

高等职业教育建筑工程专业
工学结合“十三五”规划教材

建筑结构

JIANZHU JIEGOU

主 编 / 袁芙蓉 程瑞芳
副主编 / 宁翠萍 李萍萍
主 审 / 赵毅力



电子科技大学出版社

前言

《建筑结构》是土建类专业进行学生专业能力培养的一门重要的专业基础课。在建筑力学、建筑材料、建筑制图等课程学习的基础上,围绕建筑结构受力体系阐述结构构件受力性能、计算原理及构造要求;掌握其计算原理、方法,并将其应用于工程管理、工程监理、工程造价、结构设计等工作中。本课程是建筑工程技术专业的一门必修课。通过本课程的学习,对学生提高专业综合素质、拓宽专业知识体系有着重要的作用。依据我国现行的《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)、砌体结构设计规范(GB50003—2011)及相应的施工质量验收规范等现行国家标准编制而成。

本书由袁芙蓉、程瑞芳担任主编,宁翠萍、李萍萍担任副主编,赵毅力副教授担任主审。参加本书编写工作的有:杨凌职业技术学院袁芙蓉(绪论、第6章、第7章、第9章第1节、第9章第2节)、程瑞芳(第4章、第9章第3节、第9章第4节)、宁翠萍(第5章、第9章第5节)、李萍萍(第2章、第3章)、乔丹(第8章)、杨磊(第1章)、谈凯(第10章)、李荣轶(第11章)、郭江涛(第12章)。

本书在编写过程中,受到杨凌职业技术学院建筑工程分院冯旭院长、刘洁副院长的大力支持,参考并引用了所列参考文献等有关资料,在此一并向相关人员表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

目 录

绪 论	1
第 1 章 钢筋混凝土结构材料	8
第 1 节 混凝土	8
第 2 节 钢筋	14
第 3 节 钢筋与混凝土之间的黏结力	18
本章小结	23
思考题	23
第 2 章 钢筋混凝土结构设计原理	25
第 1 节 结构的功能要求和极限状态	25
第 2 节 作用与抗力	26
第 3 节 结构的可靠度	28
第 4 节 钢筋混凝土结构极限状态设计表达式	29
本章小结	32
思考题	32
第 3 章 钢筋混凝土受弯构件正截面受弯承载力计算	33
第 1 节 受弯构件的构造规定	34
第 2 节 梁的正截面试验分析	37
第 3 节 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	40
第 4 节 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	50
第 5 节 T 形截面受弯构件正截面承载力计算	55
本章小结	63
思考题	64
习题	64
第 4 章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	66
第 1 节 钢筋骨架的构造规定	66
第 2 节 斜截面受剪破坏分析	69
第 3 节 钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力计算	71
第 4 节 钢筋混凝土梁斜截面受弯承载力计算	79
第 5 节 钢筋混凝土结构施工图	84
第 6 节 钢筋混凝土外伸梁设计	86
本章小结	92
思考题	93

习题	93
第 5 章 钢筋混凝土受压构件承载力计算	95
第 1 节 受压构件的构造规定	95
第 2 节 轴心受压构件正截面承载力计算	98
第 3 节 偏心受压构件的破坏特征	103
第 4 节 矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力计算	107
第 5 节 对称配筋的矩形截面偏心受压构件	124
第 6 节 偏心受压构件斜截面承载力计算	130
本章小结	131
思考题	131
习题	132
第 6 章 钢筋混凝土受拉构件承载力计算	134
第 1 节 轴心受拉构件承载力计算	134
第 2 节 偏心受拉构件承载力计算	135
本章小结	139
思考题	140
习题	140
第 7 章 钢筋混凝土受扭构件承载力计算	141
第 1 节 受力特点与配筋构造	141
第 2 节 钢筋混凝土受扭构件承载力计算	145
本章小结	150
思考题	151
习题	151
第 8 章 钢筋混凝土构件正常使用极限状态验算	152
第 1 节 概述	152
第 2 节 受弯构件的挠度验算	153
第 3 节 裂缝宽度的验算	157
本章小结	159
思考题	159
习题	160
第 9 章 梁板结构	161
第 1 节 概述	161
第 2 节 整体式单向板肋形楼盖	162
第 3 节 整体式单向板肋形结构设计实例	181
第 4 节 整体式双向板肋形结构	195
第 5 节 楼梯	204
本章小结	213

思考题	213
钢筋混凝土肋形楼盖设计实训任务书	214
第 10 章 预应力混凝土结构	216
第 1 节 预应力混凝土的基本知识	216
第 2 节 预应力钢筋张拉控制应力及预应力损失	223
本章小结	228
思考题	228
第 11 章 砌体结构	229
第 1 节 砌体结构的材料	229
第 2 节 砌体的种类及力学性能	231
第 3 节 无筋砌体结构承载力计算	243
本章小结	254
思考题	255
习题	256
第 12 章 钢结构简介	258
第 1 节 钢结构材料	258
第 2 节 钢结构的连接方法	261
第 3 节 钢结构基本构件计算	265
本章小结	267
思考题	267
附 录	268
参考文献	289

绪 论

建筑是供人们生产、生活和进行其他活动的房屋或场所。各类建筑都离不开梁、板、墙、柱、基础等构件，它们相互连接形成建筑的骨架。建筑中由若干构件连接而成的能承受作用的平面或空间体系称为建筑结构，在不致混淆时可简称结构。

1. 建筑结构的概念

建筑结构由水平构件、竖向构件和基础组成。水平构件包括梁、板等，用以承受竖向荷载；竖向构件包括柱、墙等，其作用是支承水平构件或承受水平荷载；基础的作用是将建筑物承受的荷载传至地基。

建筑结构有多种分类方法。按照承重结构所用的材料不同，建筑结构可分为混凝土结构、砌体结构、钢结构、木结构和混合结构五种类型。

(1) 混凝土结构

混凝土结构是钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和素混凝土结构的总称。

素混凝土结构是指由无筋或不配置受力钢筋的混凝土制成的结构，在建筑工程中一般只用作基础垫层或室外地坪。

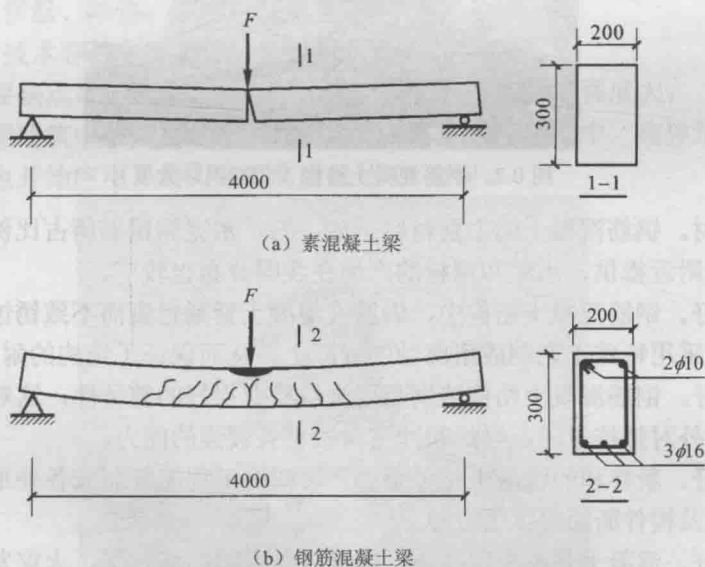


图 0.1 钢筋混凝土梁与素混凝土梁的破坏情况比较

钢筋混凝土结构是指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。在混凝土内配置受力钢筋，能明显提高结构或构件的承载能力和变形性能。图 0.1 所示素混凝土、钢筋混凝土简支梁，截面尺寸、跨度及荷载相同，混凝土强度等级均为 C20。试验结果表明，当 $F=8\text{kN}$ 时素混凝土梁即发生断裂破坏，并且破坏是突然发生的，无明显预兆。而钢筋

混凝土梁破坏前的变形和裂缝都发展得很充分,呈现出明显的破坏预兆,且破坏荷载提高到36kN。

由于混凝土的抗拉强度和抗拉极限应变很小,钢筋混凝土结构在正常使用荷载下一般是带裂缝工作的。这是钢筋混凝土结构最主要的缺点。为了克服这一缺点,可在结构承受荷载之前,在使用荷载作用下可能开裂的部位,预先人为地施加压应力,以抵消或减少外荷载产生的拉应力,从而达到使构件在正常的使用荷载下不开裂,或者延迟开裂、减小裂缝宽度的目的,这种结构称为预应力混凝土结构。

钢筋混凝土结构(如图0.2所示)是混凝土结构中应用最多的一种,也是应用最广泛的建筑结构形式之一。它不但被广泛应用于多层与高层住宅、宾馆、写字楼以及单层与多层工业厂房等工业与民用建筑中,而且水塔、烟囱、核反应堆等特种结构也多采用钢筋混凝土结构。钢筋混凝土结构之所以应用如此广泛,主要是因为它具有如下优点:



图0.2 钢筋混凝土结构(北京国际大厦)

1) 就地取材。钢筋混凝土的主要材料是砂、石,水泥和钢筋所占比例较小。砂和石一般都可由建筑工地附近提供,水泥和钢材的产地在我国分布也较广。

2) 耐久性好。钢筋混凝土结构中,钢筋被混凝土紧紧包裹而不致锈蚀,即使在侵蚀性介质条件下,也可采用特殊工艺制成耐腐蚀的混凝土,从而保证了结构的耐久性。

3) 整体性好。钢筋混凝土结构特别是现浇结构有很好的整体性,这对于地震区的建筑物有重要意义,另外对抵抗暴风及爆炸和冲击荷载也有较强的能力。

4) 可模性好。新拌和的混凝土是可塑的,可根据工程需要制成各种形状的构件,这给合理选择结构形式及构件断面提供了方便。

5) 耐火性好。混凝土是不良传热体,钢筋又有足够的保护层,火灾发生时钢筋不致很快达到软化温度而造成结构瞬间破坏。

钢筋混凝土也有一些缺点,主要是自重大,抗裂性能差,现浇结构模板用量大、工期长等等。但随着科学技术的不断发展,这些缺点可以逐渐克服。例如采用轻质、高强的混凝土,可克服自重大的缺点;采用预应力混凝土,可克服容易开裂的缺点;掺入纤维做成纤维混凝土可克服混凝土的脆性;采用预制构件,可减小模板用量,缩短工期。

应当注意的是,钢筋和混凝土是两种物理力学性质不同的材料,在钢筋混凝土结构中之

所以能够共同工作,是因为:

1) 钢筋表面与混凝土之间存在强大的黏结作用。这种黏结作用由三部分组成:一是混凝土结硬时体积收缩,将钢筋紧紧握住而产生的摩擦力;二是由于钢筋表面凹凸不平而产生的机械咬合力;三是混凝土与钢筋接触表面间的胶结力。其中机械咬合力约占 50%。

2) 钢筋和混凝土的温度线膨胀系数几乎相同(钢筋为 1.2×10^{-5} , 混凝土为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$), 在温度变化时,二者的变形基本相等,不致破坏钢筋混凝土结构的整体性。

3) 钢筋被混凝土包裹着,从而使钢筋不会因大气的侵蚀而生锈变质。

上述三个原因中,钢筋表面与混凝土之间存在黏结作用是最主要的原因。因此,钢筋混凝土构件配筋的基本要求,就是要保证二者共同受力,共同变形。

(2) 砌体结构

由块体(砖、石材、砌块)和砂浆砌筑而成的墙、柱作为建筑物主要受力构件的结构称为砌体结构,它是砖砌体结构、石砌体结构和砌块砌体结构的统称。如图 0.3 所示,西安大雁塔为砖砌单筒体结构,高 60 多米,1200 多年来,历经数次地震,仍巍然屹立。

砌体结构主要有以下优点。

1) 取材方便,造价低廉。砌体结构所需用的原材料如黏土、砂子、天然石材等几乎到处都有,因而比钢筋混凝土结构更为经济,并能节约水泥、钢材和木材。砌块砌体还可节约土地,使建筑向绿色建筑、环保建筑方向发展。

2) 具有良好的耐火性及耐久性。一般情况下,砌体能耐受 400°C 的高温。砌体耐腐蚀性能良好,完全能满足预期的耐久年限要求。

3) 具有良好的保温、隔热、隔音性能,节能效果好。

4) 施工简单,技术容易掌握和普及,也不需要特殊的设备。

砌体结构的主要缺点是自重较大,强度低,整体性差,砌筑劳动强度大。

砌体结构在多层建筑中应用非常广泛,特别是在多层民用建筑中,砌体结构占绝大多数。目前高层砌体结构也开始应用,最大建筑高度已达 10 余层。



图 0.3 砌体结构(西安大雁塔)

(3) 钢结构

钢结构指以钢材为主制作的结构,如图 0.4 所示。

钢结构具有以下主要优点:

- 1) 材料强度高, 自重轻, 塑性和韧性好, 材质均匀;
- 2) 便于工厂生产和机械化施工, 便于拆卸, 施工工期短;
- 3) 具有优越的抗震性能;
- 4) 无污染、可再生、节能、安全, 符合建筑可持续发展的原则, 可以说钢结构的发展是 21 世纪建筑文明的体现。



图 0.4 钢结构(鸟巢)

钢结构易腐蚀, 需经常油漆维护, 故维护费用较高。钢结构的耐火性差。当温度达到 250°C 时, 钢结构的材质将会发生较大变化; 当温度达到 500°C 时, 结构会瞬间崩溃, 完全丧失承载能力。

钢结构的应用正日益增多, 尤其是在高层建筑及大跨度结构(如屋架、网架、悬索等结构)中。

(4) 木结构

木结构是指全部或大部分用木材制作的结构, 如图 0.5 所示。这种结构易于就地取材, 制作简单, 但易燃、易腐蚀、变形大, 并且木材使用受到国家严格限制, 因此已很少采用。



图 0.5 木结构房屋

(5) 混合结构

由两种及两种以上材料作为主要承重结构的房屋称为混合结构,如图 0.6 所示。

混合结构包含的内容较多。多层混合结构一般以砌体结构为竖向承重构件(如墙、柱等),而水平承重构件(如梁、板等)多采用钢筋混凝土结构,有时采用钢木结构。其中以砖砌体为竖向承重构件,钢筋混凝土结构为水平承重构件的结构体系称为砖混结构。高层混合结构一般是钢—混凝土混合结构,即由钢框架或型钢混凝土框架与钢筋混凝土筒体所组成的共同承受竖向和水平作用的结构。

钢—混凝土混合结构体系是近年来在我国迅速发展的一种结构体系。它不仅具有钢结构建筑自重轻、截面尺寸小、施工进度快、抗震性能好的特点,还兼有钢筋混凝土结构刚度大、防火性能好、成本低的优点,因而被认为是一种符合我国国情的较好的高层建筑结构形式。

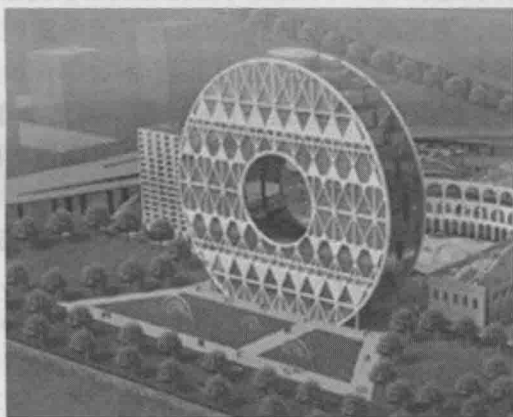


图 0.6 钢支撑框架+钢筋混凝土核心筒混合结构(广东兴业国际大楼)

2. 建筑结构的发展与应用状况

建筑结构有着悠久的历史。我国黄河流域的仰韶文化遗址就发现了公元前 5000~公元前 3000 年的房屋结构痕迹。金字塔(建于公元前 2700~公元前 2600 年)、万里长城都是结构发展史上的辉煌之作。

砌体结构是最古老的结构形式。在我国,石结构已有 5000 多年历史,在 3000 多年前的西周时期已开始生产和使用烧结砖,在秦、汉时期,砖瓦已广泛应用于房屋结构。目前,高层砌体结构已开始应用,我国已建成 12 层的砌体结构房屋。

17 世纪开始使用生铁,19 世纪初开始使用熟铁建造桥梁和房屋。自 19 世纪中叶开始,钢结构得到了蓬勃发展。钢结构应用于高层建筑,始于美国芝加哥家庭保险大楼,铸铁框架,高 11 层,1883 年建成。目前,世界上最高的钢结构房屋马来西亚吉隆坡石油大厦的高度达 450m。

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,至今仅有约 150 年的历史。1824 年,英国泥瓦工约瑟夫·阿斯普丁(Joseph. Aspadin)发明了波兰特水泥并获得专利,随后混凝土问世。1850 年,法国人郎波特(L. Lambot)制成了铁丝网水泥砂浆的小船。1861 年,法国人莫尼埃(Joseph. Monier)获得了制造钢筋混凝土构件的专利。20 世纪 30 年代预应力混凝土结构的出现,是混凝土结构发展的一次飞跃。它使混凝土结构的性能得以改善,应用范围大大扩展。目前,世界上最高的钢筋混凝土结构房屋为朝鲜平壤柳京饭店,高度达 305.4m。

建筑结构虽然已经历了漫长的发展过程，但至今仍生机勃勃，不断发展。特别是近年来，在设计理论、材料、结构等方面都得到了迅猛发展。

理论方面，目前有学者提出全过程可靠度理论，将可靠度理论应用到工程结构设计、施工与使用的全过程中，以保证结构的安全可靠。随着模糊数学的发展，模糊可靠度的概念正在建立。随着计算机的发展，工程结构计算正向精确化方向发展，结构的非线性分析是发展趋势。随着研究的不断深入、统计资料的不断积累，结构设计方法将会发展至全概率极限状态设计方法。

材料方面的发展趋势是：

1) 混凝土结构的材料将向轻质、高强、新型、复合方向发展。目前美国已制成 C200 的混凝土，我国已制成 C100 的混凝土。不久的将来，混凝土强度将普遍达到 100N/mm^2 ，特殊工程可达 400N/mm^2 。随着高强度钢筋、高强度高性能混凝土以及高性能外加剂和混合材料的研制使用，纤维混凝土和聚合物混凝土的研究和应用有了很大发展。此外，轻质混凝土、加气混凝土、陶粒混凝土以及利用工业废渣的“绿色混凝土”，不但改善了混凝土的性能，对节能和保护环境也有重要意义。轻质混凝土的强度目前一般只能达到 $5\sim 20\text{N/mm}^2$ ，开发高强度的轻质混凝土是今后的方向。除此之外，防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等满足特殊需要的混凝土以及智能型混凝土及其结构也在研究中。

2) 高强钢筋快速发展。现在强度达 $400\sim 600\text{N/mm}^2$ 的高强钢筋已开始应用，今后将会出现强度超过 1000N/mm^2 的钢筋。

3) 砌体结构材料向轻质高强的方向发展。途径之一是发展空心砖。国外空心砖的抗压强度普遍可达 $30\sim 60\text{N/mm}^2$ ，甚至高达 100N/mm^2 以上，孔洞率也达 40% 以上。途径之二是在黏土内掺入可燃性植物纤维或塑料珠，锻烧后形成气泡空心砖，它不仅自重轻，而且隔声、隔热性能好。砌体结构材料另一个发展趋势是高强砂浆。

4) 钢结构材料向高性能方向发展。除提高材料强度外，还应大力发展型钢。如 H 型钢可直接作梁和柱，采用高强螺栓连接，施工非常方便。作为一种新产品，压型钢板可直接作屋盖，也可在上面浇上一层混凝土作楼盖，如图 0.7 (a) 所示。作楼盖时压型钢板既是楼板的抗拉钢筋，又是模板。

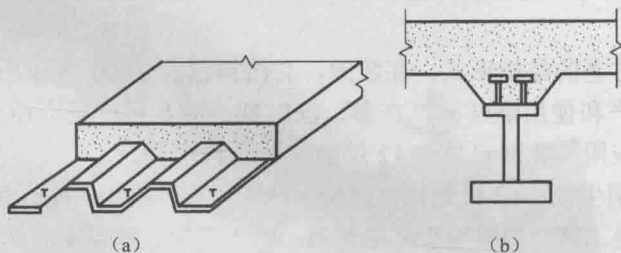


图 0.7 钢与混凝土组合结构

结构方面：一是大跨度结构向空间钢网架、悬索结构、薄壳结构方向发展。空间钢网架最大跨度已超过 100m。二是高层砌体结构开始应用。为克服传统体系砌体结构水平承载力低的缺点，一个途径是使墙体只受垂直荷载，将所有的水平荷载由钢筋混凝土内核芯筒承受，形成砖墙—筒体体系，另一个途径就是对墙体施加预应力，形成预应力砖墙。三是组合结构成为结构发展的方向，目前劲性钢筋混凝土、钢管混凝土、压型钢板叠合梁等组合结构已广泛应用，在超高层建筑结构中还采用钢框架与内核芯筒共同受力的组合体系，能充分利用材

料优势。图 0.7 (b) 所示为钢与混凝土组合梁示意图。

3. 建筑结构课程简介

根据受力与变形特点不同,结构基本构件可归纳为受弯构件、受拉构件、受压构件和受扭构件。本课程包括混凝土结构、砌体结构、钢结构基本知识等内容。通过学习,了解建筑结构的设计方法,掌握钢筋混凝土结构、砌体结构和钢结构基本构件的计算方法,理解结构构件的构造要求,能正确识读建筑结构施工图,并能处理建筑施工中的一般结构问题。

本课程是建筑工程技术等专业的主干专业课。学习本课程,应注意以下几方面。

一是要理论联系实际。本课程的理论本身就来源于生产实践,它是前人大量工程实践的经验总结。因此,学习本课程时,应通过实习、参观等各种渠道向工程实践学习,加强练习、课程设计等,真正做到理论联系实际。

二是要注意同力学课的联系和区别。本课程所研究的对象,除钢结构外都不符合匀质弹性材料的条件,因此力学公式多数不能直接应用,但从通过几何、物理和平衡关系来建立基本方程来说,二者是相同的。所以,在应用力学原理和方法时,必须考虑材料性能上的特点,切不可照搬照抄。

三是要注意培养自己综合分析问题的能力。结构问题的答案往往不是唯一的,即使是同一构件在给定荷载作用下,其截面形式、截面尺寸、配筋方式和数量都可以有多种答案。这时往往需要综合考虑适用、材料、造价、施工等多方面因素,才能做出合理选择。

四是要重视各种构造措施。现行结构实用计算方法一般只考虑了荷载作用,其他影响,如混凝土收缩、温度影响以及地基不均匀沉降等,难以用计算公式表达。规范根据长期工程实践经验,总结出了一些构造措施来考虑这些因素的影响。所谓构造措施,就是对结构计算中未能详细考虑或难以定量计算的因素所采取的技术措施,它与结构计算是结构设计中相辅相成的两个方面。因此,学习时不但要重视各种计算,还要重视构造措施,设计时必须满足各项构造要求。但除常识性构造规定外,不能死记硬背,而应该着眼于理解。

五是要注意学习有关标准、规范、规程。结构设计标准、规范、规程是国家颁布的关于结构设计计算和构造要求的技术规定和标准,设计、施工等工程技术人员都应遵循。我国标准、规范、规程有以下四种不同情况:一是强制性条文,虽是技术标准中的技术要求,但已具有某些法律性质(将来可能会演变成“建筑法规”),一旦违反,不论是否引起事故,都将被严厉惩罚,故必须严格执行。二是要严格遵守的条文。规范中正面词用“必须”,反面词用“严禁”,表示非这样做不可,但不具有强制性。三是应该遵守的条文。规范中正面词用“应”,反面词用“不应”或“不得”,表示在正常情况下均应这样做。四是允许稍有选择或允许有选择的条文。表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做,正面词用“宜”,反面词用“不宜”;表示有选择,在一定条件可以这样做的,采用“可”表示。熟悉并学会应用有关标准、规范、规程是学习本课程的重要任务之一,因此,学习中应自觉结合课程内容学习,以达到逐步熟悉并正确应用之目的。

第1章 钢筋混凝土结构材料

钢筋混凝土结构由钢筋和混凝土两种完全不同的材料组成的。为了合理地进行混凝土结构设计,需要深入地了解混凝土和钢筋的受力性能。对混凝土和钢筋力学性能、相互作用和共同工作的了解,是掌握混凝土结构构件性能并对其进行分析与设计的基础。

第1节 混 凝 土

普通混凝土是由水泥、砂、石和水按一定配合比例拌和,经过凝固硬化后形成的人造石材,是一种复杂的多相复合材料。在混凝土中,砂、石起骨架作用,称为骨料。水泥与水形成水泥浆,包裹在骨料表面并填充其空隙。混凝土的强度和变形性能不仅与水泥的强度、骨料的性质、水胶比、级配和配合比等有直接关系,还与制作方法、硬化养护条件、龄期、试件的形状和尺寸、试验方法、加载速度等有密切关系。本节简单介绍混凝土在不同受荷方式下的强度和变形性能。

1. 混凝土的强度

混凝土的强度指标主要有立方体抗压强度标准值、轴心抗压强度标准值和轴心抗拉强度标准值。

(1) 立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$

混凝土在结构中主要承受压力,抗压强度是混凝土的重要力学指标。由于混凝土受许多因素影响,因此必须有一个标准的强度测定方法和相应的强度评定标准。

《混凝土结构设计规范》(以下简称为《规范》)规定:用边长为 150mm 的立方体试件,在标准条件下(温度为 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$,相对湿度 $\geq 90\%$)养护 28d,用标准试验方法(加载速度为每秒 $0.15 \sim 0.25 \text{ N/mm}^2$,试件表面不涂润滑剂、全截面受力)测得的具有 95%保证率的抗压强度称为立方体抗压强度标准值,用符号 $f_{cu,k}$ 表示。它是混凝土其他力学指标的基本代表值。

混凝土的强度等级按混凝土立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 确定,用符号 C 表示,单位为 N/mm^2 (或 MPa)。例如 C30 表示立方体强度标准值为 30 N/mm^2 的混凝土强度等级。《规范》根据立方体抗压强度标准值,按极差 5MPa,将混凝土从 C15 到 C80 共划分为 14 个强度等级。一般认为强度等级达到或超过 C50 的混凝土为高强混凝土。相对而言, C25 以下可称为低强混凝土, C30~C45 为中强度混凝土。目前在实验室已能配制出 C100 级以上的混凝土,且也有一定的工程应用。

立方体抗压强度也可采用边长 200mm 或边长 100mm 的立方体试块测定。但是,对同一种混凝土材料,采用不同尺寸的立方体试块,所测强度不同,即立方体边长越小,抗压强度越高。当采用边长 200mm 和边长 100mm 的立方体试块且混凝土强度等级不超过 C50 时,要换算为 150mm 的立方体试块强度,应分别乘以 1.05 和 0.95 的尺寸效应换算系数。

在钢筋混凝土结构构件中混凝土的强度等级不宜低于 C15;当采用 HRB335 级钢筋时,混

混凝土强度等级不得低于 C20；当采用 HRB400 和 RRB400 级钢筋或承受重复荷载时，混凝土强度等级不得低于 C20；预应力混凝土结构的混凝土强度等级不宜低于 C30；当采用钢绞线、钢丝做预应力钢筋时，强度等级不宜低于 C40。

(2) 轴心抗压强度标准值 f_{ck}

在实际工程中，钢筋混凝土受压构件大多数是棱柱体而不是立方体，工作条件与立方体试块的工作条件有很大差别，采用棱柱体试件比立方体试件更能反映混凝土的实际抗压能力。

我国采用 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的棱柱体试件作为标准试件，测得的混凝土棱柱体抗压强度即为混凝土的轴心抗压强度。随着试件高宽比 h/b 增大，端部摩擦力对中间截面约束减弱，混凝土抗压强度降低。

根据试验结果对比得出，混凝土棱柱体试件的轴心抗压强度 f_{ck} 与立方体抗压强度 $f_{cu,k}$ 之间大致成线性关系，平均比值为 0.76。考虑到实际结构构件与试件在尺寸、制作、养护条件上的差异，加荷速度等因素的影响，偏安全地取用关系式：

$$f_{ck} = 0.67\alpha_c f_{cu,k} \quad (1.1)$$

式中： α_c ——高强混凝土脆性的折减系数，对于 C45 以下，取 $\alpha_c = 1.0$ ；对于 C45，取 $\alpha_c = 0.98$ ；对于 C60，取 $\alpha_c = 0.96$ ；中间按线性规律变化。

(3) 轴心抗拉强度标准值 f_{tk}

混凝土的轴心抗拉强度是确定混凝土抗裂度的重要指标。常用轴心抗拉试验或劈裂试验来测得混凝土的轴心抗拉强度，其值远小于混凝土的抗压强度，一般为其抗压强度的 $1/9 \sim 1/18$ ，且不与抗压强度成正比。

根据试验结果对比得知，混凝土试件的轴心抗拉强度 f_{tk} 与立方体抗压强度 $f_{cu,k}$ 之间存在一定关系。考虑实际构件与试件各种情况的差异，对试件强度进行修正，偏安全地取用关系式：

$$f_{tk} = 0.23 f_{cu,k}^{2/3} (1 - 1.645 \delta_{f_{cu}}) \quad (1.2)$$

式中： $\delta_{f_{cu}}$ ——混凝土立方体抗压强度的变异系数， $\delta_{f_{cu}}$ 的取值见相关规定。

混凝土轴心抗压强度标准值和轴心抗拉强度标准值见附表 1-1。

2. 混凝土的变形

混凝土的变形可以分为两类：一类是由外荷载作用引起的变形，另一类是由温度、湿度的变化引起的体积变形。由外荷载产生的变形与加载的方式及荷载作用持续时间有关。

(1) 混凝土在一次短期荷载作用下的变形

混凝土在一次加载下的应力—应变关系是混凝土最基本的力学性能之一，是对混凝土结构进行理论分析的基本依据，可较全面地反映混凝土的强度和变形的特点。其应力—应变关系如图 1.1 所示。

1) 上升段 oc 段：在 oa 段 (σ_c 小于 $0.3 f_c$)，应力较小时，混凝土处于弹性阶段，应力—应变曲线接近于直线；在 ab 段 (一般 σ_c 为 $0.3 f_c \sim 0.8 f_c$)，当应力继续增大，其应变增长加快，混凝土塑性变形增大，应力—应变曲线越来越偏离直线；在 bc 段 (一般 σ_c 为 $0.8 f_c \sim 1.0 f_c$)，随着应力的进一步增大，且接近 f_c 时，混凝土塑性变形急剧增大， c 点的应力达到峰值应力 f_c ，

试件开始破坏。 c 点应力值为混凝土的轴心抗压强度 f_c ，与其相应的压应变为 ε_0 ， ε_0 一般为 0.002。

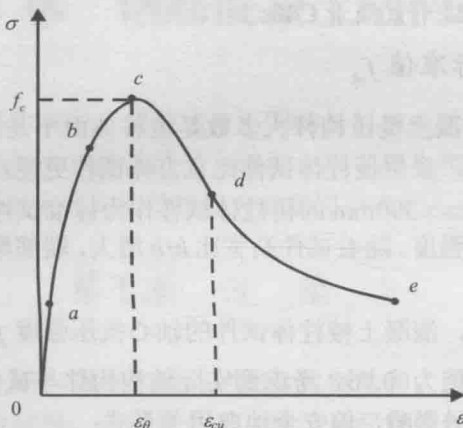


图 1.1 混凝土一次短期加载时的应力—应变曲线

2) 下降段 ce 段：当应力超过 f_c 后，试件承载力下降，随着应变的增加，应力—应变曲线在 d 点出现反弯。试件在宏观上已破坏，此时，混凝土已达到极限压应变 ε_{cu} ， ε_{cu} 值大多为 0.003~0.004，一般为 0.0033 左右。 d 点以后，通过集料间的咬合力及摩擦力，块体还能承受一定的荷载。混凝土的极限压应变 ε_{cu} 越大，表示混凝土的塑性变形能力越大，即延性越好。

混凝土受拉时的应力—应变曲线与受压时相似，但其峰值时的应力、应变都比受压时小的多。计算时，一般混凝土的最大拉应变可取 $(1 \sim 1.5) \times 10^{-4}$ 。

(2) 混凝土在重复荷载作用下的变形

混凝土在多次重复荷载作用下的应力—应变曲线如图 1.2 所示。从图中可看出，它的变形性质有着显著变化。

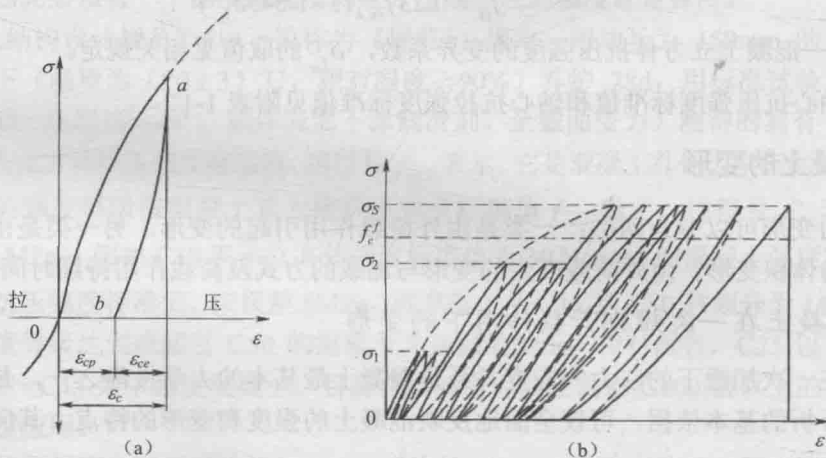


图 1.2 混凝土在重复荷载作用下的应力—应变曲线

图 1.2 为混凝土棱柱体试件在一次短期加载后的应力—应变曲线。因为混凝土是弹塑性材料，初次卸载至应力为零时，应变不能全部恢复。可恢复的那一部分称为弹性应变 ε_e ，不可恢复的残余部分称为塑性应变 ε_p 。因此，在一次加载卸载过程中，当每次加荷时的最大应力

小于某一限值时,混凝土的应力—应变曲线形成一个环状。随着加载卸载重复次数的增加,残余应变会逐渐减小,一般重复 5~10 次后,加载和卸载的应力—应变曲线越来越闭合并接近直线,如图 1.2 (b) 所示,此时,混凝土就像弹性体一样工作。试验表明,这条直线与一次短期加荷时的应力—应变曲线在原点的切线基本平行。

当应力超过某一限值时,则经过多次循环,应力—应变曲线成直线后,又能很快重新变弯且应变越来越大,试件很快就会破坏。这种破坏就称为混凝土的“疲劳破坏”。这个限值也就是材料能够抵抗周期重复荷载的疲劳强度 f_c^f 。混凝土的疲劳强度与混凝土的强度等级、荷载的重复次数及重复作用应力的变化幅度有关,其值大约为 $0.5 f_c$ 。

(3) 混凝土的弹性模量、变形模量

1) 弹性模量。由建筑力学可知,材料的应力与应变关系是通过弹性模量反映的,弹性材料的弹性模量为常数。从图 1.3 可以看出,混凝土的应力与应变的比值随着应力的变化而变化,即应力与应变的比值不是常数,所以它的弹性模量取值要复杂一些。

试验结果表明,混凝土的弹性模量与立方体抗压强度有关。《规范》采用的弹性模量 E_c 的经验公式为

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu,k}}} \quad (1.3)$$

按式 (1.3) 计算的混凝土各种强度等级的弹性模量 E_c , 列于附表 1-3。

2) 变形模量。当应力较大时,混凝土的塑性变形比较显著,就不能用 E_c 表达混凝土的应力应变之间的关系,可用变形模量 E'_c 表示。 E'_c 与弹性模量 E_c 关系可用弹性系数 ν 表示:

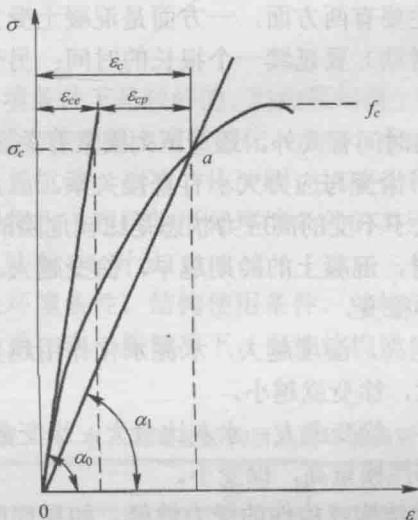


图 1.3 混凝土弹性模量、变形模量的表示方法

$$E'_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\epsilon_{ce}}{\epsilon_c} \times \frac{\sigma_c}{\epsilon_{ce}} = \nu E_c \quad (1.4)$$

弹性系数是不超过 1.0 的变数,与应力值有关,随应力增大而减小。通常,当 $\sigma \leq 0.3 f_c$ 时,混凝土基本处于弹性阶段, $\nu = 1.0$; 当 $\sigma = 0.5 f_c$ 时, $\nu = 0.8 \sim 0.9$; 当 $\sigma = 0.8 f_c$ 时, $\nu = 0.4 \sim 0.7$ 。

(4) 混凝土在长期荷载作用下的变形——徐变

混凝土在长期荷载作用下，应力不变，应变随时间的增加而增长的现象，称为混凝土的徐变。

混凝土在持续荷载作用下，应变与时间的关系曲线如图 1.4 所示。徐变在前期增长较快，随后逐渐减慢，经过较长时间而趋于稳定。一般 6 个月可达最终徐变的 70%~80%，2 年以后，徐变基本完成。

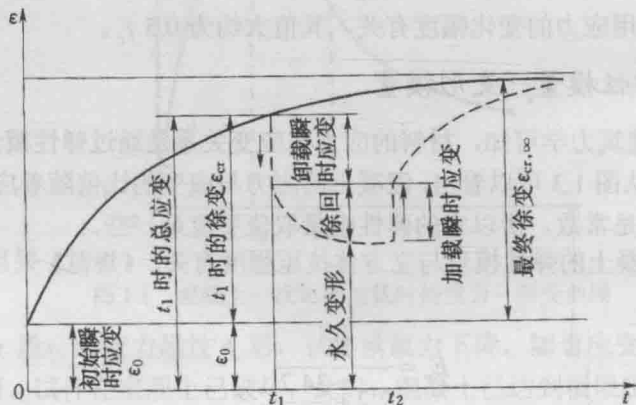


图 1.4 混凝土的徐变与时间的关系

徐变与塑性变形的不同之处在于：徐变在较小应力下就可产生，当卸掉荷载后可部分恢复；塑性变形只有在应力超过其弹性极限后才会产生，当卸掉荷载后不可恢复。

混凝土产生徐变的原因主要有两方面，一方面是混凝土受力后，水泥石中的胶凝体产生的黏性流动（颗粒间的相对滑动）要延续一个很长的时间；另一方面是集料和水泥石结合面裂缝的持续发展。

影响徐变的因素除主要与时间有关外，还与下列因素有关。

①应力条件。试验表明，徐变与应力大小有直接关系。应力越大，徐变也越大。实际工程中，如果混凝土构件长期处于不变的高应力状态是比较危险的，对结构安全是不利的。

②加荷龄期。初始加荷时，混凝土的龄期越早，徐变越大。若加强养护，使混凝土尽早结硬或采用蒸汽养护，可减小徐变。

③周围环境。养护温度越高，湿度越大，水泥水化作用越充分，徐变就越小；试件受荷后，环境温度越低，湿度越大，徐变就越小。

④混凝土中水泥用量愈多，徐变愈大；水灰比愈大，徐变愈大。

⑤材料质量和级配好，弹性模量高，徐变小。

混凝土的徐变会显著影响结构或构件的受力性能。如局部应力集中可因徐变得到缓和，支座沉陷引起的应力及温度湿度应力，也可由于徐变得到松弛，这对水工混凝土结构是有利的。但徐变使结构变形增大对结构不利的方面也不可忽视，如徐变可使受弯构件的挠度增大 2~3 倍，使细长柱的附加偏心距增大，还会导致预应力构件的预应力损失。