



国家大坝安全工程技术研究中心支撑项目

水布垭面板堆石坝 筑坝技术

杨启贵 刘宁 孙役 熊泽斌 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



国家大坝安全工程技术研究中心支撑项目

水布垭面板堆石坝 筑坝技术

杨启贵 刘宁 孙役 熊泽斌 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

水布垭面板堆石坝坝高 233 米,是世界已建和在建的最高面板堆石坝,是国家“九五”科技攻关依托工程和“十五”重点建设项目。本书全面总结了水布垭超高面板堆石坝设计、施工新理念及研究与应用的新技术、新工艺、新材料和新机具,详细介绍了超高面板堆石坝筑坝关键技术体系。

本书可供水利水电工程设计、施工、管理和科研人员借鉴使用,亦可供大专院校相关专业师生参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

水布垭面板堆石坝筑坝技术 / 杨启贵等著. -- 北京:
中国水利水电出版社, 2010.1
ISBN 978-7-5084-7200-3

I. ①水… II. ①杨… III. ①混凝土面板堆石坝—筑坝 IV. ①TV641.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第022967号

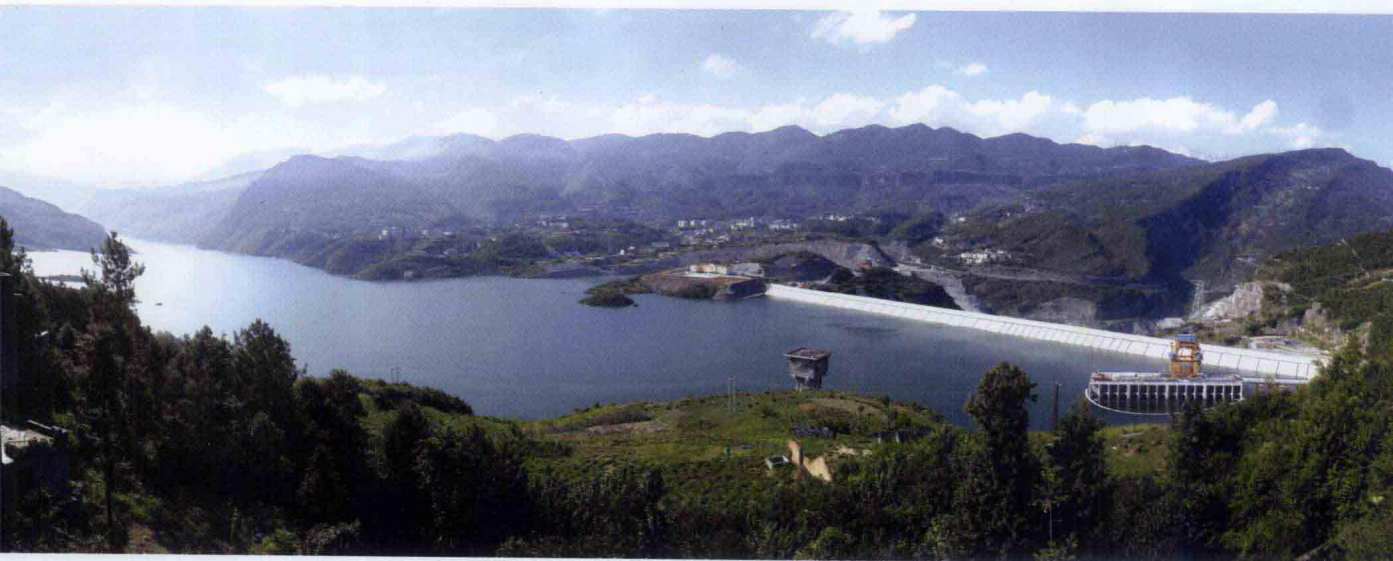
书 名	水布垭面板堆石坝筑坝技术
作 者	杨启贵 刘宁 孙役 熊泽斌 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中科印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 23印张 545千字 4插页
版 次	2010年1月第1版 2010年1月第1版印刷
印 数	0001—3500册
定 价	88.00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



大坝全景



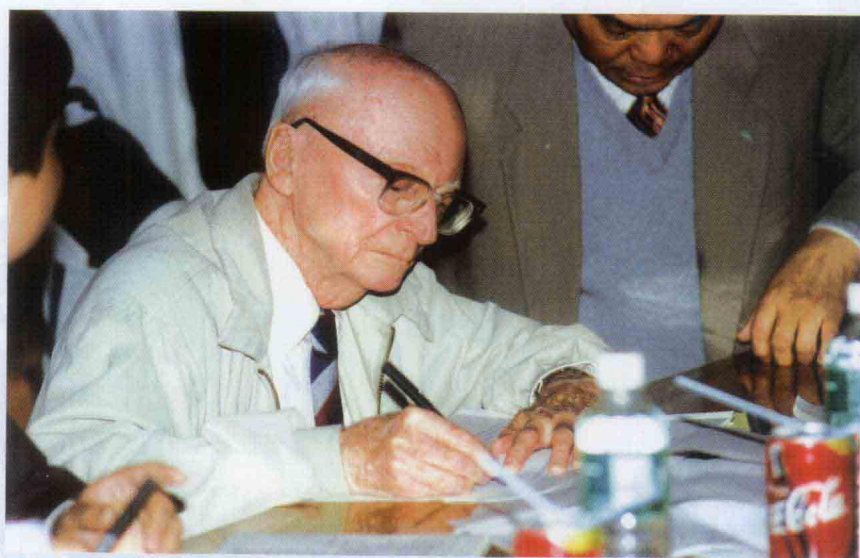
水布垭水库



溢洪道泄洪



水利专家钱正英在大坝施工现场



“面板堆石坝之父”库克先生



大坝基础强夯处理



大坝反抬填筑法施工



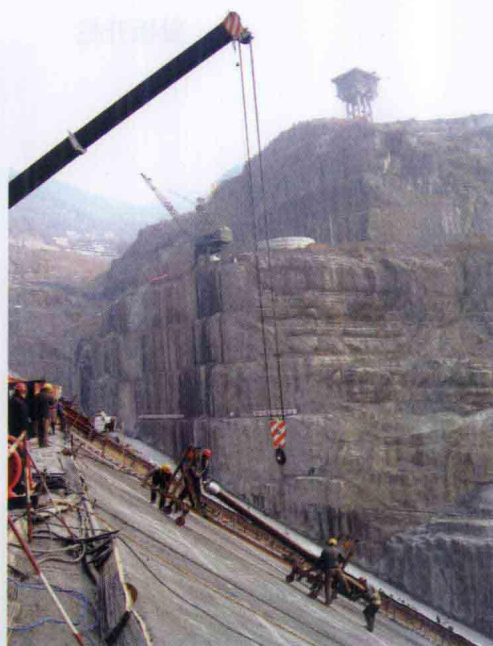
一期面板浇筑

面板永久水平缝





光栅系统安装



光纤陀螺仪安装

面板钢筋绑扎



趾板开挖



长止水铜片制作与安装



趾板灌浆

序

一座世界上最高的面板堆石坝——水布垭大坝，巍然矗立在风光旖旎的清江之上。这座高达 233m、被国际大坝委员会授予“面板堆石坝里程碑工程”荣誉称号的宏伟大坝，又一次为中国争得了一项世界纪录，是中国科技人员创造的又一项坝工奇迹。

在众多的当地材料坝型中，后起的面板堆石坝（全称应是混凝土面板碾压堆石坝）以其安全性高、经济性好、施工简便，特别是有利于环保等多种优点，成为当前最主要和最有竞争力的坝型之一，因此被普遍采用。但直到 20 世纪晚期，世界各国所建面板堆石坝的最大高度只在 180m 左右。原因也很明显：这种坝型断面较小，依靠上游很薄的混凝土面板挡水，大坝愈高，堆石体在施工和运行期中的变形也愈大，便会产生一系列不利后果。能否突破已有的纪录，一方面取决于施工水平能将堆石体压密到什么程度，更重要的是需进行全面深入的科研，弄清所有的问题，予以解决。

水布垭工程是清江梯级开发中的龙头水库，其作用巨大、影响深远。20 世纪 90 年代初，有关方面开始进行工程的预可行性研究和可行性研究，从各种因素比选，面板堆石坝都是最优选择，但坝高超过 230m，比当时世界上最高的面板堆石坝还要超过 50m，堪称特高面板堆石坝。能不能拍这个板，人们面临严峻考验。要知道，世界上的事物并不总是线性发展的，更多的是非线性的，而且会从量变引起质变。一些问题在低坝甚至一般高坝中可以忽略，在特高坝中就必须彻底弄清妥善解决。特高坝建设是不能有任何掉以轻心的。

我很钦佩工程的项目法人——湖北清江水电开发有限责任公司，他们在毅然决策采用面板堆石坝的同时，组织了设计、施工以及几乎全国主要的水电研究机构和有关院校，开展了脚踏实地的研究试验工作。研究工作分层次推进，既有国家级的重点攻关项目，又有针对水布垭工程的特殊研究项目，还有非常具体的专项研究。研究范围之广和程度之深，在我脑中留下深刻印象，而且许多地方有所创新。尤其在大坝填料特性、大坝的变形控制、新型的止水结构、面板混凝土防裂和全面监控技术等方面，用力最多。经长达十多年的苦战，掌握了材料特性，进行了各种分析，优化了设计，落实了各种细部结

构、施工技术和监控措施，这就为水布垭大坝的胜利建设奠定了坚实基础。

水布垭大坝在 2003 年初开始填筑，2006 年 10 月通过蓄水验收，2007 年 7 月开始发电，达到了质量良好、进度合理、投资经济的要求。至今已经过三年的运行考验，大坝工作性态良好，各项指标均满足设计要求，是一座“放心工程”，为特高面板堆石坝建设作出了重要的贡献。本书结合科研、设计和施工建设历程，全面总结了特高面板堆石坝的设计理论、结构措施、施工技术、质量控制、基础处理、安全监测等各方面的问题，这是水布垭建设者们十五年心血与汗水的结晶，弥足珍贵。近年来随着水利水电建设的发展，我国已有不少有关面板堆石坝的著作问世，本书的出版，在我国坝工著作宝库中又增加了重要的一本，可以对我国高面板堆石坝的推广和发展起到推动作用，我为此深感欣慰！

是为序。

潘家铮

2009 年 12 月 5 日

前言

围绕水布垭筑坝技术的研究始于该工程开始预可行性研究的 1993 年。由于坝址的地形地质条件限制，挡水建筑物宜选择当地材料坝。预可行性研究和可行性研究阶段对心墙堆石坝和面板堆石坝进行了同等深度的比选，面板坝以安全、经济、环保和施工进度快等优点成为选定坝型，坝高 233m。

20 世纪 90 年代初，国内尚无面板坝设计、施工规范可供遵循，国内外也无 200 米级面板坝成功的建设经验。当时世界最高的墨西哥 Aguamilpa 面板坝（坝高 187m）1994 年刚刚建成，国内最高的天生桥一级面板坝（坝高 178m）1993 年刚开工建设。水布垭面板坝能否从当时的最大坝高一次性上升近 50m，面临着超高面板坝设计理念、高应力条件下大坝填料力学特性、高面板坝变形控制技术、高性能面板混凝土、适应大变形的止水结构及高面板坝的新型监测手段等一系列高面板坝筑坝技术难题。业主单位湖北清江水电开发有限责任公司和设计单位长江勘测规划设计研究院组织国内外多家单位围绕面板坝筑坝技术开展了大量的研究工作。国家“九五”重点科技攻关“高坝工程技术研究——200 米级高混凝土面板堆石坝研究”课题主要以水布垭面板坝为依托，在湖北清江水电开发有限责任公司和水电水利规划设计总院组织下，针对水布垭面板坝五大技术难题开展了联合攻关。

围绕水布垭面板坝长达 15 年的研究和实践中，湖北清江水电开发有限责任公司、长江勘测规划设计研究院、长江科学院、水电水利规划设计总院、中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、中国科学院武汉岩土力学研究所、清华大学、武汉大学、河海大学、三峡大学、武汉理工大学、华中科技大学、国家电力公司昆明勘测设计研究院、中南勘测设计研究院、华东勘测设计研究院、中国葛洲坝集团公司、中国江南水利水电公司等二十余家单位参加了研究工作。此外，国内众多专家学者给予了直接指导；国际知名的加拿大国际工程管理联营公司（CIPM）、巴西 COPEL 公司以及库克、平托、莫里等著名面板坝专家也提供了咨询意见。

水布垭工程于 2001 年开始前期施工，2002 年 10 月截流，2003 年 2 月开始坝体填筑，2006 年 10 月大坝填筑基本完成并下闸蓄水，2007 年 7 月首台机

组发电，2008年9月4台机组全部移交电厂正常运行，工程完工。2008年11月，水库蓄水至399.51m，达到正常运行规模。截至2009年3月，坝体最大沉降2451mm、面板最大挠度578mm、坝后量水堰观测到的最大渗漏量为46.28L/s。综合分析监测资料表明，大坝各项性态指标均在设计控制范围内，工作状态安全、良好。2008年4月，时任国际大坝委员会主席Luis Berga先生认为：“最高的水布垭面板堆石坝（坝高233m）已经建成。这表明中国混凝土面板堆石坝建设已居于世界领先地位。很明显水布垭面板堆石坝是世界面板坝的里程碑式的工程。”2009年10月，国际大坝委员会授予水布垭大坝“面板堆石坝里程碑工程”荣誉称号，成为中国面板坝建设领先于世界各国的标志性工程。

水布垭面板坝的成功建设是国内坝工界共同努力的结果，前期论证和建设过程中已形成合作研究和成果共享机制，许多成果已公开发表，但尚无系统介绍水布垭面板坝研究和实践成果的文献，在湖北清江水电开发有限责任公司和长江勘测规划设计研究院的组织和支持下，水布垭面板坝的一批建设者相约，撰成本书，对水布垭大坝的设计、科研、施工和建设方面的主要成果进行了系统的介绍，希望能对推动面板坝筑坝技术的发展尽绵薄之力。

本书由杨启贵、刘宁、孙役、熊泽斌总体策划并统稿。参与撰写的人员有（以姓氏笔画为序）万云辉、王云清、王仲何、王亚文、邓银启、刘宁、孙役、孙贵平、向光红、宋文晶、李伟、李昌彩、李亮、杨启贵、张运健、张家发、汪明元、陈勇伦、陈润发、季凡、於习军、周伟、周厚贵、罗福海、胡颖、钮新强、贾金生、常晓林、程展林、梁存绍、曾祥虎、谭少华、廖仁强、熊泽斌、蔡金燕等。

本书引用了大量的设计科研成果和文献资料，并得到了多家单位和多位专家的大力支持，在此，向他们表示衷心的感谢！谨以此书献给所有参与和关心水布垭大坝研究、论证和建设的单位、专家、学者，并向他们表示崇高的敬意与衷心的感谢！

由于本书涉及专业众多，编写时间仓促，错误和不当之处难免，敬请同行专家和广大读者赐教指正。

编 者

2009年11月

目 录

序

前言

1 综述	1
1.1 工程概况与基本地质条件	1
1.2 研究历程	10
1.3 研究成果	14
1.4 大坝运行状态	21
参考文献	24
2 大坝填料的工程特性	26
2.1 大坝填料的强度与变形特性	26
2.2 大坝填料的流变特性	41
2.3 大坝填料的变形机理	47
2.4 软岩及软岩堆石料的工程特性	52
2.5 本章小结	59
参考文献	60
3 大坝应力变形分析	62
3.1 本构模型	62
3.2 大坝的应力变形	76
3.3 面板应力变形的子模型法分析	80
3.4 堆石体流变对大坝应力变形的影响	86
3.5 本章小结	87
参考文献	88
4 大坝变形控制	91
4.1 大坝填筑料源选择与基本特性	92
4.2 大坝变形预测	97
4.3 坝体分区	100
4.4 坝体材料压实控制标准	103
4.5 坝体不均匀变形控制	120
4.6 本章小结	126
参考文献	126

5 大坝渗流分析	128
5.1 大坝基础渗流特征	128
5.2 坝体填料渗透特性	133
5.3 坝体渗流计算与渗透稳定性分析	146
5.4 基础三维渗流场分析	155
5.5 本章小结	162
参考文献	162
6 大坝基础开挖与处理	163
6.1 基础开挖	163
6.2 趾板基础处理	166
6.3 堆石体基础处理	170
6.4 河床覆盖层处理	172
6.5 基础灌浆	181
6.6 本章小结	187
参考文献	188
7 大坝趾板与面板结构	189
7.1 趾板线路布置	189
7.2 组合式趾板结构	190
7.3 面板结构	192
7.4 混凝土原材料优选	193
7.5 混凝土配合比	199
7.6 混凝土抗裂措施	220
7.7 面板与趾板混凝土施工	224
7.8 止水结构与材料	227
7.9 本章小结	232
参考文献	233
8 大坝施工	234
8.1 施工导流与坝体度汛	234
8.2 大坝填料的现场碾压试验	242
8.3 大坝施工设备配置	254
8.4 土石方调配	258
8.5 坝料制备	263
8.6 坝体填筑	270
8.7 挤压边墙施工	276
8.8 本章小结	280
参考文献	281

9 大坝质量控制技术	283
9.1 质量管理组织体系及控制措施	283
9.2 坝体填筑质量试坑法检测	288
9.3 大坝填筑 GPS 高精度实时监控技术	290
9.4 堆石体密度附加质量法快速检测	298
9.5 挤压边墙质量检测	302
9.6 趾板灌浆抬动观测	305
9.7 本章小结	306
参考文献	307
10 大坝安全监测系统及新技术应用	308
10.1 大坝安全监测的重点和难点	308
10.2 大坝安全监测系统	309
10.3 新型监测设备	316
10.4 本章小结	329
参考文献	330
11 大坝监测资料反馈分析	331
11.1 坝体变形原型观测资料分析	331
11.2 基于南水双屈服面模型和 K-G 模型的参数反分析	341
11.3 基于幂函数流变本构模型的流变参数反馈分析	354
11.4 本章小结	358
参考文献	358
跋	359

