

锦屏二级水电站深埋引水隧洞衬砌及围岩结构分析

任旭华 李同春

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

陈祥荣

(国家电力公司华东勘测设计研究院 杭州 310014)

摘要 锦屏二级水电站(一期)引水隧洞地处高山峡谷地区,埋深大、地应力高,受大气降水入渗影响地下水极为活跃。对隧洞在不同渗控方案所形成的外部水环境条件下围岩及衬砌的工作性态进行了系统的比较研究和评价,得出了一些对高地下水水位条件深埋引水隧洞的支护设计有普遍意义的结论。

关键词 引水隧洞,高地下水水位,衬砌,围岩,结构分析

分类号 TV 692

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)01-0016-04

1 前言

锦屏二级水电站是利用雅砻江 150 km 长的大河弯的水位落差,开挖隧洞引水发电的引水式水电站。电站水头 300 m,总装机容量为 3 200 MW。该工程引水隧洞长达 18~ 20 km,并具有大直径(开挖洞径 11 m)、超深埋(最大埋深 2 500 m 左右)的特点。引水隧洞区域处于云贵高原岩溶区与青藏高原岩溶区接壤地带的锦屏山雅砻江大河弯河间地块,为典型的高山峡谷地貌。本区出露地层以三叠系为主,其中大部分为碳酸盐地层,其次为砂板岩。受大气降水补给,地下水极为丰富。前期通过开挖探洞进行观测发现,探洞区最大外水压力达 9.2 MPa,同时还伴有集中涌水问题。如此高外水压力作用下的深埋隧洞的建设国内外水电建设中尚无先例,这给引水隧洞的设计和施工提出了难题。预可行性阶段曾考虑过先行修建一 7.0 × 8.5 m² 交通洞和 4.0 × 5.0 m² 排水洞方案,以及洞周超前高压灌浆方案。本文对引水隧洞在不同渗控方案情况下地下水的情况以及对围岩稳定性及衬砌结构的影响进行探索研究。

2 地下结构弹塑性有限元方法

2.1 计算模型

在坝基、地下洞室及边坡稳定等岩体结构非线性分析中,岩体材料合理的本构模型及其参数的选取是影响计算结果的主要因素之一。目前常用的能反映岩体塑性屈服的准则有 M-C 准则或 D-P 准则,

但是这两种模型均不能较好地描述岩体的低抗拉性能。岩体材料在受拉特性方面与混凝土材料相类似,其抗拉强度远远低于抗压强度。混凝土这一特性已在描述其非线性行为的各种屈服准则中得到反映。而对岩体材料而言,目前通常采用了一种简化的处理方法,即对 M-C 或 D-P 准则进行简单截断处理。这种简单处理存在以下问题:当某一增量步,最大主应力超过岩体抗拉强度时,迭代过程中该点应力状态只能返回到屈服面的角点上,不能反映增量过程中的塑性流动过程。当增量步长较大时,由此带来的误差较大。实际上这种简单处理认为岩体在拉-压区亦服从摩尔-库仑屈服准则,且与压压区有相同的摩擦角,没有反映从单向受压屈服到单向受拉屈服的渐变过程。在以受拉-破坏为主的岩体非线性分析中,这种拉压屈服方程的描述过高地估计了拉压区的屈服强度。

本文采用复合型的弹塑性计算模型^[1],即在压压区运用 M-C 或 D-P 屈服准则,而在拉压区运用三参数屈服准则,其参数由岩体的抗拉强度和抗压强度(其值由摩擦力和凝聚力决定)来确定。该屈服准则考虑了岩体材料的低抗拉特性,且在单轴受压状态时与 M-C 或 D-P 屈服准则一致,克服了简单的 M-C 或 D-P 截断模型存在的问题。

基于 M-C 的三参数屈服准则:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi - c \cos \varphi + a_0 \sigma_1 = 0 \quad (1)$$

基于 D-P 的三参数屈服准则为

$$a_1 I_1 + \sqrt{J_2} + a_0 \sigma_1 - b = 0 \quad (2)$$

1999年7月5日收到初稿,1999年11月1日收到修改稿。

作者任旭华简介:男,博士,1963年生,1984年毕业于河海大学水电系,现为教授,主要从事水利水电工程方面的教学与研究工作。

当 $\sigma_1 = 0$ 时, 式(1), (2) 中的 a_0 取为 0; 当 $\sigma_1 > 0$ 时, 根据岩体单轴抗拉强度 f_t 可求得 a_0 及 a_0 分别为

$$a_0 = \frac{c \cos \varphi}{f_t} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \varphi \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{b}{f_t} - a - \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

2.2 隧洞开挖、支护的数值模拟

隧洞是在岩体中开挖而形成的洞室, 隧洞的应力状态分析应对开挖和支护作用进行数值模拟。在开挖以前, 岩体存在初始地应力场, 岩体的初始地应力场与自重和构造运动有关, 地下水、温度等因素均对地应力有影响。在结构计算前, 应先构造地应力场。隧洞开挖后应力释放, 初始地应力场重新分布。支护作用的影响与其施工时间有关, 计算中将遵循“先加载, 后开洞”的计算方法, 按施工顺序进行数值模拟。

水荷载对围岩和衬砌结构的作用是以渗透体压力的方式作用于隧洞。隧洞从开挖到衬砌的施工过程中, 渗流场将有相应的改变。显然, 衬砌以前的渗流场荷载已由围岩承担, 如果衬砌以后不改变原来的渗流场(施加良好的排水措施便可达到这一目的), 衬砌就不受有渗流场的荷载。仅当衬砌后渗流场有了增量, 衬砌才承担这一增量荷载(仍然与围岩共同承担)。在计算过程中, 我们将考虑水荷载的历史过程对隧洞应力的影响。

3 引水隧洞结构非线性有限元分析

3.1 计算参数

本次计算按平面应变问题考虑, 计算情况为洞内无水, 计算范围为全断面。由于渗流计算采用的是三角形单元(便于浸润线迭代), 在计算时渗流场力作一些转换后代入四边形网格。初始地应力由于缺乏观测资料, 其大小主要参考文[2]。材料力学参数如表 1 所示。灌浆圈的模拟, 是将渗透系数降低一个数量级, 并弹模适当提高。

3.2 计算工况和加载顺序

为结合渗控方案分析岩体稳定性及衬砌结构的应力状况, 论证不同方案的技术可行性, 拟按施工顺序并考虑水荷载作用历史进行全过程仿真计算, 计算分为两个方案三种工况。

方案 1: 排水洞方案

工况 初始应力(0 级加载)+ 天然流场(第一级加载)+ 交通洞、排水洞开挖, 渗流力(第二级加载)+ 两条引水洞开挖并立即支护, 稳定状态渗流力(第三级加载)。

表 1 材料力学参数

材料	E /MPa	μ	R_1 /MPa	R_c /MPa	c /MPa	φ /(°)	γ /kN·m ⁻³
岩体	3.0×10^4	0.2	2.0	150.0	2.0	55	27.5
灌浆圈	4.0×10^4	0.18	2.5	200.0	2.2	60	27.5
衬砌	2.5×10^4	0.167	3.0	250.0	5.0	62	

方案 2: 洞周灌浆加固方案
工况 初始应力(0 级加载)+ 天然流场(第一级加载)+ 两条引水洞开挖, 瞬时渗流力(第二级加载)+ 支护, 稳定状态渗流力(第三级加载)。

方案 2: 洞周灌浆加固方案

工况 初始应力(0 级加载)+ 天然流场(第一级加载)+ 两条引水洞开挖, 瞬时渗流力(第二级加载)+ 支护, 稳定状态渗流力(第三级加载)。

渗流场及渗流力的计算见文[3]。

3.3 计算成果分析

这里位移为增量位移, 应力为总的应力。

3.3.1 排水洞方案

(1) 工况 情况

交通洞、排水洞的应力和变形

交通洞、排水洞开挖后卸荷, 渗流场改变, 应力重分布。在第二级荷载作用下, 交通洞、排水洞卸荷并承受渗流力的作用, 此时交通洞应力成果列于表 2。

表 2 交通洞开挖后洞周主应力

Table 2 Principal stress of traffic tunnel

after excavation				MPa
主应力	拱顶	拱脚	侧墙	
σ_1	51.3	118.9	96.3	
σ_2	16.7	23.4	26.9	

引水洞的应力和变形

在本方案中, 引水洞的开挖是在交通洞、排水洞形成后进行的, 此时地下水位较低。衬砌支护是在开挖完成后立即进行的。引水洞周边作用于衬砌上的最大压应力 28.75MPa, 围岩最大压应力为 40.0MPa。

图 1 为主应力矢量图, 它十分直观地反映了地下洞室开挖地应力释放及渗流场改变而引起的围岩应力重分布规律, 此时拱顶最大压应力为 51.3MPa, 拱脚及侧墙底部有应力集中现象, 最大压应力为 118.9MPa。此时, 交通洞局部出现塑性区。

由于衬砌是立即支护上去的, 洞周变形较小。最大水平位移 $u_{smax} = 0.097$ cm, 发生在引水洞侧面;

最大垂直位移 $u_{y\max} = 0.126$ cm, 发生在洞顶

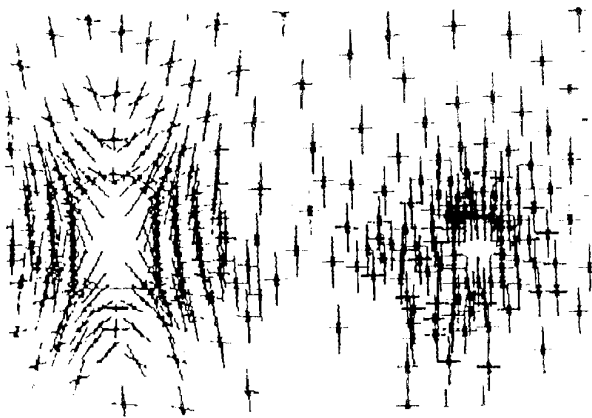


图 1 交通洞、排水洞主应力矢量图

Fig 1 Principal stress vector of traffic tunnel and drainage tunnel

引水洞洞周基本上未出现塑性区, 主要结果汇于表 3。

表 3 引水洞的应力和位移(工况 1)

Table 3 Stress and displacement of the diversion tunnel (case 1)

部位	应力/MPa		位移/cm	
	σ_1	σ_2	u_x	u_y
衬砌	28.75	6.56		
顶	51.32	13.30		0.126
围岩 侧	40.00	16.70	0.097	
底				-0.098

3.3.2 工况 1 的情况

工况 1 的前两级加载同工况 2, 所不同的是支护的时间是在围岩开挖卸荷、变形稳定后进行的, 此时所经历的水荷载历史是不同的。交通洞和排水洞的情况同前, 引水洞的情况有所不同。

第三级荷载作用下的引水洞

引水洞在开挖后衬砌前, 洞周经历了地应力释放及水荷载的改变。由于没有立即支护, 相对而言其变形量较大, 洞周最大水平位移 $u_{x\max} = 1.18$ cm, 洞周最大垂直位移 $u_{y\max} = 1.898$ cm。最大压应力为 147.7MPa。与工况 2 相比也偏大。围岩局部产生塑性变形。

第 4 级荷载作用下的引水洞

支护以后的洞周最大水平位移 $u_{x\max} = 0.72$ cm, 洞周最大垂直位移 $u_{y\max} = 0.125$ cm。塑性区开展约有 3.0m。此时衬砌最大压应力为 17.5MPa, 围岩最大压应力为 85.96MPa。

工况 1 的结果汇于表 4。

表 4 引水洞的应力和位移(工况 2)

Table 4 Stress and displacement of the diversion tunnel (case 2)

部 位	应力/MPa		位移/cm	
	σ_1	σ_2	u_x	u_y
衬 砌 第三级				
衬 砌 第四级	17.50			
围 岩 第三级	147.70		1.180	1.898
围 岩 第四级	85.96		0.720	0.125

3.3.3 引水洞洞周灌浆加固方案

(1) 第二级荷载作用下

引水洞开挖卸荷后, 洞周水压力降为零。此时的位移矢量朝向洞内, 洞周最大水平位移 $u_{x\max} = 0.154$ cm, 洞周最大垂直位移 $u_{y\max} = 2.65$ cm。围岩主应力应力矢量见图 2, 此时局部塑性。

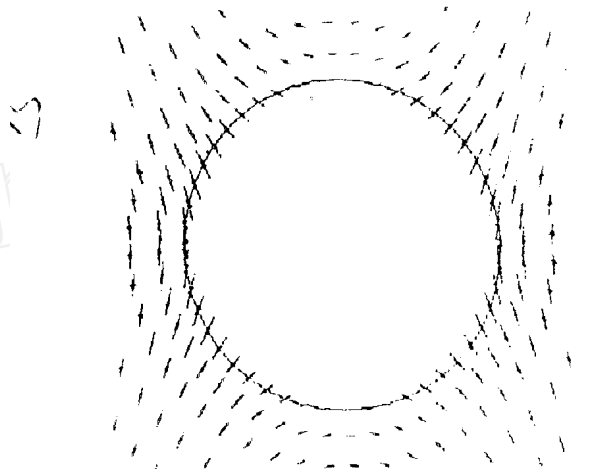


图 2 引水洞主应力矢量

Fig 2 Principal stress vector of diversion tunnel

(2) 第三级荷载作用下围岩变形稳定后进行支护, 支护后渗流场发生改变, 此时洞周最大水平位移 $u_{x\max} = 0.32$ cm, 洞周最大垂直位移 $u_{y\max} = 0.622$ cm。衬砌最大压应力为 49.0MPa, 围岩最大压应力为 130.0MPa; 大约有 3~4m 深的塑性区。

工况 2 的结果汇于表 5。

4 结 论

(1) 围岩及衬砌结构的应力及变形与衬砌及岩体的材料力学特性密切相关, 开挖方式, 支护时间以及水荷载作用历史对结果会产生较大影响。

(2) 排水洞方案, 由于在引水洞开挖之前已将地下水位大幅度下降, 不论是立即支护还是围岩变形稳定以后支护, 作用于衬砌上的压力均不算大,

按常规设计应能解决问题。其前提是保证排水的通畅性和稳定性。这个方案的主要问题是交通洞、排水洞自身在开挖施工过程中的稳定性问题。

表 5 引水洞的应力和位移(工况)

Table 5 Stress and displacement of the diversion tunnel (case 3)

部位 荷载	应力/MPa		位移/cm	
	σ_1	σ_2	u_x	u_y
衬 第二级				
砌 第三级	49.00			
围 第二级	156.60		0.154	2.650
岩 第三级	130.00		0.320	0.622

(3) 洞周灌浆方案, 在稳定渗流期作用于衬砌的最大压应力达 49MPa, 一般混凝土不能承受, 而且洞周围岩出现一定范围的塑性区。

(4) 在现有的力学参数及施工方式的条件下, 围岩变形均不大。

参 考 文 献

- 1 姚纬明, 李同春, 任旭华 岩体材料包络型复合弹塑性计算模型[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 95~99
- 2 华东勘测设计院科研所 锦屏山区地应力场回归分析报告[R]. 1997
- 3 任旭华, 李同春 超深埋引水隧洞渗流控制研究[J]. 河海大学学报(待刊)

STRUCTURAL ANALYSIS FOR THE LINER AND SURROUNDING ROCKS OF DIVERSION TUNNEL IN JINPING WATERPOWER STATION

Ren Xuhua¹, Li Tongchun¹, Chen Xiangrong²

⁽¹⁾ College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098 China

⁽²⁾ East China Investigation & Design Institute, State Power Corporation of China, Hangzhou 310014 China

Abstract The diversion tunnel in Jinping waterpower station is located at the region with high mountain and great gorge. The surrounding rocks of the tunnel is of deep embedded depth, high ground stress and rich underground water. The working behaviors of the liner and surrounding rocks under the underground water conditions are systematically studied and evaluated. Some suggestions for the support design of diversion tunnel with high groundwater level are presented.

Key words diversion tunnel, high underground water level, liner, surrounding rocks, structural analysis

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》将发表下列内容的文章:

- (1) 细观岩石力学与裂隙岩体渗流-损伤耦合分析;
- (2) 岩土工程可靠度与岩溶塌陷的风险评价;
- (3) 边坡位移反分析与数字仿真;
- (4) 地下工程的数值模拟;
- (5) 岩石动力学与岩石试验研究;
- (6) 研究进展与讨论。