

S H U I L I S H U I D I A N S H I G O N G

水利水电施工

总第110期



《中文科技期刊数据库》收录期刊



《中国知识资源总库》全文网络出版期刊

2008·第4期

中国水电四局碾压混凝土研究与应用二十年

碾压混凝土筑坝十项创新技术评析

安康水电站表孔消力池病害处治

复杂地层下大吨位预应力锚索施工
关键技术



全国水利水电施工技术信息网



中国水利水电建设集团公司

主办

水利水电施工

S H U I L I S H U I D I A N S H I G O N G

2008 · 第 4 期

《中文科技期刊数据库》收录期刊 《中国知识资源总库》全文网络出版期刊

目 次

专家综述

中国水电四局碾压混凝土研究与应用二十年

..... 中国水利水电第四工程局有限公司 席 浩 田育功 1

土石方工程

- 小湾水电站高边坡开挖预裂爆破施工 四川松林河流域开发有限公司 王应周 6
- 桃子沟水库面板堆石坝快速施工技术 中国水利水电第十三工程局有限公司 陈 峰 10
- 加纳布维水电站项目截流施工风险研究 中国水利水电第八工程局有限公司 彭运河 14

混凝土工程

- 碾压混凝土筑坝十项创新技术评析 中国水利水电第四工程局有限公司 田育功 17
- 金安桥水电站大坝碾压混凝土施工综述 中国水利水电第四工程局有限公司 计 平 23
- 三峡三期厂坝工程混凝土温控防裂技术及管理措施 中国葛洲坝集团股份有限公司 程志华 忠 兴 26
- 三板溪水电站尾水管混凝土施工
..... 中国水利水电第十四工程局有限公司 陆学华 孔维厅 熊江华 邓拥军 30

地下工程

- 龙滩水电站地下厂房快速开挖施工技术综述 四川电力开发有限公司 祁向明 34
- 三峡右岸地下电站主厂房系统支护施工 咸市革香河水电开发有限公司 王 刚
- 溪洛渡工程建设部 卓文耀 40
- 管棚及注浆加固法在引水隧洞塌方处理中的应用 中国水利水电第十三工程局有限公司 陈 峰 44
- 琅琊山抽水蓄能电站上库溶洞、落水洞处理施工技术 中国水利水电第五工程局有限公司 潘福营 46
- PCCP 在万家寨引黄工程中的应用 中国水利水电第十一工程局有限公司 王洪现 48

工程病害处治与化学灌浆

- 安康水电站表孔消力池病害处治 中国水利水电第三工程局有限公司 屈高见
- 安康水力发电厂 韩建新 51

水性环氧树脂贴嘴化学灌浆工艺及应用

- 中国水利水电第三工程局有限公司 田科宏 55
- 水溶性聚氨酯化学灌浆在博斯腾湖东泵站工程中的应用

..... 中国葛洲坝集团股份有限公司 黎学皓 常国阁 57

预应力技术

复杂地层下大吨位预应力锚索施工关键技术

..... 中国葛洲坝集团股份有限公司 刘志文 60

积石峡水电站垂直预应力锚索施工方法设计及施工

..... 中国水利水电第四工程局有限公司 马天舒 吴晓斌 64

自由式单孔多锚头预应力锚索在水电站厂房高边坡的应用

..... 中国水利水电第十四工程局有限公司
刘六艺 陈东升 胡传安 万应录 66

界河渡槽预应力混凝土拉杆拱施工技术

中国水利水电第十三工程局有限公司 于晓 刘持鹏 70

砂石骨料工程

易家坡人工骨料加工系统工艺流程设计及设备配置

..... 中国水利水电第九工程局有限公司 袁志发 74

引子渡水电站砂石系统设计优化及运行改进

..... 中国水利水电第十一工程局有限公司 路文典 张燕玲 77

企业经营与项目管理

施工项目经济效益预评估解析及方法探讨

..... 中国武警部队水电第三总队 张云祥 81

施工项目成本管理

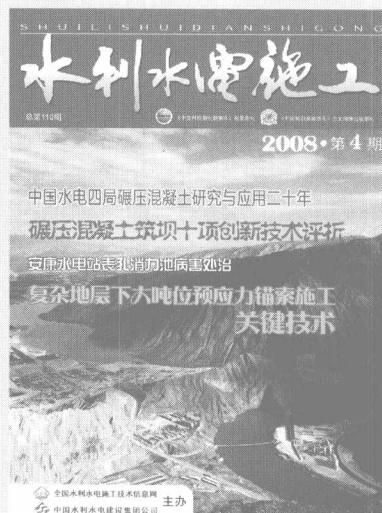
..... 中国水利水电第九工程局有限公司 封永成 84

埃塞俄比亚泰可泽水电站闸门设备安装施工管理

..... 中国水电建设集团国际工程有限公司 范文斌 87

小型水电站远端集中控制运行管理模式初探

..... 贵州桐梓河水电开发有限责任公司 刘建华 89



主管单位:

中国水利水电建设集团公司

主办单位:

全国水利水电施工技术信息网

中国水利水电建设集团公司

编 审 委 员 会

名誉主任: 范集湘

顾问: 马洪琪 张超然 付元初 梅锦煜

主任委员: 孙洪水

副主任委员: 冉贤厚 宗敦峰 郭光文

委员: 夏仲平 孙志禹 吴国如 郑桂斌

楚跃先 李伟 常满祥 王鹏禹

席浩 吴高见 厉建平 但东

涂怀健 王琳瑞 陈茂 钟彦祥

李秋生 杨涛 和孙文 何小雄

刘永祥 肖恩尚 赵春秀 缪昌文

刘家平 杨伟国 周世明 常焕生

龚长清 衡富安 马如琪 朱镜芳

夏可凤 马军领

图书在版编目 (CIP) 数据

水利水电施工. 2008 年第 4 期/全国水利水电施工技术信息网编. —北京: 中国电力出版社

ISBN 978-7-5083-8219-7

I. 水… II. 全… III. ①水利工程—工程施工—文集
②水力发电工程—工程施工—文集 IV. TV5-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 202089 号

编辑: 《水利水电施工》编辑部

主编: 宗敦峰

副主编: 楚跃先

责任编辑: 康明华 杨伟国 韩世韬

出版: 中国电力出版社

印刷: 北京博图彩色印刷有限公司

定价: 8.00 元

中国水电四局碾压混凝土研究与应用二十年

● 席 浩 田育功/(中国水利水电第四工程局有限公司)

【摘 要】 碾压混凝土筑坝技术以其施工机械化程度高、工期短、投资省等优点,备受坝工界青睐。20年来,水电四局在碾压混凝土研究与应用中,不论是在配合比设计、掺合料的应用、石粉的利用、耐久性研究、VC值的动态控制以及不同条件下的快速施工等方面,通过大量试验研究和筑坝实践,掌握了丰富的第一手碾压混凝土筑坝技术的宝贵经验和成果,碾压混凝土研究水平已达到同行业的领先地位,为碾压混凝土应用提供了更加广阔的前景。

【关键词】 碾压混凝土 研究 VC值 石粉

1 引言

1.1 水电四局碾压混凝土研究与应用回顾

碾压混凝土筑坝技术是世界筑坝史上的一次重大创新。碾压混凝土筑坝技术以其施工机械化程度高、工期短、投资省等优点,备受世界坝工界青睐。我国自1986年建成第一座福建坑口碾压混凝土重力坝以来,碾压混凝土这一新型筑坝技术立即得到了中国水利水电第四工程局(以下简称水电四局)的高度重视,马上组织技术人员到福建大田坑口大坝现场学习。1988年4月水电四局成立了以总工程师为组长的“碾压混凝土推广领导小组”,同年选派专业技术干部到福州参加了首届碾压混凝土技术培训班。此后,碾压混凝土推广领导小组和原水电部西北勘测设计院多次酝酿,提出了在龙羊峡左副坝采用碾压混凝土筑坝技术的可行性报告,从此拉开了水电四局碾压混凝土筑坝技术的序幕。根据可行性研究报告要求,从1988年开始水电四局进行了长期的、大量的碾压混凝土试验研究,在此基础上,经过充分的准备工作,1991年10月在龙羊峡左副坝进行了碾压混凝土生产性试验施工。

20年来,水电四局承建研究与应用的碾压混凝土坝工程共计15座,详见表1。在碾压混凝土研究与应用过程中,曾先后经历了金包银、大VC值的初期探索期,20世纪90年代中后期全断面碾压的过渡期,发展到目前高石粉、低VC值、200m级的高坝成熟期。碾压混凝土在不断研究、总结、创新的发展中,取得了许多重要的研究成果。目前,水电四局是《水工碾压混凝土施工规范》(DL/T 5112)的主要修编单位之一;受业主邀请进行了多座大坝碾压混凝土坝技术咨询,特别是到越南波来哥隆水电站工程进行了碾压混凝土重力坝技术咨询和现场试验,受到越南农业水利部的高度评价。其中,龙首水电站工程获得2003年度甘肃省优质工程飞天奖;百色水利枢纽工程“辉绿岩人工砂石粉在碾压混凝土中的利用研究”科研项目,荣获2005年度中国水利水电建设集团公司二等奖、中国电力科学技术三等奖。这些成绩的取得,包含了科研、管理、工程技术人员付出的大量心血,无不伴随着成功的喜悦和失败的痛苦。在水电四局建局五十周年之际,十分有必要对中国水电四局碾压混凝土研究与应用20年来的经验

进行总结,使碾压混凝土这项快速筑坝技术更趋完善、更具生命力。

表1 水电四局承建研究与应用的碾压混凝土工程一览表

序号	工程名称	地点	河流	坝型	坝高 (m)	坝体积 (万 m ³)		库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	施工年份	备 注
						碾压	总量				
1	龙羊峡左副坝	青海共和	黄河	重力坝	38	0.46	330	247	1280	1988~1991	试验研究施工
2	龙首	甘肃张掖	黑河	拱坝	80	17.6	20.8	0.132	52	1999~2001	试验研究施工
3	蔺河口	陕西岚皋	蔺河	拱坝	100	23	29.5	1.47	72	2000~2003	试验研究施工
4	百色	广西百色	右江	重力坝	130	218	269	56.6	540	2002~2006	试验研究闽黄 ^① 施工
5	三峡三期围堰	湖北宜昌	长江	重力坝	115	110.6	167	147	—	2003.12~2004.4	试验检测监理
6	戈兰滩	云南江城	李仙江	重力坝	113	93	150	—	450	2005~	业主试验中心
7	铁成	甘肃永登	大通河	重力坝	44.8	12	18.1	—	51.5	2005~2006	配合比设计试验
8	海甸峡	甘肃临洮	洮河	重力坝	54	12	21.0	0.174	52.5	2005~2006	试验检测施工
9	波来哥隆	越南昆嵩	布谷河	重力坝	97	93	118	—	—	2005.2~2006.6	技术咨询及试验
10	光照	贵州青隆	北盘江	重力坝	200.5	240	274	32.45	1040	2005~	试验研究闽黄 ^① 施工
11	金安桥	云南丽江	金沙江	重力坝	160	264	392	8.47	2400	2005~	试验研究施工
12	喀腊塑克	新疆富蕴	额尔齐斯河	重力坝	121.5	252	289	24.19	140	2006~	业主试验中心
13	莲花台	陕西商南	丹江	重力坝	72.9	23.4	30.7	—	40	2006~	配合比设计试验
14	官地	四川西昌	雅砻江	重力坝	168	280	353	7.6	2400	2007~	试验研究 411 ^② 施工
15	功过桥	云南云龙	澜沧江	重力坝	105	77	115	3.16	900	2008~	试验研究施工

① 闽黄指由中国水利水电闽江工程局和中国水利水电第四工程局组成的紧密型水电工程联营体。

② 411 指由中国水利水电第四工程局和中国水利水电第十一工程局组成的紧密型水电工程联营体。

1.2 碾压混凝土学术交流

1990年12月,水电四局参加了在海南三亚举行的首次碾压混凝土技术交流会。此后,积极组织参加全国碾压混凝土筑坝技术交流会,通过不断的学习交流,取长补短,与时俱进,吸收掌握了碾压混凝土发展动态和信息。随着碾压混凝土研究与应用的深入发展,参加全国碾压混凝土筑坝技术交流会的学术论文也不断提升,发表高质量的学术论文31篇,并多次作为大会主题发言单位发言,扩大提升了水电四局在碾压混凝土研究与应用方面的知名度和地位。

2 碾压混凝土试验研究

20年来,水电四局在碾压混凝土筑坝技术研究与应用过程中,通过大量的试验研究,不论是在配合比设计、掺合料的应用、石粉的利用、耐久性研究、VC值的动态控制、抗骨料分离、可碾性、层间结合、变态混凝土以及不同地域、自然环境条件下的快速施工等多方面进行了研究,掌握了大量丰富的第一手碾压混凝土现场应用的宝贵经验和成果,具有鲜明的技术特点,碾压混凝土研究水平已经达到同行业的领先地位。

2.1 碾压混凝土配合比设计

碾压混凝土配合比设计在施工中占有举足轻重的作用,质量优良、科学合理的配合比可以保证碾压混凝土筑坝质量,加快施工进度,获得明显的技术经济效益,起到事半功倍的作用。在碾压混凝土配合比设计过程中,经过多年不断的研究、探索和筑坝实践,形成了比较完整的理论体系。我国的碾压混凝土配合比设计采用高掺掺合料、低水泥用量、中胶凝材料、高石粉含量、掺缓凝减水剂、低VC值的技术路线,改善了碾压混凝土拌和物性能,使碾压混凝土的可碾性、液化泛浆、层间结合、密实性、抗渗等性能得到了极大的提高。水电四局碾压混凝土配合比设计见表2。

表 2

水电四局碾压混凝土配合比设计一览表

序号	工程名称	设计指标级配	级配	水胶比	砂率 (%)	水 (kg/m ³)	掺合料 (%)	外加剂 (%)		VC 值 (s)	密度 (kg/m ³)	骨料品种
								减水剂	引气剂			
1	龙羊峡左副坝	R ₉₀ 200D100S4	Ⅲ	0.47	30	80	F50	0.3	0.02	15~25	2430	卵石天然砂
2	龙首	C ₉₀ 20F300W8	Ⅱ	0.43	32	91	F53	0.7	0.45	1~6	2420	卵石天然砂 (外掺 MgO)
		C ₉₀ 20F100W6	Ⅲ	0.48	30	85	F66	0.7	0.07	1~6	2450	
3	蔺河口	R ₉₀ 200D100S8	Ⅱ	0.47	37	87	F63	0.7	0.07	1~5	2440	人工石灰岩
		R ₉₀ 200D50S6	Ⅲ	0.47	34	81	F65	0.7	0.005	1~5	2460	
4	百色	R ₁₈₀ 20D100S8	Ⅱ	0.52	38	106	F58	0.8	0.07	1~5	2600	人工辉绿岩
		R ₁₈₀ 15D25S6	准Ⅲ	0.58	34	96	F63	0.8	0.005	1~5	2650	
5	三峡三期围堰	R ₉₀ 150F50W8	Ⅱ	0.50	39	93	F55	0.6	0.01	1~8	2361	人工花岗岩
			Ⅲ	0.50	34	83	F55	0.6	0.01	1~8	2410	
6	戈兰滩	C ₉₀ 20F100W8	Ⅱ	0.45	34	93	KS5	0.8	0.05	3~8	2315	人工石灰岩 (矿渣与石粉掺合料)
		C ₉₀ 15F50W4	Ⅲ	0.50	38	83	KS60	0.8	0.04	3~8	2444	
7	铁成	C ₁₈₀ 20F300W6	Ⅱ	0.45	42	100	F40	0.8	0.040	3~8	2460	人工花岗岩
		C ₁₈₀ 15F50W4	Ⅲ	0.55	38	90	F60	0.8	0.015	3~8	2500	
8	海甸峡	C ₉₀ 15F150W4	Ⅲ	0.50	32	82	F65	0.7	0.07	1~8	2460	碎石天然砂
9	越南波来哥隆	C ₁₈₀ 15W4 (美国 ASTM)	Ⅱ	0.57	36	125	P63	0.8	—	5~15	2491	花岗岩碎石天然砂
10	光照	下部 C ₉₀ 25F150W12	Ⅱ	0.45	39	83	F50	0.7	0.06	3~5	2449	人工石灰岩 (粉煤灰代砂 3%)
		C ₉₀ 20F100W6	Ⅲ	0.50	35	75	F55	0.7	0.04	3~5	2489	
		上部 C ₉₀ 20F100W10	Ⅱ	0.50	39	83	F55	0.7	0.06	3~5	2460	
		C ₉₀ 15F50W6	Ⅲ	0.55	35	75	F60	0.7	0.04	3~5	2515	
11	金安桥	C ₉₀ 20F100W8	Ⅱ	0.47	37	100	F55	1.0	0.20	1~5	2600	人工玄武岩 (石粉代砂 4%~6%)
		C ₉₀ 20F100W6	Ⅲ	0.47	33	90	F60	1.0	0.20	1~5	2630	
		C ₉₀ 15F100W6	Ⅲ	0.53	33	90	F63	1.2	0.15	1~5	2630	
12	喀腊塑克	C ₁₈₀ 20F300W10	Ⅱ	0.45	35	98	F40	1.0	0.12	1~6	2370	花岗岩天然砂 (石粉代砂 6%~8%)
		C ₁₈₀ 20F200W6	Ⅲ	0.45	32	90	F50	1.0	0.10	1~6	2400	
		C ₁₈₀ 15F50W4	Ⅲ	0.56	32	90	F62	1.0	0.10	1~6	2400	
13	莲花台	C ₁₈₀ 10F150W8	Ⅱ	0.60	30	85	F65	0.6	0.005	3~5	2400	卵石河砂
		C ₁₈₀ 10F150W4	Ⅲ	0.60	34	78	F70	0.6	0.005	3~5	2430	
14	官地	C ₉₀ 20F100W10	Ⅱ	0.45	38	100	F55	1.0	0.3	1~5	2605	人工玄武岩
		C ₉₀ 25F100W10	Ⅱ	0.42	37	100	F55	1.0	0.3	1~5	2605	
		C ₉₀ 15F50W6	Ⅲ	0.48	34	90	F65	1.0	0.3	1~5	2630	
		C ₉₀ 20F50W6	Ⅲ	0.45	34	90	F65	1.0	0.3	1~5	2630	
		C ₉₀ 25F100W6	Ⅲ	0.42	33	90	F65	1.0	0.3	1~5	2630	
		C ₁₈₀ 20F100W10	Ⅱ	0.55	40	105	F55	0.7	0.16	2~5	2450	
15	功过桥	C ₁₈₀ 15F50W4	Ⅲ	0.58	36	92	F60	0.7	0.16	2~5	2500	人工砂质板岩

注 掺合料中 F 代表粉煤灰, P 代表火山灰, KS 代表矿渣和石灰岩各 50% 混磨掺合料。外加剂为常温条件下掺量, VC 值动态控制。

2.2 石粉在碾压混凝土中的作用

由于碾压混凝土灰浆含量远低于常态混凝土, 为保证其可碾性、液化泛浆、层间结合、密实性及其他一系列性能, 提高砂中的石粉 (粒径小于 0.16mm 的颗粒) 含量是非常有效的措施。近年来大中型工程碾压混凝土试验研究及应用证明, 人工砂石粉含量的高低直接影响碾压混凝土的工作性和施工质量。由于碾压混凝土中胶凝材料 and 水的用量较少, 当人工砂中含有适宜的石粉含量, 特别是人工砂石粉提高到 18% 左右时, 可以显著改善碾压混凝土工作性能, 降低绝热温升, 有利大坝抗渗性能和整体性能的提高。

人工砂中石粉的含量和粒径分布与制砂设备、工艺和岩石种类性能密切相关。目前,大多数工程采用的骨料主要岩石种类有石灰岩、花岗岩、辉绿岩、白云质灰岩、玄武岩、砂质板岩等,不同种类的岩石生产的人工砂石粉含量是不同的,同时,它们的化学成分也各不相同,多为非活性材料。但是,石粉能发挥微集料作用,具有填充密实作用,增加了胶凝材料体积。因此,石粉最大的贡献是提高了碾压混凝土浆砂体积比,明显改善碾压混凝土可碾性和层间结合。

2.3 碾压混凝土的浆砂体积比

石粉含量对碾压混凝土浆砂体积比(以下简称浆砂比)影响很大。近年来随着人们对石粉含量的研究和深化认识,在碾压混凝土配合比设计中对浆砂比越来越重视,浆砂比是灰浆体积(包括粒径小于0.08mm的颗粒体积)与砂浆体积的比值。根据近年来全断面碾压混凝土筑坝实践经验,当人工砂石粉含量控制在18%左右时,一般浆砂比值不会低于0.42。由此可见,浆砂比从直观上体现了碾压混凝土材料之间的一种比例关系,是评价碾压混凝土拌和物性能(可碾性、液化泛浆、层间结合、抗骨料分离等)重要的施工性能指标。

早期碾压混凝土配合比设计的特征值主要参考国外经验,一般采用 α 、 β 特征值。 α 是灰浆填充系数,是灰浆体积与砂浆孔隙体积之比,反映水、水泥、掺合料三者填充砂空隙的情况; β 是砂浆填充系数,是砂浆体积与骨料孔隙体积之比,反映水、水泥、掺合料、砂四者填充粗骨料空隙的情况。由于 α 、 β 特征值受砂颗粒级配、石粉含量等因素影响,加之 α 、 β 特征值变幅较大,计算条件复杂,不能直观评价。目前浆砂比已成为碾压混凝土配合比设计的重要参数之一。

3 主要碾压混凝土工程简介

3.1 高寒地区的龙首碾压混凝土研究与应用

龙首水电站主坝为薄双曲拱坝,是首座在西北高寒地区采用全断面碾压混凝土施工的薄拱坝。针对龙首工程地处严寒、多风、蒸发量大以及年极端温度相差极大(79℃)的自然特点,对碾压混凝土施工极为不利。龙首碾压混凝土设计指标抗冻等级F300,是当时最高的抗冻设计指标,保证抗冻指标满足设计要求是配合比设计成败的关键。水电四局试验中心针对龙首工程气候特点,在原设计单位推荐的碾压混凝土配合比基础上进行技术创新。一是选用较小的水胶比,提高Ⅰ级粉煤灰掺量,以降低混凝土温升,同时弥补了天然砂石粉含量偏低的不足。二是科学创新,突破规范VC值5~15s的规定,采用1~5s的低VC值,适应龙首气候干燥蒸发量大的特点,使混凝土入仓至碾压完毕具有良好的可碾性。三是在碾压混凝土中掺用优质的缓凝减水剂和引气剂,由于采用低VC值,解决了碾压混凝土引气难的困扰,使碾压混凝土含气量保持在4.5%~5.5%范围,抗冻等级F300的难题也迎刃而解。通过技术创新,解决了龙首工程碾压混凝土从拌和运输、入仓摊铺到碾压过程中的失水、VC值损失等一系列难题。冬季采用蓄热法施工技术创新,打破严寒地区碾压混凝土不能施工的先例,保证了龙首水电站大坝工程的质量和提前发电,为碾压混凝土在北方干燥严寒地区施工提供了宝贵的第一手资料。

3.2 蔺河口高掺粉煤灰碾压混凝土研究与应用

蔺河口水电站位于汉江支流岚河中游,地处陕西省岚皋县境内,水电站主坝为双曲薄拱坝,坝高100m,采用全断面碾压混凝土施工技术。由于双曲拱坝的特性对混凝土抗裂性能要求很高,碾压混凝土极限拉伸值设计指标 1.0×10^{-4} ,极限拉伸值是制约碾压混凝土配合比设计的关键。为了有效提高碾压混凝土抗裂性能、防渗性能、层间结合、可碾性和降低大坝温升,配合比设计采用“一高两低”的技术路线:即在碾压混凝土中高掺粉煤灰、选用较低水胶比和低VC值,大坝防渗区二级配和内部三级配碾压混凝土均掺粉煤灰65%。一是简化温控,降低成本,充分体现碾压混凝土筑坝的技术性和经济性;二是采用低水胶比和低的VC值,改善了碾压混凝土拌和物性能和施工的可碾性、液化泛浆、层间结合和抗骨料分离的能力。这样极大地提高了碾压混凝土的可塑性、抗裂性能以及抗渗性能等。质量控制结果表明,高掺粉煤灰碾压混凝土极限拉伸值满足设计要求,抗裂性能优。大坝钻孔取芯,芯样最长10.47m,芯样外观光滑致密,层间结合良好。

3.3 百色工程辉绿岩人工砂石粉在碾压混凝土中利用研究

百色水利枢纽碾压混凝土主坝工程采用辉绿岩人工骨料,由于辉绿岩骨料硬度高、密度大等自身特性,加工的人工砂级石粉含量很高,其中小于0.08mm微粉颗粒占石粉的40%~60%。在主坝碾压混凝土配合比试验研究中发现:碾压混凝土的用水量、凝结时间、工作性能、强度和干缩等性能有别于其他工程碾压混凝土,特别是碾压混凝土凝结时间严重缩短,这在国内已建、在建的碾压混凝土工程中是前所未有的。为此对“辉绿岩人工砂石粉在碾压混凝土中的利用研究”进行课题立项,通过研究解决了百色碾压混凝土现场施工难题,同时对石粉作为掺合料的可行性进行了论证应用。通过对温度—VC值—外加剂品种、掺量与碾压混凝土凝结时间关系的研究,解决了辉绿岩人工骨料碾压混凝土凝结时间严重缩短的问题,得出一整套高温地区碾压混凝土施工的重要参数,保证了亚热带高温条件下的碾压混凝土施工质量。

该科研成果在广西右江百色水利枢纽碾压混凝土主坝工程中,不仅解决了辉绿岩骨料在碾压混凝土中存在的一系列问题,而且创造性地将辉绿岩人工砂石粉作为掺合料替代部分粉煤灰,在施工现场进行了成功应用,技术经济效益显著。同时也对多余废弃的石粉进行了再利用,利于环保,具有明显的社会效应,为今后碾压混凝土施工拓展了新的思路,值得大力推广借鉴。

3.4 光照工程碾压混凝土粉煤灰代砂方案应用

光照工程为世界级碾压混凝土重力坝,碾压混凝土采用石灰岩人工砂石骨料,由于人工砂采用湿法生产,致使宝贵的0.08mm以下微石粉大量随水流失,人工砂石粉含量仅为7%~13%。2005年8月下旬,进行第一次碾压混凝土工艺试验时,采用的碾压混凝土配合比粉煤灰掺量较低,大坝防渗区二级配粉煤灰45%,大坝内部三级配粉煤灰50%,由于人工砂石粉含量偏低,经计算碾压混凝土浆砂体积比仅为0.35。因此,现场工艺试验碾压混凝土拌和物泌水和骨料分离严重,可碾性、层间结合很差,90d龄期进行钻孔取芯,芯样层间结合缝面痕迹明显,外观蜂窝麻面,很不理想,造成第一次碾压混凝土工艺试验失败。

为此,决定进行了第二次碾压混凝土工艺试验。2005年12月上旬,受闽黄水电工程联营体邀请,水电四局派试验专家到贵州光照工地,首先对碾压混凝土配合比进行了优化试验调整。在保持原有配合比水胶比不变的基础上,大坝防渗区二级配和内部三级配碾压混凝土,粉煤灰掺量分别提高到50%和55%。同时针对人工砂石粉含量偏低的情况,采用粉煤灰代砂4%技术方案,把碾压混凝土的浆砂体积比从原来的0.35提高到0.44,同时采用较低的VC值,控制仓面VC值3~5s。第二次碾压混凝土工艺试验十分成功,仓面碾压混凝土液化泛浆充分,可碾性、层间结合良好。10d龄期即对碾压混凝土进行了钻孔取芯,芯样表面光滑致密,层间结合无法辨认,得到专家一致好评认可,保证了2006年2月光照大坝碾压混凝土按期施工浇筑。

3.5 金安桥外掺石粉碾压混凝土研究与应用

金安桥水电站工程碾压混凝土大坝,是目前仅次于龙滩工程的第二碾压混凝土大坝。金安桥水电站首仓大坝碾压混凝土施工浇筑于2007年5月上旬出色完成。当时金安桥坝区正处于气候干燥少雨、高温多风、光照强烈、白天温度达30~35℃、蒸发量大等不利的施工条件下,针对碾压混凝土采用玄武岩骨料密度大、硬脆、需水量高、人工砂石粉少、特别是0.08mm以下的微石粉含量极少等特点,试验研究采用外掺石粉代砂6%~8%的技术方案,使人工砂石粉含量达到18%~20%,其中0.08mm以下微粉颗粒达到40%以上。同时对碾压混凝土拌和物VC值实行动态控制,出机VC值以仓面可碾性为原则,夜晚控制出机VC值2~5s,白天控制出机VC值1~3s,出机按下限控制,仓面按3~5s范围进行控制。金安桥碾压混凝土配合比采用外掺石粉代砂技术方案施工现场证明,碾压混凝土浆体充足,可碾性良好,骨料不分离,表面完全液化泛浆,碾压后的仓面有弹性,使上层骨料能够嵌入下层已碾压完的混凝土中,保证了碾压混凝土层间结合质量。

4 结束语

- (1) 碾压混凝土筑坝技术快速施工是其他筑坝技术无法比拟的。例如贵州光照水电站主坝为碾压混
- (下转第13页)

小湾水电站高边坡开挖预裂爆破施工

● 王应周/(四川松林河流域开发有限公司)

【摘 要】 本文结合小湾水电站工程高边坡开挖的实际,较全面地介绍了预裂爆破的机理及工程应用。在小湾水电站高边坡开挖中,对岩体进行了合理的可爆性分类,通过现场爆破试验和数据统计分析,调整孔距、孔径、线装药密度、堵塞密度及长度等对爆破参数进行优化,确定了施工中合理的爆破参数、装药结构及起爆方式和爆破网络,使爆破效果达到最佳,达到了提高边坡爆破开挖质量及保证边坡稳定的目的。

【关键词】 小湾水电站 预裂爆破 开挖施工 应用

1 石方预裂爆破技术的发展

1.1 石方预裂爆破技术的原理

进行石方开挖时,在主爆区爆破之前沿设计轮廓线先爆出一条具有一定宽度的贯穿裂缝,以缓冲、反射开挖爆破的振动波,控制其对保留岩体的破坏影响,使之获得较平整的开挖轮廓,此种爆破技术为预裂爆破。预裂爆破不仅在垂直、倾斜开挖壁面上得到广泛应用;在规则的曲面、扭曲面以及水平建基面等也可采用预裂爆破。

预裂爆破最初在美国科拉多矿山采用,1959年美国尼亚加拉水电站引水渠和竖井开挖将预裂爆破技术首次带入水电工程;美国的 D. Holmes 通过试验,将预裂爆破技术继续推广,使之广泛应用于各种地上和地下工程。我国 1964~1965 年最先在湖北陆水水电站使用预裂爆破技术,20 世纪 70 年代在葛洲坝水利枢纽施工中,通过一系列的爆破试验,从而大规模地运用预裂爆破,并第一次应用到陡边坡开挖中。1983 年,《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(SDJ 211—83)将预裂爆破收录其中,自此,在水电建设中预裂爆破成为必须进行的保护边坡质量的技术措施。近年来,随着一系列国家大型水利工程的上马,预裂爆破技术得到了广泛应用,爆破技术水平也得到进一步的发展与成熟。但由于目前的预裂爆破理论还并不十分完善,加上各类工程地质条件的千差万别,导致爆破效果往往不尽如人意,因此,解决各种复杂地质条件下的预裂爆破技术是以后的主要研究课题。

1.2 目前国内预裂爆破技术的基本要求

(1) 预裂缝要贯通,且在地表有一定开裂宽度。对于中等坚硬岩石,缝宽不宜小于 1.0cm;坚硬岩石缝宽应达到 0.5cm 左右。但在松软岩石上缝宽达到 1.0cm 以上时,减振作用并未显著提高,应多做些现场试验,以利总结经验。

(2) 预裂面开挖后的不平整度不宜大于 15cm。预裂面不平整度通常是指预裂孔所形成之预裂面的凹凸程度,它是衡量钻孔和爆破参数合理性的重要指标,可依此验证、调整设计数据。

(3) 预裂面上的炮孔痕迹保留率应不低于 80%,且炮孔附近岩石不出现严重的爆破裂隙。

1.3 目前国内预裂爆破主要技术措施要求

(1) 炮孔直径一般为 50~200mm,对深孔宜采用较大的孔径。

(2) 炮孔间距宜为孔径的 8~12 倍,坚硬岩石取小值。

(3) 不耦合系数(炮孔直径 d 与药卷直径 d_0 的比值)建议取 2~4,坚硬岩石取小值。

(4) 线装药密度一般取 250~400g/m。

(5) 药包结构型式,目前较多的是将药卷分散绑扎在导爆索上。分散药卷的相邻间距不宜大于 50cm 和不大于药卷的殉爆距离。考虑到孔底岩石的夹制作用较大,底部药包应加强,约为正常线装药密度的 2~5 倍。

(6) 装药时距孔口 1m 左右的深度内不能装药,可用砂土填塞捣实。填塞段长度应合适,如果堵塞过短,容易形成爆破漏斗或因爆破漏气影响爆破效果,堵塞过长则可能导致不能出现裂缝。

2 小湾水电站高边坡开挖施工技术特点

小湾水电站位于大理白族自治州南涧县和凤庆县交界处,是澜沧江中下游河段规划的八个梯级电站中的第二级。小湾水电站工程规模宏大,是云南省西部大开发的标志性工程,主要永久性建筑物包括混凝土双曲拱坝、坝后水垫塘及二道坝左岸泄洪洞、右岸大型地下洞室群组成的引水发电系统等。坝高 292m,是目前世界上拟建的最高混凝土双曲拱坝,其强地震区的高拱坝建设,大跨度地下厂房洞室群及高水头、高参数、大容量水轮发电机制造等,均属世界领先水平。小湾电站总装机容量 420 万 kW,年发电量 190 亿 kWh,为西电东送战略的骨干电源点。总库容 150 亿 m^3 ,水库面积 189 km^2 。

小湾水电站坝区山高谷深,两岸谷坡陡峻,地形地质条件复杂,边坡岩体风化卸荷严重。其左岸坝肩边坡开挖高程在 1640m,大坝基础高程在 953m,边坡总开挖高度近 700m,坡面平均坡度为 1:(0.4~0.6),最缓边坡坡度 1:1.1;小湾水电站的高部位质量技术指标要求较高,《小湾水电站边坡开挖质量要求与技术规范》规定:小湾边坡开挖的坡面超挖 $\leq 30\text{cm}$,欠挖 $\leq 10\text{cm}$ (坝基槽欠挖为 0),坡面爆破半孔率不小于 80%,爆破面不允许出现爆破裂隙,造孔孔位偏差 $\leq 10\text{cm}$,孔深偏差 10cm。另外小湾水电站的高边坡开挖部位,出露岩石主要为正玄武花岗岩,部分夹薄层砂岩、泥质页岩等,岩体节理、裂隙、破碎带局部发育,故小湾水电站的高边坡开挖具有开挖高差大、开挖强度高、爆破振动要求严、钻爆工程量大、地质条件复杂、开挖质量要求高、长边坡开挖难度大等特点。因此,如何结合本高边坡开挖的特点和地质条件,采取合适的施工技术措施,是保证开挖质量达到设计要求的關鍵。

3 小湾水电站初期预裂爆破参数

3.1 预裂孔的钻孔直径

小湾水电站边坡开挖高度大,达 700m,工程量亦十分巨大,总开挖量在 1600 万 m^3 以上。根据小湾工程标书要求,工程在 2002 年下半年开工,2009 年底第一台机组发电。为此要求坝基槽开挖必须保证在 2005 年 8 月 30 日前完成,边坡实际开挖工期约为 3 年,工期要求非常紧张,实际施工时考虑工程进度的因素,尽量采取较大的钻孔直径。根据其他工程经验,351 钻机采用高压风,进尺快,操作方便,移动灵活,适合在各种场地条件下作业,因此小湾电站所使用的钻机设备 27 台钻机全部为该类型。该型钻机的采用的转杆直径为 50~80mm,配合钻头,实际钻孔直径可达 110mm。为节省施工成本和充分满足进度要求,小湾水电站边坡开挖预裂孔的钻孔直径就采用 110mm。

3.2 预裂孔间距

钻孔间距 L 和钻孔直径 D 的比值 E 称为孔径比,它决定了钻孔的数量。从施工上说, E 值大好一些,可以减少孔的数量,但是过大的 E 值不能保证预裂面质量。

根据《新编爆破工程实用技术大全》,预裂孔间距 $L=(8\sim 12)D$ 。

当采用 110mm 钻孔直径时,孔间距的计算结果为 88~132cm,施工方根据原先在三峡工程的经验和小湾的岩石情况,控制孔距为 120cm。

3.3 预裂孔的线装药密度

根据《现代水利工程爆破》,线装药密度计算值为 538g/m,小湾水电站边坡开挖实际采用的预裂孔的线装药密度为 520g/m。

3.4 预裂孔的堵塞长度

预裂孔的堵塞是爆破施工环节中比较重要的环节,堵塞长度不合理,会导致造成冲孔或孔口的岩贴,影响预裂效果;堵塞物不合格,例如采用松散的干燥的碎石渣等,同样会造成爆破时高压气体冲破堵塞体而造成漏气,直接影响预裂面的形成。根据研究,预裂孔的堵塞段最好采用低黏性的湿土进行堵塞最为理想,这种土质不需要多次的夯填就能达到密实的堵塞效果,操作较为方便。但在小湾边坡开挖中,由于受现场施工条件所限,湿土的运送极为不便,最后采用钻孔的岩灰和岩砂混合经稍微湿润,堵塞效果良好。堵塞长度取孔距的 0.8 倍即 1m。

3.5 爆破实际效果

小湾水电站边坡初期爆破开挖采用的上述爆破参数,基本都是根据理论计算和参照以前先例工程的预裂爆破经验确定的,但实际小湾的前期边坡开挖自高程 1620m 到高程 1480m 左右,实际效果并不理想,预裂面半孔率在 50%以下,预裂大面普遍有拉槽岩突现象,预裂面底部成形困难,基本靠二次光面小爆破处理,预裂面顶部拉裂严重,边坡马道成形很差。

4 小湾水电站边坡开挖中爆破参数的改进和优化

4.1 前期爆破效果及原因分析

在小湾边坡开挖施工前期爆破作业中,爆破效果不甚理想:开挖面爆破裂隙发育,半孔率普遍在 30%以下,台阶上爆破漏斗明显,岩石拉裂严重,马道成形极差,坡脚超欠挖也十分严重。针对此情况,小湾建设方委托长江科学院和昆明勘测设计研究院(以下简称长一昆院)进行小湾边坡开挖的预裂爆破试验和边坡振动监测,以寻求适合小湾边坡开挖的最佳参数和爆破施工方法。长一昆院于 2003 年 6~8 月正式展开了近 3 个月的试验。根据调查,长一昆院对前期开挖效果不良原因做了初步分析:首先是爆破参数的合理性。小湾开挖部位的岩体

根据实验结果,虽然属于正玄武花岗岩,岩石极限抗压强度很高,能达到120MPa以上,但是岩层构造并不完整,存在一定的多向节理和部分软弱夹层,另外对于 F_8 、 F_9 、 F_{10} 和 F_{11} 等断层贯穿于整个边坡区域,破坏了岩体结构的完整性。另外岩层为顺边坡走向,夹角为 $27^\circ \sim 41^\circ$,对爆破影响较明显,使取得理想的爆破效果增加了难度。根据上述原因,初步认定,预裂爆破的线装药密度过大,超过了岩体的极限拉裂强度,在垂直于预裂面方向造成孔壁的拉裂破坏,影响半孔率,也是造成预裂面上拉槽破坏的直接原因。由于边坡开挖高度大,炮孔非常深,每个开挖台阶在基本在20m,实际钻孔一般在23m左右,对于这样的深孔预裂爆破,应该充分考虑岩体的夹制作用,孔越深,夹制作用就越突出,所以对于预裂孔底部应布置足够的加强药卷,对于孔顶部的部分则相应地减小线装药密度,以减轻底部预裂不全而顶部却拉裂破坏现象的发生。爆破对于预裂孔的间距,采用1.2m,实际观察看来炮孔间距还是相对较大,开挖预裂面存在较多的岩突现象。其主要原因是:如果岩体实际构造非完整,当预裂孔的间距过大时,预裂爆破产生的高压气体不及到达孔间间距的一半就迅速衰减,导致预裂裂缝不是按孔间最小距离开展,从而形成预裂面的弧面部位,造成开挖质量的缺陷。

4.2 爆破优化及爆破参数调整

4.2.1 爆破参数的改进和调整

长一昆院的爆破试验进行的重点研究是对参数调整后的爆破进行了共6次试验,分别在左4号山梁边坡1380~1320m高程上进行,主要是根据岩性特点,调整线装药密度和装药结构,线装药密度分别采用了500g/m、480g/m、420g/m、400g/m和380g/m等五种,底部加强药卷分别为10 ϕ 32mm连续药卷、12 ϕ 32mm连续药卷、6 $\times$ 2 ϕ 32mm连续药卷和4 $\times$ 2 ϕ 32mm连续药卷等布置,孔口部位的3m范围内线装药密度均采用正常装药密度的2/3。另外是预裂孔距进行调整,孔距分别采用了1.2m、1.1m、1.0m和0.9m等四种。通过对试验结构对比观察发现,对于预裂孔的线装药密度采用480g/m,底部6 $\times$ 2 ϕ 32mm连续加强药卷,爆后效果最好,半孔率高,孔底预裂到位,预裂面无明显爆破裂纹。但在局部岩体软弱部位如夹层,破碎裂隙部位和岩性有明显变化带,预裂效果显著降低,孔痕可见性差,预裂面有一定损伤。在这些部位宜降低线装药密度,控制在450~400g/m左右,在钻孔中应注意加强对这些位置和相应孔位的标识,在装药环节可以做到有效区分。

4.2.2 爆破方式的优化

(1) 预留开挖保护层:

小湾工程边坡的开挖受实际岩性的限制,马道的成形情况始终不能很好地完成,即使在采用了合适爆破参数的情况下,马道也存在拉裂缺失现象。最主要原因是岩体属于顺河道向,当经过马道时,岩体被切割,在马道外沿形成较薄的楔形体结构,非常容易遭到破坏。经

过对其他工程的借鉴,建议采取预留马道保护层的方法进行,即边坡预裂到位,但主爆孔的深度在设计上少2m,使整个开挖面高程抬高2m,马道部位也相应就预留出了近2m的保护层厚度。待下层边坡爆破后,再进行马道保护层的开挖。对于保护层的开挖,采用水平爆破的方式进行。在施工条件不能满足的情况下,也可采用手风钻小孔距爆破,但是爆破效果不如水平爆破效果理想。采用水平爆破时,一般按垂直于马道走向方向布置两排水平孔,一排是建基面部位的光爆孔或预裂孔,孔距应与坡面预裂孔距相同或略大于预裂孔距,但不宜超过12倍孔径。根据上部的保护层实际厚度情况,布置一排水平主爆孔,孔距一般在2m,距光爆孔或预裂孔在1m左右,若保护层厚度在1.5m以下时,也可不设主爆孔,对爆后局部的大石进行孤石解爆处理。对于具体采取光面爆破还是预裂爆破,研究证明,只要爆破控制得好,实际效果应当是相同;但是从控制爆破震动的角度考虑,预裂爆破方式引起的爆破震动相对较小,故小湾工程仍采用水平预裂方式进行。水平预裂孔的线装药密度比边坡减小50~60g/m,一般采用420g/m左右的线装药密度,且孔底不采取加强药卷,堵塞方式与边坡预裂一样,排间延时采用75ms,断间延时采用25ms。为提高网络传爆的可靠性,孔内均采用M5段非电雷管延时,爆后看效果良好。

(2) 使用施工预裂技术:

根据实际地形构造,小湾工程的部分边坡开挖面积较大,最宽处有45m左右,采取一次性预裂爆破的方法在现场操作有几个缺陷:

1) 爆区区域太大,主爆孔排数如相应布置较多,于爆破网络的连接不利。按45m的爆区、3m的主爆孔排距进行布置,大约至少需要布置15排,按每排间延时110ms计算,在地面网络全部传爆完成后,考虑预裂孔起爆的时间,则主爆孔内的雷管至少需要延时1.8s以上,因此爆破网络必然会采用到高位延时雷管。根据雷管的特性,段位越高,其延时精确率越差,其延时偏差可能会超过段间延时,从而引起整个起爆网络的起爆顺序混乱,造成爆破紊乱、部分孔药拒爆等不安全情况。根据以往的其他工程爆破教训,也反映出这一点,故这种一次性爆破方式不宜采用。正确的做法是将爆区进行分区,控制爆破排数,最多应低于12排,保证爆破网络的设计和可靠传爆。

2) 爆区区域太大,爆破发生后,由于岩脚的夹制作用,导致后排的底部爆破不充分,前排临空面不出来,将严重影响后续爆破,而形成预裂面附近的岩体出现大孤石或根本爆破不成功等,需要二次爆破,引起爆后出渣困难,严重滞后施工工期。

3) 爆区区域太大,一次性投入的机械设备相对需要较多,各种工序的施工时间相应延长,按照流水施工的原理,是不利于快速施工的。另外,由于小湾工程地处云贵高原,一天内气候变化较快,且雷雨暴风季节相对

月份较多,在大区域进行装药操作时,时间越长越会增大危险性,这对爆破安全的影响十分巨大。

综上所述,小湾工程不宜采用厚宽区域爆破,对于在实际爆破区域太宽时采取分块爆破的方法进行爆区处理。长一昆院根据在其他工程爆破施工中的经验,对小湾的爆破进行参照。爆区分块爆破时,如不采用施工预裂的方式,将导致后爆块的边缘位置拉裂严重,布孔困难甚至无法布孔,影响爆破效果。而且,由于未采取此方法时,前爆区爆破时产生的爆破震动直接传到上一层已开挖边坡,影响边坡稳定,因此采取合适的施工预裂方法显得比较重要。具体做法是:布孔间距比预裂孔大,可调整到 2m,相应的装药量加大。根据小湾工程的具体岩石情况,线装药采用 $\phi 32\text{mm}$ 炸药连续装药,底部增用 8 节 $\phi 32\text{mm}$ 加强药卷,竹片支撑,导爆管起爆,主爆孔内装 M11 段延时雷管,延时 880ms,段间用 M2 段非电雷管传爆。采用此项技术后,爆破边界基本未发现被破坏撕裂的情况,方便并保证了相邻块的施工和钻孔质量。

(3) 加强周边加密孔的使用:

小湾工程受特殊的地形影响,边坡局部部位较缓且施工区域狭窄,致使钻孔设备无法到达,如按设计进行布孔,部分孔位不能完成正常造孔作业。因此在实际操作上引入了周边加密孔的技术。对周边加密孔的定义是:为达到预定的爆破效果,保证爆破临空面的形成,在主爆区外沿按一定的方式,对爆区炮孔孔位进行的加密布置类型。其布置原则是尽量顺边坡坡度方向布置,保证底部的最小抵抗线应满足要求,且孔位不能与其他主爆孔发生交叉。对其装药则应根据具体情况,减小装药量,还要加强孔口的堵塞,防止发生“冲天炮”引起飞石,发生危险。周边加密孔运用后,有效地解决了特殊部位造孔困难的情况,保证了爆破时外沿临空面的有效创建,保证了整体爆破效果。

4.3 爆破安全实施

为保证爆破效果,在爆破装药联网过程中加强控制,主要做好几个方面:炮孔要全部检查验收通过后才允许装药,炮孔装药前必须检查炮孔深度和孔壁质量,保证炮孔能正常装药,预裂孔装药严格按爆破设计的装药结构进行装药,预裂孔钻至坝基基面或马道或边坡面以下时,从建基面或边坡面以上 0.6m 开始装药,0.6m 以下用岩粉堵塞,以防止破坏建基面。预裂孔、主爆孔、缓冲孔的堵塞先用塑料纸封堵至药卷顶部,然后采用黏土或岩粉封堵至孔口,并采用细木棍捣密实。堵塞长度必须符合爆破设计要求;网络连接质检员必须全过程跟踪,逐孔检查;导爆管与传爆雷管连接采用反向连接,导爆索与雷管连接采用顺向连接。联网完成后,由爆破负责人员仔细检查确认无误后签发准爆证进入起爆程序。

4.4 爆破安全监测

小湾工程由于受特殊的地形影响,开挖边坡较高,

开挖坡度陡,边坡稳定受爆破影响较大,为保证安全,需加强对爆破震动对边坡稳定影响的监测工作。一般要求是测定爆破对边坡产生的爆破震动的水平震速、垂直震速、震动频率、震动时间等四项数值。小湾工程主要采取布置震动测点和布置声波测试孔的方法进行爆破影响观测。而声波测试一般采取两种形式:一是布置在预裂线两边的骑缝孔;二是在上一层坡面上按三角形布置声波测试浅孔。其原理都是在孔内和孔间先进行了爆前及爆后的声波测试,后对比出爆破前后波速的差值,从而反映出爆破对岩石的破坏程度,为判断爆破安全定性提供依据。再根据具体的结果对爆破参数进行调整,以达到符合小湾边坡开挖特殊的具体技术规范要求的目。

5 小湾水电站预裂爆破参数调整后的效果和应用

小湾水电站边坡开挖通过 2 个月的爆破实验,通过不断地调整爆破参数和优化改进爆破工艺,边坡开挖爆破效果得到明显的改善,爆破面平整光滑,超欠挖符合设计开挖要求,半孔率提高到 90% 以上,开挖面无爆破裂隙出现。

小湾边坡开挖最终采用的爆破参数如下:预裂孔线装药密度为 380~425g/m (局部软弱部位减小),预裂孔采用高压 351 钻机造孔,孔间距为 1m,孔径 110mm,孔底采用加强装药方式,堵塞长度为 2m,炸药单耗为 0.5kg/m³,主爆孔间排距采用 4m×2.5m,周边局部采用加密孔布设,预裂保护层 2m。爆破网络采用非电雷管,同段内采用导爆管连接,主爆孔内用延时雷管,雷管段位最高控制在 M15 内。采用施工预裂爆破技术,严格控制爆区的宽度,保证爆前临空面的形成。

小湾边坡开挖后期采用上述参数和措施后,有效地保证了小湾水电站的边坡爆破效果和边坡开挖岩体稳定要求,开挖质量达到了设计要求,开挖施工也满足了工程工期进度要求。小湾高边坡开挖质量控制最终达到:开挖平整度控制在 15cm 内,半孔率在 90% 以上,超挖控制在 30cm 以内,欠挖在 10cm 以内(坝基槽实现无欠挖),开挖面基本无爆破裂隙。

6 结束语

针对其开挖质量和开挖稳定性要求较高的特点,在本工程实际施工中,结合爆破试验的研究成果,在预裂爆破中采用合理的控制爆破技术及优化后的爆破参数,有效地保证了在爆破开挖中满足质量和高边坡稳定的要求。小湾水电站边坡开挖的成功,标志着我国预裂爆破技术在高边坡石方开挖领域的充分成熟,本工程成功案例亦可为国内外其他类似高边坡开挖工程提供一定借鉴。

桃子沟水库面板堆石坝快速施工技术

● 陈 峰/(中国水利水电第十三工程局有限公司)

【摘要】 面板堆石坝施工具有工程量大、工期短、施工强度高等特点,因而施工组织、管理、度汛存在着很大的难度,同时坝体还存在着后期沉降较大及不均匀变形、面板脱空、结构性裂缝等不利情况。中国水电十三局结合桃子沟水库面板堆石坝施工的具体情况,采取了坝体快速填筑施工、减少后期沉降与不均匀变形、防止面板结构性裂缝与脱空等关键措施,进行了积极的探索与实践,取得了较好的技术经济和社会效益。

【关键词】 桃子沟水库 面板堆石坝 坝体分区 快速施工

1 工程概况

桃子沟水库工程是以灌溉、城市供水为主,兼有农村人畜饮水等综合效益的中型水利工程。桃子沟大坝位于涪陵城西北方向的马武镇松涛村境内,坝址距主城区35km,对外交通条件较好。

桃子沟水库枢纽由拦河坝、溢洪导流隧洞、放水塔和放水隧洞组成。

拦河坝为钢筋混凝土面板堆石坝,坝顶高程600.6m,最低建基面高程538m,最大坝高62.6m,坝顶长度202m,宽6.0m,前后坝坡坡比均为1:1.4,库容1280万m³。

2 工程难点分析及其对策

2.1 施工难点

坝址两岸地形坡度在35°~40°之间,坝肩处边坡落差较大,具有高陡边坡的特点,其施工技术保障措施、安全防护及坡面稳定工作较为突出。

2.2 施工措施

高边坡开挖采用自上而下、多个施工作业面分梯段开挖的施工方法,梯段高度一般为8~10m。河床部位仍采取分层开挖的方法施工。

边坡开挖前,首先进行坡顶周边截排水沟的施工。同时详细调查开挖线外对施工有影响的坡面、岸坡,以及开挖线内存在的不安全因素和岸坡的稳定性。山坡上所有危石及不稳定岩体均撬挖排除,少量岩块撬挖确有困难的,

经现场监理工程师同意用浅孔微量炸药爆破清除。

石方开挖优先选用预裂爆破施工,对不适宜采用预裂爆破的部位预留保护层,进行保护层控制爆破施工。施工自上而下进行,每一台阶爆破完毕及时处理坡顶浮石和坡面危石。开挖边坡的支护在分层开挖中逐层进行,上层的支护应保证下一层开挖安全顺利进行。为防止高空落石,沿开挖区坡顶开口线外侧采用人工编织袋装土,形成1m高安全防护墙。

3 确保大坝填筑快速施工的规划组织与管理

3.1 组织技术措施

编制详尽的施工组织设计,配备足够的资源,抽调参加过珊溪、引子渡等面板坝施工经验丰富的队伍和管理人员投入本工程。

3.2 机械设备配备与运行管理

3.2.1 设备配备

根据工期平均填筑强度41.5万m³/月,“一枯拦洪”期间为48万m³/月、1.6万m³/天,运输车辆按2倍强度配备,计算每一分钟在填筑作业面上要有2车石料上坝。坝料的推平和碾压等设备也按2倍以上强度进行配置,并选用功率大、性能优良、台班产量高的设备。

3.2.2 运行管理

各料源点根据上坝距离的远近、自卸车与挖掘机的大小合理组合配备,大坝填筑各工序均配备三套作业人员三班倒流水作业,做到停人不停机,既充分发挥设备的效率,又避免设备的闲置与浪费。

3.3 施工规划布置

3.3.1 料源供应与规划

做好料源的平衡规划,有计划地进行料场开挖和采运,使料场开采与大坝填筑在规模和强度上相适应。

3.3.2 填筑道路布置

坝基两岸山高坡陡,设计没有布置永久坝后道路,根据水库枢纽建筑物平面布置图,右岸建筑物有溢洪隧洞、放水塔和导流洞等永久建筑物,结合施工现场的实际情况修筑临时施工道路。临时施工道路布置如下:

R1 道路:由中嘴大桥至料场,全长约为 150m,路基宽 10m,路面宽 8m。

R2 道路:对坝基底桃子沟左侧已修筑临时道路进行加宽加固,并将该临时道路向桃子沟右侧延伸,使该道

路与上坝永久道路相连。

R3 道路:在 580m 位置,在桃子沟的左侧,沿山坡由坝体上游修筑一条与上坝永久道路相连的道路,道路长约 150m。

R4 道路:在大坝上游侧修筑一条与永久道路顶端相连的临时施工道路,起点为放水塔,使放水塔溢洪道导流洞进口生产临时设施与之相连,道路长约 400m。

4 堆石坝体分区及填筑施工技术参数

4.1 堆石坝体分区

堆石坝体分区如下:面板、垫层区、特殊垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区、下游干砌石护坡等。垫层区和过渡区水平宽度均为 3m,见图 1。

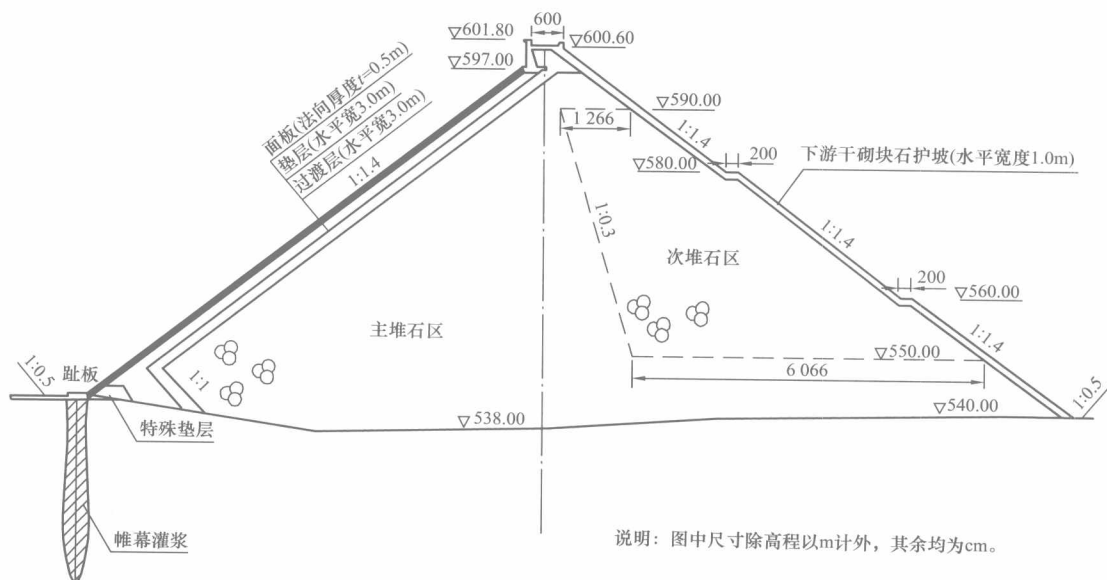


图 1 坝体结构图

4.2 坝体填筑施工技术参数

4.2.1 垫层料

垫层料为灰岩,垫层设计干密度 2.2g/cm^3 ,孔隙率 17.6%,渗透系数 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ 。其级配要求为:最大粒径 80mm,粒径小于 5mm 的颗粒含量为 30%~45%,粒径小于 0.075mm 的颗粒含量为 4%~6%。其设计碾压参数为:每层铺料厚度 40cm,碾压遍数为 8~10 遍,洒水量为 8%~25%,碾重应与碾压参数相匹配。工程实际碾压参数和洒水量根据设计填料、设计参数经现场碾压试验确定。

4.2.2 特殊垫层料

特殊垫层料为灰岩,其级配要求为:最大粒径 40mm,粒径小于 5mm 的颗粒含量为 35%~60%,粒径小于 0.075mm 的颗粒含量为 5%~10%。其设计碾压参数为:每层铺料厚度 20cm,洒水量为 8%~25%,碾重应与碾压参数相匹配。工程实际碾压参数

和洒水量应根据设计填料、设计参数经现场碾压试验确定。

4.2.3 过渡层

过渡料为砂岩,其设计干密度为 2.15g/cm^3 ,孔隙率 20%,渗透系数 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 。其级配要求为:最大粒径 300mm,粒径小于 5mm 的颗粒含量为 20%~30%,粒径小于 0.075mm 的颗粒含量小于 5%。设计碾压参数为:每层铺料厚度 40cm,碾压遍数为 8~10 遍,洒水量为 8%~25%,碾重应与碾压参数相匹配。工程实际碾压参数和洒水量根据设计填料、设计参数经现场碾压试验确定。

4.2.4 主堆石

主堆石为砂岩,其设计干密度为 2.1g/cm^3 ,孔隙率 22%,渗透系数为 $0.1 \sim 0.01\text{cm/s}$ 。其级配要求为:最大粒径 600mm,粒径小于 5mm 的颗粒含量为 4%~15%,粒径小于 0.075mm 的颗粒含量小于 5%。其设计碾压参

数为:每层铺料厚度80cm,碾压遍数为8~10遍,洒水量为8%~25%,碾重应与碾压参数相匹配。工程实际碾压参数和洒水量根据设计填料、设计参数经现场碾压试验确定。

4.2.5 次堆石

次堆石料为砂岩,其设计干密度 $2.0\text{g}/\text{cm}^3$,孔隙率25%。其级配要求为:最大粒径800mm,粒径小于0.075mm的颗粒含量不大于5%。其设计碾压参数为:每层铺料厚度1m,碾压遍数为8~10遍,洒水量8%~25%,碾重应与碾压参数相匹配。工程实际碾压参数和洒水量根据设计填料、设计参数经现场碾压试验确定。

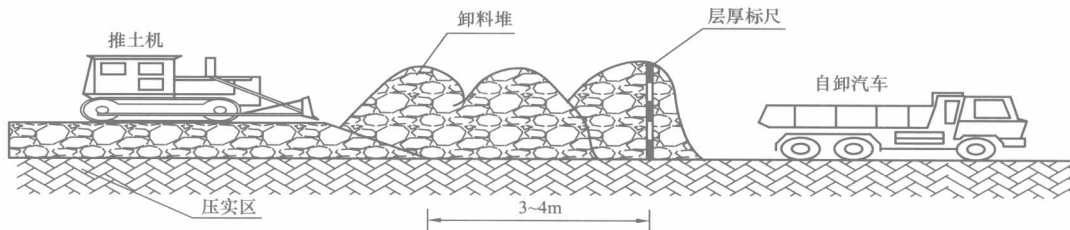


图2 后退法卸料、铺料方法示意图

(2) 洒水:人工用胶管接供水干管均匀洒水,掺水量要根据碾压参数确定。

(3) 碾压:碾压采用进退错距法,错距为30cm左右。振动碾采用YZ18振动碾碾压,行走速度为1~2km/h,碾压6~8遍,具体碾压参数根据现场碾压试验确定。压实堆石料的振动平碾行驶方向平行于坝轴,靠岸边可顺岸行驶。振动平碾难以碾及的地方,应用小型振动平碾进行压实。岸边地形突变或坡度过陡而振动平碾碾压不到的部位,适当修整地形使振动碾到位,局部可应用振动板或振动夯板压实。坝体堆石料采取大面积铺筑,以减少接缝。当分块填筑时,块间接坡处的虚坡带采取台阶式的接坡方式,即每填筑一层,外侧坡角线向填筑区移入50cm。

5.2 各分区结合部的填筑施工

5.2.1 坝体与岸坡接合部

坝体与岸坡接合部出现局部反坡的地方,均先处理成顺坡后再填筑,或按设计和监理工程师的要求先用混凝土或浆砌石修复成顺坡,再进行坝料填筑。

堆石体与岸坡接合部易出现块石集中现象,振动碾无法靠近碾压,施工中采用以下措施处理:岸边填料时自卸汽车采用后退法先填筑岸坡边4~5m的范围,然后再进行正常填筑。振动碾沿岸坡方向碾压,碾压不到的地方,采用振动夯板或手扶式振动碾碾压。

5.2.2 坝体分段结合部处理

各分段填筑结合部位易出现超径石和粗粒料集中、漏压、欠压等现象,采用反铲或装载机剔除结合部超径石,将集中的粗颗粒作分散处理的方法,进行骑缝加强碾压。

5 坝体堆石料填筑

5.1 填筑施工

(1) 铺料平料:采用15t自卸汽车运输上坝,TY320推土机后退法进行铺料平整,以避免大块石分离,铺料层厚80~100cm,用层厚标尺控制铺料层厚度,用3~5m靠尺控制平整度。堆石料在装卸时应特别注意避免分离,不允许从高坡向下卸料。靠近岸边地带以较细石料铺筑,严防架空现象。主堆石料与次堆石料连接时,先填筑主堆石料,再填筑次堆石料。堆石料区卸料、铺料方法见图2。

6 控制坝体后期沉降与变形、面板结构性裂缝与脱空的关键措施

6.1 完善大坝堆石体的分区

面板堆石坝堆石体分区原则之一是保证坝体变形的控制。分区的设置是使堆石体能为面板提供一个可靠支撑,使面板的变形、应力分布尽可能合理,并确保接缝止水系统的正常运行。从已建的大坝看,主、次堆石区变形特征相差过大的分区将会对面板的应力、变形产生较大的影响,并导致混凝土面板发生拉伸裂缝。这说明坝轴线下游的坝体材料不影响面板的老概念对高坝是错误的。

6.2 尽可能提高大堆石体的压实密度

堆石体的密实度主要通过控制填筑料级配和碾压质量实现。而采用重型压实机是提高压实度的措施之一。目前牵引式振动碾和自行式振动碾都已达25t。个别坝还采用了三边或五边的冲击压实机,该设备以12~15km/h的行走速度对地表产生高能量、大振幅、低频率的连续冲击来达到压实坝体的目的。从洪家渡大坝的试验看,冲碾压有可能获得更高的密实度。但由于行走速度大且采用转圈冲碾,在使用中必须为它提供足够大的工作面才能发挥作用。

6.3 实行早填筑并加大前期填筑强度,预留足够的预压沉降时间

堆石坝的主要技术难题是控制堆石体变形,堆石体变形包含瞬时变形和流变变形。瞬时变形在填筑碾压过

程中基本完成,而流变变形需要相当长的时间。且流变量和时间的关系可以用幂函数进行拟合,早期流变速率较快,晚期速率逐渐衰减。而坝体某一点的沉降速率又跟其上部的填筑速度和高度密切相关。要减少面板浇筑后的坝体变形,采取措施使坝体变形尽量在浇筑相应的各期面板前完成将是十分重要。而这点又跟导流度汛方案的选择密切相关。

混凝土面板堆石坝施工导流分期决定了坝体的施工分期,导流计划大体上就是大坝施工计划。混凝土面板堆石坝的导流度汛方案的选择就成为制定整个工程施工方案的关键。当然,导流度汛方案应根据工程具体情况选择,但在条件相对允许时采用低围堰枯水期挡水导流洞导流,在第一个枯水期内将坝体填筑到度汛高程,在砂浆护坡的保护下坝体挡水的度汛方案应是最优方案。它的优越之处:

(1) 实施该方案,坝体必须做到早期高强度填筑,早期高强度填筑将给坝体沉降留有足够充分的时间。

(2) 坝体早期挡水在水压作用下有利于坝体早期密实度的提高和水平位移的提前发生。

(3) 坝体经过一个汛期可使已填筑的堆石的湿化变形得到充分发展。

(4) 汛期中能继续对坝体上部高强度填筑,加速已填坝体的密实。

上述的优点说明该度汛方案的实施对加快坝体的早期沉降、减少坝体的后期变形、控制面板堆石坝结构性裂缝的发生将起到十分重要的作用。

6.4 分区合理,确保坝体均衡上升,减少坝体不均匀沉降变形

(1) 坝体填筑分期分块时要尽量减少上下游、左右块之间的高差。坝体临时挡水断面上下游高差应控制在30m左右。

(2) 当坝体临时挡水断面达到度汛标准后应尽快组织

断面下游部分的填筑,待上下游高程接近后即开始全断面填筑均衡上升。

(3) 当一期面板浇筑时,浇筑平台的下游部分应继续填筑上升,使下游部分堆石体先期得到压实,加速坝体中下游部分早期沉降。

(4) 在填筑时切不可忽视对下游堆石区填筑质量的严格控制。

通过以上措施减少各期各块因填筑高差和填筑时间差而产生的不均匀变形,使不同时段填筑的坝体之间变形协调,改善坝体位移分布。从控制坝体不均匀沉降来达到控制结构性裂缝的发生。

6.5 合理确定面板分区和浇筑时间,控制面板与坝体脱空变形

混凝土面板和堆石体的刚度相差悬殊,当坝体发生沉降时面板上部和坝体脱离即所谓“脱空”,当面板因受力弯曲产生的拉应力大于混凝土抗拉强度时面板即产生结构性裂缝。这种“脱空”现象对于低中坝影响不大,但对于大坝由于坝体变形量大脱空也大。有的坝脱空区的最大脱空间隙达15cm。要控制这种脱空现象应从合理确定各期浇筑平台高程和浇筑时间着手。

7 结束语

通过细致的规划、严密的施工组织和科学合理的安排,减少坝体后期沉降与不均匀变形和控制面板结构性裂缝与脱空的工艺措施、控制坝体不均匀变形的工艺措施、垫层坡面保护高度的调整、强风料掺配工艺等一系列技术工艺措施成功应用于工程施工实际,桃子沟面板堆石坝快速施工目标成功实现,取得了较好的技术经济效益和社会效益。在以后类似面板堆石坝工程施工中,将上述技术工艺措施加以应用、推广与提高,将对面板坝特别是面板堆石坝施工技术的发展起到积极的推动作用。

(上接第5页)

凝土重力坝,最大坝高200.5m,坝体混凝土量274万 m^3 ,其中碾压混凝土量240万 m^3 。2006年2月10日主坝采用全断面碾压混凝土开始施工至2008年3月,大坝混凝土全部浇筑到坝顶,其快速筑坝技术水平达到了空前。

(2) 三峡三期围堰碾压混凝土施工监理及检测由水电四局承担。三期围堰碾压混凝土施工被坝工界亲切地称为“三个百”工程,即堰高110.6m,在100多天的时间,浇筑碾压混凝土130万 m^3 。三期围堰正是由于采用了施工简单快速、质量可靠的碾压混凝土筑坝技术,从而有力地保证了三峡三期工程的按期截流。

(3) 目前,水电开发的重点在西南地区,为了加快水电建设开发速度,缩短工期,节省投资,许多水电站工程大坝采用碾压混凝土全断面筑坝技术,如观音岩、龙开口、鲁地拉、功果桥等水电站,为碾压混凝土应用和发展提供了更加广阔的前景。

加纳布维水电站项目截流施工风险研究

● 彭运河/(中国水利水电第八工程局有限公司)

【摘要】 非洲加纳布维水电站项目采用 EPC 合同方式建造,工程采用明渠方式导流。由于国际项目特别是交钥匙工程(EPC)的项目,在前期施工准备阶段人员、设备进场难度大,施工任务紧,造成按设计方案达到截流目标难度大,因此不得不对导流方式和导流建筑物进行修改。本文对加纳布维水电站的导流模式和截流施工的风险进行研究。

【关键词】 EPC 项目 明渠导流 截流 风险研究

1 工程概述

布维水电站项目位于加纳布维峡谷内,在沃尔特湖上游 150km 处的黑沃尔特河上。布维水电站主体工程包括一座碾压混凝土主坝和两座土石副坝、发电厂房及开关站等。主坝坝高为 110m,坝顶轴线长约 470m;副坝位于两岸山垭处,施工时不受河流洪水的影响;厂房布置在左岸台地上,为坝后背管式,紧贴主坝布置,厂房总装机容量 400MW,共装机 3 台,单机容量为 133MW。

2 工程原设计的导流方式

布维水电站项目由法国康贝联咨询公司(Coyne et Bellier)进行初步设计。初步设计规划采用全年十年一遇洪峰流量作为导流标准,一次性截流的导流模式。导流建筑物布置在河床右岸的台地上,先开挖导流明渠,在明渠过坝体段按永久混凝土结构修建涵洞,形成导流建筑物。在主坝的上、下游修筑土石围堰,形成挡水建筑物。

布维水电站的下游为沃尔特湖,无重大的城镇、工厂和铁路。沃尔特湖是阿克梭蒙波(Akosombo)坝形成的水库,为世界上至今为止最大的人工湖,有效库容达 1448 亿 m^3 。由于加纳电力紧张,使水库过度运行,自水库修建后,水库的水位一直在低水位运行。因此咨询的意见是:在布维水电站碾压混凝土主坝施工过程中,偶然的洪水不会造成很严重的损失,因此选择全年十年一遇洪峰流量作为导流标准。并且在 EPC 合同中规定,如

果施工洪水超过设计标准,造成的工程损失将由业主承担。

根据原设计的导流标准,导流明渠底宽为 35m,涵洞由 3 个单孔宽度为 10m 的孔口组成。进口明渠段的底板高程为 99m,涵洞底板及以下的明渠部分采用 1% 的坡与河床衔接。在设计过流标准 $1940\text{m}^3/\text{s}$ 的情况下,上、下游围堰的顶部高程分别为 112m 和 106m。原设计的导流建筑物的主要特性和布置见表 1。

表 1 布维水电站原设计的导流建筑物主要特性表

项 目	单位	数量	说明
导流设计流量	m^3/s	1940	$P=10\%$
导流时段		全年	
设计水位(上游/下游)	m	110.64/104.35	
围堰长度(上游/下游)	m	223.62/133.95	
围堰最大高度(上游/下游)	m	17/11	
围堰顶宽	m	10	
围堰顶部高程(上游/下游)	m	112/106	

3 原设计导流方案存在的问题

在大坝右岸坝址处有一突出的山脊,根据实测的地形图分析,明渠按该方案实施,该山脊的开挖边坡高度达 80m。边坡开挖方案为渠底至 113.50m 高程坡度为 1:0.50,113.50m 高程布置一个 5.00m 宽的马道,113.50m 高程以上按 10m 一个台阶,边坡采用 1:0.25,每个台阶布置一个 2.00m 宽的马道。

明渠的下游导墙靠近河道,施工时受河水的影响较