

DOI: 10.7672/sgjs2025220012

坦拱式地铁车站预制装配施工技术与质量控制研究

刘冠正

(青岛市市政公用工程质量安全监督站, 山东 青岛 266000)

[摘要] 以青岛地铁7号线景岱站工程为背景,开展坦拱式装配车站关键技术研究。从结构设计、构件连接、节点防水及施工工艺等方面,提出浅埋地铁车站装配式施工技术与质量控制方法。研究了主体结构的闭腔薄壁构件结构形式及分块方法,提出了三维榫卯+预应力筋复合连接方法、节点接缝设计及防水和结构机械智能化装配施工工艺,探讨了施工过程中的质量控制要点。通过工程应用分析了装配式设计、机械吊装与拼装备的合理性和可行性,验证了相关技术和质量控制措施的有效性。坦拱式地铁车站装配施工技术可实现主体结构“零渗漏”,提高了地铁车站主体结构的施工质量和效率。

[关键词] 地铁车站;坦拱式;预制装配;智能施工;质量控制

[中图分类号] U231+.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0012-05

Research on Prefabricated Construction Technology and Quality Control for Flat Arch Subway Stations

LIU Guanzheng

(Qingdao Municipal Public Engineering Quality and Safety Supervision Station, Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: Taking Jingdai Station of Qingdao Subway Line 7 as the engineering background, research on key technologies of the arch type assembly station is carried out. This paper proposes assembly construction technology and quality control methods for shallow buried subway stations from the aspects of structural design, component connection, node waterproofing and construction technology. The structural form and block method of the closed cavity thin-walled component of the main structure were studied, and a three-dimensional mortise and tenon joint + prestressed reinforcement composite connection method, node joint design, waterproof and structural mechanical intelligent assembly construction technology were proposed. The quality control points during the construction process were discussed. The rationality and feasibility of prefabricated design, mechanical lifting, and assembly equipment were analyzed through engineering applications, and the effectiveness of relevant technologies and quality control measures was verified. The assembly and construction technology of the arch style subway station can achieve “zero leakage” of the main structure, improve the construction quality and efficiency of the subway station’s main structure.

Keywords: subway stations; flat arch type; prefabricated assembly; intelligent construction; quality control

0 引言

在城市地铁建设中,传统现浇施工方式存在施工周期长、受环境影响大、施工现场管理难度高等问题^[1-4]。装配式地铁车站作为新型建设模式,将车站部分或全部构件在工厂预制,然后运输到现场组装,具有显著的优势^[5-6]。预制构件施工是装配

式地铁车站建设的关键环节,其施工技术的合理性和质量控制的有效性直接关系到车站的整体性和安全性。许多学者开展了大量研究工作,林星涛等^[7]结合理论分析和工程经验,梳理了装配式地铁车站结构形式和设计方法,提出了结构韧性设计方法。杨秀仁^[8]基于装配式地铁车站结构形式和装配模式的分析,系统研究了明挖法开挖后预制装配式隧道结构的拼装设计方法及关键施工技术。史

海欧等^[9]以深圳某地铁车站为工程背景,结合现场试验和应用,提出了在富水地层环境下,以内支撑体系为支护结构的地铁车站装配式建造技术,配套研发了机械拼装装备。冯帅克等^[10]提出了新型装配式地铁车站外墙与底板的连接节点形式,再通过室内试验,研究了该类节点的承载能力、破坏形态、滞回性能及传力性能。胥子卉等^[11]依托深圳地铁某装配式地铁车站,应用静载试验和数值模拟方法,研究了新型 C-H-C 接头的非线性力学特性,验证了其受力的合理性。现有研究成果为装配式地铁车站提供了系统的施工技术参考,相关装配式施工技术和施工装备可成功应用于类似地铁车站工程^[12-13]。然而,针对具体工程,依然需要根据工程特点优化装配式结构形式与拼装方法。本文依托青岛地铁 7 号线某地铁车站工程,研究了坦拱式地铁车站装配方法,从结构设计、构件连接、节点防水及施工工艺等方面提出了该类装配式车站施工技术。

1 工程概况

青岛地铁 7 号线景岱站位于青岛市即墨区墨城路与淮涉河四路路口,墨城路正下方,沿墨城路南北方向布置。车站西南侧为即墨区市南环秀医院,车站西北侧为庙头村,车站西侧沿路为 2~3 层小商铺,车站东北侧为 6 层高楼,车站东侧为车行,车站东南侧为某公司。

景岱站为地下 2 层岛式站台车站,车站起点里程 Z (Y) K73 + 852. 000, 终点里程 Z (Y) K74 + 125. 000, 中心里程 Z (Y) K74 + 047. 000, 车站长 273m, 宽 20. 1~24. 2m, 埋深 18. 0~20. 5m。预制装配段起终点里程为 Z (Y) K73 + 895. 000—Z (Y) K74 + 101. 000, 装配段全长 206m。车站主体结构断面为单柱双跨箱型框架、拱形无柱现浇混凝土结构与预制装配式混凝土结构。车站设置有 2 个风道、4 个出入口,如图 1 所示。车站主体采用明挖法施工,车站大里程端为盾构接收,小里程端为盾构始发,车站大、小里程端均预布设装配式吊装场地。

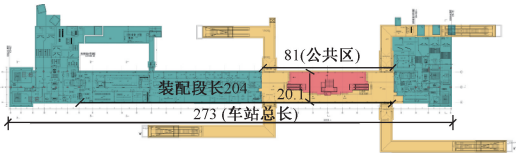


图 1 景岱站平面设计(单位:m)
Fig. 1 Plane design of Jingdai Station (unit:m)

2 坦拱式装配车站整体设计

青岛地区装配式地铁结构形式以坦拱式、矩形框架式、无柱单跨直墙拱顶式为核心。青岛地区常

面临碎裂岩地层和高地下水环境,采用坦拱式结构有利于减小基坑开挖深度,降低高地下水环境下的渗漏风险,从而更好地适应复杂地质条件。

景岱站区域内上部地层为含富水砂层的软土地层,下部地层为以砂岩碎裂岩为主的硬岩地层,地下水压力为 0. 5MPa。景岱站主体结构选用坦拱断面的装配式施工方法,如图 2 所示。坦拱式拱顶曲率较小(拱高与跨度比通常<1/5),接近扁平拱,内部空间开阔,适合大跨度需求。坦拱式结构将竖向荷载转化为轴向压力,传递至拱脚基础,弯矩和剪力较小,可减少 30%侧墙弯矩。拱形结构整体性好,动力响应较矩形框架更平缓。坦拱式地铁车站的装配式构件由预制拱肋、拱脚、侧墙板和拱顶板等拼装而成,接缝处通过现浇混凝土或预应力钢束连接,整体性能更优。

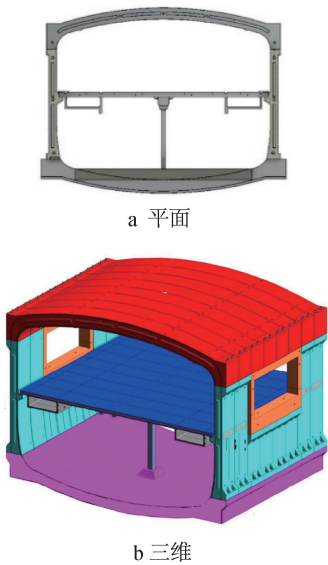


图 2 坦拱式装配车站 BIM 设计
Fig. 2 BIM design for flat arch prefabricated station

车站主体结构采用闭腔薄壁构件的设计,如图 3 所示。标准衬砌环由 7 个构件组成,其中现浇底板 A 位于车站底部,底板 A 外环宽 2m;中立柱处设置杯口,预制构件 B1(G1),B2(G2)分别为车站左右侧墙块,在 B1,B2 中设置牛腿;预制构件 C 为坦拱拱顶块,预制构件 E 为车站中板块,预制构件 ZL 为车站中纵梁,预制构件 ZZ 为车站中立柱。出入口衬砌环中预制构件 F1,F2 分别为车站左右出入口环梁,G1,G2 为环梁预制构件。通过内部空心设计,可减少坦拱结构的空腔式单块顶板质量,吊装风险可降低 30%,适应碎裂岩地层的承载力波动。

3 预制构件连接技术

预制装配式主体结构为 C50 混凝土,现浇底板为 C45 混凝土,装配式车站内部、肥槽回填为 C20

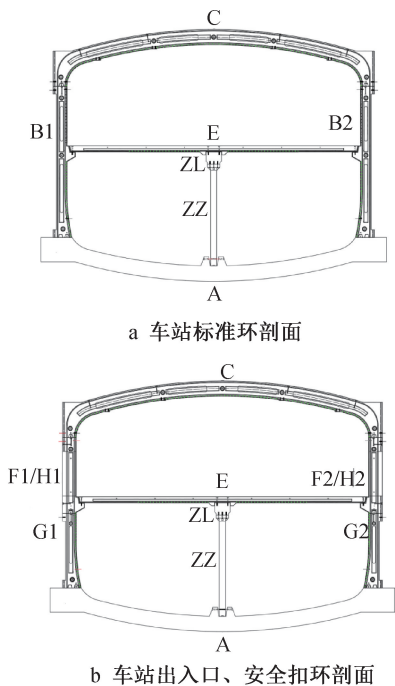


图 3 坦拱式装配式车站结构

Fig. 3 Structure of flat arch prefabricated station

素混凝土。

1) 顶板与侧墙连接采用榫卯+预应力筋复合连接

榫卯结构:顶板与侧墙采用三维凸凹榫头,榫头尺寸 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 200\text{mm}$,通过工厂预制时预留的榫槽实现快速定位,拼装误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内。榫头表面涂覆环氧树脂胶,增强界面黏结力。预应力筋连接:在榫卯结构外侧设置 $\phi 32$ 精轧螺纹钢预应力筋,单根张拉控制力达 350kN ,将顶板与侧墙拉紧形成整体。该技术使接缝处应力分布均匀,较传统螺栓连接可提升 40% 的抗弯刚度。

2) 侧墙与底板采用后浇混凝土湿接缝

预留后浇段:侧墙底部设 200mm 高后浇段,与底板顶面的键槽(深度 100mm)形成抗剪键。后浇混凝土采用 C50 微膨胀混凝土,浇筑前通过高压水枪清洗结合面。预埋注浆管:后浇段内预埋 $\phi 25$ 双液注浆管,注浆压力 0.5MPa ,填充接缝间隙,确保防水性能。

3) 立柱与基础:承插式灌浆连接

承插设计:立柱底部预制 $\phi 1\ 200 \times 800$ 承插槽,基础顶面预埋 $\phi 1\ 100 \times 700$ 插筋,插入深度 500mm 。高强无收缩灌浆料:采用 CGM-400 灌浆料,抗压强度 $\geq 60\text{MPa}$,流动度 $\geq 300\text{mm}$,24h 内完成灌浆,实现立柱与基础的刚性连接。

4) 环间连接:预应力筋逐环张拉

纵向预应力体系:每环构件间设置 4 根 $\phi 15.2$

钢绞线,单根张拉控制力 $1\ 860\text{MPa}$,通过群锚体系逐环锁定。该技术使车站纵向刚度提升 30%,有效控制沉降。

4 节点接缝防水设计

4.1 接缝 3 道防水体系

1) 第 1 道:榫卯结构内嵌遇水膨胀止水条(膨胀率 220%),宽 50mm ,厚 20mm 。

2) 第 2 道:接缝两侧涂刷双组分聚脲弹性体,双组分包括 A 组分(异氰酸酯半预聚体)和 B 组分(聚醚、胺扩链剂等),双组分的体积比为 $1:1$,质量比约为 $1:1$ 。涂料厚 2mm ,延伸率 $\geq 300\%$ 。

3) 第 3 道:后浇段内埋设 $\phi 20$ 注浆管,采用环氧树脂注浆,注浆压力为 0.3MPa ,填充细微孔隙。

4.2 变形缝防水处理措施

1) 中埋式止水带:采用 300mm 宽橡胶止水带,厚度 10mm ,与结构主筋焊接固定。

2) 外贴式止水带:外侧粘贴 400mm 宽 EVA 防水板,通过射钉固定于垫层。

3) 嵌缝材料:缝内填充聚硫密封胶,深 50mm ,表面用聚氨酯密封膏封闭。

5 智能化装配施工工艺与质量控制

5.1 关键施工装备系统

5.1.1 160t 智能门式起重机系统

1) 技术参数

桁架式结构,总起升高度 40m (轨道以上 17m /以下 23m),主跨度 27.9m 。采用四梁八轨布局,配置双卷扬机同步提升系统。荷载控制精度达 $\pm 0.5\%$,垂直定位误差 $\leq 2\text{mm}$ 。

2) 智能控制技术

PLC 变频调速:实现 $0.1 \sim 60\text{m/min}$ 无级变速,配合电子防摇算法,吊装过程摆动幅度 $< 5\text{cm}$ 。

三维坐标定位:集成激光测距与北斗定位,实时生成吊装路径三维动态模型。

远程监控系统:通过 5G 网络实现地面数码遥控,支持多机协同作业调度。

5.1.2 高低腿自由跨撑拼装台车

1) 采用“高低腿+伸缩臂”组合结构,适应 $1:10$ 基坑坡度。台车跨距 21m ,可覆盖 2.5m 宽构件拼装作业面。配置 8 组液压支腿,单点承载能力达 200t 。

2) 智能功能:①毫米级调平,搭载 6 个高精度倾角传感器,实时调整台车水平度;②构件预拼装模拟,通过车载 BIM 系统预演拼装过程,误差预警精度 0.1mm ;③自动纠偏,激光对中系统实现构件轴线偏差自动修正。

5.1.3 模块化运输平台

采用 3 轴液压平板车,轴距 6~12m。配置 48 个气囊式轮胎,胎压自适应调节系统。运输过程中构件姿态监测精度达 0.05°。

5.2 现场拼装施工工艺

5.2.1 施工准备

建立三级测量体系:首级控制网(GPS)、加密控制网(全站仪)、施工控制线(激光投线仪)。采用 Trimble SX10 型三维激光扫描仪,精度达 1mm/50m。

5.2.2 构件运输与姿态监控

通过 3 轴液压调节,适应不同尺寸构件运输,高精度监测构件姿态,防止扭曲变形。当运输大型弧形顶板时,实时数据反馈至调度中心,与门式起重机系统联动规划最优卸货点位。

1)智能吊装与精准定位:采用 2 台 160t 桁架式门式起重机双机抬吊,吊点间距 18m,实现大吨位构件高效吊装。通过 4 组电动葫芦实现构件±5°旋转及 360°翻转,实现空中姿态调整。结合三维坐标定位系统,利用激光测距与北斗定位生成构件吊装路径动态模型,实现±2mm 垂直定位精度。5G 远程监控系统支持多台门式起重机协同作业,如吊装顶板时同步调整两侧立柱位置,提升装配效率 30% 以上。

2)自适应拼装与实时纠偏:高低腿拼装台车,通过“伸缩臂+液压支腿”组合,完成大跨度作业。8 组 200t 级支腿配合倾角传感器,完成毫米级调平,确保拼装基面水平度。车载 BIM 系统预先模拟墙板与中柱的拼装流程,通过激光对中系统实时修正构件轴线偏差(0.1mm 级),避免累积误差。例如拼装异形曲面构件时,系统可自动计算最佳对接角度并引导液压微调装置定位。

3)智能协同装配施工:建立施工数字孪生平台,集成装备运行数据与 BIM 模型。通过 5G 网络传输门式起重机吊装轨迹、台车调平数据、运输平台定位信息等,实现“运输-吊装-拼装”全流程可视化管控。系统自动比对实际施工与模型偏差,触发预警并生成修正指令,如当监测到拼装缝宽超差时,立即调整台车液压支腿压力值。

4)三维榫卯与预应力筋复合连接方法:三维凸凹榫头配合环氧树脂胶粘剂,剪切强度≥15MPa。采用智能张拉系统,预应力筋伸长量控制误差≤±6mm。

5.3 接缝防水与密封施工

1)多道防水体系:结构自防水采用 P12 抗渗混凝土,裂缝宽度≤0.2mm;接缝防水采用双组分聚脲弹性体(厚 2mm)+遇水膨胀止水条(膨胀率

220%)。车站顶部设置厚 2.5mm 三元乙丙橡胶防水卷材。

2)密封工艺实施要点:采用气动密封胶注射枪,注胶压力为 0.5~0.8MPa;密封胶填充深度≥30mm,表面平整度误差≤1.5mm。

3)防水技术优势:①全断面防护,覆盖混凝土本体、接缝、外表面三重防水,多道防线,层次分明,无薄弱环节;②主动+被动防御,遇水膨胀止水条主动封堵,聚脲和 EPDM 被动阻水;③施工可控性,注胶压力与深度量化控制,避免人为操作误差;④抗变形能力,适用于装配式结构常见的接缝错动和收缩变形场景。

5.4 工程应用

本文所研究坦拱式地铁车站预制装配施工技术应用于青岛地铁景岱站,于 2024 年 4 月开始拼装,2024 年 10 月完成全部预制构件拼装,如图 4 所示。装配式施工满足规范允许渗漏率,防水效果显著优于行业标准(允许渗漏点≤2 处/1 000m²)。

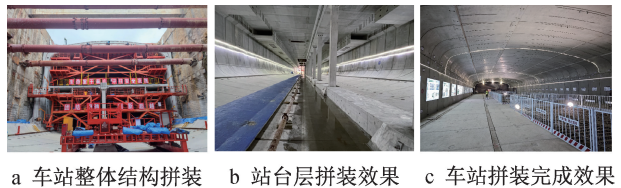


图 4 坦拱式装配车站结构
Fig. 4 Flat arch prefabricated station structure

6 结语

坦拱式地铁车站预制装配施工技术,主体结构采用闭腔薄壁构件结构形式,适用于浅埋深地铁车站,受力性能好,轻量、运输及吊装高效。坦拱式装配地铁车站的高效装配与连接技术为同类地铁工程提供了“地质复杂区+高密度城区”的装配式地铁车站解决方案,推动轨道交通行业向工业化、智能化、绿色化转型,主要具有以下技术优势。

1)主体结构为闭腔薄壁构件,结构形式分块合理,连接可靠,结构受力与传递性能良好,能较好地兼顾建筑结构功能性和施工吊装的便利性,更好地适应碎裂岩地层和地下水环境。

2)结构构件接头为三维榫卯结构,突破了传统二维连接的局限,接头牢固,提升了结构的整体性,防水性能良好。

3)施工装备与智能监测系统配合,实现了施工过程的高精度控制。机械化吊装、拼装设备智能化程度高,功能配置齐全,安装高效、施工精度高,大大提高主体结构的施工质量和效率。

参考文献:

[1] 钱七虎. 我国地下空间利用还有多大空间[J]. 科学中国人, 2023(8):33-35.
QIAN Q H. How much space is there for the utilization of underground space in China [J]. Scientific Chinese,2023(8): 33-35.

[2] 雷升祥,申艳军,肖清华,等. 城市地下空间开发利用现状及未来发展理念[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 965-979.
LEI S X, SHEN Y J, XIAO Q H, et al. Present situations of development and utilization for underground space in cities and new viewpoints for future development [J]. Chinese journal of underground space and engineering,2019,15(4):965-979.

[3] 刘帅. 富水地层地铁车站基坑降水开挖变形与控制措施研究[J]. 施工技术(中英文), 2024,53(21):103-108.
LIU S. Research on deformation and control measures of dewatering excavation in the subway station foundation excavation in water-rich stratum [J]. Construction technology, 2024, 53 (21):103-108.

[4] 刘圣勇. 地铁车站出入口暗挖工程专项施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024,53(19):99-103.
LIU S Y. Special construction technology on entrance and exit excavation engineering of metro station [J]. Construction technology,2024,53(19):99-103.

[5] 雷崇,孙波,徐军林,等. 装配整体式地下车站中板大开孔力学性能研究[J]. 铁道工程学报,2022,39(10):87-93.
LEI C, SUN B, XU J L, et al. Research on the mechanical properties of medium plate large opening of assembled integral underground station[J]. Journal of railway engineering society, 2022,39(10):87-93.

[6] 刘军,袁潇,张春节,等. 装配式半铺盖法施工临时立柱稳定性措施研究[J]. 施工技术(中英文), 2021,50(20):107-111.
LIU J, YUAN X, ZHANG C J, et al. Research on stability measures of temporary column construction by prefabricated semi-laying method [J]. Construction technology, 2021, 50 (20): 107-111.

[7] 林星涛,朱心诚,陈湘生,等. 装配式地铁地下车站结构韧性设计方法[J]. 中国公路学报,2025,38(5):146-157.
LIN X T,ZHU X C,CHEN X S,et al. Resilience design method for prefabricated underground metro station structures[J]. China journal of highway and transport,2025,38(5):146-157.

[8] 杨秀仁. 明挖预制装配式隧道结构拼装设计方法及关键技术[J]. 都市快轨交通, 2023,36(2):2-13.
YANG X R. Design method and key technology for assembling open-excavated prefabricated tunnel structures [J]. Urban rapid rail transit,2023,36(2):2-13.

[9] 史海欧,丁先立,项宝. 富水地层内支撑体系下地铁车站装配式建造技术研究[J]. 建筑结构,2024,54(24):61-66.
SHI H O, DING X L, XIANG B. Research on prefabricated construction technology of subway station under inner support system in water-rich stratum [J]. Building structure, 2024, 54 (24):61-66.

[10] 冯帅克,郭正兴,刘毅,等. 装配式地铁车站外墙-底板节点抗震性能研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023,54(1): 259-268.
FENG S K, GUO Z X, LIU Y, et al. Study on seismic behaviors of joints between sidewalls and floors for precast subway stations [J]. Journal of Central South University (science and technology), 2023,54(1):259-268.

[11] 笕子卉,王冉. 基于新型接头的装配式地铁车站力学性能研究[J]. 地下空间与工程学报,2024,20(2):518-526.
ZAN Z H, WANG R. Research on mechanical properties of assembled subway stations based on new connection joints[J]. Chinese journal of underground space and engineering,2024,20 (2):518-526.

[12] 卞波,杨永博,祝林盛,等. 无锡装配式地铁车站工业化建造综合效益分析[J]. 施工技术(中英文), 2024,53(8):44-47.
BIAN B, YANG Y B, ZHU L S, et al. Comprehensive benefits evaluation of industrialized construction for Wuxi prefabricated subway station [J]. Construction technology, 2024, 53 (8): 44-47.

[13] 安军海,张彦华,刘巧凤,等. 可液化场地中全预制柔性装配式地铁车站结构地震响应分析[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(12):5128-5140.
AN J H,ZHANG Y H,LIU Q F,et al. Response analysis of fully prefabricated flexible assembly subway station structure in liquefiable site[J]. Science technology and engineering,2025,25 (12):5128-5140.