

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



HUNNINGTU JIEGOU SHEJI YUANLI

混凝土结构 设计原理

陈宗平 薛建阳 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



HUNNINGTU JIEGOU SHEJI YUANLI

混凝土结构 设计原理



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。全书共分10章,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、预应力混凝土构件。本书根据我国现行《混凝土结构设计规范》及相关设计规范和科研成果编写而成。书中系统介绍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,叙述清楚,概念明确。书中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。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/陈宗平,薛建阳主编. —北京:中国电力出版社,2010.4

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5123-0202-0

I. ①混… II. ①陈…②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(2010)第040274号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://jc.cepp.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 2010年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 12.75印张 304千字

定价 21.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

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

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本科教材,也可作为土木工程专业专科教材,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1章 绪论	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	8
2.3 钢筋与混凝土的粘结	14
本章小结	17
思考题	18
第3章 结构设计的基本原理	19
3.1 结构可靠度及结构安全等级	19
3.2 荷载和材料强度的标准值	21
3.3 概率极限状态设计法	22
3.4 极限状态设计表达式	25
本章小结	28
思考题	29
第4章 受弯构件正截面承载力计算	30
4.1 概述	30
4.2 正截面受弯性能试验研究	30
4.3 正截面受弯承载力分析	33
4.4 单筋矩形截面受弯承载力计算	37
4.5 双筋矩形截面受弯承载力计算	41
4.6 T形截面受弯承载力计算	47
4.7 受弯构件的一般构造要求	53
本章小结	55
思考题	56
习题	56
第5章 受弯构件斜截面承载力计算	58
5.1 概述	58

5.2 受弯构件受剪性能的试验研究	58
5.3 斜截面受剪承载力计算	63
5.4 斜截面受剪承载力的设计计算方法	67
5.5 斜截面受弯承载力和构造措施	73
5.6 钢筋的构造要求	78
本章小结	80
思考题	81
习题	81
第6章 受压构件截面承载力计算	83
6.1 概述	83
6.2 轴心受压构件正截面受压承载力	83
6.3 偏心受压构件正截面受压承载力	89
6.4 偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	107
6.5 构造要求	108
本章小结	110
思考题	111
习题	111
第7章 受拉构件承载力计算	113
7.1 概述	113
7.2 轴心受拉构件正截面受拉承载力	113
7.3 偏心受拉构件正截面受拉承载力	113
7.4 偏心受拉构件斜截面受剪承载力	116
本章小结	116
思考题	117
习题	117
第8章 受扭构件截面承载力计算	118
8.1 概述	118
8.2 纯扭构件扭曲截面承载力计算	118
8.3 剪扭构件承载力计算	123
8.4 弯扭构件承载力计算	125
8.5 弯剪扭构件承载力计算	126
8.6 压弯剪扭构件承载力计算	129
8.7 受扭构件的构造要求	130
本章小结	131
思考题	131
习题	132
第9章 混凝土结构的使用性能和耐久性设计	133
9.1 概述	133
9.2 钢筋混凝土构件的裂缝宽度验算	133

9.3 受弯构件挠度验算	138
9.4 混凝土结构的耐久性	141
本章小结	143
思考题	143
习题	144
第 10 章 预应力混凝土构件	145
10.1 预应力混凝土的基本知识	145
10.2 预应力混凝土构件设计的一般规定	149
10.3 预应力混凝土轴心受拉构件	157
10.4 预应力混凝土受弯构件的计算	170
10.5 预应力混凝土构件的构造要求	183
本章小结	185
思考题	186
习题	186
附录	188
参考文献	194

第1章 绪 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,钢筋主要承受拉力,就成为钢筋混凝土结构。型钢混凝土结构是在构件截面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最多。

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有略微上升,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。

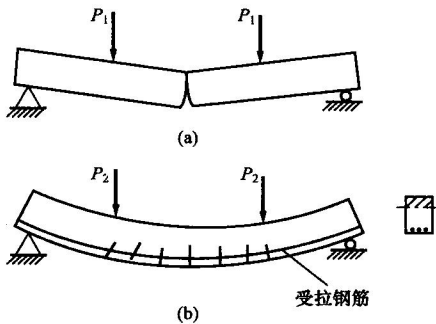


图1-1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁
(a) 素混凝土梁; (b) 钢筋混凝土梁

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地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 $(1.0 \sim$

1.5×10^{-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) 自重较大。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、木和砌体结构相比，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形式之一。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，结构内力分析和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,开始按破坏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。结构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,特长跨海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,本书的内容是关于这些基本构件的性能及设计。这些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。

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有关的设计规范和标准,如《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)和《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)等。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,应注意理论和实际相结合。

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材，按照化学成分可分为碳素钢和普通低合金钢。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。根据所加元素不同，普通低合金钢可以分锰系（如 20MnSi、25 MnSi）、硅钛系（45Si₂MnTi）、硅钒系（如 40Si₂MnV、45SiMnV）等。锰、硅元素可提高钢材的强度，并保持一定的塑性。

2.1.2 钢材的品种和级别

建筑结构中采用的钢筋，主要有热轧钢筋、钢绞线、消除应力钢丝（包括光面钢丝、螺旋肋钢丝和刻痕钢丝）以及热处理钢筋等种类。

1. 热轧钢筋

热轧钢筋是由低碳钢、普通低合金钢在高温状态下轧制而成的，按强度由低到高可分为 HPB235 级、HRB335 级、HRB400 级和 RRB400 级。热轧钢筋的种类、工程符号和直径范围见表 2-1。其中 HPB235 级为低碳钢，外形为光面圆形 [图 2-1 (a)]，HRB335 级、HRB400 级和 RRB400 级钢筋为普通低合金钢，表面轧有月牙肋或等高肋，称为带肋钢筋或称变形钢筋，如图 2-1 (b)、(c) 所示。

表 2-1 常用热轧钢筋的种类、符号和直径

种 类	钢 种	符 号	直径 (mm)
HPB235	Q235	Φ	8~20
HRB335	20MnSi	Φ	6~50
HRB400	20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi	Φ	6~50
RRB400	K20MnSi	Φ ^R	8~40

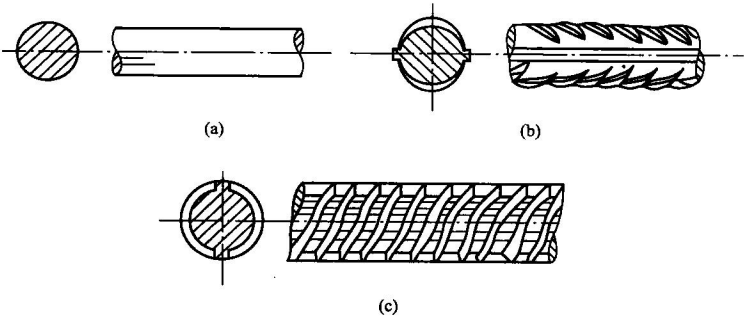


图 2-1 常用热轧钢筋的外形
(a) 光面钢筋；(b) 月牙肋钢筋；(c) 等高肋钢筋

2. 钢绞线

钢绞线是由多根高强钢丝捻制在一起经过低温回火处理清除内应力后制成的，分 3 股和 7 股两种 [图 2-2 (a)]。钢绞线的直径系指外接圆直径。

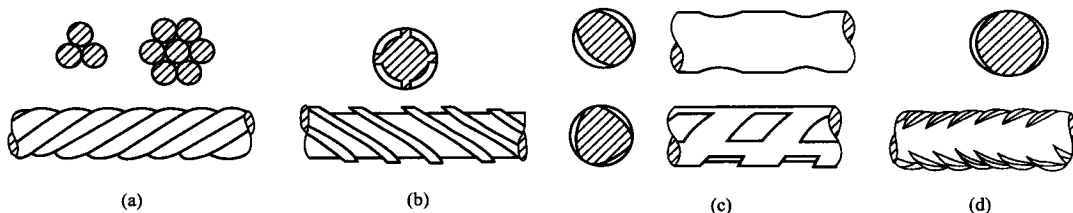


图 2-2 钢绞线、消除应力钢丝和热处理钢筋的外形
(a) 钢绞线；(b) 螺旋肋钢丝；(c) 刻痕钢丝；(d) 热处理钢筋

3. 消除应力钢丝

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光面钢丝，其直径为 4~9mm；消除应力螺旋肋钢丝是以低碳钢或普通低合金钢热轧的圆盘条为母材，经冷轧减径后在表面冷轧成有肋的钢筋，其直径为 4~8mm；消除应力刻痕钢丝是在光面钢丝表面上进行机械刻痕处理，其直径有 5mm 和 7mm 两种。螺旋肋钢丝和刻痕钢丝的形状见图 2-2 (b)、(c)。

4. 热处理钢筋

热处理钢筋是将特定强度的热轧钢筋，经过淬火和回火处理而制成。钢筋经过淬火后，强度大幅度提高，但塑性和韧性有所降低；再经过回火，又可以在不降低强度的前提下，消除由淬火产生的内应力，使塑性和韧性得到改善，热处理钢筋的外形见图 2-2 (d)。

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。

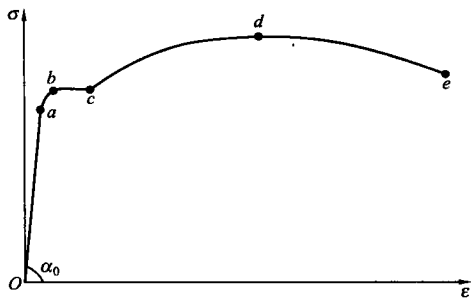


图 2-3 有明显流幅钢筋的应力—应变曲线

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(如热处理的钢筋和各类钢丝)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。

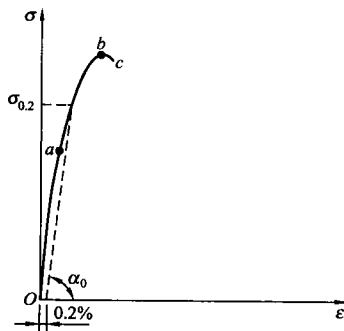


图2-4 无明显流幅钢筋的应力—应变曲线

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—2002)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 $E=\sigma/\epsilon=\tan\alpha_0$ 。各类钢筋的弹性模量见附表5。

3. 钢筋的塑性性能

(1) 延伸率

钢筋的延伸率 δ 是用钢筋试件拉断后断口两侧的残留应变来衡量的,即

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

式中 L ——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 。延伸率越大,表明钢筋的塑性和变形能力越大。

(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2-5所示,弯曲后的钢筋应无裂纹或断裂现象。

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 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

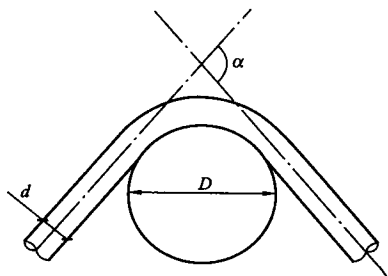


图2-5 钢筋的冷弯试验

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,钢筋与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。在设计时应该注意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作为混凝土材料性能的基本代表值。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)规定按照标准方法制作的边长为 150mm 的立方体试件,在标准养护条件(温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$,相对湿度不小于 90%)下养护,在 28d 龄期,用标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度 (N/mm^2) 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。

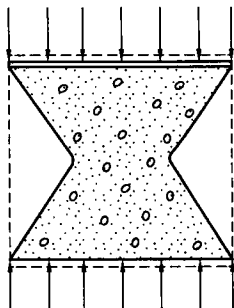


图 2-6 混凝土立方体试块的破坏状态

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验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 2-6 所示。

试验表明,混凝土抗压强度随立方体试件尺寸的减小而增大,这种现象称为尺寸效应。当采用边长为 200mm 或 100mm 立方体试块时,需将其抗压强度实测值分别乘以换算系数 1.05 或 0.95,换算成标准试件的立方体抗压强度。

(2) 轴心抗压强度

在实际工程中,受压试件往往不是立方体,而是棱柱体,因此采用棱柱体试件比立方体试件能更好地反映混凝土的实际抗压能力。

我国采用 150mm×150mm×300mm 的棱柱体作为标准试件,按上述与立方体试件相同的制作、养护和试验方法测得的抗压强度作为轴心抗压强度。由于棱柱体试件受压时试件中部的横向变形不受端部摩擦力的约束,混凝土处于单向全截面均匀受压的应力状态,因而其轴心抗压强度低于立方体抗压强度。

轴心抗压强度标准值 f_{ck} 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 的关系为

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{cl}\alpha_{c2}f_{cu,k} \quad (2-2)$$

式中 α_{cl} ——棱柱体强度与立方体强度的比值,对混凝土强度等级为 C50 及以下取 $\alpha_{cl} = 0.76$,对 C80 取 $\alpha_{cl} = 0.82$,中间按线性规律变化取值;

α_{c2} ——考虑混凝土脆性的折减系数,对 C40 及以下混凝土取 $\alpha_{c2} = 1.00$,对 C80 取 $\alpha_{cl} = 0.87$,中间按线性规律变化取值;

0.88——考虑结构中混凝土强度与试件混凝土强度之间的差异而采取的修正系数。

(3) 轴心抗拉强度

混凝土的抗拉强度比抗压强度小得多,一般只有抗压强度的 5%~10%,而且与立方体强度之间并非线性关系。立方体抗压强度越大,轴心抗拉强度与立方体抗压强度的比值就越小。轴心抗拉强度可采用图 2-7 (a) 所示的试验方法,试件尺寸为 100mm×100mm×500mm 的柱体,两端埋有伸出长度为 150mm 的 $\Phi 16$ 变形钢筋,钢筋位于试件轴线上。试验机夹头夹紧两端伸出的钢筋施加拉力,破坏时试件在没有钢筋的中部截面被拉断。

轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 的关系为

$$f_{tk} = 0.88\alpha_{c2} \times 0.395f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \quad (2-3)$$

式中 δ ——混凝土立方体抗压强度变异系数。

用轴心受拉试验测定混凝土抗拉强度时,试件的对中比较困难,故还常采用立方体或圆柱体劈裂试验来测定混凝土的抗拉强度,如图 2-7 (b) 所示。在试件上下施加一条形

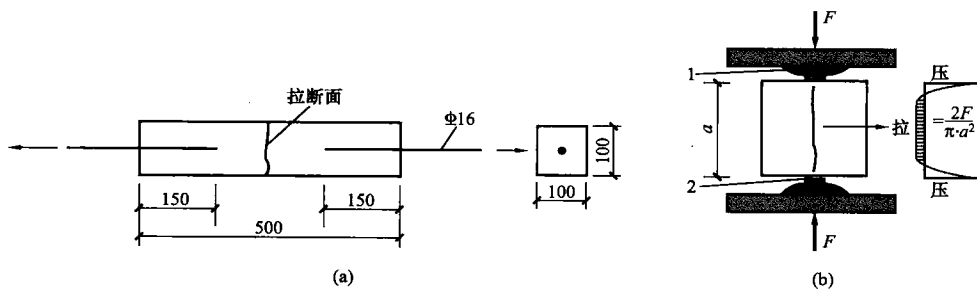


图 2-7 混凝土抗拉强度试验方法

(a) 直接拉伸试验; (b) 劈裂试验

1—钢垫条; 2—木质垫层

荷载, 这样试件中间垂直截面除加力点附近很小的范围外, 产生均匀分布的水平拉应力。当拉应力达到混凝土的抗拉强度时, 试件被劈成两半。根据弹性理论, 混凝土的劈裂强度按下式计算

$$f_t = \frac{2F}{\pi dl} \quad (2-4)$$

或

$$f_t = \frac{2F}{\pi a^2} \quad (2-5)$$

式中 F ——破坏荷载;

d, l ——圆柱体试件的直径和长度;

a ——立方体试件的边长。

2. 复杂受力状态下的混凝土强度

在实际工程中, 钢筋混凝土构件通常受到轴力、弯矩和剪力等的共同作用, 使得混凝土极少处于单向受力状态, 一般都处于复杂的受力状态。因此, 获得混凝土在复合应力作用下的强度就很有必要。

(1) 双轴应力状态

混凝土在双轴应力状态 (仅两个平面上作用着法向应力 σ_1 和 σ_2 , 与之垂直的平面上作用的法向应力 $\sigma_3=0$) 下的强度包络线, 如图 2-8 所示。其中 f'_c 表示混凝土单轴受压时的强度。由图 2-8 可见: 混凝土双轴受压时的强度 (第三象限) 大于单轴受压时的强度, 其提高幅度可以达到 26% 左右。当一向受拉、一向受压时 (第二或第四象限), 混凝土强度均低

于单轴受拉或受压时的强度。混凝土在双向受拉时 (第一象限), 其强度接近于单轴受拉强度。

(2) 剪压或剪拉复合应力状态

在构件截面上同时作用有剪应力和压应力或拉应力, 就形成了剪压或剪拉复合应力状态, 如图 2-9 所示。从图中可以看出, 混凝土抗剪强度随拉应力的增大而减小, 随压应力的增大而增大。但当压应力超过某一数值时 (如 $0.6f_c$, f_c 为混凝土抗压强度), 由于混凝土内部微裂纹的发展, 抗剪强度随压应力的增大反而减小。同时, 由于剪应力的存在, 混凝土的抗压强度要低于单轴抗压强度。

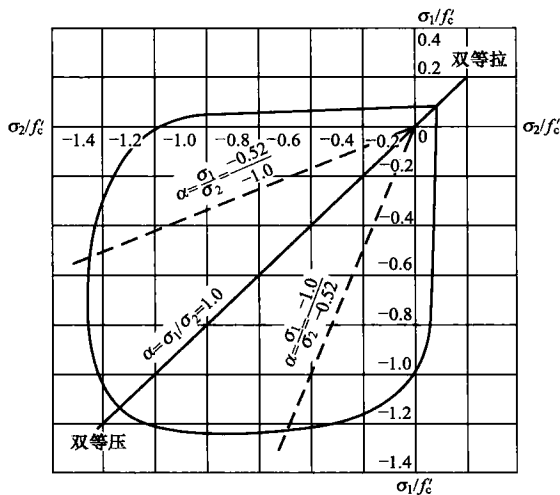


图 2-8 双轴应力状态下混凝土的强度

(3) 三轴受压状态

图 2-10 所示为混凝土圆柱体在等侧压条件下的抗压强度试验。随着侧向压应力的增大, 混凝土微裂缝的发展受到限制, 因而混凝土纵向抗压强度得到明显提高。根据试验, 可以得出混凝土纵向抗压强度与侧向压应力的关系为

$$f_{cl} = f'_c + \beta \sigma_r \quad (2-6)$$