



第1章 绪论

学习目标：

- (1) 理解混凝土结构形成机理，钢筋和混凝土共同工作的原因；
- (2) 熟悉混凝土结构的特点、发展和应用；
- (3) 理解本课程的特点和学习方法。

1.1 混凝土结构的基本概念和特点

1.1.1 混凝土结构的基本概念

以混凝土为主要材料制作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、预应力混凝土结构等。素混凝土结构是指无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构，常用于路面和非承重结构；钢筋混凝土结构是指配置受力钢筋、钢筋网或者钢筋骨架的混凝土结构；预应力混凝土结构是指配置受力的预应力钢筋，通过张拉或其他方法建立预应力的混凝土结构。混凝土结构广泛应用于工业与民用建筑、桥梁、隧道、矿井水利的港口等工程中。

钢筋和混凝土是土木工程中重要的建筑材料，钢筋的抗拉和抗压强度都很高，破坏时表现出良好的变形能力，但价格也相对较高；混凝土的抗压强度较高，但抗拉强度却很低。为了充分发挥材料的性能，将钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式有机地结合在一起共同工作，使钢筋主要承受拉力，混凝土主要承受压力，这就组成了钢筋混凝土。

图 1-1(a)所示为一素混凝土简支梁，由试验可知，在集中力和梁自身重力的作用下，梁截面上部受压，下部受拉。由于混凝土抗拉强度很低，只要梁的跨中附近截面的受拉边缘混凝土一开裂，梁就会突然断裂而破坏，破坏前变形很小，承载力很低，属于脆性破坏类型。如果在梁的底部受拉区配置适量的受力钢筋，如图 1-1(b)所示，形成钢筋混凝土梁，当荷载增加到一定值时，梁的受拉区混凝土仍会开裂，但钢筋可代替混凝土承受拉力，裂缝不会迅速发展，且梁的承载能力还会继续提高。梁在较大荷载作用下才会破坏，破坏时钢筋的应力达到屈服强度，受压区混凝土的抗压强度也能得到充分发挥。破坏前，变形较大，有明显的破坏预兆，属于延性破坏类型。因此，在混凝土中配置一定形式和数量的钢筋形成钢筋混凝土构件后，可以使构件的承载能力和变形能力都有很大的提高，钢筋和混凝土



两种材料的强度也得到了较充分的利用。

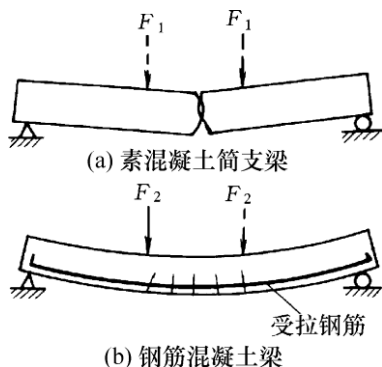


图 1-1 素混凝土简支梁与钢筋混凝土梁

钢筋和混凝土是两种物理、力学性能很不相同的材料，它们能够有效地结合在一起共同工作，主要原因如下：

(1) 混凝土硬化后，能与钢筋牢固地黏结在一起，相互传递内力。黏结力是这两种不同性质的材料能够共同工作的基础。

(2) 钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数接近。钢筋的线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，混凝土的线膨胀系数为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，两者数值相近，因此，当温度变化时，钢筋和混凝土之间不会产生较大的相对变形而导致黏结力破坏。

1.1.2 混凝土结构的特点

1. 钢筋混凝土结构的优点

钢筋混凝土结构在土木工程中应用广泛，主要有下列优点。

(1) 就地取材。砂、石是混凝土的主要成分，均可就地取材。另外，还可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废料。

(2) 耐久性和耐火性好。在一般环境下，钢筋受到混凝土保护而不易发生锈蚀，因而提高了结构的耐久性。当火灾发生时，钢筋混凝土结构不会像木结构那样被燃烧，也不会像钢结构那样很快达到软化温度而破坏。

(3) 可模性(也称可塑性)好。钢筋混凝土结构可根据需要浇筑成各种形状和尺寸。

(4) 整体性好。现浇或装配整体式的钢筋混凝土结构具有很好的整体性，并且通过合适的配筋可获得较好的延性，有利于抗震、防爆。

2. 钢筋混凝土结构的缺点

但是，钢筋混凝土结构也存在一些缺点，主要有以下几项。

(1) 自重。与钢结构相比，混凝土结构的自身重力较大，不利于建造大跨度结构及超高层建筑。

(2) 抗裂性差。普通混凝土结构在正常使用阶段一般是带裂缝工作的。裂缝过宽会影响结构的耐久性和应用范围，采用预应力混凝土可较好地解决开裂问题。

此外，混凝土结构施工工序复杂，周期较长，受季节和天气的影响较大。新旧混凝土



结构不易形成整体。混凝土结构一旦发生破坏，修补和加固比较困难。

1.2 混凝土结构的发展概况

混凝土结构是在 19 世纪中期开始得到应用的，与砌体结构、木结构和钢结构相比，混凝土结构具有更多的优点，使其在各个方面的应用发展很快，随着各种高性能混凝土材料和新型结构形式不断涌现，混凝土必将是我国今后相当长时期内一种重要的工程结构材料。

1.2.1 混凝土结构的发展过程

混凝土结构的发展，大体上可分为三个阶段：

第一阶段：从混凝土发明到 20 世纪初，是混凝土结构发展的初级阶段。这一阶段采用的钢筋和混凝土的强度都很低，主要用于建造梁、板、柱和基础等简单构件。其计算理论套用弹性理论，采用容许应力设计方法。

第二阶段：从 20 世纪初到第二次世界大战。钢筋和混凝土的强度有所提高，发明了预应力混凝土，钢筋混凝土被用于建造大跨度结构。同时，开始进行混凝土结构的试验研究，计算理论开始考虑材料的塑性性能，提出了极限状态设计法。

第三阶段：从第二次世界大战至今。随着高强度混凝土和高强度钢筋的广泛应用，以及计算机技术和施工机械的发展，大型的钢筋混凝土结构，如超高层建筑、大跨度桥梁、高耸结构、地铁工程、高速铁路、跨海隧道等不断涌现。计算理论已充分考虑材料的塑性性能，提出了以概率理论为基础的极限状态设计法。

用钢筋混凝土建造具有代表性的工程有：马来西亚吉隆坡的 88 层的石油双塔楼，高度为 450m；上海金茂大厦共 88 层，高度为 420m，主体为钢筋混凝土结构，其中部分柱是型钢混凝土柱；上海环球金融中心 101 层，高度为 492m；加拿大多伦多的预应力混凝土电视塔高达 549m，是代表性的预应力混凝土构筑物；上海东方明珠电视塔高度为 415m，主体为混凝土结构；美国西雅图金群体育馆，薄壳结构，屋顶为圆球壳，跨度达 202m；世界上最高的混凝土重力坝是瑞士狄克桑斯大坝，坝高为 285m，坝顶宽为 15m，坝底宽为 225m，坝长 695m；长江三峡水利枢纽工程是世界上最大的水利工程，混凝土大坝高达 186m，坝体混凝土用量达 $1527 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1.2.2 材料

1. 高性能混凝土

高性能混凝土具有高强度、高耐久性、高流动性及高抗渗透性等优点，是今后混凝土材料的重要发展方向。提高混凝土的强度是发展高层建筑、高耸结构和大跨度结构的重要措施。目前，美国已制成 C200 的混凝土，我国已制成 C100 的混凝土，高强混凝土的缺点是延性差，但采用高强混凝土可以减少构件截面尺寸，减轻自重，同时具有良好的耐久性。

2. 纤维混凝土

在普通混凝土中掺入适量的各种纤维材料而形成纤维增强混凝土，其抗拉、抗剪、抗





折强度和抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗震等性能均有较大提高。目前应用较多的纤维材料有钢纤维、玻璃纤维、碳纤维、合成纤维等。

1.2.3 结构

混凝土结构广泛应用于工业与民用建筑、道路桥梁、水利水电、地下工程以及核电工程等,随着轻质高强材料的使用,以及高层建筑、超高层建筑和大跨度结构的不断涌现,钢-钢筋混凝土组合结构和预应力混凝土结构的应用越来越广泛。

近年来,钢板与混凝土、钢板与钢筋混凝土或型钢与混凝土组成的钢-混凝土组合结构得到迅速发展应用。如钢板混凝土用于地下结构和混凝土结构加固,压型钢板-混凝土板用于楼板,型钢与混凝土组合而成的组合梁用于楼盖和桥梁,外包钢混凝土柱用于电站主厂房等。这些高性能新型组合结构具有充分利用材料强度、较好的适应变形能力(延性)、施工简单等特点,从而大大拓宽了钢筋混凝土结构的应用范围,使得大跨度结构、高层建筑、高耸结构和具备某种特殊功能的钢筋混凝土结构的建造成为可能。

19世纪80年代提出了预应力混凝土概念,预应力混凝土结构克服了普通混凝土结构抗裂性差、自重大的缺点。结构构件在施加预应力后可延缓裂缝的出现,减少裂缝的宽度,提高构件截面刚度,可以建造大跨度结构。水平构件采用预应力混凝土,可减少截面尺寸,减轻构件自重、降低综合造价等。

1.2.4 计算理论

从把材料看作弹性体的容许应力设计方法,发展为考虑材料塑性的极限强度理论,并迅速发展成按极限状态设计的理论体系。目前在工程结构设计中已采用基于概率论和数理统计分析的极限状态设计方法。

计算机在混凝土结构分析中的应用以及现代试验和测试技术的研究,人们可以利用非线性的分析方法对各种复杂混凝土结构进行全过程受力模拟,使得混凝土结构的计算理论和设计方法向更高的阶段发展,并日趋完善。结构分析可以根据结构类型、构件布置、材料性能和受力特点,选用线弹性分析方法、考虑塑性内力重分布的分析方法、塑性极限分析方法、非线性分析方法和实验分析方法等。

在混凝土结构耐久性设计方面,已建立了相关的材料性能劣化计算模型进行结构使用年限的定量计算,并基于混凝土在环境作用(碳化、氯盐、冻融、酸腐蚀)下的损伤机理,提出了结构设计应采取的防护措施。

1.3 本课程的特点与学习方法

本课程是土木工程专业重要的专业基础课程,主要是对建筑工程中混凝土结构构件的受力性能、计算方法和构造要求等问题进行讨论。首先介绍混凝土结构的材料性能,这是学习后续章节的基础;接着对各种钢筋混凝土构件的受力性能、设计计算方法及配筋构造进行讨论,如受弯构件正截面的承载力计算、斜截面的承载力计算,受扭构件的承载力计算,受压和受拉构件的承载力计算,受弯构件变形和裂缝宽度的验算,以及预应力混凝土



构件的计算等。

在学习混凝土结构设计原理课程时，应该注意以下几点。

(1) 钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种力学性能不同的材料组成。为了对混凝土结构的受力性能与破坏特征有较好的了解，首先要求对钢筋和混凝土的力学性能有很好的认识。

(2) 钢筋混凝土材料的力学特性及构件的计算方法比较复杂，难以用力学模型和数学模型来严谨地推导建立。因此，目前钢筋混凝土结构的计算公式常常是在大量试验研究的基础上用统计分析方法得出的半理论半经验公式。学习时应注意每一理论的适用范围和条件，而且能在实际工程设计中正确运用这些理论和公式。

(3) 学习本课程是为了在工程建设中进行混凝土结构设计，主要包括整体方案、材料选择、截面形式、配置钢筋、构造措施等。结构设计是一个综合问题，要求做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。同一构件在相同的荷载作用下，可以有不同的截面形式、尺寸、配筋方法和配筋数量，设计时需要进行综合分析，结合具体情况确定最佳方案，以获得良好的技术经济效果。

(4) 在本课程的学习中，有关基本理论的应用最终都要落实到规范的具体规定中。规范反映了国内外混凝土结构的研究成果和工程经验，是理论与实践的高度总结，体现了该学科在一个时期的技术水平。对于规范特别是其规定的强制性条文，设计人员一定要遵循，并能熟练应用。本课程涉及的规范主要有《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)。

本章小结

(1) 钢筋混凝土结构是把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，使钢筋主要承受拉力，混凝土主要承受压力，充分发挥了两种材料的各自优点。构件的承载力大大提高，构件的受力性能得到显著改善。

(2) 钢筋和混凝土共同工作的主要原因有两点：一是钢筋和混凝土之间存在黏结力，使两者之间能传递力和变形；二是两种材料之间的温度线膨胀系数接近。

(3) 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)条文是设计中必须遵守的带有法律性的技术文件，遵守设计规范的目的是使设计方法达到统一化和标准化。

思考题

1. 什么是混凝土结构？配筋的主要作用和要求是什么？
2. 钢筋和混凝土这两种不同材料能够有效结合在一起工作的主要原因是什么？
3. 钢筋混凝土结构的优缺点是什么？
4. 试简述混凝土结构计算理论的发展过程。
5. 本课程主要包括哪些内容？学习本课程需要注意哪些问题？





第 2 章 混凝土结构材料的物理力学性能

学习目标:

- (1) 熟悉钢筋的品种、级别及其性能,掌握钢筋的选用原则;
- (2) 理解混凝土在各种受力状态下的强度和变形性能,掌握混凝土的选用原则;
- (3) 理解钢筋与混凝土黏结的重要性和机理,熟悉钢筋和混凝土协同工作的构造措施。

2.1 钢 筋

2.1.1 钢筋的品种和级别

混凝土结构中使用的钢筋按化学成分可分为碳素钢和普通低合金钢两大类。碳素钢中铁元素是主要成分,此外还含有少量的碳、硅、锰、硫、磷等元素。其力学性能与含碳量有关,碳素钢可分为低碳钢(含碳量少于 0.25%)、中碳钢(含碳量为 0.25%~0.6%)、高碳钢(含碳量为 0.6%~1.4%),含碳量越高,强度越高,但塑性和可焊性越低。

普通低合金钢除含有碳素钢已有的成分外,再加入一定量的硅、锰、钛、钒、铬等合金元素,这样既可以有效提高钢筋的强度,又可以改善钢筋的塑性性能。

由于我国的钢材产量和用量巨大,为节约低合金资源,我国冶金行业近年来研制开发出新型细晶粒带肋钢筋,这种钢筋不需要添加或只需添加很少的合金元素,通过控制轧钢的温度形成细晶粒的金相组织,其外形与普通热轧带肋钢筋外形相同,其强度和延性完全能满足混凝土结构对钢筋性能的要求。

按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的规定,我国常用的钢筋品种有热轧钢筋、钢绞线、预应力钢丝(中强度钢丝、消除应力钢丝)、预应力螺纹钢筋等,见附录 A 中的附表 A.1 和附表 A.3。

热轧钢筋是低碳钢、普通低合金钢或细晶粒钢在高温状态下轧制而成的软钢,其应力-应变曲线有明显的屈服点和流幅,断裂时有“颈缩”现象,伸长率比较大。热轧钢筋按照强度的高低可分为 HPB300 级(符号 Φ)、HRB335 级(符号 Φ)、HRBF335 级(符号 Φ^F)、HRB400 级(符号 Φ)、HRBF400 级(符号 Φ^F)、RRB400 级(符号 Φ^R)、HRB500 级(符号 Φ)和 HRBF500 级(符号 Φ^F)。其中 HPB300 钢筋为光圆钢筋,属低碳钢,强度较低,与混凝土的黏结强度也较低。HRB335 级、HRB400 级、HRB500 级为普通低合金热轧月牙纹变形钢筋,HRBF335 级、



HRBF400 和 HRBF500 级为细晶粒热轧月牙纹变形钢筋, RRB400 级为余热处理月牙纹变形钢筋。热轧钢筋的外形如图 2-1 所示。余热处理钢筋是由轧制的钢筋经高温淬火、余热回温处理后得到的, 其强度提高, 但塑性、韧性、可焊性、机械连接性能和施工适用性有所降低, 一般可用于对变形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。

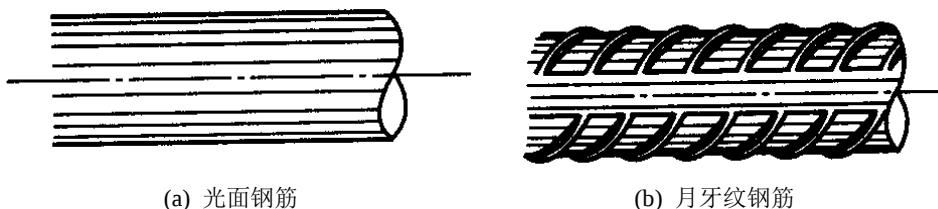


图 2-1 热轧钢筋的外形

钢绞线、预应力钢丝(中强度钢丝、消除应力钢丝)、预应力螺纹钢筋是用于预应力混凝土结构中的预应力筋。钢绞线是由若干根直径相同的高强钢丝捻绕在一起, 常用的有 1×7 (7 股)和 1×3 (3 股)等, 抗拉强度可达 1960MPa , 直径可达 21.6mm 。预应力螺纹钢筋又称精轧螺纹粗钢筋, 是在整根钢筋上轧有外螺纹的大直径、高强度、高尺寸精度的直条钢筋。抗拉强度为 $980\sim 1260\text{MPa}$, 可用螺丝套筒连接或螺帽锚固。

2.1.2 钢筋的强度与变形

1. 钢筋的应力-应变关系

钢筋按单向受拉时的应力-应变曲线的特点可分为有明显流幅的钢筋和无明显流幅的钢筋两大类。

1) 有明显流幅的钢筋

有明显流幅的钢筋的应力-应变曲线如图 2-2 所示。从图中可以看到, 应力值在 A 点以前, 应力应变呈线弹性变化关系, A 点所对应的应力为比例极限。过 A 点后, 应变增速略大于应力增速, 到达 B' 点后钢筋开始出现塑性流动现象, B' 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' 是不稳定的。待应力值降至屈服下限 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, 随着应变的增加, 应力有所增加, 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 段曲线称为钢筋的强化阶段。 D 点之后, 在试件薄弱位置产生颈缩现象, 断面缩小, 应力降低, 到达 E 点时试件被拉断。 DE 段曲线称为破坏段。

有明显屈服点的钢筋有两个强度指标: 一个是 B 点对应的屈服强度, 它是确定钢筋强度设计值的依据; 另一个强度指标是 D 点对应的极限强度, 一般情况下作为材料的实际破坏强度。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较大的变形和过宽的裂缝, 以致不能使用, 所以在钢筋混凝土构件计算中, 一般取钢筋的屈服强度作为构件破坏时的强度计算指标。





2) 无明显流幅的钢筋

无明显流幅的钢筋有预应力处理所用的钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋等。

无明显屈服点钢筋拉伸的典型应力-应变曲线如图 2-3 所示。由图 2-3 可以看出, 钢筋没有明显的流幅, 塑性变形大为减少。当到达极限强度后, 同样由于钢筋的颈缩现象出现下降段。

对没有明显流幅或屈服点的钢筋, 在设计中极限抗拉强度不能作为钢筋强度取值的依据, 通常取相应于残余应变 0.2% 所对应的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为其假定的屈服点, 称为条件屈服强度。根据试验结果, $\sigma_{0.2}$ 大致相当于极限抗拉强度的 0.8~0.9 倍。实际工程中为简化计算, 可以取 $\sigma_{0.2} = 0.85\sigma_b$ 。

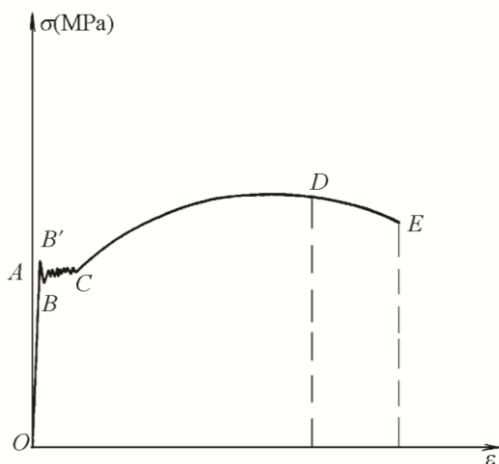


图 2-2 有明显流幅钢筋的应力-应变曲线

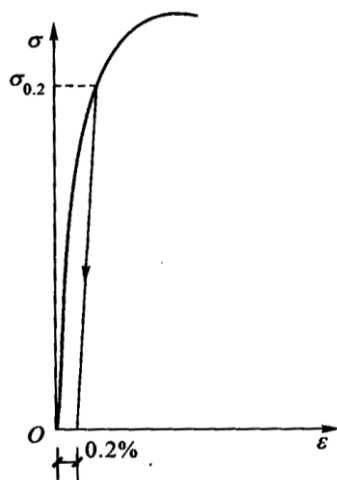


图 2-3 无明显流幅钢筋的应力-应变曲线

2. 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变形能力。通常用均匀伸长率和冷弯性能两个指标衡量钢筋的塑性。

1) 伸长率

(1) 断后伸长率。

钢筋拉断后的伸长值与原长的比率称为钢筋的断后伸长率。伸长率越大塑性越好。

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

式中: l_0 ——钢筋拉伸前的标距长度, 一般可取 $l_0 = 5d$ (d 为钢筋直径) 或 $l_0 = 10d$, 相应的断后伸长率可表示为 δ_5 或 δ_{10} ;

l ——试件经拉断并重新拼合后测量断口两侧的标距, 即产生残留伸长后的标距。

断后伸长率只能反映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。一方面, 对同一钢筋, 当测量标距长度 l_0 取值较小时, 所得的伸长率 δ 数值较大; 另一方面, 断后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, 测量钢筋拉断后的标距长度时需将拉断的两段钢筋对合后再测量, 也容易产生人为误差。因此,





近年来国际上已采用钢筋最大力下的总伸长率(均匀伸长率) δ_{gt} 来表示钢筋的变形能力。

(2) 钢筋最大力下的总伸长率

如图 2-4 所示,钢筋在达到最大应力 σ_b 时的变形包括塑性残余变形和弹性变形两部分,故最大力下的总伸长率 δ_{gt} 可用下式表示:

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

式中: L_0 ——试验前的原始标距(不包括颈缩区);

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。

上式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。

δ_{gt} 既能反映钢筋的残余变形,又能反映钢筋的弹性变形,量测结果受原始标距的影响较小,也不易产生人为误差。因此《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)采用 δ_{gt} 来统一评定钢筋的塑性性能。

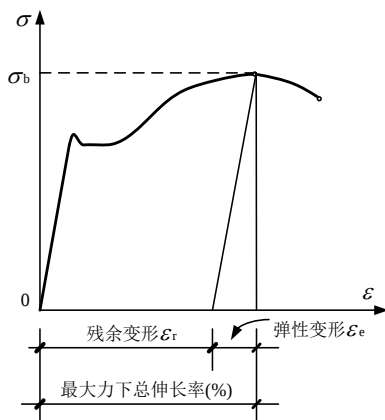


图 2-4 钢筋最大力下的总伸长率

2) 冷弯性能

冷弯是将直径为 d 的钢筋绕直径为 D 的弯芯弯曲到规定的角度后,不出现裂纹、断裂及起层现象,即认为钢筋的冷弯性能符合要求。通常弯芯的直径 D 越小, α 值越大,说明钢筋的冷弯性能越好。

国家标准规定了普通钢筋及预应力筋在最大力下的总伸长率不应小于限值 δ_{gt} ,见本书附录 A 中的表 A.5;也规定了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。

总之,伸长率越大,钢筋的塑性性能越好,破坏时有明显的拉断预兆。钢筋的冷弯性能较好,构件破坏时不易发生脆断,因此,对钢筋品种的选择,应考虑强度和塑性两方面要求。对有明显屈服点的钢筋,其检验指标为屈服强度、极限抗拉强度、伸长率和冷弯性能四项。对无明显屈服点的钢筋,其检验指标为极限抗拉强度、伸长率和冷弯性能三项。



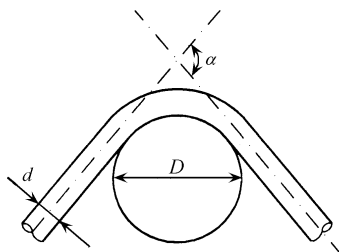


图 2-5 钢筋的冷弯试验

2.1.3 钢筋的疲劳

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,发生突然的脆性断裂现象。这种现象称为钢筋的疲劳破坏。吊车梁、桥梁、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。

钢筋疲劳断裂的原因,一般认为是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。因此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。

钢筋的疲劳试验有两种方法:一种是直接进行单根原状钢筋轴向拉伸试验;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具有离散性。我国采用直接做单根钢筋轴向拉伸试验的方法。试验表明,影响钢筋疲劳强度的主要因素为钢筋疲劳应力幅,即 $\sigma_{\max}^f - \sigma_{\min}^f$, $\sigma_{\max}^f$ 和 $\sigma_{\min}^f$ 为一次循环应力中的最大应力和最小应力。

我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定了不同等级钢筋的疲劳应力幅限值,并规定该值与截面同一层钢筋的最小应力与最大应力的比值(即疲劳应力比值) $\rho_s^f = \sigma_{\min}^f / \sigma_{\max}^f$ 有关,要求满足循环次数为 200 万次。对预应力钢筋,当 $\rho_p^f \geq 0.9$ 时可不进行疲劳强度验算。

2.1.4 混凝土结构对钢筋性能的要求

《混凝土结构设计规范》提倡应用高强、高性能钢筋。其中,高性能包括塑性好、可焊性好、机械连接性能好、施工适应性强以及与混凝土的黏结力强等性能。

1. 强度

钢筋强度包括钢筋的屈服强度及极限强度。屈服强度是构件承载力计算的主要依据。采用高强度钢筋可以节约钢筋,取得较好的经济效益。在混凝土结构中,推广应用 400MPa、500MPa 级高强热轧带肋钢筋作为纵向受力的主导钢筋。对预应力混凝土结构,可以采用钢绞线、高强预应力钢丝和预应力螺纹钢筋等,以节约材料。

2. 塑性

在工程设计中,要求钢筋有一定的延性是为了使钢筋在断裂前有足够的变形能力,在





钢筋混凝土结构中，它是反映钢筋混凝土构件将要破坏的信号，同时要保证钢筋冷弯的要求，通过试验校验钢筋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。我国的高强钢丝、钢绞线延性较高，热轧钢筋延性较好。

3. 焊接性能

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，可保证焊接后接头的良好受力性能。

4. 与混凝土的黏结力

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黏结力。钢筋表面的形状对黏结力有重要影响。此外，钢筋的锚固和有关构造要求是保证两者之间具有良好黏结力的有力措施。

2.2 混 凝 土

普通混凝土是由水泥、砂、石子和水按照一定的配合比拌和而成，经凝结和硬化形成的人工石材，是一种复杂的多相复合材料。

2.2.1 单轴向应力状态下的混凝土强度

实际工程中单向受力构件是极少见的，混凝土一般均处于复合应力状态，单轴向受力状态下混凝土的强度是研究复合应力状态下混凝土强度的基础。同时也是结构构件分析和建立强度理论公式的重要依据。

混凝土试件的大小和形状、试验方法和加载速率都会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. 混凝土的抗压强度

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《混凝土结构设计规范》规定以边长为 150mm 的立方体为标准尺寸试件，标准立方体试件在 $(20 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ 的温度和相对湿度为 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/mm^2 。

《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，用符号 $f_{\text{cu,k}}$ 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。混凝土强度等级一般可划分为：C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75 和 C80，共 14 个等级。如 C30 表示混凝土立方体抗压强度标准值为 $f_{\text{cu,k}} = 30\text{N/mm}^2$ 。

《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 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；预应力混凝土结构的混





混凝土强度等级不宜低于 C40，且不应低于 C30。

混凝土的立方体抗压强度与试验方法有关。试件在试验机上受压时，纵向会压缩，横向会膨胀，由于混凝土与压力机垫板弹性模量与横向变形的差异，压力机垫板的横向变形明显小于混凝土的横向变形，所以垫板就通过接触面上的摩擦力来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，见图 2-6(a)，抗压强度比没有约束的情况要高。如果在试件承压面上涂一些润滑剂，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，试件沿着平行于力的作用方向产生几条裂缝而破坏，所测得的极限抗压强度较低，见图 2-5(b)。标准试验方法是不涂润滑剂的。

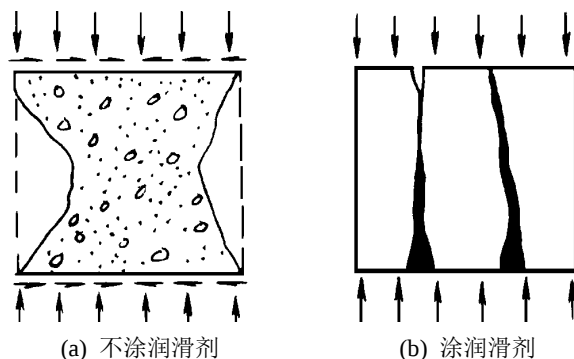


图 2-6 混凝土立方体试块的破坏特征

加载速度对立方体抗压强度也有影响，加载速度越快，测得的强度越高。主要是由于加载速度过快，混凝土试件内部微裂缝难以充分扩展，塑性变形受到一定的限制，故强度较高。通常规定加载速度为：混凝土强度等级低于 C30 时，取每秒 $(0.3\sim 0.5)\text{N/mm}^2$ ；混凝土强度等级高于或等于 C30 时，取每秒 $(0.5\sim 0.8)\text{N/mm}^2$ 。

试验表明，混凝土立方体试块尺寸越大，实测破坏强度越低，反之则越高，这种现象称为尺寸效应。根据我国的试验结果，对于边长为 200mm 和 100mm 的立方体试件，实测的立方体抗压强度分别是边长为 150mm 的立方体试件相应强度的 1.05 倍和 0.95 倍。

2. 混凝土轴心抗压强度

混凝土的抗压强度与试件的形状有关，采用棱柱体比立方体能更好地反映混凝土结构的实际抗压能力。用混凝土棱柱体试件测得的抗压强度称为轴心抗压强度，又称为棱柱体抗压强度，用 f_{ck} 表示。

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且高度比立方体试件高。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较小，所以棱柱体试件的抗压强度都比立方体的抗压强度值小，并且棱柱体试件高宽比越大，强度越小，棱柱体的受压试验及试件破坏形态如图 2-7 所示。在确定棱柱体试件的尺寸时，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。我国取用 150mm×150mm×300mm 的棱柱体作为混凝土轴心抗压强度试验的标准试件。



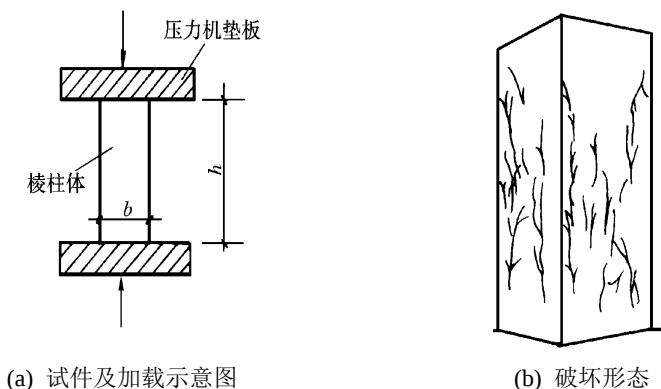


图 2-7 混凝土棱柱体受压试验及破坏形态

考虑到实际工程中现场混凝土的制作和养护条件通常比试验室条件差,而且实际结构构件承受的是荷载长期作用,这比试验时承受的短期加载不利得多,再结合我国工程实际经验并参考国外的有关规定等因素,将 $f_{\text{cu,k}}$ 、 f_{ck} 值乘以修正系数 0.88。另外,由于高强混凝土破坏时表现出明显的脆性性质,应考虑脆性折减系数。

综上所述,混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 与立方体抗压强度标准值 $f_{\text{cu,k}}$ 的关系按下式确定

$$f_{\text{ck}} = 0.88\alpha_{\text{c1}}\alpha_{\text{c2}}f_{\text{cu,k}} \quad (2-3)$$

式中: α_{c1} ——棱柱体抗压强度与立方体抗压强度之比,对混凝土强度等级为 C50 及以下的取 $\alpha_{\text{c1}}=0.76$,对等级为 C80 取 $\alpha_{\text{c1}}=0.82$,两者之间按直线规律变化取值;

α_{c2} ——混凝土的脆性折减系数,对混凝土强度等级为 C40 及以下的取 $\alpha_{\text{c2}}=1.00$,对等级为 C80 取 $\alpha_{\text{c2}}=0.87$,中间按直线规律变化取值;

0.88——考虑实际构件与试件混凝土强度之间的差异而取用的修正系数。

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)都采用直径为 6 英寸(152mm)、高为 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 。圆柱体试件抗压强度 f'_c 和我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)立方体抗压强度标准值 $f_{\text{cu,k}}$ 之间的关系为

$$f'_\text{c} = \alpha_\text{c}f_{\text{cu,k}} \quad (2-4)$$

式中: α_c 为强度换算系数,按表 2-1 取用。

表 2-1 强度换算系数 α_c 值

混凝土强度等级	C50 及以下	C60	C70	C80
α_c 值	0.800	0.833	0.857	0.875

3. 混凝土轴心抗拉强度

混凝土轴心抗拉强度 f_{tk} 也是混凝土的基本力学指标之一。实际工程中,混凝土构件的





抗开裂、受剪、受扭、受冲切等的承载力均与混凝土抗拉强度有关。混凝土抗拉强度较低，只有抗压强度的 $\frac{1}{17} \sim \frac{1}{8}$ ，混凝土强度等级越高，这个比值越小。

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。如图 2-8 所示，试件尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的柱体，两端预埋钢筋，钢筋位于试件的轴线上，将试验机的夹具夹住钢筋，对试件施加拉力使其均匀受拉，破坏时裂缝产生在试件的中部，此时的平均破坏应力即是轴心抗拉强度 f_{tk} 。

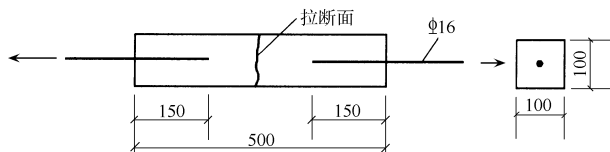


图 2-8 直接拉伸试验

在测定混凝土抗拉强度时，由于混凝土内部的不均匀性，加之安装试件的偏差等原因，上述试验方法存在对中困难。所以，国内外常采用圆柱体或立方体试件的劈裂抗拉试验来间接测试混凝土轴心抗拉强度，如图 2-9 所示。

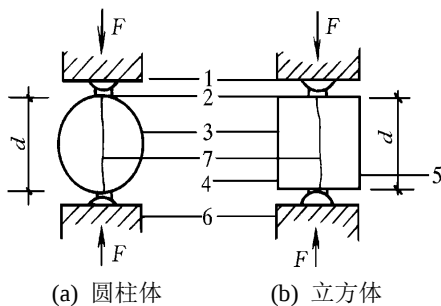


图 2-9 劈裂试验

1—压力机上路；2—垫条；3—试件；4—浇模顶面；5—浇模底面；6—压力机下板；7—破裂面

根据弹性力学原理，轴心抗拉强度的试验值 f_t^0 可按式计算

$$f_t^0 = \frac{2F}{\pi dl} \quad (2-5)$$

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，劈裂试件的大小对试验结果也有一定影响。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》(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 $f_{cu,k}$ 的换算关系为

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \times \alpha_{c2} \quad (2-6)$$

式中： δ 为变异系数，0.88 和 α_{c2} 的意义同式(2-1)；0.395 和 0.55 为轴心抗拉强度与立方体抗



压强度间的折减系数。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)给出的混凝土抗压、抗拉强度标准值和设计值分别见本书附录 A 中的表 A.7 和表 A.8。

2.2.2 复合应力状态下混凝土的强度

混凝土结构和构件通常受到轴力、弯矩、剪力和扭矩的不同组合作用，混凝土很少处于理想的单向受力状态，而更多的是处于双向或三向受力状态，因此，分析混凝土在复合应力作用下的强度就很有必要。但是，由于混凝土材料的特性，在复合应力作用下的强度至今尚未建立起完善的强度理论，目前仍只有借助有限的试验资料，介绍一些近似方法作为计算的依据。

1. 双向受力时混凝土的强度

图 2-10 所示为混凝土在双向应力作用下试验所得的强度变化规律。 σ_1 、 σ_2 为其中两个平面上的法向应力，第三个平面上应力为零， f'_c 为单轴受力状态下的混凝土抗压强度。图中第一象限为双向受拉区， σ_1 、 σ_2 相互影响并不显著，不同应力比值 σ_1/σ_2 下的双向受拉强度均接近于单向受拉强度。第三象限为双向受压区，大体上一向的强度随另一向压力的增加而增加，混凝土双向受压强度比单向受压强度最多可提高 27%。第二、四象限为拉-压共同作用区，试件破坏时混凝土的强度均低于单轴受力(拉或压)强度。

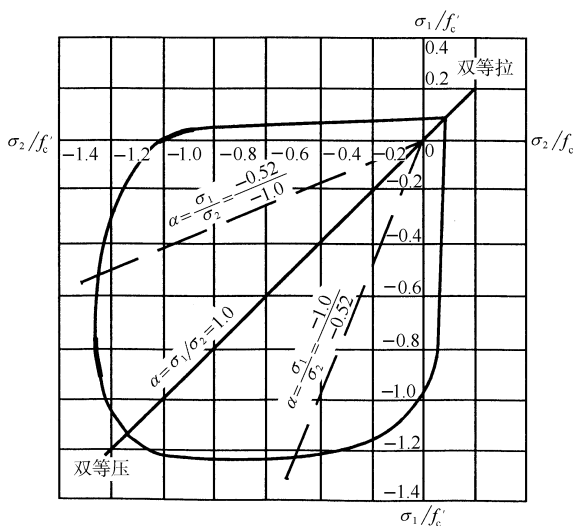


图 2-10 混凝土双向应力下的强度曲线

2. 三向受压时混凝土的强度

混凝土在三向受压的情况下，由于受到侧向压力的约束作用，最大主压应力方向的抗压强度有较大幅度的增长。常规三轴试验最典型的加载方式是：先通过对混凝土圆柱体周围施加液压，然后对试件沿纵轴施加压应力 σ_1 直至破坏。试验表明，当侧向液压值不是很大时，最大主压应力轴的抗压强度 f'_{cc} 随着侧向应力的增大而提高，由试验得到的经验公



式为

$$f'_{cc} = f'_c + k\sigma_r \quad (2-7)$$

式中: f'_{cc} ——有约束试件的轴心抗压强度;

f'_c ——无约束试件的轴心抗压强度(单轴抗压强度);

σ_r ——侧向压应力;

k ——侧向压应力系数, 根据试验结果取 $k = 4.5 \sim 7.0$, 平均值为 5.6, 当侧向压应力较低时得到的系数值较高。

对于纵向受压混凝土, 如果约束混凝土的侧向变形, 可使混凝土的抗压强度有较大提高。主要是因为周围的压应力限制了混凝土内部微裂缝的发展, 大大提高了混凝土纵向抗压强度和承受变形的能力。如工程上采用钢管混凝土柱、螺旋钢箍柱等能有效约束混凝土的侧向变形, 使混凝土的抗压强度、延性有相应的提高。

3. 正应力和剪应力共同作用下混凝土的强度

梁受弯矩和剪力共同作用以及柱在受到轴向压力的同时也受到水平剪力作用时, 构件截面形成“剪压”和“剪拉”复合应力状态。图 2-11 所示为混凝土法向应力与剪应力的关系曲线。从图中可以看出: 混凝土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混凝土抗拉强度降低。抗剪强度随压应力的增大而增大, 当压应力约超过 $0.6f'_c$ 即 C 点时, 抗剪强度反而随压应力的增大而减小。另一方面, 此曲线也说明由于剪应力的存在, 混凝土的抗压强度要低于单向抗压强度。故在梁、柱等构件中, 当有剪应力时, 将要影响其受压区混凝土的强度, 这点应引起注意。

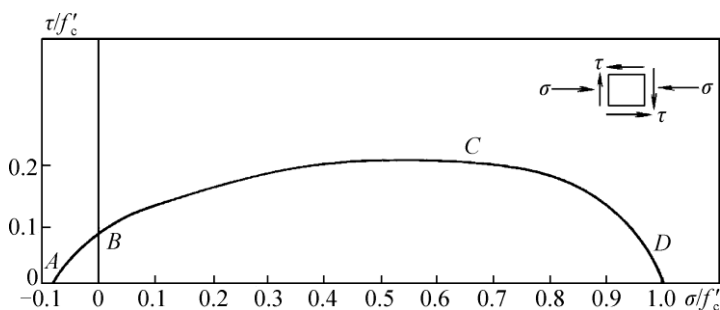


图 2-11 混凝土在正应力和剪应力共同作用下的复合强度

2.2.3 混凝土的变形

混凝土的变形可以分为两类: 一类是由于荷载作用产生的受力变形; 另一类是由于混凝土的收缩和温度变化等产生的体积变形。混凝土的变形是其重要的物理力学性能之一。

1. 混凝土在单调短期加载下的变形性能

1) 混凝土受压应力-应变曲线

混凝土单轴受压时的应力-应变关系是混凝土力学性能的一个重要方面, 反映了混凝土受压各个阶段内部结构的变化及其破坏状态, 是研究和建立混凝土构件的承载力、变形、





延性和受力全过程分析的重要依据。

我国采用棱柱体试件来测定单调短期加载下混凝土受压应力-应变全曲线。图 2-12 为实测的典型混凝土棱柱体受压应力-应变全曲线。从图中可以看出,这条曲线包括上升段和下降段两个部分。在第 I 阶段,从开始加载至应力为 $(0.3 \sim 0.4)f_{ck}$, 由于试件的应力较小,混凝土的变形主要是骨料和水泥结晶体受力产生的弹性变形,应力-应变关系接近直线, A 点称为比例极限点。超过 A 点后,进入裂缝稳定扩展的第 II 阶段,至临界点 B, 临界点 B 对应的应力可以作为长期抗压强度的依据。此后,试件中所积蓄的弹性应变能始终保持大于裂缝发展所需的能量,从而形成裂缝快速发展的不稳定状态直至 C 点,即第 III 阶段,应力达到的最高点为 f_{ck} , f_{ck} 相对应的应变称为峰值应变 ε_0 , 其值在 $0.0015 \sim 0.0025$ 波动,通常取值为 0.002。

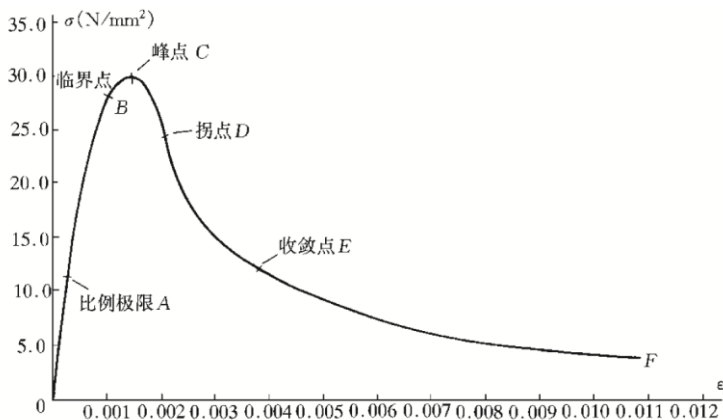


图 2-12 受压混凝土棱柱体应力-应变曲线

到达峰值应力后就进入下降段 CE, 这时裂缝继续扩展、贯通,从而使应力-应变关系发生变化。在峰值应力以后,裂缝迅速发展,结构内部的整体性受到越来越严重的破坏,试件的平均应力强度下降,当曲线下降到拐点 D 后,曲线开始凸向应变轴,这时,仅靠骨料间的咬合力及摩擦力与残余承压面来承受荷载。随着变形的增加,应力-应变曲线逐渐凸向水平轴方向发展,此段曲线中曲率最大的一点 E 称为“收敛点”。E 点以后贯通的主裂缝已很宽,结构内聚力几乎耗尽,对于无侧向约束的混凝土来说,已失去结构意义。

混凝土应力-应变曲线的形状和特征是混凝土内部结构发生变化的力学标志。不同强度的混凝土的应力-应变曲线有着相似的形状,但也有实质性区别。如图 2-13 所示的试验曲线表明,随着混凝土强度的提高,尽管上升段和峰值应变的变化不很显著,但是下降段的形状有较大的差异,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) 混凝土的变形模量

与弹性材料不同,混凝土受压应力-应变关系是一条曲线,在不同的应力阶段,应力与应变之比的变形模量不是常数,而是随着混凝土的应力变化而变化,混凝土的变形模量有如下三种表示方法。



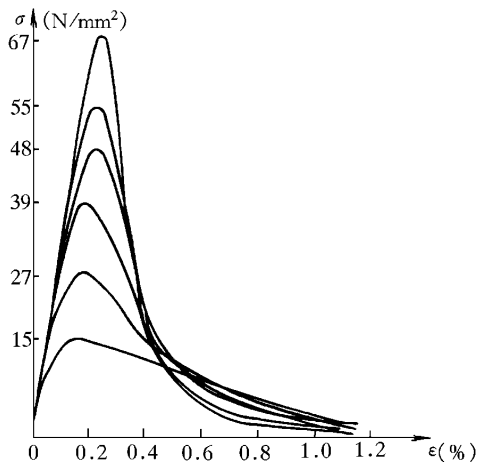


图 2-13 不同强度的混凝土受压应力-应变曲线的比较

(1) 混凝土的弹性模量 E_c 。

如图 2-14 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)作一切线,其斜率为混凝土的原点模量,称为弹性模量,用 E_c 表示。

$$E_c = \tan \alpha_0 \quad (2-8)$$

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。

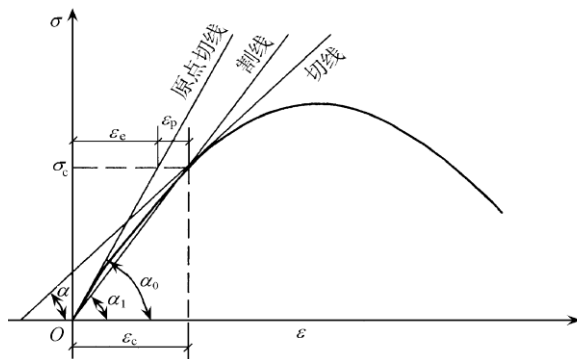


图 2-14 混凝土变形模量的表示方法

目前,各国对混凝土弹性模量的确定方法没有统一的标准。一般的做法是将混凝土棱柱体试件加载至 $0.5f_c$, 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,塑性变形不能恢复,即存在一定的残余变形,随着重复加载卸载次数的增加,应力-应变曲线逐渐稳定并基本上接近于一倾斜直线。该直线的斜率即为混凝土的弹性模量。

我国建筑科学研究院按照上述方法,用不同强度的混凝土棱柱体试件进行了大量的试验研究。由统计分析得出相应的经验公式为

$$E_c = \frac{100}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu,k}}} (\text{kN/mm}^2) \quad (2-9)$$





《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)给出的混凝土弹性模量见本书附录 A 中的表 A-9。

(2) 混凝土的受压变形模量 E'_c 。

当混凝土应力较大进入塑性阶段后, 初始的弹性模量已不能正确地反映混凝土的实际工作情况, 因此, 给出混凝土变形模量指标, 才能正确地反映混凝土应力-应变关系的真实情况。

连接图 2-12 中 O 点至曲线上某点应力 σ_c 的割线斜率, 称为割线模量或弹塑性模量, 它的表达式为

$$E'_c = \tan \alpha_1 = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{E_c \varepsilon_\varepsilon}{\varepsilon_c} = \nu E_c \quad (2-10)$$

$\nu = \frac{\varepsilon_\varepsilon}{\varepsilon_c}$ 为混凝土弹性系数, ν 反映了混凝土的弹塑性性质, 并随某点应力增大而减小,

其值在 0.5~1 变化。

(3) 混凝土的切线模量 E''_c 。

在混凝土应力-应变曲线上某一应力值为 σ_c 处作切线, 该切线的斜率即为相应于 σ_c 时的混凝土切线模量 E''_c , 即

$$E''_c = \tan \alpha \quad (2-11)$$

可以看出, 混凝土的切线模量是一个变值, 它随着混凝土应力的增大而减小。

2. 混凝土在荷载长期作用下的变形

混凝土在某一不变荷载的长期作用下, 变形随时间而增长的现象称为混凝土的徐变。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-时间曲线如图 2-15 所示。可以看出, 试件加载至应力达到 $0.5f_c$ 时, 其加载瞬间产生的应变称为瞬时应变 ε_{cla} 。若保持荷载不变, 随着加载作用时间的增加, 应变也将继续增大, 这就是混凝土的徐变 ε_{cr} 。从图中可以看出, 混凝土徐变开始增长较快, 以后逐渐减慢, 通常在最初 6 个月内可完成最终徐变量的 70%~80%, 第一年内可完成 90%左右。通常经过 2~5 年可以认为徐变基本结束。加载两年后卸载, 试件瞬时要恢复的一部分应变称为瞬时恢复应变 $\varepsilon'_{\text{cla}}$, 其值比加载时的瞬时应变略小。卸荷后经过一段时间的量测, 混凝土并不处于静止状态, 而是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 $\varepsilon''_{\text{cla}}$, 其值约为总徐变变形的 1/12。另外, 在试件中尚残存很大一部分不可恢复的应变, 称为残余应变 ε'_{cr} 。

引起混凝土徐变的原因, 目前尚无统一的解释。通常认为: 一方面混凝土中的水泥凝胶体在荷载作用下产生黏性流动, 将其受到的压力逐步传给骨料和水化后的结晶体, 两者形成应力重分布而引起徐变变形; 另一方面, 混凝土内部微裂缝在荷载长期作用下不断发展和增加, 从而导致混凝土变形的增加。由此可知, 应力较小时以第一原因为主; 应力较大的情况下以第二原因为主。



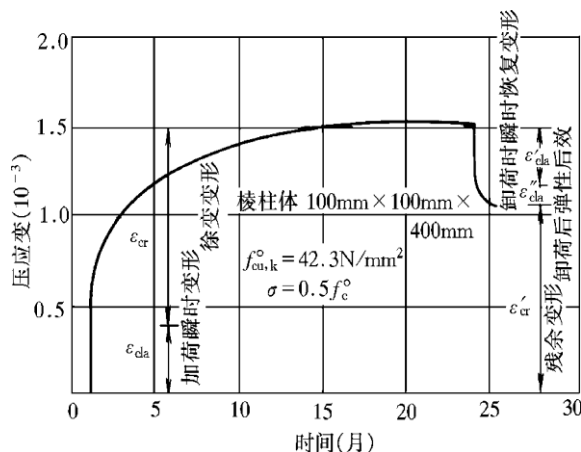


图 2-15 混凝土的徐变-时间曲线

影响混凝土徐变的因素很多，包括应力条件、内在因素和环境影响等。

1) 应力条件——施加初应力的水平和加载时混凝土的龄期

试验表明，混凝土的徐变与混凝土的应力大小有着密切关系。初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 2-16 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，通常称之为线性徐变。在线性徐变的情况下，加载初期徐变增长较快，6 个月一般已完成徐变的大部分，后期徐变增长逐渐减小，两年以后趋于稳定。

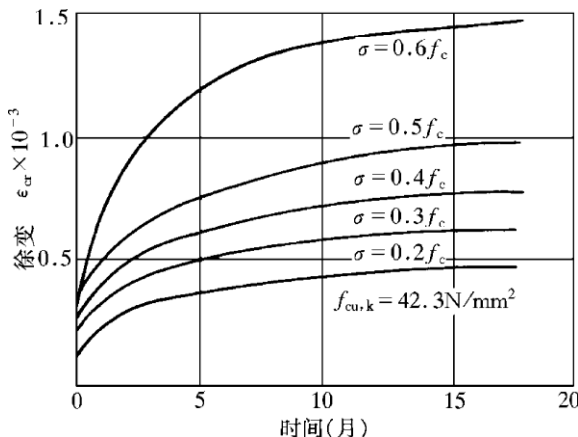


图 2-16 混凝土压应力与徐变的关系

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，在高应力的长期作用下可能造成混凝土的破坏。所以，一般取混凝土持续应力等于 $0.8f_c$ 作为混凝土的长期极限抗压强度。混凝土构件在使用期间经常处于高应力状态是不安全的，需引起注意。





2) 内在因素——混凝土的组成和配比

混凝土的组成成分对徐变也有很大影响。水泥用量越多，徐变越大；水灰比越大，徐变也越大。反之，骨料越坚硬，弹性模量越高，骨料所占的体积比越大，则徐变越小。

3) 环境影响——养护及使用条件下的温湿度

养护时温度高、湿度大，水泥水化作用越充分，徐变越小。加载后构件所处的环境温度越高、相对湿度越低，徐变越大。因此，高温干燥环境将使徐变显著增大。

徐变对钢筋混凝土结构和构件的工作性能有很大的影响。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。

3. 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。一般情况下混凝土的收缩值比膨胀值大很多。

我国铁道部科学研究所做的混凝土自由收缩的试验结果如图 2-17 所示。混凝土的收缩是随时间而增长的变形，初期收缩变形发展较快，一个月约可完成 50%，一般两年后趋于稳定，最终收缩值为 $(2\sim5)\times 10^{-4}$ 。

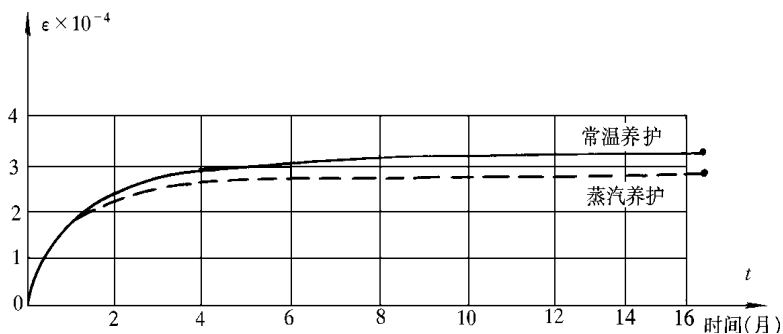


图 2-17 混凝土的收缩

蒸汽养护混凝土的收缩值要小于常温养护下的收缩值。这是因为混凝土在蒸汽养护过程中，高温、高湿的条件加速了水泥的水化和凝结硬化，一部分游离水由于水泥水化作用被快速吸收，使脱离试件表面蒸发的游离水减少，因此其收缩变形减小。

养护不好以及混凝土构件的四周受约束从而阻止混凝土收缩时，会使混凝土构件表面或水泥地面上出现收缩裂缝。

研究表明，影响混凝土收缩的因素有以下几项。

- (1) 混凝土的组成材料成分：水泥用量越大，水泥强度等级越高，水灰比越大，收缩越大；骨料的弹性模量大，则收缩小。
- (2) 外部环境因素：凝结硬化过程以及使用时，周围温度越高、湿度越大，收缩越小。
- (3) 施工质量：混凝土施工质量好，振捣越密实，收缩越小。
- (4) 构件的体积与表面积比值：比值大时，收缩小。





2.3 钢筋与混凝土的黏结

2.3.1 黏结的作用与性质

钢筋与混凝土之间的黏结，是保证钢筋与混凝土这两种性质不同的材料在结构中共同工作的前提。黏结力是钢筋与混凝土接触面上所产生的沿钢筋纵向的剪应力，这种剪应力使钢筋与周围混凝土之间的内力得到传递。

根据作用性质的不同，钢筋与混凝土之间的黏结应力可分为钢筋端部的锚固黏结应力和裂缝间的局部黏结应力两种，如图 2-18 所示。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，需要伸出一段长度，即锚固长度。受拉钢筋有足够的锚固长度以累积足够的黏结力，使钢筋中建立起发挥钢筋强度的拉力，否则，将发生锚固破坏。裂缝间的局部黏结应力是在相邻两个开裂截面之间产生，钢筋应力的变化受到黏结应力的影响，钢筋应力的变化幅度反映了裂缝之间的混凝土参与工作的程度，局部黏结应力的丧失会造成构件的刚度降低和裂缝的开展。

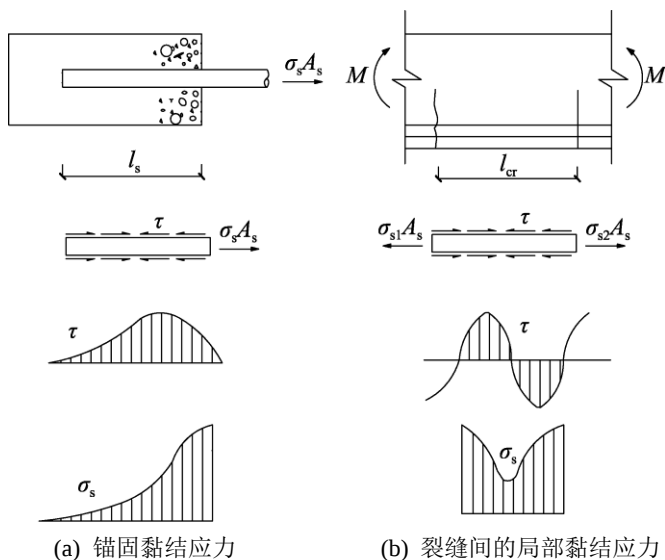


图 2-18 锚固黏结应力和裂缝间的局部黏结应力

2.3.2 黏结力的测定

黏结力的测定通常采用拔出试验方法(见图 2-19): 将钢筋的一端埋入混凝土内，在另一端施加拉力将钢筋拔出来。黏结强度按下式确定

$$\tau_m = \frac{p}{l_a \pi d} \quad (2-12)$$

式中: p ——拔出力;

d ——钢筋直径;

l_a ——钢筋的埋入长度。



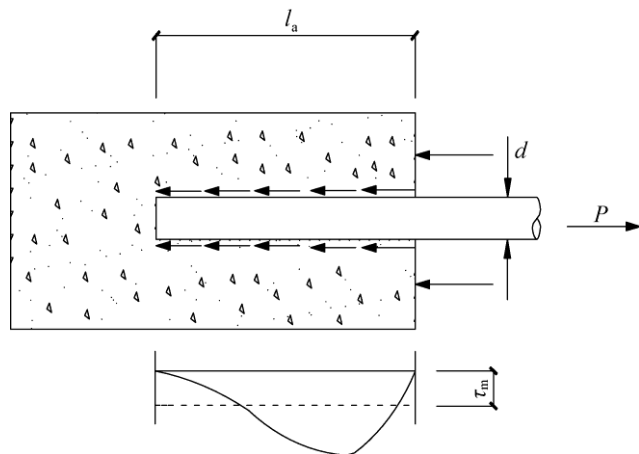


图 2-19 钢筋拔出试验中黏结应力分布图

根据拔出试验可知: ①黏结应力 τ 沿钢筋长度是按曲线分布的; ②钢筋埋入混凝土的长度 l_a 越长, 拔出力越大, 但埋入长度过长时, 尾部的黏结应力很小, 甚至为零; ③最大黏结应力在离端头某一距离处, 且随拔出力的大小而变化; ④黏结强度(即混凝土和钢筋界面上可以达到的极限黏结应力)随混凝土强度等级的提高而增大。

由此可见, 为了保证钢筋在混凝土中有可靠的锚固, 钢筋应有足够的锚固长度, 但也不必太长。根据试验资料, 光面钢筋的黏结强度为 $1.5\sim 3.5\text{N/mm}^2$, 带肋钢筋的黏结强度为 $2.5\sim 6.0\text{N/mm}^2$, 其中较大值是由较高的混凝土强度等级所确定的。

2.3.3 黏结力的组成

钢筋与混凝土的黏结力主要由以下三部分组成:

(1) 钢筋与混凝土接触面上的化学胶结力。来自于浇筑时水泥浆体向钢筋表面氧化层的渗透以及养护过程中水泥晶体的生长和硬化。从而使水泥胶体和钢筋表面产生吸附胶着作用。这种胶结力一般很小, 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即消失。

(2) 混凝土收缩后紧紧地握裹钢筋而产生的摩阻力。由于混凝土凝结时收缩, 使钢筋和混凝土接触面上产生压应力。垂直于摩擦面上的压应力越大, 接触面的粗糙程度越大, 摩阻力就越大。

(3) 钢筋与混凝土之间的机械咬合力。对光圆钢筋, 这种咬合力来自表面的粗糙不平。对于变形钢筋, 黏结力主要来自变形钢筋肋间嵌入混凝土而形成的机械咬合作用。图 2-20 所示为变形钢筋与混凝土的相互作用, 钢筋的横肋对混凝土的挤压就像一个楔子, 会产生很大的机械咬合力。变形钢筋与混凝土之间的这种机械咬合作用, 改变了钢筋与混凝土间相互作用的方式, 显著提高了黏结强度。



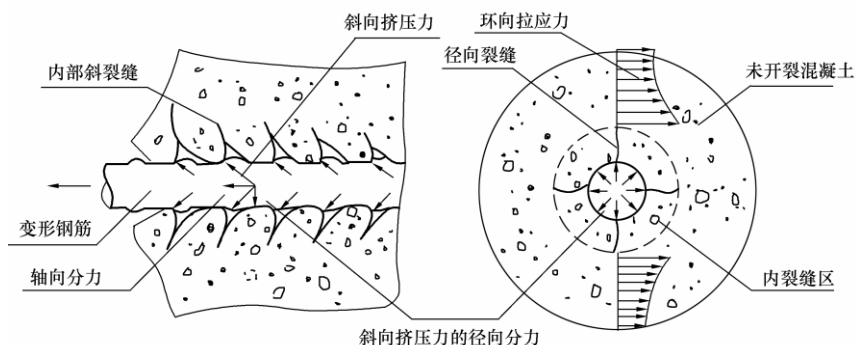


图 2-20 变形钢筋与混凝土的相互作用

可见，光圆钢筋与变形钢筋黏结力的主要区别是，光圆钢筋的黏结力主要来自黏结力和摩阻力，而变形钢筋的黏结力主要来自机械咬合作用。

2.3.4 钢筋的锚固长度

为了保证钢筋与混凝土之间的可靠黏结，钢筋必须有一定的锚固长度。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定，纵向受拉钢筋锚固长度 l_{ab} 为钢筋的基本锚固长度，它与混凝土强度、钢筋强度、钢筋直径和外形有关，按下式计算

$$l_{ab} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad (2-13)$$

式中： f_y ——钢筋抗拉强度设计值；

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值，当混凝土的强度等级高于 C60 时，按 C60 取值；

d ——钢筋的直径；

α ——锚固钢筋的外形系数，按表 2-2 取值。

可见，受拉钢筋的基本锚固长度是钢筋直径的倍数，例如 $30d$ 。

表 2-2 锚固钢筋的外形系数

钢筋类型	光圆钢筋	带肋钢筋	螺旋肋钢丝	三股钢绞线	七股钢绞线
外形系数 α	0.16	0.14	0.13	0.16	0.17

注：光圆钢筋末端应做 180° 弯钩，弯后平直段长度不应小于 $3d$ ，但用作受压钢筋时可不作弯钩。

一般情况下，受拉钢筋的锚固长度可取基本锚固长度，实际结构中受拉钢筋锚固长度还应根据锚固条件的不同按下式计算

$$l_a = \zeta_a l_{ab} \quad (2-14)$$

式中： l_a ——受拉钢筋的锚固长度，不应小于 200mm；

ζ_a ——锚固长度修正系数，按下列规定取用，当锚固条件多于一项时，修正系数可以连乘计算，但不应小于 0.6。

纵向受拉带肋钢筋的锚固长度修正系数 ζ_a 应根据钢筋的锚固条件按下列规定取用：

(1) 当带肋钢筋的公称直径大于 25mm 时，取 1.10；





- (2) 环氧树脂涂层带肋钢筋取 1.25;
- (3) 施工过程中易受扰动的钢筋取 1.10;
- (4) 锚固钢筋的保护层厚度为 $3d$ 时修正系数可取 0.80, 保护层厚度为 $5d$ 时修正系数可取 0.70, 中间按内插法取值(此处 d 为纵向受力带肋钢筋的直径);
- (5) 当纵向受拉普通钢筋末端采用弯钩或机械锚固措施时, 包括弯钩或锚固端头在内的锚固长度(投影长度)可取为基本锚固长度 l_{ab} 的 0.6 倍。钢筋弯钩和机械锚固的形式和技术要求如图 2-21 的规定。

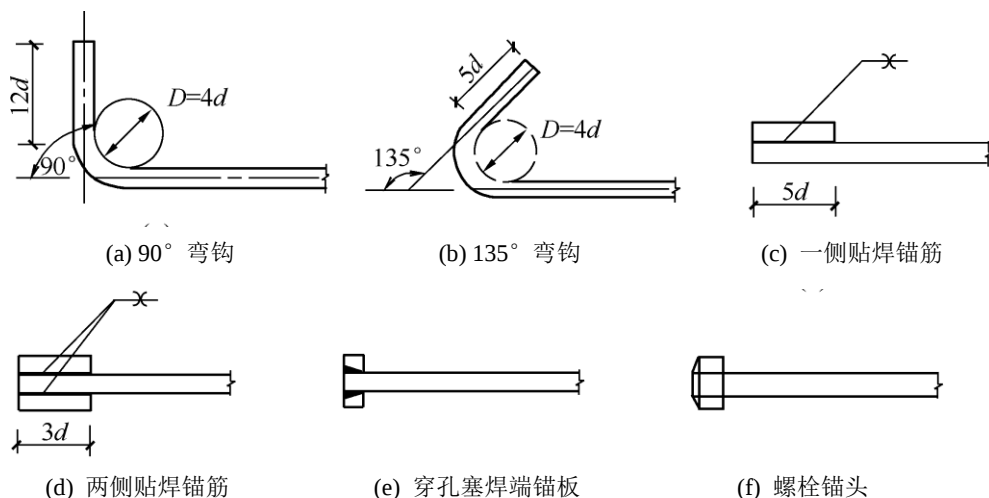


图 2-21 钢筋机械锚固的形式及构造要求

当锚固钢筋的保护层厚度不大于 $5d$ 时, 锚固长度范围内应配置构造钢筋(箍筋或横向钢筋), 其直径不应小于 $d/4$, 间距不应大于 $5d$, 且不大于 100mm (此处 d 为锚固钢筋的直径)。

混凝土结构中的纵向受压钢筋, 当计算中充分利用其抗压强度时, 锚固长度不应小于相应受拉锚固长度的 70%。

本章小结

- (1) 我国常用的钢筋品种有热轧钢筋、钢绞线、预应力钢丝(中强度钢丝、消除应力钢丝)、预应力螺纹钢筋等。
- (2) 有明显屈服点钢筋和无明显屈服点钢筋应力-应变曲线不同。有明显屈服点的钢筋取屈服强度作为强度计算指标; 对于无明显屈服点的钢筋, 取条件屈服强度作为强度计算依据。
- (3) 混凝土结构对钢筋强度、塑性、焊接性能和与混凝土黏结性能等有较高的要求。
- (4) 混凝土立方体抗压强度指标作为评定混凝土强度等级的标准。混凝土的轴心抗压、抗拉强度及复合应力作用下的强度都与立方体抗压强度有关。
- (5) 混凝土的变形有荷载作用下的受力变形和由于混凝土的收缩和温度变化等产生的体积变形。
- (6) 钢筋和混凝土之间的黏结力是两者共同工作的基础, 钢筋和混凝土的黏结力主要





由化学胶结力、摩阻力和机械咬合力三部分组成。为了保证钢筋与混凝土之间的可靠黏结，钢筋必须有一定的锚固长度。

思考题

1. 混凝土的立方体抗压强度 $f_{cu,k}$ 、轴心抗压强度标准值 f_{ck} 和抗拉强度标准值 f_{tk} 是如何确定的？
2. 混凝土的强度等级是根据什么确定的？我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 规定的混凝土强度等级有哪些？
3. 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？
4. 混凝土的变形模量和弹性模量是怎样确定的？
5. 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？如何减小徐变？
6. 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？如何减小收缩？
7. 有明显流幅钢筋和无明显流幅钢筋的应力-应变曲线有何不同？二者的强度取值有何不同？我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 中将热轧钢筋按强度分为几级？
8. 混凝土结构对钢筋的性能有哪些要求？
9. 光圆钢筋与混凝土的黏结作用是由哪几部分组成的，变形钢筋的黏结机理与光圆钢筋的有什么不同？
10. 受拉钢筋的基本锚固长度是指什么？它是怎样确定的？受拉钢筋的锚固长度是怎样计算的？

