



北京市高等教育精品教材立项项目

清华大学土木工程系列教材

Reinforced Concrete Theory and Analyse

钢筋混凝土原理和分析

过镇海 时旭东 编著

Guo Zhenhai Shi Xudong

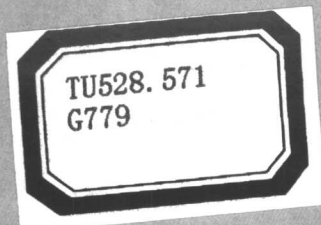


清华大学出版社



北京市高等教育精品教材立项项目

清华大学土木工程系列教材



-89

Reinforced Concrete Theory and Analyse

钢筋混凝土原理和分析

过镇海 时旭东 编著

Guo Zhenhai Shi Xudong

TU528.571

G779



00596/5

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为《钢筋混凝土原理》一书的修订版,共四篇 20 章,主要内容有混凝土的基本力学性能,混凝土的多轴强度和本构关系,钢筋和混凝土的组合作用,基本构件的承载力、裂缝变形和其一般分析方法,以及结构的抗震、疲劳、抗爆、抗高温和耐久性等特殊受力性能。

书中详尽地介绍了混凝土材料的各种受力性能,并以此为基础和以试验为依据,深入地分析钢筋混凝土构件在各种受力状态下的性能变化规律、受力机理、计算原则和方法等,以展示钢筋混凝土作为一种组合的结构材料的基本原理和分析方法。

本书可作为建筑、水利、交通、地下、海洋工程等结构工程专业研究生课程的专用教材,也可用作高等学校本科的教学参考书,并供从事钢筋混凝土结构科学研究、设计和施工管理的技术人员在工作中参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土原理和分析/过镇海 时旭东 编著. —北京:清华大学出版社,2003
ISBN 7-302-07192-6

I. 钢… II. ①过… ②时… III. 钢筋混凝土 IV. TU528.571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 077557 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:徐晓飞

文稿编辑:孙 礼

版式设计:刘祎森

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:30 字数:617 千字

版 次:2003 年 12 月第 1 版 2004 年 5 月第 2 次印刷

书 号:ISBN 7-302-07192-6/TU·204

印 数:3001~5000

定 价:39.80 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704



郑州大学

04010131387S

钢筋混凝土原理和分析

改版说明

本书是在《钢筋混凝土原理》一书的基础上修订而成的。

《钢筋混凝土原理》^[0-5]一书出版后,国内一些高等学校相继采用,并作为研究生同类课程的教材或主要参考书,有些结构工程技术人员也常在有关技术工作中用作参考。2001年底,北京市教育委员会开展“北京市高等教育精品教材建设”,本书经评审、选定为立项建设教材之一。

本书借此机会改版,且更名为《钢筋混凝土原理和分析》。全书包括四篇20章,保留了原书的编写原则和适合教学应用的体系,以及大部分内容,除了对全文进行修改和订正外,增删和变更的主要内容有:

原书《第二篇 混凝土的多轴强度和本构关系》分三章,经压缩篇幅后为一章,并入第一篇内,原书共五篇改为本书共四篇;

原书第一篇的第1章至第3章中,有关混凝土的抗压、抗拉和抗剪等基本力学性能合并成一章,其余内容相应改组;

新增设以下两章:第15章 构件分析的一般方法,介绍有限元分析的概念和压弯构件非线性全过程分析方法;第20章 耐久性,简要介绍混凝土结构耐久性失效的工程问题、机理分析和处理方法;

我国颁布的新的GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》,比原规范有较大变化,因此本书的相关内容也作了适当修改;

正文后面添设“思考与练习”,希望有助于本书的教和学。

本书新增的第15章由时旭东编写,第20章由过镇海编写,钱稼茹教授审阅。过镇海负责全书各章的修订和定稿。

欢迎高校师生和工程技术人员们对改版后的本书继续提出批评指正。

过镇海

2003年5月

前言 (原版)

我校曾为结构工程专业和相近专业的硕士研究生开设“钢筋混凝土结构理论”、“混凝土强度理论和本构关系”等课程^[0-1~0-4]。经过多年的教学实践,教员数次更迭,课程的名称和教学大纲多有演变,教学内容的侧重点也有较大变化,近年已合并成为一门课程——钢筋混凝土原理。为此需要有相应的教材,以便教学。本书就是以作者在讲授该课程时的讲稿为基础所编写的。

本书共分五篇二十二章。

第一篇在阐述混凝土材料的基本特点和受力破坏机理的基础上,比较详细地介绍了混凝土在基本受力状态下的强度和变形规律,给出了高强混凝土、轻质混凝土和纤维混凝土等多种结构混凝土的主要力学性能。

第二篇全面地概括了混凝土在多轴应力状态下强度和变形的一般规律,分类介绍并比较了混凝土的多种破坏准则和本构模型,为用有限元方法分析二维和三维混凝土结构提供必要的物理模型和计算依据。

第三篇着重分析和解决钢筋和混凝土二者共同作用的一些重要性能,这是钢筋混凝土作为组合材料区别于单一结构材料的特殊问题。

第四篇给出钢筋混凝土基本受力构件(即压弯构件)的承载力、裂缝和变形,以及抗剪和抗扭构件等的一般性能规律、机理和分析方法等。

第五篇针对结构常遇的几种特殊受力状态,包括抗(地)震、疲劳、抗爆和抗高温等,介绍钢筋和混凝土的材料和基本构件的特殊性能反应及其分析方法。

在高校结构工程类专业的本科学习期间,有关钢筋混凝土结构的课程中,一般先简要介绍钢筋和混凝土的材性,后以较大篇幅着重说明各种基本构件的性能、计算方法、设计和构造要求等,较多地遵循结构设计规范的体系和方法,以完成结构设计为主要目标。

本课程则是以研究和分析钢筋混凝土结构的性能及其一般规律,并以解

决工程中出现的各种问题为目标。全书用很大篇幅系统地介绍主要材料——混凝土在单轴和多轴应力状态下,以及各种特殊条件下的强度和变形的一般规律,以此作为了解和分析构件性能的基础。在表述钢筋混凝土构件在各种受力条件下的性能时,强调以试验结果为依据,着重介绍其受力变形和破坏的全过程、各种因素的影响、机理分析、重要技术指标的确定、计算原则和方法等。希望读者在阅读本书后,不仅能理解钢筋混凝土材料和构件受力性能的一般规律,还能对分析和解决钢筋混凝土结构工程问题的一般途径和合理方法有所了解。

本书除了作为结构工程专业研究生课程的专用教材之外,也可以作为本科生有关课程教学的参考书,对于从事钢筋混凝土结构的科研、设计和施工管理的技术人员,可为研究、分析和处理工程问题作借鉴。

在本书成文之时,作者特别感谢历年来在清华大学土木工程系工作的老一辈教授们。他们的严谨治学精神和认真工作态度为后人作出了榜样,他们在钢筋混凝土结构学科方面的教学经验和科研成果丰富了我的学识,在许多方面构成了本书的基础。作者还感谢多年来在研究工作中合作的同事们和研究生们,他们的大力协作与辛勤劳动使研究成果充实了、并不断地改进了本课程的内容。当然,本书的正式刊印和出版还有许多编辑和审校专家的努力,在此一并致谢。

限于作者的学术水平和分析能力,书中的错误或不足之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

过镇海

1998年1月 于清华园

目 录

0	绪论	1
0.1	钢筋混凝土结构的发展和特点	1
0.2	本课程的特点	3

第一篇 混凝土的力学性能

1	基本力学性能	6
1.1	材料组成和材性特点	6
1.1.1	材料的组成和内部构造	6
1.1.2	材性的基本特点	8
1.1.3	受力破坏的一般机理	11
1.2	抗压强度	13
1.2.1	立方体抗压强度	13
1.2.2	棱柱体试件的受力破坏过程	14
1.2.3	主要抗压性能指标值	16
1.3	受压应力-应变全曲线	20
1.3.1	试验方法	20
1.3.2	全曲线方程	21
1.4	抗拉强度和变形	24
1.4.1	试验方法和抗拉性能指标	24
1.4.2	受拉破坏过程和特征	29
1.4.3	应力-应变全曲线方程	32
1.5	抗剪强度和变形	33
1.5.1	合理的试验方法	33
1.5.2	破坏特征和抗剪强度	36

1.5.3	剪切变形和剪切模量	37
2	主要因素的影响	40
2.1	荷载重复加卸作用	40
2.2	偏心受压	44
2.2.1	试验方法	44
2.2.2	主要试验结果	45
2.2.3	应力-应变关系	48
2.3	偏心受拉和弯曲受拉	49
2.4	龄期	53
2.5	收缩	55
2.6	徐变	58
2.6.1	基本概念	58
2.6.2	主要影响因素	61
2.6.3	计算公式	63
3	多种结构混凝土	65
3.1	高强混凝土	65
3.1.1	应用和制备	65
3.1.2	基本力学性能	67
3.2	轻质混凝土	72
3.2.1	分类	72
3.2.2	基本力学性能	73
3.3	纤维混凝土	76
3.3.1	分类	76
3.3.2	基本力学性能	77
4	多轴强度和本构关系	82
4.1	试验设备和方法	83
4.2	强度和变形的一般规律	86
4.2.1	二轴应力状态	86
4.2.2	三轴应力状态	90
4.2.3	不同材料和加载途径	97
4.3	典型破坏形态及其界分	100

4.4	破坏准则	103
4.4.1	破坏包络面的形状和其表达	103
4.4.2	破坏准则	107
4.4.3	多轴强度计算图	112
4.5	本构关系	115
4.5.1	线弹性类本构模型	116
4.5.2	非线(性)弹性类本构模型	119
4.5.3	其它类本构模型	127

第二篇 钢筋和混凝土的组合作用

5	钢筋的力学性能	130
5.1	混凝土结构中的钢材	130
5.2	应力-应变关系	133
5.2.1	软钢	133
5.2.2	硬钢	135
5.3	反复荷载作用下的变形	136
5.4	冷加工强化性能	140
5.4.1	冷拉和时效	140
5.4.2	冷拔	141
5.5	徐变和松弛	143
6	钢筋与混凝土的粘结	146
6.1	粘结力的作用和组成	146
6.1.1	作用和分类	146
6.1.2	组成	148
6.2	试验方法和粘结机理	149
6.2.1	试验方法	149
6.2.2	光圆钢筋	151
6.2.3	变形钢筋	153
6.3	影响因素	155
6.4	粘结应力-滑移本构模型	159
6.4.1	特征值的计算	160

6.4.2	τ -S 曲线方程	161
7	轴向受力特性	163
7.1	受压构件	163
7.1.1	基本方程	163
7.1.2	应力和变形分析 ($\epsilon_y < \epsilon_p$)	165
7.1.3	应力和变形分析 ($\epsilon_y > \epsilon_p$)	167
7.2	受拉构件	168
7.2.1	分析的基本方程	168
7.2.2	各阶段的应力和变形分析	169
7.2.3	最小配筋率	171
7.2.4	受拉刚化效应	171
7.3	一般性规律	173
8	约束混凝土	175
8.1	螺旋箍筋柱	175
8.1.1	受力机理和破坏过程	175
8.1.2	极限承载力	177
8.2	矩形箍筋柱	178
8.2.1	受力破坏过程	179
8.2.2	箍筋作用机理	181
8.2.3	应力-应变全曲线方程	183
8.3	钢管混凝土	188
8.3.1	受力特点和机理	188
8.3.2	极限强度计算	190
8.4	局部受压	193
8.4.1	受力特点和机理	193
8.4.2	强度值计算	198
9	变形差的力学反应	201
9.1	混凝土收缩	201
9.2	温度变形差	205
9.3	混凝土徐变	209

第三篇 基本构件的承载力和变形

10	压弯承载力	214
10.1	受力过程和破坏形态	214
10.1.1	单筋矩形梁	214
10.1.2	适筋、少筋和超筋梁	216
10.1.3	偏心受压(拉)柱	218
10.2	长柱的附加弯矩	222
10.3	极限承载力	226
10.3.1	计算公式	226
10.3.2	双向压弯构件	231
10.4	多种材料和构造的构件	233
11	受拉裂缝	239
11.1	裂缝的成因及控制	239
11.2	构件的开裂内力	242
11.3	裂缝机理分析	244
11.3.1	粘结-滑移法	244
11.3.2	无滑移法	246
11.3.3	综合分析	249
11.4	裂缝宽度的计算	252
12	弯曲刚度和变形	257
12.1	构件的变形及其控制	257
12.1.1	变形对结构的影响	257
12.1.2	截面刚度和构件变形	258
12.2	截面刚度计算	260
12.2.1	有效惯性矩法	261
12.2.2	刚度解析法	263
12.2.3	受拉刚化效应修正法	265
12.3	变形计算	267
12.3.1	一般计算方法	267
12.3.2	实用计算方法	259

13	弯剪承载力	272
13.1	无腹筋梁的破坏形态和承载力	272
13.1.1	典型(剪压)破坏形态	272
13.1.2	斜压和斜拉破坏形态	275
13.1.3	弯剪承载力及其影响因素	277
13.2	腹筋的作用和抗剪的成分	280
13.2.1	腹筋的作用	280
13.2.2	弯剪承载力的组成	282
13.3	极限弯剪承载力的计算	283
13.3.1	关于有限元方法	283
13.3.2	经验回归式	284
13.3.3	简化力学模型	287
13.4	多种受力状态和构造的构件	289
14	抗扭承载力	299
14.1	受扭构件的弹性解和塑性解	299
14.2	纯扭构件的承载力	303
14.2.1	无腹筋构件	303
14.2.2	有腹筋构件	304
14.2.3	配筋(箍)量的影响	305
14.3	复合受扭构件	306
14.3.1	压(拉)-扭构件	306
14.3.2	剪-扭构件	306
14.3.3	弯-扭构件	308
14.3.4	弯-剪-扭构件	310
14.4	极限承载力的计算	310
14.4.1	经验计算式	310
14.4.2	桁架模型	312
14.4.3	斜扭面极限平衡	314
15	构件分析的一般方法	317
15.1	有限元分析方法在钢筋混凝土中的应用	317
15.1.1	均质材料有限元分析的一般方法	317
15.1.2	钢筋混凝土结构有限元分析的特殊问题	319

15.2	构件截面分析	321
15.2.1	基本假设	321
15.2.2	基本方程	321
15.2.3	计算方法和流程	324
15.3	构件分析	326
15.3.1	基本方程	327
15.3.2	计算流程	329

第四篇 构件的特殊受力性能

16	抗震性能	334
16.1	结构抗(地)震性能的特点	334
16.2	单调荷载下的延性	335
16.2.1	延性的概念和表达	335
16.2.2	计算方法	337
16.2.3	塑性区转角	340
16.3	低周反复荷载下的滞回特性	342
16.3.1	滞回曲线的一般特点	342
16.3.2	多种受力状态的滞回曲线	345
16.3.3	恢复力模型	352
17	疲劳性能	354
17.1	混凝土的疲劳性能	354
17.1.1	试验结果和表达方法	354
17.1.2	影响因素和计算式	357
17.2	钢筋的疲劳性能	358
17.3	钢筋和混凝土粘结的疲劳性能	361
17.4	构件的疲劳性能及其验算	364
17.4.1	受弯疲劳	364
17.4.2	受(弯)剪疲劳	367
18	抗爆性能	370
18.1	结构抗爆炸的特点	370
18.2	快速加载的材料性能	373

18.2.1	试验设备和方法	373
18.2.2	钢筋	375
18.2.3	混凝土	376
18.3	构件性能	379
18.3.1	受弯构件	379
18.3.2	受压构件	382
19	抗高温性能	384
19.1	结构抗高温的特点	384
19.2	截面温度场	386
19.2.1	温度-时间曲线	386
19.2.2	材料的热工性能	387
19.2.3	热传导方程和温度场的确定	390
19.3	材料的高温力学性能	392
19.3.1	钢材的性能	392
19.3.2	混凝土的基本性能	395
19.4	混凝土的耦合本构关系	400
19.4.1	抗压强度的上、下限	401
19.4.2	应力下的温度变形和瞬态热应变	402
19.4.3	短期高温徐变	404
19.4.4	耦合本构关系	404
19.5	构件的高温性能和抗高温验算	406
19.5.1	压弯构件	406
19.5.2	超静定结构	410
19.5.3	结构的高温分析和近似计算	412
20	耐久性	416
20.1	混凝土结构耐久性的特点	416
20.1.1	工程中的问题	416
20.1.2	耐久性失效的特点	417
20.1.3	混凝土的孔结构	418
20.2	若干耐久性问题	420
20.2.1	渗透	420
20.2.2	冻融	421

20.2.3	碱-骨料反应	422
20.2.4	碳化	423
20.2.5	化学腐蚀	425
20.2.6	钢筋锈蚀	426
20.3	结构的耐久性设计和评估	429
20.3.1	耐久性设计	429
20.3.2	已有结构的耐久性检测和评估	431
思考与练习		433
参考文献		443

0.1 钢筋混凝土结构的发展和特点

自从世界上首次制成钢筋混凝土制品,并用于结构工程,至今略过百年。比起原始人类最早所用的土、木结构,文明史初期出现的砖石砌体结构,以及在工业革命后大量发展的钢结构等来说,钢筋混凝土结构是最年轻的结构工程成员。但是,它的性能和制作工艺不断地获得改善和提高,结构形式变化多样,应用范围逐渐地扩大。现今,在世界各国,特别是在我国,它已成为结构工程中最为兴旺发达的一族。

目前,最广泛使用钢筋混凝土结构的工程领域有:

建筑工程——各类民用和公共建筑,单层和多层工业厂房,高层和大跨建筑……

桥梁和交通工程——板式、梁式、拱形和桁架式等上部结构,墩台和基础,护坡,公路路面,铁道轨枕……

水利和海港工程——大坝,水电站,港口和码头,海洋平台,蓄水池和输水管,渡槽……

地下工程——隧道,地下铁道,矿井和巷道,各类结构和重大设备的基础,沉井,沉箱,桩基等,以及军用防御工事……

特殊结构——电视塔,输电杆塔,栈桥,筒仓,烟囱,机场跑道和停机坪等,甚至,钢筋混凝土已进入传统的钢结构独占的机械制造行业,占有一席之地,例如核反应堆的压力容器和安全壳、万吨级水压机、船舶、大型机床床身等。

钢筋混凝土结构的应用范围如此广泛,形式变化多样,其内在的必然性是钢筋和混凝土二者的材性互补,充分发挥各自的优越性。混凝土作为结构材料的主体,有着制作工艺简便、就地取材、价格低廉等显著优点;但是它的抗拉强度低,质脆易裂,只有加入适当形式和数量的钢筋后,才能提高结构的承载力和延性,保证其安全性和使用条件。同时,钢筋的一些缺点,如环境稳定性差,易腐蚀,不耐火等,当其埋入混凝土内后,受到保护而克服。钢筋和混凝土的有效组合形成了承载力强、整体性好、刚度大、抗腐蚀、耐火和适应性广的结构工程材料。

此外,混凝土材料无定形,只需制作和安装好模板,就能很容易地建造任何形体复杂、尺寸大小的结构而不受限制。钢筋混凝土结构既有大量不同形状的实心或空心截面的梁、板、柱等一维构件,又适合于平板、墙板、剪力墙、折板等二维板式结构,以及薄壳、厚壳和不规则的实体三维结构。

钢筋混凝土是由两种材料组合而成。它作为一种整体材料,又很容易通过不同构造方式与其它结构材料构成多种组合结构,如钢筋混凝土-型钢组合结构,钢筋混凝土-砖墙混合结构等,更扩大了它的适应性和应用范围,增加了结构方案的多样性。

由于钢筋混凝土结构应用日广,生产需求的巨大推动力促进了研究工作的全面开展,在结构材料、施工工艺、结构整体方案、构件性能、构造措施、计算理论和设计方法等方面都取得了丰富的成果和重大的进展:

针对混凝土材料的一些缺点,如自重重大,抗裂性差,强度增长缓慢,施工季节受限制等,已经从材料选择、配制和养护工艺、配筋构造、施工管理、预加应力、改进计算方法等方面采取措施后予以解决或大大改善;

为了提高混凝土的材料性能和减轻结构重量,研制和应用了高强混凝土($>C50$)、多种轻质混凝土($\gamma=500\sim1\,900\text{ kg/m}^3$)、纤维混凝土等,近年又发展了高性能混凝土;

改进和发展混凝土的制备工艺,混凝土内注入各种添加剂,以促使高强、早强,增加和易性、抗冻性,采用泵送混凝土、免振混凝土、喷射混凝土、耐热混凝土、耐酸混凝土等,以适应不同的施工和使用条件;

钢筋由低强钢发展为以中强和高强钢种为主,对低松弛钢和有防腐蚀涂层的钢筋使用日多,用高强和抗腐蚀的树脂或碳素纤维(筋)取代钢筋的研究已取得成功;

混凝土在简单受力和多轴应力状态下的性能,及其破坏准则和本构关系的研究已有很大进展,混凝土在荷载反复作用、高速加载、荷载长期持续,或高温状态下的强度和变形试验资料已经较多;

钢筋和混凝土之间的粘结性能,包括受力机理、强度和滑移的特征值、 τ - S 曲线的形状和计算模型等,经过多年的试验和理论研究已有较深的认识,工程中关心的钢筋锚固问题也有了比较稳妥的构造措施;

各种钢筋混凝土的梁、柱基本构件在静载、动载和拟动力荷载作用下的性能,是历来研究工作的重点,大部分都有明确的结论和成熟的计算方法,在灾难(如地震、爆炸、火灾等)情况下各种构件的力学反应,也有较多的试验和理论研究成果;

结构的设计原则和计算理论,初期是从钢结构移植过来的“弹性分析-允许应力”法,发展为单一安全系数的极限承载力法,以至现在基于概率统计可靠度分析的极限状态设计法;结构的内力计算,由最简单的古典弹性分析法,发展为考虑塑性变形的极限平衡法,以至进行结构受力非线性全过程分析。有限元分析方法和计算机技术的结合,为复杂结构的准确分析提供了强力的有效手段,在实际工程中已日益普及。