



高等学校土木工程专业“十三五”规划教材
全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

混凝土结构设计原理

柴文革 李文利 主编

中国建筑工业出版社

高等学校土木工程专业“十三五”规划教材
全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

混凝土结构设计原理

柴文革 李文利 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构设计原理/柴文革, 李文利主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 1

高等学校土木工程专业“十三五”规划教材. 全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

ISBN 978-7-112-22881-2

I. ①混… II. ①柴… ②李… III. ①混凝土结构-结构设计-高等学校-教材 IV. ①TU370. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 246942 号

本书根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》及最新的国家规范和标准编写。本书主要讲述混凝土结构设计的基本原理和方法, 内容包括: 绪论、混凝土结构材料的力学性能、混凝土结构设计方法、受弯构件正截面承载力计算、受弯构件斜截面承载力计算、受压构件截面承载力计算、受拉构件截面承载力计算、受扭构件扭曲截面承载力计算、混凝土构件正常使用极限状态设计、预应力混凝土构件设计等。

每章前面列出了本章提要、学习要求, 每章后有反映相应重点概念和计算方法的小结及大量思考题与习题, 便于巩固相关知识点。本书还通过二维码提供配套数字资源, 主要内容为相关图表及思考题与习题的参考答案。

本书可作为高等院校土木工程专业及相关专业的专业基础课教材, 也可用作土建类专业继续教育教材, 并可供从事混凝土结构设计、制作及施工等工作的工程技术人员参考。

为了更好地支持教学, 本书作者制作了教学课件, 有需要的读者可发送邮件至: 2917266507@qq.com 免费索取。

* * *

责任编辑: 聂 伟 吉万旺 王 梅

责任校对: 王 瑞

高等学校土木工程专业“十三五”规划教材
全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

混凝土结构设计原理

柴文革 李文利 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 28½ 字数: 689 千字

2018 年 12 月第一版 2018 年 12 月第一次印刷

定价: 58.00 元 (附配套数字资源及课件)

ISBN 978-7-112-22881-2

(32994)

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)

前 言

“混凝土结构设计原理”是高等学校土木工程专业的核心课程，也是土木工程专业学生最早接触的专业基础课程之一。该课程所涉及的混凝土和钢筋的材料力学性能、各种钢筋混凝土基本构件的设计原理和设计方法，是学习“混凝土结构设计”“高层建筑结构”“桥梁工程”“基础工程”等后续专业课的基础，是土木工程专业学生将来从事工程设计、工程施工和管理工作中所必需的专业技术基础知识。

本教材根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》及《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010（2015年版）进行编写，主要内容包括：绪论、混凝土结构材料的力学性能、混凝土结构设计方法、受弯构件正截面承载力计算、受弯构件斜截面承载力计算、受压构件截面承载力计算、受拉构件截面承载力计算、受扭构件扭曲截面承载力计算、混凝土构件正常使用极限状态设计、预应力混凝土构件设计。

本教材本着必需、够用、实用原则，以介绍混凝土结构设计计算基本理论与方法为主，同时兼顾对规范条文的解释、对构造要求等应用层面问题的理解与应用。坚持以实际应用为导向，理论知识以够用为准，减少理论推导过程，强调工程概念和应用；教材所选内容力求科学性、思想性、应用性和先进性，同时兼顾与相关学科及课程的联系，有选择地吸收本学科的新理论、新知识和新技术；合理地组织教材内容，注意讲清基本概念、基本知识和基本方法，对书中的重点、难点的叙述力求详尽透彻，适当地分散难点和分解难点，符合认识规律的要求，便于教学。

各章配有大量图表和实例，直观形象，针对性强，便于读者学习掌握混凝土结构设计的基本原理和方法，并进行一般混凝土结构构件设计工作。

每章前列出了本章提要、学习要求，每章后有反映相应重点概念和计算方法的小结，及大量思考题与习题，便于巩固相关知识点。本书还通过二维码提供配套数字资源，主要内容为相关图表及思考题与习题的参考答案，可以辅助学习。

本教材的编写人员具有丰富的教学经验和工程实践经验，主编为北方工业大学柴文革副教授、北京城市学院李文利教授。编者以教学研究为先导，做了大量调研工作，吸收中外教材的先进经验，引进国内外最新科研成果，对教材内容进行了精心打磨。

哈尔滨工业大学硕士研究生柴嶝生、水晶石教育北京中心柴嶝阅参与了本教材的编写。柴嶝生为本教材提供了部分例题解答与习题答案，柴嶝阅负责本教材所用公式的输入与图表的绘制。

限于水平，本教材中有不妥之处敬请专家、同仁和广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1	本章学习要求	86
本章提要	1	4.1 概述	86
本章学习要求	1	4.2 受弯构件的正截面受力性能 试验分析	89
1.1 混凝土结构的基本概念	1	4.3 受弯构件正截面承载能力 计算方法	96
1.2 混凝土结构的发展简况及 其工程应用	7	4.4 单筋矩形截面受弯承载力 计算	101
1.3 本课程的任务和特点	16	4.5 双筋矩形截面受弯承载力 计算	110
本章小结	18	4.6 T形截面受弯承载力计算	119
思考题与习题	19	4.7 受弯构件的基本构造要求	128
第 2 章 混凝土结构材料的力学性能 ..	21	本章小结	131
本章提要	21	思考题与习题	132
本章学习要求	21	第 5 章 受弯构件斜截面承载力计算 ..	142
2.1 钢筋	22	本章提要	142
2.2 混凝土	30	本章学习要求	142
2.3 钢筋与混凝土的粘结作用	49	5.1 概述	142
本章小结	53	5.2 受弯构件斜截面受剪性能的 试验研究	143
思考题与习题	54	5.3 受弯构件斜截面承载能力 计算公式	152
第 3 章 混凝土结构设计方法	59	5.4 斜截面受剪承载力的设计 计算方法	157
本章提要	59	5.5 受弯构件斜截面构造要求	163
本章学习要求	59	5.6 伸臂梁设计实例	176
3.1 结构上的作用、作用效应及 结构抗力	59	本章小结	182
3.2 结构的功能要求和极限状态	61	思考题与习题	183
3.3 概率极限状态设计方法	67	第 6 章 受压构件截面承载力计算	191
3.4 实用设计表达式	70	本章提要	191
本章小结	80	本章学习要求	191
思考题与习题	81		
第 4 章 受弯构件正截面承载力计算	86		
本章提要	86		

6.1 概述	192	计算	277
6.2 轴心受压构件正截面承载力 计算	193	8.3 弯剪扭构件的承载力计算	289
6.3 偏心受压构件的受力性能 分析	203	8.4 在轴向力、弯矩、剪力和扭矩 共同作用下钢筋混凝土矩形 截面框架柱受扭承载力计算	301
6.4 矩形截面偏心受压构件正截面 承载力计算基本公式	212	8.5 协调扭转的钢筋混凝土构件 扭曲截面承载力计算	304
6.5 非对称配筋矩形截面偏心受压 构件正截面受压承载力计算	215	8.6 受扭构件的构造要求	305
6.6 对称配筋矩形截面偏心受压 构件正截面受压承载力计算	230	本章小结	306
6.7 T形和I形截面受压构件的 计算	234	思考题与习题	307
6.8 偏心受压构件的斜截面受剪 承载力计算	242	第9章 混凝土构件正常使用极限 状态设计	313
6.9 双向偏心受压构件的计算	245	本章提要	313
6.10 受压构件的一般构造要求	246	本章学习要求	313
本章小结	249	9.1 概述	314
思考题与习题	251	9.2 钢筋混凝土受弯构件的变形 验算	317
第7章 受拉构件截面承载力计算	261	9.3 钢筋混凝土构件正截面裂缝 宽度验算	329
本章提要	261	本章小结	342
本章学习要求	261	思考题与习题	342
7.1 概述	261	第10章 预应力混凝土构件设计	350
7.2 轴心受拉构件正截面承载力 计算	262	本章提要	350
7.3 偏心受拉构件正截面承载力 计算	263	本章学习要求	350
7.4 偏心受拉构件斜截面受剪 承载力计算	270	10.1 概述	350
本章小结	272	10.2 预应力损失	365
思考题与习题	272	10.3 后张法构件端部锚固区的 局部受压承载力计算	373
第8章 受扭构件扭曲截面承载力 计算	276	10.4 预应力混凝土轴心受拉构件 特征受力状态分析	377
本章提要	276	10.5 预应力混凝土轴心受拉构件的 设计计算	385
本章学习要求	276	10.6 预应力混凝土受弯构件特征 受力状态分析	392
8.1 概述	276	10.7 预应力混凝土受弯构件的设计 计算	401
8.2 纯扭构件的扭曲截面承载力 计算	277	10.8 预应力混凝土构件构造	

要求	419	附录 3 钢筋的公称直径、公称截面 面积及理论重量	442
本章小结	424	附录 4 《混凝土结构设计规范》 GB 50010—2010 (2015 年版) 其他相关规定	444
思考题与习题	425	参考文献	447
附录 1 《混凝土结构设计规范》 GB 50010—2010 (2015 年版) 的术语与符号	435		
附录 2 《混凝土结构设计规范》 GB 50010—2010 (2015 年版) 规定的材料力学性能指标	439		

第 1 章 绪 论

【本章提要】

本章讲述混凝土结构的一般概念及分类，钢筋和混凝土协同工作基础，以及混凝土结构的优缺点。介绍混凝土结构在房屋建筑工程、桥梁工程、水利工程及其他工程中的应用，混凝土结构的发展前景，包括在材料、结构、施工技术、计算理论、加固技术等方面的发展概况。还介绍了混凝土结构课程的特点和学习方法，以及指导工程设计的混凝土结构设计规范发展的概况。

【本章学习要求】

1. 掌握混凝土结构的一般概念，钢筋和混凝土两种材料共同工作的基础。
2. 理解混凝土结构的特点及其类型。
3. 了解混凝土结构在土木工程中的发展及应用概况。
4. 了解混凝土结构课程的基本内容，本课程与其他课程的关系及学习方法，混凝土结构设计规范的重要性。

本章学习重点：钢筋和混凝土能够协同工作的条件，混凝土结构课程的特点和学习方法。

1.1 混凝土结构的基本概念

1.1.1 混凝土结构概念及分类

混凝土结构是以混凝土为主要材料制成的结构，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、型钢混凝土结构、钢管混凝土结构和预应力混凝土结构和各种其他形式的加筋混凝土结构等。

常见的混凝土结构构件形式见图 1-1。

素混凝土结构是指无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构。其承载力低、性质脆，很少用来作为重要的承力结构。

钢筋混凝土结构是指配置受力钢筋的普通混凝土结构。钢筋混凝土结构在工程中应用最为广泛。本书主要内容将围绕钢筋混凝土结构展开，重点讲述钢筋混凝土结构的材料性能、设计原则、计算方法和构造措施。

型钢混凝土结构是指用型钢或用钢板焊成的型钢作为配筋的混凝土结构。型钢混凝土

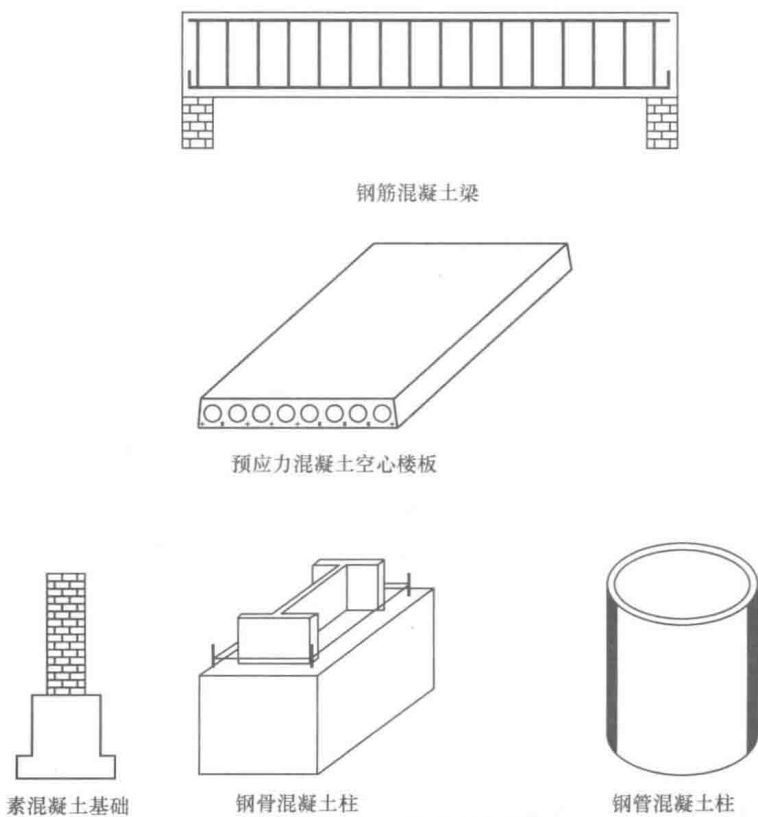


图 1-1 常见的混凝土结构构件形式

结构又称为劲性混凝土结构或钢骨混凝土结构。型钢混凝土结构承载能力大、抗震性能好，但耗钢量较多，可在高层、大跨或抗震要求较高的建筑中采用。图 1-2 为用型钢作为混凝土梁配筋的截面形式。图 1-3 为用型钢作为混凝土柱配筋的截面形式。

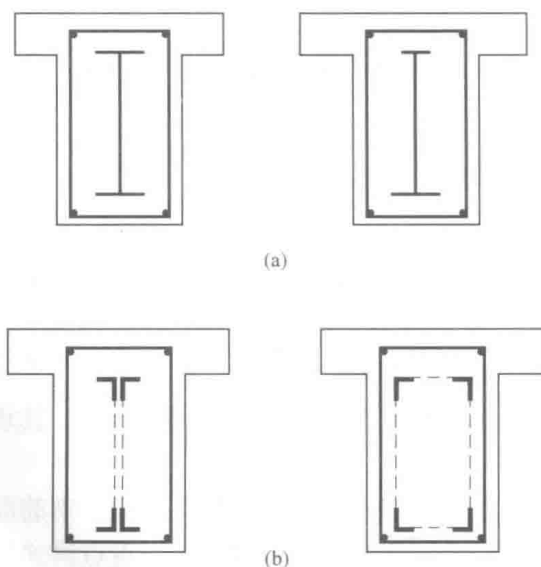


图 1-2 型钢混凝土梁截面形式

(a) 实腹式型钢混凝土梁截面；(b) 空腹式型钢混凝土梁截面

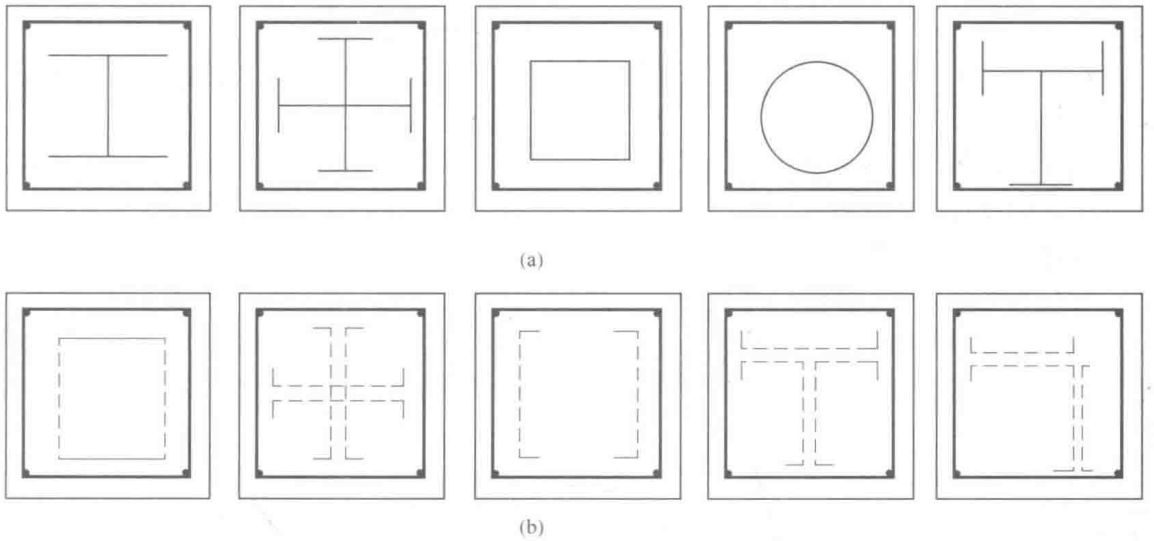


图 1-3 型钢混凝土柱截面形式
(a) 实腹式型钢混凝土柱截面；(b) 空腹式型钢混凝土柱截面

钢管混凝土结构是在钢管内浇注混凝土而形成的，且钢管及其核心混凝土能共同承受外荷载作用的混凝土结构。按截面形式不同，可分为圆钢管混凝土，方形、矩形钢管混凝土和多边形钢管混凝土等。钢管混凝土结构的构件连接较复杂，维护费用大。如图 1-4 所示为圆钢管混凝土柱。

预应力混凝土结构是指在混凝土或钢筋混凝土结构制作时，由配置受力的预应力钢筋通过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土结构。对于预应力混凝土结构，将在本书的第 10 章中介绍。



图 1-4 圆钢管混凝土柱

1.1.2 钢筋和混凝土协同工作基础

1. 钢筋和混凝土材料特性

在学习“土木工程材料”（或“建筑材料”）课程时，我们已经知道，钢筋的抗拉和抗压强度都很高，破坏时表现出良好的变形能力。但细长的钢筋受压时极易失稳，强度得不到充分发挥，同时钢筋的防锈能力差，价格较高。混凝土的抗压强度高而抗拉强度很低，一般抗拉强度只有抗压强度的 $1/20 \sim 1/8$ ，受拉破坏时具有明显的脆性性质，破坏前无预兆。

2. 混凝土简支梁试验

(1) 素混凝土简支梁破坏试验

素混凝土简支梁，跨度为 4m，梁截面尺寸 $200\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，混凝土强度等级为 C20。如图 1-5 (a) 所示。梁跨中作用一个集中荷载 P ，对其进行破坏性试验。

由材料力学可知，图 1-5 简支梁受弯后，截面的中和轴以上部分受压，以下部分受拉。

荷载增大使梁中和轴以下受拉区边缘纤维拉应变达到混凝土抗拉极限应变时，该处混凝土被拉裂，裂缝沿截面高度方向迅速开展，梁骤然脆断。

试件的破坏是由混凝土的抗拉强度控制，破坏荷载值很小，极限荷载 $P \approx 8\text{kN}$ ，混凝土的抗压强度得不到充分利用。

破坏特征：破坏前没有明显的预兆，破坏是突然的，属于脆性破坏。

(2) 钢筋混凝土简支梁破坏试验

在梁的受拉区布置 3 根直径 16mm 的 HPB300 级钢筋（记作 $3\Phi 16$ ），在受压区布置 2 根直径 10mm 的架立筋（记作 $2\Phi 10$ ），同时配置适量的箍筋。再进行同样的荷载试验（图 1-5b）。

当加载到一定阶段，截面受拉区边缘纤维拉应变达到混凝土抗拉极限应变时，该处混凝土被拉裂。混凝土开裂后，裂缝截面的混凝土拉应力由纵向受拉钢筋来承受，荷载还可进一步增加，变形将相应发展，裂缝的数量和宽度也将增大，裂缝不会沿截面的高度迅速开展。受拉钢筋抗拉强度和受压区混凝土抗压强度都被充分利用时，试件才发生破坏。

结构的承载能力有很大的提高，极限荷载 $P \approx 36\text{kN}$ 。

破坏特征：试件破坏前，变形和裂缝都发展得很充分，呈现出明显的破坏预兆，受力性能得到显著的改善，属于塑性破坏。

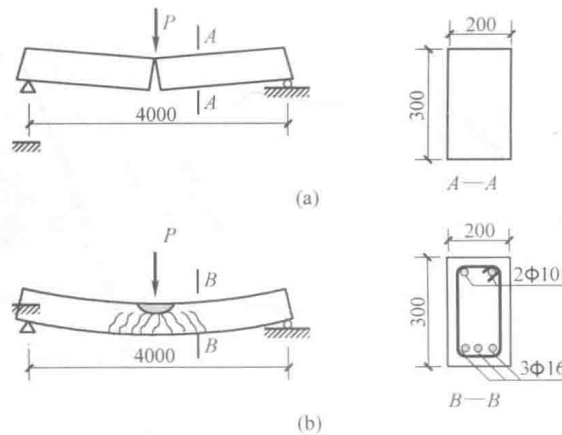


图 1-5 素混凝土梁和钢筋混凝土梁荷载试验

(a) 素混凝土梁；(b) 钢筋混凝土梁

结论：将钢筋和混凝土两种材料按照合理的方式有机结合在一起共同工作，可以取长补短，使钢筋主要承受拉力，混凝土主要承受压力，充分发挥它们的材料特性，并使得结构具有良好的变形能力。

3. 钢筋与混凝土合理的组合原则

发挥钢筋抗拉、抗压强度高的特点；发挥混凝土抗压强度高，而避免抗拉强度低的弱点。

图 1-6 为常见配筋方式。图 1-7 为常见钢筋混凝土结构和构件配筋实例。

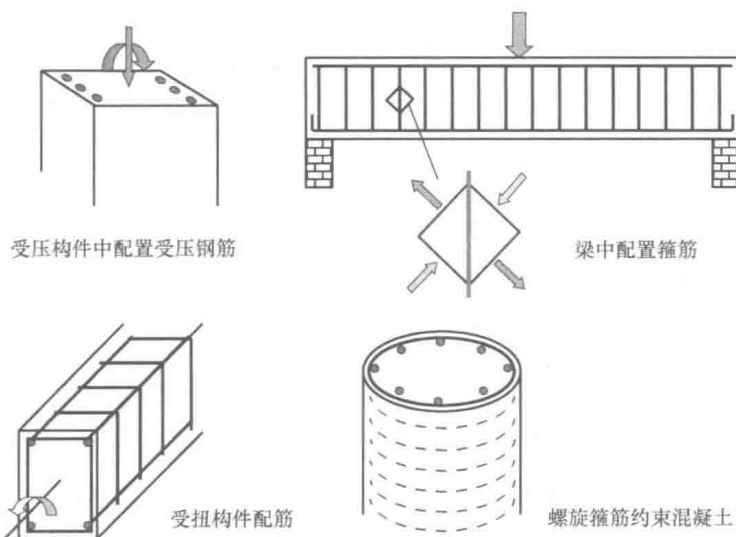


图 1-6 常见配筋方式

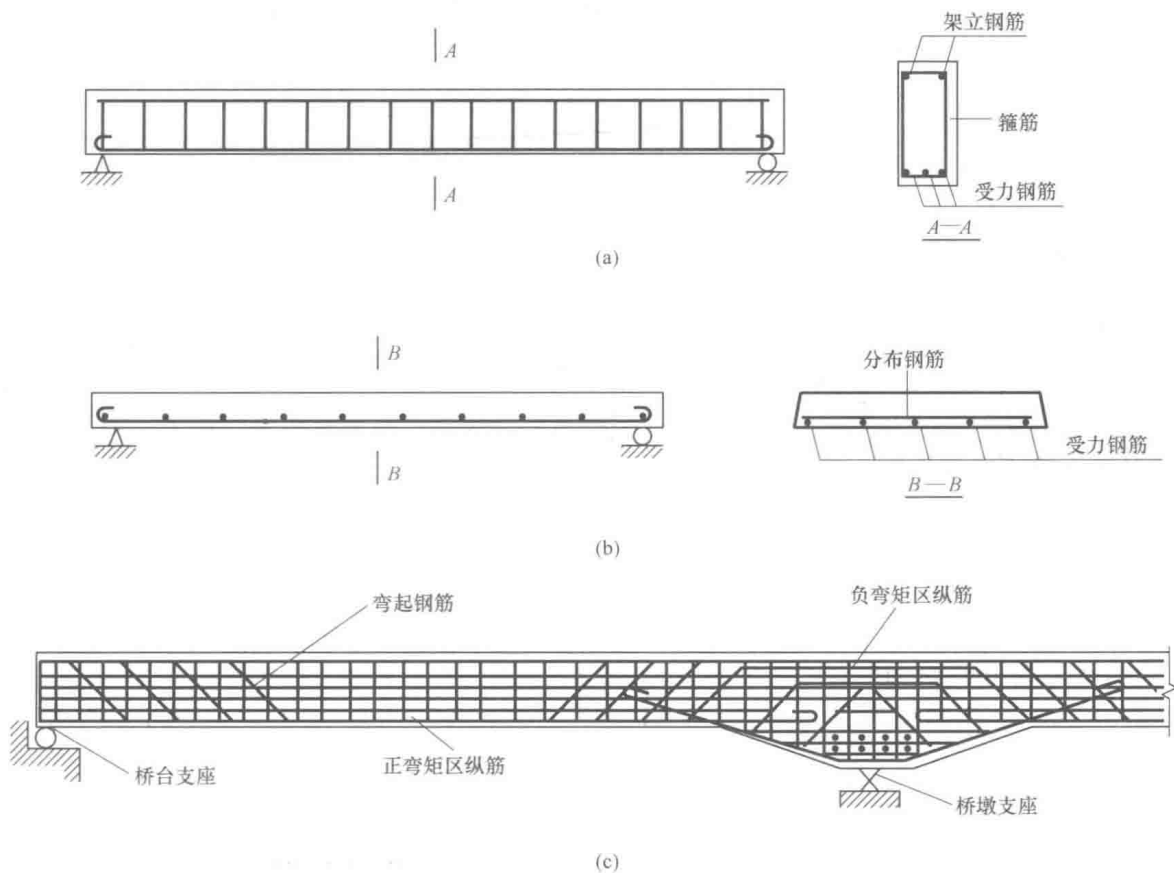


图 1-7 常见钢筋混凝土结构和构件配筋实例（一）

(a) 钢筋混凝土筒支梁的配筋；(b) 钢筋混凝土筒支平板的配筋；(c) 钢筋混凝土连续梁桥的配筋

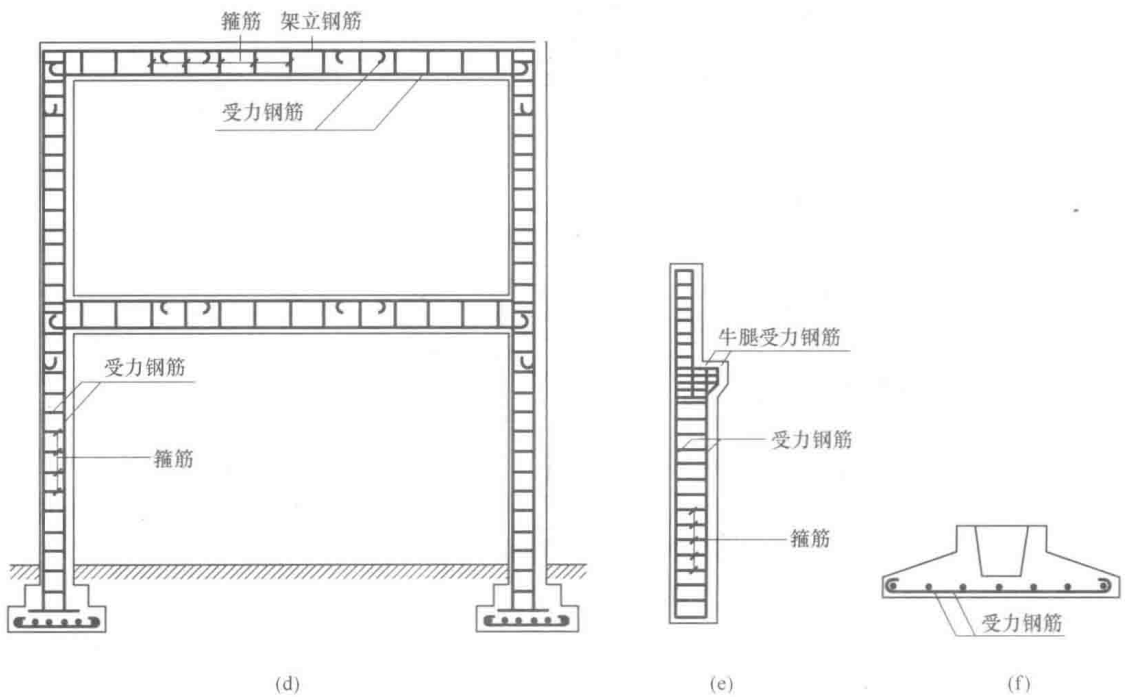


图 1-7 常见钢筋混凝土结构和构件配筋实例（二）

(d) 钢筋混凝土杯形基础的配筋；(e) 两层单跨钢筋混凝土框架配筋；

(f) 装配式钢筋混凝土单层工业厂房边柱配筋

4. 钢筋和混凝土协同工作主要原因

钢筋和混凝土两种材料的物理力学性能很不相同，但能够共同工作，其主要原因是：

(1) 钢筋与混凝土之间存在有良好的粘结力，粘结力是这两种性质不同的材料能够共同工作的基础。混凝土结硬后，能与钢筋牢固地形成整体，保证在荷载作用下，钢筋和外围混凝土能够协调变形，共同受力。

(2) 钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数接近。钢材的温度线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，混凝土的温度线膨胀系数为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。当温度变化时，两者之间不会产生过大的相对变形和温度应力导致它们之间的粘结力破坏。

(3) 呈碱性的混凝土可以保护钢筋，使钢筋混凝土结构具有较好的耐久性。

1.1.3 混凝土结构优缺点

1. 混凝土结构优点

(1) 合理用材。能充分合理的利用钢筋（高抗拉性能）和混凝土（高抗压性能）两种材料的受力性能，结构的承载力与其刚度比例合适，基本无局部稳定问题。对于一般工程结构，经济指标优于钢结构。

(2) 耐久性好，维护费用低。在一般环境下，钢筋受到混凝土保护而不易发生锈蚀，而混凝土的强度随着时间的增长还有所提高，因而提高了结构的耐久性，不像钢结构那样

需要经常的维修和保养。对处于侵蚀性气体或受海水浸泡的钢筋混凝土结构，经过合理地设计及采取特殊的防护措施，一般也可以满足工程需要。

(3) 耐火性好。混凝土是不良导热体，遭受火灾时，钢筋混凝土结构不会像木结构那样被燃烧，钢筋因有混凝土包裹而不至于很快升温到失去承载力的程度，这是钢、木结构所不能比拟的。

(4) 可模性好。混凝土可根据设计需要支模浇筑成各种形状和尺寸的结构，适用于建造形状复杂的结构及空间薄壁结构，这一特点是砌体、钢、木等结构所不具备的。

(5) 整体性好，刚度大。现浇混凝土结构的整体性好，再通过合适的配筋，可获得较好的延性，有利于抗震、防爆；同时防辐射性能好，适用于防护结构；刚度大、阻尼大，有利于结构的变形控制。

(6) 易于就地取材。钢筋混凝土中砂、石所占比例很大，水泥和钢筋所占比例较小。砂、石产地普遍，易于就地取材。另外，混凝土还可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废料作掺合料。

正是由于具有上述突出的优点，混凝土结构已经在房屋建筑、地下结构、桥梁、铁路、隧道、水利、港口等工程中得到广泛应用。

2. 混凝土结构缺点

(1) 自重大。钢筋混凝土的重度约为 25kN/m^3 ，比砌体和木材的重度都大。尽管比钢材的重度小，但结构的截面尺寸比钢结构大，因而其自重远远超过相同宽度或高度的钢结构，这对于建造大跨度结构和高层建筑结构是不利的。采用 T 形、工形、箱形等更合理的构件截面形式，研究开发高强轻质的混凝土和高强度钢筋，可以克服钢筋混凝土自重大的缺点。

(2) 抗裂性差。由于混凝土的抗拉强度较低，在正常使用时钢筋混凝土结构往往是带裂缝工作的，裂缝的存在会影响结构的耐久性，降低抗渗和抗冻能力，在工作条件较差的环境，如露天、沿海、化学侵蚀等环境，会导致钢筋锈蚀。裂缝的存在还会影响美观。当裂缝数量较多和开展较宽时，将给人造成不安全感。采用预应力混凝土、纤维混凝土可较好地解决开裂问题，利用树脂涂层钢筋可防止因混凝土开裂而导致的钢筋锈蚀。

(3) 施工比较复杂，工序多。需要支模、绑钢筋、浇筑、养护、拆模，工期长，施工受季节、天气的影响较大。现浇钢筋混凝土需要较多的脚手架、模板，脚手架、模板材料耗费量大。采用钢模、飞模、滑模等以及泵送混凝土、早强混凝土、商品混凝土、高性能混凝土、免振自密实混凝土等技术可以克服此缺点。

(4) 新老混凝土不易形成整体。混凝土结构一旦破坏，修补和加固比较困难。

1.2 混凝土结构的发展简况及其工程应用

与砖石结构、木结构和钢结构相比，混凝土结构的历史并不长，但发展极为迅速，目前已成为世界各国现代土木工程建设中占主导地位的结构。为了克服混凝土结构的缺点，发挥其优势，以适应社会建设不断发展的需要，对混凝土结构的材料制造与施工技术、结构形式、结构设计计算理论等方面的研究还在不断发展。

1.2.1 混凝土结构的早期发展

1824年，英国约瑟夫·阿斯匹丁（J. Aspdin）发明了波特兰水泥并取得了专利。

1849年，法国蓝波特（L. Lambot）制成了铁丝网水泥砂浆的小船。

1861年，法国约瑟夫·莫尼埃（Joseph Momier）获得了制造钢筋混凝土板、管道和拱桥等的专利。

德国学者1866年发表了计算理论和计算方法，1887年又发表了试验结果，并提出了钢筋应配置在受拉区的概念和板的计算方法。

1850年，美国学者进行了钢筋混凝土梁的试验，但其研究成果直到1877年才发表并为人所知。

1872年，在纽约建造第一间钢筋混凝土房屋。

1884年，第一次使用变形（扭转）钢筋并形成专利。

1890年，在旧金山建造了一幢两层高、321英尺（95m）长的钢筋混凝土美术馆。从此以后，钢筋混凝土在美国获得了迅速的发展。

1891年~1894年，欧洲各国的研究者发表了一些理论和试验研究结果。

从20世纪30年代开始，在材料性能的改善，结构形式的多样化，施工方法的革新，计算理论和设计方法的完善等方面，人们开展了大量的研究工作，混凝土结构的工程应用十分普遍，钢筋混凝土结构进入了现代化阶段。

1.2.2 材料方面的发展

1. 混凝土材料

混凝土已成为现代最主要的工程结构材料之一，我国更是广泛应用这一材料的国家之一。在专业基础课“土木工程材料”或“建筑工程材料”中，已学习过混凝土材料的相关知识。建议在“土木工程材料”或“建筑工程材料”学习基础上，进行广泛调研，进一步了解混凝土材料的发展状况。

- 1) 具有高强度、高工作性和高耐久性的高性能混凝土的发展；
- 2) 泵送混凝土和商品混凝土的发展；
- 3) 具有自身诊断、自身控制、自制修复等功能的机敏型高性能混凝土的发展，如自密实混凝土、内养护混凝土；
- 4) 利用天然轻集料的轻集料混凝土的发展；
- 5) 再生骨料混凝土的研究和利用；
- 6) 碾压混凝土的利用；
- 7) 纤维混凝土的发展；
- 8) 其他各种特殊性能混凝土，如聚合物混凝土、防辐射混凝土、耐腐蚀混凝土、防渗透混凝土、微膨胀混凝土和水中不分散混凝土等的应用；
- 9) 品种繁多的外加剂在工程上的应用；
- 10) 各种混凝土细掺料如硅粉、磨细矿渣、粉煤灰等的回收利用等。

2. 配筋材料

钢筋是混凝土结构中的配筋材料，其发展方向是高强、防腐、较好的延性和良好的粘

结锚固性能。

我国用于普通混凝土结构的钢筋的屈服强度标准值已达 $500\text{N}/\text{mm}^2$ ，预应力构件中采用的钢绞线极限抗拉强度标准值已达 $1960\text{N}/\text{mm}^2$ 。

为了提高钢筋的防腐性能，带有环氧树脂涂层的热轧钢筋和钢绞线已开始在某些有特殊防腐要求的工程中应用。

采用纤维筋代替钢筋的研究已得到较大进展。常用的树脂粘结纤维筋有碳纤维筋、玻璃纤维筋和芳纶纤维筋。这几种纤维筋的突出优点是抗腐蚀、强度高，同时还具有良好的抗疲劳性能、大的弹性变形能力、高电阻及低磁导性，其缺点是断裂应变性能较差、较脆、徐变值和热膨胀系数较大，玻璃纤维筋的抗碱化性能较差。

在钢筋的连接成形方面，正在大力发展各种钢筋成形机械及绑扎机具，以减少大量的手工操作。除了常用的绑扎搭接、焊接连接方式外，套筒连接方式得到越来越多的推广应用。

3. 模板材料

混凝土结构成形时所采用的模板材料目前有木模板、钢模板、竹模板、硬塑料模板等。

模板材料今后将向多功能方向发展。如：透水模板的使用，可以滤去混凝土中多余的水分，大大提高混凝土的密实性和耐久性。发展薄片、美观、廉价又能与混凝土牢固结合的永久性模板，将使模板可以作为结构的一部分并参与受力，还可省去装修工序。

1.2.3 结构与施工技术方面的发展

混凝土结构在土木工程各个领域得到了广泛的应用，目前混凝土结构的高度和跨度都在不断地增大。

近年来，钢板与混凝土或钢板与钢筋混凝土、型钢与混凝土组成的钢-混凝土组合结构得到迅速发展，如钢板混凝土用于地下结构和混凝土结构加固，压型钢板-混凝土板用于楼板，型钢与混凝土组合而成的组合梁用于楼盖和桥梁，外包钢混凝土柱用于电站主厂房等。以型钢或以型钢和钢筋焊成的骨架做筋材的钢骨混凝土结构，由于其筋材刚度大，施工时可用其来支撑模板和混凝土自重，可以简化支模工作。

在钢管内浇筑混凝土形成的钢管混凝土结构，由于管内混凝土在纵向压力作用下处于三向受压状态并能抑制钢管的局部失稳，因而使构件的承载力和变形能力大大提高；同时钢管可作为混凝土的模板，使得施工速度加快。因此，钢管混凝土结构在高层建筑结构的底层和拱桥等工程中得到了推广应用。

上述高性能新型组合结构具有充分利用材料强度、较好的适应变形能力（延性）、施工较简单等特点，从而大大拓宽了钢筋混凝土结构的应用范围，使得大跨度结构、高层建筑、高耸结构和具备某种特殊功能的钢筋混凝土结构的建造成为可能。

预应力混凝土结构由于抗裂性能好，可充分利用高强度材料，其各种应用发展迅速。同时结合传统预应力工艺和实际结构特点，发展了以增强后张预应力孔道灌浆密实性为目的的真空辅助灌浆技术、以减小张拉力减轻张拉设备为目的的横张预应力技术、以实现筒形断面结构环向预应力为目的的环形后张预应力技术、以减小结构建筑高度为目的的预拉预压双预应力技术等。某些有特殊要求的结构，例如核电站安全壳和压力容器、海上采油

平台、大型蓄水池、贮气罐及贮油罐等结构，抗裂及抗腐蚀能力要求较高，采用预应力混凝土结构有其独特的优越性，而非其他材料结构可比拟。

将预应力钢筋（索）布置在混凝土结构体外的预应力技术，因大幅度减小预应力损失，简化结构截面形状和减小截面尺寸，便于再次张拉、锚固、更换或增添新索，已在桥梁工程的修建、补强加固及其他建筑结构的补强加固中得到应用。

1.2.4 设计计算理论方面的发展

混凝土结构设计计算理论从把材料看作弹性体的容许应力古典理论（结构内力和构件截面计算均套用弹性理论，采用容许应力设计方法），发展为考虑材料塑性的极限强度理论，并迅速发展成按极限状态设计的理论体系。目前在工程结构设计规范中已采用基于概率论和数理统计分析的可靠度理论。

混凝土的微观断裂和内部损伤机理、混凝土的强度理论及非线性变形的计算理论、钢筋与混凝土间粘结-滑移理论等方面也有很大进展。钢筋混凝土有限元方法和现代测试技术的应用，使得混凝土结构的计算理论和设计方法向更高的阶段发展，并日趋完善。结构分析可以根据结构类型、构件布置、材料性能和受力特点选用线弹性分析方法、考虑塑性内力重分布的分析方法、塑性极限分析方法、非线性分析方法和实验分析方法等。

在混凝土结构耐久性设计方面，已建立了相关的材料性能劣化计算模型进行结构使用年限的定量计算，并基于混凝土在环境作用（碳化、氯盐、冻蚀、酸腐蚀）下的损伤机理，提出了结构设计应采取的防护措施。

1.2.5 加固技术方面的发展

近年来，混凝土结构的加固技术得到重视和发展，在加固工作程序、补强加固方法、加固材料、裂缝修补方法等方面基本形成了比较成熟的设计体系。如碳纤维布等片材粘贴加固混凝土结构技术的应用，使混凝土结构的加固不仅快速简便，而且不增加原结构重量，施工时对使用影响也很小。

总之，随着科学技术的发展和对混凝土结构研究的深入，混凝土结构的缺点正在得到克服，混凝土结构在土木工程领域将得到更为广泛的应用，发展前景更加广阔。

1.2.6 工程应用实例

由于材料强度和性能的提高、设计计算理论的成熟、施工机械与技术的发展、经济和城市化的发展、科技和计算机技术的发展，混凝土结构的应用和发展迅猛。混凝土结构不仅大量应用于一般的工业与民用建筑中，还广泛应用于大跨、高耸、重载结构中。混凝土结构高层建筑、大跨桥梁、特长隧道、水利大坝等工程已成为土木工程发展的重要标志与成果。

1. 城市建筑

(1) 哈利法塔 (Burj Khalifa Tower)

哈利法塔原名迪拜塔 (Burj Dubai)，又称迪拜大厦或比斯迪拜塔 (图 1-8)，位于阿拉伯联合酋长国迪拜，162 层，总高 828m，比台北 101 大厦高出 320m。

迪拜塔采用扶壁式筒体及成束筒结构体系，并沿高度每 7 层进行一次内收且减少筒