

第 2 章 混凝土结构材料的物理力学性能

钢筋和混凝土的物理力学性能以及共同工作的特性直接影响混凝土结构和构件的性能，也是混凝土结构计算理论和设计方法的基础。本章讲述钢筋和混凝土的主要物理力学性能以及混凝土与钢筋之间的粘结。

2.1 钢筋

2.1.1 钢筋的强度与变形

钢筋的强度和变形性能可以用拉伸试验得到的应力—应变曲线来说明。根据钢筋拉伸试验的应力—应变关系曲线的特点不同，可分为有明显屈服点钢筋（如热轧钢筋等）（见图 2-2）和无明显屈服点钢筋（如消除应力钢丝、钢绞线和热处理钢筋等）（见图 2-3）。

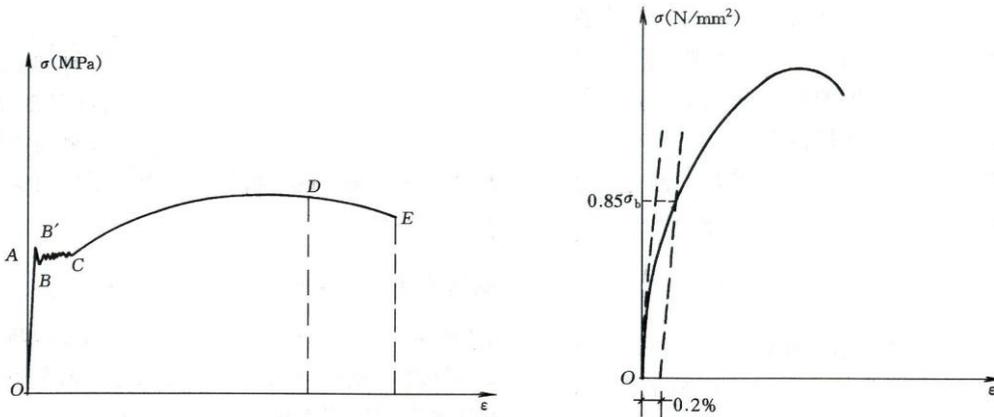


图 2-2 有明显屈服点钢筋的应力—应变曲线

图 2-3 无明显屈服点钢筋的应力—应变曲线

对有明显流幅的钢筋，从图 2-2 中可以看到，应力值在 A 点以前，应力与应变成比例变化，与 A 点对应的应力称为比例极限。过 A 点后，应变较应力增长为快，到达 B' 点后钢筋开始塑流，到 B' 点称为屈服上限，它与加载速度、截面形式、试件表面光洁度等因素有关，通常 B' 点是不稳定的，待 B' 点降至屈服下限 B 点，这时应力基本不增加而应变急剧增长，曲线接近水平线。曲线延伸至 C 点，B 点到 C 点的水平距离的大小称为流幅或屈服台阶。有明显流幅的热轧钢筋屈服强度是按屈服下限确定的。过 C 点以后，应力又继续上升，说明钢筋的抗拉能力又有所提高。随着曲线上升到最高点 D，相应的应力称为钢筋的极限强度，CD 段称为钢筋的强化阶段。试验表明，过了 D 点，试件薄弱处的截面将会突然显著缩小，发生局部颈缩，变形迅速增加，应力随之下降，达到 E 点时试件被拉断。

由于构件中钢筋的应力到达屈服点后，会产生很大的塑性变形，使钢筋混凝土

构件出现很大的变形和过宽的裂缝，以致不能使用，所以对有时显流幅的钢筋，在计算承载力时以屈服点作为钢筋强度限值。

对没有明显流幅或屈服点的预应力钢丝、钢绞线和热处理钢筋，为了与钢筋国家标准相一致，《混凝土结构设计规范》中也规定在构件承载力设计时，取极限抗拉强度 σ_b 的 85% 作为条件屈服点，如图 2-3 所示。

另外，钢筋除了要有足够的强度外，还应具有一定的塑性变形能力。通常用伸长率和冷弯性能两个指标衡量钢筋的塑性。钢筋拉断后(例如，图 2-2 中的 E 点)的伸长值与原长的比率称为伸长率。伸长率越大塑性越好。冷弯是将直径为 d 的钢筋围绕直径为 D 的弯芯弯曲到规定的角度后无裂纹断裂及起层现象，则表示合格。弯芯的直径 D 越小，弯转角越大，说明钢筋的塑性越好。

国家标准规定了各种钢筋所必须达到的伸长率的最小值(比如， δ_{100} , δ_{10} 和 δ_5 分别表示标距 $l=100d$, $l=10d$ 和 $l=5d$ 时伸长率的最小值)以及冷弯时相应的弯芯直径及弯转角的要求，有关参数可参照相应的国家标准。

2.1.2 钢筋应力-应变关系的数学模型

常用的钢筋应力—应变曲线模型有以下几种。

1. 描述完全弹塑性的双直线模型

双直线模型适用于流幅较长的低强度钢材。模型将钢筋的应力—应变曲线简化为图 2-4(a)所示的两段直线，不计屈服强度的上限和由于应变硬化而增加的应力。图中 OB 段为完全弹性阶段， B 点为屈服下限，相应的应力及应变为 f_y 和 ε_y ， OB 段的斜率即为弹性模量 E_s 。 BC 为完全塑性阶段， C 点为应力强化的起点，对应的应变为 $\varepsilon_{s,h}$ ，过 C 点后，即认为钢筋变形过大不能正常使用。双直线模型的数学表达式如下：

$$\text{当 } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \text{ 时, } \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad \left(E_s = \frac{f_y}{\varepsilon_y} \right) \quad (2-1)$$

$$\text{当 } \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,h} \text{ 时} \quad \sigma_s = f_y \quad (2-2)$$

2. 描述完全弹塑性加硬化的三折线模型

三折线模型适用于流幅较短的软钢，可以描述屈服后立即发生应变硬化(应力强化)的钢材，正确地估计高出屈服应变后的应力。如图 2-4(b)所示，图中 OB 和 BC

直线段分别为完全弹性和塑性阶段。C 点为硬化的起点，CD 为硬化阶段。到达 D 点时即认为钢筋破坏，受拉应力达到极限值 $f_{s,u}$ ，相应的应变为 $\varepsilon_{s,u}$ 。三折线模型的数学表达形式如下：

当 $\varepsilon_s \leq \varepsilon_y$ ， $\varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,h}$ 时，表达式同式(2-1)和(2-2)；

$$\text{当 } \varepsilon_{s,h} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,u} \text{ 时，} \quad f_s = f_y + (\varepsilon_s - \varepsilon_{s,h}) \text{tg} \theta' \quad (2-3)$$

$$\text{可取} \quad \text{tg} \theta' = E'_s = 0.01E_s \quad (2-4)$$

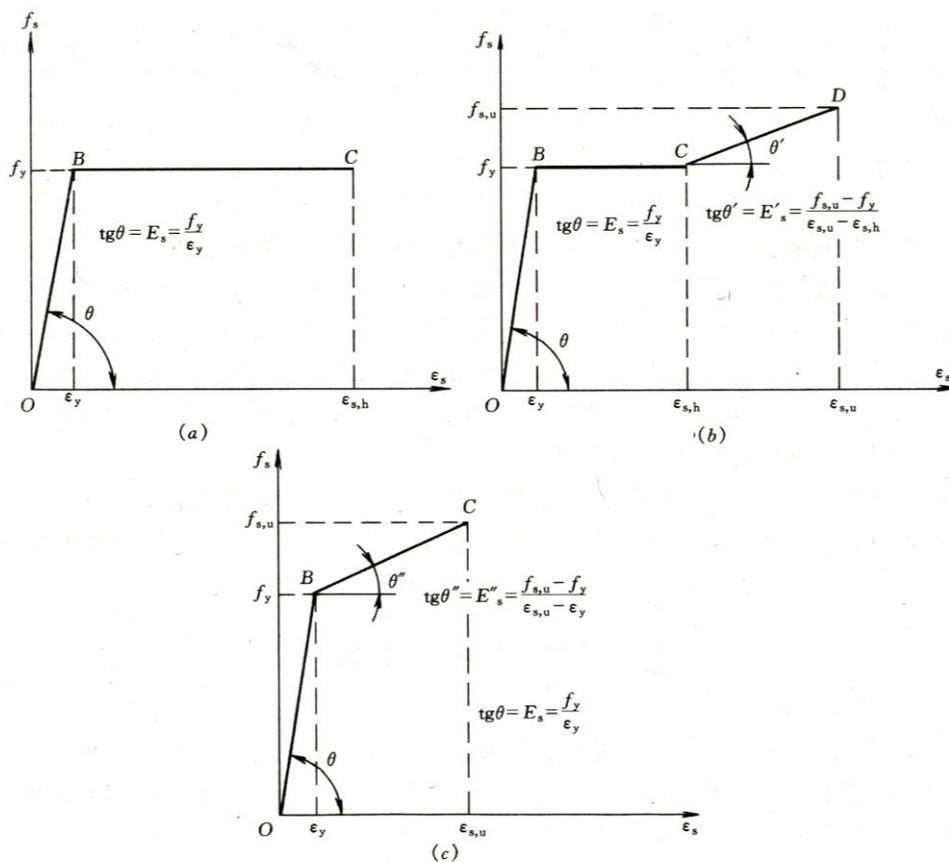


图 2-4 钢筋应力—应变曲线的数学模型

(a) 双直线；(b) 三折线；(c) 双斜线

3. 描述弹塑性的双斜线模型

双斜线模型可以描述没有明显流幅的高强钢筋或钢丝的应力—应变曲线。如图 2-4(C)所示，B 点为条件屈服点，C 点的应力达到极限值 $f_{s,u}$ ，相应的应变为 $\varepsilon_{s,u}$ ，双斜线模型的数学表达形式如下：

$$\text{当 } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \text{ 时，} \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad \left(E_s = \frac{f_y}{\varepsilon_y} \right) \quad (2-5)$$

$$\text{当 } \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,u} \text{ 时, } \quad \sigma_s = f_y + (\varepsilon_s - \varepsilon_y) \text{tg} \theta'' \quad (2-6)$$

$$\text{式中} \quad \text{tg} \theta'' = E_s'' = \frac{f_{s,u} - f_y}{\varepsilon_{s,u} - \varepsilon_y} \quad (2-7)$$

2.1.3 钢筋的疲劳性能

钢筋的疲劳是指钢筋在承受重复、周期性的动荷载作用下，经过一定次数后，突然脆性断裂的现象。吊车梁、桥面板、轨枕等承受重复荷载的钢筋混凝土构件在正常使用期间会由于疲劳发生破坏。钢筋的疲劳强度与一次循环应力中最大和最小应力的差值(应力幅度)有关，钢筋的疲劳强度是指在某一规定应力幅度内，经受一定次数的循环荷载后发生疲劳破坏的最大应力值。

钢筋疲劳断裂的主要原因是应力集中。一般认为由于钢筋内部和外部的缺陷，在这些薄弱处容易引起应力集中。应力过高，钢材晶粒滑移，产生疲劳裂纹，应力重复作用次数增加，裂纹扩展，从而造成断裂。

钢筋疲劳断裂试验有两种方法：一种是直接进行单根原状钢筋轴拉试验；另一种是将钢筋埋入混凝土中使其重复受拉或受弯的试验。由于影响钢筋疲劳强度的因素很多，钢筋疲劳强度试验结果是很分散的。我国采用直接做单根钢筋轴拉试验的方法。《混凝土结构设计规范》规定了不同等级钢筋的疲劳应力幅度限值，并规定该值与截面同一纤维上钢筋最小应力与最大应力比值(即疲劳应力比值) $\rho^f = \sigma_{\min}^f / \sigma_{\max}^f$ 有关，对预应力钢筋，当 $\rho^f \geq 0.9$ 时，可不进行疲劳强度验算。

在确定钢筋混凝土构件在正常使用期间的疲劳应力幅度限值时，需要确定循环荷载的次数，我国要求满足循环次数为 200 万次，即对不同的疲劳应力比值满足循环次数为 200 万次条件下的钢筋最大应力值为钢筋的疲劳强度。

钢筋的疲劳强度与应力变化的幅值有关，其它影响因素还有：最小应力值的大小、钢筋外表面几何尺寸和形状、钢筋的直径、钢筋的强度、钢筋的加工和使用环境以及加载的频率等。

由于承受重复性荷载的作用，钢筋的疲劳强度低于其在静荷载作用下的极限强度。原状钢筋的疲劳强度最低。埋置在混凝土中的钢筋的疲劳断裂通常发生在纯弯段内裂缝截面附近，疲劳强度稍高。

2.1.6 混凝土结构对钢筋的要求

1.钢筋的强度

所谓钢筋强度是指钢筋的屈服强度及极限强度。钢筋的屈服强度是设计计算时的主要依据(对无明显流幅的钢筋,取它的条件屈服点)。采用高强度钢筋可以节约钢材,取得较好的经济效果。改变钢材的化学成分,生产新的钢种可以提高钢筋的强度。另外,对钢筋进行冷加工也可以提高钢筋的屈服强度。使用冷拉和冷拔钢筋时应符合专门规程的规定。

2.钢筋的塑性

要求钢材有一定的塑性是为了使钢筋在断裂前有足够的变形,在钢筋混凝土结构中,能给出构件将要破坏的预告信号,同时要保证钢筋冷弯的要求,通过试验检验钢材承受弯曲变形的能力以间接反映钢筋的塑性性能。钢筋的伸长率和冷弯性能是施工单位验收钢筋是否合格的主要指标。

3.钢筋的可焊性

可焊性是评定钢筋焊接后的接头性能的指标。可焊性好,即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。

4.钢筋的耐火性

热轧钢筋的耐火性能最好,冷轧钢筋其次,预应力钢筋最差。结构设计时应注意混凝土保护层厚度满足对构件耐火极限的要求。

5.钢筋与混凝土的粘结力

为了保证钢筋与混凝土共同工作,要求钢筋与混凝土之间必须有足够的粘结力。钢筋表面的形状是影响粘结力的重要因素。

2.2 混凝土

2.2.1 混凝土的强度

虽然实际工程中的混凝土构件和结构一般处于复合应力状态,但是单向应力状态下混凝土的强度是复合应力状态下强度的基础和重要参数。

混凝土的强度与水泥强度等级、水灰比有很大关系,骨料的性质、混凝土的级配、混凝土成型方法、硬化时的环境条件及混凝土的龄期等也不同程度地影响混凝土的强度。试件的大小和形状、试验方法和加载速率也影响混凝土强度的试验结果。因此各国对各种单向受力下的混凝土强度都规定了统一的标准试验方法。

1.混凝土的立方体抗压强度和强度等级

立方体试件的强度比较稳定，所以我国把立方体强度值作为混凝土强度的基本指标，并把立方体抗压强度作为评定混凝土强度等级的标准。我国国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》(GBJ81—85)规定以边长为 150mm 的立方体为标准试件，标准立方体试件在(20±3)℃的温度和相对湿度 90%以上的潮湿空气中养护 28d，按照标准试验方法测得的抗压强度作为混凝土的立方体抗压强度，单位为 N/mm²。

《混凝土结构设计规范》规定混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定，用 $f_{cu,k}$ 表示。即用上述标准试验方法测得的具有 95%保证率的立方体抗压强度作为混凝土的强度等级。《混凝土结构设计规范》规定的混凝土强度等级有 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、和 C80，共 14 个等级。例如，C30 表示立方体抗压强度标准值为 30N/mm²。其中，C50~C80 属高强度混凝土范畴。

《混凝土结构设计规范》规定，钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C15；当采用 HRB335 级钢筋时，混凝土强度等级不宜低于 C20；当采用 HRB400 和 RRB400 级钢筋以及承受重复荷载的构件，混凝土强度等级不得低于 C20。预应力混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C30；当采用钢绞线、钢丝、热处理钢筋作预应力钢筋时，混凝土强度等级不宜低于 C40。

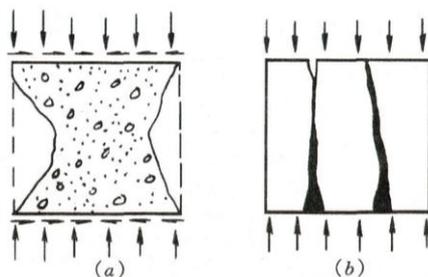


图 2-8 混凝土立方体试块的破坏特征

(a)不涂润滑剂；(b)涂润滑剂

试验方法对混凝土的立方体抗压强度有较大影响。试件在试验机上单向受压时，竖向缩短，横向扩张，由于混凝土与压力机垫板弹性模量与横向变形系数不同，压力机垫板的横向变形明显小于混凝土的横向变形，所以垫板通过接触面上的摩擦力约束混凝土试块的横向变形，就像在试件上下端各加了一个套箍，致使混凝土破坏时形成两个对顶的角锥形破坏面，抗压强度比没有约束的情况要高。如果在试件上下表面涂一些润滑剂，这时试件与压力机垫板间的摩擦力大大减小，其横向变形几乎不受约束，受压时没有“套箍”作用的影响，试件将沿着平行于力的作用方向产

生几条裂缝而破坏，测得的抗压强度就低。图 2-8(a)，(b)是两种混凝土立方体试块的破坏情况，我国规定的标准试验方法是不涂润滑剂的。

加载速度对立方体强度也有影响，加载速度越快，测得的强度越高。通常规定加载速度为：混凝土强度等级低于 C30 时，取每秒钟 $0.3\sim 0.5N/mm^2$ ；混凝土强度等级高于或等于 C30 时，取每秒钟 $0.5\sim 0.8N/mm^2$ 。

混凝土的立方体强度还与成型后的龄期有关。如图 2-9 所示，混凝土的立方体抗压强度随着成型后混凝土的龄期的逐渐增长，增长速度开始较快，后来逐渐缓慢，强度增长过程往往要延续几年，在潮湿环境中往往延续更长。

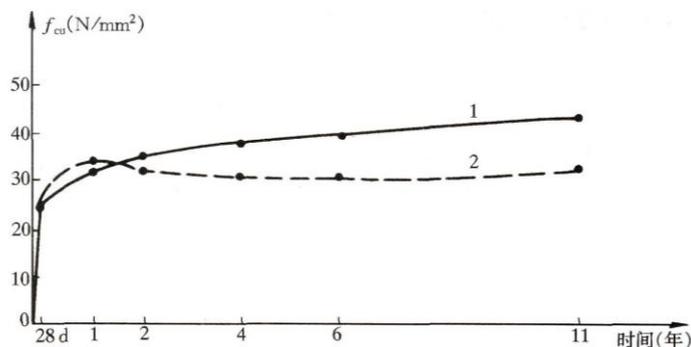


图 2-9 混凝土立方体强度随龄期的变化

1-在潮湿环境下；2-在干燥环境下

2.混凝土的轴心抗压强度

混凝土的抗压强度与试件形状有关，在实际工程中，一般的受压构件不是立方体而是棱柱体，即构件的高度要比截面的宽度或长度大。因此采用棱柱体比立方体能更好地反映混凝土结构实际抗压能力。用混凝土棱柱体试件测得的抗压强度称轴心抗压强度。

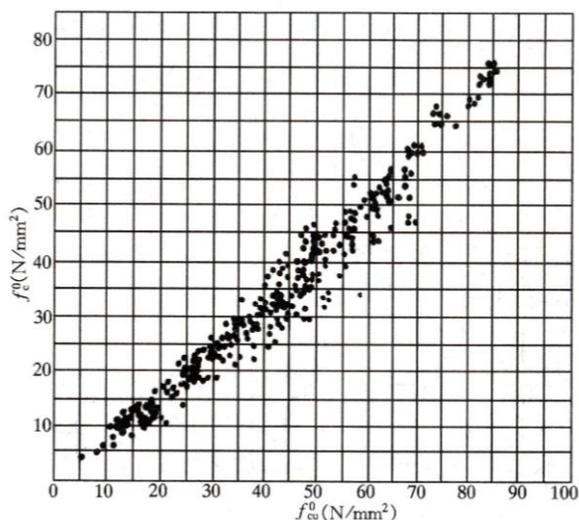


图 2-10 混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的关系

我国《普通混凝土力学性能试验方法》规定以 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 300\text{mm}$ 的棱柱体作为混凝土轴心抗压强度试验的标准试件。棱柱体试件与立方体试件的制作条件相同，试件上下表面不涂润滑剂。由于棱柱体试件的高度越大，试验机压板与试件之间摩擦力对试件高度中部的横向变形的约束影响越小，所以棱柱体试件的抗压强度都比立方体的强度值小，并且棱柱体试件高宽比越大，强度越小。但是，当高宽比达到一定值后，这种影响就不明显了。在确定棱柱体试件尺寸时，一方面要考虑到试件具有足够的高度以不受试验机压板与试件承压面间摩擦力的影响，在试件的中间区段形成纯压状态，同时也要考虑到避免试件过高，在破坏前产生较大的附加偏心而降低抗压极限强度。根据资料，一般认为试件的高宽比为 2-3 时，可以基本消除上述两种因素的影响。

《混凝土结构设计规范》规定以上述棱柱体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。

图 2-10 是根据我国所做的混凝土棱柱体与立方体抗压强度对比试验的结果。由图可以看出，试验值 f_c^0 与 f_{cu}^0 的统计平均值大致成一条直线，它们的比值大致在 0.70-0.92 的范围内变化，强度大的比值大些。这里，上角码“0”表示试验时观察到的值。

考虑到实际结构构件制作、养护和受力情况，实际构件强度与试件强度之间存在的差异，《混凝土结构设计规范》基于安全取偏低值，轴心抗压强度标准值与立方体抗压强度标准值的关系按下式确定：

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k} \quad (2-8)$$

式中： α_{c1} 为棱柱体强度与立方体强度之比，对混凝土强度等级为 C50 及以下的取 $\alpha_{c1}=0.76$ ，对 C80 取 $\alpha_{c1}=0.82$ ，在此之间按直线规律变化取值。 α_{c2} 为高强度混凝土的脆性折减系数，对 C40 及以下取 $\alpha_{c2}=1.00$ ，对 C80 取 $\alpha_{c2}=0.87$ ，中间按直线规律变化取值。0.88 为考虑实际构件与试件混凝土强度之间的差异而取用的折减系数。

国外常采用混凝土圆柱体试件来确定混凝土轴心抗压强度。例如美国、日本和欧洲混凝土协会、(CEB)系采用直径 6 英寸(152mm)、高 12 英寸(305mm)的圆柱体标准试件的抗压强度作为轴心抗压强度的指标，记作 f'_c 。对 C60 以下的混凝土，圆柱体抗压强度 f'_c 和立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 之间的关系可按式(2-9)折算。

$$f'_c = 0.79f_{cu,k} \quad (2-9)$$

当 $f_{cu,k}$ 超过 $60N/mm^2$ 后随着抗压强度提高， f'_c 与 $f_{cu,k}$ 的比值(即公式中的系数)要提高。*CEB-FIPMC-90* 给出：对 C60 的混凝土，比值为 0.833；对 C70 的混凝土，比值为 0.857；对 C80 的混凝土，比值为 0.875。

3.混凝土的轴心抗拉强度

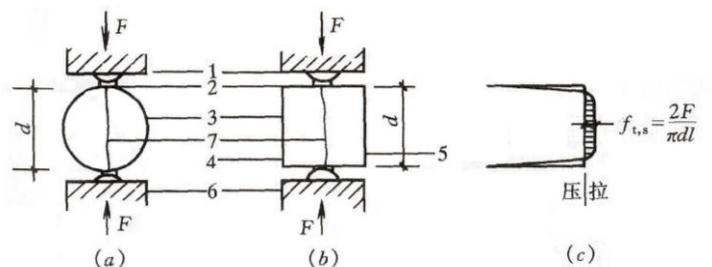


图 2-11 混凝土劈裂试验示意图

(a)用圆柱体进行劈裂试验；(b)用立方体进行劈裂试验；(c)劈裂面中水平应力分布

1-压力机上压板；2-弧形垫条及垫层各一条；3-试件；4-浇模顶面；5-浇模底面；6-压力机下垫板；7-试件破裂线

混凝土的轴心抗拉强度也是混凝土的基本力学指标之一，也可用它间接地衡量混凝土的冲切强度等其他力学性能。混凝土的轴心抗拉强度可以采用直接轴心受拉的试验方法来测定。但是，由于混凝土内部的不均匀性，加之安装试件的偏差等原因，准确测定抗拉强度是很困难的。所以，国内外也常用如图 2-11 所示的圆柱体或立方体的劈裂试验来间接测试混凝土的轴心抗拉强度。根据弹性理论，劈拉强度 $f_{t,s}$ 可按下式计算：

$$f_{t,s} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (2-10)$$

式中 F —破坏荷载； d —圆柱体直径或立方体边长； l —圆柱体长度或立方体边长。

试验表明，劈裂抗拉强度略大于直接受拉强度，劈拉试件的大小对试验结果也有一定影响。

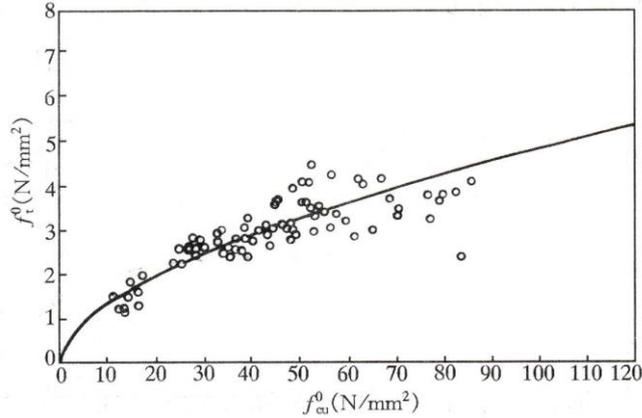


图 2-12 混凝土轴心抗拉强度与立方体抗压强度的关系

图 2-12 是混凝土轴心抗拉强度试验的结果。由图可以看出，轴心抗拉强度只有立方抗压强度的 $1/17-1/8$ ，混凝土强度等级愈高，这个比值愈小。考虑到构件与试件的差别、尺寸效应、加载速度等因素的影响，《混凝土结构设计规范》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

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \times \alpha_2 \quad (2-11)$$

式中 δ 为变异系数；0.88 的意义和 α_2 的取值与式(2-8)中的相同。

2.2.2 混凝土的变形

混凝土单轴受力时的应力-应变关系反映了混凝土受力全过程的重要力学特征，是混凝土构件应力分析、建立承载力和变形计算理论和进行非线性分析的主要依据。

1. 单轴(单调)受压应力-应变关系

混凝土单轴受压时的应力-应变关系是混凝土最基本的力学性能之一。在钢筋混凝土结构承载力计算、变形验算、超静定结构内力重分布分析、结构延性计算和有限元非线性分析等方面，它都是理论分析的基本依据。混凝土单轴受压时的应力-应变关系曲线常采用棱柱体试件来测定。当在普通试验机上采用等应力速度加载，到达混凝土轴心抗压强度 f_c 时，试验机中积聚的弹性应变能大于试件所能吸收的应变能，会导致试件产生突然的脆性破坏，试验只能测得应力-应变曲线的上升段。采用等应变速度加载，或在试件旁附设高弹性元件与试件一同受压，以吸收试验机内积聚的应变能，可以测得应力-应变曲线的下降段。典型的混凝土单轴受压应力-应变

全曲线如图 2-13 所示。

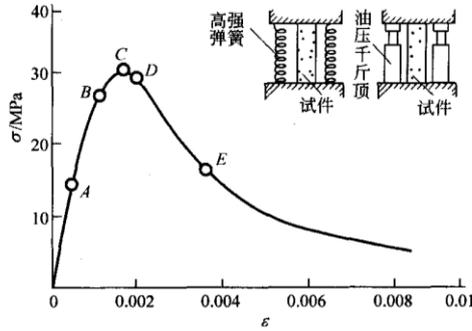


图 2-13 混凝土单轴受压应力-应变关系

混凝土应力-应变全曲线反映了混凝土受压力学性能全过程。若采用无量纲坐标 $x = \varepsilon / \varepsilon_0$, $y = \sigma / f_c^*$, 见图 2-14。

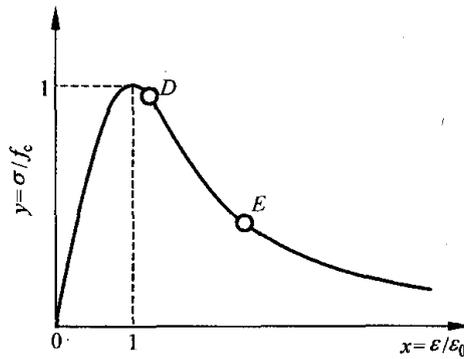


图 2-14 无量纲化混凝土单轴受压应力-应变关系

则单轴受压时混凝土应力-应变全曲线可按下列公式确定：

$$y(x) = \begin{cases} \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2-12)$$

式中 α_a 、 α_d —单轴受压应力-应变曲线上、下段的参数值，按表 2-1 采用；

f_c^* —混凝土的单轴抗压强度 (f_{ck} 、 f_c 等)；

ε_c —与 f_c^* 相应的混凝土峰值压应变，按表 2-1 采用。

表 2-1 混凝土单轴受压应力-应变曲线的参数值

$f_c^* (N/mm^2)$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\varepsilon_c (\times 10^{-6})$	1370	1470	1560	1640	1720	1790	1850	1920	1980	2030

α_a	2.21	2.15	2.09	2.03	1.96	1.90	1.84	1.78	1.71	1.65
α_d	0.41	0.74	1.06	1.36	1.65	1.94	2.21	2.48	2.74	3.00
$\varepsilon_u / \varepsilon_c$	4.2	3.0	2.6	2.3	2.1	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8

注： ε_u 为应力-应变曲线下降段上应力等于 $0.5f_c^*$ 时的混凝土压应变。

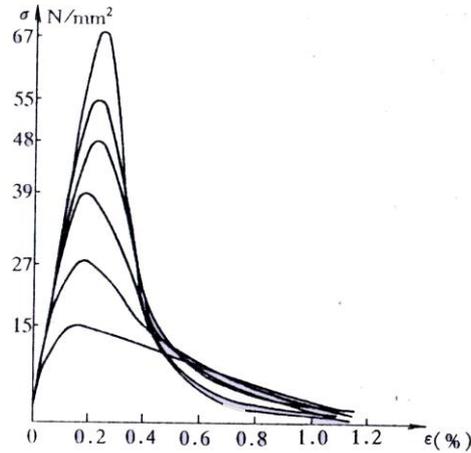


图 2-15 不同强度混凝土的受压应力-应变曲线

影响混凝土应力-应变曲线的因素很多，如混凝土的强度、组成材料的性质、配合比、龄期、试验方法以及箍筋约束等。试验表明，混凝土的强度对其应力-应变曲线有一定的影响。如图 2-15 所示，对于上升段，混凝土强度的影响较小；随着混凝土强度的增大，则应力峰值点处的应变也稍大些。对于下降段，混凝土强度有较大的影响，混凝土强度越高，下降段的坡度越陡，即应力下降相同幅度时变形越小，延性越差。另外，混凝土受压应力-应变曲线的形状与加载速度也有着密切的关系。

2. 混凝土单轴向受压应力-应变曲线的数学模型

常见的描述混凝土单轴向受压应力-应变曲线的数学模型如下。

(1) 美国采用 *E.Hognestad* 建议的模型

如图 2-16 所示，模型的上升段为二次抛物线，下降段为斜直线。

$$\text{上升段: } \sigma = f_c \left[\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (2-13)$$

$$\text{下降段: } \sigma = f_c \left(1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right) \quad \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \quad (2-14)$$

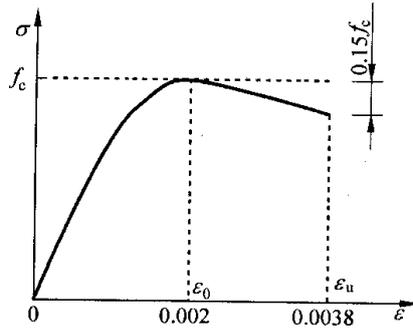


图 2-16 Hognestad 混凝土应力-应变曲线

式中，峰值应变 $\varepsilon_0 = 0.002$ ，极限压应变 $\varepsilon_u = 0.0038$ 。

(2) 德国采用 *Rüsch* 建议的模型

如图 2-17 所示，该模型形式较简单，上升段也采用二次抛物线，下降段则采用水平直线。

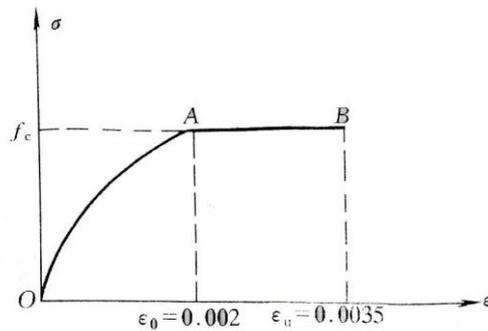


图 2-17 *Rüsch* 混凝土应力-应变曲线

$$\text{上升段: } \sigma = f_c \left[\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (2-15)$$

$$\text{下降段: } \sigma = f_c \quad \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \quad (2-16)$$

式中，峰值应变 $\varepsilon_0 = 0.002$ ，极限压应变 $\varepsilon_u = 0.0035$ 。

(3) 我国《规范》采用的模型

如图 2-18 所示，该模型形式较简单，上升段也采用二次抛物线，下降段也采用水平直线。

$$\text{上升段: } \sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right] \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \quad (2-17)$$

$$\text{水平段: } \sigma_c = f_c \quad \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_u \quad (2-18)$$

式中，参数 n 、 ε_0 和 ε_u 的取值如下：

$$n = 2 - \frac{1}{60}(f_{cu,k} - 50) \leq 2.0 \quad (2-19)$$

$$\varepsilon_0 = 0.002 + 0.5(f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \geq 0.002 \quad (2-20)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \leq 0.0033 \quad (2-21)$$

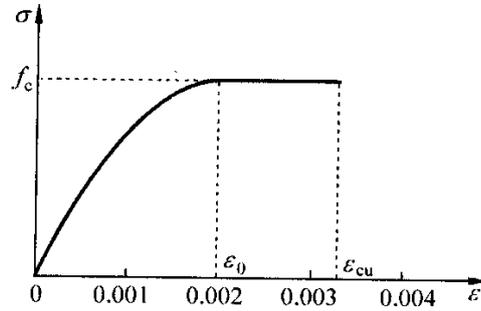


图 2-18 《规范》混凝土应力-应变曲线

3. 混凝土的弹性模量

在分析计算混凝土构件的截面应力、构件变形以及预应力混凝土构件中的预压应力和预应力损失等时，需要利用混凝土的弹性模量。由于混凝土的应力-应变关系为非线性，在不同的应力阶段，应力与应变之比的变形模量是一个变数，混凝土的变形模量有三种表示方法。

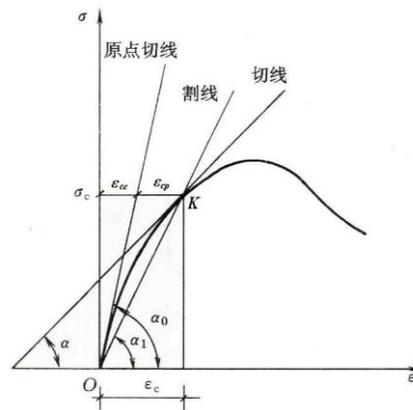


图 2-19 混凝土的弹性模量、变形模量和切线模量

(1) 原点弹性模量

如图 2-19 所示，混凝土棱柱体受压时，在应力-应变曲线的原点(图中的 O 点)作切线，该切线的斜率即为混凝土的原点弹性模量，称为弹性模量，以 E_c 表示，即

$$E_c = \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{ce}} \quad (2-22)$$

式中 α_0 为混凝土应力-应变曲线在原点处的切线与横坐标的夹角。

当混凝土进入塑性阶段后，初始的弹性模量已不能反映此时的应力-应变性质，

因此，有时用变形模量或切线模量来表示这时的应力—应变关系。

(2) 变形模量

如图 2-19 所示，连接混凝土应力—应变曲线的原点 O 及曲线上任一点 K 作一割线，K 点的混凝土应力为 σ_c ，则该割线 (OK) 的斜率即为变形模量，也称为割线模量或弹塑性模量。以 E'_c 表示，即

$$E'_c = \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} \quad (2-23)$$

可以看出，混凝土的变形模量是个变值，它随应力的大小而不同。

(3) 切线模量

如图 2-19 所示，在混凝土应力—应变曲线上某一应力 σ_c 处作一切线，该切线的斜率即为相应于应力 σ_c 时的切线模量。以 E''_c 表示，即

$$E''_c = \operatorname{tg} \alpha = \frac{d\sigma_c}{d\varepsilon_c} \quad (2-24)$$

可以看出，混凝土的切线模量是一个变值，它随着混凝土的应力增大而减小。

如图 2-19 所示，在某一应力 σ_c 下，混凝土应变 ε_c 可认为是由弹性应变 ε_{ce} 和塑性应变 ε_{cp} 两部分组成。于是混凝土的变形模量与弹性模量的关系为

$$E'_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\varepsilon_{ce}}{\varepsilon_c} \cdot \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{ce}} = \nu E_c \quad (2-25)$$

式中 ν —弹性特征系数，即 $\nu = \varepsilon_{ce} / \varepsilon_c$ 。

弹性特征系数 ν 与应力值有关。当 $\sigma_c = 0.5f_c$ 时， $\nu = 0.8-0.9$ ；当 $\sigma_c = 0.9f_c$ 时， $\nu = 0.4-0.8$ 。一般情况下混凝土的强度愈高， ν 值愈大。

目前，各国对弹性模量的试验方法尚无统一的标准。显然，要在混凝土一次加载的应力—应变曲线上作原点的切线，以求得 α_0 角的准确值是不容易的(因为试验结果很不稳定)。我国《规范》规定的弹性模量确定方法是：对标准尺寸 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的棱柱体试件，先加载至 $\sigma_c = 0.5f_c$ ，然后卸载至零，再重复加载、卸载 5~10 次。由于混凝土不是弹性材料，每次卸载至应力为零时，存在残余变形，随着加载次数增加，应力—应变曲线渐趋稳定并基本上趋于直线。该直线的斜率即定为混凝土的弹性模量。试验结果表明，按上述方法测得的弹性模量比按应力—应变曲线原点切线斜率确定的弹性模量要略低一些。

根据试验结果，《规范》规定，混凝土受压弹性模量按下列公式计算：

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu,k}}} \quad (2-26)$$

式中 E_c 和 $f_{cu,k}$ 的计量单位为 N/mm^2 。

需要注意的是：混凝土不是弹性材料，所以不能用已知的混凝土应变乘以规范中所给的弹性模量值去求混凝土的应力。只有当混凝土应力很低时，它的弹性模量与变形模量值才近似相等。

4. 混凝土轴向受拉时的应力—应变关系

由于测试混凝土受拉时的应力—应变关系曲线比较困难，所以试验资料较少。图 2-20 是采用电液伺服试验机控制应变速度，测出的混凝土轴心受拉应力—应变曲线。曲线形状与受压时相似，具有上升段和下降段。试验测试表明，在试件加载的初期，变形与应力呈线性增长，至峰值应力的 40%~50% 达比例极限，加载至峰值应力的 76%~83% 时，曲线出现临界点(即裂缝不稳定扩展的起点)，到达峰值应力时对应的应变只有 $75 \times 10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$ 。曲线下降段的坡度随混凝土强度的提高而更陡峭。受拉弹性模量与受压弹性模量值基本相同。

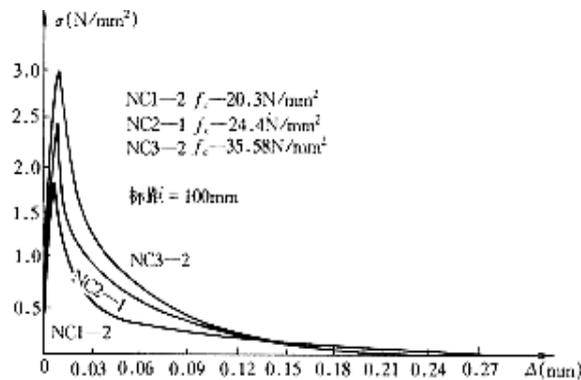


图 2-20 不同强度混凝土拉伸应力—应变曲线

混凝土单轴受拉的应力—应变曲线方程可按下列公式确定：

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2-27)$$

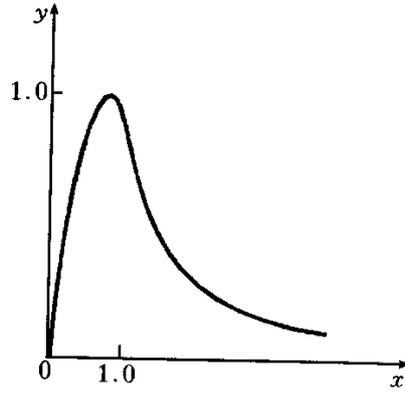


图 2-21 无量纲化混凝土单轴受拉应力-应变关系

式中 $x = \varepsilon / \varepsilon_t$, $y = \sigma / f_t^*$, 见图 2-21;

α_t —单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值, 按表 2-2 取用;

f_t^* —混凝土的单轴抗拉强度 (f_{tk} 、 f_t 等);

ε_t —与 f_t^* 相应的混凝土峰值拉应变, 按表 2-2 取用。

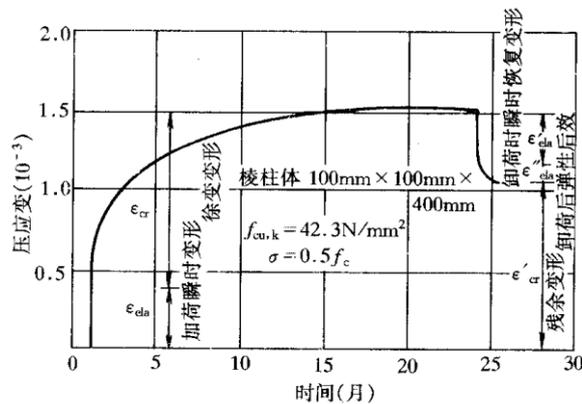
表 2-2 混凝土单轴受拉应力-应变曲线的参数值

$f_t^* (N/mm^2)$	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\varepsilon_t (\times 10^{-6})$	65	81	95	107	118	128	137
α_t	0.31	0.70	1.25	1.95	2.81	3.82	5.00

2.2.3 混凝土的徐变

结构或材料承受的荷载或应力不变, 应变或变形随时间增长的现象称为徐变。

混凝土的徐变特性主要与时间参数有关。混凝土的典型徐变曲线如图 2-27 所示。



2-27 混凝土的徐变

可以看出当对棱柱体试件加载, 应力达到 $0.5f_c$ 时, 其加载瞬间产生的应变为瞬

时应变 ϵ_{ela} 。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 ϵ_{cr} 。一般，徐变开始增长较快，以后逐渐减慢，经过较长时间后就逐渐趋于稳定。徐变应变值约为瞬时应变的 1—4 倍，如图 2-27 所示，两年后卸载，试件瞬时要恢复的一部分应变称为瞬时恢复应变 ϵ'_{ela} ，其值比加载时的瞬时变形略小。当长期荷载完全卸除后，量测会发现混凝土并不处于静止状态，而经过一个徐变的恢复过程 (约为 20d)，卸载后的徐变恢复变形称为弹性后效 ϵ''_{ela} ，其绝对值仅为徐变变形的 1/12 左右。在试件中还有绝大部分应变是不可恢复的，成为残余应变 ϵ'_{cr} 。

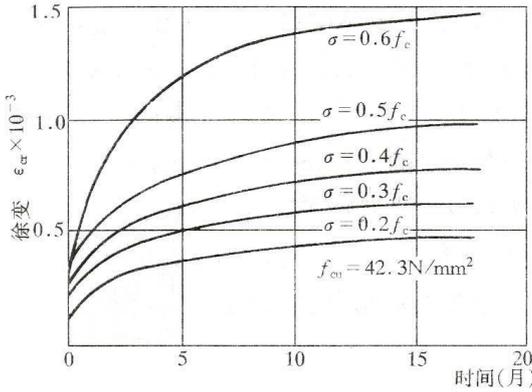


图 2-28 压应力与徐变的关系

试验表明，混凝土的徐变与混凝土的应力大小有着密切的关系。应力越大徐变也越大，随着混凝土应力的增加，混凝土徐变将发生不同的情况。如图 2-28 所示，当混凝土应力较小时 (例如小于 $0.5f_c$)，徐变与应力成正比，曲线接近等间距分布，这种情况称为线性徐变。在线性徐变的情况下，加载初期徐变增长较快，6 个月时，一般已完成徐变的大部分，后期徐变增长逐渐减小，一年以后趋于稳定，一般认为 3 年左右徐变基本终止。

当混凝土应力较大时 (例如大于 $0.5f_c$)，徐变变形与应力不成正比，徐变变形比应力增长要快，称为非线性徐变。在非线性徐变范围内，当加载应力过高时，徐变变形急剧增加不再收敛，呈非稳定徐变的现象，见图 2-29。由此说明，在高应力的作用下可能造成混凝土的破坏。所以，一般取混凝土应力约等于 $0.75f_c - 0.8f_c$ 作为混凝土的长期极限强度。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。

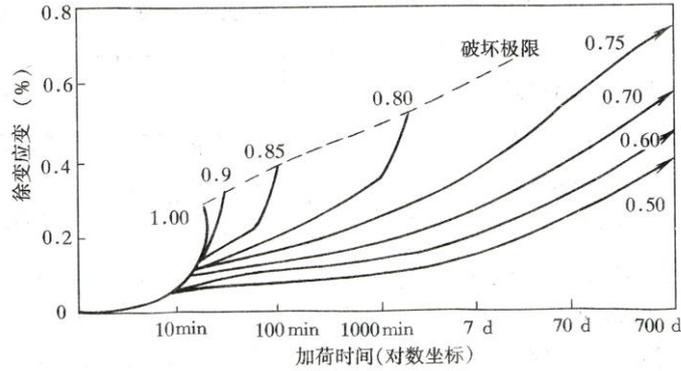


图 2-29 不同应力 / 强度比值的徐变时间曲线

试验还表明，加载时混凝土的龄期越早，徐变越大。此外，混凝土的组成成分徐变也有很大影响。水泥用量越多，徐变越大；水灰比越大，徐变也越大。如图 2-30 所示，骨料弹性性质也明显地影响徐变值，一般，骨料越坚硬，弹性模量越高，对水泥石徐变的约束作用越大，混凝土的徐变越小。

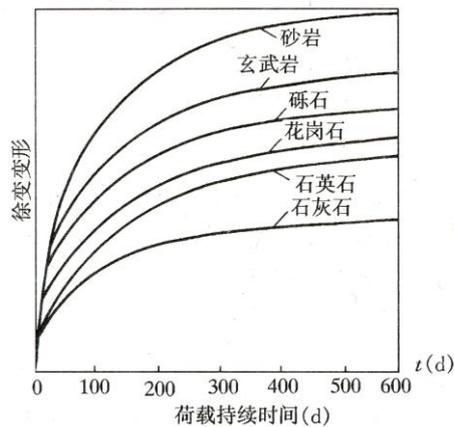


图 2-30 骨料对徐变的影响

此外，混凝土的制作方法、养护条件，特别是养护时的温度和湿度对徐变也有重要影响，养护时温度高、湿度大，水泥水化作用充分，徐变越小。而受到荷载作用后所处的环境温度越高、湿度越低，则徐变越大。构件的形状、尺寸也会影响徐变值，大尺寸试件内部失水受到限制，徐变减小。钢筋的存在等对徐变也有影响。

徐变对混凝土结构和构件的工作性能有很大影响。由于混凝土的徐变，会使构件的变形增加，在钢筋混凝土截面中引起应力重分布。在预应力混凝土结构中会造成预应力损失。

影响混凝土徐变的因素很多，通常认为混凝土产生徐变的原因主要可归结为三个方面：内在因素；环境影响；应力因素。在应力不大的情况下，混凝土凝结硬化后，骨科之间的水泥浆，一部分变为完全弹性结晶体，另一部分是充填在晶体间的

凝胶体，它具有粘性流动的性质，当施加荷载时，在加载的瞬间晶体与凝胶体共同承受荷载。其后，随着时间的推移，凝胶体由于粘性流动而逐渐卸载，此时晶体承受了更多的外力并产生弹性变形。在这个过程中，从水泥凝胶体向水泥晶体应力重新分布，从而使混凝土徐变变形增加。在应力较大的情况下，混凝土内部微裂缝在荷载长期作用下不断发展和增加，也将导致混凝土变形的增加。

2.2.4 混凝土的疲劳性能

混凝土的疲劳是在荷载重复作用下产生的。混凝土在荷载重复作用下引起的破坏称为疲劳破坏。疲劳现象大量存在于工程结构中，钢筋混凝土吊车梁受到重复荷载的作用，钢筋混凝土道桥受到车辆振动的影响以及港口海岸的混凝土结构受到波浪冲击而损伤等都属于疲劳破坏现象。疲劳破坏的特征是裂缝小而变形大，在重复荷载作用下，混凝土的强度和变形有着重要的变化。

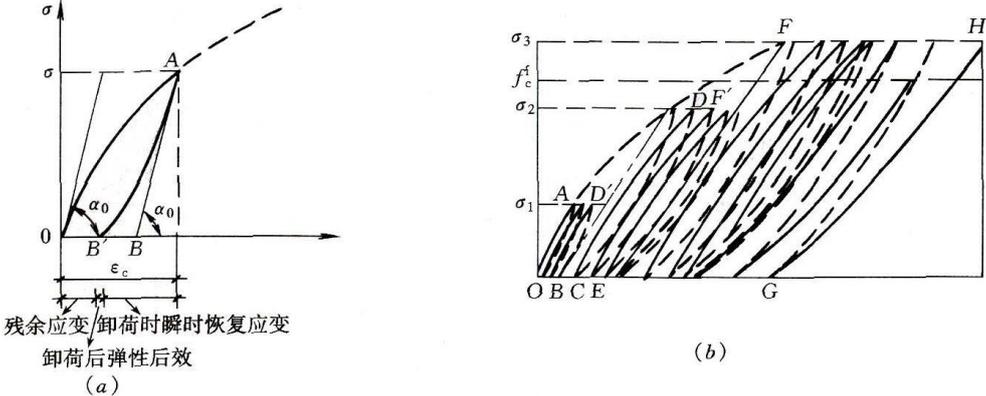


图 2-31 混凝土在重复荷载作用下的应力—应变曲线

图 2-31 是混凝土棱柱体在多次重复荷载作用下的应力—应变曲线。从图中可以看出，对混凝土棱柱体试件，一次加载应力 σ_1 小于混凝土疲劳强度 f^f 时，其加载卸载应力-应变曲线 OAB 形成了一个环状。而在多次加载、卸载作用下，应力-应变环会越来越密合，经过多次重复，这个曲线就密合成一条直线。如果再选择一个较高的加载应力 σ_2 ，但 σ_2 仍小于混凝土疲劳强度 f^f 时，其加卸载的规律同前，多次重复后形成密合直线。如果选择一个高于混凝土疲劳强度 f^f 的加载应力 σ_3 ，开始，混凝土混凝土应力—应变曲线凸向应力轴，在重复荷载过程中逐渐凸向应变轴，以致加卸载不能形成封闭环，这标志着混凝土内部微裂缝的发展加剧趋近破坏。随着重复荷载次数的增加，应力—应变曲线倾角不断减小，至荷载重复到某一定次数时，

混凝土试件会因严重开裂或变形过大而导致破坏。

混凝土的疲劳强度用疲劳试验测定。疲劳试验采用 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 300\text{mm}$ 或 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 450\text{mm}$ 的棱柱体,把能使棱柱体试件承受 200 万次或其以上循环荷载而发生破坏的压应力值称为混凝土的疲劳抗压强度。

施加荷载时的应力大小是影响应力—应变曲线不同的发展和变化的关键因素,即混凝土的疲劳强度与重复作用时应力变化的幅度有关。在相同的重复次数下,疲劳强度随着疲劳应力比值的减小而增大。疲劳应力比值 ρ_c^f 按下式计算:

$$\rho_c^f = \frac{\sigma_{c,\min}^f}{\sigma_{c,\max}^f} \quad (2-27)$$

式中 $\sigma_{c,\min}^f$ 、 $\sigma_{c,\max}^f$ — 构件疲劳验算时,截面同一纤维上的混凝土最小应力及最大应力。

2.2.6 混凝土的收缩与膨胀

混凝土凝结硬化时,在空气中体积收缩,在水中体积膨胀。通常,收缩值比膨胀值大很多。

混凝土收缩随着时间增长而增加,收缩的速度随着时间的增长而逐渐减缓。一般在 1 个月内就可完成全部收缩量的 50%,3 个月后增长缓慢,2 年后趋于稳定,最终收缩量约为 $(2-5)\times 10^{-4}$ 。

混凝土收缩主要是由于干燥失水和碳化作用引起的。混凝土收缩量与混凝土的组成有密切的关系。水泥用量愈多,水灰比愈大,收缩愈大;骨料愈坚实(弹性模量愈高),更能限制水泥浆的收缩;骨料粒径愈大,愈能抵抗砂浆的收缩,而且在同一稠度条件下,混凝土用水量就愈少,从而减少了混凝土的收缩。

由于干燥失水引起混凝土收缩,所以养护方法、存放及使用环境的温湿度条件是影响混凝土收缩的重要因素。在高温下湿养时,水泥水化作用加快,使可供蒸发的自由水分较少,从而使收缩减小;使用环境温度越高,相对湿度越小,其收缩越大。

混凝土的收缩对于混凝土结构起着不利的影晌。在钢筋混凝土结构中,混凝土往往由于钢筋或相邻部件的牵制而处于不同程度的约束状态,使混凝土因收缩产生拉应力,从而加速裂缝的出现和开展。在预应力混凝土结构中,混凝土的收缩导致

预应力的损失。对跨度变化比较敏感的超静定结构(如拱),混凝土收缩将产生不利的内力。

影响混凝土收缩的因素有:

- (1)水泥的品种:水泥强度等级越高制成的混凝土收缩越大。
- (2)水泥的用量:水泥越多,收缩越大;水灰比越大,收缩也越大。
- (3)骨料的性质:骨料的弹性模量大,收缩小。
- (4)养护条件:在结硬过程中周围温、湿度越大,收缩越小。
- (5)混凝土制作方法:混凝土越密实,收缩越小。
- (6)使用环境:使用环境温度、湿度大时,收缩小。
- (7)构件的体积与表面积比值:比值大时,收缩小。

混凝土的膨胀往往是有利的,故一般不予考虑。

混凝土的温度线膨胀系数随骨料的性质和配合比不同而略有不同,以每摄氏度计,约为 $(1.0-1.5)\times 10^{-5}$,《规范》取为 1.0×10^{-5} 。它与钢的线膨胀系数(1.2×10^{-5})相近。因此,当温度发生变化时,在混凝土和钢筋之间仅引起很小的内应力,不致产生有害的影响。

2.3 混凝土与钢筋的粘结

2.3.1 粘结的两个问题

钢筋和混凝土这两种材料能够结合在一起共同工作,除了二者具有相近的线膨胀系数外,更主要的是由于混凝土硬化后,沿着钢筋长度钢筋与混凝土之间产生了良好的粘结。钢筋端部与混凝土的粘结称为锚固。为了保证钢筋不被从混凝土拔出或压出,还要求钢筋有良好的锚固。粘结和锚固是钢筋和混凝土形成整体、共同工作的基础。

钢筋混凝土受力后会沿钢筋和混凝土接触面上产生剪应力,通常把这种剪应力称为粘结应力。若构件中的钢筋和混凝土之间既不粘结,钢筋端部也不加锚具,在荷载作用下,钢筋与混凝土就不能共同受力。

钢筋端部加弯钩、弯折,或在锚固区贴焊短钢筋、贴焊角钢等,可以提高锚固能力。光圆钢筋末端均需设置弯钩。

粘结作用可以用图 2-32 所示的钢筋和其周围混凝土之间产生的粘结应力来说明。根据受力性质的不同,钢筋与混凝土之间的粘结应力可分为裂缝间的局部粘结

应力(局部粘结)和钢筋端部的锚固粘结应力(锚固粘结)两种。

裂缝间的局部粘结应力(局部粘结)。它是在相邻两个开裂截面之间产生的，钢筋应力的变化受到粘结应力的影响，粘结应力使相邻两个裂缝之间混凝土参与受拉。局部粘结应力的丧失会影响构件的刚度的降低和裂缝的开展。

钢筋端部的锚固粘结应力(锚固粘结)。钢筋伸进支座或在连续梁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粘结力，否则，将发生锚固破坏。

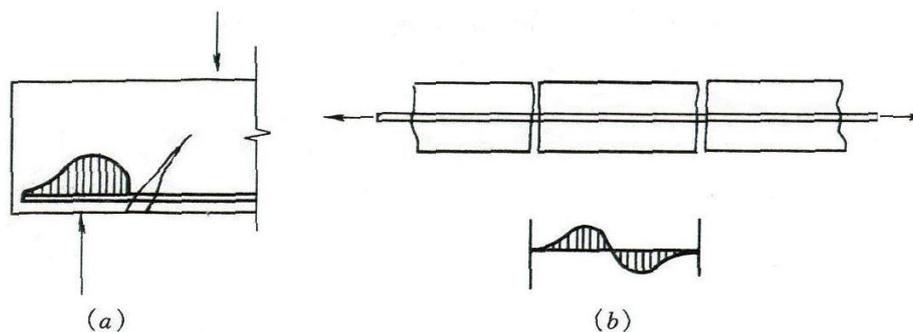


图 2-32 钢筋和混凝土之间的两种粘结示意图

(a)锚固粘结；(b)局部粘结

2.3.2 粘结力的组成及其影响因素

1. 粘结力的组成

光圆钢筋与变形钢筋具有不同的粘结机理。

光圆钢筋与混凝土的粘结作用主要由三部分组成：

(1)钢筋与混凝土接触面上的化学吸附作用力(胶结力)。这种吸附作用力来自浇注时水泥浆体对钢筋表面氧化层的渗透以及水化过程中水泥晶体的生长和硬化。这种吸附作用力一般很小，仅在受力阶段的局部无滑移区域起作用。当接触面发生相对滑移时，该力即消失。

(2)混凝土收缩握裹钢筋而产生摩阻力。摩阻力是由于混凝土凝固时收缩，对钢筋产生垂直于摩擦面的压应力。这种压应力越大，接触面的粗糙程度越大，摩阻力就越大。

(3)钢筋表面凹凸不平与混凝土之间产生的机械咬合作用力(咬合力)。对于光圆钢筋，这种咬合力来自表面的粗糙不平。

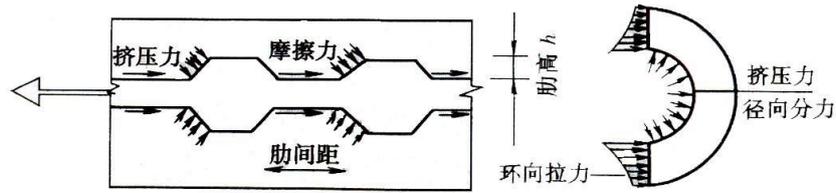


图 2-33 变形钢筋和混凝土之间的机械咬合作用

变形钢筋与混凝土之间有机械咬合作用，改变了钢筋与混凝土间相互作用的方式，显著提高了粘结强度。对于变形钢筋，咬合力是由于变形钢筋肋间嵌入混凝土而产生的。虽然也存在胶结力和摩擦力，但变形钢筋的粘结主要来自钢筋表面凸出的肋与混凝土的机械咬合作用。变形钢筋的横肋对混凝土的挤压如同一个楔，会产生很大的机械咬合力，从而提高了变形钢筋的粘结能力(图 2-33)。

光圆钢筋和变形钢筋的粘结机理的主要差别是，光面钢筋粘结力主要来自胶结力和摩阻力，而变形钢筋的粘结力主要来自机械咬合力作用。

2.影响粘结力的因素

影响粘结力的因素有很多，主要有钢筋表面形状、混凝土强度、浇筑位置、保护层厚度、钢筋净间距、横向钢筋和横向压力等。

变形钢筋的粘结力比光圆钢筋大。试验表明，变形钢筋的粘结力比光圆钢筋高出 2—3 倍。因而变形钢筋所需的锚固长度比光圆钢筋短。试验还表明，月牙纹钢筋的粘结力比螺纹钢筋的粘结力低 10%—15%。

粘结力与浇筑混凝土时钢筋所处的位置有明显的关系。对于混凝土浇筑深度超过 300mm 以上的顶部水平钢筋，其底面的混凝土由于水分、气泡的逸出和泌水下沉，与钢筋之间形成了空隙层，从而削弱了钢筋与混凝土之间的粘结作用。

混凝土保护层和钢筋间距对于粘结力也有重要的影响。对于高强度的变形钢筋，当混凝土保护层太薄时，外围混凝土将可能发生径向劈裂而使粘结力降低；当钢筋净距太小时，将可能出现水平劈裂而使整个保护层崩落，从而使粘结力显著降低。

横向钢筋(如梁中箍筋)可以延缓径向劈裂裂缝的发展和限制劈裂裂缝的宽度，从而可以提高粘结力。因此，在较大直径钢筋的锚固或搭接长度范围内，以及当一层并列的钢筋根数较多时，均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。

当钢筋的锚固区作用有测向压应力时，粘结力将会提高。

2.3.3 保证可靠粘结的构造措施

1. 保证粘结的构造措施

由于粘结破坏机理复杂，影响粘结力的因素多，工程结构中粘结受力的多样性，目前尚无比较完整的粘结力计算理论。《混凝土结构设计规范》采用不进行粘结计算，用构造措施来保证混凝土与钢筋粘结的方法。

保证粘结的构造措施有如下几个方面。

(1) 对不同等级的混凝土和钢筋，要保证最小搭接长度和锚固长度；

(2) 为了保证混凝土与钢筋之间有足够的粘结，必须满足钢筋最小间距和混凝土保护层最小厚度的要求；

(3) 在钢筋的搭接接头范围内应加密箍筋；

(4) 为了保证足够的粘结，在钢筋端部应设置弯钩。

此外，在浇注大深度混凝土时，为防止在钢筋底面出现沉淀收缩和泌水，形成疏松空隙层，削弱粘结，对高度较大的混凝土构件应分层浇筑或二次浇捣。

钢筋表面粗糙程度影响摩擦阻力，从而影响粘结强度。轻度锈蚀的钢筋，其粘结强度比新轧制的无锈钢筋要高，比除锈处理的钢筋更高。所以，一般除重锈钢筋外，可不必除锈。

2. 基本锚固长度

钢筋受拉会产生向外的膨胀力，这个膨胀力导致拉力传送到构件表面。为了保证钢筋与混凝土之间有可靠的粘结，钢筋必须有一定的锚固长度。钢筋的基本锚固长度取决于钢筋强度及混凝土抗拉强度，并与钢筋的外形有关。为了充分利用钢筋的抗拉强度，《混凝土结构设计规范》规定纵向受拉钢筋的锚固长度作为钢筋的基本锚固长度 l_a ，它与钢筋强度、混凝土强度、钢筋直径及外形有关，可按式(5-27)计算。

钢筋的锚固可采用机械锚固的形式。机械锚固的形式见图 5-34 所示，主要有弯钩、贴焊钢筋及焊锚板等。

采用机械锚固可以提高钢筋的锚固力，因此可以减少锚固长度。《混凝土结构设计规范》规定的锚固长度修正系数(折减系数)为 0.7，同时要有相应的配箍直径、间距及数量等构造措施。

3. 钢筋的搭接

钢筋长度不够时，或需要采用施工缝或后浇带等构造措施时，钢筋就需要搭接。搭接是指将两根钢筋的端头在一定长度内并放，并采用适当的连接将一根钢筋的力

传给另一根钢筋。力的传递可以通过各种连接接头实现。由于钢筋通过连接接头传力总不如整体钢筋，所以钢筋搭接的原则是：接头应设置在受力较小处，同一根钢筋上应尽量少设接头，机械连接接头能产生较牢固的连接力，所以应优先采用机械连接。受拉钢筋绑扎搭接接头的搭接长度按下式计算：

$$l_l = \zeta l_a \quad (2-28)$$

式中， ζ 为受拉钢筋搭接长度修正系数，它与同一连接区段内搭接钢筋的截面面积有关，详见表 5-3。

对于受压钢筋的搭接接头及焊接骨架的搭接，也应满足相应的构造要求，以保证力的传递。

思考题

2.1 软钢和硬钢的应力-应变曲线有何不同？二者的强度取值有何不同？了解钢筋的应力-应变曲线的数学模型。

2.2 我国建筑结构用钢筋的品种有哪些？并说明各种钢筋的应用范围。

2.3 钢筋冷加工的方法有哪几种？冷拉和冷拔后钢筋的力学性能有何变化？

2.4 钢筋混凝土结构对钢筋的性能有哪些要求？

2.5 混凝土立方抗压强度 $f_{cu,k}$ 、轴心抗压强度 f_{ck} 和抗拉强度 f_{tk} 是如何确定的？为什么 f_{ck} 低于 $f_{cu,k}$ ？ f_{tk} 与 $f_{cu,k}$ 有何关系？ f_{ck} 与 $f_{cu,k}$ 有何关系？

2.6 混凝土的强度等级根据什么确定的？我国《混凝土结构设计规范》规定的混凝土强度等级有哪些？

2.7 某方形钢筋混凝土短柱浇筑后发现混凝土强度不足，根据约束混凝土原理如何加固该柱。

2.8 单向受力状态下，混凝土的强度与哪些因素有关？混凝土轴心受压应力-应变曲线有何特点？常用的表示应力-应变关系的数学模型有哪几种？

2.9 混凝土的变形模量和弹性模量是怎么样确定的？

2.10 什么是混凝土疲劳破坏？疲劳破坏时应力-应变曲线有何特点？

2.11 什么是混凝土的徐变？徐变对混凝土构件有何影响？通常认为影响徐变的主要因素有哪些？如何减少徐变？

2.12 什么是混凝土的线性徐变？什么是混凝土的非线性徐变？

2.13 混凝土收缩对钢筋混凝土构件有何影响？收缩与哪些因素有关？如何减少

收缩？

2.14 什么是钢筋和混凝土之间的粘结力？粘结力的组成有哪些？影响钢筋和混凝土粘结力的主要因素有哪些？为保证钢筋和混凝土之间有足够的粘结力要采取哪些措施？