

高等教育“十二五”规划教材
江苏省优势学科建设工程资助项目

混凝土 结构设计原理

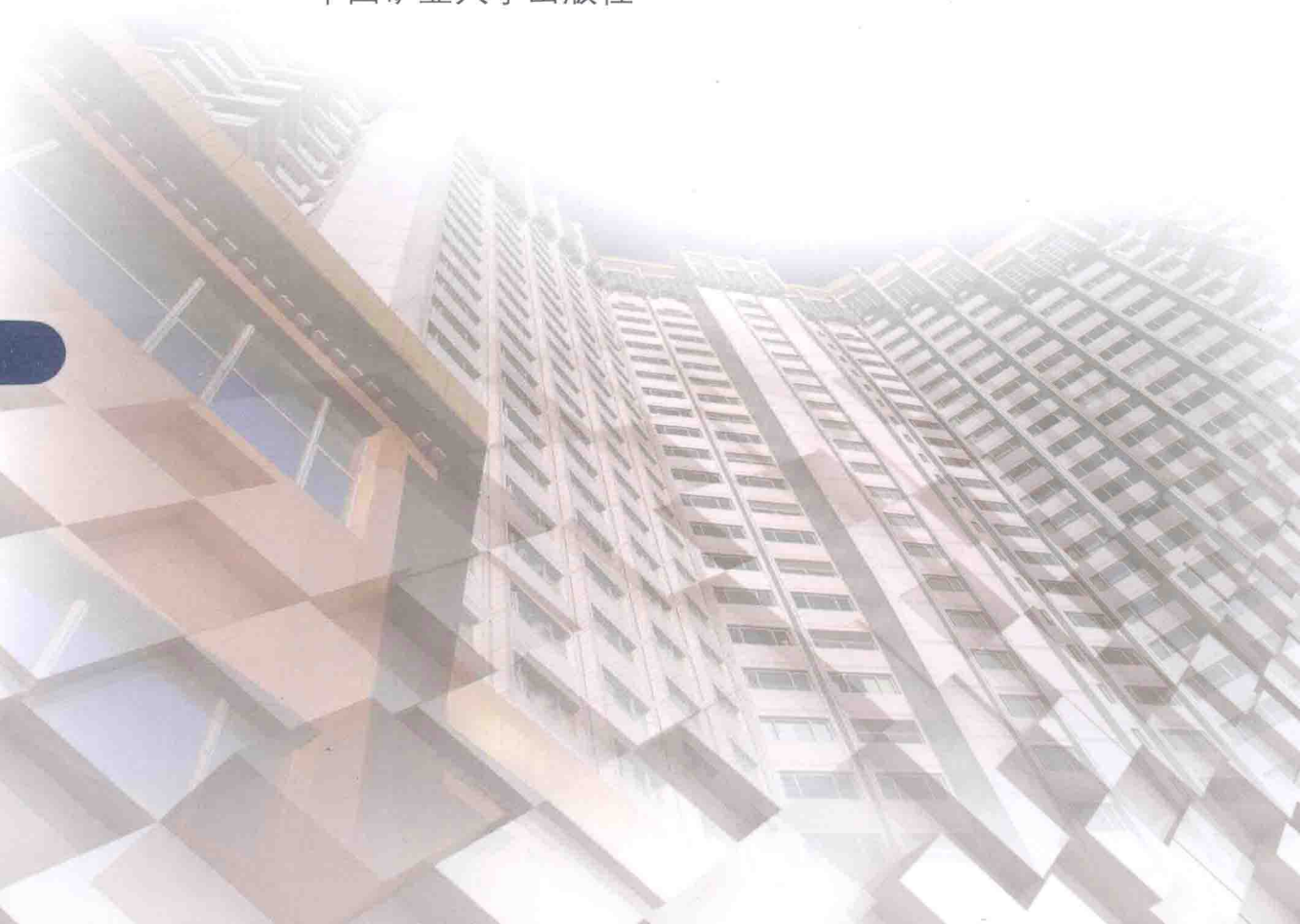
第二版

Hunningtu Jiegou Sheji Yuanli

主 编 贾福萍

副主编 李富民 郭育霞 尹世平 苗生龙

中国矿业大学出版社



高等教育“十二五”规划教材
江苏省优势学科建设工程资助项目

混凝土结构设计原理

(第二版)

主 编	贾福萍	
副主编	李富民	郭育霞
	尹世平	苗生龙

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书主要阐述混凝土结构设计的基本理论和方法,为专业基础教材。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50086—2001)和作者多年的教学经验编写而成。

全书共 10 章内容,分别为:绪论、混凝土结构材料物理力学性能、混凝土结构基本设计原则、钢筋混凝土受弯构件正截面承载力设计、钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力设计、钢筋混凝土受扭构件承载力设计、钢筋混凝土轴心受力构件承载力设计、钢筋混凝土偏心受力构件承载力设计、钢筋混凝土构件正常使用极限状态验算、预应力混凝土构件设计。各章附有大量的计算和设计例题,章后习题类型多样,书后还给出了相关的附表。

本书可作为高等学校土木工程、工程管理等专业本科生教学用书,也可作为有关科研人员和工程设计人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理 / 贾福萍主编. —2 版. —徐州:
中国矿业大学出版社, 2014. 8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2469 - 9

I. ①混… II. ①贾… 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(2014)第199724号

书 名 混凝土结构设计原理

主 编 贾福萍

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 18.5 字数 460 千字

版次/印次 2014 年 8 月第 2 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

定 价 26.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

国家标准《混凝土结构设计规范》于 2010 年修订,为适应国家标准,本书在《结构设计原理》教材基础上,对混凝土结构设计原理部分进行修订,形成此书主干内容。

本书以阐述混凝土结构的基本设计原理为重点,结合新版《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)的修订内容和《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008),着重阐述了混凝土材料物理力学性能、钢筋混凝土受弯构件、受扭构件、轴心受力构件、偏心受力构件和预应力构件的基本设计原理。在编写第 4 章、第 5 章例题时,尽可能还原工程实际背景,在此方面做了一些尝试。

参加本书编写的人员有:中国矿业大学贾福萍(第 1、3、4、6 章,附录)、李富民(第 8、9、10 章)、尹世平(第 2 章)、苗生龙(第 7 章),太原理工大学郭育霞(第 5 章)。全书由贾福萍统稿。

本书编写过程中得到了中国矿业大学出版社的大力支持和帮助,对此表示衷心感谢。

作 者

2012 年 10 月

目 录

1 绪论	1
1.1 工程结构的组成和分类	1
1.2 混凝土结构	2
1.3 本课程的特点和学习方法	5
2 混凝土结构材料物理力学性能	6
2.1 钢筋	6
2.2 混凝土	15
2.3 钢筋与混凝土之间的黏结	33
思考题	35
3 混凝土结构基本设计原则	36
3.1 概述	36
3.2 结构的功能要求	36
3.3 结构极限状态	38
3.4 耐久性设计的相关规范	43
思考题	44
4 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力设计	46
4.1 概述	46
4.2 试验研究	46
4.3 承载力计算	50
4.4 构造要求	77
思考题	80
练习题	81
5 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力设计	83
5.1 概述	83
5.2 试验研究	83
5.3 承载力计算	90
5.4 构造要求	96

5.5 实例分析	105
思考题	113
练习题	114
6 钢筋混凝土受扭构件承载力设计	117
6.1 概述	117
6.2 受扭构件试验研究	117
6.3 开裂扭矩的计算	120
6.4 纯受扭构件的受扭承载力	122
6.5 弯剪扭构件的承载力计算	124
6.6 受扭构件计算公式的适用条件及构造要求	126
思考题	131
练习题	132
7 钢筋混凝土轴心受力构件承载力设计	133
7.1 概述	133
7.2 试验研究	133
7.3 轴心受压构件承载力计算	138
7.4 轴心受拉构件承载力计算	140
7.5 构造要求	140
7.6 实例分析	141
练习题	145
8 钢筋混凝土偏心受力构件承载力设计	147
8.1 概述	147
8.2 偏心受压构件承载力计算	147
8.3 偏心受拉构件承载力计算	175
8.4 钢筋混凝土双筋构件正截面适筋设计中 x 的取值讨论	180
8.5 偏心受力构件的构造要求	181
思考题	182
练习题	183
9 钢筋混凝土构件正常使用极限状态验算	185
9.1 概述	185
9.2 裂缝控制验算	185
9.3 受弯构件的挠度验算	196
思考题	201
练习题	202

10 预应力混凝土构件设计	204
10.1 预应力混凝土的基本概念.....	204
10.2 预应力混凝土构件设计基础.....	216
10.3 预应力混凝土轴心受拉构件设计.....	234
10.4 预应力混凝土受弯构件设计.....	247
思考题.....	275
 附表	 277
 参考文献	 287

1 绪 论

本章提要:本章主要介绍一般混凝土结构的组成和分类。通过本章内容的学习,应掌握混凝土结构的一般概念和特点,了解混凝土结构在国内外的发展概况,掌握本课程的特点和学习方法。

1.1 工程结构的组成和分类

1.1.1 工程结构的组成

工程结构的基本构件有板、梁、柱、墙、杆、拱、索和基础等。板为房屋、桥梁等建筑物提供直接承受活荷载和永久荷载的平面,并将这些荷载传递到梁或墙等支承构件上,其主要内力是弯矩和剪力,是受弯构件;梁是板的支承构件,承受板传来的荷载并将其传递到柱、墙或主梁上,它的主要内力是弯矩和剪力,有时也承受扭矩,属受弯构件;柱和墙的作用是支撑楼面体系(梁、板),其主要内力是轴向压力、弯矩和剪力等,是受压构件;杆的用途很多,如组成屋架或其他空间构件的弦杆、结构的支撑杆等,其内力主要是轴向拉力或压力,是轴向受力构件;拱是工程结构特别是地下结构中的一种主要受力构件,是受压构件,可以通过调整拱的形体来改变构件的内力;索是悬挂构件或结构体系的主要传力单元,一端固定在被悬挂的构件上,另一端固定于其他结构体系上,主要承受拉力,是受拉构件;基础是将柱及墙等传来的上部结构荷载传递至地基的下部结构。

1.1.2 工程结构的分类

结构有多种分类方法,一般可以按照结构所用的材料或结构受力体系、使用功能、外形特点以及施工方法等进行分类。各种结构有其一定的适用范围,应根据结构功能、材料性能、不同结构型式的特点和使用要求以及施工和环境条件等合理选用。

按照所采用的材料分类,工程结构的类型主要有混凝土结构、钢结构、砌体结构和木结构等。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、纤维筋混凝土结构和其他各种形式的加筋混凝土结构。砌体结构包括砖石砌体结构、砌块砌体结构。这些结构材料可以在同一结构体系中混合使用,形成混合结构,如屋盖和楼盖采用混凝土结构,墙体采用砌体,基础采用砖石砌体或钢筋混凝土,就形成了砖混结构。这些结构材料也可以在同一构件中混合使用,形成组合构件,如屋架上弦采用钢筋混凝土,下弦采用钢拉杆,就形成了钢—混凝土组合柱。

按照结构的受力体系分类,工程结构的类型主要有框架结构、剪力墙结构、筒体结构、塔式结构、桅式结构、悬索结构、悬吊结构、壳体结构、网架结构、板柱结构、墙板结构、折板结

构、充气结构、膜结构等。框架结构的竖向受力体系主要由梁和柱组成；剪力墙结构的竖向受力体系主要由钢筋混凝土墙组成；筒体结构是在高层建筑中利用电梯井、楼梯间或管道井等四周封闭的墙形成内筒，也可以利用外墙或密排的柱作为外筒，或两者共同形成筒中筒结构，框架、剪力墙和筒体也可以组合形成框架剪力墙结构、框架筒体结构等结构体系；塔式结构是下端固定、上端自由的高耸构筑物；桅式结构是由一根下端为铰接或刚接的竖立细长桅杆和若干层纤绳所组成的构筑物；悬索结构的承重部分由柔性拉索及其边缘构件组成，索可以采用钢丝束、钢丝绳、钢绞线、圆钢、纤维复合材料以及其他受拉性能良好线材；楼面荷载通过吊索或吊杆传递到固定在筒体或柱子上的水平悬吊梁或桁架上，并通过筒体或柱子传递到基础的结构体系称为悬吊结构；壳体结构是由曲面形板与边缘构件（梁、拱或桁架等）组成的空间结构；网架结构是由多根杆件按照一定的网格形式，通过节点连接而形成的空间结构；仅由楼板和柱组成承重体系的结构称为板柱结构；仅由楼板和墙组成承重体系的结构则称为墙板结构；由多块条形平板组合而成的空间结构统称为折板结构；充气结构是用薄膜材料制成的构件充入气体后而形成的结构；用柔性拉索和薄膜材料及边缘构件组成的结构称为膜结构。

按照建筑物、构筑物或结构的使用功能分类，工程结构可以分为：建筑结构，如住宅、公共建筑、工业建筑等；特种结构，如水池、水塔、筒仓、储藏罐、挡土墙等；桥梁结构，如公路铁路桥、立交桥、人行天桥等；地下结构，如隧道、涵洞、人防工事、地下建筑等。

按照建筑物的外形特点不同，工程结构可以分为单层结构、多层结构、高层结构、大跨结构和高耸结构（如电视塔等）。

按照结构的施工方法不同，工程结构可以分成现浇结构、预制装配结构和预制与现浇相结合的装配整体式结构。另外，按照结构使用前是否预先施加应力，还可分为预应力结构和非预应力结构等。

1.2 混凝土结构

1.2.1 混凝土结构的类型

混凝土结构是以混凝土为主要材料的结构，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、钢管混凝土结构、型钢混凝土结构等。

素混凝土是指不配任何钢材的混凝土结构，一般常用于路面和非承重结构；钢筋混凝土结构由钢筋和混凝土组成，按照结构构件的型式和受力特点，主要在受拉部位和受压部位配置一定型式和数量的钢筋；预应力混凝土是在结构或构件中配置预应力钢筋并施加预应力的混凝土结构；钢管混凝土是指在钢管内浇筑混凝土而形成的结构；型钢混凝土又称为钢骨混凝土，把型钢或用钢板焊接成钢骨架作为配筋的混凝土结构。

1.2.2 钢筋混凝土结构的特点

钢筋混凝土结构由一系列受力类型不同的构件组成。钢筋混凝土构件有受弯构件、受拉构件、受扭构件、受压构件和上述复合受力状态下的构件。

钢筋与混凝土材料有不同的物理性能和力学性能。钢筋抗拉性能和抗压性能均好，混凝土的抗压性能强但抗拉性能较弱。将这两种性能不同的材料结合在一起共同工作，使其

发挥各自抗拉强度、抗压强度的特长,将会使构件具有较高的承载力和较好的经济效益。两种不同性能的材料能够结合在一起共同工作的基础为以下两点:

① 钢筋和混凝土两种材料的线膨胀系数相近。钢材为 1.2×10^{-5} ,混凝土为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$ 。当温度变化时,两种材料不会因产生较大的相对变形而使两种材料之间的黏结应力受到破坏。

② 钢筋混凝土结构中钢筋和混凝土之间存在黏结力,由于黏结力的存在使两者结为整体,在荷载的作用下能共同工作、协调变形。

钢筋混凝土结构除了比素混凝土结构具有更高的承载力和更好的受力性能以外,与其他结构相比具有如下较明显的优点:

① 合理用材。钢筋混凝土结构合理利用钢筋和混凝土两种不同材料的受力性能,使混凝土和钢筋的强度得到了充分发挥,特别是现代预应力钢筋混凝土的应用,在更大的范围内取代了钢结构,降低了工程造价。

② 耐久性和耐火性。与钢结构相比钢筋混凝土结构有较好的耐久性,它不需要经常的保养和维护。在钢筋混凝土结构中,钢筋被混凝土包裹而不致锈蚀,另外混凝土的强度还会随时间增长而略有提高,故钢筋混凝土有较好的耐久性。对于在有侵蚀介质环境中的钢筋混凝土结构,根据侵蚀的性质合理选用不同品种的水泥,可达到提高耐久性的目的。例如:火山灰水泥和矿渣水泥抗硫酸盐侵蚀的能力很强,可在有硫酸盐腐蚀的环境中使用;矿渣水泥抗碱腐蚀的能力也很强,也可用于碱腐蚀的环境中,由于钢筋包裹在混凝土里面而受到保护,火灾时钢筋不至于很快达到流塑状态而使结构整体破坏。

③ 整体性好。现浇混凝土结构的整体性好,刚度大。通过合适的配筋,可获得较好的延性,适用于抗震、抗爆结构,同时防震性和防辐射性能较好,适用于防护结构。

④ 可模性好。混凝土可根据实际需要浇筑成各种形状和尺寸的结构,适用于各种形状复杂的结构,如空间薄壳、箱形结构等。

钢筋混凝土结构也有下列缺点:

① 结构自重。钢筋混凝土结构自重一般为 25 kN/m^3 ,大于砌体和木材的自重。尽管比钢材的自重小,但由于钢筋混凝土结构截面尺寸较大,所以自重远远大于相同跨度或高度的钢结构。对于大跨度结构、高层抗震结构,采用钢筋混凝土均存在需减小自重的问题。

② 抗裂性能差。混凝土抗拉强度很低,一般构件都有拉应力存在,配置钢筋以后虽然可以提高构件的承载力,但抗裂能力提高很少,因此在使用阶段构件一般是带裂缝工作,影响结构的耐久性。当裂缝只能开较宽时,还将给使用者造成不安全感。

③ 费时费模。现浇的钢筋混凝土结构施工工期相对较长,且施工受季节气候条件的影响和限制;同时,混凝土工程模板耗费量大。

1.2.3 混凝土结构的发展历程与应用

(1) 混凝土结构的发展

混凝土结构的发展,大体可分为三个阶段。

① 第一阶段——从钢筋混凝土的发明至 20 世纪初。这一阶段采用的钢筋和混凝土的强度比较低,主要用于建造中小型楼板、梁、柱、拱和基础等构件。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。

② 第二阶段——从 20 世纪 20 年代到第二次世界大战前。随着混凝土和钢筋强度的

不断提高,1928年法国杰出的土木工程师 E. Freyssinet(弗雷西奈)发明了预应力混凝土,使得混凝土结构可以用来建造大跨度结构。在计算理论上,苏联著名的混凝土结构专家格沃兹捷夫开始考虑混凝土塑性性能的破损阶段设计法,在20世纪50年代又提出更为合理的极限状态设计法,奠定了现代钢筋混凝土结构的基本计算理论。

③ 第三阶段——二战以后到现在。随着建设速度的加快,对材料性能和施工技术提出更高的要求,出现了装配式钢筋混凝土结构、泵送商品混凝土等工业化生产的混凝土结构。高强混凝土和高强钢筋的发展、计算机技术的采用和先进施工机械设备的发明,建造了一大批超高层建筑、大跨度桥梁、特长跨海隧道、高耸结构等大型结构工程,成为现代土木工程标志。在设计计算理论方面,已发展到以概率理论为基础的极限状态设计方法,钢筋混凝土结构的基础理论问题也大多数得到解决。而新型混凝土材料及其复合结构型式的出现又不断提出新的课题,并不断促进混凝土结构的发展。

我国在20世纪50年代初期,钢筋混凝土的计算理论由按弹性方法的允许应力的算法过渡到考虑材料塑性的按破损阶段设计的方法。随着科学研究的深入和经验的积累,我国于1966年颁布了按多系数极限状态设计法,并于1974年正式颁布了《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10—74);1989年我国颁布了全面修订的《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89),采用了以概率论为基础的极限状态设计法;2002年颁布了全面修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002);2010年颁布了全面修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)。

混凝土材料主要朝着高强、轻质、耐久、提高抗裂性和易于成型的方向发展。工程上已大量使用强度等级C80~C100的混凝土,实验室研制出强度高于300 MPa的混凝土。在地震区采用轻质混凝土结构,如加气混凝土、陶粒混凝土等可有效减小地震损伤、节约材料、降低成本。为改善和提高混凝土耐久性,对聚合物混凝土、树脂混凝土、浸渍混凝土等材料进行的一系列研究表明,经改性的混凝土不仅抗压性能、抗拉性能好,而且耐磨、抗渗、抗冲击和耐冻。

钢筋主要向强度高、延性好和黏结性能好的方向发展。用于普通混凝土结构的钢筋强度达到435 MPa,在中等跨度的预应力构件采用800~1370 MPa的高强钢丝和钢绞线,均具有高强度、延性好、锚固性能好的特点。为提高钢筋的耐腐蚀性能,带有环氧树脂涂层的热轧钢筋在有特殊防腐要求的工程中得到应用。近期国内学者在使用FRP钢筋部分或全部替代传统钢筋的研究取得了一定的进展。

(2) 混凝土结构的应用

随着人们对混凝土的深入研究,钢筋混凝土结构在土木工程领域中取得了更广泛的应用。普通钢筋混凝土、预应力混凝土、钢和混凝土组合结构的应用进一步拓展了混凝土的使用范围。根据美国混凝土学会预言,在混凝土的性能将获得显著提高,把混凝土的拉、压强度比从目前的1/10提高到1/2,并且具有早强、收缩徐变小的特性;未来将会建造高度达600~900 m的钢筋混凝土建筑,跨度达500~600 m的钢筋混凝土桥梁,以及钢筋混凝土海上浮动城市、海底城市、地下城市等。

1.3 本课程的特点和学习方法

在本课程的学习中,应注意以下特点:

① 学习本课程前应修完工程力学、结构力学、土木工程材料等课程。这些课程与本课程有必然的联系但又有很大的不同。

② 由于混凝土受力的复杂性,目前还没有建立起比较完整的混凝土强度理论。钢筋混凝土构件或者结构是由两种材料组合而成,其受力性能受材料内部组成和外部因素(荷载、环境等)影响,因此钢筋混凝土构件的计算理论和计算公式有很多是根据实验研究得出的半理论半经验公式,初学者往往不易接受,不像数学、工程力学、结构力学等的计算原理和计算公式是根据较系统而严密的逻辑运算推导而得的,因此学习时要特别注意。由于钢筋混凝土构件的计算公式是建立在实验的基础上,故应注意它们的适用范围和条件。

③ 钢筋混凝土构件是由混凝土和钢筋两种力学性质相差很大的材料所组成,因此存在选定两种材料的不同强度等级和两种材料所用数量多少的配比问题,而这种配比可由设计者自行确定。因此对相同荷载、同一构件,可以设计出多个均能满足使用要求的解答,即问题的解答不是唯一的。这和数学、力学习题的解答不相同。正是由于材料的配比具有选择性,因此当比值超过了一定的范围就会引起构件受力性能的改变。为了防止构件出现非预期的破坏状态,往往对钢筋混凝土构件的计算公式规定其适用条件,有时还规定某些构造措施来保证。故在学习时不能忽视这些规定。

④ 注重实践锻炼。混凝土原理是一门综合性的应用学科,需要满足安全、适用、经济以及施工方便等方面的要求。这些要求一方面可通过分析技术来满足,另一方面还应通过各种构造要求来保证。这些构造措施或是计算模型误差的修正,或是实验研究的成果,或是长期工程实践经验的总结,它们和分析计算同为本课程重要的组成部分。学习时对构造要求应加深理解,通过反复应用来掌握。同时本课程是实践性很强的一门课,学习时除阅读教材外,还应了解有关规范,完成有关习题和课程设计。通过实践熟悉设计方法和构造措施。

⑤ 课程学习与国际规范学习相结合。规范是国际颁布的有关计算、构造要求的技术规定和标准。规范中的强制性条文是设计必须遵守的带法律性的技术文件,同时也是保证设计方法的统一化和标准化的依据,从而保证工程质量。注意在学习时要将有关基本理论的应用落实到规范的具体规定中。

⑥ 注意学以致用。学习本课程不仅是要懂得一些理论,更重要的是实践和应用。本课程的内容是遵照我国有关的国家标准,特别是遵照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(除特殊说明外,以下简称《规范》)而编写的。《规范》体现了国家的技术经济政策、技术措施和设计方法,反映了我国在混凝土结构学科领域所达到的科学技术水平,并且总结了混凝土结构工程实践的经验,故而《规范》是进行钢筋混凝土结构设计的依据,必须加以遵守。而只有正确理解《规范》条款的意义,不盲目乱套,才能正确地加以应用。但同时应注意,设计工作也不应被规范束缚。一方面,在设计工作中必须按照规范进行;另一方面,只有深刻理解规范的理论依据,才能更好地应用规范,充分发挥设计者的主动性和创造性。

2 混凝土结构材料物理力学性能

本章提要:本章主要讲述钢筋和混凝土两种材料的物理力学性能、强度与变形的特点,混凝土与钢筋共同工作的原理,结构设计中混凝土与钢筋材料的选用原则等。重点掌握钢筋的强度和变形性能、混凝土的单轴抗压强度、混凝土在复合受力情况下强度的变化、混凝土在短期加载下的变形性能以及混凝土的徐变和收缩等。了解钢筋和混凝土界面黏结力的组成及其影响因素、保证黏结力的构造措施以及钢筋混凝土的一般构造规定。

钢筋和混凝土的物理力学性能以及两者共同工作的特性决定了钢筋混凝土结构和构件的基本性能,也是钢筋混凝土结构计算理论和设计方法的基础。本章主要介绍钢筋和混凝土的主要物理力学性能以及混凝土与钢筋之间的黏结力。

2.1 钢筋

2.1.1 钢筋的力学性能

钢筋的力学性能有强度、变形(包括弹性和塑性变形)等,单向拉伸试验是确定钢筋性能的主要手段,根据钢筋拉伸试验得到的应力—应变关系曲线特点的不同,可以把钢筋分为有明显屈服点的钢筋(如热轧钢筋等)(图 2-1)和无明显屈服点的钢筋(如消除应力钢丝、钢绞线和热处理钢筋等)(图 2-2)两类。有明显屈服点的钢筋也称为软钢,无明显屈服点的钢筋也称为硬钢。

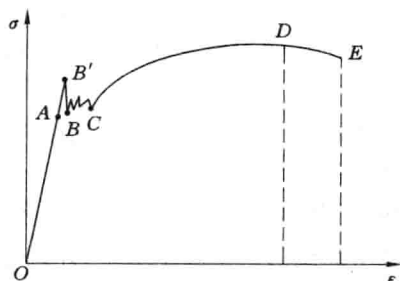


图 2-1 有明显屈服点钢筋的应力—应变曲线

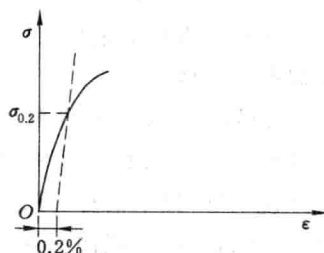


图 2-2 无明显屈服点钢筋的应力—应变曲线

2.1.1.1 有明显屈服点的钢筋(软钢)

(1) 应力—应变曲线(σ — ϵ 曲线)

① 弹性阶段(OA 段)——在 A 点以前,应力与应变成比例变化,与 A 点对应的应力称

为比例极限或弹性极限。 OA 为理想弹性阶段,卸载后可完全恢复,无残余变形。

② 屈服阶段(AC 段)——过 A 点后,应变较应力增长得快,曲线开始弯曲,到达 B' 点后钢筋开始塑流, B' 点称为屈服上限,它与加载速度、截面形式、试件表面光洁度等因素有关,当点应力降至下屈服点 B 点,此时应力基本不增加,而应变急剧增长,曲线出现一个波动的小平台,这种现象称为屈服。 B 点到 C 点的水平距离称为流幅或屈服台阶,上屈服点通常不稳定,下屈服点 B 数值比较稳定,称为屈服点或屈服强度,有明显流幅的热轧钢筋的屈服强度是按下屈服点来确定的。

③ 强化阶段(CD 段)——过 C 点以后,应力又继续上升,说明钢筋的抗拉能力又有所提高。随着曲线上升到最高点 D ,相应的应力称为钢筋的极限强度。

④ 颈缩阶段(DE 段)——过了 D 点,试件薄弱处的截面将会突然显著缩小,发生局部颈缩,变形迅速增加,应力随之下降,达到 E 点时试件被拉断。

(2) 强度指标

① 屈服强度(DE 段)——有明显流幅的钢筋的应力到达屈服点后,会产生很大的塑性变形,使钢筋混凝土构件出现很大的变形和过宽的裂缝,以致不能使用。因此,《规范》规定以下屈服点作为屈服强度,以保证混凝土构件在正常使用条件下不产生过大的变形或裂缝。对有明显流幅的钢筋,在计算承载力时以屈服强度作为钢筋强度限值。

② 极限强度——在抗震结构设计中,要求结构在罕遇地震作用下“裂而不倒”,钢筋应力的利用可考虑进入强化段,但对钢筋抗拉强度与屈服强度的比值(屈强比)有一定要求,一般不小于 1.25。

(3) 弹性模量

钢筋的弹性模量(见附表 10)是根据弹性阶段(OA 段)的应力—应变曲线确定的。当钢筋的拉应力在比例极限范围以内时,其应力与应变的关系可用下式表示:

$$E_s = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s} \quad (2-1)$$

式中 E_s ——钢材的弹性模量, N/mm^2 。

(4) 塑性指标

钢筋的塑性指应力超过屈服点以后,由于塑性变形钢筋可以被拉得很长,或者绕着很小直径能够弯转很大的角度而不致断裂的性能。通常用伸长率和冷弯性能两个指标衡量钢筋的塑性。

① 伸长率。

a. 钢筋的断后伸长率。

钢筋的断后伸长率为在标距范围内钢筋试件被拉断后的伸长值与原始标距的比值,以 $\delta(\%)$ 表示,即:

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2-2)$$

式中 l_0 ——试件拉断前的标距,目前国内采用两种试验标距:短试件取 $l_0 = 5d$,长试件取 $l_0 = 10d$,相应的断后伸长率分别用 δ_5 及 δ_{10} 表示;

d ——钢筋直径;

l ——试件拉断后重新拼合起来量测得到的长度,量测标距应该包含颈缩区。

钢筋的断后伸长率只能反映残余变形的大小,其中还包括断口颈缩区域的局部变形。试验所得的伸长率,通常 $\delta_5 > \delta_{10}$,这是因为残余变形主要集中在试件的颈缩区段内,标距越短,所得的平均残余应变自然就越大;另一方面断后伸长率忽略了钢筋的弹性变形,不能反映钢筋受力时的总体变形能力。此外,量测钢筋拉断后的标距长度 l 时需将拉断的两段钢筋拼合后再量测,也容易产生人为误差。因此,近年来国际上已采用钢筋达极限强度时的总伸长率(均匀伸长率) δ_{gt} 来表示钢筋的变形能力。

b. 钢筋最大力下的总伸长率(均匀伸长率)。

如图 2-3 所示,钢筋达到强度极限时的变形由塑性残余变形 ϵ_r 和弹性变形 ϵ_e 两部分组成。最大应力下的总伸长率 δ_{gt} 可用下式表示:

$$\delta_{gt} = \frac{L - L_0}{L_0} + \frac{\sigma_b}{E_s} \quad (2-3)$$

式中 L_0 ——试验前的原始标距(不包含颈缩区);

L ——试验后量测标记之间的距离;

σ_b ——钢筋的最大拉应力(钢筋的极限抗拉强度);

E_s ——钢筋的弹性模量。

式(2-3)括号中的第一项反映了钢筋的塑性残余变形,第二项反映了钢筋在最大拉应力下的弹性变形。

δ_{gt} 的测量方法可参照图 2-4 进行。在离颈缩区较远的一侧选择两个标记点(Y,V),两个标记间的原始标距(L_0)在试验前至少应为 100 mm;标距点 Y 或 V 与夹具的距离不应小于 20 mm 或公称直径 d 两者中的较大者;标距点 Y 或 V 与断裂点之间的距离不应小于 50 mm 或 $2d$ 两者中的较大者。钢筋拉断后测量标记点之间的距离为 L ,并求出钢筋拉断时的最大拉应力 σ_b ,然后按式(2-3)计算 δ_{gt} 。

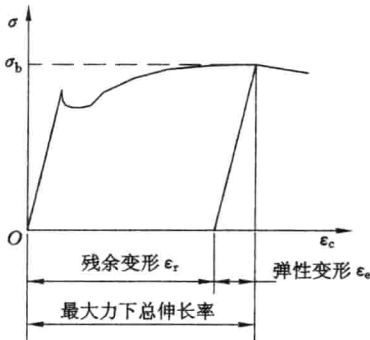


图 2-3 钢筋极限强度下的总伸长率

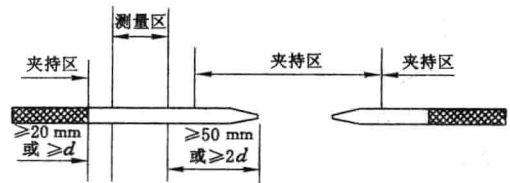


图 2-4 钢筋最大力下总伸长率的量测方法

钢筋最大力下的总伸长率 δ_{gt} 既能反映钢筋的残余变形,又能反映钢筋的弹性变形,量测结果受原始标距 L_0 的影响较小,也不易产生人为误差。

② 冷弯性能。

为使钢筋在加工时或在使用时不开裂、弯断或脆断,可对钢筋试件进行冷弯试验。如图 2-5 所示,冷弯是指在常温下将直径为 d 的钢筋绕直径为 D 的弯芯弯曲到规定的角度 α 后无裂纹、鳞落或断裂现象,则认为钢筋的冷弯性能符合要求。通常弯芯直径 D 越小,弯转

角 α 越大,说明钢筋的冷弯性能越好。国家标准规定了各种钢筋冷弯时相应的弯芯直径及弯转角,有关参数可参照相应的国家标准。

总之,伸长率越大,钢筋的塑性性能越好,破坏时有明显的拉断预兆。钢筋的冷弯性能较好,构件破坏时不易发生脆断。因此,对于钢筋品种的选择,应考虑强度和塑性两个方面的要求。

2.1.1.2 无明显屈服点的钢筋(硬钢)

图 2-2 所示为无明显屈服点或流幅钢筋的应力—应变曲线,大约在极限抗拉强度的 65% 以前,

应力—应变关系为直线,此后,钢筋表现出塑性性质,直至曲线最高点之前都没有明显的屈服点,曲线最高点对应的应力称为极限抗拉强度。对无明显流幅的钢筋,如预应力钢丝、钢绞线和热处理钢筋等,《规范》规定在构件承载力设计时,取残余应变为 0.2% 时对应的应力 $\sigma_{0.2}$ 为设计强度指标,称为条件屈服强度,其值为 $0.85\sigma_b$ 。

无明显流幅钢筋的弹性模量、伸长率和冷弯性能的概念与有明显流幅的钢筋相同。

对有明显屈服点的钢筋,其检验指标为屈服强度、极限抗拉强度、伸长率和冷弯性能四项。对无明显屈服点的钢筋,其检验指标为极限抗拉强度、伸长率和冷弯性能三项。

钢筋的受压性能试验表明,在达到屈服强度之前,受压钢筋也具有理想的弹性性质,而且屈服强度与受拉时基本相同,受拉和受压弹性模量也是基本相等的。

2.1.2 钢筋的品种和级别

《规范》根据钢筋产品标准的修改,不再限制钢筋材料的化学成分,而按性能确定钢筋的牌号和强度等级。我国在混凝土结构中使用的钢材,按其生产工艺和力学性能的不同可以分为热轧钢筋、中高强钢丝、钢绞线、预应力螺纹钢筋以及冷加工钢筋等。在钢筋混凝土结构中主要采用热轧钢筋,在预应力混凝土结构中这五种钢筋均会用到。由于冷加工钢筋的塑性较差,在荷载和跨度较大以及承受动力作用的结构构件中宜慎重采用。

(1) 热轧钢筋

热轧钢筋是指钢厂用熔化的钢水直接轧制而成的钢筋。热轧钢筋属于普通低碳钢钢筋和普通低合金钢钢筋。按照《规范》规定,在钢筋混凝土结构中所用的国产普通钢筋主要有以下五种级别:HPB300(A),HRB335(B)、HRBF335(B^F),HRB400(C)、HRBF400(C^F),RRB400(C^R)和 HRB500(D)、HRBF500(D^F)。钢筋代号前面的字母代表生产工艺和表面形状,后面的数字代表屈服强度标准值,括号内的符号为钢筋简写符号。HPB 为 hot-rolled plain steel bar, HRB 为 hot-ribbed steel bar,RRB 为 remained heat-treatment ribbed bar。F 为 fine,细粒晶体的意思。热轧钢筋的直径为 6~50 mm,其中 HPB300 钢筋的直径为 6~22 mm。

① HPB300 级钢筋。

HPB300 级钢筋是由碳素钢经热轧而成的光面圆钢筋。它具有质量稳定、塑性好、易焊接和易加工成型的优点。

② HRB335、HRBF335 级钢筋。

HRB335、HRBF335 级钢筋分别是由低合金钢经热轧而成的钢筋和采用温控轧制工艺生产的细晶粒带肋钢筋。为增加钢筋与混凝土之间的黏结力,表面轧制成外形为月牙形,其

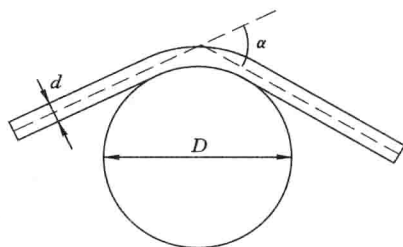


图 2-5 钢筋的冷弯试验

α ——弯曲角度; D ——弯芯直径

表面一般有钢筋牌号的标志(HRB335 以 3 表示,HRBF335 以 C3 表示),易识别。这种钢筋强度比 HPB300 级钢筋高,塑性和焊接性能都比较好,易加工成型,是我国钢筋混凝土结构构件钢筋用料最主要的品种之一。

③ HRB400、HRBF400 级钢筋。

HRB400、HRBF400 级钢筋分别是由低合金钢经热轧而成的钢筋和采用温控轧制工艺生产的细晶粒带肋钢筋。其外形为月牙形,表面分别有“4”和“C4”的标志,含碳量与 HRB335 和 HRBF335 级钢筋相当,HRB400 级钢筋微合金含量与 HRB335 级钢筋相同外,分别添加钒、铌、钛等元素,而 HRBF400 级钢筋(不加或少加低合金元素)采用温控轧制工艺生产因而强度有所提高,并保持有足够的塑性和良好的焊接性能,是我国今后钢筋混凝土结构构件受力主导钢筋用料最主要的品种之一。

④ RRB400 级钢筋。

RRB400 级钢筋是用 HRB335 级钢筋经热轧后,穿过生产作业线上的高压水湍流管进行快速冷却,再利用钢筋芯部的余热自行回火而成的钢筋。经过淬火和自行回火处理,使这种钢筋具有强度较高,同时保持足够塑性和韧性,但当采用闪光对焊时,强度有不同程度的降低。

⑤ HRB500、HRBF500 级钢筋。

HRB500、HRBF500 级钢筋是用于非预应力混凝土结构的性能优良的高强度钢筋,分为添加钒、钛等低合金元素轧制的 HRB500 级和采用温控技术(不加或少加低合金元素)轧制的细晶粒 HRBF500 级,其外形为月牙形,表面分别有“5”和“C5”的标志。HRB500、HRBF500 级钢筋具有很好的延性,焊接性、黏结性能良好,均能达到国家相关技术标准的要求,可在工程实践中应用。

我国带肋钢筋的外形,目前生产的月牙肋形,其横肋高度向肋的两端逐渐降至零,不与纵肋相连,横肋在钢筋横截面的投影为月牙形,这样可以使纵横肋相交处应力集中现象有所缓解,但相对于同质量的等高肋钢筋来说,这种钢筋除横肋以外的基本机体部分金属量有所增加,因此钢筋的屈服强度和疲劳强度有所提高。钢筋的各种形式如图 2-6 所示。

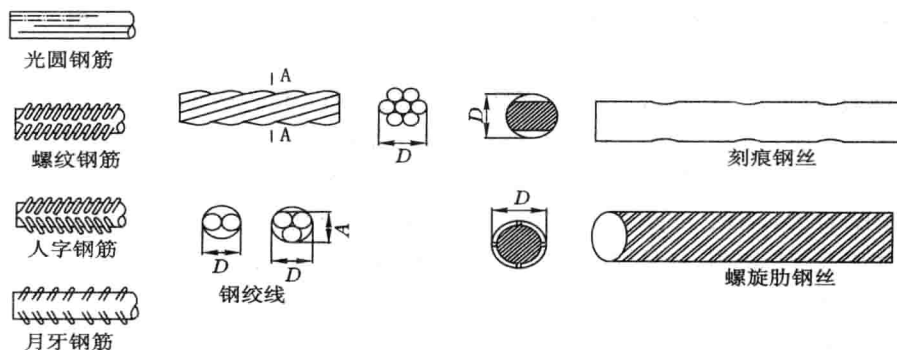


图 2-6 钢筋的各种形式

(2) 中高强钢丝

中高强钢丝有中强度预应力钢丝和消除应力钢丝,分别有光面和螺旋肋两种。

① 中强度预应力钢丝。

中强度预应力钢丝经冷加工或冷加工后热处理制成,其屈服强度标准值为 620~980