



# 拱坝设计与研究

朱伯芳 高季章 陈祖煜 厉易生 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 拱坝设计与研究

朱伯芳 高季章 陈祖煜 厉易生 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

Supported by the National Fund for Academic Publication in Science and Technology

# **Design and Research for Concrete Arch Dams**

---

By

Zhu Bofang   Gao Jizhang  
Chen Zuyu   Li Yisheng

**China WaterPower Press**

## 内 容 提 要

本书系统地总结了国内外拱坝设计、施工、运行的经验和科学研究成果,全书共分十二章,主要内容包括:拱坝的枢纽布置、泄洪消能、体形设计和优化、静态应力分析的结构力学方法和有限单元法、动态应力分析和抗震设计、抗滑稳定、基础处理、坝体分缝、温度控制、细部结构、监测系统、特殊拱坝及应力控制标准等。本书既有较高的实用价值,又有相当的理论深度。既阐述了各种实用的设计方法、施工措施和监测系统,又阐述了各种新的先进的拱坝结构形式、体形优化、新的设计和计算方法。本书可供水利水电工程设计、施工、运行、科研人员使用,也可供高等院校有关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

拱坝设计与研究/朱伯芳等著. —北京:中国水利水电出版社, 2002  
ISBN 7-5084-1176-5

I. 拱… II. 朱… III. 拱坝-设计 IV. TV649.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第057051号

书 名	拱坝设计与研究
作 者	朱伯芳 高季章 陈祖煜 厉易生 著
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	涿州市星河印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 54印张 1280千字
版 次	2002年12月第一版 2002年12月第一次印刷
印 数	0001—3100册
定 价	138.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

## 作者小传



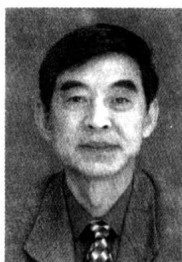
**朱伯芳** 1928年10月出生，江西余江人，1951年毕业于上海交通大学土木系后，参加佛子岭、梅山、响洪甸等我国第一批混凝土坝设计，为我国从零开始掌握现代混凝土坝设计技术作出了一定贡献。1957年底调至中国水利水电科学研究院从事混凝土高坝研究，在我国开辟了混凝土温度徐变应力、拱坝优化、高坝全过程仿真等新的研究领域。混凝土温度应力获国家自然科学基金三等奖，拱坝优化和高坝全过程仿真分别获国家科技进步二等奖（均排名第一）。出版《大体积混凝土温度应力与温度控制》、《有限单元法原理与应用》、《结构优化设计原理与应用》等著作6本，发表论文160余篇。1984年获首批国家级有突出贡献专家称号，1995年当选为中国工程院院士，是第八届、第九届全国政协委员。是博士生导师，任国际土木与结构工程计算机应用学会理事，中国土木工程学会常务理事，中国水力发电工程学会常务理事。



**高季章** 1944年10月出生，四川酉阳人，中国水利水电科学研究院教授级高级工程师。1968年清华大学水利工程系河川枢纽与水电站建筑专业毕业，1968~1978年在中国第一水电工程局从事施工技术工作。1981年中国科技大学研究生院毕业，获水力学与河流动力学专业工学硕士。1981年至今，在中国水利水电科学研究院从事科研和管理工作，历任中国水利水电科学研究院水力学所副所长、所长，中国水利水电科学研究院副院长、院长。主持或参加的项目获国家科技进步二等奖一项，省部级科技进步二等奖二项，三等奖一项。是博士生导师，中国水利学会，中国水力发电工程学会常务理事。曾任国际水利研究协会理事。主要研究领域：水利水电工程枢纽布置、泄洪消能、高速水流。



**陈祖煜** 1943年2月出生，浙江镇海人，中国水利水电科学研究院教授级高级工程师。1966年毕业于清华大学水利系，1967~1979年在官厅水库等工地任技术员。1979~1981年赴加拿大 Alberta 大学土木系进修。1981年至今在中国水利水电科学研究院工作。长期从事边坡稳定分析理论研究和工程咨询工作。曾任长江三峡、小浪底、长江干堤加固等工程的安全鉴定、验收和咨询专家。曾在第8届国际岩石力学大会(1995)、国际边坡工程学术讨论会(1999)和世纪岩土工程大会(GeoEng' 2000)作主题报告。有关天生桥和漫湾的高边坡工程的研究成果分获国家科技进步二、三等奖。曾获“有突出贡献中青年专家”称号，1999年获茅以升土力学与基础工程大奖。发表论文90余篇。



**厉易生** 1941年12月出生，浙江余姚人，中国水利水电科学研究院教授级高级工程师。1965年毕业于清华大学水利系，毕业后在黄河水利委员会工作，曾参与沁河口村沥青混凝土斜墙堆石坝、王屋山拱坝、故县混凝土重力坝的设计以及小浪底水库的科研、黄河流域规划等工作。1982年在中国水利水电科学研究院获硕士学位，以后就一直在该院结构材料所从事混凝土坝结构问题研究。主要研究方向是拱坝应力分析、体型优化设计。提出了基于拱坝优化技术的二次曲线拱坝新线型，论证了拱圈线型排序的方法，并参与了数十座拱坝的体形优化设计，为国家节省了大量的投资。1988年获国家科技进步二等奖，1994年获国家特殊津贴。

# 序

---

拱坝是一种重要的坝型，以结构合理和体型优美而著称。

1950年以前，我国只修建过几座很小的砌石拱坝。1950年以后，才大规模兴建混凝土拱坝和砌石拱坝，而且大中小并举，一浪高似一浪。据国际大坝委员会统计，1988年全世界坝高超过15m的拱坝共1592座，其中我国为753座，占47%。目前恐已超过千座，中国可称为世界拱坝大国。

不仅如此，我国所建拱坝的规模也越来越大。以坝高而言，上世纪50年代建设的首批混凝土拱坝：高87.5m的响洪甸拱坝和高78m的流溪河拱坝，对于发轫时期来说，已是不低的坝了。到了80年代，我国已先后建成150m以上的白山、东江、龙羊峡等高拱坝。至90年代建成的二滩拱坝高达240m，已是世界第三高拱坝。目前建设中的小湾拱坝高292m，建成后将是世界第一高拱坝。设计中的溪洛渡、锦屏一级等拱坝，不仅坝高都在300m量级，而且按坝身体积、泄洪能量和装机规模来衡量，都位列世界最前茅，中国不仅是世界拱坝大国，也是世界拱坝强国。

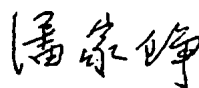
取得这些成就是不容易的，特别值得珍视的是这些成就都是我国工程和科技人员靠自己努力取得的。世界上不少发展中国家也修建了一些高坝，但多委托发达国家设计、施工和管理，而我国的坝工建设，除50年代的三门峡大坝委托前苏联设计外，所有的勘测、设计、科研、施工都自力更生完成。尽管在大跃进和文革时期受到左倾路线的严重干扰和破坏，广大科技和工程人员一直坚持实事求是和开拓创新的优良传统，取得了一个又一个的胜利，设计和施工质量是好的。尤其自改革开放以来，在国家的扶植导向下，科研和生产密切结合，在重视学习西方先进经验的同时，结合国情不断创新，这是促使我国坝工技术迅速发展的重要力量。在拱坝领域中，我国学者对拱坝的静动应力分析、温度

和徐变应力的仿真计算、拱坝的体形优化、CAD技术在拱坝设计和施工中的应用、复杂地基上修建高拱坝的突破、大流量高落差泄洪消能问题的解决等各方面都作出了突破性贡献。尽管由于改革开放前的闭关锁国政策和文字上的障碍，许多成就在当时并不为世所知，但如果说中国的拱坝技术已达到世界先进水平，应该是当之无愧的。

我国拥有得天独厚的水能资源，去年全国水电发电量已超过2400亿kW·h，但与可开发的19200亿kW·h/年相比，所占比例何其之小！在新世纪，随着西部大开发和可持续发展等基本国策的落实，更多更宏伟的拱坝有待建设。我国的拱坝建设正面临新的机遇与挑战。

本书作者们对国内外拱坝设计、科研、施工和运行情况作了系统的总结，著成专著，内容丰富，重视理论与实际的结合，相信其出版将受到我国水利水电科技界的欢迎，有利于我国拱坝技术的发展，故乐为之序。

中国科学院院士  
中国工程院院士  
国家电力公司顾问



2002年8月14日

# 前言

---

在人类改造大自然、发展国民经济的事业中，水利水电建设占有突出的地位。在狭窄河谷建造水坝，拱坝是一种既经济又安全的坝型，对于高坝，拱坝的优势尤为明显。全世界已建高度200m以上大坝共有33座，其中拱坝19座，占58%。我国自20世纪50年代建成首批高混凝土拱坝——高87.5m的响洪甸拱坝和高78m的流溪河拱坝以后，拱坝建设发展迅速。据“World Register of Dams (1988)”统计，到1988年，全世界共建高15m以上拱坝1592座，其中我国有753座，占47.3%。由于拱坝结构复杂，为了解决高拱坝建设中的难题，“七五”、“八五”、“九五”连续三个五年计划我国都把高拱坝研究列为国家重点科技攻关的课题。经过近50年的建设，我国已发展成为名副其实的拱坝大国，不但在拱坝数量上占世界第一位，而且在科学技术上也攻克了一系列难题，取得了令人瞩目的科技成果，在拱坝设计和研究上，实际上已达到世界一流水平。

早期建设的拱坝多采用等厚单心圆拱，后来逐渐采用变厚度三心圆拱、抛物线拱、对数螺旋线拱，我国并提出和建成了统一二次曲线拱和混合曲线拱两种新体型。从20世纪70年代中期开始，我国进行了拱坝体形优化的研究和应用，建立了合理而实用的数学模型，找到一个高效率的应力分析方法——内力展开法。瑞洋拱坝是世界上第一座用优化方法设计的拱坝，节省混凝土31.6%，1987年建成，运行良好，被评为优秀工程。目前全国用优化方法设计的拱坝已达百余座，设计效率大大提高，3~5天即可完成体形设计，一般可节省混凝土10%~30%，如在建的高140m的江口拱坝，经过优化节约了投资1.4亿元。优化方法也已从单目标优化发展到多目标优化。

拱坝是变半径、变厚度壳体，应力状态比较复杂。我国在



20 世纪 70 年代以前，应力分析主要采用拱冠梁法，70 年代以后，逐渐采用多拱梁法和有限元法。

20 世纪 70 年代中期以后，有限元方法在我国拱坝应力分析中得到广泛应用，几乎各种三维实体单元、厚壳和薄壳单元都应用过。目前应用较多的是 8 结点和 20 结点等参单元和节理单元，除了引进的程序外，中国水利水电科学研究院、清华大学、河海大学、武汉大学水电学院等单位还研制了用于温度徐变应力、非线性、仿真、动应力等问题的专用程序，在实际工程中得到了广泛的应用。

水利部东北勘测设计研究院、浙江大学、中国水利水电科学研究院等研制了一系列新的静力和动力多拱梁计算方法和软件，获得广泛应用。有限元法计算结果由于应力集中而数值偏大，应用于实际工程存在一定困难。为了解决这个矛盾，我国提出了等效应力法。目前我国在拱坝静力和动力应力分析方法和软件的研制上已居于世界前列。拱坝设计主要采用国内研制的多拱梁法和有限元法程序，这些程序功能很强，比国外类似程序更能适应拱坝应力分析的需要。

温度荷载是拱坝的一个重要荷载，过去采用美国垦务局经验公式，不够合理。20 世纪 80 年代初，我国提出了一套考虑当地气温和水温变化的拱坝温度荷载计算方法，并纳入拱坝设计规范。

我国是一个多地震国家，从新丰江水库发生强烈地震后，对高坝抗震进行了长期研究，取得了丰硕成果。目前已开发了带有人工透射边界、可考虑坝体接缝张开和基础滑移的非线性三维有限元动力分析程序，并已应用于小湾、溪洛渡等高拱坝。

在复杂基础上修建拱坝，稳定分析和基础处理是重要问题。乌江渡重力拱坝成功地解决了岩溶地区修建混凝土高坝的防渗问题。龙羊峡拱坝坝肩岩体被多条断层、节理切割，地质条件十分复杂，用于坝基处理的回填混凝土达到 12 万  $\text{m}^3$ ，运行情况表明，处理是成功的。我国提出了基于塑性力学上限定理的拱座稳定三维极限分析方法。

我国在拱坝枢纽布置和泄洪消能方面也取得了丰富的经验。乌江渡重力拱坝溢流堰顶单宽流量最大达  $201\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ，单宽泄洪功率  $21 \times 10^4 \text{kW}/\text{m}$ ，总泄洪功率达  $2150 \times 10^4 \text{kW}$ 。经过特大洪水的考验，证明设计是成功的。凤滩空腹重力拱坝总泄量达  $32200\text{m}^3/\text{s}$ ，不仅是我国，也是世界上拱坝泄量最大的工程，为了消能，把 13 个泄水孔高低坎相间布置，挑射水流在空中上下撞击，实际运行表明消能效果良好。二滩、东风等拱坝在枢纽布置和泄洪消能方面也是成功的。我国自主发明的宽尾墩窄缝挑坎新型消能工，已成功地应用于隔河岩拱坝等实际工程。

我国在砌石拱坝方面也积累了丰富的经验，并有不少创新，限于篇幅，本书只好割爱。

1955年本书第一作者在治淮委员会设计院从事我国第一座混凝土拱坝响洪甸拱坝的设计，当时计算手段很落后，鉴于西欧重视拱坝模型试验的经验，提出并委托清华大学水利系进行了我国第一个拱坝模型试验，此后拱坝模型试验在我国得到了迅速发展。但时至今日，计算技术已突飞猛进，而试验技术相对滞后，如温度变化和渗透水在模型中都难以模拟。运行期自重和水压力均不可能成倍增加，坝的失事是由于材料强度达不到预期值。较合理的试验方法是同比降低材料强度参数或同比增大各种荷载，但目前的超载试验中，自重不变，单独增大水压力，使坝内应力状态与破坏机制均失真。例如，某拱坝在1倍自重和1倍水压力作用下，坝底部受拉范围约20%，在1倍自重和4倍水压力作用下，坝底部受拉范围达到90%，这样求出的安全系数显然不够合理。因此，本书没有列入拱坝结构模型试验。

中国具有丰富的水能资源，到目前为止只开发了12%左右。今后随着国民经济的进一步发展，水利水电事业将更加兴旺发达，特别是在即将来临的西部大开发中，为了解决西南的能源和西北的水资源问题，必然在高山峡谷兴建大量拱坝，中国的拱坝建设正面临着—个崭新的机遇。为了迎接即将到来的拱坝建设的新高潮，我们在总结国内外拱坝设计、施工、运行和科研的基础上，写出本书。全书分为十二章，包括拱坝的枢纽布置、泄洪消能、体形设计和优化、静态应力分析的结构力学方法和有限元法、动态应力分析和抗震设计、抗滑稳定、基础处理、坝体分缝、温度控制、细部结构、监测系统、特殊拱坝及应力控制标准等。

本书材料来源有三部分：一是国内外已建拱坝的设计、施工、运行、研究的实际资料、经验与教训；二是我国“七五”、“八五”、“九五”三个五年计划中国家重点科技攻关高拱坝研究课题的大量成果；三是作者本人长期从事拱坝设计、研究和咨询的实际经验和成果。

本书内容兼顾实用价值和学术价值，立足过去，展望未来。例如，在拱坝体形上，既要对传统的圆形拱坝、抛物线拱坝、椭圆形拱坝、对数螺旋线拱坝进行阐述和评论，又要对统一二次曲线拱坝、混合曲线拱坝等新体形进行阐述和评论。又如，在计算方法上，既要阐述传统的多拱梁法，又要阐述新的线性和非线性多拱梁法和有限元法；在拱坝材料和施工方法方面，既要介绍传统的柱状分缝混凝土拱坝，又要介绍新的碾压混凝土拱坝和微膨胀混凝土无横缝拱坝。

作者希望贯彻理论联系实际的原则，写出一本既有较大实用价值，又有相

当理论深度的拱坝专著。在本书写作中，作者力求体现下述五个特点：第一，实用性，详细阐述各种实用的设计方法、施工措施和监测系统。第二，先进性，阐述国内外各种新的先进的拱坝结构形式、体形优化、设计和计算方法。第三，总结性，系统地总结国内外拱坝设计、施工、运行和研究的成功经验和失败教训。第四，清晰性，在写作方面和文字叙述上做到层次分明、概念清晰、文笔流畅。第五，资料性，国内外拱坝有重大参考价值的图纸和资料，择其精华，收入书内，大部分经分析整理后，分别插入书内有关章节。

本书第二章由高季章执笔，第七、八章由陈祖煜执笔，第一、十章由厉易生执笔，其余各章由朱伯芳执笔，全书由朱伯芳统稿。

本书第4章承贾金生教授审阅，第7、8两章中资料的收集得到张发明、杜景灿、弥宏亮等同志的热情帮助，薛云霞同志为本书的编辑付出了大量劳动，特别是中国科学院院士、中国工程院院士、国家电力公司顾问潘家铮先生在百忙之中为本书作序，我们在此特表示衷心的感谢！

拱坝是一种重要而复杂的水工结构，近年来建设实践和科学研究均发展很快。限于笔者水平和时间，不足之处，在所难免，热诚欢迎读者批评指正。

朱伯芳 高季章 陈祖煜 厉易生

2002年6月于北京

# 目 录

## 序 前言

<b>第一章 概述</b> .....	1
1.1 拱坝的发展 .....	1
1.2 拱坝分类 .....	20
1.3 坝址选择 .....	23
1.4 设计条件 .....	31
1.5 基本资料 .....	35
参考文献 .....	42
<b>第二章 枢纽布置和泄洪消能</b> .....	43
2.1 概述 .....	43
2.2 拱坝枢纽布置 .....	44
2.3 拱坝高水头大流量泄洪 .....	92
2.4 拱坝消能技术 .....	118
2.5 拱坝枢纽的高速水流问题 .....	139
参考文献 .....	155
<b>第三章 拱坝体形设计与优化</b> .....	156
3.1 拱坝的几何模型 .....	156
3.2 拱坝体形的类型 .....	157
3.3 拱坝的体形设计 .....	175
3.4 拱坝体形的手工设计 .....	181
3.5 拱坝体形的计算机辅助设计 (CAD) .....	183
3.6 拱坝体形的满应力设计 .....	184
3.7 拱坝体形的单目标优化设计 .....	186
3.8 拱坝体形的双目标优化设计 .....	193
3.9 拱坝体形的多目标优化设计 .....	198
3.10 拱坝的智能优化辅助设计 .....	201
3.11 拱坝优化中的静态应力分析与稳定分析 .....	203

3.12	拱坝优化中的动态应力分析 .....	206
3.13	拱坝体形设计中几个问题的讨论 .....	208
3.14	拱坝体形的经验性评估 .....	209
	参考文献 .....	213
<b>第四章 拱坝静态应力分析——结构力学方法 .....</b>		<b>215</b>
4.1	概论 .....	215
4.2	基础变位计算 .....	222
4.3	悬臂梁计算 .....	234
4.4	拱圈计算 .....	243
4.5	拱冠梁法 .....	267
4.6	多拱梁法——五向协调 .....	268
4.7	多拱梁法——四向协调 .....	273
4.8	多拱梁试载法——三向逐步调整 .....	274
4.9	多拱梁法——三向协调 .....	276
4.10	泊松比影响的调整 .....	278
4.11	混合法 .....	279
4.12	坝体应力计算 .....	300
4.13	算例 .....	310
4.14	影响拱梁径向荷载分配的因素 .....	315
4.15	多拱梁法与有限元法的耦合 .....	316
4.16	非线性多拱梁法 .....	319
4.17	圆拱弹性稳定性 .....	328
	参考文献 .....	334
<b>第五章 拱坝静态应力分析——有限单元法 .....</b>		<b>336</b>
5.1	一维有限单元法 .....	336
5.2	厚壳曲面单元 .....	341
5.3	三维等参单元 .....	345
5.4	非线性有限元解法 .....	357
5.5	主应力空间 .....	360
5.6	屈服准则 .....	362
5.7	弹塑性增量理论的有限元解法 .....	368
5.8	夹层单元与节理单元 .....	370
5.9	有限厚度带键槽接缝单元 .....	376
5.10	断裂力学单元 .....	380
5.11	混凝土裂缝单元 .....	383
5.12	有限元等效应力法 .....	386



5.13	拱坝施工应力 .....	388
5.14	横缝对拱坝应力的影响 .....	392
5.15	弹塑性有限单元法计算拱坝安全系数 .....	400
5.16	弹塑性稳定理论计算拱坝安全系数 .....	408
5.17	渗流场有限元分析 .....	413
	参考文献 .....	420
<b>第六章</b>	<b>拱坝动态应力分析和抗震设计 .....</b>	<b>422</b>
6.1	工程地震概论 .....	422
6.2	地震作用下的单自由度体系 .....	432
6.3	地震作用下的多自由度体系 .....	434
6.4	地震应力分析的有限元方法 .....	439
6.5	拱坝地震应力分析的结构力学方法 .....	464
6.6	混凝土的动力特性 .....	470
6.7	混凝土坝的震害 .....	472
6.8	拱坝的抗震措施 .....	482
	参考文献 .....	484
<b>第七章</b>	<b>拱坝抗滑稳定分析 .....</b>	<b>487</b>
7.1	概述 .....	487
7.2	岩体力学特性和设计参数 .....	491
7.3	拱坝沿建基面的抗滑稳定分析 .....	509
7.4	拱座抗滑稳定——楔体滑动分析 .....	515
7.5	拱座抗滑稳定——整体滑动分析 .....	523
7.6	拱坝和岩基的整体有限元及非连续介质应力应变分析 .....	538
7.7	楔体稳定分析程序和使用方法 .....	550
	参考文献 .....	562
<b>第八章</b>	<b>拱坝基础处理 .....</b>	<b>564</b>
8.1	概述 .....	564
8.2	防渗和排水设计 .....	570
8.3	拱坝蓄水后的防渗补强工程实例 .....	601
8.4	坝基和拱座岩体的灌浆加固 .....	614
8.5	坝基和拱座的混凝土传力、抗剪和补强结构 .....	629
8.6	坝基和拱座的预应力锚索加固 .....	644
	参考文献 .....	647
<b>第九章</b>	<b>拱坝温度控制 .....</b>	<b>650</b>
9.1	概述 .....	650

9.2	热传导原理及混凝土的热学性能	655
9.3	气温	660
9.4	库水温度	662
9.5	日照	666
9.6	混凝土的初始温度	670
9.7	混凝土温度场的差分解法	674
9.8	混凝土温度场的有限元解法	677
9.9	初温均匀分布平板的冷却	680
9.10	混凝土浇筑块的水化热温升	682
9.11	初温均匀分布与外温按余弦函数变化时混凝土平板的温度场	685
9.12	外界温度任意变化时混凝土平板的冷却过程	691
9.13	混凝土的弹性、徐变与应力松弛	693
9.14	徐变对结构应力和变形的影响	696
9.15	混凝土浇筑块的温度应力	701
9.16	基础浇筑块长度对温度应力的影响	709
9.17	基础浇筑块温度应力的近似计算	711
9.18	寒潮引起的温度应力及表面保温计算	712
9.19	封拱前拱坝初始温度应力	717
9.20	运行期拱坝非线性温差应力	720
9.21	混凝土湿胀应力	723
9.22	混凝土的水管冷却	724
9.23	减小拱坝温度荷载的方法	734
9.24	控制温度防止裂缝的技术措施	736
	参考文献	738
<b>第十章</b>	<b>拱坝细部结构和监测体系</b>	<b>741</b>
10.1	拱坝分缝	741
10.2	周边缝拱坝	748
10.3	拱坝的孔口和廊道	758
10.4	坝体排水	763
10.5	拱坝监测系统	764
	参考文献	776
<b>第十一章</b>	<b>特殊拱坝</b>	<b>777</b>
11.1	特殊地形、地质条件下的拱坝	777
11.2	碾压混凝土拱坝	783
11.3	微膨胀混凝土拱坝	797
	参考文献	815

<b>第十二章 关于拱坝应力控制标准和接缝灌浆时间的研究</b> .....	817
12.1 对国内外拱坝允许应力现状的分析 .....	817
12.2 拱坝设计应力 .....	824
12.3 混凝土可用强度 .....	829
12.4 关于拱坝应力控制标准的建议 .....	836
12.5 关于拱坝接缝灌浆时间的探讨 .....	838
参考文献 .....	844

# Contents

Preface

Foreword

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 Development of arch dams .....	1
1.2 Classification of arch dams .....	20
1.3 Study of dam site alternatives .....	23
1.4 Design data .....	31
1.5 Design specifications .....	35
References .....	42
<b>Chapter 2 Project layout, flood release and energy dissipation</b> .....	43
2.1 Introduction .....	43
2.2 Layout for arch dam project .....	44
2.3 Release of flood with large discharge for high arch dams .....	92
2.4 Energy dissipation for arch dams .....	118
2.5 Problems of high-velocity flow with arch dam project .....	139
References .....	155
<b>Chapter 3 Design and optimization of arch dam shapes</b> .....	156
3.1 Geometric model of arch dams .....	156
3.2 Classification of arch dam shapes .....	157
3.3 Shape design of arch dam .....	175
3.4 Manual design of arch dam shape .....	181
3.5 CAD (computer aided design) for arch dam shapes .....	183
3.6 Full stress design of arch dam shape .....	184
3.7 Single objective optimization of arch dam shape .....	186
3.8 Double objective optimization of arch dam shape .....	193
3.9 Multiple objective optimization of arch dam shape .....	198
3.10 Intelligent optimal CAD for arch dams .....	201
3.11 Static analysis of stresses and sliding stability in the shape optimization of arch dams .....	203
3.12 Dynamic stress analysis in shape optimization of arch dams .....	206