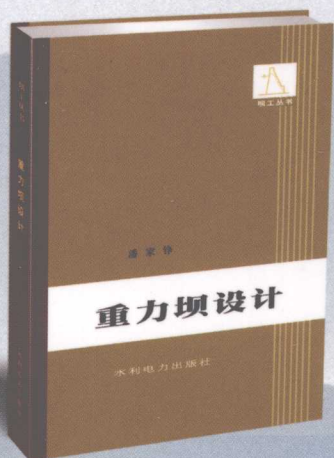


Design of concrete gravity dams
— a 20 year perspective



周建平 钮新强 贾金生 主编

重力坝设计

二十年



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

**Design of concrete gravity dams
— a 20 year perspective**

周建平 钮新强 贾金生 主编

重力坝设计

二十年



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书全面系统总结了近二十年来我国重力坝设计建设领域在设计思想、设计原则、设计方法、工程实践、施工技术、运行管理、维修加固等方面的进展和成就。

全书分 15 章, 主要介绍了重力坝设计中的工程地质、勘察方法、枢纽布置、泄洪消能设计、大坝体型及结构设计、抗滑稳定分析、大坝应力变形计算分析、动力分析及抗震设计、坝体材料分区及其设计、温度应力及温控防裂措施、地基及边坡处理、压力钢管设计、施工组织设计、安全监测及反馈分析以及重力坝补强加固和加高设计等方面的内容, 系统全面。本书紧密结合我国近二十年来已建和在建混凝土重力坝工程实际, 设计方法理论与工程技术应用相结合, 具有较高的理论价值和应用价值。

本书由经验丰富的老一辈水电专家以及战斗在一线的中青年水电工作者共同编写, 是一本完整系统、实用性强的技术文献和参考书目, 可供从事水电规划、勘察、设计、施工、科研和运行管理人员参考借鉴。

图书在版编目 (CIP) 数据

重力坝设计二十年 = Design of Concrete Gravity

Dams: A 20 Year Perspective / 周建平, 钮新强, 贾金生主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

ISBN 978-7-5084-5312-5

I. 重… II. ①周…②钮…③贾… III. 混凝土坝: 重力坝—水利工程—概况—中国 IV. TV642.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 019950 号

书 名	重力坝设计二十年 Design of concrete gravity dams — a 20 year perspective
作 者	周建平 钮新强 贾金生 主编
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
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 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	889mm×1194mm 16 开本 64.75 印张 1960 千字
版 次	2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	228.00 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

主要编写人及审稿人名单

章	主要编写人	审 稿 人
第一章	郑守仁、周建平	李浩钧、张春生、杜效鹄
第二章	陈德基、彭土标、袁建新、 周火明、汪小刚	朱建业、李文纲、金德濂
第三章	周建平、张春生、杜效鹄	童显武、王柏乐
第四章	刘之平、廖云强、邓毅国、 孙双科、张 东	郭 军、郝 鹏
第五章	钮新强、胡进华、杨本新、 黄红飞、贾金生、马锋铃	徐麟祥、杨一峰
第六章	陈祖煜、徐建强、段庆伟	高希章、陈德基
第七章	孙恭尧、徐建强、周跃飞	朱伯芳、殷有泉
第八章	陈厚群、李德玉	王柏乐、侯顺载
第九章	冯树荣、杨华全、肖 峰	涂传林、周守贤
第十章	朱伯芳、范五一、林鸿镁、 罗 清	罗承管、涂传林
第十一章	王小毛、叶伟峰、曾 勇、 周和清、杨晓东	杨启贵、陈德基、徐建军、 王仁坤
第十二章	马善定、傅金筑、陈际唐	黄 伟、李佛炎、张秀丽
第十三章	翁永红、杨学红、石青春	蒋乃明、高黛安、许春云、 谢修发
第十四章	张秀丽、王玉洁、张进平	魏德荣、沈海尧、赵花城
第十五章	徐麟祥、贾金生、陈 磊、 鲁一晖、吴德绪、范五一	汪易森、傅继涛、杨一峰

《重力坝设计二十年》

编委会成员名单

名誉主任：汪恕诚

主任：晏志勇 匡尚富 蔡其华

副主任：王斌 贾金生 钮新强

委员：（按姓氏拼音排序）

安盛勋 白俊光 陈珙新 陈厚群 陈祖煜

党林才 邓毅国 樊路琦 范福平 范五一

郭军 贾金生 蒋乃明 李德玉 廖仁强

林绍忠 刘之平 鲁一暉 饶旦 生晓高

童显武 汪小刚 王柏乐 王仁坤 杨启贵

杨晓东 张春生 张宗亮 朱伯芳

主编：周建平 钮新强 贾金生

工作人员：黄晓辉 刘娟 郑立平 杨薇 徐玮

阮本清 彭静

序

——纪念潘家铮院士八十华诞

我尊敬的学长——潘家铮院士从事水电事业逾半个多世纪，先后参加和主持过许多大中型水坝和水电站的设计和施工研究。在我国已建的几乎所有的大中型水电工程工地上都留下过他的足迹和汗水，他为我国水利水电工程建设事业作出了卓越的贡献。

在工程领域，他解决技术难题的研究成果浩瀚，论著极为丰富。他专长力学理论，特别是在水工结构分析方面造诣很深。他致力于运用力学新理论、新方法解决工程实际问题，力图沟通理论科学和工程设计两个领域。他对许多复杂结构及研究课题，如地下建筑物、地基梁与框架、土石坝的心墙和斜墙、重力坝和拱坝、调压井衬砌、压力钢管岔管和法兰、边坡稳定、滑坡涌浪、水轮机的小波稳定、水锤分析等，都创造性地运用弹性力学、结构力学、板壳理论和流体力学及特殊函数提出一系列合理而新颖的解法，并得到实际应用。中国水电和坝工技术的发展，有他奋勇开拓和辛勤耕耘的一份不可磨灭的功劳。根据潘家铮院士讲稿整理出版的《水工结构应力分析丛书》和潘家铮院士1987年编著的《重力坝设计》，对推动我国水工结构和重力坝设计水平的提高起到了十分重要的作用，成为坝工领域的经典著作。

改革开放以来，中国水电建设取得了举世瞩目的成就，正以史无前例的速度迅猛发展。今年，正值潘家铮院士八十华诞，为纪念潘总所著《重力坝设计》出版发行二十周年，中国水电工程顾问集团公司、中国水利水电科学研究院和长江水利委员会共同发起、组织编撰的《重力坝设计二十年》，系统总结我国近二十多年来在重力坝设计方面的重大进展和建设成就，以庆贺潘家铮院士生日，颂扬他在水利水电建设领域的卓越贡献，是非常有意义的。

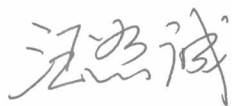
《重力坝设计二十年》涉及范围广泛，反映了中国国情和创新特色，全面系统地总结了近二十年来我国重力坝设计、建设领域在设计思想、设计原则、设计方法以及工程实践等方面的进展和成就，内容包括与重力坝有关的地质勘测新技术与岩体力学、枢纽布置、高速水流与泄洪消能、坝体体型与结构设计、坝体应力变形及稳定分析、坝体材料分区与混凝土温度控制、地基基础与边坡处理、压力钢管布置等研究成果；同时也反映了环境保护、施工技术、安全监测、运行管理、

维修加固等方面的技术成就，几乎涵盖了重力坝设计的全部内容。

《重力坝设计二十年》既反映了成熟的工程实践经验和科技成果，又提出了进一步研究的重点和发展方向，能够激发读者的思考，是一本集系统性、完整性于一体，且具有较高理论价值和应用价值的学术专著。书中的一些工程实例是当前最重要的在建的和设计中的重力坝工程，不仅代表着中国重力坝建设的整体水平，而且在一定程度上也引领着世界重力坝建设的发展方向。

“科学发展观”、“和谐社会”、“人与自然和谐相处”等国家发展理念的提出，以及“西部大开发”、“西电东送”等发展战略的实施，为我国水电开发提供了十分难得的发展机遇。水力发电是一种清洁可再生能源，加快水电发展是当前中国逐步改变过多依靠燃煤发电状况最现实可行的措施。中国的水电开发任重而道远。我国待开发的水能资源主要集中在西部的大江大河上，工程规模大，地质条件复杂，交通困难，水电建设面临着前所未有的技术挑战。与此同时，水电的大规模开发，要认真贯彻党中央“在保护生态基础上有序开发水电”的要求，认真制订好规划，深入研究生态环境保护、水库移民、超远距离输电、特大型机组设备制造以及工程运行管理等问题。

我欣喜地看到，本书各章的作者，不仅有经验丰富的老水利水电专家，还有战斗在一线的中青年工作者。中国水电工程顾问集团公司、中国水利水电科学研究院和长江水利委员会能够组织来自勘测、设计、施工、管理以及科研等领域的水利水电工作者，鼎力协作，发挥集体的聪明才智，解决水电工程建设面临的问题，是一件令人鼓舞的事情。更希望我国从事水利水电工程建设的各个单位继续合作，不仅学习潘总研究解决具体技术问题的能力，更要学习潘总对解决有关中国水利水电建设全局性的思考，学习潘总的爱国情怀、真知灼见和为国为民的高度社会责任感。我相信，《重力坝设计二十年》不仅是为了纪念潘家铮院士八十华诞和《重力坝设计》出版二十年，而且还能对我国坝工设计和建设起到重要的参考和借鉴作用，进而推动我国坝工建设的进一步健康有序发展，因此，此书必将受到我国水利水电界同仁的欢迎，故乐此为序。



2007年11月3日

前 言

混凝土重力坝由于其安全度高，设计施工技术成熟，施工导流及泄洪布置方便等优点，长期以来一直被世界各国广泛采用，是水利水电工程重要坝型之一。20世纪60年代，潘家铮院士结合新安江等工程设计建设的成功实践，撰写了《重力坝的设计和计算》一书；20世纪80年代，又根据当时国内建设的一批具有相当规模的重力坝工程，编写了《重力坝设计》一书。《重力坝设计》一书汇集了当时大量的重力坝设计资料，系统总结了重力坝设计理论和方法，并于1987年正式出版。上述两部关于重力坝设计和施工技术专著，对指导我国水利水电工程设计和建设起到了十分重要的作用，潘家铮院士也为我国水电建设事业的发展做出了杰出的贡献。

近20年来，随着改革开放的不断深入和国民经济的蓬勃发展，我国水利水电工程建设也取得了前所未有的长足发展，而当前为了缓解能源供应紧张形势，积极应对全球气候变化，优化调整能源结构，开发利用可再生清洁能源，水利水电事业进入了快速发展的新时期，这一快速发展时期，至少要持续到2020年，甚至更远。继20世纪80年代开工建设水口、隔河岩、漫湾、五强溪、岩滩等重力坝工程之后，世纪之交，又相继开工建设了三峡、龙滩、光照、向家坝、金安桥等一批高混凝土重力坝工程，不断刷新了工程规模、大坝高度和建设速度的纪录。广大工程技术人员、专家和学者依托拟建和在建水利水电建设工程，结合实际，深入研究，联合攻关，不断创新，在勘察、设计、施工和管理等诸多方面均取得重要的甚至突破性进展，提升了技术水平，积累了大量宝贵的经验。随着国内水利水电工程建设继续积极有序地向前推进，目前规划中的若干混凝土重力坝工程，由于主要集中在水能资源富集的西南地区，存在复杂的工程地质条件、强震区抗震设防、大流量泄洪消能和高边坡变形稳定等多项关键技术难题，工程建设面临新的挑战，因此，需要我们继续攀登新的技术高峰。

2007年，正值潘家铮院士80华诞，也是潘院士《重力坝设计》一书出版发行20周年。陈祖煜院士倡议，由中国水电工程顾问集团公司、长江水利委员会和中国水利水电科学研究院三家单位共同组织编写《重力坝设计二十年》，代表水利水电界同仁的心意，谨以此书献给我们尊敬的老领导、师长和战友——潘家铮院

士，为潘老祝寿，颂扬他在水利水电建设事业上卓越的建树和巨大的成就，并以此书系统总结我国近20年重力坝设计建设领域的重大进展和成功经验，进一步推动重力坝设计理论和方法的研究与应用，为今后重力坝高坝建设提供有益的借鉴。

这是一项十分有益的工作。中国水电工程顾问集团公司、长江水利委员会和中国水利水电科学研究院欣然响应陈祖煜院士的倡议，并得到了水利部原部长汪恕诚同志、潘家铮院士、三家单位主要领导和水利水电同仁的大力支持。本书编著的策划组织工作始于2006年初，2006年7月在杭州召开了编著工作启动会议，研究确定了全书的编撰原则、结构体系、组织形式、具体分工以及进度计划安排等，明确全书分15章。其中，枢纽布置、应力变形计算分析、坝体材料分区及其设计、发电引水压力管道设计研究和重力坝安全监测等5章由中国水电工程顾问集团公司负责；综述、工程地质研究、体型和结构设计、基础处理设计、施工组织设计及重力坝补强、加固和加高设计等6章由长江水利委员会负责；泄洪消能、动力分析和抗震设计研究、抗滑稳定分析和重力坝温度应力及其控制技术等4章由中国水利水电科学研究院负责。一批具有扎实理论基础且极富工程经验的院士、专家、教授热情参与了编著工作，他们无私奉献和认真负责的精神令人感动。

按照计划，2006年8月主编单位在北京主持召开了第二次编著工作会，讨论确定了各章详细目录和主要内容，明确了全书编写的基本要求和规定。历时半年多，到2007年4月，各章初稿基本完成，第三次编著工作会议在北京召开。这次会议检查和评价了工作进度，讨论协调了各章内容的衔接，为避免过多重复，要求对有关章节做进一步修改、补充或删减，明确了审稿专家和审稿要求。2007年8月，全书的编写工作全部完成，为确保质量、按时付梓，主编单位组织专家和中国水利水电出版社的编辑们一起进行了总校、统稿和全面的审定。

在编写和出版过程中，主编单位和中国水利水电出版社的领导给予了全力支持，各位作者、审稿和统稿专家、责任编辑在紧张繁忙工作之余，不计报酬热心参与编著工作，付出了辛勤劳动。大家的共同努力和密切配合，使本书得以顺利出版。在此，特向他们表示由衷的敬佩和深深谢意。

本书全面系统总结了20年来我国重力坝设计建设领域在设计思想、设计原则、设计方法、工程实践、施工技术、运行管理、维修加固等方面的进展和成就，是一本系统完整、实用性强的技术文献和参考书目，可供从事水电开发规划、勘察、设计、施工、科研人员参考借鉴。全书共15章，分别介绍了重力坝设计中的工程地质勘察、枢纽布置、泄洪消能设计、大坝体型及结构设计、抗滑稳定分析、大坝应力变形计算分析、动力分析及抗震设计、坝体材料分区及其设计、温度应力及温控防裂措施、地基及边坡处理、压力钢管设计、施工组织设计、安全监测

及反馈分析，以及重力坝补强加固和加高设计等各方面的内容。书中紧密结合了国内近 20 年来已建和在建混凝土重力坝工程，在论述设计方法理论的同时，着重工程技术的应用和工程实例，确保科学性和实用性有效结合。

由于本书涉及专业众多，编写时间仓促，虽然尽了最大努力，但错误和不当之处难免，敬请各位读者批评指正。

编者

2007 年 11 月

目 录

序

前言

第1章 综述	1
1.1 重力坝建设成就	1
1.2 重力坝筑坝技术的发展	5
1.3 未来重力坝工程及重点研究课题	30
参考文献	32
第2章 重力坝设计中的工程地质研究	34
2.1 概述	34
2.2 工程地质条件与重力坝设计	35
2.3 坝基工程地质勘察	45
2.4 坝基岩体的质量评价与建基面的确定	55
2.5 坝基抗滑稳定分析的地质边界与概化模型	69
2.6 坝基岩体工程力学性质	83
2.7 附录：坝基岩体抗剪强度参数的统计分析	92
参考文献	100
第3章 重力坝枢纽布置	102
3.1 设计要求和设计条件	102
3.2 开发目标和枢纽功能	109
3.3 枢纽布置的基本原则	116
3.4 工程实例	140
参考文献	184
第4章 泄洪消能	185
4.1 概述	185
4.2 泄水建筑物布置型式	191
4.3 泄水建筑物水力设计	197
4.4 溢流面的空蚀与空化	200
4.5 挑流消能	206
4.6 底流消能设计	209
4.7 消力戽消能与面流消能	217
4.8 泄洪雾化及下游防护	218
4.9 水力学原型观测及其分析	227
参考文献	236
第5章 重力坝的体型和结构设计	239
5.1 概述	239

5.2	体型和结构设计	239
5.3	深层抗滑稳定坝段设计	251
5.4	岸坡坝段设计	260
5.5	特殊坝段设计	263
5.6	大坝孔口应力分析和配筋设计	269
5.7	碾压混凝土坝设计	276
5.8	胶凝砂砾石坝设计	287
	参考文献	298
第6章	重力坝抗滑稳定分析	300
6.1	概述	300
6.2	抗滑稳定计算分析条件	301
6.3	抗滑稳定的安全评价方法和判据	307
6.4	深层抗滑稳定的极限平衡分析方法	319
6.5	重力坝深层抗滑稳定的三维分析	329
6.6	可靠度和分项系数设计的基本原理和方法	333
6.7	抗滑稳定的有限元分析	341
6.8	典型工程案例分析	346
6.9	附录:工程实例分析	362
6.10	附录:使用重力坝抗滑稳定分析“广义等K法”的Excel程序	366
	参考文献	369
第7章	重力坝应力变形计算分析	372
7.1	概述	372
7.2	线性弹性有限元计算分析	376
7.3	重力坝非线性应力和承载能力分析	401
7.4	断裂力学和损伤力学在重力坝设计研究中的应用	439
7.5	坝内孔口钢筋混凝土的有限元分析	456
7.6	坝基和绕坝渗流分析	469
	参考文献	491
第8章	重力坝动力分析和抗震设计研究	493
8.1	概述	493
8.2	工程场址的地震动输入	497
8.3	重力坝地震响应分析	523
8.4	重力坝动力模型试验	559
8.5	大坝混凝土的动态特性	570
	参考文献	578
第9章	重力坝材料分区及其设计	581
9.1	概述	581
9.2	坝体混凝土设计强度代表值	583
9.3	坝体混凝土材料分区及其特性	593
9.4	混凝土配合比及性能	600
9.5	混凝土的质量控制	658
	参考文献	669

第 10 章 重力坝温度应力及其控制技术	671
10.1 绪论	671
10.2 热传导原理与温度场计算	676
10.3 混凝土温度徐变应力的有限元解法	685
10.4 混凝土浇筑块的温度应力	692
10.5 重力坝的温度应力	700
10.6 气温变化引起的混凝土应力与表面保护	713
10.7 混凝土的水管冷却	722
10.8 混凝土的预冷	727
10.9 微膨胀混凝土筑坝	736
10.10 混凝土的允许温差	740
10.11 混凝土重力坝温度控制实例	744
10.12 从“无坝不裂”到“无裂缝坝”的关键技术	754
参考文献	756
第 11 章 基础处理设计	759
11.1 概述	759
11.2 坝基开挖设计	760
11.3 坝基固结灌浆设计	765
11.4 坝基软弱岩层和软弱结构面处理设计	771
11.5 渗流控制设计	783
11.6 岩溶基础处理设计	794
11.7 化学灌浆设计	801
参考文献	807
第 12 章 重力坝发电引水压力管道设计研究	808
12.1 概述	808
12.2 坝内埋管（钢管与坝体联合承载）	812
12.3 设软垫层的坝内钢管	815
12.4 坝上游面压力管道	816
12.5 坝下游面明钢管	817
12.6 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道	817
12.7 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道外包混凝土裂缝研究	828
12.8 坝下游面钢衬钢筋混凝土管道结构改进的探讨	837
12.9 坝体压力钢管厂坝间伸缩节的设置	838
12.10 坝体压力管道的科学研究	840
12.11 重力坝坝体压力管道的改进及发展	843
参考文献	844
第 13 章 重力坝施工组织设计	846
13.1 概述	846
13.2 施工导流	848
13.3 砂石料与混凝土生产系统	860
13.4 坝体混凝土施工	875
13.5 碾压混凝土施工	890

13.6 施工进度与施工仿真·····	902
参考文献·····	910
第 14 章 重力坝安全监测 ·····	912
14.1 概述·····	912
14.2 监测目的和基本原则·····	915
14.3 监测项目和布置·····	918
14.4 监测方法和仪器·····	940
14.5 监测资料分析·····	957
14.6 大坝安全监测自动化系统·····	965
参考文献·····	974
第 15 章 重力坝补强、加固和加高设计 ·····	976
15.1 概述·····	976
15.2 重力坝施工期混凝土质量检查及分析、评估·····	977
15.3 重力坝施工期的补强加固技术·····	981
15.4 重力坝分期加高·····	989
15.5 重力坝长期安全性评价·····	997
15.6 混凝土重力坝运行期的补强、加固·····	999
参考文献·····	1013
跋 ·····	1015

第 1 章 综 述

1.1 重力坝建设成就

1.1.1 国内建设成就

为了总结国内外混凝土重力坝建设的成功经验,潘家铮编著的《重力坝设计》于1987年由水利电力出版社出版,对指导我国水利水电工程设计和建设起到了十分重要的作用。20多年来,随着改革开放的不断深入和国民经济的蓬勃发展,我国江河治理和水电开发事业取得了举世瞩目的成就。坝工技术,包括混凝土重力坝技术也取得了长足的进展。继20世纪80年代开工建设水口、隔河岩、漫湾、五强溪、岩滩等重力坝工程之后,世纪之交又相继开工建设了三峡、龙滩、光照、向家坝、金安桥等一批高混凝土重力坝工程,不断刷新了大坝高度和工程规模的纪录。可以自豪地说,我国混凝土重力坝设计和建设技术已经走到了世界前列。

回顾历史,20世纪50年代,我国先后建成了新安江和古田一级两座宽缝重力坝;60年代建成了云峰、丹江口宽缝重力坝和刘家峡、三门峡实体重力坝;70年代建成了湖南镇梯形重力坝;80年代初期,又建成了乌江渡拱形重力坝。至20世纪80年代,我国已建成的高度在70m以上的混凝土重力坝有20多座,见表1.1-1。

表 1.1-1 我国 20 世纪 80 年代已建成的坝高 70m 以上的混凝土重力坝

序号	工程名称	地点	坝型	坝高 (m)	总库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	建成年份
1	乌江渡	贵州	拱形重力坝	165	23	630	1982
2	刘家峡	甘肃	重力坝	147	57	1225	1974
3	湖南镇	浙江	梯形重力坝	129	20.6	170	1979
4	云峰 ^①	吉林	宽缝重力坝	113.75	39	400/2	1967
5	潘家口	河北	宽缝重力坝	107.5	29.3	420	1980
6	黄龙滩	湖北	重力坝	107	11.8	150	1975
7	三门峡	河南	重力坝	106	159	400	1973
8	水丰 ^①	辽宁	重力坝	106	147	900/2	1943
9	新安江	浙江	宽缝重力坝	105	220	662.5	1960
10	丹江口	湖北	宽缝重力坝	97	208.9	900	1973
11	枫树坝	广东	空腹宽缝坝	95.3	19.4	160	1975
12	安砂	福建	宽缝重力坝	92	7.4	115	1978
13	丰满	吉林	重力坝	90.5	107.8	1004.5	1943
14	牛路岭	广东	空腹重力坝	90.5	7.79	80	1982
15	龚嘴	四川	重力坝	85.0	3.57	700	1979
16	大化	广西	重力坝	80	3.54	400	1985
17	池潭	福建	宽缝重力坝	78.1	8.53	100	1982
18	亭下	浙江	重力坝	76.5	1.5	4	1985
19	古田一级	福建	宽缝重力坝	71	6.55	62	1959
20	长潭	广东	空腹重力坝	71	1.69	60	1987

① 中朝共建。

新中国成立初期，百端待举而国力不足，因此，从 20 世纪 50 年代至 80 年代初期，我国混凝土重力坝建设的特点是努力探索减少工程量、节省工程投资的各种途径。为了降低坝基面扬压力、节省坝体混凝土工程量，因而修建了大量的宽缝（空腹）重力坝。在新安江、丹江口等工程的设计和施工中，对宽缝重力坝体型设计、应力分析和施工方法等作了大量详细的研究工作，大大推动了宽缝重力坝技术的发展。宽缝重力坝与实体重力坝相比，可以减少混凝土量 10%~30%。

20 世纪 80 年代中期之后，随着国民经济快速稳定发展，我国水利水电工程建设也迎来了前所未有的发展机遇，为满足防洪、供电、供水、航运等综合利用要求，水利水电事业进入了全面发展的时期。到目前，我国已建和在建的坝高在 100m 以上的混凝土重力坝和重力拱坝见表 1.1-2。从表可见，我国混凝土重力坝筑坝高度已经从 20 世纪 80 年代的坝高 150m 级跨入到了目前的坝高 200m 级，工程规模越来越大；实体重力坝增多，而宽缝（空腹）重力坝越来越少，体型简单的实体重力坝更适合机械化施工，提高施工效率；采用碾压混凝土筑坝的比例越来越高，在建的 6 座坝高 150m 以上的重力坝中，4 座为碾压混凝土重力坝，包括坝高 200m 级的龙滩和光照重力坝。施工机械化程度普遍提高，施工强度达到了前所未有的水平；工程管理实行招投标制和建设监理制，工程质量和施工进度得到有效控制。1994 年开工建设的三峡水利枢纽工程是迄今世界上综合利用要求最高、工程规模最大、建筑物类型最多、布置最为复杂、施工强度最高的枢纽工程。其中，大坝最大坝高为 181m，坝顶长度为 2309.5m，坝体混凝土量达 1610 万 m³，通过坝身泄水建筑物的最大泄量为 8.0×10⁴m³/s，三峡工程的许多指标刷新了世界水利水电工程设计和建设的纪录。

表 1.1-2 我国已建、在建坝高在 100m 以上的混凝土重力坝和重力拱坝

序号	工程名称	河流	坝型	坝高 (m)	混凝土总量 (万 m ³)	总库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	枢纽总泄量 (m ³ /s)	建成年份
1	龙滩	红水河	碾压混凝土重力坝	192/216.5	574/736	162.10/272.70	4200/6300	27692/26085	2009
2	光照	北盘江	碾压混凝土重力坝	195.5	293.71	32.45	1040	9857	2009
3	三峡	长江	混凝土重力坝	181	1610	450.00	18200/4200	102500	2006/地下电站
4	龙羊峡	黄河	混凝土重力拱坝	178	157	276.30	1280	6000	1992
5	官地	雅砻江	碾压混凝土重力坝	168	357.023	7.83	1800	16300	在建
6	乌江渡	乌江	混凝土拱形重力坝	165	193.2	23.00	630/600	21235	1983/扩建
7	向家坝	金沙江	混凝土重力坝	161	1221.01	51.63	6000	48600	在建
8	金安桥	金沙江	碾压混凝土重力坝	160	360	8.47	2400	17653	在建
9	隔河岩	清江	混凝土重力拱坝	151	268	34.00	1200	24000	1994
10	刘家峡	黄河	混凝土重力坝	147	182	61.20	1350	7419	1974
11	宝珠寺	白龙江	混凝土重力坝	132	200	25.50	700	16060	1996
12	漫湾	澜沧江	混凝土重力坝	132	153	10.60	1250/300	16805	1995/扩建
13	江垭	娄水	碾压混凝土重力坝	131	137	17.41	300	10491	2000
14	百色	右江	碾压混凝土重力坝	130	260	56.60	540	11487	2006
15	安康	汉江	折线混凝土重力坝	128	321	25.85	800	36700	1992
16	洪口	霍童溪	碾压混凝土重力坝	130	72.7	4.51	200	10200	在建
17	故县	洛河	宽缝混凝土重力坝	125	156.4	11.75	60	11436	1994
18	武都水库	涪江	碾压混凝土重力坝	119	161	5.72	150	7795	在建
19	丹江口	汉江	混凝土宽缝重力坝	117/97	292.8	339.00/208.90	900	82300	1973
20	思林	乌江	碾压混凝土重力坝	117	110	15.93	1000	32922	在建
21	彭水	乌江	碾压混凝土重力坝	113.5	93.3	14.65	1750	42200	2008
22	索风营	乌江	碾压混凝土重力坝	115.8	62	2.01	600	15954	2005

续表

序号	工程名称	河流	坝型	坝高 (m)	混凝土总量 (万 m ³)	总库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	枢纽总泄量 (m ³ /s)	建成年份
23	云峰	鸭绿江	混凝土重力坝	113.75	304	39.11	400	24204	1964
24	棉花滩	汀江	碾压混凝土重力坝	113	61.5	20.35	600	11490	2001
25	戈兰滩	李仙江	碾压混凝土重力坝	113	117.27	4.09	450	14000	在建
26	岩滩	红水河	碾压混凝土重力坝	110	62.6	34.30	1210/600	32768	1995/扩建
27	大朝山	澜沧江	碾压混凝土重力坝	108	130	9.40	1360	23800	2001
28	景洪	澜沧江	碾压混凝土重力坝	108	320	11.39	1750	34800	2008
29	潘家口	滦河	宽缝重力坝	107.5	280	29.30	420	56200	1992
30	黄龙滩	堵河	混凝土重力坝	107	98	12.28	150/340	14700	1978/扩建
31	水丰	鸭绿江	混凝土重力坝	106.4	340	149.00	630/270	59500	1971/扩建
32	三门峡	黄河	混凝土重力坝	106	163	159.00	1590	9030	1972
33	沙沱	乌江	碾压混凝土重力坝	101	187.29	7.71	1120	32019	在建
34	万家寨	黄河	混凝土重力坝	105	178.85	8.96	1080	21200	2000
35	新安江	新安江	混凝土宽缝重力坝	105	138	178.40	855	13200	1960
36	水口	闽江	混凝土重力坝	101	180	26.00	1400	51640	2000

20 世纪 70 年代以来,碾压混凝土筑坝技术因其施工快、工期短、造价低而在世界范围内得到迅速发展,特别是在实体重力坝建设中得到广泛应用。1986 年建成了福建坑口第一座碾压混凝土重力坝。我国迄今已建、在建的碾压混凝土大坝至少有 84 座,碾压混凝土筑坝技术在引进、消化吸收的基础上再创新,已经取得新的突破,形成了中国特色碾压混凝土筑坝技术,为世界坝工界所肯定。龙滩碾压混凝土重力坝是目前世界上最高、混凝土量最多的碾压混凝土重力坝,最大坝高为 216.5m,坝顶长度为 849.44m,坝体混凝土量为 736 万 m³。该枢纽工程于 2001 年开工建设,2003 年 11 月截流,2006 年 9 月底开始蓄水,2007 年 5 月第一台机组投产发电,工程进度之快、施工质量之好创造了多项高坝建设的新纪录。

20 多年来,在潘家铮的指导下,我国广大工程技术人员、专家和学者依托拟建和在建的水利水电工程,坚持不懈,努力攻关,解决了一个个重大技术难题,保证了三峡、龙滩、光照等一批高坝枢纽工程的顺利建成;在重力坝工程地质勘察技术、枢纽布置和泄洪消能设计、大坝体型设计及抗滑稳定分析、大坝应力变形计算分析、动力响应分析及抗震设计、坝基开挖及处理设计、坝体混凝土材料设计、混凝土温度控制与防裂、施工导流截流技术、施工机械化配套、施工质量和工艺控制、施工组织管理等诸多方面均取得了重要的甚至突破性进展;计算机技术、信息技术、网络技术和其他先进科学技术广泛应用于水利水电工程设计和施工,极大地提高了勘察设计水平,促进了水电工程科技进步。截至目前,更加完善的符合国情的水利水电工程勘察设计和施工技术标准已经建立,这一体系不仅反映了我国水利水电工程技术已经处于世界先进水平,而且也引领了世界水电技术的发展方向。

1.1.2 国外建设成就

混凝土重力坝的设计理论是从 17 世纪的欧洲开始孕育的,到 19 世纪后期,世界上一些国家已经开始采用混凝土修筑中低坝,随着重力坝数量的增多,设计理论和计算方法开始成形并逐步得到发展。至 20 世纪初叶,随着混凝土施工工艺和机械化施工技术的发展,现代混凝土重力坝设计和建设体系已基本形成。

20 世纪 30 年代是重力坝基本设计理论和施工技术发展最有成效的年代。在此期间,美国在西部大开发中修建了高 221.4m 的胡佛(Hoover)坝,高 183.5m 的沙斯塔(Shasta)坝,高 168m 的大古力(Grand Coulee)坝等一批高混凝土坝枢纽工程,极大地推动了重力坝技术的发展。在坝体应力