

高混凝土面板堆石坝新技术

*Recent Technology for High
Concrete Face Rockfill Dams*

郇能惠 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高混凝土面板堆石坝新技术

Recent Technology for High Concrete Face Rockfill Dams

邴能惠 著

国家自然科学基金重点项目资助
南京水利科学研究院出版基金资助



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

该书是关于高混凝土面板堆石坝工程的科技专著,全面地阐述了我国高混凝土面板堆石坝在筑坝材料、坝体分区、反滤、趾板、接缝止水、性状分析、安全监测和覆盖层上面板堆石坝等各方面的关键技术和成功经验,系统地反映了我国混凝土面板堆石坝科技工作者包括作者本人的科技创新成果,书中提出了许多涉及高混凝土面板堆石坝设计理论的观点,对于提高混凝土面板堆石坝的设计、施工、运行水平有重要的应用价值。因而该书可供水利水电行业勘测、设计、施工、运行、科研和建设管理部门有关人员使用,也可供高等院校师生参考或作为研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

高混凝土面板堆石坝新技术/郇能惠著. —北京:中国水利水电出版社, 2007

ISBN 978-7-5084-4456-7

I. 高… II. 郇… III. 混凝土面板堆石坝—新技术
IV. TV641.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第027410号

书 名	高混凝土面板堆石坝新技术
作 者	郇能惠 著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话:(010)63202266(总机)、68331835(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	787mm×1092mm 16开本 42.5印张 1008千字
版 次	2007年6月第1版 2007年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	130.00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

序

混凝土面板堆石坝是年轻而富有竞争力的坝型，自从美国建造了第一座现代混凝土面板堆石坝——新国库（New Exchequer）坝至今只有40年，全世界已经建造了300多座混凝土面板堆石坝，我国自1988年建成第一座混凝土面板堆石坝——关门山面板堆石坝的20年来，我国已建和在建的混凝土面板堆石坝有150多座，说明这种坝型对坝址地形、地质条件和筑坝材料的适应性好，投资省、工期短，往往成为坝工界的首选。

我国混凝土面板堆石坝的数量、水布垭面板坝的坝高（233m）、天生桥一级面板坝的体积（1780万 m^3 ）和面板面积（17.27万 m^2 ）都居世界第一，这是我国水利水电工程建设者和工程技术人员的成就，也是我国科学技术工作者和工程技术人员20年不懈努力、自主创新的成果，郇能惠同志是其中有代表性的一位，他在南京水利科学研究院一直从事土石坝工程科研工作，近20年来，负责完成“八五”和“九五”国家科技攻关项目和水利水电行业的重点科技项目，负责或参与了水布垭、天生桥一级、吉林台一级、公伯峡、察汗乌苏、白溪等高混凝土面板堆石坝的科研工作。他将全国的和自己的研究成果和成功经验进行系统总结，历时三年撰写此书是很有意义的。

纵阅此书，我感到这本书有三个特点：

一是内容全面。该书全面地阐述了我国高混凝土面板堆石坝在筑坝材料、坝体分区、面板、趾板、接缝止水、性状分析、安全监测和覆盖层上面板堆石坝等各方面的关键技术和成功经验。

二是技术创新。该书系统地反映了我国混凝土面板堆石坝科技工作者和工程技术人员包括作者本人的科学研究和技术创新成果。

三是观点明确。作者明确提出了许多涉及高混凝土面板堆石坝设计理论的观点，例如：筑坝材料的浸水变形特性和流变特性，室内试验的缩尺效应，坝体分区的变形协调原则，水力梯度控制面板厚度的公式，面板堆石坝应力变形性状基本规律和影响因素，防渗墙应力变形性状的基本规律和影响因素，面板堆石坝安全监测布置要点等。这些不仅是作者多年混凝土面板堆石坝工程研究成果的提炼，也是将混凝土面板堆石坝从经验设计提高到理性认识的

一次很好的努力。因此这本书的出版对我国的混凝土面板堆石坝建设会有重要推动作用。

我国将要建造古水、马吉、日冕、苗家坝等多座 300m 级超高混凝土面板堆石坝，新建的 100~200m 高混凝土面板堆石坝工程也将遇到更为复杂的技术难题，沿用先前的经验显然是不够的，有待于我国水利水电工程建设者和科学技术工作者的继续共同努力。我相信以该书为起点，在不远的将来一批高坝和超高坝建成的同时，将会形成我国自己的高混凝土面板堆石坝的设计理论。因此我乐于为序。

中国工程院院士

陈明政

2007 年 3 月

前 言

用分层碾压填筑方法建造的现代混凝土面板堆石坝已经有 40 年的历史，全世界已经建造了 300 多座混凝土面板堆石坝，由于这种坝型的安全性和经济性良好，特别是能适应不良的气候条件、地形条件和地质条件，既可以在靠近北极圈的严寒地区建造、又能在热带雨林地区施工，在强地震区、深覆盖层、深厚强风化层、冰碛土、岩溶和高陡边坡的坝址，混凝土面板堆石坝往往成为最具有竞争力的坝型。这种坝形的优势还在于软岩、特硬岩和砂砾石都可以作为混凝土面板堆石坝的筑坝材料，还可以充分利用枢纽各建筑物的开挖料来填筑坝体，尽量做到挖填平衡，大大节省投资，利于环境保护，因而混凝土面板堆石坝经常成为坝工界的首选。

我国自 20 世纪 80 年代中期开始建造混凝土面板堆石坝，起点高、发展快，据 2004 年底不完全统计，已建成和在建的混凝土面板堆石坝已经超过 150 座，其中坝高等于或高于 100m 的高混凝土面板堆石坝有 37 座，我国混凝土面板堆石坝的总数和高混凝土面板堆石坝的数量都已约占全世界的 40%；即将竣工的水布垭面板堆石坝，坝高 233m，居世界第一；已建的天生桥一级面板堆石坝的坝高 178m，其水库总库容 102.6 亿 m^3 、大坝体积 1800 万 m^3 、面板面积 17.27 万 m^2 都居世界前列，中国建设混凝土面板堆石坝的成就举世瞩目。1993 年、2000 年和 2005 年举办了三次混凝土面板堆石坝国际学术研讨会，1993 年和 1997 年出版了专著，编辑出版了中国混凝土面板堆石坝图册，编制和颁发了混凝土面板堆石坝设计规范和混凝土面板堆石坝施工规范。

我国十分重视科学技术的自主创新和开发应用，自“七五”以来，混凝土面板堆石坝的关键技术难题连续列入“七五”、“八五”和“九五”国家重点科技攻关项目、国家自然科学基金重点课题和水利水电行业重点科技项目，全国的科技工作者和工程技术人员进行了大量和系统的科技攻关和技术开发，取得了丰硕的研究成果，应用于面板堆石坝工程实践，丰富了混凝土面板堆石坝的知识宝库。笔者有幸负责承担完成了“八五”和“九五”国家重点科技攻关项目和国家电力公司重点科技项目，负责承担或参与了水布垭、天生

天生桥一级、吉林台一级、公伯峡、察汗乌苏、白溪等高混凝土面板堆石坝工程可行性研究阶段或建设阶段的科学研究工作，应邀参与了天生桥一级、三板溪、珊溪、察汗乌苏、高塘、鱼跳、茄子山和白水坑等高混凝土面板堆石坝工程的技术咨询、审查、鉴定或质量评价等工作，涉及混凝土面板堆石坝的筑坝材料、坝体分区、面板防裂、计算分析、安全监测和覆盖层上面板堆石坝等方面。深感有必要进行系统的总结，力求在混凝土面板堆石坝工程从成功经验的积累发展到理性认识和规律掌握的道路上有一点作用。

书中提出的筑坝材料浸水变形特性、流变特性和缩尺效应，坝体分区的变形协调原则、水力梯度控制的面板厚度公式、混凝土面板堆石坝静力和动力应力变形性状的基本规律和影响因素、覆盖层上混凝土堆石坝的防渗墙应力变形性状的影响因素和混凝土面板堆石坝安全监测技术等都只是探索高混凝土面板堆石坝设计理念的一次尝试，有待于工程实践的验证，期待得到水利水电工程建设工程的专家学者和工程技术人员批评指正。

本书凝聚了全国混凝土面板堆石坝工程建设中广大科技工作者和工程技术人员的心血，笔者希冀本书能反映中国混凝土面板堆石坝的科技成果和工程经验，但限于笔者水平，难免挂一漏万，顾此失彼。与此同时要向同行们特别是向混凝土面板堆石坝工程著名专家潘家铮院士、谭靖夷院士、曹克明设计大师、蒋国澄教高、赵增凯教高、顾淦臣教授、赵三其教高、凤家骥教授、傅志安教高、杨世源教高等给予笔者的指导或帮助表示衷心的感谢。

本书总结了笔者从事混凝土面板堆石坝工程科学研究的成果，这是“八五”和“九五”国家重点科技攻关项目、水利水电行业重点科技项目和多项工程科研项目组成员共同完成的，在此向我的同事特别是向沈珠江、张启岳、李泽崇、李国英、赵魁芝、章为民、米占宽、徐竹青、张志武、孙大伟、傅华、关秉洪、宋永祥、熊国文、王年香、陈铁林、马贵昌、戴丽等表示衷心的感谢。这些项目的完成得到了原国家电力公司、水电水利规划设计总院、水利水电规划设计总院、湖北清江水电开发有限责任公司、中国国电集团公司西北公司、昆明勘测设计研究院、西北勘测设计研究院、华东勘测设计研究院、北京勘测设计研究院、新疆水利水电勘测设计研究院、上海勘测设计研究院、中南勘测设计研究院、长江水利委员会勘测设计研究院、贵阳勘测设计研究院、成都勘测设计研究院、福建省水利水电勘测设计研究院、湖南省水利水电勘测设计研究院、中国水利水电科学研究院、清华大学、大连理工大学、河海大学等院校和邴凤山、毛亚杰、童显武、王柏乐、关志诚、孙永娟、翁新雄、黄晓辉、杨泽艳、党林才、李昌彩、李义昌、吴晓铭、孙役、

张成龙、张建江、张宗亮、冯业林、魏寿松、安盛勋、张发中、吴增谋、陈念水、李学强、苗喆、蒋效忠、陈振文、谭建平、吕明治、邓毅国、张沁成、张剑、彭卫军、肖贡元、傅方明、陈霞林、蔡昌光、杨启贵、熊泽斌、文亚豪、余挺、陈玉暖、郭涤寰、贾金生、汪小刚、周晓光、高莲士、孔宪京、邹德高、沈长松等的指导、支持、合作和帮助，在此向他们表示诚挚的谢意。

本书撰写和出版得到了国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金重点项目（编号：50639050）的支持和资助，得到了南京水利科学研究院出版基金的支持和资助，南京水利科学研究院出版基金于2003年资助出版了笔者另一专著《土石坝安全监测分析评价预报系统》，在此向国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司和南京水利科学研究院致以诚挚的谢意。

中国工程院院士陈明致教授级高工在百忙之中详细审阅了本书，并为本书撰写序言，本书撰写过程中中国工程院吴中如院士、曹楚生院士、周君亮院士和北京勘测设计研究院吕明治总工审阅了本书，他们都提出了宝贵的意见，使笔者受益匪浅，在此向他们一并致以诚挚的谢意。

在编辑出版过程中承中国水利水电出版社林京同志的审阅和帮助，在此向她致以诚挚的谢意。

本书撰写过程中，曾参阅大量的科技文献和资料，虽已列出，难免遗漏，特向各位作者表示衷心的感谢。

限于作者的水平和工作的局限性，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

邢能惠

2006年12月

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 混凝土面板堆石坝工程的发展	1
第二节 高混凝土面板堆石坝工程面临的挑战	6
第三节 本书的主要内容和结构	8
参考文献	10
第二章 筑坝材料工程特性研究	12
第一节 概述	12
第二节 粗粒料的抗剪强度	12
第三节 粗粒料的变形特性	37
第四节 粗粒料的浸水变形特性	45
第五节 粗粒料的流变特性	63
第六节 粗粒料的压实特性	77
第七节 粗粒料的缩尺效应	101
第八节 粗粒料的颗粒破碎	110
第九节 粗粒料的渗透特性	115
第十节 粗粒料的动力特性	131
参考文献	156
第三章 坝体分区技术	163
第一节 坝体分区	163
第二节 垫层区	185
第三节 过渡区	209
第四节 主堆石区	215
第五节 下游堆石区	225
第六节 排水区	230
参考文献	234
第四章 面板、趾板和面板防裂技术	237
第一节 面板	237

第二节	面板分缝	244
第三节	趾板	260
第四节	面板裂缝成因	282
第五节	面板混凝土防裂技术	297
第六节	面板防裂技术	323
参考文献		328
第五章	接缝和止水结构研究	332
第一节	周边缝止水结构	332
第二节	垂直缝止水结构	347
第三节	面板水平缝止水结构	353
第四节	接缝止水材料	354
第五节	接缝止水结构模型试验	363
参考文献		376
第六章	面板堆石坝计算分析和性状预测	379
第一节	增量弹塑性理论	379
第二节	稳定分析	391
第三节	渗流分析	401
第四节	应力变形性状分析	401
第五节	动力分析	417
第六节	静力应力变形性状预测	422
第七节	动力应力变形性状预测	483
第八节	土工离心模型试验	527
参考文献		553
第七章	覆盖层上面板堆石坝研究	557
第一节	覆盖层特性	557
第二节	覆盖层上面板堆石坝的主要特性	563
第三节	坝基防渗技术	563
第四节	覆盖层上面板堆石坝的防渗体系	568
参考文献		599
第八章	面板堆石坝的安全监测技术	601
第一节	安全监测仪器与埋设技术	601
第二节	安全监测原则和布置	620
第三节	安全监测资料分析技术	627
第四节	安全监测工程实例	643
参考文献		666

第一章 绪 论

第一节 混凝土面板堆石坝工程的发展

混凝土面板堆石坝是堆石坝中一种坝型。堆石坝以防渗体类型划分,可以分为土质防渗体堆石坝和非土质防渗体堆石坝。土质防渗体堆石坝又可以分为心墙堆石坝、斜心墙堆石坝和斜墙堆石坝,它们是以土质防渗体在堆石坝中的位置来冠名的,通常将土质防渗体堆石坝和均质土坝统称为土石坝。

非土质防渗体堆石坝可以分为混凝土面板堆石坝、沥青混凝土面板堆石坝、沥青混凝土心墙堆石坝和土工膜防渗堆石坝,本书只涉及混凝土面板堆石坝。

混凝土面板堆石坝发展历程可以分为两个阶段,以美国加利福尼亚州新国库(New Exchequer)坝为标志,1965年以前堆石坝体用抛填堆石筑成,1965年以后堆石坝体是分层碾压筑成。

国际大坝委员会(ICOLD)填筑坝材料专业委员会(Committee on Materials for Fill Dams)2007年技术公报(Bulletin: Concrete Face Rockfill Dams-Concepts for Design*and Construction)^[1]统计了1895~1965年建造的早期混凝土面板抛填堆石坝,如表1-1所示。

从表1-1可以看出:除了盐泉(Salt Springs)坝、帕拉迪拉(Paradela)坝和新国库(New Exchequer)坝以外,早期混凝土面板抛填堆石坝坝高都在100m以下。除了维纳斯蒂诺·卡兰扎(Venustiano Carranza)坝和新国库坝形成的水库库容(13.75亿 m^3 和12.65亿 m^3)超过1亿 m^3 ,大部分库容较小。但是除了维纳斯蒂诺·卡兰扎坝和洛斯·平赞恩斯(Los Pinzanes)坝以外坝坡都较陡。

混凝土面板抛填堆石坝有两个主要特点:

(1)对堆石材料要求较高。抛填堆石坝的堆石应具有较高的抗剪强度,特别是在低侧限压力(周围压力)时抗剪强度较高,这就使得抛填堆石坝坝坡较陡,即在1:0.5~1:1.5(见表1-1)坝坡时抛填堆石坝仍是抗滑稳定的。

(2)抛填堆石体的变形较大,与混凝土面板变形不协调,在坝高越高时,两者变形不协调的问题越严重,甚至会导致混凝土面板裂缝损坏,造成严重渗漏,例如100m高的盐泉坝、112m高的帕拉迪拉坝和150m高的新国库坝都发生了严重渗漏。

为了解决混凝土面板与抛填堆石坝体之间变形不协调问题,土质防渗体堆石坝得以发展,由于土质防渗体的变形与抛填堆石坝体的变形比较协调,不致造成土质防渗体的损坏,坝工界研究的重点转向反滤料的研究,著名的土力学奠基人太沙基(Terzaghi)提出了反滤料设计准则,在解决了反滤料和土质防渗体地基的防渗处理以后,自1950~1965年期间建造了多座坝高100m的土质防渗体堆石坝,例如恩勃克劳(Ambuklao)坝、肯尼坝、勃朗里(Brownlee)坝、樱桃谷(Cherry Valley)坝和155m高的戈斯切南(Goschenen)坝。

表 1-1 早期混凝土面板抛填堆石坝

坝 名	国 家	坝 高 (m)	用途	完成时间 (年)	坝坡 (1:n)		面板厚度 (m) $t = C + \alpha H$	面板各向 配筋率 (%)	趾板宽度 (m)	面板面积 ($1 \times 10^4 \text{ m}^2$)	堆石材料	坝体积 ($1 \times 10^3 \text{ m}^3$)	总库容 ($1 \times 10^6 \text{ m}^3$)
					上游	下游							
莫丽娜 (Morena)	美国	54	W	1895	0.5~0.9	1.3	0.23+0.003H	0.5	T		花岗岩抛填	256	61
草莓 (Strawberry)	美国	50	P/W	1916	1.1~1.2	1.3	0.23+0.003H	0.5	T		花岗岩抛填	1343	229
迪克斯河 (Dix River)	美国	84	P	1925	1~1.2	1.4		0.5	T		灰岩抛填	252	220
维纳斯蒂诺·卡兰扎 (Venustiano Carranza)	墨西哥	35	I	1930	1.75	2~3			T		土	1250	1375
盐泉 (Salt Springs)	美国	100	P/W	1931	1.1~1.4	1.4	0.3+0.0067H	0.5	T	11	花岗岩抛填	2294	171
科格斯威尔 (Cogswell)	美国	85	F	1934	1.35	1.6	0.3		T		花岗岩抛填	799	13
泰克希梅 (Taxhimay)	墨西哥	43	I	1934	0.75	1.4					安山岩抛填	112	50
马尔帕索 (Malpaso)	秘 鲁	78		1936	0.5	1.33			T		干砌和抛填		
科高蒂 (Cogoti)	智 利	75	I	1939	1.6	1.8	0.2+0.008H		T	16	砂砾石抛填		
曼迪罗 (Madero)	墨西哥	52	I	1939	1.2	1.4			T				
米克斯科艾克 (Mixcoac)	墨西哥	32	F	1941	1.2	1.4			T			400	2
圣·尔迪丰索 (San Ildefonso)	墨西哥	62	I/C	1942	1.4	1.4			T		玄武岩抛填	370	63
科罗莱恩斯 (Colorines)	墨西哥	32	P	1944	1.4	1.1~1.3			T		玄武岩抛填	95	263
萨拉扎 (Salazar)	葡萄牙	70		1949	1.25	1.4			G		石英砂岩抛填		
下熊 1 号 (Lower Bear No. 1)	美 国	71	P	1952	1.3	1.4	0.3+0.0067H	0.5	T	6	砂砾石抛填	1002	6.4

续表

坝 名	国 家	坝高 (m)	用途	完成时间 (年)	坝坡 (1:n)		面板厚度 (m) $t=C+aH$	面板各向 配筋率 (%)	趾板宽度 (m)	面板面积 ($1 \times 10^3 \text{ m}^2$)	堆石材料	坝体积 ($1 \times 10^5 \text{ m}^3$)	总库容 ($1 \times 10^6 \text{ m}^3$)
					上游	下游							
下熊2号 (Lower Bear No. 2)	美国	50	P	1952	1.0	1.4	$0.3+0.0067H$	0.5	T	3	花岗岩抛填		
伊希巴奇 (Ishibuchi)	日本	53		1953	1.2	1.4				12	英安岩抛填		
拉·乔伊 (La Joie)	加拿大	67	P	1955	1.1	1.5			T		抛填		
诺佐里 (Nozori)	日本	44		1955	1.3	1.5	$0.3+0.011H$	0.5	T		安山岩抛填		
帕拉迪拉 (Paradela)	葡萄牙	112	P	1955	1.3	1.3	$0.3+0.00735H$	0.5	T	55	花岗岩抛填	2700	165
洛斯·平赞恩斯 (Los Pinzanes)	墨西哥	67	P	1956	1.2	1.5			T			308	4
科特赖特 (Courtright)	美国	98	P/I	1958	1.0~1.3	1.3	$0.3+0.0067H$	0.5	T		花岗岩抛填	1193	152
惠桑 (Wishon)	美国	82	P/I	1958	1.0~1.3	1.4	$0.3+0.0067H$	0.5	T		花岗岩抛填	2829	158
内克赫拉 (Nakhla)	摩洛哥	46	W	1961	1.0	1.45	0.3			9	劣质砂岩抛填		
帕艾斯 (Pias)	西班牙	47		1961	1.33	1.85	0.4	0.5	G		片麻岩抛填	324	8
卡拉扬 (Karaoun)	黎巴嫩	66		1963	1.3	1.1							
维拉 (Vilar)	葡萄牙	55	P	1965	1.1~1.3	1.3	$0.3+0.00735H$	0.5			花岗岩抛填	300	100
新国库 (New Exchequer)	美国	150	P/W/I	1966	1.4	1.4	$0.3+0.0067H$	0.5	3~4		抛填和分层 碾压	3952	1265

注 用途中: W为供水; P为发电; I为灌溉。

趾板宽度中: T为槽; G为廊道。

20 世纪 60 年代大型土石方施工机械特别是重型振动碾的出现,使堆石坝分层碾压密实成为可能,同时也使采用质量较差的堆石料来填筑坝体成为可能,太沙基在 1960 年美国土木工程师协会年会提出用分层碾压堆石来改善混凝土面板堆石坝坝体的变形性能。在 1965 年完成了从抛填堆石到分层碾压堆石的过渡,标志是 1966 年建成的新国库坝,该坝是 1.2~3.0m 分层碾压堆石和 18m 一层的抛填堆石两种方法混合建造的混凝土面板堆石坝。首批用分层碾压堆石建造的现代混凝土面板堆石坝是 1967 年建成的南斯拉夫的拉玛(Rama)坝(坝高 110m)、美国的卡宾溪(Cabin Creek)坝(坝高 76m)、法国的范迪斯(Fades)坝(坝高 70m)、盖迪斯(Gandes)坝(坝高 44m)和西班牙的帕特莱斯(Piedras)坝(坝高 40m)。随着 20 世纪 70 年代澳大利亚的塞沙那(Cethana)坝(坝高 110m)、哥伦比亚的安其卡亚(Alto Anchicaya)坝(坝高 140m)和格里拉斯(Gollias)坝(坝高 130m)、巴西的阿里亚(Areia)坝(坝高 160m)等高混凝土面板堆石坝相继建成,国外已经形成较为完善的现代混凝土面板堆石坝的设计施工经验。现代混凝土面板堆石坝工程著名专家库克(J. B. Cooke)1984 年在第 18 届太沙基讲座《堆石坝的发展》^[2]阐述了堆石坝的发展过程、现代混凝土面板堆石坝的实践和高混凝土面板堆石坝的展望。

现代混凝土面板堆石坝的设计施工经验可以概括为^[3,4]以下几个方面。

(1) 经验确定坝体分区,认为库水荷载只作用在坝轴线上游的坝基上,重视上游主堆石区的筑坝材料、填筑标准和施工质量。

(2) 经验确定垫层料的颗粒级配,谢拉德(Sherard J. L.)在 1985 年总结了采用半透水级配垫层料的经验,建议了垫层料颗粒级配。

(3) 经验确定坝坡,基于抛填堆石坝的坝坡较陡,坝坡 1:1~1:1.3 的抛填堆石坝是稳定的现实,用硬岩堆石料分层碾压填筑的混凝土面板堆石坝坝坡选用 1:1.3~1:1.4,用软岩堆石料或砂砾料分层碾压填筑的面板堆石坝坝坡较缓,选用 1:1.5~1:1.75。

(4) 经验确定面板厚度,通常选用 $0.3m + \alpha H$ ($\alpha = 0.003$, H 为该点水头)来确定面板厚度,坝高 110m 的塞沙那坝选用 $\alpha = 0.002$,也有些面板坝选用较大的 α 值 ($\alpha = 0.005 \sim 0.007$),但是大部分面板坝 α 值在 0.003 左右。

(5) 经验确定面板配筋率,抛填堆石面板坝面板各向配筋率 0.5%,分层碾压堆石面板坝面板配筋率可以减少,由于面板大部分区域轴向变形是压缩变形,垂直裂缝极少发生,因而水平向(轴向)配筋率通常为 0.3%~0.35%,垂直向(顺坡向)配筋率通常为 0.35%~0.40%,周边缝附近 20m 范围内配筋率 0.5%。

(6) 经验确定趾板宽度,1983 年建成的萨尔瓦琴娜(Salvajina)坝(坝高 148m)依据趾板地基岩石的容许水力梯度来确定趾板宽度,成为后续建造的混凝土面板堆石坝工程仿效的成功实例。

(7) 经验确定堆石体碾压标准,通常采用 10t 或以上的振动碾碾压 4 遍。

(8) 防浪墙高度从起初 1~2m 发展到后来的 3~5m,以节省坝体填筑量和投资。

(9) 认为面板堆石坝的渗漏主要是周边缝止水结构损坏造成,损坏的原因可能是:止水结构安装和面板混凝土浇筑质量差、周边缝附近填筑的坝料透水性较大而且碾压不够密实、趾板较高等。采取的措施是:重视周边缝止水结构的设计与施工,周边缝止水要设置两道止水,周边缝周围设置特殊垫层区,用小型板式振动碾压实,在面板上游设置粉土覆

盖等。

(10) 认为堆石体抗剪强度高, 具有抗水流冲刷的能力, 堆石坝体的沉降量较小而且在几年后基本趋于稳定, 但是软岩堆石料或级配不良的硬岩堆石料填筑的坝体沉降较大。通过坝基或止水失效导致的渗流对堆石体的稳定影响较小, 堆石坝体抗震性能较好。

(11) 认为趾板是混凝土面板堆石坝关键部位, 在趾板宽度确定、体型设计时既要减少开挖量, 又要尽量使趾板坐落在坚硬、微风化, 不易冲蚀和可灌浆的岩基上, 应重视趾板的锚筋、帷幕灌浆和固结灌浆的设计和施工, 对于地质条件差的岩基上和覆盖层上的趾板应进行专门的设计和施工, 并对地质缺陷进行专门处理。

我国自 1985 年开始学习和引进国外的技术和经验, 同时重视自主的科学研究和技术开发, 列入国家重点科技攻关项目、国家自然科学基金重点课题和水利水电行业重点科技项目, 组织全国科技力量, 对现代混凝土面板堆石坝建设中的关键技术问题, 进行了大量的系统的科学研究, 取得的科技成果不断应用于工程实践, 推动了水利水电行业科技进步和混凝土面板堆石坝工程的建设。这种坝型在实践中体现出来的安全性、经济性和适应性良好的特点, 深受坝工界的青睐, 经常成为首选的比较坝型^[5,6,7]。据不完全统计, 到 2004 年底我国已建成和在建的混凝土面板堆石坝已超过 150 座, 其中坝高 100m 或超过 100m 的高混凝土面板堆石坝有 37 座, 如表 1-2 所示, 对照国际大坝委员会不完整的统计^[1], 我国混凝土面板堆石坝的总数已经占全世界的 40% 以上, 高混凝土面板堆石坝的数量已经占全世界的 40% 左右, 我国混凝土面板堆石坝在数量、坝高、工程规模和技术难度等方面都居世界前列, 在强地震区、深覆盖层、深厚风化层、岩溶等不良地质条件和在高陡边坡、河道拐弯等不良地形条件下建造了高混凝土面板堆石坝, 在严寒地区建造了高混凝土面板堆石坝, 利用砂砾石和软岩建造了高混凝土面板堆石坝。

表 1-2 我国高混凝土面板堆石坝工程 (坝高不小于 100m, 2004 年底统计)

序 号	坝 名	地 点	河 流	坝高 (m)	坝体积 (万 m ³)	面板面积 (m ²)	库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	完成时间 (年)
1	水布垭	湖北巴东	清 江	233	1526	137000	45.8	1600	2008
2	三板溪	贵州锦屏	清水江	185.5	828	84000	40.95	1000	2007
3	洪家渡	贵州黔西	六冲河	179.5	920	75100	49.47	600	2005
4	天生桥一级	贵州、广西	红水河	178	1800	172700	102.6	1200	1998
5	滩 坑	浙江青田	小 溪	162	980	95000	41.9	600	2009
6	紫坪铺	四川都江堰	岷 江	158	1117	108800	11.12	760	2006
7	吉林台一级	新疆尼勒克	喀什河	157	836	74000	24.4	460	2006
8	马鹿塘	云南麻栗坡	盘龙江	154	800			300	在建
9	龙首二级	甘肃张掖	黑 河	146.5	253	26400	0.86	157	2004
10	瓦屋山	四川洪雅	周公河	140	350	20000	5.5	240	2007
11	九甸峡	甘肃卓尼、 临潭	洮 河	136.5	385	41300	9.72	300	2008
12	珊 溪	浙江文成	飞云江	132.5	580	70000	18.24	200	2001
13	公伯峡	青海循化	黄 河	132.2	476	57500	6.2	1500	2005

续表

序 号	坝 名	地 点	河 流	坝高 (m)	坝体积 (万 m ³)	面板面积 (m ²)	库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	完成时间 (年)
14	乌鲁瓦提	新疆和田	喀拉喀什	133	649	75800	3.47	60	2003
15	龙 马	云南墨江	把边江	130				280	在建
16	引子渡	贵州平坝	三岔河	129.5	310	37500	5.31	360	2004
17	街 面	福建尤溪	尤 溪	129	340	30000	18.2	300	在建
18	白 溪	浙江宁海	白 溪	124.4	403	48400	1.68	18	2003
19	鄂 坪	湖北竹溪	汇湾河	124.3	298	43000	2.96	114	在建
20	黑 泉	青海大通	宝库河	123.5	540	79000	1.82	12	2000
21	芹 山	福建周宁	穆阳溪	122	248	42000	2.65	70	2000
22	白 云	湖南城步	巫 水	120	170	14500	3.6	54	1998
23	古洞口	湖北兴山	古夫河	117.6	190	28100	1.48	45	1999
24	芭蕉河	湖北鹤峰	芭蕉河	115	192	36000	0.99	34	2004
25	泗南江	云南墨江	泗南江	115	258		2.63	201	2007
26	高 塘	广东怀集	白水河	111.3	195	26400	0.96	36	1999
27	金造桥	福建屏南	金造溪	111.3	175		0.95	60	在建
28	双 沟	吉林抚松	松江河	109.7	258	37300	3.9	280	2003
29	那 兰	云南金平	藤条江	108.7	259	40800	2.86	150	2005
30	鱼 跳	重庆南川	大溪河	106	195	18800	0.95	48	2001
31	鲤鱼塘	重庆开县	桃溪河	105	180	25300	1.02	1.5	在建
32	洞 巴	广西田林	西洋江	105	316	52700	3.15	72	在建
33	茄子山	云南龙陵	苏帕河	103.6	129	22000	1.26	16	1999
34	思安江	广西桂林	思安江	103.4	210	41200	0.94	12	2003
35	盘石头	河南鹤壁	淇 河	102.2	548	73500	6.08	10	2006
36	柴石滩	云南宜良	南盘江	101.8	235	38200	4.37	60	2000
37	白水坑	浙江江山	江山港	101.3	150		2.46	40	2003

第二节 高混凝土面板堆石坝工程面临的挑战

由于混凝土面板堆石坝的安全性、经济性以及对不良地形、地质条件和筑坝材料的适应性良好,国内外已建和在建的混凝土面板堆石坝超过 300 座,而且从 20 世纪 90 年代下半叶开始,混凝土面板堆石坝的高度开始突破 200m,在“九五”国家重点科技攻关项目的研究成果基础上^[5],坝高 233m 的水布垭混凝土面板堆石坝 2000 年开始筹建,2007 年初主体工程已基本建成,可望 2007 年发电。巴西的巴拉·格兰特 (Barra Grande) 坝 (坝高 185m) 于 2004 年建成,老挝的南姆·恩盖 3 号 (Nam Ngum 3) 坝 (坝高 220m)、哥伦比亚的索盖莫所 (Sogamoso) 坝 (坝高 190m) 和巴西的坎普斯·诺沃斯 (Campos

Novos) 坝 (坝高 200m) 于 2005 年建成, 国外马来西亚的巴贡 (Bakun) 坝 (坝高 205m) 和冰岛的卡拉赫纳卡 (Karahnukar) 坝 (坝高 185m) 正在建设中, 菲律宾的艾格布露 (Agbulu) 坝 (坝高 234m)、秘鲁的莫洛·德·阿里卡 (Morro de Arica) 坝 (坝高 220m)、尼泊尔的西塞蒂 (West Seti) 坝 (坝高 195m)、印度的锡安米德尔坝 (坝高 190m) 和墨西哥的艾尔·卡琼 (EI Cajon) 坝 (坝高 189m) 都在设计中。可以说各国都兴起建设 200m 高混凝土面板堆石坝的热潮。我国的可持续发展和西部大开发, 使得大坝建设者面临更大的挑战, 澜沧江的古水坝 (坝高 305m)、怒江的马吉坝 (坝高 280m) 等工程都很可能选用面板堆石坝坝型, 即 300m 超高混凝土面板堆石坝的建设已经提到日程表上了。

混凝土面板堆石坝工程实践同时也提出了一个问题: 200m 以上高坝乃至 300m 超面板堆石坝的设计施工是否能够沿用 40 年来混凝土面板堆石坝经验设计的方法? 为了回答这个问题, 笔者认为有必要概括地总结一下两座混凝土面板堆石坝的工程给我们的启示^[7,8]。

(1) 阿瓜米尔帕 (Aguamilpa) 坝。阿瓜米尔帕坝是一座坝高 185.5m 的面板砂砾石一堆石坝, 主堆石区填筑天然冲积层砂砾石, 下游堆石区填筑流纹质英安岩堆石, 坝体各区均用 100kN 振动碾碾压 4 遍。该坝 1993 年 6 月竣工蓄水, 1994 年 10 月库水位上升至高程 218.0m 时 (水头约 160m), 渗漏量达到 260L/s, 在高程 94m、145m 和 180m 附近面板产生水平状结构裂缝, 180m 水平缝贯穿第 17~第 27 块面板, 最大缝宽 15mm, 裂缝内有淤泥质砂土淤堵, 说明通过此缝有明显渗漏。

(2) 天生桥一级坝。天生桥一级坝是一座坝高 178m 的面板堆石坝, 主堆石区填筑溢洪道开挖的灰岩堆石, 下游次堆石区分为两层, 660m 高程以下为建筑物开挖的大块灰岩料, 660m 高程以上为建筑物开挖的砂泥岩堆石。垫层料、过渡料、主堆石料、次堆石区的砂泥岩料和大块灰岩料的填筑标准一孔隙率分别是 19%、21%、23%、22% 和 24%。该坝产生的主要工程问题是:

1) 垫层区裂缝。1998 年汛后 0+850~0+950m 坝段在高程 755.6~768m 之间垫层料产生斜向裂缝, 缝长 5~40m, 最大缝宽 27mm。1999 年二期面板浇筑后库水位上升到高程 739.9m 时, 高程 746m 以上的垫层区产生水平裂缝, 缝长 60m, 最大缝宽 18cm。

2) 面板脱空和裂缝。一期、二期、三期面板顶部严重脱空, 最大脱空深度 (沿面板斜长) 10m, 最大脱空高度 15cm。各期面板顶部产生裂缝, 1997~2000 年检查发现裂缝 1296 条, 缝宽大于 0.3mm 的裂缝有 355 条, 2002 年检查三期面板裂缝时发现裂缝 4537 条, 缝宽大于 0.3mm 的有 80 条, 最大缝深 41.7cm, 已贯穿面板。

(3) 面板垂直缝附近混凝土损坏。2003 年 7 月发现 L3 和 L4 面板之间垂直缝附近混凝土被挤压损坏, 破损区范围最大宽度 3.5m, 从三期面板顶部 787.3m 延伸到底部高程 748m, 混凝土破坏最大深度 30cm, 局部面板钢筋露出, 止水与混凝土分离。修补后 2004 年 5 月发现修补的混凝土再次破损, 破损区延伸高程 710m, 破损区宽度分别是: 高程 748~754m 范围是 6m, 高程 720m 附近是 2.4m, 底层钢筋变形、底部止水铜片外露。

这两座 200m 高混凝土面板堆石坝工程出现的问题给予的启示: 经验设计的坝体分区是否可以照搬到 200m 高坝乃至 300m 超高坝? 200m 高坝和 300m 高坝坝体各区的坝料及