

# 预应力混凝土箱梁张拉顺序对结构线形偏差的影响

段志成

(青海省兴利公路桥梁工程有限公司, 青海 西宁 810001)

**摘 要** 预应力混凝土箱梁张拉顺序是控制线形偏差的核心环节, 直接影响结构预应力场建立质量与使用安全。本文详细阐述了张拉工艺要求、线形偏差判定标准及二者关联特性, 分析了张拉顺序不合理、分级持荷控制不当、对称张拉偏差引发的线形偏差问题, 提出了规划张拉批次、规范张拉参数、强化对称精度的优化措施, 并通过现场实践验证, 旨在为同类工程提供实践参考。结果表明, 优化后的张拉顺序可有效解决线形偏差问题, 保障箱梁结构线形精度与施工质量。

**关键词** 预应力混凝土箱梁; 张拉顺序; 结构线形偏差; 张拉工艺; 线形控制

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.18.021

## 0 引言

预应力混凝土箱梁因抗弯抗扭性能优良、跨越能力强, 广泛应用于公路、铁路桥梁工程中。结构线形作为衡量箱梁施工质量的核心指标, 直接关系到桥梁受力合理性与长期运营安全。张拉作业是箱梁预应力施加的关键工序, 其顺序安排直接影响预应力场分布与结构变形协调性, 不合理的张拉顺序易引发线形偏差, 进而影响工程质量。因此, 明确张拉顺序与结构线形偏差的关联, 剖析相关问题并探索优化路径, 对规范施工流程、保障桥梁结构安全稳定具有重要的工程实践意义。

## 1 预应力混凝土箱梁张拉及结构线形偏差概述

### 1.1 预应力混凝土箱梁张拉工艺核心要求

预应力混凝土箱梁通过施工阶段对内部预应力钢筋施加压应力, 提升混凝土抗拉性能, 实现钢筋与混凝土协同工作, 从而增强梁体承载能力、减小结构变形。相较传统预制箱梁, 其自重轻、刚度大、施工便捷, 在桥梁工程中应用广泛。箱梁预应力张拉工艺需全程规范、精准、稳定, 严格遵循设计与受力要求。张拉前应对千斤顶、油泵、压力表同步标定, 检测钢绞线、锚具等材料, 清理孔道以降低摩阻; 张拉时匀速加载、规范持荷, 采用对称同步张拉, 合理安排钢束张拉顺序, 确保受力均衡, 并核对伸长值, 及时排查锚具滑移、钢绞线断丝等问题, 保障箱梁线形与结构安全。

### 1.2 结构线形偏差的判定标准及危害

结构线形偏差判定以设计文件及施工规范为依据, 采用水准仪、全站仪精准测量主梁标高与轴线偏位, 将实测数据与监控目标线形对比, 按控制标准判定偏差, 超出限值即为线形异常<sup>[1]</sup>。判定时需排除温度、测量误差等干扰, 重点核查节段轴线偏位、顶面高程及合龙段对称点高差等关键指标。线形偏差会破坏箱梁受力均衡, 导致应力分布不均, 加速混凝土碳化与钢筋锈蚀, 降低结构耐久性; 轻微偏差影响桥面平顺与行车舒适性, 严重偏差则会引发箱梁过大挠曲或拱起, 增加合龙难度, 诱发梁体开裂, 影响体系转换, 危及运营安全并缩短桥梁使用寿命。

### 1.3 张拉顺序与结构线形偏差的关联特性

张拉顺序与结构线形偏差紧密相关, 主要影响预应力传递均衡性与结构变形协调性。预应力混凝土箱梁抗弯抗扭性能优异, 线形变化主要由预应力筋张拉产生的等效荷载分布控制。不同张拉顺序会使预应力在截面内分布不同, 引发弹性压缩、上拱或侧弯, 与设计不符便形成线形偏差。非对称、无序张拉易造成应力集中、变形不协调及预应力损失, 导致梁体挠曲或拱度超限; 合理张拉顺序则能保证预应力均匀传递, 减少不均匀变形。前期张拉钢束会受后续张拉变形影响产生附加应力损失, 损失差异随工序累积, 直接影响箱梁线形偏差大小与分布, 降低整体线形控制精度。

作者简介: 段志成 (1975-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路工程施工管理。

## 2 预应力混凝土箱梁张拉顺序引发结构线形偏差的问题分析

### 2.1 张拉顺序不合理导致的应力分布失衡问题

张拉顺序失当会破坏箱梁预设受力平衡,导致预应力传导不均,直接改变结构受力状态。预应力张拉依靠反向预压应力抵消后期拉应力,每束钢束张拉均会改变结构刚度,进而影响后续钢束受力<sup>[2]</sup>。若违背对称均匀原则,盲目单侧或无序张拉,会使先张拉钢束受后续变形影响产生二次压缩,造成有效预应力损失,未张拉区域也会产生附加应力。这种失衡易引发局部压应力超标,导致锚下混凝土压溃、剥落,同时部分区域预应力不足,难以抵抗荷载拉应力,引发局部变形,最终造成箱梁线形偏差并留下结构安全隐患。

### 2.2 分级张拉及持荷控制不当引发的线形偏差

分级张拉与持荷控制不当是箱梁线形偏差的重要诱因。分级张拉未按规范梯度加载、张拉间隙停留时间不足,会造成预应力筋应力传递不均,箱梁截面受力失衡,引发梁体上拱或下挠。持荷控制不到位,如持荷时间不足、张拉应力未稳定,无法抵消钢绞线应力松弛,导致锚固后预应力异常损失,有效预应力达不到设计值。这会使箱梁预压应力场分布不均,各部位变形不一致,悬臂段及合龙段易出现线形偏移、不顺滑,偏差随施工逐步累积,进一步加大梁体线形与设计要求的偏离。

### 2.3 对称张拉偏差导致的箱梁横向偏移问题

对称张拉时,左右腹板钢束张拉时机与拉力难以完全同步,即使油表读数一致,钢绞线伸长量差异仍会造成截面受力失衡,产生横向附加弯矩。箱梁宽翼板、薄腹板的结构特点导致横向刚度较弱,附加弯矩易使梁体绕中性轴扭转,跨中悬臂段扭转更为明显。孔道偏差与摩阻不均会加剧应力不对称,使单侧有效预应力偏高,进一步加大横向偏移。支架现浇或存梁阶段临时约束不足,难以抵消张拉水平分力,易造成梁体横桥向不可逆位移,偏移量随张拉批次累积,严重影响后续线形控制。

## 3 基于线形偏差控制的预应力混凝土箱梁张拉顺序优化措施

### 3.1 合理规划张拉批次及束类先后顺序

张拉批次规划应结合箱梁受力特性、混凝土龄期、强度及弹性模量发展规律,按预设施工阶段合理划分。每批张拉钢束数量需与结构承载能力匹配,严控单批次张拉数量,防止局部应力集中导致线形偏移。批次间隔应满足混凝土弹性压缩稳定要求,待前一批张拉

引起的结构变形充分稳定后再进行下一批作业,减少变形叠加对线形的影响<sup>[3]</sup>。张拉顺序严格遵循对称原则,优先张拉纵向预应力束,横向束可结合挂篮施工位置适当延后,避免滞后效应对纵向线形控制产生不利影响。纵向束区分长、短束,先张拉长束平衡跨中与梁端应力,再张拉短束优化局部应力;腹板束左右对称同步张拉,顶板与底板束按受力均衡要求有序实施,确保预应力均匀传递至箱梁全截面,从源头有效控制线形偏差。

### 3.2 规范分级张拉参数及持荷时间控制

分级张拉参数的规范设定需结合箱梁预应力筋布置特点、孔道摩阻特性及混凝土弹性模量,合理划分张拉分级节点,确保每级张拉荷载均匀传递至箱梁结构,避免因荷载突变导致局部应力集中,进而引发线形偏移。张拉过程中需严格控制加载速率,保持油压缓慢平稳上升,使预应力筋受力均匀,减少因加载过快产生的瞬时应力差对箱梁线形的扰动。持荷时间需严格遵循施工规范要求,每级张拉完成后需保持足够持荷时长,为预应力筋的应力传递和混凝土的弹性变形提供充足时间,缓解预应力损失带来的线形偏差,其中终张拉阶段持荷时长需满足规范最低要求,确保预应力筋应力稳定,同时需在持荷期间实时监测箱梁线形变化,及时发现并调整异常偏差,保障张拉过程中箱梁线形始终处于可控范围(见图1)。

### 3.3 强化对称张拉精度及偏差防控

强化对称张拉精度与偏差防控需贯穿张拉全流程,从施工准备到作业实施形成闭环管控,有效避免因张拉失衡导致箱梁线形偏差。张拉前应应对千斤顶、油泵、压力表等设备配套校验,对锚具、钢绞线、波纹管等材料严格检测,并清理孔道、修正摩阻系数、优化伸长值计算。采用智能张拉设备,将张拉力与理论伸长量输入系统,自动完成送油张拉、保压、回油锚固,同步记录压力与伸长量。张拉过程实现多台千斤顶同步控制,严控加载速率与分级持荷时间,保证两侧钢束张拉进度与力值一致,确保锚垫板、千斤顶、限位板与孔道四心同轴。同时,实时监测伸长量与梁体线形,及时处置油路泄漏、夹片异常等问题,动态微调偏差、防止累积,从源头保障对称张拉精度与线形质量。

## 4 预应力混凝土箱梁张拉顺序优化的实践应用验证

### 4.1 优化方案的现场施工应用流程

优化后的预应力混凝土箱梁张拉顺序现场施工流程以箱梁受力特性为核心。施工前完成千斤顶、油泵、压力表配套校验,保证设备匹配稳定;清理锚垫板与预

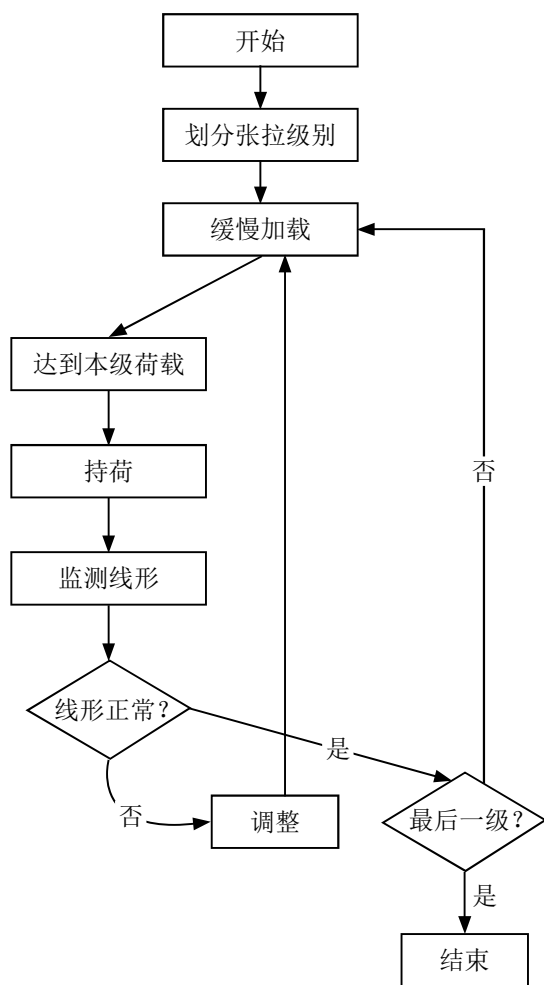


图 1 箱梁预应力分级张拉控制流程图

应力筋，检查锚后混凝土密实度，复核钢绞线、锚具、波纹管等材料质量。张拉严格遵循对称原则，由腹板束对称部位起步，缓慢升压至初应力并标记伸长量起点，匀速加载至设计张拉力后持荷，待应力均匀传递再实施锚固，再依次张拉顶板束与底板束<sup>[4]</sup>。全过程实时监测箱梁线形，记录张拉力、伸长值、锚固回缩值等关键数据，逐束检查夹片贴合状态，及时排查钢绞线滑移、断丝等隐患，确保各工序满足优化方案与规范要求，实现张拉施工安全、精准、平稳进行。

#### 4.2 线形偏差的现场监测及数据对比

线形偏差现场监测选取某（30+40+30）m 预应力混凝土连续箱梁为研究对象，采用全站仪、水准仪与分布式光纤光栅传感技术布设监测点，于箱梁顶板、底板及腹板关键截面布置观测点，覆盖梁体跨中、支点及 1/4 跨等易产生线形偏差区域，监测频率与张拉全过程同步，实时采集各阶段竖向高程、横向位移及转角变化数据。张拉采用 YDC2500 型千斤顶及配套校

验油表，分别对优化前后张拉顺序开展监测，优化前采用非对称张拉，优化后执行“先中间跨后边跨、先腹板束后顶底板束”的对称张拉方案，张拉控制应力 1 395 MPa，持荷 5 min 后锚固。监测结果表明，优化前跨中竖向线形最大偏差 8 mm，优化后降至 2 mm 以内，支点横向位移偏差由 5 mm 缩减至 1 mm，与同类工程监测参数相符，体现优化张拉顺序在结构线形偏差控制中的良好效果。

#### 4.3 优化方案的实用性及推广价值

预应力混凝土箱梁张拉顺序优化方案实用性强，可直接适配现有施工设备与工艺体系，无需新增专用设备或大幅调整流程，适用于不同跨径、截面形式的箱梁，预制与现浇施工均能与原有工序顺畅衔接<sup>[5]</sup>。该方案结合有限元模拟与现场实测校准参数，可缓解局部应力集中、梁体线形偏移等问题，降低返工率与作业强度，配合智能张拉系统实现全过程精准管控。方案推广价值高，适用于公路、铁路等各类箱梁桥梁工程，对大跨度、异形截面及线形要求高的重点工程适用性更强，可为同类工程提供技术参考，推动预应力施工向高效、精准、规范化升级，提升桥梁整体质量与结构耐久性。

#### 5 结束语

预应力混凝土箱梁的张拉顺序直接决定结构预应力场的建立质量，是控制线形偏差的核心环节。本文结合施工实践，剖析了张拉顺序不合理、分级持荷失控及对称精度不足引发的三类线形偏差问题，提出了基于批次规划、参数规范与精度防控的优化策略。工程实测表明，优化后的张拉顺序可显著降低梁体竖向与横向线形偏差，满足规范及设计要求。该方案适配性强、可操作性高，其技术路径可为公路、铁路预应力箱梁施工提供实践参考，对提升桥梁结构施工精度与长期运营耐久性具有重要的应用价值。

#### 参考文献：

- [1] 高见峰. 波形钢腹板预应力组合箱梁顶推施工技术研究[J]. 江西建材, 2022(12):225-226.
- [2] 孙文火, 李平杰. 三向预应力混凝土斜拉桥箱梁裂缝研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17):7052-7058.
- [3] 宋芝明. 预应力混凝土箱梁张拉过程结构行为研究[J]. 工程建设与设计, 2025(11):99-101.
- [4] 李国凯. 后张法预应力混凝土简支箱梁张拉施工工艺技术分析[J]. 四川水泥, 2023(04):215-217.
- [5] 董磊. 后张法预应力混凝土连续箱梁张拉施工要点[J]. 河南水利与南水北调, 2022, 51(08):49-50.