

文章编号: 1674—8247(2022)05—0020—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2022. 05. 005

## 400 km/h 高速铁路路基地段 CRTSⅢ型板式 无砟轨道静力分析

苏乾坤 何 宁 庞 玲 王育恒 卢 野

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**基于既有的 CRTSⅢ型板式无砟轨道结构设计体系,针对 400 km/h 高速铁路的运营条件,本文建立路基地段 CRTSⅢ型板式无砟轨道的梁体和梁板模型,在列车荷载、温度荷载及基础变形作用下,从静力学角度对 CRTSⅢ型板式无砟轨道进行适应性分析。结果表明:(1)在列车荷载作用下,CRTSⅢ型板式无砟轨道可适应 400 km/h 高速铁路列车动载系数的变化;(2)在列车荷载、温度荷载及基础变形的综合作用下,负温度梯度更不利于轨道部件的垂向变形,较大的基础沉降会引起自密实混凝土层与底座板出现脱空现象,在列车荷载冲击作用下将使自密实混凝土层不断的拍打底座板,应严格控制不均匀沉降的幅值不超限,建议对沉降曲线的曲率变化提出控制标准。

**关键词:**CRTSⅢ型板式无砟轨道;静力学;适应性;变形

中图分类号:U213.2<sup>+</sup>1

文献标志码:A

20

## Static Analysis of CRTSⅢ Slab Ballastless Track for 400 km/h High-speed Railway in Subgrade Section

SU Qiankun HE Ning PANG Ling WANG Yuheng LU Ye

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Based on the existing structural design system of CRTSⅢ slab ballastless track and in view of the operating conditions of 400 km/h high-speed railway, this paper establishes the beam and beam-slab models of CRTSⅢ slab ballastless track in subgrade section, and analyzes the adaptability of CRTSⅢ slab ballastless track from the perspective of statics under the action of train load, temperature load and foundation deformation. The results show that: (1) CRTSⅢ slab ballastless track can adapt to the change of dynamic load coefficient of high-speed railway train with a Speed of 400 km/h under the action of train load. (2) Under the combined action of train load, temperature load and foundation deformation, the negative temperature gradient is more unfavorable to the vertical deformation of track components. The larger scale of foundation settlement will cause cavity between the self-compacting concrete layer and the base plate, so that under the impact of train load, the self-compacting concrete layer will constantly beat the base plate. The amplitude of uneven settlement shall be strictly controlled not to exceed the limit. It is suggested to propose control standards for the curvature change of settlement curve.

**Key words:** CRTSⅢ slab ballastless track; statics; adaptability; deformation

收稿日期:2021-03-01

作者简介:苏乾坤(1992-),男,工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技开发计划(KNSQ202259)

引文格式:苏乾坤,何宁,庞玲,等. 400 km/h 高速铁路路基地段 CRTSⅢ型板式无砟轨道静力分析[J]. 高速铁路技术,2022,13(5):20-24.

SU Qiankun, HE Ning, PANG Ling, et al. Static Analysis of CRTSⅢ Slab Ballastless Track for 400 km/h High-speed Railway in Subgrade Section [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5):20-24.

无砟轨道以其整体性强、耐久性好、平顺性好、维修量少及整洁美观等优势,成为当前高速铁路的主要轨道结构型式,其中我国拥有自主知识产权的 CRTSⅢ型板式无砟轨道近年来被广泛应用,成为现有高速铁路无砟轨道的主流型式<sup>[1-2]</sup>。

目前,我国开通的线路最高设计速度为 350 km/h,已成功投入运营多年,取得了良好的社会评价。但随着生活水平的不断提高和经济的快速发展,提升列车运行速度、缩短旅行地间列车运营时间是高速铁路发展的必由之路,国务院印发的《交通强国建设纲要》也强调要统筹安排 400 km/h 级高速轮轨客运列车系统的技术储备研发。然而,400 km/h 级高速铁路运行速度更高,对 CRTSⅢ型板式无砟轨道结构的稳定性、耐久性及平顺性提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。基

于此,本文将从静力学角度对轨道结构设计提出优化建议。

1 计算模型及参数

CRTSⅢ型板式无砟轨道由钢轨、WJ-8 型扣件、轨道板、自密实混凝土、隔离层、底座构成;基于通用图的轨道结构尺寸<sup>[4]</sup>,采用有限元软件 ANSYS 建立路基地段的 CRTSⅢ型板式无砟轨道模型(梁体和梁板)<sup>[5-7]</sup>。梁体模型中钢轨采用梁单元,扣件和地基基础采用弹簧单元,其余轨道部件采用实体单元。梁板模型中钢轨采用梁单元,扣件、地基基础、自密实混凝土层采用弹簧单元,其余轨道部件采用壳单元。建立 3 块轨道板及相对应长度的底座板,选取中间的轨道板作为研究对象,计算模型如图 1 所示。

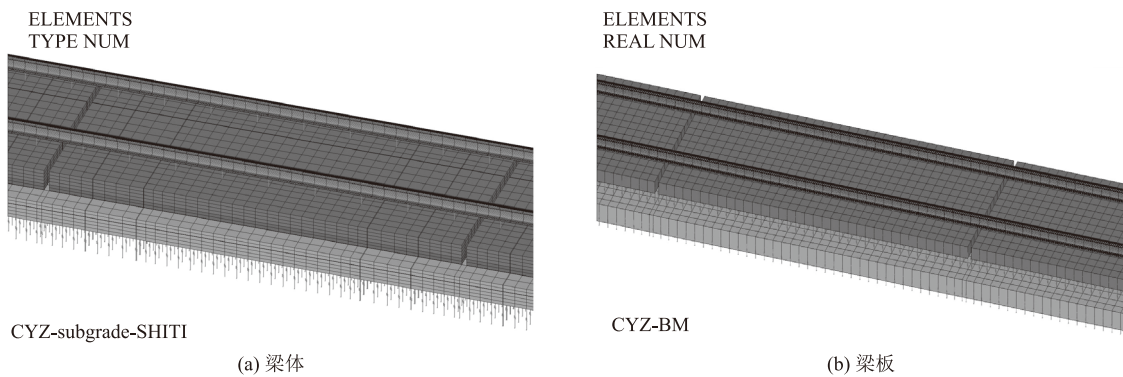


图 1 计算模型示意图

在列车冲击荷载、整体温度荷载、温度梯度和基础变形的作用下,分析路基地段轨道结构变形和内力。模型中相关参数及荷载取值参照客运专线无砟轨道设计理论与方法研究<sup>[8]</sup>和相关规范<sup>[9-10]</sup>取得,CRTSⅢ型板式无砟轨道板缝 70 mm,单元板设有 9 组扣件,扣件间距 0.63 m。列车荷载轴重 17 t,采用单轴双轮方式加载。对于 400 km/h 级高速铁路,本文将动载系数视为变量,依次取 3.0、3.25、3.5、3.75、4.0,对比工况的常用动载系数取 2。现浇自密实混凝土收缩徐变按等效降温 10 ℃考虑,轨道结构最大整体升降温均取为 ± 30 ℃,最大正温度梯度取 90 ℃/m,最大负温度梯度取为 45 ℃/m,常用整体升降温和常用温度梯度取最大值的一半。路基地段基础不均匀沉降取 15 mm/20 m,扣件支点刚度取为 30 kN/mm,路基基础面刚度取 76 MPa/m。模型计算工况如表 1 所示。

2 列车荷载的影响

2.1 变形影响分析

400 km/h 级高速铁路列车荷载冲击作用下,对比

表 1 工况设置表

工况	荷载组成
TL-BZ-1	最大列车动载系数 3.0 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃
TL-BZ-2	最大列车动载系数 3.25 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃
TL-BZ-3	最大列车动载系数 3.5 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃
TL-BZ-4	最大列车动载系数 3.75 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃
TL-BZ-5	最大列车动载系数 4 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃
TL-BF-1	最大列车动载系数 3.0 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃
TL-BF-2	最大列车动载系数 3.25 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃
TL-BF-3	最大列车动载系数 3.5 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃
TL-BF-4	最大列车动载系数 3.75 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃
TL-BF-5	最大列车动载系数 4 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃
ZH-BZ-1	常用动载系数 2 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃ + 整体升温 30 ℃
ZH-BZ-2	常用动载系数 2 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃ + 整体降温 30 ℃
ZH-BZ-3	常用动载系数 2 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃ + 常用正温度梯度 45 ℃/m
ZH-BZ-4	常用动载系数 2 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃ + 常用负温度梯度 22.5 ℃/m
ZH-BZ-5	常用动载系数 2 + 自密实混凝土等效降温 10 ℃ + 地基沉降 15 mm/20 m

分析列车荷载作用在板缝处和作用在板中处对轨道结构的影响,钢轨和轨道板的位移计算结果如表 2 所示。

表 2 列车荷载作用下轨道部件垂向位移表 (mm)

工况	钢轨最大垂向位移	轨道板板面最大垂向位移	扣件压缩量	工况	钢轨最大垂向位移	轨道板板面最大垂向位移	扣件压缩量
TL-BZ-1	4.11	0.92	3.19	TL-BF-1	4.31	1.07	3.24
TL-BZ-2	4.44	0.98	3.46	TL-BF-2	4.65	1.14	3.51
TL-BZ-3	4.77	1.05	3.72	TL-BF-3	4.99	1.21	3.78
TL-BZ-4	5.10	1.12	3.98	TL-BF-4	5.30	1.27	4.03
TL-BZ-5	5.43	1.18	4.25	TL-BF-5	5.66	1.34	4.32

由表 2 可知,同一动载系数条件下(以 TL-BZ-1 工况和 TL-BF-1 为例),受板缝和下部凸台约束的影响,列车荷载作用在板缝处上比作用在板中处引起的钢轨和轨道板垂向位移略大,分别大 0.20 mm、0.16 mm;随着动载系数增加,钢轨和轨道板的位移增加,以 TL-BZ 系列工况为例,动载系数每增加 0.25,引起钢轨和轨道板表面的垂向位移增加分别约为 0.3 mm、0.07 mm,即钢轨与轨道板的垂向位移与动载系数影响比率分别为 0.3 mm/0.25、0.07 mm/0.25。同一动载系数条件下,荷载作用在板中与作用在板缝处,对扣件压缩量的影响变化不大。随着动载系数从 3.0 增加至 4.0,荷载作用在板中时,扣件的压缩量由 3.19 mm 增加至 4.25 mm,增加幅值为 1.06 mm;动载系数对扣件结构的影响较大,建议将扣件结构视为一个独立的结构进行细部分析。

2.2 内力影响分析

列车荷载作用在板中位置钢轨时,轨道板的弯矩随动力系数的变化如图 2 所示。

由图 2 可知,轨道板的最大纵向弯矩的绝对值大于最大横向弯矩的绝对值;随着动载系数的增加,轨道板最大弯矩的绝对值也随着增加,动载系数每增加 0.25,轨道板最大纵向正、负弯矩值分别增加约 0.66 kN·m/m、0.19 kN·m/m,轨道板最大横向正、负弯矩值分别增加约 0.41 kN·m/m、0.14 kN·m/m,

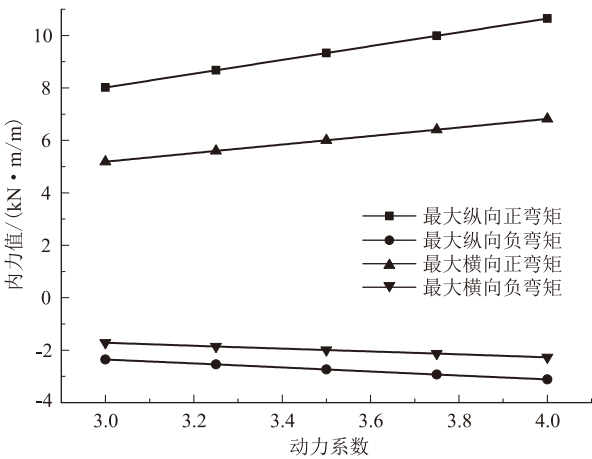


图 2 动载系数对轨道板弯矩影响趋势图

纵、横向弯矩变化率较小。  
单元薄板受温度梯度影响,易产生翘曲力,故分析在列车荷载和温度梯度共同作用下的轨道板内力。在工况 ZH-BZ-3 条件下,轨道板最大纵、横向正弯矩 16.20 kN·m/m、12.52 kN·m/m,纵横向均无负弯矩出现。在工况 ZH-BZ-4 条件下,轨道板最大纵、横向负弯矩 -6.95 kN·m/m、-5.50 kN·m/m,纵向出现最大正弯矩 0.32 kN·m/m,无横向正弯矩出现。

为分析列车作用下轨道结构的薄弱点,提取 TL-BZ-1 工况中自密实混凝土的第一主应力和凸台四周橡胶垫层的 Mises 等效应力,如图 3 所示。

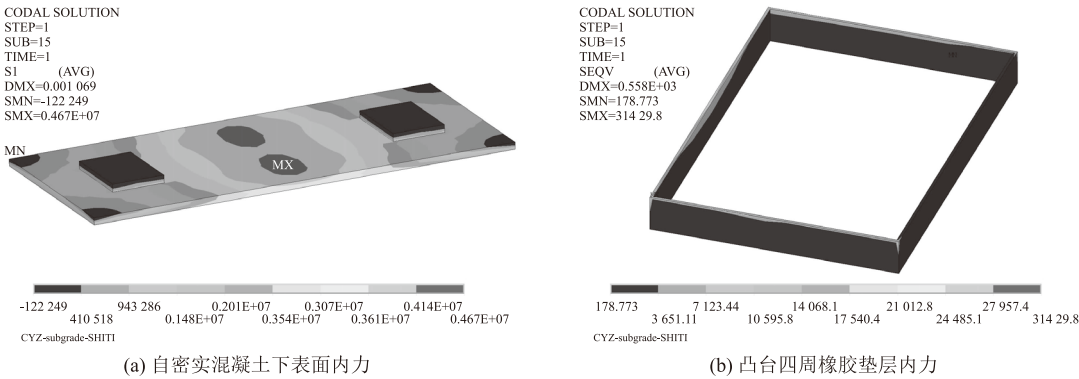


图 3 TL-BZ-1 工况下轨道部件内力云图

由图 3 可知,TL-BZ-1 工况中自密实混凝土最大主应力位于列车荷载作用正下方,拉应力最大值超出



C40 混凝土的抗拉强度,势必引起实混凝土下表面局部破坏;橡胶垫层的最大 Mises 应力为 0.03 MPa,不会引起破坏。动载系数每增加 0.25,自密实混凝土最大主应力增加约 0.17 MPa,凸台四周橡胶垫层的 Mises 应力几乎无变化。

3 综合荷载的影响

3.1 变形影响分析

高速铁路在列车荷载、温度荷载、基础变形的综合作用下,钢轨和轨道板位移如表 3 所示。

表 3 综合作用下轨道部件垂向位移表 (mm)

工况	钢轨最大垂向位移	轨道板板面最大垂向位移	扣件压缩量
ZH-BZ-1	2.30	0.30	2.00
ZH-BZ-2	2.85	0.74	2.11
ZH-BZ-3	2.76	0.63	2.13
ZH-BZ-4	2.91	0.77	2.14
ZH-BZ-5	13.70	11.57	2.13

由表 3 可知,相比于工况 ZH-BZ-1 (整体升温 30 ℃),工况 ZH-BZ-2 (整体降温 30 ℃)引起的钢轨和轨道板最大垂向位移分别大 0.45 mm 和 0.44 mm,说明高速铁路在冬季的运营中更需加强轨道部件养护和监测;相比于 ZH-BZ-3 (常用正温度梯度 45 ℃/m),工况 ZH-BZ-4 (常用负温度梯度 -22.5 ℃/m)引起的钢轨和轨道板最大垂向位移分别大 0.25 mm 和 0.14 mm,由此可知负温度梯度(轨道板上冷下热)更不利于轨道部件的垂向变形,对于夏季白昼气温较高、夜晚急剧降温时,或者冬季阳光直射轨道板时所形成的负温度梯度等情况,应加强高速铁路轨道部件的养护和监测。

按最不利条件假设底座板与路基基床表层紧密结合,当基床表层挠曲沉降时,底座板与之发生随动变形,中间的单元轨道板位于波谷处。对于 ZH-BZ-5 工况,模型中 3 块轨道板所对应的底座板长度为 17.01 m,根据 15 mm/20 m 的路基沉降限值,沉降曲线按半波正弦曲线模拟<sup>[5]</sup>,模型中所加载的路基沉降限值为 11.51 mm/17.01 m,求解后的轨道垂向变形如图 4 所示。

由图 4 可知,较大的基础沉降会引起自密实混凝土层与底座板出现脱空现象,列车荷载冲击作用将使自密实混凝土层不断的拍打底座板,导致结构破坏。高速铁路运营中应严格控制不均匀沉降的幅值,建议针对沉降曲线的曲率变化提出相应的控制标准。

3.2 内力影响分析

综合荷载作用下的钢轨和轨道板内力如表 4

所示。

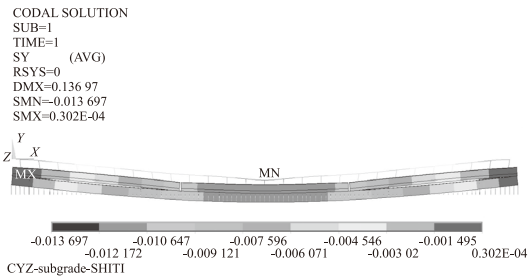


图 4 轨道结构垂向位移云图 (放大 50 倍)

表 4 综合荷载作用下轨道部件内力表 (MPa)

工况	自密实混凝土层 (含凸台)最大主应力	凸台四周橡胶垫最大 Mises 应力
ZH-BZ-1	3.47	1.08
ZH-BZ-2	4.64	0.59
ZH-BZ-3	2.38	0.19
ZH-BZ-4	1.56	0.51
ZH-BZ-5	5.64	0.52

由表 4 可知,在常用动载系数及整体升、降温 30 ℃荷载作用下,自密实混凝土层最大拉应力超限;整体降温荷载所引起的拉应力大于升温荷载,但凸台四周橡胶垫最大 Mises 应力较小;整体升温荷载下,混凝土结构受热膨胀挤压内侧橡胶垫层,最大拉应力出现在凸台与自密实混凝土的折角处;整体降温荷载下,混凝土结构收缩形成的最大拉应力出现在自密实混凝土层下表面的中部,如图 5 所示。

在常用动载系数和常用温度梯度作用下,混凝土层应力和橡胶垫应力均相对较小,不起控制作用。在常用动载系数和基础沉降的共同作用下 (工况 ZH-BZ-5),自密实混凝土层下表面大面积应力超限,最大拉应力 5.64 MPa,自密实混凝土层有断裂的风险。

4 结论及建议

本文针对路基地段 400 km/h 级高速铁路的运营条件,从静力学角度分析了在列车荷载 (不同动力系数)、温度荷载及基础变形的作用下 CRTSⅢ型板式无砟轨道的变形及内力,得出的主要结论有:

(1)在列车荷载作用下,随着动载系数增加,钢轨和轨道板的位移随之增加,动载系数每增加 0.25,引起钢轨和轨道板表面的垂向位移增加分别约为 0.3 mm、0.07 mm。动载系数的变化对轨道板弯矩的影响较小,自密实混凝土下表面存在局部破坏的风险。CRTSⅢ型板式无砟轨道可适应 400 km/h 级高速铁路列车荷载作用下动载系数的变化。

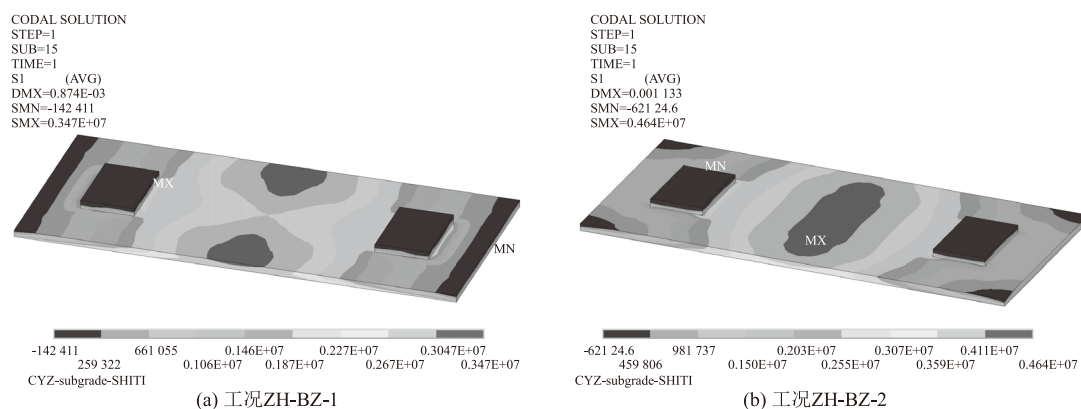


图5 自密实混凝土层第一主应力云图

(2)在综合荷载作用下,负温度梯度(轨道板上冷下热)更不利于轨道部件的垂向变形。整体升、降温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 荷载和列车荷载作用下,自密实混凝土层最大拉应力超限。整体降温荷载所引起的拉应力大于升温荷载,但凸台四周橡胶垫最大 Mises 应力较小。整体升温荷载下,最大拉应力出现在凸台与自密实混凝土的折角处;整体降温荷载下,最大拉应力出现在自密实混凝土层下表面的中部。对于夏季白昼气温较高、夜晚急剧降温时,或者冬季阳光直射轨道板时所形成的负温度梯度等情况,应加强高速铁路轨道部件的养护和监测。

(3)最不利条件下的基础沉降将引起自密实混凝土层与底座板出现脱空现象,列车荷载冲击作用将使自密实混凝土层不断的拍打底座板,导致应力超限,自密实混凝土层存在断裂的风险。建议下一步结合实际基础变形的复杂条件,开展基础变形对轨道结构的影响研究。

## 参考文献:

- [1] 王继军,姚力,王梦. 中国高速铁路无砟轨道的发展及应用[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 33-35.  
WANG Jijun, YAO Li, WANG Meng. Development and Application of Ballastless Track of High-speed Railway in China[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 33-35.
- [2] 王继军,王梦,刘伟斌,等. CRTSⅢ型板式无砟轨道系统技术[J]. 中国铁路, 2017(8): 11-15.  
WANG Jijun, WANG Meng, LIU Weibin, et al. Technology of CRTSⅢ Ballastless Track System[J]. China Railway, 2017(8): 11-15.
- [3] 苏乾坤. 客货共线 CRTSⅢ型板式无砟轨道结构优化设计[D].

成都:西南交通大学, 2017.

- SU Qiankun. The Optimize Structure Design of CRTSⅢ Slab Ballastless Track for Mixed Passenger and Freight Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [4] 通线[2018]2331, 高速铁路 CRTSⅢ型板式无砟轨道路基段轨道结构[S].  
Tong Xian[2018]2331, CRTSⅢ Slab Ballastless Track Structure of High Speed Railway in Subgrade Section[S].
- [5] 刘学毅,赵坪锐,杨荣山. 客运专线无砟轨道设计理论与方法[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2010: 309-343.  
LIU Xueyi, ZHAO Pingrui, YANG Rongshan. Research on the Design Theory and Method for Ballastless Track on Passenger Dedicated Line [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010: 309-343.
- [6] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.  
WANG Xinmin. Numerical Analysis of ANSYS Engineering Structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [7] 苏乾坤,江万红,巫江,等. 山区隧道内双块式无砟轨道道床板分块长度研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(1): 83-86.  
SU Qiankun, JIANG Wanhong, WU Jiang, et al. The Study on Block Length of Double-Block Ballastless Track in Mountain Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(1): 83-86.
- [8] 赵坪锐. 客运专线无砟轨道设计理论与方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008.  
ZHAO Pingrui. Research on the Design Theory and Method for Ballastless Track on Passenger Dedicated Line [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [9] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].  
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [10] Q/CR 9130-2018 铁路轨道设计规范(极限状态法)[S].  
Q/CR 9130-2018 Code for Design of Railway Track (Limit State Method) [S].