

低水头 水工建筑物设计

DISHUITOU
SHUIGONG JIANZHUWU SHEJI

主编 李天科 刘经强 王爱福



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

低水头 水工建筑物设计

主编 李天科 刘经强 王爱福

书号：955.4
主编：李天科、刘经强、王爱福
中国水利水电出版社
北京市：100038
E-mail: sales@waterpub.com.cn
电话：(010) 6837638 (发行中心)
北京科水图书营销中心 (零售)
电话：(010) 88381094, 68305413
全国各书店、新华书店均有出售

中国水利水电出版社
北京市：100038
161mm×260mm 18开本 21.5印张 210千字
2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷
0001-2009 册
28.00元



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书在汇总、综合分析当前国内外水利水电工程设计的基本理论和工程设计实例的基础上,针对平原、丘陵区常见的低水头水工建筑物经过几十年运行中出现的问题,分析其设计中的不足,结合现代新的计算理论和计算方法编写而成。

全书共分十二章,包括绪论、水闸、橡胶坝、引水防沙枢纽、河岸溢洪道与迷宫堰、重力坝、土石坝、平原水库优化设计方法、其他水工建筑物、基础防渗处理、土工合成材料的应用、水利枢纽布置等。

本书可供水利水电工程设计、施工技术人员阅读,或作为高等院校水利水电类专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

低水头水工建筑物设计 / 李天科, 刘经强, 王爱福
主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2009. 9
ISBN 978-7-5084-6846-4

I. ①低… II. ①李… ②刘… ③王… III. ①低水头—水工建筑物—建筑设计 IV. ①TV6

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第173705号

书 名	低水头水工建筑物设计
作 者	主编 李天科 刘经强 王爱福
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 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	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 21.5印张 510千字
版 次	2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	38.00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

水是生命之源，世间万物均离不开水。水决定了植物、动物、人类的生存与分布。

经过新中国近 60 年的水利工程建设，我国已建各类水库 8.6 万余座。这些水库在兴水利、除水害、调节水资源平衡、促进国民经济发展等方面发挥了巨大的作用。

本书是作者在总结 20 多年的水工建筑物教学、科研、工程设计、事故处理、科技咨询、技术交流的基础上，以新版的水工建筑物设计规范为主干线，结合近期相关的新技术、新工艺、新设备、新材料等编写而成。在编写过程中，本着求新、求准、实用的原则，以丘陵、平原区的低水头水工建筑物设计为主体，着重介绍水工建筑物的设计规划要求、设计方法、设计原则以及设计中应注意的问题等。同时介绍了水工建筑中应用的新设备、新技术、新材料，以及先进的优化设计手段等。

本书内容自成体系，可作为水利工程设计技术人员的参考书，也可作为高等学校水利水电类等相关专业教材。

针对当前一般水工建筑物教材中存在的问题，如教材使用周期长、只讲成熟的理论等和目前水利水电工程建设的特点：施工设备、技术等先进于设计，而设计又先进于教材，导致学生不能掌握施工中的前沿科学，因此在编写中注意体现了以下几个原则：

1. 结合某些建筑物的设计，进行基本概念、基本理论和基本知识的阐述，不追求全面的设计要求；对于方法性的内容，着重介绍基本思路，不过分追求系统和全面；对于规范性、资料性内容，着重进行原则性说明，不过多列出数据和图表。

2. 努力体现专业特点，着重介绍常用水工建筑物的设计方法、设计中应注意的问题、设计规范的使用等。

3. 为了开拓学生思路，培养学生的自学能力和创新能力，对于一些最新成就、当前发展动态或不成熟的方法和理论，阐明思路和目标，由学生自己

在以后的学习和工作中探索、改进、发展；对于某些错误的方法及工程中的教训，也在文中列出，以便于学生借鉴。

4. 结合当前水工建筑物设计的特点，还着重介绍了平原水库优化设计方法、土工合成材料在水利工程中的应用、河道上橡胶坝设计、中小型水库溢洪道上迷宫堰设计等四部分内容。

本书主编李天科、刘经强、王爱福，副主编冷爱国、王艳艳、朱逢春、王明安。具体编写分工如下：第一章由李天科编写；第二章由王明安编写；第三章由朱逢春、李天科编写；第四章由冷爱国、张云涛编写；第五章由王爱福编写；第六章由王艳艳、牛景太编写；第七章由李天科、王爱福编写；第八章由李天科、刘昌礼编写；第九章由王艳艳编写；第十章由刘经强、刘宁编写；第十一章由李天科、冷爱国编写；第十二章由刘经强编写。全书由李天科教授统稿，由姜锡强教授、于梅开研究员（教授级）、任广云研究员（教授级）三位同志审稿。审稿人对本书的编写提出了很多宝贵意见，对此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，编写时间仓促，书中难免有错误和不当之处，希望广大读者给予批评和指正。

作者

2009年5月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 水利工程概况	1
第二节 水利枢纽与土工建筑物的等级划分	8
第三节 土工建筑物的洪水标准	10
第四节 土工建筑物的超高	11
第二章 水闸	13
第一节 概述	13
第二节 水闸的总体布置	16
第三节 水闸的水力设计	22
第四节 水闸的防渗排水设计	32
第五节 闸室稳定计算	40
第六节 闸室结构分析	47
第七节 水闸设计常见问题	55
第八节 水闸的施工与运用管理	57
第三章 橡胶坝	69
第一节 概述	69
第二节 规划布置	73
第三节 工程设计	76
第四节 坝袋优化设计	83
第五节 螺栓压板锚固技术的改进	89
第六节 充排水系统技术优化	94
第七节 控制运用与管理技术	99
第八节 工程设计实例	102
第四章 引水防沙枢纽	113
第一节 概述	113
第二节 工程布置	115
第三节 无坝引水渠首	116

第四节 有坝引水枢纽	118
第五章 河岸溢洪道与迷宫堰	121
第一节 概述	121
第二节 开敞式正槽溢洪道	123
第三节 非常溢洪道	129
第四节 迷宫堰	131
第六章 重力坝	150
第一节 概述	150
第二节 重力坝的荷载及荷载组合	153
第三节 重力坝的稳定分析	162
第四节 重力坝的应力分析	165
第五节 非溢流重力坝的剖面设计	168
第六节 溢流重力坝	171
第七节 重力坝的材料及构造	175
第八节 浆砌石重力坝	179
第七章 土石坝	183
第一节 概述	183
第二节 土石坝的剖面 and 构造	186
第三节 土石坝的筑坝材料	194
第四节 土石坝的渗流分析	198
第五节 土石坝的稳定分析	207
第六节 土坝的固结与沉陷	215
第七节 钢筋混凝土面板堆石坝	219
第八节 土石坝的裂缝及其控制	228
第九节 土坝护坡设计	232
第八章 平原水库优化设计方法	249
第一节 概述	249
第二节 平原水库优化设计影响因素分析	250
第三节 工程实例	264
第九章 其他水工建筑物	267
第一节 倒虹吸管	267
第二节 跌水	276
第三节 陡坡	280
第十章 基础防渗处理	283
第一节 概述	283
第二节 黏土截水墙	283

第三节	帷幕灌浆	284
第四节	混凝土防渗墙	286
第五节	振动沉模防渗墙	290
第六节	高喷防渗技术	292
第七节	水泥搅拌桩	296
第十一章	土工合成材料的应用	300
第一节	概述	300
第二节	垂直铺塑防渗技术	308
第三节	土工膜的坝体防渗	314
第四节	土工膜应用中存在的问题	321
第五节	土工织物的反滤及排水设计	324
第十二章	水利枢纽布置	326
第一节	水利枢纽设计阶段	326
第二节	水利枢纽布置	329
参考文献		334

第一章 绪 论

● 第一节 水利工程概况

为兴水利、除水害而修建的工程称为水利工程；每一项水利工程又是由不同用途的建筑物组成，这些建筑物叫水工建筑物；不同用途的建筑物组合成一个有机的综合体，称为水利枢纽。

为了征服水旱灾害和开发水利资源，必须修建各类水利工程，水利工程是由若干个水工建筑物组成。水工建筑物是人们兴水利、除水害的产物，它来源于实践。“善治国者，必重水利”，治水，推动历史的发展，大禹治水成功、舜禅位于大禹，禹创立了中国第一个朝代——夏，中国由原始社会进入奴隶制社会；李冰修建的都江堰，使成都平原成为中国当时最大的粮仓，秦始皇在此囤粮 3 年作为战争的后盾，一举统一中国。

一、水资源

中国地跨北温带和亚热带，幅员辽阔，水量充沛，有奔腾的江河水流，有澎湃的海湾潮汐。

(1) 大江大河。中国水系众多，大江大河源远流长，有长江、黄河、珠江、淮河、海河、辽河、松花江等七大水系；有雅鲁藏布江、澜沧江、怒江、鸭绿江、图们江、黑龙江、额尔齐斯河、伊利河、阿克苏河等众多国际河流。流域面积在 100km^2 以上的河流有 50000 多条， 1000km^2 以上的河流有 1598 条。

(2) 水量资源。中国多年平均降雨量 630mm ，总降水量 60000亿 m^3 ，每年平均河川径流量为 27155亿 m^3 ，居世界第六位。按人口平均占有水量计算，世界人均占有量为 $10930\text{m}^3/(\text{人}\cdot\text{年})$ ，中国为 $2080\text{m}^3/(\text{人}\cdot\text{年})$ ，不足世界平均值的 $1/5$ ，低于美国 1975 年人均实际用水量 [$2528\text{m}^3/(\text{人}\cdot\text{年})$]。所以中国仍为贫水国，水资源十分宝贵。

(3) 水能资源。中国地势西高东低，地形复杂多变。其中山地占 33% ，高原占 26% ，丘陵占 10% ，合计占 69% ，长江落差 5400m ，黄河落差 4830m ，雅鲁藏布江、澜沧江、怒江的落差都在 4000m 以上。我国水能资源居世界第一位，理论蕴藏量 6.7605亿 kW ，可开发量 3.7853亿 kW ，经济开发量为 2.93亿 kW ，对应的年发电量为 $1.27\text{万亿 kW}\cdot\text{h}$ ，其中西部地区占 68% ，到 2007 年底，我国电网总装机容量为 7.1329亿 kW ，其中水电装机为 1.4526亿 kW ，占总容量的 20.36% 。三峡枢纽电厂单站装机 1820万 kW （远期为 2240万 kW ），是目前世界最大的水电站，单机 70万 kW 也是目前世界最大的水轮发电机组。正在规划中的刚果河上的印加水电站为 3900万 kW （ $75\text{万 kW}\times 52$ 台），建成后将成为世界最大的水电站。

水能资源无污染，为再生能源，而火电站消耗的是煤和石油等一次性能源，一次性能

源在地球上是不可能再生的,只有水能资源才是用之不竭的。

二、建设成就

1. 悠久的治水历史

中国是世界四大文明古国之一,勤劳的中国人民在征服水旱灾害和开发利用水利资源中取得了很大的成就,积累了宝贵的经验。

公元前 256 年,蜀郡太守李冰修建的都江堰,巧夺天工,旱能灌,涝能排,水旱从人,并提出“深淘滩、低作堰”的治水方针,使成都平原成为粮仓。当时灌溉面积为 200 万亩,目前已发展到 1100 万亩;经隋唐到元明建成的京杭大运河,全长 1794km,成为古代中国南北交通运输的大动脉;始建于春秋战国时代的黄河大堤长 1400km,保卫黄河的安澜;开创于东汉时期的江浙海塘,有效防止了海水的入侵,以上 4 项工程被誉为四大古代水利工程。还有安徽的芍陂、河北的引漳十二渠、陕西郑国渠、新疆坎儿井等水利工程,都体现了古代劳动人民的智慧和治水业绩。

2. 当代的水利工程建设

新中国成立以来,在中国共产党的领导下,中国的水利建设更加辉煌。

近 60 年来,全国共建成各类水库 8.6 万多座,总库容达 4924 亿 m^3 ,其中大型水库 397 座,中型 2643 座。整修和加固堤防 26 万 km,海堤 7900km,兴建水闸 31742 座,有效地控制了水旱灾害。

截至 2007 年底,水电装机 14526 万 kW,年发电量 4237 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,装机为世界第二位。三峡水利枢纽总装机 1820 万 kW,是世界最大的水电站,单机容量为 70 万 kW,是世界最大的水轮机组。

水利工程建设也不断的促进了水工建筑物科学技术的发展。如坝型革新、坝基处理方法、高水头消能防冲、模型试验方法、结构优化设计、计算机软件的开发和应用、结构设计可靠度理论、弹塑性力学计算方法等的应用,使水工建筑物结构设计更明确、更准确、更快捷。

三、现存问题

由于水量分布的地域不均衡、时间不均衡等因素,旱灾和洪涝灾害几乎每年都可能在不同的地区出现。集中表现为洪涝灾害、干旱缺水、水环境恶化等三大问题。很多城市缺水现象还相当严重,制约了经济发展,甚至影响城市居民的正常生活。1998 年长江、松花江特大洪水,又一次给人们敲响了警钟。水与人类活动不相适应主要有以下几个方面。

1. 地理特征

东南沿海年降雨量大于 1600mm,华北地区为 400~800mm,西北地区不足 250mm。长江以南诸河的年径流量占全国的 82%,而耕地仅占全国的 38%;而处于干旱、半干旱的黄、淮、海以北地区,水量占全国的 18%,土地占全国的 62%。北方的严重缺水,严重制约了农业生产和当地的经济发展。因此,国家领导人下决心兴建南水北调工程,此举已酝酿几十年。

2. 时间分布

由于气候受季风的影响,夏、秋季的径流量占全年的 70%~80%,且主要集中在汛期,造成春旱夏涝。北方地区的降雨量年际之间变化很大,丰、枯水年的降雨量相差 5 倍

以上。

3. 水土流失

水土流失已成为当今社会一大公害，中国水土流失面积达 367 万 km^2 ，占国土面积的 38%，严重地破坏了生产力，恶化了生态环境。其自然因素是土壤、植被条件差；社会因素是大兴土木，盲目开垦等。新中国成立后有三次大开荒，垦地 244.7 万亩，严重破坏了天然植被。第一次是 1960～1962 年，目的是增产防饥饿；第二次是 1966～1969 年，是“以粮为纲，全面发展”的农业政策；第三次是 1980～1981 年“联产承包，农民包山，开荒种粮”。结果均造成“跑水、跑土、跑肥”，淤积河流湖泊，被迫加高堤防，形成恶性循环。黄河河床已高出开封市 13m，高出新乡市 21m，严重危及城市安全。

4. 水质污染

由于某些地方的群众环保意识差，当地领导不重视，为了短期的经济效益而破坏了生态环境，一些小型的造纸厂、化肥厂没有污水处理设施，而将大量污水直接排放到河道中，污染了水源，甚至水中的某些生物都无法存活。

5. 泥沙问题

黄河是中华民族的摇篮，也是中国的忧患，过去黄河年输沙量达 16 亿 t，为世界第一。河床不断淤积，大堤不断加高，形成恶性循环，下游已成为地上悬河，成了海河、淮河两大流域的分水岭。

6. 洪涝灾害

洪涝灾害依然是中国江河的心腹大患，近几年，长江、淮河、珠江等几大河流特大洪水频频发生，给人民生命财产和国家经济建设带来巨大影响，防洪建设始终是我国的一项长期而紧迫的任务。

四、水利工程的分类

水利工程一般按照它所承担的任务来进行分类，如防洪工程、灌溉工程、治涝工程、水力发电工程等。一个工程往往可以具有许多任务，这种工程称为综合利用工程。

1. 防洪工程

防洪工程是通过修建水库、分洪或蓄洪工程以及堤防、河道整治、开挖新河等措施来保护农田、工矿区和城市，免受洪水危害。防洪工程应根据防护对象的要求，统一考虑上下游、左右岸、干支流、近远期和大中小工程相结合等因素，合理确定防洪工程的防洪任务；并根据防护对象的重要性、历次洪水灾害情况以及政治、经济影响，结合防护对象和防洪工程的具体条件确定其防洪标准。

2. 灌溉工程

灌溉工程是通过修建蓄水、引水、提水工程，为农作物提供必需的水量。兴建灌溉工程时要尽量考虑蓄、引、提相结合和大、中、小相结合，充分利用当地水源，实行“长藤结瓜”或“井渠结合”。灌溉工程的灌溉设计标准，要根据灌区水土资源、作物组成、气象水文、水量调节程度及国家对当地农业生产的要求等因素选择确定。

灌溉工程多采用灌溉设计保证率作为灌溉设计标准，它用灌溉用水量全部获得满足的年数占计算总年数的百分率表示，也就是灌溉用水量的保证程度；也有采用抗旱天数作为灌溉设计标准的，也就是设计采用的作物生长期间尤其是关键需水时期，由于连续无雨或

少雨而需要灌溉的天数。

3. 治涝工程

治涝工程可以采取设置排水闸、排水站或挡潮闸等工程措施,来治理洼地、垸田的涝渍灾害。兴建排涝工程时应根据农业高产稳产的要求,考虑涝区的地形、土壤、水文气象、涝渍情况,正确处理大中小、近远期、上下游、泄与蓄、自排与抽排以及工程措施与其他措施等关系,合理确定其防涝任务及设计标准。防涝设计标准一般以涝区发生一定重现期的暴雨不受渍涝为准,重现期一般 5~10 年。

4. 水力发电工程

水力发电工程有水库电站、引水式电站及抽水蓄能式电站。应根据地区工农业用电需要、综合利用要求和电站建设条件,并考虑系统中已建和计划兴建的水、火电站组成水力电力系统的发展条件等情况,合理确定所设计水电站在电力系统中的任务;并根据水电站所在电力系统的负荷特性、系统中水电容量的比重、水库的调节性能、水电站的规模及其在电力系统中的作用等因素,合理选择水电站的设计保证率。水电站的设计保证率是指水电站正常发电的保证程度,用电站正常发电总时段与计算总时段相比的百分率表示。

5. 综合利用工程

综合利用工程是一个工程具有多种任务,其所承担的任务及其主次关系,应根据国民经济有关部门的要求和工程建设的条件合理确定,并考虑远景发展及主次关系发生变化的可能性。综合利用工程各用水部门对水量、水位和用水时间各有不同的要求,应根据主次关系通过方案比较进行水量平衡妥善处理。综合利用工程还应根据综合利用和经济合理的原则,妥善解决好通航、过木、渔业、给水、卫生及水源保护等问题。对于水质污染和由于水利条件变化引起生态环境变化可能产生的影响,也应进行研究并提出解决的办法。

五、水利枢纽的分类

水利工程中有的只建有单项水工建筑物,如只建分洪闸的防洪工程、仅有排水闸的治涝工程以及无坝引水只建进水闸的灌溉工程等;但大多数水利工程都是由几种水工建筑物组成水利枢纽,对这种水利工程往往就称为水利枢纽工程或水利水电枢纽工程。如位于长江西陵峡的三峡水利枢纽工程,整个枢纽由拦河坝、泄洪闸、船闸、升船机、冲砂闸和水电站等主要建筑物组成。工程建成后不仅可以有效地改善三峡天险航道,促进长江航运事业的发展,还可以利用径流发电,年平均发电量 860 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,相当于新中国成立初期全国总发电量的 20 倍。

在农田水利工程中,还往往把水利枢纽按其作用分为蓄水(水库)枢纽、取(引)水枢纽和抽水枢纽等。如湖南省韶山灌区工程在涟水中游水府庙以上 2km 处建有水库枢纽,枢纽由拦河坝、电站和船闸等建筑物组成;经水库调节后的水量由下游 18km 处的洋潭引水枢纽进水闸进入总干渠,引水枢纽的主要建筑物有:滚水坝、泄洪闸、重力坝、土坝、水电站、斜面升船机和进水闸等。

六、水工建筑物的分类

水工建筑物一般按它的作用、用途和使用期间来分类。

(1) 按作用分:有挡水或壅水建筑物(如坝、闸、堤防以及拦截河流的各种建筑物),泄水建筑物(如溢洪道、泄水孔等),取水建筑物(如进水闸、取水塔等),输水建筑物

(如渠道和渠道上的渡槽、隧洞、涵管等)和整治建筑物(如护岸护底建筑物、导流堤、防浪堤、防水墙以及拦砂建筑物等)。

(2) 按用途分:有一般性建筑物和专门性建筑物,前者可以应用于所有的水利工程,后者仅用于某一个水利工程只实现其特定的任务。专门性水工建筑物有水电站建筑物(如厂房、压力前池、调压塔或调压井等),水运建筑物(如船闸、升船机、停泊建筑物、木材浮运建筑物及港口防护建筑物等),农田水利建筑物(如灌区的渠系建筑物和量水设备等),给水排水建筑物(如给水排水管道及扬水站等)和过鱼建筑物(如鱼道、鱼梯、升鱼机)等。

(3) 按使用期间分:有永久性建筑物和临时性建筑物。永久性建筑物是指工程运行期间长期使用的建筑物,根据其重要性又分为主要建筑物和次要建筑物。前者指失事后将造成下游灾害或严重影响工程效益的建筑物,如坝、闸、泄洪建筑物、输水建筑物及电站厂房等;后者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,如挡土墙、导流墙、工作桥及护岸等。临时性建筑物指工程施工期间使用的建筑物,如导流建筑物等。

七、水利枢纽实例:三峡水电工程

三峡水利枢纽位于西陵峡中段,湖北宜昌的三斗坪,具有防洪、发电、航运等多种功能。正常运行水位 175m,总库容 393 亿 m^3 ,坝轴线长 2335m,坝顶高程 185m,最大坝高 181m,总投资 2039 亿元。枢纽主要由以下建筑物组成。

1. 溢流坝

坝顶高程 185m,23 个坝段,位于河床中部,设有 23 个 $7\text{m}\times 9\text{m}$ 的泄水深孔,22 个宽 8m 的溢流表孔,其作用是汛期溢洪,保证大坝的安全。

2. 水电站

水电站采用坝后式厂房,布置于泄水闸两侧,左边 14 台机组,右边 12 台机组,单机容量 70 万 kW,总装机 1820 万 kW,年发电量 847 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,相当于每年节省 5000 万 t 标准煤。既节省能源又减轻了“北煤南运”的费用。

3. 船闸

船闸采用双线五级船闸,闸室有效尺寸为 $280\text{m}\times 34\text{m}\times 5\text{m}$,单向过闸时间为 5~6h,可通过万吨级船队,年单向通过能力 5000 万 t。库区回水长度 660km,高水位淹没了航道中的险滩,加大水面宽度,减少水的流速,可使水运成本降低 35%~37%。

4. 升船机

升船机为单线一级垂直提升式,承船厢有效尺寸为 $120\text{m}\times 18\text{m}\times 3.5\text{m}$,一次可通过一艘 3000 吨位客轮或者 1500 吨级船队,过坝时间为 1h。

八、水工建筑物的特点

1. 工作条件复杂多变

水工建筑物主要受水的作用和自然环境的影响。水对建筑物有静水压力而产生水平推力,建筑物必须有足够的水平抵抗力和稳定性,而水平水压力随挡水深度的不同在随时变化。此外,水面有波浪,将给建筑物附加波浪压力;水面结冰时将附加冰压力;发生地震时将附加水的地震激荡力;水流经建筑物时也会产生各种动水压力,都必须加以考虑。

建筑物上、下游的水头差,会导致建筑物及其地基内的渗流。渗流会引起对建筑物稳定不利的渗透压力;渗流也可能引起建筑物及地基的渗透变形破坏;过大的渗流量会造成水库的严重漏水。为此建造水工建筑物要妥善解决防渗和渗流控制问题。

高速水流通过泄水建筑物时可能出现自掺气、负压、空化、空蚀和冲击波等现象;强烈的紊流脉动会引起轻型结构的振动;挟沙水流对建筑物边壁还有磨蚀作用;挑射水流在空中会导致对周围建筑物有严重影响的雾化;通过建筑物的水流多余动能对下游河床有冲刷作用,乃至影响建筑物本身的安全。为此,兴建泄水建筑物,特别是高水头泄水建筑物时,要注意解决高速水流可能带来的一系列问题,并做好消能防冲设计。

除上述主要作用外,还要注意水的其他可能作用。比如,当水具有侵蚀性时,会使混凝土结构中的石灰质溶解,破坏材料强度和耐久性;与水接触的水工钢结构易发生严重锈蚀;在寒冷地区的建筑物及地基将有一系列冰冻问题要解决。

2. 设计选型的独特性

水工建筑物的型式、构造和尺寸,与建筑物所在地的地形、地质、水文等条件密切相关。比如,规模和效益大致相仿的两座坝,由于地质条件优劣的不同,两者的型式、尺寸和造价都会迥然不同。由于自然条件千差万别,因而水工建筑物设计选型总是只能按各自特征进行,除非规模特别小,一般不能采用定型设计。当然这不排除水工建筑物中某些结构部件的标准化。

3. 施工建造的艰巨性

在河川上建造水工建筑物,比之陆地上的土木工程,施工条件困难复杂得多。主要困难是解决施工导流问题,即必须迫使河川水流按特定通道下泄,以截断河流,便于施工时不受水流的干扰,创造最好的施工空间;要进行很深的地基开挖和复杂的地基处理,有时还须水下施工;施工进度往往要和洪水“赛跑”,在特定的时间内完成巨大的工程量,将建筑物修筑到拦洪高程。

4. 失事后果的严重性

水工建筑物固可为人民造福,但如失事也会产生严重后果。特别是拦河坝如失事溃决,会给下游带来灾难性乃至毁灭性的后果,这在国内外都不乏惨重实例。据统计,大坝失事最主要的原因:一是洪水漫顶;二是坝基或结构出问题,两者各占失事总数的 1/3 左右。1963 年意大利瓦衣昂拱坝溃坝,1975 年 8 月河南省的板桥、石漫滩两座大型水库溃坝,均造成严重的经济损失和人员伤亡。应当指出,有些水工建筑物的失事与某些自然因素或当时人的认识能力与技术水平限制有关,但也有些是不重视勘测、试验研究或施工质量欠佳所致,后者尤应杜绝。

九、水利枢纽对环境的影响

一条河流或一个河段及其周围地区在开发其水资源前天然状态下一般处于某种相对平衡。水利工程的建设会使原有的平衡失调,特别是具有高坝大水库的河川水利枢纽的建成运行,对周围的自然和社会环境都将产生重大的影响。规划、设计、建设水利枢纽时,在注意其巨大的经济效益的同时,必须注意其对环境的副作用,特别是不利影响方面,并力争缩小这种不利影响。

1. 物理影响

河流中筑坝建库后上、下游水文状态将发生变化。如果水库不具有较大的径流调节性能,则变化只表现为上游有一壅水段;而一般具有季、年或多年调节性能的水库,上游水位将有很大的变化幅度,这就会造成一片淹没、浸没区,也就使原来的居民要迁移。与此同时,下游河流水位以及地下水位都可能下降,甚至带来干旱。

上游水库水深加大,流速降低,河流带入水库的泥沙会淤积下来,逐渐减少水库库容,这实际上最终决定水库的寿命。水库的“沉沙池”作用,使过坝调节下放的水流成为“清水”,冲刷能力加大,从而会使下游河床刷深,也可能影响到河势变化乃至河岸稳定。经水库再下泄的水,水质一般有改善;但随着库区不同的条件,也可能受某些盐分污染。深水库底孔下放的水,水温会较原天然状态有所变化。

大面积的水库还会引起小气候的变化,例如可能增加雾天的出现频率,大水库可能诱发地震也是国内外广泛注意的问题。据调查,在已建的坝高超过 100m 和库容超过 10 亿 m^3 的水库中,发生水库地震的达 17%,但烈度不高。

2. 生态影响

高坝大库对生态影响问题涉及范围很广,包含许多人们认识不足的未知数。试举浅显的数例:较天然河流大大增加了的水库面积与容积可以养鱼,对渔业有利;但坝对原河鱼的洄游成为障碍,任何过鱼设施也难以维持原状,某些鱼类品种因此消失了。水库调蓄的水量增加农作物灌溉的机会;但水温可能不如原来情况更适应作物生长。钉螺、疟蚊等传播疾病的媒介物可能得到新的有利的繁殖条件,从而增加了血吸虫病、疟疾等的传染危险性。此外,库水化学成分的改变,营养物质浓集导致水的异味或缺氧等,也会对生物带来影响。

上述无论物理影响或生态影响,无疑都转移为对人类本身的影响。就我国当前水利建设来说,高坝大库的库区移民问题尤为重要。有的水库库区移民安置费用竟可相当于总比费的 2/3。另外还要注意,水库蓄水后还可能出现一些规划设计阶段较难预见的影响。例如库岸由于水的渗入,原本稳定的边坡可能失稳坍塌。意大利瓦依昂拱坝上游就曾发生过这种大滑坡,造成高 150m 的涌浪翻越坝顶,冲毁下游村镇,死亡 3000 余人。因此修建水利枢纽,必须充分考虑其对环境的影响,精心研究,慎重对待。

3. 目前世界面临最严重危险的 10 条河流

受气候变化、污染等因素的影响,世界上的一些主要河流正面临日益严重的干涸危险。受威胁最深的 10 条大河有:亚洲的湄公河、怒江、长江、恒河和印度河,欧洲的多瑙河,南美洲的拉普拉塔河,北美洲的格兰德河,非洲的尼罗河,大洋洲的墨累—达令河。

这 10 条“人类的血脉”正遭受人为破坏:河水被抽干,盐化,外来物种入侵,污染严重,捕捞过度,森林采伐,气候变暖,航运设施,防洪设施,过多的水坝建设破坏生态系统等。而生活在流域中的人类和野生动物也面临威胁。全球大约 41% 的人口居住在这些流域,1 万种淡水动物和植物中至少 20% 已经灭绝。

十、现代水工建筑物的发展

随着流体力学、岩土力学、结构理论和计算技术的发展,以及新型材料、大型机械、设备制造能力的提高和施工技术的进步,因此有了以高坝为代表的现代水工建筑物的发展。

在混凝土坝方面,我国于 20 世纪 50 年代依靠自己的力量,设计、施工、建成了装机

容量 66 万 kW 的新安江水电站的宽缝重力坝,其最大坝高 105m,溢流坝与坝后厂房顶溢流式水电站结合,枢纽布置高度集中紧凑,为我国大型水利工程建设开创了良好的先例。随后,坝高 100m 上下的各型混凝土坝建成了多座。20 世纪 60 年代在黄河干流强地震区建成了坝高 147m 的刘家峡水电站的实体重力坝,在解决高坝技术以及相应高水头泄水建筑物高速水流问题方面取得了相当大的进展和重要的经验;70 年代在石灰岩岩溶地区建成了 165m 的乌江渡拱形重力坝,成功地处理了岩溶地基;80 年代在葛洲坝水利枢纽施工中,在长江流量 $4400 \sim 4800 \text{ m}^3/\text{s}$ 情况下胜利实现了大江截流,保证了我国当时最大装机容量水电站和最大通航船闸的顺利建成,标志着我国水利施工达到的新水平。80 年代建造的高坝工程应以黄河“龙头”的龙羊峡重力拱坝为代表,其坝高为 178m,上游可形成 247 亿 m^3 库容的水库。此坝设计、建造过程中成功地解决了坝肩稳定、泄洪消能布置等一系列结构与水流问题。坝高 150m 以上的薄拱坝(双曲拱坝),如东江、东风等水电站的高坝建设,也都取得了成功;90 年代三峡水电工程的开工为世界瞩目。我国已具有设计和建造各种型式高坝的能力,坝高超过 200m 的高坝在中国不断出现,如施工中的二滩水电站薄拱坝坝高 240m,溪洛渡坝高 278m,小湾坝高 292m,锦屏一级坝高达 305m。

在土石坝方面,我国是建造这种当地材料坝最多的国家,而且型式多样,施工方法也多样。无论是通常的碾压式坝,或是水中倒土、水力冲填、定向爆破等特殊筑坝技术,都不乏成功的工程实例,甚至还建成很多小型的溢流土石坝。我国建成的高土石坝可以甘肃碧口水电站和陕西石头河水库的两座心墙土石坝为代表,两者的坝高分别达 101m 和 105m。与土石坝本身密切有关的深覆盖层地基处理技术也取得了很大的进展,例如碧口土石坝的砂砾石坝基混凝土防渗墙深达 44m,效果很好。相应坝型为高土石坝情况下,高水头河岸溢洪道和泄洪隧洞的修建也积累了良好的经验。现在我国在高土石坝建设方面有了飞速发展,瀑布沟心墙堆石坝高 188m,水布垭混凝土面板堆石坝高 233m,还有大量高坝在规划设计中。

高土石坝在高坝中所占比例越来越大,这与高土石坝设计理论和施工技术的不断改进以及大型施工机械的采用有关。高土石坝的建造技术不但表现在地面以上的坝高,还表现在地面以下的地基处理深度,在冲积层土基内已实现了 170m 深的深孔水泥灌浆和 131m 深的混凝土防渗墙施工。美国的奥洛维尔土石坝(高 236m),加拿大的买加堆石坝(高 242m)以及印度的特里堆石坝(高 261m)等均为高土石坝。

采用碾压混凝土的高重力坝和高拱坝,采用刚性面板防渗的碾压式堆石坝(而非抛填式堆石坝)将是很有发展前途的新坝型。高坝成套技术中所涉及的难点包含了水工新材料、大型设备的研制、高速水流、消能防冲、抗震、高边坡稳定性、安全监控等课题的解决以及一系列设计、计算技术和施工技术的提高,都要进行攻关研究。

● 第二节 水利枢纽与水工建筑物的等级划分

一项水利枢纽工程的成败对国计民生有直接影响。但不同规模的工程影响程度也不同。为使工程的安全可靠性与其造价的经济合理性适当统一起来,水利枢纽及其组成建筑物要分等分级,即先按工程的规模、效益及其在国民经济中的重要性,将水利枢纽分等,

而后再对各组成建筑物按其所属枢纽等别、建筑物作用及重要性进行分级。枢纽工程、建筑物的等、级不同，对其规划、设计、施工、运行管理的要求也不同，等级越高者要求也越高。这种分等分级、区别对待的方法，也是国家经济政策和技术政策的一种重要体现。

根据《水利水电工程等级划分及设计标准》(SL 252—2000)，水利水电枢纽工程按其规模、效益和在国民经济中的重要性分五等，其中山区、丘陵区枢纽分等指标见表 1-1，平原、滨海地区枢纽分等指标见表 1-2；枢纽中建筑物则按表 1-3 分级。

表 1-1 山区、丘陵区水利水电工程分等指标表

工程 等别	工程规模	分 等 指 标						
		水库总库容 (亿 m ³)	防 洪		排涝	灌溉	供水	水电站
			保护城镇 及其工矿区	保护农田 面积 (万亩)	排涝面积 (万亩)	灌溉面积 (万亩)	供给城区 及矿区	装机容量 (万 kW)
I	大 (1) 型	≥10	特别重要	≥500	≥200	≥150	特别重要	≥120
II	大 (2) 型	1.0~10	重要	100~500	60~200	50~150	重要	30~120
III	中 型	0.1~1.0	中等	30~100	15~60	5~50	中等	5~30
IV	小 (1) 型	0.01~0.1	一般	5~30	3~15	0.5~5	一般	1~5
V	小 (2) 型	0.001~0.01		<5	<3	<0.5		≤1

表 1-2 平原、滨海区水利水电工程分等指标表

工程 等别	工程规模	分 等 指 标						
		水库总库容 (亿 m ³)	防 洪		排涝	灌溉	供水	水电站
			保护城镇 及其工矿区	保护农田 面积 (万亩)	排涝面积 (万亩)	灌溉面积 (万亩)	供给城区 及矿区	装机容量 (万 kW)
I	大 (1) 型	>10	特别重要	>500	>200	>150	特别重要	
II	大 (2) 型	1.0~10	重要	100~500	60~200	50~150	重要	
III	中 型	0.1~1.0	中等	30~100	15~60	5~50	中等	2.5~25
IV	小 (1) 型	0.01~0.1	一般	5~30	3~15	0.5~5	一般	0.05~2.5
V	小 (2) 型	0.001~0.1		<5	<3	<0.5		<0.05

表 1-3 永久性水工建筑物级别

工程等别	I	II	III	IV	V
主要建筑物	1	2	3	4	5
次要建筑物	3	3	4	5	5

表 1-1 及表 1-2 中总库容系指校核洪水位以下的水库库容；灌溉面积等则均指设计值。对于综合利用的工程，如按表中指标分属几个不同等别时，整个枢纽的等别应以其中的最高等级为准。按表 1-3 确定水工建筑物级别时，如该建筑物同时具有几种用途，应按最高等别考虑，仅有一种用途时则按该项用途所属等别考虑。

对于 II~V 等工程，在下述情况下经过论证可提高其主要建筑物级别：①水库大坝高