

钢筋混凝土结构

哈尔滨建筑工程学院印

高等工业院校试用教材

钢筋混凝土结构

王振东 主编

赵国藩 施岚青 李树瑶 王振东 编写



哈尔滨建筑工程学院

一九八七年九月

编写说明

本书是根据高等工业院校工业与民用建筑专业“钢筋混凝土结构”课中对基本构件计算部分的教学要求而编写的，内容包括：钢筋混凝土材料的力学性能，计算方法，以及弯、剪、扭、压、拉、刚度裂缝和预应力混凝土等构件计算理论及构造要求。编写时具有以下特点：

首先是据根我国目前新修订的《建筑结构荷载规范》（1985年报批稿）和《混凝土结构设计规范》（1986年第二次送稿）等有关设计规范而编写的，反映了新的科技成果，使学生所学内容尽可能与今后使用的规范一致。但是由于上述等规范目前尚未最后定稿，其内容与本教材可能会有一定出入，所以在涉及具体设计时，应以公布的规范条文为准。

其次是考虑到目前高等院校学生学习负担过重，因此，在编写时尽量贯彻少而精的原则，教材内容力求说理透彻、内容精练，文字通顺，便利教学的要求；其中带有“★”的章节可考虑让学生自学之用，建议可不列为教学要求的内容。

本书由哈尔滨建筑工程学院王振东，大连工学院赵国藩、李树瑶，北京建筑工程学院施岚青参加编写。此外哈尔滨建筑工程学院吕玉山和大连工学院王清湘分别参加受弯构件及预应力混凝土的部分例题编写工作，本书目前只是初稿、为满足兄弟院校当前教学需要，先铅印试用，待有关新的规范条文确定后，再重新整理公开出版。

由于在编写时系统的介绍了目前最新的《混凝土结构设计规范》所规定的计算理论和计算方法，因此，本书除满足工业与民用建筑专业以及有关土建类专业的教学要求外，同时也可供广大土建人员和科技工作者系统学习钢筋混凝土结构设计新规范作参考。

因时间仓促，书中可能还会有不少错误，希望读者指正。

编者

1987年8月

绪 论

混凝土是现代主要的人造工程结构材料，据1980年的统计，全世界混凝土用量达70亿吨，按当时人口45亿计，每年人平均用量达1.6吨。我国的混凝土产量从1959年到1979年的二十年间提高了四倍，年浇筑量已超过一亿立方米（约合2.5亿吨），近年来混凝土的产量增加更快。

据1983年的统计，我国水泥产量已超过一亿吨，仅次于苏联，居世界第二位。但按年人平均用量还只有1KN（100公斤），低于全世界年人平均用量2.1KN。从发展看，进入二十一世纪后，混凝土仍将是重要的工程结构材料。

混凝土是一种抗压能力比较高的建筑材料，但是它的抗拉能力却很差。这就使得混凝土结构的应用受到很大限制。例如，试验表明，一根截面为 $200 \times 300\text{mm}$ 、跨长2.5m、用C20[注]级混凝土做成的纯混凝土简支梁，承受约1.34吨作用在跨中的集中力，就因混凝土受拉而断裂为两半（图0—1a）。但是，如果用相同等级的混凝土，在混凝土构件的受拉区配置一定数量的钢筋，作成同样尺寸的钢筋混凝土构件（图0—1b），在加载过程中，混凝土开裂后，由钢筋代替混凝土承受拉力，则构件的承载力就会大大提高。例如在上述这根钢筋混凝土梁中配置2根直径20毫米的Ⅱ级钢筋，试验表明，该梁在破坏时能承受约8.7吨作用在跨中的集中力。这就说明，与纯混凝土梁比较，同样截面形状

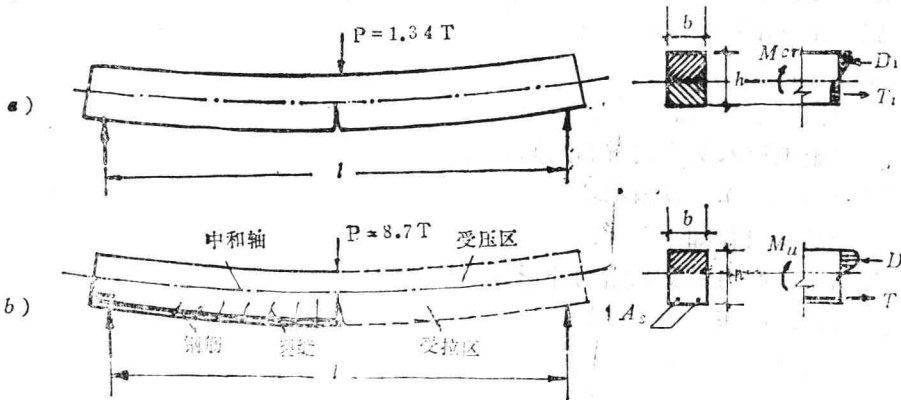


图0—1 混凝土及钢筋混凝土简支梁的承载力

和尺寸的钢筋混凝土梁可承受大得多的外荷载。钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种材料组成的共同受力的结构，除以受压为主的构件外，通常是以混凝土承担压力，以钢筋承担拉力。因此钢筋混凝土结构能比较充分地利用混凝土和钢筋这两种材料的力学性能。

钢筋和混凝土这两种性能不同的材料能结合在一起受力，主要是由于它们之间有良好的粘结力，能牢固地粘结成整体，当构件承受外荷载时，钢筋和相邻的混凝土具有相同变形而共同工作，两者不致产生相对滑动。此外，钢筋与混凝土的线膨胀系数又接近相等（钢为 1.2×10^{-5} ，混凝土为 $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-5}$ ），当温度变化时，这两种材料不致产生相对的温度变形而破坏它们之间的结合。

[注] C20表示混凝土强度等级，其中C表示混凝土，20是表示其抗压强度每平方毫米为20牛顿（N）。

钢筋混凝土除了较合理地利用钢筋和混凝土两种材料的性能外，还有下列优点：

(1) 耐久性好 处于良好环境的钢筋混凝土结构，混凝土的强度是随时间不断增长的，且钢筋受混凝土保护而不易锈蚀。所以钢筋混凝土结构的耐久性是很好的，不象钢结构那样需要定期维修。

(2) 整体性好 现浇的整体式钢筋混凝土结构，整体性好，因而有利于抗震及防爆。

(3) 可模性好 钢筋混凝土可根据设计需要，浇制成各种形状和尺寸的结构，特别适宜于建造外形复杂的大体积结构及空间薄壁结构。这一特点是砖石、钢、木等结构所没有的。

(4) 耐火性好 由传热性差的混凝土作钢筋的保护层，在遭受火灾时比钢、木结构的耐火性强。

(5) 就地取材 钢筋混凝土中所用的砂、石材料，一般可以就地或就近取材，因而材料运输费用少，可以显著降低建筑造价。而且相对来说它的能源消耗也比钢结构和砖砌体结构少。

(6) 节约钢材 钢筋混凝土结构合理地利用钢筋及混凝土各自的优良性能，在某些情况下，能代替钢结构，可节约大量钢材，降低造价。

但是，钢筋混凝土也有一些缺点：

(1) 自重比钢结构大，不利于建造大跨度结构及高层建筑。

(2) 施工比钢结构复杂，建造期一般较长，不宜在冬季和雨天施工，必须采取相应的施工措施才能保证质量。

(3) 一般情况下浇筑混凝土要用模板，现场整浇时还要用脚手架（支架），因而需要一定数量的施工用木材或钢材和其他材料。

(4) 补强维修工作比较困难。

钢筋混凝土结构可作如下分类：

(1) 按结构的受力状态和结构外形可分为杆件系统和非杆件系统两大类。杆件系统中又有受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件等等。非杆件系统可以是空间薄壁结构，也可以是外形复杂的大体积结构。

(2) 按结构的制造方法可分为整体式、装配式及装配整体式三种。整体式结构是在现场先架立模板、绑扎钢筋，然后现场浇捣混凝土而成的结构。它的整体性比较好，刚度也比较大，但生产较难工业化，施工期长，模板用料较多。装配式结构则是在工厂（或预制工场）预先制备各种构件，然后运往工地装配而成。采用装配式结构可使建筑事业工业化（设计标准化、制造工业化、安装机械化）；制造不受季节限制，能加快施工进度；并可利用工厂有利条件，提高构件质量；模板可重复使用，还可免去脚手架，节约木料或钢材。目前装配式结构在建筑工程中已普遍采用。但装配式结构的接头构造较为复杂，整体性较差，对抗震不利，装配时还需要有一定的起重安装设备。装配整体式结构是在结构内有一部分为预制的装配式构件，另一部分为现浇的混凝土。预制装配部分通常可作为现浇部分的模板和支架。它比整体式结构有较高的工业化程度，又比装配

式结构有较好的整体性。

(3) 按结构的初始应力状态可分为普通钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。预应力混凝土结构是在结构承受荷载以前,预先在混凝土中施加压力,造成人为的压应力状态,使预加的压应力可全部或部分地抵消荷载产生的拉应力。预应力混凝土结构的主要优点是抗裂性能好,能充分利用高强度材料,可以用来建造大跨度的承重结构。

钢筋混凝土结构在工程上的应用是极为广泛的。在工业与民用建筑、桥梁、道路工程、地下工程、水利水电工程、核电站、港口、航道工程、海洋工程以及水压机、机床、船舶等都广泛使用这种组合材料。

用钢筋混凝土建造的著名工程结构有:美国76层260米高的芝加哥“水塔”大厦,加拿大和苏联分别建成高度为549米及533米的预应力混凝土电视塔。大跨度的预应力混凝土桥有跨长440米的西班牙卢纳巴里奥斜拉桥(1984年)、跨长390米的南斯拉夫克尔克Ⅰ号拱桥(1980年)等。英国北海采油平台预应力混凝土贮油罐的海下深度达170米,底部直径达138米。我国建国以来修建的大型混凝土结构主要有:跨长260米的天津永和公路斜拉桥,跨长120米的福建洪塘公路下承式桁梁桥,33层106米高的广州白云宾馆,34层99米高的广州白天鹅宾馆,37层108.5米高的南京金陵饭店,29层91米高的上海宾馆,甘肃刘家峡147米高的重力坝,青海龙羊峡172米高的拱形重力坝,装机容量为271.5万千瓦的葛洲坝水电站等。

钢筋混凝土结构的应用虽然只有150年左右的历史,但因为它具有比砖石、钢木结构更多的优点,因此,国内外专家预言,钢筋混凝土仍将是今后相当长时期内的一种重要的工程结构材料,并且随着科学研究的发展,它存在的一些缺点正被逐步克服。

钢筋混凝土的发展可以从材料、结构、计算理论、试验技术等几个方面简要介绍如下:

(1) 材料方面 组成钢筋混凝土的主要材料是钢筋和混凝土,其中混凝土的发展方向是高强、轻质、耐久、抗震(爆)。

提高混凝土的强度是发展高层建筑、高耸结构、大跨结构的重要措施。这类结构的自重是结构所受荷载的主要部分,采用高强度混凝土可以减小截面尺寸,从而减轻自重,起到相辅相成的作用,因而获得较大的经济效益。目前国际上混凝土已经达到很高的强度,如罗马尼亚已制成C170的混凝土,美国已制成C200的混凝土。我国已制成C100的混凝土。预计到21世纪以后,常用混凝土的抗压强度可达 130N/mm^2 ,特制的混凝土的抗压强度可达 400N/mm^2 ,相当于现在所用的Ⅲ级钢筋的屈服强度。

利用天然轻骨料(如浮石、凝灰岩等)、工业废料轻骨料(如炉渣、粉煤灰陶粒、自燃煤矸石及其轻砂等)、人造轻骨料(如页岩陶粒、粘土陶粒、膨胀珍珠岩等及其轻砂)制成的轻骨料混凝土,具有容重小(可减轻自重10~30%)、相对强度高等优点,一般常用的轻骨料混凝土的强度等级为C15~C20,高强轻骨料混凝土可达C70。它还具有保温、抗冻性能好的优点。有的轻骨料混凝土还具有较好的延性而有利于抗震,或节约能源(如天然轻骨料及工业废料轻骨料)等优点。二十世纪六十年代以来,使构件自重减轻、截面尺寸减小的轻质高强混凝土是建造高层、大跨结构的主要材料。国外用于工程结构的轻骨料混凝土为C30~C60,容重为 $10\sim 14\text{KN/m}^3$,用于保温而不承重结构的轻骨料混凝土一般为C5~C20,容重为 $10\sim 14\text{KN/m}^3$ 。目前,我国

生产的人造轻骨料的松散容重为 $5\sim 8\text{KN}/\text{m}^3$ ，可配制成级别为 $\text{C}7.5\sim\text{C}30$ 、容重为 $12\sim 18\text{KN}/\text{m}^3$ 的轻骨料混凝土。西安和大港等地的陶粒可配制 $\text{C}40$ 的陶粒混凝土，容重为 $17\sim 19\text{KN}/\text{m}^3$ 。我国发展轻骨料混凝土的重要途径是积极利用工业废渣，如废弃锅炉煤渣，煤矿的煤矸石，火力发电站的粉煤灰等，这不仅可以利用当地工业废料，降低混凝土生产成本，而且可以变废为用，减少城市或厂区的污染，减少堆积废料占用的土地，对社会公益也是有利的。另一个途径是大力开采和利用天然轻骨料，如我国吉林、黑龙江、内蒙古、山西等地的火山群的天然轻骨料。

为了改善混凝土的抗拉性能差、延性差等缺点，二十世纪六十年代以后，掺用纤维改善混凝土性能的研究和应用发展得相当迅速。目前公认有发展前途的有掺钢纤维、掺耐碱玻璃纤维以及掺聚丙烯和尼龙等合成纤维而制成的纤维混凝土。

我国用玻璃纤维增强的水泥制品，采用耐碱玻璃纤维和低碱度水泥相配合的方法，可以大幅度提高混凝土抗拉强度，提高纤维碱化能力，构件预期寿命可在50年以上，已用于非承重和半承重的构件，并正在研究制造承重构件的问题。

钢纤维增强混凝土制品，由于具有较好的抗拉、耐磨、抗冲击等性能，已广泛用于工业厂房楼板、高层建筑、节点区、高速公路，机场跑道、军事抗爆工程、喷射混凝土隧洞衬砌等工程中。目前我国已有工厂用熔抽法或切割法生产钢纤维。

树脂混凝土是一种有机材料树脂和无机材料混凝土复合而成的新型材料，其强度可达 $10\text{N}/\text{mm}^2$ 以上。常用的树脂有聚脂树脂和环氧树脂。树脂混凝土强度高、成型性好、耐腐蚀性强，多用于冶金、化工部门有腐蚀介质的结构及容器（如酸洗槽）。国外还用于海洋结构物、高速公路路面和卫生间设备以及用于建筑装修。

聚合物浸渍混凝土可显著地提高混凝土的耐腐蚀性和强度，可用于有耐酸、耐碱要求的管道、容器、海水淡化装置、海洋平台、大坝表面的抗冲刷层等。

(2) 结构方面 近年来值得注意的发展方向之一是钢与混凝土或钢与钢筋混凝土组成的结构，如钢板混凝土、型钢与钢筋混凝土的组合梁、角钢与钢筋混凝土组合柱、以及钢管混凝土和预弯梁等。其中钢管混凝土柱是在钢管内填充混凝土，在受到轴向压力时，混凝土处于三向受压状态，因而具有抗压强度高、延性(变形能力)好的特点。由于钢管代替了模板，因此施工速度较快。这种结构近年来已在国内逐步应用。另一种施工速度快、能充分利用混凝土及钢材的强度的预弯梁的应用也发展较快。预弯梁是将预制的带有拱度的工字形钢梁，在加载状态下，在下翼缘浇筑混凝土，待混凝土达到一定强度后卸压，使下翼缘的混凝土预压，然后将其运至现场吊装，铺设预制梁板，浇筑上部混凝土，成为装配整体构件。在使用荷载作用下，下翼缘产生的外加拉应力可与预加的压应力相抵消，类似于预应力混凝土迭合式结构，但施工工艺比较简单，钢材用量虽然比钢筋混凝土结构多，但截面尺寸及自重均可减小，目前国外已用于修建桥梁及高层房屋建筑，已建成跨度达60米的公路桥。

在预应力混凝土结构中，无粘结后张预应力工艺可简化施工，降低成本。利用预应力技术还可以作为调整结构内力和变形，并作为保证结构稳定性的一种措施。

(3) 计算理论方面 钢筋混凝土宏观上是两种材料的组合体，但从微观上看，混凝土是水泥浆、砂、石、气孔、孔隙等的组合体，它的力学性能随其结构组成的不同是

相当复杂的。用力学分析钢筋混凝土结构的问题，要比以均质材料制造的结构（如钢结构）困难很多。研究混凝土的力学性能，如混凝土在复杂受力下的强度及断裂理论、混凝土的徐变理论、钢筋混凝土非线性有限元分析、在重复或反复荷载下的分析等是钢筋混凝土力学计算理论中需要深入研究的问题。

钢筋混凝土结构的设计及已建结构的鉴定，还需要对所设计的结构或已建结构的安全可靠程度作出科学的评估，应用概率论、数理统计、以及模糊数学是解决这些问题的有效途径。

（4）结构试验技术问题 由于钢筋混凝土材料的结构组成相当复杂，检验理论计算是否符合结构的实际受力情况，或者是观测结构受力后的损伤情况，研究近代试验技术，如声发射、光敏薄层、云纹法，激光散斑法等，以及模型试验技术等是钢筋混凝土学科中的一个重要方面。

钢筋混凝土结构是土木、建筑、水利工程中最基本的结构形式。本课程也是工业与民用建筑专业中极为重要的课程。学习本课程的主要目的是：掌握钢筋混凝土结构构件设计计算的基本理论和构造知识，为今后能顺利地从事结构设计工作打下牢固的基础。

在某种意义上来说，本课程是研究钢筋混凝土这一具体材料的力学理论课程。因为研究的对象不是弹性材料，它与研究弹性体的《材料力学》完全不同。在学习时应注意它们之间的异同点。钢筋混凝土的力学特性及强度理论非常复杂，人们对此认识得还不深，因此，目前钢筋混凝土结构的计算公式通常是在大量试验的基础上建立起来的。我们必须重视这种通过试验建立理论的方法，同时还应注意每一理论的适用范围和条件，在实际工程设计中才能正确运用这些理论与公式。

本课程同时又是一门结构设计课程，有很强的实践性。要搞好工程结构设计，除了要有扎实的基础理论以外，还须综合考虑材料、施工、经济、构造细节等各方面的因素。通过参加实践工作，逐步掌握对各种错综复杂因素的综合分析的能力，这是非常重要的。此外，为了培养从事设计工作的能力，必须对数字计算、整理编写设计书、绘制施工图纸等基本技能有严格的要求。

目 录

绪 论

第一章 钢筋混凝土材料的力学性能

1—1	钢筋	(1)
1—2	混凝土	(7)
1—3	钢筋和混凝土之间的粘结力	(16)

第二章 钢筋混凝土结构的设计方法

2—1	结构计算的要求	(20)
2—2	结构设计方法的概述	(21)
2—3	结构的作用、作用效应和结构抗力	(22)
2—4	结构按概率极限状态设计	(26)
2—5	按承载能力极限状态计算	(29)
2—6	按正常使用极限状态计算	(32)
2—7	数理统计中的一些基本知识★	(32)
2—8	混凝土强度标准值指标★	(36)
附录 2—1	钢筋的强度和弹性模量	(38)
附录 2—2	混凝土的强度和弹性模量	(41)

第三章 受弯构件正截面的承载能力

3—1	概述	(43)
3—2	受弯构件一般构造要求	(43)
3—3	受弯构件正截面的试验研究	(47)
3—4	正截面抗弯能力计算一般规定	(50)
3—5	单筋矩形截面梁的抗弯能力计算	(54)
3—6	双筋矩形截面梁的抗弯能力计算	(60)
3—7	T形截面梁的抗弯能力计算	(65)
3—8	正截面抗弯能力计算的几个问题★	(71)
附录 3—1	计算用表格	(74)

第四章 受弯构件斜面的承载能力

4—1	概述	(77)
4—2	无腹筋梁的抗剪能力计算	(78)
4—3	有腹筋梁的抗剪能力计算	(85)
4—4	斜截面抗剪能力计算的几个问题★	(96)
4—5	斜截面抗弯能力问题	(98)

4—6	钢筋的构造要求	(103)
第五章	受扭构件扭曲截面的承载能力	
5—1	概述	(112)
5—2	试验研究分析	(112)
5—3	矩形截面纯扭构件的承载能力	(113)
5—4	矩形截面弯剪扭构件的承载能力	(117)
5—5	T形和工字形截面弯剪扭构件的承载能力	(120)
5—6	受扭构件的构造要求	(122)
第六章	受压构件正截面的承载能力	
6—1	概述	(127)
6—2	受压构件的构造要求	(128)
6—3	轴心受压构件的抗压能力计算	(129)
6—4	偏心受压构件的抗压弯能力计算	(138)
6—5	偏心受压构件工字形截面的抗压弯能力计算	(162)
6—6	双向偏心受压构件的抗压弯能力计算	(169)
第七章	受拉构件正截面的承载能力	
7—1	概述	(173)
7—2	小偏心受拉构件的抗拉弯能力计算	(173)
7—3	大偏心受拉构件的抗拉弯能力计算	(174)
第八章	钢筋混凝土构件裂缝及变形的验算	
8—1	概述	(178)
8—2	裂缝宽度的验算	(180)
8—3	变形的验算	(190)
8—4	受弯构件不需作挠度计算的最大跨高比★	(199)
第九章	预应力混凝土构件的计算	
9—1	概述	(201)
9—2	施加预应力的方法及锚夹具	(203)
9—3	预应力混凝土的材料	(207)
9—4	预应力混凝土结构计算的一般规定	(209)
9—5	预应力混凝土轴心受拉构件的计算	(216)
9—6	预应力混凝土受弯构件的计算★	(236)
9—7	预应力混凝土构件的构造要求★	(255)
附 表	非法定计量单位与法定计量单位的换算关系	(259)

第一章 钢筋混凝土材料的力学性能

1—1 钢 筋

1—1—1 钢筋的种类和级别

我国目前通用的钢材有热轧碳素钢和普通低合金钢二种，两者的区别主要在于化学成分不同。

热轧碳素钢除含有铁元素外还含有少量的碳、硅、锰、硫、磷等元素，其力学性能与含碳量有关：含碳量高，其强度也高，质地硬，但塑性降低。在钢筋中目前常用的碳素钢主要是低碳钢和高碳钢两种。低碳钢含碳量低于0.25%，如3号钢即属此类；高碳钢含碳量超过0.6%，如碳素钢丝、刻痕钢丝等。

普通低合金钢的成分，除含有热轧碳素钢的元素外，再加入少量的合金元素，如硅、钛、锰、钒等，这些合金元素虽然含量不多，但却大大地改善了钢材的塑性性能。

对于钢筋混凝土和预应力混凝土结构中所用的钢筋和钢丝，按其生产加工工艺和力学性能的不同，可分为热轧钢筋、冷拉钢筋、热处理钢筋和钢丝四大类。

一、热轧钢筋

根据国家标准GB1499—84的规定，热轧钢筋按其强度由低到高分四级：

I级热轧钢筋—(A3、AY3)

II级热轧钢筋—(20MnSi、20MnNb6)；

III级热轧钢筋—(25MnSi)；

IV级热轧钢筋—(40Si₂MnV、45SiMnV、45Si₂MnTi)。

在上述的四级钢中，除I级钢筋外其它三级钢筋号的名称中，前面的数字是表示该钢材平均含碳量的万分数，其它化学元素的尾标数字表示该元素平均含量的取整百分数。当其平均含量小于1.5%时，不加尾标数字；当平均含量大于1.5小于2.5%时，取尾数为2。例如40硅₂锰钒(40Si₂MnV)：40是指平均含碳量为0.4%，硅的含量为2%（取整数），锰钒的含量为1%（取整数）。

I级热轧钢筋

它是光面的热轧圆钢筋，是一种低碳钢，质量稳定，塑性及焊接性能好，但强度低，主要用于中小型钢筋混凝土结构构件中的受力钢筋以及各种构件的箍筋和构造钢筋。

II级热轧钢筋

其强度比较高，塑性和可焊性都比较好，为增加钢筋与混凝土之间的粘结力，表面轧制成螺旋形，现在生产的多为月牙纹形钢筋。它主要用作大中型钢筋混凝土结构，特别是承受多次重复荷载、地震作用以及其它振动和冲击荷载的结构构件中的受力主筋和预应力混凝土构件中的非预应力钢筋。

III级热轧钢筋

其表面形状与II级钢筋相同，钢筋与混凝土之间同样具有较好的粘结性能；塑性和可

塑性也比较好,因此,其用途与Ⅱ级钢筋相同。但其强度比Ⅱ级钢筋高,如果用于普通钢筋混凝土结构中,会使混凝土裂缝开展得很大。故在这类构件中由于受到混凝土裂缝宽度的限制,其强度只能按Ⅱ级钢筋取用。

Ⅳ级热轧钢筋

其表面形状亦与Ⅱ级钢筋相同,但其强度很高,在普通钢筋混凝土构件中强度得不到充份利用,因此它较多的是用来经冷拉后作预应力钢筋使用。Ⅳ级钢筋焊接性能差,通常只能采用符合特殊工艺要求的预热闪光对焊。另外在低于 -30°C 的低温条件下,这种钢筋容易发生冷脆,不宜采用。

上述的变形钢筋外形,如图1—1所示。其中螺纹钢的横肋与其纵肋相连(图1—1a);而月牙纹钢筋外形改变了这一情况,其横肋高度向两端逐步降至零,不与纵肋相连,这样可以避免纵横肋相交处应力集中的现象。其缺点是与螺纹钢相比,月牙纹钢筋与混凝土的粘结力略有降低。

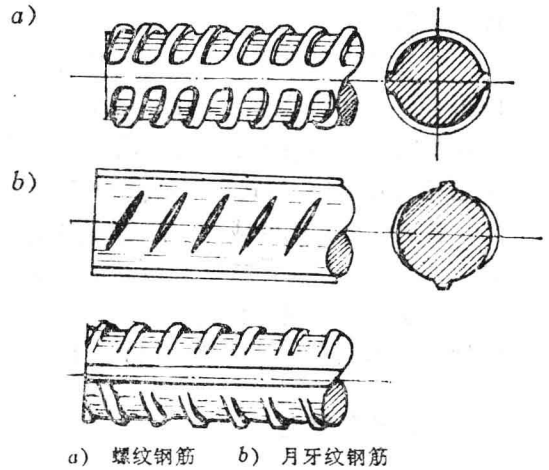


图1—1 变形钢筋外形

二、冷拉钢筋

各个等级的热轧钢筋都可以通过冷拉来提高其屈服强度。Ⅰ级钢筋通过冷拉可以达到拉直除锈和拉长的目的,一般可拉长7—10%,从而节约钢材,通常可用于普通钢筋混凝土结构;但由于其抗拉强度较未冷拉前为高,钢筋屈服时混凝土裂缝宽度开展较大,因此对于轴心受拉及小偏心受拉构件不宜采用。冷拉Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级钢筋主要用作预应力钢筋。钢筋经过冷拉后性能变脆,对承受冲击荷载或重复荷载的构件及处于负温下的结构,一般不宜采用冷拉钢筋。另外,由于在很高的焊接温度下钢筋的冷拉强化效应将完全消失,因此对钢筋必须先焊接,然后进行冷拉。

三、热处理钢筋

热处理钢筋是Ⅳ级热轧钢筋等经过加热淬火和回火处理后制成的。钢筋经过淬火后强度大幅度地得到提高,但塑性和韧性相应地降低。通过高温回火可以在不降低强度的前提下改变淬火形成的不稳定组织,消除淬火产生的内应力,使塑性和抗冲击韧性得到改善,是理想的预应力钢筋。但腐蚀可导致热处理钢筋在高应力状态下产生裂隙以致脆断。因此,这种钢筋的保管和使用都应遵守专门规定。

四、钢丝

直径小于6mm的钢筋称钢丝。钢丝的直径越细,强度越高。国家标准GB5223—85,对钢丝的规格、性能作了具体规定。钢丝都用于预应力混凝土结构,因此,它将在第九章《预应力混凝土结构》内介绍。

冷拔低碳钢丝是用小直径的Ⅰ级热轧钢筋在施工现场或予制构件厂用拔丝机经几次

冷拔而成的。由于原材料来源较为复杂，冷拔质量也不稳定，因此，规范规定把冷拔低碳钢丝分为两级：甲级钢丝质量要求较严，要求对钢丝逐盘取样检验，确定其强度，它主要用作民用建筑中小型预应力构件的预应力筋。

乙级钢丝只要求分批进行抽样检查，故实际强度取值仍存在一定的分散性，其设计强度只能取用其中一个较低值，一般只能用于中小型构件的箍筋和构造钢筋以及焊接网和焊接骨架中的钢筋。

1—1—2 钢筋的强度及变形

钢筋混凝土结构所用的钢筋按其在单向受拉时试验所得的应力应变曲线性质不同，可分为有明显屈服点的钢筋和无明显屈服点的钢筋两大类：

一、有明显屈服点的钢筋

图1—2所示为有明显屈服点的钢筋应力应变曲线。由图可以看出：在 a 点以前应力应变为直线关系， a 点的钢筋应力称为“比例极限”。当应力达到 b 点后钢筋的应力应变关系发生明显变化。超过 b 点以后钢筋的应力将下降到 c 点，然后在应力基本不变的情况下应变不断增长，从而产生相当大的塑性变形。我们把 b 点称为上屈服点， c 点称为下屈服点，与下屈服点相对应的钢筋应力称为“屈服强度”；水平段 cd 称为屈服台阶或流幅。过 d 点以后，钢筋的应力应变表现为上升的曲线；到达 e 点后，钢筋产生颈缩现象，应力开始下降，但应变仍能继续增长，直到 f 点钢筋在其某个较为薄弱部位被拉断。相应于 e 点的钢筋应力称为它的极限抗拉强度，曲线的 de 段通常称为“强化段”， ef 段称为“下降段”

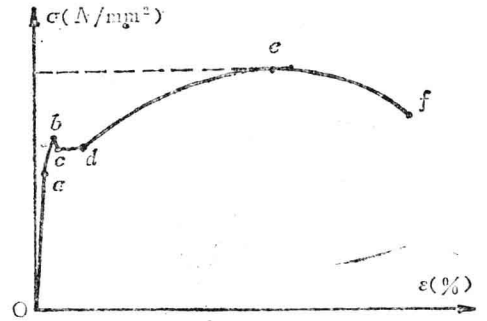


图1—2 有明显屈服点钢筋的应力应变曲线

在钢筋混凝土构件计算中，一般取钢筋的屈服点作为强度计算指标。这是因为当结构构件某个截面中的受拉或受压钢筋应力到达屈服以后，在荷载基本不增长的情况下产生较大的塑性变形。此时钢筋应力尚未进入强化阶段，而构件由于塑性变形过大最终产生不可闭合的裂缝而导致构件破坏，故取钢筋的屈服强度作为构件破坏时的强度计算指标。

二、没有明显屈服点的钢筋

如图1—3所示为没有明显屈服点的钢筋应力应变曲线。由图可以看出：钢筋没有明显的流幅，塑性变形大为减少。通常取相应于残余应变为0.2%的应力作为其假定的屈服强度(或称条件屈服强度)，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。条件屈服强度大致相当于极限抗拉强度的0.86~0.90倍。为了统一起见，《混凝土结构设计规范》规定取条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为极限抗拉强度 σ_s 的0.8倍，即 $\sigma_{0.2} = 0.8\sigma_s$ 。

图1-4列出各类钢筋的应力应变曲线。

从图中可以看出：自I级钢筋到IV级钢筋的应力应变曲线都有明显的屈服点，这种钢即为低碳钢，亦称软钢。而没有明显屈服点热处理的钢筋和碳素钢丝，称为硬钢。

当钢材的应力在比例极限范围以内时，其应力与应变的关系，可用下式表示：

$$E_s = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1-1)$$

上式中 E_s 为钢材的弹性模量，单位为 N/mm^2 。各种钢材的弹性模量见表1-1。

钢筋的塑性是指钢材应力超过屈服点以

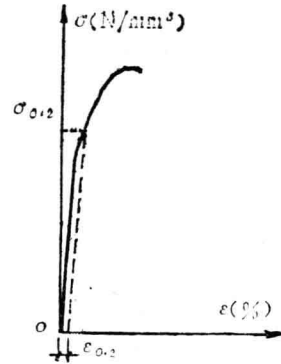


图1-3 没有明显屈服点钢筋的应力应变曲线

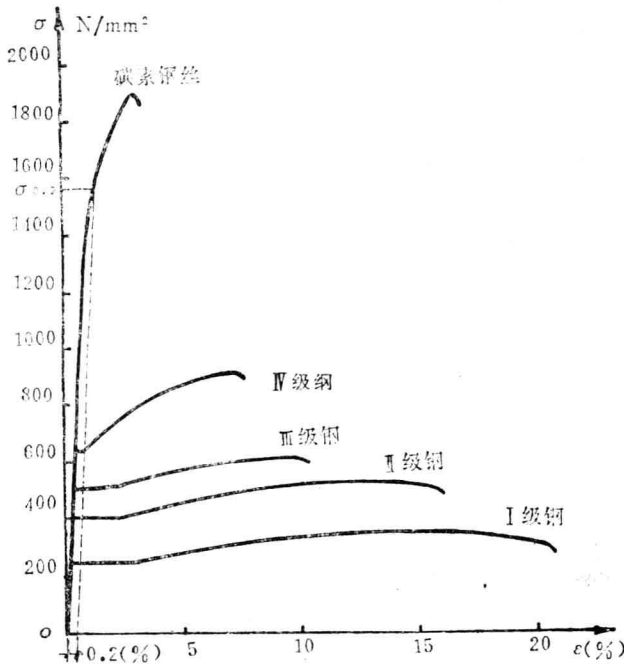


图1-4 各级钢筋的应力应变曲线

后，由于塑性变形容易拉得很长，或绕着很小的直径能够弯得很大的角度而不至的裂断性能，通常以钢筋试件的伸长率和冷弯试验来表示。

钢筋的伸长率 δ 按下式进行计算（图1-5）：

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

式中 l_0 —— 试件拉伸前的标距。目前有两种试验标距可以采用：

短试件 取 $l_0 = 5d$ ；
长试件 取 $l_0 = 10d$ 。

d ——钢筋直径。

l ——试件拉断后，在原标距范围内，由于残余变形的存在伸长后的标距尺寸。

钢筋伸长率愈大，塑性性能愈好。表1—1中分别以 δ_5 和 δ_{10} 表示短试件和长试件的伸长率。

钢筋的冷弯试验（图1—6）就是在常温下将钢筋绕直径 D 冷弯 α 角度而不至于出现

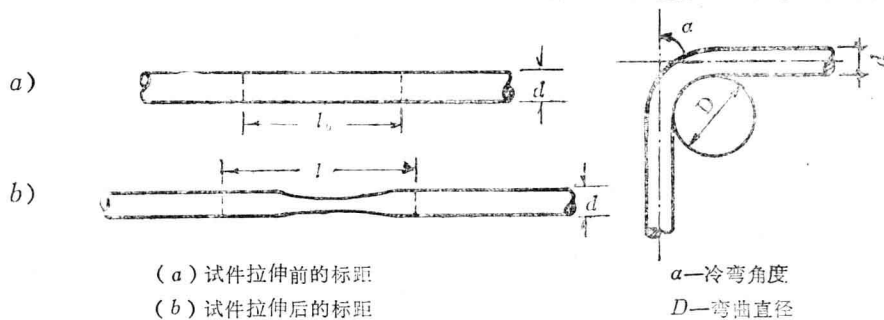


图1—5 钢筋拉伸时试件的标距

图1—6 钢筋的冷弯

裂缝的试验过程，通常以冷弯角度 α 和弯心直径 D 与钢筋直径 d 的比值来表示。当弯心直径 D 愈小，而 α 值愈大，则塑性性能愈好。冷弯性能指标列于表1—1。

伸长率和冷弯对钢筋塑性的标志是一致的。塑性好的钢筋，伸长率大，有明显的拉伸预兆；塑性差的钢筋，伸长率小，破坏是突然的，具有脆性的特点，没有明显预兆。为了保证构件破坏前有足够的预兆，因此对钢筋品种的选择需要考虑强度和塑性两方面的要求。

钢筋品种及机械性能

表1—1

钢筋种类	符号	伸长率%		冷弯试验	
		δ_5	δ_{10}	角度	D 值
I级钢筋	ϕ	25	21	180°	1d
II级钢筋	\oplus	16	—	180°	3d
III级钢筋	\oplus	14	—	90°	3d
IV级钢筋	\oplus	10	8	90°	5d
热处理钢筋	\oplus'	—	6	—	—

1—1—3 钢筋的冷加工

对软钢进行机械冷加工（冷拉、冷拔等），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。

一、冷拉

所谓冷拉是指把有明显屈服点的钢筋应力拉到超过其原有的屈服强度，如图1—7上的 K 点，然后放松，使钢筋应力重新恢复到零（即图中曲线将沿着平行于 OA 的直线 KE 回到 E 点），钢筋发生了残余变形。此时如果立即再次张拉，则钢筋的应力应变曲

线将沿图1—7中的 $EKBC$ 线发展，图形中的转折点 K 高于冷拉前的屈服点 S ，从而钢筋在第二次受拉时能够获得比原来更高的屈服强度，这种现象称为钢筋的“冷拉强化”。

如果将钢筋经冷拉放松后，放置一段时间再行张拉，则其应力应变曲线将沿图中的 $EK'DF$ 发展，曲线的转折点提高到 K' 点，此时钢筋获得了新的弹性阶段和屈服点，其屈服台阶也较冷拉前有所缩短，伸长率也有所缩小，这种现象称为“时效硬化”。合理选择 K 点可使钢筋强度有所提高，同时又保持一定的塑性，这时 K 点的应力称为拉冷控制应力，对应于拉冷控制应力的应变称为冷拉伸长率。

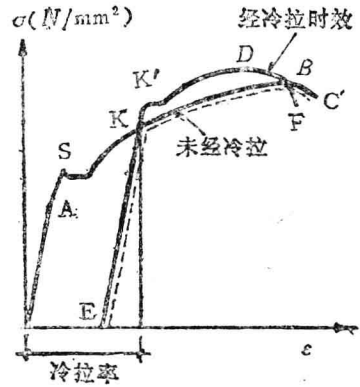


图1—7 钢筋冷拉后的应力应变曲线

冷拉是用卷扬机或其他张拉设备（千斤顶等）对热轧钢筋进行张拉。张拉时若采用钢筋的伸长率而不测冷拉时的应力来控制，叫做单控。即在一批钢筋被冷拉前，从其中抽取一定数量的试件进行拉伸试验，测出每个试件在规定的控制应力下的冷拉伸长率，然后根据试验结果确定一个统一的冷拉伸长率，最后在施工时用此确定的冷拉伸长率进行冷拉。另一种方法叫做双控，即首先根据规范规定的控制应力值进行冷拉，而相应的伸长率也不能超过规定的范围。对抗拉强度低的钢筋，可适当增大冷拉伸长率，使其应力提高到规定的控制应力值。但不能过份增大，否则会使钢筋塑性过分降低而带来其他不利的影晌。如果试验时测得的伸长率已达到规范规定的最大冷拉伸长率而相应的钢筋强度仍未达到规定的控制应力值时，则此类钢筋应该挑出不能使用，以防止由于伸长率过大而使钢筋塑性性能变坏的后果。此外，当试验测得的钢筋强度已达到控制应力值，而其相应的伸长率远未达到规定的最小冷拉伸长率时，则应按最小冷拉伸长率进行冷拉，以保证一批钢筋中部份抗拉强度偏低的钢筋建立必要的控制应力。

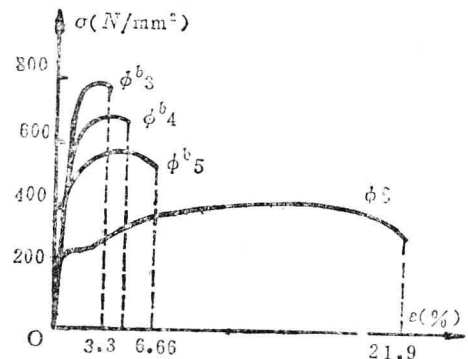


图1—8 冷拔低碳钢丝的应力应变曲线

二、冷拔

冷拔是将钢筋用强力拔过比它本身直径还小的硬质合金拔丝模，这时钢筋同时受到纵向拉力和横向压力的作用，截面变小而长度增长。经多次冷拔后钢丝的强度比原来提高很多，但塑性降低。图1—8为 $\phi 6$ 的 I 级钢筋经过三次冷拔到 $\phi 3$ 的应力应变曲线的比较。由图1—3可见，经冷拔后钢丝没有明显的屈服点和流幅，强度虽然由 260N/mm^2 提高到 750N/mm^2 ；但伸长率却由 21.9% 降低为 3.3% 。由 $\phi 6$ I 级钢筋经冷拔而成的钢丝称为冷拔低碳钢丝。

经过冷加工的钢筋，加热后其力学性能将发生变化。当加热到200℃时，钢筋的强度还略有提高；当加热到450℃时，则强度略有降低；当温度达到700℃时，钢筋会恢复到原有的力学性能。但硬化的消失和原有性能的恢复，需要有一定的高温延续时间。因此如果采用适当的焊接方法，将加热的持续时间加以控制时，则在焊接后可不致造成钢筋的屈服点或强度极限值过分的降低。

1—2 混凝土

混凝土是由水泥、砂子、石子和水按一定的配合比拌和而成的人工石材。水泥和水在凝结硬化过程中形成水泥胶块把砂子和石子等骨料粘结在一起。砂子和石子等骨料和水泥胶块中的结晶体组成弹性骨架承受外力。弹性骨架使混凝土具有弹性变形的特点，而水泥胶块中未硬化的凝胶体使混凝土具有塑性变形的性质，它需要在较长时间内逐渐硬化。由于混凝土内部结构比较复杂，因而其力学性能也较为复杂。

1—2—1 混凝土的强度

一、混凝土的立方体强度 f_{cu}

混凝土的抗压强度主要与其所用材料质量、混凝土组成、截面尺寸、施工方法和养护条件等因素有关。一般采用立方体强度作为衡量强度等级的标准，以 f_{cu} 表示之。即边长为150mm的立方体试块，在温度 $20^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 及相对湿度不低于90%的环境里养护28天，以每秒 $0.2 \sim 0.3\text{N/mm}^2$ 的速度加载进行试验所得的抗压强度极限值（以 N/mm^2 表示）。

规范规定混凝土强度分成12个强度等级，即C7.5、C10、C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60。其中7.5~60等数值是表示以 N/mm^2 为单位的立方体抗压强度的大小。

混凝土的抗压强度与试验方法有关。如在与压力机压板接触的试块表面上涂上一层润滑剂（如石蜡），其抗压强度将比表面不加润滑剂试块的抗压强度低很多，而两者的破坏情况也各不相同。在标准试验情况下，是把表面不涂油脂的试块直接放在压力机上的上下压板之间进行加载的。由于试块表面与压板之间存在着摩擦力，它好像一道箍一样阻止了试块的横向变形，延缓了裂缝的开展，因而提高了强度，试块呈二个对顶的角锥形破坏面（图1—9a）。如果在试块上下表面涂上一层润滑剂之后，则其摩擦力会大大的减小，试块沿着与作用力的平行方向产生几条裂缝，不久试件即将破坏（图1—9b）。这样得到的抗压极限强度较低。

混凝土抗压强度与试块的龄期和养护条件有关，在一定的湿度和温度条件下，混凝土的强度开始时增长很快，以后增长逐渐减慢，这个强度增长过程，往往延续许多年（图1—10）。从该图可以看出，混凝土试块在潮湿环境下养护时其后期强度较高；而在干燥环境下养护时，虽然其早期强度略高，但其后期强度比前期要低。

混凝土的抗压强度与试块的尺寸和形状有关，当试件上下表面不加润滑剂加压时，立方体越小摩擦力作用的影响也愈大，量测所得的极限强度值越高；反之则愈低，这种