

层间离缝下车辆-CRTS II 型 板式无砟轨道耦合系统动力特性研究

曹美雪, 王明生

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:随着 CRTS II 型板式无砟轨道结构服役时间的延长,层间离缝发生发展对轨道结构和行车安全的影响成为迫切需要解决的问题之一。为厘清不同程度的层间离缝对车辆-无砟轨道系统动力特性的影响程度,建立了考虑层间离缝的车辆-CRTS II 型轨道板的耦合动力学模型,用 ABAQUS 和 Simpack 联合仿真,研究了不同尺寸的单一离缝以及多离缝不同位置组合对车辆及轨道结构动力响应的影响。结果表明,单一离缝横向深度和纵向长度分别在 522 mm、1.275 m 及以上时,离缝发展明显加快;多离缝的不同位置组合中板端与板边组合为最不利情况。研究结论为高速铁路轨道结构运维提供参考价值。

关键词:CRTS II 型板式无砟轨道;离缝损伤;刚柔耦合;动力响应

中图分类号:U213.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2024)01-0081-07

CRTS II 型板式无砟轨道^[1]以其维修量少、平稳性高和耐久性好等优点,被广泛应用于京津城际、京沪、沪昆等多条高速铁路^[2-4]。然而,在铁路轨道施工和服役过程中,由于材料质量、施工工艺、温度变化和振动影响等原因^[5-7],轨道板与 CA 砂浆层之间出现了不同程度的离缝损伤^[8-9]。为了预防轨道板与 CA 砂浆层间离缝损伤,需要严格按照相关标准和规范进行施工操作和材料选择,并进行密切监测和维护。此外,离缝的产生不仅破坏了轨道结构的整体性,影响轨道结构的耐久性,甚至会影响列车的运营安全,因此研究轨道板与 CA 砂浆层间离缝对车辆-无砟轨道系统动力特性影响十分重要。

国内外众多学者针对 CRTS II 型无砟轨道层间离缝损伤做了研究^[10-12],朱永见等^[13]推导了轨道板伸缩解析解,研究轨道板与砂浆层层间离缝产生的原因。赵国堂等^[14]建立车辆-轨道空间耦合动力学分析模型,研究不同离缝量、离缝范围对车辆以及轨道动力响应的影响。季杰等^[15]基于静力学仿真结果,利用动力学方法,研究不同离缝高度下轨道板离缝病害机理和影响,提出离缝整治措施。陈龙等^[16]建立推板试验有限元模型,研究推板情况下的层间传递规律和不同参数对层间破坏的影响规律。

上述研究大多针对层间离缝产生机理、离缝的整治以及离缝下轨道系统的受力分析和影响。而针对单一层间离缝尺寸、多种不同位置离缝组合形式对车辆-CRTS II 型板式无砟轨道耦合系统动力响应影响的相关研究较少。因此,建立含轨道板与 CA 砂浆层间离缝的车辆-CRTS II 型板式无砟轨道系统耦合三维动力学模型,分析单一层间离缝尺寸、多种位置离缝组合对车辆-CRTS II 型板式无砟轨道耦合系统动力响应特性的影响,结合现有的 TG/GW 115—2012《高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行)》规定,提出合理性和经济性的离缝维修限值建议,为高速铁路安全运行管理和后期维护提供一定的参考依据。

收稿日期:2023-11-20 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20230312

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2601000)

作者简介:曹美雪(1998—),女,硕士研究生,研究方向为铁道工程。E-mail:965172528@qq.com

曹美雪,王明生.层间离缝下车辆-CRTS II 型板式无砟轨道耦合系统动力特性研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(1):81-86,120.

1 车辆-CRTS II 型板式无砟轨道耦合系统动力学模型

1.1 车辆-CRTS II 型板式无砟轨道动力学模型建立

采用有限元软件 ABAQUS 建立含轨道板与 CA 砂浆层间离缝的 CRTS II 型板式无砟轨道三维模型。非离缝区域采用共结点模拟,离缝区域由“面-面接触”中的“硬接触”模拟其脱离的动态接触形式。为了消除边界效应影响,建立 5 块轨道板,对中间一块板进行分析。

为节约计算成本,采用 ABAQUS 和 Simpack 联合仿真,由 Simpack 建立简化车辆多刚体系统,车辆主要结构分为 1 个车体、2 个转向架、4 个轮对及连接结构一系悬挂和二系悬挂。由 ABAQUS 建立轨道结构三维模型,利用 Lanczos 进行模态分析和子结构缩减,生成包含质量矩阵、刚度矩阵和模态信息的 *.inp 和 *.sim 结果文件,经 Simpack 的 FlexModal 接口将其转化为 Simpack 柔性体文件 (*.fbi 文件)。轨道结构边界条件设置为板边自由、两端固定约束形式。由轮轨接触关系实现刚性车辆与柔性轨道的耦合,轮轨法向接触和轮轨切向接触分别采用 Simpack 中提供的非线性赫兹接触理论、简化 Kaller 理论 FASTSIM 算法求解,得到车辆-CRTS II 型板式无砟轨道动力学模型进行刚柔耦合多体仿真计算,如图 1、图 2 所示。

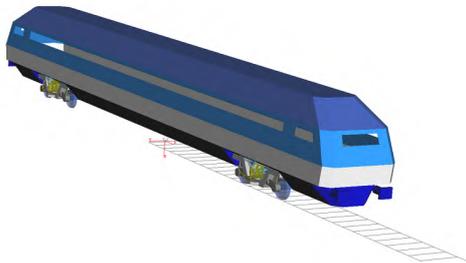


图 1 车辆系统模型

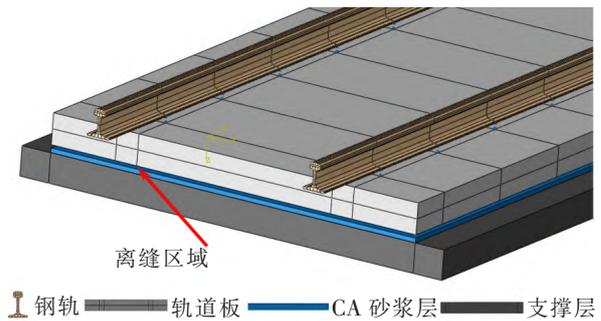


图 2 含离缝的 CRTS II 型板式无砟轨道结构示意图

1.2 模型验证

中国在遂渝线综合实验段铺设了 CRTS II 型板式无砟轨道,同时 CRTS II 型板式无砟轨道也应用于京津城际铁路等多条高速铁路线路,目前已获得了大量动力测试数据。为验证车辆-CRTS II 型板式无砟轨道动力学模型的正确性,与遂渝线板式无砟轨道结构的实测结果相比较。仿真时车速设为 200 km/h,符合遂渝线测试时动车速度范围 160~220 km/h,对比结果如表 1 所示。

表 1 仿真结果与实测数据对比

对比项	钢轨垂向位移/mm	轨道板垂向位移/mm	钢轨垂向加速度	轨道板垂向加速度
仿真结果	0.78	0.13	278g	7.3g
实测数据	0.30~0.88	0.01~0.87	173g~926g	6.1g~58.0g

由表 1 可知,本文模型仿真结果与遂渝线板式轨道实测数据保持在一定范围内,且两者都在一个数量级上,验证了本文所建立模型的合理性与可靠性。

2 结构参数及仿真工况设计

2.1 结构参数

车辆-CRTS II 型板式无砟轨道系统耦合动力学模型,采用 60 kg/m 钢轨,轨道结构由三维实体单元 Solid45 进行模拟,扣件采用弹簧元件模拟,扣件间距取 0.65 m。轨道结构参数如表 2 所示。车辆参数参考文献[17],各部件之间的连接由 Simpack 中的受力元件表示,将车辆初始位置设于轨道板之前 80 m,从而使车辆进入轨道结构之前充分振动,车速取 300 km/h。

表 2 CRTS II 型板式无砟轨道基本参数

轨道结构部件	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
钢轨	7.85×10^3	2.10×10^5	0.3
轨道板	2.50×10^3	3.55×10^4	0.2
CA 砂浆	2.40×10^3	8.00×10^3	0.2
底座板	2.50×10^3	3.25×10^4	0.2

2.2 工况设置

在无砟轨道长期服役及列车荷载作用下,轨道板与 CA 砂浆层出现了不同程度的离缝损伤。假设层间离缝发生在中间一块轨道板(第 3 块轨道板)上,根据大量的轨道线路损伤现场调研及工务部门运营维护记录^[18-19],层间离缝往往发生于板角或板边位置,往较大区域发展,离缝高度大多 ≤ 2 mm。因此,假设板角为初始位置,离缝的高度取为固定值 2 mm,结合 TG/GW 115—2012《高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行)》,工况设置如表 3 所示,各工况离缝纵向长度 y 均为 0、0.625、1.275、1.925、2.575、3.225、3.875、4.525、5.175 m,离缝发展方向如图 3 所示。

表 3 层间离缝仿真工况

工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
离缝横向深度 x/mm	0	522	1 275	2 028	2 550

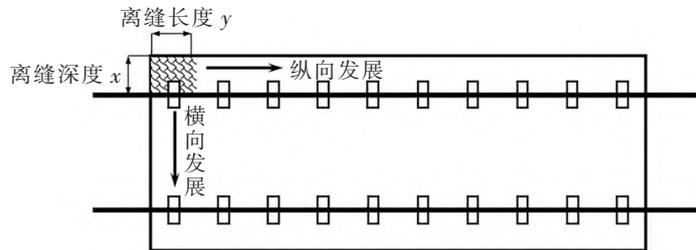


图 3 离缝工况发展示意图

3 层间离缝对车辆-CRTS II 型板式无砟轨道系统动力响应影响分析

3.1 不同尺寸的单一离缝对车辆-CRTS II 型板式无砟轨道系统动力响应影响比较

在列车荷载作用下,分析单一离缝深度不同时,离缝长度对车辆-无砟轨道系统振动响应特性的影响,并与文献^[20]中车辆和轨道动态作用性能限制标准对比。

由图 4 可知,车体垂向加速度峰值随着离缝尺寸的增大呈增大趋势。离缝深度接近贯通时,车体垂向加速度出现明显的增大。当离缝纵向长度小于 1.925 m 时,车体垂向加速度几乎不变;当离缝长度超过 1.925 m 时,车体垂向加速度出现小幅增大,但其始终未超过规范限值 0.13g。可以看出,层间离缝对车体垂向加速度的影响并不显著。这是由于扣件不仅起到连接作用,还可以起到减振和缓冲作用,使离缝扩展时传递给车体的振动影响减弱。

由图 5 可知,离缝沿轨道板的横向扩展和纵向扩展均不同程度地增大了轨道结构的垂向位移和加速度。由图 5(a)和图 5(b)可知,随着离缝长度的扩展,钢轨和轨道板的垂向位移呈增大趋势。在离缝深度至 522 mm(轨下)时,随离缝长度的增大,钢轨和轨道板垂向位移均小幅增大,但其小于规范基准值。在离缝深度分别为 1 275 mm 和 2 028 mm 条件下,当离缝长度为 0.625 m 时,离缝对钢轨和轨道板的垂向位移影响较小。这是因为离缝长度较小,非离缝区域能为

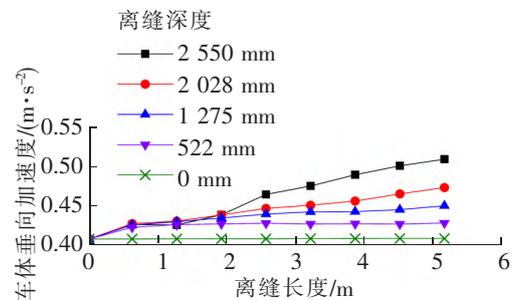


图 4 车体垂向加速度

轨道结构的稳定提供足够的支撑;当离缝长度扩展到 1.275 m 时,轨道板垂向位移最大值接近基准值 0.4 mm;当离缝长度扩展至 1.925 m 时,钢轨和轨道板垂向位移增幅扩大,钢轨垂向位移最大值接近基准值 1.5 mm,轨道板垂向位移最大值接近规范最大允许值 0.5 mm。在离缝横向贯通条件下,当离缝长度达到 1.275 m 时,轨道板垂向位移最大值超过规范最大允许值 0.5 mm;当离缝长度达到 3.225 m 左右,钢轨垂向位移已超过最大允许值 2 mm,轨道板垂向位移已达到 2 mm,钢轨和轨道板垂向位移增幅先增大后减小。这是因为离缝扩展到纵向中心线附近区域,层间损伤较大,轨道板缺少支撑使振动加剧,而当轨道板最大位移达到离缝垂向高度 2 mm 后,轨道板与 CA 砂浆层接触拍打,离缝出现竖向闭合使结构振动减弱。可以看出,相对于钢轨垂向位移,离缝对轨道板垂向位移的影响更大,这也是扣件减振和缓冲作用导致的。离缝深度超过 522 mm(轨下)后,轨道结构的振动响应加剧,当离缝长度扩展到 1.275 m 时,钢轨和轨道板垂向位移最大值显著增大。

由图 5(c)和图 5(d)可知,不同离缝深度条件下,钢轨和轨道板的垂向加速度随着离缝长度的增大呈增大趋势。在离缝深度 522 mm(轨下)和 2 550 mm(贯通)的条件下,当离缝长度扩展到 5.175 m 时,与无离缝状态相比,钢轨垂向加速度最大值分别增加了 41%、120.3%;轨道板垂向加速度最大值分别增加了 46%、219.4%,但最大值皆远小于其对应的规范限值 5 000、300 m/s^2 。在离缝深度分别为 1 275、2 028、2 550 mm(贯通)条件下,当离缝长度较小时,离缝长度变化对钢轨和轨道板垂向加速度影响较小;当离缝长度大于 1.275 m 时,钢轨和轨道板垂向加速度幅值逐渐增大;当离缝纵向长度扩展到轨道中心区域附近,钢轨和轨道板垂向加速度增幅进一步扩大。这也是因为离缝长度很大,提供支撑的非离缝区域较小,加剧了轨道结构的振动响应。可以看出,由于扣件可以起到减振和缓冲作用,离缝扩展时钢轨垂向加速度的增幅小于轨道板垂向加速度的增幅。离缝纵向长度较小时,钢轨和轨道板垂向加速度几乎不受影响;当离缝长度超过 1.275 m,钢轨和轨道板垂向加速度增幅较大,其最大值远小于规范限制值,且超过的可能性较小,但是长期的振动拍打会加速轨道结构的破坏,不利于行车稳定性和轨道结构的耐久性。

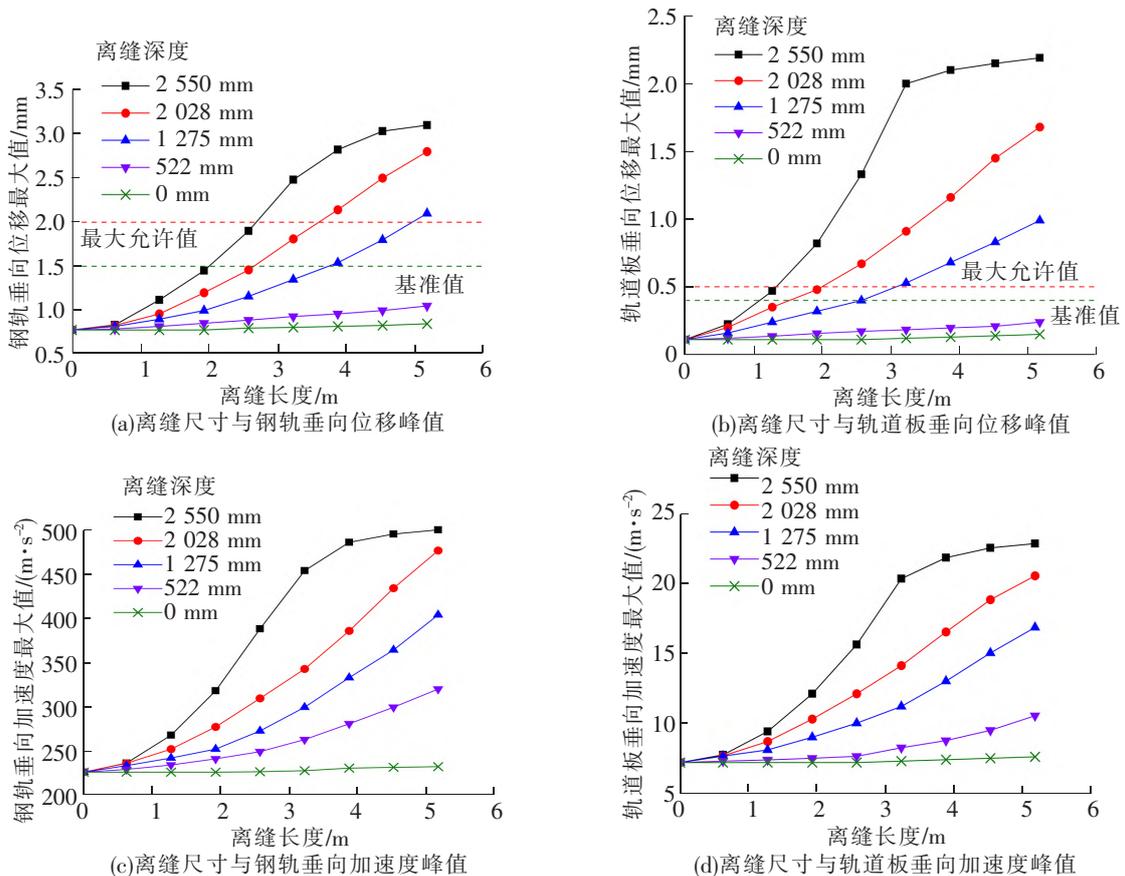


图 5 层间离缝尺寸对轨道结构动力响应影响规律

结合 TG/GW 115—2012《高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行)》规定,在实际运营维护中,应重点关注深度 522 mm、长度 1.275 m 及以上的离缝。考虑到后期运营维修的经济性,同时减轻工务部门的任务量,深度小于 100 mm 的离缝,对列车和轨道结构影响较小,做好观察记录和养护,抑制离缝进一步发展;深度 100~522 mm、长度小于 1.275 m 的离缝,控制其进一步扩展,然后择期维修;深度、长度分别在 522 mm、1.275 m 及以上的离缝,对列车和轨道结构影响加剧,应及时进行维修。

3.2 多种不同位置离缝组合对轨道结构动力响应影响

在高速铁路实际运营过程中,多个不同位置的离缝损伤可能同时存在于一块轨道板下。经过现场调研,根据离缝位置不同,将实际线路上的轨道板与 CA 砂浆层间离缝大概分为 3 种组合形式:板端+板中离缝、板端+板边离缝、板中+板边离缝。基于前文单一离缝损伤的较不利尺寸,各位置离缝深度和长度分别取 522 mm、1.275 m。由前文分析可知层间离缝状态对车体垂向加速度的影响较小,所以不再对车体加速度进行评价,分析多种不同位置离缝组合对无砟轨道结构的动态响应影响。

由图 6 可知,相较于无离缝状态,3 种离缝组合情况下,轨道结构的振动响应指标皆有增大。板端+板边离缝组合情况下,钢轨和轨道板的振动响应变化最大,钢轨和轨道板垂向位移最大值分别增加了 15.1%、67%,垂向加速度最大值分别增加了 11.5%、10.1%。板端+板中离缝组合以及板端+板边离缝组合下,钢轨和轨道板的垂向位移和垂向加速度大于板边+板中离缝组合相应的位移和加速度,可以看出,板端位置离缝对轨道结构振动响应的影响大于板边位置与板中位置离缝。主要由于离缝位于板端时,相当于一根梁一端失去约束,列车经过时使轨道各部件相互振动拍打加剧。

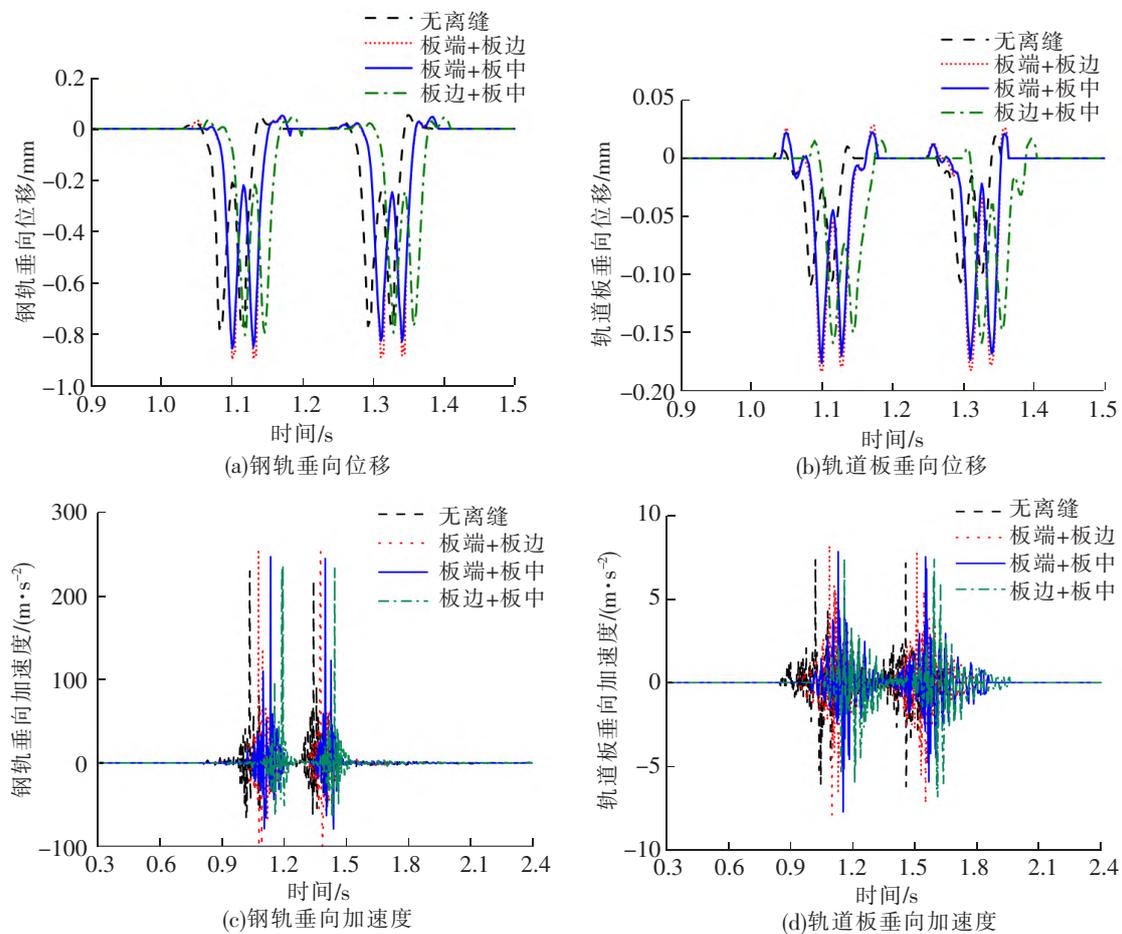


图 6 位置组合离缝对轨道结构动力响应影响规律

相对于无离缝状态,板端+板中离缝组合以及板边+板中离缝组合下,钢轨垂向位移最大值分别增大了

9.7%、3.1%，加速度最大值分别增大了 8.7%、2.7%；轨道板垂向位移最大值分别增大了 60%、44.5%，加速度最大值分别增大了 6.7%、2.3%。板端+板边离缝组合下，钢轨和轨道板的垂向位移和加速度大于板端+板中离缝组合，可以看出，板边位置离缝对轨道结构振动响应的增大作用大于板中位置离缝。主要由于离缝位于板中时，其周围的非离缝区域可以提供一定的支撑作用，使轨道结构振动较稳定。由此可知不同位置组合离缝对无砟轨道结构影响程度为板端+板边离缝>板端+板中离缝>板边+板中离缝。

4 结论

高速铁路列车运营多年，CRTS II 型板式无砟轨道的轨道板与 CA 砂浆层出现了不同程度的离缝损伤现象，建立车辆-CRTS II 型板式无砟轨道耦合动力学模型，研究单一层间离缝不同尺寸、多种不同位置离缝组合形式工况下车辆-CRTS II 型板式无砟轨道系统动力响应变化，得出如下结论：

(1)层间离缝的横向和纵向扩展对车体垂向加速度的影响较小。

(2)离缝对轨道结构本身的振动响应影响大。在离缝深度超过 522 mm(轨下)条件下，当离缝长度不超过 0.625 m 时，轨道结构的垂向位移和加速度几乎不变，此时，轨道结构损伤较小，离缝损伤发展较慢；当离缝长度延伸至 1.275 m 时，轨道板垂向位移最大值接近规范基准值 0.4 mm，离缝损伤发展加快。因此应对离缝深度在 522 mm、离缝长度在 1.275 m 及以上的离缝多加关注并及时维修。

(3)板端+板边离缝组合为最不利情况，在后期运营维护中应充分关注。板端位置离缝对轨道结构振动叠加效应最大，不同位置组合离缝对无砟轨道结构影响程度为板端+板边离缝>板端+板中离缝>板边+板中离缝，为高速铁路安全运行管理和后期维护提供一定的参考依据。

参 考 文 献

- [1]谭社会,方文珊,林超. CRTS II 型板式无砟轨道稳定性分析及养修建议[J]. 铁道建筑, 2020, 60(6): 136-139.
- [2]薛富春,聂如松. 高速列车荷载作用下无砟轨道-路基-地基精细化有限元模型与验证[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(6): 1951-1962.
- [3]李东昇,熊昌盛,杨怀志. 京沪高速铁路 CRTS II 型板式无砟轨道结构病害检查的优化建议[J]. 铁道建筑, 2020, 60(11): 115-118.
- [4]熊嘉阳,沈志云. 中国高速铁路的崛起和今后的发展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(5): 6-29.
- [5]赵国堂,刘钰. CRTS II 型板式无砟轨道结构层间离缝机理研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 117-126.
- [6]胡松林,周小林,徐庆元,等. 温度梯度荷载作用下 CRTS II 型轨道板与 CA 砂浆界面损伤扩展研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(9): 2143-2149.
- [7]赵虎. 温度作用下层间离缝对纵连板式无砟轨道稳定性的影响[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(3): 7-12.
- [8]任西冲. CRTS II 型板式无砟轨道板端上拱病害机理及整治研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
- [9]钟阳龙. CRTS II 型无砟轨道板-砂浆层层间开裂机理及控制研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- [10]朱浩,徐浩,谢铠泽,等. CA 砂浆离缝对 CRTS II 型板式轨道的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2013(12): 35-39.
- [11]赵佳. 基于模态参数的无砟轨道道床板层间脱空识别研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2017.
- [12]LIU Shaohui, JIANG Lizhong, ZHOU Wangbao, et al. Influence of mortar gap on natural vibration frequencies of high-speed railway track-bridge system[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(8): 2807-2819.
- [13]朱永见,赵国堂,郑建. CRTS II 型板式无砟轨道层间离缝产生原因分析[J]. 铁道学报, 2021, 43(2): 111-117.
- [14]赵国堂,高亮,赵磊,等. CRTS II 型板式无砟轨道板下离缝动力影响分析及运营评估[J]. 铁道学报, 2017, 39(1): 1-10.
- [15]季杰,何越磊,洪剑,等. CRTS II 型无砟轨道板离缝病害分析与整治措施[J]. 铁道标准设计, 2020, 57(9): 47-53.
- [16]陈龙,陈进杰,王建西. CRTS II 型板式无砟轨道层间传力规律及离缝破坏研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(8): 130-138.
- [17]杨儒东. 轨道不平顺激励下车轨空间耦合系统动态响应分析[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
- [18]施成,赵勇,刘心成,等. CRTS III 型板式无砟轨道层间伤损评定标准[J]. 铁道建筑, 2023, 63(6): 23-26.
- [19]姜子清,施成,赵坪锐. CRTS II 型板式无砟轨道砂浆层离缝检查及伤损限值研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(1): 53-58.
- [20]中华人民共和国铁道部. 高速铁路工程动态验收技术规范: TB 10761—2013[S]. 北京:中国铁道出版社, 2013.

(下转第 120 页)

Multiscale Rheological Properties of PE Modified Asphalt

LI Xurui^{1,2,3,4}

(1. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China;

2. Zhongben Testing Certification Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China;

3. Research and Development Center of Transport Industry of Technologies,

Materials and Equipments of Highway Construction and Maintenance, Zhengzhou 450000, China;

4. Henan Key Laboratory of Recycling Solid Waste Materials for Road Engineering, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To evaluate the rheological properties of PE(Polyethylene) modified asphalt and the correlation between different rheological indicators, dynamic shear rheological tests and multi stress creep recovery tests were conducted under different PE modifier dosages. The multiscale evaluation indicators of the rheological properties of PE modified asphalt were rutting factor. By using Shenoy parameter, low shear viscosity, irreparable creep flexibility, and creep recovery rate as the evaluation index, the correlation between different rheological indicators was analyzed. The effect of PE modifier on the aging resistance and viscoelasticity of asphalt was evaluated by aging index and Cole-Cole plot. The results show that as the content of PE modifier increases, the rutting factor, low shear viscosity, Shenoy parameter, and creep recovery rate gradually increase, and the latter three are positively correlated with the rutting factor. The irrecoverable creep compliance gradually decreases and is non-linear and negatively correlated with the rutting factor. The correlation coefficient between the rutting factor and other rheological parameters is above 90%. PE modified asphalt has improved aging resistance and elasticity. When the dosage of the PE modifier is greater than 6%, the rheological index and aging index decrease significantly due to the influence of the modifier dosage.

Key words: road engineering; PE modifier; asphalt; rheology; multiscale

(上接第 86 页)

Study on Dynamic Characteristics of Vehicle-CRTS II Slab Ballastless Track Coupling System Under Interlayer Split

CAO Meixue, WANG Mingsheng

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: With the extension of service time of CRTS II slab ballastless track structure, the impact of interlayer joints on track structure and traffic safety has become one of the urgent problems to be solved. In order to clarify the degree of influence of different degrees of interlayer separation on the dynamic characteristics of the vehicle-ballastless track system, a coupled dynamics model of vehicle-CRTS II track slab considering interlayer joints is established, and the effects of single joints with different sizes and multiple joints with different combinations of positions on the dynamic response of the vehicle and the track structure are investigated through the joint simulation of ABAQUS and Simpack. The results showed that the development of a single departure seam was significantly accelerated when the transverse depth and longitudinal length of the seam were 522 mm and 1.275 m and above, respectively. The most unfavorable combination of different positions of the multi-seam is the combination of the plate end and the edge of the slab. The conclusions of the study provide a reference value for the operation and maintenance of high-speed railroad track structures.

Key words: CRTS II slab ballastless track; interlayer separation damage; rigid and flexible coupling; dynamic response