

# 水工建筑物

HYDRAULIC STRUCTURE

吴媚玲 编著



清华大学出版社

TV6  
6041

932203

TV6  
6041

# 水 工 建 筑 物

吴 媚 玲 编 著

清 华 大 学 出 版 社

19  
1a  
179  
版  
版  
年  
工流

## 内 容 简 介

本书为高等院校《水利水电工程建筑》专业《水工建筑物》课程的教材。本书按90~96学时编写，共计十章，包括：绪论、岩基上挡水重力坝、岩基上泄水重力坝、土基上的闸、拱坝、土石坝、溢洪道、泄水隧洞、水工闸门及水利枢纽。

本书主要阐述水工建筑物的基本设计理论、工程实践经验以及国内外新的科学技术成就。考虑到水工建筑物包含的内容十分广泛，本书以既具有代表性，又应用极普遍的混凝土重力坝、土石坝和泄水隧洞为重点，同时兼顾其它水工建筑物。

本书除作为水工专业本科生的教材外，并可供有关工程技术及科研人员学习及设计参考，也可供其它相近专业作为教学参考书。

(京)新登字158号

### 水 工 建 筑 物

吴媚玲 编著

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京市人民文学印刷厂印装

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本：787×1092 1/16 印张：25.5 字数：604千字

1981年10月第1版 1981年10月第1次印刷

印数：0001—4000

ISBN 7-302-00879-5/TV·16

定价：6.95 元

## 前 言

由于国内外大量水利水电工程的建设，尤其是近年来不少高坝大库的兴建，使相应的科学技术得到了飞跃的发展。因此，编写一本结合我国国情、反映先进科技水平的水工建筑物教材，实属当务之急。

本书编者在清华大学张光斗教授、丁则裕教授 1973 年主编的《水工建筑物》讲义的基础上，参考了近年来张宪宏教授、张受天副教授等编写的有关教学参考资料，结合编者的教学、科研、生产工作，编印了讲义。经过国内 20 多所院校试用或参考，普遍反映良好。为此，编者对讲义又进行了少量的修改和补充，作为教材正式出版。

本书编写过程中得到清华大学水电系水工教研组教师们的大力支持和帮助。张光斗教授对本书作了十分仔细的审阅，并提出大量重要的修改意见和建议。为本书提供参考资料、进行审阅的还有刘光廷、沈之良、陈兴华、曾昭扬、高莲士、张楚汉教授，杨懋副教授。刘国华工程师参加了书稿的技术加工工作，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，编写仓促，书中错误和不妥在所难免，敬请广大读者批评指正。

EA 10/09

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 水利工程建设.....	1
第二节 水利枢纽和水工建筑物.....	2
<b>第二章 岩基上的挡水重力坝</b> .....	7
第一节 概述.....	7
第二节 重力坝的抗滑稳定分析.....	22
第三节 重力坝的坝体应力分析.....	36
第四节 重力坝的渗透分析.....	53
第五节 重力坝的抗震设计.....	57
第六节 重力坝的优化设计.....	66
第七节 重力坝的可靠度分析.....	70
第八节 重力坝的材料.....	76
第九节 重力坝的分缝分块及温度控制.....	82
第十节 重力坝的岩基处理.....	95
第十一节 重力坝的构造.....	105
第十二节 宽缝重力坝及腹拱式重力坝.....	116
<b>第三章 岩基上泄水重力坝</b> .....	126
第一节 概述.....	126
第二节 岩基上溢流重力坝.....	128
第三节 溢流坝的下游消能.....	138
第四节 重力坝坝身泄水孔.....	146
<b>第四章 土基上的闸</b> .....	153
第一节 概述.....	153
第二节 闸孔型式和泄流能力.....	154
第三节 闸基防渗设计.....	157
第四节 闸下游消能与防护.....	166
第五节 闸室布置及稳定计算.....	171
第六节 闸室结构计算.....	179
第七节 闸与两岸的联接建筑物.....	181
<b>第五章 拱坝</b> .....	184
第一节 概述.....	184
第二节 拱坝的布置.....	187
第三节 拱坝的计算.....	190
第四节 拱坝泄洪.....	207

第五节	拱坝的构造和地基处理	212
<b>第六章</b>	<b>土石坝</b>	<b>216</b>
第一节	概述	216
第二节	筑坝用土石料	220
第三节	土石坝剖面的基本尺寸	225
第四节	土坝的渗流分析	228
第五节	土石坝的稳定分析	239
第六节	土石坝的沉降分析	247
第七节	土石坝的应力应变分析	249
第八节	土石坝的构造	255
第九节	土石坝的地基处理	263
第十节	土石坝裂缝及防治措施	271
第十一节	土石坝的抗震设计	275
第十二节	其它型式的土石坝	281
<b>第七章</b>	<b>河岸泄水建筑物(一)——溢洪道</b>	<b>289</b>
第一节	正流式溢洪道	290
第二节	其它型式的溢洪道	302
第三节	非常泄洪设施	309
<b>第八章</b>	<b>河岸泄水建筑物(二)——泄水隧洞</b>	<b>311</b>
第一节	泄水隧洞的工作条件和布置	311
第二节	泄水隧洞行水部分的体形设计	319
第三节	地下洞室围岩的稳定性和应力分布	325
第四节	作用在水工隧洞衬砌上的荷载	335
第五节	隧洞衬砌的结构计算	341
第六节	泄水隧洞的构造	357
第七节	喷锚支护设计	363
<b>第九章</b>	<b>水工闸门</b>	<b>370</b>
第一节	概述	370
第二节	平面钢闸门	372
第三节	弧形闸门	383
第四节	启闭机	386
第五节	阀门	388
<b>第十章</b>	<b>水利枢纽</b>	<b>391</b>
第一节	水利枢纽设计的任务与阶段	391
第二节	水利枢纽布置	392
第三节	水利枢纽布置的工程实例	394
第四节	水利枢纽的经济分析	398
<b>参考文献</b>		<b>401</b>

# 第一章 绪 论

## 第一节 水利工程建设

### 一、水利工程建设的发展

水是重要的自然资源之一，可用以灌溉农田、水力发电、城市给水、发展通航、养殖业等，为社会兴利。但由于水在时间和空间上的分布不均匀，以及来水与用水的不相适应（例如我国的南涝北旱，或是冬春干旱而夏秋洪涝为害），因此就要修建水利工程，用以除害兴利，造福于人类。

根据联合国统计：全部大陆的年径流为 47 万亿  $m^3$ ，水量按人口平均为  $11800m^3/$ 人。我国正常年径流为 2.78 万亿  $m^3$ ，平均只有  $2780 m^3/$ 人，仅为世界平均值的  $1/4$  左右。

据世界能源会议统计：全世界理论水能资源为 44.28 万亿  $kW\cdot h/$ 年，相当于平均出力 50.5 亿  $kW$ ，其中可开发的水能资源，装机容量 22.6 亿  $kW$ ，年发电量 9.8 万亿  $kW\cdot h$ 。我国水能资源蕴藏量居世界第一位，理论蕴藏量为 6.76 亿  $kW$ ，可开发的容量为 3.78 亿  $kW$ ，年发电量 1.91 万亿  $kW\cdot h$ ，这是我国能源的一大优势。

我国劳动人民几千年来与水旱灾害作斗争，在兴修水利方面积累了丰富的经验，从传说中的“大禹治水”到闻名中外的都江堰水利工程，从修建黄河大堤到开凿南北大运河，都有很多的发明创造。

解放 41 年来，进行了大量的河道整治等防洪工程，彻底改变了黄河三年两决口的危害，而做到了 41 年一直保平安。至今为止，我国已建大中小型水库 8 万多座；水电站装机容量由 1949 年的 16 万  $kW$ ，发展到 1988 年的 3270 万  $kW$ ；农田灌溉面积由  $160800km^2$ ，发展到  $475700km^2$ ，灌溉面积已达我国耕地面积的 47.7%。

与世界各国相比，特别在水能资源开发利用上，我们还存在较大的差距，已开发的仅占我国可开发水能资源的 3.8%。世界各工业发达国家在其发展过程中，不论其拥有水能资源多少，大都尽先开发水电，因而这些国家中水能资源开发利用程度均较高，一般均在 40% 以上，最高的为瑞士，达 98%。水电在各国电力生产中所占比重也较大，最高的挪威竟高达 99.8%。

### 二、科学技术在水工建筑物发展中的作用

流体力学、岩土力学、结构理论以及计算技术等科学技术的发展，为水工建筑物的发展创造了有利条件。

早在 50 年代我国完全依靠自己的力量，设计、施工、制造、安装建成了坝高 102m 的新安江水电站，装机容量达 66 万  $kW$ ，为我国大型水利工程建设开创了良好的先例。60 年代，在强地震区建成了我国最高的混凝土重力坝——刘家峡大坝，坝高 147m，

在高坝技术、高速水流方面取得了相当的进展。70年代,在石灰岩岩溶地区建成了165m高的乌江渡拱型重力坝,成功地进行了岩溶地基处理工作。80年代,在长江流量为4400—4800m<sup>3</sup>/s时,葛洲坝工程成功地完成了大江截流,保证了工程的顺利进行,标志着我国水利工程施工达到的新水平。

目前世界上已建、正建的坝高超过120m的高坝已超过200座,最高的是苏联正在施工的罗贡土石坝,坝高325m;拱坝技术也不断提高,苏联的英古里拱坝高272m,法国托拉拱坝坝高比只有0.023;巴西、巴拉圭合建的1260万kW的伊泰普水电站,是世界上装机容量最大的水电站,1991年已经建成;在地基处理方面,在冲积层内已实现了170m深的深孔水泥灌浆、131m深的混凝土防渗墙施工。

随着水利事业的发展,特别是一些大型水利工程的建设(例如我国的长江三峡巨型水利枢纽、宏伟的南水北调工程),将对科学研究工作提出更多新的课题。

### 三、本课程教学的特点

《水工建筑物》是一门实用性很强的专业课,涉及面广,既有丰富的工程经验,又有大量未解决的问题,相当多的方面已采用了先进的设计方法,但有不少设计理论仍停留在经验性的阶段。为使尚很少接触工程实际的大学生学好本门课程,为将来参加水利工程建设打下基础,在本门课程的教学过程中,采取以下措施:

1. 水工建筑物课程是在学生已学完水力学、土力学、结构力学、工程地质、建筑材料、钢筋混凝土、弹性理论、有限元及计算技术等课程的基础上进行的课程,主要是应用以上理论及工程经验,解决工程实际问题。在本课程中对基本理论一般不作推导。因为学生尚少工程实际的概念,所以本课程大多数内容为课堂讲授,部分内容也可由学生自学。

2. 为适应大学毕业生能进行创造性的工作的要求,本课程内容中,除介绍常用的设计思想、设计方法、有关规范的内容等基本理论外,还介绍先进的工程实例,引进新的设计理论和设计方法,以扩大学生视野,开阔思路,利于对新技术、新理论的探讨、应用。

3. 学习的目的是为了应用,是否学好的标准应看是否能用于解决实际问题。因此,本专业课要加强理论与实践的联系,重视动手能力的培养,除课堂讲课外,还有40%多的学时进行课程设计,并进行部分课程试验及习题作业。

## 第二节 水利枢纽和水工建筑物

### 一、水利枢纽

为了综合利用水利资源,达到防洪、灌溉、发电、给水、航运等目的,需要修建几种不同类型的水工建筑物,例如挡水、泄水、输水或其它专门建筑物等,以控制和支配水流,满足国民经济的需要,这些建筑物称为水工建筑物,水工建筑物的综合体称为水利枢纽。

各部门对河流的治理和开发所提的要求不尽相同,例如为了共同的目的都需修建水



库，但在水库库容的利用上就会有矛盾，兴利和防洪一般都要求各自有较大的库容；水力发电只是利用水的能量而不消耗水量，发电后的水仍可用于农业灌溉或工业给水，但发电、灌溉和给水的用水时间不一定能一致。因此在流域规划时，必须根据河流的自然条件，结合国民经济发展的需要，尽量做到综合利用水利资源，即以最小的投资获得最大的效益，也即应该根据技术经济比较来考虑选择水利资源的开发利用。

图 1-1 是目前世界上最高的罗贡坝的工程示意图，罗贡斜心墙土石坝坝高为 335 m，填筑土石方量 7550 万  $m^3$ ，形成 116 亿  $m^3$  的库容，水电站装机容量为 360 万 kW，水利枢纽中还包括了单洞泄洪能力为 3500  $m^3/s$  的泄洪洞，以及两个断面为 15.6  $\times$  19  $m^2$  的导流洞等水工建筑物。

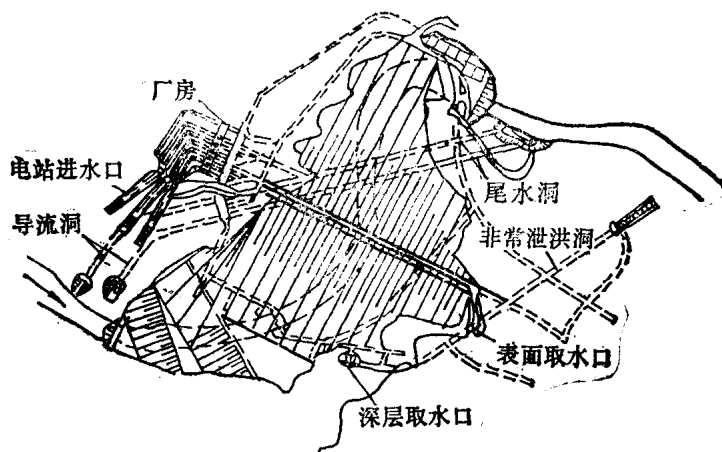


图 1-1 罗贡坝平面图

## 二、水工建筑物的分类

水工建筑物按其在水利枢纽中所起的主要作用，可以分为以下几类：

1. 挡水建筑物 用以挡拦河水、壅高水位或形成水库，如各种坝、闸和堤防等。
2. 泄水建筑物 用以宣泄在各种情况下、特别是洪水期的多余入库水量，以保证坝的安全，如溢流坝、溢洪道、泄洪洞等。
3. 输水建筑物 从水库或河道向下游输送灌溉、发电或工业用水的建筑物，如输水洞、引水管、渠道等。
4. 取水建筑物 是输水建筑物的首部建筑，如进水闸、扬水站等。
5. 专门建筑物 专门为灌溉、发电、给水、航运等用的建筑物，如电站厂房、船闸、升船机、鱼道、筏道等。
6. 整治建筑物 用以整治河道，改善河道的水流条件，如丁坝、顺坝、导流堤、护岸等。

有些水工建筑物在枢纽中所起的作用并不是单一的，例如溢流坝既起挡水作用，又起泄水作用；闸既可挡水，又能泄水，还可作取水之用。在水利枢纽布置时，应尽量使一个建筑物起到多种作用。

各种建筑物又可以按不同特点进行分类。例如挡水建筑物中的坝，可以按以下分类：

1. 按筑坝材料分为：土石坝、混凝土坝、浆砌石坝、钢筋混凝土坝、木坝等。
2. 按构造特点分为：重力坝、拱坝、支墩坝等。
3. 按是否泄水分为：非溢流坝、溢流坝。

### 三、水利枢纽对环境的影响

修建水利枢纽的地区本来处于一种自然平衡的状态，水利工程建设会使原有的平衡失调，特别是高坝大库的修建和运用，对周围的自然和社会环境有很大的影响。

#### (一) 物理的影响

1. 淤积和冲刷 由于形成水库后水流流速减低，造成泥沙淤积、水库库容减少，并影响水库的使用年限，据美国、印度等 130 座水库的调查表明，每年淤积损失的库容在 2—14.33% 之间。经过水库淤积后的清水下泄时，又会造成下游河床的冲刷，引起河道因流势变化而演变，甚至影响到河岸的稳定。

2. 水文状态的变化 根据水库的不同用途，输泄不同的水量，使天然河流的水文状态发生变化。水库蓄水造成上游地下水位抬高、下游地下水位下降，造成淹没或干旱。

3. 水质的变化 一般水库都有使水质改善的效果，但应防止库水受盐分污染。

4. 气候的变化 例如增加了下雾的频率。

5. 地震的影响 水库诱发地震问题，已是广泛引起重视的问题之一，在已建的坝高超过 100 m、库容大于 10 亿  $m^3$  的水库中，发生水库地震的达 17%。

#### (二) 生物的影响

坝和水库的生物影响是一个有着大量未知数的新奇的问题，涉及的范围十分广泛，例如：因细菌作用而使水的化学成分改变；营养物质的浓集，使水有异味或缺氧，影响鱼类生长；水库对渔业显然是有利的，但是坝对鱼的回游是个主要障碍，某些鱼类品种因此消失了；由于钉螺和疟蚊等传布疾病的媒介得到有利的生长条件，因此血吸虫病、疟疾等疾病增加了传染的危险性。

#### (三) 对人类的影响

水利枢纽是为除害兴利之目的修建的，能起到防洪、灌溉、发电、给水等有利作用，但是对人类也会产生有害的副作用，如：因库区淹没而需搬迁和妥善安置移民；一旦大坝失事，对下游造成的危害是十分严重的，如意大利瓦依昂拱坝上游大滑坡，造成 150m 高的涌浪翻过坝顶，冲毁了下游一些村镇，死亡三千人。因此，修建水利枢纽必须充分考虑对环境的影响，因为这关系到重大的国计民生，必须认真对待。

### 四、水利枢纽分等和水利建筑物分级

水利工程一般工程量大、投资多、工期长。当设计和施工标准稍有变动时，所需的投资、劳力、材料等就会有相当大的增减，而水利建筑物的失事或运用失灵，又会造成巨大的危害。因此，应把水利枢纽按其规模、效益及其在国民经济中的重要性分等，再

将枢纽中的不同建筑物按其作用及重要性分级。级别高的建筑物，对设计及施工的要求也高，级别低的建筑物则可适当降低要求。

根据原水利电力部1978年颁发的《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准》(山区、丘陵区部分)SDJ 12-78的试行规定，水利枢纽根据其工程规模、效益、在国民经济中的重要性划分为五等，如表 1-1 所示。

表 1-1 水利枢纽工程的分等指标

工程 等 别	工程 规 模	分 等 指 标				
		水库总库容 (亿m <sup>3</sup> )	防 洪		设计 灌溉面积 (km <sup>2</sup> )	水电站 装机容量 (万kW)
			保护城镇及工矿区	保护农田 (km <sup>2</sup> )		
一	大(1)型	>10	特别重要城市、工矿区	>3350	>1005	>75
二	大(2)型	10—1	重要城市、工矿区	3350—670	1005—335	75—25
三	中型	1—0.1	中等城市、工矿区	670—201	335—33.5	25—2.5
四	小(1)型	0.1—0.01	一般城镇、工矿区	<201	33.5—3.35	2.5—0.05
五	小(2)型	0.01—0.001			<3.35	<0.05

注：1. 总库容系指校核洪水位以下的水库静库容；

2. 分等指标中有关防洪、灌溉两项系指防洪或灌溉工程系统中的重要骨干工程。

枢纽中的水工建筑物，根据其所属工程等别及其在工程中的作用和重要性划分为五级，如表 1-2 所示。

表 1-2 水工建筑物级别的划分

工程等别	永久性建筑物级别		临时性建筑物级别
	主要建筑物	次要建筑物	
一	1	3	4
二	2	3	4
三	3	4	5
四	4	5	5
五	5	5	

注 1. 永久性建筑物，指枢纽工程运行期间使用的建筑物，根据其重要性分为：主要建筑物：系指失事后将造成下游灾害或严重影响工程效益的建筑物。例如：坝、泄洪建筑物、输水建筑物及电站厂房等；次要建筑物：指失事后不致造成下游灾害或对工程效益影响不大并易于修复的建筑物。例如：失事后不影响主要建筑物和设备运行的挡土墙、导流墙、工作桥及护岸等；

2. 临时性建筑物，指枢纽工程施工期间所使用的建筑物，例如导流建筑物。

为了使建筑物的安全性与其在国民经济中的重要性协调一致，对不同级别的水工建筑物，在下列方面应有不同的要求：

1. 抗御洪水的能力：如洪水标准、坝顶安全超高等。

2. 强度和稳定性：如建筑物的强度和抗滑稳定安全系数、防止裂缝发生或限制裂缝开展的要求及限制变形的要求等。

3. 建筑材料：如选用的品种、质量、标号及耐久性等。

4. 运行可靠性：如建筑物各部分尺寸裕度大小和是否设置专门设备等。

对于坝高较大、地质条件特别复杂或实践经验较少的新坝型、新结构，可提高建筑物的级别。对于低水头或失事后损失不大的水利枢纽，其水工建筑物亦可适当降低级别。

## 第二章 岩基上的挡水重力坝

### 第一节 概 述

#### 一、重力坝的工作原理及特点

重力坝是用浆砌石或混凝土材料修筑而成的挡水建筑物。一般做成上游面近于垂直的三角形断面，主要依靠坝体的重量，在坝体和地基的接触面产生抗剪强度或摩擦力，来抵抗水库的水推力，以达到稳定的要求；同时也依靠坝体自重产生的压应力，来抵消由于水压力所引起坝体上游侧的拉应力，以满足坝身强度的要求。重力坝具有以下特点：

在枢纽布置中，重力坝的泄水问题比较容易解决。与其它坝型相比较，重力坝最适于从坝顶大量溢流，图2-1所示为坝高226m的印度巴克拉溢流重力坝。在意外情况下，从非溢流重力坝顶溢过少量的洪水，一般也不会招致坝的失事，就这方面来说重力坝要比土石坝安全得多。此外，在重力坝坝体内还便于布置泄水孔或水电站的引水管道等。

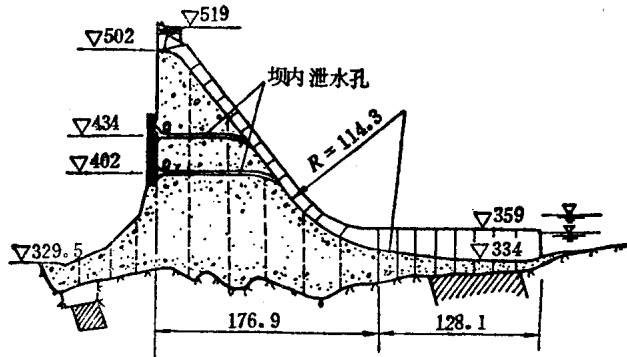


图 2-1 印度巴克拉坝剖面图(坝高226m)

重力坝地基承受很大的力，要有足够的强度，并且地基变形和沉降要很小，以免引起坝体内不利的应力。所以重力坝对地基的要求要比土石坝高，但比拱坝的要求为低。重力坝一般修在岩基上，但低的溢流重力坝也可修在土基上。

重力坝易于通过较低的坝块或底孔导流，比土石坝的施工导流更为简单和安全。在多雨地区，修建重力坝比修建土石坝受气候的影响较小。

重力坝是大体积混凝土，施工时混凝土水化发热和散热、硬化收缩，将引起坝体内温度和收缩应力，可能使坝体产生裂缝。因此要控制混凝土温度，施工时把坝体分缝分块，减小约束，待混凝土冷却到坝体稳定温度后，再给接缝灌浆，把坝体连成整体。

坝体材料和地基在一定程度上都是透水的。坝体和地基内的渗流会产生渗透压力、减少坝体重量、影响坝体稳定、并减小坝体上游侧的垂直向压应力。渗流还会侵蚀坝体和地基，造成漏水损失，并使混凝土或地基受到破坏，因此必须采取防渗措施。

重力坝在满足稳定及强度要求下，坝体内的应力分布一般很不均匀，较多部位的压应力通常是不大的，因此坝体材料的强度一般不能充分发挥作用，这是重力坝的一个主要缺点。

重力坝的型式，除常用的实体重力坝外，还有宽缝重力坝和空腹重力坝。

宽缝重力坝和实体重力坝一样，常用垂直于坝轴线的横缝将整个坝体分割成若干个坝段，而不同的是将坝的中下部位的横缝加宽。宽缝可以降低扬压力、改善坝体应力条件、节省混凝土方量。图2-2是坝高125m的苏联布拉茨克宽缝重力坝，这是目前已建成的最高的宽缝重力坝。

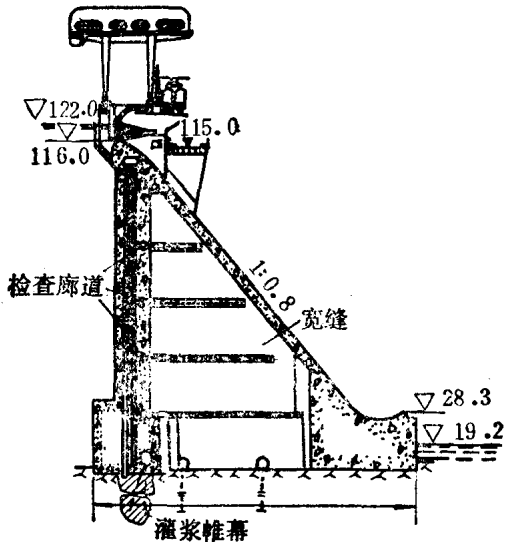


图 2-2 布拉茨克水电站大坝剖面

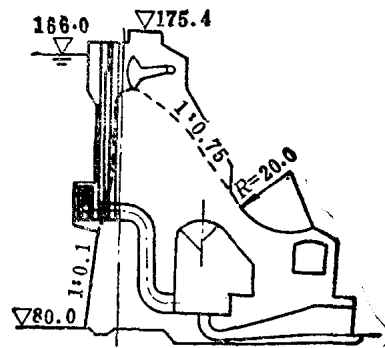


图 2-3 枫树坝腹拱坝

重力坝内设置沿坝轴向的空腹，同样具有降低扬压力、改善坝体应力的优点。又因空腹内可设置电站厂房，有利于解决大坝泄洪与厂房布置的矛盾。为改善坝体应力分布，空腹应做成拱形，称腹拱式重力坝。图2-3是93.3m高的我国枫树坝腹拱式重力坝的断面。

重力坝由于其构造简单、施工方便、工作可靠，所以发展较早，应用很广。30年代修建的美国鲍尔德拱形重力坝就高达221m。60年代以前世界上所建的高坝中，重力坝约占1/3。世界目前最高的重力坝是瑞士的大狄克桑斯坝，坝高285m。我国解放后修建了一批大中型水利工程，其中新安江、丹江口、三门峡、刘家峡等工程都采用了重力坝。刘家峡重力坝坝高147m，是我国已建成的最高的重力坝。我国近期在建和拟建的大中型水利工程中，约有半数左右是采用混凝土重力坝的。

## 二、重力坝的荷载

作用在重力坝上的荷载主要有以下几种：坝体及其上永久设备的自重，上下游坝面上的静水压力，溢流坝反弧段上的动水压力，扬压力，泥沙压力，浪压力，冰压力，地震荷载(包括地震惯性力、地震动水压力和地震动土压力)等。

### (一) 坝体及其上永久设备的自重

坝体的自重由坝体体积和坝体材料的容重算出。混凝土的容重，在初步设计阶段可根据骨料种类采取 $2.35-2.4\text{kN/m}^3$ ，施工详图阶段应由混凝土试验决定。

坝上永久设备如闸门、启门机等自重，在设计中都应考虑。

### (二) 水压力

#### 1. 静水压力

作用在坝面的静水压力可按静水力学原理计算，如图2-4，分为水平及垂直力进行计算：

$$\text{水平力} \quad P_1 = \frac{1}{2} \gamma H_1^2 \quad P_3 = \frac{1}{2} \gamma H_2^2 \quad (2-1)$$

$$\text{垂直力} \quad P_2 = \frac{1}{2} \gamma m H_1^2 \quad P_4 = \frac{1}{2} \gamma n H_2^2 \quad (2-2)$$

式中  $H_1$ 、 $H_2$ ——上、下游水深； $\gamma$ ——水的容重，一般采用 $1\text{kN/m}^3$ ，如水中含有较多的悬浮质泥沙时，应按含沙混水容重计算； $m$ 、 $n$ ——上、下游坝面坡度。

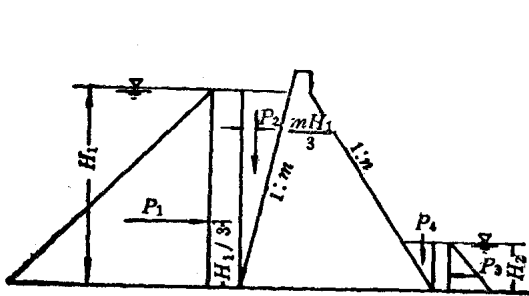


图 2-4 重力坝上静水压力分布

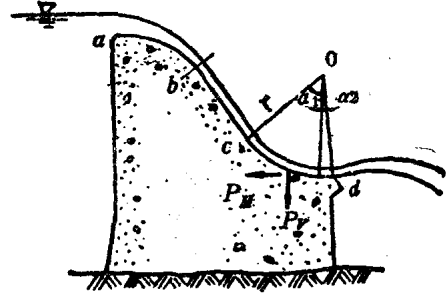


图 2-5 动水压力计算图

#### 2. 泄水动水压力

溢流重力坝泄水时，溢流面上有动水压力，图2-5的溢流堰段 $ab$ 上，一般只有很小的正或负水压力，直线段 $bc$ 上水压力也较小，都可以忽略不计。

溢流坝反弧段 $cd$ 上的动水压力，根据动量方程，其压力强度为

$$p = \frac{q\gamma}{g} \cdot \frac{v}{r} \quad (2-3)$$

因此得总水平分力为：

$$P_H = \frac{q\gamma}{g} v (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1) \quad (2-4)$$

总垂直分力为：

$$P_V = \frac{q\gamma}{g} v (\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2) \quad (2-5)$$

式中  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ ——图 2-5 所示的角度； $\gamma$ ——水的容重； $q$ ——单宽流量； $g$ ——重力加速度； $v$ ——反弧段上的流速； $r$ ——反弧半径。

$P_H$ 、 $P_V$ ——作用在反弧段的中点。

### (三) 扬压力

混凝土内存在着空隙，坝基岩石本身空隙率很小，但往往存在着节理裂隙，因此，

水库蓄水后，在上下游水位差的作用下，库水会经过坝体及坝基渗向下游，不但造成水的损失，还引起渗透压力，使坝体的有效重量减小。

### 1. 坝底扬压力

库水经坝基向下游渗透时，渗透水流沿程受到阻力，造成水头损失。如图2-6所示，上游坝踵处的扬压力强度为 $\gamma H_1$ ，下游坝趾处的扬压力强度为 $\gamma H_2$ 。由于基岩节理裂隙很不规则，难以求出坝底扬压力的准确分布，故通常假定扬压力从坝踵到坝趾呈直线变化。图中矩形ABCD部分是下游水深 $H_2$ 形成的上举力，称浮托力；三角形CDE部分是由上下游水位差形成的渗透水流产生的上举力，称为渗透压力。坝底扬压力是浮托力与渗透压力两者之和。当下游无水时，扬压力就等于渗透压力。

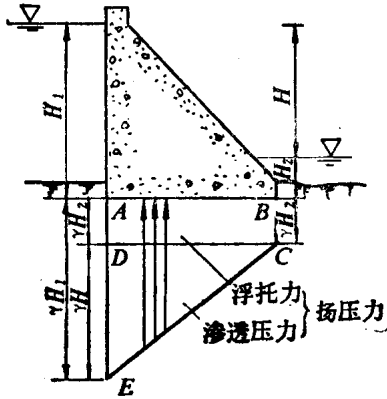


图 2-6 无防渗排水时坝底扬压力分布

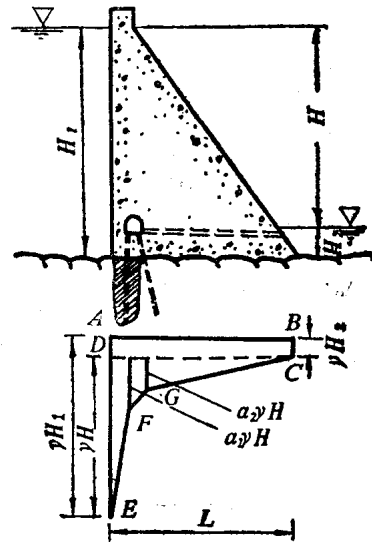


图 2-7 有防渗排水时坝底扬压力分布

为了减小坝底扬压力，改善坝的稳定和强度条件，常在坝踵附近的坝基中灌浆，形成防渗帷幕，并在防渗帷幕后设排水孔幕，此时坝底扬压力分布见图2-7；浮托力按矩形分布，压力强度为 $\gamma H_2$ ；渗透压力呈折线分布，在坝踵处为全水头 $\gamma(H_1 - H_2) = \gamma H$ ，在帷幕中心线上为 $a_1 \gamma H$ ，在排水孔中心线上为 $a_2 \gamma H$ ，在坝趾处为0，中间按直线变化。 $a_1$ 、 $a_2$ 根据坝基地质条件、防渗帷幕和排水设施的质量，参考工程的实测资料选定。通常采用 $a_1 = 0.45 - 0.6$ ， $a_2 = 0.2 - 0.4$ ，其中大值适用于岸坡坝段。

当坝基仅设有防渗帷幕而无排水孔幕时，渗透压力的分布图仅有一个转折点，即坝踵处为 $\gamma H$ ，帷幕中心处为 $a_1 \gamma H$ ， $a_1 = 0.5 - 0.7$ ，坝趾处为0。当坝基未设防渗帷幕而仅设排水孔幕时，渗透压力的分布图仅在排水孔幕处有一转折点，此处 $a_2 \gamma H$ 中的 $a_2 = 0.3 - 0.5$ 。

宽缝重力坝由于宽缝的排水减压作用，坝底的渗透压力向下游迅速减小，如图2-8。坝踵帷幕及排水中心线处均采用与实体重力坝中相应的数值，在距宽缝起点的距离为宽缝处坝段厚度 $b$ 的二倍的 $D$ 点处，渗透压力为0。

### 2. 坝体扬压力



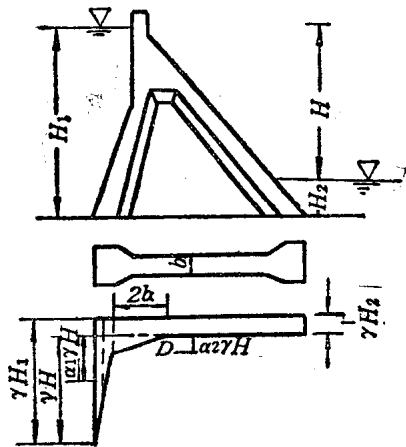


图 2-8 宽缝重力坝扬压力分布

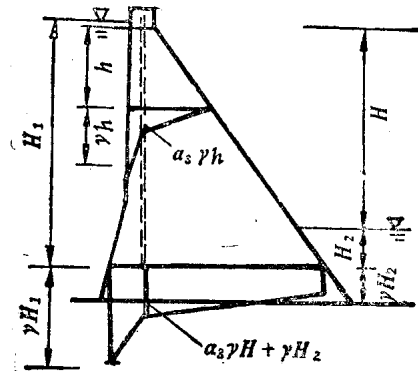


图 2-9 坝体扬压力分布

渗入坝内的水流也产生扬压力，为了减小坝内扬压力，常在上游坝面附近3—5m范围内提高混凝土的防渗性能，形成防渗层，并在其后设置坝身排水管。计算坝体水平截面上的渗透压力时，常假定为图2-9所示，上游面为 $\gamma h$ ，排水管处为 $a_3\gamma H$ ，一般采用 $a_3 = 0.15-0.3$ ，下游面为0，其间按直线变化。

#### (四) 泥砂压力

大坝建成后，入库水流挟带的泥砂逐渐淤积在坝前，对坝上游面产生泥砂压力。坝前泥砂逐年淤高，逐年固结，淤砂的容重和内摩擦角既随时间变化，又因层而异，因此泥砂压力的准确计算是比较困难的，只能参照一般经验数据，按土压力公式计算：

$$p_n = \gamma_n h_n \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right) \quad (2-6)$$

式中  $p_n$ ——泥砂对上游坝面压力强度； $\gamma_n$ ——泥砂浮容重， $\gamma_n = \gamma_1 - (1-n)\gamma$ ，其中  $\gamma_1$  为泥砂干容重， $n$  为泥砂的孔隙率， $\gamma$  为水的容重； $h_n$ ——计算点以上的淤砂厚度； $\varphi_n$ ——泥砂的内摩擦角。

坝前淤砂高程应按河流的特性及工程的情况计算确定，一般计算年限可采用50—100年。

对淤积时间较长的粗颗粒泥砂，可取内摩擦角  $\varphi_n = 18^\circ - 20^\circ$ ；粘土质淤积物可取  $\varphi_n = 12^\circ - 14^\circ$ ；极细的淤泥、粘土和胶质颗粒可取  $\varphi_n = 0^\circ$ ；当泥砂淤积很快，来不及团结时，宜取  $\varphi_n = 0^\circ$ 。

#### (五) 浪压力

水库水面在风吹下生成波浪，并对坝面产生浪压力。波浪的要素有浪高和波长，如图2-10所示，从波峰到波谷的高差为浪高  $2h_i$ ，从波峰到波峰的距离为波长  $2L_i$ 。当坝前水深大于半个波长时，波浪运动不受库底的约束，称为深水波，一般水库都能满足发生深水波的条件。

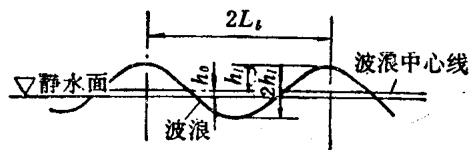


图 2-10 波浪示意图