

预制T梁桥的预应力张拉施工技术要点研究

鲍益生

武义县交通运输技术中心 浙江 金华 321200

摘要：预制T梁预应力张拉包含先张与后张两种，以大桥桥梁工程的T梁预制为研究对象，其T梁采用的后张法预制。后张拉是指在T梁生产时预埋预应力管道，T梁生产完成达到一定强度后再穿入预应力束，利用张拉设备张拉预应力束，随后，进行孔道压浆、封锚。这样T梁出厂时构件即承受一道压应力，使得T梁产生一定的形变，在后续使用过程中这部分压应力可抵消或减少行车荷载产生的拉应力。使得T梁结构刚度增加，增强结构耐久性。

关键词：预制T梁；预应力；后张法；施工技术

为解决T梁预应力张拉易出现的孔道堵塞、锚具破碎、预应力筋延伸率大、预应力损失等问题，结大桥桥梁工程，采用案例研究法对后张法预应力张拉的技术原理及流程进行分析，分析工程采用后张法预制T梁的张拉施工技术要点，针对预应力张拉易出现的问题提出管控措施，促使预应力张拉施工质量控制良好。在预制T梁预应力张拉施工中，施工单位需要从管道安装、钢绞线、张拉过程、孔道压浆等关键环节进行控制，如加强管道安装固定、控制钢绞线材料验收、规范张拉过程、及时孔道严密注浆等，提升预应力张拉施工质量。

1 预制T梁实践检验

武义县T梁桥的建设，已经有十多年实践历史，从两千多片预制T梁中汲取经验，总结其预制浇筑和张拉技术，留下了宝贵的技术财富。T梁跨度，从16米到40米，中小跨度均有分布。从程序到控制，从浇筑到验收，质量与安全已经形成了科学有效有遵循的制度性成果。

2 预制T梁桥预应力张拉安全与操作要点

(1) 施工安全控制要点。人员安全防护，张拉时千斤顶后方设防护挡板，操作人员严禁站在钢绞线轴线延长线位置；高处作业人员需持证上岗，佩戴五点式安全带及安全帽，临边设置 $\geq 1.2\text{m}$ 防护栏杆。设备安全管理，千斤顶、油压表配套标定，超6个月或张拉200次需重新校准；起重吊装半径20m内禁止交叉作业，架桥机过孔时桥下设警戒区。操作环境安全，孔道压浆前，梁端锚具及钢绞线头需设防护罩，严禁撞击；临时用电设备安装漏电保护器，移动电动工具绝缘检测合格。

(2) 关键操作流程。预应力束安装，钢绞线穿束前逐根理顺，无扭结损伤，束端安装锥帽便于穿束；波纹管接头用套管密封，锚垫板注浆孔朝上并清理灰浆。锚具安装与张拉，工作锚（永久锚固端）与工具锚（千斤顶配套工具）需区分：工作锚安装前检查锚垫板限位圈

对正，夹片用钢管轻敲顶平；工具锚夹片表面涂石蜡便于拆除，保持与千斤顶同轴线。断丝/滑丝控制，单束断丝 ≤ 1 根，总断丝率 $\leq 0.5\%$ ，超限需更换钢绞线。

(3) 压浆与应急管理。压浆时效性，终张拉后48小时内完成真空辅助压浆，浆液浓度一致时封闭保压 ≥ 3 分钟。封锚要求，钢绞线切割后外露 $\geq 30\text{mm}$ ，锚穴凿毛至75%新鲜混凝土面；浇筑补偿收缩混凝土，错台 $\leq 2\text{mm}$ ，覆膜保湿养护。应急预案，塌孔事故：立即以1:1比例回填片石与粘土；触电急救：4分钟内完成断电与心肺复苏，定期演练防坠落预案。安全核心在防护隔离（人员设备）、双控执行（应力+伸长量）、时效管理（48小时压浆）；操作关键点：锚具区分、断丝控制及分级张拉程序。

(4) 预制T梁桥预应力张拉人员安全防护措施。作业区安全管控，警戒隔离，张拉区域设置钢筋栅栏+警示标识，非作业人员严禁进入；两端布设金属套管防护装置（内径 $>$ 锚环0.5~1mm），防止锚具炸裂飞溅。站位规范，操作人员严禁位于千斤顶正后方，统一站立于千斤顶侧面；测量伸长值时停止油泵，人员退至安全区域。设备安全控制，预检要求，千斤顶、油压表每月校验1次，压力表精度 ≥ 1.5 级；高压油管使用前做耐压试验，额定油压下无渗漏。电气安全，配电箱接地电阻 $\leq 4\Omega$ ，禁用铝丝/铜丝替代保险丝；潮湿环境采用24V安全电压照明。应急处置措施，钢绞线断裂：立即停机→油泵回油泄压→更换受损钢绞线；油管爆裂：切断电源→封闭油路→撤离人员；锚具滑丝：反向顶压卸载，重新安装夹片。所有操作人员需持证上岗，每班次前进行安全交底。

(5) 预制T梁桥预应力张拉孔道对中减少摩擦方法。以下是预制T梁桥预应力张拉孔道对中减少摩擦的关键方法及技术要点：孔道精准定位，定位钢筋布置，波纹管采用U形定位钢筋固定，直线段间距 $\leq 50\text{cm}$ ，弯曲段

加密至 $\leq 30\text{cm}$; 定位钢筋直径 $\geq \phi 10\text{mm}$, 焊接于梁体主筋上, 防止混凝土浇筑移位。垂直度控制, 锚垫板与孔道轴线垂直度偏差 $\leq 1^\circ$, 锚具中心与管道中心同轴; 安装时采用激光定位仪校准, 偏差 $\leq 2\text{mm}$ 。孔道成型优化, 波纹管选型与连接, 优先选用高密度聚乙烯塑料波纹管 (摩擦系数 $\mu = 0.14 \sim 0.16$), 优于金属波纹管 ($\mu = 0.20 \sim 0.25$); 接头处搭接长度 $\geq 5\text{cm}$, 缠绕专用密封胶带防漏浆。孔道平顺处理, 弯曲段曲率半径 $\geq 4\text{m}$, 避免锐角转折 (最小转弯半径 $\geq 3\text{m}$); 管道固定后实测坐标与设计偏差 $\leq 5\text{mm}$ 。张拉过程控制, 分级张拉补偿, 分 $0 \rightarrow 10\% \sigma \rightarrow 20\% \sigma \rightarrow 100\% \sigma$ 四级加载, 每级稳压 2min ; 曲线孔道在 $50\% \sigma$ 时补张拉一次, 抵消摩擦损失。伸长值校核, 实测伸长值与理论值偏差 $\leq \pm 6\%$, 超差时暂停分析孔道摩擦; 两端张拉力同步偏差 $\leq 5\%$ 。特殊部位处理, 负弯矩区: 优先采用单根张拉替代整束张拉, 减少钢绞线间摩擦; 竖向孔道: 压浆前预张拉 $10\% \sigma$ 消除自重引起的摩擦。摩擦损失超限 ($> 15\%$ 设计值) 时需开窗检查或补浆修正。

3 预制 T 梁桥预应力张拉施工技术要点

(1) 施工准备。混凝土强度控制, T 梁混凝土强度需达到设计强度等级的 90% 以上, 且龄期不少于 7 天方可进行终张拉; 预张拉阶段强度需 $\geq 60\%$, 初张拉需 $\geq 80\%$ 。设备与材料管理, 千斤顶与油压表需配套标定, 使用超 6 个月或张拉超 200 次需重新标定; 钢绞线穿束前需理顺无扭结, 锚具夹片涂石蜡防锈。孔道与锚具检查, 波纹管接头采用套管密封缠胶带, 锚垫板压浆孔朝上, 穿束前复查通畅性。

(2) 张拉过程控制。张拉程序, 分级加载: 预张拉 (强度 60%) $\rightarrow$ 初张拉 (强度 80%) $\rightarrow$ 终张拉 (强度 $100\% + \text{龄期} \geq 10\text{天}$); 双控执行以张拉力为主控, 伸长量偏差 $\leq \pm 6\%$, 两端伸长量差值 $\leq$ 总量 5% ; 断丝率控制: 单束 ≤ 1 根, 总断丝率 $\leq 0.5\%$ 。安全操作, 千斤顶后方设防护挡板, 人员严禁站钢绞线轴线延长线上。压浆与封锚。压浆时效要求, 终张拉后 48 小时内完成真空辅助压浆, 浆液浓度进出一致时封闭保压 ≥ 3 分钟。压浆工艺, 曲线孔道高点设排气孔, 匀速恒压灌注, 压力表精度 ≥ 1.5 级。封锚处理, 钢绞线切割后外露 $\geq 30\text{mm}$, 锚穴凿毛至 75% 新鲜混凝土面; 浇筑补偿收缩混凝土, 错台 $\leq 2\text{mm}$, 覆膜养护 ≥ 7 天。质量验收重点。张拉效果: 梁体上挠值按跨径 $0.8\% \sim 1.0\%$ 控制 (如 40m 梁为 $3.2 \sim 4.0\text{cm}$); 压浆质量: 饱满度需达 100% , 锚具封闭严密无渗漏。执行中需结合《公路桥涵施工技术规范》动态调整参数。

(3) 预制 T 梁桥预应力张拉压浆施工要点。预应力张拉控制要点, 张拉前提条件, 混凝土强度 $\geq$ 设计值 90% 且龄期 ≥ 7 天 (终张拉), 预张拉强度需 $\geq 60\%$, 初张拉 $\geq 80\%$; 千斤顶与油压表配套标定, 超 6 个月或使用 200 次需重新校准。异常处置, 单束断丝 ≤ 1 根, 总断丝率 $\leq 0.5\%$, 超限需更换钢绞线; 张拉后梁体上拱值按跨径 $0.8\% \sim 1.0\%$ 控制 (例: 40m 梁为 $3.2 \sim 4.0\text{cm}$)。压浆施工关键要求, 时效与环境, 终张拉后 48 小时内完成压浆; 气温 $< 5^\circ\text{C}$ 需保温措施, $> 35^\circ\text{C}$ 不得压浆。真空压浆工艺, 孔道清理: 压缩空气除尘 $\rightarrow 0.1\text{kg/L}$ 石灰水冲洗 $\rightarrow$ 二次吹干; 真空度维持: $-0.075 \sim -0.08\text{MPa}$ 稳压 1 分钟后压浆; 饱满度控制: 排浆稠度与进浆一致时封闭保压 ≥ 3 分钟。封锚与验收, 锚头处理, 钢绞线切割外露 $\geq 30\text{mm}$, 锚穴凿毛至 75% 新鲜混凝土面; 补偿收缩混凝土封锚, 错台 $\leq 2\text{mm}$, 覆膜养护 ≥ 7 天。质量验收重点, 压浆饱满度 100% , 锚具封闭无渗漏; 孔道压浆试块抗压强度 $\geq 50\text{MPa}$ 。执行中需动态结合《公路桥涵施工技术规范》及设计文件调整参数。

(4) 预制 T 梁桥预应力张拉压浆速度与压力控制要点。以下是预制 T 梁桥预应力压浆施工中速度与压力控制的核心要点, 综合规范要求与实践经验整理: 压浆前准备控制, 孔道清洁, 压浆前用压缩空气除尘 $\rightarrow 0.1\text{kg/L}$ 石灰水冲洗 $\rightarrow$ 二次吹干, 确保无油污积水。设备校准, 压浆泵压力表精度 ≥ 1.5 级, 真空泵真空表提前校验。浆液性能与过程监控浆液动态调节, 流动度 $10 \sim 17\text{s}$ (30s 内), 泌水率 $\leq 3\%$, 水胶比 $0.4 \sim 0.45$; 每罐浆液高速搅拌 ≥ 2 分钟 ($1250\text{转}/\text{min}$)。异常处理, 压力骤升时立即停泵, 排查堵管 (查排气孔、浆液沉淀); 压浆中断超过 30 分钟需冲洗管路重新压浆。注意事项, 环境控制: 气温 $< 5^\circ\text{C}$ 时采取保温措施, $> 35^\circ\text{C}$ 禁止压浆; 时效性: 终张拉后 48 小时内完成压浆; 安全防护: 操作人员不得正对压浆管接口, 防止爆管伤害。执行中需结合《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650-2020) 动态调整。

(5) 质量验收要点。。张拉伸长量偏差、断丝率、压浆饱满度; 终张拉后梁体上挠值符合设计 (无设计时按跨径 $0.8\% \sim 1.0\%$ 估算)。要点执行需结合设计文件及《公路桥涵施工技术规范》动态调整。

4 预制 T 梁桥预应力张拉压浆后养护措施

(1) 压浆后初期养护。封闭保压要求, 压浆完成后需立即封闭锚具及排气孔, 保持稳压状态 ($\geq 0.5\text{MPa}$) ≥ 3 分钟, 确保孔道密实。封锚前处理, 锚穴凿毛至 $\geq 75\%$ 新鲜混凝土面, 清除浮浆及油污; 钢绞线切割后外露长度 $\geq 30\text{mm}$, 锚具周边打磨平整。

(2) 封锚施工与养护。混凝土浇筑,采用补偿收缩混凝土(强度 $\geq$ 梁体混凝土)封闭锚穴,分层振捣密实;控制表面错台 $\leq 2\text{mm}$,与梁体平顺衔接。覆膜保湿养护,封锚后立即覆盖塑料薄膜或土工布,持续保湿养护 ≥ 7 天;夏季每2小时洒水1次,冬季采用蒸汽养护维持温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 质量验收重点。锚固密封性:锚具封闭后无渗水、锈迹;混凝土强度:封锚混凝土7天强度达设计值90%以上;外观缺陷:表面无裂缝、蜂窝,平整度偏差 $\leq 2\text{mm}/2\text{m}$ 。

(4) 安全与时效要求。养护期间禁止踩踏锚固区,设警示围挡;终张拉至封锚完成总时限 ≤ 72 小时。

(5) 预制T梁桥预应力张拉压浆质量检测方法。无损检测方法,冲击回波法,原理:通过应力波在孔道内的反射特性判断密实度,适用于金属波纹管。操作要点:沿孔道每0.5m设检测点,定位缺陷精度达 $\pm 5\text{cm}$ 。设备:管道灌浆密实度质量检测仪(需配套阵列超声波定位)。超声波透射法,应用:结合支持向量机(SVM)

算法自动识别缺陷,准确率超90%;局限:受钢筋网干扰大,需多参数(声时、波幅)交叉验证。地质雷达法,适用场景:塑料波纹管检测,通过电磁波反射双峰值识别脱空;禁用范围:金属波纹管因电磁屏蔽无效。有损检测方法,钻芯取样法,操作:取芯验证局部密实度,芯样直径 $\geq 50\text{mm}$;限制:破坏结构,抽检率 $\leq 3\%$ 且需修补。X射线法,优势:成像直观,精度高;弊端:辐射危害,需特种作业许可。缺陷处理原则,局部脱空:钻孔补浆,压力0.5~0.7MPa;大面积缺陷:开窗清理后重新压浆;钢绞线锈蚀:破拆更换并防腐处理。

总之,T梁预应力张拉施工技术对T梁质量控制非常关键,为T梁桥的长久安全使用起到关键作用。

参考文献

- [1]刘宇.公路桥梁工程中的预应力张拉施工要点分析.2022.
- [2]张晓伟.预制T梁桥的预应力张拉施工技术要点探讨.2023.