

高架地铁桥梁结构施工关键技术与质量控制研究

曹天祺

北京赛瑞斯国际工程咨询有限公司天津分公司 天津 300450

【摘要】：为提升高架地铁桥梁施工质量与结构稳定性，针对施工技术适配不足、质量防控薄弱等问题，本文通过优化基础处理、支架模板、预制构件安装、预应力施工及工序衔接关键技术，构建全流程质量管控标准与动态监管机制。实践表明，技术优化与管控体系结合可有效降低施工风险，提升结构精度与耐久性，为高架地铁桥梁高质量建设提供技术支撑。

【关键词】：高架地铁桥梁；施工关键技术；质量控制；结构稳定性；技术优化

DOI:10.12417/2811-0528.26.08.021

城市轨道交通快速发展背景下，高架地铁桥梁因占地少、效率高成为重要选择，但其施工面临复杂工况与严苛质量要求。当前施工中存在技术适配性不足、质量风险防控不全面等问题，直接影响结构安全与运营寿命。亟需通过技术优化与体系构建，破解施工难题、保障工程质量，为高架地铁桥梁施工提供科学解决方案，助力轨道交通建设高质量推进。

1 高架地铁桥梁结构施工核心问题剖析

1.1 施工技术与复杂工况适配性不足

高架地铁桥梁多建于城市核心区域或交通繁忙路段，施工空间受限、周边环境敏感，对技术应用的灵活性和精准度要求极高。现有部分施工技术在应对复杂地质条件时存在明显短板，如软土地基处理中承载力提升效果不稳定，易导致桥梁基础沉降偏差；支架搭设技术在高跨度桥梁施工中缺乏针对性优化，可能引发结构临时受力失衡^[1]。同时，预制构件安装技术与现场工况的衔接存在脱节，构件拼接精度控制难度大，影响桥梁整体结构的密封性和受力协调性，这些技术适配问题直接制约施工效率与结构施工质量。

1.2 质量风险防控体系存在薄弱环节

质量风险管控贯穿施工全流程，但当前部分项目在关键环节的防控力度不足。原材料质量检验标准执行不严格，对钢材、混凝土等核心材料的性能检测缺乏全批次跟踪，可能导致不合格材料流入施工环节，埋下结构安全隐患。工序间质量交接验收机制不完善，前道工序的质量缺陷未及时整改便进入下道工序流程，形成质量隐患累积。此外，针对高空作业、预应力施工等高危工序的质量风险预判不足，缺乏系统性的防控措施，易因施工操作偏差引发结构裂缝、强度不达标等问题，影响桥梁结构的长期稳定性。

2 高架地铁桥梁施工关键技术优化实施

2.1 基础工程施工技术优化

基础工程作为高架地铁桥梁结构的承载根基，其施工质量直接影响整体结构的稳定性与耐久性。针对复杂地质条件下基础施工适配性不足的问题，需从地质适配技术与施工精度控制两方面进行优化。在软土地基处理中，采用复合地基加固技术，通过水泥搅拌桩与高压旋喷桩组合施工，其中水泥搅拌桩的桩径控制在 500-600mm，桩间距根据地基承载力要求调整为 1.2-1.5m，高压旋喷桩则采用三重管法施工，提升地基承载力与抗沉降能力，同时结合地质雷达探测技术，以 10-20MHz 的探测频率精准掌握地下土层分布情况，清晰识别软土夹层、孤石等不良地质体，为桩位布置与桩长设计提供精准数据支撑。

对于桩基施工，优化钻孔工艺参数，冲击钻钻孔时控制冲击频率为 40-60 次/分钟，转速保持在 15-25r/min，采用泥浆护壁改进技术，将泥浆比重严格控制在 1.1-1.3 之间，黏度维持在 18-22s，通过实时监测泥浆指标减少孔壁坍塌风险，同时引入低应变反射波法与超声波透射法组合的桩身完整性检测技术，在桩基浇筑过程中每隔 2-3m 进行一次浇筑质量监测，确保桩身混凝土密实度与垂直度符合设计标准，垂直度偏差不超过 1%。

承台施工中，针对大体积混凝土浇筑量通常在 500m³ 以上的特点，采用大体积混凝土温控技术，在承台内部按间距 1.5-2m 埋设冷却水管，水管直径选用 40mm 的无缝钢管，同时优化混凝土配合比，掺入适量粉煤灰与聚羧酸系高效减水剂，降低水泥用量至 300-350kg/m³，将混凝土入模温度控制在 30℃ 以下，通过温度传感器实时监测内部温度，确保内外温差不超过 25℃，避免温度应力引发的裂缝，保障基础结构的整体性。此外，在基坑开挖施工中，根据基坑深度与地质条件，采用放坡开挖与钢板桩支护组合技术，放坡坡度控制在 1:0.5-1:1 之间，钢板桩间距为 30-50cm，同时设置排水井点降

低地下水水位,防止基坑边坡失稳,为基础施工创造安全稳定的作业环境^[2]。

2.2 支架与模板体系优化应用

支架与模板体系是保障桥梁上部结构施工精度的关键,需针对高跨度、大荷载施工场景进行技术优化。支架搭设中,采用碗扣式满堂支架与钢管柱支架组合体系,对于跨度超过30m的桥梁段落,钢管柱采用 $\phi 630 \times 10\text{mm}$ 的螺旋焊管,间距设置为3-4m,顶部设置双拼工字钢作为横梁,碗扣式支架立杆间距根据荷载计算确定为0.6-0.9m,横杆步距为1.2m,扫地杆距地面高度不超过20cm,确保支架整体刚度与稳定性。支架材料选用Q355高强度合金钢,进场前需经过抗拉强度、屈服强度、冲击韧性等力学性能检测,各项指标需满足GB/T700-2006标准要求,同时在支架底部设置可调底座与防滑垫板,可调底座调节范围为0-30cm,防滑垫板采用10mm厚钢板,尺寸为 $200 \times 200\text{mm}$,适应施工现场地形起伏,提升支架的承载稳定性。

模板体系优化方面,采用液压爬模与钢模板组合技术,钢模板选用6mm厚Q235钢板加工而成,面板尺寸为 $1.5 \times 3\text{m}$,表面经过抛丸除锈、静电喷涂处理,平整度误差控制在2mm/m以内,确保混凝土浇筑后表面平整度达标,模板拼接处采用三元乙丙密封胶条密封,胶条压缩量控制在30%-50%,防止漏浆现象。

模板安装过程中,利用激光测距仪与全站仪进行实时定位校准,激光测距仪测量精度达到 $\pm 1\text{mm}$,全站仪测角精度为 $2''$,测距精度为 $\pm (2\text{mm} + 2\text{ppm} \times D)$,控制模板轴线偏差不得超过5mm,高程误差在 $\pm 3\text{mm}$ 范围内,确保上部结构几何尺寸符合设计要求^[3]。同时优化模板拆除时序,根据混凝土同条件养护试块的强度检测数据,当强度达到设计强度的75%以上时,方可拆除侧模,达到100%设计强度时拆除底模,对于悬臂构件需达到100%设计强度且龄期不少于28天方可拆除,避免过早拆除导致结构变形。

2.3 预制构件安装技术改进

预制构件安装的精准度与衔接质量,直接影响桥梁结构的受力协调性与密封性。针对预制构件安装与现场工况衔接脱节的问题,优化构件生产与安装的协同技术。在构件生产阶段,采用BIM技术进行预制构件三维建模,建模精度达到LOD400级别,精准设计构件拼接接口尺寸,预留钢筋接驳器位置偏差控制在3mm以内,灌浆孔位直径为50mm,间距为300-400mm,确保构件之间的衔接精度。构件生产过程中,采用自动化生产线进行钢筋加工与绑扎,钢筋保护层厚度偏差不得超过 $\pm 5\text{mm}$,混凝土浇筑采用泵送顶升工艺,浇筑速度控制在0.5-1m/h,振

捣采用插入式振捣器与附着式振捣器组合方式,确保混凝土密实度,构件出厂前需进行外观质量检测与强度检测,外观无蜂窝、麻面、裂缝等缺陷,强度达到设计强度的100%方可出厂。构件运输过程中,采用专用运输架与缓冲防护装置,运输架采用型钢焊接而成,底部设置橡胶缓冲垫,构件与运输架之间采用钢丝绳软捆绑,捆绑点设置橡胶护套,控制运输过程中的振动加速度不超过0.3g,避免构件边角破损或内部应力集中。

运输路线需提前规划,避开颠簸路段与急转弯,运输速度在城市道路中不超过30km/h,高速公路中不超过60km/h。安装施工中,引入架桥机与起重机协同作业技术,根据构件重量与安装高度,选择适配的起重设备与吊具,采用多点对称吊装工艺,控制构件起吊速度与姿态,避免吊装过程中构件变形。构件就位后,利用高精度测量仪器进行定位调整,确保构件轴线、高程及平面位置偏差在允许范围内,随后采用高强灌浆料进行接缝灌浆处理,优化灌浆压力与灌浆速度,确保接缝密实度,提升构件衔接的整体性与承载力。

2.4 预应力施工技术升级

预应力施工是提升桥梁结构抗裂性与刚度的核心技术,需针对施工过程中预应力损失过大、张拉精度不足等问题进行技术升级。预应力筋选材方面,选用高强度低松弛钢绞线,规格为 $\phi s15.2$,抗拉强度标准值不低于1860MPa,弹性模量为 $1.95 \times 10^5\text{MPa}$,延伸率不小于3.5%,进场前需经过严格的抗拉强度、弹性模量、松弛率等性能检测,每批钢绞线抽检数量不少于3盘,确保材料质量符合GB/T5224-2014标准要求。预应力孔道施工中,采用金属波纹管作为孔道套管,波纹管内径比预应力筋束外径大10-15mm,壁厚不小于0.3mm,安装过程中采用定位钢筋固定,定位钢筋间距不超过1m,曲线段间距不超过0.5m,确保孔道位置偏差不得超过5mm,避免浇筑混凝土时发生位移或破损,同时在波纹管接口处采用密封胶带缠绕,缠绕宽度不小于50mm,防止水泥浆渗入堵塞孔道。孔道安装完成后,采用通孔器进行通孔检查,确保孔道畅通无堵塞^[4]。

张拉施工前,对张拉设备进行标定校准,确保张拉力传递精准,采用智能张拉系统,实时监测张拉力与钢绞线伸长量,实现张拉过程的自动化控制与数据同步记录,严格按照设计张拉顺序与张拉应力进行施工,避免超张拉或欠张拉现象。张拉完成后,及时进行孔道压浆处理,采用真空辅助压浆技术,提升压浆密实度,防止预应力筋锈蚀,保障预应力体系的长期有效性。

2.5 施工工序衔接技术优化

施工工序的顺畅衔接是提升施工效率、避免质量隐患累积

的关键,需针对工序间交接验收不完善的问题,构建精细化衔接技术体系。在工序规划阶段,采用网络计划技术中的双代号时标网络计划法,合理划分施工流水段,根据桥梁结构特点与施工资源配置,将桥梁划分为若干个施工段,每个施工段长度控制在20-30m,明确各工序的施工时长与衔接节点,如基础施工工期为45-60天,支架搭设工期为15-20天,预制构件安装工期为20-25天,确保施工流程有序推进。同时,结合施工组织设计,制定详细的工序衔接计划,明确各专业施工班组的作业范围与配合要求,避免工序冲突。工序交接过程中,建立标准化验收机制,上道工序完成后,由施工班组自检、技术部门抽检、监理单位验收三级检测体系,从施工质量、技术参数、安全隐患等方面进行全面检测,检测项目包括结构尺寸、混凝土强度、钢筋保护层厚度、预应力张拉值等,检测数据达标且形成完整的验收记录后方可进入下道工序,对于检测不合格的部位,制定专项整改方案,整改完成后重新验收。

针对交叉作业较多的施工环节,如支架搭设与钢筋绑扎交叉、预制构件安装与预应力施工交叉等,优化作业顺序与空间布局,采用分层分段施工技术,按结构层次分为基础层、下部结构层、上部结构层,按施工段分为1#段、2#段等,明确各层次、各段落的施工优先级,避免不同工序之间的相互干扰,同时加强各施工班组的协同配合,建立实时沟通机制,通过每日施工协调会、现场技术交底等方式,及时解决衔接过程中出现的技术问题,如构件安装精度偏差、预应力张拉与模板拆除时序冲突等。

3 高架地铁桥梁结构质量控制体系构建

3.1 全流程质量管控标准制定

质量控制体系的核心在于建立覆盖施工全周期的标准化管控机制,针对原材料进场、施工过程、成品检测等关键环节明确管控要求。原材料管控方面,制定严格的准入标准与检验

流程,对钢材、混凝土、预应力筋等核心材料实施全批次检测,重点核查材料性能参数与设计标准的一致性,建立材料质量追溯档案,杜绝不合格材料流入施工环节。施工过程中,细化各工序质量控制指标,明确支架搭设精度、构件安装偏差、预应力张拉参数等关键技术控制点的允许范围,将质量管控要求融入施工技术交底与现场操作规范,确保每道工序均有明确的质量标准可循。成品检测阶段,制定系统性检测方案,涵盖结构尺寸复核、混凝土强度回弹、桩身完整性检测、预应力体系性能测试等内容,确保检测结果全面反映结构质量状况。

3.2 质量风险防控与动态监管机制搭建

质量控制体系需强化风险预判与动态管控能力,针对施工中的高风险环节构建专项防控机制。通过分析施工工艺特点与地质环境条件,识别基础沉降、结构裂缝、预应力损失等潜在质量风险,建立风险分级清单,对高等级风险制定专项防控措施^[5]。搭建动态监管平台,整合施工监测数据、质量检测结果与现场巡查信息,采用信息化手段实现质量数据实时采集、分析与预警,当监测指标超出预警阈值时,自动触发整改流程,确保风险隐患及时处置。同时,建立质量责任追溯机制,明确各环节管控责任主体,将质量控制成效与管控责任挂钩,形成“标准制定-过程监管-风险处置-责任追究”的闭环管控体系,保障质量控制体系的有效落地。

4 结语

围绕高架地铁桥梁施工关键技术与质量控制展开研究,通过剖析核心问题,优化基础工程、支架模板等多项关键技术,构建全流程质量管控与动态监管体系,有效提升了施工技术适配性与质量防控能力。未来可进一步结合智能化技术深化施工过程精准管控,优化复杂环境下技术方案,完善质量控制体系的动态调整机制,为高架地铁桥梁工程的安全高效建设提供更全面的技术保障与实践参考。

参考文献:

- [1] 翟晓冬.公路桥梁钻孔灌注桩施工关键技术及质量控制[J].石河子科技,2025(1):46-47.
- [2] 王先柱.高架桥梁施工中的关键技术及质量控制[J].大众标准化,2025(23):20-22.
- [3] 刘庆松.高速公路桥梁施工关键技术及质量控制措施[J].四川水泥,2025(4):166-168.
- [4] 张峰.公路桥梁钻孔灌注桩施工质量控制关键技术研究[J].居业,2025(12):85-87.
- [5] 杨云峰.转体T构桥梁施工关键技术及质量控制措施研究[J].山西交通科技,2025(4):82-87.