



DATIJi HUNNINGTU

WENDUYINGLI YU WENDUKONGZHI

大体积混凝土 温度应力与温度控制

(第二版)

朱伯芳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



大体积混凝土 温度应力与温度控制

(第二版)

朱伯芳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com

内 容 提 要

本书全面阐述了大体积混凝土温度应力和温度控制的基本理论、工程理念和技术措施,全书分为三部分:第一部分是混凝土结构温度场和温度徐变应力的计算方法;第二部分是各种大体积混凝土结构,包括浇筑块、重力坝、支墩坝、拱坝、嵌固板、自由墙、基础梁、混凝土杆件、隧洞和孔口的温度场和温度徐变应力的变化规律和计算方法;第三部分是控制温度、防止裂缝的工程理念、技术措施和实践经验,包括各种温差的控制、混凝土原材料的优选、混凝土预冷、水管冷却、表面保温的计算方法和技术措施,国内外实际工程控制温度防止裂缝的实践经验。

本书可供大体积混凝土结构设计、施工、研究和管理人员使用,也可供大专院校师生学习参考。

图书在版编目(C I P)数据

大体积混凝土温度应力与温度控制 / 朱伯芳著. --
新1版. -- 北京:中国水利水电出版社, 2012. 8
ISBN 978-7-5170-0159-1

I. ①大… II. ①朱… III. ①水利工程—大体积混凝土施工—应力分析②水利工程—大体积混凝土施工—温度控制 IV. ①TV544

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第217644号

书 名	大体积混凝土温度应力与温度控制 (第二版)
作 者	朱伯芳 著
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 (发行部)
经 售	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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 45.25印张 1134千字
版 次	2012年8月新1版 2012年8月第1次印刷
印 数	0001—1800册
定 价	168.00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年底调入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。现任水利部科技委员会顾问，小湾、龙滩、白鹤滩等我国特高混凝土坝顾问组成员。曾任第八届、第九届全国政协委员，水科院科技委副主任，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是由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》（1979 年第一版，1998 年第二版，2009 年第三版）、《大体积混凝土温度应力与温度控制》（1999 年）、《水工混凝土结构的温度应力与温度控制》（1976 年）、《结构优化设计原理与应用》（1984 年）及《拱坝设计与研究》（2002 年）；出版的论文集有：《水工结构与固体力学论文集》（1988 年）、《朱伯芳院士文选》（1997 年）、《混凝土坝理论与技术新进展》（2009 年）；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基金三等奖；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 consultant of the scientific and technical committee of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 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 "long time 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 optimization 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 8 books: *Theory and Applications of the Finite Element Method* (1st ed. In 1979, 2nd ed. In 1998, 3rd ed. in 2009), *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), *Selected Papers of Academician Zhu Bofang* (1997) and *New Developments in Theory and Technology of Concrete Dams* (2009). He has published more than 200 scientific papers.

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.

第二版前言

大体积混凝土结构在施工期和运用期中，由于温度的变化经常会出现较大拉应力，往往使结构发生裂缝，从而破坏了结构整体性，降低了结构耐久性，带来较大的危害性。大体积混凝土结构断面较厚，利用钢筋难以防止裂缝，如何防止裂缝一直是混凝土工程的一个重要问题。

美国学者在大体积混凝土防裂技术方面做了较多工作，从1930年开始，先后提出分缝分块、水管冷却、预冷骨料等防裂技术，得到了广泛的应用，但他们在温度应力方面做的工作并不多，美国垦务局主编的《混凝土坝冷却》一书，至今仍是国外在大体积混凝土温度控制方面的权威著作，但书中只有温度场计算，完全没有触及温度应力。

实际上引起混凝土裂缝的是温度应力而不仅是温度，例如，同样一块混凝土板，如浇筑在土基上，一般不会裂缝，如浇筑在岩基上，就可能裂缝，这是由于岩基约束作用大于土基。为了防止裂缝，需要控制温度应力，使之不超过允许拉应力。而控制温度应力，不但要控制温度，还需要改善约束条件，需要研究温度应力的变化规律。由于混凝土温度应力与混凝土结构施工过程密切相关，温度应力的分析比自重、水压力等外荷载引起的应力的分析要复杂得多。

笔者及其团队从1950年开始一直致力于大体积混凝土温度应力和温度控制的研究，已建立了比较完整的理论体系，主要包括以下几方面的内容。

(1) 混凝土温度场和温度徐变应力计算方法。在继承前人工作的基础上，提出了一系列新的计算方法，如：库水温度算法、水管冷却等效热传导方程、浇筑块温度应力影响线、混凝土徐变的两个基本定理、混凝土徐变应力隐式解法、混凝土结构仿真应力分析法等，建立了一套完整的混凝土温度场和温度徐变应力计算方法，包括理论解法和数值解法，可以计算各种混凝土结构在不同条件下的温度场和温度徐变应力场。

(2) 各种大体积混凝土结构温度场和温度徐变应力场的变化规律和基本特点。不同结构的温度应力变化规律是不同的，为了防止裂缝，必须充分掌握各种混凝土结构温度应力的变化规律。笔者及其团队长期以来在这方面花费了大量精力，

目前已基本摸清了拱坝、重力坝、支墩坝、混凝土浇筑块、船坞、水闸、管道、隧道、地基梁、混凝土平板和混凝土构件的温度场和温度应力的变化规律。

(3) 防止混凝土裂缝的技术措施。重视各种温度控制措施在不同条件下实际降低温度应力的效果,特别阐明和强调了表面保温对防止裂缝的重要意义,如果工程上需要完全杜绝裂缝,除了控制内部温度外,往往还需要进行长期表面保温。由于塑料工业的发展,目前进行长期保温并不困难,费用也不高。

长期以来,国内外的实际情况是“无坝不裂”,但这个局面目前已经开始改观,在我国,对重要的混凝土工程都进行了详尽的温度徐变应力分析,在温度应力的引导下,我国已有数座混凝土坝建成后没有出现裂缝,这在世界筑坝史上是一个重要的成就。

在继承前人成果的基础上,本书系统地总结了我国学者的工作。把本书与美国垦务局主编的《混凝土坝的冷却》一书加以对照,对我国学者在混凝土温度应力方面所做的工作就一目了然了。

第一版于1999年由中国电力出版社出版后被广泛应用,2003年重印了一次,也已售罄。据中国科学院信息研究中心2010年的统计资料,本书为我国水利水电行业被引用最多的著作之一。对此,笔者一方面感到欣慰,另一方面,也颇为惶恐,深感责任的重大。

从本书第一版出版以来的12年间,笔者在大体积混凝土温度应力方面又发表了论文20余篇,积累了一批新成果:提出了“全面温控长期保温”的理念,在这一理念的指导下,我国已在世界上首次建成了数座无裂缝的混凝土坝,结束了“无坝不裂”的历史;提出了小温差早冷却缓慢冷却的新的水管冷却方式、变水位下及寒冷地区的拱坝温度荷载、氧化镁混凝土筑坝的原则、混凝土半熟龄期的新理念、混凝土坝抗裂安全系数设置原则等。最近十几年,我国进行了世界上规模空前的混凝土坝建设,在建设大坝的实践过程中也为温度控制积累了许多宝贵的经验。为了总结吸收最近12年的新理论成果和实践经验,笔者决定对本书第一版的内容进行修改,遂出第二版。这次修改的幅度比较大,与第一版相比,约有一半章节是新写的。

希望本书第二版的出版,对我国从事大体积混凝土设计、施工、研究、教学 and 管理的科技人员能有所帮助。由于本书内容比较广泛,而混凝土温度应力问题又比较复杂,书中难免有不少缺点乃至错误,欢迎读者批评指正。

朱伯芳

2011年8月20日

于北京玉渊潭畔

第一版前言

旧中国没有兴建过混凝土坝，在混凝土温度应力方面当然也没有进行过任何研究工作。1951年，笔者从上海交通大学提前毕业参加治淮工程，有幸先后参加了佛子岭、梅山、响洪甸三座混凝土坝的设计工作。根据当时所能找到的少量参考资料，在佛子岭连拱坝的设计中采取了一些防裂措施，但施工结果仍产生了相当多的裂缝。吸取佛子岭坝的经验和教训，在梅山连拱坝的设计中，在防裂措施方面作了一些改进，结果梅山连拱坝的裂缝比佛子岭坝有所减少，但还是出现了不少裂缝。这使笔者感到混凝土温度应力是一个需要深入研究的问题。当时（1955年）笔者在治淮委员会设计院参加响洪甸拱坝的设计工作，由于拱坝是高度超静定结构，对温度变化比较敏感，笔者决定利用业余时间对大体积混凝土温度应力进行一些研究。那时人们对温度应力的认识是比较肤浅的，国内能找到的有关参考资料也很少，而实际工程问题是很复杂的，为了有效地防止裂缝，必须搞清楚温度应力发生和发展的基本规律。因此笔者不是简单总结一下国内外温度控制的经验，而是从一个比较高的起点开始，着手研究混凝土温度应力的变化规律，并于1956年、1957年先后发表了两篇论文，这可以算是我国在混凝土温度应力研究方面的开始。

1958年，笔者被调到水利水电科学研究院工作，院里成立了一个混凝土温度应力研究小组，由笔者负责，工作条件比以前有所改善。当时虽然受到“大跃进”等政治运动的影响，未能安下心来扎扎实实地做研究，但在文化大革命前的一段时间，我们还是提出了一批研究成果，并在实际工程中得到应用。在此基础上，我们写了《水工混凝土结构的温度应力与温度控制》一书的初稿，对混凝土温度应力与温度控制进行了比较系统的阐述，并于1966年5月排出了清样。可惜因“文化大革命”开始，未能及时出版。

“文化大革命”中，水利水电科学研究院被撤销，笔者被下放到三门峡水利工地。当时既没有科研设备，科研任务也很少，住在聊蔽风雨的土坯房中，连做饭用的蜂窝煤都要到几十里外的三门峡市去购买，工作条件和生活条件相当

艰苦。在这种条件下，笔者找了宋敬廷同志合作，搞起了有限单元法研究。工地缺乏图书资料，我们就利用出差机会到外地去收集资料，回到工地，推导公式，编制程序。当时还没有微机，国内只有少数大城市有晶体管计算机，工地没有计算机，只好再到外地去调试程序、进行计算。在这种十分困难的条件下，我们编制了我国第一个不稳定温度场有限元程序、第一个混凝土温度徐变应力有限元程序等5个有限元程序。程序出来后颇受欢迎，为当时国内几个重大水利水电工程提供了一批计算成果。在这个基础上，笔者写作出版了《有限单元法原理与应用》一书（1979年），并修改了写成于1966年的《水工混凝土结构的温度应力与温度控制》一书的底稿，终于1976年也出版了。

在过去的20多年中，国内外在混凝土温度应力方面的理论研究和工程措施都有了不少进展，笔者本人在此期间虽然又开拓了拱坝优化、仿真计算、反馈设计等新的研究领域，但在混凝土温度应力方面一直在不断地进行研究，又先后发表30余篇论文。承中国电力出版基金委员会给予资助，笔者决定重新写一本大体积混凝土温度应力方面的书。

本书取材兼顾理论和实际，一方面充分阐述混凝土温度场和应力场变化的规律和各种有效的计算方法，因为只有充分掌握温度应力的基本规律，才能对症下药，有效地防止裂缝；另一方面，本书详细阐述了控制温度、防止裂缝的各种有效的技术措施。

由于防止裂缝的安全系数比较小（目前一般 $k=1.3\sim 1.8$ ），而影响温度应力的因素又很多，要完全防止裂缝是很不容易的，但从目前国内外大体积混凝土的施工水平来看，只要精心设计、精心施工，防止危害结构的大裂缝是可能的。此外，除了引起裂缝外，温度变化也是大体积混凝土结构的一个重要而复杂的荷载。因此，在大体积混凝土结构的设计和施工中，应特别重视温度应力问题。希望本书的出版能在这方面对读者有所帮助。

由于温度应力问题比较复杂，而本人的精力和水平有限，书中难免有不少缺点乃至错误，欢迎读者批评指正。

朱伯芳

1998年2月1日晨

目 录

作者简介

第二版前言

第一版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 大体积混凝土温度应力的重要意义	1
1.2 混凝土温度应力的特点	2
1.3 混凝土温度及应力的变化过程	3
1.4 混凝土温度应力的类型	4
1.5 混凝土温度应力的分析	4
1.6 混凝土裂缝的原动力是温度应力而不仅是温度	5
1.7 控制温度应力、防止裂缝的技术措施	6
1.8 最近 30 年大体积混凝土温控防裂的基本经验	7
第 2 章 混凝土的力学与热学性能	9
2.1 混凝土性能随龄期而变化的关系式	9
2.2 混凝土的微裂缝与破坏机理	13
2.3 混凝土的抗拉强度	14
2.4 混凝土的极限拉伸变形	16
2.5 混凝土的弹性模量	18
2.6 混凝土的热学性能	21
2.7 水泥水化热与混凝土的绝热温升	23
2.8 混凝土的自生体积变形	30
2.9 混凝土的干湿变形	30
2.10 混凝土的自由温度变形与热膨胀系数	31
2.11 混凝土的半熟龄期	32
2.12 原型混凝土与室内混凝土试件性能的差别	35
参考文献	36
第 3 章 热传导方程与边值条件	38
3.1 热传导方程	38
3.2 初始条件和边界条件	39
3.3 边界条件的近似处理	42
3.4 气温	45
3.5 库水温度估算	50

3.6	库水温度数值计算	57
3.7	太阳辐射热	65
3.8	温度场求解方法概述及一维问题差分解法和图解法	69
3.9	二维温度场的差分解法	75
3.10	外界温度变化的影响深度	76
3.11	从施工期到运行期的温度变化	79
3.12	稳定温度场	81
3.13	温度场反分析	83
	参考文献	87
第4章	混凝土的浇筑温度和水化热温升	88
4.1	混凝土的出机口温度	88
4.2	混凝土的入仓温度	89
4.3	混凝土的浇筑温度	90
4.4	混凝土浇筑层水化热温升的理论解	95
4.5	水管冷却与层面散热共同作用下浇筑层温度场的理论解	99
4.6	混凝土水化热温升的图解法和数值解法	100
4.7	混凝土坝施工期温度场实用计算	104
	参考文献	112
第5章	混凝土的天然冷却	114
5.1	第三类边界条件半无限体的冷却	114
5.2	第一类边界条件平板的冷却	115
5.3	第三类边界条件平板的冷却	118
5.4	初温均匀分布、外温按余弦函数变化、第一类边界条件下平板的温度场	120
5.5	外界温度任意变化时平板的温度场	127
5.6	两向及三向冷却问题、乘积定理	129
	参考文献	131
第6章	混凝土的应力—应变关系和弹性徐变应力分析	132
6.1	混凝土的应力—应变关系	132
6.2	混凝土的徐变度	138
6.3	混凝土的松弛系数和松弛模量	147
6.4	用于初步设计的混凝土弹性模量、徐变度和松弛系数	150
6.5	混凝土徐变对结构变形和应力的影响	154
6.6	混凝土结构的分类和弹性徐变应力分析方法	156
6.7	晚龄期混凝土结构简谐应力分析	158
6.8	晚龄期混凝土结构简谐应力分析的等效模量法和等效温度法	161
	参考文献	164
第7章	嵌固板与自由板的温度应力	167
7.1	嵌固板温度应力	167

7.2	自由板温度应力计算原理	170
7.3	混凝土自由板因水化热而产生的温度应力	174
7.4	外界温度简谐变化时第一类边界条件自由板的温度应力	175
7.5	外界温度简谐变化时第三类边界条件自由板的温度应力	181
7.6	拆模引起的温度应力	185
	参考文献	190
第8章	计算温度场的有限单元法	191
8.1	热传导问题的变分原理	191
8.2	稳定温度场计算	195
8.3	等参数单元	199
8.4	不稳定温度场的显式解法	202
8.5	不稳定温度场的隐式解法	205
8.6	不稳定温度场算例	207
	参考文献	209
第9章	计算温度应力的有限单元法	210
9.1	弹性温度应力分析	210
9.2	变应力作用下弹性徐变方程的隐式解法	217
9.3	混凝土弹性徐变温度应力分析	222
9.4	复合单元	224
9.5	弹性徐变体应力场分区异步长算法	227
9.6	不稳定温度场分区异步长解法	231
	参考文献	234
第10章	气温变化应力、混凝土表面保温和养护	236
10.1	寒潮期间气温折线变化时的表面温度应力	236
10.2	气温正弦变化、单向散热时的表面保温	238
10.3	气温正弦变化、双向散热时的表面保温	243
10.4	临界表面放热系数	247
10.5	施工期坝块越冬应力与表面保温	250
10.6	国内外混凝土表面保温的实践经验	255
10.7	表面保温效果的宏观分析	258
10.8	重要部位长期保温的必要性	260
10.9	表面保温材料	261
10.10	过水缺口的表面保温	270
10.11	过水孔口的防裂措施	270
10.12	混凝土的早期养护	271
	参考文献	271
第11章	混凝土浇筑块的温度应力	273
11.1	刚性基础上浇筑块均匀冷却应力的理论解	275

11.2	弹性基础上多层浇筑块温度应力的理论解·····	276
11.3	弹性基础上浇筑块均匀冷却应力的数值解·····	281
11.4	浇筑块温度应力影响线·····	286
11.5	冷却区高度对温度应力和接缝开度的影响·····	294
11.6	两种上下层温差·····	299
11.7	关于基础混凝土温差控制的两个原理·····	300
11.8	浇筑块长度对施工期温度应力的影响·····	309
11.9	基础浇筑块施工期温度应力的近似计算·····	311
11.10	分缝间距对年变化温度应力的影响·····	311
11.11	混凝土过度预冷的开裂风险·····	313
11.12	并列多个坝块的温度应力·····	315
11.13	混凝土自重引起的当量温升·····	315
11.14	混凝土浇筑块二维温度应力的变化规律·····	316
11.15	混凝土浇筑块三维温度应力变化规律·····	321
11.16	混凝土浇筑块实际裂缝情况·····	324
	参考文献·····	328
第 12 章	混凝土重力坝与支墩坝的温度应力 ·····	330
12.1	重力坝的无应力温度场·····	330
12.2	均匀温差引起的重力坝温度应力·····	332
12.3	通仓浇筑重力坝温度应力的特点·····	333
12.4	常态混凝土重力坝的温度应力·····	337
12.5	碾压混凝土重力坝的温度应力·····	339
12.6	重力坝的贯穿性裂缝及其影响·····	347
12.7	重力坝的劈头裂缝·····	349
12.8	重力坝运行期年变化温度场引起的应力·····	352
12.9	重力坝运行期纵缝开度的变化·····	357
12.10	严寒地区重力坝温度应力·····	361
12.11	重力坝加高的温度应力·····	363
12.12	重力坝加高时减轻温度应力的措施·····	369
12.13	解决重力坝加高问题的新思路·····	372
12.14	重力坝加高中防止新老混凝土结合面开裂的方法·····	377
12.15	宽缝重力坝的温度应力与裂缝·····	381
12.16	支墩坝的温度应力与裂缝·····	383
	参考文献·····	385
第 13 章	混凝土拱坝温度应力 ·····	387
13.1	拱坝温度荷载概论·····	387
13.2	恒定水位下的拱坝温度荷载·····	391
13.3	变化水位下的拱坝温度荷载·····	396

13.4	寒冷地区有保温层拱坝的温度荷载	400
13.5	减小拱坝温度荷载的方法	406
13.6	碾压混凝土拱坝的温度控制与接缝设计	408
13.7	混凝土拱坝运行期裂缝与永久保温	419
13.8	拱坝接缝灌浆时间的探讨	427
13.9	拱坝裂缝	433
13.10	拱坝温度应力的观测成果	438
	参考文献	440
第14章	船坞、船闸和水闸的温度应力	442
14.1	坞墙和闸墩的自生温度应力	442
14.2	船坞坞墙的约束应力	442
14.3	水闸闸墩的约束应力	447
14.4	窄底板上坞墙和闸墩的约束应力	448
14.5	简化计算	449
14.6	水闸温度应力的三维有限元分析	452
14.7	岩基上的船坞、水闸和溢洪道	456
14.8	计算应力与实测应力的比较	456
	参考文献	457
第15章	混凝土坝仿真分析、动态温控、数字监控与温度应力模型试验	458
15.1	混凝土坝全过程仿真分析	458
15.2	混凝土坝的动态温度控制与温控决策支持系统	461
15.3	混凝土坝的数字监控	463
15.4	混凝土坝温度场和应力场模型试验	467
	参考文献	469
第16章	弹性地基上梁的温度应力	470
16.1	梁的自生温度应力	470
16.2	半平面地基上梁的约束应力	471
16.3	文克尔地基上梁的温度应力	480
	参考文献	489
第17章	圆形隧洞运行期的温度应力	490
17.1	计算模型的选择	490
17.2	圆形隧洞的温度场	490
17.3	圆形隧洞的弹性温度应力	493
17.4	圆形隧洞的弹性徐变温度应力	495
	参考文献	499
第18章	混凝土管道的温度应力	500
18.1	轴对称圆形管道的温度应力	500

18.2	管道过水内温骤降引起的温度应力	501
18.3	正弦变化准稳定温度作用下的管道应力	504
18.4	水化热在混凝土管道内引起的应力	505
	参考文献	508
第 19 章	混凝土坝内孔口温度应力	509
19.1	坝内圆形孔口的温度应力——温度为半径的幂函数	509
19.2	坝内圆形孔口的温度应力——温度为时间的余弦函数	510
19.3	坝内钢管周围的温度应力——温度为时间的余弦函数	512
19.4	坝内矩形泄水孔口的早期温度应力	515
19.5	坝内矩形泄水孔口的晚期温度应力	517
19.6	坝内矩形泄水孔口附近的湿胀应力	519
	参考文献	520
第 20 章	混凝土结构与钢筋混凝土结构的温度应力与徐变分析	521
20.1	素混凝土结构与钢筋混凝土结构温度应力的差别和设计原则	521
20.2	素混凝土构件温度应力分析	523
20.3	钢筋混凝土和预应力混凝土构件的徐变分析	524
	参考文献	533
第 21 章	混凝土与钢筋混凝土的干缩应力	534
21.1	混凝土湿度场计算及混凝土的干缩特性	534
21.2	混凝土自由板的干缩应力	535
21.3	钢筋混凝土板的干缩应力	537
21.4	混凝土的湿胀应力	539
	参考文献	540
第 22 章	混凝土的断裂	541
22.1	混凝土的微观裂缝和宏观裂缝	541
22.2	裂缝扩展条件	542
22.3	混凝土的断裂韧性	544
22.4	内部裂缝的应力强度因子	544
22.5	表面裂缝的应力强度因子	545
22.6	圆孔边缘裂缝的应力强度因子	546
	参考文献	546
第 23 章	混凝土的水管冷却	548
23.1	概述	548
23.2	后期水管冷却平面温度场	550
23.3	后期水管冷却空间温度场	554
23.4	初期水管冷却温度场	560
23.5	水管冷却温度场及冷却时间实用算式	563