

大直径盾构隧道上层预制车道结构传力分析

潘青, 胡文, 袁森林

[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: 随着盾构隧道技术以及装配式建筑的发展与成熟, 大直径盾构隧道内部采用全预制双层结构逐步成为一种趋势。依托漕宝路快速路新建工程, 采用 MIDAS Civil 软件建立考虑加载过程的上层预制车道结构模型, 对上层预制车道结构传力特征进行分析。研究表明: 分阶段加载对上层预制车道结构受力影响显著, 进行预制车道板结构设计时, 采用一次性加载计算结果将导致设计偏不安全; 与车道板共同预制的纵梁受弯剪扭复合作用, 纵梁中部约束弱, 应力主要集中于柱端附近; 车道板-板间后浇湿接头对于协调相邻车道板间的受力和变形效果明显。

关键词: 大直径盾构; 上层车道结构; 预制拼装; 传力分析

中图分类号: U459.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)02-0221-05

Analysis on Force Transfer of Upper Prefabricated Lane Structure in Large-diameter Shield Tunnel

PAN Qing, HU Wen, YUAN Senlin

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

Abstract: With the development and maturity of shield tunneling and fabricated architecture technology, the full prefabricated double-layer structure in large-diameter shield tunnel gradually becomes a trend. Relying on the newly built Caobao Road Expressway Project, the upper prefabricated lane structure model considering the loading process is built by using the software Midas Civil to analyze the force transfer characteristics of the upper prefabricated lane structure. The research shows that the effect of stage loading on the stress of the prefabricated lane structure on the upper layer is significant. In the design of prefabricated lane slab structure, using one-time loading results will lead to unsafe design. The longitudinal beam prefabricated with the lane slab is subjected to the combined action of bending, shear and torsion, and the central constraint of the longitudinal beam is weak. And the stress is mainly concentrated near the column end. The post-poured wet joint between the lane slabs has obvious effect on coordinating the stress and deformation between the adjacent lane slabs.

Keywords: large-diameter shield; upper lane structure; prefabricated assembly; force transfer analysis

0 引言

随着城市地下空间的开发和交通建设的快速发展, 我国城市道路建设中大直径盾构隧道的比例不断提高, 其内部形式也趋于多样化。其中双层预制结构具有空间利用率高、功能适配性强、施工效率高等特点, 在国内逐步得到了推广应用, 如南京纬三路隧道、上海周家嘴路越江隧道、诸光路隧道等

工程^[1-3]。

上述工程中内部上层预制结构均为“板-梁-柱”体系, 诸多专家学者针对该体系的设计施工展开了研究。黎晨等^[4]通过数值模拟及足尺静载试验对纬三路上层车道结构的受力特征进行了分析, 证明了上层车道板预制加梁板后浇接头形式的承载能力。黄俊等^[5]以预制车道板宽度、接缝方式为变量进行了对比分析, 结果表明车道板宽度越大, 车道板内力越小, 同时发现了铰缝有利于车道板间的协同作用。在此基础上, 王文东^[6]进一步对比了预制车道板之间的连接方式, 综合受力特点及施工难易程度, 推荐采用近等刚度连接接头。

目前上层预制车道结构的研究主要集中于结构体系的拆分以及可行性等, 对施工及运营期内整个

收稿日期: 2024-04-26

基金项目: 上海市科委科技创新行动计划项目(22dz1203002); 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司拂晓计划(K2024N016A)

作者简介: 潘青(1995—), 女, 工学硕士, 工程师, 从事地下结构工程设计工作。

上层预制车道体系的传力特征研究尚不充分。鉴于此,本文依托于漕宝路快速路新建工程,采用MIDAS Civil软件建立考虑加载过程的上层车道模型,探明车辆荷载作用下预制车道结构的传力特征及结构关键受力点,以期为后续类似工程提供技术支持与参考。

1 工程概况

漕宝路快速路新建工程西起嘉闵高架立交,向东接S20公路至中环立交,全长约7.2 km,线路走向如图1所示。本工程作为上海市主城区南部的东西向快速客运通道、虹桥枢纽快速集散通道及沿线区域的中长距离客运通道,对于完善骨干路网、均衡高速路网流量,提升区域东西向道路网容量,适应重点地区功能转型发展,支撑虹桥商务区可持续发展等方面具有重要作用。

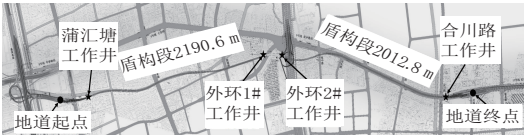


图1 漕宝路快速路新建工程线路走向示意图

本工程中盾构段分为东西两段,总长约4.2 km,其中东段长约2.0 km,隧道平面最小曲线半径480 m,隧道纵断面呈V字形,最大纵坡5.0%;西段长约2.2 km,隧道平面最小曲线半径500.2 m,隧道纵断面呈V字形,最大纵坡5.0%。盾构隧道采用单孔双层双向6车道形式,管片外径为15 m,管片厚度为650 mm。隧道内部结构分为上、下层车道结构。下层车道结构为“口”形预制构件+两侧预制边箱涵型式,上层车道结构为预制车道板+预制立柱+现浇基座型式,如图2所示。

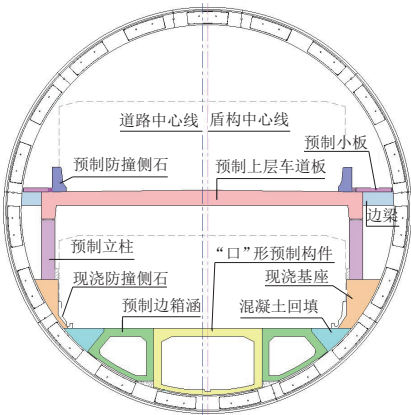


图2 漕宝路盾构隧道内部结构横断面

2 上层车道结构数值模拟

2.1 数值计算模型与材料参数

根据漕宝路隧道上层车道结构形式,利用有限

元分析软件MIDAS Civil建立三维模型,模型长度根据变形缝设置情况确定,即32 m(8块车道板)一道变形缝,如图3所示。模型中在柱底施加固定约束,在车道板两侧边梁远端施加水平约束。构件尺寸及材料特性列于表1中,其中预制纵梁采用板单元模拟,可避免纵梁单元与车道板单元重叠导致的刚度叠加现象。

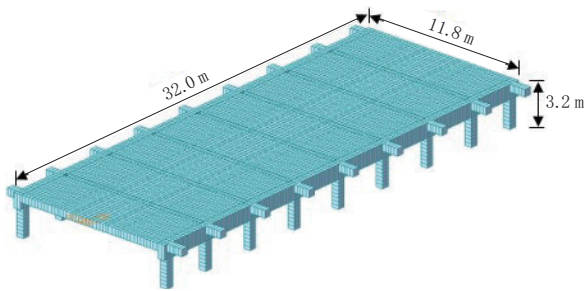


图3 上层车道结构计算模型

表1 计算构件物理力学特性表

构件	混凝土强度等级	单元类型	构件尺寸
预制车道板	C50	板	跨度11.8 m,宽4 m,板厚0.5 m
预制纵梁 (与车道板共同预制)	C50	板	截面0.5 m×1.0 m
预制立柱	C50	梁	截面0.5 m×0.5 m,长2.7 m,间距4 m
现浇边梁	C40	梁	截面0.5 m×0.5 m,长1.15/0.75 m,间距4 m
湿接头	C60	板	截面0.5 m×0.4 m

2.2 计算工况及荷载

为尽可能还原上层车道结构的实际传力特征,本文对应施工至运营的过程,对上层车道结构进行了分阶段模拟,并与一次性加载的结果进行对比分析,具体阶段划分如下。

一是吊装阶段,预制立柱安装完成,上层预制车道板搁置于立柱上,此时车道板两端简支,各车道板处于独立受力状态,结构仅受重力作用。此外,在进入下一阶段前,将因结构自重所产生的位移清零。吊装阶段计算模型见图4。

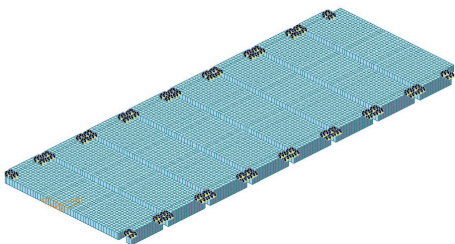


图4 吊装阶段计算模型

二是拼装阶段,浇筑车道板-板、梁-柱后浇湿接头,该阶段上层车道结构施工完成,此时结构所受荷载除重力外,还包含铺装、吊装、防撞侧石等荷载,具体荷载设置详表2,拼装阶段计算模型见图5。

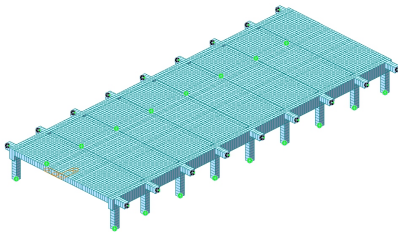


图5 拼装阶段计算模型

表2 拼装阶段模型荷载

荷载名称	荷载值	备注
自重	根据尺寸自动计算	—
铺装荷载/kPa	2.1	90 mm厚铺装层
吊装荷载/kPa	2.0	车道板底部吊装重量
防撞侧石荷载/kPa	22.3	荷载按实布置
盖板荷载/(kN·m)	15.0	位置分布详图2横断面
风机荷载/kPa	16.0	风机静荷载600 kg/台

三是运营阶段,施加运营期内的车辆荷载,根据漕宝路隧道设计标准取城-B车辆荷载,荷载取值参照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),详细见图6,车道按实布置,车道宽度为3 m。为确保分析包含结构受力最不利工况,车辆荷载选用移动荷载的形式施加。

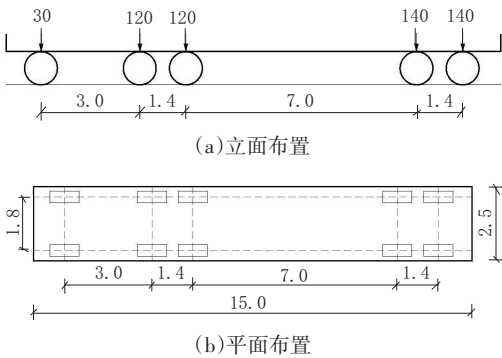


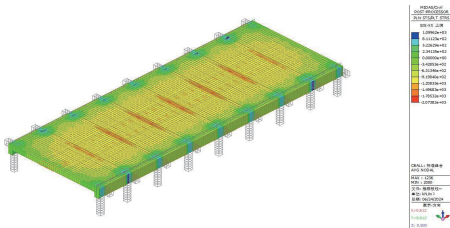
图6 车辆荷载的立面、平面尺寸(尺寸单位:m;
荷载单位:kN)

3 计算结果分析

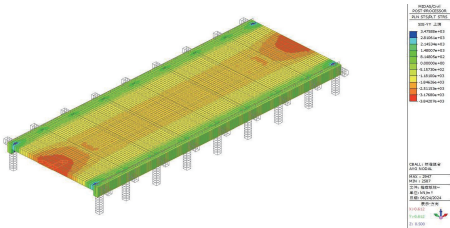
3.1 上层车道结构计算结果汇总

图7为上层车道结构应力分布云图,从图中可以发现,由于湿接头刚度小于两侧预制车道板,应力分布在湿接头处不连续。

图8为上车车道结构弯矩云图,各构件具体内力计算结果汇总于表3和表4中。

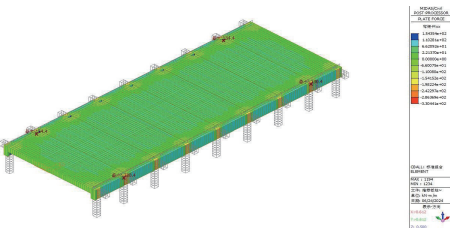


(a)板单元应力Sxx(纵向)

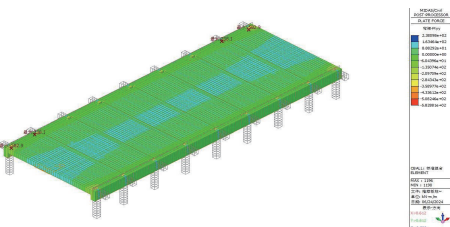


(b)板单元应力Syy(横向)

图7 上层车道结构应力云图(单位:kN/m²)



(a)板单元弯矩Mxx(纵向)



(b)板单元弯矩Myy(横向)

图8 上层车道结构内力云图(单位:kN·m/m)

表3 分阶段加载板单元计算结果汇总表

构件	$M_{xx}/[(\text{kN}\cdot\text{m})\cdot\text{m}^{-1}]$		$M_{yy}/[(\text{kN}\cdot\text{m})\cdot\text{m}^{-1}]$	
	最大值	最小值	最大值	最小值
预制车道板	67	-29	342	-136
预制纵梁	183	-201	61	-372
湿接头	65	-24	93	-92

表4 分阶段加载预制立柱计算结果汇总表

位置	$M_z/(\text{kN}\cdot\text{m})$	N/kN	V/kN
弯矩最大值处内力	311	-516	169
弯矩最小值处内力	-315	-511	-171
轴力最大处内力	-89	-674	146

表5和表6列出了未考虑分阶段加载情况下车道结构的弯矩情况,便于分析施工阶段对结构受力的影响。

表5 一次性加载板单元计算结果汇总表

构件	$M_{xx}/[(\text{kN}\cdot\text{m})\cdot\text{m}^{-1}]$		$M_{yy}/[(\text{kN}\cdot\text{m})\cdot\text{m}^{-1}]$	
	一次加载		一次加载	
	最大值	最小值	最大值	最小值
预制车道板	85	-49	283	-193
预制纵梁	154	-367	110	-589
湿接头	86	-43	159	-157

表6 一次性加载预制立柱计算结果汇总表

位置	$M_z/(\text{kN}\cdot\text{m})$	N/kN	V/kN
弯矩最大值处内力	514	-507	278
弯矩最小值处内力	-517	-498	-280
轴力最大处内力	-163	-678	268

3.2 预制上层车道结构传力分析

(1) 预制车道板

图9对分阶段和一次性加载情况下预制车道板的纵向弯矩 M_{xx} 及横向弯矩 M_{yy} 进行了对比,从图中可以发现在该结构体系中,车道板受弯的主要受力方向为横向,并且图7的结构应力云图表明车道板在柱端附近存在应力集中现象。

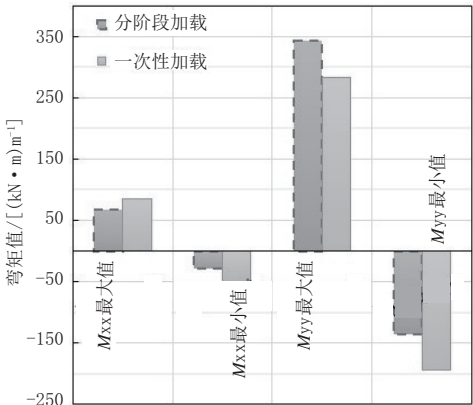


图9 预制车道板弯矩对比 (单位: $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)

为分析各加载阶段对结构受力的影响程度,图10整理了各阶段预制车道板横向弯矩 M_{yy} 的累计值以及各阶段内力占比。从图中可以发现,吊装阶段,车道板由自重所产生的跨中正弯矩占比53%,影响最大,运营阶段中的车辆荷载次之,影响最小的是拼装阶段,对于支座处的负弯矩,运营阶段影响最大,占比为51%,紧接着分别是拼装和吊装阶段。

此外,结合表3与表4中的具体数值可以发现,相较于一次性加载,在分阶段加载情况下,车道板纵向传力削弱,导致跨中部分承担荷载比例由59%提高至72%。这一现象是由于分阶段加载考虑了吊装时车道板的单独受力状态,该阶段中由车道板自重

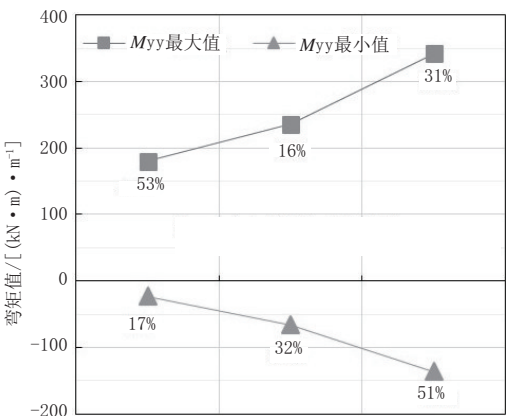


图10 各阶段预制车道板横向弯矩 M_{yy} (单位: $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)

注: 1—图中数据为阶段累计值; 2—数据标签下的数值为各阶段内力占比。

产生的内力及变形并未在板间发生传递。

(2) 预制纵梁

纵梁是整个上层车道结构体系中的重要传力部件,受弯剪扭复合作用,处于不利状态,因此设计中常采用加大梁高的办法,以满足抗扭最小截面要求。

在纵梁应力分布方面,从图8可以,看出纵梁中部约束弱,应力主要集中于柱端附近。图11进一步对比了分阶段加载与一次性加载条件下预制纵梁的弯矩,结果表明分阶段加载时梁-柱节点处的约束有所减弱,导致纵梁跨中纵向正弯矩 M_{xx} 增大,而支座处纵向负弯矩 M_{xx} 减小。

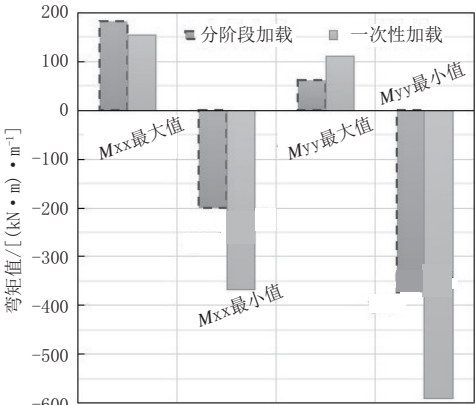


图11 预制纵梁弯矩对比 (单位: $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)

(3) 现浇湿接头

分析图8并对比表3中湿接头和车道板的弯矩值可以发现,车道板间湿接头的纵向传力效果明显,且传力主要依靠跨中板带部分。

图12为分阶段加载和一次性加载情况下现浇湿接头的弯矩对比,结果表明相较于一次性加载,分阶段加载情况下的现浇湿接头弯矩均有所降低。基于这一现象,在进行结构设计时,可通过考虑施工阶段,对湿接头的设计进行优化。

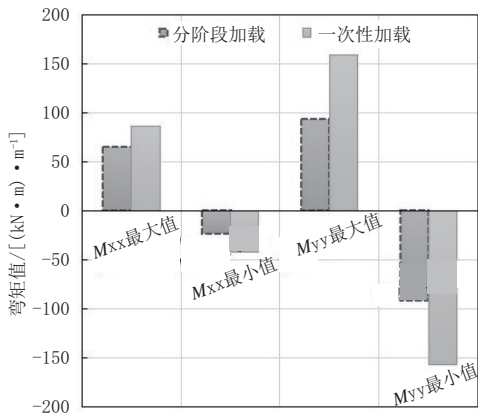


图 12 现浇湿接头弯矩对比(单位:kN·m/m)

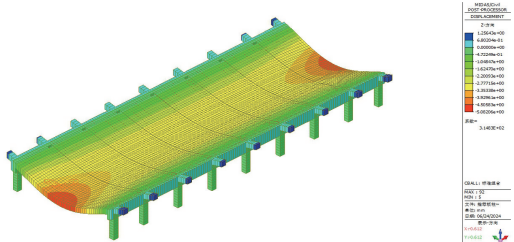


图 13 上层车道结构竖向变形云图(单位:mm)

此外,图 13 为上层车道结构在移动车辆荷载下的竖向变形包络结果,从图中可以看出上层车道变形连续,表明湿接头具备协调相邻车道板间变形的作用。

(4) 预制立柱

图 14 立柱弯矩云图表明,边跨立柱顶部弯矩明显高于中间跨处的立柱,在结构设计中应对边跨立柱有所重视。

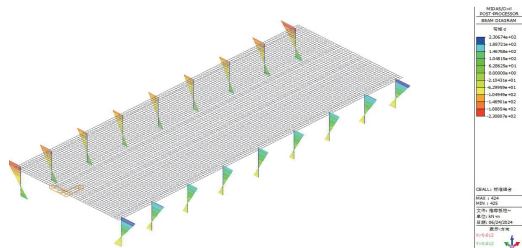


图 14 立柱弯矩云图 Mz(单位:kN·m)

在加载阶段方面,图 15 对比了分阶段和一次性加载情况下预制立柱的内力情况,结果表明考虑分阶段加载后,立柱轴力基本无差异,而弯矩和剪力均降低约 40%,这一现象表明加载阶段对上层车道结构的竖向传力影响较小。

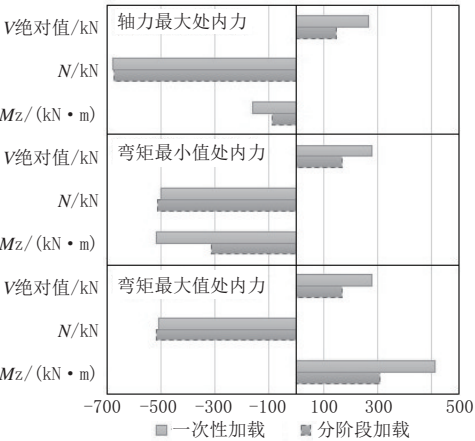


图 15 预制立柱内力对比

4 结 论

漕宝路快速新建工程盾构段具有大直径、单孔双层双向 6 车道、全预制内部结构等特点。本文通过考虑施工至运营加载过程的有限元模拟对上车预制车道结构的传力特点进行了分析,得到以下结论。

- (1) 分阶段加载对上层预制车道结构受力影响显著,特别是进行预制车道板结构设计计算时,采用一次性加载计算结果将导致设计偏不安全。
- (2) 与车道板共同预制的纵梁受弯剪扭复合作用,且纵梁中部约束弱,应力主要集中于柱端附近
- (3) 车道板-板间后浇湿接头对于协调相邻车道板间的受力和变形效果明显。
- (4) 对于上层预制车道结构体系中的预制立柱,边跨立柱受力明显高于中间跨处的立柱,应重点关注。

参考文献:

[1] 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,2016,36(4):451-457.

[2] 姜海西.盾构隧道内部双层预制结构关键连接技术研究[J].城市道桥与防洪,2018(10):190-194.

[3] 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.

[4] 黎晨,张开银,黄俊.盾构隧道内部双层车道板结构受力分析[J].现代隧道技术,2016,53(1):103-110.

[5] 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.

[6] 王文东.双层内部预制结构隧道车道板间连接形式的数值研究[J].城市道桥与防洪,2020(7):281-284.