

碾压混凝土材料、 结构与性能

方坤河 著

本书系统地介绍了水工碾压混凝土的原材料、配合比设计、拌和物的特性、硬化碾压混凝土的结构及其性能，总结了国内已建工程碾压混凝土的性能及特点。



武汉大学学术丛书
WUHAN UNIVERSITY ACADEMIC LIBRARY

▶ 全 国 优 秀 出 版 社 ▶ 武汉大学出版社



武汉大学学术丛书

碾压混凝土材料、结构与性能

方坤河 著

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

碾压混凝土材料、结构与性能/方坤河著. —武汉: 武汉大学出版社, 2004. 2

(武汉大学学术丛书)

ISBN 7-307-04182-0

I. 碾… II. 方… III. ①振动挤压混凝土—结构 ②振动挤压混凝土—性能 IV. TU528.59

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 096783 号

责任编辑: 谢文涛 责任校对: 刘 欣 版式设计: 支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

印刷: 湖北省京山德新印刷有限公司

开本: 850×1168 1/32 印张: 9.5 字数: 239 千字 插页: 3

版次: 2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-0412-0/D · 556 定价: 20.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购买我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。



武汉大学学术丛书
编委会

主任委员 ▶ 侯杰昌

副主任委员 ▶ 卓仁禧 胡德坤

秘书长 ▶ 江建勤

委员 (以姓氏笔画为序)

▶ 丁俊萍	马费成	王秀珍
文习山	邓大松	石 兢
龙泉明	宁津生	刘经南
李文鑫	李德仁	杨弘远
杨金忠	卓仁禧	易 帆
罗以澄	周云峰	周茂荣
庞代文	胡德坤	侯杰昌
施雨湘	郭齐勇	谈广鸣
曾令良	樊明文	



方坤河 1946年出生，广东普宁人。武汉水利电力学院水工结构工程专利毕业，工学硕士，武汉大学水利水电学院教授，博士生导师。长期从事建筑材料的教学和科学研究工作，先后获国家科学技术进步一等奖1项，省部级科学技术进步二等奖2项、三等奖2项，参编出版教材、科技书12本。曾获湖北省有突出贡献专家、国家有突出贡献专家、湖北省师德先进个人、全国优秀教师称号，享受政府特殊津贴。在水工碾压混凝土材料及性能的研究方面取得突出成绩，在碾压混凝土筑坝技术的研究、推广和应用方面做出了突出的贡献。

内 容 提 要

本书除绪论外共有十章：碾压混凝土的组成材料、碾压混凝土的配合比设计、碾压混凝土的结构、碾压混凝土拌和物的工作性、碾压混凝土的凝结特性、碾压混凝土的强度特性、碾压混凝土的热学特性、碾压混凝土的变形特性、碾压混凝土的耐久性、碾压混凝土的应用与未来。

本书既可作为高等学校水利类专业学生的选修课教材，也可供从事水利水电工程的有关技术人员参考。

前 言

本书是水利水电工程碾压混凝土材料方面的专门著作，是作者二十余年来在筑坝碾压混凝土方面的研究成果和对国内外筑坝碾压混凝土资料的总结。书中全面介绍了水利水电工程坝用碾压混凝土原材料、配合比设计、碾压混凝土的结构、碾压混凝土的性能及耐久特性，反映了国内外碾压混凝土材料的当前技术水平、存在的问题及今后的发展趋势。

全书除绪论外，共分十章。第一章由林枫编写；第三、四章由阮燕编写；第五、八章由曾力编写；第六章由吴定燕编写；方坤河编写绪论、第二、七、九、十章，并负责全书的统稿。

国内各有关单位及同行为本书的编写提供了大量资料，出版社编辑及有关人员付出的辛勤劳动，对本书的出版起了很大的作用。对此，我们表示衷心的感谢。

恳请读者对书中的缺点和不妥之处，给予批评、指正。

作 者

2003.10

前 言	1
绪 论	1
第一章 碾压混凝土的组成材料	14
第一节 水泥	14
第二节 掺合料	23
第三节 骨料	46
第四节 外加剂	58
第五节 拌和及养护用水	67
第二章 碾压混凝土的配合比设计	69
第一节 碾压混凝土配合比的主要类型	70
第二节 碾压混凝土配合比设计的基本原理	72
第三节 碾压混凝土配合比设计方法	79
第三章 碾压混凝土的结构	92
第一节 碾压混凝土的结构层次	92
第二节 碾压混凝土中硬化胶凝材料浆的 成分、形貌与结构	96
第三节 碾压混凝土与硬化胶凝材料浆的孔结构	98
第四节 碾压混凝土的孔结构变化	105

第四章 碾压混凝土拌和物的工作性	115
第一节 碾压混凝土拌和物的工作度.....	115
第二节 碾压混凝土的流变特性.....	126
第三节 碾压混凝土拌和物的易密性.....	134
第四节 碾压混凝土拌和物的抗分离性.....	143
第五章 碾压混凝土的凝结特性	148
第一节 胶凝材料浆、砂浆及碾压混凝土 拌和物凝结性态的特点.....	149
第二节 配合比及环境条件对碾压混凝土 凝结特性的影响.....	156
第三节 碾压混凝土坝施工层面 混凝土凝结性态的判断.....	159
第六章 碾压混凝土的强度特性	168
第一节 碾压混凝土的抗压强度.....	169
第二节 碾压混凝土的抗拉强度.....	182
第三节 碾压混凝土的抗剪强度.....	191
第七章 碾压混凝土的热学特性	200
第一节 胶凝材料水化热.....	200
第二节 碾压混凝土的热物理系数.....	206
第三节 碾压混凝土的绝热温升.....	212
第八章 碾压混凝土的变形特性	219
第一节 碾压混凝土的静力抗压弹性模量.....	219
第二节 碾压混凝土的极限拉伸变形.....	225
第三节 碾压混凝土的徐变.....	228
第四节 碾压混凝土的干缩湿胀变形.....	233

第五节 碾压混凝土的其他变形·····	236
第六节 碾压混凝土的抗裂性·····	239
 第九章 碾压混凝土的耐久性·····	 247
第一节 碾压混凝土的抗渗性能·····	247
第二节 碾压混凝土的抗冻性·····	258
第三节 碾压混凝土的抗冲耐磨性能·····	264
第四节 碾压混凝土的抗碳化性能·····	268
第五节 碾压混凝土的抗溶蚀性及稳定性·····	271
 第十章 碾压混凝土的应用与未来·····	 277
第一节 碾压混凝土的应用·····	277
第二节 碾压混凝土的未来·····	280
 参考文献·····	 287

绪 论

一、碾压混凝土及碾压混凝土坝的发展概况

碾压混凝土是用振动碾压实的超干硬混凝土。碾压混凝土坝是坝工界在寻求快速、经济地建设混凝土重力坝过程中产生的一种新坝型。由于这种坝型造价低、建设速度快，在较短时间内获得了世界性的认可。

由于大型土石方施工机械的使用以及土力学理论的发展，土石坝的建设周期缩短、造价降低，使得土石坝的造价低于混凝土重力坝，从而得到快速的发展。1950 年以前，全世界 15m 及以上坝高的坝中，混凝土坝占 38%，但 1951~1977 年期间降至 25%，1978~1982 年期间进一步降至 16.5%。而在上述时期内，混凝土拱坝所占比例是增加的，故混凝土重力坝所占比例下降得更为严重。然而，混凝土重力坝承受洪水漫顶破坏的能力强，具有较好的耐久性，无须在坝外另行布置专门的溢洪建筑物以及修建过程对环境的破坏较小等优越性是土石坝无法与之相比的。因此，坝工专家们为寻求快速、经济建造混凝土重力坝进行了不懈的努力。

1964 年，意大利建成了 172m 高的阿尔普格拉（Alpe Gera）坝。在该坝施工时，自卸卡车从拌和厂将混凝土直接运至施工仓面卸料，用推土机平仓，用悬挂于推土机后部的插入式振捣器组进行振捣，像土石坝施工一样，从坝的一端向另一端一层层地浇

筑,在坝体规定位置用切缝机切割振捣后的混凝土形成横缝。该坝通过减少坝体内部混凝土的水泥用量达到降低大体积混凝土浇筑的单价。由于采用土石坝施工方法水平浇筑贫混凝土以代替混凝土坝传统的垂直柱状浇筑方法,因而加快了施工速度。1965年,加拿大魁北克曼尼科根一号(Manicouagan I)坝中两座18m高的重力翼墙,用垂直滑模施工方法浇筑富混凝土形成翼墙上游面,下游面用预制混凝土块砌筑。翼墙内部使用贫混凝土,推土机平仓、插入式振捣器振捣。根据魁北克水电局估计,这比常规方法浇筑翼墙降低造价20%,缩短工期2/3。

1970年,在美国加利福尼亚州阿斯劳玛尔(Asilomar)召开的“混凝土坝快速施工”会议上,意大利人提出的关于阿尔普格拉坝施工的报告引起了人们的震动。但是,对于碾压混凝土坝的发展有启发的还是加利福尼亚大学的杰罗姆·拉斐尔(Jerome Raphael)发表的《最优重力坝》一文。他提出了基于水泥土理论及应用的许多观点。他建议使用高效率、大容量的土石方运输机械和压实机械施工,并用水泥、砂砾石混合料作为筑坝材料。他认为,水泥固结砂砾石材料的抗剪强度较高,从而可使坝的断面比典型的土石坝断面小很多;因此使用类似于土石坝施工的连续浇筑方法,与传统的混凝土坝施工方法相比,能缩短施工时间并减少施工费用。1972年,在阿斯劳玛尔召开的“混凝土坝经济施工”会议上,美国田纳西流域管理局的罗伯特·W. 康农(Robert W. Cannon)发表了题为《用土料压实方法建造混凝土坝》的论文,进一步发展了拉斐尔的设想。康农介绍了在泰斯·福特(Tims Ford)坝试验块上,无坍落度的贫混凝土用自卸卡车运输、前端装载机铺筑,振动碾压实的试验结果。1973年,在第十一届国际大坝会议上,莫法特(A. I. B. Moffat)宣读了题为《适用于重力坝施工的干贫混凝土研究》的论文。他推荐将早在20世纪50年代英国路基上使用的干贫混凝土用于修筑混凝土

坝,用筑路机械将其压实。他预计,坝高 40m 以上的坝,造价可降低 15%。

碾压混凝土用于筑坝,于 1960~1961 年期间在我国台湾省石门坝的心墙上曾用过。但对于碾压混凝土坝的发展产生过重要影响的是巴基斯坦塔贝拉 (Tarbela) 坝的隧洞修复工程。1974 年,该坝的泄洪隧洞出口被洪水冲垮,修复工作必须在春季融雪之前完成,于是采用碾压混凝土进行修复。在 42d 时间里铺筑了 35 万 m^3 碾压混凝土,日平均铺筑量 8 300 余 m^3 ,最大日铺筑强度达 1.8 万 m^3 。这是迄今世界上最高的碾压混凝土铺筑强度,充分显示了碾压混凝土施工快速、经济的特点。

碾压混凝土筑坝从概念的形成到成为现实,仅仅不足十年时间。1980 年,第一座碾压混凝土坝——日本岛地川 (Shimajigawa) 坝诞生。该坝高 89m,上下游面用 3m 厚的常态混凝土作防渗或保护层,坝体内部碾压混凝土中胶凝材料用量为 $120\text{kg}/\text{m}^3$,其中粉煤灰占 30%。1982 年,美国建成世界上第一座全碾压混凝土重力坝——柳溪 (Willow Creek) 坝。该坝高 52m,坝轴线长 543m,不设纵横缝。坝体上游面碾压混凝土水泥用量为 $104\text{kg}/\text{m}^3$,下游面碾压混凝土胶凝材料用量为 $151\text{kg}/\text{m}^3$,其中粉煤灰 $47\text{kg}/\text{m}^3$,坝体内部碾压混凝土胶凝材料用量仅为 $66\text{kg}/\text{m}^3$,其中粉煤灰占 $19\text{kg}/\text{m}^3$ 。该坝采用 30cm 厚的薄层连续铺筑上升方法,在 17 个星期里完成了 33.1 万 m^3 碾压混凝土的铺筑,比常态混凝土重力坝缩短工期 1~1.5 年,造价仅相当于常规混凝土重力坝的 40%、堆石坝的 60% 左右。柳溪坝的建设,充分显示了碾压混凝土坝所具有的施工快速和经济的巨大优势。它的建成极大地推动了碾压混凝土坝在世界各国的迅速发展。

我国对碾压混凝土筑坝技术的研究开始于 1978 年。1979 年开始室内试验,1980 年和 1981 年先后在四川省龚咀水电站的混

凝土路面和预制构件场进行了现场碾压试验。1983 年又在福建厦门进行野外碾压试验, 为沙溪口坝提供资料, 胶凝材料中粉煤灰掺量高达 50%。1984 年及 1985 年正式将碾压混凝土用于沙溪口坝的纵向围堰及电厂开关站挡墙施工。1985 年在长江葛洲坝船闸下导墙基础上也进行了两次现场碾压试验。此后, 铜街子坝施工水泥罐基础和牛日溪沟副坝也先后使用了碾压混凝土。在广泛试验的基础上, 我国第一座碾压混凝土坝——福建省大田县坑口坝仅用 6 个月的时间就于 1986 年 5 月建成。

坑口坝的成功建设, 为我国快速建坝开创了新的途径。在筑坝试验过程中, 证实了我国独特的高掺粉煤灰、低水泥用量碾压混凝土的优越性; 总结了碾压混凝土坝设计、施工和质量控制方面的经验; 极大地调动了我国坝工界建造碾压混凝土坝的积极性。自坑口坝建成以后, 碾压混凝土坝在我国获得了迅速的发展。

截至 1998 年底, 全世界已建成 184 座碾压混凝土坝, 有 25 座正在施工, 具体分布情况见表 0-1。近 20 年来, 我国碾压混凝土坝的建设发展迅速, 截至 2003 年 10 月底, 已建成碾压混凝土坝 50 座, 在建碾压混凝土坝 16 座, 正在设计或规划中的碾压混凝土坝 24 座。此外, 还有大量的碾压混凝土围堰成功地应用于水利水电工程中, 详细情况见表 0-2。

经过近 20 年的研究和建设实践, 我国已形成适合国情的碾压混凝土设计规范、碾压混凝土试验规程、碾压混凝土施工规范及验收规程等文件。碾压混凝土坝的坝型已从重力坝逐渐扩展到重力拱坝和薄拱坝。已建成的普定坝是当时世界上已建成的最高碾压混凝土重力拱坝; 已建成的沙牌坝是目前世界上最高的碾压混凝土重力拱坝; 已建成的龙首坝是目前世界上最高的碾压混凝土薄拱坝; 正在建设的龙滩坝是当今世界上最高的碾压混凝土重力坝。我国的碾压混凝土筑坝技术已被世界同行专家认为具有世

界领先水平。

表 0-1 世界各国已建、在建碾压混凝土坝统计表
(截至 1998 年底)

(座)

洲	国家	已建成	在建	合计	洲	国家	已建成	在建	合计
亚洲	中国	30	10	40	欧洲	西班牙	21	0	21
	日本	32	4	36		法国	6	0	6
	吉尔吉斯斯坦	1	0	1		希腊	3	0	3
	泰国	1	0	1		意大利	0	1	1
	合计	64	14	78		罗马尼亚	2	0	2
北美洲	美国	29	0	29	欧洲	俄罗斯	1	0	1
	加拿大	2	0	2		合计	33	1	34
	合计	31	0	31	非洲	阿尔及利亚	0	1	1
中美洲和南美洲	阿根廷	1	0	1		安哥拉	1	0	1
	巴西	14	2	16		厄立特里亚	0	1	1
	智利	1	0	1		摩洛哥	8	1	9
	哥伦比亚	0	2	2		南非	13	1	14
	多米尼亚	1	0	1		合计	22	4	26
	法属圭亚那	1	0	1	大洋洲	澳大利亚	9	0	9
	洪都拉斯	2	0	2		印度尼西亚	0	1	1
	墨西哥	5	0	5		合计	9	1	10
	委内瑞拉	0	1	1		总计	184	25	209
	合计	25	5	30					

碾压混凝土材料、结构与性能

表 0-2 我国的碾压混凝土坝 (截至 2003 年 10 月底)

序号	坝名	所在省	坝高 (m)	坝型	建成年份 (或建设阶段)
1	坑口	福建	56.8	重力坝	1986
2	龙门滩	福建	57.5	重力坝	1989
3	天生桥二级	广西、贵州	61.7	重力坝	1989
4	马回	四川	27.0	重力坝	1989
5	潘家口下库	河北	25.0	重力坝	1989
6	铜街子	四川	88.0	重力坝	1990
7	荣地	广西	53.0	重力坝	1991
8	万安	江西	68.0	重力坝	1992
9	广蓄下库	广东	43.5	重力坝	1992
10	岩滩	广西	111.0	重力坝	1992
11	水口	福建	100.0	重力坝	1993
12	锦江	广东	68.0	重力坝	1993
13	大广坝	海南	57.0	重力坝	1993
14	普定	贵州	75.0	重力拱坝	1993
15	温泉堡	河北	48.5	重力拱坝	1994
16	水东	福建	63.0	重力坝	1994
17	山仔	福建	64.6	重力坝	1994
18	观音阁	辽宁	82.0	重力坝	1995
19	溪柄一级	福建	63.5	薄拱坝	1995
20	百龙滩	广西	28.0	重力坝	1996
21	石漫滩	河南	40.0	重力坝	1997
22	满台城	吉林	37.0	重力坝	1997
23	双溪	广东	52.0	重力坝	1997

续表

序号	坝名	所在省	坝高 (m)	坝型	建成年份 (或建设阶段)
24	桃林口	河北	82.0	重力坝	1998
25	石板水	重庆	83.0	重力坝	1998
26	碗窑	浙江	79.0	重力坝	1998
27	高坝洲	湖北	57.0	重力坝	1999
28	红坡	云南	55.2	重力拱坝	1999
29	松月	吉林	31.1	重力坝	1999
30	花滩	四川	85.3	重力坝	1999
31	涌溪三级	福建	81.5	重力坝	1999
32	江垭	湖南	128.0	重力坝	2000
33	长顺	湖北	63.0	重力坝	2000
34	汾河二库	山西	87.0	重力坝	2000
35	白石	辽宁	50.3	重力坝	2000
36	杨溪水 (Ⅲ)	广东	46.0	重力坝	2000
37	小洋溪	贵州	43.6	重力坝	2000
38	小洋溪副坝	贵州	缺数据	重力坝	2000
39	棉花滩	福建	111.0	重力坝	2001
40	龙首	甘肃	80.0	双曲拱坝	2001
41	石门子	新疆	109.0	拱坝	2001
42	山口 (Ⅲ)	广东	57.4	重力坝	2001
43	玉石	辽宁	50.0	重力坝	2001
44	大朝山	云南	106.0	重力坝	2002
45	阎王鼻子	辽宁	34.5	重力坝	已建成
46	沙牌	四川	129.0	重力拱坝	2002