

高速铁路 CRTS III 型无砟轨道-减隔震桥梁 系统地震响应分析

张永亮, 毕明辉, 郑佳轩

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为研究高速铁路轨道-减隔震桥梁系统的纵向地震响应及损伤状态,以桥面铺设 CRTS III 型无砟轨道结构的 7 跨 32 m 简支梁桥为研究对象,建立了轨道-桥梁系统有限元模型,通过非线性时程分析获得了系统在不同的地震波、地震动强度及支座类型下各关键构件的地震响应分布规律。结果表明:纵向地震激励下梁体位移呈阶梯形分布,最大值出现在桥跨中心处;扣件位移最大值出现在桥台伸缩缝处,且在每跨梁端伸缩缝处出现极值,扣件位移受不同地震波的频谱特性影响显著。钢轨应力最大值出现在边跨两侧的伸缩缝处,复合板截面正应力由轴力和弯矩分量共同引起。支座及轨道系统进入非线性后,与地震动强度增加幅度相比,易损构件纵向变形的增幅表现出显著的放大效应及分布不均衡性。考虑轨道系统,与摩擦摆支座相比,同球向双球面支座可明显降低扣件、梁体及支座的位移响应;轨道系统对支座位移具有显著的抑制作用。

关键词:高速铁路;简支梁桥;CRTS III 型轨道系统;减隔震;地震响应

中图分类号:U24

文献标志码:A

Seismic response analysis of CRTS III ballastless track-damper and isolation bridge system for high-speed railway

ZHANG Yongliang, BI Minghui, ZHENG Jiaxuan

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To study the longitudinal seismic response and damage state of the high-speed railway track-isolation bridge system, a 7-span 32 m simply supported beam bridge with CRTS III type ballastless track structure laid on the bridge deck was taken as the research object. A finite element model of the track-bridge system was established, and the seismic response distribution law of each key component under different seismic waves, seismic intensity and bearing types was obtained through nonlinear time-history analysis. The results show that the longitudinal displacement of the beam body presents a stepwise distribution under longitudinal seismic excitation, with the maximum value occurring at the center of the bridge span. The maximum displacement of the fastener occurs at the expansion joint of the abutment, and extreme values appear at the expansion joint at each beam end. The displacement of the fastener is significantly affected by the spectral characteristics of different seismic waves. The maximum stress of the rail occurs at the expansion joints on both sides of the side span, and the normal stress of the composite slab section is caused by the combined action of axial force and bending moment components. After the bearing and track system enter the nonlinear state, compared with the increase in seismic intensity, the increase in longitudinal deformation of the vulnerable components shows a significant amplification effect and distribution

收稿日期:2024-12-01; 修回日期:2025-03-27

基金项目:国家自然科学基金项目(52168018)

作者简介:张永亮(1975—),男,教授,博士,从事桥梁抗震研究。E-mail:zhangyong_L@126.com

通信作者:毕明辉(1998—),男,硕士研究生,从事桥梁抗震研究。E-mail:2523837989@qq.com

imbalance. Considering the track system, compared with the friction pendulum bearing, the same ball direction double spherical surface bearing can significantly reduce the displacement response of the fastener, beam body and bearing. The track system has a significant inhibitory effect on the displacement of the bearing.

Key words: high-speed railway; simple supported beam bridge; CRTS III track system; reduce and isolate earthquakes; seismic response

0 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,线路难免穿越地震多发区^[2],现有的四纵四横高速铁路网中有三纵两横位于高烈度地震区,因此我国高速铁路桥梁面临严重的地震威胁^[3]。1975 年海城 7.3 级地震、2008 年汶川 8.0 级地震和 2022 年青海门源 6.9 级地震均造成众多铁路桥梁上部轨道结构发生损坏,轨道震害类型包括钢轨弯曲变形、错位和拉断等,这对震后救援及修复工作造成很大影响^[4-6]。高速铁路桥梁与轨道是一个不可分割的受力整体,应将桥梁和轨道作为一个系统进行抗震设计,因此研究轨道-桥梁系统的地震响应对铁路桥梁的抗震设计和震后修复有重要意义^[7]。

王继军等^[8]研究了不同类型单元式无砟轨道无缝线路在大跨桥上的适应性;张鹏飞等^[9]建立了 CRTS III 型板式无砟轨道无缝线路精细化空间耦合模型,分析了不同列车荷载作用长度、桥上扣件纵向阻力及墩台顶固定支座纵向刚度对挠曲力与位移的影响;娄平等^[10]建立振动模型及振动方程,并编制相关计算程序,分析了地震动强度以及行车速度对行车安全的影响规律;周旺保等^[11]研究了高速铁路轨道-桥梁系统震后轨道不平顺的产生机理;GUO 等^[12]研究了高速铁路轨道-桥梁系统地震破坏特征;张鹏飞等^[13-14]研究了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。综合上述研究可知,目前研究多围绕 CRTS III 型板式无砟轨道结构的行车安全或者使用抗震支座的轨道-桥梁系统的地震响应分析。而高速铁路桥梁具有刚度大、周期小、基频高等显著特征,理论上更适合采用减隔震技术,因此随着减隔震支座的发展和应用,对使用减隔震支座的高速铁路轨道-桥梁系统的地震响应进行研究十分必要。

为探究高速铁路轨道-减隔震桥梁系统在不同地震波、不同地震动强度及不同支座下的纵向地震响应规律,本文以双线 7 跨 32 m 标准简支箱梁桥为研究对象,建立了带有 CRTS III 型板式无砟轨道结构的高速铁路轨道-桥梁系统有限元模型,研究各构件在不同频谱特性及地震动强度作用下的地震响应分布特征,系统比较了不同支座类型对轨道系统及桥梁地震响应的差异。

1 高速铁路轨道-桥梁系统有限元模型

本文以位于八度区,设计基本加速度为 0.3 g 的 7 跨 32 m 高速铁路轨道-桥梁系统为研究对象,桥梁结构包括主梁、支座和桥墩。主梁为 32.6 m 的混凝土简支箱梁,结构具体尺寸参考铁路工程建设通用参考图《通桥(2016)2322A-II-1》,每跨梁自重 822 t,二期恒载 130 kN/m。支座采用同球向双球面减隔震支座,如图 1 所示。桥墩采用高度为 15 m 的圆端形实体桥墩,结构具体尺寸参考铁路工程建设通用参考图《通桥(2021)4301-III》。

CRTS III 型板式无砟轨道结构自上而下由 CHN60 钢轨、WJ-8 型扣件、轨道板、自密实混凝土层、隔离层土工布、弹性橡胶垫板,以及底座板等部分组成^[12],如图 2 所示。轨道板与自密实混凝土依靠门型钢筋以及混凝土的黏结力实现连接。底座板中央的限位凹槽与自密实混凝土的凸台互相咬合。底座板上表面铺设土工布,限位凹槽四周设置弹性橡胶垫,以缓冲凸台与凹槽的碰撞^[15]。根据底座的施工要求,在铺设底座钢筋前,需对梁面进行凿毛和清理,以保证底座混凝土与梁体的黏着力,同时采用 L 型钢筋将底座钢筋网片与梁体连接起来,保证底座与梁体之间的连接。

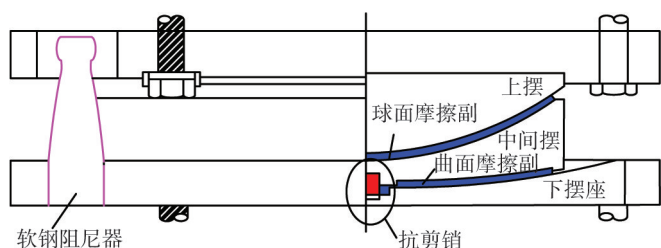


图 1 减隔震支座结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the seismic isolation bearing

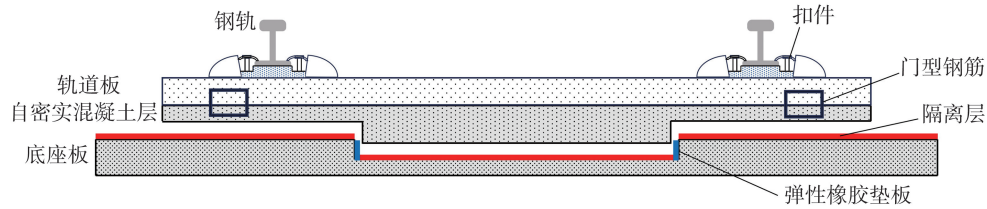


图2 CRTS III型板式无砟轨道结构示意图

Fig.2 Structural diagram of CRTS III slab ballastless track

本文采用 Midas Civil 建立的 7×32 m 高速铁路轨道-桥梁系统的有限元模型,桥梁两侧各考虑长度为 50 m 的路基段,如图 3 所示。由于轨道板和自密实混凝土层连接紧密,且二者均不易发生损伤^[13],因此出于简化模型,提高计算效率考虑,将二者作为一个整体构件“复合板”考虑^[16],底座板同理也和简支箱梁作为整体考虑。模型中钢轨、复合板、底座板、简支箱梁以及桥墩采用弹性梁单元模拟,材料特性见表 1。扣件和隔离层采用滞后系统模拟,弹性橡胶垫板采用弹性连接模拟,具体参数见表 2^[16-21]。减隔震支座(同球向双球面支座)采用一般连接中的弹簧单元(滞回模型为多折线塑性随动)和摩擦摆隔震装置并联模拟,具体参数见表 3。考虑墩底的桩-土相互作用,采用节点弹性支撑模拟墩底纵向转动刚度,其余方向固定。本文按照以上模拟方式分别建立采用隔震(双曲面支座)、减隔震支座的两种模型,其中地震强度为 0.10 g 时,隔震、减隔震支座未进入工作状态,等效为抗震支座模拟,具体见表 4。根据以上参数建立有限元模型如图 4 所示。

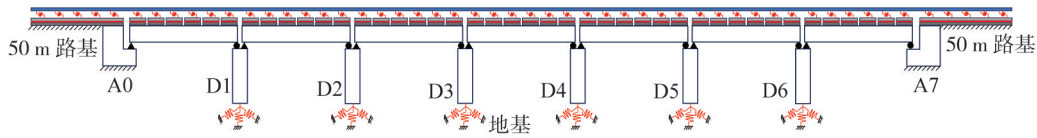


图3 CRTS III型板式无砟轨道-简支梁桥结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of CRTS III slab ballastless track-simple supported beam bridge structure

表1 构件材料特性

Table 1 Material properties of components

构件	材料	弹性模量/MPa	质量密度/(kg/m ³)	泊松比
钢轨	钢材	210 000	7 850	0.3
复合板	混凝土	32 500	2 500	0.2
底座板	混凝土	32 500	2 500	0.2
简支箱梁	混凝土	34 500	2 500	0.2
桥墩	混凝土	31 500	2 500	0.2

表2 连接构件力学特性参数^[16-21]

Table 2 Mechanical characteristic parameters of connecting members^[16-21]

构件	屈服强度/kN	屈服位移/mm	弹性刚度/(kN/mm)
扣件	15	2.0	7.5
隔离层	80	0.2	400.0
弹性橡胶垫板			500.0

表3 减隔震支座力学特性参数

Table 3 Mechanical characteristic parameters of seismic isolation bearing

本构类型	等效屈服荷载/kN	等效屈服位移/mm	极限荷载/kN	极限位移/mm	屈服前刚度(k_1)	屈后刚度比(k_2/k_1)
减震棒	121	1.5	206	136.9	157 403	0.008
曲面摩擦	206	2.5			82 333	0.053

表4 计算模型

Table 4 Calculation model

模型	支座类型		
	0.10 g	0.30 g	0.57 g
1	抗震支座	隔震支座	隔震支座
2	抗震支座	减隔震支座	减隔震支座

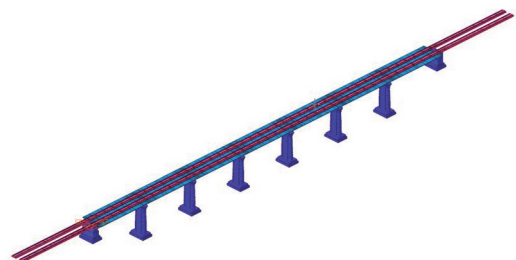


图4 CRTS III型板式无砟轨道-简支梁桥有限元模型

Fig.4 Finite element model of CRTS III slab ballastless track-simple supported beam bridge

2 不同地震波对系统地震响应的影响

采用 El-Centro 波和 Taft 波作为激励,两条地震波的具体信息见表 5,将两条地震波的最大峰值加速度调整为 0.57 g,沿桥纵向作用于模型 2,以研究地震强度为 0.57 g 时模型 2 在两种不同地震波作用下的地震响应规律。不同地震波作用下各构件地震响应如图 5 所示,不同地震波作用下各构件地震响应最值见表 6,其中扣件位移、隔离层位移分别为钢轨和复合板、复合板和底座板的相对位移。为清晰描述地震响应规律,将桥台和桥墩接缝处分别记为 A0、D1~D6、A7,如图 3 所示。

表 5 地震波信息

Table 5 Seismic wave information

地震波信息	特征周期/s	峰值加速度/g	持续时间/s
El-Centro 波	0.5440	0.3569	53.72
Taft 波	0.5370	0.1557	54.38

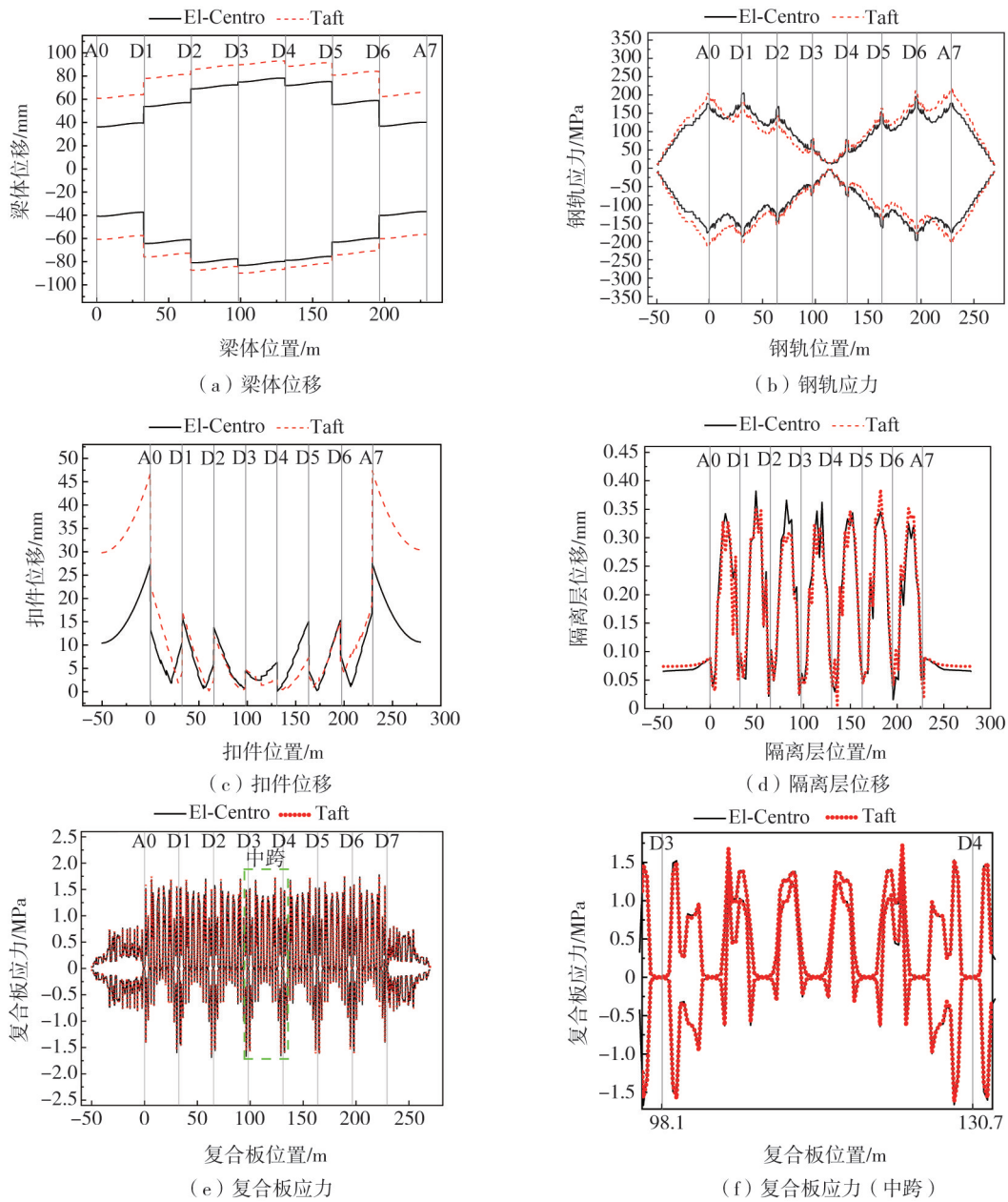


图 5 不同地震波作用下各构件地震响应

Fig. 5 Seismic response of each component under different seismic waves

由图 5 和表 6 分析可知,两种不同地震波作用下,梁体位移、钢轨应力和扣件位移的变化较为明显,且均关于跨中呈对称分布,并在梁缝处发生突变,这是因为多跨简支梁桥在水平地震激励作用下梁端发生竖向转角,且梁缝左右两跨的梁端转角是不连续的,进而引起突变。梁体位移从两侧向中间逐渐增大,整体呈现为阶梯形变化趋势;钢轨应力和扣件位移在每一跨都呈现为两端大、中间小的分布特征,在整体又呈现出从路

基段开始逐渐增大,在第一跨梁左侧或右侧梁缝处达到最大后,后向中跨逐渐减小的变化趋势,这是因为路基段系统刚度由路基刚度和轨道、扣件刚度组成,而桥墩处的轨道系统刚度由减隔震支座和轨道、扣件刚度组成,二者刚度相差较大,且随着从路基段到中跨,轨道系统的约束效应逐渐减小而造成的。与El-Centro波相比,在Taft波作用下的三者地震响应最大值分别增加了12.0%、5.3%、72.1%,扣件位移受不同地震波的频谱特性影响较大。

两种不同地震波作用下,复合板应力和隔离层位移变化不大。由图6分析可知,复合板应力中弯曲应力占主导地位,且弯曲应力包络图对称分布,在每跨梁端伸缩缝处出现极大值,而轴向应力以拉应力为主,在每跨跨中出现极大值。弯曲应力和轴向应力在跨中分布均匀,在梁端出现突变,这是由于CRTSⅢ型板式无砟轨道系统的“桥上单元”设计思路,复合板在桥上为单元板式结构,故各单元之间影响不大,但受钢轨在梁缝处的应力突变影响,复合板在梁缝处产生较大的弯曲应力。隔离层位移在桥跨段整体分布较为均匀,这是由于复合板和底座板均为单元板式结构,并在梁缝处断开,且复合板和底座板通过凹槽连接,使得隔离层位移分布均匀的同时受地震波影响也较小。

表6 不同地震波作用下各构件地震响应最大值

构件响应	El-Centro波	Taft波
梁体位移/mm	83.120	93.060
钢轨应力/MPa	206.000	217.000
扣件位移/mm	27.510	47.330
复合板应力/MPa	1.780	1.760
隔离层位移/mm	0.382	0.385

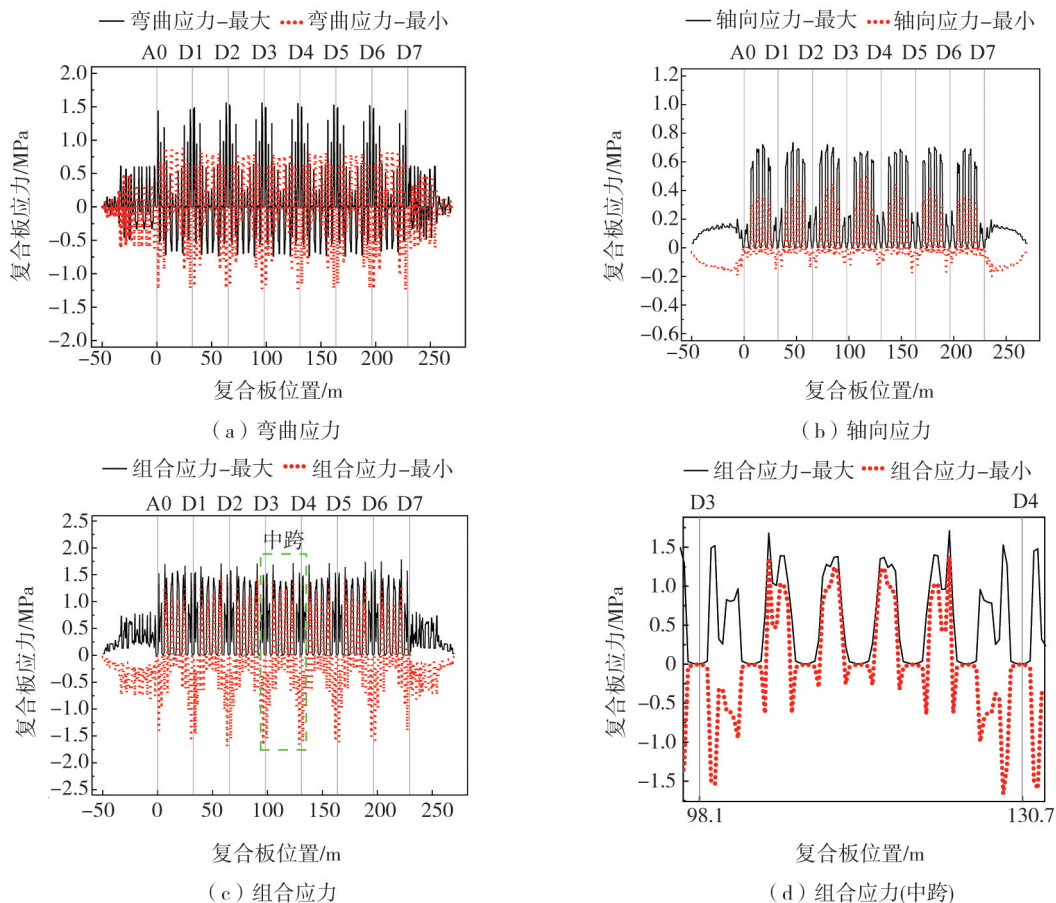


图6 El-Centro波作用下复合板应力

Fig. 6 Stress of composite plate under El-Centro wave

3 地震动强度对系统地震响应的影响

为研究模型2在不同地震动强度作用下系统各构件的地震响应规律,选用El-Centro波作为激励,将地震波最大加速度峰值分别调整为0.10g(多遇地震)、0.30g(设计地震)、0.57g(罕遇地震)。不同地震动强度作用下各构件的地震响应如图7所示,不同地震动强度作用下各构件的地震响应最值见表7,轨道各构件损伤界限划分见表8^[22-23]。

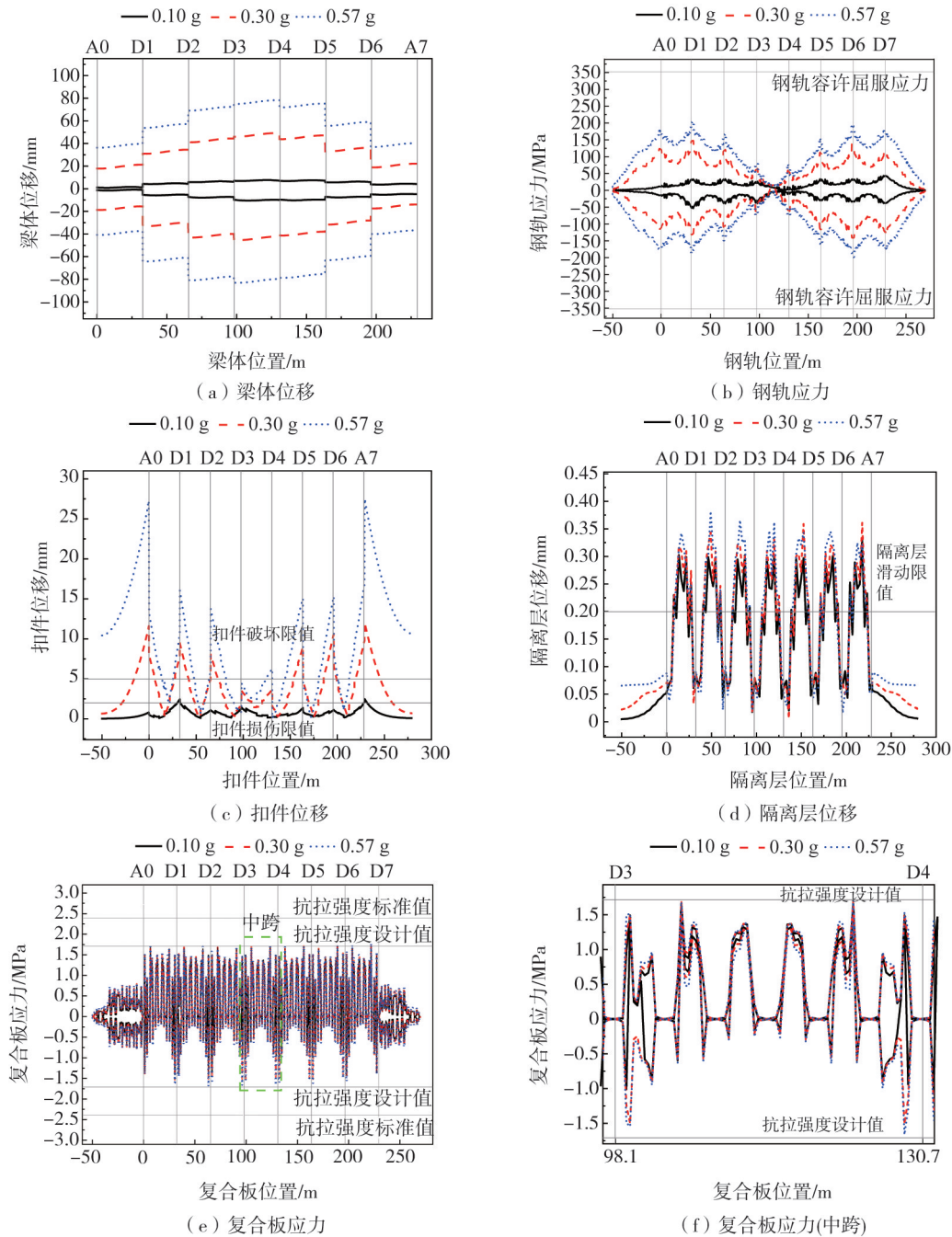


图 7 不同地震动强度作用下各构件地震响应

Fig. 7 Seismic response of each component under different ground motion intensities

表 7 不同地震动强度作用下各构件地震响应最大值

Table 7 Peak seismic responses of each component under different ground motion intensities

构件响应/g	0.10	0.30	0.30/0.10	0.57	0.57/0.10
梁体位移/mm	9.86	49.23	499.3%	83.12	843.0%
钢轨应力/MPa	50.90	148.00	290.8%	206.00	404.7%
扣件位移/mm	2.65	12.00	452.8%	27.51	1038.1%
复合板应力/MPa	1.58	1.71	108.2%	1.78	112.7%
隔离层位移/mm	0.33	0.36	109.1%	0.38	115.2%

表 8 轨道各构件损伤界限划分^[22-23]

Table 8 Damage limit division of track construction^[22-23]

轨道构件	轨道各构件损伤界限	
	弹性界限	破坏界限
钢轨应力/MPa	352	457
扣件位移/mm	2	5
复合板应力/MPa	1.71	2.39
隔离层位移/mm	0.2	

由图 7 和表 7 分析可知,随着地震动强度的增加,各构件地震响应明显增大,但各构件响应最大值的增幅各不相同。其中梁体位移、钢轨应力和扣件位移的最大值变化幅度相对较大,与多遇地震相比,设计地震

和罕遇地震作用下的地震响应最大值分别增加了 399.3%、352.8%、190.8% 和 743.0%、938.1%、304.7%，罕遇地震作用下最大值达到了 83.12 mm、27.51 mm 和 206.00 MPa。在罕遇地震作用下钢轨应力仍在弹性界限内，但在设计地震作用下梁端附近的扣件的位移就已远超过破坏界限而失效，这说明扣件作为连接构件，尤其是梁端附近的扣件是关键受力、传力构件，也是极易损构件。

不同地震动强度下，复合板应力和隔离层位移的最大值变化较小，其中复合板应力的最大值在设计地震和罕遇地震作用下相比多遇地震分别增加了 8.2% 和 12.7%，在罕遇地震作用下，复合板应力最大值为 1.78 MPa，超出弹性界限，但仍在破坏界限以内。隔离层位移的最大值在设计地震和罕遇地震作用下相比多遇地震分别增加了 9.1% 和 15.2%，可以看出隔离层位移随地震动强度的变化不大。这是因为除隔离层自身产生的摩擦力以外，底座板凹槽及其四周的弹性橡胶垫对自密实混凝土层的限位作用也使得隔离层位移变化不大。

4 不同支座对系统地震响应的影响

选用 El-Centro 波作为激励，将地震波最大加速度峰值调整为 0.57 g 作用于模型 1 和模型 2，以研究不同支座对系统地震响应的影响。采用不同支座时上部结构各构件地震响应如图 8 所示，采用不同支座时上部结构各构件地震响应极值见表 9。

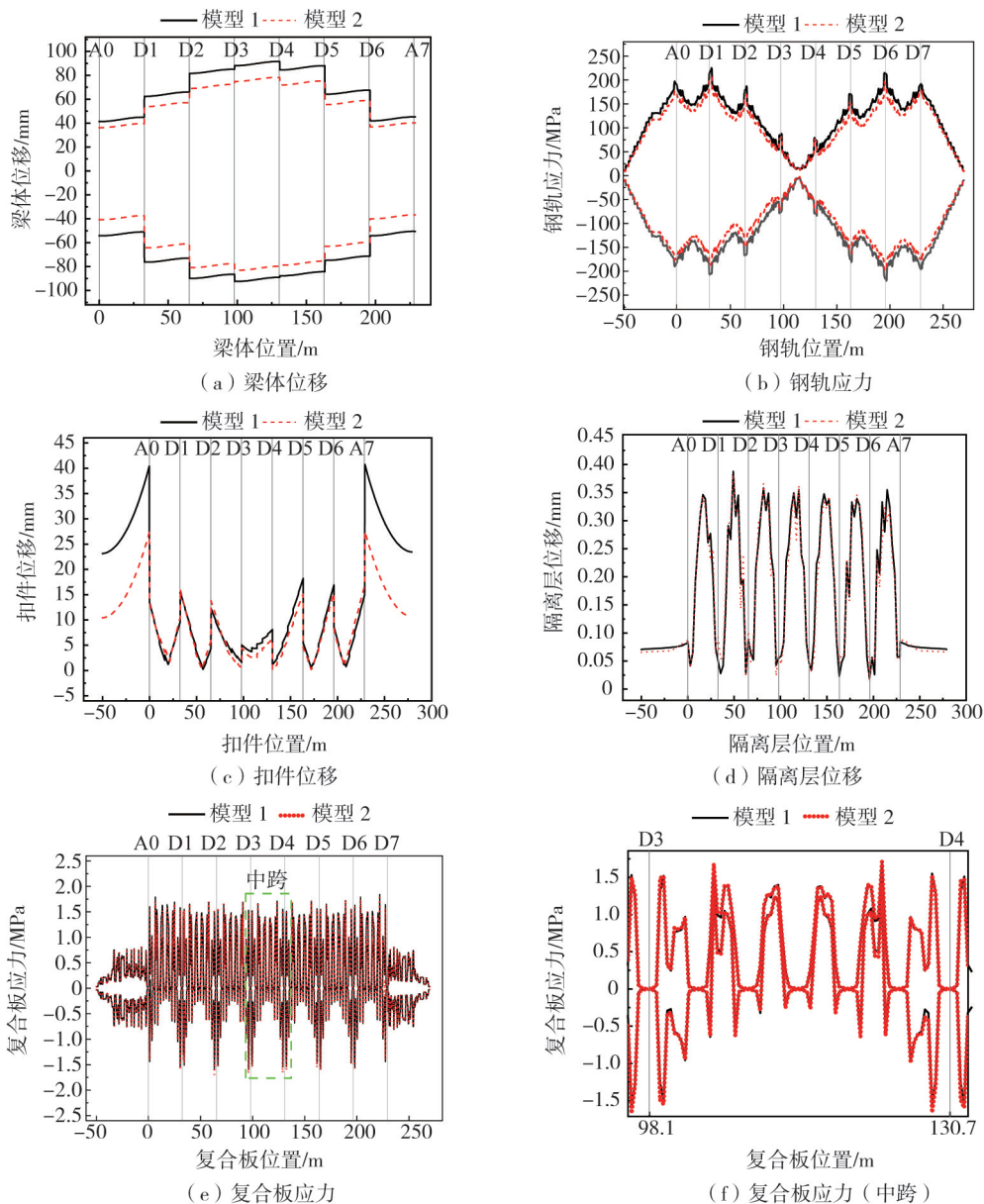


图 8 采用不同支座时上部结构各构件地震响应

Fig. 8 Seismic response of each member of superstructure with different supports

表 9 采用不同支座时上部结构各构件地震响应极值

Table 9 Peak values of seismic responses of superstructure components with different supports

构件响应	模型 1	模型 2	模型 2/模型 1	构件响应	模型 1	模型 2	模型 2/模型 1
梁体位移/mm	92.450	83.120	89.9%	复合板应力/MPa	1.840	1.780	96.7%
钢轨应力/MPa	225	206	91.6%	隔离层位移/mm	0.388	0.382	98.5%
扣件位移/mm	40.750	27.510	67.5%				

由图 8 和表 9 分析可知,两个模型地震响应的规律基本一致,但模型 2 的地震响应明显比模型 1 的要小。相较于模型 1,模型 2 的梁体位移、钢轨应力和扣件位移分别减小了 10.1%、8.4%和 32.5%,其中扣件位移的减小最明显,且这一现象在路基段更为明显,说明减隔震支座的使用使得系统上部结构的地震响应明显减弱。

选用 El-Centro 波作为激励,将地震波最大加速度峰值调整为 0.57 g,并引入模型 1 和模型 2 对应的无轨道约束的工况 1 作为对比分析,其中模型 1-工况 1、模型 2-工况 1 分别为使用隔震支座和减隔震支座时不考虑轨道约束的情况;模型 1-工况 2、模型 2-工况 2 分别为使用隔震支座和减隔震支座时考虑轨道约束的情况。采用不同支座时下部结构各构件地震响应如图 9 所示。

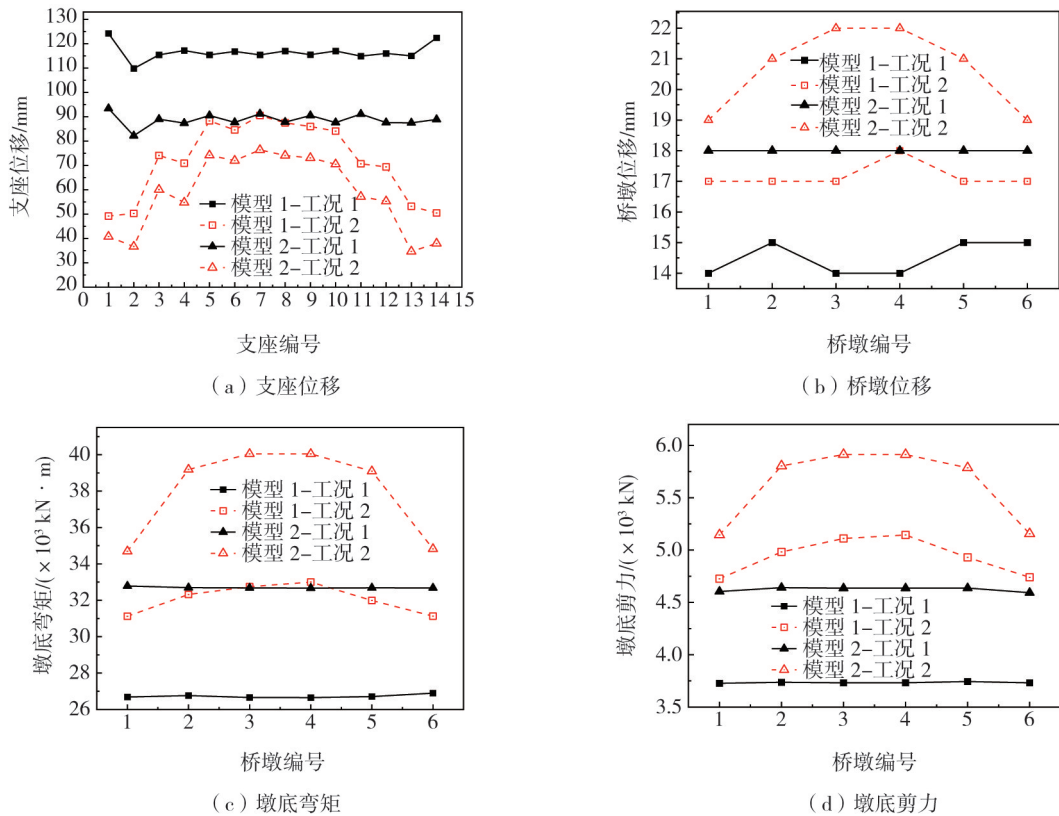


图 9 采用不同支座时下部结构各构件地震响应

Fig. 9 Seismic response of substructure components with different supports

从图 9 中分析可知,两种工况下,模型 2 的支座位移均小于模型 1。以工况 2 为例,模型 2 的支座位移最小仅为模型 1 的 0.65 倍;但模型 2 的桥墩位移、墩底弯矩及墩底剪力则大于模型 1,其墩底弯矩在工况 2 下的最大值达到模型 1 的 1.2 倍。这说明,减隔震支座中的减震樨起到了一定的限制支座位移的作用,但同时也会使得桥墩的地震响应变大。

同一模型下,支座位移、桥墩位移和墩底内力在工况 1 时分布均匀,整体呈直线分布特征,在工况 2 时呈现出两侧小,中间大的分布形式。这是因为在考虑轨道约束的影响后,轨道的约束使得地震响应整体分布形式发生变化,且轨道约束的影响从两侧向中间减弱,进而使得地震响应出现两侧小,中间大的分布形式。与工况 1 相比,工况 2 的支座位移减小,而桥墩位移和墩底内力增大。以模型 2 为例,其支座位移相比工况 1 最大降低了 60.0%;但其墩底剪力却增大了 28.0%。这说明轨道约束对支座位移有明显的减小作用,但会放大桥墩位移和墩底内力,因此在进行高速铁路桥梁的地震响应研究时,轨道约束的影响不可忽略。

5 结论

通过对高速铁路 CRTS III 型无砟轨道-桥梁系统在不同地震波、不同地震动强度及不同支座下各关键构件的纵向地震响应规律及损伤状态进行分析,得出以下结论:

1) 在地震激励下,梁体纵向位移呈阶梯形分布,最大值出现在桥跨中心处。扣件纵向位移最大值出现在桥台伸缩缝处,且在每跨梁端伸缩缝处出现极值,扣件位移受不同地震波的频谱特性影响显著。

2) 钢轨应力最大值出现在边跨两侧的伸缩缝处。在 0.57 g 地震激励下,钢轨应力远小于钢轨的容许屈服应力,保持在弹性状态。复合板截面正应力由轴力及弯矩分量共同引起,但二者最不利位置不同,复合板组合应力整体分布较均匀。

3) 支座及轨道系统进入非线性后,与地震动强度增加幅度相比,易损构件纵向变形的增幅表现出显著的放大效应及分布不均衡性。当地震动强度从 0.10 g 分别增至 0.30、0.57 g 时(即分别增大 3 倍、5.7 倍),扣件位移的最大值分别增大 4.53 倍和 10.38 倍。

4) 考虑轨道系统时,与双曲面支座相比,同球向双球面减隔震支座因软钢阻尼器的耗能作用,可明显降低扣件、梁体及支座的位移响应。轨道系统对支座位移具有显著的抑制作用,同时会增大墩底内力;因此,在进行高速铁路桥梁的地震响应研究时,轨道约束的影响不可忽略。

参考文献:

- [1] 王继军,王梦,刘伟斌,等. CRTS III 型板式无砟轨道系统技术[J]. 中国铁路, 2017(8): 11-15.
WANG Jijun, WANG Meng, LIU Weibin, et al. Technology of CRTS III ballastless track system[J]. China Railway, 2017(8): 11-15. (in Chinese)
- [2] REN J J, DENG S J, ZHANG K Y, et al. Design theories and maintenance technologies of slab tracks for high-speed railways in China: A review[J]. Transportation Safety and Environment, 2021, 3(4): tlab024.
- [3] HUANG F Q, LI M, MA Y C, et al. Studies on earthquake precursors in China: A review for recent 50 years[J]. Geodesy and Geodynamics, 2017, 8(1): 1-12.
- [4] 林庆利,林均岐,刘金龙. 铁路系统的震害分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(增刊1): 566-574.
LIN Qingli, LIN Junqi, LIU Jinlong. Analysis of seismic damage to railway system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(Sup. 1): 566-574. (in Chinese)
- [5] 蔡丽雯,黄勇,何静,等. 2022 年青海门源 6.9 级地震交通系统震害与启示[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(4): 8-16.
CAI Liwen, HUANG Yong, HE Jing, et al. Earthquake damage and enlightenment from traffic system in 2022 Qinghai Menyuan M_s 6.9 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(4): 8-16. (in Chinese)
- [6] 李鑫,李智敏,盖海龙,等. 青海门源 M_s 6.9 地震极震区震害调查与防灾建议[J]. 震灾防御技术, 2022, 17(1): 84-94.
LI Xin, LI Zhimin, GAI Hailong, et al. Investigation and prevention suggestion of earthquake disaster in the extreme earthquake area of M_s 6.9 earthquake in Menyuan County, Qinghai Province[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2022, 17(1): 84-94. (in Chinese)
- [7] 蒋丽忠,周旺保,魏标,等. 地震作用下高速铁路车-轨-桥系统安全研究进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(9): 1-13.
JIANG Lizhong, ZHOU Wangbao, WEI Biao, et al. Research progress of train-track-bridge system safety of high-speed railway under earthquake action[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(9): 1-13. (in Chinese)
- [8] 王继军,江成,赵磊,等. 高铁单元板式无砟轨道大跨梁端适应性对比[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(5): 18-23, 87.
WANG Jijun, JIANG Cheng, ZHAO Lei, et al. The adaptive contrast research on the slab track of high-speed railway in long span bridge end[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(5): 18-23, 87. (in Chinese)
- [9] 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[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(6): 61-72.
ZHANG Pengfei, GUI Hao, LEI Xiaoyan, et al. Deflection force and displacement of CRTS III slab track on bridge under train load[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(6): 61-72. (in Chinese)
- [10] 娄平,宫凯伦,赵晨. 地震作用下 CRTS III 型板式无砟轨道行车安全性[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 1-7.
LOU Ping, GONG Kailun, ZHAO Chen. Vehicle running safety on CRTS III slab ballastless track under earthquake[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 1-7. (in Chinese)
- [11] 周旺保,彭东航,蒋丽忠,等. 横向地震作用下高速铁路 CRTS III 型无砟轨道-桥梁系统震致轨道不平顺研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(8): 2773-2784.
ZHOU Wangbao, PENG Donghang, JIANG Lizhong, et al. Study on track irregularity of CRTS III ballastless track-bridge system of high-speed railway under transverse earthquake[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(8): 2773-2784. (in Chinese)
- [12] GUO W, YE Y T, HU Y. Seismic damage analysis of bridge-CRTS III slab ballastless track system on high-speed railway[J]. Soil Dynamics and

- Earthquake Engineering, 2022, 161: 107416.
- [13] 张鹏飞, 蔡科, 雷晓燕, 等. 地震作用下桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道纵向动力响应分析[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(1): 45-53.
ZHANG Pengfei, CAI Ke, LEI Xiaoyan, et al. Longitudinal dynamic response analysis of CRTSⅢ slab track on bridge under seismic action[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(1): 45-53. (in Chinese)
- [14] 张鹏飞, 蔡科, 王承隆, 等. 多维地震作用下桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道系统动力响应[J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(5): 924-939.
ZHANG Pengfei, CAI Ke, WANG Chenglong, et al. Dynamic response of the China Railway Track System Ⅲ slab track system on a bridge under multidimensional seismic actions[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2024, 54(5): 924-939. (in Chinese)
- [15] YANG J Q, CUI Z D. Influences of train speed on permanent deformation of saturated soft soil under partial drainage conditions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 133: 106120.
- [16] 彭东航. 高速铁路桥梁震致轨道不平顺劣化机理研究及其防控措施[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
PENG Donghang. Mechanism of post-seismic track irregularity for high-speed railway bridge and its control measure[D]. Changsha: Central South University, 2023. (in Chinese)
- [17] 叶毅滔. 高速铁路轨道-桥梁系统地震破坏特征及震后行车分析[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
YE Yitao. Seismic damage characteristics of high-speed railway track-bridge system and analysis of post-earthquake vehicle running [D]. Changsha: Central South University, 2022. (in Chinese)
- [18] TJ/GW 114—2013 高速铁路 CRTS Ⅲ型板式无砟轨道三元乙丙橡胶弹性缓冲垫层暂行技术条件[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
TJ/GW 114—2013 Interim technical conditions for EPDM elastic cushion layer for CRTS Ⅲ slab ballastless track of high speed railway[S]. Beijing: China Railway Press, 2013.
- [19] 蒋丽忠, 刘丽丽, 周旺保, 等. 高速铁路 CRTSⅢ型轨道板隔离层关键构件-弹性垫板试验[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 1-11.
JIANG Lizhong, LIU Lili, ZHOU Wangbao, et al. Experimental investigation on rubber pad-the key component of isolation layer in CRTS Ⅲ track of high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 1-11. (in Chinese)
- [20] ZENG Z P, DI W, SHUAIBU A A, et al. Longitudinal sliding resistance characteristics of the WJ-8 conventional resistance fastener [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2021, 235(10): 1268-1277.
- [21] 杨艳丽. WJ7、WJ8 型扣件纵向阻力现场试验与研究[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(2): 51-52.
YANG Yanli. Field test and research on longitudinal resistance of WJ7 and WJ8 fasteners[J]. Railway Standard Design, 2010, 54(2): 51-52. (in Chinese)
- [22] YU J, JIANG L Z, ZHOU W B, et al. Component damage and failure sequence of track-bridge system for high-speed railway under seismic action[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2023, 27(3): 656-678.
- [23] TB 10015—2012 铁路无缝线路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
TB 10015—2012 Code for design of railway continuous welded rail[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2013. (in Chinese)