

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.045



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



高速铁路 32 m 简支箱梁墩台横桥向沉降 静力影响及损伤评级

余翠英^{1a}, 杨沁婕^{1b}, 罗文俊^{1b}, 马斌²

(1. 华东交通大学 a. 理学院; b. 土木建筑学院, 南昌 330013; 2. 中铁二局集团有限公司, 成都 610013)

摘要:针对高速铁路桥梁新旧线并行修建引起的横桥向墩台不均匀沉降的问题,利用 ABAQUS 有限元分析方法,选取高速铁路常用的 32 m 标准双线多跨简支梁桥,建立 CRTS III 型单元板式无砟轨道-桥梁-墩台空间静力耦合模型;考虑不同沉降类型和沉降幅值,研究横桥向桥墩不均匀沉降对轨道结构层间受力及其轨面变形规律,在此基础上提出适用于该桥型的单、双墩横桥向不均匀沉降静态损伤分级及维修建议。结果表明:横桥向墩台不均匀沉降对轨面高低不平顺影响最大,其次为扭曲和水平不平顺,且沉降墩顶处易出现变形极值;横桥向墩台仅单侧沉降时,单墩沉降差 10、15、20 mm,伤损等级依次为 II、III、IV 级;需要关注桥墩横桥向双侧沉降情形,损伤比单侧沉降更严重;当沉降差达到 20 mm 时,自密实混凝土层横向拉应力超过 C40 混凝土抗拉强度限值,轨道结构存在开裂风险。建议日常保养时单、双墩横桥向不均匀沉降控制在 10 mm 及以下,应避免出现沉降 15 mm 及以上的不利情形。

关键词:高速铁路;简支箱梁;墩台沉降;横桥向沉降;受力变形;静态损伤分级

中图分类号:U443.21 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2024)02-0154-11

Static influence and damage classification on 32 m simply-supported box girder of the high-speed railway under pier transverse settlement

YU Cuiying^{1a}, YANG Qinjie^{1b}, LUO Wenjun^{1b}, MA Bin²

(1a. School of Science; 1b. School of Civil and Architectural Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 2. China Railway Second Bureau Group Co., Ltd., Chengdu 610013, P. R. China)

Abstract: Due to the uneven transverse settlement of bridge piers caused by the parallel construction of existing

收稿日期:2022-11-03

基金项目:国家自然科学基金(52068028);江西省自然科学基金(20212BAB204015);江西省教育厅科技资助项目(GJJ190329);华东交通大学博士启动资金(452)

作者简介:余翠英(1976-),女,博士,副教授,主要从事列车-轨道(桥梁)系统振动、无砟轨道结构损伤机理及脱轨安全控制研究,E-mail:yucuiying1023@163.com。

罗文俊(通信作者),女,教授,博士生导师,E-mail:lwj06051979@163.com。

Received: 2022-11-03

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52068028); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20212BAB204015); Science and Technology Foundation of Department of Education of Jiangxi Province (No. GJJ190329); Startup Foundation for Doctors of East China Jiaotong University (No. 452)

Author brief: YU Cuiying (1976-), PhD, associate professor, main research interests: vibration of train-track (bridge) system, structure damage mechanism and derailment safety control of ballastless track, E-mail: yucuiying1023@163.com.

LUO Wenjun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lwj06051979@163.com.

and new high-speed railway lines, a CRTS III slab track-bridge system static-coupled model was established using the ABAQUS finite element analysis method for a commonly used 32 m standard double-track multi-span simply supported beam bridge in high-speed railways. Considering different settlement types and settlement amplitudes, this paper studies the force between layers of track structure and the deformation law of rail surface caused by the uneven settlement of piers in the transverse direction. On this basis, the static damage classification and maintenance suggestions for the uneven settlement of single and double piers in the transverse direction under this type of bridge are proposed. Based on this analysis, static damage classification and repair recommendations were proposed for single and double-pier uneven transverse settlement of this bridge type. The results have shown that the uneven settlement of the pier in a transverse direction has the greatest influence on the vertical irregularity of the rail surface, followed by the distortion and the horizontal irregularity, and the deformation extremum is easy to appear at the top of the settlement pier. When the unilateral settlement of the pier in the transverse direction of the bridge, the settlement difference between the singer pier of 10 mm, 15 mm and 20 mm, its damage classification is rated as II, III and IV. It is necessary to pay attention to the bilateral settlement of the pier across the bridge, and the damage is more serious than the unilateral settlement. When the settlement difference of the transverse direction reaches 20 mm, the transverse tensile stress of the self-compacting concrete layer exceeds the tensile strength limit of C40 concrete, and the track structure has the risk of cracking. It is recommended that the uneven settlement in the transverse direction of the single and double piers should be limited to 10 mm or less for daily maintenance and that adverse settlement of 15 mm or more should be avoided.

Keywords: high-speed railway; simply-supported box girder; pier settlement; transverse settlement; stress and deformation; static damage classification

桥梁作为高速铁路系统的重要支撑结构^[1-2],“以桥带路”的设计理念在长大结构和地形复杂地区得到广泛的应用。随着行车速度的提高和列车轴重的增加,在外部环境因素的影响下,桥梁墩台基础易发生不均匀沉降^[3-5],桥上的轨道结构受自重和沉降共同作用产生累积附加变形,进而影响轨道结构的几何形位和受力变形^[6],长此以往会影响高速铁路桥梁的行车安全性和舒适度^[7-9]。

众多学者对桥梁墩台竖向均匀沉降引起轨道结构变形进行了相关研究,陈兆玮等^[10]推导了单元板式无砟轨道的桥墩竖向沉降对钢轨变形的解析映射关系,并建立有限元模型验证了其合理性。陈天浩等^[11]分析了墩台沉降下桥上纵连板式无砟轨道底座板的脱空机理,得到桥墩沉降量和底座板脱空的定量关系。Malena等^[12]提出一种预测桥墩沉降作用下砌体拱桥的承载能力和破坏规律的新方法,研究了桥墩沉降对砌体拱桥结构的影响。勾红叶等^[13]通过建立桥梁竖向沉降对CRTS I型轨面几何形态的通用映射解析模型,分析桥墩沉降等典型桥梁变形对轨面变形的影响。张鹏飞等^[14]对多跨简支梁桥和大跨连续梁桥上CRTS II型板式无砟轨道建立有限元模型,研究墩底均匀沉降和差异沉降下轨道和桥梁结构的纵向受力变形。冯玉林等^[15]建立CRTS II型纵连板式无砟轨道-桥梁静力学模

型,研究不同形式损伤对梁上钢轨及扣件受力变形的影响规律,并提出了防止轨面变形的措施。

已有研究大多考虑单个或相邻墩台整体均匀下沉引起的顺桥向不均匀沉降对桥上轨道结构的影响。事实上,随着高铁路网的加密和建设规模的扩大,新建线与既有线交叉、并行的情况^[16-18]日益增多,易发生既有桥梁墩台两侧不均匀下沉的横桥向沉降。为此,笔者以墩台横桥向沉降为研究对象,梁型考虑高铁常用的32 m标准箱梁(梁长为32.6 m),采用ABAQUS建立CRTS III型板式无砟轨道-桥梁沉降模型,考虑单墩及双墩不同程度沉降对梁上轨道结构静力特性影响,以期对既有线桥梁沉降控制和养护维修提供技术支持和理论依据。

1 计算原理

1.1 基本假设

- 1) 基于重力作用平衡后再施加沉降荷载,轨面变形计算结果为去除重力影响下的附加变形;
- 2) 因桥梁竖向刚度较大,未考虑轨道结构对桥梁自身结构的变形影响;
- 3) 扣件和支座均考虑为线性弹簧约束;
- 4) 除沉降墩外,计算时固定其他桥墩底部。

1.2 桥墩横桥向沉降下轨道结构变形机理

当桥墩发生横桥向不均匀沉降时,与沉降桥墩

相邻的两跨梁体在自重作用下产生垂向位移,且桥面向沉降较大一侧倾斜,桥上的底座板随梁体下沉垂向变形,自密实混凝土层因凹凸限位槽和层间黏结作用跟随底座板变形,与之接触的轨道板也发生向下移动,使得布设在轨道板上方的扣件随之变形并产生扣件力,钢轨在自重和扣件拉力的共同作用下发生变形。

2 轨道-桥梁-墩台沉降有限元模型

2.1 有限元模型建立

以 5~32.6 m 标准双线简支梁桥为例建立有限元模型,桥上轨道结构为 CRTS III 型单元板式无砟轨道,主要由轨道板、自密实混凝土层以及底座板组成,选用标准 60 kg/m 钢轨,以 C3DBR 实体单元模拟,扣件用 Cartesian 弹簧单元模拟,扣件竖向刚度为 30 MN/m,模型中对支座的模拟采用 Spring 弹簧单元,每个支座采用 6 根弹簧连接三向平动和转动,单跨桥支座布置为固定、纵向、横向、多向支座,轨道结构及桥梁部件以实际尺寸按 C3DBR 实体单元建模。相邻轨道板和自密实混凝土层的板间距均取 0.07 m,相邻底座板间距为 0.02 m;轨道板和自密实混凝土层间设定摩擦接触,摩擦系数为 0.5;自密实和底座板、桥梁层间均设置为 TIE 绑定接触。箱梁截面类型为单箱单室,梁端顶板、底板及腹板局部向内侧加厚,不同截面尺寸见图 1,有限元模型如图 2 所示,材料参数和支座参数取值分别见表 1 和表 2。

2.2 模型验证

为验证有限元模型的可行性,利用文献[19]的 3~20 mm 的单墩竖向沉降工况类型进行验证,扣件刚度取 35 MN/m,沉降以支座施加均匀竖向位移模拟,并与沉降 5 mm 时的解析结果进行比对,如图 3 所示,本模型跟随性下沉值与文献值最大误差为

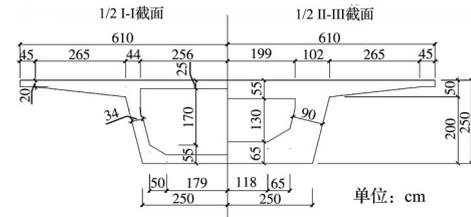


图 1 桥梁截面图

Fig. 1 Cross-sectional view of the bridge

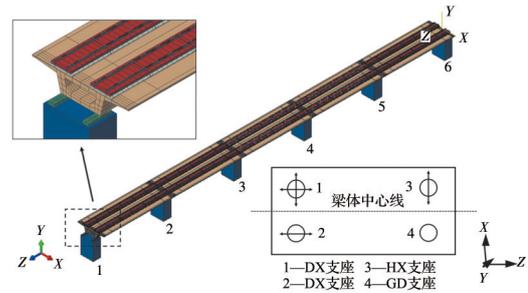


图 2 CRTS III 型板式无砟轨道-桥梁空间耦合模型

Fig. 2 Track-bridge spatial coupling mode of CRTS III slab ballastless

表 1 模型参数取值

Table 1 Parameters of the model

结构	弹性模量/GPa	泊松比	备注
钢轨	210	0.3	标准 60 轨
轨道板	36.5	0.2	C60 混凝土
自密实混凝土	34	0.2	C40 混凝土
底座板	34	0.2	C40 混凝土
箱梁	35.5	0.2	C50 混凝土
桥墩	32	0.2	C30 混凝土

1.68%,沉降引起的上拱值与文献值最大相差 0.01 mm,且轨面整体变形趋势和数量级与文献值一致;模型最大下沉值与解析结果误差为 2.06%,也在允许范围内,验证了有限元沉降损伤模型的合理性和正确性。

表 2 桥梁支座参数

Table 2 Parameters of bridge bracing

支座	纵向刚度/(N/m)	横向刚度/(N/m)	竖向刚度/(N/m)	纵向扭转/(kN·m ²)	横向扭转/(kN·m ²)	竖向扭转/(kN·m ²)
GD	6.0×10 ⁸	6.0×10 ⁸	7.5×10 ⁸	1.0×10 ⁸	0	1.0×10 ⁸
ZX	3.0×10 ⁶	6.0×10 ⁸	7.5×10 ⁸	1.0×10 ⁸	0	1.0×10 ⁸
HX	1.2×10 ⁷	1.5×10 ⁷	7.5×10 ⁸	1.0×10 ⁸	0	1.0×10 ⁸
DX	3.0×10 ⁶	1.5×10 ⁷	7.5×10 ⁸	1.0×10 ⁸	0	1.0×10 ⁸

2.3 计算工况及说明

兼顾模型边界条件和计算效率,选取典型的单墩和双墩沉降两种类型,横桥向不均匀沉降通过墩顶支座施加强制位移进行模拟,其中单墩沉降以 3 号桥墩进行设置,双墩沉降则以 3 号和 4 号桥墩进

行设置,如图 4 所示。为方便对计算结果进行分析,双线线路划分上、下行,钢轨沿 X 轴正向依次进行编号(I~IV),同时规定沿 X 轴正向为桥墩右侧,X 轴负向记为桥墩左侧,如图 5 所示。根据《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)的桥上无砟轨道墩台沉

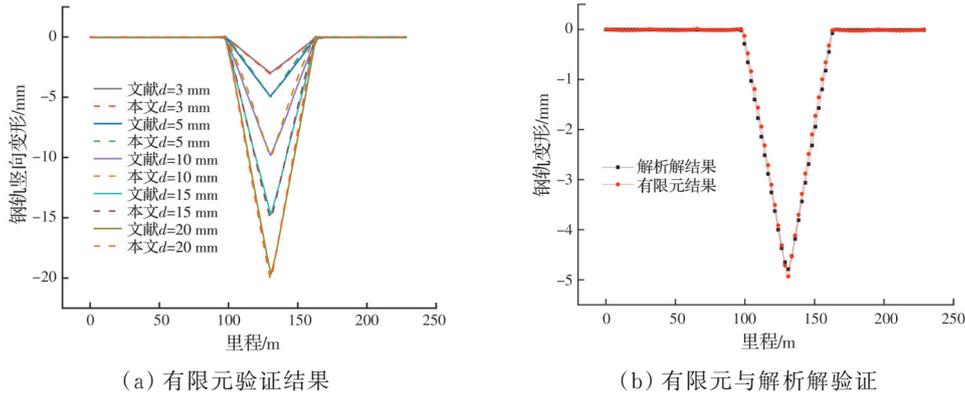


图 3 模型验证

Fig. 3 Verification of the model

降限值,考虑沉降差 20 mm 进行墩台横桥向沉降工况设置,见表 3。

表 3 横桥向桥墩沉降工况设置

Table 3 Setting of per settlement conditions in the transverse direction

沉降类型	工况类型	左侧沉降值/mm	右侧沉降值/mm
单墩沉降	类型 1	0	5、10、15、20
	类型 2	5	10、15、20、25
	类型 3	10	15、20、25、30
双墩沉降	类型 4	0	5、10、15、20
	类型 5	5	10、15、20、25
	类型 6	10	15、20、25、30

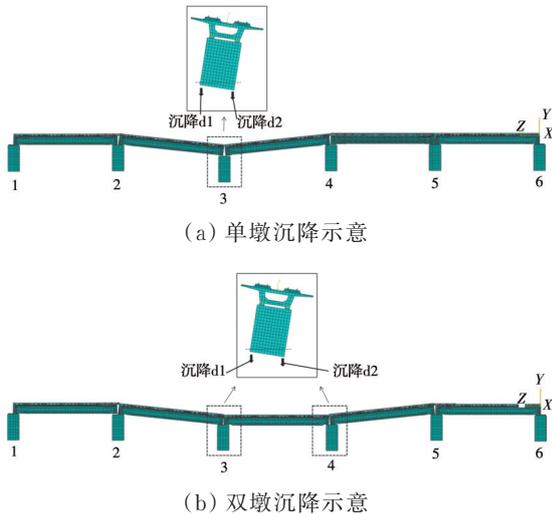


图 4 桥墩沉降示意图(放大 100 倍)

Fig. 4 Settlement diagram of bridge pier (100 times magnification)

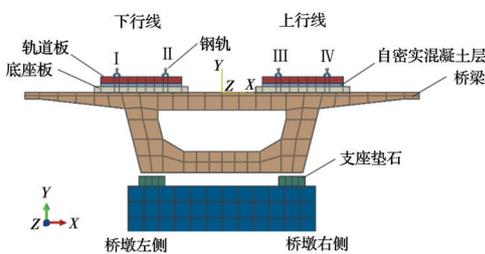


图 5 桥梁及钢轨编号示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bridge and rail numbers

3 计算结果及分析

3.1 单墩沉降及轨面映射关系

3号桥墩发生横桥向不均匀沉降时,与之相邻梁体顺桥向和横桥向发生不同程度倾斜,基于轨道-桥梁系统自下而上的跟随性变形关系,桥上双线 4

根钢轨受桥面沉降倾斜程度产生不同的位移变形。

图 6 为单墩沉降类型 1 下的钢轨轨面竖向变形曲线。由图 6 可知,单墩沉降时,顺桥向钢轨垂向变形以沉降墩为中心向相邻梁体延伸近似呈“V”字形,由于桥面出现倾斜,自下而上映射使得沉降墩相邻梁体轨面出现高低、水平、扭曲等复合不平顺变形曲线,上行线钢轨 III 和 IV 以下沉为主,钢轨 IV 的高低不平顺最严重,其次为钢轨 III;下行线钢轨轨面在沉降墩远端墩顶处发生上拱变形,其中钢轨 I 以上翘为主,钢轨 II 变形以下沉为主。钢轨变形与墩台横桥向沉降差整体成正比,尤其是沉降差 15 mm 时,上行线长波高低不平顺大于 12 mm;沉降差达到 20 mm 时,高低不平顺超过 15 mm,桥面扭曲不平顺超过 1.5 mm,考虑进行临时补修和限速运行。

图 7 为单墩沉降类型 2 和类型 3 下的钢轨轨面竖向变形曲线,桥墩横桥向沉降导致桥面发生倾斜,考虑左侧沉降的计入,钢轨 I 仍在沉降远端出现上拱,在沉降墩里程处达到桥墩左侧对应沉降值。位于桥面下落区域钢轨 III 和钢轨 IV 受下沉变形控制,轨面高低不平顺随桥墩左右侧沉降量增加而增大,沉降远端处因桥面倾斜易出现扭曲不平顺。

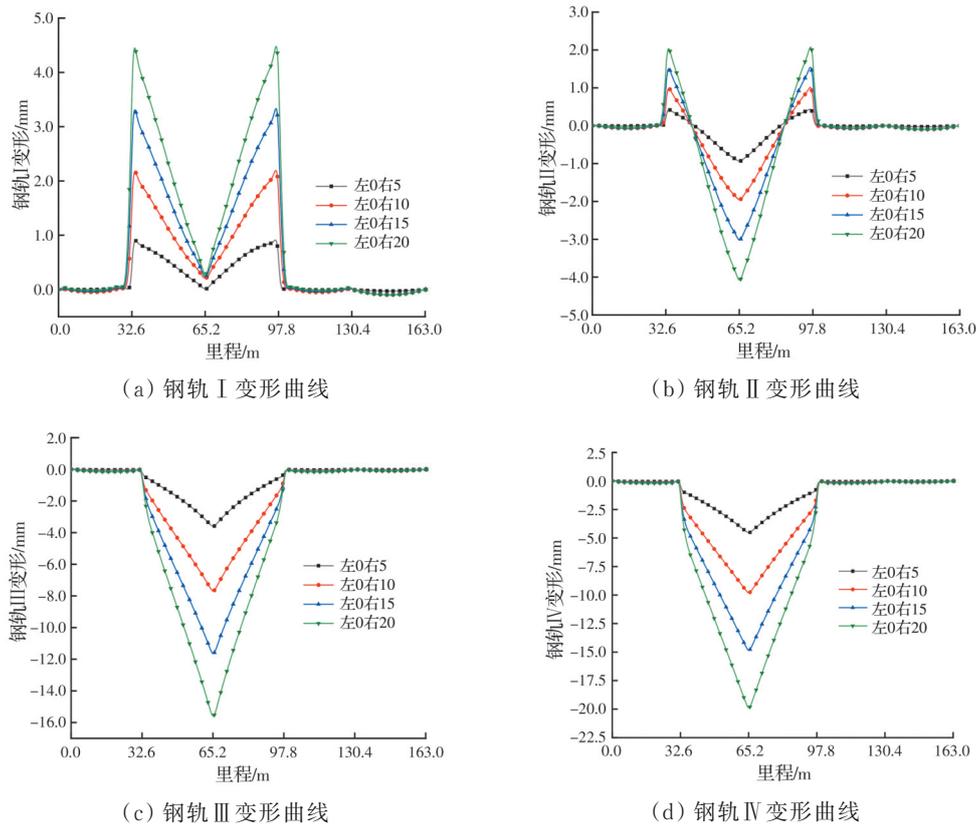


图 6 单墩沉降类型 1 下钢轨轨面竖向变形曲线

Fig. 6 Vertical deformation curves of rail surface under single pier settlement in type 1

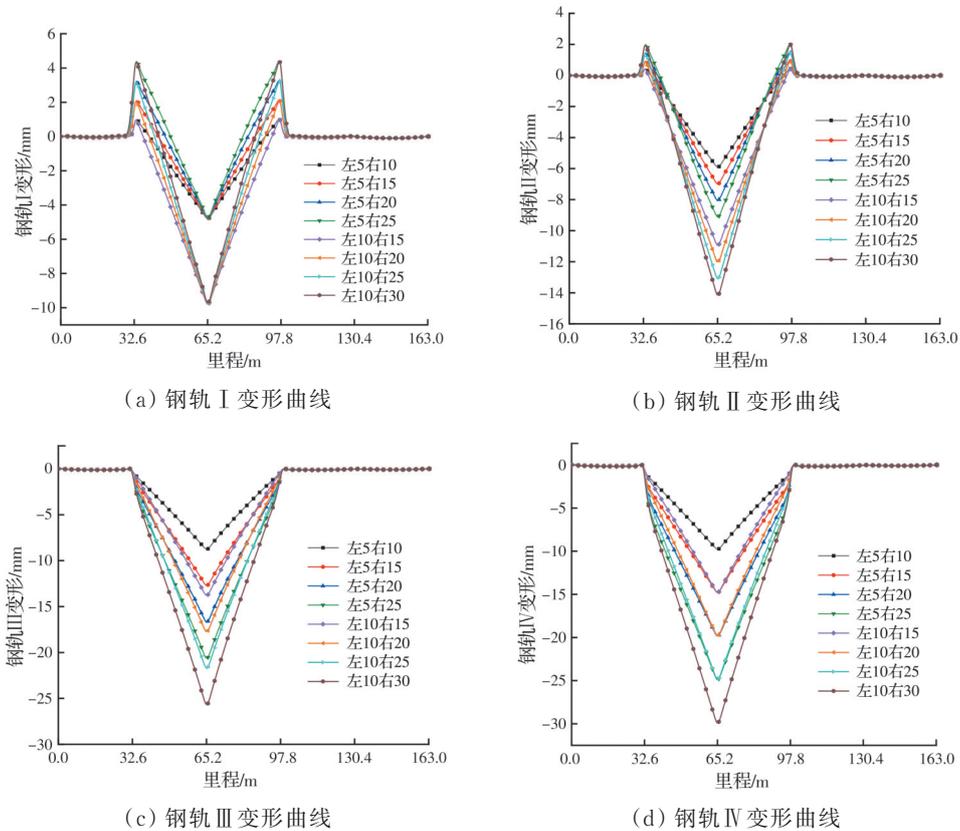


图 7 单墩沉降类型 2 和类型 3 下钢轨轨面竖向变形曲线

Fig. 7 Vertical deformation curves of rail surface under single pier settlement in type 2 and type 3

3.2 双墩沉降及轨面映射关系

当 3 号和 4 号桥墩右侧同时沉降时,与之相邻两侧梁体向沉降墩侧发生跟随性倾斜,中跨梁体左侧钢轨 I 以上拱为主,梁体右侧钢轨 III~IV 以下沉为主,其轨面变形规律与单墩沉降类似,沉降墩对应中跨梁体轨面变形体现为水平不平顺。图 8(a)、(b)中,2~5 号墩顶钢轨 I、II 出现明显短波上拱现

象;沉降差为 10 mm 时,高低不平顺大于 9 mm,建议加强日常保养工作并监控沉降发展态势;当双墩横桥向沉降差 15 mm 及以上时,高低不平顺大于 15 mm;尤其沉降差 20 mm 时,沉降墩顶轨面上拱超过 4 mm,水平不平顺大于 6 mm^[20],桥面扭曲不平顺大于 1.5 mm,建议临时紧急补修和限速 200 km/h 运行,并控制横桥向墩台沉降差。

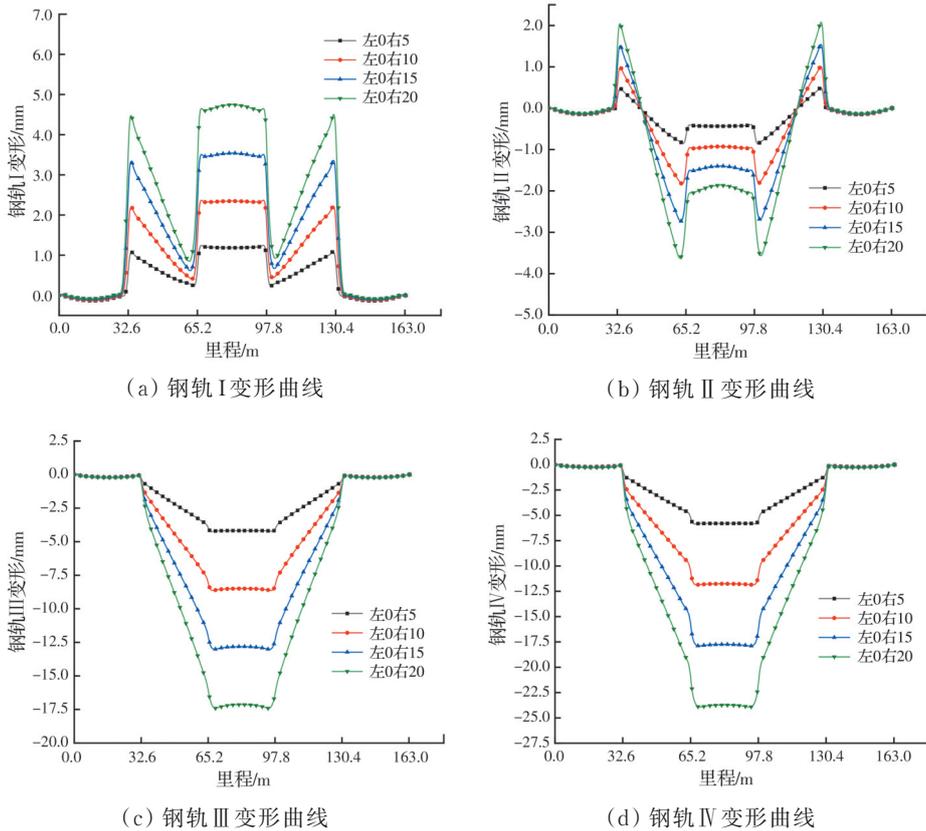


图 8 双墩沉降类型 4 下钢轨轨面竖向变形曲线

Fig. 8 Vertical deformation curves of rail surface under single pier settlement in type 4

图 9 为 3 号和 4 号双墩横桥向不均匀沉降(左侧沉降 0 mm,右侧沉降 20 mm)对应的梁上轨道结构变形云图。由图 9 可见,云图红色为下行线轨面上拱区域,蓝色为上行线下沉区域,整体横桥向墩台沉降差越大,桥面越倾斜,映射到桥上钢轨变形影响也越显著;云图右下方对应为 3 号墩梁体轨面出现高低、水平和扭曲不平顺等复合变形曲线;左上为 5 号墩轨面以高低不平顺为主的变形曲线。

图 10 为双墩沉降类型 5 和类型 6 下的双线 4 钢轨轨面竖向变形曲线,由于桥墩左右侧均发生沉降,轨道几何形位中高低不平顺愈发严重,当沉降差达到 20 mm 时,水平和扭曲不平顺均超过限值要求^[20-21]。沉降影响区域的桥跨端部出现多处上拱,整体发展态势比桥墩单侧沉降更为严重。

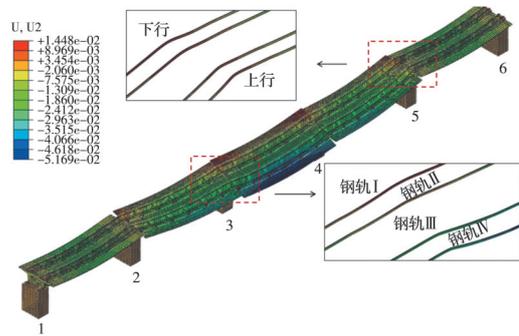


图 9 双墩沉降下桥上轨面变形云图

Fig. 9 Nephogram of rail surface deformation on bridge under double piers settlement

3.3 桥墩沉降差对轨道结构应力影响

为进一步研究墩台横桥向不均匀沉降对轨道结构受力的影响,以工况类型 1 和类型 4 为例,选取部分有代表性的轨道结构横、竖向应力进行分析。

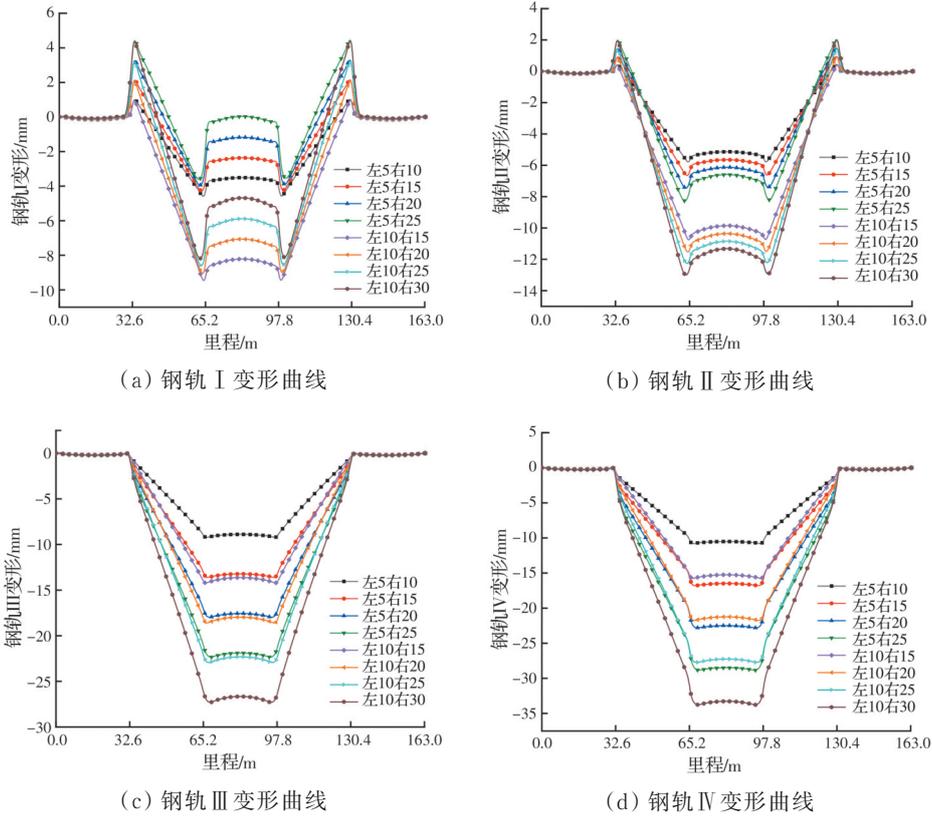


图 10 双墩沉降类型 5 和类型 6 下钢轨轨面竖向变形曲线

Fig. 10 Vertical deformation curves of rail surface under double piers settlement in type 5 and type 6

图 11 可见轨道结构各部件的空间拉应力随沉降量增加整体呈增大趋势,而轨道板为先减小后增大趋势,其原因是当沉降较小时,横向拉应力峰值由重力控制,当沉降差达到 10 mm 及以上时,通过扣件系统施加在轨道板的作用力会削弱重力场影响,轨道板横向拉应力整体变小,横向拉应力峰值转移到沉降起始端处,且随沉降差增加缓慢增大。图 11(a)中沉降差达到 15 mm 时,自密实横向拉应力反超底座板横向拉应力值,沉降差达到 20 mm 时,自密实横向拉应力高达 2.727 MPa,超过 C40 混

凝土抗拉强度限值,轨道结构有开裂的风险;图 11 (b)中底座板竖向拉应力大于轨道板和自密实混凝土竖向拉应力,底座板竖向拉应力最大为 1.978 MPa,未超过限值。

图 12 为 3 号桥墩沉降差 20 mm 时自密实横向应力峰值云图。受沉降墩和层间作用影响,自密实混凝土最大应力出现在 3 号沉降墩上方右侧板端处,最大拉压应力分别为 2.727、2.517 MPa,拉应力超过规范限值^[22],表明沉降墩处的填充层(自密实)对沉降影响较为敏感。

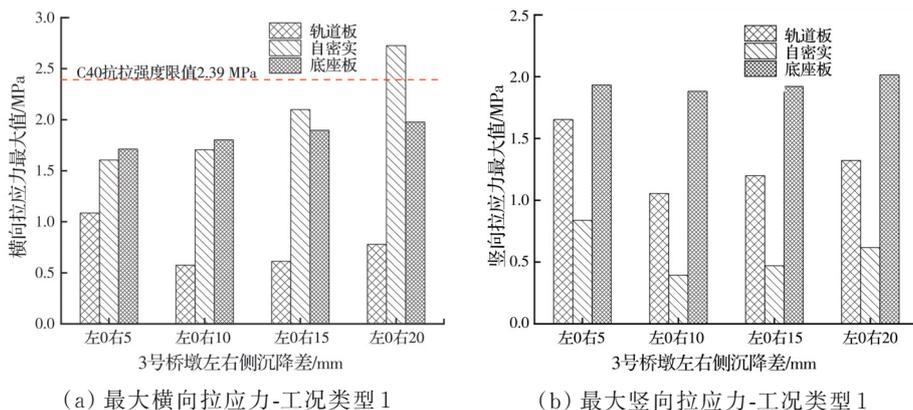


图 11 轨道结构各部件横、竖向拉应力最大值

Fig. 11 Maximum transverse and vertical tensile stresses of each component of the track structure

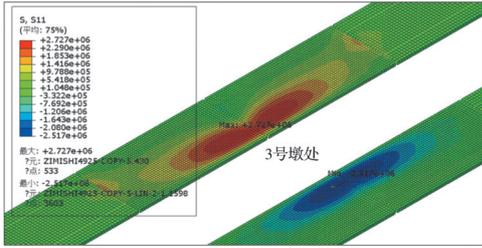
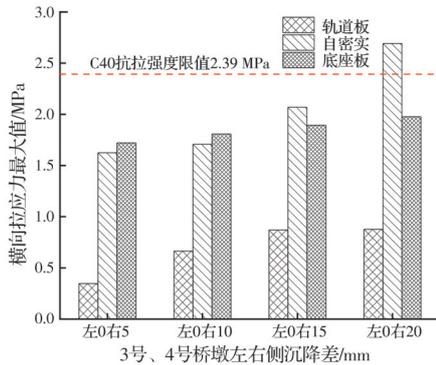


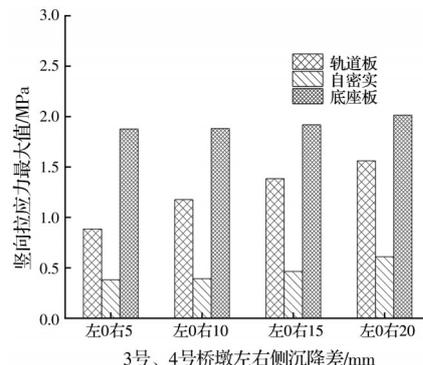
图 12 自密实混凝土层横向应力峰值云图

Fig. 12 Nephogram of transverse stress peak of self-compacting concrete

图 13 为双墩沉降下的轨道结构空间拉应力最



(a) 最大横向拉应力-工况类型 4



(b) 最大竖向拉应力-工况类型 4

图 13 轨道结构各部件空间拉应力最大值

Fig. 13 Maximum transverse and vertical tensile stresses of each component of the track structure

图 14 为 3 号和 4 号双墩沉降差 20 mm 时自密实横向应力峰值云图。由图 14 可见,自密实混凝土最大应力对称分布在 3 号沉降墩左侧板端和 4 号沉降墩上方右侧板端处,最大拉压应力分别为 2.692、2.466 MPa,拉应力超过规范限值^[22]。

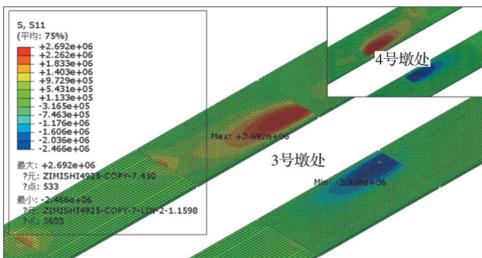


图 14 自密实混凝土层横向应力峰值云图

Fig. 14 Nephogram of transverse stress peak of self-compacting concrete

3.4 横桥向沉降静态损伤分级及维修建议

以工况类型 1 中桥墩两侧沉降差 15 mm 为例,提取双线 4 钢轨沿里程方向的钢轨垂向变形曲线,如图 15 所示。沉降影响区域下的轨道几何不平顺呈现空间复杂性变化,出现以高低不平顺为主的复合不平顺,不同沉降幅值将对线路运营条件有较大影响,故有必要对不同沉降类型下轨道损伤进行评

估分级。大值,图 13(a)中轨道结构各部件的横向拉应力随右侧桥墩沉降量的增加而增大,其中自密实混凝土的增长幅值略大,当右侧沉降量达到 20 mm 时,自密实混凝土的最大横向拉应力为 2.692 MPa,超过 C40 混凝土抗拉强度限值。图 13(b)中底座板和轨道板的最大竖向拉应力远大于自密实层的竖向拉应力,应力值随沉降量增加总体呈增长趋势,当桥墩左右沉降差达到 20 mm 时,轨道板和底座板的最大竖向拉应力分别为 1.562、2.014 MPa。

估分级。

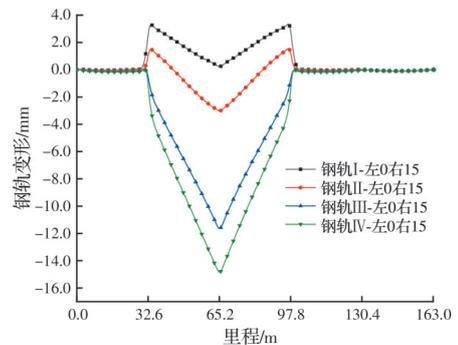


图 15 单墩沉降差 15 mm 钢轨变形曲线

Fig. 15 The rail deformation curves under the settlement difference of a single pier between 15 mm

综合各工况沉降计算结果,选择轨道高低、水平和扭曲不平顺等复合不平顺为评定指标,综合考虑规范中 250(不含)~350 km/h 线路静态和动态几何尺寸管理偏差容许值^[20],初步提出考虑桥墩横桥向不均匀沉降下的静态损伤等级划分依据及维修建议,见表 4。单、双墩横桥向不均匀沉降静态损伤等级和维修建议详情见表 5 和表 6。当单、双墩横桥向沉降差在 15 mm 及以上时,线路需临时补修,甚至限速 200 km/h,建议日常保养单、双墩不均匀沉降控制在 10 mm 以内。

表4 横桥向墩台不均匀沉降静态损伤分级依据(建议)

Table 4 Damage grade classification of uneven settlement of bridge pier in the transverse direction (recommendation)

评定依据(轨道不平顺/mm)					伤损等级			
上拱	高低	水平	扭曲	桥梁扭曲	I(作业验收)	II(日常保养)	III(临时补修)	IV(限速200 km/h)
2	7	2	2	<1.5	I			—
4	9	4	3	<1.5		II		—
7	12	6	5	1.5			III	—
8	15	7	6	>1.5				IV

注:上拱实际为轨面短波高低不平顺,即弦长为10 m以下弦测量的最大矢度;高低考虑轨面长波不平顺动态限值,桥梁扭曲限值1.5 mm^[21]。

表5 单墩横桥向不均匀沉降下线路静态损伤评级及维修建议

Table 5 Damage grade classification and proposal of maintenance under the uneven settlement of the single pier in the transverse direction

损伤类型	左侧沉降/mm	右侧沉降/mm	不平顺峰值/mm				伤损等级	维修等级	备注
			上拱	高低	水平	扭曲			
单墩类型1	0	5	0.86	4.50	0.95	0.48			
		10	2.16	9.77	2.16	0.84	II	II	
		15	3.30	14.80*	3.26	1.34	III	III	
		20	4.40	19.90*	4.36	1.66*	IV	IV	应力超限
单墩类型2	5	10	0.97	9.74	1.11	0.54	II	II	
		15	2.08	14.71*	2.20	0.96	III	III	
		20	3.20	19.93*	3.29	1.34	IV	IV	
		25	4.33	24.89*	4.39	1.80*	IV	IV	应力超限
单墩类型3	10	15	0.93	14.76*	1.15	0.53	III	III	
		20	2.29	19.82*	2.24	0.96	IV	IV	
		25	3.15	24.86*	3.33	1.41	IV	IV	
		30	4.22	29.96*	4.43	1.73*	IV	IV	应力超限

注:带*号为超过规范容许偏差值,备注栏为自密实混凝土横向拉应力超限工况。

表6 双墩横桥向不均匀沉降下线路静态损伤评级及维修建议

Table 6 Damage grade classification and proposal of maintenance under the uneven settlement of double piers in the transverse direction

损伤类型	左侧沉降/mm	右侧沉降/mm	不平顺峰值/mm				伤损等级	维修等级	备注
			上拱	高低	水平	扭曲			
双墩类型4	0	5	1.06	5.84	1.65	0.54			
		10	2.15	11.86	3.32	0.94	II	II	
		15	3.31	17.84*	5.00	1.34	IV	IV	
		20	4.45	23.75*	6.70*	1.72*	IV	IV	应力超限
双墩类型5	5	10	0.99	10.83	1.68	0.55	II	II	
		15	2.08	16.81*	3.35	0.98	IV	IV	
		20	3.21	22.78*	5.04	1.38	IV	IV	
		25	4.38	28.84*	6.74*	1.77*	IV	IV	应力超限
双墩类型6	10	15	0.95	15.80*	1.71	0.54	IV	IV	
		20	2.05	21.73*	3.39	0.99	IV	IV	
		25	3.20	27.71*	5.09	1.46	IV	IV	
		30	4.34	33.69*	6.78*	1.82*	IV	IV	应力超限

注:带*号为超过规范容许偏差值,备注栏为自密实混凝土横向拉应力超限工况。

4 结论

1)采用ABAQUS,建立了考虑横桥向不均匀沉降的轨道-桥梁-墩台有限元模型,分析了单墩和双墩横桥向不均匀沉降两种类型对CRTS III型板

式无砟轨道结构受力变形影响,发现横桥向沉降差对自密实混凝土横向拉应力影响最大。当横桥向墩台沉降差达到20 mm时,自密实混凝土横向拉应力超过规范限值要求,存在开裂风险。

2)通过横桥向墩台不均匀沉降分析,揭示了桥

墩沉降差与轨面不平顺(上拱、高低、水平和扭曲)的映射规律。单墩沉降时,相邻墩顶处下行线易出现明显短波上拱现象,上拱值随着横向沉降差增大而增大;上行线以跟随性下沉为主,出现长波高低、水平和扭曲等复合不平顺;双墩沉降时,两沉降墩对应中跨梁轨面变形以水平不平顺为主,相邻墩两边跨轨面不平顺映射规律与单墩沉降类似。

3)基于有限元仿真结果,以静态轨道不平顺为评定依据,综合考虑轨道结构受力,开展横桥向墩台不均匀沉降的静态损伤等级评估,初步提出了32 m多跨简支梁桥静态损伤分级及维修建议。

4)沉降差相同时,双墩沉降损伤病害较单墩沉降严重,双侧沉降较单侧沉降严重;建议日常保养单、双墩横桥向不均匀沉降控制在10 mm以内,应避免出现沉降15 mm及以上的不利工况。后续将结合SIMPACK多体动力学软件进行列车-轨道-桥梁系统动力学研究,进一步分析墩台横桥向沉降对高速列车行车安全性和舒适性的影响。

参考文献

- [1] 盛黎明. 中国高速铁路典型和特殊结构桥梁[J]. 中国铁路, 2010(12): 74-77.
SHENG L M. Typical and special structural bridge of China high speed railways [J]. Chinese Railways, 2010 (12): 74-77. (in Chinese)
- [2] 陈兆玮. 桥墩沉降下纵连板式轨道与桥面间动态接触行为及其对列车动态特性的影响[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1): 97-105.
CHEN Z W. Dynamic contact behavior between longitudinal slab track and bridge deck under pier settlement and its influence on train dynamic characteristics [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1): 97-105. (in Chinese)
- [3] 李奇, 吴阅, 吴琪. 考虑轨道静态变位的简支梁竖向刚度限值研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(3): 34-39.
LI Q, WU Y, WU Q. Research on the threshold of vertical stiffness of simply supported girders considering static deformation of track [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(3): 34-39. (in Chinese)
- [4] 邹振华. 不均匀沉降对大跨连续梁及轨道结构影响分析[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(3): 61-65.
ZOU Z H. Effects analysis of differential settlement on long-span continuous bridge and ballastless track structure [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(3): 61-65. (in Chinese)
- [5] PARKS S, YANG M J, GAJAN S, et al. Strength-based differential tolerable settlement limits of bridges [J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(1): 46-58.
- [6] 翟婉明, 赵春发, 夏禾, 等. 高速铁路基础结构动态性能演变及服役安全的基础科学问题[J]. 中国科学(技术科学), 2014, 44(7): 645-660.
ZHAI W M, ZHAO C F, XIA H, et al. Basic scientific problems of dynamic performance evolution and service safety of high-speed railway infrastructure [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 645-660. (in Chinese)
- [7] 徐庆元, 张泽, 方子匀, 等. 墩台沉降对桥上纵连板式无砟轨道线路动力影响[J]. 振动与冲击, 2019, 38(7): 112-118.
XU Q Y, ZHANG Z, FANG Z Y, et al. Effects of uneven settlement of pier and abutment on dynamic characteristics of longitudinal connected slab ballastless track on bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(7): 112-118. (in Chinese)
- [8] GOU H Y, LIU C, HUA H, et al. Mapping relationship between dynamic responses of high-speed trains and additional bridge deformations [J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(9/10): 1051-1062.
- [9] ZHOU W B, NIE L X, JIANG L Z, et al. Mapping relation between pier settlement and rail deformation of unit slab track system [J]. Structures, 2020, 27: 1066-1074.
- [10] 陈兆玮, 孙宇, 翟婉明. 高速铁路桥墩沉降与钢轨变形的映射关系(I): 单元板式无砟轨道系统[J]. 中国科学(技术科学), 2014, 44(7): 770-777.
CHEN Z W, SUN Y, ZHAI W M. Mapping relationship between pier settlement and rail deformation of high-speed railway (I): Unit slab ballastless track system [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 770-777. (in Chinese)
- [11] 陈天浩, 杨建伟, 王金海. 高速铁路桥墩沉降与无砟轨道底座板脱空区域的映射关系[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(1): 41-48.
CHEN T H, YANG J W, WANG J H. Mapping relationship between pier settlement and base plate void area of the ballastless track for high-speed railways [J]. Railway Standard Design, 2022, 66(1): 41-48. (in Chinese)
- [12] MALENA M, ANGELILLO M, FORTUNATO A, et al. Arch bridges subject to pier settlements: continuous vs. piecewise rigid displacement methods [J]. Meccanica, 2021, 56(10): 2487-2505.
- [13] 勾红叶, 冉智文, 蒲黔辉, 等. 高速铁路桥梁竖向变形与轨面几何形态的通用映射解析模型研究[J]. 工程力学, 2019, 36(6): 42-47
GOU H Y, RAN Z W, PU Q H, et al. Study on mapping relationship between bridge vertical deformation and track geometry of high-speed railway [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 42-47. (in Chinese)

- [14] 张鹏飞, 连西妮, 桂昊, 等. 桥墩温度梯度对桥上CRTS II型板式无砟轨道纵向力的影响[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 80-90.
ZHANG P F, LIAN X N, GUI H, et al. Effect of pier temperature gradient on longitudinal force of CRTS II slab ballastless track on bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 80-90. (in Chinese)
- [15] 冯玉林, 蒋丽忠, 曾永平, 等. 连续梁桥典型变形对轨道几何形位演变的影响[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(1): 91-96.
FENG Y L, JIANG L Z, ZENG Y P, et al. Influence of the typical deformation of continuous beam bridge on the track geometry evolution [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(1): 91-96. (in Chinese)
- [16] 方淑君, 徐新桐, 王涛, 等. 运营状态下新建桥对邻近高铁桥梁沉降的分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(5): 1187-1195.
FANG S J, XU X T, WANG T, et al. Influence of new bridge loading on additional foundation settlement of existing bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(5): 1187-1195. (in Chinese)
- [17] ZHANG D, XIAO J H, ZHANG X. Effects of pier deformation on train operations within high-speed railway ballastless track-bridge systems [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(10): 96-105.
- [18] 丁志文, 马斌, 张艺瀚, 等. 南昌二元地层便道荷载对邻近桥梁桩基的影响[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(5): 30-39.
DING Z W, MA B, ZHANG Y H, et al. Influence of adjacent construction access load on the existing bridge pile foundation in Nanchang binary strata [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(5): 30-39. (in Chinese)
- [19] JIANG L Z, LIU L L, ZHOU W B, et al. Mapped relationships between pier settlement and rail deformation of bridges with CRTS III SBT [J]. Steel and Composite Structures, 2020, 36(4): 481-492.
- [20] 高速铁路无砟轨道线路维修规则: TG/GW 115—2012 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.
High-speed railroad ballastless track line maintenance rules: TG/GW 115—2012 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2020. (in Chinese)
- [21] 高速铁路桥隧建筑物修理规则: TG/GW 114—2011 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
High-speed railroad bridge and tunnel building repair rules: TG/GW 114—2011 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [22] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

(编辑 胡玲)