



普通高等教育“十二五”规划教材

高等水工结构

解宏伟 陈 曦 编 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

高等水工结构

解宏伟 陈 曦 编 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共分4章,全面系统地论述了碾压混凝土坝、混凝土面板堆石坝、水工混凝土温度应力与温度控制、重力坝应力计算方法和应力控制标准,并对其设计方法和计算技术通过工程实例进行了分析。

本书可供从事水利工程设计、施工、监理和管理的科技人员参阅,也可作为大专院校有关专业教师、研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高等水工结构 / 解宏伟, 陈曦编著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-1164-4

I. ①高… II. ①解… ②陈… III. ①水工结构—高等学校—教材 IV. ①TV3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第191346号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 高等水工结构
作 者	解宏伟 陈曦 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	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.75印张 326千字
版 次	2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	28.00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

前 言

中国大坝建设历史悠久，已有 2500 多年。随着水利水电事业的开发，大坝建设迅猛发展。根据国际大坝委员会统计，我国已建、在建高于 15m 及以上的大坝占全世界的 53%，特别是近 10 年来，高坝大库巨型水电站日益增多，取得巨大成就，为世界瞩目。在 21 世纪，大坝建设继续发展，将达到新的更高水平。

目前，国内外都认为碾压混凝土坝和面板堆石坝，是有发展前景和发展比较快的两种坝型。20 世纪 80 年代以来，这两种坝型在中国都有相当迅速的发展。

目前世界上所建的大坝数量已非常多，而且许多国家新建的坝越来越少，在这种情况下，国际大坝委员会近几年大坝会议讨论的题目，几乎每次都有关于大坝安全、大坝老化、大坝环境、新材料、新技术、新结构等方面的内容。

本书是根据我国坝工建设实际，结合培养应用型人才的需要，在总结教学经验和吸收以往同类教材的基础上编写的。

本书共 4 章，第 1 章、第 3 章由解宏伟编写，第 2 章、第 4 章由陈曦编写。在本书的撰写过程中，得到了清华大学陈永灿教授、李庆斌教授、金峰教授，西安理工大学陈尧隆教授、李守义教授、张晓飞博士，青海省水利厅张生福总工程师的关心、支持和指导；同时得到了青海大学李若东教授、孙凡副教授（博士）、陶凤铃副教授、袁晓伟高级实验师的帮助，特别是刘洋君、贺巨龙、李可也、楚段段等硕士生为本书的编写做了大量而繁琐的工作，在此一并深表谢意。

本书编写过程中参阅了大量的文献资料，得到很多启发，在此对所引用资料涉及的专家学者表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中谬误难免，敬请读者批评指正。

编 者

2013 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 碾压混凝土坝	1
1.1 概述.....	1
1.2 碾压混凝土坝的设计.....	9
1.3 碾压混凝土坝施工新技术.....	25
1.4 碾压混凝土拱坝.....	40
第 2 章 混凝土面板堆石坝	61
2.1 概述.....	61
2.2 混凝土面板堆石坝的设计.....	75
2.3 深覆盖层上的面板堆石坝.....	87
2.4 面板堆石坝的泄洪及放空设施.....	92
2.5 面板堆石坝的施工导流及度汛.....	98
2.6 面板堆石坝的变形.....	104
2.7 复合土工膜面板堆石坝.....	111
2.8 面板堆石坝的稳定分析.....	115
2.9 面板堆石坝应力和变形分析.....	118
2.10 严寒地区混凝土面板堆石坝施工技术.....	126
2.11 我国混凝土面板堆石坝设计与施工经验.....	130
第 3 章 水工混凝土温度应力与温度控制	133
3.1 概述.....	133
3.2 混凝土工程中温度应力的意义.....	138
3.3 温度场和温度应力的分析方法.....	140
3.4 温度应力的发展过程及类型与温控防裂措施.....	143
3.5 混凝土的温度场.....	145
3.6 混凝土的温度应力.....	149
3.7 计算温度场和温度应力的有限单元法.....	154
3.8 计算温度应力的约束系数法.....	172

3.9 温度应力的控制	175
3.10 混凝土温度控制标准	176
3.11 混凝土温度控制实例	180
第4章 重力坝应力计算方法和应力控制标准	194
4.1 概述	194
4.2 重力坝应力计算方法综述	194
4.3 重力坝应力计算的材料力学法	196
4.4 重力坝应力计算的有限元法	197
参考文献	210

第 1 章 碾 压 混 凝 土 坝

1.1 概 述

1.1.1 碾压混凝土坝的发展概况

碾压混凝土筑坝技术是最近 20 多年来发展起来的一项筑坝新技术。这项新技术最早是在 1960 年使用于我国台湾石门坝的围堰上，作为其防渗体材料。1970 年美国加州大学拉斐尔 (Raphael) 教授首次提出碾压混凝土的概念，1972 年美国陆军工程师团和田纳西河流开发局分别做了试验，并写成报告。1975 年在巴基斯坦的塔贝拉 (Tarbela) 工程泄洪洞出口消力池修复工程中采用。1976 年在日本的大川坝的上游围堰也使用了碾压混凝土。世界上第一座用碾压混凝土筑坝的是在 1978 年 9 月修建的日本的岛地川坝，该坝为高 89m 的碾压混凝土重力坝，于 1980 年建成。随后世界上许多国家都相继开展了这个领域的研究工作，碾压混凝土的筑坝技术已越来越多地得到世界各国坝工界的重视。我国自 1986 年建成第一座碾压混凝土坝 (福建坑口坝) 以来，也大力研究发展该项新技术。

碾压混凝土筑坝技术改变了柱状浇筑的常规混凝土坝用振捣器插入混凝土振捣密实的方法，而是用振动碾压机在层面振动碾压，大仓面碾压施工。碾压混凝土筑坝材料采用超干硬性无坍落度混凝土，为使压实振动波易传到层底，每层上下部压实均匀，混凝土摊铺碾压的层厚一般为 30cm。由于碾压混凝土在成型条件、配合比的组分比例、高掺量混合材料的应用以及凝聚结构等方面，都与常态混凝土有明显差别。

碾压混凝土坝是将常态混凝土坝的结构和碾压土石坝的施工技术等优点集中于一体，该项新技术具有节省水泥、施工简便、缩短工期、造价低廉等优点。但是，由于碾压混凝土筑坝是采用通仓薄层浇筑方法，与传统的柱状浇筑方法有明显的区别，因此，在水化热、散热条件和方式等方面与常态混凝土筑坝有重大差别。由于碾压混凝土单位体积混凝土所用水泥用量比常态混凝土少，绝热温升也将较低，这是一个有利的条件。但是，碾压混凝土坝不能像常规混凝土坝那样埋设冷却水管散热，且不能像常规混凝土坝施工中柱状块浇筑所具有的那么大的散热表面积，这是温控方面的不利条件。因此，由于筑坝方法的改变而引起的一系列关键技术问题需进行科技攻关研究。坝越高，引起的相关技术问题越复杂，坝的高度体现了一个国家的综合科学技术水平。

随着对碾压混凝土筑坝技术研究的不断深入，目前已在全世界得到广泛应用，坝高也在逐步提高。据统计，当前世界上已建及在建的坝高在 100m 以上的碾压混凝土高坝共有 29 座。它们分别分布在 8 个国家，日本有 12 座，中国有 10 座，哥伦比亚有 2 座，其他 5 座分别在安哥拉、墨西哥、智利、阿尔及利亚和俄罗斯。在这 29 座坝中，最早建成的是日本的玉川坝，高 100m，1990 年建成。目前已建成的最高的碾压混凝土坝是日本的浦山坝，高 156m，1999 年建成。当前在建的坝高超过浦山坝的有两座，一座是哥伦比亚的拉

麦尔坝,坝高 188m,计划 2003 年建成;另一座就是我国 2001 年开工的龙滩坝。龙滩坝计划分两期建成,一期坝高 192m,最终坝高 216m,最近主张一次建成的呼声也比较高,原计划一期已于 2009 年建成,是迄今为止世界上最高的一座碾压混凝土重力坝。

随着碾压混凝土坝的建设和发展,在碾压混凝土重力坝的设计、施工方面已有较成熟的经验,但将碾压混凝土筑坝技术用于建筑拱坝(尤其是高拱坝)还处于探索、实践阶段。在这 29 座碾压混凝土高坝中,就坝型而言,绝大多数是重力坝,只有 3 座是拱坝,全在我国。其中沙牌拱坝,高 132m,是当前世界上最高的碾压混凝土拱坝。

我国从 1978 年开始对碾压混凝土筑坝技术进行研究,在大量试验研究的基础上,将其广泛应用于工程实际,如 1986 年建成了我国第一座高 58.6m 的碾压混凝土重力坝。我国目前已建和在建的碾压混凝土坝约 40 座。经过近 20 年的努力,我国在碾压混凝土材料性能研究和碾压混凝土坝设计、现场施工组织及施工工艺等方面积累了丰富的经验,正在形成较为配套的具有中国特色等压混凝土筑坝技术。

我国 1986 年建成第一座碾压混凝土坝(福建坑口坝,高 58.6m),至 2010 年底,我国已建成碾压混凝土重力坝 26 座,在建的 14 座。我国已建及在建的坝高在 100m 以上碾压混凝土坝见表 1-1-1。

表 1-1-1 我国已建及在建的坝高在 100m 以上碾压混凝土坝

坝名	地点	河流	坝高 (m)	坝顶长 (m)	坝型	底宽 (m)	顶宽 (m)	坝体混凝土量 (万 m ³)		库容 (亿 m ³)	装机 (万 kW)	开工 年份	建成 年份
								总量	其中碾压 混凝土				
岩滩	广西巴马 /都安	红水河	110	525	重力坝	73	20	63.6	37.6	33.5	121	1985	1993
水口	福建闽清	闽江	101	791	重力坝	68	18	171	60	23.4	140	1987	1995
江垭	湖南慈利	澧水	131	327	重力坝	105	12	130	105	17.4	30	1995	1999
棉花滩	福建永定	汀江	111	308.5	重力坝	84.5	7	61.5	50	20.3	60	1997	2001
石门子	新疆玛纳斯	塔西河	109	187	拱坝	30	5	20	16.1	0.8	0.3	1998	2001
沙牌	四川汶川	草坡河	132	238	拱坝	28	9.5	41.5	39.3	0.18	3.6	1995	2003
大朝山	云南云县/ 景东	澜沧江	111	460	重力坝	115	8	112.7	75.7	9.4	135	1997	2003
蔺河口	陕西岚皋	岚河	100	311	拱坝	27.1	6	29.4	22.9	1.47	7.2	1999	2004
龙滩	广西天峨	红水河	192	792	重力坝	168	37	532	339	162	420	2001	2009
百色	广西百色	右江	130	720	重力坝	102	12	269	210	56.6	54	2001	2006

1.1.2 碾压混凝土材料特点及其施工技术

1.1.2.1 碾压混凝土材料特点

碾压混凝土是由水泥、混合材料、水、砂、石子及外加剂等六种材料所组成。水、水泥和混合材料形成胶凝材料浆体,它填充砂子的空隙并包裹砂子颗粒形成砂浆。砂浆填充石子的空隙并把石子包裹起来。为了保证碾压混凝土具有良好的技术性质并保证降低工程造价,必须合理选择组成碾压混凝土的各种原材料。

碾压混凝土属干、贫混凝土，干即材料的用水量少，是超干硬性无坍落度混凝土，贫即材料的水泥用量少，以较大掺量粉煤灰代替水泥，单位体积混凝土水泥用量比常态混凝土少。碾压混凝土的振动压实不同于常态混凝土，它是依靠振动碾逐层振动压实的，为了使碾压混凝土能够经过碾压达到密实并获得设计所要求的强度，都必须通过调整单位胶凝材料浆体的用量来实现。也就是说，通过试验确定混凝土的最优用水量的过程中必须保持一定的水胶比 $[W/(C+F)]$ 和粉煤灰掺量 $[F/C$ 或 $F/(C+F)]$ 。碾压混凝土的配合比，是指碾压混凝土各组或材料相互间的配合比例。配合比设计的任务，实质上就是在满足碾压混凝土工作度、强度、抗渗性与耐久性，以及尽可能经济等基本要求，比较合理地确定水泥、粉煤灰、水、砂和石子（分别以 C 、 F 、 W 、 S 、 G 等符号表示）五项材料用量之间的四个对比关系。即水胶比 $[W/(C+F)]$ ，灰胶比 $[F/(C+F)$ 或 $F/C]$ ，砂率 $[S/(S+G)]$ ，胶砂比 $[(C+F+W)/S]$ ，正确地确定这四个参数，就能使碾压混凝土能满足各项技术指标要求。因此，碾压混凝土配合比设计的根本出发点应该是：胶凝材料浆体最大限度地填满细骨料间的空隙并包裹细骨料颗粒；形成密实的砂浆，砂浆最大限度地填满混凝土拌和物中粗骨料间的空隙并包裹粗骨料颗粒，形成均匀密实的混凝土。配合比设计方法采用“水灰比定则”，还必须考虑现场的施工设备条件与施工方法，如运输、平仓、铺料方法、振动碾的功率与各项参数是否与配合比相适应，一般通过现场试验碾压验证。

碾压混凝土作为水工大体积混凝土，由于其材料特性，不能像一般常态混凝土用坍落度来衡量稠度，而是用振动台式稠度试验（简称 VC 试验）所得的值（Vibrating Compaction 值，简称 VC 值）来衡量其稠度。研究表明，在保持水胶比不变的条件下，VC 值随单位用水量的增大而减小，在单位用水量保持不变时，VC 值随水胶比的增大而减小；在水胶比相同的条件下，达到相同的 VC 值，人工骨料的用水量比天然骨料多；在水胶比和胶凝材料用量保持不变的条件下，VC 值有极小值，砂率有最优值；当砂率大于最优砂率时，VC 值随砂率的增加而减小。当混凝土原材料得到准确计量时，现场对 VC 值进行检测和控制，能及时发现施工中的失控因素，确保碾压混凝土配合比的及时调整，从而使碾压混凝土的质量得到保证。

根据我国试验和工程实际经验，碾压混凝土材料配合比如下。

胶凝材料：水泥（C）+粉煤灰（F）

水泥（C）：50~60kg/m³

粉煤灰（F）：90~100kg/m³

用水量（W）：80~100kg/m³

水胶比： $W/(C+F)=0.5\sim 0.7$

胶凝材料： $(C)+(F)=140\sim 160\text{kg/m}^3$

灰胶比： $F/(C+F)=0.55\sim 0.65$

砂率：0.28~0.35

最大骨料：80mm

粗骨料用三级配，即 80~40mm，40~20mm，20~5mm

其配比约为 30：40：30

初凝时间：6~8h

横缝间距：15~30m

VC 值：10~15s（碾压混凝土振动碾压的时间）

1.1.2.2 碾压混凝土坝施工技术

我国的碾压混凝土坝施工技术采用大面积薄层连续浇筑的方法。混凝土摊铺和碾压的层厚一般为 30cm，这样可防止骨料分离，压实振动波易传到层底。为保证层间黏结良好，层间允许间隔时间从以下层混凝土拌和物拌和加水时起到上层混凝土碾压完毕为止，需控制在混凝土初凝时间以内，层厚和浇筑的仓面面积受此制约。

碾压混凝土振动碾压遍数约为 6~7 遍，连续浇筑 3~4 层后宜间歇 2~3d。通常仅对施工缝和冷缝采用刷毛，冲洗以后铺设砂浆层的处理方法，对于连续浇筑的碾压混凝土，要求施工层面具有足够的抗渗性和层间黏结强度。

1.1.3 碾压混凝土坝的特点

碾压混凝土筑坝采用在层面上振动碾压的方法，不同于常态混凝土的柱状浇筑法，因而碾压混凝土坝的设计、施工有其自身的特点：

(1) 碾压混凝土筑坝技术改变了常态混凝土筑坝用振捣器插入混凝土振捣密实的方法，而是用振动碾压机在层面振动碾压，大仓面碾压施工。

(2) 该项新技术具有节省水泥、施工简便、缩短工期、造价低廉等优点。

(3) 碾压混凝土属干、贫混凝土，以较大掺量粉煤灰代替水泥，单位体积混凝土所用水泥量比常态混凝土少，其单位体积混凝土散发的水化热要比常态混凝土少，绝热温升也将较低，具有温控简单的有利条件。

(4) 碾压混凝土坝一般只能靠表面散热，且不能像常态混凝土坝施工中柱状块所具有的那么大的散热表面积，这是温控方面的不利条件。

1.1.4 碾压混凝土坝的种类

碾压混凝土筑坝的方式，目前大致有三种主要类型。日本在碾压混凝土坝的断面设计、混凝土的材料的配比、坝体施工工艺以及温度控制方面总结出一套方法，提出日本式的碾压混凝土坝，称为 RCD (Roller Compacted Dam)。欧美各国根据其经验提出的碾压混凝土筑坝方法，称为 RCC (Roller Compacted Concrete)。我国从 1980 年开始在研究应用和发展碾压混凝土筑坝过程中，结合具体的自然条件和我国的施工装备水平，从混凝土材料、施工技术和大坝设计等方面进行分析和论证，解决了一系列的关键性技术问题，开拓了适合我国特点的碾压混凝土筑坝方法，称为 RCCD (Roller Compacted Concrete Dam)。

1.1.4.1 日本的 RCD (Roller Compacted Dam)

日本的 RCD 筑坝技术主要的特点，是采用薄层摊铺、平仓 2~4 层后一次碾压的方法。碾压层高度根据振动压实能量、浇筑能力、温控因素确定，多数采用 75cm。一般碾压层之间间歇约 2~4d，对碾压层面均用刷毛机刷毛、冲洗并铺设砂浆层处理。浇筑程序如下：先在下卧浇筑块顶面铺 15cm 厚水泥砂浆，然后浇筑几层混凝土拌和料，每浇一层，进行平仓，再浇上一层，浇到块顶后一次进行碾压。碾压后的顶面作为水平工作缝，进行凿毛、清洗处理。根据日本的实践经验，RCD 比常态混凝土工程施工速度加快 20%，工程费用节约 20% 左右，从已建成的碾压混凝土坝看，工程尚未发生严

重漏水。

施工特点是：用 7t 振动碾碾压，碾压层高度 50cm 时，一般振动碾压 6 遍；碾压层高度 75~100cm 时，一般振动碾压 8~10 遍。RCD 的浇筑和碾压一般分条进行，浇筑条宽约 10m。浇到块顶一次碾压，碾压条宽 2m，两条搭接宽为 20cm。

1.1.4.2 美国的 RCC

欧美的 RCC 在许多方面和 RCD 相同，但在 RCC 筑坝的过程中，根据具体的工程和承建单位的情况，也有许多不同的做法。

1. 美国陆军师团修建的 RCC 坝

美国陆军师团 1982 年开始修建的 RCC 坝是柳溪坝 (Willow Creek Dam)，坝高 52m。为充分发挥碾压混凝土的优点，胶凝材料 $66.5\text{kg}/\text{m}^3$ ，其中水泥 $47.5\text{kg}/\text{m}^3$ ，粉煤灰 $19\text{kg}/\text{m}^3$ ，灰胶比 0.29；用水量 $60\text{kg}/\text{m}^3$ ，水灰比 0.9，其拌和料十分干硬；浇筑层厚 30cm，层面未处理，连续浇筑和碾压，坝体未设横缝，大坝建成后，碾压混凝土强度和抗渗性虽然满足要求，但在排水廊道和下游面立即发现层间接缝漏水，抗剪强度较小。经处理后，大坝能正常应用，但仍有漏水。在后来的麋溪坝 (Elk Creek Dam，坝高 76m) 建设中对材料配比、施工技术和坝体设计作了改进，采取了针对性的两种措施：一是在上下游坝面设常态混凝土防渗体和保护层，厚度为 1m，并在防渗层中设钢筋网；二是对层面进行处理，碾压混凝土材料按强度要求确定，并适当增加胶凝材料用量，改善拌和物的压实性能。

施工特点是：用 10t 振动碾碾压 6~8 遍，包括第一遍无振碾压，浇筑层厚 30cm，每一层新混凝土前，不论间歇时间长短，必须用高压水枪冲洗下卧混凝土层面，把层面冲洗干净后，铺 12.5mm 后的水泥砂浆。

2. 美国垦务局修建的 RCC 坝

美国垦务局修建的第一座 RCC 坝是 1985 年修建的上静水坝 (Upper Still Water Dam)，坝高 87m，为使层间黏结好，采用二级配混凝土。胶凝材料用量 $254\text{kg}/\text{m}^3$ ，其中水泥 $80\text{kg}/\text{m}^3$ ，粉煤灰 $174\text{kg}/\text{m}^3$ ，灰胶比 0.69，用水量 $101\text{kg}/\text{m}^3$ ，水胶比 0.4，用砂 $682\text{kg}/\text{m}^3$ ，粗骨料 $1990\text{kg}/\text{m}^3$ ，砂率 0.34。浇筑层厚 30cm，上游坝面设常态混凝土防渗层。运行期间水平层面接缝没有漏水，层面抗剪强度也未减弱。但建成后第一个冬季，由坝顶开始产生裂缝，向下发展到坝面，有 16 条裂缝贯入坝体，裂缝平均间距 34m，有漏水。

施工特点是：用双辊振动碾碾压 5~6 遍，包括第一遍无振碾压，浇筑层厚 30cm。混凝土大面积连续浇筑 3~4 层后间歇，顶面按水平工作缝处理。

1.1.4.3 中国的 RCCD

中国吸取了 RCD 和 RCC 的经验与教训，通常采用高掺量粉煤灰的中等胶结材料用量混凝土，坝体少设横缝，不设纵缝，连续式浇筑等适合我国条件的施工方法，使我国的碾压混凝土筑坝技术达到了较高的水平。中国的 RCCD 以及日本的 RCD 和欧美的 RCC，虽它们有许多共同点，但各自适应本国国情。

根据实验室试验和原型观测的结果，我国 RCCD 混凝土有如下特性。

(1) 强度增长缓慢，后期继续增长。由于粉煤灰掺量较大，碾压混凝土水硬化缓慢，因而强度增加也慢。但后期强度的增加远高于不加粉煤灰的混凝土，其 90d 和 180d 龄期

的抗压强度响应为 28d 龄期抗压强度的 140%~200% 和 170%~230%。由于早期强度较低, 施工期要加强养护。

(2) 水硬化发热量少, 发热缓慢。碾压混凝土坝内最大温升约为 10~15℃, 发生在龄期 40~80d, 并受环境温度的影响较大。相对来说, 坝内温度分布较均匀, 温度梯度较小, 温度应力也较小。但对大体积混凝土, 尤其是环境温度较高时, 温度应力还会超过混凝土抗拉强度, 因此需要采取防裂措施。

(3) 抗裂性能好。这种混凝土的后期抗拉强度增加比例较抗压强度增加比例大, 抗拉强度与抗压强度的比率较高, 为 0.12~0.14。而混凝土的后期弹性模量为 28 龄期的 130%~150%, 相对弹性模量增加缓慢, 此外, 由于用水量少, 干缩系数也小, 有利于混凝土抗裂。

(4) 水泥水硬化效率高。混凝土中粉煤灰用量多, 不超过 60% 时, 每公斤水泥能获得的混凝土抗压强度效率较高。试验表明, 90d 龄期的抗压强度效率可达到 0.3~0.4MPa/kg, 约为普通混凝土的一倍。

(5) RCCD 层间接缝做得好的话, 其黏结性能良好, 抗剪强度、弹性模量和不透水性与碾压混凝土本体接近。这是因为碾压混凝土有足够多的胶结料砂浆。早期国外的 RCC, 胶结料砂浆少, 混凝土分离, 不注意碾压时下卧层混凝土是否初凝, 所以层间结合差, 发生漏水。我国 RCCD 克服了这些缺点, 但层间黏结强度离散性较大, 沿层面切向渗透系数往往大于碾压混凝土本体的渗透系数。

以上从总体上分析, 碾压混凝土的性能可满足高坝建设的要求。

1.1.5 三种碾压混凝土坝的各自特点

1.1.5.1 日本的 RCD

(1) 结构型式: 金包银式。金包银式是日本采用的最典型的做法。为了上游坝面的防渗和下游坝面的保护以及坝基面的粘接和填平, 在碾压混凝土坝上游面、下游面和与坝基接触面上均设有有一定厚度的常态混凝土, 一般上游面常态混凝土厚度为 3m, 下游面为 2~2.5m, 坝基部分为 1.5~3m。

(2) 富胶凝材料。RCD 的胶凝材料少, 其中水泥较多, 粉煤灰较少, VC 值略大, 较干硬。RCD 的胶凝材料用量及其他参数如下。

胶凝材料: 水泥 (C) + 粉煤灰 (F) 120~130kg/m³

水泥: 95~100kg/m³

粉煤灰: 25~30kg/m³

用水量: 90~100kg/m³

水灰比: 0.75~0.85

灰胶比: 20%~30%

砂率: 0.30~0.34

最大骨料: 80mm

初凝时间: 6~8h

横缝间距: 15m

VC 值: 15~20s

碾压层厚度：50~100cm

(3) 施工特点。薄层浇筑 3~4 层后，一次碾压，浇筑层厚 0.75~1.0m。

1.1.5.2 美国的 RCC

(1) 结构型式：金包银式。对于高、中坝一般采用金包银型式，这样可起防渗和保护作用，提高耐久性，而振动碾可不撞击模板，使混凝土振捣密实，又不影响内部混凝土的施工。

(2) 胶凝材料。RCC 的胶结料、水泥、粉煤灰比 RCD 略多，VC 值最大，很干硬。RCC 的胶凝材料用量及其他参数如下：

水泥 (C) + 粉煤灰 (F) 130~140kg/m³

水泥：65~70kg/m³

粉煤灰：65~70kg/m³

用水量：90~100kg/m³

砂率：0.30~0.34

最大骨料：50~75mm

初凝时间：6~8h

横缝间距：50~150m

VC 值：15~20s

碾压层厚度：30cm

(3) 施工特点。薄层浇筑，单层浇筑并碾压，浇筑层厚 0.30m。

1.1.5.3 中国的 RCCD

(1) 结构型式。对于高坝；一般采用金包银式或变态混凝土的结构型式；对于中坝上游面防渗体，RCCD 采用胶凝材料较多的二级配碾压混凝土，其防渗效果也较好；对于低坝和围堰则可采用全碾压混凝土坝或上游坝面设防渗薄膜。

中低坝：全碾压混凝土或防渗层

(2) 胶凝材料。RCCD 的胶结料、水泥、粉煤灰比 RCD 和 RCC 多，VC 值小，见表 1-1-2。RCCD 的胶凝材料用量及其他参数如下：

水泥 (C) + 粉煤灰 (F) 140~160kg/m³

水泥：50~60kg/m³

粉煤灰：90~100kg/m³

用水量：80~100kg/m³

砂率：0.30

最大骨料：80mm

初凝时间：6~8h

横缝间距：15~30m

VC 值：10~15s

碾压层厚度：30cm

(3) 施工特点。与 RCC 相同，薄层浇筑，单层浇筑并碾压，浇筑层厚 0.30m，见表 1-1-3。国内外几座碾压混凝土坝胶凝材料用量见表 1-1-2。

第 1 章 碾 压 混 凝 土 坝

表 1-1-2

国内外几座碾压混凝土坝胶凝材料用量

单位: kg/m³

工 程 名 称	胶凝材料用量	水 泥	粉 煤 灰
坑口重力坝 (中)	150	60	90
岩滩重力坝 (中)	150	55	95
水口重力坝 (中)	160	65	95
观音阁重力坝 (中)	130	72	58
上静水重力坝 (美)	245	76	169
柳溪重力坝 (美)	66	47	19
盖尔斯威尔 (美)	104	53	51
温彻斯特 (美)	103	70	33
岛地川重力坝 (日)	120	84	36
大川 (日)	120	96	24
玉川 (日)	130	91	39

美国、日本和中国三国碾压混凝土坝和特性见表 1-1-3。

表 1-1-3

三种碾压混凝土坝的比较

比 较 项 目	RCCD	RCD	RCC		
			美国垦务局	美国陆军师团	
材 料	水泥 C (kg/m ³)	50~60	96~100	65~70	70
	粉煤灰 F (kg/m ³)	90~100	25~37	65~70	33
	胶结料 C+F (kg/m ³)	140~160	120~180	130~140	103
	灰胶比 F/(C+F) (%)	55~65	20~30	50	32
	用水量 W (kg/m ³)	80~100	90~100	100	75
	水胶比 W/(C+F)	0.5~0.7	0.75~0.85	0.71~0.77	0.73
	砂率	0.3	0.30~0.34	0.34~0.36	
	VC 值 (s)	10~15	15~20	15~20	20
	初凝时间 (h)	6~8	6~8	6~8	4
	最大骨料 (mm)	80	80	50	50~75
	粗骨料级配	3	3	2	2~3
	最大温升 (°C)	10~15	<20		
	减水缓凝剂 (%)	0.5	0.25~0.40	有	有
	施 工	仓面面积 (m ²)	3000~5000	可较大	3000~5000
摊铺层厚度 (cm)		30	16.7~25.0	30	30
碾压层厚度 (cm)		30	50~100	30	30
水平工作缝间隔 (层)		3~4	2~4	3~4	1
浇筑条带宽 (m)		不分	10	不分	不分
振动碾重 (t)		7~11 BW201	7 BW200	双辊 振动碾	10
碾压次数 (含无振碾压) (次)		7~8	7~11	5~6	6~8

续表

比较项目		RCCD	RCD	RCC		
				美国垦务局	美国陆军师团	
设计	坝面型式	高坝	金包银	金包银	金包银	
		中、低坝	全碾压混凝土或其他防渗层			
	常态混凝土防渗层厚度 (m)		>1.5, 抗渗梯度 1/30~1/15	3.0	2~3	1.0 (设钢筋网)
	温度收缩横缝间距	防渗层内 (m)	15~18	15	<60	131~157 (设在地基突变处)
坝体内 (m)		30~45	15			

1.2 碾压混凝土坝的设计

1.2.1 枢纽布置

碾压混凝土枢纽布置的任务,是要解决好各主要建筑物的协调和配置问题。这些建筑物包括:坝体,取水建筑物,泄水排沙建筑物,施工导流建筑物和其他临时性建筑物等。这些建筑物在空间上,施工过程中以及运行中有密切的关系。由于碾压混凝土坝的特殊性,枢纽布置较其他坝型更为复杂。枢纽布置应充分发挥碾压混凝土坝的优越性,尤其是要能适应快速施工的特点。一般应遵循以下原则:

- (1) 碾压混凝土部分要相对集中布置。
- (2) 过坝建筑物不宜布置在碾压混凝土部分,宜布置在常态混凝土部分。
- (3) 导流建筑物宜布置在常态混凝土部分。

对于穿过坝体的引水、泄洪等不宜于碾压施工的结构物,枢纽布置时可考虑布置在两岸或基础垫层的常态混凝土内。RCCD坝可做成溢流坝,但不宜设坝内泄洪孔的埋管等。

施工导流宜采用隧洞和明渠。因碾压混凝土被溢流冷却易产生裂缝。如必须仓面溢流过水,仓面应加保护层,一旦表面裂缝,应予以处理。如需在坝体内设导流底孔,宜布置在常态混凝土坝块内。发电引水管宜用坝基卧管或坝后背管式,坝内管路宜水平布置,放在常态混凝土区域内。

1.2.2 坝体断面设计

碾压混凝土坝断面设计的基本原则是:①满足稳定和强度要求,保证坝体的安全;②工程量小;③运用方便;④便于发挥碾压混凝土快速施工的要求。因而在断面设计中,应把握以下原则:

(1) 坝体断面外形轮廓尽量简单,以利施工,如图1-2-1、图1-2-2所示。

(2) 溢流坝断面为有常态混凝土护面的平滑溢流面如图1-2-5所示。

(3) 坝体的稳定分析和应力分析仍采用常

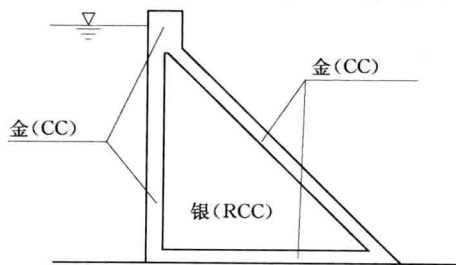


图 1-2-1 金包银分区图

态混凝土坝计算方法（碾压混凝土重力坝分缝分块如图 1-2-3 所示）。

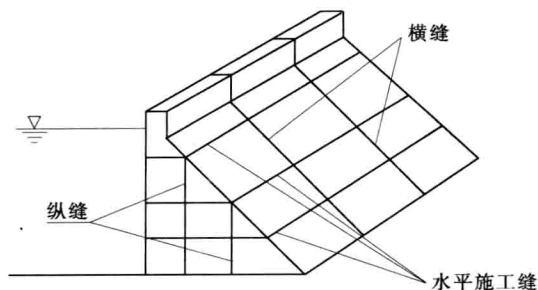


图 1-2-2 常规混凝土重力坝分缝分块图

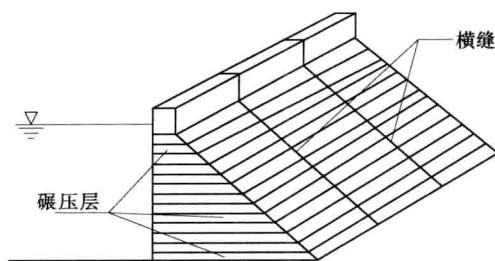


图 1-2-3 碾压混凝土重力坝分缝分块图

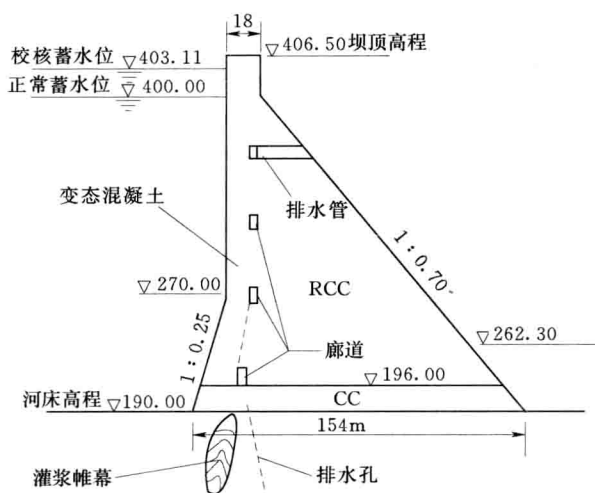


图 1-2-4 龙滩坝剖面图

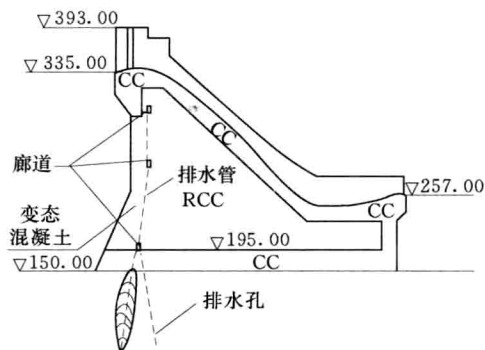


图 1-2-5 龙滩溢流坝剖面图

(4) 廊道应多用途并简化，以利碾压施工，如图 1-2-4 所示。

外形轮廓应力求简单，坝顶最小宽度为 5m。上游坝面宜采用铅直面或斜面。尽管碾压混凝土层间接缝的抗渗性可做得与碾压混凝土本体相近，但为确保坝体不渗漏，一般在上游坝面仍做防渗结构。RCCD 溢流坝一般做成带常态混凝土护面的平顺溢流面。也有用碾压混凝土做成梯级形溢流面的，可以帮助消能，一般用于次要的低坝或围堰，不宜用于重要的坝。

RCCD 重力坝的应力和稳定计算可用常态混凝土坝的计算方法。我国的碾压混凝土层间接缝黏结较好，抗剪强度和弹模与碾压混凝土本身相近，目前由于碾压混凝土层面的抗剪强度和沿层面方向渗透系数的离散性较大，对于重力坝坝体的最不利层面，需进行抗滑稳定计算，至于坝体高度超过目前实践经验范围以外的特高重力坝，要深入研究坝体应力和极限承载能力的分析计算方法，以及相应的设计控制标准。

1.2.3 坝体构造方面

RCCD 坝宜少设或不设温度收缩横缝。当坝较长时应设横缝，其间距由温度应力计算来定。由于碾压混凝土的后期发热，弹模和抗拉强度随龄期增长，温度应力计算是较复杂

的。目前国内外都在研究坝体温度应力计算机程序,以确定横缝间距。已建 RCCD 坝的横缝间距最小为 15~20m,最大的 50~60m。

RCCD 坝一般不宜设纵缝,因纵缝要传力,需做键槽和灌浆系统,较为复杂。但是,如修高坝,由于浇筑碾压的面积限制,及防止产生温度裂缝,必须设纵缝时,可在纵缝两侧用常态混凝土层,纵缝做法同常态混凝土筑坝。因不能埋设冷却水管,通过坝内冷却来提前灌浆,故应加强混凝土预冷,如降低入仓温度等。这个问题需进一步研究。

RCCD 的坝内廊道应多用途并简化。低坝设 1 条,高、中坝设 2~3 条,特高坝还可多设。基础灌浆排水廊道宜设在基础常态混凝土内。坝体排水、检查、观测及交通廊道等,尽可能合并,设在常态混凝土内,与上游常态混凝土防渗层相连。在全碾压混凝土坝的廊道周围可不用常态混凝土。廊道两壁和顶盖可用预制混凝土模板。

RCCD 的某些坝体结构不适宜用碾压混凝土,如闸墩、坝内引水管、坝顶构造等,须配置钢筋,适宜用常态混凝土浇筑,做法同常态混凝土坝。

碾压混凝土强度等级及坝内分区方面。混凝土强度等级及分区应满足大坝设计要力求简单。碾压混凝土强度采用 180d 龄期。坝体内部混凝土强度等级按强度需要确定,不低于 C7.5,外部混凝土强度等级还要考虑抗渗和耐久性,不低于 C10。

坝体内部碾压混凝土宜采用同一种强度等级。对高、中坝可按高程或部位分别采用不同强度等级,但在同一浇筑层内尽量用一种强度等级。

RCCD 坝的基础垫层必须用常态混凝土,厚度约 1.5m,对高坝宜加厚到 3m,以便抗渗。RCCD 坝四周的常态混凝土强度与常态混凝土坝相同。

1.2.4 碾压混凝土坝层面抗剪特性

碾压混凝土一方面由于其胶凝材料相对较少,在运输和铺筑过程中容易分离,使混凝土质量很难达到均匀,从整体上影响坝体的抗渗性;另一方面,由于碾压混凝土采用大面积薄层摊铺,用振动碾压实的施工工艺,层厚一般为 30cm,因此在坝体中形成较多的层面。这些层面的结合性能受到材料性质、混凝土配合比、施工工艺和施工管理水平以及施工现场气候条件等诸多因素的影响。

在工程界,碾压混凝土坝被称为“千层饼”。其层面抗剪性能问题十分突出。通过工程实践和研究,目前对于影响层间黏结的基本因素已经明确,主要的影响层面抗剪性能的因素是:

- (1) 运输和平仓过程中骨料分离。
- (2) VC 值过大或过小。
- (3) 振动压实能量不够。
- (4) 层间间隔时间过长。
- (5) 碾压层厚度过大。

对于高碾压混凝土重力坝的断面设计,层面抗剪断常数在抗滑稳定分析中起控制作用。为了改善碾压混凝土层间黏结状态,提高其和易性、可碾性、密实性、抗渗性和抗剪强度,碾压混凝土在浇筑时需要有足够的胶凝材料。目前,世界上各国碾压混凝土坝中的胶凝材料用量比早期有增加的趋势。