

# 桥梁工程大跨双塔钢混组合梁施工控制技术分析

栗鹏程

四川公路桥梁建设集团有限公司 四川成都 610000

**摘要:** 大跨双塔钢-混凝土组合桥梁因其跨越力大、自重轻、施工方便等优点,已成为桥梁工程中一种重要的结构型式。该桥型兼具钢结构高强、混凝土经济等优点,在跨江跨海等重大交通枢纽工程中得到了广泛地应用。但由于结构体系及施工工艺的复杂性,使得结构在施工过程中受力状态不断变化,对施工精度提出了更高的要求。因此,开展大跨度双塔钢混凝土组合梁的施工控制技术研究,对于保证工程质量,保证施工安全,提高桥梁整体受力具有重要意义。

**关键词:** 桥梁工程; 大跨双塔钢混组合梁; 施工控制技术

针对大跨双塔钢-混凝土组合梁的施工控制技术,国内外学者进行了大量的研究,包括结构分析、施工监测和控制等。尽管已有研究取得了一些成果,但是随着桥梁建设向大跨度、复杂程度的方向发展,其施工过程中的非线性效应、环境效应等问题日益突出,对施工控制技术提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。与此同时,新材料、新技术不断涌现,对其施工控制技术提出了更高的要求。对大跨双塔钢-混凝土组合梁施工控制技术进行系统剖析,探索其优化路径,既是我国桥梁工程技术发展的内在要求,也是推动我国交通基础设施建设向高质量发展的重要举措。

## 一、大跨双塔钢混组合梁施工关键技术分析

### 1. 钢梁分段吊装与线形控制

大跨双塔钢-混凝土组合梁桥施工中,钢梁分段吊装和线形控制是其关键技术。钢梁一般是在厂内预制,在工地上分段吊装,钢梁自重、结构复杂,对吊装过程中受力分析及施工方案设计提出了更高的要求。为了保证吊装过程的安全稳定,必须综合考虑风荷载、斜拉索受力及钢梁弹性变形等因素。在此基础上,利用高精度量测控制系统,实时监控钢梁的安装位置及位姿,结合有限元分析,预测及调整施工过程中的变形<sup>[2]</sup>。通过精确吊装及线形控制,有效降低施工误差,保证钢梁安装后满足设计要求,为后续施工奠定基础。

### 2. 混凝土桥面板现浇施工

现浇混凝土桥面板是一种重要的结构形式,其施工质量直接关系到桥梁的整体工作性能及耐久性。现浇桥

面板的关键是模板体系的稳定,配合比的设计和振捣的控制。模板体系应具有足够的刚度及稳定性能,能抵抗混凝土侧压力及施工荷载。在混凝土配合比设计中,应综合考虑抗裂、耐久、强度等方面的要求。在浇筑时,要严格控制振捣时间、振捣方式,防止过振、漏振,保证混凝土密实均匀。另外,混凝土养护也是施工过程中的一个重要环节,合理的养护措施能有效地降低混凝土的收缩开裂。为充分展示混凝土桥面板现浇施工的关键参数数据,可参考表1:

表1 混凝土桥面板施工参数的控制

参数名称	控制指标	单位	备注
水灰比	0.40-0.45	-	控制混凝土强度和耐久性
坍落度	180-220	mm	确保混凝土流动性
振捣时间	20-30	s	每次振捣时间
养护温度	20-30	℃	保持混凝土表面湿润
养护时间	7-14	d	确保混凝土强度发展

### 3. 钢混界面剪力连接施工

钢-混凝土界面剪力连接是钢-混凝土组合梁施工的核心步骤,其施工质量直接影响钢-混凝土组合梁的协同工作性能。抗剪节点一般采用剪力钉、剪力键等抗剪构件。在施工时,要保证接头的位置、间距、角度等精度,而且连接件的焊接质量是关键,可采用超声等无损检测手段严格控制焊接质量。在浇筑混凝土时,为保证接头和混凝土的粘结强度,接头处的混凝土要足够密实<sup>[3]</sup>。而且还需设计合理的施工缝、伸缩缝,以降低温度应力,高质量抗剪连接施工可有效改善其整体受力性能,保证其长期服役安全可靠。

## 二、桥梁工程大跨双塔钢混组合梁施工控制技术的优化应用策略

### 1. 精细化施工模拟与预应力优化调整

大跨度双塔钢-混凝土组合桥梁施工期间, 结构体系不断变换, 应力和变形呈现动态变化的特点, 采用有限元方法对其进行分析。在精细化施工模拟中, 能以有限元理论为基础, 构建高精度三维有限元模型, 对施工全过程进行分区, 模拟各阶段荷载作用、边界条件变化和材料性能演化, 实现对结构响应的准确预测<sup>[4]</sup>。预应力是控制梁变形和内力的关键因素, 以结构力学和材料力学为基础, 综合考虑混凝土收缩徐变、温度效应、钢混结合面滑移等因素, 调节预应力筋布置方式、张拉顺序和张拉力大小, 可实现结构受力更加合理, 降低施工风险, 保证成桥后结构受力满足设计要求。

在具体实施过程中, 可利用Midas Civil、ANSYS等专业有限元软件, 根据设计图纸和施工方案, 建立包含钢梁、桥面板、桥墩等构件的精细化三维有限元模型。在此基础上, 细化预应力混凝土结构体系, 即钢梁架设, 混凝土浇筑, 预应力张拉, 每一道工序都设置相应的受力状态, 例如: 钢梁自重按 $78.5 \text{ kN/m}^3$ 计算, 混凝土浇筑时考虑分层浇筑动荷载。数值模拟严格按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362-2018)规定, 设定混凝土弹性模量随龄期增长的参数, 采用普通硅酸盐水泥配制C50混凝土, 其3天弹性模量分别取 $2.8 \times 10^4 \text{ MPa}$ 、28 d分别为 $3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$ , 在预应力优化方面, 基于遗传算法, 以梁跨中挠度不大于 $L/800$  ( $L$ 为梁跨径), 最大压应力不大于 $23.1 \text{ MPa}$ 的约束条件, 对预应力筋的线形、张拉顺序和张拉力进行调整。例如, 在一主跨300米的大跨度双塔钢-混凝土组合梁, 通过优化设计, 将原设计的两端对称张拉调整为先张拉塔根、再张拉跨中区束, 张拉力由 $1395 \text{ MPa}$ 调整为分阶段张拉, 第一级张拉至 $1200 \text{ MPa}$ , 最终张拉至 $1395 \text{ MPa}$ , 从而有效地控制梁的上拱度, 最终偏差小于 $10 \text{ mm}$ , 满足JTG/T 3650-2020的《公路桥涵施工技术规范》的要求。

### 2. 智能监测系统与数据驱动决策支持

将传感技术、物联网、大数据和人工智能等理论与方法相结合, 通过在桥梁关键部位布设传感器, 实时获取结构的应力、应变、位移、温度等信息。数据驱动的决策支持是基于机器学习算法, 深度挖掘海量监测数据, 分析数据之间的相关性和变化规律, 并对结构状态的演变趋势进行预测<sup>[5]</sup>。其核心是充分挖掘数据的时效性和

关联性, 建立科学的决策模型, 实现监测数据向施工控制指令的转换, 由“经验决策”到“数据决策”, 提高施工控制的精度和时效性。

在具体实施过程中, 可在钢梁关键截面布置光纤光栅应变传感器, 确保测量精度达到 $\pm 1 \mu \varepsilon$ , 量程 $\pm 15000 \mu \varepsilon$ , 实现对钢梁应力变化的监控。在桥墩顶部及梁体关键节点处分别安装北斗卫星定位接收机和静力水准仪, 实现水平 $\pm 2 \text{ mm}$ 和竖向 $\pm 1 \text{ mm}$ 的位移监测, 实时获取结构位移数据, 还可利用5G通信技术, 构建物联网传输网络, 保证数据传输延时小于1秒。同时, 采用Python语言与TensorFlow框架相结合的方法, 建立基于LSTM神经网络的预测模型。例如, 在一座大跨度双塔钢-混凝土组合梁施工中, 应采集施工前3个月的应力、位移和温度等监测数据, 将模型预报误差控制在5%以内。当系统监测到某钢梁截面应力达设计值85% (如 $180 \text{ MPa}$ , 监控值 $153 \text{ MPa}$ )时, 系统会自动启动预警机制, 并调用历史相似条件下的数据, 生成暂停加载、局部加固等调整方案, 为施工决策提供可靠依据。

### 3. 高精度定位与安装技术革新

为保证大跨双塔钢-混凝土组合梁的施工质量, 高精度的定位和安装工艺是关键。在复杂环境条件下, 传统定位方法很难达到较高的精度要求, 以全站仪、GPS、北斗等现代定位技术为基础, 配合自动化测量设备, 可达到毫米级精度。施工工艺的革新主要体现在吊装设备的自动化、智能化安装系统等方面。这些技术可以有效地提高施工效率, 减少人为误差, 保证施工安全稳定<sup>[6]</sup>。

在具体实施过程中, 可采用北斗卫星定位系统和惯导设备相结合的方法进行钢梁节段吊装。将双频多星座北斗接收机安装于钢梁节段上, 可实现 $\pm 10$ 毫米的水平定位和 $\pm 20$ 毫米的高程定位; 同时采用惯导系统对卫星信号相互遮挡造成的定位误差进行实时校正。采用全站仪配合全站仪, 以 $0.5''$ 的角度精度、测距精度 $\pm (1 \text{ 毫米} + 1 \text{ ppm} \times D)$  ( $D$ 是测距)来复核钢梁节段的平面位置和高程。如在一座大跨度双塔钢-混凝土组合梁的施工, 可先采用北斗定位系统对节段进行粗定位 (误差控制在 $\pm 5 \text{ cm}$ 以内), 然后用全站仪精确测量, 再用液压千斤顶和缆风绳对节段进行微调。该方法可满足GB 50205-2020《钢结构工程施工质量验收标准》的要求, 对相邻钢梁节段进行拼接, 控制界面错边、轴线偏差不大于3毫米、高程误差小于5毫米。针对桥面板的安装, 可利用三维激光扫描技术, 对预制拼装的精度达到 $0.1 \text{ mm}$ , 并

将扫描数据与设计模型进行对比,提前对桥面板的位置进行调整,以保证安装后的桥面平整度误差小于3 mm。

#### 4. 混凝土性能优化与浇筑技术创新

在大跨双塔钢-混凝土组合梁施工过程中,混凝土力学性能的优化是关键。高性能混凝土(HPC)可显著提高梁体抗压、抗渗及耐久性能,在混凝土中加入适量的矿物掺合料,可有效地提高混凝土的工作性能及力学性能。同时,浇筑技术的革新也是十分重要的,采用分层浇筑法和跳仓浇筑法,可有效地减小温度、收缩裂缝的产生。同时,采用智能振捣技术及温度实时监控系統,可保证混凝土的密实度及温度控制,进一步提高混凝土质量。对混凝土性能进行优化和浇筑工艺的创新,不仅可以改善结构性能,而且可以延长桥梁使用寿命,减少后期维修费用。

在具体实施过程中,针对大跨度双塔钢-混凝土组合梁桥,可采用“双掺”的方法,即用Ⅱ级粉煤灰(15~20%)和矿渣微粉(20~25%)取代水泥,来降低混凝土的水化热。粗骨料粒径为5~25 mm,细骨料粒径为2.6~2.9,细砂含量为38%~42%。并采用高效减水剂控制坍落度160~200 mm,膨胀度 $\geq 500$  mm,满足JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》的要求。同时,还对浇筑工艺进行了创新,采取分层、分段浇筑的方法,每层浇筑厚度控制在30~50 cm之间。例如,在一座大跨度双塔钢-混凝土组合梁桥施工中,可采用由跨中部向两端对称浇筑混凝土的方法,将浇筑速度控制在30~50 m<sup>3</sup>/h。在混凝土浇筑过程中,采用预先埋设的温度传感器对混凝土内部温度进行监测,当内外温差大于25℃时,采用水冷却循环系统降温。混凝土浇筑完毕后,立即用土工织物覆盖,洒水养护,最少要养护14天,保证混凝土的强度增长达到设计标准,28天的抗压强度达到C50,并且弹性模量不小于 $3.45 \times 10^4$  MPa。

#### 5. 环境友好型施工管理与资源循环利用

环境友好型建设管理在可持续发展理念的指导下,遵循生态环境保护的原则,对施工组织设计进行优化,采用环保施工工艺,降低施工过程中的噪声、粉尘、污水等污染物的排放。资源循环利用以循环经济理论为基

础,对建筑废物、水等进行回收处理和再利用,提高资源利用率,减少工程建设对环境的影响,达到经济和环境效益的统一。

在具体实施过程中,可在施工现场设置不少于2.5米的围篱,并在围篱上安装喷雾降尘设备,每5米设置1个喷头,喷雾压力不小于0.3 MPa,使粉尘的浓度得到有效地降低,并采用电液锤等低噪声施工设备,噪声比传统的柴油打桩机低20~30分贝。同时,在施工现场设置沉淀池和隔油池,对施工废水进行沉淀和隔油处理,使其达到GB8978—1996《污水综合排放标准》三级标准后排放。此外,还可从资源回收角度出发,对拆卸下来的模板和脚手架等钢材进行分类回收,经过机械加工制成临时建筑构件,提升回收率,达到绿色施工的目的。

#### 结束语

综上所述,大跨双塔钢-混凝土组合梁的施工控制技术是保证工程质量和安全的核心内容,对其进行研究和应用具有重要的意义。科学、合理的施工控制方法,可以有效降低施工风险,保证结构的受力达到设计要求,提高桥梁的长期服役性能。随着智能感知、大数据、人工智能等技术的深入发展,施工控制将向智能化、精准化和自动化方向发展。这些措施的实施将为大跨双塔钢-混凝土组合梁桥的建设提供技术支撑,促进我国交通基础设施建设的新跨越。

#### 参考文献

- [1] 彭志明. 桥梁工程大跨双塔钢混组合梁施工控制技术[J]. 中国设备工程, 2024, (21): 5-7.
- [2] 侯智. 桥梁施工中大跨径连续刚构线性控制技术分析[J]. 产品可靠性报告, 2024, (01): 91-93.
- [3] 陈思艳. 桥梁工程大跨双塔钢混组合梁施工控制技术[J]. 建筑技术开发, 2024, 51(01): 111-114.
- [4] 周柏宇, 彭林. 高墩大跨径连续刚构桥梁施工线形控制技术[J]. 交通世界, 2023, (19): 178-180.
- [5] 段东东. 大跨度铁路桥梁预应力施工控制技术研究[J]. 运输经理世界, 2023, (10): 127-129.