

装配式公路桥梁结构体系优化与施工关键技术研究

江 旭

中交路桥南方工程有限公司 北京 通州 100027

摘要: 随着我国交通基础设施建设向高质量、绿色化、智能化方向转型升级,装配式桥梁技术因其工厂化预制、现场快速拼装、环境扰动小等优势,成为现代公路桥梁工程的重要发展方向。本文系统梳理了装配式公路桥涵结构体系的发展现状,深入分析了当前主流结构形式(如节段梁、整孔箱梁、 π 型梁、UHPC连接结构等)的技术特点与适用条件;在此基础上,从结构体系整体性、连接构造可靠性、材料性能匹配性及全寿命周期经济性四个维度,提出了结构体系优化的关键路径;重点聚焦于施工阶段的核心技术难题,对高精度预制、智能运输、精准定位、高效连接(特别是干接缝与湿接缝技术)、施工过程控制与监测等关键技术进行了系统阐述。研究表明,通过结构体系协同优化与施工关键技术集成创新,可显著提升装配式桥梁的性能、效率与可持续性,为我国公路桥梁工业化建造提供有力支撑。

关键词: 装配式桥梁; 结构体系优化; 干接缝; 湿接缝; 超高性能混凝土(UHPC); 智能建造; 施工控制

引言

传统现浇混凝土桥梁施工周期长、现场作业量大、质量受环境影响显著、对既有交通和生态环境干扰严重,已难以满足新时代“双碳”目标下基础设施建设的高标准要求。装配式桥梁技术,作为建筑工业化理念在交通领域的延伸,通过将桥梁主要构件在工厂标准化、批量化预制,再运至现场进行机械化快速拼装,实现了“像造汽车一样造桥梁”的愿景。该技术不仅大幅缩短工期、提升工程质量可控性、降低安全风险,更有效减少了现场扬尘、噪音及建筑垃圾,契合绿色低碳发展理念。近年来,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》等政策文件,明确鼓励推广装配式桥梁技术。然而,在推广应用过程中,仍面临结构体系整体性不足、连接节点可靠性存疑、施工精度要求高、成本效益不显著等瓶颈问题。因此,亟需从结构体系顶层设计出发,结合施工工艺创新,开展系统性优化与关键技术攻关。本文旨在系统探讨装配式公路桥梁结构体系的优化策略,并深入剖析其施工过程中的关键技术,以期为工程实践提供理论参考与技术支持。

1 装配式公路桥梁结构体系发展现状与类型分析

装配式桥梁结构体系按构件划分尺度可分为构件级、节段级和整孔级三大类,各类体系在适用跨径、施工效率、结构整体性等方面各有优劣。

1.1 主流结构体系类型

1.1.1 节段预制拼装桥梁

该体系将主梁沿纵向划分为若干标准节段(通常2~4m),在工厂预制后运至现场,采用悬臂拼装或逐跨

拼装方式进行架设。节段间通过预应力钢束(体内或体外)连接成整体。其优点在于构件尺寸小、运输方便、适用于中等及以上跨径(40~200m),且线形控制灵活,特别适合城市高架、山区峡谷等复杂地形。但其施工工序复杂,对节段匹配精度、拼装线形控制及临时支撑要求极高。

1.1.2 整孔预制梁桥

将整跨主梁(如小箱梁、T梁、空心板等)在预制场整体浇筑成型,经养护后整体运输并架设。适用于中小跨径($\leq 40\text{m}$)桥梁,施工速度快、现场作业极少。但受限于运输限界(宽度、高度、重量),跨径越大,运输难度呈指数级增长,且对吊装设备能力要求高。

1.1.3 π 型梁与组合梁体系

π 型梁是一种横截面呈“ π ”形的预制构件,两片 π 梁并置后,顶部现浇桥面板形成整体。该体系自重较轻,便于运输与吊装,适用于城市立交、人行天桥等场景。此外,钢-混凝土组合梁(如钢主梁+预制混凝土桥面板)也属于广义装配式体系,兼具钢结构跨越能力强与混凝土桥面板耐久性好的优点。

1.1.4 新型高性能材料连接体系

近年来,超高性能混凝土(UHPC)因其超高强度($> 150\text{MPa}$)、高韧性、低渗透性等特性,被广泛应用于装配式桥梁的接缝区域。UHPC湿接缝可显著减小接缝宽度(可缩至10cm以内),提升连接刚度与耐久性,甚至实现“等同现浇”性能。此外,胶接缝(Epoxy Joint)、剪力键+预应力干接缝等无模板、免养护连接方式也日益受到关注。

1.2 现存问题分析

尽管装配式桥梁技术已取得显著进展,但在实际工程推广中仍面临一系列共性挑战。首先,大量接缝的存在不可避免地削弱了结构的整体连续性,容易在接缝处形成刚度突变和应力集中,影响结构的长期服役性能。其次,连接节点的可靠性高度依赖于现场施工质量,例如接缝界面的凿毛处理、清洁度、灌浆密实度等细节若控制不当,将直接导致连接失效。再次,当前设计、制造与施工环节之间仍存在信息割裂现象,缺乏有效的协同机制,导致误差在各阶段不断累积,最终影响拼装精度与结构性能^[1]。最后,尽管装配式桥梁在工期和环保方面具有优势,但其初期投入成本(包括专用模具摊销、运输费用、大型吊装设备租赁等)往往高于传统现浇方案,使得部分项目在经济性评估中处于劣势,制约了其大规模应用。

2 装配式桥梁结构体系优化路径

针对上述问题,结构体系的优化不应局限于单一构件或连接节点,而应贯穿“设计—材料—制造—施工”全链条,实现性能、效率与成本的综合平衡。

2.1 提升结构整体性与冗余度

为弥补装配式结构因接缝带来的整体性弱化,应在结构体系层面进行系统性优化。一方面,应合理规划接缝位置,避免将其设置在弯矩或剪力峰值区域,优先布置于反弯点附近,以减小不利内力对连接性能的影响。另一方面,应强化横向连接措施,例如在相邻梁体之间设置横向预应力筋、采用UHPC横向连接带,或引入钢制横梁,从而有效提升桥梁横向整体刚度,改善荷载横向分布性能。此外,为增强结构在极端事件(如地震、撞击)下的安全性,可在关键部位(如墩顶区域)引入冗余设计思想,设置双重传力路径,提高结构的抗连续倒塌能力,确保局部损伤不会引发整体失效。

2.2 创新连接构造与材料匹配

连接构造是装配式桥梁性能的核心。传统湿接缝依赖普通混凝土,存在收缩开裂、养护周期长、模板支拆繁琐等问题。相比之下,UHPC湿接缝技术通过材料性能的跃升,实现了接缝宽度的大幅缩减和力学性能的显著提升。研究表明,合理设计的UHPC接缝其抗弯刚度可达到现浇混凝土的90%以上,且早期强度发展迅速,24小时内即可满足拆模或张拉要求。与此同时,干式连接体系(如预应力干接缝)通过高强螺栓或预应力筋直接压紧预制块体,完全省去现场浇筑环节,极大提升了施工效率^[2]。然而,干接缝对预制精度和拼装控制提出了更高要求。此外,还需关注材料间的热膨胀系数匹配问题,在接缝区采用与主体混凝土性能协调的UHPC或改性砂浆,可有效

减少温度变化引起的界面开裂风险,提升长期耐久性。

2.3 模块化与标准化设计

模块化与标准化是降低装配式桥梁成本、提高生产效率的基础。应推动跨径、梁高、翼缘宽度等关键参数的系列化与模数化,形成覆盖常用跨度的标准化构件库,从而提高模具复用率,摊薄单件成本。同时,对预埋件(如剪力钉、预应力管道定位器、吊装孔等)的位置、规格和接口形式进行统一规定,确保不同厂家生产的构件在现场能够“即插即用”,避免因接口不匹配导致的返工或延误。在此基础上,全面推行基于BIM(建筑信息模型)的正向设计流程,将结构、钢筋、预应力、预埋件等信息集成于统一数字模型中,并无缝传递至预制厂和施工现场,实现设计—制造—施工的信息贯通,从根本上减少误差源。

2.4 全寿命周期成本优化

装配式桥梁的经济性评价不能仅关注初期建设成本,而应立足于全寿命周期视角。一方面,应通过优化接缝防水构造、提升混凝土保护层质量、采用耐腐蚀钢筋或涂层等措施,延长结构使用寿命,降低后期维护与修复成本。另一方面,应引入碳足迹评估方法,量化预制、运输、拼装等各环节的碳排放,优选低碳材料与施工方案,响应国家“双碳”战略。此外,可借鉴价值工程(Value Engineering, VE)理念,在确保结构安全与功能需求的前提下,通过系统性的功能分析与成本对比,识别非必要成本项,寻求性能与造价的最佳平衡点,从而提升装配式桥梁的整体经济竞争力。

3 装配式桥梁施工关键技术

施工是装配式桥梁从设计图纸走向实体结构的关键环节,其核心在于实现“精准”与“高效”的统一。

3.1 高精度预制技术

预制环节的质量直接决定了现场拼装的成败。现代智能预制场普遍采用数控液压模板系统,可根据设计参数自动调节模板尺寸,确保构件几何尺寸偏差控制在 ± 1 毫米以内。同时,为控制混凝土早期收缩与徐变,普遍应用蒸汽养护结合智能温控系统,实现温度曲线的精准调控,保障混凝土均匀硬化^[3]。在质量检测方面,三维激光扫描技术被广泛用于对预制构件进行全尺寸数字化检测,生成高精度点云模型,并与BIM设计模型进行比对,及时发现偏差,建立构件的“数字孪生”档案,为后续运输与拼装提供数据支撑。

3.2 智能化运输与吊装

大型预制构件的运输是装配式施工的难点之一。为此,工程中常采用多轴线液压平板车,其具备自动调平、

独立转向和载荷分配功能,能够适应复杂路况和狭窄转弯半径。在运输前,利用BIM与GIS(地理信息系统)融合技术进行路径模拟与优化,提前识别限高、限重、弯道半径等潜在障碍,制定最优运输方案。吊装环节则依赖于大型履带吊或架桥机,配合GPS/北斗定位与倾角传感器,实时监控梁体的空间姿态,实现毫米级的精准就位,有效避免碰撞和安装误差。

3.3 精准定位与姿态调整

现场拼装的精度控制是确保结构整体性的关键。施工前需建立高精度三维测量控制网,采用高精度全站仪或激光跟踪仪对墩台、支座及临时支撑进行精确定位。在梁体就位过程中,通过在支座或临时支架上设置液压千斤顶、楔形调平块等微调装置,可对梁体的平面位置、高程及转角进行六自由度精细调整。此外,借助数字孪生技术,在虚拟环境中预先模拟整个拼装过程,识别潜在的干涉点和误差累积路径,为现场施工提供可视化指导和风险预警。

3.4 高效可靠连接技术

连接技术是装配式桥梁施工的核心。干接缝技术主要包括胶接缝和预应力干接缝。胶接缝在预制节段匹配面上涂刷环氧树脂胶,依靠胶体粘接力与预加压力共同传递剪力,要求界面平整度控制在1毫米以内且绝对清洁干燥。预应力干接缝则通过张拉体内或体外预应力筋,使相邻节段接触面产生足够摩擦力以抵抗剪切,施工速度快,但对节段几何匹配精度要求极为严苛^[4]。相比之下,湿接缝技术虽需现场支模、绑扎钢筋和浇筑,但通过引入UHPC材料,可将接缝宽度大幅缩减至10-20厘米,甚至取消箍筋,且UHPC早期强度高,24小时内即可达到拆模强度,显著缩短工期。对于竖向连接(如桥墩与盖梁),灌浆套筒连接技术通过高强无收缩灌浆料实现钢筋的可靠连接,已在多个工程中验证其高可靠性。

3.5 施工过程智能监控与质量保障

为确保施工全过程可控、可溯,现代装配式桥梁工

程广泛部署物联网(IoT)传感网络。在关键节点布设应变计、倾角仪、温湿度传感器等设备,实时采集结构受力与环境数据,并通过无线传输至云端管理平台。无人机巡检技术则用于高空接缝质量检查、线形复核及安全巡查,提升检查效率与覆盖范围。更重要的是,引入区块链技术构建质量追溯系统,将原材料检测报告、预制过程参数、运输轨迹、拼装记录等关键数据上链存储,确保信息不可篡改、全程可追溯,为工程质量终身责任制提供技术保障。

4 结语

本文系统探究装配式公路桥梁结构体系优化与施工关键技术,得出重要结论。结构体系优化要从整体性等多维度协同,推动设计-材料-施工一体化集成。UHPC湿接缝等新型连接技术,借材料与构造创新提升接缝性能与施工效率,是实现“等同现浇”的关键。高精度预制等技术构成现代施工闭环,保障质量与安全。虽初期投入高,但从全寿命周期看,装配式桥梁综合效益显著。未来,其将向更高装配率等方向发展,装配范围延伸至基础;人工智能等深度融合推动“无人化工地”成真;绿色技术降低环境负荷;基于智能感知等的韧性设计赋予桥梁更强抵御与恢复能力。

参考文献

- [1]韩鹏翔.公路桥梁装配式施工技术的质量控制要点与优化策略研究[J].中国住宅设施,2025,(06):124-126.
- [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]陶少聪.公路桥梁装配式上部构造施工技术[J].石河子科技,2025,(02):54-55.
- [4]林浩.基于预制装配式技术的公路桥梁建设效率提升策略研究[C]//广西信息化发展组织联合会.第四届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集.青岛新世纪路桥工程有限公司,2024:193-195.