

拱坝封拱温度场 及温控优化

刘德富 黄达海 田 斌 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

拱坝封拱温度场 及温控优化

刘德富 黄达海 田 斌 著

封面设计：田斌

本书是作者在多年从事拱坝温控设计、施工、科研工作的基础上，结合工程实例，系统总结了拱坝封拱温度场及温控优化的研究成果。

本书可作为水利水电工程技术人员、科研人员和高等院校相关专业师生的参考书。

ISBN 978-7-122-18218-2

定价：35.00元

中国水利水电出版社

地址：北京市三里河路



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要内容有三部分：拱坝封拱温度场优化理论及实施办法；拱坝施工全过程仿真与温控优化；拱坝坝踵开裂机理。

本书可供水电科研、设计、施工等机构人员及有关院校人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

拱坝封拱温度场及温控优化/刘德富, 黄达海, 田斌
著. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

ISBN 978 - 7 - 5084 - 5912 - 7

I. 拱… II. ①刘…②黄…③田… III. ①拱坝—温度场—
研究②拱坝—温度控制—最佳化—研究 IV. TV642.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 144873 号

书 名	拱坝封拱温度场及温控优化
作 者	刘德富 黄达海 田 斌 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: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、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	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 27.75 印张 658 千字
版 次	2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷
印 数	001—300 册
定 价	120.00 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

拱坝是一个三边嵌固在岩基上的变曲率、变厚度高次超静定空间壳体结构。由于其优越的安全与经济特性，在国内外得到广泛应用，特别是在高坝中，拱坝比例明显高于其它坝型。我国从二滩拱坝建设开始，一批 200m 以上的拱坝陆续进入施工或设计阶段，包括锦屏（305m）、小湾（292m）、溪洛渡（278m）等。在二滩拱坝之前，我国大陆缺乏建设 200m 以上特高拱坝的经验，致使解决高拱坝建设中的科学技术问题，成为我国近 20 年来坝工科技攻关的主要内容之一。

拱坝是一渐进结构。不仅结构经历了“各个坝块独立”、“下部封拱上部独立”、“全坝灌浆成为整体”三个阶段，而且材料也经历了“散离体拌和”、“流体浇注”、“发热硬化”三个阶段。从施工期到运行期，温度荷载始终是拱坝的一项主要荷载。如何减小拱坝温度荷载的不利影响、防止拱坝裂缝，直接关系到拱坝的安全与经济性。针对这一问题，作者结合我国一系列高拱坝工程实践，开展了拱坝封拱温度场优化、拱坝施工全过程仿真及温控优化、拱坝开裂机理等方面的研究。

在拱坝设计阶段，如何确定封拱温度场，使其对拱坝应力、稳定等尽可能有利，是国内外少有人论及的一个问题。作者通过温度荷载及其效应分析认为：运行期温度荷载可以通过人为确定的封拱温度场来改变。拱坝上下游温度变幅，均是相对其封拱温度计算的，因此可以通过各个高层封拱温度的高低，调整相应层温度荷载，减小其对拱坝的不利影响。作者依托我国在建的小湾与锦屏拱坝，在本书中建立了一套拱坝封拱温度场优化的方法，并给出了实施办法。

为了保证拱坝施工安全、经济，应针对具体工程，在不同部位、不同施工季节，采取不同的温度控制措施。这就需要根据每个浇筑块的材料参数、环境条件、施工措施及进度等，模拟大坝施工期的温度场及应力场。在不断优化温控措施、提升温控管理水平的前提下，达到防止大坝产生温度裂缝的目的。为此，作者经过长期研究，提出了拱坝施工过程模拟与其结构性态仿真接力计算及同步动态显示方法，详细讨论了仿真计算中边界及初始条件赋值办法及其影响，探讨了混凝土表面裂缝机理及防止措施，开发了我国第一个拱坝温控数据库，并针对具体工程，研究了温控措施及其优化问题。

拱坝开裂几乎与拱坝的历史一样久远，一直是坝工界关注的问题。工程上，常通过限制坝体最大拉应力防止拱坝开裂，而拉应力允许值主要靠经验确定，而我国 200m 以上特高拱坝的建设经验较少。因此，我国现行拱坝规范确定的允许拉应力是否适合特高拱坝、拱坝开裂的机理是什么、如何更好地防止拱坝开裂，成为我国特高拱坝建设必须解决的问题。作者针对奥地利 Kolnbrein 拱坝坝踵开裂实例，建立了拱坝开裂计算的方法，探讨了拱坝开裂的机理，提出了防止拱坝开裂的措施。

本著作是在大量科研项目成果基础上编写而成，项目来源主要有国家“九五”科技攻关及湖北省科技创新团队计划等纵向项目、国内大型水电设计、施工及建设单位等资助的项目。研究成果已经被近 20 个工程所采用，如小湾、溪洛渡、锦屏一级、白鹤滩、三江、沙老河、沙牌等，开发的软件已经在两家设计单位及 4 家高校使用。没有上述项目经费的支持，不可能取得本书所列成果，也就没有本书的出版。参与项目研究的人员有许多，如彭辉、李洋波、刘心庭、王从锋、张萍、徐卫超、韩燕、孟永东等，没有他们的心血也不可能有本书的出版。在此，对资助单位和参与研究的人员表示衷心的感谢。

本书绪论及第一篇由刘德富撰写，第二篇由黄达海撰写、第三篇由田斌撰写，全书由刘德富统稿。在编写过程中，得到了彭辉、李洋波、张萍、杨虎、刘小萍、程维、谭力、卢晓春等老师和同学的帮助和支持。本书的出版得到了三峡大学重点学科建设经费的资助。出版社编辑们也为本书的出版付出了心血，使本书增色不少。在此一并感谢。

本书虽然主要介绍的是混凝土拱坝封拱温度及温控优化问题，但所介绍的理论和方法同样适合于其它大体积混凝土结构，可广泛应用于土木、水电、铁路交通、煤炭矿山等大体积混凝土结构设计施工之中，特别是混凝土拱坝等坝工结构。本书强调理论联系实际，在介绍理论和方法的同时，介绍了大量具体工程的研究结论，因此本书既可以供从事大体积混凝土结构温控理论教学、研究的人员参考，也可以供从事大体积混凝土结构设计、施工的技术人员参考。

在本书的撰写过程中，吸收了不少拱坝专家的成果与智慧，本书所有荣誉，应与这些前辈共享。由于作者理论水平不高与工程经验欠缺，本书中必然存在一些不当之处，恳请读者批评，并直接联系我们。

作者：刘德富 (dfliu@ctgu.edu.cn)

黄达海 (huangdh@tsinghua.edu.cn)

田斌 (eudiltb@ctgu.edu.cn)

目 录

前言

绪 论

1 世界拱坝的发展	3
2 中国拱坝理论与实践	8
3 本书主要内容	14
参考文献	17

第一篇 拱坝封拱温度场优化理论与实施办法

第 1 章 温度荷载作用下拱坝工作特性的研究	25
1 概述	25
2 温度荷载对圆弧拱圈应力、稳定及变形影响规律的研究	25
3 拱坝温度荷载作用效应研究	32
4 拱坝最不利温度荷载组合问题	35
参考文献	37
第 2 章 拱坝封拱温度场多目标优化方法	39
1 概述	39
2 拱坝封拱温度场多目标非线性规划方法	41
3 拱坝封拱温度场多目标线性规划方法研究	45
参考文献	50
第 3 章 拱坝封拱温度场及体形综合优化方法研究	52
1 概述	52
2 拱坝封拱温度场及体型综合优化方法	53
3 人工神经网络方法在拱坝近似优化中的应用	58
参考文献	68
第 4 章 拱坝最优封拱温度场实施办法研究	71
1 概述	71
2 等间距布置水管、单向通水人工冷却问题的求解	72
3 分区冷却时断面温度参数计算方法	76
4 冷却参数的设计方法	77
5 示例	81

6 结语	81
参考文献	82
第5章 小湾拱坝最优封拱温度场及实施办法初探	83
1 基本情况	83
2 小湾最优封拱温度场计算结果	85
3 最优封拱温度场实施办法	91
4 结论及建议	96
参考文献	96
第6章 锦屏一级拱坝最优封拱温度场及实施办法初探	97
1 工程概述	97
2 锦屏最优封拱温度场计算结果	99
3 最优封拱温度场实施办法	121
4 结论及建议	121
参考文献	122
第7章 结论与展望	123
1 结论	123
2 展望	124
第二篇 拱坝施工全过程仿真与温控优化	
第1章 拱坝温度应力仿真计算原理	129
1 温度应力仿真技术的发展	129
2 拱坝温度应力仿真计算原理	131
3 程序设计与加速计算方法	138
4 拱坝混凝土跳仓浇筑与全坝仿真计算	145
参考文献	154
第2章 拱坝施工过程仿真温度边界	156
1 水温边界	156
2 气温边界	172
3 地温边界赋值方法	183
4 新老浇筑层面温度赋值方法	188
参考文献	196
第3章 大坝混凝土温控措施优化设计	197
1 混凝土温控设计原则	197
2 混凝土温控措施主要方法	203
3 温控参数敏感性分析	210
4 个性化温控措施选择与实践	223
5 大坝夏季冷却高峰时段通水流量计算	230
6 施工期蓄水期间未灌横缝开度分析	233

参考文献	239
第4章 混凝土温湿耦合机理与试验研究	241
1 多孔介质传热传质的理论问题	241
2 混凝土温度与湿度耦合特性的试验研究	249
3 混凝土等温传湿过程的试验研究	259
4 常温下混凝土质扩散系数及其应用	265
参考文献	272
第5章 大坝混凝土施工期表面保护	275
1 混凝土表面开裂的危害	275
2 早龄期混凝土表面开裂的试验研究	277
3 寒潮袭击时半无限平面问题的无限平面化	284
4 温度突降条件下表层温度计算中有关问题讨论	292
5 大体积混凝土热学参数反分析新方法	295
6 早龄期混凝土表面保护仿真计算	300
7 大体积混凝土表面保温程序开发	313
参考文献	316
第6章 拱坝温控数据库开发	318
1 温控信息类型	318
2 温控数据库的数据结构与程序开发原理	319
参考文献	342

第三篇 拱坝坝踵开裂机理分析

第1章 引言	355
1 高拱坝坝踵开裂研究的重要性	355
2 高拱坝坝踵开裂机理研究现状	357
3 Kölnbrein 拱坝开裂损坏的基本情况	361
4 关于拱坝柔度的讨论	363
参考文献	368
第2章 高拱坝坝踵应力的敏感性因素	371
1 概述	371
2 高拱坝的自重应力	371
3 高拱坝坝踵应力的敏感性分析	380
4 Kölnbrein 拱坝坝踵开裂机理及坝与基础的合理结合方式	394
参考文献	399
第3章 高拱坝剪切破坏	400
1 概述	400
2 拱坝剪切破坏的概念	400
3 Kölnbrein 拱坝坝基面上的剪应力	402

参考文献	407
第4章 高拱坝坝踵非线性断裂分析	409
1 概述	409
2 非线性有限元方程解法	409
3 高拱坝非线性断裂分析力学模型及其本构关系	411
4 非线性有限元提高计算精度与效率的措施	419
5 线弹性拉裂非线性分析	420
6 弹塑性拉裂非线性分析	422
7 高拱坝开裂分析的混合式裂缝模型	423
参考文献	429
第5章 冰冻帷幕对高拱坝工作性态的影响	431
1 概述	431
2 人工冰冻帷幕作用引起的温度荷载	431
3 Kölnbrein 拱坝第二条裂缝成因分析	433
参考文献	435

绪 论

1 世界拱坝的发展

1.1 拱坝特点

拱坝是一个三边嵌固在岩基上的变曲率、变厚度的高次超静定的空间壳体结构。在外荷载作用下,一部分通过梁的作用传到河床基岩,一部分通过拱的作用传到两岸坝肩基岩。当河谷狭窄时,则以拱的作用为主。由于拱是一推力结构,因此坝体应力状态则以受压为主,从而可以充分发挥混凝土、砌石类材料抗压强度高的特点,将坝体可做的较薄,以达到节约材料的目的。

由于坝体一般较薄,且为高次超静定结构,在荷载方面,与重力坝相比,扬压力对应力的影响减小,而温度荷载成为主要荷载之一,地基变形成为影响坝体应力的重要因素。

由于拱坝是一高次超静定的空间壳体结构,且一般以拱向作用为主。当局部超载时坝体应力可以自行调整,只要坝肩稳定可靠,坝体的安全度一般较高。

正是基于以上特点,使得拱坝成为一种既安全又经济的坝型,在世界各国得到了广泛的应用。

1.2 拱坝发展阶段

1.2.1 拱坝建设的萌芽阶段(1845年以前)

人类修建拱坝有着悠久的历史。早在罗马时期,由于砌石圆拱结构在桥梁等建筑物上的应用,人们自然就会想到是否可以在挡水坝中采用砌石圆拱结构,并修建了一系列似现代拱坝的挡水建筑物。如法国的鲍姆(Baume)拱坝,西班牙的阿尔曼扎(Almanza)、阿里肯特(Alicante)、埃尔切(Elche)拱坝,意大利的高桥(Ponte Alto)拱坝等。其中高桥拱坝于1612年建成时仅4.98m,以后随着水库不断淤积,坝体不断加高,共加高7次,最后一次是1887年加高至39m。这座坝的建设过程充分体现了人们单凭经验在实践中摸索前进的过程。

在1854年以前,所有修建的拱坝水平截面虽为拱形,但由于缺乏理论指导,并没有真正认识到利用拱结构的优点,只能说是一种似拱坝结构。但该阶段的拱坝实践为后期拱坝的发展积累了经验,可以称之为拱坝的萌芽阶段。

1.2.2 拱坝建设的起步阶段(1854~1917年)

1.2.2.1 概述

拱坝萌芽阶段大量似拱坝建筑的实践以及17世纪欧洲工业的发展和工程力学的诞生,为拱坝建设的起步做了大量的理论与实践的准备。1854年,法国工程师左拉(Zola)在普罗旺斯地区艾克斯设计建成43m高的左拉拱坝。该拱坝以圆筒公式为指导,主要利用水平拱的作用来保证大坝的安全。因此被世界各国公认为世界上第一座真正意义的拱坝。该坝的建成标志着拱坝建设的起步,并且在此之后半个多世纪的时间里,不少国家坝工专家都在相同理论的指导下建设了一批形状相似的拱坝。

该时期在设计上,将拱坝坝体比拟成一系列独立叠置的水平圆弧形拱圈,在外荷作用下通过水平拱圈的作用,将其传至两岸,而忽略了拱坝上、下拱圈传力的梁的作用。在对

水平拱圈结构的认识上又可分为“圆筒结构”和“固端拱”两种。

1.2.2.2 圆筒结构时期

圆筒结构认为,水平圆弧形拱圈相当于完整圆筒上的一部分,其内力及应力与完整圆筒中相同,相当于把水平拱圈看成是两端受滚轴支撑的静定拱结构,在径向 p 作用下,半径为 R 的圆拱内只有轴力 N ,其轴力的大小为 $N=PR$,其应力为 $\sigma=PR/t$,由应力及材料的允许应力 $[\sigma]$,按照 $\sigma=PR/t \leq [\sigma]$ 即可以设计拱圈的半径及厚度 t 。应用圆筒结构概念及计算公式,在 20 世纪以前修建了一批中小型拱坝。该时期对拱坝建设起过推动作用的拱坝及人物有:法国左拉 (Zola) 拱坝 (坝高 $H=43\text{m}$),是第一个提出和使用圆筒结构概念及公式的工程;美国 F. E. Brown 于 1883~1884 年设计修建的熊谷 (Bear Valley) 拱坝 ($H=18\text{m}$),该坝在 $1/2$ 坝高处的水平环向应力高达 5.9MPa ;澳大利亚于 1897 年建成的帕克斯拱坝 ($H=10.2\text{m}$),河谷宽高比高达 16.1;1879 年法国工程师皮来杜 (A. Pelletrean) 利用圆筒公式中半径与厚度的关系,推导出使圆弧拱圈体积最小的所谓经济中心角为 $133^{\circ}34'$ 。

在应用圆筒结构概念修建拱坝时,环向应力水平一般在 $1\sim 5\text{MPa}$,大坝的形状一般为等半径圆筒形拱坝,水平拱圈为等厚,设计的荷载一般只考虑径向压力荷载。

1.2.2.3 固端拱结构时期

20 世纪初,西欧和北美的工程师们逐渐认识到圆筒结构概念完全忽略了两岸地基的约束,与事实不符,因此建议改用固端拱的结构概念进行水平拱圈的设计与计算。对此做过大量理论工作的学者有:意大利的郭迪 (Guidi)、法国的帕格安德 (Pigeand) 和美国的凯因 (Gain) 等。按此概念设计的典型拱坝如:1914 年由乔敬生 (L. J. Jorgensen) 设计建成的美国鲑鱼 (Selmon) 拱坝 ($H=51\text{m}$),该坝是世界上第一座采用变半径等中心角、与现代双曲拱坝形状相似的拱坝,也是世界上第一座在坝身设置垂直径向横缝以解决温度收缩问题的拱坝;乔氏设计的另一座拱坝斯波亨 (Spouding) 拱坝 ($H=84\text{m}$),1910 年建成,是第一座在横缝中设计键槽并进行灌浆的拱坝;意大利的坝工人员也利用固端拱结构概念在 20 世纪初修建了不少的拱坝,如 1909 年建成的西斯蒙 (Cismon) 拱坝 ($H=44.4\text{m}$);1914 年建造的卡非洛 (Carfino) 拱坝 ($H=40\text{m}$) 等。

采用固端拱概念设计的拱坝,其形状仍一般是等半径的圆筒形拱坝,考虑的荷载除径向压力之外,人们开始注意到固端拱属超静定结构,温度的变化将会对拱圈内力及位移产生影响,可以计算出拱内的轴力、剪力及弯矩。固端拱概念的形成,不仅将拱坝设计理论向前推进了一步,而且为后期拱梁概念的形成及计算方法的发展奠定了基础。

1.2.3 拱坝建设的成熟阶段 (1917~1960 年)

1.2.3.1 概述

在起步阶段的后期,随着拱坝高度的不断发展,人们越来越认识到将本来为一整体的坝体人为地分成一系列上、下互不相干的水平拱圈进行二维应力分析与实际并不相符。并且瑞士、意大利、美国等国的坝工专家不约而同地想到用垂直悬臂梁来联系各层拱圈以反映上、下拱圈的相互作用。最早使用这一概念的是美国的维切尔 (H. Vischer) 和瓦格纳 (L. wagner),他们在 1889 年校核熊谷拱坝及甜水 (Sweetwater) 拱坝时最早引入了拱冠梁的概念,并利用拱冠梁与水平拱在共轭点上的径向变位一致的条件,将径向压力分配

到拱和梁上,从而初步形成了拱梁分载的概念。之后1904年伍道德(S. Woodard)再次著文介绍拱冠梁法,并按照其介绍的方法于1908~1909年设计建成了挑战者(Path Finder)拱坝($H=67\text{m}$)和比尔牛(Baffalo Bill)拱坝($H=99\text{m}$)。

拱冠梁法此后经过西欧和美国工程师的不断研究与改进,1917年瑞士坝工专家格伦纳(H. E. Gruner)和两位助手史图基(A. Stucky)和济科(H. Gicot)在设计瑞士第一座拱坝蒙特萨耳文斯(Montsalvens)拱坝时($H=55\text{m}$),正式提出多拱梁分载的概念。并采用4拱9梁径向变位一致的多拱梁法进行了该坝的应力计算。该坝的设计及建造,标志着拱坝的建设已从起步阶段进入了成熟阶段。该阶段的设计方法以多拱梁分载法为标志,拱坝体形由单曲等半径圆筒拱坝向多种线型的变厚度的双曲拱坝发展。

1.2.3.2 多拱梁分载概念的发展

在格伦纳提出并应用多拱梁分载概念之后,1920年瑞士坝工专家诺兹利(F. A. Noetzli)在设计可立奇(Coolidge)拱坝时进一步肯定了拱梁分载概念中垂直梁的作用,并对不同河谷宽高比下拱梁分载的比例及拱梁应力分布特点进行了专门研究,指出河谷越宽,梁承担的荷载越大,垂直梁顶部都不同程度地受到顶部拱圈的支撑,致使梁的应力分布呈顶部下游面受拉,下部上游面受拉的应力分布状态。

进入20世纪20年代之后,美国对拱梁分载法进行了一系列的研究工作,于1923年1月在美国成立了全国性的拱坝研究委员会(Committee on Arch Dam Investigation),并于1926年设计建造了供实验研究用的史蒂文森溪(Stevenson Creek)拱坝($H=18\text{m}$),埋设了大量的观测设备,并进行了多次蓄水加载试验。通过对该坝详细的观测研究,进一步证实了拱梁分载概念及其结构性态,同时加深了温度变化对拱坝受力影响的认识,提出了如果在拱梁分载中能进一步考虑地基变形以及大坝的扭转及剪切变形的话,将更切合实际。

在理论上,1925年伏格特(F. Vogt)提出了地基变形计算的伏格特方法;1929年印兹(J. hinds)提出了径、切、扭一致的拱梁分载法;1930年克恩(F. D. Kirn)编制了单位荷载变位及内力计算的辅助表格,提出了通过试算办法求得变位一致的方法,即美国垦务局所称的试载法(Trail Load Method);1933年韦斯特加德(H. M. Westergard)又增加了地震动水压力计算的方法;1934年霍克(J. G. Houk)在径、切、扭变位一致调整中又引入了自相平衡的扭转系统。

在拱坝实践上,美国在这一时期进入了拱坝建设的高峰期,建成拱坝150余座,且主要集中在加利福尼亚州。典型的拱坝有:帕科依玛(Pacoima)拱坝($H=113\text{m}$, 1927~1929年),代阿布洛(Diablo)拱坝($H=118\text{m}$, 1927~1930年),奥怀希(Owyhee)拱坝($H=128\text{m}$, 1928~1932年),胡佛(Hoover)拱坝($H=221\text{m}$, 1932~1936年)等。其中胡佛拱坝不仅在高度上创造了当时高坝建设的新记录,而且在混凝土分缝分块柱状浇筑施工方法及混凝土人工冷却等温控方面取得了巨大的成绩,成为了混凝土坝建设中的一个里程碑。同时也应看到,美国在胡佛拱坝设计中过于保守,曾有人用现代观点设计该坝,认为至少可以减少2/3的坝体方量,这种保守态度妨碍了细高拱坝在美国的发展。

1.2.3.3 双曲拱坝及带缝拱坝(周边缝、底缝)的发展

同样基于拱梁分载法,但由于对拱、梁重要性认识上的差异,特别是对梁内垂直向拉

应力危害性认识上的不同,致使美国与欧洲在发展拱坝上走上了不同的道路。美国工程师们本着拱、梁并重的观念,以同样的准则限制拱梁拉应力的大小,对坝踵的拉应力及开裂持保守态度,致使拱坝底部厚度较大。而欧洲的工程师们则不同,他们认为拱坝应以拱向作用为主,可适度放宽对梁向拉应力的限制。同时减少坝踵拉应力的办法不是靠增加厚度,而是切出梁的受拉区的混凝土减小梁的厚度或设置底缝以削弱梁的刚度达到减少梁分载的比例的目的。正是基于以上的认识,法国坝工专家柯因(A. Coyne)在1935年设计马立奇(Mareges)拱坝($H=90\text{m}$)时,切出了底宽7m的上游坝踵混凝土,率先建成了体形上既有水平曲率又有垂直曲率的双曲拱坝。之后意大利的工程师们通过模型试验,发现当梁具有垂直曲率时,不仅可以调整拱梁分载比例,而且利用坝体上、下倒悬的自重还可以减小上游坝踵及下游中上部的垂直拉应力;试验还进一步发现,拱坝上游靠近坝基的拉应力主要由周边地基约束所致,只要放松该约束,拉应力即可减小或消除。据此,1939年尼固拉依(F. Nicolai)在设计奥雪莱塔(Osigletta)拱坝($H=76.8\text{m}$)时,不仅采用了典型的双曲拱坝的体形,而且设置了周边缝。之后他们设计建成了一大批沿坝基设置底缝或周边缝的双曲拱坝,如瓦依昂(Vajont)拱坝($H=262\text{m}$, 1957~1960年)等。

1.2.3.4 抗滑稳定概念的形成及发展

在早期拱坝建设中,人们主要把精力放在了对坝体应力的研究上,很少重视拱坝的稳定问题。所谓拱坝稳定是指沿着建基面或浅层潜在软弱结构面滑动失稳。这一概念最早出现在美国垦务局1949年出版的Treatise in Dams上,之后1950年美国克里格(W. P. Creager)和杰斯汀(J. D. Justin)合著的《水电手册》(Hydroelectric Handbook)进一步提出了计算上滑失稳的简图及公式。然而由于当时拱坝均位于两岸陡峻的狭谷中,且厚度较大,基本上不存在发生滑动失稳的可能,因此未能引起人们的重视。进入20世纪50年代后,修建拱坝的河谷越来越宽、坝体厚度也越来越薄,有人逐渐认识到坝体沿岸坡向上滑动的可能。在第六届国际大坝会议(法国巴黎,1955年)上,瑞士工程师森德斯特(K. J. Sundquist)明确提出了上滑失稳的概念,并建议用锚筋将坝体锚固在基岩上。但由于包括刚卸任的国际大坝委员会主席柯因等专家的不同意见,认为混凝土和岩石的胶结强度已能可靠地发挥作用,致使再次失去重视稳定问题。直到1959年由柯因设计的法国马尔帕塞(Malpasset)拱坝($H=66\text{m}$, 1953~1955年)等拱坝失事,才使人们将拱坝的安全从单纯强调坝体强度安全转移到更重视拱坝稳定安全的观点上来。并在稳定分析方法上从刚体极限平衡法、到地质力学模型试验以及有限单元法等得到了迅速地发展。

1.2.4 拱坝建设的熟练阶段(1960年~今)

经过拱坝建设成熟阶段的发展,人们无论在拱坝的安全准则、还是在应力稳定分析方法上均已成熟,已达到建设200m以上拱坝的水平。1960年完成的意大利瓦依昂(Vajont)拱坝($H=262\text{m}$)标志着拱坝建设已进入熟练阶段。

该时期拱坝研究的主要内容是拱坝新的结构形式及其体型优化的方法。20世纪60年代葡萄牙、西班牙和美国坝工专家在双曲概念的基础上进一步提出了薄壳的概念,并提出了用橡皮薄膜模型反向施加水压力以求得最优体型的试验方法。1969年美国加州大学史密斯(P. Smith)教授又用有限元与迭代法相结合的办法,研制了橡皮薄膜模型的计算机

试验系统 LD3D, 用于确定拱坝的较优体型。进入 70 年代后, 将数学规划方法用于确定拱坝最优体型得到了迅速的发展, 其中最早引入该方法的是英国的夏普 (R. Shape) 和辛克维兹 (O. C. Zienkiewicz, 1969 年)。1976 年我国朱伯芳院士等人也开始着手从事拱坝体型优化研究工作, 并注重实用性、注重理论与软件开发同步、注重实践, 致使我国在拱坝体型优化技术方面居世界领先水平。

在结构形式上, 进入拱坝建设熟练阶段后, 随着拱坝应用条件的放宽 (包括地形、地质等自然条件), 以及对拱梁荷载分配规律认识的加深, 人们越来越认识到等厚圆弧拱坝并非最佳体型, 同时随着计算手段的进步, 从而促使水平拱圈的形状从单圆心向多圆心、非圆弧、变厚拱型发展。如马塞洛 (C. Marcello) 率先在瑞士瓦勒迪莱 (Valledilei) 拱坝 ($H=143\text{m}$, 1958~1961 年) 采用抛物线拱坝; 里偌埃 (M. Leroy) 于 1962 年提出对数螺旋线拱型并首先应用于法国乌格朗斯 (Vouglans) 拱坝; 因坝踵开裂而闻名的奥地利柯恩布赖茵 (Kolnbrein) 拱坝 ($H=200\text{m}$, 1973~1977 年), 其水平面由坝顶双曲线形过渡到坝底部为椭圆形。有关非圆弧、变厚拱型的全面研究与应用主要始于 20 世纪 80 年代后期, 主要国家应属中国。在中国研究或应用过的拱圈线形包括二圆心、三圆心、五圆心、椭圆、抛物线、双曲线、对数螺旋线、悬链线、二次曲线、混合曲线、三次样条曲线等。

坝高不断创记录是该阶段的一个主要特点。到目前为止, 国外已设计建成 19 座 200m 及以上的拱坝, 在 31 座 200m 及以上大坝中占 60% 以上, 其中最高的为前苏联的英古力 (ИНГУРИ) 拱坝 ($H=272\text{m}$, 1964~1980 年); 国内已经建成的 200m 以上的拱坝有二滩拱坝 (坝高 240m), 正在设计或建设的 200m 及以上的拱坝有 9 座以上。

1.3 世界拱坝建设的时空分布

自从 1854 年法国建成世界上第一座真正意义上的拱坝以来, 拱坝的发展经历了起步、成熟到熟练的过程。在这 150 多年的拱坝发展历程中, 虽然有过如马尔帕塞、瓦依昂等拱坝失事的惨痛教训, 但作为一种经济 and 安全性均较优越的坝型, 在世界各国得到了广泛应用。截止 1999 年的统计资料, 全世界已建坝高超过 30m 的拱坝共 1102 座, 主要分布在中国、美国及西欧的阿尔卑斯山地区的法国、意大利及瑞士等国。拱坝在各类大坝中所占的比例随坝高的增加而增加, 如在 100~150m 大坝中拱坝约占 30%; 对 150~200m 的大坝约占 45%; 对 200m 以上的大坝约占 60%。上述数据充分说明在高坝中拱坝的经济与安全性是其它坝型无法相比的。

在时间上, 拱坝建设有三个高峰期, 第一个高峰期为 1920~1930 年, 10 年时间共建成 200 余座拱坝, 建设的地点主要集中在美国, 特别是集中在加利福尼亚州; 第二个高峰期为 1950~1960 年, 10 年时间共建成 150 余座拱坝, 建设的地点主要集中在西欧的阿尔卑斯山地区的法国、意大利及瑞士等国; 第三个高峰期为 1970~1980 年, 10 年时间共建成 500 余座拱坝, 建设的地点主要集中在中国。

在拱坝发展历史中, 从 1854 年第一座真正拱坝的建设到 1936 年美国胡佛大坝的建成, 应该说美国代表着世界拱坝建设的水平, 对拱坝拱梁结构概念的形成、应力分析方法的产生和发展以及大体积混凝土坝成套施工及温控技术的发展作出过巨大的贡献。之后拱坝建设的先进水平转移到了西欧 (法、意、瑞), 其主要贡献在于对双曲拱坝结构等轻、

巧、薄拱坝结构的发展以及拱坝结构模型实验方法的发展。进入 20 世纪 70 年代末期,代表世界拱坝建设水平的国家移至前苏联,它以高拱坝建设为其主要标志。但到了 80 年代末期,应该说代表世界拱坝建设水平的国家是中国,其主要标志有对非圆弧拱型拱坝的发展、体型优化技术、RCC 拱坝的实践、复杂自然条件下修建拱坝的技术(包括宽河谷、大流量、复杂地基等)、特高拱坝的建设、动静力应力稳定分析方法的完善及其软件的开发、拱坝 CAD 技术的发展等。

2 中国拱坝理论与实践

2.1 中国拱坝的实践

中国拱坝的建设起步相对较晚,但发展迅速。1928 年在福建省厦门市建成第一座拱坝——上里浆砌石拱坝($H=27.3\text{m}$),这是旧中国建成的几座拱坝中最高的一座。新中国成立后,拱坝建设逐渐起步,1950~1970 年建成 29m 以上的拱坝约 80 余座,其中中小浆砌石拱坝约 60 座,此间建成的最高拱坝为安徽省的响洪甸重力拱坝($h=87.5\text{m}$, 1958 年建成)。进入 20 世纪 70 年代之后,拱坝建设得到迅猛发展,仅 1971~1980 年十年时间建成 10m 以上拱坝约 388 座,其中典型代表有河南群英浆砌石重力拱坝($H=100.5\text{m}$, 1971 年建成),是目前世界上最高的浆砌石拱坝;陕西石门大孔口泄洪的混凝土双曲拱坝($H=88\text{m}$, 1979 年建成),是我国第一座拱坝坝身设置大孔口泄洪的拱坝;广东泉水混凝土双曲拱坝($H=80\text{m}$, 1979 年建成),是目前我国已建高拱坝中厚高比最小的拱坝($T/H=0.112$)。进入 80 年代后,在 1981~1990 年十年时间里共建成 20m 以上的拱坝约 150 座,与 70 年代相比虽然数量上有所减少,但在坝高及结构形式上不断创新,1982 年建成湖南风滩空腹重力拱坝($H=112.5\text{m}$),不仅是该类坝型中最高的一座,而且该坝坝身泄洪量高达 $32000\text{m}^3/\text{s}$,是目前世界泄洪量最大的拱坝之一;1983 年建成贵州乌江渡上重下拱的重力拱坝($H=165\text{m}$),该坝不仅较好地解决了岩溶发育的灰岩地区建高坝的难题,而且采用坝后厂房、厂前挑流泄洪的枢纽布置方案,较好地解决了泄洪、发电在枢纽布置上的矛盾;1986 年建成吉林白山三圆心重力拱坝($H=149.5\text{m}$);1988 年建成浙江紧水滩五圆心双曲拱坝($H=102\text{m}$)及湖南东江双曲拱坝($H=157\text{m}$);1990 年建成我国最高的重力拱坝——青海龙羊峡重力拱坝($H=175\text{m}$),该坝不仅位于强震区,而且地质条件十分复杂。

进入 90 年代之后,我国拱坝建设无论从坝的高度、厚度、数量还是从建设的难度上讲,已接近或达到世界水平,如表 0-2-1 所示。在高度上,1999 年完建的四川二滩抛物线双曲拱坝($H=240\text{m}$)已在世界高拱坝的排行榜上名列第四;正在施工之中的云南小湾拱坝($H=292\text{m}$)、溪落渡拱坝($H=278\text{m}$)及锦屏拱坝($H=305\text{m}$)均已高出目前世界最高的拱坝(英古力拱坝 $H=272\text{m}$)。在厚度上,如用第九次国际大坝会议建议的创优性系数(=作用在坝上的总静水压力 P /坝体方量 V)、即每方混凝土所承受的水压力的大小来评价的话,我国特高拱坝已达到世界平均水平。在数量上,据不完全统计,截止到 2005 年,我国已建 15m 以上拱坝 800 余座,已建、在建 30m 以上的拱坝有 495 座,60m 以上有 169 座,是世界上建拱坝最多的国家。在难度上,我国拱坝建设、特别是