

水布垭大坝工程混凝土温控与防裂问题浅析

闫 磊¹, 阙 巍²

(1. 华中科技大学土木学院, 湖北 武汉 430074; 2. 厦门大学经济学院, 福建 厦门 361005)

摘要 湖北清江水布垭工程是目前世界上最高的混凝土面板堆石坝, 其抗裂性、耐久性问题是该工程所面临的三大技术难题之一。以水布垭工程实践为例, 对 200 m 级混凝土面板堆石坝的面板抗裂性、耐久性问题进行了分析探讨, 提出了为防止或减少混凝土面板裂缝的发生, 应多管齐下, 从材料选择、结构设计、温度控制、施工工艺等多方面进行严格控制。

关键词 混凝土面板堆石坝 温度控制 防裂 水布垭工程

中图分类号: TV641.4+3

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2004)07-0077-03

1 工程概况

水布垭工程位于湖北省巴东县, 是长江三峡下游支流——清江梯级开发的控制工程, 上距恩施市 117 km, 下距隔河岩工程 92 km, 距河口 153 km, 工程开发的主要任务是发电和防洪。其坝址控制流域面积 10860 km², 多年平均降雨量 1500 mm, 多年平均流量 299 m³/s, 多年平均年径流量 94.4 亿 m³。坝址实测最大流量 12400 m³/s, 调查历史最大流量 14500 m³/s, 多年平均年输沙量 670 万 t, 平均含沙量 0.59 kg/m³。工程的设计蓄水位 400 m, 相应库容 43.12 亿 m³, 是一座多年调节水库。水电站保证出力 310 MW, 年平均发电量 39.2 亿 kW·h, 在电网中担负调峰调频任务^[1]。

湖北清江水布垭工程坝高 233 m, 是目前世界上最高的混凝土面板堆石坝, 主要面临三大技术难题: 200 m 级以上的高坝能否选用混凝土面板堆石坝这一坝型, 筑坝石料能否就地取材, 如何解决混凝土面板抗裂性、耐久性问题, 大坝周边缝选择何种结构和止水材料。这三大难题的解决, 国内没有先例, 国际上也没有现成经验。业主清江水电开发有限公司与国内外专家经过 5 年努力, 终于攻克了这三大世界级技术难题, 获得经济效益超过 22 亿元。

水布垭枢纽的混凝土工程除溢流堰属大体积混凝土外, 其他部位的混凝土结构复杂, 多属于薄壁(板)或墩、柱结构, 其防裂极难控制。若混凝土面板出现裂缝, 将严重影响面板的耐久性。孙役^[2]于 2004 年指出, 混凝土干缩和温度应力是造成面板早

期裂缝产生的主要因素, 而坝体变形所造成的压力、面板的自重及施工期反向水压力则是面板后期开裂的主要因素。因此, 进行相应的混凝土温控与防裂控制设计是十分必要的。

2 混凝土温度控制设计

2.1 基本资料

由于水布垭坝址没有气象观测资料, 故采用邻近长阳水文气象站的观测资料。

a. 气温。根据长阳水文气象站 1960~1991 年系列的观测资料, 多年平均气温为 16.4℃。

b. 水温。根据长阳水文水文站 1960~1987 年实测水温资料, 多年平均水温为 16.4℃。

c. 地温。长阳水文站 1962~1991 年实测 20 cm 深的多年平均地温为 18.0℃。

d. 风速。长阳水文站 1962~1991 年实测多年平均风速为 1.2 m/s, 1959~1991 年实测多年最大风速为 16 m/s。

e. 胶凝材料水化热。长江科学院对不同粉煤灰掺量下低热 425 号和中热 525 号水泥进行试验, 所产生的水化热温升见表 1。

2.2 设计成果^[3]

a. 库表水温。根据工程的坝址、水温、气温及其他气象因素, 并参考已建水库的资料, 从偏于安全考虑, 库表水温年平均取值取 18.0℃。

b. 库底水温。水布垭水库属分层型水库, 库水深达 233 m, 库底能形成较稳定的低温水层。库底水温的确定, 国内外尚无成熟的方法。经过多种方法计

表 1 胶凝材料的水化热温升

水泥 品种	掺灰 量/%	各龄期水化热温升/(J·g ⁻¹)						
		1d	2d	3d	4d	5d	6d	7d
低热 425 号	0	23.05	92.15	163.65	183.47	196.11	204.58	210.41
低热 425 号	15	22.62	31.69	104.95	149.32	170.48	184.81	194.88
低热 425 号	20	22.96	26.58	74.73	140.75	166.61	183.12	194.98
中热 525 号	0	143.03	193.87	222.90	240.60	250.90	256.72	259.94
中热 525 号	15	120.01	168.10	195.71	213.98	227.74	236.54	241.54

注：资料来源于长江科学院 2001 年 2 月试验资料。

算,并与已建水库实测库底水温进行类比,拟定库底水温为 11℃。

c. 库水温垂直分布. 库水温垂直分布规律较符合幂函数的分布规律. 通过拟合,其分布规律为

$$T_y = 18 - 0.065y + 1.6183 \times 10^{-4}y^2 - 4.98246 \times 10^{-8}y^3$$

式中: T_y 为垂直方向(y 向)的库水温。

d. 气温. 气温年平均值为 16.4℃,考虑到辐射热的影响,年均升温值 2~3℃。

e. 准稳定温度场. 面板、电站厂房底板等结构,散热厚度较薄,一般可视为半无限体或无限平板,不存在稳定温度场,只存在施工期或运行期的准稳定温度场^[4]。不同厚度半无限体准稳定温度(受气温影响)见表 2。溢流堰基础约束区平均稳定温度为 16.5℃。

表 2 半无限体准稳定温度

厚度/m	温度/℃	厚度/m	温度/℃	厚度/m	温度/℃
1	6.6	5	11.3	12.0	14.3
2	8.1	6	12.0	14	14.6
3	9.4	8	13.1	16	14.8
4	10.4	10	13.8		

2.3 混凝土温度控制标准

a. 基础温差. 水布垭工程混凝土基础允许温差与浇筑块长边尺寸、浇筑高度有关^①。陡坡、填塘混凝土温度控制适当加严,洞室混凝土适当放宽,趾板配有温度钢筋,基础允许温差按 26~28℃考虑。由于面板基础与岩石不同,其基础温差有待进一步研究,暂按 24~26℃考虑。

b. 块体最高温度控制标准. 参照部分已建工程的经验,并兼顾混凝土内外温差要求和实际施工条件,对均匀上升浇筑块,各季节混凝土块体最高温度控制标准按表 3^①执行。

表 3 混凝土温度控制标准

水泥 品种	不同月份混凝土温度控制标准/℃				
	12,1,2月	3,11月	4,10月	5,9月	6,7,8月
≤R ₂₈ 200 号	23~25	27~29	31	34~35	36~38
≥R ₂₈ 250 号	24~27	29~30	31~33	34~36	37~39

c. 块体设计允许最高温度. 对于基础约束区混

凝土,按基础允许温差加上坝体稳定温度与块体最高温度控制标准的较小值确定;对于均匀上升的脱离基础约束区的混凝土,按块体最高温度控制标准确定。为减小面板混凝土裂缝的发生几率,原则上避免夏季浇筑,春秋季控制最高温度不超过 31~33℃。趾板为嵌固板,配有钢筋,按限裂考虑,高温季节(5~9月)控制最高温度不超过 33~35℃,可有效防止贯穿裂缝的产生。

3 防裂设计

水布垭大坝混凝土工程量较大,在满足结构设计对混凝土各项性能指标要求的前提下,合理选用各部位混凝土的特性指标,对原材料提出必要的质量要求,并提出混凝土施工质量的评定标准和温控防裂措施是保证抗裂性能的根本手段。

混凝土裂缝产生原因较复杂,一般主要有变形、温度应力和干缩应力等,故从原材料选择、配合比、结构设计、温度控制、施工工艺等方面采取措施,保证混凝土施工质量,防止或减少裂缝的产生。

3.1 提高混凝土自身抗裂能力

严格优化选择原材料(水泥、粉煤灰、骨料、外加剂等),合理设计配合比,使混凝土具有良好的和易性、耐久性的同时,还具有较强的抗裂性。施工过程中应保证原材料的质量。

3.2 合理分缝分块

合理的分缝分块,可减少混凝土块体尺寸,减小基础约束应力,防止或减少裂缝的发生。

面板分缝. 垂直缝间距 16m,在两坝肩受拉区的垂直缝间距为 8m;水平方向设两条施工缝,分别位于高程 280m 和 360m。趾板分缝. 趾板沿长度方向设施工缝,在左右岸趾板转折点和地质缺陷处,为适应不均匀沉降设伸缩缝,施工缝最大间距不宜超过 25~30m。溢流堰坝段分缝. 溢流堰坝段横缝间距 15.1~25.5m,溢流堰最大底宽 69.7m,暂设一道纵缝。地下厂房分缝. 地下厂房结构复杂,一般采用错缝为主,结合直缝分块。

3.3 合理安排施工程序和进度

合理安排施工程序和进度是防止混凝土裂缝产生的主要措施之一。面板、趾板、厂房底板以及基础约束区混凝土应尽量安排在低温季节施工。

3.4 控制块体最高温度

采取必要的温控措施,使块体实际出现的最高温度不超过块体设计允许的最高温度。控制块体实际最高温度的有效措施包括:降低混凝土浇筑温度,

①清江水电开发有限公司. 水布垭工程组织设计, 2000.

减少胶凝材料的水化热温升,降低出机口温度,减少运输途中或仓面的温度回升。夏天浇筑面板、趾板及基础约束区混凝土,应采取制冷措施,控制出机口温度 14℃,并严格控制混凝土层间间歇期。

3.5 加强表面保护和养护

3.5.1 保温

在外界气温骤降期间,应重视面板、基础约束区及其他主要结构部位的表面保护,冬季应对孔口、洞口进行封堵。

新浇混凝土的顶侧面:遇日平均气温在 2~3 d 内降温大于 6~8℃时,基础约束区混凝土龄期大于 3 d,一般部位龄期大于 5 d 的,需要进行表面保护。

基础约束区永久暴露面:10~4 月份浇筑的混凝土,浇完拆模后即设永久保温层;5 月份浇筑的混凝土,9 月初设永久保温层。立模时表面保护材料(可选聚乙烯泡沫板)固定在模板内侧,拆模后留在混凝土表面上。

在气温骤降期间,混凝土顶面保温至上层混凝土浇筑为止,揭开保温材料至上层混凝土浇筑的间歇期不应超过 12h。棱角部位应加强保护。大风天气应确保保温材料对混凝土表面的覆盖牢固、紧密。

3.5.2 保湿

混凝土初凝后,可采取洒水或喷雾等方式进行养护,保持混凝土表面湿润,减少表面干缩裂缝的发生。面板(趾板)表面应保持湿润,直到水库蓄水为止。对一般浇筑层连续养护至上一层混凝土浇筑前。对较长暴露面一般部位,养护 21 d;重要部位不少于 28 d。

3.6 合理控制浇筑层厚及间歇期

面板(趾板)等薄板结构一次浇筑成型,大坝等部位基础约束区浇筑层厚一般为 1.5~2.0 m,脱离基础约束区浇筑层厚一般为 1.5~3.0 m。填塘混凝土深度小于 3 m 的部位,一般不再分层;深度大于 3 m 的部位分层浇筑,分层厚度 1~1.5 m,待冷却到基岩温度后再上升,必要时应埋设冷却水管进行初期冷却。混凝土浇筑层厚和层间间歇期见表 4^①,最长间歇期不宜超过 15 d。

表 4 层间间歇期

层厚/m	层间间歇期/d			
	12~2 月	3~5 月	9~11 月	6~8 月
1.5	4~7	5~7	5~7	6~10
2.0	5~7	6~10	6~10	7~10

3.7 提高施工工艺,加强施工管理

面板防裂是关键的施工技术之一,为减少和防

止面板裂缝,应注意:①在面板浇筑前,相应的坝体沉陷变形应趋于稳定;②面板垫层应密实、平整,防止过大的沉降和起伏差;③面板厚度应均匀变化,防止应力集中;④严格控制滑模拉升速度,防止黏结拉裂,加强人工抹面,保持表面光滑;⑤改善溜槽出口的布料方式,防止粗骨料集中;⑥堆石体沉降应基本稳定,防止产生变形破坏;⑦对钢化纤维混凝土进行研究,利用其抗裂性高、变形适应性强等优点,提高面板混凝土的防裂和抗渗性能。

4 结 语

混凝土面板堆石坝是极有发展前途的一种新坝型,但如何解决面板抗裂性、耐久性问题极其关键。为防止混凝土面板裂缝,提高防渗能力,应该多管齐下,从材料、结构和施工等方面严格控制。水布垭工程在这方面做出了有益尝试,为国内 200 m 级混凝土面板堆石坝的修建提供了可借鉴的成功经验。

参考文献:

[1] 岳中明,杨清.中国水布垭工程——世界上最高的面板坝[J].水利学报,2000(9):.

[2] 孙役,燕乔,王云清.面板堆石坝面板开裂机理与防止措施研究[J].水力发电,2004(2):30~32.

[3] 傅志安,凤家骥.混凝土面板堆石坝[M].武昌:华中理工大学出版社,1993.140.

(收稿日期 2004-04-23 编辑 骆超)

(上接第 66 页)

自动化系统,没有配置 RCS-9000 后台监控系统,目前对 110 kV 系统的操作只能在现场进行。

b. 淮阴二站自动化设备较多,通信规约许多互不相同,设计院在施工中未能协调好各方面关系,使得施工不能顺利进行。

c. 美国通用电气公司生产的 M60 电动机管理继电器功能强大,淮阴二站仅用其一小部分功能,且 M60 继电器最主要的热模式保护功能并未投入使用。

参考文献:

[1] 杨洪群.淮阴第二抽水站变电所 GIS 设备选型[J].江苏水利,2000(9):26~27.

[2] 孔庆霞,范景林.大型同步电动机无刷励磁在淮阴二站中的应用[J].淮阴工学院学报,2000(4):30~32.

(收稿日期 2004-02-18 编辑 熊水斌)

①清江水电开发有限公司.水布垭工程组织设计,2000.