

公路桥梁施工中预应力技术探讨

陈旭波

中国葛洲坝集团路桥工程有限公司 湖北 宜昌 443000

摘要: 公路桥梁施工中预应力技术通过预先施加应力,有效提升结构抗裂性、刚度与承载能力。该技术涵盖先张法与后张法两大工艺,结合体内/体外、有粘结/无粘结等体系分类,适配不同桥梁类型需求。关键环节包括预应力筋合理布置、张拉顺序控制、孔道压浆密实度保障等。其应用显著减轻桥梁自重、降低材料消耗,同时需严格控制材料质量、设备精度及施工工艺,以规避预应力损失、压浆不饱满等质量通病。

关键词: 公路桥梁施工; 预应力技术; 应用

引言: 在现代公路桥梁建设中,随着桥梁跨径不断增大、结构形式日益复杂,传统混凝土结构因抗裂性不足、刚度衰减快等问题逐渐难以满足工程需求。预应力技术通过预先对混凝土施加压应力,有效抵消荷载产生的拉应力,成为提升桥梁结构性能的核心手段。其不仅能减小结构截面尺寸、减轻自重,还可显著延长桥梁使用寿命,降低后期维护成本。本文围绕预应力技术原理、施工工艺、质量控制及典型应用展开探讨,为公路桥梁工程实践提供理论参考与技术支撑。

1 预应力技术基本理论

1.1 预应力技术原理

(1) 预应力混凝土的定义与分类: 定义为在结构承受荷载前,对混凝土受拉区预先施加压力,抵消荷载产生的拉应力,提升抗裂性与刚度的混凝土。分类中,先张法是在浇筑混凝土前张拉预应力筋并固定,待混凝土达到强度后放张,依靠粘结力传递预应力,适用于预制构件;后张法是浇筑混凝土时预留孔道,混凝土达标后穿筋张拉并锚固,通过锚具传递预应力,多用于现场施工的大型构件。(2) 预应力损失的组成与计算方法: 组成包括摩擦损失(预应力筋与孔道壁摩擦导致)、锚具变形损失(张拉后锚具变形引起)、温差损失(混凝土与筋材温差产生)等。计算时,摩擦损失按 $\sigma_{11} = 2\sigma_{con}l\mu + \sigma_{con}\kappa x$ (μ 为摩擦系数, κ 为孔道偏差系数)计算;锚具变形损失按 $\sigma_{12} = \frac{a}{l} \times 1000$ (a 为锚具变形值, l 为筋长)计算,再叠加其他损失得总损失^[1]。

1.2 预应力体系分类与特点

(1) 有粘结与无粘结预应力对比: 有粘结预应力筋与混凝土通过灌浆粘结,整体性好、抗疲劳性强,但施工复杂、后期维护难;无粘结预应力筋涂防腐油脂并包护套,与混凝土无粘结,施工简便、可更换,但整体刚

度较低。(2) 体外与体内预应力适用场景: 体外预应力筋布置在构件外部,便于检查更换,适用于桥梁加固、大跨度结构;体内预应力筋埋于构件内部,受力更均匀,适用于常规工业与民用建筑的梁、板构件。

1.3 预应力材料与设备

(1) 预应力筋性能要求与选型: 性能需满足高强度(抗拉强度 $\geq 1860\text{MPa}$)、高韧性、低松弛。选型上,钢绞线适用于大跨度结构,高强钢丝适用于小直径、高应力场合,需根据构件受力、跨度选择。(2) 锚具、张拉设备技术标准与选择依据: 锚具需符合GB/T14370标准,具备足够承载力与锚固效率系数;张拉设备需满足同步张拉精度要求。选择依据为预应力筋类型、张拉控制力,如钢绞线常用夹片式锚具,配套穿心式千斤顶。

2 公路桥梁施工中预应力技术

2.1 预应力筋的布置与张拉工艺

(1) 预应力筋的合理布置原则: 需结合桥梁受力特点,曲线布筋适用于连续梁、T梁等受弯构件,通过抛物线或圆曲线形布置,使预应力筋合力线与构件弯矩图适配,抵消跨中正弯矩与支座负弯矩;空间布筋多用于箱型梁,考虑横向、纵向及竖向受力,如在箱梁腹板布置竖向预应力筋,增强抗剪能力,同时避免筋材相互干扰,保证混凝土浇筑密实性。布置时还需预留足够保护层厚度,满足耐久性要求。(2) 张拉顺序与张拉力的控制要点: 张拉顺序遵循“对称、分批、均匀”原则,如对筒支梁,先张拉腹板筋再张拉顶板筋,对连续梁,从支座向跨中对称张拉,防止构件侧弯或开裂;多束筋张拉时,按编号分批进行,避免单束张拉导致构件应力集中。张拉力控制以“应力控制为主、伸长量校核为辅”,根据设计要求确定张拉控制应力(通常为预应力筋抗拉强度标准值的0.75倍),张拉前需对设备进行标定,张拉过程中实时监测伸长量,若实际伸长量与理论值偏差超过 $\pm 6\%$,

需暂停张拉, 排查锚具、孔道等问题^[2]。

2.2 预应力孔道成型与压浆技术

(1) 孔道成型方法的优缺点: 金属波纹管成型, 优点是强度高、抗变形能力强, 适用于大跨度桥梁及张拉吨位大的场景, 缺点是重量大、安装难度较高, 且易因焊接接头处理不当导致漏浆; 塑料波纹管成型, 优点是重量轻、安装便捷、耐腐蚀, 能减少孔道摩擦损失, 缺点是高温环境下易变形, 适用于中小跨度桥梁及环境湿度较大的区域。选择时需结合桥梁跨度、施工环境及成本综合考量。(2) 真空辅助压浆技术的原理与施工要点: 原理是通过真空泵在孔道内形成 $-0.06\sim-0.1\text{MPa}$ 的负压, 排出孔道内空气与水分, 再将水泥浆以 $0.5\sim0.7\text{MPa}$ 压力压入孔道, 使水泥浆密实填充孔道, 减少孔隙, 提升预应力筋防腐性能与结构整体性。施工要点包括: 压浆前检查孔道密封性, 确保无漏气点; 水泥浆需控制水灰比($0.26\sim0.28$), 添加高效减水剂与膨胀剂, 保证流动性与体积稳定性; 压浆顺序从孔道低端向高端进行, 待出浆口排出浓浆且压力稳定后, 关闭阀门保压 $3\sim5\text{min}$, 防止浆体回流^[3]。

2.3 预应力施工中的质量控制

(1) 张拉力与伸长量的双控标准: 张拉力需严格按设计文件执行, 张拉设备(千斤顶、压力表)每半年标定一次, 确保精度; 伸长量计算需考虑预应力损失(如摩擦损失、锚具变形损失), 理论伸长量公式为 $\Delta L = \frac{\sigma_{\text{con}} L}{E_s} (\sigma_{\text{con}}$

为张拉控制应力, L 为筋长, E_s 为筋材弹性模量), 实际伸长量需在张拉过程中分阶段记录(初应力 10% 、 20% 、 100% 时), 偏差超限时需重新验算^[4]。(2) 孔道摩阻测试与参数修正方法: 施工前需选取代表性孔道进行摩阻测试, 采用“张拉端与固定端双端测试法”, 在孔道两端安装传感器, 施加不同张拉荷载, 记录两端应力差值, 计算实际摩擦系数 μ 与孔道偏差系数 κ ; 若测试值与设计值偏差较大(如 μ 偏差超 0.02), 需修正张拉控制应力, 确保预应力有效传递, 修正后需重新验算构件受力性能。(3) 常见质量问题的预防措施: 断丝、滑丝预防, 需选用合格锚具, 张拉前检查筋材表面是否有锈蚀、损伤, 安装锚具时确保夹片贴合紧密, 张拉时缓慢匀速加载, 避免超应力张拉; 孔道堵塞预防, 波纹管安装时固定牢固, 避免移位或破损, 浇筑混凝土时派人看护, 防止振捣棒撞击波纹管, 若发现波纹管破损, 及时用胶带修补, 浇筑后定期通孔检查, 发现堵塞尽早清理。

3 预应力技术在公路桥梁中的典型应用

3.1 大跨径连续梁桥中的应用

(1) 预应力体系对结构受力性能的优化作用: 通过纵向、横向、竖向三向预应力体系, 纵向预应力筋抵消梁体跨中正弯矩与支座负弯矩, 减少混凝土开裂风险; 横向预应力筋增强箱梁顶板抗剪与抗弯能力, 防止翼缘板开裂; 竖向预应力筋提升腹板抗剪性能, 避免出现斜裂缝。同时, 预应力使梁体整体刚度提升 $20\%\sim30\%$, 减少长期挠度, 延长桥梁使用寿命。(2) 案例分析: 以某跨径 120m 的跨江连续梁桥为例, 采用后张法有粘结预应力体系, 纵向筋采用 $\phi_s 15.2$ 钢绞线(抗拉强度 1860MPa), 按抛物线形布置, 跨中筋间距 15cm , 支座附近加密至 10cm ; 横向筋采用 $\phi_s 12.7$ 钢绞线, 沿顶板横向布置; 竖向筋采用精轧螺纹钢(直径 32mm), 间距 50cm 。通过该设计, 梁体跨中挠度控制在 $L/600$ 以内, 通车5年无明显裂缝。

3.2 斜拉桥与悬索桥中的辅助应用

预应力在索塔、锚固区等关键部位的应用: 索塔作为斜拉桥核心承重结构, 承受斜拉索水平分力, 需在塔柱内布置环向预应力筋(采用 $\phi_s 15.2$ 钢绞线, 间距 $20\sim30\text{cm}$), 抵消水平推力, 防止塔柱开裂; 锚固区(如索塔锚固段、主梁锚固点)受力集中, 采用群锚体系(每个锚固点设 $12\sim16$ 束钢绞线), 并在锚固区周围布置局部加强预应力筋, 增强混凝土抗裂性。悬索桥中, 预应力用于加劲梁与桥塔连接部位, 通过预应力筋减少连接节点应力集中, 提升结构稳定性。

3.3 特殊桥梁结构中的创新应用

(1) 波形钢腹板组合梁桥的预应力技术: 波形钢腹板替代传统混凝土腹板, 纵向预应力筋仅布置于顶板与底板(采用无粘结钢绞线), 利用波形钢腹板的抗剪优势, 减少预应力筋用量 $30\%\sim40\%$; 同时, 在钢腹板与混凝土顶底板结合处布置横向预应力筋, 增强界面粘结力, 避免出现剥离裂缝, 适用于中小跨径($30\sim80\text{m}$)桥梁。(2) 装配式桥梁的预应力连接技术: 预制梁段采用预应力拼接, 在梁端预留孔道, 吊装就位后穿入钢绞线张拉锚固, 形成整体结构。如某装配式T梁桥, 梁段拼接采用 $\phi_s 15.2$ 钢绞线(每接缝6束), 张拉控制应力 1395MPa , 通过预应力实现梁段刚接, 提升桥梁整体受力性能, 且施工效率较现浇提升 50% 。

4 预应力施工中的常见问题与对策

4.1 预应力损失过大问题

(1) 原因分析: 材料方面, 预应力筋松弛率超标(如低松弛钢绞线松弛率超 0.25%)、锚具变形量过大(超过规范允许的 2mm); 工艺方面, 张拉顺序混乱导致应力分布不均、孔道摩阻系数实测值大于设计值(如波纹管安

装偏差大);环境方面,高温环境使混凝土早期收缩加快,或低温环境导致张拉设备精度下降,均会加剧预应力损失。(2)补偿措施:采用超张拉工艺,按设计控制应力的1.03~1.05倍张拉,持荷5~10min,抵消筋材松弛损失;对大跨度构件,在张拉完成1~2天后进行二次张拉,补偿混凝土收缩徐变引起的损失;同时,施工前校准孔道摩擦系数,修正张拉控制应力,确保实际预应力值符合设计要求^[5]。

4.2 孔道压浆不密实问题

(1)压浆缺陷的检测方法:超声波检测通过发射声波穿透孔道,根据波形反射判断压浆密实度,可快速排查空洞、断浆区域;钻孔取芯法在孔道代表性位置钻孔取样,直观观察浆体饱满度与粘结情况,适用于关键部位的验证检测;此外,还可采用预埋传感器法,实时监测压浆过程中的压力变化,及时发现压浆不连续问题。(2)改进措施:优化水泥浆配合比,控制水灰比0.26~0.28,添加高效减水剂(掺量0.8%~1.2%)与膨胀剂(掺量3%~5%),提升浆体流动性与体积稳定性;全面采用真空辅助压浆技术,先抽真空使孔道负压达-0.06~-0.1MPa,再以0.5~0.7MPa压力压浆,排出孔道空气与水分;压浆后保压3~5min,防止浆体回流,确保孔道填充密实。

4.3 锚具失效与预应力筋断裂问题

(1)锚具选型与安装质量控制:锚具选型需匹配预应力筋类型,如钢绞线选用夹片式锚具(符合GB/T14370标准),精轧螺纹钢选用螺母式锚具;安装时确保锚具与孔道同心,夹片安装平整、无偏斜,张拉前检查锚具硬度(夹片硬度HRC55~60),避免因硬度不足导致滑丝;锚垫板与混凝土接触面需平整,浇筑时固定牢固,防止

位移导致应力集中。(2)预应力筋的防护与耐久性提升:预应力筋存放时避免露天堆放,采用防雨棚遮盖,防止锈蚀;穿筋前检查筋材表面,去除锈迹、油污;孔道压浆需饱满,浆体中可添加阻锈剂(掺量2%~3%);对体外预应力筋,采用高密度聚乙烯护套包裹,定期检查护套完整性,发现破损及时修补;桥梁运营期间,定期检测预应力筋应力损失情况,确保耐久性满足设计年限要求。

结束语

公路桥梁施工中预应力技术作为提升结构性能的关键手段,其科学应用对保障工程质量、延长使用寿命意义重大。通过精准控制预应力筋布置、张拉工艺及孔道压浆等核心环节,可有效解决混凝土开裂、结构变形等难题。未来,随着材料创新与智能化施工技术的融合,预应力技术将向更高精度、更耐久的方向发展,为公路桥梁建设提供更可靠的技术支撑,推动行业向绿色化、长寿命化迈进。

参考文献

- [1]岳鑫.公路桥梁施工中的预应力技术优化研究及应用[J].交通世界,2024(18):139-141.
- [2]赵久敏,张昕琪.预应力技术在道路桥梁施工中的应用探讨[J].建设机械技术与管理,2024,37(3):135-137.
- [3]钟锦华.预应力技术在公路桥梁工程施工中的应用[J].汽车画刊,2024(05):266-268.
- [4]翟明,吴永国,赵庆亮.预应力施工技术在公路桥梁施工中的应用[J].运输经理世界,2024(15):98-100.
- [5]马素,王文武.市政桥梁工程施工中预应力施工技术的应用分析[J].中国住宅设施,2024(5):160-162.