

【水利水电工程】

积石峡水电站面板堆石坝湿化变形控制研究

张 伟¹, 雷 艳², 蔡新合², 崔文娟³

(1. 黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810008; 2. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065; 3. 河南黄河勘测设计研究院, 河南 郑州 450003)

摘 要: 积石峡水电站面板堆石坝主堆石区采用坝址区岩石开挖料填筑而成, 为控制坝体的湿化变形, 在坝体填筑基本完成后, 采用坝体底部浸水的措施。结果表明: 坝体浸水能提前释放堆石坝的湿化变形, 特别适用于风化岩、软岩等软化系数小的岩石填筑的坝体; 坝体浸水加速了面板堆石坝的施工期变形, 缩短了大坝施工期沉降时间, 为混凝土面板的提前施工及其裂缝控制创造了良好的先决条件; 坝体排水期间, 坝体内外水位差应不超过 1 m。

关 键 词: 面板堆石坝; 开挖料; 湿化变形; 坝体浸水; 积石峡水电站

中图分类号: TV641.4 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1000-1379.2014.03.041

Research on Wetting Deformation Control of CFRD for Jishixia Hydropower Station

ZHANG Wei¹, LEI Yan², CAI Xin-he², CUI Wen-juan³

(1. Huanghe Hydropower Development Co. Ltd, Xining 810008, China; 2. Hydrochina Xibei Engineering Corporation, CHECC, Xi'an 710065, China; 3. Henan Yellow River Reconnaissance, Design and Research Institute, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In the concrete faced rock-fill dam of Jishixia Hydraulic Power Station, the major material zone was filled by excavation of stones in dam area. In order to control rock-fill material's wetting deformation, the dam bottom took immersion measures after the completion of dam filling. The monitoring results show that the dam immersion can release the wetting deformation in advance and is especially suitable for the dam body filled with the rock of smaller softening coefficient such as soft rock and weathered rock, that dam immersion can create a prerequisite condition of completion in advance and crack control from accelerating the deformation and shortening settlement time of concrete faced rock-fill dam during construction, and that the dam water level difference between inside and outside should not exceed 1 m during dam drainage stage.

Key words: concrete faced rockfill dam; excavated rock; wetting deformation; dam immersion; Jishixia Hydropower Station

面板堆石坝的混凝土面板是水利枢纽防渗体系的关键部分, 一旦开裂, 有可能对坝体安全乃至水利枢纽的安全运行造成威胁。控制面板裂缝是消除上述安全隐患的关键。坝体底部浸水措施是促使面板堆石坝施工期释放湿化变形、施工后期变形趋于稳定的一个新思路, 目前在国内相关工程中鲜有应用。积石峡水电站建设过程中, 通过理论研究以及在坝体预留沉降期内对 1 785 m 高程以下坝体实施浸水, 提前释放了坝体的湿化变形, 增加了面板施工前的坝体沉降, 减少了面板裂缝, 取得了良好的控制效果。

1 工程概况

积石峡水电站是黄河上游龙羊峡—青铜峡河段规划 25 座水电站的第 11 座, 是继龙羊峡、拉西瓦、李家峡、公伯峡等大型水电站之后的第 5 座大型水电站。该电站位于青海省循化撒拉族自治县境内积石峡出口处的黄河干流上, 电站正常蓄水位 1 856 m, 总库容 2.635 亿 m³, 最大发电水头 73 m, 总装机容量 1 020 MW, 多年平均发电量 33.63 亿 kW·h。

该水电站主体工程包括混凝土面板堆石坝、左岸表孔溢洪

道、左岸中孔泄洪洞、左岸引水发电系统和坝后厂房等。面板堆石坝坝顶高程 1 861 m, 趾板开挖最低高程 1 758 m, 最大坝高 103 m, 坝顶全长 321.9 m, 坝顶宽 9.8 m, 坝顶上游侧设 5.2 m 高的 L 形混凝土防浪墙, 上游坝坡 1:1.5, 下游坝坡 1:1.3~1.4, 在 1 800 m 以下的面板上游加设顶宽均为 5 m、坡度分别为 1:1.7 和 1:2.0 的粉质壤土及开挖任意料压坡体, 下游坝坡设 4 层 9 m 宽的“之”字形上坝公路。坝体填筑总量约 296 万 m³。

2 坝址区开挖料岩性及在大坝填筑中的应用

坝址区岩石开挖料主要分布在左岸表孔溢洪道及电站进水口部位、高程 1 819~1 940 m 的白垩系 K₁³、K₁⁴ 地层中, 开挖量约 450 万 m³。其中: K₁³⁻² 分布高程 1 819~1 910 m, 岩性为紫红色、紫灰色砾岩夹薄层及条带状中细沙岩, 局部夹透镜状

收稿日期: 2013-05-21

基金项目: 黄河上游水电开发有限责任公司科研项目 (2010-041-HHS-KJ-X)。

作者简介: 张伟 (1982—), 男, 陕西西安人, 工程师, 硕士, 主要从事水电工程技术管理工作。

E-mail: weil23504@163.com

泥质粉沙岩,其饱和抗压强度为 33 ~ 123 MPa,软化系数为 0.33 ~ 0.87; K_1^4 岩性为砖红色、紫红色泥质粉沙岩及中细沙岩、砾岩,其饱和抗压强度为 32 ~ 122 MPa,软化系数为 0.29 ~ 0.88。坝址区开挖料试验结果见表 1。

表 1 坝址区开挖料试验结果

地层 层位	试验项	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)		相对体 积质量	吸水率/%		孔隙 率/%	垂直单轴抗 压强度/MPa		软化 系数
		干	饱和		天然	饱和		干	饱和	
K_1^{3-2}	最大值	2.68	2.70	2.75	1.56	1.59	4.09	174	123	0.87
	最小值	2.58	2.63	2.68	0.42	0.52	0.74	72	33	0.33
	平均值	2.66	2.67	2.71	0.74	0.77	1.95	117	75	0.62
K_1^{4-2}	最大值	2.67	2.71	2.79	1.31	1.33	5.38	168	122	0.88
	最小值	2.62	2.61	2.66	0.7	0.71	0.75	72	32	0.29
	平均值	2.65	2.68	2.72	0.99	1.01	2.81	109	72	0.67

坝址区岩层分布无规律,岩相变化大,岩体抗风化能力差,不同地层甚至同地层的岩石抗压强度差异较大。其中分布范围较广的 K_1^{3-2} 层紫红色含砾沙岩及紫红色砾岩软化系数较小,为 0.33 ~ 0.39; K_1^3 层紫红色中细沙岩和砾岩相对耐风化,强度较高,但部分钙质胶结的砾岩易风化; K_1^4 层紫红色粉沙质泥岩、泥铁质粉沙岩较易风化,且微裂隙极发育,风化后抗压强度降低。因此,坝址区岩石整体偏软。

在可研阶段,不推荐坝址区开挖料作为面板堆石坝主堆石区的填筑料,特别是正常尾水位以下主堆石区的填筑料。施工准备阶段,为了最大限度地利用开挖料、降低工程造价,黄河上游水电开发有限责任公司(简称黄河公司)委托西北勘测设计院(简称西北院)和清华大学就坝址区岩石开挖料用作大坝填筑料的可行性进行了专题试验研究^[1]。中国水电建设集团十五工程局有限公司积石峡项目部对现场开挖料进行了筛分试验,取得了开挖料的级配。通过材料试验、模型计算等方面的综合研究,并经国内知名面板坝专家的咨询论证,认为岩石开挖料用于筑坝是可行的。清华大学的计算分析认为,开挖料的湿化变形特性处于一般水平,用于正常尾水位以下的主堆石区可能会导致坝体产生一定的湿化变形(预计最大沉降约 120 mm、向下游侧的最大水平位移约 40 mm),建议采取措施(如在浇筑面板前浸水等)减小该变形对面板的影响。

根据以上研究结果,结合面板堆石坝各区域的设计要求以及坝料平衡原则,西北院对坝体堆石区进行了必要的优化^[2],将原高程 1 784 m(电站正常尾水位高程)以下的主堆石区坝料由天然沙砾石改为坝址区岩石开挖料^[2]。

3 坝体浸水的实施与效果分析

根据研究结果,在大坝填筑完成后的预留沉降期(半年)内,根据西北院提出的具体方案,黄河公司组织相关单位对堆石坝高程 1 785 m(水平排水体底部高程)以下坝体进行了 2 个月的浸水施工。

3.1 浸水原理

利用上游围堰、坝体与两岸山体围成的坝前小基坑蓄水,水通过挤压墙和反渗排水管自然渗透进入厂房上游坝体下部的大基坑,达到坝料浸水的效果,使堆石料在自重条件下发生沉降变形,从而减少其蓄水后的湿化变形。排水主要利用河床

趾板底部的反渗排水管。

3.2 浸水施工方法及主要措施

3.2.1 施工准备

首先,从右岸上游跨趾板道路向上游围堰后的抽水泵站修筑一条宽 5 m 的临时道路,以便机械调运抽排水设备。其次,在上游围堰靠近右岸的水流平缓区和基坑里分别设置浮船和充排水设备。其中:浮船由空汽油桶扎制而成,上面铺有木板,通过钢丝绳固定在上游围堰前和基坑内的水面上;基坑充水设备为 1 台 200 kW 离心水泵和 1 台 75 kW 离心水泵,基坑排水设备为 1 台 135 kW 离心水泵和 1 台 75 kW 离心水泵(备用)。

3.2.2 基坑充水

为了使坝内水位较快达到 1 785 m 高程,一次性将坝前小基坑水位充到 1 789 m 高程(蓄水量约 12 万 m^3)。考虑到充水设备的充水能力(200 kW 水泵的额定流量为 789 m^3/h ,75 kW 水泵的额定流量为 480 m^3/h),和上游围堰的渗漏水量(500 m^3/h),计算得知基坑充水时间约为 3 d。

3.2.3 坝体充水

在小基坑充水的同时,利用坝体中预埋的监测仪器实时监测坝内水位上升情况,当坝内水位达到 1 785 m 高程后,使小基坑水位维持在 1 785 ~ 1 789 m 高程 2 ~ 3 d,以确保高程 1 785 m 以下坝体填筑料充分浸泡。

3.2.4 小基坑及坝体排水

利用小基坑排水设备将坝体和基坑内水体排至河道(坝体主要通过河床趾板底部的反渗排水管排水)。排水期间,为了防止因小基坑水位下降过快而出现坝体垫层区渗透破坏、挤压墙鼓包破碎等质量问题,经计算,提出采用严格控制坝体内外水位差的方法进行排水控制,具体措施(按时间实施):第 1 ~ 15 d,小基坑水位从 1 785 m 开始下降,第 1 d 早上水位迅速下降 1 m,使坝体内外水位差不超过 1 m,然后按 33 cm/d 的水位下降速度排水,使基坑水位下降至 1 779 m;第 16 ~ 55 d 按 50 cm/d 的水位下降速度排水,使基坑水位下降至 1 760 m。

3.3 浸水实施过程及效果分析

2009 年 9 月 6 日小基坑开始充水,9 月 25 日坝内水位充到 1 785 m 高程,9 月 27 日小基坑开始缓慢向外排水,11 月 5 日小基坑水体基本排完,大坝浸水施工结束。浸水施工共历时 61 d,浸水期间坝体内外水位控制符合设计要求,水位变化曲线见图 1,浸水期间坝体沉降变化曲线见图 2。

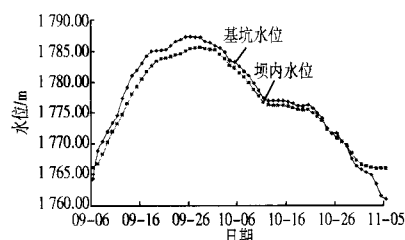


图 1 浸水期间小基坑水位变化曲线(2009 年)

根据坝体排水期的日常检查,混凝土挤压墙未出现鼓包、塌陷、渗漏破坏等不良后果,说明坝内外水位差不超过 1 m 的控制措施是合适的。根据电磁式沉降仪的监测结果,2009 年 9 月 8 日起坝体沉降开始加快,9 月 20 日以后沉降速度明显变

缓,10月31日以后沉降趋于稳定。浸水期间坝体最大沉降发生在坝体中部附近(坝右0+167.36、坝上0+00处),最大沉降量增加11.7 cm,达到46.9 cm。到2011年5月31日,坝体最大沉降量为49.7 cm,远小于有限元计算结果(80 cm);实测坝体最大沉降发生位置在1 810 m高程左右、坝轴线附近,与有限元计算结果基本一致。蓄水后最大沉降增加3.5 cm。与公伯峡大坝相比,积石峡后期变形明显要小,而且坝体沉降收敛速度明显要快,说明坝体浸水加速坝体沉降变形。

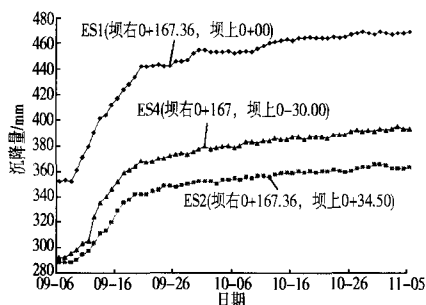


图2 浸水期间坝体沉降变化曲线

同时,对比蓄水前后ES1电磁式沉降管测值变化过程线及相关测值^[3],浸水期坝体各高程沉降量达到坝体总沉降量的23%~55%,浸水后各高程坝体沉降量达到坝体总沉降量的71%~95%,这说明坝体浸水能够有效加快坝体沉降,使坝体沉降在短期内趋于稳定,其对于大坝施工期沉降控制的作用是非常巨大的。ES1电磁式沉降管测点沉降过程线见图3。

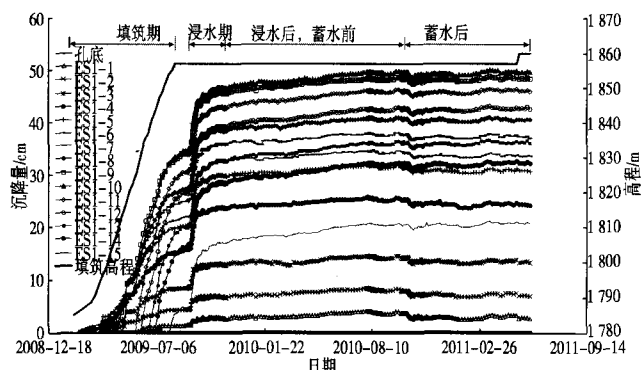


图3 ES1电磁式沉降管测点沉降过程线

根据钢丝水平位移计的监测结果^[3],浸水期坝轴线以下坝体的水平位移基本稳定,而坝轴线以上坝体的水平位移随着浸水时间的延长持续增大,2009年11月5日后(浸水结束)趋于稳定。浸水期间最大水平位移发生在坝右0+168.36、坝上0-60处,向上游位移为42 mm。至2010年10月13日水库蓄水

前,该处向下游位移为14 mm,说明浸水后坝体向上游的水平变形基本完成。

蓄水前混凝土面板裂缝的普查结果表明^[4],宽度大于等于0.2 mm的面板混凝土裂缝27条,总量较少,混凝土面板单位面积的裂缝条数也较少(2.0条/1 000 m²),且1 790 m高程以下未出现混凝土裂缝,说明浸水后坝体变形均匀性好,也说明坝体浸水对预防面板混凝土裂缝的发生有着明显的基础保障作用。

4 结 语

积石峡水电站面板堆石坝采用岩性整体偏软的坝址区开挖料作为堆石区填筑料,坝体施工期沉降量较大、沉降时间较长,通过面板施工前坝体浸水,使坝体湿化变形得到提前释放,使坝体沉降、水平位移相对快速趋于稳定,为后续面板混凝土的提前施工创造了条件。研究表明:坝体浸水是利用坝体上下游挡水设施(围堰或永久建筑物)、两岸边坡形成的大基坑储水,使下游最高尾水位以下需要浸水的坝体得到浸泡;坝体浸水能提前释放堆石坝的湿化变形,特别适用于风化岩、软岩等软化系数小的岩石填筑的坝体,对于沙砾石或硬岩填筑的堆石坝,浸水效果可能会有所降低;坝体浸水能加速面板堆石坝的施工期变形,缩短大坝施工期沉降时间,为混凝土面板的提前施工及其裂缝控制创造了良好的先决条件;坝体排水期间,坝体内外水位差应严格控制,该工程的经验是坝内外水位差不超过1 m;采用浸水工艺的面板堆石坝,其面板施工前大坝预留沉降期可较积石峡工程要求的半年时间适当减少,进而为工程的提前发电创造条件,并为提高工程的经济效益奠定基础。

参考文献:

- [1] 清华大学. 积石峡面板堆石坝开挖料筑坝的可行性研究最终研究报告[R]. 西宁:青海黄河上游水电开发有限责任公司工程建设分公司,2006.
- [2] 雷艳,王康柱,蔡新合. 积石峡水电站混凝土面板堆石坝坝体分区优化设计及填料调整[J]. 西北水电,2011(2):19-23.
- [3] 西安理工大学. 积石峡水电站面板堆石坝坝体沉降期咨询分析报告[R]. 西宁:青海黄河上游水电开发有限责任公司工程建设分公司,2011.
- [4] 张伟. 积石峡水电站混凝土面板堆石坝施工综述[J]. 东北水利水电,2014(1):11-12.

【责任编辑 吕艳梅】

(上接第125页)

- [5] 华承博. 新型土工平面应变仪的开发与研制[D]. 大连:大连理工大学,2010.
- [6] 王晓峰,石怀清,王东红. 平面应变条件下原状黄土结构性定量研究[J]. 岩土工程技术,2012,26(6):286-291.
- [7] 张常光,胡云世,赵均海. 平面应变条件下非饱和土抗剪强度统一解及应用[J]. 岩土工程学报,2011,33(1):32-37.
- [8] 侯世伟,路德春,杜修力. 平面应变条件下土体剪切带的产生条件与形成机理[J]. 北京工业大学学报,2012,38(7):1025-1031.
- [9] 钱建国,吕玺琳,黄茂松. 平面应变状态下土体的软化特性与本构模拟[J].

岩土力学,2009,30(3):617-622.

- [10] 付中原. 真三轴仪的平面应变改造及黄土平面应变实验研究[D]. 陕西:西北农林科技大学,2009.
- [11] 李浩东. 陕北子洲黄土平面应变试验及滑坡机理分析[D]. 陕西:西北农林科技大学,2012.
- [12] 李浩东,骆亚生,王瑞瑞,等. 平面应变条件下非饱和黄土强度特性分析[J]. 中国农村水利水电,2011(11):73-76.
- [13] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

【责任编辑 吕艳梅】