

# 复杂地质条件下隧洞开挖与支护技术研究

## ——以闽江竹岐~大樟溪引水工程为例

文 / 刘 宣 厦门同安承工工程管理有限公司

**摘要:**我国水资源时空分布不均,南方丰沛而北方短缺,跨流域调水工程成为解决区域水资源供需矛盾的战略选择。福建省作为东南沿海经济发达省份,水资源分布极不均衡,闽江流域水资源丰富,而沿海地区水资源紧张。在此背景下,平潭及闽江口水资源配置工程应运而生,旨在优化区域水资源配置格局。该工程穿越多条断裂带,地质构造复杂,岩性多变,水文地质条件复杂,施工难度大,技术要求高,其建设经验对我国复杂地质条件下水利工程建设具有重要参考价值。

**关键词:**复杂地质;隧洞开挖;支护技术;大樟溪引水工程

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.015

### 引言

闽江竹岐至大樟溪引水工程的建设实践,开创了复杂地质条件下长距离隧洞施工的技术典范。该工程的成功实施,不仅完善了福建省水资源配置格局,更推动了我国隧洞工程技术的创新发展。其系统化的技术解决方案,为类似地质条件下的水利工程建设提供了宝贵经验,对提升我国地下工程建造水平具有重要的示范意义和推广价值。

### 一、工程概况

福建省平潭及闽江口水资源配置工程中的闽江竹岐至大樟溪引水线路是“一闸三线”工程的重要组成部分,属于2级建筑物,设计标准严格。工程总长38201.176米,其中37164.963米为输水隧洞,采用5.5米洞径的平底圆型断面设计,底宽4.0米,既保证了施工便利性又确保了结构稳定性。工程包含3段隧洞和3段管道,其中最隧洞段达23343.298米,设有多条施工支洞,如溪坪支洞416米、王庙支洞561米等,为施工提供了便利条件。调压井采用斜井布置,长320.615米,断面尺寸6.1×5.7米。管道系统采用DN3600大直径钢管,出水口设计为竖井式结构,设计流量26.3立方米每秒。工程面临复杂地质条件,穿越11条断层,特别是F123区域性断裂,施工难度大。设计洪水标准为50年一遇,校核标准200年一遇,建筑物使用年限达100年,体现了工程的高标准和耐久性。

### 二、工程地质特征

#### (一)地层岩性特征

工程区属构造侵蚀中低山至低山地貌,地表多为第四系坡残积层覆盖。输水隧洞沿线主要分布白垩系石帽山群上组上段的钾长流纹岩、流纹岩夹熔结凝灰岩等,岩石致密坚硬,均属工程坚硬岩类。溪源溪管道段地表为冲洪积砂砾石覆盖,基础持力层为砂砾石层和弱风化钾长花岗岩。7条施工支洞基岩岩性基本为钾长流纹岩和晶屑凝灰熔岩,弱风化岩石致密坚硬,具备良好的成洞条件。这种岩性组合为隧洞开挖提供了稳定

的围岩环境,但局部需注意岩体节理裂隙发育对围岩稳定的影响<sup>[1]</sup>。

#### (二)地质构造特征

线路地质构造以断裂构造发育为主,查明与洞线相交的断层有11条,包括北东向6条、北西向2条、北西西向2条及南北向1条。其中F123和F2为区域性断裂,断层宽度达10-30米,断裂带为硅化破碎蚀变岩,局部出现压碎岩。其余断层规模较小,宽度2-10米。除F123断层与洞轴线小角度相交对围岩影响较大外,其余断层均以大角度相交。这种构造格局要求施工中需重点关注断层带附近的围岩稳定性,特别是区域性断裂可能引发的突水、塌方等地质灾害。

#### (三)水文地质特征

隧洞区地下水活动受构造控制明显,断裂带可能成为地下水富集通道。施工中需防范断层破碎带的涌水风险,文档特别指出需采用超前地质预报手段探明含水情况。溪源溪管道横穿河道段存在砂卵石层渗透问题,需做好围堰截水措施。此外,不同岩体接触面(如基岩与心墙粘土层)易形成渗流通道,施工中要求接触段复喷两次并掺加速凝剂。这些水文地质条件对隧洞开挖支护工艺和排水系统设计提出了较高要求,需严格执行“防、截、排、堵”的综合治理原则。

### 三、隧洞开挖技术研究

#### (一)全断面光面爆破技术应用

为确保开挖轮廓平整与围岩稳定,工程核心洞段采用规范化全断面光面爆破技术。施工流程包括:测量放线(激光全站仪)、钻孔(YT-28气腿式风钻,孔深IV类围岩2.3m、I-III类围岩2.8m,周边孔外插角 $\leq 5^\circ$ )、装药(掏槽/崩落孔 $\Phi 32\text{mm}$ 药卷连续装填,装药系数0.7-0.85;周边孔 $\Phi 25\text{mm}$ 药卷间隔装药,底部加强)、堵塞(黏土炮泥,长度 $\geq 30\text{cm}$ )及起爆网络(非电导爆管簇连,毫秒微差:掏槽 $\rightarrow$ 崩落 $\rightarrow$ 底孔 $\rightarrow$ 周边,段间隔 $\geq 25\text{ms}$ )。临近敏感区域通过加密钻孔、减少单孔药量、增长堵塞等措施,严格将爆破振速控制在

5cm/s 以内, 并架设防护排架限制飞石。爆后安全检查(30 分钟后进行)与技术总结持续优化爆破参数。该技术有效保障了成型质量与施工安全<sup>[2]</sup>。

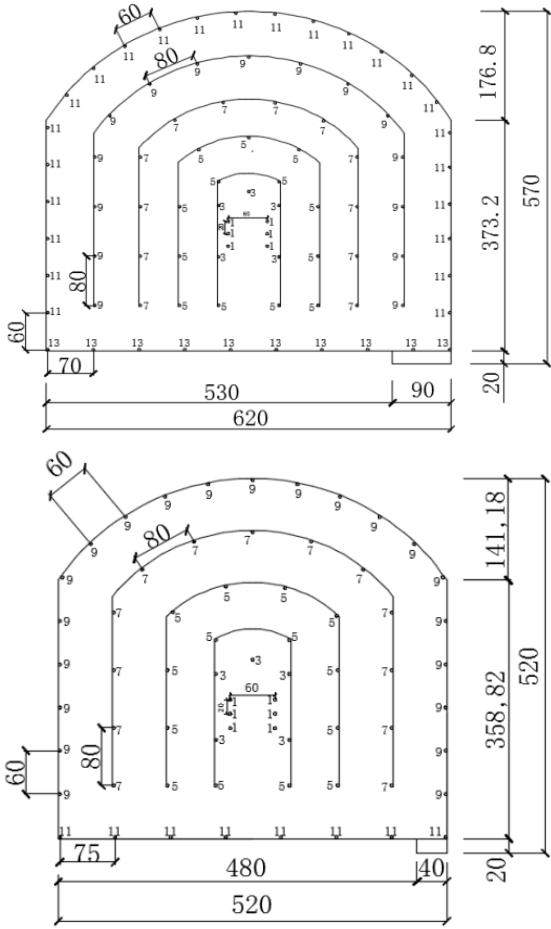


图 1 炮眼布置图

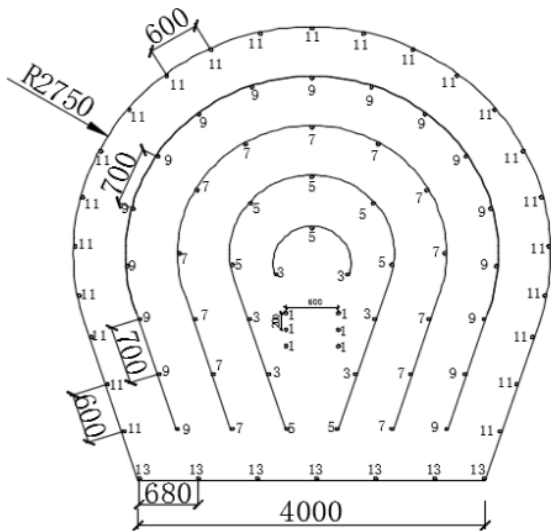


图 2 炮眼布置图

(二) 控制爆破技术实施要点

在福建省平潭及闽江口水资源配置工程第 1 标段施工中, 控制爆破技术是确保施工安全与周边环境稳定的

关键措施。该技术针对隧洞临近村庄、铁路及高速公路等敏感区域, 采用精细化爆破方案, 有效降低振动与飞石风险。施工过程中, 严格遵循“短进尺、弱爆破、及时封闭、勤观测”原则, 确保爆破作业安全可控。爆破前, 通过测量放线精准定位炮孔, 采用直径小于 50mm 的钻头钻孔, 确保孔位精度。炮孔布置采用掏槽眼、辅助眼、周边眼分层设计, 孔距与排距按  $a=(1 \sim 1.2)W$ 、 $b=W$  计算, 保证爆破能量均匀分布。装药结构严格区分, 正常炮眼采用偶合连续装药, 预裂孔采用间隔不偶合装药, 底部加强装药以提高破碎效果。堵塞采用炮泥填实, 长度不小于孔深 1/3, 防止爆轰气体过早逸散。起爆网络采用非电导爆管雷管簇连法, 按掏槽眼→辅助眼→周边眼顺序分段起爆, 毫秒雷管间隔时间  $\geq 25ms$ , 降低振动叠加效应。爆破前设置警戒线, 疏散人员并实施交通管制, 确保安全距离  $\geq 200m$ 。爆破后 30 分钟进行爆区检查, 发现盲炮立即按规程处理, 严禁强行掏取。飞石控制采用防护排架覆盖, 限制飞石范围  $\leq 50m$ , 邻近构建筑物段采用密孔少药策略, 进一步降低风险。通过动态振动监测与参数优化, 该技术成功将爆破振速控制在 5cm/s 以内, 满足邻近构建筑物保护要求, 为工程安全高效推进提供了可靠保障<sup>[3]</sup>。

(三) 开挖过程质量控制体系

工程建立了完善的开挖质量全过程控制体系。测量放线采用激光全站仪作导线控制网, 每月进行一次复测。钻孔作业实行分区负责制, 各钻手定人定位施钻。每排炮由工程师按“平、直、齐”标准检查, 水平周边孔偏差不大于 5cm。装药作业严格按设计说明书执行, 炸药选用抗水硝铵炸药。周边孔采用砂袋堵塞, 其他炮孔用炮泥填实。通风散烟采用轴流风机强力通风, 配置气体监测仪器。出渣前人工配合机械处理掌子面及顶拱危石。建立开挖质量追溯制度, 每循环记录钻孔布置、装药参数和爆破效果。实行三级检验制度, 班组自检、施工队复检和项目部终检相结合。质量控制指标包括超挖量、残孔率、轮廓平整度等, 纳入施工人员考核体系。通过严格的质量控制, 工程开挖质量优良率达到 95% 以上。

四、支护技术体系研究

(一) 超前支护系统设计与实施

工程针对不同围岩条件设计了系统的超前支护方案。在 V 类围岩段采用  $\Phi 42$  超前注浆小导管, 长度 4 米, 外插角控制在 10-15 度。小导管尾部支撑于钢架上, 每排纵向搭接长度不小于 1 米, 横向间距 40cm。注浆采用水泥浆液, 特殊地段添加 5% 水玻璃, 注浆压力 0.5-1.0MPa。IV 类围岩段则采用  $\Phi 25$  超前锚杆支护, 锚杆间距 150cm, 排距 100cm。钻孔采用 40 毫米钻头, 孔深进入稳定岩层。超前支护施工前喷射 5cm 厚混凝土封闭工作面, 防止漏浆。注浆过程实时记录压力、流量等参数, 确保注浆质量。在断层破碎带等特殊地段, 采用双层超

前支护,先施工小导管注浆,再施作超前锚杆,形成复合支护体系。通过声波检测和取芯试验验证,注浆加固区岩体强度提高30%-50%,有效改善了开挖条件<sup>[4]</sup>。

### (二) 初期支护结构优化配置

初期支护采用动态设计理念,根据围岩类别匹配差异化支护参数。IV类围岩段实施C25混凝土初喷4cm,架设16#工字钢拱架,间距0.8米。钢拱架间用Φ20钢筋纵向连接,挂设Φ6钢筋网,网格间距25cm,最后复喷至12cm厚。V类围岩段在超前支护基础上,初喷5cm混凝土,钢拱架加密至0.6米间距,复喷至15cm。II、III类围岩采用B型支护,B1型喷射C30素混凝土,B2型加设Φ6@250毫米钢筋网。支护施工实行“四不”制度:喷锚工艺未完成不前进、厚度不足不前进、发现问题不解决不前进、量测结果不安全不前进。钢拱架安装确保拱脚置于稳固基岩上,必要时设置钢垫板。钢筋网随岩面起伏铺设,与围岩间隙不大于3cm。喷射混凝土采用湿喷工艺,分层施作,每层厚度5-6cm,从拱脚向拱顶顺序施工。

### (三) 二次衬砌质量控制体系

二次衬砌采用模筑钢筋混凝土结构,C25混凝土强度。衬砌时机根据监测数据确定,要求变形速率小于0.2毫米/天,累计变形达预计值80%以上。衬砌台车长6米,就位误差控制在±3cm内。混凝土采用集中拌合,输送泵浇筑,对称分层进行,每层厚度不超过50cm。振捣采用插入式与附着式振捣器结合,避免触碰钢筋和模板。施工缝处理严格,旧混凝土面凿毛清洗,设置接茬钢筋,先铺高标号砂浆再浇筑。拱顶部位采用泵送挤压施工,设置注浆管进行后期补偿注浆。模板拆除时混凝土强度不低于设计强度70%,拆模后立即养护不少于14天。衬砌背后超挖处采用同级混凝土回填,拱脚以上1米范围重点处理。通过全过程质量控制,衬砌结构表面平整度偏差小于5毫米,裂缝宽度控制在0.2毫米以下,结构耐久性满足100年使用要求。

## 五、辅助施工技术

### (一) 排水系统设计及实施

工程针对不同地质条件设计了完善的排水系统。顺坡段采用40×40cm梯形排水沟,沿隧洞右侧布置,沟底坡度不小于1%。反坡段每100米设置1座12立方米集水井,配备3台1.1千瓦污水泵,其中2台备用。突涌水风险段采用多级接力排水方案,支洞与主洞交叉口设置37千瓦大功率水泵站。排水管路采用直径150毫米钢管,承压能力不低于1.0兆帕。洞外设置三级沉淀池,尺寸9×3×3米,处理达标后排入自然沟渠。针对断层破碎带等富水区段,施工前钻设直径100毫米超前泄水孔,孔深20-30米,形成系统排水网络。排水系统实行24小时值班制度,配备水位自动报警装置,确保排水能力满足最大涌水量需求。

### (二) 通风系统优化配置

通风系统采用混合式布局,主风机选用93-1型轴流式,功率110千瓦。风管采用直径800毫米阻燃风管,每节长度50-100米,减少接头漏风。风量计算综合考虑排烟、人员需求和最低风速要求,取最大值882立方米/分钟。风压计算包括动压和静压,系统总风压4711帕。风机功率根据公式 $W=QHK/60n$ 计算确定,实际配置91千瓦。通风管理实行“以长代短、以大代小、截弯取直”原则,吊挂锚杆间距5米,确保风管平直稳固。针对长距离独头掘进段,适时增设11千瓦射流风机辅助通风。配置多种气体检测仪,爆破后通风时间不少于30分钟,CO浓度降至24ppm以下方可进洞。通风系统维护实行专人负责制,每日检查风管完好性,漏风率控制在5%以内。

### (三) 监测与信息化施工

工程建立完善的监测预警体系保障安全施工。采用收敛计、多点位移计、应力计等设备,按围岩类别设置不同间距监测点(III类30m,IV类20m,V类10m)。开挖面后方1倍洞径内每天测2次,1-3倍内每天1次。利用全站仪、电子水准仪采集数据(精度0.1mm),实时传输至信息平台自动分析,生成变形速率-时间曲线。设定允许值70%为预警阈值,触发应急预案。爆破振动监测(TC-4850测振仪)确保振速<5cm/s。结合TSP203、地质雷达超前预报(15-20m)探明地质。监测数据每日指导支护参数动态调整,成功预警3次较大变形,实现信息化施工。

## 结语

闽江竹岐至大樟溪引水工程成功破解了复杂地质条件下长距离隧洞建设难题。实践表明,应对断层破碎带、软弱围岩等,“超前预报、动态设计、信息化施工”的技术路线效果显著。水压爆破、复合支护、智能监测等技术的综合应用,确保了工程安全质量,并兼顾了节能环保。该工程成果为类似地质条件隧洞建设提供了宝贵经验,具备良好推广价值。

## 参考文献

- [1] 高惟峻. 深埋复杂地质条件下隧道开挖监测技术研究与应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (27): 94-96.
- [2] 唐浩. 复杂地质条件下隧道工程洞身开挖方法及重点技术分析[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(17): 107-109.
- [3] 赵晖, 张浩然, 郭望成. 复杂水文地质条件下隧洞开挖渗流场分析[C]// 中国水利学会. 2023中国水利学术大会论文集(第三分册). 中水珠江规划勘测设计有限公司; 2023: 234-239.
- [4] 谢东元, 黄勇, 王士发, 等. 复杂地质条件隧洞开挖超前地质预报实践与应用[J]. 红水河, 2020, 39(06): 99-101.