

# 预应力施工技术在市政路桥施工中的实践

文 / 李汉斌 广东雄桥建设集团有限公司

**摘要：**在市政路桥工程施工中，科学应用预应力施工技术能够提升工程结构的整体稳定性、抗裂性能与承载能力，有效延长工程使用寿命，对保障城市交通系统安全高效运转具有重要意义。本文以广东省珠海市金湾大桥改扩建工程为实例，探讨预应力技术在混凝土结构施工、受弯构件预制与安装、既有路桥结构加固、钢绞线应用及支架搭设拆除等环节的实践形式与操作要点。同时，针对当前施工中存在的张拉设备校准不足导致应力值偏差、压浆材料配比不当引发空洞等突出问题，深入分析其成因与危害，并提出定期校准设备、优化浆液配比、加强防腐保护、完善监测系统针对性解决对策。

**关键词：**预应力施工技术；市政路桥工程；施工实践；技术应用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.051

## 引言

随着城市化进程的不断加快，市政路桥工程的施工质量直接关系到城市运转效率与群众出行安全。在市政路桥施工过程中，通过预先施加应力抵消部分工作荷载产生的拉应力，延缓构件开裂时间提高结构整体刚度。文章将结合实际工程情况分析预应力施工技术在市政路桥施工中的具体应用形式、现存问题及实践对策，旨在推动预应力技术在市政建设领域的规范化、高效化应用。

### 一、工程概况

本次以广东省珠海市金湾大桥改扩建工程为实例，该工程是珠海市西部城区交通网络升级的关键项目，连接金湾区核心商圈与航空产业园，对推动区域产业协同发展、改善群众出行条件具有重要意义。工程全长 3.2km，桥梁段长 1.8km，采用双向六车道设计，配套建设人行道及非机动车道，设计荷载为城市 - A 级，设计使用年限 100 年。在该工程施工中，由于桥梁跨越水域且需承受高频次重载交通，结构需具备更强的抗裂性和刚度，通过预应力技术可有效抵消车辆荷载及温度变化产生的应力，减少梁体裂缝产生。

### 二、预应力技术在市政路桥施工中的应用

#### （一）混凝土结构施工中的预应力应用

在珠海市金湾大桥改扩建工程的混凝土结构施工中，一是针对新建连续梁桥的箱梁施工，采用后张法预应力技术，在混凝土浇筑前预先布设波纹管，确保预应力筋的孔道位置偏差控制在 5mm 以内。波纹管安装完成后，需进行通长检查，避免因接头漏浆导致孔道堵塞，影响后续张拉作业。二是在混凝土浇筑过程中，严格控制浇筑顺序与振捣强度，特别是预应力筋密集区域，采用插入式振捣棒与附着式振捣器配合作业，防止因蜂窝麻面影响预应力传递效果<sup>[1-2]</sup>。

#### （二）受弯构件预制与安装中的预应力技术

金湾大桥改扩建工程中，受弯构件主要包括新建连续梁的预制节段与旧桥改造中的预制板梁，在预制与安装过程中应用预应力技术直接影响结构受力性能。在预制节段施工中，采用短线匹配法预制，梁体模板

采用钢模确保几何尺寸偏差不超过 3mm。预应力筋采用  $\phi$ s15.2mm 高强度低松弛钢绞线，单束张拉力控制在 260kN，预制阶段先进行初张拉使梁体形成临时受力结构，避免运输过程中产生裂缝。

在预制构件运输前，需采用专用运输支架保证梁体支点位置与设计一致，防止因受力不均导致预应力损失。安装过程中利用架桥机进行吊装，起吊点设置在预应力筋锚固区附近，确保起吊时梁体承受正弯矩与设计受力状态一致。构件安装就位后，进行节段间湿接缝施工，接缝处设置环形预应力筋，待接缝混凝土强度达标后进行终张拉使各预制节段形成整体连续结构。

#### （三）既有路桥结构加固工程中的预应力应用

针对金湾大桥旧桥的加固改造，预应力技术主要用于体外预应力加固与截面增补加固两个方面。对于原简支梁桥的梁体加固采用体外预应力钢绞线加固法，在梁体两侧腹板处增设钢绞线束，并通过锚固装置将预应力传递至梁体。钢绞线采用防腐涂层与套管双重保护，避免环境因素导致锈蚀。施工时，先在梁体上钻孔安装锚固块，锚固块与梁体之间采用环氧树脂黏结，确保黏结强度不低于 3MPa。钢绞线安装完成后，进行分级张拉，初始张拉力为设计值的 20%，每级加载提升设计值，直至达到控制应力，张拉过程中实时监测梁体上拱度，确保不超过设计限值。

#### （四）钢绞线在预应力施工中的具体应用

钢绞线是预应力施工中的核心材料，其性能与应用质量直接决定预应力体系的承载能力和耐久性，在施工中需严格把控各个环节。一是钢绞线的选型需符合工程设计要求，通常选用高强度低松弛型钢绞线，其抗拉强度、弹性模量等参数需经过实验室检测，确保满足设计标准<sup>[3]</sup>。例如，在大跨度桥梁施工中，常用  $\phi$ s15.2mm 钢绞线，单根破断力不低于 260kN，1000 小时松弛率控制在 2.5% 以内，以保证长期受力稳定性。

张拉过程是钢绞线应用的关键步骤，需遵循“对称、分级、匀速”原则，张拉控制力按设计值分级施加，每级加载后稳定 3-5 分钟，同时记录伸长值，确保实际伸

长值与理论值偏差在±6%以内。张拉完成后需及时锚固，锚具夹片外露长度控制在2-5mm，并用防腐油脂密封。此外，孔道压浆需采用真空辅助工艺，水泥浆水灰比控制在0.4-0.45，掺入阻锈剂，形成密实保护层；体外钢绞线需外套防腐套管，两端密封防止水分侵入导致锈蚀。钢绞线的应用需全程处于质量管控中，任何环节的疏漏都可能引发结构安全隐患，必须严格按照施工规范操作，确保其发挥最优受力性能。图1是预应力钢绞线穿索张拉端和固定端具体位置示意图。

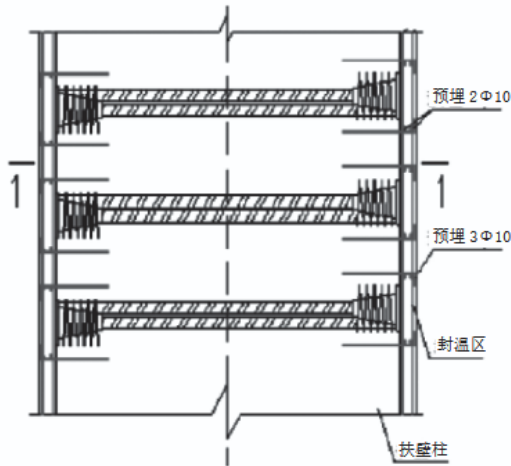


图1 预应力钢绞线穿索示意图

#### (五) 支架搭设与拆除过程中的预应力控制

支架作为预应力混凝土施工的临时支撑结构，其搭设与拆除过程的预应力控制对梁体线形和结构安全至关重要，需制定科学的控制方案。支架搭设前需进行受力计算，将预应力张拉反力、梁体自重、施工荷载等纳入荷载组合，确保立杆、横杆等构件的截面尺寸和间距符合承载力要求，通常立杆间距不大于0.6m，横杆步距不超过1.2m，扫地杆距地面0.2m，底部设置可调底座以适应地基沉降。

支架搭设完成后必须进行分级预压，加载量为设计荷载120%，分3级进行，每级加载后静置12小时以上，通过监测沉降数据判断支架稳定性，当连续24小时沉降量小于1mm时方可卸载，预压结果作为梁体立模预拱度设置的依据，避免预应力张拉后梁体线形偏差。

支架拆除需与预应力张拉顺序协调，遵循“先跨中后两端、对称分级拆除”原则，拆除前确认梁体预应力已完成张拉且锚固可靠，防止因支撑卸荷导致梁体产生附加应力<sup>[4]</sup>。拆除时先松动跨中区域支架，再逐步向两端对称推进，每拆除一段暂停1小时，监测梁体挠度和应力变化，确保在设计允许范围内。对于跨越水域或交通要道的支架，拆除需避开高峰期，采用吊装设备分段移除，防止构件坠落引发安全事故。

### 三、预应力技术在市政路桥施工中存在的问题

#### (一) 张拉设备校准不足导致应力值偏差

一是设备校准周期不规范是常见问题，多数施工单位未严格按照规范要求每半年进行一次强制校准，部分

工程甚至全程未开展校准工作导致千斤顶、压力表等设备因长期使用出现机械磨损，示值偏差逐渐增大，严重时应力值偏差可达±10%以上，远超规范允许的±5%限值。二是校准方法存在缺陷，部分单位仅采用单设备校准，未进行千斤顶与压力表的配套校准，忽略了两者的匹配误差。实际施工中，同一千斤顶搭配不同压力表时，应力示值可能产生显著差异，若未针对性校准，极易造成张拉应力虚高或不足。三是校准环境与施工环境差异过大也会引发偏差，如校准在常温实验室进行，而施工处于高温或低温环境，液压油黏度变化会导致设备实际输出力与校准值不符。

#### (二) 压浆材料配比不当或施工工艺缺陷引发空洞

压浆作业是保障预应力体系耐久性的关键环节，材料配比与施工工艺的缺陷易导致孔道内出现空洞，形成严重质量隐患。在材料配比方面，常见问题集中在水灰比控制不当：部分施工单位为追求浆体流动性，盲目增大用水量，使水灰比超过0.45导致浆体凝结后收缩过大，形成孔隙；另有单位为提高强度过度减少用水量，浆体流动性差，难以充满孔道拐角与钢绞线间隙，直接产生空洞。

在施工工艺方面，一是压浆顺序不合理，多数工程未严格遵循“从低处向高处、从一端向另一端”的原则导致孔道内空气无法彻底排出，形成气泡聚集区。其次，真空辅助压浆技术应用不规范，真空泵负压值未达到-0.06MPa以上的标准，孔道内残留空气未被抽出，压浆过程中空气被包裹形成空洞。二是压浆压力控制不当，压力过小时浆体无法克服阻力填满孔道，压力过大容易导致浆体从密封处泄漏，形成局部缺浆。

#### (三) 防腐涂层破损或环境湿度影响导致锈蚀

防腐涂层施工环节的质量缺陷是锈蚀的首要诱因，部分工程中钢绞线涂层存在漏涂、针孔等问题，这与涂覆工艺控制不严密密切相关：涂覆时未彻底清除钢绞线表面油污与锈迹，导致涂层附着力不足；喷涂厚度不均匀，局部厚度低于0.3mm的标准要求，易在受力后破损。此外，锚具防腐处理不到位也较为常见，夹片与锚垫板间隙未用防腐油脂填满，成为水分侵入的通道。

环境湿度与介质侵蚀加剧了锈蚀进程，在南方多雨地区或沿海市政工程中尤为突出。空气相对湿度长期高于80%时，水分易通过涂层破损处渗入，与钢绞线发生电化学反应；沿海地区空气中的氯离子具有强腐蚀性，可穿透薄弱涂层，加速锈蚀速度。某滨海大道桥梁工程因未考虑氯离子影响，通车3年后检测发现，体外预应力钢绞线锈蚀率达15%，部分钢丝截面损失超过20%，严重威胁结构安全。锈蚀会导致钢绞线力学性能下降：抗拉强度降低10%-30%，延伸率下降更明显，使预应力体系承载能力大幅削弱。

#### (四) 监测点布设不合理导致数据失真

一是监测点数量不足，部分工程为节省成本，未按规范要求梁体跨中、支点等关键部位布设监测点，如连续梁桥仅在跨中设置1-2个应力监测点，无法捕捉梁

体纵向应力分布规律，难以发现局部应力集中现象。二是监测点位置选择不当，将应变片粘贴在混凝土表面蜂窝麻面处或靠近施工临时荷载区域，监测数据会包含虚假信号。三是监测点保护措施缺失会造成数据失真，在施工过程中碰撞、污染等因素会导致传感器损坏或读数漂移。部分监测点因未设置防护盒，被振捣棒碰撞后灵敏度下降，监测值比实际值偏低 20% 以上。

#### 四、实践对策

##### (一) 定期校准设备并采用双机复核制度

针对张拉设备校准不足的问题，施工单位需建立严格的设备管理体系，从校准周期与复核机制两方面保障应力值准确性。一是明确校准周期，按规范要求每 3 个月对千斤顶、压力表进行一次强制校准，且在工程开工前、张拉作业超过 200 次后必须追加校准，校准工作需由具备资质的第三方机构完成，校准报告需详细记录设备编号、校准环境温度及示值误差<sup>[5]</sup>。二是推行双机复核制度，每束钢绞线张拉时采用两台同型号校准合格的千斤顶同步作业，分别连接独立压力表，张拉过程中实时对比两组应力数据，当偏差超过 3% 时立即停止作业，排查设备故障。

##### (二) 优化浆液配比并采用真空辅助压浆技术

为解决压浆空洞问题，采用 42.5 级水泥控制水灰比在 0.4-0.45 之间，每立方米浆体掺入 5% 膨胀剂与 3% 减水剂，通过试拌确定最佳配比，确保浆体初始流动度在 18-22s，30min 流动度不低于 15s，28 天抗压强度不小于 30MPa。在施工中全面应用真空辅助压浆技术，具体流程为：先检查孔道密封性，安装真空泵与压浆泵，启动真空泵使孔道内负压达到 -0.06 至 -0.1MPa 并保持 5 分钟；再启动压浆泵，以 0.5-0.7MPa 压力从孔道低端向高端压浆，当高端出浆口流出浓浆且不含气泡时，关闭出浆阀并持压 3 分钟。压浆顺序遵循“先下后上、先长后短”原则，避免空气残留。

##### (三) 加强涂层质量检验并采用阴极保护技术

针对锈蚀问题，在涂层施工前对钢绞线进行喷砂除锈，达到 Sa2.5 级标准，表面粗糙度控制在 50-80 μm；涂覆采用无气喷涂工艺，环氧涂层厚度均匀控制在 0.3-0.4mm，每米检测 3 个点，不合格处需重新喷涂（如图 2）。锚具安装后用防腐油脂填充夹片间隙，再包裹三层防水卷材，确保密封严密。在高湿度或沿海环境中，采用牺牲阳极阴极保护技术，在预应力孔道附近预埋锌合金阳极块，通过导线与钢绞线连接，利用锌阳极的牺牲腐蚀保护钢绞线。定期检测阳极块损耗量，当重量减少 20% 时及时更换。

##### (四) 优化监测方案并增加实时数据传输系统

为避免监测数据失真，监测点布设遵循“关键部位加密”原则，连续梁桥在跨中、1/4 跨、支点处各布设 3 个应力监测点，每 5 米设置 1 个线形监测点，确保覆盖全梁受力关键区。传感器安装前需进行标定，应变片粘贴在混凝土表面平整处，避开施工干扰区域，并用防护盒保护防止机械碰撞。

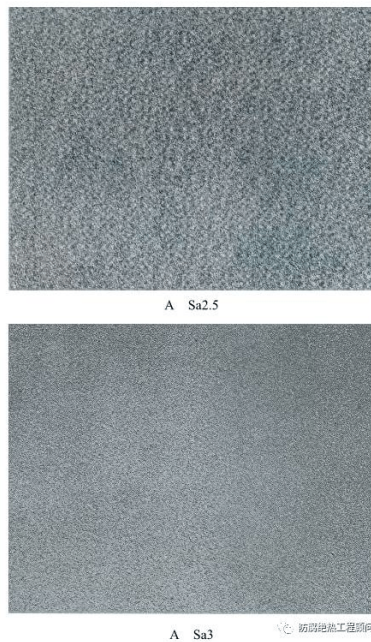


图 2 钢绞线喷砂除锈

同步搭建实时数据传输系统，传感器数据通过无线传输模块发送至监控中心，系统每 10 分钟自动采集一次数据，当应力值超出设计限值  $\pm 5\%$  时自动报警。安排专人 24 小时监控数据，发现异常立即通知现场暂停施工，排查原因。

#### 结语

综上所述，在市政路桥工程中预应力施工技术通过科学施加预应力，能够提升结构的承载能力、抗裂性与耐久性，为工程安全稳定运营提供重要保障。在实践中，针对张拉偏差、压浆空洞、锈蚀风险及监测失真等问题采取设备定期校准、优化压浆工艺、强化防腐措施及完善监测系统对策，可显著提升技术应用效果。只有充分发挥预应力技术的优势，才能进一步提高市政路桥工程的建设质量，更好地满足人民群众对安全、高效出行的需求。

#### 参考文献

- [1] 陈启帆. 市政路桥工程预应力施工技术分析[J]. 中国住宅设施, 2024 (12): 128-130.
- [2] 李桂荣. 市政路桥施工预应力技术应用研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024 (22): 177-179.
- [3] 洪丽. 市政路桥工程中预应力施工技术重点研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024 (21): 193-195.
- [4] 戴永健. 市政路桥工程建设中预应力施工技术的应用研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024 (21): 196-198.
- [5] 王青. 市政路桥施工中预应力技术的应用探究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023 (34): 103-105.

作者简介：李汉斌（1991 年 05 月），男，汉族，广东省佛山市人，本科，中级工程师，研究方向：市政路桥施工。