模块 1
建筑结构的基本设计原则

学习目标

(1)了解结构的功能要求和结构极限状态的基本概念。
(2)掌握极限状态的设计方法。
(3)掌握极限状态的实用设计表达式。

1.1 建筑结构的功能要求和极限状态

1.1.1 建筑结构的功能要求

1)安全性

结构在预定的使用期限内,应能承受正常施工、正常使用时可能出现的各种荷载、强迫变形(如超静定结构的支座的不均匀沉降)、约束变形(如由于温度及收缩引起的构件变形受到约束时所产生的变形)等的作用。在偶然荷载(如地震、强风)作用下或偶然事件(如火灾、爆炸)发生时和发生后,构件仅产生局部损坏,不发生连续倒塌。

2)适用性

结构在正常使用荷载作用下具有良好的工作性能,如不发生影响正常使用的过大挠度、永久变形和动力效应(过大的振幅和振动),或不产生令使用者感到不安宽度的裂缝。

3)耐久性

结构在正常使用和正常维护条件下,在规定的环境中及预定的使用期限内应有足够的耐久性。如不发生由于混凝土保护层碳化或氯离子的侵入而导致的钢筋锈蚀,以致影响结

构的使用寿命。

这些功能要求概括起来可以称为结构的可靠性，即结构在规定的时间内（如设计使用年限为 50 年）、规定的条件下（正常设计、正常施工、正常使用和维护，不考虑人为过失）完成预定功能的能力。

1.1.2　建筑结构的极限状态

结构能够满足功能要求而良好地工作，称为结构可靠或有效。反之，则为结构不可靠或失效。区分结构工作状态有效与失效的标志是极限状态。

极限状态是结构或构件能够满足设计规定的某一功能要求而达到的临界状态，有明确的标志及限值。超过这一界限，结构或构件就不能再满足设计规定的该项功能要求，而进入失效状态。

根据功能要求，结构的极限状态可分为以下两类：

1）承载能力极限状态

结构或构件达到最大承载力或达到不适于继续承载的变形的极限状态为承载能力极限状态。当结构或构件出现下列状态之一时，即认为其超过了承载能力极限状态：

（1）整个结构或其中的一部分作为刚体失去平衡（如倾覆、过大的滑移）。

（2）结构构件或连接部位因荷载过大而遭到破坏，包括承受多次重复荷载产生的疲劳破坏（如钢筋混凝土梁受压区混凝土达到其抗压强度）。

（3）结构构件或连接部位因产生过度的塑性变形而不适于继续承载（如受弯构件中的少筋梁的破坏）。

（4）结构转变为机动体系（如超静定结构由于某些截面的屈服形成塑性铰，使结构成为几何可变体系）。

（5）结构或构件丧失稳定（如细长柱达到临界荷载发生压屈）。

（6）地基丧失承载力而被破坏。

2）正常使用极限状态

结构或构件达到正常使用或耐久性的某项规定限值的极限状态为正常使用极限状态。当结构或构件出现下列状态之一时，应认为其超过了正常使用极限状态：

（1）影响结构或构件的正常使用的外观变形（如梁产生超过了挠度限值的过大的挠度）。

（2）影响结构或构件正常使用或耐久性的局部损坏（如不允许出现裂缝的构件开裂；或允许出现裂缝的构件，其裂缝宽度超过了允许限值）。

（3）影响结构或构件正常使用的振动。

（4）影响结构或构件正常使用的其他特定状态（如由于钢筋锈蚀产生的沿钢筋的纵向裂缝）。

1.2 建筑结构承受的荷载分类和荷载代表值

1.2.1 荷载的分类

结构上的荷载按其随时间的变异性的不同，分为以下三类：

(1)永久荷载。永久荷载(恒荷载)是指在结构设计基准期内，其作用量值不随时间变化，或其变化幅度与平均值相比可以忽略不计的荷载，如结构构件的自重。这里的设计基准期是指为确定荷载代表值及与时间有关的材料性能等的取值而选用的时间参数。《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)取结构的设计基准期为 50 年。

(2)可变荷载。可变荷载(活荷载)是指在结构设计基准期内其作用量值随时间而变化，且其变化幅度与平均值相比不可忽略不计的荷载，如楼面活荷载、屋面活荷载、积灰荷载、起重机荷载、风荷载、雪荷载等。

(3)偶然荷载。偶然荷载是指在结构设计基准期内不一定出现，而一旦出现其量值很大且持续时间很短的荷载，如爆炸力、撞击力等。

1.2.2 荷载的代表值

进行结构或构件设计时，针对不同的设计目的，对荷载应赋予一个规定的量值，该量值即为荷载代表值。永久荷载采用标准值为代表值；可变荷载采用标准值、组合值、频遇值和准永久值为代表值，其中荷载标准值为基本代表值。

(1)荷载标准值。荷载标准值是荷载的基本代表值，为设计基准期内最大荷载统计分布的特征值(如均值、众值、中值或某个分位值)。荷载标准值可由设计基准期内最大荷载概率分布的某一分位值确定。理论上它应为结构在使用期间正常情况下，可能出现的具有一定保证率的偏大荷载值。但是，很多可变荷载并不具备充分的统计参数，只能根据已有的工作经验确定，故实际上荷载标准值取值的分位值并不统一。

对于结构构件自重，永久荷载标准值可按结构构件的设计尺寸与材料单位体积的自重计算确定，相当于自重的统计平均值，其分位值为 0.5。对于自重变异性较大的材料(如屋面保温材料、防水材料、找平层等)，自重的标准值应根据对结构的不利状态，分别取《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)给出的自重上限值或下限值。

(2)可变荷载组合值。结构上作用有多种可变荷载时，各种可变荷载同时达到预计的最大值的概率是很小的，为使组合后的荷载效应在设计基准期内的可靠度与仅有的一种可变荷载单独作用时趋于一致，必须引入荷载组合值系数 ψ_c 对同时作用于多种可变荷载的标准值进行拆减。可变荷载的组合值即该可变荷载的标准值与组合值系数 ψ_c 的乘积。

(3)可变荷载频遇值。对于可变荷载，在设计基准期内在结构上偶尔出现的较大荷载称为可变荷载频遇值。其具有持续时间较短或发生次数较少的特点，其对结构的破坏性有所

减缓。可变荷载频遇值由荷载标准值乘以小于 1.0 的频遇值系数 ψ_f 得到。ψ_f 可根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)取值。

(4)可变荷载准永久值。对于可变荷载,在设计基准期内经常作用的那部分可变荷载称为可变荷载准永久值。其具有总持续时间较长的特点,对结构的影响类似于永久荷载。可变荷载准永久值由荷载标准值乘以小于 1.0 的准永久值系数 ψ_q 得到。ψ_q 可根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)取值。

1.3　极限状态设计方法

1.3.1　承载能力极限状态计算

1)设计表达式

(1)当用内力的形式表达持久设计状况、短暂设计状况和地震设计状况时,结构构件应采用下列极限状态设计表达式:

$$\gamma_0 S \leqslant R \tag{1-1}$$

$$R = R(f_c, f_s, a_k, \cdots)/\gamma_{Rd} \tag{1-2}$$

式中,γ_0 为结构构件的重要性系数;S 为承载能力极限状态下荷载效应组合的设计值,对持久设计状况和短暂设计状况应按荷载的基本组合计算,对地震设计状况应按荷载的地震组合计算;R 为结构构件的抗力设计值;$R(\,)$为结构构件的抗力函数;f_c、f_s 分别为混凝土、钢筋的强度设计值;a_k 为几何参数的标准值,当几何参数的变异性对结构性能有明显的不利影响时,应增减一个附加值;γ_{Rd}为结构构件的抗力模型不定性系数。

在持久设计状况和短暂设计状况下,安全等级为一级的结构构件的 γ_0 不应小于 1.1;安全等级为二级的结构构件的 γ_0 不应小于 1.0;安全等级为三级的结构构件的 γ_0 不应小于 0.9;地震设计状况时 γ_0 应取 1.0。对于 γ_{Rd},静力设计取 1.0;对不确定性较大的结构构件,根据具体情况取大于 1.0 的数值;抗震设计时应用承载力抗震调整系数 γ_{RE}代替 γ_{Rd}。

(2)对偶然荷载下的结构进行承载能力极限状态设计时,式(1-1)的荷载效应组合的设计值 S 按偶然组合计算,结构重要性系数取不小于 1.0 的数值;式(1-2)中,混凝土、钢筋的强度设计值 f_c、f_s 改用强度标准值 f_{ck}、f_{yk}(或 f_{pyk})。

2)荷载效应组合的设计值

(1)基本组合的效应设计值。对于基本组合,荷载效应组合的设计值 S 应从下列组合中取最不利值确定。

由可变荷载控制的效应设计值为

$$S = \sum_{i \geqslant 1} \gamma_{Gi} S_{Gik} + \gamma_p S_p + \gamma_{Q1} L_1 S_{Q1k} + \sum_{j>1} \gamma_{Qj} \psi_{cj} \gamma_{Lj} S_{Qjk} \tag{1-3}$$

由永久荷载控制的效应设计值为

$$S=\sum_{i\geqslant 1}\gamma_{Gi}S_{Gik}+\gamma_{p}S_{p}+\gamma_{L}\sum_{j>1}\gamma_{Qj}\psi_{cj}S_{Qjk} \tag{1-4}$$

式中，γ_{Gi}为第 i 个永久荷载的分项系数；γ_{p} 为预应力荷载的分项系数；γ_{Q1}为第 1 个可变荷载（主导可变荷载）的分项系数；γ_{Qj}为第 j 个可变荷载的分项系数；γ_{L}、γ_{Lj}为第 1 个和第 j 个考虑结构设计使用年限的荷载调整系数：结构设计使用年限为 5 年时 $\gamma_{L}=0.9$，结构设计使用年限为 50 年时 $\gamma_{L}=1.0$，结构设计使用年限为 100 年时 $\gamma_{L}=1.1$，对结构设计使用年限为 25 年的结构构件，γ_{L} 应按各种材料结构设计规范的规定采用；S_{Gik}为第 i 个永久荷载标准值的效应；S_{p} 为预应力作用有关代表值的效应；S_{Q1k}为第 1 个可变荷载（主导可变荷载）标准值的效应；S_{Qjk}为第 j 个可变荷载标准值的效应；ψ_{cj}为第 j 个可变荷载的组合值系数。

需要指出的是，式(1-3)与式(1-4)仅适用于荷载与荷载效应为线性关系的情况。同时，当 S_{Q1k}无法明显判断时，可依次以各可变荷载效应为 S_{Q1k}，最后选取其中最不利的荷载效应组合。在应用式(1-4)时，为简化计算，对于可变荷载，仅考虑与结构自重方向一致的竖向荷载而忽略影响不大的水平荷载。

(2)偶然组合的效应设计值。偶然组合的效应设计值可按式(1-5)确定：

$$S=\sum_{i\geqslant 1}S_{Gik}+S_{p}+S_{Ad}+(\psi_{fl}\text{或}\psi_{ql})S_{Q1k}+\sum_{j>1}\psi_{qj}S_{Qjk} \tag{1-5}$$

式中，S_{Ad}为偶然荷载设计值的效应；ψ_{fl} 为第 l 个可变荷载的频遇值系数；ψ_{ql}、ψ_{qj} 为第 l 个和第 j 个可变荷载的准永久值系数。

式(1-5)中，偶然荷载的代表值不乘分项系数，主要是考虑到偶然荷载的确定本身带有较大的主观因素；与偶然荷载同时出现的其他荷载可根据观测资料和工程经验采用适当的代表值。

1.3.2 正常使用极限状态计算

1)设计表达式

对于正常使用极限状态，结构构件应根据不同情况分别采用荷载效应的标准组合、频遇组合或准永久组合，采用下列极限状态设计表达式：

$$S\leqslant C \tag{1-6}$$

式中，S 为正常使用极限状态的荷载组合的效应（如变形、裂缝等）设计值；C 为结构构件达到正常使用要求所规定的变形、应力、裂缝宽度和自振频率等的相应限值。

2)标准组合的效应设计值

$$S=\sum_{i\geqslant 1}S_{Gik}S_{P}+S_{Q1k}+\sum_{j>1}\psi_{cj}S_{Qjk} \tag{1-7}$$

标准组合宜用于不可逆正常使用极限状态，即当某个极限状态被超越时将产生严重的永久性损害的情形。

3)频遇组合的效应设计值

$$S=\sum_{i\geqslant 1}S_{Gik}+S_{P}+\psi_{fl}S_{Q1k}+\sum_{j>1}\psi_{qj}S_{Qjk} \tag{1-8}$$

由式(1-8)可知，频遇组合是永久荷载的标准值，主导可变荷载的频遇值和伴随可变荷载的准永久值的效应组合。频遇组合宜用于可逆正常使用极限状态，即当某个极限状态被

超越时仅产生局部损害、较大的变形或短暂的振动等。

4)准永久组合的效应设计值

$$S=\sum_{i\geqslant 1}S_{Gik}+S_P+\sum_{j\geqslant 1}\psi_{qj}S_{Qjk} \tag{1-9}$$

准永久组合宜用于在当长期作用效应是决定性因素时的正常使用极限状态。

同理,式(1-7)、式(1-8)和式(1-9)仅适用于荷载与荷载效应为线性关系的情况。由于正常使用极限状态要求的目标可靠指标较小,因而对荷载不乘以分项系数,设计时对材料强度采用标准值。

课堂案例

如图 1-1(a)所示,某钢筋混凝土预制柱安全等级为一级,采用翻身吊装,吊点设在牛腿下部,起吊时混凝土达到设计强度(C30)的 100%。上柱、牛腿和下柱的自重分别为 15.6 kN、6.5 kN 和 42.43 kN。吊装验算的计算简图及弯矩图如图 1-1(b)、图 1-1(c)所示。

问题:

如何确定吊装时钢筋混凝土预制柱的受弯承载力,并验算所用的弯矩设计值。

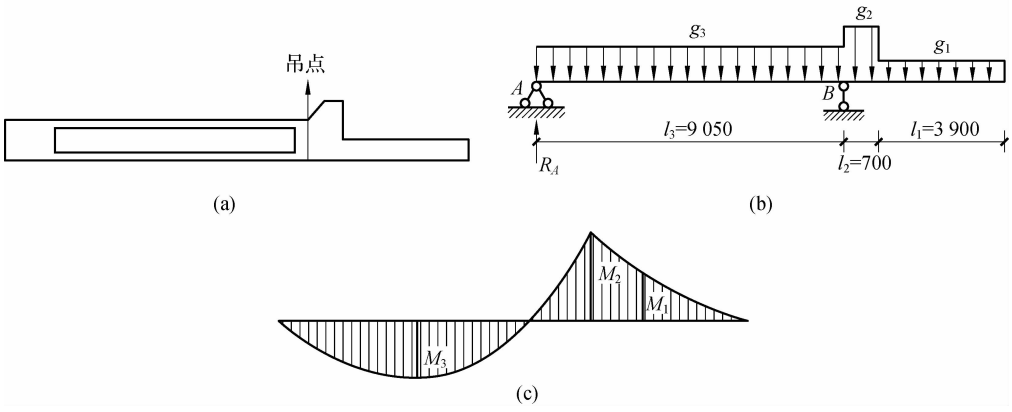

图 1-1　吊装验算的计算简图及弯矩图

分析:

(1)荷载计算。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中第 3.1.4 条的规定,考虑动力系数$\mu=1.5$,各段柱自重线荷载设计值为

上柱:　$g_1=\mu\gamma_G g_{1k}=1.5\times 1.2\times\dfrac{15.6}{3.9}=7.2\ \text{kN/m}$

牛腿:　$g_2=\mu\gamma_G g_{2k}=1.5\times 1.2\times\dfrac{6.5}{0.7}=16.7\ \text{kN/m}$

下柱:　$g_3=\mu\gamma_G g_{3k}=1.5\times 1.2\times\dfrac{42.43}{9.05}=8.44\ \text{kN/m}$

(2)内力计算。

$M_1=\frac{1}{2}g_1l_1^2=\frac{1}{2}\times7.2\times3.9^2=54.76\ \text{kN/m}$

同理可得 $M_2=\frac{1}{2}q_1(l_1+l_2)^2+\frac{1}{2}\times(q_2-q_1)l_2^2$

$=\frac{1}{2}\times7.2\times(3.9+0.7)^2+\frac{1}{2}\times(16.7-7.2)\times0.7^2=78.5\ \text{kN}\cdot\text{m}$

由 $\sum M_B=R_Al_3+M_2-\frac{1}{2}g_3l_3^2=0$,可得

$R_A=\frac{1}{2}g_3l_3-\frac{M_2}{l_3}=\frac{1}{2}\times8.44\times9.05-\frac{78.5}{9.05}=29.5\ \text{kN}$

AB 段：$M_3=M(x)=R_Ax-\frac{1}{2}g_3x^2$

令 $\mathrm{d}M(x)/\mathrm{d}x=0$,则下柱段的最大弯矩发生在 $x=R_A/g_3=29.5/8.44=3.50$ m 处,因此 $M_3=51.56$ kN/m。

(3)弯矩设计值计算。根据上文 γ_0 的具体分类,此处取 $\gamma_0=1.1$。

上柱:弯矩设计值 $\gamma_0M_1=1.1\times54.76=60.24$ kN·m

下柱:由于 $M_3<M_2$,故取 M_2 为下柱的验算弯矩,$\gamma_0M_2=1.1\times73.2=80.52$ kN·m。

1.3.3 耐久性验算

1)耐久性的概念

材料的耐久性是指材料暴露在使用环境下抵抗各种物理和化学作用的能力。对钢筋混凝土结构而言,钢筋被浇筑在混凝土内,混凝土起到保护钢筋的作用,如果能够根据使用条件对钢筋混凝土结构进行正确的设计和施工,在使用过程中又能对混凝土认真地进行定期维护,可使其使用年限达百年及以上,因此,它是一种很耐久的材料。

钢筋混凝土结构长期暴露在使用环境中,耐久性会逐渐降低。其影响因素主要有材料的质量、钢筋的锈蚀、混凝土的抗渗及抗冻性、除冰盐对混凝土的破坏等。

混凝土结构的耐久性应根据表 1-1 的使用环境类别和表 1-2 的耐久性的基本要求进行设计。

表 1-1 混凝土结构的环境类别

环境类别	说　明
一	室内干燥环境： 无侵蚀性静水浸没环境
二 a	室内潮湿环境： 非严寒和非寒冷地区的露天环境； 非严寒和非寒冷地区与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境； 严寒和寒冷地区的冰冻线以下与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境

（续表）

环境类别	说　明
二 b	干湿交替环境； 水位频繁变动环境； 严寒和寒冷地区的露天环境； 严寒和寒冷地区冰冻线以上与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境
三 a	严寒和寒冷地区冬季水位变动区环境； 受除冰盐影响环境； 海风环境
三 b	盐渍土环境； 受除冰盐作用环境； 海岸环境
四	海水环境
五	受人为或自然的侵蚀性物质影响的环境

注 1：室内潮湿环境是指构件表面经常处于结露或湿润状态的环境。

注 2：严寒和寒冷地区的划分应符合国家现行标准《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—1993)的有关规定。

注 3：海岸环境和海风环境宜根据当地情况，考虑主导风向及结构所处迎风、背风部位等因素的影响，由调查研究和工程经验确定。

注 4：受除冰盐影响环境为受到除冰盐雾影响的环境；受除冰盐作用环境指被除冰盐溶液溅射的环境以及使用除冰盐地区的洗车房、停车楼等建筑。

表 1-2　结构混凝土材料的耐久性基本要求

环境等级	最大水胶比	最低强度等级	最大氯离子含量/%	最大碱含量/($kg \cdot m^{-3}$)
一	0.60	C20	0.30	不限制
二 a	0.55	C25	0.20	3.0
二 b	0.50(0.55)	C30(C25)	0.15	
三 a	0.45(0.50)	C35(C30)	0.15	
三 b	0.40	C40	0.10	

注 1：氯离子含量系指其占胶凝材料总量的百分比。

注 2：预应力构件混凝土中的最大氯离子含量为 0.05%；最低混凝土强度等级应按表中的规定提高两个等级。

注 3：素混凝土构件的水胶比及最低强度等级的要求可适当放松。

注 4：有可靠工程经验时，二类环境中的最低混凝土强度等级可降低一个等级。

注 5：处于严寒和寒冷地区二 b、三 a 类环境中的混凝土应使用引气剂，并可采用括号中的有关参数。

注 6：当使用非碱活性骨料时，对混凝土中的碱含量可不做限制。

2)对混凝土结构的要求

对于设计使用年限为 100 年且处于一类环境中的混凝土结构应符合下列规定：

(1)钢筋混凝土结构的强度等级不应低于 C30；预应力混凝土结构的强度等级应不低于 C40。

(2)混凝土中的最大氯离子含量为 0.05%。

(3)宜使用非碱活性集料，当使用碱活性集料时，混凝土中的碱含量不得超过 3.0 kg/m^3。

(4)混凝土保护层厚度宜较规范规定的厚度增加40%,在使用过程中宜采取表面防护、定期维护等有效措施。

(5)处于严寒及寒冷地区潮湿环境中的混凝土结构应满足抗冻要求,混凝土抗冻等级应符合有关标准的要求。

(6)有抗渗要求的混凝土结构,其抗渗等级应符合有关标准的要求。

(7)三类环境中的结构或构件,其受力钢筋宜采用环氧涂层带肋钢筋,预应力钢筋应有防护措施,且宜采用有利于提高耐久性的高性能混凝土,混凝土强度等级不得低于C30。

(8)四类和五类环境中的混凝土结构,其耐久性要求应符合有关标准的规定。

(9)对临时性混凝土结构,可不考虑耐久性要求。

(10)未经技术鉴定或设计许可,不得改变结构的使用环境和用途。

学习评价

1)填空题

(1)结构的功能要求包括_____、_____、_____。

(2)区分结构工作状态可靠与失效的标志是_____。

(3)根据功能要求,结构的极限状态可分为_____、_____两类。

(4)结构上的荷载按其随时间的变异性的不同分为_____、_____、_____。

(5)永久荷载采用_____为代表值,可变荷载采用_____、_____、_____和_____为代表值。

(6)_____为基本代表值。

(7)目前除少数十分重要的结构外,一般结构均采用实用的_____表达式进行设计。

(8)用_____度量结构的可靠度具有明确的物理意义,能较好地反映问题的实质。

(9)建筑结构中各类结构构件的安全等级,宜与_____的安全等级相同,对其中部分结构构件的安全等级可根据其重要程度和综合经济效益进行适当调整,但不得低于_____级。

(10)对标准值大于4 kN/m^{2}的工业房屋楼面结构的活荷载,分项系数γ_Q取_____。

2)名词解释

(1)结构的可靠性

(2)极限状态

(3)偶然荷载

(4)荷载标准值

(5)可变荷载准永久值

3)简答题

(1)荷载效应组合的设计有什么具体要求?

(2)对混凝土结构的要求有哪些?

(3)材料的耐久性指的是什么?

模块 2
钢筋和混凝土的力学性能

学习目标

(1)了解钢筋的品种、级别及性能。
(2)掌握混凝土的力学性能并进行混凝土的强度计算。
(3)熟悉混凝土与钢筋的选用原则。
(4)掌握钢筋与混凝土的共同工作原理。

2.1 钢筋的性能及要求

2.1.1 钢筋的分类

混凝土结构用钢筋按化学成分的不同可分为碳素钢和普通低合金钢。根据含碳量的不同,碳素钢又可分为低碳钢(碳质量分数小于 0.25%)、中碳钢(碳质量分数为 0.25%～0.6%)、高碳钢(碳质量分数大于 0.6%)。钢筋含碳量越高,其强度越高,但塑性和可焊性就越低。工程中常用低碳钢。普通低合金钢是在碳素钢的基础上,再加入微量的合金元素,如硅、锰、钒、钛、铌等,其目的是提高钢材的强度,改善钢材的塑性。

钢筋按生产加工工艺和力学性能的不同分为普通钢筋和预应力钢筋。普通钢筋为低碳钢,由普通低合金钢在高温状态下轧制而成,如 HRB335、HRB400 和 RRB400 级。预应力钢筋可分为热处理钢筋和预应力钢丝。热处理钢筋是将强度大致相当于 HRB400 级钢筋的某些特定钢号的钢筋经淬火和回火处理后制成,其强度可大幅度提高,而塑性降低不大。预应力钢丝是由高碳钢筋经多次冷拔而成,包括光面钢丝、刻痕钢丝、钢绞线(用光面钢丝绞织而成),钢丝直径越细,强度就越高。

钢筋按其外形的不同，分为光面钢筋和带肋钢筋。带肋钢筋有螺纹钢筋、人字纹钢筋和月牙纹钢筋。目前常用的是月牙纹钢筋，如图 2-1 所示。通常带肋钢筋直径不小于 10 mm，光面钢筋直径不小于 6 mm。

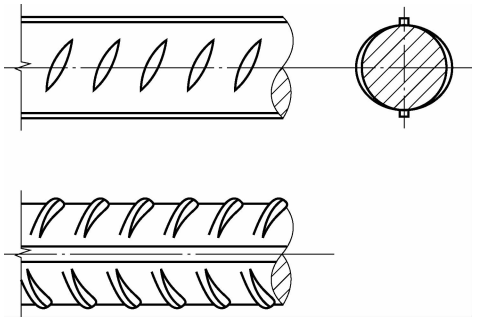

图 2-1　月牙纹钢筋

2.1.2　钢筋的强度和变形性能

1）钢筋的强度

钢筋按其力学性能的不同，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称为软钢，如热轧钢筋；无物理屈服点的钢筋称为硬钢，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（σ-ε）关系曲线（见图 2-2）来说明。

有物理屈服点钢筋的典型拉伸 σ-ε 关系曲线如图 2-2(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，钢筋处于弹性工作阶段。AB 段为钢筋的弹塑性阶段，σ-ε 呈曲线关系。这时如果卸荷，钢筋内将存在残余应变。B'点是不稳定的，称为钢筋的屈服上限，B 点为屈服下限，B 点的应力称为屈服强度 f_y。BC 段称为钢筋的屈服阶段或屈服台阶，其应力不增加而应变急剧增长。CD 段称为钢筋的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，σ-ε 曲线又开始上升，直至应力达到最高应力点 D。D 点相应的应力称为钢筋的极限抗拉强度 f_t，钢筋应力超过 f_t 后其在薄弱处的截面变细，产生颈缩现象，DE 段称为钢筋的颈缩阶段。钢筋被拉断（E 点）后的伸长值与原长的比率称为伸长率 δ。

提示

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，钢筋的承载力越高。钢筋强度设计时，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形和过宽的裂缝，以至于钢筋不能再被使用。

极限抗拉强度 f_t 是检验钢筋质量的另一强度指标，可度量钢筋的强度储备。

无物理屈服点钢筋的应力-应变(σ-ε)关系曲线如图 2-2(b)所示。其曲线 σ-ε 没有明显的屈服台阶,钢筋的强度高,但伸长率 δ 小。为了与国家关于钢筋的其他标准相一致,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中规定取钢筋卸荷后残余应变为 0.2%时所对应的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为条件屈服点,其值相当于 $0.85\sigma_b$(σ_b 为钢筋国家标准的极限抗拉强度)。无物理屈服点钢筋由于条件屈服点不易测定,因此质量检验以极限抗拉强度作为其主要强度指标。

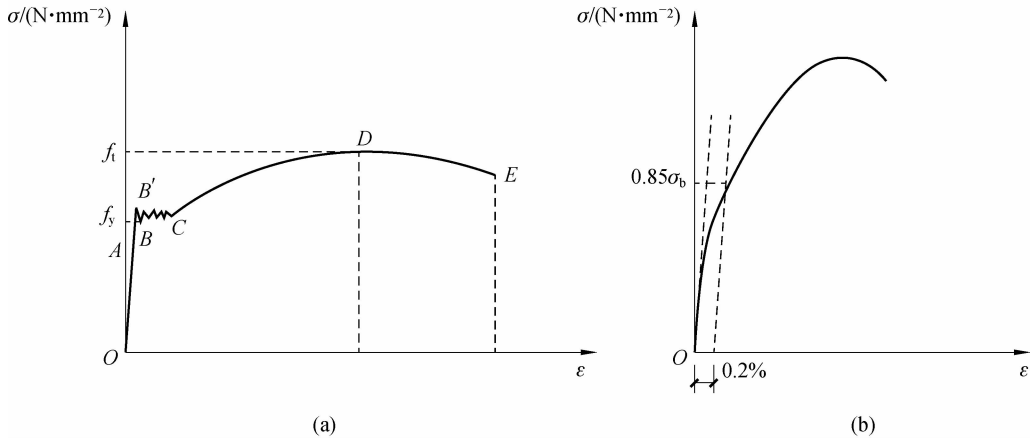

图 2-2　钢筋的 σ-ε 曲线

(a)有物理屈服点钢筋的 σ-ε 曲线　(b)无物理屈服点钢筋的 σ-ε 曲线

2)钢筋的变形性能

(1)钢筋的伸长率。钢筋试件被拉断后,其弹性变形消失,塑性变形则残留下来,如图 2-3 所示。伸长率反映了钢筋拉断前的变形能力,其值越大,钢筋拉断前吸收的应变能越多,钢筋的塑性越好。伸长率 δ 可用式(2-1)表示。

$$\delta=\frac{l_1-l_0}{l_0}\times 100\% \tag{2-1}$$

式中,l_0 为钢筋拉伸试验试件的初始量测标距;l_1 为试件经拉断并重新拼合后量测断口两侧的标距。

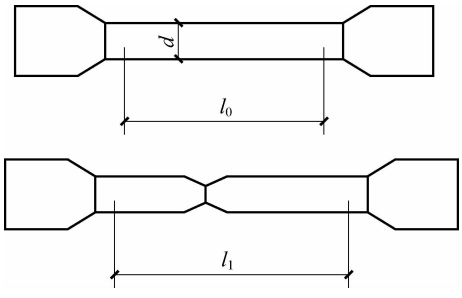

图 2-3　拉断前后的钢筋试件

国内对应变量测标距规定取 $l_0=5d$(d 为试件直径),相应的伸长率用 δ_5 表示;也有取 $l_0=10d$ 的,相应的伸长率用 δ_{10} 表示。通常 $\delta_5>\delta_{10}$。

上述伸长率只反映颈缩区域的残留变形的大小，与钢筋拉断时的应变状态相差甚远，且各类钢筋对颈缩的反应不同，加上端口拼接的量测误差，难以真实反映钢筋的塑性。为此，《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)对普通钢筋及预应力钢筋在最大作用力下的总伸长率 δ_{gt} 提出了要求。

在一般试验条件下，可以按图 2-4 量测试验后非颈缩端口区域标距 L_0 内的残余应变 $\varepsilon_r=(L_1-L_0)/L_0$（$L_1$ 为残余长度），加上已回复的弹性应变 $\varepsilon_e=F_b/A_sE_s$（A_s 为试样的原始横截面积，E_s 为钢筋的弹性模量，F_b 为最大作用力）而得的总伸长率，即

$$\delta_{gt}=\left(\frac{L_1-L_0}{L_0}+\frac{F_b}{A_sE_s}\right)\times 100\% \tag{2-2}$$

总伸长率 δ_{gt} 比断口附近伸长率 δ 更真实地反映了钢筋在拉断前的平均（非局部区域）伸长率，可客观地反映钢筋的变形能力，是比较科学的塑性指标。

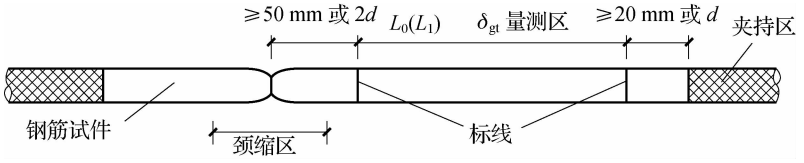

图 2-4　钢筋总伸长率的测定

(2)钢筋的冷弯性能。钢筋的冷弯性能通过冷弯试验来反映，如图 2-5 所示。冷弯是在常温下将直径为 d 的钢筋绕弯心直径为 D 的辊轴弯曲到规定的冷弯角度 α 后，检查试件表面，如果不出现裂纹、断裂或起层现象，则认为钢筋的冷弯性能合格。钢筋的伸长率一般不能反映钢材脆化的倾向，而钢筋的冷弯性能可反映钢筋的塑性性能和内在质量。为了使钢筋在弯折加工时不致断裂和在使用过程中不至脆断，使用前应对钢筋进行冷弯试验，并保证满足规定的指标。表 2-1 列出了常用钢筋的强度、伸长率、冷弯性能和弹性模量等力学性能指标。

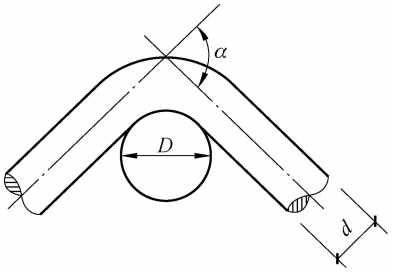

图 2-5　钢筋的冷弯试验

表 2-1　常用钢筋的力学性能指标

钢筋级别	钢　　号	公称直径 d/mm	屈服强度 /(N·mm^{-2})	抗拉强度 /(N·mm^{-2})	伸长率 δ_5	冷弯性能 D（弯心直径）	弹性模量 /(N·mm^{-2})
HRB335	20MnSi	6～25	335	490	16	$\alpha=180°$，$D=3d$	2.0×10^5
		28～50				$\alpha=180°$，$D=4d$	

（续表）

钢筋级别	钢　　号	公称直径 d/mm	屈服强度 /(N·mm^{-2})	抗拉强度 /(N·mm^{-2})	伸长率 δ_5	冷弯性能 D（弯心直径）	弹性模量 /(N·mm^{-2})
HRB400	20MnSiV 20MnSiNb 20MnTi	6～25	400	570	14	$\alpha=180°, D=4d$	2.0×10^5
		28～50				$\alpha=180°, D=5d$	
RRB400	K20MnSi	8～25	400	600	14	$\alpha=90°, D=3d$	2.0×10^5
		28～40				$\alpha=90°, D=4d$	

（3）钢筋的冷加工。为了节约钢材，在常温下对有明显屈服点的钢筋（软钢）进行机械冷加工，可以使钢材内部的组织结构发生变化，从而提高钢材的强度，但其塑性会有所降低。

冷拉是在常温条件下，把钢筋应力拉到超过其原有的屈服点，然后完全放松，使钢材内部的组织结构发生变化，从而提高其强度。冷拉只能提高钢筋的抗拉屈服强度，却不能提高其抗压屈服强度。故当用冷拉钢筋做受压钢筋时，其屈服强度与母材相同。

冷拔是将钢筋（盘条）用强力拔过比它本身直径还小的硬质合金拔丝模，这是钢筋同时受到纵向拉力和横向压力的作用以提高其强度的一种加工方法。钢筋经多次冷拔后，截面变小而长度增长，抗拉强度比原来提高很多，硬度提高，冷拔后钢丝的抗压强度也得到提高，但塑性降低。

经过冷拉和冷拔的钢筋（钢丝）加热后其力学性能将发生变化。钢材硬化的消失和原有性能的恢复，都需要有一定的高温持续时间。因此，在焊接时如果采用适当的焊接方法，严格控制高温持续时间，则在焊接后可有效地避免钢筋屈服强度或极限强度值的过分降低。

2.1.3　混凝土结构对钢筋性能的要求

1）一般要求

（1）钢筋应有较高的强度和适宜的屈强比。强度是指钢筋的屈服强度 f_y，屈服强度高，可减少结构的用钢量，节约钢材，提高经济效益。屈强比是指屈服强度 f_y 与极限抗拉强度 f_t 的比值，即 f_y/f_t，该值反映结构的可靠程度。钢筋的屈强比越小，结构越可靠，但钢材强度的利用率就越低，不经济；其屈强比太大，则结构不可靠。

（2）钢筋应有较好的塑性。钢筋的塑性好，则在破坏之前会产生较大的塑性变形（构件有明显的变形和裂缝），可避免突然的脆性破坏带来的危害，所以应保证钢筋的伸长率和冷弯性能合格。

（3）钢筋应具有较好的焊接性能。要求保证钢筋焊接后接头的受力性能良好，不产生裂纹和过大的变形。

（4）钢筋与混凝土之间应具有良好的黏结力。黏结力是保证钢筋和混凝土共同工作的

基础，钢筋表面形状对黏结力有着重要的影响。为了加强钢筋与混凝土的黏结力，除强度较低的 HPB300 级钢筋为光面钢筋外，常用的 HRB335、HRB400 和 RRB400 级钢筋均为表面带肋钢筋。

2）抗震要求

对于有抗震要求的混凝土结构用钢筋，除应满足上述一般要求外，还应满足以下要求：

（1）抗震等级为一、二级的框架结构，其纵向受力钢筋采用普通钢筋时，应满足以下要求：

①钢筋的抗拉强度实测值与屈服强度实测值的比值（强屈比）不应小于 1.25，其目的是为了保证当构件某个部位出现塑性铰后，塑性铰处有足够的转动能力与耗能能力。

②钢筋的屈服强度实测值与强度标准值的比值不应大于 1.3，其目的是满足结构设计中强柱弱梁、强剪弱弯的设计要求。

（2）普通钢筋宜优先采用延性、韧性和可焊性较好的钢筋。纵向受力钢筋宜选用 HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 级钢筋，箍筋宜选用 HRB400、HRBF400、HPB300、HRB500、HRBF500 级钢筋，也可选用 HRB335、HRBF335 级钢筋。

2.2 混凝土的力学性能

2.2.1 混凝土的强度

混凝土的强度主要包括立方体抗压强度、轴心抗压强度和轴心抗拉强度等，其抗压强度与水泥、集料的品种、级配、配合比、硬化条件和龄期等有关。影响混凝土抗压强度的主要因素有混凝土受压时的横向变形条件和加荷速度等。

1）混凝土在单向应力作用下的强度

（1）立方体抗压强度。《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2010）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 150 mm 的立方体试件，在 28 天或设计规定的龄期内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 0.3～0.8 N/mm^2。立方体试件的强度比较稳定，制作与试验比较方便。

提示

由于粉煤灰等矿物掺合料在水泥及混凝土中的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 28 天，可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。

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，《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)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 400 MPa 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。我国采用规格为 150 mm×150 mm×300 mm 的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。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)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，其中，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 0.88。轴心抗压强度标准值 f_{ck} 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 的关系按式(2-3)计算。

$$f_{ck}=0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k} \tag{2-3}$$

式中，α_{c1} 为棱柱体强度与立方体强度的比值，对 C50 及以下的普通混凝土取 $\alpha_{c1}=0.76$，对高强度混凝土 C80 取 $\alpha_{c1}=0.82$，其间按线性内插法确定；α_{c2} 为 C40 以上混凝土的脆性折减系数，对 C40 及以下普通混凝土取 $\alpha_{c2}=1.00$，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。

由于混凝土内部的不均匀性，加之安装试件的偏差等原因，准确测定混凝土的抗拉强度是很困难的。国内外常采用立方体(150 mm×150 mm×150 mm)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 2-6 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，试件沿中间垂直截面被劈裂为两部分而破坏。根据弹性理论，劈裂抗拉强度 σ_t 可按式(2-4)计算。

$$\sigma_t=\frac{2P}{\pi ld} \tag{2-4}$$

式中，P 为试件破坏时施加的荷载；d 为圆柱体试件直径或立方体试件边长；l 为圆柱体试件高度或立方体试件边长。

试验表明，混凝土的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。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)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(2-5)。

$$f_{tk}=0.88\times0.395f_{cu,k}^{0.55}(1-1.645\delta)^{0.45}\times\alpha_{c2} \tag{2-5}$$

式中，δ 为变异系数；0.88 与 α_{c2} 的取值与式(2-3)相同；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。

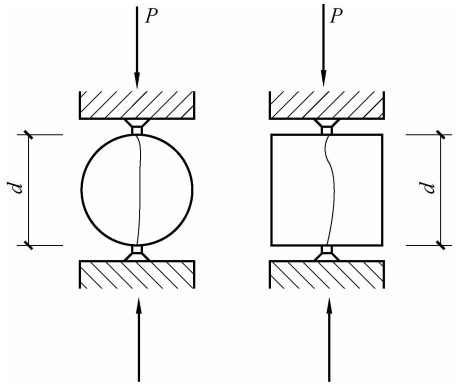

图 2-6　混凝土的劈裂抗拉试验

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)给出了混凝土抗压、抗拉强度标准值，如表 2-2 所示。

表 2-2　混凝土抗压、抗拉强度标准值

强度种类	混凝土强度等级													
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_{ck}	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
f_{tk}	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.39	2.51	2.64	2.74	2.85	2.93	2.99	3.05	3.11

注：f_{ck} 指混凝土轴心抗压强度标准值，f_{tk} 指混凝土轴心抗拉强度标准值。

2)在复合应力状态下的混凝土强度

在实际的混凝土结构中，混凝土处于单向应力状态的情况很少，往往都处于三向复合压应力的状态。在复合应力状态下，混凝土的强度和变形性能与单向应力状态下有明显的不同。

提示

混凝土三向受压时，混凝土一向的抗压强度随另两向压应力的增加而增大，并且混凝土的极限压应变也大大增加。这是由于侧向压力约束了混凝土的横向变形，抑制了混凝土内部裂缝的出现和发展，使得混凝土的强度和延性均有明显提高。

利用三向受压可使混凝土抗压强度得以提高这一特性，在实际工程中可将受压构件做成“约束混凝土”，以提高混凝土的抗压强度和延性，常用的做法有配置密排侧向箍筋、螺旋箍筋柱及钢管混凝土柱等。

2.2.2　混凝土的变形

混凝土的变形可分为两类：一类是在荷载作用下的受力变形，如单调短期加荷、多次重

复加荷以及荷载长期作用下的变形；另一类变形与受力无关，称为体积变形，如混凝土收缩、膨胀及由于温度变化所产生的变形等。

1）混凝土在一次短期荷载作用下的变形

（1）混凝土在单调短期加荷作用下的应力-应变曲线反映的是其最基本的力学性能，曲线的特征是研究钢筋混凝土构件的强度、变形、延性（承受变形的能力）和受力全过程的依据。

图 2-7 所示为混凝土棱柱体试件在受压时的应力-应变曲线，曲线由上升段 Oc 和下降段 ce 两部分组成。

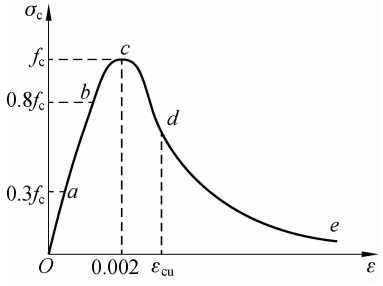

图 2-7　混凝土棱柱体试件在受压时的应力-应变曲线

①曲线 Oa 段（$\sigma_c \leqslant 0.3 f_c$）。此时混凝土受到的压应力较小，混凝土基本处于弹性工作阶段，应力-应变关系呈直线，卸载后应变可恢复到零。

②曲线 ab 段（$0.3 f_c < \sigma_c \leqslant 0.8 f_c$）。随着混凝土受到的压应力继续增大，应变增加的速度比应力快，混凝土呈现出塑性性质，应力-应变关系偏离直线；此阶段混凝土内部的微裂缝开始延伸、扩展。

③曲线 bc 段（$0.8 f_c < \sigma_c \leqslant f_c$）。混凝土的塑性变形显著增大，在 c 点达到峰值应力（$\sigma_c = f_c$），相应的峰值压应变 $\varepsilon_0 \approx 0.002$。此阶段混凝土内裂缝不断扩展，裂缝数量及宽度急剧增加，最后形成相互贯通并与压应力方向平行的裂缝，试件即将被破坏。

④曲线 ce 段。当压应力达到 c 点峰值应力后，曲线开始下降，试件承载力逐渐降低，应变继续增大，并在 d 点出现拐点，d 点相应的应变称为混凝土的极限压应变 ε_{cu}，一般为 0.003 3。ε_{cu} 值越大，说明混凝土的塑性变形能力越强，即材料的延性越好，抗震性能越好。

（2）混凝土的横向变形系数。混凝土试件在一次短期加压时，其纵向产生压缩应变 ε_{cv}，而横向产生膨胀应变 ε_{ch}，则其比值 $v_c = \varepsilon_{ch}/\varepsilon_{cv}$ 称为横向变形系数（又称泊松比）。当混凝土应力 $\sigma_c \leqslant 0.5 f_c$ 时，其值基本为常数，《混凝土结构设计规范》中取 $v_c = 0.2$；当 $\sigma > 0.5 f_c$ 时，横向变形突然增加，表明混凝土内部微裂缝开始迅速发展。

（3）混凝土的弹性模量、变形模量和剪变模量。混凝土的应力与其弹性应变之比称为混凝土的弹性模量，用符号 E_c 表示。根据大量试验统计结果，《混凝土结构设计规范》采用的计算混凝土的弹性模量的经验公式为

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \dfrac{34.7}{f_{cu,k}}} \tag{2-6}$$

强度等级为 C15 的混凝土的弹性模量为 $E_c = 2.20 \times 10^4\ \mathrm{N/mm^2}$；强度等级为 C20 的混

凝土的弹性模量为 $E_c=2.55\times10^4$ N/mm^2；强度等级为 C25 的混凝土的弹性模量为 $E_c=2.80\times10^4$ N/mm^2；强度等级为 C30 的混凝土的弹性模量为 $E_c=3.0\times10^4$ N/mm^2；强度等级为 C35 的混凝土的弹性模量为 $E_c=3.15\times10^4$ N/mm^2；强度等级为 C40 的混凝土的弹性模量为 $E_c=3.25\times10^4$ N/mm^2；强度等级为 C45 的混凝土的弹性模量为 $E_c=3.35\times10^4$ N/mm^2。

混凝土的应力与其弹塑性总应变之比称为混凝土的变形模量，用符号 E'_c 表示。该值小于混凝土的弹性模量 E_c。混凝土的弹性模量 E_c 与变形模量 E'_c 的关系为

$$E'_c=\upsilon E_c \tag{2-7}$$

式中，υ 为混凝土弹性特征系数，当 $\sigma_c\leqslant0.3f_c$ 时，$\upsilon=1.0$；当 $\sigma_c=0.5f_c$ 时，$\upsilon=0.8\sim0.9$；当 $\sigma_c=0.9f_c$ 时，$\upsilon=0.4\sim0.7$。

混凝土的剪变模量是指剪应力和剪应变的比值，用 G_c 表示。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中取 $G_c=0.4E_c$。

2)混凝土在重复荷载作用下的变形

工程中的某些构件，例如，工业厂房中的吊车梁，在其使用期限内要承受大约 200 万次以上的重复荷载作用，在多次重复荷载作用的情况下，混凝土的强度和变形性能都会出现重要变化，混凝土将产生“疲劳”现象。混凝土由于荷载重复作用而引起的破坏称为疲劳破坏。疲劳破坏的产生取决于加荷时应力是否超过混凝土的疲劳强度 f_c^f。试验表明，混凝土疲劳强度 f_c^f 低于轴心抗压强度 f_c，大致为 $(0.4\sim0.5)f_c$，此值的大小与荷载重复作用的次数、应力变化幅度及混凝土强度等级有关。

通常情况下，承受重复荷载作用并且荷载循环次数不少于 200 万次的构件必须进行疲劳验算。

3)混凝土在长期荷载作用下的变形

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大的现象称为徐变。混凝土的徐变与时间参数有关。图 2-8 所示为混凝土棱柱体试件加荷至 $\sigma=0.5f_c$ 时测得的应变与时间的关系曲线。

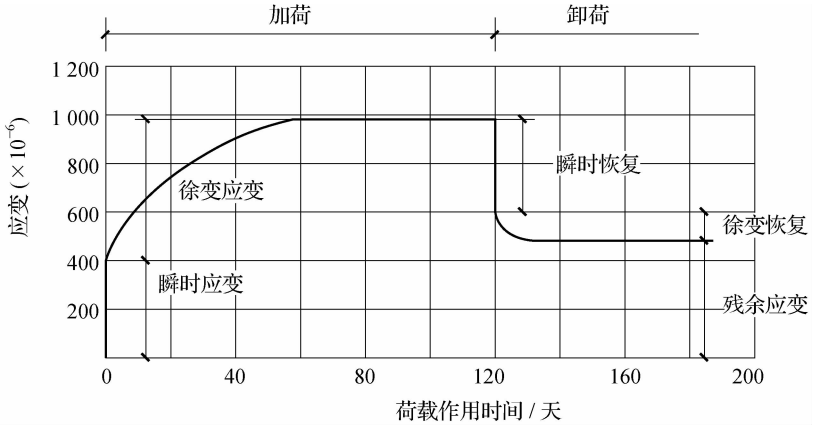

图 2-8　混凝土棱柱体试件加荷至 $\sigma=0.5f_c$ 时测得的应变与时间的关系曲线

从图 2-8 中可以看出，对棱柱体试件加荷，试件会产生瞬时应变。若保持荷载不变，随

着加荷作用时间的增加，应变也将继续增长，这就是混凝土的徐变。一般情况下，混凝土的徐变在加荷早期增长较快，以后逐渐减慢，经过较长时间后就逐渐趋于稳定，徐变值为瞬时应变的 1～4 倍。如果过几个月后卸荷，试件会瞬时恢复一部分应变，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，这部分应变称为残余应变。

影响混凝土徐变的因素是多方面的，主要可归结为以下三个方面：

(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，混凝土的徐变越大；水胶比越大，混凝土的徐变越大；集料的弹性模量越小，混凝土的徐变就越大；构件尺寸越小，混凝土的徐变越大。

(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，混凝土的徐变就越大。若采用蒸汽养护则可减少混凝土的徐变量 20%～25%。

(3)应力因素。施加初应力的大小和加荷时混凝土的龄期是影响混凝土徐变的应力因素。加荷时混凝土的龄期越长，混凝土的徐变就越小。当加荷龄期相同时，初应力越大，混凝土的徐变也越大。当应力 $\sigma \leqslant 0.5 f_c$ 时，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 $\sigma > 0.8 f_c$ 时，徐变的发展不再是收敛的，最终将导致混凝土被破坏。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。$\sigma = 0.8 f_c$ 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；使长细比较大的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。

2.3　钢筋与混凝土的黏结

2.3.1　钢筋与混凝土共同工作的原理

若钢筋混凝土构件受力后钢筋和混凝土有相对滑移的趋势，就会在钢筋和混凝土接触面上产生沿钢筋轴线方向相互作用的剪力，这种力称为钢筋和混凝土的黏结应力。若构件中的钢筋和混凝土之间不能有效地黏结，在荷载作用下，钢筋与混凝土就不能共同受力。

钢筋与混凝土的黏结力由以下三部分组成：

(1)因水泥颗粒的水化作用形成的凝胶体对钢筋表面产生的胶结力。

(2)因混凝土硬结时体积收缩，将钢筋紧紧握裹而产生的摩擦力。

(3)由于钢筋表面凹凸不平与混凝土之间产生的机械咬合力。

其中，胶结力作用最小，光面钢筋以摩擦力为主，带肋钢筋以机械咬合力为主。

黏结作用可以用图 2-9 所示的钢筋与混凝土之间的黏结应力示意图来说明。根据受力性质的不同，钢筋与混凝土之间的黏结应力可分为裂缝间的局部黏结应力和钢筋端部的锚

固黏结应力两种。

①裂缝间的局部黏结应力是在两个相邻开裂截面之间产生的，钢筋应力的变化会受黏结应力的影响，黏结应力使两个相邻裂缝之间的混凝土参与受拉。局部黏结应力的丧失会造成构件刚度的降低和裂缝的展开。

②钢筋伸进支座或在连续梁中承担负弯矩的上部钢筋在跨中截断时，需要延伸一段长度，即锚固长度。要使钢筋承受所需的拉力，就要求受拉钢筋有足够的锚固长度，以积累足够的黏结力，否则，钢筋混凝土构件将发生锚固破坏。同时，可通过在钢筋端部附加弯钩、弯折，或在锚固区贴焊短钢筋、贴焊角钢等措施来提高钢筋的锚固能力。光圆钢筋末端均须设置弯钩。

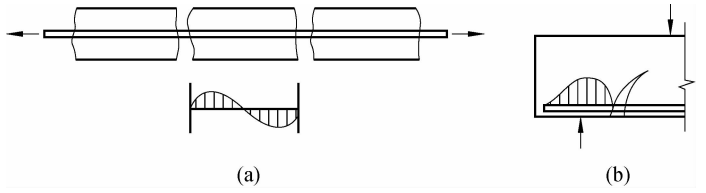

图 2-9　钢筋与混凝土之间的黏结应力

(a)裂缝间的局部黏结应力　(b)钢筋端部的锚固黏结应力

2.3.2　黏结锚固强度

钢筋与混凝土的黏结锚固强度通常采用拉拔试验来测定，如图 2-10 所示。黏结锚固应力 τ 由拉拔力 F 除以锚固面积 $\pi d l_a$ 而得，d 为钢筋直径，l_a 为锚固长度。

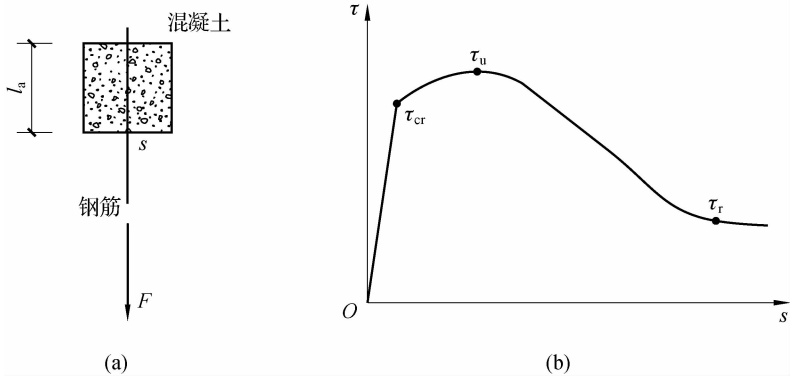

图 2-10　钢筋与混凝土的黏结锚固应力与滑移(τ-s)关系曲线

(a)拉拔试件　(b)τ-s 曲线

由拉拔试验可得

$$\tau=\frac{F}{\pi d l_a} \tag{2-8}$$

黏结锚固应力与滑移(τ-s)关系曲线表达了钢筋与混凝土之间的黏结锚固性能。曲线的斜率表示锚固刚度(抵抗滑移的能力)；曲线的峰值 τ_u 为锚固强度；曲线下降段为锚固延性(大滑移时的锚固能力)。

2.3.3　影响黏结锚固强度的因素

影响钢筋与混凝土黏结锚固强度的因素有很多，主要有混凝土强度、保护层厚度、钢筋净间距、横向配筋、侧向压应力及浇筑混凝土时钢筋的位置等。

(1)光圆钢筋及变形钢筋的黏结锚固强度都随混凝土强度等级的提高而提高。试验表明，当其他条件基本相同时，黏结锚固强度与混凝土的抗拉强度大致呈正比关系。

(2)当黏结发生破坏时，钢筋周围的混凝土容易产生劈裂裂缝，从而对结构的耐久性产生不利影响。由于钢筋外围一定厚度的混凝土保护层可防止混凝土因产生径向劈裂力而使黏结锚固强度降低，因而增大保护层厚度，可以提高外围混凝土的抗劈裂能力，有利于黏结锚固强度的充分发挥。当保护层厚度大于 5 倍钢筋直径时，黏结锚固强度将趋于稳定。

(3)混凝土构件截面上有多根钢筋并列在一排时，钢筋净间距对黏结锚固强度有重要的影响。钢筋净间距过小，外围混凝土将发生水平劈裂，形成贯穿整个梁宽的劈裂裂缝，造成整个混凝土保护层剥落，黏结锚固强度将显著降低。一排钢筋的根数越多，净间距越小，黏结锚固强度降低得就越多。

(4)横向钢筋(如梁中的箍筋)可以限制混凝土内部裂缝的发展和到达构件表面的裂缝宽度，从而提高黏结锚固强度。因此，在使用较大直径钢筋的锚固区或搭接长度范围内，或在截面内钢筋根数较多的位置，应设置一定数量的附加箍筋，以防止混凝土保护层的劈裂崩落。

(5)在直接支承的支座处，如梁的简支端，钢筋的锚固区会受到来自支座的横向压应力的作用，横向压应力约束了混凝土的横向变形，使钢筋与混凝土间抵抗滑动的摩阻力增大，因而可以提高黏结锚固强度。

(6)黏结锚固强度与浇筑混凝土时钢筋所处的位置有关。当混凝土浇筑深度过大时(超过300 mm)，钢筋底面的混凝土会出现沉淀收缩和离析泌水，气泡将逸出，使混凝土与水平放置的钢筋之间产生强度较低的疏松空隙层，从而削弱钢筋与混凝土间的黏结作用。

另外，钢筋的表面形状对黏结锚固强度也有影响，变形钢筋与混凝土的黏结锚固强度大于光圆钢筋。

钢筋在节点内的锚固、相互之间的搭接以及在必要位置处的截断，除与钢筋和混凝土间的黏结性能有关外，还受到构件形式、受力状态、裂缝展开等因素的影响。

由于黏结破坏机理复杂，影响黏结力的因素众多，工程结构中黏结受力的多样性等因素，目前尚无比较完整的黏结力计算理论。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)采用的是：不进行黏结计算，用构造措施来保证混凝土与钢筋的黏结。

学习评价

1)填空题

(1)混凝土结构用钢筋按化学成分可分为_____和_____。

(2)钢筋按生产加工工艺和力学性能的不同分为_____和_____。

(3)钢筋的强度和变形一般通过_____来说明。

(4)_____是检验钢筋质量的另一强度指标,可度量钢筋的强度储备。

(5)_____反映了钢筋拉断前的变形能力,其值越大,钢筋拉断前吸收的应变能越多,塑性越好。

(6)混凝土强度等级应按_____标准值确定。

(7)影响混凝土抗压强度的主要因素有_____和_____等。

(8)通常情况下,承受重复荷载作用并且荷载循环次数不少于_____次的构件必须进行疲劳验算。

2)名词解释

立方体抗压强度　　冷拉　　冷拔

3)简答题

(1)混凝土的变形可分为哪两类?

(2)钢筋与混凝土的黏结力由哪几部分组成?

(3)混凝土的立方体抗压强度是如何确定的?

(4)什么是混凝土的徐变?影响混凝土徐变的因素主要有哪些?徐变对混凝土构件的受力性能有何影响?

(5)引起混凝土收缩的主要原因是什么?收缩对混凝土有何影响?