

# 第1章 概 论

## 本章导学

本章叙述了混凝土结构的一般概念及特点,主要有两方面内容:一是将钢筋和混凝土组合在一起形成钢筋混凝土结构的原因,二是钢筋与混凝土共同工作的基础。同时简要介绍了混凝土结构的发展与应用概况,以及本课程的主要内容、特点以及学习过程中需注意的问题。

## 学习目标

通过本章学习,掌握混凝土结构的一般概念及特点;了解混凝土结构在国内外土木工程中的发展与应用概况;了解本课程的主要内容、要求和学习方法。

## 1.1 混凝土结构的概念与特点

### 1.1.1 混凝土结构的概念

以混凝土为主制成的结构称为混凝土结构,包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构称为素混凝土结构;配置受力普通钢筋的混凝土结构称为钢筋混凝土结构;通过张拉或其他方法建立预加应力,配置受力的预应力筋的混凝土结构称为预应力混凝土结构。

混凝土是现代工程结构中应用极为广泛的一种建筑材料。近些年我国每年的混凝土用量约为  $1.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 其中在房屋建筑的用量约为  $9 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 钢筋用量约为  $2 \times 10^7 \text{ t}$ 。混凝土是由胶凝材料、粗集料、细集料、水和外加剂等,按适当比例配制,经拌和、养护硬化而成的具有一定强度的人工石材。胶凝材料包括水泥、石灰、水玻璃、粉煤灰和矿粉等,但目前工程结构中使用最为广泛的是以水泥为胶凝材料的混凝土。

混凝土是一种抗压能力较高而抗拉能力很低的材料,这使素混凝土结构的应用受到很大的限制。钢筋混凝土结构是目前土木工程中使用最为广泛的结构形式,由钢筋和混凝土两种力学性能不同的材料组成。利用混凝土的抗压能力较高,钢筋的抗拉能力较强的特点,将钢筋和混凝土通过合理的方式组合在一起,使钢筋主要承受拉力,混凝土主要承受压力,二者共同

工作,充分发挥两种材料的性能优势,以满足工程结构既安全可靠又经济合理的要求。

图 1-1(a)、(b)所示分别为尺寸和混凝土强度均相同的素混凝土简支梁和钢筋混凝土简支梁受压破坏情况。素混凝土梁中没有配置钢筋,钢筋混凝土梁在截面受拉区配有适量的钢筋。

图 1-1(a)中所示的素混凝土梁在荷载作用下,梁截面上部受压,下部受拉。当梁跨中截面下边缘的混凝土应变达到其极限拉应变时,该部位开裂,随后由于该截面高度减小导致开裂截面受拉区的拉应力不断增大,裂缝迅速向上延伸并立即引起梁的破坏。这种破坏很突然,属没有预兆的脆性破坏。同时由于混凝土的抗拉强度很低,所以梁破坏时的变形和极限承载力均很低。所以,对于在各种作用下会在截面中产生拉应力的结构不应采用素混凝土结构。

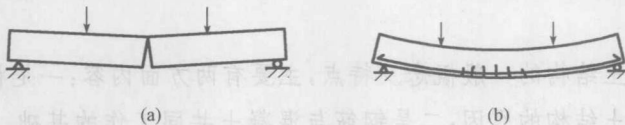


图 1-1 简支梁受压破坏情况  
(a)素混凝土梁;(b)钢筋混凝土梁

为了改变这种情况,在梁的受拉区配置适量的钢筋形成钢筋混凝土梁,如图 1-1(b)所示。在外荷载作用下钢筋混凝土梁同样是跨中截面下边缘的混凝土首先开裂,由于钢筋与混凝土牢固地黏结在一起,此时开裂截面原先由混凝土承担的拉力转由钢筋承担。同时由于钢筋的强度和弹性模量均很高,能有效地约束裂缝的开展,使其不能无限制地向上延伸而导致梁断裂破坏,故钢筋混凝土梁还能继续承受外荷载,直到受拉钢筋达到屈服强度,受压区混凝土压碎,梁才达到破坏状态。可见钢筋混凝土梁不仅能承受较大的外荷载,而且使钢筋的抗拉强度和混凝土的抗压强度都得到较为充分的利用,破坏前的变形大,有明显的预兆,属延性破坏,且钢筋混凝土梁的承载能力和变形能力大大超过同等条件下的素混凝土梁。图 1-2 给出了素混凝土梁和钢筋混凝土梁跨中截面的弯矩  $M$  与构件变形  $f$  的关系曲线。

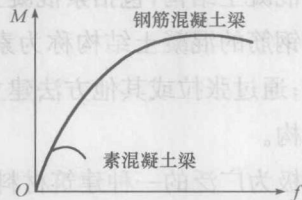


图 1-2 素混凝土梁与钢筋混凝土梁  $M-f$  关系曲线

在轴心受压的柱中通常也配置抗压能力较高的钢筋,一可以协助混凝土承受压力以提高柱的承载力及减小柱的截面尺寸,二可以提高柱的变形能力以改善构件破坏时的脆性性能,同时还可以承担偶然因素引起的拉力。

钢筋和混凝土这两种物理力学性能极不相同的材料能够有效地结合在一起共同工作,主要是由于以下三个原因。

(1)混凝土硬化后,钢筋与混凝土之间存在着良好的黏结力,使钢筋和混凝土在荷载作用下

能够协调变形,共同受力。因此,黏结力是二者能够共同工作的基础。

(2)钢筋与混凝土两种材料的温度线膨胀系数相近。钢筋为  $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,混凝土为  $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。因此,钢筋与混凝土之间的黏结力不会因为温度变化产生较大的相对变形而破坏。

(3)钢筋至构件边缘的混凝土保护层对钢筋起到保护作用。混凝土的碱性环境使钢筋不易发生锈蚀;而且在遭遇火灾时不致因钢筋很快软化而导致结构破坏。因此,在混凝土结构中,钢筋表面必须有一定厚度的混凝土作保护层。

### 1.1.2 混凝土结构的特点

钢筋混凝土结构在土木工程中得到广泛的应用,是由于其具有以下主要优点。

(1)取材容易。混凝土所用的砂、石均易于就地取材,另外,还可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废料。

(2)合理用材。钢筋混凝土结构合理地发挥了钢筋和混凝土两种材料性能的优势,与钢结构相比,可以节约钢材、降低造价。

(3)整体性好。现浇或装配整体式钢筋混凝土结构均具有良好的整体性,又具备较好的延性,适用于抗震结构;同时防振性、防辐射性能较好,适用于防护结构。

(4)耐久性好。在混凝土结构中,钢筋由于受到混凝土的包裹而不易锈蚀,所以混凝土结构具有良好的耐久性。

(5)耐火性好。混凝土为不良导热体,且包裹在钢筋的外面,所以火灾时钢筋不会很快达到软化温度而导致结构整体破坏。因此,与木结构、钢结构相比,混凝土结构具有良好的耐火性。

(6)可塑性好。新拌合混凝土是可塑的,所以可根据建筑造型的需要制作成各种形状和尺寸的混凝土结构。

钢筋混凝土结构也存在着一些缺点,主要是包括以下几点。

(1)自重。这对大跨度结构、高层建筑结构以及结构抗震均是不利的,也给运输和施工吊装带来困难。

(2)抗裂性差。由于混凝土的抗拉强度低,所以在正常使用阶段钢筋混凝土构件的受拉区通常存在裂缝。如果裂缝宽度过大,就会影响结构的耐久性和使用性能。因此,对一些不允许出现裂缝或对裂缝宽度有严格限制的结构,就应采取相应措施。

此外,混凝土结构尚存在施工复杂,施工周期长、工序多、浇筑混凝土时需要模板支撑、施工受季节气候影响、结构的隔热隔声性能较差以及修复加固困难等缺点。

随着科学技术的不断发展,这些缺点正在被逐步克服或逐渐改进。如采用轻质高强混凝土以减轻结构自重;采用预应力混凝土以提高结构的抗裂性,扩大其应用范围;采用预制装配式构件可以节约模板和支撑,加快施工进度等。

## 1.2 混凝土结构的发展与应用

### 1.2.1 混凝土结构的发展

混凝土结构自 19 世纪中期出现至今,只有一百五十多年的历史,与砖石砌体结构、钢木结构相比,历史并不长,但发展却很快,现已成为土木工程领域最为重要的结构形式。其发展大致分为以下四个阶段。

第一阶段:1850—1920 年。1824 年英国人阿斯普丁(J. Aspdin)取得波特兰水泥(现称为硅酸盐水泥)专利后,制作混凝土的胶结材料发生了质的变化,此后水泥与混凝土的生产技术迅速发展,混凝土的用量急剧增加。1850 年,法国人 L. Lambot 用水泥砂浆涂在钢丝网的两面做成小船——标志着钢筋混凝土结构的诞生。1861 年法国花匠 J. Monier 用钢丝作为配筋制作了花盆并申请了专利,并相继申请了板、管道、拱桥等专利,因此,他被认为是钢筋混凝土结构的发明者。1884 年德国人 Wayss、Bauschinger 和 Koenen 等提出了钢筋应配置在构件中受拉力的部位和钢筋混凝土板的计算理论。随后,钢筋混凝土结构逐渐得到了推广应用。该阶段钢筋与混凝土的强度都很低,只能建造一些板、梁、柱和拱等简单的构件。此阶段采用材料力学中的容许应力法,按弹性理论进行结构的内力计算和截面设计。

第二阶段:1920—1950 年。这一阶段钢筋和混凝土的强度得到提高,开始出现装配式钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和壳体空间结构等。1928 年法国工程师 E. Freyssinet 提出了混凝土收缩和徐变理论,采用了高强钢丝,并发明了预应力锚具,为预应力混凝土技术在工程上的应用奠定了基础。此阶段计算理论在考虑材料塑性性能的基础上,按破损阶段进行构件的截面承载能力计算。

第三阶段:1950—1980 年。该阶段材料强度不断提高,各种新的结构形式和施工技术相继得到应用,同时广泛采用预制构件。混凝土结构所能达到的跨度和高度不断刷新。混凝土结构不断向新的应用领域拓展。结构构件计算理论已过渡到多系数极限状态设计方法,但还没有给出结构可靠度的定义和计算方法,各种系数取值等仍然带有不少主观经验成分。

第四阶段:大致从 1980 年起至今。这一阶段高强混凝土、高性能混凝土以及高强钢筋等新型材料的相继出现并在工程上得到应用,大板和大模板现浇等工业化体系进一步发展,高层建筑新结构体系有较多的应用。振动台试验、拟动力试验和风洞试验较普遍地开展。同时,计算机辅助设计和绘图的程序化,改进了设计方法并提高了设计质量。非线性有限元分析方法的广泛应用,推动了混凝土强度理论和本构关系的深入研究,并形成了“近代混凝土力学”这一分支学科。结构构件的设计计算方法也已发展到以概率理论为基础的极限状态设计方法,该法可分为三个水准:半概率法、近似概率法和全概率法。我国《混凝土结构设计规范》的 GBJ 10—1989、GB 50010—2002 和 GB 50010—2010 采用的都是近似概率法。全概率法是完全基于概率论的设计法,尚处于研究阶段。

### 1.2.2 混凝土结构的应用

混凝土结构在工业与民用建筑、桥梁、隧道、道路工程、地下工程、水利工程、海洋工程及特种结构等方面都得到了广泛的应用。

混凝土结构在其所用材料和配筋方式上不断取得许多新的进展,形成了一些新型混凝土及其结构形式,如高性能混凝土、纤维增强混凝土及钢-混凝土混合结构等。随着高强钢筋、高强高性能混凝土以及高性能外加剂和混合材料的研制使用,混凝土的应用范围不断扩大,钢纤维混凝土和聚合物混凝土、防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等有特殊要求的混凝土及智能型混凝土也不断应用于工程实践中。此外,轻质混凝土、加气混凝土、陶粒混凝土以及利用工业废渣的“绿色混凝土”,不但能改善混凝土的性能,而且对节能和环保具有重要的意义。

我国是使用混凝土结构最多的国家。在房屋建筑工程中,住宅、学校等民用建筑以及单层、多层工业厂房大量使用混凝土结构,其中钢筋混凝土结构在一般工业与民用建筑中使用最为广泛。高层建筑中的框架结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构、筒体结构等也多采用混凝土结构。桥梁工程中,中小跨度的桥梁绝大部分采用钢筋混凝土结构建造,大跨度桥梁也有相当部分采用混凝土结构建造,或采用预应力混凝土结构、钢-混凝土组合结构及钢结构建造。即使在悬索桥、斜拉桥等大跨度桥梁中,其桥塔一般也采用混凝土结构,其桥面板也有的采用混凝土结构。水利水电工程中的水电部分、拦洪坝、水工隧洞、溢洪道等均采用混凝土结构。特种结构中的水塔、烟囱、筒仓、电视塔、核电站反应堆安全壳等也大都采用混凝土结构建造。

世界上较高的钢筋混凝土结构建筑包括:1996年建成的广州中信广场,80层,高391m,为筒中筒结构;2003年建成的中国台北国际金融中心,101层,高455m;1998年建成的马来西亚吉隆坡石油双塔楼,88层,高452m,以上两栋建筑均为钢-混凝土混合结构;上海环球金融中心大厦,95层,高492m,为筒中筒结构体系,其中内筒为钢筋混凝土结构,外筒为型钢混凝土框架;上海金茂大厦,88层,高420.5m,为钢筋混凝土核心筒和外框架所组成的钢-混凝土混合结构;2010年建成的阿联酋哈利法塔,高828m,其中600m以下为钢筋混凝土结构,以上为钢结构,为当前世界上的最高建筑;建设中的632m的上海中心大厦和660m的深圳平安国际金融中心均为钢-混凝土混合结构。

应用混凝土结构的桥梁工程中,2000年建成的福州市青州闽江大桥,主跨605m,在钢-混凝土结合梁斜拉桥中居世界第一。1991年建成的挪威特隆赫姆 Skarnsundet 预应力混凝土斜拉桥,跨度530m。2005年建成的巫山长江大桥,主跨460m,为钢管混凝土拱桥,在钢管混凝土拱桥中居世界第一。1997年建成的万县长江大桥,主跨420m,采用钢管混凝土拱为劲性骨架的箱形拱桥,为世界首创。1997年建成的虎门大桥中的辅航道桥,主跨270m,为预应力混凝土连续刚架桥,居当时同类桥的世界第一。

水坝建设方面,世界海拔最高的坝是我国雅砻江流域梯级开发龙头电站的锦屏一级拱坝,为混凝土双曲拱坝,坝高305m,2005年开工建设。我国清江梯级开发第一级电站的水布

坝大坝,坝高 233m,为世界第一高混凝土面板堆石坝,2007 年建成。目前世界上最高的重力坝为瑞士的大狄桑坝,高 285m。我国的三峡水利枢纽,水电站主坝高 185m,设计装机容量  $1.82 \times 10^7 \text{ kW}$ ,发电量居世界第一,坝体混凝土用量达到  $2.79 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,为世界之最。

## 1.3 本课程的内容和特点

### 1.3.1 本课程的内容

本课程为土木工程专业的学科基础课,主要讲述混凝土基本构件的受力性能、计算方法和构造措施等基本理论。从学习混凝土结构材料的物理力学性能和以概率理论为基础的极限状态设计方法开始,然后讨论受弯构件正截面和斜截面承载力计算,受压、受拉和受扭构件承载力计算,正常使用极限状态验算及耐久性设计以及预应力混凝土构件设计等。这些内容是土木工程混凝土结构中的共性问题,即混凝土结构的基本理论。

### 1.3.2 本课程的特点

从某种意义上说,本课程是研究钢筋混凝土这一具体材料的力学理论课程。但是,钢筋混凝土是由非线性的且拉压强度相差悬殊的混凝土和钢筋组合而成,受力性能复杂。它与研究弹性体的“材料力学”完全不同,在学习时应注意它们之间的异同点。

(1)钢筋混凝土构件是由钢筋和混凝土两种力学性能不同的材料组成的复合材料,且混凝土是非均匀、非连续和非弹性材料。这与材料力学中单一理想的弹性材料不同,所以材料力学公式可以直接应用的不多。故要搞清钢筋混凝土的受力性能和破坏特性,首先应掌握好钢筋和混凝土材料的物理力学性能。

(2)钢筋混凝土既然是一种复合材料,就存在两种材料在数量比例和强度搭配的问题,超过一定范围,就会引起构件受力性能的改变,从而引起构件设计方法的改变,学习时应予以注意。

(3)钢筋混凝土材料的力学性能和构件的计算方法都是建立在试验研究基础上的。根据一定数量的试验研究,在试验数据的基础上拟合出半理论半经验公式。因此,学习时不仅要深刻理解构件的破坏机理和受力性能,还应特别注意构件计算方法的适用条件和应用范围。同时,本课程还包括结构和构件的选型、截面尺寸确定、荷载分析与内力分析等,它是一个综合性的问题,需要考虑各方面的因素。在学习本课程时要学会对多种因素进行综合分析,培养综合分析判断的能力。

(4)本课程的实践性强,课程内容及其设计计算等应符合现行规范的要求,主要涉及《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(以下简称《规范》)、《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)(以下简称《统一标准》)和《建筑结构荷载规范》(2006 版)(GB 50009—2001)(以下简称《荷载规范》)等规范。设计规范是国家颁布的有关计算和构造要求的技术规定和标准,规范条文特别是强制性条文是设计中必须遵守的法律性技术文件。因此,只有深

刻理解规范条文的概念和本质,才能正确地应用规范而不被规范所束缚,充分发挥设计者的主动性和创造性。随着科学技术的不断发展,设计规范必然需要不断修订和补充。因此,要用发展的观点来看待设计规范,要善于观察和分析,不断地进行探索和创新。

(5)进行构件设计时离不开计算,但现行的实用计算方法一般只考虑了荷载效应。对其他作用,如混凝土收缩、温度变化及地基不均匀沉降等,难以用计算公式来表达。《规范》根据长期的工程实践经验,总结出一些构造措施来考虑这些因素的影响。因此学习本课程时,不仅要掌握各种计算方法,对于各种构造措施也应给予足够的重视。在设计混凝土结构时,除了进行各种计算外,还必须检查各项构造措施是否满足要求。

### 本章小结

(1)以混凝土为主制成的结构称为混凝土结构。钢筋混凝土是将钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式结合在一起共同工作,充分发挥钢筋和混凝土各自优点的一种复合材料。配置适量钢筋后,混凝土构件的承载力得到大大提高,构件的受力性能得到显著改善。

(2)混凝土结构有许多优点,同时也有缺点。应通过不断的研究和技术开发,进行合理的设计,充分发挥其优点,克服其缺点。

(3)钢筋与混凝土能够共同工作的原因有三个:钢筋与混凝土之间存在着良好的黏结力;钢筋与混凝土的温度线膨胀系数接近;混凝土对钢筋的保护作用。

(4)混凝土构件的力学性能和设计计算与材料力学既有共同之处又有显著区别,且比材料力学复杂,学习时应予以注意。

### 思考题

1. 什么是混凝土结构?混凝土结构有哪些优点和缺点?如何克服这些缺点?
2. 钢筋与混凝土能够共同工作的原因是什么?
3. 以简支梁为例,说明素混凝土构件和钢筋混凝土构件在承载能力和变形能力方面的差异。
4. 简述混凝土结构的发展与应用情况。
5. 本课程主要包括哪些内容?学习时应注意哪些问题?

## 第2章 混凝土结构的物理力学性能

### ● 本章导学

本章主要讲述混凝土与钢筋两种材料的力学性能,以及钢筋与混凝土之间的黏结力。学生在学习时应重点抓住材料的强度和变形性能两个方面指标,同时了解其试验方法。混凝土的强度包括在单向应力作用下的强度和复合应力作用下的强度,混凝土的变形有荷载作用下的变形和非荷载作用下的变形(主要有混凝土的收缩变形)。其中混凝土在单向应力作用下的强度和荷载作用下的变形是学习混凝土力学性能的基础。钢筋分为有物理屈服点的钢筋和无物理屈服点的钢筋,有物理屈服点的钢筋是学习的重点。钢筋与混凝土之间的黏结力主要是通过构造措施来保证的,构造措施内容多而细,学生可以结合相关图集资料来认识。

### ● 学习目标

通过本章学习,熟悉土木工程用钢筋的品种、级别及其性能;掌握土木工程对钢筋性能的要求及选用原则;熟悉混凝土在各种受力状态下的强度与变形性能;掌握混凝土的选用原则;了解钢筋与混凝土的共同工作原理,熟悉钢筋与混凝土之间协同工作的构造原理。

混凝土结构的受力性能与钢筋和混凝土材料的力学性能密切相关。对钢筋和混凝土材料的力学性能以及二者共同工作原理进行较为深入的了解是掌握钢筋和混凝土构件计算理论、合理地进行混凝土结构设计的基础。

## 2.1 混凝土的物理力学性能

### 2.1.1 混凝土的强度

混凝土的强度与水泥强度等级和水灰比有很大的关系,集料的性质、混凝土的配合比、硬化条件、制作方法、龄期等也不同程度地影响混凝土的强度。在试验时,因试件形状、尺寸、试验方法和加载时间的不同,所测得的强度也不同,因此,混凝土在各种单向受力状态下的强度指标必须以统一规定的标准试验方法为依据。

### 1. 混凝土在单向应力作用下的强度

(1)立方体抗压强度。《规范》规定,混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定。立方体抗压强度标准值是指按标准方法制作、养护的边长为 150mm 的立方体试件,在 28d 或设计规定的龄期以标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度值。立方体抗压强度标准值是混凝土各种力学指标的基本代表值,采用  $f_{cu,k}$  表示,单位为  $N/mm^2$ 。

按照标准试验方法,试件应在相对湿度为 95% 以上的标准养护室中养护,试验时,试件的承压面不涂润滑剂,普通混凝土加荷速度为每秒  $0.3 \sim 0.8 N/mm^2$ 。立方体试件的强度比较稳定,制作与试验比较方便。图 2-1 为混凝土立方体试件在标准试验方法下的破坏情况。

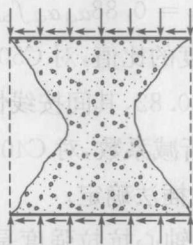


图 2-1 混凝土立方体试件的破坏情况

由于粉煤灰等矿物掺合料在水泥及混凝土中大量应用以及现代混凝土工程的发展,确定混凝土立方体抗压强度标准值的试验龄期不仅限于 28d,可由设计根据具体情况适当延长。

混凝土强度等级由符号 C 和混凝土立方体抗压强度标准值表示。例如 C35 表示立方体抗压强度标准值为  $35 N/mm^2$  的混凝土强度等级。《规范》规定的混凝土强度等级有 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80 共 14 个等级,其中 C50 及以下的为普通混凝土,C50 以上的为高强度等级混凝土。C80 以上的高强度混凝土,目前虽偶有工程应用但用量较少,且对其性能的研究尚不够,故《规范》中未列入。

我国建筑工程实际应用的混凝土强度低于发达国家。我国建筑结构安全度总体上比国际水平低,但材料用量并不少,其原因在于国际上较高的安全度是依靠较高强度的材料实现的。为了提高材料的利用率,工程中应用的混凝土强度等级宜适当提高。因此《规范》规定素混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C15;钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C20;采用强度等级为 400MPa 及以上的钢筋时,混凝土强度等级不应低于 C25。预应力混凝土结构的混凝土强度等级不宜低于 C40,且不应低于 C30。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。

(2)轴心抗压强度。在工程中,混凝土受压构件大多是棱柱体,采用棱柱体抗压强度能更好地反映混凝土结构的实际抗压能力。用棱柱体试件测得的抗压强度称为轴心抗压强度或棱柱体抗压强度。

我国采用  $150mm \times 150mm \times 300mm$  棱柱体作为轴心抗压强度的标准试件。棱柱体试件与立方体试件的制作条件相同,试件承压面不涂润滑剂。如图 2-2 所示,棱柱体试件比立方

体试件高,试验机承压板与试件间摩擦力对试件高度中部横向变形的约束影响小,试件中部基本上处于单向均匀受压的应力状态。试件破坏是由于中间区段竖向裂缝的发展,导致混凝土被压碎,因而测得的棱柱体试件的抗压强度比立方体抗压强度小。《规范》规定以棱柱体标准试件试验测得的具有95%保证率的抗压强度为混凝土轴心抗压强度标准值,用符号 $f_{ck}$ 表示,c表示抗压,k表示标准值。轴心抗压强度是混凝土构件抗压计算的强度指标。

考虑到结构中混凝土的实体强度与立方体试件混凝土强度之间的差异,根据经验,结合试验数据分析并参考其他国家的有关规定,对试件混凝土强度的修正系数取为0.88。轴心抗压强度标准值 $f_{ck}$ 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 的关系按下式计算:

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k} \quad (2-1)$$

式中  $\alpha_{c1}$ ——棱柱体强度与立方体强度的比值,对C50及以下普通混凝土取 $\alpha_{c1}=0.76$ ,对高强度混凝土C80取 $\alpha_{c1}=0.82$ ,其间按线性内插法确定;

$\alpha_{c2}$ ——C40以上混凝土的脆性折减系数,对C40取 $\alpha_{c2}=1.00$ ,对高强度混凝土C80取 $\alpha_{c2}=0.87$ ,其间按线性内插法确定。

(3)轴心抗拉强度。混凝土试件的轴心抗拉强度是确定混凝土抗裂度的重要指标,用符号 $f_{tk}$ 表示。混凝土的抗拉强度远小于其抗压强度,一般只有抗压强度的5%~10%;抗拉强度与立方体抗压强度间不呈线性关系,混凝土强度等级越高,比值 $f_{tk}/f_{cu,k}$ 越小。

由于混凝土内部不均匀性,加之安装时的偏差等原因,准确测定抗拉强度是很困难的。国内外常采用立方体(150mm×150mm×150mm)或圆柱体试件的劈裂抗拉试验来间接测定混凝土的轴心抗拉强度。如图2-3所示,劈裂抗拉试验在立方体或圆柱体试件上通过钢制弧形垫块施加均匀线荷载。除垫条附近很小的范围以外,在中间垂直截面上产生与该面垂直且均匀分布的拉应力。当拉应力达到混凝土的抗拉强度时,试件被沿中间垂直截面劈裂为两部分而破坏。根据弹性理论,劈裂抗拉强度 $\sigma_t$ 可按式计算:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (2-2)$$

式中  $P$ ——破坏荷载;

$d$ ——圆柱体试件直径或立方体试件边长;

$l$ ——圆柱体试件高度或立方体试件边长。

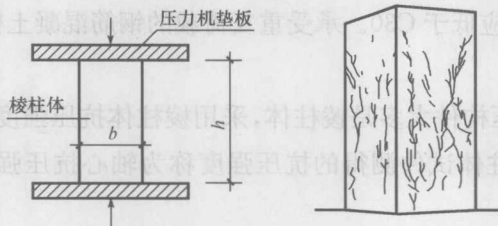


图 2-2 混凝土棱柱体抗压试验及破坏形态

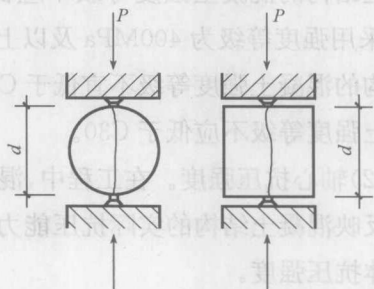


图 2-3 混凝土劈裂抗拉试验

试验表明,劈拉强度略大于直接受拉强度,劈裂试件的大小对试验结果也有一定的影响。《规范》考虑了从普通强度混凝土到高强度混凝土的变化规律,取轴心抗拉强度标准值  $f_{tk}$  与立方体抗压强度标准值  $f_{cu,k}$  的关系为式(2-3)。式中  $\delta$  为变异系数,0.88 与  $\alpha_{c2}$  的取值与式(2-1)相同。其中系数 0.395 和指数 0.55 为轴心抗拉强度与立方体抗压强度的折算关系,是根据试验数据进行统计分析以后确定的。

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

《规范》给出混凝土抗压、抗拉强度标准值,可参见附表 1。

## 2. 混凝土在复合应力作用下的强度

工程中混凝土结构和构件通常受到轴力、弯矩、剪力或扭矩的作用,大多处于复合应力状态,处于理想的单向应力状态的很少。因此,有必要研究混凝土在复合应力作用下的强度。

(1) 混凝土的双向受力强度。图 2-4 为混凝土双向受力试验结果。微元体在两个平面作用着法向应力  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$ , 第三个平面上应力为零。第一象限为双向受拉情况,  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$  相互影响不大, 无论应力比值  $\sigma_1/\sigma_2$  如何, 双向受拉强度均接近单向受拉强度。第二、四象限为拉-压应力状态, 此时混凝土的强度均低于单向抗拉强度或单向抗压强度。第三象限为双向受压区, 大体上一方向的强度随另一方向压力的增加而增加, 混凝土双向抗压强度比单向抗压强度最多可提高 20% 左右。

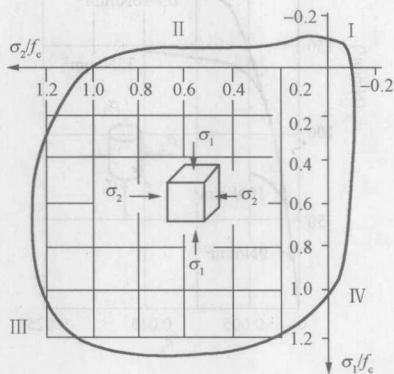


图 2-4 混凝土在双向应力作用下的试验结果

(2) 混凝土在法向应力和切应力作用下的复合强度。图 2-5 为混凝土法向应力和切应力的关系曲线。压应力小时, 抗剪强度随着压应力的增大而增大, 大约在  $\sigma/f_c > 0.6$  后抗剪强度随着压应力的增大而减小。从图中也可以看出, 由于剪应力的存在, 混凝土的抗压强度要低于单向抗压强度。因此梁受弯矩和剪力共同作用以及柱在压剪状态下, 剪应力会影响梁与柱的受压区混凝土的抗压强度。另一方面, 抗剪强度随着拉应力的增大而减小, 也就是说剪应力的存在会使抗拉强度降低。

(3) 混凝土的三轴受压强度。混凝土在三向压力作用下, 由于受到侧向压应力的约束, 其最大主压应力方向的抗压强度有较大幅度的提高。当混凝土圆柱体受压试件受到侧向液压

作用时(图 2-6),随着侧向压应力的增加,微裂缝的发展受到极大的限制,大大提高了混凝土纵向抗压强度,并使混凝土的变形性能接近于理想的弹塑性状态。当侧向液压值不是很大时,最大主压应力轴的抗压强度与侧向约束压应力的经验公式为:

$$f'_{cc} = f'_c + (4.5 \sim 7.0) f_L \quad (2-4)$$

式中  $f'_{cc}$  ——有侧向约束压应力试件的轴心抗压强度;

$f'_c$  ——无侧向约束压应力试件的轴心抗压强度;

$f_L$  ——侧向约束压应力。

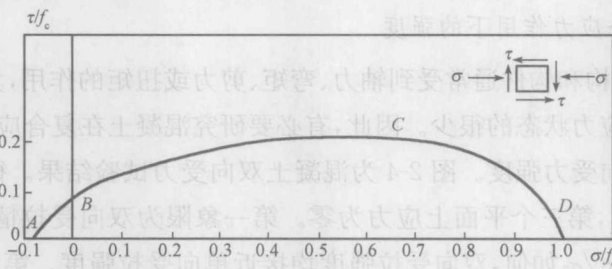


图 2-5 混凝土在法向应力和切应力作用下的复合强度变化曲线

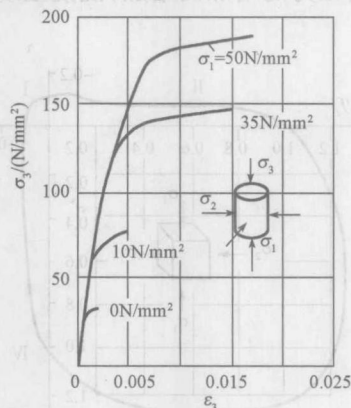


图 2-6 混凝土圆柱体试件三向受压试验时轴向应力-应变曲线

混凝土受压构件变形受到约束时,不仅可以提高其纵向抗压强度,还可以提高混凝土的延性,改善钢筋混凝土结构的抗震性能。在混凝土受压构件上限制混凝土的横向变形可形成“约束混凝土”,工程上的螺旋箍筋柱和钢管混凝土柱就是“约束混凝土”应用的例子。

## 2.1.2 混凝土的变形

### 1. 混凝土在一次短期荷载作用下的变形

我国采用棱柱体试件受压时的应力-应变曲线反映混凝土在一次短期荷载下的变形性能,如图 2-7 所示。

在压应力较小时的 OA 段 ( $\sigma \leq 0.3 f_c$ ),应力应变关系接近于直线,混凝土表现为弹性性

质;AB段( $\sigma=0.3f_c\sim0.8f_c$ )为裂缝稳定扩展阶段;BC段( $\sigma=0.8f_c\sim1.0f_c$ )为裂缝不稳定发展阶段,峰点C所对应的应力 $\sigma_{\max}$ 作为棱柱体抗压强度 $f_c$ ,相应的应变为峰值应变 $\epsilon_0$ ,通常取 $\epsilon_0=0.002$ 。

如果试验机的刚度足够大,当试件应力达到 $f_c$ 时试验机释放的能量不至于将试件立即破坏,而是缓慢地卸荷,应变继续增加,应力逐渐减小,曲线下降至拐点D。超过D点时,混凝土仅靠集料间的咬合力及摩擦力与残余承压面来承受荷载,此时已失去了结构的意义。混凝土的极限压应变 $\epsilon_{cu}$ 通常取0.0033。

混凝土的抗压强度随着混凝土强度等级的增大而增大,不同强度等级的受压混凝土棱柱体的 $\sigma\epsilon$ 关系曲线如图2-8所示。

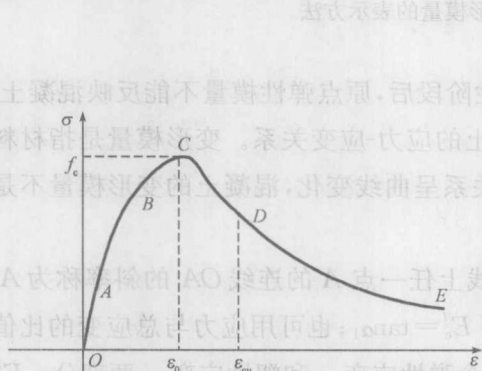


图 2-7 混凝土一次短期荷载下受压时的应力-应变曲线

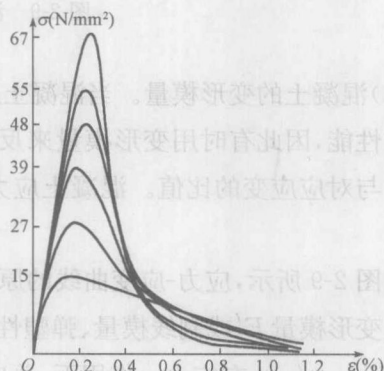


图 2-8 不同强度等级的受压混凝土棱柱体 $\sigma\epsilon$ 曲线

## 2. 混凝土的弹性模量和变形模量

(1)混凝土的弹性模量即原点弹性模量。在计算混凝土构件的截面应力、变形、预应力混凝土构件的预压应力等时需要利用混凝土的弹性模量。由于一般情况下受压混凝土的 $\sigma\epsilon$ 关系曲线是非线性的,应力和应变的关系并不是常数,于是就有“模量”的取值问题。

如图2-9所示,混凝土的弹性模量即原点弹性模量 $E_c$ ,可用混凝土 $\sigma\epsilon$ 关系曲线原点切线的斜率表示,即 $E_c=\tan\alpha_0$ ,也可用应力与弹性应变的比值来表示,即 $E_c=\sigma_c/\epsilon_{ce}$ 。

目前,对弹性模量取值的通常做法是:对标准棱柱体试件,先加载至 $\sigma=0.5f_c$ ,然后卸载至零,再加载卸载5~10次。由于混凝土的塑性性质,每次卸载至零时,存在残余变形。随着多次重复加载卸载,变形趋于稳定,应力-应变曲线在 $0.5f_c$ 以下段接近直线。该直线的斜率即为混凝土的弹性模量。根据试验值进行统计分析, $E_c$ 与其强度标准值 $f_{cu,k}$ 的经验关系见式(2-5),取值见附表3。由于混凝土组成成分不同(掺入粉煤灰等)而导致变形性能的不确定,必要时可根据实验确定弹性模量。

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu,k}}} \quad (2-5)$$

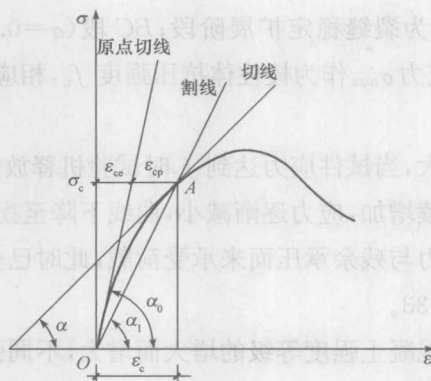


图 2-9 混凝土变形模量的表示方法

(2)混凝土的变形模量。当混凝土进入塑性阶段后,原点弹性模量不能反映混凝土应力-应变的性能,因此有时用变形模量来反映混凝土的应力-应变关系。变形模量是指材料受力后应力与对应应变的比值。混凝土应力-应变关系呈曲线变化,混凝土的变形模量不是一个常数。

如图 2-9 所示,应力-应变曲线的原点与曲线上任一点 A 的连线 OA 的斜率称为 A 点的混凝土变形模量  $E'_c$  或割线模量、弹塑性模量,即  $E'_c = \tan \alpha_1$ ;也可用应力与总应变的比值来表示,即  $E'_c = \sigma_c / \epsilon_c$ 。在应力  $\sigma_c$  作用下,总应变  $\epsilon_c$  包含弹性应变  $\epsilon_{ce}$  和塑性应变  $\epsilon_{cp}$  两部分。 $E'_c$  与  $E_c$  的关系为

$$E'_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\epsilon_{ce}}{\epsilon_c} \cdot \frac{\sigma_c}{\epsilon_{ce}} = \nu E_c \quad (2-6)$$

弹性应变  $\epsilon_{ce}$  与总应变  $\epsilon_c$  的比值称为弹性系数  $\nu$ 。 $\nu$  反映了混凝土的弹塑性性质,当应力  $\sigma_c$  较小时,混凝土基本处于弹性阶段,可取  $\nu=1$ ,随着  $\sigma_c$  的增大, $\nu$  值逐渐减小。

混凝土受拉弹性模量与受压弹性模量取值相同,当混凝土达到极限抗拉强度时,可取受拉弹性模量为  $0.5E_c$ 。

### 3. 混凝土在长期荷载作用下的变形(徐变)

混凝土结构或材料承受的荷载或应力不变,而变形或应变随时间增长的现象称为徐变。混凝土的徐变与时间参数有关。图 2-10 为混凝土棱柱体试件加荷至  $\sigma=0.5f_c$  测得的应变与时间的关系曲线。

从图中可以看出,对棱柱体试件加荷,其加荷产生瞬时应变。若保持荷载不变,随着加载作用时间的增加,应变也将继续增长,这就是混凝土的徐变。一般情况下,徐变在加载早期增长较快,以后逐渐减慢,经过较长时间后就逐渐趋于稳定,徐变值约为瞬时应变的 1~4 倍。如果过几个月后卸荷,试件瞬时恢复一部分,其值比加荷时的瞬时应变略小。当长期荷载完全卸载后,混凝土要经过一个徐变的恢复过程,其值约为徐变变形的 1/12。最后剩下的大部分应变不可恢复,称为残余应变。

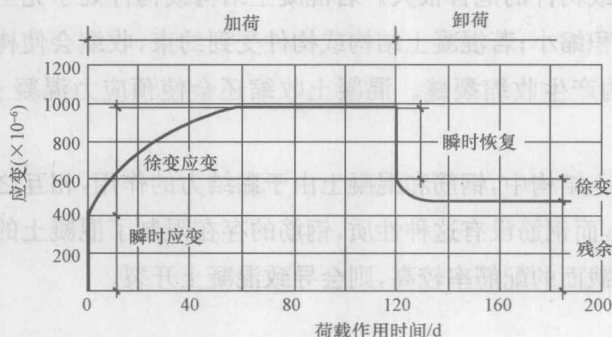


图 2-10 混凝土的徐变曲线(应变与时间的关系)

影响混凝土徐变的因素是多方面的,主要可归结为三个方面。

(1) 内在因素。混凝土的组成成分是影响徐变的内在因素。水泥用量越多,徐变越大;水灰比越大,徐变越大;集料的弹性模量越小,徐变就越大;构件尺寸越小,徐变越大。

(2) 环境因素。混凝土养护及使用时的温度和湿度是影响徐变的环境因素。养护和使用环境的温度越高、湿度越低,徐变就越大。若采用蒸汽养护则可减少徐变量 20%~25%。

(3) 应力因素。施加初应力的的大小和加荷时混凝土的龄期是影响徐变的应力因素。加荷时混凝土的龄期越长,徐变也越小。加荷龄期相同时,初应力越大,徐变也越大。当应力  $\sigma \leq 0.5f_c$ , 徐变与初应力成正比,这种情况称为线性徐变。一般的解释认为这种现象是由于水泥胶体的黏性流动所致。当应力  $\sigma > 0.8f_c$  时,徐变的发展不再是收敛的,最终将导致混凝土破坏。一般认为发生这种现象的原因,是水泥胶体的黏性流动的增长速度已比较稳定,而应力集中引起的微裂缝则随应力的增大而发展。 $\sigma = 0.8f_c$  即为混凝土的长期抗压强度。因此混凝土构件在使用期间,应当避免经常处于不变的高应力状态。

徐变对混凝土结构和构件的受力性能有重要影响:使构件变形增大;使受弯构件挠度加大;使长细比较大柱的附加偏心距增大;使预应力混凝土构件产生预应力损失。

#### 4. 混凝土的收缩

混凝土在空气中硬化时体积缩小的现象称为混凝土的收缩。一般认为产生收缩的主要原因是由于混凝土硬化过程中凝胶体本身体积缩小的凝缩和混凝土内的自由水蒸发产生的干缩。

混凝土的收缩变形随时间的增长而增长,硬化初期收缩发展较快,一个月约完成收缩总量的 50%,三个月后增长减慢,一般两年后趋于稳定。

通过试验得出各种因素对混凝土收缩的影响如下:水泥用量越多,收缩越大;水灰比越大,收缩越大;水泥等级越高,收缩越大;集料的级配越好、弹性模量越大,收缩越小;养护时温度、湿度越高,收缩越小;使用环境温度越低、湿度越高,收缩越小;混凝土越密实,收缩越小;构件的体积与表面积的比值越大,收缩越小。采用蒸汽养护时的收缩值小于常温养护下的收缩值。

收缩对混凝土结构或构件的危害很大。若混凝土结构或构件处于完全自由状态,收缩只会引起结构或构件的体积缩小;若混凝土结构或构件受到约束,收缩会使构件产生收缩应力,收缩应力过大,会使结构产生收缩裂缝。混凝土收缩还会使预应力混凝土构件产生预应力损失。

在不受约束的混凝土结构中,钢筋和混凝土由于黏结力的作用,相互之间变形是协调的。混凝土具有收缩的性质,而钢筋没有这种性质,钢筋的存在限制了混凝土的自由收缩,使混凝土受拉,钢筋受压,如果截面的配筋率较高,则会导致混凝土开裂。

## 2.2 钢筋的物理力学性能

### 2.2.1 钢筋的品种和级别

钢筋的品种很多,目前混凝土结构所采用的钢筋按化学成分的不同分为碳素结构钢和普通低合金钢。碳素结构钢除含有铁元素外,还含有少量的碳、硅、锰杂质元素和硫、磷、氧、氮等有害元素。根据含碳量的不同,碳素结构钢又可分为低碳钢、中碳钢、高碳钢。随着含碳量的增加,钢材的强度随之提高,但钢材的塑性和可焊性降低。普通低合金钢除了碳素钢中已有的成分外,还加入少量的合金元素,如硅、锰、钛等,有效地提高了钢材的强度,改善了钢材的塑性和可焊性等性能。

钢筋按加工工艺和力学性能的不同,有热轧钢筋、消除应力钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋。热轧钢筋根据外形又分为热轧光圆钢筋(牌号 HPB 系列)和热轧带肋钢筋(牌号 HRB 系列及 HRBF 系列)。我国生产的热轧钢筋有 HPB300、HRB335、HRBF335、HRB400、HRBF400、RRB400、HRB500 和 HRBF500。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用性。余热处理钢筋(RRB 系列)由轧制钢筋经高温淬火,余热处理后提高强度,其延性、可焊性、机械连接性能及施工适用性降低,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。采用控温轧制工艺生产的 HRBF 系列钢筋称为细晶粒热轧带肋钢筋。

钢筋按其外形的不同,分为光圆钢筋和带肋钢筋两种。带肋钢筋有螺纹、人字纹和月牙纹等,如图 2-11 所示。热轧钢筋中的 HPB300 钢筋为光圆钢筋,与混凝土黏结强度较低,主要用于板的受力钢筋、梁柱箍筋及构造钢筋。低强度的 HPB235 钢筋即将淘汰,但在《规范》的过渡期及既有的结构设计时,HPB235 钢筋仍按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)取值。带肋钢筋与混凝土黏结强度较高,一般用于混凝土结构的受力钢筋,通常宜采用 HRB400、HRBF400、RRB400、HRB500 和 HRBF500,也可采用 HRB335、HRBF335。预应力钢筋宜采用预应力钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋。



图 2-11 钢筋的外形

(a)光圆钢筋; (b)人字纹钢筋; (c)螺纹钢筋; (d)月牙纹钢筋

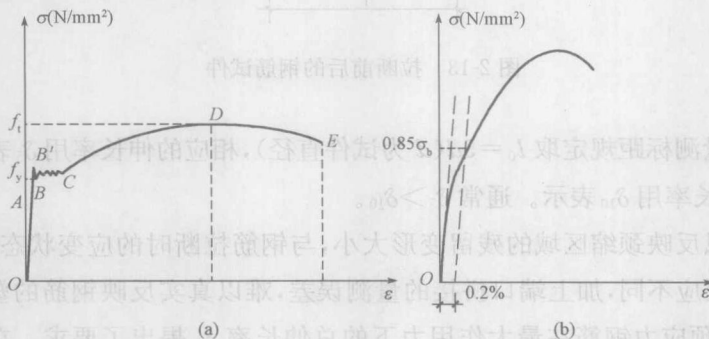
## 2.2.2 钢筋的强度和变形性能

### 1. 钢筋的强度

钢筋按力学性能的不同,分为有物理屈服点的钢筋和无物理屈服点的钢筋。有物理屈服点的钢筋也称为软钢,如热轧钢筋;无物理屈服点的钢筋也称为硬钢,如钢绞线、钢丝和预应力螺纹钢筋。

钢筋的强度和变形一般通过常温静载下的单向拉伸曲线——应力-应变关系曲线(图 2-12)来说明。

有物理屈服点钢筋的典型拉伸应力-应变关系曲线如图 2-12(a)所示。OA 段表示钢筋处于弹性阶段,应力和应变呈线性关系,处于弹性工作阶段。AB 段为弹塑性阶段, $\sigma$ - $\epsilon$  呈曲线关系。这时如果卸荷,将存在残余应变。 $B'$  点是不稳定的,称为屈服上限, $B$  点为屈服下限, $B$  点的应力称为屈服强度  $f_y$ 。 $BC$  段称为屈服阶段或屈服台阶,应力不增加而应变急剧增长。 $CD$  段称为强化阶段或应变硬化阶段。达到  $C$  点后,钢筋又恢复继续承载的能力, $\sigma$ - $\epsilon$  曲线又开始上升,直至应力达到最高应力点  $D$ 。 $D$  点相应的应力称为极限抗拉强度  $f_t$ 。试件应力超过  $f_t$  后试件在薄弱处的截面变细,产生颈缩现象, $DE$  段称为颈缩阶段。试件拉断( $E$  点)后的伸长值与原长的比率称为伸长率  $\delta$ 。

图 2-12 钢筋的  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线(a)有物理屈服点的钢筋  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线; (b)无物理屈服点的钢筋  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线

屈服强度  $f_y$ 、极限抗拉强度  $f_t$  反映了钢筋的强度, $f_y$  值越大钢筋承载力越高。设计时有物理屈服点的钢筋取钢筋的屈服强度作为钢筋强度的设计依据。这是由于钢筋应力达到屈服强度后,构件将继续产生很大的塑性变形,卸荷后塑性变形无法恢复,使构件产生很大的变