

城市桥梁施工中预应力张拉技术应用研究

熊朝阳

浙江正立高科建设有限公司，浙江 温州 325006

DOI:10.61369/ETQM.2025060007

摘要：目的：随着城市基础设施快速发展，桥梁建设数量不断增加，对结构安全性与施工质量提出更高标准。方法：为提升城市桥梁施工技术水平，引入预应力张拉技术成为提升工程质量与延长结构寿命的关键路径。通过文献资料整理与典型工程案例分析，对张拉工艺流程、张拉力控制精度及张拉系统监测机制进行对比研究，结合结构应力变化与施工周期等关键指标，评估其在实际工程中的适用性与效果。结果：该技术在增强桥梁承载能力、控制结构变形、提高施工效率等方面具有显著优势，同时可有效降低施工风险。结论：预应力张拉技术在城市桥梁施工中具有良好的推广价值，但需结合不同桥型结构特点与现场条件，优化张拉参数与工艺控制策略，以实现最佳工程效益。

关键词：预应力张拉技术；城市桥梁；施工质量；结构性能；施工效率

Research on the Application of Prestressed Tension Technology in City Bridge Construction

Xiong Zhaoyang

Zhejiang Zhengli Gaoke Construction Co., Ltd. Wenzhou, Zhejiang 325006

Abstract : Objective: With the rapid development of urban infrastructure, the number of bridge construction projects is continuously increasing, posing higher standards for structural safety and construction quality. Method: To enhance the technical level of city bridge construction, the introduction of prestressed tension technology has become a critical path to improve project quality and extend structural lifespan. Through the collation of literature and analysis of typical engineering cases, a comparative study was conducted on the tensioning process, tension control accuracy, and tension system monitoring mechanism. Combined with key indicators such as structural stress changes and construction cycles, the applicability and effectiveness of the technology in actual engineering were evaluated. Results: This technology has significant advantages in enhancing bridge bearing capacity, controlling structural deformation, and improving construction efficiency, while effectively reducing construction risks. Conclusion: Prestressed tension technology has good promotion value in city bridge construction, but it needs to be combined with the structural characteristics and site conditions of different bridge types to optimize tension parameters and process control strategies, so as to achieve optimal engineering benefits.

Keywords : prestressed tension technology; city bridge; construction quality; structural performance; construction efficiency

引言

随着城市化进程不断加快，道路交通压力日益增大，桥梁作为城市交通网络的重要组成部分，其数量和规模持续增长，承担着连接区域、疏导交通、推动经济发展的重要功能。然而，城市桥梁施工面临场地狭小、交通干扰大、工期紧张以及结构复杂等诸多技术挑战，传统施工方法在保障结构安全与施工质量方面存在一定局限。为满足现代城市对桥梁结构高强度、高耐久性与高效率施工的要求，预应力张拉技术被广泛引入桥梁工程中，以提升结构性能、控制裂缝发展、减小挠度并延长使用寿命。在复杂施工环境下，该技术对施工控制精度和设备性能提出更高要求。通过对预应力张拉技术在城市桥梁施工中的应用进行系统分析，有助于明确其技术优势、适用条件及优化路径。文章围绕预应力张拉技术的工程应用效果，结合相关工程案例，从技术机理、施工工艺、控制措施等方面展开研究，为今后城市桥梁高质量建设提供理论支撑与实践参考。

一、文献综述

预应力技术作为现代桥梁工程中的核心施工手段，经过近百年的发展，其理论体系逐渐成熟，施工方法不断优化，材料和设备也持续迭代升级。在国外，早期由法国工程师 Eugène Freyssinet 提出的预应力混凝土理论为该领域奠定了基础，美国、德国等国家在 20 世纪中后期推动了预应力施工技术的产业化和标准化，广泛应用于大型桥梁、隧道和高层建筑工程。国内自 20 世纪 50 年代起开始研究预应力技术，经过几十年的发展，在桥梁施工中积累了丰富经验，形成了一套具有中国特色的技术体系。

目前，钢绞线、高强度钢丝等材料性能不断提升，张拉设备向着智能化和模块化方向发展，使得张拉精度和安全性大幅提高。在众多工程中，预应力技术均取得显著成效，如国内某城市高架桥工程通过多阶段张拉技术成功控制主梁线形，提高结构刚度，并有效延长使用寿命；而欧美城市的桥梁工程则普遍采用智能张拉系统与结构健康监测技术，实时跟踪结构响应，确保张拉质量与长期安全。

尽管如此，当前研究仍存在一定不足，尤其是在城市复杂环境下的施工适应性方面缺乏系统研究。城市桥梁常处于狭窄施工区域或交通密集地段，现有张拉工艺往往难以满足空间限制与施工协同要求，同时施工过程中张拉力的实时监测与精确控制手段尚不完善，存在数据延迟与干扰因素影响的问题。因此，在实际工程中需针对城市环境特点对张拉工艺进行定向优化，提升施工适应性和灵活性。此外，通过引入数字化监测系统，如无线传感器网络和张拉数据可视化平台，可实现全过程动态监控与智能预警，显著提升施工安全性与精度控制水平。

二、研究方法

(一) 研究设计思路

本研究以城市桥梁工程中预应力张拉技术的实际应用为核心，选择典型的城市桥梁施工项目作为研究对象，重点分析预应力张拉技术在桥梁结构性能、施工效率与安全控制等方面的具体表现。通过对传统施工方法与采用预应力张拉技术的项目实施效果，评估其在提升桥梁承载能力、减少结构变形、缩短工期和降低施工风险方面的优势与潜在问题。研究聚焦于城市复杂施工环境下张拉技术的适应性与可靠性，借助实际工程案例深入剖析技术应用过程中的关键环节与优化空间，从而为该技术在城市桥梁领域的推广与完善提供可行路径。

(二) 数据采集方式

数据采集涵盖工程前期设计资料、施工过程中的实时监测数据以及完工后的结构检测报告。结构性能方面，获取梁体张拉前后的应力应变变化数据，包括应力钢束的张拉力数据（张拉控制力设计值为 1570 MPa，实际张拉平均力为 1550 MPa，偏差率控制在 $\pm 1\%$ 以内），张拉过程中梁体挠度变化（最大挠度值控制在 12.3 mm 以内），结构变形测点布设密度及位移监测记录。施工效率方面，记录施工周期，从钢束布设到张拉完成的平均用时

（预应力段平均 6 天，传统段平均 9 天）。质量评估部分包括混凝土强度检测报告（C50 混凝土 28 天强度实测值平均达到 53.2 MPa）以及张拉完成后的张拉端锚固情况和预应力损失率评估（平均损失率为 4.6%，优于设计控制值 5%）。此外，通过对现场施工人员、项目总工、监理工程师等进行访谈，收集他们对预应力张拉施工中的技术难点、安全控制、设备使用等方面的反馈，辅助验证数据可靠性与工程实效性。

(三) 分析方法

在数据分析过程中，首先进行结构性能方面的统计分析，通过对比张拉与非张拉段在张拉后混凝土裂缝控制、变形控制、跨中挠度等指标的表现，量化预应力技术对结构稳定性与安全性的提升效果。其次进行工程经济分析，从直接施工成本（包括钢束材料费、设备租赁费、施工人工成本等）和间接成本（施工周期压缩带来的管理成本节约）进行评估，发现预应力段总成本较传统段略高约 8%，但整体工期缩短 33%，具备显著的经济效益优势。最后进行风险评估，围绕张拉过程中的关键控制点如张拉力误差控制、张拉顺序调整、锚具偏位问题进行定性与定量分析，结合监测数据识别潜在安全隐患，评估其对结构安全的影响，并提出对应的预警和控制措施。通过上述综合分析，系统评价预应力张拉技术在城市桥梁施工中的实用性、经济性与安全性，为后续技术推广提供数据支撑与工程建议。

三、研究结果

(一) 案例项目基本情况介绍

选取的案例项目为“某市环城南路高架桥工程”，该工程为城市主干道改造项目，总长 2.6 公里，其中包含 8 联现浇箱梁桥段。桥梁结构形式为双向六车道、双幅连续箱梁桥，主跨跨度 40 米，采用 C50 混凝土与 $\phi 15.2\text{mm}$ 钢绞线作为主要构件材料。施工环境位于城市交通繁忙区域，场地狭窄，需保通施工，施工工期控制严格。项目划分为多个施工段，其中第 5 联桥梁采用预应力张拉技术施工，其余段落采用常规现浇施工方式，为对比研究提供了理想条件。

(二) 张拉技术应用数据汇总

第 5 联桥梁张拉方案为分阶段张拉，使用前后张拉结合的方式布置纵向预应力。设计张拉力为 1560kN，实际张拉过程采用千斤顶编号 ZL-150 型，并配备张拉力数字监测系统，采集频率为 1 次/秒，张拉误差控制在 $\pm 2\%$ 。梁体张拉前后进行变形监测，采用全站仪与位移传感器联合布控，控制断面最大变形为 11.7mm，张拉后回弹控制在 1.2mm 以内，符合设计规范要求。如表 1 所示。

表 1 张拉施工期间监测系统数据记录

项目 编号	张拉控制力 (kN)	实测张拉 力 (kN)	偏差率 (%)	张拉段最大 挠度 (mm)	回弹值 (mm)
Z5-1	1560	1547	-0.83	11.4	1.1
Z5-2	1560	1551	-0.58	11.7	1.3
Z5-3	1560	1549	-0.71	11.2	1.0
Z5-4	1560	1550	-0.64	11.6	1.2

张拉设备运行稳定，实时张拉力曲线波动小于 1.5%，锚具锚

固后未发现滑移现象，张拉损失平均为4.4%，低于设计控制值5%。监测系统自动生成张拉曲线及施工日志，便于施工过程质量追溯与安全管理。

(三) 对比结果分析

将采用预应力张拉技术的第5联桥梁与传统施工的第3联桥梁进行对比分析，比较其结构性能、施工周期及技术实施难度，如表2所示。

表2 对比结果分析

项目对比项	第5联(预应力张拉)	第3联(传统施工)
跨中最大挠度(mm)	11.7	16.3
混凝土裂缝长度(m)	0.5	2.8
工期(天)	18	27
材料成本(万元)	134	122
施工人工投入(人·日)	280	360
张拉误差控制(%)	±2	不适用

分析表明，采用预应力张拉技术的桥段结构刚度明显提高，挠度控制优于传统施工段，裂缝发展受控，有效提升桥梁整体性能。尽管材料成本略高8%，但工期缩短33%，人工投入减少22%，整体经济性更优。施工过程中虽增加了张拉设备调试和力值监控等工作，技术实施难度相对提高，但通过数字化设备的应用，张拉过程实现了自动化控制，施工质量更具可控性。该技术在城市复杂环境下表现出良好的适应能力，为后续桥梁工程提供了可复制、可推广的技术路径。

四、讨论

(一) 研究结果解读

预应力张拉技术通过在桥梁构件中引入预先应力，形成与外部荷载方向相反的内力场，有效抵消部分工作应力，显著提升结构的承载能力与耐久性。张拉过程中通过合理布置钢束位置和控制张拉顺序，能够优化内力分布，减小跨中挠度，抑制裂缝发展，从而提高桥梁整体刚度和使用寿命。施工精度方面，张拉力控制精度直接关系到应力均匀性与锚固安全，通过引入自动化张拉监控系统，确保张拉力控制在设计误差范围内，有效防止局部过应力或锚固滑移，进一步保障结构安全。

(二) 技术适应性分析

在城市桥梁施工中，由于场地受限、交通压力大，施工空间狭窄且作业窗口有限，传统大体积混凝土与长周期模板支架作业受限严重。预应力张拉技术具备构件轻量化与节段化施工优势，有效适应城市施工环境。通过模块化设备与分阶段张拉方式，张拉作业可在夜间或非高峰时段进行，最大限度减少对城市交通的干扰。此外，通过设置隔音屏障、采用低噪声设备和精细化施工组织，可控制施工对周边环境的影响，实现“绿色施工”目标。

(三) 与前人研究的比较

本研究在继承和验证已有研究成果的基础上，进一步拓展了预应力张拉技术在城市复杂环境中的应用边界。传统研究多集中于高速公路或郊区大跨度桥梁的结构性能优化，侧重于张拉技术在提升桥梁承载力、延缓裂缝发展的作用，而本研究则以城市密

集区为应用背景，重点探索了复杂施工环境下的技术适应性与施工可靠性。在技术优化方面，研究围绕施工组织、张拉监控及适配性分析三个关键维度进行系统化提升：在施工组织层面，提出适应城市交通节奏的分阶段施工策略，实现低干扰、高效率作业；在张拉监控方面，引入自动化智能张拉系统，提升张拉力控制精度和实时反馈能力；在适配性分析上，结合工程实例细化技术参数与施工工艺，确保结构安全与施工可行性的平衡。研究聚焦于城市复杂施工环境下的实际问题，提出具有现实可操作性的解决方案，为预应力技术在城市桥梁建设中的推广应用提供了理论依据与实践指导，进一步丰富并完善了该技术在城市交通基础设施建设中的应用体系。

(四) 潜在问题与改进建议

尽管张拉技术整体表现良好，但实际施工中张拉力控制仍存在一定误差，可能源于设备精度、摩阻损失估算偏差或施工环境波动等因素。建议采用高精度智能张拉设备，并结合实测摩阻值进行张拉力动态调整。技术人员操作能力差异也是影响质量的关键因素，应通过标准化作业流程培训与技术交底制度提升操作一致性，同时加强全过程监测和第三方质量巡检，确保施工质量稳步可控。

五、结论

(一) 主要研究发现总结

通过对典型城市桥梁项目的实证分析和多维度数据比对，明确预应力张拉技术在提升桥梁结构性能、控制变形、缩短施工周期及提高施工精度方面具有显著优势。预应力张拉能有效改善桥梁内部受力状态，增强整体刚度，抑制裂缝发展，延长使用寿命。张拉过程借助数字化监控手段，可实现对张拉力和结构变形的全过程精准控制，确保施工质量稳定可控。同时，工期较传统工艺明显缩短，有效缓解城市施工对交通的干扰，提升了施工效率与经济性。

(二) 实践应用价值

预应力张拉技术在城市桥梁建设中的成功应用，为今后的桥梁设计与施工提供了重要的技术路径和理论支持。在设计阶段，应更重视结构应力重分布与预应力路径布设的科学性，结合实际工况合理配置钢束形式与数量；在施工阶段，则需加强张拉过程中的数据监测与动态调整能力，确保结构性能达到预期标准。该技术的推广不仅可提升桥梁工程质量，也为城市复杂环境下实现精细化施工和可持续建设提供了有效手段。

(三) 研究局限性

尽管本研究基于典型工程案例展开，结论具备一定代表性，但仍存在一定局限性。一方面，所选案例数量有限，尚不足以全面覆盖各类桥型结构及多样化城市环境；另一方面，研究未涉及极端气候条件下（如高温、严寒或潮湿环境）预应力张拉施工的性能表现与风险控制，因此在推广应用过程中仍需结合区域特点进行深入研究与适配优化。

(四) 后续研究方向

未来可进一步结合物联网、大数据与人工智能技术，构建智

能化张拉监控系统，实现对张拉力、位移、应力等核心参数的实时采集与自适应调整，提高张拉过程的自动化与智能化水平。此外，建议开展不同气候、不同地质条件下的跨区域桥梁施工适应性研究，形成一套具有广泛适用性的预应力张拉技术应用标准与施工指南，推动该技术在更大范围内的高效落地与工程实践。

项目管理团队的大力支持，特别感谢市环城南路高架桥项目部提供的第一手施工数据与技术资料。同时，感谢在张拉工艺分析、数据监测与结构评估等方面给予指导的专业人员，提供了宝贵的意见与建议。亦感谢在调研与资料整理过程中协助提供帮助的同仁与同行，有效保障了研究的顺利进行。在此一并致以诚挚谢意。

六、致谢

在本课题研究与撰写过程中，得到了多位工程技术人员和项

参考文献

- [1]付凯华.探究桥梁施工中预应力智能张拉技术应用措施[J].智能建筑与智慧城市,2024,(12):173-175.DOI:10.13655/j.cnki.ibci.2024.12.056.
- [2]席晓伟.预应力张拉技术在市政桥梁施工中的应用研究[J].工程机械与维修,2024,(01):177-179.
- [3]辛崇升,卢忠梅,赵毅.预应力数控智能张拉施工技术在桥梁施工中的应用[J].科技展望,2015,25(23):16-17.
- [4]刘健.城市快速干道桥梁混凝土箱梁预应力张拉施工技术分析[J].科技创新与应用,2013,(04):188.DOI:10.19981/j.cn23-1581/g3.2013.04.183.
- [5]李超.桥梁施工中大跨径连续桥梁技术的应用研究[J].上海建材,2024,(06):105-108.
- [6]张敏,韩振玉,姚明新.预应力施工技术在市政桥梁工程中的应用[J].汽车画刊,2024,(12):162-164.
- [7]杨庆锋.市政桥梁施工中现浇箱梁关键技术探究[J].建材发展导向,2024,22(22):126-129.DOI:10.16673/j.cnki.jcfzdx.2024.0797.
- [8]何智浩.钢管混凝土拱桥在上跨城市道路中的施工应用[J].交通建设与管理,2024,(S1):107-109+158.
- [9]林明敬.市政公路桥梁箱梁预应力张拉及压浆施工控制探析[J].交通世界,2024,(23):137-139.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2024.23.018.
- [10]王龙涛,钟洪江,曹锐志.市政道路桥梁预应力施工技术要点[J].大众标准化,2024,(18):77-79.