

文章编号:1003-1995(2021)03-0103-05

无砟轨道荷载分配特征与影响因素研究

郭杰 赵坪锐

(西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘 要 随着车速的提高,无砟轨道结构和线下基础应力水平有所提高,无砟轨道荷载分配系数是进行轨道结构和线下基础设计的重要参数。本文以四种无砟轨道为研究对象,采用理论分析和有限元相结合的方法计算无砟轨道荷载分配系数,并分析影响因素。结果表明:轮轨力由 5 个扣件分担,且无砟轨道类型、线下基础类型和轮轨力大小对扣件荷载分配系数基本无影响,推荐无砟轨道扣件荷载分配系数分别为 7%,23%,40%,23%,7%;无砟轨道整体刚度的增大使扣件荷载分配趋于集中,中间扣件荷载分配系数增大显著,对无砟轨道结构受力不利;扣件刚度突变使扣件荷载分配更加趋于集中,当扣件刚度突变值达到 700 kN/mm 时轮轨力由 3 个扣件分配,对无砟轨道结构受力更为不利;脱空对扣件荷载分配系数影响很小,可忽略不计。

关键词 无砟轨道;分配系数;数值模拟;扣件;刚度;脱空

中图分类号 U213.2⁺44 **文献标识码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1003-1995.2021.03.23

轮轨力直接作用在钢轨上,由作用点左右若干轨枕或扣件分担,并逐层传递给下面的结构,包括轨道结构和线下基础。荷载分配系数是指每个钢轨支点压力与轮轨力的比值。对于有砟轨道,荷载分配系数是指轨枕荷载分配系数,而对于无砟轨道则是指扣件荷载分配系数。由于轨道结构与线下基础是由多种特性差异较大的材料构成,因此荷载传递是一个复杂的过程。轨枕或扣件的荷载分配系数决定了其下部结构的荷载大小,是进行轨枕和线下基础设计的重要参数^[1]。早期在轨道工程设计时,假设轮轨力由 3 根轨枕分担^[2],其中,中间轨枕分担 50%,左右两根轨枕各分担 25%,该假设与实际荷载分配特征有较大差异。日本学者通过实测并结合工程经验,提出了经典的轨枕荷载分配系数,即假设轮轨力由 5 根轨枕分担^[3],轨枕荷载分担比分别为 10%,20%,40%,20%,10%,并应用于世界第一条高速铁路东海道新干线的设计中。国内学者针对重载铁路全面系统地研究了轨枕荷载分配系数,做了大量的仿真与试验工作。文献[4]系统分析了重载铁路轨枕荷载分配系数的影响

因素,结果表明最大轨枕荷载分配系数受各因素如轴重、轨枕间距、基床填料特性等影响较小。文献[5]分析了单轴轮轨力作用下重载铁路轨枕荷载分配系数,得出当轮轨力作用在轨枕间任意位置 $1/n$ (n 为任意自然数) 时,轨枕荷载分担比可表达为 $(n-1):(2n-1):(4n-2):(2n+2):(n+1):1$ 的结论。

学者们对无砟轨道扣件荷载分配系数进行了一些仿真计算和试验研究。文献[6]采用梁板模型研究了扣件刚度对扣件荷载分配系数的影响,其结果显示轮轨力由 5 个扣件分担,扣件刚度越大,荷载分配越集中。文献[7]详细分析了 CRTS I 型板式无砟轨道扣件荷载分配系数的影响因素,结果表明轴重、基床和地基填料特性对扣件荷载分配系数影响很小,扣件刚度、间距对扣件荷载分配系数有一定影响,双轮轴作用时轴间距对内侧扣件分配系数有一定影响,但最大扣件荷载分配系数变化较小。文献[8-9]开展了 CRTS I 型板式无砟轨道足尺模型试验,结果表明荷载作用在扣件正上方时由 5 个扣件分担,荷载作用在扣件中间时由 6 个扣件分担,荷载大小对扣件荷载分配系数基本无影响,荷载作用位置对最大扣件荷载分配系数影响较小。

对无砟轨道扣件荷载分配系数的研究取得了一定的成果,但研究所选参数范围太小,不具有代表性,未开展不同线下基础扣件荷载分配特征的研究,且未开展典型病害对扣件荷载分配系数影响的研究。随

收稿日期:2020-03-27;修回日期:2020-06-09

基金项目:国家自然科学基金(U1534203)

第一作者:郭杰(1994—),男,硕士研究生。

E-mail:guojie9494@163.com。

通信作者:赵坪锐(1978—),男,副教授,博士。

E-mail:przhao@163.com。

着车辆速度的提高,轨道结构和线下基础的应力水平也有所增大,需要加强无砟轨道结构和线下基础以满足强度要求。因此,研究无砟轨道荷载分配系数对无砟轨道结构和线下基础设计具有一定指导意义。此外,在无砟轨道有限元建模时,为简化模型和防止应力集中现象,有时不建钢轨和扣件,这时就需要将荷载直接加在承轨台处,也要用到荷载分配系数。故研究无砟轨道荷载分配系数对简化无砟轨道建模具有一定的积极意义。

本文以无砟轨道为研究对象,包括三种板式无砟轨道(CRTS I 型板式无砟轨道、CRTS II 型板式无砟轨道、CRTS III 型板式无砟轨道)和双块式无砟轨道,线下基础包括路基、桥梁和隧道,建立不同线下基础的无砟轨道有限元模型,对无砟轨道扣件荷载分配系数进行深入系统的分析。本文先分析正常状态下无砟轨道荷载分配特征,给出荷载分配系数建议,再重点研究典型无砟轨道病害对荷载分配系数的影响,本文选取的无砟轨道病害包括扣件刚度突变和脱空。

1 有限元模型和计算参数

本文只给出路基上 CRTS I 型板式无砟轨道主要计算参数,见表 1,扣件垂向刚度 50 kN/mm,扣件间距 629 mm,路基面支承刚度 76 MPa/m,其他无砟轨道主要计算参数参见相关文献选取。对于 CRTS I 型板式无砟轨道,忽略凸形挡台对轨道板翘曲变形的约束作用^[10]。

表 1 CRTS I 型板式无砟轨道主要计算参数

结构	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	尺寸 (m×m×m)
钢轨	2.06×10^5	0.3	7 850	
轨道板	3.60×10^4	0.2	2 500	$4.962 \times 2.4 \times 0.19$
CA 砂浆	2.00×10^5	0.2	1 900	$4.962 \times 2.4 \times 0.19$
底座板	3.25×10^4	0.2	2 500	$15.026 \times 3.0 \times 0.30$

有限元模型中,钢轨用梁单元模拟,扣件和基础用线性弹簧单元模拟,其刚度的计算参见文献[11-12],中间各结构层采用实体单元模拟。模型长度取三块轨道板或相当长度,以中间轨道板为研究对象,所建立的路基上 CRTS I 型板式无砟轨道有限元模型见图 1。

由扣件荷载分配系数 γ 定义可给出其计算方法,计算公式为

$$\gamma = \frac{R_d}{P_d} \quad (1)$$

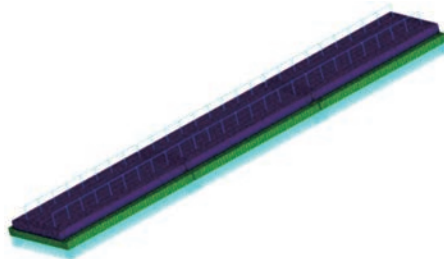


图 1 路基上 CRTS I 型板式无砟轨道有限元模型

式中: R_d 为扣件荷载; P_d 为轮轨力。

本文轮轨力均施加在模型中间扣件正上方。

2 扣件荷载分配系数特征分析

选取轴重为 15 t。车辆在脉冲型激励如钢轨接头焊缝凸台激励下,轮轨力有可能达到 1 000 kN^[13],故取轮轨力取为 75 ~ 1 000 kN,计算无砟轨道扣件荷载分配系数。由计算结果可知,不同无砟轨道类型、不同线下基础和不同轮轨力大小时无砟轨道扣件荷载分配系数基本无差别,轮轨力由 5 个扣件分担,中间扣件荷载分配系数为 39.7% ~ 41.4%,左右 2 个扣件荷载分配系数为 23.1% ~ 23.3%,其余 2 个扣件荷载分配系数为 6% ~ 7%。

采用弹性地基连续梁模型计算的扣件荷载计算公式为

$$R_d = \frac{P_d k a}{2} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx) \quad (2)$$

式中: k 为钢轨基础弹性模量, $k = D/a$, D 为钢轨支座刚度; a 为扣件间距; x 为待求位置离荷载作用点的距离。

联立式(1)和式(2)可得,无砟轨道扣件荷载分配系数 γ 理论解为

$$\gamma = \frac{k a}{2} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx) \quad (3)$$

由式(3)可知,无砟轨道扣件荷载分配系数与轮轨力大小无关,与轨道结构特性、待求位置与荷载作用点距离有关,待求位置与荷载作用点距离越远则扣件荷载分配系数 γ 越小。理论分析与本文计算结果、文献[8-9]结论一致。

以 CRTS I 型板式无砟轨道为例,经计算,路桥隧区段的钢轨支座刚度 D 分别为 26.64, 42.42, 43.52 kN/mm,按照式(3)计算,荷载作用点处扣件荷载分配系数分别为 35.4%, 39.7%, 40.0%,左右 2 个扣件荷载分配系数分别为 24.6%, 25.4%, 25.4%,其余 2 个扣件荷载分配系数分别为 9.8%, 8.0%, 7.9%,有限元解与理论解误差较小,且理论解采用的计算模型为连续梁模型,而有限元法则为点支承梁模型,可以认为本文的有限元计算结果是可靠的。

基于以上计算结果和分析,本文推荐的无砟轨道扣件荷载分配系数分别为7%,23%,40%,23%,7%,见图2。

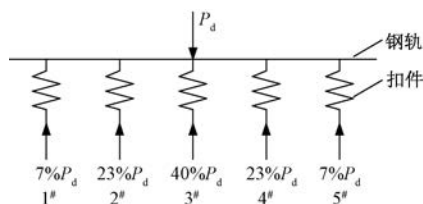


图2 无砟轨道扣件荷载分配系数

由于无砟轨道类型、线下基础类型和轮轨力大小对扣件荷载分配系数影响很小,故下文仅以路基上CRTS I 型板式无砟轨道计算结果为例进行分析,轴重均为15 t。

3 扣件荷载分配系数影响因素

3.1 整体刚度

已有研究成果表明,高速铁路合理的轨道整体刚度为70~80 kN/mm,且一般不超过100 kN/mm^[14-15],因此,取整体刚度为50~90 kN/mm,扣件荷载分配系数随整体刚度变化见图3。

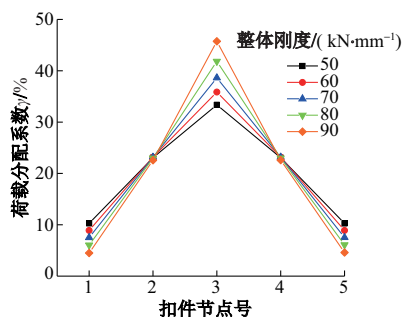


图3 扣件荷载分配系数随整体刚度变化

由图3可知,随着无砟轨道整体刚度的增大,除中间扣件荷载分配系数增大外,其余4个扣件荷载分配系数均呈减小趋势。其中,中间扣件荷载分配系数增大显著,由33.2%~34.0%增大到42.2%~46.6%。左右2个扣件荷载分配系数基本不变,仅由23.1%~23.2%减小到22.4%~23.1%。其余2个扣件荷载分配系数有一定变化,由9.8%~10.3%减小到4.0%~5.8%。表明无砟轨道整体刚度的增大使得荷载分配趋于集中,对无砟轨道结构受力不利。为使中间扣件荷载分配系数适中以降低其下部结构应力,无砟轨道整体刚度不宜取太大。

3.2 扣件刚度突变

扣件由于安装不当会导致刚度剧烈突变,可达到正常刚度值的10倍以上,扣件刚度突变对车辆和轨道

动力特性均带来不利影响。参考文献[16],本文取扣件刚度突变值为100~1 000 kN/mm。轮轨力作用点处扣件刚度取突变值,其余扣件刚度值不变,均为50 kN/mm,扣件刚度突变计算工况见图4,扣件荷载分配系数随扣件刚度突变值的变化曲线见图5。

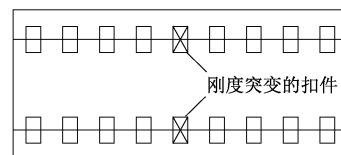


图4 扣件刚度突变计算工况图示

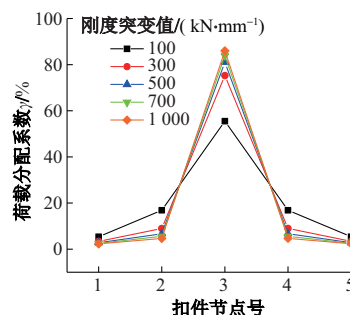


图5 扣件荷载分配系数随扣件刚度突变值的变化曲线

由图5可知,随着扣件刚度突变值的增大,除中间扣件荷载分配系数增大外,其余4个扣件荷载分配系数均呈减小趋势。其中,中间扣件荷载分配系数增大显著,由55.4%~57.2%增大到85.8%~89.3%,但增大速度逐渐缓慢。左右2个扣件荷载分配系数有一定变化,由16.7%~16.9%减小到3.9%~4.8%,但减小速度逐渐缓慢。其余2个扣件荷载分配系数变化较小,仅由4.7%~5.4%减小到1.5%~2.3%,且减小速度逐渐减小。以上计算和分析结果表明,扣件刚度突变值的增大使得荷载分配更加趋于集中,当扣件刚度突变值达到700 kN/mm时,中间3个扣件荷载分配系数之和约为95%,即轮轨力由作用点左右5个扣件分配逐渐变为左右3个扣件分配,这种分配模式对无砟轨道结构和线下基础受力更为不利。

为使中间扣件荷载分配系数适中以降低其下部结构应力,施工时应避免发生扣件安装不当导致刚度突变的现象,并加强对扣件刚度突变的检测。

3.3 脱空对扣件荷载分配系数的影响

无砟轨道承受复杂的荷载,如列车荷载、温度荷载、路基不均匀荷载等,又暴露在外部环境中,加之施工不当等因素共同作用,易产生脱空现象,并对车辆和轨道受力特性产生不利影响^[17-18]。由于本文轮轨力仅施加在模型中间扣件上,故本文仅研究板中轨道板、底座板脱空对扣件荷载分配系数的影响,并假设脱空沿轨道板和底座板横向完全脱空,轨道板脱空时

假设脱空沿厚度完全伤损,底座板脱空时删除对应位置路基弹簧以模拟脱空,CRTS I 型板式无砟轨道脱空见图 6,图中 l 为脱空长度,表征脱空大小。取脱空长度为 0.5 ~ 1.5 m,扣件荷载分配系数见图 7。

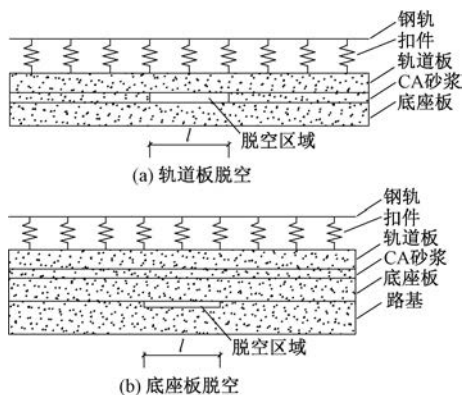


图 6 CRTS I 型板式无砟轨道脱空示意

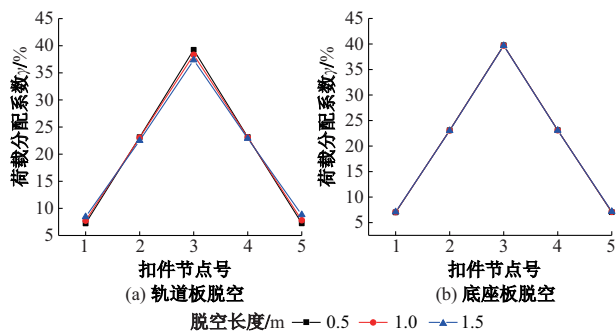


图 7 不同脱空长度时扣件荷载分配系数

由图 7 可知:随着脱空长度的增大,扣件荷载分配系数变化很小,变化幅度均不超过 2%,这表明脱空对扣件荷载分配系数影响很小,可忽略不计。

4 结论

本文建立了不同轨下基础的四种无砟轨道结构有限元模型,分析了无砟轨道扣件荷载分配特征,并研究参数变化和典型病害对扣件荷载分配系数的影响,得出以下结论:

1) 轮轨力由 5 个扣件分担,且无砟轨道类型、线下基础类型和轮轨力大小对扣件荷载分配系数基本无影响,本文推荐的无砟轨道扣件荷载分配系数分别为 7%,23%,40%,23% 和 7%。

2) 无砟轨道整体刚度的增大使扣件荷载分配趋于集中,中间扣件荷载分配系数增大显著,对无砟轨道结构受力不利,无砟轨道整体刚度不宜取太大以降低轨道结构和线下基础受力。

3) 扣件刚度突变使扣件荷载分配更加趋于集中,当扣件刚度突变值达到 700 kN/mm 时,轮轨力由 3 个

扣件分配,对无砟轨道结构受力更为不利,施工中应禁止扣件安装不当现象的发生。

4) 轨道板、底座板脱空均对扣件荷载分配系数影响很小,可忽略不计。

参 考 文 献

- [1] 刘晶磊,叶庆志,宋绪国,等.重载铁路路基荷载条件及动力特性研究[J].铁道工程学报,2015,32(2):33-38,53.
- [2] 李子春.轨道结构垂向荷载传递与路基附加动应力特性的研究[D].北京:铁道部科学研究院,2000.
- [3] 朱波.大轴重作用下重载铁路路基结构荷载传递规律及设计方法研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [4] 吕文强.大轴重重载铁路路基基床结构设计方法及技术标准研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [5] 张立群,张丽娇.重载铁路单轮轴作用轨枕荷载分担规律研究[J].河北建筑工程学院学报,2016,34(2):10-13,21.
- [6] 王军文,段树金,李锁全.高速铁路板式轨道结构静力分析[J].工程力学,2002,19(增刊):290-293.
- [7] 周颖,陈瑾.高速铁路无砟轨道路基结构荷载传递规律研究[J].铁道工程学报,2016,33(5):18-24.
- [8] 边学成,蒋红光,金皖峰,等.板式轨道-路基相互作用及荷载传递规律的物理模型试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(8):1488-1495.
- [9] 蒋红光.高速铁路板式轨道结构—路基动力相互作用及累积沉降研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [10] 任娟娟,田根源,徐家铎,等.客货共线单元板式无砟轨道荷载作用特性与疲劳寿命预测[J].铁道学报,2019,41(3):110-116.
- [11] 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.
- [12] 刘学毅,赵坪锐,杨荣山,等.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.
- [13] 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学[M].4版.北京:科学出版社,2015.
- [14] LÓPEZ PITA A, TEIXEIRA P F, ROBUSTÉ F. High Speed and Track Deterioration: The Role of Vertical Stiffness of the Track [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218(1):31-40.
- [15] 赵国堂.铁路轨道刚度的确定方法[J].中国铁道科学,2005,26(1):1-6.
- [16] 刘学毅,张重王,万章博.无砟轨道扣件刚度突变对高速列车动力的影响[J].铁道工程学报,2014,31(9):53-58.
- [17] 李培刚,刘学毅,黎国清.CA 砂浆脱空对桥上单元板式轨道动力特性的影响研究[J].中国铁道科学,2014,35(3):20-27.
- [18] 任娟娟,严晓波,徐光辉,等.底座板脱空对板式无砟轨道行车动力特性的影响[J].西南交通大学学报,2014,49(6):961-966.

(下转第 112 页)

Research for Reinforcement Design of High Speed Railway Ballastless Track Structure Based on Limit State Method

YIN Yinyan^{1,2}, ZHAO Yunzhe^{1,2}

(1.China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd., Wuhan 430063, China;

2.Hubei Key Laboratory of Railway Track Safety Service, Wuhan 430063, China)

Abstract The design method of high speed railway ballastless track structure is changing from allowable stress method to limit state method. According to Q/CR 9130—2018 *Code for Design of Railway Track (Limit State Method)*, the reinforcement design for CRTS III slab ballastless track base of Fuyang–Hangzhou section in Shangqiu–Hefei–Hangzhou high speed railway was carried out by using the limit state method. According to CRTS I, CRTS III slab ballastless track and double block ballastless track with different foundations under track, the reinforcement results of limit state method, allowable stress method and current general reference drawing were compared and analyzed, and the reinforcement suggestions of limit state method for different types of ballastless track structure were put forward. The research results could provide a reference for the design and application of limit state method for high speed railway track.

Key words high speed railway; limit state method; comparative research; allowable stress method; general reference drawing; ballastless track; reinforcement design

(编辑:苗蕾 校对:李付军)

(上接第 106 页)

Study on Load Distribution Characteristics and Influencing Factors of Ballastless Track

GUO Jie, ZHAO Pingrui

(MOE Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract With the increase of train speed, the stress level of ballastless track structure and track foundation was increased. The load distribution coefficient of ballastless track was an important parameter for the design of track structure and track foundation. In this paper, four kinds of ballastless track were taken as the research object, the load distribution coefficient of ballastless track was calculated by combining theoretical analysis and finite element method, and the influencing factors were analyzed. The results show that the wheel rail force is shared by five fasteners. The type of ballastless track, the type of track foundation and the magnitude of wheel rail force have no effect on the load distribution coefficient of fasteners. The recommended load distribution coefficient of ballastless track fasteners is 7%, 23%, 40%, 23% and 7% respectively. The increase of the overall stiffness of ballastless track causes the fastener load distribution tend to be centralized, and the load distribution coefficient of middle fastener increases significantly, which is unfavorable to the ballastless track structure. The sudden change of fastener stiffness makes the load distribution of fastener more centralized. When the sudden change value of fastener stiffness reaches 700 kN/mm, the wheel rail force is distributed by three fasteners, which is more unfavorable to the ballastless track structure. The effect of cavity on the load distribution coefficient of fastener is negligible.

Key words ballastless track; distribution coefficient; numerical simulation; fastener; stiffness; cavity

(编辑:刘莉 校对:苗蕾)