

普通高等教育“十三五”规划教材

# 高等水工结构

主编 王瑞骏



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

中央财政支持地方高校发展专项资金项目资助

普通高等教育“十三五”规划教材

# 高等水工结构

主编 王瑞骏



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本教材重点介绍坝工技术新进展以及坝工结构分析的新理论和新方法, 主要内容包括: 坝工建设进展及其关键问题、碾压混凝土坝、混凝土面板堆石坝、坝工应力分析的有限元法、水工混凝土温度应力与温度控制、土石坝的渗流有限元分析。

本教材主要供水工结构工程学科硕士研究生修读《高等水工结构》学位课程使用, 也可供本学科博士生及其他相近学科研究生参考使用, 同时还可供相关专业技术人员参考及专业技术干部培训使用。

### 图书在版编目 (C I P) 数据

高等水工结构 / 王瑞骏主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 8  
普通高等教育“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-5170-4599-1

I. ①高… II. ①王… 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(2016)第188392号

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 <b>高等水工结构</b>
作 者	GAODENG SHUIGONG JIEGOU 主编 王瑞骏
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
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13印张 308千字
版 次	2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	<b>32.00元</b>

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

多年来，西安理工大学水工结构工程学科在《高等水工结构》课程教学中已经积累了大量的教学经验，取得了不少有益的教学成果。其中，西安理工大学陈尧隆教授原《高等水工结构》校内教材曾在我校长期使用，为促进本课程的教学质量起到了重要作用，也受到了师生的普遍好评。

众所周知，随着水利水电工程建设事业的迅速发展，在水工结构尤其是坝工结构的设计、施工及研究等方面，相关的专业技术知识在不断更新，理论研究水平在不断提高，涉及的领域也在不断扩展。如何适应这种发展需要，将最新并相对成熟的水工结构专业技术知识及其理论研究成果融汇到《高等水工结构》课程教学中，无疑是进一步提高本课程教学质量的一个关键问题。而教材作为课程教学的工具和载体，编写一本与上述教学目的相适应的教材就显得十分必要。本教材就是基于上述考虑而尝试编写的。

本教材编写的指导思想包括：①论述对象侧重于坝工（大坝工程）结构；②内容选择上力求突出前沿性和实用性；③章节编排上力求系统性和可查阅性。基于上述指导思想，本教材重点介绍了坝工技术的新进展以及坝工结构分析的新理论和新方法；结合实际教学需要，在每章后还编排了相应的复习思考题。

在本教材编写过程中，以陈尧隆教授原《高等水工结构》校内教材为基础，并尽可能广泛地查阅了最新文献资料，同时还参考和借鉴了兄弟院校类似课程的教材和教案。因此，本教材的编写主要得益于前人大量的辛勤工作，前人相关的工作成果是本教材编写的基础。为此，编者在此向所有其工作成果被本教材所引用的专家和学者一并表示诚挚的敬意和谢意！虽然本教材在每章最后均列出了相应的主要参考文献著录表，并按参考文献编号做了文内夹注，但参考文献著录及文内夹注难免存在疏漏或不当之处，在此，希望有关专家和学者予以谅解！

在编者指导下，编者的研究生刘伟、薛一峰、任亮、王志杰、孙阳等同学

协助编者承担了部分资料整理及编写等工作，在此，编者诚挚地感谢他们的辛勤付出！在本教材编写过程中，得到了我校陈尧隆教授、程文教授、水利水电学院及研究生院等个人和单位的大力支持，在此一并表示诚挚的谢意！

虽然编者投入大量精力期望确保本教材的编写质量，但由于水平所限，因此其中难免存在一些不足或疏漏，欢迎各位读者批评指正！

编者

2016年3月

# 目录

## 前言

<b>第 1 章 坝工建设进展及其关键问题</b> .....	1
1.1 坝工发展概述 .....	1
1.2 坝工技术的发展现状及发展趋势 .....	9
1.3 高坝典型事故 .....	13
1.4 坝工发展的关键问题 .....	25
复习思考题 .....	26
参考文献 .....	26
<b>第 2 章 碾压混凝土坝</b> .....	28
2.1 概述 .....	28
2.2 碾压混凝土坝设计 .....	35
2.3 碾压混凝土坝施工技术 .....	46
2.4 碾压混凝土拱坝 .....	51
复习思考题 .....	60
参考文献 .....	60
<b>第 3 章 混凝土面板堆石坝</b> .....	62
3.1 概述 .....	62
3.2 混凝土面板堆石坝设计 .....	64
3.3 深覆盖层上的面板堆石坝 .....	87
3.4 面板堆石坝的坝顶溢洪道与放空设施 .....	92
3.5 施工期堆石坝体过水与临时断面挡水度汛 .....	93
3.6 面板堆石坝的变形特征及其控制 .....	95
复习思考题 .....	96
参考文献 .....	97
<b>第 4 章 坝工应力分析的有限元法</b> .....	99
4.1 概述 .....	99
4.2 重力坝应力变形的有限元分析 .....	102

4.3 拱坝应力变形的有限元分析 .....	117
4.4 土石坝应力变形的有限元分析 .....	126
复习思考题 .....	137
参考文献 .....	137
<b>第5章 水工混凝土温度应力与温度控制</b> .....	139
5.1 概述 .....	139
5.2 温度应力的发展过程及类型 .....	141
5.3 混凝土的温度场 .....	143
5.4 混凝土的温度应力 .....	148
5.5 温度场和温度应力分析的有限元法 .....	156
5.6 温度应力分析的约束系数法 .....	163
5.7 水工混凝土的温控标准及温控措施 .....	164
复习思考题 .....	167
参考文献 .....	167
<b>第6章 土石坝的渗流有限元分析</b> .....	169
6.1 概述 .....	169
6.2 渗流分析的基本原理 .....	172
6.3 土石坝渗流的二维有限元分析 .....	174
6.4 土石坝渗流的三维有限元分析 .....	189
6.5 土石坝渗流场与应力场的耦合有限元分析 .....	200
复习思考题 .....	201
参考文献 .....	201

# 第 1 章 坝工建设进展及其关键问题

## 1.1 坝工发展概述

### 1.1.1 坝工发展简史

人类筑坝的历史已有近 5000 年，全世界已建的水坝目前已达数万座。根据坝工技术历史发展的进程，水坝可分为以下三类<sup>[1]</sup>：①古代坝，19 世纪中期以前建造；②近代坝，19 世纪中期至 20 世纪初期建造；③现代坝，20 世纪初期以后建造。

#### 1.1.1.1 古代坝<sup>[1][2]</sup>

古代坝的基本特征是，坝是凭经验建造的。在整个建坝历史中，古代坝的历时占绝大部分。

公元前 3200 年，在约旦的贾瓦地区曾建造过一些块石护坡土坝。这些古代坝是在 1974 年由耶路撒冷的不列颠考古学院发现的，其规模也很小，但被《吉尼斯世界纪录大全》列为世界最古老的坝。

公元前 2900 年左右，埃及在尼罗河干流建造了一座砌石坝——科希斯坝，坝址位于孟菲斯以南 20km 处的科希斯。坝高为 15m，坝长为 450m。因此，该坝堪称世界最古老的“大坝”。

公元前 1305—前 1290 年，埃及人曾在霍姆斯附近的阿西河上建造过一座堆石坝，坝高 6m，长 2000m。此坝一直使用到现在，有 3300 年左右的历史，堪称世界上使用年限最长的坝。

意大利在 1611—1613 年修建了一座干砌条石拱坝（高桥坝），坝高 4.9m，坝体厚度 2m，拱弧半径 14m，此后曾 8 次加高。其加高的次数在水坝加高史上是创纪录的。最后一次加高是在 1887 年，坝高达 38m。高桥坝及其加高过程如图 1.1 所示<sup>[1]</sup>。

中国古代坝保留最完整、最典型的是安徽省寿县的安丰塘，也称芍陂，建于公元前 598—前 591 年间，至今已有 2600 年历史，由春秋时楚相孙叔敖主持修建，与都江堰、漳河渠、郑国渠并称为我国古代四大水利工程。安丰塘现在是一个四面筑堤的平原水库，塘堤周长 24.3km，堤高 6.5m，水面 34km<sup>2</sup>，库容近 1 亿 m<sup>3</sup>，可对近 64 万亩农田进行自流灌溉。

洪泽湖是我国现存五大淡水湖之一，总容量达 130 亿 m<sup>3</sup>，年入湖洪水总量超过 800 亿 m<sup>3</sup>，规模之大，世所公认。但它不是天然湖泊，而确实是一座水库，其依托的就是洪泽湖大堤，该大堤实际上就是一道拦淮大坝，古时称高家堰，相传是东汉（约公元 200 年）广陵太守陈登开始修筑，清朝初坝高 5.12m，全长 67.25km，创世界最长水坝纪录。时至今日，苏北地区 3000 万亩农田和 1650 万人口仍以这条大坝作为主要防洪屏障，而由其拦挡形



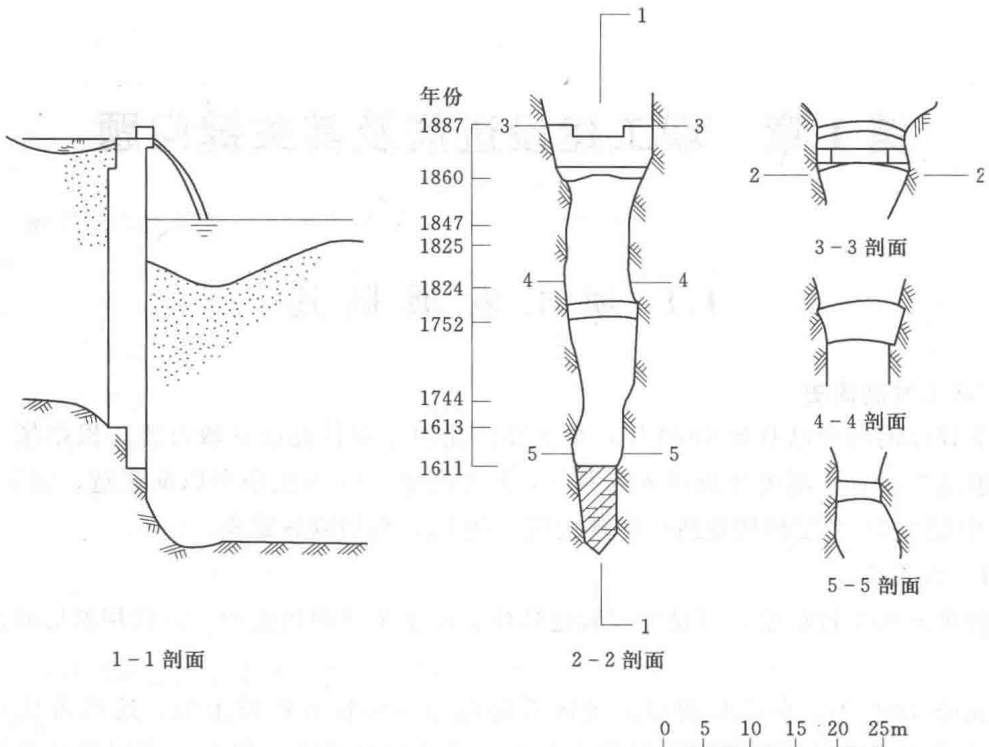


图 1.1 高桥坝及其加高过程示意图

成的洪泽湖则仍作为淮河下游重要的调节控制水库。高家堰断面如图 1.2 所示<sup>[2]</sup>。

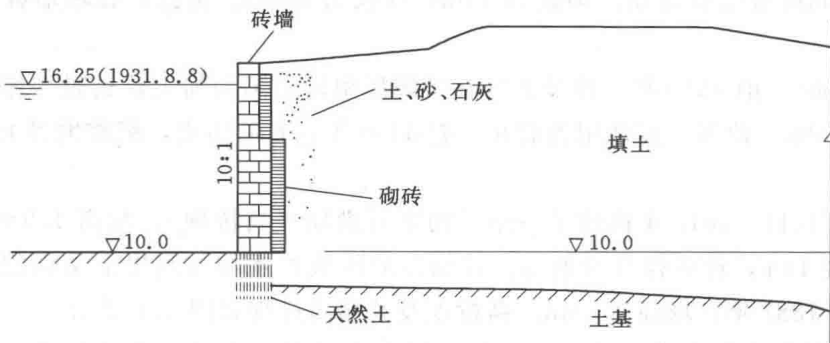


图 1.2 高家堰断面图 (单位: m)

### 1.1.1.2 近代坝<sup>[1]</sup>

近代坝的基本特征是，坝的设计开始有了理论做指导，这主要表现在重力坝与拱坝的设计上。

法国是最先研究并建造近代坝的国家。左拉坝是世界上第一座用理论进行设计的拱坝，建造目的主要是为了使下游重要城市免受洪水的威胁。设计最大压应力值只取用 0.65MPa；坝轴线选用拱形；加深地基开挖深度；加糙坝基表面，即在基面上用瓦西水泥浇筑“人工石”；不在坝内开设引水管道；特别重视坝踵及坝趾处坝与地基接缝的处理等等。左拉坝的布置如图 1.3 所示<sup>[1]</sup>。

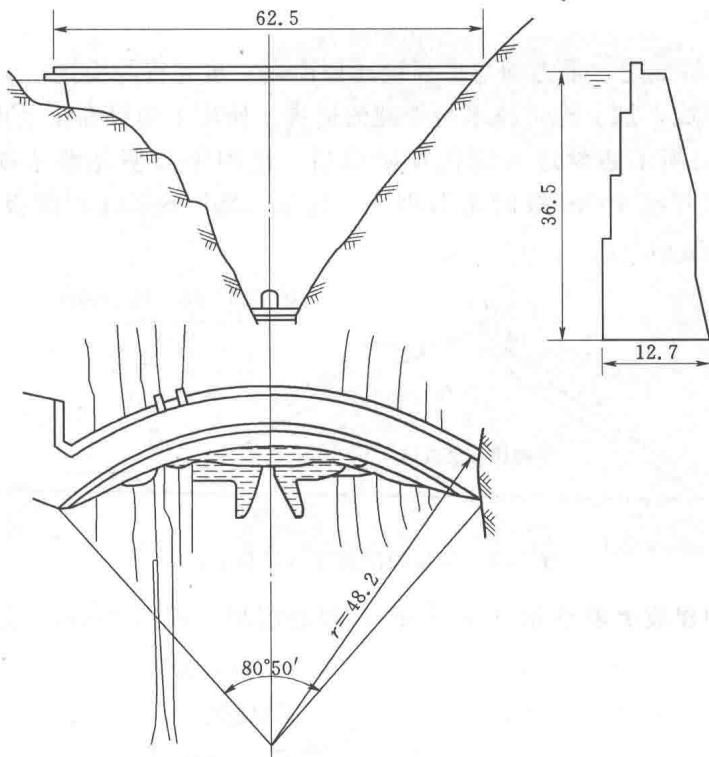


图 1.3 左拉坝布置图 (单位: m)

埃及在 1898—1903 年建造了一座著称于世的近代坝——阿斯旺坝。此坝位于尼罗河上，最大坝高 29m 左右。全坝由非溢流坝段、带底孔的泄水坝段以及左岸船闸组成。非溢流坝段长约 550m，底孔坝段总长 1400m，共设 180 个泄水孔。其中 140 个位置较低，孔宽 2m，孔高 7m；40 个位置较高，孔宽 2m，坝体采用花岗岩岩石，用波特兰水泥砂浆砌筑。坝体总方量为 53.5 万  $m^3$ 。泄水底孔坝段坝体断面如图 1.4 所示<sup>[1]</sup>。

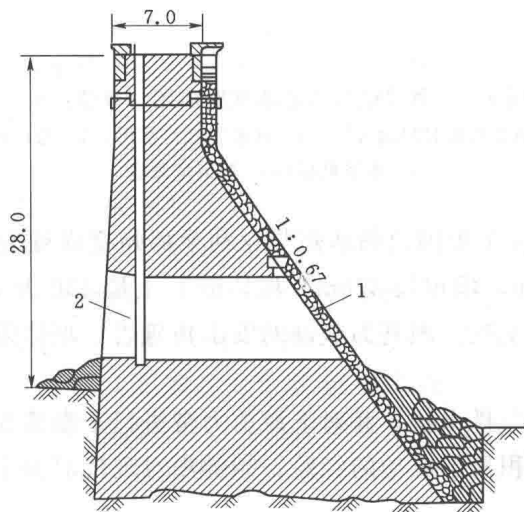


图 1.4 阿斯旺坝泄水底孔坝段坝体断面图 (单位: m)

1—支墩; 2—泄水底孔

1.1.1.3 现代坝<sup>[1]</sup>

现代坝的基本特征是，重力坝与拱坝设计理论进一步完善与提高，土石坝设计理论在 20 世纪初期开始形成，加上施工技术与管理进步的进步，使坝工建设在全世界得到飞速发展。

到 20 世纪初期坝工建设进入现代坝阶段后，建坝中心便逐渐从欧洲转移到美国。1931 年，美国建成首座 100m 级的土石坝——盐泉（Salt Spring）面板坝，坝高 100m。大坝断面如图 1.5 所示<sup>[1]</sup>。

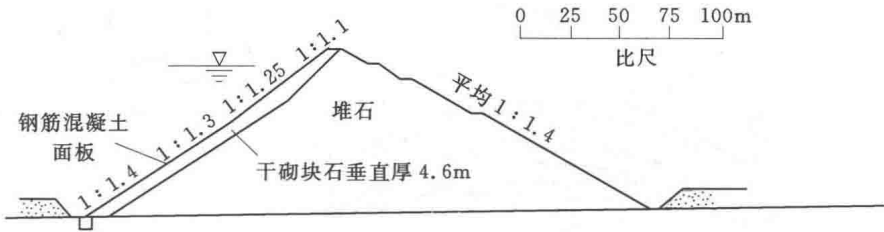


图 1.5 盐泉坝断面图（单位：m）

1968 年，美国建成奥罗维尔（Orowille）斜心墙坝，坝高 230m。大坝断面如图 1.6 所示<sup>[1]</sup>。

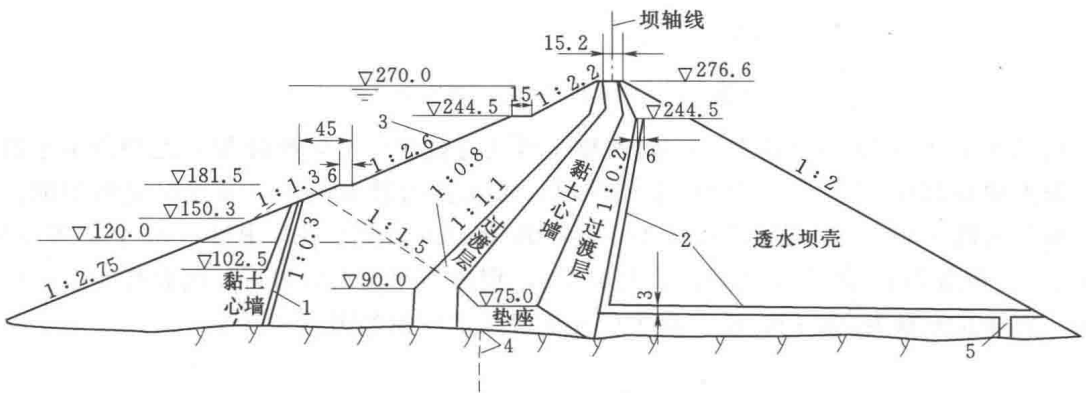


图 1.6 奥罗维尔斜心墙坝断面图（单位：m）

- 1—不透水料取自岸边开挖；2—透水料做排水用；3—抛石护坡；
- 4—灌浆帷幕；5—渗漏量测堰

胡佛坝（图 1.7<sup>[1]</sup>）位于美国内华达州与亚利桑那州交界处的黑峡谷之中，为混凝土重力拱坝，坝高 221.4m，坝顶长 379m，坝体混凝土量 336 万 m<sup>3</sup>，是美国综合开发科罗拉多河水资源的关键性工程。坝基为坚硬的安山角砾岩。坝体设计采用了当时美国刚提出的先进的试载法。

坝基设置有灌浆帷幕与排水孔，并对上游剪力带进行了灌浆加固处理。在混凝土坝施工机械和施工工艺等方面积累了成功的经验。胡佛坝对现代混凝土坝设计和施工技术的形成与发展具有重要影响。

胡佛坝是世界最早建造的高度超过 200m 的大坝，比当时最高的坝高出 85m。那时世界上几乎所有的坝都只有它一半高。其库容为 367 亿 m<sup>3</sup>，比著称于世的阿斯旺坝的库容



图 1.7 胡佛坝

大 8 倍。工程开挖量相当于巴拿马运河开挖量的  $1/4$ 。工程的规划设计工作于 1921—1928 年完成，1931 年开工，1936 年建成。在纪念建坝 20 周年时，美国土木工程师学会称此坝为现代美国土木工程七大奇迹之一。

中国现代大坝建设以三峡、二滩和小浪底工程为代表，这三座工程标志着中国大坝建设在建设技术上由追赶世界水平达到与世界水平同步。三峡水利枢纽具有防洪、发电、航运等巨大综合利用效益，拦河大坝（混凝土重力坝）最大坝高 181m；二滩混凝土双曲拱坝是上世纪亚洲第一、世界第三的高拱坝；小浪底斜心墙堆石坝最大坝高 154m，在国际国内赢得了广泛赞誉。

国际大坝委员会规定<sup>[3]</sup>：坝高超过 15m，或者库容超过 300 万  $m^3$ 、坝高在 5m 以上的坝为大坝。

未来大坝建设的主要国家将为包括中国、印度、巴西、土耳其及非洲等工业化相对较晚的国家。

### 1.1.2 我国坝工发展现状

我国建坝历史虽久，但前期发展较慢。

根据 1950 年国际大坝委员会的统计资料，当时全球 5268 座水库大坝中，我国仅有 22 座，数量极其有限，当时我国坝工发展尚处于非常落后的阶段<sup>[3]</sup>。

新中国成立后，特别是改革开放 30 多年来我国坝工建设有了突飞猛进的发展。据不完全统计<sup>[3]</sup>，截至 2010 年年底，我国已建、在建坝高在 30m 以上的大坝共计 5564 座（同期全世界共计 13629 座，我国占 40%），其中坝高在 300m 以上大坝 1 座，200~300m 之间的大坝 13 座，150~200m 之间的大坝 30 座，100~150m 之间的大坝 141 座，30~100m 之间的大坝 5379 座。

目前，我国建坝总数及高坝数量均已跃居世界第一。在各类大坝中，我国的代表性高坝如下：

(1) 混凝土坝：常态混凝土坝已建最高坝为锦屏一级混凝土双曲拱坝（坝高 305m，为世界同类最高坝），另外还有小湾双曲拱坝（坝高 292m）、溪洛渡双曲拱坝（坝高 278m）等高坝。碾压混凝土坝已建和在建共计 90 余座，已建的龙滩碾压混凝土重力坝坝高 216.5m，为世界同类最高坝。

(2) 土石坝：已建的水布垭混凝土面板堆石坝最大坝高 233m，为目前世界已建面板堆石坝中的最高坝；另外还有三板溪坝（坝高 186m）、洪家渡坝（坝高 180m）等高坝。

### 1.1.3 世界三类已建最高坝

#### 1.1.3.1 大狄克逊 (Grand Dixence) 重力坝<sup>[1]</sup>

大狄克逊坝位于瑞士狄克逊河上，建于 1953—1962 年，坝高 285m，坝顶长 695m，库容 4 亿  $m^3$ ，电站装机 86.4 万 kW。该坝为目前世界最高混凝土重力坝。

1931—1935 年曾在大狄克逊坝上游 400m 处建造过一座大头坝，这就是坝高 87m 的狄克逊坝。原计划只是加高狄克逊坝，由于种种原因后决定新建大狄克逊坝，而将老坝（狄克逊坝）作为新坝的上游围堰。

坝址处河谷呈 V 形，山势陡峭。坝基为质地良好的花岗片麻岩。根据地形、地质及施工条件，曾进行堆石坝、拱坝、支墩坝和重力坝等坝型方案比较，最后选定实体重力坝方案。大坝分二期施工。大坝断面如图 1.8 所示<sup>[1]</sup>。

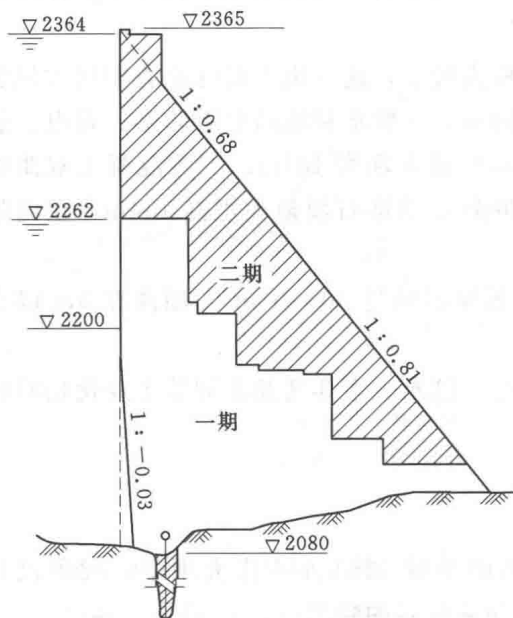


图 1.8 大狄克逊坝断面图 (单位: m)

该坝采用传统的材料力学法设计，未计两岸的影响。其特点是采用分期加高的方法修建；为改善分期加高施工时坝踵应力条件，上游坝面下部采用倒坡。

#### 1.1.3.2 英古里双曲拱坝<sup>[4]</sup>

目前世界已建的最高拱坝为我国锦屏一级水电站混凝土双曲拱坝。该坝位于四川省境内的雅砻江上，于 2014 年 11 月建成，坝高 305m，坝顶长 552.23m，坝体厚高比 0.207。在 2009 年以前，英古里混凝土双曲拱坝为世界最高拱坝。

英古里坝位于格鲁吉亚的西部德日瓦里市附近的英古里河支瓦尔峡谷内，临近土耳其边界，为目前世界上已建最高的混凝土拱坝，具有发电和防洪等综合效益。

该坝为双曲拱坝，最大坝高 271.5m，厚高比 0.29，坝顶弧长 758m，总库容 11.1 亿  $m^3$ 。

地下厂房装机 5 台，单机容量 26 万 kW，另在尾水渠上建 4 座电站（总装机 34 万 kW），总装机容量 164 万 kW。建于 1965—1982 年。

该坝坝址为不对称峡谷，坝基地质条件复杂，由各种裂隙发育的石灰岩、白云质石灰岩等构成，在右坝肩下约 100m 处分布有派生构造断裂斜断层，地震烈度为 8 度。大坝横剖面及上游立视图分别如图 1.9、图 1.10 所示<sup>[4]</sup>。

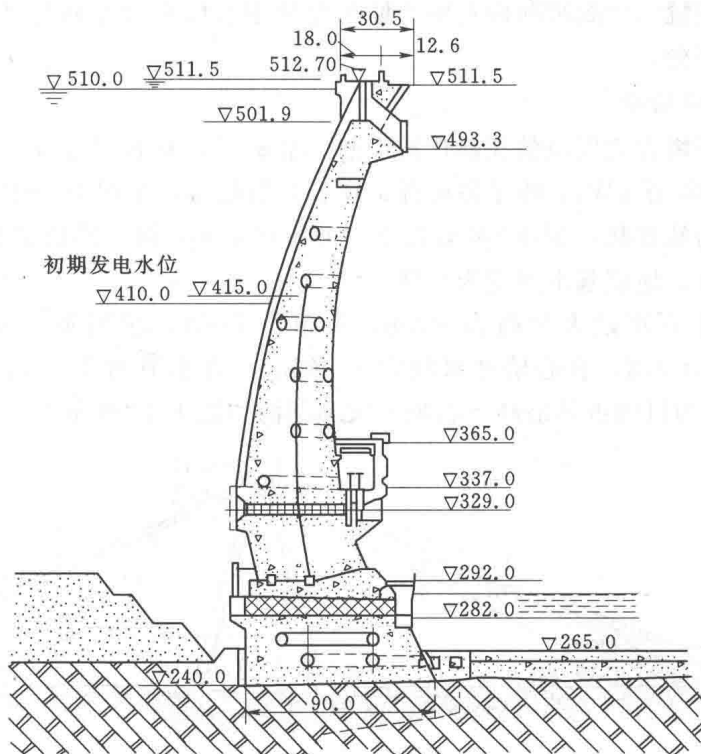


图 1.9 英古里坝横剖面图

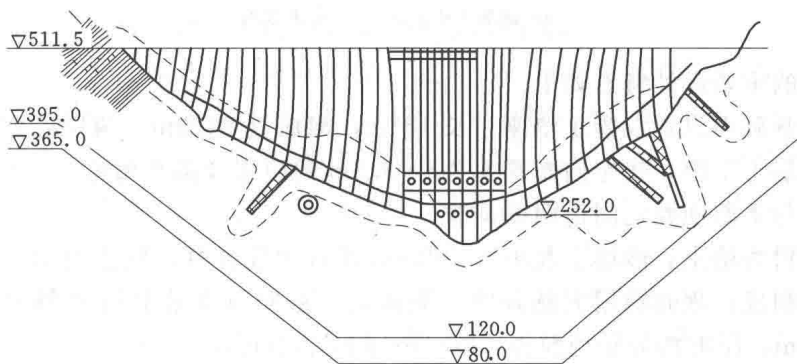


图 1.10 英古里坝上游立视图

英古里坝的主要设计特点包括：

(1) 该坝采用周边缝结构。通过拱座均匀扩散坝基（肩）应力，从而改善坝体地震应力分布状况，并减少地基产生裂缝的可能性。周边缝采用三道止水，其材料均为紫铜片。

(2) 为了使坝在地震计算烈度作用下具有近似弹性变形，设计了一种独特的结构：在坝上部 1/4 处设有穿过横缝的抗震钢筋网（跨缝水平钢筋+垂直钢筋）。

(3) 为了消除基础塑性变形，在坝下游两岸的底部设计了混凝土板和设置预应力锚筋等加固设施。

(4) 为了抵消由于坝体施工和水库蓄水引起右岸断层区产生的水平位移，在断层垫座

上设置了两组浇筑缝（大致沿断面走向的缝十与坝中心面平行方向的缝），两组缝均延伸至垫座高度的一半处。

### 1.1.3.3 努列克心墙坝<sup>[4]</sup>

努列克坝位于塔吉克斯坦的瓦赫什河中游。水库库容为 10.5 亿  $\text{m}^3$ ，电站装机容量为 270 万 kW（9 台 30 万 kW）。除了发电外，还有灌溉效益。工程于 1961 年开工，1980 年建成。坝址地形为峡谷状，深达 300m 以上，河床宽 40m，河床冲积层厚 13~20m。大坝建在多发性强震区，地震基本烈度为 9 度。

努列克心墙土石坝最大坝高为 300m，坝顶长 744m，坝顶宽 20m，上游坝坡 1:2.25，下游坝坡 1:2.2，直心墙迎水坡为 1:0.25，背水坡为 1:0.27。坝体总体积为 5800 万  $\text{m}^3$ 。该坝为目前世界最高土石坝。大坝剖面如图 1.11 所示<sup>[4]</sup>。

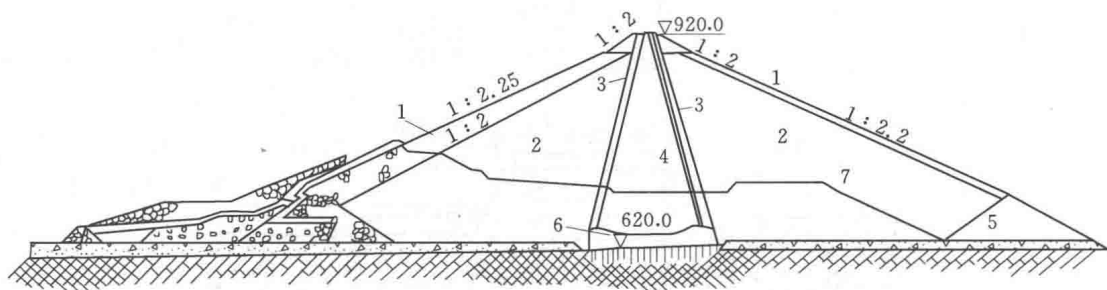


图 1.11 努列克坝横剖面图

1—堆石压坡体；2—坝壳堆石；3—反滤层；4—心墙；5—堆石护脚；  
6—混凝土垫座；7—一期堆筑线

努列克坝的主要设计特点如下：

(1) 心墙基础面设置混凝土垫座，长 157m，河床处宽 23m，两岸处宽 30~60m，垫座表面覆盖两层土工膜，垫座内布置 4.2m×3.8m 的灌浆及检查廊道。

(2) 心墙与下游坝壳之间设两层反滤。

(3) 心墙料为壤土、砂壤土及小于 200mm 碎石的混合物；反滤料由天然砾卵石混合物由过筛加工制成；坝壳料用天然砾卵石混合物，粗卵石含量平均 20%~25%，最大粒径 500~600mm；压坡料为平均粒径 400~700mm 的毛石。

(4) 抗震措施：

1) 大坝上游坝体内部高程 855m、876m 和 894m 各设一层加筋抗震层，以缓和、吸收最危险地震可能引起的坝内切向应力。

2) 在较高的 912m 高程处，也设加筋抗震层并将上下游大坝坝体结合在一起。

### 1.1.3.4 世界上设计最高的土石坝：罗贡斜心墙坝<sup>[4]</sup>

罗贡斜心墙坝也位于塔吉克斯坦境内的瓦赫什河上，在努列克坝上游约 70km 处。水库总库容 130 亿  $\text{m}^3$ ，具有灌溉和发电等综合效益。

大坝为黏土斜心墙土石坝，设计最大坝高 335m，坝顶长 660m，顶宽 20m，底宽 1500m，坝体体积 7550 万  $\text{m}^3$ 。左岸地下厂房装机 6 台，总装机 360 万 kW。

坝址基岩为砂岩、粉砂岩和泥板岩，地震烈度为 9 度。

大坝于1975年开工，由于苏联解体、阿富汗战争及泥石流灾害等因素影响，至今未建成。大坝设计剖面如图1.12所示<sup>[4]</sup>。

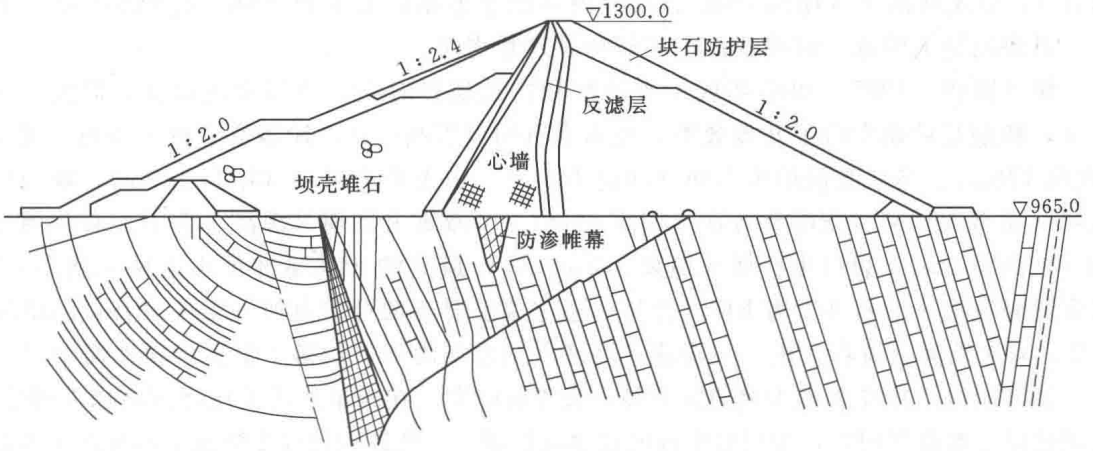


图 1.12 罗贡坝设计剖面图 (单位: m)

## 1.2 坝工技术的发展现状及发展趋势

### 1.2.1 我国坝工技术发展进程

根据1950年国际大坝委员会的统计资料，当时全世界5268座水库大坝中，中国仅有22座，说明当时我国坝工技术发展尚处于非常落后的阶段<sup>[3]</sup>。

1951—1977年，世界其他国家平均每年建坝335座，中国为420座。1982年国际大坝委员会统计，全世界15m以上大坝为34798座，中国为18595座，占总数的53.4%，居世界首位。1983—1986年，全世界建坝速度下降，每年只有209座建成，中国下降得更多，只有56座。1986年底统计，全世界大坝共有36226座，中国有18820座，占52%，仍居世界首位。从1990年开始，全世界在建大坝每年在1100~1700座之间，中国在250~310座之间，约占1/5~1/4。全世界每年完建的大坝为199~368座，中国为72~153座。1994年以后，情况稍有变化，即1994年前中国始终居第一位，土耳其和日本分别为第二、三位。此后1995年印度跃居第一位，有650座，中国(280座)和土耳其(145座)分列第二、三位<sup>[2]</sup>。

我国坝工技术的发展大致经历了以下四个阶段<sup>[2]</sup>：

第一阶段：1950—1957年发展初期，从治淮起步，根治海河、开始治黄。比较著名的大坝在北方有永定河的官厅土坝(坝高46m)，淮河北支流有白沙(坝高47.82m)、薄山(坝高48.4m)、南湾(坝高35m)等土坝，淮河南支流有佛子岭(坝高74.4m)、梅山连拱坝(高88m)，响洪甸重力拱坝(高87.5m)和磨子潭土墩坝(高82m)等。在海河流域各支流上也开始建设。1955年黄河流域开发规划完成，首批开工的有三门峡重力坝(坝高106m)。

第二阶段：1958—1966年进入高速发展时期，全国基本建设全面展开。特别是中小



型坝建设,因各地积极投入,数量猛增,大型工程比较著名的有黄河刘家峡重力坝(坝高147m)、新丰江支墩坝(高105m)、新安江水电站重力坝(坝高105m)、云峰重力坝(高114m)、流溪河拱坝(坝高78m)、以礼河一级水电站的毛家村土坝(高82m)等。1963年8月海河特大洪水,许多水库工程经历了严重考验。

第三阶段:1967—1986年属十年动乱和拨乱反正时期,建坝速度降低,但重视工程质量,特别是后期实行了开放政策,技术上有明显提高。这一阶段兴建的大坝有:龙羊峡(坝高178m)、乌江渡拱形重力坝(坝高165m)、白山重力拱坝(坝高149m)、湖南镇支墩坝(坝高129m)、龚嘴重力坝(坝高86m)、凤滩重力拱坝(坝高113m)、石头河土石坝(坝高105m)、碧口土石坝(坝高102m)等,最大的长江葛洲坝水电站(坝高48m)也在此时完成,装机272万kW,此外,还完成了群英砌石重力坝(坝高101m)。1975年8月,河南淮河上游特大洪水,造成了两座大型水库失事,取得了宝贵经验教训。

第四阶段:1987年至今属巩固和技术大发展时期。在改革开放国民经济高速发展阶段,大坝建设速度显著回升,新坝型出现而且迅速发展。一些达到世界先进水平的大坝工程陆续开工,完成了一大批高坝和大型水电站,包括安康重力坝(坝高120m)、紧水滩拱坝(坝高102m)、东江拱坝(坝高155m)、东风拱坝(坝高168m)、隔河岩拱坝(坝高151m)、漫湾重力坝(坝高132m)、鲁布革土石坝(坝高101m)等。举世瞩目的三峡水利枢纽(坝高181m,装机1820万kW),最高的二滩拱坝(坝高240m,装机330万kW)和小浪底水利枢纽土石坝(坝高154m,装机180万kW)等也都是在这一时期陆续开工建设的。

目前国内外工程界普遍认为,碾压混凝土坝和混凝土面板堆石坝是最有前途和富有竞争力的两种坝型。从20世纪80年代以来,这两种坝型在全世界范围内尤其是在我国得到了迅速发展。因本教材另有两章将详述这两种坝型的筑坝技术,故在此仅作一般性介绍。

(1) 碾压混凝土坝筑坝技术<sup>[2,3,5]</sup>。碾压混凝土坝是从国外引进并在近20年内得到迅速发展的一种坝型。它具有水泥用量少、施工速度快、工期短、造价低等优点,在适合建设混凝土坝的坝址,基本上都研究和比较了碾压混凝土坝型。

1978年以来,我国就开始进行碾压混凝土施工工艺的研究,吸取了美国、日本等国的经验,在福建沙溪口,厦门机场、葛洲坝船闸等工程做了试块,1984年在福建坑口开始全碾压混凝土重力坝建设,该坝高58m,上游面用沥青砂浆防渗,于1986年建成,随后在国内逐渐铺开,铜街子、岩滩、水口等10余项工程相继用碾压混凝土筑坝<sup>[2]</sup>。经过各方面共同努力攻关,在贵州75m高的普定拱坝设计和施工中,初步建立了有我国特色的碾压混凝土筑坝技术。该坝工程质量优良,自1993年建成后,至今基本无渗漏。此后,经过江垵、汾河二库、棉花滩、大朝山、沙牌、百色等工程的进一步实践、探索和创新,我国的碾压混凝土筑坝技术已日趋成熟,在不少方面已位于国际前列。到目前,已建和在建碾压混凝土坝约有150余座。已建的红水河龙滩碾压混凝土重力坝,坝高216.5m,坝体混凝土总量达700万m<sup>3</sup>,其中碾压混凝土约占65%,是目前世界上最高和体积最大的碾压混凝土重力坝。龙滩碾压混凝土重力坝工程2007年作为中国代表荣获国际碾压混凝土工程里程碑奖。沙牌碾压混凝土拱坝(坝高132m),是目前世界已建的最高碾压混凝土拱坝,它经受住了2008年5月12日汶川地震的严峻考验,在国际坝工界具有里程碑意义,作为碾压混凝土高拱坝的代表,为碾压混凝土筑坝技术的进一步推广应用起到了新的