

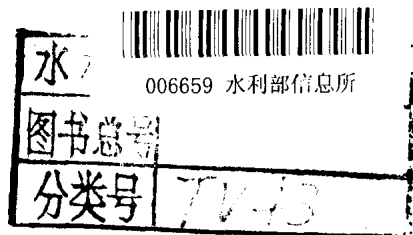
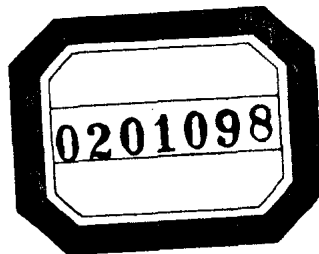


职工中等专业学校教材

成都水力发电学校 冯毅立 编

钢筋混凝土与砖石结构





职工中等专业学校教材

.....

钢筋混凝土与砖石结构

成都水力发电学校 冯毅立 编

水利电力出版社

职工中等专业学校教材

钢筋混凝土与砖石结构

成都水力发电学校 冯毅立 编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

昌平建华印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 29.25印张 674千字

1989年12月第一版 1989年12月北京第一次印刷

印数0001—2200册

ISBN 7-120-00989-3/TV·343

定价 7.55元

内 容 提 要

《钢筋混凝土与砖石结构》系水利电力职工中等专业学校教材。

全书共10章，内容包括钢筋混凝土材料的主要力学性能；钢筋混凝土结构设计计算方法；钢筋混凝土受弯构件、受压构件、受拉构件的强度计算和变形与裂缝宽度计算；预应力混凝土构件计算；钢筋混凝土楼盖结构、单层厂房排架结构、多层框架结构的内力分析及结构设计以及砖石结构等。章末附有思考题和习题，还附有现浇单向板肋形楼盖、单层厂房排架的设计实例。本书系依据新规范、新标准编写的。

本书主要作职工中等专业学校教材，同时可作职工函授与自学用书，也可供有关工程技术人员参考。

ZW71/16

前 言

为了提高水利电力系统职工的技术水平,使水利电力职工中等专业学校的教学工作走向正规化、系统化,我司统一组织编写了这套水利电力职工中专教材。这套教材是根据我司1985年系统内各职工中等专业学校和普通中等专业学校中有经验的教师分工编写的。在编写过程中,力求在保证理论的系统性、完整性的同时,密切联系生产实际,深入浅出,突出职工教育的特点。

水利电力职工中专教材分基础课及专业课两大部分,包括发电厂及电力系统、输配电工程、用电管理、电厂热能动力装置、电厂热工测量及自动化、水工建筑、水电工程施工、水电站动力设备、陆地水文、工业与民用建筑及经济管理等11个专业,共约120种教材。

本教材是根据职工中专“工业与民用建筑”专业教学计划及《钢筋混凝土与砖石结构》课程教学大纲编写的。全书共10章,内容包括钢筋混凝土材料的主要力学性能;钢筋混凝土结构设计计算方法;钢筋混凝土受弯构件、受压构件、受拉构件的强度计算和变形与裂缝宽度计算;预应力混凝土构件计算;钢筋混凝土楼盖结构、单层厂房排架结构、多层框架结构的内力分析及结构设计以及砖石结构等。其中除基本构件部份作了较为详尽的叙述并配有典型例题和习题外,还附有现浇单向板肋形楼盖,单层厂房排架的设计实例。

本书又根据我国《钢筋混凝土结构设计规范》、《砌体结构设计规范》、《工业与民用建筑荷载规范》编写的。介绍了新规范、新标准,并采用了新的国际通用符号和我国法定计量单位。

全书由成都水电学校冯毅立编写,由杭州电力学校陆纯武审稿。

由于编写时间仓促,教材中错误难免,恳请读者批评指正。

水利电力部教育司

1988年4月1日

目 录

前言	
绪论	1
第一章 钢筋混凝土材料的主要力学性能	4
第一节 混凝土的力学性能	4
第二节 钢筋	12
第三节 钢筋与混凝土的共同工作	16
第二章 钢筋混凝土结构设计计算方法	18
第一节 结构的功能要求及其极限状态	18
第二节 数理统计中几个名词浅释	19
第三节 结构按极限状态的设计方法	24
第三章 钢筋混凝土受弯构件	32
第一节 受弯构件正截面强度计算	34
第二节 受弯构件斜截面强度计算	60
第三节 受弯构件构造要求	77
第四节 受弯构件的变形及裂缝宽度验算	86
第四章 钢筋混凝土受压构件	102
第一节 轴心受压构件	102
第二节 偏心受压构件	106
第五章 钢筋混凝土受拉构件	136
第一节 轴心受拉构件	136
第二节 偏心受拉构件	137
第六章 预应力混凝土构件	144
第一节 概述	144
第二节 预应力钢筋的张拉控制应力和预应力损失	148
第三节 预应力钢筋的传递长度	153
第四节 预应力混凝土轴心受拉构件	154
第五节 预应力混凝土受弯构件	170
第六节 预应力混凝土构件的构造要求	208
第七章 钢筋混凝土楼盖结构	212
第一节 现浇单向板肋形楼盖	212
第二节 现浇双向板肋形楼盖	237
第三节 装配式铺板楼盖	246
第四节 钢筋混凝土楼梯、过梁和雨篷	250

第八章 单层厂房排架结构	277
第一节 单层厂房结构组成	277
第二节 单层厂房排架结构内力计算	278
第三节 单层厂房排架柱设计	289
第四节 柱下单独基础	295
第九章 多层框架	324
第一节 概述	324
第二节 多层框架的计算	326
第三节 现浇整体式框架的节点构造	353
第十章 砖石结构	355
第一节 砖石砌体的力学性质	355
第二节 砌体结构构件计算	365
第三节 混合结构房屋的结构布置及静力计算方案	386
第四节 墙、柱高厚比和构造措施	391
第五节 刚性方案多层房屋的计算	398
第六节 弹性和刚弹性方案单层房屋计算	407
第七节 过梁、墙梁、挑梁	416
附表	431
附表1 混凝土的标准强度、设计强度及弹性模量	431
附表2-1 钢筋设计强度	431
附表2-2 钢筋标准强度	432
附表2-3 钢丝设计强度	432
附表2-4 钢丝标准强度	433
附表2-5 钢筋弹性模量	433
附表3 钢筋混凝土构件中纵向受力钢筋的最小配筋百分率	433
附表4 受弯构件最大配筋率	434
附表5 受弯构件的允许挠度	434
附表6 裂缝控制等级、混凝土拉应力限制系数 α 及最大裂缝宽度允许值	434
附表7 矩形和T形截面受弯构件正截面强度计算表	435
附表8 受弯构件截面抵抗矩塑性系数	436
附表9 钢筋的计算截面面积及理论质量	437
附表10 每米板宽内的钢筋截面面积表	437
附表11 等跨连续梁在均布荷载和集中荷载作用下的弯矩和剪力系数表	438
附表12 单跨双向板在均布荷载作用下的内力系数表	446
附表13 单层厂房排架柱柱顶反力与位移	449
附表14 电动桥式吊车数据表	453
附表15 框架在均布或倒三角形荷载作用下的反弯点高度比	454
附表16 分布钢筋的直径及间距参考表	459
参考书目	460

绪 论

一、钢筋混凝土结构的特点

混凝土是一种人造石材，它的抗压强度很高而抗拉强度却很低（抗拉强度约为抗压强度的 $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{17}$ ），因此素混凝土制作梁构件，在荷载很小时受拉区就已开裂并进而发生脆断破坏。如果在梁的受拉区域配置抗拉强度很高的钢筋，使拉力由钢筋承担。而受压区的压力仍由混凝土承担，那么梁就可以承担大得多的荷载见图0-1。

将钢筋以合理的形式配置在混凝土中就形成一种新的结构材料——钢筋混凝土。这种全新的结构材料能将钢筋和混凝土这两种物理力学性能完全不同的材料结合在一起共同工作、使其发挥各自的特点，做到物尽其用，即充分发挥钢筋的抗拉能力和混凝土的抗压能力、获得节省材料，提高构件承载能力的效果。钢筋和混凝土能够结合成整体共同工作，是因为当混凝土结硬后在钢筋和混凝土之间产生粘结力，将钢筋和混凝土粘结成一个整体，协调变形、共同受力，同时钢筋和混凝土具有几乎相同的温度线膨胀系数（钢筋为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ；混凝土为 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C} \sim 1.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ），当温度变化时，两种材料共同变形，不会产生相互错动而破坏两者间的粘结力。此外，包在钢筋外面的混凝土保护了钢筋，有助于防止钢筋锈蚀。

钢筋混凝土结构除了能合理利用钢筋和混凝土两种材料的力学性能外，还具有以下优点：

（1）耐久性 混凝土包裹钢筋，可保护钢筋免遭锈蚀，同时混凝土强度随龄期而有所增长，因此钢筋混凝土耐久性能良好，几乎不需保养和维修。

（2）耐火性 混凝土是不良热导体，遇到火灾时包裹在混凝土里面的钢筋不会很快升温到失去承载能力的程度。与钢、木结构相比耐火性能较好。

（3）整体性 钢筋混凝土结构，特别是现浇钢筋混凝土结构整体性能良好，因此对于地震作用具有较强的抵抗能力。

（4）可模性 钢筋混凝土可根据工程需要浇制成各种尺寸和形状的构件。

（5）就地取材 混凝土的原材料砂、石可以就地取材、降低工程造价。

（6）节约钢材 钢筋混凝土结构能充分发挥钢筋和混凝土的力学性能，特别是预应力混凝土结构的应用，在一定范围内可以代替钢结构，与钢结构相比，可以节约钢材，降低造价。

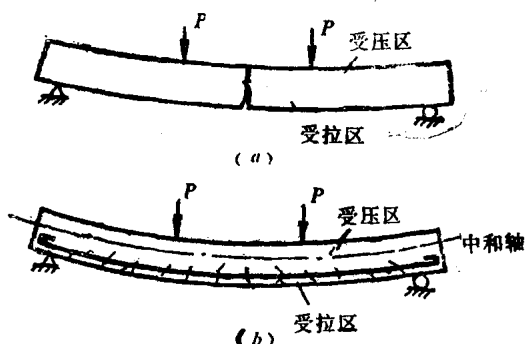


图 0-1

（a）素混凝土梁；（b）钢筋混凝土梁

钢筋混凝土结构也有一些缺点,比如自重大;制作费工;施工工期长等。但采用预应力混凝土结构;可以减小构件截面尺寸,减轻构件自重。此外发展装配式结构;采用工具式钢模板和滑模施工工艺等有利于克服施工工期长的缺点。

钢筋混凝土结构有很多优点,所以在基本建设中应用广泛,一般工业与民用建筑、水利工程、交通运输工程、国防工程以及各种特种结构诸如料仓、水塔、管道、烟囱、电杆、设备基础等等皆广泛使用钢筋混凝土结构。在工程建设中,目前以钢筋混凝土结构的应用最为广泛。

二、钢筋混凝土结构的发展概况

钢筋混凝土结构的产生和发展迄今约有150年的历史。从19世纪后半叶到20世纪20年代,是钢筋混凝土结构发展的初期阶段,这个期间出现了钢筋混凝土的梁、板、柱、拱等简单构件,所采用的混凝土和钢筋强度等级都很低,钢筋混凝土的结构计算理论尚未建立,设计方法沿用《材料力学》中的容许应力法。到20世纪20~30年代,随着对钢筋混凝土结构的进一步了解,提出并使用了破损阶段计算方法。20世纪50年代以后,随着对钢筋混凝土结构的深入研究,生产经验的积累,以及数理统计方法的应用,又提出了按极限状态计算方法,这是一种半概率、半经验的设计方法。70年代随着对结构安全度的分析、取值和表达方式的不同,我国采用多系数分析,单一安全系数表达的极限状态设计方法(TJ10-74),该方法仍属半概率设计方法的范畴。近年来,随着建筑科研工作的发展,为了改进评估结构可靠程度的分析方法,使各种结构的设计理论、设计原则、设计表达式统一化和设计规范系列化,提高我国建筑结构设计规范的先进性和统一性,我国于1984年颁布了《建筑结构设计统一标准》(GBJ68-84),这是按可靠度理论和近似概率法的基本原理制定的,是制定和修订有关工业与民用建筑结构设计规范所应共同遵守的准则,这样就使以概率理论为基础的结构近似概率设计法进入了实用阶段,设计理论进入了一个新的发展水平。在此基础上,我国于1989年颁布了新的钢筋混凝土结构设计规范。

从材料方面看,目前混凝土强度等级达C40~C60,此外各种轻质高强混凝土也有很大发展,如加气混凝土、陶粒混凝土、浮石岩混凝土等,容重减轻到 $14\sim 18\text{kN/m}^3$,强度等级可达C50,不仅用于非承重结构,也可用于承重结构。

结构方面,在一般工业与民用建筑中广泛采用的定型化、标准化的装配式结构和预应力混凝土结构促进了建筑工业化的发展,为进一步加快建设速度、降低造价,保证施工质量创造了条件。近年来钢筋混凝土在大跨结构和高层结构中的应用有了令人瞩目的发展。目前世界上最高的钢筋混凝土建筑是芝加哥水塔广场大厦,已达76层、高262m。预应力混凝土桥梁最大跨度已达240m,最高的预应力混凝土电视塔高达549m。我国钢筋混凝土结构的高层建筑近年来有如雨后春笋,有了很大发展。如50层的深圳国际贸易中心大楼高160m。33层的广州白云宾馆高112m。26层的北京中央彩电大楼高107m等等。此外福建乌龙江大桥桥跨达144m。预应力钢筋混凝土屋架跨度达60m,预应力钢筋混凝土吊车梁吊车吨位达400kN。

总之,钢筋混凝土结构这门学科,无论设计理论、科学研究,工程建设等各方面都在迅速发展,具有广阔的前景。

三、本课程的特点及其学习方法

《钢筋混凝土及砖石结构》是工业与民用建筑专业的主要专业课，学好本课程不仅对于今后从事土建结构设计的人至关重要，就是对于从事施工技术和工程管理工作的人同样也是必不可少的，因为掌握必要的结构设计理论知识有助于了解结构受力原理和性能，正确理解设计意图，在审议设计方案、施工图纸、制定施工技术方案和处理工程事故等方面才能作出正确的判断，从而保证工程结构的质量。

《钢筋混凝土及砖石结构》是一门综合性很强的学科，它不仅与《高等数学》、《材料力学》、《结构力学》关系密切，而且与《建筑材料》、《房屋建筑学》、《建筑施工》等课程相互关联。研究问题时不仅涉及受力分析，而且与材料性能、构造要求、施工条件和施工工艺以及经济造价等等都有关系，需要综合考虑，也就是说结构设计时需要综合考虑安全、适用、经济以及施工的可行性等各方面的因素。因此学习时必须着重培养归纳总结、综合运用能力。

《钢筋混凝土及砖石结构》又是一门实践性很强的学科，它的设计理论是在科学实验和工程经验的总结基础上建立起来的，学习时除了重视掌握基本理论以外，还必须注意借鉴工程经验。结构设计必须与建筑工程实践密切联系，无论方案选择，受力分析以及细部构造处理都要从实际出发，注意理论联系实际。

学习《钢筋混凝土及砖石结构》时，还必须学会运用设计规范。设计规范是为了贯彻国家技术经济政策、保证设计质量，由国家颁布的具有技术法律效力的设计文件，是工程技术人员进行设计时必须遵守的共同准则，因此学习本课程时即应注意熟悉规范，运用规范。本教材内容是与1989年颁布的《钢筋混凝土结构设计规范》、《砌体结构设计规范》、《工业与民用建筑结构荷载规范》等规范相协调的。

第一章 钢筋混凝土材料的主要力学性能

钢筋混凝土是由钢筋与混凝土这两种力学性能完全不同的材料组成的。要掌握钢筋混凝土结构设计的基本理论,必须首先了解这两种材料的力学性能。本章讨论的内容为以后各章讨论的构件受力特征、设计计算原理提供依据。

第一节 混凝土的力学性能

一、混凝土的强度

(一) 立方强度(f_{cu})与强度等级

混凝土的强度不仅与水泥标号、骨料的级配、材料的配合比、养护环境的温湿度条件、龄期等因素有关,同时也与测定混凝土强度时试件的尺寸、形状、受力性质以及测定方法有关。因此有必要规定材料强度的试验方法。《混凝土结构设计规范》(以后简称《规范》)规定:混凝土的立方强度是指边长15cm的标准立方体试件在标准条件(温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $\geq 90\%$)下养护28d后在压力试验机上以大约 $0.15 \sim 0.25 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ 的速度加压到试件破坏时所测得的平均压应力,用符号 f_{cu} 表示。

设计钢筋混凝土结构时,由于各类结构构件的使用要求、重要程度、受力情况、施工条件等的不同,对混凝土的强度要求也就不同,因此需要按照立方强度的大小将混凝土划分为不同的强度等级,以便结构设计时按照安全、经济的原则,根据具体情况选用不同的等级。《规范》规定,混凝土的强度等级划分为10级,即C10、C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C60。其中10~60等数系表示以 N/mm^2 为单位的立方强度值。

试验表明,混凝土的立方强度与测定强度的试验方法有关。通常试件上、下表面与压力机垫板间是直接接触的,在压力作用下,混凝土试件纵向缩短,横向膨胀,而试件表面与压力机垫板之间的摩擦力将阻止试件横向自由膨胀,就像试件上、下各加了一道套箍一样,这就提高了试件的抗压强度,而这种强度的提高只不过是试验方法造成的人为的因素。破坏时试件中部混凝土剥落如图1-1(a)所示。这是由于摩擦力的影响在试件中部很小,混凝土基本上可以自由膨胀的缘故。如果在试件上、下表面涂上油脂或其它润滑剂,摩擦力

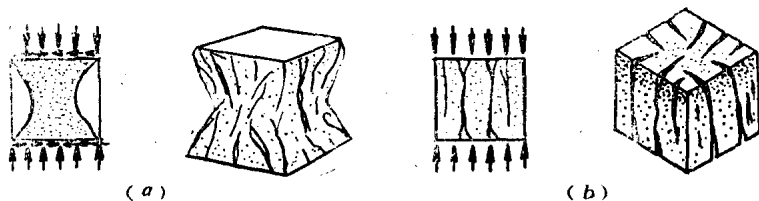


图 1-1 立方体试件

(a) 有摩擦破坏; (b) 无摩擦破坏

将大为减小，混凝土的横向膨胀几乎不受约束，这样测得的立方强度就较低。试件破坏时将由横向拉力将试件纵向拉裂。如图1-1(b)所示。

实际工程上测定混凝土立方强度时，《规范》规定试件表面不涂润滑剂。

当采用非标准尺寸的试件时，由于试件尺寸不同，试件与压力机垫板间摩擦力影响也不同，尺寸愈小，摩擦力的影响愈大，试件强度也愈高，这就是所谓“尺寸效应”。因此必须把这种非标准尺寸试件测得的立方强度乘以换算系数，以便求得相当于标准试件的立方强度值。《规范》规定当采用20cm或10cm的立方体试件时，应分别乘以1.053或0.947的换算系数。以消除由于试件尺寸不同，摩擦力影响所造成的人为的强度改变现象。

混凝土的立方强度只是衡量混凝土强度的相对指标，它不能表示结构构件中混凝土的真实强度。这是因为：

(1) 立方强度是用立方体试件在标准条件下制作养护并用标准试验方法测得的强度值，与实际工程结构构件的尺寸、形状、制作养护条件和受力情况等均不同，强度也就不同。

(2) 立方体强度受试验时试件与压力机承压垫板间摩擦力的影响人为地提高了，所以不能反映结构构件中混凝土的真实强度。

(3) 材料试件的加荷速度远高于实际结构的受荷速度，致使试件强度高于实际结构构件的材料强度。

(4) 试件材料和实际结构的材料性能受时间因素的影响显然也不一样。

结构构件混凝土的强度用轴心抗压强度和轴心抗拉强度表示。

根据《规范》规定，钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不宜低于C15；当采用Ⅰ级钢筋时，混凝土强度等级不宜低于C20；当采用Ⅱ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应低于C30；当采用碳素钢丝、钢绞线、热处理钢筋作预应力钢筋时，混凝土强度等级不应低于C40。

(二) 轴心抗压强度 f_c 。(棱柱体强度)

用截面尺寸为 $150 \times 150\text{mm}$ ，高宽比 $\frac{H}{a} = 3 \sim 4$ 的棱柱体混凝土试件，在标准条件下养护28天，用标准方法试压得出的强度叫做混凝土轴心抗压强度或棱柱体强度。用棱柱体试件，由于高宽比较大，试件与垫板间摩擦力对试件中部已基本没有影响，试件中部截面应力能反映混凝土轴心受压时的真实强度。同时试件高宽比不过大，又可避免过高试件可能产生的附加偏心的影响（附加偏心可能由材料的不匀质和试件几何尺寸偏差或对中偏差引起）。

试验表明，混凝土的轴心抗压强度的统计平均值 μ_{fc} 与混凝土的立方强度的统计平均值 μ_{fcu} 之间关系如图1-2所示：

$$\mu_{fc} = 0.76 \mu_{fcu} \quad (1-1)$$

考虑到工程结构构件中混凝土与棱柱体试件中混凝土无论制作情况、养护情况均有不同，强度因而也不同；同时吸取了过去的工程实践经验；并参考其它国家的有关规定，所以实际取用的混凝土轴心抗压强度应在公式(1-1)基础上再乘以降低系数0.88，则结构

中混凝土轴心抗压强度平均值 μ_{fc} 应为

$$\mu_{fc} = 0.88 \times 0.76 \mu_{fcu} = 0.67 \mu_{fcu} \quad (1-2)$$

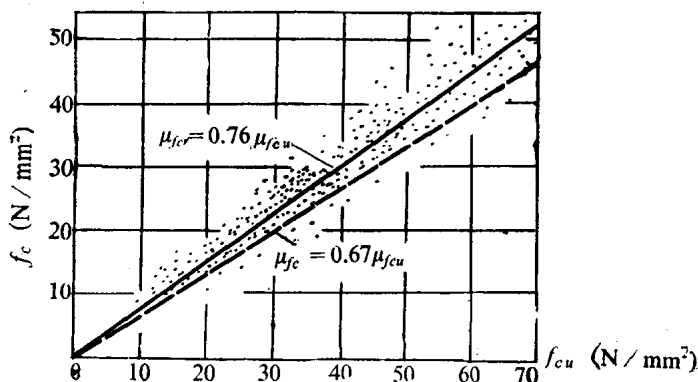


图 1-2

由此《规范》取轴心抗压强度与立方强度关系为：

$$f_{ck} = 0.67 f_{cu,k} \quad (1-3)$$

对于C45、C50、C60混凝土，考虑到脆性破坏特征显著以及实践经验不足，其轴心抗压强度再分别乘以折减系数0.975、0.95和0.9。

(三) 轴心抗拉强度 f_t

混凝土的轴心抗拉强度 f_t 远低于抗压强度 f_c ，一般只有抗压强度的1/8~1/17，所以在一般钢筋混凝土构件的强度计算中，不考虑混凝土承担拉力，拉力全部由钢筋承担，仅在屋架的拉杆以及梁、板需作抗裂验算时，才利用混凝土的抗拉能力，并以混凝土抗拉强度作为拉裂验算的重要指标。

测试抗拉强度的方法有两种。我国常用在试件两端轴线上各预埋一根螺纹钢筋的棱柱体试件（通常试件尺寸用100×100×500mm。钢筋埋入长度为150mm，见图1-3）。试验机夹头夹住伸出的钢筋施加轴向拉力，试件均匀受拉，使在中间不配筋的区段内拉断，试件破坏时的平均拉应力即混凝土的轴心抗拉强度。这种试验方法钢筋对中比较困难，因此有时采用另一种劈裂试验方法来代替。

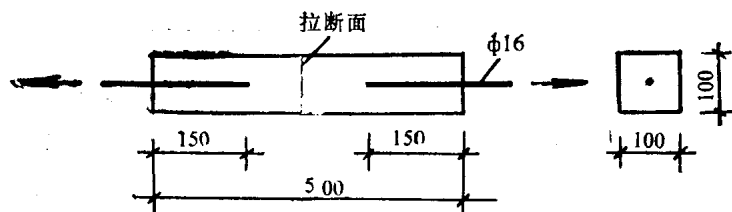


图 1-3 (单位mm)

另一种试验方法如图1-4所示，用两根截面为 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 的方钢垫条放在平放的圆柱体或立方体试件上，并对中施加线荷载，根据弹性力学可知，在试件的垂直中面上除加荷

的局部区域外将作用有均匀水平拉应力, 当此拉应力达到混凝土极限抗拉强度时, 试件沿垂直中面劈裂破坏, 由此即可求得混凝土抗拉强度。

当采用立方体劈裂试件时, 混凝土抗拉强度可由下式求得:

$$f_t = \frac{2P}{\pi a^2}$$

式中 a ——立方体试件边长。

因为混凝土强度是用立方强度检测的, 因此需要求出混凝土轴心抗拉强度与立方强度的关系, 根据抗拉强度试验, 考虑到构件与试件的差别、尺寸效应, 加荷速度等因素的影响, 《规范》取,

$$f_t = 0.23 f_c^{1/3} \quad (1-4)$$

同样, 考虑强度等级高的混凝土破坏时表现出来的脆性性质, C50、C60 混凝土由公式 (1-4) 求得的轴心抗拉强度还应分别乘 0.95、0.90 的折减系数。

二、混凝土的变形

(一) 混凝土在单调短期加荷过程中的应力应变关系——混凝土受压时应力应变全曲线

研究混凝土在单调短期加荷时的应力应变关系, 也就是研究混凝土受压时应力应变全曲线, 找出曲线中最大应力及其对应的应变和破坏时极限应变这三个特征值。它也是确定构件截面中应力分布规律建立强度和变形计算理论必不可少的主要依据。混凝土受压时的应力应变全曲线用 $h/b = 3 \sim 4$ 的棱柱体试件来测定。

混凝土受压时应力应变全曲线如图 1-5 所示, 分上升段与下降段两部分。

在加荷过程中, 当应力较小时 ($\sigma \leq 0.3 f_c$, 即曲线上 OA 段), 混凝土应力应变关系接近弹性性质, 应力应变关系近似为一直线, 卸荷后应变将恢复到零。

随着应力不断加大 ($\sigma = 0.3 f_c \sim 0.8 f_c$, 即曲线的 AB 段), 混凝土表现出明显的塑性性质, 应变增长速度比应力增长速度快, 应力应变关系偏离直线呈曲线关系。

当应力进一步升高到接近混凝土轴心抗压强度 f_c 时 ($\sigma = 0.8 f_c \sim 1.0 f_c$, 即曲线的 BC 段), 应变增长速度进一步加快, 达到 C 点时, 混凝土达到了最大承载能力, 这时的应力即为轴心抗压强度 f_c , 与 C 点对应的混凝土应变 ϵ_0 一般都在 0.002 左右, 即

$$\epsilon_0 = 0.002 \quad (1-5)$$

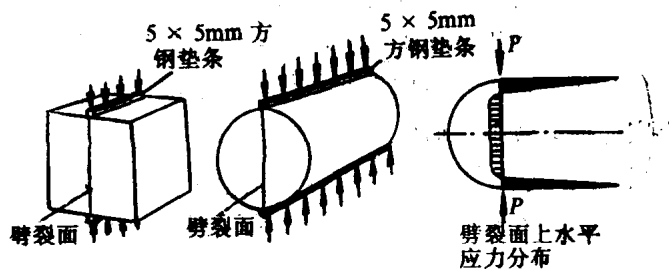


图 1-4

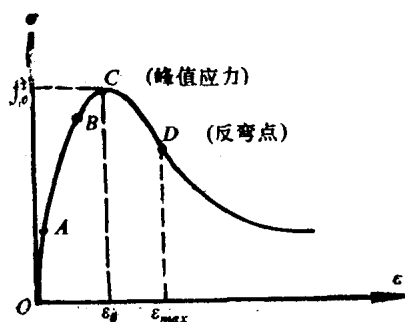


图 1-5

图1-5中曲线OC段总称为应力-应变曲线的上升段。

如果试验机的刚度较大，它积蓄的弹性变形能较小，变形恢复速度也较慢，或混凝土强度等级较低，则当应力达到 f_c 时，混凝土还不会立即破坏，这时如果缓慢地卸荷，混凝土应力逐渐减小，而应变却不断增加，直到达到D点，试件破坏。相应的D点应变即为极限压应变 ϵ_{max} ，对于钢筋混凝土受弯和偏心受压构件， ϵ_{max} 约为 $(0.2 \sim 0.6) \times 10^{-2}$ 。一般取 ϵ_{max} 为 $(0.3 \sim 0.35) \times 10^{-2}$ （或取其平均值 0.33×10^{-2} ）。曲线的CD段即为应力应变曲线的下降段。各类强度等级的混凝土棱柱体试件从外观看，在下降段反弯点（D点）附近就已充分破碎了，D点以后的承载力是由破碎后混凝土碎块间的咬合力及摩擦力提供的。

试验表明，强度等级低的混凝土下降段很明显，曲线长而平缓。而强度等级高的混凝土下降段初始段较陡，随后才变得较平缓（图1-6）。

混凝土应力应变曲线还受加荷速度的影响。随着加荷速度减慢，峰值应力逐步略有下降如图1-7所示。与峰值应力对应的应变则逐步略有增大，下降段逐步变得较为平缓。

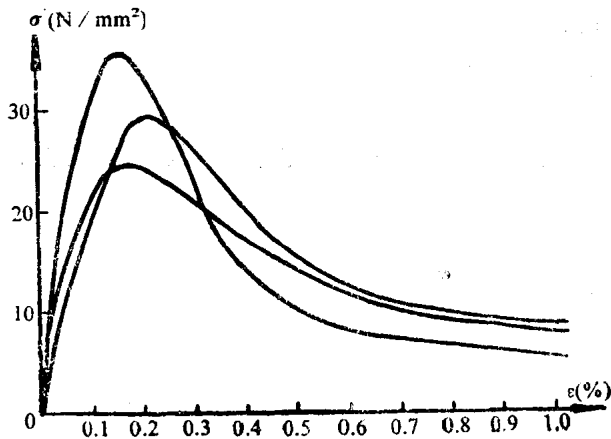


图 1-6

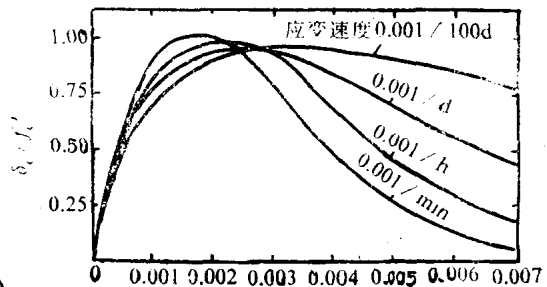


图 1-7

（二）混凝土在多次重复荷载下的应力应变关系

混凝土棱柱体试件加荷到应力超过A点后若卸荷到应力为零，则应力应变曲线如图1-8所示，加载时曲线凹向 ϵ 轴，卸载时变为凸向 ϵ 轴，且卸荷曲线始点切线AB与加载曲线始点切线OP相平行。卸载后立即恢复的“弹性变形”为 ϵ_{ee} ，经过一定时间才能恢复的变形叫“弹性后效”或“迟弹性应变”（即图中 ϵ_{ee} ）。有一部分变形是不能恢复的，叫“残余应变”或“塑性应变”（图中 ϵ_{ep} ）。混凝土在应力超过A点后所表现出来的这种性质就是混凝土的弹塑性性质。

如果将试件加荷至压应力达到某个数值 σ ，然后卸荷至零，再加荷至应力达到 σ ，再卸荷为零，如此循环往复多次，就叫做多次重复加荷。如前所述，混凝土每经过一次加卸荷循环将有两部分塑性变形不能恢复，在多次加卸荷循环过程中，这些塑性变形将逐渐积累，只不过每次循环产生的残余变形将随次数的增加而不断减小。图1-9表示多次重复荷

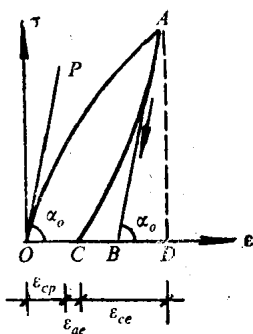


图 1-8

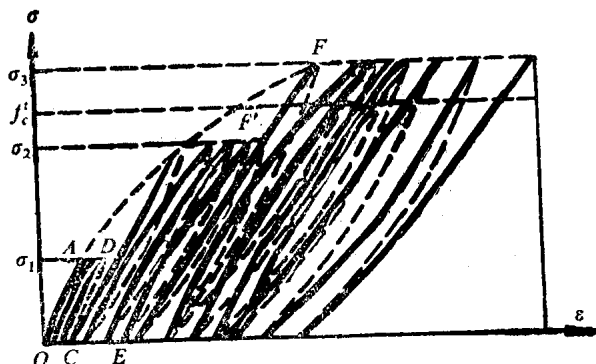


图 1-9

载作用下的应力应变曲线。当每次循环所加的压应力 σ 小于某个数值 f_t^i 时(如图 $\sigma_1 < f_t^i$; $\sigma_2 < f_t^i$),经过若干次加卸荷循环后,累积塑性变形将不再增加。混凝土加卸荷应力应变曲线将变得接近直线,如图中 CD (应力 σ_1)、 EF' (应力 σ_2)所示,且与原点切线基本平行。如果每次加荷时压力超过某一数值 f_t^i (如图 $\sigma_3 > f_t^i$),则经过几次循环后,应力应变曲线将变成直线,再继续重复加卸荷,应力应变曲线就转为反向弯曲,变形不断增加,试件很快破坏。这就是混凝土的疲劳破坏。通常我们把能使试件加卸荷循环200万次才发生破坏的压应力称为混凝土的疲劳抗压强度,以符号 $f_{t,i}$ 表示。

(三) 混凝土的弹性模量和变形模量

混凝土不是弹性材料,受拉、受压时其应力 σ 与应变 ϵ 之比都不是一个常数。只有在应力较小时,混凝土才接近弹性性质,这个阶段混凝土的弹性模量可用应力应变曲线过原点切线的斜率来表示,称为“初始弹性模量”或简称“弹性模量”,即

$$E_c = \tan \alpha_0 \quad (1-6)$$

混凝土在一次加荷下的初始弹性模量不易准确测定。《规范》给出的混凝土弹性模量是这样测定的:把混凝土棱柱体试件加荷到应力 $\sigma = 0.5f_c$,再卸去荷载,然后再加荷到 $\sigma = 0.5f_c$,再卸荷,如此加载、卸载循环往复10次,此时混凝土的加荷曲线趋近于一条直线,而且,此直线与第一次加荷时应力应变曲线的原点切线是大致平行的。于是,即可借助这条多次重复荷载作用下的应力应变曲线的斜率来确定混凝土的初始弹性模量。通常如图1-10所示。取10次加卸荷循环后应力应变曲线上 0.5N/mm^2 与 $0.5f_c$ 之间的应力差 σ_i 与相应的应变差 ϵ_i 用下式计算:

$$E_c = \frac{\sigma_i}{\epsilon_i} \quad (1-7)$$

把各种强度等级的混凝土用上述方法测得的 E_c 值通过回归分析,即可求得混凝土弹性模量与其主要影响参数立方强度 f_{cu} 之间的关系为:

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1-8)$$

由这个公式求得的各个强度等级的混凝土弹性模量值列于本书附录的附表1中。

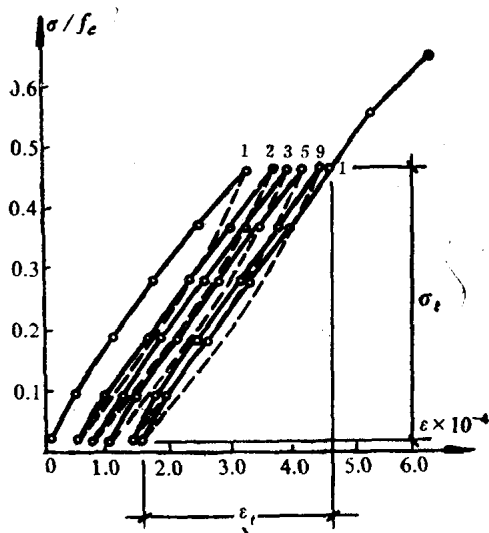


图 1-10

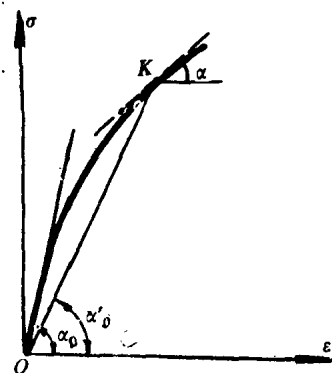


图 1-11

混凝土剪切弹性模量可取为:

$$G_c = 0.4E_c \quad (1-9)$$

混凝土应力较大时,即进入弹塑性阶段,这时不能再用初始弹性模量 E_c 来反映混凝土的应力应变性质,而应改用混凝土的变形模量。如图1-11,连接原点与应力应变曲线上任一点 K ,则割线 OK 的斜率即为割线模量或称“变形模量”,又称“弹塑性模量”,用符号 E'_c 表示:

$$E'_c = \tan \alpha'_0 = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \nu E_c \quad (1-10)$$

即变形模量等于弹性模量乘以小于1的系数 ν 。对于受压混凝土,系数 ν 在1.0~0.4之间变化。

混凝土受拉时的弹性模量等于受压弹性模量,受拉破坏时变形模量也用公式(1-10)表示,相应的系数 $\nu=0.5$ 。

(四) 混凝土的徐变

混凝土在荷载长期作用下,随时间而增长的变形叫做徐变,混凝土的徐变对于结构构件的变形和内力分布以及预应力钢筋中的应力都将产生重要影响。

如图1-12所示,在不变应力作用下,徐变的发展先快后慢,通常在最初6个月可完成最终徐变量的70%~80%,第一年内可完成90%,其余部份则在后续几年内完成。最终徐变量 $\epsilon_{cr}(t=\infty)$ 可达初始弹性应变 ϵ_{e0} 的2倍到4倍。

若在荷载作用一段时间后卸载,则有一部份瞬时应变 ϵ'_{e0} 立即恢复,还有一部分应变 ϵ'_{e1} 将在一段时间内逐渐恢复,叫“徐回”。剩下相当一部分是不能恢复的永久变形。

徐变产生的原因,尚待进一步探讨,一般认为,混凝土中水泥凝胶体在应力长期作用下发生粘性流动、以及混凝土内部的微裂缝在荷载长期作用下不断增加、扩展是徐变产生的主要原因。当应力不大时前者为主,应力较大时后者为主。

影响徐变的因素很多,可以归纳为以下三类: