

DOI: 10.7672/sjgs2022050126

TBM与钻爆法在并行长大引水隧洞施工中的适用性研究*

徐顺通^{1,2}, 杨靖¹, 余志超³, 杨兴国^{1,2}, 陶剑¹, 李海波^{1,2}

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

[摘要] 在某水电站并行长大引水隧洞中,通过对隧洞规模、沿线工程地质条件、施工工期及开挖渣料再利用等进行综合对比分析,研究钻爆法与TBM施工方法的适用性。TBM施工方法在难以增加施工支洞的长隧洞工程中具有较明显优势,而钻爆法在大断面、复杂地质条件隧洞开挖施工中的适用性更强。通过布置合适的施工支洞,可有效增加该引水隧洞施工断面,从而加快钻爆法施工进度,而TBM施工出渣料粒径过小,难以满足洞渣作为骨料再利用的要求,且引水隧洞开挖洞径大,所在区域地质条件复杂,缺少相关工程参考经验,一旦突发施工事故,难以快速解决,工期不确定性增加,因此推荐采用钻爆法作为该水电站并行长大引水隧洞的主要开挖方式。

[关键词] 地下工程;引水隧洞;钻爆法;TBM;适用性

[中图分类号] TU94⁺1

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2022)05-0126-04

Applicability Study on TBM and Drilling-blasting Method for Construction of Parallel Long and Large Diversion Tunnels

XU Shuntong^{1,2}, YANG Jing¹, YU Zhichao³, YANG Xingguo^{1,2}, TAO Jian¹, LI Haibo^{1,2}

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu,

Sichuan 610065, China; 3. PowerChina Guiyang Engineering Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: Taking the parallel long diversion tunnel of a hydropower station as an example, the applicability, of drilling and blasting method and TBM construction method, is studied by comprehensive comparative analysis of tunnel size, engineering geological conditions along the line, construction period and excavation slag reuse, etc. TBM construction method has obvious advantages in the construction of long tunnel projects, which are difficult to increase the construction adits; while drilling and blasting method has stronger applicability in the construction of tunnel excavation projects with large section and complex geological conditions. By arranging appropriate construction adits, the construction section of the diversion tunnel can be effectively increased to speed up the construction progress with drilling and blasting method. However, the particle size of the slag produced by TBM construction is too small to meet the requirements of the reuse of the slag as aggregate. In addition, due to the large diameter of the diversion tunnel excavation, complex regional geological conditions, and the lack of relevant engineering reference experience, once a construction accident occurs, it is difficult to quickly solve, thus increasing the uncertainty of the construction period. Therefore, drilling and blasting method is recommended as the main construction excavation method of the parallel large diversion tunnel of the hydropower station.

Keywords: underground engineering; diversion tunnel; drilling-blasting method; TBM; applicability

* 国家自然科学基金青年项目(11902210);四川大学研究生科研创新基金资助(2018YJSY076)

[作者简介] 徐顺通, 硕士研究生, E-mail: 806562152@qq.com

[收稿日期] 2021-12-02

0 引言

21世纪被称为地下空间的世纪^[1],地下工程有广阔发展前景,随着一带一路、南水北调、川藏铁

路、雅江下游水电开发等国家重大战略工程相继实施,特大地下厂房洞室群、长大引水隧洞、超长铁路隧洞等成为关键性工程^[2]。除此之外,在市政、水利、道路等建设过程中,也有大量地下工程在筹建或建设中。

钻爆法和 TBM 是开挖隧洞的主要方式^[3]。钻爆法优点如下^[4-5]:对围岩适应性强,遇到突发事故或复杂地质情况时较易处理,可开挖任意形状断面,工效高、成本低。尽管近年来钻爆法在施工机械生产水平与施工技术方面均有很大提高与改进,但仍存在单工作面平均掘进速度慢、施工工序繁多、交叉施工、施工组织管理难度大及超欠挖控制困难等问题^[6]。TBM 具有以下优势^[7-8]:隧洞过流断面水力学特性好;施工速度快、对围岩扰动小、超欠挖可控制在 2cm 内;施工环境比钻爆法得到较大改善。然而 TBM 适用性窄,在岩爆、涌水、岩溶发育段、软弱围岩大变形段均不适宜采用 TBM 施工,且施工成本高,依赖进口,较难解决设备故障^[9]。

某引水隧洞是该水电站建设的控制性工程,直接关系到电站的发电工期甚至工程成败,选择合适的施工方式非常关键。本文通过对比分析 TBM 与传统钻爆法应用于该水电站引水隧洞的优劣特性,从而选择适用于该水电站引水隧洞的施工方法。

1 工程概况

某水电站位于西藏自治区与四川省交界的金沙江上游河段,左岸属四川省甘孜州巴塘县,右岸属西藏昌都地区芒康县。如图 1 所示,水电站坝址位于苏洼龙至麦曲河口河段上,坝址控制流域面积 184 436km²,多年平均流量为 952m³/s。电站采用混合式开发,正常蓄水位 2 387.000m,相应库容为 0.167 亿 m³,调节库容为 0.081 亿 m³,电站装机容量为 826MW(其中引水式电站装机 740MW,河床式电站装机 86MW),年发电量(联合运行)为 44.86 亿 kW·h(其中引水式电站装机 41.7 亿 kW·h,河床式电站 3.16kW·h)。



图 1 水电站王大龙坝址

洞轴线间距约 40m,单条引水隧洞长约 11km,加上施工支洞、横通洞,总隧洞长度>26km。引水隧洞设计为圆形断面,开挖洞径 14.2m,衬砌后洞径 13m,在国内属于极大洞径开挖。

2 TBM 与钻爆法适用性分析

2.1 施工规模与地质条件

如图 2 所示,引水隧洞进口边坡以横向坡为主,边坡整体较稳定,但卸荷较强烈,岩体较破碎,卸荷带内分布危岩体及众多小危石,边坡局部稳定性较差。隧洞中后段以板岩、片岩为主,呈薄层至中厚层状,片理发育,岩体内部裂隙、小断层发育,且大部分洞段岩层走向与洞轴线近于平行,隧洞围岩整体稳定性较差。因此,存在局部软岩变形和塌方等风险,如果采用 TBM 施工,易造成 TBM 卡机被困的情况。水电站引水隧洞直径为 13m,大于国内最大引水隧洞直径,即 11.8~12.6m,属于国内 TBM 施工案例中极大洞径施工项目。参照锦屏 II 级引水隧洞施工经验可知,高地应力超大断面隧洞施工过程极有可能出现大规模岩爆、崩塌等现象,且很难实施加强支护与高效清理等措施,严重制约 TBM 施工进度,甚至损坏设备^[10]。

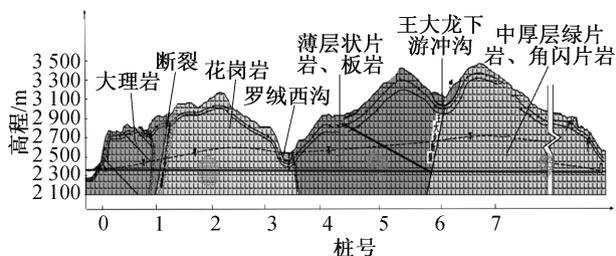


图 2 并行长大引水隧洞纵截面地质

隧洞埋深较大或穿越断层时,开挖过程中,极有可能遇到突水、涌水问题,从而影响工期进展,甚至导致停工。锦屏 II 级引水隧洞开挖过程中遇到大规模突水、涌水问题,出水流量大、随机性强,其中 2 号引水隧洞 K5+800 段汛期最大涌水量达 4.8m³/s,影响施工安全和进度。

隧洞沿线穿越的苏洼龙-王大龙-曾大同断层、王大龙断层等区域性断层附近岩体较破碎、透水性较强,并可能连通河水和冲沟等地表水,存在较大涌水可能。断层带作为贮水构造时,局部可能形成封闭囊状水体或串珠状水体,当隧洞揭穿断层时,存在短时间突水的可能性。另外,罗绒西沟跨沟洞段的冲沟地表水沿裂隙或小断层入渗,存在较大涌水的可能性。因此,若采用 TBM 施工,存在突水、涌水现象,甚至 TBM 被淹的风险。

从隧洞开挖规模和地质条件方面考虑,TBM 更

引水发电系统采用两洞两机布置,2 条引水隧

适用于隧洞开挖洞径较小(一般 $<10\text{m}$)、地质较均匀、支护量小或支护速度快的工程,在这种条件下,能明显发挥TBM开挖速度快的优势。

2.2 施工工期

该工程施工工期是主要制约因素,因此加快施工进度是重点考虑的问题之一。如图3所示,由该水电站可研阶段勘测设计资料可知,若采用钻爆法施工,可通过开挖4条施工支洞增加施工断面,实现长洞短打,加快施工进度。如图4所示,可在并行隧洞间设置若干横通洞,将2条独立的并行隧洞构成施工系统,通过横通洞将该施工段分成更小的单元,几个单元同时施工且互不干扰,在有序的施工组织下,可增加施工工作面,缩短施工工期。然而,若采用TBM施工,TBM机械进场开挖准备时间较长,且施工速度受地质条件影响较大,施工工期不确定性影响因素多。



图3 支洞布置

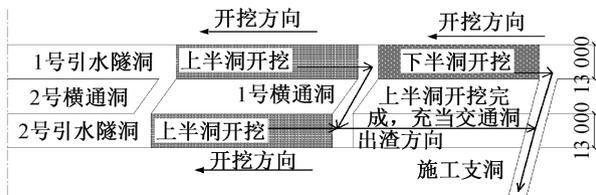


图4 施工系统布置

由《金沙江昌波水电站预可行性研究报告》^[11]可知,采用分层钻爆法开挖工期为44个月,开挖衬砌总工期为62个月。采用单台设备钻爆的开挖工期为45个月,开挖衬砌总工期约64个月。虽然TBM掘进机单工作面掘进速度快,但钻爆法可多断面同时作业,因此TBM在该隧洞施工工期上不具有明显优势。从施工进度方面考虑,TBM施工方法在难以增加施工支洞的长隧洞施工中具有较明显优势。如全程深埋长隧洞工程中,难以增加施工支洞或增加施工支洞会大规模增加成本,采用TBM施工可有效加快施工进度和控制成本。

2.3 出渣料再利用

隧洞开挖形成的洞渣料是良好的建筑材料,可用于制作混凝土骨料、垫层料等。该水电站主体建筑及导流工程涉及混凝土总量(含喷射混凝土)约189.07万 m^3 ,共需要成品混凝土骨料约415.95万t,另外,大

坝尚需基础换填料29.53万 m^3 ,围堰垫层料及反滤料尚需8.35万 m^3 ,尽可能利用隧洞开挖形成的洞渣料,可极大降低工程建设成本。因此,隧洞开挖形成的洞渣料粒径和品质是施工方式选取的最主要考虑因素之一。钻爆法施工产生的洞渣料已被证明能用于制作混凝土骨料、反滤料等建筑材料;但采用TBM法开挖隧洞,出渣料块体越小越适应出渣设备,要将TBM开采的出渣料用作混凝土骨料,需调整TBM刀具,但增加工程成本。

此外,众多实际工程案例^[12-13]表明,相比钻爆法,TBM出渣料的粗粒径偏小,且粒型多呈扁平状,成品骨料质量较差,人工砂石粉含量超标,毛料含水率过大,如果用于制作混凝土骨料,会增加混凝土水泥用量,甚至骨料难以满足规范要求。

因此,从出渣料再利用角度考虑,采用TBM法施工,产生的洞渣料块度偏小,人工砂石粉含量超标,加工后的成品骨料质量不如钻爆法,不满足出渣骨料再利用要求。

2.4 施工成本

水利工程引水隧洞施工成本主要包括开挖、支护衬砌、临时工程。从谢燕生等^[14-15]对钻爆法与TBM造价比选研究结果来看,TBM开挖造价远大于钻爆法,但由于TBM对围岩扰动小,在Ⅲ类围岩下可减少支护与衬砌厚度,使TBM综合造价在Ⅲ类围岩中造价比钻爆法低。而Ⅳ,Ⅴ类围岩自稳能力较差,需加强支护和衬砌厚度,因而TBM法在Ⅳ,Ⅴ类围岩中施工造价的优势不明显。此工程引水隧洞长约11.79km,其中Ⅲ类围岩为40%,Ⅳ,Ⅴ类围岩占60%。由《金沙江昌波水电站预可行性研究报告》^[11]可知,TBM在施工综合造价上相对于钻爆法没有明显优势,TBM设备投资大,还需1.5km长掘进机施工支洞、拆卸洞、洞外组装平台等临时工程。综合来看,TBM法在控制施工成本方面优势不明显。

该水电站工程设计所需混凝土骨料、垫层料等累计达232.9万 m^3 。采用钻爆法开挖的出渣料可用作混凝土骨料,预估引水隧洞开挖有用料约239.43万 m^3 ,基本满足骨料用料所需。引水隧洞开挖洞渣料的再利用,一定程度上可节约工程投资,且与建设生态、绿色工程相适应。该工程位于金沙江上游,生态环境较脆弱,如果开挖弃渣处理不当,将影响自然环境与生态。因此,采用钻爆法开挖形成的洞渣料可实现再利用,降低工程建设成本,更符合绿色工程理念。

3 结语

钻爆法和 TBM 是开挖隧洞的主要方式,各自优缺点如下:①在开挖洞径较小、地质较均匀、支护量小或支护速度快的工程中,更能发挥 TBM 开挖速度快的优势,而钻爆法在大断面、复杂地质条件开挖工程中的适用性更强;②TBM 法在难以增加施工支洞的长隧洞工程施工中具有较明显优势;③采用 TBM 法施工产生的洞渣料块度偏小、人工砂石粉含量超标,加工后的成品骨料质量不如钻爆法,而且增加工程成本。因此,对需要洞渣作为骨料再利用的工程,较适合选用钻爆法。

在并行长大引水隧洞的复杂地质情况中,若采用 TBM 施工方法,缺少相关工程参考经验,一旦突发施工事故,难以快速解决,且增加工期不确定性,而钻爆法施工工艺成熟,工期保证性更高。同时,该引水隧洞通过布置合适的施工支洞,增加施工断面,可有效加快施工进度,充分展现钻爆法长洞短打的优势。此外,若采用 TBM 开挖,出渣料粒径过小,人工砂石粉含量超标,较难满足加工混凝土骨料的要求。因此,经过综合分析,推荐采用钻爆法作为该水电站并行长大引水隧洞的主要开挖方式。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 21 世纪我国隧道及地下空间发展的探讨[J]. 铁道科学与工程学报,2004(1):7-9.
- [2] 轩辕啸雯. 21 世纪初中国地下工程概况[J]. 施工技术,2002(1):38-51.

- [3] 李庆中,曹廷立,张继勇. 南水北调西线工程长隧洞施工方法研究[J]. 水利水电科技进展,2001(4):50-52.
- [4] 王宗禹,王建功,渠俐. 钻爆法掘进与掘进机掘进施工方式的优化探讨[J]. 煤炭科学,2008(9):59-61.
- [5] 吴均. 新疆某水电站长隧洞施工方法比较[J]. 水科学与工程学报,2015(2):65-69.
- [6] 陈兵. 小断面隧洞机械开挖与钻爆法开挖对比分析[J]. 中国高新技术企业,2017(9):164-165.
- [7] 翟梁皓. TBM 在某引水隧道施工中应用研究[D]. 长春:长春工程学院,2017.
- [8] 张谷鹏.TBM 施工技术及其工程应用分析[J]. 河南水利与南水北调,2015(10):18-19.
- [9] 尚彦军,杨志法,曾庆利,等. TBM 施工遇险工程地质问题分析和失误的反思[J]. 岩石力学与工程学报,2007(12):2404-2411.
- [10] YANG J, YANG X G, ZHOU J W, et al. Comparative study of the excavation damage and rockburst of the deeply buried Jinping II diversion tunnels using a TBM and the drilling-blasting method [J]. Advances in civil engineering,2020(2):1-14.
- [11] 中国电建集团贵阳勘测设计研究院. 金沙江昌波水电站预可行性研究报告[R]. 2020.
- [12] 赵志芳,吴晓东. TBM 开挖料用作混凝土骨料的试验研究及应用[J]. 云南水力发电,2013,29(3):9-11.
- [13] 唐毅,郑崇飞. 以 TBM 掘进料为料源加工人工骨料的技术研究[J]. 四川水力发电,2010,29(S2):196-199.
- [14] 谢燕升. 水利工程 TBM、钻爆隧洞方案的造价编制和比选[J]. 广东水利水电,2018(8):79-82.
- [15] 邵伟. 钻爆隧洞方案和水利工程 TBM 的造价比选研究[J]. 黑龙江水利科技,2019,47(11):47-50.

(上接第 125 页)

约 70 000kPa。最大弯矩组合在 2 个拱腰边墙处。施工时注意边墙拱架接腿和横撑连接位置可靠连接,防止节点失稳破坏。

5 结语

1)从小断面匝道开挖进入分岔隧道大跨段需考虑导洞长期安全性,根据周边围岩情况,考虑整体大断面隧道稳定性,综合确定反挖调头施工位置。

2)反挖施工大断面软弱围岩下的分岔隧道大跨段施工,可采用非对称双侧壁导坑工法,支护参数和分布形式需根据地层结构法有限元计算确定。

3)采用数值有限元分析得出反挖大跨段设计支护和工法实施中的围岩变形和应力、初支变形和内力均在安全允许范围内。本文通过计算给出临时支护的计算内力和变形,建议加固薄弱围岩和支护。

本项目在施工中获得成功,临时支护稳定直至二衬浇筑完成,变形和支护内力均满足设计要求,

本文限于篇幅没有做深入对比分析,后续将根据监测数据做进一步研究并完善形成系统工法。

参考文献:

- [1] 丁文其,郑康成,金威.某深埋分岔隧道空间荷载结构计算方法[J].中国公路学报,2016,29(2):90-97.
- [2] 谈识,丁文其,吴官胜,等.城市分岔隧道无中导洞施工工法分析研究[J].现代隧道技术,2018,55(S2):15-23.
- [3] 李宜高.八字岭分岔隧道开挖方法[J].公路交通技术,2006,8(4):136-140.
- [4] 吴张中,徐光黎,吴立,等.超大断面隧道侧向扩挖施工围岩力学特征研究[J].岩土工程学报,2009,31(2):172-177.
- [5] 胡云鹏.大跨度小净距分岔隧道双向施工关键技术研究[J].铁道建筑技术,2018(12):77-80.
- [6] 刘鹏.胶州湾隧道浅埋分岔段的设计及施工关键技术[J].隧道建设,2010,33(6):474-480.
- [7] 李勇,李晓春,胡学兵.地下互通式立交隧道设计与施工[J].公路交通技术,2007(S1):100-103,110.
- [8] 中国交通建设股份有限公司,中交第四公路工程局有限公司.公路工程施工安全技术规范:JTG F90—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.