

建筑工程系列书

# 钢筋混凝土与砖石结构

上册

华南工学院建筑结构教研组 编

华南工学院出版社

建筑工程系列书

# 钢筋混凝土与砖石结构

上册

华南工学院建筑结构教研组编



华南工学院出版社

## 内 容 提 要

本书是根据全国高等教育自学考试大纲编写的,分为上、下册出版。上册主要阐述钢筋混凝土与砖石结构的材料力学性能及计算原则;钢筋混凝土构件受弯、剪、扭、压、拉、裂缝和变形的计算等。本书可作工业与民用建筑专业成人教育和全日制专科的教材,或自学考试用书,也可供有关的设计、施工和科研工作人员参阅。

建筑工程系列书  
钢筋混凝土与砖石结构(上册)  
华南工学院建筑结构教研组编

华南工学院出版社出版发行

(广州 五山)

广东省新华书店经销

华南师范大学印刷厂印刷

787×1092 16开本 23印张 559千字

1987年1月第1版 1987年11月第1次印刷

印数 1—9500册

ISBN 7-5623-0014-3/TU·4

统一书号 15410·040 定价 3.85元

## 编辑说明

建筑工程系列书是本社为适应多层次、多种形式办学需要，针对高等学校工科建筑工程专业教学要求而编辑出版的试用教材和主要教学参考书。这些书均结合考虑大专要求和成人教育的特点，由具有较高学术水平和丰富教学经验的教授编写或审稿。其特点是，内容上注意理论联系实际，释疑解难，深入浅出，并附有思考题或实验实习指导，便于自学，特别适用于成人高等教育的各种形式（大专班、函授、刊授、电大、夜大、业余大等）的教学需要。有部分书特别注明与本科通用。

建筑工程系列书的种类和计划出版的时间是：

- 一、《建筑工程测量》（本科和专科通用，1985年出版，1987年重版）
- 二、《建筑结构选型》（主要参考书，1985年出版）
- 三、《建筑材料学》（本科和专科通用，1986年出版，1987年重版）
- 四、《理论力学》（1986年出版）
- 五、《材料力学》（1986年出版）
- 六、《结构力学》（1987年出版）
- 七、《材料力学解题指导》（本科和专科通用，1986年出版）
- 八、《钢筋混凝土与砖石结构》（上、下册，1987年出版）
- 九、《机械零件与建筑机械》（本科和专科通用，1987年出版）
- 十、《建筑经济与企业管理》（本科和专科通用，1987年出版）
- 十一、《钢结构》（本科和专科通用，1987年出版）
- 十二、《城市规划》（主要参考书，1986年出版）

编辑出版这门学科的系列试用教材，对我们来说，是一个新的尝试，恳切地希望广大读者和师生能提出宝贵的意见。

华南工学院出版社  
一九八七年十月

## 前 言

本书根据全国高等教育自学考试大纲，工业与民用建筑专业钢筋混凝土及砖石结构课程的要求而编写，适用于刊授、函授专科的自学教材，亦可作为全日制、业余大学、夜大工业与民用建筑专业专科教材。

全书分上下两册，上册包括钢筋混凝土结构、砖石结构的材料力学性能及计算原则和弯、剪、扭、压、拉、钢筋混凝土构件裂缝和变形的计算，平面楼盖、砖石结构等等章节。下册包括预应力混凝土结构、单层厂房、多层和高层房屋结构、房屋结构抗震设计要点和构造特点等。

本书在内容编排上力求由浅入深，每章节都有详细的例题、并附思考题、习题，便于自学。

参加本书编写工作的是本课程的任课教师，他们（按负责编写部分的先后次序排列）是张学文（绪论及第一、二、三、四、五章），陈眼云（第六、七、八章），李烈轩（第九、十二、十三章），陈晖（第十、十一章），傅其信（第十四章）。本书上册由陈眼云主编，下册由李烈轩主编。

编者 1986. 9.

# 目 录

## 结论

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| 第一节 钢筋混凝土的一般概念          | ( 1 )  |
| 第二节 钢筋混凝土的主要优缺点及其应用     | ( 1 )  |
| 第一章 钢筋混凝土材料的主要力学性能      | ( 2 )  |
| 第一节 混凝土的主要力学性能          | ( 2 )  |
| 第二节 钢筋及其主要力学性能          | ( 10 ) |
| 第三节 钢筋和混凝土的共同工作         | ( 14 ) |
| 附录                      | ( 15 ) |
| 思考题                     | ( 18 ) |
| 第二章 钢筋混凝土结构的基本设计原则和计算方法 | ( 19 ) |
| 第一节 结构设计的基本原则           | ( 19 ) |
| 第二节 钢筋混凝土结构计算方法的发展      | ( 19 ) |
| 第三节 结构安全度的概念及其考虑的因素     | ( 20 ) |
| 第四节 两种极限状态              | ( 21 ) |
| 第五节 荷载及材料强度             | ( 21 ) |
| 第六节 结构计算的基本原理           | ( 23 ) |
| 附录                      | ( 24 ) |
| 思考题                     | ( 30 ) |
| 第三章 受弯构件正截面强度计算         | ( 31 ) |
| 第一节 概述                  | ( 31 ) |
| 第二节 受弯构件的一般构造要求         | ( 31 ) |
| 第三节 受弯构件正截面强度的试验研究      | ( 34 ) |
| 第四节 单筋矩形截面受弯构件正截面强度计算   | ( 38 ) |
| 第五节 双筋矩形截面受弯构件正截面强度计算   | ( 46 ) |
| 第六节 T形截面受弯构件的强度计算       | ( 52 ) |
| 附录                      | ( 62 ) |
| 思考题                     | ( 65 ) |
| 第四章 受弯构件斜截面的强度计算        | ( 67 ) |
| 第一节 概述                  | ( 67 ) |
| 第二节 钢筋混凝土梁沿斜截面的破坏       | ( 67 ) |
| 第三节 影响斜截面强度的主要因素        | ( 70 ) |
| 第四节 梁斜截面强度的计算公式         | ( 72 ) |
| 第五节 斜截面强度计算方法和步骤        | ( 77 ) |
| 第六节 构造要求                | ( 82 ) |
| 附录                      | ( 88 ) |
| 思考题                     | ( 89 ) |
| 第五章 受扭构件的强度计算           | ( 90 ) |
| 第一节 概述                  | ( 90 ) |

|     |                                  |       |
|-----|----------------------------------|-------|
| 第二节 | 钢筋混凝土构件开裂扭矩的计算                   | (90)  |
| 第三节 | 钢筋混凝土构件受扭破坏现象                    | (92)  |
| 第四节 | 抗扭纵筋和箍筋的计算                       | (93)  |
| 第五节 | 抗扭钢筋的构造要求                        | (95)  |
| 第六节 | 抗扭设计中的一些问题                       | (95)  |
|     | 思考题                              | (97)  |
| 第六章 | 钢筋混凝土平面楼盖                        | (98)  |
| 第一节 | 整体式单向板交梁楼盖概述                     | (98)  |
| 第二节 | 整体式单向板楼盖中单向板与主、次梁的内力计算方法         | (102) |
| 第三节 | 整体式单向板楼盖的计算步骤与构造                 | (111) |
| 第四节 | 整体式双向板交梁楼盖概述                     | (135) |
| 第五节 | 整体式双向板交梁楼盖中的双向板、次梁、主梁内力计算方法与构造要求 | (137) |
| 第六节 | 双重井式楼盖                           | (162) |
| 第七节 | 装配式平面楼盖                          | (163) |
| 第八节 | 钢筋混凝土楼梯                          | (173) |
| 第九节 | 钢筋混凝土过梁                          | (185) |
| 第十节 | 钢筋混凝土雨蓬                          | (188) |
|     | 附录                               | (195) |
|     | 思考题                              | (208) |
|     | 习题                               | (208) |
| 第七章 | 钢筋混凝土受压构件                        | (211) |
| 第一节 | 受压构件的分类                          | (211) |
| 第二节 | 受压构件的构造                          | (212) |
| 第三节 | 轴心受压构件的强度计算                      | (214) |
| 第四节 | 偏心受压构件的强度计算                      | (221) |
|     | 思考题                              | (242) |
|     | 习题                               | (243) |
| 第八章 | 受拉构件的强度计算                        | (246) |
| 第一节 | 轴心受拉构件的强度计算                      | (246) |
| 第二节 | 偏心受拉构件的强度计算                      | (247) |
|     | 思考题                              | (250) |
|     | 习题                               | (250) |
| 第九章 | 钢筋混凝土构件裂缝和变形的计算                  | (252) |
| 第一节 | 概述                               | (252) |
| 第二节 | 受弯构件的抗裂度计算                       | (253) |
| 第三节 | 轴心受拉构件的抗裂度计算                     | (260) |
| 第四节 | 受弯构件的变形计算                        | (262) |
| 第五节 | 构件的裂缝宽度计算                        | (277) |
|     | 思考题                              | (287) |
|     | 习题                               | (287) |
| 第十章 | 砖石结构                             | (289) |

|     |                    |         |
|-----|--------------------|---------|
| 第一节 | 绪言.....            | ( 287 ) |
| 第二节 | 砖石材料和砌体的力学性能.....  | ( 290 ) |
| 第三节 | 砖石结构的基本计算原理.....   | ( 305 ) |
| 第四节 | 无筋砖石结构构件的强度计算..... | ( 308 ) |
| 第五节 | 砖石结构房屋墙柱设计.....    | ( 320 ) |
| 第六节 | 过梁的形式及设计.....      | ( 345 ) |
| 第七节 | 墙体的构造措施.....       | ( 349 ) |
| 第八节 | 混合结构墙、柱基础.....     | ( 354 ) |
|     | 习题.....            | ( 358 ) |

# 绪 论

## 第一节 钢筋混凝土的一般概念

钢筋和混凝土是两种物理——力学性能很不相同的材料。这两种材料组合成整体、共同发挥作用即为钢筋混凝土。

结硬后的混凝土与天然石料相似，其抗压强度很高，而抗拉强度却很低（抗拉强度一般只有抗压强度的  $\frac{1}{9} \sim \frac{1}{18}$ ）。如果用素混凝土做一条梁（如图 0-1 所示），梁在荷载作用下，其截面中和轴以上部分受压，而中和轴以下部分受拉。由于混凝土的抗拉强度远低于其抗压强度，因而在荷载不太大的情况下，受拉区混凝土即开裂，裂缝的发展使梁瞬即脆断破坏。很显然，梁的破坏是由于受拉区混凝土抗拉强度不足而引起的。这种破坏在发生之前没有给人以破坏的预兆，而且，混凝土抗压强度高这一特性也未得到充分发挥。

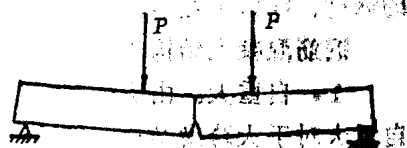


图 0-1 素混凝土梁

如果在上述混凝土梁的受拉区配置适量的钢筋（如图 0-2 所示），使其帮助混凝土抵抗拉力，则情况和素混凝土梁大不相同。配置了适量受拉钢筋的混凝土梁不仅承载力比相同情况的素混凝土梁大许多倍，而且这种梁在破坏之前其变形和裂缝宽度要经历一个由小到大的较长的过程，这个过程给人以破坏的预兆。

这种预兆在工程上具有重要意义，它可以使人们对将要破坏的构件采取安全措施。配置适量钢筋的混凝土梁破坏时首先是受拉钢筋屈服，而后受压区混凝土被压碎。显然，这种梁在破坏时钢筋和混凝土两种材料的强度都得到了充分的发挥，较素混凝土梁经济、合理。

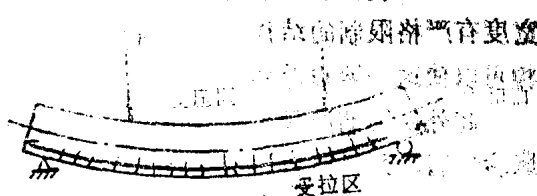


图 0-2 钢筋混凝土梁

在受压的混凝土柱中配置适量的受压钢筋，协助混凝土承受压力，从而可以减小柱子截面尺寸，或在同样截面尺寸情况下提高柱的承载力。

## 第二节 钢筋混凝土的主要优缺点及其应用

钢筋混凝土除了充分利用钢筋和混凝土两种材料的受力性能之外，尚具有如下优点：

1. 耐久性好。在钢筋混凝土结构中，混凝土的强度随着时间的增加而增长，而钢筋由于混凝土的保护不易生锈，所以钢筋混凝土的耐久性很好，在使用过程中几乎不需要保养和维修。

2. 耐火性好。混凝土是热的不良导体,在遇到火灾时,包在混凝土内的钢筋温度不会很快上升到使其失去承载能力的程度。因此,与钢、木结构相比,混凝土结构具有较好的耐火性。

3. 可模性好。根据实际需要,钢筋混凝土可以浇制成各种形状和尺寸的构件,这就为选择经济、合理的结构形式和美观的建筑造型提供了有利条件。

4. 整体性好。钢筋混凝土特别是现捣的钢筋混凝土结构,其整体性较之混合结构要好得多。由于整体性好,钢筋混凝土结构具有较好的抗震性能。因此,在地震区建造的高耸建筑物,如高层房屋、烟囱、水塔等,多采用钢筋混凝土结构。

5. 就地取材。钢筋混凝土结构所用的大量的砂、石产地较广,一般可以就地找到,这为减轻材料运输、降低工程造价提供了有利条件。在工业废料(如矿渣、粉煤灰等)比较多的地区,可将工业废料制成人造骨料用于钢筋混凝土中,这样也可以解决废料处理和环境污染问题。

6. 节约钢材。钢筋混凝土结构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,降低工程造价。

钢筋混凝土结构也存在一些缺点,主要有:

1. 自重~~大~~。由于钢筋混凝土的自重~~大~~,使材料的运输量大,也给施工吊装带来困难。自重~~大~~对于大跨度结构、高层建筑以及结构的抗震都是不利的。为使钢筋混凝土自重~~大~~的缺点得到改善,目前国内外都在研究和采用轻质、高强混凝土以减小构件截面尺寸和减轻自重。此外,采用预应力钢筋混凝土结构也可以减轻结构自重。

2. 费木料多、费工多、施工周期长,而且施工受到气候和季节的限制。目前采用装配式钢筋混凝土结构以及改善施工方法和施工工艺,如采用滑模、提模、升板等施工技术,可使这些缺点得到改善。

3. 抗裂性差。钢筋混凝土结构一般是带裂缝工作,对一些不允许出现裂缝或者对裂缝宽度有严格限制的结构,要满足使用要求,往往使工程造价提高很多。采用预应力混凝土结构可以使这一缺点得到改善。

此外,钢筋混凝土结构的隔热、隔声性能较差。目前改善的方法是采用泡沫混凝土或膨胀珍珠岩砂浆等材料。

由于钢筋混凝土结构具有许多优点,因而在基本建设中得到了广泛的应用。但是,解放前钢筋混凝土结构在我国发展非常缓慢,由我国自己设计和建造的钢筋混凝土工程寥寥无几。在设计~~和~~施工方面也是袭用外国的旧方法,在钢筋混凝土结构方面基本上没有进行过科学研究工作。

解放以后,在党和政府的领导下,我国进行了大规模的社会主义建设,钢筋混凝土结构也随之在各项建设中得到广泛应用和迅速发展。在工业建筑方面,单层和多层厂房已广泛采用了钢筋混凝土结构。并且,单层厂房广泛采用了各种配套定型的国家或地区的通用标准化构配件;在居住及公共建筑中,钢筋混凝土结构住宅、旅馆、影剧院等到处可见;在交通工程中,新的钢筋混凝土结构铁路桥、公路桥及繁华城市的钢筋混凝土立体交叉结构在不断出现;在水利及港口工程中,钢筋混凝土被广泛用于建造水库、水坝、码头等。此外,在国防工程及各种特种结构如贮油罐、料仓、水池、水塔、烟囱等,也广泛使用钢筋混凝土。近年来,

钢筋混凝土高层建筑在我国也得到了迅速发展。在北京、上海、广州、深圳等地相继出现了许多高层住宅、宾馆、酒店等。随着科学技术的发展，钢筋混凝土结构的应用范围也必将日益扩大。

解放后，我国在钢筋混凝土结构计算理论和计算方法方面进行了大量的科学研究工作，取得了一定成果。在此基础上，并吸取了外国的先进经验，我国于1955年、1966年、1974年先后颁布了钢筋混凝土结构设计规范。现行的《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10-74) (试行)是七十年代初及以后在总结工程实践经验和科学研究成果的基础上编制的。同时还编制了一些专门规范、规程和设计手册，这对于统一设计标准、保证工程质量、提高设计速度、节约材料和降低造价等方面都起了重要作用。近年来，我国的一些高等院校和科研部门对钢筋混凝土结构又进行了大量的试验研究，这些研究成果将在即将公布的新规范中得到反映。

为了实现四个现代化，党中央提出了尽快把我国科学技术搞上去，努力赶超世界先进水平的伟大号召。在这一伟大号召指引下，我国基本建设战线出现了欣欣向荣的景象，新的建筑材料、新型的建筑结构及先进的施工技术在不断出现。不久的将来，我国定能赶上和超过世界水平。

# 第一章 钢筋混凝土材料的主要力学性能

## 第一节 混凝土的主要力学性能

### 一、混凝土的强度

混凝土的强度是混凝土受力性能的基本标志,它往往对结构或构件的承载能力产生较大的影响。在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不同。根据具体情况选择适当强度的混凝土,往往能获得较好的设计效果。

正如《建筑材料》中论述的那样,影响混凝土强度的因素很多。相同的混凝土,由于受力情况的不同,也表现出不同的强度。在设计中,要正确采用混凝土的强度,就必须了解在不同情况下混凝土的受力性能。同时,作为设计依据,也必须有统一的方法来确定混凝土的各种强度数值。

#### (一) 混凝土的立方强度及标号

混凝土的强度等级是以混凝土的标号来划分的。混凝土的标号则决定于混凝土的立方强度。

我国《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ10-74)(试行)规定,以边长为20cm的混凝土立方体标准试块,在标准条件下,(温度 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 $\geq 90\%$ )养护28天后,用标准试验方法在压力试验机上作抗压试验所测得的抗压极限强度(以 $\text{kg}/\text{cm}^2$ 计),简称立方强度。《规范》规定以这个抗压极限强度,作为混凝土的标号,并用符号 $R$ 表示。

根据立方强度的数值,《规范》规定,混凝土分为九种标号:75、100、150、200、250、300、400、500、600号。如果某种混凝土试块的抗压极限强度在上列等级之间时,则应认为属于较低标号的一种,例如对试压强度为 $165\text{kg}/\text{cm}^2$ 的混凝土,则定为150号。

试验表明,混凝土的立方强度不仅与养护期的温度、湿度、龄期等因素有关,而且与试验的方法有关。试件在试验机上受压时,纵向缩短,横向就要扩张。在一般情况下,试件的上下表面有内向的摩擦力,这是由试件的横向扩张产生的。摩擦力就如同在试件的上下端加了一个箍,它阻止了试件自由横向变形,这样就延缓了裂缝开展,从而提高了试件的抗压极限强度。而当压力达到极限强度时,试块中部外围混凝土发生剥落,这是由于摩擦力对中部的影响很小,混凝土基本可以自由膨胀的缘故。最后剩下试件的破坏情形如图1-1a所示。

如果在试件的上下表面与试验机垫板之间涂上油脂或其他润滑剂,摩擦力就大大减小,混凝土

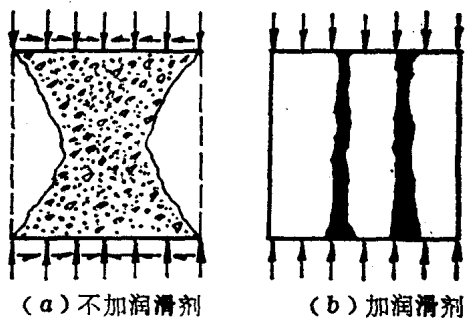


图 1-1

土的横向变形几乎不受约束，这样测得的抗压极限强度就较低，试件破坏时形成多条纵向裂缝，如图 1-1b 所示。

《规范》规定的试验方法是不加润滑剂的。当试件上下表面不加润滑剂时，量测所得试件的抗压极限强度值与试件的尺寸大小有关。立方体越小，所测得的强度值越高。《规范》规定用边长为 20cm 的立方体作为标准试件。由于 20cm 边长的立方体试件，用料多，重量大，试验时又需要大吨位的试验机，所以在实际工程中常采用边长为 10cm 或 15cm 的立方体试件。当采用这两种尺寸的试件时，所测得的强度应乘以下列换算系数：

边长为 10cm 的立方体试块——0.9；

边长为 15cm 的立方体试块——0.95。

试验时加荷速度对立方体强度也有影响，加荷速度越快，测得的强度越高。通常规定加荷速度为每秒钟增加压力  $2 \sim 3 \text{ kg/cm}^2$ 。

混凝土的强度不仅与试件的尺寸有关，而且与试件的形状有关。在构件中，混凝土的受力情况和立方体试件不同，因而立方体受力情况并不能代表混凝土在物件中的受力情况，它只是作为一种在给定的统一试验方法下衡量混凝土强度的基本指标。因为这种试件的制作和试验均比较简便，而且离散性比较小，一般的施工单位都可以进行试验。至于混凝土在其他情况下的强度值，我们只需通过试验建立起混凝土在该情况下的强度值与立方体强度值的关系，就可以只对混凝土立方体试件进行试验，而直接计算出混凝土在其他受力情况下的强度值。

混凝土的标号应根据构件的受力情况、钢筋的种类、施工条件等选用。《规范》规定，钢筋混凝土结构的混凝土标号不宜低于 150 号；采用 I、II 级钢筋时，不宜低于 200 号；承受重复荷载的构件，不得低于 200 号。

现浇钢筋混凝土结构的混凝土标号一般不宜低于 150 号；预应力混凝土结构一般采用 300~600 号混凝土；装配式钢筋混凝土结构的混凝土标号一般不宜低于 200 号。

## (二) 混凝土的轴心抗压强度(棱柱强度) $R$ 。

在实际工程中受压构件的高度  $H$  通常要比构件截面的边长  $a$  大许多倍，而非立方体。这时，混凝土的工作情况与立方体试件时混凝土的工作情况大不相同，采用棱柱体试件则比较能更好地反映混凝土的实际抗压能力。用棱柱体测得的混凝土的抗压强度则称为轴心抗压强度，或棱柱强度。

如图 1-2 的棱柱体，由试验表明，构件的高宽比越大，则试验机垫板与试件之间的摩擦力对试件横向变形的约束影响就越小，所测得的强度也越小，但当高宽比到达一定的数值之后，这种影响就不大了。

在确定棱柱体试件的尺寸时，如果采用高宽比很大的棱柱体，当然可以消除试件与试验机垫板间摩擦力的影响，使试件的中间区段处于纯压状态。但是，如果试件的高宽比太大，在试件破坏之前往往产生较大的附加偏心，从而使抗压极限强度降低。因此，棱柱体试件就必须有一个合适的高宽比。根据国内试验资料，一般认为试件的高宽比  $h/b = 3 \sim 4$  时，基本可以消除上述两种因素的影响。据此，目前一般采用试件尺寸有  $15 \times 15 \times 45 \text{ cm}$ ， $10 \times 10 \times 30 \text{ cm}$

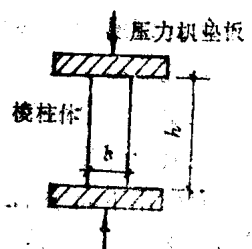


图 1-2

等几种。

我国近年所作的349组棱柱体抗压试验,其中 $15 \times 15\text{cm}$ 截面的棱柱体试件共122组,根据试验结果所得的经验公式可以近似地取

$$R_c = 0.8R \quad (1-1)$$

考虑到试验误差及多年采用的数值等因素,现行《规范》中采用

$$R_c = 0.7R \quad (1-2)$$

这样取值是偏于安全的。在计算钢筋混凝土轴心受压构件时(例如柱、桁架的腹杆等),都是采用混凝土的棱柱强度 $R_c$ 作为计算指标。

对500号及600号的高标号混凝土,考虑到脆性破坏特征显著和实践经验尚不足,其轴心抗压强度按上述公式计算后,再分别乘以折减系数0.95及0.9取用。

在钢筋混凝土结构中,计算轴心受压构件时(例如柱、桁架的腹杆等),是采用混凝土的棱柱强度(轴心抗压强度)作为计算指标的。

### (三)混凝土的轴心抗拉强度 $R_t$

混凝土的轴心抗拉强度是它的抗拉强度指标。混凝土的轴心抗拉强度可以在棱柱体试件两端预埋钢筋,然后对试件施加拉力的方法和采用劈裂试验的方法测得。根据试验结果,混凝土的轴心抗拉强度只有立方强度的 $\frac{1}{17} \sim \frac{1}{8}$ ,考虑到试验误差等因素,《规范》规定按下列公式计算:

$$R_t = 0.5R_c^{\frac{2}{3}} \quad (1-3)$$

在实用中,直接测定混凝土的轴心抗拉强度是比较困难的,可以根据公式(1-3)由混凝土的立方强度换算得到。

在工程中,对某些不允许出现裂缝的钢筋混凝土构件,例如,贮液池池壁、某些屋架中的拉杆以及某些梁板等,应根据使用要求作抗裂度计算,以保证混凝土不出现裂缝。此时就必须利用混凝土的抗拉能力,并以混凝土的轴心抗拉极限强度,作为确定混凝土抗裂度的重要指标。有时,也可以通过混凝土的轴心抗拉强度间接地衡量混凝土的其他力学指标,如冲击强度等。

混凝土的立方强度、轴心抗压强度、抗拉强度是混凝土的基本强度指标。在进行结构设计时,可以从本章附录1-1中查用。此外,关于混凝土的弯曲抗压强度及疲劳强度问题,将在以后有关部分叙述。

## 二、混凝土的变形

研究混凝土的变形,对于掌握钢筋混凝土结构设计和计算方法是重要的,这是因为钢筋混凝土结构的计算理论与计算公式的建立,与混凝土的变形相关。

混凝土的变形可以分为两类:一类为混凝土的受力变形,包括一次短期加荷的变形、荷载长期作用下的变形以及多次重复荷载作用下的变形。另一类称为混凝土的体积变形,这类变形是指混凝土在硬化过程中的收缩变形和由于温度变化所产生的变形。

### (一)混凝土在一次短期加荷时的应力应变关系

对混凝土棱柱体试件进行拉伸与压缩试验证明,在短期荷载作用下,混凝土的应力-应变图形呈曲线形,如图1-3所示。试件受压时的应力-应变曲线分为两段,应力达到 $R_c$ 之

前为上升段，之后为下降段。在曲线的开始部分，即应力约为 $0.2 \sim 0.3R_0$ 时，由于水泥凝胶体流动很小，变形主要取决于骨料和水泥石的抗压弹性变形，故图形接近于直线；随着应力的增大，水泥凝胶体的流动以及内部微裂缝的产生和扩展，使应变比应力增长速度较前为快，混凝土呈现出塑性性质。但当应力小于 $0.5R_0$ 时图形偏离直线关系并不大；当应力大于 $0.5R_0$ 时，应变比应力的增加明显加快；而当应力大于 $0.75R_0$ 之后，应变急剧加快，这主要是由于微裂缝不断发展并贯通的结果。当应力达到 $R_0$ 时，试件破坏，在此之前曲线为上升段。但应力达到 $R_0$ 时，如果试验机的刚度很大，即它积蓄的变形能较小或试件的混凝土标号较低、试验机所释放出的弹性能还不立即将试件破坏，若试验机不再加荷而是随着缓慢的卸荷，应力逐渐地减小，试件还能承受一定的荷载，而应变却在继续增加，直至应变达到 $\epsilon_{max}$ 时，试件才宣告破坏。从应力达到最大，到试件破坏这个阶段为曲线的下降段。

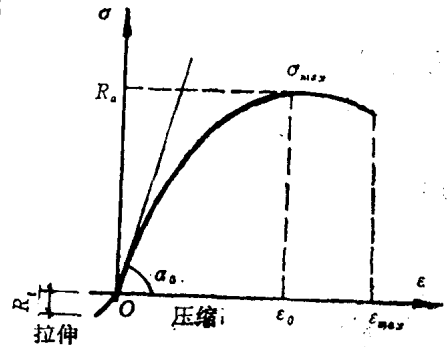


图 1-3

从混凝土的应力-应变图形我们可以看出，最大应力点所对应变并非最大应变，而是 $\epsilon_0$ ；最大应变所对应的也非最大应力。必须指出，在实际工程中不能象试验机那样自动卸荷，因此，对于截面上压应力均匀分布的素混凝土构件来说，其应力应变图形是不存在下降段的， $\epsilon_0$ 就是其最大应变，其值约等于 $0.0015 \sim 0.002$ 。对于截面上压应力分布不均匀的钢筋混凝土构件，例如受弯构件或大偏心受压构件来说，当受压区边缘纤维应力达到 $R_0$ 时，构件并不会立即破坏，这时应力还没有达到 $R_0$ 的纤维的应力将继续增加，最外边缘纤维将最大应力卸荷给附近的纤维，使自己承受较小的应力，只有当最外边缘纤维的应变达到 $\epsilon_{max}$ 时，构件才会破坏，最外边缘纤维经历了下降段。非均匀受压的钢筋混凝土构件，其极限应变值可达 $0.002 \sim 0.006$ ，有时甚至达到 $0.008$ 。

试验指出，低标号混凝土下降段比较明显，曲线较长，较平缓；高标号混凝土下降段短而陡。可见低标号混凝土延性要比高标号的好。

试验指出，当拉应力达到 $R_t$ 时，混凝土就断裂，其受拉极限变形要比受压极限变形小得多，仅为 $0.00005 \sim 0.00015$ 。

## (二) 混凝土的弹性模量

在结构设计中，当计算超静定结构的内力，以及计算钢筋混凝土构件的变形、抗裂度、预应力混凝土构件的截面预压应力值和由于温度变化、支座沉降产生的内力时，均需用混凝土的弹性模量 $E_c$ 。

如前所述，混凝土试件在加荷过程中，除有弹性变形之外，还有塑性变形，也即混凝土不是理想的弹性材料，而是弹塑性材料，其应力-应变图形为曲线形，只有在应力很小的时候图形才接近于直线，其应力与应变关系不服从虎克定律。因此，不能象定义弹性材料的弹性模量那样来定义混凝土的弹性模量，或者说混凝土的弹性模量有它自己的定义。

通常，混凝土的受压弹性模量是这样定义的：过应力-应变曲线图上的原点作切线（图1-3），则定义该切线的斜率为原点弹性模量，或简称弹性模量，即

$$E_k = \frac{\sigma_k}{\varepsilon_k} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (1-4)$$

要在混凝土一次加荷应力应变曲线上作原点的切线，找出 $\alpha$ 角是不容易做准确的，所以《规范》给出了如下确定混凝土弹性模量的方法：对混凝土棱柱体先以每秒 $2 \sim 3 \text{ kg/cm}^2$ 的速度均匀加荷，至应力为 $0.4 \sim 0.5 R_k$ ，然后以同样速度卸荷至零，再重复加卸荷 $5 \sim 10$ 次，由于混凝土不是弹性材料，每次卸荷至应力为零时，变形不能完全恢复，其塑性变形部分残留下来。随着加荷次数的增加，应力-应变曲线逐渐接近直线并趋于稳定，该直线的正切即为混凝土的弹性模量。

国家建委建筑科学研究院对混凝土受压弹性模量做了大量的试验，总结出了它与混凝土标号之间的关系式为：

$$E_k = \frac{10^6}{2.2 + \frac{330}{R}} \quad (1-5)$$

试验结果表明，混凝土的受压弹性模量与受拉弹性模量十分接近，可取受拉弹性模量等于受压弹性模量。

各种标号混凝土的弹性模量 $E_k$ 可从附录1-1中查到。

这里必须指出，对混凝土材料不能象对弹性材料那样，用已知的混凝土应变乘以《规范》中所给弹性模量值去求混凝土的应力。只有当应力很低（例如 $0.2 R_k$ ）时，才可以近似这样计算。

### （三）混凝土在荷载长期作用下的变形性能

混凝土在长期荷载作用下，即使压应力不变，它的应变随时间的增加而继续增长的现象称为混凝土的徐变。

混凝土产生徐变的原因，因为研究得还不够，目前尚未得出统一的结论。通常认为，一方面由于混凝土中一部分尚转化为晶体的水泥凝胶体在应力的长期作用下产生变形，另一方面由于混凝土内部的微裂缝在荷载的长期作用下不断增加和扩展所致。当应力不大时以前者为主，当应力较大时以后者为主。

影响徐变的因素有如下几点：

1. 应力的大小是影响混凝土徐变的主要因素之一，应力越大徐变也越大。当应力较小（例如 $\sigma < 0.5 R_k$ ）时，徐变大致与应力成正比，称为线性徐变。在线性徐变范围内，六个月即完成徐变的大部分，一年后趋于稳定，2~3年后徐变基本终止。但当混凝土应力较大（例如 $\sigma > 0.5 R_k$ ）时，徐变与应力不成正比，称为非线性徐变。在非线性徐变范围内，当应力过高时，徐变急剧增加而不再收敛，从而导致混凝土破坏，所以取混凝土应力约等于 $0.75 \sim 0.8 R_k$ 为混凝土的长期极限强度。如果构件的混凝土在使用中长期处于不变的高应力状态是不安全的，需要特别注意。

2. 加荷时混凝土龄期越早，徐变越大。

3. 水灰比大，徐变大；水泥用量多，徐变也大。

4. 环境的湿度大，徐变小。

5. 使用高质量的水泥、高质量骨料，并且级配好，徐变小。

混凝土的徐变对钢筋混凝土构件的受力性能有重要影响。徐变会使构件或结构产生内力

或应力重分布；增大钢筋混凝土构件的变形；在预应力构件中，徐变导致预应力的损失；对于长细比较大的偏心受压构件，徐变引起的附加偏心距的增大导致构件的强度降低。混凝土的徐变也会带来一些有利影响，例如减少应力集中现象及减低温度应力等。

#### (四) 混凝土在重复荷载作用下的变形性能

混凝土棱柱体在重复荷载作用下，混凝土的变形有着重要变化。我们采用确定混凝土弹性模量时的方法，给混凝土棱柱体试件多次反复加荷。当所加荷载不太大时，经一次加荷卸荷，其应力-应变曲线如图 1-4a 所示，是一条环状曲线。如继续反复加荷，而加荷应力  $\sigma_1$  小于混凝土的疲劳强度时，其环状曲线越来越闭合（如图 1-4b 所示），最后曲线闭合成一条直线。试验表明，这条直线与一次加荷曲线在 O 点的切线基本平行。如果再选择一个加荷应力  $\sigma_2$ ，而  $\sigma_2$  仍小于混凝土的疲劳强度时，其加、卸荷的应力-应变曲线同前。如果我们再选择一个较大的加荷应力  $\sigma_3$ ，而  $\sigma_3$  大于混凝土的疲劳强度，经多次反复加荷，其应力-应变曲线开始凸向应力轴，而后变为直线，接着凸向应变轴，这就标志着混凝土即将破坏。

试验表明，当加荷应力较小时，经反复加荷，混凝土的应力-应变图形为直线之后即保持不变；而当加荷应力较大时，经反复加荷，混凝土的应力-应变图形变为直线之后接着凸向应变轴。使混凝土的应力-应变图形由保持直线而变为凸向应变轴的应力界限值称为混凝土疲劳极限强度。

试验证明，混凝土的疲劳极限强度低于棱柱体抗压强度，大致在  $0.5R_c$  左右。《规范》规定，混凝土的疲劳强度取等于混凝土的强度与相应的疲劳强度修正系数  $\gamma_f$  的乘积。修正

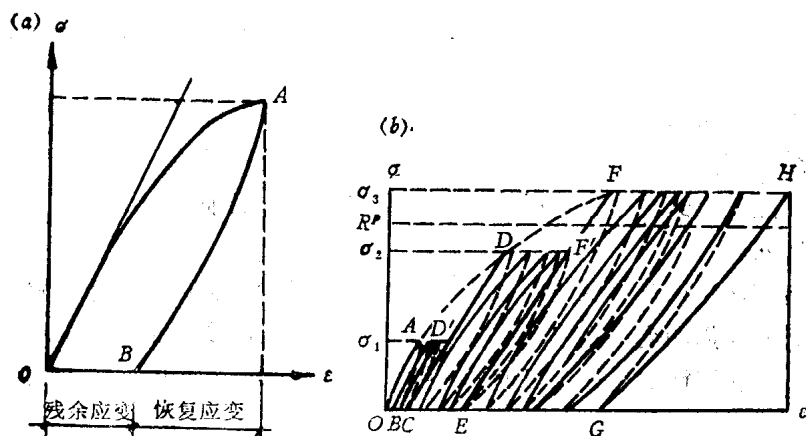


图 1-4

系数  $\gamma_f$  应根据不同的疲劳应力  $\rho$  按附录 1-2 取用。此处

$$\rho = \frac{\sigma_{min}^p}{\sigma_{max}^p}$$

式中  $\sigma_{min}^p$ 、 $\sigma_{max}^p$  —— 构件疲劳验算时，截面同一纤维上的混凝土最小应力及最大应力。

承受多次重复荷载的结构如吊车梁、汽锤基础等，必须用疲劳强度进行疲劳验算。