

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.05.34

# 实例碾压混凝土重力坝变形监测资料统计模型分析

尚 层

(新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘 要:** 一个实例工程碾压混凝土重力坝从建成到现在已运行多年,为了了解该工程坝体的变形情况,对该碾压混凝土重力坝的重点坝段进行了专题分析,采用大坝运行多年的监测资料并结合统计建模方法,对坝基抗滑、坝体抗倾覆稳定及水平位移进行了深入的分析。结果表明:坝基倾斜影响分量中水压分量占70%~85%,温度分量约占10%~20%,时效分量所占比重不超过10%,另外,复杂的地质条件、非连续性的岩体介质及基岩矿物种类也是造成坝基倾斜变化的主要原因。坝基及坝体水平位移受库水位影响较大,其中EL675.1m与EL706.5m高程测点水压分量分别约占80%、60%,温度分量分别约占10%、20%,时效分量分别约占10%、20%。坝基、坝体整体变形规律正常。

**关键词:** 碾压混凝土坝;重力坝;坝体变形;变形监测资料;统计模型

中图分类号:TV698.1<sup>+</sup>1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)05-0205-07

## Statistical analysis of deformation monitoring data of a RCC gravity dam

SHANG Ceng

(Project Construction Authority, Xinjiang Irtysh River Basin, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** A RCC gravity dam has operated for many years since being built. In order to understand the deformation of the project, in this paper, the key dam section of the RCC gravity dam is analyzed. By using the years of monitoring data and combining with statistical modeling methods, the anti-skidding of the dam foundation, the anti-overturning stability and the horizontal displacement of the dam are analyzed in depth. The results show that, the water pressure component of the dam foundation is 70%~85%. The temperature component is about 10%~20%, and the proportion of the aging component is not more than 10%. In addition, the complicated geological conditions, non-continuous rock mass and bedrock mineral species are also the main cause of dam foundation diagonal changes. The horizontal displacement of the dam foundation and the dam is greatly influenced by the reservoir water level, the water pressure components of EL675.1m and EL706.5m account for about 80% and 60%, respectively. The temperature components account for about 10% and 20%, respectively. The aging components account for about 10% and 20%. The overall deformation of the dam and dam foundation is normal.

**Key words:** RCC dam; gravity dam; dam deformation; deformation monitoring data; statistical model

变形监测是大坝监测项目中的重要项目之一,是了解坝体、坝基变形规律的重要依据。大坝变形可通过外观和内观的共同监测来掌握其变形规律,国内对大坝变形监测的各种手段和变形资料分析已有了较为深入的研究<sup>[1-8]</sup>,但对于坝基倾斜原因及分布特性研究较少。本文通过长序列的监测资料,并结合统计建模等方法,对RCC大坝的坝基倾斜原因及变化规律进行了深入的分析,通过统计建模对

坝体、坝基的水平位移做了较为详尽的分析,为了解类似工程变形规律,掌握工程工作特性起到了重要借鉴作用。

## 1 工程概况

本文实例碾压混凝土重力坝工程规模为I等大(1)型工程,该枢纽水库总库容为 $24.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,正常蓄水位为739m,死水位为680m,主坝采用全断

收稿日期:2017-03-06; 修回日期:2017-04-05

作者简介:尚层(1985-),男,新疆乌鲁木齐人,硕士,工程师,主要从事工程安全监测技术研究工作。

面碾压混凝土重力坝,坝长为1489 m,最大坝高为121.5 m。坝址区纬度较高,年温差很大。坝址区基岩为上石炭统变质砂岩,总体产状为 $315^{\circ}\text{NE}\angle 69^{\circ}$ ,强风化层厚度为0.6~2.5 m,弱风化层厚度为1.8~2.3 m。河床左岸阶地坝段基岩中主要发育有f99、f100、f102缓倾角断层,右岸坡坝段基岩位置发育f628、f632、f243条陡倾角断层(施工时已进行了挖除处理),坝基610~620 m高程缓倾角节理相对较为集中。该RCC主坝的地震设防烈度为VIII度,坝下游由于表孔、中孔、底孔的冲刷坑而形成临空面,对坝基深层稳定不利。坝基变质岩中黄铁矿分布广泛,以原生矿物为主,主要化学成分为 $\text{FeS}_2$ ,含量多在0.003%~0.018%之间,局部可达1.91%。坝基开挖表明,主河床坝段坝基黄铁矿含量较高,受其氧化影响,风化下限埋深较深。

## 2 监测布置

### 2.1 坝基倾斜监测布置

为监测坝基沿上下游方向的倾斜状况,在28<sup>#</sup>、31<sup>#</sup>、34<sup>#</sup>坝段基础横向廊道内分别安装了3条静力水准线,编号分别为 $\text{LS}_3$ 、 $\text{LS}_4$ 、 $\text{LS}_5$ ,在每条线上各布设5个测点,水准线 $\text{LS}_3$ 、 $\text{LS}_4$ 、 $\text{LS}_5$ 分别以 $\text{LS}_{3-1}$ 、 $\text{LS}_{4-1}$ 、 $\text{LS}_{5-1}$ 为测值基准点,如图1所示。28<sup>#</sup>~32<sup>#</sup>坝段上游纵向灌浆廊道的静力水准线为 $\text{LS}_1$ ,用以监测主河床坝基沿纵向的垂直位移变形分布情况。 $\text{LS}_1$ 以29<sup>#</sup>坝段双金属标 $\text{DS}_3$ 的锚固点位移为参考,相应取该坝段上水准线测点 $\text{LS}_{1-2}$ 测点为测值基准

点,水准线长度为68.0 m。

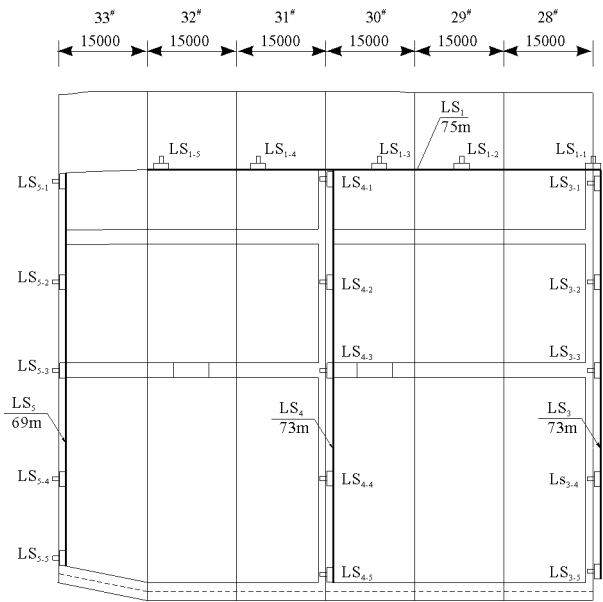


图1 坝基横向廊道静力水准布置图(单位:mm)

另外,由于静力水准线 $\text{LS}_1$ 设置了水准工作基点 $\text{DS}_3$ ,因此将该静力水准 $\text{LS}_1$ 的位移测值视为绝对位移量。而 $\text{LS}_3$ 、 $\text{LS}_4$ 、 $\text{LS}_5$ 无水准工作基点,故其位移量为相对位移量。

### 2.2 坝体水平位移监测布置

该碾压混凝土重力坝设有21条正、倒垂线监测坝顶、坝体及坝基各部分的上下游、左右岸方向的位移量。正垂线共12条,采用“单段式”与“一线多测站”式布置,其中29<sup>#</sup>溢流坝段自下而上共设3条正垂线。垂线布置图见图2所示。

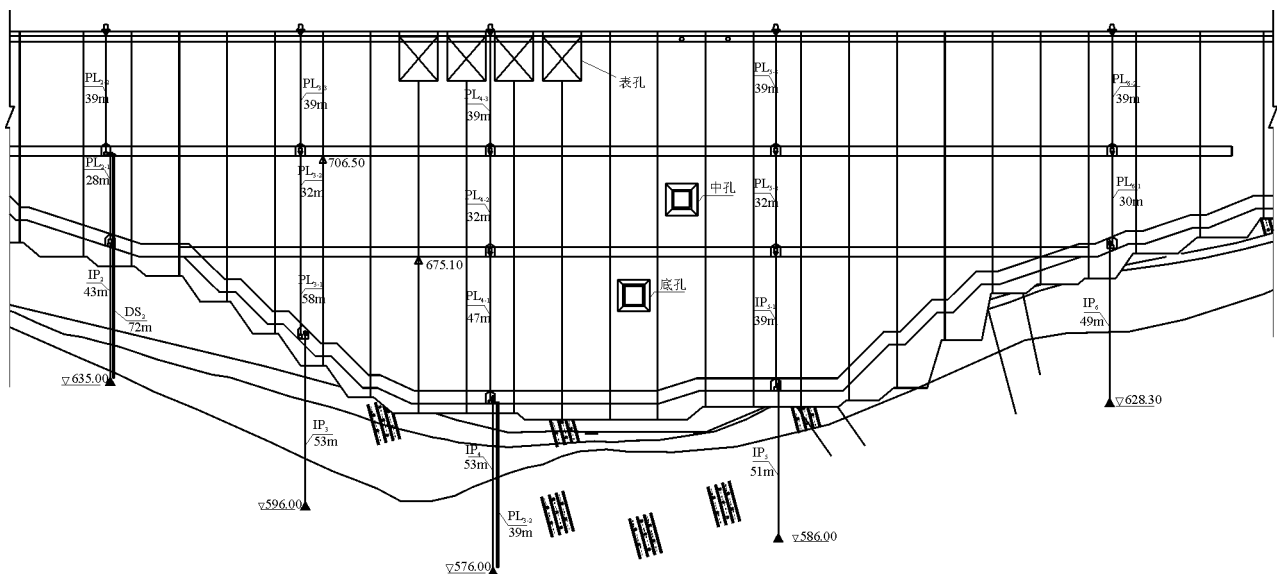


图2 坝体垂线布置图

### 3 坝基倾斜监测成果分析

#### 3.1 变化规律

根据  $LS_3$ 、 $LS_4$ 、 $LS_5$  各测点监测的垂直位移的相对位移量,各坝段坝基倾斜量可按测点间垂直位移量通过(1)式换算得到:

$$\alpha = \arctan(d/L) \times 205384.628 \quad (1)$$

式中: $d$  为各测点间的相对垂直位移,mm,以下沉为正,抬升为负; $L$  为测点间距,mm; 倾斜角度  $\alpha$ , ( $^\circ$ ),以向下游转动为正,向上游转动为负。

28#坝段横向灌浆廊道各测点垂直位移时序过程线如图 3 所示,从图 3 中可知:该坝段坝基各测点的垂直位移沉降量与库水位的变化呈明显的负相关关系,即库水位升高,各测点垂直位移沉降量增大,反之则规律相反。此规律在 2013 年 3-8 月蓄水时段(库水位升高 25 m 左右)表现最为明显,而在库水位较为平稳的时段,静力水准各测点的垂直位移变化量相对较为平缓,主要呈弹性波动状态。其余

两坝段变形规律和该坝段一致。

#### 3.2 影响因素

经过对多年的监测数据的综合分析,判断影响大坝坝基垂直位移伴随库水位变化的因素主要有:

(1)库水位的变化是影响坝体上游面承受静水压力大小的直接因素。随着库水位的升高,库水推着坝体和坝基向下游运动、倾斜的作用增强,致使建基面处的坝体竖向应力呈现出坝踵受拉坝趾受压的变化。

(2)库水位对库盘压力作用的影响表现为库水位升高,库盘下沉,坝基上游纵向灌浆廊道静水准  $LS_1$  各测点在蓄水前后的垂直位移变化量很好地说明了这一现象,如表 1 所示。

(3)库水位的变化直接影响坝基扬压力的变化,进而影响坝基倾斜度的变化。

因此,库水位对坝基倾斜角度的影响可归类为 3 个部分,即:库水推力分量角度  $\alpha_1$ 、库盘水压力分量角度  $\alpha_2$ 、坝基扬压力分量角度  $\alpha_3$ ,如图 4 所示。

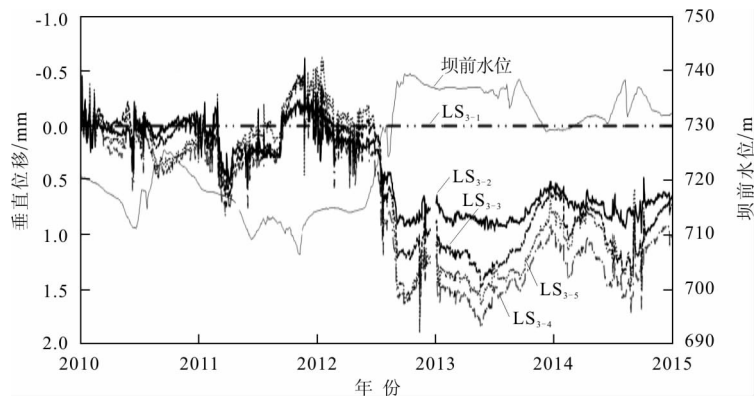


图 3 28#坝段坝基横向廊道垂直位移时序过程线(2010-10-24 - 2015-10-24)

表 1 2013 年蓄水前后静力水准  $LS_1$  不同坝段垂直位移变化统计表

日期	库水位/m	不同坝段垂直位移测值 /mm				
		$LS_{1-1}$ (28#)	$LS_{1-2}$ (29#)	$LS_{1-3}$ (30#)	$LS_{1-4}$ (31#)	$LS_{1-5}$ (32#)
2013-03-10	714.72	0.90	0.52	0.73	0.4	0.37
2013-07-19	739.25	0.12	-0.17	0.21	-0.29	-0.11
增量	↑24.53	↓0.78	↓0.69	↓0.52	↓0.69	↓0.48

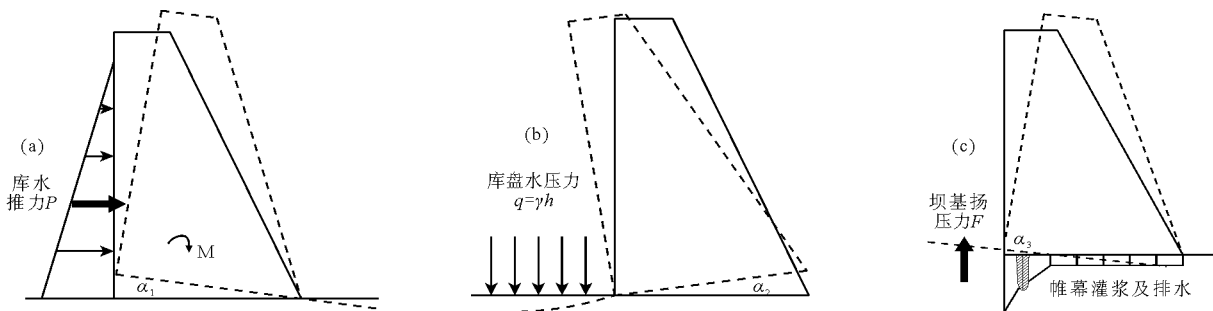


图 4 坝基倾斜发展的 3 个主要荷载因素

### 3.3 坝基倾斜分布规律

图5为28#、31#、34#典型坝段坝基垂直位移分布图。从图5中可知28#、31#坝段在坝轴线下游58m位置处出现倾斜分布拐点,即上游坝基呈现出向下游倾斜的分布规律,而下游坝基呈现出向上游倾斜的分布规律;而34#坝段分别在坝轴线下游25、42m位置处呈现出两次倾斜分布拐点,即坝基先向下游倾斜,然后向上游倾斜,最后又向下游倾斜的分布规律。

造成坝基倾斜空间分布出现拐点的因素较多<sup>[9-11]</sup>,查阅地质资料发现坝址区属两条断裂带之间所夹的IV级夷平面内,河谷两岸边坡左陡右缓,呈不对称“U”形谷。河床坝基610~615m高程缓倾角节理相对发育,平均密度0.73条/m,平均间距1.37m,缓倾角节理一般延伸长度1~3m,局部长

达5~8m,且连通率高。在复杂的工程地质条件下基岩属于非连续性的岩体介质,由于结构面的存在,对外载荷(如静水压力、扬压力等)由近及远传递是一种削弱作用,故28#、31#坝段坝基倾斜拐点远离上游主要荷载面;在冬季严寒条件下,开挖卸载、基础灌浆处理等措施对渗流条件影响较为显著,如图6所示扬压力分布突然变化部位所对应的坝基倾斜度也较大;由于上游纵向灌浆廊道帷幕的存在造成34#坝段帷幕前后渗流压力变化较为显著,另外,由于34#~39#坝段基岩黄铁矿含量较高,地下水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子含量最高可达1277mg/L,故可推测在水流的作用下加快了节理裂隙中黄铁矿的氧化速度,并造成基岩局部岩性的差异,结合帷幕的作用共同造成34#坝段坝基倾斜分布呈现出两个拐点,如图7所示。

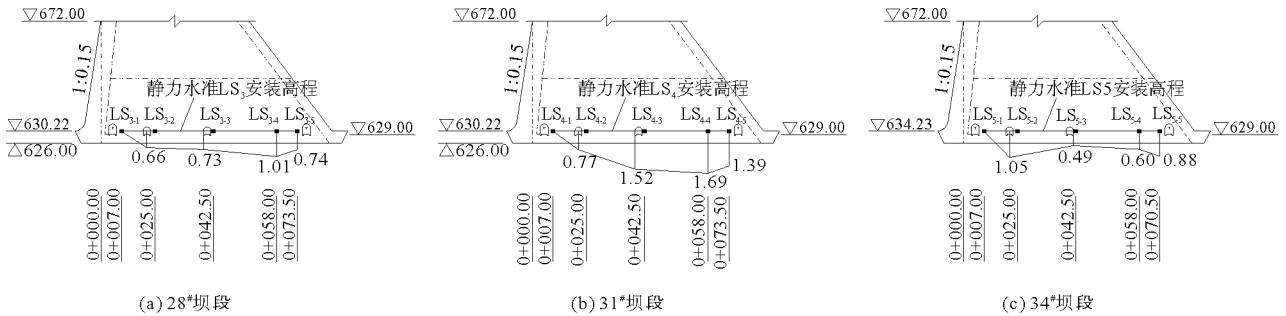


图5 28#、31#、34#坝段坝基垂直位移分布图(2015-10-26)(单位:m)

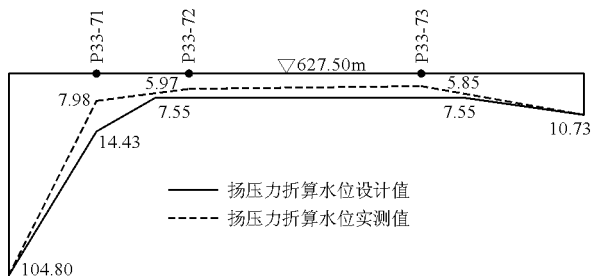


图6 34#坝段坝基扬压力分布图(2015-10-26)(单位:m)

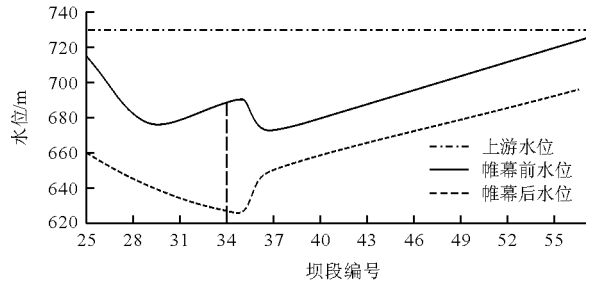


图7 帷幕前后渗压折算水位分布图(2015-10-26)

### 3.4 统计建模

坝基垂直位移 $\delta$ 主要由水压分量 $\delta_H$ 、温度分量 $\delta_T$ 及时效分量 $\delta_\theta$ 3个部分组成<sup>[12-15]</sup>,即:

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta \quad (2)$$

结合大坝自身特点,根据力学分析与工程经验,坝基变形统计回归分析模型可表示为:

$$\delta = \sum_{i=1}^3 [a_{1i}(H_u^i - H_{u0}^i)] + \sum_{i=1}^2 [b_{1i} \left( \sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi it_0}{365} \right) +$$

$$b_{2i} \left( \cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi it_0}{365} \right)] + c_1(\theta - \theta_0) + c_2(\ln\theta - \ln\theta_0) + a_0 \quad (3)$$

式中: $H_u$ 、 $H_{u0}$ 分别为监测日、起测日的上游水头,m; $t$ 表示监测日当天至起测日的累计天数; $t_0$ 表示建模系列第一个监测日至起测日的累计天数; $\theta$ 等于 $t$ 除以100, $\theta_0$ 等于 $t_0$ 除以100; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 均为回归系数。

根据各坝段坝基倾斜的分布规律、特点,28#、31#坝段分别选择各自静力水准线上相对沉降量最大点与基准点之间的坝基倾斜量作统计建模分析,

34#坝段选择第 4 个点和基准点之间的坝基倾斜量作统计建模分析,建模时间段选择 2010 年 10 月 28 日至 2015 年 10 月 26 日。

各项坝段坝基倾斜统计模型精度分析表见表 2,由表 2 可以看出 3 个坝段坝基倾斜量统计模型校正复相关系数在 0.8720~0.9567 之间,说明模型拟合精度较好。同时考虑到外界因素干扰及仪器测值稳定性的粗差影响,计算出本模型的剩余标准差  $S$  为  $0.7002'' \sim 1.3308''$ ,可认为基本满足《混凝土坝安全监测技术规范》(SL601-2013)中规定的坝基倾斜监测精度  $\pm 1''$  的要求<sup>[16]</sup>。

表 2 28#、31#、34#坝基倾斜统计模型精度分析表

坝段	复相关系数 $R$	判定系数 $R^2$	校正复相关系数 $R_a$	剩余标准差 $S$
28#	0.9581	0.9180	0.9576	0.7002''
31#	0.9101	0.8283	0.9085	1.3308''
34#	0.8756	0.7667	0.8720	1.2365''

通过建立统计模型,绘制典型坝段坝基倾斜量统计模型过程线见图 8。由图 8 可以看出,坝基倾斜量受水压分量的影响较为显著,通过变幅分析,水压分量占总分量的百分比为 70%~85%;其次是受温度的影响,温度分量约占总分量的百分比为 10%~20%;时效分量对坝基倾斜量的影响最弱,各坝段中时效分量所占比重均不超过 10%,且呈逐渐收敛、稳定状态。总体而言,经过长序列分析,水压分量是坝基倾斜度变化的主导因素,即库水位升高,坝基向下游倾斜量增加。而温度的影响则主要体现在库水位较为平稳的时段,且主要呈弹性波动的影响。

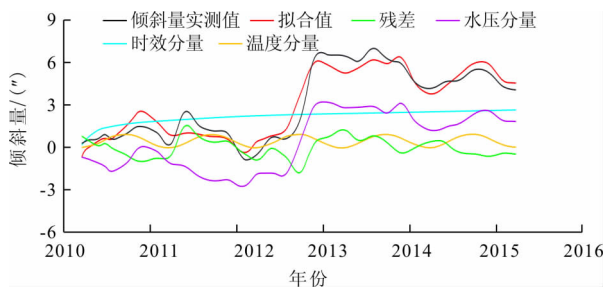


图 8 28#坝段坝基倾斜量统计模型过程线 (2010-12-01 - 2015-12-01)

### 4 坝基及坝体上下游向变形分析

#### 4.1 坝基上下游向变形分析

由于坝基上下游位移方向和库水推力  $P$  作用线在同一方向上,与扬压力及库盘水压力也处在同

一平面内,因此库水位的变化对坝基上下游方向位移影响明显,如图 9 所示。图 9 中红圈所标注部位为典型库水位变化对坝基上下游方向水平位移影响较明显的时段,2013 年 3 月至 2013 年 8 月蓄水期间,除左岸阶地 14#坝段外(建基面高,受水位影响小),其余各项坝段坝基向下游位移量均有不同程度的增长。

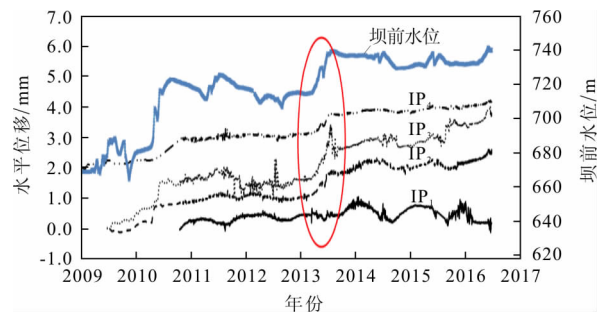


图 9 14#、21#、25#、29#坝段坝基上下游方向水平位移时序过程线 (2009-01-01 - 2016-06-25)

坝基上下游方向水平位移沿纵向的分布曲线如图 10 所示。由图 10 可知:从左岸 14#阶地坝段至主河床 29#溢流坝段,坝基向下游的水平位移随纵向桩号的增加呈不断增加的趋势,而自主河床 35#挡水坝段至右岸 62#台地坝段的坝基上下游向水平位移变化相对较为平缓,较之 29#坝段向下游水平位移量有所减少。

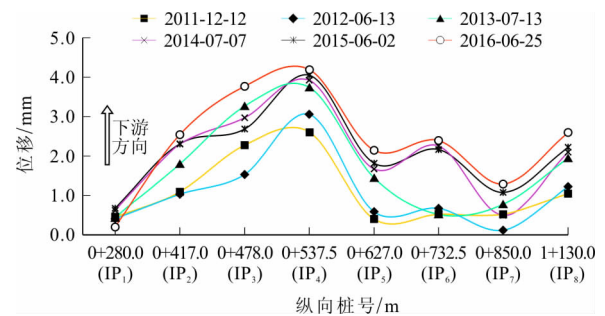


图 10 典型坝段坝基上下游方向分布

通过对比各坝段地质条件发现,上下游方向位移受地质条件影响较为明显,29#溢流坝段上下游位移较大的原因主要有两点:一是由于 29#溢流坝段建基面较低,坝体自重和库水荷载作用较大;二是主河床坝段(纵向桩号 0+497 m~0+635 m)亦发育 4 组节理,基岩中软弱带在相对较高荷载条件下会相应产生较大上下游向滑移变形。结合第 3 节中坝基倾斜分析,可知 29#坝段坝基位移量较之其他坝段虽稍大,但变化规律稳定,具弹性特征,处于正常状态。

### 4.2 坝体上下游向变形分析

如图 11 所示为典型坝段坝体上下游向水平位移过程线(图中离群尖点为测值粗差)。与坝基监测结果类似,受 2013 年 3 月至 8 月间水库蓄水影响,坝体各部位水平位移向下游有所发展(红框所示区段)。通过进一步研究发现,蓄水阶段上游库水位与坝体上下游水平位移量呈良好的线性相关关系,如图 12 所示。考虑坝体变形的滞后效应,若将下游位移量(因

变量)选取的时间点较之上游库水位(自变量)靠后 2 d,可使复相关判定系数  $R^2$  达到最大值,分别为 0.9521 与 0.9415。据此可推测,上游库水位变化对坝体向下游位移量影响的滞后时间约为 2 d。截止 2016 年 6 月 25 日,上下游向水平位移分布如图 13 所示,坝体各坝段上下游水平位移沿铅垂线的分布规律性较为明显:各坝段上下游向水平位移随坝高的增加,坝体倾向下游位移量呈递增趋势。

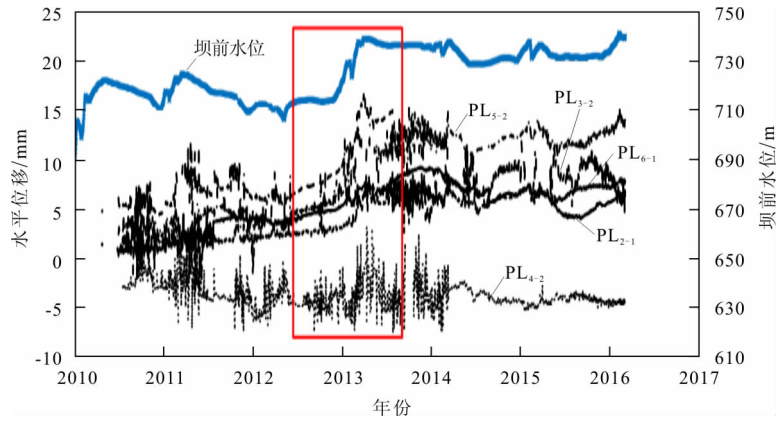


图 11 典型坝段坝体上下游向水平位移时序过程线(EL706.5 m)(2010-04-24 - 2016-04-24)

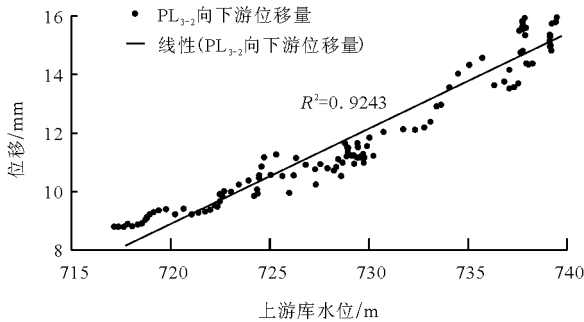


图 12 25#坝段 706.5 m 高程向下游位移量与库水位相关性分析

选入了与水位、温度和时效相关的影响因子,校正复相关系数分别为 0.8560、0.9373,拟合效果良好。

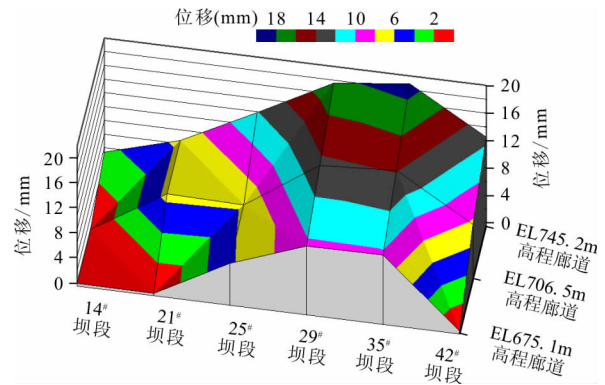
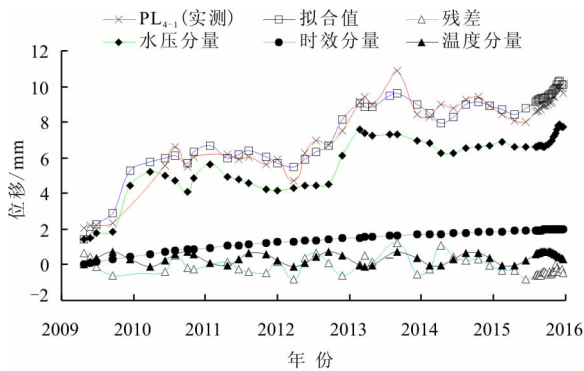
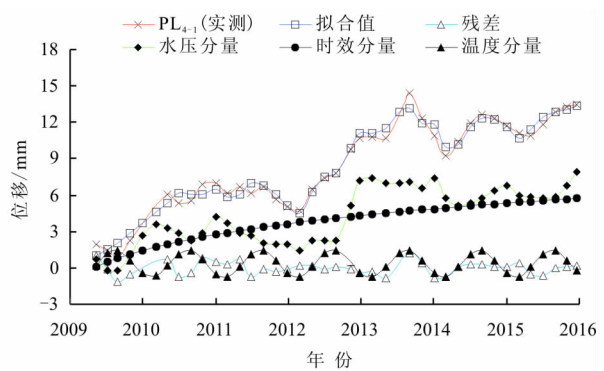


图 13 坝体垂线上下游方向水平位移分布图(2016-06-25)

通过统计建模分析可知,典型坝段(29#坝段) EL675.1 m、EL706.5 m 高程的两测点统计模型均



(a) 29#坝段, EL675.1m, 2009-11-01-2016-06-25



(b) 29#坝段, EL706.5m, 2009-11-01-2016-06-25

图 14 坝体典型测点上下游水平位移统计模型过程线

如图14所示,库水位波动对该坝段 EL675.1 m 与 EL706.5 m 高程坝体上下游向水平位移的影响仍居于主导地位。但随着高程的增加,水位分量的比重有所降低,而温度与时效的影响则相对有所加强。根据位移发展过程中各分量变幅判断,EL675.1 m 与 EL706.5 m 高程测点水压分量分别约占 80%、60%,温度分量分别约占 10%、20%,时效分量分别约占 10%、20%。

总体而言,坝体及坝顶上下游向位移沿铅垂方向的分布符合将坝体视为悬臂梁(由于横缝的存在,各坝段具有一定的独立性)受库水推力作用形成的挠曲线规律。除库水位外,气温也是影响坝体向下游位移量大小的一个因素。截止 2016 年 6 月 25 日,坝体及坝顶向下游最大位移量为 18.30 mm (35<sup>#</sup>坝段坝顶),向下游最小位移量为 2.99 mm (14<sup>#</sup>左岸阶地坝段坝顶)。当前坝体及坝顶上下游水平位移变化规律稳定,时效变形较小,处于正常状态。

## 5 结 论

通过对一个实例工程碾压混凝土重力坝的主坝变形监测资料进行总览概括,对于坝基抗滑、坝体抗倾覆稳定及顺河向位移变形的影响因素及其分布特征进行了较为深入地分析,并根据统计建模手段得到以下结论:

(1) 坝基倾斜影响分量中水压分量占 70% ~ 85%;温度影响相对较弱,温度分量约占 10% ~ 20%。时效分量对坝基倾斜量的影响最弱,各坝段中时效分量所占比重均不超过 10%,并呈逐渐收敛状态,坝基倾斜变形整体呈安全稳定状态。

(2) 温度分量对坝基倾斜的影响主要体现在库水位较为平稳的时段,且主要呈弹性波动的影响。

(3) 复杂的地质条件、非连续性的岩体介质及基岩矿物种类也是造成坝基倾斜变化的主要原因。

(4) 坝基及坝体上下游向水平位移变化主要受库水位变化影响,此外,坝体混凝土温度变化也是影响坝体变形的另一个不可忽视的因素。根据位移发展过程中及统计建模分量变幅判断,29<sup>#</sup>坝段 EL675.1m 与 EL706.5m 高程测点水压分量分别约占 80%、60%,温度分量分别约占 10%、20%,时效分量分别约占 10%、20%。

(5) 29<sup>#</sup>坝段坝体及坝基向下游位移量较之其他坝段虽稍大,但其变化规律稳定,弹性特性明显,坝基抗滑稳定及坝体变形均处于正常状态。

### 参考文献:

- [1] 李镇惠,骆建宇,马奕仁,等. 三峡大坝水平位移回归监测建模分析[J]. 长江科学院院报,2013,30(11):109-112.
- [2] 姚天宝,申惟文,任建明. 逐步回归和偏最小二乘回归模型在混凝土重力坝变形监测中的应用[J]. 水电能源科学,2015,33(2):81-84.
- [3] 沈慧,王志远,黄武春. 大化水电站溢流坝段水平位移异常原因分析[J]. 水利水电科技进展,2012,32(6):50-55.
- [4] 郭金龙. 2010-2014年柴河水库大坝水平位移、沉陷研究分析[J]. 中国水能及电气化,2016(10):41-45.
- [5] 闵四海. 二滩拱坝运行期坝体水平位移分析[J]. 四川水力发电,2014,33(4):94-101.
- [6] 魏超,陶家祥. 丰满大坝水平位移安全监控指标的拟定[J]. 人民黄河,2012,34(1):108-110.
- [7] 何宁,王国利,何斌,等. 高面板堆石坝内部水平位移新型监测技术研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(s2):24-29.
- [8] 范方超. 卡尔曼滤波在变形监测数据处理中的应用[J]. 黑龙江科技信息,2016(13):91-92.
- [9] 李美蓉,陈媛,张林,等. 复杂地质条件下多结构面对重力坝坝基稳定性的影响及处理[J]. 岩土力学,2014,35(s1):328-333.
- [10] 徐卫亚,江涛,赵志峰,等. 光照重力坝坝基断层影响及处理的三维数值模拟[J]. 岩石力学及工程学报,2006,25(6):1099-1105.
- [11] 汪海涛,彭亮,崔东. 某坝址黄铁矿的分布规律及其对大坝工程的影响分析[J]. 水利规划与设计,2007(4):40-41.
- [12] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [13] 黄铭,葛修润,刘俊. 大坝垂线位移监测资料分析的4种统计模型[J]. 长江科学院院报,2001,18(2):37-40.
- [14] 吴彦,王金国,黄春华. 混凝土重力坝垂直位移统计回归模型与工程应用[J]. 人民珠江,2012,33(1):72-75.
- [15] 陈晓鹏,张强勇,刘大文,等. 边坡变形统计回归分析模型及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(2):3673-3679.
- [16] 中华人民共和国水利部. SL601-2013 混凝土坝安全监测技术规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2013:14-15.