

小湾水电站建设中的几个技术难题

马 洪 琪

(华能澜沧江水电有限公司, 云南 昆明 650214)

摘要: 小湾水电站混凝土双曲拱坝是即将建成的世界最高拱坝,许多技术难题当属世界第一,工程建设极具挑战性. 结合对关键技术的研究实践与认识,介绍了工程建设中遇到并成功攻克的多项主要技术难题,如:700 m 高工程边坡处理、坝基岩体开挖卸荷松弛、拱坝混凝土温控防裂、泄洪消能及雾化研究、拱坝抗震安全等.

关 键 词: 混凝土双曲拱坝; 技术难题; 创新; 小湾水电站

中图分类号: TM612:TV52

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0011-06

小湾水电站是国家实施西部大开发和“西电东送”战略的标志性工程. 电站位于云南省大理州南涧县和临沧市凤庆县的澜沧江中游,是澜沧江中下游河段8个梯级电站的第2级,也是该河段的“龙头水库”. 水库正常蓄水位1 240 m,相应库容150亿 m^3 ,调节库容99亿 m^3 ,具有不完全多年调节性能. 工程以发电为主,兼有防洪、航运、旅游等综合利用效益.

电站装机容量4 200 MW,保证出力1 778 MW,多年平均年发电量约190亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$. 枢纽工程主要由混凝土双曲拱坝、坝身泄洪孔口、坝后水垫塘和二道坝、左岸泄洪洞和右岸地下引水发电系统组成. 最大坝高294.5 m,是即将建成的世界最高拱坝.

小湾水电工程地形地质条件复杂,工程规模巨大,许多技术难题当属世界第一,没有可供借鉴的经验. 现将建设过程中遇到的主要技术难题概述如下.

1 700 m 高工程边坡处理设计

小湾坝址河谷深切、岸坡陡峻、沟梁相间、地应力高. 左岸坝顶以上分布有2,4,6号山梁边坡及饮水沟堆积体、龙潭干沟堆积体边坡. 右岸坝顶以上主要分布有3号山梁边坡、大椿树沟堆积体边坡. 边坡出露岩层主要是黑云花岗岩片麻岩、角闪斜长片麻岩,岩层产状为近横河的EW,陡倾上游. 边坡内Ⅲ,Ⅳ级结构面发育,按产状主要可分为3组:①近SN向陡倾角组;②近EW向顺片麻理组;③顺坡的中缓倾角组. 这些结构面构成后缘拉裂面、侧向切割面及顺坡向中缓倾角节理裂隙组成的结构体,易向河谷方向呈一陡一缓状滑动破坏,进而向周边扩展,形成平面型坍塌,是边坡稳定处理的重点. 边坡上部的强风化、强卸荷变形岩体及堆积体,是边坡开挖及支护的难点.

小湾拱坝左岸边坡开挖高度约700 m,右岸边坡高度约600 m,边坡陡峻,开挖体型复杂,变形破坏样式多,边坡稳定对主要建筑物施工期和运行期安全影响大,为此,设计中对此进行了专题研究,施工中结合实际情况,总结形成了“高清坡、低开口、陡开挖、强支护、先锁口、排水超前”的开挖支护原则. 在开口线以外,进行了较彻底的清坡,做好地表排水,并在开口线外侧打3排锚筋桩,采用较陡的开挖边坡,坡面采用系统锚

收稿日期: 2009-09-17

作者简介: 马洪琪(1942-),男,上海人,中国工程院院士,主要从事水电建设工程技术及其管理工作.

E-mail: mahq@lcjسد.cn

杆、喷混凝土和预应力锚索加固、地下排水洞超前施工等综合加固措施。在强风化、强卸荷岩体和崩坍堆积体中,采用组合螺旋钻跟管钻机造孔、钻孔固壁注浆、土工布包裹锚索止浆等技术,解决了造孔难、穿索难、漏浆量大等技术难题。对岩质边坡,规定按 10 m 高度的梯段开挖,每台阶留 3 m 宽施工马道,边坡预裂,严格控制主爆破区、缓冲区及预裂爆破的单响装药量,以控制爆破振动影响。要求随机锚杆紧跟开挖面,系统锚杆及喷混凝土滞后开挖工作面 1 层,锚索支护滞后 2 层,由表及里、自上而下,稳扎稳打,逐层加固。目前,边坡已经历 5 个雨季考验,变形监测表明,枢纽区边坡工程处于整体稳定状态。处理后的工程高边坡见图 1 和图 2。

小湾电站高边坡的处理原则、施工程序和方法、控制标准,已被其它工程高边坡广泛采用。



图1 右岸边坡
Fig.1 Right bank slope



图2 工程高边坡局部
Fig.2 Some high slope area

2 坝基岩体开挖卸荷松驰

小湾拱坝建基面岩体以微风化岩体为主,其中Ⅱ类岩体占 89.3%,Ⅲa 类岩体占 3.0%,需要处理的Ⅲb 类以下岩体仅占 7.7%,主要是 F11 断层,其它属Ⅲ、Ⅳ级结构面,此外,部分坝段还分布有蚀变带。坝址区的应力水平较高,两岸高程 1 100 ~ 1 170 m 部位, $\sigma'_1=8 \sim 17$ MPa,河床深部 40 ~ 50 m 处,最大主应力一般为 22 ~ 35 MPa,局部应力集中可达 50 MPa。

小湾大坝坝基开挖过程中,两岸坝肩特别是低高程坝基岩体出现强烈的卸荷松驰现象,成为主要工程地质问题。

坝基岩体开挖卸荷松驰的主要表现形式为:两岸坝肩部位沿已有裂隙错动、张开和扩展;上、中高程坝基完整岩体呈“葱皮”现象;低高程部位岩体“板裂”,特别是在缺陷槽二次开挖和灌浆、排水洞与坝基交界处,“板裂”现象很严重;河床坝基浅部岩体沿新生或原有水平卸荷裂隙发生差异回弹和蠕滑,局部岩体发生岩爆。图 3、图 4 和图 5 分别为卸荷松驰的几种形式。

小湾坝基开挖爆破前后的声波检测结果表明,大多数坝段开挖爆破声波衰减小于 10% 的影响深度小于 1.0 m,但 201 个长期监测孔声波检测表明,卸荷松驰深度随时间而增加,一般在爆破后 60 ~ 90 d 增幅最大,90 ~ 180 d 增幅减缓,180 d 后趋于平稳。设计按松驰程度将坝基松驰岩体分为松驰带、过渡带和基本正常带。根据声波实测资料,松驰带主要集中在深度 3.0 m 以内。现场变形试验表明,黑云花岗片麻岩变形模量因卸荷而显著降低,角闪斜长片麻岩受卸荷影响较轻。

为抑制卸荷松驰变形,对坝基的重点区域进行锚固。在高程 975 ~ 1 070 m 处,系统布置 450 kN 预应力锚杆,间距 3.0 m,高差 3.0 m,梅花型布置。在高程 1 070 ~ 1 110 m 处按“1 排预应力锚杆+4 排普通砂浆锚杆+1 排预应力锚杆”的间隔布设。1 110 m 以上用普通砂浆锚杆加固。对 975 m 以下卸荷松驰较强烈的部位,进行了二次开挖,即将河床 22#、23#坝段整体下挖 2.5 m 至 950.5 m 高程,并沿该高程面两侧伸入 21#和 24#

坝段 10 m 后,顺势向上放坡,左岸按原 975.0 m 高程顺坡下挖约 6 m 后连接,右岸接原 975.0 m 高程坡面.二次开挖的处理原则和程序为:①超前锚固,将 $3\times\Phi 32$ 砂浆锚筋桩预锚到开挖面以下,锚筋桩长 9 m,间排距 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$;②采用小梯段薄层光面爆破开挖建基面;③对建基面及时进行预应力锚固,预应力锚杆采用 $\Phi 32$,长 4.5 m,间排距 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$,张拉力 150 kN;④用冲击锤对建基面进行彻底清基;⑤立即浇筑大坝混凝土覆盖建基面.



图3 沿已有裂隙错动、张开和扩展

Fig. 3 Dislocation, opening and extension of rock along the existing fracture aperture



图4 葱皮现象

Fig. 4 Onion-peel phenomenon



图5 板裂现象

Fig. 5 Bedded rock failure

为增强岩体的整体性、均匀性,提高岩体变形模量,对卸荷松弛岩体进行了高质量的固结灌浆.小湾大坝要求一律采用有盖重固结灌浆,即当坝段混凝土厚度达 6 m,相邻坝段混凝土厚度达 4.5 m 后,对本坝基进行有盖重固结灌浆,如混凝土龄期达 21 d,则撤出灌浆设备后再浇筑一层 1.5 m 混凝土,再做剩余固结灌浆,一般要三进三出才能完成一个坝段的固结灌浆.在 12#~32#坝段固结灌浆孔内布设了长 12.0 m、入岩 9.0 m 的 $3\times\Phi 32$ 锚筋桩共 3 066 根,在这些坝段坝趾贴角部位的固结灌浆孔内布设了 1 654 根锚筋桩,加上基础二次开挖中设置的 2 000 根超前锚筋桩,共 6 720 根.

另外,在坝趾贴角混凝土上,最低高程 965 m,左岸至高程 1 085 m,右岸至高程 1 142 m,共布置了 4 000 kN 级、6 000 kN 级拉力分散型锚索共 502 根,总加固力 27.4 万 t.建基面浅表部位岩体开挖卸荷松弛后,在一定范围内降低了基岩变形模量和抗剪强度,影响其完整性和均质性,从而会改变拱坝的应力、变形分布,带来不利后果.为进一步评价处理效果和拱坝—地基系统稳定状况和安全度,有关科研单位开展了拱坝安全性评价科技攻关研究.多拱梁和有限元计算结果表明,抗剪安全系数都大于 2.0.为了评价小湾拱坝整体安全度,做了 2 个物理模型试验,四川大学的地质力学模型试验采用超载结合降强的试验方法,软弱结构面降强 20%,综合超载安全系数为 3.96~4.20;清华大学的模型采用超载法,得到小湾拱坝的上游起裂、非

线性变形、超载极限破坏安全系数分别为 1.4~2.0, 2.9~3.5 和大于 6.5, 在坝高 200 m 以上的同类工程中属中等水平。

小湾拱坝严格清除了坝基浅层开挖卸荷强松弛岩体, 并对岩体进行了必要的锚固和钢筋网铺设; 对坝基进行了高质量固结灌浆处理; 坝踵设置了诱导缝, 以改善坝踵应力状况; 上游面高拉应力区采用了坝面喷涂聚脲和坝前回填粉煤灰等防渗淤堵措施; 两岸坝肩及抗力体布设了完善的渗控系统; 坝趾重点区域和两岸拱座设置了预应力锚索。小湾拱坝整体抗滑稳定和坝基浅层抗滑稳定安全性有了明显的恢复和提高。

小湾坝基岩体开挖卸荷松弛现象之严重实属罕见, 实践使我们认识到, 在深山峡谷高地应力区开挖坝基, 应遵循边挖边锚或先锚后挖的方法; 建基面上的地质缺陷应一次开挖到位, 尽量避免二次刻槽开挖; 对小的地质缺陷可在混凝土浇筑前采用冲击锤、风镐等清挖处理, 开挖面应平顺, 用弧线连接; 建基面上出露的灌浆洞、排水洞、置换洞、传力洞等应遵循先洞后坡的原则, 并在交界面上的 10 m 范围内对已形成的洞井先做好支护处理。这些处理原则对类似工程具有重要的借鉴价值。

3 拱坝混凝土温控防裂

小湾拱坝混凝土总量 870 万 m^3 , 混凝土采用 $\text{C}_{180}40$ 、 $\text{C}_{180}35$ 、 $\text{C}_{180}30$ 强度等级, 拱冠梁底宽 73 m, 河床坝段基础部位与上下游贴角通仓浇筑, 最大坝块厚度达 90 m, 浇筑仓面 2 200 m^2 。小湾拱坝混凝土具有工程量、混凝土标号高、坝块厚、浇筑仓面大、施工强度高特点, 坝体混凝土温控防裂技术十分复杂, 难度极大。为此, 对混凝土性能及温控防裂技术进行了系统的研究, 制订了小湾拱坝混凝土应具有“高强度、中等弹模、低热、微膨胀、大极拉值”的技术路线, 对中热水泥生产厂家进行技术改造, 优选粉煤灰及外加剂, 优化混凝土配合比, 按现行规范, 制定了从宽的温控防裂措施和相应的施工工法, 经过 5 年的试验研究和 12 次相关的咨询会和审查会确定了施工方案, 应该说技术准备是非常充分的。

施工质量检查表明, 混凝土原材料、拌和物性能、混凝土施工各环节温度控制均满足设计要求。混凝土强度和性能检测结果表明, 小湾大坝混凝土强度高于设计值, 极限拉伸、弹性模量和徐变性能与其它工程类处于较好水平; 混凝土的干缩较大, 劈拉强度偏低, 对混凝土抗裂相对不利, 混凝土自生体积变形呈先收缩后膨胀型, 前期收缩与通水冷却温降重合时不利于混凝土抗裂, 但总体而言, 小湾拱坝混凝土的性能是比较好的。

小湾拱坝混凝土 1 000 m 高程以下, 即基础以上 50 m 高度范围内均未出现混凝土温度裂缝, 说明基础约束区混凝土的温控防裂措施是有效的。但是, 2007 年 11 月中旬在 1 060 m 廊道巡检时, 发现部分坝段出现了平行于坝轴线的内部裂缝。按照以往经验及现行规范控制, 拱坝在非约束区出现此类裂缝的几率很小, 原因何在? 结合监测资料分析发现, 一冷结束后, 由于残余水化热的作用, 混凝土内部温度回升较大, 平均为 4.5℃, 致使二冷降温幅度过大; 大坝浇筑块体厚, 二期冷却高程范围过小, 未在高程方向上形成合理的温度梯度; 由于要求沿坝体厚度方向从上游到下游形成 3 个不同的封拱温度, 实施时采用了先上游后下游的 3 个分区不同步二期冷却, 在界面上形成较大的温度梯度; 混凝土自生体积变化尚处于收缩期。以上因素使混凝土内部的拉应力接近或超过混凝土极限抗拉强度, 导致混凝土开裂。

采取的针对性措施是: ①一冷结束后, 采取间歇性的中期冷却, 控制混凝土温度回升; ②二期冷却的高度进一步细化, 在拟灌区以上设同冷层和过渡层, 冷却高度为 0.4 倍坝块厚度(原来的同冷层高度仅为 6 m); ③取消了二期冷却同高程 3 个分区, 采用同一封拱温度。此外还要求降温速率小于 0.5℃/d, 通水温度与混凝土内部温度之差不大于 15℃等更为严格的要求, 采取这些措施后, 坝体混凝土尚未发现裂缝(见图 6)。



图 6 小湾大坝混凝土浇筑

Fig. 6 Dam concrete placement of Xiaowan hydropower project

进一步研究分析认为:①高标号混凝土内高掺粉煤灰,延缓了水泥的放热过程,一冷结束后残余水化热仍较大,必须采取不间断的中期冷却,控制温度回升^[3];②传统的基础约束区、脱离约束区的概念对特高厚拱坝不完全适用.小湾拱坝在基础以上120 m高度,拱坝厚度仍有60 m,在此范围内,下部已封拱的拱坝整体刚度很大,将对上部坝块产生类似于基础的“二约束”,因此,二冷的高度及温度梯度要适应这种特殊情况,现行规范在这方面无明确要求;③理论分析表明,通水温度与混凝土内部温度相差过大,会在冷却水管附近产生较大的局部拉应力,现行规范规定偏宽^[3];④混凝土的全级配试验与湿筛二级配试验成果对比,全级配混凝土的抗拉强度和极限拉伸值仅为湿筛试件的70%左右,混凝土的实际抗裂能力较湿筛二级配混凝土试验值低,需研究论证特高厚拱坝的抗裂安全系数.

4 泄洪消能及雾化研究

(1)泄洪消能措施 小湾水电站坝址区山高谷窄,最大泄洪落差226.26 m,最大泄洪流量20 683 m³/s(校核洪水),相应下泄功率46 000 MW,其“大泄量、高水头、窄河谷”的泄洪消能问题突出,泄洪功率为世界同类坝型前列.小湾水电站泄洪消能建筑物由坝身5个表孔、6个中孔、水垫塘、二道坝和左岸泄洪洞组成.坝身泄洪采用“横向单体扩散、纵向分层拉开、整体入水归槽”的泄洪碰撞消能方式.水工模型试验成果表明,泄洪的消能效果较好.常年洪水采用左岸泄洪洞和过机流量泄洪,也可采用表孔或中孔单独泄洪,3套泄洪措施互为备用,运行调度灵活(见图7).



图7 小湾大坝蓄水泄洪

Fig. 7 Flood discharge from Xiaowan reservoir

(2)泄洪雾化问题 根据二滩工程的经验,高拱坝坝身泄洪雾化较严重,防护措施要求高.由于表、中孔联合泄洪,空中碰撞,水舌在水垫塘内的溅水引起的雾化十分严重,将在坝后较大范围内形成强烈的泄洪雾化区.两岸坝肩抗力体均位于强暴雨区,须设置有效的坡面保护和地表、地下排水措施,确保边坡稳定.

对于泄洪雾化的研究,直接从多座水电站泄洪雾化原型观测资料入手,发现泄洪雾化纵向范围与水舌平均入水流速、入水角以及泄流量之间的关系.考虑水舌碰撞因素对泄洪雾化的影响,基于量纲分析方法建立了估算泄洪雾化纵向范围的经验关系式.根据二滩水电站泄洪雾化原型观测得到的雾化降雨量等值线图,绘制了小湾电站坝身表孔单独泄洪、中孔单独泄洪、中表孔联合泄洪以及泄洪洞泄洪各典型工况下泄洪雾化降雨的等值线图.采用人工神经网络方法,考虑水力学因素与地形因素对泄洪雾化的影响,建立“泄洪雾化的人工神经网络预测模型”.这些研究成果对工程下游防护措施设计具有较好的指导作用.

(3)拱坝泄洪流激振动问题 通过天津大学的水弹性模型,研究了拱坝泄洪流激振动问题.研究表明:小湾拱坝泄洪时表、中孔孔口的脉动荷载振动会对坝体产生流激振动作用,约在80 μm量级,影响甚微.研究工作为坝体泄洪建筑物结构设计优化提供了参考.

5 小湾高拱坝抗震技术措施

小湾工程建筑物地区地震基本烈度为Ⅷ度,经地震危险性分析,小湾大坝地震设防标准按500年超越概率为10%的基岩峰值水平加速度为0.308g,设计烈度为Ⅸ度,以超越概率为100年1%的地震动加速度峰值0.359g进行校核.

数值分析表明,在设计地震烈度下,大坝横缝张开约10 mm.为保证拱坝的整体性,在动力反应较强的部位设置拱向钢筋,限制横缝开度,拱向钢筋在横缝两侧4 m范围内涂沥青及加PVC套管,允许自由滑动,其余部位应在混凝土内有足够的锚固长度.在梁向上下游面设梁向限裂钢筋,以控制梁向裂缝.此外还研究论证在坝顶设置抗震阻尼器的必要性.抗震钢筋布置见图8.

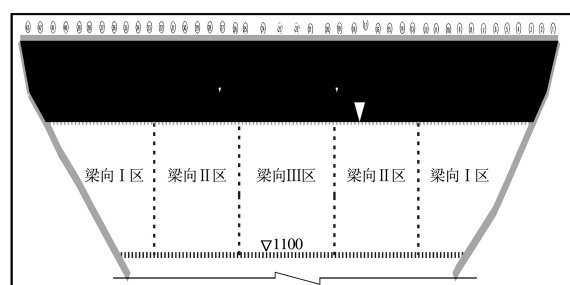


图 8 梁向抗震钢筋分区

Fig. 8 Zoning reinforcement against earthquake

6 结 语

小湾水电站在建设过程中遇到的诸多技术难题,在世界水电工程中十分罕见,已超出了现行规范及以往的认识水平,极具挑战性.在建设过程中对关键技术难题的研究实践与认识,具有开创性,所取得的经验,将对我国乃至世界高拱坝建设水平的提高产生深刻影响.

参 考 文 献:

- [1] 中国水电顾问集团公司. 云南澜沧江小湾水电站枢纽工程蓄水安全鉴定报告[R]. 昆明: 中国水电顾问集团公司, 2008. (China Hydropower Engineering Consulting Group Corporation. Identification report of water storage safety of Xiaowan hydropower project on Lancang River of Yunnan Province[R]. China Hydropower Engineering Consulting Group Corporation, 2008. (in Chinese))
- [2] 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院. 云南澜沧江小湾水电站拱坝坝基开挖卸荷松弛岩体工程处理措施研究子题中间成果报告[R]. 昆明: 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 2008. (Hydrochina Kunming Engineering Corporation. Engineering measures of unload relaxation caused by rock excavation in the dam foundation of unload relaxation caused by rock excavation in the dam foundation of Xiaowan hydropower station [R]. Kunming: Hydrochina Kunming Engineering Corporation, 2008. (in Chinese))
- [3] 朱伯芳. 小温差早冷却缓慢冷却是混凝土坝水管冷却的新方向[J]. 水利水电技术, 2009, 40(1): 44-50. (ZHU Bo-fang. Pipe cooling of concrete dam from earlier age with smaller temperature difference and longer time[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(1): 44-50. (in Chinese))

Key technical problems of Xiaowan hydropower project construction

MA Hong-qi

(Yunnan Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650214, China)

Abstract: The Xiaowan hydropower project double-curvature arch dam under construction is becoming the highest arch dam in the world. A lot of technical problems solved during construction must be world problems, and the project construction is a real challenge. According to research practice and understanding of key technology of hydropower engineering, main technical problems, such as construction treatment of high steep slopes of 700 meters, unload relaxation caused by rock excavation in the dam foundations, temperature control against cracks in the concrete arch dam, researches on flood discharge and energy dissipation as well as automatization, and arch dam safety against earthquake, are tackled by the author in the study.

Key words: concrete double-curvature arch dam; technical problems; innovation and creativity; Xiaowan hydropower project