

宜兴抽水蓄能电站上水库主坝下游堆石区设计优化

肖贡元

(上海勘测设计研究院,上海 200434)

摘要 :针对宜兴抽水蓄能电站上水库主坝建在倾斜基础面上的特点 ,为避免下游堆石体后期沉降过大 ,对下游堆石区设计进行了优化。下游堆石区改为主堆石Ⅱ区 ,并将高程 426.50 m 以下的贴坡堆石体设计为“增加变形模量区” ,其压实标准高于主堆石区 ,坝体下游堆石填筑施工超前于上游堆石。原型观测数据和反演分析成果表明 :“增模区”变形模量显著提高 ,主坝变形很小 ;下游堆石区的优化对于减少坝体不均匀沉降、减少上游面板开裂 ,以及减少堆石体对下游重力挡墙的土压力起到了重要作用。

关键词 :混凝土面板堆石坝 ;下游堆石区 ;增模区 ;优化设计 ;宜兴抽水蓄能电站

中图分类号 :TV641.6 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2010)02-0049-04

Design optimization of downstream rockfill zone in main dam of upper reservoir of Yixing Pumped Storage Power Station/XIAO Gong-yuan(Shanghai Investigation , Design & Research Institute , Shanghai 200434 , China)

Abstract : With regard to the main dam of the upper reservoir of Yixing Pumped Storage Power Station built on an inclined bedrock surface and in order to avoid large post settlement of the downstream rockfill , the downstream rockfill zone was optimized. The downstream rockfill zone was treated as the second main rockfill zone , and the rockfill zone below the elevation of 426.50 m was designed as the “ increased modulus zone ” where the index of compaction was required higher than that of the main rockfill zone. Meanwhile , the filling construction of the downstream rockfill began before that of the upstream one. The data of prototype monitoring and the results of back analysis indicate that the deformation modulus in the “ increased modulus zone ” obviously increases , and the deformation of main dam is small. The design optimization of the downstream rockfill zone plays an important role in reducing the differential settlement of dam body , the cracks of upstream concrete face slabs and earth pressure of rockfill on the downstream retaining walls.

Key words : concrete face rockfill dam ; downstream rockfill zone ; increased modulus zone ; design optimization ; Yixing Pumped Storage Power Station

1 工程概述

宜兴抽水蓄能电站位于江苏省宜兴市西南郊的铜官山区 ,距宜兴市区约 7 km ,是一座日调节纯抽水蓄能电站。电站总装机容量为 1 000 MW ,安装 4 台单机容量 250 MW 的可逆式抽水蓄能机组 ,额定发电水头为 363.0 m。电站工程于 2003 年 8 月开工 ,4 台机组于 2008 年年底前全部投入商业运行。

电站枢纽由上水库、下水库、输水系统、地下厂房、开关站等组成。上水库位于铜官山主峰东北侧 ,总库容 530.7 万 m³ ,正常蓄水位 471.50 m ,死水位 428.60 m。上水库采用全库盆钢筋混凝土面板防渗。

上水库主坝位置是“ W ”形的两沟一梁地形 ,沟和梁均以甚陡的纵坡倾向下游 ,主坝建基面是陡倾向下游的斜面。坝基岩石主要是砂岩夹粉砂质泥

岩 ,层面产状向下游缓倾。此外还有多条花岗斑岩脉侵入 ,风化很深。地形、地质条件对大坝和库岸稳定极为不利。受地形、地质条件的制约 ,上水库建设具有相当的难度。经多方案比较后 ,上水库主坝采用钢筋混凝土面板堆石混合坝方案。筑坝堆石料来自库盆开挖的砂岩夹泥岩料。

钢筋混凝土面板堆石混合坝坝顶高程 474.20 m ,坝顶长 494.90 m ,趾板以上最大坝高 47.2 m ,坝轴线处最大坝高 75.2 m。上游由钢筋混凝土面板挡水 ,上游面坝坡度为 1:1.3 ,下游面上坝道路之间坝坡度为 1:1.26(综合坝坡为 1:1.42)。在坝轴线下游 135.5 m 处设置混凝土重力挡墙 ,墙顶高程 381.90 m ,墙顶长 347.80 m ,挡墙上游面坡度为 1:0.1 ,下游面坡度为 1:0.2 ,最大墙高 45.9 m (图 1)。

区。要求主堆石区孔隙率 $n \leq 22\%$ 、次堆石区 $n \leq 24\%$,都在规范规定的范围内。与规范不同的是在次堆石区与基础面之间设置了 1 层厚 4 m 的基础过渡区 ,采用过渡层级配。这是考虑到主坝下游坝体坐落在倾斜建基面上 ,为保证坝料与基础面接触良好、增大接触面的抗剪能力而采取的措施。

2002 年下半年招标设计时 ,在招标文件中将原来的次堆石区调整为主堆石 II 区 ,原主堆石区称为主堆石 I 区。此外 ,为加强下游坝体的排水 ,沿上下游方向顺沟谷紧贴坝基布置 3 条纵向排水带 ,排水层位置及厚度同过渡区 ,每条排水带宽度为 10 m。

筑坝材料来自上水库库盆开挖料 ,其岩性主要是泥盆系五通组石英岩状砂岩夹粉砂质泥岩和茅山组岩屑石英砂岩夹粉砂质泥岩 ,呈弱风化。弱风化五通组石英岩状砂岩干抗压强度为 187 MPa ,饱和抗压强度为 83 MPa ,软化系数为 0.44。弱风化茅山组岩屑石英砂岩干抗压强度为 142 MPa ,饱和抗压强度为 54 MPa ,软化系数为 0.38。虽然软化系数低 ,但饱和抗压强度并不低 ,仍属硬岩。弱风化粉砂质泥岩干抗压强度为 63 MPa ,饱和抗压强度为 22 MPa ,软化系数为 0.35 ,属于软岩 ,但经试验不具浸水崩解性。由于薄层夹层无法完全剥离 ,主坝坝体堆石料即为上述 2 类砂岩夹泥岩料 ,其中泥岩在上坝料中质量比控制在 10% ~ 15% 范围。在施工图设计阶段 ,进一步深化对上水库库盆砂岩夹泥岩料的试验研究。进行了模拟主坝堆石填筑施工过程的筑坝材料现场新型直剪试验^[2]以及堆石料的湿陷试验^[3]等特殊试验 ,证明库盆开挖料完全可以满足主堆石料的要求。现场碾压试验也证实采取合适的施工工艺后孔隙

率小于 20%。这些成果为优化下游堆石区提供了科学依据。

在此基础上 ,2004 年根据世界银行特别咨询团专家的建议 ,对下游堆石区做了进一步优化。将主堆石 II 区(包括一小部分主堆石 I 区)以高程 426.50 m 为分界线又分成 2 个不同的区域。分界线以下的主堆石区进一步提高设计指标和施工参数 ,称为“增模区”(即增加变形模量区) ,要求主要采用物理力学性能相对更好的五通组石英岩状砂岩夹泥岩料填筑 ,并通过减少铺层厚度、增加碾压遍数、充分洒水湿化来达到较高的密实度和较小的孔隙率 ,从而有更高的变形模量。这样 ,主堆石 I 区和 II 区按设计指标要求实际上变成以高程 426.50 m 为分界线的 2 个分区 :该高程以上为“主堆石区” ,以下为“主堆石增模区” 。调整后的坝体各区设计施工指标见表 1。

为了减少上、下游堆石的沉降差 ,在堆石填筑施工程序上 ,第 1 阶段先填筑高程 426.50 m 以下即“增模区”的堆石体。位于高程 426.50 m 以上部位的堆石填筑分为 2 个阶段 ,按照下游超前于上游的原则 ,第 2 阶段先填筑下游部分(起坡点不超过坝轴线上游 15.0 m) ,在高程 426.50 m 以下部位即第 1 阶段填筑完成后即可施工。其余部分为第 3 阶段 ,必须等待高程 426.50 m 填筑面的沉降率达标后(沉降率小于 1 ~ 3 mm/月)方可填筑 ,即为“增模区”留有预沉降的时间。

主坝坝体堆石填筑从 2004 年 12 月 15 日开始 ,分 3 个阶段逐次进行各部位坝体填筑 ,2005 年 10 月 25 日完成第 1 阶段的填筑 ,2006 年 4 月 9 日完成第

表 1 上水库主坝坝体分区及设计施工指标

坝体分区	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙率/ %	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大粒径/ mm	粒径小于 0.075 mm 的 颗粒质量 分数/%	粒径小于 4.75 mm 的 颗粒质量 分数/%	泥岩 质量分数/ %	铺料 厚度/cm	加水量/ %	碾压 遍数/遍
特殊垫层区(2B)	2.17	< 19	$(1 \sim 5) \times 10^{-3}$	40	2.5 ~ 6	40 ~ 50		20	10	
垫层(2A)	2.19	< 19	$(0.1 \sim 9) \times 10^{-3}$	80	3 ~ 8	35 ~ 55		40	10	6 ~ 8
过渡层(3A)	2.15	< 20	$\geq 1 \times 10^{-2}$	300	< 4.5	< 20		40	10 ~ 20	6 ~ 8
主堆石 I 区、II 区(3B、3C)	2.09	≤ 22	$\geq 1 \times 10^{-1}$	800	< 5.5	< 20	≤ 15	80	10	8
“主堆石增模区”	2.14	≤ 20	$\geq 1 \times 10^{-1}$	600	< 5.5	< 20	≤ 15	60	10	10
过渡区(3C1)	2.15	< 20	$(1 \sim 5) \times 10^{-2}$	300	< 4.5	< 20	≤ 10	60	10	10
排水层(3F)	2.04	< 25	$\geq 1 \times 10^{-1}$	600				60	10	10

注 ①筑坝材料来源 :垫层料和特殊垫层区料用新鲜砂岩料 ,由砂石料加工厂用库盆开挖料加工的石料掺配 ;其余均利用库盆开挖料 ,其中“增模区”主要采用五通组石英岩状砂岩夹泥岩料。②加水要求 :料场 5%、运输中 2%、坝面洒水 3%。③碾压机具为 18t 自行式振动碾 ,垫层斜坡碾压用 10t 振动碾。④排水层粒径小于 25 mm 的颗粒质量分数不超过 10%。

2 阶段的填筑 ,第 2 阶段填筑完成后 ,高程 426.50 m 界面的实测沉降率为 2.2mm/月 ,开始进行第 3 阶段即其余部分的填筑 ,于 2006 年 9 月 8 日完成。3 个月 后 ,坝体月沉降量已小于 1 mm。主坝混凝土面板 于 2006 年 12 月 20 日开始浇筑 ,2007 年 5 月初全部 完成。

4 下游堆石区优化效果

下游堆石区优化为主堆石Ⅱ区和“增模区”后 ,施 工单位中国葛洲坝集团宜兴施工局严格按设计要求 施工 ,从表 2 可见堆石的碾压效果很好 ,其中主堆石Ⅱ “增模区”的平均孔隙率仅为 16.2% ,非常密实。

表 2 上水库主坝主堆石区填筑料施工检测结果(均值)

部 位	干密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙率/ %	粒径小于 4.75 mm 颗粒质量 分数/%	渗透系数 K ₂₀ / (cm·s ⁻¹)
主堆Ⅱ(3C)“增模区”	2.23	16.2	9.7	5.88×10 ⁻¹
主堆Ⅱ(3C)区	2.13	20.5	10.6	6.41×10 ⁻¹
主堆Ⅰ(3B)“增模区”	2.21	17.6	13.1	5.09×10 ⁻¹
主堆Ⅰ(3B)区	2.15	19.8	10.5	6.30×10 ⁻¹

宜兴抽水蓄能电站上水库于 2007 年 7 月正式 蓄水。2008 年 8 月以后 ,上水库水位已多次达到正 常蓄水位 471.50 m ,这是抽水蓄能电站的运行方式 所决定的。在上水库蓄水安鉴阶段 ,业主单位华东 宜兴抽水蓄能有限公司委托南京水利科学研究院 (以下简称南科院)和中国水利水电科学研究院-河 海大学水工结构工程研究所联合体(以下称联合体) 分别进行了上水库主坝反演分析和正分析研究。根 据坝体监测、检测的实测数据 ,反演了坝体计算参 数 ,并利用这些参数进行了正分析。表 3 为下游堆 石区优化前后邓肯 E-B 模型参数对照。优化前的 参数是可行性研究阶段室内试验结果 ,优化后(1)和

优化后(2)分别是南科院和联合体的反演分析结果。 可以看出 ,尽管两者的成果有差别 ,但均反映出优化 后下游堆石区尤其是“增模区”的变形模量有明显的 提高。此外 ,“增模区”堆石体内摩擦角增大 ,还减少 了作用在下游挡墙上的土压力 ,有利于挡墙的稳定。

优化效果最终要反映在坝体变形上。表 4 分别 列出了优化前后坝体内部变形、面板挠度以及周边 缝变形的计算值和实测值。表中优化前计算值是可 行性研究复核阶段上海勘测设计研究院的计算结 果 ,优化后计算值(1)和优化后计算值(2)分别是南 科院和联合体依据反演分析所得参数进行正分析的 成果。实测变形资料来自国家电力监管委员会大坝 安全监察中心《江苏宜兴抽水蓄能电站上水库水工 建筑物安全监测资料分析报告》。

从表 4 数据可知 ,与常规混凝土面板堆石坝相 比 ,宜兴抽水蓄能电站上水库主坝的变形较小。经 检查主坝上游钢筋混凝土面板仅发现数条裂缝 ,缝 宽小于 0.1 mm。当然 ,面板裂缝少是多项措施的综合 结果^[4] ,但下游堆石区优化功不可没。下游堆石 区的优化对于减少坝体不均匀沉降、防止或减少上 游面板开裂 ,以及减少堆石体对下游重力挡墙的土 压力起到了重要作用。

5 结 语

下游堆石区的优化是宜兴抽水蓄能电站上水库 主坝设计的一项重要创新。主坝全部采用工程开挖 料作为大坝填筑料。在充分研究筑坝材料特性的基 础上 ,改变以往混凝土面板堆石坝主堆石区与次堆 石区的分区原则 ,针对堆石混合坝的体型特点 ,下游 堆石区按主堆石区的要求设计 ,并在 426.50 m 高程 以下设置“增模区” ,进一步提高其设计压实度要求。

表 3 坝体堆石区邓肯 E-B 模型参数对照

设计阶段	材 料	φ ₀ /(°)	Δφ/(°)	K	n	R _f	K _b	m
优化前	主堆石	50.61	7.67	770	0.40	0.84	561	0.29
	次堆石	49.22	5.38	540	0.30	0.78	633	-0.12
优化后(1)	主堆石	53.1	7.8	715	0.34	0.86	270	0.28
	主堆石(“增模区”)	55.1	8.9	800	0.44	0.86	450	0.42
优化后(2)	主堆石	53.1	7.8	655	0.31	0.88	366	0.29
	主堆石(“增模区”)	55.1	8.9	913	0.42	0.89	482	0.33

表 4 坝体内部变形、面板挠度及周边缝变形的计算与实测最大值

成 果	坝体沉降/cm		坝体水平位移/cm		面板挠度/cm		蓄水期周边缝变形值/mm		
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	开合度	相对沉降	水平错动
优化前计算值	27.30	28.88	31.67	35.28	0.59	13.44	1.4	4.70	3.20
优化后计算值(1)	20.00	22.00	9.20	10.30		6.70	3.0	3.30	1.00
优化后计算值(2)	14.96	16.07	9.75	10.29		4.71	0.9	1.62	0.97
实测值	8.69	13.03	5.42	6.46		3.10	10.2	7.30	11.30

注 ①坝体内部变形实测值未包括仪器埋设前坝体已发生的变形。实测值只反映仪器埋设位置的变形 ,与计算最大变形出现的位置一般 不对应。②实测周边缝变形最大值仅分别出现在个别测点 ,且年变幅较大。其余测点实测变形值均较小或很小。

[5] 梅亚东. 梯级水库优化调度的有后效性动态规划模型及应用[J]. 水科学进展 ,2000 ,11(2) :195-198.

[6] 张玉新 ,冯尚友. 多目标动态规划逐次迭代算法[J]. 武汉水利电力学院学报 ,1988(6) :72-82.

[7] 黄强 ,颜竹丘. 应用大系统递阶控制理论解梯级水电站水库群长期最优调度[J]. 水电能源科学 ,1993 ,11(2) :80-87.

[8] 王少波 ,解建仓 ,汪妮. 基于改进粒子群算法的水电站水库优化调度研究[J]. 水力发电学报 ,2008 ,27(3) :12-15.

[9] 马光文 ,王黎. 遗传算法在水电站优化调度中的应用[J]. 水科学进展 ,1997 ,8(3) :275-280.

[10] 钟登华 ,熊开智 ,成立芹 ,等. 遗传算法的改进及其在水库优化调度中的应用研究[J]. 中国工程科学 ,2003 ,5(9) :22-26.

[11] AHMED J A ,SARMA A K. Genetic Algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir [J]. Water Resources Management ,2005 ,19 :145-161.

[12] 梁伟 ,陈守伦 ,何春元 ,等. 基于混沌优化算法的梯级水电站水库优化调度[J]. 水电能源科学 ,2008 ,26(1) :63-66.

[13] 邱林 ,田景环 ,段春青 ,等. 混沌优化算法在水库优化调度中的应用[J]. 中国农村水利水电 ,2005(7) :17-19.

[14] 刘起方 ,马光文 ,刘群英 ,等. 对分插值与混沌嵌套搜索算法在梯级水库联合优化调度中的应用[J]. 水利学报 ,2008 ,39(2) :140-150.

[15] 唐巍 ,郭镇明 ,唐嘉亨 ,等. 复杂函数优化的混沌遗传算法[J]. 哈尔滨工程大学学报 ,2000 ,21(5) :1-5.

[16] 王文川 ,程春田 ,徐冬梅. 基于混沌遗传算法的水电站优化调度模型及应用[J]. 水力发电学报 ,2007 ,26(6) :7-11.

[17] 李兵 ,蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用 ,1997 ,14(4) :613-615.

[18] 骆晨钟 ,邵惠鹤. 用混沌搜索求解非线性约束优化问题[J]. 系统工程理论与实践 ,2000 ,20(8) :54-57.

[19] 姚俊峰 ,梅焜 ,彭小奇 ,等. 混沌遗传算法及其应用[J]. 系统工程 ,2001 ,19(1) :70-74.

(收稿日期 2009-08-16 编辑 高建群)

(上接第 13 页)

压强等水力特性参数的时空演化规律 ,分析出现空蚀危险的区域和时刻。针对阀门后突扩体顶板和升坎凸弧处出现较低负压问题 ,提出一系列的体型方案 ,分析了体型参数对流速、流态、压强分布的影响。分析结果表明 ,方案 3 的顶板压强最大 ,升坎凸弧处方案 8 的压强最大。数值模拟对阀门体型优化具有方案变化快、经济省的优点 ,是物理模型试验研究的有力补充手段。

参考文献 :

[1] 李云 ,胡亚安 ,宣国祥. 通航船闸水力学研究进展[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 ,1996 ,11(2) :232-239.

[2] 阎诗武. 船闸廊道输水阀门振动研究进展[J]. 水利水运工程学报 ,1998(2) :109-118.

[3] 周华兴. 高水头船闸阀门空化问题的研究[J]. 水运工程 ,1993(11) :28-33.

[4] 王玲玲 ,高飞. 三峡永久船闸输水系统输水特性研究[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2002 ,30(4) :96-99.

[5] 王玲玲 ,戴会超 ,王琼. 三峡船闸水力学数值实验室的研制及应用[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2004 ,32(1) :100-103.

[6] 戴会超 ,王玲玲. 三峡永久船闸阀门段廊道水力学数值模拟[J]. 水力发电学报 ,2005 ,24(3) :88-92.

[7] 马峥 ,张计光 ,陈红勋 ,等. 三峡永久船闸输水廊道水动力学特性研究[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 ,2007 ,22(2) :175-181.

[8] 王智娟 ,江耀祖 ,吴英卓 ,等. 银盘船闸阀门段体型优化三维数值模拟研究[J]. 人民长江 ,2008 ,39(4) :91-93.

(收稿日期 2009-05-21 编辑 高建群)

(上接第 52 页)

在施工程序上 ,下游堆石区填筑超前于上游 ,并设定预沉降期 ,待“增模区”沉降基本稳定后再填筑高程 426.50 m 以上的堆石区。宜兴抽水蓄能电站上水库主坝运行 2 年多来的安全监测结果表明坝体变形微小 ,应力变形性状良好 ,大坝稳定安全 ,取得了显著的经济效益 ,也促进了工程技术进步。2009 年 5 月专家组对“宜兴抽水蓄能电站上水库建设关键技术研究”项目研究成果的鉴定意见认为下游堆石区的优化是该项目研究成果的主要创新点之一 ,对此给予了充分肯定。本工程下游堆石区优化的经验在类似工程中具有推广应用价值。

参考文献 :

[1] 曹克明 ,汪易森 ,徐建军 ,等. 混凝土面板堆石坝[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2008 :129-134.

[2] 刘斯宏 ,肖贡元 ,杨建州 ,等. 宜兴抽水蓄能电站上库堆石料的新型现场直剪试验[J]. 岩土工程学报 ,2004 ,26(6) :772-776.

[3] 肖贡元. 宜兴抽水蓄能电站上库主坝堆石料的特殊研究[J]. 水利水电科技进展 ,2005 ,25(6) :49-51.

[4] 国家电力监管委员会大坝安全监察中心. 江苏宜兴抽水蓄能电站上水库水工建筑物安全监测资料分析报告[R]. 杭州 :国家电力监管委员会大坝安全监察中心 ,2009.

[5] 肖贡元 ,傅方明. 江苏宜兴抽水蓄能电站上库主坝设计特点[J]. 水力发电 ,2009 ,35(2) :49-53.

(收稿日期 2009-07-10 编辑 高建群)