

# 基于预应力技术的高速公路桥梁施工研究

蒋小波

(四川公路桥梁建设集团有限公司, 四川 成都 610093)

**摘 要** 随着我国高速公路网络建设持续推进, 桥梁工程建设规模及技术复杂度显著提升, 预应力技术凭借其在改善结构受力、提升桥梁承载能力与耐久性方面的独特优势, 已成为现代桥梁工程的关键技术。本文围绕预应力技术在高速公路桥梁施工中的应用展开研究, 并提出现浇连续箱梁预应力张拉施工控制、预制 T 梁后张法施工工艺、悬臂浇筑桥梁竖向预应力安装技术及高速公路匝道桥预应力孔道定位控制技术, 旨在为提高桥梁整体的施工质量、延长其使用寿命提供实践参考, 进而促进高速路桥梁工程高质量发展。

**关键词** 预应力技术; 高速公路; 桥梁施工

中图分类号: U445.57

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.017

## 0 引言

近年来, 高速公路桥梁工程建设规模不断扩大, 施工环境也呈现出更加复杂的发展趋势, 对结构安全及长期稳定性提出了更高要求。高速公路桥梁工程有着较强的综合性, 其施工过程涉及多种工艺及技术环节。预应力技术在桥梁施工中的应用, 能够改善结构受力性能, 提高工程整体质量及运行安全性。然而, 从当前实际情况来看, 该技术在具体应用过程中仍存在一定提升空间, 尚难以完全满足复杂工程条件下的施工需求, 因此有必要对其应用进行进一步分析研究。

## 1 预应力技术概述

预应力技术是在混凝土结构承载之前, 或承载过程中施加一定的预压应力, 使构件内部产生和外荷载方向相反的应力状态, 继而改善结构受力性能的一种

施工方法<sup>[1]</sup>。在高速公路桥梁工程中, 这项技术主要是凭借张拉高强度的钢筋或钢绞线, 让混凝土在受力前预先处于受压状态, 以此抵消或减弱外荷载作用下产生的拉应力, 减少裂缝出现的可能, 提高结构的整体刚度及承载能力。预应力技术一般分为先张法和后张法两种施工形式, 分别适用于不同的结构类型及施工条件(如表 1 所示)。采用这项技术, 可提高桥梁构件的抗裂能力、耐久性能及使用年限, 同时有助于控制结构变形、改善受力分布。

## 2 高速公路桥梁施工中预应力技术的应用要点

### 2.1 预应力施工前期准备工作

在高速公路桥梁预应力施工开始前, 要全面核对设计图纸、施工方案及技术参数, 保证张拉力、控制应力及钢绞线规格等都符合工程要求。施工材料方面,

表 1 先张法和后张法区别

| 项目       | 先张法                   | 后张法                          |
|----------|-----------------------|------------------------------|
| 张拉时机     | 混凝土浇筑前张拉预应力筋          | 混凝土浇筑后张拉预应力筋                 |
| 是否需要台座   | 需要坚固的张拉台座             | 不需要固定台座, 可在现场施工              |
| 锚具使用     | 不需要永久性锚具(仅临时夹具)       | 需要永久性锚具, 锚具留在构件中             |
| 适用构件类型   | 多用于中小型构件(空心板梁)        | 多用于大型构件(T 梁、箱梁), 尤其适合曲线预应力布置 |
| 施工灵活性    | 工序较简单, 但受限于台座长度, 不够灵活 | 施工更灵活, 适用于现场拼装和复杂结构          |
| 成本与效率    | 成本较低, 适合工厂化批量生产       | 成本较高, 但适应性强, 适合现场施工          |
| 预应力筋回缩方式 | 依靠预应力筋与混凝土之间的黏结力实现回缩  | 依靠锚具固定, 直接传递预应力              |
| 施工步骤     | 张拉→浇筑混凝土→放松预应力筋       | 浇筑混凝土→穿束→张拉、锚固→孔道压浆          |

作者简介: 蒋小波(1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 公路与桥梁。

应重点检查高强度钢绞线、锚具及波纹管的质量性能。其中钢绞线的抗拉强度一般 $\geq 1\ 860\ \text{MPa}$ ，以保证结构受力的安全。同时，对张拉设备进行标定和校验，误差要控制在 $\pm 2\%$ 。施工现场还需完成孔道定位及模板安装，并对混凝土配合比进行试验调整，水胶比通常控制在 $0.35 \sim 0.45$ 之间，以提高结构的密实性<sup>[2]</sup>。

## 2.2 预应力张拉施工技术控制

预应力张拉是桥梁施工中对结构受力性能影响较大的工序，必须严格控制施工过程的规范程度和操作精度<sup>[3]</sup>。张拉前，需对千斤顶、油泵及压力表做统一标定，保证张拉力误差控制在 $\pm 2\%$ 以内。张拉过程中应按分级加载的原则进行，一般按设计张拉力的20%、40%、60%、80%、100%逐级施加，防止应力突变对构件造成损伤。同时，要实时记录伸长值，实际伸长量及理论值的偏差宜控制在 $\pm 6\%$ 范围内。张拉顺序应按设计要求对称进行，以减少结构偏心受力。张拉完成后要及时锚固锁定，并进行复核检测，保障预应力施加均匀稳定，从而保障桥梁结构的整体安全及长期使用性能。

## 2.3 混凝土压浆施工质量管理

预应力孔道压浆施工的质量，是影响后张法预应力构件结构完整程度及使用寿命的重要环节。压浆前，需严格控制浆液配合比，水泥浆的水胶比一般控制在 $0.26 \sim 0.30$ 之间，并掺入适量的减水剂及膨胀剂，以提高抗离析能力。压浆施工应在张拉完成后24 h内进行，以减少孔道锈蚀的风险。压浆时要采用连续注浆的方式，注浆压力通常控制在 $0.5\ \text{MPa} \sim 0.7\ \text{MPa}$ ，保障浆液能填满孔道并把内部空气排出。压浆结束后需进行稳压保压处理，稳压时间 $\geq 2\ \text{min}$ ，以增强密实效果。同时，应对压浆的饱满度进行检测，防止出现空洞或不密实现象，继而提高桥梁结构的防护能力及使用寿命<sup>[4]</sup>。

## 2.4 混凝土浇筑施工工艺应用

混凝土浇筑是预应力桥梁结构成型的基础工序，施工质量的好坏会直接影响后续张拉和整个结构的受力性能<sup>[5]</sup>。施工时，要严格控制混凝土配合比及坍落度，坍落度一般控制在 $120\ \text{mm} \sim 160\ \text{mm}$ 之间，这样才能保证混凝土有足够的流动性，也便于振捣密实。浇筑应遵循分层、分段及连续作业的方式进行，每层厚度宜控制在 $30\ \text{cm} \sim 50\ \text{cm}$ ，并配合振捣设备充分振实，防止出现蜂窝、麻面等质量问题。同时，要合理控制浇筑速度及温度条件，混凝土入模温度宜控制在 $5\ ^\circ\text{C} \sim 30\ ^\circ\text{C}$ 范围内，以减少温度裂缝的出现。在预应力孔道

及钢筋密集的部位，应加强局部振捣和检查，保障结构内部的紧凑均匀。

## 3 高速公路桥梁施工中预应力技术的应用

### 3.1 现浇连续箱梁预应力张拉施工控制

在现浇连续箱梁施工过程中，预应力张拉控制关系着桥梁结构的受力稳定性。在施工阶段需严格控制张拉顺序等参数。施工前，应结合设计要求检测钢绞线、锚具及张拉设备。其中，钢绞线抗拉强度标准值通常为 $1\ 860\ \text{MPa}$ ，弹性模量宜控制在 $1.95\ \text{MPa} \times 10^5\ \text{MPa}$ 左右。千斤顶及压力表应按规范完成配套标定，标定误差需控制在 $\pm 2\%$ ，以保障张拉数据准确。对于跨径30 m以上的连续箱梁，通常采用双控张拉方式，即同时控制张拉应力及理论伸长值，避免单一控制方式造成应力施加不足或超张拉现象。

张拉施工时，应按“对称、分级、均匀”的原则进行操作。一般先进行腹板束张拉，再进行顶板束和底板束施工，以减少结构局部应力集中。分级张拉通常按设计控制应力的20%、40%、60%、80%、100%逐步加载，每级加载完成后需稳定持荷 $2\ \text{min} \sim 3\ \text{min}$ ，观察钢束及锚具状态是否正常。对于长束预应力施工，钢束长度 $> 60\ \text{m}$ 时，宜采用两端同步张拉工艺，以降低孔道摩阻损失。在施工过程中，还应重点控制实际伸长值与理论伸长值之间的偏差，通常要求偏差控制在 $\pm 6\%$ 。当偏差超过规范要求时，必须暂停施工并查明原因，防止因钢束滑移或孔道堵塞影响结构受力性能。在现浇连续箱梁施工后期，还需加强张拉后的结构线形及应力监测。梁体挠度控制通常采用全站仪及位移监测设备联合测量，跨中挠度偏差宜控制在设计值 $\pm 5\ \text{mm}$ 。

### 3.2 预制T梁后张法预应力施工工艺

预制T梁后张法施工是高速公路桥梁工程中的常用工艺，有着施工效率高、结构受力性能稳定等特点，广泛应用于20 m、30 m及40 m跨径桥梁结构中。后张法施工主要是在混凝土达到设计强度后，再对预应力钢束进行张拉，使梁体内部形成稳定的预压应力状态。在施工过程中，需重点控制孔道成型、钢束穿设等工序，以保证预制T梁结构的整体质量及耐久性能。

在梁体预制阶段，应先做好波纹管孔道安装及定位工作。波纹管一般采用金属波纹管或高密度塑料波纹管，安装时需按照设计坐标进行固定，孔道定位偏差通常 $\leq 5\ \text{mm}$ 。对于30 m以上的大跨径T梁，可每隔0.5 m设置一道定位钢筋，以防止浇筑过程中孔道上浮或偏移。混凝土浇筑时，应加强锚固区及波纹管周边

振捣,振捣时间一般控制在 20 s ~ 30 s,防止出现漏振、蜂窝及孔洞现象。梁体混凝土强度达到设计强度的 90% 以上后,方可进行预应力张拉施工。常用混凝土强度等级多为 C50 及以上,其弹性模量通常不低于  $3.45 \text{ MPa} \times 10^4 \text{ MPa}$ ,以满足后张法施工的受力要求。张拉时宜采用两端同步张拉工艺,并按“初张拉—分级张拉—持荷锚固”的顺序进行。张拉完成后,应及时进行孔道压浆施工。压浆宜采用真空辅助压浆工艺,真空度控制在  $-0.06 \text{ MPa} \sim -0.08 \text{ MPa}$  之间,压浆压力控制在  $0.5 \text{ MPa} \sim 0.7 \text{ MPa}$  范围内。浆液水胶比一般为  $0.26 \sim 0.30$ ,并掺加适量膨胀剂及减水剂,以提高浆体流动性及密实性。

### 3.3 悬臂浇筑桥梁竖向预应力安装技术

竖向预应力主要布置于桥梁腹板区域,凭借施加竖向压应力,提高箱梁抗剪能力及腹板整体刚度,减少主梁在长期荷载作用下出现裂缝及变形的问题。在悬臂浇筑施工过程中,由于节段数量较多、结构线形变化明显,若竖向预应力安装偏差过大,容易导致预应力损失增加,甚至影响桥梁整体受力性能。因此,需全过程技术控制竖向预应力筋定位、安装及张拉过程。

施工前,应结合桥梁节段长度及腹板尺寸,精确放样定位竖向预应力筋。通常采用  $\Phi 25 \text{ mm}$  或  $\Phi 32 \text{ mm}$  高强精轧螺纹钢作为竖向预应力材料,其抗拉强度标准值一般  $\geq 930 \text{ MPa}$ 。安装时,应在腹板内部设置定位钢筋网及固定支架,支架间距宜控制在  $0.8 \text{ m} \sim 1.0 \text{ m}$  之间,以保证竖向预应力筋安装稳定。对于箱梁腹板厚度较小区域,竖向筋中心偏差需控制在  $\pm 5 \text{ mm}$ ,避免因安装偏位造成局部受力不均。悬臂节段施工时,每个节段长度一般为  $3 \text{ m} \sim 5 \text{ m}$ ,施工过程中需同步复核竖向预应力孔道位置,确保和设计坐标一致。

混凝土浇筑阶段,应加强腹板区域振捣质量控制,振捣时间宜控制在 20 s ~ 25 s 之间,避免出现漏振及孔洞问题。梁段混凝土强度达到设计强度 90% 以上后,方可进行竖向预应力张拉施工。在施工过程中,应严格控制张拉伸长值及锚固应力变化,实际伸长量与理论值偏差宜控制在  $\pm 6\%$  范围内。对于高墩大跨桥梁,为减少悬臂端不平衡荷载影响,竖向预应力张拉通常采用左右对称施工方式,并控制相邻节段高差不超过 10 mm。竖向预应力施工完成后,还需检查锚固区及腹板裂缝情况。锚固端混凝土局部压应力较大,应增设钢筋加密区或局部加强钢板,提高锚固区域抗裂能力。

### 3.4 高速公路匝道桥预应力孔道定位控制技术

高速公路匝道桥曲线半径小、纵横坡变化大及桥梁线形复杂,预应力孔道往往呈空间曲线布置形式,

施工难度明显高于普通直线桥梁。若孔道定位控制不准确,容易出现波纹管偏移、钢束穿束困难及张拉摩阻损失增大等问题。因此,在高速公路匝道桥施工过程中,需全过程技术控制预应力孔道测量放样等环节,以保证孔道线形满足设计要求。

施工前,应依据桥梁平曲线、超高及纵坡参数建立三维坐标控制体系,并利用全站仪进行精确放样。对于曲线半径小于 300 m 的匝道桥,孔道中心定位偏差通常需控制在  $\pm 3 \text{ mm}$ 。孔道安装时,多采用金属波纹管配合定位钢筋网固定的方式进行施工。波纹管连接处通常采用套管密封工艺,接头长度宜为  $200 \text{ mm} \sim 300 \text{ mm}$ ,并利用胶带进行缠绕封闭,防止混凝土浆液渗入孔道内部造成堵塞。混凝土浇筑阶段是预应力孔道最容易发生偏移的时期。由于匝道桥箱梁断面变化较多,浇筑时应采用分层、对称及连续施工方式,每层浇筑厚度宜控制在  $30 \text{ cm} \sim 40 \text{ cm}$  之间,以减小混凝土侧压力对波纹管的影响。振捣过程中,应避免振捣棒直接接触波纹管,振捣点间距一般控制在 30 cm 左右,单点振捣时间控制在 20 s 左右,防止因过振导致孔道位移。在后续预应力张拉施工中,匝道桥曲线孔道容易产生较大的摩阻损失,因此多采用两端同步张拉工艺进行施工。

## 4 结束语

高速公路桥梁施工对结构安全性及耐久性能有着较高要求,合理应用预应力技术,能改善桥梁受力状态,提高结构整体稳定性。在施工过程中,应结合不同桥梁结构特点,科学控制张拉等重要环节,减少施工误差。未来,伴随桥梁工程向大跨径、复杂化方向发展,预应力施工技术也需不断优化完善,以提升高速公路桥梁工程建设的高质量发展。

## 参考文献:

- [1] 周梁.高速公路桥梁施工中预应力技术的应用[J].汽车画刊,2025(09):119-121.
- [2] 宋吉伟.山区高速公路桥梁施工中预应力技术的应用研究[J].建筑机械,2025(08):338-340,345.
- [3] 李永斌.预应力技术在高速公路桥梁施工中的应用[J].汽车画刊,2025(03):86-88.
- [4] 包国军.基于预应力技术的高速公路桥梁施工[J].工程机械与维修,2023(04):87-89.
- [5] 李帅.预应力技术在高速公路桥梁施工中的应用[J].工程建设与设计,2023(10):198-200.