

# 高碾压 混凝土重力坝

中南勘测设计研究院 孙恭尧 王三一 冯树荣 编著

GaoNianYa  
HunNingTu ZhongLiBa



# 高碾压 混凝土重力坝

---

---

中南勘测设计研究院 孙恭尧 王三一 冯树荣 编著



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书主要介绍国家重点科技攻关项目中高碾压混凝土重力坝设计技术的研究成果,针对碾压混凝土筑坝的特点,同时也简要介绍了近年来国内外碾压混凝土筑坝的经验。内容包括碾压混凝土组成材料配合比设计及其性能、碾压混凝土重力坝的布置和构造、高碾压混凝土重力坝的应力和承载能力分析、碾压混凝土重力坝温度场温度徐变应力计算方法和控制温度防止裂缝的工程措施、高气温和多雨环境条件下碾压混凝土重力坝的连续施工技术、碾压混凝土重力坝的铺筑层面处理和快速施工技术 etc。

本书可供水利水电工程技术人员参考,也可供高等学校有关专业师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

高碾压混凝土重力坝/孙恭尧,王三一,冯树荣编著.  
北京:中国电力出版社,2003  
ISBN 7-5083-1741-6

I. 高… II. ①孙…②王…③冯… III. 混凝土坝:碾压土坝:重力坝 IV. TV642.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 073528 号

中国电力出版社出版、发行  
(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)  
汇鑫印务有限公司印刷  
各地新华书店经售

2004 年 3 月第一版 2004 年 3 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 30.75 印张 755 千字  
印数 0001—2000 册 定价 60.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



重力坝是一种古老坝型，以其体型简单、便于泄洪和能适应多种地基条件而被广泛采用。在漫长的坝工发展史上，特别是 20 世纪利用混凝土建坝以来，重力坝起了重要的作用。目前，最高的混凝土重力坝已达到 284m 的高度，三峡混凝土大坝的体积已达 1600 万  $\text{m}^3$ 。

但混凝土坝依靠自重维持稳定，断面不免偏大，材料强度未能充分利用，常规的施工方法使工期较长，造价也常较贵。随着坝高不断增加，拱坝和土石坝成为其强有力的竞争对手。一段时期以来，发达国家重力坝在大坝中的比重明显降低。直至 20 世纪 80 年代，出现了采用超干硬性混凝土和振动碾压实方式的建坝技术，混凝土重力坝又面临了新的飞跃。这种称为“碾压混凝土重力坝”的新坝型，在施工速度和工程造价上较常规混凝土重力坝有明显优势，所以一出现就在世界各国得到迅速推广。我国发展最为迅速，现已成为碾压混凝土坝最多的国家。更重要的是，我国的碾压混凝土重力坝不仅在数量上，而且在建坝高度和科技发展上均居于世界前列。在新世纪中，我国将修建一大批碾压混凝土高坝，其中最突出的是已开工建设的、高达 216.5m 的龙滩水电站大坝，这是迄今为止世界上已建、在建的高碾压混凝土坝之冠。

量变引起质变，要用碾压混凝土修建 200m 以上的高坝，将面临一系列难题，必须综合考虑安全、施工、经济等多方面因素来解决。为此，国家在“八五”、“九五”期间，安排了重点科技攻关项目，组织国内优秀的设计单位和科研院校开展深入试验研究，在总结国内外碾压混凝土筑坝技术的基础上，全面研究了碾压混凝土的特性，高碾压混凝土重力坝的应力分布特点、分析方法和承载能力，控制坝体温度和开裂的措施以及铺筑层面处理和连续施工技术等等，提出了既先进又实用的成果。这才使龙滩碾压混凝土高坝的设计通过各次审查并最终得以胜利完成。这项研究工作历时之久、投入之多、组织力量之广都是不多见的，充分说明国家对科技发展的重视和社会主义制度的优越性。

本书较全面地介绍了上述科研成果。这些成果不仅对龙滩大坝的建设有重大作用，对其他碾压混凝土高坝工程也有重要的参考价值，也能对推动我国碾压混凝土筑高坝技术的发展起积极作用。当然，碾压混凝土毕竟是一种较新材料，用碾压混凝土修建高坝所产生的问题相当复杂，可资借鉴的成熟经验相对较少，还有不少课题在完善和探索之中。希望全国从事碾压混凝土筑坝工作的单位和专家能群策群力、交流提高，通过实践—理论—再实践的正确方式，不断总结，共同为我国新世纪高坝建设做出新的贡献。

中国科学院、中国工程院院士

陆永钟

2002年6月27日于三峡

# 前 言

我国碾压混凝土筑坝技术在水电水利工程中的应用，经历了近 20 年的发展过程，现在我国已经成为世界上建造碾压混凝土坝最多的国家。目前动工兴建的龙滩水电站碾压混凝土重力坝，最大坝高 216.5m，坝体混凝土量 730 万  $m^3$ ，属采用全断面的碾压混凝土筑坝，这在世界上尚无实践经验。“九五”国家重点科技攻关项目论证时，项目主持部门国家电力公司以及有关单位和专家一致认为，龙滩碾压混凝土重力坝筑坝技术超过目前的世界水平，因此必须在过去“八五”科技攻关研究成果和国内外碾压混凝土筑坝经验的基础上，继续开展对一系列重大关键技术问题进行研究的国家级科技攻关，把龙滩碾压混凝土重力坝设计好、建设好，为我国今后更大规模的水电建设服务。为此，“九五”国家重点科技攻关项目“碾压混凝土高坝筑坝技术研究”（1996—220）中，设置了“高碾压混凝土重力坝设计方法的研究”专题。主要研究内容分为四个方面：①高碾压混凝土重力坝应力计算方法和承载能力研究；②碾压混凝土重力坝温度应力分析和防裂措施研究；③高气温及多雨环境条件下碾压混凝土坝施工技术研究；④碾压混凝土坝施工层面处理和坝体快速施工技术研究。研究工作以龙滩碾压混凝土重力坝为依托对象，同时又以“九五”期间兴建的江垭和涌溪三级电站碾压混凝土重力坝施工现场作为试验论证场地，采用现场、室内试验研究与分析计算相结合的方法，考虑新理论和计算分析新方法的运用、设计参数取值标准的选择以及有关判别准则的拟定等一系列设计环节之间的协调和配套原则，取得了适合高碾压混凝土重力坝特点的设计技术科研成果，并已在工程设计或施工中得到应用。近几年我国修建的高碾压混凝土坝逐年增多，科技成果的及时介绍可以更好地为工程建设服务。

随着碾压混凝土筑坝技术被广泛采用，为了促进该项技术的进步和满足高碾压混凝土坝建设的需要，我国新颁发的电力行业标准 DL 5108—1999《混凝土重力坝设计规范》、DL/T 5112—2000《水工碾压混凝土施工规范》，在对原规范进行修订的过程中，吸取了最近几年我国在碾压混凝土筑坝方面一些成功的新经验，以及“九五”、“八五”国家重点科技攻关成果。上述事实使我们认识到，及时介绍国家重点科技攻关研究成果的重要意义，这也是编者编写此书的初衷。

本书主要根据我国碾压混凝土筑坝的实践经验，介绍“九五”和“八五”国家重点科技攻关项目中有关高碾压混凝土重力坝设计的主要研究成果。这些成果是我国广大水电水利工程技术人员、研究人员、专家、学者的实践经验和研究工作成果的结晶。本书力图反映我国当前碾压混凝土筑坝技术方面的主要成果和特色，以及高碾压混凝土坝设计的水平；在编写过程中多数资料取自有关的研究报告、论文、工程报告、工程介绍、工作总结和综述等。书中有关引用的资料，除附注于编末之外，未能逐个列举。承担和参加国家重点科技攻关项目中有关高碾压混凝土重力坝设计专题研究的单位有：中南勘测设计研究院、中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、武汉大学、河海大学、西安理工大学、清华大学、北京大学、天津大学、大连理工大学、华北水利水电学院、广西大学、辽宁水电工程局、涌溪水电

有限公司、澧水流域水利水电综合开发公司、中国水利水电第十四工程局涌溪分局、广西水电工程局、广西水电科研所、华东勘测设计研究院等。国家重点科技攻关工作在水电水利规划设计总院的直接领导下，在热心于碾压混凝土坝建设的专家、学者的指导和帮助下，经参与科技攻关全体人员的密切协作和共同努力，圆满地完成了各项研究任务，为本书的编写奠定了基础。在本书编写过程中，南京水利科学研究院、成都勘测设计研究院等单位的研究、设计人员，提供了宝贵的研究成果。中南勘测设计研究院龙滩工程处以及参加国家重点科技攻关的人员，为本书稿的完成也做了许多工作。全书成稿后，水电水利规划设计总院王柏乐总工程师对书稿进行了全面审阅，提出很多宝贵意见。在此对于上述专家、研究人员的辛勤工作和有关单位的热心支持、帮助表示衷心的感谢，特别要感谢潘家铮院士、谭靖夷院士、沈崇刚、王圣培、林伯洗等老一辈专家对高碾压混凝土坝建设的悉心倡导和全力支持。

由于碾压混凝土筑坝的实践经验和科技成果内容广泛，与高重力坝设计工作直接有关的资料十分丰富，定有不少有益的经验由于作者的疏漏，未能总结在内。此外，限于作者的水平和一些条件限制，书中的错误和不妥之处，欢迎读者批评指正。高碾压混凝土坝的建设正在蓬勃发展中，筑坝技术也在不断完善，希望今后通过进一步的实践，积累更多的经验，纠正和补充本书的不足。

# 目 录

序  
前言

<b>1. 绪论</b> .....	1
1.1 碾压混凝土坝的发展概况和技术进展 .....	1
1.2 碾压混凝土筑坝的主要特点 .....	10
1.3 高碾压混凝土重力坝的温度应力和温度控制 .....	18
1.4 高碾压混凝土重力坝的设计和相关的科学技术 .....	28
<b>2. 碾压混凝土的组成材料及拌和物的工作性</b> .....	29
2.1 碾压混凝土的组成材料 .....	29
2.2 重力坝碾压混凝土的配合比设计 .....	38
2.3 碾压混凝土拌和物的工作性 .....	53
<b>3. 碾压混凝土的性能</b> .....	60
3.1 碾压混凝土的结构及其对性能的影响 .....	60
3.2 碾压混凝土的容重 .....	65
3.3 碾压混凝土的强度特性 .....	68
3.4 碾压混凝土的变形特性 .....	78
3.5 碾压混凝土的耐久性 .....	86
3.6 碾压混凝土的热学性能 .....	99
<b>4. 重力坝混凝土和坝基岩体强度参数</b> .....	104
4.1 重力坝混凝土的强度体系和强度标准值 .....	104
4.2 大体积全级配混凝土强度的尺寸效应和粒径效应 .....	109
4.3 重力坝与基岩之间抗剪断参数分析 .....	112
4.4 混凝土重力坝坝基岩体分级专家系统 .....	124
<b>5. 混凝土重力坝有限元分析计算的应力控制标准</b> .....	137
5.1 坝基变形对于重力坝应力分布的影响 .....	137
5.2 重力坝坝踵的应力集中 .....	144
5.3 混凝土重力坝有限元法分析的应力控制标准 .....	155
<b>6. 碾压混凝土重力坝的枢纽布置及坝体构造设计</b> .....	159
6.1 碾压混凝土重力坝的选定条件和枢纽布置 .....	159

6.2	碾压混凝土重力坝的坝体构造 .....	167
6.3	碾压混凝土坝的渗流控制和防渗结构 .....	177
<b>7.</b>	<b>混凝土重力坝可靠度分析和分项系数极限状态设计法 .....</b>	<b>185</b>
7.1	工程结构的可靠度分析 .....	185
7.2	重力坝概率极限状态的设计原则 .....	195
7.3	混凝土重力坝的目标可靠指标 .....	199
7.4	混凝土重力坝分项系数极限状态设计计算分析 .....	206
<b>8.</b>	<b>重力坝应力和承载能力的非线性弹性和非线性断裂分析 .....</b>	<b>223</b>
8.1	混凝土重力坝的非线性弹性应力和承载能力分析 .....	223
8.2	混凝土重力坝的非线性断裂分析原理 .....	232
8.3	虚裂纹模型及其数值分析方法 .....	235
8.4	钝裂纹带模型及有限元方法 .....	242
<b>9.</b>	<b>混凝土重力坝弹塑性应力和承载能力分析 .....</b>	<b>252</b>
9.1	概 述 .....	252
9.2	应力空间表述的弹塑性本构理论 .....	254
9.3	应变空间表述的弹塑性本构理论 .....	258
9.4	大体积混凝土和岩体介质材料的弹塑性模型 .....	261
9.5	重力坝承载能力分析及其临界状态判别的新方法 .....	270
9.6	重力坝弹塑性问题有限元应力和承载能力分析计算的求解方法 .....	276
9.7	龙滩碾压混凝土重力坝弹塑性应力和承载能力分析 .....	280
<b>10.</b>	<b>混凝土重力坝的温度控制和防裂措施 .....</b>	<b>291</b>
10.1	重力坝设计中温度应力的特点 .....	291
10.2	高碾压混凝土坝的水管冷却 .....	294
10.3	混凝土重力坝的坝体防裂及温度控制 .....	303
<b>11.</b>	<b>混凝土重力坝温度应力的分析计算方法 .....</b>	<b>308</b>
11.1	重力坝温度和温度应力的分析方法和依据条件 .....	308
11.2	重力坝温度场计算原理 .....	317
11.3	重力坝三维温度应力有限元计算原理 .....	322
11.4	高碾压混凝土重力坝时间过程仿真应力分析计算方法 .....	327
11.5	碾压混凝土重力坝温度应力分析的广义约束矩阵法 .....	336
<b>12.</b>	<b>龙滩碾压混凝土重力坝分缝及温度控制设计方案分析 .....</b>	<b>340</b>
12.1	挡水坝段温度和温度应力计算成果分析 .....	340
12.2	溢流坝段温度控制和防裂方案分析 .....	348



12.3	底孔坝段温度控制和防裂方案的分析 .....	354
12.4	高碾压混凝土重力坝分缝及劈头裂缝分析研究 .....	360
<b>13.</b>	<b>碾压混凝土坝铺筑层面的胶结机理和处理措施 .....</b>	<b>370</b>
13.1	碾压混凝土坝铺筑层面的胶结机理 .....	370
13.2	碾压混凝土坝铺筑层面结合强度的影响因素分析 .....	372
13.3	碾压混凝土施工中的传热传质解算 .....	385
13.4	碾压混凝土坝铺筑层(缝)面的处理 .....	391
<b>14.</b>	<b>高气温环境条件对碾压混凝土坝连续施工的影响分析 .....</b>	<b>394</b>
14.1	高气温环境对碾压混凝土坝直接铺筑施工的影响 .....	394
14.2	气温及相对湿度对碾压混凝土坝连续施工的影响分析 .....	398
14.3	风速对碾压混凝土坝铺筑的影响分析 .....	402
14.4	太阳辐射热对碾压混凝土坝铺筑的影响 .....	407
<b>15.</b>	<b>高气温条件下碾压混凝土坝的连续施工 .....</b>	<b>410</b>
15.1	高气温条件下缓凝减水剂在碾压混凝土拌和物中的应用 .....	411
15.2	碾压混凝土筑坝的斜层平推铺筑法 .....	415
15.3	碾压混凝土筑坝改进的台阶浇筑法 .....	423
15.4	高气温季节碾压混凝土筑坝的通用方法 .....	424
<b>16.</b>	<b>降雨对于碾压混凝土坝连续施工的影响分析 .....</b>	<b>427</b>
16.1	降雨对于碾压混凝土坝施工影响的模拟试验方法 .....	427
16.2	降雨对于碾压混凝土可碾性影响的分析 .....	430
16.3	降雨对于碾压混凝土坝压实密度的影响分析 .....	435
16.4	降雨对于碾压混凝土坝施工层面结合质量的影响分析 .....	438
16.5	基于分形理论的降雨过程模拟方法 .....	440
<b>17.</b>	<b>碾压混凝土重力坝建设工期分析的模糊网络计划法 .....</b>	<b>446</b>
17.1	模糊网络计划模型 .....	446
17.2	碾压混凝土重力坝施工组织与计划方案实例 .....	451
17.3	碾压混凝土重力坝建设工期及其保证率 .....	453
<b>18.</b>	<b>碾压混凝土重力坝浇筑仿真分析 .....</b>	<b>462</b>
18.1	碾压混凝土坝浇筑系统仿真的设计目标 .....	462
18.2	碾压混凝土坝浇筑仿真模型构造及程序设计 .....	463
18.3	碾压混凝土重力坝浇筑模拟结果的形象化表示 .....	468
18.4	碾压混凝土重力坝浇筑系统仿真的实现 .....	470
18.5	碾压混凝土重力坝浇筑仿真实例分析 .....	472
	<b>参考文献 .....</b>	<b>478</b>

# 1. 绪 论

## 1.1 碾压混凝土坝的发展概况和技术进展

### 1.1.1 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性混凝土。碾压混凝土坝是在常态混凝土坝与土石坝激烈竞争中产生的。土力学理论的发展,放宽了土石坝对建筑材料的限制,增大了利用当地材料筑坝的可能性;大型土石方施工机械的使用,加快了土石坝的施工速度,使得土石坝的造价降低,在经济上占了优势,从而使土石坝获得了蓬勃的发展。不过在造价降低的同时,土石坝的安全性较混凝土坝低的特性并没有改变,主要原因是洪水漫顶和筑坝材料的内部侵蚀;此外,土石坝的泄洪建筑物不能与坝体结合,需要在坝外另行布置专门的溢洪道;大规模开采当地材料对周围环境的破坏相当大。这都是土石坝不如混凝土坝的方面。

注意到混凝土坝和土石坝各自具有的特点,人们努力寻求一种新的坝型,以便把混凝土坝的安全和土石坝的高效率施工结合起来。20世纪60年代有几个工程就是按照这一想法进行的:意大利于1961年在阿尔卑斯山区修建172m高的阿尔佩盖拉(Alpa Gera)混凝土重力坝。由于山高,施工时间受限制,采用两条斜轨斗车运送混凝土,然后用自卸卡车入仓。取消坝内冷却水管,用推土机平仓,铺成厚80cm的一层。坝体从河床一岸到另一岸全线同时浇筑上升,用悬挂于推土机后部的插入式振捣器进行振捣,用切缝机切割振捣后的混凝土,在坝体规定位置形成横缝。为了坝体防渗,除做好分缝止水外,还在坝体上游面铺设钢板,据称效果良好。1965年加拿大魁北克曼尼科甘一号(Manicougan I)坝建造了两座18m高的重力式翼墙。内部使用贫浆混凝土,以推土机铺筑,插入式振捣器振捣;上游面使用富浆混凝土,以垂直滑模形成;下游面使用预制混凝土块。

1970年在美国的加州召开了混凝土快速施工会议。拉费尔(J.M.Raphael)提交会议的论文《最优重力坝》建议使用水泥砂砾石材料筑坝并用高效率的土石方运输机械和压实机械施工。由于水泥的稳固作用而增大了材料的抗剪强度,从而可以缩小坝的断面;因使用类似于土石坝施工的连续浇筑方法又可能缩短施工时间和减少施工费用。

1972年在同一地点又召开了混凝土坝经济施工会议。坎农(R.W.Cannon)的论文《用土料压实方法建造混凝土坝》进一步发展了拉费尔的设想。坎农介绍了用自卸卡车运输、前端装载机铺筑、振动碾压实无坍落度的贫浆混凝土的试验结果。他建议上、下游坝面用富浆混凝土并用水平滑模形成。他还认为用自卸卡车运输混凝土不一定是最合适的方式。

1973年在第11届国际大坝会议上莫法特(A.I.B.Moffat)提出了题为《适用于重力坝施工的贫浆混凝土研究》的论文。他推荐将20世纪50年代英国路基上使用的贫浆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,造价可减少15%。

对于碾压混凝土坝的发展产生过强烈影响的是巴基斯坦塔贝拉 (Tarbela) 坝的隧洞修复工程。1974 年, 该坝的泄洪隧洞出水口被洪水冲垮, 修复工作必须在春季融雪之前完成, 要求的施工速度必须极其快速。于是采用碾压混凝土进行修复, 在 42d 时间里浇筑了 35 万  $\text{m}^3$  碾压混凝土, 日平均浇筑强度为  $8400\text{m}^3$ , 最大日浇筑强度达 1.8 万  $\text{m}^3$ , 这是迄今世界上最高的碾压混凝土浇筑强度。

碾压混凝土坝从设想到成为现实历时 10 年。1980 年出现了世界上第一座碾压混凝土坝——日本岛地川重力坝。该坝高 89m, 上游面用 3m 厚的常态混凝土起防渗作用, 坝体碾压混凝土的胶凝材料用量为  $120\text{kg}/\text{m}^3$ , 其中粉煤灰占 30%。压实层厚度为 50cm 和 70cm, 每一压实层碾压完毕后, 停歇 1~3d 再继续浇筑上升。工程采用切缝机形成坝体横缝。

1982 年美国建成了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, 内部碾压混凝土的胶凝材料用量仅  $66\text{kg}/\text{m}^3$ , 压实层厚度 30cm, 连续浇筑上升, 33.1 万  $\text{m}^3$  碾压混凝土在不到 5 个月时间内完成, 比常态混凝土坝缩短工期 1~1.5 年, 造价只有常态混凝土重力坝的 40% 左右和堆石坝的 60% 左右。柳溪坝充分显示了碾压混凝土坝所具有的快速和经济的巨大优势。它的建成大大推动了碾压混凝土坝在美国和世界其他各国的迅速发展。

截至 1999 年底, 全世界 30 个国家完建和在建的 15m 坝高以上的碾压混凝土坝共 224 座, 其中: 中国 46 座、日本 40 座、美国 31 座、西班牙 23 座。2001 年中国动工兴建的龙滩碾压混凝土重力坝, 建设初期坝高 192m, 建设后期坝高 216.5m, 是目前世界上兴建的最高的碾压混凝土重力坝。

我国对碾压混凝土筑坝技术的研究开始于 1978 年。在进行了大量室内研究以后, 1981 年在四川省龚嘴水电站的混凝土路面工程中、1983 年在福建省厦门机场工地, 进行了大型试验块的野外碾压试验。在最后一次试验中, 混凝土胶凝材料  $152\text{kg}/\text{m}^3$  中掺用了 50% 的粉煤灰, 结果混凝土的可碾压性明显改善, 密实性与均匀性大有提高, 抗压强度普遍达到设计要求, 有的试样抗压强度甚至超过 24MPa, 显示了大掺量粉煤灰碾压混凝土的优越性。1984 年和 1985 年进一步扩大试验规模, 几座水电站工程的非主体工程或非主要部位应用了碾压混凝土。它们是: 铜街子水泥罐基础、牛日溪沟副坝、沙溪口纵向围堰和开关站挡墙以及葛洲坝船闸下导墙等。这些半生产性试验对大体积碾压混凝土施工进行了较全面的实际演练, 锻炼了队伍, 提高了施工技术和施工管理水平, 为采用碾压混凝土筑坝技术打下了基础。

为了将取得的技术成果应用于混凝土坝中, 选定了福建省坑口重力坝作为碾压混凝土筑坝技术工业性试验工程。根据前几年试验研究成果并参考当时国外已建碾压混凝土坝的实践经验, 确定坑口坝按照以下原则进行, 即“高掺粉煤灰、低水泥用量、坝体不设纵横缝、低温季节施工、全断面分层碾压、连续浇筑上升和沥青砂浆防渗”。经过 6 个多月碾压施工, 高 56.8m 的我国第一座碾压混凝土坝于 1986 年 5 月建成。

在筑坝试验过程中, 对碾压混凝土的稠度控制、压实规律、混凝土初凝及层面间隔时间、施工组织管理、仓面异种混凝土施工、下游面模板简化、坝体温度变化特性等问题展开了专题研究和现场观测, 为提高碾压混凝土筑坝技术积累了宝贵的经验。

坑口坝试验成功为我国快速建坝开辟了新途径。自坑口坝建成以后, 碾压混凝土坝在我国获得了迅速发展, 一些已经设计的甚至已经施工的工程改用碾压混凝土, 许多新工程更是积极采用碾压混凝土。截至 1999 年底, 全国共建成 34 座碾压混凝土坝, 正在施工的有 12

座，设计中的有 20 座。我国已建成的碾压混凝土坝见表 1.1-1。

碾压混凝土坝综合了混凝土坝运行安全和土石坝施工快速的特性，具有工期短、造价低等优点，因此发展速度较快。

优点主要有：

#### (一) 工期短

碾压混凝土筑坝改变了常态混凝土筑坝用振捣器插入振捣密实的方法，代之以在层面振动碾压，将土石坝大型施工机械用到混凝土坝上，实现快速、大仓面碾压施工。碾压混凝土坝断面尺寸与常态混凝土坝相似，但坝体结构简单、不设纵缝、不以模板形成横缝，所以浇筑速度比常态混凝土坝大为加快。和土石坝相比，碾压混凝土坝断面小、工程量小，又采用与土石坝相同的施工机械，所以碾压混凝土坝比土石坝工期短。日本玉川坝采用自卸卡车运输混凝土至坝址附近，经斜坡道入仓，用 21 个月的时间浇筑了 100 万  $m^3$  混凝土，比用吊罐入仓缩短工期 5~7 个月。该坝冬季 5 个月不施工，因此实际缩短工期约 1 年左右。美国盖勒斯维勒 (Galesville) 坝，坝高 51m，只用 2 个多月时间就浇筑完成。美国麋鹿溪 (Elk Creek) 坝最高日浇筑强度达 9474 $m^3$ 。我国岩滩水电站主坝于 1989 年 11 月 10 日创造了 10681 $m^3$  的最高日浇筑强度。我国江垭碾压混凝土坝采用斜层平推铺筑法，仓面面积扩大，施工进度进一步加快。最大仓面面积 12000 $m^2$ ，为平层通仓法仓面面积的 2.05 倍；月浇筑混凝土 12 万  $m^3$ ，浇筑强度提高 1.2 倍；碾压混凝土铺筑效率提高 1.25~1.43 倍。此外，施工工期较原设计的常态混凝土坝方案缩短 1 年以上。

#### (二) 造价低

碾压混凝土和常态混凝土相比，水泥用量少。此外，碾压混凝土坝还节约了模板工程量。根据玉川坝估算，节省水泥 11%，混凝土单价降低 10% 左右，从而节约能源和投资；可节约模板费用 30%，同时节省了冷却、接缝灌浆费用。坑口坝碾压混凝土单价为同强度常态混凝土单价的 88%。天生桥二级碾压混凝土单价为常态混凝土单价的 77%。和土石坝相比，碾压混凝土坝体积小、省建筑材料；坝基宽度小，减少了开挖和基础处理范围；施工导流及泄洪建筑物的长度缩短；而且可把泄洪建筑物布置在河床内，不必在河床外另设溢洪道。

### 1.1.2 碾压混凝土坝筑坝技术的进展

我们可以从下述的几个方面，分析碾压混凝土筑坝技术的发展趋势。

#### 一、碾压混凝土坝的地区分布较广泛规模日益扩大

碾压混凝土坝可修建在各种不同气候条件下的世界各个地区。在高温地区，阿尔及利亚的贝利哈罗恩 (Beni Haroun) 坝 (坝高 121m，碾压混凝土量 169 万  $m^3$ )，所处地区最高气温可达 43℃；在低温地区，美国的上静水 (Upper Stillwater) 坝 (坝高 91m，碾压混凝土量 112 万  $m^3$ ) 和加拿大的拉克罗伯森 (Lac Robertson) 坝 (坝高 40m，碾压混凝土量 2.8 万  $m^3$ )，两坝所处地区冬季最低气温可达 -35℃ 以下；在多雨地区，智利的潘戈 (Pangué) 坝 (坝高 113m，碾压混凝土量 66 万  $m^3$ )，在 13 个月的施工期内总降水量达 4436mm，最集中时 3 个月的降水量就达 3130mm。

碾压混凝土坝的设计者，对于工程的安全运行极为重视，经过 10 年设计、施工和运行方面的经验积累，碾压混凝土重力坝才突破了坝高 50m 左右的筑坝高度，并且也经过了同

表 1.1-1

我国建成的碾压混凝土坝

序号	坝名	地点	河流	坝高 (m)	坝长 (m)	坝型	底宽 (m)	顶宽 (m)	坝体积(万 m <sup>3</sup> )		总库容 (亿 m <sup>3</sup> )	目的	装机容量 (MW)	完成 年	业主单位	设计单位	施工单位
									碾压	总量							
1	坑口	福建大田	屏山溪	56.8	122.5	重力	42	5	4.3	6.2	0.27	H.S	1.5	1986	大田县	福建水电设计院	福建水利水电工程局
2	龙门滩	福建德化	大梅溪	57.5	150	重力	48	6	7.1	9.3	0.528	H.I.S	18	1989	德化县	福建水电设计院	福建水利水电工程局
3	天生桥二级	贵州安龙	南盘江	61	470	重力	43	4	14.3	28.4	0.26	H	1320	1989	南方电力联营公司	贵阳勘测设计研究院	安能建设总公司
4	马回	四川蓬安	嘉陵江	27	141	重力	26	13.5	26	41	0.8	H	46.3	1989	四川省水利厅	四川水电设计院	四川水利水电工程局
5	潘家口	河北迁西	滦河	25	277	重力	15	6	0.6	2.3	0.1	S.H.C	10	1989	潘家口管理局	天津勘测设计研究院	安能建设总公司
6	铜街子	四川乐山	大渡河	88	1029	重力	82	4	40.7	85.5	2.0	H.C	600	1990	四川省电力局	成都勘测设计研究院	水电第七工程局
7	荣地	广西融水	都浪河	53	136	重力	44	5	6.3	10.8	0.194	I	3	1991	融水县	广西水电设计院	葛洲坝水利水电工程局
8	广蓄下岸	广东从化	流溪河	43.5	153.1	重力	32	7	3.2	5.6	0.17	H	1200	1992	南方电力联营公司	广东水电设计院	水电第十四工程局
9	万安	江西万安	赣江	68	1104	重力	41	22	15.6	148.0	22.1	H.N	500	1992	江西省电力局	长江勘测规划设计研究院	安能建设总公司
10	岩滩	广西巴马	红水河	111	525	重力	73	20	62.6	90.5	24.3	H.N	1210	1992	广西自治区电力局	广西水电设计院	广西水利水电工程局
11	锦江	广东仁化	锦江	60	229	重力	38.4	7	18.2	26.7	1.89	H.C	25	1993	仁化县	广东水电设计院	葛洲坝水利水电工程局

续表

序号	坝名	地点	河流	坝高 (m)	坝长 (m)	坝型	底宽 (m)	顶宽 (m)	坝体积(万m <sup>3</sup> )		总库容 (亿m <sup>3</sup> )	目的	装机容量 (MW)	完成 年	业主单位	设计单位	施工单位
									碾压	总量							
12	水口	福建闽侯	闽江	101	791	重力	68	20	37.5	171.0	23.4	H.N	1400	1993	华东电管局	华东勘测设计研究院	华田公司闽江工程局
13	大厂坝	海南昌化	昌化江	57	719	重力	42.3	8.5	48.5	82.7	17.1	H.C	240	1993	海南省电力公司	中南勘测设计研究院	葛洲坝水利水电工程局
14	普定	贵州普定	三岔河	75	196	拱	28.2	6.3	10.3	13.7	9.2	H.I	75	1993	贵州省电力局	贵阳勘测设计研究院	水电第八工程局
15	温泉堡	河北抚宁	汤河	49	188	拱	13.8	5	5.5	6.25	0.07	S	0	1994	秦皇岛市	河北省水电设计院	河北水利工程局
16	水东	福建尤溪	龙溪	68	239	重力	43	8	6.5	11.5	1.05	H.N	76	1994	尤溪县	福建省水电设计院	闽江水电工程局
17	山仔	福建连江	鳌江	65	273	重力	63	6	19.4	23.5	1.81	H.S.I	45	1994	连江县	福建省水电设计院	水电第十四工程局
18	观音阁	辽宁本溪	太子河	82	1040	重力	66	10.3	96.3	181.5	21.7	C.H.I.F	19.5	1995	辽宁省水利厅	辽宁省水电设计院	辽宁水利工程局
19	溪柄溪一级	福建龙岩	溪柄溪	63	93	拱	12	7.4	2.5	3.3	0.09	S.H	2	1996	龙岩地区水电局	清华大学	葛洲坝水利水电工程局
20	百龙潭	广西马山	红水河	28	274	重力	36	84	6.2	8.0	0.69	H.N	192	1996	广西自治区电力局	广西电力勘测设计研究院	广西水电工程局
21	石渡滩	河南午阳	滚河	40	645	重力	37	7	27.5	35	1.2	S.I	0	1997	午阳市	天津勘测设计研究院	水电第十一工程局
22	满台城	吉林汪清	嘎嘎河	37	337	重力	27.5	6	7.8	13.6	1.0	H.I	2.4	1997	汪清县	延边水电勘测设计研究院	吉林水利工程局
23	双溪	广东大埔	梅潭河	52	221	重力	40	5	12.8	17.2	0.91	H	36	1997	大埔地区电力局	广东水电设计院	葛洲坝工程局

续表

序号	坝名	地点	河流	坝高 (m)	坝长 (m)	坝型	底宽 (m)	顶宽 (m)	坝体积(万m <sup>3</sup> )		总库容 (亿m <sup>3</sup> )	目的	装机容量 (MW)	完成 年	业主单位	设计单位	施工单位
									碾压	总量							
24	桃林口	河北青龙	青龙河	82	524	重力	62	10.5	74.1	151.4	8.54	S.H.F	96	1998	河北省水利厅	河北水利水电设计院	安能建设总公司
25	石板水	四川丰都	龙河	83	445	重力	62.5	12	23.7	56.4	1.05	H.F.R	115	1998	涪陵水利局、长江委	成都勘测设计研究院	水电第三工程局
26	碗窑	浙江江山	达河溪	83	390	重力	61.5	8.5	294	442	223	I.C.H	12.6	1998	浙江省水利厅	浙江水利水电设计院	浙江水电工程局
27	江垵	湖南慈利	娄水	131	336	重力	105	12	99	135	17.5	C.H.I	300	1999	澧水流域开发公司	湖南水利水电设计院	辽宁水利水电工程局
28	涌溪三坝	福建德化	南溪	86.5	198	重力	59.6	8	19.6	25.5	0.69	C.S.H	40	1999	福建省水利水电厅	华东勘测设计研究院	水电第十四工程局
29	花滩	四川荣经	荥河	85.3	173.24	重力	70	8	24	29	0.0824	H	24	1999	雅安地区水电公司	四川水利水电设计院	水电第十工程局
30	长顺	湖北利川	郁江	63	250	重力	45	7	17	20	0.8	S.H	36	1999	恩施地区水利局	湖北水利水电设计院	湖北水利水电工程局
31	高坝洲	湖北枝城	清江	57	188	重力	42	5	70.2	79.8	4.3	H.N	252	1999	清江水电开发公司	长江勘测规划设计研究院	葛洲坝水利水电工程局
32	红坡	云南昆明	沙朗河	55.2	244	拱	26	4.5	7.1	7.6	0.03	S	0	1999	昆明市、西山区	昆明水利水电设计院	水电第八工程局
33	汾河二库	山西太原	汾河	88	227.7	重力	72	7.5	36.2	44.8	1.3	S.C.H	96	1999	山西省水利厅	山西水利水电设计院	山西水利建筑工程局
34	松月	吉林和龙	海潮河	31.1	271	重力	22.7	5	4.44	7.75	0.213	S.H	0.375	1999	和龙县水利局	延边水电设计院	和龙水利水电工程局

注 H—发电、C—防洪、I—灌溉、N—航运、R—旅游、S—供水、F—养鱼。

样长的时间，人们才有足够的信心去修建除重力坝之外的其他碾压混凝土坝型。在1994年以前，碾压混凝土坝平均规模基本没有发生改变，每年建成的碾压混凝土坝的平均坝高在40~50m的范围内，平均碾压混凝土量也在10万~20万 $m^3$ 之间。直到1995年人们似乎才确定了修建大型碾压混凝土坝的信心。在过去的几年里，尤其是那些在建的碾压混凝土坝，其规模稳步扩大。1998年建成的碾压混凝土坝平均坝高为70m，平均碾压混凝土量为42.5万 $m^3$ ，在建的碾压混凝土坝平均坝高87m，平均碾压混凝土量为45.5万 $m^3$ 。我国1999年建成的江垭碾压混凝土重力坝，坝高131m，混凝土方量135万 $m^3$ 。

1998年，浇筑量最大的阿尔及利亚的贝利哈罗恩（Beni Haroun）碾压混凝土坝开工建设，碾压混凝土总量将达169万 $m^3$ ，超过日本的富濑（Miyagase）坝（坝高155m，碾压混凝土量153.7万 $m^3$ ）。1999年哥伦比亚的拉米尔（Miel）I级坝开工建设，其坝高将达188m，超过目前世界上最高的日本的浦山（Urayama）坝（坝高156m，碾压混凝土量为129.4万 $m^3$ ），其碾压混凝土量也将达到166.9万 $m^3$ ，几乎与贝利哈罗恩（Beni Haroun）坝相同。泰国的哈丹（Tha Dan）坝已于1999年1月进行招标，可望在当年底开工并于2000年开始碾压混凝土施工，该坝的碾压混凝土量可达540万 $m^3$ 。2001年开工的我国龙滩碾压混凝土重力坝，坝高216.5m，坝体混凝土量为730万 $m^3$ ，已成为21世纪兴建的第一座、目前碾压混凝土筑坝史上最高的碾压混凝土坝。碾压混凝土坝的规模正在日益扩大，到目前为止似乎还没有出现坝高和碾压混凝土量的极限。

## 二、碾压混凝土材料与筑坝技术在发展中相互促进

早期的碾压混凝土坝多采用低胶凝材料用量的贫浆碾压混凝土，而从目前较为稳定的发展趋势看，当今的碾压混凝土坝多采用高胶凝材料用量的富浆碾压混凝土。自1992年以来采用不同胶凝材料用量修建的碾压混凝土坝占总数的比例，稳定在以下的范围内：富浆碾压混凝土坝（胶凝材料用量 $150kg/m^3$ 以上）占 $(45 \pm 2)\%$ ；中等胶凝材料用量碾压混凝土坝（胶凝材料用量 $100 \sim 149kg/m^3$ ）占 $(23 \pm 2)\%$ ；（日本）RCD坝占 $(16 \pm 2)\%$ ；贫浆碾压混凝土坝（胶凝材料用量低于 $99kg/m^3$ ）占 $(12.5 \pm 1.5)\%$ 。

我国碾压混凝土坝从一开始就采用了高掺粉煤灰，少用水泥，以减少产生水化热，从而缩小温差，防止出现裂缝。根据多年研究结果，粉煤灰的掺量可以达到 $2/3$ 。在使用粉煤灰条件有困难地区，可以采用磷矿渣和磨细的凝灰岩作为掺合料，这种方法已在大朝山碾压混凝土坝成功采用。我国还发现在碾压混凝土拌和时掺用17%的岩粉（ $d \leq 0.16mm$ 的颗粒），不仅对强度没有影响，而且增加了混凝土的和易性，改善了工作度。中国碾压混凝土坝的平均胶凝材料用量为 $173kg/m^3$ 。在36座已知胶凝材料用量的碾压混凝土坝中，33座为富浆碾压混凝土坝，2座为中等胶凝材料用量的碾压混凝土坝，另有1座RCD坝。通过各工程混凝土采用外加剂的实践，证实外加剂可以提高碾压混凝土的性能和耐久性，并以复合外加剂最为有效，已在如普定、大朝山、棉花滩等许多工程中采用，证明是合理的，而且应进一步发展。由于40多座坝的实践，通过大量的室内外试验成果，已经有条件建立碾压混凝土配合比的数据库，并通过优选在具体工程条件下，预选比较合适的配合比，仅用少量的室内试验，即可取得合适的配比，大大减少试验工作量和时间。

在中国、日本、美国和西班牙这四个碾压混凝土坝最多的国家里，碾压混凝土平均的水泥用量大致相同，基本上在 $75 \sim 85kg/m^3$ 的范围内。胶凝材料用量的差异，主要是活性掺合料（即粉煤灰）用量的不同所造成的。日本碾压混凝土胶凝材料用量较低，活性掺合料的掺



量也最低；而西班牙胶凝材料用量最高，活性掺合料的掺量也最高。这四个国家中，日本、中国和西班牙已经根据本国的特殊情况形成了自己的风格。在日本全部为其特有的 RCD 坝。这种型式由于碾压混凝土所占比例较少，因此造价相对昂贵，但对于一个长期受地震困扰的国家来说，这种 RCD 坝的结构型式是有安全保障的。在中国和西班牙均采用高胶凝材料用量的富浆碾压混凝土。以上这三个国家的碾压混凝土坝都掺入了活性掺合料，一般都是低钙粉煤灰。而在美国，碾压混凝土坝的设计方法纷杂多变，从很低的胶凝材料用量 ( $64\text{kg}/\text{m}^3$ ) 到很高用量 ( $252\text{kg}/\text{m}^3$ )，从碾压混凝土根本不掺入活性掺合料到采用很高掺量的活性掺合料，各种情况都有出现，好像没有一个固定的发展模式。

### 三、碾压混凝土筑坝技术日趋完善

#### (一) 变态混凝土

由于常态混凝土与碾压混凝土的工艺不同，施工时常互相干扰，同时在材料制备、结构分缝、温控等方面也各有不同，增加了出现裂缝的可能性，因此目前在设计施工中尽量减少使用常态混凝土的可能。如基础垫层常态混凝土最好尽量减薄，并迅速覆盖碾压混凝土；与两岸坝肩、电梯井、通气孔、廊道连接部位过去都用常态混凝土，现在都改用变态混凝土。

所谓变态混凝土（又称改性混凝土），是指那些随着碾压混凝土施工逐层进行，在碾压混凝土摊铺施工中铺洒灰浆，使之增加工作度以便可用插入式振捣棒进行振实的碾压混凝土摊铺层。这种工艺 1989 年在岩滩围堰工程中首先采用，1990 年先后在荣地和普定碾压混凝土坝上游面或止水片附近得到应用。现在这种工艺已成功实现全断面碾压混凝土坝，并广泛地应用于众多的碾压混凝土坝中。采用这种方法可将碾压混凝土改性，形成平整的外部表面和良好的内部结合面，有效地避免了在紧靠上、下游坝面模板附近及靠近两岸坝肩地段，碾压混凝土不容易被振实现象出现。在靠近坝肩地段施工时，先铺设一层水泥砂（灰）浆，再摊铺一层碾压混凝土，其后在碾压混凝土上再铺洒水泥浆，最后用插入式振捣棒进行振实。变态混凝土的浆体掺量为混凝土体积的 5%~10%，通常灰浆的水灰比与碾压混凝土相同。

变态混凝土在坝内止水和周边基岩处，使用厚度为 0.5~1.0m；在上、下游面以及横缝模板处，使用厚度为 0.2~0.3m。变态混凝土的最大优点是对于靠近坝肩及紧靠上、下游模板的地段不需再用常态混凝土进行浇筑，面仅对碾压混凝土进行铺洒胶浆改性即可。水泥浆可在现场拌制。根据工程实践经验，铺洒灰浆的碾压混凝土的铺层厚度可以与平仓厚度相同，以简化变态混凝土的施工工艺。江垭工程的变态混凝土，经钻孔取样和压水试验研究，具有较好的抗渗性、密实性以及与周边碾压混凝土的良好结合，如果使用厚度增加到 0.5m，更可弥补碾压混凝土抗渗的不均匀性。

#### (二) 碾压混凝土坝的层面处理

碾压混凝土坝的主要特点之一是具有大量的铺筑层面，特别是高坝。若层面处理不善，不仅会影响到坝身的整体强度和防渗效果，对施工进度也有影响，层面抗剪强度过低甚至会影响到大坝安全。碾压混凝土层面是否需要处理及其处理方式，与层面的状态有关，而层面的状态又与很多因素有关，其中最重要的因素是铺筑层之间的间隔时间、碾压混凝土材料的性质、铺筑层的铺筑方法、施工期的环境条件等。层间间隔时间指的是从下层混凝土拌和物拌和加水时起至上层混凝土碾压完毕为止的历时。

根据层面处理方式的差别，国外通常将层面缝分为热缝、冷缝和温缝。最初用层面的外