

普通高等学校土建类“十二五”应用型规划教材

HUNNINGTU JIEGOU JIBEN YUANLI

混凝土结构基本原理

张丽华 左敬岩 主编



黄河水利出版社

普通高等学校土建类“十二五”应用型规划教材

混凝土结构基本原理

主 编 张丽华 左敬岩
副主编 李 哲 党玲博
丁永刚 王兴国



黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书是依据混凝土结构最新设计规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)编写的普通高等学校土建类“十二五”应用型规划教材之一。本书系统介绍了混凝土结构材料的物理力学性能,混凝土结构设计方法,受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件的承载力计算原理和方法,钢筋混凝土构件变形、裂缝、耐久性,预应力混凝土构件设计等,并将计算原理、设计方法与施工图紧密结合,以培养学生工程设计及应用能力、工程意识及责任意识。

本书可作为高等学校土木工程专业的教材,也可作为广大从事土木工程设计和施工等工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构基本原理/张丽华,左敬岩主编. —郑州:黄河水利出版社,2011.8

普通高等学校土建类“十二五”应用型规划教材

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0092 - 9

I. ①混… II. ①张… ②左… III. ①混凝土结构 - 高等学校 - 教材 IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 166475 号

策划编辑:李洪良 电话:0371 - 66024331 E-mail:hongliang0013@163.com

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:20

字数:463 千字

印数:1—3 100

版次:2011 年 8 月第 1 版

印次:2011 年 8 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

前 言

本书根据高等学校土木工程专业指导委员会制定的专业方案及课程大纲、土木工程专业规范,国家最新颁布和实施的混凝土设计规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)而编写,并结合新规范及时更新了各部分内容。

本书编写组根据多年的一线教学改革与工程经验,在编写过程中,注重理论密切联系实际,注重培养学生设计与应用能力,注重培养学生工程意识及责任意识。

全书分为十章,主要介绍混凝土结构材料的物理力学性能,混凝土结构设计方法,受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件的承载力计算原理和方法,钢筋混凝土构件变形、裂缝、耐久性,预应力混凝土构件设计等,并将设计原理、设计方法与施工图紧密结合,以培养学生工程设计及应用能力、工程意识及责任意识。

全书由华北科技学院张丽华、黑龙江科技学院左敬岩任主编,由西安理工大学李哲、黄河科技学院党玲博、河南工业大学丁永刚、河南理工大学王兴国任副主编,郑州航空工业管理学院侯晓英、南阳理工学院尹晓清参加编写。全书由张丽华统稿。具体编写分工为:张丽华编写第一章、第三章和附录,左敬岩编写第二章,李哲编写第四章,侯晓英编写第五章和第七章,丁永刚编写第六章,王兴国编写第八章,党玲博编写第九章,尹晓清编写第十章。

由于编者的水平有限,不足之处在所难免,敬请读者批评指正,以便改进与完善。

编 者

2011年6月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 混凝土结构的一般概念	(1)
第二节 混凝土结构的特点	(1)
第三节 混凝土结构发展概况	(2)
第四节 混凝土结构体系	(3)
第五节 本课程的学习方法	(4)
思考题	(5)
第二章 混凝土结构材料的物理力学性能	(6)
第一节 钢 筋	(6)
第二节 混凝土	(12)
第三节 钢筋与混凝土的黏结性能	(23)
思考题	(30)
第三章 混凝土结构设计方法	(31)
第一节 结构的功能要求和极限状态	(31)
第二节 极限状态设计的基本概念及原理	(33)
第三节 极限状态实用设计表达式	(36)
思考题	(45)
习 题	(45)
第四章 受弯构件正截面受弯承载力计算	(46)
第一节 概 述	(46)
第二节 受弯构件的一般构造	(47)
第三节 受弯构件正截面受弯承载力受力全过程的试验研究	(51)
第四节 混凝土构件正截面承载力的计算原理	(55)
第五节 单筋矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算	(60)
第六节 双筋矩形截面受弯构件的正截面承载力计算	(67)
第七节 T形截面受弯构件正截面受弯承载力计算	(73)
习 题	(83)
第五章 受弯构件斜截面受剪承载力计算	(86)
第一节 概 述	(86)
第二节 简支梁斜截面受剪破坏机理	(86)
第三节 斜截面受剪破坏的三种主要形态	(88)
第四节 受弯构件斜截面受剪承载力计算	(92)

第五节 受弯构件斜截面承载力设计计算步骤	(97)
第六节 斜截面的受弯承载力	(102)
第七节 受弯构件设计实例	(111)
思考题	(117)
习 题	(118)
第六章 受压构件承载力计算	(120)
第一节 受压构件的类型及一般构造要求	(120)
第二节 轴心受压构件正截面受压承载力计算	(123)
第三节 偏心受压构件承载力计算	(131)
第四节 偏心受压构件 $N_u \sim M_u$ 相关曲线	(159)
第五节 双向偏心受压构件正截面承载力计算	(161)
第六节 偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	(164)
思考题	(166)
习 题	(166)
第七章 受拉构件承载力计算	(168)
第一节 概 述	(168)
第二节 轴心受拉构件正截面承载力计算	(169)
第三节 偏心受拉构件正截面承载力计算	(170)
第四节 偏心受拉构件斜截面承载力计算	(174)
思考题	(175)
习 题	(175)
第八章 受扭构件扭曲截面受扭承载力的计算	(176)
第一节 概 述	(176)
第二节 纯扭构件的试验研究	(176)
第三节 纯扭构件的扭曲截面承载力计算	(178)
第四节 剪扭构件的承载力计算	(186)
第五节 弯剪扭构件的承载力计算	(191)
第六节 受扭构件的构造要求	(198)
思考题	(198)
习 题	(198)
第九章 钢筋混凝土构件的变形、裂缝和耐久性	(200)
第一节 概 述	(200)
第二节 钢筋混凝土构件的裂缝宽度验算	(201)
第三节 受弯构件挠度验算	(215)
第四节 混凝土构件的截面延性	(228)
第五节 耐久性设计	(231)
思考题	(238)
习 题	(238)

第十章 预应力混凝土构件	(241)
第一节 概 述	(241)
第二节 预应力混凝土轴心受拉构件	(256)
第三节 预应力混凝土受弯构件的设计计算	(266)
第四节 预应力混凝土构件的构造要求	(279)
第五节 部分预应力混凝土与无黏结预应力混凝土简介	(284)
思考题	(295)
习 题	(296)
附录一 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 附表	(297)
附录二 钢筋的计算截面面积及公称质量	(301)
附录三 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 的有关规定	(304)
附录四	(307)
参考文献	(309)

第一章 绪 论

第一节 混凝土结构的一般概念

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、钢骨混凝土结构、钢管混凝土结构、纤维增强混凝土结构等。混凝土结构广泛应用于建筑、桥梁、地下工程、水利、港口等土木工程结构,其中钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构在土木工程中应用最多。

素混凝土结构是指无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构,很少作为土木工程的承力结构,主要用于承受压力结构,如基础、挡土墙、堤坝等。

钢筋混凝土结构是配有受力钢筋的混凝土结构,广泛用于各种受弯、受压、受拉的构件及结构,如梁、板、柱、基础、墙体等。

预应力混凝土结构是指在施工制作时,预先对混凝土的受拉区施加压应力的混凝土结构,其抗裂性好、刚度大,用于大跨度的结构,可减小构件截面,减轻结构自重。

钢骨混凝土结构是用型钢焊成实心或空心钢骨作为配筋的混凝土结构。这种混凝土结构承载力大、延性好、抗震性能好,可用于高层结构中的梁、柱、墙等。

钢管混凝土结构是指在钢管内浇捣混凝土而形成的构件或结构,主要应用于单层和多层工业厂房柱、设备构架柱、栈桥、地铁站台柱及高层和超高层建筑,以及桥梁结构中。

纤维增强混凝土结构是在普通混凝土中掺入钢纤维、合成纤维等各种纤维材料的混凝土结构。其在美国、日本应用较早,我国从 1992 年开始,也有了相应的设计与施工规程。

第二节 混凝土结构的特点

钢筋混凝土结构是混凝土结构中最常用、最具代表性的一种结构,是由钢筋和混凝土两种物理力学性能不同的材料组成的。混凝土的抗压能力较强,但抗拉能力较差,当其受拉时易开裂,使构件产生裂缝;而钢材的抗拉和抗压性能都很好。将两种材料结合在一起能充分发挥各自所长,协同工作。其原因是钢筋和混凝土的温度线膨胀系数很接近(钢筋为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$),且两者之间有黏结力,在荷载作用下或温度变化时,两者能共同受力、协调变形。

钢筋混凝土结构是建筑结构中应用最为广泛的结构形式,其优点如下:

(1) 可模性好。可根据需要浇筑成各种形状和尺寸的结构。

(2) 与砌体结构及钢结构比承载力较高。

(3) 耐久性、耐火性好。钢筋有混凝土保护层包裹,不易生锈,使用寿命长;遇火灾时,与钢结构相比,不会因升温过快软化而破坏。

(4) 现浇的钢筋混凝土结构整体性好、刚度大、抗震性能好。

(5) 混凝土用量最多的砂、石等可就地取材,还可利用矿渣、粉煤灰等工业废料。

钢筋混凝土结构的主要缺点是:

(1) 自重。钢筋混凝土重度约为 25 kN/m^3 , 相同内力作用下截面尺寸比钢结构的截面尺寸大, 自重, 还会使地震力加大, 对大跨度结构应用受到一定的限制, 高层建筑结构产生不利影响。

(2) 抗裂性差。混凝土的抗拉强度较低, 普通钢筋混凝土结构一般情况下带裂缝工作, 对抗渗漏要求高的结构, 其使用受到一定的限制。另外, 钢筋混凝土结构的施工工序多, 施工中需要大量模板, 工期较长, 且受施工季节和气候条件的影响。

第三节 混凝土结构发展概况

钢筋混凝土结构在 19 世纪中期首先在英、法两国得到应用, 与砌体结构、钢结构相比, 历史并不长, 但其发展很快, 特别是近年来, 在材料、结构和施工、设计理论三个方面有了很大进步。

一、材料方面

材料主要是向轻质、高强、耐久的方向发展。目前, 钢筋混凝土结构中常用的混凝土抗压强度为 $20 \sim 40 \text{ N/mm}^2$; 预应力混凝土结构中采用的混凝土抗压强度可达 $60 \sim 80 \text{ N/mm}^2$ 。采用高强混凝土、高强度钢筋是当前混凝土结构的一个重要发展方向。目前, 已研制出的高强混凝土可达 200 N/mm^2 , 采用的钢筋的屈服强度标准值已达 500 N/mm^2 , 而用于预应力混凝土的钢丝抗拉强度则高达 1860 N/mm^2 。此外, 纤维增强混凝土结构、钢筋混凝土结构、钢管混凝土结构都已在工程中开始应用。

二、结构和施工方面

混凝土结构由过去简单结构发展到高层、超高层、大跨度等复杂结构。例如, 上海 95 层 460 m 高的浦东环球金融中心大厦, 内筒为钢筋混凝土结构。此外, 为了快速施工, 还广泛采用定型化、标准化的装配式结构和预应力混凝土构件。

三、设计理论方面

1887 年科伦首次发表了钢筋混凝土的计算方法; 1918 年艾布拉姆斯发表了著名的计算混凝土本身强度的水灰比理论; 1928 年法国弗列新涅提出了混凝土收缩和徐变理论, 为预应力混凝土技术在工程中的应用奠定了基础。设计理论从最初的估算, 发展到 20 世纪初的容许应力方法、40 年代的按破损阶段计算法、50 年代以来采用的极限状态设计法。目前, 基于概率论与数理统计的可靠度理论使钢筋混凝土的极限状态设计方法更趋完善。随着试验和测试技术与计算手段的提高, 钢筋混凝土的设计理论会日趋完善, 并向更高阶段发展。

第四节 混凝土结构体系

一、混凝土结构的组成

钢筋混凝土结构由很多受力构件组合而成,主要受力构件有楼板及屋面板、梁、柱、墙、基础等,其中,板、梁是水平受力构件,柱、墙是竖向受力构件。

楼板及屋面板:是将活荷载和恒载(通过梁或直接)传递到竖向支承结构(柱、墙)的主要水平构件,属于受弯构件,其形式可以是实心板、空心板、带肋板等。

梁:是将楼板上或屋面上的荷载传递到立柱或墙上的受弯构件(截面内力有弯矩、剪力,有时还有扭矩),楼层处的梁称为楼盖梁,屋面处的梁称为屋面梁,多为矩形截面,当梁与板一起整浇时,形成T形、L形截面梁。此外,还有门窗洞口上的过梁、雨篷梁等。

柱:其作用是支承楼面体系,属于受压构件,当荷载有偏心作用时,柱受压的同时还会受弯。

墙:与柱相似,是受压构件,混凝土墙(如楼梯间墙)主要用于承重并向基础传递荷载,高层建筑中的剪力墙还用于承受水平风载和地震作用,它受压的同时还会受弯、受剪。

基础:是将上部结构的所有重量传递到地基(土层)的承重混凝土构件,其形式多样,有条形基础、独立基础、桩基础、筏板基础和箱形基础等。

二、混凝土结构的基本构件与结构类型

每一个承重结构都由一些基本构件组成,基本构件的类型如图1-1所示。

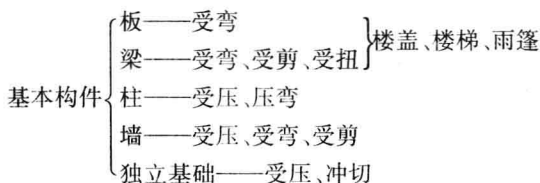


图 1-1 基本构件的类型

混凝土受力构件的不同连接和组合形成了不同的结构类型,主要有框架结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构、排架结构、筒体结构等。

框架结构:通常是指由梁、柱组成的结构。需要平面空间较大的建筑一般采用钢筋混凝土框架结构,多为10层以下。

剪力墙结构:纵、横墙体全部由钢筋混凝土剪力墙组成,墙体既承受竖向荷载,又抵抗水平荷载。15~50层的住宅和旅馆等小开间的高层建筑多采用剪力墙结构。

框架-剪力墙结构:在框架结构中柱与柱之间纵、横方向适当布置大于140mm厚的钢筋混凝土墙体(剪力墙)而组成的结构体系,一般在15~30层的建筑中较常使用。

排架结构:通常是指由柱子和屋架(或屋面梁)组成的结构,其特点是柱子和屋架(或梁)铰接。多为混凝土结构,也可以采用钢结构,这种结构跨度一般为12~36m,可以是单跨和多跨,广泛用于各种工业厂房建筑。

筒体结构:是由钢筋混凝土墙或密集的柱围成的一个侧向刚度很大的筒体。当要求侧向刚度更大时,可采用筒中筒(外筒套内筒)或筒束。筒体结构多用于高层或超高层(高度超过 100 m 的建筑)结构。

第五节 本课程的学习方法

混凝土结构基本原理这门课程是土木工程专业的一门重要的专业基础课程。混凝土结构基本原理主要研究基本构件及结构的受力性能、计算方法、构造措施等问题,不但要进行强度和变形计算,还要进行结构和构件的设计。设计包括结构方案及材料的选择、构件截面尺寸的确定、承载力及变形计算、构造要求等。学习时要注意以下几点:

(1)正确理解和使用计算公式。混凝土结构中的计算公式与力学中的计算公式有所不同。力学中的材料都是理想的弹性或塑性材料,而钢筋混凝土结构材料是非均质、非弹性的,计算公式建立在科学试验和工程经验的基础上,不是完全利用几何、平衡条件等经严谨的计算推导而建立的。因此,要很好地掌握钢筋和混凝土材料的力学性能,了解混凝土结构受力性能及破坏特征,理解公式建立时采用的基本假定,注重分析公式与设计计算公式之间的联系与区别。关键是能正确地使用公式,注意其适用范围和限制条件。

(2)结构计算及设计答案不唯一。在数学和力学基础学科中,问题的答案一般是唯一的,而结构设计是要综合考虑建筑方案、结构方案、截面形式、材料选择、承载力、变形计算及配筋构造等因素,在相同荷载作用下,有多种可行的截面形式、尺寸及不同的配筋方式、数量等。在多种答案中,还需综合考虑安全、经济(造价、材料用量)、施工方便等因素确定最合理的答案,或主要考虑某些因素而确定相对合理的答案。

(3)重视构造措施。结构和构件设计必须经过计算及构造设计两部分才能完成,因为强度和变形计算公式建立过程中,并不是考虑了结构上的所有作用及影响因素,也很难考虑所有的影响因素,如温度影响、混凝土收缩、地基不均匀沉降等,而是在一定简化条件下建立的计算模型,还必须用构造设计来补充。构造设计是长期的科学试验和工程实践经验的总结,计算和构造同等重要。

(4)重视与基础课程的联系。混凝土结构基本原理这门专业基础课和许多课程密切相关,学习时必须综合运用各门课程的知识去解决问题。如土木工程材料提供了钢筋和混凝土的材料性能;结构力学对各种结构的内力和变形的计算,为钢筋混凝土提供了基本的内力数据和计算原理;房屋建筑学中的建筑方案、建筑构造做法,为钢筋混凝土结构方案确定、构件选型、恒荷载计算等提供了依据。混凝土结构是在上述课程基础上研究结构及构件设计的。

(5)重视实践和规范应用。钢筋混凝土结构是一门理论性和实践性较强的课程,学习时,一方面应重视基本知识及理论学习,另一方面还应有目的地到施工现场参观、学习,增强感性认识,培养工程意识、责任意识,积累工程经验。此外,为了更好地配合本课程的学习,还应进一步熟悉、掌握和应用国家颁布的有关结构设计计算和构造要求的技术规定和标准,如《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001),它们是工程技术人员进行设计时必须遵守的法规。

思考题

1. 什么是混凝土结构？什么是素混凝土结构？
2. 什么是钢筋混凝土结构？什么是预应力混凝土结构？
3. 混凝土结构有哪些基本构件？
4. 什么是框架结构、排架结构？从你周围的建筑中各举一实例。
5. 混凝土结构有哪些主要优、缺点？
6. 钢筋和混凝土两种物理、力学性能不同的材料，为什么能结合在一起共同工作？

第二章 混凝土结构材料的物理力学性能

学习要求

熟悉工程用钢筋的品种、级别、性能;掌握工程对钢筋性能的要求及选用原则;掌握混凝土在各种受力状态下的强度和变形性能;掌握混凝土的选用原则;了解钢筋和混凝土共同工作的原因,掌握保证钢筋和混凝土之间共同工作的构造措施。

钢筋和混凝土是混凝土结构的主要材料,钢筋与混凝土的物理力学性能、相互作用以及共同工作的特性直接影响混凝土结构和构件的性能,也是确定混凝土结构计算理论和设计方法的基础。

第一节 钢 筋

钢筋在混凝土结构中起着提高其承载能力、改善其受力性能的作用。了解钢筋的品种及其力学性能是合理选用钢筋的基础,而合理选用钢筋是混凝土结构设计的前提。混凝土结构中使用的钢材不仅要求有较高的强度、良好的变形性能(塑性)和可焊性,而且与混凝土之间应有良好的黏结性能,以保证钢筋与混凝土能很好地共同工作。

一、钢筋的品种、成分和等级

混凝土结构中使用的钢筋按化学成分可分为碳素钢和普通低合金钢两大类。钢材的主要成分为铁元素,碳素钢除含有铁元素外,还含有少量的碳、锰、硅、磷、硫等元素。随着含碳量的增加,钢材的强度和硬度提高,而塑性、韧性和可焊性降低。碳素钢通常可分为低碳钢(含碳量小于0.25%)、中碳钢(含碳量为0.25%~0.6%)和高碳钢(含碳量为0.6%~1.4%)。磷和硫是钢材中有害元素,它们的含量增加会降低钢材的变形性能和可焊性。碳素钢中加入少量的合金元素,如锰、硅、镍、钛、钒等,可有效地提高钢材的强度和改善钢材的其他性能,生成普通低合金钢(合金元素不大于5%),如20MnSi、20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi等。

混凝土结构中使用的钢筋按表面形状可分为光圆钢筋(见图2-1(a))和变形钢筋等。为了保证钢筋和混凝土之间的黏结力,对于强度较高的钢筋,表面均做成带肋的变形钢筋。带肋钢筋的表面肋形主要有螺纹、人字纹和月牙纹,见图2-1。螺纹钢筋表面的肋形方向一致,而人字纹钢筋表面的肋形方向不一致,形成人字。螺纹钢筋和人字纹钢筋的纵肋和横肋都相交,横肋较密,容易造成应力集中,对受力不利。月牙纹钢筋表面纵肋和横肋不相交,横肋在钢筋横截面上的投影呈月牙状。目前,我国变形钢筋主要采用月牙纹钢筋。月牙纹钢筋与混凝土的黏结性能略低于螺纹钢筋和人字纹钢筋,但仍能保证良好的

黏结性能,锚固延性及抗疲劳性能等高于螺纹钢筋和人字纹钢筋。

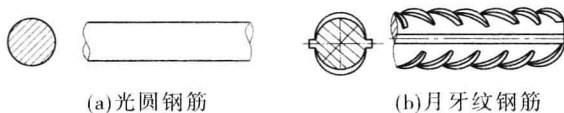


图 2-1 混凝土结构用热轧钢筋的表面形式

混凝土结构中使用的钢筋也可分为柔性钢筋和劲性钢筋。我国工程中常用的普通钢筋称为柔性钢筋。劲性钢筋是指角钢、槽钢、工字钢、钢轨、钢板、钢管等焊接成的骨架。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定混凝土结构中使用的钢筋主要有热轧钢筋、热处理钢筋和钢丝、钢绞线等。

热轧钢筋分为普通热轧钢筋和细晶粒热轧钢筋两种。普通热轧钢筋是由低碳钢和普通合金钢在高温状态下经热轧成型并自然冷却的成品钢筋;细晶粒热轧钢筋是在热轧过程中,通过控温和控冷工艺形成的细晶粒钢筋。常用热轧钢筋按其强度由低到高分为 HPB300(符号 Φ)、HRB335(符号 Φ)、HRBF335(符号 Φ^F)、HRB400(符号 Φ)、HRBF400(符号 Φ^F)、RRB400(符号 Φ^R)、HRB500(符号 Φ)和 HRBF500(符号 Φ^F)。RRB400 钢筋为余热处理钢筋,其屈服强度与 HRB400 级钢筋的相同。HPB300 级钢筋为光圆钢筋,其余强度较高的钢筋均为表面带肋的变形钢筋。热轧钢筋主要用在钢筋混凝土结构中,也用做预应力混凝土结构中的非预应力钢筋。

热处理钢筋、消除应力钢丝和钢绞线都是高强钢筋,其符号和直径范围见附表 1-6,主要用于预应力混凝土结构中。

热处理钢筋是将特定强度的热轧钢筋,如 K20MnSi、40Si2Mn、48Si2Mn 和 45Si2Cr,通过加热后的正火、淬火、回火和退火等调质工艺处理制成的。热处理钢筋可焊性、机械连接性能及施工适应性均稍差,须控制其应用范围。一般,可在对延性及加工性能要求不大的构件中使用,如在基础、大体积混凝土以及跨度及荷载不大的楼板、墙体中应用。

消除应力钢丝是将钢筋拉拔后,校直,经中温回火消除应力并稳定化处理的钢丝,分光面钢丝和螺旋肋钢丝两种。预应力钢绞线一般是由 3 根或 7 根直径为 2.5~6.0 mm 的高强度光面钢丝绞捻后,再经稳定化处理而制成的。

二、钢筋的力学性能

钢筋的力学性能指钢筋的强度和变形性能。钢筋的强度和变形性能可以由钢筋单向拉伸的应力—应变曲线来分析说明。

(一) 钢筋的强度

对于有明显流幅的钢筋(应力—应变曲线见图 2-2),A 点以前应力值较小,应力与应变成正比例关系,卸去外力,试件恢复原状,无残余变形,这一阶段称为弹性阶段,与 A 点对应的应力称为比例极限或弹性极限。过 A 点后,应变增长速度大于应力增长速度,应力增长较小的幅度后达到 B'点,进入屈服阶段。B'点不稳定,随后应力稍有降低达到 B 点,钢筋进入流幅阶段,曲线接近水平线,应力不增加而应变持续增加。曲线延伸至 C 点,B 点到 C 点水平距离的大小称为流幅或屈服台阶。B'点和 B 点分别称为上屈服点和

下屈服点。有明显流幅的热轧钢筋屈服强度是按屈服下限确定的。过 C 点以后,应力又继续上升,钢筋的抗拉能力又有所提高,此阶段为强化阶段。曲线的最高点 D 点所对应的应力称为钢筋的极限强度。试验表明,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。

当钢筋混凝土构件中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,以致不能正常使用,所以对有明显流幅的钢筋,在进行承载力计算时采用屈服强度作为钢筋强度值。

钢材除应具有高的强度,还应具有一定的屈强比(屈服强度和极限强度的比值)。屈强比是反映钢材利用率和安全可靠程度的一个指标。屈强比越小,钢材受力超过屈服强度时的可靠性越大,结构越安全。但屈强比过小,钢材强度的有效利用率太低,造成浪费。所以,应合理选用屈强比,即在保证安全可靠的前提下,尽量提高钢材的利用率。

热轧低碳钢和普通低合金钢都属于有明显流幅的钢筋,强度相对较低,但变形性能好。不同强度等级的钢筋屈服台阶的长度是不同的,强度越高,屈服台阶的长度越短,塑性越差。

对于没有明显屈服点的钢筋(应力—应变曲线见图 2-3),在外力作用下屈服现象不明显,钢筋的塑性较差,不能测出屈服点对应的强度,所以采用残余应变为 0.2% 的应力值作为条件屈服点或条件屈服强度,用 $\sigma_{0.2}$ 表示。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定设计时,采用极限抗拉强度 σ_b 的 85% 作为条件屈服强度。热处理钢筋、钢丝和钢绞线等属于无明显屈服点的钢筋,强度高,但变形性能差。

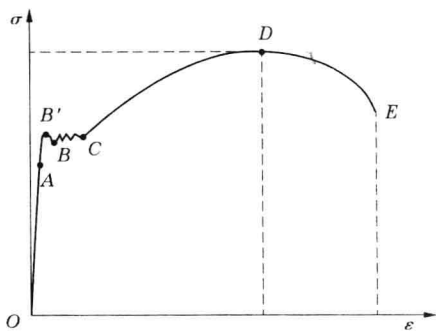


图 2-2 有明显流幅钢筋的应力—应变曲线

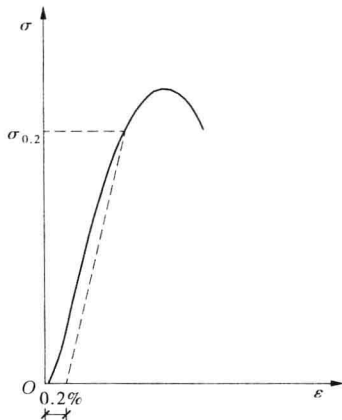


图 2-3 无明显流幅钢筋应力—应变曲线

(二) 钢筋的塑性性能

混凝土结构中所使用的钢筋既要有较高的强度,又要有良好的变形能力。衡量钢筋塑性性能的主要指标有伸长率和冷弯性能。

钢筋的伸长率是钢筋拉断后的伸长值与原长的比值。钢筋的伸长率越大,钢筋的塑性性能越好。国家标准规定了各种合格钢筋在给定标距下的最小伸长率,分别用 δ_{100} 、 δ_{10} 或 δ_5 表示。 δ 表示断后伸长率, δ_{10} 、 δ_5 下标分别表示标距为 $10d$ 和 $5d$, d 为被检钢筋的直径, δ_{100} 下标表示 $l = 100$ mm。

此伸长率为断口缩颈区域残余变形的大小,不同标距长度得到的结果不一致,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,容易产生总体误差。鉴于钢筋对结构安全的重要性,钢筋塑性性能应满足钢筋在最大拉力下的总伸长率(又称均匀伸长率),以提高混凝土结构的变形性能和抗震性能。

钢筋在最大拉力下的总伸长率(均匀伸长率)按式(2-1)计算

$$\delta_{gt} = \left(\frac{\Delta l}{l_0} + \frac{\sigma_b}{E_s} \right) \times 100\% \quad (2-1)$$

式中 l_0 ——试件拉伸前的标距长度;

Δl ——试件拉断后的伸长值。

冷弯性能是钢筋在常温条件下,承受弯曲变形的能力,它是将直径为 d 的钢筋绕直径为 D 的弯芯弯曲到规定的角度后无裂纹、断裂及起层现象,则表示合格。弯芯的直径 D 越小,弯转角 α 越大,钢筋的塑性性能越好。冷弯性能也反映了钢筋的焊接质量。

三、钢筋的冷加工

在常温下采用冷拉、冷拔、冷轧和冷扭等方法对热轧钢筋进行加工处理,称为钢筋的冷加工。钢筋经冷加工处理后强度会提高,可以节省钢材。但是,冷加工钢筋的变形性能显著降低,除冷拉钢筋有明显屈服点外,其他钢筋均无明显屈服点。同时,冷加工钢筋在焊接热影响区的强度降低,热稳定性较差。现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)未将冷加工钢筋列入,在结构设计中也不提倡采用冷加工钢筋,使用时应符合相应的技术规程。下面主要介绍钢筋的冷拉和冷拔。

(一) 冷拉

冷拉是将热轧钢筋在常温下张拉,使钢筋应力超过屈服强度达到强化阶段,然后卸载。冷拉过程的应力—应变曲线如图 2-4 所示,钢筋张拉达到 K 点后卸载,若立即再次张拉钢筋,其应力—应变曲线将沿 $O'KDE$ 变化。 K 点是新的屈服点,钢筋的屈服强度提高了,塑性降低,没有流幅出现,这种现象称为钢筋的冷拉强化。若隔一段时间后再张拉,钢筋的应力—应变曲线将沿 $O'K'D'E'$ 变化, K' 点是新的屈服点,钢筋的屈服强度和极限

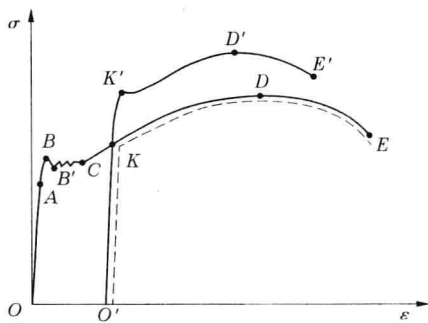


图 2-4 钢筋的冷拉应力—应变曲线

强度明显提高,塑性降低,这种现象称时效硬化。时效硬化受温度影响较大,在常温下,需要 20 d 左右完成时效硬化,在 100 °C 的温度下需要 2 h 完成,250 °C 时仅需要 0.5 h,超过 250 °C 钢筋会随温度的升高而软化,强度降低,甚至恢复到冷拉前的强度,因此,需焊接的冷拉钢筋,必须先焊接后再进行冷拉。

冷拉只能提高钢筋的抗拉强度,但降低其塑性,所以为了保证冷拉钢筋具有一定的塑性,应合理地选择张拉控制应力和控制应变。

(二) 冷拔

冷拔是将直径为 6 ~ 8 mm 的 HPB300 级热轧钢筋通过直径较小的合金拔丝模加工成

的钢丝。钢筋在冷拔时不仅受到轴向位伸,而且受到侧向挤压,所以热轧钢筋经过冷拔后,其抗拉强度和抗压强度均得到提高。钢筋经拉拔后,原有的明显屈服点消失,无屈服平台,塑性性能降低。

四、钢筋的疲劳

钢筋的疲劳是指钢筋在重复、周期性的动荷载作用下,经过一定次数后突然发生脆性断裂的现象。承受重复荷载的吊车梁、桥面板、轨枕等钢筋混凝土构件在正常使用期间会由于疲劳而发生破坏。

钢筋疲劳断裂的原因,一般认为是钢筋内部和外部存在缺陷,在这些薄弱处容易引起应力集中。应力过高,钢材晶粒滑移,产生疲劳裂纹,应力重复作用次数增加,裂纹扩展,从而造成断裂。

钢筋的疲劳试验有两种方法:一种是直接进行单根原状钢筋轴拉试验,另一种是将钢筋埋入混凝土中使其重复受拉或受弯的试验。我国采用直接做单根钢筋轴拉试验的方法。

钢筋的疲劳强度主要与一次循环应力中最大和最小应力的差值(应力幅度)有关,钢筋的疲劳强度是指在某一规定应力幅度内,经受一定次数循环荷载后发生疲劳破坏的最大应力值。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定了不同等级钢筋的疲劳应力幅度限值,并规定该值与截面同一纤维上钢筋最小应力与最大应力比值有关,对于预应力钢筋,当应力幅 $\rho^f \geq 0.9$ 时可不进行疲劳强度验算。在确定钢筋混凝土构件在正常使用期间的疲劳应力幅度限值的同时,需要确定循环荷载的次数,我国要求将不同的疲劳应力比值满足循环次数为 200 万次条件下的钢筋最大应力值作为钢筋的疲劳强度。

钢筋的疲劳强度与应力变化的幅值有关,其他影响因素还有:最小应力值的大小、钢筋外表面几何尺寸和形状、钢筋的直径、钢筋的强度、钢筋的加工和使用环境以及加载的频率等。

由于承受重复荷载的作用,钢筋的疲劳强度低于其在静荷载作用下的极限强度,原状钢筋的疲劳强度最低。埋置在混凝土中的钢筋的疲劳断裂通常发生在纯弯段内裂缝截面附近,疲劳强度稍高。

五、钢筋应力—应变关系的数学模型

应用数学模型表述钢筋的应力—应变关系又称应力—应变本构关系。对混凝土结构或构件进行结构分析时必须应用钢筋和混凝土的应力—应变关系。常用的钢筋应力—应变关系曲线模型有以下几种。

(一) 描述完全弹塑性的双直线模型

双直线模型适用于流幅阶段较长的低强度钢筋,如图 2-5 所示。该模型将钢筋的应力—应变曲线简化成两段直线,不计钢筋屈服强度的上限和钢筋强化阶段强度的提高。钢筋屈服前(完全弹性阶段)OB 段,应力—应变关系为斜线,斜率为钢筋的弹性模量。钢筋屈服后(塑性阶段)BC 段,应力—应变关系为直线,即应力保持不变,应变继续增加。双直线模型的数学表达式如下: