

# 高速铁路桥梁墩顶位移对 CRTS II 型轨道几何状态的影响研究

陈利民 李晓龙 陈 鹤

(上海东华地方铁路开发有限公司, 200070, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 建立了高速铁路桥梁及 CRTS II 型板式无砟轨道结构的有限元模型, 计算分析了不同墩顶位移计算工况下的轨道不平顺, 并结合相关规范给出了桥梁下部结构的位移限值建议值。研究发现, 桥墩横向位移对轨向不平顺影响较大, 轨向不平顺极值与桥墩横向位移基本呈线性关系, 桥墩横向位移限值建议为 9 mm; 桥墩垂向位移对高低不平顺影响较大, 高低不平顺极值与桥墩垂向位移基本呈线性关系, 桥墩垂向位移限值建议为 12 mm; 当桥墩发生双向位移时, 会使得高低与轨向不平顺小幅度增加, 故桥墩双向位移限值建议为 7.2 mm。

**关键词** 高速铁路; 桥墩位移; 轨道几何不平顺; 板式无砟轨道

**中图分类号** U213.2<sup>+</sup>13

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.020

## Influence of High-speed Railway Bridge Pier Top Displacement on CRTS II Track Geometric Status

CHEN Limin, LI Xiaolong, CHEN He

**Abstract** Finite element model of high-speed railway bridge and CRTS II slab ballastless track structure is established. Track irregularity under different pier top displacement calculation working conditions is calculated and analyzed, and the displacement limit value of fixed bridge substructure is recommended considering relevant specifications. It is found that pier lateral displacement has a larger impact on track irregularity, and the extreme value of the track irregularity is basically in a linear relationship with the pier lateral displacement, and the limit value of pier lateral displacement is recommended to be 9 mm. Pier vertical displacement has larger impact on height irregularity. The extreme value of height irregularity is basically in a linear relationship with pier vertical displacement, and the limit value of pier vertical displacement is suggested to be 12 mm. When a two-way displacement of the pier occurs, both the height and track irregularity will be slightly increased, thus the limit value of pier two-way displacement is recommended to be 7.2 mm.

**Key words** high-speed railway; pier displacement; track geometric irregularity; slab ballastless track

**Author's address** Shanghai Donghua Local Railway Development Co., Ltd., 200070, Shanghai, China

上海轨道交通市域线机场联络线(以下简称“机场线”)总长 68.68 km, 设 9 座车站。机场线在七宝站南侧部分分为明挖段和隧道段。受通道东侧大量厂房和居民楼限制, 部分线路与沪昆高铁线路距离较近。当新建铁路线路与既有高速铁路线路距离较近时, 新建铁路线路施工不可避免地会对邻近既有高速铁路线路的下部结构产生影响。

我国现行的规范大多通过测量轨道几何不平顺值来评价高速铁路线路轨道的状态。但是, 现有手段无法实时监测轨道几何不平顺值, 只能通过监测桥墩墩台等其他结构沉降来对其进行间接测量。由此, 准确地计算高速铁路桥墩位移对轨道几何状态的影响并确定其下部结构的位移限值, 对于保障既有线路的安全运行具有重要意义。

目前, 国内针对高速铁路桥墩位移对高速铁路线路影响的研究多集中在对加速度、减载率等列车行车指标的影响。现有文献[1-6]中多基于列车-轨道-桥梁耦合动力学理论结合有限元仿真分析方法研究桥梁差异性沉降对列车运营加速度及安全性的影响, 然而针对桥梁墩顶位移对轨道几何状态的影响较少, 罕见提出桥梁墩顶的位移限值。基于此, 本文采用有限元分析软件建立桥墩-桥梁-CRTS II 型轨道结构模型, 研究高速铁路不同桥墩位移下的轨道几何状态变化, 为既有高速铁路线路安全性评估提供理论依据。

## 1 CRTS II 型轨道的有限元模型

### 1.1 轨道结构

CRTS II 型轨道为板式无砟轨道, 主要包含钢

轨、扣件、轨道板、CA 砂浆层、底座板、L 型挡块等部件,其主要结构示意图如图 1 所示。

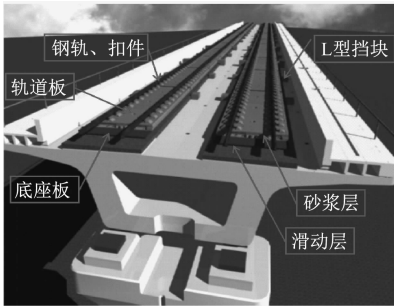


图 1 CRTS II 型轨道结构模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of CRTS II track structure model

1.1.1 钢轨

有限元模型中,钢材选用梁单元进行模拟;结合实际情况,选用常见的 60 kg/m 钢轨,母材为 U71Mn(k),屈服强度取 457 MPa。

1.1.2 扣件

采用非线性弹簧单元来模拟扣件,并输入广义的力-变形曲线以定义其非线性行为。为全面考虑

扣件系统的纵向阻力、横向刚度和垂向刚度,在钢轨和轨道板上每对应结点之间均分别建立 3 个弹簧单元来模拟 3 个方向的扣件刚度。扣件节点按等间距原则布置,桥梁轨道板上的扣件节点间距取 629 mm。高速铁路无砟轨道桥梁上常采用 WJ-7 型小阻力扣件,其位移-阻力关系如图 2 所示。WJ-7 型扣件的最大横向抗力取 50 kN,垂向刚度按表 1 选取。

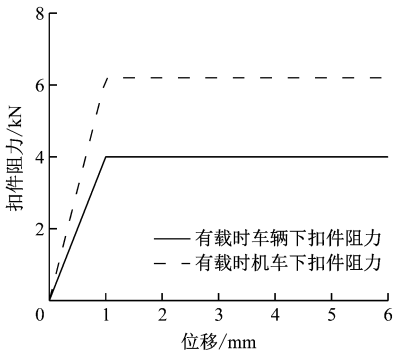


图 2 WJ-7 型小阻力扣件的位移-阻力关系

Fig.2 Diagram of WJ-7 small resistance fastener displacement-resistance relationship

表 1 WJ-7 型扣件垂向刚度  
Tab.1 Vertical rigidity of WJ-7 fastener

扣件类型	适用范围	轨下胶垫刚度/(kN/mm)	扣件系统节点静刚度/(kN/mm)
WJ-7A 型	客货专线,无挡肩结构无砟轨道	30 ~ 40	50
WJ-7B 型	客运专线,无挡肩结构无砟轨道	20 ~ 30	35

本次模拟轨道板结构为沪昆高铁轨道结构,其为客运专线,因而采用 WJ-7B 型的垂向刚度。

1.1.3 轨道板、砂浆填充层、底座板

CRTS II 型轨道为预应力混凝土结构,采用 C55 混凝土。标准轨道板长度为 6 450 mm,宽度为 2 550 mm,厚度为 200 mm。每块标准轨道板设置 10 对承轨台,扣件节点间距为 650 mm。标准轨道板的实体单元模型如图 3 所示。

砂浆填充层是兼具混凝土刚性和沥青弹性的半刚性体。砂浆材料的 28 d 抗压强度不低于 15 MPa,弹性模量取 200 MPa。砂浆填充层采用实体单元进行模拟,与轨道板等长等宽,厚度为 30 mm。底座板也采用实体单元模拟,其混凝土强度等级为 C35,宽度为 2 950 mm,厚度为 190 mm。

1.2 桥梁结构

1.2.1 箱梁

箱梁混凝土强度等级为 C50。考虑桥梁支座部分截面加厚,箱梁采用变截面实体单元进行模拟,

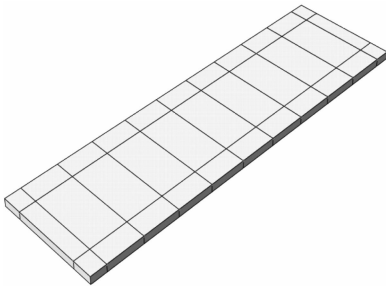


图 3 轨道板实体单元模型

Fig.3 Solid element model of track slab

可全面考虑桥梁结构的几何尺寸和材料属性。32 m 简支箱梁的实体单元模型如图 4 所示。本次模拟为分析桥墩变形对钢轨的影响,考虑边界效应的影响,拟建立 4 跨简支梁(单跨为 32 m)进行模拟。

1.2.2 支座

一般情况下,支座橡胶层自身变形相对桥墩位移极小,可以忽略不计。因此,采用弹簧单元对支座进行模拟。根据支座垂向承载力、水平向承载力

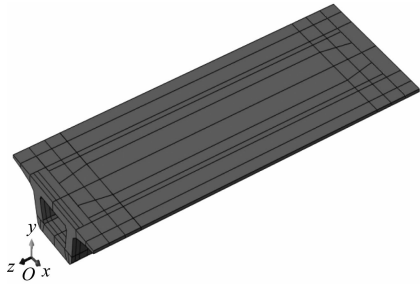


图 4 32 m 简支箱梁实体单元模型

Fig. 4 Solid element model of 32 m simply supported box girder

表 2 固定与活动支座各方向模拟弹簧刚度

Tab. 2 Simulated spring stiffness in all directions of fixed and movable supports

支座	刚度/(N/m)			转动弹簧刚度/(Nm <sup>2</sup> )		扭转刚度/(Nm <sup>2</sup> )
	垂向	横向	纵向	垂向	横向	
固定支座	$3.2 \times 10^9$	$6.0 \times 10^8$	$6.0 \times 10^8$	$1.0 \times 10^{11}$	0	$1.0 \times 10^{11}$
多向支座	$3.2 \times 10^9$	$1.5 \times 10^7$	$3.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^{11}$	0	$1.0 \times 10^{11}$
纵向支座	$3.2 \times 10^9$	$6.0 \times 10^8$	$3.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^{11}$	0	$1.0 \times 10^{11}$
横向支座	$3.2 \times 10^9$	$1.5 \times 10^7$	$1.2 \times 10^7$	$1.0 \times 10^{11}$	0	$1.0 \times 10^{11}$

1.3 边界条件

由于有限元模型仅考虑某些桥墩的整体位移对于轨道几何状态的影响,因此除产生位移的桥墩外,剩余桥墩均采用下部固定的边界条件,限制其各方向位移。同时,在沿钢轨方向的轨道板两端,限制轨道板结构的纵向位移。

4 跨 CRTS II 型轨道简支梁桥的有限元计算模型如图 5 所示。由于施工过程仅影响桥墩的横向及垂向位移,故本研究仅考虑桥墩横向位移工况和垂向位移工况。

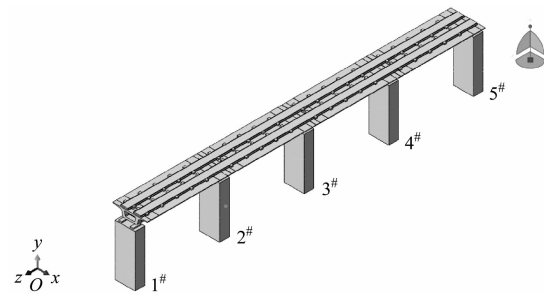


图 5 4 跨 CRTS II 型板式无砟轨道简支梁桥有限元计算模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of finite element calculation model of simply supported beam bridge on 4-span CRTS II slab ballastless track

与允许位移范围,可计算垂向、横向、纵向刚度,以及转动弹簧刚度,如表 2 所示。

1.2.3 桥墩

桥墩混凝土强度等级取 C30。桥墩同样采用实体单元进行模拟,以便在墩顶面纵横向水平力作用下,计算由墩身弯曲、基础倾斜、基础平移及橡胶支座剪切变形等引起的墩顶位移。

由于本研究主要分析墩顶位移对桥梁上部结构及轨道结构造成的影响,不考虑桥墩自身的变形因素,故而仅取墩顶各方向位移变化工况。

2 轨道几何不平顺的仿真计算

2.1 桥墩横向位移计算工况

4 跨简支梁桥 3<sup>#</sup>桥墩整体横向位移  $d_x$  分别取 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm,通过有限元模型计算轨道几何不平顺值。

单墩  $d_x = 40$  mm 时,轨道几何不平顺值计算结果如图 6 所示。由图 6 可知:该工况下,高低不平顺极值为 0.643 mm,轨向不平顺极值为 2.265 mm,轨距不平顺极值为 0.022 mm,水平不平顺极值为 0.428 mm,  $d_x$  对轨向不平顺的影响最大,对其他指标影响较小;当单墩  $d_x = 40$  mm 时,其他不平顺值均小于 0.65 mm。

轨向不平顺极值随桥墩横向位移变化如图 7 所示。由图 7 可见,轨道轨向不平顺极值与  $d_x$  基本呈线性关系,拟合公式为  $d_{gx} = 0.056 6 d_x - 0.000 5$ ,拟合优度  $R^2 = 0.997$ ,其中  $d_{gx}$  为轨向不平顺极值,  $d_x$  为 3<sup>#</sup>桥墩横向位移值。

2.2 桥墩垂向位移计算工况

4 跨简支梁桥 3<sup>#</sup>桥墩整体垂向位移  $d_y$  分别取 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm,通过有限元模型计算轨道几何不平顺值。

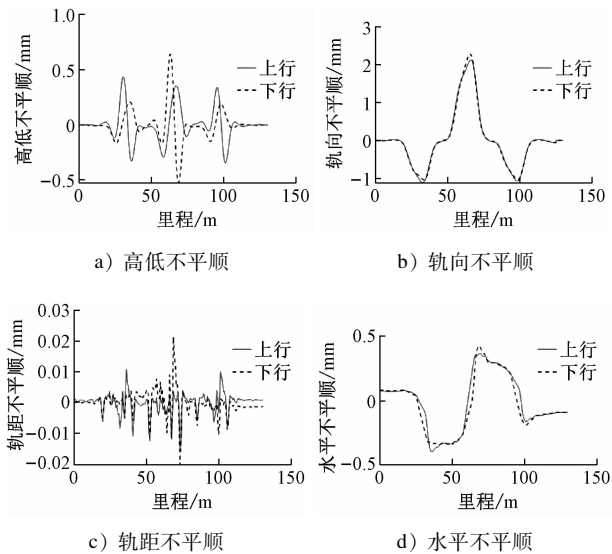


图 6 单墩  $d_x = 40$  mm 时的轨道不平顺计算结果

Fig. 6 Calculation results of track irregularity with single pier  $d_x = 40$  mm

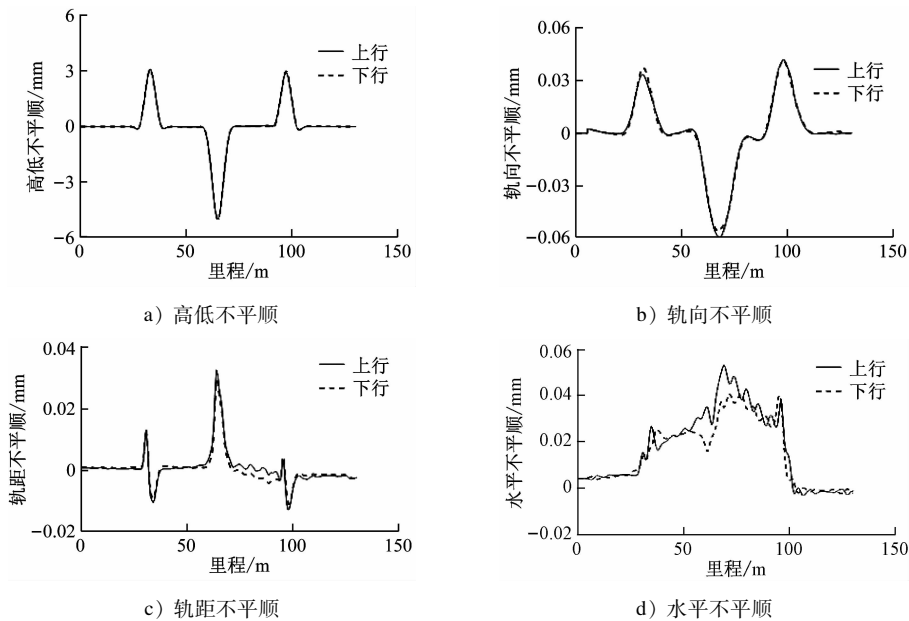


图 8 单墩  $d_y = 40$  mm 时的轨道不平顺计算结果

Fig. 8 Calculation results of track irregularity with single pier  $d_y = 40$  mm

mm,水平不平顺极值为 0.05 mm,桥墩  $d_y$  对轨道高低不平顺影响较大,对其他指标影响较小;在最不利工况下,其他不平顺值均小于 0.07 mm。

高低不平顺极值随  $d_y$  变化情况如图 9 所示。由图 9 可以看出,轨道高低不平顺极值与  $d_y$  基本呈线性关系,拟合公式为  $d_{gd} = 0.124\ 3d_y + 0.145\ 5$ ,  $R^2 = 0.971$ ,其中  $d_{gd}$  为高低不平顺极值, $d_y$  为 3# 桥墩垂向位移值。

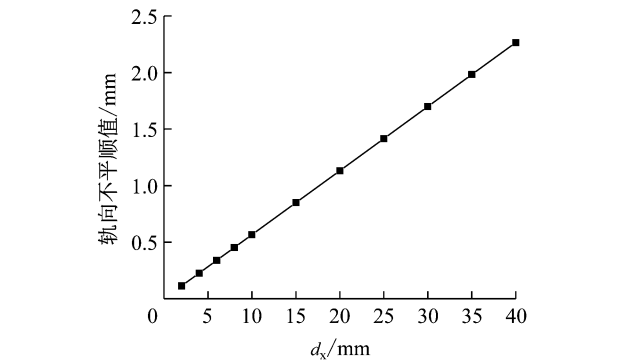


图 7 不同  $d_x$  时的轨向不平顺变化量

Fig. 7 Variation track irregularity with different values of  $d_x$

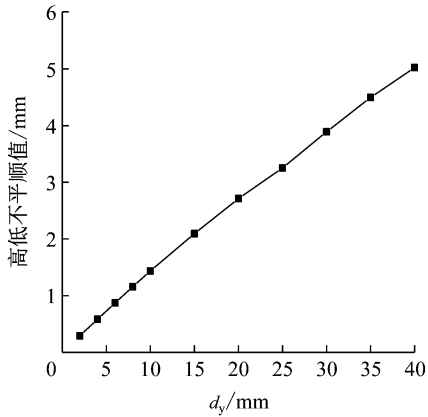
单墩  $d_y = 40$  mm 时,轨道几何不平顺值计算结果如图 8 所示。

由图 8 可知:高低不平顺极值为 5.02 mm,轨向不平顺极值为 0.06 mm,轨距不平顺极值为 0.03

### 2.3 桥墩双向位移计算工况

在双向位移计算工况中,取 4 跨简支梁桥 3# 桥墩整体同时发生横向位移  $d_x$  和垂向位移  $d_y$ 。按双向位移(即  $d_x$  与  $d_y$  同时发生相同位移量  $d_{双}$ ) $d_{双}$  分别取 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm,通过有限元模型计算轨道几何不平顺值。

单墩  $d_{双} = 40$  mm 时,轨道几何不平顺值计算结

图9 不同  $d_y$  时的高低不平顺值变化量Fig. 9 Variation of height irregularity with different values of  $d_y$ 

果如图 10 所示。由图 10 可见:高低不平顺极值为

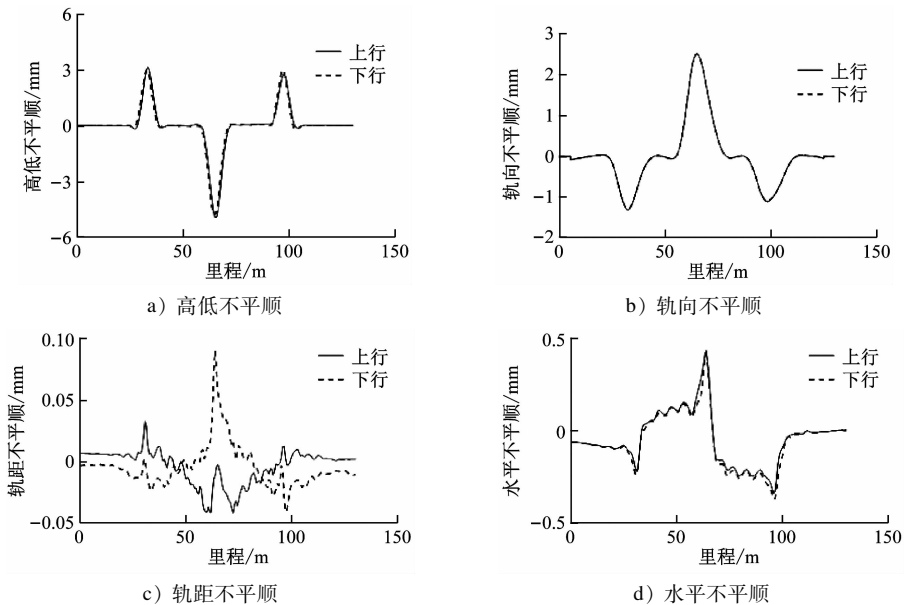
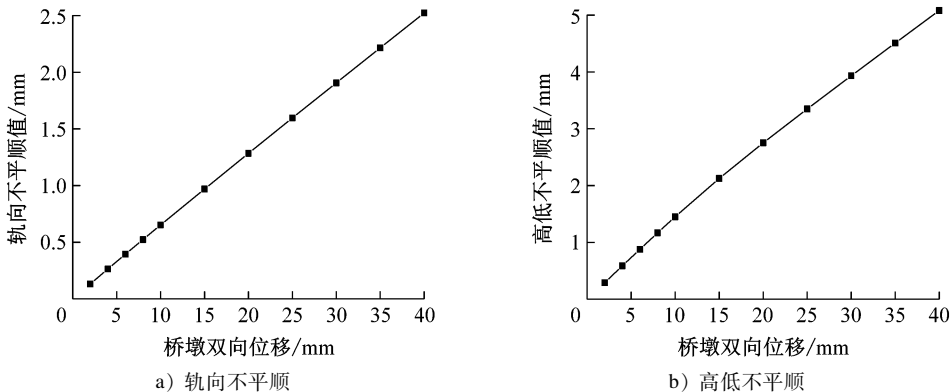
图 10  $d_{\text{双}} = 40 \text{ mm}$  时的轨道不平顺计算结果Fig. 10 Calculation results of track irregularity with  $d_{\text{双}} = 40 \text{ mm}$ 

图 11 不同双向位移计算工况下的轨道几何不平顺

Fig. 11 Track geometric irregularity under different two-way displacement calculation working conditions

5.08 mm, 轨向不平顺极值为 2.52 mm, 轨距不平顺极值为 0.09 mm, 水平不平顺极值为 0.44 mm, 单个桥墩双向位移对轨道高低不平顺和轨向不平顺影响较大, 对其他指标影响较小; 且与单个桥墩单向位移相比, 单个桥墩双向位移的高低不平顺和轨向不平顺值均有小幅度的增加。

最大轨向不平顺值和高低不平顺值随桥墩  $d_{\text{双}}$  变化如图 11 所示。由图 11 可以看出: 在单墩双向位移计算工况下, 轨道高低不平顺极值与双向位移量基本呈线性关系, 拟合公式为  $d_{\text{gd}} = 0.1258 d_{\text{双}} + 0.146$ ,  $R^2 = 0.947$ , 其中  $d_{\text{gd}}$  为高低不平顺极值,  $d_{\text{双}}$  为 3# 桥墩双向位移值; 在单墩双向位移工况下, 轨道轨向不平顺极值与双向位移量基本上呈线性关系, 拟合公式为  $d_{\text{gx}} = 0.0629 d_{\text{双}} + 0.0185$ ,  $R^2 =$

0.972, 其中  $d_{gx}$  为轨向不平顺极值,  $d_{双}$  为 3# 桥墩双向位移值。

### 3 桥墩位移限值的建议值

根据轨道几何不平顺的计算结果, 桥墩的位移与相应轨道不平顺极值存在线形关系。本文根据目前现有规范, 并按结构应力水平不能超出其强度的要求, 给出桥墩位移限值的建议值。

首先, 根据《普速铁路线路修理规则》中对于静态轨道几何状态不平顺的规定, 将作业验收的不平顺值 4.000 mm 作为线路轨道的初始不平顺; 然后, 叠加不同计算工况下的几何不平顺极值计算值, 得到几何不平顺值限值的参考值; 最后, 综合考虑结构应力情况, 提出单墩位移限值建议值。

#### 3.1 单墩横向位移限值建议值

单墩横向位移 40 mm 工况下, 轨向不平顺值为 6.265 mm (即 4.000 mm + 2.265 mm), 大于计划修补限值 6.000 mm, 小于临时修补限值 12.000 mm。根据仿真结果, 此时的底座板最大拉应力已超限。因此, 轨向不平顺不作为桥墩横向位移限值的指标。

横向位移限值由底座板最大拉应力控制。当单墩  $d_x = 11.3$  mm 时, 底座板拉应力达到混凝土容许应力 (2.25 MPa)。为了安全起见, 取 80% 容许应力作为应力控制值, 此时的单墩横向位移控制建议值为 9.0 mm。

#### 3.2 单墩垂向位移限值建议值

在  $d_y = 15$  mm 工况下, 高低不平顺值为 6.094 mm (即 4.000 mm + 2.094 mm), 超过计划维修限值 6.000 mm。故垂向位移限值应控制在 15 mm 以内。此外, 桥墩垂向位移过大会引起轨道板脱空, 进而对列车的安全运行造成影响。由此, 考虑一定的安全储备, 单墩垂向位移控制建议值取 12.0 mm。

#### 3.3 单墩双向位移限值建议值

由于双向位移会加剧轨道不平顺极值, 所以双向位移限值应对单墩单向位移限值进行折减。考虑一定的安全储备, 双向位移控制建议值为 7.2 mm。

### 4 结论

1) 单墩横向位移、单墩垂向位移以及单墩双向位移分别为 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm 计算工况下, 钢轨变形随着桥墩位移的变化而变化。

2) 桥墩横向位移主要对轨道轨向不平顺产生较大影响, 且轨向不平顺极值与桥墩横向位移呈线性关系; 横向位移为 40 mm 时, 轨向不平顺极值为 3.299 mm, 其他不平顺极值均小于 1 mm。桥墩垂向位移对轨道高低不平顺产生较大影响, 且高低不平顺极值与桥墩垂向位移呈线性关系; 垂向位移为 40 mm 时, 高低不平顺值为 8.693 mm, 其他不平顺值均小于 0.1 mm。

3) 综合考虑《普速铁路线路修理规则》的相关要求、结构应力水平、钢轨几何不平顺值维修准则等, 建议桥墩位移限值: 单墩垂向位移限值为 12.0 mm, 单墩横向位移限值为 9.0 mm, 单墩双向位移限值为 7.2 mm。

### 参考文献

- [1] 王少杰. 基于应变的轻轨梁桥线形监测及其变化对列车运行性影响研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
WANG Shaojie. Strain-based deformation monitoring of light-rail girder bridge and its effect on dynamic performance of train-bridge interaction systems[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [2] CHEN Z W, ZHAI W M, CAIC B. et al. Safety threshold of high-speed railway pier settlement based on train-track-bridge dynamic interaction[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58 (2): 202.
- [3] 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(II): 纵联板式无砟轨道系统[J]. 中国科学(技术科学), 2014(7): 778.  
CHEN ZhaoWei, SUN Yu, ZHAI Wanming. Mapping relationship between pier settlement and rail deformation of high-speed railways—part II: the longitudinal connected ballastless track system [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014(7): 778.
- [4] ZHANG X, SHAN Y, YANG X. Effect of bridge-pier differential settlement on the dynamic response of a high-speed railway train-track-bridge system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017(7): 1.
- [5] 石晓宇. 桥墩不均匀沉降与梁体徐变上拱对高速铁路行车安全的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
SHI Xiaoyu. Influence of uneven settlement of bridge pier and creep camber of bridge girder on the running safety for high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [6] 李世安. 高速铁路桥墩差异沉降对列车运行影响研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.  
LI Shi'an. Study on influence of pier differential settlement on train operation of high speed railway [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2018.

(收稿日期: 2021-09-09)