

# 离缝修复条件下无砟轨道板温度翘曲变形特征

许玉德<sup>1,2</sup>, 缪雯颖<sup>1,2</sup>, 严道斌<sup>3</sup>, 祝文君<sup>1,2</sup>, 徐伟昌<sup>4</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804; 3. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235; 4. 中国铁路上海局集团有限公司, 上海 200071)

**摘要:** 根据高速铁路无砟轨道离缝修复工艺, 基于双线性内聚力模型理论, 采用内聚力单元模拟层间粘结界面, 建立考虑多界面粘结的CRTS II型板式无砟轨道有限元模型。计算分析了无砟轨道板在温度梯度 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}\sim+100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 、温升温降 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作用下的翘曲变形, 结果表明: 离缝修复条件下, 在计算范围内温度荷载作用时, 轨道板翘曲变形模式和最值与正常状态一致, 说明离缝修复使无砟轨道板温度翘曲变形得到恢复。

**关键词:** 无砟轨道; 离缝修复; 轨道板; 温度荷载; 翘曲变形  
**中图分类号:** U216 **文献标志码:** A

## Warping Features of Ballastless Track-Slab Under Debonding-Repaired Condition

XU Yude<sup>1,2</sup>, MIAO Wenying<sup>1,2</sup>, YAN Daobin<sup>3</sup>, ZHU Wenjun<sup>1,2</sup>, XU Weichang<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Tunnel Engineering and Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, China; 4. China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

**Abstract:** Based on the construction technology of the debonding repairment applied to the high speed railway ballastless track, the interlayer interfaces were simulated by adapting cohesive element based on the bilinear cohesive zone model, and a finite element model of II slab track of China railway track system (CRTS) was established with full consideration of multi-interface bonding properties. The warping features of the ballastless track-slab were calculated and analyzed at the temperature gradient loads from  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$  to  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$  and the temperature change loads from  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively. The results show that within the range of the temperature loads in this paper, under the debonding-repaired condition, the warping modes and the warping extremes of the track-slab are consistent with the normal state, which indicates that the debonding repairment has restored the warping of the track-slab.

**Key words:** ballastless track; debonding repairment; track-slab; temperature load; warping

我国高速铁路广泛采用无砟轨道结构, 且以中国铁路轨道系统 (China railway track system, CRTS) 系列无砟轨道为主<sup>[1]</sup>。在长期高速运营条件下, CRTS 系列无砟轨道频发离缝等结构病害, 离缝导致无砟轨道结构部件受力变形异常, 进而影响高速铁路行车安全<sup>[2]</sup>。当前, 中国铁路上海局集团有限公司管内沪杭、杭甬、合蚌等高铁线路采用“双组份低粘度灌浆树脂”对离缝进行修复<sup>[3]</sup>。离缝修复后的无砟轨道产生一系列新的课题需要研究, 尤其是修复无砟轨道结构的力学特性评估及服役性能演变等。

轨道板翘曲变形是高速铁路无砟轨道结构服役状态评判的重要指标之一<sup>[4]</sup>。通过分析外荷载作用下轨道板翘曲变形模式和最值等特征, 可在一定程度上判断无砟轨道结构性能的好坏。目前, 国内外学者在无砟轨道板翘曲变形规律及其如何反映结构服役状态的研究方面已经取得了一定的成果, 文献[5-8]分析了结构完好状态下无砟轨道板在温度梯度作用下的温度翘曲变形及应力特征, 提出正、负温度梯度交替变化引起的温度翘曲及压、拉应力交替变化, 是无砟轨道结构产生离缝的主要原因。文献

收稿日期: 2020-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(51808033); 中国铁路总公司科技研究开发计划(2017G003-B); 上海领军人才“地方队”培养计划

第一作者: 许玉德(1965—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为轨道管理及养修技术。

E-mail: xuyude2000@163.com



论文  
拓展  
介绍

[9-12]分析了存在离缝状态下无砟轨道板在温度梯度、温升温降、列车荷载作用下的结构力学响应,认为由于多荷载综合作用导致层间损伤加剧进而使得离缝区域扩展,是引起轨道板损伤、塑性变形、异常上拱的重要原因。可以看出,相关研究中多考虑温度荷载作用的影响,但关注点多聚焦在无砟轨道处于完好状态或存在病害条件下的轨道板温度翘曲变形规律及其影响,而针对养护维修后这一特定阶段的研究极其匮乏。

我国高速铁路正在迈入大规模、高质量运营维护阶段,一系列的病害修复技术也在阶段性的试用和评估中,本文以中国铁路上海局集团有限公司管内正在进行的CRTS II型板式无砟轨道砂浆层离缝修复作业为研究对象,基于建模仿真计算结果,分析温度梯度和温升温降荷载作用下无砟轨道板温度翘曲变形规律及特征,初步评估离缝修复作业对无砟轨道结构特性产生的影响,本研究可为验证离缝修

复技术的科学性和有效性提供一定的参考,并为离缝修复工艺的改进优化提供数据基础。

## 1 离缝修复工艺

文献[3]中详细介绍了CRTS II型板式无砟轨道砂浆层离缝修复的成套技术,涵盖修复材料、机具、工艺流程等。其中,修复材料选用中国铁道科学院集团有限公司研发的CARS-A型双组份低粘度灌浆树脂(CARS表示中国铁科院),其技术指标可见文献[3]。修复工艺流程主要包括:注胶前准备(查清离缝尺寸等特征信息、清除离缝处灰尘及积水等)→离缝注胶(设置注胶嘴、离缝封闭、连接注胶管、注胶)→收尾工作(等待材料固化、去除注胶嘴、打磨清理、表面处理)。如图1所示,为合蚌客运专线CRTS II型板式无砟轨道砂浆层离缝修复前后效果示意图。

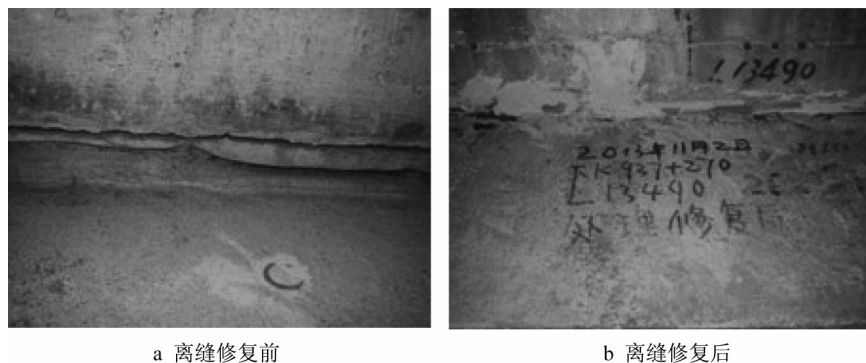


图1 CRTS II型板式无砟轨道离缝修复效果(来源:<http://www.hbmzj.com>)

Fig. 1 Effect of debonding repairment in CRTS II slab ballastless track (Source: <http://www.hbmzj.com>)

## 2 无砟轨道建模

已有的研究认为,无砟轨道层间粘结作用对于结构力学及损伤特性有重要影响<sup>[2]</sup>。CRTS系列无砟轨道均为典型的层合结构,主体结构由轨道板、砂浆层(或自密实混凝土)、底座板(支承层)等部件组成,并依靠层间粘结作用联结而形成整体。在长期运营过程中,外荷载作用使得层间粘结性能逐渐退化,其约束无砟轨道部件的能力也逐渐减弱,进一步造成无砟轨道各部件的变形难以协调。在无砟轨道建模时,层间粘结作用一般用层间粘结界面表示,建立层间粘结界面的方法有摩擦接触<sup>[13]</sup>、内聚力模型法<sup>[9-10]</sup>等。

### 2.1 内聚力模型

本文采用双线性内聚力模型表征离缝修复条件下CRTS II型板式无砟轨道层间粘结作用及其演变规则,如图2所示,其中,由点 $O \rightarrow A \rightarrow B$ 代表的就是层间粘结状态的变化过程。在 $O \rightarrow A$ 阶段,随着界面相对位移 $\delta$ 的上升,界面应力 $\sigma$ 随之线性上升,达到点A时(界面相对位移达到 $\delta_{n,s,t}^0$ ,称作临界损伤位移;或界面应力达到 $\sigma_{n,s,t}^0$ ,称作内聚强度; $n, s, t$ 分别代表法向、第一切向、第二切向方向),粘结界面的损伤产生,其约束无砟轨道部件的能力开始减弱,该阶段OA直线的斜率( $k_{n,s,t}^0$ )称作界面初始刚度。之后,粘结界面的损伤进入线性退化阶段 $A \rightarrow B$ ,直至界面应力下降至为零(界面相对位移达到 $\delta_{n,s,t}^f$ ,称作临界失效位移),粘结界面的完全失效,此时层与层之间处于相对

自由状态,对于轨道结构上部的无砟轨道板而言,其转化为受层间摩擦作用的约束。需要说明的是,由曲线  $O \rightarrow A \rightarrow B$  与坐标轴围成的三角形区域面积 ( $G_{I,II,III}^c$ , I, II, III 分别表示 I 型、II 型、III 型断裂模式) 代表的是界面损伤失效过程中所释放的能量,称作断裂能。以上层间内聚强度、界面初始刚度、临界损伤位移、临界失效位移、断裂能等指标决定了层间粘结界面抵抗损伤的能力,因此是无砟轨道有限元建模时的输入参数。

## 2.2 无砟轨道模型

为避免有限元模型计算的“边界效应”,建立了 5 块板总计 32.45 m 长的无砟轨道有限元模型,如图 3a 所示,其中,采用内聚力单元模拟层间粘结界面。对于离缝修复工况的选择,结合中国铁道科学研究院集团有限公司的现场调研数据<sup>[14]</sup>,选定特征尺寸为  $6\,450\text{ mm} \times 350\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  的轨道板与砂浆层层间板边贯通离缝修复作为研究工况,如图 3b 所示。需要说明的是,为更真实反映离缝修复条件下的无砟轨道板温度翘曲变形,仅在图 3a 中#3 轨道板处设置离缝修复工况。由此,对于#1、#2、#4 和#5 轨道板处,沿垂向方向从上至下分别是轨道板-砂浆层粘结界面、砂浆层-支承层粘结界面、

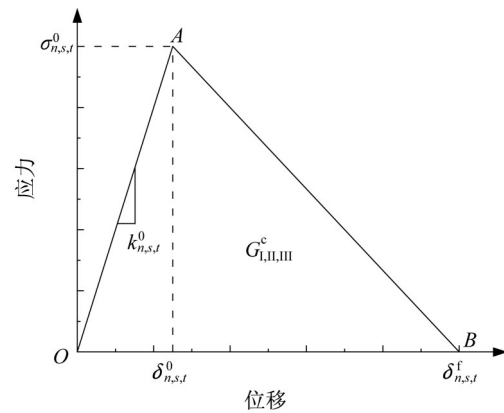


图 2 双线性内聚力模型应力-位移本构关系

Fig. 2 Stress-displacement constitutive relationship of bilinear cohesive zone model

支承层;而对于#3 轨道板处,从上至下分别是轨道板-轨道板与砂浆层层间(轨道板-修复材粘结界面、修复材-修复材-砂浆层粘结界面,以及轨道板-砂浆层粘结界面)、砂浆层、砂浆层-支承层粘结界面、支承层。无砟轨道结构沿纵向则由宽窄接缝和纵连钢筋进行联结约束。CRTS II 型板式无砟轨道各部件尺寸均按照标准尺寸进行设定,各部件材料参数见表 1,各层间粘结界面参数见表 2。

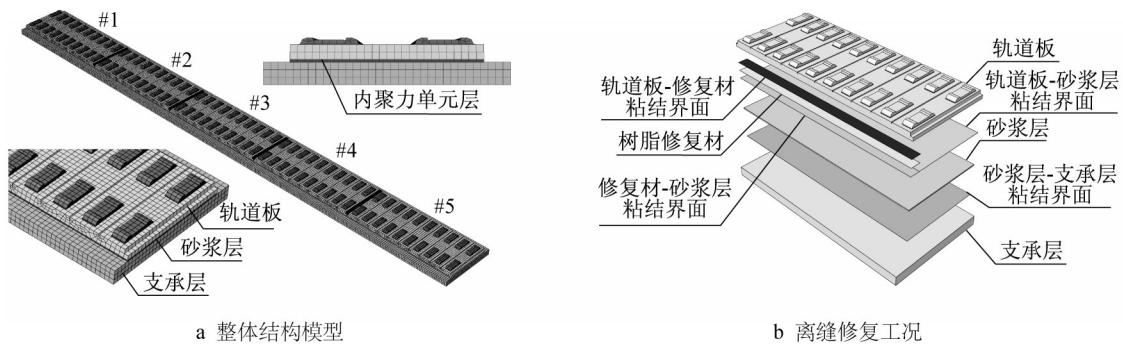


图 3 离缝修复后 CRTS II 型板式无砟轨道有限元模型

Fig. 3 Finite element model of debonding repaired CRTS II slab ballastless track

表 1 离缝修复无砟轨道结构部件材料参数<sup>[15]</sup>

Tab. 1 Parameters of material of involved parts of debonding repaired ballastless track<sup>[15]</sup>

部件	材料	密度 / ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 / MPa	泊松比	热膨胀系数 / $10^{-6}\cdot\text{C}^{-1}$
轨道板	C55 混凝土	2 500	35 500	0.2	10
砂浆层	CA 砂浆	1 900	7 000	0.2	15
支承层	C15 混凝土	2 500	22 000	0.2	10
宽窄接缝	C55 混凝土	2 500	35 500	0.2	10
纵连钢筋	钢材	7 900	210 000	0.3	12
修复材料	CARS-A 型双组份低粘度灌浆树脂		769	0.2	65

为评估砂浆层离缝修复作业对无砟轨道温度翘曲变形的影响,本文同时还设置了结构完好工况以

及存在离缝工况作为对比。对于结构完好工况,即在#3 轨道板与砂浆层、砂浆层与支承层层间设置尺

表2 层间粘结界面内聚力模型参数<sup>[15]</sup>  
 Tab. 2 Parameters of involved interfaces of cohesive zone model<sup>[15]</sup>

粘结界面	模式	内聚强度 $\sigma^0$ / MPa	断裂能 $G$ / (mJ·mm <sup>-2</sup> )	界面初始刚度 $K$ / (MPa·mm <sup>-1</sup> )	损伤起始位移 $\delta^0$ / $\mu\text{m}$	损伤失效位移 $\delta^f$ / $\mu\text{m}$
轨道板—砂浆层	法向	1.163	0.012	2 230.426	0.522	20.910
	切向	0.848	0.009	1 383.755	0.613	20.980
砂浆层—支承层	法向	1.096	0.010	547.790	2.000	18.970
	切向	0.623	0.006	441.504	1.410	20.090
轨道板—修复材	法向	3.235	0.015	2 469.252	1.310	9.160
	切向	2.261	0.013	1 081.861	2.090	11.860
修复材—砂浆层	法向	0.873	0.005	178.263	4.900	10.680
	切向	0.602	0.002	137.121	4.390	8.100

寸为6 450 mm×2 550 mm×2 mm的完好粘结界面。对于存在离缝工况,则在轨道板与砂浆层层间设置尺寸为6 450 mm×350 mm×2 mm的板边贯通离缝,并设置该处轨道板与砂浆层为摩擦接触,摩擦系数取为0.3。

各部件建模完成后,在垂向方向进行装配、叠合并绑定完成整体建模。网格划分方面,轨道板、砂浆层、支承层、宽窄接缝均采用C3D8R实体单元,纵连钢筋采用T3D2桁架单元,内聚力单元采用COH3D8粘结单元。相互作用方面,各层采用绑定约束,纵连钢筋与混凝土采用嵌入模型表征。边界条件方面,在模型两端施加对称完全固定约束,底部设置弹性基础,基础刚度为1 000 MPa·m<sup>-1</sup>。

### 2.3 温度荷载

本文重点关注温度荷载作用下的无砟轨道板翘曲变形,而实际上无砟轨道结构所处的温度场具有空间性、时变性、随机性等不确定特征,因此难以全

面模拟无砟轨道真实所处的温度场。根据既有相关文献[5-12]的研究,本文采用温度梯度和温升温降两种温度荷载类型进行仿真模拟。

对于温度荷载的取值,基于中国铁道科学研究院集团有限公司在沪杭高铁金山北站附近CRTS II型板式无砟轨道实尺模型温度观测点获取的年温度场数据,提取无砟轨道板年温度梯度数据如图4所示,可见其基本在-30 °C·m<sup>-1</sup>~+80 °C·m<sup>-1</sup>范围内,处于我国《高速铁路设计规范》<sup>[16]</sup>中CRTS II型板式无砟轨道设计温度梯度-45 °C·m<sup>-1</sup>~+90 °C·m<sup>-1</sup>范围内,考虑到偶发性极端气温条件的可能性,本文选定-50 °C·m<sup>-1</sup>~+100 °C·m<sup>-1</sup>温度梯度范围进行计算。同时,提取无砟轨道板年温升温降幅值数据如图5所示,可见轨道板的温升温降基本在-20 °C~+20 °C范围内,我国《高速铁路设计规范》未将温升温降作为设计荷载,本文考虑偶发性极端气温条件的可能性,选定-30 °C~+30 °C温升温降范围进行计算。

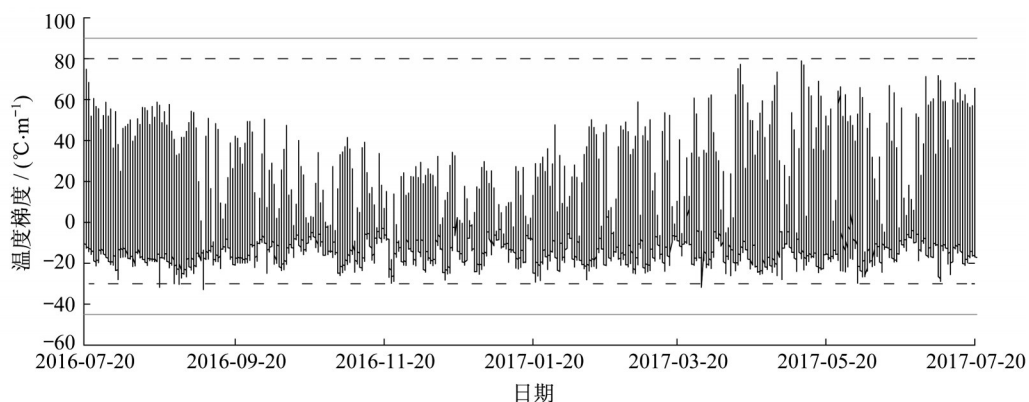


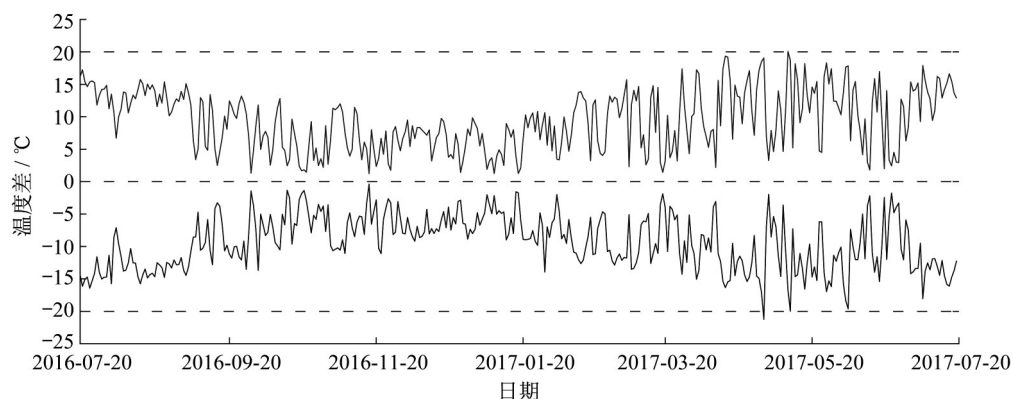
图4 CRTS II型无砟轨道板实测温度梯度<sup>[15]</sup>

Fig. 4 Data of measured temperature gradient of CRTS II ballastless track<sup>[15]</sup>

## 3 轨道板翘曲变形特征

首先需要说明的是,一方面,由于在本文计算温

度荷载范围内所得到的计算结论基本一致,因此,本文后续仅给出部分特征温度荷载作用下无砟轨道板翘曲变形的结果,其中温度梯度取为-50 °C·m<sup>-1</sup>、

图5 CRTS II型无砟轨道实测温升温降数据<sup>[15]</sup>Fig. 5 Data of measured temperature rise and drop of CRTS II ballastless track<sup>[15]</sup>

$-25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 $+100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 作用的结果,温升温降则取 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作用的结果。另一方面,在本文计算温度荷载范围内所产生层间损伤程度非常有限,并未对轨道板的宏观温度变形产生明显的影响,故本文在后续分析时不再阐述层间损伤对温度变形的影响情况。

定义轨道板的纵向、垂向、横向方向如图6a所示。为更直观地展现不同工况中轨道板翘曲变形的相似性和差异性,如图6b所示,在轨道板中间假缝位置(图中虚线)以下100 mm处提取垂向位移曲线,

该位置位于板表和板底的中间,能更真实反映轨道板内部的变形情况。需要说明的是,沿不同轴向不同截面提取的垂向位移曲线,其对比结果与图6b所示位置提取曲线所反映的结论基本一致,因此本文仅选取图6b所示一处位置的数据进行分析说明。同时,本文计算结果显示,轨道板所受最大拉压应力均小于其抗拉、抗压强度,轨道板最大应力随温度荷载变化呈线性变化,基于此,不在后文中对轨道板表现的受力特征进行详细分析。

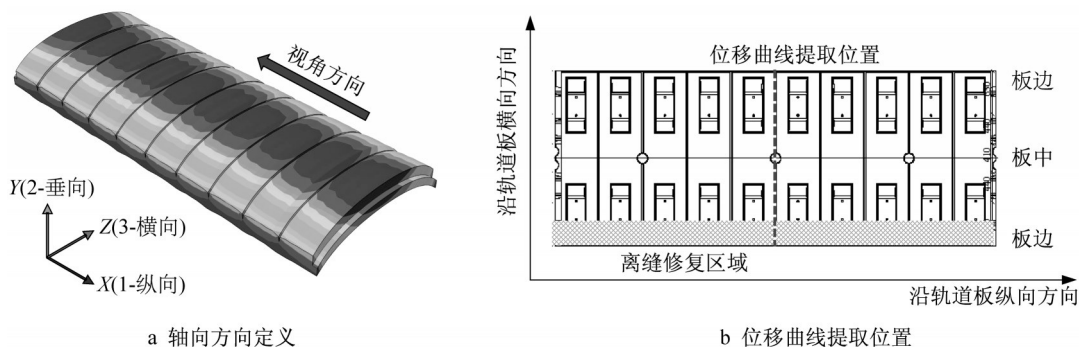


图6 轨道板轴向方向定义及位移曲线提取位置

Fig. 6 Definition of direction of track-slab and extraction position of displacement curve

### 3.1 温度梯度荷载作用

#### (1) 正温度梯度荷载作用

图7为正温度梯度荷载 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $+100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 作用下三种工况的轨道板垂向位移分布横断面视图。

从图中可见,三种工况中轨道板均呈现“中间拱起、两边下沉”的形态,垂向位移的最值位于板中和板边区域。与结构完好工况相比,在存在离缝工况下,轨道板在离缝一侧的垂向位移明显增大,在 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 荷载作用下垂向位移最值为 $-0.123\text{ mm}$ ,

约是结构完好工况中 $-0.042\text{ mm}$ 的2.9倍;在 $+100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 荷载作用下最值为 $-0.245\text{ mm}$ ,约是结构完好工况中 $-0.085\text{ mm}$ 的2.9倍;与此同时,轨道板板中位移最值位置也发生了偏移。离缝修复工况下,轨道板形态和垂向位移最值基本与结构完好工况一致。

图8为正温度梯度荷载 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $+100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 作用下三种工况在轨道板位移提取位置的垂向位移曲线。

从图中可见,结构完好时,轨道板垂向位移沿线

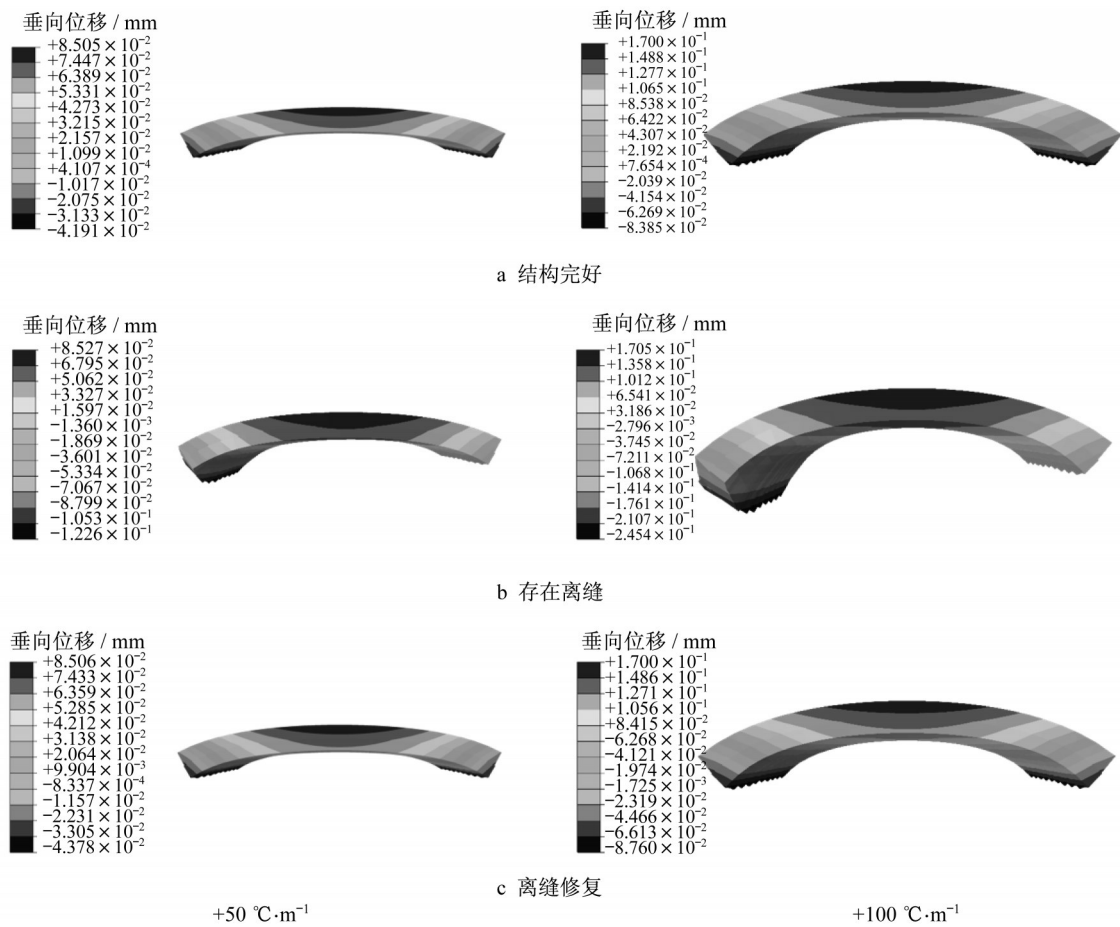


图7 正温度梯度作用下轨道板垂向位移云图

Fig. 7 Distribution of vertical displacement of track-slab under positive temperature gradient load

路中心线轴对称分布;存在离缝时,垂向位移曲线轴对称分布的形态被打破;在离缝修复后,轨道板垂向

位移曲线与结构完好工况几乎完全贴合,可见离缝修复作业可以较好地恢复轨道板垂向位移。

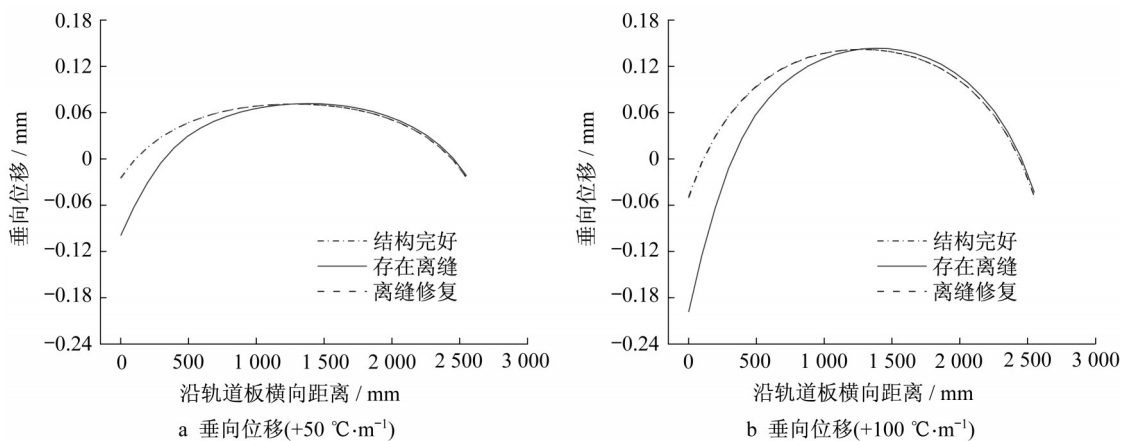


图8 正温度梯度作用下轨道板垂向位移对比图

Fig. 8 Comparison of vertical displacement of track-slab under positive temperature gradient load

(2) 负温度梯度荷载作用

图9为负温度梯度荷载 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 作用下三种工况的轨道板垂向位移分布横断面

视图。

从图中可见,三种工况中轨道板均呈现“两边翘曲,中间下凹”的态势,垂向位移的最值同样位于板

中和板边区域。与结构完好工况相比,在存在离缝的工况下,轨道板在离缝一侧的垂向位移明显增大,在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 荷载作用下最值为 $+0.075\text{ mm}$ ,约是结构完好工况中 $+0.032\text{ mm}$ 的2.3倍;在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 荷载作用下最值为 $+0.179\text{ mm}$ ,约是结构完好

工况中 $+0.064\text{ mm}$ 的2.8倍;与此同时,轨道板板中位移最值位置也发生了偏移。而在离缝修复工况下,轨道板形态和垂向位移最值基本与结构完好工况一致。

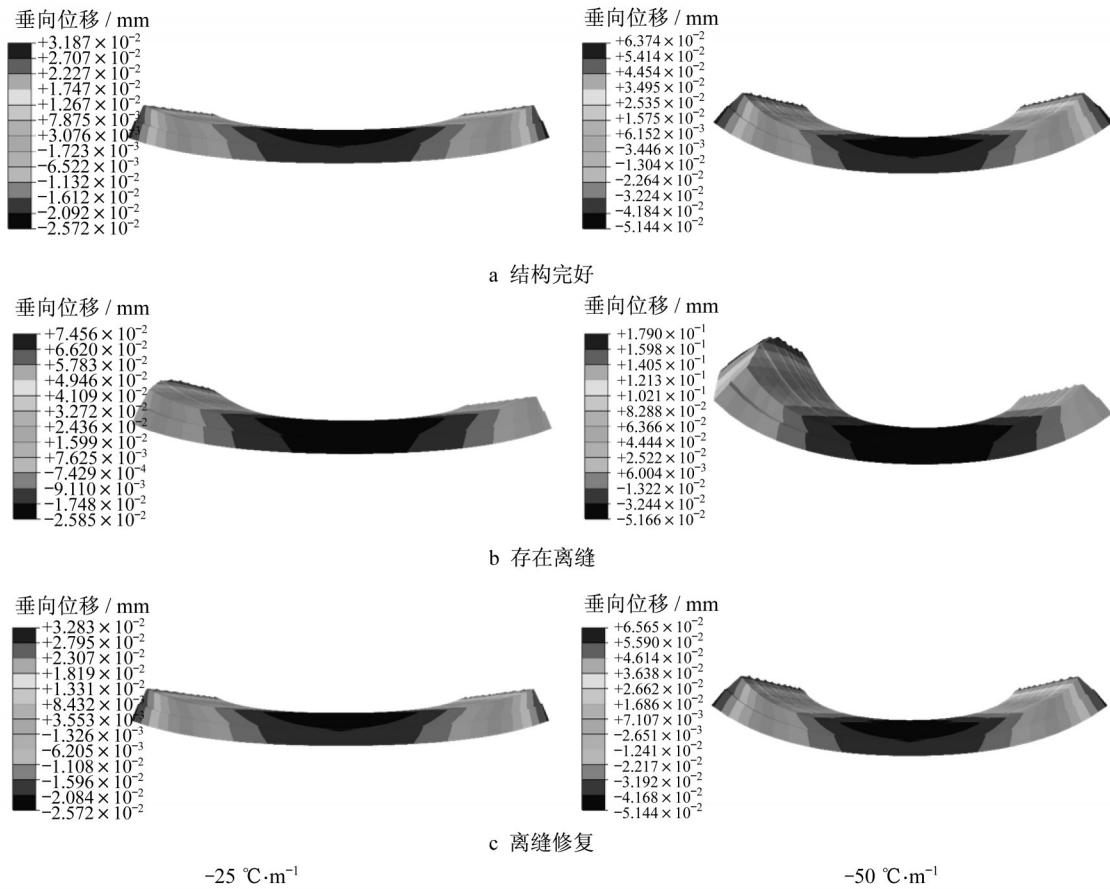


图9 负温度梯度作用下轨道板垂向位移云图

Fig. 9 Distribution of vertical displacement of track-slab under negative temperature gradient load

图10为负温度梯度荷载 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ 作用下三种工况在轨道板位移提取位置的垂向位移曲线。

从图中可见,在负温度梯度作用下,无砟轨道板垂向位移特征与正温度梯度作用下近似,即结构完好时,轨道板沿线路中心线轴对称分布;存在离缝时,垂向位移曲线按照轨道板板中对称分布的形态被打破;离缝修复后,离缝导致的位移偏差得到恢复,轨道板垂向位移曲线与结构完好工况几乎贴合。结合正负温度梯度工况下的分析结果,可以判断离缝修复作业对恢复轨道板垂向位移效果良好。

### 3.2 温升温降荷载作用

#### (1) 温升荷载作用

图11为温升荷载 $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作用下三种工况的轨道板垂向位移分布横断面视图。从图中可

以看出,三种工况中轨道板均呈现“中间拱起,两边下沉”的轴对称形态,但是与正温度梯度荷载作用不同,轨道板垂向位移均为正数,即轨道板整体沿着垂向正向上拱,最值位于板中位置。在存在离缝的工况中,与结构完好时相比,轨道板在离缝修复一侧以及板中位置的垂向位移没有明显偏移,而是在板边下端存在差别,在 $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 荷载作用下其垂向位移为 $+0.004\text{ mm}$ ,在 $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 荷载作用下为 $+0.008\text{ mm}$ ,分别是结构完好工况的36.4%和34.8%。在离缝修复工况中,轨道板垂向位移分布在形态和最值上都基本与结构完好工况一致。

图12为温升荷载 $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作用下三种工况在位移提取位置的垂向位移曲线。由图中可见,以结构完好工况为参照,存在离缝工况中,轨道板垂向位移曲线在离缝修复一侧出现了偏移,但与

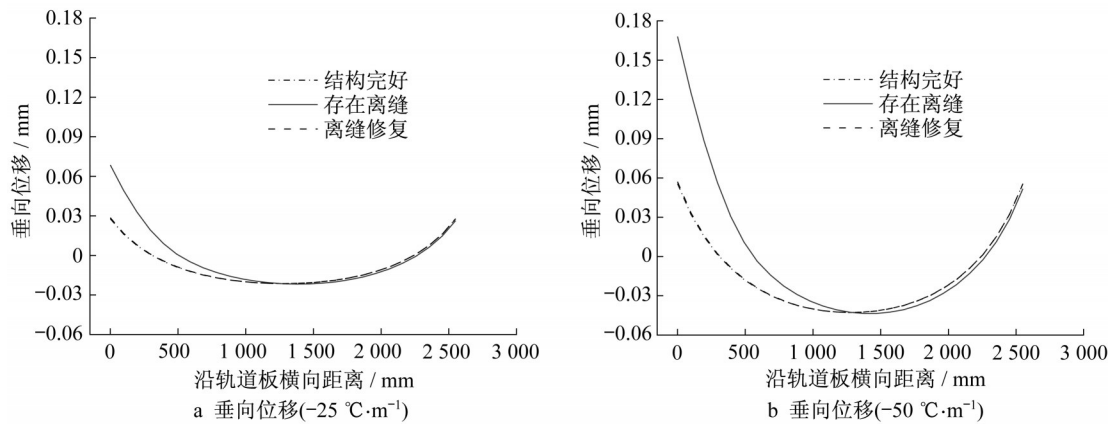


图 10 负温度梯度作用下轨道板垂向位移对比图

Fig. 10 Comparison of vertical displacement of track-slab under negative temperature gradient load

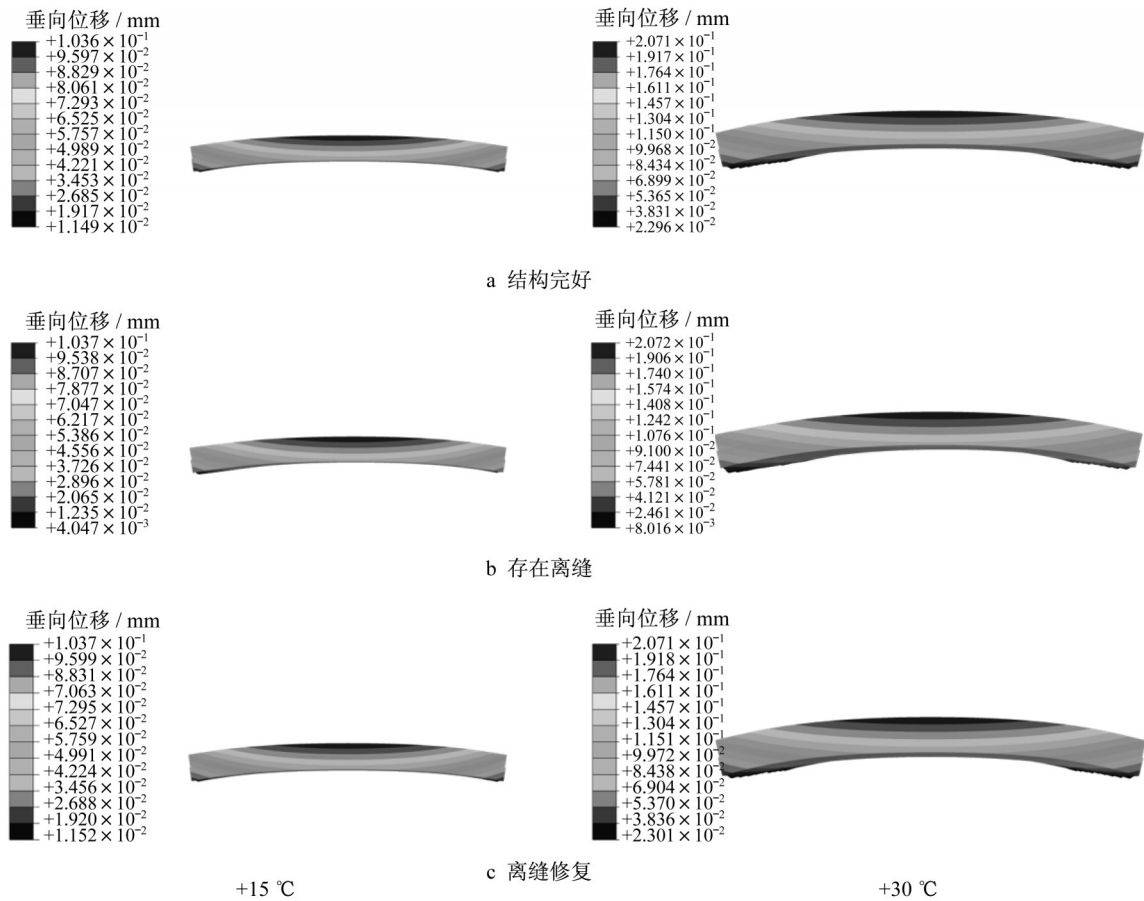


图 11 温升荷载作用下轨道板垂向位移云图

Fig. 11 Distribution of vertical displacement of track-slab under temperature rise load

温度梯度荷载作用下成倍的差异相比,温升荷载作用下差异基本控制在 15% 范围内。在离缝修复工况中,轨道板垂向位移曲线则与结构完好工况几乎完全贴合,可见离缝修复作业可以较好地恢复轨道板垂向位移。

(2) 温降荷载作用

图 13 为温降荷载  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  作用下三种

工况的轨道板垂向位移分布横断面视图。

从图 13 中可看出,三种工况中轨道板均呈现“两边翘曲、中间下凹”的形态,轨道板整体沿着垂向反向下凹,位移最值位于板中位置。在存在离缝的工况中,与温升荷载作用的情况类似,轨道板在板边下端的垂向位移存在偏移,在  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  荷载作用下为  $-0.003\text{ mm}$ ,在  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  荷载作用下垂向位移为  $-0.002\text{ mm}$ ,分别是



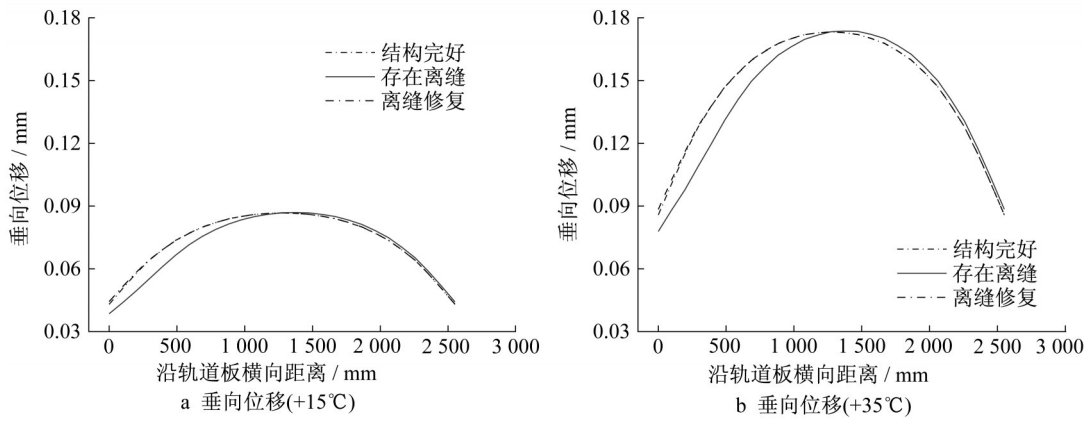


图 12 温升荷载作用下轨道板垂向位移对比图

Fig. 12 Comparison of vertical displacement of track-slab under temperature rise load

结构完好工况的 27.3% 和 8.7%。在离缝修复工况中，轨道板垂向位移分布在形态和最值上都基本与结构完好工况一致。

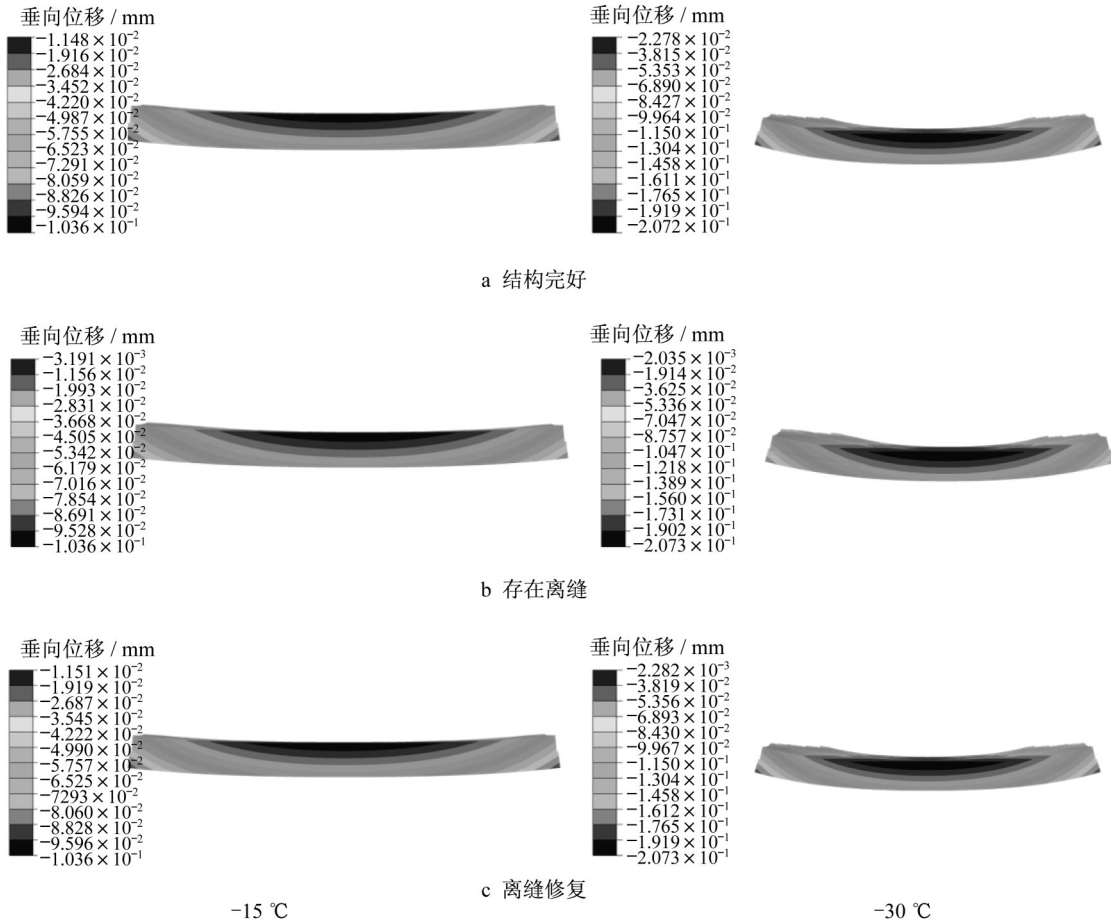


图 13 温降荷载作用下轨道板垂向位移云图

Fig. 13 Distribution of vertical displacement of track-slab under temperature drop load

图 14 为温降荷载  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  作用下三种工况在位移提取位置的垂向位移曲线。

由图 14 中可见，与温升荷载作用的情况类似，以结构完好工况为参照，存在离缝工况中的轨道板

垂向位移曲线在离缝修复一侧出现了偏移的情况，差异基本控制在 18% 范围以内。而在离缝修复工况中，轨道板垂向位移曲线则与结构完好工况几乎完全贴合。结合温升温降作用下的分析结果，可以

判断离缝修复作业对恢复轨道板垂向位移效果良好。

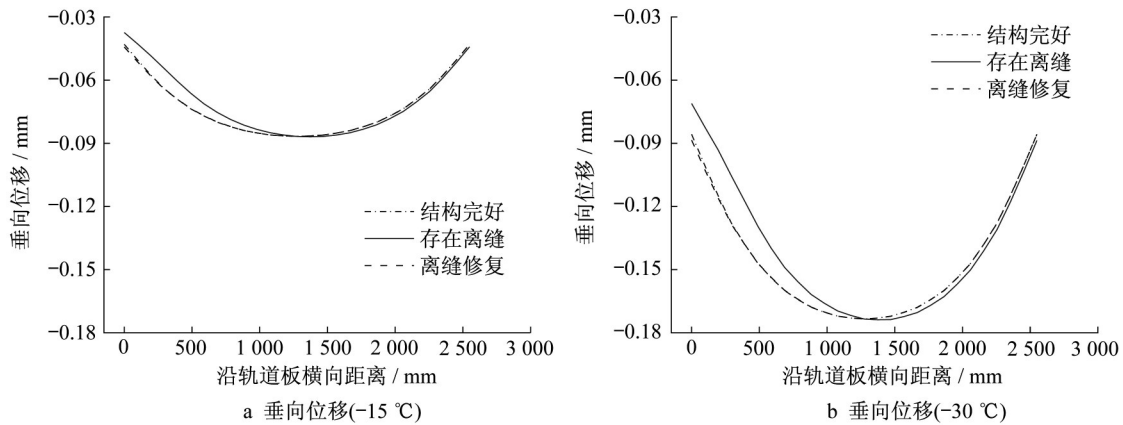


图 14 温降荷载作用下轨道板垂向位移对比图

Fig. 14 Comparison of vertical displacement of track-slab under temperature drop load

## 4 结论与进一步研究方向

根据高速铁路无砟轨道离缝修复工艺,基于双线性内聚力模型理论,在有限元仿真软件 ABAQUS 中以内聚力单元模拟层间粘结界面,建立考虑多界面粘结的离缝修复后 CRTS II 型板式无砟轨道有限元模型,计算分析了无砟轨道板在温度梯度以及温升温降荷载作用下的翘曲变形特征,对比结构完好、存在离缝、离缝修复等三种工况的结果,发现当存在离缝时,在温度梯度荷载作用下,离缝区域垂向位移最值可达结构完好工况的 2.3~2.9 倍,在温升温降荷载作用下,为结构完好工况的 8.7%~36.4%。而在离缝修复条件下,无砟轨道板垂向翘曲变形形态及最值与结构完好时基本一致,表明离缝修复使无砟轨道板温度翘曲变形得到恢复。

本文针对无砟轨道离缝修复后的轨道板翘曲变形特征进行了定性和定量分析,初步评估了离缝修复作业对轨道板翘曲变形的控制效果,可为验证离缝修复作业的科学性和有效性提供一定的参考。但本文研究仅考虑了单一温度梯度和温升温降荷载,进一步研究中应考虑长期循环温度荷载作用的影响,并建立能考虑组合荷载(温度、列车、水、基础变形等)作用的有限元仿真模型,探索离缝修复后层间界面二次损伤规律及二次离缝产生的机理,以全面评估离缝修复后无砟轨道结构特性,为离缝修复作业推广深化和工艺优化提供更充分的理论基础。

## 作者贡献申明:

许玉德: 方案制定、资金筹措、过程监督;  
 缪雯颖: 模型仿真、数据处理、论文写作;  
 严道斌: 模型仿真、数据处理、论文校修;  
 祝文君: 资金筹措、论文校修;  
 徐伟昌: 资金筹措、论文校修。

## 参考文献:

- [1] 练松良. 轨道工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.  
LIAN Songliang. Track engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [2] 钟阳龙, 高亮, 王璞, 等. 温度荷载下 CRTS II 型轨道板与 CA 砂浆界面剪切破坏机理[J]. 工程力学, 2018, 35(2): 230.  
ZHONG Yanglong, GAO Liang, WANG Pu, *et al.* Mechanism of interfacial shear failure between CRTS II slab and CA mortar under temperature loading [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35 (2): 230.
- [3] 易忠来, 李化建, 温浩, 等. CRTS II 型板式无砟轨道充填层离缝修复技术研究[J]. 铁道建筑, 2015(1): 102.  
YI Zhonglai, LI Huajian, WEN Hao, *et al.* Study on remedy technology of open joint of filling layer for CRTS II slab-type ballastless track [J]. Railway Engineering, 2015(1): 102.
- [4] SONG L, LIU H, CUI C, *et al.* Thermal deformation and interfacial separation of a CRTS II slab ballastless track multilayer structure used in high-speed railways based on meteorological data [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117528.
- [5] 刘钰, 赵国堂. CRTS II 型板式无砟轨道结构层间早期离缝研究 [J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 1.  
LIU Yu, ZHAO Guotang. Analysis of early gap of between layers of CRTS II slab ballastless track structure [J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 1.

- [6] 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.  
CHEN Long, CHEN Jinjie, WANG Jianxi. Study on stress transfer and interface damage of CRTS II slab ballastless track [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(8): 130.
- [7] 钟堃, 何越磊, 路宏遥, 等. 持续高温作用下 CRTS II 型无砟轨道层间离缝分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(5): 1128.  
ZHONG Yao, HE Yuelei, LU Hongyao, *et al.* Analysis of interface seam of CRTS II slab track under sustained high temperature [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(5): 1128.
- [8] 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.  
ZHAO Guotang, LIU Yu. Mechanism analysis of delamination of CRTS II slab ballastless track structure [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(7): 117.
- [9] ZHU S, WANG M, ZHAI W, *et al.* Mechanical property and damage evolution of concrete interface of ballastless track in high-speed railway: Experiment and simulation [J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 460.
- [10] ZHANG Y, WU K, GAO L, *et al.* Study on the interlayer debonding and its effects on the mechanical properties of CRTS II slab track based on viscoelastic theory [J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 387.
- [11] CAI X, LUO B, ZHONG Y, *et al.* Arching mechanism of the slab joints in CRTS II slab track under high temperature conditions [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 98: 95.
- [12] REN J, WANG J, LI X, *et al.* Influence of cement asphalt mortar debonding on the damage distribution and mechanical responses of CRTS I prefabricated slab [J]. Construction and Building Materials, 2019, 230: 116995.
- [13] ZHONG Y, GAO L, ZHANG Y. Effect of daily changing temperature on the curling behavior and interface stress of slab track in construction stage [J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 638.
- [14] 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(1): 53.  
JIANG Ziqing, SHI Cheng, ZHAO Pingrui. Crack detecting of mortar layer for CRTS II slab type ballastless track and its damage limit [J]. Railway Engineering, 2016(1): 53.
- [15] XU Y, YAN D, ZHU W, *et al.* Study on the mechanical performance and interface damage of CRTS II slab track with debonding repairment [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119600.
- [16] 国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB 10621—2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.  
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of high speed railway: TB 10621—2014 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.