

寒区水电站高面板堆石坝沉降特性研究

刘 枫^{1,2}

¹中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春

²水利部寒区工程技术研究中心, 吉林 长春

收稿日期: 2021年12月13日; 录用日期: 2021年12月18日; 发布日期: 2022年1月13日

摘 要

为了研究寒区高面板堆石坝的沉降变形特性, 建立了堆石坝沉降与库水位、环境温度和时效之间的非线性关系模型, 分析认为坝体沉降已基本稳定, 与同类型的面板堆石坝相比沉降较大。同时分析了坝体内部测点沉降变幅较大的原因, 认为主要与水管内水温的变化有关。

关键词

寒区, 混凝土面板堆石坝, 安全监测, 沉降特性, 统计模型分析

Studies on Settlement Characteristics of a High Concrete Face Rockfill Dam in Cold Region

Feng Liu^{1,2}

¹China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun Jilin

²Research Center on Cold Region Engineering Ministry of Water Resources, Changchun Jilin

Received: Dec. 13th, 2021; accepted: Dec. 18th, 2021; published: Jan. 13th, 2022

Abstract

In order to study the settlement characteristics of high concrete face rockfill dam in cold region, the mathematical models of the dam deformations versus the water level, the environmental temperature and the time-effect are proposed. It is concluded that the dam settlement is basically stable, and the settlement is larger than that of the same type of faced rockfill dams. Meanwhile, the reason for large settlement variation of the monitoring points inside the dam body is analyzed, which is mainly related to the change of water temperature in the water pipe.

Keywords

Cold Region, Concrete Face Rockfill Dam, Safety Monitoring, Settlement Characteristics, Statistical Model Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

混凝土面板堆石坝已经在全球范围内得到了广泛的应用，其主要优点在于建设工期短、建设成本低、施工简单和良好的内在抗震性能。而堆石坝建成后的变形特点直接影响到其安全性，因此关于堆石坝变形特性的研究引起了广泛的关注。Matheson 等[1]分析了 2 个堆石坝的沉降特性，指出坝内观测点的沉降约占坝高的 0.05%~0.1%，坝顶沉降为坝高的 0.1%~0.2%。Dascal [2]根据现场观测数据，研究了堆石坝建后 3 年的变形特性。李克绵等[3]分析了寒区双沟堆石坝坝体的沉降规律，对沉降测值中出现的周期性变化进行了探讨。梁希林等[4]对寒区双沟堆石坝填筑料的邓肯 E-B 模型参数进行反演分析，并用反演所得的坝体材料参数及其实际填筑过程进行有限元计算，根据实际监测结果与预测值进行对比，分析了有限元计算结果的合理性。本文采用定性和定量的方法对寒区双沟水电站面板堆石坝的外部沉降和内部沉降进行了分析，研究了堆石坝的沉降特性。

2. 工程概况

寒区双沟水电站为松江河梯级水电站的第 2 级电站，坝址位于吉林省东南部山区抚松县境内的松江河上。枢纽工程由混凝土面板堆石坝、岸坡溢洪道、引水系统及发电厂房等建筑物组成。面板堆石坝最大坝高 110.50 m，坝顶长 294.00 m，坝顶高程 590.00 m，大坝下游面 514.00 m、539.00 m、564.00 m 高程设置了 3 条马道。水库死水位 567.00 m，正常蓄水位 585.00 m，水库总库容 $3.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，电站总装机 $2 \times 140 \text{ MW}$ 。

3. 沉降监测仪器布置

堆石坝沉降监测包括外部沉降监测和内部沉降监测，外部沉降通过布设在坝体表面的水准点进行监测，内部沉降通过布设在坝体内部的振弦式沉降仪进行监测。

3.1. 外部沉降

大坝外部沉降共布置了 4 条测线，共计 21 个测点，测点布置在视准线测点旁，分别为 514 马道 3 个，539 马道 5 个，564 马道 6 个，坝顶靠近下游侧 7 个，详见表 1，采用精密水准仪和配套的铟钢条码尺进行观测。

Table 1. Summary of outer settlement observation points of the dam
表 1. 大坝外部沉降测点统计

监测项目	测点名称	高程(m)	测点编号	数量(个)	备注
外部沉降	水准点	514.00	LD1-1~3	3	下游侧
		539.00	LD2-1~5	5	
		564.00	LD3-1~6	6	
		坝顶	LD4-1~7	7	

3.2. 内部沉降

为了观测坝体的内部沉降，选择最大坝高断面(0 + 190.35 m)作为沉降监测的基本剖面，选择坝下游3个马道所在的高程(514.00 m、539.00 m、564.00 m)作为监测高程，顺流向布设3条测线，共布置振弦式沉降仪13套，详见图1。

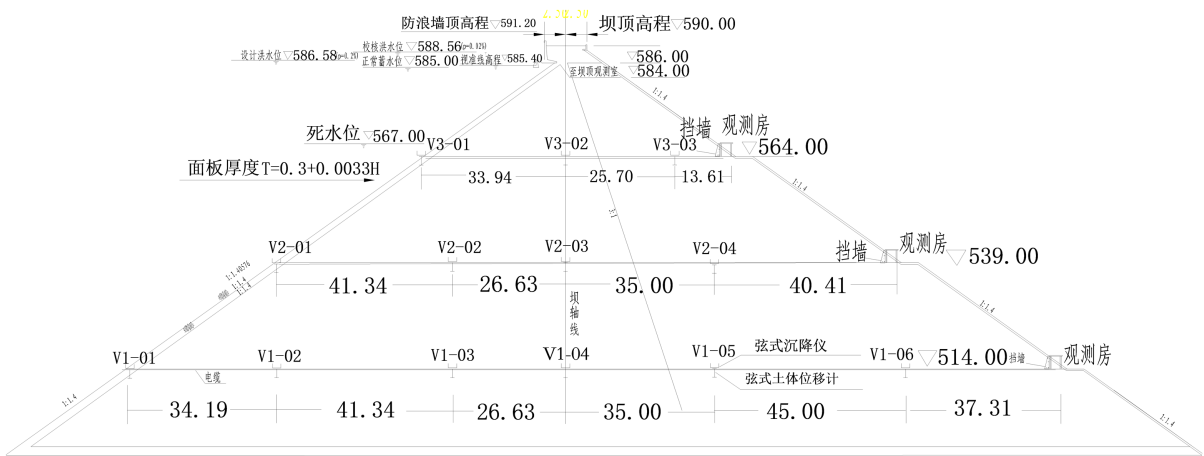


Figure 1. Layout of chord sinking apparatus inside the dam (unit: m)

图 1. 大坝内部振弦式沉降仪布置图(单位: m)

4. 沉降特性分析

4.1. 外部沉降

各层马道沉降的基准日期为2009年6月2日，坝顶下游侧为2009年9月23日，累计沉降最大测点测值过程线见图2，2009年9月12日水库下闸蓄水，蓄水前各点沉降在2 mm以内，沉降主要发生在蓄水后。

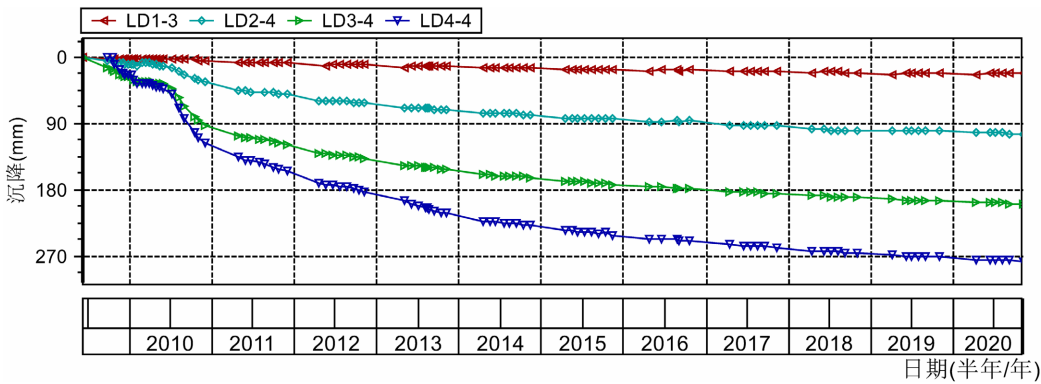


Figure 2. Process lines of largest accumulated settlement of outer observation points of top and berms of the dam

图 2. 大坝各级马道及坝顶外部累计沉降最大测点测值过程线

截至2020年11月04日，514马道、539马道、564马道、坝顶最大累计位移分别为22.60 mm (LD1-3)、103.50 mm (LD2-4)、199.00 mm (LD3-4)、277.90 mm (LD4-4)；2016年至2020年，LD1-3年平均变化速率在1.18~1.48 mm/a之间，LD2-4年平均变化速率在0.73~3.80 mm/a之间，LD3-4年平均变化速率在4.72~6.90 mm/a之间，LD4-4年平均变化速率在5.68~9.40 mm/a之间，详见表2。自2016年以来，坝体

各测点沉降速率逐年减小，变形整体趋于收敛。

坝体外部累计最大沉降为 277.90 mm (LD4-4)，约占最大坝高的 0.26%；各测线靠近中间部位的沉降较大，靠近两端较小，且坝顶最大，514 马道最小，符合土石坝变形的一般特性，目前坝体沉降仍在缓慢增长，呈现一定的流变性。

Table 2. Summary of annual deformation rates of dam’s outer settlement
表 2. 大坝外部沉降年均变化速率统计表

测点	年均值(mm)					年均变化速率(mm/a)			
	2016	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020
LD1-3	17.32	18.50	19.98	21.35	22.60	1.18	1.48	1.37	1.25
LD2-4	86.36	92.85	98.97	99.70	103.50	6.49	6.12	0.73	3.80
LD3-4	177.18	184.08	189.30	194.28	199.00	6.90	5.22	4.98	4.72
LD4-4	247.78	257.18	264.72	270.40	277.90	9.40	7.54	5.68	7.50

4.2. 内部沉降

4.2.1. 实测沉降分析

514.00 m、539.00 m、564.00 m 高程各测点分别于 2006 年 9 月 2 日、2007 年 4 月 16 日和 2007 年 7 月 23 日开始观测，目前 V1-05、V2-04 测点损坏停测，坝体各高程累计沉降最大测点测值过程线见图 3。

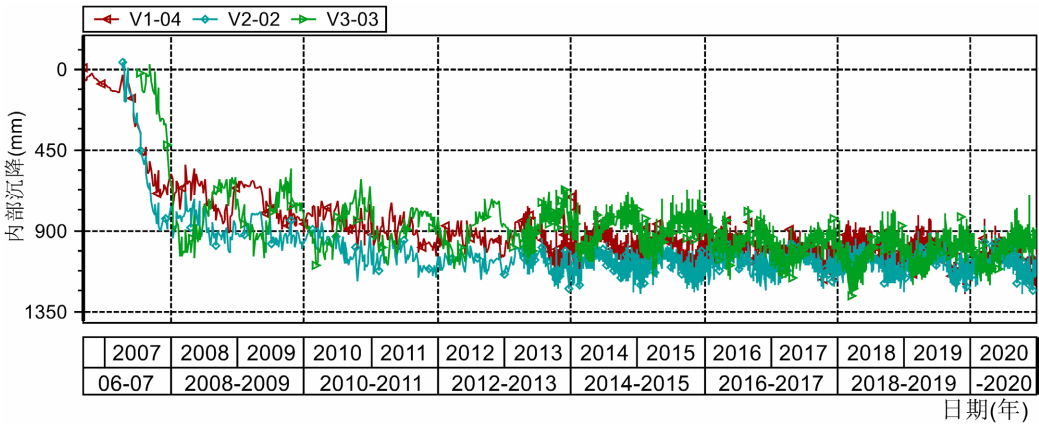


Figure 3. Process lines of largest accumulated settlement of inner observation points at different altitudes of the dam
图 3. 坝体各高程累计沉降最大测点测值过程线

截至 2020 年 12 月底，514.00 m 高程、539.00 m 高程、564.00 m 高程最大累计沉降分别为 1203.70 mm (V1-04)、1249.99 mm (V2-02)、1128.20 mm (V3-03)；V1-04 年均变化速率在 6.69~25.33 mm/a 之间，V2-02 年均变化速率在 1.07~3.98 mm/a 之间，V3-03 年均变化速率在 11.91~40.62 mm/a 之间，详见表 3。

坝体最大累计沉降位于坝轴线附近，为 1353.09 mm (外部沉降 103.10 mm，内部沉降 1249.99 mm)，发生在 539 m 高程的 V2-02 测点，沉降量约占最大坝高的 1.22%，与同类型的面板堆石坝相比沉降较大。部分测点沉降变幅较大，表现为一定的周期性变化。

沉降规律为同一高度上是坝体中间测点处沉降较大，下游区次之，上游区测点最小。同一位置处 539 m 高程处沉降量最大，514 m 高程次之，564 m 高程沉降最小。

Table 3. Summary of annual deformation rates of dam's inner settlement
表 3. 大坝内部沉降年均变化速率统计表

测点	年均值(mm)					年均变化速率(mm/a)			
	2014	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018
V1-04	985.32	1010.65	1003.96	1031.61	1049.94	25.33	6.69	27.65	18.33
V2-02	1071.54	1075.52	1081.28	1080.21	1078.73	3.98	5.76	1.07	1.48
V3-03	950.40	991.02	1023.06	1009.63	997.72	40.62	32.04	13.43	11.91

4.2.2. 统计模型分析

1) 模型因子选择

统计模型分析是建立原因量和效应量之间关系的定量分析方法。原因量选取时效 t 、温度 T 和水位 h 三个分量，时效分量表示大坝内部沉降随时间推移向某一方向发展的分量，温度分量表示大坝内部沉降随气温变化的分量，水位分量表示大坝内部沉降随库水位变化的测值分量。

采用多元逐步回归计算方法，对各因子进行选中或剔除。统计分析模型采取如下形式：

$$F = f(t) + f(T) + f(h) \quad (1)$$

其中： F ——坝体沉降； $f(t)$ ——时效分量； $f(T)$ ——温度分量； $f(h)$ ——水位分量。

将这些因子与相应的待定系数组成统计模型回归方程，采用多元逐步回归法求解获得最终回归方程。

2) 统计结果分析

对大坝内部沉降较大的测点(V1-04、V2-02、V3-03)建立统计模型进行定量分析，结果汇总于表 4，可知：

a) 各测点复相关系数在 0.90~0.93 之间，回归拟合精度较高；测点沉降时效分量变幅最大，占比 83.61%~91.65%；温度分量次之，占比 8.35%~10.73%，水位分量最小，占比 0%~5.84%。

b) 测点 V1-04、V2-02、V3-03 当前的沉降速率分别为 0、0.006 mm/d、0.007 mm/d，按此速率估算其年沉降量分别约为 0 mm、2.19 mm、2.56 mm，表明坝体内部沉降已基本稳定。

Table 4. Summary of statistical results of inner deformation model of the dam
表 4. 大坝内部变形统计模型回归结果统计表

测点编号	变幅(mm)		复相关系数	分量变幅(mm)			所占比例(%)			时效速率(mm/d)
	实测值	计算值		水位	时效	温度	水位	时效	温度	
V1-04	1203.70	1213.69	0.93	0	1112.33	101.36	0	91.65	8.35	0
V2-02	1249.99	1236.41	0.91	72.16	1058.50	105.75	5.84	85.61	8.55	0.006
V3-03	1128.20	1130.36	0.90	64.06	945.07	121.24	5.67	83.61	10.73	0.007

4.2.3. 内部沉降呈周期性变化分析

坝体内部沉降过程线如图 3 所示，环境气温变化过程线如图 4 所示。

从图 3、图 4 中可以明显看出，各测点内部沉降随气温的变化呈现一定的周期性，当气温升高时，沉降增加，反之则减小，并与气温的变化周期有一定滞后。产生上述现象的原因如下：

振弦式沉降仪主要由振弦式压力传感器、储液罐、通液管(1 根进水管和 2 根回水管)、通气信号电、干燥管、沉降板和测读仪表组成。沉降测值出现周期性变化，主要与水管内水温的变化有关，整个系

统受温度影响较大。暴露在外面的部分受气温影响，温度变化较大；而坝体内部埋设部分温度变化相对较小，且有一定滞后。气温降低，管内水温降低，柱状液体高度减小，导致沉降值减小，反之，沉降值增加。

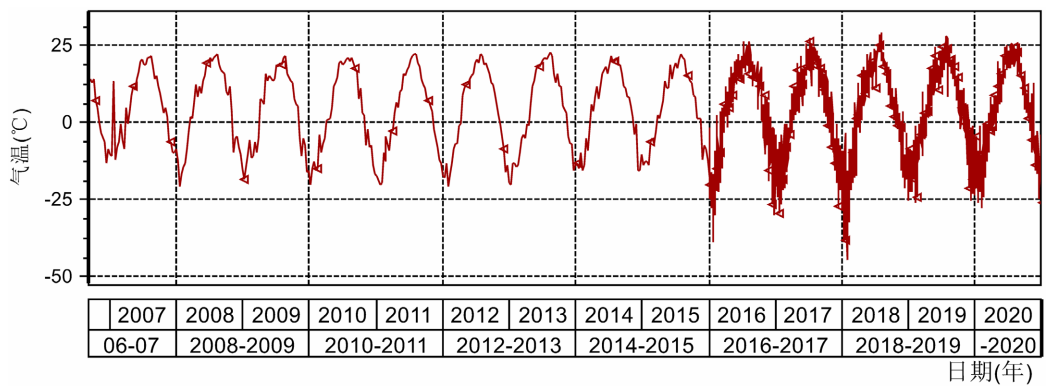


Figure 4. Process line of temperature in the reservoir area
图 4. 库区气温过程线

5. 沉降特性分析

- 通过对寒区双沟水电站面板堆石坝沉降进行定性和定量分析，可得出如下结论：
- 1) 坝体外部累计最大沉降为 277.90 mm (LD4-4)，约占最大坝高的 0.26%；目前坝体沉降仍在缓慢增长，呈现一定的流变性，但各测点沉降速率逐年减小，整体趋于收敛。
 - 2) 坝体最大累计沉降位于坝轴线附近，为 1353.09 mm (外部沉降 103.10 mm，内部沉降 1249.99 mm)，沉降量约占最大坝高的 1.22%，与同类型的面板堆石坝相比沉降较大。
 - 3) 坝体内部测点沉降变幅较大，表现为一定的周期性变化，与沉降规律不尽相符，主要与水管内水温的变化有关。
 - 4) 通过对大坝内部沉降较大的测点建立统计模型进行定量分析可知，测点时效分量变幅最大，温度分量次之，水位分量最小；测点当前的沉降速率分别为 0~0.007 mm/d 之间，按此速率估算其年沉降量不超过 2.56 mm，表明坝体内部沉降已基本稳定。

参考文献

[1] Matheson, G.M. and Parent, W.F. (1989) Construction and Performance of Two Large Rockfill Embankments. *Journal of Geotechnical Engineering*, **115**, 1699-1716. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1989\)115:12\(1699\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:12(1699))

[2] Dascal, O. (1987) Postconstruction Deformations of Rockfill Dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, **113**, 46-59. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1987\)113:1\(46\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:1(46))

[3] 李克绵, 张文东, 刘天鹏, 王洪洋, 薛立梅. 振弦式沉降仪在双沟水电站混凝土面板堆石坝中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(3): 58-60.

[4] 梁希林, 刘枫. 双沟水电站面板堆石坝变形反演分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(6): 423-431.