

顶推纠偏对无砟轨道的影响及工艺优化

许玉德^{1,2}, 石梓煊^{1,2}, 邱俊兴^{1,2}

(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)

摘要: 基于高速铁路无砟轨道纠偏工程, 建立路基上 CRTS II 型板式无砟轨道纠偏有限元模型。选取顶推纠偏典型方案, 模拟不同顶推压力作用, 分析无砟轨道结构力学与损伤行为。在此基础上, 研究扩大解黏区和凿除宽窄接缝对纠偏的影响, 并提出纠偏工艺优化建议。结果表明, 轨道板假缝开裂是力学控制指标, 保证部件不开裂的临界顶推压力为 0.58 MPa, 对应纠偏位移为 1.50 mm。轨道板与宽窄接缝层间是损伤控制界面, 保证层间不损伤的临界顶推压力为 0.51 MPa, 对应纠偏位移为 1.23 mm。若需提升单次纠偏位移, 则建议将既有方案解黏区往两端各扩大 3/4 轨道板长, 并在纠偏前对宽窄接缝进行凿除。

关键词: 无砟轨道; 横向纠偏; 仿真计算; 拉应力; 刚度下降率

中图分类号: U216

文献标志码: A

Effect of Alignment Correction on Ballastless Tracks and Optimization of Rectification Process

XU Yude^{1,2}, SHI Zixuan^{1,2}, QIU Junxing^{1,2}

(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)

Abstract: Based on the alignment correction engineering for ballastless track on high-speed railways, a finite element model for the alignment correction of the CRTS II slab ballastless track on the subgrade was established. A typical pushing scheme for alignment correction was selected, and the effects of different pushing pressures were simulated. The mechanical and damage performance of the ballastless track were analyzed. The effect of expanding the delamination zone and removing the wide and narrow joints was studied, and optimization

suggestions for the alignment correction were proposed. The results show that the fake-crack of track-slabs is a critical mechanical control index, and the critical pushing pressure to ensure the components from crack is 0.58 MPa, corresponding to an alignment displacement of 1.50 mm. The interface between the track-slab and the wide and narrow joint is a critical control area for damage, and the critical pushing pressure to ensure interlayer from damage is 0.51 MPa, corresponding to an alignment displacement of 1.23 mm. To increase the alignment displacement, it is recommended to expand the delamination zone of the existing scheme by 3/4 of the track-slab length on each end. At the same time, the wide and narrow joints could be removed before alignment correction.

Keywords: ballastless track; lateral alignment correction; simulation calculation; tensile stress; stiffness degradation

结构横向偏移是高速铁路无砟轨道系统的重点病害, 直接影响高速列车运行的安全性, 必须及时采取有效手段进行整治, 使线形条件恢复至安全可控范围。目前, 高速铁路工务部门多采用特定纠偏工艺对无砟轨道结构横向偏移进行整治, 如注浆抬升纠偏法^[1]等。虽然相关工艺已基本成熟, 整治工作也已在路内开展, 但是既有纠偏方案对无砟轨道结构的内在影响机制仍不明确, 有必要开展进一步研究。

进行纠偏时应尽量避免对无砟轨道结构本身造成衍生损伤或破坏, 因此需要关注纠偏过程中结构力学和损伤行为。为此, 刘竞等^[2-4]仿真分析了 CRTS II 型板式无砟轨道在单点或多点顶推力作用下各部件的受力与变形, 并基于工程实践提出了不

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2602900)

第一作者: 许玉德, 教授, 博士生导师, 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

同线下基础、不同无砟轨道结构类型横向纠偏解离界面的选择建议。宋茜^[5]计算分析了不同纠偏长度、解离长度和层间摩擦因数下CRTSⅡ型双块式无砟轨道道床板的受力。许玉德等^[6]关注了路基上CRTSⅡ型板式无砟轨道纠偏过程中层间离缝和部件损伤的扩展规律。此外,刘竞等^[7]和董敏琪等^[8]基于无砟轨道纠偏施工现场的数据监测工作,评价了既有纠偏方案的整治效果。以上研究取得了一些重要成果,对现场正在开展的纠偏作业起到了一定的指导作用。需要指出的是,以上研究多是基于纠偏作业中可测得的力学指标开展,对可能产生的隐蔽性损伤等关注较少。

基于此,为了更好地认识既有纠偏方案对无砟轨道结构的内在影响机制,保证纠偏无砟轨道结构本身的安全性,建立了路基上CRTSⅡ型板式无砟轨道纠偏有限元模型,较为全面地分析了既有纠偏方案下无砟轨道结构各部件力学特性和层间损伤规律,并站在维修工程实施的角度,提出了既有纠偏方案的改进方法,研究结果可为无砟轨道纠偏作业的

深化提供一定的参考。

1 纠偏无砟轨道模型

1.1 纠偏方法

以中国铁路上海局集团有限公司管内高速铁路纠偏工程为例,路基上CRTSⅡ型板式无砟轨道采用注浆抬升纠偏法,关键流程^[6]有:①纠偏作业前,将纠偏区段及其两端各3块轨道板范围内的扣件松开;②横向顶推前,将解黏剂注入纠偏区段的支承层与路基表层之间,解除支承层与路基表层黏结约束,形成解黏区;③解黏完成后,采用机械顶推技术对轨道结构进行横向纠偏,直至达到预定纠偏量;④纠偏到位后,采用高聚物注浆材料对解黏区缝隙进行填充,实现上部轨道结构的快速平稳抬升。

1.2 模型建立

现场整治结构横向偏移时,以连续3块轨道板及以上居多,因此选取3块轨道板工况为顶推纠偏典型方案。在有限元软件中建立包含9块轨道板的路基上CRTSⅡ型板式无砟轨道纠偏模型,见图1。

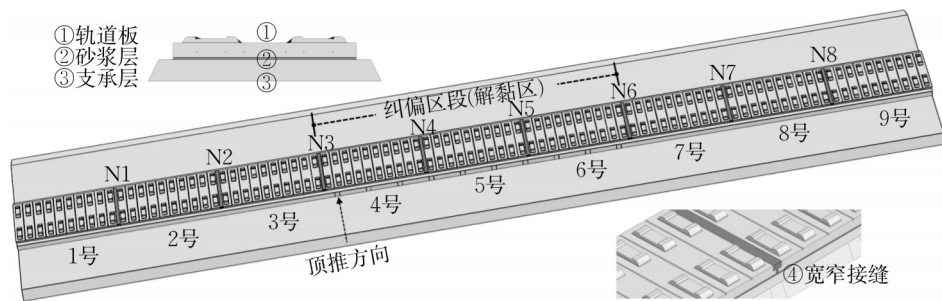


图1 路基上CRTSⅡ型板式无砟轨道纠偏模型

Fig.1 Alignment correction model of CRTSⅡ slab ballastless track on the subgrade

部件方面,钢轨扣件松开可忽略,模型包括轨道板(1号~9号)、砂浆层、支承层、宽窄接缝(N1~N8)、钢筋架构和路基,各部件结构尺寸、材料属性、空间位置与文献^[6]中一致。

相互作用方面,考虑轨道板-砂浆层及轨道板-宽窄接缝层间黏结作用,以双线性内聚力模型表征,采用内聚力单元,单元厚度为2 mm,网格尺寸为50 mm。对于轨道板-砂浆层间黏结^[9],法向内聚强度取1.792 MPa,界面刚度取708.485 MPa·mm⁻¹,断裂能释放率取0.025 mJ·mm⁻²;切向内聚强度取0.956 MPa,界面刚度取63.039 MPa·mm⁻¹,断裂能释放率取0.018 mJ·mm⁻²。对于轨道板-宽窄接缝层间黏结,其实质为新旧C55混凝土的界面黏结,故

双线性内聚力模型参数取C55混凝土断裂损伤力学参数的60%^[10]。此外,对于支承层与路基之间的相互作用,解黏区的支承层-路基层间作用设为摩擦,现场试验测定摩擦因数为0.275^[10],非解黏区的支承层-路基层间作用设为绑定。钢筋架构采用有限元软件的“嵌入”功能实现与其他部件相互作用的设定。

荷载方面,考虑重力荷载,并基于顶推纠偏典型方案,采用千斤顶等设备对纠偏区域的支承层施加顶推压力。千斤顶布置间隔为2 m,共布置10个,并在千斤顶与支承层之间加垫一块300 mm×300 mm的钢板,以保证顶推压力作用相对均匀。边界条件方面,为了保证纠偏区段轨道结构的均匀变形,作业

时在纠偏区段两侧各3块轨道板的外侧进行植筋锚固,因此考虑本模型的两端和底部均采用完全固定约束。

此外,为了完成预定纠偏量,往往采用多次小幅度加载顶推的方式进行作业。要确保单次小幅度加载顶推的安全,控制千斤顶的顶推压力是关键。基于此,设定单次顶推压力0.5、0.6、0.7、0.8 MPa 4种工况进行仿真计算,并结合计算结果对轨道部件力学特性和层间损伤规律进行分析。

2 轨道部件力学特性

仿真计算结果表明,顶推纠偏过程中无砟轨道砂浆层和支承层的受力与变形均稳定安全,这与作业现场的一般认知一致,故以下仅对轨道板、宽窄接缝、纵连钢筋等部件的情况进行说明。

2.1 轨道板

4种顶推压力工况下,轨道板的最大拉应力均出现在假缝位置。事实上,其他相关研究在仿真时无一例外地忽略了假缝,因此计算结果势必存在大的偏差。提取4种顶推压力工况下轨道板的最大横向位移和最大拉应力,结果如表1所示。一方面,当顶推压力为0.6 MPa及以上时,轨道板的最大拉应力超过C55混凝土抗拉强度设计值1.96 MPa,假缝将出现不可控的开裂,而假缝一旦开裂,开裂处轨道结构将发生局部应力突变,甚至可能引起开裂处CA砂浆层等部件的连带破坏,这对结构的承载能力及列车运行安全都是不利的;另一方面,在4种顶推压力工况下,轨道板的最大拉应力均出现在5号轨道板处,表明纠偏过程中应尤其关注中间轨道板的情况。

表1 轨道板最大横向位移和最大拉应力

Tab.1 Maximum lateral displacement and tensile stress of track-slabs

顶推压力/ MPa	最大横向位 移/mm	最大拉应力/ MPa	所在位置
0.5	1.23	1.59	5号轨道板
0.6	1.56	2.05	5号轨道板
0.7	1.92	2.53	5号轨道板
0.8	2.27	3.01	5号轨道板

基于表1数据,建立最大拉应力 σ_{ts} 与顶推压力 P_s 、最大横向位移 w_s 之间的拟合关系式,如下所示:

$$\sigma_{ts} = 4.74P_s - 0.786 \quad (1)$$

$$\sigma_{ts} = 1.36w_s - 0.082 \quad (2)$$

考虑轨道板的安全性,基于拟合关系式(1)、

(2),在C55混凝土抗拉强度设计值1.96 MPa的条件下,算得既有纠偏方案下保证轨道板假缝不开裂的临界顶推压力为0.58 MPa,对应的纠偏位移为1.50 mm。

2.2 宽窄接缝

4种顶推压力工况下,宽窄接缝的最大拉应力均出现在N3和N6宽窄接缝处,该位置为解黏区两端边界,这无疑表明支承层与路基之间的相互作用关系是影响部件受力的重要因素。提取4种顶推压力工况下宽窄接缝的最大横向位移和最大拉应力,结果如表2所示。一方面,当顶推压力为0.8 MPa时,宽窄接缝的最大拉应力由顶推压力0.7 MPa工况下的安全结果1.80 MPa跃升至3.10 MPa,大幅超过C55混凝土抗拉强度设计值1.96 MPa,宽窄接缝将出现不可控的开裂;另一方面,同等对比轨道板的纠偏安全计算结果,宽窄接缝混凝土发生开裂的可能要低于轨道板混凝土,这与部件的几何型式是密切相关的。

表2 宽窄接缝最大横向位移和最大拉应力

Tab.2 Maximum lateral displacement and tensile stress of wide and narrow joints

顶推压力/ MPa	最大横向位 移/mm	最大拉应力/ MPa	所在位置
0.5	0.22	1.20	N3、N6宽窄接缝
0.6	0.27	1.50	N3、N6宽窄接缝
0.7	0.33	1.80	N3、N6宽窄接缝
0.8	0.39	3.10	N3、N6宽窄接缝

2.3 纵连钢筋

目前,纵连钢筋的纠偏安全性问题没有相关研究。考虑到CRTS II型板式无砟轨道的超长纵连特性,有必要关注纠偏过程中6根纵连钢筋的力学特性。提取4种顶推压力工况下纵连钢筋的Mises应力,结果如图2所示。需要说明的是,从顶推一侧向顶推对立侧纵连钢筋序号依次为No. 1~6。

仿真计算结果表明,外侧纵连钢筋(No. 1、6)、内侧纵连钢筋(No. 2~5)各自的变化趋势基本一致,因此图2a中仅展示No. 1、2纵连钢筋沿轨道纵向的应力变化。由图2a可见,纵连钢筋在解黏区内均呈现波动的“W”形态,结合如图2b所示的应力峰值情况,可知纠偏过程中纵连钢筋受力并不稳定。纵连钢筋存在张拉不良或失效等问题时易导致受力异常,可能引起宽窄接缝混凝土开裂破坏,这一点在未来的研究中需要加以关注。当然,综合图2中所有数据可以看出,6根纵连钢筋的Mises应力远小于屈服强度,可认为在纵连张拉良好的条件下纵连钢筋

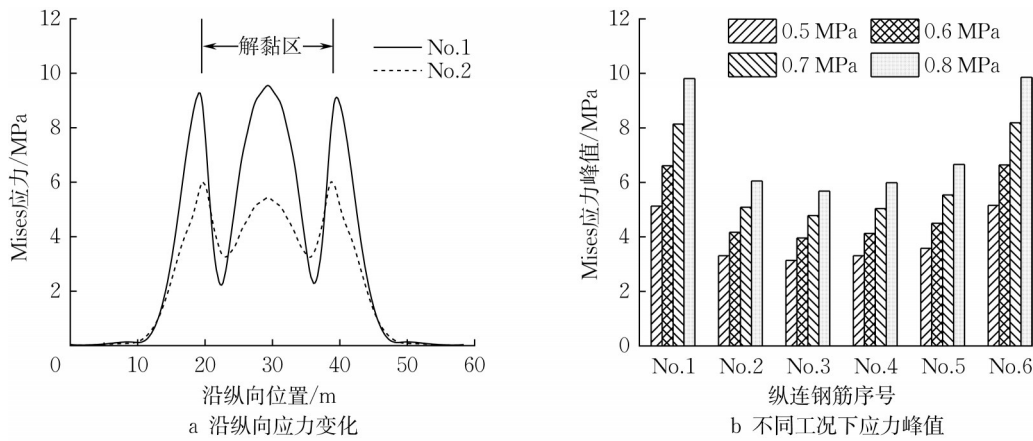


图2 纵连钢筋力学特性

Fig.2 Mechanical properties of longitudinally connected steel bars

具有较好的纠偏安全性。

3 层间黏结损伤规律

根据结构设计理念,良好的层间黏结是保持CRTS II型板式无砟轨道各部件各向力学性能协调的关键,因此纠偏过程中应尽量避免对其造成伤害。事实上,4种顶推压力工况的计算结果表明,顶推纠偏过程中轨道板-砂浆层间黏结始终保持良好,故以下仅对轨道板-宽窄接缝层间黏结情况进行说明。

重点关注位于解黏区内的N3~N6宽窄接缝及层间黏结界面,采用有限元软件中内置的场变量刚

度下降率 η_{SDEG} 表示层间黏结损伤,取值范围为0~1,取值为0表示层间黏结良好,取值为1表示层间黏结失效。基于4种顶推压力工况的计算结果,提取N3~N6宽窄接缝层间黏结界面下端的 η_{SDEG} 数据,绘制不同顶推压力工况下 η_{SDEG} 沿顶推方向位置的变化云图和曲线,结果如图3所示。由于模型的对称性,N3与N6宽窄接缝的结果一致,N4则与N5宽窄接缝的结果一致,故图3中仅展示N3和N4宽窄接缝层间黏结界面损伤情况。需要说明的是,图3a为宽窄接缝的侧视图,各小图的上半部分为宽接缝,下半部分为窄接缝。图3b图例中如0.6 MPa (N3)代表的是顶推压力为0.6 MPa工况下N3宽窄接缝的层间黏结界面损伤,图例中其他项以此类推。

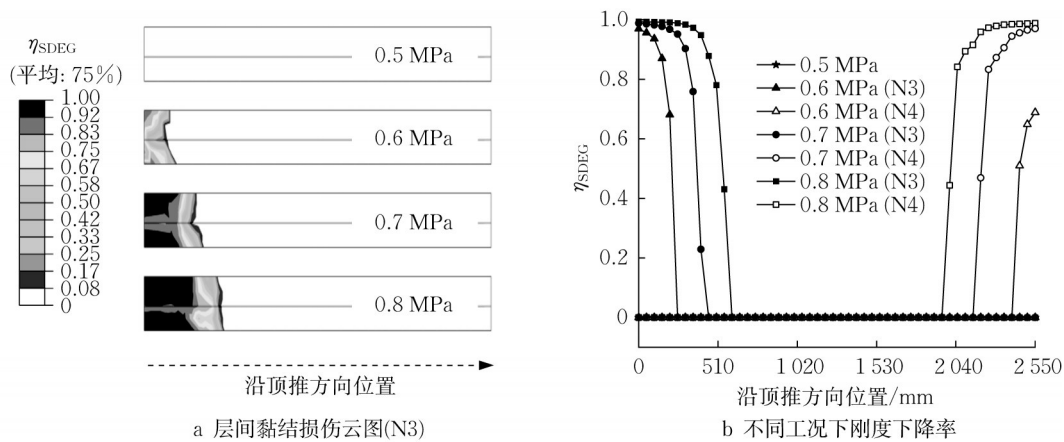


图3 宽窄接缝层间黏结损伤特性

Fig.3 Interfacial damage characteristics of wide and narrow joints

由图3a可见,当顶推压力为0.5 MPa时,N3宽窄接缝处轨道板-宽窄接缝层间黏结良好,而随着顶推压力的增加,层间黏结出现损伤并加剧,部分位置 η_{SDEG} 达到1,处于黏结失效状态。结合图3b可知,N3

宽窄接缝层间黏结损伤相较于N4的损伤程度更高、损伤范围更大、损伤速率更快。综合可判断,N3和N6宽窄接缝层间黏结界面状态最为不利,是CRTS II型板式无砟轨道纠偏损伤控制界面。

基于上述认识,为了进一步确定最不利宽窄接缝层间黏结界面状态的纠偏安全性,在0.5~0.6 MPa顶推压力范围内,通过减小顶推压力的增量步长进行仿真计算,算得既有纠偏方案下保证宽窄接缝层间不损伤的临界顶推压力为0.51 MPa,对应纠偏位移为1.23 mm,比轨道板的纠偏安全计算结果更为苛刻。

4 纠偏作业工艺优化

为了提升单次纠偏位移,进而提高纠偏作业效率,有必要对既有纠偏方案进行工艺优化。由前述可知,层间不损伤比部件不开裂要求更为苛刻,而层间损伤又以轨道板-宽窄接缝层间为主,故优化时应重点关注宽窄接缝的情况。一方面,既有纠偏方案中,解黏区边界正位于宽窄接缝处,可考虑调整解黏区边界位置,扩大解黏区;另一方面,现场纠偏中宽窄接缝出现问题较多,可考虑凿除宽窄接缝后再进行纠偏作业。

4.1 扩大解黏区

以标准轨道板长度为参考,按照解黏区往两端各扩大1/4、1/2、3/4轨道板长3种工况进行分析,千斤顶施加的顶推压力则从0.30 MPa开始以0.05 MPa的步长增量逐渐增加。仿真计算结果表明,与

既有纠偏方案相比,扩大解黏区内的宽窄接缝受力与变形情况均有所改善,且N4和N5宽窄接缝层间黏结界面首先出现损伤,表明最不利层间黏结界面由既有方案中的N3和N6宽窄接缝转变为N4和N5宽窄接缝。

为了进一步讨论扩大解黏区后最不利轨道部件的力学特性与最不利层间黏结界面的损伤规律,提取不同顶推压力工况下轨道板最大拉应力和轨道板-宽窄接缝层间黏结损伤深度数据,结果如图4所示。其中,轨道板-宽窄接缝层间黏结损伤深度是指损伤沿顶推方向的扩展深度。对于轨道板最大拉应力,由图4a可知,相同顶推压力作用下,随着解黏区扩大,最大拉应力呈现逐渐增大的趋势;随着顶推压力的增加,最大拉应力同样呈现逐渐增大的趋势。对于轨道板-宽窄接缝层间黏结损伤深度,由图4b可知,当解黏区扩大3/4轨道板长时,顶推压力0.40 MPa下出现损伤,且随着顶推压力的增加而加剧;解黏区扩大1/2轨道板长时,顶推压力0.45 MPa下出现损伤;解黏区扩大1/4轨道板长时,顶推压力0.50 MPa下出现损伤。综合图4a、b中的数据可以发现,若层间不出现损伤,则部件也不会出现开裂,也就是说,层间不损伤仍然比部件不开裂的要求更为苛刻。由此可认为,当解黏区扩大后,无砟轨道安全纠偏位移主要受N4和N5宽窄接缝层间黏结情况控制。

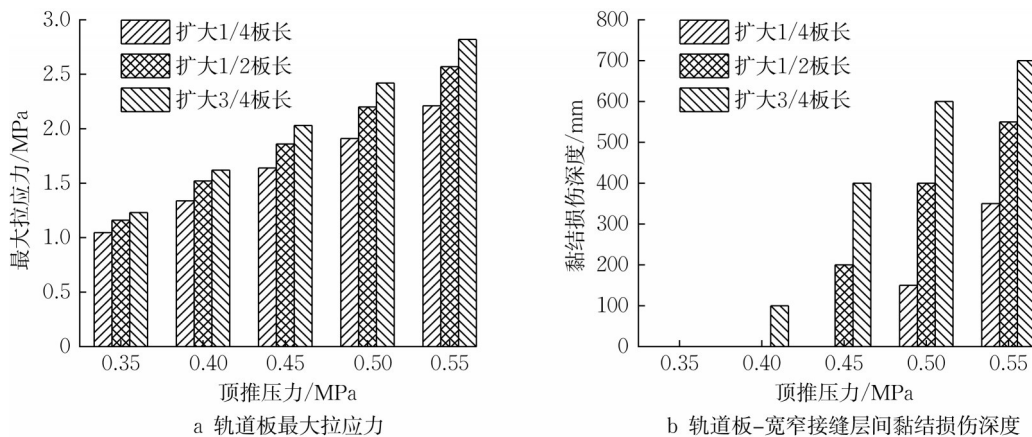


图4 轨道板最大拉应力及N4宽窄接缝层间黏结损伤深度

Fig.4 Maximum tensile stress of track-slabs and interfacial damage depth of wide and narrow joint N4

为了进一步确定扩大解黏区后的宽窄接缝层间黏结界面临界参数规律,定义层间黏结界面开始出现损伤的顶推压力为“损伤临界顶推压力”,对应纠偏位移为“损伤临界纠偏位移”。计算得到各解黏范围下宽窄接缝层间黏结的损伤临界顶推压力和损伤临界纠偏位移,结果如表3所示。

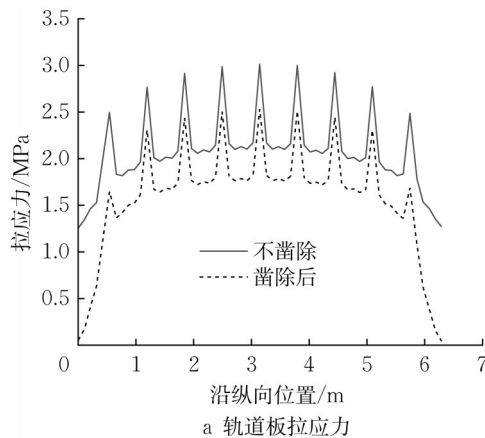
由表3可见,随着解黏范围的扩大,损伤临界纠偏位移不断增大。需要指出的是,一方面,解黏范围越大,作业所消耗的人力物力资源越多;另一方面,当解黏范围扩大至一个板长时,解黏区边界将再次位于宽窄接缝。综合以上,认为解黏区扩大3/4轨道板长是平衡纠偏量提升与解黏成本投入的最优选择。

表3 宽窄接缝层间黏结界面临界参数
Tab.3 Interface critical parameters of wide and narrow joints

解黏范围	损伤临界顶推压力/MPa	损伤临界纠偏位移/mm	所在位置
未扩大	0.51	1.23	N4、N5宽窄接缝
扩大1/4板长	0.47	1.60	N4、N5宽窄接缝
扩大1/2板长	0.42	1.85	N4、N5宽窄接缝
扩大3/4板长	0.37	2.10	N4、N5宽窄接缝

4.2 凿除宽窄接缝

以生死单元功能模拟解黏区内宽窄接缝凿除,有限元模型其他输入条件与1节中所述一致。仿真计算结果表明,当凿除解黏区内的宽窄接缝后,纠偏过程中轨道板的最大拉应力仍然出现在假缝位置,



且均位于5号轨道板。沿轨道纵向提取5号轨道板的拉应力数据,提取路径为顶推对立侧假缝下端部所在直线,结果如图5a所示。由图5a可见,凿除宽窄接缝后,轨道板所受拉应力整体减小,分布规律基本一致。需要指出的是,在凿除宽窄接缝后,纠偏区段相邻轨道板间仅通过纵连钢筋张拉锁件直接相连,导致纠偏作业时纵连钢筋应力增大。提取6根纵连钢筋的Mises应力峰值,如图5b所示。可以看出,凿除宽窄接缝后应力峰值大幅提升,但数值仍然远小于屈服强度,纵连钢筋纠偏安全性得到保证。当然,凿除宽窄接缝后,作业人员应对纵连钢筋的张拉情况进行检查,确保纵连钢筋的纵连效果。

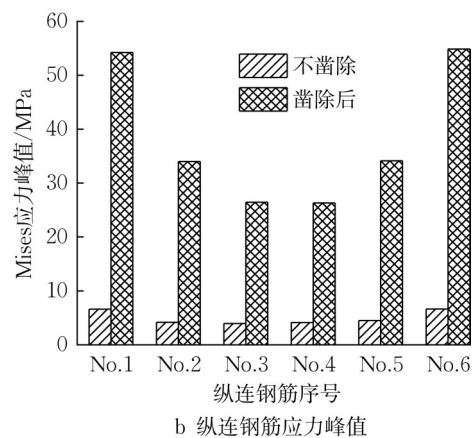


图5 凿除宽窄接缝前后无砟轨道关键部件受力对比

Fig.5 Comparison of mechanical properties of key components for ballastless track before and after removing wide and narrow joints

宽窄接缝已被凿除,无砟轨道纠偏不再受轨道板-宽窄接缝层间黏结界面控制,纠偏过程中只须保证部件不开裂即可。提取4种顶推压力工况下凿除宽窄接缝后轨道板的最大横向位移和最大拉应力,结果如表4所示。

表4 凿除宽窄接缝后轨道板最大横向位移和最大拉应力
Tab.4 Maximum lateral displacement and tensile stress of track-slabs after removing wide and narrow joints

顶推压力/MPa	最大横向位移/mm	最大拉应力/MPa	所在位置
0.5	1.28	1.37	5号轨道板
0.6	1.61	1.74	5号轨道板
0.7	1.96	2.14	5号轨道板
0.8	2.30	2.53	5号轨道板

建立凿除宽窄接缝后轨道板最大拉应力与顶推压力、最大横向位移之间的拟合关系式,在C55混凝土抗拉强度设计值1.96 MPa的条件下,算得保证部

件轨道板假缝不开裂的临界顶推压力为0.65 MPa,对应纠偏位移为1.80 mm。因此,相比于不凿除宽窄接缝情况下的最大纠偏位移1.23 mm,凿除宽窄接缝后的最大纠偏位移为1.80 mm,提升幅度达到46%。由此可见,凿除宽窄接缝对提升纠偏位移的效果是显著的。由于宽窄接缝重新浇筑相对容易,因此建议纠偏作业前进行凿除。

5 结论

(1) 纠偏过程中,由于假缝的存在,因此随着顶推压力的增加预制轨道板将先于砂浆层、支承层、宽窄接缝等开裂。保证轨道板假缝不开裂的临界顶推压力为0.58 MPa,对应纠偏位移为1.50 mm。

(2) 纠偏过程中,随着顶推压力的增加,轨道板-砂浆层间黏结始终保持良好,而轨道板-宽窄接缝层间黏结出现损伤并加剧。保证层间不损伤的临界顶

推压力为0.51 MPa,对应纠偏位移为1.23 mm。

(3)在部件不开裂、层间不损伤的条件下,纠偏作业时,将既有顶推纠偏方案中的解黏区范围往两端各扩大3/4轨道板长,可有效提升临界纠偏位移,同时也是平衡纠偏量提升与解黏成本投入的优选。

(4)轨道板-宽窄接缝层间黏结损伤控制困难,纠偏作业前若将宽窄接缝凿除,可降低结构各部件最大拉应力等指标,有效提升临界纠偏位移,且由于宽窄接缝重新浇筑相对容易,因此建议纠偏作业前进行凿除。

作者贡献声明:

许玉德:过程监督,资金筹措,论文校修。

石梓煊:模型仿真,数据处理,论文写作。

邱俊兴:模型仿真,数据处理,论文校修。

参考文献:

- [1] 谭社会. 高速铁路无砟轨道线形纠偏技术进展研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 310.
TAN Shehui. State of lifting and inclination correction technique of high-speed railway ballastless track[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 310.
- [2] 刘竞, 李书明, 潘永健, 等. 纠偏对CRTS II型板式无砟轨道结构影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 1943.
LIU Jing, LI Shuming, PAN Yongjian, *et al.* Analysis of influence of rectification on CRTS II slab ballastless track structure [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(8): 1943.
- [3] 刘竞, 潘永健, 杨延强, 等. 顶推纠偏下的无砟轨道力学行为及关键参数研究[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(1): 23.
LIU Jing, PAN Yongjian, YANG Yanqiang, *et al.* Research on mechanical behavior and key parameters of ballastless track under jacking and rectification of displacement [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(1): 23.
- [4] 刘竞, 郑新国, 孙宏伟, 等. 无砟轨道结构横向纠偏修复解离界面研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(2): 87.
LIU Jing, ZHENG Xinguo, SUN Hongwei, *et al.* Study on dissociation interface for lateral correction and repair techniques of ballastless track structure [J]. Railway Engineering, 2021, 61(2): 87.
- [5] 宋茜. 运营高速铁路无砟轨道抬升纠偏综合维修技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
SONG Xi. Research on comprehensive maintenance technology of ballastless track lifting and rectifying deviation for operating high speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [6] 许玉德, 严道斌, 邱俊兴, 等. 路基上CRTS II型板式轨道纠偏作业损伤扩展规律[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 824.
XU Yude, YAN Daobin, QIU Junxing, *et al.* Damage propagation laws of subgrade CRTS II slab track under displacement correction [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(6): 824.
- [7] 刘竞, 郑新国, 卢克明, 等. 双块式无砟轨道纠偏修复时道床板结构受力变形行为研究[J]. 施工技术, 2021, 50(5): 105.
LIU Jing, ZHENG Xinguo, LU Keming, *et al.* The stressed deformation evolution behaviors of twin-block ballastless track structure in deviation rectification [J]. Construction Technology, 2021, 50(5): 105.
- [8] 董敏琪, 王武斌, 苏谦, 等. 基于CDP模型的双块式无砟轨道横向纠偏效果研究[C]// 2022世界交通运输大会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2022: 3964-3971.
DONG Minqi, WANG Wubin, SU Qian, *et al.* Research on lateral correction effect of double block ballastless track based on CDP model [C]// Proceedings of World Transport Congress 2022. Beijing: People's Communications Press Co., Ltd., 2022: 3964-3971.
- [9] 刘学毅, 苏成光, 刘丹, 等. 轨道板与砂浆黏结试验及内聚力模型参数研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(3): 22.
LIU Xueyi, SU Chengguang, LIU Dan, *et al.* Research on the bond properties between slab and CA mortar and the parameters study of cohesive mode [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(3): 22.
- [10] 邱俊兴. 路基上CRTS II型板式轨道纠偏整治施工受力特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2018.
QIU Junxing. Research on the mechanical properties of CRTS II slab ballastless track on subgrade when correcting the lateral deviation [D]. Shanghai: Tongji University, 2018.