

高压引水隧洞受力分析

赵宁 高涛

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南, 郑州, 450003)

摘要: 本文通过对科卡科多-辛克雷水电工程两条高压引水隧洞渗流场数值仿真计算, 研究了高压引水隧洞采用透水衬砌设计时, 渗流场水头变化情况对隧洞结构设计的影响。结果表明: 施工完建期, 地下水压力作用在衬砌外表面, 检修期由于衬砌外表面的水压力没有完全消散, 衬砌均以承受压应力为主; 当充水运行期的内水压力达到一定数值时, 混凝土开裂, 内水压由混凝土衬砌和固结灌浆的围岩承担, 钢筋控制裂缝进一步发展, 由此算的结构配筋量比不透水理论的配筋量大幅减小。

关键词: 内水压力 渗流场 高压引水隧洞 应力

前言

通常认为, 隧洞内水压力大于150m时为高压水工隧洞, 高压水工隧洞常采用钢板衬砌和钢筋混凝土衬砌。钢板衬砌是钢板来承受内水压力, 钢板衬砌有费用高昂、加工制作和运输困难的缺点。钢筋混凝土衬砌在高水头作用下, 将会开裂, 基于钢筋混凝土透水衬砌理论, 以科卡科多-辛克雷水电工程发电厂房的两条引水隧洞为例, 采用FLAC^{3D}软件模拟隧洞的渗流场, 考虑渗流场和应力的耦合作用, 对高压引水隧洞的结构设计进行研究。

1 工程概况

科卡科多-辛克雷水电工程装机1500兆瓦, 位于距离基多市约140公里的纳波省的可卡科多河。水库最高发电水位1231.00m, 正常发电水位1229.50m, 最低发电水位1216.00m。水电站引水系统由上平段、竖井段、下平段三部分组成, 下平段后半部分采用钢板衬砌, 其余均为钢筋混凝土衬砌, 钢筋混凝土衬砌段隧洞内径5.80m, 混凝土衬砌厚度60cm、90cm, 内水最大静水头超过600m。

2 计算原理和方法

FLAC^{3D}程序中的流动模型可以与力学模型同时建立, 能考虑流体与岩土体之间的相互作用, 既可以计算完全饱和情况下的流动, 也可以模拟具有自由水面的流动。

FLAC^{3D}模拟原理包括运动方程、平衡方程、本构方程和连续方程。

3 高压隧洞渗流分析

3.1 渗流场计算区域的确定及模型的建立

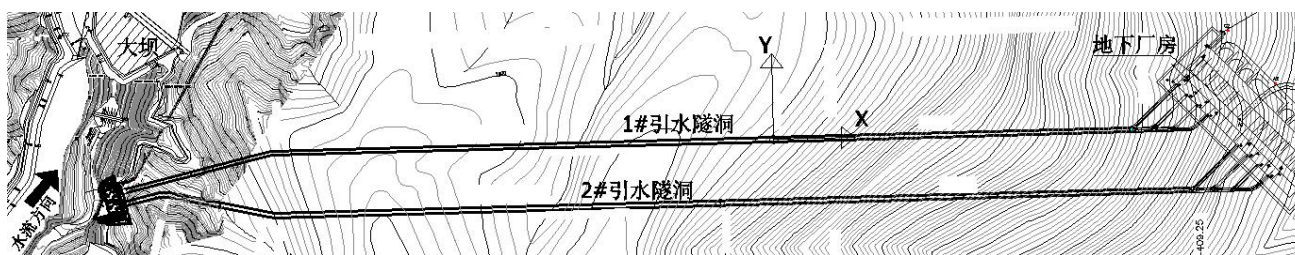


图1 三维渗流数值计算区域

场区渗流场数值计算模型的坐标系为: X轴与1#引水隧洞下平段洞轴线重合, 指向下游方向为正; Z轴为铅直方向, 向上为正, 为模拟区域的实际高程; Y轴与1#引水隧洞下平段洞轴线垂直, 偏北方向为正方向; 坐标原点取在1#引水隧洞下平段入口断面的中心点。模型中上游边界为一斜切面, 其走向与1231m高程的河岸线基本保持一致; 模型下游边界取至引水隧洞末端, 未包含地下厂房; 模型左侧边界抵至大坝右岸坝肩处。进行渗流数值模拟计算时对处在下平段的两条较大的破碎带加以考虑。

3.2 渗流计算结果

引水隧洞的渗流计算包含施工完建期、检修期和充水运行期三种工况。计算结果汇总如下：

(1) 在施工完建期，衬砌外表面的孔压小于原地下水条件下该处的孔压，当固结灌浆圈尚未完成时，局部区段的衬砌外表面孔压达到了原来的37%；当固结灌浆圈完成以后，衬砌外表面的孔压仅相当于原孔压的19%。

(2) 检修期，衬砌内外表面和固灌内外表面存在较大的压差和水力坡降，在放空的全过程中，衬砌内外表面最大压差达到了380多米（衬砌外表面孔压高于衬砌内表面孔压）。检修放空的过程中，两支引水隧洞相互之间影响很小，在单管放空和双管放空条件下，其孔压变化情况基本一样。

(3) 充水运行期，衬砌内外表面的孔压差别较小，衬砌外压达到了衬砌内压的92.27%以上，局部洞段甚至达到了99.30%。对于上平段和竖井段上半部分，衬砌开裂程度较小，衬砌内外压差相对较大；对于竖井段下半部分和下平段，衬砌开裂程度较大，衬砌内外压差相对较小。

4 隧洞受力分析

渗流分析的结果表明，隧洞施工完建期和检修期，圆形断面在竖井段高程678.00m、梯形断面在下平段桩号0+796.00处的外水压力最大，两断面处的参数见表1。

表1 典型断面基本参数

计算断面位置	断面形式	衬砌厚度 (m)	围岩类别	外水压力-内水压 (m)	
				施工完建期	检修期
竖井段 (高程 678.00m)	圆形	0.6	II类	117	387.88
下平段 (桩号 0+796.00)	马蹄形	0.9	IV类	178	343.80

注：施工完建期选用的是衬砌浇筑完成但固结灌浆未完成时的值

选取这两个断面对隧洞施工完建和检修工况的受力情况进行分析，将受力截面的最大应力与混凝土强度进行对比来校核结构强度是否满足要求，将受力截面的最大剪力与结构能够提供的剪力进行对比来确定结构是否需要配抗剪筋，以完成这两个工况的结构设计。

4.1 隧洞施工完建期受力分析

圆形衬砌混凝土环向呈受压应力状态，最大环向应力出现衬砌的内表面，最大为-7.46MPa。

梯形衬砌受力如下：

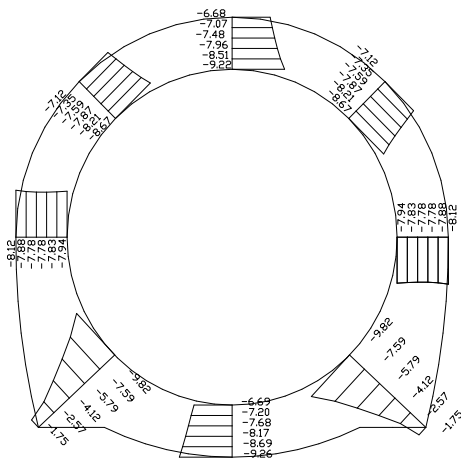


图2 衬砌混凝土环向应力/MPa

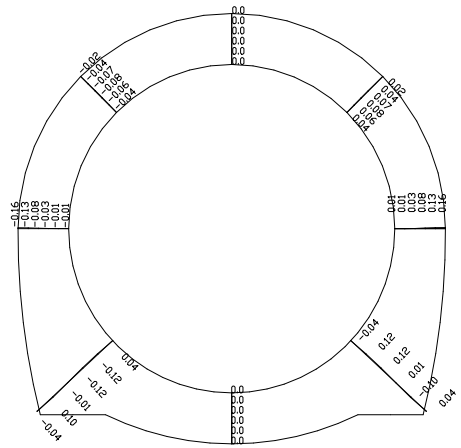


图3 衬砌混凝土剪应力/MPa

梯形衬砌混凝土环向呈受压应力状态，最大环向应力出现在两侧底板与边墙交界位置的外表面，最大为-9.82MPa；最大剪应力出现在两侧边墙的外表面，最大为0.16MPa。

通过对强度和剪力复核，表明此引水隧洞在施工完建期衬砌强度满足要求，不需要配环向受力筋和剪力筋。

4.2 隧洞检修期的受力分析

检修期受力形式与施工完建期类似：圆形衬砌混凝土环向呈受压应力状态，最大环向应力出现在衬砌的内表面，达到了-22.47MPa；马蹄形衬砌混凝土环向呈受压应力状态，最大环向应力出现两侧底板与边墙交界位置的外表面，达到了-18.85MPa，最大剪应力出现在两侧边墙的外表面，达到0.31MPa。

通过对强度和剪力复核，表明此引水隧洞在检修期衬砌强度满足要求，不需要配环向受力筋和剪力筋。

4.3 隧洞充水运行期的衬砌结构分析与配筋设计

采用渗流计算的水压力成果，对典型断面进行配筋计算。在内水压力作用下，衬砌混凝土开裂，以钢筋的强度允许值进行结构的配筋设计，内水压力（渗透水压）全部由钢筋承担，保证混凝土和围岩的裂缝在一定范围内。

计算公式如下：

$$A_s = \frac{T}{[\sigma_s]} = \frac{(P_i - P_o)R_e}{0.6F_y}$$

式中： A_s —所需钢筋面积， mm^2 ；

T —断面合力， MN ；

$[\sigma_s]$ —钢筋应力， N/mm^2 ；

P_i —内外表面水压， MPa ；

P_o —外内表面水压， MPa ；

R_e —等效半径， m ；

F_y —钢筋的抗拉强度设计值， N/mm^2 ；

选用的钢筋强度为420MPa，根据美国规范规定（ACI 318-02），钢筋允许应力数值可取为0.6 F_y ，即252MPa，进而计算所需要的钢筋面积，详见表2。

表2 运行期钢筋设计（透水压力部分）

计算断面	水压/MPa		等效半径 Re	断面合力 T	所需钢筋面积 As1
	内表面 Pi	外表面 Po	/m	/MN	mm ²
竖井段（高程 888.00m）	3.299	3.257	3.2	0.1360	540
竖井段（高程 678.00m）	5.349	5.304	3.2	0.1437	570
下平段（桩号 0+772.00）	5.878	5.849	3.2	0.0957	380
下平段（桩号 0+796.00）	5.910	5.826	3.35	0.2811	1115
下平段（桩号 0+858.00）	5.935	5.882	3.2	0.1702	676

以上配筋结果，比不透水理论计算的最小配筋 $2658\text{mm}^2/\text{m}$ 小很多。

此工程为发电厂房的引水隧洞，要考虑水击压力作用时所需要的钢筋，将运行期所用钢筋面积与水击压力所需钢筋面积合并可得各个典型断面的配筋总面积。

5. 小结

透水理论是在保证围岩稳定的前提下进行的，高压隧洞必须有足够的埋深，即必须满足“挪威准则”，这是确保隧洞在高水头作用下，围岩不发生大量渗水或山体滑坡的必要条件，配筋主要作用是控制混凝土裂缝的无限线扩展，保证围岩的整体稳定。计算结果表明：

1.内水压力按渗透体积力考虑时，计算的钢筋量远小于内水压力按不透水面力计算的钢筋量。

2.高压隧洞在施工期和检修期，外水压力大于内水压力，结构主要承受压应力，隧洞在充水运行时，内水压大于外水压，结构承受的内力为拉力，由于混凝土的抗压能力远大于抗拉能力，所以决定结构配筋的阶段是衬砌开裂的运行期。

参 考 文 献：

- [1]谢遵党，伍鹤皋，苏凯，等，厄瓜多尔CCS工程压力管道透水衬砌结构分析和有限元计算研究报告 2014.4
 [2]李新星，蔡永昌，庄晓莹，等 高压引水隧洞衬砌的透水设计研究 岩土力学 2009年5月 第30卷第5期

作者简介：赵宁（1978—），女，陕西长安人，高工，主要从事水利水电工程设计工作。

E-mail: zhaoning0625@126.com

手机号：13783612362