

预制梁先张拉智能施工技术

宋玉龙¹, 张所倩¹, 王 涛², 阚绍江², 王江涛²

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004;
2. 华能澜沧江水电股份有限公司托巴水电工程建设管理局, 云南 迪庆 674608)

摘要:为解决传统锚固张拉系统人工张拉主观控制随意性大,易导致预应力施工质量受外部因素影响大的问题,采用先张法结合智能张拉系统实现预应力锚索张拉的自动控制,以提高张拉质量和效率。结合 TB 水电工程从施工准备、台座设计及布置、预制梁钢筋绑扎、波纹管定位与安装、模板安装、钢绞线安装及张拉等方面对预制梁先张拉智能施工技术进行了介绍,认为通过钢结构张拉台座进行先张拉预应力梁施工,工艺简单,提升了预制梁的施工质量与耐久性;智能张拉系统可通过传感器的实时监控,提高张拉质量,使预应力张拉能高质量、高标准地安全完成。

关键词: 预制梁; 先张拉法; 智能张拉

中图分类号: TV134.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2024)S1-0115-05

Intelligent construction technology of pretensioned beam//SONG Yulong¹, ZHANG Suoqian¹, WANG Tao², KAN Shaojiang², WANG Jiangtao² (1. *Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China*; 2. *Tuoba Hydroelectric Engineering Construction Management Bureau of Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Diqing 674608, China*)

Abstract: In order to solve the problem that the subjective control of artificial tensioning in the traditional anchoring tensioning system is arbitrary, which is easy to cause the prestressed construction quality to be greatly affected by external factors, the pretension method combined with intelligent tensioning system is used to realize the automatic tensioning control of prestressed anchor cable to improve the tensioning quality and efficiency. Combined with TB Hydropower Project, this paper introduces the intelligent construction technology of prefabricated beams from the aspects of construction preparation, pedestal design and layout, prefabricated beams reinforcement lashing, bellows positioning and installation, formwork installation, steel strand installation and tension. It is considered that the construction of pretensioned prestressed beams through steel structure tensioning pedestal is simple, and the construction quality and durability of prefabricated beams are improved. The intelligent tensioning system can improve the tensioning quality through the real-time monitoring of the sensor, so that the prestressed tensioning can be completed safely with high quality and high standard.

Key words: precast beam; pretensioning method; intelligent tension

自 20 世纪 60 年代起,我国开始发展预应力锚索加固技术,目前锚索加固技术已广泛应用于边坡加固、桥梁施工、预制梁等张拉施工中。锚索张拉施工技术是预应力锚索施工中至关重要的一环,其施工质量的优劣直接影响结构的耐久性和安装精度。锚索张拉的质量和效果难以直观检查,需通过张拉过程记录的数据进行反映,即以施工过程的张拉油压值、张拉力、伸长量、升压时间、持荷时间、偏差率等参数作为评判张拉质量的依据^[1]。预应力锚索张拉分为先张拉和后张拉^[2]施工,先张拉法具有施工方便、成本低等优点,在中、小跨径装配式桥梁工程中得到了广泛应用^[3]。先张拉法必须配备先张

拉生产台座,且受力计算需满足张拉稳定要求^[4]。传统锚固张拉系统,基本通过人工调节阀门控制张拉压力、测量张拉伸长值等,各工序控制粗糙,随意性较大,且需要人工较多,难以保障预制梁张拉的均匀受力,容易受力不均出现裂缝,且容易出现数据记录错误等。智能锚索张拉系统不仅具有高精度和稳定性,还能完全排除人为因素干扰,能有效确保预应力张拉施工质量,规范预应力张拉施工^[5]。坝顶梁 BL1、BL2、L1、UL1 底部均布置有预应力筋(钢绞线),需采用先张法进行施工,本文将先张拉法和智能锚索张拉系统应用在 TB 水电工程的预制梁中,以保障大坝预制梁平稳预紧,并提高张拉效率和张

作者简介:宋玉龙(1988—),男,高级工程师,主要从事水利水电工程质量管理研究。E-mail:476940755@qq.com

取 L1 梁的 $N(2870.910\text{ kN})$ 进行压杆截面强度和稳定性计算。L1 梁长度为 16.80 m , 考虑梁两端各留出 0.8 m 封模工作空间, 则压杆长度为 $16.8+0.8\times 2=18.40\text{ m}$, 选定压杆截面形式为 $500\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的箱型梁, 20 mm 厚。截面强度 $\sigma=N/A=(2870.910\times 10^3)/[(500\times 20+(400-40)\times 20)\times 2]=83.46\text{ MPa}$ (A 为压杆截面积), 小于截面强度屈服值 $f(205\text{ MPa})$, 满足要求。

压杆长细比为 116 , 根据 GB50017—2017《钢结构设计标准》附录 D, 选取其稳定系数 $\varphi=0.458$ 。因此压杆整体稳定性计算为 $N/\varphi Af=(2870.910\times 10^3)/(0.458\times 34400\times 205)=0.89<1.0$, 满足要求。

压杆局部横梁应满足 $b/t\leq 40\varepsilon_k$ (b 为箱型压杆的净宽度, t 为箱型压杆的厚度, $\varepsilon_k=\sqrt{235/f_y}$, 其中 f_y 为钢材的屈服强度, 取 235 MPa), 本文压杆 $b/t=500/20=25<40$, 满足要求。

2.2.3 端部横梁稳定性计算

端部横梁焊接固定在压杆端头, 每组先张拉台座布置 4 个张拉槽, 则端部横梁为四跨梁结构, 选定压杆宽度为 500 mm , 预制梁两侧各留出 500 mm 作为模板安装工作空间, 端部横梁跨内局部承受均布荷载。根据设计图纸中预应力筋布置位置, 绘制弯矩图和剪力图, 可知端部横梁所受最大弯矩为 $1065.48\text{ kN}\cdot\text{m}$, 最大剪力为 1888.26 kN , 因此经计算受弯强度为 $112.83\text{ MPa}<205\text{ MPa}$, 满足要求。端部横梁挠度计算结果 (表 2) 均小于 2 mm , 满足要求。

端部横梁抗剪验算: 根据绘制的剪力图, 端部横梁所受最大剪力 (V) 为 1888.26 kN ; 剪应力处以上 (或以下) 毛截面对中和轴的面积矩 $S=5179093\text{ mm}^3$, 毛截面惯性矩 $I=2698004288\text{ mm}^4$, 腹板厚度取 I56b 工字钢中间最小截面厚度 ($t_w=14.5\times 2=29\text{ mm}$), 端部横梁的最大剪应力 $\tau=VS/(It_w)=(1888.26\times 10^3\times 5179093)/(2698004288\times 29)=124.99\text{ MPa}$, 小于钢材抗剪设计强度 $f_v(125\text{ MPa})$, 满足要求。

2.3 预制梁钢筋绑扎

①钢筋在钢筋厂加工完成后按施工图纸在预制梁厂安装成整体, 并需要符合 DL/T 5169—2013《水工混凝土钢筋施工规范》的相关规定。钢筋的最小

混凝土保护层 (钢筋外边缘至混凝土表面的距离) 按规范要求执行。②钢筋按照图纸间排距严格布置, 施工过程中采用钢卷尺检验, 仓面验收时进行抽检。③在混凝土和模板之间设置高于同部位混凝土强度的混凝土垫块来保证混凝土保护层厚度。④在钢筋绑扎完毕后, 参照规范标准进行详细检查, 并记录检查数据, 不合格部位督促整改, 确保绑扎出合格的预制梁钢筋。⑤预制梁钢筋整体吊装采用汽车吊, 吊装完成后安装波纹管及侧模。⑥在混凝土振捣时, 质检员应全程盯仓查看, 时常检查钢筋架立位置, 如因浇筑混凝土碰撞而发生变动, 应及时矫正。

2.4 波纹管定位、安装

①在预制梁钢筋骨架绑扎完成后、腰筋拉接筋绑扎前安装波纹管定位钢筋网, 定位钢筋网安装完成后方可穿塑料波纹管。②波纹管安装前, 应按设计图要求在箍筋上标出预应力筋的曲线坐标位置。根据设计图纸锚索孔道轴线, 按照等间距沿梁中心对称划分轴线, 标出节点位置, 轴线曲率变换处必须划分节点。根据锚索孔道轴线和标注节点计算出每个节点相对于轨道梁底面横向向中心线的水平距离和竖向距离, 经审核无误后在梁底模板或主筋上定出每个节点在梁底模板上的投影点。波纹管轴线水平段可直接在投影点临近的箍筋上按照该点对应的竖向距离标记出波纹管的轴线位置。非水平段应先测量出投影点附近的箍筋距梁横向向中心线的水平距离, 然后计算竖向距离, 并在箍筋上使用红油漆标记。③波纹管由定位钢筋网和沿孔道设置的轨道筋控制其位置, 定位钢筋网用钢筋焊成“井字形”支架, 点焊固定在梁腰筋或箍筋上, 用来托架波纹管, 钢筋网间距 0.8 m 左右, 误差不大于 4 mm , 局部可根据需要加密布置。预应力筋曲线坐标位置标记完成后, 必须经复核无误后才能安装定位钢筋网。④波纹管从梁一端依次穿过定位钢筋网, 用多股扎丝与钢筋网绑扎固定, 波纹管两端按设计要求安放弹簧圈。金属波纹管接长时, 采用大一号直径的金属波纹管作为接头管, 接头管的长度取 50 cm 。接头管的两端采用热塑管或黏胶带密封, 以防接缝处漏浆。⑤金属波纹管按设计位置精确定位, 形状圆滑, 施工时要严格控制尺寸与位置, 定位钢筋必须焊接牢固。

表 2 各梁端部横梁挠度计算结果

预制梁名称	E/MPa	I/mm^4	$q/(\text{N/mm})$	l/mm	b'/mm	$w_{\max}/\text{mm}$
人行交通桥梁 BL1	206 000	2 698 004 288	2 528. 58	2 590	984	1. 51
人行交通桥梁 BL2	206 000	2 698 004 288	2 970. 64	2 510	902	1. 49
L1	206 000	2 698 004 288	4 423. 59	2 260	649	1. 19
监测沟梁 UL1	206 000	2 698 004 288	2 701. 13	2 600	992	1. 65

注: $w_{\max}=qbl^3(8-4b^2/l^2+b^3/l^3)/384EI$, 其中 E 、 I 、 q 、 l 、 b' 、 $w_{\max}$ 分别为弹性模量、截面惯性矩、线荷载、跨度、荷载分布范围长度、挠度。

2.5 模板安装

模板采用定制定型整装模板,局部采用型钢补模,为保证浇筑过程中不变形,使用对拉螺栓将侧模对拉固定。侧模下面垫方木(方木沿着梁长度方向,方木两端超出梁 20 cm)。

模板采用汽车吊或随车吊进行吊装。立模前由测量工程师按照图纸放出控制点,严格按照测量放样点进行立模,重要结构设控制点,模板的安装偏差需符合 DL/T 5110—2013《水电水利工程模板施工规范》要求。模板安装时接头应平顺光滑,不出现错台,模板局部不平整度小于 2 mm,板面缝隙不大于 2 mm,超过规定值时,应进行校正或进行填缝处理,防止漏浆,确保混凝土浇筑的外观质量。

2.6 钢绞线安装及张拉

2.6.1 钢绞线要求

①采用公称直径为 15.2 mm 高强度低松弛钢绞线,抗拉强度标准值为 1 860 MPa。②钢绞线进场分批次取样进行检测,产品附带质量合格证书,从每盘钢绞线首尾截取 600 mm,检验其直径、极限抗拉强度、延伸率是否达到设计要求。③钢绞线入库后设置专门的材料架进行堆放,覆盖防雨布,避免沾水锈蚀。④钢绞线切割采用电动砂轮锯切割,根据设计图纸下料长度进行切割,切割口的两端各 5 cm 处用铁丝绑扎。⑤传力墩两端在同一水平面上,保持张拉横梁与台座轴线垂直,使得每根钢绞线张拉力一致。

2.6.2 钢绞线张拉

先张法预制梁采用夹片式单孔锚具,具有自锚性能,其张拉程序:0→初始应力→ $1.05\sigma_{con}$ (持荷 5 min)→ σ_{con} (锚固)。

预应力钢绞线公称面积 $A_g = 140\text{ mm}^2$,抗拉强度标准值为 1 860 MPa, σ_{con} 为 1 302 MPa,弹性模量 $E_p = 1.95 \times 10^5\text{ MPa}$,基于以上数据进行张拉理论伸长值计算(表 3),并与现场实际张拉伸长值对比,实测值与理论值误差控制在±6%之内,即为合格,若超出则需停止作业并查找原因后方可继续张拉。

2.6.3 智能张拉施工

智能张拉是指不依靠工人手动控制,而利用计

算机智能控制技术,通过传感技术采集施工过程中每台千斤顶(张拉设备)的工作压力和钢绞线的伸长量、回缩量等数据,并及时将数据上传到计算机。同时,泵站(张拉设备)在接收到系统指令后对变频电机的工作参数进行调整,从而实时调控油泵电机的转速,实现对张拉力和加载速度的实时且精确控制。

a. 调整预应力筋长度:采用夹片式锚具,调整预应力筋长度,使每根预应力筋受力均匀。

b. 智能系统设置:提前安装、设置预应力的智能张拉系统,并检查网络是否正常,从主机进入主操作页面,录入预应力筋张拉相关参数,严格按照理论计算表录入,录入完成后需进行核对,确保无误后启动一建张拉。

c. 初始张拉:预应力筋张拉施工前,需向监理人员报备,检查现场张拉设备安装是否满足张拉要求,以及智能系统张拉参数录入是否正确,经监理人员同意后方可启动张拉。智能张拉系统网络连接控制千斤顶均匀受力张拉,单根先施加 10% 的力进行预紧,并在预应力筋上做好标记,作为测量延伸量的基点。

d. 正式张拉:一端固定,一端张拉。采用对称张拉的顺序进行张拉,先张拉两侧钢绞线,逐步向中部靠近。在施工过程中,智能张拉系统会自动记录张拉数据,并与录入系统的理论张拉值进行校对,误差超过设定范围时,智能系统会进行弹窗提示、预警,停止张拉施工。待查明原因后,方可继续施工。

e. 持荷:为使预应力筋完成部分徐舒,以减少钢绞线锚固后的应力损失,高强度低松弛钢绞线张拉达到控制应力后需持荷 5 min。

f. 锚固:预应力筋持荷 5 min 后,查看智能系统记录的数据,比对实测值与理论计算值,确保误差在±6%范围内,若超出,则现场逐项排查原因直至满足要求。张拉完成后,千斤顶回油至零,确保施工安全。

2.6.4 混凝土浇筑及养护

2.6.4.1 浇筑

混凝土拌制必须按照事先确定的配合比进行配

表 3 钢绞线理论伸长值计算结果

预制梁名称	拉力/kN	压力表数/MPa	钢绞线长度/m	理论伸长值/mm	累计伸长值/mm
BL1、BL2	18.228	3.317	18.24	12	12
	36.456	7.223	18.24	24	37
	182.280	38.464	18.24	122	158
	191.394	40.416	18.24	128	286
L1、UL1	18.228	3.317	19.68	13	13
	36.456	7.223	19.68	26	39
	182.280	38.464	19.68	131	171
	191.394	40.416	19.68	138	309

料,其强度和弹性模量均需满足设计要求,拌制时掌握好最佳搅拌时间,保证骨料粒径和清洁。采用汽车吊配和小立罐入仓,送于仓面的混凝土应及时平仓振捣,不得堆积。平仓采用人工平仓,使用铁锹等手工工具,将成堆的混凝土料摊平至规定厚度,仓内有粗骨料堆积时,需人工分散至砂浆较多处,以免造成蜂窝。

混凝土浇筑应先平仓后振捣,严禁以振捣代替平仓。混凝土振捣采用人工振捣,振捣混凝土时,选用合适型号的软轴振捣棒。并注意控制振捣时间,避免欠振或过振。另外,由于坝顶预制梁钢筋较密,为保证预制梁边缘混凝土充分振捣,需要在预制梁两侧面模板上各安装2台附着振捣器,辅助振捣混凝土。

2.6.4.2 拆模及养护

混凝土达到设计强度方可拆模,具体的拆模时间应进行计算和试验复核(对混凝土进行回弹试验测定其强度),混凝土结构实测强度已经能承受自重或外在其他荷载时,经监理工程师批准后,方可提前拆模。拆模时先使钢模脱离混凝土表面,并人工用钢丝刷等清除钢模上附着的混凝土和砂浆,喷刷脱模剂,拆除的模板、钢管等应堆码整齐。被损坏的模板及时进行校正,验收不合格的模板不得投入使用。

混凝土浇筑完毕后立即用高分子混凝土节水保湿养护膜包裹养护,人工辅助洒水养护,定期补水。混凝土初凝后开始洒水养护,局部人工洒水养护,使其表面保持湿润状态,在炎热干燥气候情况下应提前进行养护。冬季施工时,所有预制梁夜晚应覆盖2cm厚保温被进行保温。早期应避免太阳光暴晒,混凝土表面宜加遮盖。养护时间不少于28d。

2.6.4.3 钢绞线放张

预应力钢绞线的放张应符合下列规定:①预应力筋放张必须在构件混凝土浇筑后7d以上且达到设计强度85%以上方可进行。②在预应力筋放张之前,应将限制位移的侧模、翼缘模板或内模拆除。③预应力筋的放张应分阶段、均匀、对称、相互交错地进行。④采用砂筒进行放张时,放砂速度应均匀一致。⑤放张后,预应力筋在构件端部的内缩值宜不大于1.0mm。⑥预应力筋放张后,钢丝和钢绞线应采用机械切割的方式进行切断。⑦长线台座上预应力筋的切断顺序,应由放张端开始,依次向另一端切断。

2.6.5 浇筑封端混凝土

封锚前,先在混凝土表面接茬处进行凿毛处理,清除锚垫板表面及锚环外面上部的灰浆。用环氧树脂涂封锚具,用防水涂料涂封锚穴的四周,对外露锚头进行防锈、防水处理,绑扎钢筋,浇筑封锚混凝土。

养护结束后,用聚氨酯防水涂料对封锚新老混凝土之间的交接缝进行防水处理。封锚混凝土连续浇筑,一次成型,并应具有良好的密实度。封锚混凝土采用自然养护。

3 结 论

通过钢结构张拉台座进行先张拉预应力梁施工,安装简便,工艺相对简单,省去了成孔、穿束、压浆等工艺,不需要复杂的设备,保证了构件混凝土浇筑密实度,提升了预制梁的施工质量与耐久性。智能张拉系统可通过传感器的实时监控,提高张拉质量,使预应力张拉能高质量、高标准地安全完成。预制梁共施工17个单元,优良率100%,外观光滑平整,根据门机负荷试验,位移变化偏差值在±3mm内,满足强度要求。

参考文献:

[1] 范雄安,龚泽鹏,蒋小春,等. 水利水电工程锚索张拉云监测系统研究与应用[J]. 四川水力发电,2022,41(3):1-3. (FAN Xiongan, GONG Zepeng, JIANG Xiaochun, et al. Research and application of cable tension cloud monitoring system for water conservancy and hydropower projects [J]. Sichuan Hydropower, 2022, 41(3):1-3. (in Chinese))

[2] 余志勇. 后张法预制梁张拉质量控制及锚下有效预应力提升探讨[J]. 青海交通科技,2021(3):138-143. (SHE Zhiyong. Study on tension quality control of post-tensioned prefabricated beams and effective prestress enhancement under anchors [J]. Qinghai Transportation Science and Technology, 2021(3):138-143. (in Chinese))

[3] 刘殿生,吴晨磊,朱敏涛. 先张法预应力混凝土梁自平衡模板体系研究[J]. 混凝土与水泥制品,2024(6):72-75. (LIU Diansheng, WU Chenlei, ZHU Mintao. Research on self-balancing formwork system of pretensioned prestressed concrete beams [J]. Concrete and Cement Products, 2024(6):72-75. (in Chinese))

[4] 齐鲁杰,刘中良,陈振山,等. 先张法预制梁台座计算分析及施工质量控制[J]. 四川水泥,2023,7(5):154-156. (QI Lujie, LIU Zhongliang, CHEN Zhenshan, et al. Calculation analysis and construction quality control of pretensioned prefabricated beam pedestal [J]. Sichuan Cement, 2023, 7(5):154-156. (in Chinese))

[5] 邵方敬. 白鹤滩水电站左岸锚固系统智能化施工技术分析[J]. 居舍,2019(12):78-79. (SHAO Fangjing. Analysis of intelligent construction technology of left bank anchoring system of Baihetan Hydropower Station [J]. Ju She, 2019(12):78-79. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-25 编辑:刘晓艳)