



普通高等教育“十二五”规划教材

(第二版)

混凝土结构设计原理

薛建阳 主 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

(第二版)

混凝土结构设计原理

主 编 薛建阳
编 写 陈宗平 朱丽华
 刘祖强 伍 凯
主 审 童岳生



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材，是根据我国最新修订的国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)及相关科研成果等编写而成的。全书分为10章，主要内容包括钢筋和混凝土材料的基本性能，结构设计的基本原理，受弯构件正截面承载力计算，受弯构件斜截面承载力计算，受压构件截面承载力计算，受拉构件截面承载力计算，受扭构件截面承载力计算，钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性，预应力混凝土构件。书中将第一版与新规范不同的内容包括全部例题逐一进行了修改。主要章节都配有必要的例题、小结、思考题和习题，便于学生自学和复习巩固相关知识。

本书可作为高等学校土木工程专业的教材，还可供相关工程技术人员学习新规范时参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构设计原理/薛建阳主编. —2版. —北京: 中国电力出版社, 2012. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3437-3

I. ①混… II. ①薛… 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 (2012) 第 200598 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010年4月第一版

2012年11月第二版 2012年11月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13.25印张 318千字

定价 24.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书第一版自问世以来，得到广大读者的青睐，收到了许多关于教材内容的反馈意见。另外，《工程结构可靠性设计统一标准》（GB 50153—2008）于2009年7月1日起实施，新修订的国家标准《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2010）也已出版发行，并于2011年7月1日起实施。为使读者系统地了解新规范的内容，便于学习和进行工程应用，本书进行了全面修订。主要开展了以下工作：

1. 淘汰了235MPa级低强钢筋，增加500MPa级高强钢筋；提出钢筋延性（最大力下总伸长率）的要求。
2. 修改和补充了结构在规定的设计使用年限内应满足的功能要求、极限状态的标志和极限状态设计表达式、作用组合的效应设计值的组合方法等内容。
3. 对结构的侧移二阶效应，提出了增大系数的简化方法。
4. 修改了构件斜截面的受剪承载力计算公式。
5. 补充了拉、扭和拉、弯、剪、扭构件承载力计算方法。
6. 调整和补充了预应力混凝土构件的张拉控制应力、预应力损失数值计算、构造要求和无粘结预应力基本概念等内容。
7. 修改了钢筋混凝土和预应力混凝土构件正常使用极限状态设计时裂缝宽度、挠度验算的有关规定。
8. 增加了楼盖舒适度要求，规定了楼板竖向自振频率的限制。
9. 修订了环境等级划分，完善耐久性设计方法。适当调整了钢筋保护层厚度的规定。
10. 修改了钢筋锚固长度的有关规定，增加了端板等机械锚固方式和要求。
11. 增加了并筋（钢筋束）的配筋方式，等效直径的概念及设计方法。
12. 按新规范对书中例题进行了全面修改。

参加本书修订工作的有：西安建筑科技大学薛建阳修订第1、2、3、4章、刘祖强修订第5、9章，朱丽华修订第6章，河海大学伍凯修订第7、8章，广西大学陈宗平修订第10章。全书由薛建阳统稿并任主编。

承蒙西安建筑科技大学童岳生教授再次审阅全书并提出许多宝贵意见，在此表示诚挚的谢意！

限于作者的学识和对新规范的理解尚有不足之处，错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者
2012年6月

第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

《混凝土结构设计原理》是土木工程专业的一门主要专业基础课程。本书系统讲述了钢筋混凝土构件和预应力混凝土构件的受力性能、设计计算方法和构造措施，内容包括钢筋和混凝土材料的基本性能，以概率理论为基础的混凝土结构极限状态设计方法，受弯构件正截面和斜截面承载力计算，受压构件截面承载力计算，受拉构件承载力计算，受扭构件截面承载力计算，混凝土结构的使用性能和耐久性设计，以及预应力混凝土构件设计等。

本书的编写依据为我国现行《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2002）及相关设计规范和科研成果。为适应土木工程专业应用型人才培养的要求，在编写过程中做到概念明确、内容简明、讲述清楚。书中主要章节均配有相当数量的例题，有利于学生理解和掌握相关知识；还给出了小结、思考题和习题，以方便自学和巩固所学内容。本书可作为高等院校土木工程专业的本科教材，也可作为土木工程专业的专科教材，还可供相关工程技术人员参考。

本书由广西大学和西安建筑科技大学的部分教师共同编写，具体分工为：广西大学陈宗平编写第1、2、3、4章、第10章的10.1节和10.2节，西安建筑科技大学薛建阳编写第5、6、7、8章及附录，西安建筑科技大学刘义编写第9章，广西大学郑宏宇编写第10章的10.3节、10.4节和10.5节。全书由陈宗平、薛建阳任主编。

西安建筑科技大学资深教授童岳生先生审阅了全书并提出了许多宝贵意见。博士生张锡成、刘祖强和硕士生张风亮、祝刚绘制了部分插图，在此一并表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中错误与不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2009年12月

目 录

前言

第一版前言

第 1 章 概论	1
1.1 混凝土结构的基本概念	1
1.2 混凝土结构的特点	2
1.3 混凝土结构的发展和应用	2
1.4 本课程的主要内容和学习方法	3
本章小结	4
思考题	4
第 2 章 钢筋和混凝土材料的基本性能	5
2.1 钢筋	5
2.2 混凝土	9
2.3 钢筋与混凝土的粘结	16
本章小结	20
思考题	20
第 3 章 结构设计的基本原理	22
3.1 结构可靠度及结构安全等级	22
3.2 荷载和材料强度的标准值	24
3.3 概率极限状态设计法	25
3.4 极限状态设计表达式	28
本章小结	32
思考题	33
第 4 章 受弯构件正截面承载力计算	34
4.1 概述	34
4.2 正截面受弯性能试验研究	34
4.3 正截面受弯承载力分析	37
4.4 单筋矩形截面受弯承载力计算	41
4.5 双筋矩形截面受弯承载力计算	45
4.6 T 形截面受弯承载力计算	51
4.7 受弯构件的一般构造要求	58
本章小结	60
思考题	61

习题	61
第 5 章 受弯构件斜截面承载力计算	63
5.1 概述	63
5.2 受弯构件受剪性能的试验研究	63
5.3 斜截面受剪承载力计算	69
5.4 斜截面受剪承载力的设计计算方法	72
5.5 斜截面受弯承载力和构造措施	79
5.6 钢筋的构造要求	83
本章小结	85
思考题	85
习题	86
第 6 章 受压构件截面承载力计算	87
6.1 概述	87
6.2 轴心受压构件正截面受压承载力	87
6.3 偏心受压构件正截面受压承载力	92
6.4 偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	113
6.5 构造要求	114
本章小结	115
思考题	116
习题	116
第 7 章 受拉构件截面承载力计算	119
7.1 概述	119
7.2 轴心受拉构件正截面受拉承载力	119
7.3 偏心受拉构件正截面受拉承载力	119
7.4 偏心受拉构件斜截面受剪承载力	122
本章小结	123
思考题	123
习题	123
第 8 章 受扭构件截面承载力计算	124
8.1 概述	124
8.2 纯扭构件扭曲截面承载力计算	124
8.3 剪扭构件承载力计算	129
8.4 弯扭构件承载力计算	131
8.5 弯剪扭构件承载力计算	132
8.6 压弯剪扭构件承载力计算	135
8.7 拉弯剪扭构件承载力计算	136
8.8 受扭构件的构造要求	137
本章小结	137

思考题·····	138
习题·····	138
第 9 章 钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性·····	139
9.1 概述·····	139
9.2 钢筋混凝土构件的裂缝宽度验算·····	139
9.3 受弯构件挠度验算·····	144
9.4 混凝土结构的耐久性·····	147
本章小结·····	150
思考题·····	150
习题·····	151
第 10 章 预应力混凝土构件·····	152
10.1 预应力混凝土的基本知识·····	152
10.2 预应力混凝土构件设计的一般规定·····	157
10.3 预应力混凝土轴心受拉构件·····	164
10.4 预应力混凝土受弯构件的计算·····	176
10.5 预应力混凝土构件的构造要求·····	188
本章小结·····	193
思考题·····	193
习题·····	194
附录·····	195
参考文献·····	202

第 1 章 概 论

1.1 混凝土结构的基本概念

混凝土结构是以混凝土为主要材料形成的结构，它主要包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、型钢混凝土结构、钢管混凝土结构、预应力混凝土结构及配置各种纤维筋的混凝土结构。这种结构广泛应用于建筑、道路、桥梁、隧道、矿井以及水利、港口等各种工程结构中。

素混凝土结构是指不配置任何钢材的混凝土结构。将钢筋与混凝土这两种材料结合在一起，使混凝土主要承受压力，钢筋主要承担拉力，就成为钢筋混凝土结构。型钢混凝土结构是在构件中主要配置型钢或用钢板焊接成的钢骨架，同时配有部分受力钢筋和构造钢筋的混凝土结构。钢管混凝土结构是指在钢管中浇筑混凝土而成的结构。预应力混凝土结构是指在结构或构件制作时，通过张拉预应力钢筋等方法对受拉部位预先施加压应力而制成的混凝土结构。在普通混凝土结构中掺入适量钢纤维、碳纤维、玻璃纤维及合成纤维等纤维材料而形成的混凝土结构，称为纤维混凝土结构。在目前的实际工程中，以钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构应用较多。

如图 1-1 所示的两根截面尺寸、跨度、混凝土强度等级都相同的简支梁，其中一根为素混凝土梁 [图 1-1 (a)]，另一根在受拉区配有适量的钢筋 [图 1-1 (b)]。素混凝土梁由于混凝土的抗拉强度很低，当荷载较小时，梁下部受拉区边缘的混凝土就会出现裂缝，导致梁截面高度减小，裂缝迅速向上发展并引起梁的脆断而破坏。因此素混凝土梁的承载能力很低。对于受拉区配有适量钢筋的梁，当受拉区混凝土开裂后，受拉区的拉应力主要由钢筋承担，而中和轴以上受压区的压应力则由混凝土承担。此时，荷载还可继续增加，直至受拉区的钢筋达到屈服强度之后荷载还可略微上升，最后由于受压区混凝土被压碎，梁达到极限承载力而告破坏。试验表明，钢筋混凝土梁的承载力比素混凝土梁提高很多。混凝土的抗压能力和钢筋的抗拉能力都得到了充分利用。而配有适量钢筋的梁，在破坏前存有明显的预兆，其受力性能得到了显著改善。

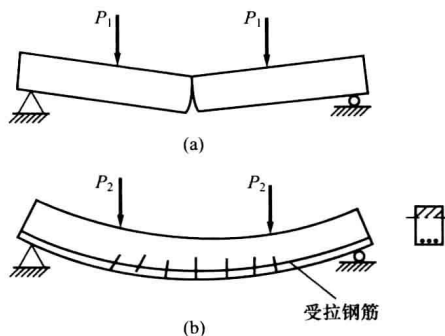


图 1-1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁
(a) 素混凝土梁；(b) 钢筋混凝土梁

钢筋和混凝土这两种物理和力学性能差别很大的材料能够有效的结合在一起共同工作，其主要原因为：

1) 钢筋与混凝土之间存在着粘结力，使两者能可靠的结合在一起，保证在外荷载作用下，钢筋与混凝土能够共同受力，协调变形。因此，粘结力是钢筋与混凝土共同工作的基础。

2) 钢筋与混凝土两种材料的温度线膨胀系数相近。混凝土的温度线膨胀系数为 $(1.0 \sim$

$1.5) \times 10^{-5}$, 钢筋为 1.2×10^{-5} 。因此当温度变化时, 不会因钢筋与混凝土之间产生较大的相对变形而使粘结力遭到破坏。

3) 钢筋埋置于混凝土中, 混凝土对钢筋起到了保护和固定的作用, 使钢筋不容易发生锈蚀, 其耐久性得到保证, 而且发生火灾时, 不致因钢筋迅速软化而导致结构整体破坏。

1.2 混凝土结构的特点

1.2.1 混凝土结构的主要优点

1) 耐久性好。在混凝土结构中, 钢筋受到保护不易锈蚀, 因此混凝土结构具有良好的耐久性, 不像钢结构那样需要经常地保养和维护。

2) 耐火性好。混凝土为不良导热体, 当火灾发生时, 混凝土不会像木结构那样迅速燃烧, 也不会像钢结构那样很快软化而破坏。因此, 混凝土结构具有更好的耐火性。

3) 整体性好。现浇或装配整体式混凝土结构具有良好的整体性, 其刚度较大, 有利于抵抗地震作用或强烈爆炸时冲击波的作用。

4) 可模性好。混凝土结构可根据需要浇筑成任何形状, 有利于建筑造型。

5) 就地取材。混凝土的主要成分, 如砂和石均可就地取材。另外, 还可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废料。

6) 节约钢材。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, 与钢结构相比, 可以节约钢材并降低造价。

1.2.2 混凝土结构的主要缺点

1) 自重大。在负担相同荷重的情况下, 混凝土结构的截面尺寸和自重都比钢结构大, 这对大跨结构、高层建筑结构都是不利的。另外, 自重大会使结构地震作用增大, 对抗震也不利。

2) 抗裂性差。由于混凝土的抗拉强度很低, 因此在正常使用条件下钢筋混凝土构件截面的受拉区都处于开裂状态, 如果裂缝过宽, 则会影响结构的耐久性和应用范围。

3) 需用模板。混凝土结构的制作, 需用模板予以成型。如果采用木模板, 则可重复使用的次数减少, 从而增加工程造价。

此外, 混凝土结构施工工序复杂, 周期较大, 且受季节和气候的影响较大。如遇损伤, 则修复比较困难。混凝土的隔热、隔声性能也较差。

1.3 混凝土结构的发展和应用

混凝土结构的应用至今已有 150 多年的历史。与钢结构、木结构和砌体结构相比, 由于它在材料及物理力学性能等方面具有许多优点, 因此成为土木工程领域最主要的结构型式之一。混凝土结构的应用和发展大致分为四个阶段:

第一阶段: 从钢筋混凝土的出现至 20 世纪初。这一时期由于钢筋和混凝土的强度都很低, 仅能建造一些小型的梁、板、柱和基础等构件。钢筋混凝土的计算理论初步形成, 结构构件的截面设计采用允许应力设计方法。

第二阶段: 从 20 世纪 20 年代到第二次世界大战前后。钢筋和混凝土的强度有所提高,

已建成各种空间结构,发明了预应力混凝土并应用于实际工程。在计算理论方面,开始按破损阶段进行构件的截面设计。

第三阶段:第二次世界大战到20世纪70年代末。由于材料强度的提高、施工技术的快速发展,混凝土单层厂房和桥梁结构的跨度不断增大,预制构件被广泛采用,混凝土高层建筑的高度已达262m。构件设计已过渡到按极限状态的设计方法。

第四阶段:从20世纪80年代到现在。随着建设速度加快,对材料性能和施工技术提出了更高要求,出现泵送混凝土等生产技术。尤其是近年来,高强混凝土和高强钢筋的出现,计算机的采用和先进施工机械设备的发明,建造了一批超高层建筑,大跨度桥梁,特长海底隧道和高耸结构等大型工程,标志着土木工程已经发展到了一个新的阶段。在设计计算理论方面,以概率理论为基础的极限状态设计方法得到了广泛采用,非线性有限元分析方法的出现和发展,推动了混凝土强度理论及其本构关系的深入研究,并形成了“近代混凝土力学”这一新兴学科。

目前,高性能混凝土和各种特殊用途的混凝土不断研制成功并获得应用,如钢纤维混凝土和聚合物混凝土有了很大发展;轻质混凝土、加气混凝土、陶粒混凝土及利用工业废渣制成的“绿色混凝土”不仅改善了混凝土的性能,而且对节能和环保具有重要意义。此外,防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等特殊需要的混凝土,以及智能型混凝土材料及其结构也正在研究中。混凝土结构的应用范围也在不断扩大,已从工业与民用建筑、城建及交通、水利水电工程领域扩大到了国防工程、海洋工程、地下建筑、核电站安全壳等各个方面。

1.4 本课程的主要内容和学习方法

1.4.1 主要内容

混凝土结构是由各种基本构件组成的,本书主要讲述钢筋混凝土构件及预应力混凝土构件的性能及设计。钢筋混凝土构件按照受力特点可以划分为以下几类:

1) 受弯构件,如梁、板等。这些构件截面上的内力以弯矩为主,故称为受弯构件,同时,构件截面上也有剪力作用。

2) 受压构件,如柱、墙等。这类构件的截面上有压力作用。当压力沿构件的纵轴作用在截面形心上时,称为轴心受压构件。如果压力不是沿构件的纵轴作用在截面形心上,或者在截面上同时有压力和弯矩作用,则为偏心受压构件。受压构件中通常还有剪力作用。

3) 受拉构件,如屋架下弦杆、拉杆拱中的拉杆等。如果忽略构件自重,它们通常按轴心受拉构件考虑,如果截面上同时有拉力和弯矩作用,则为偏心受拉构件。偏心受拉构件中也会有剪力作用。

4) 受扭构件,如曲梁、雨篷梁及框架结构的边梁等。这类构件的截面上除产生弯矩和剪力外,还会产生扭矩。因此,应考虑扭矩对构件受力性能的影响。

对预应力混凝土构件,主要介绍其轴心受拉和受弯时的受力性能。

1.4.2 课程特点及学习方法

在学习混凝土结构设计原理课程时,应注意以下几点:

1) 钢筋混凝土构件是由钢筋和混凝土两种材料组成的构件,且混凝土是非均质、非连续、非弹性的材料,因此,不能直接采用材料力学的公式来计算钢筋混凝土构件的承载力和

变形。而材料力学解决问题的基本方法，即利用平衡条件、物理条件和几何条件建立基本方程的思路，对于钢筋混凝土构件也是适用的。

2) 钢筋混凝土构件的两种材料，在强度和数量上存在一个合理的配比范围。如果钢筋和混凝土在面积上的比例及材料强度的搭配超过了这个范围，就会引起构件受力性能的改变，从而引起截面设计方法的改变。

3) 钢筋混凝土构件的计算方法是建立在试验研究的基础之上的。钢筋和混凝土材料的力学性能应通过试验确定。只有通过试验研究，才能深刻理解构件的破坏机理和受力性能，并建立相应的力学模型和计算公式。

4) 在学习混凝土结构设计计算理论的同时，还应重视构造措施，包括对截面形式、材料选用及配筋构造的认识。注意学会对影响构件承载力和变形性能的多种因素进行综合分析，培养综合能力。

5) 本课程的实践性很强，因此应当学会在设计过程中逐步熟悉和正确运用我国现行的有关设计标准和规范，如《混凝土结构设计规范》(GB 50010)、《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068)和《建筑结构荷载规范》(GB 50009)等。这些设计规范是国家颁布的有关结构设计的技术规定和标准，规范条文尤其是强制性条文是带有一定法律性质的技术文件，必须深入理解并在设计中遵照执行。

本章小结

1. 混凝土结构是以混凝土为主要材料制成的结构。在混凝土中配置适量钢筋，使混凝土主要承受压力，钢筋承担拉力，就可使构件的承载力大大提高，受力性能也得到显著改善。混凝土结构有许多优点，但也存在一定缺点。

2. 钢筋和混凝土两种材料能够有效地结合在一起共同工作，主要有三方面原因：钢筋与混凝土之间存在粘结力；两种材料的温度线膨胀系数很接近；混凝土对钢筋提供保护作用。

3. 混凝土结构从出现到现在已有 150 多年的历史，它在建筑、道桥、隧道、矿井、水利和港口等各种工程中得到了广泛应用。学习混凝土结构设计原理课程时，应注意理论与实际相结合。

思考题

- 1-1 试说明素混凝土构件与钢筋混凝土构件在受力性能方面的差异。
- 1-2 钢筋与混凝土能够共同工作的原因是什么？
- 1-3 混凝土结构有哪些优点和缺点？它在实际工程中有哪些应用？

第2章 钢筋和混凝土材料的基本性能

2.1 钢 筋

2.1.1 钢材成分

混凝土结构中使用的钢筋,按照其钢材的化学成分可分为碳素钢和普通低合金钢。根据钢材中含碳量的多少,碳素钢通常可分为低碳钢(含碳量少于0.25%)、中碳钢(含碳量0.25%~0.6%)和高碳钢(含碳量0.6%~1.4%)。随含碳量的增加钢材的强度提高,但塑性和可焊性降低。

在钢材中加入少量合金元素,如锰、硅、钒、钛等,即制成低合金钢,它可以明显改善钢材的力学性能。锰、硅元素可提高钢材的强度,并保持一定的塑性。近年来新开发的细晶粒钢筋,不需添加或仅需添加很少的合金元素,就可满足混凝土结构对钢筋强度和延性的要求。

2.1.2 钢筋的品种和级别

建筑结构中采用的钢筋,主要有热轧钢筋、预应力钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋等种类。

热轧钢筋是由低碳钢、普通低合金钢或细晶粒钢在高温状态下轧制而成的,按强度由低到高可分为HPB300(工程符号为 Φ)、HRB335(工程符号为 Φ)、HRBF335(工程符号为 Φ^F)、HRB400(工程符号为 Φ)、HRBF400(工程符号为 Φ^F)、RRB400(工程符号为 Φ^R)、HRB500(工程符号为 Φ)、HRBF500(工程符号为 Φ^F)。其中HPB300为低碳钢,外形为光面圆形[图2-1(a)],HRB335、HRB400、HRB500为普通低合金钢,HRBF335、HRBF400、HRBF500为细晶粒钢筋,均在表面轧有月牙肋,称为带肋钢筋,如图2-1(b)所示。RRB400钢筋为余热处理月牙纹变形钢筋,是由轧制钢筋后经高温淬水,余热处理后提高强度。

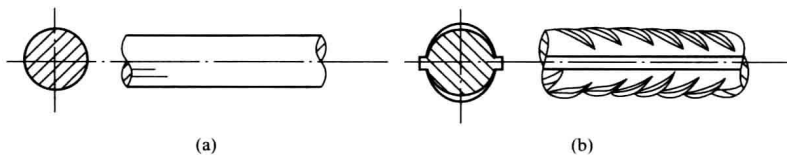


图2-1 常用热轧钢筋的外形

(a) 光面钢筋; (b) 月牙肋钢筋

钢筋混凝土结构中的纵向受力钢筋宜采用HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500钢筋,也可采用HPB300、HRB335、HRBF335和RRB400钢筋。梁、柱纵向受力普通钢筋应采用HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500钢筋。箍筋宜采用HRB400、HRBF400、HPB300、HRB500、HRBF500钢筋,也可采用HRB335、HRBF335钢筋。HRB系列普通热轧带肋钢筋具有较好的延性、可焊性、机械连接性能及施工适应性。RRB系列钢筋的延性、可焊性、机械连接性能及施工适应性均有所降低,一般可用于对变形性能

及加工性能要求不高的构件中,如基础、大体积混凝土、楼板、墙体,以及次要的中小结构构件等。

中强度预应力钢丝的抗拉强度为 $800\sim 1270\text{MPa}$,外形有光面(工程符号 Φ^M)和螺旋肋[工程符号 Φ^{HM} ,如图 2-2(b)所示]两种;消除应力钢丝的抗拉强度为 $1470\sim 1860\text{MPa}$,外形也有光面(工程符号 Φ^P)和螺旋肋(工程符号 Φ^H)两种;钢绞线[工程符号 Φ^S ,如图 2-2(a)所示]抗拉强度为 $1570\sim 1960\text{MPa}$,是由多根高强钢丝扭结而成,常用的有 1×7 (7股)和 1×3 (3股)等;

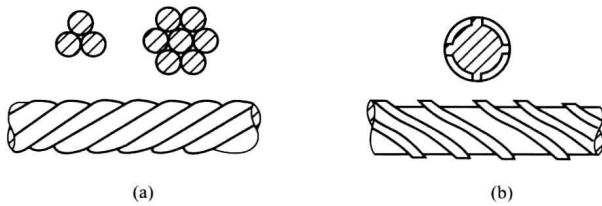


图 2-2 钢绞线、消除应力钢丝的外形
(a) 钢绞线; (b) 螺旋肋钢丝

预应力螺纹钢筋(工程符号 Φ^T)又称精轧螺纹粗钢筋,其抗拉强度为 $980\sim 1230\text{MPa}$,是用于预应力混凝土结构的大直径高强钢筋。这种钢筋在轧制时沿钢筋纵向全部轧成有规律的螺纹肋条,可用螺丝套筒连接和螺帽锚固,不需要再加工螺丝,也不需要焊接。

预应力筋宜采用预应力钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋。

2.1.3 钢筋的强度和变形性能

1. 钢筋的应力—应变曲线

根据钢筋受拉时应力—应变关系曲线特点不同,可将钢筋分为有明显流幅的钢筋和无明显流幅的钢筋两类。

(1) 有明显流幅的钢筋

有明显流幅的钢筋(如热轧钢筋)由拉伸试验得到的典型应力—应变曲线如图 2-3 所示,从图中可见,在 a 点以前,钢筋处于弹性阶段,应力—应变关系呈直线, a 点对应的应力称为比例极限。过 a 点后,应变较应力增长速度加快,到达 b 点后钢筋开始塑流,应力—应变关系接近于水平线,这种塑流变形一直持续到 c 点。相应于 b 点的应力称为钢筋的屈服强度。过 c 点以后,钢筋进入强化阶段,应力—应变关系为上升的曲线,直到 d 点达到其极限抗拉强度。超过 d 点后,钢筋产生颈缩现象,应力开始下降,但应变仍能继续增大,到 e 点钢筋被拉断, e 点对应的应变称为钢筋的极限应变。

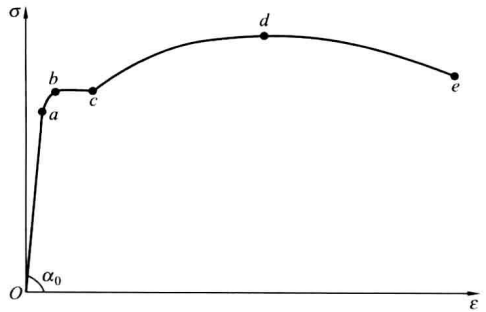


图 2-3 有明显流幅钢筋的应力—应变曲线

钢筋混凝土构件设计时,对有明显流幅的钢筋,取屈服强度作为钢筋强度取值的依据。因为钢筋屈服以后,将产生较大的塑性变形,使构件的变形和裂缝宽度增大很多,以致影响正常使用。

(2) 无明显流幅的钢筋

无明显流幅的钢筋(如预应力螺纹钢筋和各类钢丝)在拉伸时典型的应力—应变曲线如图 2-4 所示。可以看出,钢筋应力达到比例极限(图中 a 点)之前,应力—应变关系呈直线,钢筋具有明显的弹性性质。超过 a 点之后,钢筋表现出一定的塑性变形,应力与应变均

继续增长,但没有明显的屈服点。达到极限抗拉强度 σ_b (b 点)后,由于钢筋颈缩,曲线出现下降段,至 c 点钢筋被拉断。

设计中,对无明显流幅的钢筋,一般取残余应变为 0.2% 时对应的应力 ($\sigma_{0.2}$) 作为钢筋强度取值的依据,称为条件屈服强度。《混凝土结构设计规范》(GB 50010) (书中如无其他特殊说明,以下简称《规范》) 为简化计算,取 $\sigma_{0.2} = 0.85\sigma_b$ 。

2. 钢筋的弹性模量

钢筋的弹性模量是根据拉伸试验中弹性阶段的应力—应变曲线确定的。由图 2-3 和图 2-4 可见,弹性模量 $E = \sigma/\varepsilon = \tan\alpha_0$ 。各类钢筋的弹性模量见附表 5。

3. 钢筋的塑性性能

钢筋除了要有足够的强度外,还应具有一定的塑性性能和变形能力。这可以用钢筋的伸长率和冷弯性能两个指标来衡量。

(1) 伸长率

钢筋断后伸长率 δ 是用钢筋试件拉断后断口两侧的残留应变来衡量的,即

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中 l_0 ——钢筋试件拉伸前的量测标距;

l ——钢筋试件拉断时的量测标距,量测标距包括颈缩区。

以往通常用标距为 $10d$ 或 $5d$ (d 为钢筋实际的直径) 范围内的极限伸长率,记为 δ_{10} 或 δ_5 。伸长率越大,表明钢筋的塑性和变形能力越大。

上述伸长率仅反映了钢筋残余变形的大小,其中还包含了断口颈缩区域的局部变形。这一方面使得不同量测标距长度所得的结果不一致,即对同一钢筋,当量测标距取值较小时,所得伸长率较大,而当量测标距取值较大时,所得伸长率较小;另一方面,由式 (2-1) 求得的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,在量测钢筋拉断后的标距长度时,需将拉断后的两段钢筋对合后再量测,也容易产生人为误差。

因此,我国《规范》采用了钢筋在最大力下的总伸长率(又称均匀伸长率) δ_{gt} 来表示钢筋的延性,即其变形能力。

钢筋在达到最大应力 σ_b 时的变形包括塑性变形和弹性变形两部分,如图 2-5 所示。故最大力下的总伸长率 δ_{gt} 可用下式表示

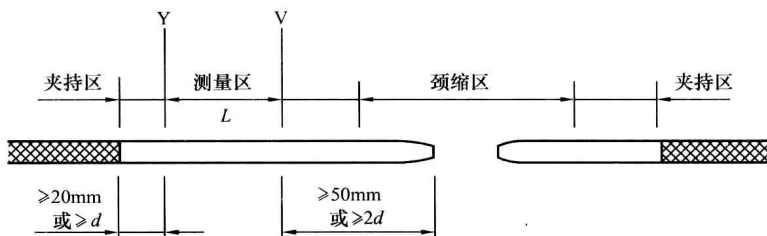


图 2-5 最大力下的总伸长率量测方法

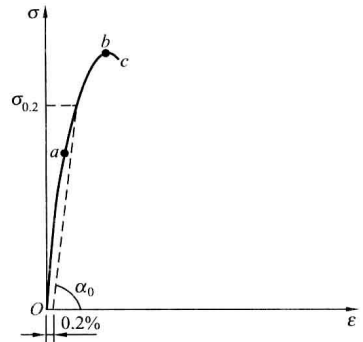


图 2-4 无明显流幅钢筋的应力—应变曲线

$$\delta_{gt} = \left(\frac{L - L_0}{L_0} + \frac{\sigma_b}{E_s} \right) \times 100\% \quad (2-2)$$

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 (即极限抗拉强度);
 E_s ——钢筋的弹性模量。

式 (2-2) 括号中的第一项反映了钢筋的塑性变形, 第二项反映了钢筋在最大拉应力下的弹性变形。《规范》采用 δ_{gt} 评定钢筋的塑性性能, 并要求普通钢筋及预应力筋在最大力下的总伸长率 δ_{gt} 不应小于表 2-1 规定的数值。

表 2-1 普通钢筋及预应力筋在最大力下的总伸长率限值

钢筋品种	普通钢筋			预应力筋
	HPB300	HRB335、HRBF335、HRB400、 HRBF400、HRB500、HRBF500	RRB400	
$\delta_{gt}(\%)$	10.0	7.5	5.0	3.5

(2) 冷弯性能

为了使钢筋在加工和使用时不发生断裂, 要求钢筋具有一定的冷弯性能, 冷弯是将钢筋围绕某个规定的直径 D (D 为 $1d$, $2d$, $3d$ 等, d 为钢筋直径) 的辊轴弯曲一定的角度 (90° 或 180°), 如图 2-6 所示, 弯曲后的钢筋应无裂纹或断裂现象。

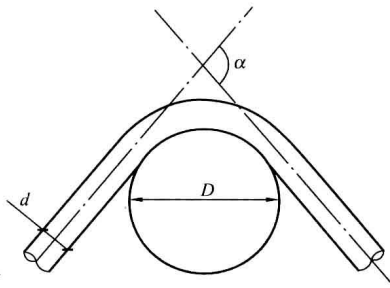


图 2-6 钢筋的冷弯试验

辊轴直径越小, 弯折角度越大, 钢筋的冷弯性质就越好, 其塑性变形能力越大。

2.1.4 钢筋的疲劳性能

钢筋的疲劳破坏是指钢筋在重复、周期动荷载作用下, 经过一定次数后, 钢材发生脆性的突然断裂破坏的现象。工程结构中的吊车梁、桥面板、铁路轨枕等承受重复荷载作用的构件, 常会发生疲劳破坏, 此时钢筋的

最大应力低于静荷载作用下钢筋的极限强度。钢筋的疲劳强度是指在某一规定应力幅内, 经受一定次数 (我国规定为 200 万次) 循环荷载后发生疲劳破坏的最大应力值。

一般认为, 在外力作用下, 钢筋发生疲劳断裂是由于钢筋内部和表面缺陷引起应力集中, 在充分荷载作用下内部微裂纹逐渐扩展造成的。影响钢筋疲劳强度的因素很多, 如疲劳应力幅、最小应力值、钢筋外表面的几何形状、钢筋直径、钢筋种类、轧制工艺和试验方法等。我国《规范》规定了不同等级钢筋在不同的疲劳应力幅比值 $\rho^f = \sigma_{\min}^f / \sigma_{\max}^f$ (σ_{\max}^f 和 σ_{\min}^f 分别为重复荷载作用下同一层钢筋的最大应力和最小应力) 时的疲劳应力幅值限值, 见附表 6 和附表 7。对预应力筋, 当 $\rho^f \geq 0.9$ 时, 可不作疲劳验算。

2.1.5 混凝土结构对钢筋性能的要求

(1) 适当的强度和屈强比

强度是指钢筋的屈服强度和极限强度。采用较高强度的钢筋可以节省钢材, 获得较好的经济效益。但钢筋的强度并非越高越好, 因为高强钢筋在高应力下的大变形会引起混凝土结

构产生过大的变形和裂缝宽度。另外，屈强比为钢筋的屈服强度与极限强度之比，它代表了钢筋和结构的强度储备。屈强比小，则结构的强度储备大，但屈强比过小，则钢筋的强度不能有效利用，造成不经济。

(2) 足够的塑性

要求钢筋在断裂前有足够的变形，出现明显的破坏预兆。因此，应保证钢筋的延伸率和冷弯性能合格。

(3) 可焊性好

在许多情况下，钢筋之间需要通过焊接连接。因此，要求在一定的工艺条件下，钢筋焊接后不产生裂纹及过大的变形，保证焊接后的接头性能良好。

(4) 耐久性与耐火性

钢筋容易遭受腐蚀而影响表面与混凝土的粘结性能，甚至削弱截面，降低承载力。有时采用环氧树脂涂层钢筋或镀锌钢丝可提高钢筋的耐久性。钢筋在高温作用下承载力会降低。在设计时应该对钢筋设置必要的混凝土保护层厚度以满足对构件耐久性和耐火极限的要求。

(5) 与混凝土具有良好的粘结性能

粘结力是保证钢筋与混凝土共同工作的基础，而变形钢筋与混凝土的粘结性能最好，设计中宜优先选用变形钢筋。

另外，在寒冷地区要求钢筋具备抗低温性能，以防止钢筋低温冷脆而破坏。

2.2 混 凝 土

2.2.1 混凝土的强度

普通混凝土是由水泥、砂、石和水按一定比例拌和、凝结硬化后形成的人工石材。混凝土的强度不仅与水泥强度、水灰比、骨料品种、混凝土配合比、硬化条件和龄期等因素有关，还与试件的尺寸、形状，以及试验方法具有非常密切的关系。

1. 混凝土单向受力时的强度

(1) 立方体抗压强度和混凝土的强度等级

我国以立方体抗压强度标准值作为混凝土各种力学指标的基本代表值。《规范》规定按照标准方法制作、养护（温度为 $20^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不小于90%）的边长为150mm的立方体试件，在28d或设计规定龄期以标准试验方法测得的，具有95%保证率的抗压强度值（以 N/mm^2 计），作为混凝土立方体抗压强度标准值，记为 $f_{\text{cu,k}}$ ，并以此确定混凝土的强度等级，共划分了14级，即C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80，其中C50及其以下为普通混凝土，C50以上为高强混凝土。

钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于C20；采用强度等级400MPa及以上的钢筋时，混凝土强度等级不应低于C25。承受重复荷载的钢筋混凝土构件，混凝土强度等级不应低于C30。

试件在试验机上单向受压时，纵向压缩，横向膨胀，当试验承压接触面不涂润滑剂时，则试件两端因受承压钢板与试件端面间横向摩擦力的作用，其横向变形受到约束，就像在试件上下各加了一个“套箍”，致使混凝土最终形成两个对顶的角锥形破坏面，如图2-7所示。