

水工混凝土技术

黄国兴 陈改新 纪国晋 刘艳霞 王少江 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水工混凝土技术

黄国兴 陈改新 纪国晋 刘艳霞 王少江 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书综合论述水工混凝土技术，内容包括绪论、混凝土原材料、混凝土配合比设计、混凝土拌合物性能、混凝土力学性能、变形性能、热学性能、耐久性能、全级配大体积混凝土性能、特种混凝土，以及水工混凝土施工质量控制与检验、水工混凝土裂缝预防措施与处理技术等。

本书主要阐述了中国水利水电科学研究院结构材料研究所近 20 多年来水工混凝土方面研究成果，同时也介绍了国内外学者有关文献资料。本书可供从事水利水电行业水工混凝土设计、施工、科研人员，以及水工混凝土建筑物运行管理人员与高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目（C I P）数据

水工混凝土技术 / 黄国兴等编著. — 北京：中国水利水电出版社，2014. 10
ISBN 978-7-5170-2621-1

I. ①水… II. ①黄… III. ①水工建筑物—混凝土施工 IV. ①TV544

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第236710号

书 名	水工混凝土技术
作 者	黄国兴 陈改新 纪国晋 刘艳霞 王少江 编著
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
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 39.75 印张 943 千字
版 次	2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	248.00 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

作者简介

黄国兴，男，1940年生，江苏江阴市人，教授级高级工程师，享受国务院政府特殊津贴。1965年毕业于华东水利学院（今河海大学）水工结构专业，大学毕业分配到中国水利水电科学研究院从事水工材料研究与应用工作，1971年9月下放原水电部第二工程局设计处（现北京水电勘测设计院前身）从事水工设计工作7年，1978年12月调回中国水科院仍从事水工材料研究与应用工作，2000年退休后赴中国三峡总公司试验中心当技术顾问长达7年。2007年开始，作为专家组成员参加数十项水电站工程蓄水（或竣工）安全鉴定与水利工程竣工验收安全评估工作。曾先后任中国水利水电科学研究院结构材料所副所长、所长与总工程师，并兼任中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会副理事长、混凝土耐久性专业委员会主任委员、纤维混凝土专业委员会委员、中国水力发电工程学会水工专业委员会秘书等职。承担过多项国家自然科学基金项目、国家“七五”、“八五”、“九五”科技攻关项目，以及原能源部重点科技攻关项目等，取得了大量科研成果，其中“聚合物薄膜在碾压混凝土拱坝防渗工程中的应用”与“碾压混凝土拱坝接缝重复灌浆”两项研究成果填补了国内空白。公开发表论文近40篇，曾执笔编写出版专著《混凝土的徐变》、《混凝土的收缩》与《混凝土徐变与收缩》，与他人合作编写出版专著《大体积混凝土》、《水工混凝土建筑物修补技术及应用》、《混凝土建筑物修补材料及应用》与《水工混凝土技术》等共7部专著，参编行业规范1项。获省部级科技进步三等奖2项，中国电力科学技术一等奖1项。

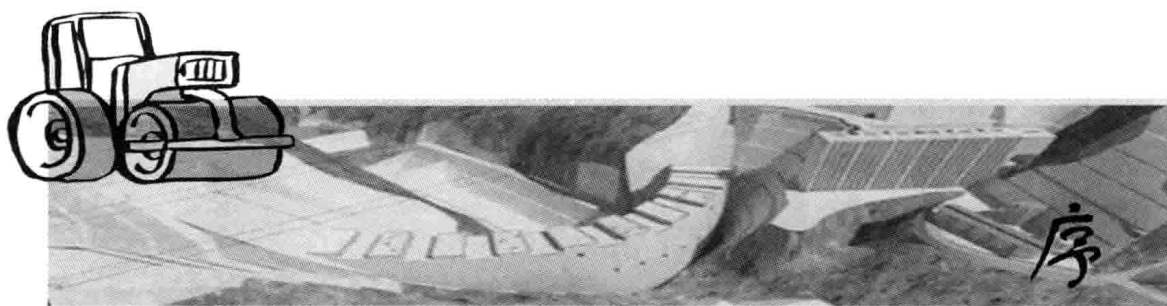
陈改新，男，1966年生，河南洛阳市人，硕士，教授级高级工程师。1988年毕业于同济大学材料科学与工程系。现就职于中国水利水电科学研究院，从事水工材料的研究、测试、开发和推广应用工作，任结构材料研究所副所长，主要研究领域为水工混凝土的耐久性和高性能化，水工建筑物混凝土的检测、评估和修补加固，兼任中国土木工程学会混凝土耐久性专业委员会秘书长，全国混凝土标准化技术委员会委员，全国水泥制品标准化技术委员会委员。公开发表论文40余篇，主持编写《水工混凝土试验规程》（SL 352—2006）等行业标准3项，参编《水工混凝土耐久性技术规范》（DL/T 524—2010）等行业标准5项；合作编写专著《水工混凝土建筑物修补技术及应用》、译著《碾压混凝土坝发展水平与工程实例》。完成的“景洪水电站工程双掺材料特性研究与工程应用”2007年获云南省科技进步二等奖，“寒冷干旱地区碾压混凝土重力坝关键技术研究与应用”2010年获新疆自治区科技进步二等奖。

纪国晋，男，1971年7月生，安徽省全椒县人，教授级高级工程师，中国水利水电科学研究院结构材料研究所副总工程师，研发部主任，中国建筑材料联合会混凝土外加剂分会常务理事，中国腐蚀与防护学会建筑工程专业委员会委员，中国土木工程学会纤维混凝土委员会委员，水利部第一届青联委员。1999年毕业于武汉工业大学（现武汉理工大

学)材料学专业,获硕士学位,1993~1996年留校从事生物材料的研究工作,1999年进入中国水科院从事水工高性能混凝土及耐久性研究、混凝土缺陷检测与评估加固技术等领域的研究工作。主持完成国内三十余个大中型水电工程混凝土相关技术服务和咨询工作。发表专业论文30余篇,与人合作编写出版专著《混凝土建筑物修补材料及应用》。获省部级科技进步奖二等奖1项。

刘艳霞,女,1977年生,山东省青州市人,高级工程师。1999年毕业于石家庄铁道学院(无机非金属材料专业),2008年于中国水利水电科学研究院获博士学位,同年留院结构材料研究所工作。主要从事水工混凝土性能及试验研究、水工新材料研发及应用等工作。作为科研骨干或负责人,参与了国家自然科学基金项目、水利部公益性行业科研专项、科技部科研院所技术开发研究专项、973项目等多项国家级和部级重点项目、国家重点工程科研项目及国际合作项目等十余项,发表论文10余篇,参编行业规范3项。

王少江,男,1972年6月生,河南省灵宝市人,高级工程师,现就职于中国水利水电科学研究院结构材料研究所。1990年考入同济大学材料科学与工程系学习,1994年进入中国建筑材料科学研究院工作,主要从事水泥混凝土新材料新技术的研究开发推广工作。1998年考取武汉工业大学北京研究生部(后并入北京工业大学)材料学专业研究生,攻读硕士学位。2003年5月调入中国水利水电科学研究院结构材料研究所工作至今,从事水工高性能混凝土及新材料的研究与应用。作为主要参加者或项目负责人先后参加了国家高技术研究发展计划、水利部科技创新项目,以及多项国家重点工程科研项目的研究工作。近年来,发表论文、撰写科研报告20多篇,参编国家规范1项,行业规范7项,获国家发明专利3项,获省部级科技进步奖特等奖1项。

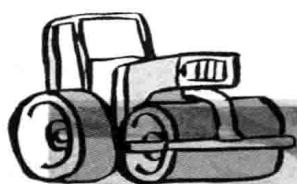


中国水利水电科学研究院结构材料所组织编写的《大体积混凝土》专著于1990年出版至今已20多年。通过国家“八五”、“九五”、“十五”、“十一五”科技攻关项目、国家自然科学基金项目、省部级重点项目的研究，以及三峡、小湾、龙滩、溪洛渡、锦屏、向家坝等大中型水利水电工程实践，在水工混凝土技术研究与应用方面取得了很多新成果，积累了大量的水工混凝土技术资料。作者为了总结近20多年来水工混凝土技术，特编写了《水工混凝土技术》一书。

本书书名《水工混凝土技术》比原来书名《大体积混凝土》较确切。在章节安排上也有所改进，如硬化混凝土性能按混凝土力学、变形、热学与耐久等四大性能分四章编写，特别是对混凝土极限拉伸变形与自生体积变形作了较为详细论述。本书增加了全级配大体积混凝土性能，包括强度、弹模、徐变、干缩、自生体积变形、抗渗、抗冻、动力特性等。本书还简述10种常用水工特种混凝土（碾压、泵送、喷射、自密实、水下不分散、膨胀、纤维、聚合物、防渗墙及沥青混凝土）对原材料要求、配合比特点、混凝土特性及用途，并附有工程实例，便于读者参考应用。本书最后两章分别介绍水工混凝土施工质量控制与检验，以及水工混凝土裂缝预防措施与处理技术，特别是对水工混凝土裂缝处理技术（如裂缝调查与成因分析，裂缝修补方法、修补材料及修补工艺等）作了较为详细介绍。本书总结了近20多年水工混凝土技术的新进展，内容丰富且较为全面。本书的出版，相信将会受到水利水电行业水工混凝土设计、施工与科研人员，以及水工混凝土建筑物运行管理人员及高等院校有关专业师生的欢迎。为此，本人乐于为本书作序。

朱伯芳

2012年9月24日



前言

由吕宏基、关英俊、杨德福、丁宝瑛、姜福田、李金玉、黄国兴等编著的《大体积混凝土》专著，主要收集1990年以前的有关资料并经整理编写而成。从1990年至今的20多年，正值我国水利水电事业大发展时期，水工混凝土技术得到了很大提高，如混凝土掺合料与骨料、混凝土配合比设计优化、混凝土极限拉伸与自生体积变形、混凝土徐变与收缩、混凝土耐久性、全级配大体积混凝土性能、混凝土动力强度特性、各种特种混凝土，以及水工混凝土施工质量控制与检验、水工混凝土裂缝预防措施与处理技术等方面取得了大量研究成果，积累了很多水工混凝土技术资料。为了总结近20年来水工混凝土技术，特编写《水工混凝土技术》一书。

本书共分12章。第1章为绪论，主要简述水工混凝土技术的研究与进展概况；第2章叙述混凝土原材料（水泥、掺合料、外加剂、骨料等）；第3章介绍混凝土配合比设计；第4章叙述混凝土拌合物性能；第5章介绍混凝土抗压、抗拉、抗剪强度，弹性模量、多轴强度与动力强度等力学性能；第6章介绍了混凝土变形性能，包括极限拉伸变形、收缩变形、徐变变形、自生体积变形、温度变形与湿胀变形等；第7章叙述混凝土热学性能，包括绝热温升、比热、导热系数、导温系数、线膨胀系数等；第8章介绍混凝土耐久性能，包括抗渗性、抗冻性、抗冲磨性、抗空蚀性、抗化学侵蚀性，以及混凝土碳化与钢筋锈蚀、混凝土碱—骨料反应与混凝土抗裂性等；第9章介绍全级配大体积混凝土性能，包括抗压、抗拉与抗弯强度、弹性模量、极限拉伸、徐变、收缩、自生体积变形、抗渗性与抗冻性等；第10章介绍特种混凝土，包括碾压混凝土、泵送混凝土、喷射混凝土、自密实混凝土、水下不分散混凝土、膨胀混凝土、纤维混凝土、聚合物混凝土、防渗墙混凝土与沥青混凝土等；第11章介绍水工混凝土施工质量控制与检验；第12章介绍水工混凝土裂缝预防措施与处理技术。

本书第1、6、10、11、12章由黄国兴编写，第2章由纪国晋编写，第3、4章由王少江编写，第5、7、9章由陈改新编写，第8章由刘艳霞编写。本书由黄国兴统稿。

书中有很多资料引自许多单位的研究成果或个人论文著作。在此，谨向有关单位及个人表示衷心感谢！

本书中部分研究成果还受到国家重点基础研究计划（项目编号：2013CB035903）和十二五国家科技支撑计划（项目编号：2013BAB06B02）的资助，在此对项目资助单位和项目组成员表示感谢！

在编写本书过程中，曾得到中国水利水电科学研究院结构材料研究所领导及同志们热情支持与帮助，在此表示感谢！

我国著名水工结构专家、中国工程院朱伯芳院士为本书作序，在此表示衷心感谢！

由于作者理论知识和实践经验的限制，书中可能存在一些缺点与错误，诚恳希望读者给予指正。

作者

2014年4月

目 录

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 水工混凝土的分类	1
1.3 混凝土坝的发展	3
1.4 水工混凝土技术的研究与进展概况	6
参考文献	15
第2章 混凝土原材料	16
2.1 水泥	16
2.2 掺合料	29
2.3 骨料	56
2.4 外加剂	73
2.5 拌合水	90
参考文献	92
第3章 混凝土配合比设计	94
3.1 混凝土配合比设计原则	94
3.2 基本资料	96
3.3 混凝土配合比设计	97
3.4 混凝土配合比的试配、调整与确定	104
3.5 常用特种混凝土配合比设计	106
3.6 国内部分大中型水利水电工程混凝土配合比	109
参考文献	118
第4章 混凝土拌合物性能	119
4.1 混凝土拌合物工作性	119
4.2 混凝土拌合物凝结时间	128
4.3 混凝土拌合物含气量	133
4.4 混凝土拌合物表观密度	136
4.5 混凝土拌合物的离析	137

4.6	混凝土拌合物沉降与泌水	138
4.7	混凝土拌合物的收缩	138
	参考文献	139
第5章	混凝土力学性能	140
5.1	抗压强度	140
5.2	抗拉强度	166
5.3	弹性模量	187
5.4	抗弯强度	200
5.5	抗剪强度	206
5.6	多轴强度	213
5.7	断裂韧度	219
5.8	动载力学特性	226
	参考文献	231
第6章	混凝土变形性能	233
6.1	极限拉伸	233
6.2	收缩变形	246
6.3	徐变变形	267
6.4	自生体积变形	288
6.5	温度变形	298
6.6	湿胀变形	299
	参考文献	300
第7章	混凝土热学性能	303
7.1	概述	303
7.2	绝热温升	303
7.3	导热系数	313
7.4	导温系数	317
7.5	比热	320
7.6	线膨胀系数	322
7.7	部分工程大坝混凝土热学性能试验结果	325
	参考文献	330
第8章	混凝土耐久性能	332
8.1	概述	332
8.2	抗渗性	333
8.3	抗冻性	341
8.4	抗冲磨性	360
8.5	抗空蚀性	371

8.6	混凝土化学反应侵蚀	379
8.7	混凝土碳化与钢筋锈蚀	395
8.8	混凝土碱骨料反应	404
8.9	混凝土抗裂性	413
	参考文献	420
第9章	全级配大体积混凝土性能	424
9.1	概述	424
9.2	全级配混凝土试验方法研究	426
9.3	抗压、抗拉与抗弯强度	430
9.4	弹性模量	439
9.5	极限拉伸	442
9.6	徐变	444
9.7	干缩	449
9.8	自生体积变形	451
9.9	抗渗性	453
9.10	抗冻性	454
9.11	线膨胀系数	457
9.12	动载力学特性	457
9.13	初步结论	461
	参考文献	463
第10章	特种混凝土	464
10.1	碾压混凝土	464
10.2	泵送混凝土	477
10.3	喷射混凝土	485
10.4	自密实混凝土	496
10.5	水下不分散混凝土	504
10.6	膨胀混凝土	513
10.7	纤维混凝土	520
10.8	聚合物混凝土	535
10.9	防渗墙混凝土	542
10.10	沥青混凝土	551
	参考文献	559
第11章	水工混凝土施工质量控制与检验	562
11.1	混凝土原材料品质检验	562
11.2	混凝土拌合与拌合物质量控制与检验	565
11.3	碾压混凝土铺筑现场质量控制	568

11.4	混凝土施工质量控制与检验	568
11.5	现场混凝土抗压强度检测	570
11.6	现场混凝土质量评定与验收	578
	参考文献	583
第 12 章	水工混凝土裂缝预防措施与处理技术	584
12.1	水工混凝土裂缝分类	584
12.2	水工混凝土裂缝原因	586
12.3	水工混凝土裂缝预防措施	587
12.4	水工混凝土裂缝处理技术	594
	参考文献	623

第1章 绪 论

1.1 概 述

为了防洪、发电、灌溉、供水、航运等目的而修建的挡水、泄洪、输水、排沙等建筑物称为水工建筑物。修建水工建筑物所用的混凝土材料称水工混凝土。水工混凝土不全是大体积混凝土，实际上水工混凝土可分为水工大体积混凝土、水工结构混凝土与水工特种混凝土等三种。水工大体积混凝土一般为三级配（骨料最大粒径 80mm）或四级配（骨料最大粒径 120mm 或 150mm），主要用于大坝、基础等素混凝土结构；水工结构混凝土一般为二级配（骨料最大粒径 40mm）或一级配（骨料最大粒径 20mm），主要用于钢筋混凝土结构，如水电站厂房结构、闸墩、进水塔、隧洞衬砌、船闸等结构工程；水工特种混凝土一般为二级配或一级配，包括水工碾压混凝土、喷射混凝土、泵送混凝土、水下不分散混凝土、膨胀混凝土、纤维混凝土、防渗墙混凝土、自密实混凝土、聚合物混凝土、水工沥青混凝土等 10 种。

1.2 水工混凝土的分类

水工混凝土主要分为水工大体积混凝土、水工结构混凝土与水工特种混凝土等三种。

1.2.1 水工大体积混凝土

关于大体积混凝土的定义，美国混凝土学会 ACI 207 委员会对于大体积混凝土的定义是，“任何就地浇筑的大体积混凝土，其尺寸之大，必须要求采取措施解决水泥水化热及随之引起的体积变形问题，以最大限度地减少开裂”^[1-1]。对水利水电工程用的水工大体积混凝土，是指现场浇筑的混凝土体积很大，必须采取措施，解决水泥水化热引起温度变形的混凝土问题，以尽量减少混凝土裂缝。

水工大体积混凝土一般为四级配或三级配混凝土，主要用于大坝、基础等无配筋的素混凝土结构。水工大体积混凝土强度等级较低，一般为 $C_{90} 10$ 、 $C_{90} 15$ 、 $C_{90} 20$ 、 $C_{90} 25$ ，胶材用量相对较低，而掺合料掺量较高，水泥宜选用低热或中热水泥，例如长江三峡大坝混凝土选用中热硅酸盐水泥，掺 25%~35% I 级粉煤灰。

水工大体积混凝土又有两种，一种是常态混凝土，另一种为碾压混凝土，而碾压混凝土又属水工特种混凝土。水工碾压混凝土一般为三级配或二级配，三级配碾压混凝土用于大坝内部与基础部位，而二级配碾压混凝土用于上游防渗等外部。



1.2.2 水工结构混凝土

水工结构混凝土是指用于水工钢筋混凝土结构的混凝土材料。水利水电工程中钢筋混凝土结构数量较多,如溢流坝段闸墩、坝内孔口、进水口、消能设施(消力池、挑流坎、消力塘等);厂房机墩、板、梁、柱;调压井(室);水工隧洞(导流洞、泄洪洞、引水洞、尾水洞、排沙洞等)衬砌;水闸、船闸、升船机;渡槽、渠道、倒虹吸管等结构。

水工结构混凝土强度等级较高,一般为 C20、C25、C30、C35,个别抗冲磨混凝土可达 C50 或 C60,甚至 C70,如小浪底泄洪冲沙洞衬砌混凝土设计强度等级为 C70。因此其胶材用量较高,而掺合料掺量相对较低。

1.2.3 水工特种混凝土

凡是采用特种施工方法(碾压密实、泵送、喷射、自流平自密实)或具有特种性能(水下不分散、微膨胀、抗渗性优、粘结强度高、韧性好)的混凝土均称为特种混凝土。归纳起来,水利水电工程中常用的水工特种混凝土有以下 10 种,即碾压混凝土、泵送混凝土、喷射混凝土、自密实混凝土、水下不分散混凝土、微膨胀混凝土、纤维混凝土、聚合物混凝土、防渗墙混凝土与沥青混凝土。

除碾压混凝土与微膨胀混凝土有三级配或四级配混凝土外,其余特种混凝土均为二级配或一级配混凝土。

碾压混凝土主要用于浇筑重力坝、拱坝、施工围堰及公路路面等,一般采用三级配或二级配混凝土,其胶材用量低,而掺合料掺量高,一般为 60% 左右。

泵送混凝土主要用于水工隧洞衬砌、高压引水钢管外回填、导流洞与导流底孔封堵(特别是顶部回填封堵)、钢筋密集与空间狭窄部位等。泵送混凝土一般为二级配或一级配混凝土,坍落度 14~16cm,胶材用量不宜低于 300kg/m³。

喷射混凝土主要用于水工隧洞喷锚支护与永久衬砌、地下厂房等洞室喷锚支护与衬砌、岩石边坡喷锚支护及水工混凝土建筑物结构补强加固等。喷射混凝土的最大骨料粒径不大于 15mm,且不能有超径含量,其胶材用量比普通混凝土高得多,一般为 400~450kg/m³,最高达 500kg/m³。

自密实混凝土浇筑时依靠自重流动,无需振捣就达到密实的混凝土,主要用于钢筋密集部位、薄壁构件、预制构件,以及大坝导流底孔与地下工程导流洞顶部封堵等。自密实混凝土的最大骨料粒径不大于 20mm(一级配),混凝土拌合物具有良好的流动性、抗离析性和充填性,胶材用量也很高。

水下不分散混凝土是水下不分散、自流平自密实的混凝土,主要用于海堤护坡、河道护岸、堤防加固等水下部位混凝土,以及水电厂尾水护坦、水垫塘、消力池底板等水下补强加固等。水下不分散混凝土的最大骨料粒径不宜大于 20mm,必须掺用水下不分散剂,胶材用量较高,一般在 350kg/m³ 以上。

微膨胀混凝土主要用于大体积补偿收缩混凝土(大坝与大型结构基础)、导流底孔与导流洞封堵、厂坝之间宽缝回填、坝基坑塘与断层挖槽回填等工程。微膨胀混凝土一般为四级配或三级配混凝土,其膨胀量应视用途而定。



纤维混凝土主要包括钢纤维混凝土与合成纤维混凝土两种,钢纤维混凝土主要用于水工建筑物抗冲磨部位、水工隧洞与地下厂房支护和衬砌、水工混凝土建筑物补强加固等工程;合成纤维混凝土主要用于混凝土面板堆石坝混凝土面板、地下厂房岩锚梁、混凝土预制板材与管材、水池刚性防水层等工程。

聚合物混凝土包括聚合物水泥混凝土、树脂混凝土、聚合物浸渍混凝土三种。聚合物水泥混凝土主要用于新建水工混凝土建筑物表面防渗、水工混凝土建筑物冻融破坏修补、水工钢筋混凝土建筑物渗漏处理与防碳化处理等。

防渗墙混凝土是一种掺黏土或膨润土混凝土,其特点是低强、低弹模、变形性能好,主要用于水工建筑物地基防渗墙。防渗墙混凝土的骨料最大粒径不大于 40mm (二级配),黏土掺量一般不大于 30%。

沥青混凝土是以石油沥青为胶结材料的混凝土。沥青混凝土主要用于土石坝防渗(心墙或斜墙)工程、引水渠道衬砌、抽水蓄能电站上库与下库防渗工程,以及土石坝与混凝土坝渗漏处理工程等。沥青混凝土的粗骨料是指粒径大于 2.5mm 的石子,必须选用碱性岩石,如沉积岩中的石灰岩与白云岩,岩浆岩中的玄武岩与辉绿岩。

1.3 混凝土坝的发展

1.3.1 国外混凝土坝发展情况

1900 年前,世界上建成的混凝土坝很少,而且都是低坝,1887~1890 年美国在加利福尼亚州建成 49m 高的水晶泉(Crystal Spring)坝,1900~1930 年建成几座高 100m 左右的混凝土坝,并开始进行混凝土施工质量控制,即控制混凝土坍落度与抽样检测抗压强度,1916~1926 年河勃拉姆斯(Duff Abrams)等人对混凝土单位用水量与抗压强度的关系做了大量研究工作。

1915 年美国在爱达荷州建成世界上第一座高 100m 级箭石混凝土坝(Arrow Rock)^[1-2]。

1930 年后,技术人员开始注意大坝混凝土裂缝问题。1933 年美国开始修建高 221m 的胡佛坝(Hoover),对大坝混凝土进行了全面研究,胡佛坝所采用的大体积混凝土施工技术,有的至今仍在沿用。1936 年世界上第一座 200m 级混凝土坝(胡佛坝)建成。

自建胡佛坝以来,大体积混凝土技术得到了很大发展,主要有大体积混凝土中掺用掺合料、减水剂、引气剂,改善混凝土性能,特别是提高混凝土耐久性;采用更有效的温度控制措施;采用不分纵缝的通仓浇筑法;发展强力的平仓振捣设备;碾压混凝土的研究与应用;各种特种混凝土的研究与应用;水工混凝土建筑物修补技术的研究与应用等。

1965 年意大利修建阿尔卑惹拉(Alpe Gera)重力坝时,创新一套与传统柱状浇筑法完全不同的施工方法,即全坝面不分纵缝与横缝,连续浇筑。浇筑层厚 70cm,浇筑 12h 后用切缝机切成横缝(间距 15m),上游面用钢板防渗,坝高 175m,体积 180 万 m^3 ,浇筑工期 21 个月。

20 世纪 70 年代开始,日、美、英等国对碾压混凝土筑坝技术进行了研究。日本于



1976 年首先用碾压混凝土修建大川坝施工围堰, 随后修建了岛地川、玉川等碾压混凝土坝。1985 年美国垦务局主持施工上静水 (Upper Stillwater) 碾压混凝土坝 (坝高 88m, 体积 107 万 m^3)。后来世界上很多国家修建了碾压混凝土坝, 不仅有重力坝, 还有拱坝。碾压混凝土坝坝高越来越高, 如哥伦比亚米埃尔 (Miel) 碾压混凝土重力坝坝高 188m, 碾压混凝土 166.9 万 m^3 。缅甸南部钽桑碾压混凝土重力坝坝高 235m, 是目前世界上最高的碾压混凝土坝, 总体积 865 万 m^3 , 装机 7100MW。巴基斯坦的 Basha 碾压混凝土坝正在设计中, 坝高达 300m^[1-3]。根据中国大坝协会秘书处统计, 截至 2009 年, 国外已建成的高 200m 以上的混凝土坝见表 1.3-1^[1-4]。

表 1.3-1 国外已建高 200m 以上混凝土坝

序号	坝名	国家	坝型	坝高 (m)	大坝体积 (万 m^3)	总库容 (亿 m^3)	装机容量 (万 kW)	建成年份
1	大狄克逊	瑞士	重力坝	285	589	4.0	170	1962
2	英古里	格鲁吉亚	拱坝	271.5	396	11.1	43.3	1980
3	洋特	意大利	拱坝	262	35	1.7		1960
4	阿尔瓦罗	墨西哥	重力坝	260	589	4.0	170	1980
5	莫瓦桑	瑞士	拱坝	250.5	211			1958
6	德里内尔	土耳其	拱坝	247	350	16.7	21	2004
7	萨扬舒申斯克	前苏联	拱坝	245	908	313	235	1989
8	奇比	埃塞俄比亚	拱坝 ^①	241				
9	吉申	印度	重力坝	236	950	18.1	3	1995
10	尔门内克	土耳其	拱坝	235				
11	埃尔卡洪	洪都拉斯	拱坝	234	150	57	13.5	1985
12	奇尔克伊	格鲁吉亚	拱坝	232.5	136	27.8	21.4	1977
13	卡伦Ⅳ	伊朗	拱坝	230	240	21.9	21.6	2006
14	塔桑	缅甸	拱坝 ^①	227.5				
15	马克拉	印度	重力坝	226	413	96.2	135.4	1963
16	胡佛	美国	拱坝	221.4	249	348.5	134.5	1936
17	康脱拉	瑞士	拱坝	220	66	1.1	2.32	1965
18	姆拉丁其	南斯拉夫	拱坝	220	74	8.9	8.6	1976
19	德沃夏克	美国	重力坝	219	493	42.8	106	1973
20	格伦峡	美国	拱坝	216.4	374.7	333	114	1966
21	托克托古尔	前苏联	重力坝	215	335	195	120	1978
22	尔门内克	土耳其	拱坝	210	270	46	11.4	
23	鲍脱柯斯	波多黎哥	拱坝 ^①	210				
24	卢佐内	瑞士	拱坝	208	133			1963
25	锡马潘	墨西哥	拱坝	207	21	10	12.9	
26	卡伦Ⅲ	伊朗	拱坝	205	115	27.5	42.5	2001



续表

序号	坝名	国家	坝型	坝高 (m)	大坝体积 (万 m ³)	总库容 (亿 m ³)	装机容量 (万 kW)	建成年份
27	拉克瓦	印度	重力坝	204	287	5.8	30	1996
28	阿尔门德拉	西班牙	拱坝	202	218.8	24.5	13	1970
29	迪兹	伊朗	拱坝	203	46	33.4		1962
30	伯克	土耳其	拱坝	201	74.5	4.3		1996
31	胡顿	格鲁吉亚	拱坝	200.5	148	3.7		1991
32	卡伦 I	伊朗	拱坝	200	119	31.4		1993
33	柯恩布赖茵	奥地利	拱坝	200	160		13.4	1977

① 碾压混凝土坝。

1.3.2 我国混凝土坝的发展情况

我国修建大型混凝土坝是从 20 世纪 50 年代初治淮工程开始的, 1954 年在安徽省淠河上建成佛子岭连拱坝, 坝高 74.4m。1956 年又在安徽省史河上建成 88m 高的梅山连拱坝。1960 年在浙江省新安江上建成 105m 高的新安江混凝土宽缝重力坝, 在河南省黄河上建成 106m 高三门峡混凝土重力坝。1965 年在辽宁省鸭绿江上建成 114m 高云峰宽缝重力坝。1969 年在甘肃省黄河上建成 147m 高刘家峡混凝土重力坝。1979 年在浙江省乌溪江上建成 120m 高湖南镇支墩坝, 在河北省滦河上建成 107.5m 高潘家口混凝土重力坝。1982 年在贵州省乌江上建成 165m 高乌江渡重力拱坝, 1984 年在吉林省第二松花江上建成 149.5m 高白山重力拱坝, 1985 年在湖南省耒水上建成 157m 高东江混凝土双曲拱坝, 1986 年在青海黄河上游建成 177m 高龙羊峡混凝土重力坝, 1990 年在四川雅龚江上建成 240m 高二滩混凝土双曲拱坝, 2006 年在湖北长江中游建成 181m 高三峡混凝土重力坝, 2010 年在青海黄河上游建成 250m 高拉西瓦拱坝、在云南建成 294.5m 高小湾双曲拱坝等。根据中国大坝协会秘书处统计, 截止到 2009 年, 我国已建与在建高 30m 以上混凝土坝共 1497 座, 其中拱坝 862 座 (含 40 座碾压混凝土拱坝)、重力坝 635 座 (含 89 座碾压混凝土重力坝)^[1-4]。我国已建成高 200m 以上混凝土坝列于表 1.3-2^[1-4]。

表 1.3-2 我国已建高 200m 以上混凝土坝

序号	坝名	所在省	坝型	坝高 (m)	坝体积 (万 m ³)	总库容 (亿 m ³)	装机容量 (万 kW)	完建年份	备注
1	锦屏一级	四川	拱坝	305.0		150	360	2014	
2	小湾	云南	拱坝	294.5	705	151	420	2010	
3	溪洛渡	四川	拱坝	285.5	1178	129	1260	2012	
4	拉西瓦	青海	拱坝	250.0	373	108	420	2010	
5	二滩	四川	拱坝	240.0	414	58	330	1999	
6	构皮滩	四川	拱坝	232.5	242	56	300	2013	
7	大冈山		拱坝	210.0		7	260	2012	
8	光照	贵州	重力坝	200.5		32	104	2007	碾压混凝土