

瀑布沟水电站量水堰防渗墙深度优化分析

李先能

(国能大渡河瀑布沟水力发电总厂,四川雅安 625000)

摘要:量水堰的设立可以对瀑布沟水电站大坝的非正常工作状态做出正确预警,随着量水堰防渗墙深度增长会大大增加经济成本;因此,探寻合适的悬挂式防渗墙方案不但可以使量水堰达到预警作用还可以降低投资成本。研究表明:量水堰工作状态取决于堰顶高程与下游水位之差和防渗墙深度两个主要因素。通过现场勘测数据确定了瀑布沟大坝坝基覆盖层和两岸山体的水文地质分区及其渗透系数取值范围,对比不同量水堰防渗墙深度、不同堰顶高程的阻水效果,并综合考虑经济效益,最终确定堰顶高程 674 m,防渗墙底部深入原河床地面线以下 10 m 的施工方案。

关键词:瀑布沟水电站;三维渗流模型;量水堰防渗墙方案比选

中图分类号:TV223.4+2

文献标志码:B

文章编号:1001-2184(2024)01-0138-05

Optimization Analysis of Depth of Cut-off Wall of Measuring Weir at Pubugou Hydropower Station

LI Xianneng

(CHN ENERGY DaDu River Hydropower Development CO., LTD, Ya'an Sichuan 625000)

Abstract: The establishment of measuring weir can make an accurate early warning for abnormal working condition of the dam of the Pubugou Hydropower Station, however, the economic costs can increase significantly as the depth of the measuring weir impermeable wall. Therefore, exploring a suitable suspended cut-off wall program can not only make the measuring weir achieve the early warning function but also reduce the investment costs. The study shows that the working condition of the measuring weir depends on two main factors: the difference between the weir top elevation and the downstream water level, and the depth of the cut-off wall. The hydrogeological zoning and the range of the permeability coefficient of the Pubugou Dam foundation overburden and the mountains on both sides of the river were determined in the range through field survey data. The depth of the impermeable wall of the measuring weir, the water blocking effect of the weir top elevation, and the economic benefits were compared comprehensively. Eventually, the construction program was determined to be the weir top elevation of 674m, and the bottom of the seepage control wall was 10m deep below the original riverbed ground line.

Keywords: Pubugou Hydropower Station; Three-dimensional seepage model; Cut-off wall scheme selection of the measuring weir

0 引言

防渗墙是水库最重要的组成部分^[1]。坝体防渗墙可以有效降低坝体内部浸润线高度,浸润线在心墙处骤降,使浸润线降至下游排水体中^[2]。量水堰是指设在渠道、水槽中用以量测水流流量的溢流堰。最常用的是具有特制缺口的薄壁堰;有些国家还使用由混凝土等材料直接建成的宽顶堰、三角堰、截头三角堰等^[3]。量水堰位置处于厚度较厚且渗透性较强的覆盖层,为使量水堰能够

检测到坝基渗水,在量水堰下端设置防渗墙是必要的;但是要考虑到尽可能减短防渗墙长度的布置原则和最小的投资原则^[4-5]。

笔者通过分析瀑布沟大坝目前的坝基渗流监测、水位长观孔监测成果、坝脚下游水位以及坝基地质条件,确定了上下游计算水位。首先对比了相同堰顶高程下不同深度的防渗墙渗控效果,然后对不同堰顶高程下不同深度的防渗墙渗控效果进行优化比选,并综合考虑经济成本投入给出最优优化设计方案。

收稿日期:2023-07-13

1 工程概况

瀑布沟水库正常蓄水位 850.00 m,死水位 790.00 m,总库容 53.37 亿 m^3 。拦河大坝为砾石土心墙堆石坝,最大坝高 186.0 m,坝顶高程 856.00 m,坝顶长 540.5 m,坝顶宽度 14.0 m。上游坝坡 1:2 和 1:2.25,下游坝坡 1:1.8,坝体断面分为四个区,即砾石土心墙、反滤层、过渡层和堆石区。上、下游围堰作为坝体堆石的一部分。地震设防烈度为Ⅷ度。

2002年12月25日国务院正式批准瀑布沟水电站立项。2005年11月22日工程截流。2009年9月通过蓄水安全鉴定。2009年11月1日下闸蓄水。2010年12月蓄水至正常蓄水位。2013年1月通过枢纽工程专项验收。

2 瀑布沟水电站枢纽区三维渗流计算模型

2.1 渗流控制方程及有限元分析

渗流水力学认为,当渗透介质中水流流速不大时,可认为地下水运动服从不可压缩流体的饱和和稳定达西渗流规律。笔者结合各向异性多孔介质连续介质模型的有限元进行阐述。

2.1.1 达西定律

在多孔介质中,水流运动为层流状态,服从线性达西定律。

$$v_i = -k_{ij} J_j = -k_{ij} h_j (i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中: v_i 为流速分量; k_{ij} 为介质的渗透张量; J 为水力坡降; h 为水头。

2.1.2 稳定渗流基本微分方程

将上式代入渗流连续性方程 $v_{i,i} = 0$,可得稳定渗流基本控制微分方程。

$$(k_{ij}, h_j)_{,i} = w (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中:采用张量指标记法, w 为恒定降雨入渗或蒸发量。

2.1.3 微分方程的定解条件

(1)第一类边界条件(Dirchlet条件)又称定水头边界条件。

$$H(x, y, z) = \varphi(x, y, z) | (x, y, z) \in \Gamma_1 \quad (3)$$

(2)第二类边界条件(Neuman边界)。

$$k_n \frac{\partial h(x, y, z)}{\partial n} = q(x, y, z) | (x, y, z) \in \Gamma_2 \quad (4)$$

式中: Γ_1 为具有给定流入流出流量的边界段; N 为 Γ_2 的外法线方向。

(3)混合边界条件,即水头差与过流量之间保持一定的线性关系。

$$h(x, y, z) + \alpha \frac{\partial h(x, y, z)}{\partial n} = \beta(x, y, z) \in \Gamma_3 \quad (5)$$

式中: α, β 为常数。

2.2 三维渗流有限元网格模型

2.2.1 地层参数及边界条件

(1)模拟的地层及地质结构。包含深厚覆盖层(Q_4^{1-1})、深厚覆盖层(Q_4^{1-2})、深厚覆盖层(Q_4^{2-1})、深厚覆盖层(Q_4^{2-2})和深厚覆盖层(Q_3^2)。

覆盖层下覆岩体水文地质分区为:透水率 1 Lu 线以上岩体、透水率 3 Lu 线以上岩体和透水率 10 Lu 线以上岩体。在剖分有限单元时严格按照水文地质分区进行。

(2)模拟的水工建筑物。坝体结构部分:黏土心墙、反滤排水层、反滤保护层、弃渣重区、下游围堰。水工结构:导流洞、溢洪洞、防渗墙、量水堰、防渗帷幕等。

(3)边界条件。四周垂直截取边界:均设置为隔水边界。地表边界:坝轴线上游侧低于库水位的地方设为已知库水位边界,高于库水位的岸坡为可能出渗边界;坝轴线下游侧低于下游河水水位的地方设为已知水位边界,高于下游水位的岸坡设为可能出渗边界。模型底部截取边界:设为隔水头边界。

2.2.2 三维模型建立

有限元网格模型生成采用河海大学渗流实验室开发的基于 AUTOCAD 软件的断面节点控制自动剖分方法^[6-7]。该方法生成的单元为六面体八节点等参有限单元,局部区域采用四面体单元或五面体单元过渡衔接。该模型整个库区由 44 个建模剖面控制自动剖分生成,共生成 69 683 个单元和 69 001 个节点。为确保计算精度,考虑到坝体结构相对两岸山体和坝基更为复杂,因此在坝体处进行了网格加密处理。图 1 为瀑布沟水电站枢纽区整体三维有限元网格模型。建立的三维渗流有限元网格模型较为准确地反映了瀑布沟水电站枢纽区坝体结构、灌浆帷幕、溢洪洞及导流洞、发电厂房的分布、位置及范围。

3 量水堰渗控方案计算分析

根据设计方案,量水堰渗控措施主要包括:沿

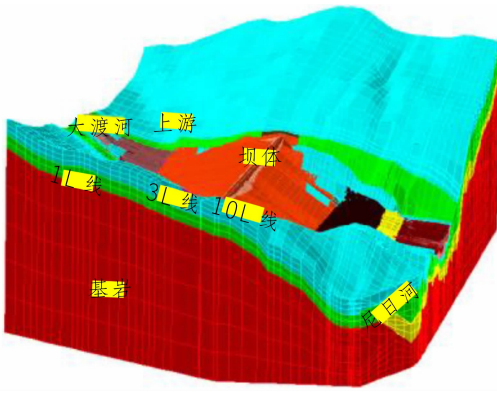


图 1 瀑布沟水电站枢纽区整体三维有限元网格模型图

量水堰轴线,在覆盖层地层打防渗墙,20 Lu 以上岩体进行帷幕灌浆。瀑布沟水电站上游正常蓄水位为 850.0 m,瀑布沟水电站坝脚为大渡河干流与尼日河支流汇口处,根据尼日河支流汇口上游方向 961.24 m 处水位站(2020 年建设)监测资料,查询最低水位 685.53 m,到坝脚河道平均比

降 1.25%。推算下来坝脚最低水位约 673.51 m,因此确定了上游水位为 850.0 m,下游计算水位为 673.5 m。根据上述反演建立的大坝三维渗流分析模型,开展了上游水位 850.0 m 和下游水位 673.5 m 条件下,在不同堰顶高程、不同防渗墙深度条件下三维渗流场计算,并比选量水堰渗控最优方案。

3.1 堰顶高程 675.0 m 条件下量水堰渗控方案

在堰顶高程 675.0 m 条件下,堰顶高程比下游水位 673.5 m 高 1.50 m。从表 1(堰顶高程 675.0 m 条件下不同深度量水堰防渗墙的阻水效果)中可以看出:不同深度的防渗墙会使墙前地下水位有所抬升,抬升值越大,说明防渗墙的阻水作用越大。当量水堰堰顶高程高于下游水位 1.50 m 时,防渗墙深度到达 60.0 m 时,防渗墙前水位刚刚到达堰顶高程,少量地下水进入量水堰。由于设置 60 m 深的量水堰防渗墙投资成本过高,因此堰顶高程为 675.5 m 的工况不符合设计理念。

表 1 堰顶高程 675.0 m 条件下不同深度量水堰防渗墙的阻水效果

防渗墙深度 /m	剖面 2		剖面 5		坝体坝基渗流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	进入量水堰的渗流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	因防渗墙的阻水作用而使地下水进入量水堰的增加量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$
	墙前水位	抬升值	墙前水位	抬升值			
0.0	674.23(低于堰顶 0.77 m)	—	674.24(低于堰顶 0.76 m)	—	7 080.93	0.00	—
60.0	675.11(高于堰顶 0.11 m)	0.88	675.14(高于堰顶 0.14 m)	0.90	7 071.91	198.24	198.24
防渗墙全封闭+帷幕灌浆	677.74(高于堰顶 2.74 m)	3.51	677.76(高于堰顶 2.76 m)	3.52	6 943.37	6 413.85	6 413.85

3.2 堰顶高程 674.5 m 条件下量水堰渗控方案

在堰顶高程 674.5 m 条件下,堰顶高程 674.5 m 比下游水位 673.5 m 高 1.0 m。从表 2(堰顶高程 674.5 m 条件下不同深度量水堰防渗墙的阻水效果)中可以看出:当量水堰堰顶高程高于下游水位 1.0 m 时,防渗墙深度到达 40.0 m 时,防渗墙水位刚好到达堰顶高程,少量地下水进入量水堰。由于在量水堰下部设置 40 m 防渗墙同样存在投资成本过高的问题,因此堰顶高程为 674.5 m 的工况不符合设计理念。

3.3 堰顶高程 674.0 m 条件下量水堰渗控方案

在堰顶高程 674.0 m 比下游水位 673.5 m 高 0.50 m。从图 2(堰顶高程 674.0 m 条件下不

同深度量水堰防渗墙的浸润线)和表 3(堰顶高程 674.0 m 条件下不同深度量水堰防渗墙的阻水效果)中可以看出:当量水堰堰顶高程高于下游水位 0.50 m 时,浸润线在量水堰防渗墙深度在 18.0 m 时比无防渗墙时有小幅度提升,防渗墙深度到达 18.0 m 时防渗墙前水位高于堰顶高程 0.16 m,少量地下水进入量水堰;因此,堰顶高程 674.0 m 时建设较浅的防渗墙既可达到量水堰的预警作用,投资成本也相对较低。

4 结语

通过大量的计算结果可以总结如下规律:地下水能否进入量水堰取决于两个控制因素:(1)堰顶高程与下游水位之差;(2)防渗墙深度。堰顶高

表2 堰顶高程 674.5 m 条件下不同深度量水堰防渗墙的阻水效果

防渗墙深度 /m	剖面 2		剖面 5		坝体坝基渗流量 /($m^3 \cdot d^{-1}$)	进入量水堰的渗流量 /($m^3 \cdot d^{-1}$)	因防渗墙的阻水作用而使地下水进入量水堰的增加量 /($m^3 \cdot d^{-1}$)
	墙前水位	抬高值	墙前水位	抬高值			
0.0	674.23(低于堰顶 0.27 m)	—	674.23(低于堰顶 0.27 m)	—	7 079.41	0.00	0.00
18.0	674.30(低于堰顶 0.20 m)	0.07	674.30(低于堰顶 0.20 m)	0.07	7 073.06	0.00	0.00
30.0	674.42(低于堰顶 0.08 m)	0.19	674.43(低于堰顶 0.07 m)	0.20	7 070.58	0.00	0.00
40.0	674.61(高于堰顶 0.11 m)	0.39	674.63(高于堰顶 0.13 m)	0.40	7 068.63	223.54	223.54
50.0	674.85(高于堰顶 0.35 m)	0.62	674.87(高于堰顶 0.37 m)	0.64	7 066.43	772.51	772.51
60.0	675.10(高于堰顶 0.60 m)	0.87	675.13(高于堰顶 0.63 m)	0.90	7 064.07	1 057.27	1 057.27
防渗墙全封闭+帷幕灌浆	677.23(高于堰顶 2.73 m)	3.00	677.24(高于堰顶 2.74 m)	3.01	7 039.34	6 433.73	6 433.73

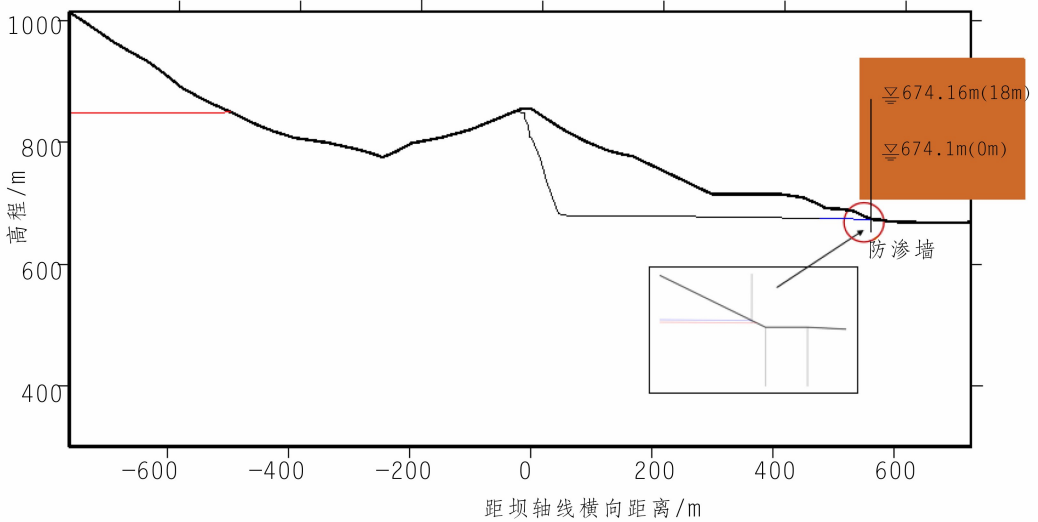


图2 堰顶高程 674.0 m 条件下不同深度量水堰防渗墙的浸润线

表3 堰顶高程 674.0 m 条件下不同深度量水堰防渗墙的阻水效果

防渗墙深度 /m	剖面 2		剖面 5		坝体坝基渗流量 /($m^3 \cdot d^{-1}$)	进入量水堰的渗流量 /($m^3 \cdot d^{-1}$)	因防渗墙的阻水作用而使地下水进入量水堰的增加量 /($m^3 \cdot d^{-1}$)
	墙前水位	抬高值	墙前水位	抬高值			
0.0	674.23(低于堰顶 0.27 m)	—	674.23(低于堰顶 0.27 m)	—	7 079.41	0.00	0.00
18.0	674.30(低于堰顶 0.20 m)	0.07	674.30(低于堰顶 0.20 m)	0.07	7 073.06	0.00	0.00
30.0	674.42(低于堰顶 0.08 m)	0.19	674.43(低于堰顶 0.07 m)	0.20	7 070.58	0.00	0.00
40.0	674.61(高于堰顶 0.11 m)	0.39	674.63(高于堰顶 0.13 m)	0.40	7 068.63	223.54	223.54
50.0	674.85(高于堰顶 0.35 m)	0.62	674.87(高于堰顶 0.37 m)	0.64	7 066.43	772.51	772.51
60.0	675.10(高于堰顶 0.60 m)	0.87	675.13(高于堰顶 0.63 m)	0.90	7 064.07	1 057.27	1 057.27
防渗墙全封闭+帷幕灌浆	677.23(高于堰顶 2.73 m)	3.00	677.24(高于堰顶 2.74 m)	3.01	7 039.34	6 433.73	6 433.73

程与下游水位之差越小,地下水越容易进入量水堰;防渗墙深度约大,地下水越容易进入量水堰。

在下游水位为 673.50 m 时,量水堰高程为 675.0 m 和 674.5 m 时,量水堰防渗墙深度分别达到 60 m 和 40 m,量水堰才能发挥预警作用,投资成本过高;量水堰高程为 674.0 m 时设计较浅的防渗墙量水堰即可发挥预警作用。

确定瀑布沟大坝坝后新增量水堰采用悬挂式防渗墙结构,防渗墙底部深入原河床地面线以下 10 m,量水堰底高程为 673 m,顶高程为 674 m,实施过程中根据瀑布沟大坝下游新增设的六个长观孔测量水位变化和现场施工情况进行适当调整。

参考文献:

- [1] 刘菊莲. 防渗墙对某水库地下渗流场影响研究[J]. 海河水利, 2022, 233(1): 97-100.

- [2] 曲华斌,王克磊,杨震. 土石坝防渗墙嵌岩深度对坝体稳定性影响[J]. 水利技术监督, 2023(9): 192-194+202.
- [3] 吴建纲. 数字量水堰[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(2): 85-87.
- [4] 卢陈涛,马得莲,滕玉楠. 珊溪水库增设量水堰关键技术方
- [5] 栋良,郎玲芳. 珊溪水库增设大坝量水堰工程措施研究[J]. 大坝与安全, 2017(06): 63-68.
- [6] 盛金昌,速宝玉,詹美礼. 三维天然渗流场反演分析及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(2): 203-207.
- [7] 盛金昌,赵坚,速宝玉,等. 复杂地质条件下超大型洞室群有限元网格的自动生成[J]. 水力发电学报, 2000(4): 79-85.

作者简介:

李先能(1976-),男,四川凉山人,中级工程师,本科,从事水利水电工程技术管理工作.

(编辑:吴永红)

(上接第 131 页)

过 AVC 子站就地闭环运行试验,确认 AVC 调控能力是否满足要求,调控过程是否正确。完成 AVC 子站厂站内联调试,AVC 子站无功控制策略有效,且能正确响应调度 AVC 主站的调控指令。

4 结 语

根据 AVC 技术现有理论与现场工程技术经验,对自动电压控制技术无功分配策略总结,并设计安全约束功能。在工程应用方面为厂站端 AVC 子站无功分配策略、安全约束功能设计,以及 AVC 动态与 AVC 联调试提供了参考。抽水蓄能电站是支撑电网系统安全、稳定、经济运行的有效途径,是支撑可再生能源、新能源大规模发展的重要保障。抽水蓄能中长期发展规划装机容量倍增,将推动我国抽水蓄能事业高质量发展。未来强化自动电压控制在抽水蓄能电站领域的研究,对在全国各区域电网调度开展自动电压控制规范化应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 梁彦,冯凌云. 蓄能机组自动发电控制系统的关键技术研究与应用[J]. 西北水电, 2018(1): 86-88.
- [2] 凌胜军,马景浩. 浅析水电厂 AVC 控制策略[J]. 电气工程学报, 2017, 12(8): 50-54.
- [3] 杨建波. 火电机组 AVC 一体化控制系统研发与应用[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
- [4] 陈建鑫,杨建波,刘友宽,等. 电厂侧子站系统设计[J]. 云南电力技术, 2016, 44(5): 60-63.

- [5] 秦绍俊. 自动电压无功控制系统(AVC)在聊城发电厂的应用研究[D]. 北京:华北电力学, 2013.
- [6] 蒋逸静. 天荒坪抽水蓄能电站的电压控制[J]. 华东电力, 2001(9): 8-10+52.
- [7] 单鹏珠,张柏,李勇,等. 张河湾抽水蓄能电站 AVC 子站系统设计及应用实现[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(04): 137-142.
- [8] 单鹏珠,俞鸿飞,朱辰. 浙江电网水电厂 AVC 功能设计及其应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2010, 34(02): 6-8+16.
- [9] 黄杨梁,邵霞. 自动电压控制在抽水蓄能电站应用研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2016, 2(02): 78-82.
- [10] 潘文忠. 谏壁发电厂 2×1 000 MW 机组 AVC 系统研究与应用[D]. 南京:南京理工大学, 2018.

作者简介:

李玉齐(1991-),男,湖北通城人,工程师,硕士研究生,从事电力检测与故障诊断、自动电压控制(AVC)、新能源、涉网试验等方面工作;

支晓晨(1988-),男,陕西渭南人,工程师,学士,从事电力检测与故障诊断、自动电压控制(AVC)、自动发电控制(AGC)、新能源、涉网试验等方面工作;

邱文俊(1986-),男,上海人,工程师,学士,从事电力检测与故障诊断、电力市场等方面工作;

张顺仁(1984-),男,江苏南通人,工程师,学士,从事电气计量、电能质量、励磁系统涉网试验等方面工作;

朱琦文(1987-),男,上海人,工程师,学士,从事电力检测与故障诊断、无功涉网试验等方面工作;

李超(1993-),男,黑龙江哈尔滨人,工程师,硕士研究生,从事电力检测与故障诊断、电力市场等方面工作.

(编辑:吴永红)