

大跨度桥梁悬臂浇筑施工关键技术及质量控制

杨 洋, 蔡 毅*

(四川公路桥梁建设集团有限公司大桥工程分公司, 四川 成都 610031)

摘 要 悬臂浇筑施工因受力复杂, 对施工技术和质量控制要求极高。基于此, 本文围绕大跨度桥梁悬臂浇筑施工的关键技术展开分析, 同时构建涵盖材料控制、工序管理、线形应力控制及合龙段施工的质量控制体系。落实全过程精细化管控措施, 旨在借助精细化管控提高成桥线形精度并保证结构受力安全, 为同类工程提供可靠技术支撑, 以保障桥梁结构安全、施工效率及长期使用性能, 实现大跨度桥梁悬臂施工的规范化管理。

关键词 大跨度桥梁; 悬臂浇筑; 挂篮; 分节段悬臂浇筑; 预应力张拉

中图分类号: U445.466

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.23.019

0 引言

大跨度桥梁是交通基础设施的重要组成部分, 其结构跨度大、受力复杂, 对施工技术提出了极高要求。悬臂浇筑法因施工灵活、对支撑依赖少而被广泛应用于大跨度桥梁建设中, 但施工过程中存在混凝土裂缝、位移偏差等问题。因此, 深入研究悬臂浇筑施工的关键技术及质量控制方法, 对于提升工程质量具有重要意义, 也能为类似大跨度桥梁施工提供可借鉴的技术参考。

1 大跨度桥梁悬臂浇筑施工概述

1.1 大跨度桥梁类型

大跨度预应力混凝土桥梁主要包括连续梁桥与连续刚构桥两类结构形式。连续梁桥在墩顶设有支座, 主梁利用支座将荷载传递至桥墩, 结构受力明确, 温度变形约束较小; 而连续刚构桥则将主梁与桥墩固结为整体, 取消墩顶支座, 形成墩梁共同受力体系, 提高桥梁整体刚度, 减小主梁正弯矩峰值, 尤其适用于高墩大跨度桥梁。

1.2 悬臂浇筑施工原理

悬臂浇筑施工是一种自支撑施工方法, 适用于大跨度桥梁施工。其核心原理在于通过悬臂梁段逐步伸展, 实现桥梁结构从支座向跨中延伸的施工过程。施工起始于桥墩或支座处, 利用预制或现浇段构建悬臂结构, 悬臂梁自身承受自重和施工荷载, 同时借助支架、托架及预应力钢筋形成受力体系, 保证结构在施工过程中保持稳定性^[1]。在浇筑过程中, 施工顺序遵循从支座向前逐段延伸的原则, 每浇筑一段混凝土, 立即

进行养护, 待混凝土强度及弹性模量达到设计要求后, 进行预应力张拉, 以控制悬臂梁挠度和应力发展。凭借科学布置施工缝和分段荷载控制, 结合精确测量和变形监测, 实现悬臂梁段连续延伸, 同时保证结构整体受力安全和施工精度, 最终形成连续受力体系, 满足桥梁设计力学性能和长期耐久性要求。

2 大跨度桥梁悬臂浇筑施工关键技术

2.1 挂篮设计与选型

挂篮是悬臂浇筑施工的核心装备, 其结构形式与性能直接影响施工效率与安全水平。在实际工程中, 菱形挂篮与三角挂篮应用最为广泛, 其中菱形挂篮主桁架呈菱形布置, 受力路径简洁、重心低, 行走稳定性良好, 因此特别适用于跨度较大、节段较重的桥梁施工^[2]。而三角挂篮主桁架呈三角形, 虽然结构刚度高, 变形控制精确, 但自重较大, 所以对行走系统的要求更高。桁架式挂篮则在前两者基础上优化, 通过增加横向联系优化整体性, 使其能够适用于宽幅桥梁施工。挂篮设计必须满足强度、刚度和稳定性三项基本要求。其中强度验算保证构件在最不利工况下应力满足规范要求, 刚度验算控制挂篮弹性变形对立模标高精度的影响, 一般要求变形量控制在节段长度的 1/400 以内。而稳定性验算则包括行走状态下的抗倾覆能力和浇筑状态下的抗滑移分析, 以保证挂篮在施工过程中不发生失稳。此外, 挂篮预压试验是消除非弹性变形并获取弹性变形数据的关键环节。试验采用最大节段重量的 1.2 倍分级加载至设计荷载, 观测各级荷载下挂篮的变形情况, 并在卸载后测量残余变形以确定非弹性

作者简介: 杨洋 (1994-), 男, 本科, 研究方向: 施工管理。

*通信作者: 蔡毅 (1992-), 男, 本科, 研究方向: 施工管理。E-mail: 956761776@qq.com

部分,同时记录荷载与弹性变形的线性关系。这些预压试验结果为后续节段立模标高的精确计算提供直接依据,从而保证悬臂浇筑施工的整体精度和结构安全。

2.2 0 号块及墩梁固结施工技术

0 号块作为悬臂浇筑的起始节段,承受整个悬臂体系的全部荷载,受力复杂,因此施工质量要求极高。0 号块可根据墩高选择不同支撑方式,墩高较小时通常采用落地钢管支架,搭设简便且稳定性良好,而墩高较大时则采用墩身预埋托架,此方法能够节省材料,但对托架的预埋精度要求较高。无论采用哪种支撑形式,都需要进行预压处理以消除非弹性变形,从而保证 0 号块浇筑后的沉降量控制在设计允许范围内^[3]。由于 0 号块混凝土体积大、水化热集中,为防裂采用分层浇筑,每层厚度控制在 30 厘米至 50 厘米,同时延长浇筑间隔时间以促进水化热散发。梁体内部设置冷却水管,利用通水循环降温,使混凝土内部温度不超过 70 摄氏度,且内外表温差控制在 25 摄氏度以内。混凝土浇筑完成后,应及时进行覆盖保湿养护,养护时间不少于 7 天,从而有效防止温度裂缝和收缩裂缝。墩梁固结体系根据桥梁结构形式不同,可分为永久固结和临时固结。对于连续刚构桥,通常采用永久固结方式,在墩顶与 0 号块整体浇筑的同时,利用预应力束加强连接,形成刚性节点,以保证结构整体受力稳定。而对于连续梁桥,则采用临时固结体系,该体系由临时支座和抗拉锚固装置组成,用于承受悬臂施工阶段产生的不平衡弯矩。在全桥合龙及体系转换完成后,采用切割或消解的方式平稳解除临时约束,实现向永久支座的顺利过渡,从而保证桥梁结构的整体安全性和施工精度。

2.3 分节段悬臂浇筑工艺

分节段悬臂浇筑是悬臂法施工的核心工序,其施工循环周期直接影响工程进度和结构质量。标准节段施工包括挂篮前移、模板就位等环节,每个节段施工周期通常为 7 天至 10 天,其中混凝土强度达到设计要求及预应力张拉阶段占用时间最长。为了缩短施工周期,可通过优化混凝土配合比、采用早强剂或温控养护措施,以加快混凝土早期强度发展。在施工过程中,必须严格遵循对称平衡原则,确保两侧悬臂节段混凝土浇筑量偏差不得超过节段自重的 5%,并按照从前端向后端,先底板、后腹板再顶板的浇筑顺序,保证混凝土密实度和均匀性^[4]。振捣作业采用插入式振捣棒与附着式振捣器结合的方法,插入式振捣点间距控制在振捣棒有效作用半径的 1.5 倍以内,以防止漏振或过振造成局部空洞或离析。混凝土养护是保障结构强度

发展和裂缝控制的关键环节,梁体表面覆盖土工布或保水膜,并布设自动喷淋系统定时喷水保持湿润,同时监测梁体及环境温度。在大风或高温天气条件下采取防风遮阳措施,低温季节采用电热养护或蒸汽养护,养护时间一般不少于 7 天,对于梁体关键受弯截面或结构应力集中部位可延长至 14 天,从而有效控制收缩裂缝和温度裂缝的发生,保证梁体长期服役性能。

2.4 预应力张拉与孔道压浆技术

预应力张拉是悬臂浇筑施工的关键工序,直接决定结构承载能力。在施工过程中,张拉控制遵循双控原则,即以张拉力为主,伸长值为辅,保证受力均匀与施工安全。预应力束张拉按设计力值分级施加,每级张拉完成后持荷并观察伸长值,最终达到设计张拉力后保持 5 分钟锚固,实际伸长值与理论伸长值偏差控制在 $\pm 6\%$ 以内,若超出该范围需立即查明原因并采取相应处理措施。张拉顺序严格遵循对称分级原则,先张拉纵向预应力束,再张拉横向预应力束,最后张拉竖向预应力束。悬臂段施工,先张拉纵向顶板束,后张拉纵向腹板束;合龙束张拉,先张拉纵向底板束,后张拉纵向顶板束。同时保证同一截面对称布置的预应力束同步张拉,以避免偏心加载导致梁体扭转^[5]。施工中采用智能张拉系统,可自动控制张拉过程并实时采集张拉力与伸长值数据,生成完整张拉记录,从而减少人为误差,提高张拉质量的稳定性。

孔道压浆作为预应力体系的最后一道防护工序,其质量直接关系到预应力束的长期可靠性。压浆过程中采用真空辅助工艺,压浆前对孔道抽真空,保持真空度在 -0.06 兆帕至 -0.08 兆帕,以保证孔道内空气彻底排出。浆体性能严格控制,水胶比维持在 0.26 至 0.28,流动度保持在 14 秒至 18 秒,泌水率不超过 1%,压浆压力稳定在 0.5 兆帕至 0.7 兆帕,并持压 3 分钟至 5 分钟,以保证浆体充盈密实。压浆完成后及时封锚,防止水分或空气渗入孔道,确保预应力束的长期锚固可靠性和结构耐久性。

3 大跨度桥梁悬臂浇筑施工质量控制

3.1 材料与构配件质量控制

在大跨度桥梁悬臂浇筑施工中,混凝土及预应力材料的质量控制至关重要。水泥采用强度等级不低于 42.5 的硅酸盐水泥,初凝时间不少于 3 小时。粗骨料选用连续级配碎石,含泥量 $\leq 1\%$,针片状颗粒 $\leq 8\%$,细骨料采用中粗砂,含泥量 $\leq 2\%$,细度模数 2.3~3.0。为适应长距离运输与高温施工,掺配缓凝型高效减水剂,减水率 20%~30%,将初凝时间延长至 8 小时~12 小时,确保和易性与强度。在预应力材料方面,钢绞

线进场须检测弹性模量、抗拉强度及松弛率,锚具夹片抽检硬度,锚固效率系数 ≥ 0.95 ,总应变 $\geq 2\%$,波纹管检验刚度与密封性,壁厚均匀无裂缝锈蚀。所有材料存放于防潮仓库,钢绞线分类垫高防锈。此外,钢筋安装采用定位架控制间距与保护层,垫块间距 ≤ 1 米且每平方米不少于 4 个。预应力管道直线段定位网片间距 ≤ 50 厘米,曲线段加密至 30 厘米,接头套管胶带密封以防浆体渗入堵塞。

3.2 分项工程施工质量控制

0 号块支架与托架预压是分项工程施工质量控制中的首要环节,其目的是确保后续浇筑标高符合设计要求。预压荷载取最大施工荷载的 1.2 倍,采用分级加载方式逐级观测沉降量,加载完成后持荷 24 小时以记录总沉降量,卸载后测量残余变形,并据此计算弹性变形与非弹性变形。凭借预压数据可科学确定支架预拱度设置,保证 0 号块浇筑完成后标高严格符合设计要求。在挂篮悬浇施工中,全过程监控钢筋安装、模板安装及混凝土浇筑三道工序:(1)钢筋安装阶段重点控制骨架尺寸、间距及连接质量,预应力管道位置偏差严格控制在 ± 5 毫米以内;(2)模板安装阶段则确保底模标高、侧模垂直度及内模尺寸精度,同时模板接缝严密,防止漏浆;(3)在混凝土浇筑过程中,技术人员全程旁站,重点检查坍落度、浇筑顺序及振捣密实度,异常情况及时处理。预应力张拉及压浆工序实行双控记录管理,张拉设备定期标定,压力表精度不低于 1.0 级。张拉过程中实时记录张拉力与伸长值,绘制张拉力—伸长曲线,用于判断张拉质量。压浆操作中需要记录真空度、压浆压力等参数,每孔压浆均留置试件,检验浆体强度。

3.3 线形与应力控制

线形控制是悬臂浇筑施工质量管理的关键环节。立模标高确定需综合考虑设计预拱度、挂篮弹性变形及温度修正等因素。其中,设计预拱度通过收缩徐变分析计算,以抵消桥梁成桥后的长期变形,施工预拱度依据结构自重、预应力作用及施工荷载计算确定,挂篮弹性变形取值则基于挂篮预压试验数据,温度修正根据现场实测建立温度—挠度关系曲线。为实现精确控制,建立完整的挠度观测体系,每个节段前端布设高程观测点,墩顶设定基准点并定期复核。观测时间选在凌晨 4 时至 6 时以消除日照温差影响,观测节点覆盖混凝土浇筑前、浇筑后、预应力张拉前及张拉后四个时刻。若分析发现实测偏差超过设计允许范围,需及时调整后续节段立模标高。在应力监控方面,在关键截面(主梁根部、跨中及四分点区域)埋设 3 个至 5

个应变传感器,数据采集频率与挠度观测同步。对比实测应力与理论计算值以验证结构受力安全,当应力超出预警值时,立即暂停施工并分析原因,及时调整参数或采取局部补强措施,保证整体安全与质量可靠。

3.4 合龙段施工质量控制

合龙段施工是悬臂浇筑的最终环节,其施工精度直接影响桥梁整体成桥质量。为降低温度对合龙间隙的影响,施工通常安排在当日最低温度时段。合龙前需连续观测悬臂端标高及轴线变化,绘制温度—挠度关系曲线,以确定最佳合龙时机。劲性骨架锁定是合龙段施工的关键操作。在锁定前,应精确测量合龙间隙的宽度与高差,确认满足合龙条件。锁定过程中保持悬臂端相对稳定,并在温度稳定后 2 小时内完成焊接作业,避免温度变化引起骨架受力异常。锁定完成后,应复核合龙段标高与轴线,确认锁定效果满足设计要求。在此基础上,临时配重卸载与合龙段混凝土浇筑同步进行。配重通常采用水箱布置在悬臂端,其总重量与合龙段混凝土重量相当。混凝土浇筑采用逐步推进方式,每浇筑一定方量即卸载相应重量配重,以维持悬臂端荷载平衡。混凝土浇筑完成后立即覆盖养护,养护时间不少于 7 天,以保证混凝土强度均匀达到设计要求。随后,进行合龙束预应力张拉,实现结构体系从悬臂状态向连续整体状态的转换,完成合龙段施工的质量控制。

4 结束语

大跨度桥梁悬臂浇筑施工技术深度融合了结构力学、材料科学与施工工艺,采用实时监控支架预压、线形及应力,以及精细控制合龙段的方式,为复杂桥型施工提供可行方案,能有效提升施工精度和结构安全性,保证桥梁长期运营的可靠性。未来,随着智能监测技术与数字化施工方法的发展,悬臂浇筑施工实时控制和风险预警能力能为大跨度桥梁建设的安全性与可持续性提供 stronger 的支撑。

参考文献:

- [1] 马立辉.大跨度铁路桥梁悬臂浇筑施工技术研究[J].工程技术研究,2025,10(24):83-85.
- [2] 姚东桃.市政路桥大跨度桥梁悬臂浇筑施工技术优化研究[J].新城建科技,2025,34(11):157-159.
- [3] 王彦科,王世强.挂篮悬臂浇筑技术在大跨度桥梁施工中的应用[J].中国高新科技,2025(21):112-114.
- [4] 朱锐辉.大跨度桥梁挂篮施工技术的应用与优化[J].四川水泥,2025(10):227-228,231.
- [5] 任涵.大跨度连续刚构桥梁悬臂浇筑施工技术要点[J].四川建材,2022,48(05):115-116.