

公路桥梁施工中预应力技术的应用

饶 松

云南交投工程建设养护有限公司 云南 昆明 650000

摘 要：随着我国基础设施建设的飞速发展，公路桥梁作为连接区域交通网络的关键节点，其建设规模与技术要求不断提升。预应力技术作为现代桥梁工程的核心技术之一，凭借其卓越的结构性能和经济性，在公路桥梁施工中得到了广泛应用。本文旨在系统阐述预应力技术的基本原理、分类及其在公路桥梁施工中的具体应用形式，深入剖析其在提升桥梁结构性能方面的核心优势，并详细探讨预应力施工的关键技术要点与质量控制措施。同时，本文也指出了当前预应力技术应用中存在的挑战，并对未来发展趋势进行了展望，以期对相关工程实践和理论研究提供有益的参考。

关键词：公路桥梁；预应力技术；后张法；先张法；施工工艺；质量控制

引言

进入21世纪以来，我国公路网建设取得了举世瞩目的成就，高速公路、国道、省道等各级公路里程持续增长，对跨越江河、山谷、既有交通线等障碍物的桥梁工程提出了更高、更新的要求。现代公路桥梁不仅需要满足日益增长的交通荷载和通行能力，还需具备更长的使用寿命、更低的维护成本以及更优的耐久性和安全性。在此背景下，传统的钢筋混凝土结构因其抗裂性能差、自重大、跨越能力有限等固有缺陷，已难以完全满足现代桥梁工程的需求。预应力混凝土技术的出现和发展，为解决上述难题提供了革命性的方案。该技术通过在混凝土结构承受使用荷载之前，预先对其受拉区施加压应力，从而有效抵消或大幅减小外部荷载作用下产生的拉应力，从根本上改善了混凝土的受力状态。这一技术革新极大地拓展了混凝土结构的应用边界，使得建造大跨度、轻量化、高耐久性的公路桥梁成为可能。从城市高架桥到跨海大桥，从简支梁桥到连续刚构桥，预应力技术已成为现代公路桥梁不可或缺的核心技术。因此，深入研究和掌握预应力技术在公路桥梁施工中的应用，对于保障工程质量、提升结构性能、推动行业技术进步具有重要的现实意义。

1 预应力技术的基本原理与分类

1.1 基本原理

预应力技术是指在结构承受使用荷载之前，通过特定的方法对结构施加预先设计的内力，使结构在使用荷载作用下产生有利的应力状态。在公路桥梁工程中，预应力通常通过高强度钢材（预应力筋）对混凝土构件施加压力，以抵消或减少外部荷载引起的拉应力，提高结构的抗裂性、刚度和承载能力。预应力效应的基本原

理可概括为：在混凝土构件中预先施加压应力，当构件承受外部荷载时，预压应力与荷载产生的拉应力相互抵消，使混凝土在使用状态下保持受压或低拉应力状态，从而避免或减少裂缝的产生。这一原理基于材料力学和结构力学的基本理论，特别是弹性理论中的叠加原理。

1.2 主要分类

1.2.1 先张法预应力技术

先张法是指在浇筑混凝土前，先对预应力筋进行张拉并临时锚固在台座上，然后浇筑混凝土，待混凝土达到规定强度后，放松预应力筋，通过预应力筋与混凝土之间的粘结力传递预应力。先张法主要用于预制构件的生产，如预制T梁、空心板梁、箱梁等。先张法的主要优点是：工艺简单，无需永久锚具；预应力传递均匀；构件质量易于控制。缺点是需要专门的张拉台座，适用于标准化、批量化的构件生产，对大型复杂结构适用性有限。

1.2.2 后张法预应力技术

后张法是指先浇筑混凝土构件，在混凝土中预留孔道，待混凝土达到规定强度后，穿入预应力筋并进行张拉，然后通过锚具将预应力筋锚固在构件端部，最后进行孔道压浆。后张法可分为有粘结后张法和无粘结后张法。有粘结后张法通过孔道压浆使预应力筋与混凝土形成整体，共同工作；无粘结后张法在预应力筋表面涂覆防腐油脂并包裹塑料套管，使其与混凝土不直接粘结，便于后期更换和维护^[1]。后张法的主要优点是：适用于各种形状和尺寸的结构，特别是大型复杂桥梁；可在施工现场进行，灵活性强；预应力大小和布置可根据需要调整。缺点是需要使用锚具和预留孔道，施工工艺复杂，质量控制难度大。

2 预应力技术在公路桥梁中的主要应用形式

2.1 简支梁桥

简支梁桥是公路中小跨径桥梁中最常见的结构形式。在此类桥梁中,预应力技术主要应用于预制预应力混凝土空心板梁、T梁和小箱梁。

2.1.1 空心板梁

通常采用先张法预制。通过施加预应力,可以有效减小板梁在车辆荷载下的挠度和裂缝宽度,提高其承载能力和耐久性。预应力空心板梁具有结构高度小、自重轻、便于工厂化生产等优点,广泛应用于跨径在10-20米的桥梁。

2.1.2 T梁和小箱梁

对于20-50米跨径的桥梁,T梁和小箱梁更为常见,多采用后张法预制。通过在梁肋底部布置直线或折线形的预应力钢束,可以抵抗跨中正弯矩。预应力技术的应用使得T梁和小箱梁能够实现更大的跨径,减轻自重,降低吊装难度,并显著改善其在长期使用中的抗裂性能。

2.2 连续梁桥与连续刚构桥

对于中等至大跨径(40-200米以上)的公路桥梁,连续梁桥和连续刚构桥是主流选择。这类结构受力复杂,存在正负弯矩交替区域,对结构的整体性和抗裂性要求极高,后张法预应力技术是其得以实现的关键。

2.2.1 纵向预应力

这是最主要的预应力系统。通过在箱梁顶板、底板和腹板内布置多束曲线形预应力钢束,来抵抗由恒载和活载产生的巨大弯矩和剪力。底板束主要抵抗跨中区域的正弯矩,顶板束则主要抵抗墩顶区域的负弯矩。精确的线形设计和张拉控制是确保结构安全的核心^[2]。

2.2.2 横向预应力

在宽桥或分离式双箱结构中,为保证桥面板在车辆轮载下的局部受力性能,防止横向开裂,通常在桥面板内设置横向预应力钢束。这能有效将荷载在横向分配,提高桥面板的整体性。

2.2.3 竖向预应力

在箱梁腹板内设置竖向预应力筋(通常为精轧螺纹钢),主要作用是抵抗主拉应力,防止腹板出现斜裂缝,提高结构的抗剪能力。这对于高腹板的箱梁尤为重要。

2.3 斜拉桥与悬索桥

在特大跨径桥梁中,预应力技术同样不可或缺,主要体现在主梁的构造中。

2.3.1 斜拉桥主梁

无论是混凝土主梁还是钢-混结合梁,其混凝土部分(如桥面板、边主梁)均需配置预应力。预应力不仅用

于抵抗局部荷载,更重要的是用于平衡斜拉索巨大的水平分力,防止主梁受压失稳,并控制主梁的长期徐变和收缩变形,确保成桥线形的稳定。

2.3.2 悬索桥加劲梁

对于混凝土加劲梁的悬索桥(虽较少见),预应力同样是其结构设计的核心。对于钢加劲梁悬索桥,其桥面系通常采用预制预应力混凝土桥面板,通过剪力钉与钢梁连接,形成组合结构,预应力桥面板能有效提高桥面系的刚度和耐久性。

3 预应力施工关键技术与质量控制

3.1 预应力筋与锚具的质量控制

施工的起点在于材料本身,预应力筋(通常为1×7标准型钢绞线)和配套锚具、夹具必须具备完整的出厂合格证明和权威机构的型式检验报告,并在进场后按批次进行严格的复验。复验项目不仅包括钢绞线的抗拉强度、规定非比例延伸力($F_{p0.2}$)和最大力总伸长率(A_{gt}),还需对锚具的静载锚固性能(效率系数 $\eta_a \geq 0.95$,总应变 $\epsilon_{apu} \geq 2.0\%$)进行专项试验,确保其在极限状态下的可靠性。所有材料应分类存放于干燥、通风的专用库房,钢绞线盘卷严禁平放,以防散盘造成不可逆的塑性变形。

3.2 预应力孔道的精准定位

施工中普遍采用镀锌金属波纹管或高密度聚乙烯(HDPE)塑料波纹管作为成孔管道,其空间坐标必须严格遵循设计图纸。现场通过焊接在梁体普通钢筋骨架上的U型或井字形定位钢筋网架进行三维空间固定,定位网的间距在直线段不宜大于80厘米,在曲线段特别是反弯点附近应加密至50厘米以内。定位的精度要求极高,任何超出规范允许偏差(通常为 ± 5 毫米)的位移,都将导致预应力筋的实际线形偏离理论设计,进而改变其产生的等效荷载,影响结构内力分布^[3]。尤其是在箱梁腹板与顶底板交汇的锚固齿块区域,波纹管的定位必须格外牢固,以承受后续混凝土浇筑时的巨大侧压力和浮力。

3.3 混凝土浇筑与养护

浇筑过程中,必须确保混凝土的密实性,尤其在锚垫板后方、波纹管下方及钢筋密集的腹板区域,需采用小直径振捣棒进行充分振捣,避免出现空洞、蜂窝或骨料架空等缺陷,这些缺陷会严重削弱锚固区的局部承压能力,甚至在张拉时引发混凝土崩裂。同时,应严格控制混凝土的水胶比和坍落度,以减少收缩和徐变引起的预应力损失。养护环节同样关键,必须采用覆盖土工布洒水或喷涂养护剂等方式,确保混凝土在早期(特别是前7天)处于充分湿润状态,以获得设计要求的强度和弹

性模量。只有当同条件养护试块的强度和弹性模量均达到设计张拉要求（通常为设计强度的80%以上，且龄期不少于7天）时，方可进行张拉作业。

3.4 预应力张拉控制

预应力张拉必须严格执行“双控”原则，即以张拉力控制为主，伸长量校核为辅。张拉前，所有千斤顶和配套的压力传感器、油压表必须由具备资质的计量单位进行配套标定，并绘制出精确的“力-压”和“力-伸长”关系曲线。张拉程序通常为0→初应力（10%-15% σ_{con} ）→100% σ_{con} （持荷5分钟）→锚固。在持荷阶段，可以有效减少预应力筋的松弛损失。张拉过程中，实测的伸长量必须与理论计算值进行对比，其误差应控制在 $\pm 6\%$ 以内。理论伸长量的计算需综合考虑孔道的几何线形、预应力筋的弹性模量、孔道壁的摩擦系数（ k ）和偏差系数（ μ ）等参数，任何一项参数的偏差都会导致计算失准。一旦实测值超出允许范围，必须立即停止作业，系统排查原因，可能是孔道内存在塌陷、漏浆导致的摩阻异常增大，或是锚具夹片滑丝、预应力筋在孔道内被卡住等^[4]。对于箱梁等对称结构，必须保证两端或两侧千斤顶同步、对称张拉，同步误差应控制在油表读数相差不超过一个最小分度值，以防止结构产生过大的偏心受力或扭曲变形。

3.5 孔道压浆与封锚

规范要求张拉完毕后48小时内完成压浆。现代工程普遍采用高性能压浆材料，其水胶比通常控制在0.26-0.28之间，并掺入高效减水剂和膨胀剂，以确保浆体具有高流动性（初始流动度 ≤ 25 秒）、无泌水、微膨胀和高强（28天抗压强度 ≥ 50 MPa）的特性。传统的重力压浆法已难以保证质量，目前主流采用真空辅助压浆技术。该技术首先在孔道一端用真空泵抽真空，使孔道内真空度稳定在-0.06至-0.10MPa，然后在另一端用活塞式压浆机连续、缓慢地注入水泥浆。真空环境能有效排除孔道内的空气和水分，确保浆体饱满、密实，无气泡、无空洞，极大地提升了防腐可靠性。压浆完成后，需及时对锚头进行封锚处理。封锚前应将锚具周围混凝土凿毛并清洗干净，然后支立模板，浇筑与梁体同强度的无收缩混凝土，并仔细振捣密实。最后，在封锚混凝土表面涂刷聚氨酯等高性能防水涂料，形成一道严密的防水层，彻底隔绝外部水分从锚头处侵入孔道内部。

4 挑战与未来发展趋势

尽管预应力技术已相当成熟，但在实际应用中仍面临一些挑战，如预应力损失的精确计算、长期性能（徐

变、收缩）的预测、施工误差的累积效应以及既有桥梁预应力状态的评估与加固等。未来，预应力技术的发展将呈现以下趋势：

4.1 智能化施工

应用物联网（IoT）、大数据和人工智能技术，对张拉过程、压浆质量进行实时监控与智能分析，实现施工过程的数字化、可视化和智能化管理。

4.2 新材料应用

探索碳纤维增强复合材料（CFRP）等新型预应力筋材，其具有轻质、高强、耐腐蚀等优点，有望解决传统钢绞线易锈蚀的问题。

4.3 精细化设计与分析

借助更先进的有限元分析软件，对预应力结构进行全寿命周期的精细化仿真，更准确地预测其长期性能和耐久性。

4.4 绿色与可持续

优化预应力设计，进一步减轻结构自重，减少材料消耗，降低碳排放，推动桥梁工程的绿色可持续发展。

5 结语

预应力技术作为现代公路桥梁工程的基石，通过其独特的受力机理，成功克服了普通混凝土结构的诸多局限，为建造大跨度、高性能、长寿命的现代化桥梁提供了坚实的技术支撑。从简支梁到连续刚构，从预制构件到现浇箱梁，预应力技术的应用无处不在，深刻地改变了桥梁的面貌。其在提升结构抗裂性、耐久性、刚度和跨越能力方面的优势是无可替代的。然而，技术的价值最终体现在施工质量上。预应力施工是一项高精度、高风险的作业，必须严格把控从材料、定位、张拉到压浆的每一个环节，坚持“双控”原则，确保预应力的有效建立和长期可靠。面对未来的挑战，行业应积极拥抱新技术、新材料，推动预应力技术向更智能、更精准、更绿色的方向发展。

参考文献

- [1]李俊彦.公路桥梁施工中预应力技术措施与质量管控[J].大众标准化,2025,(19):13-15.
- [2]张连江.桥梁施工中的预应力技术应用与实践[J].散装水泥,2025,(04):52-54.
- [3]张利峰.高速公路桥梁施工中预应力施工技术的应用[J].汽车画刊,2025,(08):92-94.
- [4]尹馨.现代技术角度下预应力技术在桥梁施工中的应用探究[J].建材发展导向,2025,23(16):76-78.