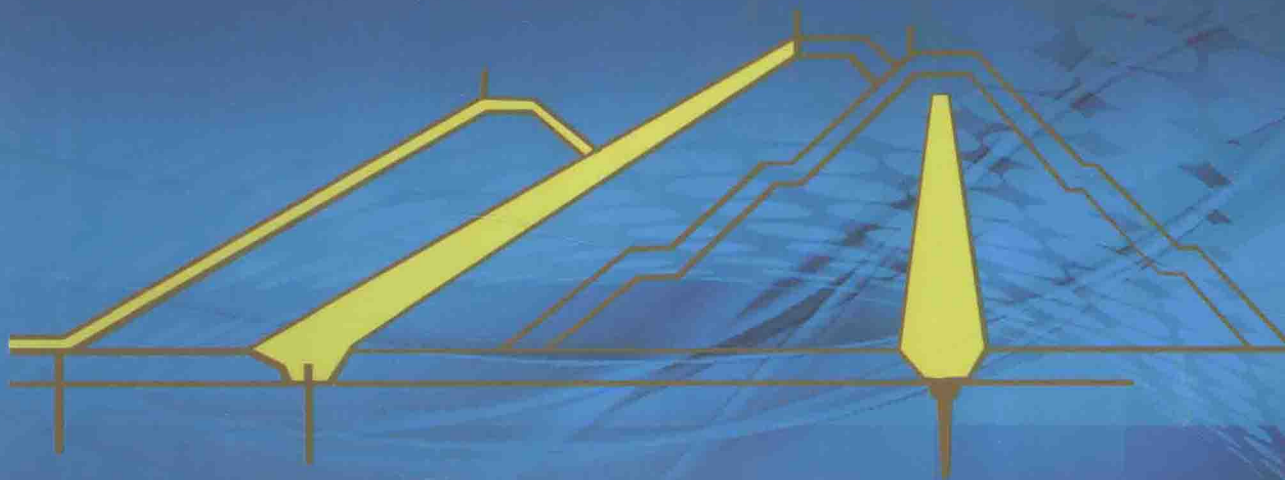


土石坝技术

Technology for Earth-Rockfill Dam

2013年论文集

水电水利规划设计总院
中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会
中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院有限公司 组编
水利水电土石坝工程信息网
国家能源水电工程技术研发中心高土石坝分中心



www.sstsbw.com



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

土石坝技术

Technology for Earth-Rockfill Dam

2013年论文集

水 电 水 利 规 划 设 计 总 院
中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会
中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院有限公司 组编
水 利 水 电 土 石 坝 工 程 信 息 网
国家能源水电工程技术研发中心高土石坝分中心



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

土石坝技术. 2013 年论文集/水电水利规划设计总院
等组编. —北京: 中国电力出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-5123-5841-6

I. ①土… II. ①水… III. ①土石坝-文集 IV. ①
TV641-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 083211 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 6 月第一版 2014 年 6 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 30.25 印张 684 千字
定价 130.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

编 委 会

顾 问	马洪琪	陈祖煜	曹克明	林 昭	王柏乐
	周建平	宗敦峰	刘志明	彭 程	冯峻林
	关志诚	蒋国澄	梅锦煜		

主 任 张宗亮

副主任 杨泽艳 党林才

委 员	蔡昌光	陈振文	陈绍松	陈 江	迟世春
	程展林	邓毅国	冯业林	樊路琦	何定恩
	黄晓辉	孔宪京	李 勇	李国英	李庆云
	练继建	吕明治	刘斯宏	毛文然	孙永娟
	孙来成	孙 役	沈益源	汪小刚	王仁超
	王君利	王亚文	温彦锋	吴关叶	吴晓铭
	吴高见	吴毅瑾	谢力明	徐卫亚	徐泽平
	熊泽斌	叶发明	杨和明	杨西林	姚栓喜
	殷宗泽	袁友仁	于玉贞	余 挺	朱俊高
	朱 晟	张社荣	张丙印	张跃民	湛正刚
编 辑	杨建敏	周少萍	雷红军	刘一萍	马淑君
	梁礼绘				

近几十年来,我国的土石坝建设取得了举世瞩目的成就,20世纪50年代初,我国的土石坝高度仅为40~50m,之后陆续建成当时亚洲第一高的毛家村土坝(82m)以及碧口(102m)、鲁布革(104m)、小浪底(154m)等一批标志性土石坝工程。进入21世纪,我国土石坝筑坝技术有了质的飞跃,在数量、坝高和建设规模等方面都得到前所未有的发展,陆续建成了天生桥一级(178m)、洪家渡(179.5m)、水布垭(233m)等200m级高土石坝。2013年建成的261.5m高的糯扎渡心墙堆石坝为同类坝型中世界第三、亚洲第一。

在天生桥一级、水布垭、糯扎渡等世界一流土石坝工程建设中,积累了大量的工程经验,促使我国土石坝筑坝技术有了长足的发展。特别是糯扎渡高心墙堆石坝工程建设,在超高心墙堆石坝设计准则、计算分析理论、施工工艺及安全控制技术等方面取得了多项具有中国自主知识产权的创新性成果,使我国堆石坝筑坝技术水平迈上了一个新台阶。

作为土石坝工程技术领域的专业论文集,《土石坝技术》致力于适应新形势下土石坝建设的技術需求,共享土石坝建设发展的新技术、新经验、新理念,研究土石坝建设中的新问题。该论文集的前身是由水利水电土石坝工程信息网主办的网刊《土石坝工程》,该刊于1984年创刊,为内部连续性交流资料。在广大网员单位和读者的支持下,经过了20年的历程,共出版网刊80期,约1200万字,发行10万余册。自2005年起,网刊《土石坝工程》改名为《土石坝技术》,并由每年4期的内部交流资料变更为每年出版1册的正式出版物。中国水电顾问集团华东勘测设计研究院担任水利水电土石坝工程信息网网长单位期间,坚持每年出版1册《土石坝技术》论文集,甄选当年国内土石坝工程领域的最新学术论文,为国内土石坝建设领域搭建一个展示新成果、分享新技术、促进交流与合作的平台,受到水利水电专家和同仁的广泛关注与好评。

2013年《土石坝技术》论文集由水利水电土石坝工程信息网、中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会联合组织,是中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院继任水利水电土石坝工程信息网网长单位后组织编制的首册论文集,在论文集编制过程中得到了各网员单位,特别是国家能源水电工程技术研发中心高土石坝分中心技术委员会各位专家、学者的大力支持与帮助,在此深表感谢。

希望本论文集的出版、发行能为广大水利水电工作者,特别是从事土石坝设计研究工作的同仁们带来裨益。

《土石坝技术》编委会

2014年1月

前言

一、工 程 设 计

糯扎渡水电站枢纽工程主要技术创新与实践

..... 张宗亮 刘兴宁 冯业林 李仕奇 张四和 武赛波 邵光明 (1)

糯扎渡心墙堆石坝设计..... 袁友仁 张宗亮 冯业林 邓建霞 (10)

土石坝及地基抗震若干进展及规范修编

..... 刘小生 赵剑明 王钟宁 杨玉生 刘启旺 陈 宁 (16)

深厚覆盖层上 200m 级超高面板堆石坝极限抗震能力研究

..... 李红军 赵剑明 徐泽平 (26)

巴贡水电站工程设计优化与创新技术应用..... 刘俊杰 (34)

糯扎渡心墙堆石坝防渗土料的设计、研究与实践

..... 张宗亮 冯业林 相 彪 袁友仁 (41)

糯扎渡高心墙堆石坝初次蓄水速度研究与设计..... 雷红军 冯业林 刘兴宁 (50)

校核地震作用下紫坪铺面板坝的动力分析与安全评价

..... 赵剑明 陈 宁 刘启旺 刘小生 杨玉生 杨正权 梁文杰 (57)

V 形河谷高面板堆石坝应力应变仿真计算研究

..... 洪慧俊 金津丽 丁佳峰 孙其臣 (65)

河口村水库工程大坝填筑分期设计研究..... 杨应军 包芬芬 竹怀水 (71)

基于最大熵的坝体健康评估专家模糊赋权模型

..... 杨 阳 何勇军 徐海峰 李 铮 (76)

多途径综合开发商业软件精细求解土石坝结构静动力反应

..... 熊 堃 岑威钧 胡清义 (82)

新疆高寒地区察汗乌苏、柳树沟面板坝面板防裂及止水防冰冻结构设计探讨

..... 苗 喆 朱孔光 李学强 (93)

尾矿坝地震稳定性分析方法比较初探

..... 安 君 刘小生 马怀发 赵剑明 刘启旺 杨玉生 (103)

濮阳市引黄灌溉调节水库三维有限元渗流计算分析

..... 张桂花 张一冰 田永军 胡士辉 (108)

试验边界条件和试样厚度对垫层料渗透特性参数的影响分析

.....	李巍尉	马凌云	杨凌云	刘涛	王建民	(114)
江坪河水电站高混凝土面板堆石坝设计	王国辉	欧红光	(120)			
西藏江雄水库新建大坝渗漏成因分析与处理	辛建芳	普布	杨俊	司马世华	朱家旺	(130)
金川水电站混凝土面板堆石坝施工设计	周丹顺	高海涛	侯江炜	(138)		
江坪河水电站防渗帷幕设计	刘惟轶	欧红光	罗崇宏	(143)		
小盘河水库工程大坝枢纽布置	宋修昌	包芬芬	(150)			
新疆锡伯提水库加固设计	代巧枝	李鑫	(154)			
境主庙大坝防渗加固设计	张振江	(158)				
三维渗流分析在河口村水库工程坝肩防渗措施方面的应用和研究	张彩双	陈艳丽	田华祥	(162)		
寒潮下土坝坡的冻冰厚度	吴一匡	(167)				

二、试验研究及监测

堆石料蠕变速率与模型	李海芳	张茵琪	(170)				
砾石土的击实特性及压实控制标准研究	保华富	王海波	王磊	王坤	胡鹏	(177)	
糯扎渡高心墙堆石坝安全监测系统设计与实践	谭志伟	邹青	字陈波	和丽东	(187)		
长河坝水电站堆石料抗剪强度现场直剪试验 ...	刘斯宏	杜三林	伍小玉	李法海	(194)		
堆石料蠕变模型试验研究	张茵琪	李海芳	孙庚	(201)			
砾石土渗透稳定特性试验研究	刘杰	谢定松	(209)				
沥青混凝土心墙料温度敏感性试验研究	黄斌	张伟	谭凡	何晓民	(219)		
粉煤灰和天然火山灰对胶砂性能影响对比试验研究	毕亚丽	(230)					
安徽绩溪抽水蓄能电站下水库软岩筑坝材料的试验研究	符晓	徐文仙	黄维	汤旻	郎玲芳	赵琳	(236)
对混凝土棱柱体法判定标准的几点看法	张勇	彭乃中	毕亚丽	孙宇飞	(246)		
碎砾石土渗透、渗透变形性能及影响因素分析研究	赵晓菊	齐俊修	(250)				
几种混合材抑制集料 ASR 有效性试验研究	毕亚丽	张勇	王宁芳	(258)			
金川水电站面板混凝土早期开裂试验研究	张勇	孙宇飞	(263)				
水工建筑物修补用环氧砂浆热膨胀性能试验研究	孙宇飞	胡炜	张勇	(267)			
砾石土料中粗粒组分含水率及其关系研究与应用	谭小军	江万红	王红刚	(271)			
水电站平面控制网网点稳定性分析及位移修正	沈静	付青萍	(277)				
掺粉煤灰与天然磨细火山灰碾压混凝土性能对比试验研究	毕亚丽	彭乃中	冀培民	张勇	(282)		

大坝砾石土防渗心墙填筑质量快速检测方法研究

..... 保华富 杜三林 王海波 庞 桂 王 坤 (288)

土石坝动力分析方法的大型振动台模型试验验证研究

..... 杨正权 刘小生 汪小刚 赵剑明 张海丰 (297)

大坝心墙接触黏土有关工程特性试验研究

..... 保华富 庞 桂 王 坤 王 磊 武进云 (306)

三、工 程 建 设

高土石围堰施工—运行过程边坡稳定性分析

..... 罗立哲 胡志根 刘 全 倪锦初 李勤军 (313)

金川坝基饱和砂、粉土层震动液化评价及工程措施 付恩怀 高海涛 (321)

土石坝新型防渗技术在新南水库除险加固中的应用 黄院生 (327)

软基上灰坝滑坡治理措施优化研究 魏迎奇 田继雪 李维朝 蔡 红 (331)

西藏江雄水库新建大坝渗漏成因分析与处理

..... 辛建芳 普 布 杨 俊 司马世华 朱家旺 (336)

功果桥水电站大坝混凝土施工工艺优化 邱泳莹 (344)

高土石坝施工关键技术研究 吴高见 (349)

水工建筑修补用环氧砂浆在低温条件下的性能与应用 ... 孙宇飞 张 勇 韩练练 (361)

响水涧抽水蓄能电站面板堆石坝施工中采用的几项实用措施 尹成福 (366)

湖北清江水布垭水电站大坝 R4-R5 面板挤压破坏段防渗度汛施工 谭建平 (370)

唐山电厂主厂房岩溶地基加固与质量检测技术 刘 健 (373)

面板堆石坝混凝土接缝 SR 鼓包机械成形研究 谭建平 陈 乔 吕小龙 (379)

斜卡水电站面板堆石坝 SR 表止水设计与施工 李 志 杨韩刚 (384)

金川水电站混凝土面板堆石坝施工设计 周丹顺 高海涛 侯江炜 (391)

强风化石料在溧阳抽水蓄能电站上水库中的应用 潘福营 (395)

长河坝水电站基坑排水设计与施工 薛 凯 李二伟 (400)

复合土工膜防渗技术在西霞院反调节水库工程上的应用 宋修昌 代巧枝 (407)

高喷灌浆在复杂地层防渗工程中的应用 翁嘉玲 (415)

新型栅栏连锁块在鸭河口水库大坝护坡的应用 刘兰勤 袁清超 董振锋 (423)

坝基斜坡廊道加强固结灌浆施工与效果 赵补厚 (428)

西霞院土石坝防渗复合土工膜设计及应用效果 代巧枝 刘许超 包芬芬 (432)

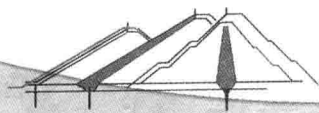
南水北调工程新乡段辉县二标渠道衬砌试验段施工 张超魁 (442)

长河坝水电站砾石土心墙料压实度现场检测指标的选择 田中涛 (452)

积石峡水电站面板堆石坝不均匀沉降控制措施

..... 张 伟 崔文娟 蔡新合 郭永康 顾 斌 (459)

北京大宁水库穿堤坝倒虹吸底部砂卵石水平帷幕灌浆施工 常 亮 (465)



一、工程设计

糯扎渡水电站枢纽工程 主要技术创新与实践

张宗亮 刘兴宁 冯业林 李仕奇 张四和 武赛波 邵光明

(中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院)

[摘要] 糯扎渡水电站枢纽工程掺砾土心墙堆石坝最大坝高 261.5m; 地下厂房装机容量 $9 \times 650\text{MW}$, 主厂房开挖尺寸 $418\text{m} \times 29\text{m} \times 81.6\text{m}$; 溢洪道最大下泄流量(PMF时) $31318\text{m}^3/\text{s}$ 。该工程高心墙堆石坝设计、泄水建筑物设计、引水系统及地下厂房设计、导截流工程设计、安全监测设计等有诸多工程技术创新。在工程设计的各阶段开展了大量研究工作, 取得了丰硕且有价值的研究成果, 并应用于工程实践, 为工程建设提供了先进的技术保障。

[关键词] 工程布置 心墙堆石坝 溢洪道 泄洪隧洞 分层取水 导截流工程 安全监测
创新 糯扎渡水电站

1 工程概况

糯扎渡水电站工程是澜沧江中下游河段梯级规划“二库八级”电站的第五级, 枢纽位于云南省普洱市思茅区和澜沧县境内, 其上游与大朝山水电站衔接, 下游与景洪水电站衔接。电站工程以发电为主, 并兼有下游景洪市(坝址下游约 110km)的城市、农田防洪及改善下游航运等综合利用任务。水库正常蓄水位 812.00m, 汛限水位 804.00m, 死水位 765.00m; 水库总库容 $237.03 \times 10^8\text{m}^3$ 。调节库容 $113.35 \times 10^8\text{m}^3$, 具有多年调节能力。电站装机容量 5850MW ($9 \times 650\text{MW}$), 保证出力 2406MW。

工程枢纽由心墙堆石坝、左岸岸边溢洪道、左岸泄洪隧洞、右岸泄洪隧洞、左岸引水系统和地下厂房组成, 最大坝高 261.5m。工程于 2003 年 10 月通过可行性研究审查, 2011 年 3 月通过国家核准。

2004 年 4 月工程开始筹建, 2006 年 1 月准备工程开工, 2007 年 11 月 4 日实现大江截流, 2008 年 12 月心墙区开始填筑, 截止到 2012 年 5 月 28 日, 大坝心墙部位已填筑至 EL804m (心墙坝高已达 244m), 溢洪道、泄洪洞、引水发电系统等项目也均按计划顺利进行。

工程 2011 年 11 月 6 日 1、2 号导流隧洞下闸, 2011 年 11 月 29 日 3 号导流隧洞下闸,

2012年2月8日4号导流隧洞下闸,2012年4月18日5号导流隧洞下闸。2012年三季度首台机组发电,2014年竣工。

2 工程布置及主要建筑物

本工程为Ⅰ等大(1)型工程,永久性主要水工建筑物为1级建筑物,其他次要建筑物为3级建筑物。堆石坝设计标准为1000年(设计洪水标准 $P=0.1\%$),泄洪流量 $Q=26913\text{m}^3/\text{s}$,校核标准为PMF,泄洪流量 $Q=37532\text{m}^3/\text{s}$ 。

坝址区50年超越概率10%的基岩地震动峰值加速度为203.7gal,相应的坝址场地地震基本烈度为Ⅷ度。堆石坝设计地震采用基准期100年超越概率2%,基岩地震动峰值加速度为379.9gal。其他非雍水建筑物采用50年基准期超越概率5%(基岩地震动峰值加速度为257.3gal)设防。

2.1 枢纽布置

根据地形地质条件,结合施工及运行要求的综合比选,最终确定枢纽布置为:挡水建筑物为直心墙堆石坝;泄洪建筑物由左岸开敞式溢洪道、左岸泄洪隧洞(后段结合5号导流隧洞)、右岸泄洪隧洞和下游护岸工程组成;引水发电建筑物由左岸引水系统、地下主副厂房洞室群、尾水系统(其中1号尾水隧洞与2号导流隧洞结合)、地面副厂房及出线场组成;导流建筑物由左岸1、2、5号导流隧洞,右岸3、4号导流隧洞组成。上、下游围堰形式均为土石围堰,上游围堰与大坝结合,下游围堰与量水堰结合。糯扎渡水电站枢纽建筑物透视图如图1所示。

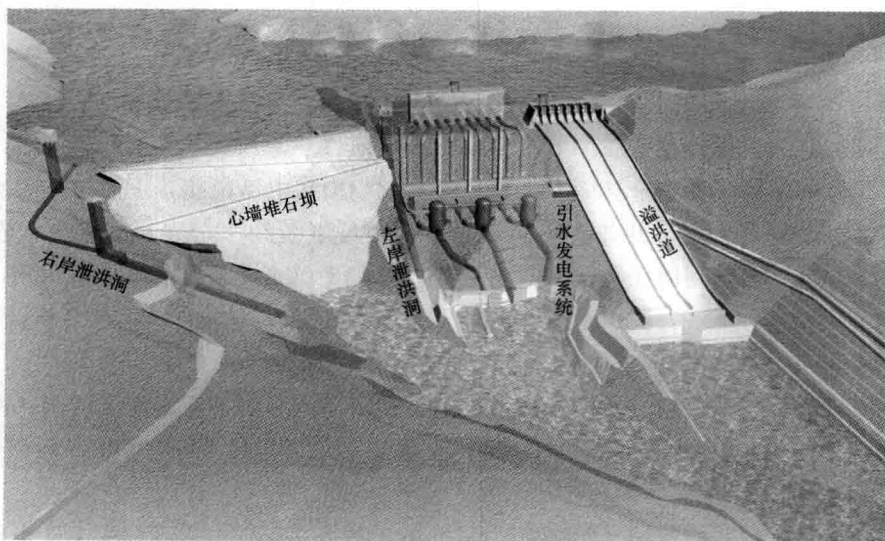


图1 糯扎渡水电站枢纽建筑物透视图

2.2 主要建筑物

2.2.1 挡水建筑物

心墙堆石坝坝顶高程为821.5m,最大坝高261.5m,坝体基本剖面为中央直立掺砾土

心墙形式,心墙两侧为反滤层,反滤层以外为堆石体坝壳。坝顶宽度为 18m,心墙基础最低建基面高程为 560.0m,上游坝坡坡度为 1:1.9,下游坝坡坡度为 1:1:8。坝体总填筑量为 3400 万 m^3 ,其中心墙量为 464 万 m^3 。

2.2.2 泄水建筑物

(1) 开敞式溢洪道布置于左岸平台靠岸边侧部位,溢洪道水平总长 1445m、宽 151.5m。进口底板高程 775.0m,共设 8 个 $15\text{m}\times 20\text{m}$ (宽 $\times$ 高)表孔,每孔均设检修门和弧形工作闸门,溢流堰顶高程 792m,堰高 17m,最大泄流量 $31318\text{m}^3/\text{s}$,最大流速 52m/s,采用挑流并预挖消力塘消能。

(2) 左岸泄洪隧洞进口底板高程为 721.0m,全长 950m。有压段为内径 12m 的圆形断面,工作闸门为 2 孔,孔口尺寸为 $5\text{m}\times 9\text{m}$,最大泄流量 $3395\text{m}^3/\text{s}$,最大流速 42m/s。无压段断面为城门洞形,尺寸为 $12\text{m}\times (16\sim 21\text{m})$,其后段与 5 号导流隧洞结合,结合段长 343m,出口采用挑流消能。

(3) 右岸泄洪隧洞进口底板高程为 695.00m,平面转角 60° ,全长 1062m。有压段为内径 12m 的圆形断面,工作闸门为 2 孔,孔口尺寸 $5\text{m}\times 8.5\text{m}$,最大泄流量 $3257\text{m}^3/\text{s}$,最大流速 42m/s。无压段断面为城门洞形,尺寸 $12\text{m}\times (18.28\sim 21.5\text{m})$,出口采用挑流消能。

2.2.3 引水发电建筑物

(1) 电站进水口引渠底板高程 734.5m,进水塔长 225m、宽 35.2m (顺水流方向)、高 88.5m,塔顶高程同大坝坝顶高程 821.5m。为了尽量减小下泄低温水对下游水生物的影响,进水口利用检修拦污栅槽设置叠梁门进行分层取水。按单机单管布置 9 条引水道,单机引用流量为 $381\text{m}^3/\text{s}$,引水道的直径为 9.2~8.8m。

(2) 地下主、副厂房尺寸为 $418\text{m}\times 29\text{m}\times 81.6\text{m}$,机组间距 34m,机组安装高程 587.9m。地下主变压器室尺寸为 $348\text{m}\times 19\text{m}\times 38.6\text{m}$,内设主变压器层、电缆层及 GIS 层;上游设 9 条母线洞与主厂房相连,下游设两条出线竖井通向 821.50m 平台地面副厂房。

地面副厂房、500kV 出线场、出线终端塔场地、进排风楼等布置在主厂房顶 821.50m 平台上。

(3) 尾水调压室采用圆筒式调压井,按“一”字形布置,调压室直径分别为 27.8 (1 号)、29.8m (2、3 号),高 92m,间距为 102m,尾水闸门室布置在尾水调压室上游 42.5m 处。调压井后各接一条尾水隧洞,洞径为 18m,洞长 447~465m,其中 1 号尾水隧洞与 2 号导流隧洞相结合,结合段长 334.4m,城门洞形断面尺寸为 $16\text{m}\times 21\text{m}$ (宽 $\times$ 高)。尾水隧洞出口均布置两孔尾水检修闸门。

2.2.4 导截流建筑物

上游围堰为与坝体结合的土石围堰,堰顶高程 656m,围堰顶宽 15m,堰顶长 265m。624m 高程以下上游面坡度为 1:1.5,624m 高程以上为 1:3,下游面坡度为 1:2,最大堰高约 82m。围堰上部采用土工膜斜墙防渗,下部及堰基防渗采用混凝土防渗墙,厚 0.80m。下游围堰与量水堰结合,为土石围堰,堰顶高程 625.00m,围堰顶宽 12m,堰顶

长 191m, 下部坡度为 1:1.5, 上部为 1:1.8, 最大堰高 42m。围堰上部采用土工膜心墙防渗, 下部及堰基采用混凝土防渗墙防渗, 厚 0.80m。

导流隧洞断面形式均为圆形, 1~3 号导流隧洞断面尺寸为 16m×21m (宽×高), 1、3 号导流隧洞进口底板高程为 600.00m; 2 号导流隧洞进口底板高程为 605.00m, 后段与 1 号尾水隧洞结合; 4 号导流隧洞断面尺寸为 7m×8m (宽×高), 进口底板高程为 630.00m; 5 号导流隧洞进口底板高程为 660.00m, 前段为有压段, 衬砌后断面尺寸为 7.0m×9.0m (宽×高), 底坡为平坡, 闸后为无压洞段, 衬砌后断面尺寸为 10.0m×12.0m (宽×高), 其中与左岸泄洪隧洞结合段长 212m, 结合段底坡与左岸泄洪隧洞底坡一致, 出口采用挑流消能。

3 主要技术创新与实践

3.1 工程勘察与试验

3.1.1 工程地质分区

坝址区工程地质条件复杂, 岩体风化程度、构造发育程度等均呈现很大的不均一性。在详细分析坝址区地层岩性、地质构造、风化卸荷、地下水等基本地质条件的基础上, 参考岩体质量综合分类的方法, 将坝址区工程地质条件按不同等级分为 A、B、C、D、E、F 六个区。以 A 区工程地质条件最好, 以下依次变差, F 区分布有工程区两条最大的断层, 属最差。工程地质分区为枢纽建筑布置提供了可靠依据, 如 A 区位于坝基左岸, 主要建筑物除大坝坝基外, 地下厂房、引水发电系统均布置于该区。

3.1.2 右岸构造软弱岩带渗透变形试验及固结灌浆试验

坝基右岸中部岩体受构造、风化、蚀变等因素的综合影响, 形成了大致顺河方向延伸并包括断层在内的构造软弱岩带, 带内岩体破碎, 风化较强烈、完整性差, 各级结构面发育, 而且多夹泥或附有泥质薄膜。由于构造软弱岩带岩体强度及变形模量低、抗变形性能差, 渗透性较大, 易产生不均匀变形, 难以满足大坝对地基强度、抗变形性能及防渗方面的要求, 为了对坝基处理措施提供依据, 特对该构造软弱岩带开展渗透变形试验及固结灌浆试验。

渗透变形试验布置于带内规模最大断层内, 在探洞内通过对断层钻孔压水, 在距钻孔 3m 的观测断面处观察地下水的出水和变化情况直至破坏, 研究其抗渗透变形特性, 试验结果表明断层带最小临界比降大到 2, 可以满足抗渗变形要求。然后在探洞内进行高压固结灌浆试验, 试验表明通过高压灌浆处理, 特别是超细水泥的使用, 对于降低岩体的透水性, 提高岩体的渗透稳定性效果显著; 岩体的均一性和力学性质也有不同程度的提高, 抵抗变形破坏的能力得到加强。说明采用高压固结灌浆的方法处理坝址右岸构造软弱岩带的措施是可行的。

3.1.3 主要建筑物开挖区按料场开展勘察试验

电站进水口及溢洪道开挖料石渣总方量约 4000 万 m^3 , 充分利用开挖渣料可以节约大量资金。因此对电站进水口及溢洪道开挖区进行了详查级石料勘察。根据勘察成果, 以及施工期揭露的实际情况, 对开挖渣料分类用于不同筑坝堆石料区或混凝土骨料。

3.2 挡水建筑物

糯扎渡心墙堆石坝坝高 261.5m, 仅次于苏联的努列克 (Nurek) 坝 (坝高 300m) 和哥斯达黎加的博鲁卡 (Boruca) 坝 (坝高 267m), 位居世界第三, 国内第一。比国内已建成最高的小浪底心墙堆石坝 (坝高 160m) 高出 100 余米, 而且国内已建工程中没有超过 200m 的高心墙堆石坝; 上游坝坡坡度为 1:1.9, 下游坝坡坡度为 1:1.8; 工程规模巨大, 技术难度高。

如此规模的心墙堆石坝设计国内没有任何成熟经验可资借鉴, 国外可资借鉴的经验也很少。为此, 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院联合多家高等院校和科研机构从 2000 年可研阶段开始针对糯扎渡心墙堆石坝关键技术问题开展了持续、深入的科技攻关, 研究内容包括坝料勘察、试验及坝料特性研究, 土石坝计算分析理论及抗裂措施研究, 心墙堆石坝坝料分区及结构优化研究, 心墙堆石坝动力反应分析计算理论及抗震措施研究, 心墙堆石坝渗流分析及渗控措施研究等, 解决了诸多关键技术问题; 招标施工图阶段持续与相关科研单位开展深化研究工作, 并结合施工需要及施工中的一些问题, 坝料压实指标波动对大坝安全的影响、垫层及廊道裂缝对大坝安全的影响、蓄水速度对大坝安全的影响等科研项目, 以及 2008 年汶川地震后最新的地震动参数开展了大坝抗震深化研究。

针对糯扎渡心墙堆石坝开展的科研工作取得的丰硕研究成果大部分均运用到了工程的设计、施工中, 根据研究成果对高心墙堆石坝进行了创新设计, 使我国高土石坝筑坝技术上上了一个新的台阶。

(1) 心墙防渗土料采用天然混合土料中掺人工碎石的砾质土料, 改善了力学性质, 使之适应了超高坝防渗土料的要求。

(2) 通过对堆石料性质劣化的试验研究及其对坝体应力、变形影响的计算分析研究, 论证了含软岩堆石料可用于高心墙堆石坝上游坝壳, 最终大坝上游共利用了 478 万 m^3 建筑物开挖的含软岩堆石料, 减少弃渣和料场开挖料, 除取得显著的经济效益外, 还方便了施工, 也有利于环境保护。

(3) 通过大量的坝料试验及计算分析, 论证了上游坝坡采用 1:1.9、下游坝坡采用 1:1.8 是可行性 (目前国外已建 200m 以上心墙堆石坝坝坡坡度一般上游为 1:2.2、下游为 1:2.0), 减小了大坝轮廓和工程布置难度, 减少了填筑量。

(4) 论证了直心墙堆石坝抗水力劈裂的安全性, 比采用斜心墙堆石坝施工更为方便。

(5) 土石坝计算静动力本构关系修正。

(6) 提出了采用“数字大坝——工程质量与安全信息管理系统”进行大坝施工质量的数字化监控思路, 该系统由天津大学开发实施, 对保障大坝施工质量提供了实时、动态的全过程有效的监督控制。

(7) 为进行大坝施工质量及设计反馈、施工期及运行期的安全评价, 昆明勘测设计研究院联合清华大学开展了“数字大坝——工程安全评价与预警信息管理系统”的研究, 对施工过程、检测质量及监测数据进行综合分析及合理评价, 考虑时空效应结合多尺度有限元计算进行反演分析, 对大坝进行安全评价, 并预测大坝在不同条件下的性态及安全裕度, 根据监测和分析成果修正和完善不同时期、不同工况下大坝的各级警戒值和安全评价

指标,提出相应的应急预案与防范措施。

(8) 开展了土料压实控制标准与检测方法的研究,对比超大型($\phi 600\text{mm}$, $2690\text{kJ}/\text{m}^3$ 功能)、大型($\phi 300\text{mm}$, $2690\text{kJ}/\text{m}^3$ 功能)及小型($\phi 152\text{mm}$, $595\text{kJ}/\text{m}^3$ 功能)击实试验,论证了采用 $595\text{kJ}/\text{m}^3$ 功能小型击实($\phi 152\text{mm}$) P20 细料成果对掺砾土料进行质量控制和采用 $2690\text{kJ}/\text{m}^3$ 功能大型击实($\phi 300\text{mm}$) 成果对掺砾土全料进行质量控制均是可行的;施工过程中采用 $595\text{kJ}/\text{m}^3$ 功能小型击实($\phi 152\text{mm}$) P20 细料成果对掺砾土料进行质量控制和定期采用 $2690\text{kJ}/\text{m}^3$ 功能大型击实($\phi 300\text{mm}$) 成果对掺砾土全料进行质量复核。

3.3 泄水建筑物

本工程校核洪水标准(PMF)时总泄洪流量为 $37532\text{m}^3/\text{s}$,溢洪道、左岸和右岸泄洪隧洞联合泄洪功率为 66940MW 。泄洪流量及功率均名列世界前茅。

3.3.1 溢洪道

溢洪道设 8 个 $15\text{m}\times 20\text{m}$ (宽 $\times$ 高)表孔,泄槽段宽 151.5m ,最大泄量 $31318\text{m}^3/\text{s}$,最大泄量时落差 182m ,为国内最大岸边开敞式溢洪道,最大泄洪功率(PMF 时) 55860MW ,为世界同类工程之首,最大流速 $52\text{m}/\text{s}$ 。

为方便运行管理、检修,采用两道中隔墙将泄槽分为左、中、右三槽。泄槽底板采用厚 $0.8\sim 1.2\text{m}$ 的薄板结构,根据地形条件采用上缓下陡的两级底坡布置形式,跨断层部位采用有盖重固结灌浆和系统锚筋桩锚固处理,垂直水流方向仅在掺气坎附近设结构横缝,结构横缝间 $65\sim 128\text{m}$ 采用通仓浇筑。

溢洪道出口采用预挖消力塘形成水垫的消能方式,较好地解决了溢洪道的消能问题,但由于消力塘底面积大,约为 53000m^2 ,按平均厚度 3m 衬砌,混凝土方量为 $15.7\times 10^4\text{m}^3$,且要设复杂的抽排水系统,因此对消力塘的结构及水力设计进行了专项研究,取消了消力塘底板衬砌和复杂的抽排水系统,采取护岸不护底方案。

3.3.2 泄洪隧洞

(1) 左岸泄洪隧洞最大泄流量为 $3395\text{m}^3/\text{s}$,工作闸门孔口尺寸为 $5\text{m}\times 9\text{m}$,布置 2 孔,设计水头为 103m 。

(2) 右岸泄洪隧洞最大泄流量为 $3257\text{m}^3/\text{s}$,工作闸门孔口尺寸为 $5\text{m}\times 8.5\text{m}$,布置 2 孔,设计水头为 126m 。

(3) 泄洪隧洞闸门孔口流速接近 $40\text{m}/\text{s}$,无压断流速约 $42\text{m}/\text{s}$ 。泄洪隧洞两孔合一并侧向收缩的结构形式在国内尚没有成熟的工程实践;高水头、高流速增加了泄洪隧洞有压流、无压流过渡设计及无压段掺气减蚀设计的难度。

3.4 引水发电建筑物

糯扎渡水电站水库具有多年调节性能,且水库库容巨大,属典型的水温分层型水库,下泄低层低温水将对下游鱼类产生一定的不利影响,“必须采取措施,将不利影响减小到最低”。昆明勘测设计研究院对电站进水口进行了分层取水设计研究。设计采用叠梁门多层取水设计方案:进水塔顺水流向依次布置工作拦污栅、检修拦污栅(叠梁闸门)、检修闸门、事故闸门和通气孔,其中检修拦污栅与叠梁闸门共用检修拦污栅栅槽。

取水叠梁闸门在引水发电下闸挡水工况将闸门整个挡水高度分成四挡,水库水位高于803.00m以上时,门叶整体挡水,挡水闸门顶高程为774.04m,为第一层取水;水库水位在790.40~803.00m时,吊起第一节叠梁门,仅用第二、第三节门叶挡水,此时挡水闸门顶高程为761.36m,此为第二层取水;水库水位在777.70~790.40m时,继续吊起第二节叠梁门,仅用第三节门叶挡水,此时挡水闸门顶高程为748.68m,此为第三层取水;水库水位降至765.00~777.70m时,继续吊起第三节叠梁门,无叠梁闸门挡水,此为第四层取水。

叠梁门多层取水水位保证率高,电站运行的灵活性较高,可保证水电站绝大部分运行时间引用水库上层水发电,最大限度解决了对下游鱼类产生的不利影响。

尾水调压室采用圆筒式,为了减小尾水调压室规模、降低施工难度、确保施工安全,经分析研究认为2号导流隧洞有较好的利用价值,1号尾水调压室充分利用了2号导流隧洞与1号尾水隧洞结合点至中部堵头段间的一段隧洞作为扩展调压室,减小了井筒尺寸,开挖时有利于围岩稳定,降低施工难度,缩短施工工期,节省了工程投资。通过水力过渡过程数值计算分析及水力学试验研究,经过优化后1号尾水调压室井筒内直径由33m调整为27m,2、3号尾水调压室井筒内直径由33m调整为29m,连通上室宽度增加为12m,阻抗板底高程降低为578.5m,调压室后设置30m渐变段与尾水隧洞衔接,调压室底部中心至分缝处的距离调整为17m。尾水调压室和尾水闸门室内的最高、最低涌浪均满足设计要求。

3.5 边坡工程

糯扎渡工程枢纽区主要边坡右岸坝顶高程以上永久边坡最大高度220m、电站进水口边坡最大高度87m、尾水隧洞出口边坡最大高度225m、溢洪道边坡最大高度270m,左、右岸泄洪隧洞进出口边坡、下游护岸工程边坡规模相对较小,主要边坡均为岩质边坡。边坡采用台阶式开挖,每15m或20m高的梯段设宽3m的马道,开挖坡比根据地质条件、建筑物设计体型等因素具体确定。设计中对建筑物边坡开展了地质详查和结构面统计分析、岩体质量等级评定分析、边坡计算参数研究、边坡失稳模式判别、边坡二维及三维稳定分析、典型边坡二维有限元分析等系统研究,研究结果及施工实践表明:枢纽区边坡在综合采用分台阶开挖、边坡防排水系统、系统喷锚支护、预应力锚索等处理措施后,边坡满足稳定和安全要求。

施工期间,针对规模较大的尾水隧洞出口边坡和溢洪道消力塘边坡开展了开挖过程监测信息反馈分析及长期稳定性研究,根据研究结果,对消力塘边坡底部加强了预应力锚固,目前各部位开挖坡施工期间及运行长期稳定均可得到保证。

3.6 心墙堆石坝安全监测

糯扎渡心墙堆石坝布置了完善的监测系统,在传统监测仪器布置的基础上,针对工程特点和难点,主要在以下方面进行了创新:

(1) 上游堆石体位移监测。国内心墙堆石坝监测对下游堆石体位移关注较多,而对于上游堆石体位移监测较为忽视,但上游堆石体在蓄水期和运行期的重要性不低于下游堆石体,为此,糯扎渡水电站在上游堆石体内部分层布置弦式沉降仪,在心墙表面对应高程布

置视准线以监测上游堆石体位移,为全方位监测大坝的变形性态提供了支撑。

(2) 心墙与反滤间错动变形监测。心墙与反滤之间的错动情况对评价大坝的整体变形协调至关重要,但国内在此方面尚无监测实例,本工程将剪变形计布置于心墙与反滤之间,埋设高程与上下游堆石体对应,可综合评判大坝的变形协调情况。

(3) 心墙沉降监测。心墙沉降监测一般采用电磁沉降仪,因其具有埋设简单、测值可靠等优点而应用广泛,但由于埋设于心墙中的电磁沉降环为磁性体,存在埋设时间长后消磁的风险。针对此情况,糯扎渡心墙沉降环采用不锈钢材料,通过将磁性被动探测改进到主动发射,提高了仪器的耐久性。

(4) 下游堆石体沉降监测。下游堆石体沉降监测一般采用水管式沉降仪,常规水管式沉降仪测线为三管式,包括进水管、排水管和排气管,由于超高坝带来管线超常规,管线的不均匀沉降可能导致观测异常,为此,本工程将三管式改进为四管式,增加一根进水管,提高了仪器的可靠性及观测精度。

3.7 导截流建筑物

为满足工程施工导截流的需要,糯扎渡水电站共布置5条导流隧洞,规模巨大;上游围堰与大坝坝体结合,下游土石围堰后期改造成坝体量水堰,围堰布置、体型结构要求特殊,且围堰施工工期相当紧张。

(1) 大断面导流洞开挖支护和薄壁混凝土衬砌。采用考虑“一次支护加固围岩的作用”的隧洞开挖、支护及混凝土衬砌设计方法,完成总长3300余米隧洞的支护、薄壁混凝土衬砌设计,取得巨大经济效益。总结的大型水工隧洞的开挖、支护和衬砌设计理念在国内多个工程中运用。

(2) 大断面浅埋渐变段开挖、支护。1、2号导流洞进口渐变段最大开挖尺寸为 $27.6\text{m}\times 26.3\text{m}$,受 F_5 、 F_6 断层影响,为Ⅲ、Ⅳ类岩体。采用先悬吊锚筋桩,后预应力锚索及超前锚杆锚固,再进行隧洞进口开挖支护的设计方案,成功运用于2号导流洞进口渐变段,上覆岩体厚仅 27.2m ,开挖跨度 27.6m ,平顶一次开挖、支护成型施工中,国内外均属首次。

(3) 大断面导流洞通过不良地质洞段。1、2号导流洞开挖断面尺寸为 $19.6\text{m}\times 24.3\text{m}$ 。隧洞穿过 F_3 断层及影响带长约 40m ,充填物为断层泥带。施工工程利用监测实际资料,采用“反演分析法”进行支护调整,使巨型隧洞成功穿越40余米特殊地质段,既是隧洞支护设计创新,也是施工技术的成功实践,具有国内先进水平。

(4) 80m级土工膜防渗体围堰。鉴于围堰布置、结构的特殊要求及工期的紧迫性,对围堰布置及结构形式进行技术研究,确定了实现工期有保障,围堰结构安全、经济上较优的围堰布置形式。采用高达82m的上游土工膜斜墙土石围堰及下游土石围堰后期改造成坝体量水堰的围堰设计。上游围堰为目前国内外最高土石围堰。

(5) 大流量、高流速、高落差山区河流截流工程实践。截流龙口最大流速为 7.52m/s ,最大落差 6.7m ,具有高流速、高落差的特点,截流难度大。现场监测龙口各水力学指标与设计完全吻合,截流规划设计准确指导了截流的实施。既为截流水力设计参数取值提供了成功经验,也值得其他山区河工程截流借鉴。

3.8 料物平衡与工程建设里程碑

(1) 坝料利用情况。糯扎渡水电工程可用开挖料主要有电站进水口、溢洪道开挖料, 尾水出口边坡、地面开关站及导流洞进口开挖料等, 开挖总量约 $4002 \times 10^4 \text{ m}^3$, 利用料包括直接上坝、回采上坝和混凝土粗细骨料, 利用料总量约为 $2232 \times 10^4 \text{ m}^3$, 利用率约为 56%。

(2) 工程建设里程碑。糯扎渡水电站 2003 年 10 月通过可行性研究审查。审查通过的工程施工总工期为 11.5 年 (138 个月), 其中准备工程工期约 3 年 (34 个月), 主体工程工期约 5.7 年 (69 个月), 完建工期约 3 年 (35 个月); 第一台机组发电工期约 8.5 年 (103 个月)。工程筹建期为 3 年。

工程项目于 2004 年 4 月筹建期陆续开工建设, 2006 年 1 月导流洞主洞开工建设, 2007 年 11 月 4 日截流, 2008 年 12 月大坝心墙区开始填筑, 2011 年 11 月下闸蓄水, 2012 年三季度首台机组投产发电, 2014 年 6 月工程完工。工程筹建期、准备期、首台机组发电均缩短工期约 1 年。

3.9 永久与临时建筑物密切结合

结合地形地质条件、施工及运行要求, 减少工程量, 降低工程投资, 永久与临时建筑多处结合布置, 具体如下:

- (1) 上游围堰与大坝结合。
- (2) 下游围堰与量水堰结合。
- (3) 5 号导流隧洞后段与左岸泄洪隧洞结合。
- (4) 2 号导流隧洞后段与 1 号尾水隧洞及 1 号尾水调压室结合。
- (5) 5 号导流隧洞交通洞充分利用 15 号施工支洞。

3.10 厂房三维协同设计

采用 RIVET 等软件进行多专业协同三维设计, 设计成果可从多角度、各部位真实展示, 甚至可模拟漫游电站厂房。在各专业、各系统的设计过程中解决了相互交错、漏、碰、撞的问题, 三维模型不仅真实地再现了工程实施后的全貌, 而且可方便地转化为二维施工图。目前, 电站的布置、电缆桥架等均采用三维模型转化的方式出二维施工图。推广采用了三维协同设计, 有效减少了设计中经常出现的错、漏、碰问题 95% 以上。

作者简介

张宗亮 (1963—), 男, 山东济南人, 全国工程设计大师, 教授级高工, 博士, 博士生导师, 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院副院长兼总工程师, 土石坝工程技术领域著名专家。