

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.01.006

某电站引水隧洞施工方案研究与应用

王 兵¹, 朱记伟¹, 魏徐良²

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 引水隧洞是水利水电工程中的重要建筑物, 施工技术复杂, 施工难度大。为制定一个先进、成熟、经济、适用、可靠的施工方案, 需要对不同施工方案进行全面比选。结合某电站引水隧洞工程实例系统研究了其施工方案, 基于该工程特点, 从施工质量、工期、环境保护、工程投资等方面对比分析了钻爆法、TBM法、钻爆法+TBM法的优缺点。结果表明: 采用钻爆法施工更为合理; 确定了平洞段施工采用分层钻爆开挖, 斜井段采用导井开挖, 在复杂特殊地质段采用中空自进式锚杆支护; 并制定了具体施工方法。钻爆法方案在实际应用中有效保证了工程质量和进度, 以期为今后类似引水隧洞施工提供借鉴和参考。

关键词: 引水隧洞; 钻爆法; 平洞; 施工方案

中图分类号: TV554

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)01-0030-05

Application of Construction Schemes for Water Diversion Tunnel of Hydropower Station

WANG Bing¹, ZHU Jiwei¹, WEI Xuliang²

(1. State Key Laboratory of Ecological Water Conservancy in the Northwest Arid Area, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: Water diversion tunnel is an important building in water resources and hydropower engineering. Its construction technology is complex and difficult, thus it is essential to carry out a compare and selection to make an advanced, mature, economical, applicable and reliable construction scheme. Taking the diversion tunnel project of a hydropower station as an example, the construction scheme of the project was studied systematically in this paper. From the aspects of construction quality, construction period, environmental protection, project investment and so on, the advantages and disadvantages of drilling and blasting method, TBM method, drilling and blasting method + TBM method were analyzed according to the engineering characteristics. The results showed that the drilling and blasting method is more reasonable. The adit of diversion tunnel can be excavated by stratified drilling and blasting, the deviated interval section inverse well drill excavated of pilot shaft, complex special geological section adopted self-drilling hollow grouting anchor, and developed a construction procedure. In practical application this scheme can effectively ensure the quality and the progress of the project, the research is expected to provide a reference for similar diversion tunnel construction in the future.

Keywords: diversion tunnel; drilling and blasting method; horizontal tunnel; construction schemes

为满足水利水电工程各项任务的需要, 在地面以下开凿的各种隧道, 称为水工隧道, 其中起到引水

发电作用的则被称为引水发电隧洞。近年来我国建设的水工隧洞在数量上大有增加, 截至目前, 围绕大

收稿日期: 2016-10-13

修稿日期: 2016-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372304); 陕西省水利科技项目(2013slkj-05)

作者简介: 王 兵(1993—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为水利水电工程施工技术。E-mail: xautwangbing@163.com

通讯作者: 朱记伟(1982—), 男, 山东日照人, 博士, 副教授, 主要从事水利水电建设工程管理研究。E-mail: xautzhu@163.com

型水利枢纽工程,我国已建成的各类水工隧洞总长超过 10 000 km,在建及纳入规划的水工隧洞总长超过 3 000 km,我国已成为世界隧道及地下工程建设规模和建设速度第一大国。由于引水隧洞决定着电站工程施工质量的好坏程度,隧洞及地下工程所处的地质水文条件极其复杂,且引水隧洞的施工作业具有隐蔽性强、施工综合性高、施工空间有限、施工环境恶劣、危险性大等特点,因此对施工方案的研究尤为关键。引水隧洞施工与工程地质、围岩分级、施工要求、施工季节、工程投资等密切相关,在引水隧洞工程施工前必须综合考虑以上因素,并对施工方案进行研究,本文以某电站引水隧洞为例,综合比较

大断面平洞、斜井的施工方法,制定本工程合理可行的施工方案。

1 工程概况

某引水隧洞总长 518.488 m,位于河流左岸斜坡地带,隧洞轴线上地表最高高程 1 880 m,隧洞最大埋深 180 m。由上游至下游沿线穿越的断层主要有 f11、f4、f7 三条断层,岩溶主要顺层面及断层等结构面发育于隧洞,隧洞处于枯季地下水位以上,地质剖面详图如图 1 所示。隧洞轴线总体上垂直岩层走向展布,围岩整体稳定性相对较好。

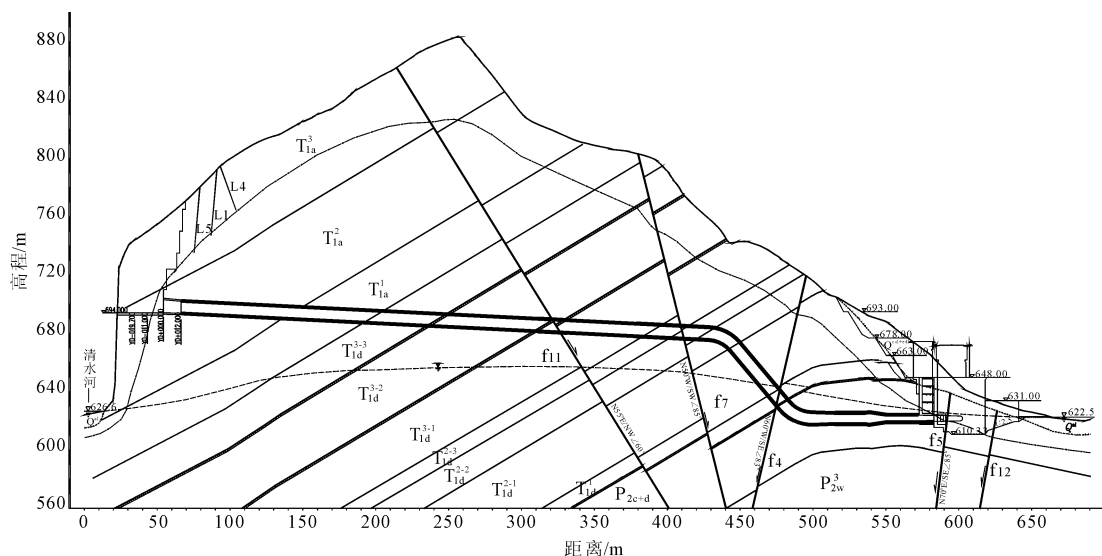


图 1 引水隧洞地质剖面图

主要工程地质问题:隧洞中仅 32.8%为 II 类围岩,基本稳定;45.1%为 III 类围岩,受构造扰动影响,围岩局部不稳定,存在小型不稳定块体;IV、V 类围岩占 22.1%。且围岩中发育有岩溶、裂隙和断层,施工中可能发生涌水、软岩变形等地质问题。

隧洞由上平段、上弯段、斜井段和下弯段四部分组成。平洞段长 447.568 m,开挖断面呈直径 9.2 m 的圆形;上、下弯段垂直转弯半径为 25 m,转弯角度为 50°;斜井段是连接上、下弯段的直线段,倾角为 50°,长度为 70.92 m,开挖断面呈直径 9.6 m 的圆形。

2 施工方案比选

本工程施工方案比选主要包括:(1)大断面平洞段施工方案比选;(2)大断面斜井段施工方案比选;(3)不良地质段施工方案比选。

2.1 大断面平洞段施工方案比选

(1) 施工方案比较。在长期的工程实践中,目前大断面隧洞施工已经积累了丰富的理论和经验,逐渐形成了一整套独具特色的隧洞施工方法体系。隧洞施工方法多种多样,按破岩方式主要可以分为钻爆法和掘进机法。钻孔爆破法是开挖石洞室的常规方法,即通过钻孔、装药、爆破、出渣这四项主要作业开挖岩石,同时还包括了测量、供电、供水、通风、排烟、降尘、临时支护等辅助作业。掘进机法简称 TBM(Tunnel Boring Machine, TBM),是挖掘隧道、巷道及其它地下洞室的一种新方法。这两种方法各有优势,适用于不同的条件^[1]。根据引水隧洞地质资料、工程要求、作业场地等,在设计电站引水隧洞施工方案时,比选了全隧洞钻爆法施工、全隧洞 TBM 法施工以及 TBM + 钻爆法联合施工方案^[2]。三种方案综合比较见表 1。

表 1 引水隧洞施工方案比较表

项目	全隧洞钻爆法	全隧洞 TBM 法	钻爆 + TBM 法
理论	依靠炸药的冲击波对岩石冲击、挤压进行破碎。	依靠机械的压紧、切削来破岩。	进口处工作面采用 TBM 法施工,出水口处工作面采用钻爆法施工。
施工可靠性	钻爆法施工技术成熟,可适应于各种复杂地质。	TBM 法对加快施工进度、减少安全事故的发生有明显的优势,但隧洞穿越 3 条断层,对 TBM 的施工有较大的影响,且设备的维修、保养影响施工进度。	TBM 法对加快施工进度、减少安全事故有一定的优势,但 TBM 段隧洞穿越 3 条断层,且围岩稳定性不好,影响 TBM 施工进度。
施工长度	钻爆法:447.47 m	TBM 法:447.57 m	钻爆法:73.38 m TBM 法:374.19 m
施工质量	存在超欠挖问题	消除了超欠挖	出水口处工作面存在超欠挖问题
施工进度	5 m/d	35 m/d	25 m/d
环境保护	对围岩的扰动大,噪音大,粉尘多。	对围岩的扰动小,对周围环境影响小。	对围岩的扰动较小,对周围环境影响较小。
工程投资	施工成本低,工程投资少。	TBM 设备及使用费高,维修费用高,综合费用最贵。	TBM 设备及使用费较高,维修费用较高,综合工程投资多。

(2) 施工方案比选。结合本工程,由表 1 可知, TBM 法施工方案在确保工程工期、质量、减少对围岩的扰动性、保证安全、保护环境等方面具有明显的优势,但是 TBM 掘进机受厂商设计、制造、运输、装配等制约,如不能在设计时间内开始施工,将会影响整个工期,甚至于增大投资。对于施工风险而言,平洞段围岩多处发育有岩溶,断层,裂隙等, TBM 法施工与钻爆法施工均存在一定的风险,但是钻爆法施工经验丰富,施工技术灵活,可以适应不良地质下隧洞的开挖。对于工程投资而言,隧洞平洞段长度仅 447.568 m,设备的一次性投入较大,且 TBM 掘进机的日常维护、保养也需要大量的资金投入,综合费用较多。

综合以上分析,确定引水隧洞平洞段采用钻爆法施工,分层开挖,上层开挖高度取 7.6 m,下层开挖高度取 2.0 m,开挖采用 H178 三臂钻钻孔,出渣采用 3 m³ 侧翻装载机装 15 t 自卸汽车由各工作面运至下游渣场^[3]。

2.2 大断面斜井段施工方案比较

斜井是水电工程中的重要建筑物,其开挖存在一定的难度,根据《水工建筑物地下开挖工程施工规范》^[4](SL378-2007)的规定,斜井开挖方法可依据表 2 进行选择。

本工程引水隧洞斜井段倾角为 50°,断面属大断面,根据表 2,斜井段采用先开挖导井再扩挖成型的施工方法。目前,导井开挖主要包括有反井钻机法和爬罐法。倾角大于 45°,长度小于 250 m 的斜井导井开挖宜采用反井钻机法,长度大于 250 m 的斜井宜采用爬罐法开挖导井^[5]。本工程斜井长 70.92 m,开挖顺序为先进行斜井上、下弯段开挖,再开挖

直线段。所以确定斜井段采用 LM-200 反井钻机先开挖一导井,然后自上而下进行钻孔爆破扩挖至设计断面^[6]。扩挖时爆破出渣可由导井溜下,在下弯段及时装载运至弃渣场,较为方便,且出渣速度快,导井内可形成自然通风,通风条件好。

表 2 斜井开挖方法

倾角/(°)	开挖方法
倾角 < 6	平洞方法开挖
6 < 倾角 < 30	自上而下全断面开挖
30 < 倾角 < 45	小断面斜井可自上而下开挖,若自下而上开挖,需有扒渣、溜渣措施;大、中型断面斜井,可采用导井扩大开挖。
45 < 倾角 < 75	自下而上先开挖导井,再自上而下扩挖或自下而上全断面开挖成型。
倾角 > 75	竖井方法开挖

2.3 不良地质段施工方案比较

本工程引水隧洞穿越三条断层破碎带和岩溶地质段,在地下洞室的施工中,围岩的稳定性具有非常重要的地位,特别是对于不良地质段,它不仅影响到隧洞施工方案的选择,还决定着隧洞的开挖质量,因此,研究不良地质条件下大断面隧洞开挖具有非常重要的意义。

(1) 断层围岩段隧洞的开挖。隧洞断层带围岩整体性差,岩体破碎,隧洞开挖时易出现坍塌事故,因此断层带围岩段上的大断面隧洞在开挖时应遵循自上而下、“多循环、浅钻孔、弱爆破、强支护”的施工原则,采取合理的开挖程序进行分部、分序开挖,在断层部位进行超前支护、紧急支护准备、围岩注浆加固、开挖后加强支护等措施,以顺利开挖断层破碎带^[5,7]。为了缩小开挖过程中的顶拱跨度,减小应

力变形,限制围岩的松弛,并保证围岩的稳定,本工程断层段隧洞上半洞开挖采用中部预留岩柱法,即先开挖左右侧导洞,再开挖中部预留的岩柱;下半洞采取半断面开挖法。

(2) 岩溶围岩段隧洞的开挖。本工程岩溶主要顺层面及断层等结构面发育于隧洞,岩溶发育现象在引水隧洞工程地质中非常常见,岩溶发育段施工以封、堵、拉为原则,本着“先上部再下部”的处理顺序,对溶洞空腔内部进行回填,对经过回填处理的溶洞采取分段分层台阶法施工^[8-10]。

3 隧洞支护方案选择

支护是指在地下洞室每一循环开挖完成后,采取的支持、加固或使用构件覆盖围岩等保护措施,以保证围岩开挖后的稳定性以及后期施工的安全性。由此可见,支护是引水隧洞施工作业中必不可少的一个环节。

隧洞支护按照对围岩作用效果可分为临时支护和永久支护两类,临时支护包括锚杆支护、挂钢筋网、喷混凝土、超前锚杆、构架支撑、混凝土衬砌及其联合支护措施等。在断层、塌方等不良地质洞段可采取钢支撑、混凝土戴帽、管棚等支护形式^[11]。

本工程Ⅱ类、Ⅲ类围岩约占78%,隧洞开挖断面属于大断面,开挖采取全断面分层钻爆,根据以上特点,本工程平洞段的支护形式主要采取锚杆和喷混凝土,斜井段的支护形式采取锚杆、喷混凝土以及挂钢筋网。在围岩极其破碎、围岩变形强烈、断层、岩溶等复杂特殊地质条件下隧洞支护采取中空自进式锚杆这种新型锚杆支护类型代替普通砂浆锚杆。

4 具体施工方法

本工程具体施工方法主要包括:(1)平洞段开挖方法及爆破设计;(2)斜井段导井开挖施工方法;(3)斜井扩挖施工方法及爆破设计;(4)中空自进式锚杆施工方法。

4.1 平洞段开挖方法及爆破设计

(1) 平洞段上半洞开挖施工方法。本工程平洞段上半洞围岩稳定处,开挖采用全断面开挖、周边光面爆破、楔形掏槽方式、非电毫秒微差起爆网络爆破^[12]。开挖设计每循环进尺为3.0 m,爆破设计共布置炮眼153个,其中:掏槽眼6个,孔深3.6 m,炮孔间距30 cm~90 cm;辅助眼91个,孔深3.3 m,炮孔间距70 cm~90 cm;周边孔56个,孔深3.3 m,炮孔间距40 cm~50 cm^[13-14]。采用这种方式爆破,完

全满足开挖进度计划。

(2) 平洞段下半洞开挖施工方法。引水隧洞下半洞开挖在该标段上部开挖任务全部完成后,由标段分界里程处退行开挖。由于底部开挖后,运输车辆无法在洞内运行,因此,底部开挖必须与隧洞整体衬砌协调进行施工,底部开挖与衬砌施工拉开约30 m距离。Ⅲ类、Ⅳ类围岩底部开挖采用爆破施工,Ⅴ类围岩视地质情况采用机械直接开挖或采用松动爆破开挖,开挖后喷射10 cm混凝土封闭岩面。底部开挖出渣采用挖掘机或装载机装渣,自卸汽车运输。

底部开挖工序应与衬砌施工以及钢筋绑扎安装工序合理安排,尽量减小相互之间的施工干扰,避免造成窝工现象。底部开挖及出渣尽量安排在衬砌混凝土待强时间和钢筋绑扎安装时间内进行。底部开挖时要通过实际施工信息反馈确定炮眼布置和爆破参数,以确保底部爆破施工不影响到整个洞室的稳定性。

4.2 斜井导井开挖施工

斜井开挖采用先开挖导井、后扩挖成型的方式施工,即先自下而上通过采用LM-200反井钻机二次扩孔开挖一直径为2.0 m的导井,再自上而下扩挖至设计断面。

反进钻机开挖导井按下平段开挖→井口基础浇筑→轨道铺设→钻机安装→钻机调试→开孔钻进→导孔钻进→ $\Phi 1.4$ m扩孔钻进→ $\Phi 2.0$ m扩孔钻进,待导井开挖结束后,拆除导井轨道,将导井解体运输至检修厂维修^[15-16]。

4.3 斜井扩挖施工及爆破设计

(1) 扩挖施工方法。由于本工程斜井段岩石较差,以Ⅳ类、Ⅴ类围岩为主,扩挖施工采用YT-28气腿钻人工从上而下钻爆,设计岩石面采用光面爆破,斜井施工分层为2.0 m。为了便于施工出渣,减少人工扒渣量,采用漏斗状分层施工。斜井扩挖施工时,在斜井内采用专门设计的扩挖台车和运输台车辅助人工钻爆作业以及作业人员上、下交通,材料,器具等的运输,同时在斜井下侧井壁设置爬梯作为备用。溜至斜井下部的爆破石渣,采用3 m³侧翻装载机装15 t自卸汽运至渣场。

(2) 扩挖爆破设计。斜井段半径为4.8 m,剩余扩挖断面面积为69.24 m²,斜井段扩挖周边采用光面爆破,扩挖设计每循环进尺为2.0 m。炸药采用2号岩石乳化炸药、雷管采用非电毫秒微差雷管。周边孔采用竹片分节装药,爆破孔采用柱状连续装药,堵塞采用砂和黏土的混合物。共布置5圈炮孔,周

边孔间距为 40 cm ~ 45 cm, 崩落孔间距为 70 cm ~ 90 cm, 共布置炮孔 140 个, 其中周边眼 30 个, 辅助眼 110 个, 平均 2.22 个孔/m², 孔径为 45 mm, 孔深为 2.3 m^[17]。

4.4 中空自进式锚杆施工

由于普通砂浆锚杆具有诸如无法插杆、塌孔、注浆不饱满等缺点, 无法发挥锚杆支护的作用, 也不能有效保证围岩的整体稳定性, 所以在复杂特殊地质条件下使用中空自进式锚杆取代普通砂浆锚杆, 能够提高围岩的承载能力。

中空自进式锚杆采用由内向外的注浆方式, 能够有效解决注浆不饱满的问题, 而且将钻孔与锚杆安装两个作业合二为一, 施工操作更加方便, 加快了支护作业的进度, 保证了不良地质段隧洞开挖的质量, 还可以对围岩施加一定的预应力, 改善围岩的受力条件, 发挥了锚杆支护的作用, 保证了断层处围岩的稳定性。中空自进式锚杆施工工序如图 2 所示^[18]。

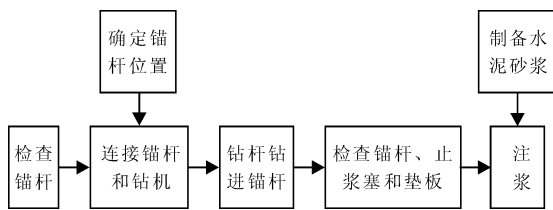


图 2 中空自进式锚杆施工工序流程

5 结 语

随着电站引水隧洞工程应用范围越来越广, 隧洞施工技术在不断提高, 如何选择合理的施工方案关系着整个工程的质量、成本和进度。通过对引水隧洞平洞段和斜井段不同施工方案的比选, 最终采用平洞段分层开挖方法, 斜井段先开挖导井再扩大开挖成型方法施工, 该方法具有施工效率高、施工成本低、施工质量好、施工安全性能高等优点, 是一种安全实用的引水隧洞施工技术, 为今后类似工程的施工可提供一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 刘冬. 钻爆法与 TBM 隧洞开挖[J]. 工程科技, 2014(4):170.
- [2] 张景春. 钻爆法与 TBM 盾构机施工技术特点比较[J]. 交通世界·运输车辆, 2015(18):150-151.
- [3] 高林涵, 梁元林. 南水北调中线釜山隧洞工程快速施工控制技术[J]. 水利与建筑工程学报, 2006, 4(4):86-88.
- [4] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物地下开挖工程施工规范: SL378-2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [5] 卢平, 朱记伟, 刘建林. 复杂特殊地质特大断面导流隧洞施工技术[J]. 中国农村水利水电, 2016(4):130-132.
- [6] 叶华新. 引水隧洞斜井全断面扩挖施工技术[J]. 云南水力发电, 2016, 32(4):73-76.
- [7] 黄加, 罗龙, 沈阳. 南总干渠灌溉隧洞开挖与支护[J]. 水力发电, 2014, 40(1):72-75.
- [8] 马文波, 宋威. 锦屏二级水电站引水隧洞岩溶段处理措施及施工[J]. 人民长江, 2015, 46(20):63-66.
- [9] 孙金库. 锦屏二级水电站 3# 引水隧洞溶洞处理施工方案[J]. 水利水电技术, 2013, 44(5):49-51.
- [10] 赵殿封. 六景郁江隧洞施工技术[J]. 水利水电技术, 2013, 44(3):39-43.
- [11] 唐芬芬, 刘攀. 梨园水电站导流洞不良地质洞段支护处理措施[J]. 水利水电技术, 2012, 43(5):6-8.
- [12] 李治中, 于永叶. 古城水电站引水隧洞开挖与支护施工[J]. 水电与新能源, 2016(2):34-38.
- [13] 黄娣媛, 陈东. 隧洞三臂凿岩台车开挖爆破设计[J]. 水利水电技术, 2012, 43(5):9-11.
- [14] 陈振军. 某水电站引水发电洞开挖及支护方法讨论[J]. 新疆水利, 2013(2):32-34.
- [15] 刘全鹏, 赵宁, 梁晓军. 坪头水电站 1# 竖井的开挖与支护[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1):25-30.
- [16] 叶华新. 引水隧洞斜井全断面扩挖施工技术[J]. 云南水力发电, 2016, 32(4):73-76.
- [17] 宋旭亮, 徐矫. 新奥法在超深竖井施工中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(1):148-150.
- [18] 朱建伟, 赵延涛. 空自进式锚杆施工计划及质量控制[J]. 科技创新与应用, 2014(31):215.