

模块化钢结构安装技术在超深竖井智能停车库中的施工应用

许亮

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

摘要: 国内汽车保有量激增与城市化进程加速,导致城市停车位供需矛盾尖锐,而超深竖井智能停车库因高效利用地下空间,成为重要的解决方案。然而,在超深竖井环境下,停车设备钢结构安装面临诸多挑战,传统钢结构散件拼装工艺存在质量难控、安全风险高、进度滞后等问题,难以满足超深竖井环境下的安装要求。依托南京市建邺区已完工的沉井式停车库工程,阐述了模块化钢结构安装技术流程与关键工艺,并基于工程实例,从施工安全、施工质量和施工进度3个方面,对传统钢结构散件拼装工艺与模块化钢结构安装工艺进行对比分析。结果表明,模块化钢结构安装技术可显著降低安全风险、提升安装质量、缩短施工周期,为超深竖井智能停车库建设提供可靠的技术支撑,对推动城市地下空间开发与智能停车产业发展具有重要的意义。

关键词: 超深竖井停车库;钢结构;模块化安装技术;对比分析

中图分类号: TU758

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0408-06

Application of Modular Steel Structure Installation Technology in Construction of Ultra-deep Shaft Intelligent Parking Garages

XU Liang

[Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: With the rapid surge in domestic automobile ownership and the accelerated urbanization, the contradiction between the supply and demand of urban parking spaces has become increasingly acute. The ultra-deep shaft intelligent parking garages have emerged as a critical solution owing to their efficient utilization of underground space. Nevertheless, the installation of steel structures for parking equipment in ultra-deep shaft environments confronts multiple challenges. Traditional scattered component assembly technology for steel structures suffers from issues including difficult quality control, high safety risks, and prolonged construction progress, which is hard to meet the installation requirements in the ultra-deep shaft environments. Relying on the completed open caisson-type parking garage project in Jianye District, Nanjing, the modular installation technical processes and key technologies of steel structures are expounded. And based on the engineering cases, the assembly process of traditional steel structure components and the modular installation process of steel structures are compared and analyzed from three aspects of construction safety, construction quality and construction progress. The results indicate that modular steel structure installation technology can significantly reduce the safety risks, improve the installation quality, and shorten the construction cycle, which provides the reliable technical support for the construction of ultra-deep shaft intelligent parking garages, and has a great significance for promoting the development of urban underground space and intelligent parking industry.

Keywords: ultra-deep shaft parking garage; steel structure; modular installation technology; comparative analysis

0 引言

随着我国城市化进程加快,汽车保有量持续攀升,截至2025年9月底已达3.63亿辆,年均新增

2 000万辆,而停车位建设滞后,导致“停车难”成为制约城市发展的突出瓶颈^[1-3]。在此背景下,占地小、空间利用率高的超深竖井智能停车库,成为重要的解决方案^[4-7]。然而,这种处于地下数十至百米的竖井智能停车库,存在空间狭窄、通风能力差、垂直运输难等问题,给核心的钢结构安装带来严峻挑战。

当前,超深竖井钢结构工程多采用传统散件安

收稿日期: 2026-01-04

作者简介: 许亮(1990—),男,学士,工程师,从事市政地下空间工程施工技术与管理工。

装工艺,局限性尤为突出^[8-10]。在安全性方面,散件在吊装过程中易发生晃动和碰撞,而井下交叉作业频繁,易引发坠落、物体打击事故,并且有害气体难排出会对人员健康造成危害;在质量方面,井下温湿度会影响焊接与防火涂料施工,空间限制会导致拼装精度不足;在施工进度方面,超深竖井环境下,吊装次数多、工序繁琐,受环境天气的影响较大,工期成本增加。现有相关研究多聚焦传统流程优化,未能从根本上破解这些痛点。

为打破瓶颈,模块化钢结构安装技术应运而生。它在地面预制完整的功能模块,在井下完成整体安装,彻底改变了传统钢结构散件安装的作业逻辑^[11-15]。本研究的技术与方法创新点体现在3个方面:一是针对超深竖井停车库钢结构的功能与结构特征,提出“底层散件安装+上部分层标准化模块”的混合施工模式,解决了阶梯型底板无法标准化预制的难题;二是创新地设计“永临结合”的模块固定方式与专用吊架吊点体系,保障了深井内模块吊装的稳定性与安装精度;三是建立了涵盖施工安全、施工质量和施工进度量化评价指标体系,实现了2种工艺应用效果的科学对比。

基于此,本研究以南京市建邺区已建成的2个超深竖井智能停车库项目——沉井式停车设施建设项目(儿童医院)与沉井式停车设施建设项目(南湖中心广场)为分析案例,前者采用传统散件拼装技术,后者采用模块化钢结构安装技术,系统阐述模块化钢结构安装的施工流程与关键工艺,并从施工安全、施工质量和施工进度3个方面开展对比分析,量化评估该技术的应用优势,明确其适用性与推广价值。本研究成果不仅可为超深竖井智能停车库工程提供更优的技术解决方案,还可为地下管廊等类似超深地下结构的钢结构安装提供参考,助力城市地下空间开发技术创新。

1 工程概况

2座超深竖井智能停车库(以下简称“停车库”)均由同一施工单位、同一管理团队、同等级别施工人员组织施工。施工组织方案、设备配置标准、质量安全管控体系均保持一致,仅在钢结构安装工艺方面存在差异,确保了2种工艺对比的等效性与客观性。其中一座停车库位于儿童医院旁,设置2个井筒,单个井筒钢结构总质量约为198 t,采用传统散件拼装工艺施工;另一座停车库位于南湖中心广场东区,设

置1个井筒,钢结构总质量约为206 t,采用模块化安装技术施工。

2座停车库的井筒尺寸参数一致,深度约为67.5 m、内径为12 m,车库钢结构高度为55 m,共25层。其中,1~17层、25层的层高为2 m,设计为轿车停车位;18~24层的层高为2.5 m,设计为SUV (Sports/Utility Vehicles,运动型多用途汽车)停车位。单个井筒每层设置4个车位,总计100个停车位。车库钢结构示意图如图1所示。

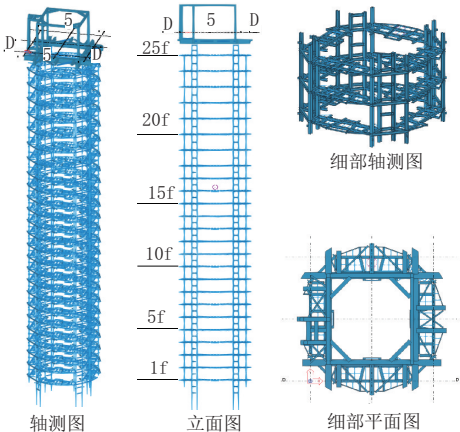


图1 车库钢结构示意图

2 模块化钢结构安装技术

2.1 总体施工工艺流程

模块化钢结构施工工艺流程以测量放样为基准,并行推进场地、胎架准备与底层钢结构施工。停车库采用“模块化单元预制拼装+整体吊装就位”的方式,经过连接、纠偏、加固,循环完成所有模块的安装,最后进行模块单元连接处的防腐、防火处理。通过并行组织、模块化集成,施工过程可实现效率提升与精度控制。总体工艺流程如图2所示。

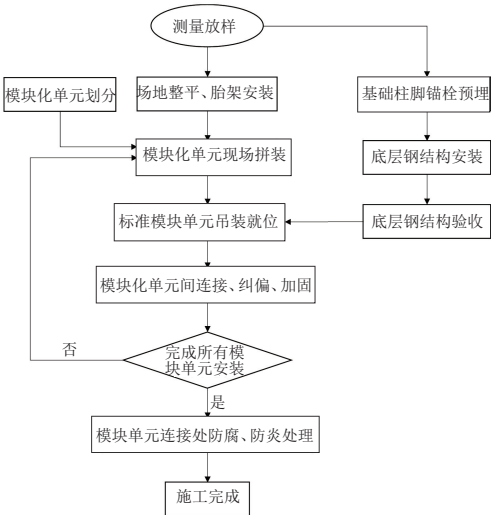


图2 总体施工工艺流程图

2.2 关键施工工艺

2.2.1 模块化单元划分

本项目根据停车库钢结构的结构形式,遵循吊装可行性、结构安全性、施工便捷性和经济性等原则,开展模块化单元划分;同时,兼顾模块间连接节点的标准化,采用螺栓连接替代现场焊接的方式,减少井下作业量。

为满足竖井停车设备的功能需求,结构底板设计呈由内到外的阶梯形态。由于底层(1层)钢结构柱脚标高不一致,难以进行标准模块化施工。因此,采用传统散件拼装工艺施工。底层钢结构示意图如图3所示。

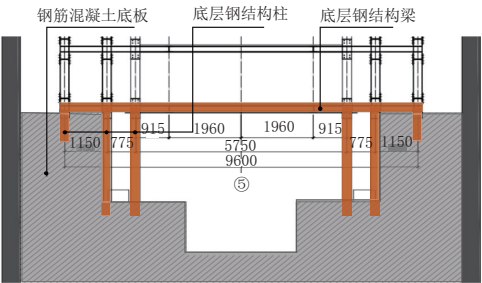


图3 底层钢结构示意图(单位:mm)

根据模块化单元划分原则,本项目将2~25层停车库钢结构划分成8个标准模块化单元,即每3层为1个标准模块化单元。具体划分情况如表1所示。

表1 标准模块化单元划分一览表

编号	单元名称	划分范围/层	平面尺寸	高度/m	质量/kg
1	标准模块化单元1	2~4	标准模块化单元外切圆直径为11.7 m	6	22 327
2	标准模块化单元2	5~7		6	22 327
3	标准模块化单元3	8~10		6	22 327
4	标准模块化单元4	11~13		6	22 327
5	标准模块化单元5	14~16		6	22 327
6	标准模块化单元6	17~19		7	26 048
7	标准模块化单元7	20~22		7.5	27 909
8	标准模块化单元8	23~25		7	26 048

2.2.2 胎架安装

在标准模块拼装场地,采用专业测量仪器,精准确定放样拼装轴线和标准模块化单元的中心点位。标准模块化单元含16根立柱,每根立柱柱脚对应设置1处柱脚胎架,用于统一柱脚标高并限制立柱平面位置。

胎架由定位板、柱脚板支撑、柱脚板及限位板组成,材质均为Q235钢。各部件核心控制要求包括3点:一是定位板与地面须进行可靠连接,以避免吊装时胎架发生位移;二是柱脚板支撑须精准调节标高,确保16个胎架柱脚板标高一致;三是限位板须严格

按放样位置安装,以控制柱脚的垂直度。柱脚胎架示意图如图4所示。

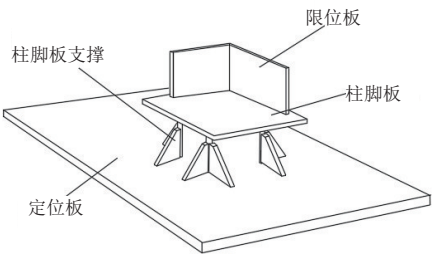


图4 柱脚胎架示意图

2.2.3 标准模块化单元现场拼装

停车库钢结构构件以散件形式进场,在地面采用传统工艺进行拼装,核心为立体框架结构的标准化预制。施工核心控制要点包括以下3点。一是梁柱组合单元在侧放固定后须标记格构梁的定位,以确保拼装基准确。二是构件在进行翻身作业时设置溜绳,以防止受力不均产生变形,且吊装至胎架上,须做好定位测量与临时固定。三是4榀梁柱组合单元就位后,应按“自下而上、先主后次”的顺序安装连接件,安装前,须对接触面进行除锈打磨;安装中,须实时监测模块的垂直度与水平度,及时调整偏差。总体拼装流程如图5所示。

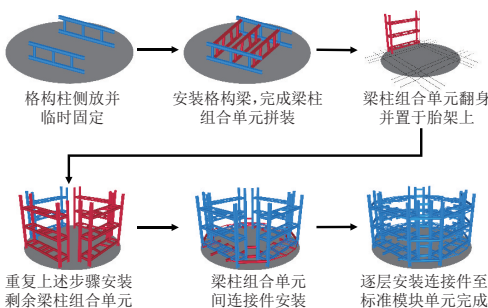


图5 标准模块化单元总体拼装流程图

2.2.4 标准模块化单元吊装就位

(1) 吊装设备选型

根据最不利工况参数(吊装总质量为29.9 t,含模块质量为27.9 t、钩头质量为0.5 t、索具和吊架质量为1.5 t;吊装高度为5 m,构件尺寸为7.5 m×11.7 m,作业半径为12 m),经设备性能对比,本项目选用QAY160汽车吊,其额定起重质量满足吊装要求,并可预留20%的安全余量。设备起重性能如表2所示,最不利工况示意图如图6所示。

表2 QAY160汽车吊起重性能表

臂长/m	作业半径/m	额定起重质量/t	配重/t	有效起重质量/t	适用工况
31.2	12	40	37	32	本工程最不利工况

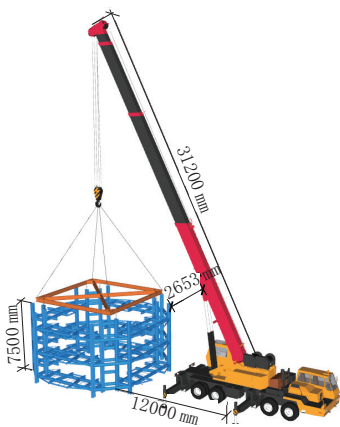


图6 最不利工况起重示意图(单位:mm)

(2)吊架、吊点位置设计

为保障吊装过程中受力平衡、避免模块变形,本项目创新地设计了专用吊架与精准吊点体系:一是专用吊架采用4根 HM294×200×8×12 钢梁搭建,并设置中间支撑,使钢丝绳仅承受竖向力;二是将吊点设定于模块内圈8根立柱与横梁交点处,吊架对应设置8个吊耳,距离角部825 mm,节点部位采用12 mm 加劲板进行加强。吊架与吊点示意图如图7和图8所示。

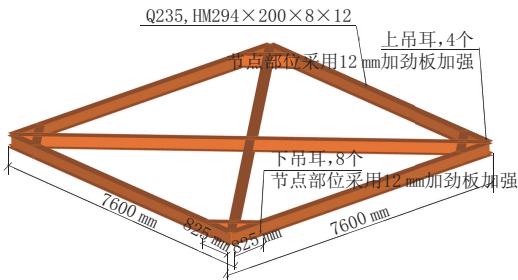


图7 专用吊架示意图(单位:mm)

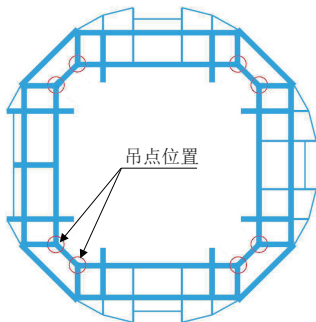


图8 吊点位置示意图

(3)吊装就位核心控制

吊装就位工序分为吊装前准备、试吊、吊装与就位及加固4个阶段,核心控制要点包括3点:一是试吊离地30 cm,检查吊架受力与模块平衡情况;二是吊装横移时通过溜绳进行姿态校正,并在入井下放前复核中心线对齐情况;三是采用“永临结合”的方式固定构件,以永久螺栓进行初步连接,同步焊接临时支撑系统进行补充加固,在验收合格后解除吊架

连接。标准模块吊装如图9所示。

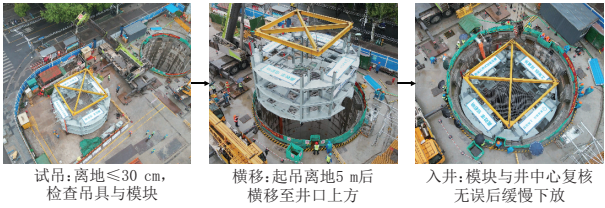


图9 标准模块吊装示意图

3 施工应用分析

为全面评估传统工艺与模块化工艺在实际施工中的应用效果,本研究从施工安全、施工质量和施工进度3个方面,结合南京市建邺区已完工的2座超深竖井智能停车库项目的实际施工情况,进行系统性对比分析,为工艺选择提供实操依据。

3.1 施工对比

3.1.1 安全性能对比

(1)吊装风险^[16]

传统工艺:需在68 m深井内进行1 128次零散构件的吊装作业。狭小的空间、气流的扰动(井内通风采用2台大功率轴流风机),易导致构件发生晃动、碰撞和坠落风险,且人员暴露风险高。

模块化工艺:采用“地面拼装+整体吊装”的施工方式,井内吊装作业仅需8次,且吊装过程中模块结构稳定、重心居中,抗风载能力强,精准对接无碰撞,风险显著降低。

(2)交叉作业风险

传统工艺:井下多工序(吊装、加固、防火喷涂等)同步推进,人员、设备动线重叠,交叉密集且占用应急通道,一旦发生事故,救援难度大。

模块化工艺:核心作业转移至地面,井内仅需进行模块连接、加固及防火涂料补喷,工序单一、动线清晰,应急通道畅通,无交叉作业风险。

(3)环境危害

传统工艺:井下焊接、喷涂作业会产生大量的有害气体,而深井狭长易使气体积聚,且高湿环境会加剧粉尘沉降,人员存在长期暴露于危害环境中的风险。

模块化工艺:井下作业量锐减,有害气体产生量大幅减少,作业点固定且易排风,同时地面作业配备通风除尘设备,危害显著降低。

3.1.2 施工质量对比

(1)焊接质量

传统工艺:井下湿度大、空间狭小,焊接人员姿态受限,焊接质量易出现气孔缺陷,后续返修量大。

模块化工艺:以地面焊接为主,环境优越、人员姿态灵活,焊接质量易把控,基本无需返修。

(2) 防火涂料质量

传统工艺:井下高湿环境使得涂料干燥时间超过12 h,在此期间,涂层附着力下降且易下挂。此外,空间限制易造成漏喷,需后期进行补涂。

模块化工艺:地面整体喷涂配备烘干设备,干燥时间缩短至2 h内,涂层附着力强、厚度均匀,仅需在井下补喷连接处,施工质量更有保障。

(3) 安装质量

传统工艺:井下无法使用大型测量设备,而人工测量精度有限,在实际施工中,25层钢结构需逐层安装,因此误差不断叠加,最终整体垂直度偏差达到50 mm。虽然这一偏差值仍满足 $H/1\ 000$ 的要求,但超出规范规定的最大允许偏差值(35 mm)^[17-18]。因此,需对已完工的钢结构进行逐层微调、纠偏,最终将整体垂直度控制在30 mm以内。

模块化工艺:在地面操作时,可依托精密的测量仪器进行精准定位,因此,单层钢柱垂直度偏差 ≤ 1 mm,3层模块偏差 ≤ 3 mm,仅相当于8层安装的误差传递,最终整体垂直度偏差 ≤ 17 mm,无需进行后期纠偏。

3.1.3 施工进度对比

传统工艺:2个井筒采用流水施工方式,计划工期为80 d,实际施工中,钢结构安装用时为90 d(单井为45 d),叠加垂直度纠偏7 d,单井实际总用时为52 d。

模块化工艺:1个井筒计划工期为40 d,实际完成25层钢结构安装仅用时34 d,工期相较于传统工艺大幅缩短。

3.2 工艺差异的机理分析

3.2.1 误差传递机理

传统散件拼装工艺为逐层累积安装模式,由于井下人工测量精度有限,每层安装的微小误差会随安装层数的增加而不断叠加。在25层钢结构安装完成后,累积的误差值超过规范允许的最大值,需进行逐层纠偏。

模块化工艺为“地面3层预制+井下整体安装”模式,在地面的操作,可依托精密的测量仪器,控制单根钢柱垂直度偏差 ≤ 1 mm,3层模块偏差 ≤ 3 mm,且模块间采用标准化螺栓进行连接,因此,误差传递仅发生在模块与模块之间,而非逐层传递。这种工艺从根源上减少了误差累积,最终大幅降低整体垂直度偏差。

3.2.2 受力路径变化机理

在传统的散件吊装工序中,单个构件为独立的受力体,在深井气流的扰动下,易产生晃动、碰撞,受力状态不稳定。

在模块化工艺中,模块为整体立体框架结构,吊装时形成完整的受力体系,重心居中、刚度大,抗风载与气流扰动能力显著提升,且专用吊架与吊点的设计,使吊装力沿立柱与横梁的主受力路径传递,避免局部应力集中导致的构件变形,保障了吊装与安装过程中结构的稳定性。

3.2.3 施工组织优化机理

传统工艺的施工组织为井下多工序同步推进,吊装、加固、焊接和喷涂等工序交叉进行,人员与设备动线重叠,存在大量的等待与协同耗时。

模块化工艺将核心作业转移至地面,地面预制与井下安装并行施工,井下仅需完成模块对接与少量的防火涂料补喷作业,工序单一、动线清晰,消除了工序交叉的等待时间,同时大幅减少井下作业人员的数量,施工组织效率显著提升。

3.3 应用效果

综上所述,模块化钢结构安装工艺通过“地面集中作业+井下精准对接”的模式创新,实现3大核心成效。

一是安全成效。井内吊装次数从1 128次锐减至8次;消除了交叉作业带来的隐患;井下有害气体与粉尘产生量显著降低;大幅减少人员在高风险作业环境中暴露的时间。碰撞、坠落、中毒等安全风险得到全方位管控。

二是质量成效。规避井下高湿、狭小等恶劣环境带来的影响:地面标准化作业使焊接返修率、涂料补涂率大幅下降;安装精度从传统工艺的30 mm(纠偏后)提升至17 mm以内。安装质量的稳定性与可控性得到显著增强,减少返修与纠偏成本。

三是进度成效。单井施工周期从传统工艺的52 d缩短至34 d,工期效率提升34.6%。通过减少井下多工序交叉等待时间,项目整体推进时间成本大幅降低,施工效率优势突出。

4 结 语

本研究结合南京市建邺区2座超深竖井智能停车库的施工实践,阐述了模块化钢结构安装的技术流程与关键工艺。模块化钢结构安装技术以“地面预制+井下整体安装”为核心,精准破解了超深、狭小空间钢结构施工的行业痛点。该技术通过工序转移

与集成化施工,在施工安全、施工质量和施工进度 3 大方面实现突破性提升。其本质是将传统井下分散作业转化为地面标准化作业,既降低了特殊环境对施工的制约,又契合绿色施工理念,减少了资源消耗与环境的不良影响。

该技术适用于井径 $\geq 8\text{ m}$ 、深度 $\leq 80\text{ m}$ 的圆形超深竖井,且钢结构为环形立体框架结构的工程。对于井径 $< 8\text{ m}$ 的超小竖井,由于模块吊装与对接空间不足,该技术的适用性受到限制;对于深度 $> 80\text{ m}$ 的竖井,需进一步优化垂直运输设备与模块的固定体系;对于异形截面竖井,需重新设计模块化单元划分方案,标准化程度会有所降低,施工效率提升幅度相应减小。

从应用价值来看,该技术通过安全风险管控、施工质量升级和工期效率提升的协同优化,降低了人工、设备与返工成本的投入,显著提升了项目的综合效益,为类似深井、狭小空间钢结构安装工程提供了可复制、可推广的解决方案。未来,可进一步探索“模块化+装配式”融合模式,将电气、消防等系统预装至模块内,实现“下放即完工”,从而缩短工期;同时,推动制定行业专项标准,为技术规模化推广应用提供坚实支撑。

参考文献:

[1] 孔令斌.城市机动车停车发展的思考[J].城市交通,2023,21(4):8.
[2] 胡瑞山,杨振山,张婉莹.北京市备案停车场供需空间格局分析[J].地球信息科学学报,2016,18(6):779-786.

[3] 叶治安,汪长伟.停车难:制约现代城市发展的一大瓶颈[J].上海城市管理,2017,26(1):6-9.
[4] 陈珑云,朱笑云.沉井式地下停车库促进城市有机更新[J].地下空间与工程学报,2021,17(2):343-349.
[5] 李瑛,谢锡荣,刘兴旺,等.井筒式超深地下立体车库结构计算方法研究[J].建筑结构,2022,52(15):146-152.
[6] 赵禹贺,方光秀,闫勇.沉井式地下停车库的智能系统创新设计与研究[J].山西建筑,2020,46(8):189-191.
[7] 王剑涛.深井式停车库存取车控制系统研究[J].现代信息科技,2023,7(8):138-140.
[8] 李刚.超深高压竖井直段钢衬吊装施工方案[J].中国电力企业管理,2020(30):84-85.
[9] 李瑛,谢锡荣,刘兴旺,等.井筒式超深地下立体车库结构计算方法研究[J].建筑结构,2022,52(15):146-152.
[10] 谢红涛,徐罗平,范玮武,等.大型钢结构吊装施工安全风险分析及控制[J].工业安全与环保,2023,49(11):23-27.
[11] 孙希波,侯效毅,徐阳,等.地铁施工竖井装配式钢结构初衬的受力分析[J].地下空间与工程学报,2022,18(1):281-289.
[12] 曹轲,万雨晨,周小涵.预制装配式技术在地下工程的应用与研究进展[J].地下空间与工程学报,2023,19(6):2055-2071.
[13] 周春,邱德斌.超高超重钢结构模块化施工技术[J].石油化工建设,2021,43(5):72-75.
[14] Liew J Y R, Chua Y S, Dai Z. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings[J]. Structures, 2019, 21: 135-149.
[15] Chen Z, Liu J, Yu Y. Experimental study on interior connections in modular steel buildings[J].Engineering Structures, 2017, 147:625-638.
[16] 张磊.超深沉井停车库的钢结构安装施工关键技术[J].上海建设科技,2023(4):32-35.
[17] GB 50755—2012 钢结构工程施工规范[S].
[18] GB 50205—2020 钢结构工程施工质量验收标准[S].

(上接第 388 页)

为背景,详细介绍了顶升施工过程中的关键技术,包括 PLC 液压同步顶升系统、顶升设备布置、临时支点布置、顶升步骤及顶升施工控制要点等。相关工程已于 2025 年 9 月完成施工,其成功经验可为其他类似桥梁的施工所借鉴。

参考文献:

[1] 聂建国.钢混组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2011.
[2] 卢永成,邵长宇.长大轨合建桥梁新技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
[3] 胡志坚,于善利,李刚.预应力钢-混箱形组合连续梁负弯矩区开裂分析[J].桥梁建设,2020,50(4):66-71.
[4] 聂立力,周迅,熊伟.某城市连续钢混组合梁桥设计与研究[J].中国水运,2023,23(16):115-117.
[5] 周慧,成新.跨线连续钢-混组合梁桥负弯矩区抗裂措施设计与研究[J].南昌工程学院学报,2024,43(4):41-47.
[6] 梁心普.中支点顶升法控制钢混组合梁桥面板裂缝[J].科技创新与应用,2019(9):115-117.

[7] 刘立明.城市高架桥钢混组合梁顶升施工技术分析[J].安徽建筑,2025,32(6):57-60.
[8] 刘晓奎,顾民杰.钢-混组合连续梁桥中支点顶升施工过程受力分析[J].城市道桥与防洪,2022(2):104-107;126.
[9] 蒋恺,陈泽鹏,孙宗申.大跨径钢混组合梁施工关键技术及控制要点研究[J].城市道桥与防洪,2023(6):167-171;216.
[10] 李剑鸾.钢混组合梁负弯矩区桥面板抗裂措施计算分析[J].安徽建筑,2021,28(11):159-161.
[11] 刘飞.连续钢混组合梁负弯矩区处理措施[J].北方交通,2015(1):33-35.
[12] 解超.桥梁工程连续钢混组合梁抗裂措施分析[J].交通世界,2022(17):172-174.
[13] GB/T 51256—2017 桥梁顶升移位改造技术规范[S].
[14] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].
[15] 高伟,瞿波,张开,等.高震区大跨度连续钢混组合梁顶升施工技术[C]//2023 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(中册).北京:《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司,中建铁路投资建设集团有限公司,2023:358-361.