

高土石坝筑坝技术与设计方法

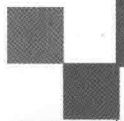
张宗亮 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高土石坝筑坝技术与设计方法

张宗亮 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书对近年来作者从事高土石坝设计工作所取得的实践经验进行了总结提炼。全书共分为9章, 主要内容包括高土石坝发展及研究现状、高土石坝计算理论与方法、高面板堆石坝设计指南、高心墙堆石坝设计指南、高土石坝工程建设、工程安全评价及反馈预警系统、高土石坝运行维护与健康诊断、高土石坝碳足迹与能耗分析以及高土石坝全生命周期管理体系等。

本书可供大型水利水电工程设计、施工等专业的工程技术人员学习参考, 也可供相关科研单位研究人员及高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高土石坝筑坝技术与设计方法 / 张宗亮主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2017.3
ISBN 978-7-5170-5266-1

I. ①高… II. ①张… III. ①高坝—土石坝—筑坝
IV. ①TV641.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第053077号

书 名	高土石坝筑坝技术与设计方法
作 者	GAO TUSHIBA ZHUBA JISHU YU SHEJI FANGFA 张宗亮 主编
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、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	北京印匠彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 29.25印张 525千字
版 次	2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷
印 数	0001—1200册
定 价	157.00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

《高土石坝筑坝技术与设计方法》

编写人员名单

顾 问 马洪琪 王伯乐

主 编 张宗亮

副 主 编 袁友仁 冯业林

编写人员 (以姓氏笔画为序)

孔令学 冯业林 严 磊 李仕奇 邹 青

张礼兵 张宗亮 庞博慧 相 彪 袁友仁

唐 力 曹军义 梁礼绘 雷红军 谭志伟

我国高土石坝引领世界技术与发展，
本书凝练的主要创新成果很有价值！

中国工程院院士

孙洪琪

2016年9月



序 一

截至目前，位于我国西部的雅砻江、大渡河、澜沧江、怒江、金沙江、黄河等水电基地以及藏东南“四江”的开发利用程度还很低，这些流域是未来中国水电开发的重点地区。这些地区多高山峡谷，交通及地形地质条件复杂，建设水利水电工程的技术难度将会越来越大。在大江大河上建造水利水电工程，大坝是最核心的主体建筑物，其建设与运行安全是整个工程的首要问题。目前我国高100m以上的已建、在建大坝约200座，其中土石坝约占60%，混凝土坝约占40%。在这些坝型中，土石坝由于对地基基础条件具有适应性良好、能就地取材及充分利用建筑物开挖渣料、造价较低、水泥用量较少等特点，优势极其明显，使其成为坝工建设中最有发展前景的坝型之一，因此，近20座水电站将其作为代表性坝型。

近几十年来，我国的土石坝建设取得了举世瞩目的成就，20世纪陆续建成了当时亚洲第一高的毛家村土坝（坝高82m）以及碧口（坝高102m）、鲁布革（坝高104m）、小浪底（坝高160m）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了前所未有的发展，陆续建成了天生桥一级（坝高178m）、洪家渡（坝高179.5m）、紫坪铺（坝高156m）、水布垭（坝高233m）等200m级高土石坝。2013年建成的糯扎渡心墙堆石坝（坝高261.5m）为同类坝型中坝高世界第三、亚洲第一。目前还有多座土石坝枢纽工程在建、拟建，如古水水电站（面板堆石坝，坝高240m）、双江口水电站（心墙堆石坝，坝高312m）、两河口水电站（心墙堆石坝，坝高295m）、如美水电站（心墙堆石坝，坝高315m）等。

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，积累了大量工程经验，我国土石坝筑坝技术有了长足的发展。特别是在糯扎渡高心墙堆石坝工程建设中，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，使得我国堆石坝筑坝技术水平迈上了一个新台阶。

《高土石坝筑坝技术与设计方法》一书是以中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司全国工程设计大师张宗亮为技术总负责的土石坝工程设计研究团

队，通过总结糯扎渡、天生桥一级等高土石坝工程设计、建设中的研究与实践成果编著而成，其中系统集成多项土石坝筑坝关键技术以及行业领先的创新研究成果，包括高土石坝工程建设中的计算理论与方法、高面板堆石坝及心墙坝设计指南、工程建设及施工技术、工程安全评价及预警系统、运行维护与健康诊断、碳足迹与能耗分析、全生命周期管理体系等。该书具有较高的理论水平和实用价值，可为我国今后 300m 级高土石坝的建设提供重要借鉴，也可作为高土石坝工程技术人员的案头用书。

中国工程院院士



2016 年 10 月

序 二

土石坝是一种历史悠久又充满活力的坝型，因其具有可充分利用当地天然材料、能适应不同的地质条件、施工方法简便、抗震性能良好等特点，而成为水利水电工程建设中应用最广、发展最快的一种坝型。

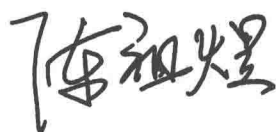
自 20 世纪 50 年代后，世界近代土石坝筑坝技术迅猛发展，促成了一批高坝的建设。我国土石坝工程界紧跟世界时代潮流，在土石坝理论研究、筑坝技术、施工建设、后期运行维护与安全评价等方面，认真吸取了国内外的成功实践经验，开展了基础扎实、创新实用的众多科研工作，土石坝技术水平和建设水平得到不断提升。特别是进入 21 世纪以来，随着我国水电战略的实施，在水能资源丰富、地震烈度较高的西部地区，已经建成多座 200m 级高土石坝，如小浪底（坝高 160m）、瀑布沟（坝高 188m）、水布垭（坝高 233m）、糯扎渡（坝高 261.5m）等，一大批高 200m 以上超高土石坝待建或正在设计中，如古水（坝高 240m）、两河口（坝高 295m）、双江口（坝高 312m）、如美（坝高 315m）等工程，我国土石坝工程建设正在向 300m 的高度迈进，前景值得期待。

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司（以下简称昆明院），自建院以来风雨六十载，先后承担了国内外 450 余座水电项目的勘测设计工作，土石坝工程作为昆明院的核心技术优势，在国内外享有较高的认可和赞誉。作为昆明院的技术领军人物，本书主编张宗亮曾先后参与了鲁布革水电站，主持了天生桥一级、糯扎渡水电站等 20 余座百米以上高土石坝的勘察设计工作，取得的成果代表了我国土石坝工程界勘察设计科研领域的领先水平，创造了中国乃至世界水电项目上的多项第一，并先后荣获全国工程设计大师、全国杰出工程师奖等荣誉称号。经过 30 余年的工程实践，张宗亮作为技术总负责，在昆明院逐步建立起了一支集科研、设计、施工、监测等全专业、百余名专业人才的土石坝工程设计研究团队。该团队与国内著名高等院校、科研院所广泛联合，依托国家能源水电工程技术研发中心高土石坝分中心、云南省水利水电土石坝工程技术研究中心开展了高土石坝筑坝技术与发展研究，并编著了《高土石坝筑坝技术与设计方法》一书。该书内容包括高土石坝计算理论与方法、高面板

堆石坝设计指南、高心墙堆石坝设计指南、高土石坝工程建设、工程安全评价及反馈预警系统、高土石坝运行维护与健康诊断、高土石坝碳足迹与能耗分析、高土石坝全生命周期管理体系等。该书不是仅对某项工程科研设计成果的列举，而是站在了一个很高的高度，通过对大量工程成功实践经验的提炼与升华，集成了高土石坝关键技术问题，提出了合理化指导方法与建议。该书内容脉络清晰、研究成果丰富，贯穿了高土石坝科研、勘察、设计、建设、运行管理等全生命周期的各个阶段，是作者及其团队对高土石坝研究与实践的系统总结，是一部很好的体系完整、专业性强的科研工程专著。

该书可以为广大水利水电行业专业人员提供技术参考，具有重要的实用价值和借鉴作用，同时也能为相关科研人员提供更多的创新性思路，具有较高的学术价值，是近十多年来少有的高水准专著。相信该书的出现将会为我国高土石坝筑坝技术的发展提供积极的推动作用。

中国科学院院士



2016年10月

前言

FOREWORD



据不完全统计,全世界所建设的百米以上的高坝中,土石坝所占的比重呈逐年增长趋势,20世纪60年代占比接近40%,70年代占比接近60%,80年代占比为70%以上,至21世纪初增加至80%以上。土石坝已成为高坝的绝对主力坝型。

与国际坝工建设水平相比,我国高心墙堆石坝的发展较慢,进入21世纪后才先后建成小浪底(坝高160m)、瀑布沟(坝高188m)、糯扎渡(坝高261.5m)。在吸收国际高土石坝建设经验和糯扎渡工程大量创新性研究成果及成功实践的基础上,工程界对建设更高心墙堆石坝的信心有了极大的提高,当前在建、拟建心墙堆石坝最大坝高已达300m级(两河口坝高295m,双江口坝高312m,如美坝高315m)。

现代面板堆石坝也以其造价低、工期短等特点,自1985年引进我国后得到了蓬勃发展,30年来取得了举世瞩目的成绩。据不完全统计,截至2015年年底,国内已建坝高150m以上面板堆石坝15座,代表性工程有天生桥一级(坝高178m)、水布垭(坝高233m)、三板溪(坝高185.5m)、洪家渡(坝高179.5m),水布垭坝是目前世界最高面板堆石坝,拟建的高面板坝从200m级坝高向300m级坝高发展,包括古水(坝高240m)、茨哈峡(坝高257.5m)、大石峡(坝高251m)、拉哇(坝高234m)等。

目前,高土石坝建设仍处于蓬勃发展的时期,而我国土石坝的数量、规模、技术已居于世界前列,为促进更高土石坝的建设,编者团队结合近30年土石坝工程实践经验,重点总结糯扎渡和天生桥一级的设计、科研和建设实践成果编撰此书,期望能为土石坝建设者带来更多启迪与帮助。

我国现行《碾压式土石坝设计规范》(DL/T 5398—2007)和《混凝土面板堆石坝设计规范》(DL/T 5016—2011)对于200m级以上高坝均要求进行专门研究,也就意味着在规范层面尚未覆盖200m级以上高坝。本书针对高面

板堆石坝和高心墙堆石坝提出了设计指南，其中对关键技术环节的认识比规范反映的内容更深一步，工程措施更具针对性。通过本书的抛砖引玉，希望能为超高土石坝的设计研究起到参考和帮助作用。

本书纳入了编者针对高土石坝运行维护与健康诊断、高土石坝碳足迹与能耗分析以及高土石坝全生命周期管理体系三方面新兴课题的系统性研究成果，围绕安全、环保、经济三大目标进行阐述，其成果对风险控制、节能减排、降本增效有着直接而客观的指导意义，对完善高土石坝全生命周期管理链起到积极作用。

本书可供包括政府、投资、设计、施工和运行维护等所有高土石坝参与人员阅读，书中关于碳足迹概念及其计算方法、工程全生命周期管理理念及其框架体系也可为水利水电行业及其他行业同仁参考借鉴。

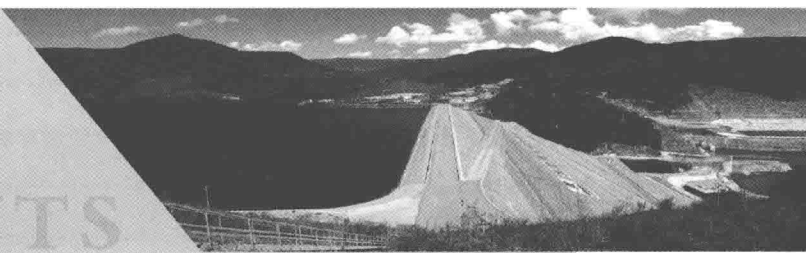
由于作者水平有限，书中难免会有一些错误，敬请读者批评指正。同时，欢迎读者与作者联系，就有关土石坝筑坝技术问题探讨，共同促进高土石坝安全建设、健康发展。

作者

2016年9月

目录

CONTENTS



序一

序二

前言

第 1 章 高土石坝发展及研究现状	1
1.1 土石坝的发展	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 高心墙堆石坝的发展及建设情况	3
1.1.3 高混凝土面板堆石坝的发展及建设情况	3
1.2 高土石坝筑坝技术研究现状	8
1.2.1 筑坝材料工程特性	9
1.2.2 坝体结构及材料分区设计	10
1.2.3 大坝计算分析理论与方法	11
1.2.4 大坝施工与质量控制	17
1.2.5 大坝安全监测评价指标和预警系统	19
第 2 章 高土石坝计算理论与方法	23
2.1 筑坝材料常用静力本构模型及适应性	23
2.1.1 堆石料常用本构模型及其特点	23
2.1.2 坝料本构模型选择及其适应性	26
2.2 筑坝材料动力本构模型及计算方法	27
2.2.1 坝料动力本构模型及其特点	27
2.2.2 地震永久变形分析方法	34
2.3 筑坝材料流变、湿化变形特性及计算方法	36

2.3.1	坝料湿化变形特性及计算方法	36
2.3.2	坝料流变变形特性及计算方法	38
2.4	筑坝材料接触面特性及本构模型	39
2.4.1	坝料接触面试验特性	39
2.4.2	常用接触面本构模型及其适应性	40
2.5	混凝土面板及其接缝材料的本构模型	42
2.5.1	混凝土面板挤压破损机理及数值模拟分析	42
2.5.2	混凝土面板接缝材料的本构模型	50
2.6	心墙堆石坝张拉裂缝及水力劈裂计算方法	54
2.6.1	张拉裂缝工程实用估算方法——变形倾度有限元法	54
2.6.2	心墙压实黏土张拉断裂特性及本构模型	54
2.6.3	土石坝张拉裂缝的有限元数值仿真算法	57
2.6.4	土石坝水力劈裂发生过程的数值仿真算法	60
2.7	心墙堆石坝渗流计算理论与方法	63
2.7.1	渗流分析发展概况	63
2.7.2	高土石坝坝体坝基系统渗流控制分析计算理论及方法研究	66
2.7.3	渗流计算分析工程实例	72
2.8	高土石坝坝坡抗滑稳定计算分析方法	77
2.8.1	坝坡静力抗滑稳定分析方法	77
2.8.2	坝坡动力抗滑稳定分析方法	82
2.8.3	坝料非线性强度指标适用性	84
2.9	高土石坝变形反演分析方法	92
2.9.1	基于神经网络的高坝变形反演分析方法	92
2.9.2	高坝工程实例变形反演分析	93
2.10	小结	95
第3章	高面板堆石坝设计指南	98
3.1	综述	98
3.2	坝的布置和坝体分区	101
3.2.1	坝的布置	101
3.2.2	坝顶	102
3.2.3	坝坡	103

3.2.4	坝体分区	103
3.3	筑坝材料及填筑标准	105
3.3.1	坝料勘察与试验、料场规划	105
3.3.2	垫层料与过渡料	106
3.3.3	堆石料	106
3.3.4	填筑标准	106
3.4	趾板	106
3.5	混凝土面板	107
3.6	接缝和止水	107
3.7	坝基处理	108
3.8	计算分析	109
3.8.1	渗流计算	109
3.8.2	抗滑稳定计算	109
3.8.3	应力和变形分析	110
3.9	高面板堆石坝主要安全指标	110
3.9.1	渗流控制安全指标	110
3.9.2	坝体变形安全标准	112
3.9.3	面板变形与应力安全标准	116
3.9.4	接缝变形安全标准	119
3.9.5	坝坡稳定安全标准	120
3.9.6	小结	122
3.10	高面板堆石坝设计工程措施研究	123
3.10.1	枢纽整体性安全措施	124
3.10.2	渗流控制措施	126
3.10.3	坝体变形控制措施	130
3.10.4	抗震措施	135
第4章	高心墙堆石坝设计指南	138
4.1	说明	138
4.2	筑坝材料	138
4.2.1	料场勘察要求	138
4.2.2	坝料试验内容及合理组数	140

4.2.3	坝料试验参数的整理与选用	141
4.3	坝体结构	142
4.3.1	坝体分区	142
4.3.2	坝坡	143
4.3.3	坝顶超高	143
4.3.4	坝顶构造	143
4.3.5	心墙	144
4.3.6	混凝土垫层	144
4.3.7	防渗帷幕	146
4.3.8	反滤料	146
4.3.9	排水	146
4.3.10	软岩堆石料的利用	146
4.4	坝基处理	147
4.4.1	建基面设计	147
4.4.2	基础缺陷处理	148
4.5	计算分析	148
4.5.1	渗流计算	148
4.5.2	抗滑稳定计算	149
4.5.3	应力和变形计算	150
4.5.4	抗震计算	151
4.6	高心墙堆石坝主要安全指标	152
4.6.1	洪水标准与安全超高	152
4.6.2	坝料特性设计指标	153
4.6.3	坝体坝基防渗指标	156
4.6.4	变形控制指标	164
4.6.5	坝坡稳定安全指标	164
4.6.6	抗震安全指标	166
4.7	高心墙堆石坝设计工程措施研究	168
4.7.1	泄洪控制措施	168
4.7.2	变形控制措施	170
4.7.3	渗流控制措施	171
4.7.4	抗震措施	175

第 5 章 高土石坝工程建设	179
5.1 高土石坝工程建设发展概况	179
5.2 施工分期规划及水流控制技术	181
5.2.1 导流方式与导流标准	181
5.2.2 导流建筑物设计及施工技术	183
5.2.3 高土石坝工程截流技术	194
5.2.4 高坝大库下闸蓄水规划	196
5.2.5 小结	199
5.3 高土石坝施工技术	200
5.3.1 坝料选择与开采加工	200
5.3.2 坝体填筑分区及施工仿真分析	209
5.3.3 坝体填筑施工技术	213
5.3.4 施工全过程质量控制及措施	216
第 6 章 工程安全评价及反馈预警系统	221
6.1 工程安全监测设计	221
6.1.1 心墙堆石坝安全监测设计	222
6.1.2 面板堆石坝安全监测设计	239
6.2 安全评价	247
6.2.1 变形	247
6.2.2 应力	254
6.2.3 渗流	258
6.3 反馈分析及预警系统	259
6.3.1 反馈分析原理及方法	259
6.3.2 典型工程反馈分析成果	272
6.3.3 安全监测信息管理及预警系统	288
6.4 小结	297
第 7 章 高土石坝运行维护与健康诊断	298
7.1 高土石坝运行维护	298
7.1.1 高土石坝运行现状	298
7.1.2 运行维护的重要性与体系	300
7.1.3 土石坝检查与检测	301

7.1.4	应急预案编制	319
7.2	高土石坝健康诊断	320
7.2.1	构建健康诊断体系指标的原则	321
7.2.2	高土石坝健康诊断指标	321
7.2.3	指标权重与综合评价	321
第 8 章	高土石坝碳足迹与能耗分析	323
8.1	概述	323
8.1.1	目前全球环境问题的严重性	324
8.1.2	大力开展水电可再生能源建设	325
8.1.3	水电开发的环境影响及研究意义	326
8.2	碳足迹理论	329
8.2.1	水电工程能耗分析的目的与定位	329
8.2.2	水电工程碳足迹的概念	330
8.2.3	碳足迹与能耗的转换关系	331
8.2.4	水电枢纽工程能耗分析系统边界的确定	333
8.3	碳足迹混合 LCA 分析方法	334
8.3.1	生命周期评价方法	334
8.3.2	主要碳排放数据的收集	339
8.3.3	基于混合 LCA 的水电枢纽工程碳足迹分析方法	354
8.4	高土石坝碳足迹及能耗分析	356
8.4.1	糯扎渡水电站简介	356
8.4.2	不同水电枢纽布置方案的碳足迹及能耗分析	360
8.4.3	水电碳足迹评价	382
8.5	工程碳足迹分析系统开发	387
8.5.1	开发目的	387
8.5.2	系统架构设计	388
8.5.3	系统功能实现	388
8.6	小结	404
第 9 章	高土石坝全生命周期管理体系	406
9.1	水电工程全生命周期管理体系框架	406
9.1.1	水电工程全生命周期管理	406