

文章编号: 1674—8247(2021)05—0090—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.017

CRTSⅢ型轨道板制造台架力学性能分析与结构优化

廉 栋^{1,2} 黄兴启^{1,2} 蔡 灿³ 杨显鹏³

(1. 山东高速铁建装备有限公司, 山东 潍坊 262603;

2. 山东省高速铁路 CRTSⅢ型轨道板智能制造技术工程实验室, 山东 潍坊 262603;

3. 西南石油大学, 成都 610500)

摘 要: CRTSⅢ型无砟轨道的平顺性、安全性和可靠性很大程度上取决于 CRTSⅢ型轨道板的预制质量, 其力学性能是保证预制质量的关键。为剖析 CRTSⅢ型轨道板制造台架的力学性能, 本文通过实验测试和数值分析研究了轨道板制造台架的力学特性, 并对关键结构进行优化分析。研究表明: (1) CRTSⅢ型轨道板制造台架纵向张拉梁挠度最大值为 0.01 mm, 最大拉应力为 36.6 MPa, 最大压应力为 19.3 MPa, 满足装备强度和刚度要求; (2) 台架底部增设 4 根体外预应力拉杆, 可显著提高制造台架的平整度, 降低翘曲变形。在上述研究基础上, 本文还分析了 CRTSⅢ型轨道板的失效原因, 提出了底模板设置反向预拱度、自导向柔性橡胶套和设置柔性内衬垫层的三项结构优化建议。

关键词: CRTSⅢ型轨道板; 制造; 力学性能; 结构优化

中图分类号: U213.2⁺44 **文献标志码:** A

90

Mechanical Performance Analysis and Structural Pptimization of CRTSⅢ Track Slab Manufacturing Bench

LIAN Dong^{1,2} HUANG Xingqi^{1,2} CAI Can³ YANG Xianpeng³

(1. Shandong High Speed Railway Construction Equipment Co., Ltd., Weifang 262603, China;

2. Shandong Province High-speed Railway CRTSⅢ Track Plate Intelligent Manufacturing
Technology Engineering Laboratory, Weifang 262603, China;

3. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The smoothness, safety, and reliability of CRTSⅢ ballastless track largely depend on the prefabrication quality of CRTSⅢ track slab, and its mechanical properties are the key to ensure the prefabrication quality. In order to analyze the mechanical properties of CRTSⅢ track slab manufacturing bench, this paper studies the mechanical properties of the track slab manufacturing bench through experimental test and numerical analysis, and optimizes the key structures. The results show that: (1) The maximum deflection, maximum tensile stress, and maximum compressive stress of longitudinal tension beam of CRTSⅢ track slab manufacturing bench are 0.01mm, 36.6 MPa, and 19.3 MPa, which meet the requirements of equipment strength and stiffness. (2) By adding four externally prestressed tie rods at the bottom of the bench, the flatness can be significantly improved and the warping deformation can be reduced. The

收稿日期: 2020-12-31

作者简介: 廉栋(1987-), 男, 工程师。

引文格式: 廉栋, 黄兴启, 蔡灿, 等. CRTSⅢ型轨道板制造台架力学性能分析与结构优化[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(5): 90-95.

LIAN Dong, HUANG Xingqi, CAI Can, et al. Mechanical Performance Analysis and Structural Pptimization of CRTSⅢ Track Slab Manufacturing Bench [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5): 90-95.

flatness of the bench for manufacturing CRTSⅢ track slab before and after the test is significantly improved. On the basis of the above research, the failure reasons of CRTSⅢ track slab were analyzed, and three structural optimization suggestions were put forward, including setting reverse pre-camber, self-guided flexible rubber sleeve, and setting flexible inner liner.

Key words: CRTSⅢ track slab; manufacturing; mechanical properties; structural optimization

在 CRTSⅢ型无砟轨道施工中,高质量的 CRTSⅢ型轨道板是实现线路高标准铺设的关键。对于轨道板的加工,目前已开展了大量的相关研究和技术工艺创新^[1]。

王红亮^[2-3]详细对比了 CRTSⅢ型先张板与 CRTSⅢ型后张板的设计和制造技术,发现双向先张预应力轨道板预应力布置更加均匀,锚穴开裂的可能性较小,且其矩阵式生产模式可极大地提高生产效率。陈福现^[4]在工厂生产中对先张法预制 CRTSⅢ型轨道板技术开展了研究,采用批量预制,确保了较高的质量和完成速度。上述研究表明,轨道板制造技术及其装备是改善轨道板的重要载体,因此,需加强对相关制造装备及技术的研究。

CRTSⅢ型轨道板制造台架作为流水线生产载体,是保证 CRTSⅢ型轨道板制造质量的关键。在制作 CRTSⅢ型轨道板过程中,台架在多次周转使用过程中需承受巨大的张拉与锚固应力、高频率的振动作用和高低温蒸汽养生的交替作用,因此应具有足够的强度、刚度和稳定性,以满足流水线循环作业需求^[5]。为剖析 CRTSⅢ型轨道板制造台架的力学性能,本文建立了相关力学模型,通过实验测试和数值分析,研究了轨道板制造台架的力学特性,并对关键结构进行了优化,为高质量和高效率制造 CRTSⅢ型轨道板奠定了基础。

1 流水线机组台架模型结构

CRTSⅢ型轨道板制造台架是制作轨道板的关键设备^[6],由侧模板、加劲肋、底模板和加劲梁组成。侧模板和加劲肋直接承受张拉与锚固作用力并起到约束混凝土成型的作用,考虑纵、横向侧模受力不同,二者采用不同厚度的钢板制作而成。底模板承托轨道板重量并承受侧模板传递的张拉锚固力,为防止底模板变形过大影响轨道板成型后的板面平整度,在底模板下设置多道加劲梁予以加强。加劲梁是承受张拉锚固力的主要受力构件,采用钢箱制作而成,横向设置 10 道,纵向设置 4 道。根据上述结构特点建立 CRTSⅢ型轨道板制造台架结构有限元模型,分别对模型张拉横梁

和模型整体结构进行力学分析,如图 1 所示。

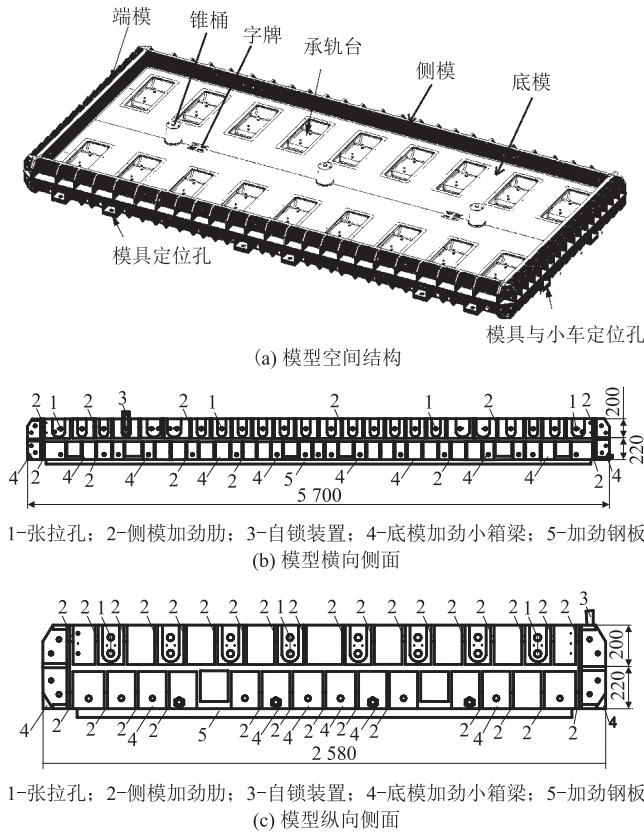


图 1 CRTSⅢ轨道板制造台架结构示意图

2 机组装备力学性能分析

2.1 张拉梁力学分析

CRTSⅢ型轨道板制造台架张拉梁是预应力筋张拉与锁定的直接受力构件,需对其强度、刚度和稳定性进行验算。张拉梁设计为箱型截面,截面尺寸为 150 mm×250 mm,采用 15 mm 厚 Q235B 钢板焊接而成。张拉梁纵向加载点集中荷载 $F = 2 \times 80 = 160$ kN,横向加载节点集中荷载 $F = 80$ kN,建立有限元模型,分别得到纵向张拉梁受力变形,如图 2 所示,横向张拉梁受力变形,如图 3 所示。从图 2 可以看出,CRTSⅢ型轨道板制造台架纵向张拉梁挠度最大值为 0.01 mm,最大拉应力为 36.6 MPa,最大压应力为 19.3 MPa,满足强度和刚度要求。

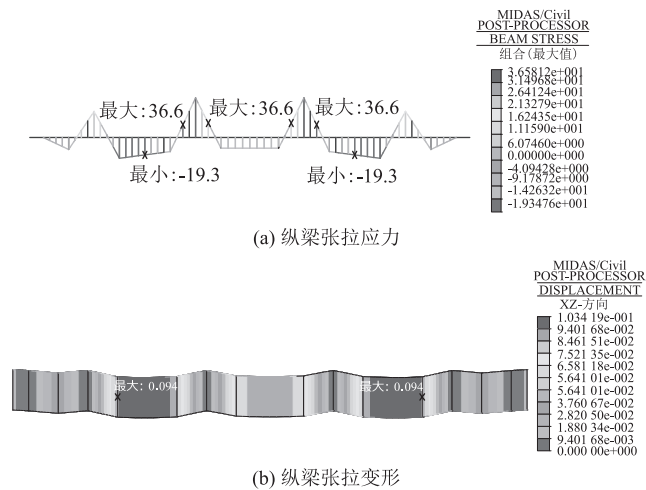


图 2 纵向张拉梁受力变形图

2.2 模型结构优化分析

CRTSⅢ型轨道板制造台架横向预应力筋布设在板厚中间部位,其合力中心线距底模 100 mm;纵向预

应力筋上下对称布置于横向预应力筋上,其合力中心线距底模为 100 mm。模型传力途径为:侧模板承受均匀分布的集中力(侧压力),以受弯为主;底模板承受侧模板传递的集中力及结构自重,以双向受弯为主;加劲梁承受侧模传递的集中力及结构自重,以压弯为主。三者组成一个协调的变形体,共同承受外部荷载。

为优化模型结构,分别选取不同厚度的底模板和底模加劲梁进行力学分析,以确定最佳结构形式。不同模型结构尺寸关键部位如表 1 所示,力学分析结果对比如图 3 所示。

表 1 模型关键部位尺寸表(mm)

组成	长度	高度	厚度	材料
横向侧模板	5 700	200	35	Q345B
纵向侧模板	2 580	200	50	
侧模加劲肋	190	220	20	Q235B
底模板	300	220	20/30/40	
底模板加强箱梁	5 700	225	40/30/20	Q235B

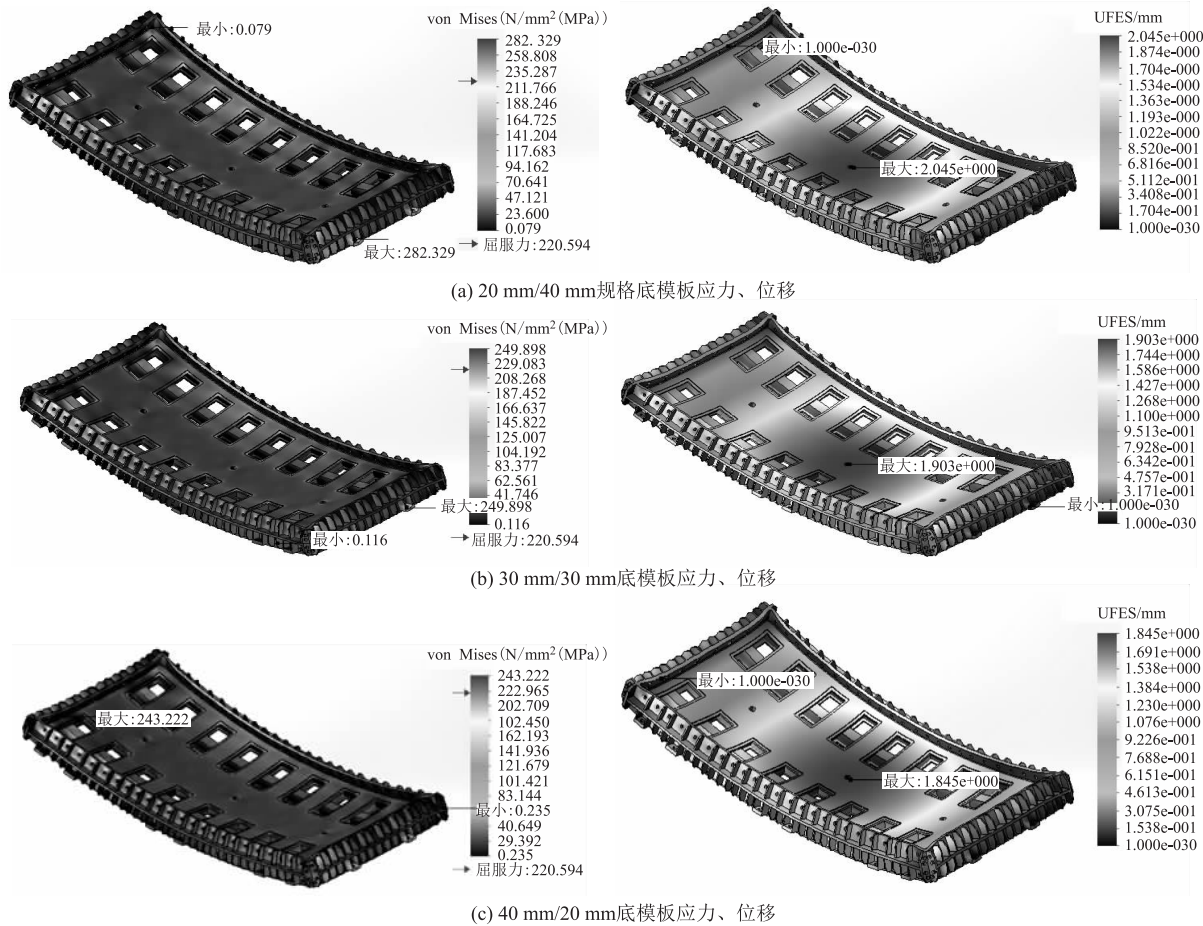


图 3 模型受力变形图

从图 3(a)可以看出,采取底模板厚度 20 mm、底模加劲肋 40 mm 时,模型底模板向上翘曲变形最大值为 2.045 mm,超过 1 mm 技术标准,将无法保证轨道板板面平整度,需对模型底板进行加强。从图 3(b)可

以看出,采取底模板厚度 30 mm、底模加劲肋 30 mm 时,模型底模板向上翘曲变形最大值为 1.903 mm,超过 1 mm 技术标准,将无法保证轨道板板面平整度,需对模型底模板进行加强。从图 3(c)可以看出,采取

底模板厚度 40 mm、底模加劲肋 20 mm 时,模型底模板向上翘曲变形最大值为 1.845 mm,超过 1 mm 技术标准,将无法保证轨道板板面平整度,需对模型底模板进行加强。

由此可见,适当增加底模厚度可有效约束底板翘曲变形,但效果不显著,仍无法解决翘曲变形超限问题,需采取其他措施予以加强。考虑 CRTSⅢ型轨道板制造台架总重量及现场空间布局的制约,在 CRTSⅢ型轨道板制造台架底部增设 4 根体外预应力拉杆,每根拉杆施加 20 t 张拉力。在 CRTSⅢ型轨道板制造台架施加体外预应力拉杆后,模型产生预拱度为 0.42 mm,底板翘曲量降为 1.07 mm,考虑混凝土重量引起的底板竖向挠曲变形,模型最终翘曲变形满足要求。为保证体外预加力的作业效果,设置合理的张拉

支撑点和张拉螺纹长度,从中间向两边 2 根对称、同步张拉并可靠锁定。优化后模型总重量为 12.5 t,小于行走行吊起吊临界荷载 16 t。

2.3 模型振动疲劳试验

为验证 CRTSⅢ型轨道板制造台架结构的振动疲劳性能,对 CRTSⅢ型轨道板制造台架进行专门的疲劳试验^[7]。采用 50 t 疲劳试验机对 CRTSⅢ型轨道板制造台架进行集中加载,加载频率为 3 Hz 的正弦波,加载幅度控制在 70 ~ 80 kN,加载循环次数 200 万次。

疲劳试验过程中测试了 CRTSⅢ型轨道板制造台架振动前后的坐标、模具螺栓孔中心距偏差、平面度、线性度、承轨台偏差、承轨面坡度等指标,对比结果如如图 4 所示。从图 4 可以看出,试验前、后 CRTSⅢ型轨道板制造台架的平面度和线性度并没有发生明显变

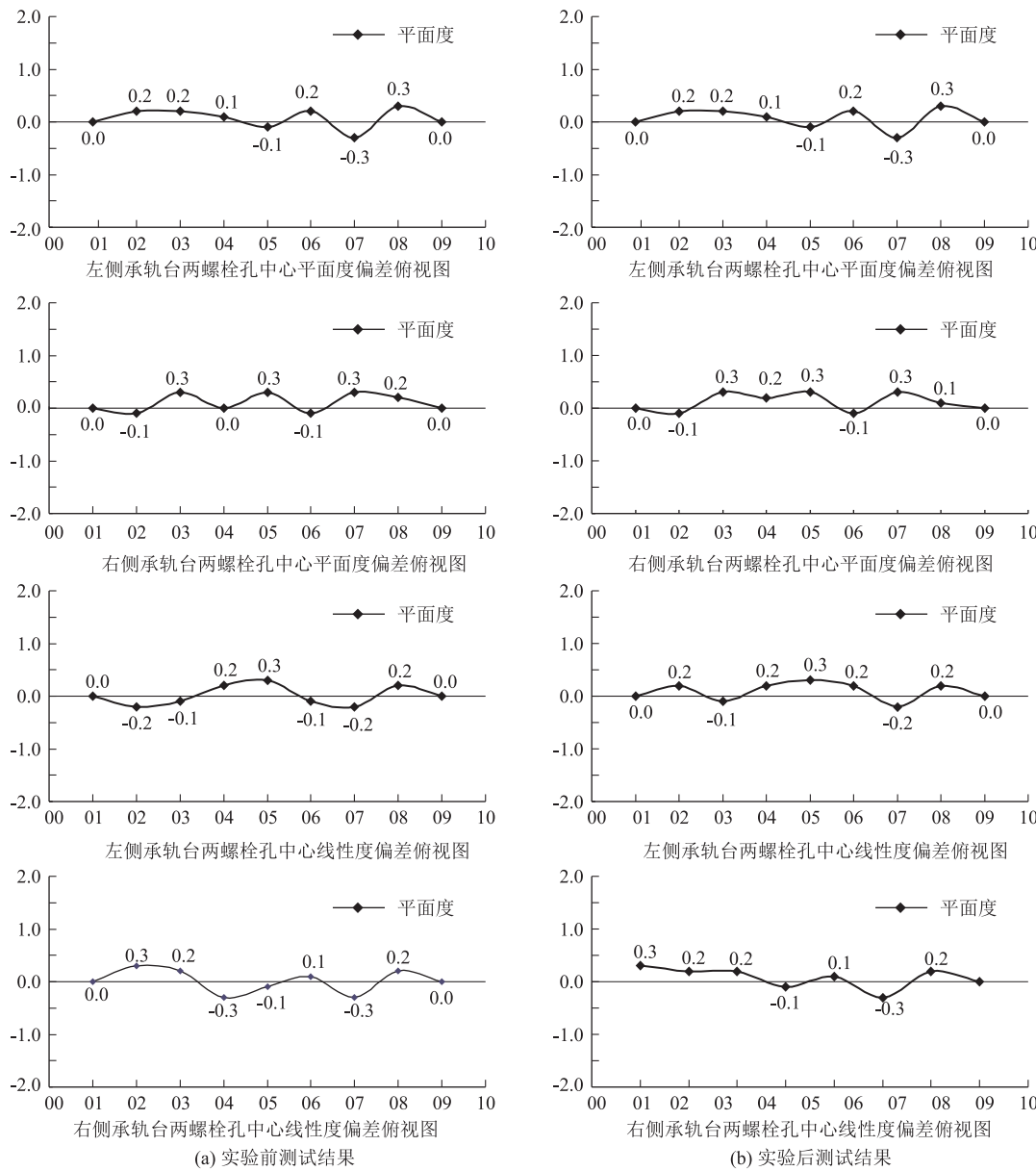


图 4 CRTSⅢ型轨道板制造台架疲劳试验对比图

化,测试得到实验前后的数值误差均保持在 $-0.3 \sim 0.3$ 之间。由此可知,CRTSⅢ型轨道板制造台架受振动力影响较小,没有发生疲劳变形。

3 机组装备结构优化

在流水线试生产过程中发现部分产品出现误差超限(翘曲)和局部开裂现象。结合应力分析结果,总结导致该现象原因为: CRTSⅢ型轨道板制造台架在巨大张拉力作用下持续发生徐变变形,而模型内混凝土与 CRTSⅢ型轨道板制造台架直接接触,在其初期强度较低的情况下随模型的徐变而不断变化,不能自我变形;在预应力筋放松时,巨大的张拉力由 CRTSⅢ型轨道板制造台架直接传递给轨道板,极易导致混凝土(特别是端部锐角部位)开裂。过程示意如图 5 所示。

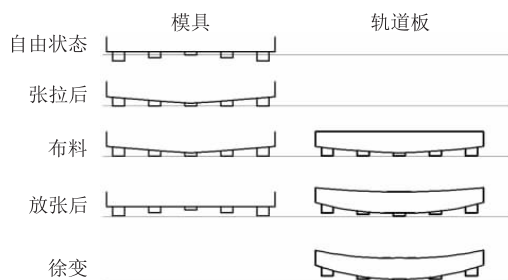


图5 产品超差原因分析总结示意图

为进一步消除误差,避免混凝土开裂,需对 CRTSⅢ型轨道板制造台架结构进行优化。

(1) 底模板设置反向预拱度

将底模板预先加工成凸起状(按照抛物线形设置,最大凸起量约 2.5 mm),如图 6 所示,可有效提高模型底板的整体刚度;同时可消除模型在巨大张拉力作用下产生的向下翘曲变形,保证预应力筋放松后轨道板板面的平直度。



图6 底模板改进图

(2) 设置自导向柔性橡胶套

为解决轨道板脱模时封锚口混凝土易开裂的问题,在张拉杆上设置自导向柔性橡胶套(如图 7 所示),在保证张拉杆安装作业的同时,又可适应脱模时张拉杆产生的位移,有效避免张拉杆对封锚口混凝土的破坏。

(3) 设置柔性内衬垫层

模型内,混凝土与侧模板直接接触,受模型的约束

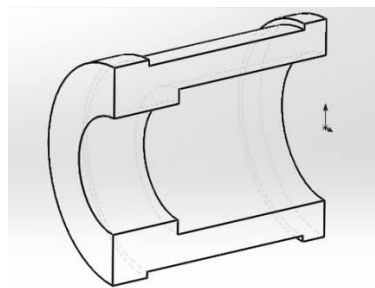


图7 自导向柔性橡胶套图

作用无法实现自我变形,一直处于被动变形状态,影响其凝固硬化与强度增长。因此,在模型内侧设置一定厚度的弹性垫层(弹性变形量约 2 mm ,如图 8 所示),使混凝土与模型间形成有效隔离层,可实现混凝土的自我变形,特别是在预应力筋放松时,可保证轨道板均匀承受预加力。优化后的张拉设备如图 9 所示,采用优化后的设备可大批量高质量地生产轨道板。

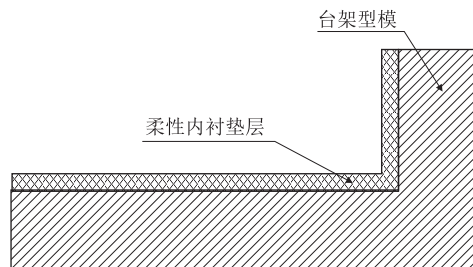


图8 柔性内衬垫层图

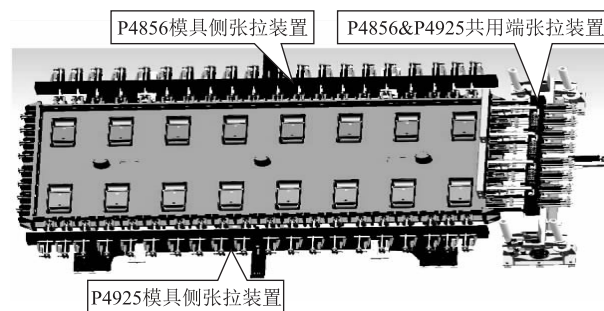


图9 优化后的 CRTSⅢ型轨道板制造张拉设备图

4 结论

在总结国内学者关于 CRTSⅢ型轨道板制造相关研究的基础上,本文提出需进一步加强 CRTSⅢ型轨道板制造装备的研究。为剖析 CRTSⅢ型轨道板制造台架模型的力学性能,本文通过实验测试和数值分析,研究了轨道板制造台架的力学特性,并对关键结构进行了优化分析,得出主要结论如下:

(1) 数值分析结构表明, CRTSⅢ型轨道板制造台

架纵向张拉梁挠度最大值为 0.01 mm,最大拉应力为 36.6 MPa,最大压应力为 19.3 MPa,满足强度和刚度要求。

(2)原有的 CRTSⅢ型轨道板制造台架无法保证轨道板板面制造的平整度,建议在 CRTSⅢ型轨道板制造台架底部增设 4 根体外预应力拉杆,每根拉杆施加 20 t 张拉力,可显著提高平整度,降低翘曲变形。

(3)对比试验前、后 CRTSⅢ型轨道板制造台架的平面度和线性度,发现无明显变化,测试得到实验前后的数值误差均保持在 $-0.3 \sim 0.3$ 之间。

(4)混凝土与 CRTSⅢ型轨道板制造台架直接接触使得在初期强度较低的情况下,轨道板随模型的徐变而不断变化,在预应力筋放松时,巨大的张拉力极易造成混凝土(特别是端部锐角部位)开裂。为改善上述问题,本文提出底模板设置反向预拱度、设置自导向柔性橡胶套和设置柔性内衬垫层三项结构优化措施。

参考文献:

- [1] 陈婕妤. 时速 350 km CRTSⅢ型板式无砟轨道板预制技术[J]. 国防交通工程与技术, 2011, 9(S1): 36-39.
CHEN Jieyu. Prefabrication Technology of CRTSⅢ Slab Ballastless Track Slab at 350 km/h [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2011, 9(S1): 36-39.
- [2] 王红亮. 郑徐客运专线 CRTSⅢ型先张无砟轨道板创新技术及生产工艺[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(3): 41-45.
WANG Hongliang. Innovative Technology and Manufacturing Technique of CRTSⅢ Type Pre-Tensioning Ballastless Track Slab for Zhengzhou-Xuzhou Passenger Dedicated Line [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(3): 41-45.
- [3] 苏雅拉图. 郑徐客专 CRTSⅢ型先张法轨道板预制施工工艺研究[J]. 山西建筑, 2016, 42(3): 133-136.
SUYALATU. On CRTSⅢ-Type Pre-Tensioning Method in Track Plate Forecasting along Zhengzhou-Xuzhou Special Passenger Railway[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(3): 133-136.
- [4] 陈福现. 先张法预制 CRTSⅢ型轨道板技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2017(1): 102-106.
CHEN Fuxian. Study on Prefabricating CRTSⅢ Track Slab Technology with Pretensioned Method [J]. Railway Construction Technology, 2017(1): 102-106.
- [5] 王成晓. CRTSⅢ型板式无砟轨道力学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
WANG Chengxiao. Study on Mechanical Characteristics of CRTSⅢ Type Slab Ballastless Track [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [6] 钱振地, 王其昌. 桥上板式无砟轨道施工成套设备的研制与开发[J]. 铁道工程学报, 2004, 21(4): 47-49.
QIAN Zhendi, WANG Qichang. Manufactory and Development of a Complete Set of Equipment for Construction of Ballastless Slab Track [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004, 21(4): 47-49.
- [7] 中国铁道科学研究院. 盘锦至营口客运专线 CRTSⅢ型板式无砟轨道系统动力性能试验研究[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2013.
China Academy of Railway Sciences. Dynamic Performance Test Research on the CRTSⅢ Type Slab Ballastless Track of Panjin-Yingkou Passenger Dedicated Line[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2013.
- [10] 张家坤, 弓俊青, 岳清瑞, 等. 光纤光栅传感技术在土木工程结构监测中的应用[J]. 北方交通大学学报, 2003, 27(5): 94-97.
ZHANG Jiakun, GONG Junqing, YUE Qingrui, et al. Application for Inspecting Technology of Fiber Bragg Grating in Civil Engineering Structure[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003, 27(5): 94-97.
- [11] FILOGRANO M L, CORREDERA GUILLEN P, RODRIGUEZ-BARRIOS A, et al. Real-Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 85-92.
- [12] 叶肖伟, 姜洋, 倪一清, 等. 基于 FBG 反射谱特征的铁路道岔损伤识别试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 71-76.
YE Xiaowei, JIANG Yang, NI Yiqing, et al. Experimental Study on Damage Detection of Railway Turnouts Based on Characteristics of FBG Reflective Spectra[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 71-76.
- [13] 张兆亭, 闫连山, 王平, 等. 基于光纤光栅的钢轨应变测量关键技术研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(5): 65-69.
ZHANG Zhaoting, YAN Lianshan, WANG Ping, et al. Key Techniques for Rail Strain Measurements Based on Fiber Bragg Grating Sensor [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(5): 65-69.
- [14] OTHONOS A. Fiber Bragg Gratings [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(12): 4309-4341.
- [15] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
ZHANG Zijia. Theoretical Basis and Sensing Technology of Fiber Bragg Grating[M]. Beijing: Science Press, 2009.