

普通高等教育“十三五”规划教材

水工观测技术与实践

主 编 龚成勇 李正贵
副主编 韩 伟 李琪飞 何香如
文海罡 江启峰
主 审 李仁年



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十三五”规划教材

水工观测技术与实践

主 编 龚成勇 李正贵
副主编 韩 伟 李琪飞 何香如
文海罡 江启峰
主 审 李仁年



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书的主要内容包括水电站建筑物及其观测目的、内容、项目、要求和基本方法；测量与误差理论；内部观测和外部观测的观测方法、观测仪器、观测资料的收集、处理；水位、温度、渗透观测、变形观测等资料的整理分析，以及观测设备和计算机应用实践和数据处理。在内容上尽量做到“面要宽、点要实”，既努力做到概念明确、思路清晰，又遵循由易到难，循序渐进的原则。

本书可作为水利水电工程、能源与动力工程、热能与动力工程（水动方向）等专业的教材，以及水电厂运行高级工培训和自学用书，也可作为相关领域科研人员、设计人员和工程管理人员的参考资料及工程技术人员的学习材料。

图书在版编目（C I P）数据

水工观测技术与实践 / 龚成勇, 李正贵主编. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2017. 5
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-5629-4

I. ①水… II. ①龚… ②李… III. ①水工建筑物—原型观测—技术教育—教材 IV. ①TV698.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第269091号

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 水工观测技术与实践 SHUIGONG GUANCE JISHU YU SHIJIAN
作 者	主 编 龚成勇 李正贵 副主编 韩 伟 李琪飞 何香如 文海罡 江启峰 主 审 李仁年
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 (营销中心)
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	北京市密东印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 25.75印张 610千字
版 次	2017年5月第1版 2017年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	59.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

水工建筑安全观测和监测需要多种技术人才,即工程设计、仪器开发或选型、工程施工、程序配套设计、运行维护等,实施过程不仅是一种技术工作,也是一种管理工作,其主要包括信息采集、处理、结论的得出、措施的制定、信息的反馈等。其根本目的是为了水工建筑物的安全和工程效益。《水工观测技术与实践》是以水工建筑物安全观测和监测、数据处理为题材编著的专业教材,可作为水利水电工程、能源与动力工程、热能与动力工程(水动方向)等专业的专业课程教材以及高校师生和工程技术人员参考书籍,也可用作水电厂运行高级工的培训教材。本书以水工建筑物安全观测和监测为准绳,适当吸收国内外比较成熟的新理论、新方法、新技术,并注重水工建筑物安全观测和监测实践应用,在内容上要尽量做到“面要宽,点要实”,既努力做到概念明确、思路清晰,且遵循由易到难,循序渐进的原则。

本书共计10章,第1章为水工建筑物基础,是水工观测与监测的整体对象;第2章为水工观测概论,是水工建筑物监测和观测的总体要求;第3章~第5章是观测数据处理所采用到的主要数学基础知识;第6章和第7章主要介绍水工建筑物内部观测与数据分析;第8章和第9章主要介绍水工建筑物外部观测与数据分析;第10章主要介绍水工观测工程实践案例。

本书内容有如下主要特色:

(1) 内容系统完整。水工观测属于交叉技术工程,其内容比较繁杂,知识构成广泛,内容的交叉性强,基础知识多,工程实践性强。本书以水工观测实践为主线,以水工建筑物为对象,以误差理论、观测技术、数据采集处理及其精度、观测实践等为基础,将其主要内容整合起来,做到内容完整、脉络清楚、重点突出。

(2) 知识面广,且注重重点知识的介绍。以课程四大块(水工建筑物、误差理论、观测基础、工程观测实践)为主要内容,利用工程设计逻辑性将知识点呈现出来,尽力做到“面要宽,点要实”。

(3) 知识点的拓展性。水工观测系统性的构建必须保证知识的完整性,随着水电行业的发展,相关知识更新较快,本书增加观测仪器及设备、观测数据处理程序应用基础,观测资料的采集、处理和应用,观测实践等相关内

容，以便帮助读者拓展相应知识。

(4) 创新性。主要表现为：①将快速发展的“预报、控制、检验、改进”监控技术和水工观测相关知识融合起来，既注重基础知识的讲述，也拓展读者视野，保证了知识的完整性；②编写过程中引用最新现行规范，并参考最新的研究成果；③增加了水工观测设计等内容，帮助读者系统掌握水工观测和监测的知识，形成以观测和监测功能为目的的专业知识的介绍；④引用了大量的示意图和工程简图，增强本书的可读性和实践性。

(5) 引用并借鉴了大量的参考文献，保证了内容选材上的科学性、合理性。

本书由兰州理工大学副校长李仁年教授规划、并担任主审，由兰州理工大学能源与动力工程学院水利水电工程系龚成勇和西华大学能源与动力工程学院李正贵担任主编，韩伟、李琪飞、何香如、文海罡、江启峰担任副主编。本书得到了甘肃省流体机械及系统重点实验室（兰州理工大学）和流体及动力机械教育部重点实验室（西华大学）的大力支持，并由流体及动力机械教育部重点实验室（西华大学）资助出版。编写过程中引用了一些相关资料，对其著者深表谢意。由于编者学识和水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2016年12月

目 录 /

前言

第 1 章 水工建筑物基础	1
1.1 概述	1
1.2 重力坝	1
1.2.1 重力坝的特点	1
1.2.2 重力坝的荷载及其组合	3
1.2.3 重力坝的稳定分析	12
1.3 土石坝	18
1.3.1 土石坝简介	18
1.3.2 土石坝的类型	19
1.3.3 土石坝的渗流分析	20
1.3.4 地下水渗流的基本方程	20
1.3.5 平面渗流的控制方程	21
1.3.6 流网的绘制及应用	25
1.4 拱坝	29
1.4.1 拱坝简介	29
1.4.2 拱坝的类型	31
1.4.3 拱坝的荷载及荷载组合	32
1.5 水电站建筑物的典型布置形式	35
1.5.1 水电站的基本布置及组成建筑物	35
1.5.2 水电站枢纽的典型布置形式	36
1.5.3 水电站输水系统	37
1.5.4 水电站厂房建筑物及其设备组成	39
1.6 其他水工建筑物	41
1.6.1 溢洪道	41
1.6.2 水工隧洞	43
思考题与练习	45
第 2 章 水工观测概论	46
2.1 水工观测工作的目的	46

2.2 观测的内容和项目	47
2.2.1 水工观测工作的内容和要求	47
2.2.2 水工观测项目和测次	47
2.3 观测工作的基本要求	48
2.4 水工观测研究进展	49
思考题与练习	51
第3章 误差基本理论	52
3.1 误差的产生	52
3.2 偶然误差的性质	54
3.3 误差的数学基本概念	55
3.4 避免误差危害的若干原则	56
3.5 最小二乘法原理	61
3.5.1 算术平均值原理	61
3.5.2 最小二乘法原理	62
3.6 衡量观测精度的标准	65
3.6.1 中误差	65
3.6.2 相对误差	65
3.6.3 容许误差	66
3.6.4 观测值函数的中误差	66
3.7 算术平均值的中误差	71
3.8 同精度观测值的中误差	72
3.9 权	74
3.9.1 权的概述	74
3.9.2 权与中误差的关系	75
3.9.3 观测值函数的权	77
3.10 平差和精度的几点讨论	79
3.10.1 单一水准路线的平差和精度讨论	79
3.10.2 具有一个结点的水准路线平差	81
3.11 测量平差及其程序设计	82
3.11.1 水准模型网的间接平差	82
3.11.2 测边网平差程序设计	84
思考题与练习	95
第4章 沉陷和位移观测中的精度分析	96
4.1 沉陷观测中的精度分析	96
4.1.1 水准尺上的读数精度	96
4.1.2 水准测量中测站限差的分析	96
4.1.3 水准测量每千米中误差的计算	98

4.1.4	水准测量中若干闭合差的限差	100
4.2	视准线法观测位移的精度分析	102
4.2.1	活动“觇牌法”的精度分析	102
4.2.2	测微器法（即测小角法）的精度分析	104
4.3	前方交会观测水平位移的方法和精度分析	105
4.3.1	一般原理和方法	105
4.3.2	观测点位移值的计算步骤	107
4.3.3	精度分析	109
4.4	外部因素对观测的影响	110
4.4.1	温度变化的影响	110
4.4.2	地面折光的影响	111
4.4.3	水准观测中尺垫和仪器脚架对观测结果的影响	112
4.5	条件观测平差	113
4.5.1	条件方程式与误差方程式	113
4.5.2	将非线性条件方程式化为误差方程式	114
4.5.3	列出法方程式	115
4.5.4	法方程的求解	118
4.5.5	改正数平方和的计算、精度估算	123
4.5.6	水准网按条件观测平差	125
4.5.7	逐渐趋近平差法	128
	思考题与练习	131
第5章	条件平差原理	132
5.1	基础方程和它的解	132
5.2	精度评定	134
5.3	条件平差原理	135
5.4	精度评定	138
5.5	计算单位权方差和中误差的估值	138
5.6	平差值函数的协因数	140
5.7	条件平差的计算步骤	141
	思考题与练习	143
第6章	内部变形监测	144
6.1	概述	144
6.2	监测布置	144
6.2.1	测斜仪（计）类	144
6.2.2	多点位移计	146
6.2.3	滑动测微计	147
6.2.4	收敛计	147

6.2.5	基岩变形计	148
6.2.6	沉降仪	148
6.2.7	引张线式水平位移计	149
6.2.8	土体位移计	150
6.2.9	测（裂）缝计	150
6.3	监测仪器设施与方法	150
6.3.1	测斜仪（计）类	150
6.3.2	多点位移计	167
6.3.3	滑动测微计	172
6.3.4	收敛计	175
6.3.5	基岩变形计	181
6.3.6	沉降仪类	183
6.3.7	引张线式水平位移计	190
6.3.8	土体位移计	194
6.3.9	测（裂）缝计	197
	思考题与练习	203
第7章	观测资料的采集、处理和应用	204
7.1	引言	204
7.2	观测系统的误差	204
7.3	观测资料的采集和现场质量控制	208
7.4	单支仪器观测资料的误差检验和处理	212
7.4.1	对比检验方法	213
7.4.2	统计检验方法	216
7.5	无应力计资料计算	218
7.6	应变计组的误差检验和处理	220
7.7	应变计组资料检验和处理的新方法	225
7.8	混凝土实际应力的计算方法和步骤	227
7.9	观测成果的计算、分析和应用	230
	思考题与练习	232
第8章	外部观测	233
8.1	水平位移观测	233
8.1.1	活动觇标法观测水平位移	233
8.1.2	小角度法观测水平位移	237
8.1.3	激光准直法观测水平位移	238
8.1.4	引张线法观测水平位移	241
8.1.5	倒垂法观测水平位移	244
8.2	垂直位移观测	247

8.2.1	起测基点的校测	248
8.2.2	垂直位移标点的观测	250
8.2.3	误差来源	251
8.2.4	观测精度要求	252
8.3	倾斜观测方法	253
8.3.1	观测计算	254
8.3.2	倾斜观测仪器	254
8.4	基线丈量	256
8.4.1	基线丈量方法	256
8.4.2	基线尺的维护	258
8.4.3	其他基线丈量方法	259
8.4.4	基线长度计算	260
8.4.5	基线丈量的精度分析	262
8.4.6	基线丈量的精度计算	262
8.5	渗流及扬压力观测	263
8.5.1	绕坝渗流观测	263
8.5.2	扬压力观测	265
8.6	温度观测	266
8.6.1	气温观测	266
8.6.2	水温观测	267
8.7	水流流态观测	267
8.7.1	进口流态观测	267
8.7.2	水面轨迹观测	267
8.7.3	下游流态观测	269
8.8	接缝观测和裂缝观测	269
8.8.1	接缝观测	269
8.8.2	裂缝观测	271
8.8.3	遥测测缝计	271
8.9	土壤固结和孔隙水压力观测	271
8.9.1	土坝固结观测	271
8.9.2	孔隙水压力观测	272
8.10	超声波检验技术	276
8.10.1	超声非金属检测仪	276
8.10.2	超声波声速的测定	277
8.10.3	用超声波法测量混凝土的抗压强度和动弹性模量	277
8.10.4	检测混凝土的裂缝	278
8.11	水质及泥沙分析	279
8.11.1	水质分析	279

8.11.2 泥沙分析	279
思考题与练习	281
第9章 观测资料分析	282
9.1 绪论	282
9.1.1 观测资料分析的目的及意义	282
9.1.2 观测资料分析的内容和方法	284
9.1.3 观测资料分析的基础工作	287
9.2 水位及气温资料整理分析	293
9.2.1 水库水位及下游水位资料整理分析	293
9.2.2 气温资料整理分析	297
9.2.3 气温成果整理	301
9.3 水温资料的整理分析	301
9.3.1 实测成果表的编列和特征值的统计	302
9.3.2 水温过程线的绘制和分析	302
9.3.3 垂线水温分布图的绘制和分析	303
9.3.4 断面水温分布图的绘制和分析	304
9.3.5 水温变化的影响因素	305
9.3.6 水温成果整理	305
9.4 坝体混凝土温度资料整理分析	305
9.4.1 混凝土温度过程线的绘制和分析	306
9.4.2 混凝土温度分布图的绘制和分析	306
9.4.3 平均温度和温度梯度的计算	308
9.4.4 影响混凝土温度的因素分析	309
9.4.5 坝体混凝土温度的理论计算	310
9.4.6 混凝土温度成果整理	314
9.5 渗透观测资料的整理分析	314
9.5.1 坝基扬压力资料的整理分析	314
9.5.2 坝体孔隙压力资料的整理分析	323
9.5.3 坝体及坝基漏水资料的整理分析	325
9.5.4 水化验资料的整理分析	328
9.6 变形观测资料的整理分析	331
9.6.1 引起变形的原因	331
9.6.2 变形的变化规律	333
9.6.3 变形资料整理分析的一般方法	334
9.6.4 建立变形的回归分析的函数关系式	335
9.6.5 变形回归分析计算的步骤	338
9.6.6 变形回归分析的实例	339
思考题与练习	343

第 10 章 水工观测工程实践案例	345
10.1 观测设计概述与工程概况	345
10.1.1 水工观测设计概述	345
10.1.2 工程概况	346
10.1.3 监测设施概况	348
10.2 环境量监测资料分析	370
10.2.1 水位监测资料分析	370
10.2.2 气温监测资料分析	371
10.3 外部观测资料分析	371
10.3.1 坝顶水平位移监测	371
10.3.2 基础沉陷位移监测	372
10.4 坝体接缝开合度监测资料分析	372
10.4.1 3 号闸墩测缝计监测分析	372
10.4.2 2 号机纵缝、宽槽测缝计监测分析	375
10.4.3 比较 2 号和 4 号机宽槽测缝计监测分析	381
10.5 坝体应力应变监测资料分析	382
10.5.1 3 号闸墩应力应变监测分析	382
10.5.2 2 号机应力应变监测分析	382
10.5.3 4 号机应力应变监测分析	382
10.6 坝体钢筋应力监测资料分析	386
10.6.1 3 号闸墩钢筋计应力分析	386
10.6.2 2 号机钢筋计应力分析	386
10.6.3 4 号机钢筋计应力分析	388
10.7 坝体温度场监测资料分析	389
10.8 渗流监测资料分析	389
10.8.1 基础扬压力分析	389
10.8.2 渗透压力分析	389
10.8.3 两岸绕渗分析	393
10.9 结论与说明	394
思考题与练习	395
参考文献	396

第1章 水工建筑物基础

1.1 概 述

水工建筑物按其作用可分为以下几类：

(1) 挡水建筑物。用以拦截江河、形成水库或壅高水位。如各种坝、水闸以及为抗御洪水或挡潮，沿江河海岸修建的堤防、海塘等。

(2) 泄水建筑物。用以宣泄多余水量、排放泥沙和冰凌，或为人防、检修而放空水库、渠道等，以保证坝和其他建筑物的安全。如各种溢流坝、坝身泄水孔及各式岸边溢洪道和泄水隧洞等。

(3) 输水建筑物。为满足灌溉、发电和供水的需要，从上游向下游输水用的建筑物。如引水隧洞、引水涵管、渠道和渡槽等。

(4) 取（进）水建筑物。输水建筑物的首部建筑，如引水隧洞的进口段、灌溉渠首和供水用的进水闸、扬水站等。

(5) 整治建筑物。用以改善河流的水流条件，调整水流对河床及河岸的作用，以及防护水库、湖泊中的波浪和水流对岸坡的冲刷。如丁坝、顺坝、导流堤、护底和护岸等。

(6) 专门建筑物。为灌溉、发电、过坝需要而兴建的建筑物，如专为发电用的压力前池、调压室、电站厂房；专为灌溉用的沉沙池、冲沙闸；专为过坝用的船闸、升船机、鱼道和过木道等。

应当指出的是，有些水工建筑物的功能并非单一，难以严格区分其类型，如各种溢流坝，既是挡水建筑物，又是泄水建筑物；水闸既可挡水，又可泄水，有时还可作为灌溉渠首或供水工程的取水建筑物。

1.2 重 力 坝

1.2.1 重力坝的特点

重力坝是一种古老而又应用广泛的坝型，它因主要依靠坝体自重产生的抗滑力维持稳定而得名。通常修建在岩基上，用混凝土或浆砌石筑成。坝轴线一般为直线，垂直坝轴线方向设有永久性横缝，将坝体分为若干个独立坝段，以适应温度的变化和地基不均匀沉降，坝的横剖面基本上是上游近于铅直的三角形，如图 1.1 所示。

1.2.1.1 重力坝的工作原理及特点

重力坝在水压力及其他荷载的作用下，主要依靠坝体自身重量在滑动面上产生的抗滑力来满足稳定要求；同时也依靠坝体自重在水压力所产生的压应力来抵消由于水压力所引起的拉应力，以满足强度要求。2012 年竣工的三峡枢纽工程就是按照重力坝原理而修

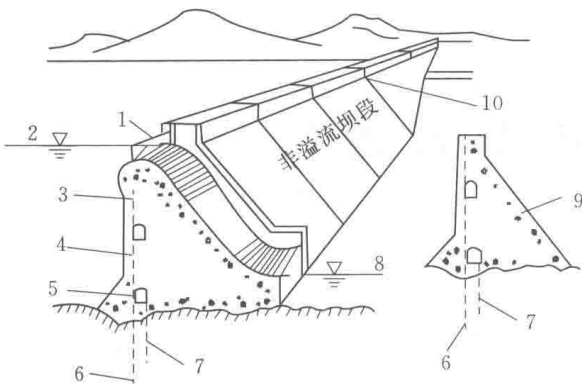


图 1.1 混凝土重力坝示意图

1—闸门；2—上游水位；3—溢流坝段；4—排水管；
5—廊道；6—帷幕灌浆孔；7—排水孔；8—下游水位；9—非溢流坝段；10—横缝

建的，如图 1.2 所示。

重力坝与其他坝型比较，其主要特点如下。

(1) 结构作用明确，设计方法简便。重力坝沿坝轴线用横缝将坝体分成若干个坝段，各坝段独立工作，结构作用明确，稳定和应力计算都比较简单。

(2) 泄洪和施工导流比较容易解决。重力坝的断面大，筑坝材料抗冲刷能力强，适用于在坝顶溢流和坝身设置泄水孔。在施工期可以利用坝体或底孔导流。枢纽布置方便紧凑，一般不需要另设河岸溢洪道或泄洪隧

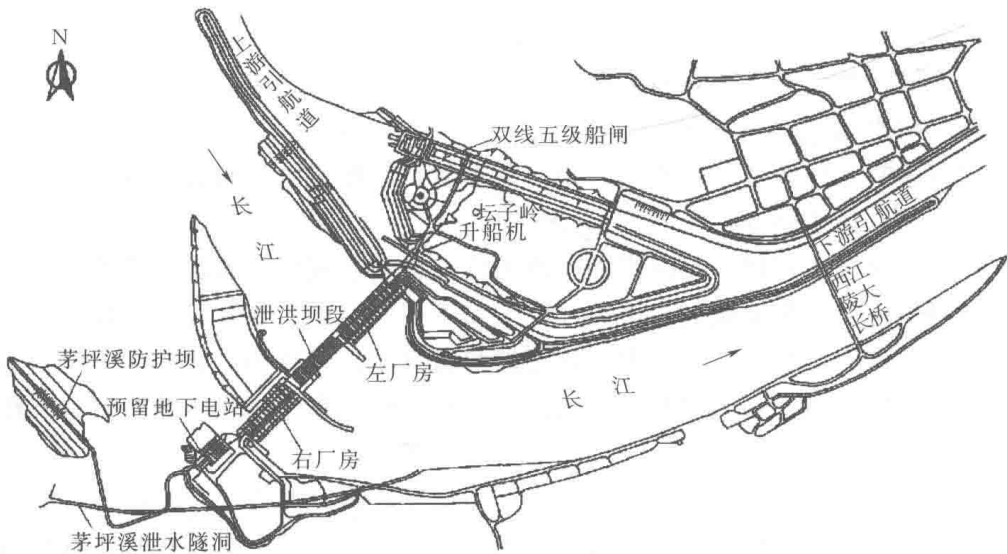


图 1.2 三峡大坝平面布置图

洞。在有意外发生的情况下，即使从坝顶少量过水，一般也不会招致坝体失事，这是重力坝最大的优点。

(3) 具有结构简单、施工方便、安全可靠的特点。坝体放样、立模、混凝土浇筑和振捣都比较方便，有利于机械化施工。且由于剖面尺寸大，筑坝材料强度高，耐久性好。因此，抵抗水的渗透、冲刷，以及地震和战争破坏的能力都较强，安全性较高。

(4) 对地形、地质条件适应性强。地形条件对重力坝的影响不大，几乎任何形状的河谷均可修建重力坝。因为坝体作用于地基面上的压应力不大，所以对地质条件的要求也较低。重力坝对地基的要求虽比土石坝高，但低于拱坝及支墩坝，对于无重大缺陷、一般强度的岩基均可满足要求。

(5) 受扬压力影响较大。坝体和坝基在某种程度上都是透水的，渗透水流将对坝体产生扬压力。由于坝体和坝基接触面较大，故受扬压力影响也大。扬压力的作用方向与坝体自重的方向相反，会抵消部分坝体的有效重量，对坝体的稳定和应力不利。

(6) 材料强度不能得到充分发挥。由于重力坝的断面是根据抗滑稳定和无拉应力条件确定的，坝体内的压应力通常不大，使材料强度得不到充分发挥，这是重力坝的主要缺点。

(7) 坝体体积大，水泥用量多，一般均需采取温控散热措施。许多工程因施工时温度控制不当而出现裂缝，有的甚至形成危害性裂缝，从而削弱了坝体的整体性能。

1.2.1.2 重力坝的类型

(1) 按坝的高度分类，可分为高坝、中坝和低坝三类。坝高大于 70m 的为高坝；坝高在 30~70m 的为中坝；坝高小于 30m 的为低坝。坝高指的是坝体最低面（不包括局部深槽或井、洞）至坝顶路面的高度。

(2) 按筑坝材料分类，可分为混凝土重力坝和浆砌石重力坝。一般情况下，较高的坝和重要的工程经常采用混凝土重力坝；中、低坝则可以采用浆砌石重力坝。

(3) 按泄水条件分类，可分为溢流坝和非溢流坝。坝体内设有泄水孔的坝段和溢流坝段统称为泄水坝段。非溢流坝段也可称作挡水坝段，如图 1.1 所示。

(4) 按施工方法分类，可分为浇筑式混凝土重力坝和碾压式混凝土重力坝。

(5) 按坝体的结构形式分类，可分为实体重力坝 [图 1.3 (a)]、宽缝重力坝 [图 1.3 (b)]和空腹重力坝 [图 1.3 (c)]。

1.2.2 重力坝的荷载及其组合

作用在重力坝上的主要荷载有坝体自重、上下游坝面上的水压力、扬压力、浪压力或冰压力、泥沙压力以及地震荷载等。

1.2.2.1 荷载计算

荷载计算包括确定荷载的大小、方向和作用点。一般按单位坝长进行分析，但对溢流坝段则通常取一个坝段进行计算。

1. 自重（包括永久设备重）

坝体自重是维持大坝稳定的主要荷载，其大小可根据坝的体积和材料重度计算确定。

$$G = \gamma_c V$$

(1.1)

式中 G ——坝体自重，kN；

V ——坝的体积， m^3 ；

γ_c ——筑坝材料的重度， kN/m^3 。

筑坝材料重度选用的是否合适，直接会影响到坝的安全和经济，对此必须要慎重。在初步设计阶段可根据材料种类按表 1.1 选取，施工图设计阶段应通过现场实验确定。

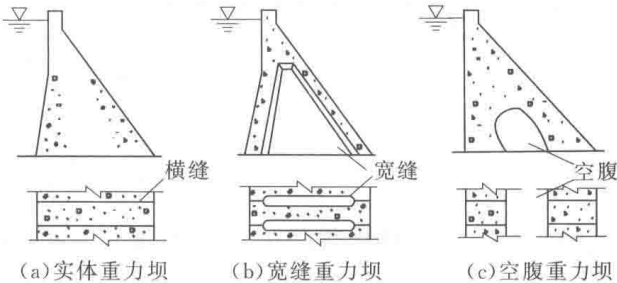


图 1.3 重力坝的基本形式

表 1.1 筑坝材料的重度

筑坝材料	混凝土	浆砌石	浆砌条石	细骨料混凝土砌石
重度/(kN/m^3)	23.5~24	21~23	23~25	23~24

2. 水压力

(1) 挡水坝的静水压力。静水压力可按水力学的原理计算。坝面上任意一点的静水压强为 $p = \gamma_0 y$ ，其中 γ_0 为水的重度， y 为该点距水面深度。当坝面倾斜或为折面时，为了计算方便，常将作用在坝面上的水压力分为水平水压力和垂直水压力分别计算，如图 1.4 所示。

(2) 溢流坝的水压力。溢流坝段坝顶闸门关闭挡水时，静水压力计算与挡水坝段完全相同。在泄水时，作用在上游坝面的水压力可按式 (1.2) 近似计算，如图 1.5 所示。

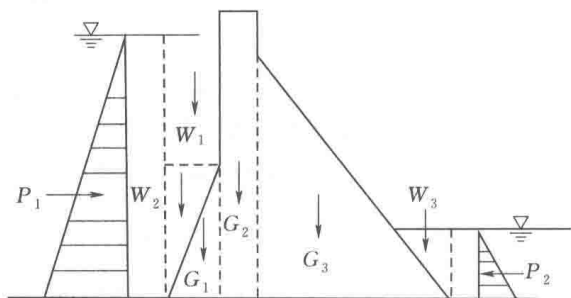


图 1.4 挡水坝的静水压力

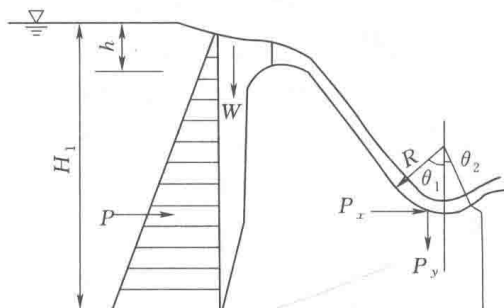


图 1.5 溢流坝的水压力

$$P = \frac{1}{2} \gamma_0 (H_1^2 - h^2) \quad (1.2)$$

式中 P ——单位坝长的上游水平压力，kN/m，作用在压力图形的形心；

H_1 ——上游水深，m；

h ——坝顶溢流水深，m；

γ_0 ——水的重度，一般采用 9.81 kN/m^3 。

(3) 溢流坝下游反弧段的动水压力。其可根据流体动量方程求得。若假设反弧段始、末两断面的流速相等，则单位坝长在该反弧段上动水压力的总水平分力 P_x 与总垂直分力 P_y 的计算公式如下：

$$P_x = \frac{\gamma_0 q v}{g} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (\text{kN}) \quad (1.3)$$

$$P_y = \frac{\gamma_0 q v}{g} (\sin \theta_2 + \sin \theta_1) \quad (\text{kN}) \quad (1.4)$$

式中 q ——鼻坎处单宽流量， m^3/s ；

v ——反弧段上的平均流速， m/s ；

θ_1 、 θ_2 ——反弧段圆心竖线左、右的中心角。

P_x 、 P_y 的作用点，可近似地认为作用在反弧段中央，其方向以图 1.6 所示为正。溢流面上的脉动水压力和负压对坝体稳定和坝内应力影响很小，可以忽略不计。

3. 扬压力

(1) 坝基面上的扬压力。扬压力由上、下游水位差产生的渗透水压力和下游水深产生的浮托力两部分组成，其大小可按扬压力分布图形进行计算。影响扬压力分布及数值的因素有很多，设计时根据坝地质条件、防渗及排水措施、坝体的结构形式等综合考虑选用

扬压力计算图形。

1) 坝基设有防渗帷幕和排水幕的实体重力坝。防渗帷幕和排水幕是重力坝减小渗透压力的常用措施。防渗帷幕是通过在岩基中钻孔灌浆而成的，其渗透系数远小于周围岩石的渗透系数，渗透水流绕过或渗过帷幕时要消耗很大的能量，从而使帷幕后的渗透压力大为降低。排水幕是一排由钻机钻成的排水孔组成的，能使部分渗透水流自由排出，使渗透压力进一步降低。这种情况的扬压力分布图形如图 1.6 所示。图中矩形部分是由下游水深 H_2 产生的浮托力，在水平坝基上任一点的压强为 $\gamma_0 H_2$ ；折线部分是由上下游水位差 H 产生的渗透压力，上游压强为 $\gamma_0 H$ ，下游为零，排水幕处为 $\alpha \gamma_0 H$ 。 α 为剩余水头系数，河床坝段采用 $\alpha = 0.25$ ，岸坡坝段采用 $\alpha = 0.35$ ，对于水文和工程地质条件较复杂的地基，应进行研究论证，以确定合适的数值。

在特殊情况下，也可只设灌浆帷幕或排水幕，相应的扬压力图形与图 1.6 类似，其剩余水头系数 α 可以结合专门论证进行确定。

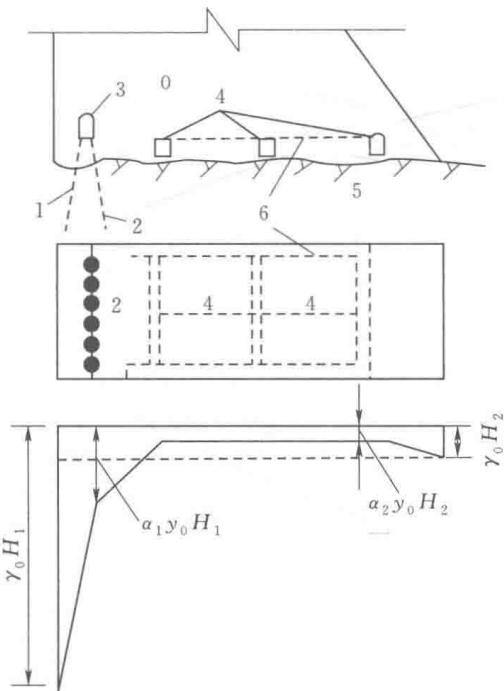


图 1.7 采用抽排降压措施的实体重力坝坝基面扬压力

1—防渗帷幕；2—主排水幕；3—灌浆廊道；4—纵向排水廊道；5—基岩面；6—横向排水

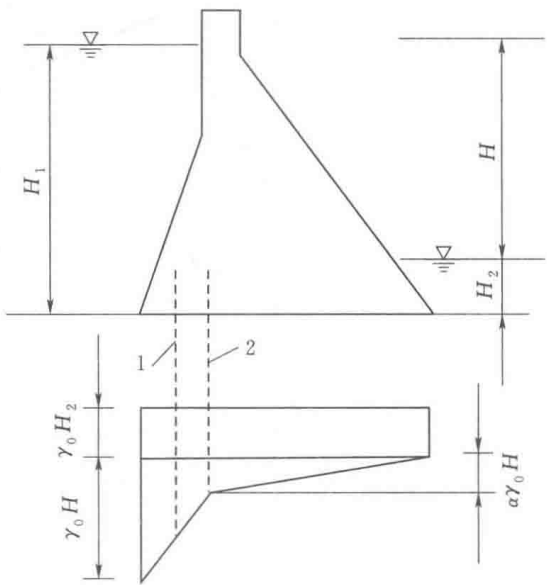


图 1.6 设有防渗帷幕和排水幕的坝基面扬压力
1—防渗帷幕；2—主排水幕

2) 采用抽排降压措施的实体重力坝。防渗帷幕和排水幕不能降低浮托力，当下游水深较大时，浮托力对扬压力的影响显著。为了更有效地降低扬压力，可以采用抽排降压措施，即在坝体廊道内设置抽水设备及排水系统，定时抽排，使扬压力进一步降低。此时坝基面上的扬压力分布图形如图 1.7 所示。图中 α_1 为主排水幕处扬压力剩余系数，一般取 $\alpha_1 = 0.2$ ， α_2 为坝基面上残余扬压力系数，可取 $\alpha_2 = 0.5$ 。当有专门论证时，系数 α_1 、 α_2 可采用论证后的值。

(2) 坝体内部的扬压力。渗透水流除在坝基面产生渗透压力外，渗入坝体内部的水流也会产生渗透压力。为减小坝体内的渗透压力，常在坝体上游面附近的 3~5m 范围内，提高混凝土的防渗性能，形成防渗层，并在防渗层后设坝身排水管。坝体内部的扬压力按图 1.8 所示的分布图形进行计算，图中 α_3 常取 0.2。当坝内无排水管时，则取渗透压力为三角形分布。