



大体积混凝土 温度应力与温度控制

朱伯芳 著

中国电力出版社



大体积混凝土 温度应力与温度控制

朱伯芳 著

电力科技专著出版基金资助项目

中国电力出版社

THERMAL STRESSES AND TEMPERATURE CONTROL OF MASS CONCRETE

by
BOFANG ZHU

*Professor , China Institute of
Water Resources and Hydropower Research
and
Academician , Chinese Academy of
Engineering*

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

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年我从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。这使我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）我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，我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。因此我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、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年我被调到水利水电科学研究院工作，院里成立了一个温度应力研究小组，由我负责，工作条件比以前有所改善，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。

十年动乱中水利水电科学研究院被撤消，我被下放到三门峡工地，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，连炊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困难。在这种条件下，我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。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，我们写作出版了《有限单元法原理与应用》一书（1979年），并修改了《水工混凝土结构的温度应力与温度控制》一书的底稿，予以出版（1976年）。

在过去的二十多年中，国内外在混凝土温度应力方面的理论研究和工程措施方面都有了
不少进展，我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，我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（目前一般取 $k=1.3\sim1.8$ ），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，但从目前的国内外水平来看，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

前 言

第一章 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	5
§ 1.6 控制温度应力、防止裂缝的技术措施	5
第二章 热传导原理、基本参数及差分解法	8
§ 2.1 热传导方程	8
§ 2.2 初始条件和边界条件	10
§ 2.3 边界条件的近似处理	12
§ 2.4 混凝土的热学性能	15
§ 2.5 水泥水化热与混凝土绝热温升	17
§ 2.6 气温	21
§ 2.7 库水温度估算	27
§ 2.8 库水温度数值计算	34
§ 2.9 日照	44
§ 2.10 混凝土温度场求解方法概述	49
§ 2.11 一维温度场的差分解法和图解法	50
§ 2.12 二维温度场差分解法	62
§ 2.13 温度场反分析	63
参考文献	66
第三章 运行期建筑物的温度场	67
§ 3.1 外界温度变化的影响深度	67
§ 3.2 从施工期到运行期的温度变化	70
§ 3.3 稳定温度场的分析	71
§ 3.4 实体重力坝和重力拱坝的稳定温度场	73
§ 3.5 宽缝重力坝和有引水管的重力坝的稳定温度场	75
参考文献	76

第四章 混凝土的浇筑温度和水化热温升	77
§ 4.1 混凝土的机口温度	77
§ 4.2 混凝土的入仓温度	79
§ 4.3 混凝土的浇筑温度	80
§ 4.4 混凝土水化热温升的理论解	85
§ 4.5 混凝土水化热温升的图解法和数值解法	89
§ 4.6 仓面喷雾和表面流水冷却	92
参考文献	93
第五章 混凝土的天然冷却	94
§ 5.1 初温均匀分布、外温为零、第一类边界条件下平板的冷却	94
§ 5.2 初温线性分布、外温为零、第一类边界条件下平板的冷却	98
§ 5.3 初温抛物线分布、外温为零、第一类边界条件下平板的冷却	99
§ 5.4 初温均匀分布、气温为零、第三类边界条件下平板的冷却	100
§ 5.5 初温均匀分布、气温线性变化、第三类边界条件下平板的温度场	106
§ 5.6 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	107
§ 5.7 外界温度任意变化时平板的冷却过程	114
§ 5.8 两向及三向冷却问题、乘积定理	118
参考文献	121
第六章 计算温度场的有限单元法	122
§ 6.1 变分原理	122
§ 6.2 稳定温度场计算	127
§ 6.3 等参数单元	130
§ 6.4 不稳定温度场的显式解法	134
§ 6.5 不稳定温度场的隐式解法	136
§ 6.6 不稳定温度场算例	139
参考文献	141
第七章 混凝土的强度和变形	142
§ 7.1 混凝土的微裂缝与破坏机理	142
§ 7.2 混凝土的强度	142
§ 7.3 混凝土极限拉伸变形	144
§ 7.4 混凝土的自生体积变形	149
§ 7.5 混凝土的干湿变形	153
§ 7.6 混凝土的自由温度变形与热膨胀系数	154
参考文献	155

第八章 混凝土的弹性变形、徐变与应力松弛	156
§ 8.1 常应力作用下混凝土的应变	156
§ 8.2 变应力作用下混凝土的应变	158
§ 8.3 混凝土的应力松弛	160
§ 8.4 长期应力作用下混凝土的侧向应变与泊松比	163
§ 8.5 复杂应力状态下混凝土的应变	164
§ 8.6 混凝土的弹性模量	165
§ 8.7 混凝土的徐变度	171
§ 8.8 混凝土的松弛系数和松弛模量	188
§ 8.9 用于初步设计的混凝土弹性模量、徐变度和松弛系数	196
§ 8.10 变应力作用下弹性徐变方程的隐式解法	199
§ 8.11 常系数流变模型	205
§ 8.12 混凝土的流变模型	213
§ 8.13 混凝土徐变对结构变形和应力的影响	218
§ 8.14 混凝土结构的分类与应力分析方法	232
§ 8.15 修正有效弹性模量法	234
§ 8.16 晚龄期均质及比例变形混凝土结构的分析	236
§ 8.17 晚龄期非比例变形混凝土结构的弹性徐变应力	238
§ 8.18 晚龄期混凝土结构简谐应力分析	241
§ 8.19 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	245
参考文献	248
第九章 嵌固板的温度应力	251
§ 9.1 嵌固板温度应力计算原理	251
§ 9.2 水泥水化热在嵌固板内引起的温度应力	252
第十章 自由板的温度应力	255
§ 10.1 自由板温度应力计算原理	255
§ 10.2 混凝土自由板因水化热而产生的温度应力	259
§ 10.3 外界温度简谐变化时自由板的温度应力——第一类边界条件	260
§ 10.4 外界温度简谐变化时自由板的温度应力——第三类边界条件	267
§ 10.5 拆模引起的温度应力	272
参考文献	280
第十一章 混凝土刚架的温度应力和钢筋混凝土 构件的徐变分析	281
§ 11.1 弹性基本杆件的温度应力和变形	281
§ 11.2 虚功原理求结构的温度变位	284

§ 11.3	力法计算弹性基础上刚架的温度应力	286
§ 11.4	钢筋混凝土和预应力混凝土构件的徐变分析	289
§ 11.5	混凝土与钢筋混凝土的干缩应力	298
参考文献		305

第十二章 气温变化引起的温度应力、混凝土

的表面保温和养护 306

§ 12.1	气温折线变化时混凝土的表面温度应力	306
§ 12.2	气温正弦变化、单向散热时的表面保温	308
§ 12.3	气温正弦变化、双向散热时的表面保温	314
§ 12.4	临界表面放热系数	318
§ 12.5	国内外混凝土表面保温的实践经验	320
§ 12.6	表面保温材料	323
§ 12.7	过水缺口的表面保温	329
§ 12.8	过水孔口的防裂措施	329
§ 12.9	混凝土的早期养护	330
参考文献		331

第十三章 基础梁的弹性徐变温度应力 332

§ 13.1	岩石基础上梁的弹性温度应力	332
§ 13.2	老混凝土基础上梁的弹性温度应力	340
§ 13.3	梁的侧面温度应力	341
§ 13.4	基础梁的弹性徐变温度应力	342
参考文献		346

第十四章 圆形隧洞运行期的温度应力 347

§ 14.1	计算模型的选择	347
§ 14.2	圆形隧洞的温度场	348
§ 14.3	圆形隧洞的弹性温度应力	351
§ 14.4	圆形隧洞的弹性徐变温度应力	353
参考文献		357

第十五章 混凝土管道及坝内孔口的温度应力 358

§ 15.1	轴对称圆形管道的温度应力	358
§ 15.2	管道过水内温骤降引起的温度应力	359
§ 15.3	正弦变化准稳定温度作用下的管道应力	362
§ 15.4	水化热在混凝土管道内引起的应力	363
§ 15.5	坝内圆形孔口的温度应力——温度为半径的幂函数	366
§ 15.6	坝内圆形孔口的温度应力——温度为时间的余弦函数	368

§ 15.7 坝内钢管周围的温度应力——温度为时间的余弦函数	369
§ 15.8 坝内矩形泄水孔口的早期温度应力	373
§ 15.9 坝内矩形泄水孔口的晚期温度应力	375
§ 15.10 坝内矩形泄水孔口附近的湿胀应力	377
参考文献	378
第十六章 计算温度应力的有限单元法	379
§ 16.1 用三角形单元计算二维弹性温度应力	393
§ 16.2 用有限单元法计算弹性温度应力的通用公式	393
§ 16.3 混凝土弹性徐变温度应力分析	402
§ 16.4 算例	405
参考文献	409
第十七章 混凝土坝仿真应力分析	410
§ 17.1 概述	410
§ 17.2 仿真分析的并层算法	411
§ 17.3 并层坝块接缝单元	417
§ 17.4 弹性徐变体应力场分区异步长算法	423
§ 17.5 不稳定温度场分区异步长解法	427
§ 17.6 碾压混凝土重力坝仿真分析	433
§ 17.7 带泄洪深孔和导流底孔的通仓浇筑常态混凝土重力坝的 三维仿真分析	435
参考文献	438
第十八章 混凝土的断裂	440
§ 18.1 裂缝扩展条件	441
§ 18.2 混凝土的断裂韧度 (K_{IC})	443
§ 18.3 内部裂缝的应力强度因子	443
§ 18.4 表面裂缝的应力强度因子	444
§ 18.5 圆孔边缘裂缝的应力强度因子	445
§ 18.6 钢筋阻止裂缝扩展的作用	445
§ 18.7 计算应力强度因子的有限单元法	446
§ 18.8 钝裂缝带模型	449
参考文献	451
第十九章 柱状浇筑块的温度应力	453
§ 19.1 弹性温度应力的平面问题	454
§ 19.2 刚性基础上均质浇筑块的弹性温度应力	456

§ 19.3	弹性基础上均质浇筑块均匀冷却问题的数值解与 实验结果	459
§ 19.4	弹性基础上均质浇筑块的温度应力影响线	462
§ 19.5	基础浇筑块长度对温度应力的影响	469
§ 19.6	基础浇筑块温度应力的近似计算	471
§ 19.7	高浇筑块的温度应力	472
§ 19.8	分缝间距对外界温度年变化引起的应力的影响	474
§ 19.9	弹性基础上多层浇筑块的温度应力	476
§ 19.10	刚性和拟刚性基础上多层浇筑块的温度应力 ——弹性力学准平面问题	483
§ 19.11	并列多个浇筑块的温度应力	489
§ 19.12	混凝土自重引起的膨胀变形	490
§ 19.13	岩基上混凝土浇筑块温度应力的变化规律	490
§ 19.14	混凝土浇筑块实际裂缝情况	514
§ 19.15	改善浇筑块温度应力状态以防止裂缝的技术措施	517
	参考文献	519

第二十章 混凝土重力坝与支墩坝的温度应力 520

§ 20.1	实体重力坝的无应力温度场	520
§ 20.2	空心重力坝的无应力温度场	521
§ 20.3	通仓浇筑实体重力坝的温度应力	522
§ 20.4	碾压混凝土重力坝的温度应力	536
§ 20.5	重力坝的贯穿性裂缝及其影响	545
§ 20.6	重力坝的劈头裂缝	546
§ 20.7	重力坝加高的温度应力	554
§ 20.8	重力坝加高时减轻温度应力的措施	563
§ 20.9	宽缝重力坝的温度应力	568
§ 20.10	支墩坝的温度应力与裂缝	572
	参考文献	577

第二十一章 拱坝的温度应力 578

§ 21.1	拱坝裂缝	578
§ 21.2	拱坝的温度荷载	584
§ 21.3	减小拱坝温度荷载的方法	594
§ 21.4	多拱梁法计算拱坝温度应力	596
§ 21.5	有限单元法计算拱坝温度应力	604
§ 21.6	碾压混凝土拱坝的温度应力与横缝设计	612
§ 21.7	拱坝温度应力的观测成果	619
	参考文献	621

第二十二章 船坞和水闸的温度应力	622
§ 22.1 坞墙和闸墩的自生温度应力	622
§ 22.2 船坞坞墙的约束应力	622
§ 22.3 水闸闸墩的约束应力	626
§ 22.4 窄底板上坞墙和闸墩的约束应力	628
§ 22.5 简化计算	629
§ 22.6 计算应力与实测应力的比较	631
参考文献	632
第二十三章 混凝土的水管冷却	633
§ 23.1 概述	633
§ 23.2 金属水管二期冷却计算	634
§ 23.3 金属水管一期冷却计算	641
§ 23.4 非金属水管冷却计算	643
§ 23.5 水管排列方式的影响	651
§ 23.6 用有限单元法计算水管冷却效果	652
§ 23.7 水管冷却的等效热传导方程	660
§ 23.8 冷却时间计算	664
§ 23.9 影响水管冷却效果的几个因素	665
§ 23.10 高温季节二期水管冷却的坝块表面保温	668
§ 23.11 水管冷却施工中的几个问题	670
参考文献	671
第二十四章 混凝土的预冷	672
§ 24.1 概述	672
§ 24.2 地笼取料	674
§ 24.3 冷却拌和水及加冰拌和	674
§ 24.4 预冷骨料	675
§ 24.5 浸水式预冷骨料	677
§ 24.6 喷淋法预冷骨料	679
§ 24.7 风冷骨料	680
§ 24.8 真空汽化法预冷骨料	681
§ 24.9 淋水和风冷混合式预冷骨料	682
参考文献	683
第二十五章 大体积混凝土的冬季施工	684
§ 25.1 大体积混凝土冬季施工的设计原则	684
§ 25.2 大体积混凝土冬季施工的技术措施	684

§ 25.3 大体积混凝土冬季施工的蓄热保温计算	686
§ 25.4 混凝土坝冬季施工实例	687
参考文献	692

第二十六章 坝体分缝分块..... 693

§ 26.1 横缝形式和间距	693
§ 26.2 纵缝形式和间距	694
§ 26.3 浇筑层厚度	703
§ 26.4 相邻坝块高差	705
§ 26.5 水电站混凝土分缝分块与封闭块	710
参考文献	711

第二十七章 混凝土的允许温差、制冷容量及裂缝

的检查与处理..... 712

§ 27.1 混凝土允许温差计算方法	712
§ 27.2 国内外采用的混凝土允许温差	715
§ 27.3 混凝土坝温度控制实例	720
§ 27.4 制冷容量	730
§ 27.5 混凝土裂缝的检查	733
§ 27.6 混凝土裂缝的处理	734
参考文献	737
附录 单位换算	738

CONTENTS

Foreword

CHAPTER 1 INTRODUCTION	1
§ 1.1 Importance of thermal stresses in massive concrete structures	1
§ 1.2 Peculiarity of thermal stresses in massive concrete structures	2
§ 1.3 Variation of temperature and stresses with time in mass concrete	3
§ 1.4 Two types of thermal stresses in mass concrete	4
§ 1.5 Analysis of thermal stresses in massive concrete structures	5
§ 1.6 Measures for controlling temperature and preventing cracks in mass concrete	5
CHAPTER 2 THEORY OF HEAT CONDUCTION, BASIC PARAMETERS AND METHOD OF FINITE DIFFERENCE	8
§ 2.1 Differential equation for conduction of heat	8
§ 2.2 Initial condition and boundary condition	10
§ 2.3 Approximate treatment of boundary condition	12
§ 2.4 Thermal properties of concrete	15
§ 2.5 Heat of hydration of cement and adiabatic temperature rise of concrete	17
§ 2.6 Air temperature	21
§ 2.7 Approximate estimate of temperature of water in the reservoir	27
§ 2.8 Numerical analysis of temperature of water in the reservoir	34
§ 2.9 Solar thermal radiation	44
§ 2.10 Outline of methods of solution for temperature field of mass concrete	49
§ 2.11 One dimensional finite difference method and graphical method	50
§ 2.12 Two dimensional finite difference method	62
§ 2.13 Back analysis of temperature field in mass concrete	63

CHAPTER 3	TEMPERATURE FIELD OF CONCRETE STRUCTURES	
	IN PERIOD OF OPERATION	67
§ 3.1	Depth of influence of variation of ambient temperature	67
§ 3.2	Variation of temperature of concrete from period of construction to period of operation	70
§ 3.3	Analysis of steady temperature field	71
§ 3.4	Steady temperature field in solid gravity and gravity-arch dam	73
§ 3.5	Steady temperature field in gravity dams with open trasverse joints and with conduits	75
CHAPTER 4	PLACING TEMPERATURE AND TEMPERATURE RISE	
	DUE HYDRATION HEAT	77
§ 4.1	Temperature of concrete leaving the mixer	77
§ 4.2	Temperature of concrete entering the form	79
§ 4.3	Placing temperature of concrete	80
§ 4.4	Theoretical solution of temperature rise due to hydration heat	85
§ 4.5	Graphical and numerical method for computing temperature rise due to hydration heat	89
§ 4.6	Spraying fog and cooling by water flowing on the top of mass concrete	92
CHAPTER 5	NATURAL COOLING OF MASS CONCRETE	94
§ 5.1	Cooling of a flat slab with initial uniform temperature distribution and first kind of boundary condition	94
§ 5.2	Cooling of a flat slab with linear initial temperature and first kind of boundary condition	98
§ 5.3	Cooling of a flat slab with parabolic initial temperature and first kind of boundary condition	99
§ 5.4	Cooling of a flat slab with initial uniform temperature and third kind of boundary condition	100
§ 5.5	Temperature field in a flat slab with uniform initial temperature, linearly varying air temperature and third kind of boundary condition	106

§ 5.6	Temperature field in a flat slab with uniform initial temperature, sinusoidal variation of air temperature and first kind of boundary condition	107
§ 5.7	Cooling of a flat slab with arbitrary variation of air temperature	114
§ 5.8	Cooling of mass concrete in two and three dimensions, theorem of multiplication	118
CHAPTER 6 FINITE ELEMENT METHOD FOR SOLUTION OF TEMPERATURE FIELD		122
§ 6.1	Variational principle	122
§ 6.2	Solution of steady temperature field	127
§ 6.3	Isoparametric elements	130
§ 6.4	Explicit solution of transient temperature field	134
§ 6.5	Implicit solution of transient temperature field	136
§ 6.6	Examples of computation of transient temperature field	139
CHAPTER 7 STRENGTH AND DEFORMATION OF CONCRETE		142
§ 7.1	Microcrack and rupture mechanism of concrete	142
§ 7.2	Strength of concrete	142
§ 7.3	Extensibility of concrete	144
§ 7.4	Autogenous volumetric change of concrete	149
§ 7.5	Deformation of concrete due to change of moisture content	153
§ 7.6	Coefficient of thermal expansion of concrete	154
CHAPTER 8 ELASTIC STRAIN, CREEP AND STRESS RELAXATION OF CONCRETE		156
§ 8.1	Strain of concrete under constant stress	156
§ 8.2	Strain of concrete under stress varying with time	158
§ 8.3	Stress relaxation of concrete	160
§ 8.4	Lateral strain and Poisson's ratio of concrete under long-time load	163
§ 8.5	Strain of concrete under three dimensional stress condition	164
§ 8.6	Modulus of elasticity of concrete	165
§ 8.7	Unit creep of concrete	171

§ 8.8	Coefficient of stress relaxation and relaxation modulus of concrete	188
§ 8.9	Modulus of elasticity, unit creep and coefficient of stress relaxation of concrete for preliminary analysis	196
§ 8.10	Implicit solution of elasto-creeping equation under stresses varying with time	199
§ 8.11	Rheological model with constant coefficients	205
§ 8.12	Rheological model of concrete	213
§ 8.13	Influence of creep on the stresses and deformations of concrete structures	218
§ 8.14	Classification of concrete structures and methods of stress analysis	232
§ 8.15	Improved effective modulus method	234
§ 8.16	Analysis of structures of matured concrete with proportional strain	236
§ 8.17	Elastocreeping stresses in structures of matured concrete with nonproportional strain	238
§ 8.18	Analysis of harmonic stresses in structures of matured concrete	241
§ 8.19	Method of equivalent modulus and method of equivalent temperature for analyzing stresses in matured concrete due to harmonic variation of temperature	245
CHAPTER 9	THERMAL STRESSES IN A FIXED SLAB	251
§ 9.1	Principles for analyzing thermal stresses in a fixed concrete slab	251
§ 9.2	Thermal stresses in a fixed concrete slab due to hydration heat	252
CHAPTER 10	THERMAL STRESSES IN A FREE SLAB	255
§ 10.1	Principles for analyzing thermal stresses in a free concrete slab	255
§ 10.2	Thermal stresses in a free concrete slab due to hydration heat	259
§ 10.3	Thermal stresses in a free slab due to harmonic variation	