

急曲线大纵坡条件下超大直径盾构隧道上层车道板一体化拼装施工

强晓

上海黄浦江越江设施投资建设发展有限公司，上海 200002

DOI:10.61369/ME.2026060038

摘 要： 针对上海漕宝路快速路新建工程2标 ϕ 15.56m超大直径盾构隧道具有 R=500m小半径曲线、最大5%纵坡及隧道内净高受限的施工难点，传统桁车吊装工艺在安全性、效率及精度上均难以满足要求。依托该工程，通过优化施工组织设计，研发应用了基于DCY100运输车的顶升回转一体化拼装工艺。通过实施“滞后500环”的纵向流水作业节拍，开展陈太路1:1足尺试验段验证，并集成板柱接头精细化控制技术，成功解决了大吨位、大跨度预制车道板在急曲线段的空间拟合难题。现场应用表明，该工艺将单块车道板拼装时间由传统工艺的60min缩短至15min以内，轴线偏差控制在 ± 3 mm，作业人员减少50%，实现了隧道内部结构施工的安全、高效与毫米级精度，为后续类似工程提供了可复制的经验。

关 键 词： 单管双层隧道；预制拼装；车道板；流水作业

Integrated Assembly Construction of Upper-Level Lane Slabs for Ultra-Large-Diameter Shield Tunnels Under Conditions of Sharp Curves and Steep Longitudinal Slopes

Qiang Xiao

Shanghai Huangpu River Cross-River Facilities Investment, Construction and Development Co., Ltd. Shanghai 200002

Abstract： The shield tunnel with an outer diameter of ϕ 15.56 m for Bid 2 of the New Caobao Road Expressway Project in Shanghai features construction difficulties including a sharp curve with a radius of 500 m, a maximum longitudinal gradient of 5%, and limited internal clearance height. The conventional overhead travelling crane hoisting assembly method cannot meet the requirements in terms of safety, efficiency and assembly accuracy. Based on this project, the integrated jacking-rotating assembly technology adopting DCY100 transporter was developed and applied via optimizing construction organization design. By adopting a longitudinal flow construction rhythm with a 500-ring lag, a full-scale 1:1 test section at Chentai Road was carried out for verification. Combined with refined control technology for slab-column joints, the spatial fitting challenge of heavy-duty and large-span prefabricated lane slabs in sharp curve sections was successfully addressed. Field application results show that this technology reduces the assembly time of a single lane slab from 60 min by the conventional method to less than 15 min, controls the alignment deviation within ± 3 mm, and cuts the number of operators by 50%. It realizes safe, efficient and millimeter-level precision construction of internal tunnel structures, and provides replicable experience for similar subsequent projects.

Keywords： single-tube double-deck tunnel; prefabricated assembly; lane slab; flow construction

引言

随着城市地下空间开发向深层化发展，单管双层大断面盾构隧道因其节约用地、结构紧凑等优势，在上海市快速路网建设中应用日益广泛。漕宝路快速路新建工程2标盾构段为国内单管双层双向六车道隧道，其内部结构采用“板-梁-柱”支撑体系。其中，上层预制车道板作为该体系的核心承重构件，具有跨度大（11.8m）、重量大（最大59t）、安装精度要求高（轴线偏差 ≤ 5 mm）的特点。

在以往类似工程中，上层车道板多采用隧道顶部行车配合钢丝绳吊装，例如朱学银在诸光路隧道项目中采用纵向悬臂行车，为了抵抗行车倾覆在行车腿部填充混凝土^[1]。仇崧羽在上海市周家嘴路越江隧道中安装上层车道板也采用了隧道内专门的吊装机，然而在安拆

该设备占用了隧道内大量工期^[2]。

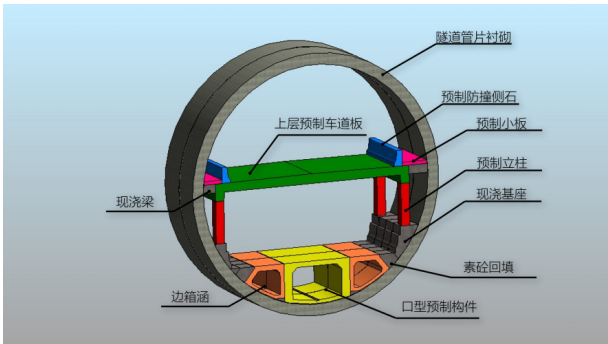
在漕宝路隧道 R=500m 的小半径曲线及 5% 的大纵坡条件下，除了以上研究者提到的不足外，行车吊装还存在其他弊端：

一是高空作业风险高，钢丝绳柔性悬挂导致构件摆动难以控制，且因为竖向重力作用，导致构件在斜坡段不可避免拼装缝隙过大；二是作业效率低下，单块车道板安装耗时长达 60min，且占用隧道顶部空间，阻断下方物流通道，进而影响其他工作面施工效率；三是精度调整困难，钢丝绳难以适应纵坡变化及曲线拟合要求。

为此，本项目开展上层车道板智能化拼装施工技术的研究与应用，旨在攻克上述难题。

一、工程难点分析

漕宝路 2 标盾构段全长约 4.2km，隧道衬砌管片内径 13.7m，分为上下两层车道，下层车道结构为：口型预制构件 + 边箱涵 + 素砼回填，上层车道结构为现浇基座 + 预制立柱 + 预制车道板。



盾构隧道内部结构断面图

上层车道板共分为 YB1~YB4 四种型号，标准段 YB1 板外形尺寸为 3930mm × 11800mm × 500mm，采用 C60 高性能混凝土，内部设置非抽芯永久内模以减轻自重，实测单块重量达 55~59t。

上层车道板施工面临以下主要难点：

空间极度受限：洞内下层车道可利用净高为 3.85 m，拼装设备连同构件的总高度需严格管控在 3.75 m 以内，传统桁车整体构架偏高，受空间边界限制，很难满足该隧道工况下的施工使用要求。

线形控制极难：隧道平面取 500m 最小曲线半径，纵向最大坡度 5%，预制车道板为直线构件，安装作业中要在三维空间内匹配隧道设计线形，拼装设备能否实现灵活的姿态调整，直接决定该类工况下施工可行性。

物流组织复杂：盾构掘进过程中管片运输、同步注浆，需和隧道后部双层车道内部结构施工同步作业，涉及口型预制构件、边箱涵、素砼填充、现浇基座、预制立柱、上层车道板、预制防撞侧石等施工内容。下层车道内浆液运输车、构件运输车与拼装设备交错通行。一旦拼装设备挤占通行通道、作业耗时增加，便会干扰盾构正常掘进，带来工期严重滞后的隐患。

精度要求苛刻：车道板依靠牛腿支座架设在预制立柱顶端，施工中应保证板底与柱顶贴合紧密，轴线安装偏差不大于 ±3mm，支承构造还需适配 5% 纵坡的安装工况。



传统桁车工艺吊装预制车道板

二、施工管理体系

为应对超大吨位车道板拼装的施工难点，项目围绕安全保障与质量控制搭建全链条管理机制，通过方案专家评审、工艺预试验夯实前期基础，作业现场落实安全管控，各工序同步执行质量验收，覆盖施工各个阶段。

（一）设备与方案双重评审

车道板在隧道内拼装时受空间约束，施工难点突出，项目设立技术攻关专班，依托隧道双头运输车进行设备升级，研发专用拼装机，实现构件转运、顶升、回转与安装姿态微调的一体化作业。

项目邀请行业专家开展专项方案评审，着重研判设备多项关键性能：3.85m 低净空环境下运行稳定性、70t 荷载工况的承载安全性能，以及 ±0.2° 调平机构的作业可靠性。经过专家组逐项审核，专业分包编制的车道板运输安装技术方案、总承包单位报送的隧道上层车道板安全专项施工方案，均顺利通过审查。



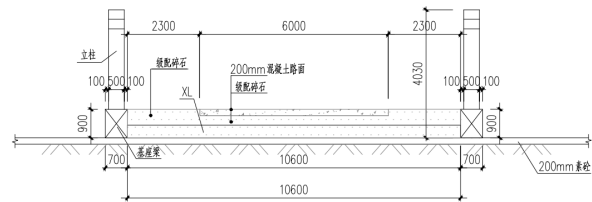
拼装机实际照片



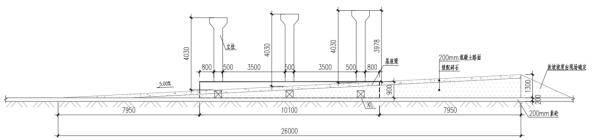
专项施工方案编制评审

(二) 试验段验证

为避免直接上线施工风险，项目在试验基地搭建1:1足尺试验场。新试验场地现状为20cm厚整平的现浇素砼，现浇5%坡度的临时道路模拟隧道内坡度，临时道路长度26m，模拟隧道内5%的纵坡条件，布置6根预制立柱，模拟在最不利工况条件下安装2块车道板。



试验段横断面图



试验场地结构纵断面

试验发现与优化：

溜车风险：现场初期试作业期间，当设备带重载在5%坡道上进行就位调整，会出现微量滑移现象。项目团队针对该工况缺陷及时改进作业管控措施，明确现场操作约束，不允许重载状态下整机反复移位，构件的对位微调，全部依靠设备本体液压系统实施。

工时分解：在试验段作业过程中开展工时实测，单块车道板拼装各工序用时：构件转运到位5min，顶升回转6min，精调对位落位7min，设备撤离复位2min，全流程累计约20min。通过现场记录的作业时长可以看出，整套工序衔接有序，证明该施工工艺具备实体工程应用的可行性。

(三) 安全与质量管控

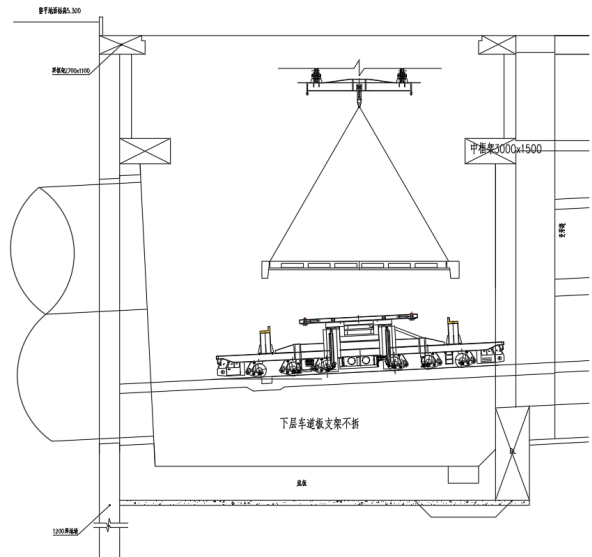
安全方面：项目制定22项DPZ70设备安全操作准则，有限空间作业优先完成通风，气体检测达标后再施工，现场配备双鼓风机、四合一气体检测仪，设备采用无线遥控，操作人员无需进入高危区域即可实施控制。

质量方面：强化前置工序质量管控。完成立柱植筋后开展拉拔检测， $\Phi 20$ 、 $\Phi 25$ 钢筋植入深度分别控制在335mm、415mm，契合设计参数；再复核立柱顶部标高，使实测偏差不大于 $\pm 2\text{mm}$ 。

三、总体施工工艺

(一) 场地布置与竖向运输

合川路工作井作为竖向运输作业点位，搭设专用运输通道，采用60t行车设备，从工作井吊装孔下入，完成车道板构件的垂直吊运施工。



吊装纵断面示意图

(二) 纵向流水作业节拍

通过实地研判现场施工节奏，项目组将“以环号定工序，以距离保安全”作为组织管控依据。合理设定各工序滞后环数，运行纵向流水作业方式，分隔盾构掘进与内部结构施工作业面，消除工序间的相互干扰。

纵向流水作业节拍

作业区段	对应施工内容
盾构机及车架范围	盾构掘进、管片衬砌安装、“口”型预制构件安装
车架后50环内	预制边箱涵安装、素砼回填浇筑
车架后100环内	下层基座及防撞墙浇筑
车架后300环内	预制立柱安装
车架后500环内	上层预制车道板安装

优势：DPZ70拼装机荷载大，将拼装工序滞后500环实施，可减少盾构掘进带来的地层扰动，保障地层条件稳定。拼装工位设于隧道深部，前方作业通道得以释放，掘进掌子面与后方内部结构拼装工作面实现空间错置。

(三) 水平运输与顶升回转工艺

设计图纸将预制立柱灌浆强度80%设定为上层车道板安装的准入条件，施工现场适当提高安全储备，摒弃设计给定阈值，待灌浆强度实测值抵达100%后，再进行上层车道板的吊装就位作业。

DPZ70拼装机与车道板构件由DCY100型双头运输车驮运进入隧道。全程采取低速管控，平路行驶速度上限5km/h，坡道部位限速3km/h。车辆缓慢前行，车尾超出已拼装上层车道板后，方可完成停靠定位。

拼装工艺流程：

支腿固定：设备完成就位，将四角液压支腿下放支撑在地面之上，整机荷载经由支腿传递至地基，隔离车辆悬架的弹性缓冲，避免悬挂结构产生形变，为后续拼装作业提供刚性支撑条件。

顶升越障：依靠主顶升油缸的顶升作用，将车道板抬到立柱顶面上方约 400mm 的位置。

回转向：回转驱动单元驱动平台完成 90° 转角，车道板由纵向运输形态转至横向安装方位。机构可实现 0.1° 的回转控制精度，定位过程完全自主，无需人工开展限位作业。

坡度自适应：回转平台设置四点二级顶升油缸，调平区间 ±0.2°。针对隧道既有纵坡工况，分别修正车道板横、纵向倾角，使板底与立柱顶面处于平行状态，保障构件就位装配精度。

精调落位：横移油缸可调行程 ±250 mm，纵移油缸可调行程 ±150 mm。通过两组油缸实施毫米级位置校准，动态调整车道板空间坐标，使构件精准对接并落置于立柱设计安装位置。

撤出复位：待插销油缸回缩到位后，收拢整机支腿，运输车向后倒车，从构件安装工位撤离，完成本次安装循环。

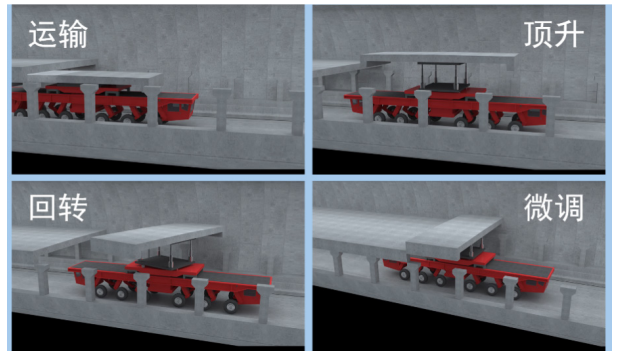


图4 拼装机拼装上层车道板流程示意图

（四）接缝及现浇梁施工

车道板就位之后及时处理板柱接头。相邻板体 500 mm 宽湿接缝采用吊模浇筑工艺。板顶浇筑 500 mm × 500 mm 横梁，以钢桁架作为模板支撑。所有后浇部位均采用 C60 高性能混凝土，保证各构件形成完整的受力整体。

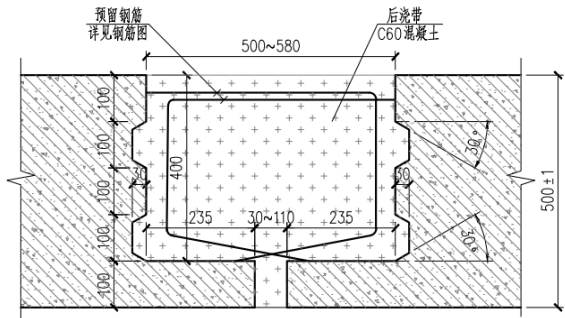


图5 板-板接头横断面

参考文献

[1] 朱学银, 李章林, 何伟. 盾构隧道内部双层装配式结构施工关键技术研究 [J]. 中国高新科技, 2019, (08): 10~11.
[2] 仇松羽. 大直径公路隧道内主体结构全预制构件安装施工工期研究 [J]. 绿色建筑, 2021, 13(04): 111~112+122.

四、实施效果

在漕宝路 2 标盾构隧道施工现场，上层车道板拼装作业累计完工 1042 块。通过质量核验，拼装构件各项检测项目，均达到工程优良的评定水平。

效率显著提升：单块车道板拼装平均耗时保持 15min，传统桁车工艺则需 60min，作业效率提高 75%。隧道内物料转运无阻碍，在内部结构施工全过程，盾构设备没有出现停机故障。

精度控制优异：利用数字化测量开展设备精细化调整，车道板轴线偏差稳定处于 ±3mm 允许区间。板底与立柱接合处紧密贴合，现场实测的安装精度均满足设计技术规定。

安全效益突出：借助低位顶升实现无人化现场施工，摒弃传统高空吊装作业，该项目拿到上海市绿色工地荣誉，同时参与建设单位智慧工地、无废工地的示范创建工作。

经济效益明显：该工艺条件下现场仅需 3~4 名操作人员，传统方案用工为 6~8 人，人员缩减比例达 50%。设备前期投入压力较大，而工期压缩、人工开支与材料损耗的下降，能够为项目创造可观的综合经济价值。

车道板安装前后效益对比				
检测项目	设计值	传统工艺	技术升级后	提升幅度
车道板拼装时间	/	60min	15min	↑ 75%
车道板轴线偏差	≤ 5mm	± 15mm	± 3mm	↑ 80%
安全风险	/	存在吊装风险	取消吊装作业	↓ 100%
作业人员	/	6~8 人	3~4 人	↓ 50%

五、结语

漕宝路快速路 2 标超大直径盾构隧道，急曲线走向、大纵坡坡度与有限净空交织在一起，上层车道板很难兼顾安装精度与施工速度。项目依托顶升回转一体化拼装工艺，配合纵向流水作业的施工节拍，有效处理了这一技术痛点。从现场实施效果来看，该成套技术的安全水平、构件精度以及施工组织，均优于传统桁车作业，具备向外推广的现实条件。后续工作将围绕设备能耗、项目成本开展优化，推动预制拼装技术朝着低碳、经济的方向继续完善。