

水电站建设中引水隧洞施工技术浅析

晏耀华

中国水利水电第七工程局有限公司，四川成都，610000；

摘要：在大型水电站项目建设中，引水隧洞的深竖井对引水系统中重要构筑物的有重要连接作用，它的施工质量及施工安全决定工程建设进度及后期运行的稳定性。鉴于此，本文研究主要围绕引水隧洞深竖井相关施工技术开展，所涉及内容以软岩洞段核心施工技术、软岩（钙质板岩）超深（300m 级）竖井核心施工技术、软岩超深竖井现场安全监测技术为主。本文研究仅供业内人士参考。

关键词：引水隧洞；建设项目；水电站；施工技术

DOI：10.69979/3029-2727.25.12.071

前言

在水电站项目建设中，引水隧洞属于重要施工部分，工程规模往往相对较大，施工建设受周边复杂地质条件及空间限制，施工难度及风险都比较大。为此，本文主要结合以往工程经验，对水电站项目建设中的引水隧洞相关施工技术进行总结分析，对今后更加安全高效地完成此类工程项目建设活动有一定借鉴意义。

1 在水电站项目建设中引水隧洞的施工特点

在水电站项目建设中，引水隧洞有比较显著性的施工特点，具体表现为：一是，引水隧洞通常需要穿越山体最深部区域，地质条件极具复杂性，潜在许多不确定性^[1]。二是，由于引水隧洞以狭长的地下结构居多，施工建设空间受限，对施工人员和工程设备都有比较高的要求，增加了施工难度。三是，地下施工作业环境往往有封闭性特点，潜在比较高的安全风险，例如，包含坍塌和涌水在内的地质风险，提升设备故障及设备碰撞等机械伤害，中毒及触电等意外风险，所以，需要严格落实好安全监测及其控制方面的工作。

2 引水隧洞主要施工技术研究

2.1 软岩洞段核心施工技术

在开展引水隧洞现场施工过程中，以钙质板岩为例，针对软岩洞段部分的施工核心在于围岩扰动控制、强化实施支护加固处理，这一过程中需要充分把握软岩基本的力学特性及工地现场地质条件，将针对性、科学合理性的施工方案制定出来，并运用至工程建设中，具体分析 阐述如下：

2.1.1 充分把握软岩地层的基本特性

钙质板岩是一种层状软岩，它的抗压强度一般处于 15-30MPa 范围，强度偏低，遇水浸泡之后，它的强度还会有所下降，软化崩解风险大。钙质板岩层理发育，整个岩层之间不具较强黏结力，受开挖扰动影响，层间容

易出现分离和掉块情况。此外，钙质板岩整体存在比较大的变形量，实施开挖火花，围岩层应力分布比较集中，潜在比较大的塑性变形风险支护加固处理不及时的情况下，会诱发塌方^[2]。

2.1.2 开挖施工

在钙质板岩等软岩洞段进行开挖施工时，鉴于软岩强度低、易变形、稳定性差，尤其是钙质板岩层理与节理发育、各向异性显著，精准定位难度大，对施工控制要求极高，必须严格遵循短进尺、快支护及弱爆破原则，常用台阶和中隔壁施工方法。其中，导井施工精准定位可采取以下针对性措施：施工前运用三维地震勘探、地质雷达探测等技术详细勘查，掌握岩层关键信息并构建三维地质模型提供地质依据；建立高精度测量系统，使用全站仪等实时精确测量参数，因岩层变形大需增加测量频次、定期复测校正，用数据实时监控调整施工轨迹；研发专门的导向装置，如可调节导向支架，依岩层变化调整导向角度，安装高精度传感器实时监测钻具并反馈数据以便调整参数^[3]；钻进时根据实时地质情况，通过监测扭矩等参数判断岩层变化，遇软弱夹层或破碎带降低钻进速度和推力，进坚硬岩层则适当增加，同时依钻进效果调整冲洗液性能和流量。此外，单次开挖进尺要严格限制在 1.5m 内，防止围岩长时间暴露引发变形甚至塌方；采用预裂或光面爆破，通过试验确定合理爆破距离和线装药密度以减少对围岩扰动；台阶法施工时，先挖上部 2 - 3m 台阶并及时支护，再挖下部台阶，上下台阶间距保持 5 - 8m，防止应力集中影响施工安全与质量。

2.1.3 支护施工

在引水隧道现场施工期间，对于软岩洞段实施支护作业的时候，应该严格遵守整体性、高强度性和及时性等基本施工原则，采用包含初期支护及二次二次衬砌在内的支护体系。（1）初期支护。待开挖施工后 1h 之内，进行混凝土初喷作业，确保厚度达到 5~8cm，对围岩表

面进行及时封闭处理。采用 I18-I22 型钢架设间距为 0.8-1.2m 的钢架,用混凝土材料所制作的垫块将钢架和围岩中间区域填实。开展混凝土复喷作业,一直到达到预设 15~25cm 厚度后,打设长度为 3~5m Φ 25 中空类型的注浆锚杆,确保间距维持 1.0m \times 1.0m,促使喷、锚、架支护体系形成^[4]。(2) 二次衬砌。通过检查确认初期支护维持良好稳定性之后,通过浇筑 C30-C40 钢筋混凝土,实施二次衬砌作业,要求厚度达到 50~80cm。借助衬砌台车,达到整体连续浇筑的目的,并且,确保衬砌满足密实度要求。

2.2 软岩超深竖井核心施工技术

在引水隧洞具体施工过程中,与普通竖井相比,300m 级软岩超深竖井现场施工难度相对较大,例如,围岩较软、深度过大、潜在比较高的施工风险等。为此,需要围绕开挖施工、支护施工及出碴施工这几个环节入手,将施工技术专项方案合理制定出来,联合运用反井钻机导孔及正井扩挖工艺,确保顺利高效地完成软岩超深竖井部分的施工任务,针对该阶段的核心施工技术具体阐述如下:

2.2.1 基础准备必须落实到位

正式施工之前,应该到项目建设现场做好地质勘探方面的工作,联合物探、钻探等技术,充分了解和把握竖井施工范围内的钙质板岩基本层理走向、涌水点总体分布现状、裂隙发育现状等,将地质现状完整的剖面图绘制出来。同时,合理选用和配置施工设备。例如,配置 LM-500 型号 Φ 2.4m 级的反井钻机,能够满足 >300 m 深度隧道导孔相关施工需求。配置 ≥ 20 t 提升机 HZ-6 型抓岩机等,为出碴效率提供保障。

2.2.2 导孔施工

在引水隧道软岩超深竖井这一施工阶段,导孔施工属于重要的先行工序,能够为后期阶段的正井扩挖作业提供所需出碴通道。如下是导孔施工期间所涉及技术要点:(1) 钻机安装及其定位作业。在井口周边布置 >3 个测量控制点,确保所布置控制点与施工扰动区保持较远距离,且与井口距离 ≥ 10 m,创造良好的通视条件,用全站仪对控制点坐标进行复核,保证基准不存在偏移问题。对软岩薄弱段,予以分段定位。硬岩段及软岩段的轴线偏差分别把控至 $\leq 0.5\%$ 范围、 $\leq 1\%$ 范围。在竖井井口位置进行混凝土现场浇筑作业,确保浇筑厚度能够超过 1.5m。在反井钻机现场安装时候,需要先借助水平仪予以校准处理,保证钻机整个立轴部分垂直度的偏差把不会超过 0.1%,防止导孔偏斜,导致后续施无法顺利进行。(2) 定向钻纠偏措施。在导孔钻进过程中,为有效应对可能出现的偏斜情况,需采用定向钻纠偏技术。首先,利用高精度的随钻测量系统(MWD),实时

获取钻头的位置、方向、倾角等关键参数,将这些数据与预设的钻孔轨迹进行对比分析。一旦发现钻孔轨迹出现偏差,根据偏差的大小和方向,及时调整钻机的钻进参数,如钻压、转速、扭矩等。对于较小的偏差,可通过微调钻进参数,利用钻头自身的自重和旋转作用,使钻孔逐渐回归到设计轨迹上;对于较大的偏差,则需停止钻进,安装专门的纠偏工具,如可弯接头、偏心钻头,通过改变钻头的钻进方向来实现纠偏。纠偏过程中,要密切关注随钻测量系统的反馈数据,精确控制纠偏量,避免过度纠偏导致新的偏差产生。(3) 钻进参数。注重钻进设备和工具的合理选型,确保与软岩特性适配,以免后期阶段出现偏斜问题。例如,考虑到钙质板岩容易磨损,所以,钻头可以采用金刚石复合片(PDC)钻头,合理设置刃口角度为 120° - 130° ,确保能够减少对于软岩产生切削扰动,每钻进 50m,对钻头存在的磨损情况进行细致检查,对磨损严重钻头给予更换处理。在钻进时候,可以将速度调整至 0.5-1.0m/h 范围,每次钻进 50m 时候,都要对孔斜进行 1 次准确测量,如果发现偏斜 >50 mm,务必对钻进角度进行合理调整。(4) 排碴及冷却处理。基于压气排碴手段,将导孔最底层的钻孔岩屑排入下部分隧洞当中,借助钻机内部的冷却系统,将冷却水持续输送至钻头位置,对钻头起到良好的冷却作用,以免钻头因温度过高而受损^[5]。

2.2.3 正井扩挖

待结束导孔施工,需要坚持由上而下原则规范实施正井扩挖作业,扩大竖井直径至施工设计图中所要求尺寸,在施工作业期间,需要对围岩变形进行严格把控,确保安全顺利地完 成扩挖施工,如下所本环节所涉及的技术要点:(1) 注重扩挖进尺及爆破控制。单次扩挖施工,要求进尺限制于 1.0-1.2m 范围。实行分层爆破,在周边眼位置配置 $\Phi 25$ mm 药卷,将其装药密度合理把控至 80-120g/m 范围,保证竖井整个开挖轮廓维持良好平整性,避免超挖情况出现。(2) 临时支护。待顺利完成扩挖后,及时做好临时支护,应该先完成混凝土现场喷射作业,确保厚度达到 5cm 厚。而后,打设砂浆锚杆、搭建型钢钢架。(3) 出碴施工。借助抓岩机抓取开挖岩屑,将其放入竖井内部溜碴孔位置,而后,逐渐落到下部隧洞当中,借助装载机将岩屑运到矿车上面,达到高效出碴的目的。本施工阶段,应该保证同步进行开挖及出渣作业,防止岩屑大量堆积情况出现。

2.2.4 支护加固及其优化

充分考虑到钙质板岩所具备的软岩特性,在开展超深竖井现场支护加固作业期间,需要以喷、锚、架等传统施工工艺为基础,予以合理优化或改进,确保支护加固更具稳定性及强度性,具体操作要点如下:(1) 超前支护。正式进行竖井现场开挖作业之前,需要用 4~6

m 长度的 $\Phi 42$ 较小导管开展超前注浆作业, 环向间距把控至 30~40cm 范围, 采用水玻璃双液浆和水泥等材料为注浆材料, 将注浆压力把控至 1.0~1.5MPa 范围, 提前打造止水帷幕, 降低围岩坍塌、涌水等风险。(2) 锚杆支护。在锚杆支护现场施工期间, 可以实行中空形式注浆锚杆、预应力形式锚索综合支护体系。要求锚杆长度达到 5~6m, 锚索长度把控至 10~12m 范围, 将中空形式注浆锚杆、预应力形式锚索之间的间距把控至 2.0m*2.0m 范围, 预应力限制于 50~80kN 范围, 确保能够将围岩应力直接传递到最深层的稳定岩层当中, 对塑性变形起到良好预防作用。(3) 衬砌施工。在开展二次衬砌作业期间, 可以实行滑模施工技术, 将滑模整体提升速度限制于 0.2~0.3m/h 范围, 基于分层布料手段完成混凝土现场浇筑作业, 每层浇筑厚度应该以 30~50cm 为宜, 确保振捣均匀且密实, 混凝土整体抗渗性及强度性能能够满足要求, 能够与超深竖井水压较高环境更具适配性。

2.3 软岩超深竖井现场安全监测技术

在引水隧道软岩超深竖井现场施工中, 应当建立包含围岩变形和支护受力、涌水变化等在内的完善化监测体系, 积极落实安全监测方面的工作, 对提前预警及风险控制有重要作用, 实施要点如下:

2.3.1 变形监测

对于软岩超深竖井现场施工阶段, 围岩变形作为能够将竖井施工整体安全性反映出来的重要指标, 需要严格落实好变形监测, 如此才能够为施工安全提供保障。在项目实践中, 所需监测项目以深层位移、围岩收敛为主。(1) 在深层位移现场监测方面。可以配置 CX-06 型号多点式位移计, 在施工段竖井四周围岩进行钻孔, 确保钻孔深度达到 15~20m, 位移测点布设 5 个左右即可。对深度不同围岩位移现状进行实时监测, 对塑性范围做出准确判断。如果深层位移 $> 30\text{mm}$, 立即给予加密支护处理^[6]。(2) 在围岩收敛现场监测方面。在施工段竖井井壁位置, 合理布置 JSS30A 型号的收敛计, 确保每间隔 50m 位置, 就布置用于监测的 1 个断面, 要求各断面区域测点布置 3~4 个即可, 对井壁水平及竖直两个方向的位移量予以实时监测, 如果识别到异常位移, 立即给予纠正处理。

2.3.2 受力监测

对支护结构开展受力监测, 主要是对支护体系进行可靠性的验证分析, 确保能够提早识别支护失效问题, 所需监测项目主要包括锚杆及钢架应力、混凝土实际应力, 实施要点如下: (1) 监测锚杆拉力。可以采用 ML-200 型号锚杆测力计, 将其安装布置到中空注浆对应的锚杆端部位置, 在各监测断面区域均需布置相应测点, 以 3~5 个为宜, 对锚杆拉力达到实时监测的目的。如果

发现拉力 $>$ 设定值 120% 或者拉力 $<$ 设定值 80%, 就应该对锚杆参数进行适当调整处理。(2) 监测钢架应力。在型钢整个钢架上方区域粘贴 BX120-3AA 型的应变片, 在各监测断面区域均需布置 4~6 个左右的测点, 借助数据信息采集仪器, 对钢架应力动态变化予以实时监测, 设置预警值为钢材总体屈服强度 70%, 以此为限制范围, 如果监测结果显示超出该预警数值, 则立即给予调整处理。(3) 监测混凝土应力。在二次衬砌的混凝土内部, 埋设用于监测混凝土整体应力变化的应力监测计, 在围岩压力及水压作用之下, 对混凝土整体的应力变化进行实时监测, 保证混凝土无开裂风险。

2.3.3 涌水监测

除了上述安全监测外, 还需要落实好涌水监测, 具体如下: 在竖井最底部区域布置集水井, 并安装电磁流量计, 对涌水量进行实时监测, 如果发现涌水量 $> 20\text{m}^3/\text{h}$, 立即起到运行应急预案, 增设排水设备或进行注浆堵水处理, 将现存问题解决。

3 结束语

综上所述, 在水电站项目建设中, 引水隧洞所具备的施工特点主要表现为: 地质条件极具复杂性, 潜在许多不确定性; 施工建设空间受限, 有比较大的施工难度; 潜在比较高的安全风险等。为此, 在引水隧洞现场施工期间, 需要提高对引水隧洞的深竖井现场施工阶段所涉及各项技术应用的重视度, 包括软岩洞段、软岩超深竖井等施工技术。除此之外, 还应该在软岩超深竖井现场施工期间, 严格落实好安全监测各项技术工作, 以此为引水隧道整体施工建设提供安全保障, 确保水电站整个建设项目达到比较高的施工水平。

参考文献

- [1] 向胜. 水电站引水隧洞开挖及支护技术[J]. 云南水力发电, 2023, 39(11): 209-213.
- [2] 邹彪. 橙子沟水电站引水隧洞加固方案分析[J]. 水上安全, 2023(4): 185-187.
- [3] 李俊美. 某水电站引水隧洞施工与运行期的稳定性模拟分析[J]. 工程建设与设计, 2023(14): 55-57.
- [4] 屈江昆, 刘新平. 南俄 3 水电站引水隧洞开挖实践研究[J]. 水上安全, 2024(17): 178-180.
- [5] 贾晓阳, 梁洪源, 陈佳佳. 巴基斯坦 SK 水电站项目引水隧洞涌水处理技术[J]. 珠江水运, 2024(18): 39-42.
- [6] 钟久安, 李乔斌, 冯艺, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞大流量地下水导排施工技术[J]. 水利水电快报, 2023, 44(S02): 35-38.