

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0100

袁梦玲, 刘昌伟, 袁占荣, 等. 龙羊峡拱坝垂直位移变化规律[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 1010-1018. YUAN M L, LIU C W, YUAN Z R, et al. Analysis of vertical displacement variation of Longyangxia arch dam[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 1010-1018. (in Chinese)

龙羊峡拱坝垂直位移变化规律

袁梦玲¹, 刘昌伟², 袁占荣¹, 周天宇², 潘坚文², 王进廷²

(1. 国家电投集团青海黄河电力技术有限责任公司, 西宁 810016;
2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:通过对龙羊峡拱坝垂直位移监测资料进行分析, 总结其沉降变形的时间变化规律和空间分布规律, 进一步研究水压和温度等因素对龙羊峡坝体沉降变形的作用机理, 并对变形中存在的一些特殊现象进行解释。研究表明: 水压和温度对龙羊峡拱坝不同高程的变形影响不同, 导致坝体不同高程的垂直位移变化存在“相位差”; 坝体部分测点垂直位移有一定的持续变形趋势; 2018 年以来的高水位运行期间, 坝体各部位垂直位移测值变化趋势改变; 坝基扬压力对 7 号坝段坝基垂直位移影响较大; 坝体高高程部位近右岸坝段的垂直变形规律与同高程其他坝段垂直变形规律相反。

关键词:龙羊峡拱坝; 垂直位移; 变形规律; 特殊变形; 空间分布

中图分类号: TV698.11 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



监测资料分析是大坝健康监测的重要内容^[1-3], 有助于保障大坝长期安全运行^[4]。垂直位移是大坝变形监测中主要的项目之一, 可以直观反映坝体的沉降变形, 对坝体垂直变形规律及其机理进行分析是监测资料分析的重要内容。通常来讲, 土石坝和堆石坝的垂直位移更大, 更受关注, 国内外对土石坝和堆石坝的垂直位移研究^[5-8]也较多, 如: Kalkan 等^[5]基于大地测量资料对土耳其的阿塔图尔克大坝垂直位移进行分析, 发现其近河中央坝顶沉降变形较大, 坝体黏土心墙发生剪切滑塌; 洪羽等^[7]对小浪底水库水位变化与主坝沉降变化规律进行分析, 得出坝体沉降速率与库水位下降速率成正比。对于土石坝和堆石坝垂直位移的预测也进行了很多研究^[9-11], 如 Kose 等^[11]提出用灰色预测方法预测土石坝垂直位移, 并在土耳其科班大坝上得到应用。

对于混凝土坝, 人们通常更关注其水平位移, 但垂直位移也能反映一些重要的大坝变形现象和机

理, 对大坝工作性态的监控具有重要意义, 近年来对混凝土坝垂直位移的研究也越来越多。El-Askary 等^[12]采用差分合成孔径雷达干涉测量技术(DInSAR)处理卫星图像, 对埃塞俄比亚复兴大坝的垂直位移进行分析, 发现其主坝坝顶西侧存在不均匀沉降, 且沉降量较东侧更大; 朱赵辉等^[13]对百色水利枢纽垂直位移产生的坝基抬升、坝顶沉降的“异常”现象进行分析, 得出该现象主要是混凝土徐变效应的结果; 张博等^[14]、李作光^[15]对丰满大坝及其重建工程的垂直位移监测资料进行了分析; 有学者还对国内岩滩^[16]、观音阁^[17]、白山^[18]、丹江口^[19]等混凝土坝的垂直位移及其影响因素进行了分析。

影响混凝土坝垂直位移的因素主要是水压、温度和时效^[14, 18-19], 各因素对于混凝土坝的影响程度也不相同。对于低水头或水位变化不大的混凝土坝, 温度对其垂直位移的影响更大^[18-19], 而对于高水头混凝土坝, 相较于其他因素水压对其垂直位移影响

收稿日期: 2022-01-05 修回日期: 2022-07-05 网络出版时间: 2022-07-21

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220720.2033.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52022047; 52192672); 黄河水电公司科技项目(HGS-KJ)

作者简介: 袁梦玲(1986—), 女, 湖北荆州人, 工程师, 主要从事大坝安全监测研究。E-mail: 514933122@qq.com

通信作者: 潘坚文(1983—), 男, 广西桂平人, 副教授, 博士生导师, 主要从事高坝健康监测研究。E-mail: panjianwen@tsinghua.edu.cn

更大^[20]。水压对重力拱坝垂直位移的作用主要表现在两方面^[20]:库水压力作用使坝体向下游倾转,导致坝体上游面上抬,下游面下沉;库水重力作用引起库盘及坝基沉降,使坝体向上游倾转,导致坝体上游面下沉,下游面上抬。对于双曲拱坝,水压的影响还包括垂直拱受压产生水平位移的同时坝体上抬。基于以上3个因素,学者们^[21-23]提出了很多预测混凝土坝垂直位移的统计模型并在实际工程中得到应用。近年来,小波分解^[24]、随机森林模型^[25]、神经网络^[26]等人工智能方法被用于改进统计回归模型以提高预测精度。

龙羊峡水库为多年调节水库,库水位平均年变幅15 m,库区气温平均年变幅34℃,水位和气温年变幅均较大,皆是影响大坝变形的重要因素,研究水压和温度对龙羊峡重力拱坝垂直位移的作用机理具有重要意义。龙羊峡重力拱坝的垂直位移监测资料显示,坝体不同高程和不同坝段的垂直位移变化规律不尽相同。从时间和空间的角度对龙羊峡坝体的垂直位移变化规律及其物理成因进行分析,并对7号坝段坝基垂直位移变幅大于同高程其他坝段和2463 m高程6、7、8号坝段存在长期持续变形等特殊变形现象进行解释分析。龙羊峡大坝作为典型的高混凝土重力拱坝,相关经验对其他高混凝土坝的安全监测有一定的指导意义。

1 大坝安全监测

1.1 工程概况

龙羊峡水电站于1986年10月下闸蓄水,1987年2台机组发电,1989年6月4台机组全部投运,1991年拱坝封拱完成,1993年主体工程基本建完。电站为一等大(1)型工程,大坝按1级建筑物设计。枢纽建筑物包括以混凝土重力拱坝为主的挡水建筑物、泄水建筑物、引水系统和发电厂房等。主坝为外半径265 m、底宽80 m的定圆心混凝土重力拱坝,坝高178 m,坝顶高程2610 m,拱坝坝顶弧长396 m,共分为18个坝段。

1.2 垂直位移监测

龙羊峡拱坝垂直位移通过几何水准和静力水准两种方式进行监测,几何水准和静力水准测点布置在坝内高程2600、2530、2463、2443 m廊道,目前正在测的几何水准和静力水准测点详见表1。图1为拱坝2443 m高程垂直位移测点布置。

表1 大坝垂直位移测点(在测)布置情况

Tab. 1 Layout of dam vertical displacement measuring points (under measurement)

| 高程/m | 监测方式 | 测点编号(在测) |
|-------|------|--|
| 2 600 | 几何水准 | DM0002 ~ DM0022 |
| | 静力水准 | HL002 ~ HL014, HP007P |
| 2 530 | 几何水准 | DM3001 ~ DM3016、 DM6318 ~ DM6361、 DM6364 ~ DM6380 |
| | 静力水准 | HL304, HL305, HL307、 HL308-1, HL308-2, HL309、 HL311, HL313 ~ HL322 |
| 2 463 | 几何水准 | DM6301 ~ DM6353、 DM6365、 DM6368 ~ DM6371 |
| | 静力水准 | HL501 ~ HL519, HL522 ~ HL529、 HL504P, HL508P, HL514P |
| 2 443 | 几何水准 | DJS1 ~ DJS23 |
| | 静力水准 | HL601 ~ HL620, HL608P、 HL609P, HL612P, HP613P |

采用监测精度较高、数据记录较完整的静力水准监测数据进行分析,由于早期监测数据波动性较大、异常值较多,选取2012年至今的数据作为分析对象。垂直位移方向规定为:“+”表示下沉位移,“-”表示上抬位移。

2 各高程垂直位移规律及成因分析

2.1 2 600 m 高程

在2600 m高程部位选取5、9、11号坝段的垂直位移进行分析,分别做垂直位移随上游水位和气温变化的过程线见图2。由图2可知:

拱坝2600 m高程部位各坝段垂直位移呈明显的年周期性变化规律,一般每年3—4月坝体下沉位移达到最大,每年10—11月坝体上抬位移达到最大。

从过程线的相关性上看,拱坝2600 m高程垂直位移同时受到上游水位和环境气温的共同影响,具体表现为:库水位上升,坝体在上游水压的作用下发生向下游的倾转变形,这种倾转变形随着高程的增加而逐渐明显,使得坝体较高高程部位的上游侧发生显著的抬升现象;库水位下降反之。气温升高,坝体受热膨胀,表现为上抬变形;气温降低,坝体降温收缩,表现为下沉变形。2600 m高程垂直位移与气温变化周期期间存在相位差,位移达到上抬最大值的时间一般为10月,滞后高温极值出现时间(一般为8月)约2个月。

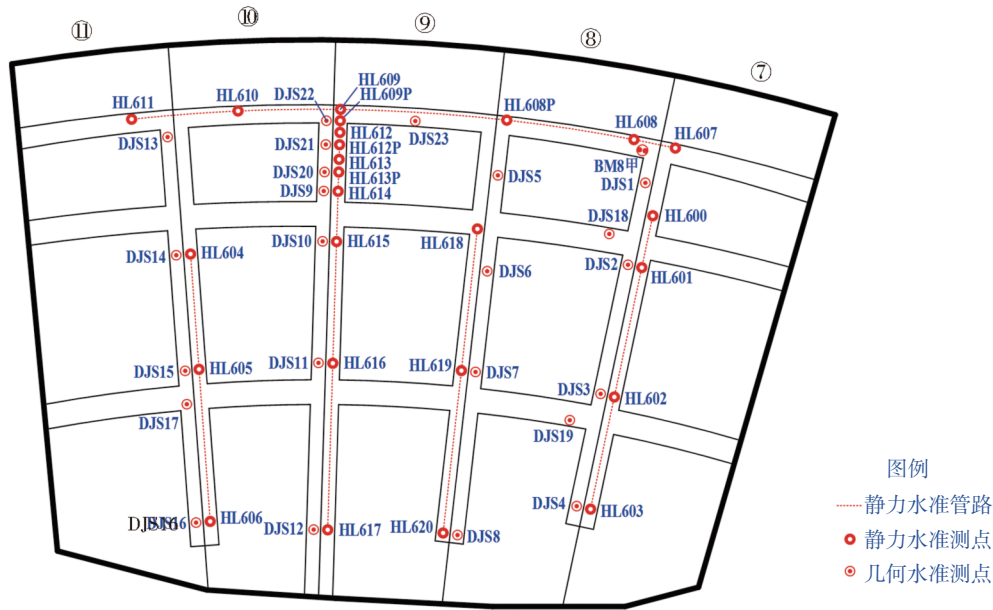


图 1 拱坝 2 443 m 高程垂直位移测点布置

Fig. 1 Layout of vertical displacement measuring points for 2 443 m elevation of the dam

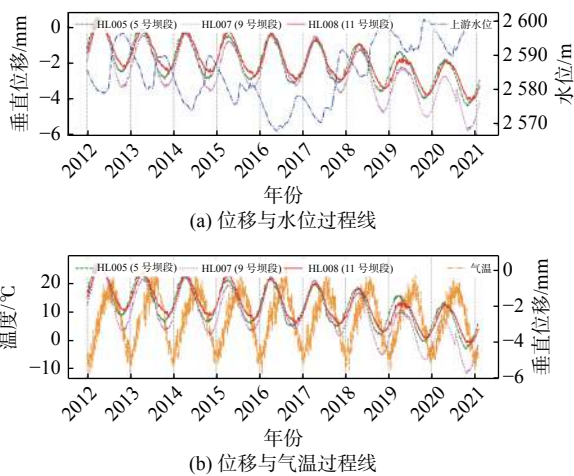


图 2 2 600 m 高程 5、9、11 号坝段垂直位移与上游水位和气温过程线

Fig. 2 Process lines of vertical displacement and upstream water level and temperature in no.5, 9 and 11 dam sections at 2 600 m elevation

2.2 2 443 m 高程和 2 463 m 高程

在 2 443 m 高程和 2 463 m 高程部位选取 7、9、11 号坝段垂直位移进行分析,做垂直位移随上游水位变化的过程线见图 3、图 4。由图 3、图 4 可知:

拱坝 2 463 m 及 2 443 m(基础灌浆廊道)高程部位的垂直位移变幅明显小于坝顶,但也呈现出一定的年周期性变化规律,一般每年 10—11 月坝体下沉位移达到最大,每年 3—4 月坝体上抬位移达到最大。图 3 中 2 443 m 高程 7 号坝段垂直位移年变幅明显大于同高程其他坝段,位移极值出现时间也不同于上述规律,该特殊现象将在 3.1 节进行分析。图 4 中 2 463 m 高程 7 号坝段垂直位移表现出

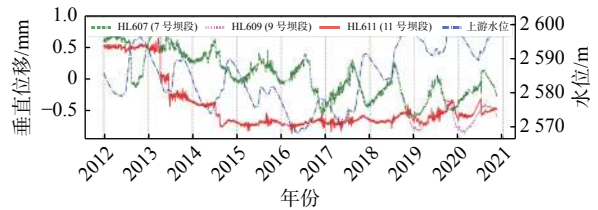


图 3 2 443 m 高程 7、9、11 号坝段垂直位移与上游水位过程线

Fig. 3 Process lines of vertical displacement and upstream water level of no.7, 9 and 11 dam sections at 2 443 m elevation

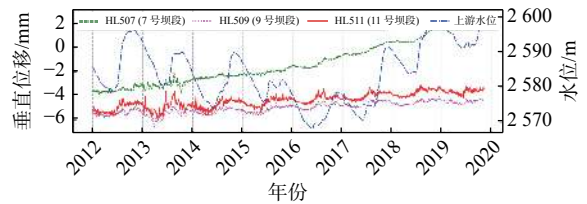


图 4 2 463 m 高程 7、9、11 号坝段垂直位移与上游水位过程线

Fig. 4 Process lines of vertical displacement and upstream water level of no.7, 9 and 11 dam sections at 2 463 m elevation

持续下沉趋势,下沉速率明显大于同高程其他坝段的垂直位移,这一特殊现象将在 3.2 节进一步讨论。

从过程线的相关性上看,由于坝体底部边界及内部温度均相对较为稳定(坝基部位温度实测过程线见图 5,温度年变幅不超过 1 °C),坝体低高程部位及坝基的垂直位移没有受到来自温度的显著影响,但其仍表现出与库水位间微弱的相关性,库水位升高,坝基在库水压力作用下发生沉降变形,库水位下降,坝基回弹。

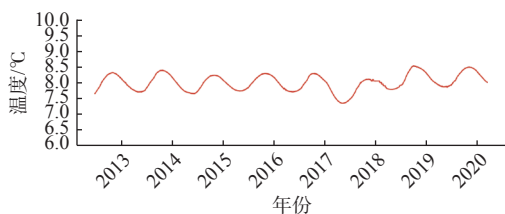


图5 9号坝段坝基温度实测过程线

Fig. 5 Measured process line of temperature at heel of no.9 dam section

2.3 2 530 m 高程

2 530 m 高程部位选取 7 和 9 号坝段垂直位移进行分析,分别做垂直位移随上游水位和气温变化的过程线见图 6。由图 6 可知:

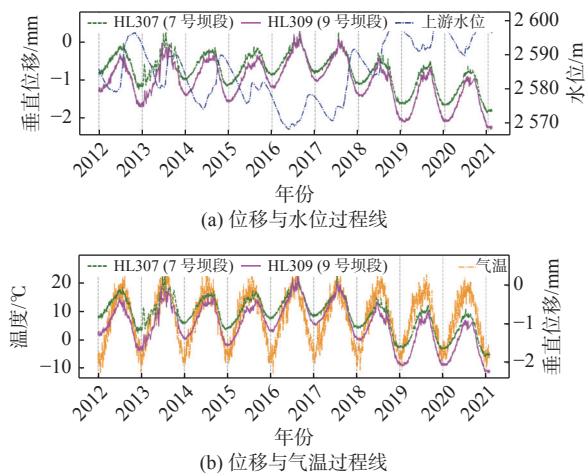


图6 2 530 m 高程 7 号和 9 号坝段垂直位移与上游水位和气温过程线

Fig. 6 Process lines of vertical displacement and upstream water level and temperature in no.7 and no.9 dam sections at 2 530 m elevation

拱坝 2 530 m 高程部位各坝段垂直位移变幅为 2 600~2 463 m,呈明显的年周期性变化规律,一般每年 7—8 月坝体下沉位移达到最大,每年 12 月—次年 1 月坝体上抬位移达到最大。

拱坝 2 530 m 高程部位垂直位移极值出现时间介于坝顶和坝基之间,推测坝体中间高程部位的垂直位移受到来自上游水位和气温的综合影响:库水位上升,坝体在上游水压的作用下发生向下游的倾转变形,使得坝体中部的上游侧发生显著的抬升现象;库水位下降反之。但不同于 2 600 m 高程垂直位移随上游水位同步变化,2 530 m 高程垂直位移与上游水位变化周期间存在相位差,位移达到上抬最大值的时间一般为 1 月初,滞后高水位极值出现时间(一般为 10 月)约 2 个月。气温升高,坝体膨胀,应表现为上抬变形;气温降低,坝体收缩,应表现为下沉变形。2 530 m 高程坝体垂直位移表现恰与之相反。这种水压影响滞后现象和温度影响反常现

象是二者相互复杂作用的结果,说明水压和温度对龙羊峡坝体不同高程的变形影响不同。

2.4 不同高程垂直位移变化规律总结

统计坝体 2 443、2 463、2 530、2 600 m 高程所有测点垂直位移的最大值和最小值出现时间,其时间分布见表 2。为了对比分析,表中还给出了环境量极值出现时间。可以看出:坝体高高程部位库水压占主导,温度影响较小,垂直位移随水位同步变化;坝体中部受水压和温度共同作用,垂直位移变化滞后于水位约 2 个月;坝体基础部位,受外界气温影响较小,主要受上游水压影响,库水位抬升时,坝基垂直位移有小幅下沉变化的趋势。

表 2 坝体典型高程垂直位移极值和环境量极值出现时间
Tab. 2 Occurrence time list of extreme values of vertical displacements and environment variables at typical elevation

| 项目 | 最大值位移(下沉) 出现时间 | 最小值位移(上抬) 出现时间 |
|-------------------------|-------------------|-------------------|
| 温度 | 7—8月 | 12月—次年1月 |
| 上游水位 | 10—11月 | 4—5月 |
| 2 600 m垂直位移 | 3—4月 | 10—11月 |
| 2 530 m垂直位移 | 7—8月 | 12月—次年1月 |
| 2 463 m、2 443 m 垂直位移 | 10—11月 | 3—4月 |

3 特殊变形现象说明

3.1 7 号坝段坝基垂直位移变幅大于同高程其他坝段

对于 7 号坝段坝基垂直位移年变幅大于同高程其他坝段,垂直位移极值出现时间也不同于其他坝段的特殊现象,考虑到坝基温度变化不大,很有可能是水压的影响。各坝段坝基帷幕灌浆廊道帷幕前后最大扬压水位和 2019 年最高水位时扬压水位分布见图 7 和图 8,可以看出,7 号和 8 号坝段帷幕前后扬压水位明显高于其他坝段,帷幕前高出其他坝段 50 m 左右,帷幕后高出其他坝段 25 m 左右。对比垂直位移特殊变形测点和扬压力异常测点位置发现二者基本重合。7 号坝段坝基垂直位移和 8 号坝段 D8g-6 测点扬压水位过程线见图 9,可以看出:扬压力增大时,坝基抬升;扬压力减小时,坝基下沉。计算 2014 年后垂直位移和扬压水位的相关系数为-0.688 9,表明该部位垂直位移与扬压力有较强的负相关性,说明 7 号坝段坝基垂直位移特殊

变形是由该部位扬压力异常引起的,应加强对该部位渗流和变形的监测。

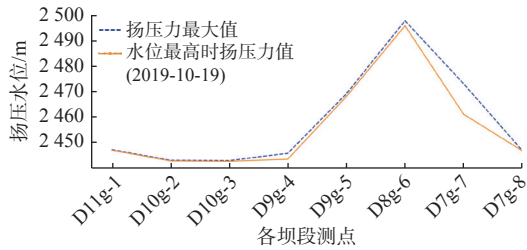


图 7 灌浆廊道坝基帷幕上游扬压水位特征值分布

Fig. 7 Distribution of characteristic values of uplift water level upstream of dam foundation curtain of grouting corridor

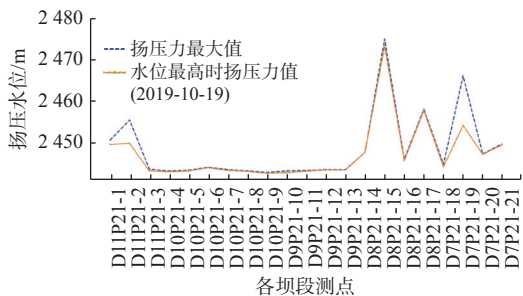


图 8 灌浆廊道坝基帷幕下游扬压水位特征值分布

Fig. 8 Distribution of characteristic values of uplift water level downstream of dam foundation curtain of grouting corridor

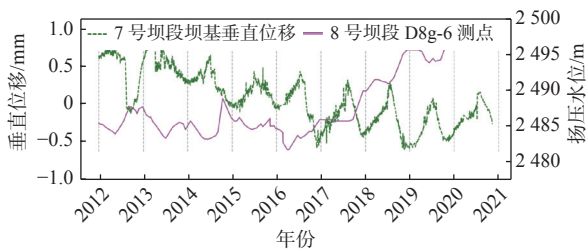


图 9 7 号坝段坝基垂直位移与 D8g-6 测点扬压水位过程线

Fig. 9 Process line of vertical displacement of dam foundation in no.7 dam section and uplift water level of D8g-6

3.2 垂直位移变化趋势

自 2017 年开始,龙羊峡水位逐年上升,2018 年首次达到正常蓄水位 2 600 m,随后几年也都达到了正常蓄水位。龙羊峡水电站在高水位运行期间,坝体变形也有明显的响应。由图 2 和图 6 可以看出,2017 年后 2 600 m 高程和 2 530 m 高程坝体的垂直位移有明显上抬趋势,且越靠近拱冠梁(9 号坝段)上抬值越大,说明龙羊峡坝体变形受上游水位影响显著,坝体在上游水压作用下发生向下游的倾转变形,使得坝体 2 600 m 高程和 2 530 m 高程的上游侧产生抬升现象。由图 4 可知,7 号坝段 2 463 m 高程垂直位移在高水位运行期间下沉速率显著增大,且波动性也更加明显。由图 3 可知,9 号坝段 2 443 m 高程垂直位移在高水位运行期间变幅明显增大。

除以上测点外,其他测点垂直位移在高水位运行期间也表现出不同程度的上抬或下沉趋势,由于篇幅所限,不再一一列举。

从长期趋势看,虽然龙羊峡拱坝建成运行已有 30 多年,但坝体部分测点垂直位移仍表现出一定的持续变形趋势,未达到稳定状态。由图 2 可以看出 2 600 m 高程各坝段垂直位移均表现出持续缓慢上抬的趋势。由图 4 可以看出 2 463 m 高程 3 个坝段的垂直位移均表现出持续下沉的趋势,7 号坝段尤其明显。统计 2 463 m 高程不同测点垂直位移变化趋势及其变化量见表 3。为了避免 2018—2020 年高水位对长期变形趋势的影响,表 3 只统计了 2012—2017 年垂直位移平均值的变化。从表 3 可以看出,2 463 m 高程各坝段垂直位移都有持续下沉的趋势,其中 6、7、8 号坝段沉降速率较快。

表 3 2463 m 高程不同测点垂直位移变化情况

Tab. 3 Vertical displacement variation statistics of different measuring points at 2463 m elevation

| 测点 | 坝段号 | 2012年平均/mm | 2017年平均/mm | 差值/mm |
|-------|-----|------------|------------|-------|
| HL506 | 6 | -3.42 | -0.73 | 2.69 |
| HL507 | 7 | -3.50 | -0.18 | 3.32 |
| HL508 | 8 | -3.69 | -1.10 | 2.59 |
| HL509 | 9 | -5.41 | -4.62 | 0.79 |
| HL510 | 10 | -4.00 | -2.22 | 1.78 |
| HL511 | 11 | -4.98 | -3.98 | 1.00 |
| HL512 | 12 | -5.23 | -4.46 | 0.77 |

4 垂直位移空间分布规律

由于静力水准在运行过程中经历多次维护和基准值调整,其绝对位移监测成果之间不具备横向比较的条件。为通过静力水准测值分析拱坝垂直位移的空间分布规律,有必要对所有测点的测值按统一的基准值重新进行计算。为使调整后垂直位移测值能够直观反映坝体在水压、温度等荷载影响下发生的弹性变形规律,基准日当日的上游水位和气温应以接近多年平均环境条件为宜。

经筛选,以 2015 年 3 月 25 日(平均环境条件)、2016 年 7 月 5 日(高温低水位条件)和 2019 年 12 月 19 日(低温高水位条件)作为典型工况日,基准日及典型工况日环境条件情况见表 4。

拱坝高程 2 600、2 530、2 463、2 443 m 典型工况日相对于基准日的不同坝段垂直位移分布见图 10~13,由图可知:

表4 基准日及典型工况日环境条件
Tab. 4 List of environmental conditions on base day
and typical working day

| 工况 | 日期 | 上游水位/m | 环境气温/℃ |
|-------|-------------|----------|--------|
| 多年平均 | 2008—2020年 | 2 583.85 | 7.46 |
| 基准 | 2015年3月25日 | 2 580.99 | 8.10 |
| 高温低水位 | 2016年7月5日 | 2 569.36 | 24.20 |
| 低温高水位 | 2019年12月19日 | 2 599.06 | -6.10 |

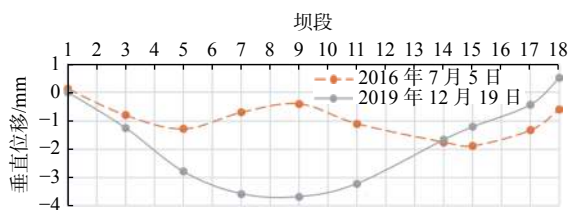


图10 拱坝高程2 600 m典型日垂直位移分布

Fig. 10 Typical daily vertical displacement distribution of the arch dam at 2 600 m elevation

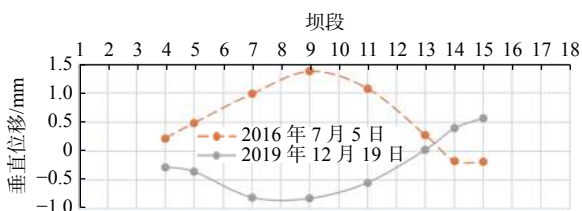


图11 拱坝高程2 530 m典型日垂直位移分布

Fig. 11 Typical daily vertical displacement distribution of the arch dam at 2 530 m elevation

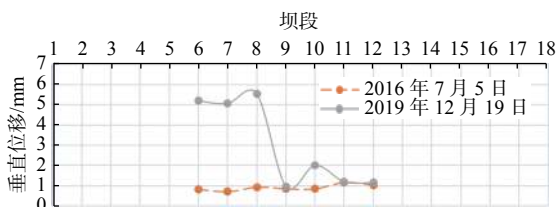


图12 拱坝高程2 463 m典型日垂直位移分布

Fig. 12 Typical daily vertical displacement distribution of the arch dam at 2 463 m elevation

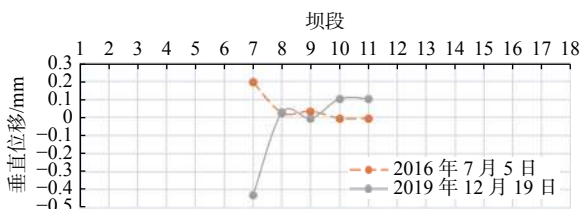


图13 拱坝高程2 443 m典型日垂直位移分布

Fig. 13 Typical daily vertical displacement distribution of the arch dam at 2 443 m elevation

2 600 m 高程,各坝段高温低水位工况日和低温高水位工况日相对于基准日均表现为上抬变形,符合2.1节水位和气温对坝体高高程部位垂直位移的

影响规律,且从拱冠到拱端上抬变形量逐渐减小,符合变形协调规律。

2 530 m 高程,高温低水位和低温高水位工况日刚好分别对应其垂直位移上抬和下沉极值出现时间,两典型日相对于基准日的垂直位移呈对称分布,且各坝段垂直位移变化量从拱冠到拱端逐渐减小,符合变形协调规律。

2 600 m 高程和2 530 m 高程从14号坝段开始到右岸基础的垂直位移变形规律与其他坝段规律相反,表现为低温高水位时下沉,高温低水位时上抬。利用时间序列分解算法(decompose函数)的相加模型对2 600 m 高程靠近右岸坝段的垂直位移时间序列进行分解,分解成趋势项、季节性周期项和残余项。

图14为位移时程和趋势项时程图,可以看出,2017年后水位上升,该部位垂直位移变化趋势明显改变,表现为下沉趋势,说明水压对靠近右岸坝段的作用机理不同于坝体其他部位,水位升高使其下沉。

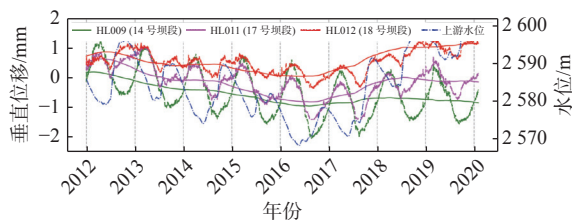


图14 2 600 m 高程14、17、18号坝段垂直位移及其趋势项与上游水位过程线

Fig. 14 Process lines of vertical displacement and its trend term and upstream water level of no.14, 17 and 18 dam sections at 2 600 m elevation

2 463 m 高程,各坝段高温低水位工况日垂直位移普遍小于低温高水位工况日,符合拱坝低高程部位的垂直位移(以下沉为正)与上游水位呈正相关的分析结论,其中6、7、8号坝段高水位期间相对于同高程其他坝段下沉量大4 mm左右,这与3.2节提到的这3个坝段的持续变形趋势有关。

2 443 m 高程,典型工况日相对于基准日垂直位移变化不大,不超过1 mm。7号坝段相比于其他坝段垂直位移变形规律相反,表现为高水位上抬变形,低水位下沉变形,且量值较大,其原因在3.1节已进行分析。

5 结论

分析龙羊峡拱坝垂直位移时间变化规律和空间

分布规律及其成因,并对垂直位移的一些特殊变形现象进行分析,主要得到以下结论:

龙羊峡拱坝不同高程的垂直位移变化存在“相位差”,是因为水压和温度对龙羊峡坝体不同高程的变形影响不同:坝体高高程部位库水压力占主导,温度影响相对较小;坝体基础部位受外界气温影响较小,主要受上游水压影响;坝体中部受水压和温度相互复杂作用,出现了水压影响滞后现象和温度影响反常现象。

坝基7号和8号坝段帷幕前后扬压力值大于其他坝段,扬压力异常导致了7号坝段坝基垂直位移幅较大,应加强对该部位渗流和变形的监测。

龙羊峡水电站在2018年以来高水位运行期间,坝体变形有明显的响应,各部位测值变化趋势显著改变。

龙羊峡坝体部分测点垂直位移表现出一定的持续变形趋势,应加强2463m高程6、7、8号坝段监测。

龙羊峡拱坝高高程部位从14号坝段开始到右岸基础的垂直变形规律与同高程其他坝段垂直变形规律相反,表现为水位升高时下沉,水位降低时上抬。

参考文献(References):

- [1] 张研宇. 白石水库大坝安全监测资料数据分析[J]. *黑龙江水利科技*, 2021, 49(1): 37-44,59. (ZHANG Y Y. Analysis of dam safety monitoring data of Baishi Reservoir[J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2021, 49(1): 37-44,59. (in Chinese)) DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2021.01.010.
- [2] 曹光明. 龙羊峡大坝变形性状分析[D]. 天津: 天津大学, 2004. (CAO G M. Analysis of deformation character Longyangxia dam[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.(in Chinese))
- [3] 吴世勇, 高鹏. 二滩拱坝安全监测资料分析[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(4): 108-113, 107. (WU S Y, GAO P. Safety monitoring and analysis of Ertan arch dam[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(4): 108-113, 107. (in Chinese)) DOI: CNKI:SUN:SFXB.0.2009-04-021.
- [4] 赵二峰, 顾冲时. 混凝土坝长效服役性状健康诊断研究述评[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(5): 22-34. (ZHAO E F, GU C S. Review on health diagnosis of long-term service behaviors for concrete dams[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(5): 22-34. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdbx.20210503.
- [5] KALKAN Y, POTTS L V, BILGI S. Assessment of vertical deformation of the Atatürk dam using geodetic observations[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2016, 142(2): 1-14. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000148.
- [6] SALIM S A M, ADAM S M. Investigating the vertical displacement of Duhok embankment dam: A 31-years case study[J]. *Journal of Engineering Research*, 2021, 9(ICRIE): 1-16. DOI: 10.36909/jer.v9iICRIE.11655.
- [7] 洪羽, 王志刚. 小浪底水库水位骤变与主坝沉降变化规律分析[J]. *河南科技*, 2021, 40(14): 52-54. (HONG Y, WANG Z G. Analysis on sudden change of water level and change of main dam settlement in Xiaolangdi Reservoir[J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(14): 52-54. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-5168.2021.14.027.
- [8] 陈金花. 白杨河引水工程水库坝体垂直位移监测资料分析[J]. *水利规划与设计*, 2015(8): 100-102. (CHEN J H. Analysis of monitoring data of vertical displacement of dam body in Baiyanghe Diversion Project[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2015(8): 100-102. (in Chinese)) DOI: JournalArticle/5b3bdfac095d70f009e49fe.
- [9] BAYRAK T. Modelling the relationship between water level and vertical displacements on the Yamula dam, Turkey[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, 7(2): 289-297. DOI: 10.5194/nhess-7-289-2007.
- [10] GURBUZ A. A new approximation in determination of vertical displacement behavior of a concrete-faced rockfill dam[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(3): 883-892. DOI: 10.1007/s12665-011-1070-4.
- [11] KOSE E, TASCI L. Prediction of the vertical displacement on the crest of Keban dam[J]. *Journal of Grey System*, 2015, 27(1): 12-20.
- [12] EI-ASKARY H, FAWZY A, THOMAS R, et al. Assessing the vertical displacement of the grand ethiopian renaissance dam during its filling using DInSAR technology and its potential acute consequences on the downstream countries[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4287-4311. DOI: 10.3390/rs13214287.
- [13] 朱赵辉, 朱友良, 刘建树, 等. 百色水利枢纽垂直位移异常问题研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, 19(4): 371-380. (ZHU Z H, ZHU Y L, LIU J S, et al. Research on abnormal vertical displacement of Baise Multipurpose dam Project[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and*

- Hydropower Research*, 2021, 19(4): 371-380. (in Chinese)) DOI: [10.13244/j.cnki.jjwhr.20200053](https://doi.org/10.13244/j.cnki.jjwhr.20200053).
- [14] 张博,陶家祥,曹其光,等.丰满大坝垂直位移监测资料分析[J].*三峡大学学报(自然科学版)*,2010,32(6): 25-28. (ZHANG B, TAO J X, CAO Q G, et al. Analysis of monitoring data of vertical displacements of Fengman dam[J]. *Journal of Three Gorges University, (Natural Sciences)*, 2010, 32(6): 25-28. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1672-948X.2010.06.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-948X.2010.06.006).
- [15] 李作光.丰满大坝重建工程施工期坝区垂直位移监测及资料分析[J].*水电与抽水蓄能*,2019,5(6): 146-150. (LI Z G. Monitoring and data analysis of vertical displacement of dam area during construction period of Fengman dam reconstruction project[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2019, 5(6): 146-150. (in Chinese)) DOI: [CNKI:SUN:DBGC.0.2019-06-031](https://doi.org/CNKI:SUN:DBGC.0.2019-06-031).
- [16] 王校利,陶丛丛.岩滩水电站混凝土重力坝垂直位移观测资料分析[J].*水电能源科学*,2010,28(3): 51-53. (WANG X L, TAO C C. Observation data analysis of vertical displacement of concrete gravity dam for Yantan hydropower station[J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28(3): 51-53. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-7709.2010.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7709.2010.03.017).
- [17] 张赛.观音阁水库坝体垂直位移影响因素分析[J].*黑龙江水利科技*,2019,47(8): 17-21, 50. (ZHANG S. Analysis of influencing factors of vertical displacement of dam body in Guanying Reservoir[J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2019, 47(8): 17-21, 50. (in Chinese)) DOI: [10.14122/j.cnki.hskj.2019.08.005](https://doi.org/10.14122/j.cnki.hskj.2019.08.005).
- [18] 夏秀龙,刘明.白山大坝垂直位移监测系统的应用研究[J].*内蒙古水利*,2019(9): 50-52. (XIA X L, LIU M. Application research of Baishan dam vertical displacement monitoring system[J]. *Inner Mongolia Water Conservancy*, 2019(9): 50-52. (in Chinese)) DOI: [CNKI:SUN:NMSL.0.2019-09-025](https://doi.org/CNKI:SUN:NMSL.0.2019-09-025).
- [19] 陈浩.丹江口大坝加高前后垂直位移方案变化及数据分析[D].昆明:昆明理工大学,2021. (CHEN H. Variation and data analysis of vertical displacement scheme of Danjiangkou dam before and after heightening[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)) DOI: [10.27200/d.cnki.gkmlu.2021.001421](https://doi.org/10.27200/d.cnki.gkmlu.2021.001421).
- [20] 徐磊,郑东健,何侃.某高拱坝初蓄水期垂直位移变化规律及其影响因素分析[J].*水电能源科学*,2013,31(2): 99-101. (XU L, ZHENG D J, HE K. Vertical displacement behavior analysis of high arch dam in early storage period and its influencing factors[J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(2): 99-101. (in Chinese)) DOI: [CNKI:SUN:SDNY.0.2013-02-030](https://doi.org/CNKI:SUN:SDNY.0.2013-02-030).
- [21] 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. (WU Y, WANG J G, HUANG C H. Statistical regression model of vertical displacement of concrete gravity dam and its engineering application[J]. *Pearl River*, 2012, 33(1): 72-75. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1001-9235.2012.01.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9235.2012.01.022).
- [22] 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. (HUANG M, GE X R, LIU J. Four kinds of statistical models used in monitoring data analysis of pendulum wire deformation[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2001, 18(2): 37-40. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1001-5485.2001.02.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5485.2001.02.010).
- [23] 任德记,张超峰,尚泽宇.最优加权组合法在大坝垂直位移分析中的运用[J].*人民长江*,2005,36(10): 56-57. (REN D J, ZHANG C F, SHANG Z Y. Application of optimal weighted group method in vertical displacement analysis of dam[J]. *Yangtze River*, 2005, 36(10): 56-57. (in Chinese)) DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2005.10.024](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2005.10.024).
- [24] 辛大鹏,田林亚,沈哲辉.小波分解AR-BP网络模型在大坝垂直位移预测中的应用[J].*测绘工程*,2015,24(12): 53-56. (XIN D P, TIAN L Y, SHEN Z H. Application of AR-BP network model to the prediction of vertical displacement of dam[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2015, 24(12): 53-56. (in Chinese)) DOI: [10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2015.12.013](https://doi.org/10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2015.12.013).
- [25] 罗浩,郭盛勇,包为民.拱坝变形监测预报的随机森林模型及应用[J].*南水北调与水利科技*,2016,14(6): 116-121, 158. (LUO H, GUO S Y, BAO W M. Random forest model and application of arch dam's deformation monitoring and prediction[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(6): 116-121, 158. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.06.020](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.06.020).
- [26] 吴中如,陈波.大坝变形监控模型发展回眸[J].*现代测绘*,2016,39(5): 1-3, 8. (WU Z R, CHEN B. A review on displacement of dam safety monitoring models[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2016, 39(5): 1-3, 8. (in Chinese)) DOI: [CNKI:SUN:JSCH.0.2016-05-001](https://doi.org/CNKI:SUN:JSCH.0.2016-05-001).

Analysis of vertical displacement variation of Longyangxia arch dam

YUAN Mengling¹, LIU Changwei², YUAN Zhanrong¹, ZHOU Tianyu², PAN Jianwen², WANG Jinting²

(1. State Power Investment Corporation Qinghai Yellow River Electric Power Technology Co.,Ltd.,Xining 810016,China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: Monitoring data analysis is an important part of dam health monitoring to ensure the long-term safe operation of the dam. Vertical displacement is one of the main component in dam deformation monitoring. It can reflect the settlement deformation of the dam intuitively. The analysis of vertical deformation law and mechanism of the dam is a key content of data monitoring analysis. The main factors affecting the vertical displacement of the concrete dam are water pressure, temperature, and time-varying, and the influence degree of each factor is different. For the concrete dam with a low water head or little change of water level, the temperature has a greater influence on the vertical displacement, while for the high water head concrete dam, the water pressure has a greater influence than other factors. The effect of water pressure on the vertical displacement of a gravity arch dam is mainly manifested in two aspects: (1) The dam body tilts downstream due to the action of reservoir water pressure, which leads to the upstream surface of the dam body to lift and the downstream surface to sink. (2) The gravity action of the reservoir water causes the settlement of the reservoir plate and the dam foundation, which causes the dam body to tilt upstream, resulting in the upstream surface of the dam body sinking and the downstream surface lifting. The water pressure and temperature influence on deformation at different elevations of Longyangxia arch dam are different, which results in “phase difference” in the vertical displacement of the dam. The reservoir water pressure in the high elevation part is dominant, and the influence of temperature is comparatively small. The foundation of the dam is less affected by external air temperature and is mainly affected by upstream water pressure. Due to the complex interaction between water pressure and temperature in the middle part of the dam, the hysteresis phenomenon of water pressure effect and the abnormal phenomenon of temperature effect appears. The uplift pressure in the upstream and downstream of the curtain at the no.7 and no.8 dam sections foundation is larger than other dam sections, which leads to the large vertical displacement of the no.7 dam foundation. Therefore, the monitoring of seepage and deformation in this section should be strengthened. During the operation of high water levels since 2018, the deformation of the dam body has an obvious response, and the variation trend of the measured vertical displacement of the dam has changed significantly. Although Longyangxia arch dam has operated for more than 30 years, the vertical displacement of some measuring points of the dam still shows a trend of continuous deformation and has not reached a stable state. The settlement rate of no.6, 7 and 8 dam sections at 2 463m elevation is faster, so the observation of these sections should be strengthened. The vertical deformation of Longyangxia arch dam from the no.14 dam section to the right bank foundation is contrary to that of other dam sections at the same elevation, which sinks as the water level rises and lifts when the water level decreases.

Key words: Longyangxia arch dam; vertical displacement; deformation law; special deformation; spatial distribution