

预应力混凝土桥梁施工技术要点探析

戚桂松

中铁十局集团第五工程有限公司 江苏 苏州 215011

【摘要】：预应力混凝土桥梁凭借承载能力强、耐久性好、跨度适应性广等优势，在现代公路、铁路及市政桥梁工程中得到广泛应用。其施工技术的规范性与精准度，直接决定桥梁结构的受力性能、使用寿命及运营安全。本文结合工程实践，系统梳理预应力混凝土桥梁施工前期准备、核心施工工艺，重点补充先张与后张预应力计算方法、后张曲线预应力计算、张拉应力与伸长量校核控制、智能张拉操作工艺，并完善质量控制要点及常见问题防控措施，深入探析各环节技术关键，为同类桥梁施工提供技术参考，助力提升预应力混凝土桥梁施工质量与工程效益。

【关键词】：预应力混凝土；桥梁施工；先张法；后张法；预应力计算；伸长量校核；智能张拉；质量控制

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.102

1 引言

随着我国交通基础设施建设的快速推进，桥梁工程朝着大跨度、轻量化、高耐久性方向发展，预应力混凝土结构凭借可有效抵消荷载拉应力、控制结构裂缝、提升整体刚度的特点，成为桥梁建设的主流形式。相较于普通混凝土桥梁，预应力混凝土桥梁施工工序更为复杂，涉及材料管控、预应力设计计算、预应力张拉、孔道压浆、混凝土浇筑等多个关键环节，任一环节施工把控不当，均会引发预应力损失、结构开裂、承载力不足等质量问题。因此，全面掌握先张、后张预应力计算方法、后张曲线束计算方式、张拉应力与伸长量双控标准、智能张拉标准化工艺，规范施工流程，强化全过程质量管控，对保障桥梁工程质量、延长结构使用寿命具有重要意义。本文结合现行施工规范与工程实例，对预应力混凝土桥梁施工技术要点展开全面探析，旨在为工程施工提供科学指导。

2 预应力混凝土桥梁施工前期准备要点

施工准备是保障预应力混凝土桥梁顺利施工的基础，需从技术、材料、设备、现场四个维度全面落实，规避前期隐患，为后续施工奠定坚实基础。

2.1 技术准备

技术准备核心在于图纸审核与施工方案编制。施工前需组织技术人员深入研读施工图纸，精准掌握桥梁结构尺寸、预应力筋布置、张拉控制应力、张拉顺序等核心参数，重点核对预应力孔道坐标、锚垫板位置、钢筋间距等细节，及时与设计单位沟通解决图纸矛盾与疑问。同时，结合桥梁跨度、现场地质、施工环境等条件，编制专项施工方案，明确施工工艺流程、关键工序控制指标、安全防护措施及应急预案，针对大跨度悬臂浇筑、支架现浇等特殊工艺，需进行专项力学计算与施工模拟，确保方案的可行性与科学性。此外，完成技术交底工作，对施工人员、质检人员进行分层交底，使其明确各工序操作规范、质量标准及注意事项，尤其是预应力张拉、压浆等核心工序的技术要求。

2.2 材料质量控制

材料质量是预应力混凝土桥梁施工的核心保障，需严格控制原材料进场、检验、存放全流程。

1. 预应力材料：预应力筋优先选用低松弛高强度钢绞线，进场时需核查出厂合格证、质量检验报告，并按规范进行拉伸试验、松弛率检测，确保其强度、伸长率等指标符合设计要求，严禁使用锈蚀、损伤、力学性能不合格的钢绞线。锚具、夹具、连接器需具备良好的锚固性能，进场后进行硬度检测、静载锚固性能试验，匹配性检验合格后方可使用，避免出现锚固失效、滑丝等问题。

2. 混凝土材料：水泥选用强度等级不低于 42.5 级的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，保证早期强度与稳定性；粗骨料选用质地坚硬、级配良好的碎石，粒径控制在 5-25mm，含泥量不大于 1%；细骨料选用洁净中粗砂，含泥量不大于 3%；外加剂优先选用高效减水剂，掺量经试验确定，改善混凝土和易性，减少收缩裂缝。所有原材料进场后需分类存放，钢绞线做好防雨防锈措施，水泥、外加剂存入干燥仓库，避免受潮结块。

2.3 施工设备调试

预应力施工设备的精度直接影响施工质量，需提前完成调试与标定工作。张拉设备包括千斤顶、油泵、压力表、油管等，需定期送专业机构进行标定，标定周期不超过 6 个月或张拉次数不超过 200 次，确保张拉力与压力表读数呈线性关系，张拉精度控制在 $\pm 2\%$ 以内。混凝土搅拌、浇筑、养护设备，以及孔道成型、压浆设备，需提前进行试运行，排查故障，确保设备运行稳定，满足施工连续性要求。同时，配备高精度测量仪器，如全站仪、水准仪，完成校准后用于桥梁轴线、高程、孔道坐标的测量放样，控制施工精度。

2.4 现场准备

现场施工需完成场地平整、支架搭设、模板安装等工作。根据施工方案规划材料堆放区、钢筋加工区、混凝土浇筑区，做到分区明确、物流顺畅。对于支架现浇施工，需对支架基础

进行压实处理,检测地基承载力,避免基础沉降引发结构变形;支架搭设完成后进行预压,消除非弹性变形,预压荷载不小于梁体自重的1.2倍。模板选用钢模板,保证表面平整、刚度充足,安装时严格控制轴线位置、截面尺寸,接缝处做好密封处理,防止漏浆,同时预留预应力孔道、锚垫板安装位置,确保定位精准。

3 预应力混凝土桥梁核心施工技术要点

3.1 先张法与后张法预应力计算方法

1.先张法预应力计算

先张法通过台座张拉预应力筋,浇筑混凝土并达到强度后放张,使预应力借助粘结力传递至结构。

$$\text{张拉控制应力 } \sigma_{\text{con}} \leq 0.75f_{\text{ptk}}$$

$$\text{总预应力损失 } \Delta\sigma = \Delta\sigma_{11} + \Delta\sigma_{12} + \Delta\sigma_{13} + \Delta\sigma_{14}$$

式中: $\Delta\sigma_{11}$ —— 锚具变形损失;

$\Delta\sigma_{12}$ —— 钢筋松弛损失;

$\Delta\sigma_{13}$ —— 养护温差损失;

$\Delta\sigma_{14}$ —— 混凝土收缩徐变损失。

$$\text{有效预应力 } \sigma_{\text{pe}} = \sigma_{\text{con}} - \Delta\sigma$$

2.后张法直线预应力筋计算

后张法在混凝土达到强度后穿束张拉,通过锚具锚固,需计入孔道摩擦损失: $\Delta\sigma_{15} = \sigma_{\text{con}} \cdot kx$

$$\text{总有效预应力: } \sigma_{\text{pe}} = \sigma_{\text{con}} - \Delta\sigma_{11} - \Delta\sigma_{12} - \Delta\sigma_{14} - \Delta\sigma_{15}$$

3.后张法曲线预应力筋精确计算

曲线孔道需同时考虑长度偏差与转角摩擦,采用指数式计算摩擦损失: $\Delta\sigma_{15} = \sigma_{\text{con}}(1 - e^{-(\mu\theta+kx)})$

式中: μ —— 孔道摩擦系数(塑料波纹管 $\mu = 0.14 \sim 0.17$); θ —— 曲线包角(rad); k —— 管道偏差系数($k = 0.0015 \sim 0.003$); x —— 张拉端至计算截面长度(m)。实际张拉应力需按曲线损失分段修正,两端张拉时取两端平均值。

3.2 张拉应力与伸长量校核控制方法

预应力张拉严格执行“应力控制为主,伸长值校核为辅”的双控原则。

1.理论伸长量计算

$$\text{直线筋: } \Delta L_{\text{理}} = \frac{P_p \cdot L}{A_p \cdot E_s}$$

$$\text{曲线筋分段计算: } \Delta L_{\text{理}} = \sum \frac{P_{pi} \cdot L_i}{A_p \cdot E_s}$$

式中: P_p —— 预应力筋平均张拉力; L —— 预应力筋长度; A_p —— 钢绞线截面面积; E_s —— 钢绞线弹性模量。

2.实测伸长量计算

$$\Delta L_{\text{实}} = L_{100\%} - L_{10\%}$$

3.校核标准

实测与理论伸长量偏差允许范围: $\Delta L_{\text{实}} \in \Delta L_{\text{理}} \pm 6\%$ 超出范围需停机排查:孔道堵塞、摩擦异常、设备未标定、钢绞线损伤、锚具安装偏位等。

3.3 智能张拉系统操作工艺

智能张拉实现自动同步、精准控力、数据可追溯,是现代桥梁预应力施工的主流工艺。

1.系统联校与参数录入

对千斤顶、油泵、压力传感器、位移传感器统一联校标定;录入钢绞线参数、设计张拉力、理论伸长值、持荷时间、张拉顺序。

2.设备安装对中

锚具、夹片、限位板、千斤顶严格对中,钢绞线顺直无扭缠、无交叉受力。

3.自动分级张拉流程

系统按设定流程自动执行: $0 \rightarrow 10$

持荷 5min 后自动锚固、自动锁顶。

4.同步控制要求

两端张拉同步力差 $\leq \pm 1\%$, 多项张拉平衡误差 $\leq \pm 2\%$ 。

5.数据自动采集与上传

实时记录压力、位移、伸长量、时间,生成张拉曲线与检测报告,实现全过程可追溯。

6.异常保护机制

出现断丝、滑丝、伸长量超标、压力突变时,系统自动停机并声光报警。

3.4 预应力孔道施工

预应力孔道是预应力筋的布设通道,其成型质量直接影响预应力筋穿束与张拉效果,核心控制要点为孔道定位、成型与防护。

1.孔道定位:根据设计图纸,采用定位钢筋固定波纹管,定位钢筋间距按规范设置,曲线段加密至 50cm,直线段不大于 80cm,确保孔道顺直、坐标精准,偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内。锚垫板与孔道垂直安装,保证预应力筋受力均匀,避免局部应力集中。

2.孔道成型:优先选用塑料波纹管,其耐腐蚀、摩阻力小,可有效减少预应力损失。波纹管连接采用专用接头,密封胶带缠绕牢固,防止浇筑混凝土时漏浆堵塞孔道。浇筑混凝土前,需在波纹管内存入内衬管或充气气囊,防止管道变形,混凝土

浇筑完成后及时抽出, 确保孔道通畅。

3 孔道防护: 施工过程中避免电焊、重物撞击损伤波纹管, 浇筑混凝土时安排专人看护, 及时处理移位、破损的孔道, 浇筑完成后采用高压水或空气清理孔道内杂物, 保证孔道洁净无堵塞。

3.5 预应力筋加工与穿束

1. 钢绞线加工: 钢绞线采用砂轮锯切割, 严禁使用电弧焊或气割, 防止高温损伤钢绞线性能。下料长度根据孔道长度、张拉工作长度、锚具厚度计算确定, 预留足够的张拉操作长度, 一般不小于 80cm。下料完成后进行编束, 梳理顺直, 采用铁丝绑扎牢固, 避免缠绕, 每束钢绞线根数一致, 编号清晰, 便于后续穿束。

2. 穿束施工: 穿束分为人工穿束与机械穿束, 短距离直线孔道采用人工穿束, 长距离、曲线孔道采用卷扬机机械穿束。穿束前检查钢绞线表面无锈蚀、毛刺, 孔道通畅, 穿束过程中避免拖拽损伤钢绞线与波纹管, 穿束完成后调整钢绞线位置, 确保其在孔道内均匀分布, 端部伸出长度一致。

3.6 混凝土浇筑与养护

预应力混凝土需具备高强度、低收缩、密实性好的特点, 浇筑与养护需严格遵循规范要求。

1. 浇筑: 采用分层分段对称浇筑工艺, 分层厚度控制在 30~50cm, 避免一次性浇筑过厚导致振捣不实、温度裂缝。浇筑顺序从梁体两端向中间推进, 先浇筑底板与腹板, 再浇筑顶板, 振捣采用插入式振捣器, 快插慢拔, 振捣至混凝土表面泛浆、无气泡上升为止, 严禁振捣器触碰波纹管、钢筋及模板, 防止孔道移位、钢筋变形。浇筑过程中实时监测模板、支架变形情况, 发现异常及时停工处理。

2. 混凝土养护: 混凝土浇筑完成后, 表面及时覆盖土工布、保湿膜, 洒水养护, 养护时间不少于 14 天。夏季施工避免阳光直射, 采取遮阳措施, 控制混凝土内外温差不大于 25°C; 冬季施工采用保温养护, 覆盖保温棉被, 必要时采用蒸汽养护, 防止混凝土受冻。养护期间严禁踩踏、堆放重物, 待混凝土强度达到设计强度的 85% 以上, 且弹性模量满足设计要求后, 方可进行预应力张拉作业。

参考文献

- [1] JTG/T 3650-2020, 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [2] 叶见曙. 结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [3] 王梦恕. 现代预应力混凝土桥梁施工技术与质量控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [4] 李建军. 大跨度预应力混凝土连续梁桥施工关键技术研究[J]. 公路工程, 2022, 47(03): 156-161.
- [5] 张敏. 预应力混凝土桥梁施工常见问题及防控措施探析[J]. 交通世界, 2021(28): 89-90.
- [6] 刘军. 智能张拉技术在预应力桥梁施工中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(12): 102-103.
- [7] 陈宝春. 预应力混凝土桥梁曲线束摩擦损失计算与工程应用[J]. 铁道工程学报, 2021(06): 78-83.

3.7 孔道压浆与封锚

孔道压浆的目的是保护预应力筋免受腐蚀, 使预应力筋与混凝土形成整体, 共同受力, 需保证压浆密实、饱满。

1. 压浆准备: 张拉完成后及时切除多余钢绞线, 外露长度不小于 30mm, 严禁采用电弧切割, 采用砂轮锯切割。封堵锚具端部缝隙, 安装压浆管与排气管, 压浆管选用高压橡胶管, 连接牢固无渗漏。

2. 压浆施工: 水泥浆选用普通硅酸盐水泥配制, 水胶比控制在 0.30~0.35, 流动度 18~22s, 泌水率不大于 2%, 且泌水在 24h 内可被水泥浆吸收。可掺入适量膨胀剂、减水剂, 改善水泥浆性能, 防止收缩开裂。压浆采用真空辅助压浆工艺, 先对孔道抽真空, 真空度维持在 -0.06~-0.08MPa, 然后从一端压浆, 待另一端排出浓浆后, 封闭出浆口, 持压 3~5min, 确保孔道内水泥浆密实无空隙。压浆过程连续进行, 不得中断, 冬季施工保证压浆环境温度不低于 5°C, 夏季避免高温暴晒。

3. 封锚施工: 压浆完成后, 清理锚具表面杂物, 绑扎封锚钢筋, 浇筑封锚混凝土, 混凝土强度与梁体一致, 养护完成后做好防水处理, 保证锚具区域密封完好, 防止水分侵入腐蚀预应力筋。

4 结语

预应力混凝土桥梁施工是一项系统性工程, 涵盖前期准备、预应力计算、张拉控制、智能张拉、核心工序、质量管控等多个环节, 技术要求高、管控要点多。施工过程中, 需严格遵循现行规范与设计的要求, 精准掌握先张、后张及曲线预应力计算方法, 严格执行张拉应力与伸长量双控校核标准, 规范智能张拉操作工艺, 同时强化预应力孔道、混凝土浇筑、孔道压浆等关键工序管控, 落实全过程质量监测, 有效防控常见施工问题, 确保预应力施加精准、结构受力合理、施工质量达标。

随着施工技术的不断创新, 智能化张拉、BIM 技术模拟、真空辅助压浆等先进技术的应用, 进一步提升了预应力混凝土桥梁施工的精准度与效率。未来施工中, 需持续优化施工工艺, 加强技术创新与人员培训, 不断提升预应力混凝土桥梁施工水平, 保障桥梁工程的安全性、耐久性与经济性, 为交通基础设施建设高质量发展提供有力支撑。