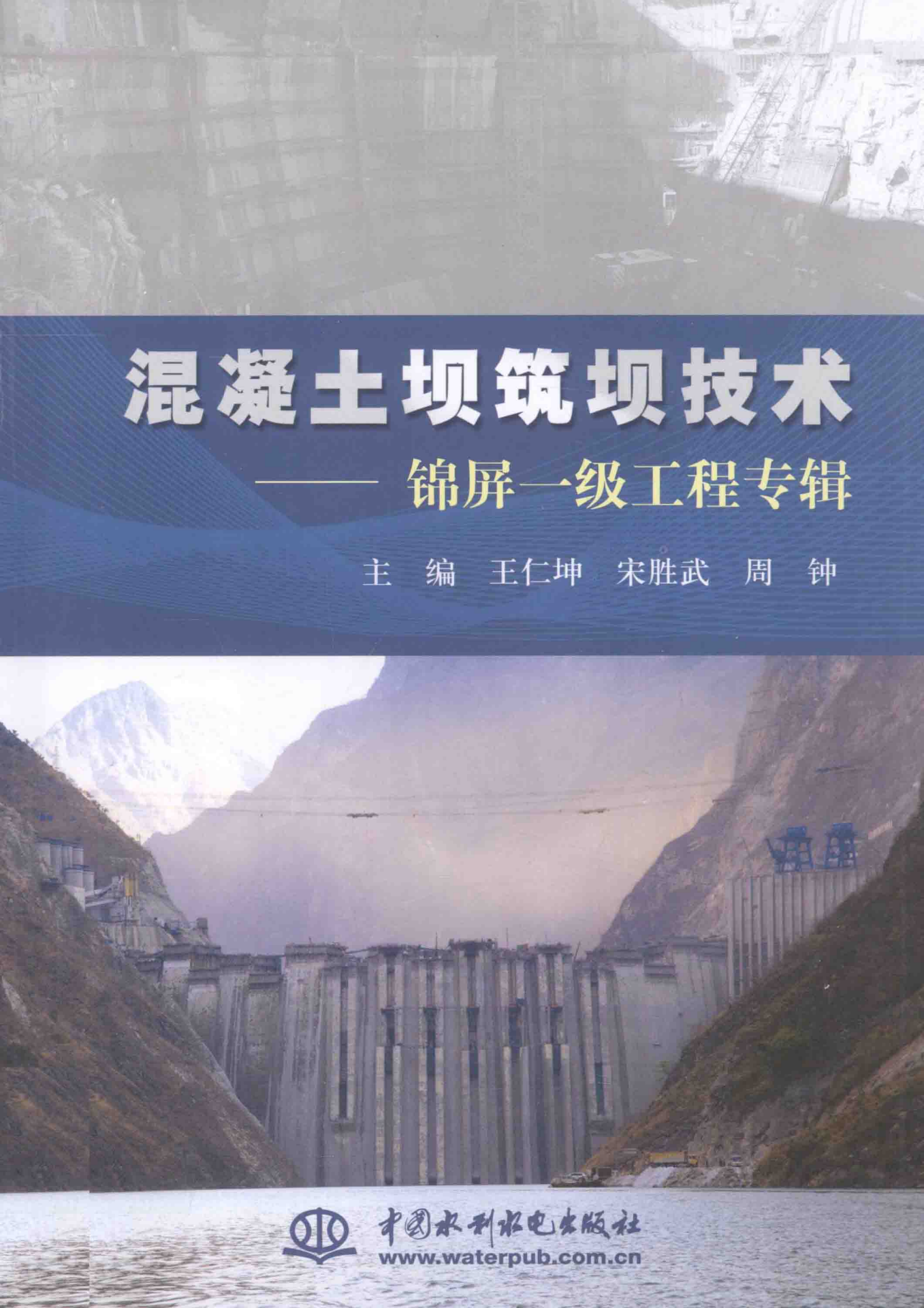




混凝土坝筑坝技术

—— 锦屏一级工程专辑

主 编 王仁坤 宋胜武 周 钟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

混凝土坝筑坝技术

—— 锦屏一级工程专辑

主 编 王仁坤 宋胜武 周 钟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本论文集选录了 34 篇文章, 内容涉及综述、工程设计、工程施工、科研与试验、新技术与新材料、工程监理等。

本论文集内容详实、实用性强, 对高拱坝工程建设有一定的借鉴作用, 可供广大水利水电工程技术人员阅读, 也可供高等院校、科研、设计、施工及管理单位人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

混凝土坝筑坝技术 : 锦屏一级工程专辑 / 王仁坤, 宋胜武, 周钟主编. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-5170-1388-4

I. ①混… II. ①王… ②宋… ③周… III. ①混凝土坝—筑坝—文集 IV. ①TV642-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第265737号

书 名	混凝土坝筑坝技术——锦屏一级工程专辑
作 者	主编 王仁坤 宋胜武 周 钟
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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 16.75 印张 397 千字
版 次	2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	78.00 元



凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

水利水电混凝土坝信息网成立于 1976 年，是目前国内唯一的混凝土筑坝技术专业信息网。拥有成员单位 86 家，十多年来成都勘测设计研究院一直承担信息网网长工作，每年依托大、中型在建工程举办全网技术年会，并出版论文专集，对混凝土坝工程从管理、设计、施工、监理、科研等几方面进行总结梳理，成果、经验得到了广泛应用，受到了设计、施工、监理等单位的好评。

十多年来本网工作开展顺利，2006—2012 年先后在小湾、拉西瓦、光照、溪洛渡、向家坝等特大型、大型工程地召开年会。年会的顺利召开离不开各业主单位的大力支持和帮助，特向华能澜沧江水电有限公司、黄河上游水电有限公司拉西瓦分公司、中国长江三峡集团公司、乌江流域黔源电力公司等表示感谢！

今年水利水电混凝土坝信息网技术交流年会依托锦屏一级工程，将在西昌举行，为配合信息网年会的召开特出版本书。本书主要包括锦屏一级工程设计、施工、科研与试验、新技术与新材料等方面内容，是多年来锦屏一级工程技术人员经验的结晶，值得相关工程技术人员借鉴。

本书在成都勘测设计研究院领导的大力支持下终于出版了，在此向积极参与、热情支持本次技术交流活动的论文作者表示感谢，希望我们的工程技术人员多多关注本网活动并积极投稿支持。愿本信息网越办越好！在此祝会议代表们身体健康、工作顺利！

《混凝土坝技术》编辑部

2013 年 10 月

目 录

前言

一、综述

3 锦屏一级大坝工程建设解决的几个重大技术难题

王继敏 刘林生

10 举步维艰 攻坚克难

周 钟

二、工程设计

21 复杂地基条件下的高拱坝基础处理思路及技术实践

陈秋华

30 复杂地质条件特高拱坝筑坝关键技术

饶宏玲

40 上游垮山洪水对锦屏一级大坝的影响及工程应急措施分析

周 静

47 锦屏一级拱坝坝身临时导流底孔大悬臂预应力闸墩优化研究

张公平 张 剑 唐 虎 唐忠敏

55 对现行规范中拱座稳定计算公式修正方法的探讨

庞明亮 胡云明 饶宏玲 邵敬东

61 锦屏一级水电站坝基防渗排水及特殊处理设计

唐志丹 祝海霞 潘晓红

72 锦屏一级水电站拱坝坝基固结灌浆设计

祝海霞 潘晓红 尤 林

- 81 锦屏一级电站进水口特性及结构分析
唐碧华
- 87 锦屏一级泄洪洞混凝土温控设计与实施
阎士勤 黄 玮 游 湘
- 95 工程高边坡设计风险控制
游 湘 杨 敬 张 旻
- 102 锦屏一级水电站缆机基础设计
张 剑 张 敬 张公平
- 107 锦屏一级水电站充水保压蜗壳三维非线性分析
幸享林 廖成刚

三、工程施工

- 119 碾压混凝土坝铺筑层面结合质量控制技术
吴 旭
- 126 隧洞混凝土浇筑斜洞液压自行式钢模台车施工设备创新研发
吴登明
- 136 浅谈锦屏一级水电站混凝土双曲拱坝 4.5m 升层施工
周 强
- 143 浅谈锦屏一级水电站导流洞封堵水下混凝土围堰施工
周 强

四、科研与试验

- 153 高拱坝整体稳定地质力学模型材料试验研究
杨 田 张 林 陈 媛 董建华
- 160 拱坝坝肩稳定破坏试验中结构面相对位移测试研究
李美蓉 陈 媛 张 林 胡成秋
- 165 锦屏一级拱坝天然地基条件下坝肩稳定三维地质力学模型试验研究
夏婵婷 张 林 陈 媛 陈建叶
- 172 左坝肩高陡边坡安全监测及变形特征分析
蔡德文 王伟凯 陈晓鹏

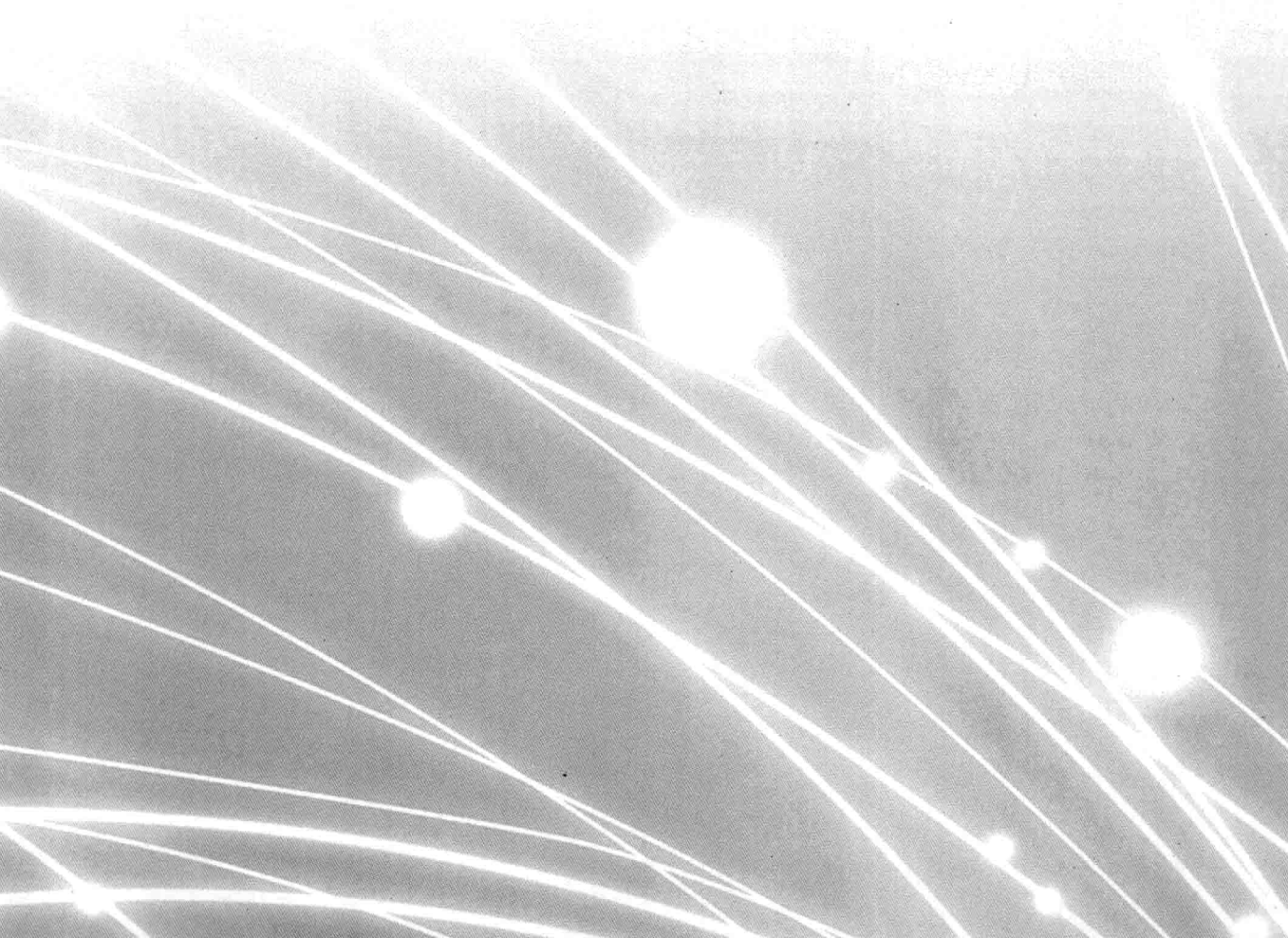
五、新技术与新材料

- 185** 坝身表、深孔无碰撞泄洪消能技术在锦屏一级高拱坝中的应用
张公平 周 钟 唐忠敏
- 196** 锦屏一级拱坝混凝土的温度控制设计
张 敬 周 钟 陈秋华
- 204** 锦屏一级水电站拱坝混凝土人工骨料的选择
李光伟
- 209** 养护温度对大坝混凝土性能影响试验研究
柏仲生 肖延亮 李 翼
- 214** 抑制拱坝混凝土碱骨料反应的试验研究
周麒雯

六、工程监理

- 225** 锦屏一级水电站拱坝接缝灌浆系统、结构复杂部位及岸坡部位混凝土施工质量控制
张壮丽 王国平
- 231** 锦屏一级水电站大坝混凝土施工过程的温度控制
管仕军 张克思 何向红
- 238** 锦屏一级水电站拱坝接缝灌浆施工技术
刘 涛 康 宁 王元鹏
- 242** 锦屏一级水电站混凝土双曲拱坝测量控制网
黄胜超 刘学军
- 246** 锦屏一级水电站右岸高线混凝土拌和系统设计
王 鑫
- 251** 快速控制灌浆防渗施工技术在渣体围堰的应用
赖晓龙 季 峰
- 258** 锦屏水电站泄洪洞无盖重固结灌浆可行性分析
路 珂

一、综 述



锦屏一级大坝工程建设解决的几个重大技术难题

王继敏 刘林生

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川成都 610016)

【摘要】 锦屏一级水电站坝高 305m, 为世界第一高拱坝, 工程规模大, 技术要求高, 地质地质条件复杂, 建设过程中面临诸多技术难题。本文主要介绍了拱坝混凝土砂石骨料生产、超高边坡稳定安全控制、复杂地质条件地基处理、特高拱坝高强度快速施工等难题的解决及采取的新技术, 可为今后类似工程提供技术借鉴。

【关键词】 锦屏一级特高拱坝; 砂石骨料生产; 超高边坡安全控制; 复杂地质条件地基处理; 特高拱坝快速施工技术

1 概述

1.1 工程概况

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内, 是雅砻江干流中下游水电开发规划的“控制性”水库梯级。本工程规模巨大, 开发任务主要是发电。电站装机容量 3600MW, 保证出力 1086MW, 多年平均年发电量 166.2 亿 kW·h, 年利用小时数 4616h。水库正常蓄水位 1880m, 死水位 1800m, 正常蓄水位以下库容 77.6 亿 m³, 调节库容 49.1 亿 m³, 属年调节水库。

枢纽主要建筑物由混凝土双曲拱坝、坝身 4 个表孔+5 个深孔+2 放空底孔与坝后水垫塘、右岸 1 条有压接无压泄洪洞及右岸中部地下厂房等组成。混凝土双曲拱坝是世界第一高拱坝, 坝高 305m, 坝顶高程 1885m, 坝顶宽度 16m, 坝底厚度 63m, 宽高比 0.207。

锦屏一级水电站主要工程量为: 土石方开挖 2980 万 m³, 混凝土 1542 万 m³, 灌浆 262 万 m。

1.2 工程建设节点

根据工程建设总体安排, 锦屏一级水电站主要建设节点如下:

2004 年初开展前期准备工作, 2005 年 9 月 8 日经国家发改委正式核准; 2005 年 11 月 12 日正式开工建设; 2006 年 12 月 4 日实现大江截流; 2009 年 10 月 23 日, 大坝首仓混凝土浇筑; 2012 年 10 月 8 日, 左岸导流洞下闸; 2013 年 7 月 18 日第二阶段蓄至死水位 1800m; 2013 年 8 月 30 日首批机组 (5、6 号机) 投产发电; 2013 年 10 月 14 日第三阶段蓄至 1840m; 计划 2015 年 6 月工程完工。

2 建设过程重大技术难题处理

锦屏一级水电站作为世界第一高拱坝, 工程技术要求高, 但大坝位于高山峡谷内, 且

坝址断层、煌斑岩脉、绿片岩、深部拉裂缝及低波速拉裂岩体等广为分布,因此安全优质建好大坝面临诸多技术难题。工程建设过程中,经广大建设者共同努力,攻克了复杂地形地质条件下拱坝砂石骨料生产、超高边坡稳定安全控制、复杂地质条件地基处理、特高拱坝高强度快速施工等技术难题,基本建成了一座优质的特高拱坝。

2.1 砂石骨料生产问题

2.1.1 料源选择

锦屏一级水电站拱坝厚度薄,应力水平高,结构受力对骨料要求高。在对当地的人工骨料料场进行了大量的勘探和试验基础上,通过综合性能对比,推荐大奔流沟的砂岩料场作为大坝混凝土的人工骨料料源。但该料场变质石英砂岩为具有潜在危害性反应的活性骨料,进一步对不同骨料组合混凝土的碱骨料反应进行的试验研究表明:采用大理岩人工砂替代砂岩人工砂可以减少砂岩混凝土的碱活性膨胀。因此,在锦屏一级水电站大坝混凝土中采用三滩右岸的大理岩作为细骨料,以降低大坝混凝土中活性骨料所占的比例。同时,采用高掺优质Ⅰ级粉煤灰(掺量35%)、控制总碱量($1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 混凝土)等措施抑制混凝土碱骨料反应。因此,大坝混凝土骨料采用大奔流沟砂岩粗骨料和三滩右岸大理岩细骨料的组合骨料料源方案。

2.1.2 料场开采布置

大奔流沟料场区陡峻的顺向边坡,自然坡度为 $55^\circ\sim 65^\circ$,最大坡高780m,料场开口线距离地面公路垂直高差超过500m。如何解决高陡边坡、狭窄场地高强度毛料开采与运输这一问题,是大坝混凝土浇筑强度得以保障的关键。考虑料场场地狭窄,施工布置困难,汽车运输难度巨大,毛料分级开采,采用竖井与斜井相结合的毛料运输布置形式。毛料开采后,经竖井溜至布置于井下的旋回破碎机粗破后,采用皮带运输系统将半成品料直接运输至约3.5km外的印把子粗骨料砂石加工系统,进一步破碎、筛分及堆存。采用竖井和井下旋回破碎机布置的技术,成功实现了矿山技术与锦屏砂石骨料运输方式的有机结合,既解决了毛料及半成品骨料运输问题,又因地制宜解决了因为场地狭窄无法布置加工系统的难题。

料场开采后形成458.5m的高陡人工边坡,边坡层状岩体相对数百米坡高来讲可视为薄板,高程1865m以下最薄岩层层厚仅为5~10cm,当边坡开挖后,岩层卸荷回弹,层状岩层沿层面蠕滑,边坡岩层在下部受阻时,边坡中下部应力集中部位的压剪应力超过岩体的抗剪强度时,岩层剪切折断,可能引起边坡岩体溃屈整体破坏。为保证料场边坡稳定,开挖过程中控制单级边坡开挖坡比,确保边坡开挖不切脚,以此来保证岩体自身刚性;同时,在料场高程1955~1865m、1820~1805m、1745~1730m各布置3排30~60m/2000kN预应力锚索。边坡开挖过程中,严格按预裂爆破程序作业,对边坡进行保护性开挖。采取各种措施后,料场超高边坡施工期稳定,确保了毛料稳定供应。

2.1.3 骨料生产质量控制

大奔流料场有用料层状分布不均,夹层风化石、锈染料、板岩、大理岩等杂质分布于整个料场。在毛料开采过程中,加强选料控制,剔除风化石,控制锈染料、板岩、大理岩等杂质,严格控制进入骨料竖井的毛料质量。同时,受大奔流沟料场砂板岩岩性的影响,加工系统生产的各级成品骨料针片状含量较高,粒形差,其中特大石针片状超标和最大边

长超长的问题显得尤为突出。为此,新增特大石整形车间,对系统进行全整形工艺改进,并组织对中碎 40~80mm 以下粒径进行整形工艺优化、细碎对中小石进行整形工艺优化,同时对筛分机进行调整改造。通过特大石整形车间及工艺优化的实施,有效改善了粗骨料针片状含量问题,合格率达到 96% 以上。

三滩右岸大理岩细骨料,大理岩中存在中晶条带,性能差异大,毛料破碎成粉率较高,成品砂石粉含量不稳定;同时毛料含水率变化制约着系统稳定生产,成品砂含水率不稳定。为此通过采取以下措施进行骨料质量控制:采取选粉机剔除石粉的新技术,并在细骨料胶带机上架设皮带秤,通过数显仪随时观察选粉机进料情况,保证选粉机进料稳定性;控制半成品料含水率,封闭造粉部位,增加除尘器,减少除尘喷头的使用和防止雨水淋湿物料。经工艺改造后,成品砂含水率控制在 3% 以内、石粉含量控制在 14%~20%,提高了系统成品砂质量的稳定性,为大坝混凝土质量提供了保障。

2.1.4 粗骨料运输系统

大坝混凝土用粗骨料由左岸印把子沟砂石加工系统生产,距离右岸 1885m 高线混凝土拌和系统约 5.5km,最大高差为 314m。为解决高峰期每天超过 1 万 t (最高达 2.5 万 t) 的高强度骨料运输问题,同时需解决爬坡加转弯的皮带运输难题,采用“皮带机+管带机”相结合的带式输送系统运输方式,其中管带机长 2.74km,直径为 500mm,最大坡度 11.77%,最大运输强度 2500t/h,适合锦屏高山狭谷地形,很好地解决了普通带式输送系统爬坡、大转弯限制的运输技术与特大石汽车运输配合,为锦屏一级大坝混凝土高强度浇筑提供了有力保障。

2.2 超高边坡安全控制

锦屏工程规模巨大,边坡陡峻,工程区内各水工建筑物在开挖过程中将形成一系列高陡边坡。此外,在枢纽区泄洪雾化区及高程范围,也存在十分高陡的自然边坡及危岩体。开挖边坡主要有坝肩左和右岸高边坡、电站进水口及尾水边坡、水垫塘边坡,自然边坡有泄洪雾化区边坡、左和右岸高位危岩体,施工部位相互重叠、立体交叉干扰大,施工通道布置困难,施工材料运输量大,施工安全风险突出。下面介绍几个具有代表性的边坡工程。

2.2.1 左岸高边坡

左岸高边坡由左岸坝顶 1885 以上拱肩槽及缆机平台开挖边坡和坝顶 1885 以下拱肩槽开挖边坡作为一个整体构成,总体开挖高度达 530m (2110~1580m)。且地质结构面众多,相互组合,分析表明左岸坝肩边坡的存在由煌斑岩脉、 f_{42-9} 断层、 SL_{44-1} 深部裂隙等边界组成的控制性“大块体”整体失稳问题,天然状态下边坡安全系数不满足要求。通过在 f_{42-9} 断层上设置抗剪洞增加抗滑力,采用系统锚杆和锚索为主对局部结构面组合的小型块体进行加固的措施,处理后边坡安全系数满足规范要求。

边坡处理工程量大,锚杆、锚杆束、预应力锚索主要工程量为分别为 5.51 万根、0.22 万束、0.41 万束。自 2005 年 5 月左岸边坡开始开挖施工,至 2009 年 8 月 20 日开挖施工结束。施工过程中采取了倾倒变形体保护层爆破预裂技术、坡积体大口径多锚头锚索钻孔成孔技术、锚索自动张拉锁定技术、高压喷水降尘等施工技术,并采用了施工排架、马道及防护网等安全防护措施,施工过程中布置多点位移计、锚索测力计、谷幅观测等监

测设施,通过数据采集和反馈分析来监测边坡稳定,确保了施工安全。监测资料分析表明目前 1885m 高程以下边坡变形收敛,1885m 高程以上边坡蠕变也在可控范围。

2.2.2 水垫塘及雾化区边坡

水垫塘建基面高程为 1591m,断面为梯形,边墙顶高程 1661m,底板水平宽 47m,边坡坡度为 1:0.5。水垫塘、二道坝开挖支护工程于 2009 年 2 月 2 日开工,2010 年 5 月 3 日完工。该施工时段内,上游拱肩槽开挖、上部雾化区支护处理、左右岸高位危岩体处理等工程形成多方位立体交叉作业;施工单位多,施工面广,工期均非常紧,协调难度大;施工场地狭窄,施工道路布置困难。

泄洪雾化区自然边坡主要指拱肩槽下游坡开口线(桩号坝 0+80m 左右)以下,桩号(坝)0+1650m 以前,左岸高程 1661m(水垫塘边墙顶)至高程 1920m,右岸高程 1661m(水垫塘边墙顶)至高程 1885m 边坡。因为边坡高陡,坡度约为 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$,自然边坡不宜开挖削坡,因地制宜,主要采用“贴坡 50cm 厚混凝土+锚索的支护形式”进行加固处理,主要支护工程量为贴坡混凝土、喷混凝土、锚杆、锚索、排水孔等分别为 24.25 万 m^3 、1.83 万 m^3 、6.19 万根、0.15 万束、39.30 万 m。

雾化区边坡施工与水垫塘施工上下立体交叉作业,施工干扰大,安全风险突出,在施工过程中,参建各方通过定期现场协调会、增加施工通道、加大安全防护力度(如投入主、被动防护网高达 5 万 m^2)、增加资源投入等措施,有效地解决了施工中的各项安全问题,工程按期完工,确保水垫塘充水和大坝蓄水目标如期实现。

2.2.3 高位危岩体处理工程

锦屏施工区内,在长期风化、卸荷作用下,边坡浅表层的岩体沿卸荷裂隙张拉松弛,形成“高悬”于枢纽建筑物、生活营地及交通道路上方的危岩体,主要分布于三滩、道班沟、棉纱沟及大坪四部分。

枢纽区高位危岩体规模大且远高于坝顶。左岸坝顶 1885m 以上拱肩槽及缆机平台开挖边坡开口线以外,以及左岸泄洪雾化区自然边坡高程 1920m 以上,桩号(坝)0+80m~(坝)0+1650m,涉及面积约 30 万 m^2 。左岸危岩体处理最高位置为 2450m 高程,距离最近的汽车运输平台高差 490m;右岸最高危岩体处理为 2350m 高程,距离最近的汽车运输平台高差 435m。左、右岸枢纽区开挖边坡开口线以外的危岩体,上下立体交叉施工干扰大,施工难度高。

高位危岩体位置陡峭,没有材料运输通道,最终参建单位采取架设施工临时栈桥、缆索吊接力和人工运输等方式运输施工设备及施工材料。高位危岩体处理部位下部同时进行大坝施工、雾化区边坡处理、引水发电系统尾水施工,为确保施工安全,对危岩体采取先铺设主动防护网、被动防护网后,再进行系统支护的工艺。

高位危岩体处理工程于 2008 年 6 月开始施工,至 2013 年 8 月施工完成。主要采用锚杆、主动及被动防护网、锚索、喷混凝土等支护形式,其中锚杆为 1.35 万根,防护网为 25 万 m^2 。

2.3 复杂地质条件地基处理

锦屏一级水电站坝基范围出露 f_2 、 f_5 、 f_8 、 f_{13} 、 f_{14} 、 f_{18} 等主要断层,同时存在层间挤压错动带、煌斑岩脉、绿片岩等软弱构造带、溶蚀性节理及左岸坝肩发育的深部荷裂隙,

这些地质缺陷,对坝体的变形及应力、拱座的稳定及基础的渗流控制均会产生显著影响。本工程基础处理难度均超出了现行规范及已有工程经验。为提高岩体的抗变形能力、均匀性以及抗渗性能,基础处理工程采取了混凝土垫座及网格置换、固结灌浆、防渗排水等一系列地基加固处理措施。

2.3.1 左、右岸抗力体处理

左、右岸抗力体处理工程所涉施工项目主要有不良地质体开挖、网格混凝土回填、喷锚支护、灌浆等,其中,各类洞室总长度约 15km,开挖量约为 64 万 m^3 ,混凝土回填量约为 16 万 m^3 ,固结灌浆量约为 88 万 m 。主要施工特点为处理范围大、地质条件差、程序复杂、工期紧张,因而对现场管理、资源投入要求高。施工过程中吸取其他工程类似经验,研究采取一些能够快速施工又能保证施工质量的先进工艺。

(1) 开展了单一稳定性浓浆灌浆试验、不同比级水泥浆灌浆试验、水泥-环氧树脂复合灌浆试验、反循环钻进试验、高压耐久性压水试验、灌浆远程实时监控系统研究和应用、变形自动报警装置的研究应用等代表国内外先进水平的施工工艺,在试验中不断优化施工工艺。

(2) 以 f_5 为代表的宽大断层破碎带的处理,是大型水电水利工程地基处理中的一大难题。经各方综合比较论证,对 f_5 断层采用“高压水喷射冲洗置换开挖、混凝土回填、灌浆补强”的新颖处理方案。制定非常细致的施工工艺,有效应对可能遇到的钻孔偏斜、断层泥冲空后置换网格变形拉裂等难题。经过处理完成的 1730m 层置换网格间的 f_5 断层,未出现任何有害变形,各项检测指标满足设计要求。

2.3.2 坝基处理

大坝右岸建基面岩体由大理岩构成,左岸建基面由大理岩、砂板岩构成,建基面以 II 级、III₁ 岩体为主,局部发育有断层、绿片岩、煌斑岩脉、IV₂ 级岩体、III₂ 级岩体等地质缺陷。根据拱坝建基面“主要以 III₁、II 级岩体作为建基岩体,高高程局部利用 III₂ 级岩体”的原则,需对不满足建基岩体要求的地质缺陷采取必要和有效的基础处理措施,以增强大坝地基的刚度和渗透稳定性,保证大坝的安全。

拱坝基础固结灌浆工程量大(37 万 m),各坝段固结灌浆施工时间长,为防止常规有盖重固结灌浆施工期间大坝混凝土产生裂缝的通病,固结灌浆采取前期无盖重灌浆结合后期有盖重灌浆(河床坝段)或引管有盖重灌浆(岸坡坝段),在整个固结灌浆施工期间,仅河床坝段有极少裂缝产生,岸坡坝段则无裂缝。

拱坝基础地质条件复杂,断层多(有 f_2 、 f_5 、 f_8 、 f_{13} 、 f_{14} 、 f_{18} 等)规模大,其物理力学性能,防渗性能等较差,采取了置换平洞、防渗斜井等结合固结灌浆、帷幕灌浆、水泥-化学复合灌浆等措施进行综合处理,对 f_2 断层还采取了“高压旋喷冲洗+高压固结灌浆”的措施,上述措施效果明显,有效改善了断层部位的物理、力学性能和防渗性能,满足了工程要求。

坝区岩体裂隙分布不均匀,且地应力较高,地层可灌性总体较差,但在局部裂隙、断层发育部位可灌性则较好,特别是高高程溶蚀裂缝吸浆量特大,为此帷幕灌浆采用可重复灌浆的孔口封闭灌浆法,灌浆材料以普通水泥为主,辅以湿磨细水泥,特殊部位还采取化学灌浆,而针对高高程溶蚀裂缝涌水大,吸浆量大的情况,则采取了提前进行地质勘探,

查明溶蚀裂缝分布范围,先采用速凝浆材等进行预处理,再进行正常的帷幕灌浆施工,这些针对锦屏一级水电工程地质条件特点帷幕灌浆工艺、措施成效显著,帷幕灌浆防渗效果好。目前,坝基防渗帷幕后的扬压力、渗漏量等均较小,满足设计要求。

2.4 特高拱坝高强度快速施工技术

招标阶段大坝混凝土浇筑布置四台缆机,由于本工程施工条件复杂,边坡及坝基开挖施工难度极大,垫座以上边坡开挖工期滞后,垫座混凝土与大坝混凝土叠加,混凝土浇筑强度增加,且施工图阶段采取更为严格的温控措施,由此导致混凝土浇筑及辅助作业压力大。因此施工阶段增加了一台缆机,并在左岸坝顶高程增加一座混凝土生产系统,供应左岸垫座 1800m 高程以上混凝土,并将混凝土入仓方式调整为布料机入仓。

可研阶段大坝混凝土浇筑工期 54 个月,月平均浇筑强度为 8.86 万 m^3 ,高峰月浇筑强度为 16.24 万 m^3 ,高峰时段月平均浇筑强度为 13.12 万 m^3 ;施工阶段,混凝土施工强度指标有所增加,最高月浇筑强度为 17.59 万 m^3 ,月平均浇筑强度为 14.32 万 m^3 。

大坝没产生危害性的温度裂缝。

2.4.1 4.5m 浇筑升层技术

锦屏一级高拱坝浇筑因边坡及坝基开挖工程滞后、混凝土量增加、骨料前期供应紧张等因素影响,导致实现建设目标压力增大。但锦屏工程的施工能力保障充分,混凝土浇筑强度有保证,设备改造迅速,这为开展 4.5m 浇筑升层技术研究应用提供了条件,因此开展特高拱坝混凝土浇筑 4.5m 关键技术研究及实时仿真分析与评价研究,突破传统 3.0m 拱坝常态混凝土浇筑技术,保证混凝土施工质量,实现锦屏一级拱坝高强度浇筑快速施工。

经过系统分析研究不同条件下 4.5m 升层混凝土内部温度及应力,得出结论,设计温控措施条件下,非约束区 4.5m 升层浇筑温度应力满足要求,4.5m 升层浇筑可行,故将该技术推广至全坝段非约束区混凝土浇筑中,采取 4.5m 升层技术浇筑混凝土 229 万 m^3 ,约占大坝形体混凝土总量的 50%,比常规升层浇筑缩短工期约 6 个月。

2.4.2 温度自动化监测及全坝段全过程仿真分析技术

在制定合适的温控设计标准和要求后,拱坝混凝土温控防裂成败的关键在于温控控制。在拱坝混凝土温控防裂工作中,贯穿并实现了“早冷却、慢冷却、小温差”的温控理念,采用“精细化、科学化、动态跟踪”管理的全坝段全过程仿真分析技术。对大坝坝体混凝土内部数量极其庞大(坝体内埋设温度计约 3600 支)的用于温控的温度计实施自动化监测系统。该系统实现了温度数据的自动采集、传输和网络化管理,混凝土浇筑块中的稳度计在埋设 12h 内接入自动化监测系统,进行实时监控。同时对所采集的数据进行全坝段全过程仿真分析技术,利用温度监测数据反演分析混凝土的温度过程。同时跟踪仿真锦屏一级拱坝的温度应力场,评估混凝土坝开裂风险。当现场温控实施情况偏离设计要求或出现较大系统风险时,及时提出整改意见和建议。大坝施工过程中,还利用仿真分析技术,每月对大坝混凝土浇筑排仓计划进行一次温度、应力仿真分析,分析成果直接用于计划调整和优化。

2.4.3 智能通水冷却技术

精细控制大坝内部温度,必须适时控制冷却水通水温度、流量和时间,目前普通的人

工通水方式费时费力，且易出错，不够准确。锦屏一级水电站成功开展了冷却通水智能控制系统的研发与使用。

采用混凝土坝冷却通水智能控制系统，实现了定时自动采集、记录混凝土内部温度、通水数据，解决了人为采集、录入数据的误差问题，方便了数据的管理，提高了数据记录的效率与管理的水平；系统采用数据处理软件进行分析，给出通水流量建议值，减少了以往人工经验控制算法计算时间，解决了温控滞后问题，提高了工程施工质量；高拱坝智能通水冷却技术系统既提高了控制的精度及可靠性，确保了混凝土温控质量，保证了工程施工质量，又对提高监控质量与施工管理自动化水平、降低了劳动强度、节约成本等具有重要意义。

3 结语

锦屏一级特高拱坝建设过程中，遇到了众多建设难题，经过全体建设者共同努力，克服了高陡料场开采布置、骨料加工及运输难题，确保了大坝混凝土正常浇筑；克服了狭窄空间各类高陡边坡、高位危岩体处理难题，最大限度地保证了施工人员安全；开发推广基础处理新技术，确保坝基和抗力体地质缺陷处理质量；研究采用 4.5m 混凝土浇筑升层，并研究了大坝温度自动化监测系统和全坝段全过程仿真分析技术、智能通水冷却技术，快速、高质量完成了大坝施工。

目前，锦屏一级大坝第三阶段蓄水至高程 1840m 水位，边坡变形稳定，大坝及基础变形测值变化较小，坝体及坝基变形符合一般规律；坝基帷幕和排水廊道渗压变化较小，帷幕后渗透压力折减系数均小于 0.4，排水后渗透压力折减系数均小于 0.2；各层抗力体平洞渗压基本无变化；坝体应力及温度状态正常。枢纽工程处于正常工作状态。

举步维艰 攻坚克难

周 钟

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川成都 610072)

【摘 要】 锦屏一级水电站是雅砻江干流下游河段的控制性水库梯级电站, 工程的开发任务以发电主要, 结合汛期蓄水兼有减轻长江中下游防洪负担的作用。锦屏工程地质条件复杂, 技术难度高, 具有高山峡谷、高拱坝、高边坡、高地应力、深部卸荷, 针对复杂地质条件下的高边坡稳定分析及支护技术、300m级特高拱坝结构和基础处理设计、高水头大泄量窄河谷的泄洪消能技术、高地应力环境超大规模地下厂房洞室群围岩稳定与变形控制等世界的技术难题, 设计院进行科技攻关, 组织并联合国内一流的科研机构, 开展专项课题研究, 解决多项技术难题, 推动了工程的顺利建设, 本文结合锦屏一级水电站的工程设计, 简要叙述勘测设计的艰辛历程与重大技术难题的研究成果, 以便相关工程借鉴。

【关键词】 锦屏一级; 勘测设计; 攻坚克难; 复杂地质; 深部裂缝; 特高拱坝; 基础处理; 无碰撞消能; 微震监测; 围岩稳定; 投产发电; 铸就辉煌

1 工程概况

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内, 是雅砻江干流下游河段(卡拉至江口)的控制性水库梯级电站, 其下游梯级为锦屏二级、官地、二滩和桐子林水电站。

锦屏一级工程规模巨大, 开发河段内河谷深切、滩多流急、不通航, 工程的开发任务主要是发电, 结合汛期蓄水兼有减轻长江中下游防洪负担的作用。电站装机容量3600MW, 保证出力1086MW, 多年平均年发电量166.2亿kW·h, 年利用小时数4616h。水库正常蓄水位1880m, 死水位1800m, 正常蓄水位以下库容77.6亿m³, 调节库容49.1亿m³, 属年调节水库, 对下游梯级电站的补偿效益显著。

锦屏一级水电站地处深山峡谷地区, 地质条件较复杂, 工程规模巨大, 技术难度高, 尤其是大坝最大高度达305m, 其技术水平处于世界前列。电站为典型的深山峡谷区的坝式开发水电站, 枢纽主要建筑物位于普斯罗沟与手爬沟间1.5km长的河段上, 地形地貌极有利于布置混凝土拱坝。枢纽主要建筑物由混凝土双曲拱坝。坝身4个表孔+5个深孔+2个放空底孔与坝后水垫塘, 右岸1条有压接无压泄洪洞及右岸中部地下厂房等组成。

混凝土双曲拱坝为世界第一高拱坝, 坝高305m, 坝顶高程1885m, 坝顶宽度16m, 坝底厚度63m, 厚高比0.207, 坝体基本体形混凝土方量476万m³。泄洪设施由坝身4个表孔, 5个深孔, 2个放空底孔, 坝后水垫塘以及右岸1条有压接无压泄洪洞组成。表孔孔口尺寸11m×12m; 深孔孔口尺寸5m×6m; 放空底孔尺寸5m×6m; 坝后采用复式水