

铁路工程中的预制拼装技术研究

刘鑫

中铁上海工程局集团第五工程有限公司 广西 南宁 530000

摘要: 铁路工程预制拼装技术通过工厂标准化生产构件,现场拼装成型,涵盖桥梁、轨道、站房、隧道等多领域。该技术以施工效率高、质量可控性强、环保节能效果突出为核心优势,采用干接、湿接、胶接等工艺,结合BIM、三维激光扫描等智能技术实现精准施工。其应用显著缩短工期,降低现场作业风险,但面临初期投资高、复杂环境适应性挑战,需通过标准化体系完善与技术创新持续优化。

关键词: 铁路工程; 预制拼装; 关键技术

引言: 随着我国铁路建设向高速化、规模化与绿色化发展,传统现场浇筑施工模式因效率低、质量波动大、环境影响显著等问题逐渐难以满足需求。预制拼装技术凭借其“工厂标准化生产+现场快速组装”的工业化建造理念,成为提升铁路工程建造效率与质量的关键路径。该技术通过模块化设计、智能化拼装及全生命周期管理,不仅缩短工期、降低风险,更契合绿色低碳发展要求,对推动铁路行业转型升级具有重要意义。

1 铁路工程预制拼装技术基础理论

1.1 预制拼装技术定义与分类

铁路工程预制拼装技术是指在工厂标准化生产铁路工程所需构件,经运输至施工现场后,通过专用设备与工艺完成拼装成型的施工技术体系,是工业化建造理念在铁路工程领域的核心应用。其分类主要涵盖两大维度:(1)按结构类型划分:可分为桥梁预制拼装、轨道预制拼装、站房预制拼装、隧道预制拼装等。其中桥梁预制拼装应用最广泛,涵盖简支梁、连续梁等构件;轨道预制拼装以板式无砟轨道板拼装为典型;站房预制拼装聚焦梁柱、墙板等构件;隧道预制拼装则以管片拼装为主。(2)按施工工艺划分:包括纵向拼装、横向拼装及模块化集成等。纵向拼装适用于桥梁梁体等线性构件的逐段衔接;横向拼装多用于宽幅构件的分块组合;模块化集成则是将多个功能构件预制为整体模块,现场直接吊装就位,效率更高^[1]。

1.2 技术核心原理

(1) 标准化设计理念与模数化协调:通过制定统一的构件规格、接口标准,实现构件批量生产,同时基于模数协调原则,确保不同构件间的适配性,为拼装施工奠定基础。(2) 连接节点力学性能与构造设计:连接节点是预制拼装结构的关键,需通过合理的构造设计与力学验算,保证节点具备足够的强度、刚度与稳定性,满

足铁路工程的承载与抗变形要求。(3) 施工过程力学分析与变形控制:通过数值模拟与现场监测相结合的方式,分析拼装过程中构件的受力状态与变形规律,采取针对性控制措施,避免拼装误差累积,保障工程质量。

1.3 技术优势与局限性

(1) 优势:显著缩短工期,工厂预制与现场施工并行作业,大幅减少现场作业时间;质量可控性强,工厂标准化生产环境可有效规避现场施工的质量波动;环保节能效果突出,减少现场浇筑产生的粉尘、噪音与废弃物;降低现场作业风险,减少高空、露天等危险作业环节。(2) 局限性:初期投资成本较高,需建设专用预制工厂与购置专用设备;受运输条件限制,大型预制构件的运输半径与运输效率受限;连接节点的耐久性面临考验,长期受环境侵蚀与列车荷载作用,需持续优化防护技术。

2 铁路工程预制拼装关键技术研究

2.1 预制构件设计与标准化

(1) 构件分块原则与接口设计标准:构件分块需遵循“受力合理、运输可行、施工便捷”三大原则,结合结构力学特性划分构件单元,避免出现应力集中区域;同时严格制定接口设计标准,明确接口尺寸公差、连接方式及密封要求,确保不同构件接口精准适配,为拼装施工提供基础保障。接口设计需兼顾力学性能与施工操作性,减少现场调整工作量。(2) 预应力体系与耐久性设计:针对铁路工程荷载大、运营周期长的特点,合理选用先张法、后张法等预应力体系,通过精准计算确定预应力筋布置方式与张拉参数,提升构件承载能力与抗裂性能;耐久性设计需结合工程所处环境,针对性采取防腐、抗冻、抗渗措施,如采用高性能混凝土、增设防腐涂层等,延长构件使用寿命,降低后期维护成本^[2]。(3) BIM技术在预制构件设计中的应用:借助BIM技术构建三

维构件模型,实现构件设计可视化、协同化。通过模型进行碰撞检测,提前规避设计冲突;利用模型参数化特性,快速生成不同规格构件的设计方案,提升设计效率;同时,BIM模型可关联构件生产、运输、拼装等全生命周期信息,为后续施工环节提供数据支撑,实现设计与施工的高效衔接。

2.2 连接节点技术

(1) 干式连接与湿式连接:干式连接包括螺栓连接、套筒连接、榫卯连接等,具有施工便捷、无需养护等优势,适用于对施工进度要求高的场景,其中螺栓连接通过高强度螺栓实现构件紧固,套筒连接则依靠套筒与钢筋的机械咬合传递力;湿式连接以灌浆套筒连接、后张预应力连接为代表,灌浆套筒通过高强灌浆料的粘结作用实现钢筋对接,后张预应力连接则通过张拉预应力筋使节点形成整体,湿式连接整体性更强,适用于对结构刚度要求高的关键部位。(2) 节点力学性能试验与数值模拟:通过开展节点静载、动载试验,测试节点的强度、刚度、延性及疲劳性能,验证节点设计的合理性;利用有限元软件进行数值模拟,模拟不同荷载工况下节点的受力状态与变形规律,优化节点构造设计。试验与模拟相结合,可精准掌握节点力学特性,为节点设计优化提供科学依据。(3) 节点耐久性保障措施:针对连接节点易受环境侵蚀的问题,采取多重防腐措施,如对螺栓、套筒等金属连接件进行热镀锌、喷涂防腐涂层处理;设计防松脱结构,采用防松螺母、开口销等部件,避免列车振动导致连接件松动;同时,在节点处设置密封构造,防止雨水、湿气渗入,保障节点长期稳定工作^[9]。

2.3 施工装备与工艺

(1) 预制构件运输与吊装设备选型:根据构件重量、尺寸及运输路线,选用专用运输车辆,如平板拖车、箱梁运输专用车等,配备防滑、固定装置,防止运输过程中构件损坏或移位;吊装设备需结合构件重量与吊装高度,选用塔吊、履带吊等,配备专用吊具,确保吊装过程平稳、安全。设备选型需综合考虑施工场地条件、施工进度要求,提升运输与吊装效率。(2) 精准定位与安装技术:采用激光定位、智能监测等先进技术,提升构件安装精准度。激光定位技术可实现构件平面位置与高程的精准校准,智能监测系统通过传感器实时采集构件安装过程中的位移、倾角等数据,及时反馈调整,避免拼装误差累积;同时,优化安装流程,采用“先定位、后固定”的原则,确保构件安装位置准确、稳固。(3) 现场拼装顺序优化与协同作业管理:结合工程结构特点,通过数值模拟与现场试验,优化拼装顺序,避免拼装过程

中结构产生过大应力;建立协同作业管理体系,协调预制构件运输、吊装、安装等各环节工作,明确各岗位职责,采用信息化管理手段,实时掌握施工进度与质量状态,确保各环节高效衔接、有序推进。

2.4 质量控制与检测技术

(1) 预制构件生产过程质量控制:制定严格的工厂化制造标准,对原材料进场、钢筋加工、混凝土浇筑、养护等环节进行全程管控。原材料需经检验合格后方可使用,钢筋加工精度需符合设计要求,混凝土浇筑过程中控制振捣质量与浇筑速度,养护阶段严格控制温度、湿度,确保构件强度达标。同时,建立生产过程质量追溯体系,记录构件生产全过程信息,便于后期质量核查。(2) 拼装精度检测方法:采用三维激光扫描、全站仪监测等高精度检测技术,对构件拼装精度进行全面检测。三维激光扫描可快速获取构件表面三维数据,精准识别拼装偏差;全站仪监测则可对构件的平面位置、高程等关键参数进行实时监测,确保拼装精度符合设计要求。对检测发现的偏差,及时采取调整措施,避免偏差扩大^[4]。(3) 无损检测技术在连接节点中的应用:针对连接节点的隐蔽性特点,采用超声波检测、射线检测、磁粉检测等无损检测技术,检测节点内部缺陷、连接件紧固状态等。超声波检测可检测灌浆套筒内灌浆料饱满度,射线检测可识别节点内部裂纹等缺陷,磁粉检测可发现金属连接件表面损伤,通过无损检测及时排查质量隐患,保障节点连接质量。

3 铁路工程中的预制拼装技术挑战与发展趋势

3.1 现存问题与挑战

(1) 标准化程度不足与跨区域协调困难:当前行业内预制构件的规格、接口标准尚未完全统一,不同设计单位、施工企业的技术体系存在差异,导致构件通用性差,难以实现规模化批量生产,增加了设计与施工成本。同时,跨区域铁路工程建设中,各地区的地质条件、气候环境、技术要求存在差异,现有标准难以全面适配,跨区域协调机制不健全,导致技术衔接不畅,影响施工进度与质量管控。(2) 复杂环境下的施工适应性:在高寒、高海拔、沿海等复杂环境区域,预制拼装技术面临严峻考验。高寒地区低温环境易导致混凝土构件冻胀开裂、连接节点密封性能下降;沿海地区高盐雾环境会加速金属连接件腐蚀,降低节点耐久性;高海拔地区缺氧、强辐射环境则会影响施工装备性能与施工人员作业效率,现有技术对复杂环境的适应性不足,缺乏针对性的解决方案。(3) 全生命周期成本与效益平衡:预制拼装技术初期投资较高,需建设专用预制工厂、购置大型施工装

备,导致项目前期成本压力大。同时,在运营维护阶段,连接节点、预应力体系等关键部位的维护成本较高,且若出现质量问题,修复难度大、成本高。如何优化设计与施工方案,降低初期投资与运营维护成本,实现全生命周期内的成本与效益平衡,是当前面临的重要挑战。

3.2 技术创新方向

(1) 智能化制造与机器人拼装技术:推进预制构件智能化制造,引入自动化生产线、智能检测设备,实现构件生产过程的自动化、精准化管控,提升构件生产效率与质量稳定性。研发适用于铁路工程的拼装机器人,结合视觉识别、精准定位技术,实现构件吊装、对接、紧固等环节的自动化作业,降低人工依赖,提升拼装精度与施工安全,尤其适用于复杂环境下的施工场景。(2) 新材料应用:加大超高性能混凝土、纤维增强复合材料、高性能防腐材料等新型材料的研发与应用力度。超高性能混凝土具有高强度、高韧性、高耐久性等优势,可减小构件截面尺寸、减轻构件重量,提升结构承载能力;纤维增强复合材料具有轻质高强、耐腐蚀等特性,可用于制作构件外壳、连接件等,提升构件抗腐蚀能力;高性能防腐材料可有效延长金属连接件、预应力筋的使用寿命,降低维护成本^[5]。(3) 基于数字孪生的全流程监控与管理:构建铁路工程预制拼装全生命周期数字孪生模型,整合构件设计、生产、运输、拼装、运营维护等各环节数据,实现物理实体与数字模型的实时映射。通过数字孪生模型进行施工过程模拟优化、风险预警,实时监控构件拼装精度与结构受力状态;在运营阶段,基于模型开展状态监测与故障诊断,实现全流程智能化管控,提升工程管理效率与决策科学性。

3.3 政策与标准化建议

(1) 完善行业规范与技术标准体系:结合行业发展实际,由行业主管部门牵头,组织科研机构、企业等多方力量,修订完善预制拼装技术相关的行业规范与技术标准。统一构件规格、接口设计、施工工艺、质量检测等方面的标准要求,形成覆盖全生命周期的标准体系;针对复杂环境下的技术应用,制定专项技术标准,提升标准的针对性

与适配性,为技术应用提供明确依据。(2) 推动产学研协同创新机制:建立政府引导、企业主导、科研机构参与的产学研协同创新机制,整合各方资源,聚焦技术瓶颈问题开展联合攻关。鼓励企业与高校、科研院所共建创新平台,加强关键技术研发与成果转化,加速智能化装备、新材料等创新成果的工程化应用;加大政策扶持力度,通过科研经费补贴、税收优惠等方式,激发企业创新积极性。(3) 加强国际技术交流与合作:积极开展国际技术交流与合作,引进国外先进的预制拼装技术、装备与管理经验,结合我国铁路工程实际情况进行消化吸收再创新。参与国际标准制定,提升我国在铁路预制拼装技术领域的国际话语权;推动国内企业与国际企业开展合作,共同开展技术研发与项目建设,拓展技术应用场景,提升技术国际化水平。

结束语

铁路工程预制拼装技术作为工业化建造的核心载体,正通过标准化设计、智能化装备与全流程数字化管控的深度融合,推动行业向高效、精准、绿色方向演进。尽管面临跨区域协调、复杂环境适应性及全生命周期成本优化等挑战,但随着新材料应用、数字孪生技术及产学研协同创新的突破,其应用边界将持续拓展。未来,需进一步强化标准引领与技术创新,加速技术成果转化,为全球铁路建设提供中国智慧与中国方案。

参考文献

- [1]陶诗君,汤伟,于文韬.分析预制装配墩柱的特点与施工工艺[J].公路技术,2021,(3):132-135.
- [2]郑杰,张凯迪,贾俊峰,张建勋.探讨预制装配式桥墩连接关键技术及工程应用[J].铁路技术,2022,(4):76-79.
- [3]陈宝魁,彭新,王靓妮.研究预制拼装桥墩工程应用与创新研究[J].铁路技术,2022,(6):101-102.
- [4]杨枋.铁路项目建设中的T梁预制与架设施工技术[J].建材与装饰,2020,(3):258-259.
- [5]陈飞.铁路工程建设中T梁预制与架设施工技术探讨[J].建筑工程技术与设计,2020,(9):184-187.