

300 m 级面板堆石坝适应性及对策研究

马洪琪

(华能澜沧江水电有限公司,昆明 650214)

[摘要] 系统总结了 200 m 级面板坝建设的主要经验与教训,对 4 座 300 m 级面板坝典型工程进行了分析,提出了 300 m 级面板坝需要研究的基础科学和关键技术问题。

[关键词] 混凝土面板堆石坝;适应性;对策研究

[中图分类号] TV642.1 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)12-0004-05

1 前言

混凝土面板堆石坝由于具有良好的适应性、安全性和经济性,在国内外得到广泛采用。据统计,到 2008 年底,国外已建坝高 30 m 以上的现代面板坝约 275 座,坝高 150 m 以上的面板坝 10 座,最高的是马来西亚巴贡坝,高达 203.5 m。我国已建坝高 30 m 以上面板坝 170 座,其中坝高 150 m 以上的面板坝 7 座,最高的是水布垭坝,高 233 m,是目前世界上最高的混凝土面板堆石坝。

我国西部地区有丰富的水能资源,合理利用这些水资源,需要建高坝大库,进行径流调节。但这些高坝工程地处高山峡谷地区,交通不便,地震地质背景复杂。而高面板堆石坝可以直接利用当地材料,减少外来物资运输压力,具有对复杂地形地质条件适应性强、抗震性能优良等特点,在经济比较中具有明显的优势,因此面板堆石坝往往成为首选坝型。如古水、马吉、如美、茨哈峡等水电站,坝高都在 250~300 m。但目前国内外只有 200 m 级面板坝的建设经验,300 m 级面板坝的技术储备不足,其工程特性、关键技术和运行特点尚难把握。为此,由中国水电顾问集团公司、华能澜沧江水电有限公司、华电怒江水电有限公司牵头,联合国内勘测设计单位、科研院所和高等院校开展了“300 m 级面板堆石坝适应性及对策研究”^[1]课题。研究课题在总结 200 m

级面板堆石坝经验与教训的基础上,依托古水、马吉、如美和茨哈峡等水电工程,就 300 m 级面板坝的经济优势和筑坝条件、堆石分区和筑坝参数、稳定性评价与变形控制、防渗和止水结构、施工技术要求及质量控制等方面进行了系统的研究。现将主要研究成果介绍如下。

2 200 m 级面板坝的经验与教训

2.1 突出问题

2000 年以前建成的 200 m 级面板坝的设计与施工,基本上沿用 100 m 级面板坝的成熟经验和设计理念。如 1993 年墨西哥建成的 187 m 高的阿瓜密尔帕坝,2000 年建成的我国天生桥一级面板坝,坝高 178 m。其坝体断面分区见图 1 和图 2。这两座坝都出现了坝体沉降量大、面板水平向结构性裂缝多、面板与垫层料脱空、压缝面板混凝土挤压破坏、渗漏量较大等问题。究其原因,是人们的认识还停留在 100 m 级面板坝的经验阶段,没有从变形控制的角度对坝体断面分区、坝料特性、压实度等方面提出更高的要求。J. B. Cooke 认为,阿瓜密尔帕坝的水平拉伸裂缝是由于上下游堆石区过大沉降差所致,上游堆石区的压缩模量是下游堆石区压缩模量的 5.5 倍,压缩模量梯度太大,上游部分坝体向下游倾斜,导致面板裂缝。天生桥一级面板坝下游堆石区利用了砂岩及泥岩等软岩开挖料,上下游堆石区

[收稿日期] 2011-09-20

[作者简介] 马洪琪(1942—),男,上海市人,中国工程院院士,教授级高级工程师,华能澜沧江水电有限公司高级顾问,研究方向为水利水电工程施工;E-mail: mahq@lcsj.cn

的压缩模量比为2;此外,天生桥一级坝为了度汛的需要,先填筑上游坝体临时挡水断面,形成上下游堆石区高差达123 m,在汛后以1.0 m/d的速度将上下游堆石体填平,使上下游堆石区产生过大的沉降差,引起上游面拉伸变形,导致垫层料开裂,继而使面板与垫层料脱空,致使面板产生许多水平裂缝。另外,对堆石料的压实密度,也还停留在经验坝的阶段,如天生桥一级坝对上下游堆石区的孔隙率要求分别为22%和24%^[2]。以上分析可见,经验设计

认为“绝大部分水平荷载是通过坝轴线以上坝体传到地基中去的,而愈往下游堆石体对面板变形的影响愈小,故坝料变形模量可从上游到下游递减”的认识对150~200 m级面板坝是不完全适用的。高坝设计要重视变形控制。邴能惠提出,“坝体分区设计应遵循4条原则:料源决定原则、水力过渡原则、开挖料利用原则和变形协调原则。重点是变形协调原则,既要做到坝体各区的变形协调,又要做到坝体变形和面板变形之间的同步协调”^[3]。

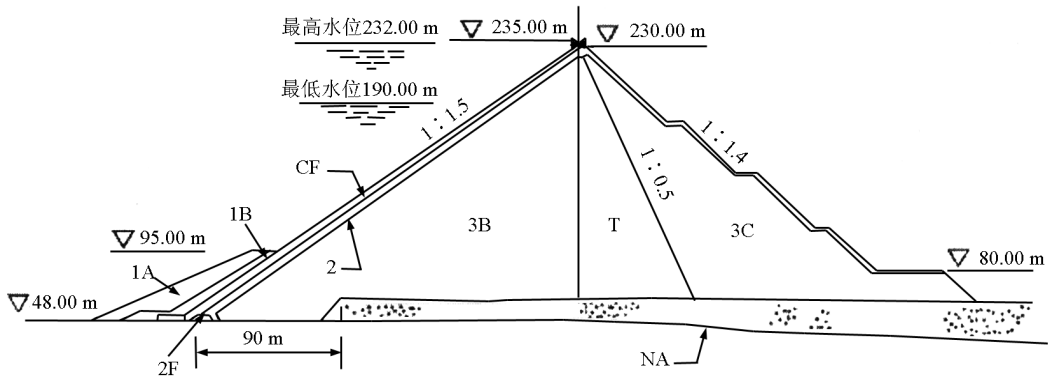


图1 阿瓜密尔帕坝断面分区
Fig. 1 Aguamilpa section partition

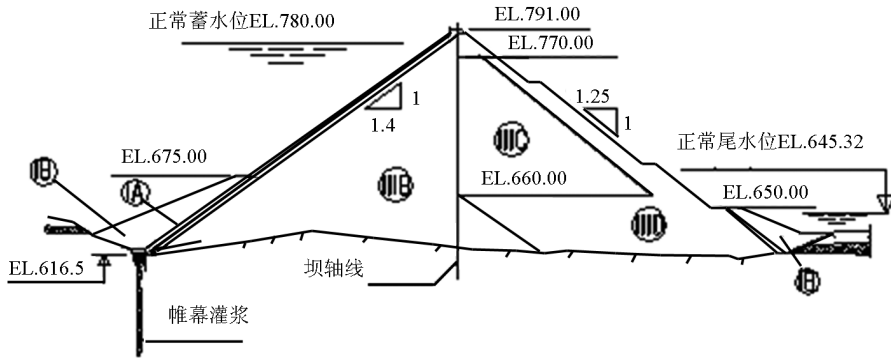


图2 天生桥一级坝断面分区
Fig. 2 Tianshengqiao dam section partition

2.2 主要经验

2000年以后我国已建、在建和拟建的面板堆石坝共18座,涉及各种不利的地形、地质条件和气候条件,工程设计建设总体上是成功的,积累了应对各种困难的经验。中国面板坝无论在数量上,还是在坝高和规模上,都处于世界前列,我国在引进消化吸收的基础上再创新,取得了领先世界的面板坝筑坝技术。如2005年建成的贵州洪家渡面板坝,坝高

179.5 m,2007年建成的贵州三板溪面板坝,坝高185.5 m,2007年建成的湖北水布垭面板坝,坝高233 m,这3座面板坝,虽然也还存在不同程度的面板结构性裂缝、面板脱空及压缝混凝土面板挤压破碎,但渗漏量小,总体运行良好。2006年建成的四川紫坪铺面板坝,坝高158 m,经受了“5·12”汶川特大地震的考验。

总结这些面板堆石坝的建设经验,主要有以下

几个方面:

2.2.1 断面分区设计

这3座200 m级面板坝吸取已建工程教训,在坝体分区上注意了渗流控制和变形控制,增大了上游堆石区的范围,上下游堆石区的分界线向下游倾斜,以减小下游堆石区变形对坝体上游堆石区与面板的影响。上下游堆石区采用同一料源,或尽量减

少上下游堆石区的压缩模量差,并在较陡岸坡和上部高程设置了特别碾压区(增模区),要求比主堆石区有更高的压实度,以协调变形。从渗流控制要求,坝体内有竖向和水平向排水区,使渗透水能顺利排至下游,使下游水位以上坝体保持干燥状态。典型的坝体断面见水布垭面板堆石坝断面分区设计(见图3)。

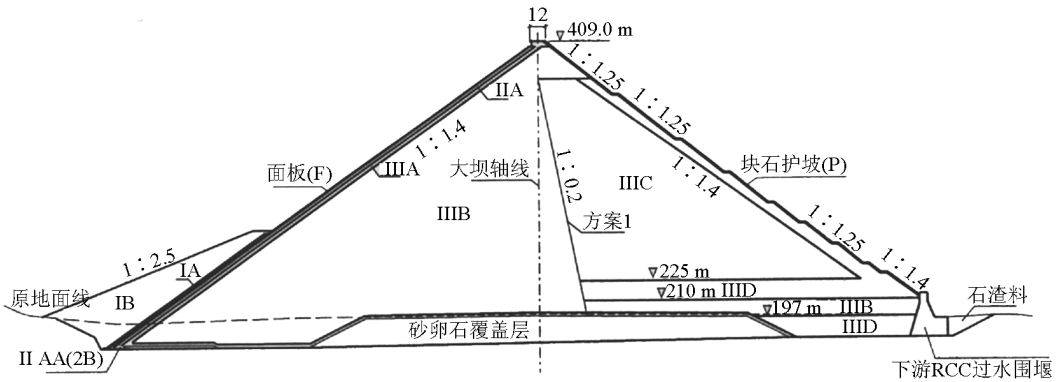


图3 水布垭坝断面分区

Fig. 3 Shuibuya dam section partition

2.2.2 压实标准

堆石体采用中等硬度以上级配良好的石料,要求孔隙率降低至20%以下,采用20~30 t的大型振动碾提高堆石体压实度,洪家渡和董菁坝还采用冲碾压实机,击振力达200~250 t。采用GPS监控技术实时在线控制施工质量,采用附加质量法等手段检测干密度。洪家渡、三板溪、水布垭上游堆石区的孔隙率分别为19.6%、17.62%、19.6%,下游堆石区的孔隙率分别为20.02%、19.48%、20.7%,比天生桥一级降低了2%~4%。3座堆石坝的最大沉降率分别为0.74%、0.78%和0.96%,而天生桥一级为1.94%,上下游堆石体的压缩模量比为1.3或更小^[2]。

2.2.3 筑坝分期

吸取天生桥一级坝上下游堆石体高差123 m的教训,摒弃了原有前高后低的填筑程序,注重将坝体施工填筑分期与坝体变形控制结合起来,除第一个汛期采用临时断面挡水度汛外,要求坝体填筑分期尽量做到上下游均衡上升,不可前高后低,可以后高前低,以减少上下游堆石体沉降差。在分期施工混凝土面板前,创新性地提出了堆石体预沉降控制理论,提出坝体预沉降控制的两项指标,即每期面板施工前,堆石体应有半年左右的预沉降周期,沉降变形

速率已趋于收敛,并要求面板的顶高程应低于堆石体15~20 m。这是避免或减少面板结构性裂缝的重要措施。

2.2.4 面板结构及接缝止水

面板顶部的厚度从30 cm加厚到40 cm,对于水库深度大于120 m范围的面板采用新的厚度计算公式 $T=0.0045H$ 。提高混凝土的防裂性能,掺复合外加剂和其他纤维性材料对混凝土改性。为防止面板挤压破坏,除提高混凝土强度等级外,在压性缝端部一定范围内设置挤压钢筋,并在压缝内嵌填富有弹性和具有吸收变形能力的嵌缝材料,同时减小底部铜止水鼻子高度,少削弱面板受压断面尺寸。

接缝止水结构形式从单一止水型向与自愈止水相结合发展。国内大多数工程都取消中部止水,加强表层止水,使止水结构更可靠。止水材料能适应较大的拉伸、剪切变形,其耐久性大幅提高,研发并广泛应用抗老化性好的三复合橡胶板盖层。

2.2.5 5座典型面板坝反演分析

为验证计算模型和计算参数,根据原型观测资料,对天生桥一级、洪家渡、三板溪、水布垭和巴贡5座200 m级面板坝进行反演分析,对计算模型及方法进行修正,以适应300 m面板堆石坝的应力变形计算,为建设300 m级面板堆石坝提供理论依据。

反演分析的基本结论^[1]：

1) 邓肯张 E-B 模型和沈珠江双屈服面流变模型在整体上适用于 200 m 级面板坝计算分析,能较好反映坝体内代表性测点的沉降、水平位移过程和坝体变形分布规律,可为工程设计、施工和运行管理提供参考依据。

2) 反演计算得到的模型参数与试验参数存在一定的差异,主要是室内试验缩尺效应与颗粒破碎机理不同,应力状态和应力路径不同,难以客观反映原级配粗粒料的力学特性。

3) 反演分析得到的沉降数值与实测比较接近,但偏小;而水平位移计算值明显大于实测值,其分布规律也有一定差异,可见模型在堆石体水平位移的模拟上尚存在一定缺陷。

4) 堆石体的徐变、湿变和劣变对高面板坝,特别是超高面板坝的沉降变形影响显著,现有模型尚不能较好反映堆石料的徐变特性。

3 300 m 级面板堆石坝典型工程分析

研究的依托工程为云南的古水,坝高 310 m,青海的茨哈峡,坝高 253 m,怒江的马吉,坝高 270 m,西藏的如美,坝高 315 m。

3.1 经济优势及筑坝条件

对 4 个依托工程的研究表明,从地形地质条件、天然建筑材料、坝基适应性、枢纽布置、施工强度及工期、筑坝条件等方面综合分析,面板堆石坝与其他坝型相比,具有较强的经济优势和广泛的适应性。可避免土料缺乏、质量不满足要求或占用耕地对环境 and 水土保持造成不利的影 响。工期可缩短一年,可节省投资数亿甚至数十亿元。

3.2 堆石分区、筑坝参数与变形特性

结合古水工程进行了堆石料性能试验和高应力作用下工程特性研究,提出了邓肯张 E-B 模型参数;开展了高应力状态下不同孔隙率堆石料大型渗透、三轴及压缩试验,进行了不同级配垫层料力学特性及渗流特性试验,提出了适宜于 300 m 级面板堆石坝筑坝材料的设计参数,重点研究了坝料分区、填筑程序、坝料密实度对坝体变形的影响,提出了坝体分区设计建议(见图 4)。

计算表明,这 4 座面板坝的坝体应力和变形、接缝位移、面板应力规律,与已建 200 m 级面板坝相比,未见明显异常和突变。采用硬岩材料筑坝的 300 m 级面板坝,孔隙率小于 20%,坝体沉降可控制在坝高的 1% 以内。

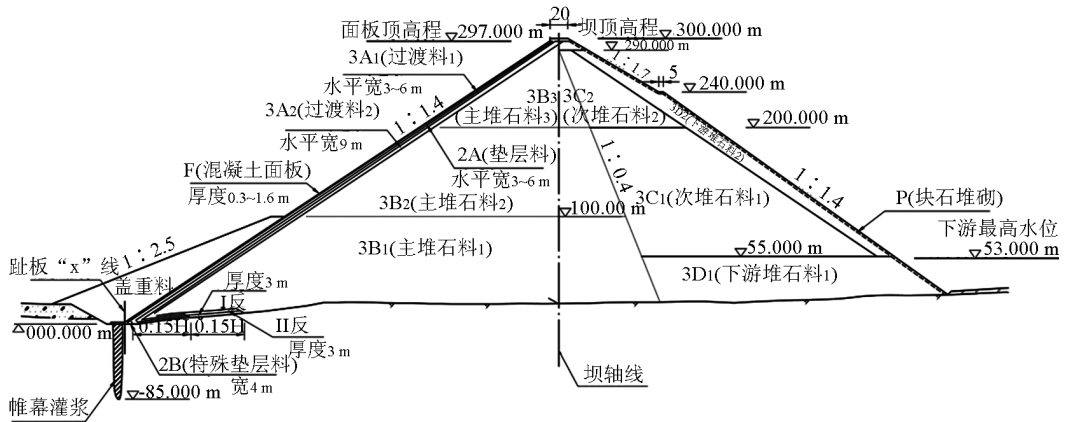


图 4 古水面板堆石坝断面分区

Fig. 4 The concrete face rockfill dam section partition

3.3 稳定性评价与变形控制标准

高面板堆石坝宜采用非线性强度指标进行坝坡稳定分析。采用中硬岩材料筑坝,在碾压密实的情况下,堆石体的坝坡稳定不会成为 300 m 级面板坝的制约因素。

要高度重视 300 m 级面板坝的渗透稳定问题,

对现有反滤准则的适应性进行了研究,提出可适当增厚垫层区和过渡区,并按反滤原则进行设计,必要时尚应通过试验论证。

分析已建工程堆石体变形的规律和特点,建立初始干密度与轴向和围压下强度与时间变形关系,考虑堆石体徐变变形影响,提出适应 300 m 级面板

坝本构模型改进方向和措施,要求更加注重堆石体自身变形的协调性和堆石体变形与面板变形的协调性,更加重视堆石体的长期变形特性,特别是风化变形、湿化变形和徐变变形。

3.4 防渗和止水系统

200 m 级面板坝工程实践表明,目前的塑性填料型和自愈性填料型止水系统都是有效的,塑性填料型止水系统还具有良好的抗震性能。对 300 m 级面板坝,按每道止水均能够独立起到止水作用进行设计是必要的。试验研究表明,适当结构形式和材质的顶部和底部止水结构均可基本满足 300 m 级面板坝的接缝止水要求。

压缝面板挤压破坏的初步研究结果表明,压性垂直缝两侧混凝土的挤压破坏是压应力集中造成的,通过适当的接缝衬垫材料设计,可减小应力集中。

4 300 m 级面板堆石坝应重点研究的突出问题

坝体变形控制和混凝土面板防裂是超高面板堆石坝的关键技术问题。200 m 级高面板堆石坝筑坝材料及断面设计、变形控制措施和面板防裂技术基本可以供 300 m 级高面板堆石坝借鉴,但一些措施在 300 m 级面板堆石坝中应用的针对性和效果还需检验。随着坝体高度增加,堆石体应力水平增大,徐变特性明显,坝体后期变形对面板工作特性有较大的影响。目前 200 m 级高面板堆石坝的计算模型、试验手段仍然有一定局限性,理论分析结果与监测结果也仅仅是一定程度地吻合。计算模型和试验手段的局限性引起的预测误差,200 m 级面板堆石坝尚在控制范围之内,而 300 m 级面板堆石坝是否存在由量到质的变化,其计算模型、试验手段均需要改进,定量分析需要更准确、可靠。对 300 m 级面板堆石坝,还需进一步开展基础科学和关键技术研究^[1]。

1) 选择建设条件较好的 300 m 级面板堆石坝作为依托工程,深入开展坝体稳定、应力变形和面板防裂等关键技术研究及相应的施工技术研究。

2) 深入开展与坝高、河谷形状及堆石料原岩特性相适应的堆石体密实度指标、坝体断面分区等研究。按坝体变形控制要求,提出满足坝坡抗滑稳定和坝料渗透稳定的坝料设计准则、分区设计原则。

3) 进一步探讨采用非线性强度指标进行 300 m

级面板堆石坝坝坡稳定分析的适应性,研究 300 m 级面板堆石坝坝坡稳定设计准则。开展超高水头作用下大尺度堆石体的渗透破坏试验技术研究。

4) 研制更大尺度的试验设备,提高大型试验设备的稳定性和精确性,开展堆石体大尺度试验技术研究、原位及数值试验研究,在堆石体复杂应力路径的试验手段上有所突破。

5) 研究合理的堆石体本构模型和参数的确定方法,探索更为合理的接触面模型和模拟手段,发展更为精细的模拟方法,提高数值模拟的精细度,从微观角度研究堆石体变形机理,合理进行坝体变形预测。

6) 深入开展高面板堆石坝垂直缝挤压破坏机理和原因分析,预测 300 m 级面板堆石坝挤压破坏可能性,从控制坝体变形和提高面板抗挤压等方面提出面板结构和材料措施。

7) 研究与 300 m 级面板堆石坝接缝张开、沉降、剪切等大变形相适应的止水结构及材料。对已有止水结构进行改进,增强止水结构的自愈性和大变形高水头下的稳定性。

8) 结合已有面板堆石坝的抗震实例,系统地归纳总结各种抗震方法和工程抗震措施,研究其针对性、可靠性和作用机理,提出相应的抗震加固措施。

9) 对 750 m 级超长垂直水平位移计的适应性以及耐久性进行研究,积极发展新型坝体变形监测技术。开发 300 m 级面板堆石坝变形实时动态智能反馈与预测系统,实时高效地为堆石坝的后续施工提供技术支撑。

10) 结合依托工程,研究制定适应于 300 m 级面板堆石坝的施工导流、填筑分期、上下游堆石体高差、分期面板顶部堆石体超高的控制标准,制定恰当的压实标准和质量控制标准、预沉降控制标准,研制大型碾压机具,提高堆石体的压实度。

参考文献

- [1] 中国水电工程顾问集团公司,华能澜沧江水电有限公司,华电怒江水电有限公司. 300 m 级面板堆石坝适应性及对策研究报告[R]. 2010.
- [2] 马洪琪,曹克明. 超高面板坝的关键技术问题[J]. 中国工程科学,2007,9(11):4-10.
- [3] 鄯能惠. 高混凝土面板堆石坝设计理念探讨[J]. 岩土工程学报,2007,29(8):1143-1150.

(下转 19 页)