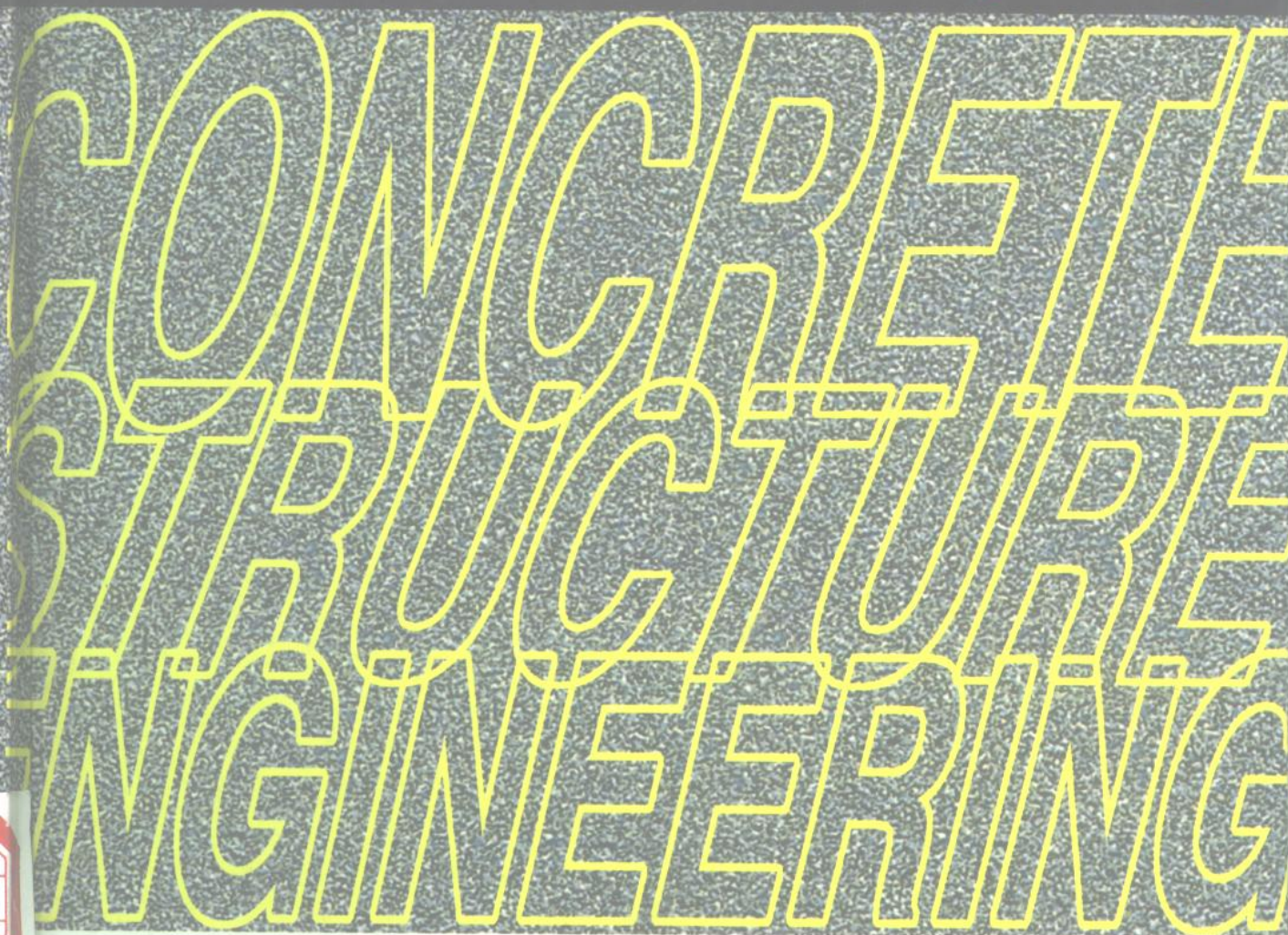


混凝土结构工程学

■ 江见鲸 主编
Edited by Jiang Jian-Jing

Concrete Structure Engineering



中国建筑工业出版社
China Architecture & Building Press

混凝土结构工程学

Concrete Structure Engineering

江见鲸 主编

Edited by Jiang Jian-jing

中国建筑工业出版社

(京) 新登字 035 号

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构工程学/江见鲸主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 1998

ISBN 7-112-03574-0

I. 混… II. 江… III. 混凝土施工 IV. TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 13673 号

本书全面系统地介绍了混凝土结构的设计计算理论、科研成果及工程应用前景。主要内容包括普通钢筋混凝土、预应力混凝土、钢管混凝土、钢管混凝土及钢-混凝土组合梁等结构的设计计算理论。对混凝土学科的某些新领域, 如混凝土结构的耐久性、双向板设计中的板条法等也作了较详细的介绍。

本书可供土建专业大专院校师生作为教学参考书, 也可供从事土建工程设计和施工的广大工程技术人员阅读参考。

混凝土结构工程学

Concrete Structure Engineering

江见鲸 王 强

Edited by Jiang Jian-jing

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 38¹/₂ 字数: 937 千字

1998 年 11 月第一版 1998 年 11 月第一次印刷

印数: 1—2 200 册 定价: 62.00 元

ISBN 7-112-03574-0

TU·2759 (8817)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书作者名单（按姓氏笔画顺序）

List of Authors (In Alphabetical Order)

叶列平，清华大学土木工程系

Ye Lie-ping, Department of Civil Engineering, Tsinghua University

江见鲸，清华大学土木工程系

Jiang Jian-jing, Department of Civil Engineering, Tsinghua University

杜拱辰，中国建筑科学研究院

Du Gong-chen, China Academe of Building Research

顾惠若，同济大学建筑工程系

Gu Hui-ruo, Department of Architectural and Construction Engineering, Tongji University

颜德姮，同济大学建筑工程系

Yan De-heng, Department of Architectural and Construction Engineering, Tongji University

Preface

Concrete structure is widely used in the world, especially in China. In writing this book, more efforts were paid in following aspects:

(1) Various types of concrete structures were discussed, such as reinforced concrete, prestressed concrete, steel concrete, steel tube filled concrete, and steel-concrete composite structures, etc.

(2) The design and calculation method was mainly illustrated based on Chinese code. Some other methods adopted in the codes of foreign countries, such as ACI318, BS8110, CEB-FIP model codes were also introduced to help reader to understand the behaviors of concrete structure, especially for that were not given in Chinese code.

(3) New development and updating topics in the past years, such as durability of concrete structures, unbonded prestressed concrete and strip method for slabs, etc, were introduced in the book.

(4) Much effort was paid in writing to present the basic mechanics and behaviors clearly. Likewise many examples were given to help readers to grasp the essential concept easily and be helpful for practical purpose.

The contributing authors are as follows,

Jiang Jian-jing, Ph. D, professor, writes chapter 1, 3, 5, 6, 7, 11 and 8 in part.

Ye Lie-ping, Dr. Eng, associate professor, writes chapter 9, 10.

Du Gong-chen, senior engineer, writes chapter 8.

Gu Hui-ruo, professor, writes chapter 4 and 2 in part.

Yan De-heng, Dprofessor, writes chapter 2 and 4 in part.

Defects may be existed in this book, the authors welcome any suggestion and comment.

Jiang Jian-jing

In Tsinghua University 1998. 1

目 录

第 1 章 绪论	1	和变形	46
1.1 混凝土结构的特点	1	2.4.2 单轴受拉的强度和变形	48
1.2 混凝土结构的发展简况	2	2.4.3 多轴应力状态下的强度和变形	48
1.2.1 混凝土发展的几个阶段	2	2.4.4 粘结锚固性能	52
1.2.2 房建工程	2	2.4.5 徐变性能	52
1.2.3 桥梁工程	3	参考文献	53
1.2.4 特殊结构与高耸结构	3	第 3 章 建筑结构设计方法	55
1.2.5 水利及其它工程	4	3.1 建筑结构设计理论的发展	55
1.3 混凝土结构发展展望	4	3.1.1 容许应力设计法	55
1.3.1 材料方面	4	3.1.2 破损阶段设计法	56
1.3.2 结构方面	5	3.1.3 多系数极限状态设计法	57
1.3.3 计算理论	6	3.1.4 基于可靠性理论的极限状态	
1.3.4 施工技术	8	设计法	57
1.3.5 耐久性	9	3.2 结构极限状态的基本概念	58
1.3.6 测试技术	10	3.2.1 结构的功能要求	58
参考文献	11	3.2.2 结构的极限状态	59
第 2 章 材料性能	12	3.3 结构可靠度的基本原理与计算方法	59
2.1 钢筋的物理力学性能	12	3.3.1 结构可靠度的基本概念	59
2.1.1 钢筋的强度和变形	12	3.3.2 结构可靠指标计算——中心点法	
2.1.2 钢筋的徐变和松弛	14		61
2.1.3 钢筋的疲劳强度	15	3.3.3 结构可靠指标计算——验算点法	
2.2 混凝土的物理力学性能	16		67
2.2.1 混凝土单轴受力的强度和变形	17	3.4 近似概率法在设计规范中的应用	75
2.2.2 简单受力条件下的混凝土强度	22	3.4.1 目标可靠度的确定	75
2.2.3 多轴应力状态下的强度和变形	28	3.4.2 分项系数	77
2.2.4 混凝土的徐变和收缩	33	3.4.3 荷载作用的统计分析	78
2.2.5 混凝土的疲劳强度	38	3.4.4 构件抗力的统计分析	84
2.3 钢筋与混凝土的粘结性能	39	3.4.5 我国《建筑结构设计统一标准》	
2.3.1 概述	39	的表达式	88
2.3.2 粘结强度与影响因素	40	3.4.6 国外规范的分项系数	92
2.3.3 局部粘结应力与相对滑移的关系		3.5 结构体系的可靠度	92
.....	43	3.5.1 几个基本术语的含义	92
2.3.4 变形钢筋在交变荷载作用下的		3.5.2 体系可靠度的界限估计法	96
粘结退化	44	3.5.3 PENT 法 (概率网络法)	99
2.4 高强混凝土的物理力学性能	46	3.5.4 蒙特卡洛模拟法	101
2.4.1 强度标准、单轴受力的强度		参考文献	104

第4章 混凝土构件正截面承载力

计算	105
4.1 受弯构件正截面承载力分析	105
4.1.1 试验研究	105
4.1.2 基本假定	106
4.1.3 受弯构件全过程分析的基本公式	107
4.2 受弯构件极限承载力的实用计算公式	108
4.2.1 受压区应力图的特征系数	109
4.2.2 我国规范的基本计算公式	111
4.2.3 矩形截面承载力计算	115
4.2.4 T形截面承载力计算	122
4.2.5 沿截面周边布置纵筋的受弯构件	127
4.2.6 双向受弯构件	129
4.3 中心受压构件承载力计算	133
4.3.1 概述	133
4.3.2 中心受压短柱的试验研究	133
4.3.3 长细比对承载力的影响	136
4.3.4 普通钢箍柱承载力计算	136
4.3.5 螺旋钢箍柱承载力计算	138
4.4 偏心受压构件承载力计算	140
4.4.1 试验研究	140
4.4.2 基本计算理论	142
4.4.3 偏压构件数值分析方法	146
4.4.4 计算极限承载力的基本公式	150
4.4.5 矩形截面偏心受压构件	156
4.4.6 T形及工形截面偏心受压构件	164
4.4.7 圆形及环形截面偏心受压构件	167
4.4.8 腹部均匀配筋的偏心受压构件	172
4.4.9 双向偏压构件	177
参考文献	183

第5章 剪切与扭转

5.1 无腹筋梁的抗剪性能	185
5.1.1 斜裂缝的形成	185
5.1.2 斜裂缝形成后的受力分析	186
5.1.3 破坏形态	188
5.2 有腹筋梁的抗剪性能	189

5.2.1 腹筋的作用	189
5.2.2 有腹筋梁的破坏形态	189
5.2.3 变角度桁架模型	189
5.3 抗剪承载力计算	190
5.3.1 影响抗剪承载力的因素	191
5.3.2 斜截面抗剪承载力计算公式	193
5.3.3 有轴力作用构件的斜截面承载力	196
5.4 一些国外规范的抗剪承载力计算公式	198
5.4.1 美国 ACI—318 规范	198
5.4.2 美国 BS8110 规范	199
5.4.3 欧洲 CEB—FIP 混凝土规范	200
5.4.4 前苏联 CHH—84 规范	201
5.4.5 日本建筑学会公式	202
5.4.6 不同国家规范计算公式比较	203
5.5 纯受扭构件承载力计算	203
5.5.1 两类扭转	203
5.5.2 矩形截面构件的开裂扭矩	204
5.5.3 受扭构件的受力分析	206
5.5.4 受扭承载力计算公式	209
5.6 弯剪扭构件的承载力计算	214
5.6.1 弯剪扭构件的破坏类型	214
5.6.2 弯剪扭构件的计算模型	215
5.6.3 斜弯破坏的极限平衡理论	218
5.6.4 弯剪扭构件配筋的规范算法	218
5.7 一些国外规范的计算公式	226
5.7.1 美国 ACI 规范	226
5.7.2 欧洲 CEB—FIP 模式规范	229
5.7.3 英国 BS8110 规范	230
参考文献	231

第6章 裂缝与耐久性

6.1 混凝土的裂缝与控制标准	232
6.1.1 产生裂缝的原因	232
6.1.2 裂缝的控制标准	233
6.1.3 国外一些规范的裂缝控制标准	236
6.2 裂缝宽度的计算	237
6.2.1 裂缝宽度的计算理论	237
6.2.2 裂缝宽度计算	248
6.2.3 一些国外规范的裂缝宽度计算	250
6.3 混凝土结构耐久性问题综述	255

6.3.1 耐久性问题的重要性	255	7.5 柱支承板的抗冲切计算	341
6.3.2 影响混凝土结构耐久性的主要因素	256	7.5.1 抗冲切计算的基本公式	341
6.4 混凝土的碳化	257	7.5.2 计算例题	342
6.4.1 碳化机理	258	参考文献	344
6.4.2 影响碳化的主要因素	258	第8章 预应力混凝土结构	346
6.4.3 减小混凝土碳化的措施	260	8.1 概述	346
6.4.4 混凝土碳化深度的计算	260	8.1.1 预应力的概念	346
6.5 钢筋的锈蚀	264	8.1.2 施加预应力的作用	347
6.5.1 混凝土中钢筋锈蚀机理	264	8.1.3 预应力混凝土的定义及分类	348
6.5.2 影响锈蚀的主要因素	265	8.1.4 预应力混凝土基本性状的分析和计算	349
6.5.3 防止钢筋锈蚀的措施	268	8.1.5 偏心距和曲线筋	355
6.5.4 钢筋锈蚀的预测模型	269	8.1.6 预应力混凝土的各个受力阶段	358
6.6 耐久性设计	271	8.2 预应力混凝土用的材料	359
6.6.1 概述	271	8.2.1 预应力钢材	359
6.6.2 结构工作环境分类	271	8.2.2 预应力钢材的性能	362
6.6.3 结构耐久性等级	273	8.2.3 预应力构件用的混凝土	365
6.6.4 耐久性极限状态计算	274	8.3 预应力工艺	365
6.6.5 保证耐久性的构造措施	275	8.3.1 各种预加应力方法	365
参考文献	279	8.3.2 先张法	366
第7章 双向板的设计与分析	281	8.3.3 后张法	366
7.1 双向板的弹性分析	281	8.3.4 预应力体系	368
7.1.1 弹性薄板弯曲的基本方程	281	8.3.5 无粘结预应力混凝土	370
7.1.2 简支矩形板的纳维 (Navier) 解	282	8.4 预应力损失	371
7.1.3 按弹性分析计算表格	284	8.4.1 概述	371
7.1.4 轴对称圆板的计算	287	8.4.2 最大张拉应力和预应力总损失值估计	373
7.1.5 弯矩系数法	289	8.4.3 混凝土弹性压缩引起的损失	374
7.2 柱支承的双向板分析	295	8.4.4 锚固损失	376
7.2.1 概述	295	8.4.5 摩擦损失	377
7.2.2 直接设计法	296	8.4.6 热养护损失	380
7.2.3 等代框架法	303	8.4.7 混凝土徐变损失	380
7.3 塑性铰线分析法	312	8.4.8 混凝土收缩损失	381
7.3.1 塑性铰线法的基本原理	312	8.4.9 钢材的松弛损失	381
7.3.2 机动法	313	8.4.10 分项计算的总损失值	382
7.3.3 静力法	317	8.5 受弯截面分析	385
7.4 板条法	320	8.5.1 概述	385
7.4.1 板条法的基本原理	320	8.5.2 预加力引起的混凝土应力	386
7.4.2 荷载的分区分配方法	321	8.5.3 荷载引起的混凝土应力	389
7.4.3 四边支承矩形板	323	8.5.4 预应力筋应力的变化	391
7.4.4 有自由边的矩形板	328	8.5.5 开裂弯矩	394
7.4.5 有孔洞的板	332	8.5.6 抗弯承载力	396
7.4.6 柱支承的双向板	338		

8.5.7 简化分析法.....	403	9.2.1 叠合梁和组合梁.....	460
8.6 部分预应力及非预应力配筋.....	407	9.2.2 掀起作用.....	462
8.6.1 部分预应力及全预应力.....	407	9.2.3 剪力连接件.....	463
8.6.2 部分预应力混凝土梁的荷载挠度曲线.....	408	9.2.4 完全组合作用与部分组合作用.....	463
8.6.3 部分预应力与全预应力的比较.....	410	9.3 组合梁的承载力计算.....	464
8.6.4 部分预应力的分类.....	411	9.3.1 钢-混凝土组合梁的受力性能 ..	464
8.6.5 非预应力筋的用途.....	412	9.3.2 计算方法及计算假定.....	465
8.6.6 开裂截面的弹性分析.....	413	9.3.3 受弯承载力计算.....	467
8.6.7 开裂截面的消压分析法.....	417	9.3.4 受剪承载力计算.....	467
8.6.8 无粘结部分预应力混凝土.....	418	9.4 剪力连接件设计.....	467
8.7 受弯截面设计.....	421	9.4.1 剪力连接件的构造要求.....	467
8.7.1 截面初步设计(弹性)	422	9.4.2 剪力连接件试验.....	469
8.7.2 弹性设计一般概念.....	424	9.4.3 剪力连接件的受力性能.....	470
8.7.3 弹性设计, 混凝土无拉应力.....	425	9.4.4 剪力连接件的承载力计算.....	472
8.7.4 弹性设计, 混凝土允许有拉应力.....	430	9.4.5 剪力连接件的数量及布置.....	475
8.7.5 极限设计.....	432	9.4.6 横向钢筋.....	475
8.7.6 截面形状与高跨比.....	434	9.5 施工阶段的计算.....	477
8.7.7 容许应力及分项系数取值讨论.....	436	9.6 组合梁的变形计算.....	479
8.8 剪切和端部设计.....	438	9.6.1 换算截面.....	479
8.8.1 剪切裂缝.....	438	9.6.2 使用阶段的变形计算.....	479
8.8.2 预应力的抗剪作用.....	439	9.7 部分剪力连接组合梁.....	480
8.8.3 斜裂缝剪力计算公式.....	439	9.8 连续组合梁.....	482
8.8.4 抗剪强度设计.....	441	9.8.1 概述.....	482
8.8.5 后张法端部承压计算.....	444	9.8.2 连续组合梁负弯矩区的性能及计算.....	482
8.8.6 先张法预应力传递长度.....	447	9.8.3 连续组合梁的内力.....	485
8.9 挠度、反拱、裂缝.....	449	9.8.4 连续组合梁的剪力连接计算.....	488
8.9.1 概述.....	449	9.8.5 正常使用阶段的挠度和裂缝计算.....	489
8.9.2 梁的荷载-挠度曲线	450	9.9 压型钢板-混凝土组合板	489
8.9.3 预应力梁的挠度计算.....	451	9.9.1 概述.....	489
8.9.4 裂缝控制.....	453	9.9.2 组合板的设计.....	490
参考文献	455	9.9.3 组合板的构造要求.....	495
参考文献	455	参考文献	498
第9章 钢-混凝土组合结构.....	457	第10章 钢骨混凝土结构	500
9.1 钢-混凝土组合梁	457	10.1 概述	500
9.1.1 钢-混凝土组合梁的基本原理 ..	457	10.1.1 钢骨与混凝土的共同工作	500
9.1.2 钢-混凝土组合梁的优缺点	457	10.1.2 钢骨混凝土梁的形式与构造	502
9.1.3 钢-混凝土组合梁的形式	458	10.1.3 钢骨混凝土柱的形式与构造	504
9.1.4 混凝土翼缘板的有效宽度.....	459	10.2 钢骨混凝土梁	505
9.1.5 钢-混凝土组合梁的一般要求 ..	460		
9.2 钢与混凝土的共同工作.....	460		

10.2.1	梁的受弯性能	505
10.2.2	受弯承载力计算	506
10.2.3	梁的受剪性能	514
10.2.4	斜截面受剪承载力计算	518
10.2.5	变形和裂缝计算	522
10.2.6	二阶段受力梁	527
10.3	钢管混凝土柱	529
10.3.1	轴心受压柱承载力	529
10.3.2	轴力和弯矩作用下柱的承载力	532
10.3.3	轴力和双向弯矩作用下柱的 承载力	545
10.3.4	框架柱的受剪承载力	547
10.3.5	柱脚设计	553
10.4	构件连接	559
10.4.1	梁柱节点	559
10.4.2	柱与柱的连接	571
10.4.3	钢管拼接	574
10.5	钢管混凝土剪力墙	578
10.5.1	钢管混凝土剪力墙的一般要求	578
10.5.2	钢管混凝土剪力墙的受力性能	579
10.5.3	钢管混凝土剪力墙的计算	581

参考文献	586
第 11 章 钢管混凝土柱	588
11.1 概述	588
11.1.1 钢管混凝土柱的优点	588
11.1.2 钢管混凝土柱的应用	588
11.2 钢管混凝土柱的基本性能	589
11.2.1 钢管混凝土柱承载力试验分析	589
11.2.2 钢管混凝土柱强度增强机理 ...	590
11.2.3 钢管混凝土的变形特性	591
11.2.4 轴心受压短柱的极限分析	591
11.3 钢管混凝土柱的承载力计算	593
11.3.1 承载力影响因素	593
11.3.2 《规程》推荐的计算公式	598
11.3.3 钢管混凝土结构的变形计算 ...	600
11.3.4 设计和施工的一般原则	600
11.4 国内外一些强度计算公式	601
11.4.1 日本建筑协会公式	601
11.4.2 英国 Bondale-Dark 公式	601
11.4.3 美国 Garden-Jacobson 公式 ...	602
11.4.4 前苏联公式	602
11.4.5 哈尔滨建筑大学公式	602
参考文献	606

第1章 绪 论

1.1 混凝土结构的特点

混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和各种其它形式的加筋混凝土结构。素混凝土结构常用于路面和一些非承重结构；预应力混凝土是配制了预应力钢筋的混凝土结构。在大多数情况下，混凝土结构是由钢筋和混凝土组成的钢筋混凝土结构。

钢筋混凝土结构由钢筋与混凝土两种材料组成，这两种材料结合可以取长补短，是非常理想的。

混凝土抗压强度较高而抗拉强度很低；钢材抗拉、抗压强度均很高，但作成细长条的钢筋，受压易压屈，几乎不能形成实际承重结构，两者组合，则可充分发挥两者的强度。

钢材在一般环境中易于锈蚀，维护很费事，但钢筋置于混凝土中，则不易受腐蚀，使耐久性大大提高，几乎不需要经常维护。

此外，钢材耐火性差，钢筋放在混凝土中则可提高其耐火性。

钢筋与混凝土能很好地共同工作，还基于钢筋（尤其是带肋钢筋）与混凝土之间有很好的粘结力，在外荷作用下能协调变形、共同工作。此外，钢材与混凝土的温度线膨胀系数很接近，钢为 1.2×10^{-5} ，混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$ ，当温度变化时，两者不会发生过大的相对变形而使两者间的粘结破坏。

两种材料结合形成一整体结构，可以有效地利用两种材料的强度，这可以用一组对比实验来说明。用 C20 混凝土制作两根梁，截面均为 $150\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，长 3000mm ，一根为纯混凝土梁，一根梁的下部放置两根 $\Phi 16$ 钢筋（Ⅰ级钢筋，直径 16mm ）。置梁于间距为 2500mm 的支座上作承载试验，在跨中逐步加集中荷载。素混凝土在跨中加载接近 10kN 时，梁底产生一条裂缝，并迅速向上发展，导致梁断裂破坏，最大承担荷载为 10.1kN 。而配有钢筋的梁，当荷载比 10kN 多一点时，梁底也产生裂缝，但裂缝微小。当荷载增加时，裂缝也向上发展，但较慢，梁仍可继续承载，直到荷载加到 55.7kN 时，梁底钢筋达到流限。稍后，裂缝上方的受压区混凝土被压碎，梁才告破坏。可见，配有钢筋的梁，承载力大大提高，而且破坏也不像素混凝土那样突然。

钢筋混凝土结构在实际结构中有广泛的应用，这是因为它有很多优点。其主要优点有：

(1) 强度高。和砖、木结构相比，其强度高。在一定条件下可以用来替代钢结构构件，达到节约钢材、降低造价的目的。

(2) 耐久性好。在一般环境条件下，钢筋受混凝土保护不易生锈，而混凝土的强度随着时间的增长还会有所增长，所以耐久性好。

(3) 耐火性好。混凝土是不良导体，遭火灾时，钢筋因有混凝土包裹，不致很快升温

而达到失去承载力的程度，因而其耐火性比钢结构和木结构好。

(4) 可模性好。混凝土可根据设计需要浇筑成各种形状和尺寸的结构，因此适用于形状复杂的结构，如箱形结构，空间薄壳等。

(5) 整体性好。整体浇筑的钢筋混凝土结构整体性好，对抗震、抗爆结构有利。

(6) 易于就地取材。混凝土原材料中有很大的比例是石子和砂子，产地广泛，便于就地取材。

但是，钢筋混凝土结构也有些缺点，主要有：

(1) 自重。这对建造大跨结构和抗震结构是不利的。

(2) 抗裂性差。开裂过早。普通钢筋混凝土结构在正常使用荷载下往往带裂缝工作，这对耐久性不利，并且限制了在防渗、防漏要求严格的容器、管道结构中的应用。

(3) 施工比较复杂，工序多，工期长，受环境影响大。如雨天施工，冬季施工，特干燥高温天气下施工等，必须采取特别措施以确保工程质量。

(4) 混凝土一旦局部破坏，补强修复工作比较困难。

我们在应用混凝土结构时必须充分发挥其优点，避免其缺点，并努力发展新的技术，使其缺点得以克服或改进。

1.2 混凝土结构的发展简况

1.2.1 混凝土发展的几个阶段

人造硅酸盐水泥的发明距今仅 170 多年，钢筋混凝土结构的制成也仅 150 年左右，与砖石结构、钢木结构相比，历史并不长，但发展非常迅速，至今为止几乎在所有土建工程建设领域均有广泛的应用。混凝土结构的发展，大体上可分为三个阶段。

第一阶段是从钢筋混凝土发明至本世纪初。这一阶段，所采用的钢筋和混凝土的强度都比较低，主要用来建造中小型楼板、梁、拱和基础等构件。计算理论则套用弹性理论，设计则采用容许应力的方法。

第二阶段是从本世纪初到第二次世界大战前后。这一阶段的重要成就是预应力混凝土的发明和应用，混凝土和钢筋强度有所提高，钢筋混凝土被用来建造大跨空间结构。在计算理论上，已开始考虑材料的塑性，如板的塑性铰线理论。钢筋混凝土截面已开始按破坏阶段计算破坏承载力。

第三阶段是二战以后直到现在。这一阶段的主要成就是高强混凝土和高强钢筋的出现及其广泛应用；采用装配式混凝土、泵送商品混凝土等工业化生产混凝土结构；许多大型结构工程的兴建，如超高层建筑，大跨度桥梁，特长的跨海隧道，高耸结构等。计算理论上已过渡到充分考虑混凝土和钢筋塑性的极限状态设计理论，在设计方法上已过渡到以概率论为基础的多系数表达的设计公式。

钢筋混凝土的发展非常迅速，应用极为广泛，成就非常突出。下面仅举一些例子加以说明。

1.2.2 房建工程

在房屋建筑中，工厂、住宅、办公楼等单层、多层建筑广泛采用混凝土结构。在 7 层以下的多层房屋中大多采用砌体结构为墙体，作为竖向承重构件，但其楼板几乎全都采用

了预制混凝土板或现浇楼盖。高层建筑是城市发展的产物。目前世界上最高的混凝土建筑为美国芝加哥的威克·德赖夫大楼，于1990年建成，65层，高296m。中国目前最高的混凝土建筑为广东国际大厦，总建筑面积约18万m²，主体为63层，高200.18m。南美最高的建筑为委内瑞拉的加拉加斯办公塔楼，高237m，是钢和混凝土的混合结构。澳洲（大洋洲）的最高建筑为澳大利亚墨尔本的里奥托中心，1986年建成，高243m，是混凝土结构。欧洲最高的建筑是德国在莱茵河畔建造的密思埃姆大厦，70层，高256m，香港最高的房屋为香港中心大厦，78层，高374m，也采用了混凝土结构。

在单跨度建筑方面，钢筋混凝土屋架，V型折板，薄腹梁已得到广泛应用。林同炎设计的旧金山地下展览厅，采用钢筋混凝土拱16片，跨度为83.8m，拱的推力达4.8万kN。意大利都灵展览馆拱顶由装配式构件组成，跨度达95m，非常宏伟、壮丽。由钢筋混凝土薄壳组成的屋盖更是风格多样，跨度可以很大。如美国西雅图金群体育馆采用圆球壳，跨度已达202m。南斯拉夫贝尔格莱德展览馆，采用带肋的圆球顶，直径约110m。澳大利亚悉尼歌剧院于1959年动工兴建，1979年竣工，主体结构由三组巨大的壳片（实为组合拱）组成，壳片曲率半径为76m。整个结构建于186m×97m的现浇钢筋混凝土基座上。建筑涂成白色，状如帆船，在蓝色的海洋上显得十分清秀、美丽，成为悉尼的标志性建筑，已成为世界著名风光建筑。

1.2.3 桥梁工程

在桥梁建筑方面，中小跨桥梁中很大一部分采用钢筋混凝土建造。结构形式有梁、拱、桁架等。有些大跨度桥虽已采用钢悬索和钢制斜拉索，但其桥面结构也有用混凝土结构的。预应力简支梁桥在20~50年代已广为应用。1976年洛阳黄河桥，共67孔由跨度为50m简支梁组成。1989年建成的厦门高集跨海大桥，主跨46m，桥体结构由平行的两个带翼箱形梁组成，跨过高崎—集美海峡。由钢筋混凝土建造拱桥有较大优势。1960年葡萄牙建成的波尔图拱桥，跨度达270m，拱顶厚3.0m，拱脚厚4.0m。1964年建成的巴西巴拉圭的巴拉那一约基拱桥，跨度达290m，其拱顶厚3.2m，拱脚处厚4.8m。格拉载斯威尔桥也是1964年建成的拱桥，拱跨达304.8m，拱顶厚4.26m，拱脚处厚7.0m。目前世界上跨度最大的混凝土拱桥是克罗地亚的克尔克Ⅱ号桥，形式为敞肩拱桥，跨度达390m，拱券厚6.5m，是等截面的。第二长的拱桥是日本于1989年建成的别府明礬桥，跨度为30m+351m+30m。我国最大的铁路拱桥为丰沙线上永定河七号桥，跨度达150m。公路拱桥在我国应用很广，江南水乡处处可见混凝土拱桥。1989年建成的四川涪陵乌江桥，全长351.83m，主跨200m，为拱结构，矢跨比为1/4，是我国目前跨度最大的拱桥。钢筋混凝土刚架桥在铁路、公路中也广为应用。如广东洛溪跨越珠江的洛溪大桥，采用刚架结构，桥面与墩身整体刚接，主跨达180m。我国西南交通重要干线南昆铁路上，有许多桥梁采用混凝土结构。其中清水河大桥，主桥三跨为72m+128m+72m，为预应力连续刚架结构。桥梁主跨128m，是我国铁路桥梁中的最大跨度，其中4号桥墩高100m，是世界上最高的铁路桥墩。超过500m跨度的大桥往往采用悬索桥或斜拉桥，但目前也常与混凝土结构混合使用。如香港青马大桥，跨度1377m，桥体为悬索结构，其中支承悬索的两端立塔高203m，是混凝土结构。又如上海杨浦大桥，主跨602m，为斜拉桥，其桥塔及桥面均为混凝土结构。

1.2.4 特殊结构与高耸结构

混凝土结构在道路、港口工程中也有大量应用。许多贮水池，贮仓构筑物，电线杆，下

水管道等等均可见到混凝土结构的应用。由于滑模施工方法的发展,许多高耸建筑可采用混凝土结构。目前世界上最高的人工建筑物,当推加拿大多伦多电视塔,塔高 553.3m (包括了钢天线部分),1975 年建成。其截面主体中间为圆筒,在塔楼以下有 Y 形肢翼相连。塔楼建于 335m 处,人们可以乘电梯到塔楼观光或小吃。第二高的建筑为莫斯科奥斯坦金电视塔,高 533.3m,1967 年建成。我国混凝土电视塔中超过 400m 高的有天津电视塔,高 415.2m,北京中央电视塔,高 405m。这两座电视塔均为截锥形。

1.2.5 水利及其它工程

在水利工程中,因混凝土自重大,其中砂石比例大而易于就地取材,故常用来修建大坝。如瑞士狄克桑斯坝,坝高 285m,是目前世界上最高的重力坝,坝顶宽 15.0m,坝底宽 225m,坝长 695m,库容量 4 亿 m^3 。美国胡佛坝,为 1936 年建成的混凝土重力坝,高 221m,坝顶长 379m,顶厚 14m,底宽 202m。这在混凝土建坝史上被认为是一个里程碑,因兴建该坝时,采用分块浇注法,解决了大体积混凝土的收缩和温度应力问题,为以后修建大坝提供了成功经验。巴西和巴拉圭共有的伊泰普水电站,装机容量为 1260 万千瓦,是目前世界上装机容量最大的水电站。其主坝高 196m,长 1060m,为混凝土坝。我国龙羊峡水电站是青海省内黄河上游的一座大电站,拦河大坝为混凝土重力坝,坝高 178m,坝顶长 393.34m,坝顶宽 15m,底宽 80m,于 1989 年全部竣工。这是在高寒地区建成的重力坝,技术难度大,其高度在世界上列第六位。

混凝土结构在其它特殊的结构中也有广泛的应用。如地下铁道的支护和站台工程,核电站的安全壳,机场的跑道,填海造地工程,海上采油平台等。这里就不一一介绍了。

1.3 混凝土结构发展展望

混凝土已成为现代最主要的工程结构材料之一,中国更是广泛应用这一材料的国家。目前,我国水泥的年产量 1997 年已超过 4 亿吨,居世界第一位。可以预见,钢筋混凝土结构仍将是一种重要的工程材料,并在材料、结构、施工技术和计算理论等各个方面得到进一步发展。

1.3.1 材料方面

组成混凝土结构的主体材料混凝土主要发展方向是高强、轻质、耐久、提高抗裂性和易于成型。

高强混凝土是发展方向。混凝土强度高可减少断面,减轻自重,提高空间利用率。目前国内常用混凝土的强度等级为 $20\sim 40\text{N/mm}^2$,国外常用的强度等级在 60N/mm^2 以上。在实验室内,我国已制成 C100 以上的混凝土,美国已制成 C200 混凝土。估计到 21 世纪,常用混凝土强度可达 100N/mm^2 以上。在特殊结构(如高耸、大跨、薄壁空间结构等)的应用中,可配置出 400N/mm^2 左右的高强混凝土。目前,高强混凝土的塑性不如普通强度的混凝土,研制出塑性好的高强混凝土仍然是当今要研究的问题。

外加剂的发明与应用为混凝土性质的改善起到了很大的作用。目前的外加剂主要有四类,(1)改善拌合物流动性的外加剂,如各种减水剂,增塑剂;(2)调节混凝土凝结时间的外加剂,如缓凝剂、早强剂、速凝剂等;(3)改善混凝土耐久性的外加剂,如引气剂、防水剂,阻锈剂等;(4)改善混凝土其它性能的外加剂,如加气剂,防冻剂,膨胀剂,着色

剂等。今后一段时间各种高性能的复合型外加剂还会不断地被研制出来。尤其是高强度、自流密实混凝土的外加剂，可使混凝土免去振捣工序，对混凝土工艺会产生重大影响。地下工程、隧道支护中使喷射混凝土早凝结、少回落，但在喷射前又要有大流动性的外加剂也是需要进一步研制的。

粉煤灰等工业废料的利用目前已有一定成效，但其质量稳定性，利用率等还有待进一步开发研究。

纤维混凝土因改善了混凝土的抗裂性、耐磨性及延性，在一些有特殊要求的工程中已开始应用。目前增强纤维主要是钢纤维，但问题是钢纤维生产加工和拌合比较麻烦，今后随着生产工艺的改进，纤维混凝土可望在高层、桥梁、地下、水工、核电站等各个方面进一步推广应用。

随着化工、高分子聚合物生产的发展，掺入高分子化合物混凝土，如浸渍混凝土、聚合物混凝土、树脂混凝土等会得到发展应用，目前大多处于实验室研究阶段。实验室研究显示，这类混凝土不仅抗压强度好，抗拉性能也好，而且耐磨、抗渗、抗冲击，耐冻等性质均大大优于普通混凝土。随着聚合物混凝土的逐步推广应用，必然会引起新的结构的发展。

为了减轻混凝土结构的自重，国内外都在大力发展轻质混凝土。轻质混凝土主要采用轻质骨料。轻质骨料主要有天然轻集料（如浮石、凝灰岩等），人造轻骨料（页岩陶粒，粘土陶粒，膨胀珍珠岩等）和工业废料（如炉渣、矿渣粉煤灰陶粒等）。轻质混凝土的密度小于 1800kg/m^3 。瑞典已经研制成超轻混凝土，密度比水小，可作屋面板和墙板。轻质混凝土因自重小，有利于结构抗地震，吸收冲击能快，隔热隔声性能好。对于利用工业废料的轻质混凝土可以变废为用，减少占用农田，减轻环境污染，应大力推广应用。轻质混凝土强度等级一般为C15~C20，高强度轻质混凝土已在实验室中配制成功，今后会进一步得到应用。

碾压混凝土是近期发展起来的一种新型混凝土，可用于大体积（如大坝，大型设备基础等）混凝土及公路路面等。日本于1978年采用碾压混凝土建造重力坝。碾压混凝土水灰比很低，坍落度极小，在未凝结前其性能与普通混凝土大不相同，施工中不用振捣，而用大型碾压机碾压，凝固后其性能又与普通混凝土相近。因为这种混凝土不用振捣，工序简单，机械化程度大大提高，施工条件改善，施工工期可大大缩短。这些优点使得碾压混凝土会得到推广应用。碾压混凝土分层碾压，层间结合需要进一步研究，碾压混凝土中采用钢纤维增强，可以改善碾压混凝土的抗压、抗拉强度及压缩韧性和耐磨性。

对于钢材，主要是向高强、防腐方向发展。目前普通钢筋的强度已达 420N/mm^2 ，在预应力混凝土中的高强钢丝强度已达 1800N/mm^2 ，今后钢筋及钢丝的强度可望有进一步提高。为了增强结构的耐久性，钢筋的防锈、防腐问题日益得到重视，研制出低成本、高抗腐蚀性能的钢筋是主要课题。目前普通钢筋中，Ⅰ级、Ⅱ级钢筋均为带肋钢筋，粘结力较好。而高强钢丝往往是光圆的，如何生产粘结力好的高强钢丝是值得研究的课题。

1.3.2 结构方面

钢和混凝土组合结构是值得注意的发展方向。型钢与混凝土组合用于桥梁、房屋建筑已有一段历史。在约束混凝土概念的指导下，外包钢混凝土柱已在火电厂主厂房，石油化工企业的构筑物中得到应用。钢管混凝土在地下铁道，桥梁，高层中已开始广泛应用，目

前我国已经有了这方面的设计和施工规程。钢-混凝土组合结构、钢筋混凝土（劲性钢筋混凝土）和钢管混凝土由于其具有强度高，截面小，延性好的优点，加之施工简化（钢筋可代替支架，钢板、钢管可作模板使用等）、缩短工期，在以后必将得到更加广泛的应用。

预应力混凝土是 20 世纪工程结构的重大发明之一，现在已有先张法、后张法、无粘结预应力等技术。预应力技术在将来还会有大的发展。在锚具方面应发展高效而耐久的锚夹具。在施加预应力方面也会有新技术出现，如近期在国内外已研究将预应力用于组合结构，方法是将带有拱度的工字形钢梁，在加载状态下在下翼缘浇筑混凝土，当混凝土达到一定强度后卸载，这样下翼缘的混凝土即受到预压力。这种方法不需要锚夹具，具有应用前景。又如体外张拉预应力索的技术，开始只用于补强和加固，目前也已开始用于新结构，因体外张拉预应力筋可避免制孔、穿索、灌浆等工序，并且在发现问题时易于更换预应力索。对于预应力技术，不论在张拉方法、形式、锚夹具的改进等方面，预应力技术还会有进一步的发展。

在工程结构的实践上，许多跨世纪的工程和大型、巨型工程都将应用混凝土结构。人口增长，城市发展，土建工程会向空间发展，如超高层建筑等；向地下发展，如地下交通、地下商场等；向海洋发展，如填海造田、人工岛等，这些工程的建设必将扩大混凝土的应用，建造出更加宏伟的建筑来。现在美国已有人把月球上取回的土煅烧制成水泥，设想在月球上建造房屋及人类活动中心，大部分材料可就地取材，只要带上水就可制造混凝土。至于越海、越江隧道，环球地铁的建筑均离不开混凝土结构的支护。可以展望混凝土结构在未来的工程建设中会发挥更大的作用。

1.3.3 计算理论

钢筋混凝土分析方法一方面与数学、力学的发展有关，另一方面与实验技术的进步有关。随着计算机应用的普及和有限元方法的进展，钢筋混凝土结构的非线性有限元分析已经开始应用并将继续扩大。钢筋混凝土有限元分析针对混凝土的特点，有以下几个问题需进行深入研究。（1）混凝土的破坏准则。这是关于混凝土在不同比例三向应力作用下的破坏准则。已知的古典强度理论大多包含 1~2 个参数，难以确切反映混凝土的破坏规律。对此，国内外学者提出了不少计算准则，其中参数有 3~8 个。尽管如此，一些学者在高三轴压力下破坏曲线的走向还有不同观点，更不用说比较一致的表达式了。此外，为考虑三轴应力下塑性变形及应力软化的特点，有许多学者建议在应变空间建立破坏准则，但这有待于进一步实验证实。（2）混凝土的本构关系。如果说破坏准则在一定范围也比较成熟的话，则本构关系需要研究的问题更多。在不同应力比下加载时各应力之间的相互作用，非比例加载下不同应力路径的本构关系，卸载再加载、尤其是反向加载的应力应变关系，都还不能说已经搞得很清楚。现在比较常用的是将一维 $\sigma-\epsilon$ 关系在某种相当条件下推广到二维或三维，这当然是简单易行的，但显然还比较粗糙，有待进一步改进。（3）钢筋与混凝土间的粘结关系，这是两种材料共同作用的基础，在钢筋混凝土有限元分析中起重要作用。但是这种粘结作用的物理关系还没有搞得很清楚，比较多的是基于拔出试验，但拔出试验是在一段长度内的综合结果，很难反映真正的 $\tau-s$ （粘结-滑移）关系，由于钢筋与混凝土间难以非破坏地嵌入测试元件， $\tau-s$ 关系就很难直接测定。另外在有限元模型上还有困难，目前最常用的是双弹簧模型或双滑片（无厚度四边形滑移单元）模型，但这又很难用于三维分析。（4）钢筋的本构关系。与混凝土相比钢筋的本构关系比较简单，但在屈服以后如何简

化则也还有待进一步研究。(5) 裂缝处理。混凝土开裂后对结构性能有很大影响。由于裂缝出现有一定的随机性,并且在第一条裂缝出现后其周围应力释放,要隔一定距离才能产生新的裂缝,此外,裂缝分布是不规则的,这些都给裂缝处理带来很大困难。目前,处理裂缝的主要方法有两种,一种是处理为单个裂缝,有裂缝就设为单元边界;另一种是弥散裂缝,用单元开裂来代替单独裂缝。但对于一般结构来讲要一条一条裂缝去计算,几乎是不现实的。用弥散法去处理裂缝则与单元划分有关。因而对裂缝的处理是国内外学者仍很关心的问题。(6) 时效问题。对长期荷载来讲,应考虑混凝土的收缩和徐变,但这无论对收缩徐变本身变化规律,还是从其计算方法来讲,都还不能说已经研究得很清楚了。这方面的工作需要作更多的努力。

对于框架、板壳,可用极限平衡法求其破坏荷载。在板、壳中的塑性铰线法已广为应用,但其求得的极限荷载是上限,另一种方法,“板带法”,求得的是下限,对设计来讲是偏于安全的。这一方法在英国已列入规范,在美国也已写入教科书,不久可与塑性铰线法一样得到推广应用。此外用极限平衡法求得极限荷载可估计承载力的安全度,但在使用荷载下如何保证使用极限状态还是一个需要认真研究的问题。

对于钢筋混凝土基本构件的计算,在单种荷载作用下的强度计算,基本上已形成体系,有关规范给出的计算公式也可满足工程要求。但有关变形的计算仅限于受弯构件,或还有压弯构件。裂缝计算理论不成熟,统计又很离散,现行规范也只限于受弯构件,并且其精度不能令人满意。这些都有待研究改进。钢筋混凝土在复合受力或反复荷载下的计算理论相当复杂,实验数据又不是很充分,其设计建议还相当粗略,今后在这方面的研究会有更多的成果。美籍华人徐增全教授提出统一桁架理论,将平衡、协调和混凝土的应力应变关系包括软化段组合在这一理论之中,故又称软化桁架理论,这有可能解决剪力传递强度,对深梁、剪力墙、墙板的受剪,对受剪、扭复合受力构件的计算提供了一条有效途径。美国学者 Kotsovos 提出了一个应力途径的概念,即结构承担的荷载总是通过内部的拉力和压力传到支座上去的,如在这一途径上配置合适的钢筋,拉力区可直接配受拉筋,压力区可配压筋或约束混凝土的钢筋就可提高或改善结构的强度。这一方法有相当的直观性,其有效性也部分地为实验所证实。这是值得进一步研究的一种新理论。

在可靠度方面,已经经历了基于经验的单一安全系数法,基于部分统计数字的多系数法,目前又采用了以概率论为基础的分项系数法。实际上工程结构的可靠度包括在设计、施工和使用维护的全过程中,而目前的规范大多限于设计阶段。有许多学者提出了全过程可靠度的思想。此外,影响结构的可靠度,不确定的因素很多,从性质上大致可以分为随机性、模糊性和信息不完全性。目前,在可靠度的设计方法中,比较多的只是考虑了事物的随机性。随机性是事件在一次试验中,并不能预计出现某种必然的结果,而在重复多次的试验中会呈现统计的规律性。例如,住宅楼面上有多大荷载,是有随机性的,但经过大量的统计,我们可以确定其平均值及标准差,从而可在具有一定保证率的前提下推算其设计取用荷载的标准值。处理随机性的数学方法是概率论、数理统计和随机过程等。现在一些国家及我国建筑结构中已经引用以概率论为基础的可靠性设计原则。但实际应用还是很初步的,因为许多因素的统计资料不全,甚至还未进行系统统计。我国有些部门还停留在单一综合安全系数设计法的阶段,对概率论应用和实际计算方法的改进均需进行更深入、仔细的研究。