

# 预应力混凝土箱梁施工质量控制关键技术分析

孙 勇

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 预应力混凝土箱梁施工质量控制关键技术涵盖材料选择、工艺流程及过程监控。施工需严格检验预应力筋、锚具及混凝土原材料质量,确保符合设计标准。通过精准控制模板安装、钢筋绑扎、预应力张拉与压浆等关键环节,提升结构稳定性。采用实时监测技术调整施工参数,及时修复裂缝、露筋等缺陷,保障箱梁力学性能与耐久性,实现工程安全与耐久性目标。

**关键词:** 预应力; 混凝土箱梁; 施工质量控制; 关键技术

引言: 预应力混凝土箱梁因其优越的力学性能与跨度能力,广泛应用于桥梁工程中。然而,其施工过程涉及材料性能控制、工艺精度管理及结构应力监测等多环节,任一环节的疏漏均可能导致结构开裂、预应力损失等质量问题,影响工程安全与耐久性。本文聚焦施工质量控制关键技术,系统分析材料检验、模板支架安装、混凝土浇筑及预应力张拉等核心环节的技术要点,为提升箱梁施工质量提供理论支持与实践指导。

## 1 预应力混凝土箱梁施工关键技术概述

### 1.1 预应力混凝土箱梁结构特点

(1) 力学性能与受力分析: 该结构通过预应力筋预先施加压力,有效抵消运营阶段产生的拉应力,显著提升结构抗裂性和刚度,延缓混凝土碳化进程。受力时,箱梁腹板主要承受剪力和部分弯矩,翼缘板承担横向弯矩,底板在预应力作用下形成受压区,整体受力体系均衡,适用于大跨度桥梁工程。(2) 箱梁截面形式与优势: 常见截面形式包括单箱单室、单箱多室等,截面呈封闭状,具有良好的抗扭性能和整体性。相比实心梁,其自重更轻,能减少下部结构负荷,且截面惯性矩大,跨越能力强,可适应复杂地质与跨度需求。

### 1.2 施工工艺流程

(1) 支架搭设与模板安装: 支架需进行强度、刚度和稳定性验算,采用碗扣式或盘扣式支架体系,搭设后进行预压消除非弹性变形。模板选用钢模板,确保表面平整光滑,接缝严密,安装后校核轴线、标高及垂直度。(2) 钢筋绑扎与预应力管道布置: 钢筋绑扎遵循设计间距,注重保护层厚度控制,预应力管道采用金属波纹管,安装时固定牢固,保证位置准确,接头处密封处理,防止混凝土浇筑时漏浆堵管。(3) 混凝土浇筑与养护: 采用泵送连续浇筑,从腹板向底板、翼缘板推进,振捣密实避免蜂窝麻面。养护采用洒水覆盖或蒸汽养护,保持

湿度在90%以上,养护期不少于7天。(4) 预应力张拉与压浆: 张拉前校验设备,采用双控法(应力和伸长值),按设计顺序对称张拉。张拉完成后及时压浆,水泥浆稠度不低于设计要求,确保管道密实<sup>[1]</sup>。

### 1.3 质量控制的主要环节

(1) 材料质量控制: 混凝土原材料需检验合格,配合比优化设计; 钢材、预应力筋进场时核查质量证明文件,进行力学性能试验,不合格材料严禁使用。(2) 施工过程监控: 实时监测混凝土浇筑温度,避免温差裂缝; 采用传感器监测结构变形和应力,及时调整施工参数,确保结构稳定性。(3) 成品验收与缺陷修复: 验收时检测截面尺寸、外观质量及预应力值,对表面裂缝、露筋等缺陷,采用压力灌浆、粘贴钢板等方法及时修复,确保工程质量达标。

## 2 预应力混凝土箱梁施工质量控制关键技术分析

### 2.1 材料选择与检验技术

(1) 混凝土配合比设计与性能要求: 需结合箱梁受力特点与施工环境,采用“低水化热、高抗裂、强耐久性”设计原则。胶凝材料选用P.O42.5低热水泥,掺加I级粉煤灰(掺量20%-30%)与矿粉(掺量10%-15%),减少水泥用量至300-350kg/m<sup>3</sup>; 粗骨料选用连续级配碎石(5-25mm),含泥量≤1%; 细骨料采用中砂,细度模数2.6-3.0,含泥量≤3%; 外加剂选用聚羧酸系高效减水剂,减水率≥25%,控制混凝土坍落度在180-220mm(泵送施工)。性能需满足: 28d抗压强度≥设计值,弹性模量≥3.25×10<sup>4</sup>MPa,抗裂等级≥P8,氯离子渗透系数≤1.0×10<sup>-12</sup>m/s。(2) 预应力筋、锚具及管道的质量检验标准: 预应力筋(钢绞线)进场需核查质量证明书,按每批次30t取样,检测抗拉强度(≥1860MPa)、屈服强度(≥1670MPa)、伸长率(≥3.5%),外观无锈蚀、损伤; 锚具(夹片式)按每2000套取样,做静载锚固性能试验,

效率系数  $\geq 0.95$ , 总应变  $\geq 2.0\%$ , 外观无裂纹、变形; 金属波纹管 ( $\Phi 50-\Phi 100\text{mm}$ ) 按每1000m取样, 检测壁厚 ( $\geq 0.3\text{mm}$ )、刚度 (径向刚度  $\leq 0.2\text{mm/kN}$ )、密封性 (水密性试验无渗漏)<sup>[2]</sup>。

## 2.2 模板与支架施工技术

(1) 模板刚度与稳定性控制: 采用定制钢模板, 面板厚度  $\geq 6\text{mm}$ , 背楞采用[10槽钢 (间距  $\leq 50\text{cm}$ ), 横肋采用I14工字钢 (间距  $\leq 120\text{cm}$ )。模板组装后, 需验算刚度 (挠度  $\leq L/400$ ,  $L$ 为模板跨度) 与稳定性, 通过对拉螺栓 (M20, 间距  $\leq 80\text{cm}$ ) 加固, 螺栓与模板接触处加设钢垫片 (厚度  $\geq 5\text{mm}$ ), 防止模板变形。模板接缝处粘贴5mm厚海绵条, 拼接缝隙  $\leq 1\text{mm}$ , 避免漏浆。

(2) 支架预压与变形监测: 支架采用盘扣式脚手架 (立杆间距  $\leq 60\text{cm}$ , 横杆步距  $\leq 120\text{cm}$ ), 搭设完成后进行分级预压 (分3级: 50%、100%、120%设计荷载), 每级持荷时间  $\geq 24\text{h}$ 。预压前在支架顶部、中部及底部布设沉降观测点 (每10m设1个断面, 每个断面3个点), 采用水准仪监测沉降值, 直至最后24h沉降差  $\leq 2\text{mm}$ , 确定支架弹性变形与非弹性变形, 预压完成后根据变形值调整模板标高, 确保施工后箱梁标高符合设计要求。

## 2.3 混凝土浇筑与养护技术

(1) 浇筑顺序与振捣工艺: 采用分层分段浇筑, 分层厚度  $\leq 30\text{cm}$ , 分段长度  $\leq 10\text{m}$ , 浇筑顺序从箱梁底板两端向中间推进, 再浇筑腹板 (对称浇筑, 高差  $\leq 50\text{cm}$ ), 最后浇筑翼缘板。振捣采用插入式振捣棒 ( $\Phi 50$ , 振捣间距  $\leq 30\text{cm}$ ), 振捣时间控制在20-30s, 至混凝土表面无气泡、泛浆为止, 避免漏振 (腹板与底板交接处需加强振捣) 与过振 (防止骨料离析)。(2) 温控措施与裂缝预防: 浇筑前控制混凝土入模温度  $\leq 30^\circ\text{C}$  (夏季采用冰水拌合骨料、夜间浇筑); 浇筑过程中在箱梁腹板、底板埋设温度传感器 (每5m设1个点), 实时监测内部温度, 当内外温差  $\geq 25^\circ\text{C}$  时, 覆盖保温被并通循环水降温。混凝土初凝后 (浇筑完成后4-6h), 在表面覆盖土工布, 采用喷淋养护 (每2h喷水1次), 保持表面湿润。(3) 养护制度与湿度控制: 混凝土浇筑完成后12h内启动养护, 标准养护期  $\geq 14\text{d}$  (冬季采用蒸汽养护, 温度控制在5-35 $^\circ\text{C}$ , 相对湿度  $\geq 90\%$ )。采用湿度传感器监测养护环境湿度, 当湿度  $< 90\%$  时, 增加喷淋次数或覆盖塑料薄膜密封, 确保混凝土强度正常发展, 减少收缩裂缝<sup>[3]</sup>。

## 2.4 预应力张拉与压浆技术

(1) 张拉顺序与力值控制: 张拉需在混凝土强度达到100%设计值且龄期  $\geq 14\text{d}$  后进行, 采用对

称张拉工艺 (先腹板后翼缘, 先下后上), 按 “0 $\rightarrow$ 10% $\sigma_{\text{con}} \rightarrow$ 20% $\sigma_{\text{con}} \rightarrow$ 100% $\sigma_{\text{con}}$  (持荷5min)  $\rightarrow$ 锚固” 步骤施工 ( $\sigma_{\text{con}}$  为设计张拉控制应力)。采用双控法控制 (应力控制为主, 伸长值校核为辅), 实际伸长值与理论伸长值偏差需在  $\pm 6\%$  以内, 若超出偏差, 需暂停张拉, 检查预应力筋、管道是否存在问题, 调整后再继续。(2) 压浆材料选择与密实度检测: 压浆采用专用无收缩水泥浆, 水泥选用P.O42.5R水泥, 掺加压浆专用外加剂 (含膨胀剂、减水剂), 配合比需满足: 水胶比  $\leq 0.35$ , 流动度 (25 $^\circ\text{C}$  时)  $\leq 30\text{s}$ , 28d抗压强度  $\geq 30\text{MPa}$ , 膨胀率1%-2%。压浆采用真空辅助压浆工艺 (真空度  $\geq -0.09\text{MPa}$ ), 压浆压力控制在0.5-0.7MPa, 持压时间  $\geq 5\text{min}$ 。压浆完成后28d, 采用超声波检测仪检测管道密实度, 对不密实部位 (声学参数异常区域), 钻孔压浆补密实。

## 2.5 变形监测与应力控制技术

(1) 施工阶段变形监测方法: 采用 “全站仪+应变传感器” 联合监测, 变形监测包括箱梁标高 (每浇筑段设3个观测点, 采用全站仪按二等水准精度测量)、轴线偏位 (每10m设1个断面, 测量箱梁中心轴线与设计轴线偏差, 允许偏差  $\leq 10\text{mm}$ ); 应力监测在预应力筋张拉前, 在箱梁腹板、锚固区粘贴振弦式应变传感器 (每5m设1个点), 实时采集施工各阶段 (浇筑、张拉、养护) 的应力数据, 数据采集频率为每小时1次 (张拉阶段每10min1次)<sup>[4]</sup>。(2) 应力分布模拟与实时调整: 施工前采用Midas Civil软件建立箱梁有限元模型, 模拟各施工阶段应力分布, 确定应力控制阈值 (腹板最大压应力  $\leq 0.6f_{\text{ck}}$ ,  $f_{\text{ck}}$  为混凝土轴心抗压强度标准值)。施工中对模拟应力与实测应力, 当实测应力超出阈值10%时, 及时调整施工参数 (如减缓浇筑速度、调整张拉顺序、加强养护), 若应力过小, 检查预应力筋张拉是否到位、混凝土强度是否达标, 确保箱梁应力状态符合设计要求, 避免因应力异常导致结构开裂或变形。

## 3 预应力混凝土箱梁施工常见质量问题及防治措施

### 3.1 箱梁表面裂缝问题

(1) 裂缝类型与成因分析: 常见裂缝包括温度裂缝与收缩裂缝。温度裂缝多因混凝土浇筑后内外温差过大 (超过25 $^\circ\text{C}$ ), 内部热量难以散发, 外部快速降温收缩, 内部受拉产生裂缝, 多分布于腹板与翼缘板交接处; 收缩裂缝则源于混凝土硬化过程中水分蒸发, 体积收缩受模板或钢筋约束, 形成表面细短裂缝, 常见于箱梁底板与翼缘板表面。此外, 水泥水化热过高、养护不及时也会加剧裂缝产生。(2) 防治措施: 优化混凝土配合比, 选用低热水泥, 掺加粉煤灰、矿粉减少水泥用量, 同时

掺入聚丙烯纤维抑制裂缝扩展；浇筑时控制入模温度不超过30℃，夏季采用骨料遮阳、冷水拌合，冬季做好保温；加强养护，浇筑后12h内覆盖土工布，采用自动喷淋系统保持湿度，养护期不少于14d；对已出现的细微裂缝，采用环氧树脂浆液低压灌注修复，较宽裂缝需凿槽嵌入止水条后灌浆。

### 3.2 预应力损失问题

(1) 预应力损失计算与监测：预应力损失主要包括锚具变形损失、摩擦损失、钢筋松弛损失等，需依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》计算，如锚具变形损失按 $\Delta\sigma_{l1} = (a/E_p) \times 1000$ 计算（ $a$ 为锚具变形值， $E_p$ 为预应力筋弹性模量）。施工中通过在预应力筋上粘贴应变片，或使用预应力损失监测仪，实时监测张拉前后及运营初期的应力变化，掌握损失规律。(2) 减少损失的技术措施：采用超张拉工艺，张拉时将应力提高至设计值的1.03-1.05倍，持荷5-10min，抵消钢筋松弛损失；针对摩擦损失，张拉前在管道内涂抹专用润滑剂，确保预应力筋顺畅滑动，同时采用两端对称张拉，减少孔道摩擦影响；对长期存放的预应力筋，采用二次张拉技术，在第一次张拉后1-2d进行补张拉，弥补早期松弛损失。

### 3.3 局部应力集中问题

(1) 锚固区与接缝处应力分析：锚固区因预应力筋集中受力，锚具对混凝土产生局部挤压，易出现应力集中，导致锚固区混凝土开裂、压溃；接缝处（如分段浇筑的施工缝）因新旧混凝土结合面粘结强度不足，受荷载作用时易产生剪切裂缝，尤其在腹板与底板接缝处风险较高。(2) 结构优化与加固方法：优化锚固区结构设计，在锚具周围设置螺旋筋或钢筋网片，增强局部混凝土抗压能力，同时增大锚固区截面尺寸，分散集中应力；接缝施工前，将旧混凝土表面凿毛，清除浮浆，涂刷界面剂，浇筑新混凝土时加强振捣，确保结合紧密；对已

出现应力集中的区域，采用粘贴碳纤维布或外包钢板的方式加固，碳纤维布粘贴时需保证平整度，钢板采用化学锚栓固定，提升局部承载能力。

### 3.4 其他质量问题

蜂窝麻面多因混凝土配合比不当（砂率过低、坍落度偏小）、振捣不密实，或模板表面粗糙、漏浆导致，表现为表面出现孔洞、麻点；漏浆则源于模板拼接缝隙未密封、对拉螺栓松动，或波纹管接头密封不严，混凝土浇筑时浆液渗漏。修复时，对蜂窝麻面先清理表面杂物，用高压水枪冲洗干净，采用同强度等级细石混凝土填补，振捣密实后覆盖养护；漏浆形成的缝隙，先剔除松动混凝土，采用环氧树脂砂浆嵌填，表面抹平；若波纹管漏浆导致管道堵塞，需钻孔清理后重新压浆，确保预应力施工质量。

### 结束语

预应力混凝土箱梁施工质量控制是保障桥梁结构安全与耐久性的核心环节。通过严格把控材料性能、规范施工工艺流程、强化实时监测与动态调整，可有效减少裂缝、预应力损失及应力集中等质量问题。未来需进一步融合智能化监测技术与精细化施工管理，推动施工控制向标准化、数字化方向发展，为提升大型桥梁工程的建设质量与长期服役性能提供坚实保障，助力交通基础设施高质量发展。

### 参考文献

- [1]刘龄嘉,徐岳.预应力混凝土桥梁施工控制技术研究进展[J].中国公路学报,2021,(08):118-120.
- [2]张士铎,郭小宏.预应力混凝土桥梁施工质量控制要点分析[J].施工技术,2022,(12):105-106.
- [3]周磊.支架现浇预应力混凝土连续箱梁施工关键技术[J].设备管理与维修,2024,(10):89-90.
- [4]朱克东.市政工程现浇预应力混凝土连续箱梁施工技术研究[J].建筑工程技术与设计,2024,(15):148-150.