

公路工程中装配式结构施工技术发展现状与前景

王震

新疆北新岩土工程勘察设计有限公司 新疆 乌鲁木齐 831400

摘要：随着我国基础设施建设进入高质量发展阶段，传统现浇施工模式在资源消耗、环境污染、施工效率及质量控制等方面日益显现出局限性。装配式结构施工技术以其标准化设计、工厂化生产、装配化施工、信息化管理等优势，成为推动公路工程绿色、智能、高效建造的重要方向。本文系统梳理了公路工程中装配式结构施工技术的发展背景与核心内涵，分析了其在桥梁、涵洞、挡墙、护栏等典型构件中的应用现状，对比了国内外技术发展水平，深入探讨了当前面临的关键技术瓶颈，如连接可靠性、运输限制、成本控制与标准体系缺失等问题。在此基础上，结合“双碳”目标、新型工业化和智能建造等国家战略导向，展望了该技术在材料创新、智能装备、数字孪生、全生命周期管理等方面的未来发展趋势，并提出了完善标准体系、强化科研攻关、优化政策激励等发展建议，以期为我国公路工程装配式技术的规模化、高质量应用提供理论支撑与实践参考。

关键词：公路工程；装配式结构；预制构件；智能建造；绿色低碳；标准化

引言

传统公路工程施工方式暴露出诸多问题：现场湿作业多、施工周期长、环境扰动大、质量波动明显、劳动力依赖度高，难以满足新时代对“绿色、低碳、智能、安全、高效”的工程建设要求。在此背景下，装配式结构施工技术作为建筑工业化的重要组成部分，逐步从房屋建筑领域向交通基础设施领域延伸。所谓装配式结构，是指将结构构件在工厂内进行标准化、批量化预制，再运输至施工现场通过可靠连接方式组装成整体结构的建造模式。该技术具有“设计标准化、生产工厂化、施工装配化、管理信息化”的显著特征，契合国家“十四五”规划中关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的战略部署，亦是实现交通领域“双碳”目标的重要路径。公路工程中的装配式结构涵盖范围广泛，包括桥梁上部结构（如T梁、箱梁、空心板）、下部结构（如桥墩、承台）、涵洞、挡土墙、声屏障、护栏、排水沟等。相较于铁路、市政等领域，公路工程因线性分布、地形复杂、荷载多样等特点，其装配式技术的应用更具挑战性，也更具研究价值。

1 装配式结构施工技术的核心内涵与优势

1.1 技术定义与特征

公路工程装配式结构施工技术是指将原本在现场浇筑的混凝土或钢结构构件，转移至专业化预制厂进行标准化生产，通过科学设计节点连接方式，利用大型吊装或顶推设备在现场快速拼装形成完整结构体系的施工方法。其核心特征可概括为：（1）标准化设计：基于模数协调原则，统一构件尺寸、接口形式与连接方式，实现

设计—生产—施工一体化。（2）工厂化生产：在受控环境下采用自动化生产线，提升构件精度与耐久性，减少现场作业量。（3）装配化施工：现场以“搭积木”方式完成主体结构安装，大幅缩短工期，降低对交通与环境的干扰。（4）信息化管理：依托BIM（建筑信息模型）、物联网（IoT）、RFID等技术，实现构件全生命周期追踪与质量管控。

1.2 主要优势

一是提升工程质量与耐久性：工厂环境可控，混凝土养护条件优越，钢筋定位精准，有效减少裂缝、蜂窝等质量通病。二是缩短工期，减少交通干扰：现场作业时间可压缩30%~70%，尤其适用于城市快速路、高速公路改扩建等对交通影响敏感的项目。三是降低环境影响：减少现场扬尘、噪音、废水排放，符合绿色施工与“双碳”目标要求^[1]。四是提高施工安全性：高空、临水等高风险作业转移至地面工厂，降低安全事故率。五是推动产业升级：促进预制构件制造、智能装备、物流运输等产业链协同发展，培育新质生产力。

2 国内外发展现状分析

2.1 国外发展概况

发达国家在装配式公路结构领域的探索起步较早，技术体系相对成熟且应用场景丰富。美国自20世纪90年代起大力推行“加速桥梁施工”（Accelerated Bridge Construction, ABC）战略，其核心即在于通过全预制构件实现桥梁的快速更换与新建。例如，在佛罗里达州和加利福尼亚州，大量桥梁采用预制墩柱与盖梁，通过灌浆套筒实现竖向连接，不仅施工效率大幅提升，而且在

地震多发区展现出良好的抗震性能。日本则在高抗震设防需求驱动下,发展出高精度节段拼装桥梁技术,普遍采用预应力筋配合环氧树脂胶接缝,拼装精度可达毫米级,并形成了可在夜间封闭时段完成整桥更换的成熟工法。欧洲各国亦各具特色:德国和法国在高速公路附属设施如护栏、排水沟、声屏障等方面实现了高度标准化与自动化生产;荷兰则将预制模块化理念融入生态公路建设,广泛应用预制透水铺装单元与生态挡墙,兼顾功能性与环境友好性。总体而言,国外经验表明,成熟的装配式技术离不开完善的规范体系、稳定的供应链以及跨专业协同机制的支撑。

2.2 国内发展现状

我国公路工程装配式技术虽起步较晚,但近十年来在政策引导与工程实践双重驱动下取得了显著进展。交通运输部相继出台《关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见》《公路“十四五”发展规划》等文件,明确提出鼓励发展装配式建造技术。在工程实践中,江苏五峰山长江大桥引桥成功应用了全预制墩柱与盖梁体系,浙江杭绍甬智慧高速公路全线推广预制装配式护栏、中央分隔带及排水沟,雄安新区对外骨干路网则大规模采用预制U型梁与装配式涵洞,均取得了良好的社会与经济效益。与此同时,高校与企业联合开展了大量技术研发工作,针对连接节点这一核心技术难点,探索了包括超高性能混凝土(UHPC)湿接缝、预应力干接缝、机械套筒连接等多种新型构造形式,并通过足尺模型试验对其在动荷载、温度循环及地震作用下的力学性能进行了系统验证。然而,与国际先进水平相比,我国在标准化程度、连接技术统一性、配套规范完整性以及全链条协同能力方面仍存在明显短板,尚未形成可复制、可推广的成熟技术体系,制约了该技术的大规模应用。

3 关键技术问题与挑战

3.1 节点连接可靠性

连接节点是装配式结构的“生命线”。公路结构承受车辆动荷载、温度变化、地震作用等复杂工况,对节点的强度、刚度、延性及耐久性要求极高。目前常用连接方式包括:一是湿连接(现浇混凝土):整体性好但需现场养护,削弱装配优势;二是干连接(螺栓、预应力):施工快但构造复杂,易产生应力集中;三是半干连接(灌浆套筒、UHPC填充):兼顾性能与效率,但成本高、施工精度要求严^[2]。如何在保证安全的前提下简化连接构造、提升施工容错率,是亟待解决的技术难题。

3.2 构件运输与吊装限制

公路工程线性分布,预制厂选址受限。大型构件(如

整跨梁、高墩柱)受道路限高、限宽、桥梁承载力制约,运输难度大、成本高。此外,山区、水网地区吊装空间受限,对起重设备提出更高要求。发展分段预制+现场拼装或轻量化构件(如钢-混组合结构)是重要方向。

3.3 初期成本偏高

尽管全生命周期成本可能更低,但装配式结构前期投入较大:模具摊销、运输费用、专用设备租赁等导致单方造价高于现浇。在当前“低价中标”市场环境下,业主积极性不足。需通过规模化生产、标准化设计降低边际成本。

3.4 标准规范体系不健全

现行《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)等对装配式技术规定较为原则,缺乏针对连接构造、施工工艺、质量验收的专项标准。设计—生产—施工各方责任边界模糊,制约技术推广。

3.5 产业协同不足

设计院习惯现浇思维,预制厂缺乏工程经验,施工单位对新工艺掌握不足,导致“设计难生产、生产难施工”的脱节现象。亟需建立EPC(设计—采购—施工)一体化模式,打通产业链。

4 未来发展趋势与前景展望

4.1 新型材料与结构体系驱动性能升级

未来公路装配式结构的发展将深度依赖材料科学与结构工程的交叉创新。超高性能混凝土(UHPC)因其抗压强度超过150MPa、优异的抗裂性与耐久性,有望在连接节点、薄壁梁板、轻型护栏等关键部位实现突破性应用,不仅可显著减小构件截面尺寸、降低自重,还能提升结构整体刚度与服役寿命。同时,钢-混凝土组合结构将凭借钢材良好的延性与混凝土优异的抗压性能,在大跨径桥梁上部结构中发挥更大作用,兼顾承载效率与抗震韧性^[3]。此外,在“双碳”战略牵引下,再生骨料、粉煤灰、矿渣微粉等工业固废将在非承重预制构件中逐步替代天然砂石,推动公路工程向循环经济模式转型。材料性能的跃升将为结构形式的轻量化、模块化与高性能化提供坚实基础。

4.2 智能化与数字化深度融合重塑建造流程

数字技术将成为装配式技术迭代升级的核心引擎。基于BIM与GIS融合的全生命周期管理平台,将实现从方案设计、工厂排产、物流调度到现场安装、健康监测的信息无缝流转与动态协同。在预制工厂,机器人自动绑扎钢筋、3D打印定制模板、AI视觉识别质检等智能装备将大幅提升生产精度与效率,减少人为误差。在施工现场,搭载高精度定位与自动控制系统的智能吊装设备,

可实现构件毫米级精准就位；无人化摊铺与灌浆机器人则将进一步减少人工干预。更重要的是，通过嵌入传感器与物联网技术，预制构件在出厂时即具备“数字身份”，其受力状态、环境响应与损伤演化可在运维阶段实时感知，为预测性维护与寿命评估提供数据支撑，真正实现“建造即运维”的一体化理念。

4.3 模块化集成设计提升系统功能与效率

未来的装配式单元将超越单一结构功能，向多功能集成化方向演进。设计不再局限于独立的梁、柱、墙，而是将照明、通信、监控、融雪、排水等多种子系统整合于同一预制模块之中。例如，一段中央分隔带护栏可同时集成LED诱导灯带、5G微基站、气象感知器与电加热融雪装置；一座装配式涵洞可预埋光纤传感网络与智能排水控制系统。这种“一次预制、多重功能”的集成设计理念，不仅大幅减少现场管线敷设与设备安装工序，提升施工效率，还能增强基础设施的智慧化水平与应急响应能力^[4]。模块化程度的提高，也将进一步推动设计标准化与生产规模化，形成良性循环。

4.4 政策与市场机制协同加速技术普及

技术的规模化应用离不开制度环境的支撑。预计交通运输主管部门将加快出台《公路工程装配式结构与施工技术指南》《预制构件质量验收规程》等专项标准，明确技术路线、构造细节与验收方法，为行业提供权威指引。同时，装配式技术的减碳效益将被纳入绿色公路评价体系，并探索与全国碳交易市场联动，使减排量转化为可交易资产，形成市场化激励。在项目审批、用地保障、财政补贴等方面，地方政府亦可对采用装配式技术的项目给予绿色通道或资金支持。随着示范工程经验的积累与成本曲线的下降，装配式技术将从“政策驱动”逐步转向“市场驱动”，最终成为公路工程建设的主流范式。

5 发展建议

为加速公路工程装配式技术的高质量发展，亟需从制度、技术、产业与政策多维度协同发力。首先，应加快构建覆盖设计、生产、运输、安装、检测全过程的技术标准体系，编制通用图集与构造手册，统一接口形式

与连接方式，消除技术壁垒。其次，应强化科研攻关，设立国家级重点研发计划专项，聚焦新型连接技术的可靠性验证、结构长期性能监测、抗震抗疲劳机理等基础性与前沿性问题，夯实技术根基。第三，应推动示范工程建设，在国家重大战略通道如西部陆海新通道、沿边国道等项目中优先采用装配式技术，通过“以点带面”积累可复制的经验。第四，应完善政策激励机制，对采用装配式技术的项目给予审批绿色通道、税费减免、评优加分等实质性支持，扭转“低价中标”对技术创新的抑制效应。最后，应着力培育专业化产业集群，支持龙头企业牵头建设区域性预制构件生产基地，整合设计、制造、施工与运维资源，打造“一站式”服务能力，真正实现产业链的高效协同。

6 结语

公路工程装配式结构施工技术是推动交通基础设施转型升级的战略方向。尽管当前在连接可靠性、成本控制、标准体系等方面仍存挑战，但其在提升质量、缩短工期、绿色低碳等方面的综合优势不可替代。未来，随着新材料、新工艺、智能化技术的深度融合，以及政策与市场的双重驱动，装配式技术将在公路工程中实现从“局部应用”向“系统集成”、从“试点示范”向“规模推广”的跨越，为构建安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化公路网提供坚实支撑。

参考文献

- [1]卢金龙.装配式结构在公路工程中的应用分析[J].西部交通科技,2022,(09):178-179.
- [2]李志侠.山区公路装配式桥梁构件预制拼装技术[J].交通世界,2025,(21):104-106.
- [3]陈鹏,王飞,董浩.装配式道路施工技术在公路工程中的质量控制与效率提升路径[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题.江苏兆港建设工程有限公司;镇江同弘建筑工程有限公司;2025:646-653.
- [4]陶少聪.公路桥梁装配式上部构造施工技术[J].石子科技,2025,(02):54-55.