

文章编号: 1674—8247(2021)04—0060—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.04.012

## 路基不均匀沉降对 CRTS II 型板式无砟轨道 结构的影响分析

陈攀

(中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023)

**摘要:** CRTS II 型板式无砟轨道采用纵连结构, 轨道板刚度较大, 一旦路基发生不均匀沉降, 将影响无砟轨道结构的受力。本文基于有限元分析理论, 建立了三维有限元计算模型, 分析了路基不均匀沉降和列车荷载共同作用下 CRTS II 型板式无砟轨道结构的力学特性。研究表明: (1) 随着不均匀沉降的出现和发展, 轨道结构的应力峰值迅速增长, 当沉降量大于 10 mm/20 m 时, 轨道板已处于开裂工作状态; (2) 不均匀沉降对扣件竖向受力的影响不大, 对其纵向受力影响较大; (3) 当沉降量为 25 mm/20 m 时, 轨道结构出现空吊问题, 并且随着沉降量的增大, 轨道结构的空吊问题越来越严重, 为了使轨道结构在运营期间不产生空吊问题, 建议路基不均匀沉降量应小于 20 mm/20 m。

**关键词:** 不均匀沉降; CRTS II 型板式无砟轨道; 影响; 分析

中图分类号: U213.2<sup>+</sup>44 文献标志码: A

## Analysis on the Impact of Differential Settlement of Earthworks on CRTS II Slab Ballastless Track

CHEN Pan

(CREEC (Chongqing) Survey, Design and Research Co., Ltd., Chongqing 400023, China)

**Abstract:** CRTS II slab ballastless track is connected longitudinally between track slabs which are so rigid that the differential settlement of earthworks will affect the stress on the ballastless track structure. Based on the finite element analysis theory, this paper establishes a 3D finite element calculation model and analyzes the mechanical characteristics of CRTS II slab ballastless track structure under the combined action of differential settlement of earthworks and trainload. The results show that: (1) With the emergence and development of differential settlement, the stress peak of track structure increases rapidly, and when the settlement is more than 10 mm per 20 m, the track slab is already in a cracking working state. (2) Differential settlement has little impact on the vertical stress of fasteners, but has a great impact on their longitudinal stress. (3) When the settlement is 25mm per 20m, the problem of unsupported suspension of track structure appears, and with the increase of settlement, the problem becomes more and more serious. In order to avoid the problem of unsupported suspension of track structure during operation, it is suggested that the differential settlement of subgrade should be less than 20 mm per 20 m.

**Key words:** differential settlement; CRTS II slab ballastless track; impact; analysis

收稿日期: 2020-07-01

作者简介: 陈攀(1989-), 男, 工程师。

引文格式: 陈攀. 路基不均匀沉降对 CRTS II 型板式无砟轨道结构的影响分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(4): 60-64.

CHEN Pan. Analysis on the Impact of Differential Settlement of Earthworks on CRTS II Slab Ballastless Track[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4): 60-64.

无砟轨道与有砟轨道相比具有稳定性高、刚度均匀性好、结构耐久性强、维修工作量少等优点,在国内、外已得到了较为广泛的应用,目前我国高速铁路和客运专线基本以无砟轨道为主。CRTS II 型板式无砟轨道是一种纵向连续配筋的混凝土结构,在路基地段由钢轨、扣件、轨道板、水泥乳化沥青砂浆(CA 砂浆)、底座板等组成,如图 1 所示<sup>[1]</sup>。

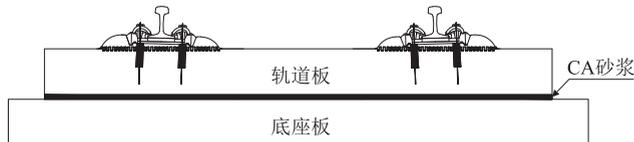


图1 CRTS II型板式无砟轨道结构示意图

高速铁路具有高速度和高密度的特点<sup>[2]</sup>,对安全性和舒适性有着很高要求。由于无砟轨道轨道板刚度较大,一旦路基或桥梁发生不均匀沉降,将影响无砟轨道结构的受力,虽然客运专线无砟轨道轨下基础部分沉降变形可通过调整钢轨扣件来减小或消除,但钢轨扣件调整量是非常有限的,且仅依靠扣件调整不能消除不均匀沉降引起的轨道结构之间的空吊问题<sup>[3]</sup>。目前,我国很多地区由于过度开采地下水导致大面积的区域性沉降,其中以环渤海和长三角地区最为显著<sup>[4]</sup>。地面区域性沉降引起高速铁路基础的沉降变形,使线路产生不平顺,影响列车运行,缩短了轨道结构使用寿命。在高速运营条件下,会使轨道结构产生裂纹,钢轨和扣件局部受力,引起较大的轮轨动力响应,造成车体垂向加速度、轮轨力、无砟道床应力的增加,对行车平稳性、舒适性和安全性都会产生不利的影响<sup>[5-6]</sup>。国内外已有较多关于不均匀沉降对无砟轨道影响的分析,但 CRTS II 型板式无砟轨道结构不同于其他无砟轨道结构,其轨道板通过连接锁件连接起来形成连续结构,不均匀沉降对其轨道结构受力的影响更加复杂,有必要针对不均匀沉降对 CRTS II 型板式无砟轨道结构的影响进行分析研究<sup>[7]</sup>。

本文参考京沪高速铁路现场反馈的实测路基沉降数据,基于有限元分析理论,建立轨道-路基不均匀沉降力学模型及有限元模型,分析了路基不均匀沉降荷载和列车荷载共同作用下轨道结构的受力及变形特性,提出了 CRTS II 型板式无砟轨道路基不均匀沉降的容许限值,为该新型轨道结构相关行业标准的制定提供一定理论参考。

## 1 计算条件

### 1.1 计算模型及关键参数

采用有限元分析方法,建立包括钢轨、扣件、轨道板、CA 砂浆层、支承层和路基在内的 CRTS II 板式无砟轨道的力学模型(如图 2 所示)和有限元分析模型,模型中包含钢轨、弹性不分开式扣件、预制轨道板、CA 砂浆调整层、支承层及路基等;模型中轨道板、CA 砂浆层与支承层三者层间粘结,支承层与路基面之间层间可以滑动,模型中各轨道结构组成部分的材料参数如表 1 所示。考虑到不影响计算精度且最大程度上消除边界效应,模型中取轨道板长度为 64 m,且模型两端采用全约束<sup>[8]</sup>。

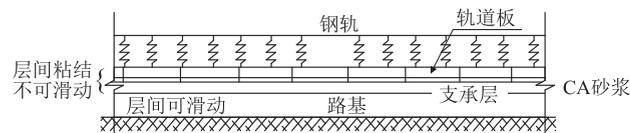


图2 不均匀沉降力学模型图

表1 各轨道结构组成部分材料参数表

参数	钢轨	轨道板	CA 砂浆层	支承层
弹性模量/MPa	$2.1 \times 10^5$	$3.65 \times 10^4$	7 000 ~ 10 000	5 000 ~ 10 000
泊松比	0.3	0.2	0.167	0.2
线膨胀系数	$1.18 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$

### 1.2 计算工况

计算时主要考虑不均匀沉降荷载和列车荷载共同作用下轨道结构的受力特性,本文参考京沪高速铁路现场反馈的实测路基沉降数据,总结提炼出京沪高速铁路沿线区域性沉降的典型线型模型,作为模型中不均匀沉降的位移荷载。为了简化计算,模型中路基上采用  $y$  mm/20 m 的“漏斗形”沉降曲线( $y$  为不同的沉降量)。参照 TB 10621-2014《高速铁路设计规范》中对静轮载的规定,最大垂向静轮载取 75 kN;路基不均匀沉降取 0 mm/20 m、10 mm/20 m、15 mm/20 m、20 mm/20 m、25 mm/20 m、30 mm/20 m 6 种工况,分析路基不均匀沉降与静轮载共同作用下轨道结构的受力特性。

## 2 计算结果分析

### 2.1 不均匀沉降荷载作用下轨道结构受力分析

#### 2.1.1 不均匀沉降荷载作用下轨道板受力分析

在不均匀沉降荷载和列车荷载共同作用下,轨道结构会发生弯曲变形,同时轨道结构内部会产生较大的应力。不同沉降荷载与列车荷载共同作用下的轨道

结构各部件的第一主应力如表2和图3所示。

表2 不同沉降工况下轨道结构应力峰值(MPa)

轨道沉降量/(cm/20 m)	轨道板	砂浆层	支承层	路基表层
0	0.870	0.049	0.182	0.029
1	1.600	0.180	0.410	0.100
1.5	2.400	0.280	0.590	0.160
2	3.210	0.370	0.770	0.210
2.5	4.010	0.470	0.950	0.260
3	4.810	0.560	1.140	0.310

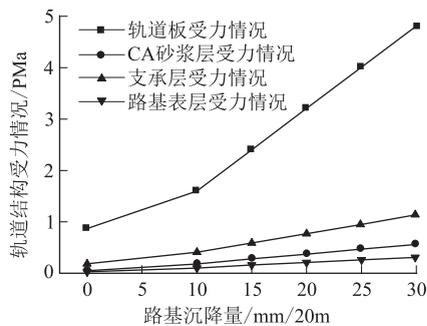


图3 不同沉降荷载工况下轨道结构应力变化曲线图

由表2可以看出,沉降量为0时,轨道结构各部件受力较小,随着沉降的出现和发展,轨道结构的应力峰值迅速增长;轨道板静力荷载作用下最大拉应力为0.87 MPa,且随着沉降量的增加其值呈线性迅速增长,当沉降量大于10 mm/20 m时,轨道板已处于开裂工作状态,最大应力为1.6 MPa,当沉降量大于30 mm/20 m时,轨道板已经破坏,最大应力为4.81 MPa;CA砂浆层、支承层和路基表层的初始拉应力均较小,沉降量为30 mm/20 m时,其拉应力峰值分别为0.56 MPa、1.14 MPa和0.310 MPa。不同沉降工况下,路基表层拉应力的峰值分别为0.029 MPa、0.1 MPa、0.16 MPa、0.21 MPa、0.26 MPa、0.31 MPa,均能够满足强度要求。

不同沉降工况所导致的轨道板正截面弯矩和拉力峰值均小于控制指标。为更好地看出轨道结构各部件应力随沉降增长的发展规律,将沉降量为10 mm/20 m时轨道各组成部分的应力峰值作为参照,绘制各沉降工况下轨道结构应力发展趋势曲线,如图4所示。

由图3可以看出,当沉降量达到10 mm/20 m时,各轨道结构的第一主应力和沉降量基本呈直线型关系。这一规律对于监控沉降对轨道结构安全性能的影响具有十分重要的意义。

### 2.1.2 不均匀沉降荷载作用下扣件系统受力分析

在不均匀沉降荷载和列车荷载共同作用下,轨道

结构会发生弯曲变形,由于扣件系统对钢轨的约束作用,会使扣件产生较大的应力,严重情况下会导致弹条断裂。不同沉降荷载作用下扣件所受的竖向力和纵向力如图4、图5所示。

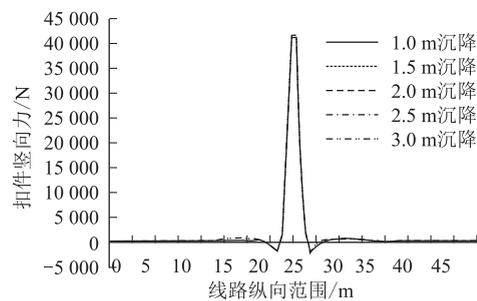


图4 不同沉降荷载下扣件竖向力变化曲线图

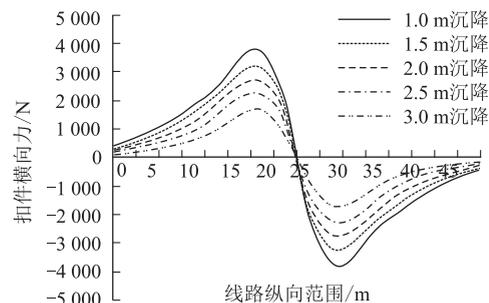


图5 不同沉降荷载下扣件纵向力变化曲线图

由图4可以看出,不同沉降荷载作用下,扣件竖向力的变化曲线基本重合,由此可以看出不均匀沉降荷载对扣件竖向力的影响很小,因此扣件竖向力可以不作为不均匀沉降的控制标准。由图5可以看出,随着不均匀沉降荷载的增大,扣件纵向力的变化趋势基本一致,但扣件纵向力随着不均匀沉降的增加而增大,当沉降量为10 mm/20 m时,扣件的最大纵向力为1 698.4 N,当沉降量为30 mm/20 m时,扣件的最大纵向力为3 798.9 N,相对于沉降量为10 mm/20 m时,增大了2.24倍。

### 2.2 不均匀沉降荷载对轨道结构空吊问题的影响分析

在不均匀沉降荷载和列车荷载共同作用下,轨道结构会产生弯曲变形,由于轨道结构各组成部分的材料性能不同,导致轨道结构各组成部分的变形不协调,从而导致轨道结构出现空吊问题。

列车荷载与不同沉降量共同作用下轨道各结构的垂向变形曲线如图6所示。

由图7可以看出,不均匀沉降量对轨道结构的垂向变形有显著的影响,沉降量分别为10 mm/20 m、

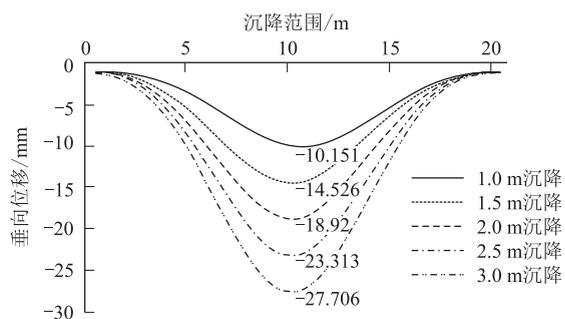


图6 不同沉降量下轨道结构垂向位移变化情况图

15 mm/20 m、20 mm/20 m、25 mm/20 m、30 mm/20 m 时,轨道板的最大垂向位移分别为:10.151 mm、14.526 mm、18.920 mm、23.313 mm、27.706 mm。若以沉降量10 mm/20 m 时为参照,则其他工况垂向位移分别达到 143.10%、186.39%、229.66%、272.94%,这一发展趋势对于轨道结构的受力是非常不利的。

由于轨道结构各组成部分的材料性能不同,导致轨道结构各组成部分的变形不协调,从而导致轨道结构出现空吊问题,轨道结构的最大变形出现在沉降中心处,为了能够更好的反映出轨道结构的空吊问题,本文将位于沉降中心的轨道板上表面和路基表层的竖向位移进行分析,如图7所示。

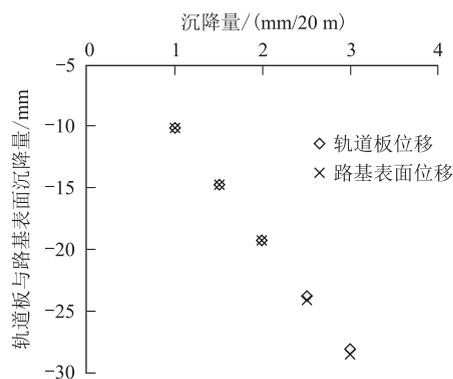


图7 相对沉降曲线图

由图7可以看出,随着不均匀沉降量的增大,轨道结构的竖向位移也随着增大,当沉降量小于 20 mm/20 m 时,轨道板的沉降量总是大于路基表层的沉降量,说明轨道板与路基表层沉降的跟随性较好,轨道结构不会出现空吊问题;当沉降量为 25 mm/20 m 时,轨道板的沉降量小于路基表层的沉降量,轨道结构出现空吊问题,并且随着沉降量的增大,轨道结构的空吊问题越来越严重,当沉降量为 30 mm/20 m 时,轨道结构的空吊值达到 0.68 mm,为了使轨道结构在运营期间不产生空吊问题,建议路基不均匀沉降量应小于

20 mm/20 m。

### 2.3 路基不均匀沉降控制指标建议值

目前,我国高速铁路应用的无砟轨道扣件系统的高度调节量调整量一般为  $-4 \sim +26$  mm,可满足沉降限值 20 mm/20 m 的要求。基础的沉降可全部由扣件调高量来抵消,从而实现钢轨零沉降的要求。由于空吊是轨道结构层间由于沉降和变形不协调产生的,空吊作为一种轨道结构破坏形式具有一定的特殊性,扣件调高量只作用于钢轨与轨道板之间,扣件调高量不能解决轨道板与下部结构之间的空吊问题。吊空一旦发生,只能采用工程措施进行修复。因此,本文认为吊空一旦发生,无砟轨道结构即视为破坏,并应考虑一定安全储备,建议路基不均匀沉降限值取 20 mm/20 m。

## 3 结论

本文基于有限元分析方法,综合考虑了路基不均匀沉降和列车荷载共同作用下对 CRTS II 型板式无砟轨道的影响分析,得到以下结论:

(1)在路基不均匀沉降荷载和列车荷载共同作用下,轨道结构会出现弯曲变形,同时轨道结构内部会产生应力;随着不均匀沉降的出现和发展,轨道结构的应力峰值迅速增长;轨道板静力荷载作用下最大拉应力为 0.87 MPa,且随着沉降量的增加其值呈线性迅速增长,当沉降量大于 10 mm/20 m 时,轨道板的最大拉应力值达到 1.8 MPa,轨道板已处于开裂工作状态。

(2)不均匀沉降对扣件竖向受力的影响不大;对其纵向受力影响较大,扣件纵向力随着不均匀沉降的增加而增大;当沉降量为 10 mm/20 m 时,扣件的最大纵向力为 1 698.4 N,当沉降量为 30 mm/20 m 时,扣件的最大纵向力增大了 2.24 倍。

(3)不同沉降荷载工况下,轨道结构各组成部分的变形曲线基本一致,随着不均匀沉降量的增大,轨道结构竖向位移也随之增大;当沉降量小于 20 mm/20 m 时,轨道板的沉降量总是大于路基表层的沉降量;当沉降量为 25 mm/20 m 时,轨道板的沉降量小于路基表层的沉降量,轨道结构出现空吊,并且随着沉降量的增大,轨道结构的空吊问题越来越严重,为了使轨道结构在运营期间不产生空吊问题,建议路基不均匀沉降量应小于 20 mm/20 m。

### 参考文献:

- [1] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道设计[M]. 北京:中国铁道出版社, 2006.

- ZHAO Guotang. High-speed Railway Ballastless Track [M]. Beijing: China Railway Press, 2006.
- [2] 宁星. 地面沉降下无砟轨道的力学特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- NING Xing. Research on the Mechanical Properties of Unballasted Track under Land Subsidence [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [3] 张群. 路基不均匀沉降对双块式无砟轨道的影响研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- ZHANG Qun. Study of Doubleblock Ballastless Track causing by Subgrade Differential [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [4] 尤昌龙, 李殿龙. 铁路客运专线路基沉降特性及其对策 [J]. 铁道科学与工程学报, 2005.
- YOU Changlong, LI Dianlong. Settlement and Deformation of Passenger Dedicated Line and Its Countermeasure [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005.
- [5] 高增增. 路基不均匀沉降对双块式无砟轨道结构受力影响分析 [J]. 中国铁路, 2010(7): 74 - 76.
- GAO Zengzeng. Analysis of the Influence of the Uneven Subgrade Settlement on the Structure of the Double-Block Ballastless Track [J]. China Railway, 2010(7): 74 - 76.
- [6] 刘茹冰. 路基不均匀沉降对板式轨道动力学影响分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- LIU Rubing. Analysis of Differential Settlement of Subgrade Effecting on Slab Track Dynamics [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [7] 韩义涛, 姚力. 基础沉降对土路基上板式轨道动力性能影响分析 [J]. 铁道工程学报, 2007(10): 28 - 31.
- HAN Yitao, YAO Li. Analysis of the Dynamic Performance for Slab Track Settlement on Embankment [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(10): 28 - 31.
- [8] 刘学毅, 赵坪锐, 杨荣山, 等. 客运专线无砟轨道设计理论与设计方法 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
- LIU Xueyi, ZHAO Pingrui, YANG Rongshan, et al. Design Theory and Design Method of Ballastless Track of Passenger Dedicated Line [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010.

(上接第 33 页)

- [4] 中铁二院工程集团有限责任公司. 云顶隧道补充工程地质勘察报告 [R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2013.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Supplementary Engineering Geological Survey Report of Yunding Tunnel [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2013.
- [5] 刘超, 袁伟, 路军富, 等. 某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 108 - 115.
- LIU Chao, YUAN Wei, LU Junfu, et al. A Study of the Micro-Macro-Physical and Mechanical Properties of Silty Mudstone in the Bottom Drum Section of a Railway Tunnel [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 108 - 115.
- [6] 范秋雁. 膨胀岩与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- FAN Qiuyan. Swelling Rock and Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [7] 张倬元, 王士庆, 王兰生. 工程地质分析原理 (第 2 版) [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- ZHANG Zhuoyuan, WANG Shiqing, WANG Lansheng. Principles of Engineering Geological Analysis (2nd Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [8] GB/T 50218 - 2014 工程岩体分级标准 [S].
- GB/T 50218 - 2014 Classification Standard of Engineering Rock Mass [S].
- [9] 蒋昱州, 王瑞红, 徐卫亚. 岩石力学特性的时间效应 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- JIANG Yuzhou, WANG Ruihong, XU Weiya. Time Effect of Rock Mechanical Properties [M]. Beijing: China Water Power Press, 2016.
- [10] 王崇良, 王茂靖, 赵文, 等. 兰渝铁路梅岭关隧道底鼓段病害成因分析 [J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 63 - 68.
- WANG Chonggen, WANG Maojing, ZHAO Wen, et al. Cause Analysis of Diseases in the Floor Heave Section of Meilingguan Tunnel in Lanzhou-Chongqing Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 63 - 68.