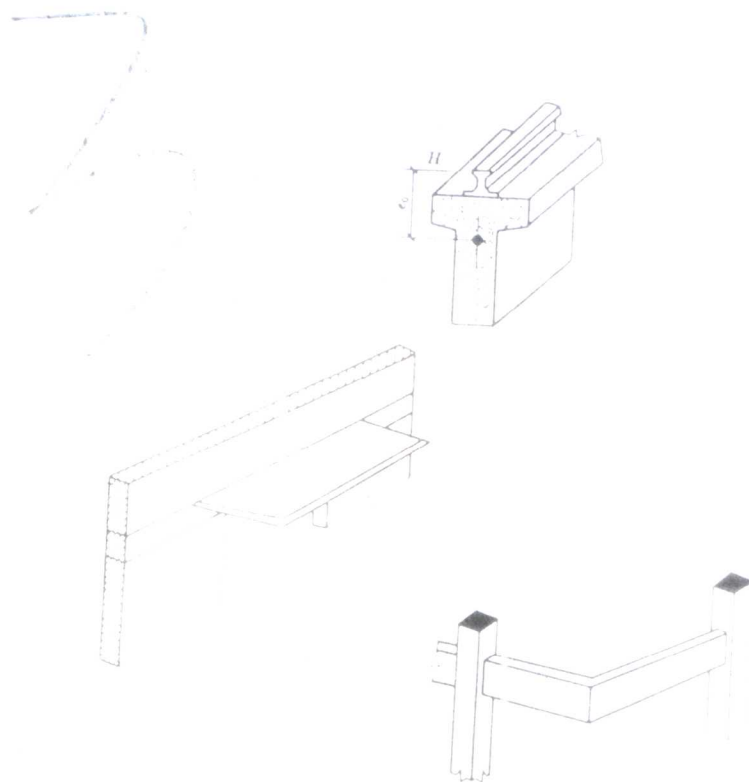


21世纪高等学校土木工程专业 **精 编** 系列教材

混凝土结构基本原理

Hunningtu Jiegou
Jiben Yuanli

熊丹安 主编



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

21 世纪高等学校土木工程专业精编系列教材

混凝土结构基本原理

熊丹安 主编

武汉理工大学出版社

【内容简介】

《混凝土结构基本原理》以现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)及相应新规范为依据,以方便教学和自学为原则,具体讲述了混凝土结构构件的设计原理和方法。全书共分为9章,包括:绪论、钢筋混凝土材料的力学性能、设计原则和方法、轴心受力构件承载力、受弯构件承载力、偏心受力构件承载力、受扭构件承载力、钢筋混凝土构件正常使用极限状态验算、预应力混凝土结构构件。

本书的显著特点是:以混凝土相对受压区高度 ξ 为基本变量代替相应公式中的 x ,使计算公式与适用条件统一,简化了计算步骤和公式数量;用流程图说明计算过程;书中例题量大,解题方法新颖;每章开始有提要,章末有复习思考题和习题。本教程可作为大学本科土木工程专业的学科基础课教材,并与专业课程《混凝土结构设计》紧密衔接,适合土木工程专业的各个课群组,也可供土木工程技术人员参考,还可作为自学自考教材。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构基本原理/熊丹安主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2005

ISBN 7-5629-2265-9

I. 混…

II. 熊…

III. 混凝土结构-教材

IV. TU37

出版者:武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路122号 邮编:430070)

印刷者:武汉理工大印刷厂

发行者:各地新华书店

开 本:850×1168 1/16

印 张:13.25

字 数:336千字

版 次:2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷

书 号:ISBN 7-5629-2265-9/TU·275

印 数:1—2000册

定 价:20.00元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

前言

为适应我国高等教育事业的发展,培养土木工程专业的实用型高级工程技术人才,本着“言简意赅、开宗明义”的精神,以“基本概念讲清、基本计算简明、基本构造实用、方便教学和自学”为原则,作者根据多年的教学实践和施工、设计经验,编写了这本《混凝土结构基本原理》。

本教材依据现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)和相应规范的有关内容,具体讲述混凝土结构的设计原理以及混凝土结构构件的设计方法。包括:绪论、钢筋混凝土材料的力学性能、设计的基本原则和方法、钢筋混凝土轴心受力构件承载力、钢筋混凝土受弯构件和偏心受力构件的正截面承载力及斜截面承载力、钢筋混凝土受扭构件承载力、钢筋混凝土裂缝宽度验算和受弯构件挠度验算、预应力混凝土结构构件的设计计算等。

《混凝土结构基本原理》由熊丹安教授主编,姚勇副主编。参加编写的人员有:熊丹安(编写第1、5、6章)、姚勇(编写第2、7章)、肖贵泽(编写第3、4章)、杨志勇(编写第8、9章)、廖晖(参编第5、6章),全书由熊丹安教授统稿。

本书的显著特点是:在受弯构件和偏心受力构件的正截面承载力计算中,以混凝土相对受压区高度 ξ 代替 x ,使计算公式和适用条件统一;直接求解 ξ 以加快计算速度,摒弃了传统的查表方法和查表表达式;用简化的流程图说明计算步骤;用尽量简洁的语言说明原理,用较多的实例示范;用★号标明重要说明,用*号表示按学时的不同、可不一定讲授但能自学的部分等等。总之,期盼本书的出版使读者受益。书中不当之处,请批评指正。

编者

2005年元旦

目 录

1 绪论	(1)
1.1 混凝土、钢筋、混凝土结构	(1)
1.2 混凝土结构的发展简况	(3)
1.3 本课程的特点和学习方法	(4)
1.4 本书的主要符号和计量单位	(5)
本章小结	(6)
思考题	(6)
2 钢筋和混凝土的力学性能	(7)
2.1 钢筋	(7)
2.2 混凝土	(13)
2.3 钢筋与混凝土的粘结	(23)
本章小结	(28)
思考题	(28)
选择题	(29)
3 设计原则和方法	(30)
3.1 结构可靠度的一般知识	(30)
3.2 结构可靠度理论简介	(33)
3.3 极限状态设计法	(36)
3.4 荷载代表值和材料强度代表值	(40)
本章小结	(41)
思考题	(42)
4 钢筋混凝土轴心受力构件承载力	(43)
4.1 概述	(43)
4.2 轴心受拉构件承载力	(44)
4.3 轴心受压构件承载力	(47)
本章小结	(54)
思考题	(54)
习题	(54)
5 钢筋混凝土受弯构件承载力	(55)
5.1 受弯构件的一般构造规定	(56)
5.2 受弯构件正截面性能试验研究	(58)
5.3 受弯构件正截面承载力计算公式	(60)
5.4 按正截面受弯承载力的设计计算	(64)
5.5 受弯构件剪弯段的受力特点	(76)
5.6 受弯构件受剪承载力计算公式	(81)

5.7 梁按斜截面受剪承载力的设计计算	(83)
5.8 纵向钢筋的弯起、锚固、截断及箍筋构造要求	(89)
* 5.9 伸臂梁设计	(97)
* 5.10 深受弯构件	(103)
本章小结	(107)
思考题	(107)
习题	(108)
6 钢筋混凝土偏心受力构件承载力	(111)
6.1 偏心受压构件的构造要求	(112)
6.2 偏心受压构件的受力性能	(114)
6.3 矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力计算	(118)
6.4 对称配筋 I 形截面正截面受压承载力计算	(132)
6.5 偏心受拉构件正截面承载力计算	(136)
6.6 偏心受力构件的斜截面受剪承载力	(139)
* 6.7 双向偏心受力构件正截面承载力计算	(141)
本章小结	(142)
思考题	(143)
选择题	(143)
习题	(143)
7 受扭构件承载力	(146)
7.1 矩形截面纯扭构件承载力	(146)
7.2 矩形截面剪扭构件承载力	(148)
7.3 矩形截面弯扭构件承载力	(149)
7.4 受扭构件的计算和构造	(150)
本章小结	(153)
思考题	(153)
习题	(153)
8 钢筋混凝土构件的正常使用极限状态	(154)
8.1 裂缝宽度验算	(154)
8.2 受弯构件的变形验算	(159)
本章小结	(163)
思考题	(163)
习题	(163)
9 预应力混凝土结构构件	(165)
9.1 预应力混凝土的一般概念	(165)
9.2 施加预应力的方法及锚具	(168)
9.3 预应力混凝土的材料	(170)
9.4 张拉控制应力及预应力损失	(170)
9.5 预应力混凝土轴心受拉构件的计算	(175)
9.6 预应力混凝土受弯构件的计算	(184)

* 9.7 预应力混凝土构件的构造规定	(195)
本章小结.....	(196)
思考题.....	(197)
习题.....	(197)
附录.....	(198)
参考文献.....	(202)

1 绪论

本章提要

作为本书的开篇,本章介绍了混凝土结构的分类和结构构件的组成材料,钢筋和混凝土共同工作的原因,混凝土结构的发展概况和优缺点;关于本课程的学习方法,尤其应引起读者的重视。

建筑业是国民经济的支柱产业之一,混凝土结构广泛用于房屋建筑工程、大跨度结构、桥梁、港口、大坝、地下工程等。本章将简要介绍混凝土结构的分类、组成材料,混凝土结构的优缺点及发展概况。

1.1 混凝土、钢筋、混凝土结构

1.1.1 混凝土、钢筋

混凝土(concrete)是由水泥、砂、石、水等材料按一定配合比经搅拌,入模成型,养护硬化而成的人工石材,文字“砼”对其作了形象的表示。混凝土是一种非匀质、非连续、非弹性的材料,其抗压强度较高而抗拉强度很低,破坏呈脆性,它的性能与石材类似。不仅如此,由于水泥和水的化学-物理反应过程要经历很长时间,所以混凝土的性能还与时间有关。

钢筋(steel bar)则是较理想的匀质弹性材料,其材质均匀,抗拉强度和抗压强度都很高。

显然,混凝土和钢筋是两种性质不同的材料。

1.1.2 混凝土结构

混凝土和钢筋都是土木工程中的重要建筑材料。混凝土结构包括有钢筋混凝土结构(reinforced concrete structure)、预应力混凝土结构(prestressed concrete structure)和素混凝土结构(plain concrete structure)等三种结构形式。其中,素混凝土结构主要用于设备基础、路面、某些非承重结构和大体积的块体结构中,而一般的混凝土结构构件则由钢筋和混凝土组成。在钢筋混凝土结构构件中,混凝土主要承受压力,钢筋主要承受拉力(也可按需要承受构件受压区的部分压力),二者各自发挥其特长,共同工作。预应力混凝土结构则是一种特殊的钢筋混凝土结构,其中的预应力钢筋在构件承受荷载之前被施加拉应力。

既然混凝土和钢筋是两种性质完全不同的材料,为什么二者能结合在一起共同工作呢?其主要原因是:

(1)混凝土结硬后,能与钢筋牢固地粘结在一起,相互传递应力;粘结力是这两种材料共同工作的基础。

(2)钢筋和混凝土具有相近的线膨胀系数,因而在温度变化时,它们之间不会发生较大的相对变形,其粘结力不致因温度变化而破坏(钢筋的线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,混凝土为 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C} \sim 1.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)。

(3)混凝土提供的碱性环境可以保护钢筋免遭锈蚀。钢筋在碱性环境下不会锈蚀,而水泥与水反应后生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 恰好提供了这种环境。

那么,钢筋和混凝土是如何共同受力的呢?下面看一个简单的例子。如图 1.1 所示的简支梁,当其承受均布荷载 q 时,梁的弯矩图为一抛物线,沿梁跨长各截面下部受拉,跨中截面的弯矩最大。若该梁为素混凝土梁,则在荷载不大的情况下,由于混凝土的抗拉强度很低,梁在跨中弯矩最大处截面的受拉区首先开裂。而一旦开裂,裂缝将迅速向受压区发展,导致裂缝处受力截面高度减小,梁很快破坏。破坏荷载与开裂荷载几乎相同,是“一裂即坏”型的无警告破坏。而当在梁的受拉区配置适当的纵向钢筋①后,在荷载作用下,由于钢筋和混凝土共同受力,虽然梁开裂时的荷载与素混凝土梁相差不大,但开裂后的拉力可由钢筋①承担,裂缝不会迅速发展,梁可以继续承受荷载。直至受拉区的钢筋屈服、受压边缘混凝土被压坏,梁才丧失承载能力,破坏前有明显预兆。可见,适当配筋的钢筋混凝土梁,不仅承受的荷载可以大大增加,而且受力性能也有显著改善。而荷载在梁内产生的剪力则由配置在梁内的箍筋②和混凝土共同承担,并通过配置在梁上部的纵向构造钢筋③(架立钢筋)相互绑扎形成钢筋骨架以便于混凝土的浇灌。显然,钢筋在梁内是有序配置的。

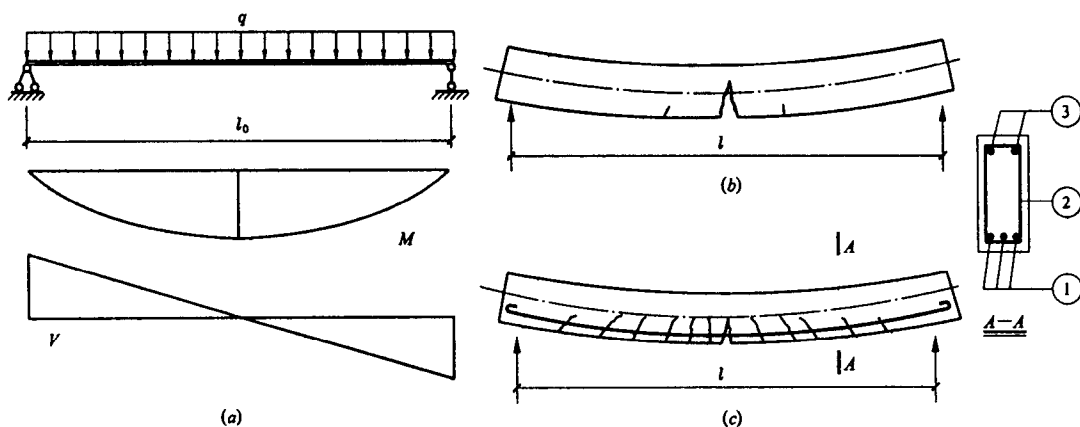


图 1.1 简支梁的受力

(a)梁的弯矩图、剪力图;(b)素混凝土梁;(c)钢筋混凝土梁

1.1.3 钢筋混凝土结构构件的类型

钢筋与混凝土的有序结合形成的钢筋混凝土结构构件,按其受力状态的不同可以分为:受弯构件(承受弯矩 M 和剪力 V),主要构件形式为钢筋混凝土梁和钢筋混凝土板;受压构件(仅承受轴心压力 N 的构件称为轴心受压构件,不仅承受压力,同时还承受弯矩和剪力的构件称偏心受压构件),主要构件形式为钢筋混凝土柱及钢筋混凝土墙;受拉构件(承受拉力 N 或拉力、弯矩等共同作用),如屋架的受拉腹杆和弦杆;受扭构件(承受扭矩 T 并与弯矩、剪力等共同作用),如雨篷梁、平面曲梁、螺旋楼梯等。其中受弯构件和受压构件是最基本的受力构件。

1.1.4 钢筋混凝土结构构件的优缺点

除了能合理利用钢筋和混凝土两种材料的性能外,钢筋混凝土结构构件还具有如下优点:

(1)整体性好。尤其是现浇的钢筋混凝土结构,构件的连接通过钢筋的贯通和锚固、混凝土浇筑成整体,其整体性能好,有利于承受各种作用,尤其是偶然作用(如地震、冲击波)的影响,钢筋混凝土结构广泛用作抗震结构。

(2)可模性好。混凝土在浇筑时是半流动状态,钢筋的加工也比较容易,因而可按使用需要制成各种形状和尺寸的结构。此外,根据建筑物的结构选型,可以设计成各种形式的受力结构,也具有设计的自由性。

(3)就地取材。混凝土的主要原材料是砂、石骨料,易于就地取材;而且还可利用工业废料如粉煤灰、矿渣、煤矸石等作骨料,变废为宝。

(4)耐久性好。如前所述,混凝土可以保护钢筋免遭锈蚀,同时混凝土结构受风雨寒暑的影响小,因而钢筋混凝土结构的耐久性好,不需要像钢结构那样经常性维护。采用特种混凝土还可使钢筋混凝土结构在恶劣环境(如侵蚀性介质环境和海水环境中等)下正常受力。

(5)耐火性好。钢筋和混凝土都是不燃材料,但在高温受热时强度会显著降低。然而,混凝土的热传导系数很小,适当的混凝土保护层可使钢材不致在火灾发生时很快达到软化的危险温度而导致结构整体破坏,与钢结构或木结构相比,钢筋混凝土结构有很好的耐火性。

(6)节省钢材。由于钢筋混凝土结构合理地利用了材料性能,在某些情况下可以代替钢结构,从而节省钢材,降低造价。

钢筋混凝土结构也存在着如下缺点:

(1)自重较大。由于混凝土的强度较低,因此钢筋混凝土结构构件往往需要大的截面尺寸,而钢筋混凝土材料的自重标准值达 $24\sim 25\text{kN/m}^3$,因此钢筋混凝土结构显得较为笨重。

(2)易出现裂缝。由于混凝土的抗拉强度低,以及结构混凝土的收缩受到约束等原因,钢筋混凝土结构很难避免裂缝的发生。

(3)施工繁琐。钢筋混凝土结构的施工,包括钢筋加工、形成钢筋骨架;模板的制作、加工;混凝土的浇筑、养护、拆模等工序,施工繁琐;施工质量的监督、检查等也非易事。

(4)工期较长。施工繁琐加之混凝土达到规定的强度需要一定的时间,因此施工周期较长。同时,施工还受季节影响。

1.2 混凝土结构的发展简况

自从 1824 年 Aspdin(英)发明水泥后,混凝土开始得到应用。1850 年, Lambot(法)用铁丝网和水泥砂浆制造小船,可以说是钢筋混凝土的开始。1868 年,曾经采用钢筋混凝土制作花盆的 Monier(法)发明了混凝土板并获得专利权。随着对钢筋混凝土性能认识的深入,钢筋混凝土梁、板的制作和计算方法的发表(1887 年),配置纵向钢筋和箍筋的配筋方法的形成(1892 年),水灰比对混凝土强度影响的正确认识(1918 年),为现代的钢筋混凝土结构的发展奠定了基础。

钢筋混凝土结构的早期设计理论,是基于弹性理论的容许应力设计方法。由于混凝土并非匀质弹性材料,容许应力的取值也带有很大的不确定性,这种设计方法大都偏于保守,有时也不安全。随着对混凝土结构及构件的受力性能研究的深入,该法在绝大多数国家已不再采用。

20 世纪 40 年代,前苏联开始采用按破损阶段的设计方法。这种方法考虑到了混凝土和钢筋

实际受力的塑性性能,使设计更符合钢筋混凝土的工作情况,比容许应力设计法前进了一大步,但在安全系数的取值上仍带有经验性。

20 世纪 50 年代,基于对材料和荷载的统计分析研究,前苏联又首先将按破损阶段的设计方法代之以按极限状态的设计方法,指出结构的极限状态是一种特定状态。超过这一状态时,结构构件即丧失承载能力或不能正常使用。这种方法要比按破损阶段的设计方法更合理,因此到 20 世纪 70 年代,为多数国家所接受。这种方法考虑到荷载及材料强度的变异性并由统计规律确定,而对一些非统计因素则仍根据以往经验确定,因而这种设计方法是一种半经验、半概率的极限状态设计法。我国《钢筋混凝土结构设计规范》(GBJ 21—66)、《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10—74)都采用了这种极限状态设计方法。

随着结构设计理论的发展、结构可靠度理论的提出,以概率理论为基础的极限状态设计法应运而生。这种设计方法是在对材料、荷载等的变异性进行大量调查、统计和分析的基础上,运用概率方法,以失效概率和与之相联系的可靠度指标来衡量结构的可靠性,因而更为科学和合理。我国《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89)和经过修订、最新颁布的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)都是采用这种设计方法。

结构设计理论和材料科学的发展以及施工技术的进步,使得钢筋混凝土结构在各类工程结构中占有主导地位。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)(以下简称《规范》)的施行必将促进我国混凝土结构设计水平的进一步提高。

目前,混凝土结构广泛用于:(1)房屋建筑工程。如多层住宅、办公楼等民用建筑的楼盖和屋盖;单层和多层工业厂房;在高层和超高层建筑中的应用也十分普通。(2)大跨度建筑及桥梁工程。预应力混凝土屋架、薄腹大梁、折板、拱、薄壳等广泛用于大跨度建筑,桥梁工程中有相当部分由混凝土结构建造。(3)特种结构与高耸结构。如贮仓、贮水池、电线杆、上下水管道、电视塔等(如加拿大的多伦多电视塔,系采用钢筋混凝土结构,高达 549m)。(4)水利、电力工程、地铁、核电站的安全壳、机场跑道等等。

随着国民经济的发展,混凝土结构学科也进入了一个全新的领域。在材料方面,混凝土向轻质、高强、耐久方向发展,《规范》规定的混凝土强度最高等级已达 C80,钢筋则向高强度并有较好延性和高粘结锚固性能方向发展,预应力构件中的高强钢丝、钢绞线强度已达 1860 N/mm^2 ;结构方面,预应力技术、钢和混凝土组合结构、钢管混凝土柱、外包钢筋混凝土柱、劲性钢筋混凝土结构等如百花争艳;而混凝土结构的施工技术进步对保证新材料的应用和新结构的实施起着关键作用。

1.3 本课程的特点和学习方法

本课程既是土木工程专业的学科基础课,同时又是专业技术课,内容丰富、头绪繁多,往往使初学者有畏难情绪。但与其他课程一样,只要掌握了其内在规律和课程特点,其学习也并不难,并会品味到其中的乐趣。

从内容上讲,本课程将首先介绍钢筋和混凝土材料的力学性能,再介绍混凝土结构构件的设计方法;然后具体讲述各种不同混凝土结构构件的设计(而且每一种构件都包括工程应用、受力性能、破坏特征、公式应用、构造要求等几个方面);通过对结构构件的理解和把握,再在《混凝土结构设计》中介绍常用混凝土结构的整体设计。

在学习本课程时,应注意课程的下述特点:(1)材料的特殊性。钢材在屈服前,是一种较理想的匀质弹性材料,而混凝土则是一种非匀质、非连续、非弹性材料;钢筋混凝土结构构件不同于其他结

构构件的主要原因,就在于混凝土的特殊性。(2)公式的实验性。正是由于材料的特殊性,使得混凝土结构构件的计算公式不可能完全通过理论推导得出,而是通过大量试验研究和统计分析完成的。(3)公式的适用性。正是由于公式的实验性,有关公式都有一定的适用条件,超出了有关适用条件的范围,该公式就不能应用。(4)解答的多样性。无论是进行结构构件的设计和结构设计,往往有多种解答,这就需要综合多方面的因素,选择其中较为合理的解答。(5)设计的规范性。混凝土结构以及其相应结构构件的设计计算,是以《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)及相应设计规范为依据进行的。本书的有关内容,是相应规范的具体体现。

1.4 本书的主要符号和计量单位

1.4.1 主要符号

符号采用主体符号带上、下标的书写方法,主体符号用斜体,上、下标用正体(i, j, l 除外)。具体参照相应公式,主要有:

(1)材料性能符号

E_c, E_s ——混凝土、钢筋的弹性模量;

$f_{cu}, f_{cu,k}$ ——边长为 150mm 的混凝土立方体抗压强度、抗压强度标准值;

f_{tk}, f_t ——混凝土抗拉强度标准值、设计值;

f_{yk}, f_{ptk} ——普通钢筋、预应力钢筋强度标准值;

f_y, f_y' ——普通钢筋的抗拉、抗压强度设计值;

f_{py}, f_{py}' ——预应力钢筋的抗拉、抗压强度设计值。

(2)荷载和内力符号

$G_k(g_k), G(g)$ ——恒荷载标准值、设计值(括号内表示均布荷载,下同);

$Q_k(q_k), Q(q)$ ——活荷载标准值、设计值;

N_k, M_k, V_k, T_k ——轴向力、弯矩、剪力、扭矩标准值;

N, M, V, T ——轴向力、弯矩、剪力、扭矩设计值。

(3)几何参数符号

b ——矩形截面宽度, T 形、I 形截面的腹板宽度;

h, h_0 ——截面高度、截面有效高度;

c ——混凝土保护层厚度;

l_0 ——计算跨度或计算长度;

I ——截面惯性矩;

A ——构件截面积;

A_s, A_s' ——受拉区、受压区纵向非预应力钢筋面积。

1.4.2 计量单位

本书采用以 N—mm(牛顿—毫米制)为标准的法定计量单位,计量单位和词头符号采用正体书写。如:

力的单位: N(牛)、kN(千牛);

应力的单位: N/mm^2 或 MPa (兆帕);

长度的单位: mm (毫米)、 m (米);

在工程计算中,可近似取 $1 \text{ 公斤力}(\text{kgf})=10 \text{ 牛}(\text{N})$ 。

本章小结

钢筋和混凝土是两种不同性质的材料,但它们通过有序结合可以形成共同受力的钢筋混凝土结构构件,粘结力是两者共同受力的基础。由于钢筋混凝土结构具有一系列的优点,因而在土木工程中得到广泛的应用。钢筋混凝土结构构件的设计方法,也从最初的容许应力法发展到以概率理论为基础的极限状态设计法。了解本课程的特点有助于课程的学习。

思 考 题

1. 钢筋和混凝土的受力性能有何不同? 为什么它们能共同工作?
2. 钢筋在混凝土结构构件中主要起哪些作用?
3. 钢筋混凝土结构主要有哪些优点和缺点?
4. 本课程有哪些主要特点?
5. 本书的法定计量单位是什么? 力和应力的单位如何表示?

2 钢筋和混凝土的力学性能

本章提要

钢筋和混凝土的力学性能,是混凝土结构构件计算的基础。本章主要介绍钢筋和混凝土的强度和变形性能,包括钢筋和混凝土的应力-应变曲线、钢筋的品种和级别、钢筋的冷加工方法及性能,混凝土的各类强度指标、混凝土的变形模量、混凝土的收缩和徐变及对结构的影响。此外,保证钢筋和混凝土的粘结力,是结构构件设计中要注意的重要构造措施。

用于钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构的材料是混凝土和钢筋。了解它们的力学性能及共同工作的原理,是分析结构构件受力性能、结构计算理论和设计方法的基础。

2.1 钢筋

2.1.1 钢筋的强度和变形

根据钢筋(steel reinforcement)的拉伸试验,可以得出钢筋的应力-应变曲线,从而了解其强度和变形规律。

2.1.1.1 钢筋的应力-应变关系(stress-strain relationships for steel)

钢筋混凝土及预应力混凝土结构中所用的钢筋可分为两类:有明显屈服点的钢筋和无明显屈服点的钢筋(习惯上分别称它们为软钢和硬钢)。

有明显屈服点钢筋的典型拉伸应力-应变曲线如图 2.1 所示。在 a 点以前,应力与应变按比例增加,其关系符合虎克定律, a 点对应的应力称为比例极限;

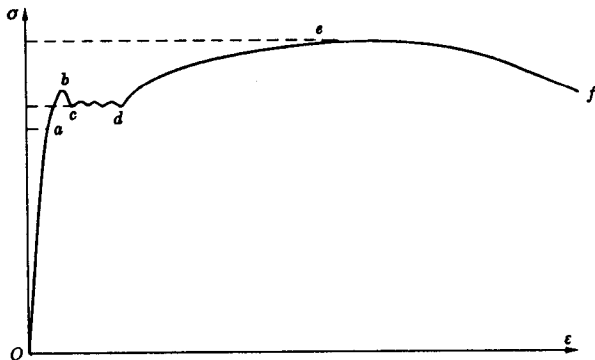


图 2.1 钢筋的应力-应变曲线

过 a 点后,应变较应力增长为快;到达 b 点后,应变急剧增加,而应力基本不变,应力-应变曲线呈现水平段 cd ,钢筋产生相当大的塑性变形,此阶段称为屈服阶段。对于一般有明显屈服点的钢筋, b 、 c 两点称为屈服上限和屈服下限。屈服上限为开始进入屈服阶段时的应力,呈不稳定状态;到达屈服下限时,应变增长,应力基本不变,比较稳定。相应于屈服下限 c 点的应力称为“屈服强度”。当钢筋屈服发生塑性流动到一定程度,即到达图中 d 点后,应力又开始增加,应力-应变曲线又成上升曲线,其最高点为 e , de 段称为钢筋的“强化阶段”,相应于 e 点的应力称为钢筋的极限抗拉强度。过 e 点后,钢筋的薄弱断面显著缩小,产生“颈缩”现象(图 2.2),变形迅速增加,应力随之下降,到达 f 点时被拉断。

无明显屈服点钢筋的典型拉伸应力-应变曲线如图 2.3 所示。这类钢筋的极限强度一般很高,但变形很小,也没有明显的屈服点,通常取相应于残余应变为 0.2% 时的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为名义屈服点,称为条件屈服强度。



图 2.2 钢筋的颈缩现象

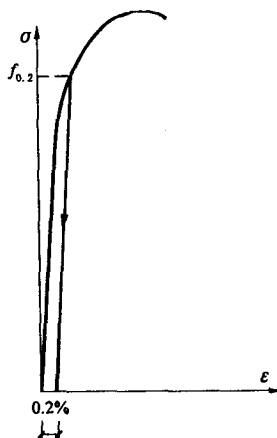


图 2.3 无明显屈服点钢筋的应力-应变曲线

在到达屈服强度之前,钢筋的受压性能与受拉时的规律相同,其屈服强度也与受拉时基本一样。在到达屈服强度之后,由于试件发生明显的塑性压缩,截面面积增大,因而难以给出明确的极限抗压强度。

2.1.1.2 钢筋的强度和变形指标

对于有明显屈服点的钢筋,当结构构件中某一截面钢筋应力达到屈服强度后,它将在荷载基本不增加的情况下产生持续的塑性变形,构件可能在钢筋尚未进入强化段之前就已破坏或产生过大的变形与裂缝。因此,钢筋的屈服强度是钢筋关键性的强度指标。此外,钢筋的屈强比(屈服强度与极限抗拉强度的比值)表示结构可靠性的潜力。在抗震设计中,考虑受拉钢筋可能进入强化阶段,对于抗震等级较高的结构构件,要求钢筋屈强比不大于某一数值,因而钢筋的极限强度是检验钢筋质量的另一强度指标。

对于无明显屈服点钢筋,由于其条件屈服点不容易测定,因此这类钢筋的质量检验以极限抗拉强度作为主要强度指标。《规范》规定取条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为极限抗拉强度 σ_b 的 0.85 倍,即

$$\sigma_{0.2} = 0.85\sigma_b \quad (2.1)$$

反映钢筋变形性能的基本指标是“伸长率”和“冷弯性能”。伸长率是钢筋试件拉断后的伸长值与原长的比率:

$$\delta = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \times 100\% \quad (2.2)$$

式中 δ ——伸长率(%)；

l_1 ——试件受力前的标距长度(一般取 $10d$ 或 $5d$, d 为试件直径)；

l_2 ——试件拉断后的标距长度。

上述方法反映颈缩区域的残留变形大小。还可以用颈缩区以外钢筋拉断前的均匀伸长率作为钢筋的塑性指标。

伸长率大的钢筋塑性性能好,拉断前有明显的预兆;伸长率小的钢筋塑性性能差,其破坏突然发生,呈脆性特征。具有明显屈服点的钢筋有较大的伸长率,而无明显屈服点的钢筋伸长率很小。

钢筋还应满足冷弯性能要求。冷弯是将钢筋绕某一规定直径的辊轴在常温下进行弯曲(图 2.4)。冷弯的两个参数是弯心直径 D (即辊轴直径)和冷弯角度 α 。在达到规定的冷弯角度时钢筋应不发生裂纹或断裂。冷弯性能可以间接地反映钢筋的塑性性能和内在质量。几种钢筋的伸长率及冷弯试验要求见表 2.1。

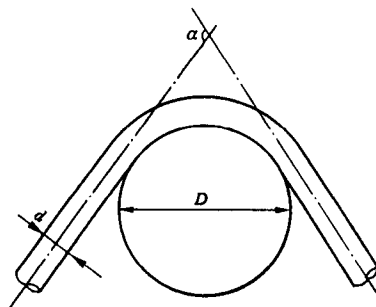


图 2.4 钢筋冷弯

屈服强度、极限强度、伸长率和冷弯性能是对有明显屈服点钢筋进行质量检验的四项主要指标,对无明显屈服点的钢筋则只测定后三项。

表 2.1 钢筋的伸长率及冷弯试验要求

钢筋种类		HPB235 级	HRB335 级	HRB400 级
伸长率(%)	δ_5	25	16	14
	δ_{10}	21	—	—
冷弯要求	α	180°	180°	90°
	D	d	$3d$	$3d$

注: δ_5 的测量标距为 $5d$, δ_{10} 的测量标距为 $10d$ 。

2.1.1.3 钢筋的弹性模量 E_s

钢筋在屈服前(严格地讲是在比例极限之前),应力-应变为直线关系,其比值即为弹性模量:

$$E_s = \frac{\sigma_s}{\epsilon_s} \quad (2.3)$$

式中 σ_s ——屈服前的钢筋应力(N/mm^2);

ϵ_s ——相应的钢筋应变。

各种钢筋的弹性模量系根据钢筋的受拉试验确定,同一种钢筋的受拉弹性模量与受压弹性模量相同。钢筋弹性模量 E_s 的具体数值见附录附表 4。

2.1.2 钢筋的分类和品种

按照钢筋的化学成分不同、生产工艺和力学性能的差异,分为不同的类型和品种。

2.1.2.1 按化学成分

我国目前常用的钢筋由碳素结构钢及普通低合金钢制造。钢筋的化学成分主要是铁元素。除

铁元素外,还含有少量的碳、硅、锰、硫、磷等元素。按照含碳量的多少,碳素结构钢可分为低碳钢、中碳钢和高碳钢(一般低碳钢的含碳量不大于 0.22%,高碳钢的含碳量大于 0.6%)。随着含碳量的增加,钢筋的强度提高,塑性降低。硅、锰等元素可以提高钢材的强度并保持一定的塑性。磷、硫是钢材中的有害元素,使钢筋易于脆断。在低碳钢中加入少量锰、硅、铌、钒、钛、铬等合金元素后,便成为普通低合金钢,如 20 锰硅、25 锰硅、40 硅 2 锰钒、45 硅锰钒等。

2.1.2.2 按生产工艺和力学性能

按照钢材生产加工工艺和力学性能的不同,用于混凝土结构中的钢筋分为热轧钢筋、冷加工钢筋、预应力钢丝、预应力钢绞线和热处理钢筋等。近年来,我国强度高、性能好的预应力钢筋已可充分供应,应优先采用。冷加工钢筋(冷拉钢筋、冷拔低碳钢丝、冷轧带肋钢筋、冷轧扭钢筋等)因有专门设计规程,没有列入《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)。

热轧钢筋属于有明显屈服点的钢筋,由冶金工厂直接热轧成型,分为 HPB235 级、HRB335 级、HRB400 级或 RRB400 级三个等级。其中 HPB235 级钢筋系指现行国家标准《钢筋混凝土用热轧光圆钢筋》(GB 13013)中的 Q235 级钢筋;HRB335 级和 HRB400 级钢筋系指现行国家标准《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB 1499)中的 HRB335 级和 HRB400 级钢筋;RRB400 级钢筋系指现行国家标准《钢筋混凝土用余热处理钢筋》(GB 13014)中的 KL400 级钢筋。随着钢筋屈服强度的提高(上述钢筋表示的数值 235、335、400 等系指根据屈服强度确定的强度标准值),钢筋的塑性有所降低(图 2.5)。

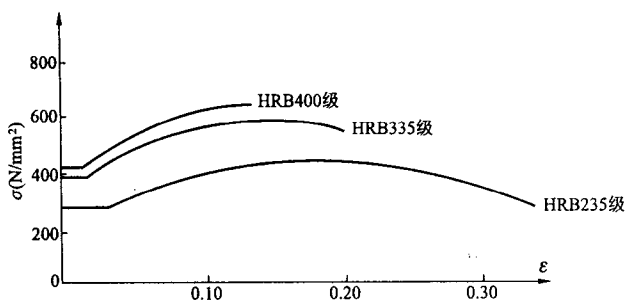


图 2.5 各种热轧钢筋的应力-应变曲线

热轧钢筋按其外形特征,可分为光圆钢筋和带肋钢筋两类。HPB235 级钢筋是光圆钢筋,HRB335、HRB400、RRB400 级钢筋是带肋钢筋。目前广泛使用的带肋钢筋是纵肋与横肋不相交的月牙纹钢筋(图 2.6(b))。与螺旋钢筋(图 2.6(a))相比,月牙纹钢筋避免了纵横肋相交处的应力集中现象,使钢筋的疲劳强度和冷弯性能得到一定改善,而且还具有在轧制过程中不易卡辊的优点;不足的是与螺旋钢筋相比,月牙纹钢筋与混凝土的粘结强度略有降低。

预应力钢丝、钢绞线和热处理钢筋都属于无明显屈服点钢筋。预应力钢丝系指现行国家标准《预应力混凝土用钢丝》(GB/T 5223)中的光面、螺旋肋和三面刻痕的

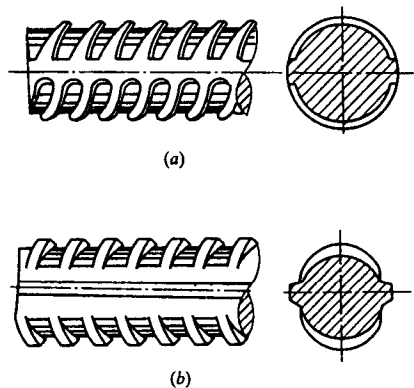


图 2.6 带肋钢筋

(a) 螺旋钢筋; (b) 月牙纹钢筋