

# 公伯峡水电站导流洞安全监测分析评价

孔庆梅, 张秀山

(黄河电力测试科技工程有限公司, 西宁 810000)

**摘要:** 公伯峡水电站导流洞下闸蓄水 1 个月 后对导流洞导 0+ 159 m - 导 0+ 214 m 段进行了封堵, 但导流洞导 0+ 214 m 下游段改建为右岸旋流式泄洪洞下平洞段的漩流洞、水垫塘和退水洞, 为此导流洞导 0+ 214 m 以下洞身段安全运行直接影响右岸泄洪洞泄洪。文章对公伯峡水电站导流洞导 0+ 214 m 以下洞身 4 个监测断面监测资料进行全面分析、研究, 评价其运行性态。

**关键词:** 公伯峡水电站; 导流洞; 监测资料

**中图分类号:** TV 698. 1

**文献标识码:** A

## 1 工程概况

公伯峡水电站是国家实施西部大开发战略中西电东送北部通道的启动工程, 也是黄河水电公司组建后滚动开发黄河上游水电资源的第一座大型电站。它位于青海省循化县与化隆县交界处的黄河干流上, 坝址河道上游 76 km 为已建的李家峡水电站, 下游 148 km 为已建的刘家峡水电站, 距西宁市公路里程 153 km。水库正常蓄水位 2 005. 0 m, 总库容 6. 2 亿  $m^3$ , 为日调节水库, 电站装机容量 1 500 MW, 保证出力 492 MW, 年发电量 51. 4 亿  $kW \cdot h$ 。

公伯峡水电站属一等大 (1) 型工程, 枢纽包括混凝土面板堆石坝、引水发电系统及泄水建筑物等三部分。

导流隧洞布置于黄河右岸, 由进口明渠、进水塔、导流洞及出口明渠挑流鼻坎等构成, 导流洞全长 1 224. 54 m。进口明渠长 162 m, 底板高程为 1 898. 5 m, 底宽 18 m, 并设一 6 m 高的拦碴坎; 进水塔为岸塔式, 塔顶高程 1 957 m, 塔高 61. 5 m; 导流洞长 1 004. 255 m, 其中隧洞段长 724. 02 m, 涵洞段长 280 m。导流洞出口高程 1 895. 0 m。导流洞出口明渠长 58. 25 m, 底板高程 1 895. 0 m。出口采用挑流鼻坎消能。进、出口均为直线段, 桩号导 0+ 89. 570 - 导 0+ 361. 220 段设计为凹向左岸, 半径 360 m 的圆弧曲线。导流洞工程于 2000 年 7 月 1 日开工, 2002 年 3 月 10 日完工。

## 2 导流洞监测仪器布置<sup>[1]</sup>及运行情况<sup>[2]</sup>

根据《混凝土坝安全监测技术规范》结合本工程特点, 在导流洞隧洞段导 0+ 425 m、导 0+ 493 m、导 0+ 614 m、导 0+ 695 m 断面上共安装埋设了 45 支差动电阻式仪器, 其中测缝计 9 支、岩石变位计 9 支、渗压计 9 支、钢筋计 18 支, 监测导流洞安全运行情况。以上仪器于 2001 年 7 月 2 日开始埋设安装, 2001 年 12 月 7 日所有仪器埋设安装完毕, 并投入使用。

导流洞工程于 2002 年 3 月 18 日开始过流, 2004 年 8 月 8 日导流洞下闸水库开始蓄水。导流洞自 2004 年 8 月 8 日下闸蓄水后不再过水运行, 下闸蓄水 1 个月 后对导流洞导 0+ 159 m - 导 0+ 214 m 段进行了封堵, 于 2005 年 12 月 07 日永久封堵段结束。在泄洪建筑物设计中, 将导 0+ 214 m - 导 0+ 335. 50 m 段的 II 类围岩套衬改建成右岸泄洪洞下平洞段的漩流洞和水垫塘, 导 0+ 335. 50 m - 导 0+ 361. 221 m 段改建为右泄洪洞退水洞。

导流洞开挖过程中先后发生了 7 次规模较大的塌方, 尤其是 2001 年 2 月与 4 月, 发生两次大塌方以致冒顶。在导流洞封堵施工时, 封堵段渗漏水严重, 设计将封堵段高压固结灌浆孔孔深改为入岩 15 m, 同时将普通固结灌浆改为全断面高压固结灌浆, 孔深为入岩 10 m。

导流洞改建成右岸旋流式泄洪洞后于 2006 年 8 月

12至 18日进行了三次过水试验, 试验结果表明, 设计合理、施工质量较高, 达到了设计要求。

### 3 导流洞监测资料分析

#### 3.1 导流洞衬砌体温度特征

导流隧洞观测断面混凝土衬砌厚度为 100–150 m, 过水部位受水温控制。图 1 绘出了不同断面不同部位不同仪器的温度测值。

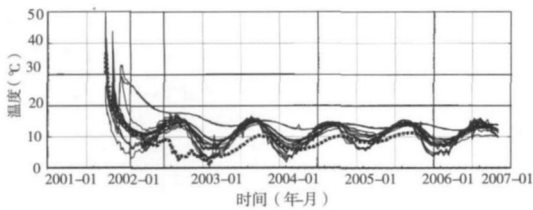


图 1 导流洞各断面不同部位温度

从仪器所测温度特征看, 仪器埋设初期由于混凝土水化热作用最高温度达 50℃, 之后温度逐渐降低, 并且呈年周期变化, 最高温度为 16.2℃, 最低温度为 6.5℃。

2002年开始衬砌体温度趋于稳定, 按照同一部位的不同仪器温度测值间有所不同, 垂直于拱顶的测缝计、渗压计和岩石变位计温度测值变化规律基本一致, 呈年周期变化, 但年变化幅度较小, 其年内平均温度逐年降低, 高温期各部位温度基本一致, 低温期温度相差较大。离洞内水体由远到近温度测值变幅增大, 且相位前移, 即衬砌体内侧比外侧温度变幅小, 且相位滞后。从理论上讲, 符合一般规律, 可以认为其反映了实际情况, 同时也说明衬砌体温度确实受洞中水温控制<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 钢筋计测值分析

为了监测导流洞衬砌体钢筋应力, 在导 0+ 425 m 观测断面的底板、边墙和拱顶部位布置了 12支钢筋计, 在导 0+ 493 m 观测断面的底板和边墙布置了 6支钢筋计。图 2 图 3 描述了这些钢筋计的测值变化过程。

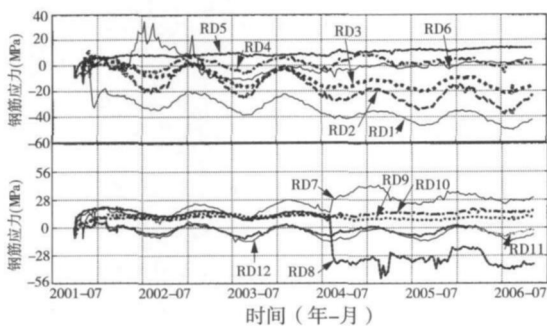


图 2 导流洞导 0+ 425 m 断面钢筋计应力

从导 0+ 425 m 断面钢筋计测值看, 平行或垂直于底板的钢筋计除 RD8测点外其它测点测值大部分呈受

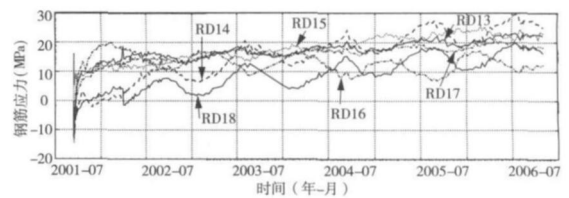


图 3 导流洞导 0+ 493 m 断面钢筋计应力

拉状态, 但拉应力值较小, 最大值为 43 MPa(埋在 1 897 m 高程平行于底板的 RD7)。2004年 8月之前导流洞处在过水运行期, 各测点测值呈年周期变化, 之后测值逐渐趋于稳定。布置在 1 897 m 高程平行于底板的 RD8测点测值在 2004年 8月 8日下闸蓄水前后发生突变, 测值从 9 MPa突变为 -29 MPa 之后基本趋于稳定。平行于边墙和拱顶的钢筋计 (RD-1-4 RD-11、12) 测值呈年周期变化, 年变幅均较小, 大部分呈受压状态, 测值在 -50 MPa-15 MPa 之间变化。

从导 0+ 493 m 断面钢筋计测值看, 底板各部位混凝土处于受拉状态, 拉应力最大产生在 1 896 m 高程平行于底板的测点处, 其最大拉应力为 30 MPa。底板各部位拉应力呈年周期变化, 且拉应力逐渐增大, 如果在以后的运行期拉应力还是持续增大, 此部位混凝土可能被拉裂, 应恢复此部位钢筋应力的监测 (钢筋计“+”表示拉应力;“-”表示压应力)。

由测值变幅得出, 各部位埋设方向一致的钢筋计钢筋应力测值相对变化不大, 尤其是两侧受力比较均匀, 而且受力变化主要源于水温变化, 可以推测衬砌体整体形成前, 洞室开挖引起的应力重分布已大致完成, 所以围岩对衬砌体的压力不明显。

#### 3.3 测缝计测值分析

为了了解衬砌体与岩石的结合情况, 在导 0+ 425 m、导 0+ 493 m、和 0+ 614 m 断面上分别布置了 3支、2支和 4支测缝计, 测值变化过程如图 4 图 5 所示, 资料分析得出:

(1) 施工完成后, 导 0+ 425 m 断面右边墙 1 908 m 高程部位衬砌体在温降作用下, 与岩体脱离 (JD-3 显示 1.94 mm 张开量), 导 0+ 493 m 断面右边墙 1 907 m 高程部位衬砌体在温降作用下, 与岩体脱离 (JD-5 显示 0.23 mm 张开量) 导 0+ 614 m 断面拱顶部位衬砌体在温降作用下, 与岩体脱离 (JD-7 显示 4.50 mm 张开量), 灌浆之后测值稳定 (灌浆后测缝计工作正常)。

(2) 隧洞过水后, 导 0+ 425 m 断面顶部衬砌体呈压缩变形, 变形量增至 -0.11 mm (2004年 7月 25日), 导 0+ 425 m 断面左边墙衬砌体呈压缩变形, 变形量增至 -0.23 mm (2004年 7月 25日), 导 0+ 493 m 断面右边墙衬砌体呈压缩变形, 压缩量逐渐增大至 -0.21 mm

(2004年 7月 25日),之后压缩量逐渐收敛。

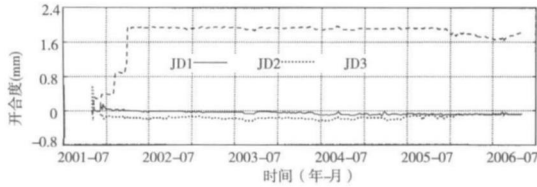


图4 导流洞0+425 m断面衬砌体与围岩接缝开合度

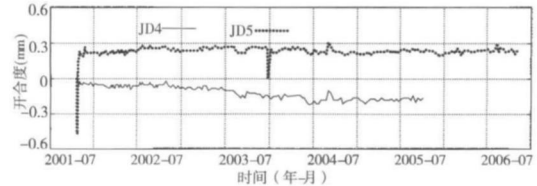


图5 导流洞导0+493 m断面衬砌体与围岩接缝开合度

从量值上看,导 0+ 614 m 断面拱顶部位衬砌体和导 0+ 425 m 断面右边墙 1 908 m 高程部位衬砌体存在一些问题外,其它部位接缝变化都较小,处于正常工作状态。

### 3.4 岩石变位计测值分析

在导 0+ 425 m 断面的拱顶和左右边墙布置了 3 支岩石变位计;在导 0+ 493 m 断面的拱顶布置了 1 支岩石变位计、导 0+ 614 m 断面的左右边墙布置了 2 支岩石变位计;导 0+ 695 m 断面的拱顶和左右边墙布置了 3 支岩石变位计,监测岩石变位。图 6- 图 8 给出了围岩的变位情况。

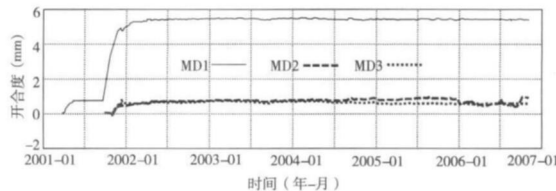


图6 导流洞导0+425 m断面岩石变位计测值过程线

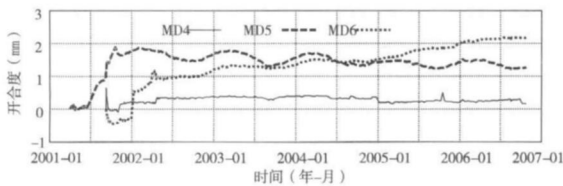


图7 导流洞导0+493 m、导0+614 m岩石变位计测值过程线

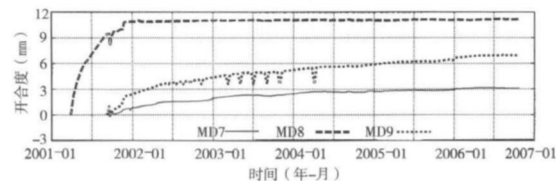


图8 导流洞导0+695 m岩石变位计测值过程线

(1) 导 0+ 425 m、导 0+ 493 m、导 0+ 614 m 和导 0 + 695 m 断面各部位围岩均呈张开趋势,张开量最大的测点位于导 0+ 695 m 断面拱顶 1 912. 4 m 高程部位,仪器埋设方向垂直于拱顶,其张开量为 11. 17 mm,该点张开量主要从 2001 年 3 月 26 日仪器埋设开始逐渐增大,至 2001 年 11 月 20 日张开量为 10. 00 mm,之后经固结灌浆后基本趋于稳定,说明围岩运行稳定。

(2) 导 0+ 425 m 断面拱顶围岩自 2001 年 3 月 27 日仪器埋设后测值逐渐增大,呈张开趋势,至 2001 年 10 月 24 日张开量突变为 3. 34 mm,且逐渐增大至 5. 00 mm,固结灌浆之后趋于稳定,从图 6 可以看出左右边墙围岩基本处于稳定状态。

(3) 导 0+ 493 m 断面拱顶围岩自 2001 年 3 月 31 日仪器埋设后测值逐渐增大,呈张开趋势,至 2001 年 9 月 11 日张开量为 1. 36 mm,之后受水温控制呈年周期变化,张开量逐年减小,因此判断为该部位围岩基本处于稳定状态。

(4) 从图 7 可以看出 MD- 6 仪器埋设初期处于闭合状态,2002 年 1 月该部位测值从 - 0. 30 mm 突变为 0. 55 mm,之后张开量逐年增加,至 2006 年 10 月 25 日张开量 2. 18 mm。从测值变化过程来看 MD- 4 测点所在部位围岩基本处于稳定状态。

### 3.5 渗压计测值分析

渗压计测值显示出隧洞充水以前,随着衬砌体的逐步形成,该部位渗透压力逐渐恢复,这说明渗压计工作正常,可以作为分析依据。自渗压计安装至 2006 年 11 月,各部位渗压计测值较小,均在 - 0. 201 MPa- 0. 047 MPa 之间,由此判断衬砌体底部无贯穿性裂缝。

由图 9- 图 11 可以看出布置在导 0+ 425 m 断面和导 0+ 614 m 断面垂直于拱顶的渗压计所测渗透压力变幅较小,与导流隧洞过水和库区蓄水均无明显的联系,证明该部位衬砌体与岩石防渗效果好<sup>[3]</sup>。布置在断面底部和边墙部位的渗压计测值显示,各部位渗透压力在过水期间随水温变化产生周期性变化,水温升高则渗透压力增大,水温降低渗透压力减小。

下闸蓄水之后,也就是导流洞不在过水运行期,导 0 + 614 m 断面边墙和导 0+ 695 m 断面底板的渗透压力仍存在周期性变化,可见此部位渗透压力与隧洞过水无关,说明该部位衬砌体防渗效果好,导 0+ 493 m 断面边墙和底部渗透压力趋于稳定,无明显变化;导 0+ 425 m 断面左右边墙下闸蓄水后渗透压力明显降低,之后渗透压力随气温呈周期性变化,这种现象与右岸防渗面板渗透压力变化基本一致,说明该部位渗透压力受右岸防渗体防渗效果的影响<sup>[4]</sup>。

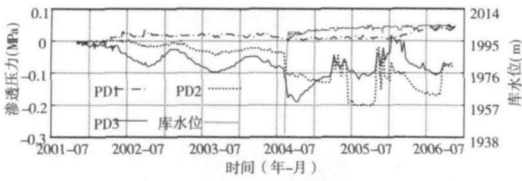


图 9 导流洞导 0+425 m 渗压计测值过程线

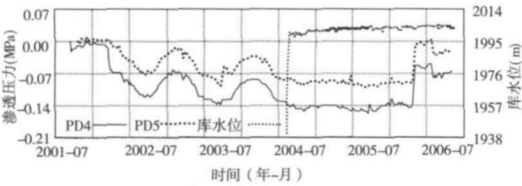


图 10 导流洞导 0+493 m 渗压计测值过程线

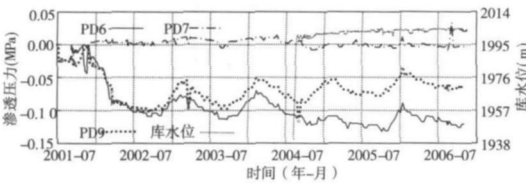


图 11 导流洞导 0+614 m、导 0+695 m 渗压计测值过程线

#### 4 评价

通过以上监测资料综合分析, 导流洞隧洞段导 0+ 425 m、导 0+ 493 m、导 0+ 614 m 和导 0+ 695 m 断面部位未见明显危及安全的问题, 认为导流洞隧洞段运行正常, 说明右泄洪洞退水段下游段运行正常。主要揭示出的规律如下:

(1) 从测缝计测值看出, 导 0+ 425 m 断面右边墙衬

砌体在温降作用下, 与岩体脱离 (JD-3 显示 1.94 mm 张开量); 导 0+ 614 m 断面拱顶部位衬砌体在温降作用下, 与岩体脱离 (JD-7 显示 4.50 mm 张开量), 固结灌浆后测值趋于稳定, 这说明导 0+ 425 m 断面右边墙、导 0+ 614 m 断面拱顶部位衬砌体与岩石经过固结灌浆后接触关系良好。

(2) 从导 0+ 493 m 断面钢筋计测值看, 底板各部位混凝土处于受拉状态, 最大拉应力为 30 MPa, 底板各部位拉应力呈年周期变化, 且拉应力逐渐增大, 如果在以后的运行期拉应力还是持续增大, 此部位混凝土可能被拉裂, 应恢复此部位钢筋应力的监测。

(3) 整体上看衬砌体在运行期受力较均匀, 说明整体工作性态没有大的问题, 所存在的问题属局部性质<sup>[5]</sup>;

(4) 以上四个断面所在部位在右泄洪洞退水段下游处, 为了以后泄洪安全, 应恢复原有的观测项目, 加强监测。

#### 参考文献:

[1] DL/T 5178-2003 混凝土坝安全监测技术规范 [S].  
 [2] 储海宁. 混凝土坝内部观测技术 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1989.  
 [3] 吴中如. 水工建筑物安全监测理论及其应用 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1990.  
 [4] 金虎城. 天生桥一级水电站大坝安全监测 [J]. 水力发电, 1999(3): 58-60.  
 [5] 张保军. 清江隔河岩导流隧洞出口端施工安全监测 [J]. 大坝观测与土工试验, 2000(3): 36-38.

### Analysis and Evaluation on the Diversion Tunnel Monitoring of Gongboxia Hydropower Station

KONG Qingmei ZHANG Xiushan

(Yellow River Electric Power Test Science Technology Engineering Co. Ltd., Xining 810000, China)

**Abstract** The backing of section 0+ 159 m - 1 0+ 214 m has been implemented one month after the diversion tunnel of Gongboxia Hydropower Station started to impound. However, the downstream of the section 0+ 214 m has been changed into the right bank of cyclone spillway section under the adit. The swirling flow of holes, water plunge pool and the back water tunnel. So the security of the sections down the section 0+ 214 m directly affects flood discharge of the barrier. This paper will have a comprehensive analysis, research, and evaluation for monitoring data on 4 monitoring sections below the body of Gongboxia Hydropower Station 0+ 214 m diversion tunnel.

**Key words** Gongboxia Hydropower Station; diversion tunnel; monitoring data