

清华大学学术专著

钢筋混凝土的 高温性能及其计算

过镇海 时旭东 著



清华大学出版社

清华大学学术专著

钢筋混凝土的 高温性能及其计算

过镇海 时旭东 著



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE AT ELEVATED TEMPERATURE AND ITS CALCULATION

Guo Zhenhai Shi Xudong

内 容 简 介

本书是作者与他们所指导的研究生们多年来在混凝土材料、构件和结构的高温(抗火)力学性能方面的试验与理论研究成果的汇集和总结。

全书分为四篇十四章。各篇章分述的主要内容有:混凝土的高温强度、高温变形,不同温度-应力途径下的耦合本构关系和钢材的高温力学性能;火灾的温度-时间曲线、材料的热工性能、截面(二维)温度场的非线性分析、温度场的计算图表;受弯构件、受压构件和超静定结构的高温力学性能;非匀质截面的一般力学特性、构件和结构的非线性全过程分析、极限承载力的计算和火灾后结构的损伤评估。

本书强调以混凝土材料和结构的高温(抗火)试验研究为基础,从中分析其力学性能的机理和一般规律,并通过非线性有限元分析实现理论计算,同时建议了适合工程实用的简化计算方法。本书可供高等学校结构工程专业类的师生作为参考教材,并可供从事结构工程的有关科研、设计和施工管理的技术人员在工作中参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土的高温性能及其计算/过镇海,时旭东著. —北京:清华大学出版社,2002

ISBN 7-302-05959-4

I. 钢… II. ①过… ②时… III. 钢筋混凝土—高温—性能研究 IV. TU528.571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 078742 号

出 版 者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

责任编辑:孙 礼

版式设计:韩爱君

印 刷 者:清华大学印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:17.75 字数:399 千字

版 次:2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-05959-4/TU·186

印 数:0001~2000

定 价:39.00 元

Abstract

This book is the collection and summation of the experimental and theoretical researches on the mechanical behaviours of reinforced concrete materials, members, and structures at elevated temperature (fire exposure), which have been conducted by the authors and their post-graduates for years.

There are four parts and fourteen chapters in this book, and the main contents introduced are: strength, and deformation of concrete at elevated temperature, coupling constitutive relation of concrete under different temperature-stress paths, mechanical behaviours of reinforcement at elevated temperature; temperature-time curve of fire, thermal behaviours of materials, non-linear analysis of sectional (2 dimensional) temperature field, calculation charts for temperature field; behaviours of flexural members, compressive members, and statically indeterminate structures at elevated temperature; general mechanical characteristics of non-homogeneous section, non-linear finite-element analysis of members and structures, calculation of ultimate strength or load, fire damage evaluation of structures.

It is emphasised that the experimental investigation of concrete materials and structures at elevated temperature is the research basis. Then, the mechanisms and general regularities of the structural behaviours are analysed, theoretical calculation is performed by non-linear finite-element analysis, and the simplified calculation methods are suggested for the engineering practice.

This book may be used as a reference text for the university teachers and students in the structural engineering field, and also used as a reference for the structural engineers, who are engaged in the scientific research, design, or construction.

前言

在我国和世界各国的所有结构工程中,钢筋混凝土的结构占有最大的份额。随着大量工程经验和研究成果的积累、制作工艺的改善和高效新材料的应用,混凝土结构的性能不断提高,形式变化多样,应用范围逐渐扩大。至今,混凝土结构不仅普遍地应用于各类民用和公用建筑、单层和多层厂房、高层和大跨建筑工程中,还广泛地应用于桥梁、交通、水利和各种地下工程。在一些特殊结构中,如电视塔、输电杆塔、筒仓、烟囱等,甚至核电站的反应堆压力容器和安全壳、巨型锻造水压机等,采用钢筋混凝土或预应力混凝土结构也屡见不鲜。

一般的混凝土结构都在常温($<60^{\circ}\text{C}$)下工作,可按照现行规范^[0-1]进行设计或安全性验算。但是,有些结构,如高温车间、烟囱、核反应堆工程、锻造水压机等结构,处于经常性的高温($100^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$)状态下工作。此外,由于自然的或人为的原因引发的各种偶然性火灾事故,使结构在短期内承受高温的作用,一小时内可达 $1\,000^{\circ}\text{C}$ 或者更高。混凝土结构在高温下工作,由于材料性能的严重劣化和发生剧烈的内(应)力重分布,使结构开裂,变形增大,承载力下降,比结构的常温性能大大恶化,甚至出现局部破损或倒塌,导致巨大的经济损失,甚至人员伤亡。至今,我国在这方面的研究工作有限,尚无相应的抗高温(火)设计规范可循,不能适应建设工程发展的需要。因而,混凝土材料和结构的高温性能成为一个迫切的重要研究课题。

作者和所指导的研究生们^①,自 1989 年起至今进行并完成了国家 863 高科技计划、国家自然科学基金和教委(教育部)博士点基金等所资助的多项有关研究项目。本书的内容就是这些试验和理论研究成果的系统化与总结。

混凝土结构在高温下比在常温下的性能要复杂得多,理论分析的难度很大。这是因为结构在环境温度变化的情况下形成了动态的不均匀温度场,高温使材料(混凝土和钢筋)的强度和变形性能严重劣化,又使结构产生剧烈的内(应)力重分布;还因为温度和荷载(应力)有显著的耦合作用效应,使材料的本构关系和构件受力性能随温度-荷载途径而有较大变化。为此,本书首先通过试验手段展示混凝土的材料、构件和结构在温度与荷载

① 相继参加有关试验和理论研究工作的博士生有石贵平、时旭东、郭玉涛和杨建平,硕士生有李卫、姜立、李华东、南建林、吕彤光、张杰英和孙劲峰等。还有许多本科生在毕业论文阶段参与了有关试验研究工作。

共同作用下的力学性能,然后进行机理分析,总结试验数据,归纳其一般性规律,进一步建立准确的理论分析方法,并给出简化的实用计算方法,供工程实践中应用。

全书分为四篇,分别介绍混凝土和钢筋的高温力学性能及温度-应力耦合本构关系、构件截面温度场的理论分析和计算图表、各类基本构件和超静定结构的高温试验及其性能的一般规律、高温构件和结构的受力全过程分析方法及极限承载力的实用算法、结构在火灾后损伤等级的评定标准和方法。

对于从事科研、设计和施工工作的技术人员,在进行结构的高温(抗火)设计和计算,或者结构(火)灾后处理时,本书可提供重要的概念、试验依据、理论分析的方法和参数等。对于高等学校结构工程专业类的教师、研究生和本科生,本书可作为混凝土结构类课程的参考教材。

本书由两人撰写,过镇海负责第一、二、三、四、八、九、十一、十三(部分)和十四章,时旭东负责第五、六、七、十、十二、十三(部分)章,后由过镇海整理定稿。

本书付梓之时,作者谨向支持和关心有关科研项目及出版工作的组织与人员致以衷心的感谢。他们是:为有关科研项目提供经费资助的国家科委 863 高科技计划、国家自然科学基金和国家教委博士点科研基金等组织,曾共同进行并完成各项试验及理论研究任务的研究生、本科生、试验技术人员和工人们,为出版提供资助、编辑、审校的组织 and 人员。

至今,混凝土结构的高温性能试验研究、相应的理论分析和设计计算方法等还不很完善,许多问题有待更深入、更广泛的试验及理论研究加以解决和提高。由于作者们的试验研究内容尚不完备,认识水平和理论分析能力有限,书中难免有不足,甚或谬误之处,敬请专家和读者们批评。

过镇海

2002 年 5 月 2 日于清华园

作者简介



过镇海 1934年生，江苏省无锡市人。清华大学土木工程系教授、博士生导师，曾任全国钢筋混凝土结构标准技术委员会副主任、土木工程学会混凝土和预应力混凝土学会理事等职。主要科研领域有：预应力混凝土屋架、结构工程的整体性能、二阶段受力叠合梁、加气混凝土材料和构件、素混凝土和约束混凝土在单调和反复荷载下的性能、混凝土的受拉和剪切性能、混凝土的多轴强度和本构关系、混凝土材料和结构的抗火性能等，多次参与混凝土结构类设计规范（程）的编制与修订工作。在国内外学术杂志上发表论文近百篇，曾获部委级科技进步二等奖和三等奖各两次。



时旭东 博士，1960年生，安徽省天长市人。清华大学土木工程系副教授。主要科研领域有：单层工业厂房结构的抗震性能、高强混凝土构件的抗震性能、混凝土材料和结构的抗火性能、轻钢结构结构的抗火性能、高强混凝土的高温性能及其应用、环保节能轻型结构的受力体系、建（构）筑物结构损伤鉴定方法、受损结构的安全度评估方法和加固措施等，并负责或参与近70栋建（构）筑结构的鉴定、安全分析、加固和设计等。在国内外学术杂志上发表论文五十余篇。

目 录

绪 论	1
0.1 结构工程中的温度问题	1
0.2 结构火灾的严重性和对策	2
0.3 混凝土结构高温性能的特点	3

第一篇 材料的高温力学性能

第一章 混凝土的高温强度	7
1.1 试验方法和设备	7
1.1.1 总体试验方案	7
1.1.2 材料性试验炉的设计和制作	9
1.2 高温抗压强度	10
1.2.1 高温宏观现象	10
1.2.2 高温时的立方体抗压强度	12
1.2.3 降温后的抗压强度	15
1.3 高温抗拉强度	16
小结	17
第二章 混凝土的高温变形	18
2.1 自由升降温变形	18
2.1.1 一次升温变形和线膨胀系数	18
2.1.2 升降温循环的变形	19
2.2 高温受压变形和应力-应变曲线	21
2.2.1 高温受压变形的特点	21
2.2.2 高温时的棱柱体抗压强度和峰值应变	22
2.2.3 应力-应变全曲线方程	23
2.2.4 初始弹性模量和峰值割线模量	24

2.3	重复荷载作用下的应力-应变曲线	25
2.3.1	包络线和共同点、稳定点的轨迹线	25
2.3.2	卸载和再加载曲线方程	27
2.4	短期高温徐变	28
2.4.1	恒温-等应力作用下的高温徐变	28
2.4.2	变温度-应力状况下的高温徐变	30
小结		32
第三章	温度-应力途径和混凝土的耦合本构关系	33
3.1	温度-应力途径和变形分量	33
3.1.1	温度-应力途径及其分解	33
3.1.2	高温变形的组成分量	34
3.1.3	试验方法和试件平均温度	34
3.2	不同温度-应力途径下的混凝土抗压强度	36
3.2.1	高温抗压强度的上下限	36
3.2.2	不同温度-应力途径的影响	37
3.3	应力作用下的温度变形和瞬态热应变	39
3.3.1	应力作用下的温度变形	39
3.3.2	瞬态热应变	40
3.4	温度-应力耦合本构关系	42
3.4.1	不同温度-应力途径下的变形比较	42
3.4.2	耦合本构关系的基本计算式	43
3.4.3	变形增量计算规则	44
3.4.4	算例和试验验证	45
小结		49
第四章	钢筋的高温力学性能和本构关系	50
4.1	试验方法和设备	50
4.1.1	试验方案	50
4.1.2	试验内容和数据处理	52
4.2	高温抗拉强度	53
4.2.1	高温特征和极限抗拉强度	53
4.2.2	高温屈服强度	54
4.2.3	温度-应力途径的影响	56
4.3	高温受拉变形和应力-应变曲线	57
4.3.1	高温受拉变形的特点	57
4.3.2	应力-应变曲线方程	59
4.3.3	弹性模量	61

4.4 应力作用下的温度变形·····	62
4.4.1 自由膨胀变形·····	62
4.4.2 恒定应力下的温度变形·····	63
4.4.3 短期高温徐变·····	64
小结·····	65

第二篇 构件的截面温度场

第五章 火灾升温曲线和热传导方程·····	69
5.1 火灾和温度-时间曲线·····	69
5.1.1 火灾温度变化的特点·····	69
5.1.2 火灾温度的影响因素·····	70
5.1.3 标准的火灾温度-时间曲线·····	71
5.2 材料的热工性能·····	73
5.2.1 混凝土的热工参数·····	73
5.2.2 钢(筋)的热工参数·····	76
5.3 热传导方程·····	77
5.3.1 热传导基本方程·····	77
5.3.2 定解条件和求解方法·····	80
小结·····	81
第六章 温度场的理论分析·····	82
6.1 差分分析法·····	82
6.1.1 离散化方法和差分格式·····	82
6.1.2 稳态热传导问题·····	83
6.1.3 瞬态热传导问题·····	84
6.1.4 算例·····	86
6.2 有限元-差分混合分析法·····	88
6.2.1 单元热传导方程·····	88
6.2.2 总体合成方程和边界条件·····	90
6.2.3 稳态热传导方程及其计算·····	94
6.2.4 瞬态热传导方程的差分格式·····	94
6.2.5 数值解的稳定性·····	96
6.3 计算程序及其验证·····	97
6.3.1 计算程序的编制·····	97
6.3.2 算例和验证·····	98
6.3.3 试验验证·····	101
6.3.4 截面温度场的一般规律·····	103
小结·····	104

第七章 温度场的计算图表	105
7.1 基本假设和应用条件	105
7.2 板——单面受火	106
7.2.1 计算表格.....	106
7.2.2 温度分布曲线.....	108
7.3 梁、柱——三面受火.....	109
7.3.1 计算表格.....	109
7.3.2 等温曲线图.....	113
7.4 方柱——四面受火	119
7.4.1 计算表格.....	119
7.4.2 等温曲线图.....	120
7.5 方柱——相邻两面受火	122
7.5.1 计算表格.....	122
7.5.2 等温曲线图.....	124
小结.....	127

第三篇 构件和结构的高温性能

第八章 受弯构件的高温性能	131
8.1 构件高温试验的方法和设备	131
8.1.1 总体试验方案.....	131
8.1.2 构件试验炉的设计和制作.....	133
8.2 高温时的受力性能	134
8.2.1 试验方法和试件.....	134
8.2.2 拉区高温梁.....	135
8.2.3 压区高温梁.....	137
8.3 不同温度-荷载工况下的受力性能	138
8.3.1 恒载升温途径.....	139
8.3.2 钢筋保护层厚度的影响.....	140
8.3.3 升降温循环后.....	142
小结.....	144
第九章 受压构件的高温性能	145
9.1 三面高温的轴心受压柱	145
9.1.1 试验方法和内容.....	145
9.1.2 高温时的受力性能.....	146
9.1.3 恒载升温途径下的受力性能.....	149
9.2 三面高温的偏心受压柱	150

9.2.1	试验方法和内容	150
9.2.2	高温时的变形	151
9.2.3	极限承载力和极强偏心距	153
9.3	不同温度工况的三面高温偏压柱	156
9.3.1	恒载升温途径下的性能	156
9.3.2	高温持续和降温后的性能	158
9.4	两面高温的偏心受压柱	160
9.4.1	试验方法和内容	160
9.4.2	温度分布和变形	162
9.4.3	极限承载力	165
	小结	167
第十章	超静定结构的高温性能	169
10.1	研究内容和试验方法	169
10.1.1	试件的设计和试验内容	169
10.1.2	试验方法和量测技术	171
10.2	连续梁的高温性能	174
10.2.1	变形和破坏的宏观过程	174
10.2.2	极限高温承载力	176
10.2.3	内力重分布过程	177
10.3	框架的高温性能	180
10.3.1	变形和破坏的宏观过程	180
10.3.2	极限高温承载力	183
10.3.3	内力重分布过程	184
	小结	187
第四篇 理论分析和实用计算方法		
第十一章	非匀质截面的一般力学特性	191
11.1	工程中的非匀质截面构件	191
11.2	截面的力学特征点	192
11.3	线弹性材料的解析解	195
11.3.1	两种材料组成的矩形截面构件	195
11.3.2	材性沿截面高度连续变化的构件	198
	小结	201
第十二章	结构受力全过程的有限元分析	202
12.1	基本假设和材料本构关系	202
12.1.1	基本假设	202

12.1.2	混凝土的热-力本构模型	203
12.1.3	钢筋的热-力本构模型	205
12.2	截面本构关系的增量格式	206
12.2.1	力、变形、温度和时间的增量有限元格式	206
12.2.2	增量有限元格式的求解	209
12.2.3	有温度增量时,应力和应变值及其增量的确定	213
12.3	结构的有限元分析	216
12.3.1	梁单元等效刚度矩阵	216
12.3.2	结点位移向量的求解	219
12.3.3	计算步骤	219
12.4	理论计算与试验结果的比较	220
小结		222
第十三章	构件和结构高温极限承载力的实用算法	224
13.1	基本假设和等效截面的确定	224
13.2	周边高温的轴心受压构件	226
13.3	受弯构件	227
13.3.1	单面高温板	227
13.3.2	三面高温梁	228
13.4	偏心受压构件	231
13.4.1	极限轴力-弯矩包络图的确定	231
13.4.2	截面极限承载力计算	232
13.5	超静定结构	236
13.5.1	塑性极限分析的一般原理	236
13.5.2	高温塑性铰的特点	236
13.5.3	塑性极限分析的方法和步骤	238
13.5.4	算例和验证	240
小结		243
第十四章	结构的抗火分析和损伤等级评定	244
14.1	工程中的结构抗火分析问题	244
14.2	构件火灾损伤等级的评定	246
14.2.1	建筑物火灾的典型案例分析	246
14.2.2	火灾损伤等级的评定标准	247
14.3	抗火分析和损伤等级评定的实例	248
14.3.1	结构方案简况	248
14.3.2	构件的截面温度场分析	249
14.3.3	板的抗火承载力分析	251

14.3.4 柱的抗火承载力分析·····	252
14.3.5 结构的抗火损伤评定·····	253
小结·····	255
参考文献·····	256

CONTENTS

Introduction	1
0.1 Thermal Problems in Structural Engineering	1
0.2 Harmfulness and Resolution of Structure Fire	2
0.3 Behaviour Characteristics of Reinforced Concrete Structures at Elevated Temperature	3

PART ONE

Mechanical Behaviours of Materials at Elevated Temperature

Chapter 1 Strength of Concrete at Elevated Temperature	7
1.1 Testing Method and Device	7
1.1.1 General Testing Program	7
1.1.2 Design and Manufacture of the Furnaces for Material Testing	9
1.2 Compressive Strength at Elevated Temperature	10
1.2.1 General Phenomena during Heating	10
1.2.2 Cubic Compressive Strength at Elevated Temperature	12
1.2.3 Compressive Strength after Cooling	15
1.3 Tensile Strength at Elevated Temperature	16
Conclusions	17
 Chapter 2 Deformation of Concrete at Elevated Temperature	 18
2.1 Deformation during Heating and Cooling	18
2.1.1 Deformation during Monotonic Heating and Linear Expansion Coefficient	18
2.1.2 Deformation during Heating-Cooling Cycle	19
2.2 Compressive Deformation and Stress-Strain Curve at Elevated Temperature	21
2.2.1 Characteristics of Compressive Deformation	21

2.2.2	Prismatic Compressive Strength and Corresponding Strain	22
2.2.3	Equation of Stress-Strain Curve	23
2.2.4	Initial Elastic Modulus and Secant Modulus at Stress Peak	24
2.3	Stress-Strain Curves under Repeated Loading	25
2.3.1	Envelope and Loci of Common Point and Stability Point	25
2.3.2	Formulas of Unloading and Reloading Curves	27
2.4	Short Time Creep at Elevated Temperature	28
2.4.1	Creep under Constant Temperature and Stress	28
2.4.2	Creep under Variable Temperature and Stress	30
	Conclusions	32
 Chapter 3 Temperature-Stress Paths and Coupling Constitutive		
	Relation of Concrete	33
3.1	Temperature-Stress Paths and Deformation Components	33
3.1.1	Temperature-Stress Path and Its Resolving	33
3.1.2	Composite Components of Deformation at Elevated Temperature	34
3.1.3	Testing Method and Average Temperature of the Specimen	34
3.2	Compressive Strength of Concrete under Different Temperature-Stress Paths	36
3.2.1	Upper and Lower Bounds of Compressive Strength	36
3.2.2	Influence of Different Temperature-Stress Paths	37
3.3	Thermal Strain under Stress and Transient Thermal Strain	39
3.3.1	Thermal Strain under Stress	39
3.3.2	Transient Thermal Strain	40
3.4	Coupling Temperature-Stress Constitutive Relation	42
3.4.1	Comparison of Strains under Different Temperature-Stress Paths	42
3.4.2	Basic Formulas of Coupling Constitutive Relation	43
3.4.3	Calculation Rules for Strain Increments	44
3.4.4	Example and Experimental Demonstration	45
	Conclusions	49
 Chapter 4 Mechanical Behaviour and Constitutive Relation of		
	Reinforcement at Elevated Temperature	50
4.1	Testing Method and Device	50
4.1.1	Testing Program	50
4.1.2	Test Contents and Data Processing	52