

预应力锚索在巴基斯坦Mohmand水电站边坡支护中的应用

张帆 黄贞翔

中国葛洲坝集团第三工程有限公司 陕西 西安 710077

摘要: 本文详细阐述了预应力锚索在巴基斯坦Mohmand水电站边坡支护中的应用情况。施工选用无粘结钢绞线编制锚索,将锚固端锚固于水泥净浆,经千斤顶张拉锁定实现边坡预应力锚固。文中着重介绍了从锚索编制、灌浆、锚墩制作到张拉的全过程控制方法,涵盖下料、洗索、编索等具体工艺步骤,以及钻孔、压水试验、下索、灌浆等关键环节。同时,对锚索张拉前的准备、预紧、张拉及锁定操作,还有合同期内不同阶段的检查工作都进行了全面说明。该工程经验可供同类边坡支护工程参考借鉴。

关键词: Mohmand水电站; 预应力锚索; 边坡支护; 施工工艺; 质量检查

1 工程概况

Mohamnd水电站位于巴基斯坦莫赫曼德特里斯瓦特河流域,距白沙瓦市以北48公里,装机容量80万千瓦,设4台20万千瓦混流式机组,建有213m高混凝土面板堆石坝等设施。其大坝引水隧洞和地面厂房边坡及洞脸,在喷混与锚杆支护后,布置后张法预应力锚索。边坡主体锚索设计荷载700kN,由6束15.24mm钢绞线编制;洞脸附近锚索1050kN,由9束同规格钢绞线编制。锚索长15-35m,间距、排距3m或4m。工程施工超四千束锚索,总长超十千米,采用无黏结后张锚固,并经防腐处理保障长期运行。

2 锚索编制工艺

2.1 钢绞线下料

钢绞线下料时,务必确保下料长度精准契合设计要求,需在设计长度基础上额外增加1m的钢绞线长度,从而保证按设计量下索后,仍留存充足的张拉作业长度。下料完毕后,统一在钢绞线的同一端量取锚固长度部分,剥除该部分钢绞线的防护涂层,此端即为锚固端,未剥除防护涂层的部分则为自由端。

2.2 钢绞线清洗(洗索)

预应力锚索钢绞线锚固端的清洗质量标准:钢绞线表面应达到光洁、洁净状态,触摸时具有显著的涩滞手感。清洗作业步骤如下:在锚固端剥除防护涂层的一侧将钢绞线拆解,使其单根分离。首先利用锯末初步清洗钢绞线表层附着的大部分油脂,接着使用柴油进行二次清洗,以去除不溶于水的油脂成分,最后采用洗衣粉水溶液清洗残留油脂以及二次清洗残留的柴油,再用抹布擦拭干净,并按原样重新编织成束。成束后,在钢绞

线自由端与锚固端交界处套装热缩套管,并用热风枪加热使其紧密收缩固定。此举旨在阻断水泥浆体与自由段钢绞线的接触,避免浆体渗入影响张拉作业,同时降低交界处的应力集中效应。

2.3 锚索编制(编索)

依据设计荷载,将6束(700kN)或9束(1050kN)钢绞线编制为一根锚索。编制时,每隔1m设聚氯乙烯隔离架,其可使钢绞线呈藕节状,增强锚固牢固度,同时理顺钢绞线,防止交叉缠绕,保障预应力施加效果。编制过程中,在隔离架中间孔穿插公称外径20mm的HDPE管作进浆管,用铁丝绑扎固定,并在锚固端钢绞线端头每隔10cm开设2-3个斜向注浆孔,用于波纹管注浆。

钢绞线成索后,将止浆器穿至自由端1.5m处,把两根长度2m、外径20mm的HDPE管插入止浆器回浆孔,再将环氧树脂、环氧砂和固化剂按配比制成环氧砂浆,灌注至止浆器内,实现钢绞线与HDPE管锚固连接,防止灌浆时浆液外漏。待止浆器内环氧砂浆终凝(12-24小时),从锚固端穿套HDPE波纹管。其既能保护自由端钢绞线、减少预应力损失,又能优化锚固端注浆效果。穿套完成后,在锚固端波纹管口装PVC导向帽,穿出HDPE注浆管,用环氧砂浆填充间隙,防止导向帽脱落。导向帽内环氧砂浆终凝后,在波纹管外侧每隔1m绑扎对中支架,确保下索时锚索居中,利于注浆均匀。

部件组装完毕,通过注水试验检查波纹管密闭性,漏水处用防水胶带封堵,直至完好,完成锚索编制工艺。

3 锚索灌浆工艺

3.1 钻孔施工

钻孔前,依据施工图纸在边坡精准确定钻孔点位,

采用MD-50或MD-80型锚索钻机进行钻孔作业。对于设计荷载700kN的锚索,钻孔直径为138mm;对于设计荷载1050kN的锚索,钻孔直径为168mm。钻孔倾角控制在7°-15°之间,实际钻孔深度应比设计孔深超钻0.5-1m。钻孔结束后,使用探孔器(以锚索波纹管直径制作,用单束钢绞线连接)进行探孔检查,确认孔深满足设计要求且无明显阻碍后,方可进入下一步施工工序。若遇塌孔或孔深不足等异常情况,需重新进行扫孔作业。

3.2 压水试验

完成锚索编制和钻孔施工后,在下索之前,需进行压水试验。试验孔段为孔底至距离孔底10m位置的孔段,压水压力为0.4MPa,压水持续时间为10min。当压水过程中的吕荣值不超过1L/(m·min)时,方可进行下索作业。若吕荣值超过1L/(m·min),需进行灌浆回填处理,然后重新进行钻孔、压水试验,直至压水吕荣值不超过1L/(m·min)。

3.3 锚索安装

压水试验达标后,将锚索从锚索制作车间运输至施工现场,按照导向帽-波纹管-止浆器的顺序依次缓慢穿入钻孔内,直至止浆器进入基岩10cm深度位置。下索完成后,拌制砂浆进行封孔作业,并在进浆管和波纹管内外回浆管上做好清晰标记。

3.4 锚索灌浆

锚固水泥净浆的水灰比为0.45,灌浆压力为0.4MPa,采用全孔一次灌浆工艺。施灌时,浆液从进浆管注入,水泥浆应保持均匀、缓慢、连续流动。当两个回浆管依次回出浓浆(与进浆相同稠度)时,依次封闭两根回浆管。第二根回浆管封闭后,持续握浆10min,即可结束压力灌浆。

4 锚墩制作工艺

预应力锚索锚墩是预应力锚索系统中的核心传力部件,也叫锚固墩或锚头承压板,位于锚索外露端与边坡、基坑支护墙等结构之间,主要作用是将锚索施加的预应力高效传递到被加固的岩土体或结构中,确保锚固系统长期稳定运行。

在Mohmand水电站工程中,锚墩制作需在锚索灌浆结束至少24小时后进行。本工程锚墩设计尺寸为900mm×500mm×400mm。施工前,要用电锤对锚索周边1m×1m范围的边坡面找平,使坡面与锚索轴线呈90°垂直,为施工打好基础。

施工时严格按设计图纸操作,依次进行钢筋绑扎、锚索套筒及垫板安装、模板支立,最后浇筑C35混凝土。钢筋绑扎严控规格、间距和连接方式;锚索套筒和垫板

精准调整位置角度;模板支立采用定制钢模板,以对拉螺栓和支撑体系固定。混凝土浇筑采用分层连续工艺,每层厚不超300mm,并使用插入式振捣棒确保密实,避免出现质量问题。

5 锚索张拉工艺

锚索工程中,张拉施工至关重要,它直接关系到预应力工程的成败。该环节控制难度较大,且意外风险时有发生。Mohmand水电站边坡锚索采用的方法是锚固后张式,采用一侧锚固、另一侧分级张拉的方式进行施工。

5.1 锚索张拉准备

锚索张拉前,张拉设备率定是关键准备工作^[2],率定周期通常为半年,且张拉时千斤顶、液压油泵和压力表等设备须配套使用。

锚索张拉以应力控制为主,理论伸长值 ΔL_r 校核为辅,最大测试负荷为设计荷载的150%,但不得超极限荷载80%。在Mohmand水电站工程前期,曾因伸长值 ΔL_r 计算偏差导致其过长,后将计算起点调整为锚具工具夹片位置,成功解决问题,加快施工进度,凸显出精准计算伸长值 ΔL_r 对保障预应力锚固工程质量与施工效率的重要意义。

$$\Delta L_r = \frac{(L_{fr} + L_e) (T_p - T_a) \times 10^6}{A_t \times E_t}$$

其中:

L_{fr} : 设计自由端长度(m)

L_e : 工作锚底部到工具夹片的长度(m)

T_p : 最大测试负荷为设计荷载(kN)的150%

T_a : 初始固定负荷为设计荷载(kN)的15%

A_t : 钢绞线的截面面积(mm²)

E_t : 钢绞线弹性模数(Mpa)

5.2 锚索预紧

当锚索内灌注浆液强度达30MPa、锚墩强度达25MPa后,方可开展张拉施工。施工时,先剥除锚头外露钢绞线保护层,洗净油脂后安装工作锚,再用预紧千斤顶单束预紧。

预紧是关键环节,可消除锚具、夹片与钢绞线间0.5-2mm的装配间隙,确保单根钢绞线受力差异 $\leq 5\%$,以10-15% σ_{con} 预紧力使钢绞线绷直,提前发现潜在问题。单束预紧后,依次安装工作夹片等部件,进行整体预紧:施加设计荷载80%压力并持压5分钟,缓慢放张至0.5MPa,在工作锚板处夹百分表,用于监测实际伸长值。

5.3 锚索张拉

本工程锚索采用单侧多级张拉工艺,张拉等级严格按设计荷载的15%-45%-75%-105%-135%-150%逐级递增。在15%-135%的张拉过程中,每个等级均需持压5分

钟,确保应力均匀传递;当张拉至150%设计荷载时,持压时间延长至30分钟,以充分消除锚索内部应力松弛影响。

持压结束后,缓慢放张锚索,放张过程中持续拨动工作夹片防止其提前锁紧,直至压力降至设计荷载的15%,分别读取最大与最小伸长值,两者差值即为实际伸长值。按技术要求,实际伸长值与设计伸长值 ΔL_r 的误差必须控制在 $\pm 5\%$ 以内,以保证预应力施加的准确性。

完成伸长值测量后,将锚索重新张拉至设计荷载的120%,随即卸下百分表进入锁定工序。操作人员需拨动张拉撑靴中间的张紧盘紧密贴合工作夹片,依次锁紧撑靴上三处均匀分布的锁紧螺栓,并实时观测张拉油泵压力值。当压力从120%升至130%时,立即停止锁紧操作,随后松动油泵止回阀,使工作夹片牢固锁紧锚头,完成张拉锁定。

锁定结束后,更换为剩余荷载检测撑靴,将其置于锚板并与工作锚保持适当空隙,安装剩余荷载检测千分表。张紧张拉油泵过程中,持续监测千分表读数变化,当指针正向走动达到1mm时,即刻停止加压并记录剩余荷载值。根据规范,初次剩余荷载需处于设计荷载的110-120%区间内方判定为锁定合格,否则需重新调整螺栓锁紧力值,直至满足验收标准。

6 合同期内的检查

6.1 初次合格检查

在完成锁定的8h后,需再次检测锁定锚索的剩余荷载。若8h后剩余荷载处于初次锁定荷载的100-96%区间内,则判定为张拉合格。若大于100%,则需要重新张拉;若小于96%,则需检测48h后剩余荷载。若48h后剩余荷载处于初次锁定荷载的100-94%区间内,则仍可判定为张拉合格。若小于94%,则需检测96h后剩余荷载。若96h后剩余荷载处于初次锁定荷载的100-93%区间内,则仍可判定为张拉合格,否则便需要重新进行张拉^[3]。

6.2 短期检查

完成锚索锁定操作之后的4个月内,每隔2个月需重新检查剩余荷载。在四个月後,若锚索剩余的荷载处于设计的锁定荷载的 $\pm 10\%$,则可修剪多余的外露钢绞线,

进行封锚操作。若不在 $\pm 10\%$ 区间内,则需进行预应力分析,考虑是否重新张拉或是否增加锚索密度。

6.3 长期检查

长期检查的锚索检查范围选取为第一批100个锚索的15%、第二批100个锚索的12%和其他锚索的10%。剩余荷载检查的频率为选中锚索锁定后的2个月、4个月、8个月、1年、18个月、2年,直到缺陷责任期结束时。

7 结语

预应力锚索系统在边坡支护工程中展现出显著的技术优势,通过预张拉在边坡内部形成主动压应力场,改变岩土体原始应力状态,促使潜在滑移面由受拉状态转变为受压状态,形成“梁-拱效应”,实现局部荷载向深层稳定岩体的有效传递^{[1][5]}。Mohmand水电站边坡采用的群锚系统,构建起连续的抗滑帷幕,将表层松散岩土体与深层稳定岩体牢固连接,有效限制坡体变形,通过合理的荷载重分布降低坡脚应力集中现象^{[1][4]}。该工程大规模应用预应力锚索的成功实践,为同类边坡支护工程提供了宝贵的经验借鉴,具有较高的工程应用价值和技术参考意义。

参考文献

- [1]李海波,刘亚群,周青春,等.预应力锚索加固高陡边坡的数值模拟与工程应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S2):3711-3718.
- [2]崔健.N-J水电站大坝闸墩预应力锚索施工研究及应用[J].水利水电,2019(6):2529-7821.
- [3]British Standards Institution. BS EN 1537:2013 Execution of special geotechnical works – Ground anchors[S]. London:BSI,2013.
- [4]冯夏庭,张传庆,李邵军,等.复杂地质条件下大型地下洞室群围岩稳定性分析与支护优化[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10):1968-1977.
- [5]胡焕校,周德培,李安洪.预应力锚索加固边坡的作用机理及设计方法[J].岩石力学与工程学报,2003,22(8):1312-1316.