

金沙江上游巴塘水电站沥青混凝土心墙堆石坝设计

柏俊磊¹, 张华明¹, 李天宇¹, 李进²

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;

2. 华电金沙江上游水电开发有限公司, 四川 成都 610095)

摘要:金沙江上游河段的巴塘水电站工程,其挡水建筑物为最大坝高 69m 的沥青混凝土心墙堆石坝,工程坝址区地震基本烈度为Ⅷ度,区域地质条件较为复杂,存在一定的技术问题。在分析和借鉴国内外已建的类似工程的基础上,结合工程本身的实际技术特点,就该工程坝体结构设计、坝基处理、坝坡设计、沥青心墙与混凝土基座的连接方式、防渗心墙沥青混凝土材料的设计参数等方面进行了一些有益的方案设计。这些设计在工程上的实际应用,最终确保了工程建设的顺利实施,相关设计成果可为后续类似工程的设计提供一定的参考。

关键词:坝体结构;沥青混凝土心墙;坝坡稳定

中图分类号:TV641.4

文献标志码:B

文章编号:1001-2184(2024)03-0134-07

Design of the Asphalt Concrete Core Rockfill Dam in Batang Hydropower Station on the Upstream of Jinsha River

BAI Junlei¹, ZHANG Huaming¹, LI Tianyu¹, LI Jin²

(1. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an Shanxi 710065;

2. Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., LTD., Chengdu Sichuan 610095)

Abstract: The retaining structure of the Batang Hydropower Station in the upstream of the Jinsha River is an asphalt concrete core rockfill dam, with a maximum dam height of 69 meters. The basic seismic intensity in the engineering area is VIII, and the geological conditions in the engineering area are complex, involving complex technical issues. On the basis of summarizing and analyzing similar projects both domestically and internationally, combined with the actual characteristics of the project, and some beneficial design schemes have been proposed in terms of dam structure design, dam foundation treatment, dam slope design, connection between core wall and foundation, and asphalt core wall parameters. The application of these designs ensures the successful implementation of engineering construction, and the relevant achievements can provide reference for similar projects.

Keywords: Dam Structure; Asphalt concrete core wall; Dam slope stability

1 工程概况

巴塘水电站工程位于四川省巴塘县和西藏自治区芒康县交界处的金沙江上游河段,是该河段 13 个梯级水电开发规划中的第 9 级电站。工程首要任务是发电,水库蓄水后的正常蓄水位高程为 2 545.00 m,死水位高程为 2 540.00 m,水库总库容 1.58 亿 m³。电站安装 3 台单机容量为 25 万千瓦的混流式水轮发电机组,总装机容量为 75 万千瓦,为二等大(2)型工程。

工程最终选定的坝址为下坝址,坝址河谷相对较窄,横河断面形态呈不对称“V”形,河谷山体

左缓右陡。大坝坝轴线位于金沙江主河道与左岸支流巴楚河汇合口的上游约 660 m 处,坝轴线处河谷宽约 180 m,右岸山体较高、山体雄厚,局部较陡;左岸为三面临空的象鼻山体端部。

坝址区地层岩性主要以黑云母石英片岩为主,局部穿插花岗岩等,河床覆盖层最大厚度为 61.70 m,按照其颗粒组成、分布层次等,从下部至上部一共分成 4 个岩组:Ⅰ岩组(Q₄^{al-Ⅰ})—含泥砾中细砂层,主要分布在河床中间、覆盖层最底部,厚度 5~15 m 不等;Ⅱ岩组(Q₄^{al-Ⅱ})—砂卵砾石层,主要分布于覆盖层中、下部位,该组层厚度在 4.7~25 m 不等,埋深 18~33 m;Ⅲ岩组

收稿日期:2024-03-15

(Q_4^{al-III})—含泥砾中粗砂层,主要分布于覆盖层中、上部位,最小埋深 15.50 m,该组层最大厚度 13.20 m,分布高程 2 444.30~2 466.20 m,横河向呈连续分布,左岸厚右岸薄,纵向延伸长度超过 500.00 m,向上下游侧呈透镜状渐变尖灭;IV 岩组(Q_4^{al-IV})—砂卵砾石层,主要分布于河床覆盖层上部,该组层厚度在 12.00~27.00 m 之间。

2 坝体结构设计

2.1 坝体基本断面设计

挡水建筑物坝轴线走向为 NE46°34'8",拦河坝坝顶长度为 338.80 m,坝顶高程 2 549.00 m,

最大坝高 69.00 m,大坝考虑交通需要,坝顶宽度为 10.00 m。大坝上游坝坡坡比为 1:2.2,2 502.50 m 高程以下坝体利用部分上游土石围堰堰体,下游坝坡坡面设置有“Z”字型上坝交通,路面净宽度 6.00 m,下游坡面 2 527.00 m 高程设 2.00 m 宽水平马道,2 527.00 m 高程以上坝坡坡比为 1:2.0,2 527.00 m 高程以下坝坡坡比为 1:1.6,下游综合坝坡 1:2.03。上、下游坝坡坡面均采用干砌石护坡,2 500.00 m 高程以下设压坡体,压坡体下游坡度为 1:2.0,采用块石护坡,坝体标准典型剖面见图 1。

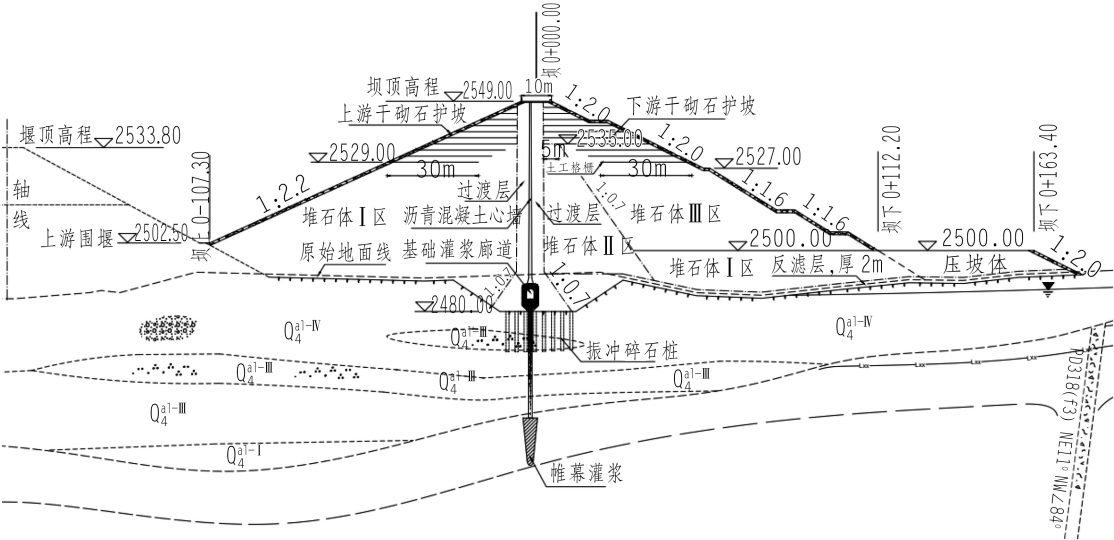


图 1 坝体标准典型剖面图

根据国内其他工程经验^[1-3],并参照规范要求^[4],巴塘电站大坝坝体防渗形式为沥青混凝土心墙防渗,沥青心墙采用渐变厚度设计,宽度为 0.50~1.10 m,在心墙底部设 2.00 m 高的放大脚。心墙上、下游侧设置水平宽度不小于 4.00 m 的过渡层,心墙下游侧的堆石坝体与坝基覆盖层之间设置 2.00 m 厚的反滤层。沥青混凝土心墙顶部高程 2 548.40 m,心墙基础与河床覆盖层、两岸基岩接触部位设混凝土基座,河床部位基座内设 2.5 m×3.5 m(宽×高)帷幕灌浆兼检测廊道与基础防渗墙刚性连接,岸坡混凝土基座嵌入弱风化基岩之中,对岸坡基座底部岩体进行固结灌浆处理,固结灌浆深度 8 m,孔、排距 2 m。河床覆盖层基础防渗采用封闭式钢筋混凝土防渗墙,防渗墙厚度为 1.2 m,顶部与大坝基础廊道刚性连接,廊道顶部与上部沥青混凝土心墙相接,防

渗墙底部嵌入基岩内 1 m。

2.2 坝体分区及坝料设计

拦河大坝根据坝址区地形地质条件、筑坝材料分布等综合分析,在满足反滤过渡、变形模量过渡的要求下,充分发挥各种材料的渗透、强度特性,使坝体满足渗流与渗透稳定要求,具有良好的抗震性能和较高的抵御变形的能力。同时,坝体分区设计按照当地材料坝就地、就近取材和挖填平衡原则,充分利用工程左岸边坡开挖料,坝体结构主要分为大坝内部沥青混凝土心墙、上游过渡料区、下游过渡料区、心墙上游堆石区、心墙下游堆石区、坝基反滤料区、下游压坡体和上下游护坡等。

大坝内部沥青混凝土心墙轴线位于坝顶面中部坝轴线上游 2.0 m 处,心墙顶高程 2 548.40 m,底高程 2 493.00 m;在沥青心墙上游侧和下游

侧分别设置不小于 4 m 宽度的过渡层,过渡层外侧为坝壳堆石料,分为堆石Ⅰ区、堆石Ⅱ区、堆石Ⅲ区以及大坝下游压坡体。

心墙上游坝体及下游水下部分坝体设计为堆石Ⅰ区,是坝体承受水压力的主要支撑体,对上游坝坡稳定及坝体变形控制意义重大,要求采用低压缩性、级配良好的坝料填筑,并要求碾压到足够

的密实度。料源主要采用左岸建筑物开挖的弱风化和强风化混合料,控制强风化岩石掺入量比例不高于 20%。堆石料最大粒径 800 mm,粒径小于 5 mm 含量不超过 30%,粒径小于 0.075 mm 含量不超过 5%,填筑压实孔隙率 $\leq 20\%$,渗透系数 $>10^{-2}$ cm/s,堆石Ⅰ区坝料级配曲线见图 2。

在心墙周围过渡料下游设置堆石Ⅱ区,主要

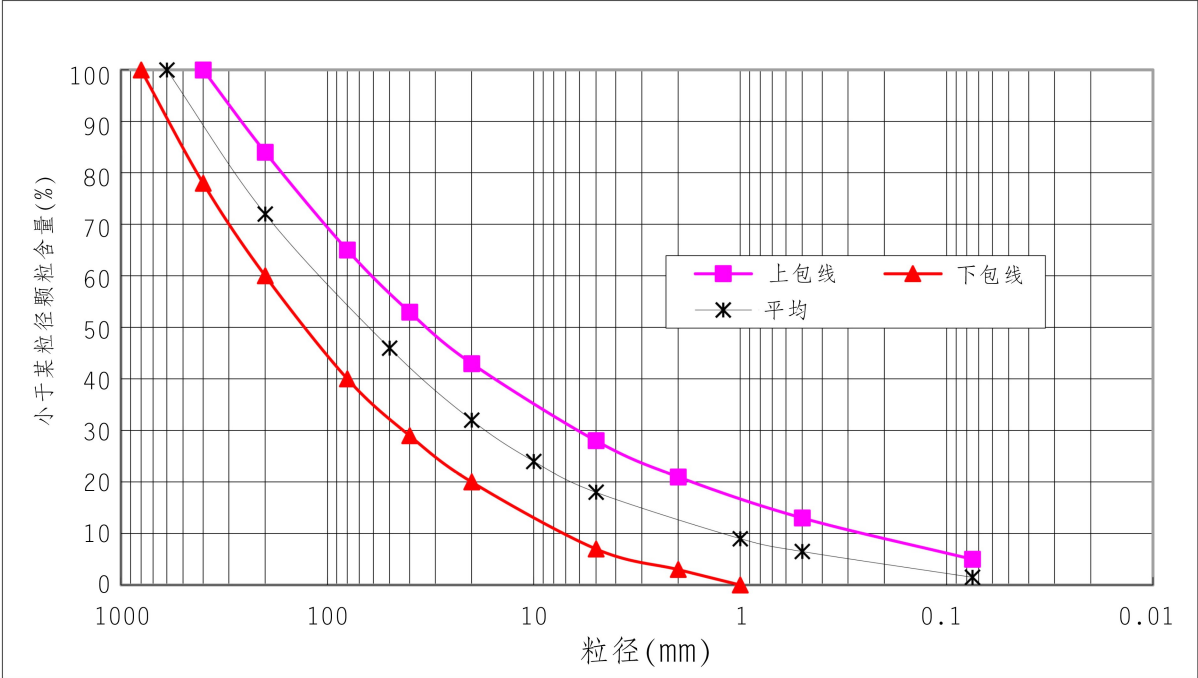


图 2 堆石Ⅰ区坝料级配曲线

对沥青混凝土心墙起到一定的支撑作用,抑制沥青心墙防渗体在上游水头压力作用下向下游变形的趋势,是坝体主要受力区,要求采用低压缩性、级配良好的坝料填筑,并要求碾压到足够的密实度。料源采用左岸建筑物开挖的弱风化岩石,堆石料最大粒径 800 mm,粒径小于 5 mm 含量不超过 30%,粒径小于 0.075 mm 含量不超过 5%,填筑压实孔隙率 $\leq 20\%$,渗透系数 $>10^{-2}$ cm/s。

下游堆石Ⅱ区外围水位以上设堆石Ⅲ区,该料区基本位于坝体干燥区,材料要求适当降低,料源主要采用左岸建筑物开挖的弱风化和强风化混合料,控制强风化岩石掺入量不超过 50%。坝料最大粒径 800 mm,粒径小于 5 mm 含量不超过 30%,粒径小于 0.075 mm 含量不超过 5%,填筑压实孔隙率 $\leq 20\%$,渗透系数 $>10^{-2}$ cm/s。

考虑坝壳料特性,使沥青混凝土心墙和大坝坝壳体之间形成良好的变形模量过渡衔接,最终

改善心墙的整体受力条件,在紧邻心墙上、下游侧均设置过渡料层,过渡料层水平厚度不小于 4 m。过渡料自身具有良好的渗透性能和渗透稳定,同时,为避免沥青混凝土被压入过渡料层的空隙之中,过渡料层混合料最大粒径与沥青混凝土骨料的最大粒径之比应小于 8 : 1,最大粒径不超过 80 mm,过渡料采用人工骨料厂加工掺配的成品料。沥青混凝土骨料的最大粒径为 20 mm,与混凝土骨料加工系统协调考虑,心墙过渡料的最大粒径为 80 mm,粒径小于 5 mm 的颗粒含量不超过 35%,小于 0.075 mm 的颗粒含量小于 5%,级配连续,填筑压实孔隙率 $\leq 18\%$,渗透系数 $>5 \times 10^{-3}$ cm/s。过渡料级配曲线见图 3。

为防止大坝基础覆盖层细粒料流失,河床基础覆盖层产生渗透破坏,在心墙下游坝体底部河床部位设基础反滤料层,该层厚度为 2 m。料源采用人工骨料厂加工掺配的成品料,最大粒径 80 mm,

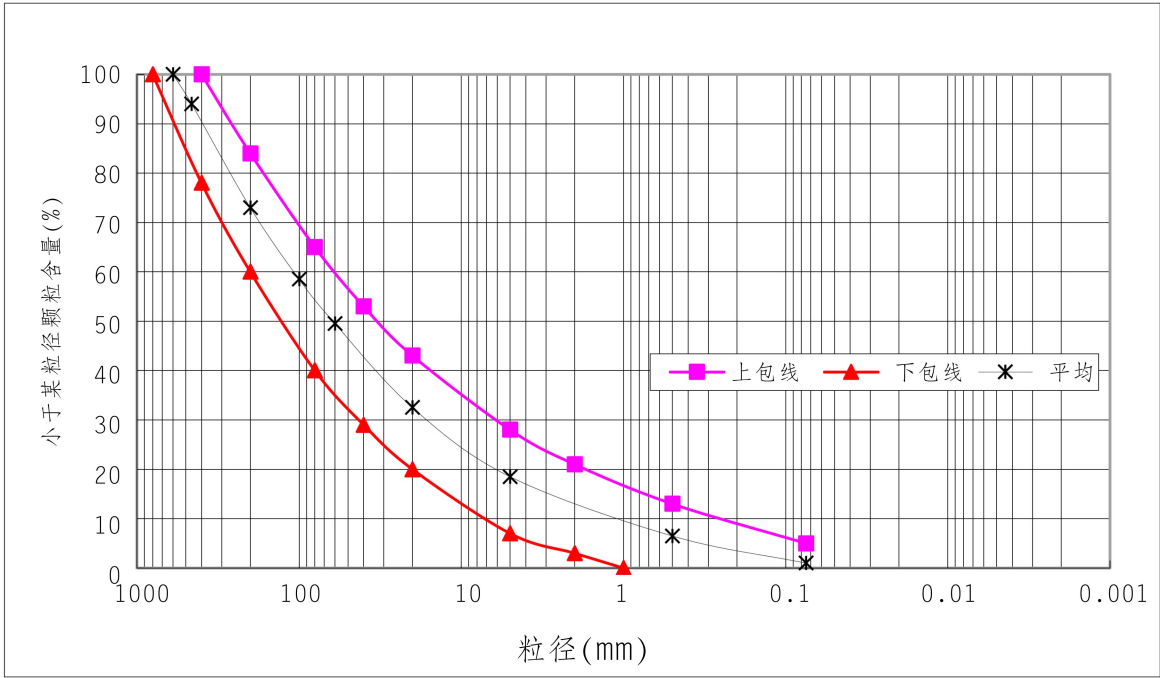


图3 过渡料级配曲线

粒径小于5 mm 含量为35%左右,粒径小于0.075 mm 含量不超过5%,连续级配,渗透系数 $>5\times10^{-3}$ cm/s。

2.3 沥青混凝土心墙设计

根据施工方法的不同,沥青混凝土心墙可以分为碾压式和浇筑式两种型式^[2]。

结合目前国内外已建工程实践经验,经分析比较,巴塘水电站采用碾压式沥青混凝土心墙,心墙采用垂直体型渐变厚度设计,厚度为0.50~1.10 m,在心墙底部设2 m 高的放大脚,坝轴线为直线,心墙顶部高程为2 548.40 m,高出正常蓄水位3.4 m,高出校核洪水位0.5 m。根据规范^[2]要求,碾压式沥青混凝土主要设计指标见表1。

表1 碾压式沥青混凝土主要设计指标

序号	项目	指标	说明
1	孔隙率 / %	≤3	芯样
		≤2	马歇尔试件
2	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)	≤1×10 ⁻⁸	—
3	水稳定系数	≥0.90	—
4	弯曲强度 /kPa	≥400	—
5	弯曲应变 /%	≥1	—
6	内摩擦角 /°	≥25	—
7	黏结力 /kPa	≥300	—
8	抗压强度 /MPa	≥3	—

沥青混凝土粗、细骨料采用巴塘上游电站洞挖大理岩料,填料采用大理岩岩粉,沥青采用水工70 号沥青。

根据沥青混凝土心墙配合比试验结论,综合考虑巴塘水电站坝体心墙防渗体防渗变形能力、施工条件以及工程安全经济等方面,结合工程实际情况,确定推荐的沥青混凝土配合比材料和级配参数见表2,推荐的沥青混凝土矿料级配见表3,推荐配合比级配曲线见图4。

2.4 沥青心墙与建筑物连接

沥青混凝土心墙与其他建筑物的连接主要包含:心墙与基础灌浆廊道、心墙与岩质岸坡和心墙与左岸溢洪道右侧混凝土挡墙等的连接。

该工程采用适当放大沥青心墙底部横断面的方法与混凝土基座以及其他建筑物连接。河床水平基座采用平面连接,左右岸斜坡基座采用“弧形凹槽+铜止水”连接。弧形凹槽宽2.0 m、深0.2 m。沥青混凝土心墙底部度由1.0 m 渐变至2.0 m,渐变段长2.0 m。为增大黏结力并适应心墙水平变形,沥青心墙和混凝土基座之间的接触面,使用沥青冷底子油和沥青玛蹄脂进行处理。沥青玛蒂脂主要是由沥青、大理岩矿粉以及人工砂配制而成,配合比为1:2:1.5,砂细度模数1.4~2.2。

3 基础处理

表 2 推荐的沥青混凝土配合比的材料和级配参数表

级配参数				材料			
最大粒径 /mm	级配指数	填料含量 /%	油石比 /%	粗骨料	细骨料	填料	沥青
19	0.41	13	7.1	大理岩	大理岩	大理岩矿粉	克拉玛依 70 号

表 3 推荐配合比的矿料级配

筛孔尺寸 /mm	粗骨料(16.00~2.36)					细骨料(2.360~0.075)					小于 0.075
	19.00	16.00	13.20	9.50	4.75	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	
理论级配	100.0	93.4	86.5	76.0	57.9	44.2	34.0	26.5	20.7	16.3	13.0
合成级配	100.0	93.4	86.5	76.0	56.5	40.7	36.4	28.6	20.1	16.1	13.0

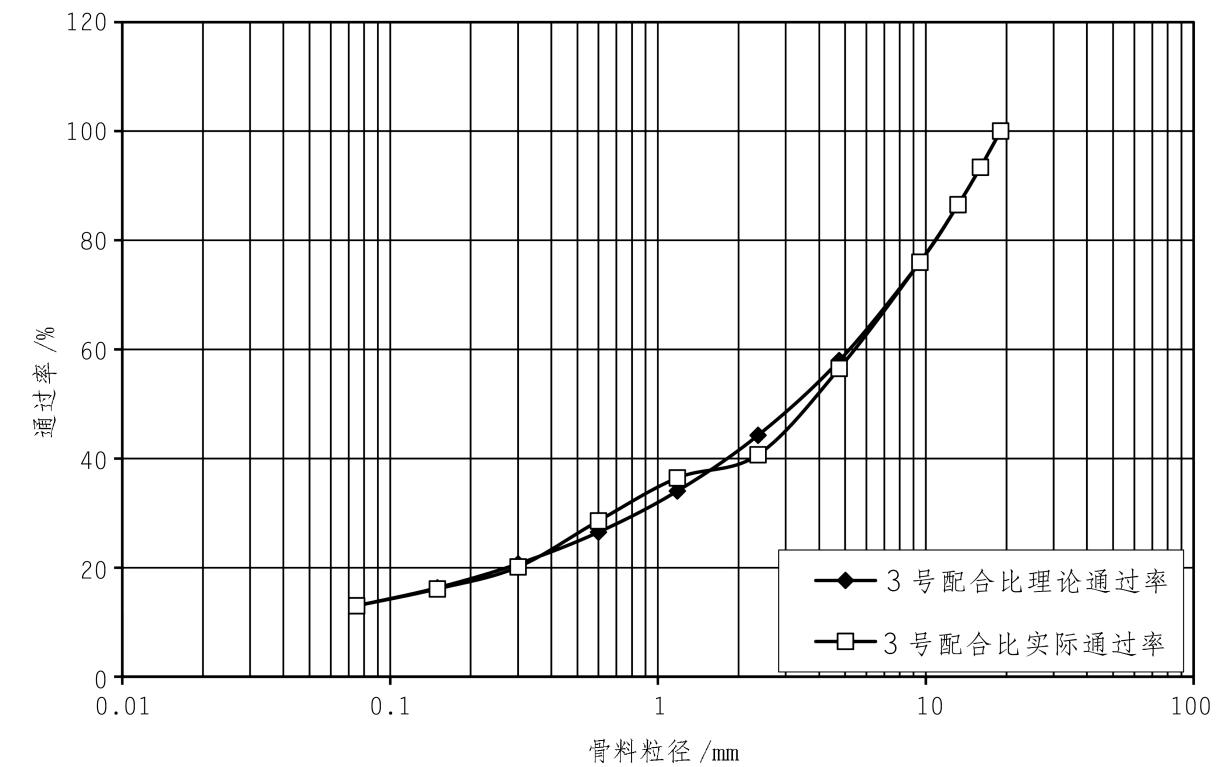


图 4 推荐配合比级配曲线

3.1 心墙槽基础开挖

坝体高 69 m,右岸沥青混凝土心墙基础置于强风化岩体中部,须进行基础固结灌浆。左岸坝肩通过混凝土重力式挡墙与溢洪道连接,右岸坝肩受雄松—苏洼龙断裂影响,右岸心墙基础等永久边坡适当放缓,开挖坡比为 1∶0.9,与水平廊道接触面岩体质量较好部位开挖坡比为 1∶0.3。

3.2 坝基开挖

根据河床覆盖层建基面的选择,清除坝基范围内河床覆盖层表部较为松散的部分,清基深度初估为 1 m,实际施工中,由于受 2018 年两次“白格”堰塞湖溃堰洪水冲刷淤积影响,清基深度约 2.5 m。

左右岸基岩出露,局部分布有崩坡积。坝基

范围内岩石基础清除表面松动石块,并使基础平顺。崩坡积碎石土予以清除,不便全部清除的清至原状层,并采用过渡料保护。左岸发育的格然通滑坡总体位于坝轴线下游,滑坡堆积物性状相对较差,结合枢纽布置,已将建筑物基础范围滑坡体全部挖除。

3.3 基础固结灌浆

对两岸坡心墙基座进行固结灌浆,提高岩体的完整性,减少表层岩体的渗透性,改善混凝土基座和基岩的接触条件,固结灌浆孔排距 2 m,深度 8 m。

3.4 坝基心墙基础碎石桩

大坝河床基础覆盖层内存在一定的砂层透

镜体,分布范围沿河流方向在大坝基础河床内延伸长度达到120 m,坝轴线方向左右延伸长度约185 m,最大埋深距地面约20 m。该透镜体不存在地震作用下的液化问题,但其力学参数指标低于相邻砂卵砾石层,考虑到该透镜体所在的上部覆盖层为大坝基础,为进一步减轻工程后期运行过程中可能存在的坝基不均匀沉降风险,特别是避免由于坝基不均匀沉降从而影响心墙坝防渗体系的损坏,需要对该区域地基采用碎石振冲桩进行加固。振冲碎石桩以等边三角形布置,桩直径为1.0 m,桩间距为3.0 m,最大桩深20.0 m。

4 坝基防渗处理

坝基河床覆盖层深厚且分层复杂,为满足枢纽建筑物的渗流控制的要求,进一步降低坝基透水覆盖层发生类似管涌等形式的渗透破坏,减少坝体基础渗漏水量,大坝基础采用混凝土防渗墙与封闭式帷幕灌浆相结合的防渗形式。

根据规范^[4]中相关条文要求,大坝坝基帷幕灌浆深入相对不透水层($q\leq 5\text{ Lu}$)以下5 m,帷幕灌浆深入两岸的长度范围为水库蓄水后正常蓄水位情况下地下水位线与山体相对不透水层($q\leq 5\text{ Lu}$)在两岸山体内的相交处。右岸防渗

帷幕在心墙混凝土基座、右岸坝基2 484.00 m高程灌浆平洞以及右岸坝肩2 549.00 m高程灌浆平洞进行,左岸建筑物基础部位帷幕灌浆在基础灌浆廊道及平洞内进行,左岸其余部位防渗帷幕在左岸坝基2 505.00 m高程灌浆平洞以及左岸坝肩2 549.00 m高程上坝交通洞兼帷幕灌浆平洞内进行,帷幕灌浆孔排数左岸以F11断层为界,右岸以雄松—苏洼龙断裂为界按双排孔设计,孔距1.5 m,排距1.0 m,其余部位按单排孔设计,孔距1.5 m,帷幕底部高程左岸为2 480.00 m,河床段为2 421.00 m,右岸为2 480.00 m,之间按照线性过渡连接。

为便于基础及两岸帷幕灌浆施工,在河床及两岸坝肩设置帷幕灌浆廊道、平洞,均为城门洞型断面,基础廊道及右岸2484.00 m平洞尺寸2.5 m×3.5 m,其余两岸平洞3.0 m×3.5 m。

5 坝坡稳定分析

根据规范^[5-6]规定,主要采用规范推荐的简化Bishop法(毕肖普法)以及瑞典圆弧法,分别对大坝上下游坝坡抗滑稳定安全系数进行计算,采用拟静力法计算(同时计入水平向和竖向地震惯性力)地震工况下的坝坡稳定,针对最大断面进行分析。坝坡稳定分析计算成果见表4。

表4 坝坡稳定分析计算成果表

计算工况	运用时期及工况	最小安全系数					
		简化毕肖普法		规范允许 安全系数	瑞典圆弧法		规范允许 安全系数
		上游	下游		上游	下游	
正常情况	稳定渗流期(正常蓄水位)	1.847	1.567	1.35	1.825	1.394	1.25
	稳定渗流期(设计洪水位)	1.847	1.567	1.35	1.825	1.301	1.25
	正常降落期(正常水位~死水位)	1.648	1.567	1.35	1.519	1.396	1.25
非常情况Ⅰ	竣工期	1.894	1.567	1.25	1.893	1.469	1.15
	稳定渗流期(校核洪水位)	1.877	1.527	1.25	1.876	1.288	1.15
	水库水位骤降期(校核洪水位~死水位)	1.566	1.489	1.25	1.443	1.326	1.15
非常情况Ⅱ	稳定渗流期+设计地震	1.251	1.331	1.15	1.240	1.172	1.05
	稳定渗流期+校核地震工况	1.148	1.275	>1.00	1.143	1.106	>1.00

通过坝坡稳定计算及分析,各计算工况下,坝坡抗滑稳定安全系数计算值均大于规范规定的安全系数规定值,即巴塘水电站上、下游坝坡在各种设计工况下下均是稳定的,且有较大的安全储备,坝坡稳定性满足要求。

6 结 语

巴塘水电站沥青混凝土心墙堆石坝,最大坝高69.0 m,坝址区最大覆盖层厚度达到61.7 m,地震基本烈度较大,地质条件较为复杂。面对工程面临的“高地震烈度、深厚覆盖层地基”等技术

问题,设计因地制宜,该工程堆石坝坝体结构分区、开挖料利用及料源参数设计、大坝基础振冲桩加固处理、心墙基座接触面连接方式、心墙沥青混凝土设计参数等方面提出了一些有益的设计方案,目前工程应用效果良好,相关设计成果可为后续类似工程建设提供一些参考。

参考文献:

[1] 中国水力发电工程学会水工及水电站建筑物专业委员会. 2002 年水工专委会学术交流会议学术论文集[C]. 2002 年 5 月 11-13. 丽江, 中国.

[2] 何顺宾,胡永胜,刘吉祥. 冶勒水电站沥青混凝土心墙堆石坝设计[J]. 水电站设计, 2006, 22(2): 46-53.

[3] 索丽生, 李宁, 高安泽, 等. 水工设计手册(第 6 卷): 土石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.



(上接第 133 页)

有水管的进、出端均应作好清晰的标记以保证整个冷却过程中冷却水能按正确的方向流动。总管的布置应使管头的位置易于调换冷却水管中水流方向^[5]。

混凝土入仓时即可开始通水冷却,通水时间 7~10 d 左右。混凝土温度与水温之差不超过 20~25℃,冷却水温度控制在 10~15℃;通水开始至出现混凝土最高温度后 1 d,通水流量宜为 1.5~2.0 m³/h;出现最高温度 1 d 后,通水流量不宜超过 1.5 m³/h;泄洪洞、溢洪洞现场采用每 24 h 调整一次冷却水进出水方向,混凝土日降温幅度不超过 1℃。

6 结 语

高流速、大泄量的泄洪洞、溢洪洞抗冲耐磨混凝土要想达到镜面混凝土标准,工艺性试验的开展是必不可少的,通过试验确定模板材质、最佳振捣参数及脱模剂,可在一定程度上提高实现镜面混凝土目标的概率。温度控制措施是防止混凝土结构表面裂缝产生的重中之重,需严格执行温控要求。施工过程的质量控制是镜面混凝土实现的

[4] 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范:NB/T1 1015-2022[S].

[5] 碾压式土石坝设计规范:NB/T 10872-2021[S].

[6] 水电工程边坡设计规范:NB/T 10512-2021[S].

作者简介:

柏俊磊(1988-),男,湖北十堰人,高级工程师,硕士,从事水工设计及项目管理相关工作;

张华明(1967-),男,陕西汉中,人,正高级工程师,学士,从事水工设计及项目管理相关工作;

李天宇(1981-),男,辽宁本溪人,高级工程师,硕士,从事水工设计及项目管理相关工作;

李 进(1984-),男,湖北南漳人,工程师,硕士,从事水电工程建设管理工作。

(编辑:吴永红)

基础,应做好事前、事中控制,严格执行质量标准要求。纤维的掺加虽能改善混凝土的物理力学性能,但可能对混凝土外观质量不利,最终影响混凝土的镜面效果。

参考文献:

[1] 黄必虎. 水工“镜面”混凝土施工技术[J]. 建设机械技术与管理, 2008(5): 111-113.

[2] 杜新国. 镜面混凝土质量影响因素及结构稳定性研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(10): 27-31.

[3] 于洋. 浅谈水利水电隧道施工“镜面混凝土”保障措施[J]. 铁路采购与物流, 2023, 18(6): 59-61.

[4] 王丰,赵希平,陈伟民. 溪洛渡水电站泄洪洞抗冲耐磨混凝土施工技术[J]. 水利水电技术(中英文), 2013(4): 34-37.

[5] 杨士彬. 水电站泄洪洞工程温控技术研究[J]. 科技传播, 2012(10): 144, 149.

作者简介:

余建国(1994-),男,四川西昌人,工程师,工学学士,从事水利水电工程施工工作;

衣志勇(1989-),男,黑龙江哈尔滨人,工程师,本科,从事水利水电工程施工工作;

杨红富(1994-),男,云南大理人,助理工程师,本科,从事水利水电工程施工工作。

(编辑:吴永红)