

文章编号:1004-2954(2025)06-0001-05

基于流固耦合理论的 CRTSⅢ型无砟轨道 SCC 灌注参数影响规律研究

高亮¹, 孙洪斌², 张广海³, 周会⁴, 郑小明⁵, 张红乾⁶

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 山东铁路投资控股集团有限公司, 济南 250013;

3. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100160; 4. 安徽兴宇轨道装备有限公司, 安徽蚌埠 233000;

5. 中国水利水电第四工程局集团有限公司, 西宁 810007; 6. 中铁上海工程局集团有限公司, 上海 201906)

摘要: CRTSⅢ型板式无砟轨道已成为我国新建高铁主要采用的轨道结构型式, 自密实混凝土灌注施工作为关键施工环节, 其施工质量直接影响轨道结构平顺性。为探究自密实混凝土流变参数对灌注施工质量和效率的影响机制, 基于流固耦合理论建立自密实混凝土灌注全过程有限元分析模型, 研究自密实混凝土灌注过程中轨道结构的力学特性及其受流变参数的影响规律。研究表明: 自密实混凝土灌注过程中轨道板所受的上浮力和位移变化分为4个阶段; 塑性黏度对自密实混凝土的灌注影响比屈服应力的影响更大; 随着塑性黏度的增大, 灌注时间、轨道板所受的上浮力、轨道板位移均呈现先减小再增大趋势; 随着屈服强度的增大, 灌注时间、轨道板所受的上浮力、轨道板位移均逐渐增大。为了控制灌注施工质量, 自密实混凝土流变参数的最佳取值范围为: 屈服应力为45~65 Pa, 塑性黏度为90~120 Pa·s。研究成果可为自密实混凝土灌注施工材料和工艺优化提供理论支撑。

关键词: CRTSⅢ型无砟轨道; 自密实混凝土; 流固耦合; 灌注施工; 流变参数

中图分类号: U213.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13238/j.issn.1004-2954.202409180006

Research on the Influence of SCC Pouring Parameters of CRTSⅢ Ballastless Track Based on Fluid-Structure Coupling Theory

GAO Liang¹, SUN Hongbin², ZHANG Guanghai³,
ZHOU Hui⁴, ZHENG Xiaoming⁵, ZHANG Hongqian⁶

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Shandong Railway Investment Holding Group Co., Ltd., Jinan 250013, China; 3. PowerChina RoadBridge Group Co., Ltd., Beijing 100160, China; 4. Anhui Xingyu Rail Equipment Co., Ltd., Bengbu 233000, China; 5. Sinohydro Engineering Bureau 4 Co., Ltd., Xining 810007, China; 6. Shanghai Civil Engineering Co., Ltd. of CREC, Shanghai 201906, China)

Abstract: The CRTSⅢ ballastless track has become the main type of track structure for newly built high-speed railways in China. As a critical process, the pouring construction of self-compacting concrete (SCC) directly affects the smoothness of track structure. To investigate the influencing mechanism of SCC rheological parameters on the quality and efficiency of pouring construction, a finite element analysis model of the complete SCC pouring process was established based on fluid-structure coupling theory. The mechanical properties of track structure during SCC pouring and their variation patterns affected by rheological parameters were studied. The results showed that the buoyancy force and displacement variation of track slab during SCC pouring could be divided into four stages. Plastic viscosity had greater influence on SCC than yield stress. As plastic viscosity increased, the pouring time, buoyancy force, and

track slab displacement first decreased and then increased. As yield strength increased, the pouring time, buoyancy force, and track slab displacement increased gradually. To ensure the quality of pouring construction, the optimal ranges

收稿日期: 2024-09-18; 修回日期: 2024-11-18; 网络首发日期:

2025-03-07

基金项目: 山东省交通运输厅科技计划项目(2021B99)

作者简介: 高亮(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 1997年毕业于西南交通大学土木工程学院, 工学博士, 主要从事无砟轨道智能施工理论与方法研究工作, E-mail: lgao@bjtu.edu.cn。

for SCC rheological parameters were: yield stress of 45 to 65 Pa and plastic viscosity of 90 to 120 Pa · s. The research findings can provide theoretical support for optimizing materials and processes in SCC pouring construction.

Key words: CRTS III ballastless track; self-compacting concrete; fluid-structure coupling; pouring construction; rheological parameters

引言

目前,高速铁路在我国广泛运营,主要轨道结构形式为 CRTS III 型板式无砟轨道^[1],自密实混凝土层作为 CRTS III 型板式无砟轨道的重要结构^[2],其灌注施工质量直接影响 CRTS III 型板式无砟轨道结构的质量,为了从材料工作性能角度指导灌注施工,亟需开展 CRTS III 型无砟轨道自密实混凝土早期工作性能研究工作。

学者们针对自密实混凝土灌注过程中灌注时间、灌注速度、早期温度场、工作参数等变量对其灌注质量开展研究。丁伟^[3]研究不同拌和物性能、灌注时间、排浆时间的充填层强度分布特征,提出基于强度标准差的充填层匀质性指标、现场最佳拌和物状态及灌注工艺。LI^[4]研究工作参数和填充时间对自密实混凝土填充层质量的影响。徐桂弘^[5]模拟计算了灌注过程中轨道板的受力情况,发现自密实混凝土流动是引起轨道板位移的主要原因,轨道板受力与其灌注速度呈指数关系。ALYHYA^[6]对不同粗骨料体积、浆料与固体比率和水与黏结剂比率的自密实混凝土力学特性进行研究。郭厚勇^[7]基于自密实混凝土线外工艺性灌捣板试验,研究秋季晴天、秋季小雨和冬季低温天气下自密实混凝土的灌注质量及性能。魏春城^[8]通过开展现场试验、建立自密实混凝土早期温度场计算模型,分析自密实混凝土早期温度时空演变规律。

对于自密实混凝土施工,一些学者从自密实混凝土本身出发研究其组成成分对灌注施工的影响。YUAN^[9]从自密实混凝土的组成、各组分配合出发研究其对自密实混凝土施工的影响。LONG^[10]研究施工过程中,添加增黏剂对自密实混凝土的和易性及其力学特性的影响。对于自密实混凝土施工工艺、施工优化措施等学者们也进行研究。王显进^[11]在大量灌板试验的基础上,分析自密实混凝土性能控制指标、灌注方式、轨道板压紧工艺参数、防溢管高度及自密实混凝土养护方式。樊齐旻^[12]研究自密实混凝土灌注方式和模板设计与安装方面的优化措施。孙彬^[13]介绍 CRTS III 型板式无砟轨道自密实混凝土施工工艺原理、施工操作要点、技术特点、质量要求、混凝土的生产、运

输、灌注和养护。张婧颖^[14]阐述了自密实混凝土施工流程和技术指标,建立标准化质量管理体系,明确质量控制要点。对自密实混凝土施工全过程中原材料及拌和物质量控制、模板安装等环节易出现的问题进行梳理,并提出相应措施。童小飞^[15]总结了 CRTS III 型板自密实混凝土的配制方法、混凝土质量控制技术,通过试验确定了自密实混凝土最佳的灌注工艺流程、施工质量控制参数、指标及施工质量控制关键要点。

综上所述,目前对于既有的无砟轨道灌注技术研究多从试验角度进行开展,而从理论方面的研究较少;对自密实混凝土性能参数研究主要聚焦在宏观参数,较少从流变参数角度进行研究,对于流变参数对灌注施工的研究较少。因此,为了研究流变参数对自密实混凝土灌注施工效果的影响,本文建立自密实混凝土灌注施工流体动力学及有限元分析模型,研究屈服应力和塑性黏度对灌注时间、灌注过程中轨道板力学状态的影响规律,以期获得自密实混凝土流变参数对灌注施工质量的影响,为灌注施工过程中自密实混凝土性能优化提供理论指导。

1 CRTS III 型轨道板灌注施工模型

1.1 自密实混凝土模型

利用 ABAQUS 软件对自密实混凝土在无砟轨道板结构层间流动进行流体动力学模拟。采用自密实混凝土相、空气相多相流模拟初始状态,其中自密实混凝土使用宾汉姆模型进行模拟。以自密实混凝土屈服应力 $\tau = 45 \text{ Pa}$, 塑性黏度 $\eta = 90 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,自密实混凝土灌注施工过程中轨道板所受上浮力、位移随时间的变化为例进行分析。对自密实混凝土模型施加沿 y 轴负方向的重力,使其在重力的作用下流动,模型 4 个出口均设置为自由流出口,其余壁面均设置为无滑移的壁面。

本文拟对施工期耦合进行研究,因此选取一块轨道板长度的底座板进行建模,底座板底部设置两个限位凹槽。无砟轨道有限元分析模型不考虑钢轨、扣件及自密实混凝土层;简化轨道细部结构,仅在设计限位装置布置时考虑承轨台位置,建立的轨道结构模型及自密实混凝土模型如图 1 所示,无砟轨道计算参数如表 1 所示。

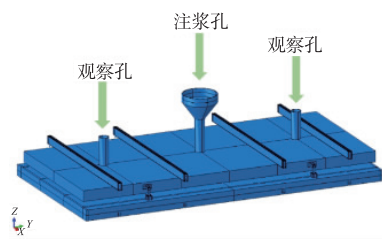


图 1 无砟轨道结构灌注模型

Fig. 1 Pouring model of ballastless track structure

表 1 CRTS III 型板式无砟轨道计算参数

Tab. 1 Calculation parameters for CRTS III slab-type ballastless track

部件	混凝土材料	尺寸(长×宽×厚)/m	密度/(kg/m³)	弹性模量/Pa	泊松比
轨道板	C60	5.6×2.5×0.2	2 500	3.65×10 ¹⁰	0.2
自密实混凝土层	C40	5.6×2.5×0.1	2 400	3.40×10 ¹⁰	0.2
限位凹槽	—	0.7×1.0×0.1	—	—	—
底座板	C40	5.6×3.1×0.3	2 500	2.80×10 ¹⁰	0.2

1.2 自密实混凝土验证

坍落度试验是混凝土和易性的测定方法与指标,通过坍落度试验可以评价自密实混凝土的流动性。在此之前并没有通过试验对自密实混凝土模型进行验证,因此,为验证自密实混凝土本构模型的正确性,开展自密实混凝土坍落度试验,同时,建立坍落扩展度有限元模型,获取扩展时间 T_{500} 及坍落扩展度,有限元仿真与试验结果如图 2 所示。

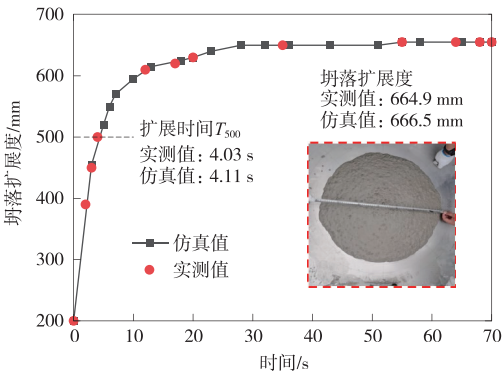


图 2 自密实混凝土坍落扩展度仿真与试验结果

Fig. 2 Simulation and test results of slump flow of SCC

由图 2 可知,现场试验结果坍落扩展度稳定时间为 67.8 s,扩展时间 T_{500} 为 4.03 s,最终扩展度为 664.9 mm,试验测得的指标均满足 QC-R 596—2017《高速铁路 CRTS III 板式无砟轨道自密实混凝土》限值,因此可认为试验采用的自密实混凝土是符合规范要求的。根据有限元仿真结果,可知坍落扩展度稳定时间为 69.2 s,扩展时间 T_{500} 为 4.11 s,最终扩展度为 666.5 mm。对比分析实测值与仿真值,发现坍落度稳定时间的误差为 2.06%、扩展时间 T_{500} 的误差为

1.99%,最终扩展度误差为 0.24%,均满足误差允许范围,证明有限元仿真建立的自密实混凝土模型是正确的。

1.3 灌注施工模型验证

为了验证自密实混凝土灌注施工有限元分析模型的准确性,开展现场位移测定试验,将自密实混凝土流动模型所测得的力施加到轨道结构中测量轨道板的位移,具体布置方案与试验情况如图 3 所示。

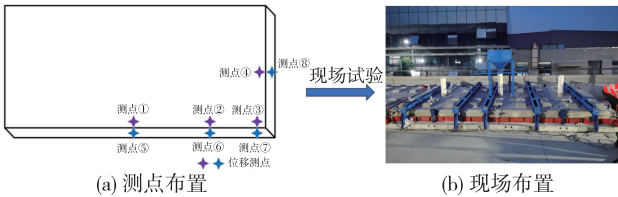


图 3 测点布置

Fig. 3 Arrangement of measurement points

现场自密实混凝土灌注试验中,于轨道板板边、中部等位置布置位移传感器,测试自密实混凝土灌注过程中相应位置的轨道板垂向位移变化情况。模型建立后,结合现场试验数据,开展“无砟轨道-限位装置”耦合分析模型验证,以验证简化后轨道结构模型,可以得到轨道板板边中部垂向位移仿真值,模型仿真值为 0.922 mm,实测值为 0.994 mm,相对误差为 7.2%,所建立的轨道结构耦合分析模型具有一定的可靠性,可以基于当前所建立的模型进行下一步分析计算。

2 流变参数对灌注施工效果影响

2.1 灌注过程中轨道板力学特性分析

自密实混凝土的流动性与其流动参数有关,轨道自密实混凝土灌注完成时间、效果受其流变参数的影响,不同流变参数对其灌注影响不同,根据既有研究成果,发现屈服应力和塑性黏度对自密实混凝土灌注施工效果的影响最为显著,为了研究流变参数对自密实混凝土灌注施工的影响规律,以自密实混凝土屈服应力 $\tau=45\text{ Pa}$,塑性黏度 $\eta=90\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时,自密实混凝土灌注施工过程中轨道板所受上浮力、位移随时间的变化为例进行分析。灌注施工过程轨道板所受的上浮力、位移随时间的变化如图 4 所示。

由图 4 可以看出,自密实混凝土灌注过程中轨道板所受上浮力和位移时程变化分为 4 个阶段。第一阶段,轨道板上浮力和位移均未发生阶段,该阶段自密实混凝土在轨道板与底座板层间自由流动,并未接触轨道板,因此轨道板所受的上浮力和位移均为 0。第二阶段,轨道板所受的上浮力和位移缓慢增长阶段,该阶段自密实混凝土灌注时与轨道板接触,因而会对轨道板产生一定

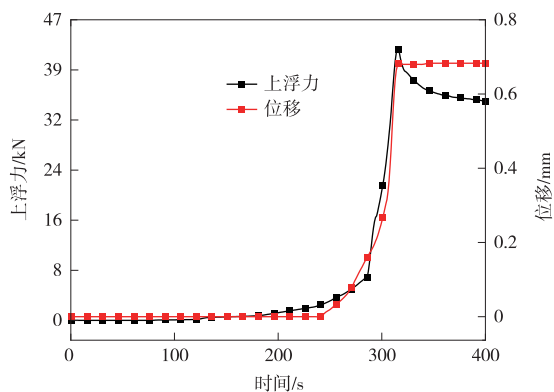


图 4 轨道板力学特性时程

Fig. 4 Time histories of mechanical properties of track slab

的上浮力和位移,但是由于只有注浆口下面自密实混凝土与轨道板有接触,其余部位无接触,所以轨道板所受的上浮力和位移增长均比较缓慢。第三阶段,轨道板所受的上浮力和位移快速增长阶段,此时自密实混凝土基本充满轨道板与底座板之间的空腔,由于出浆口的设置一定程度限制了自密实混凝土的流动,此时自密实混凝土的作用使轨道板所受上浮力、位移均达到峰值。第四阶段,轨道板所受的上浮力回落、位移保持稳定阶段,该阶段由于自密实混凝土填满轨道板与底座板之间的空腔,但未发生凝固,会反向轨道板注浆孔以及观察孔流动,使得轨道板所受的上浮力回落。

总体来说,自密实混凝土灌注过程中轨道板所受的上浮力随着灌注时间的增加逐渐增大,上浮力达到最大值后,由于自密实混凝土反向流动,使得轨道板所受的上浮力回落,直至最后趋于稳定。在自密实混凝土刚开始灌注时,由于轨道板与底座板之间有足够空间供自密实混凝土自由流动,因此自密实混凝土灌注初期,轨道板并不会发生位移,当自密实混凝土灌注到一定量时,轨道板会产生一定的位移,并随着灌注时间的增加逐渐趋于稳定。

2.2 屈服应力影响

自密实混凝土主要是由水组成的液相与骨料组成的固相共同复合的两相材料,一般认为新拌自密实混凝土属于 Bingham 流体,其流变性能主要表征为屈服应力和塑性黏度。屈服应力是阻止拌和物发生塑性变形的最大应力,塑性黏度反映拌和物在流动过程中其内部结构阻碍流动的黏滞阻力的大小。Bingham 流体模型的流变方程式为

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (1)$$

式中, τ 为剪应力; τ_0 为屈服应力; μ 为塑性黏度; γ 为剪切速率。

屈服应力是指自密实混凝土启动或维持流动的最小应力,分为静态屈服应力和动态屈服应力两部分。

能够使自密实混凝土从静止状态变为流动状态的最小应力称为静态屈服应力,维持自密实混凝土流动所需要最小应力称为动态屈服应力。屈服应力是表征自密实混凝土流变性的重要指标之一,与聚集粒子间距离、胶凝材料含量、集料体积、含砂量、骨料粒径分级、骨料形状等因素有关。当自密实混凝土聚集粒子之间的距离增大时,屈服应力会相应减小;自密实混凝土胶凝材料含量高时,骨料颗粒之间的距离反而会增大,因此屈服应力减小;粗集料体积增大时,其体积分数也会相应增大,粒子之间的距离减小,屈服应力增大;当自密实混凝土含砂量增加时,粗集料掺量也会增大,屈服应力增大,自密实混凝土中更多的骨料颗粒和较少的砂浆会使得自密实混凝土能够更好地流动;当骨料粒径分级越好,骨料之间的距离会增大,使得屈服应力减小;此外,天然骨料相比于破碎骨料,骨料颗粒之间的摩擦较小,屈服应力也会比破碎骨料小。

根据式(1)可知,自密实混凝土的剪切应力受屈服应力和塑性黏度的影响,当屈服应力大时,自密实混凝土的剪切应力也大,此时自密实混凝土从静止状态变为流动状态所需要克服的阻力就越大,其流动速度就会越慢,影响灌注过程中轨道板所受的上浮力、位移及灌注完成时间。自密实混凝土屈服应力越大,轨道板所受的上浮力、位移就越大,完成灌注所需要的时间也就越长。为了研究屈服应力对自密实混凝土灌注施工的影响,保持塑性黏度不变,对不同屈服应力下,轨道板上浮力、轨道板位移及自密实混凝土完成灌注时间进行模拟,结果如图 5 所示。

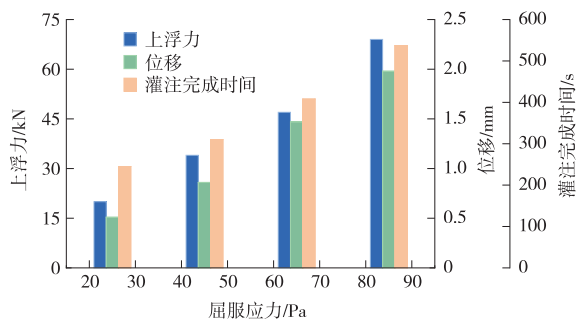


图 5 屈服应力对灌注施工影响

Fig. 5 Effect of yield stress on pouring construction

由图 5 可以看出,轨道板上浮力的变化趋势随着屈服应力的增大呈现逐渐增大的趋势,当屈服应力为 85 Pa 时,上浮力达到最大 69 kN。同时可以发现,灌注过程中轨道板位移与屈服应力也呈现正相关趋势,随着屈服应力逐渐增大,轨道板最大位移也逐渐增大,当屈服应力为 85 Pa 时轨道板位移达到最大为 1.98 mm。不同的屈服应力对自密实混凝土完成灌注

时间的影响也不同,随着屈服应力的增大,灌注时间逐渐变长,两者呈现正相关。

2.3 塑性黏度影响

一旦自密实混凝土克服静屈服应力开始流动后,其所受到的自由流动的阻力被称为塑性黏度,塑性黏度是一种加快自密实混凝土流动所需要的额外剪切应力,直接影响自密实混凝土的流动速度。塑性黏度大时,自密实混凝土流动所需要的额外剪切应力就大,其流动速度就会慢,完成灌注所需要的时间就会越长。塑性黏度与自密实混凝土中液体含量、骨料含量、气泡含量、集料体积分数、含砂量、骨料粒径分级集料的形状等因素有关。当自密实混凝土中的液体含量增加或骨料含量降低时,其塑性黏度降低;同时,如果新拌自密实混凝土没有振捣,导致其中含有大量气泡,在自密实混凝土中起着润滑作用,会使自密实混凝土的塑性黏度显著降低;如果拌和时粉末含量增多,相当于其中的液体含量减少,会使塑性黏度增大;粗集料体积分数增加时,塑性黏度也会增加,自密实混凝土流动速度降低,分级良好的骨料其自密实混凝土的塑性黏度降低;天然集料颗粒之间的摩擦减小,自密实混凝土的塑性黏度相比于破碎集料的塑性黏度减小。

根据式(1)可知,塑性黏度对自密实混凝土的剪切应力也有影响,当塑性黏度大时,自密实混凝土的剪切应力也大,自密实混凝土流动所需要克服的阻力也越大,其流动速度就会变慢,完成灌注所需要的时间也就越长,灌注过程中轨道结构所受的上浮力、位移也会越大。塑性黏度较小时,自密实混凝土流动所需要克服的阻力就越小,越容易流动,会对轨道板产生一个较大的冲击力,使得开始灌注时轨道板所受的上浮力和位移变大。为了研究塑性黏度对自密实混凝土灌注施工的影响,保持屈服应力不变,对不同塑性黏度下,轨道板上浮力、轨道板位移及自密实混凝土完成灌注时间进行模拟,结果如图6所示。

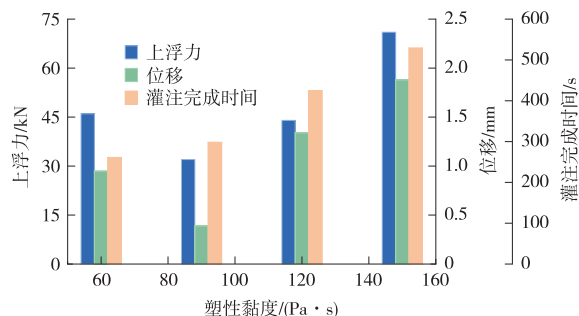


图6 塑性黏度对灌注施工影响

Fig. 6 Effect of plastic viscosity on pouring construction

由图6可知,轨道板上浮力随塑性黏度的增大呈

现先减小再逐渐增大的趋势,最初塑性黏度为 $60 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时轨道板所受的上浮力大,主要与自密实混凝土灌注过程对轨道板的冲击力较大有关。随着塑性黏度增大,灌注时其对轨道板的冲击力减小,使得轨道板所受的上浮力也减小,当轨道板所受的上浮力达到最小值后,随着塑性黏度的增大,自密实混凝土灌注对轨道板上浮力也逐渐增大,塑性黏度为 $150 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,轨道板所受上浮力最大为 71 kN 。灌注过程中轨道板位移与轨道板上浮力的变化趋势一致,均随着塑性黏度增大呈现先减小再逐渐增大的趋势,当自密实混凝土灌注完成后,轨道板的位移达到最大值,随着塑性黏度逐渐增大,轨道板最大位移先减小再增大,当塑性黏度为 $160 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,轨道板位移达到最大为 1.88 mm 。自密实混凝土塑性黏度的取值影响其灌注时间,不同塑性黏度的灌注时间有较大差异,随着塑性黏度增大,灌注时间逐渐变长,总体呈现灌注时间随着塑性黏度的增大而变长的趋势。塑性黏度 $60 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时灌注完成所需时间最长为 253 s ,塑性黏度 $160 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时灌注完成所需时间最短 545 s 。

3 结论

本文基于流固耦合理论,建立自密实混凝土灌注施工有限元分析模型,研究自密实混凝土灌注过程中轨道结构的力学特性及其受流变参数的影响规律。主要结论如下。

(1)建立的有限元分析模型能够很好地模拟自密实混凝土灌注过程,模型仿真值与实测值之间误差均小于 10% ,本文所建立的轨道结构自密实混凝土灌注施工模型准确可靠。

(2)自密实混凝土灌注过程中轨道板所受的上浮力和位移变化分为4个阶段。初始阶段,未产生明显的上浮力和位移;随后,上浮力和位移缓慢增长;随着自密实混凝土逐渐填满轨道板与底座板层间空腔,上浮力和位移快速增长并达到峰值;灌注结束后,上浮力回落,位移保持稳定。

(3)随着塑性黏度增大,灌注时间、轨道板所受的上浮力、轨道板位移均呈现先减小再增大趋势;随着屈服强度增大,灌注时间、轨道板所受的上浮力、轨道板位移均逐渐增大。自密实混凝土流变参数的最佳取值范围为:屈服应力 $45 \sim 65 \text{ Pa}$,塑性黏度 $90 \sim 120 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

参考文献:

- [1] WANG J, GAO L, ZHAO W Q, et al. Evolution Mechanism of Inter-layer Fatigue Properties of CRTSⅢ Slab Track[J]. Construction and Building Materials, 2022,360:129459.

(下转第22页)

- [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [20] 刘勇. 利用既有铁路开行市域(郊)列车基本条件综合评价模型应用[J]. 中国铁路, 2022(2): 140-147.
- LIU Yong. Application of Comprehensive Evaluation Model for Basic Conditions of Utilizing Existing Railways to Operate Urban(Suburban) Trains[J]. China Railway, 2022(2): 140-147.
- [21] 刘学锋. 既有铁路改造为市郊铁路线路适用性评价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- LIU Xuefeng. Study on Evaluation in the Applicability of the Line of Suburban Railway that Reformed from Existing Railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [22] 张森, 于敏. 都市圈跨制式轨道交通贯通融合票价体系研究[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(2): 79-84.
- ZHANG Sen, YU Min. Fare System under the Background of Integration of Cross-standard Rail Transit Payment Areas in Metropolitan Area[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(2): 79-84.
- [23] 杨力. 基于既有西户铁路开行市域列车的建设方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(2): 39-46.
- YANG Li. Study on the Construction Scheme of Regional Train Operation on the Existing Xi'an-Huxian Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(2): 39-46.
- [24] 国家铁路局. 市域(郊)铁路设计规范: TB10624—2020[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2021.

(编辑: 王婷)

(上接第5页)

- [2] 李化建, 谭盐宾, 谢永江, 等. 自密实混凝土的特点及其在高速铁路中的应用[J]. 铁道建筑, 2012(8): 143-145.
- LI Huajian, TAN Yanbin, XIE Yongjiang, et al. Characteristics of Self-compacting Concrete and Its Application in High-speed Railway[J]. Railway Engineering, 2012(8): 143-145.
- [3] 丁伟, 贾宝红, 李文旭, 等. 基于强度分布的CRTSⅢ板式轨道充填层灌注质量的影响因素研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(11): 2651-2657.
- DING Wei, JIA Baohong, LI Wenxu, et al. Study on Influencing Factors of Filling Quality of CRTSⅢ Slab Track Filling Layer Based on Strength Distribution[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(11): 2651-2657.
- [4] LI W X, MA K L, LONG G C, et al. Influence of Workability Parameters and Filling Time on the Quality of SCC Filling Layers[J]. Magazine of Concrete Research, 2021, 73(12): 636-647.
- [5] 徐桂弘, 刘学毅, 杨荣山, 等. 混凝土灌注过程中无砟轨道板产生位移的原因[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 42-46.
- XU Guihong, LIU Xueyi, YANG Rongshan, et al. Reasons for Displacement of Ballastless Track Slab during Self-Compacting Concrete Pouring[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1): 42-46.
- [6] ALYHYA W S, ABO DHAHEER M S, AL-RUBAYE M M, et al. Influence of Mix Composition and Strength on the Fracture Properties of Self-compacting Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 110: 312-322.
- [7] 郭厚勇, 张玉山, 张春林. 天气变化对自密实混凝土灌注质量及性能的影响[J]. 铁道建筑, 2018, 58(10): 116-119.
- GUO Houyong, ZHANG Yushan, ZHANG Chunlin. Inf Luence of Weather Changes on Pouring Quality and Working Performance of Self-compacting Concrete of CRTSⅢ Slab Ballastless Track[J]. Railway Engineering, 2018, 58(10): 116-119.
- [8] 魏春城, 杨荣山, 张光明, 等. 无砟轨道自密实混凝土早期温度场及其影响研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(12): 22-27.
- WEI Chuncheng, YANG Rongshan, ZHANG Guangming, et al. Research on the Early Temperature Field of Self-compacting Concrete of Ballastless Track and Its Influence[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(12): 22-27.
- [9] YUAN Q, LONG G C, LIU Z Q, et al. Sealed-space-filling SCC: a Special SCC Applied in High-speed Rail of China[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 167-176.
- [10] LONG G C, LIU H, MA K L, et al. Development of High-performance Self-Compacting Concrete Applied as the Filling Layer of High-speed Railway[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(2): 04017268.
- [11] 王显进. 郑徐客运专线CRTSⅢ型板式无砟轨道自密实混凝土施工工艺探讨[J]. 铁道建筑, 2015, 55(8): 105-108.
- WANG Xianjin. Discussion on Construction Technology of Self-compaction Concrete for CRTSⅢ Slab-type Ballastless Track on Zhengzhou-Xuzhou Passenger-dedicated Railway[J]. Railway Engineering, 2015, 55(8): 105-108.
- [12] 樊齐旻, 谭盐宾. CRTSⅢ型板式无砟轨道自密实混凝土施工工艺优化及应用[J]. 施工技术, 2016, 45(17): 106-108.
- FAN Qimin, TAN Yanbin. Optimization and Application of Construction Technology for Self-compacting Concrete in CRTSⅢ Slab Ballastless Track[J]. Construction Technology, 2016, 45(17): 106-108.
- [13] 孙彬, 陈继娇. CRTSⅢ型板式无砟轨道自密实混凝土施工技术[J]. 施工技术, 2015, 44(S2): 303-305.
- SUN Bin, CHEN Jijiao. The Construction Technology for Self-compacting Concrete of CRTSⅢ Slab Ballastless Track[J]. Construction Technology, 2015, 44(S2): 303-305.
- [14] 张婧颖, 刘心成, 王域辰. CRTSⅢ型板式无砟轨道自密实混凝土施工质量控制[J]. 铁道建筑, 2020, 60(8): 143-147.
- ZHANG Jingying, LIU Xincheng, WANG Yuchen. Construction Quality Control of Self-compacting Concrete in CRTSⅢ Ballastless Track[J]. Railway Engineering, 2020, 60(8): 143-147.
- [15] 童小飞, 刘磊, 王成启. CRTSⅢ型板自密实混凝土配制及施工关键技术研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(2): 37-41.
- TONG Xiaofei, LIU Lei, WANG Chengqi. Research on the Key Technology of Preparation and Construction of CRTSⅢ Self-compacting Concrete Slabs[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(2): 37-41.

(编辑: 王婷)