uniform excitation, dynamic response

doi: 10.1360/SST-2022-0287