

剖析双层盾构隧道预制内部结构拆分设计技术

刘 念

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 相较于地面结构,盾构隧道内部双层车道结构预制装配化具有如下特征:首先受制于洞内空间限制,预制构件需小型化、轻量化。其次,隧道为纵向延续,具备模数化、标准化条件,适合预制装配化。最后,上海软土易变形,叠加盾构掘进偏差,与预制高精度相驳。因此,基于上海诸光路通道,针对上述特征剖析双层盾构隧道预制内部结构拆分设计技术,形成如下结论:预制立柱拆分点宜为柱底和梁底,其高度由吊装作业空间、吊具高度、接头高度和施工容差共同确定。立柱横向净距受制于车道宽度,而纵向净距随隧道延续不受限制。因此,纵梁长度短,宜与车道板合并预制,形成 n 形结构,可减少一道拼装工序和后浇接头数量。

关键词: 盾构;隧道;内部车道结构;预制;拼装;拆分设计

中图分类号: U452.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)10-0142-05

Analysis on Split Design Technology of Prefabricated Internal Structure of Double-layer Shield Tunnels

LIU Nian

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

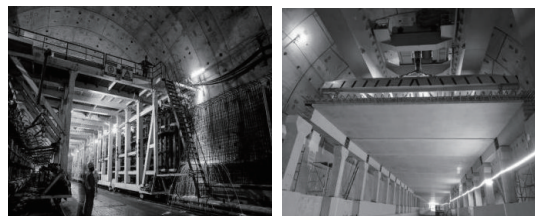
Abstract: Compared with the ground structure, the prefabrication and assembly of the double-layer lane structure inside the shield tunnel have the following characteristics. Firstly, due to the space limitations inside the tunnel, the prefabricated components need to be miniaturized and lightweight. Secondly, the tunnel is longitudinally continuous and has the conditions for modularization and standardization, making it suitable for prefabrication and assembly. Finally, the soft soil in Shanghai is prone to deformation, and when combined with the deviation of shield tunneling, it conflicts with the precast high precision. Therefore, based on the Zhuguang Road Tunnel in Shanghai and aiming at the above characteristics, the internal structure split design technology of double-layer shield tunnel prefabrication is analyzed, and the following conclusions are that the split points of prefabricated columns should preferably be the bottom of the column and the bottom of the beam. Its height is jointly determined by the hoisting operation space, the height of the lifting gear, the height of the joint and the construction tolerance. The transverse clear distance between the columns is restricted by the width of the lane, while the longitudinal clear distance is not restricted as the tunnel continues. Therefore, the longitudinal beam is short in length and is advisable to be prefabricated in combination with the lane slab to form an n-shaped structure, which can reduce one assembly process and the number of post-poured joints.

Keywords: shield; tunnel; interior lane structure; prefabrication; assembly; split design

0 引 言

盾构隧道已广泛应用于城市道路建设。根据内部车道结构的布置,总体上讲可以分为单层、双层两种形式。其中,双层布置形式更为集约化,空间利用率更高,因此应用越来越广泛,如上海北横通道、银都路越江隧道,南京的纬七路隧道等。总体上讲,双层道路盾构隧道内部结构建造工艺可以分为两类,分别

是现浇滑膜工艺和预制装配工艺,如图 1 所示。



(a) 现浇滑膜工艺 (b) 预制装配工艺
图 1 双层道路盾构隧道内部结构建造工艺

其中,现浇滑膜工艺的研究重点是实现与盾构机掘进、管片拼装的同步实施。所以,主流方案为下层车道采用预制构件,快速形成通道,用于管片、渣土、同步注浆浆液等运输,以实现同步作业,剩余结

收稿日期: 2025-02-20

基金项目: 上海建工科技项目(23JCSF-39)

作者简介: 刘念(1988—),男,硕士,高级工程师,从事隧道工程的设计和科研工作。

构采用现浇施工,如图2所示半预制化体系。

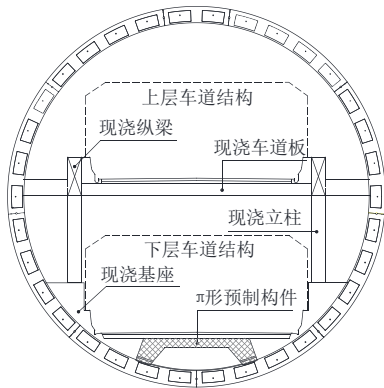


图2 盾构隧道双层车道结构体系

相较于现浇工艺,预制工艺可减少建筑垃圾、改善洞内环境、提高效率、降低污染。因此,针对盾构隧道内部车道结构的预制拼装化开展了大量的研究。例如,陈国光^[1]基于上海复兴东路双层越江隧道对带牛腿管片上架设预制混凝土车道板的同步施工工艺开展研究和应用。黄俊、王善高、马明等^[2-3]基于南京纬三路过江盾构隧道针对双层“板-梁-柱”结构体系开展车道板的预制拼装研究。宋丽妹、姜海西、温竹茵等^[4-11]基于上海诸光路通道针对双层盾构隧道的全预制化开展研究,实现梁、板、柱等主要构件的预制,预制率首次达90%。张宇宁、陈扬勋、肖明清等^[12-13]开发出多种预制“口或π或C”形预制拼装结构。法国A86公路隧道采用带牛腿管片上架设预制混凝土车道板的方案,相较于上海复兴东路越江隧道,其车道数由2条增加到3条,盾构直径更大,车道板跨度更大^[14-15]。但是文献中关于双层盾构隧道预制内部结构拆分设计的总结相对较少。因此,本文基于上海诸光路通道应用经验,展开应用总结,全面剖析双层盾构隧道预制内部结构的拆分设计关键技术。

1 工程概况

上海诸光路通道位于青浦区和闵行区交界,北起北青公路,南至会展外环路,双向四车道,沿金丰路—诸光路南北走向,设计时速40 km/h,净高5 m,城-A荷载,全长约2.8 km,其中盾构段长1.39 km,管片外径14.0 m,最小埋深8.54 m,最大埋深33.17 m,最小平曲线半径700 m,最大纵坡4.8%,采取一台土压平衡盾构自南向北掘进。

其中,盾构隧道内部双层车道采用预制拼装整体式“板-梁-柱”结构,如图3所示。自下而上依次是π形预制构件、两侧现浇混凝土带、现浇植筋基

座、预制立柱、预制n形车道板、预制防撞侧石等。预制构件间通过湿接头和灌浆套筒连接,从而形成整体结构。

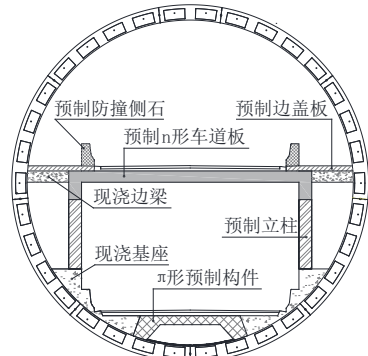


图3 诸光路通道预制双层车道结构

施工工序总体上可以总结为7步:

工序1:随盾构机掘进,同步安装π形预制构件,快速形成通道,用于管片、渣土、同步注浆浆液等运输。π形预制构件上方设置110~130 mm找平层,以降低拼装精度要求(仅需小于30 mm)。

工序2:相隔一定距离后浇筑π形预制构件两侧空间,形成下层车道结构。

工序3:复测隧道变形量,以确定基座顶标高修正量,然后浇筑,并同时精准预留灌浆套筒插筋。其中,灌浆套筒安装精度要求高,插筋预留精度须满足±2 mm要求。

工序4:拼装预制立柱,并实施灌浆作业,如图4所示。其中,预制立柱安装须在限界5.5 m内,达到±5 mm的安装精度要求。



图4 预留插筋插入预制立柱灌浆套筒过程

工序5:拼装预制上层n形车道板。上海诸光路通道采用60 t纵向悬臂式行车,在限界5.5 m内,起吊45 t重车道板,并达到±10 mm的安装精度要求,如图5所示。

工序6:一次性浇筑板-板接缝、板-梁-柱接头和边梁,形成整体式结构。

工序7:相隔一定距离后,依次拼装预制边盖板、预制防撞侧石和铺装作业。

预制构件在盾构隧道内部采用双头平板车运



图5 预制车道板吊装

输,行走在由 π 形预制构件拼装形成的下层车道上方。双头平板车与60 t纵向悬臂式行车支腿水平间隙为250 mm,如图6所示。



图6 预制车道板吊装

上述预制方案,较传统现浇方案具有如下优势:

(1)预制构件工厂化、标准化生产,辅以智慧拼装设备,实现“乐高式”的智能建造。

(2)预制拼装工艺工期比现浇工艺缩短了80%。

(3)预制构件在工厂标准化生产,使用高精度钢模和蒸养设备,比现场现浇作业能够更好地控制质量、外观与精度,而且呈现出来的效果更加细腻,更加美观。

(4)预制构件制作完成后直接运到施工现场安装,有效地减少了模板等材料的大量周转,也减少了现浇混凝土作业产生的噪声、振动、粉尘等环境污染,隧道内施工环境大大改善。

(5)相比现浇作业三十几名作业人员,预制拼装每个工作面仅需7名作业人员,减少80%左右。同时一定程度上减少了安全隐患,安全文明施工,更易管理。

2 双层盾构隧道预制结构拆分设计特征

预制件拆分设计是预制拼装结构设计的关键环节。因此,应根据建筑功能、结构受力、拼装工艺和接头工艺等诸多因素,采取合理的拆分方式。

首先,拆分设计一个基本的核心思想就是标准化、模块化。要求构件的尺寸、规格和质量标准尽量统一,以确保预制构件在制作、拼装中的互换性和通用性,从而提高生产效率,降低成本。例如,盾构隧道预制管片为了拟合不同的曲线半径,早期采用左

右转环+直线环组合的方式来拟合不同的曲线半径。之后开发出通用楔形管片环,采用旋转管片的方式来拟合各种楔形量,从而实现全线采用一种管片实施。因此,通用楔形管片环已在地铁、公路、排水等各行业盾构隧道中得到广泛应用。

由于盾构隧道内部车道结构为条状结构,呈现纵向延续的特性,具有很好的标准性、复制性。为了最大化提高标准性,应注意内部功能空间的模块化设计,如楼梯、风机、消防箱等间距应呈现公倍数关系。例如:当消防箱间距设置为24 m,则楼梯、风机和变形缝间距应采用24的倍数,如48 m、96 m等,从而实现预制构件在隧道走向规律性的重复,如图7所示。

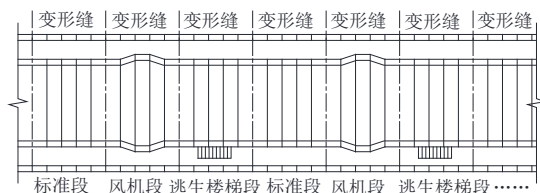


图7 盾构隧道预制结构沿隧道走向拆分布置

此外,双层盾构隧道内部车道结构的预制装配化较地面建筑结构存在显著不同,可以总结为以下三点:首先,盾构隧道建设费用高昂、空间资源珍贵,因此应进行集约化布置以提高利用率。通常将在两层车行结构的顶部布置流射风机、照明、信号灯、监控等设备区,底部布置电缆通道,两侧依次布置变电室、疏散楼梯、排烟支管、管线空间。因此,双层盾构隧道结构被琐碎的建筑空间所拆分,其预制构件尺寸小、种类繁多。其次,洞内吊装空间受限,大型吊装设备难以进入盾构隧道内部作业,因此预制构件需小型化、轻量化,常采用梁-板-柱结构体系,更接近民建结构,即总结为“桥梁的荷载、民建的尺寸”。最后,上海软土易变形,同时盾构的蛇形掘进会产生偏差,与预制装配高精度相驳,需充分考虑盾构隧道偏差的消除^[16]。

所以,虽然从安装效率和结构整体性考虑,预制构件尺寸越大越好,但考虑到洞内施工吊装及运输能力、建筑空间等需求,双层盾构隧道预制结构横向拆分设计应遵循小型化、轻量化的原则。

3 诸光路盾构隧道拆分方案讨论

上海诸光路通道盾构段内部结构采用“板-梁-柱”结构体系,如图8所示。“板-梁-柱”结构体系为目前双层盾构隧道最常用的内部结构体系,上海上中路、军工路、外滩通道,南京纬三路隧道和珠海兴

业快线等工程中均采用“板-梁-柱”结构体系。“板-梁-柱”结构体系,荷载由板至梁、梁至柱依次传递,具有传力路径明确、受力机制清晰等特点。同时,该结构体系以横向受力为主,沿纵向依次延续,适配于隧道工程的平面应变特性。

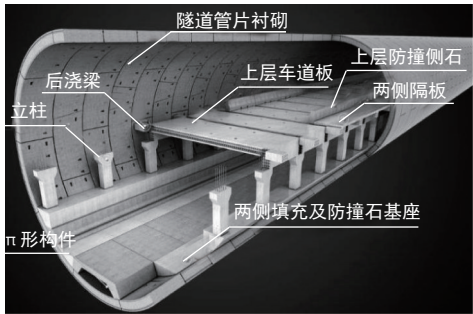


图8 诸光路通道盾构段预制内部结构效果图

3.1 预制立柱拆分设计

需要注意的是:盾构内“板-梁-柱”结构体系以横向为主受力方向,以纵向为延伸方向。所以,纵梁处于扭矩为主的弯剪扭状态。受制于盾构隧道空间,纵梁高、宽和立柱宽均较小,其抗扭能力不足以约束上层车道板的变形,不能形成刚性节点^[17]。所以,上层车道板的受力特征如同三跨连续梁结构,如图9所示。

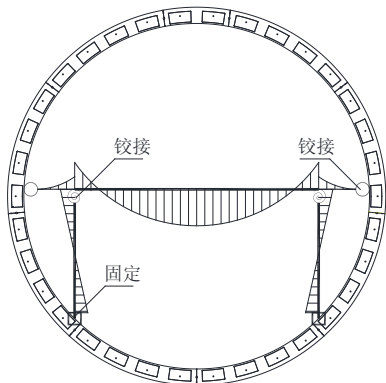


图9 “板-梁-柱”结构体系横向受力简图

此外,由于立柱间沿隧道走向需放置消防箱、配电箱、控制箱等管养设施,导致立柱纵向宽度受限,远小于纵梁高。所以,立柱对纵梁不能形成刚性约束。所以,纵梁的受力特征如同多跨连续梁结构,如图10所示。

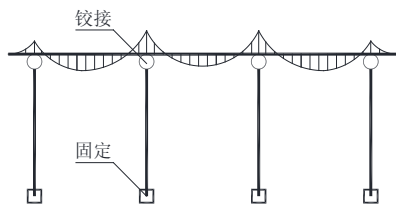


图10 “板-梁-柱”结构体系纵向受力简图

根据前述分析的力学特点,预制立柱拆分位置宜位于柱底与纵梁底。同时,预制立柱的高度还应

考虑盾构隧道内轮廓对预制立柱吊装的限制,如图11所示。

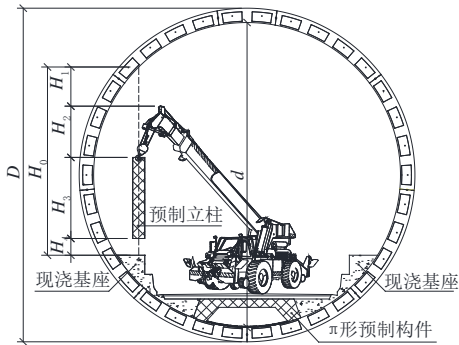


图11 盾构隧道内轮廓对预制立柱吊装的限制

由于预制立柱位于圆隧道两侧,实际可用吊装高度 H_0 远小于盾构隧道直径 D ,其值由吊装作业高度 H_1 、吊具高度 H_2 、预制立柱高度 H_3 、连接接头需求高度 H_4 组成。预制立柱高度 H_3 应不大于 $H_0-H_1-H_2-H_4-\Delta$ 。其中, Δ 为施工容差,与拼装工艺有关,可取30~50 cm。吊装作业高度 H_1 、吊具高度 H_2 根据拼装设备确定。诸光路通道自主设计拼装机械手如图12所示。吊装作业高度 H_1 约1.0 m,吊具高度 H_2 约0.8 m。立柱底采用灌浆-套筒连接时,连接接头需求高度 H_4 为预留插筋高度,取10倍预留插筋直径。



图12 预制立柱拼装机械手

3.2 预制车道板拆分设计

“板-梁-柱”结构体系根据受力特征常拆分为板、梁、柱构件。拼装阶段,预制车道板简支于纵梁牛腿上,使用阶段通过叠合层与纵梁牢靠连接,如图13所示。

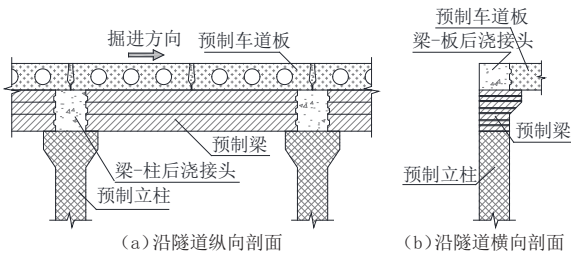


图13 预制板-预制梁后浇叠合连接

众所周知,影响预制拼装施工效率的关键工序在于连接接头的实施。后浇接头混凝土灌注施工

时,易产生水化热、粉尘等环境污染,所以接头数量宜少不宜多。盾构隧道纵向延续,立柱纵向间距不受限制,布置较为灵活,但是横向受制于车道宽度,所以立柱横向跨度远大于纵向跨度。由此,纵梁长度小,适合与车道板合并预制,形成n形预制车道板。该拆分方案不仅接头数量减少,并且板缝与梁-柱节点、后浇系梁位于同一位置,可以一起浇筑,减少一道工艺,如图14所示。

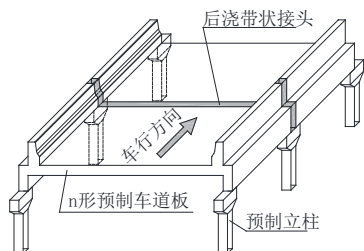


图14 n形预制车道板

预制车道板(纵梁)拆分位置宜位于梁支座端。预制车道板(纵梁)长度 L_2 为立柱中心距 L_0 减去后浇湿接头宽度 L_1 ,如图15所示。其中,立柱中心距 L_0 应为盾构管片环宽 H 的倍数。诸光路通道盾构管片环宽为2.0 m,立柱中心距 L_0 取2倍环宽为4.0 m,后浇湿接头宽度 L_1 等于预制立柱宽0.5 m。所以,预制车道板(纵梁)长度 L_2 为3.5 m,如图16所示。

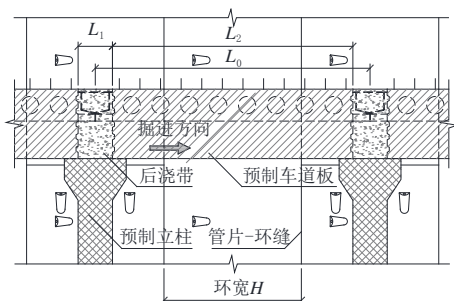


图15 预制纵梁拆分设计简图

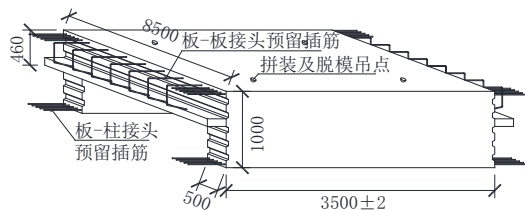


图16 n形预制车道板示意图(单位:mm)

吊装设备高度、宽度受制于盾构隧道内部空间,吊载能力受限。考虑吊具等重量后,吊装设备能力通常在40~60 t。因此,诸光路通道采用空心板减重,将n形预制车道板控制在45 t重。

4 结 语

本文基于上海诸光路通道工程应用经验,对盾

构隧道预制内部结构拆分设计技术进行了分析,得出如下结论:

(1)盾构隧道内部车道结构布置应沿纵向模块化、模数化设计,以便预制构件在纵向上重复呈现,且尽可能减少预制件种类。

(2)盾构隧道内空间狭小,吊装设备能力有限,双层盾构隧道预制结构横向拆分设计应遵循小型化、轻量化的原则。

(3)预制立柱拆分位置宜位于柱底与纵梁底,其高度应由吊装作业空间、吊具高度、连接接头需求高度和施工容差共同确定。

(4)立柱横向净距受制于车道宽度,而纵向净距随隧道延续不受限制。所以立柱横向净距远大于纵向。因此,纵梁长度短,宜与车道板合并预制,形成n形结构,可减少一道拼装工序和后浇接头数量。

参考文献:

- [1] 陈国光.上海复兴东路双层越江隧道道路同步施工工艺研究与应用[J].地下工程与隧道,2006(3):43-45;61.
- [2] 黄俊,马明,李勇,等.盾构隧道内部双层结构快速化施工方法技术研究[J].公路,2013(3):212-219.
- [3] 王善高,史世波,舒恒,等.单管双层特长盾构隧道内部结构预制施工技术——以南京纬三路过江盾构隧道工程为例[J].隧道建设,2016(4):451-457.
- [4] 宋丽妹.软土地区城市道路隧道预制拼装技术应用[J].中国市政工程,2018(2):58-61;64.
- [5] 姜海西.盾构隧道内部双层预制结构现场拼装难点分析[J].现代隧道技术,2018,55(增刊2):386-391.
- [6] 温竹茵,刘念,燕晓.盾构隧道双层车道结构与管片不同连接形式研究[J].现代隧道技术,2020,57(增刊1):382-386.
- [7] 刘念,李一伦.盾构隧道双层车道结构与管片不同连接形式的受力分析[J].城市道桥与防洪,2020(1):201-203.
- [8] 刘念,孙双簏.浅谈盾构隧道内部结构预制拼装技术[J].低温建筑技术,2016,38(10):109-111.
- [9] 王俊生,何炜.盾构法隧道内部双层结构预制拼装施工工艺分析[J].安徽建筑,2020,27(5):124-126.
- [10] 杨海波.超大直径盾构法隧道内部结构预制构件生产工艺[J].安徽建筑,2019,26(11):135-137.
- [11] 姬杨蓓蓓.上海诸光路地下通道预制拼装施工方案设计和工程难点分析[J].建筑施工,2019,41(4):672-675.
- [12] 张宇宁,岳岭,刘方,等.大直径盾构隧道全预制结构拼装技术实践[J].铁道标准设计,2020,64(1):147-152.
- [13] 陈扬勋,肖明清,薛光桥,等.大直径盾构隧道预制中隔墙振动响应特性研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(12):2376-2384.
- [14] Welburn. A86 - the path to fire safety A86[J]. Tunnels & Tunnelling International, 2003(2): 42-45.
- [15] BROTO André. The A86 Motorway: an underground motorway and a new transport system[J]. Routes/Roads, 2006(1): 14.
- [16] 刘念.双层盾构隧道内部预制拼装车道结构拼装偏差分析及对策[J].现代隧道技术,2021,58(4):210-217.
- [17] 宋丽妹,刘念.盾构隧道预制双层车道结构体系特点与设计[J].城市道桥与防洪,2017(9):220-222.