

路基水平变形对 CRTS II 型板式无砟轨道 静态变形的映射规律

殷 威¹ 倪婉昱² 闫广鹏¹

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 430010, 武汉; 2. 四川蜀道高速公路集团有限公司, 610041, 成都)

摘 要 [目的] 目前, 高速铁路路基水平变形相关控制指标尚不完善, 因此有必要对无砟轨道路基水平变形影响规律及限值进行研究。[方法] 利用有限元方法, 计算了不同波长和幅值的余弦型路基水平变形条件下, CRTS II 型板式无砟轨道的结构受力、变形及线路轨道不平顺值; 参照轨道几何尺寸容许偏差管理值和无砟轨道结构拉应力容许值, 研究了路基余弦型水平变形的传递规律及限值。[结果及结论] 钢轨、轨道板、砂浆层、支承层等无砟轨道结构的水平变形对高速铁路路基余弦型水平变形存在显著的响应特征。当水平变形波长为 20 m、水平变形幅值为 10 mm 时, 路基余弦型水平变形对轨道轨向不平顺造成的影响最大, 对轨道水平不平顺的影响次之, 对轨距及高低不平顺指标的影响可忽略。当水平变形幅值为 20 mm 时, 随着水平变形波长的增大, 钢轨水平变形最大值也有所增大, 轨向不平顺、轨道板及支承层拉应力则先增大后减小。路基余弦型水平变形幅值的限值随着水平变形波长的增大而增大, 二者满足二次函数关系。

关键词 高速铁路基; 无砟轨道; 水平变形

中图分类号 U216.417

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.030

Mapping Law of CRTS II Type Slab Ballastless Track Static Deformation Due to Subgrade Horizontal Deformation

YIN Wei¹, NI Wanyu², YAN Guangpeng¹

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., 430010, Wuhan, China; 2. Sichuan Shudao Expressway Group Co., Ltd., 610041, Chengdu, China)

Abstract [Objective] Aiming at the insufficient control indexes for high-speed railway subgrade horizontal deformation currently, it is necessary to study the influence law and limit values of ballastless track subgrade horizontal deformation. [Method] Using finite element method, the structural stress, deformation, and track irregularity of CRTS (China railway track system) II type ballastless track are calculated under horizontal deformation conditions of cosine-shaped subgrade with different wavelengths and amplitudes. Referring to the allowa-

ble tolerance values for track geometric dimensions and the allowable tensile stress values of ballastless track structure, the transmission law and limit values of subgrade cosine-shaped horizontal deformation are studied. [Result & Conclusion] The horizontal deformation of ballastless track structures such as rail, track slab, mortar layer and supporting layer shows significant response characteristics to cosine-shaped horizontal deformation of high-speed railway subgrade. When the wavelength and amplitude of horizontal deformation are 20 m and 10 mm respectively, the influence of subgrade cosine-shaped horizontal deformation on track alignment irregularity is the greatest, followed by the influence on track horizontal irregularity, while the influence on gauge and vertical irregularity indicators can be ignored. When the amplitude of horizontal deformation is 20 mm, as its wavelength increases, the maximum value of rail horizontal deformation increases, while the track irregularity, track slab and supporting layer tensile stresses first increase and then decrease. The limit value of subgrade cosine-shaped horizontal deformation amplitude increases with the increase of horizontal deformation wavelength, and the two satisfy a quadratic function relationship.

Key words high-speed railway subgrade; ballastless track; horizontal deformation

板式无砟轨道具有高稳定性、高平顺性和少维修性等特点, 已逐渐成为我国轨道结构选择的主导模式。近年来, 随着高铁周边邻近工程活动的日益加剧, 环境土体应力的变化极易诱发高速铁路基变形, 导致轨道结构应力增加与轨道不平顺, 进而影响列车运行的安全性与舒适性。因此, 有必要对高速铁路基变形进行控制研究。

目前, 已有大量文献对高速铁路基变形的影响规律及控制指标进行了研究^[1-3]。文献[4]通过建立高铁无砟轨道有限元模型, 分析多因素下路基不均匀沉降的轨道板内力分布, 并基于轨道板抗弯疲劳强度确定路基不均匀沉降的控制指标, 获得沉降幅

值限值随着沉降波长线性增加的结论,沉降波长为 20 m 下的沉降幅值限值为 7 mm。文献[5]研究了不同路基不均匀沉降和无砟轨道温度梯度荷载下,CRTS II 型板式无砟轨道线路的车辆振动特性及无砟轨道各部件动应力特性,得出无砟轨道裂缝间距对于沉降限值有较大影响的结论;综合各指标后,将沉降波长 20 m 下的沉降限值取为 10 mm。文献[6]研究了不同波长和幅值的路基不均匀沉降下,轨道几何状态和车-轨系统动力学性能的影响规律,得到波长为 12~20 m 下的路基沉降更容易导致轨道和路基间发生脱空的结论;建议列车运行速度为 400 km/h 高速铁路的错台控制限值取为 5 mm,线路折角控制限值取为 1‰。

目前,关于高铁路基变形影响及控制指标的研究主要针对路基沉降,且沉降形式多局限于波长为 20 m 的余弦型沉降,针对其他量值的路基水平变形研究甚少。高铁路基水平变形将直接影响临近高

铁或其他建(构)筑物的工程安全,因此,利用有限元方法计算不同波长和幅值下,无砟轨道路基水平变形影响规律和限值的研究,对路基水平变形的控制和无砟轨道的养护维修具有重要的现实意义和应用价值。

1 高铁路基 CRTS II 型板式无砟轨道静态分析模型

1.1 建立模型

沪杭高铁桩板结构路基 CRTS II 型板式无砟轨道横断面示意图如图 1 所示。参照沪杭高铁路基原型和 TB 10621—2014《高速铁路设计规范》,本文基于 ABAQUS 软件建立了高铁路基 CRTS II 型板式无砟轨道的静态分析模型,其结构自上而下包含钢轨、扣件、轨道板、CA(水泥沥青)砂浆层、支承层、路基基床、基床以下路堤及承载板。

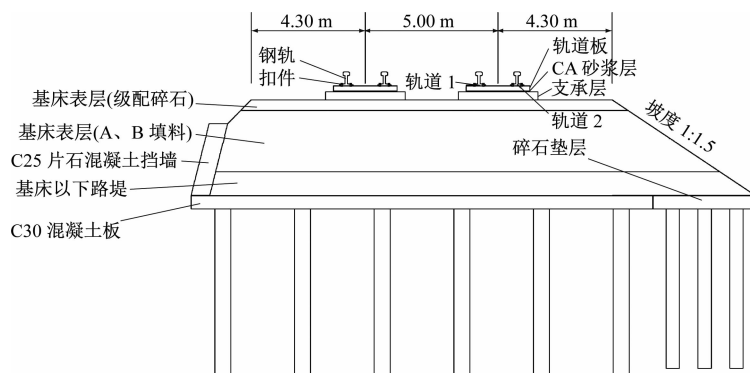


图 1 沪杭高铁桩板结构路基 CRTS II 型板式无砟轨道横断面示意图

Fig. 1 Diagram of CRTS II type slab ballastless track profile of Shanghai-Hangzhou High-speed Railway pile-slab structure subgrade

模型沿线路方向长 120 m,CRTS II 型板式无砟轨道模型及网格划分示意图如图 2 所示。梁单元类型为 B31,板单元类型为 S4R,实体单元类型为 C3D8R。首先,考虑各层结构的重力作用进行路堤本体的地应力平衡,再将路基变形作为变形荷载施加在承载板上,以计算路基变形对路基上无砟轨道结构受力和变形的影响。

1.2 模型参数

文献[7-9]的研究结果表明,高铁路基水平变形情况多为余弦型,此外还包括错台型和折角型。本文针对余弦型路基变形情况,开展高铁路基水平变形传递规律和控制指标研究。

目前,高铁一般采用 60 kg/m 钢轨,钢轨母材为

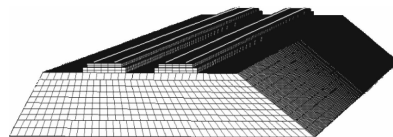


图 2 CRTS II 型板式无砟轨道模型及网格划分示意图

Fig. 2 Diagram of CRTS II type slab ballastless track model and mesh division

U71Mn(k),屈服强度为 457 MPa。钢轨选用梁单元进行模拟,密度取为 7 800 kg/m³,弹性模量取为 210 GPa,泊松比取为 0.3。支承层采用钢筋混凝土结构,混凝土强度等级为 C15,轨道板混凝土强度等级为 C50。高铁路基 CRTS II 型板式无砟轨道静力分析模型的主要参数如表 1 所示。

表 1 高速铁路 CRTS II 型板式无砟轨道静力分析模型主要参数

Tab.1 Main parameters of high-speed railway subgrade CRTS II type slab ballastless track static analysis model

结构层	厚度/m	宽度/m	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
轨道板	0.20	2.55	35 500	0.20	2 500
CA 砂浆层	0.03	2.55	200	0.33	2 000
支承层	0.30	3.00	22 500	0.20	2 500
基床表层	0.40	—	180	0.20	2 300
基床底层	2.30	—	45	0.30	2 100
基床以下路堤	0.90	—	30	0.30	1 800

2 路基余弦型水平变形传递规律及控制指标

基于上述有限元模型,在不同波长和幅值的余弦型路基水平变形条件下,计算钢轨不平顺及无砟轨道结构最大拉应力。结合高铁无砟轨道几何尺寸容许偏差管理值和无砟轨道结构拉应力容许值,确定高铁余弦型路基水平变形允许限值。其中:高铁无砟轨道几何尺寸容许偏差管理值以作业验收标准作为控制指标;轨道板拉应力最大值选取偏保守的设计,以 C50 混凝土抗拉强度标准值 2.64 MPa 作为控制指标;支承层的拉应力最大值以 C15 混凝土抗拉强度标准值 1.27 MPa 作为控制指标。

2.1 变形传递规律

为全面研究不同波长和幅值的余弦型路基水平变形对 CRTS II 型板式无砟轨道的影响,所设置的计算参数如表 2 所示。

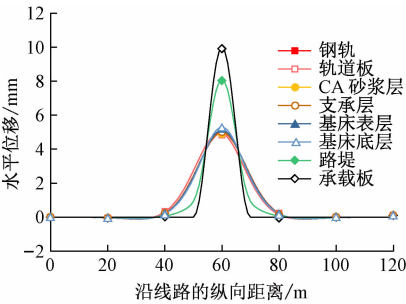
表 2 余弦型路基水平变形模型计算参数

Tab.2 Calculation parameters of cosine-shaped subgrade horizontal deformation model

水平变形波长/m	水平变形幅值/mm
20	5、7、10、20、30
30	5、7、10、20、30
40	5、7、10、20、30
60	5、10、20、30、50
100	10、20、30、50、80

以水平变形波长为 20 m、水平变形幅值为 10 mm 的计算工况为例进行分析。计算工况下,各结构沿线路纵向的水平变形曲线如图 3 所示。由图 3

可知:各结构层的变形曲线形状与余弦型曲线非常接近;钢轨、轨道板、CA 砂浆层、支承层等无砟轨道结构同基床表层及底层的水平变形曲线较为接近。计算工况下,各结构层的最大水平变形如表 3 所示。除了基床以下路堤、承载板部分,其他各结构层的水平变形最大值约为 5 mm,这是由于轨道结构各层连接作用强,且无砟轨道结构与基床表层存在黏结作用。水平变形在基床以下路堤部分变形更显著。



注:水平位移以水平向右为正,以水平向左为负。

图 3 计算工况下各结构沿线路纵向的水平变形曲线
Fig. 3 Horizontal deformation curves of each structure along route longitudinal direction under calculation working conditions

表 3 计算工况下各结构层的最大水平变形

Tab.3 Maximum horizontal deformation of each structural layer under calculation working conditions

结构层	最大水平变形/mm
钢轨	4.97
轨道板	4.97
砂浆层	5.00
支撑层	5.02
基床表层	5.12
基床底层	5.29
基床以下路堤	8.10
承载板	10.00

计算工况下的无砟轨道结构应力云图如图 4 所示。轨道板和支承层均在水平变形外凸处侧表面受拉,在水平变形内凹处侧表面受压,轨道板最大拉应力为 2.40 MPa,支承层最大拉应力为 3.14 MPa。根据 4 根钢轨的变形计算结果,可以得到轨道不平顺容差变化情况。计算工况下,轨道 1 和轨道 2 的轨向不平顺、轨距不平顺、高低不平顺及水平不平顺变化情况如图 5 所示。路基余弦型水平变形对轨道轨向不平顺造成的影响最大,最大轨向不平顺为 0.82 mm。由于轨道结构发生微量旋转,钢轨

的最大水平不平顺也达到了 0.28 mm。其余两项不平顺指标受路基余弦型水平变形影响很小,均在 0.03 mm 以下。由此可见,路基余弦型水平变形对

轨道轨向不平顺影响较大,对轨道水平不平顺影响次之,对轨距及高低不平顺的影响可忽略,故下面仅对轨向不平顺进行研究。

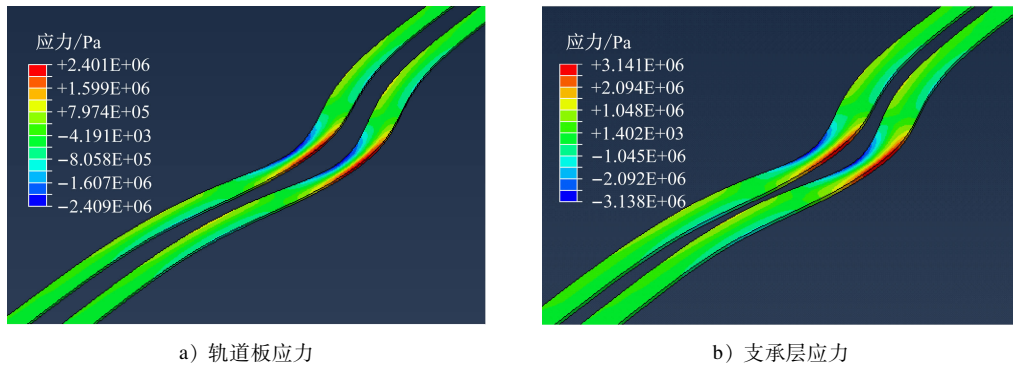


图 4 计算工况下的无砟轨道结构应力云图

Fig. 4 Ballastless track structure stress under calculation working conditions

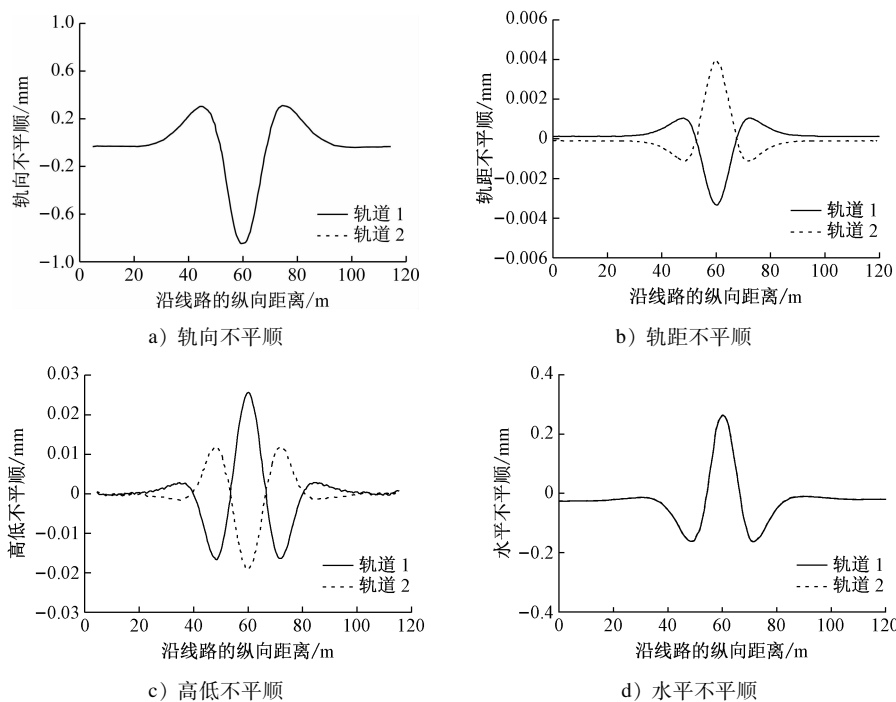


图 5 计算工况下轨道 1 和轨道 2 的轨向不平顺、轨距不平顺、高低不平顺及水平不平顺变化情况

Fig. 5 Variation of track, gauge, height and horizontal irregularities of Track 1 and Track 2 under calculation working conditions

2.2 路基余弦型水平变形限值研究

各水平变形波长 l 下,轨道轨向不平顺最大值随水平变形幅值的变化情况如图 6 所示。各水平变形波长下,无砟轨道支承层和轨道板最大拉应力随水平变形幅值的变化情况如图 7 所示。由图 6 和图 7 可知:在水平变形波长一定时,轨道轨向不平顺最大值、无砟轨道支承层及轨道板拉应力最大值均与水平变形幅值呈线性关系。

当水平变形幅值为 20 mm 时,钢轨水平变形、

轨向不平顺、轨道结构拉应力随水平变形波长的变化情况如图 8 所示。随着路基水平变形波长的增大,变形处基床表层和支承层的黏结面积有所增大,基床表层为轨道结构提供了更多的黏结力,进而导致轨道结构的水平变形有所增大。轨向不平顺、轨道板及支承层拉应力随着水平变形波长先增大后减小。这种现象是受到两方面因素综合影响导致的,一方面随着水平变形波长的增大,轨道结构水平变形最大值有所增大,另一方面当水平变形

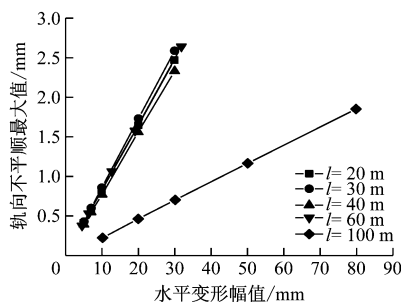


图6 各水平变形波长下轨道轨向不平顺最大值随水平变形幅值变化情况

Fig. 6 Track irregularity maximum value changing with horizontal deformation amplitude under different horizontal deformation wavelengths

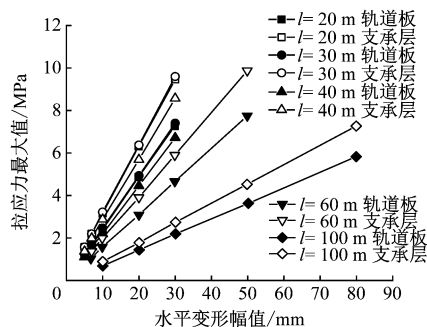
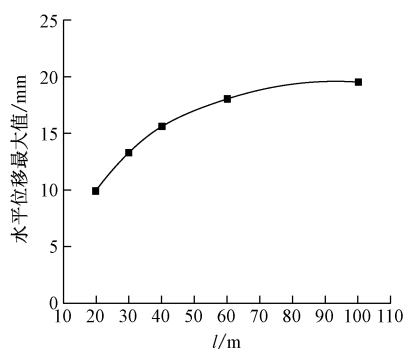
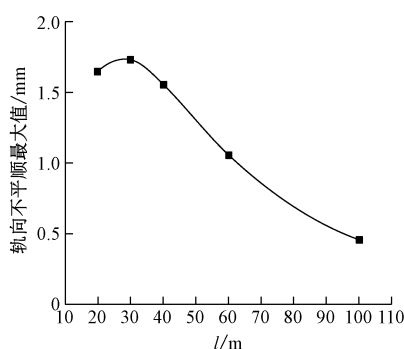


图7 各水平变形波长下无砟轨道支承层和轨道板最大拉应力随水平变形幅值变化情况

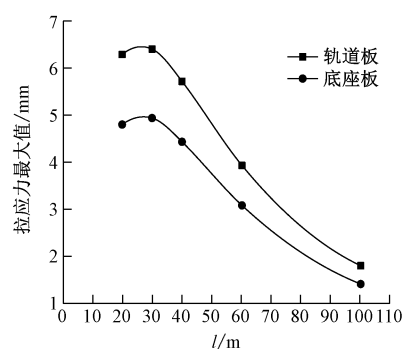
Fig. 7 Ballastless track supporting layer and track slab maximum tensile stress changing with horizontal deformation amplitude under different horizontal deformation wavelengths



a) 轨道水平变形最大值



b) 轨向不平顺最大值



c) 结构拉应力

图8 钢轨水平变形、轨向不平顺及轨道结构拉应力随水平变形波长的变化情况(水平变形幅值为20 mm)

Fig. 8 Rail horizontal deformation, track irregularity and track structure tensile stress changing with horizontal deformation wavelengths (horizontal deformation amplitude as 20 mm)

幅值一定时,水平变形波长的增大也会导致水平变形曲率的减小,而轨道结构的变形曲率直接影响着轨道轨向不平顺和结构受力情况。

根据铁运[2012]83号《高铁无砟轨道线路维修规则(试行)》,作业验收时的线路轨道静态几何尺寸容许偏差管理值——轨向不平顺为2 mm,以及支承层的拉应力最大值应小于C15混凝土抗拉强度标准值1.27 MPa,确定不同水平变形波长下的路基余弦型水平变形幅值限值,如表4所示。结合图6和图7可知:当水平变形幅值小于表4中的限值时,钢轨的轨向不平顺最大值均小于2 mm,轨道板拉应力最大值均未超过C50混凝土抗拉强度标准值。

利用二次多项式进行拟合,路基余弦型水平变形幅值限值 h_{\max} (单位mm)与波长 l (单位m)的关系式可以表示为:

$$h_{\max} = 0.0017l^2 - 0.0785l + 5.0088$$

表4 不同水平变形波长下的路基余弦型水平变形幅值限值

Tab. 4 Limit values of subgrade cosine-shaped horizontal deformation amplitudes under different horizontal deformation wavelengths

水平变形波长/m	变形幅值限值/mm
20	4.2
30	4.1
40	4.5
60	6.5
100	14.1

3 结论

1) 钢轨、轨道板、CA砂浆层、支承层等无砟轨道结构的水平变形对高速铁路路基余弦型水平变形存在显著的响应特征。当水平变形较大时,支承层和基床表层之间会发生离缝;当支承层和基床表层未发生离缝时,钢轨不平顺最大值、无砟轨道支承层

及轨道板拉应力最大值同路基变形量呈线性关系。

2) 当波长为 20 m、水平变形幅值为 10 mm 时,路基余弦型水平变形对轨道轨向不平顺造成的影响最大,对轨道水平不平顺的影响次之,对轨距及高低不平顺的影响可以忽略。

3) 当水平变形幅值为 20 mm 时,钢轨水平变形最大值随着水平变形波长的增大而增大;随着水平变形波长的增大,轨向不平顺、轨道板及支承层拉应力呈先增大后减小的变化趋势。

4) 获得了不同水平变形波长下的路基余弦型水平变形幅值限值,水平变形幅值限值随着水平变形波长的增大而增大,二者满足二次函数关系式。此关系式可作为高速铁路路基余弦型水平变形的控制准则,在一定程度上补充了高铁 CRTS II 型板式无砟轨道线路路基变形控制指标的研究,并为高速铁路其他形式变形控制指标的确定提供了参考方法。

参考文献

- [1] LIN Z, NIU F, LI X, et al. Characteristics and controlling factors of frost heave in high-speed railway subgrade, Northwest China [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153: 33.
- [2] 张炳楠. 地下煤矿开采对高速公路路基路面变形影响研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
ZHANG Bingnan. Underground coal mining on highway subgrade road surface deformation impact study [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [3] YE G, CAI Y, ZHANG Z. Numerical study on load transfer effect of stiffened deep mixed column-supported embankment over soft soil [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(3): 703.
- [4] 王作洲. 基于轨道板抗弯疲劳强度的高速铁路基不均匀沉降控制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
WANG Zuozhou. Uneven settlement control of subgrade based on bending fatigue strength of slab in high-speed railway [D]. Hang-

zhou: Zhejiang University, 2012.

- [5] 徐庆元, 范浩, 李斌, 等. CRTS-II 型板式无砟轨道线路路基不均匀沉降限值研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2013, 44(12): 5038.
XU Qingyuan, FAN Hao, LI Bin, et al. Limited value for uneven settlement of subgrade under CRTS-II type slab track [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(12): 5038.
- [6] 韦强文. 时速 400 公里高速铁路无砟轨道设计荷载及基础沉降限值研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
WEI Qiangwen. Study on design loads and subgrade settlement limits of ballastless track for 400 km/h high-speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [7] 魏婷. 盾构施工对高速铁路安全的影响研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
WEI Ting. Study of high-speed railway safety influence by the shield construction [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.
- [8] 方浩. 软土地区基坑开挖对邻近高速铁路基变形影响及保护距离研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
FANG Hao. Study on the influence of excavation on deformation of adjacent high-speed railway subgrade in soft soil area and the protection distance [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [9] 赵伟. 新建路基对临近高速铁路基变形的影响因素辨识及控制 [D]. 上海: 同济大学, 2019.
ZHAO Wei. Identification and control of influencing factors of new subgrade on deformation of adjacent high-speed railway subgrade [D]. Shanghai: Tongji University, 2019.

· 收稿日期:2022-01-18 修回日期:2022-03-23 出版日期:2024-07-10
Received:2022-01-18 Revised:2022-03-23 Published:2024-07-10
· 第一作者:殷威,高级工程师,258156480@qq.com
通信作者:倪婉昱,硕士研究生,846197751@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 174 页)

- CHEN Qihui, LIU Yanlei, HAN Jianyong, et al. Construction mechanics response of the excavated foundation pit above the excavated station [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2021, 36(4): 1.
- [8] 王占生, 潘皇宋, 庄群虎, 等. 基坑围护 SMW 工法桩施工对下卧盾构隧道变形影响分析 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 53.
WANG Zhansheng, PAN Huangsong, ZHUANG Qunhu, et al. Analysis on the influence of SMW pile construction on the deforma-

tion of underlying shield tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 53.

· 收稿日期:2022-02-11 修回日期:2022-03-14 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-11 Revised:2022-03-14 Published:2024-07-10
· 第一作者:张志伟,高级工程师,zhangzhiwei@163.com
通信作者:王海涛,教授,whtdjtu@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license