

# 黄河公伯峡水电站大坝进水口坝段位移性态分析

王全胜<sup>1</sup>, 王雪梅<sup>2</sup>

(1. 中国水电四局技工学校, 西宁 810007; 2 黄河电力测试科技工程有限公司, 西宁 810000)

**摘要:** 公伯峡水电站进水口坝段基础(1 961.00 m 高程)上下游相对垂直位移偏大, 并有趋势性; 坝段整体持续向下游位移, 且有趋势性增长。这些问题是否会影响到进水口坝段的安全运行, 是工程十分关注的问题, 也是水电站大坝安全运行重点关注的问题。为了准确的掌握进水口坝段的运行状态, 在对监测系统进行评估的基础上, 经过对公伯峡水电站进水口坝段变形观测资料以及对公伯峡地区气候、气象资料的分析, 初步得出结论: 水库蓄水的前 3 年, 是进水口坝段基础(1 961.00 m 高程)上下游相对垂直位移和顺流向水平位移趋势性增大较快的时段; 也是进水口坝段垂直位移和水平位移年变化量值较大的时段。2006 年以后上述位移的年变化量逐年递减, 但是此位移的趋势性依然存在。

**关键词:** 公伯峡; 进水口坝段; 位移性态

**中图分类号:** TV 698.1

**文献标识码:** A

在对公伯峡水电站大坝观测资料分析中发现电站进水口坝段存在: 坝段基础(1 961.00 m 高程)廊道所测上下游相对垂直位移偏大, 并有趋势性; 坝段整体持续向下游位移, 且有趋势性增长, 均以 5 机进水口坝段最为明显; 5 机进水口坝段测压管水位相对高于进水口其它坝段等问题。为此, 对进水口坝段位移性态作了进一步的分析, 以期对其安全性有一个全面的了解和评价。

分析范围是: 进水口坝段桩号引 0+ 000.00- 0+ 069.00 m、引左 0+ 000.00- 引左 0+ 094.00 m, 对应进水口坝段下游至压力钢管下弯段伸缩缝处。

## 1 概况

公伯峡水电站位于青海省循化、化隆两县交界的黄河干流上, 是黄河上游龙羊峡至青铜峡段规划的第四座大型梯级水电站。电站总装机容量为 1 500 MW, 水库正常蓄水位 2 005.00 m, 相应库容 6.20 亿 m<sup>3</sup>, 具有日调节性能。电站以发电为主, 兼有防洪、灌溉、供水等综合功能。本工程枢纽主要由大坝、引水发电系统和泄水建筑物三部分组成。枢纽布置格局为: 河床式钢筋混凝土面板堆石坝, 右岸引水发电系统, 左右岸泄洪洞及左岸溢洪道、两岸灌溉取水口。

电站进水口为混凝土重力坝式进水口, 坝顶长 94.00 m, 坝顶高程 2 010.00 m, 坝高 52.00 m- 58.00 m, 分为 5 个坝段。压力钢管道为敷设在岩石基础上的钢衬钢筋混凝土外包管, 钢管内径 8.00 m, 外包混凝土厚度 1.50 m, 压力钢管采用一机一管布置型式。电站厂房位于大坝下游坡脚右岸岸边, 为地面式厂房, 主厂房内布置 5 台单机容量 300 MW 水轮发电机组。2003 年 11 月电站进水口坝段混凝土浇筑完成。

### 1.1 电站环境量简况

水电站自 2004 年 8 月下闸蓄水以来, 库水位基本在 2 000.00 m 以上运行, 2006 年下半年后基本在 2 004.00 m 附近运行, 接近正常蓄水位 2 005.00 m, 多年运行平均水位为 2 002.40 m, 如图 1 所示。

由于公伯峡气温资料中断, 环境量因素中的资料选用进水口坝段钢筋计 R-35(仪器埋设位置: 进水口坝段 1 机压力钢管顶部, 距压力钢管外包混凝土表面约 25.00 cm)的温度资料, 替代气温资料。如图 2 所示。

### 1.2 电站进水口结构布置简况

电站进水口为混凝土重力式挡水建筑物, 轴线 NW 300°5'13.2" 与大坝轴线夹角 16°5'13.2"。进水口分为 5 个坝段, 由右至左依次为 1-5 机坝段。其中 2-5 机坝段宽度均为 18.0 m, 1 机坝段最大宽度 27.0 m

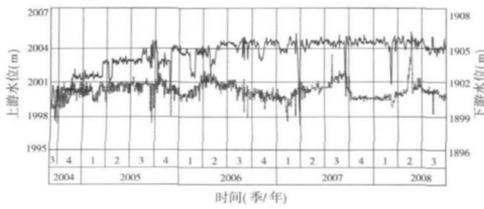


图1 公伯峡水电站水位过程线

注:2004年8月8日水库开始蓄水,当月23日水位超过1998m高程,图中略去了之前的水位测值。

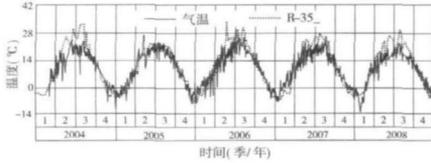


图2 公伯峡水电站气温过程线

(其中包括另在坝段右侧带有 5.0 m × 10.0 m 混凝土结构体与右岸连接段)。1#-5#机进水口顺水流方向长度分别为 69.0m、64.0m、59.0m、54.0m 及 50.0m。进水口底高程 1975.00m。

为了提高进水口坝段的抗滑稳定,在坝段前沿设置了齿墙。1#机进水口上游齿墙基础高程为 1952.00m,坝段基础面高程为 1955.00m,2#机进水口上游齿墙基础高程为 1955.00m,坝段基础面高程为 1958.00m,3#-5#机进水口上游齿墙基础高程为 1958.00m,坝段基础面高程为 1961.00m。

## 2 进水口 5#机坝段位移监测资料分析

进水口 5#机坝段断面主要项目:位移监测体系、钢筋应力监测、混凝土应力监测、温度监测、混凝土接缝变形监测和渗流监测等。如图 3所示。

### 2.1 坝体垂直位移分析

垂直位移约定:“+”表示测点下沉;“-”表示测点上抬。量值均以 mm 计。

电站进水口段垂直位移采用几何水准法和静力水准法两种方法监测。几何水准点布置在电站进水口段坝顶(10个测点)和进水口基础廊道内(17个测点,含右岸高趾墙 3个测点)。分别是 LD-J-01-10(坝顶水准点)、LD-JS-01-17(基础廊道水准点)。基础廊道内静力水准测点布置于几何水准测点旁。如图 4所示。

经过对观测资料的分析可以看出:

进水口坝段坝顶垂直位移(测点位于坝顶下游侧)呈明显的年周期变化,高温季节坝体沉降量较小,低温季节坝体沉降量较大,并存在下沉的趋势性。如图 5所示。基础廊道垂直位移测值表现出上游侧相对下游侧抬升的趋势,2006年之后此趋势性渐缓(表 1、图 6)。需要说明的是,基础廊道内沉降变化量受到 2007年底及 2008年初极低气温的影响,趋势性的部分量值是受

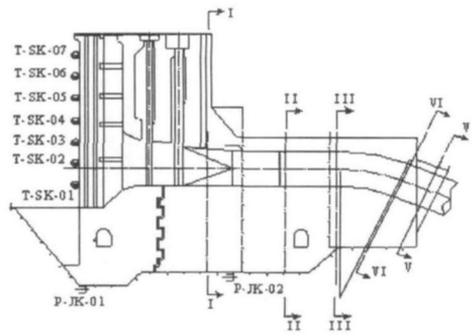


图3 进水口坝段观测仪器布置图

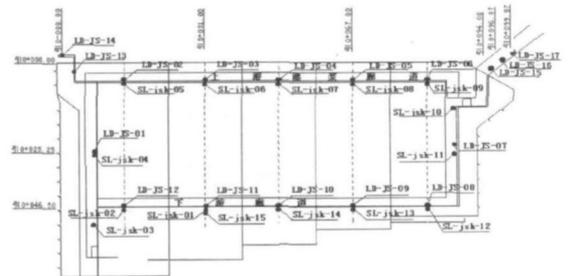
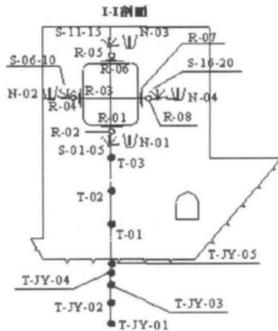


图4 进水口基础廊道水准观测布置图

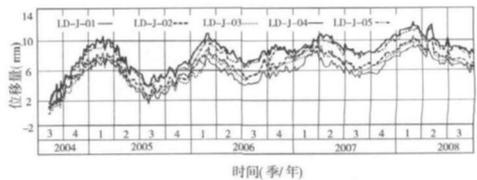


图5 进水口坝段 2010 m 垂直位移过程线

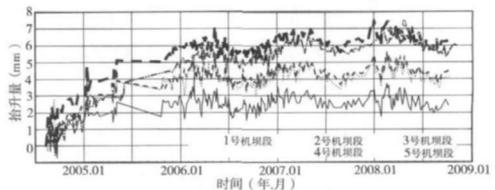


图6 基础廊道上游侧相对下游侧变化量

极低气温影响引起的。

(1)通过对各坝段之间相对不均匀沉降的分析得出:1#机坝段相对2#机坝段,3#机坝段相对4#机坝段之间存在不同程度的不均匀沉降(图 6)。

表 1 进水口坝段基础廊道垂直位移量表

上下游侧廊道对应点号	LD- JS- 01	LD- JS- 02	LD- JS- 03	LD- JS- 04	LD- JS- 05	LD- JS- 06
总沉降量 (mm)	- 1. 24	- 2. 28	- 2. 69	- 2. 44	- 3. 33	- 3. 33
相对 LD- JS- 01 沉降量 (mm)	0. 00	- 1. 04	- 1. 45	- 1. 20	- 2. 09	- 2. 09
上下游侧廊道对应点号	LD- JS- 07	LD- JS- 12	LD- JS- 11	LD- JS- 10	LD- JS- 09	LD- JS- 08
总沉降量 (mm)	+ 0. 53	- 0. 28	+ 0. 82	+ 1. 67	+ 2. 70	+ 3. 36
相对 LD- JS- 01 沉降量 (mm)	+ 1. 77	+ 0. 96	+ 2. 06	+ 2. 91	+ 3. 94	+ 4. 60

注:表中“+”表示坝体下沉;“-”表示坝体抬升。

(2)分别对进水口基础廊道 1#机坝段和 5#机坝段上游测点 LD- JS- 02、LD- JS- 06 相对同一坝段中部 LD- JS- 01、LD- JS- 07 测点及 LD- JS- 01、LD- JS- 07 相对廊道同一坝段下游侧 LD- JS- 12、LD- JS- 08 测点(图 4)的垂直位移量对比得出:1#机坝段 LD- JS- 02 相对 LD- JS- 01、LD- JS- 01 相对 LD- JS- 12 垂直位移变化量值不大,且趋势性不明显(图 7)。5#机坝段 LD- JS- 06 相对 LD- JS- 07,变化量值约 4.0 mm, LD- JS- 07 相对 LD- JS- 08,变化量值约 2.0 mm,较 LD- JS- 07 相对 LD- JS- 06 测点变化量小(图 7)。由此可知,进水口基础垂直位移量值最大的部位在 5#机坝段上游侧,即进水口 5#机坝段坝踵齿槽附近;垂直位移变化最快的时段发生在 2004 年 8 月至 2005 年 10 月。

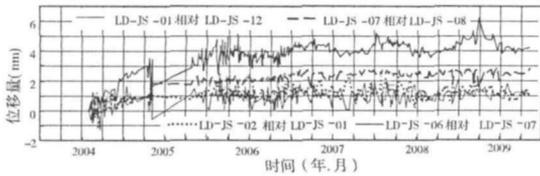


图 7 进水口基础廊道 1#机、5#机坝段垂直

(3)对 5#机坝段垂直位移和水平位移比较,可以看出 5#机坝段垂直位移和水平位移量值相近(图 8),说明坝体的水平位移值不完全是倾斜变形造成的,也含有弯曲变形。

综上所述,水库蓄水至 2005 年 10 月,是各坝段沉降变化最快的时段,也是变化趋势性最为明显的时段。进水口基础垂直位移变化量较大时段主要发生在 2005 年 4 月份基础廊道灌浆之前,灌浆之后趋势性减缓(2005 年 4 月至 2005 年 10 月进水口坝段基础补强灌浆);基础廊道上游侧坝段之间的不均匀沉降较下游侧廊道显著。

2.2 坝体水平位移分析

表 2 进水口坝段水平位移各测点累计位移量及最大值

点号	1#正垂线		1#倒垂线		5#正垂线		5#倒垂线	
	左右岸	上下游	左右岸	上下游	左右岸	上下游	左右岸	上下游
累计位移量 (mm)	+ 0. 28	+ 3. 73	+ 0. 41	+ 2. 97	+ 3. 91	+ 11. 87	+ 0. 26	+ 6. 12
最大值 (mm)	+ 3. 42	+ 4. 56	- 0. 25	+ 2. 91	+ 4. 06	+ 13. 22	+ 1. 17	+ 6. 46

备注:表中“+”表示测点向左岸、向下游位移,“-”表示测点向右岸、向上游位移。

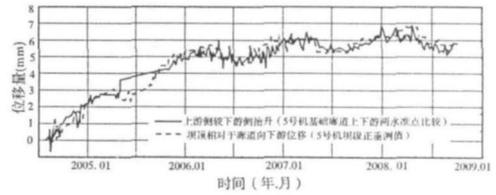


图 8 5#机坝段垂直位移和水平位移比较

水平位移约定:垂线法测值位移变化量“+”表示测点向左岸、向下游位移,“-”表示测点向右岸、向上游位移,量值均以 mm 计。

电站进水口左右两端分别布置了一组正倒垂线(垂线坐标仪 4 套),设在进水口 1#机和 5#机坝段桩号引左 0 + 004. 00 m、引左 0+ 092. 00 m。正倒垂线在基础廊道 1 961. 00 m 高程处衔接,正垂挂线点高程为 2 010. 00 m,倒垂锚固点高程为 1 913. 00 m 高程。

分析进水口 1#机、5#机坝段正倒垂线左右岸方向、顺流向方向位移过程线得出:

(1)1#机坝段水平位移左右岸方向位移最大值为 + 3. 42 mm,发生在 2005 年 2 月份;5#机坝段水平位移左右岸方向位移最大值 + 4. 06 mm,发生在 2008 年 9 月份。分析认为,左右岸方向位移与气温相关性较好,表现为 1#机坝段低温季节向左岸位移,高温季节向右岸位移,5#机坝段低温季节向右岸位移,高温季节向左岸位移的规律性。坝段基础变化规律与坝顶变化规律相一致。各坝段水平位移左右岸方向无趋势性变化。如图 9 图 10 所示。

(2)1#机坝段水平位移顺流向位移最大值为 + 4. 56 mm,发生在 2005 年 2 月份;5#机坝段水平位移顺流向位移最大值 + 13. 22 mm,基础面 1 961. 0 m 高程顺流向位移最大值为 + 6. 46 mm,均发生在 2008 年 3 月份。对于坝高约 60 m 的重力坝而言,基础位移 6. 46 mm 的量值是较大的(表 2)。

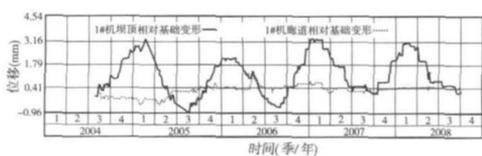


图9 进水口1#机坝段垂线左右岸方向变化量过程线

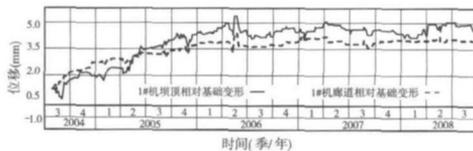


图11 进水口1#坝段垂线顺流方向变化量过程线

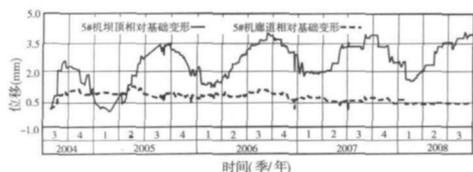


图10 进水口5#机坝段垂线左右岸方向变化量过程线

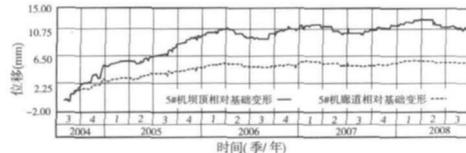


图12 进水口5#机坝段垂线顺流方向变化量过程线

(3) 2004年 10月 - 2007年 3月 (库水位基本稳定在 2 000.00 m 高程), 进水口 1#机坝段坝顶 2 010.00 m 高程相对基础锚固点 1 913.00 m 高程顺流向位移了 3.26 mm, 基础面 1 961.00 m 高程相对基础锚固点 1 913.00 m 高程顺流向位移了 2.23 mm; 5#机坝段坝顶 2 010.00 m 高程相对基础锚固点 1 913.00 m 高程顺流向位移了 9.26 mm, 基础面 1 961.00 m 相对基础锚固点 1 913.00 m 高程顺流向位移了 4.08 mm。可见, 进水口坝段顺流向水平位移主要发生在水库蓄水后的 3 年之内。从长序列资料可以看出, 随着蓄水期的延长坝段顺流向水平位移量值虽然逐年增加, 但年内位移量变幅已呈现逐年递减趋势。见表 3 及图 11、图 12。2007 年底、2008 年初极低气温对坝段的位移量也有一定影响。

表 3 5#机坝段水平位移顺流向年平均变化量

观测日期	5#机 2010m		5#机 1961m	
	顺流向位移量 (mm)	顺流向位移量 (mm)	5#机 2010m 年变化量 (mm)	5#机 1961m 年变化量 (mm)
2004年 9月	1.56	1.39	0.00	0.00
2005年 9月	8.41	4.57	6.85	3.18
2006年 9月	10.72	5.40	2.31	0.83
2007年 9月	11.26	5.54	0.54	0.14
2008年 9月	11.75	6.11	0.49	0.57
2009年 9月	12.12	6.24	0.37	0.13

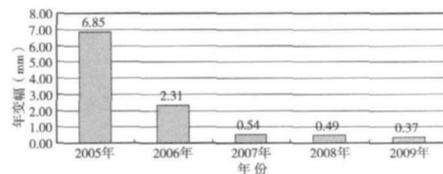


图13 5#机坝段坝顶水平位移顺流向年平均变化量

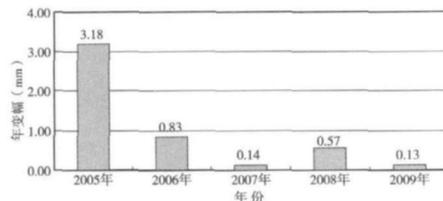


图14 5#机坝段基础水平位移顺流向年平均变化量

左右岸方向的位移情况, 1#机坝段高温季节向右岸位移, 5#机坝段高温季节向左岸位移, 符合混凝土坝的一般变化规律。

### 3 主要结论和建议

#### 3.1 主要结论

分析认为: 进水口坝段位移量偏大且有趋势性的问题集中表现在 5#机坝段齿槽部位。同时也从电站进水口坝段运行状况中揭示了以下主要规律:

##### 3.1.1 垂直位移特征

(1) 坝顶垂直位移依然呈明显的年周期变化, 高温季节坝体沉降量较小, 低温季节坝体沉降量较大, 并存在下沉的趋势性。

(2) 基础廊道垂直位移表现出上游侧相对下游侧抬升的趋势, 变化量最快的时段发生在 2004 年 8 月至 2005 年 10 月, 即基础廊道补充灌浆之前。最大沉降量发生部位在 5#机坝段上游侧, 即进水口 5#机坝段坝踵齿槽部位, 2006 年之后此趋势减缓。

综合来看, 进水口坝段水平位移顺水流方向总体向下游位移, 且 5#机坝段位移量大于 1#机坝段的位移量, 自动化观测值与人工观测值趋势相一致。2005 年 4 月份进水口基础廊道灌浆处理并没有使坝段顺流向方向位移停止。至今, 进水口坝段顺流向位移仍然有趋势性增长, 但年变化量值逐年减缓。见表 3 及图 13、图 14

坝段水平位移左右岸方向的变形是以气温引起的变化为主, 无明显的趋势性。对比进水口 1#与 5#机坝段

(3)自蓄水初期进水口各坝段之间就存在不同程度的不均匀沉降,趋势性不甚明显。

### 3.1.2 水平位移特征

(1)水平位移左右岸方向的位移量与气温相关性较好,表现为 1# 坝段冬季向左岸位移,夏季向右岸位移, 5# 坝段冬季向右岸位移,夏季向左岸位移的规律性,坝段基础变化规律与坝顶变化规律相一致,且无趋势性。

(2)坝体总体向下游位移, 5# 坝段位移量值大于 1# 坝段的位移量值,自动化监测值与人工观测值趋势相一致。

(3)2005 年进水口基础廊道灌浆处理没有使坝段顺流向水平位移停止,至今进水口坝段顺流方向位移仍然有趋势性。此趋势主要发生在水库蓄水后的 3 年之内,长序列资料显示坝段顺流方向位移量随着蓄水年份的增长年变幅呈逐年递减的趋势。

(4)5# 坝段垂直位移和水平位移量值相近。说明坝段坝踵部位有转动,而此处处于坝段齿槽部位。

### 3.2 存在问题及下一步的工作建议

(1)5# 坝段坝踵齿槽部位目前有存在拉应力区和材料强度折减的可能,应加强报告分析中坝齿槽部位的监测,随时分析。

(2)应加强电站进水口坝段变形监测、基础场压力监测、右高趾墙接缝监测,及时分析监测成果。

(4)通过分析排查,进水口坝段顺流向位移量主要

发生在水库蓄水后 3 年之内,随着蓄水时段的延长年平均位移量呈逐年递减趋势。但是,坝段垂直位移和顺流方向水平位移的趋势性仍在继续,应引起高度重视。

(5)建议对进水口坝段特别是 5# 坝段齿槽部位及右高趾墙部位,按 2005 年补强灌浆孔位打检查孔并作试验性灌浆,观察其吃浆量和吕荣值以进一步判断坝基是否有拉裂现象。

### 参考文献:

- [1] 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院. 黄河公伯峡水电站枢纽工程竣工安全鉴定设计自检报告[R]. 西宁:中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 2006
- [2] 黄河上游水电开发有限责任公司. 黄河公伯峡水电站枢纽工程竣工安全鉴定建设自检报告[R]. 西宁:黄河上游水电开发有限责任公司建设公司, 2006
- [3] 黄河电力勘测科技工程有限公司. 黄河公伯峡水电站大坝安全监测资料分析报告[R]. 西宁:黄河电力测试科技工程有限公司, 2008
- [4] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及应用[M]. 南京:河海大学出版社, 1990.
- [5] 秀丽,付敬,刘建,等. 软硬互层边坡岩体的蠕变特性研究及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 19(1): 7-9

## Analysis of Displacement Behavior of the Intake Dam Section on Gongboxia Dam

WANG Quan-sheng<sup>1</sup>, WANG Xue-mei<sup>2</sup>

(1. Technical School Four Bureau of China's Hydropower, Xining 810007, China

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

**Abstract** There exists great relative vertical displacement of the upstream and downstream of the intake dam section foundation (EL 1961.00m) of Gongboxia dam, and there is a trend of growth. The section continuously moves toward downstream, and also there is a trend of growth. It is an engineering problem of great concern whether these issues will affect the safe operation of the intake dam section. In order to accurately grasp the operational status of the intake dam, the monitoring system of Gongboxia dam was evaluated, and deformation observation data and the climate of Gongboxia dam, meteorological data were analyzed, and preliminary conclusions were obtained. In the first 3 years of water storage, the relative vertical and flow of horizontal displacement of the upstream and downstream of the intake dam (EL 1961.00m) increased faster, the level of vertical and horizontal displacement changes larger. After 2006, the annual variation of the displacement gradually declined, but the trend of growth remains.

**Key words** Gongboxia intake dam section, displacement behavior