

龙河口水库大坝位移变形监测分析

文 / 余旻晓 安徽省龙河口水库管理处

摘要：本文基于龙河口水库大坝 2008—2024 年垂直位移监测数据，通过时空特征分析与统计建模，对垂直位移监测数据进行定性和定量分析，系统研究龙河口水库大坝变形规律。研究表明：（1）坝体沉降符合土石坝典型分布特征，坝顶中部沉降量（西坝 46.00mm，东坝 29.00mm）显著大于坝肩；（2）统计模型显示垂直位移主要受时效分量主导（贡献率 >60%），水压分量影响为 0%，温度分量贡献率 <30%；（3）坝顶沉降尚未收敛（年均增速 0.5—8.5mm/a），而坝坡部位已趋稳定，为类似土石坝安全评价提供理论依据。

关键词：垂直位移；统计模型；时效分量；土石坝；变形监测；龙河口水库

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.079

引言

龙河口水库作为皖西地区关键的水利枢纽工程，其最大坝高为 33.8m，坝型为粘土心墙砂壳坝。大坝变形监测是保障其长期安全运行的核心环节，其中垂直位移直接反映坝体固结过程与整体稳定性状态。本研究基于实测数据分析表明，当前最大沉降量与坝高之比仅为 0.13%，处于较低水平。然而，时效分量持续主导位移变化的特征需引起高度关注，这反映了坝体材料在长期荷载作用下的流变效应尚未完全稳定。因此，系统分析其变形规律对于工程安全管理具有重要的现实意义。

一、资料与方法

（一）研究区概况与数据资料

龙河口水库位于六安市境内杭埠河上游，属长江流域长江干流水系。该水库主要用于洪水防御、农田灌溉和城市供水，同时还兼具发电、水产养殖及旅游等多种用途，是一个功能齐全的大型水库。

本文选取龙河口水库 2008—2024 年东大坝上游 59.00m、66.00m 高程平台、坝顶、下游 49.00m、60.00m 高程平台和西大坝坝顶，6 组共 30 个沉降标点垂直位移监测数据进行分析研究，其中，东大坝上游 59.00m 高程平台 5 个人工沉降观测点因长期浸泡水下导致观测不连续，不满足观测资料整编分析要求，相关数据已作剔除处理，最终生成了各测点的逐年时间序列数据集^[1]。

（二）研究方法

运用格拉布斯 (Grubbs) 准则识别并剔除观测粗差，并采用时空克里金 (Kriging) 插值方法填补因故缺失的

观测值，确保数据质量。利用反距离加权 (IDW) 插值技术生成坝体沉降等值线图，直观揭示沉降的空间分布格局，并与土石坝荷载传递的力学机制相互印证。建立考虑水压、温度及时效分量的多元统计模型，定量解析各因素对垂直位移的贡献率。通过模型分析结果，识别出主导变形的因素及其发展趋势，并建立一个基于剩余均方误差的预警阈值模型。

二、垂直位移监测资料的时空分析

（一）坝顶垂直位移测值变化规律分析

图 1—图 2 为西坝坝顶、东坝坝顶垂直位移测点的实测过程线（2008—2024 年），可以看出：

（1）通过对坝体沉降分布情况及其统计特征值的分析获悉，在相同高程位置，坝体中间部分的沉降明显大于上下游两侧的沉降，这表明龙河口水库大坝的表层沉降情况符合土石坝的一般沉降规律。监测数据显示，大坝结构的沉降指标无明显异常。

（2）根据测点沉降值的实测曲线可以发现，所有测点的沉降范围在 -20 毫米至 50 毫米之间，总体变形较小。在沉降量变化上，东西坝坝顶沉降量呈缓慢增加并未完全收敛的迹象，沉降位移的年均增速稍有放缓，今后需持续关注其沉降收敛性；其他地区的沉降量基本保持稳定，表明大坝的固结沉降过程已接近完成。

（3）位于东坝上游 66.00m 高程的测点数据表现出一些波动，这是由于其位置靠近库水，并长期受到库水位变动的影响造成的。在 2013 年，东坝下游 49.00m 和 60.00m 高程平台的测量值出现显著变化，原因是该年校测基点后采用了新的基点高程数据。

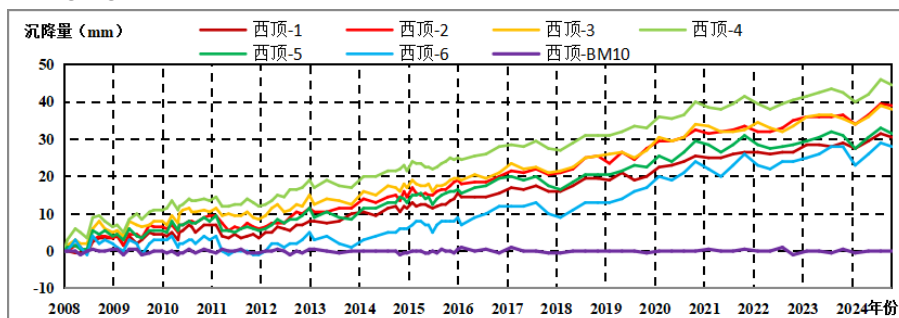


图 1 西坝坝顶垂直位移过程线

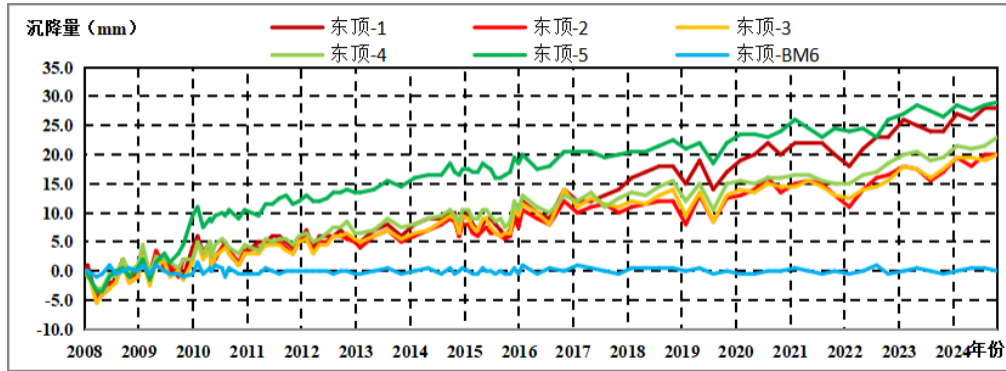


图2 东坝坝顶垂直位移过程线

(二) 坝顶垂直位移特征值分析

表1 提供了从2008年到2024年主要测点的垂直移动最大值和年度变化范围的统计数据。

表1 2008—2024年坝顶垂直位移主要测点特征值统计表 单位：mm

测点	极值统计				年变幅			
	极大值	日期	极小值	日期	最大值	年份	最小值	年份
西顶-3	39.00	2024-9-26	0.00	2008-2-27	8.0	2008	1.0	2023
西顶-4	46.00	2024-9-26	0.00	2008-2-27	8.5	2008	2.0	2013
东顶-1	28.00	2024-12-19	-5.00	2008-5-19	7.0	2008	2.0	2014
东顶-3	20.00	2024-12-19	-5.50	2008-5-19	6.5	2008	1.0	2024
东顶-5	29.00	2024-12-19	-3.50	2008-5-19	6.0	2009	1.0	2017
66-2	13.50	2022-12-16	0.00	2008-5-19	7.0	2023	0.0	2016
66-3	13.50	2022-12-16	0.00	2008-5-19	6.5	2023	0.0	2016
60-4	3.00	2012-9-27	-16.50	2022-9-28	6.5	2022	1.0	2011
60-5	5.00	2012-3-30	-17.50	2022-9-28	14.5	2015	0.0	2011
49-1	5.00	2012-12-27	-13.00	2023-6-28	4.0	2012	1.0	2009
49-2	3.50	2012-12-27	-13.50	2015-9-22	4.5	2015	1.0	2011
49-3	3.00	2012-12-27	-13.50	2015-9-22	4.5	2015	0.5	2011

由表1可以看出：

(1) 沉降极值分布规律分析

自2008年起，西坝顶端沉降量在2024年9月26日达到最大值46mm（西顶-4），东坝坝顶沉降量在2024年12月19日达到最大值29.00mm（东顶-5），66.00m高程沉降量在2022年12月16日达到最大值13.50mm（66-2），60.00m高程沉降量在2012年3月30日最大值5.00mm（60-5），49.00m高程沉降量在2012年12月27日达到最大值5.00mm（49-1）。

(2) 沉降年变幅分布规律分析

2008年至今，西坝坝顶沉降量在2008年达到最大年变幅为9.5mm（西顶-4）；其次为2008年的变幅为8.00mm（西顶-3）。东坝坝顶沉降量在2008年达到最大年变幅为7.00mm（东顶-1）；其次为2008年的变幅为6.50mm（东顶-3）。66.00m高程沉降量在2023年达到最大年变幅为7.00mm（66-2）；其次为2023年的变

幅为6.50mm（66-3）。60.00m高程沉降量在2015年达到最大年变幅为14.50mm（60-5）；其次为2022年的变幅为6.50mm（60-4）。49.00m高程沉降量在2015年达到最大年变幅为4.50mm（49-2）；其次为2015年的变幅为4.50mm（66-2）。

三、垂直位移监测资料的统计模型分析

(一) 统计模型建立的基本原理

坝体的垂直位移一般受水压、温度以及时效等因素的影响。因此，本工程大坝垂直位移统计模型主要由水压分量、温度分量和时效分量构成^[2]。即：

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta \quad (1)$$

式中： δ ——坝体位移； δ_H 、 δ_T 、 δ_θ ——分别为水压分量、温度分量和时效分量。

根据龙河口大坝的特点，并考虑初始值的影响，得到龙河口大坝的垂直位移（x、y）的统计模型为：

$$\delta = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i (H^i - H_0^i) + \sum_{i=1}^6 \left[b_{1i} \left(\sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi it_0}{365} \right) + b_{2i} \left(\cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi it_0}{365} \right) \right] + c_1 (\theta - \theta_0) + c_2 (\ln \theta - \ln \theta_0) \quad (2)$$

公式中 H_0 代表建模时选择的资料中首日的水深； t_0 代表建模所选资料序列首日至始测日累计天数， $\theta_0 = \frac{t_0}{100}$ 。

(二) 垂直位移统计模型及其成果分析

1. 统计模型

使用逐步回归技术，通过公式（2）对垂直位移的监

测数据进行回归分析。从2008年1月开始,提取各个垂直位移测点的资料,分析各测点统计模型的参数和特征值,并创建包含回归系数和特征值的统计表。

2. 精度分析

在25个坝顶垂直位移测点中,复相关系数R在0.9以上的有11个测点,东西坝坝顶垂直位移测点复相关系数均在0.9以上,而66.00m、60.00m以及49.00m高程平台均在0.8以下,可能是测值不规律性波动占比较大引起的。通过上述分析可以看出,坝顶垂直位移测点具有较高的复相关系数(R),同时对应的均方差(S)较低。总的来说,坝顶大多数测量点的垂直位移的统计模型精度较高,适合于量化分析其变形趋势。相比之下,各高程平台的垂直位移测点的统计模型精度普遍较低,难以满足定量分析的要求。

3. 各分量对垂直位移的效应分析

为了量化分析和评估不同成分对垂直位移的影响,选取了复相关系数超过0.8的测点。通过统计模型分离出的各个成分如表2所示。以2023年具有代表性的时间段垂直位移的年度变化幅度为例。2023年的最大实际测量值以及相关组分统计在表2中。

表2 坝顶垂直位移2023年年变幅及其各分量统计表 单位: mm

测点	实测值	拟合值	水压分量	温度分量	时效分量	a0
西顶-1	1.0	1.3852	0.0000	0.0000	1.3852	1.9
西顶-2	0.5	2.2265	0.0000	0.6350	1.7038	2.2
西顶-3	1.0	1.5320	0.0000	0.0000	1.5320	3.0
西顶-4	2.0	2.2538	0.0000	0.6749	1.6983	1.3
西顶-5	2.5	1.3739	0.0000	0.0000	1.3739	1.1
西顶-6	3.0	1.4568	0.0000	0.0000	1.4568	7.8
东顶-1	2.0	1.2631	0.0000	0.0000	1.2631	0.5
东顶-2	2.5	0.8133	0.0000	0.0000	0.8133	-0.3
东顶-3	2.0	0.8275	0.0000	0.0000	0.8275	-2.8
东顶-4	1.5	0.8570	0.0000	0.0000	0.8570	3.4
东顶-5	2.0	1.0831	0.0000	0.4675	0.6156	-7.9

(三) 预测模型

由式(4-2-2)及附表4-2-1~附表4-2-4的垂直位移统计模型,得到垂直位移的预报模型如下:

当 $|\delta| \leq 2S$ 时,测值正常;

当 $2S < |\delta| \leq 3S$ 时,进行2到3次监控,若未发现趋势变化则视为正常,反之则判定为异常;

当 $|\delta| > 3S$ 时,测值异常,分析成因。

式中: δ 为实测值;为模型拟合值,S为剩余均方差^[2]。

结语

(1) 龙河口水库大坝的垂直位移似乎与水库水位和温度的变化没有明显的相关性。坝顶位移主要受时效影响,目前尚未完全收敛,需持续关注其收敛性;自上次安全评估以来,坝体其他区域的位移变化趋于稳定,测量数据没有显示出显著的变化趋势。

(2) 大坝顶部的沉降现象明显强于坡面上的沉降情

(1) 温度分量(δT)

表2可知,土石坝坝顶的垂直位移测量点基本不受温度的显著影响,个别点受到温度作用,但其温度影响部分也相对较弱。截至2023年的坝顶垂直位移年度变化幅度中,受温度影响的测点,其温度因素的贡献不超过30%。总的来说,土石坝的竖向位移受温度变化的影响有限,这与其垂直位移的规律相符。

(2) 水压分量(δH)

通过对表2的数据分析,我们可以看出坝顶的垂直位移与水库水位之间并不存在关联。建模结果显示,该结构的水压力因素完全未受到影响,影响程度为0%。综上所述,龙河口水库大坝顶部的垂直位移不受上游水库水位变化的影响。

(3) 时效分量($\delta \theta$)

根据表2可见,时效效应仍然占主要部分,坝顶的垂直位移尚未趋于稳定,后续仍需关注其变动情况。在2023年坝顶垂直位移年变幅中,时效分量基本都在60%以上,且多数测点占比100%,坝顶垂直位移沉降随时间的变化仍在不断发展。

况。在相同高程处,大坝中间区域的沉降比上下游侧更显著,这表明龙河口水库大坝表层沉降情况与土石坝沉降的分布特点相一致。

(3) 分析测点沉降值的实际测量曲线,各测点的沉降量在-20mm到50mm之间波动,总体变形较小。大坝最大沉降量占坝高的比例小于0.2%,沉降量较小。

综上所述,龙河口水库所测垂直位移监测数据比较全面,总体的规律性较好,无明显异常现象。大坝顶部的垂直移动尚未完全稳定,后续仍需继续关注其收敛情况的变化。

参考文献

- [1] 葛西西,王亚坤,杨倩.龙河口水库大坝安全自动监测系统设计[J].广西水利水电,2025,(02):81-86.
- [2] 余常新.梅山水库连拱坝垂直位移监测资料时空分析[J].安徽水利水电职业技术学院学报,2020,20(03):18-22.