

复杂地质条件下灌区（长）隧洞围岩稳定与施工关键技术研究

李 云

云南红河弥勒灌区资产投资管理有限公司 云南 蒙自 661100

摘 要：针对滇中高原复杂地质条件下灌区长隧洞施工面临的围岩稳定性差、涌突水风险高、施工空间受限等突出难题，本文以红河州石屏灌区大练庄至赤瑞湖水库连通工程 1 输水隧洞（全长 6539.71m）为研究对象，系统分析了隧洞穿越砂岩、页岩、泥灰岩、白云岩等多岩性互层地层的工程地质特征及主要工程地质问题。基于悬臂式掘进机施工工艺与“边挖边衬”的快速衬砌理念，提出了“悬臂掘进机开挖为主、钻爆法辅助、初期支护与二次衬砌平行跟进”的综合施工技术体系。研究表明：悬臂掘进机对围岩扰动小、开挖成型质量高，结合 I16 钢支撑、锚杆、钢筋网、喷射混凝土形成的复合支护体系，可有效控制软岩大变形；反坡分级排水与超前地质预报相结合可降低涌突水风险；通过优化施工组织实现开挖、支护、衬砌三工序平行作业，平均日进尺可达 3~4m，显著缩短了工期。研究成果可为类似复杂地质条件下灌区长隧洞施工提供技术参考。

关键词：灌区长隧洞；复杂地质；悬臂掘进机；边挖边衬；围岩稳定；施工技术

引言

灌区工程是保障区域水资源优化配置和农业灌溉安全的重要基础设施。随着国家重大水利工程建设持续推进，长距离输水隧洞在复杂地质条件下的施工技术难题日益凸显。根据《水利水电工程施工组织设计规范》（SL303-2017）及《水工隧洞设计规范》（SL279-2016）的相关要求，隧洞施工必须综合考虑围岩地质条件、地下水赋存状态、施工方法适应性等多重因素，制定科学合理的施工方案。石屏灌区是云南省“十四五”期间“两新一重”建设的重大水利工程，也是国家 150 项重大水利工程项目之一。其中，大练庄至赤瑞湖水库连通工程 1 输水隧洞全长 6539.71m，穿越多条断层破碎带及不同岩性交替地层，III、IV、V 类围岩分别占比 43.43%、53.03% 和 3.54%，最大埋深约 350m，洞身多位于地下水位以下，地质条件极为复杂。该隧洞断面小（衬砌后净断面仅 2.2m×2.5m），施工空间受限，传统钻爆法难以满足工期和安全要求。因此，迫切需要探索适用于此类复杂地质条件下小断面长隧洞的围岩稳定控制理论与高效施工技术^[1]。本文依托该工程实践，深入分析复杂地质条件下灌区长隧洞的围岩变形机理及失稳模式，系统总结悬臂掘进机施工与“边挖边衬”的关键技术措施，以期同类工程提供借鉴。

1 工程地质条件与围岩稳定分析

1.1 工程地质特征

输水隧洞位于石屏县龙武镇西北山间，地处扬子准地台与华南褶皱系两大一级大地构造单元交汇部位，地质构造背景复杂。隧洞穿越地层包括侏罗系下统冯家河组（J_{1f}）的钙质砂岩、泥岩，三迭系舍资组（T_{3s}）的砂岩、长石石英砂岩，以及震旦系灯影组（Z_{1dn}）、陡山沱组（Z_{1bd}）的白云岩、硅质白云岩等。岩体以薄层至中厚层状为主，强至弱风化，属碎裂至层状结构。据钻孔揭露，覆盖层厚度 1.0~5.5m，地下水位高于隧洞顶板 120~160m，岩体透水性 1~100Lu 不等。

1.2 主要工程地质问题

（1）围岩稳定性问题。隧洞围岩以 IV 类为主，约占 53%，其饱和单轴抗压强度多为 15~40MPa，岩体完整性系数 $K_v = 0.37 \sim 0.58$ 。泥岩、页岩等软岩夹层遇水易软化膨胀，开挖后自稳时间短，拱顶常有坍塌，边墙存在失稳风险^[2]。据现场监测，IV 类围岩洞周位移速率一般为 0.5~2mm/d，需要及时支护。

（2）涌突水问题。隧洞近 64% 的洞段位于地下水位以下，正常涌水量约为 30m³/h，局部岩溶发育段最大预测涌水量可达 0.3~0.64m³/s。断层 F₁（觅告莫-龙车断层）与洞轴线于 DC1+451.6 处相交，断层带宽度 1~

2m, 角砾岩与断层泥并存, 为高渗透性含水构造, 存在突涌水风险。

(3) 软岩大变形问题。隧洞最大埋深 342m, 泥岩、页岩、泥质砂岩等软岩洞段在侧压力系数 $K_0 > 1$ 和地下水共同作用下, 易产生塑性大变形。根据软岩变形判别标准, 埋深大于 300m 的泥质岩类洞段存在挤压变形可能, 需加强系统锚杆与钢支撑联合支护。

(4) 高外水压力问题。根据《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008) 推荐的外水压力折减系数法, 隧洞多处洞段折减外水水头为 80~176m, 折算外水压力 0.15~0.42MPa。高外水压力不仅增加衬砌荷载, 还可能导致围岩渗透破坏。

1.3 围岩变形机理与失稳模式

基于上述地质条件, 可将围岩失稳模式归纳为三类: 一是结构面控制型失稳, 主要发生在层间错动带、节理密集带, 岩层产状与洞轴线夹角小于 30° 时, 易产生楔形体滑塌; 二是应力控制型失稳, 主要出现在埋深较大的软岩洞段, 围岩发生塑性流动, 产生挤压大变形; 三是渗流控制型失稳, 在岩溶发育或断层破碎带, 地下水渗流降低结构面抗剪强度, 诱发渗透破坏。三类失稳模式在空间上相互叠加, 增加了围岩稳定控制的难度^[3]。

2 围岩稳定控制理论与支护体系

2.1 复合支护承载拱机制

针对复杂地质条件, 本工程建立了“超前预支护—初期柔性支护—二次衬砌刚性支护”三层次复合支护体系, 其核心机制是通过多层次的协同作用, 在围岩-支护系统中形成承载拱。第一层为超前小导管或超前锚杆 ($\phi 25$ 或 $\phi 42$ 钢管, $L = 4.5\text{m}$, 环向间距 200mm, 每 3m 布置一排), 在掌子面前方形成预加固圈; 第二层为初期支护 (I16 钢支撑 + $\phi 25$ 系统锚杆 + $\phi 6$ 钢筋网 + 喷射 C20 混凝土), 钢支撑间距 IV 类围岩 1.0m、V 类围岩 0.6m, 喷射厚度 160mm, 及时封闭围岩表面并提供径向抗力; 第三层为二次衬砌 (C25 钢筋混凝土, 厚度 400mm), 承担长期安全储备。该体系的设计理念强调“先柔后刚、允许适量变形、限制过量位移”。初期支护允许围岩产生一定收敛 (控制值取预测最终位移的 80%, 即变形速率 $< 2\text{mm/d}$), 以释放部分应变能, 降低支护荷载; 待变形趋于稳定后施作二次衬砌, 共同承担长期外水压力和松弛荷载。这与新奥法 (NATM) 的核心思想一致, 但根据本工程小断面、长洞段的特点进行了适应性改进, 形成了“快支护、强封闭、早成环”的施

工原则。

2.2 超前地质预报技术

为确保围岩稳定, 施工中采用了综合超前地质预报技术体系。短距离预报采用 IDS 探地雷达 (有效距离 15~30m), 在掌子面按“井”字形布置测线, 探测前方断层破碎带、软弱夹层及含水区; 中长距离预报采用 YCS3000 矿用本安型瞬变电磁仪 (有效距离 50~100m), 采用半圆观测系统进行多角度加密探测, 识别富水构造。两种方法相互验证, 必要时辅以超前钻孔验证, 预报准确率可达 80% 以上, 为动态调整支护参数提供了可靠依据。

2.3 断层破碎带与涌突水综合处治

对 F₁ 断层破碎带及岩溶水发育段, 采取“堵排结合、以堵为主”的综合处治策略。全断面帷幕注浆形成止水圈, 注浆压力 0.6~1.0MPa, 浆液扩散半径 $\geq 1.5\text{m}$; 辅以超前钻孔排水降压, 在侧壁钻设 $\Phi 50 \sim \Phi 100$ 排水孔引导水流至集水井。排水系统按 $40\text{m}^3/\text{h}$ 能力配置 QW100-85-20-7.5kW 水泵, 每 500~1000m 设中间接力水池, 分级抽排。

3 施工关键技术研究

3.1 悬臂掘进机适应性分析

本工程选用的 XTR5/260M 悬臂式掘进机 (功率 392kW, 截割硬度 $\leq 60\text{MPa}$) 集切割、装载、运输、行走于一体。与钻爆法相比, 其优势在于: 切割过程振动小, 对围岩扰动降低约 60%, 成型断面平整度高 (超挖控制在 15cm 以内), 开挖后围岩自稳时间延长 30% 以上; 同时避免了爆破震动对已衬砌段的不利影响, 使“边挖边衬”成为可能^[4]。试验段数据表明, IV 类围岩平均掘进速度为 1.5m/h , 每循环进尺 3~4m, 单个工作面日平均进尺 5.0m。

3.2 “边挖边衬”快速施工技术

“边挖边衬”是本工程缩短工期的最关键技术措施, 其核心在于破解开挖、支护、衬砌三工序的空间冲突问题。主要技术手段包括:

(1) 底板先行衬砌。开挖支护完成后立即清理底板, 采用自行式液压栈桥 ($L = 16\text{m}$) 跨越新浇底板, 栈桥下可通行梭式矿车 (8t 电瓶车配 8m^3 梭式矿车), 实现底板浇筑与掌子面出渣互不干扰。底板每仓浇筑 12m , 2~3 天完成。

(2) 边顶拱钢模台车跟进。底板强度达标后铺设轨

道,边顶拱钢模台车($L=10.2\text{m}$)就位浇筑。台车中部预留通道,满足轨行式混凝土搅拌运输车及材料运输车通行。边顶拱每仓浇筑时间约24h,与底板施工间隔一个工作面长度(约50m)进行流水作业。

(3)通风与环保。全部动力设备采用电力驱动(杜绝燃油设备尾气),掘进机配备水幕降尘与复合除尘设备,钢筋连接采用机械套筒减少焊接烟尘。洞口设22×4kW轴流风机压入式通风,风管直径600mm,供风量 $562\text{m}^3/\text{min}$,确保洞内作业环境达标。

通过上述措施,实现了开挖、底板衬砌、边顶拱衬砌三道工序在不同区段平行流水作业,综合平均日进尺达3.0~4.0m,较传统钻爆法先贯通后衬砌方案缩短总工期约15个月。

3.3 钻爆法辅助施工技术

当掘进机遭遇硬质围岩(单轴抗压强度 $>60\text{MPa}$)时,退机至50m外并进行防护,采用全断面光面爆破辅助掘进。爆破参数如下:炮孔直径40mm,孔深2.5~2.7m,总孔数48个,单循环装药量61.3kg,炸药单耗 $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。掏槽孔采用直眼桶型掏槽,周边孔间距0.5m,采用数码电子雷管逐段起爆,炮孔利用率85%。爆破后通风排烟15min,掘进机再进场进行修整和出渣。两种工艺转换灵活,确保了全隧连续性施工。

3.4 施工安全监测与信息化管理

建立五大安全管理系统(门禁系统、视频监控系统、人员定位系统、应急电话系统、气体检测系统),实现洞内外实时可视化管理。在IV、V类围岩洞段每5~10m设置收敛监测断面,采用JSS30A数显收敛计监测围岩变形,建立“黄色—橙色—红色”三级预警机制。变形速率连续3天超过 $2\text{mm}/\text{d}$ 时启动黄色预警,加强支护;超过 $5\text{mm}/\text{d}$ 时启动红色预警,立即停工撤人并启动应急预案。监测数据实时上传至信息管理平台,支撑支护参数的动态调整。

4 工程应用效果与讨论

截至2025年7月,试验段300m已全部完成开挖支护,底板衬砌150m,全断面衬砌120m,各类监测数据表明:(1)围岩变形控制效果良好。IV类围岩

拱顶累计沉降量15~25mm(控制值30mm),边墙收敛10~18mm(控制值25mm),变形速率趋于稳定($<0.3\text{mm}/\text{d}$),复合支护体系有效控制了软岩变形。(2)施工工效显著提升。进口掘进机工作面月均进尺100~120m,较传统钻爆法提高约50%。混凝土衬砌滞后开挖面约50m,实现了工序连续均衡生产。(3)安全与环保效益明显。洞内空气质量经监测符合《环境空气质量标准》(GB3095-2012)要求,粉尘浓度 $\leq 2\text{mg}/\text{m}^3$;未发生一起安全生产事故,安全风险显著降低。

5 结语

在复杂地质条件下,灌区长隧洞围岩稳定控制应严格遵循“预报先行、分级支护、动态调整”的核心原则。通过深度融合超前地质预报、复合支护体系与全方位信息化监测手段,构建起从被动应对向主动防控转变的技术闭环。针对软岩大变形与涌突水等关键风险因素,需实施系统锚杆、钢支撑及注浆堵排等综合处治措施,并在施工中持续迭代优化支护参数以适配围岩变化。同时,充分发挥悬臂掘进机对小断面隧洞低扰动开挖的优势,依托自行式栈桥与钢模台车打造“边挖边衬”的高效流水线作业模式,彻底破解开挖、支护及衬砌工序间的时空冲突,实现工期缩短约30%的目标。此外,深化信息化施工与动态管理机制,强化对围岩变形及环境气体数据的实时智能分析与反馈,建立快速响应决策体系,从而全方位保障工程安全高效实施,为同类复杂地质隧洞工程提供极具价值的科学决策依据与技术示范。

参考文献

- [1] 封博研. 水工隧洞围岩稳定及支护结构的优化设计[J]. 建筑机械化, 2026, 47(02): 101-103+108.
- [2] 员江瑞. 复杂地质条件下水工隧洞变形控制与处理路径探讨[J]. 人民黄河, 2025, 47(S2): 127-128+131.
- [3] 赵士伟, 龚宾, 刘国玉. 滁河四级站干渠工程水工隧洞开挖方案研究与应用[J]. 水利水电工程设计, 2025, 44(04): 22-26+35.
- [4] 程丽荣. 水工隧洞钢筋混凝土衬砌结构计算方法初探[J]. 地下水, 2025, 47(04): 296-299.