

文章编号:1671-1637(2019)03-0071-08

CRTS II型板式轨道底座板后浇带脱空对 轨道结构与行车的影响

杨荣山^{1,2}, 汪杰^{1,2}, 姜恒昌^{1,2}, 陈帅^{1,2}, 杜金鑫^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学
高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:在间断行车情况下,采用超高压水射流法对桥上CRTS II型板式轨道底座板后浇带进行修复;建立了CRTS II型板式轨道结构静力计算模型,分析了底座板后浇带不同脱空长度对钢轨、轨道板垂向位移与轨道板拉应力的影响;建立了车辆-轨道耦合动力计算模型,分析了底座板后浇带完全脱空长度为1.0 m时,正常行车对轨道结构、行车安全与舒适性的影响。计算结果表明:在1.5倍静轮载作用下,随着后浇带脱空长度增大,钢轨与轨道板垂向位移随之增大,当底座板后浇带完全脱空长度为1.0 m时,钢轨和轨道板的垂向位移均增大了0.03 mm,说明完全脱空对其垂向位移影响较小;后浇带脱空长度分别为0.7、0.8、0.9、1.0 m时,轨道板的最大拉应力分别为0.96、1.12、1.18、1.22 MPa,后浇带完全脱空时轨道板的最大拉应力小于其抗拉强度设计值1.96 MPa,轨道板不会开裂;列车运行速度为300 km·h⁻¹,后浇带完全脱空长度为1.0 m时,钢轨和轨道板的最大垂向位移分别为0.91、0.32 mm,均小于《高速铁路工程动态验收技术规范》(TB 10761—2013)中钢轨和轨道板垂向位移的基准值1.5、0.4 mm,说明后浇带脱空后正常行车对轨道结构不会造成较大的影响;后浇带完全脱空时,轨道板垂向加速度约为正常时的3倍,说明正常行车将会增大下部基础的振动强度。静、动力分析结果表明,采用超高压水射流法修复底座板后浇带可允许列车以正常速度通行。

关键词:铁道工程;板式轨道;后浇带;超高压水射流法;轨道结构;垂向位移;轮轨垂向力

中图分类号:U213.212 **文献标志码:**A

Effects of post-pouring belt void of base slab on track structure and train operation of CRTS II slab track

YANG Rong-shan^{1,2}, WANG Jie^{1,2}, JIANG Heng-chang^{1,2}, CHEN Shuai^{1,2}, DU Jin-xin^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering of Ministry of Education,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Under the uninterrupted train running condition, the post-pouring belt of CRTS II slab track base slab on the bridge was repaired by using the ultra-high pressure water jet method. The statics calculation model of CRTS II slab track structure was established, and the effects of post-pouring belt with different void length on the vertical displacements of rail and track slab and the tensile stress of track slab were analyzed. The vehicle-track coupling dynamics calculation model was established, and the influences of normal running on track structure, running safety and

收稿日期:2019-01-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51778543)

作者简介:杨荣山(1975-),男,河北容城人,西南交通大学教授,工学博士,从事高速重载轨道结构与轮轨系统动力学研究。

comfort were analyzed when the complete void length of the post-pouring belt of base slab was 1.0 m. Calculation result shows that under the action of 1.5 times static wheel load, the vertical displacements of rail and track slab increase with the increase of the void length of post-pouring belt. When the complete void length of post-pouring belt is 1.0 m, the vertical displacements of rail and track slab both increase by 0.03 mm, so the complete void has less effect on vertical displacements. When the void length of post-pouring belt is 0.7, 0.8, 0.9 and 1.0 m, respectively, the maximum tensile stress of track slab is 0.96, 1.12, 1.18 and 1.22 MPa, respectively. When the post-pouring belt completely voids, the maximum tensile stress is less than the designed tensile strength of 1.96 MPa, and the track slab will not crack. When the train speed is $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and the complete void length of post-pouring belt is 1.0 m, the maximum vertical displacements of rail and track slab are 0.91 and 0.32 mm, and less than the reference values of 1.5 and 0.4 mm in *Technical Regulations for Dynamic Acceptance for High-Speed Railways Construction* (TB 10761—2013), which shows that the normal running after post-pouring belt voids can not cause great influence on the track structure. When the complete void of post-pouring belt occurs, the vertical acceleration of track slab is about 3 times of the value under the normal condition, which indicates that normal running will increase the vibration intensity of the lower foundation. The statics and dynamics analysis results show that using the ultra-high pressure water jet method to repair the post-pouring belt of base slab can allow the train travel at normal speeds. 1 tab, 11 figs, 31 refs.

Key words: railway engineering; slab track; post-pouring belt; ultra-high pressure water jet method; track structure; vertical displacement; wheel-rail vertical force

Author resume: YANG Rong-shan(1975-), male, professor, PhD, swjtu-yrs@qq.com.

0 引 言

CRTSⅡ型板式无砟轨道自在京津城际铁路铺设以来,便在中国众多高速铁路线路中得到了广泛的应用^[1]。桥上CRTSⅡ型板式无砟轨道系统主要由钢轨、扣件、轨道板、砂浆调整层、底座板、两布一膜滑动层、高强挤塑板、侧向挡块、固结机构等部分组成,桥台后设置摩擦板、端刺及过渡板^[2-4]。桥上混凝土底座板施工采用设置多个临时端刺和常规区的施工方法,分块浇筑,预留后浇带,不仅能够解决底座板在同一时段内全部连接成形的技术难题,而且还可以预防混凝土收缩开裂,释放混凝土的大部分收缩应力,待主体混凝土收缩基本完成,达到一定强度后,采用微膨胀混凝土对底座板后浇带进行回填,抗衡残余收缩应力^[5-9]。

底座板后浇带内分布大量配筋,在浇筑混凝土施工过程中难以振捣密实,在后期线路运营过程中随着温度的变化,底座板后浇带容易出现横向贯穿断裂裂缝和内部混凝土受压压溃破坏等病害,使后浇带失去原有的功能和作用。底座板后浇带出现病害后,底座板便不再是稳定的纵连体系,在温度变化情况下可自由伸缩,并且对上部轨道结构和钢轨

产生附加应力;在后浇带损坏界面处,底座板和砂浆层之间将会产生离缝,若不及时对后浇带进行修复处理,离缝将会沿着轨道结构纵向蔓延,降低轨道系统整体刚度,影响整个轨道结构的稳定性^[10-12]。

针对CRTSⅡ型板式无砟轨道底座板伤损修复问题,国内广大学者进行了大量的研究,并提出了一些可行性的修补方案。刘微通过对修复材料力学性能的研究,针对路基上CRTSⅡ型板式轨道支承层断裂病害,提出了采用SKD801灌缝胶和SKD803修补胶进行断裂伤损修补的修复方法^[12];黄传岳针对CRTSⅡ型板式无砟轨道支承层斜裂纹伤损,提出了设置临时钢垫梁过渡的支承层修复方案^[13];吴绍利等针对底座板混凝土的伤损维修提出了具体的施工步骤,并提出了修复材料应具有二次可维修性^[14];景璞等针对底座板的裂纹、掉块等病害,提出了在病害部位摊铺聚合物水泥纤维砂浆并涂刷纳米荷叶型表面剂的修复方法^[15-16];汪梨园等针对桥上CRTSⅡ板式无砟轨道底座板后浇带的伤损病害,提出了2种常规修复方法,揭板彻底修复法和横联帮宽补强法^[17-18]。

采用揭板彻底修复法和横联帮宽补强法对底座板后浇带进行彻底修复处理时,不仅工作量大,施工

时间长,而且对行车也将产生较大的影响^[19-20]。近年来,超高压水射流技术发展较快,采用这种技术可清除钢筋混凝土中的混凝土而保留钢筋,可用于快速修复钢筋混凝土结构^[21-22]。实际工程中超高压水射流技术广泛应用于矿井开挖、岩石破碎、橡胶基材料切削、混凝土路面破碎修复及超高性能混凝土表面凿毛修补处理中^[23-27],但在轨道结构伤损修复中依然沿用传统的修复方法,若采用这种技术修复底座板后浇带,则无需揭板即可修复后浇带,具有高效、安全、不干扰行车等优点。但天窗期施工时间较短,将伤损后浇带内混凝土完全清除后,不能及时对脱空后的后浇带进行灌注混凝土修复,且后浇带内钢筋较多,很难对悬空的轨道板进行临时支护,因此,在底座板后浇带完全脱空的情况下,列车正常通过时对轨道结构及行车的安全性、舒适性是否会产生影响,是这种修复技术的关键前提。本文开展一

定范围内轨道板脱空的车辆-轨道系统力学分析,可为底座板后浇带的修复提供一定的理论指导。

1 计算模型

在分析底座板后浇带完全脱空情况下正常过车对轨道板和行车的影响时,应根据实际需要解决的问题,对实际的轨道结构及车辆进行简化,建立相应的计算模型。

1.1 静力计算模型

建立如图1所示的静力计算模型。在计算中主要考虑垂向轮轴力的作用,忽略桥梁结构和温度力的影响。在计算模型中,CHN60钢轨采用欧拉梁单元;扣件间距为0.65 m,采用线性弹簧单元;轨道板、CA砂浆层、宽接缝与底座板均采用实体单元,由于CRTSⅡ型板式轨道采用预应力筋进行板件纵连,建模时按照等效纵向连续的弹性体考虑。



图1 静力计算模型

Fig. 1 Static calculation model

为消除边界效应,沿纵向建立3块纵连轨道板,取中间轨道板作为轮轴力的加载对象。轨道板和底座板端部约束纵、横向位移,板边为自由边界,底座板底部约束其3个方向的自由度。在上述边界条件下,模型无刚体位移、无多余约束,符合CRTSⅡ型板式轨道实际边界情况。

1.2 动力计算模型

采用超高压水射流对后浇带进行修复时,后浇带完全脱空时间较短,仅供临时正常过车,在计算中可不考虑桥梁结构和温度力的作用。计算模型中采用CRH380系列高速列车,整车模型由车体、2个转向架和4个轮对组成,不考虑车体、转向架和轮对的侧滚,不考虑偏心作用,车辆系统前后作用对称,整个车辆共有10个自由度^[28]。轨道结构采用梁板模型,钢轨采用弹性点支撑梁模型,扣件采用支点线性弹簧模拟,轨道板和底座板采用弹性薄板进行模拟,CA砂浆层则采用均布线性弹簧单元进行模拟,车辆-轨道垂向耦合动力学计算模型见图2。

1.3 计算参数取值

计算模型主要参数取值见表1。

2 静力计算结果分析

底座板沿纵向预留后浇带的常见尺寸有500、678 mm,采用超高压水射流清除底座板后浇带内混凝土时,考虑对界面混凝土的伤损情况,后浇带的脱空长度分别取0.7、0.8、0.9、1.0 m进行计算,底座板脱空位置在板中,见图3。计算轴载取1.5倍轴重,在后浇带正上方承轨台钢轨上施加集中荷载,同时忽略长桥结构和温度荷载的影响。

2.1 钢轨、轨道板垂向位移

底座板后浇带脱空长度分别为0.7、0.8、0.9、1.0 m的情况下,计算得到钢轨、轨道板的最大垂向位移分别见图4、5。由图4可知:随着后浇带脱空长度增大,钢轨的垂向位移也随之增大;后浇带内混凝土完好时,钢轨最大垂向位移为0.82 mm;底座板后浇带完全脱空长度为1.0 m时,钢轨的最大垂向位移为0.85 mm,钢轨的垂向位移增大0.03 mm。由图5可知:后浇带未脱空时,轨道板最大垂向位移为0.03 mm;随着后浇带脱空长度增大,轨道板的最大垂向位移也随之增大;后浇带完全脱空长度为1.0 m

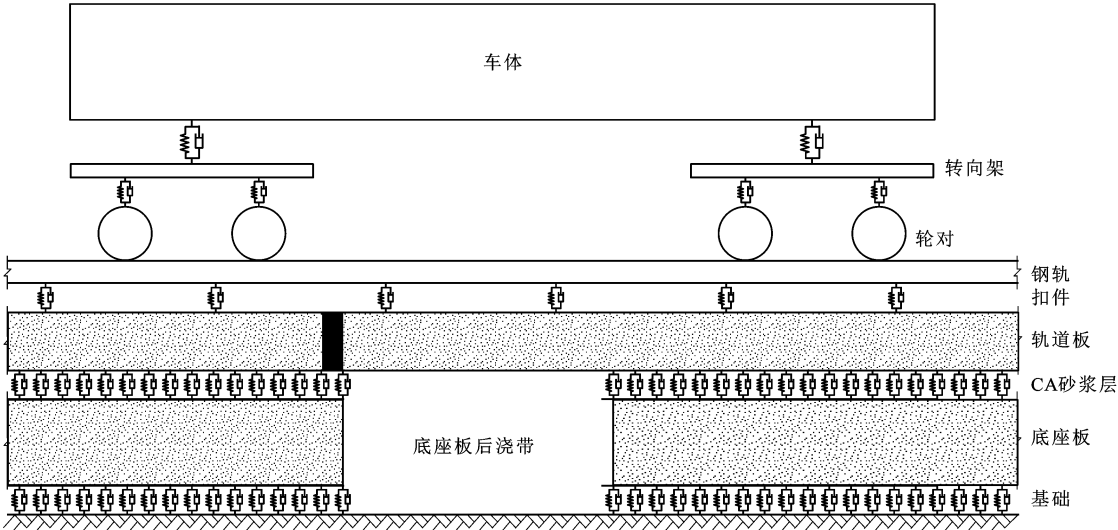


图 2 车辆-轨道垂向耦合动力学模型
Fig. 2 Vertical coupling dynamics model of vehicle and track

表 1 参数取值
Tab. 1 Parameter values

部件	参数	取值
车辆	转向架中心距/m	17.5
	轴距/m	2.5
	车轮滚动圆直径/m	0.86
	车体空载质量/t	34.934
	车体重心位置/m	1.52
	车体点头转动惯量/(t·m ²)	1 711.8
	构架质量/t	3.3
	构架重心位置/m	0.51
	构架点头转动惯量/(t·m ²)	1.807
	轮对质量/t	1.78
	轮对点头转动惯量/(t·m ²)	0.118
	一系悬挂垂向刚度/(kN·m ⁻¹)	1 176
	一系悬挂垂向阻尼/(kN·s·m ⁻¹)	10
	二系悬挂垂向刚度/(kN·m ⁻¹)	240
	二系悬挂垂向阻尼/(kN·s·m ⁻¹)	20
钢轨	弹性模量/MPa	2.06×10 ⁵
	泊松比	0.3
	密度/(kg·m ⁻³)	7 850
轨道板	尺寸(长度×宽度×厚度)/m	6.45×2.55×0.20
	弹性模量/MPa	3.55×10 ⁴
	泊松比	0.2
CA 砂浆	弹性模量/MPa	7 000
	厚度/m	0.03
底座板	尺寸(宽度×厚度)/m	2.95×0.20
	弹性模量/MPa	3.4×10 ⁴
	泊松比	0.2
	密度/(kg·m ⁻³)	2 500

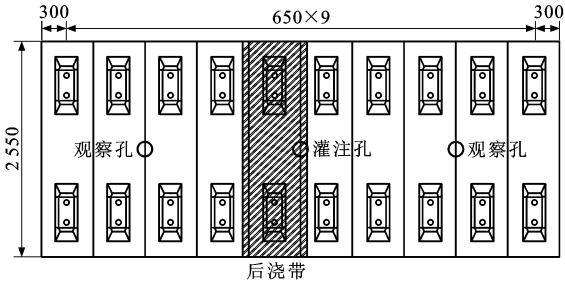


图 3 后浇带脱空平面(单位:mm)
Fig. 3 Post-pouring belt void plan (unit: mm)

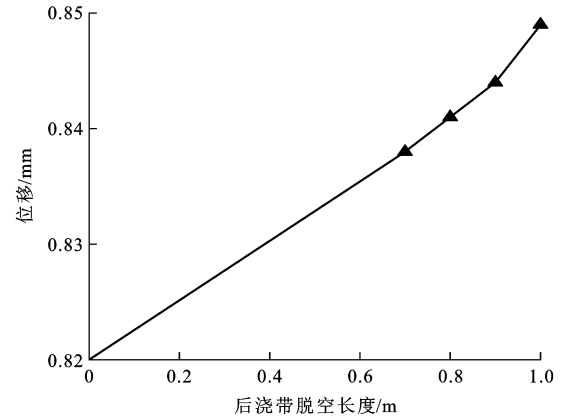


图 4 钢轨最大垂向位移
Fig. 4 Maximum vertical displacements of rail

时,轨道板的最大垂向位移为 0.06 mm,轨道板的垂向位移增大 0.03 mm。可见,在 1.5 倍静轮载作用下,底座板后浇带完全脱空后对钢轨和轨道板的垂向位移影响较小。

2.2 轨道板拉应力

在列车荷载作用下,轨道板底部受拉,在荷载作用点正下方的轨道板底部将会出现最大拉应力。轨

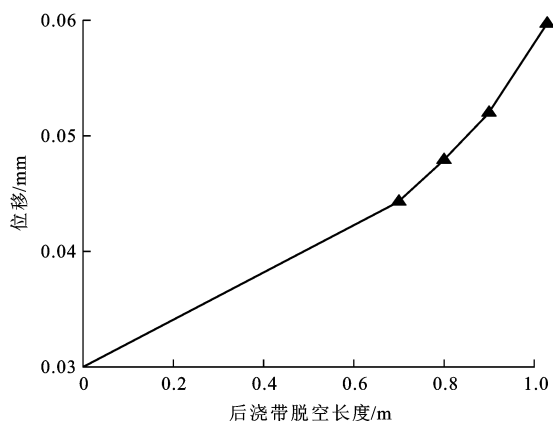


图5 轨道板最大垂向位移

Fig. 5 Maximum vertical displacement of track slab

道板后浇带脱空长度分别为 0.7、0.8、0.9、1.0 m 的情况下,计算得轨道板的最大拉应力见图 6,可知:后浇带未脱空时,轨道板的最大拉应力为 0.34 MPa;后浇带完全脱空时,轨道板的拉应力将显著增大,后浇带脱空长度分别为 0.7、0.8、0.9、1.0 m 时,轨道板的最大拉应力分别为 0.96、1.12、1.18、1.22 MPa;后浇带脱空长度为 1.0 m 时,轨道板的最大拉应力增大了 0.88 MPa。CRTSⅡ型轨道板采用 C55 混凝土浇筑,其轴心抗拉强度设计值为 1.96 MPa,后浇带完全脱空时轨道板的最大拉应力小于其抗拉强度设计值,因此,轨道板不会开裂。

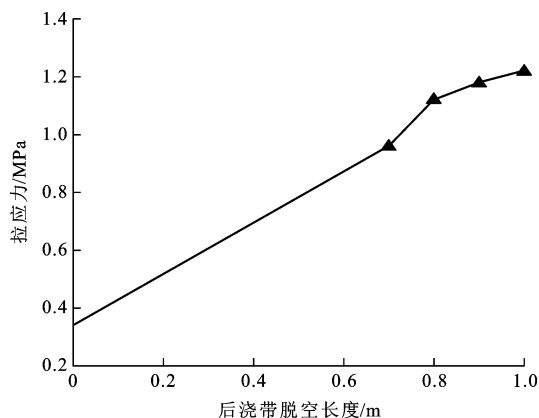


图6 轨道板最大拉应力

Fig. 6 Maximum tensile stress of track slab

3 动力计算结果分析

车辆-轨道耦合系统动力学评价指标主要包括两方面:一是轨道结构动力响应指标,主要包括钢轨、轨道板、底座板的垂向加速度和垂向位移等;二是车辆的安全性指标,主要包括脱轨系数、轮重减载率、轮轨力和车体振动加速度^[29-31]。考虑宽接缝的不利影响,采用 LS-DYNA 进行动力学计

算分析时后浇带脱空位置选在靠近轨道板板端处,轨道不平顺谱采用德国谱,底座板后浇带沿纵向脱空长度取 1.0 m,计算列车时速为 300 km·h⁻¹时,钢轨和轨道板垂向位移、轨道板垂向加速度、轮轨垂向力、车体垂向加速度。

3.1 钢轨与轨道板垂向位移

底座板后浇带脱空区和正常区钢轨与轨道板的垂向位移计算结果分别见图 7、8。由图 7 可知:列车通过底座板后浇带脱空区时,钢轨的垂向位移将明显增大;列车通过正常区时钢轨的垂向位移最大为 0.82 mm,列车通过脱空区时钢轨的垂向位移最大为 0.91 mm,即底座板后浇带完全脱空长度为 1.0 m 时,钢轨的垂向位移增大 0.09 mm。由图 8 可知:列车通过底座板后浇带脱空区时,轨道板的垂向位移将显著增大;列车通过正常区时轨道板的垂向位移最大为 0.18 mm,列车通过脱空区时轨道板的垂向位移最大为 0.32 mm,即底座板后浇带完全脱空长度为 1.0 m 时,轨道板的垂向位移增大 0.14 mm。

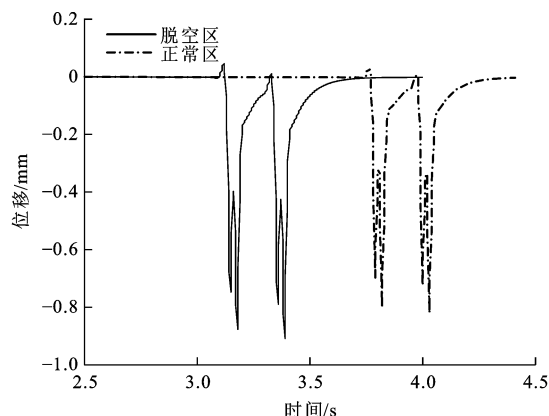


图7 钢轨垂向位移

Fig. 7 Vertical displacements of rail

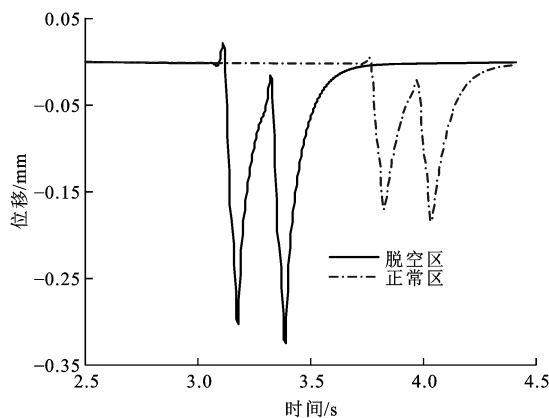


图8 轨道板垂向位移

Fig. 8 Vertical displacements of track slab

根据《高速铁路工程动态验收技术规范》(TB

10761—2013)中规定:钢轨垂向位移的基准值为 1.5 mm,轨道板板端垂向位移基准值为 0.4 mm。后浇带脱空长度为 1.0 m 时,钢轨最大垂向位移和轨道板最大垂向位移均小于规范基准值,说明底座板后浇带脱空后正常行车对轨道结构不会造成较大的影响。

3.2 轨道板垂向加速度

底座板后浇带脱空区和正常区轨道板的垂向加速度计算结果见图 9,可知:列车通过正常区时轨道板的垂向加速度最大为 $0.66g$ (g 为重力加速度),列车通过后浇带脱空区时,轨道板的垂向加速度将显著增大,轨道板的垂向加速度最大为 $2.22g$;底座板后浇带完全脱空长度为 1.0 m 时,过车时轨道板的垂向加速度约为正常时的 3 倍,轨道板垂向加速度的增量为 $1.56g$,轨道板的振动响应将显著增强。由此说明,底座板后浇带完全脱空后正常行车将会增大下部基础的振动强度,若采用超高压水射流法对振动极度敏感或有强制性要求地段的底座板后浇带进行修复处理时,可考虑采用临时隔振措施。

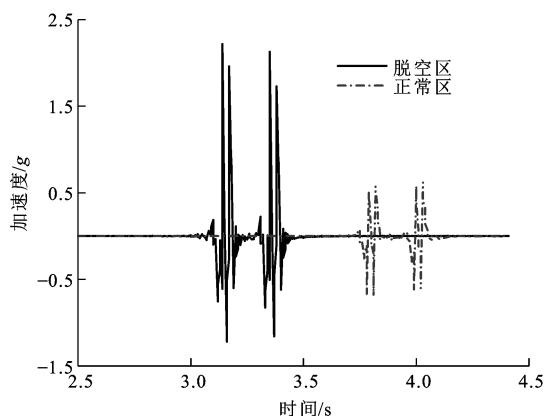


图 9 轨道板垂向加速度

Fig. 9 Vertical accelerations of track slab

3.3 轮轨垂向力

轮轨垂向力计算结果见图 10,列车在 3.1~3.4 s 通过底座板后浇带脱空区。由图 10 可知:底座板后浇带完全脱空时轮轨垂向力并没有产生明显的变化,最大轮轨垂向力为 93.53 kN,最小轮轨垂向力为 37.76 kN,根据轮轨垂向力计算轮重减载率为 0.556。

根据中国《高速试验列车动力车强度及动力学性能规范》(95 J01-L)中规定:动力车通过直线、曲线、道岔和桥梁时,导向轮对每个车轮作用于轨道的垂向力峰值极限值为 170 kN。根据《高速铁路工程动态验收技术规范》(TB 10761—2013)中规定:对于间断式测力轮对,轮重减载率不大于 0.8,对于连续

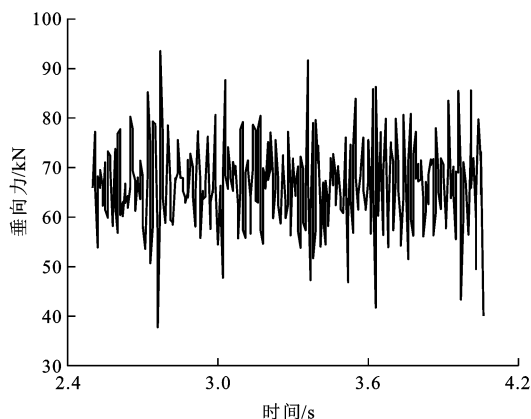


图 10 轮轨垂向力

Fig. 10 Vertical forces of wheel-rail

式测力轮对,轮重减载率不大于 0.65。同时《铁路车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》(GB 5599—1985)中规定:车辆轮重减载率允许限度不大于 0.60,车辆轮重减载率危险限度不大于 0.65。根据上述计算中得到的轮轨垂向力和轮重减载率均小于上述规范的规定值,说明底座板后浇带完全脱空后正常行车对行车的安全性不会造成影响。

3.4 车体垂向加速度

车体垂向加速度计算结果见图 11,列车在 3.1~3.4 s 通过底座板后浇带脱空区。由图 11 可知:底座板后浇带完全脱空对车体垂向加速度没有明显的影响,车体垂向加速度最大为 $0.27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

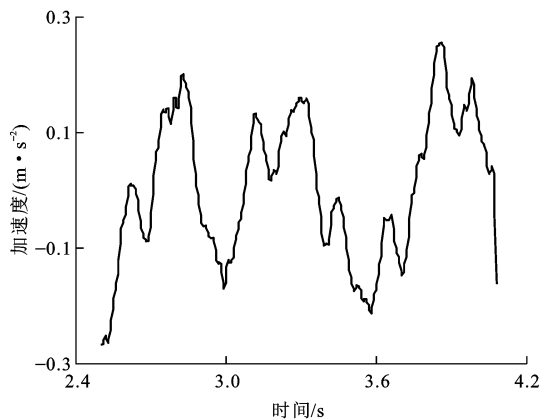


图 11 车体垂向加速度

Fig. 11 Vibration accelerations of vehicle body

根据《新建时速 300~350 公里客运专线铁路设计暂行规定》(铁建设【2008】147 号)中规定:车体垂向振动加速度不超过 $0.13g$ 。根据《高速铁路工程动态验收技术规范》(TB 10761—2013)中规定:车体垂向振动加速度不超过 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。根据上述计算结果可知车体垂向振动加速度均小于规范中的规定值,说明底座板后浇带完全脱空后正常行车对行车的舒适性不会造成影响。

4 结 语

(1)根据静力计算结果可知,随着后浇带脱空长度的增加,轨道体系的受力和变形也随之增大;底座板后浇带脱空长度为1.0 m时,钢轨的垂向位移增大0.03 mm,轨道板的垂向位移增大0.03 mm;轨道板的最大拉应力为1.22 MPa,小于轨道板抗拉强度设计值,因此,轨道板不会开裂。

(2)根据车辆-轨道垂向耦合动力学计算结果可知,底座板后浇带脱空长度为1.0 m,正常过车时钢轨的垂向位移增大0.09 mm,轨道板的垂向位移增大0.14 mm,轨道板的垂向加速度约为正常时的3倍。根据动力计算得到的钢轨、轨道板的垂向位移和轨道板的垂向加速度均符合相关规范要求,说明底座板后浇带完全脱空情况下正常行车对轨道结构不会产生较大的影响。

(3)列车通过底座板后浇带脱空区时,对轮轨垂向力和车体垂向振动加速度没有明显的影响,最大轮轨垂向力为93.53 kN,最小轮轨垂向力为37.76 kN,轮重减载率为0.556,车体最大垂向加速度为 $0.27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,参数均符合相关规范要求,说明底座板后浇带完全脱空情况下正常行车对行车的安全性和舒适性不会造成影响。

(4)超高压水射流法可在不间断行车情况下,对底座板后浇带进行修复处理,采用超高压水射流法对桥上CRTSⅡ型板式轨道后浇带进行彻底修复处理时,具体的施工步骤及施工注意事项将是下一步的研究重点。

参考文献:

References:

- [1] 何华武. 京津城际铁路科技创新[J]. 铁道建筑技术, 2009(2): 1-12.
HE Hua-wu. Science and technology innovations on Beijing-Tianjin Inter-City Railway[J]. Railway Construction Technology, 2009(2): 1-12. (in Chinese)
- [2] 张鹏飞, 桂昊, 高亮, 等. 桥上CRTSⅡ型板式无砟轨道制动力影响因素分析[J]. 铁道工程学报, 2018(7): 30-35, 108.
ZHANG Peng-fei, GUI Hao, GAO Liang, et al. Analysis of influencing factors of braking force of CRTSⅡ slab track on bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018(7): 30-35, 108. (in Chinese)
- [3] 魏强, 赵国堂, 蔡小培. CRTSⅡ型板式轨道台后锚固结构研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(7): 90-95.
WEI Qiang, ZHAO Guo-tang, CAI Xiao-pei. Study on anchor structure behind the abutment for slab track CRTSⅡ[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(7): 90-95. (in Chinese)
- [4] 姜子清, 王继军, 江成. 桥上CRTSⅡ型板式无砟轨道伤损研究[J]. 铁道建筑, 2014(6): 117-121.
JIANG Zi-qing, WANG Ji-jun, JIANG Cheng. Research of CRTSⅡ slab ballastless track damage on bridge[J]. Railway Engineering, 2014(6): 117-121. (in Chinese)
- [5] DONG Wei, ZHOU Xiang-ming, WU Zhi-min. A fracture mechanics-based method for prediction of cracking of circular and elliptical concrete rings under restrained shrinkage[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 131: 687-701.
- [6] 朱乾坤. 高速铁路简支梁桥与CRTSⅡ型板式无砟轨道相互作用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
ZHU Qian-kun. Interaction between simply supported beams and CRTSⅡ slab ballastless track[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [7] 郑先奇. 京沪高速铁路CRTSⅡ型板式无砟轨道长桥底座板施工技术[J]. 铁道标准设计, 2013(2): 38-43.
ZHENG Xian-qi. Construction technology of base board of CRTSⅡ slab ballastless track upon long bridge on Beijing-Shanghai High-Speed Railway[J]. Railway Standard Design, 2013(2): 38-43. (in Chinese)
- [8] HOSSAIN A B, WEISS J. Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(5): 531-540.
- [9] 刘全青. CRTSⅡ型板式无砟轨道底座板施工关键技术[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2013, 26(增): 229-232, 235.
LIU Quan-qing. Key technology of CRTSⅡ slab ballastless track base plate construction[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2013, 26(S): 229-232, 235. (in Chinese)
- [10] 张亚爽. 简支梁长桥上CRTSⅡ型板式无砟轨道底座板施工受力分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
ZHANG Ya-shuang. Mechanic analysis for the concrete roadbed of CRTSⅡ slab track during construction on the long bridge of simply supported beam[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese)
- [11] 赵坪锐, 胡佳, 刘观. 长大桥梁上CRTSⅡ型板式轨道底座板施工工艺优化检算[J]. 铁道建筑, 2014(6): 142-145.
ZHAO Ping-rui, HU Jia, LIU Guan. Optimization calculation of construction technology of CRTSⅡ slab track base plate on long bridge[J]. Railway Engineering, 2014(6): 142-145. (in Chinese)
- [12] 刘微. CRTSⅡ型板式无砟轨道支承层断裂影响及修复效果研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
LIU Wei. Research on the influence and repairing effect of hydraulically bounded layer fracture of CRTSⅡ slab track[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [13] 黄传岳. CRTSⅡ型板式无砟轨道支承层斜裂伤损修复方法[J]. 铁道建筑, 2018, 58(11): 139-141.
HUANG Chuan-yue. Repairing method of supporting layer inclined crack damage of CRTSⅡ slab ballastless track[J]. Railway Engineering, 2018, 58(11): 139-141. (in Chinese)

- [14] 吴绍利,王 鑫,吴智强,等. 高速铁路无砟轨道结构病害类型及快速维修方法[J]. 中国铁路, 2013(1): 42-44.
WU Shao-li, WANG Xin, WU Zhi-qiang, et al. High-speed railway ballastless track structure disease type and rapid maintenance method[J]. Chinese Railways, 2013(1): 42-44. (in Chinese)
- [15] 景 璞,李 飞. CRTS II 型板式无砟轨道病害修补方案研究[J]. 铁道技术监督, 2017, 45(11): 22-29.
JING Pu, LI Fei. Study on patching scheme of CRTS II slab ballastless track diseases[J]. Railway Quality Control, 2017, 45(11): 22-29. (in Chinese)
- [16] ZHAO Jing, SONG Ting. Fiber-reinforced rapid repair material for concrete pavement[J]. Advanced Materials Research, 2010, 168-170: 870-874.
- [17] 汪梨园. 高速铁路运营期间 CRTS II 型板式无砟轨道底座板断裂修复技术[J]. 铁道建筑技术, 2014(7): 44-47, 74.
WANG Li-yuan. Repair technologies for the base plate fracture of CRTS II slab ballastless track in the operation of high-speed railway[J]. Railway Construction Technology, 2014(7): 44-47, 74. (in Chinese)
- [18] 吕建华,杨冀超,贾金民,等. 高速铁路 CRTS II 型板式无砟轨道底座板修复技术[J]. 中国铁路, 2014(4): 77-80.
LYU Jian-hua, YANG Ji-chao, JIA Jin-min, et al. High-speed railway CRTS II ballastless track base plate repair technology[J]. Chinese Railways, 2014(4): 77-80. (in Chinese)
- [19] 柴 强. 高速铁路 CRTS II 型板式无砟轨道养护维修技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
CHAI Qiang. Research on maintenance techniques of CRTS II slab ballastless track system on high speed railway[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014. (in Chinese)
- [20] 周明岩. 严寒地区高速铁路板式无砟轨道养护维修技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2017.
ZHOU Ming-yan. Study on maintenance and repair technology of slab track of high speed railway in cold area[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2017. (in Chinese)
- [21] BODNÁROVÁ L, SITEK L, HELA R, et al. New potential of highspeed water jet technology for renovating concrete structures[J]. Slovak Journal of Civil Engineering, 2011, 19(2): 1-7.
- [22] MOMBER A, LOUIS H. On the behaviour of concrete under water jet impingement[J]. Materials and Structures, 1994, 27(167): 153-156.
- [23] WU Gang, SONG Jia-hui, HOU Ke-bang, et al. Application of high-pressure water jet in mine[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1033/1034: 1323-1326.
- [24] TIAN Chang-liu, CHENG Xue-li, WANG Wei. Experimental study on rock breaking with impacting water jet by modulation of chaos [J]. Advanced Materials Research, 2012, 535-537: 1751-1754.
- [25] HAM Y B, KWON S K, NOH J H, et al. Development of road stripe removing equipment using high-pressure water jet [J]. Automation in Construction, 2006, 15(5): 578-588.
- [26] CHEN Hai-long, LI Zhao-min, GAO Zhi-han, et al. Numerical investigation of rock breaking mechanisms by high pressure water jet[J]. Procedia Engineering, 2015, 126: 295-299.
- [27] 陈 俊. 超高性能混凝土(UHPC)高压水射流凿毛处理及修补材料研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
CHEN Jun. Research on artificial chiseling with high pressure water jet and repair materials of ultra-high performance concrete[D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese)
- [28] ZHAI Wan-ming, WANG Kai-yun, CAI Cheng-biao. Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics [J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(11): 1349-1376.
- [29] 蔡成标. 无砟轨道动力学理论及应用[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(3): 255-261.
CAI Cheng-biao. Dynamics of ballastless track and its application[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(3): 255-261. (in Chinese)
- [30] 朱胜阳. 高速铁路无砟轨道结构伤损行为及其对动态性能的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
ZHU Sheng-yang. Damage behavior of high-speed railway ballastless track and its effect on structure dynamic performance[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [31] 任娟娟,徐家铎,田根源,等. 客货共线无砟轨道轮轨力统计特征研究[J]. 工程力学, 2018, 35(2): 239-248.
REN Juan-juan, XU Jia-duo, TIAN Gen-yuan, et al. Field test and statistical characteristics of wheel-rail force for slab track with passenger and freight traffic [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(2): 239-248. (in Chinese)