

大化水电站溢流坝段水平位移异常原因分析

沈 慧¹, 王志远¹, 黄武春²

(1. 国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 广西桂冠大化水力发电总厂, 广西 河池 530800)

摘要:针对大化水电站观测资料中显示的溢流坝段水平位移夏秋季节趋向下游,与一般混凝土大坝温升向上游位移变化规律相反的异常现象,通过有限元计算和大量实测资料深入对比分析,发现大化水电站溢流坝段特殊的变形规律真实可信,它是坝地质条件及电站运行方式的真实反映。异常原因为大化电站上游水位变动小而下游水位变幅特别大,泄洪季节下游水压力的垂直分量作用于溢流面和护坦,在上游水压力的联合作用下,引起基岩向下游转动,表现为夏季泄洪坝顶趋向下游。有限元计算表明地基变形模量低,在一定程度上验证了地质缺陷对变形的影响。

关键词:溢流坝段;安全监测;水平位移;下游水位;大化水电站

中图分类号:TV652.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2012)06-0050-06

Analysis of horizontal displacement abnormality for overflow dam of Dahua Hydroelectric Power Plant//SHEN Hui¹, WANG Zhiyuan¹, HUANG Wuchun² (1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. Dahua Hydroelectric Power Plant of Guangxi Guiguan Electric Power Co., Ltd., Hechi 530800, China)

Abstract: With regard to the abnormal phenomenon that the observed data of Dahua Hydroelectric Power Plant show that the horizontal displacement of overflow dam is toward the downstream in summer and autumn, while the concrete dams generally have the contrary variation rules owing to temperature rise, through the FEM calculations and the in-depth comparison of observed data, the special deformation rules of overflow dam of Dahua Hydroelectric Power Plant are true and reliable. This phenomenon is reflected by the geological conditions of dam foundation and the operation modes of hydropower station. The causes for the abnormal phenomenon are as follows: the fluctuating range of the upstream water level of Dahua Hydroelectric Power Plant is small, while that of the downstream one is quite large; during the flood period, the vertical component of the downstream water pressure acts on the overflow dam surface and the apron, it will cause the dam foundation to turn towards the downstream direction under the combined action of the upstream water pressure, resulting in that the crest of the overflow dam goes towards the downstream in summer. The FEM calculations show that the deformation modulus of the dam foundation is low, and the impact of geological defects on the deformation is validated to some extent.

Key words: overflow dam; safety monitoring; horizontal displacement; downstream water level; Dahua Hydroelectric Power Plant

大坝变形监测是大坝安全监测的重要组成部分。由于坝体变形直观可靠,其监测成果可直接评估大坝安全状况,故规范将变形监测规定为必测项目。正确掌握大坝变形规律对了解大坝工作状态,评估大坝安全状况有着重要的意义^[1-5]。以往,人们对混凝土坝顶水平位移的常规认识是“在高温季节趋向上游,低温季节趋向下游”,这条规律在多数水电站大坝中具有普遍性,是合理、正确的;但大化水电站溢流坝段则出现了相反的异常现象,观测资料显示,溢流坝段水平位移在夏季温升时趋向下游,与一般混凝土大坝位移方向相反。由于早期人工观测精度低,测次密度小,难以发现其中不同的规律,加

之设于溢流坝顶的引张线自动化观测系统曾出过故障,溢流坝段这种特殊的变形规律被认为观测资料“不可靠”而迟迟未得到确认。本文在复核数据的基础上,通过对大量实测资料的分析判断,证明大化水电站溢流坝段特殊的变形规律是真实存在的,它与坝地质条件及电站运行方式有关,国内罕见。有限元计算也证明下游水位变幅大及坝基较软弱是造成夏秋季节大坝向下游变形的主要原因。

1 工程与地质概况

大化水电站位于广西大化县境内红水河中游,为红水河梯级规划中的第6个梯级电站,是一座以

作者简介:沈慧(1981—),女,江苏南京人,工程师,硕士,主要从事大坝安全监测研究。E-mail:narishenhui@163.com

发电为主、兼有通航等综合利用功能的枢纽工程。正常蓄水位 155.0 m, 水库总库容 8.76 亿 m^3 , 正常蓄水位相应库容 4.15 亿 m^3 , 为日调节水库。

溢流坝全长 228.4 m, 共分 12 个坝段, 13 个溢流孔, 其中 4 号、5 号、6 号坝段为混凝土空腹重力坝, 其余坝段为实体重力坝, 坝顶高程 174.5 m, 最大坝高 74.5 m; 厂房位于河床右侧, 全长 175 m, 分 5 个坝段, 最大高度 83.3 m, 基岩以下挖深 36 m。由于汛期下游水位高, 厂房为全封闭式, 是我国挡水最高的河床式水电站之一。

大化水电站于 1975 年 10 月开工, 工程分两期施工, 1982 年 5 月 27 日下闸蓄水, 1983 年 12 月第一台机组正式投产发电, 1985 年 6 月最后一台机组投入运行, 1986 年 6 月工程竣工。大坝自运行以来泄洪频繁, 每年均发生大于 10000 m^3/s 的洪水流量, 闸门年均开启 1100 余次泄洪或进行晚峰水位调节。坝址区地层为三叠系下统岩层, 岩性为灰色或深灰色薄层泥岩与灰岩互层, 性质软弱, 抗冲、抗风化性能较差。由于构造挤压强烈, 不仅有层间错动和层间挤压破碎带, 而且岩体内各种断裂均较发育。

溢流坝段基本开挖至弱风化岩体, 但岩体为薄层状软硬相间岩层, 受结构挤压强烈, 各类陡倾角断裂和缓倾角断裂十分发育, 岩体完整性较差。厂房基础亦置于微风化岩体上, 但该处岩层陡立, 层间结合较牢, 地基允许承载力能满足厂房对地基的要求。河床坝基断裂仍然发育, 但宽度不大, 沿断裂带形成的风化槽规模短小, 总体看岩体较完整。为提高溢流坝防渗性能, 在坝前设置了防渗铺盖, 在铺盖廊道内进行帷幕灌浆。

2 水平位移变化规律分析

2.1 观测设施布置

坝顶水平位移观测包括视准线、引张线和垂线等设施, 其中溢流坝段引张线 EX2 全长 249.3 m, 设在高程 172.9 m 电缆廊道内, 共布设 14 个测点。引张线右端点用 PL2 和 IP5 垂线组观测, 左端点用

PL5 和 IP10 垂线组观测。5 号墩下游侧(坝下 0+38 m)的 PL3 和 IP7 垂线组、10 号墩下游侧(坝下 0+30 m)的 PL4 和 IP8 垂线组单独观测坝体挠度。引张线和垂线观测布置见图 1。

2.2 水平位移规律

大化水电站溢流坝段和厂房坝段坝顶均布置了引张线, 但测值过程线形态相反, 粗看大致是“峰谷相对”。详细分析, 有以下一些特点:

a. 溢流坝段夏秋季节高水位期趋向下游, 冬春季低水位期在温降时趋向下游, 温升时趋向上游, 看上去形似一个“山”字, 每年如此, 以 2007 年最为典型, 见图 2。

b. 溢流坝段引张线相对位移只在夏季呈半个“正弦曲线”, 冬季则基本保持水平, 见图 3。

c. 引张线两端点的位移测值(即靠近厂房的 1 号坝段右边墩和 12 号坝段左边墩)与中央溢流段有差异, 1 号坝段位移测值与厂房坝段测值接近。

d. 厂房坝段的变形规律与一般混凝土坝相同, 低温季节向下游位移, 高温季节向上游位移, 但变幅与同类型水电站相比特别小。经统计, EX101 ~ EX105 在 1996—2011 年期间的多年平均年变幅依次为 3.85 mm, 3.84 mm, 3.66 mm, 3.24 mm 及 2.96 mm, 对一座高达 83 m 的河床式厂房坝段来说, 年变幅还不到 4 mm; 而国内河床式电站如浙江富春江电站^[6], 厂房段高 57.4 m, 坝顶位移多年平均年变幅为 6.1 ~ 7.4 mm (2001—2005 年); 宁夏青铜峡电站^[7,8], 坝高 42.7 m, 厂房段高 42.7 m, 坝顶位移多年平均年变幅为 4.1 ~ 9.2 mm (1995—2005 年); 山西天桥水电站, 厂房坝段高度 41.5 m, 坝顶位移多年平均年变幅 8.23 ~ 8.76 mm (1996—1999 年, 均同为引张线自动化测值)。

3 异常位移规律成因分析

3.1 资料可靠性分析

由于溢流坝段异常的位移规律, 也曾怀疑过原始资料的可靠性, 因此在分析之前, 首先对水平位移

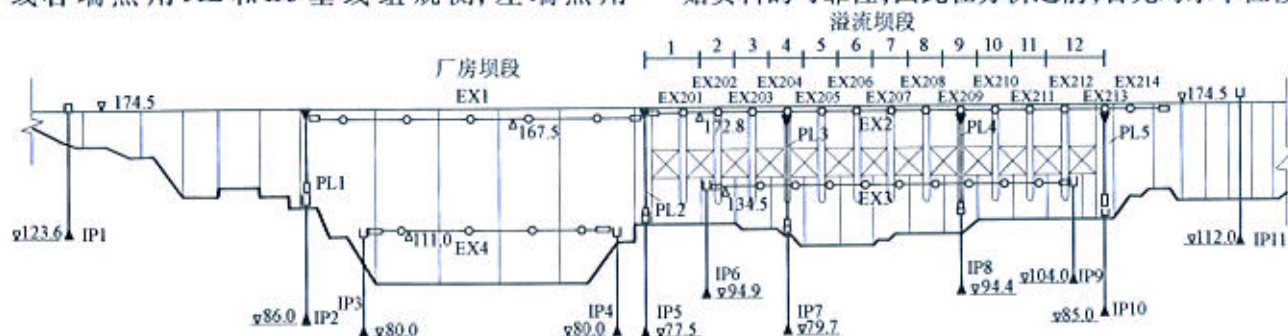


图 1 引张线及垂线观测布置(单位:m)

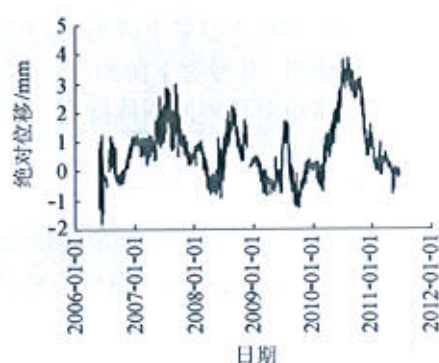


图2 溢流坝引张线绝对位移过程线(向下游为正)

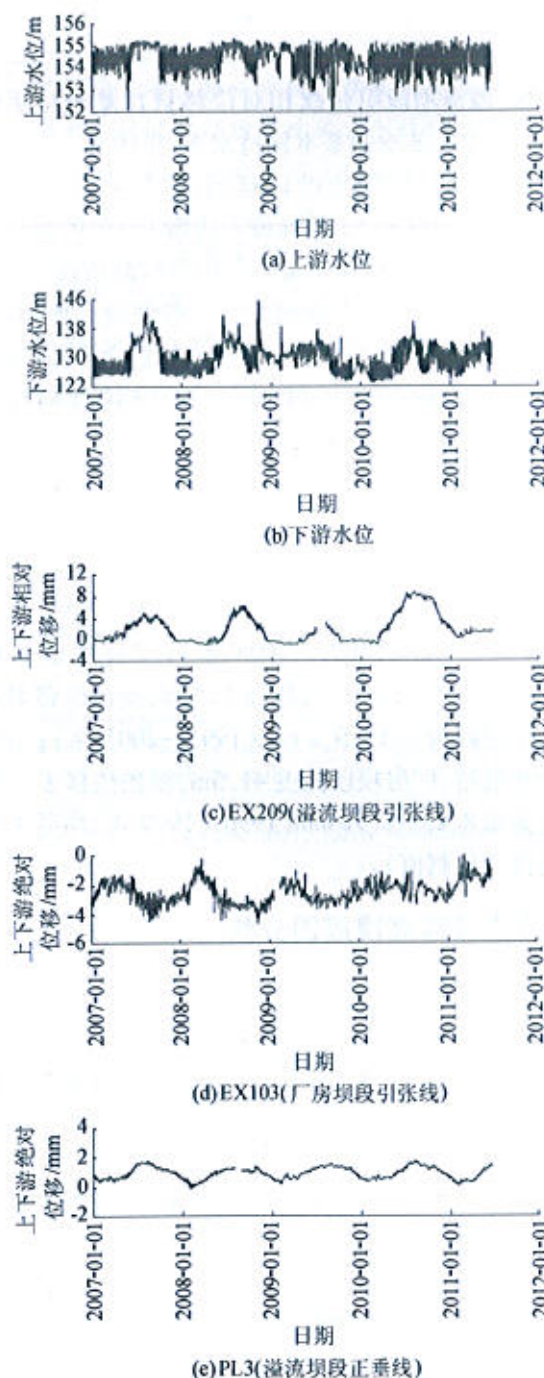


图3 水平位移实测过程线

观测数据可靠性进行了考察。

溢流坝 172.9 m 高程引张线 EX2 于 1996 年安装,并实现了自动化监测^[9],2004 年 1 月至 2006 年 4 月,因设备故障处于停测状态,2006 年 6 月系统改造,恢复测量,同时保留人工比测。从引张线本身测值来看(不考虑两端垂线),2002 年以前测值变幅明显偏小,年变幅只有 1 mm 左右,虽然它的规律也是夏季向下游,冬季向上游,但其绝对值形态被两端点垂线的规律性所掩盖;加之 2004—2006 年的测值中断,位移规律似乎是从 2002 年开始发生了变化,实质是 1996—2001 年间系统故障所致,2002 年电厂发现后进行了修正,此后恢复正常。2009 年 6 月 27 日至 2009 年 7 月 31 日期间引张线线体不自由。除去这些不正常时期的数据,引张线测值规律性很好,人工与自动化观测成果一致,且垂线和引张线两种相互独立的观测设施测得成果一致,资料可信,详见图 3(图中 PL3 为溢流坝 4 号坝段正垂线绝对位移),可看出其变化规律同样为夏秋季节趋向下游。

3.2 定性分析

引起混凝土坝变形的主要因素有水压力、扬压力、泥沙压力和温度等,要解释大化水电站溢流坝段异常的位移现象,可按照统计模型的分量形式将位移分为 3 部分:水压分量、温度分量和时效分量。这里暂不考虑时效变形,先从温度和气压两方面来分析。

3.2.1 温度变形

大坝温度变形值取决于上下游坝面的温差,亦即上游库水温和下游面气温的差异。对绝大多数河床径流式水电站来说,由于库水位变动极小,气温形成的位移占支配地位,高温季节时坝顶趋向下游,低温季节时趋向下游。大化水电站则不同,下游水位变化幅度很大,并呈明显的季节性。观测资料显示,1996—2010 年期间在冬季 1 月和 2 月历年最低水位平均值为 123.66 m,与库水位相差 30 m 左右,所以这时上下游坝面温差较大,温度位移比较显著;到 7 月和 8 月持续泄洪时,下游水位升高,历年最高水位平均值为 147.57 m,上下游水位仅相差 10 m 左右,由于水位差小,上下游坝面温差也小,坝体温度分布比较均匀,温度变化影响同样也小,所以夏秋季节坝顶温度位移较小。这点可从厂房坝段位移变幅值偏小得到验证。如前所述,大化水电站厂房坝段的位移平均年变幅不到 4 mm,主要原因就是夏季上下游温差小的缘故。

3.2.2 水压变形

红水河水量丰富,大化水库年径流量达 632.60 亿 m^3 ,水库总库容 8.76 亿 m^3 ,正常蓄水位相应库容 4.15 亿 m^3 ,库容系数小于 1%,只具有日调节性能,因此库水位十分稳定。1996—2010 年期

间平均年变幅仅 2.04 m, 多年平均库水位 154.43 m。相比之下, 大化水库下游水位变化很大, 与稳定的库水位形成极大反差, 在国内也是罕见的。下游水位最低值为 1984 年的 117.73 m, 最高值为 1988 年 8 月 31 日的 157.57 m, 比当日库水位仅低 1.2 m, 1984—1995 年期间下游水位平均年变幅为 31.65 m, 是库水位变幅的 15 倍。

1992 年上游岩滩电站水库蓄水后情况有所缓和, 1996—2010 年期间平均年变幅为 24.32 m, 比前期减小约 7 m, 期间年最高水位平均值为 147.57 m, 最低水位平均值为 123.66 m, 但 1996 年下游百龙滩水库蓄水后 (正常蓄水位 126 m), 下游水位平均值比前期有显著抬高, 年平均值由 124.62 m 升至 1996 年的 131.62 m, 此后基本维持在 130 m 附近变化, 其对坝体变形的影响不可忽视。

溢流坝坝顶引张线与下游水位过程线有明显的相关性, 经计算 EX209 与下游水位的日平均值在 2007 年简单相关系数高达 0.787, 这很容易联想到下游水位起主要作用。分析认为, 溢流坝在夏秋季节倾向下游除与下游高水位有关外还与溢流坝坝体结构形式有关, 下游水压对坝体有一个水平向合力使坝体倾向上游; 但同时它垂直于溢流坝面和护坦的作用力所产生的力矩则使坝体向下游转动, 如图 4 及图 5 所示。一般重力坝非溢流段下游坡很陡, 在 1:0.7 左右, 作用在下游坝面的垂直力很小, 但对大化水电站溢流坝段来说竖向力不能忽视。尤其因基岩比较软弱, 在高水位时会产生较大沉陷变形, 进而导致坝体变形转向下游, 使坝顶向下游位移。

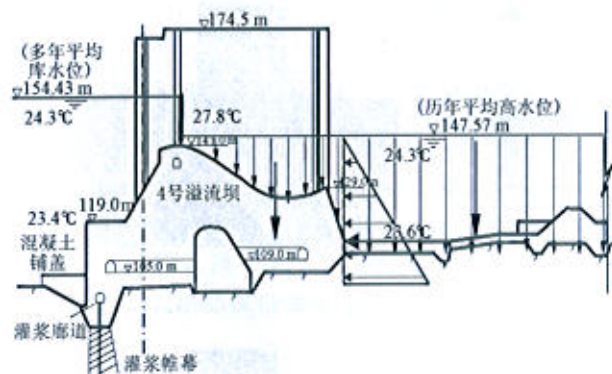


图 4 溢流坝 7 月下游最高水位水压及温度荷载示意图 (1996—2010 年)

在高温季节坝体的温度位移仍然存在, 并且指向上游, 但它相对比较微弱, 小于水压位移, 在夏秋季节成为次要因素。

引张线两端点即靠近厂房的 1 号坝段右边墩和 12 号坝段左边墩坝段与中央溢流坝段有差异, 这是因为它们的下游边界条件和中央溢流坝段不同, 受下游水压

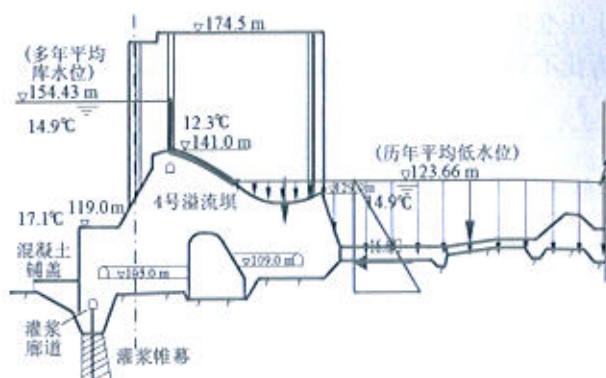


图 5 溢流坝 1 月下游最低水位水压及温度荷载示意图 (1996—2010 年)

力的影响相对较小。厂房坝段主要以温度变形为主。

中央溢流段的位移形似“山”字可以解释为: 夏秋季节以水压位移分量为主要, 上下游水压分量均指向下游, 坝体向下游位移; 冬春季节以温度位移分量为主要, 也指向下游, 坝体也向下游位移, 只是位移不明显, 使原本的“正弦曲线”变成了“山”字形曲线。

溢流坝段相对位移在冬春季出现“水平段”则说明, 冬春季由于水压影响小, 中央溢流坝段的位移与两端点变形规律相同, 同步变化, 所以呈“水平”状。相对位移更能反映溢流坝段本身变化规律, 因为它没有叠加两端点的位移, 如图 6 所示。

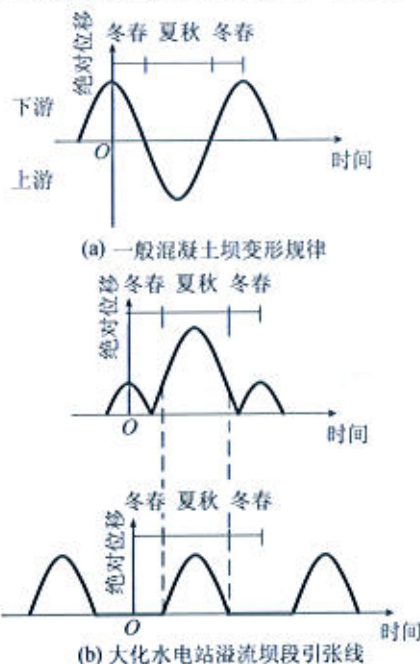


图 6 溢流坝段引张线变形规律示意图

曾对大化水电站溢流坝段引张线观测数据进行统计模型分析, 试图分解出水压变形和温度变形, 但由于下游水压因子和温度因子具有较高的相关性, 简单相关系数为 0.42, 采用逐步回归以及偏最小二乘回归计算, 分解效果均不理想。对这种冬春季下游低水位期以温度变形为主, 夏秋季节高水位期

水压变形占优势的大坝,统计模型难以发挥作用,因为找不到一个合适的模型表示两种规律。

3.3 有限元计算

为验证上述分析结论,对溢流坝主河槽部位7号坝段进行了三维有限元计算。计算模型网格剖分情况见图7,单元数21948,节点数25183。坝体的上下游方向各取约1倍坝高,地基深度亦取约1倍坝高。坝体及地基均假定为线弹性材料,其材料特性参数分别为:混凝土弹性模量26 GPa,灌浆帷幕弹性模量20 GPa,混凝土泊松比0.167,地基泊松比0.25,地基弹性模量取3组进行分析,见表1。

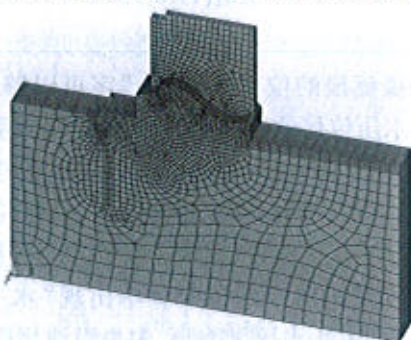


图7 溢流坝7号坝段有限元计算网格

假定上游水位不变(取多年平均库水位154.43 m),下游水位分别取历年平均高水位147.57 m和历年平均低水位123.66 m,计算了3组不同地基弹性模量下的水平位移,结果如表1和图8所示。

有限元计算结果显示了水压作用下坝顶水平位移的变化。可以看出,当地基弹性模量从2 GPa变化到5 GPa时,下游水位的升高引起坝体向下游的

表1 不同地基弹性模量下有限元计算成果对比

方案	上游水位/m	下游水位/m	地基弹性模量/GPa	坝顶水平位移/mm	位移变幅/mm
1	154.43	123.66	2	3.75	4.88
		147.57		8.63	
2	154.43	123.66	3	2.02	3.21
		147.57		5.23	
3	154.43	123.66	5	0.84	1.87
		147.57		2.71	

注:位移以向下游为正。

位移增量为4.88~1.87 mm。经统计,大化水电站溢流坝7号坝段坝顶引张线多年平均年变幅4.48 mm,虽然该值包含了水压、温度及时效位移在内,不便和有限元计算成果直接进行对比,但至少有一点可以证明,当下游水位升高时,坝顶水平位移增量是指向下游的。因地基软弱,泄洪季节下游水位的垂直分量使坝体和基础下沉,由于坝踵处经过帷幕固结灌浆等处理,上下游基础的刚度可能有一定差别,从而产生不均匀沉降,基础向下游倾斜,其量值大于大坝温度变形产生的位移量,表现为坝顶向下游移动。在方案3中,若降低帷幕弹性模量,取5 GPa计算,在下游水位为147.57 m的情况下,坝顶向下游位移量由2.71 mm减小至2.12 mm,说明上下游基础刚度的差别对坝基转动量确有影响。有地质资料^[10]显示,大化水电站地基变形模量在2.7~5.0 GPa,比较低,上述计算在一定程度上对该量级作出了验证。

4 结论

a. 河床式电站在上游水位基本不变而下游水

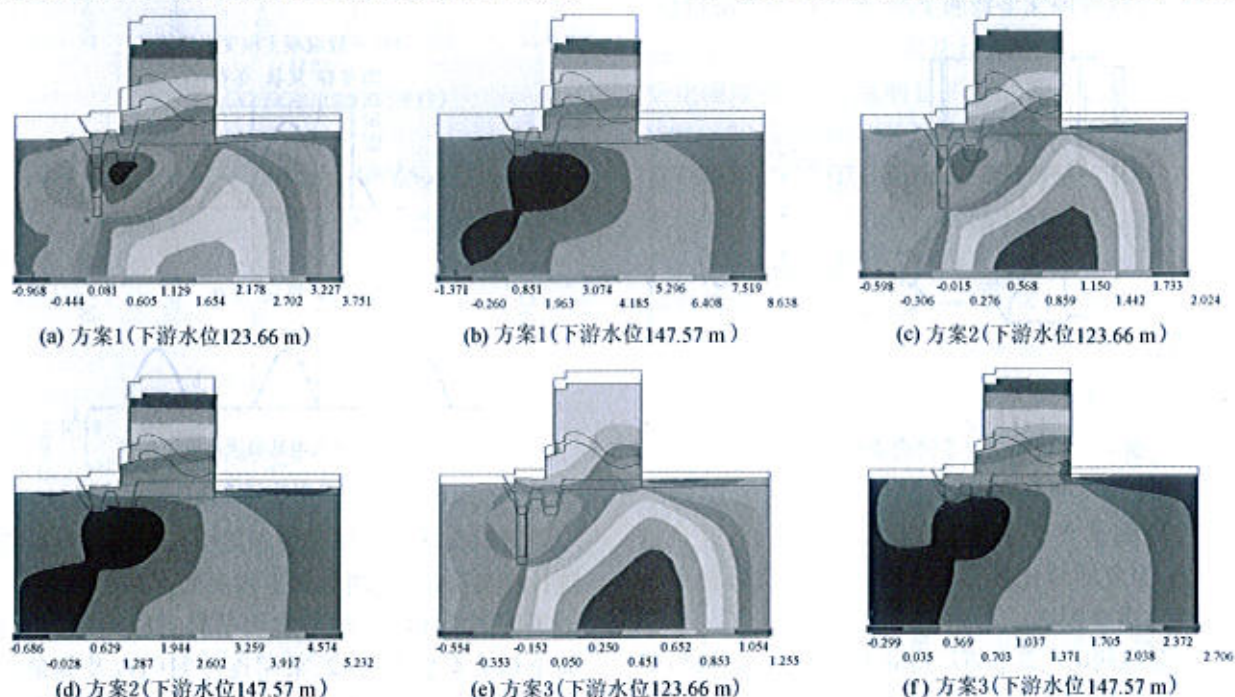


图8 坝体水平位移等值线(单位:mm)

位变幅很大的条件下,夏季泄洪时溢流段成为“潜堰”,水重作用在溢流面和护坦上使坝体和基础下沉,并使坝顶向下游位移。

b. 温度对位移的影响反映在水位变化引起下游侧的温度变化。夏季高水位工况下,因下游水位升高,溢流坝段处于“浅堰”状态,坝体温度分布较均匀,上下游温差降低,进而使温度分量减小。

c. 坝踵处经过帷幕固结灌浆等处理,使上下游基础的刚度有一定差别,从而在水荷载作用下产生不均匀沉降,基础向下游倾斜,使坝顶向下游变形。

d. 所谓“异常”的位移不能用常规大坝位移规律分析时,不应轻易否定资料,而应结合具体情况在复核数据的基础上根据大坝当时的荷载和上下游边界条件等因素对位移的影响作综合研究。大化坝顶位移变幅较小,以往人工观测资料数据密度低,精度有限,难以发现其中不同的规律,而在自动化观测条件下,数据密度、精度都大大提高,这为研究大坝变形规律,掌握大坝工作性态起到重要的作用。

参考文献:

- [1] 吴中如,沈长松,阮焕祥. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 南京:河海大学出版社,1990.

- [2] 彭虹. 大坝变形监测自动化中的几个问题[J]. 大坝与安全,2007(1):34-37.
[3] 彭虹. 再谈变形监测自动化中的几个问题[J]. 大坝与安全,2008(5):22-28.
[4] 彭虹. 三谈变形监测自动化中的几个问题[J]. 大坝与安全,2011(2):17-23.
[5] 王志远. 混凝土坝观测设计中的若干问题[J]. 大坝观测与土工测试,1999,23(1):45-47.
[6] 富春江大坝第三次安全定期检查大坝监测资料分析报告[R]. 南京:国电自动化研究院大坝及工程监测研究所,2005.
[7] 青铜峡水电站观测资料延长期补充分析报告:1984—1989年[R]. 南京:能源部南京大坝观测资料分析中心,1990.
[8] 韩世栋,李凤珍,章赢. 青铜峡大坝电站坝段水平位移监测资料分析[J]. 黑龙江水专学报,2007,34(2):32-34.
[9] 刘观标,王志远,罗昌. 大化大坝监测系统更新改造及自动化系统设计[J]. 水电自动化与大坝监测,1998,22(5/6):4-7.
[10] 大化水电站大坝原型观测资料分析总报告[R]. 南京:能源部南京大坝观测资料分析中心,1993.

(收稿日期:2012-08-29 编辑:熊水斌)

(上接第45页)

b. 在大流量变幅范围内,通过比较加设防挑盖板时不同池长情况下的T形墩消力池的消能率,确定适合肯斯瓦特水利枢纽工程的消力池池长为52.5m。优化后的消力池提高了消能率,减少了开挖方量,工程效益相对较高。

c. 试验分析得出T形墩支腿长度设计时存在一个最优支腿长度。在大流量变幅范围内,支腿长度为12m时的消能率最高,且比较稳定。

d. 在原设计方案的基础上对T形墩形体进行优化,通过消能效果分析,认为墩形设计为支腿梯形、前墩弧形时的消能效果最好。

参考文献:

- [1] 刘焕芳. 新疆玛纳斯河肯斯瓦特水利枢纽工程溢洪道水力模型试验报告[R]. 石河子:石河子大学,2009.
[2] 王忠诚. T形墩消力池的试验研究与工程应用[D]. 大连:大连理工大学,2001.
[3] 田嘉宁,李郁侠. T形墩消力池的体型与水力设计[J]. 西安理工大学学报,1998,4(4):369-372.

- [4] 肖富仁. 高水头泄水建筑物泄洪消能设计思路探讨[J]. 水电站设计,2008,24(4):6-10.
[5] 李琳,葛旭峰,谭义海,等. 小石峡水电站溢洪道消能工优化试验[J]. 水利水电科技进展,2011,31(4):77-81.
[6] 尹志刚,左战军,刘春友,等. 若干拱网消能工与普通消力池工程实例的经济分析[J]. 水利经济,2008,26(2):30-32.
[7] 李中枢,杨敏. T形墩消力池的水力特性与体型研究[J]. 水利学报,1995,26(3):28-39.
[8] 吕宏兴,裴国霞,杨玲霞. 水力学[M]. 北京:中国农业出版社,2002:233-258.
[9] 艾克明,刘昭然,宋向宁. T型墩消力池的研究与应用[J]. 水力发电学报,1997(4):30-42.
[10] 艾克明,刘昭然,宋向宁. T型墩消力池的水力设计[J]. 湖南水利,1997(1):8-11.
[11] 刘昭然,郭静霞,王雪莉. 三江口溢流坝T型墩消力池的试验研究[C]//泄水建筑物消能防冲论文集. 北京:水利水电出版社,1980.
[12] 刘文华. 大变幅流量下溢洪道水力特性试验研究[D]. 石河子:石河子大学,2010.

(收稿日期:2012-03-19 编辑:骆超)