

水利水电工程预应力锚索施工技术研究

刘英勋

中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司 四川 成都 611130

摘要: 本文聚焦水利水电工程预应力锚索施工技术。阐述了其基本构成与作用原理,剖析施工关键技术与工艺流程,涵盖前期准备、各环节施工要点及特殊地质处理。探讨施工质量控制、检测方法与安全控制措施。同时,提出技术改进方向,分析智能化、自动化趋势及未来在水利水电工程中的发展前景,旨在为该技术在水利水电工程中的应用与优化提供参考。

关键词: 水利水电工程; 预应力锚索; 施工技术; 质量控制; 结构加固

引言: 在水利水电工程建设中,边坡及结构物稳定至关重要。预应力锚索作为有效加固手段,应用广泛。然而,不同地质条件和工程需求对施工技术提出挑战。深入研究水利水电工程预应力锚索施工技术,掌握其构成、原理、施工流程及质量控制要点,并探索技术创新方向,对提升工程质量、保障工程安全、推动水利水电事业发展具有关键意义。

1 预应力锚索的基本构成与作用原理

1.1 预应力锚索的基本构成

预应力锚索是水利水电工程中用于加固岩土体、稳定边坡及结构物的重要支护体系,其核心构成包括锚固段、自由段和锚头三部分。拉力型预应力锚索锚固段通过高强度材料与周围岩土体形成牢固粘结,是锚索承载力的关键来源,通常采用水泥砂浆或化学浆液灌注,形成直径150-300mm的圆柱体锚固体。压力型预应力锚索没有锚固段,承压板(有时称为“承压板”或“压力板”)是一个关键部件,其主要作用是将锚索的预应力通过锚具均匀地传递到岩土介质中,确保整个锚固系统的有效性和稳定性。自由段位于锚固段与锚头之间,采用无粘结钢绞线或高强钢丝束,外层包裹聚乙烯护套,确保预应力传递过程中不与周围介质接触,避免应力损失^[1]。当锚索采用有粘结钢绞线时,应确保锚固段灌浆时不渗漏到自由段。锚头作为张拉锁定装置,由锚具、夹片、锚垫板及防护罩组成,其中锚具多采用OVM或VM系列,单根钢绞线锚固力可达200-500kN。在材料选择上,锚索体普遍采用 $\Phi 15.2\text{mm}$ 低松弛预应力钢绞线,其抗拉强度标准值达1860MPa,延伸率 $\geq 3.5\%$ 。对于腐蚀性环境,需采用环氧涂层钢绞线或不锈钢材质。锚固剂方面,纯水泥浆水灰比控制在0.4-0.5,28天抗压强度不低于30MPa;化学浆液则选用改性环氧树脂,固化时间可调至4-24小时,以适应不同地质条件。

1.2 预应力锚索的作用原理

预应力锚索通过主动施加预压应力改变岩土体应力状态,其作用机制包含三个方面:首先,锚索张拉产生的轴向压力可抵消部分下滑力,提高边坡安全系数。以某水电站高边坡为例,施加500kN预应力后,边坡稳定性系数从1.05提升至1.35。在杨房沟水电站的高陡边坡治理中,通过合理布置预应力锚索,施加预应力后,边坡稳定性得到了显著提升,保障了工程施工和运行安全。其次,锚固段形成的压缩区能够约束岩体变形,测试表明,锚索作用范围内岩体弹性模量提高20%-30%。最后,锚索群形成的空间加固效应可改善岩体结构面力学性能,使结构面抗剪强度参数 c 值提高30%-50%, ϕ 值增加 5° - 10° 。从力学模型分析,单根锚索可简化为弹性地基梁,其临界长度 $L_c = \sqrt{(EI/P)}$,其中 E 为钢绞线弹性模量, I 为截面惯性矩, P 为预应力值。当锚索长度超过 L_c 时,需考虑分段锚固设计。在群体锚索作用中,采用三维有限元模拟显示,锚索间距小于3倍锚固体直径时,加固效果显著增强,但间距过小会导致应力重叠效应,建议最优间距为2.5-3.0m。

2 水利水电工程预应力锚索施工关键技术及工艺流程

2.1 施工前期准备

地质勘察是施工准备的核心环节,需通过钻孔取芯、物探测试等手段获取岩体完整性指数 K_v 、结构面间距 R_i 等参数。以某拱坝基础处理为例,勘察发现F10断层带宽度达3m,采用3排锚索进行加固,锚索倾角与断层面夹角控制在 25° - 30° 。测量放样需建立三级控制网,锚孔位置偏差不得超过100mm,孔口高程误差控制在 $\pm 50\text{mm}$ 范围内。材料检验方面,钢绞线需进行力学性能复验,包括屈服强度、松弛率等指标,每批抽检量不少于3盘。锚具需通过静载锚固性能试验,总应变 $\epsilon_{apu} \geq 2.0\%$,且锚具效率系数 $\eta_a \geq 0.95$ 。施工设备配置需考虑工程规

模,大型水电站宜采用全液压锚固钻机,钻孔直径150-300mm,深度可达80m,配套高压注浆泵压力需达到8MPa以上。

2.2 关键施工工艺流程

2.2.1 钻孔施工

钻孔工艺直接影响锚固质量,需根据岩体特性选择合适方法。硬质岩体宜采用潜孔锤跟管钻进,软弱破碎带则需使用双壁钻杆套管跟进。钻孔直径应比锚索体大40-60mm,以形成足够的注浆空间^[2]。钻孔倾角偏差不得超过设计值的 $\pm 1^\circ$,方位角偏差 $\leq \pm 2^\circ$ 。在某边坡治理工程中,采用金刚石钻头回转钻进,平均钻速达2m/h,成孔质量优良率达92%。

2.2.2 锚索制作与安装

锚索编制需在专用平台完成,钢绞线下料长度 $L = L_s + L_f + L_a + 1.5m$,其中 L_s 为锚固段长度, L_f 为自由段长度, L_a 为锚头工作长度。采用机械编束法,确保钢绞线平行度误差 $\leq 5mm/m$ 。隔离支架间距按设计要求设置,通常锚固段1.0-1.5m,自由段2.0-2.5m。注浆管采用 $\phi 25mm$ 塑料管,出浆孔间距500mm,端部用胶带密封防止进浆。安装过程中需控制下索速度,避免锚索体扭曲。对于水平孔,需采用卷扬机牵引,牵引力不超过钢绞线抗拉强度的50%。在某地下厂房工程中,采用导向帽辅助下索,使安装成功率提升至98%。

2.2.3 注浆施工

注浆材料配合比需通过试验确定,纯水泥浆水灰比0.4-0.5,可掺入减水剂和早强剂。注浆压力控制是关键,岩土锚固段注浆压力宜为1.0-2.0MPa,自由段采用0.5-1.0MPa低压注浆。注浆方式分为一次注浆和二次劈裂注浆,后者可提高锚固体密实度15%-20%。在某高边坡工程中,采用脉冲注浆技术,使锚固体28天抗压强度达45MPa。

2.2.4 张拉与锁定

张拉前需进行预张拉,消除钢绞线松弛变形,预张拉力取设计值的10%-15%。分级加载制度通常为 $0.2P \rightarrow 0.5P \rightarrow 0.75P \rightarrow 1.0P \rightarrow 1.1P$ (P 为设计值),每级持荷5min,1.1P持荷10min。张拉顺序需遵循对称原则,避免偏心受力。锁定荷载取设计值的105%-110%,单根钢绞线伸长量 $\Delta L = PL / (AE)$,其中 A 为钢绞线截面积, E 为弹性模量。

2.2.5 封锚与防腐

张拉完成后48小时内需完成封锚,采用C40微膨胀混凝土封闭锚头,保护层厚度不小于50mm。对于在水位以下及水位变动区的锚索,需采用双重防腐体系:在混凝土

锚头外侧涂刷多层防水漆;或锚头采用钢罩加防腐油脂防护后浇筑混凝土封闭。在某跨海大桥工程中,采用热缩套管防护,使锚头使用寿命延长至50年以上。

2.3 特殊地质条件下的施工技术

在断层破碎带施工中,需采用跟管钻进+管棚支护技术。某水电站右岸边坡治理中,在F8断层带设置 $\phi 219mm$ 管棚,间距0.5m,长度15m,有效控制了塌孔风险。对于软弱夹层,采用对穿式锚索技术,在相对稳定岩体中设置锚固端,使锚索承载力提高40%。在溶洞发育区,需先进行注浆加固,注浆压力控制在2-3MPa,待结石体强度达15MPa后再进行钻孔施工。

3 施工质量控制与检测

3.1 施工过程质量控制

在预应力锚索施工过程中,钻孔质量是后续施工的基础,至关重要。为确保钻孔质量,采用先进的孔内电视成像技术进行检查。该技术通过将高清摄像头送入孔内,能直观、清晰地判断孔壁的完整性,查看是否存在裂缝、掉块等缺陷,同时还能准确评估孔壁的清洁度,检查是否有泥浆、杂物残留。注浆密实度直接影响锚索的锚固效果,采用声波透射法进行检测。当声波在注浆体中传播的波速低于3500m/s时,说明注浆存在不密实的情况,需及时进行补浆处理。在张拉过程中,要实时、精准地监测油压表读数,严格控制误差,确保其不得超过 $\pm 1.5\%$,以保证张拉力符合设计要求,从而保障锚索的施工质量。

3.2 验收检测方法

锚索验收检测是确保工程质量的关键环节,包含基本试验和验收试验。基本试验的最大试验荷载取设计值的1.5倍,主要目的是检验锚索的极限承载能力;验收试验的最大试验荷载取设计值的1.2倍,用于验证锚索是否满足设计要求。试验采用循环加载制度,每级荷载持荷10min后测量位移量。合格标准为总位移量不超过设计值的10%,且在最后一级荷载下位移稳定。例如在白鹤滩水电站拱坝工程中,通过严谨的验收试验,发现3根锚索位移超标,随即对这3根锚索进行补强处理,经再次检测后满足要求。长期监测采用振弦式锚索测力计,其量程为设计值的1.2-1.5倍,精度达到0.5%FS。监测频率前3个月每月进行2次,之后每季度1次。数据分析时需建立预应力损失模型,充分考虑钢绞线松弛、岩体蠕变等因素,通常预应力损失率在10%-20%范围内属于正常情况。

3.3 安全控制措施

在预应力锚索施工中,安全控制是保障工程顺利进行和人员生命安全的重要前提。需建立完善的三级安全

管理体系,明确各级管理人员的安全职责。现场设置专职安全员,负责日常安全巡查和监督工作,每日进行班前安全交底,向施工人员强调当天作业的安全注意事项和操作规范。高空作业是施工中的高风险环节,必须搭设坚固可靠的双排脚手架,并设置安全网和防坠器,为施工人员提供全方位的安全防护。张拉作业区危险性较大,要设置明显的警示标志,严禁非操作人员进入,避免发生意外事故。在杨房沟水电站边坡工程中,通过安装智能监控系统,能够实时、精准地监测锚索应力变化情况。

4 预应力锚索施工技术的优化与创新

4.1 预应力锚索施工技术的改进方向

在材料创新领域,传统钢绞线锚索在复杂恶劣环境下易出现腐蚀问题,影响工程长期稳定性。为此,研发高强耐腐蚀纤维增强复合材料(FRP)锚索成为重要方向。FRP锚索以玻璃纤维、碳纤维等为增强体,树脂为基体,其抗拉强度可达2500MPa,远超普通钢绞线。同时它具有优异的耐化学腐蚀性能,在酸、碱、盐等腐蚀性介质中,耐久性为钢绞线的3倍,可显著延长锚索使用寿命,减少后期维护成本。工艺改进方面,开发可回收锚索技术意义重大。通过特殊设计的锚具,在工程服役期满后,可实现锚索体完整拔出,回收率达90%以上,既节约资源又降低对环境的影响。另外,推广大吨位锚索技术迫在眉睫。随着水利水电工程规模不断扩大,单索承载力需突破5000kN,以满足特大型工程对锚固力的更高要求,保障工程安全稳定运行。

4.2 预应力锚索施工技术的智能化与自动化趋势

智能张拉系统的应用是预应力锚索施工智能化的重要体现。该系统采用压力传感器和位移传感器双控模式,实时精准监测张拉过程中的压力和位移数据。通过PLC自动调整油泵流量,能将张拉精度提升至 $\pm 1\%$,有效避免人为操作误差,确保锚索预应力施加准确无误。在某地铁工程中,应用智能张拉系统后,单根锚索施工时间缩短40%,大大提高了施工效率。自动化施工设备的发展也日新月异。研发的全液压锚索钻机,集钻孔、注浆、张拉功能于一体,实现一站式作业,减少了设备转运和人员操作环节,提高了施工连贯性和安全性。采用

BIM技术进行三维建模,可直观展示锚索在工程中的布置情况,通过模拟分析优化布置方案,减少钢筋碰撞率30%以上,提升施工质量,降低施工成本。

4.3 预应力锚索施工技术在未来水利水电工程中的发展前景

在“双碳”目标引领下,绿色施工技术成为水利水电工程发展的必然趋势。预应力锚索技术也不例外,研发低能耗注浆材料是重要举措。这种新型注浆材料通过优化配方和制备工艺,使水泥用量减少20%,碳排放降低15%,在保证注浆效果的同时,实现节能减排目标^[3]。在超深覆盖层处理方面,发展深长锚索技术至关重要。随着高坝大库建设需求增加,锚固深度需突破100m,以提供足够的锚固力,确保工程在复杂地质条件下的稳定性。结合数字孪生技术,建立锚索全生命周期管理系统,可实现对锚索从设计、施工到运维的全过程数字化管控。通过实时监测和数据分析,能及时发现潜在问题并采取措措施,预计可使工程寿命延长20年以上。预应力锚索技术正朝着材料高性能化、施工智能化、监测数字化方向发展,将为水利水电事业高质量发展提供有力保障。

结束语

水利水电工程预应力锚索施工技术是保障工程稳定的关键。通过对其基本构成、作用原理、施工关键技术及质量控制等方面的研究,明确了施工要点与标准。随着技术发展,材料创新、智能化与自动化趋势为该技术带来新机遇。未来,在绿色施工、“双碳”目标等要求下,预应力锚索技术将不断优化,为水利水电工程安全稳定运行提供更坚实支撑。

参考文献

- [1]严跃岗.堆积体预应力锚索抗滑桩施工技术在水利工程中的应用——以白鹤滩水电站工程为例[J].工程技术研究,2023,8(6):86-88.
- [2]李成.预应力锚索施工技术在水利工程边坡治理中的应用[J].黑龙江水利科技,2018,46(6):186-187.
- [3]赵党旗.抽水蓄能电站低温季节预应力锚索护壁灌浆钻孔施工技术研究及实践[J].工程管理,2024,5(12):149-150.