

# 悬臂式掘进机在水工隧洞中的应用研究

孟尧

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i5.6361

**[摘要]** 随着社会经济的不断进步,使得各行各业得到迅速发展,其中包括地铁建设、水利建设、水力发电建设、交通建设等工程行业,同时也意味着地下隧洞工程不断增加。并且确保施工人员安全、提高工程建设质量、缩短工程建设周期、降低工程投资、保护环境成为各参建方的共同目标。而且相关实践表明,隧洞采用掘进机开挖比钻爆法开挖效率有所提高、施工质量较好、超欠挖小、安全有保障、环境污染小,在工程运用中取得了较好的经济效益和社会效益。本文通过有限元模拟与工程实际相结合对悬臂式掘进技术的发展和在水工隧洞中的运用展开论述。旨在为类似工程设计、施工提供参考。

**[关键词]** 悬臂式掘进机; 水工隧洞; 设计施工; 模拟研究

**中图分类号:** TV672+.1 **文献标识码:** A

## Research on the Application of Suspension Tunnel Boring Machine in Water Conservancy Tunnels

Yao Meng

Xinjiang Water Resources and hydropower Survey Design and Research Institute limited liability company

**[Abstract]** In order to meet the growing needs, all walks of life have developed rapidly, including subway construction, water conservancy construction, hydropower construction, transportation construction and other engineering industries, which also means that underground tunnel projects continue to increase. To ensure the safety of construction personnel, improve the quality of construction, shorten the construction period, reduce the project investment, and protect the environment have become the common goals of all participants. Compared with drilling and blasting method, tunnel excavation with TBM has higher efficiency, better construction quality, less overcut and undercut, safety and environmental pollution, and has obtained better economic and social benefits in engineering application. This paper discusses the development of cantilever tunneling technology and its application in hydraulic tunnel through the combination of finite element simulation and engineering practice. The purpose is to provide reference for similar engineering design and construction.

**[Key words]** Cantilever boring machine; Hydraulic tunnel; Design and construction; Simulation study

### 前言

水利工程在全国各地发挥着重要作用是国民经济的基础设施和基础产业,影响着经济的生存发展以及农业、气候、发电和防洪问题。隧洞开挖又是水利工程的重点难题,为确保隧洞开挖安全、提高工程建设质量、缩短工程建设周期、降低工程投资、环境保护,是国民经济快速发展的重要条件,作为提高效率的保证,发展先进掘进技术有着重要意义,在工程建设中发挥重要的作用<sup>[1]</sup>。

目前,传统的钻爆法对地面建筑物震动影响较大存在局限性,非爆破开挖技术在中国地下工程实践中得到了长足发展。悬臂掘进机在我国公路、铁路、城市交通和长引水水利水电项目中成功地解决了小断面超欠挖控制难度大、施工成本高、施工进度缓慢,环境污染等问题<sup>[2]</sup>。悬臂式掘进机施工目前适用于岩

石强度以IV类和V类为主的地下隧洞、隧洞沿线一定范围内有重要建筑或居民房屋时不宜使用钻爆法施工的,还有因为隧洞全线长度太长采用钻爆法施工的粉尘不能有效的排出隧洞的开挖<sup>[3]</sup>。目前的悬臂式掘进机是依靠自身重量与底板产生的摩擦力提供推力,由于刀头对岩石的切割挤压力是有上限的,因此悬臂式掘进机不适用岩石较为完整、硬度较大的隧洞开挖<sup>[4]</sup>。悬臂式掘进机施工与钻爆法施工相比较,悬臂式掘进机施工存在诸多优点:首先是减少施工操作人员,从而有效的减少工作强度和降低人员的安全风险;其次是施工中的超欠挖量较小,从工程案例统计来看,采用钻爆法施工时超挖量通常在20cm之上,而采用悬臂式掘进机施工超挖量减少到5cm以下,因此降低了由超挖产生的支护混凝土工程量,从而有效的降低了

工程建设投资<sup>[5]</sup>。悬臂式掘进机的动力装置为电力驱动,在施工中不会产生爆破粉尘,也不会产生有毒有害气体,因此隧洞中的施工作业环境比较好<sup>[6]</sup>。

## 1 工程概况

新疆某III等中型水库于2024年开始兴建,位于新疆和田地区属暖温带大陆性干旱气候,四季分明,降水稀少,日照丰富,纬度地带性气候变化明显。根据水文监测气象站多年收集的气象数据显示:多年的平均温度为4.5℃,极端情况下的最高温度为36.8℃,极端情况下的最低温度为-22.3℃;多年的平均降水量为190mm;多年的平均年蒸发量为1267mm;多年的平均风速为1.7m/s,最大风速18m/s;多年平均气压861.7mb;最大冻土深度77cm,最大积雪厚度11cm。坝址区以泥质砂岩为主,夹少量砂质泥岩:泥质砂岩单轴饱和抗压强度平均值7.7MPa,为软岩,砂质泥岩单轴饱和抗压强度平均值4.8MPa,为极软岩。水库由挡水建筑物、泄水建筑物、引水建筑物及电站厂房组成,主要水工建筑物包括拦河坝、溢洪道、泄洪冲沙洞、发电洞、发电站厂房。

## 2 枢纽布置方案比选设计

### 2.1 工程设计要求

工程设计必须满足相关规范强条,根据《碾压式土石坝设计规范》<sup>[7]</sup>规定,泄水和引水建筑物布置应考虑下列要求:

(1)泄水建筑物要满足规范中的使用条件和应用要求,建筑物调度运行要可靠灵活,建筑物的泄洪能力要满足规范要求的宣泄设计流量、校核流量,并且满足冲沙、排冰、排污的要求。(2)泄水建筑物应当根据地形地貌、地质、泄洪规模、水头等因素综合比较后确定布置和型式。(3)河流泥沙含量大的应当设置挡沙或排沙建筑物,并且在进水口位置设置防淤堵措施。(4)引、泄水建筑物进、出口周围的坝体边坡,要设置安全可靠的防护。出口位置应当采用合适的消能方式,使得消能后的水流远离坝坡脚。依据以上规范内容,该工程的泄水建筑物最少要有一条开敞式溢洪道或开敞式进口泄洪洞和一条排沙洞。水库承担灌溉、防洪,兼顾发电等综合利用任务,为在确保工程安全的前提下满足功能要求,便于运行和调度管理,并兼顾施工期导流、分期蓄水、事故放空等需要,泄水建筑物宜分层布置。

### 2.2 水库建设的必要性

(1)灌溉任务:该水库工程承担下游灌区灌溉任务,下游灌溉用水量对水库正常运行无要求。但是下游灌溉总用水量对水库的正常运行有要求。该工程计划7月中旬开始蓄水并蓄至汛限水位,汛期在8月末结束,汛期结束后开始蓄冬闲水一直蓄至正常蓄水位为止,当来年3月份河道来水量不足时,由水库向下游供水,以此满足下游春灌需水量。(2)防洪任务:水库承担下游地区的防洪安全任务,6月初~8月底时段为汛期,水库的蓄水水位不超过汛限制水位,提前预留防洪库容,保证下游汛期的安全。汛期,当水库水位超过汛限水位、低于防洪高水位时,启动泄洪冲沙兼导流洞控制下泄流量不超过下游河道安全泄量,在水库水位达到或即将超过防洪高水位时,表孔溢洪道全开,以泄洪系统的泄流能力下泄,直至水库水位回落至防洪汛限水位。

(3)发电供电任务:该工程不设发电库容,电力系统对水库电站及水库的调度运行要求应服从供水任务,电站利用灌溉用水进行发电。

### 2.3 枢纽布置原则

根据《水工隧洞设计规范》<sup>[8]</sup>综合利用要求及工程特点确定引、泄水建筑物布置的原则如下:

(1)结合地形条件,坝址河段左右岸均较为顺直,因而引、泄水建筑物可布置于左右岸。(2)根据厂址比选结论,厂房布置于坝后,为减少泥沙影响,实现灌溉发电洞“门前清”,具有冲沙功能的泄水隧洞须紧临发电洞进口布置。(3)泄水建筑物存在高流速问题,在布置时应以直线为宜,特殊地形地质条件下可以考虑有压洞段设置平面转弯段,同时考虑出口消能对岸坡的影响。(4)深孔的功能需满足水库排沙要求,同时作为最下层的泄水通道,还需考虑施工期导流、度汛、初期蓄水要求,同时满足水库放空的需要。(5)深孔作为水库的最低泄水通道,需满足水库死水位排沙、冲沙运行要求。考虑深孔的排沙效果,深孔布置应尽可能顺直,并尽可能远离电站,以避免深孔排沙造成电站尾水泥沙淤积问题。

依据上述原则及地形要求,从泄洪规模、运行方式安全、安全检修等方面综合比较,初步拟定泄水建筑物通过表层、深层布置泄洪。

### 2.4 枢纽布置方案比选

根据上述原则拟定枢纽布置方案如下:

方案一:表孔溢洪道布置在河道右岸的坝肩处,泄洪冲沙洞、发电洞布置在河道的左岸,靠近坝轴线,引渠明挖,泄洪冲沙兼导流洞为无压洞,进口布置在发电洞进口上游侧。

方案二:表孔溢洪洞、泄洪冲沙兼导流洞及灌溉发电洞均布置在左岸,从临河侧向左岸山体依次布置灌溉发电洞、泄洪冲沙兼导流洞、表孔溢洪洞。

方案三:表孔溢洪道布置在河道左岸的坝肩处,泄洪冲沙洞、发电洞布置在河道的右岸,靠近坝轴线,泄洪冲沙兼导流洞进口布置在发电洞进口上游侧。

通过综合分析,工程在本阶段采用推荐方案一。

## 3 泄洪冲沙兼导流洞有限元模拟

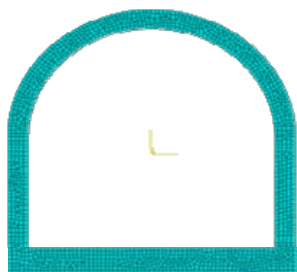
隧洞为城门洞型3.0m×4.5m(宽×高)衬厚0.5m,洞身临时支护采用锚杆挂网喷护,沿洞长均采用钢拱架支护。泄洪冲沙兼导流洞以泥质砂岩为主,夹少量砂质泥岩都为极软岩。因此隧洞施工方案选择为悬臂式掘进机开挖。为了验证施工过程的安全性,结合有限元软件进行模拟分析隧洞衬砌的受力变形情况。

### 3.1 有限元计算模型及参数

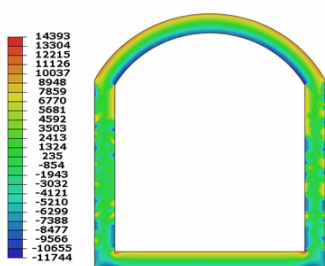
隧洞衬砌有两层,第一层是初期支护(钢拱架衬砌)、第二层是二次衬砌(钢筋混凝土衬砌)。在实际开挖过程中采用边开挖边衬砌。本节通过有限元软件模拟隧洞开挖后不加钢拱架泥岩的受力变形情况,再对比模拟施加钢拱架衬砌后泥岩的受力变形情况。隧洞围岩基本资料如表1所示,模型如图1所示,现场开挖如图2所示。

表1 围岩相关参数

材料	密度 kg·m <sup>-3</sup>	弹性模量 GPa	泊松比	摩擦角 (°)	粘聚力 MPa
IV类泥岩	2250	0.3	0.26	31	0.3



衬砌模型网格



应力计算云图单位: pa

图1 有限元模拟图



掌子面开挖



边开挖边支护

图2 悬臂掘进机现场开挖图

### 3.2 模拟结果分析

隧洞在施工开挖过程中,隧洞周围岩体会出现应力集中现象。由模拟结果可知隧洞衬砌最大应力出现在隧洞顶拱及边墙底部,顶拱外侧受拉力内侧受压力,底板底层受压力,底板面层受拉力,最大拉应力14.39kpa,最大压应力11.74kpa。模拟得出的应力完全在钢筋网及钢拱架的承受范围内。悬臂掘进机在开挖过程中按照要求边开挖边支护,能够保证施工安全。

### 4 结语

本工程泄洪冲沙兼导流洞已安全贯通,全程未发生安全事故。通过边开挖边支护的方法可以满足隧洞安全施工。采用悬臂掘进机开挖每天的平均进尺为10m,相较于传统的爆破施工效率明显提高,由现场开挖断面看出掘进机开挖面比较规整,基本与设计尺寸一致,不存在欠挖情况,且超挖量较小。隧洞内的扬尘通过通风管道排出,隧洞内的扬尘较小,施工人员的身体健康得以保障。

本文通过有限元模拟与工程实际相结合对悬臂式掘进技术的发展和在水工隧洞中的运用展开研究,发现在合适的地质条件时,采用悬臂掘进机开挖会取得较好的经济效益和社会效益。研究结果可为类似工程设计、施工提供参考。

### 【参考文献】

[1]刘浩,卢丹.荆门市用水统计调查直报管理系统的困境和对策[J].水利技术监督,2023(6):120-122.  
 [2]詹建昌.超长隧洞施工环境监测[J].云南水力发电,2022,38(07):248-250.  
 [3]王静斋,李杰.亭子口灌区一期工程隧洞悬臂掘进机选型与应用[J].水利水电工程设计,2024,43(1):65-68.  
 [4]杨辉斌.悬臂掘进机部分断面掘进法在隧洞开挖施工中的应用[J].水利科技,2021(3):40-41,65.  
 [5]牛蕴琳,杜秀惠.悬臂掘进机在LD电站交通洞中的施工效率及费用分析[J].水利水电工程设计,2022,41(3):9-10,17.  
 [6]周新顺.悬臂掘进机在水利水电隧洞工程中的应用[J].四川水力发电,2013(10):49-51.  
 [7]SL274-2020,碾压式土石坝设计规范[S].  
 [8]SL279-2016,水工隧洞设计规范[S].

### 作者简介:

孟尧(1998-),男,新疆伊犁人,硕士,工程师,主要从事水利工程设计相关工作。