

# 大跨度特殊地质条件下洞室群快速开挖技术研究与应用

金怀锋

(云南省能源投资集团有限公司, 云南 昆明 650200)

**【摘要】** 乌东德水电站右岸导流隧洞跨度大、开挖断面大、地质条件差、工期紧, 本文通过研究解决工程中出现的各种技术难题, 总结出一套大跨度特殊地质条件下洞室群快速开挖支护方法, 供类似工程借鉴。

**【关键词】** 乌东德水电站; 大跨度; 洞室群; 快速开挖

中图分类号: TV554

文献标志码: A

文章编号: 1005-4774(2017)04-0008-05

## Research and application of cavern group rapid excavation technology under large span special geological conditions

JIN Huaifeng

(Yunnan Energy Investment Group Co., Ltd., Kunming 650200, China)

**Abstract:** Diversion tunnels on the right bank of Wudongde Hydropower Station are characterized by large span, large excavation section, poor geological condition and short construction duration. In the paper, all technical difficulties in the project are solved through study. A set of cavern group rapid excavation supporting methods under large span special geological conditions is summarized as reference for similar projects.

**Keywords:** Wudongde Hydropower Station; large span; cavern group; rapid excavation

乌东德水电站, 是金沙江下游河段规划建设的一个梯级水电站中最上游的梯级电站, 坝址右岸属云南省昆明市禄劝县, 左岸属四川省会东县<sup>[1]</sup>。乌东德水电站施工导流采用河床一次拦断全年围堰、隧洞导流的方式, 共布置5条导流隧洞, 其中左岸布置2条, 右岸布置3条, 5条导流隧洞总长8091.5m。右岸3条导流隧洞按“两低一高”平行布置, 右岸3~5号导流洞长度分别为1472.37m、1613.60m、1699.62m。本文依托乌东德水电站右岸3~5号导流洞开挖支护工程, 针对导流洞大跨度特殊地质条件下洞室群快速开挖技术进行全面深入的研究, 总结出一套复杂地质条件下隧洞

安全、优质、快速、合理开挖的施工技术。

### 1 大跨度特殊地质条件洞室群开挖现状及意义

国内水电站不良地质洞段大多为不超过百米级的断层及其断层影响带, 多数施工历时3~5个月, 大多采取“超前锚杆+钢支撑”、稳打稳扎、安全稳妥开挖支护通过, 其经济性有待考究, 不良地质洞段顶拱开挖方法除小湾电站导流隧洞采用了全断面开挖支护外, 大多采用中导洞或留核心土开挖的方法<sup>[2-3]</sup>。

乌东德水电站导流洞不良地质洞段开挖长度近

900m,开挖断面最大尺寸为 27.90m × 30.30m,其大跨度居国内前列,该工程具有洞段长、洞径高、跨度大、易破碎、断面岩性不一、复杂多变的地质围岩等特点,开挖支护工期紧张仅为 21 个月,且外围施工条件复杂。在国内像这样复杂多变的特殊地质条件下大断面洞室开挖无规范可循。因此,研究大型地下洞室在开挖期和运行期的围岩稳定性,保证隧洞在施工和运行期有足够的安全性,形成一套完整、成熟的施工技术,是一个极其重要的课题,对地下工程施工技术的发展将起到极大的推动作用。

## 2 主要技术性能指标及难点与创新点

### 2.1 主要技术性能指标

右岸导流洞岩石松散破碎,自稳能力差,不良地质洞段连续最长达 884.37m,3 号、4 号导流隧洞开挖标准断面 19.90m × 27.20m(宽 × 高),其中渐变段最大开挖断面为 27.9m × 30.30m(宽 × 高),3 号、4 号导流洞岩柱隔墙距离 26.10m,最小隔墩仅 13.77m,小于洞径。

右岸导流洞大断面Ⅳ2 类围岩不良地质洞段顶拱全断面一次开挖支护、半幅或中导洞开挖支护,整体成型效果较好;顶拱层开挖采用“超前锚杆或超前小导管、无盖重固结灌浆”进行超前预支护,中下层开挖采用“超前斜孔固结灌浆 + 超前锚杆”预支护,保证开挖面成型效果;不良地质洞段顶拱采用“Ⅰ20b 钢支撑、预应力锚杆、模喷混凝土及无盖重灌浆”联合支护,增加了顶拱部位自稳能力;中下层边墙采用“锚索、预应力锚杆及锚筋桩”进行加强支护,减少了大断面高边墙变形,保证了导流隧洞施工期稳定。

在技术支持上,采用数值计算与现场监测相结合方法。

### 2.2 技术难点

右岸 3 号 ~ 5 号导流洞上游段工程具有洞径高(最高 30.30m)、跨度大(最高 27.90m)、相隔近(最近 26.10m),特殊地质段岩层极薄、散粒状、同一断面内岩性不一、围岩复杂多变、特殊地质段较长,开挖施工过程的安全问题尤为突出。

地质情况复杂,岩石完整性较差,属Ⅳ类围岩,如

何选择合理的开挖程序确保大跨度洞室、三大洞室隔墩安全与稳妥开挖;在不良地质洞段长、洞径最高、跨度大、易破碎、断面岩性不一、复杂多变以及开挖支护工期紧张条件下,要保证顶拱成型效果,减少地质超挖。

导流洞岩层走向与洞轴线成小角度相交、倾向左壁(靠江侧),岩体中微裂隙发育,岩体极为破碎,多呈散粒体状结构,手捏易碎,而且两洞间围岩隔墙厚 26.10 ~ 30.10m,开挖过程中要保证导流洞之间中隔墙稳定;要减小开挖爆破对围岩的扰动,确保开挖期间的围岩稳定,合理选择开挖爆破参数;顶拱开挖过程中出现地质超挖,造成钢支撑与岩石面存在大量空腔,须保证空腔部位顶拱开挖面稳定,避免二次坍塌以及空腔处理。

导流洞下挖过程中顶拱应力调整,造成顶拱部位钢支撑外喷混凝土脱落,须保证洞内施工人员及设备安全;导流洞内锚杆、锚索及锚筋桩布置比较密集,而且施工过程中根据地质及围岩变形情况不断调整支护方案,须保证后续支护施工不对已完成的锚索及锚筋桩造成损坏。

### 2.3 技术创新点

工程具有洞段长、洞径高、跨度大、围岩极薄、散粒状、易破碎、岩性不一等特点,采用多种开挖方法、多种支护型式,确保隧洞隔墙稳定,按期完成开挖支护。

顶拱地质塌方部位钢支撑空腔采用“模喷混凝土”工艺,即先在钢支撑外空腔部位设置免拆快易收口模板作复拱,然后,喷混凝土或浇筑混凝土回填密实,并进行无盖重固结灌浆,以空腔密实确保围岩稳定;在隧洞顶拱安装 GPS2 型隧洞防护网作安全防护网,并采用 U 形卡与锚杆连接,以确保下层开挖安全。

掺聚丙烯粗纤维代替掺钢纤维进行喷混凝土,减少喷混凝土回弹量,减少设备磨损、堵管,延长设备寿命,节约投资及成本。

## 3 工程实践与应用

### 3.1 开挖支护方案选择

#### 3.1.1 顶层主要开挖方法

顶层开挖方法选择,主要根据工程地质、水文条件

及施工安全系数等综合因素,右岸上游段主要采用“超前小导管+钢支撑”全断面开挖、“中导洞超前勘探、全断面+钢支撑”扩挖跟进、“半洞错距+钢拱架(钢支撑)”三种方法进行开挖<sup>[4]</sup>。

顶层开挖层高为9m,选用钻爆台车配手风钻钻

爆,按“弱爆破或机械无爆破、短进尺、勤支护”的原则施工,先系统支护,再加强支护。应急加强支护施工中不断优化调整开挖支护方案,以保施工安全(3号、4号导流隧洞典型开挖分层见图1,5号导流隧洞典型开挖分层见图2)。

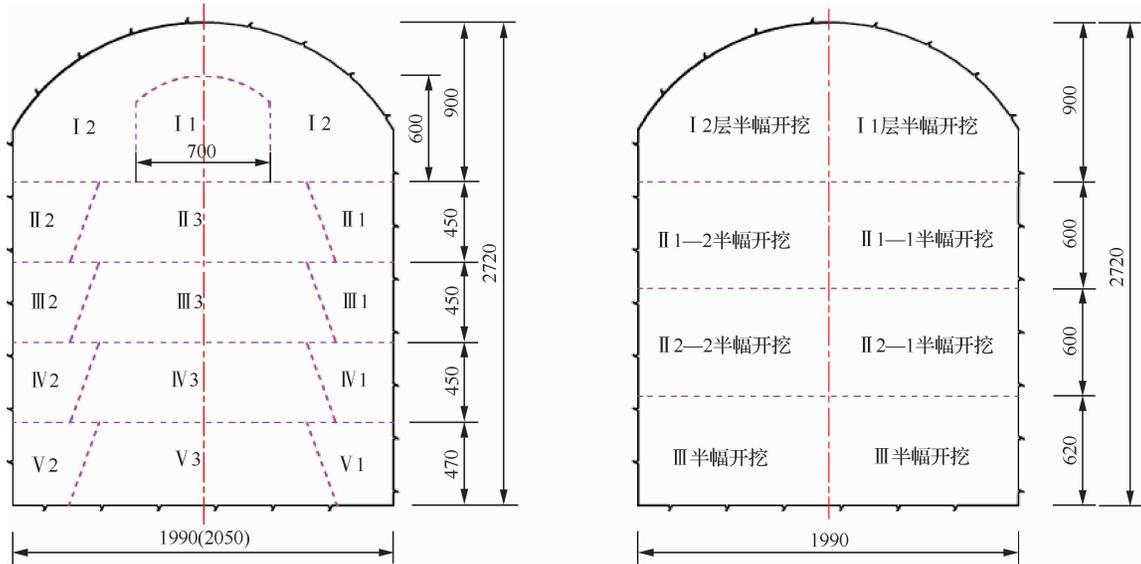


图1 3号、4号导流隧洞典型开挖分层(单位:cm)

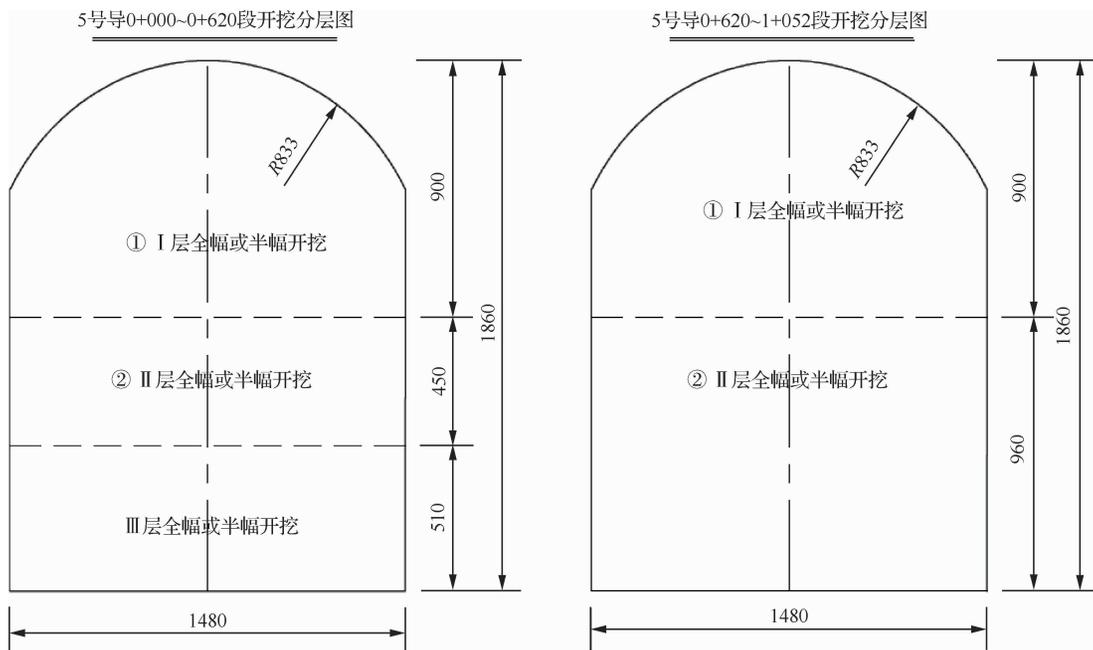


图2 5号导流隧洞典型开挖分层(单位:mm)

a. 3号导流隧洞。0+000~0+100m为进口岸坡段,考虑先洞后墙开挖,采用“先挖7m×6m中导洞超前勘探,全断面+钢支撑扩挖开挖跟进”的开挖方式;0+100~0+195m主要考虑施工资源配置,采用先右

侧边导洞后左半洞的“半洞错距+钢拱架”开挖方式,并在左半洞临时增加法向锁口锚杆;30+195~0+300m前方出现塌方情况采用“超前小导管+钢支撑”全断面开挖;0+300~0+831.595m主要考虑围岩自

稳能力、施工队伍技能情况,采用先右侧边导洞后左半洞的“半洞错距+钢拱架”开挖方式。

b. 4号导流隧洞。0+000~0+170m采用“先挖7m×6m中导洞超前勘探,全断面+钢支撑扩挖跟进”的开挖方式;0+170~0+390m采用“超前小导管+钢拱架”全断面开挖;0+390~884.374m采用先右边导洞后左半洞的“半洞错距+钢拱架”开挖方式。

c. 5号导流隧洞。5号导流隧洞由于开挖断面(14.80m×18.60m)比3号、4号导流隧洞(19.90m×27.30m)相对较小,0+000~0+050m采用“先挖7×6m中导洞超前勘探,全断面+钢支撑扩挖跟进”开挖方式;0+050~1+051.652m采用“中导洞超前全断面”开挖。

### 3.1.2 中下层开挖方法

中下层开挖方法选择主要根据地质构造岩层走向、施工通道、作业队伍技能等因素综合考虑选择,右岸导流隧洞上游段主要采用半幅错距开挖和中间拉槽预留保护层开挖两种方法<sup>[5]</sup>。根据各洞段地质情况,中层、下层开挖分层高度有所不同,基本分层为4.50m、6m两个层高,具体的开挖方法选择如下:

a. 3号、4号导流隧洞。3号导流洞0+000~0+300m共分5层开挖,中下层Ⅱ~Ⅴ层开挖高度均为4.50m,Ⅴ层开挖高度为4.70m;0+300~0+831.595m分4层开挖,Ⅱ层、Ⅲ层开挖高度均为6m,Ⅳ层开挖高度为6.20m。

4号导流洞0+000~0+390m共分5层开挖,中下层Ⅱ~Ⅴ层开挖高度均为4.50m,Ⅴ层开挖高度为4.70m;0+390~0+884.374m共分4层开挖,Ⅱ层、Ⅲ层开挖高度均为6m,Ⅳ层开挖高度为6.20m。

3号、4号导流洞中下层开挖先进行了中间拉槽预留保护层开挖生产性试验,但因围岩破碎开挖效果不理想,后来均调整为半幅(错距)开挖,开挖过程中多次降坡改路,优先右半幅采用手风钻造水平爆破孔开挖,按设计轮廓线进行周边光爆(局部洞段反铲机械无爆破开挖),一排炮一支护,循环进尺按2.0m控制,以确保施工安全。

b. 5号导流隧洞。5号导流洞0+000~0+620m共分3层开挖,Ⅱ层、Ⅲ层开挖高度分别为4.50m、

5.10m;0+620~1+051.652m共分2层开挖,Ⅱ层开挖高度为9.60m。

5号导流洞中层、下层0+000~0+620m采用半幅(错距)开挖,0+620~1+051.652m一次性开挖至底板,采用手风钻造水平爆破孔开挖,按设计轮廓线进行周边光爆。支护紧跟,循环进尺按2.0m控制。

## 3.2 因地制宜,及时支护

右岸3~5号导流隧洞支护除设计系统支护条件外,增加了钢支撑、预应力锚杆、超前锚杆、超前小导管、无盖重固结灌浆等加强支护措施<sup>[6]</sup>。

## 4 基于施工过程仿真的数值分析

### 4.1 数值分析的目的和意义

通过数值分析方法,主要对右岸导流隧洞上游段围岩的开挖、支护过程进行数值仿真分析,有助于了解围岩稳定和衬砌支护的力学特性,研究施工期应力、位移和内力的大小和分布,为右岸导流隧洞上游段提出一系列性能评价方法和增强结构安全的工程措施,为设计、施工提供指导<sup>[7-8]</sup>。

### 4.2 3号、4号导流洞施工期有限元模型

利用FLAC3D软件局部模拟3号、4号和5号导流隧洞,采用六面体单元划分网格,共计剖分169623个单元和174624个节点,见图3。

### 4.3 有限元分析结论

3号洞右边墙中下部和4号洞左边墙中上部的稳定性较差,对洞间岩柱的稳定产生不利影响,应充分重视并做好上述边墙部位的监测、支护和局部掉块加固工作,从而限制边墙局部失稳并向深部发展,保障洞间岩柱的稳定性,也避免因洞群效应而引发邻近洞室的失稳。

各洞室均是边墙中部及中上部临空面的部位围岩变形较大,且大部分变形均在距开挖面5m深的范围内发生。考虑到围岩浅表层变形很大,可能会出现局部垮塌,因此建议在洞室继续下挖过程中,将上述部位作为围岩监测的重点部位,并及时做好新出露开挖面的锚喷支护和灌浆加固工作,降低围岩松弛范围并限制其向深部进一步发展。

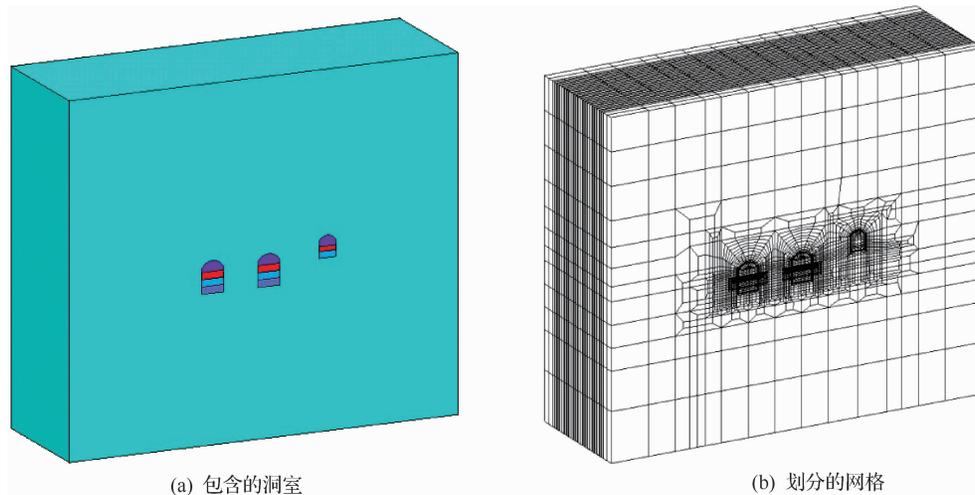


图3 右岸导流隧洞局部模型

考虑到位移监测手段仅能获得监测范围内的围岩变形数据,而无法有效掌握开挖卸荷作用下的岩体结构特征和岩体完整性指标。计算分析揭示,3号洞和4号洞之间的洞间岩柱稳定性对3号洞和4号洞都具有控制性影响,因此建议尽快对该部位增加声波测试、钻孔摄像等必要的检测手段,从而更加全面地了解围岩性状和稳定状态,为后续开挖和反馈分析提供必要资料。

### 5 施工安全监测

电站导流隧洞开挖断面大,地质条件复杂,技术难度大,在施工全过程中,各种施工手段辅以安全监测支持,以此指导施工。通过安全监测(见图4),及时掌握洞室及其周围环境的动态变化,相应调整开挖程序,增加支护措施,并预测其变化趋势,保证了工程的安全、优质、快速施工,为围岩工程建设提供成功经验。

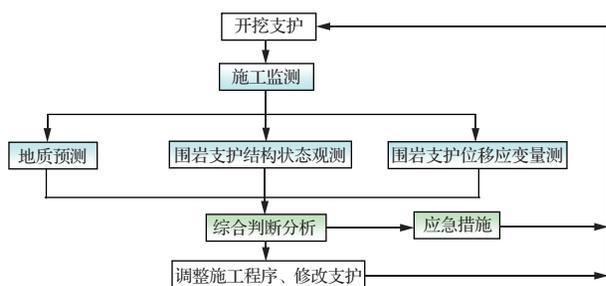


图4 右岸导流隧洞施工监测流程

### 6 结论

乌东德水电站右岸导流隧洞顶层采取“中导洞全

断面、半洞错距开挖”,在地质塌方部位钢支撑空腔采用“模喷混凝土”、掺聚丙烯粗纤维代替掺钢纤维喷混凝土、无盖重固结灌浆,预应力锚杆,隔墩加对穿锚索,在隧洞顶拱安装 GPS2 型隧洞防护网作安全防护网等工艺及措施,实现了复杂特殊地质条件下大跨度特长隧洞洞室群快速、安全、优质开挖支护,监测数据表明围岩处于稳定状态,降低了安全风险,节约了工程投资,可供类似工程借鉴施工,对推动流域梯级开发进程,具有深远的社会意义。◆

### 参考文献

- [1] 王凯元.金沙江川滇交界段构造-地貌特征[J].云南地质,1989(1):1-10.
- [2] 文天平,杨黎明.不良地质隧道洞口段的施工技术[J].世界隧道,2000(3):8-12.
- [3] 陈安平.不良地质隧洞快速施工研究——以克林隧洞工程为例[D].南宁:广西大学,2005.
- [4] 张根才.全断面隧洞掘进机(TBM)在万家寨引黄工程不良地质段中的施工[J].水利建设与管理,2007(10):19-20.
- [5] 胡书红.龙滩水电站左岸导流洞工程快速施工风险及方案分析[D].北京:中国地质大学(北京),2008.
- [6] 付红波,李秋玲.乌东德水电站导流洞不良地质洞段开挖支护施工技术[J].西北水电,2013(5):32-36.
- [7] 张国强.水电站地下厂房洞室群施工数值仿真[D].大连:大连理工大学,2007.
- [8] 毕磊.基于不确定性分析的地下洞室群施工进度仿真分析与优化研究[D].天津:天津大学,2015.