

样

中等专业学校试用教材

给水排水 工程结构

杨禹门 主编

杨禹门 张述勇 戴德全 编



中国建筑工业出版社

中等专业学校试用教材

给水排水工程结构

杨禹门 主编
杨禹门 张述勇 戴德全 编

中国建筑工业出版社

本书是根据《给水排水工程结构》教学大纲、《建筑设计统一标准》(GBJ68-84)、新修订的《混凝土结构设计规范》和《砌体结构设计规范》(送审稿)以及《给水排水工程结构设计规范》(GBJ67-84)编写的中等专业学校给水排水专业试用教材。

本书共十章,阐述了钢筋混凝土材料的力学性能,概率极限状态设计方法,受弯、受压、受拉构件的强度、裂缝与变形计算,梁板结构,钢筋混凝土和预应力混凝土水池和水管,砌体结构的强度和强度计算以及砖壁水池和混合结构管道等。

本书亦可供给给水排水工程技术人员参考。

中等专业学校试用教材

给水排水工程结构

杨禹门 主编

杨禹门 张述勇 戴德全 编

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17½ 字数: 426 千字

1988年12月第一版 1990年12月第二次印刷

印数: 8,091—14,930册 定价: 3.15元

ISBN7-112-00512-4/G·67

(5616)

前 言

本书是根据新修订的给水排水专业《给水排水工程结构》教学大纲和有关新标准、新规范进行编写的，是中等专业学校给水排水专业的试用教材。

本书注重力学概念，但力求通俗易懂，并避免繁琐的推导证明，着重培养学生对构件进行受力分析的能力。

本书附有较多的例题，每章都附有小结、思考题和习题。本书例题注意突出重点，分散难点和避免冗长的计算，以达到掌握基本方法的目的。

本书绪言、第一、二、七、八、九和十章由衡阳铁路工程学校杨禹门编写，第三、四章由北京城市建设学校张述勇编写，第五、六章由天津市市政工程学校戴德全编写，全书由杨禹门主编。

本书由北京城市建设学校贺力民主审。武汉城市建设学校谭盈进、济南城市建设学校霍加禄、广州市市政建设学校周美新、抚顺城市建设学校邱晓岩、上海市城市建设工程学校曹勇、广西建筑工程学校吴雄、平顶山城建环保学校肖小存和福州市建筑工程职业学校何梦生等同志参加了审稿。

由于水平所限，书中定有错误或不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

绪言	1
第一章 钢筋混凝土材料的力学性能	4
第一节 钢筋	4
第二节 混凝土	6
第三节 钢筋与混凝土之间的粘结力	10
第二章 钢筋混凝土结构的基本设计原则	13
第一节 极限状态设计方法的基本概念	13
第二节 极限状态设计表达式	16
第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面强度计算	19
第一节 钢筋混凝土梁正截面抗弯性能的试验研究	19
第二节 单筋矩形截面受弯构件的强度计算与截面构造	22
第三节 双筋矩形截面受弯构件的强度计算	35
第四节 单筋T形截面受弯构件的强度计算	39
第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面强度计算	48
第一节 抗剪试验研究	48
第二节 斜截面抗剪强度计算	50
第三节 斜截面强度的构造要求	57
第五章 钢筋混凝土受压构件强度计算	68
第一节 轴心受压构件强度计算	68
第二节 矩形截面偏心受压构件正截面强度计算	72
第六章 钢筋混凝土受拉构件强度计算	89
第一节 轴心受拉构件强度计算	89
第二节 偏心受拉构件正截面强度计算	89
第七章 钢筋混凝土构件的裂缝和变形计算	95
第一节 概述	95
第二节 抗裂度计算	95
第三节 裂缝宽度的计算	98
第四节 受弯构件的变形计算	104
第八章 钢筋混凝土梁板结构	110
第一节 概述	110
第二节 整体式单向板肋形顶盖	111
第三节 双向板	132
第四节 圆形平板	137
第五节 整体式无梁顶盖	144
第六节 装配式梁板结构	152

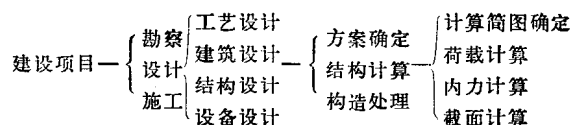
第七节	板上开孔的处理	155
第九章	水池和管道	161
第一节	水池的类型	161
第二节	水池的荷载和计算内容	163
第三节	钢筋混凝土圆形水池	166
第四节	钢筋混凝土矩形水池	182
第五节	管道	194
第六节	预应力混凝土圆形水池和水管	202
第十章	砌体结构	210
第一节	概述	210
第二节	砌体的强度	210
第三节	基本设计规定	215
第四节	受压构件的强度计算	215
第五节	轴心受拉、受弯和受剪构件的强度计算	221
第六节	砌体局部受压强度计算	221
第七节	墙、柱的高厚比验算	225
第八节	砖壁水池	226
第九节	混合结构矩形管道	233
附录		241
附录2-1	混凝土的标准强度和设计强度	241
附录2-2	混凝土弹性模量 E_c (kN/mm^2)	241
附录2-3	钢筋的标准强度和设计强度(N/mm^2)	242
附录2-4	钢筋弹性模量	243
附录3-1	钢筋混凝土受弯构件的最大配筋率 μ_{max}	243
附录3-2	钢筋混凝土构件纵向受力钢筋的最小配筋百分率	243
附录3-3	钢筋混凝土矩形截面受弯构件正截面抗弯强度计算用系数 ξ 、 γ_s 、 α_s	244
附录3-4	钢筋的计算截面面积及理论重量	245
附录3-5	每米板宽内各种钢筋间距时的钢筋截面面积	246
附录8-1	按弹性法计算时梁、板的计算跨度	247
附录8-2	均布荷载及集中荷载作用下等跨连续梁的弯矩和剪力系数	247
附录8-3	矩形板在分布荷载作用下静力计算表	253
附录8-4	圆形平板的弯矩系数($u = \frac{1}{6}$)	262
附录8-5	边缘固定有中心支柱圆板在均布荷载作用下的弯矩系数	262
附录8-6	边缘铰支有中心支柱圆板在均布荷载作用下的弯矩系数	263
附录8-7	边缘铰支有中心支柱圆板在边缘均布力矩作用下的弯矩系数	263
附录8-8	有中心支柱圆板的中心支柱荷载系数 K_n 及圆板抗弯刚度系数 k	263
附录9-1	圆形水池池壁内力系数表	264

绪 言

一、《给水排水工程结构》课的任务

建筑物或构筑物中支承荷载而起骨架作用的部分叫做结构。给水排水构筑物有水池、水塔、取水井、沟渠等，这些构筑物由梁、板、墙、柱、壳等构件组成，这些由构件组成的能承受各种作用的平面或空间体系称为给水排水工程结构。

一个建设项目，例如给水工程、房屋建筑、铁路工程等，通常要经过勘察、设计和施工三个阶段。一个建设项目的设计一般包括工艺设计、建筑设计、结构设计、设备设计等几方面。结构设计又包括确定方案、结构计算、构造处理等几个部分。结构计算则包括计算简图确定、荷载计算、内力计算、截面计算等几项工作。下列简图说明各项工作的关系。



本课程就是要讨论给水排水工程的结构设计，具体地说，就是要介绍给水排水构筑物结构设计的基本理论和基本方法。

结构设计的基本知识对于工艺设计人员来说无疑是很重要的，因为只有掌握了结构知识，才能配合工艺设计选用合适的构筑物。结构设计的基本知识对于施工人员来说也是必不可少的，因为只有懂得结构设计的原理和方法，了解结构的构造要求，即具备了较为完整的结构设计知识，才能看懂结构设计图，理解设计的意图，从而确定施工工艺，才能正确处理施工中的结构问题。

二、钢筋混凝土和砌体结构的特点

大量的构筑物和建筑物是由钢筋混凝土筑成的或者由砖石砌成的。

钢筋混凝土是由两种力学性能不同的材料——钢筋和混凝土结合而成的一种复合材料。混凝土具有较高的抗压强度，但是抗拉强度比抗压强度低很多，因此素混凝土梁在不大的荷载作用下就会由于受拉区断裂而破坏（图0-1a），这时混凝土的抗压强度远远没有得到利用。如果在梁中沿拉应力方向配置钢筋，形成钢筋混凝土梁（图0-1b），虽然当荷载增大到一定程度，受拉区混凝土会出现裂缝，但是钢筋可以代替混凝土承受拉力，使梁的承载能力得到很大的提高。如果配筋适当，两种材料的强度得以充分利用。

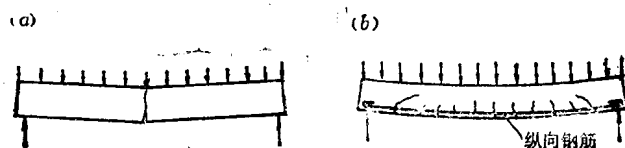


图 0-1 混凝土梁及钢筋混凝土梁

钢筋和混凝土两种性质不同的材料之所以能共同工作是因为钢筋和混凝土之间有很好的粘结力，使两者能牢靠地粘结在一起，在荷载作用下，它们之间不产生相对的滑移而能整体工作；其次是两者的温度线膨胀系数几乎相等，在温度变化时不致因线性胀缩不同而破坏两者的整体性；同时混凝土还能很好地保护钢筋免于锈蚀，增加了结构的耐久性，使结构始终保持整体工作。

钢筋混凝土结构具有下列特点：

- 1.取材方便 混凝土中占比例较大的砂、石材料均系地方性材料，均可就地选用；用钢量比钢结构少得多，且钢筋运输也比较方便。
- 2.耐久性较好 钢筋混凝土结构在正常设计、施工和使用条件下，具有较好的耐久性，不需要专门的维修。
- 3.整体性较好 现浇钢筋混凝土结构整体性好，具有良好的抗震性。
- 4.可模性好 钢筋混凝土可以根据需要浇筑成各种形状和尺寸。
- 5.抗渗性、抗冻性和耐火性均较好。

由于钢筋混凝土结构具有这些特点，所以在给水排水工程中得到广泛的应用。但是钢筋混凝土结构也存在着一些缺点，如自重较大，抗裂性较差，建造耗费模板，施工受季节条件的限制等。随着科学技术的发展，钢筋混凝土结构的这些缺点正在逐步地得到克服和改善。例如采用轻质高强混凝土可以减轻自重；采用预应力混凝土可提高构件的抗裂性；采用预制装配式构件可以节约模板，加快施工速度，并且不受季节气候的影响；采用工具式模板可以降低木材消耗等。

砌体结构与钢筋混凝土结构比较，突出的优点是能充分利用地方材料，节约木材和钢材，而且施工方法比较简单。但是它的强度较低，对于温度应力、地基不均匀沉降及地震作用比较敏感，容易出现裂缝，而且抗渗漏能力较差，必须采用专门的防水措施。正是这些缺点使得砌体结构在给水排水工程中的应用受到一定限制。

用砖砌筑水池池壁有时可以在灰缝内配置钢筋或在砌体内设置钢筋带的办法来提高砌体的抗拉强度。

三、本课程的特点

本课程的主要先导课是《工程力学》，《工程力学》讨论了构件计算的基本理论、方法以及结构内力和变形的计算方法。这些知识是学习工程结构的基础。但是《工程力学》是研究单一、匀质、连续、弹性材料的构件，而钢筋混凝土结构则是研究两种材料组成的构件，而且混凝土是非匀质、非连续、非弹性材料，因此《工程力学》所导出的计算构件的公式不能直接应用，但是解决问题的一般方法，如通过几何、物理和平衡条件建立基本方程的途径，对于钢筋混凝土仍是适用的，仅仅在具体内容上需要考虑钢筋混凝土的性质和受力特点。我们在学习钢筋混凝土结构时，要复习有关的《工程力学》知识，并且注意它们的异同，从而加深对钢筋混凝土结构理论的理解。

工程力学侧重于应力分析和变形计算，它的解答往往是唯一的，而钢筋混凝土课程要解决的不仅仅是强度和变形计算问题，而主要的是结构构件的设计，包括方案、截面型式及材料的选择、配筋构造等。结构设计是一个综合问题，解答不是唯一的，往往需要进行适用、材料用量、造价、施工等各项指标的综合分析比较才能做出合理的选择。

钢筋混凝土结构涉及面较广，有实验研究，有公式推导和适用条件，还有构造要求

等。同是受弯构件，不同形状有不同的公式，初学者不免感到困难。如果我们能及时搞清基本原理，并在理解的基础上及时记住基本知识，那么就可由浅入深，逐步掌握钢筋混凝土结构理论。

本门课程包括钢筋混凝土和砌体结构两大部分，每一部分都有基本构件和构筑物（水池和道管）两大内容。钢筋混凝土与砌体结构的基本构件是根据《混凝土结构设计规范》和《砌体结构设计规范》编写的，内容大致相同于工业与民用建筑专业。构筑物部分则是根据《给水排水工程结构设计规范》编写的。学完本课程后，对规范的有关条款将有所理解，实际设计工作都必须利用有关的规范。

第一章 钢筋混凝土材料的力学性能

钢筋和混凝土这两种材料的力学性能以及它们的共同工作特性，是学习钢筋混凝土结构理论所必须具备的基础知识。钢筋混凝土结构的计算理论、计算方法和构造措施都是以这两种材料所具有的力学性能为依据的。《建筑材料》课已经介绍了一些有关钢筋和混凝土力学性能的知识，这里要给予必要的复习与补充。

第一节 钢 筋

一、钢筋的成分、性能、品种和级别

热轧钢筋按化学成分可分为碳素钢和普通低合金钢两类。碳素钢除含铁元素外，还含有少量碳、硅、锰、磷、硫等元素。含碳量对钢材的力学性能有很大影响，含碳量高，强度高，但质地较硬脆。含碳量少于0.25%的称为低碳钢或软钢，含碳量在0.6~1.4%的称为高碳钢或硬钢。普通低合金钢除含有碳素钢的元素外，还加入少量的合金元素，如锰、硅、钒等。由于加入了合金元素，大大提高了钢材的塑性，使普通低合金钢仍具有软钢的力学性能。

软钢的应力应变曲线如图1-1所示。在a点以前，应力应变为直线关系，材料处于弹性阶段，a点的应力称为比例极限，应力达到c点，钢筋开始流动，c点的应力称为屈服强度；以后应力应变曲线显示出一个水平段cf，称为屈服台阶或流幅；过f点以后，进入强化阶段，应力应变表现为上升的曲线，到达d点后，钢筋产生颈缩现象，应力开始下降，但应变仍能增长，直到e点钢筋较为薄弱部位被拉断。相应于d点的钢筋应力称为极限抗拉强度。

在钢筋混凝土构件计算中，一般取屈服强度作为钢筋的强度限值。这是因为当钢筋应力达屈服强度以后，将产生很大的塑性变形，而且在卸荷时这部分变形是不可恢复的，这将使构件出现很大的变形和不可闭合的裂缝，以致不能使用。

高碳钢没有明显的流幅（图1-2），它的强度一般比低碳钢为高，但伸长率大为减少，其塑性性能较差。通常取相应于残余应变为0.2%的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为没有明显流幅钢筋的假定屈服强度。

塑性好的钢筋伸长率大，能给出拉断前的预告；塑性差的钢筋伸长率小，破坏无预兆，具有脆性的特征。为了保证构件破坏前有足够的预兆，选择钢筋品种需要考虑强度和塑性两方面的要求。

反映钢筋塑性性能的另一个指标是冷弯。冷弯就是检验钢筋绕一钢辊能弯多大角度而不断裂（图1-3）。钢辊直径越小，弯转角越大，钢筋的塑性就越好。冷弯与伸长率对钢筋塑性的标志是一致的。

我国目前钢筋混凝土和预应力混凝土结构中常用的钢筋有热轧钢筋、冷拉热轧钢筋、

热处理钢筋和钢丝四大类。热轧钢筋属于软钢，是热轧成型的，按其强度大小分为 I、II、III 和 IV 级，分别以 Φ 、 Φ 、 Φ 和 Φ 表示，图 1-4 为不同级别钢筋应力应变的大致图形。钢筋混凝土结构常选用 I、II 或 III 钢筋。钢丝和热处理钢筋属于硬钢，常用作预应力钢筋。

钢筋按其外形特征可分为光面钢筋和肋纹钢筋两类。I 级钢筋是光面钢筋，其余三级都属肋纹钢筋。肋纹钢筋有螺纹形和人字形，近几年又生产了月牙纹（图 1-5），新型月牙纹钢筋目前正在广泛使用。

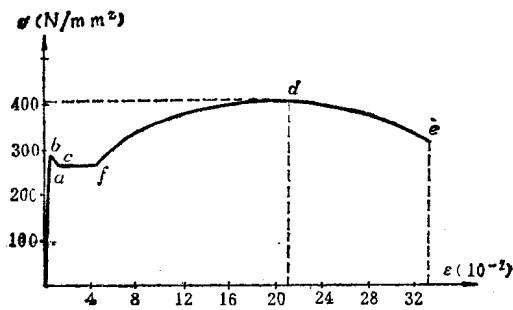


图 1-1 软钢应力应变曲线

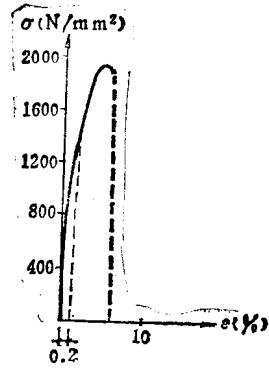


图 1-2 硬钢应力应变曲线

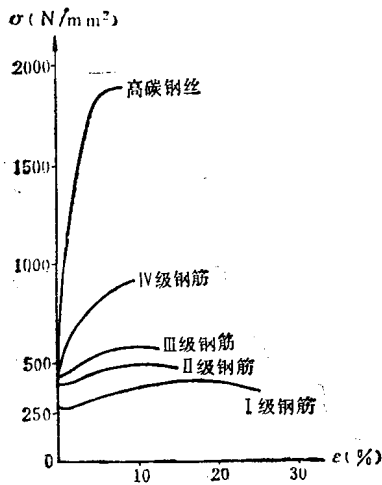


图 1-4 各级钢筋应力应变图

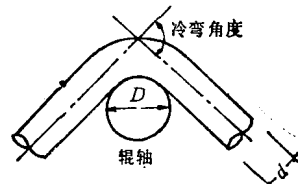


图 1-3 冷弯角度

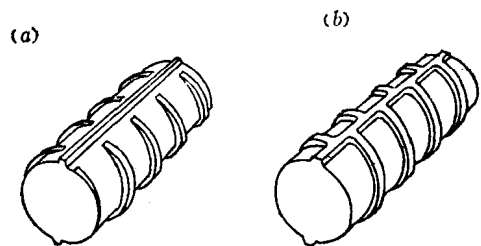


图 1-5 肋纹钢筋的外形
a) 月牙纹; b) 螺纹

二、钢筋的冷拉和冷拔

所谓冷拉，就是预先将钢筋拉伸超过它的屈服强度，然后放松，于是在使用时，钢筋就会获得比原来屈服强度更高的新的屈服强度。如图 1-6 所示，钢筋原来的应力应变曲线为 $\sigma Aacd$ ，如果预先将钢筋拉到 a 点，超过原来的屈服强度，然后放松，那么钢筋获得残余变形 oo' 。如果立即重新加荷，应力应变曲线将沿 $o'acd$ 进行，屈服强度提高到 a 点，钢

筋经冷拉后得到强化。如果冷拉到 a 点卸荷后，经过一段时间再施拉力，则应力应变曲线将沿 $o'a'c'd'$ 进行，屈服强度提高到 a' 点，这种现象称为时效硬化。

钢筋冷拉后，屈服极限提高了，但伸长率有所降低。塑性降低了，不利于承受冲击荷载和重复荷载。

I级钢筋通过冷拉可以达到拉直、除锈和拉长的目的，因其强度提高不多，故只作普通钢筋。冷拉II级、III级和IV级钢筋因其强度较高，主要用作预应力钢筋。

冷拔是将钢筋用强力拔过比其直径还小的硬质合金拔丝模（图1-7），使它产生塑性变形，拔成较细的钢丝。经多次冷拔后钢丝的强度比原来提高很多，但塑性降低。例如一根 $\phi 6$ 的I级钢筋，经三次冷拔到 $\phi 3$ 时，其强度由原来 240N/mm^2 提高到 750N/mm^2 ，而伸长率却由原来的21.9%降低到只有3.3%。

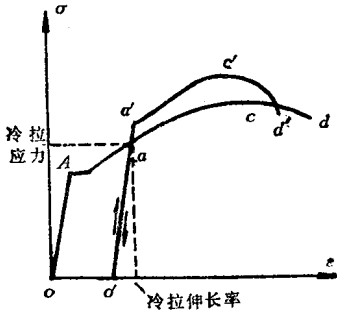


图 1-6 钢筋冷拉后的应力应变曲线

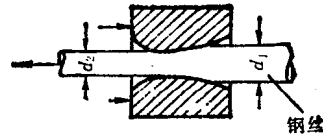


图 1-7 合金拔丝模

由低碳钢冷拔而成的钢丝叫做冷拔低碳钢丝，常用作预应力钢筋，也可用作非预应力钢筋。

钢筋进行冷拉和冷拔只能提高它们的抗拉强度，而不能提高抗压强度，这在设计中要加以注意。

第二节 混 凝 土

一、混凝土的强度

混凝土的强度与试件的形状、尺寸材料配制、养护条件及受力情况等因素有关，其主要强度有立方体抗压强度、轴心抗压强度和抗拉强度。

（一）混凝土立方体抗压标准强度 $f_{cu,k}$ 及混凝土强度等级

立方体抗压标准强度是指按照标准方法制作养护的边长为150mm的立方体试块，在28天龄期，用标准试验方法测得的具有95%保证率的抗压强度。

按同一配合比在同样条件下制作的混凝土，用同一方法到试验机上去试验，测得的立方强度是不尽相同的。图1-8示某预制构件厂生产的同一强度等级（约为C18）的混凝土的实测立方强度的统计直方图。其中横坐标为实测强度，纵坐标表示具有不同强度的试块在这个统计样本中出现的频数。显然，由于生产过程和原材料组成的不稳定所造成的强度离散性是不可避免的。

如果认为混凝土立方强度这个随机变量服从正态分布（图1-9），设测得的混凝土的

平均立方强度为 μ_{fcu} , 标准差为 σ , 离散系数 $\delta = \frac{\sigma}{\mu_{fcu}}$, 则根据数理统计知识可得具有95% 保证率的抗压强度, 即立方体抗压标准强度 $f_{cu,k}$ 为:

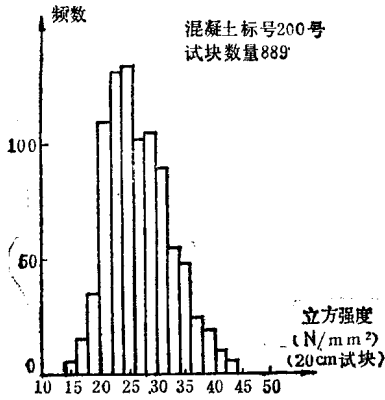


图 1-8 混凝土立方强度统计直方图

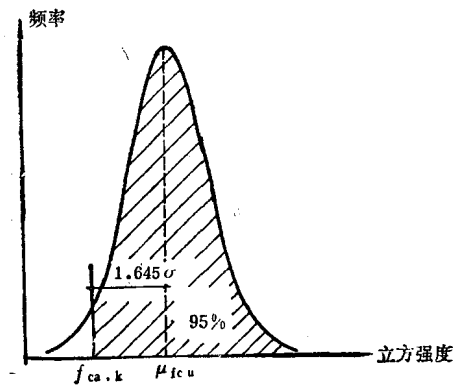


图 1-9 正态曲线

$$f_{cu,k} = \mu_{fcu} - 1.645\sigma$$

$$= \mu_{fcu} - 1.645\delta \cdot \mu_{fcu} = \mu_{fcu} (1 - 1.645\delta) \quad (1-1)$$

各种强度等级的离散系数 δ 根据统计结果可按表1-1取用。

混凝土强度的离散系数 δ

表 1-1

混凝土强度等级	C 10	C 15	C 20	C 25	C 30	C 35	C 40	C 45	C 50	C 60
离散系数 δ	0.24	0.21	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10

立方体的受力情况并不代表混凝土在构件中的受力情况, 它只是一种衡量混凝土强度的基本指标, 混凝土强度等级就是按立方体抗压标准强度确定。规范规定的混凝土强度等级有C10、C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50和C60等。C20就是表示立方体抗压标准强度为20N/mm²的混凝土。在钢筋混凝土结构中一般采用C15~C30级, 当采用II、III级钢筋时, 混凝土强度等级不宜低于C20。

(二) 混凝土轴心抗压标准强度 f_{ck}

通常钢筋混凝土受压构件的高度比它的截面边长大很多, 因此棱柱体试件的受力状态更接近于构件中混凝土的受力情况。混凝土轴心抗压标准强度是利用高宽比 $h/b = 3 \sim 4$ 的试件进行试验得出的。根据试验并考虑过去的设计经验, 规范取

$$f_{ck} = 0.67f_{cu,k} \quad (1-2)$$

由于强度等级高的混凝土在破坏时表现出明显的脆性性质, 所以C45、C50和C60混凝土由公式(1-2)算得的轴心抗压强度还应分别乘以0.975、0.95和0.9的折减系数。

(三) 混凝土抗拉标准强度 f_{tk}

混凝土的抗拉强度是确定钢筋混凝土构件抗裂度的重要指标。混凝土抗拉强度远小于其抗压强度, 一般约为 $1/8 \sim 1/17f_{cu,k}$, 而且不与 $f_{cu,k}$ 成线性关系, $f_{cu,k}$ 越大, 比值

$f_{tk}/f_{cu,k}$ 越小。根据试验及过去的设计经验，规范用

$$f_{tk} = 0.23f_{cu,k}^{\frac{2}{3}} (1 - 1.645\delta)^{\frac{1}{3}} \quad (1-3)$$

考虑到强度等级高的混凝土在破坏时表现出明显的脆性性质，C45、C50和C60混凝土由公式(1-3)求出的轴心抗拉强度还应分别乘以0.975、0.95和0.9的折减系数。

二、混凝土的变形

(一) 混凝土的应力应变曲线

试验表明，混凝土受拉和受压时，应力应变图形均为曲线。

混凝土棱柱体受压的应力应变曲线如图1-10所示，图形分为两段，应力达轴心抗压强度试验值 f_c^i 之前为上升段，之后为下降段。当应力较低($\sigma < 0.2 \sim 0.3f_c^i$)时，应力应变曲线接近直线，混凝土处于弹性阶段。随着应力的增大，应力应变曲线逐渐偏离直线而向下弯曲，即应变比应力增长快，混凝土出现明显的塑性性质。混凝土的应变包括弹性应变 ϵ_e 和塑性应变 ϵ_p 两部分。应力应变图中最大应力值就是轴心抗压强度试验值 f_c^i ，相应的应变为 ϵ_0 ， ϵ_0 约等于 $1.5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$ 。以后应力逐渐减小，应变不断增加，直到D点破坏，其相应的极限压应变为 ϵ_{max} 。

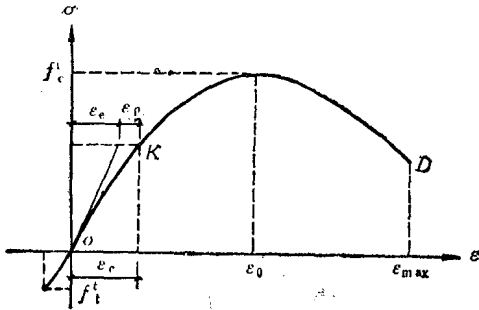


图 1-10 混凝土应力应变曲线

实际结构所受的荷载是不能象试验机那样稳定地下降，因此对于截面上压应力均匀分布的素混凝土构件来说，是不存在下降段，它的极限压应变应为 ϵ_0 。但是对于截面上压应力分布不均匀的钢筋混凝土构件，例如受弯构件，当受压边缘达到抗压强度时，并不会使构件立即破坏，这时还没有达到抗压强度的邻近纤维的应力将继续增加，从而使边缘纤维经历下降段。构件破坏时，边缘纤维的混凝土应变可达 $\epsilon_{max} = 2 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$ 。

混凝土受拉应力应变曲线类似于受压的应力应变曲线，但拉伸极限应变很小，一般只有 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.15 \times 10^{-3}$ 。

(二) 混凝土的弹性模量和变形模量

软钢在屈服前(严格地说是比例极限前)的应力与应变成正比，我们把 σ/ϵ 定义为弹性模量 E_s ，它表示材料抵抗变形的能力。只要应力小于屈服强度，同一种钢材， E_s 是一个常量。

对于混凝土来说，只当应力较小时，应力与应变才成正比，同钢材一样，也可把 $\sigma_c/\epsilon_c = \text{tg } \alpha_0$ ，即把应力应变曲线原点切线的斜率定义为混凝土的弹性模量 E_c (图1-11)，即

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \text{tg } \alpha_0 \quad (1-4)$$

当应力稍大，混凝土处于弹塑性阶段(图1-11)，为了反映这一阶段的变形性能，按弹性模量的定义，对于某点K，把割线OK的斜率定义为混凝土的变形模量 E_c' (或称弹塑

性模量)，即

$$E_c' = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_e + \varepsilon_p} \quad (1-5)$$

显然，变形模量 E_c' 不是常量，不同点（即不同应力）有不同的值， σ_c 越大， E_c' 越小。

由公式（1-4）和（1-5）知：

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_c} \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \nu E_c' \quad (1-6)$$

式中 $\nu = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_c}$ ，称为混凝土的弹性特征系数。 ν 值也不是常量，它随应力的增大而减小，也即变形模量随应力增大而减小。通常 $\nu = 0.4 \sim 1.0$ 。

通过大量试验，混凝土弹性模量取下式计算：

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{ca, K}}} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-7)$$

混凝土受拉时的弹性模量 E_{ct} 基本上与受压时弹性模量 E_c 相等，受拉时变形模量 E_{ct}' 也可表示为：

$$E_{ct}' = \nu_t E_{ct} = \nu_t E_c \quad (1-8)$$

式中 ν_t 为受拉时的弹性特征系数。混凝土临近拉裂时， $\nu_t = 0.5$ 。

（三）混凝土的收缩

混凝土在空气中结硬时，体积会收缩；在水中结硬时，体积会膨胀。收缩值比膨胀值大得多。收缩包括水泥结硬时产生的凝缩和干燥环境中产生的干缩。混凝土收缩规律如图 1-12 所示，混凝土从开始凝结起就产生收缩，初期收缩较快，两周可完成全部收缩量的 25%，一般两年后趋于稳定，最终收缩量约 $2 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$ 。

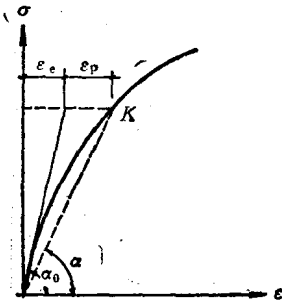


图 1-11 混凝土的弹性模量和变形模量

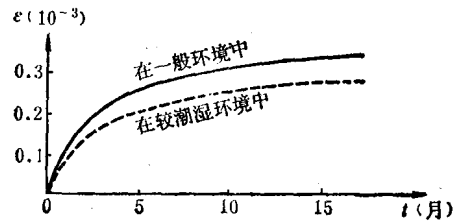


图 1-12 混凝土的收缩

混凝土收缩是不受力情况下的自发变形，当受到外部或内部约束时，将在混凝土中产生拉应力，从而导致混凝土开裂。

试验指出，水泥用量越多、水灰比越大、骨料级配越差，收缩越大。因此，加强养护、减小水灰比、减少水泥用量、加强振捣以及初凝时用铁板在构件表面上压光等都是减少收缩的有效措施。

（四）混凝土的徐变

在持续荷载作用下，混凝土变形会随着持续时间而不断增长，这种随时间而增长的变形称为徐变。徐变发展规律如图1-13所示，加荷初期，徐变增长较快，以后逐渐变慢，但持续很久，约两年左右基本稳定。徐变应变值一般约为加荷初期初始应变值的2~4倍。

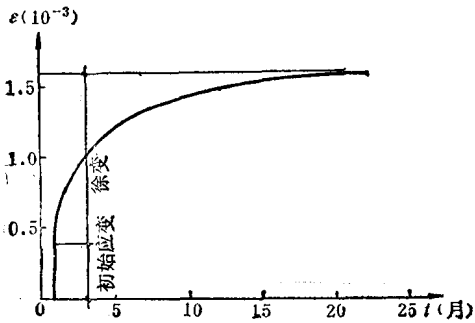


图 1-13 混凝土的徐变

试验证明，影响混凝土徐变的因素主要是持续应力的大小。持续作用的应力越大，则徐变越大。当应力较小 ($\sigma < 0.5f_c^t$, f_c^t 为轴心抗压强度试验值) 时，徐变与应力成线性关系；当应力较大 ($\sigma > 0.5f_c^t$) 时，徐变急剧增加，并会导致混凝土的破坏。所以如果构件的混凝土在使用期间经常处于不变或少变的高压应力状态是很不安全的。

试验还表明，加荷时混凝土的龄期越短，徐变越大；水泥用量越多，徐变越大；水灰比越大，徐变也越大。

混凝土的徐变会使钢筋混凝土构件的变形增加，也会导致预应力混凝土的预应力损失。但混凝土徐变也会带来一些有利的影响，例如减少应力集中现象及减低温度应力等。

混凝土的徐变会使钢筋混凝土构件的变形增加，也会导致预应力混凝土的预应力损失。但混凝土徐变也会带来一些有利的影响，例如减少应力集中现象及减低温度应力等。

混凝土的徐变会使钢筋混凝土构件的变形增加，也会导致预应力混凝土的预应力损失。但混凝土徐变也会带来一些有利的影响，例如减少应力集中现象及减低温度应力等。

第三节 钢筋与混凝土之间的粘结力

钢筋与混凝土这两种材料所以能够形成整体，共同承担作用，是因为它们之间具有足够的粘结强度，承受了由于阻止相对滑动沿钢筋和混凝土接触面上产生的剪应力，通常把这种剪应力称为粘结应力。

图1-14a示钢筋表面有塑料套管的梁，钢筋与混凝土之间不存在阻止相对滑动的相互作用力，因此梁受力后，钢筋不伸长，不参加受力，构件实际上是一有孔的素混凝土梁。图1-14b示钢筋与混凝土之间具有充分粘结强度的梁，受力后，钢筋与混凝土接触面上产生粘结应力，通过它将部分拉力传给钢筋，使钢筋受拉，从而共同承担作用。显然，钢筋中的拉力大小，取决于钢筋与混凝土之间的粘结作用。

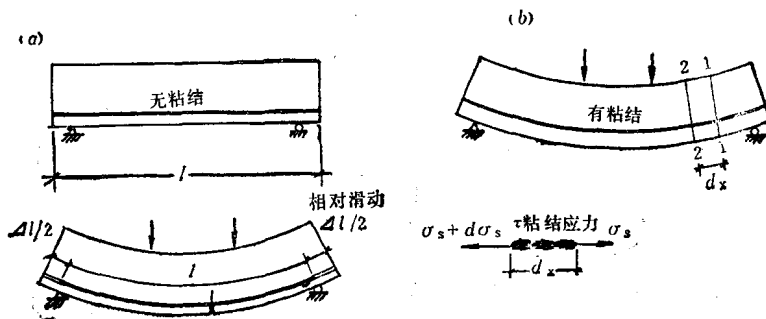


图 1-14 粘结力的作用

(a) 钢筋与混凝土之间无粘结；(b) 钢筋与混凝土之间有粘结

钢筋与混凝土之间的粘结力由三部分组成：

- (1) 水泥胶体与钢筋的胶结力；
- (2) 混凝土收缩后握裹钢筋而产生的摩擦力；
- (3) 钢筋表面凹凸不平与混凝土之间的机械咬合力。

粘结强度可用图1-15所示拔出试验来测定，即将钢筋一端埋入混凝土，另一端施加拉力。试验证明，在拔出试验的各个阶段，钢筋表面的粘结应力沿埋入长度是不均匀分布的。如拔出时的拉力为 N_a ，钢筋埋入长度为 l_a ，钢筋截面的周长为 s ，则平均粘结强度 $\bar{\tau}$ 可按下式计算：

$$\bar{\tau} = \frac{N_a}{l_a s} \quad (1-9)$$

试验还证明，钢筋与混凝土之间的粘结强度与混凝土强度等级、钢筋类型及直径、混凝土保护层的厚度、钢筋在构件中的位置等因素有关。

根据粘结强度由式(1-9)可以求出钢筋的锚固长度 l_a 。根据试验和过去的工程经验，当计算中充分利用受拉钢筋强度时，锚固长度 l_a 不应小于表1-2的规定。受压钢筋的锚固长度 l'_a 应满足 $l'_a \geq 0.7l_a$ 。

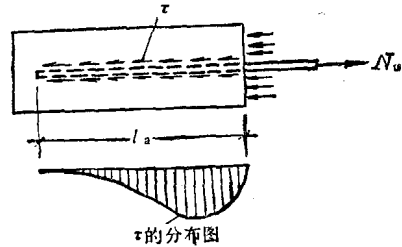


图 1-15 粘结应力分布

受拉钢筋的锚固长度 l_a

表 1-2

钢筋类型	混凝土强度等级			
	C 15	C 20	C 25	$\geq C 30$
I级钢筋(端部带标准弯钩)	40d	30d	25d	20d
II级钢筋(月牙纹)	50d	40d	35d	30d
III级钢筋(月牙纹)	—	45d	40d	35d
冷拔低碳钢丝	250mm			

注：1. 当II、III级钢筋表面为螺纹时，锚固长度按表中数值减去5d采用。

2. 直径大于25mm的II、III级钢筋，锚固长度应按表甲及注1数值加5d采用。

3. 受拉钢筋的锚固长度在任何情况下均不应小于250mm。

光面钢筋的粘结强度较差，为了增强钢筋端部的锚固作用，采用绑扎骨架和绑扎网的受拉光面钢筋的端部均应设置弯钩，标准弯钩的构造如图1-16所示。因为光面钢筋端部加了弯钩，加强了锚固，所以表1-2中规定的锚固长度比粘结强度较大的肋纹钢筋为小。

顺便指出，下列钢筋末端可不作弯钩，肋纹钢筋，焊接骨架(网)中光面钢筋，绑扎骨架中轴心受压构件内受压光面钢筋和其他构件中直径小于12mm的受压光面钢筋。

钢筋的接长如果不是采用焊接而是采用绑扎时，则接头处的钢筋内力的传递也是靠粘结力来完成，因此钢筋要有足够的搭接长度。钢筋搭接长度是钢筋锚固长度的特例，但是两根钢筋并列，钢筋的粘结面积相对减少，粘结力比单根钢筋为小，因此受拉钢筋搭接长度 l_l 不应小于 $1.2l_a$ (图1-17)，受压钢筋的搭接长度应满足 $l_l \geq 0.7 \times 1.2l_a = 0.85l_a$ 。