

装配式混凝土桥梁结构连接节点力学性能 及快速施工技术研究

王祥海

广西桂建工程质量检测有限公司, 广西 钦州 535000

DOI:10.61369/ERA.2026030020

摘要 : 本文围绕装配式混凝土桥梁结构连接节点力学性能及快速施工技术展开系统研究, 从连接介质、受力形式、构造位置三个维度对连接节点进行分类, 剖析灌浆套筒、预应力拼接、榫卯连接等典型节点的构造设计要点, 探究不同连接方式下节点的传力机理与破坏模式。基于 ABAQUS、ANSYS 等有限元软件构建节点数值模型, 通过足尺或缩尺试验完成模型验证与校准, 采用控制变量法开展参数化分析, 明确混凝土强度、灌浆料等级、套筒长度、灌浆密实度等关键参数对节点承载力、刚度等力学指标的影响规律。从精密预制构件生产、高效吊装与拼装、连接节点快速施工工艺三个层面构建快速施工技术体系, 形成模具精准控制、智能化定位拼装、自动化灌浆张拉等关键技术方案。

关键词 : 装配式混凝土桥梁; 连接节点; 力学性能; 传力机理

Research on Mechanical Properties and Rapid Construction Techniques for Connection Joints in Prefabricated Concrete Bridge Structures

Wang Xianghai

Guangxi Guijian Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Qinzhou, Guangxi 535000

Abstract : This paper presents a systematic study on the mechanical properties and rapid construction techniques for connection joints in prefabricated concrete bridge structures. The connection joints are classified based on three dimensions: connection medium, stress form, and structural location. The design essentials of typical joints, such as grouted sleeve connections, prestressed splicing, and mortise-tenon connections, are analyzed. The force transfer mechanisms and failure modes of joints under different connection methods are explored. Numerical models of the joints are constructed using finite element software such as ABAQUS and ANSYS, and the models are validated and calibrated through full-scale or scaled-down experiments. Parametric analysis is conducted using the controlled variable method to clarify the influence of key parameters, including concrete strength, grout grade, sleeve length, and grout compactness, on the mechanical properties such as load-bearing capacity and stiffness of the joints. A rapid construction technique system is established from three aspects: precise prefabricated component production, efficient lifting and assembly, and rapid construction techniques for connection joints. Key technical solutions are developed, including precise mold control, intelligent positioning and assembly, and automated grouting and tensioning.

Keywords : prefabricated concrete bridge; connection joint; mechanical property; force transfer mechanism

引言

随着装配式技术在中小跨度桥梁中的广泛应用及向大跨度桥梁领域的延伸, 结构整体性能与施工效率的核心制约因素逐渐聚焦于连接节点。作为预制构件传力与协同工作的枢纽, 连接节点的力学性能直接决定桥梁结构的承载能力、刚度、耐久性及抗灾能力, 其施工效率则直接影响工程建设周期与综合成本, 因此成为装配式混凝土桥梁技术研究的核心与难点。当前装配式混凝土桥梁连接节点形式日趋多样, 湿连接、干连接及半干连接各有优劣, 不同节点的构造设计、传力机理及破坏模式存在显著差异, 在复杂荷载与施工偏差的耦合影响下, 易出现界面剥离、灌浆不密实、螺栓失效、节点开裂等问题, 严重时可能引发结构安全隐患。同时, 现有研究多侧重单一类型节点的力学性能分析或孤立施工工艺优化, 对节点力学性能与快速施工技术的协同适配性研究不足, 数值模拟模型的工程适用性有待进一步验证, 关键设计参数与施工工艺的量化匹配关系尚未完全明确, 难以满足装配式桥梁高效、安全建设的实际需求。为破解上述难题, 本文围绕装配式混凝土桥梁结构连接节点力学性能及快速施工技术开展系统性研究。

一、装配式桥梁连接节点类型与受力机理分析

(一) 装配式桥梁连接节点的分类

任何一个成功的设计构件都需要合理的选择材料,充分利用材料的性能,使各种材料各尽其能、协调工作、充分发挥结构的整体作用^[1]。装配式混凝土桥梁连接节点按连接介质可分为湿连接、干连接与半干连接三类,湿连接依赖胶凝材料,整体性与刚度大但施工慢,多用于主梁与桥墩;干连接通过机械咬合或螺栓连接,施工快捷可拆卸,适用于临时工程但整体性较弱;半干连接结合两者优势,兼顾效率与性能,常见于中等跨度桥梁。按受力形式分为受弯、受压、受拉及复合受力节点,其中主梁多承受复合受力,桥墩基础则以受压受弯为主。按构造位置则可分为主梁间、主梁与桥墩、桥墩与基础及附属结构连接,需针对不同位置的受力需求进行针对性设计。

(二) 典型连接节点构造设计

典型装配式桥梁连接节点的构造设计需满足受力传递、施工便捷性与耐久性要求,结合不同节点类型的性能特点优化构造细节^[2]。灌浆套筒连接作为湿连接核心,通过预埋套筒灌注高强料利用粘结传力,需控制套筒尺寸与锚固深度以确保密实,常用于主梁纵拼及桥墩连接;预应力拼接节点作为干连接代表,通过预留孔道穿束张拉依靠挤压力传力,需合理设置孔道与锚固以满足抗裂及刚度要求,适用于大跨度梁体拼接;榫卯连接则通过端头榫槽咬合定位并辅以灌浆或螺栓加固,需优化咬合尺寸确保抗剪抗扭及拼装便捷,多用于中小跨板桥连接^[3]。

(三) 节点传力机理与破坏模式分析

装配式桥梁连接节点的传力机理取决于连接方式与构造设计,核心是实现构件间力的有效传递,确保结构整体受力协调^[4]。湿连接依靠灌浆料与钢筋的粘结及材料强度传力,需防范界面剥离;干连接通过接触挤压或机械连接(如预应力、螺栓)传力,关键在于摩擦系数及螺栓布置;半干连接则结合两者优势^[5]。节点破坏模式包括粘结剥离、钢筋屈服、灌浆压溃、螺栓剪切及滑移等,受构造、材料及荷载影响。通过优化构造、提升材料性能及控制施工质量,可确保节点传力可靠与结构安全。

二、连接节点数值模拟与参数化分析

(一) 有限元模型的建立

基于 ABAQUS、ANSYS 等有限元软件构建装配式桥梁连接节点数值模型,需结合节点构造与受力特性,合理选取单元类型、材料本构、边界条件及荷载施加方式,保障模型贴合实际力学行为^[6]。单元类型上,预制混凝土构件与灌浆料用 C3D8R 等实体单元,钢筋以 T3D2 桁架单元通过 Embedded 技术嵌入,螺栓、套筒等金属构件用实体单元。材料本构需匹配工程性能,混凝土与灌浆料采用损伤塑性模型,输入抗压、抗拉强度等参数考虑损伤;钢筋用双线性弹塑性模型模拟屈服后塑性变形;金属连接件采用理想弹塑性模型考虑塑性破坏^[7]。边界条件与荷载施加还原实际场景,按节点位置设定约束,分级施加轴力、弯矩等荷载或位

移加载至节点破坏,获取完整荷载-位移曲线。模型构建中简化次要细节以减计算量,同时保证核心受力部位精度。

(二) 模型验证与校准

为保证数值模型可靠性,需结合室内试验数据对其验证校准,将模型计算值与试验值的误差控制在 10% 以内^[8]。试验需采用与数值模型一致的节点构造、材料参数及加载方案,制作足尺或缩尺试件,通过静力、疲劳加载获取节点承载力、刚度、裂缝发展及破坏形态等数据。模型验证从三方面开展,对比极限承载力,调整混凝土损伤因子、钢筋粘结强度等材料本构参数;拟合荷载-位移曲线,优化摩擦系数、粘结刚度等界面接触参数,确保曲线各阶段趋势一致;对比裂缝分布与破坏位置,调整单元网格精度并修正应力集中区域构造模拟,使破坏模式与实际吻合^[9]。校准后的模型需能精准预测节点在不同荷载工况下的力学响应,为后续参数化分析与优化设计提供可靠支撑。若计算结果与试验数据偏差较大,需排查单元类型、边界条件、材料参数等环节并修正,直至满足验证标准。

(三) 参数化扩展分析

基于验证数值模型,开展参数化扩展分析,明确关键设计参数对连接节点力学性能的影响规律,为节点优化设计提供依据^[10]。参数选取结合工程实际与构造特点,聚焦材料性能(混凝土 C40-C60、灌浆料 CGM-100 至 CGM-150、钢筋 HRB400-HRB600)、构造尺寸(套筒长度 200-400mm 等)、施工参数(灌浆密实度 80%-100% 等)三类,采用控制变量法获取节点力学性能指标。结果显示:混凝土与灌浆料强度提升显著优化承载力及刚度(CGM-100 升至 CGM-150 时承载力提升 25%-30%);套筒最优长度为钢筋直径 18-22 倍,锚固长度需满足构造要求;合理提升预应力张拉值增强整体性,过量易致开裂;灌浆密实度低于 90% 时性能下降明显。据此提出参数合理取值建议,为装配式桥梁节点设计提供量化依据,实现力学性能与经济性协同优化。

三、装配式桥梁快速施工关键技术研究

(一) 精密预制构件生产技术

精密预制构件是装配式桥梁快速施工与质量管控的核心基础,其生产精度直接决定现场装配效率与节点力学性能。基于工厂标准化生产模式,构建模具精准控制-原材料质量管控-生产过程智能化监测的精密生产技术体系。模具采用模块化可调式高强度钢结构,经三维扫描检测将尺寸偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内,同步预留构件收缩变形量;原材料选用高强高耐久混凝土(优化配合比,掺入矿物掺合料与高效减水剂),钢筋、套筒等预埋件经进场力学性能检测,灌浆料采用早强高强微膨胀型,初凝 4-6 小时、终凝不超 12 小时;生产环节依托自动化布料与变频振动设备保障混凝土浇筑密实度,通过无线传感器监测养护温湿度,采用蒸汽或恒温养护加速强度达标,构件出厂前经三维扫描、回弹检测验收并标注定位标识,为现场精准装配提供支撑。

(二) 高效吊装与拼装技术

高效吊装与拼装技术是提升装配式桥梁施工效率的核心,需

结合构件重量、跨度及现场工况优化方案与工艺，实现构件精准对接、快速固定。吊装设备需按预制构件类型（主梁、桥墩柱等）选用塔式起重机、汽车起重机或架桥机，配套专用吊具并增设缓冲垫，采用双点或四点吊装方式，避免构件受力不均开裂，保障吊装平稳与构件表面质量。拼装定位采用智能化定位+人工微调模式，依托GPS、激光测距仪及BIM技术构建定位体系，将轴线偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 、高程偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ ；关键部位预设定位销、榫槽等导向结构，辅以千斤顶、手拉葫芦实时微调，确保对接精准。施工流程采用流水作业，多跨桥梁运用架桥机逐跨拼装技术，实现吊装与拼装同步推进，缩短施工周期。同时需划定吊装警戒区域，配备专职安全员，落实安全防护措施。

（三）连接节点快速施工工艺

针对不同类型连接节点特性，优化施工工艺并研发快速施工技术，实现节点连接高效化、标准化。湿连接节点以灌浆工艺优化为核心，采用高压灌浆设备配合预埋孔道，结合早强型灌浆料与蒸汽养护技术，将施工周期缩短30%以上；以灌浆套筒节点为例，采用0.3–0.5MPa自动化灌浆设备，搭配流动传感器监测灌浆过程，可有效避免空鼓、漏灌问题。干连接节点聚焦螺栓紧固与预应力张拉优化，运用电动扭矩扳手、液压张拉设备等自动化工具提升工效与质量；通过螺栓群同步紧固技术及扭矩传感器，保障螺栓受力均匀、紧固达标；预应力拼接节点采用两端同步张拉技术优化张拉顺序，缩短张拉时间，张拉后及时锚固封锚。半干

连接节点融合干湿连接优势，先以螺栓、定位销等机械连接实现构件快速固定并提供临时支撑，再开展局部灌浆，无需等待灌浆料硬化即可推进后续工序；同步研发便携式灌浆枪、快速定位夹具等专用机具，简化操作流程，降低对人工技能的依赖。

四、结束语

本文针对装配式混凝土桥梁连接节点力学性能与快速施工技术的核心问题，从节点分类、受力机理、数值模拟及施工技术四个维度开展系统性研究，形成了较为完善的理论分析与技术方案。明确了湿连接、干连接、半干连接等不同类型节点的构造特点与传力规律，厘清了混凝土强度、灌浆料等级、套筒尺寸等关键参数对节点力学性能的影响机制，验证了有限元数值模型在节点性能预测中的可靠性，构建了涵盖精密预制、高效拼装、节点快速连接的一体化施工技术体系，可为工程实践提供直接指导。未来可结合长期性能试验，完善考虑环境因素的节点力学性能演化模型，提升研究成果的长期适用性；聚焦大跨度、复杂工况下装配式桥梁节点的设计与施工技术，拓展研究范围；融合智能化监测技术，开发节点施工质量实时管控与性能长期监测系统，实现设计、施工、运维全生命周期协同优化。后续研究将持续完善装配式混凝土桥梁连接节点技术体系，为交通基础设施高质量建设提供更全面的支撑。

参考文献

- [1] 王天. 结构损伤对大跨度铁路钢-混凝土组合桁架桥力学性能的影响研究[D]. 兰州交通大学, 2013. DOI:10.7666/d.Y2384693.
- [2] 林帮军, 王近兴, 毛力辉, 等. 装配式梁桥三角形钢横梁隔梁栓接节点设计与力学性能分析[J]. 福建交通科技, 2025(7): 68–73.
- [3] 陈晓飞, 熊文, 宋晓东, 等. 装配式桥梁下部结构接头力学特性分析[J]. 公路, 2022, 67(7): 176–183.
- [4] 曹紫龙. 装配式桥梁节点病害与灌浆材料力学性能试验研究[D]. 河北: 河北大学, 2022.
- [5] 陈广飞. 基于不同带肋角钢连接的梁柱半刚性节点力学性能研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2024.
- [6] 史战萍. 桥梁满堂支架节点力学性能研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2016.
- [7] 周黎军, 赵启林, 李飞, 等. FRP轻量化应急桥模块间连接节点力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(14): 99–104, 107. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20221615.
- [8] 孟祥勇, 王海军, 武加强. 预制系梁与柱式墩连接节点力学性能分析[J]. 建筑技术开发, 2024, 51(6): 128–131. DOI:10.3969/j.issn.1001-523X.2024.06.046.
- [9] 赵小童. 大跨度钢筋混凝土桥梁施工满堂支架结构力学分析[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2021.
- [10] 陈鸿炜, 苏庆田, 吴冲, 等. 空间钻石型钢塔梁柱连接节点力学特性分析[J]. 结构工程师, 2014(6): 61–66. DOI:10.3969/j.issn.1005-0159.2014.06.009.