

中国碾压混凝土筑坝技术

ZHONGGUO NIANYA HUNNINGTU ZHUBA JISHU

2010

主 编 张严明

副主编 李虎章 杨 萍



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国碾压混凝土 筑坝技术 2010

主 编 张严明
副主编 李虎章 杨 萍



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

在中国水力资源极为丰富的西南地区,修建高坝,加快清洁能源开发,是国家能源发展战略。采用碾压混凝土筑坝技术,具有快速、经济等优势,一直得到坝工界的青睐。本书收集的贵州沙沱等碾压混凝土大坝建设中管理和施工技术成果,主要有碾压混凝土拌和料入仓手段、材料配合比、掺合料选择及坝体高温季节施工技术等内容。

本书可供类似工程设计、施工、科研等部门有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国碾压混凝土筑坝技术. 2010/张严明主编. —北京:中国水利水电出版社, 2010. 9

ISBN 978-7-5084-7887-6

I. ①中… II. ①张… III. ①碾压土坝: 混凝土坝-文集 IV. ①TV642. 2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 178981 号

书 名	中国碾压混凝土筑坝技术 2010
作 者	主编 张严明 副主编 李虎章 杨 萍
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国人民大学出版社印刷厂
印 刷	北京海洋印刷厂
规 格	210mm×297mm 16 开本 19.75 印张 584 千字
版 次	2010 年 9 月第 1 版 2010 年 9 月第 1 次印刷
印 数	001—800 册
定 价	78.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

主 编 单 位

中国水力发电工程学会碾压混凝土筑坝专业委员会
中国水利学会碾压混凝土筑坝专业委员会
中国人民武装警察部队水电第一总队

编 辑 委 员 会

(按姓氏笔画排序)

于子忠	王进春	方坤河	孙玉琳	刘兴荣
李虎章	李春敏	吴元东	张严明	杨 萍
杨多根	陈祖荣	周光奉	宗敦锋	郑桂斌
姚元成	贾金生	梅锦煜	潘罗生	

会议主办单位

中国水力发电工程学会碾压混凝土筑坝专业委员会
中国水利学会碾压混凝土筑坝专业委员会

会议承办单位

中国人民武装警察部队水电第一总队
金安桥水电站有限公司
贵州乌江水电开发有限责任公司沙沱电站建设公司

会议协办单位

贵州乌江沙沱水电站大坝土建工程福贵联营体
石家庄市长安育才建材有限公司
中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院

前 言

中国水力发电工程学会碾压混凝土筑坝专业委员会和中国水利学会碾压混凝土筑坝专业委员会成立 20 多年以来,一直积极地打造碾压混凝土筑坝技术交流平台,组织全国性学术交流,促进碾压混凝土技术研究、交流及推广应用工作。同时,促进建设、设计、施工、科研等单位之间的通力合作,展示碾压混凝土筑坝技术成就,不断推动碾压混凝土筑坝技术的进步和发展。几十年来,专委会紧密结合碾压混凝土筑坝技术不同时期的发展状况和特点,每年都有放矢地选择特定主题,全方位开展各类交流,成效显著。

本书以贵州乌江沙沱水电站、云南金沙江金安桥水电站工程建设为主题,同时收入了近期中国碾压混凝土筑坝技术的建设、设计、施工、科研和运行管理等方面技术成果,以供 2010 年度学术交流会议使用。

此书出版得到了贵州乌江水电开发有限责任公司沙沱电站建设公司、中国人民武装警察部队水电第一总队和金安桥水电站有限公司等单位的大力支持,在此,谨表示衷心地感谢!

编 者

2010 年 8 月

目 录

前 言

综 合

沙沱水电工程的技术创新和管理创新	吴元东 郭定明	(3)
沙沱水电站碾压混凝土高温季节温控措施	蒋廷军 李虎章	(7)
沙沱水电站大坝工程施工特点和难点综述	杨兴贵 范雄安 杨景华	(11)
官地碾压混凝土重力坝的抗震分析	童 伟 张连明 范书立	(18)
沙沱水电站碾压混凝土重力坝设计	苏 鹏 张海超 何福娟等	(24)
官地水电站碾压混凝土重力坝设计	陈 强 张连明 彭文明	(30)
铜街子水电站碾压混凝土坝安全监测 19 年成果分析	魏大智 谭登明 沈定斌	(36)
碾压混凝土筑坝的几点思考	刘洪超 张建龙 李金磊等	(49)
金安桥水电站大坝工程碾压混凝土施工工法的制定与执行	王广茂 俞 猛	(54)
混凝土输送系统在水电施工中的应用研究	马作兴 朱自学 何永忠等	(59)
沙沱水电站碾压混凝土施工技术应用	张 庆 罗 敏 周先练等	(70)
沙沱水电站大坝土建工程施工监理工作实践和体会	杨兴贵	(76)

施 工

大倾角皮带机在碾压混凝土运输中的研究与应用	蒋廷军 李金良 由淑明等	(83)
沙沱水电站大坝基础强岩溶矩阵式渗漏通道处理实践	张海超 范雄安 蒋廷军	(92)
磷渣微粉在沙沱水电站碾压混凝土工程中的应用	朱国忠 李宏伟	(96)
沙沱水电站碾压混凝土仓面质量控制	高明友 樊 洪	(102)
沙沱水电站箱式满管垂直输送混凝土新技术	陈祖荣 吴友旺 徐益群	(105)
沙沱水电站施工技术创新	陈祖荣 蒋亨强 陈其足等	(110)
金安桥大坝碾压混凝土快速施工关键技术	田育功 冯美升	(117)
大坝碾压混凝土斜层碾压施工工艺的应用	王有德 王彦宏	(123)
缓角度长满管溜槽垂直输送碾压混凝土的施工技术研究	陈永明 郝文旭	(126)
大体积碾压混凝土温度性能研究	魏治文 朱国忠	(129)
缅甸耶涯水电站长缓凝碾压混凝土大仓位薄层连续高强度施工技术	叶志江 谭文华 孙 琦	(133)

金安桥水电站大坝碾压混凝土配合比优化与混凝土质量·····	谢永英	李先镇	(140)
金安桥水电站大坝温度控制及思考·····	刘洪超	张建龙	(152)
金安桥大坝碾压混凝土芯样及原位抗剪试验·····		李迪光	(159)
新型贫胶硬填料筑坝技术研究应用·····	魏建忠	吴祖廷 吴友旺等	(164)
碾压混凝土施工成本控制·····	罗 罡	詹筱霞	(172)
沙沱水电站大倾角波状挡边带式输送机设计及计算·····	李金良	蒋廷军 樊孝忠	(175)

材 料

四级配碾压混凝土拌和物性能试验研究·····	吴元东	李家正 郭定明	(183)
沙沱水电站半干式制砂工艺的优质低碳技术研究与应用·····	王忠禄	张昌晶	(186)
磷渣粉的掺入使碾压混凝土缓凝的机理研究·····	方坤河	陈 霞	(194)
金安桥玄武岩骨料碾压混凝土性能研究与应用·····	田育功	雷俊杰 张建龙	(201)
缓凝组分在碾压混凝土多复杂影响因素下的成功选用·····		王 鑫	(211)
天然砂在碾压混凝土中的生产利用及控制·····	高居生	马合沙提 米国才	(216)
掺磷渣粉与粉煤灰的碾压混凝土性能比较研究·····	杨华美	林育强 杨华全等	(221)
粗骨料裹粉对混凝土性能影响的研究·····	周启坤	何湘安 王元安	(228)
功果桥大坝砂岩骨料的碾压混凝土特性·····	王述银	覃理利 周世华	(232)
混凝土抗溶出性侵蚀试验方法研究·····	阮 燕	方坤河	(236)
“双超”混凝土筑坝技术研究应用·····	魏建忠	吴祖廷 吴友旺	(242)
灰坝灰用作碾压混凝土掺合料的可行性研究·····	王迎春	石 妍 杨华全等	(250)
外掺不同细度石粉对碾压混凝土性能的研究·····	周启坤	李迪光 王元安	(255)
含石灰石粉和粉煤灰复合胶凝材料的抗硫酸盐侵蚀特性·····	刘数华	阎培渝	(259)
石灰石粉对碳酸盐骨料 ASR 活性的抑制研究 ·····	吴定燕	方坤河 刘永和	(266)

科 研

碾压混凝土重力坝温控防裂仿真研究·····	杨 萍	胡 平 刘 玉	(273)
保持高抗冻碾压混凝土含气量的试验研究·····	魏振刚	高建山	(279)
高寒地区某碾压混凝土重力坝保温措施及应用效果分析·····	阮新民	夏世法 鲁一晖等	(284)
基于生长连接模型对碾压混凝土温度场仿真分析中的探索·····	彭文明	段云岭 杜效鹄	(291)
神经网络在碾压混凝土坝温度场反分析中的应用·····		于 猛	(297)
高温季节碾压混凝土通水冷却效果简析·····	张发勇	范雄安	(303)

综合

沙沱水电工程的技术创新和管理创新

吴元东 郭定明

(贵州乌江水电开发有限责任公司 贵州贵阳 550002)

【摘 要】 水电开发建设是一项复杂的系统工程,必须创新管理,遵循工程建设与自然和谐、与社会和谐的原则,本文提出将环保理念融入工程技术,以工程促移民,坚持以技术为核心的综合管理和以技术为核心的风险管理,推进水电工程又好又快建设。

1 概述

乌江为长江右岸最大支流,多年平均径流量 534 亿 m^3 ,集中落差 2124m,是我国十二大水电基地之一。沙沱水电站位于贵州省沿河县城上游约 7km 处,是乌江干流开发选定方案中的第 9 级,也是乌江在贵州境内的最后一个在建梯级电站。电站总库容 9.10 亿 m^3 ,属日调节水库,装机 1120MW,多年平均发电量 45.52 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$;枢纽由碾压混凝土重力坝、坝身溢流表孔、左岸引水坝段、坝后厂房及右岸垂直升船机等建筑物组成。最大坝高 101m,坝长 631m。工程计划 2012 年首台机组投产。

沙沱水电站移民 1.8 万余人,其中施工区移民就近 3000 人,坝址位于县城附近,人口集中,农民人均耕地不足半亩,电站开工后失地移民不愿外迁,社会环境复杂。

2 技术创新

2.1 磷矿渣筑坝技术

贵州有大量的磷矿渣占用土地堆放,对环境有一定的影响,为了开发利用,将其变废为宝,不仅对环保有利,还能解决大坝用粉煤灰紧缺的问题。乌江公司在索风营水电站和构皮滩水电站就对磷矿渣作为筑坝材料进行过系统研究,取得了大量研究成果。但由于诸多因素制约,最终未能大规模使用,沙沱水电站工程重点在磷矿渣生产和运用进行研究,成果表明:采用不同比例的粉煤灰和磷矿渣粉进行混掺,在碾压混凝土中,磷矿渣粉比例为总掺合料掺量的 0%~50% 范围。碾压混凝土的工作性好,包裹充分,振动时泛浆快,振后混凝土塑弹性好,当比例超过总掺量的 50% 后,碾压混凝土工作性变差,骨料有分离现象,振动泛浆慢,且混凝土不易振捣密实;在常态混凝土中,磷矿渣粉比例为总掺量的 0%~50% 范围,混凝土的和易性好,浆体含量丰富,振动时泛浆快,当比例超过总掺量的 50% 后,混凝土和易性变差,骨料有分离现象,混凝土不易振捣密实。试验还证明:采用粉煤灰和磷矿渣粉按照 1:1 进行混掺时,对于碾压和常态混凝土不同龄期混凝土强度、变形、耐久性能等指标和单掺粉煤灰比较均有提高,但弹性模量较单掺粉煤灰稍大,利用这一特性,在进行配合比设计时,可以降低水泥的用量,同时混凝土泌水和干缩比单掺粉煤灰小,有效解决了单掺磷矿渣粉混凝土泌水大、干缩大这一困扰工程界的难题。

沙沱水电站工程在国内首次大规模使用磷矿渣与粉煤灰混掺作为筑坝材料,至今已浇筑近 60 万 m^3 混凝土,各项物理、力学指标完全满足设计要求,保证了工程质量,同时在配合比设计中利用其特性,降低了水泥用量。

2.2 砂石系统“半干法”制砂技术的提升

碾压混凝土由于用砂量大,用水量少,尤其是对砂的含水波动特别敏感,传统的棒磨机制砂由于采用“全湿法”工艺,导致砂的含水量远超规范要求,必须采用强制脱水和建很大的砂仓进行自然脱水,投入很大且影响高峰期混凝土产量,“全干法”制砂由于砂中含泥等有害成分,会影响混凝土的性

能。“半干法”制砂工艺很好地解决了上述问题,在索风营水电站首次成功运用后,又在沙沱砂石系统进一步对“半干法”制砂技术进行了提升,通过加大制砂车间调节仓容,调整制砂机线速度和破碎腔锤头提高出砂比率,采用聚氨酯高频振动筛提高砂筛余率,增加制粉车间动态调整碾压砂的石粉含量,生产废水按照零排放的要求进行处理后再利用,系统产生污染少,为工程提供了优质的砂石骨料。

2.3 复杂岩溶地基堵漏综合技术

沙沱水电站坝基岩石呈缓倾角层状构造,发育矩阵式网状分布深切溶蚀裂隙,基坑最大渗漏量超过 $1\text{m}^3/\text{s}$,且为有压流,基坑开挖和基础混凝土浇筑难度较大。通过数次深入勘探,无法找到渗漏通道,渗漏通道呈矩阵式网状分布,即使找到某一通道用常规方法堵漏效果也欠佳。由于大坝基础渗漏源众多,采用堵源头的方案往往效果差,因此,须调整思路,将堵源头的方案调整为堵出口,利用“排除法”即“头痛医头脚痛医脚”的方法使问题简单、具体化。通过研究,放弃了堵渗漏源头的常规措施,在坝体结构末端采用排除法堵出口,以期形成静水状态,然后再采用常规基础处理方式施工。

在矩阵式网状分布有压岩溶渗漏通道进行系统性灌浆堵漏效果差,对于不同类型渗漏通道分别采取了膜袋灌浆、大流量泵送砂浆、膏浆及黏土混合物等灌浆处理措施。对于短渗径、高流速岩溶通道的堵漏,由于流速快,通道窄(有的只有 1cm 左右),堵漏难度极大,其施工工艺和材料是关键,在施工中分别采用在水泥砂浆中添加高黏性、低流动物质(如黏土)形成塑性砂浆,并利用泵送混凝土工艺将塑性浆液瞬间大流量挤压入矩阵式网状分布的小裂隙是非常有效的手段,成功地解决了大坝基础极其复杂的渗漏,达到大坝基础处理要求,确保了工程进度目标,为类似工程提供了成功经验。

2.4 “双超”混凝土筑坝材料及工艺

“双超”(“双超”混凝土:即混凝土所使用骨料为基坑开挖的任意料,最大粒径超过 500mm ,为超大骨料;胶凝材料用量少于 $40\sim 60\text{kg}$,为超少胶材)混凝土坝是材料和工艺的突破,集当前最具竞争能力的混凝土面板堆石坝与碾压混凝土坝两种坝型之优势。“双超”混凝土筑坝技术是一种新型的碾压混凝土筑坝技术,是介于胶凝砂砾石(CSG)与面板堆石坝之间的一种全新筑坝技术。“双超”混凝土筑坝技术是在坝址附近易于得到的河床砂砾石或开挖弃渣等材料中加入少量胶凝材料,经现场简单拌和后碾压而成的坝体施工技术。其特点是:骨料就地取材,来自大坝开挖石渣,无需另外加工;骨料最大粒径达 70cm ;胶凝材料用量少;施工简易快速;“双超”混凝土在施工及开挖工作面附近利用挖掘机现场拌制,施工简单,混凝土无须拌和楼拌和,就地取材,经济性好。2009年6月在下游围堰进行现场碾压试验,至今已经历两个汛期,围堰运行良好。通过现场碾压试验,获得了宝贵的试验数据,为以后“双超”混凝土筑坝技术的实施积累了经验。

2.5 四级配碾压混凝土的研究

国内外对四级配碾压混凝土的研究和应用几乎是空白,主要是由于骨料粒径增加,碾压混凝土拌和物的骨料包裹较差和大骨料分离等问题,制约了四级配碾压混凝土的应用。本课题以沙沱水电站工程为研究背景,在国内首次系统全面地开展四级配碾压混凝土配合比、性能及施工工艺试验研究。通过先进的原材料选择、配合比设计、施工工艺调整,克服四级配碾压混凝土设计和施工可能存在的缺点和困难,使四级配碾压混凝土在筑坝技术中成为现实,填补在四级配碾压混凝土研究中领域的空白。

研究表明:四级配碾压混凝土的基本用水量与三级配碾压混凝土相比,可以降低 $8\sim 10\text{kg}/\text{m}^3$ 用水量,节约胶凝材料 $16\sim 20\text{kg}/\text{m}^3$;四级配碾压混凝土的 VC 值采用 $4\sim 6\text{s}$ 较为合适,不仅加压振动成型的湿密度能达到 $2400\text{ kg}/\text{m}^3$ 以上,而且大骨料表面裹浆情况较好,有利于提高大骨料表面与砂浆的黏结强度。沙沱工程已完成室内试验,正在进行现场的试验研究,这一新型的碾压混凝土品种将很快在沙沱工程中得到应用。

2.6 大倾角波状挡边带式输送机应用于输送碾压混凝土

结合沙沱水电站工程大坝施工场地狭小,碾压混凝土提升高度大等特殊的施工环境,在国内首次研究应用了一种适合碾压混凝土垂直运输入仓设备——大倾角波状挡边式皮带机。大坝碾压混凝土

输送选用自行设计改进的大倾角波状挡边带式输送机,输送皮带坡度达到 45° ,并根据试验使用情况对设备常规拍打装置作了替换设计,该设备已完成 4万 m^3 碾压混凝土的输送,保证了混凝土的质量不受影响,为碾压混凝土大角度垂直输送入仓提供了一种新型的解决方案,有显著的效益。

3 管理创新

3.1 将环保融入工程技术

工程施工会对环境带来一定不利影响,在沙沱水电站建设中,我们始终将环保工作融入工程技术,坚持不破坏就是最好的环保理念,在工程建设中通过技术措施和手段最大限度地减少对环境的影响。针对本工程右岸边坡陡峭,地质条件差的特点,及时调整场内施工道路布置,取消右坝肩下游近 1km 道路,采用其他方案替代,仅此一项措施就减少边坡开挖 20余万 m^3 ,保护植被 10余万 m^2 ,并解决了高边坡开挖带来的稳定问题。同时对由于施工而影响的边坡等部位,及时采取植被恢复措施,使其恢复原来的面貌。

沙沱人工砂石系统按照国家环境影响评估批复要求,单独与承包商签订施工废水零排放处理协议,承包商应用先进的“半干法”制砂工艺,较常规砂石系统大大降低能耗,减少粉尘、废水的同时,并按照零排放进行设计再次利用和处理废水,被誉为“环保砂石系统”。既节约了工程投资,又保护了环境。

3.2 坚持实施以技术为核心的风险管理

由于受前期移民影响,至2006年10月沙沱辅助工程不能按照原计划动工,而2007年初下游的彭水电站将下闸蓄水,其回水将淹没沙沱纵向围堰的礁石基础,从而导致纵向围堰无法施工,危及到导流方案的重大调整,形势异常危急。为了确保纵向围堰在2007年5月达到度汛高程,经过认真研究,决定调整施工程序:将原定的先开挖坝肩再施工纵向围堰的顺序调整为先施工纵向围堰再开挖坝肩;针对乌江流域水情特点,在确保安全的条件下,将纵向围堰度汛标准从全年10年一遇调整为枯水期10年一遇的高水位,从而将混凝土从 30万 m^3 减少到 10万 m^3 ,大大降低施工强度;由于砂石系统尚未投产,现场不具备建设临时砂石系统的条件,经过调研,决定在工地周边 10km 范围内开采砂石骨料,较好地解决了这一难题,纵向围堰于2007年4月提前达到度汛高程,为年底的一期截流奠定坚实基础。

由于受2008年初凝冻灾害和11月遭遇同期200年一遇洪水的影响,大坝工期滞后4个月,无法实现在2009年初进行大江二期截流,若再推后截流,将没有时间完成土石围堰的加高保护,汛期洪水可能冲毁土石围堰而功亏一篑,造成更大的损失和浪费。所以,水电工程一般选择推迟一年截流,这对工程带来的损失将不可估量。经过反复论证与推敲并结合一期导流明渠施工揭露的地质情况,决定将原设计的土石过水围堰调整为碾压混凝土过水围堰,并将围堰轴线向下移 40m 使其避开河床覆盖层而尽量坐落在导流明渠岩石基础上,即使在围堰施工期间洪水来临也不会冲毁。工程于2009年4月17日实现大江二期截流,在二期截流后1个月时间内成功将围堰浇筑到度汛高程并抽干基坑内全部积水,为工程的后续施工奠定了坚实的基础,开创了大型水电工程汛前成功截流的先河。

3.3 把移民工程纳入主体工程同步管理

移民是当前水电工程必须面对并妥善处理的重大课题,过去移民工程一般由地方政府组织建设,但由于种种原因影响,往往工期无法保证,投资超过概算时有发生,制约了电站下闸蓄水。为了确保工程的顺利推进,按照贵州省政府的指示,充分发挥地方政府和项目业主的优势,总结探索出“地方政府管民生,项目业主管移民工程”的工作方针,即地方政府将大型的移民基础设施工程返包业主施工,充分发挥业主单位工程技术和管理的优势,把移民返包工程纳入主体工程同步管理。并承诺移民返包工程建设若有节余,全部返还地方政府用于移民安置。目前已完成和在建的移民返包工程工期、质量和投资都处于良好的受控状态。

3.4 有效的高温季节碾压混凝土温控措施

碾压混凝土高温季节施工温控是关键,沙沱水电站夏季气温高,为了确保高温季节大坝混凝土施工质量,避免产生危害性温度裂缝,建设公司组织参建各方对高温季节混凝土施工多次召开了相关专题会议,总结吸收国内类似工程成功的经验,形成了一揽子技术措施,成立了大坝混凝土温控小组,要求碾压混凝土的初凝时间在气温 32°C 时应达到17h以上,在气温超过 34°C 时,初凝时间须超过10h,从而保证混凝土的层间结合。并在创造仓面小气候环境上大胆创新,在施工作业面搭设遮阳篷和喷雾措施以降低仓内气温及利于混凝土的保湿。根据国内成熟的工程实例以及成功的工程经验,采用了弱化出机口温控,强化混凝土入仓后温控的措施转移,为进一步降低骨料温度和混凝土温升,夏季加密冷却水管间距,并在埋设后其上层混凝土碾压完毕立即开始连续通制冷水20d,然后再通河水40d,直到坝内温度在低温季节到来前达到设计允许温度。在混凝土浇筑完后在平面应采用蓄水养护、立面采用流水养护,未拆模部位在模板外侧设置花管流水降低模板温度,防止混凝土表面由于温度过高而发生干缩裂缝,禁止采用人工洒水养护等一系列措施,成效显著,已浇筑大坝混凝土的最高温度基本控制在设计范围内,大坝未出现一条危害性裂缝,已经取得的混凝土芯样外观密实,最长芯样达到13.58m。

4 结语

水电开发建设是一项复杂的系统工程,必须创新管理,遵循工程建设与自然和谐、与社会和谐的原则,本文提出将环保理念融入工程技术,以工程促移民,坚持以技术为核心的综合管理和以技术为核心的风险管理,大胆采用新技术新工艺和实施风险决策,在沙沱水电站建设中取得了良好的经济和社会效益,工程至今通过技术优化以节约近2亿元,工程质量良好,推进了本工程又好又快建设。

沙沱水电站碾压混凝土高温季节温控措施

蒋廷军 李虎章

(中国人民武装警察部队水电第一总队)

【摘 要】 碾压混凝土是一种干硬性混凝土,采用通仓薄层连续施工,较常态混凝土更易受到高温、强烈日晒、蒸发、相对湿度、刮风等因素的影响,沙沱水电站坝区极端气温高、且持续时间长,必须采取切实有效的施工技术措施,保证碾压混凝土连续、快速施工,以确保碾压混凝土的施工质量和施工进度。结合并采用以往碾压混凝土高温季节施工技术措施的同时,在沙沱水电站大坝高温气候施工时采取碾压混凝土仓面搭设遮阳棚的施工技术措施,极为有效地降低了仓面气温、强烈日晒。同时根据各部位混凝土内部温度监测情况,实施个性化通水冷却,有效控制混凝土内外温差,使碾压混凝土的施工质量得到了更可靠的保证,为类似工程提供了成功经验。

1 引言

乌江沙沱水电站位于贵州省沿河县城,属Ⅱ等大(2)型工程,枢纽由全断面碾压混凝土重力坝、左岸坝后厂房、右岸垂直升船机、溢流表孔和消力池等建筑物组成。大坝共分为 16 个坝段,从左到右依次为:左岸挡水坝段、厂房取水坝段、电梯井坝段、溢流坝段、右岸升船机坝段和右岸挡水坝段。最大坝高 101m,河床最低建基面高程 270m,基础最宽处 73.125m,碾压混凝土量约 137 万 m³,占大坝混凝土总量 70%。

沙沱水电站碾压混凝土大坝施工区处于贵州东北部,多年平均气温 17.5℃,实测极端最高气温 42.0℃,历年各月极端最高气温平均为 34.8℃,坝址区夏季气温较高,且持续时间长,每年 5~9 月的月平均气温均高于 20℃,夏季常年月平均气温高达 28℃,且高温季节长达 3~5 个月,使混凝土降温幅度及难度均较大。具体坝址气温统计见表 1。

表 1 沙沱水电站坝址气温统计表(℃)

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
多年平均	6.4	7.7	12.2	17.6	21.6	24.9	28.0	27.7	24.0	18.3	13.3	8.5	17.5
极端最高	24.6	28.6	32.7	35.6	39.1	39.9	41.6	42.0	38.4	36.6	32.7	25.2	42.0
极端最低	-5.4	-3.1	0.0	1.8	9.0	13.9	18.3	17.5	13.0	7.0	-0.3	-3.5	-5.4

按常规混凝土重力坝设计规范规定,坝体混凝土设计温控要求为:基础允许温差强约束区为 16℃、弱约束区为 18℃,脱离基础约束区后,按各月的允许最高内部温度控制。坝体混凝土脱离基础约束区后,控制上下层温差不大于 17℃,内外温差一般是控制内部最高温度与外界气温之差。根据计算分析,低温季节(每年 11 月~次年 3 月)按自然入仓就能基本满足温度应力的要求,坝体混凝土脱离基础约束区后,控制上下层温差不大于 20℃。混凝土大坝正常浇筑各月的内外温差等控制指标见表 2。

表 2 碾压混凝土满足内外温差及基础温差的允许最高温度标准(℃)

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
月平均气温	6.4	7.7	12.2	17.6	21.6	24.9	28	27.7	24	18.3	13.3	8.5
允许内外温差	自然入仓			20	20	20	20	20	20	20	自然入仓	
允许最高温度				32	32	32	32	32	32	32		

根据碾压混凝土施工规范,在气温等于或高于 25℃时,按照高温季节碾压混凝土施工实施。在高温天气混凝土施工时,严防因内外温差过大,产生表面裂缝。沙沱水电站坝区极端气温高、且持续时间长,在综合采取以往类似工程的各项温控技术措施的同时,采取创新措施在碾压混凝土仓面搭设遮阳棚的施工技术,极为有效地降低了仓面气温、强烈日晒;并根据混凝土内部监测温度,对各部位冷却水管采取个性化通水冷却,有效控制混凝土的内外温差,从而使碾压混凝土的施工质量得到了更为可靠的保证。

2 原材料选择及优化混凝土施工配合比

2.1 水泥

采用发热量较低的水泥和减少单位水泥用量,是降低混凝土水热温升的最有效措施。沙沱水电站大坝碾压混凝土选用彭水茂田能源开发有限公司和重庆三磊水泥有限公司生产的秀山三磊 P·O42.5 中热硅酸盐水泥,7d 的水化热低于 270KJ/kg,水泥的比表面积控制在 300m²/kg 左右,以延缓水泥的早期发热速度及发热量。

2.2 采用高掺量粉煤灰

掺粉煤灰不但能减少单位混凝土中的水泥用量,还有利于防裂。在施工配合比设计中,优先选用需水量≤90%的优质粉煤灰。试验表明:增加 10%的粉煤灰掺量,其 3d 水化热可降低 16.2%,7d 水化热可降低 20.0%。大坝碾压混凝土粉煤灰使用贵州大龙天成工贸有限公司生产的大龙Ⅱ级粉煤灰及金沙县金润新型材料有限公司生产的金沙Ⅱ级粉煤灰,掺合料品质均满足相应规范要求。坝体内部三级配碾压混凝土掺合料掺量为 65%,坝体上游面防渗区二级配碾压混凝土掺合料掺量为 55%,高掺粉煤灰有效延缓及降低了水化热。

2.3 选用适应高温条件的高效缓凝减水剂

根据长江水利委员会长江科学院试验成果,沙沱水电站大坝碾压混凝土选用 HLC-NAF 高效缓凝减水剂,要求根据沙沱的实际气候状况分冬季型和夏季型,夏季型的配方要求对碾压混凝土的初凝时间可控制在 6~8h 范围,与夏季的施工相匹配。高效缓凝减水剂具有延迟水泥水化反应的作用,从而可以消减水泥水化热峰值,掺入 0.7%的 HLC-NAF 高效缓凝减水剂后,中热水泥的水泥水化热峰值推迟约 20h,说明掺入可以明显的抑制水化反应,降低前期的水化热。

2.4 优化配合比设计

长江水利委员会长江科学院试验成果推荐的大坝 RⅠ区三级配碾压混凝土配合比水泥用量为 64kg/m³,粉煤灰掺量为 96 kg/m³,经过试验优化调整,最终选定的 RⅠ区三级碾压混凝土配合比,水泥用量为 54 kg/m³,粉煤灰掺量为 99 kg/m³,减少了胶材的用量 7 kg/m³,对降低发热、削减温升的峰值有利。实践表明,每 1m³混凝土中少用 10kg 水泥,则可降低混凝土绝热温升 1.2℃左右。

3 温控措施

沙沱水电站坝区在夏季施工期间,气温高,需从混凝土生产、运输、碾压、养护、后冷及施工工艺上采取一系列的降温防护措施,才能达到设计的浇筑温度指标。

3.1 降低混凝土浇筑温度

降低混凝土浇筑温度是控制混凝土最高温度最有效也是最必须的措施。按设计要求经过计算,

4~10 月份常态混凝土出机口温度控制在 $14\sim 15^{\circ}\text{C}$ 以内,碾压混凝土出机口温度控制在 14°C 以内,强约束区浇筑温度要求控制在 17°C 内,弱约束区浇筑控制在 20°C 以内,脱离约束区浇筑温度控制在 20°C 内。实践表明,浇筑温度每降低 1°C ,混凝土最高温度可降低 $0.3\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 。为降低混凝土浇筑温度,骨料的运输、堆存均设保温设施,骨料堆存高度要求不小于 6m ;为充分预冷骨料,对骨料进行风冷,采用冷却水、加冰拌制低温混凝土。

3.2 运输过程中的降温与防护

碾压混凝土主要采用自卸汽车运输和皮带机输送、满管入仓,为防止混凝土在运输途中温度回升过快,均在自卸汽车和皮带机上加设遮阳篷,降低日照热辐射对混凝土温度的影响。

运输设备加设遮阳措施后,取得了一定的防热辐射效果,通过现场对比性实验,在气温为 30°C ,从机口到入仓时间为 15min 情况下,采用加设遮阳篷的汽车运输混凝土与不加设遮阳篷的汽车运输混凝土温度回升低 $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}$,且混凝土运输途中温度回升与运输时间密切相关,因此缩短运输时间也是至关重要的方面。

采用皮带机输送,皮带平坦,带上混凝土的平均厚度不到 30cm ,混凝土与外界环境接触面积大,热量交换顺畅,混凝土升温快,皮带机上加设遮阳措施后,能有效降低升温。

3.3 仓面搭设遮阳棚

在沙沱水电站大坝在高温季节施工时,首次采取在仓面搭设遮阳棚,避免阳光直射,降低仓面气温,形成仓面局部小气候,经现场检测,搭设遮阳棚后可有效降低仓面气温 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$,是在高温条件下碾压混凝土施工极为有效的温控措施,不足的是在仓面面积 3000m^2 以上时,仓面搭设遮阳棚较困难。

3.4 快速施工与层面保护

碾压混凝土的主要特点是要求施工速度快,这不仅在质量控制上起着重要作用,且在温度控制上有着重要意义。碾压混凝土大坝碾压层面多而薄,快速施工的目的就是下层碾压混凝土初凝之前,上层碾压混凝土必须碾压完毕,从而使层间混凝土能够达到良好的层面结合效果。快速施工的同时,可以减少混凝土层面与外界接触时间,从而减少外界与碾压混凝土的热量交换,能更好的控制混凝土的浇筑温度。

沙沱水电站大坝在高温季节碾压混凝土施工中,为更好的控制碾压混凝土 6h 的层间间歇时间,采用高效缓凝减水剂延长碾压混凝土的初凝时间,铺筑过程中在仓面搭设遮阳棚、人造喷雾,适当降低施工环境温度(根据现场测定,依外界环境温度的不同,一般仓面温度较外界环境温度可降低 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$),增大环境湿度,避免混凝土失水干硬。

碾压混凝土有水化热低、水化速度慢的特点,在高温季节施工中,由于是大仓面薄层摊铺施工,这就导致外界温度倒灌入碾压混凝土中,基本谈不上层面的散热作用,为减少外界温度倒灌,在碾压完毕以后,及时覆盖 PEP 保温被。

碾压混凝土快速施工是一个系统工程,拌和楼生产、运输、入仓到仓面施工“一条龙”要相互衔接好,同时要加强对仓面施工管理,避免出现浇筑中断、运输车辆在入仓口排队等候入仓现象,减少冷却水管铺设、压实度检测等占压时间,同时根据外界环境温度,动态调整混凝土的 VC 值,确保碾压混凝土的快速施工及碾压效果。

3.5 铺设冷却水管通水冷却

在混凝土中埋设冷却水管,进行通水冷却,以削减水化热温升,确保混凝土最高温度 T_{max} 不超过设计允许的温度及减小坝体内外温度梯度。

(1) 冷却水管布置

坝内冷却水管均采用高密度聚乙烯管,导热系数不小于 $0.45/(\text{Mr}\cdot^{\circ}\text{C})$,规格为支管外径 32mm 、内径 30mm ,布置形式 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ (垂直距离 $\times$ 水平距离),单根长度不超过 250m ;垂直断面呈梅花型布置,冷却水管距结构边线 $1.5\sim 2.0\text{m}$ 以外范围布置。冷却水管平面布置见图 1。