

# 猴子岩混凝土面板堆石坝施工期沉降变形分析

秦 朋, 彭 成 军, 李 战 备, 黄 小 红, 张 志 奎

(葛洲坝集团试验检测有限公司, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**为研究猴子岩水电站混凝土面板堆石坝在施工期的沉降变形规律,在坝前不同部位布置了 8 支弦式沉降仪。首先结合影响沉降的环境变量,通过聚类分析将上游侧坝体 8 个部位进行聚类分组,分析沉降变形规律与坝体构造及施工过程的联系;然后利用因子分析法揭示了沉降变形的主要影响因子;最后通过模型分析验证聚类分组的合理性及因子提取的准确性。结果表明,挤压边墙约束和堆石体流变的双重作用加快了挤压边墙下堆石体固结速率,其沉降变形趋近稳定,为一期面板施工创造了有利条件;猴子岩大坝上游侧整体施工质量良好,为坝体后期施工及运行期稳定性奠定了基础。

**关 键 词:**沉降变形; 聚类分析; 混凝土面板堆石坝; 猴子岩水电站

中图法分类号: TV641.1

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.S1.050

猴子岩水电站位于四川省甘孜藏族自治州康定县境内,是大渡河干流水电规划调整“3 库 22 级”的第 9 座梯级电站<sup>[1-2]</sup>。拦河坝为混凝土面板堆石坝,设计最大坝高 223.5 m<sup>[3]</sup>,是目前世界上同类型第 2 高坝<sup>[4]</sup>。修建面板堆石坝的核心问题是堆石体变形,尤其是高面板堆石坝,变形过大可能导致周边缝张开、止水失效、面板开裂等严重后果<sup>[5]</sup>。水库蓄水后,面板将承受巨大水压力,挤压边墙只是传力体结构,上游侧坝体(简称坝前)则是迎水面板的最近受力体,其沉降变形会直接影响面板强度,进而影响坝体安全<sup>[6]</sup>。堆石坝沉降变形主要发生在施工期,因此有必要对施工期坝前堆石体沉降原型观测资料进行综合分析。为了对猴子岩工程坝前堆石体沉降变形展开观测,在坝前 1 863.5 m 高程 0+162.8 断面布置了 8 支弦式沉降仪。本文根据仪器监测的沉降量变化,结合影响沉降的环境变量对坝前不同部位沉降变形进行了聚类分组,分析坝前沉降变形规律,利用因子分析法准确提取了坝前堆石体沉降变形作用因子,最后通过模型分析对猴子岩工程坝前整体施工质量做出评价。

## 1 聚类分析

### 1.1 分析原理

受经验及专业知识的影响,常规数据分类结果通

常带有主观性和任意性<sup>[7]</sup>。聚类分析按照距离的远近,将初始化后的数据分成若干个类别,以使类别内的“差异”尽可能小,类别间“差异”尽可能大,有效地减少了人为因素的影响。统计学中最常用的距离表达式是欧几里得距离,对于两组数据 $(X_1, Y_1, Z_1)$ 和 $(X_2, Y_2, Z_2)$ ,欧几里得计算公式为

$$L(1,2) = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2} \tag{1}$$

得到不同两组数据的距离后,系统随机选择两类数据计算的平均距离,类间距离可表示为

$$D_{ij} = \sqrt{\frac{1}{S_i S_j} \sum_{m=F_i} \sum_{n=F_j} L^2} \tag{2}$$

式中, $D_{ij}$ 为类 $F_i, F_j$ 的组间平均距离; $S_i, S_j$ 为类 $F_i, F_j$ 中样点个数。

由数据本身结构的中心初步确定每个类别的原始中心点,逐一计算每组数据到各类别中心点的距离,并将该组数据按照距离最近原则归入各类别,形成新的类别中心点,如此循环重复前一步骤,直至收敛为止,最终得到分类结果。

### 1.2 分析结果

猴子岩工程规划在 2014 年 11 月进行一期面板施工,因此坝前在 9 月份填筑至 1 760 m 高程后停止。

目前坝轴线上游堆石体沉降相对稳定,属自然沉降,满足聚类分析静态条件。用于监测坝前沉降的 SH-4~SH-11 号弦式沉降仪分布及坝前施工进程如图 1 所示。

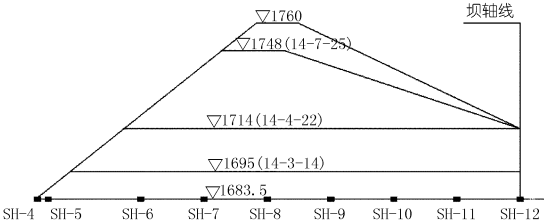


图 1 沉降仪分布及坝前施工过程示意

以坝前仪器分布位置作为样点,选取坝前 8 个样点的截面数据进行聚类分析,得到层次聚类树如图 2 所示。其中第 1 组为 SH-4,SH-5 样点,第 2 组为 SH-10,SH-11 样点,第 3 组为其余样点。

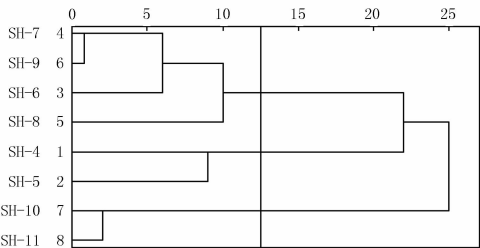


图 2 聚类树状示意

1.3 第 1 组样点沉降分析

样点 SH-4,SH-5 位于挤压边墙下沿,覆盖厚度较小,坝前施工碾压在该部位上方经过的频次也相对较小。根据实测资料可知,样点 SH-4,SH-5 两处沉降量较小,但沉降量与覆盖厚度的比值却最大。这主要是因为堆石体在流变过程中,上游方向受到挤压边墙的约束,使该部位堆石体应变较小,但是应力较大。自 2014 年 4 月 4 日第 1 次观测开始,样点 SH-4 前 36 d 沉降 52 mm,后 36 d 沉降 42 mm;SH-5 前 36 d 沉降 49 mm,后 36 d 沉降 47 mm。由于挤压边墙作用加快了该部位堆石体固结速率,压缩模量增大,因此降低了沉降速率。相比样点 SH-5,样点 SH-4 更靠近挤压边墙,该现象更明显。

1.4 第 2 组样点沉降分析

从分布图可以看出,样点 SH-10,SH-11 位于坝前填筑区下游侧,堆石体流变具有临空面。坝前填筑至 1 714 m 高程后,该部位上方作为填筑料运输通道,其上土层厚度长期不变,且离填筑碾压区较远。因此,堆石体随时间流变是此处沉降的主要原因。

1.5 第 3 组样点沉降分析

样点 SH-6,SH-7,SH-8,SH-9 分布区域位于

填筑区下方,坝前填筑过程对其碾压频次较高,其沉降受到外因影响相对较大;样点 SH-6,SH-7 距离挤压边墙较近,其沉降在一定程度上受到挤压边墙约束和填筑碾压共同影响,但前者相对较小。

2 因子分析

堆石体的沉降主要受应力状态及时效影响,施工期导致沉降的因子较多,且十分复杂。通常沉降变形与多个环境变量相关性较高,但这些变量之间存在着很强的相关关系或者说变量之间存在着很强的信息重叠。为探究沉降变形作用机理,用较少的独立变量来代替原来的变量进行分析,将具有一定相关关系的多个变量综合为数量较少的几个因子。本文使用主成分提取法分别对第 1 组样点 SH-4,第 2 组样点 SH-11 以及第 3 组样点 SH-9 进行了主轴因子分析。因各变量数据单位不一致,主成分分析前需先进行标准化,最后得到因子分析的过程与结果如表 1,2 所示。

表 1 因子分析参数

| 样点编号  | 主成分特征值 | KMO 度量 | Bartlett 检验 | 主成分集中信息 |
|-------|--------|--------|-------------|---------|
| SH-4  | 4.088  | 0.716  | 0.000       | 81.764  |
| SH-9  | 3.788  | 0.745  | 0.000       | 75.764  |
| SH-11 | 4.184  | 0.700  | 0.000       | 83.680  |

表 2 样点成分矩阵

| 样点编号  | 覆盖厚度  | 浇筑高程  | 温度    | 时效    |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| SH-4  | 0.673 | 0.984 | 0.894 | 0.981 |
| SH-9  | 0.985 | 0.991 | 0.046 | 0.975 |
| SH-11 | 0.700 | 0.976 | 0.097 | 0.975 |

3 个样点的 Bartlett 检验均小于 0.05 的显著度,说明变量之间存在相关关系,适合做因子分析。因子分析的解,即 KMO 度量大于 0.5 是因子分析的前提。根据成分矩阵中最高荷载定义,因子在主成分上荷载越大,则与主成分的联系较高。与样点 SH-11 相同,样点 SH-9 覆盖厚度、浇筑高程及时效 3 个因子在主成分上荷载较大,但其主成分特征值与主成分集中信息都比样点 SH-11 小,这与外因影响程度相关,样点 SH-9 受到填筑碾压影响较大。与前两个样点不同的是,样点 SH-4 的温度因子在主成分上荷载较大,温度变化对该部位沉降变形影响相对明显。造成该现象的主要原因有:① 样点 SH-4 分布位置位于挤压边墙下方堆石体边缘,上游距临空面较近,因此该部位温度随气温变化滞后时间较短;② 该部位堆石体变形趋近稳定,沉降变化量较小,与温度变化导致堆石体变形处于同一量级。从样点 SH-4 成分矩阵可以看出,与该部位堆石体沉降变形联系最高的是浇筑高程和时效两个因子,而该样点分布位置离填筑区较远,这是因为挤

压边墙约束了坝前堆石体上游流变方向,因此填筑区高程变化对样点 SH-4 沉降变形有直接影响。

3 模型分析

在施工期,坝体会随着堆石体填筑和时间效应完成大部分沉降变形。根据已观测沉降变化,并结合沉降因子变量对堆石体沉降变形的影响可建立统计模型,以分析获取变形规律。面板堆石坝施工期沉降模型主要由填筑分量和时效分量组成<sup>[7]</sup>,因子分析结果表明与沉降变形联系最高的填筑分量为填筑高程,因此本次建立的模型数学表达式为

$$S = a + bh^m + ch^ne^d \tag{3}$$

式中,  $S$  为沉降量,mm;  $h$  为坝前填筑高程,m;  $t$  为观测当日与第 1 次观测日的时间差,d;  $a,b,c,d,m,n$  皆为统计参数。

根据各测点观测数据,结合相对观测之日对应的浇筑高程及时差,对坝前 8 个样点的数据进行非线性统计,回归结果见表 3,部分样点拟合结果如图 3 所示。

表 3 坝前样点统计回归参数

| 样点编号  | $a$     | $b$    | $c$     | $d$    | $m$    | $n$    | 复相关系数 $R^2$ |
|-------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|-------------|
| SH-4  | 6.651   | 19.964 | -7.427  | 2.357  | -0.328 | 0.219  | 0.846       |
| SH-5  | 6.741   | 0.231  | -0.320  | 2.793  | 0.723  | 1.000  | 0.841       |
| SH-6  | 10.000  | 19.523 | -6.047  | 1.693  | 0.130  | 0.614  | 0.871       |
| SH-7  | 1.775   | 29.542 | -1.537  | 3.574  | -0.287 | 0.746  | 0.888       |
| SH-8  | -19.794 | 8.205  | -2.040  | 5.000  | 0.523  | 0.768  | 0.974       |
| SH-9  | 12.416  | 28.992 | -13.133 | 3.599  | 0.416  | 0.150  | 0.960       |
| SH-10 | -58.189 | 7.423  | -31.193 | -2.865 | 0.627  | -0.404 | 0.993       |
| SH-11 | 20.000  | 17.037 | -11.476 | -2.350 | 0.111  | 0.373  | 0.994       |

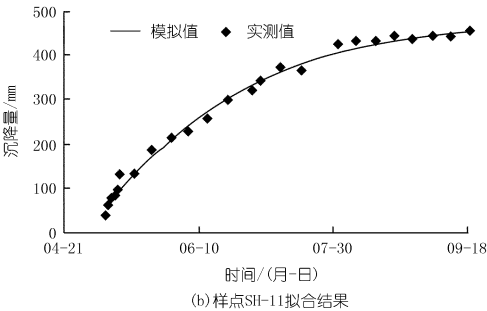
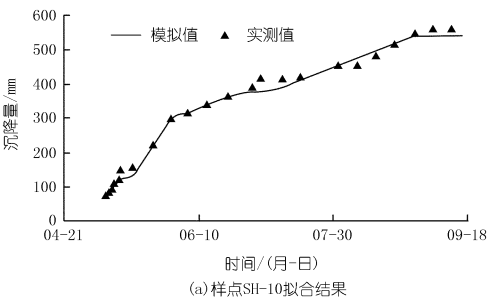


图 3 第 3 组样点统计回归分析(2014 年)

(下转第 163 页)

从图 3 可以看出,模型拟合结果良好,各样点复相关系数较高,其中样点 SH-10,SH-11 的复相关系数甚至在 0.99 以上,因此,认为所建模型是合理的。因子分析结果表明,样点 SH-11 沉降变形受到外因影响比样点 SH-9 小,因此样点 SH-11 比 SH-9 回归效果好。因子分析样点 SH-4 温度的主成分荷载较大,而模型分析忽略了温度因子,因此样点 SH-4 回归效果相对较差。统计模型回归结果验证了因子分析的可靠性。

从表 3 可以看出,模型在第 2 组样点部位回归效果最好,第 1 组样点回归效果最差。第 3 组中样点 SH-8,SH-9 回归效果又比样点 SH-6,SH-7 效果好。这是因为该模型反映的是堆石体自然流变规律,属于内因造成的沉降,而第 1 组,第 3 组样点沉降变形分别受到挤压边墙约束和施工碾压不同程度的外因影响,因此回归效果不如第 2 组样点。因此,统计模型回归结果也验证了聚类分组的合理性。

需要说明的是,该沉降统计模型是基于邓肯-张模型对堆石体变形特性的描述,并结合经验公式而得到的,通常在面板堆石坝施工期沉降分析中所使用的填筑分量是覆盖厚度,在其他类似工程中应用效果较好。本次分析的样点 SH-8 处于填筑区正下方,填筑高程与覆盖厚度两个因子信息是重叠的,但其回归效果不如样点 SH-10,SH-11。该现象说明猴子岩工程施工期坝前整体填筑高程直接影响填筑区以外部位堆石体的沉降变形,堆石体流变明显。

控制堆石体流变是修建面板堆石坝的技术关键。流变定义为施工结束后堆石体的缓慢变形,堆石坝在施工期发生的堆石体流变并不完全,在运行期也会有流变现象发生。施工期振动碾压及碎石作业目的是加速堆石体骨架应力的重新分布,从而使粗大棱角颗粒或软弱颗粒少量破碎、细化,颗粒排列得以进一步调整,即促使施工期流变<sup>[8]</sup>。流变在施工期发生比例越大,运行期堆石体则越稳定。在沉降量较小的前提下,施工期流变越明显说明施工对流变影响越大,施工质量越好。

4 结论

(1) 猴子岩工程坝前施工期沉降分布符合堆石体变形规律。挤压边墙约束加速了坝前堆石体固结速率,挤压边墙下堆石体沉降变形的温度因子作用比较明显,变形趋近稳定。通过增加挤压边墙强度可提高其对堆石体的约束,但会加大蓄水期面板剪应力,不利

关部门,以便防汛指挥部门正确分析和判断行蓄洪区内防汛形势,制定科学的防汛调度方案。

2.5 水行政执法巡查

采用无人机系统可以提高水行政执法巡查效率,大幅降低成本,保障人身安全。在水政监督执法、采砂管理等执法、巡查和搜证过程中,常常需动用专用执法船只和武装执法人员,出动一次需充分准备,耗费大量的人力和物力,在遇到负隅顽抗的违法人员时,往往需要直接面对致命的风险;此外,专用执法或监测船只的动向和航线容易暴露,使违法人员有充足的时间逃离现场和毁灭证据。而无人机具有体积小、隐蔽性强、起飞地点随意、速度快、空中悬停和出勤成本几乎为零(多旋翼电动型)等特点,是巡查搜证的理想替代装备。

2.6 水利行业应用广泛

无人机系统可以跟踪事件的发展态势,帮助指挥中心实施不间断的指挥处理。由于无人机的使用方便快捷,到达现场之后能够迅速开展工作,不间断地跟踪事件的发展,有利于指挥中心及时掌握事件态势。在追踪事件态势方面,无人机相比大飞机更有优势。无人机机体小巧,速度容易控制,机动性好,具有大飞机不具备的急转弯功能,飞行灵活机动。此外,无人机能超低空飞行,适应性更强,而大飞机在山区飞行受地形和高度的限制较多。无人机飞行高度低,综合观测效果更好,分辨率可以提高到0.1 m。目前无人机搭载的光学传感器夜间使用效果不佳,如配备红外或夜视功能的观测系统,可使无人机系统的应用范围大幅度增加。

无人机系统的快速高效航拍功能在水土保持、生态建设、岸线建筑物管理、水资源保护等方面有巨大的应用潜力。结合无线图传设备,无人机系统可在较大区域进行实时、连续、稳定的拍摄,特别是那些人员无法到达的危险区域,例如对水土保持示范区、生态修复情况、蓝藻爆发、岸线堤防、岸线建筑物、取水口、河流污染情况进行实地巡查。无人机操作人员可以在安全地域内操控无人机飞行,进行相关信息的实时采集、监控和传输,为科学评估、决策提供重要的第一手信息。

3 结语

随着我国水利现代化建设的不断发展和进步,如何利用最新技术加快水利信息化建设,有力支撑水利行业的规划、建设、监测和管理等工作值得进一步研究。无人机系统在应对频繁发生的水涝干旱、森林火灾、冬雨冬雪等灾害时具有极大的应用潜力,应成为水利科技人员的研究重点,充分发挥其机动灵活、续航时间长、视频影像实时传输和不受地形地貌影响等优势,推进水利事业的发展。

参考文献:

[1] 魏瑞轩,李学仁.无人机系统及作战使用[M].北京:国防工业出版社,2009.  
[2] 沈怀荣.无人机气象探测技术[M].北京:清华大学出版社,2010.  
[3] 全国勘察设计注册工程师水利水电工程专业管理委员会,中国水利水电勘测设计协会.水利水电工程专业基础知识[M].郑州:黄河水利出版社,2007.

(编辑:常汉生)

(上接第155页)

于坝体稳定,增加挤压边墙厚度不失为一个可行方法。

(2) 猴子岩工程坝前填筑区施工碾压外因对沉降变形作用明显,但主要沉降变形仍然是堆石体随填筑高程及时间变化自然流变造成。

(3) 猴子岩工程坝前施工质量较好,堆石体在施工期流变明显,一定程度上降低了后续施工段以及运行期流变幅度。

参考文献:

[1] 郑正勤.猴子岩水电站工程建设的必要性及关键技术问题[J].人民长江,2014,45(8):1-3.  
[2] 朱永国,徐成.猴子岩绿色水电站目标体系与实施规划[J].人民长江,2014,45(8):4-7.

[3] 孟建正.猴子岩水电站面板堆石坝填筑质量控制[J].2014,45(8):96-98.  
[4] 窦向贤.猴子岩水电站高面板堆石坝设计[J].人民长江,2014,45(8):42-45.  
[5] 李金凤,杨启贵.水布垭面板堆石坝施工期沉降变形分析[J].人民长江,2006,37(8):94-96.  
[6] 黎佛林,蔡德所,秦朋,等.水布垭面板堆石坝面板挠度监测方法比较[J].水力发电,2013,39(1):82-84.  
[7] 吴中如.水工建筑物安全监控及其应用[M].北京:高等教育出版社,2003.  
[8] 傅世平,刘国华,吴宏平.白溪面板堆石坝沉降监测资料分析[J].水电自动化与大坝监测,2007,31(6):72-75.

(编辑:胡旭东)