

市域快线双块式轨枕结构参数优化研究*

吴嘉¹ 冯青松² 马晓川² 尹华拓¹ 磨玉琼³ 孙魁²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510220, 广州; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 330013, 南昌;

3. 广西三维铁路轨道制造有限公司, 530409, 南宁//第一作者, 正高级工程师)

摘要 相较城市轨道交通线路,市域快线的设计要求更高,采用双块式轨道结构可以进一步提高其安全性、平稳性和舒适性。针对广州某市域快线的技术特点和运营需求,设计了该线路双块式轨枕结构方案;并以降低混凝土温度收缩应力为原则,确定了较为合理的双块式轨枕倒圆角半径取值。建立堆放状态下的双块式轨枕结构力学分析模型,研究钢筋桁架参数对轨枕堆放力学性能的影响规律;并以钢筋等效应力和钢筋用量综合较小为优化目标,提出了较为合理的双块式轨枕钢筋桁架结构参数。

关键词 市域快线;双块式轨枕;结构参数

中图分类号 U213.3^{*4}

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.018

Structure Parameters Optimization of Urban Rapid Rail Bi-block Sleeper

WU Jia, FENG Qingsong, MA Xiaochuan, YIN Huatuo, MO Yuqiong, SUN Kui

Abstract Compared with the urban rail transit lines, the design requirements for urban rapid rail are higher, but the Bi-block track structure can further improve the safety, stability and comfort of rail transit lines. According to the technical characteristics and operational requirements of a Guangzhou urban rapid rail line, the scheme of Bi-block track sleeper structure for Guangzhou urban rapid rail is designed with the reduction of temperature shrinkage stress of concrete as the principle, and the reasonable round radius value of Bi-block track is determined. Then, a mechanical analysis model of Bi-block sleeper under stacking state is established, and the influence law of reinforced concrete truss parameters on the mechanical properties of sleeper stack is studied. Finally, taking the relatively small equivalent stress of reinforcement and the amount of steel bars as the optimization target, reasonable structure parameters of the Bi-block sleeper reinforced truss are proposed.

Key words urban rapid rail; bi-block sleeper; structure parameter

Fist-author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510220, Guangzhou, China

双块式无砟轨道结构被广泛应用于国内外高速铁路中。针对双块式无砟轨道,国内学者对其进行了较多的理论和试验研究。文献[1]基于芯样实测方法对双块式轨枕结构的强度指标进行了修正。文献[2]介绍了 CRTS II 双块式轨枕制造技术的工艺流程和技术优点。文献[3]针对铁路双块式轨枕在设计、制造等环节中存在的问题,从定性的角度提出了一些结构优化设计建议。文献[4]提出了客运专线双块式轨枕堆放受力的简化计算方法。文献[5]对客运专线双块式轨枕的堆放受力进行了分析和检算。文献[6]介绍了铁路客运专线双块式轨枕钢筋桁架的制造工艺和流程。文献[7-8]对大温差地区以及干旱风沙地区双块式无砟轨道结构进行了优化设计。文献[9]测试了客货共线双块式无砟轨道结构的振动响应。文献[10]分析了列车荷载、温度荷载,以及桥梁挠曲变形等对轨道结构受力的影响规律。相较高速铁路,市域快线的平稳性、舒适性等运营条件都不尽相同。因此,有必要平衡双块式轨枕结构的服役性能与产品生产成本间的关系,从而对市域快线双块式轨道结构进行优化设计。

1 双块式轨枕倒圆角尺寸

广州某市域快线的轨道结构采用 SFC 错列式扣件。根据该扣件的尺寸,预留一定的行走空间,且在轨枕上表面设置 1:40 的轨底坡。设计的双块式轨枕结构,如图 1 所示。为了防止和减少双块式轨枕与混凝土道床浇筑后裂纹的产生以及进一步发展,需对混凝土轨枕块进行倒角处理。目前,工

* 国家自然科学基金项目(51878277);江西省自然科学基金项目(20192BAB216035);江西省教育厅科研项目(GJJ200640)

程中常用的倒角方式为倒圆角。在既有设计的基础上,通过比选分析得出较优的倒角方案。

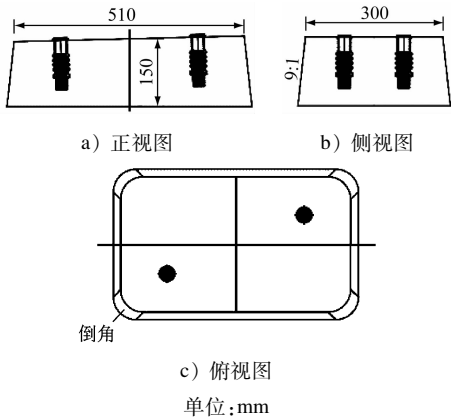


图 1 双块式轨枕结构方案

Fig. 1 Structural scheme of double block sleeper

1.1 双块式轨枕-轨道板整体计算模型

为分析温度荷载作用下轨枕混凝土的收缩应力和变形(间接反映浇筑后新、旧混凝土的开裂可能性),采用有限元方法,建立双块式轨枕-轨道板的整体计算模型,如图 2 所示。

该模型中,双块式轨枕与轨道板接触界面的节点,采用直接耦合的方式进行处理,以模拟两者的相互握裹作用。轨枕采用 C60 混凝土,道床采用

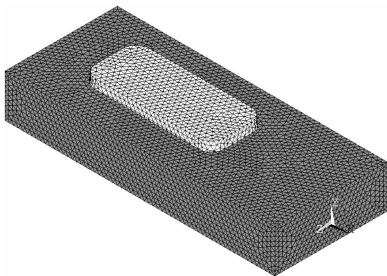


图 2 双块式轨枕-轨道板整体计算模型

Fig. 2 Integral calculation model of double block sleeper track slab

C40 混凝土。轨枕和道床混凝土材料的弹性模量分别为 3.6×10^4 MPa 和 3.25×10^4 MPa,泊松比均为 0.2,材料热膨胀系数均为 1×10^{-5} 。

1.2 不同倒圆角半径对双块式轨枕收缩应力的影响

采用单因子变量法,分析倒直角及倒圆角半径对混凝土轨枕块的受力与变形影响。倒圆角半径分别取 30 mm、40 mm、50 mm、60 mm 和 70 mm,保持模型的其他参数不变,分析轨枕块倒角方式对降温 5℃ 时双块式轨枕收缩应力的影响。主要计算结果如图 3 所示。

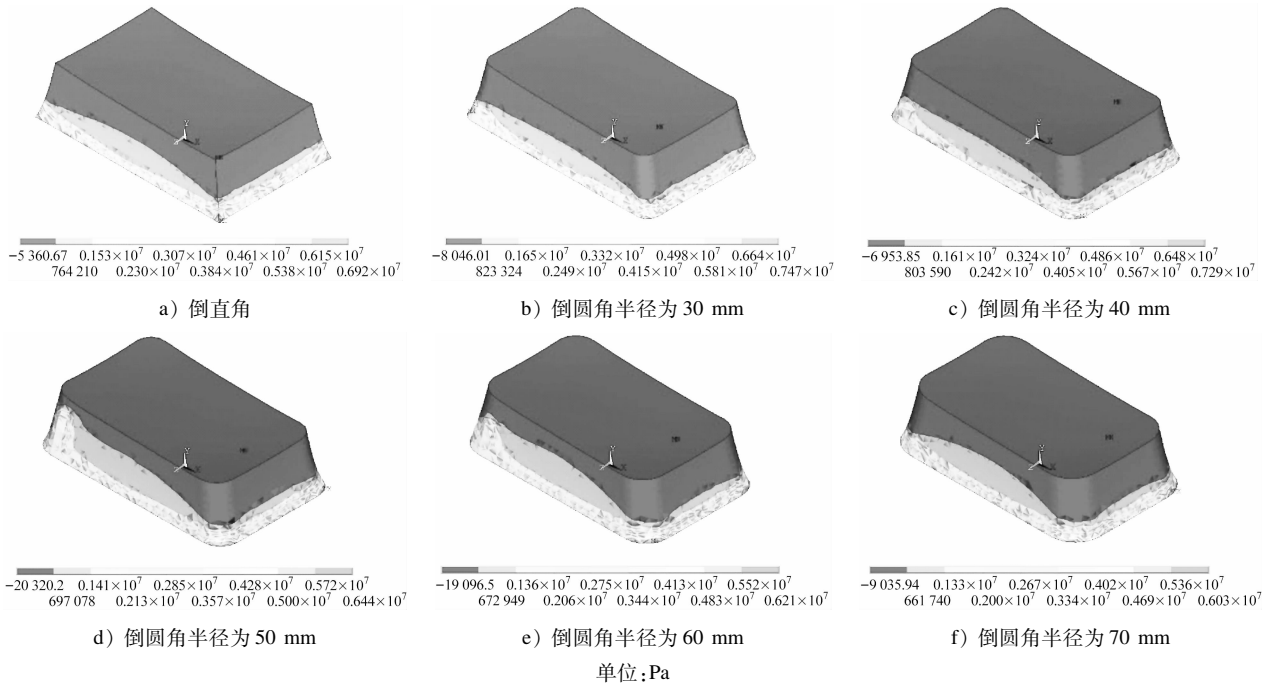


图 3 不同倒角下双块式轨枕混凝土收缩应力云图

Fig. 3 Shrinkage stress cloud diagram with different chamfer of double block sleeper concrete

倒圆角半径对轨枕收缩应力的影响规律,以及 相比倒直角工况轨枕收缩应力的降低幅度规律,如

图 4 所示。由图 4 可见,随着倒圆角半径的增大,轨枕块收缩应力并非呈线性变化趋势,而是先缓慢减小、后骤然减小、再缓慢减小。当倒圆角半径为 50 mm 时,混凝土收缩应力的降低幅度最大。考虑到增大轨枕倒圆角半径会减小其承载面积,为避免这种不利影响,结合倒圆角半径对降低轨枕收缩应力的影响规律,倒圆角半径取 50 mm 时较为合理。

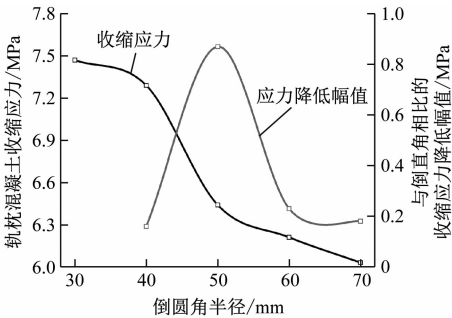


图 4 双块式轨枕倒圆角半径-混凝土收缩应力关系曲线
Fig. 4 Relationship curve between fillet radius and concrete shrinkage stress of double block sleeper

2 钢筋桁架参数对双块式轨枕力学性能的影响分析

2.1 计算模型

双块式轨枕是一种工厂内预制的钢筋混凝土结构,其不可避免地存在吊装、堆放、运输等环节。其中,轨枕多层堆放时,底层的钢筋桁架要承担多层轨枕的自重作用,导致双块式轨枕的受力状态最为不利^[8]。本文采用有限元分析方法,建立了市域快线双块式轨枕在堆放状态下的力学性能分析模型(半模型),如图 5 所示。

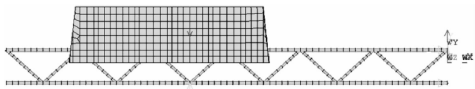


图 5 双块式轨枕堆放受力分析有限元模型
Fig. 5 Finite element model for stress analysis of double block sleeper stacking

将底层钢筋桁架的自重以及堆放于其上的 5 层轨枕的质量之和作为荷载条件,施加在轨枕上表面堆放的位置;约束堆放点的竖向位移,本文将靠近轨枕中心的下主筋波谷位置作为堆放点;将半模型最右侧的钢筋节点约束横向位移。我国客运专线 SK-1 型双块式轨枕钢筋桁架的结构参数为:上主筋直径 12 mm,下主筋直径 10 mm,连接筋直径 7

mm,连接筋波长 200 mm,桁架高度 89 mm,下主筋间距 70 mm。采用该参数进行计算,得到市域快线轨枕结构中钢筋的等效应力分布,如图 6 所示。

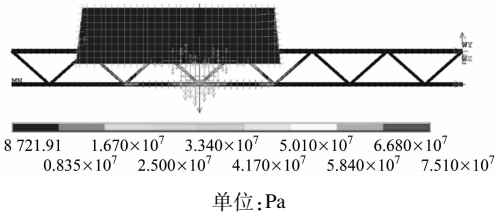


图 6 双块式轨枕钢筋桁架等效应力云图
Fig. 6 Cloud diagram of equivalent stress for double block sleeper reinforcement truss

由图 6 可见,钢筋最大等效应力为 75.1 MPa,且该值出现在连接筋与混凝土轨枕交界处。该结论与文献[7-8]的结论相同,证明了模型的正确性。

2.2 钢筋桁架参数对其最大等效应力的影响

双块式轨枕中钢筋桁架的主要结构参数有:上主筋直径,下主筋直径,连接筋直径,连接筋波长,桁架高度,下主筋间距等。其中,为不增加桁架钢筋的电磁感应投影面积,应保持钢筋桁架高度和下主筋间距不变^[6]。

采用单因子变量法,分析钢筋桁架的上主筋直径、下主筋直径、连接筋直径和连接筋波长对双块式轨枕在堆放状态下的力学性能影响。目前,双块式轨枕的钢筋桁架均采用机器进行全自动生产,其制造精度要优于人工焊接。采用机器加工的钢筋桁架参数的可调整范围如表 1 所示。

表 1 钢筋桁架参数的可调整范围
Tab. 1 Adjustable range of reinforcement truss parameters

参数	常用值/mm	调整范围/mm
上主筋直径	12	8 ~ 14
下主筋直径	10	8 ~ 14
连接筋直径	7	5.5 ~ 8
连接筋波长	170/200/220	170 ~ 220

分别计算上主筋直径、下主筋直径、连接筋直径和连接筋波长对钢筋桁架最大等效应力的影响,如图 7 所示。

由图 7 a) 可见,在轨枕堆放状态下,桁架钢筋最大等效应力随着上主筋直径增大而呈现小幅增加趋势,且上主筋直径对轨枕堆放状态下钢筋最大等效应力的影响非常小,可忽略不计。由图 7 b) 可

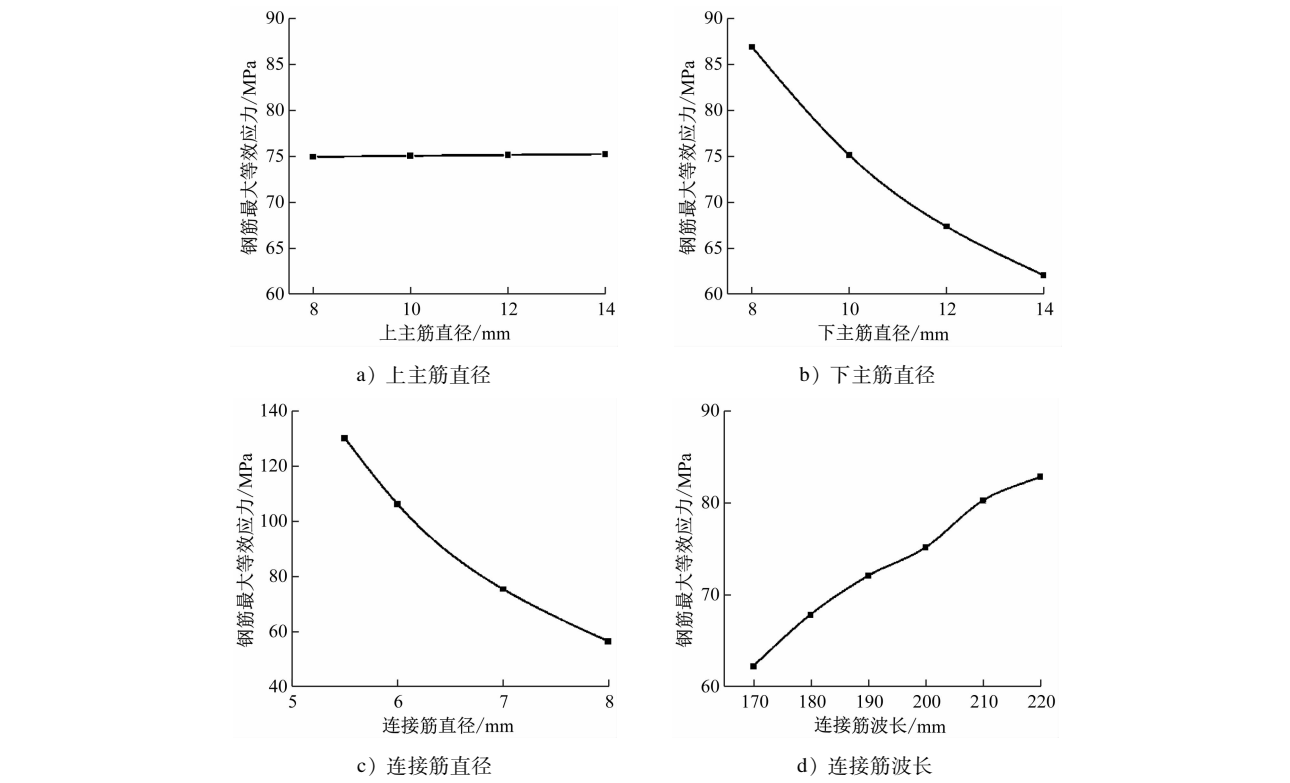


图 7 钢筋桁架参数对钢筋最大等效应力的影响

Fig. 7 Influence of reinforcement truss parameters on maximum equivalent stress

见,桁架钢筋最大等效应力随着下主筋直径增大而逐渐减小,且减小趋势逐渐放缓,由此说明下主筋直径对于轨枕堆放状态下的钢筋最大等效应力而言是敏感参数之一。由图 7 c)可见,桁架钢筋最大等效应力随着连接筋直径增加而快速减小,且减大幅度渐趋稳定;相对于下主筋直径而言,连接筋直径对双块式轨枕桁架钢筋的受力更加敏感。由图 7 d)可见,桁架钢筋最大等效应力随着连接筋波长的

增大而逐渐增大,说明连接筋波长对于堆放状态时的钢筋最大等效应力而言也是敏感参数之一。

此外,连接筋波长的取值影响混凝土轨枕与钢筋桁架的位置。为保证混凝土轨枕模具的制造和精确定位,原则上要求连接筋不得从侧面穿过轨枕模具。不同连接筋波长条件下双块式轨枕与钢筋桁架间的位置关系,如图 8 所示。

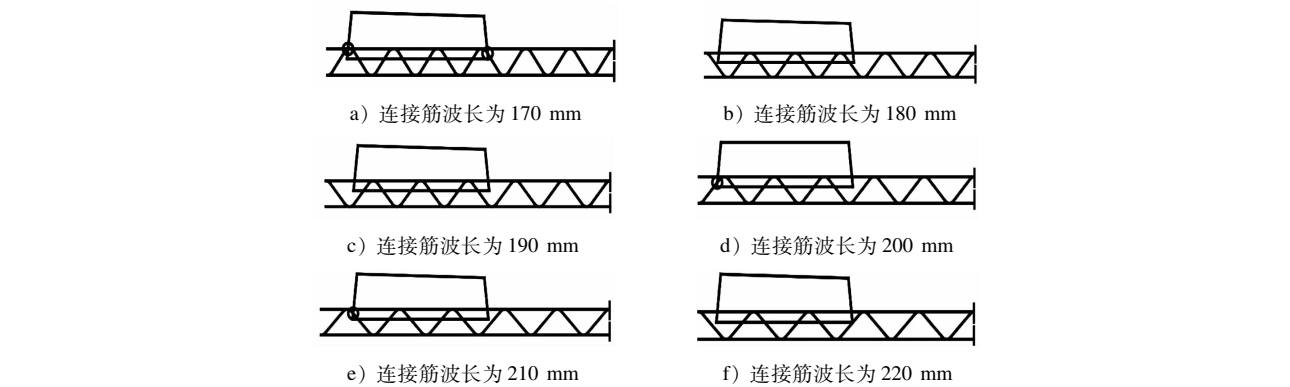


图 8 双块式轨枕与钢筋桁架的相对位置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of relative position between double block sleeper and reinforcement truss

由图 8 可见,仅当连接筋波长为 180 mm、190 mm 和 220 mm 时能够满足钢筋与混凝土轨枕块的

相对位置关系。

3 钢筋桁架参数组合模拟试验

将下主筋直径(8 mm、10 mm、12 mm、14 mm)、连接筋直径(5.5 mm、6.0 mm、7.0 mm、8.0 mm)和连接筋波长(180 mm、190 mm、220 mm)等参数取值进行排列组合,并采用本文建立的有限元模型分别进行计算,得到总计 48 组计算结果,如图 9 所示。

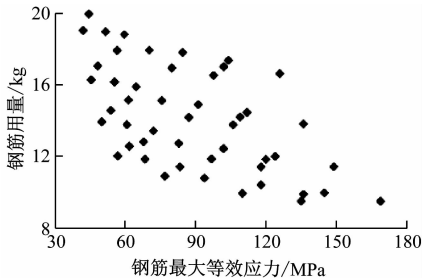


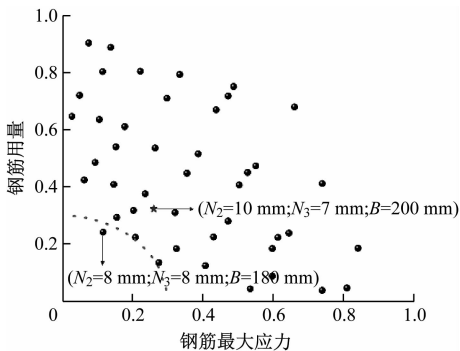
图 9 钢筋桁架参数组合模拟试验原始数据
Fig. 9 Raw data of combined simulation test of reinforced truss parameters

将钢筋桁架结构参数进行优化的目标是:使得钢筋等效应力和钢筋用量综合较小。考虑到图 9 中坐标轴的设置参数可能会对优化结果产生影响,因此本文将原始数据分别进行如下归一化处理:

$$x_G = (x - z)/(y - z) \tag{1}$$

- 式中:
- x_G ——归一化后的数据;
 - x ——原始数据;
 - y ——样本数据的最大值;
 - z ——样本数据的最小值。

通过式(1),得到模拟试验的归一化数据,如图 10 所示。由图 10 可见,虚线圈以内的方案是 48 组数据中的最优方案。该方案的钢筋等效应力和钢



注: N_2 为下主筋直径; N_3 为连接筋直径; B 为连接筋波长; ☆代表铁路方案的位置。
图 10 钢筋桁架参数组合模拟试验归一化数据
Fig. 10 Normalized data of combined simulation test of reinforced truss parameters

筋用量均优于铁路的钢筋桁架方案。两种方案的结构参数和优化效果对比如表 2 所示。

表 2 两种方案的结构参数与优化效果对比
Tab. 2 Comparison of structural parameters and optimization effects between the two schemes

方案	上主筋直径/mm	下主筋直径/mm	连接筋直径/mm	连接筋波长/mm	钢筋最大等效应力/MPa	钢筋用量/kg
国铁方案	12	10	7	200	75.1	12.88
优化方案	12	8	8	180	56.8	12.03

为进一步验证优化方案的可行性,根据上述优化方案的设计参数,在工厂预制双块式轨枕,并对其运输和承载试验(见图 11)。经观察发现,运输和承载后的轨枕波纹筋波峰处焊点完好,无焊点开裂、脱焊等现象,满足双块式轨枕的预制、储存、运输和使用的要求。



a) 运输试验



b) 承载试验

图 11 优化方案下的双块式轨枕试验
Fig. 11 Double block sleeper test under optimized scheme

4 结语

1) 为预防和减少双块式轨枕与混凝土道床浇筑后裂纹的产生与发展,根据降低混凝土温度收缩应力的原则,建议混凝土轨枕进行倒圆角处理,且倒圆角半径取 50 mm。

2) 双块式轨枕堆放状态下,上主筋直径对钢筋桁架的受力影响可忽略不计,下主筋直径、连接筋直径、连接筋波长是影响钢筋应力的敏感参数。以钢筋等效应力和钢筋用量综合较小为优化目标,推

荐下主筋直径8 mm、连接筋直径8 mm、连接筋波长180 mm,作为市域快线双块式轨枕钢筋桁架结构参数方案。此方案下的力学性能和钢筋用量均优于铁路钢筋桁架方案。

3) 通过试验发现,运输和承载后的轨枕波纹筋波峰处焊点完好,无焊点开裂、脱焊等现象,满足双块式轨枕的预制、储存、运输和使用的要求。

参考文献

- [1] 崔国庆. 双块式无砟轨道道床板裂缝控制研究[J]. 铁道标准设计,2010(1):66.
CUI Guoqing. Study on track bed slab track control of double block ballastless track[J]. Railway Standard Design, 2010(1): 66.
- [2] 王仁杰. 高速铁路双块式轨枕横向极限抗力研究[J]. 建筑安全,2019(4):13.
WANG Renjie. Study on lateral ultimate resistance of double block sleepers for high-speed railway[J]. Building Security, 2019(4): 13.
- [3] 王正寿. 高速铁路双块式轨枕制造关键技术研究[J]. 山西建筑,2010(18):252.
WANG Zhengshou. Research on key technologies of high-speed railway double block sleeper manufacturing[J]. Shanxi Architecture, 2010(18): 252.
- [4] 孙立,陈秀方. 双块式无砟轨道轨枕的优化设计研究[J]. 铁道建筑技术,2008(5):1.
SUN Li, CHEN Xiufang. Study on optimal design of double block ballastless track sleeper[J]. Railway Construction Technology, 2008(5): 1.
- [5] 林红松,赵坪锐,刘学毅. 客运专线双块式轨枕堆放受力简化算法[J]. 路基工程,2010(5):36.
LIN Hongsong, ZHAO Pingrui, LIU Xueyi. Simplified calculation method of stacking stress of double block sleepers for passenger dedicated line[J]. Subgrade Engineering, 2010(5): 36.

- [6] 吴军. 双块式轨枕吊装堆放受力分析[J]. 铁道工程学报, 2010(11):43.
WU Jun. Stress analysis of hoisting and stacking of double block sleepers[J]. Journal of Railway Engineering, 2010(11): 43.
- [7] 邵银秀. 铁路客运专线双块式轨枕钢筋桁架制作研究[J]. 工程技术,2008(5):21.
SHAO Yinxu. Research on fabrication of double block sleeper reinforcement truss for passenger dedicated railway[J]. Engineering Technology, 2008(5): 21.
- [8] 杨斌. 大温差地区路基上双块式无砟轨道结构优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
YANG Bin. Study on structural optimization of double block ballastless track on subgrade in large temperature difference area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [9] 褚卫松. 干旱风沙地区高速铁路双块式轨枕设计研究[J]. 铁道标准设计,2014(11):41.
CHU Weisong. Design of double block sleepers for high-speed railway in arid and sandy areas[J]. Railway Standard Design, 2014(11): 41.
- [10] 朱玉明. 客货共线铁路双块式无砟轨道动力响应测试分析[J]. 铁道建筑,2013(7):127.
ZHU Yuming. Dynamic response test and analysis of double block ballastless track of mixed passenger and freight railway[J]. Railway Architecture, 2013(7): 127.
- [11] 高增增. 桥梁地段CRTS I型双块式无砟轨道结构受力分析[J]. 中国铁路,2014(8):71.
GAO Zengzheng. Stress analysis of CRTS I double block ballastless track structure in bridge section[J]. China Railway, 2014(8): 71.

(收稿日期:2019-11-18)

(上接第89页)

径较大时,车辆在钢弹簧浮置板轨道上具有较小的轮轨垂向力。弹性扣件减振轨道上车辆的轮轨安全性指标略小于其他3种减振轨道。

参考文献

- [1] LING L, JIANG P B, WANG K Y, et al. Dynamic interaction between rail vehicles and vibration-attenuating slab tracks[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258:119545.
- [2] LING L, JIANG P B, WANG K Y, et al. Nonlinear stability of rail vehicles traveling on vibration-attenuating slab tracks[J]. ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2020, 15(7):071005.
- [3] 王志强,王安斌,徐宁,等. 地铁轨道道床减振垫减振性能研究

- [J]. 城市轨道交通研究, 2016(7):70.
- WANG Zhiqiang, WANG Anbin, XU Ning, et al. Vibration damping performance of roadbed damping pad applied in Zhengzhou metro[J]. Urban Mass Transit, 2016(7): 70.
- [4] 王金,高志升,张鸿飞,等. 浮置板轨道结构减振性能的落轴试验[J]. 城市轨道交通研究, 2016(10):37.
WANG Jin, GAO Zhisheng, ZHANG Hongfei, et al. Test on vibration reduction performance of different floating slab track structure[J]. Urban Mass Transit, 2016(10): 37.
- [5] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4版. 北京:科学出版社, 2015.
ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupled Dynamics[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.

(收稿日期:2020-10-23)