

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.07.048

地铁盾构隧道与预制道床装配一体化技术研究

周志宇, 韩刚, 姚晨晨

(山东轨道交通勘察设计院有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 为构建地铁盾构隧道装配一体化技术体系, 解决盾构隧道与道床结构装配式全预制构件化的最后关键一环, 结合预制式轨道板新技术, 基于信息化、智能化、预制装配化设计理念, 初次提出了一种预制道床构件及安装方法, 设计了连接式和承插式两种预制道床构件纵向连接方式, 将轻质混凝土应用到预制道床中, 研发集成搬运机械伸缩臂、智能识别操作系统、注浆设备系统等功能的施工装备, 以期最大限度地实现地铁盾构隧道全部构件预制装配化, 提高机械化作业水平, 减少现场工人数量, 降低劳动强度, 提高施工效率, 保证施工质量。

关键词: 地铁; 盾构隧道; 装配一体化; 预制道床构件; 纵向连接

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)07-0194-04

0 引言

预制钢筋混凝土构件具有生产质量高、外观质感优、尺寸精度高的优点, 同时工厂流水线生产方式具有降低资源消耗、减少碳排放量、降低环境影响等优势, 已全面推广应用到建筑结构、桥梁结构领域。地下结构工程中, 地铁车站已有采用预制装配式结构型式^[1-2], 盾构隧道广泛采用预制管片拼装技术。新型预制轨道板^[3]、装配式轨顶风道^[4]、预制装配式UHPC站台板^[5]等新技术也得到了工程应用。

我国隧道建造技术在建造技术智慧化、构件预制拼装化、材料绿色环保化、施工装备智能化方面取得了一系列成果。地铁区间隧道通常优选盾构法施工, 盾构隧道中唯一尚未实现预制拼装化的部分就是处于预制式轨道板和管片之间的道床结构。

本文结合目前地铁盾构隧道采用预制管片和预制式轨道板设计方案, 基于信息化、智能化、预制装配化设计理念, 提出一种预制道床构件及安装方法, 设计两种纵向连接方式, 提出将轻质混凝土应用到道床中, 研发出集成搬运机械伸缩臂、智能识别操作系统、注浆设备系统、吊车等功能的施工装备, 从而最大限度上实现地铁盾构隧道全部构件预制装配, 初步构建地铁盾构隧道全装配一体化技术体系, 避免现阶段道床结构现浇施工中的一些问题, 以期达到智能化、机械化作业程度, 减少现场工人数量, 降

低人工劳动强度。

1 总体设计研究

用预制板式轨道结构的地铁盾构隧道^[6], 见图1。装配式施工过程是通过专用铺板装备对预制轨道板进行高精度定位, 利用支撑装置固定轨道板, 灌注纤维混凝土填充层即可完成预制轨道板铺设。

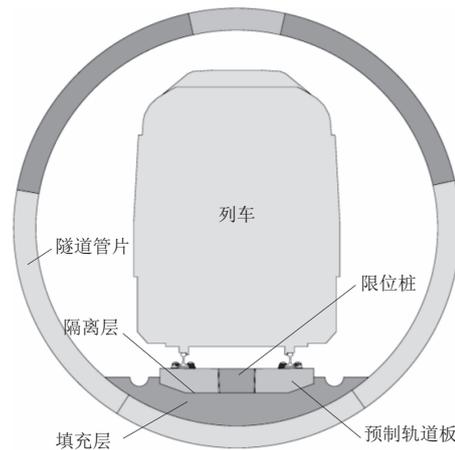


图1 用预制板式轨道结构的地铁盾构隧道示意图

目前填充层尚未实现预制化, 浇筑施工时仍需要大量装备^[3], 而且配备抗浮支架, 施工工艺控制严, 施工精度要求高。现研发设计预制装配道床构件, 实现地铁盾构隧道与预制道床结构装配一体化。结合目前常见3种盾构隧道的道床结构型式, 设计3种盾构隧道与预制道床装配一体化技术体系示意图, 见图2。

方案一: 梯形凹槽预制道床。考虑半圆形双侧排水沟, 道床结构型式采用梯形凹槽, 方便梯形预制轨道板安装。

收稿日期: 2023-06-27

作者简介: 周志宇(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事城市轨道交通工程设计与研究工作。

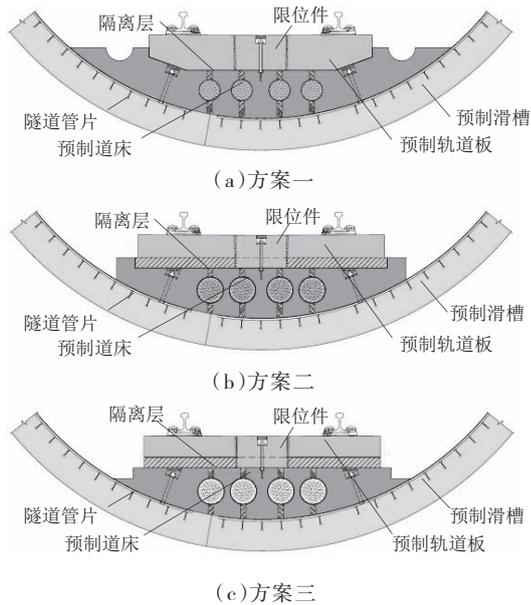


图2 地铁盾构隧道与预制道床结构装配一体化技术体系示意图

方案二:矩形凹槽预制道床。考虑后做双侧排水沟,道床结构型式采用矩形凹槽,方便矩形预制轨道板安装。

方案三:矩形平顶预制道床。考虑双侧排水沟,道床结构型式采用矩形平顶,更加方便预制轨道板安装。

2 详细设计研究

2.1 道床预制件设计

为实现道床预制件与盾构隧道管片、预制轨道板之间的高效协同快速安装施工作业,初次提出连接式预制道床和承插式预制道床的概念。

2.1.1 连接式预制道床

连接式预制道床^[7]是将道床预制件拆分为主体构件和连接棒体,以连接棒体为特点,构件自身包括主体构件、空腔、连接棒体、注浆孔、注浆管、预埋件、安装孔,三维示意图见图3。

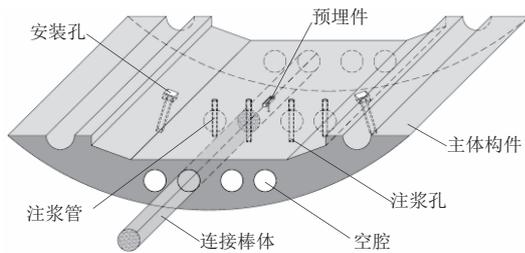


图3 连接式预制道床结构三维示意图

连接棒体可采用轻质多孔发泡混凝土等材料替代道床预制件单元中部分混凝土,以减轻主体构件自身重量的10%~20%;发泡混凝土综合单价比混凝土低30%左右,降低工程造价。

2.1.2 承插式预制道床

承插式预制道床是为方便直线段区间盾构隧道道床快速施工,将连接棒体与主体构件设计为一体,采用承插式连接一体化装配拼接,构件自身包括主体构件、空腔、注浆孔、注浆管、预埋件,三维示意图见图4。

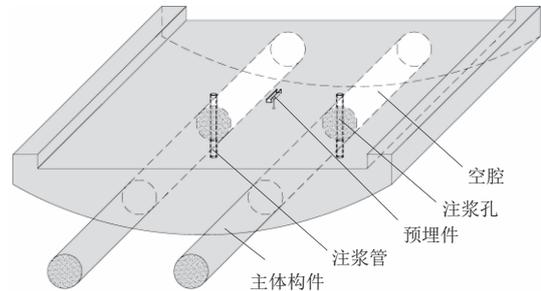


图4 承插式预制道床结构三维示意图

两种预制道床主体构件均通过内部设置空腔,方便施工搬运和拼装,不需要现场浇筑和养护,机械化拼装完成即提供下一道工序施工所需工作平台,大大提高施工效率。

结合盾构隧道管片现有的预埋滑槽技术,通过主体构件内部可设置安装孔,方便安装T形螺栓,实现主体构件与管片之间的有效可靠连接。同样适用于小曲率半径区间隧道管片。

2.1.3 包络设计

考虑外部荷载作用下盾构隧道管片发生一定的变形,在管片拼装完成后采用点云、雷达等技术扫描完成隧道底部轮廓线。根据轮廓线采取包络设计预制道床主体构件,减少装配构件间隙的注浆填充量,提高道床预制件主体构件与盾构区间管片装配一体化精度。

拼装成型的盾构隧道变形应符合规定的结构安全控制值20 mm。当隧道水平位移超过控制值,采取补偿变形处理措施,可采用10 mm厚度的高强度混凝土垫块。当隧道竖向位移超过控制值,道床预制件尺寸在包络设计的前提下仍不满足安装使用要求,需根据隧道实际变形量专项设计特殊道床预制件,从而实现道床全预制装配一体化设计与施工。

2.2 预制件连接设计

预制道床构件采用纵向连接设计,充分利用主体构件中间设计的空腔和上下贯通的注浆孔。主体构件安装到位后,将注浆钢花管插入注浆孔抵到隧道管片。其中,连接式预制道床将连接棒体的一半插入主体构件空腔内抵到中间注浆孔已插入的注浆管,将下一个主体构件穿到连接棒体,插入下一个注

浆管,重复施工即可完成连接式拼装。承插式预制道床直接通过纵向承插式连接即可,同样通过注浆钢花管插入注浆孔抵到隧道管片,注入浆液实现充填间隙达到预制构件之间的界面有效黏结。

2.3 注浆孔设计

在预制道床主体构件中部处设计上下贯通的注浆孔,能够为注浆管插入定位顶住两侧的连接棒体或者单侧的承插式结构体。同时,为实现道床结构预制件装配后形成整体,通过注浆管注浆有效地填充构件之间的间隙。

施工时,主体构件安装到位后,在注浆孔内插入注浆管,接着安装下一个主体构件。注浆管通过注浆孔低压 0.2 ~ 0.5 MPa 注入浆液,将浆液有效充填到各预制件之间的间隙。

2.4 注浆液设计

考虑预制构件的自身生产误差、施工误差、外部作用不均引起变形误差等因素,装配预制构件之间均有一定的间隙,需要设计一种填充预制钢筋混凝土构件间隙的充填材料。

注浆液的充填材料组分包括重烧氧化镁、磷酸二氢钾、聚乙烯醇、烷基磺酸酯、聚丙烯纤维、硼砂、F级粉煤灰和细砂。

通过现场设备制备,注浆液具有凝结速度快、早期强度高、界面黏结性好、耐久性好和抗冲击性能优的特点,预制构件间隙形成界面黏结,形成结构整体共同承受列车反复荷载作用,提高全预制构件拼装轨道结构上方列车运行的稳定性。

注浆液可通过添加新材料配方,形成具有高效绝缘性能的注浆液,在拼装完成后注浆包裹道床预制件,达到杂散电流自防护效果。

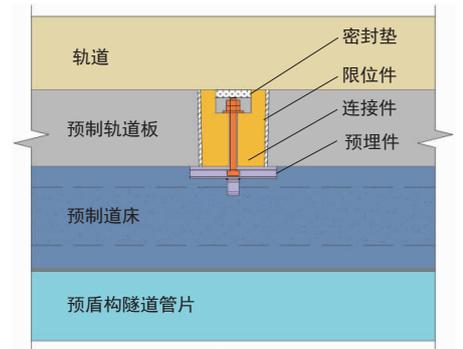
2.5 限位件设计

为限制道床预制主体构件上方预制轨道板的移动,在主体构件中设置预埋件,优化预制限位件设计内部螺栓孔,通过 T 形螺栓将预制道床主体构件与限位件有效连接在一起(见图 5)。

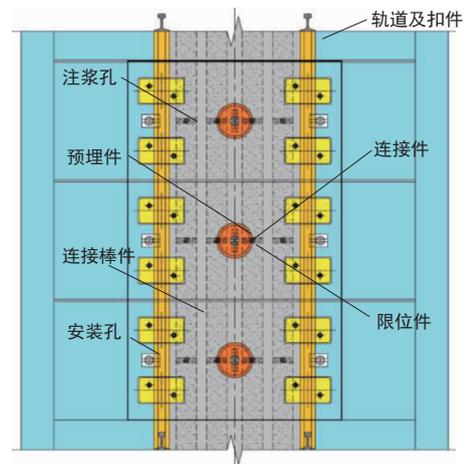
2.6 管道通道设计

为满足区间盾构隧道管线横向穿越通过轨道的需求,方便管线穿越与安装施工,同时方便后期运营维护,有需求的区间段位置的道床预制主体构件底部预留横向贯通设计的管线通道(见图 6)。

管线通道内预先埋设好的管道体应具有良好的防腐防静电性能,以有效地隔绝杂散电流对管道体的腐蚀破坏,减低维护费用。在注浆液充填完成后,



(a)剖面图



(b)平面图

图 5 限位件设计

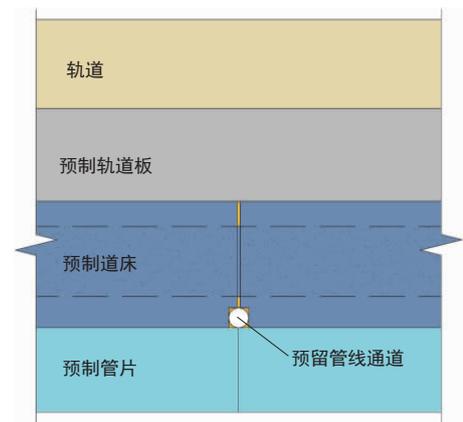


图 6 预留管线通道设计

管道体被牢牢固定住,不会发生管道移位现象。同时,有特殊需求区段合理地设置管线通道数量,以备不时之需。

2.7 结构配筋设计

为保证预制道床结构主体构件强度和刚度,3种常见构件型式的配筋设计示意图见图 7。

结合现有成熟的预制式轨道板和绝缘隔离层技术,道床预制件可以减少因杂散电流防护所需的配筋量,有利于降低工程造价。

3 装配一体化技术

为方便道床预制构件快速拼装施工,研发了专

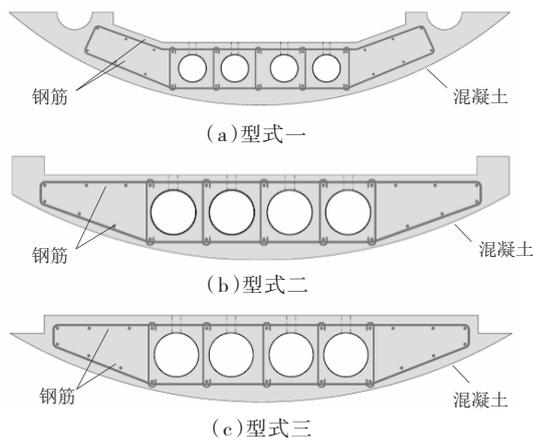


图7 三种型式预制道床主体构件配筋设计

用智能化自动机械安装设备,大大提高施工效率的同时,与原现浇施工现场相比,大幅度减少了工人数量,大大降低了工人的劳动强度。

3.1 连接式装配一体化设计

为实现道床预制件高效快速安装作业,连接式自动智能化安装装备主要包括预制件运输车、移动吊车、伸缩臂、搬运机械臂、注浆设备系统、智能识别操作系统。

运输车将预制件搬运就位,通过智能识别操作系统识别连接棒体,搬运机械臂抓取并安装预制件。安装施工主要过程示意图见图8。

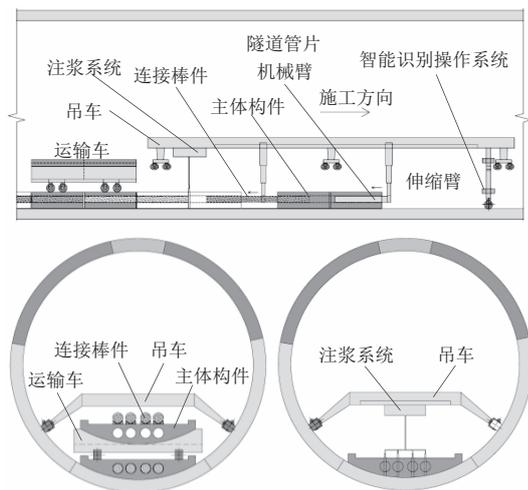


图8 连接式预制道床构件安装示意图

3.2 承插式装配一体化设计

承插式道床预制构件更加适用于直线段区间盾构隧道道床构件标准化设计与安装。承插式智能自动化安装装备主要包括预制件运输车、移动吊车、搬运伸缩臂、注浆设备系统、智能识别操作系统。

运输车将预制件搬运就位,通过智能识别操作系统识别承插式道床预制构件,伸缩臂抓取并安装承插式道床预制构件。安装施工过程示意简图见图9。

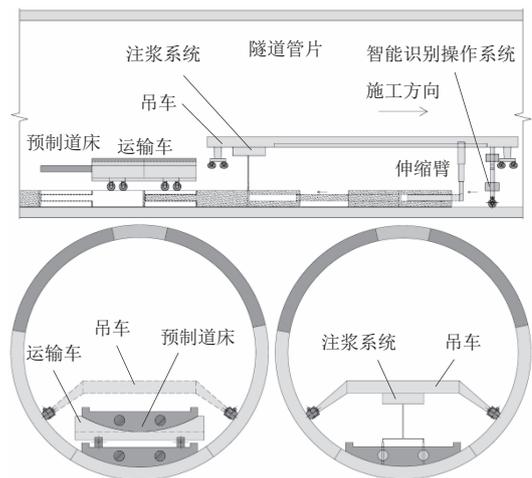


图9 承插式预制道床构件安装示意图

4 结语

构建地铁盾构隧道装配一体化技术,在满足使用功能和承载能力的前提下,实现了地铁盾构法区间最后一个环节道床基础结构的预制拼装。

(1)初步构建了地铁盾构隧道全部构件预制拼装一体化技术体系,最大限度地构建了构件预制化、施工机械化、拼装智能化。

(2)初次提出了一种预制道床构件和安装方法,设计了连接式和承插式两种纵向连接方式,保证了预制件纵向整体性可靠连接;设计了注浆液和注浆设备系统,提高了道床预制构件拼装的整体性和稳定性;配备了智能识别操作系统,提高了安装的准确性和高效性。

(3)将轻质混凝土应用到道床中,可减轻构件自身重量的10%~20%。发泡混凝土综合单价比混凝土低30%左右,能够降低工程造价。

(4)研发预制道床构件智能自动化施工用装备,以期提高机械自动化、智能化作业水平,提高全预制道床结构施工效率。

预期开展预制道床构件室内缩尺试验,拼装试验测试,高性能注浆液绝缘性能试验,道床结构强度、整体刚度、稳定性评价分析,图形识别系统开发等方面工作,优化和调整结构设计与拼装工法;在管片厂内进行足尺试验研究与实测分析后,进一步完善和评价盾构隧道与预制道床装配一体化技术体系,试点应用于实际工程。

下一步对盾构隧道装配一体化基础理论、道床吸能吸音降噪功能材料、高性能绝缘注浆液杂散电流防护技术、盾构同步拼装智能识别自动化技术等方面进行深入研究。

(下转第227页)

少开裂风险。

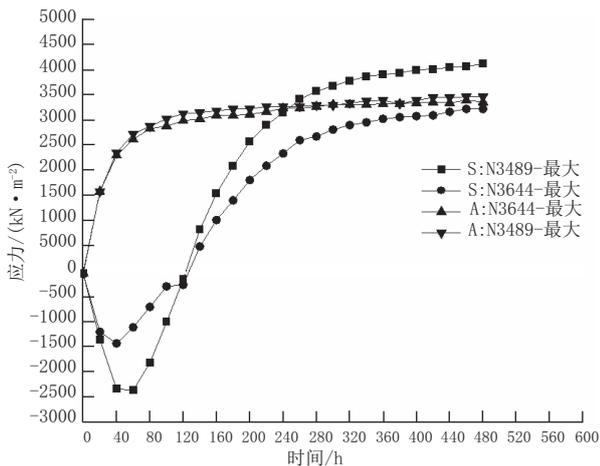


图 12 侧墙有限元应力计算结果(N代表“节点”;S为布设冷却水管的测试结果,A为未布设冷却水管的测试结果)

4 结 语

(1)如不采取控裂措施,混凝土抗裂安全系数为0.96,不满足规范大于1.15的要求,车站C45混凝土开裂风险很大。

(2)采取侧墙降温 and 底板升温的技术措施,并控制侧墙降温幅度不小于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,底板升温幅度不小于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,可使混凝土抗裂安全系数达到1.16,满足规范大于1.15的要求。

(3)与不布设冷却水管的底板和侧墙相比,布设冷却水管的底板温升约 $3\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$,侧墙温降约 $4\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$,

可有效降低混凝土开裂风险。

(4)与不布设冷却水管的底板和侧墙相比,布设冷却水管后其拉应力在早期有一定程度的减少,后期减少幅度加大,20 d拉应力下降值可达到 0.9 MPa ,可有效减少开裂风险。

参考文献:

- [1] 于连山,谢清泉,刘维正,等.轨道交通车站主体结构混凝土开裂分析与控制措施[J].铁道科学与工程学报,2019,16(10):2562-2571.
- [2] 高德风,周欣,费晓春,等.现浇隧道大体积侧墙结构混凝土裂缝控制技术[J].新型建筑材料,2020,47(3):8-12,36.
- [3] 耿敏,李志全,李路,等.徐州轨道交通地下车站侧墙结构高性能混凝土早期抗裂性能研究[J].施工技术,2018(增刊1):1759-1761.
- [4] 苏有文,古松.大体积混凝土施工过程温度应力场监测及有限元分析[J].浙江工业大学学报,2010,38(4):442-447.
- [5] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [6] 徐丽.混凝土底板上长墙的温度应力计算[J].工程质量,2009(3):60-63.
- [7] 徐文,李忠超,张建亮,等.水管冷却控制地铁车站侧墙混凝土早期开裂研究[J].中国建筑防水,2019(12):51-55.
- [8] 王同炎.福田火车站超长混凝土结构抗裂技术[J].施工技术,2013(18):44-47.
- [9] 王一凡,宁兴东,陈尧隆,等.大体积混凝土温度应力有限元分析[J].水资源与水工程学报,2010,21(1):109-113.
- [10] 王江锋,杜春雪,黄志全,等.暗涵墙体混凝土温度场与应力场仿真分析[J].水利水电技术,2017,48(11):83-88.
- [11] 丁兵勇,杨忠良,唐瑜莲,等.水电站厂房大体积混凝土温度应力分析与防裂措施[J].南水北调与水利科技,2015,13(2):362-365.

(上接第197页)

参考文献:

- [1] 杨秀仁.明挖地铁车站预制装配式结构理论与实践[D].北京:北京交通大学,2020.
- [2] 杨秀仁.我国预制装配式地铁车站建造技术发展现状与展望[J].隧道建设(中英文),2021,41(11):1849-1870,41-62.
- [3] 艾永飞,吴宝游,艾永林,等.无轨工装模式下预制板式轨道施工技术研究——以苏州轨道交通5号线工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(S2):597-604.
- [4] 苏立勇,路清泉,张志伟,等.地铁车站轨顶风道装配式技术研究:以北京地铁19号线一期工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(5):814-821.
- [5] 喻波,王呼佳,高鲲,等.预制装配式UHPC站台板结构技术研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(11):1898-1905.
- [6] 王占生,杨秀仁,陈鹏,等.便于快速施工的预制板式轨道结构及施工方法:CN111877054A[P].2020-11-03.
- [7] 李虎,韩刚,周志宇,等.一种隧道承插式道床构件及施工方法:CN115788499A[P].2023-03-14.