 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i9.11575

Research on Quality Control Techniques for the Entire Prestressed Bridge Tensioning Construction Process

Lingtong Meng

Shanghai Baoye Group Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

Post-tensioned prestressing construction technology is a core process in modern bridge engineering, and its construction quality directly affects the bearing capacity, durability, and operational safety of bridge structures. This paper systematically analyzes the quality control technology for the entire process of post-tensioned prestressing tensioning construction. Proceeding from key stages including material and equipment control, processing and installation of prestressing tendons, tensioning construction process control, duct grouting, and anchor sealing, it discusses the quality control key points and technical measures at each phase. Research indicates that quality control of prestressing tensioning should achieve dual synchronous control of tensioning force and elongation value, strengthen the inspection of effective prestress under anchor, and promote the application of intelligent tensioning technology, so as to minimize the influence of human factors to the greatest extent and ensure that the permanent prestress of the structure meets the design requirements.

Keywords

post-tensioned method; prestressing tensioning; quality control; intelligent tensioning; effective prestress under anchor

预应力桥梁张拉施工全过程质量控制技术研究

孟令通

上海宝冶集团有限公司，中国·山东 济南 250000

摘　要

后张法预应力施工技术是现代桥梁工程的重要工艺环节，施工质量好坏直接影响桥梁结构的承载能力、耐久性、运营安全性。本文对后张法预应力张拉施工全过程的质量控制技术实行了系统的分析，从材料以及设备控制、预应力筋加工安装、张拉施工过程控制、孔道压浆及封锚等环节入手，论述了各个阶段的质量控制要点以及技术措施。研究说明预应力张拉质量控制要实现张拉力和伸长值的双控，加强锚下有效预应力检测，推进智能张拉技术的应用，最大限度地减少人为因素的影响，保证结构永存预应力符合设计要求。

关键词

后张法；预应力张拉；质量控制；智能张拉；锚下有效预应力

1 引言

预应力混凝土结构由于有着抗裂性能好、承载能力大、结构截面小等优点，已经变成现代桥梁工程的主要结构形式。后张法是预应力施工的主要工艺方法，其基本原理是在混凝土构件浇筑养护到了设计强度后，用张拉设备对预留孔道内的预应力筋施加张拉力，让它产生弹性伸长，然后用锚具将预应力锁定在构件两端，最后借助孔道压浆使预应力筋及混凝土协同工作。该工艺特点决定了预应力张拉施工是一项技术密集、工序繁杂、质量要求高的作业过程。近些年来，由于桥梁工程向着大跨径、高墩、长寿命方向发展，预应力施工质量控制的要求也越来越高。从全过程思路建立系统的质量控制体系，已经变成工程界和学术界共同关注的重要课题。

【作者简介】孟令通（1989–），男，中国河北邯郸人，本科，工程师，从事公路与桥梁工程研究。

2 预应力张拉施工前的技术准备

2.1 预应力材料质量控制

预应力筋是施加预应力的主要材料，预应力筋的性能指标直接决定张拉效果。后张法施工中常用高强钢丝、钢绞线或预应力螺纹钢筋。材料进场后应按相关标准分批检验，内容有极限抗拉强度、屈服强度、伸长率、松弛性能等力学指标，还有直径、截面面积等几何参数。检验不合格的材料不得使用，应严格区分存放，不得混用。锚具应做硬度检验、静载锚固性能试验、疲劳性能试验，保证其锚固能力系数不小于 0.95，总应变满足规范要求。夹片式锚具硬度检验应按批次抽检，每批抽检数量不少于 5% 且不少于 5 件。

2.2 张拉设备的配套标定

张拉设备系统由千斤顶、油泵、压力表及附属管路组成。设备选型应满足最大张拉力的要求，千斤顶的额定张拉力应大于设计张拉力的 1.5 倍以上，行程应满足理论伸长值及富

余量的要求。张拉设备首次使用前、连续使用 300 次或者使用期满 6 个月时，均应实行配套标定。标定方法一般使用压力传感器或者测力环对千斤顶、油泵、压力表系统实行整体标定，建立张拉力与压力表读数的对应关系。标定应在试验机或者专用标定装置上实行，标定结果应绘制回归曲线并给出回归方程。需要特别指明的是，标定结果只对所标定的配套设备有效，实际使用中不得随意更换组合 [1]。

3 预应力筋的制作与安装质量控制

3.1 预应力筋下料与编束

预应力筋下料长度应根据构件孔道长度、锚具厚度、千斤顶工作长度、工具锚厚度、预留富余量等融合因素来计算。下料应使用砂轮切割机或专用切断设备，严禁使用电弧切割或气割，以免高温灼伤钢绞线表面、改变其金相组织，削弱承载能力。钢绞线下料后应按设计编号实行编束，编束时应保持各根钢绞线平行顺直、不相互缠绕，每隔 1.0~1.5m 绑扎一道，绑扎应牢固且不影响钢绞线相对滑动。编束完成后要实行外观检查，保证无损伤、锈蚀、折弯等缺陷，在端部做好标记，防止穿束过程中出现混淆。

3.2 预应力孔道安装

预应力孔道定位、安装是影响预应力筋线形精度、孔道摩阻损失的重要工序。定位钢筋网片或定位支架应按设计坐标设置，其间距直线段不宜大于 1.0m，曲线段不宜大于 0.5m。定位偏差应符合规范要求，纵向偏差不超过 ±10mm，横向偏差不超过 ±5mm。孔道接头应连接严密，用大一号的套管套接，套管长度应为被连接管道直径的 5~7 倍，两端用胶带或专用卡箍密封，防止混凝土浇筑过程中漏浆堵塞孔道。孔道端部应设置螺旋筋或钢筋网片等加强筋来承受锚下局部高压应力。孔道安装完成后解决其位置、线形、接头密封性实行检查，采取可靠措施防止孔道上浮、位移。

3.3 预应力筋穿束

穿束作业可以在混凝土浇筑前或者浇筑后实行，后穿束方式更为常见。穿束前应清孔检查，保证孔道畅通无堵塞，可使用压缩空气吹扫孔道内杂物。穿束时保护预应力筋表面，防止划伤、弯折。机械穿束时，牵引力要平稳施加，防止冲击荷载损伤孔道。穿束后预应力筋外露长度应满足张拉操作要求，端部应做临时保护，防止锈蚀、损伤。

4 张拉施工过程控制技术

4.1 张拉条件与施工准备

张拉作业应在构件混凝土强度以及弹性模量到了设计规定值后实行。混凝土强度一般以同条件养护试件为依据，弹性模量的检验也不能忽视，强度达标但弹模偏低会造成过大的徐变变形。张拉前应做好以下准备工作，检查锚具、夹片安装到位且清洁无杂物；千斤顶、油泵、压力表配套正确且标定在有效期内；安装工具锚、限位板，千斤顶、锚具、孔道三者轴线对中，偏心距不大于 3mm；设置安全防护屏障，张拉端设挡板，防止意外飞射伤人。

张拉控制应力应按设计要求确定，一般取预应力筋抗拉强度标准值的 70%~75%。张拉程序应根据结构特点及设计要求来确定，常见的程序有一次张拉、分级张拉、超张拉等。分级张拉有利于观察各个阶段的受力响应，及时发现异常。超张拉可以部分抵消预应力松弛损失，但是超张拉值不应超过规范允许上限 [2]。

4.2 张拉力与伸长值双重控制

现行规范明确要求预应力张拉实行张拉力以及伸长值双重控制，即以张拉力为主控指标，以伸长值为校核指标。张拉力的施加用油泵压力表读数或者智能张拉系统的传感器力值来控制。实际施加的张拉力以及设计张拉力的允许偏差一般控制在 ±3% 以内。

预应力筋的理论伸长值按下式计算：

$$\Delta L = \frac{P_p L}{A_p E_p}$$

式中，P_p 为预应力筋的平均张拉力（N），L 为预应力筋的计算长度（mm），A_p 为预应力筋截面面积（mm²），E_p 为预应力筋的弹性模量（N/mm²）。实际伸长值的量测应在张拉过程中同步进行，通常以张拉控制应力的 10%~15% 作为初始应力值，分级记录各级伸长量，最终实际伸长值为从初始应力至最终应力的累计伸长量与初始应力以下推算伸长值之和。

实际伸长值与理论伸长值的允许偏差一般在 ±6% 以内。超出此范围时应停止张拉，查明原因并采取相应措施后方可继续作业。常见偏差原因含有：孔道摩阻系数以及设计取值不符、预应力筋弹性模量波动、锚具回缩量异常、千斤顶标定误差等。

4.3 张拉过程中的常见问题与处置

实际工程中张拉作业会遇到各种异常工况，必须及时识别并妥善处理。

锚具回缩量异常属于常见问题之一。锚具回缩量囊括锚具本身变形、夹片滑移以及锚下混凝土压缩变形，回缩量一般控制在 6mm 以内。回缩量过大，有效预应力明显下降，应检查夹片是否安装到位、锚下混凝土有无局部缺陷，必要时更换锚具或重新张拉。

断丝或者滑丝属于预应力张拉过程中出现的严重质量问题。单根钢绞线断丝面积不应大于该截面总钢丝面积的 1%，一束内断丝不得超过 1 丝。断丝超限时，应退锚更换钢绞线后重新张拉。断丝原因可能及钢绞线本身存在微裂纹、夹片硬度偏高损伤钢绞线、张拉速度过快有关 [3]。

孔道摩阻损失过大，就会造成构件沿长度方向预应力分布不均。实际工程中可以凭借摩阻试验测定孔道摩阻系数，以及设计值对比分析偏差来源。实测摩阻大于设计值时，应检查孔道有无局部弯折、波纹管接头错台、漏浆堵塞等。

5 孔道压浆与封锚质量控制

孔道压浆是后张法预应力施工的最后核心工序，主要作用有保护预应力筋不被锈蚀、使预应力筋与混凝土粘结协同工作、改良锚具受力状态。压浆质量缺陷会引发预应力筋锈蚀、有效预应力下降甚至结构破坏，所以必须给予高度重视。

5.1 压浆材料与配合比控制

压浆材料应使用专用预应力孔道压浆料或压浆剂配制的浆液，其性能应满足流动性、泌水率、膨胀率、强度、耐久性等指标要求。水灰比控制在 0.26~0.28 之间，浆液初始流动度为 10~17s，30min 后流动度不大于 20s。浆液在常温下 3h 内泌水率不大于 2%，24h 内泌水应被完全吸收。浆液膨胀率宜为 0~2%，保证硬化后浆体以及孔道壁周密接触。

5.2 压浆工艺控制

压浆作业应在张拉完成后 48h 内实行，且应在构件温度不低于 5℃的条件下施工。压浆应使用专用压浆设备，设备应有着自动计量、自动记录压力和流量数据的功能。压浆压力控制在 0.5~0.7MPa，超长孔道可增加到 1.0MPa。压浆速度应均匀缓慢，防止过快造成孔道内空气不能排出。

压浆工艺应使用真空辅助压浆法，即在压浆前对孔道抽真空至 -0.06~-0.1MPa，然后在真空状态下实行压浆。该方法可以有效地排除孔道内的空气和水汽，增加压浆的饱满度，减少气泡及空隙。压浆过程中要观察出浆口出浆情况，待出浆口流出的浆液浓度与进浆口一致且无气泡后，关闭出浆口阀门并继续持压 0.5MPa 以上，持压时间不少于 3min。

5.3 压浆质量检验

压浆质量检验囊括压浆饱满度检验以及浆体强度检验。压浆完成后解决孔道压浆密实度实行抽样检测，检测方法可以使用冲击回波法、超声波法或者内窥镜法。发现不密实孔道应及时补压浆。浆体试件应在压浆过程中同时制作，标准养护后检验其抗压强度，28d 强度不应小于 50MPa[4]。

封锚是压浆后收尾工序，应在压浆强度到了设计要求后实行。封锚混凝土应选用以及构件同强度等级的微膨胀混凝土，浇筑前对锚穴实行凿毛处理并湿润，浇筑后加强养护，防止收缩开裂。智能张拉系统一般由数控张拉子系统、数据管理子系统以及辅助控制子系统三部分组成。数控张拉子系统由油泵、千斤顶、压力传感器、位移传感器组成，可以自动采集张拉力和伸长值，实现张拉力及伸长值的实时控制；数据管理子系统负责施工数据的存储、处理和上传，生成张拉记录报表；辅助控制子系统给予油温监控、故障诊断、断电恢复、安全保护等辅助功能。

6 锚下有效预应力的检验与评价

6.1 锚下有效预应力的检测方法

目前工程中常用的锚下有效预应力检测方法为反拉法。反拉法的基本原理是在已张拉锚固的预应力筋端部再施加张拉力，凭借监测张拉力 - 伸长量曲线来确定锚具回松瞬间的荷载值，该值就是锚下有效预应力。反拉法检测应选择有代表性的构件及预应力束实行抽样检测，抽样比例一般不少于构件总数的 3% 且不少于 3 束。智能张拉技术相比传统人工张拉工艺，在质量控制方面有明显的优势。第一，自动采集数据可以消除人工读表、测量的读数误差，增加张拉力、伸长值的控制精度；第二，实时双控功能可以在张拉过程中同时监控张拉力、伸长值，发现异常立即报警，防止超差后无法补救；第三，数据自动记录、上传功能保证施工过程的可追溯性，为质量验收、后期运营管理给出可靠的数据支撑。

6.2 检测结果的应用与反馈

锚下有效预应力检测结果可以评定张拉施工质量的总体水平，反馈教导后续施工。检测结果表明锚下有效预应力大多低于设计值，应系统排查原因，可能与张拉控制应力偏低、孔道摩阻损失超预期、锚具回缩过大、预应力松弛损失严重等有关。根据检测结果调整张拉参数或者精进施工工艺，有利于张拉质量的持续改良 [5]。

7 结语

后张法预应力张拉施工是多工序衔接、多因素耦合的系统工程。全过程质量控制要从材料检验、设备标定、预应力筋制作安装、张拉作业实行、孔道压浆到锚下有效预应力检验形成闭环。张拉力以及伸长值的双重控制是过程控制的重点，锚下有效预应力检测是结果评定的核心，智能张拉技术的应用使质量控制从经验依赖向数据驱动转变。各个环节的质量控制缺一不可，任何一个工序的疏忽都会对结构的长期性能造成不良影响。

将来预应力施工质量控制的发展方向，应该从施工过程的信息化、标准化、精细化入手，精进智能张拉系统功能和性能标准，建立施工全过程数字质量管理平台，为桥梁结构的安全耐久给予更加可靠的技术保障。

参考文献

[1] 桥梁预应力张拉控制及反馈方法: CN102922601A[P]. 2012-10-09.

[2] 河北省市场监督管理局. 公路桥梁后张法预应力智能张拉技术规程: DB13/T 6174-2025[S]. 2025.

[3] 孙晓斌. 后张法预应力混凝土简支箱梁预应力施工要点及质量控制[J]. 交通建设与管理, 2024(A1).

[4] 吕春贵. 预制T梁桥的预应力张拉施工技术要点研究[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(11): 57-59.

[5] 姚志安, 范立朋, 陆学村, 等. 基于锚下有效预应力检测的预应力后张法施工质量控制[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 179-183.