

高等学校房屋建筑专业系列教材

混凝土结构及砌体结构

(上册)

陆春阳 何崇禹 主编



重庆大学出版社

混凝土结构及砌体结构

(上册)

陆春熙 何崇禹 主编

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书是根据我国现行建筑结构设计规范编写的。全书分上、下两册。上册内容包括钢筋混凝土材料力学性能、钢筋混凝土结构构件和预应力混凝土轴心受拉构件,每章末尾均有复习思考题和习题。

本书可供房屋建筑工程专业(专科)作为教材,也可供土建工程技术人员参考。

Hunningtu Jiegou Ji Qiti Jiegou/Shangce
混凝土结构及砌体结构
(上 册)

陆春阳 何崇禹 主编

责任编辑 曾令维

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆电力印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:362千

1998年4月第1版 1998年4月第1次印刷

印数:1—6000

ISBN7-5624-1678-8/TU·55 定价:15.00元

前 言

本书是根据房屋建筑工程专业教学基本要求编写的专科系列教材之一。全书分上、下两册。上册由陆春阳、何崇禹主编,内容包括材料的力学性能,结构设计方法,钢筋混凝土构件受弯、受剪、受压、受拉及受扭承载能力计算,钢筋混凝土构件裂缝和变形计算,预应力混凝土的基本概念,预应力混凝土轴心受拉构件等内容。下册由黄双华、宋健夏主编,内容包括梁板结构、单层工业厂房结构、多层房屋框架结构、砌体结构。本书根据现行《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)编写。为了便于复习,理解基本概念,掌握计算方法,每章均附有思考题和习题。

构件的受力性能是结构设计的主要依据。大学专科主要是培养应用型人才。因此,本书的编写思路是“构件受力性能—计算简图和计算公式—构件设计计算方法”,重点阐明构件设计方法和构造措施,强调用基本原理解决实际问题,力求做到内容精炼,条理清楚,便于自学。

本书编写分工如下:陆春阳编写绪论和第二章,王琳编写第一、第九章,阮莉编写第三、第四章,何崇禹编写第五章,阎清儒编写第六、第七、第八章。何崇禹对第三、第四章的初稿提出了修改意见。全书由陆春阳修改定稿。

限于编者水平,书中不可避免地存在缺点和错误,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
0-1 混凝土结构的一般概念	1
0-2 混凝土结构发展概况	2
0-3 本课程内容及学习方法	2
第一章 钢筋混凝土材料的力学性能	4
1-1 混凝土	4
1-2 钢筋	14
1-3 钢筋与混凝土之间的粘结作用	19
复习思考题	24
第二章 结构设计方法	25
2-1 概率极限状态设计法的概念	25
2-2 承载力极限状态计算方法	27
2-3 正常使用极限状态验算方法	33
复习思考题	34
习题	35
第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	36
3-1 受弯构件截面构造	36
3-2 梁正截面抗弯性能的试验研究	38
3-3 正截面承载力计算的基本假定	41
3-4 单筋矩形截面	46
3-5 双筋矩形截面	53
3-6 T形截面	57
复习思考题	64
习题	66
第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面受剪承载力计算	69
4-1 受弯构件斜截面受剪性能	69
4-2 斜截面受剪承载力计算公式	72
4-3 斜截面受剪承载力计算方法	77
4-4 受弯构件的钢筋布置	85
4-5 受弯构件设计例题	90
复习思考题	96
习题	97
第五章 钢筋混凝土受压构件	100
5-1 概述	100

5-2	轴心受压构件	102
5-3	偏心受压构件的受力性能	109
5-4	矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	113
5-5	对称配筋工字形截面偏心受压构件正截面承载力计算	131
5-6	偏心受压构件斜截面承载力计算	138
	复习思考题	139
	习题	140
第六章	钢筋混凝土受拉构件	144
6-1	概述	144
6-2	轴心受拉构件	144
6-3	偏心受拉构件	145
	复习思考题及习题	149
第七章	钢筋混凝土受扭构件	150
7-1	概述	150
7-2	矩形截面受扭构件承载力计算	151
7-3	矩形截面弯、剪、扭构件承载力计算	155
7-4	受扭构件的构造要求	157
	复习思考题及习题	162
第八章	钢筋混凝土构件裂缝宽度和变形验算	163
8-1	概述	163
8-2	裂缝宽度验算	163
8-3	受弯构件的变形验算	169
	复习思考题及习题	178
第九章	预应力混凝土构件	180
9-1	预应力混凝土的基本概念	180
9-2	施加预应力的方法及锚、夹具	183
9-3	预应力混凝土材料	186
9-4	张拉控制应力和预应力损失	187
9-5	预应力混凝土轴心受拉构件	193
	复习思考题	209
	习题	209
附录		211
附录一	混凝土强度标准值、设计值、弹性模量	211
附录二	钢筋、钢丝强度标准值、设计值、弹性模量	212
附录三	受弯构件的允许挠度	216
附录四	裂缝控制等级、混凝土拉应力限制系数 α_{cr} 及最大裂缝宽度允许值 $[\tau w_{max}]$ (mm)	216
附录五	混凝土构件中纵向受力钢筋的最小配筋百分率(%)	217
附录六	纵向受拉钢筋的最小锚固长度 l_a	217
附录七	钢筋混凝土矩形截面受弯构件正截面抗弯能力计算系数表	218

附录八 钢筋的计算截面面积及公称质量	219
附录九 每米板宽各种钢筋间距时的钢筋截面面积	220
参考文献	222

绪 论

0-1 混凝土结构的一般概念

以混凝土为主构成的结构,称为混凝土结构。混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。

混凝土的抗压强度较高,抗拉强度较低。素混凝土结构一般用于承受压力的构件。当结构构件中出现拉应力时,在构件的受拉区中配置受力钢筋,可以改善构件的受力性能。图 0-1 所示的简支梁,跨度 4m,截面尺寸 $b=200\text{mm}$, $h=350\text{mm}$,混凝土强度等级 C20 级,在跨中承受集中荷载 P 的作用。图 0-1(a)是素混凝土梁,图 0-1(b)是钢筋混凝土梁,在梁截面下边缘附近配置了 $2\phi 20$ 的受拉钢筋。当 $P=10.8\text{kN}$ 时,两根梁均出现裂缝。素混凝土梁开裂后立即断裂破坏。钢筋混凝土梁开裂后,钢筋承受了裂缝处的拉应力,还能承受更大的荷载,直到钢筋拉应力达到其屈服强度,裂缝延伸开展,梁上边缘混凝土被压碎,导致梁破坏,破坏荷载 $P_u=51.3\text{kN}$ 。在以上例子中,梁的钢筋截面积大约只有混凝土截面积的 1%,梁的承载能力增加了约 4 倍,说明钢筋在混凝土构件中的作用是显著的。使用荷载一般大于开裂荷载,在使用阶段,钢筋混凝土梁一般存在着裂缝。裂缝虽然不影响结构的安全,但有碍美观,而且可能影响结构的耐久性。产生裂缝的原因是混凝土的拉应力超过了其抗拉强度。因此,在构件承受荷载作用以前,在其受拉区人为地施加预压应力,抵消使用荷载产生的拉应力,可以提高构件的抗裂能力,改善混凝土的抗裂性能,这就是预应力混凝土构件。

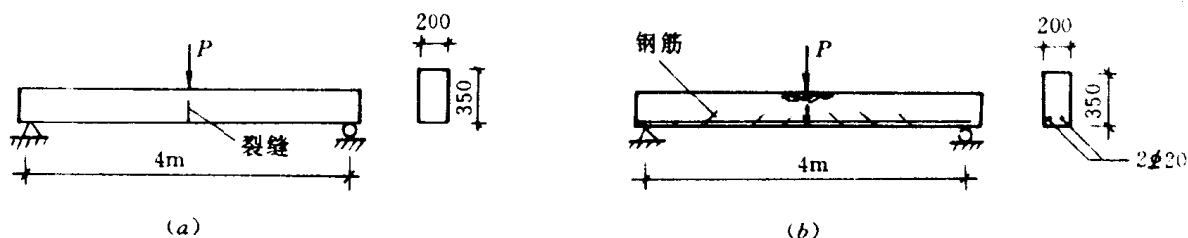


图 0-1 素混凝土梁与钢筋混凝土梁破坏情况对比

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种材料构成的。两种材料的物理力学性能有很大的差异。两种材料结合在一起,能够共同工作,主要原因是:(1)钢筋与混凝土之间存在粘结力,在荷载作用下,两种材料能协调变形,共同受力。(2)钢筋与混凝土的温度膨胀系数相近,钢筋为 1.2×10^{-5} ,混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$ 。当温度变化时,两种材料不会产生较大的相对变形,不会破坏它们之间的粘结力。(3)钢筋表面的混凝土保护层,防止钢筋锈蚀,保证结构的耐久性。

钢筋混凝土结构的主要优点如下:

- (1)混凝土结构中用量较大的砂、石等材料,一般能就地取材。

(2)混凝土结构可以根据需要浇筑成各种形式。

(3)耐久性和耐火性较好,维护费用低。

(4)钢筋混凝土结构承载力较高,大多数情况下可以代替钢结构,因而可以节约钢材。

钢筋混凝土结构的主要缺点是自重大,抗裂性差,户外施工受季节影响。这些缺点在一定程度上限制了钢筋混凝土结构的应用范围,例如不能适用于大跨度结构。但是,随着科学技术的进步,已经研究出了克服混凝土结构缺点的有效措施,例如用轻质高强混凝土可以减轻结构自重,施加预应力可以改善混凝土构件的抗裂性能等。

0-2 混凝土结构发展概况

混凝土结构出现于19世纪中叶,至今约有150年的历史。混凝土结构出现初期,主要在英、法两国应用,用于梁、板、柱、基础等简单结构。近30年来,混凝土结构有了很大的发展,已经成为工程建设中应用最广的一种结构。

材料方面,过去用的混凝土强度比较低,抗压强度一般在 20N/mm^2 以下,目前常用的抗压强度为 $20\sim 40\text{N/mm}^2$,预应力混凝土结构中用的混凝土强度达到 $60\sim 80\text{N/mm}^2$ 。近年来,已经研制成强度为 200N/mm^2 的混凝土。为了减轻结构自重,国内外都在大力发展各种轻质混凝土,其自重一般为 $14\sim 18\text{kN/m}^3$,强度可达 50N/mm^2 。钢筋混凝土结构中用的钢筋强度达到 420N/mm^2 ,常用的钢筋强度为 $235\sim 335\text{N/mm}^2$ 。预应力混凝土结构广泛采用各种低合金钢筋、高强钢筋和钢丝,钢丝的抗拉强度高达 1800N/mm^2 。轻质高强材料的应用,为高层建筑和大跨度结构的发展提供了有利条件。

结构方面,除了一般的建筑结构以外,钢筋混凝土结构广泛地应用于桥梁工程、水利工程。近年来,钢筋混凝土和预应力混凝土在高层建筑、大跨度桥梁和高耸结构物中的应用有了很大的发展。目前世界上最高的钢筋混凝土高层建筑高度262m,我国最高的钢筋混凝土建筑为广州国际贸易中心大楼,地面以上的高度195m,国内已建成的中央电视塔、上海电视塔,高度均在300m以上。预应力混凝土箱形截面斜拉桥已成为大跨度桥梁的主要结构形式,我国红水河铁路桥,主跨96m,天津永定河公路桥,主跨260m,均属亚洲第一。

计算理论方面,本世纪初采用以弹性理论为基础的容许应力法。40年代以后,考虑混凝土塑性变形的计算理论有很大的发展,40年代按破坏阶段计算。50年代以后,采用极限状态设计法,概率理论更多地应用于结构计算,构造措施逐步合理,设计规范日趋完善。随着对混凝土强度和变形理论的深入研究,现代化测试技术的发展以及电子计算机的应用,钢筋混凝土结构计算已能进行从加载到最后破坏的全过程分析,从个别构件的计算过渡到考虑结构整体空间工作,结构与地基共同工作的分析方法,使钢筋混凝土结构计算方法向更高阶段发展。

0-3 本课程内容及学习方法

本书分上、下册。上册讨论混凝土结构、预应力混凝土结构构件的受力性能(强度和变形的变化规律)、设计计算方法及配筋构造。下册讨论混凝土楼盖结构、单层厂房结构、多层房屋结

构及砌体结构的受力性能、设计方法及构造措施。通过本课程的学习,使学生初步掌握混凝土结构和砌体结构的设计方法。

本书的基本构件部分实质上是混凝土结构和砌体结构的材料力学,楼盖结构和房屋结构设计部分实质上是混凝土结构和砌体结构的结构力学。通过静力平衡条件、变形协调关系和材料的应力应变关系建立基本方程,是混凝土结构、砌体结构与力学相似之处。力学课讨论的结构构件由单一匀质弹性材料构成。混凝土结构由钢筋和混凝土两种材料组成。砌体结构由块材和砂浆两种材料组成。混凝土和砌体都不是匀质弹性材料,这是混凝土结构、砌体结构与力学的不同点,也是混凝土结构及砌体结构的特点。在混凝土结构和砌体结构中,两种材料强度配比不同,会引起受力性能的改变,例如,在混凝土构件中,钢筋和混凝土的面积比例超过某一界限,会使构件的破坏特征发生变化,在砌体结构中,块材和砂浆的强度比例超过一定界限,会引起构件受拉破坏面形状的变化。学习本课程时,要注意掌握混凝土结构和砌体结构的特点。

由于混凝土和砌体物理力学性能的复杂性,目前尚未建立起完善的强度理论。有关混凝土和砌体材料的受力性能,在很大程度上是依赖实验分析。因此,学习本课程时,要重视构件的实验研究,注意实验中观测到的现象,掌握受力分析时所用的基本实验依据。相当一部分混凝土结构和砌体结构的计算公式都带有经验性质,它们不像数学和力学公式那样严谨,但能够较好地反映结构的真实受力性能。在学习和使用各种计算公式时,要特别注意它们的使用范围和限制条件。

混凝土结构和砌体结构课程主要是解决结构设计问题。结构设计包括结构方案选择、结构布置、构件强度计算及构造措施等内容,是一个综合性的问题,需要根据具体情况,综合考虑安全适用、经济合理和施工制造等各方面的因素,才能作出合理的选择。结构设计的答案不是唯一的。在学习本课程时,要注意培养独立思考的能力、分析和解决实际问题的能力。

在学习本课程时,要学会使用混凝土结构设计规范(GBJ10—89)和砌体结构设计规范(GBJ3—88)。设计规范是国家颁布的有关结构设计的技术规定和标准,是结构设计工作的法律文件,是工程技术人员进行设计时必须遵守的规定。设计规范是我国40多年来在混凝土结构和砌体结构方面的科学技术和工程实践经验的总结。在学习使用规范时,要正确理解规范条文的概念和实质,注意受力分析公式与设计公式之间的联系和区别,了解和掌握我国有关结构设计的技术经济政策。混凝土结构是一门发展中的学科,许多计算方法和构造措施还有不够完善之处。各国每隔一定时间都要修订自己的结构设计规范。我国结构设计规范大约10年左右修订一次。因此,在学习过程中,要注意规范修订的动向,新规范颁布后,要及时学习和掌握新规范。

混凝土结构与砌体结构是实践性较强的学科,与建筑施工的关系很密切。学习本课程,要注意理论与实践相结合。一方面通过课堂学习、习题、作业来掌握必要的理论知识,通过课程设计和毕业设计学会运用理论知识来解决实际工程问题。另一方面,通过现场参观、生产实习来了解实际工程的结构布置、结构构造和施工过程,积累感性知识,加深对本课程内容的理解。

第一章 钢筋混凝土材料的力学性能

1-1 混 凝 土

1-1-1 混凝土的组成

普通混凝土是用水泥、砂、石子及水按一定配合比拌合,然后入模浇筑、并经养护凝固硬化后做成的人工石材。

混凝土是一种多相复合材料,其各组成成分具有不同的性质,因而各组成成分的数量比例,尤其是水和水泥的比例(即水灰比)对混凝土的强度和变形有重要影响。另外,混凝土的性能在很大程度上还取决于搅拌程度、浇筑的密实性、硬化条件和对它的养护。

混凝土在凝固硬化过程中,水泥和水形成水泥胶块,把砂、石骨料粘结在一起。水泥胶块由水泥凝胶体、水泥结晶体和未水化的水泥颗粒组成。在混凝土凝结时期,由于水泥胶块的收缩以及泌水、骨料下沉等原因,在骨料与水泥胶块结合界面薄弱处会形成许多随机分布的微裂缝(如图 1-1)。

另外,硬化混凝土中游离水的作用形成的毛细孔,混凝土拌合物中夹带的空气未被完全排除形成的气孔,以及水泥凝胶体固相之间的凝胶孔等非密实部分会在结硬混凝土材料中形成为孔隙。

混凝土材料中,砂石骨料、水泥胶块中的水泥结晶体、未水化的水泥颗粒组成了混凝土的弹性骨架,主要用来承受外力,并使混凝土有着弹性变形;而水泥胶

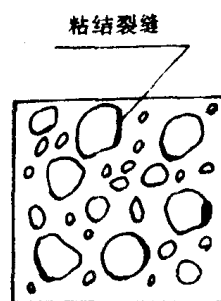


图 1-1 混凝土内微裂缝

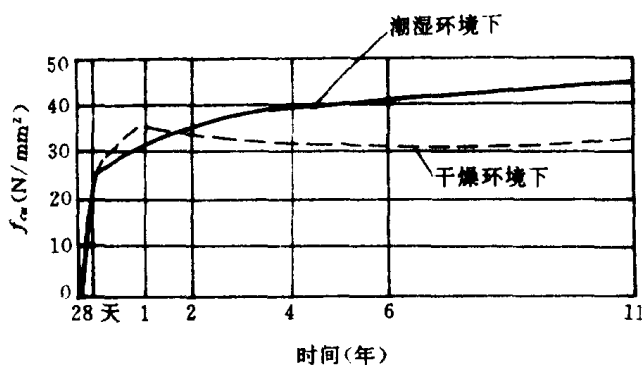


图 1-2 混凝土强度随时间变化

块中的水泥凝胶体,则起着调整和扩散混凝土应力的作用,并且水泥凝胶体、孔隙和结合界面的微裂缝,在外荷载作用下使混凝土产生相当的塑性变形。另外,混凝土结构中的孔隙、界面微裂缝是混凝土内最薄弱的部分,往往是混凝土受力破坏的起源,而受荷前就存在的微裂缝,在荷载作用下将继续扩展,对混凝土的强度和变形会产生重要的影响。

由于水泥胶块的硬化过程需要若干年才能完成,所以混凝土的强度、变形会在较长时间内随时间而变化。混凝土的强度随时间而增长,初期增长速度快,以后增长速度慢,若干年后趋于稳定,变形也随时间逐渐加大(图 1-2)。

1-1-2 混凝土的强度

混凝土的强度是指它所能承受的某种极限应力。由于混凝土在结构中主要承担压力，故在混凝土诸多力学性能中，抗压强度是最重要的性能。

一、立方体抗压强度及强度等级

混凝土抗压强度与组成材料、制作条件等有关，同时还受试件尺寸、试验方法等因素的影响，因此必须有一个统一的强度测定方法和相应的强度测定标准。

目前国际上确定混凝土抗压强度所采用的混凝土试件形状有圆柱体和立方体两种。我国以立方体试件测定混凝土的抗压强度，并根据立方体强度来划分混凝土的强度等级。

《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。立方体抗压强度标准值系指按照标准方法制作养护的边长为 150mm 的立方体试件，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。《规定》规定的混凝土强度等级有 12 个级别，即：C7.5；C10；C15；C20；C25；C30；C35；C40；C45；C50；C55；C60。字母 C 后的数字即表示以 N/mm^2 为单位的该级别混凝土的立方体抗压强度标准值，例如 C20 表示混凝土的立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k} = 20\text{N}/\text{mm}^2$ 。

影响混凝土抗压强度的因素很多，水泥标号高，强度大，水灰比大，强度低，养护环境的温度高、湿度大，混凝土强度大。

试验方法对混凝土立方体抗压强度有较大影响，试件在试验机上受压时，纵向缩短，同时横向膨胀。由于混凝土与压力机垫板弹性模量和横向变形系数不同，二者间将有较大横向变形差异。当试件的承压面上不涂润滑剂时，混凝土的横向变形受到摩擦力的约束，在试件上、下端形成“箍”的作用，可延缓裂缝的开展，提高试件的抗压强度。破坏时，在“箍”的约束作用较弱的试件中部，外围混凝土剥落，形成两个对顶的角锥体破坏面，如图 1-3(a)。如果在试件上、下表面抹些润滑剂，试件与压力机垫板间摩擦力将大大减小，其横向变形几乎不受约束，破坏时试件将产生几条平行作用力的裂缝，如图 1-3(b)。其抗压强度较前述低。《规范》规定标准试验方法是不加润滑剂的。

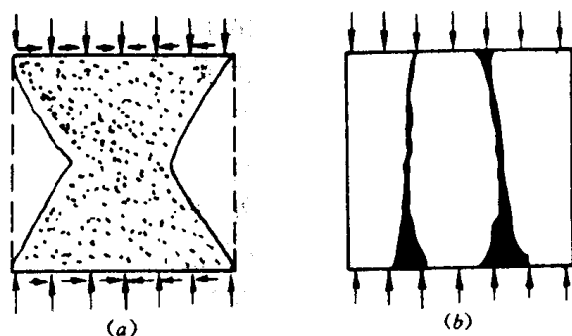


图 1-3 混凝土立方体的破坏情况

当试件上、下表面不涂润滑剂加压时，所测得的抗压强度值与试件尺寸有很大关系，立方体边长越小，其抗压强度值越高。我国过去长期采用 200mm 边长的立方体试块，用料多、重量大，试验所需试验机吨位大。目前很多科研单位为节约材料，减少工作量，大多采用边长为 100mm 的立方体试块。但这两种尺寸的试块测得的强度与 150mm 边长的标准试块测得的强度有一定的差异，必

须将它们的抗压强度实测值乘以换算系数，转换成 150mm 边长标准试块的强度。据试验结果，《规范》规定当采用边长为 200mm 和 100mm 的立方体试块时，其换算系数分别取 1.05 和 0.95。另外，试验加载速度对立方体强度也有影响，加载速度越快，测得强度越高，通常试验采用的加载速度为每秒 $0.15 \sim 0.3\text{N}/\text{mm}^2$ 。

二、轴心抗压强度 f_c

工程实际中,结构构件一般不是立方体,而是棱柱体,所以采用棱柱体试件比立方体试件能更好地反映混凝土的实际抗压能力。

同样边长的混凝土试件,随着高度的增加,其抗压强度将下降,图 1-4。但当高宽比 h/b 大于 3 后(但不超过 6),强度趋于稳定。我国采用 $150 \times 150 \times 300\text{mm}^3$ 棱柱体作为标准试件,试验测得的抗压强度称为混凝土的轴心抗压强度或棱柱体抗压强度。

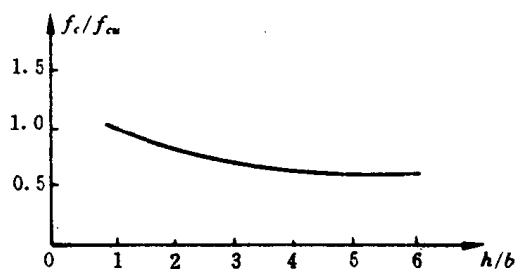


图 1-4 混凝土棱柱体高宽比对其强度的影响

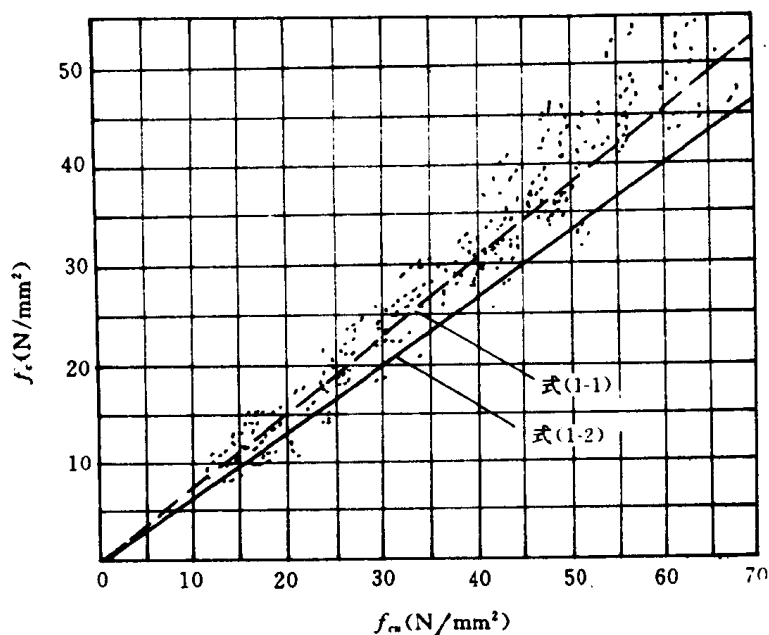


图 1-5 混凝土轴心抗压强度与立方体强度的关系

由于棱柱体试件用料多,重量大,试验困难,故工程中很少直接测量 f_c ,而是根据测定的立方体抗压强度 f_{cu} 进行换算。根据国内进行的棱柱体与立方体抗压强度对比试验,结果如图 1-5 所示,由图可见,二者近似直线关系,回归的经验公式为:

$$f_c = 0.76f_{cu} \quad (1-1)$$

考虑到实际结构构件与试件在尺寸、制作、养护、受力情况诸方面的差异,并照顾到过去的设计经验,《规范》取用:

$$f_c = 0.88 \times 0.76f_{cu} = 0.67f_{cu} \quad (1-2)$$

国外还有采用圆柱体试件来测定轴心抗压强度的,称为 f'_c 。试件直径为 6 英寸(150mm),高为 12 英寸(300mm),圆柱体试件的抗压强度 f'_c 和我国边长为 150mm 立方体抗压强度之间的换算关系大致为

$$f'_c = 0.79f_{cu} \quad (1-2a)$$

三、轴心抗拉强度 f_t

混凝土的抗拉强度远小于其抗压强度,一般只有抗压强度的 5%~10%,且不与抗压强度

成比例增长。目前,在钢筋混凝土构件的强度计算中一般不考虑混凝土承担拉力,但测试混凝土的抗拉强度,可间接地衡量混凝土的其它力学性能,如混凝土的抗裂度、冲切强度等。

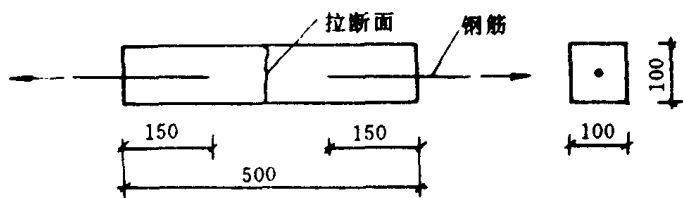


图 1-6 混凝土抗拉试验试件

夹具夹紧两端伸出的钢筋,对试件施加拉力。破坏时试件中部产生横向裂缝,混凝土被拉断,此时的平均拉应力即为混凝土的轴心抗拉强度 f_t 。

根据立方体抗压和轴心抗拉的强度对比试验,结果如图 1-7 所示。轴心抗拉强度的统计平均值:

$$f_t = 0.26f_{cu}^{\frac{2}{3}} \quad (1-3)$$

考虑到构件与试件的差别、尺寸效应、受荷情况等因素的影响,《规范》取:

$$f_t = 0.88 \times 0.26f_{cu}^{\frac{2}{3}} = 0.23f_{cu}^{\frac{2}{3}} \quad (1-4)$$

由于直接的轴心抗拉试验方法对试件尺寸及钢筋位置要求较严,并且试验时对中比较困难,故采用上述直接测试法是相当困难的。国内外常采用另一种间接的测试方法,通过圆柱体或立方体的劈裂试验来确定混凝土的抗拉强度,如图 1-8 所示。对圆柱体或立方体试件施加线荷载,在试件中间截面除加力点附近很小的范围以外,产生与该截面垂直且均匀分布的拉应力。当拉应力达到混凝土的抗拉强度时,试件沿中间垂直截面劈裂拉断成两半。劈裂强度 $f_{t,s}$ 可按下式计算:

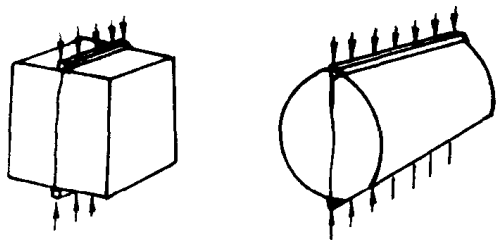


图 1-8 混凝土劈裂试验试件

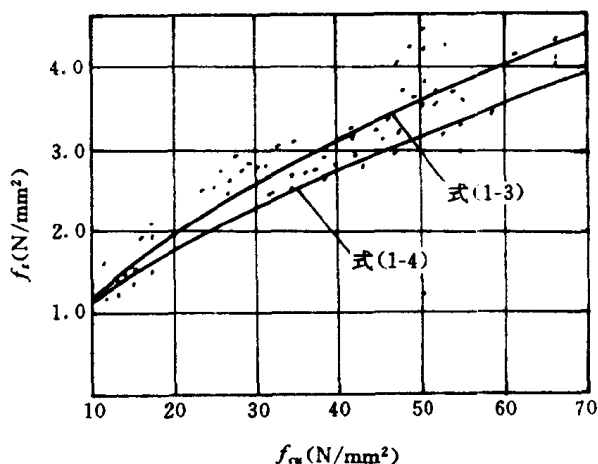


图 1-7 混凝土抗拉强度与立方体强度的关系

对圆柱体或立方体试件施加线荷载,在试件中间截面除加力点附近很小的范围以外,产生与该截面垂直且均匀分布的拉应力。当拉应力达到混凝土的抗拉强度时,试件沿中间垂直截面劈裂拉断成两半。劈裂强度 $f_{t,s}$ 可按下式计算:

$$f_{t,s} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (1-5)$$

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。

根据试验结果,采用边长为 100mm 的立方体劈裂试件时, $f_{t,s}$ 与 f_{cu} 的关系为:

$$f_{t,s} = 0.19f_{cu}^{\frac{3}{4}} \quad (1-6)$$

四、复合应力状态下的混凝土强度

在钢筋混凝土结构中,构件通常受到轴向力、弯矩、剪力及扭矩的不同组合作用,因此混凝土很少处于理想的单向应力状态,而更多的是处于复合应力状态,如双向应力状态或三向应力状态。

双向应力状态情况,如在两个平面上作用着法向应力 σ_1 和 σ_2 ,第三个平面上应力为零。这时双向应力状态下混凝土强度的试验曲线如图 1-9 所示。在双向拉应力作用下(第一象限), σ_1 与 σ_2 相互影响不大,即不同应力比值 σ_1/σ_2 下的双向受拉强度均接近于单向抗拉强度。在双向压应力作用下(第三象限),一向的抗压强度随另一向压应力的增加而增加,混凝土双向受压强度比单向受压强度最多可提高 27%。在拉压应力作用下(二、四象限),无论是抗拉强度或抗压强度均低于单向拉伸或压缩时的强度。

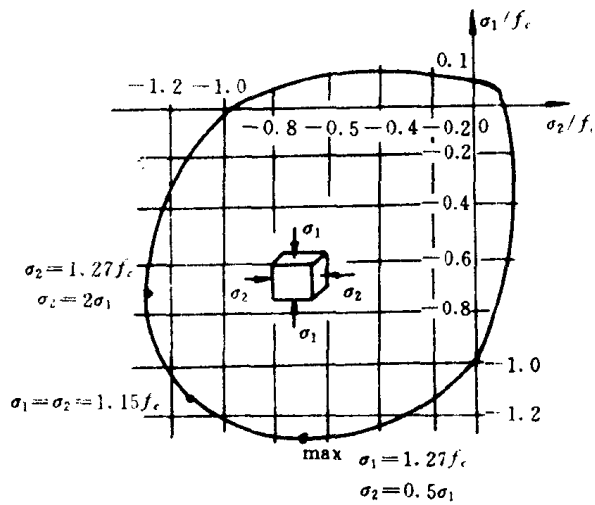


图 1-9 混凝土双向应力下强度曲线

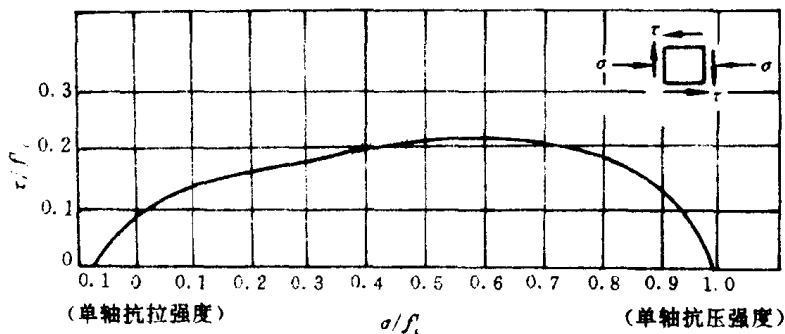


图 1-10 混凝土剪压或剪拉下强度曲线

个面上同时作用着法向应力 σ ,形成剪压或剪拉复合应力状态,其强度曲线如图 1-10 所示,图中看出,抗剪强度随拉应力的增大而减小(或者说,剪应力的存在使抗拉强度降低),当压应力较小时抗剪强度随压应力的增大而增大,但当压应力超过 $0.6f_c$ 时,抗剪强度反而随压应力的增加而减少,或者说,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。

混凝土在三向受压的情况下,由于侧向压力约束了混凝土的横向变形,并抑制了混凝土内部微裂缝的发展,可以极大地提高混凝土的抗压强度。试验给出经验公式:

$$f'_c = f_c + 4.1\sigma_2 \quad (1-7)$$

式中: f'_c ——有侧向压力约束的试件的轴心抗压强度;

f_c ——无侧向约束的试件的轴心抗压强度;

σ_2 ——侧向约束压应力。

1-1-3 混凝土的变形性能

一、混凝土棱柱体在一次短期荷载作用下的应力应变关系

混凝土在一次短期加载下的应力应变关系是混凝土最基本的力学性能之一,它可以较全面地反映混凝土的强度和变形特点,是钢筋混凝土构件应力分析,建立强度和变形计算理论所必不可少的依据。

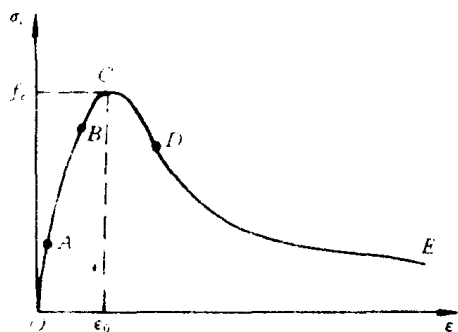


图 1-11 混凝土一次短期荷载下的应力应变曲线

混凝土受压的应力应变曲线,通常用高宽比 $h/b = 3 \sim 4$ 的柱体试件来测定。混凝土完整的应力-应变曲线如图 1-11 所示。曲线由上升段和下降段两部分组成。

上升段 OC: 在曲线的开始部分 (OA 段 (混凝土应力 $\sigma_c < 0.3f_c$)), 应力-应变为直线关系, 混凝土表现出理想的弹性性质, 其变形主要是骨料和水泥结晶体受力产生的弹性变形, 水泥胶体的粘性流动小, 混凝土内部的初始微裂缝尚未发展, 一般称 A 点为比例极限点。超过 A 点后, 随着应力的增大, 混凝土表现出越来越明显的非弹性性质, 应力应变曲线越来越偏离直线, 如曲线 AB 段 ($\sigma_c = 0.3f_c \sim 0.8f_c$), 这是由于水泥凝胶体的粘性流动以及混凝土内部的初始微裂缝的扩展贯通、新的裂缝产生的结果。B 点称为临界点, 临界点应力 ($\sigma_c = 0.8f_c$) 可作为长期抗压强度的依据。此后塑性变形显著增大, 应力应变曲线的斜率急剧减小, 当应力达峰值应力 f_c 时, 曲线的斜率接近水平, 如曲线 BC 段 ($\sigma_c = 0.8f_c \sim 1.0f_c$)。在接近峰值应力 f_c 的高应力作用下, 混凝土内部贯通的微裂缝转变为明显的纵向裂缝, 试件开始被破坏。此时混凝土达到的最大应力值 σ_{max} , 为混凝土轴心抗压强度 f_c , 与峰值应力相应的应

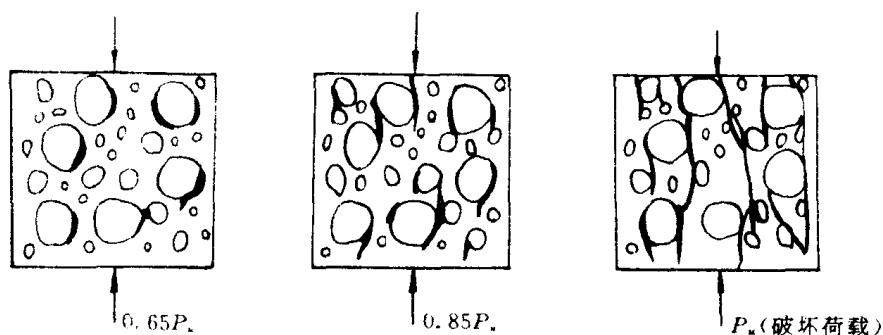


图 1-12 混凝土内微裂缝发展过程

变平均值 $\epsilon_c = 0.002$ 。试件中混凝土的微裂缝发展过程如图 1-12。

下降段 CE: 当试件加荷接近最大应力 σ_{max} 时, 若试验机的刚度大, 使试验机所释放的能量不至于立即将试件破坏, 则在到达峰值应力 f_c 后, 随应变的增长, 应力逐渐减少, 但试件还能承受一定的荷载, 直至应力应变曲线在 D 点出现反弯点, 试件从宏观上已充分破碎。此时混凝土达到极限压应变 ϵ_{cu} 。 $\sigma-\epsilon$ 曲线的下降段, 反映了混凝土内部裂缝的不断迅速扩展和混凝土沿裂缝面上的剪切滑移。超过反弯点, 结构受力性质开始发生本质的变化, 骨料间的咬合力及摩

擦力与残余块体共同承受荷载,反弯点以后曲线 DE 表示的低受荷能力,就是由它们提供的。

混凝土的极限压应变 ϵ_{cu} 包括弹性应变和塑性应变两部分,塑性应变部分越长,表明混凝土的变形能力越强,亦即延性越好。对于结构混凝土,不仅要利用它的强度,而且还要利用它的变形性能。

混凝土应力-应变曲线的形状和特征,标志着其内部结构发生的变化。不同强度混凝土的应力-应变曲线有着相似的形状,但也有实质的区别如图 1-13。随着混凝土强度的提高,上升段和峰值应力对应的应变的变化不大,而下降段的形状有较大差异。混凝土的强度愈高,下降段的坡度愈陡,即强度等级高的混凝土受荷时的延性比强度低的差。

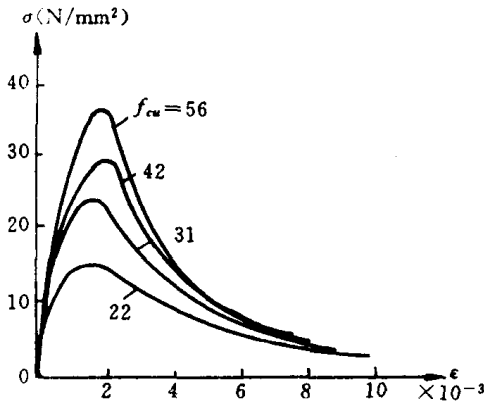


图 1-13 不同强度混凝土的应力应变关系

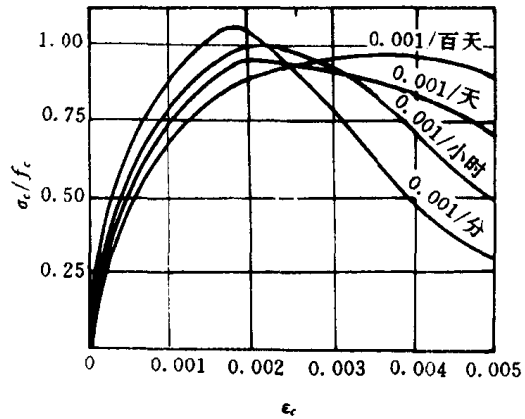


图 1-14 不同加荷速度时的混凝土应力-应变曲线

另外,混凝土受压应力-应变曲线的形状还与加载速度有关,如图 1-14。同一强度等级的混凝土,随着加载速度(应变速度)的降低,最大应力值减小,而达到最大应力时的应变却增加了,曲线下降段也比较平缓,混凝土延性增加。

混凝土受拉的应力-应变曲线形状与受压时相似,但其应力峰值及对应的应变均比受压时的相应值小很多,如图 1-15。混凝土的极限拉应变 ϵ_{tu} 与混凝土的强度、配比、养护条件有很大关系,其值可在 $(0.5 \sim 2.7) \times 10^{-4}$ 的范围内变化。强度越高极限拉应变也越大,在构件计算中,对一般混

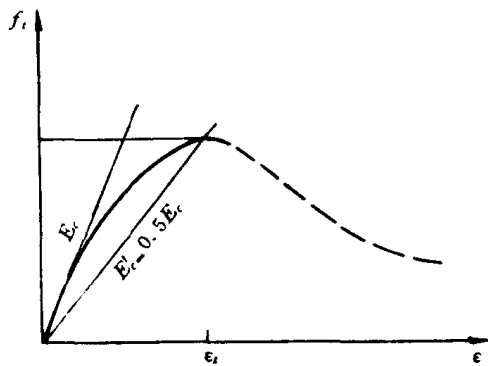


图 1-15 混凝土受拉 σ - ϵ 曲线

凝土强度,可取 $\epsilon_{tu} = (1 \sim 1.5) \times 10^{-4}$ 。

二、混凝土的变形模量

由材料力学中,我们知道,材料的应力应变关系是通过弹性模量反映的。在弹性材料中应力与应变是线性关系,弹性模量为常数。从前面已经看到,混凝土受压应力-应变关系是一条曲线,只有在应力很小时($\sigma_c < 0.3f_c$)才接近直线,因此曲线上任一点切线的正切 $E = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$ 为一变数,即在不同的应力阶段,混凝土应力与应变的比值是一个变数,称为变形模量。

图 1-16 中混凝土应力-应变曲线上任一点 A 处,应力为 σ_c ,与 σ_c 相应的混凝土的应变为 ϵ_c ,包括弹性应变 ϵ_{ce} 和塑性应变 ϵ_{cp} 两部分,即: