

索塔锚固区小半径环向预应力施工技术

罗家易

(中交一航局城市交通工程有限公司)

摘要:为了解决钢混组合梁斜拉桥超高索塔锚固区小半径环向预应力施工精度控制难题,以甘肃省庆阳市黄土高原地区某一级公路特大斜拉桥为例,采用理论计算分析和现场实践的方法重点研究了小半径环向预应力张拉工艺的施和优,理论伸长量、修正后的理论伸长量与实际伸长量的对比分析。钢绞线伸长量修正值的引入对伸长量偏差控制具有重要作用。研究成果为超高索塔锚固区小半径环向预应力施工提供了有效的指导和建议,对保障桥梁结构体系的可靠性与长期服役性能具有重要意义。

关键词:超高索塔;锚固区;环向预应力;伸长量

1 工程概况

甘肃省庆阳市黄土高原地区某一级公路特大斜拉桥跨越黄土沟壑,该处黄土沟壑冲切深度达116 m,两侧黄土塬水平距离约600 m。该特大斜拉桥全长698 m,主桥为(125+240+125) m双塔双索面半漂浮体系钢混组合梁斜拉桥,索塔采用钢筋混凝土索塔,2座索塔高度分别为190.3 m和183.3 m,均属于超过100 m的超高索塔。索塔上塔柱拉索锚固区采用 $12\phi^{s}15.2$ 预应力钢绞线锚固,单个索塔塔肢第1节钢锚梁区域设置3束钢绞线,第2—第4节钢锚梁区域分别设置2束钢绞线,第5节钢锚梁区域设置4束钢绞线,第6—第10节钢锚梁区域分别设置6束钢绞线。单个塔肢设置43束 $12\phi^{s}15.2$ 预应力钢绞线,全桥共172束。预应力钢绞线采用 $12\phi^{s}15.2$ 高强低松弛钢绞线,波纹管内径为90 mm,壁厚大于3 mm;环向预应力曲线半径150 cm。该特大桥索塔锚固区环向预应力布置图如图1所示,图中●表示预应力钢绞线T1,○表示预应力钢绞线T2。

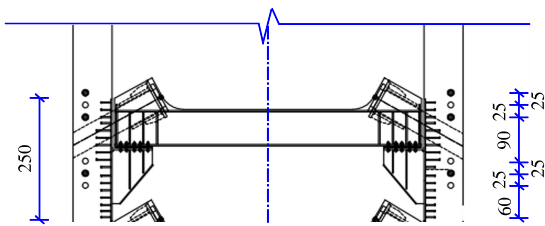


图1 索塔上塔柱锚固区预应力钢绞线布置图(cm)

2 环向预应力的作用及施工难点

在桥梁结构体系中,针对混凝土索塔锚固区

的受力特点,采用预应力钢绞线等构件施加环向预应力是一种有效的技术方法。当环向预应力施加到位后,会在索塔塔壁周围形成连续环绕的预应力场。该预应力场能够有力抵抗斜拉索传递而来的巨大拉力,防止混凝土索塔在长期、反复的拉索锚固力作用下产生裂缝,显著增强索塔的承载能力。此外,根据实际需求,调整预应力钢束的数量、规划其位置以及优化布置形式,可实现对索塔受力状态的精细控制,保障桥梁在复杂荷载下稳定安全运行,延长其服役周期。

但环向预应力往往受索塔截面尺寸限制和索塔锚固区钢锚梁位置分布影响,施工时存在一定技术难度,主要体现在以下方面:

1) 在环向预应力的构建中,每束均由12根规格为 $\phi^{s}15.2$ 的高强低松弛钢绞线组成。鉴于要确保这12根钢绞线均匀受力,避免因局部受力不均引发断丝这一严重质量问题,对钢绞线的处理要求极为严格。需保证每根钢绞线的长度大致相同,并且在穿束操作完成后,钢绞线之间不能相互缠绕,对钢绞线的下料精度以及穿束准确性提出了很高的要求。

2) 在预应力布置方面,每节钢锚梁区域会设置2~6束环向预应力。而且预应力在布置时较为密集,每层之间的竖向间距最小仅有25 cm,这对施工工艺和精度把控都带来了不小的挑战,且环向预应力曲线半径小,单个孔道弯曲处穿束困难,施工难度大。

3) 环向预应力曲线半径小会增加应力摩擦损

失,使得预应力束的有效预应力降低,而且张拉时曲线外侧钢绞线会对内侧钢绞线进行挤压,容易出现假锚现象,控制不当可能影响预应力钢绞线受力均匀性和索塔结构的整体性能。

3 环向预应力施工工艺

在斜拉桥环向预应力施工过程中,借鉴过往类似项目的施工经验,在桥塔主体结构施工阶段,预先埋设波纹管以预留预应力孔道,为后续预应力施工做好准备。同时,在后场开展钢绞线的预处理工作,对钢绞线进行编号,并依据设计和计算要求精准下料,确保每根钢绞线的长度和规格符合标准。待索塔外模顺利脱模后,进行预应力穿束作业,将处理好的钢绞线准确穿入预留的预应力孔道内。随后关注索塔混凝土的强度发展情况,待其强度达到相关规范规定的标准后,及时开展预应力张拉,通过张拉设备对钢绞线施加设计要求的预应力,保障桥塔结构获得预期的预应力。预应力张拉完成后进行预应力孔道压浆操作。利用专业压浆设备将配置好的水泥浆液均匀地压入预应力孔道内,填充钢绞线与孔道之间的间隙,保护钢绞线免受外界环境的侵蚀,并增强结构整体性。最后进行预应力锚口的封闭处理,采用合适的密封材料对锚口进行密封,防止水分和有害物质的侵入,确保预应力体系长期稳定工作。在整个预应力施工过程中,充分利用索塔液压爬模平台作为预应力张拉、压浆以及封锚等关键工序的施工平台,保证施工便利,确保施工质量和安全。

3.1 预应力管道及锚垫板安装

在预应力施工环节预应力管道的预留采用埋设塑料波纹管的方式。为确保预应力施工的质量与安全符合要求,在波纹管投入使用之前,必须对其开展外观质量检查,排除外观缺陷、不符合质量标准的波纹管,防止其影响后续预应力施工效果和结构稳定性。管道安装时需注意管道定位与标高控制,测量放样定位完成后,采用 $\phi 12$ mm井字形定位钢筋,对管道位置及上下层管道间距进行定位控制。管道长度、高度方向允许偏差分别为 ± 30 mm和 ± 10 mm,管道位置上下层间距允许偏差为 ± 10 mm。

管道长度不足需要连接时,采用直管与圆弧管(弯管)相对接成型,管道接头处的连接管采用大一级直径的同类管道,其长度为被连接管道内

径的5~7倍,确保管道连接顺畅,便于后期穿束,接头处使用胶带密封并外包PVC管保护,以防止混凝土浇筑期间漏浆。管道安装完毕后,在端口使用土工布填塞来作为临时封堵,防止水或其他杂物进入。在预应力锚口下按照 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 布置 $\phi 12$ mm锚下钢筋,在两处圆弧位置设置U形 $\phi 20$ mm防崩钢筋,并与索塔受力主筋连接,以防止张拉时塔壁圆弧区域混凝土因受力过大而发生崩裂。

在预应力施工时,针对不同安装方式的预应力锚垫板有不同的定位与固定流程。对于采用深埋锚方式的预应力锚垫板,需借助槽口模板实现精准定位。操作时先利用螺栓将锚垫板稳固地固定在槽口模板上,确保二者连接紧密、位置准确。之后再通过测量定位,对槽口模板和锚垫板的整体位置进行精确校准,最终将槽口模板连同锚垫板一并牢固地固定在塔柱模板上,以此保证预应力锚垫板在后续施工中处于正确位置。而对于采用设置防护罩方式的预应力锚垫板,先通过测量定位确定锚垫板在模板上的准确位置,随后直接将锚垫板固定在模板上,为后续预应力施工提供可靠的基础。

3.2 预应力钢绞线下料及穿束

钢绞线施工前严格执行进场验收制度,对每批次材料进行外观检查(表面无裂纹、无油污、无锈蚀斑点)及力学性能复验,经第三方检测合格后才能投入使用。下料前采用全站仪复测锚垫板空间坐标,通过BIM模型计算各束钢绞线实际轨迹长度,结合两端张拉工艺特点,计算下料长度。钢绞线下料长度为钢束长与张拉时的工作长度之和,本工程采用两端张拉,单端工作长度为80~90 cm。采用高精度砂轮切割机进行定尺切割,切割时设置专用固定支架,确保切口与钢绞线轴线垂直,下料时应保证每根钢绞线的长度一致,便于穿束和伸长量计算与控制。下料后编码标识,采用尼龙绳间隔1.5 m捆扎成束,运输过程中采用防雨布覆盖并设置橡胶垫层防机械损伤。穿束前采用全站仪二次校核锚垫板安装精度,使用通孔器进行孔道通过性检测。人工穿束时配备专用牵引器引导钢绞线束头,穿束过程严格控制牵引速度 ≤ 0.5 m/s,穿束完成后外露钢绞线端部采用PE套管防护,避免施工污染。通过建立“下料长度双人复核+穿束影像记录+端头防护专项验收”

的质量控制体系，保障后续张拉施工的精度与可靠性。

3.3 理论伸长量计算

本桥索塔上塔柱拉索锚固区采用 $12\phi^s15.2$ 高强低松弛钢绞线锚固。上塔柱单个塔肢设 43 束 $12\phi^s15.2$ 预应力钢绞线，全桥共设置 172 束。塔柱施工时预埋管道与锚座，为后续操作提供基础。待混凝土强度达到设计要求，再进行预应力钢绞线穿束。之后按“0→初应力→ σ_{con} （持荷 5 min 锚固）”流程张拉，确保钢绞线受力稳定， σ_{con} 为张拉控制应力。张拉结束后，开展孔道压浆，填充波纹管孔道内钢绞线的间隙，防止钢绞线锈蚀，增强预应力钢绞线的整体性；最后封锚保护锚具，保障预应力体系长期稳定。环向预应力筋构造图如图 2 所示。

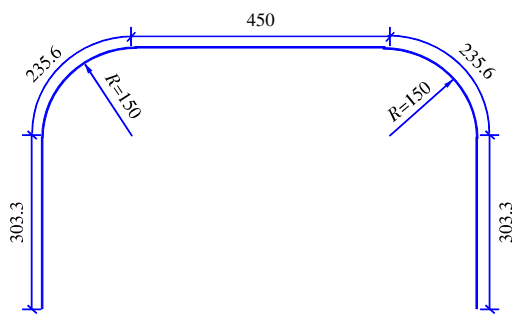


图 2 索塔锚固区环向预应力筋构造图 (cm)

环向预应力 2 处曲线半径为 150 cm，采用双端张拉，将环向预应力筋一分为二，每 1/2 预应力筋又分为 2 个直线段和 1 个曲线段，曲线段预应力筋平均张拉力计算依据规范 JTG/T 3650—2020《公路桥涵施工技术规范》^[1]，并以平均张拉力计算理论伸长量。计算公式为：

$$P_p = \frac{P(1 - e^{-(kx + \mu\theta)})}{kx + \mu\theta} \quad (1)$$

式中： P_p 为预应力筋平均张拉力，N； P 为预应力筋张拉端的张拉力，N； x 为从张拉端至计算截面的孔道长度，m； θ 为从张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角之和，rad； k 为孔道每米局部偏差对摩擦的影响系数； μ 为预应力筋与孔道壁的摩擦系数。

根据类似斜拉桥索塔的施工经验，环向预应力张拉时摩擦系数较小^[2]。因此， μ 取规范最小值 0.15，影响系数 k 取规范值 0.001 5，按式(1)计算 1/2 预应力钢绞线 3 段平均张拉力分别为 1 391.831 5 MPa、1 216.671 9 MPa 和 1 057.714 6 MPa，从而

得出单端理论伸长量为 49.7 mm，双端理论伸长量为 99.4 mm。

3.4 预应力张拉压浆及封锚

预应力施加前的准备工作包括：钢绞线进场后的报验以及对千斤顶、油表及其配套油泵进行校验，确保设备性能符合施工要求。张拉操作程序为：安装锚具和千斤顶，将钢绞线张拉至初应力状态，并记录此时钢绞线的初始长度；随后继续张拉至 2 倍初应力，记录该阶段的伸长量；之后张拉至设计规定的应力值，再次记录伸长量；完成张拉后进行回油锚固操作，紧接着记录钢绞线的实际伸长量，并据此计算回缩量；最后仔细检查钢绞线是否存在滑丝、断丝等异常。在预应力张拉过程中，采用张拉力控制和引伸量控制相结合的双控方式。其中，预应力筋张拉力控制精度在 $\pm 1.5\%$ 以内，引伸量的误差范围则应控制在 $\pm 6\%$ 以内，以此保证预应力施工的质量和安全性。

在预应力筋穿束前将每根预应力筋长度切割一致，穿束完成后，对单根钢绞线两端逐根预紧，最大限度减小预应力筋的非线性变形，张拉时按设计两端同时张拉，初应力取 $20\%\sigma_{con}$ ，两端同步对称连续张拉，取 $40\%\sigma_{con}$ 时的伸长量进行初始伸长量计算，达到控制应力后持荷 5 min。

在完成预应力张拉作业后的 24 h 内及时开展压浆工作。本工程采用真空辅助压浆工艺，在正式压浆前，对预应力孔道进行抽真空处理，使真空度稳定维持在 $-0.10 \sim -0.06$ MPa 的区间范围内。待真空度达到稳定状态后，立即开启孔道压浆端的阀门，并同步启动压浆泵，进行连续不间断的压浆操作。针对曲线孔道，压浆过程中的压力控制在 $0.5 \sim 0.7$ MPa。压浆时，在出浆口处连接一个直径为 8 cm、长度为 180 cm 的厚柱状塑料袋，当有效浆体将该塑料袋完全充满后，即可停止压浆。为确保预应力孔道压浆的质量以及结构的耐久性，使用性能优良、具有高流动度的压浆液，保证顺畅填充孔道；保证浆液不泌水、不离析、无沉降，避免出现浆液分层或沉淀现象；浆液凝结时间应适宜，从而便于施工操作；浆液在塑性阶段应具备优良的补偿收缩能力，以弥补浆液收缩产生的空隙；浆液硬化之后产生微膨胀，增强与孔道的粘结效果，同时还应具有一定的强度，满足结构承载要求。

预应力压浆完毕后，对以深埋锚方式的预应

力束进行封锚，锚口处塔壁混凝土凿毛并将周围冲洗干净，连接被截断的塔柱钢筋，安装模板，浇筑封锚混凝土。

3.5 伸长量对比分析

经过相关研究分析，由于混凝土材料具有抗压不抗拉的特性，一般采用环向预应力体系平衡索塔拉索锚固区受到的拉索巨大水平分力，避免塔身出现应力裂缝^[3]。但本工程由于索塔截面尺寸的限制，环向预应力的钢束半径较小，一般在150~200 cm。在曲线转角处外侧预应力筋挤压导致内侧钢绞线出现“假锚”的情况，导致每根钢绞线会产生很大的不均匀性，伸长量误差幅度会达到20%以上，最高可超过45%。同时由于曲线预应力束在张拉时向管道内侧挤压，会向孔道内壁贴紧并和波纹管发生径向偏移引起几何伸长^[4]。按上述分析，环向预应力曲线处钢绞线张拉前后位置及偏移情况如图3—图5所示，张拉前后偏移的距离为s。

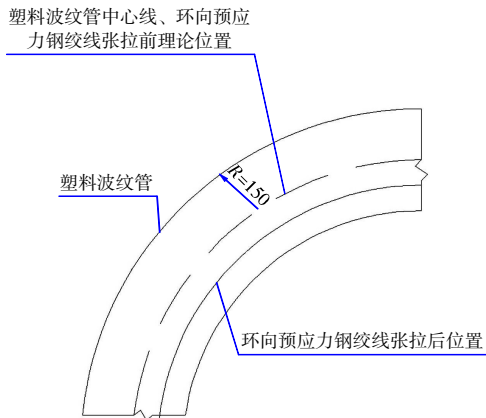


图3 钢绞线张拉前后位置示意图(cm)

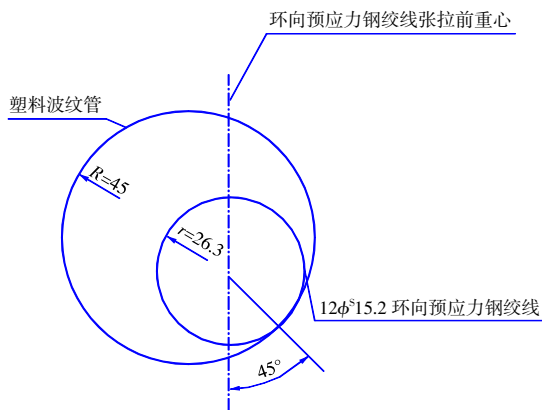


图4 张拉前钢绞线的偏移情况示意图(mm)

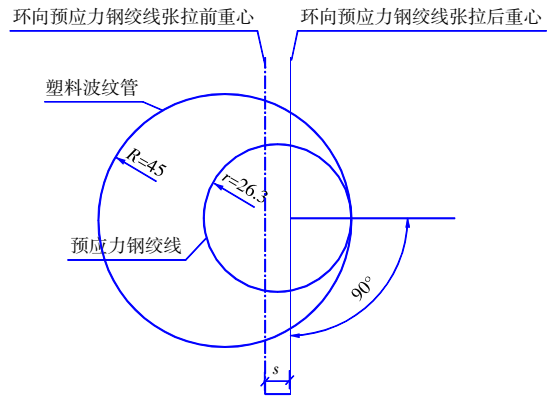


图5 张拉后钢绞线的偏移情况示意图(mm)

预应力孔道的内壁半径设定为R，张拉前，钢绞线的重心位置与孔道内壁之间的间距为d。完成张拉后，钢绞线的实际重心位置相较于初始位置向内发生了偏移，偏移的距离为s。钢绞线理论伸长量的修正值 ΔL_p 计算公式为：

$$\Delta L_p = \pi(P+d) - \pi(P+d-s) = \pi s \tag{2}$$

在计算中，针对塑料波纹管管道内布置的12根直径均为15.2 mm的钢绞线，将其等效理想化为1根面积相等的圆形钢绞线，该等效圆形钢绞线的半径r取值为26.3 mm。同时，已知塑料波纹管的内径D为90 mm。设定张拉前的状态为：钢绞线与塑料波纹管中心处于特定位置关系，即钢绞线与波纹管中心垂直方向偏45°的内壁相切，如图4所示；张拉后钢绞线与波纹管中心发生偏移，呈垂直方向偏90°的内壁相切，如图5所示。在此情况下，计算径向偏移量s为： $s = \frac{2-\sqrt{2}}{2} (\frac{D}{2} - r) = 5.48 \text{ mm}$ 。

按照以上模型，通过式(2)计算分析，理论伸长量修正值 ΔL_p 为17.2 mm，则修正后理论伸长量L计算公式为：

$$L = L_p + \Delta L_p \tag{3}$$

式中： L_p 为钢绞线伸长量，mm。

经计算，修正后理论伸长量L为116.6 mm，与未修正的理论伸长量99.4 mm相比提高了约17%，符合类似桥梁结构反映的普遍现象。考虑修正值后，现场实测伸长量范围为110.5~123.1 mm，伸长量偏差范围为-5.2%~5.6%，满足设计及规范规定的±6%。通过以上计算和实际施工验证了理论模型的合理性。

4 应用效果

应用环向预应力理论伸长量修正值分析模型

确定本工程斜拉桥超高索塔锚固区的预应力筋与孔道壁的摩擦系数 μ 取值为0.15,孔道每米局部偏差对摩擦的影响系数 k 取值为0.0015,同时采取理论伸长量修正值、钢绞线两端逐根预紧措施、智能张拉系统和严格控制分级张拉等措施,成功完成了本工程2座超高索塔锚固区共172束的环向预应力施工,实现了小半径环向预应力张拉伸长量的高精度控制,偏差值完全满足设计及规范要求,避免了因偏差超标导致的返工、材料浪费,使得工程实体质量得到保障,同时有效提高施工效率,降低了施工风险带来的潜在损失,节约了施工成本。

5 结语

基于现场的实际施工及计算分析,在开展类似小半径环向预应力张拉作业前,对每根预应力钢绞线采用两端逐根预紧的方式可以有效消除钢束在张拉过程中可能出现的非线性变形,进而使孔道内每根钢绞线的受力状况更加均匀,对于保障结构的安全性具有积极作用。

在计算超高索塔锚固区小半径环向预应力束的张拉伸长量时,本文采用了环向预应力束张拉伸长量的修正方法。该方法充分考虑了环向预应力张拉过程中实际出现的“假锚”现象以及径向偏移等导致伸长量增大的因素,对于同类型超高索塔锚固区小半径环向预应力束张拉伸长量的控制具有一定的指导价值。

综上所述,本研究成果对于提高斜拉桥超高索塔锚固区小半径环向预应力的施工精度和质量,确保桥梁结构的整体安全稳定,具有一定的实际应用价值和理论指导意义,为未来类似桥梁建设提供了有力的技术参考。

参考文献:

- [1] JTG/T 3650—2020,公路桥涵施工技术规范[S].
- [2] 刘壮武,章晨昊.斜拉桥斜塔锚固区环形预应力孔道摩阻试验研究[J].价值工程,2022,41(33):73-75.
- [3] 于得安,曾宪柳,张泽.大跨径斜拉桥索塔锚固区U形环向预应力施工技术研究[J].交通世界,2020(14):102-104.
- [4] 辛亮,鲁文婷,黄维,等.松原大桥索塔锚固区环向预应力张拉控制研究[J].建筑技术,2017,48(6):665-667.