

预应力混凝土连续梁桥悬臂浇筑施工关键技术研究

王 辉

中铁十局集团第四工程有限公司 江苏 南京 210023

【摘要】：预应力混凝土连续梁桥凭借跨越能力大、结构刚度佳、行车舒适性强及耐久性优异等优势，在现代公路、铁路桥梁工程中得到广泛应用。悬臂浇筑施工技术是该类桥梁建造的核心工艺，尤其适用于跨深谷、河流及既有交通线路的复杂施工场景。本文结合工程实践，系统阐述预应力混凝土连续梁桥悬臂浇筑施工的技术原理，深入剖析挂篮施工、梁段浇筑、预应力张拉、线形控制、合龙与体系转换等关键技术，提出施工质量控制要点与常见病害防治措施，旨在为同类桥梁悬臂浇筑施工提供技术参考，保障桥梁施工质量与结构安全，提升工程建设效益。

【关键词】：预应力混凝土；连续梁桥；悬臂浇筑；关键技术；施工控制

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.006

1 引言

随着我国交通基础设施建设的快速推进，大跨度桥梁工程数量持续增长，预应力混凝土连续梁桥因结构受力合理、造型美观、施工适应性强等特点，成为大、中跨径桥梁的首选桥型。悬臂浇筑施工法作为该桥型的主流施工工艺，无需搭设大量支架，不影响桥下交通与通航，施工灵活性强，可有效降低施工难度与工程造价。

该施工技术以桥墩为依托，利用挂篮作为移动施工平台，沿桥梁轴线对称逐段浇筑混凝土梁段，待梁段混凝土达到设计强度后施加预应力，通过循环施工完成悬臂梁段浇筑，最终进行合龙与体系转换，形成连续梁整体结构。但悬臂浇筑施工工序繁杂，涉及多专业协同作业，施工过程中挂篮变形、混凝土质量、预应力张拉精度、线形控制等因素均会直接影响桥梁成桥质量与结构安全。因此，深入研究悬臂浇筑施工关键技术，优化施工工艺，强化全过程质量控制，对保障桥梁工程顺利实施、延长结构使用寿命具有重要的工程实际意义。

2 悬臂浇筑施工技术原理与工艺流程

2.1 技术原理

悬臂浇筑施工基于结构对称受力与预应力受力体系原理，以桥墩顶部 0 号块为施工起点，在 0 号块上安装挂篮设备，将挂篮作为悬臂施工的核心承载与作业平台，向桥梁跨中方向对称、分段浇筑混凝土梁段。每段梁段混凝土养护至设计强度后，依次进行纵向、横向、竖向预应力筋张拉与孔道压浆，使梁段形成独立受力单元；随后挂篮脱模、前移至下一段位，重复上述施工流程，直至两侧悬臂梁段施工完成。最后通过边跨、中跨合龙施工，完成结构体系转换，将悬臂受力体系转换为连续梁整体受力体系，实现桥梁结构的连续受力与稳定承载。

2.2 施工工艺流程

预应力混凝土连续梁桥悬臂浇筑施工流程严谨，各工序环环相扣，具体工艺流程为：施工准备→墩顶 0 号块施工→挂篮设计、加工与安装→挂篮预压试验→对称悬臂梁段浇筑→预

应力张拉与孔道压浆→挂篮前移循环施工→边跨现浇段施工→合龙段施工与临时荷载卸载→体系转换→全桥线形与应力检测→桥面系施工。

施工过程中严格遵循“对称、平衡、同步”原则，控制两侧悬臂梁段施工进度偏差，确保结构受力均衡，避免因受力不均导致梁体开裂、线形偏差过大等问题。

3 悬臂浇筑施工关键技术分析

3.1 挂篮施工技术

挂篮是悬臂浇筑施工的核心设备，其设计与施工质量直接决定悬臂施工的安全性、精度与效率。常用挂篮类型包括桁架式、斜拉式、菱形等，其中菱形挂篮因自重轻、刚度大、操作便捷，应用最为广泛。

挂篮设计要求：挂篮需满足强度、刚度、稳定性三大核心要求，自重需控制在浇筑梁段重量的 0.3-0.5 倍，设计安全系数不低于 2.0，确保承受施工荷载、混凝土自重、施工人员及设备荷载时不产生过量变形与失稳。同时，挂篮需具备良好的移动性能，行走过程平稳、同步，便于模板定位与调整。

挂篮安装与预压：挂篮在 0 号块顶面精准安装，完成主桁架、悬吊系统、模板系统、行走与锚固系统的组装后，必须进行预压试验。预压采用分级加载方式，荷载为最大施工荷载的 1.2-1.3 倍，模拟梁段混凝土浇筑受力状态，消除挂篮非弹性变形，测定弹性变形数据，为后续立模标高调整提供依据。预压过程中实时监测挂篮各部位变形、应力，确保各项指标符合设计与规范要求后，方可投入使用。

挂篮行走控制：单段梁段施工完成且预应力张拉结束后，进行挂篮行走作业。行走前松开锚固装置，通过液压驱动系统推动挂篮同步前移，行走速度控制在 0.05-0.1m/min，严格控制两侧挂篮行走同步性，偏差不得超过 5cm。到位后立即进行锚固，调整模板标高与线形，进入下一段施工准备，避免挂篮悬空停留引发安全风险。

3.2 梁段混凝土浇筑施工技术

混凝土施工质量是保证梁体结构强度与耐久性的关键，悬臂浇筑梁段混凝土具有分段施工、截面复杂、钢筋与预应力管道密集等特点，需严格控制浇筑、振捣、养护全流程质量。

混凝土配合比设计：选用 C50-C60 高强度混凝土，优化配合比，控制水胶比不大于 0.33，掺入适量粉煤灰、矿粉与高效减水剂，提升混凝土工作性、强度与抗裂性能，降低水化热。混凝土坍落度控制在 $180\pm 20\text{mm}$ ，初凝时间不低于 8h，满足分段浇筑与泵送施工需求。

浇筑工艺控制：梁段混凝土采用“先底板、再腹板、后顶板”的浇筑顺序，沿悬臂根部向端部斜向分层浇筑，每层厚度不超过 30cm，避免一次性浇筑厚度过大引发离析与水化热集中。腹板浇筑采用分层、对称下料方式，防止单侧受力导致模板偏移；顶板浇筑完成后及时进行收面处理，消除表面浮浆与裂缝。

振捣与养护：振捣采用插入式高频振捣器，振捣间距控制在 40cm 左右，确保混凝土密实，无蜂窝、麻面、空洞等缺陷，振捣过程中避免触碰预应力管道与钢筋骨架。混凝土浇筑完成后，及时覆盖土工布、保湿棉，采用自动喷淋养护，养护时间不少于 7 天，控制混凝土内外温差不超过 20°C ，防止温度应力与收缩应力导致梁体开裂。

3.3 预应力施工技术

预应力体系是连续梁桥受力核心，预应力张拉精度直接影响结构承载能力与受力状态，施工中需严格遵循设计要求，规范张拉、压浆、封锚全流程操作。

预应力管道安装：采用金属波纹管或塑料波纹管，严格按照设计坐标定位，每间隔 50-80cm 设置 U 型定位钢筋，固定管道位置，避免浇筑过程中管道偏移、漏浆。管道接头密封处理，穿束前采用高压空气清理管道，确保管道通畅。

张拉施工控制：待梁段混凝土强度与弹性模量达到设计值的 90% 以上，方可进行预应力张拉。张拉采用“双控法”，以张拉力为主，伸长值为辅，实测伸长值与理论伸长值偏差控制在 $\pm 6\%$ 以内。张拉顺序遵循“先纵向、后横向、再竖向”，对称、分级张拉，避免单侧张拉导致梁体受力失衡。张拉过程分 $0 \rightarrow 0.2\sigma_{\text{con}} \rightarrow 1.0\sigma_{\text{con}}$ （持荷 5min） \rightarrow 锚固四步进行，确保预应力施加均匀、到位。

孔道压浆与封锚：张拉完成后 48h 内进行孔道压浆，采用真空辅助压浆工艺，浆液水胶比控制在 0.27-0.30，流动度 25-30s，压浆压力 0.5-0.7MPa，持荷 3min，保证管道内浆液密实，无空隙。压浆完成后，及时切除多余钢绞线，采用微膨胀混凝土封锚，保护锚具与钢绞线，防止锈蚀。

3.4 线形控制技术

线形控制是悬臂浇筑施工的核心管控要点，直接决定桥梁成桥线形与受力状态，需通过精准监测与动态调整，确保桥梁轴线、标高符合设计要求。

监测系统建立：构建全方位线形监测网络，在梁段前端底板中心线、翼缘板边缘、腹板顶部设置监测测点，采用激光测距仪、全站仪等精密仪器，实时监测挂篮变形、梁段标高、轴线偏差。监测节点涵盖挂篮预压后、混凝土浇筑前、浇筑后、预应力张拉后、挂篮行走后等关键施工阶段，全面掌握结构变形数据。

立模标高调整：立模标高需综合设计标高、挂篮弹性变形、混凝土收缩徐变、预应力张拉变形、温度影响等因素计算确定，公式为： $H_{\text{立模}} = H_{\text{设计}} + \Delta H_{\text{挂篮变形}} + \Delta H_{\text{混凝土自重}} + \Delta H_{\text{预应力}} + \Delta H_{\text{温度}}$ 。通过预压试验获取挂篮变形数据，结合实时监测结果动态调整立模标高，消除各类变形偏差。

误差控制与调整：施工中严格控制梁段轴线偏差不超过 10mm，标高偏差不超过 $\pm 5\text{mm}$ 。若出现线形偏差，及时分析原因，通过调整挂篮模板、优化张拉顺序、调整浇筑顺序等方式修正，避免偏差累积影响成桥线形。同时，考虑温度变化对梁体变形的影响，选择温度稳定的时段进行测量与调整，提升监测精度。

3.5 合龙与体系转换技术

合龙与体系转换是悬臂浇筑施工的收尾关键工序，标志着桥梁结构从悬臂受力体系转换为连续梁整体受力体系，直接影响桥梁结构受力均衡性。

合龙段施工：合龙段分为边跨合龙与中跨合龙，遵循“先边跨、后中跨”的施工顺序。合龙前连续 48h 监测合龙口宽度变化，选择日温最低、温度变化平稳的时段进行合龙施工。合龙段采用微膨胀混凝土，浇筑前在合龙口设置劲性骨架临时锁定，两侧悬臂端施加等效配重，随混凝土浇筑同步卸载，保证合龙过程结构受力平衡。混凝土浇筑完成后加强养护，达到设计强度后及时张拉合龙预应力筋，完成合龙段施工。

体系转换：合龙施工完成后，依次拆除临时支座、挂篮、施工支架等临时设施，解除墩梁临时锚固，将桥梁结构受力体系转换为永久连续梁体系。体系转换过程分级、对称进行，实时监测墩顶、梁体应力与变形，控制结构受力平稳过渡，避免应力集中导致梁体开裂，确保结构受力符合设计要求。

4 施工质量控制与常见病害防治

4.1 施工质量控制要点

原材料质量控制：严格把控水泥、骨料、钢筋、预应力钢绞线、锚具等原材料进场质量，每批材料均需具备出厂合格证证明与检测报告，进场后按规范进行复检，不合格材料严禁使用。

工序质量管控：实行工序交接验收制度，每道工序完成后，经自检、互检、专检合格后，方可进入下一道工序。重点管控挂篮预压、模板安装、混凝土浇筑、预应力张拉、线形监测等关键工序，留存完整施工记录与检测数据。

施工安全控制：制定专项施工安全方案，挂篮安装、行走、混凝土浇筑等高空作业环节，设置安全防护设施，加强施工人员安全培训与技术交底。定期检查挂篮锚固、悬吊系统、液压设备等关键部位，消除安全隐患，确保施工安全。

4.2 常见病害与防治措施

梁体裂缝：主要由温度应力、收缩应力、受力不均引发。防治措施：优化混凝土配合比，降低水化热；加强混凝土养护，控制内外温差；严格控制预应力张拉时机与顺序，避免结构受力失衡；出现微裂缝时，采用环氧树脂灌浆修补。

预应力损失：因管道摩阻、张拉不到位、混凝土徐变导致。防治措施：精准定位预应力管道，减少管道弯折；张拉前校核张拉设备，严格执行双控标准；采用真空辅助压浆，保证管道密实，减少预应力损失。

线形偏差过大：由挂篮变形、测量误差、温度影响导致。防治措施：做好挂篮预压，精准调整立模标高；采用高精度测量仪器，固定测量时段与人员；加强施工过程动态监测，及时修正偏差。

混凝土质量缺陷：出现蜂窝、麻面、空洞等问题。防治措施：严格控制混凝土坍落度，规范振捣操作，避免漏振、过振；钢筋与预应力管道密集区域，采用小型振捣器精细化振捣，确保混凝土密实。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国交通运输部.公路桥涵施工技术规范(JTG/T 3650-2020)[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [2] 范立础.桥梁工程(上册)[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [3] 贾长洋.预应力混凝土连续梁桥悬臂浇筑施工质量控制关键点分析[J].科海故事博览,2025(28):100-102.
- [4] 李茂升.大跨度预应力混凝土连续箱梁桥悬臂施工技术[J].科教文创,2024(138):45-47.
- [5] 周志祥.现代预应力混凝土结构设计与施工[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.

5 工程实例应用

某跨河预应力混凝土连续梁桥，主桥跨径布置为(65+120+65)m，采用悬臂浇筑施工工艺，箱梁为单箱单室截面，0号块长度12m，标准悬臂梁段长度3-4m，共计22个悬臂浇筑段。

施工中采用菱形挂篮，经1.3倍设计荷载预压，非弹性变形消除，弹性变形值为8mm，据此精准调整立模标高；混凝土采用C55高强度混凝土，严格控制浇筑与养护流程，未出现温度裂缝；预应力张拉严格执行双控标准，伸长值偏差均在规范范围内；线形监测全程动态管控，成桥后检测，梁段轴线偏差最大6mm，标高偏差最大3mm，符合设计要求；合龙与体系转换平稳有序，桥梁结构受力均衡，各项指标均满足规范与设计要求，工程顺利竣工验收，投入使用后结构状态良好。

6 结论

预应力混凝土连续梁桥悬臂浇筑施工是一项系统、复杂的工程技术，挂篮施工、梁段混凝土浇筑、预应力张拉、线形控制、合龙与体系转换是核心关键环节，各环节施工质量直接决定桥梁整体性能与结构安全。施工中需严格遵循技术规范，优化施工工艺，强化全过程质量与安全管控，精准控制结构线形与受力状态，有效防治施工病害，保障桥梁施工质量。

随着桥梁工程技术的不断发展，悬臂浇筑施工技术将朝着智能化、轻量化、高效化方向升级，智能化监测设备、高性能材料、自动化施工设备将进一步提升施工精度与效率。未来，需持续深化关键技术研究，结合工程实践不断优化施工方案，推动悬臂浇筑施工技术的创新与应用，为大跨度预应力混凝土连续梁桥建设提供更可靠的技术支撑，助力我国交通基础设施建设高质量发展。