

文章编号: 1674—8247(2020)03—0022—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.03.005

大跨斜拉桥高速铁路无砟轨道适应性研究

秦 艳

(中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

摘 要:本文基于有限元的方法,建立了斜拉桥上双块式无砟轨道精细化模型,分析了特大桥上无砟轨道在温度及桥梁挠曲变形作用下的适应性,并运用动力学理论分析了其行车动力学响应。分析结果表明:(1)温度荷载下,大跨斜拉桥轨道结构层间铺设土工布比设置弹性垫层受力更为不利,部分区域出现层间离缝脱空现象;(2)7.9 m与6.4 m板长轨道变形与桥梁变形趋势基本一致,但抗拉工况下7.9 m板比6.4 m板受力更为不利,受力状态亦更加复杂;(3)大跨桥梁挠曲变形对道床板受力影响不大,二者整体变形协调较为一致,在高速行车条件下,脱轨系数和轮重减载率等动力学指标均满足规范要求。研究结果可为大跨斜拉桥上无砟轨道的优化设计与平顺性研究提供参考。

关键词:高速铁路;斜拉桥;理论分析;无砟轨道;适应性
中图分类号:U213.244 **文献标志码:**A

22

Research on Adaptability of Ballastless Track of High-speed Railway with Long-span Stayed-cable Bridge

QIN Yan

(China Railway Shanghai Design Institute Group, Shanghai 200070, China)

Abstract: Based on the finite element method, a refined model of CRTS double-block slab track on cable-stayed bridge is established, and the adaptability of slab track on super large bridge under the action of temperature and deflection deformation of bridge is analyzed, then dynamics response of train is analyzed by using dynamics theory. The results are as follows: (1) Under the temperature load, the stress of laying geotextile between layers of the track structure of long-span cable-stayed bridge is more unfavorable than setting elastic cushion, and the gap between track layers in appeared in some areas. (2) The deformation trend of tracks on 7.9m and 6.4m slabs are basically the same as that on the bridge, but the stress of 7.9 m slab is more unfavorable than that of 6.4m slab under the tensile conditions, the stress state is more complex. (3) The flexure deformation of the large-span bridge has little effect on the stress of the bed slab, and the deformation of the two is consistent. Under the high-speed operation, the dynamic indexes such as derailment coefficient and wheel load reduction rate can meet the requirements in the code. The research results can provide references for the optimal design and smoothness study of ballastless track on long-span cable-stayed bridge.

Key words: high-speed railway; stayed-cable bridge; theoretical analysis; ballastless track; adaptability

无砟轨道结构是我国高速铁路主要的轨道结构类型,具有高平顺性、高稳定性、高可靠性和少维修的特

收稿日期:2020-04-24

作者简介:秦艳(1983-),女,高级工程师。

引文格式:秦艳.大跨斜拉桥高速铁路无砟轨道适应性研究[J].高速铁路技术,2020,11(2):22-27.

QIN Yan. Research on Adaptability of Ballastless Track of High-speed Railway with Long-span Stayed-cable Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 22-27.

点^[1-3],这使得无砟轨道设计速度明显高于有砟轨道。目前我国高速铁路无砟轨道大部分铺设于路基及中小跨度桥梁之上,大跨尤其跨度超过 200 m 以上的桥梁多采用有砟轨道结构。但高速列车行驶中有砟轨道会出现道砟飞溅,道床阻力下降等问题,影响列车正常运行^[4-6]。无砟轨道结构取消了碎石道床,轨道结构保持几何状态的能力较高,轨道稳定性相应增强,维修工作量减少,已成为高速铁路轨道结构的发展方向^[7-8]。我国地形地质条件复杂,为跨越江河、公路等,需修建大量大跨特殊桥梁。高速运营时,梁体变形与轨道高平顺要求相矛盾,无砟轨道结构面临与大跨特殊桥梁结构的协调性难题^[9-11]。

斜拉桥是目前铁路桥梁中跨度最大、结构也最为复杂的一种桥型,近年来在我国高速铁路上逐步开始应用。斜拉桥与无砟轨道组成了一种复杂的多层结构体系,存在钢轨多轨线、多种轨道形式以及轨道板、板梁等结构间复杂的相互作用关系。伴随着高速铁路的发展,无砟轨道与斜拉桥的相互作用更加复杂,研究也需不断深化,开展高速铁路斜拉桥无砟轨道技术的相关研究显得尤为重要。

本文以池黄高速铁路太平湖大桥为研究对象,通过建立无砟轨道-特大斜拉桥空间耦合静力学分析模型,对不同温度荷载、不同层间接触、不同板长工况下桥上双块式无砟轨道进行静力学分析,并运用动力学理论进行动力学分析,研究结果可为大跨度斜拉桥无砟轨道优化设计提供参考。

1 车辆-无砟轨道-桥梁空间一体化耦合模型及参数

1.1 整体耦合模型

新建池州至黄山客运专线设计速度 350 km/h,双线,采用双块式无砟轨道。太平湖特大桥为池黄高速铁路在安徽省境内连接黄山区与池州区的过江通道,大桥主桥为(3×31.5) m 双线简支箱梁+(48+118+2×228+118+48) m 矮塔斜拉桥+(1×31.5) m 双线简支箱梁,主塔为 H 型钢钢筋混凝土塔柱,斜拉索为平行钢丝束。

整体有限元模型由轨道模型和桥梁模型组成,两个模型通过扣件系统实现传力等相互作用。轨道模型包括钢轨结构和扣件结构,桥梁模型从上到下依次为主塔柱、塔柱连接燕尾板、斜拉索、钢轨、梁体、桥墩。

1.2 无砟轨道精细化模型

桥梁地段双块式无砟轨道结构由钢轨、弹性扣件、

双块式轨枕、混凝土道床板、弹性垫层、混凝土底座板(设限位凹槽)等组成,均采用实体单元模拟。双块式无砟轨道底座直接浇筑于桥面上,并与桥面采用预埋套筒植筋连接,两者基本不会发生相对位移,故采用绑定连接。无缝线路-无砟轨道-斜拉桥空间耦合模型如图 1 所示。梁端模型长 85 m,跨中模型长 228 m。

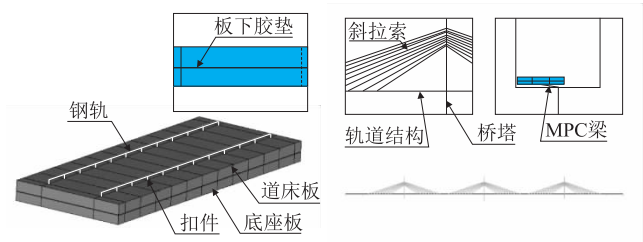


图 1 无缝线路-无砟轨道-斜拉桥空间耦合模型图

扣件考虑纵向、横向和垂向的刚度,将钢轨与轨道板之间的单元节点连接起来,采用线性弹簧单元进行模拟,并考虑扣件垫板的作用,约束扣件端部的转动。扣件间距为 0.6~0.65 m,根据不同板长方案分别设置。

1.3 材料参数

斜拉桥-无砟轨道各结构的材料参数如表 1 所示。

表 1 轨道结构材料参数表^[12-13]

名称	弹性模量 /GPa	线膨胀系数 /(10 ⁻⁵ m/℃)	泊松比	密度 /(kg/m ³)
梁体	36	1.00	0.20	2 600
斜拉索	195	1.20	0.30	8 005
主塔	36	1.00	0.20	2 625
钢轨	205.90	1.18	0.30	7 830
轨枕	36.00	1.00	0.20	2 500
道床板	32.50	1.00	0.20	2 450
底座板	32.50	1.00	0.20	2 500

2 静力学特性分析

2.1 温度荷载影响

温度荷载造成的无砟轨道翘曲变形、温度裂纹等问题逐渐成为影响高速铁路正常运营的关键因素。在复杂温度及极端高低温条件下,无砟轨道易出现上拱离缝、翘曲变形、开裂掉块等问题,直接影响无砟轨道耐久性和可靠性^[14-15]。根据当地的极端气温以及无砟轨道设计规范,选取无砟轨道设计检算温度荷载为:整体最大升温 41.2℃,最大降温 16℃、正温度梯度 95℃/m、负温度梯度 45℃/m。

基于斜拉桥-无砟轨道-无缝线路空间耦合模型,结合当地的气候条件,对整桥结构施加温度荷载,

研究外界温度荷载下无砟轨道与斜拉桥的适应性。温度荷载工况分为:(1)桥梁降温 20℃,斜拉索降温 35℃;(2)桥梁升温 20℃,斜拉索升温 35℃。得到不同温度荷载下桥梁表面的垂向变形曲线如图 2 所示。

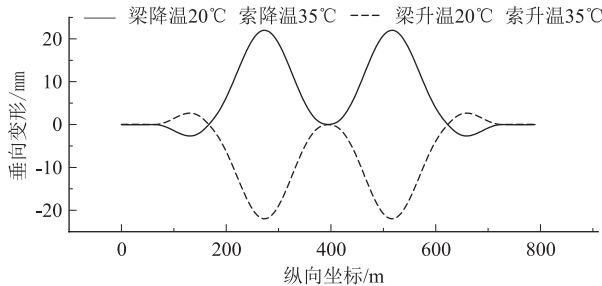


图 2 不同温度荷载下桥梁表面垂向变形曲线图

由图 3 可知,与斜拉桥的桥梁刚度相比,斜拉索与桥梁锚固处的刚度不均匀并不会引起线路的局部不顺。在温度荷载下,228 m 跨处的垂向变形最大,取最不利条件进行分析,对 228 m 跨处桥梁表面施加强制位移,并对轨道结构施加温度梯度荷载,分析温度荷载下斜拉桥上双块式无砟轨道的静力学特性。

2.1.1 层间接触分析

目前双块式无砟轨道主型板长为 6.4 m,因此,本文对特大桥上 228 m 跨处铺设 6.4 m 标准板,结构层间分别采用土工布隔离层和弹性垫层时,无砟轨道在升降温荷载作用下的受力变形进行分析。

(1) 结构层间采用土工布隔离层

道床与底座之间设置聚丙烯土工布隔离层,隔离层厚 4 mm,采用摩擦关系模拟土工布的作用,纵横向摩擦系数取为 0.7。

采用土工布时,常会出现以下几种情况:①升温荷载下,双块式无砟轨道底座板与道床板间会出现层间脱空的现象。两端道床板由于钢轨的拉扯与层间滑移,凸台周围受力较大,且主要承受拉应力,最大纵向拉应力达 7.779 MPa,底座板主要承受压应力,最大纵向压应力为 21.35 MPa。②降温荷载下,底座板与道床板间会出现层间脱空的现象,且板端处离缝较为明显。两端道床板由于钢轨的拉扯与层间滑移,凸台周围受力较大,且主要承受拉应力,最大纵向拉应力达 6.757 MPa,底座板凹槽处最大纵向拉应力为 7.986 MPa。

(2) 结构层间采用弹性垫层

道床与底座间设置弹性垫层,厚 14 mm,弹性垫层接触刚度取 0.1 N/mm³。①升温荷载下,双块式无砟轨道变形与桥梁变形趋势基本一致,二者协调变形,跟

随性较好。跨中道床板受钢轨的拉扯作用,轨枕处受力较为集中,且主要承受拉应力,纵向拉应力最大值为 5.566 MPa。由于道床板和底座板之间存在弹性垫层,底座板所受拉应力较道床板小,底座板主要承受压应力,纵向压应力最大值为 19.59 MPa。②降温荷载下,双块式无砟轨道变形与桥梁变形趋势基本一致,二者协调变形和跟随性均较好。道床板发生四角翘曲变形,凸台上部混凝土受拉作用明显,且跨中区域道床板纵向拉应力最大值达 4.739 MPa。由于道床板和底座板之间存在弹性垫层,底座板的总体受力较道床板小,底座板纵向拉应力最大值为 7.803 MPa。

上述计算结果表明,结构层间采用弹性垫层时,道床及底座的受力状态优于结构层间采用土工布隔离层时。其主要原因在于土工布刚度较大,在垂向上为刚性接触,轨道多层之间协调性与弹性垫层相比较差,在斜拉桥大变形条件下,会加剧两者之间的差异性。因此,本文以下部分内容将主要基于结构层间采用弹性垫层展开分析。

2.1.2 板长影响

考虑太平湖大桥索间距 8 m 的实际设计情况,为匹配索间距,在 6.4 m 标准板基础上,分析 7.9 m 板在温度荷载作用下的受力变形。

当特大桥上 228 m 跨处铺设 7.9 m 板道床结构,结构层间采用弹性垫层时:①在升温荷载下,7.9 m 板双块式无砟轨道变形与桥梁变形规律与 6.4 m 板相同,跨中道床板轨枕处主要承受拉应力,纵向拉应力最大值为 6.752 MPa;底座板主要承受压应力,纵向压应力最大值为 18.94 MPa。②在降温荷载下,7.9 m 板双块式无砟轨道变形与桥梁变形规律也与 6.4 m 板相同,跨中道床板最大纵向拉应力达 5.990 MPa。底座板的总体受力较道床板小,最大纵向拉应力为 7.476 MPa。

升降温荷载作用下,两种板长道床与底座的受力情况对比如表 2 所示。

表 2 两种板长升降温工况受力情况对比表

受力情况	升温荷载		降温荷载	
	7.9 m	6.4 m	7.9 m	6.4 m
道床 $\sigma_{拉}$ /MPa	6.752	5.566	5.990	4.739
底座 $\sigma_{拉}$ /MPa	18.94	19.59	7.476	7.803

由表 2 可知,两种板长无砟轨道变形与桥梁变形趋势均基本一致,无局部不均匀现象,二者跟随性均较好。与 6.4 m 板长相比,7.9 m 板长道床拉应力较大,受力状态亦更加复杂,因此,建议桥上铺设 6.4 m 板长

的双块式无砟轨道。

2.2 桥梁挠曲变形影响

基于斜拉桥-无砟轨道-无缝线路空间耦合模型,考虑 ZK 活载满跨作用桥梁主梁左侧(48.8+118+228) m 范围,ZK 活载加载位置示意如图 3 所示,桥梁垂向位移变形曲线如图 4 所示。

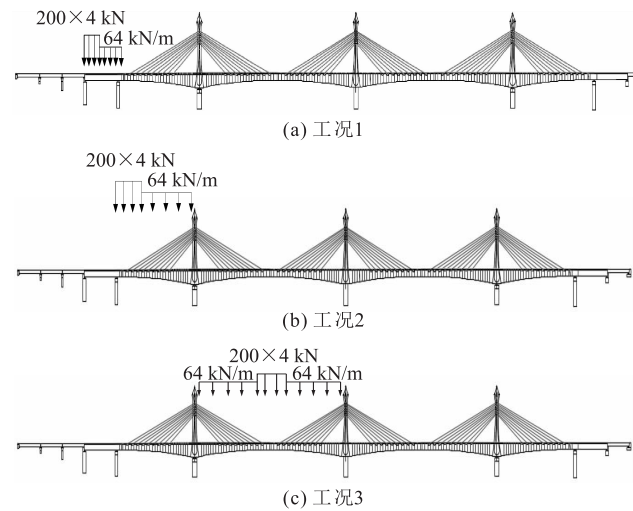


图3 ZK 活载加载位置示意图

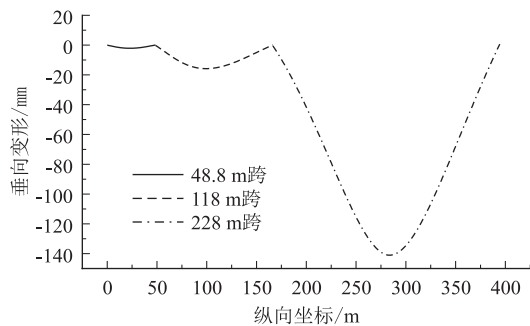


图4 桥梁垂向位移变形曲线图

从图 4 可以看出,挠曲荷载作用下,桥梁主跨产生了较大的垂向变形,其挠曲位移峰值出现在桥梁 284 m 处,为 141 mm。而在加载两侧,梁体因受桥墩的垂向支撑,位移较小,趋近于 0。取最不利条件,对 228 m 跨处桥梁表面施加强制位移,分析桥梁挠曲变形对双块式无砟轨道静力学特性的影响。

分析结果表明:在挠曲荷载下,6.4 m 和 7.9 m 板长的双块式无砟轨道变形与主桥桥梁变形趋势均基本一致,无局部不均匀现象。跨中道床板受钢轨约束作用,轨枕受力较为集中,且主要承受拉应力,7.9 m 板道床纵向拉应力最大值 1.171 MPa,大于 6.4 m 板道床纵向拉应力最大值 1.116 MPa;因道床板和底座板间存在弹性垫层,底座板总体受力小于道床板,7.9 m 板底座板纵向拉应力最大值 0.200 MPa,大于 6.4 m

板底座板纵向拉应力最大值 0.076 MPa。从计算结果可知,6.4 m 板整体受力整体优于 7.9 m 板,但二者均满足相应混凝土等级强度值。

3 动力行车影响

将车辆、无砟轨道、特大斜拉桥看作一个联合动力体系,以轮轨接触为界面,分别建立车辆、轨道-特大斜拉桥梁的运动方程,通过轮轨的几何相容条件和相互作用力平衡条件来联系。将车辆、轨道和桥梁的运动方程联立,得到车辆-轨道-桥梁耦合系统的运动方程:

$$\begin{bmatrix} M_m & 0 \\ 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_m \\ \ddot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_m & 0 \\ 0 & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_m & 0 \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_m \\ x_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_m \\ F_f \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: m f ——车辆模型和轨道-特大斜拉桥模型。

求解式(1)方程组,利用自主开发的动力仿真平台完成不同行车速度下的动力计算,得到不同速度下大跨斜拉桥上无砟轨道动力特性如图 5 所示,车辆行驶特性如表 3 所示。

表3 车辆行驶特性表

车辆行驶特性指标	速度		
	250 km/h	300 km/h	350 km/h
轮轨垂向力/kN	88.88	99.44	108.43
脱轨系数	0.07	0.09	0.09
轮重减载率	0.36	0.46	0.58

由图 5 和表 3 分析可知,随着车速的提高,桥梁垂向加速度在 50~100 Hz 的振动明显衰减。当车辆行驶速度由 250 km/h 增加至 350 km/h 时,轮轨垂向力、脱轨系数和轮重减载率都有明显的增大。但轨道结构和桥梁结构的振动特性指标和车辆行驶特性指标均满足规范要求。

4 结论

本文以斜拉特大桥上无砟轨道系统为研究对象,对复杂条件下的斜拉桥-无砟轨道结构的受力与变形特征、车辆-轨道-斜拉桥系统的动力学行为等进行了研究,主要结论如下:

(1)在不同外界荷载下,桥梁变形曲线均呈现光滑过渡的状态,无砟轨道与桥梁整体适应性较好,未出现线路局部不均匀变形。

(2)温度荷载与主桥变形效应叠加后,道床板与底座板层间铺设土工布比设置弹性垫层受力更为不利,且会出现层间离缝脱空现象。弹性垫层刚度小,协

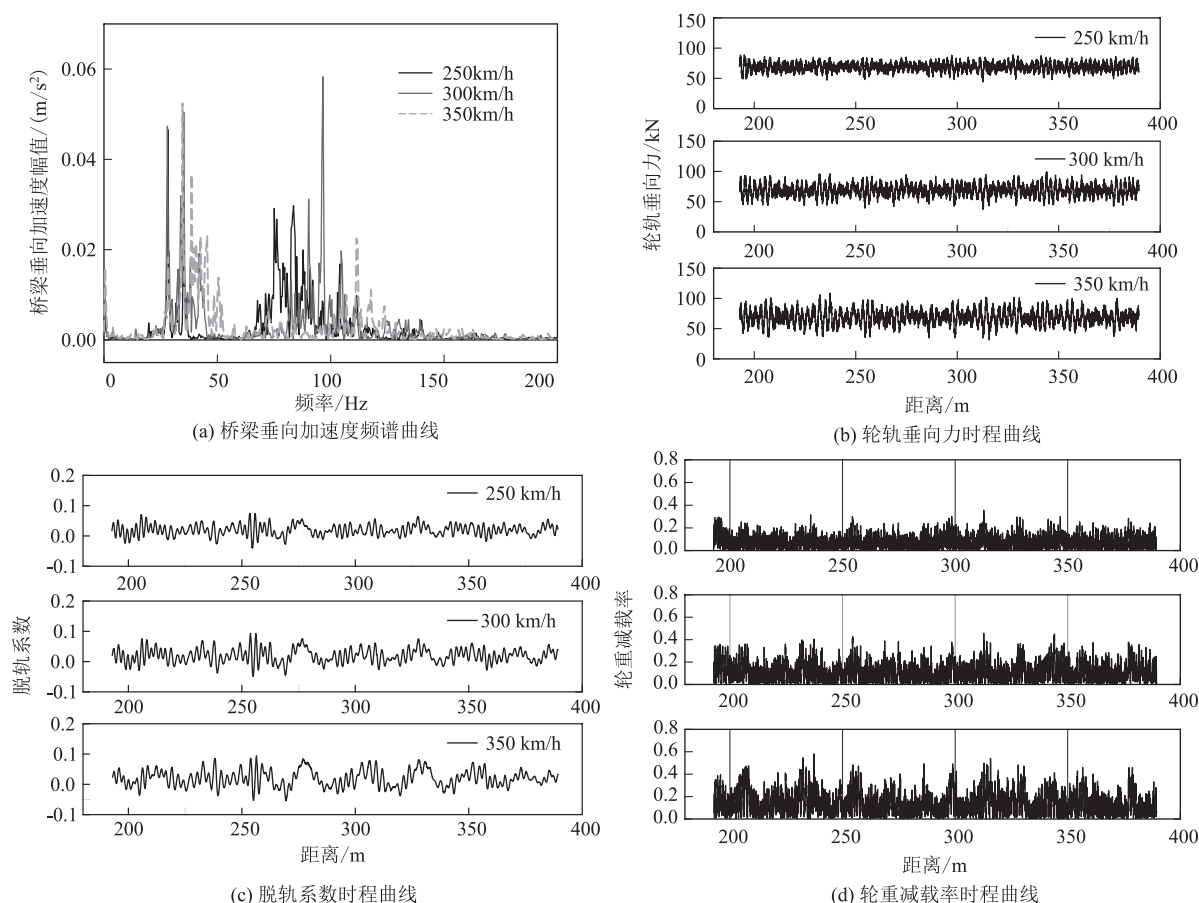


图5 不同速度下大跨斜拉桥上无砟轨道动力特性图

调变形能力好,建议在主桥道床板与底座间设置弹性垫层。

(3)在升温荷载下,道床板主要承受拉应力,底座板在凹槽与板边位置主要承受压应力;在降温荷载下,道床板和底座板在凸台之间区域均承受较大的拉应力。较6.4 m板,7.9 m板在抗拉情况下的受力更为不利,受力状态亦更加复杂。建议桥上铺设6.4 m板长的双块式无砟轨道。

(4)大跨桥梁挠曲变形下,7.9 m道床板轨枕处受拉应力会略大于6.4 m板,但两种板型的无砟轨道受力均未超过相应混凝土等级强度值。

(5)随着车辆行驶速度的增大,轮轨垂向力和轮重减载率也逐渐增大,桥梁结构振动减小。轨道结构和桥梁结构的振动特性指标和车辆行驶特性指标均满足规范要求。

参考文献:

- [1] 辛学忠. 德国铁路无砟轨道技术分析及建议[J]. 铁道标准设计, 2005(2): 1-6.
- XIN Xuezhong. Technical Analysis of Ballastless Track of DB and

Proposals [J]. Railway Standard Design, 2005(2): 1-6.

- [2] LIU Xueyi, ZHAO Pingrui, DAI Feng. Advances in Design Theories of High-speed Railway Ballastless Tracks [J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(3): 154-162.
- [3] BUI Phu Doanh, LUO Qiang, WEI Yongxing, et al. Dynamics Performance of Subgrade-Tunnel Transition on Chongqing-Suining Ballastless Track [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009(3): 223-228.
- [4] 田利民. 客运专线无砟轨道系统设计[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(1): 13-16.
- TIAN Limin. Systematic Design of Ballastless Track on Passenger Dedicated Lines [J]. China Railway Science, 2008, 29(1): 13-16.
- [5] 高宗余. 跨长江黄河的高速铁路大跨度桥梁[J]. 中国工程科学, 2009, 11(1): 17-21.
- GAO Zongyu. Large-span High-speed Railway Bridges across Yangtze River and Yellow River [J]. Engineering Sciences, 2009, 11(1): 17-21.
- [6] HSU W K, SHIH N H, LEE Y L. Railway Continuous Prestressed Concrete Bridge Design in Ballastless Track Turnout Zones [J]. Technologies, 2017, 5(2): 11.
- [7] 朱颖. 大跨桥上纵连板式轨道结构受力分析与试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.

- ZHU Ying. Force Analysis and Experimental Study of Longitudinal Connected Slab Track on Long-span Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [8] 高亮, 辛涛, 肖宏, 等. 高速铁路桥上不同轨枕型式动力特性对比[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 68–72.
- GAO Liang, XIN Tao, XIAO Hong, et al. Comparative Study on Dynamic Characteristics of Different Sleeper Types on Bridge in High Speed Railway [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(1): 68–72.
- [9] 赵坪锐, 杨荣山, 刘学毅. 简支梁桥上连续结合式无砟轨道层间连接设计[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 14–17.
- ZHAO Pingrui, YANG Rongshan, LIU Xueyi. Interlaminar Connection Design of Continuous Combined Ballastless Track on Simply Supported Bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 14–17.
- [10] CHEN Zhaowei, ZHAI Wanming, CAI Chengbiao, 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): 202–210.
- [11] 翟婉明, 蔡成标, 王开云. 高速列车-轨道-桥梁动态相互作用原理及模型[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 132–137.
- ZHAI Wanming, CAI Chengbiao, WANG Kaiyun. Mechanism and Model of High-speed Train-Track-Bridge Dynamic Interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 132–137.
- [12] 蔡成标, 徐鹏. 弹性支承块式无砟轨道结构参数动力学优化设计[J]. 铁道学报, 2011, 33(1): 69–75.
- CAI Chengbiao, XU Peng. Dynamic Optimization Design of the Structural Parameters of Low Vibration Track [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(1): 69–75.
- [13] 李永乐, 夏飞龙, 李龙, 等. 大跨度钢桁梁斜拉桥无砟轨道桥面竖向静力刚度特性[J]. 铁道学报, 2014, 36(12): 79–83.
- LI Yongle, XIA Feilong, LI Long, et al. Vertical Static Stiffness of Ballastless Tracks Laid on Long-span Steel Truss Cable-stayed Bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(12): 79–83.
- [14] 曲村, 高亮, 乔神路. 高速铁路长大桥梁 CRTS I 型板式无砟轨道无缝线路力学特性分析[J]. 铁道标准设计, 2011(4): 12–16.
- QU Cun, GAO Liang, QIAO Shenlu. Mechanical Property Analysis on CRTS I Ballastless Continuously Welded Track on Long Bridge of High-speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2011(4): 12–16.
- [15] 徐浩, 林红松, 代丰, 等. 孟加拉帕德玛大桥无砟轨道结构形式适应性分析[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(4): 30–34.
- XU Hao, LIN Hongsong, DAI Feng, et al. Structural Adaptability Analysis of Ballastless Track on Bangladesh Padma Bridge [J]. High Speed Railway Technodgy, 2018, 9(4): 30–34.

(编辑:刘会娟 白雪)

(上接第21页)

- [10] 卿三惠, 黄润秋. 乌鞘岭特长隧道软弱围岩大变形特性研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(2): 7–14.
- QING Sanhui, HUANG Runqiu. Study on the Large Deformation Characteristics of the Soft Rocks in Wushaoling Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(2): 7–14.
- [11] 江权, 史应恩, 蔡美峰, 等. 深部岩体大变形规律: 金川二矿巷道变形与破坏现场综合观测研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1337–1348.
- JIANG Quan, SHI Ying'en, CAI Meifeng, et al. In-situ Observation on Large Deformation and Failure of Deep Tunnel: Case Study for the Jinchuan No. 2 Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1337–1348.
- [12] 冯雪磊, 马凤山, 赵海军, 等. 深部高地应力碎胀巷道岩体变形破坏与收敛监测分析[C]//2018年全国工程地质学术年会论文集. 西安: 中国地质学会:《工程地质学报》编辑部, 2018: 725–732.
- FENG Xuelei, MA Fengshan, ZHAO Haijun, et al. Analysis of Rock Mass Deformation and Fracture and Convergence Monitoring of Deep Bulking Roadway under High Ground Stress [C]. Proceedings of National Annual Engineering Geology Academic Conference in 2018. Xi'an: Editorial Dedarpmnt of Journal of Engineering Gedogy, Geological Society of China, 2018: 725–732.
- [13] 付雄. 基于收敛-约束原理的地下洞室稳定性分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- FU Xiong. Analysis of Stability in Underground Engineering Based on Convergence-confinement Theory [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [14] 陈建勋, 楚锟, 王天林. 用收敛约束法进行隧道初期支护设计[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2001, 21(2): 57–59.
- CHEN Jianxun, CHU Kun, WANG Tianlin. Design of Initial Support of Tunnel with Convergence Constraint Method [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2001, 21(2): 57–59.
- [15] 唐雄俊. 隧道收敛约束法的理论研究与应[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- TANG Xiongjun. Theoretical Research and Application of Tunnel Convergence Constraint Method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [16] 李占金. 鹤煤五矿深部岩巷变形机理及控制对策研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.
- LI Zhanjin. Study on Deformation Mechanism and Control Strategy for Deep Rock Roadway in the Fifth Coal Mine of HBCG [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2009.
- [17] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Engineering Mechanics of Soft Rock [M]. Beijing: Science press, 2002.

(编辑:刘会娟 白雪)