

高混凝土面板堆石坝 施工关键技术

宗敦峰 向 建 李秋生 何小雄 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高混凝土面板堆石坝 施工关键技术

宗敦峰 向 建 李秋生 何小雄 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书总结了近年来面板堆石坝施工实践中所遇到的具体问题,以及所采取的具体的解决方法。以紧密结合具体工程实践的方式,分别论述了从料源规划及开采、坝体填筑及变形控制、坝体填筑石料的压实方式、坝面固坡护坡、趾板和面板现场施工、混凝土防裂施工、特殊坝型的关键施工以及与面板堆石坝相关的其他施工技术等方面的内容,阐述了面板堆石坝施工中的关键技术。

本书可适用水利水电行业施工技术人员,也可作为大专院校师生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高混凝土面板堆石坝施工关键技术 / 宗敦峰等著

— 北京 : 中国水利水电出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-5170-1934-3

I. ①高… II. ①宗… III. ①混凝土面板坝—堆石坝—工程施工 IV. ①TV641. 4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第080681号

责任编辑 林京

书 名	高混凝土面板堆石坝施工关键技术
作 者	宗敦峰 向建 李秋生 何小雄 著
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
刷 印	北京鑫丰华彩印有限公司
规 格	210mm×285mm 16开本 19.25印张 582千字
版 次	2014年4月第1版 2014年4月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	180.00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

《高混凝土面板堆石坝施工关键技术》

编 审 委 员 会

主 任 宗敦峰

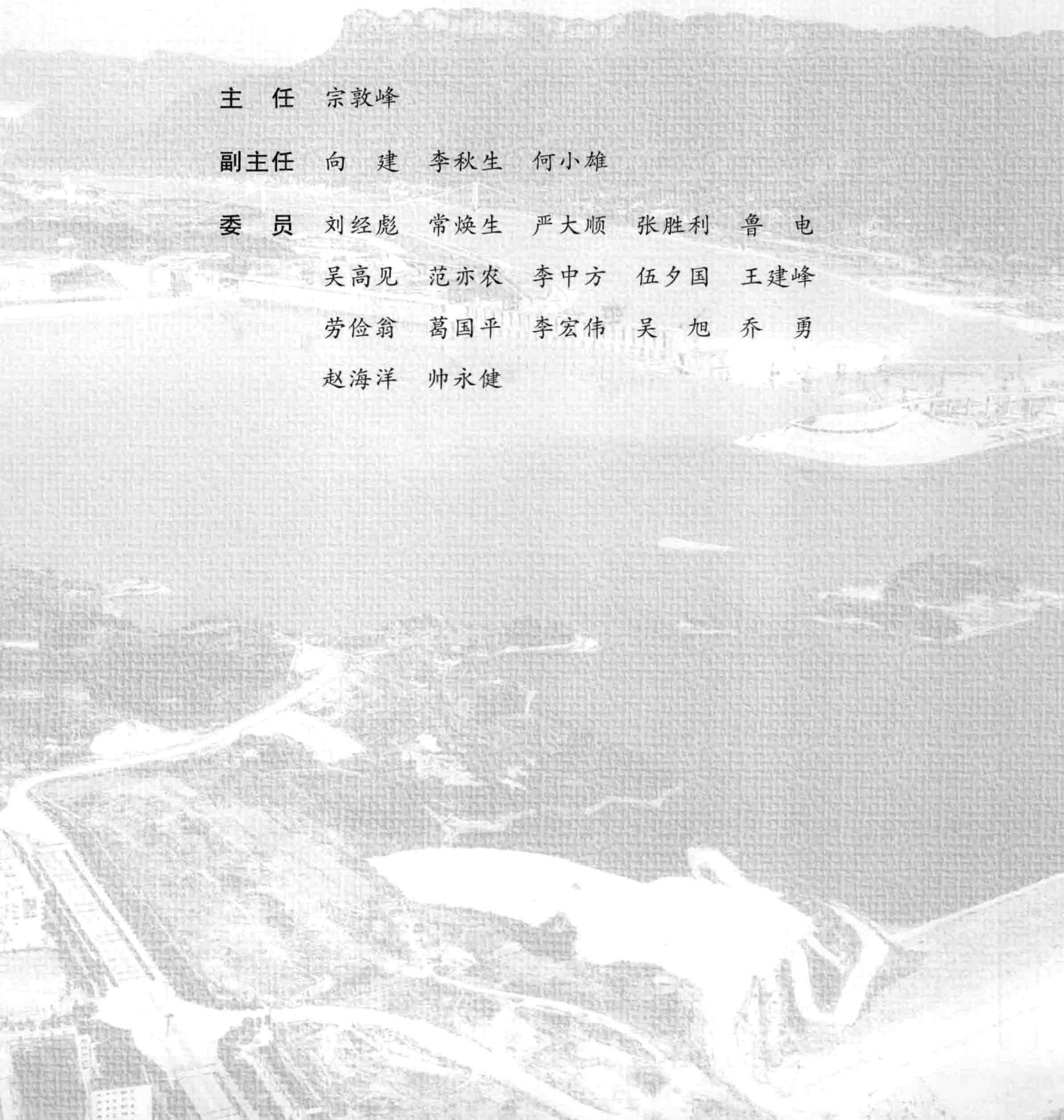
副主任 向 建 李秋生 何小雄

委 员 刘经彪 常焕生 严大顺 张胜利 鲁 电

吴高见 范亦农 李中方 伍夕国 王建峰

劳俭翁 葛国平 李宏伟 吴 旭 乔 勇

赵海洋 帅永健



前 言

我国用现代的技术大规模地建设混凝土面板堆石坝始于 1985 年，经过 30 多年的发展，大坝的建设规模和坝高都在不断增加，200m 级的高混凝土面板堆石坝在我国有多座建设完成并投入使用。中国水利水电建设股份有限公司作为我国最大的水电施工建设企业，在承担建设的国内外高混凝土面板堆石坝施工中，积极应用和实践先进的科研成果和设计技术，同时也依托工程，针对工程建设中高混凝土面板堆石坝施工的技术难点和发展需要，开展了包括快速施工规划与组织、新技术、新工艺、新材料、新机具的系列研究和应用，形成了系统的高混凝土面板堆石坝优质快速施工技术。

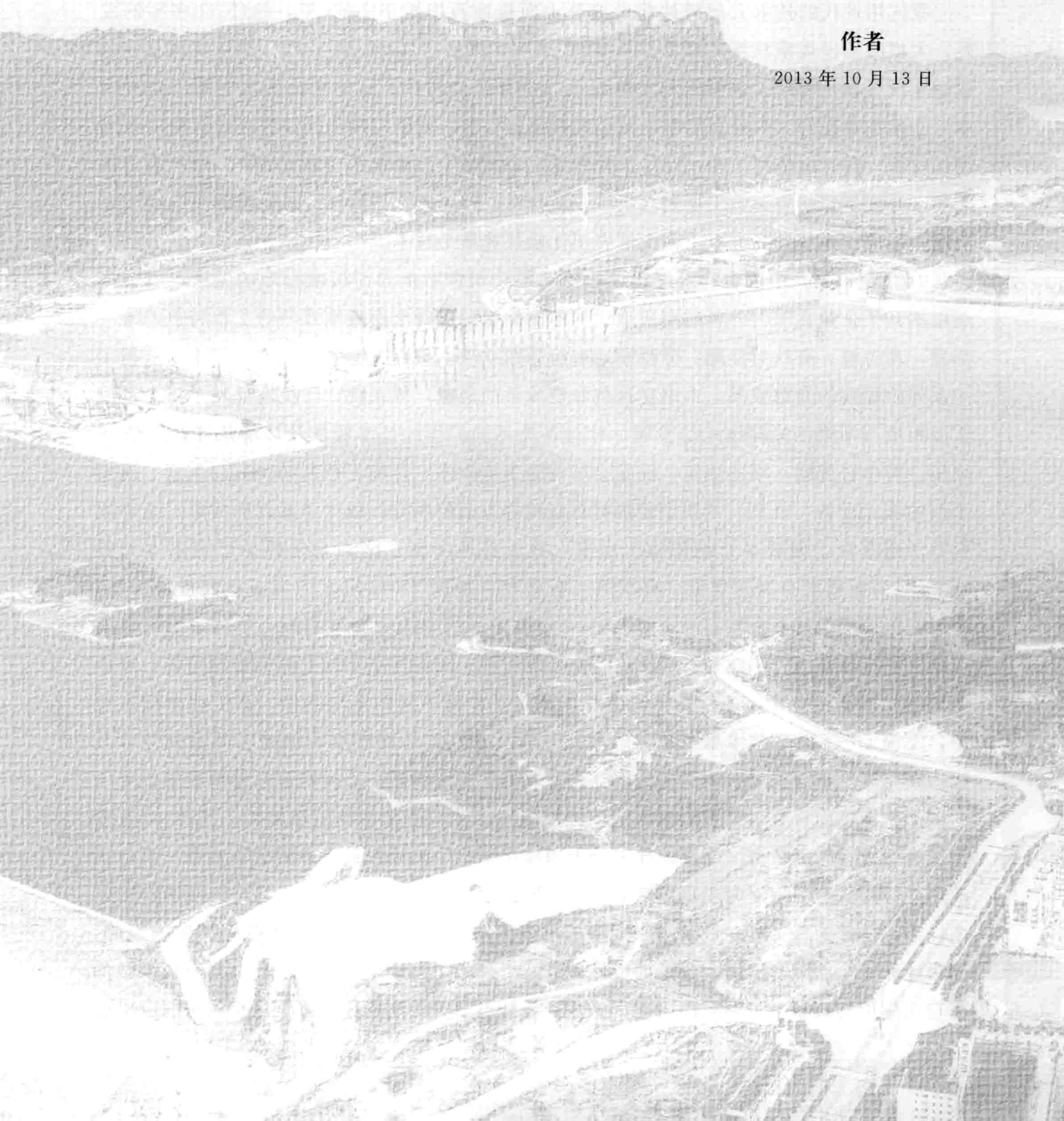
21 世纪以来，中国水利水电建设股份有限公司针对世界面板堆石坝的发展，有计划地根据其子企业在国内外各时期所承建的不同类型的混凝土面板堆石坝的工程特点，统一部署，动态地、有针对性地进行课题立项，研究关键的相关施工技术，获得了一系列阶段性的专题成果。本书是这些专题成果的集成，较系统、广泛地反映了当今混凝土面板堆石坝施工关键技术的发展。针对各类不同工程的技术要求及环境条件，历经 10 余年，对坝料规划、坝体填筑、混凝土结构施工等技术，开展了系列的研究与创新。研发了新的施工设备、机具，开展了特定材料应用等方面的研究，取得了系列的成果。全面地提升了高混凝土面板堆石坝的施工水平。并成功地实施了诸如马来西亚巴贡水电站等 200m 级高面板堆石坝的建设。典型的工程包括：坝高 200m 以上的混凝土面板堆石坝；建于深覆盖层上的面板堆石坝；坝长达 4319m 的长混凝土面板堆石坝；坝体设溢流堰的混凝土面板堆石坝；小粒径石料填筑的面板堆石坝；深覆盖层基础上的面板堆石坝；寒冷地区的面板堆石坝等。工程遍布国内外，涵盖了各种不同的筑坝条件。在工程建设过程中，发现了一系列的技术难点和发展需要，通过研究获得面板堆石坝施工的系列技术方法，在高混凝土面板堆石坝快速施工工艺上取得实质性突破；通过创新面板坝新型施工工艺（无轨滑模面板施工工艺、挤压边墙固坡施工工艺、砂浆翻模固坡施工工艺等），开发了成套面板坝施工装备（电液控导向调平边墙挤压机、趾板混凝土连续浇筑装置、自行式液压悬臂门式防浪墙混凝土浇筑装置等）；研制的 VF 混凝土防裂剂，具有良好的补偿收缩性能，良好的施工和易性及膨胀变形的可控性，可防止或减少混凝土收缩产生的裂缝。同时建立了全面配套的适合各类面板坝型的施工技术，并应用于当今世界上具有代表性的工程。应用的典型工程遍布国内外，涵盖了各种不同的筑坝条件。由于这些成果的应用还

创立了多项国家级优质工程。

本书的成果取得了多项专利、工法，成为国内规范和国际大坝委员会相关技术公告的技术依据，注重在高混凝土面板堆石坝技术上的普遍适应性、合理性和可靠性，在成果推广上注重重大技术方面等核心技术的应用，因此相关成果在国内外工程中得到了广泛应用。

作者

2013年10月13日



目 录

前言

1 高混凝土面板堆石坝施工技术研究与应	1
1.1 引言	2
1.2 典型工程项目概况及特点介绍	3
1.3 技术难点和施工技术发展需求	8
1.4 主要技术内容简介	10
1.5 技术经济效益	16
2 料源规划及开采技术	17
2.1 坝体填筑料与开采料的关系及坝体填料规划策略	19
2.2 马来西亚巴贡水电站工程料场的施工规划	19
2.3 三板溪水电站料场坝料施工规划方法	28
2.4 填筑料与开挖料的挖填平衡规划方法	32
2.5 马来西亚巴贡水电工程坝料的开采方法	42
2.6 三板溪工程坝料的开采方法	47
2.7 施工道路布置	50
3 坝体填筑及变形控制施工技术	55
3.1 填筑的加载方式与坝体变形关系	56
3.2 控制坝体变形协调的施工手段	70
3.3 深覆盖层混凝土面板堆石坝变形控制施工技术	71
3.4 填筑料的特殊压实施工技术	90
4 面板堆石坝坝面固坡护坡技术	101
4.1 挤压式混凝土边墙固坡技术	102
4.2 面板堆石坝翻模固坡技术	127
4.3 护坡技术	133
5 混凝土趾板、面板现场施工技术	137
5.1 趾板施工技术	138
5.2 面板混凝土的施工技术	141
5.3 大坝面板止水的施工方法	159
5.4 面板裂缝的修补方法	169
5.5 面板堆石坝混凝土结构施工实用技术	172

6 趾板、面板混凝土防裂材料应用	181
6.1 补偿收缩混凝土简述	182
6.2 趾板混凝土防裂材料	183
6.3 面板混凝土防裂	202
7 特殊坝型的关键施工技术	213
7.1 小粒径石料填筑混凝土面板坝堆石体试验	214
7.2 堆石坝体溢洪道的施工技术	242
7.3 深覆盖层坝基防渗墙施工技术	255
8 与面板堆石坝相关的其他施工技术	269
8.1 滩坑水电站水流控制施工技术	270
8.2 导流洞封堵期间,生态放水的分期封堵方式	276
8.3 光纤温度传感技术在超长混凝土面板堆石坝渗漏探测中的应用	285



1 高混凝土面板 堆石坝施工 技术研究 与应用 综述



1.1 引言

21 世纪以来,中国水利水电建设股份有限公司针对世界混凝土面板堆石坝的发展,有计划地根据其子企业在各时期所承建的不同类型的混凝土面板堆石坝的工程特点,统一部署,动态地、有针对性地、分阶段地研究相关的施工关键技术。针对各类不同工程的技术要求及环境条件,对混凝土面板堆石坝的坝料规划、坝体填筑、混凝土结构施工等关键技术进行了系列的研究与创新,且结合实际工程边研究、边应用、边推广、边完善,历经了 10 余年的努力,取得了系列的成果。本书是这些专题成果的集成。较系统、全面、广泛地反映了当今高混凝土面板堆石坝施工关键技术的发展。

中国水利水电建设股份有限公司所属企业在 10 余年的时间里,先后在国内外承建了各类型的面板堆石坝工程,据不完全统计,所承建的 100m 以上高度的混凝土面板堆石坝工程有 20 余座,占国内同类工程的 80% 以上,见表 1-1。典型的水电工程包括:坝高 200m 以上的面板堆石坝;建于深覆盖层上的面板堆石坝;坝长 4319m 的长面板堆石坝;坝体设溢流堰的混凝土面板堆石坝;小粒径石料填筑的面板堆石坝;深覆盖层基础上的面板堆石坝;寒冷地区建造的面板堆石坝等。

表 1-1 中国水电建设股份有限公司所承建的部分 100m 以上高度的混凝土面板堆石坝工程统计

序号	坝名	位 置	河流	坝高 (m)	坝体体积 (万 m ³)	面板面积 (万 m ²)	库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	泄水流量 (m ³ /s)	蓄水年份
1	巴贡	马来西亚	BALUI	205.0	1730	12.00	440.00	2400	15000	2010
2	三板溪	中国贵州省	清水江	185.5	961	9.40	40.90	1600		2006
3	南娥二级	老挝	南俄河	182.0				615		
4	洪家渡	中国贵州省	六冲河	179.0	900	7.50	45.90	600	6996	2008
5	滩坑	中国浙江省	小溪	162.0	980	9.50	41.90	600		2008
6	紫坪铺	中国四川省	岷江	156.0	1180	13.20	10.80	760	7008	2005
7	董箐	中国贵州省	北盘江	150.0				880		2009
8	龙首 2 级	中国青海省	黑河	146.0	253	2.64	0.86	157	2629	2004
9	公伯峡	中国青海省	黄河	139.0	453	5.80	6.92	1500	7500	2004
10	九甸峡	中国甘肃省	洮河	133.5	300		10.04	300		2008
11	乌鲁瓦提	中国新疆维吾尔自治区	卡拉喀什河	133.0	606	7.22	3.47	60	1890	2000
12	珊溪	中国浙江省	飞云江	132.5	589	6.88	18.42	200	8429	2001
13	街面	中国福建省	尤溪	129.0	340	3.00	18.24	300		2007
14	白溪	中国浙江省	白溪	124.4	390	4.80	1.68	18		2001
15	黑泉	中国青海省	宝库河	123.5	540	7.90	1.82	12	389	2000
16	芹山	中国福建省	穆阳河	122.0	248	4.00	2.65	70	3315	1999
17	白云	中国湖南省	巫水	120.0	170	1.45	3.60	54	2150	1998
18	洒南江	中国云南省	洒南江	115.0	297		2.63	200		2007
19	双沟	中国吉林省	松江河	110.0	258	3.73	3.90	280		2009
20	那兰	中国云南省	藤条江	109.0	259	4.08	2.86	150		2005
21	茄子山	中国云南省	苏帕河	106.0	140	2.20	1.21	16	730	2000
22	思安江	中国广西壮族自治区	思安河	103.0	210	4.12	0.94	12		2004
23	柴石滩	中国云南省	南盘江	102.0	217	3.82	4.37	60	3336	2001

从表 1-1 中列出,在这些众多的工程建设过程中,发现了一系列的施工技术难点和发展需要,通过研究获得了面板堆石坝施工的系列技术方法,在高面板堆石坝快速施工工艺上取得实质性突破;通过创新面板坝新型施工工艺(无轨滑模面板施工工艺、挤压边墙固坡施工工艺、砂浆翻模固坡施工工艺等),开发了成套面板坝施工装备(电液控导向调平边墙挤压机、趾板混凝土连续浇筑装置、自行式液压悬臂门式防浪墙混凝土浇筑装置等);研制的 VF 混凝土防裂剂,具有良好的补偿收缩性能,拌制的混凝土具有良好的和易性及膨胀变形的可控性,可防止或减少混凝土收缩产生的裂缝。同时建立了全面配套的适合各类面板坝型的施工技术,并应用于当今世界上具有代表性的工程。应用的典型工程遍布国内外,涵盖了各种不同的筑坝条件。这些成果的应用还创立了多项国家级优质工程。全面地提升了高面板堆石坝的施工技术水平,并成功地实施了诸如马来西亚巴贡水电站等 200m 级高面板堆石坝的建设。

1.2 典型工程项目概况及特点介绍

1.2.1 马来西亚巴贡水利工程

巴贡水电枢纽位于马来西亚沙捞越州(SARAWAK)中部的巴雷(BALUI)河上,距下游的别拉嘎镇(Belaga)37km,距民都鲁180km。工程所在地为赤道地区,属热带雨林气候,全年高温多雨,日照强烈,年平均气温 26°C ,多年平均降雨量4500mm,相对的湿季时段为每年10月至次年5月,干季时段为每年的6~9月。枢纽建筑物主要由混凝土面板堆石坝、开敞式溢洪道和装机容量2400MW的地面厂房三大部分组成。库容440亿 m^3 ,是目前东南亚最大的水电站。



图 1-1 马来西亚巴贡水电站大坝俯视

大坝的坝型为混凝土面板堆石坝,最大坝高205.00m,坝顶长度740.00m。水库总库容440亿 m^3 。坝体实际填筑总方量为1730万 m^3 。溢洪道包括:前池、溢流堰、卸槽段和挑流鼻坎,为开敞式溢洪道,溢流堰最大高度34.00m,泄槽段宽度50m,长度608.00m,设计最大泄洪流量 $15000\text{m}^3/\text{s}$ 。进水口的结构型式为独立进水塔,进水塔尺寸,170m $\times$ 63m $\times$ 56m(长 $\times$ 宽 $\times$ 高),水流控制采用叠梁门取上层水,设工作闸门和事故闸门。厂房为地面岸坡式厂房,8台机组,总装机容量2400MW,厂房结构尺寸,256.50m $\times$ 49.00m $\times$ 64.00m。引水隧洞包括上平段、竖井、下平段,压力钢管段,单洞长度最长589m,最短537m,总长约4501m,隧洞衬砌后直径8.50m/7.0m/4.85m。上平段长度75~

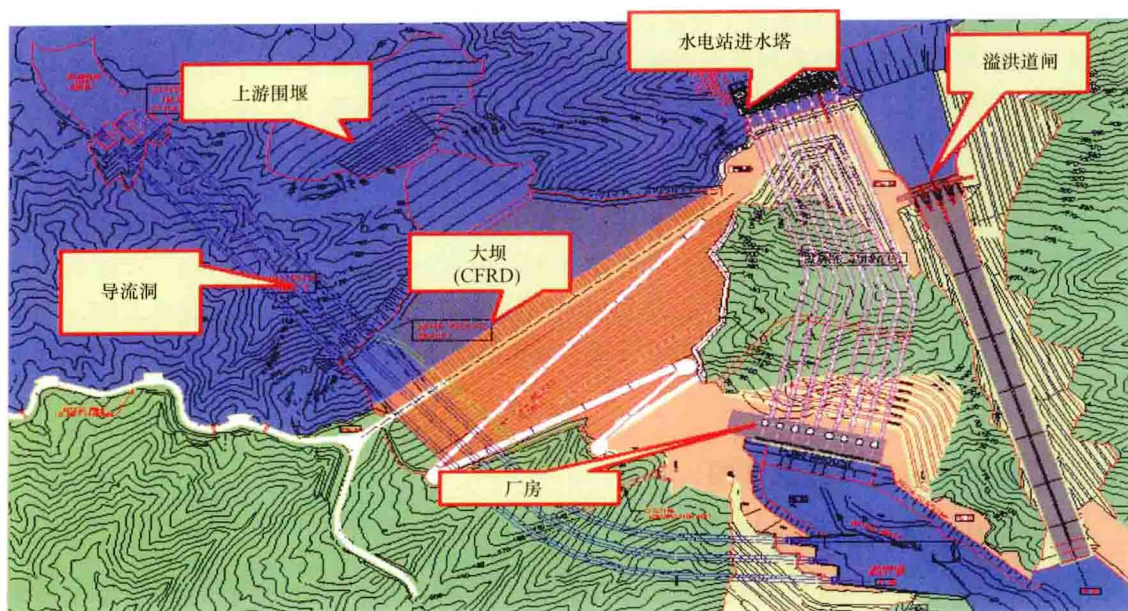


图 1-2 马来西亚巴贡水电站工程平面布置

43m, 上弯段 37m, 竖井 50~53m, 下平段混凝土衬砌长度 161~109m, 压力钢管长度 217m。最大开挖直径 9.9m。马来西亚巴贡水电站主体工程于 2003 年 5 月开工, 2010 年 10 月下闸蓄水, 被评为 2011 年度国家优质工程金奖。

混凝土面板堆石坝最大坝高 205m, 是目前在建的同类型的世界第二高面板堆石坝; 坝顶轴线长 740m, 坝顶高程 236.50m, 上游边坡坡比为 $V:H=1:1.4$, 下游边坡坡比 $V:H=1:1.3$; 实际总填筑方量 1730 万 m^3 , 是世界知名的高面板堆石坝。施工区河道狭窄, 河谷成 V 形。大坝两岸边坡坡度为 20~60°, 高约 300m。坝址区岩层由砂岩、杂砂岩、页岩和泥岩互层等组成, 杂砂岩占 70% 左右, 页岩和泥岩约占 30%。微风化砂岩饱和湿抗压强度约 100~150MPa, 弱风化砂岩抗压强度约 70~100MPa; 坝底河谷宽度 40m, 顺流向宽度 580m; 坝顶长度 740m, 坝顶宽度 12m; 大坝上游坡比 1:1.4, 下游局部坡比 1:1.3, 在下游坝坡上设“之”字形上坝道路, 下游坡综合比 1:1.52。大坝防渗体为上游薄型混凝土面板结合帷幕灌浆系统防渗, 在面板上游高程 125.00m 以下, 加设顶宽分别为 4m 和 6m、坡度分别为 1:1.4 和 1:2.5 的上游 1A 和 1B 盖重区。大坝主体为堆石填筑体, 设计总填筑方量 1730 万 m^3 。枢纽工程最高月开挖强度 208.9 万 m^3 ; 连续 11 个月开挖强度超过 150 万 m^3 ; 填筑总工期 35.5 个月, 平均月填筑强度 47.1 万 m^3 , 最高月填筑强度 86.4 万 m^3 , 连续 7 个月填筑强度超过 70 万 m^3 , 曾获中国企业第 12 批新纪录。

1.2.2 麦洛维水电站

苏丹麦洛维水电站位于苏丹首都喀土穆以北 400km 的尼罗河第四瀑布及麦洛维镇附近, 主要目的为发电和灌溉。该工程主要由土堤、面板堆石坝、黏土心墙坝、混凝土重力坝、取水口、开关站、厂房及附属结构组成, 是一项用于发电和灌溉的大 (1) 型水电枢纽工程。

大坝全长 9.7km, 最大坝高 67.5m, 库容 124.5 亿 m^3 , 装机 10 台 125 万 kW, 总投资近 17 亿欧元。主要工程量为: 土石方挖填 2720 万 m^3 , 混凝土浇筑 190 万 m^3 , 钢筋制安 12 万 t。各种闸门和拦污栅 70 套, 启闭机 44 台套, 金属结构安装共 2.3 万 t, 被称为苏丹的“三峡水利工程”。

混凝土坝段轴线长 542.6m, 最大坝高 67m, 左右岸土堤轴线长 2244.7m, 最大堤高 17.9m, 左右岸面板堆石坝轴线长 6060m, 其中左岸面板堆石坝长 4319m, 是世界上最长的面板堆石坝。最大坝高 65.4m, 坝顶宽 10m, 坝体上游坡比 1:1.303, 下游坡比 1:1.5, 混凝土面板厚度 0.3~0.45m, 双向

单层钢筋布置, 面板混凝土设计强度等级 C20/25, 总面积约 198910m^2 。

1.2.3 九甸峡水利枢纽混凝土面板堆石坝

九甸峡水利枢纽混凝土面板堆石坝坝顶高程 2206.50m , 最大坝高 133.5m , 坝顶宽度 11m , 坝轴线长 232m , 坝顶设 L 形防浪墙, 墙高 3.5m , 墙顶高程 2206.50m ; 上游坝坡坡比为 $1:1.4$, 下游综合坡比为 $1:1.5$, 局部坡比为 $1:1.4$, 设置上下两层“之”字形道路, 道路宽 8.0m ; 上游混凝土面板厚度为 $0.3\sim 0.69\text{m}$ 。坝体填筑总量约为 300万 m^3 。

坝体结构上游至下游分别由以下几个部分组成: 最前部分为上游盖重保护体; 第二部分为厚度 $30\sim 69\text{cm}$ 的钢筋混凝土面板; 第三部分为挤压边墙; 第四部分为厚度为 300cm 的垫层区; 第五部分为厚度为 500cm 的过度层区; 第六部分为主堆石区和下游堆石区; 其中下游堆石区包裹在主堆石区内; 最下游部分为干砌块石护坡, 其中高程 2178.00m 以上坝后坡面上根据抗震要求设置厚度为 15cm 喷钢筋混凝土护面。

大坝整个坝基坐落在覆盖层上, 上游侧河床段趾板处覆盖层深度约为 25m , 河床段趾板上游设置连接板, 与防渗墙连成一体, 防渗墙设计深度约为 26m 。坝基后部覆盖层的最大深度约为 45m 。

大坝两岸坡非常陡峭, 左岸坝坡设计开挖坡比为 $1:0.1$, 趾板后坡坡比为 $1:0.3$, 右岸坝坡设计开挖坡比为 $1:0.2$, 趾板后坡坡比为 $1:0.3\sim 1:0.5$ 。

高程 2120.00m 以下两岸坡基本呈直立状, 局部为倒坡; 左岸高程 2120.00m 以上为开挖边坡, 开挖坡比为 $1:0.1$, 右岸高程 $2120.00\sim 2125.00\text{m}$ 为一阶梯平台, 高程 2125.00m 以上为开挖边坡, 坡比为 $1:0.2$ 。

1.2.4 桐柏抽水蓄能电站下水库工程

桐柏抽水蓄能电站位于浙江省天台县, 水电站装机容量 1200MW 。水电站等别为一等工程, 工程规模属大(1)型, 电站枢纽由上水库、下水库、输水系统、地下厂房及开关站等组成。下水库在百丈溪上建坝形成, 主坝为钢筋混凝土面板堆石坝。副坝位于库尾垭口上, 坝型为混凝土重力坝。泄水建筑物为溢洪道和导流泄放洞。挡水坝和泄水建筑物均按一级建筑物设计。导流泄放洞, 导流泄放洞布置在下水库右岸, 为 I 级建筑物, 具有导流、泄洪和放空水库的功能。施工期间承担下水库的导流任务, 导流完成后根据电站运行需要在出口设置弧形工作门, 将导流洞改建成永久泄放洞, 参与泄洪和放空水库。

混凝土面板堆石坝: 混凝土面板堆石坝最大坝高 68.25m , 坝顶高程 148.25m , 防浪墙顶高程 149.45m , 坝顶宽度 8m , 坝顶长 434m 。上游坝坡 $1:1.4$, 下游平均坡度 $1:1.5$ 。

坝身溢洪道: 坝身溢洪道位于坝体河床部位, 由溢流堰进口段、陡槽、挑流鼻坎、护坦、预挖冲坑及出水渠组成, 全长约 200m 。溢流堰进口段总长 21.13m , 中部为驼峰堰, 堰高 73cm , 堰顶高程 141.90m 。进口段分两孔, 每孔净宽 13m , 中、边墩厚度 1m , 顶部布置交通桥。堰上不设闸门, 堰底板高程 141.17m , 与水库正常蓄水位齐平。堰底板厚度 0.6m , 堰底板下设垂直锚筋及 1.5m 厚垫层和 3m 厚过渡层。溢洪道泄槽为矩形, 净宽 27m , 坡比 $1:1.5$, 底板厚 60cm 。下设碎石垫层和过渡层, 水平宽分别为 2.0m 和 4.0m 。泄槽混凝土底板通过锚筋网和钢筋混凝土锚固板与坝体堆石连成一体。沿水流方向每隔水平长 15m , 设一道掺气槽, 将底板分成 5 段。底板上游端部与长 4.4m 、厚 0.4m 的水平锚固板连接, 在底板设置水平锚筋 $\Phi 28@2.4\times 2.0\text{m}$, 长 10m , 与堆石体相锚固。泄槽侧墙高度为 2.4m , 墙厚 0.4m , 墙顶坡比 $1:1.5$ 。侧墙垂直水流方向分结构缝, 设在底板掺气槽处, 缝宽 5cm 。挑流鼻坎采用连续式挑坎, 坎基设置于弱风化的基岩上, 基础高程 80.00m , 反弧半径 8.0m , 坎底高程 89.25m , 坎顶高程 90.00m , 挑射角 25° 。鼻坎边墙扩散角为 5° 。鼻坎下游 15m 范围设置了钢筋混凝土防冲护坦和边墙。冲刷坑采用预挖, 长 25m , 宽 42m , 冲坑底高程 73.50m , 上游坡度为 $1:7.0$, 下游坡度为 $1:2.0$, 与下游出水渠衔接。

1.2.5 双沟水电站

双沟水电站位于吉林省抚松县,第二松花江上游支流松江河上,为松江河梯级水电站第二级电站。水库总库容 3.88 亿 m^3 ,水电站总装机容量 280MW,多年平均发电量 3.868 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。枢纽主要由混凝土面板堆石坝、岸坡式溢洪道、引水系统及发电系统组成,最大坝高 110.50m。淹没耕地 1505.8 亩,迁移人口 485 人。

双沟水电站大坝坝高 110m,是目前东北地区最高的混凝土面板堆石坝,由于石料场设在大坝的上游,全部上坝料需跨越趾板上坝。双沟大坝跨趾板桥的设计、施工及成功应用,保证了大坝施工的顺利进行,为类似工程施工积累了宝贵的经验。双沟大坝首次采用了砂浆翻模固坡的工艺技术,效果良好。

1.2.6 大水沟水库

大水沟水库位于云南省镇雄县五德镇大水沟,距镇雄县城 64km,水库属金沙江下段水系白水江源头支流牛场河。坝址以上流域面积 365km^2 ,水库总库容 2770 万 m^3 ,装机容量 6400kW,水库是以灌溉为主,结合发电、防洪和人畜饮水等综合利用的中型水利工程。

水利枢纽工程于 2000 年 5 月开工,2003 年 12 月建成。水利枢纽工程由混凝土面板堆石坝、输水隧洞、河岸式溢洪道、泄洪冲沙(导流)隧洞、坝后电站等组成。

混凝土面板堆石坝高 75.6m,坝顶长 176.52m,顶宽 7m,上游坝坡 1:1.4,下游平均坝坡 1:1.403。坝体由混凝土面板、垫层料、过渡料、主、次堆石体组成,总填筑量 75 万 m^3 。混凝土面板坝堆石体首次采用小粒径石料填筑而成。

1.2.7 三板溪水电站

三板溪水电站位于沅水干流上游河段的清水江下游贵州省黔东南苗族侗族自治州锦屏县内,是沅水干流继五强溪水电站后的第二个百万级水电站。水电站坝型为混凝土面板堆石坝,最大坝高 185.5m,属 200m 级高面板堆石坝,在面板堆石坝中,该坝高位居全国第二。该水电站总装机容量 100 万 kW,安装 4 台 25 万 kW 混流式水轮发电机组,年发电量 24.28 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。同时,该水电站的建设将极大提高沅水中游安江河段和下游常德、益阳、桃源以及洞庭湖区的防洪能力,使防洪标准由目前的 5 年一遇提高到 20 年一遇。

坝址为不对称 V 形峡谷,两岸基岩多裸露,河床覆盖层薄。右岸山体雄厚,右岸岸坡 $45^\circ \sim 60^\circ$;左岸岸坡 $40^\circ \sim 45^\circ$,高程 478.00m 以上较单薄,为条形山脊,岩石风化较深。坝址岩性主要为元古界板溪群清水江组变余凝灰岩、变余凝灰质砂岩等。工程地质条件较好,地震基本烈度为 6 度。

枢纽布置为:河床布置主坝,左岸条形山脊上布置副坝;溢洪道布置在左岸,位于主、副坝之间;泄洪洞布置在溢洪道左侧山体中;地下引水发电厂房布置在右岸。

溢洪道:溢洪道为岸边开敞式溢洪道,长 686m,溢流堰为 WES 实用堰,堰顶高程 456.00m,设 3 孔溢流表孔,孔口闸门尺寸 $20\text{m} \times 19\text{m}$ (宽 $\times$ 高),采用挑流消能。设计洪水位和校核洪水位时的下泄流量分别为 $10306\text{m}^3/\text{s}$ 和 $13100\text{m}^3/\text{s}$,最大流速为 45.6m/s 。

泄洪洞:泄洪洞位于溢洪道左侧,塔式进水口底板高程 400.00m,进水口设 2 孔 $5\text{m} \times 9\text{m}$ (宽 $\times$ 高)的深孔,其后接 $13\text{m} \times 13.5\text{m}$ (宽 $\times$ 高)的城门洞型无压隧洞,总长约 816m,其中隧洞长约 745m,采用挑流消能。设计洪水位和校核洪水位时下泄流量分别为 $2880\text{m}^3/\text{s}$ 和 $2940\text{m}^3/\text{s}$,洞内最大流速为 42.1m/s 。

发电引水系统:右岸地下厂房装有 4 台单机容量为 25 万 kW 的混流式水轮发电机组,水电站进水口为岸塔式,引水隧洞洞径为 7.0m,单机单洞引水。主厂房尺寸为 $147.5\text{m} \times 22.7\text{m} \times 60.0\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),主变压器开关室位于主厂房下游,尺寸为 $111.0\text{m} \times 23.0\text{m} \times 31.8\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。尾水系统



图 1-3 三板溪水电站

采用“2机1井1洞”的布置方式。尾水设2个阻抗式调压井，内径24m，高度约61.8m，2条尾水隧洞的内径均为12.0m。

施工导流：采用隧洞导流，一次拦断河床的导流方式。导流隧洞布置在左岸，过水断面尺寸为16.0m×18.0m（宽×高），隧洞断面为城门洞型，隧洞长734m。上、下游围堰均为土石围堰。截流后采取“枯抢拦洪”度汛方案。

拦河坝：主坝和副坝均为混凝土面板堆石坝，坝顶高程482.50m，坝顶宽10.00m，主坝坝顶长423.75m，最大坝高185.50m，副坝坝顶长233.78m，最大坝高50.50m，主、副坝上下游坝坡均为1:1.4，属200m级高面板堆石坝，位居全国第二高面板堆石坝。

1.2.8 公伯峡水电站

公伯峡水电站位于青海省循化、化隆两县交界处的黄河干流上，是一座以发电为主，兼有防洪、灌溉、供水等综合效益的大（1）型工程，其工程枢纽由挡水大坝、引水发电系统及泄水建筑物组成。坝顶高程2010.00m，最大坝高132.2m，库容6.3亿 m^3 ，总装机容量1500MW。工程土石方开挖量1170万 m^3 ，土石方填筑514万 m^3 ，混凝土浇筑145万 m^3 ，金属结构制安13841t。2002年3月工程截流，2004年8月第一台机组提前一年并网发电，2006年8月工程竣工。

大坝钢筋混凝土防渗面板一次性浇筑到坝顶，斜长达218m，成为世界上一次浇筑最长的混凝土防渗面板。同时，还采用深层帷幕灌浆、施工缝多层防渗处理等多种措施，成功解决了建筑物基础稳定和钢筋混凝土面板堆石坝渗漏问题。

1.2.9 滩坑水电站

滩坑水电站位于浙江省青田县境内的瓯江支流小溪上，距温州市92km，距青田县城西门约32km，水库正常蓄水位160.00m，总库容41.55亿 m^3 ，相应水库面积70.93 km^2 ，干流回水长度80km，控制

流域面积 3330km², 调节库容 21.26 亿 m³, 防洪库容 3.50 亿 m³, 坝顶高 171m, 系多年调节水库。溢洪道 6 个闸孔, 最大泄洪 14334m³/s, 装机容量 60 万 kW, 年平均发电量 10.35 亿 kW·h。该水电站由拦河坝、溢洪道、泄洪洞、引水系统、发电厂房等建筑物组成。

拦河坝为混凝土面板堆石坝, 坝顶高程 171.00m, 最大坝高 162.0m, 坝顶长 507.0m。大坝趾板设计为平趾板, 设在弱风化岩层上。

1.2.10 董箐水电站

董箐水电站位于贵州省镇宁县与贞丰县交界的北盘江上, 是北盘江流域梯级开发的第 3 个水电站, 水电站总容量为 88 万 kW, 多年平均发电量近期 30.26 亿 kW·h。是“西电东送”第二批重点电源建设项目之一, 水电站以发电为主, 兼有通航、防洪、供水、养殖和改善生态环境等综合效益。

工程按 5000 年一遇洪水校核, 校核洪水位 493.08m, 下泄流量 13330m³/s; 500 年一遇洪水设计, 设计洪水位 490.70m, 下泄流量 11478m³/s。坝址河谷呈开阔的 V 形, 坝址区出露地层为青岩组第二段 (T2q2)、边阳组第一段 (T2b1) 和第二段 (T2b2) 及第四系 (Q) 地层, 坝基及两坝肩以灰色厚层砂岩、粉砂岩夹钙质泥岩为主。坝址区处于多德向斜北西翼, 坝址区未发现大的断裂带发育, 褶皱、裂隙是坝址区的主要构造形迹。坝址处地形开阔, 利于建筑物的布置, 不存在岩溶渗漏问题, 岩石完整, 构造单一。

钢筋混凝土面板堆石坝最大坝高 150m, 坝顶高程 494.50m, 坝顶全长 678.63m, 上游坝坡 1:1.4, 下游综合坡比 1:1.5, 坝体总填筑方量约 890 万 m³。溢洪道控制段距大坝左坝肩约 60m, 分别由引水明渠段、控制段、泄槽段及消能工组成。厂房采用坝后式右岸地面厂房, 主要有主厂房、中控楼和开关站组成。出线为超高压 500kV。厂区枢纽主要由主机间、右端安装间、上游副厂房、上游升压开关站、中控楼、下游副厂房、下游尾水平台及尾水渠等建筑物组成。厂内安装 4 台水轮发电机组, 总容量 880MW, 主厂房长 137.0m、宽 25.5m、高 67.62m, 机组安装高程 359.60m。本课题依托董箐水电站面板堆石坝工程, 系统研究了冲碾技术的方法和工艺, 并与振动碾压工艺进行了对比研究, 取得了系统性成果。

1.3 技术难点和施工技术发展需求

在高面板堆石坝技术发展的过程中, 料源规划开采、坝体变形控制、坝体防渗控制等方面一直是技术上的核心难点。解决这些技术难点, 就是施工技术发展的必然需求, 是促进面板堆石坝筑坝技术发展的必经之路。研究新的材料、新的工艺、新的方法, 将拓宽解决面板坝施工技术问题的思路。

1.3.1 料源规划及开采技术的发展需要

料源规划及开采技术发展的需要主要体现在以下几方面:

(1) 坝体填料与开挖料的不同物理性质的不均衡时空分布规律, 导致了施工进程的供需矛盾, 产生了不必要的弃料, 过多地占用堆料场、弃渣场地, 并产生过多二次倒运费用。如何将初期开挖的新鲜程度较低的开挖料适时地用于坝体填筑; 提升坝体填料规划与开采技术的应用水平是解决以上问题的途径, 是土石方挖填施工技术发展的需要。

(2) 面板堆石坝的填筑施工与建筑结构物的基础开挖施工之间, 由于受到各种因素的制约, 施工进度受到干扰。往往致使从结构物的基础开挖出的有用料不能直接运至工作面进行填筑, 产生二次倒运。如何将工程结构物的开挖料尽可能地直接运至大坝填筑, 以减少料场的开挖量, 使二次倒运量最小, 节约成本。而解决好工序间的时间进程, 是能否优质快速经济施工的关键。

(3) 施工道路的布置是面板堆石坝施工中的一个关键性的步骤, 由于受到客观环境的影响, 布置施工道路具有诸如: 地形影响、料源位置影响、坝体动态形象面貌影响、趾板建筑物影响等影响因素,

如何克服这一系列影响因素而使施工道路通畅是整个面板堆石坝施工的关键点。

1.3.2 高坝变形控制施工技术的发展需要

高坝变形控制和施工技术的发展需要主要体现在以下几方面:

(1) 进一步地认识 200m 堆石坝体的实际变形规律,将有助于此类坝型设计施工的技术发展。

(2) 坝体填筑的分序加载问题是涉及坝体变形、施工资源的均衡、施工工期之间较为复杂的矛盾,解决好这一矛盾对实现面板堆石坝优质、快速、经济施工,极具其重要性。

(3) 坝体沉降的均匀性是体现堆石坝质量的关键,沉降控制,特别是深覆盖层基础的处理等系列活动,是面板堆石坝的一项关键技术。研究恰当的施工手段、施工次序,可实现改善坝体不合理的沉降方式。

(4) 坝体填筑压实技术是保证坝体质量的关键。在负温条件下,如何进行坝体的填筑施工。冲碾技术的方法和工艺在面板堆石坝的压实施工中是何效果,能否将冲碾技术用于面板堆石坝的压实施工中,以提高施工效率。都具有其研究价值。

(5) 当地材料坝的最大特点就是充分利用坝址区的各类岩土,包括各种开挖料的利用来降低工程造价,加快施工进度。因此对当地材料的研究利用是今后面板坝技术进一步发展的一个方向,小粒径石料是特指一种岩石比较坚硬、开挖后最大粒径一般小于 100mm,含有少量 100~200mm 粒径,没有大于 200~600mm 粒径的石料,这种石料单体抗压强度大但级配不能满足设计规范对主堆石体的级配要求。探索小粒径石料来填筑堆石坝体的施工技术、质量检测手段,对拓宽坝体对填筑料的适应性具有深远的意义。

1.3.3 高坝防渗施工技术的发展需要

高坝防渗施工技术的发展需要主要体现在以下几方面:

(1) 渗漏控制是反映面板堆石坝质量的关键,控制坝体渗漏的途径为:一方面可通过坝体压实过程的控制,避免或减少坝体的不均匀变形来控制混凝土面板开裂;另一方面则可通过面板、趾板混凝土材料的改善,减少混凝土裂缝的产生。研究这方面问题对坝体渗漏控制具有重要意义。

(2) 混凝土面板施工中,面板施工工艺是决定面板施工质量的关键,研究适宜于混凝土面板施工特点的施工工艺具有意义。

(3) 止水施工的工艺质量控制是减少坝体渗漏的关键,探索相应的施工工艺程序是高坝防渗的关键。

(4) 在深覆盖层基础面上建造的面板堆石坝,其防渗墙的施工质量直接影响坝体的渗漏。探索相应的施工工艺程序是高坝防渗的关键。

1.3.4 特殊施工工艺的发展需要

特殊施工工艺的发展需要主要体现在以下几方面:

(1) 传统上的坝体填筑存在坝面削坡的问题,研究坝面施工中的固坡技术,可缩短工期、节约坝体垫层料用量,是面板堆石坝施工技术发展需要。

(2) 面板堆石坝的施工进程往往受到趾板、防浪墙等混凝土结构施工速度的制约。通过研究和应用加快防浪墙等混凝土结构施工速度的设施和手段,对提高面板堆石坝的施工速度,具有其意义。

(3) 面板堆石坝坝身溢洪道技术质量要求高、风险大,结构复杂,施工难度大,需采用特殊的施工工艺。因此,面板堆石坝坝身溢洪道施工工艺技术进行系统的研究可填补此项施工技术的空白,使此类坝型的设计意图的实现成为可能。

(4) 深覆盖层面板堆石坝的施工技术的关键是解决深覆盖层地基的处理问题。研究其适合的施工方法是此类坝型是保证大坝质量的关键。