

高等学校教学用书

50984

钢筋混凝土结构

(专 科 教 材)

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

钢筋混凝土结构

(专科教材)

长春建筑专科学校 侯治国

武汉冶金建筑专科学校 杨锡琪

主编

冶金工业出版社

前 言

为适应我国高等工业专科教育的发展,我们依据专科学校工业与民用建筑专业“钢筋混凝土结构”课程教学要求,编写了本书。本教材参考了《建筑结构统一标准》(GBJ68—84)、《混凝土结构设计规范》(第二次送审稿)新标准,新规范;采用了新的国际通用符号和我国法定计量单位;并附有有关专业术语的英语词汇。

全书共十二章,主要内容包括钢筋混凝土材料的物理力学性能;以概率理论为基础的极限状态设计原理;以平截面假定为基础的受弯构件正截面强度计算;受弯构件斜截面强度计算;受拉、受扭、受压构件强度计算;构件的裂缝宽度与变形计算;预应力混凝土构件;梁板结构,单层工业厂房,多层及高层房屋等。除对基本构件作了较详尽的叙述并配有典型的例题和习题外,还附有肋形楼盖、排架和框架结构实例。本书编写力求具有专科教材的特点,作到理论联系实际,便于自学。

本书主要作为专科学校工业与民用建筑专业的教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

全书由侯治国、杨锡琪主编。参加编写的有长春建筑专科学校侯治国(第3、4、8章),孙精诚(第5、6、7章),陆怀本(第9章);武汉冶金建筑专科学校杨锡琪(绪论、第1、2、10章),赵传智(第11、12章)。由陆怀本、赵传智主审。

在编写过程中,南京航务工程专科学校林坚、彭源图,南京金陵职业大学单香麟等同志参加了讨论并给予指导。吴富英、沈仪贞、葛建国、李风祥为本书插图作了大量工作。在此谨致谢意。

在有关设计规范正式颁布后,其内容可能与本书有不一致之处,望读者在涉及具体设计工作时,以国家正式颁布的规范为准。

由于我们水平有限,编写时间仓促,书中的不妥乃至错误之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

1986年10月

目 录

绪论	1
0.1 钢筋混凝土的一般概念	1
0.2 钢筋混凝土的主要优缺点	2
0.3 钢筋混凝土的应用和发展简况	3
1 钢筋混凝土材料的物理力学性能	5
1.1 混凝土的强度	5
1.2 混凝土的变形	10
1.3 钢 筋	17
1.4 钢筋与混凝土之间的粘结力	23
2 钢筋混凝土结构的基本计算原理	26
2.1 概 述	26
2.2 极限状态的分类及其设计要求	27
2.3 建筑结构的荷载	27
2.4 结构构件的抗力	31
2.5 建筑结构可靠度的概率分析	33
2.6 极限状态设计表达式	37
2.7 设计系数的确定原则与规定	39
3 受弯构件正截面的强度计算	43
3.1 基本构造要求	43
3.2 正截面试验分析结果	47
3.3 单筋矩形截面的强度计算	55
3.4 双筋矩形截面的强度计算	63
3.5 单筋 T形截面强度计算	71
习题	81
4 受弯构件斜截面强度计算	84
4.1 斜截面的工作阶段及其破坏情况	84
4.2 影响斜截面抗剪强度的主要因素	87
4.3 斜截面的强度计算	89
4.4 保证斜截面抗弯强度的构造措施	101
4.5 钢筋的构造要求	106
习题	114
5 受扭构件	116
5.1 受扭构件的限制条件	116
5.2 受扭构件的强度计算	119
5.3 受扭构件的构造要求	125
习题	127
6 受压构件	128

6.1 轴心受压构件	128
6.2 偏心受压构件	136
6.3 偏心受压构件斜截面抗剪强度计算	162
习题	163
7 受拉构件	164
7.1 轴心受拉构件的正截面强度计算	164
7.2 偏心受拉构件的正截面强度计算	164
习题	166
8 钢筋混凝土构件的变形和裂缝计算	167
8.1 概述	167
8.2 构件抗裂度计算	168
8.3 受弯构件的变形计算	169
8.4 裂缝宽度验算	182
8.5 钢筋的代换	189
习题	190
9 预应力混凝土构件	192
9.1 预应力混凝土的基本概念	192
9.2 预加应力方法和锚具	193
9.3 预应力混凝土材料	196
9.4 张拉控制应力和预应力损失	197
9.5 预应力混凝土轴心受拉构件	202
9.6 预应力混凝土受弯构件	214
9.7 预应力混凝土构件的构造	233
习题	234
10 梁板结构	236
10.1 整体式单向板肋形楼盖	236
10.2 双向板肋梁楼盖	267
10.3 无梁楼盖	277
10.4 装配式楼盖	286
10.5 楼梯	293
10.6 雨篷	301
11 单层工业厂房	320
11.1 单层工业厂房的结构组成与受力特点	320
11.2 单层工业厂房的结构构件选型与支撑布置	322
11.3 单层工业厂房铰接排架的内力分析与组合	333
11.4 单层工业厂房排架柱设计	355
11.5 牛腿与预埋件设计	357
11.6 柱下单独基础设计	362
11.7 单层工业厂房铰接排架设计实例	369
12 多层及高层房屋	400
12.1 多层及高层房屋的结构类型	400
12.2 框架房屋的结构布置与计算简图	404

12.3	框架结构的近似内力分析	406
12.4	框架结构的内力组合与杆件设计	414
12.5	多层框架房屋设计实例	426
12.6	剪力墙结构的内力计算	448
12.7	剪力墙的截面强度计算与构造要求	461
12.8	框架——剪力墙结构的计算特点	468
12.9	基础	472
附表 1	混凝土设计强度	484
附表 2	不同 ρ^f 值时混凝土的疲劳强度修正系数 γ_p	484
附表 3	混凝土弹性模量 E_c	484
附表 4-A	钢筋设计强度	485
附表 4-B	钢丝设计强度	485
附表 5	钢筋弹性模量	486
附表 6-A	钢筋疲劳计算强度	486
附表 6-B	预应力钢筋疲劳设计强度	486
附表 7	受弯构件的允许挠度	487
附表 8	裂缝控制等级、混凝土拉应力限制系数及最大裂缝宽度允许值	487
附表 9	钢筋混凝土矩形和 T 形截面受弯构件强度计算表	488
附表 10	受拉钢筋的锚固长度 l_a	488
附表 11	钢筋混凝土构件中受力钢筋的最小配筋百分率	489
附表 12	γ 取值表	489
附表 13	截面抵抗矩塑性系数 γ_m	489
附表 14	钢筋混凝土结构伸缩缝最大间距	491
附表 15	钢筋的计算截面面积及理论重量	491
附表 16	钢筋混凝土板每 m 宽的钢筋用量表	492
参考文献		493

绪 论

0.1 钢筋混凝土的一般概念

钢筋混凝土 (reinforced concrete) 是由钢筋和混凝土两种力学性能不同的材料所组成。由于混凝土的抗压强度较高, 但抗拉强度却很低 (大约只有其抗压强度的 $1/10$), 而钢筋的抗拉和抗压强度均很高, 因此, 将这两种材料合理地结合在一起共同工作, 使混凝土主要承受压力, 钢筋主要承受拉力, 这样可以扬长避短, 成为一种具有良好使用性能的钢筋混凝土构件或结构。

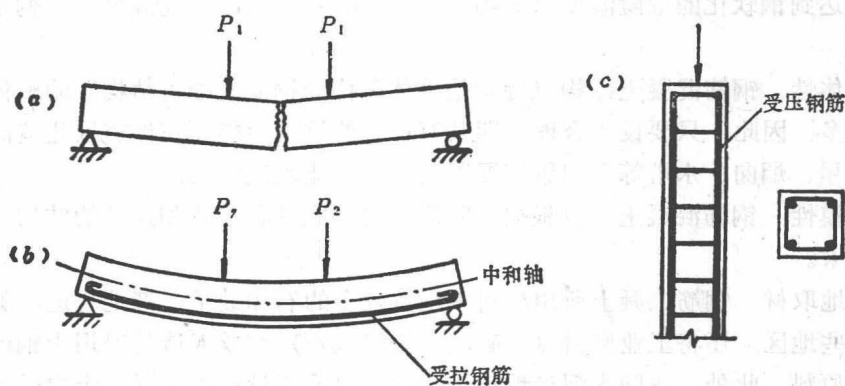


图 0-1

例如, 图0-1a、b所示的两根简支梁, 前者是未配置钢筋的素混凝土梁, 后者则是在受拉区配置适量钢筋的钢筋混凝土梁, 根据试验, 两者的承载能力和破坏方式有很大差别。素混凝土梁 (plain concrete beam), 由于混凝土抗拉强度很低, 在不大的荷载作用下, 梁就会在受拉区边缘开裂, 并且迅速导致脆性破坏。钢筋混凝土梁, 由于在梁的受拉区配置了适量的钢筋, 此时受拉区的抗拉能力明显得到加强, 在荷载作用下, 当受拉区混凝土开裂后, 梁中和轴以下受拉区的拉力可转移给钢筋来承受, 中和轴以上受压区的压应力则仍由混凝土来承受, 只要梁内配筋适当, 梁就不会突然脆性破坏, 并且梁上荷载仍可以继续增加, 直到受拉钢筋应力达到屈服强度, 混凝土的压应力达到抗压极限强度时, 梁才开始破坏。由此可见, 经过配筋以后的钢筋混凝土梁可以充分发挥钢筋和混凝土这两种材料的受力特性, 从而大大提高梁的承载能力。

在受压的混凝土柱中, 通常也配置钢筋, 见图0-1c。其目的是协助混凝土承受压力, 从而可以减小柱截面尺寸, 提高柱的承载能力。同时还可以增强构件的延性(ductility), 防止构件突然脆性破坏。

钢筋和混凝土是受力性能不同的两种材料, 然而它们能够结合在一起共同工作。其主要原因是: 由于混凝土硬化后钢筋和混凝土之间产生了良好的粘结力, 使两者牢固地粘结在一起, 在荷载作用下, 相互之间不致发生相对滑动, 而能整体工作; 其次, 两者的温度

线膨胀系数非常接近，钢筋为 1.2×10^{-5} ，混凝土为 $(1.0 \sim 1.48) \times 10^{-5}$ ，当温度发生变化时，不致因胀缩不同而破坏它们的整体性。

0.2 钢筋混凝土的主要优缺点

钢筋混凝土结构除了能合理地利用钢筋和混凝土两种材料的受力性能外，尚有下列许多优点：

(1) 耐久性 根据实际的观察，建造很久的钢筋混凝土结构中的钢筋，由于受到混凝土的保护而不致锈蚀，同时混凝土本身的强度又随时间的增加而有所增长，所以钢筋混凝土结构具有良好的耐久性，不象钢结构那样需要经常的保养和维修。即使处于侵蚀性气体或受海水浸泡的钢筋混凝土结构，只要选择适当的水泥和骨料，经过合理的设计，其耐久性也是很高的。

(2) 耐火性 因为混凝土是不良的传热导体，钢筋有混凝土作为保护层，就不致因燃烧而很快地达到钢软化的危险温度（大约在 500°C 左右），所以钢筋混凝土结构是耐火的结构。

(3) 整体性 钢筋混凝土结构（特别是整体现浇的钢筋混凝土结构）的整体性比砖石结构要好得多，因此，只要设计合理，即具有良好的抗震性能。在地震区建造高耸建筑物，如高层房屋、烟囱、水塔等采用钢筋混凝土结构是比较适宜的。

(4) 可模性 钢筋混凝土可以根据实际需要浇制成各种形状和尺寸的结构，容易满足建筑上的要求。

(5) 就地取材 钢筋混凝土所用材料中用量较多的石和砂子，产地普遍，就地取材均较容易。有些地区，还将工业废料（如矿渣、粉煤灰等）制成人造骨料用于钢筋混凝土中，变废料为原料。此外，我国水泥产地也较普遍，钢筋用量在钢筋混凝土中只占少数，运输也较方便。

(6) 节约钢材 由于钢筋混凝土结构能够充分发挥材料的受力性能，因此在相当大的范围内可代替钢结构，不仅节约了钢材，而且也降低了工程造价。

正因为如此，钢筋混凝土结构在工业和民用建筑中得到广泛的应用。不过，钢筋混凝土结构也存在着下列一些缺点：

(1) 本身自重大 与钢结构相比，钢筋混凝土结构本身自重往往较大，在受弯构件中更为显著。自重太大，不仅对于设计大跨度结构、高层建筑以及抗震结构都很不利，而且在施工中也会增加材料运输费用，并使构件吊装不便。改善的方法：可尽量采用预应力混凝土结构以及采用轻质高强混凝土和高强钢筋，从而使构件的截面尺寸减小、自重减轻。同时也可以改进结构型式，使受力合理，如采用折板结构、空间箱壁结构、框架轻板等，也能使结构自重减轻。

(2) 费工大、费模板多，施工周期长 建造整体式的钢筋混凝土结构是较费工的，同时又须建立模板和支撑，现浇混凝土也须在模板内养护一定时间，不仅费模板多，而且工期较长。为了克服这些缺点，目前大力发展装配式钢筋混凝土结构，积极采用先进施工技术，例如采用活动式大模板、升板技术、滑升模板代替固定模板以及工业化现浇施工工艺等，均取得较好的成效。

此外，钢筋混凝土隔热和隔音的性能较差，加固或拆修也较困难。这些缺点目前有的

已经得到克服，有的正在逐步加以改善。

0.3 钢筋混凝土的应用和发展简况

钢筋混凝土结构在建筑工程中的应用，已有一百多年的历史。但是，解放前由于我国经济建设发展缓慢，钢铁工业、水泥工业很不发达，因此在钢筋混凝土结构的应用、设计和施工技术方面均十分落后，不仅没有本国的设计规范和设计方法，而且建造的钢筋混凝土工程也寥寥无几。解放后，随着社会主义建设事业的蓬勃发展，钢筋混凝土结构在我国各项工程建设中才得到迅速的发展，并取得十分显著的成就，其应用范围是相当广泛的。

在工业厂房中，广泛地采用钢筋混凝土构件来建造，如屋面板、屋架、吊车梁、柱、基础等，并积极推广标准设计及定型构配件，大力使用装配式钢筋混凝土及预应力混凝土。与工业建筑有关的特种结构，也大部分用钢筋混凝土结构来建造，如烟囱、水池、水塔、冷却塔、筒仓、栈桥及设备基础等。目前，我国自行设计建造的大跨度预应力混凝土屋架跨度可达60m，预应力混凝土吊车梁的吨位可达4000kN。随着工业厂房结构体系的改革，有些地区还常采用预应力混凝土V形折板、单T板和双T板等新结构作为屋盖，采用钢筋混凝土大型墙板作为工业厂房的围护结构，也有采用钢管混凝土柱作为支承厂房的骨架，这些对于减轻结构自重、缩短施工周期都有积极的作用。同时，近年来，为了节约用地，多层厂房在工业建筑中所占比重出现日益增多的趋势。

在民用建筑中，钢筋混凝土的应用也很广泛。不仅大量用于混合结构房屋中，如屋盖、楼盖、楼梯、雨蓬、阳台和基础等，而且也大量用于新型的装配式大板居住建筑、框架轻板结构以及高层建筑。特别是用钢筋混凝土建造高层建筑，近年来在我国发展甚快，目前国内90m以上的高层建筑已有20多座，最高的是深圳国际贸易中心大楼，共50层，高度为160m，采用的是筒中筒结构体系。在国外，采用钢筋混凝土建造最高的房屋是美国芝加哥的水塔广场塔楼（water tower building），共76层，高度为262m，采用的是筒体结构。

钢筋混凝土也可用于大跨度的公共建筑中，如车站、会堂、剧院、展览馆、体育馆等，一般采用钢筋混凝土门式刚架、拱、薄壳等结构型式。例如，广州体育馆采用了现浇钢筋混凝土双铰门式刚架，跨度达49.8m；北京体育学院田径房采用了钢筋混凝土落地拱，跨度为46.7m；北京火车站中央大厅的屋盖采用了钢筋混凝土双曲扁壳，平面尺寸为35×35m，壳顶厚度仅只80mm；新疆某地采用椭圆旋转曲面的圆形薄壳，直径达60m，壳体厚度也仅只80mm。

在交通运输系统中，钢筋混凝土可用来建造桥梁、涵洞、隧道、挡土墙、轨枕、飞机场和道路等。我国有名的福建乌龙江大桥，就是用钢筋混凝土建造的，最大跨径达144m，全长为548m。

在水工建筑中，钢筋混凝土是很理想的材料，可用来建造水坝、水电站、码头、船坞等。例如，湖北的葛洲坝水利枢纽工程、浙江新安江水电站等都是规模宏大的钢筋混凝土工程。

在国防工程中，由于混凝土具有较好的抵抗辐射能力，因此也广泛地采用钢筋混凝土来建造各种防御工事、防空地下室以及防放射性结构物等。

随着钢筋混凝土结构在工程建设中的大量应用，我国在钢筋混凝土基本构件性能、计

算理论和设计方法等方面也进行了一系列有计划的科学研究。经过多年的努力,在钢筋混凝土结构可靠度与计算方法、材料性能与荷载分析、单层与多层厂房结构、高层建筑结构、大板与升板结构、大跨度特种结构、结构抗震设计以及电子计算机在钢筋混凝土结构中的应用等方面都取得较好的科研成果。同时,建国三十多年来,先后对钢筋混凝土结构设计规范进行了五次修订,设计理论基础由弹性理论发展到塑性理论,由长期使用的半概率、半经验的设计方法发展到采用以概率理论为基础的极限状态设计方法。实践表明,钢筋混凝土结构作为一门重要的科学技术,我国正在日益接近国际先进水平。

1 钢筋混凝土材料的物理力学性能

1.1 混凝土的强度

混凝土是由水泥、砂、石和水按一定比例配合而成。混凝土强度的大小不仅与组成材料的质量和配合比有着直接的关系，而且与混凝土的硬化条件、龄期、受力情况以及测定其强度时所采用的试件形状、尺寸和试验方法等也有着密切的关系。在实际工程中，常用的混凝土强度有：立方体抗压强度、轴心抗压强度、弯曲抗压强度、抗拉强度以及局部抗压强度等。兹将其主要强度指标分述如下：

1.1.1 混凝土的立方体抗压强度 f_{cu} (cube strength of concrete)

混凝土的立方体抗压强度是衡量混凝土强度的主要指标，混凝土强度等级就是按立方体抗压标准强度来确定的。《混凝土结构设计规范》(送审稿)〔以下简称《规范》〕规定，按照标准方法制作养护的边长为150mm的混凝土立方体试块，在28天龄期，用标准试验方法测得的具有95%保证率的抗压强度称为立方体抗压标准强度，以 $f_{cu,k}$ 表示，并以此作为混凝土强度等级。由于这种试件的强度比较稳定，制作与试验也均较方便，因此《规范》把它作为衡量混凝土各种力学指标的基本代表值。

在测定混凝土的立方体强度时，除按规范规定的标准方法进行制作和试验外，此处需要说明几点：

(1) 在试验测定混凝土的立方体强度时与试件上、下表面是否加润滑剂有密切关系。若不加润滑剂，则试块上、下表面与压力机垫板之间会产生摩擦力，试压时垫板能阻止试块的横向变形，垫板就象“箍”一样，把试块的上、下端箍住，此时测得的抗压强度较高；如果加了润滑剂，则试块上、下表面与压力机垫板之间的摩擦力大大减小，试压时试件可以比较自由地横向变形，此时测得的抗压强度较低。上述两种情形的破坏形式如图1-1所示。规范所规定的试验方法是不加润滑剂的。

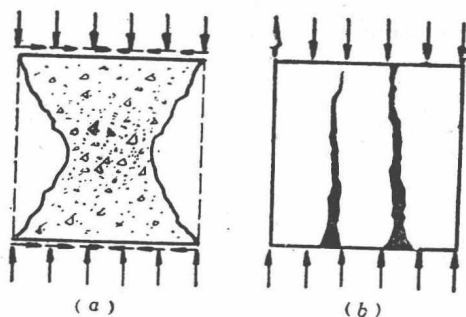


图 1-1 混凝土立方体的破坏情形
a—未加润滑剂；b—加润滑剂

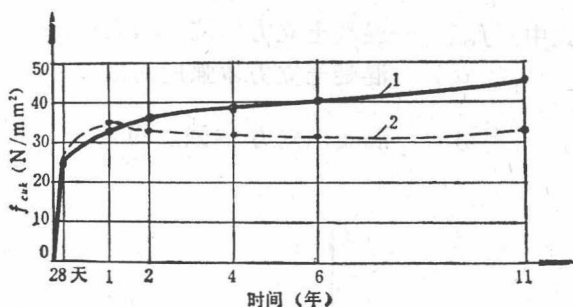


图 1-2 混凝土强度随龄期而增长
1—在潮湿环境下；2—在干燥环境下

(2) 测定混凝土的立方体强度与试件的尺寸、大小也很有关系。立方体愈小，试验所得的强度值愈高。这是由于试件愈小，硬结愈快，摩擦力作用的影响相对也愈大的缘

故。在确定混凝土强度等级时,原钢筋混凝土规范(TJ10—74)规定立方体试件标准尺寸采用 $200 \times 200 \times 200\text{mm}$,由于这种试块用料多、重量大、试验时需用吨位大的压力机,对施工单位很不方便,因此在新的钢筋混凝土《规范》中已改用 $150 \times 150 \times 150\text{mm}$ 的立方体作为试件标准尺寸。如果采用了边长为 200mm 或 100mm 的立方体试块,这样测得的强度往往前者偏低、后者偏高,因此须将测得的数据分别乘以换算系数 1.05 或 0.95 ,才能折算成边长为 150mm 时的立方体强度,作为混凝土的实际强度等级。

(3) 试验时加载的速度对立方体强度的测定亦有影响,加载速度愈快,测得的强度愈高。一般规定加载速度为每秒增加压力 $0.2 \sim 0.3\text{N/mm}^2$,属于快速试验强度。

(4) 混凝土的立方体抗压强度还随着试验时混凝土龄期的增长而增大,增长的速度开始较快,后来逐渐缓慢,若混凝土始终保持在潮湿环境内,则强度的增长可延续至11年以后,见图1-2。从图中试验所得曲线可知,强度的增长与时间的关系大体接近于对数函数性质的曲线。在确定混凝土强度等级时,混凝土龄期采用的是28天,如果由于施工紧迫,需要用三天或七天龄期的试块进行试验,则可按下列公式推算出28天龄期的抗压强度值:

$$f_{cu} = f_n \frac{\log 28}{\log n} \quad (1-1)$$

式中 f_{cu} ——混凝土28天的立方体抗压强度;

f_n ——混凝土 n 天的立方体抗压强度;

$\log 28, \log n$ ——28天及 n 天以10为底的对数。

(5) 混凝土的立方体抗压标准强度是具有95%保证率的抗压强度,这与过去长期采用的只具有85%保证率的混凝土标号在定义上是有区别的。由于混凝土强度取值标准有所提高,同时混凝土立方体试件标准尺寸有所改变(边长由 200mm 改为 150mm),经过“双改”以后,目前混凝土的强度等级与对应的原混凝土标号在实际强度上并不相同。例如,原混凝土标号为 $200(\text{kg/cm}^2)$ 号,大体相当目前混凝土强度等级为 $\text{C}18(\text{N/mm}^2)$ 。

根据系统的统计资料表明,混凝土立方体强度的概率分布可采取正态分布(见图1-3),当混凝土立方体抗压标准强度以具有95%保证率来取值时,则它与混凝土立方体强度的平均值 μ 之间具有下列关系:

$$f_{cu,k} = \mu - 1.645\sigma = \mu(1 - 1.645\delta) \quad (1-2)$$

式中 $f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压标准强度(即混凝土强度等级);

σ ——混凝土立方体强度的标准差;

δ ——混凝土立方体强度的变异系数($\delta = \frac{\sigma}{\mu}$),见表1-1。

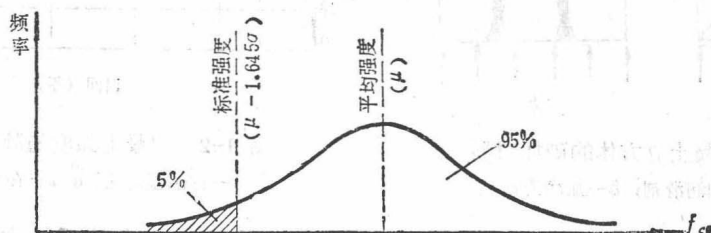


图 1-3 混凝土立方强度的统计资料

表 1-1 混凝土强度的变异系数

$f_{cu,k}$	C10	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60
δ	0.24	0.21	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10

注 上表系根据1979~1980年全国十个省、市、自治区的混凝土强度的统计调查结果，在混凝土标准强度和设计强度取值时所采用的变异系数。

目前，我国混凝土《规范》中规定的混凝土强度等级有C10、C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C60。在实际工程中，钢筋混凝土结构所采用的混凝土强度等级不宜低于C15；当采用Ⅱ级钢筋时，混凝土强度等级不宜低于C20；当采用Ⅲ级钢筋以及对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宜低于C30。当采用碳素钢丝、钢绞线、热处理钢筋作预应力钢筋时，混凝土强度等级不宜低于C40。

1.1.2 混凝土的轴心抗压强度 f_c (axial compression strength of concrete)

在实际的结构中，受压的构件往往不是立方体而是棱柱体，所以在试验时应采用棱柱体试件才能更好地反映混凝土受压构件的实际抗压强度。

用棱柱体试件测得的抗压强度称为棱柱体抗压强度或称轴心抗压强度。试验时，通常棱柱体的高宽比 h/b 取3~4（若 h/b 值太大，则在破坏前可能产生较大的附加偏心而降低抗压极限强度；若 h/b 值太小，又难以消除试件试压时两端的摩擦阻力对强度的影响）。常用的试件尺寸为100×100×300mm、150×150×450mm等，见图1-4a。

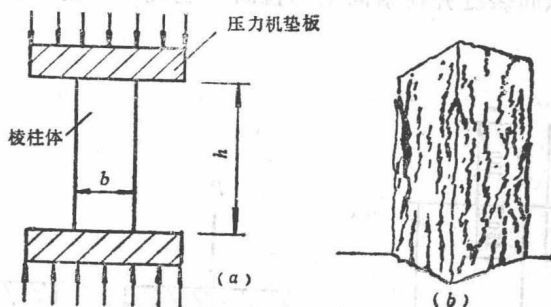


图 1-4 混凝土棱柱体抗压试验

试验指出，混凝土棱柱体抗压强度较立方体强度为小，并且棱柱体试件高宽比 h/b 愈大，则强度愈低，主要是由于试件上、下端与垫板之间的摩擦阻力对试件影响减小的缘故。棱柱体试件的破坏形式如图1-4b所示。

根据国内120组截面尺寸为150×150mm的棱柱体（高宽比 $h/b=3\sim4$ ）抗压强度 f_c 与立方体的抗压强度 f_{cu} 对比试验结果，混凝土棱柱体抗压强度平均值 μ_{f_c} 与立方体抗压强度平均值 μ 的关系式为：

$$\mu_{f_c} = 0.76\mu \quad (1-3)$$

考虑到试件的试验、工艺、条件等与结构中混凝土的实际条件的差异，试件强度应乘以修正系数0.83，以近似地反映结构中混凝土轴压强度。这样，结构中混凝土轴心抗压强度平均值 μ_{f_c} 即为：

$$\mu_{f_c} = 0.88 \times 0.76\mu = 0.67\mu \quad (1-4)$$

此时, 混凝土轴心抗压标准强度为:

$$f_{ck} = \mu_{f_c}(1 - 1.645\delta_{f_c}) = 0.67\mu(1 - 1.645\delta_{f_c}) \quad (1-5)$$

式中, δ_{f_c} 为混凝土轴心抗压强度的变异系数。若假定 $\delta_{f_c} = \delta$, 并用式 (1-2) 中的 μ 代入式 (1-5), 则得混凝土轴心抗压标准强度与立方体抗压标准强度的关系式为:

$$f_{ck} = 0.67 \frac{f_{cuk}}{1 - 1.645\delta} (1 - 1.645\delta) = 0.67f_{cuk} \quad (1-6)$$

式中 f_{ck} ——混凝土轴心抗压标准强度;

f_{cuk} ——混凝土立方体抗压标准强度。

1.1.3 混凝土的轴心抗拉强度 f_t (axial tensile strength of concrete)

混凝土试件在轴心拉伸情况下的极限抗拉强度, 在结构设计中是确定混凝土抗裂度的重要指标。

测定混凝土的抗拉强度, 以前曾采用直接的轴心抗拉试验, 混凝土试件尺寸为 $100 \times 100 \times 500\text{mm}$, 两端预埋钢筋, 钢筋位于试件轴线上, 将试验机的夹具夹紧钢筋后对试件施加拉力, 试件破坏时的平均拉应力即为混凝土的轴心抗拉强度平均值 μ_{f_t} , 见图 1-5a。由于采用这种试验方法, 安装试件很难保证不发生偏心, 产生的次应力又不易确定, 试验时很小的偏心就会严重地影响 μ_{f_t} 值, 所以目前国内外常采用“劈裂试验”(split test) 来间接的确定混凝土轴心抗拉强度。试件可用立方体也可用圆柱体, 试验时将试件横过来, 上、下面垫以 $\phi 4$ 的钢丝, 放在试验机中施加压力, 如图 1-5b。此时, 试块不是被压坏, 而是在钢丝附近产生纵向裂缝并在横向被劈拉断, 混凝土的抗拉强度可根据弹性理论由下

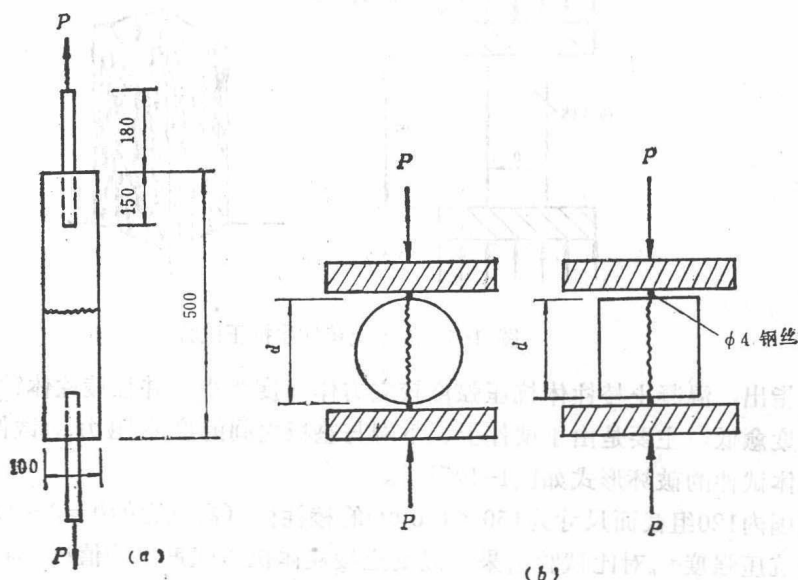


图 1-5 混凝土抗拉强度的两种试验方法

a—直接试验; b—劈裂试验

式确定:

$$f_t = \frac{2P}{\pi d l} \quad (1-7)$$

式中 P ——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。

由试验可知，混凝土的轴心抗拉强度平均值 μ_{ft} 比立方体抗压强度平均值 μ 要小得多，其关系式为（已考虑试验与实际条件的差异）：

$$\mu_{ft} = 0.23\mu^{2/3} \quad (1-8)$$

此时，轴心抗拉标准强度为：

$$\begin{aligned} f_{tk} &= \mu_{ft}(1-1.645\delta_{ft}) = 0.23\mu^{2/3}(1-1.645\delta_{ft}) \\ &= 0.23 \frac{f_{cu}^{2/3}}{(1-1.645\delta)^{2/3}} (1-1.645\delta_{ft}) \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中， δ_{ft} 为混凝土轴心抗拉强度的变异系数。若假定 $\delta_{ft} = \delta$ ，则上式可写作：

$$f_{tk} = 0.23f_{cu}^{2/3}(1-1.645\delta)^{1/3} \quad (1-10)$$

对于高等级混凝土，考虑其脆性破坏特征显著和实践经验不足，因此，对强度等级为C45、C50和C60的混凝土按式1-10计算后应分别乘以0.975、0.95和0.90的折减系数（对轴心抗压强度也同样地考虑了该项折减系数）。

由于混凝土的抗拉强度很低，在钢筋混凝土构件的强度计算中往往不考虑受拉混凝土的作用，但是对于不允许出现裂缝的构件，例如：水池池壁、在有侵蚀性介质作用下的屋架下弦等，就应考虑受拉混凝土的作用。

混凝土的各种标准强度可见表1-2。

表 1-2 混凝土标准强度 (N/mm²)

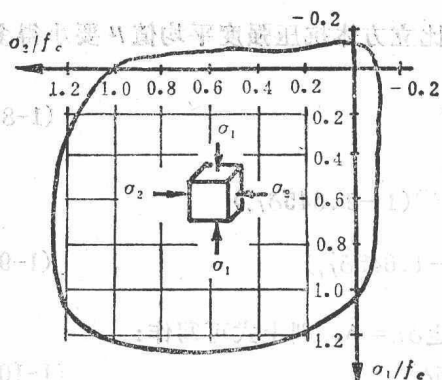
项 次	强度种类	符 号	混 凝 土 强 度 等 级									
			C10	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60
1	轴心抗压	f_{ck}	6.7	10.0	13.5	17.0	20.0	23.5	27.0	29.5	32.0	36.0
2	弯曲抗压	f_{cmk}	7.5	11.0	15.0	18.5	22.0	26.0	29.5	32.5	35.0	39.5
3	抗 拉	f_{tk}	0.9	1.2	1.5	1.75	2.0	2.25	2.45	2.6	2.75	2.95

1.1.4 复合应力状态下混凝土的强度 (strength of concrete under combined stress)

在钢筋混凝土结构中，混凝土实际上很少是处于单向受力状态，往往是处于复合应力状态。有关混凝土在复合应力状态下的强度计算理论，虽然目前尚不完善，但是研究和了解复合应力状态下混凝土的强度，对于认识强度极限状态却很有帮助。

(1) 当混凝土处于双向应力状态时(即混凝土在两个方向上分别作用有法向应力 σ_1 和 σ_2)，根据试验，这时混凝土的强度不仅与法向应力 σ_1 、 σ_2 的大小有关，同时与 σ_1 、 σ_2 的作用方向(拉或压)也有关。在双向应力状态下混凝土的强度增减变化情形如图1-3所示。图中第三象限表示混凝土在双向压应力作用下，它的强度与仅承受单向压力时的强度相比，最多可提高约27%；图中第一象限表示混凝土在双向拉应力作用下，这时它的强度几乎接近于单向拉应力时的强度；图中第二、四象限表示混凝土处于一个方向受压、一个方向受拉，在此情况下，混凝土的强度会有所降低。

(2) 当混凝土处于三向受压的情况下, 根据试验, 这时混凝土的强度和延性均有较大的提高。国外曾对混凝土圆柱体进行过一些试验, 在圆柱体的周围施加液体压力, 以便约束混凝土, 然后在圆柱体的轴向施加压力直至破坏, 得到下列的关系式:



$$f'_{ce} = f'_c + k f_l \quad (1-11)$$

式中 f'_{ce} —— 被约束试件的轴心抗压强度;

f'_c —— 未约束试件 (即单向受力) 的轴心抗压强度;

f_l —— 侧向约束压力;

k —— 侧压效应系数, 有的试验得到 $k=4.1$, 有的试验得到 $k=4.5 \sim 7.0$, 当试件周围压力较小时所得到的 k 值较高。

图 1-6 混凝土双向应力下的强度曲线

试验表明, 混凝土在三向受压的情况下, 不仅混凝土的强度有明显的提高, 同时由于侧向压应力的存在, 约束了混凝土的侧向变形, 推迟了混凝土内部裂缝的出现和发展, 从而使混凝土的延性也有显著的提高。

(3) 当混凝土在法向应力和剪应力同时作用下, 这时试验所得的混凝土强度曲线如图 1-7 所示。由试验可知, 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。所以当梁和柱中出现剪应力时, 其受压区混凝土的强度将会受到一定影响。

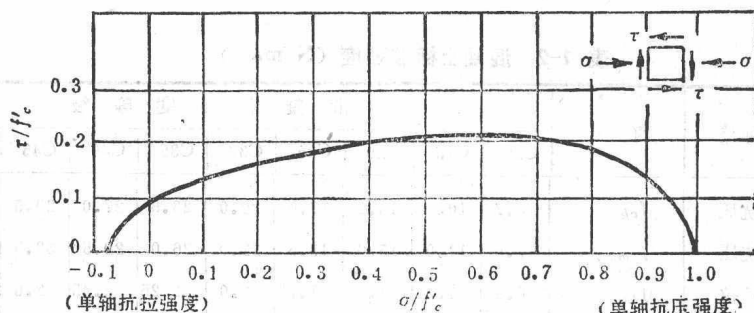


图 1-7 法向应力和剪应力组合的破坏曲线

1.2 混凝土的变形 (deformation of concrete)

研究混凝土的变形性能, 对于深刻地理解钢筋混凝土构件的受力分析具有密切的关系。混凝土的变形有两类: 一类是混凝土的受力变形, 包括一次短期荷载下的变形、长期荷载下的变形和多次重复荷载下的变形; 另一类是混凝土的体积变形, 如收缩、膨胀以及温度变化而产生的变形。

1.2.1 混凝土在一次短期荷载下的变形 (deformation of concrete under short-term monotonic loading)

混凝土在一次短期荷载下的应力应变关系可由混凝土的压缩与受拉试验获得, 典型的应力应变曲线如图 1-8 所示, 图中曲线 $OABCD$ 和 OT 分别表示混凝土受压和受拉时的情况