



混凝土坝 理论与技术新进展

NEW DEVELOPMENTS IN THE THEORY AND TECHNOLOGY OF
CONCRETE DAMS

朱伯芳 著

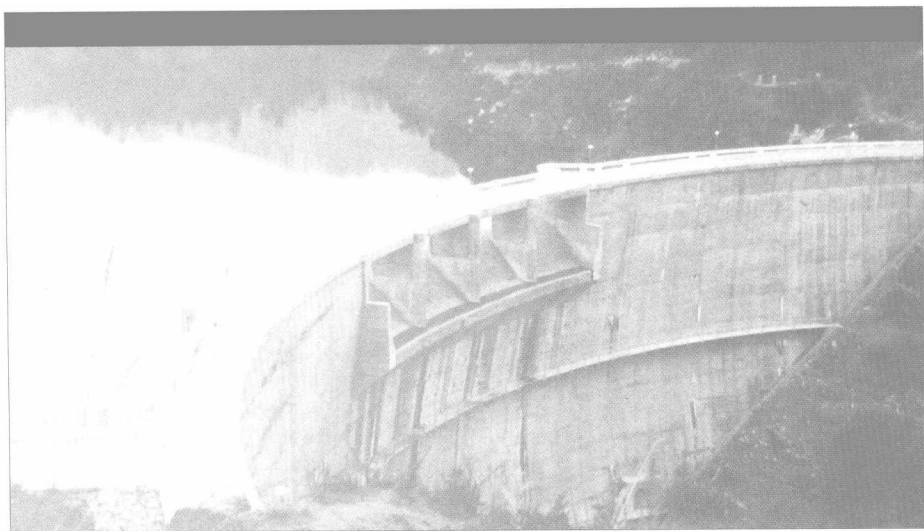


中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



混凝土坝 理论与技术新进展

朱伯芳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书阐述了混凝土坝理论与技术的新进展,全书包括:混凝土坝设计方法现代化与安全系数设置,混凝土坝温度应力与“无坝不裂”历史的结束,高拱坝设计与研究,混凝土坝安全监控,混凝土的力学与热学性能,混凝土结构的水管冷却与加温,微膨胀混凝土筑坝技术,重力坝加高,抗地震、有限元、混凝土高坝全过程仿真分析,渗流场、裂缝漏水对温度场影响和综合研究,共11个专题。

本书是水利水电工程界从事设计、施工、科研、管理的广大工程技术人员及高等院校相关专业师生的宝贵参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土坝理论与技术新进展/朱伯芳著. —北京:中国水利水电出版社, 2009

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6160 - 1

I. 混… II. 朱… III. 混凝土坝—研究 IV. TV642

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 201234 号

书 名	混凝土坝理论与技术新进展
作 者	朱伯芳 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 41.75 印张 990 千字 2 插页
版 次	2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—2200 册
定 价	150.00 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

作者简介

朱伯芳（1928.10～ ），江西余江人，中国工程院院士，水工结构和固体力学专家。1951年毕业于上海交通大学土木系，1951～1957年参加我国第一批混凝土坝（佛子岭、梅山、响洪甸）的设计。1957年底调至中国水利水电科学研究院（以下简称“水科院”）从事混凝土高坝研究。1969年下放到黄河三门峡水利电力部第十一工程局工作。1978年调回重建的水科院工作至今。1995年当选为中国工程院院士。现任国家南水北调专家委员会委员，水利部科技委员会委员，水科院科技委副主任，小湾、龙滩、白鹤滩等我国特高混凝土坝顾问组成员。曾任第八、第九届全国政协委员，中国土木工程学会及中国水力发电学会常务理事，中国土木工程计算机应用学会理事长，国际土木工程计算机应用学会理事，曾被聘为清华大学、天津大学、大连理工大学、华北水利水电学院、南昌工程学院的兼职教授。

我国混凝土温度应力、拱坝优化、混凝土坝仿真、混凝土徐变理论的开拓者。

建立了混凝土温度应力与温度控制完整的理论体系，包括混凝土徐变理论的两个基本定理，拱坝、重力坝、船坞、水闸、隧洞、浇筑块、氧化镁混凝土坝等各种水工混凝土结构温度应力的变化规律、主要特点和计算方法，拱坝温度荷载、库水温度、水管冷却、基础梁、寒潮、重力坝加高等一整套计算方法以及温度控制方法和准则。提出了全面温控、长期保温、结束“无坝不裂”历史的新理念，并在我国首先实现了这一理念，在世界上最先建成了数座无裂缝的混凝土坝。

提出了高拱坝优化数学模型和内力开展等高效解法，在世界上首先实现了拱坝体形优化，已在拉西瓦、江口、瑞洋等100多个实际工程中成功应用，可节约混凝土量10%～30%，并大幅度提高了拱坝体形设计的效率。

开辟了混凝土坝仿真分析，提出了复合单元、分区异步长、水管冷却等效热传导方程及有限元徐变应力隐式解法等一整套高效解法。提出了有限元等效应力算法及其控制标准，为拱坝设计规范所采纳，为有限元法取代多拱坝梁法创造了条件。

提出了混凝土坝耐强烈地震而不垮的机理，首次说明了强烈地震后大量房屋桥梁等结构倒塌而混凝土坝不垮的根本原因在于混凝土坝平时即承受了巨大水平荷载而且安全系数较大。

提出了混凝土坝数字监控的新理念，弥补了仪器监控只能给出大坝变位场而不能给出

应力场和安全系数的缺点，为改进混凝土坝的安全监控找到了新途径。

提出了混凝土半熟龄期的新理念，为改善混凝土抗裂性能找到了一条新途径。

为三峡、小湾、龙滩、溪洛渡、三门峡、刘家峡、新安江等一系列重大水利水电工程进行了大量研究。研究成果在实际工程中获得广泛应用，有十几项成果已纳入重力坝、拱坝、船坞、水工荷载、水工混凝土结构等设计规范。

出版的专著有：《有限单元法原理与应用》（第一版，1979，第二版，1998），《大体积混凝土温度应力与温度控制》（1999），《水工混凝土结构的温度应力与温度控制》（1976），《结构优化设计原理与应用》（1984）及《拱坝设计与研究》（2002）；出版的论文集有：《水工结构与固体力学论文集》（1988），《朱伯芳院士文选》（1997）；以第一作者发表论文共计 200 余篇。

1984 年获首批国家级有突出贡献科技专家称号。1982 年其“水工混凝土温度应力研究”成果获国家自然科学三等奖；1988 年其“拱坝优化方法、程序与应用”研究成果获国家科技进步二等奖；2001 年其“混凝土高坝仿真分析及温度应力研究”成果获国家科技进步二等奖；2004 年其“拱坝应力控制标准研究”成果获中国电力科技进步一等奖，以上诸获奖项目他均为第一完成人；2007 年在圣彼得堡获国际大坝会议荣誉奖。

About the Author

Zhu Bofang, the academician of the Chinese Academy of Engineering and a famous scientist of hydraulic structures and solid mechanics in China, was born in October 17, 1928 in Yujiang country, Jiangxi Province. In 1951, he graduated in civil engineering from Shanghai Jiaotong University, and then participated in the design of the first three concrete dams in China (Foziling dam, Meishan dam and Xianghongdian dam). In 1957, he was transferred to the China Institute of Water Resources and Hydropower Research where he was engaged in the research work of high concrete dams. He was elected the academician of the Chinese Academy of Engineering in 1995. He is now the member of the technical committee of the Ministry of Water Resources of China, the member of the technical committee of water transfer from south part to north part of China, the deputy chairman of the scientific and technical committee of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, the member of the consultant group of the Xiaowang dam, the Longtan dam and the Baihetan dam. He was the member of the 8th and the 9th Chinese People's Consultative Conference, the board chairman of the Computer Application Institute of China Civil Engineering Society, the member of the standing committee of the China Civil Engineering Society and the standing committee of the China Hydropower Engineering Society.

He is the founder of the theory of thermal stresses of mass concrete, the shape optimization of arch dams, the simulating computation of concrete dam and the theory of creep of concrete in China.

He has established a perfect system of the theory of thermal stress and temperature control of mass concrete, including two basic theorems of creep of nonhomogeneous concrete structures, the law of variation, the principal peculiarities and the methods of computation of the arch dams, gravity dams, docks, sluices, tunnels and various hydraulic structures, the method of computation of temperature in reservoirs, pipe cooling, beams on foundation, cold wave, heightening of gravity dam and the methods and criteria for control of temperatures. He proposed the idea of "permanent thermal insulation as well as comprehensive temperature control" which ended the history of "no concrete dam without crack" and some concrete dams without crack had been constructed in China.

He proposed the mathematical model and methods of solution for shape optimi-

zation of arch dams, which was realized for the first time in the world and up to now had been applied to more than 100 practical dams, resulting in 10% ~ 30% saving of dam concrete and the efficiency of design was raised a great deal.

He developed the simulating computation of concrete dams and proposed a series of methods, including the compound element, different time increments in different regions, the equivalent equation of heat conduction for pipe cooling and the implicit method for computing elasto-creeping stresses by FEM.

He proposed the equivalent stress for FEM and its allowable values which had been adopted in the design specifications of arch dams in China, thus the condition for substituting the trial load method by FEM is provided.

The reason why lots of houses and bridges were destroyed but no concrete dam was destroyed by strong earthquakes is explained. It is due to the fact that concrete dams must resist large horizontal water loads with big coefficients of safety in ordinary loading case.

The instrumental monitoring can give only the displacement field but can not give the stress field and the coefficient of safety of concrete dams. In order to overcome this defect, the new idea for numerical monitoring has been proposed which can give the stress field and the coefficient of safety and raise the level of safety control of concrete dams.

The new idea for semi-mature age of concrete has been proposed. The crack resistance of concrete may be promoted by changing its semi-mature age.

A vast amount of scientific research works had been conducted for a series of important concrete dams in China, such as Three Gorges, Xiaowan, Longtan, Xiluodu, Sanmenxia, Liujiaxia, Xin'anjiang, etc. More than ten results of his scientific research were adopted in the design specifications of gravity dams, arch dams, docks and hydraulic concrete structures.

He has published 7 books: Theory and Applications of the Finite Element Method (1st ed. In 1979, 2nd ed. In 1998), Thermal Stresses and Temperature control of Mass Concrete (1999), Thermal Stresses and Temperature Control of Hydraulic Concrete Structures (1976), Theory and Applications of Structural Optimization (1984), Design and Research of Arch Dams (2002), Collected Works on Hydraulic Structures and Solid Mechanics (1988) and Selected Papers of Academician Zhu Bofang (1997). He has published more than 200 scientific papers, from which 70 papers published in recent 11 years are collected in this book.

Academician Zhu was awarded the National Prize of Natural Science in 1982 for his excellent research work in thermal stresses in mass concrete, the National Prize of Scientific Progress in 1988 for his prominent research work in the optimum design of arch dams and the National Prize of Scientific Progress in 2001 for his outstanding research works in simulating computation and thermal stresses. He was awarded the ICOLD Honorary Member at Saint Petersburg in 2007.

序

我国地理和气候条件特殊，除水害、兴水利历来是安民兴邦的大事。党中央、国务院高度重视水利工作，新中国成立以来，我国兴建了8.7万多座水库，在防洪、灌溉、供水、发电等方面发挥了巨大效益。伴随着大规模的水利水电建设，我国坝工技术也取得了突飞猛进的发展，有些领域达到了国际领先水平，这其中凝聚着诸多专家和工程技术人员辛勤劳动和不懈努力。

朱伯芳院士是我国大坝技术发展创新的杰出代表，著名水工结构和固体力学专家，中国工程院院士。他参加了我国第一批建造的佛子岭、梅山、响洪甸三个混凝土坝的设计，为我国从无到有掌握现代化混凝土坝设计技术，作出了突出贡献和重大创新。他是我国混凝土温度徐变应力、拱坝优化及混凝土坝仿真的创建者和奠基人。他建立了混凝土温度应力和温度控制较完整的理论体系；创造了拱坝优化数学模型和高效求解方法，在世界上首先实现了拱坝体形优化；开辟了混凝土坝仿真的一整套计算方法，使计算精度和计算效率得到很大提高。朱伯芳院士的一系列研究成果，特别是在混凝土温度徐变应力分析方面的研究工作，处于世界领先水平。

在不断进行理论创新的同时，朱伯芳院士还是现代混凝土坝设计技术的优秀实践者，他所创造的理论体系、研究成果和计算方法，在工程实践中得到广泛应用。为了摸清生产中存在的问题，他几乎跑遍了国内所有混凝土坝土地；应用他在混凝土温度应力方面的研究成果，先后在我国建成了数座无裂缝坝，在世界上首先结束了“无坝不裂”的历史；他的拱坝优化理论在拉西瓦、江口、瑞洋等100多个实际工程中得到应用，可节约10%~30%的坝体混凝土用量，并大幅度地提高了高拱坝体形设计效率。作为国内一流的水利工程专家，从20世纪50年代末开始，他就经常参加国内一系列大型水利水

电工程的科研、评审和咨询工作。他以一个科学家的真诚与执著，为工程献计献策，为国家谏言把关。

从朱伯芳院士身上，我们看到了科学家兼工程师的许多优良品质，他的个人经历涉及设计、施工和科研等各个领域。他不断开拓新的研究领域，始终站在科学研究的第一线；面对现代科学技术的飞速发展，他广泛涉猎多种学科，跟踪国际新技术的发展趋势；他紧密联系实际，勇于开拓，不断为我国水利工程的设计、科研和施工提供一系列开拓性的成果。

朱伯芳院士一直十分关心年轻人的培养与成长，循循善诱，不遗余力。他经常告诫学生们要“勤于工作，勤于学习，勤于思考。”他担任20多年研究生导师，培养出一批博士、硕士，他们如今都成为各自工作岗位的骨干。朱伯芳院士虽已年逾8旬，却仍然不知疲倦地致力于新的研究和创新，这种学习不止、创新不止的精神非常值得敬佩。

本书是在1997年已出版的《朱伯芳院士文选》的基础上，又从朱伯芳院士1997年以后发表的论文中精选出74篇结集而成，内容包括混凝土坝设计方法的现代化、混凝土坝温度应力、结束“无坝不裂”历史关键技术、高拱坝设计、大坝安全监控、混凝土性能改进、微膨胀混凝土筑坝、重力坝加高、混凝土高坝全过程仿真、抗地震、渗流场和综合分析等方面。本书部分成果曾获得2001年国家科技进步二等奖和2004年中国电力科技进步一等奖。

我相信，本书的出版，不仅为我国水利水电工程科研、设计、施工和教学等单位提供了非常有参考价值的著作，也将对我国水利水电科技水平的提高和青年科技人才的培养起到巨大的激励和示范作用，故乐之为序。

祝愿朱伯芳院士继续为我国水利水电事业的发展发挥更大的作用。

水利部部长

2008年10月23日

前 言

在 1949 年以前，我国并未自行设计和建造过一座混凝土坝。在 1949 年以后，由于水利水电事业的蓬勃发展，我国从无到有、白手起家自行建造了大量混凝土坝。我国已建和在建的混凝土坝的数量早已跃居世界首位，而且目前在建的混凝土坝的高度也居世界首位，如锦屏一级拱坝（高 305m）、小湾拱坝（高 292m）、溪洛渡拱坝（高 278m）的高度均超过了世界已建最高的英古里拱坝（高 272m），龙滩碾压混凝土重力坝的高度（216m）也居世界第一。一个国家同时兴建世界上最高的 4 座混凝土坝是史无前例的，而且除了这 4 座世界最高的坝以外，我国同时还在修建一大批高度不等的混凝土坝，如拉西瓦拱坝（高 250m）等。在我国，混凝土坝的设计、施工、科研工作都是依靠本国科技人员自行完成的，在完成混凝土坝建设的同时，也造就了一支高水平的科技队伍，积累了丰富的设计、施工和科研经验。笔者有幸，参加了这一伟大建坝事业的全过程。1951~1957 年，参加了淮河佛子岭连拱坝、梅山连拱坝和响洪甸拱坝的设计。1957 年调至中国水利水电科学研究院以后，一直从事混凝土坝的研究和咨询工作，屈指算来，至今已 58 年。笔者先后在国内外公开发表论文约 200 余篇，1996 年以前发表的论文已出选集（《水工结构与固体力学论文集》，水利电力出版社，1988；《朱伯芳院士文选》，中国电力出版社，1997）。本书共选收论文 74 篇，其中 70 篇选自最近 11 年发表的论文，2 篇选自以前发表的论文，2 篇为纪念中国水利水电科学研究院建院 50 周年而作。

本书的内容，包括以下 11 个专题（篇）。

1. 混凝土坝设计方法现代化与安全系数设置

目前我国混凝土坝建设的规模是空前的，但混凝土坝设计方法还是七八十年前的老方法，如拱坝应力分析的拱梁分载法、重力坝应力分析的材料力学方法、抗滑稳定分析的刚体极限平衡法等。这些方法的优点是具有长期应

用的经验，但也存在着一些固有的缺点。例如，拱梁分载法用伏格特系数计算基础变位，过于粗糙，应力计算中只考虑了坝面水荷载，忽略了作用于地基的水荷载，忽略了施工过程中的应力等；抗滑稳定问题实际是剪切破坏问题，是否滑动取决于应力状态，目前的刚体极限平衡法忽略了应力状态和大坝与地基的相互影响。一个投资几十亿甚至几百亿元的大型工程，应力和稳定分析在微机上几秒钟就计算完了，这种计算的简单、快速与实际问题的复杂性、工程的重要性及当前计算技术与固体力学的高水平是不协调的。因此，笔者提出了混凝土坝设计方法的现代化问题，并提出了一套新的思路供国内坝工专家们思考和研究。目前国内关于混凝土坝安全系数的设置存在着较大争论，一部分专家主张采用单一安全系数法，另一部分专家主张采用基于可靠度理论的多项系数法。笔者对这个问题从理论和实践两个方面进行了较深入的分析。我国建坝数量和规模均居世界首位，积累了较多经验，笔者对我国混凝土坝坝型进行了回顾与展望。

2. 混凝土坝温度应力与“无坝不裂”历史的结束

混凝土坝裂缝是长期困扰人们的一个老问题，虽然过去提出了改善混凝土抗裂性能、分缝分块、水管冷却、预冷骨料等温度控制措施，但实际上国内外仍然是“无坝不裂”，主要由于缺乏温度应力理论的指导，因为过去国内外关于混凝土坝温度应力的研究成果极少，经过多年努力，我们已建成了比较完整的混凝土温度应力理论体系，并纠正了过去只重视早期表面保护而忽视了后期表面保护的缺点，提出了“全面温控、长期保温”以结束“无坝不裂”的关键理念。目前我国已有3座混凝土坝竣工后未出现裂缝，在世界上最先结束了混凝土坝“无坝不裂”的历史。基础混凝土允许温差是混凝土坝最重要的温度控制指标，笔者提出了关于基础混凝土温差控制的两个原理并据此提出了一套新的基础混凝土允许温差。此外，还提出了混凝土坝复合永久保温防渗板，研究了重力坝的劈头裂缝和底孔超冷问题。

混凝土坝温度应力与气温、水温、材料性能、施工方法、温控措施等多种因素有关，许多实际问题缺乏计算方法，笔者提出了一系列混凝土坝温度应力计算方法，在实际工程中得到比较广泛的应用。

1956年我国部分专家提出了混凝土坝高块浇筑的方法，笔者当即在《水力发电》杂志上表示了不同的意见，但1958年被拔“白旗”之后又被安排参与有关工作，未能再坚持自己的见解。

3. 高拱坝设计与研究

国外不少拱坝建成后产生了严重裂缝,被迫进行大规模加固,有的甚至被迫废弃。引起拱坝裂缝有温度因素,也有温度之外的其他因素。在深入分析后,笔者提出了建设高质量永不裂缝拱坝的可行性及实现策略。拱坝主要依靠抗压强度将水荷载传递至两岸岩基,抗压安全系数十分重要。我国高度200m以下拱坝的允许压应力均采用90天龄期抗压强度除以安全系数4.0,而已建和在建的200m以上特高拱坝的允许压应力反而采用180天龄期抗压强度除以4.0,如果换算成90天龄期的强度,安全系数只有3.50。特高拱坝的安全系数本应高于一般拱坝,现在反而低于一般拱坝,显然欠妥。笔者建议适当提高我国特高拱坝的安全系数,已为在建的小湾、溪洛渡等特高拱坝所采纳。

有限元法具有强大的计算功能,但由于应力集中,计算得到的坝踵拉应力太大,远远超过混凝土抗拉强度,限制了它的应用。实际上由于基岩存在着裂隙等原因,坝踵拉应力不至于那么大。笔者提出有限元等效应力法及相应的应力控制标准,为SL 282—2003《混凝土拱坝设计规范》所采用,为有限元法在拱坝中的应用扫清了障碍。温度荷载是拱坝的重要荷载,目前在计算中假定水位是固定的,实际水位是变化的,并对温度荷载有很大影响,笔者提出了水位变化时拱坝温度荷载的计算方法。笔者对拱坝灌浆时间等问题进行了探讨,并提出了拱坝应力水平系数与安全水平系数,它们比柔度系数更为合理。

4. 混凝土坝安全监控

笔者提出了一个新理念:对混凝土坝进行数字监控,以弥补仪器监控的不足。仪器监控是重要的,但实际工程中只有少数几个坝段有应变计,绝大多数坝段内并没有应变计,而且即使在观测断面内,由于应变计数量太少,也不能给出应力场的全貌和坝体安全系数;在仪器监控之外,再进行数字监控,就可以克服这一缺点,提高混凝土坝安全监控的水平。

5. 混凝土的力学与热学性能

笔者提出了一个新理念:混凝土的半熟龄期,即混凝土强度、绝热温升等达到其最终值一半时的龄期,它代表绝热温升和强度增长的速度。研究表明,适当改变半熟龄期,可以显著提高混凝土的抗裂能力,这就为改进混凝土抗裂能力找到了一个新的途径。

混凝土标号是涉及所有混凝土坝设计和施工的一个重要问题,我国以前的混凝土坝设计规范中均采用基于 90 天龄期 80% 保证率的混凝土标号,DL 5108—1999《混凝土重力坝设计规范》改用基于 28 天龄期 95% 保证率的混凝土强度等级。笔者指出,混凝土强度等级对于工业民用建筑是合适的,但混凝土坝施工周期较长,若采用基于 28 天龄期的混凝土强度等级,将造成较大的浪费,并增加温控的难度,仍以采用基于 90 天或 180 天龄期的混凝土标号为宜,正在编制中的 2 本混凝土坝的设计规范原拟改用混凝土强度等级,后来接受笔者意见,都决定采用基于 90 天(常态混凝土)或 180 天龄期(碾压混凝土)的混凝土标号,但改用符号 C_{90} 和 C_{180} ,以区别于基于 28 天龄期的混凝土强度等级。混凝土的绝热温升是依赖于温度的,笔者提出了一个混凝土绝热温升三参数计算模型,公式简洁,可考虑温度对绝热温升的影响。

6. 混凝土结构的水管冷却与加温

提出了水管冷却的新方式——小温差早冷却缓慢冷却,在不影响施工进度的前提下,可大幅度削减温度应力。提出了水管冷却自生应力计算方法。系统研究了冷却高度、水管间距及水温调控对温度应力的影响。提出了利用塑料水管易于加密的特点,可以克服钢管不易加密的缺点,从而大大强化水管冷却的效果。提出了水管冷却仿真计算的复合算法,首次研究了高温季节进行坝体后期冷却存在的问题,指出在高温季节进行后期冷却必须采用强力表面保温,否则靠近表面 3~5m 内的混凝土很难冷却到预定的灌缝温度。首次提出,对于软基上的水闸、涵洞、船坞等建筑物,利用水管或表面加温也可达到防止裂缝目的,而加温比冷却在施工上要简单得多。

7. 微膨胀混凝土筑坝技术

利用氧化镁混凝土的微膨胀变形简化温控措施,是我国首创的筑坝技术。目前国内关于氧化镁混凝土筑坝存在着两种指导思想:第一种指导思想是,氧化镁可以取代一切温控措施;第二种指导思想是,氧化镁可以适当地简化温控措施,但不能取代一切温控措施。笔者指出了第一种指导思想的错误所在,按第一种指导思想建设的沙老河拱坝竣工后产生 6 条严重的贯穿裂缝,缝宽达到罕见的 8mm。按第二种指导思想建设的三江河拱坝,竣工后未产生裂缝。笔者对氧化镁混凝土筑坝的基本规律进行了分析,指出存在着 6 大差别:室内外差别(室外实际膨胀变形只有室内试验值的一半左右),地区差别(南方应用难度小,北方应用难度大),时间差别(氧化镁膨胀与混凝土冷缩不同

步), 坝型差别 (重力坝难度小, 拱坝难度大), 温差差别 (只能补偿基础温差、不能补偿内外温差) 及内含氧化镁与外掺氧化镁的差别。认识并掌握这些差别, 才能做好氧化镁混凝土坝的设计和施工。笔者还提出了氧化镁混凝土膨胀变形的三参数计算模型。

8. 重力坝加高

重力坝加高时存在着两个问题: 第一是新混凝土的温度控制; 第二是新老混凝土结合面在竣工后大部分将被拉开, 削弱了大坝的整体性。笔者提出了一整套解决上述问题的新思路和新技术, 并已被丹江口大坝加高工程所采纳。

9. 抗地震、有限元、混凝土高坝全过程仿真分析

国内外每次大地震之后, 大量房屋桥梁等结构被毁, 但混凝土坝损害轻微, 首次从理论上阐明了混凝土坝耐强烈地震而不垮的机理。1999 年 9 月 21 日, 在日月潭附近发生了一次百年来台湾省最大的地震, 震中实测水平加速度达到 $1.01g$, 附近有许多水利水电工程, 笔者对地震引起的水利水电工程的灾害进行了详细介绍, 对水工结构特别是混凝土坝的抗震有一定参考价值。在国内外拱坝抗震计算中, 以前都未考虑接缝灌浆前坝体冷却对跨缝钢筋的影响, 笔者提出了这个问题及计算方法, 计算结果表明, 其影响比较大。笔者还提出了有限厚度带键槽的接缝单元、温度场的接缝单元及混凝土高坝全过程仿真分析的一整套高效求解方法。

10. 渗流场、裂缝漏水对温度场的影响

如何考虑排水孔作用是坝基渗流场分析的一个难点, 过去提过一些计算方法, 都不太理想, 笔者提出了夹层代孔列法, 计算很方便, 效果也较好。分析了排水孔直径、间距及深度对排水效果的影响。提出了非均匀各向异性体温度场的有限元解法。由于混凝土的渗透系数很小, 正常情况下, 渗流对混凝土温度的影响很小, 可忽略不计, 但坝内有裂缝时, 缝内漏水对温度场的影响就比较大, 笔者提出了考虑裂缝水对混凝土温度场影响的计算方法。

11. 综合研究

2008 年是中国水利水电科学研究院结构材料研究所建所 50 周年, 笔者对水科院结构所在水工混凝土温度应力和混凝土坝体形优化、数字监控等领域的研究成果进行了综述, 多年共发表论文 200 余篇, 提出了大量研究成果, 在

实际工程中获广泛应用，先后获国家自然科学奖 1 项，国家科技进步奖 2 项，部级奖 7 项。

笔者对我国退田还湖提出了一些建议，由于牵涉到大量人口，实行退田还湖实际上存在较大困难，比较现实的办法是对于干流和圩垸采用不同的防洪标准和建立避水措施。鉴于我国是一个发展中国家，提出了我国应大力加强应用研究的意见。

本次结集出版的论文，为笔者最近 11 年的研究成果，混凝土坝建设中许多问题十分复杂，限于本人的精力和水平，书中难免有许多缺点乃至错误，欢迎读者批评指正。

朱伯芳

2008 年 7 月 11 日

北京 玉渊潭畔

目 录

序

前言

第 1 篇 混凝土坝设计方法现代化与安全系数设置

当前混凝土坝建设中的几个问题·····	3
混凝土坝安全评估的有限元全程仿真与强度递减法·····	15
混凝土坝计算技术与安全评估展望·····	25
论混凝土坝安全系数的设置·····	32
关于可靠度理论应用于混凝土坝设计的问题·····	41
论混凝土坝抗裂安全系数·····	48
DL 5108—1999《混凝土重力坝设计规范》中几个问题的商榷·····	56
我国混凝土坝坝型的回顾与展望·····	64

第 2 篇 混凝土坝温度应力与“无坝不裂”历史的结束

全面温控、长期保温，结束“无坝不裂”历史·····	75
加强混凝土坝面保护，尽快结束“无坝不裂”的历史·····	82
混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望	
——从“无坝不裂”到“无裂缝坝”的跨越·····	88
关于混凝土坝基础混凝土允许温差的两个原理·····	102
混凝土坝的复合式永久保温防渗板·····	113
通仓浇筑常态混凝土和碾压混凝土重力坝的劈头裂缝和底孔超冷问题·····	122
重力坝横缝止水至坝面距离对防止坝面劈头裂缝的影响·····	129
混凝土坝施工期坝块越冬温度应力及表面保温计算方法·····	133
重力坝运行期年变化温度场引起的应力·····	139
重力坝运行期纵缝开度的变化·····	144
地基上混凝土梁的温度应力·····	150
水工钢筋混凝土结构的温度应力及其控制·····	160
水闸温度应力·····	167
混凝土坝高块浇筑质疑·····	173

Prediction of Water Temperature in Deep Reservoirs	176
Thermal Stress in Roller Compacted Concrete Gravity Dams	182

第 3 篇 高拱坝设计与研究

建设高质量永不裂缝拱坝的可行性及实现策略	197
混凝土拱坝运行期裂缝与永久保温	208
拱坝的有限元等效应力及复杂应力下的强度储备	219
拱坝应力控制标准研究	226
论特高混凝土拱坝的抗压安全系数	238
水位变化条件下的拱坝温度荷载	247
寒冷地区有保温层拱坝的温度荷载	253
关于拱坝接缝灌浆时间的探讨	262
混凝土拱坝的应力水平系数与安全水平系数	270
提高拱坝混凝土强度等级的探讨	275
中国拱坝建设的成就	283
国际拱坝学术讨论会专题综述	288
Temperature Control and Design of Joints for RCC Arch Dams	296
Shape Optimization of Arch Dams for Static and Dynamic Loads	306
Optimum Central Angle of Arch Dam	326

第 4 篇 混凝土坝安全监控

提高混凝土坝安全监控水平的新途径——数字监控	333
混凝土坝的数字监控	341
混凝土高坝施工期温度与应力控制决策支持系统	348
混凝土坝运行期安全评估与全坝全过程有限元仿真分析	356

第 5 篇 混凝土的力学与热学性能

混凝土的半熟龄期——改善混凝土抗裂能力的新途径	365
论坝工混凝土标号与强度等级	376
混凝土绝热温升的新计算模型与反分析	384

第 6 篇 混凝土结构的水管冷却与加温

小温差早冷却缓慢冷却是混凝土坝水管冷却的新方向	393
混凝土坝水管冷却自生温度徐变应力的数值分析	404
混凝土坝后期水管冷却的规划	411
利用塑料水管易于加密以强化混凝土冷却	419