

 西安交通大学 “十一五”规划教材
土木工程专业系列教材

混凝土力学与构件设计原理

杨政 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学

“十一五”规划教材

土木工程专业系列教材

混凝土力学与构件设计原理

杨政 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



为了满足我国经济建设的需要,同时也是为了与国际教育体制接轨,我国高级工程专门人才培养模式正在向专业宽口径方向转变。近年来,我国的原建筑工程、交通土建工程、地下工程、铁道工程、隧道工程、矿井建设等专业已调整归并为土木工程专业。

土木工程专业涉及工程领域广泛,混凝土结构的类型很多,但其基本受力构件的受力特点具有共性。本教材精选内容,加强基础理论介绍,突出受力性能分析,而不仅仅拘泥于规范的具体规定。教材内容和体系注重学生从数学、力学基础课程学习过渡到专业课程学习的认知规律,以混凝土构件的力学机理为基础,从材料性能、截面受力特征到构件破坏机理、承载力及变形的计算方法,形成完整体系。在本教材中安排了混凝土结构材料的基本性能,钢筋混凝土轴心受力构件正截面承载力计算,钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算,钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算,钢筋混凝土受扭构件承载力计算,钢筋混凝土偏心受力构件承载力计算,钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性分析以及预应力混凝土构件计算等内容。

为了便于下一步混凝土结构设计专业课程的学习,本教材还对混凝土构件的设计方法进行了介绍(本教材的配套电子课件可通过 <http://ligong.xjtupress.com> 网站免费下载)。考虑到我国建筑、公路、铁道、桥梁等工程的混凝土结构设计规范尚未统一,但各类工程有关混凝土结构的设计原理大同小异,为了节省篇幅,在介绍设计方法时,本教材只对建筑工程的有关规范内容作了介绍。读者在掌握了构件破坏机理、承载力和变形的计算方法及建筑工程混凝土结构的设计原理后,不难掌握其他工程的混凝土结构设计原理。

同济大学顾祥林教授在百忙之中审阅了全部书稿,并提出了宝贵意见,徐小瑞女士对本书进行了校核,西安交通大学出版社编辑李慧娜、桂亮为本书出版做了很多工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者知识所限,同时,以分析混凝土构件的力学机理为主、将《混凝土结构设计规范》作为混凝土力学的应用来编写混凝土构件设计原理教材,也是编者的初次尝试。书中不妥或错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。本书在编写过程中,还参考了国内外一些优秀教材,在此也向这些教材的编著者们一并致谢。

编者

2010年2月

前言

第1章 绪论..... (1)

1.1 混凝土结构的一般概念及特点 (1)

1.2 混凝土结构的形式 (3)

1.3 混凝土结构的发展及工程应用概况 (4)

1.4 本课程的特点及学习方法 (7)

思考题..... (9)

第2章 混凝土结构材料的物理力学性能 (10)

2.1 混凝土..... (10)

2.1.1 混凝土的组成结构..... (11)

2.1.2 混凝土单轴应力状态下的强度..... (12)

2.1.3 混凝土多轴应力状态下的强度..... (19)

2.1.4 混凝土的变形..... (26)

2.2 钢筋..... (40)

2.2.1 钢筋的品种和级别..... (41)

2.2.2 钢筋的强度与变形..... (43)

2.2.3 钢筋的冷加工..... (47)

2.2.4 钢筋的疲劳特性..... (48)

2.2.5 钢筋的徐变和松弛..... (49)

2.2.6 混凝土结构对钢筋性能的要求..... (49)

2.3 钢筋与混凝土之间的粘结力..... (50)

2.3.1 粘结应力..... (50)

2.3.2 粘结力的组成..... (51)

2.3.3 影响粘结性能的因素..... (55)

2.3.4 钢筋的锚固长度..... (57)

思考题 (58)

第3章 混凝土结构设计方法 (60)

3.1 建筑结构设计理论的发展历史..... (60)

3.1.1 容许应力设计法..... (60)

3.1.2	破损阶段设计法	(61)
3.1.3	极限状态设计法	(62)
3.1.4	概率极限状态设计法	(62)
3.2	结构上的作用、作用效应及其统计分析	(63)
3.2.1	结构上的作用与作用效应	(63)
3.2.2	荷载标准值的确定	(64)
3.3	结构的抗力及其统计分析	(66)
3.3.1	结构抗力的不定性	(66)
3.3.2	结构抗力的统计参数和概率分布类型	(71)
3.4	结构可靠度计算方法	(73)
3.4.1	结构的功能要求及结构可靠度	(73)
3.4.2	建筑结构的安全等级	(74)
3.4.3	结构的极限状态	(74)
3.4.4	结构的功能函数	(75)
3.4.5	结构可靠指标	(76)
3.4.6	结构的设计状况	(79)
3.5	概率极限状态设计法	(80)
3.5.1	直接概率设计法	(80)
3.5.2	基于分项系数表达的概率极限状态设计法	(83)
	思考题	(92)
	习题	(92)
第4章	钢筋混凝土轴心受力构件	(94)
4.1	普通箍筋轴心受压构件的试验分析	(95)
4.2	普通箍筋轴心受压构件受力分析	(96)
4.2.1	轴心受压截面的弹性分析	(97)
4.2.2	轴心受压截面的弹塑性分析	(99)
4.2.3	轴心受压截面的塑性分析	(107)
4.2.4	长期荷载作用下混凝土徐变对轴心受压构件的影响	(108)

4.2.5 轴心受压构件设计	(112)
4.3 配置约束箍筋混凝土柱的正截面承载力分析 ..	(116)
4.3.1 受力机理和破坏过程	(117)
4.3.2 极限承载力	(118)
4.3.3 配置约束混凝土箍筋柱的设计	(121)
4.4 轴心受拉构件	(123)
4.4.1 轴心受拉截面的弹性分析	(123)
4.4.2 轴心受拉截面的弹塑性分析	(123)
4.4.3 轴心受拉截面的弹塑性简化分析	(127)
4.4.4 轴心受拉构件设计	(129)
思考题	(130)
习题	(131)
第5章 受弯构件正截面承载力的计算	(133)
5.1 受弯构件正截面的受力特性	(133)
5.1.1 单筋矩形适筋梁正截面受弯的受力过程和破坏形态	(133)
5.1.2 配筋率对受弯构件正截面破坏特征的影响	(137)
5.2 受弯构件正截面受力过程的理论分析	(138)
5.2.1 受弯截面的弹性分析	(138)
5.2.2 受弯截面的弹塑性分析	(143)
5.2.3 受弯截面的塑性分析	(154)
5.3 受弯构件正截面承载力计算原理	(156)
5.3.1 正截面承载力计算的基本假定	(156)
5.3.2 等效应力分布图	(156)
5.3.3 适筋截面与超筋截面的界限及界限配筋率	(158)
5.3.4 受弯截面的最小配筋率	(160)

5.3.5 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	(160)
5.3.6 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	(165)
5.3.7 T形截面受弯构件正截面承载力计算	(168)
5.4 受弯构件正截面设计	(171)
5.4.1 构造要求	(172)
5.4.2 单筋矩形截面设计	(175)
5.4.3 双筋矩形截面设计	(179)
5.4.4 T形截面设计	(184)
思考题	(187)
习题	(188)
第6章 受弯构件斜截面承载力的计算	(190)
6.1 斜截面破坏形态	(190)
6.2 斜截面抗剪承载力计算公式	(196)
6.2.1 影响斜截面抗剪承载力的主要因素	(196)
6.2.2 弯剪承载力的组成和斜截面抗剪计算公式	(201)
6.3 斜截面抗剪承载力的设计	(207)
6.4 斜截面抗弯承载力的设计	(213)
6.4.1 斜截面抗弯承载力	(213)
6.4.2 抵抗弯矩图	(214)
6.4.3 部分纵向受拉钢筋弯起	(216)
6.4.4 纵向受力钢筋的截断位置	(218)
6.4.5 纵向受力钢筋的锚固	(219)
6.5 梁内箍筋和纵向钢筋的构造要求	(221)
6.5.1 箍筋的构造要求	(221)
6.5.2 纵向钢筋的构造要求	(222)
思考题	(223)
习题	(224)

第 7 章 偏心受力构件承载力的计算	(225)
7.1 偏心受压构件正截面承载力计算	(225)
7.1.1 偏心受压构件的破坏形态	(225)
7.1.2 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算公式	(231)
7.1.3 工字形截面和 T 形截面偏心受压构件正截面承载力计算公式	(235)
7.1.4 偏心受压构件正截面承载力计算方法	(239)
7.2 偏心受拉构件正截面承载力计算	(261)
7.2.1 偏心受拉构件的受力特点	(262)
7.2.2 偏心受拉构件正截面承载力计算	(263)
7.3 正截面承载力 $N_u - M_u$ 相关曲线	(267)
7.3.1 对称配筋矩形截面偏心受力构件的 $N_u - M_u$ 相关关系	(267)
7.3.2 对称配筋矩形截面偏心受力构件的 $N_u - M_u$ 相关曲线	(270)
7.4 双向偏心受压构件正截面承载力的计算	(271)
7.5 偏心受力构件斜截面抗剪承载力计算	(275)
7.6 偏心受力构件的构造要求	(279)
思考题	(279)
习题	(280)
第 8 章 受扭构件承载力的计算	(282)
8.1 平衡扭转与协调扭转	(282)
8.2 受扭构件的弹性解和塑性解	(283)
8.3 混凝土纯扭构件的承载力	(286)
8.3.1 素混凝土构件	(286)
8.3.2 有腹筋受扭构件	(288)
8.3.3 纯扭构件的抗扭承载力计算公式	(291)

8.4 复合受扭构件的承载力计算	(296)
8.4.1 剪-扭构件	(297)
8.4.2 弯-扭构件	(300)
8.4.3 弯-剪-扭构件	(302)
8.5 轴力对弯剪扭作用构件承载力的影响	(303)
8.6 受扭构件计算公式的适用条件和构造要求	(304)
思考题	(310)
习题	(311)
第9章 钢筋混凝土构件裂缝、变形和耐久性	(312)
9.1 钢筋混凝土构件裂缝、变形和耐久性要求	(312)
9.2 钢筋混凝土构件的裂缝	(313)
9.2.1 轴拉构件的裂缝	(314)
9.2.2 轴拉构件裂缝的间距	(317)
9.3 钢筋与混凝土的粘结和滑移	(320)
9.3.1 钢筋和混凝土之间的粘结	(320)
9.3.2 钢筋和混凝土之间的粘结应力和滑移	(321)
9.3.3 裂缝间区段应力和滑移的弹性分析	(322)
9.3.4 裂缝间钢筋应力的不均匀系数	(324)
9.3.5 裂缝最大宽度及其验算	(326)
9.4 裂缝和粘结对截面分析的影响	(333)
9.4.1 裂缝和粘结力对轴拉构件截面分析的影响 ..	(333)
9.4.2 受弯构件裂缝的出现和开展及其对截面受力性 能的影响	(334)
9.4.3 考虑裂缝间粘结应力的受弯构件开裂后的弹性 分析	(335)
9.4.4 受弯构件开裂后的刚度	(338)
9.5 钢筋混凝土受弯构件的变形	(343)
9.5.1 钢筋混凝土受弯构件的挠度	(344)
9.5.2 钢筋混凝土受弯构件的挠度计算	(345)

9.5.3 长期荷载对钢筋混凝土受弯构件刚度的影响	(346)
9.6 钢筋混凝土构件的截面延性	(348)
9.7 钢筋混凝土结构的耐久性	(353)
9.7.1 影响钢筋混凝土结构耐久性能的主要因素	(354)
9.7.2 混凝土裂缝对结构耐久性的影响	(355)
9.7.3 材料劣化对结构耐久性的影响	(355)
9.7.4 混凝土结构耐久性设计	(361)
思考题	(364)
习题	(365)
第10章 预应力混凝土构件	(366)
10.1 预应力的概念	(366)
10.1.1 普通混凝土的主要缺陷及预应力的作用	(366)
10.1.2 预应力的一般概念	(367)
10.1.3 施加预应力的方法	(368)
10.1.4 预应力混凝土的分类	(370)
10.1.5 夹具和锚具	(371)
10.1.6 预应力混凝土的材料	(373)
10.2 预应力混凝土的张拉控制应力及预应力损失	(374)
10.2.1 预应力混凝土的张拉控制应力 σ_{con}	(375)
10.2.2 预应力混凝土预应力的损失	(376)
10.2.3 预应力损失值的组合	(386)
10.2.4 先张法构件预应力钢筋的传递长度	(386)
10.2.5 后张法构件锚固区局部承压计算	(388)
10.3 预应力混凝土轴心受拉构件的应力分析	(392)
10.3.1 先张法轴心受拉构件	(393)

10.3.2 后张法轴心受拉构件·····	(395)
10.4 预应力混凝土轴心受拉构件的计算和验算·····	(400)
10.4.1 施工阶段验算·····	(400)
10.4.2 使用阶段的计算和验算·····	(400)
10.5 预应力混凝土受弯构件应力分析·····	(408)
10.5.1 施工阶段·····	(409)
10.5.2 使用阶段·····	(411)
10.6 预应力混凝土受弯构件挠度分析·····	(413)
10.6.1 预应力混凝土受弯构件的挠度和反拱·····	(414)
10.6.2 梁的荷载-挠度曲线·····	(414)
10.7 预应力混凝土受弯构件的设计计算·····	(416)
10.7.1 使用阶段的计算·····	(416)
10.7.2 施工阶段的验算·····	(431)
10.8 预应力混凝土构件的构造要求·····	(438)
思考题·····	(443)
习题·····	(444)
附录 ·····	(446)
附录1 术语和符号·····	(446)
附录2 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)规定的材料力学指标·····	(452)
附录3 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)一般规定·····	(455)
附录4 常用数表和数据·····	(457)

第①章

绪 论

混凝土,一般是指由水泥掺入一定级配的石子和砂子加水拌和,经水泥水化结硬而成的具有所需形体、强度和耐久性的人造石材。其抗压强度较高而抗拉强度很低,力学性能与石材相似,也被形象地称为“砼”,意为人造石材。

我们的住房、工厂、商业大楼、大坝和输水设施、道路、桥梁、隧道以及其他基础设施的建造都离不开混凝土。混凝土已成为当今世界上应用最广泛的建筑材料,在日常生活中,几乎各方面都直接或间接地应用到混凝土,按体积计算,混凝土是当今世界中数量最大的人造产品。

1.1 混凝土结构的一般概念及特点

以混凝土为主制成的结构称为混凝土结构。混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构及配置各种纤维筋的混凝土结构。素混凝土结构指不配置任何钢筋的混凝土结构,主要用于承受压力的结构(如基础、支墩、挡土墙、堤坝、地坪路面等)和一些非承重结构;钢筋混凝土结构是混凝土结构中最具代表性的一类结构,它是由配置受力的普通钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土制成的结构,适用于各种受压和受弯构件,有时也用于受拉构件,如各种桁架、梁、板、柱、拱、壳等;预应力混凝土结构指结构构件制作时,在其受拉部位人为地预先施加压力的混凝土结构,由于抗裂性好、刚度大且强度高,较适宜用于建造跨度大、荷载重以及有抗裂、抗渗要求的结构,如大跨屋架、桥梁、储水池、核电站反应堆安全壳等。混凝土材料抗压强度较高,而抗拉能力很低。钢筋的抗拉、抗压强度均很高,但细长的钢筋,受压易弯屈,几乎不能形成实际的承重结构。在钢筋混凝土结构中,利用混凝土的抗压能力较强而钢筋的抗拉能力很强的特点,混凝土主要承受压应力,钢筋主要承受拉应力。另外,在混凝土结构中由于混凝土和箍筋的约束作用,在混凝土受压区钢筋也能发挥很好的作用。钢筋和混凝土组合共同工作,可以充分发挥两者的长处,满足工程结构的使用要求。

钢筋与混凝土结合形成一整体结构,能够很好地共同工作是基于混凝土硬化后与钢筋(尤其是带肋的钢筋)之间有良好的粘结力,在外荷载作用下,共同变形、共同受力。此外,钢筋的温度线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,混凝土的温度线膨胀系数为 $(1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}) / ^\circ\text{C}$,两者十分接近,当温度变化时,它们不会产生过大的相对变形而使其间的粘结发生破坏。

配有钢筋的混凝土构件因有钢筋协同工作,较素混凝土构件承载能力大为提高,而且破坏也不像素混凝土那样突然。钢筋混凝土结构,特别是现浇钢筋混凝土结构,整体性好,结构的各个部分是以一个力学上的整体状态结合在一起。通过合理配筋,可以获得较好的延性,对于结构抵抗地震作用或强烈爆炸时的冲击波作用具有较好的性能。

钢筋混凝土结构合理地发挥了钢筋和混凝土两种材料的性能,在某些情况下可以代替钢结构,从而节约钢材降低造价。近年来,利用工业废料制造人工骨料,或作为水泥的外加成分,以改善混凝土性能的研究和应用得到了大力发展。

钢筋混凝土工程在实际结构工程中得到广泛应用,是因为它有许多优点,主要包括:①强(度)价(格)比高。在相同的建造费用条件下,砖、木、钢结构等受力构件的承载力远比钢筋混凝土制成的构件小。②耐久性好。一般环境条件下,混凝土的强度随着时间的增长还会有所增长,而钢筋受混凝土保护不易生锈,维修维护费用少。③耐火性好。混凝土是热的不良导体,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,其耐火性比钢结构和木结构好。④可模性。混凝土可根据设计需要浇筑成各种形状和尺寸的结构,适用于形状复杂的结构。⑤整体性好。整体浇筑的钢筋混凝土结构整体性好,对结构抗震、抗爆有利。⑥易于就地取材。混凝土原材料中占很大比例的是石子和砂子,产地广泛,便于就地取材。钢筋混凝土工程是人类迄今所发现的最具适应性、最大量采用和最完善的施工方法。另外,钢筋混凝土是由两种材料组合而成,它作为一种整体材料,又可以通过不同构造方式与其他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。目前,钢筋混凝土结构已成为土木工程中最具代表性的结构形式,在国内外的工程建设中得到了广泛的应用。

钢筋混凝土结构也有许多缺点,不过在实际工程应用中,往往可以采取不同的技术和措施来减弱或消除这些缺点对结构的不利影响,混凝土结构的主要缺点及其减弱或消除对结构不利影响的技术和措施如下。

(1) 自重大

在承受同样载荷的情况下,混凝土构件的自重往往比钢结构构件大很多,不适用于建造大跨度结构和高层建筑。混凝土结构的较大自重对结构的抗震也不

利,也给运输和施工吊装带来困难。目前,在实际工程中,减轻混凝土结构的自重可以采取许多措施,例如:采用受力性能好且能减轻自重的构件型式,如空心板、槽形板、薄腹梁、空间薄壁结构等;采用轻质高强混凝土,缩小构件截面尺寸,可以减轻结构自重,并改善隔热隔声性能。

(2) 抗裂性能差

由于混凝土抗拉强度低,普通钢筋混凝土结构在正常使用阶段往往带裂缝工作,在工作条件较差的环境下会影响结构的耐久性,对防渗、防漏要求较高的结构也不适用。同时,由于混凝土开裂,限制了其在大跨度结构中的应用,也限制了高强度钢筋在混凝土结构中的应用。采用预应力混凝土可以有效地提高混凝土构件的抗裂性,使得高强混凝土和高强钢筋在混凝土结构中得到广泛的应用,同时也大大扩展了混凝土结构的应用范围;利用树脂涂层钢筋可防止在恶劣工作环境下,因混凝土开裂而导致的钢筋锈蚀。

(3) 施工的季节性

混凝土施工受到气候的限制。在严寒地区冬季施工,需要采取保温措施,可在混凝土中掺加化学拌和剂加速凝结、增加热量、防止冻结。在酷热地区夏季或雨季施工,需采用防护措施,控制水灰比,加强养护。

(4) 施工复杂

现浇混凝土施工工序多、工期长,需大量模板和支撑,施工受季节、天气的影响较大。利用可重复使用的钢模板、滑模等先进施工技术,采用泵送混凝土、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,可大大提高施工效率。采用预制装配式结构,可以减少现场操作工序,克服气候条件限制,加快施工进度等。

(5) 混凝土修复和加固困难

混凝土结构一旦破坏,其修复、加固、补强都比较困难。但新型混凝土结构的加固技术不断得到发展,如最近研究开发的采用粘贴碳纤维布加固混凝土结构技术,不仅快速简便,而且几乎不增加原结构重量。

1.2 混凝土结构的形式

混凝土结构按其构成形式分为实体结构和组合结构两大类。大坝、桥墩、基础等通常为实体,结构中混凝土的体积很大,称为实体结构;房屋、桥梁、码头、地下建筑等通常由若干基本构件连接组合而成,称为组合结构。

一般的混凝土结构由许多构件组合而成,主要受力构件有楼板、梁、柱、墙、基础等基本构件。①楼板:将活荷载和恒载通过梁或直接传递到竖向支承结构(柱、墙)的主要水平构件,其型式可以是实心板、空心板、带肋板等。②梁:将楼

板上或屋面上的荷载传递到柱或承重墙上,前者为楼盖梁,后者为屋面梁,其截面形式多为矩形、花篮形、T形、倒L形等,如梁与板整体浇筑在一起,中间梁形成T形截面梁,边梁形成倒L形截面梁。③柱:其作用是支承楼(屋)面体系,属于受压构件,荷载偏心作用时,柱受压的同时还受弯,其截面形式有矩形、工字形等。④墙:与柱作用相似,是受压构件,承重的混凝土墙常用作基础墙、楼梯间墙,或在高层建筑中用于同时承受水平风载和地震作用的剪力墙,它受压的同时也受弯。⑤基础:将上部结构荷载传递到地基(土层)的混凝土承重构件,其型式多样,有独立基础、桩基础、条形基础、平板式筏基础和箱形基础等。有时,一个混凝土构件还会由受力不同的小构件组合而成,如屋架,就是由一系列受压和受拉的杆组成,进行受力分析时,这些受压和受拉的杆可简化成轴心受压和轴心受拉构件。

1.3 混凝土结构的发展及工程应用概况

最早在希腊和罗马是采用火山灰制造混凝土。现代意义的混凝土始于硅酸盐水泥发明以后(1824年英国人阿斯普汀(Joseph Aspdin)取得硅酸盐水泥发明专利,而美国波特兰水泥则迟至1872年才由舍勒(David O. Saylor)制成,但价格低廉,用现代方法生产的波特兰水泥更是直至1892年才出现)的约四分之一世纪,1848年法国人朗波特(J. L. Lambot)制造了第一只钢筋混凝土小船,1861年法国人莫尼埃(Joseph Monier)获得了制造钢筋混凝土板、管道和拱桥等的专利,美国第一个钢筋混凝土工程是由沃德(W. E. Ward)于1875年在纽约建成的,其中墙、楼板(梁和屋面)用混凝土建造,并用金属加强。而后又建造了一些钢筋混凝土建筑,其中的加州科学院建筑(1888或1889年)很好地抗御了1906年地震。从实际意义的钢筋混凝土结构在土木工程中应用至今也仅仅130多年,与砖石砌体结构、钢结构和木结构相比,发展历史并不长,但由于钢筋混凝土结构在物理力学性能及材料来源等方面的优点,发展非常迅速。目前,混凝土已成为土木工程结构中最主要的结构材料,而且高性能混凝土和新型混凝土结构形式还在不断发展。纵观历史,现代混凝土结构是随着水泥和钢铁工业的发展而发展起来的,其发展大体可分为三个历史阶段。

① 第一阶段:从混凝土发明至20世纪初。硅酸盐水泥的发明和转炉炼钢的成功,为钢筋混凝土的广泛应用提供了充分而坚实的物质基础。欧美一些学者对钢筋混凝土构件进行了试验研究,发表了试验结果并提出了混凝土结构的计算理论和计算方法,初步奠定钢筋混凝土在建筑工程中应用的科学基础。这一阶段,所采用的钢筋和混凝土的强度都比较低,主要用于建造中小型楼板、梁、柱、拱和基础等构件。计算理论套用弹性理论,设计则采用容许应力的方法。

② 第二阶段:从20世纪初到第二次世界大战前后。这一阶段混凝土和钢筋的强度有所提高,在计算理论上开始考虑材料的塑性,钢筋混凝土截面开始按破损阶段计算结构的破坏承载力。这一阶段的重要成果是预应力混凝土的发明和应用,混凝土被用来建造大跨度空间结构。

③ 第三阶段:从第二次世界大战以后到现在。第二次世界大战后,由于钢材短缺,混凝土结构建筑得到大规模发展。这一阶段的特点是,随着高强混凝土和高强钢筋的出现,预制装配式混凝土结构、高效预应力混凝土结构、泵送商品混凝土以及各种新的施工技术等广泛地应用于各类土木工程结构中。在计算理论上,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,采用以概率论为基础的多系数表达的设计公式。

从19世纪中期到20世纪初期的第一阶段,可以说是钢筋混凝土发展的初步阶段。从20世纪30年代开始,在材料性能改善、结构形式多样化、施工方法革新、计算理论和设计方法完善等多方面开展了大量研究工作,工程应用十分普遍,使钢筋混凝土结构进入了现代化的阶段。现代混凝土结构的应用范围也在不断扩大,从工业与民用建筑、交通设施、水利水电建筑和基础工程扩大到了近海工程、海底建筑、地下建筑、核电站建设等领域,甚至已开始构思和实验用于月球表面的建筑。随着轻质高强材料的使用,大跨度、高层建筑中的混凝土结构也越来越多。

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。自20世纪50年代以来,钢筋混凝土在高层建筑中的应用有了迅猛发展。高强混凝土的发展,促进了混凝土在超高层建筑中的应用。著名的混凝土超高层建筑有:中国台北的金融大厦(101层,高508米)、美国芝加哥的西尔斯大厦(110层,高443米)、马来西亚吉隆坡的石油双塔大厦(95层,高390米,连同桅杆总高492米)、上海金茂大厦(88层,高420.5米)、广州中天广场的中信大厦(80层,高322.5米,连同桅杆总高382.5米)。2009年建成的迪拜塔为目前世界上最高的建筑,它采用高强混凝土结构,高度达到818米。此外,在大跨度的公共建筑和工业建筑中,钢筋混凝土桁架、门式刚架、拱、薄壳等结构形式也有广泛应用。法国巴黎国家工业与技术展览中心大厅的钢筋混凝土薄壳结构,平面呈三角形,边长219米(即跨度),壳顶离地面46米,是双层波形拱壳,支承在3个角部墩座上,墩座与预应力拉杆相连。澳大利亚悉尼歌剧院,由3组、10对钢筋混凝土壳片组成,以环境优美和建筑造型独特闻名于世。

在桥梁建筑方面,钢筋混凝土桥梁随处可见,结构形式有梁、拱、桁架等。预应力简支梁桥已广为应用,1976年我国建成的洛阳黄河桥共67孔,由跨度为50米简支梁组成。1987年开建、1989年建成的厦门高集跨海大桥,跨过高崎-集美海峡,是我国第一座跨越海峡的公路大桥,大桥全长6695米,主桥长2070米,桥