

# 玉瓦水电站引水隧洞衬砌结构计算优化设计

祖 威

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川 成都 610072)

**摘 要:**玉瓦水电站为成都院 EPC 总承包项目之一,可研阶段概算投资水平总体偏高,项目经过多次技术方案优化后,顺利实现了开工建设。技施阶段,为满足控制投资要求,结合控制地下工程不确定性风险分析,对长引水隧洞开挖和衬砌支护参数进行优化设计是水电站精细化设计方法之一。笔者利用结构力学法和有限单元法对引水隧洞衬砌结构进行配筋计算,通过对比分析,达到优化钢筋工程量,降低工程投资目的。此文总结了引水隧洞衬砌结构优化的部分经验,可对其他类似工程起到设计借鉴参考目的。

**关键词:**引水隧洞;有限单元法;衬砌结构计算;优化工程量

**中图分类号:**TV222;TV672+.1

**文献标志码:**B

**文章编号:**1001-2184(2023)06-0112-04

## Optimization Design of Concrete Lining Structural Calculation for Headrace Tunnel of Yuwa Hydropower Project

ZU Wei

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072)

**Abstract:** Yuwa Hydropower Station is one of the projects adopting the EPC contract mode type in PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited. The project estimated investment of Yuwa Hydropower Project is much higher in the feasibility study stage. After optimization of technical proposals was done for many times, the project was successfully in construction on time. In order to control the project cost, combined with the risk analysis of uncertainty in underground engineering, the optimization of design parameters of excavation and concrete lining for long headrace tunnel is one of the fine design methods of hydropower station. This paper introduces the reinforcement calculation of concrete lining design for headrace tunnel with the structural mechanics and finite element method. Though comparative analysis, optimizing reinforcement quantity and reducing project investment are achieved. This paper summarizes some experience of optimizing the lining structure in headrace tunnel, which can be used as reference for other similar projects.

**Key words:** Headrace tunnel; Finite element method; Structural calculation of concrete lining; Optimizing reinforcement quantity

## 0 引 言

玉瓦水电站是白水江干流水电开发“一库七级”方案中的第 2 级电站,上游为梯级龙头电站—多诺水电站,下游为陵江水电站,开发任务为单一发电功能的引水式电站。电站已于 2017 年 4 月并网发电,电站设计引用流量为  $41.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,额定水头 135 m,装机容量 49 MW。根据《防洪标准》GB 50201—2014 和《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》DL 5180—2003 规范规定,玉瓦水电站工程规模为小(1)型,工程等别为 IV 等,引水隧洞为 4 级建筑物。

引水隧洞布置于黑河右岸,从进水口至调压室全长 14.289 km,进水口底板高程 2 007.50 m,至调压室处引水隧洞底板高程降为 1 965.00 m,根据绕纳沟地形、地质条件,在绕纳沟段设置管桥段,管桥段底板高程 1 991.85 m。

引水隧洞区地层岩性主要为薄层状灰岩夹砂岩、板岩、千枚岩,以中硬岩为主,基本具备成洞条件。隧洞垂直埋深一般 300~400 m,最大达 1 000 m。技施阶段开挖后围岩揭示比例为:Ⅲ类围岩 77.5%,Ⅳ类围岩 21.1%,Ⅴ类围岩 1.4%。

根据现场地形地质条件,引水隧洞衬砌支护形式分为三种,Ⅲ类围岩洞段采用喷锚支护,Ⅳ、

收稿日期:2023-10-08

V类围岩洞段采用混凝土衬砌,管桥段采用钢板衬砌。引水隧洞开挖断面和过水断面均采用城门洞型开挖断面,过水断面为4.0 m×4.8 m(宽×高),相应流速2.35 m/s。引水隧洞III类围岩边顶拱采用喷锚支护,底板素混凝土作为永久衬砌,底板混凝土厚20 cm,IV、V类过水断面围岩采用钢筋混凝土衬砌,衬砌厚度分别为30 cm和40 cm。

引水隧洞沿线承受内水水头为0.11~0.69 MPa,为精细化设计,在衬砌结构计算时,内水压力水头分别选取20、30、42、50、60、70 m共6段进行计算分析。

### 1 引水隧洞衬砌结构计算方法

隧洞衬砌的结构计算,是确定衬砌断面尺寸的重要依据之一<sup>[1]</sup>。隧洞衬砌是沿隧洞开挖断面四周形成的人工护壁建筑物,与一般地面建筑物不同,隧洞衬砌与围岩紧贴,相互约束作用,衬砌结构计算多属非线性力学问题。衬砌的计算应与围岩类别相适应,不同的类别,应当采用不同的计算理论。几十年来,国内外学者对隧洞衬砌进行了各种理论方法研究,中国也建成了大量的混凝土、钢筋混凝土衬砌结构的水工隧洞,其衬砌结构的应力计算方法各有不同<sup>[2]</sup>。

对于围岩相对均质,且岩体覆盖厚度满足要求的有压圆形隧洞,计算方法采用厚壁圆筒理论。对于其他断面形式(有压、无压)的隧洞(如城门洞型、马蹄形等)衬砌结构计算,采用边值数值解法。对于直径(宽度)不小于10 m的1级隧洞和高压隧洞,宜采用有限元法计算<sup>[3]</sup>。

随着现代数值计算技术的高速发展,有限元计算软件的普及开发,多数设计单位设计人员开始采用有限元法对衬砌结构进行计算,将围岩与衬砌一起进行计算,模拟复杂的地质条件,得出较为符合实际的分析结果<sup>[4]</sup>。

根据技施阶段玉瓦水电站引水隧洞实际情况和计算要求,此文采用结构力学法和有限单元法,对引水隧洞衬砌结构IV类围岩选取70 m水头各工况计算成果进行分析,得出两种计算方法的衬砌配筋计算结果对比,对衬砌结构配筋进行了设计优化。

### 2 基于结构力学方法的隧洞衬砌结构计算

根据《水工隧洞设计规范》DL/T 5195—2004的规定,对于城门洞形有压隧洞,宜采用边值数值解法进行内力求解。《水工隧洞衬砌计算软件》是《水工隧洞设计规范》的一个辅助计算工具,属于工具型软件。软件主要用于水电水利工程的水工隧洞钢筋混凝土衬砌的结构设计工作。此文仅选取控制工况正常运行工况进行对比分析。

#### 2.1 计算参数

建筑物环境类别为二类,正常使用极限状态下,最大裂缝宽度允许值为0.25 mm。衬砌结构采用C20混凝土,钢筋采用HRB400型热轧钢筋<sup>[5]</sup>。引水隧洞衬砌结构计算简图见图1,主要材料物理力学参数设计值见表1。

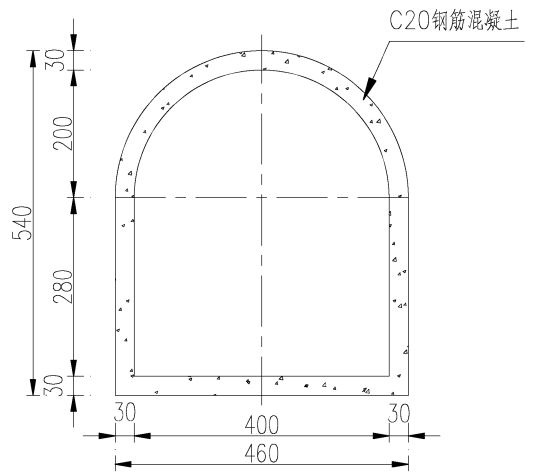


图1 引水隧洞衬砌结构计算简图

表1 主要材料物理力学参数设计值

编号	材料类型	容重 /kN·m <sup>-3</sup>	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 ×10 <sup>4</sup> /MPa	泊松比 /μ	抗剪断强度	
							f'	C'
1	结构混凝土 C20	25.0	9.6	1.1	2.55	0.167	/	/
2	喷射混凝土 C20	22.0	10.0	1.1	2.10	0.167	/	/
3	IV类围岩	27.0	/	/	0.25	0.350	0.45	0.35

## 2.2 计算结果

计算软件计算正常运行工况,衬砌结构正截面计算配筋结果见表 2。

表 2 衬砌结构正截面计算配筋结果

部位	计算截面	配筋		裂缝情况	
		内层配筋 计算面积 /mm <sup>2</sup>	外层配筋 计算面积 /mm <sup>2</sup>	宽度 /mm	位置
上侧拱	0	1 399	1 169	0.214	内层
	10	1 001	1 391	0.180	外层
边墙	16	497	1 849	0.150	外层
	19	3 468	0	0.190	内层
底板	20	2 997	0	0.231	内层
	30	251	1 718	0.086	外层

备注:由于篇幅有限,本表仅列出内外层计算配筋最大值,未列其他部位的配筋结果。

由配筋计算表可知,隧洞 IV 类围岩衬砌结构需要配置内外层钢筋。内层钢筋配筋计算面积为 3 468 mm<sup>2</sup>,外层钢筋的配筋计算面积为 1 849 mm<sup>2</sup>,计算最大裂缝宽度为 0.231 mm,位于底板内侧。

## 3 基于有限元计算的隧洞衬砌结构计算

### 3.1 计算模型

引水隧洞衬砌结构有限元计算软件采用 Ansys 软件,根据《水工混凝土结构设计规范》DL/T 5057—2009 附录 D 规定的应力图形法进行配筋计算。

计算假定为:围岩四周均按平面应变问题处理;围岩左右表面受水平向 X 方向约束,上下表面受垂直方向 Y 方向约束。围岩、混凝土结构近似假定为各向同性、均匀连续的弹性体;混凝土衬砌假定为不透水体,内、外水压力等荷载均作用在相关面上。

玉瓦水电站引水隧洞 IV、V 类围岩段支护设计时,提出了永久衬砌与临时支护相结合的设计理念。将一期临时支护作为永久支护的一部分,一期支护在运行期与二期衬砌部分共同承担内水或外水压力作用<sup>[6]</sup>。

由于引水隧洞初期支护实施的时效性较好,因此在模型中,对引水隧洞衬砌外的初期支护喷混凝土厚度 10 cm,专门划分网格并附喷混凝土材料属性。根据隧洞 IV 类围岩断面简图,对围岩、喷混凝土、混凝土衬砌进行了模拟。引水隧洞 IV 类围岩衬砌部分网格划分见图 2。

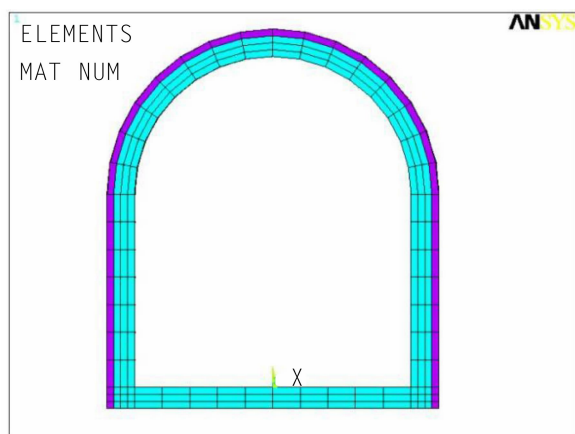


图 2 引水隧洞 IV 类围岩衬砌部分网格划分

### 3.2 计算结果

由计算云图成果可知:运行工况下,在横水流方向,衬砌绝大部分的拉应力较小,在边墙与底板相接处,局部拉应力较大,最大拉应力为 0.473 MPa;在垂直方向,衬砌绝大部分拉应力较小,最大拉应力出现在顶拱与边墙相接处,约为 2.65 MPa。顶拱主要受压应力作用,拉应力最大值为 0.21 MPa,出现在顶拱与边墙交接部位附近内侧。衬砌在内水压力作用下,基本成内侧受拉,外侧受压,或外侧拉应力较小(小于混凝土抗拉强度)。IV 类围岩衬砌结构应力峰值见表 3;70 m 计算水头 IV 类围岩运行工况衬砌竖向正应力(整体分布+局部分布)见图 3。

表 3 IV 类围岩衬砌结构应力峰值 /MPa

计算范围	正常运行工况		
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_1$
70 m 计算水头	0.473	2.65	4
最大值部位	边墙底板内侧 交界处	边墙底板内侧 交界处	边墙底板内侧 交界处

## 4 隧洞衬砌结构计算对比分析

《水工隧洞衬砌计算软件》是隧洞结构设计时常用的计算程序,已应用于多个工程实践。但隧洞程序计算配筋时,在内、外荷载组合及简化上与有限元方法差异较大。因此两种计算方法的配筋结果相差也较大。根据前述的计算结果,有限元法与隧洞程序配筋对比见表 4。

从表 4 可以看出,隧洞衬砌计算程序计算配筋结果较有限元计算配筋结果偏大,需配置双层钢筋,而有限元计算配筋结果相对较小,单层配筋即可满足设计规范要求。

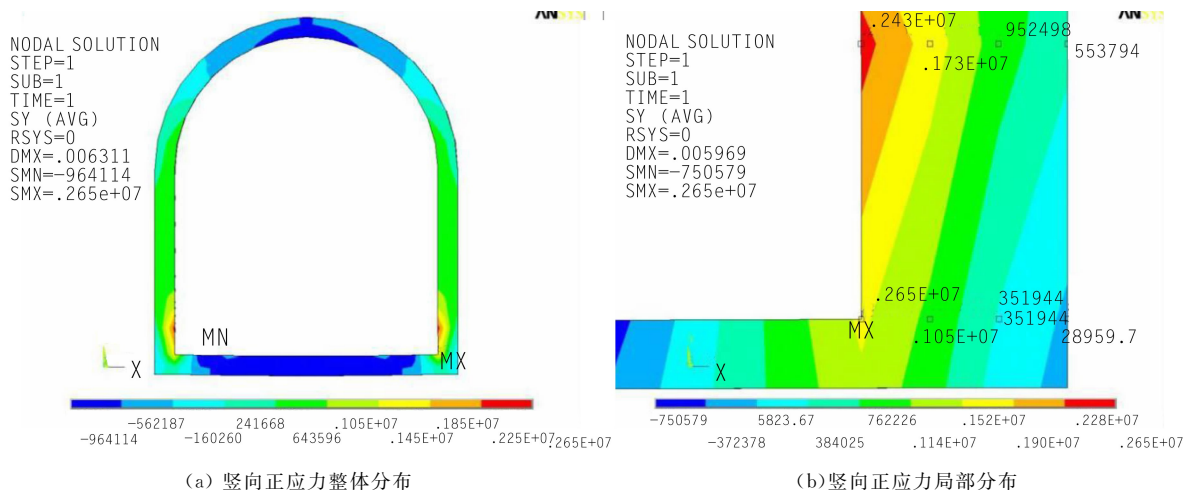


图3 70 m 计算水头Ⅳ类围岩运行工况衬砌竖向正应力

表4 有限元法与隧洞程序计算配筋对比表

围岩类别	计算水头	部位	截面序号	弯矩 /kN·m <sup>-1</sup>	轴力 /kN	内层受力钢筋		外层受力钢筋		备注	
						计算配筋 /mm <sup>2</sup>		计算配筋 /mm <sup>2</sup>			
						程序	程序	程序	A	程序	A
Ⅳ类	70 m	顶拱	10	-8.86	597	1 001	600	1 391	0		
		边墙	19	85.27	578	3 468	1 252	0	0	双层筋	单层筋
		底板	30	95.70	489	0	600	1718	0		

备注:表中“程序”指水工隧洞衬砌计算软件,“A”指有限元软件 Ansys。

根据有限元应力图形配筋计算结果,以及与隧洞程序配筋对比结果,结合现场施工情况,并类比其他工程的实际配筋成果,玉瓦水电站引水隧洞Ⅳ类围岩实际配筋参数为受力筋:6Φ25=2 945 mm<sup>2</sup>;架立筋:5Φ16,1 005 mm<sup>2</sup>。根据《水工隧洞设计规范》验算的裂缝宽度最大值为0.13 mm,满足设计规范要求。

### 5 结语

此文以玉瓦水电站引水隧洞Ⅳ类围岩衬砌结构计算为例,采用结构力学方法和有限元方法进行计算后对比分析,从而得出配筋计算成果,为结构设计提供依据。

(1)采用永临结合理念,对引水隧洞衬砌结构计算进行精细化设计,根据实际开挖揭示地质情况,经综合比较,技施阶段引水隧洞钢筋工程量较招标深化设计阶段工程量相比,优化了约940 t 钢筋,引水隧洞的整体投资得到很好地控制,为总承包项目完成“双控目标”打下坚实基础。在输水系统充水试验和放空检查过程中,引水隧洞工作状态正常。

(2)有限元法在衬砌结构计算中的应用,现在

还只是作为一种辅助手段,最终配筋结果与有限元计算结果之间还是存在一定的差距。随着数值计算理论的发展和对隧洞围岩衬砌结构的认识,有限元法的应用会越来越广,越来越得到重视。

(3)对于线性弹性模型,未对衬砌结构模拟钢筋和混凝土开裂,配筋计算结果仍相对偏大。

### 参考文献:

- [1] 沈长松,刘晓青,王润英,等.水工建筑物(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,2016:388-389.
- [2] DL/T 5195-2004 水工隧洞设计规范[S].中国电力出版社,2004.
- [3] 唐碧华,谢金元,曾海钊.高压钢筋混凝土隧洞计算方法分析[C].北京:中国水利水电出版社,2014:140-143.
- [4] 潘家铮.水工隧洞和调压室[M].北京:水利电力出版社,1990.
- [5] DL/T 5057-2009 水工混凝土结构设计规范[S].中国电力出版社,2009.
- [6] 许韬,刘一.玉瓦水电站引水隧洞设计经验总结[J].四川水力发电,2017(增刊1)27-29,51.

### 作者简介:

祖威(1984-),男,河北唐山人,高级工程师,硕士,从事水工结构设计工作。

(责任编辑:廖益斌)