

高等职业技术学院房屋建筑工程专业系列教材

WUTP



混凝土结构

张保善 主编

HNTJG

武汉理工大学出版社

【内容提要】

本书结合我国近年来的科研成果及新颁布的《混凝土结构设计规范》GB50010—2002编写。主要介绍了混凝土结构的材料力学性能、设计原理,受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件的正截面和斜截面承载力等的计算方法,以及预应力混凝土构件的设计原理与方法,房屋建筑的抗震设计与构造要求要点。全书以应用为主进行讲述,突出了应用型与适用性的特点,可作为高职高专房屋建筑工程专业的教科书,也可作为建筑工程专业技术人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构/张保善主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2003.1

ISBN 7-5629-1874-0

I. 混…

II. 张…

III. 混凝土结构-高等学校-教材

IV. TU 37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 096869 号

武汉理工大学出版社出版发行

各地新华书店经销

湖北省荆州市鸿盛印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:24 字数:620千字

2003年1月第1版 2003年1月第1次印刷

印数:1~5000册 定价:28.00元

前 言

本书根据混凝土结构的特点,结合国家对高等职业技术学院房屋建筑工程专业的要求编写。主要突出了应用型、适用性的特点,以加强学生应用混凝土结构进行设计的基础理论与具体技能培养,学以致用,结合工程实际。

在教材编写中突出了尽量做到内容精炼,概念清楚,文字叙述简明,注意由浅入深,循序渐进。本教材可作为高职高专房屋建筑工程专业的教材,也可供土木工程技术人員学习与参考。

本书共分 13 章,主要内容有钢筋混凝土材料力学性能;设计基本原理;受弯构件正截面、斜截面承载力计算;受弯构件变形与裂缝宽度验算;受拉、受扭、受压构件承载力计算;梁、板结构;单层工业厂房;多层框架房屋;抗震构造等。参加本书编写人员分工如下:

孙海粟	第 1 章
张保善	第 2 章,第 13 章
赵华玮	第 3 章,第 4.4、4.5 节
和 燕	第 4.1、4.2、4.3 节
蔡丽朋	第 5 章,第 6 章
赵丽君	第 7 章
王渊辉	第 8 章
李乃宏	第 9.1、9.2、9.3、9.4 节
李 柯	第 9.5、9.6 节
李九宏	第 10 章
杨 蕊	第 10.1.7 节
张 玲	第 11 章
何世玲	第 12 章

本书由张保善担任主编,李九宏、蔡丽朋担任副主编。在编写过程中参考了汪霖祥主编的《钢筋混凝土结构及砌体结构》及《混凝土结构设计规范》GB50010—2002 等书籍,在此特表示衷心感谢!并对为本书付出辛勤劳动的编辑同志表示衷心感谢!

由于编者时间仓促,学习新规范不够,水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2002 年 10 月

目 录

1 混凝土结构材料的力学性能	(1)
1.1 钢筋	(1)
1.1.1 钢筋的化学成分、级别和品种	(1)
1.1.2 钢筋的强度和变形	(2)
1.1.3 钢筋的冷加工	(4)
1.2 混凝土	(4)
1.2.1 混凝土强度	(4)
1.2.2 混凝土变形	(7)
1.3 钢筋和混凝土之间的粘结	(11)
1.3.1 概述	(11)
1.3.2 粘结破坏的过程	(11)
2 混凝土结构基本计算原则	(13)
2.1 结构极限状态设计法的基本概念	(13)
2.1.1 结构的功能要求	(13)
2.1.2 结构的极限状态	(14)
2.1.3 结构的极限状态过程与可靠度度量	(14)
2.2 结构上的作用	(16)
2.2.1 作用分类与荷载效应	(16)
2.2.2 荷载代表值	(16)
2.3 结构构件的抗力	(17)
2.4 结构按半概率极限状态计算的实用表达式	(17)
2.4.1 承载能力极限状态设计表达式	(17)
2.4.2 正常使用极限状态验算	(18)
3 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	(21)
3.1 概述	(21)
3.1.1 板的一般构造要求	(22)
3.1.2 梁的一般构造要求	(23)
3.2 单筋矩形截面梁受力状态	(24)
3.2.1 单筋矩形截面梁正截面受力状态的试验研究	(24)
3.2.2 适筋梁的破坏特征	(26)
3.2.3 配筋率对破坏特征的影响	(27)
3.3 单筋矩形截面受弯构件承载力计算	(27)
3.3.1 基本假定	(27)
3.3.2 等效矩形应力图	(28)
3.3.3 相对受压区高度及其与配筋率的关系	(28)

3.3.4	计算公式及适用条件·····	(30)
3.3.5	基本公式的应用·····	(31)
3.4	双筋矩形截面梁正截面承载力计算·····	(39)
3.4.1	基本公式及适用条件·····	(39)
3.4.2	基本公式的应用·····	(40)
3.5	T形截面承载力计算·····	(43)
3.5.1	概述·····	(43)
3.5.2	基本公式·····	(44)
3.5.3	基本公式的应用·····	(47)
4	钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算·····	(53)
4.1	概述·····	(53)
4.2	斜截面破坏形态·····	(54)
4.2.1	无腹筋梁斜裂缝出现前后的应力状态及截面破坏形态·····	(54)
4.2.2	有腹筋梁斜截面的受力特点及破坏形态·····	(57)
4.2.3	影响斜截面承载力的主要因素·····	(58)
4.3	受弯构件斜截面承载力计算·····	(59)
4.3.1	基本计算公式·····	(59)
4.3.2	公式适用条件·····	(60)
4.3.3	计算截面位置·····	(62)
4.3.4	设计计算方法·····	(63)
4.3.5	计算实例·····	(64)
4.4	受弯构件的钢筋布置·····	(68)
4.4.1	抵抗弯矩图·····	(68)
4.4.2	纵向钢筋截断在抵抗弯矩图中的表示方法及构造要求·····	(69)
4.4.3	弯起钢筋在抵抗弯矩图上的表示方法及构造要求·····	(69)
4.4.4	纵向钢筋的其它构造要求·····	(71)
4.4.5	箍筋的构造要求·····	(73)
5	钢筋混凝土受压构件的承载力计算·····	(77)
5.1	轴心受压构件正截面承载力计算·····	(77)
5.1.1	配置普通箍筋的轴心受压构件·····	(77)
5.1.2	配置螺旋箍筋的轴心受压构件·····	(82)
5.2	偏心受压构件受力性能·····	(84)
5.2.1	偏心受压构件破坏特征·····	(84)
5.2.2	大、小偏心受压破坏的界限·····	(85)
5.2.3	附加偏心距 e_a ·····	(85)
5.2.4	偏心距增大系数 η ·····	(85)
5.3	矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算·····	(87)
5.3.1	基本假定·····	(87)
5.3.2	承载力计算公式·····	(87)

5.3.3	垂直于弯矩作用平面的承载力验算	(89)
5.3.4	偏心受压构件的构造要求	(90)
5.3.5	非对称配筋的设计计算方法及实例	(91)
5.3.6	矩形截面对称配筋的承载力计算	(95)
5.4	对称配筋 I 形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(98)
5.4.1	大偏心受压计算($\xi \leq \xi_b$)	(99)
5.4.2	小偏心受压计算($\xi > \xi_b$)	(100)
5.5	偏心受压构件斜截面承载力计算	(101)
6	钢筋混凝土受拉构件承载力计算	(104)
6.1	轴心受拉构件正截面承载力计算	(104)
6.1.1	承载力计算公式	(104)
6.1.2	构造要求	(104)
6.1.3	设计实例	(105)
6.2	偏心受拉构件正截面承载力计算	(105)
6.2.1	承载力计算公式	(105)
6.2.2	截面设计方法及实例	(107)
6.3	偏心受拉构件斜截面承载力计算	(110)
7	钢筋混凝土受扭构件	(112)
7.1	概述	(112)
7.2	纯扭构件的承载力计算	(113)
7.2.1	素混凝土纯扭构件的开裂扭矩	(113)
7.2.2	钢筋混凝土纯扭构件的承载力计算	(114)
7.3	弯、剪、扭构件承载力计算	(116)
7.3.1	弯扭构件承载力计算	(116)
7.3.2	剪扭构件承载力计算	(117)
7.3.3	弯、剪、扭构件承载力计算	(117)
7.3.4	计算公式的适用范围和构造要求	(119)
7.3.5	应用举例	(120)
8	钢筋混凝土构件变形和裂缝计算	(125)
8.1	钢筋混凝土构件的变形计算	(125)
8.1.1	钢筋混凝土抗弯刚度的计算	(125)
8.1.2	受弯构件的挠度计算	(131)
8.1.3	计算实例	(132)
8.2	钢筋混凝土构件和裂缝宽度验算	(135)
8.2.1	裂缝宽度计算公式	(136)
8.2.2	计算实例	(139)
9	预应力混凝土构件	(143)
9.1	预应力混凝土的基本概念	(143)
9.1.1	预应力混凝土的基本概念	(143)

9.1.2	预应力混凝土结构的优缺点	(143)
9.1.3	施加预应力的方法	(144)
9.2	预应力混凝土的材料与锚夹具	(146)
9.2.1	预应力混凝土的材料	(146)
9.2.2	锚具和夹具	(147)
9.3	张拉控制应力和预应力损失	(150)
9.3.1	张拉控制应力	(150)
9.3.2	预应力损失	(151)
9.3.3	预应力损失组合	(155)
9.4	预应力混凝土轴心受拉构件的计算	(156)
9.4.1	轴心受拉构件应力分析	(156)
9.4.2	预应力轴心受拉构件的计算	(161)
9.5	预应力混凝土受弯构件的计算	(168)
9.5.1	预应力混凝土受弯构件应力分析	(168)
9.5.2	预应力混凝土受弯构件计算	(171)
9.6	预应力混凝土构件的构造要求	(181)
10	钢筋混凝土梁板结构	(186)
10.1	钢筋混凝土单向板肋梁楼盖	(188)
10.1.1	单、双向板的划分	(188)
10.1.2	单向板楼盖的结构布置	(189)
10.1.3	单向板楼盖的内力计算	(190)
10.1.4	连续板的计算与构造	(202)
10.1.5	次梁的计算与构造	(205)
10.1.6	主梁的计算与构造	(207)
10.1.7	单向板肋梁楼盖设计实例	(209)
10.2	钢筋混凝土现浇双向板肋梁楼盖	(222)
10.2.1	双向板的受力特点及试验结果	(222)
10.2.2	双向板的计算	(222)
10.2.3	双向板的构造要求	(230)
10.2.4	双向板支撑梁的计算要点	(231)
10.3	钢筋混凝土装配式楼盖	(234)
10.3.1	铺板式楼盖的构件形式	(234)
10.3.2	装配式钢筋混凝土楼盖的连接构造	(237)
10.3.3	装配式楼盖的计算要点	(239)
10.4	楼梯计算	(240)
10.4.1	现浇板式楼梯	(241)
10.4.2	现浇梁式楼梯	(245)
10.4.3	折线形楼梯计算与构造	(247)
10.5	雨篷	(248)

10.5.1	雨篷板的设计	(248)
10.5.2	雨篷梁的设计	(248)
10.5.3	雨篷的整体倾覆验算	(249)
10.5.4	雨篷梁、板的构造	(249)
11	钢筋混凝土单层工业厂房	(262)
11.1	单层工业厂房的结构组成及受力特点	(262)
11.1.1	单层工业厂房结构的主要构件	(262)
11.1.2	单层工业厂房的受力特点	(263)
11.2	单层工业厂房的结构布置	(265)
11.2.1	柱网布置及定位轴线	(265)
11.2.2	变形缝的设置	(266)
11.2.3	主要构件的选型	(266)
11.2.4	支撑的布置原则	(268)
11.2.5	抗风柱、圈梁、连系梁、过梁和基础梁的布置	(270)
11.3	单层工业厂房排架计算	(272)
11.3.1	排架计算简图	(272)
11.3.2	排架荷载计算	(273)
11.3.3	排架内力计算	(276)
11.3.4	排架荷载组合和内力组合	(284)
11.3.5	单层工业厂房柱的设计	(285)
11.3.6	牛腿设计	(287)
11.3.7	单层工业厂房结构设计实例	(288)
12	多层框架结构	(303)
12.1	多层房屋的结构体系	(303)
12.1.1	多层房屋的结构类型	(303)
12.1.2	框架结构类型	(304)
12.2	多层房屋的荷载	(304)
12.2.1	竖向荷载	(305)
12.2.2	水平荷载	(306)
12.3	多层框架结构房屋的结构布置	(306)
12.3.1	结构布置原则	(306)
12.3.2	框架承重体系布置	(307)
12.3.3	变形缝布置	(307)
12.4	多层框架结构计算简图	(309)
12.4.1	框架梁、柱截面尺寸的初步选定	(309)
12.4.2	计算单元的选取	(310)
12.4.3	计算模型的确定	(310)
12.4.4	计算图式的简化	(311)
12.5	多层框架的内力及侧移计算	(315)

12.5.1	竖向荷载作用下的内力计算	(315)
12.5.2	水平荷载作用下的内力计算	(319)
12.5.3	多层框架在水平荷载作用下的侧移计算	(331)
12.6	多层框架的内力组合与构件设计	(335)
12.6.1	内力组合	(335)
12.6.2	框架梁、柱截面设计要点	(337)
12.6.3	多层框架连接构造	(338)
13	建筑结构的抗震简介	(343)
13.1	地震成因、震级和烈度	(343)
13.2	我国地震的特点与抗震策略	(344)
13.3	建筑场地、地基和基础	(346)
13.3.1	建筑场地的选择	(346)
13.3.2	建筑场地土的类型及划分	(346)
13.3.3	地基基础	(347)
13.4	多层砌体房屋、底部框架-抗震墙房屋的抗震设计	(348)
13.4.1	抗震设计原则	(348)
13.4.2	结构方案与结构布置	(348)
13.4.3	多层砌体房屋抗震计算	(350)
13.4.4	墙体抗震承载力验算	(354)
13.4.5	底部框架-抗震墙房屋的抗震设计要点	(355)
13.5	多层砌体房屋的抗震构造措施	(357)
13.5.1	多层砖房构造措施	(357)
13.5.2	底部框架-抗震墙房屋的抗震构造措施	(360)
13.6	多高层钢筋混凝土结构房屋抗震设计的一般要求	(361)
13.6.1	结构体系选择	(361)
13.6.2	结构布置	(362)
13.6.3	多层框架结构水平地震作用计算	(365)
13.6.4	水平地震作用下框架内力计算	(365)
13.6.5	钢筋混凝土框架梁的设计	(365)
13.6.6	框架柱截面设计	(367)
13.6.7	框架节点抗震验算与构造要求	(371)
参考文献		(374)

1 混凝土结构材料的力学性能

本章提要

本章主要讲述混凝土结构中钢筋和混凝土两种材料的主要物理力学性能及计算指标。

钢筋和混凝土的强度、变形以及两者共同工作时的性能,是学习钢筋混凝土构件受力性能、计算理论和设计方法的基础,本章叙述内容都是根据试验研究所观察到的现象和测定到的数据与结论,学习时要深刻理解其本质,弄清两种材料的物理力学性能。

1.1 钢 筋

1.1.1 钢筋的化学成分、级别和品种

钢筋混凝土结构对钢筋的基本性能有以下几点要求:

- ① 具有较高的强度。钢筋强度高,则用钢量少,可以节约钢材。
- ② 具有较好的塑性。使钢筋在断裂前有较大的变形,不致使构件发生脆性破坏。衡量钢筋的塑性有两个指标,一个是钢筋的伸长率,即钢筋试件拉断后的伸长值与原长值的比率;另一个是钢筋的冷弯性能,即钢筋绕某一规定直径的辊轴弯曲,要求在达到规定的冷弯角度时钢筋不发生裂纹、起层或断裂,如图 1.1(b)。
- ③ 具有与混凝土良好的粘结力。良好的粘结力使钢筋和混凝土可靠粘结,共同受力,可保证钢筋充分发挥作用。
- ④ 具有较好的可焊性。要求钢筋焊接后不产生裂纹和过大变形,保证焊接后接头性能良好。

为了满足建筑用钢的需要,冶金工业生产了许多品种的钢筋。现行《混凝土结构设计规范》规定了选用钢筋品种的原则,即普通钢筋宜采用 HRB400 级和 HRB335 级钢筋,也可以采用 HPB235 级和 RRB400 级钢筋;预应力钢筋宜采用预应力钢绞线、钢丝,也可采用热处理钢筋。

钢筋的品种按所含元素的不同,一般可分为碳素钢和普通低合金钢两类。

碳素钢除含有铁元素外还含有少量的碳、锰、磷、硫等元素。钢筋中碳的含量增加,强度就随之提高,但塑性和可焊性降低。根据钢材中含碳量的多少,通常可分为低碳钢(含碳量少于 0.25%)、中碳钢(含碳量在 0.25%~0.6%)和高碳钢(含碳量在 0.6%~1.4%)。在低碳钢中,加入少量锰、硅、钒、钼、钛等元素,便成为普通低合金钢,如 20MnSi、45MnSiV 等。此时钢

筋强度显著提高,塑性可焊性等性能也可得到改善。

钢筋按其生产加工工艺和力学性能,可以分为热轧钢筋、冷拉钢筋、热处理钢筋和钢丝四类。

1.1.1.1 热轧钢筋

热轧钢筋按其强度由低到高分成四级:HPB235、HRB335、HRB400、RRB400,它们由冶金工厂直接热轧成型。

(1) HPB235 级热轧钢筋(Φ)

由普通碳素 Q235 钢经热轧而成的光面圆钢筋。它是一种低碳钢,质量稳定,塑性好,易焊接,易加工成形,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。

(2) HRB335 级热轧钢筋(Φ)

主要是由 20MnSi 低合金钢经热轧而成的变形钢筋,其表面形状通常有螺纹形和月牙形两种。这种钢筋的强度较高,塑性和可焊性能都比较好,易加工成形。它主要用作大中型钢筋混凝土结构构件的主筋,特别是承受多次重复荷载、地震作用及其它振动和冲击荷载的结构构件的受力主筋和预应力混凝土构件中的非预应力钢筋。

(3) HRB400 级热轧钢筋(Φ)

由 20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi 低合金钢经热轧而成的变形钢筋,外形为月牙纹形。其强度高且与混凝土粘结性能较好。新Ⅱ级钢 HRB400 将作为主导钢筋。

(4) RRB400 级热轧钢筋(Φ)

其代表钢种有 K20MnSi 等。由于含碳量较高,因此强度较高,但塑性和焊接性较差,一般经冷拉后作预应力钢筋。

1.1.1.2 冷拉钢筋

在常温下,对普通热轧钢筋进行张拉,使其应力超过屈服点,以提高其屈服强度。

1.1.1.3 热处理钢筋

热处理钢筋是由 40Si2Mn、48Si2Mn、45Si2Cr 热轧钢筋等经过淬火和回火处理后制成。钢筋经淬火后强度大幅度提高,但塑性和韧性相应降低。

1.1.1.4 钢丝

直径小于 6mm 的钢筋称为钢丝。国产钢丝包括:碳素钢丝、刻痕钢丝、钢绞线及冷拔低碳钢丝四种。钢丝的直径越细,其强度越高。冷拔低碳钢丝是用直径较小的 HPB235 级热轧钢筋用冷拔机经过几次冷拔后成形的。钢丝都是用于预应力混凝土结构。预应力钢筋以钢绞线及高强钢筋作为主导钢筋。

1.1.2 钢筋的强度和变形

根据钢筋在单调受拉时应力-应变曲线特点不同,可将钢筋分为有明显屈服点和无明显屈服点两类。

1.1.2.1 有明显屈服点的钢筋

工程上将这类钢筋习惯称为软钢,软钢从加载到拉断,有四个阶段。图 1.1(a)所示为软钢的应力-应变曲线,自开始加载至应力达到 a 点之前,应力-应变呈线性关系, a 点应力称为比例极限, Oa 段属于线弹性工作阶段;应力达到 b 点后钢筋进入屈服阶段,应力不再增加而应变一直增大,产生很大的塑性变形, b 点应力称为屈服强度,在应力-应变曲线中呈现一水平线

段,称为屈服台阶;超过 c 点后应力-应变关系重新表现为上升的曲线, cd 段称为强化段。曲线最高点 d 对应的应力称为抗拉强度或极限强度,此后钢筋试件产生颈缩现象,应力-应变关系成为下降曲线,应变继续增加,到 e 点断裂, de 段称为破坏阶段。

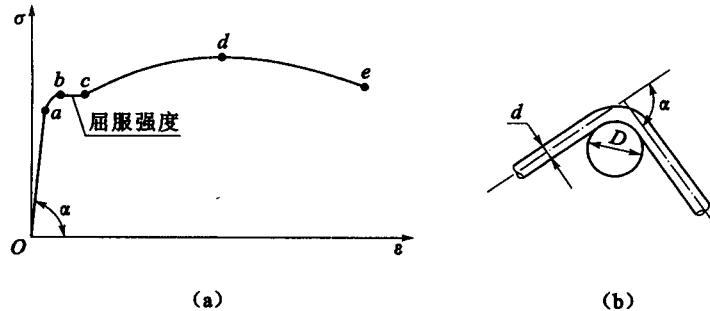


图 1.1 有明显屈服点钢筋的应力-应变曲线

钢筋断裂点 e 所对应的横坐标为伸长率,它标志钢筋的塑性,伸长率越大,塑性越好。钢筋的塑性除用伸长率标志外,还可用冷弯性能试验来检验(图 1.1(b))。钢筋塑性越好,冷弯角 α 就越大。

屈服强度是钢筋强度标准值的依据。因为钢筋屈服后产生较大的塑性变形,这将使构件的变形与裂缝宽度大大增加,以致无法使用,所以在钢筋混凝土构件计算中采用屈服强度作为钢筋强度标准值。

1.1.2.2 无明显屈服点的钢筋

无明显屈服强度的钢筋,工程上习惯称为硬钢。硬钢强度高,但塑性差,脆性大。从加载到拉断,不像软钢那样有明显的屈服阶段,基本上不存在屈服台阶。图 1.2 所示为硬钢的应力-应变曲线。

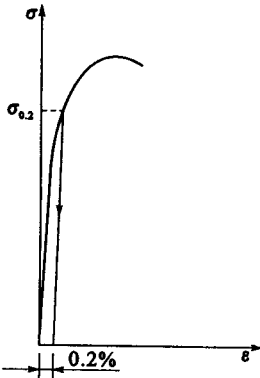


图 1.2 无明显屈服点钢筋的应力-应变曲线

由图 1.2 可知,这类钢筋中只有一个强度指标,即抗拉强度。如前所述,在设计中,一般取残余应变为 0.2% 时所对应的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为无屈服点钢筋的强度取值,通常称为条件屈服强度。为了简化计算,《混凝土结构设计规范》统一取 $\sigma_{0.2} = 0.8\sigma_b$ (其中 σ_b 为无明显屈服点钢筋的抗拉强度),作为强度标准值。钢筋的强度设计值见表 1.1、表 1.2。

表 1.1 普通钢筋强度设计值 (N/mm^2)

种 类		符 号	f_{yk}	f_y	f'_y
热轧钢筋	HPB235(Q235)	Φ	235	210	210
	HRB335(20MnSi)	Φ	335	300	300
	HRB400(20MnSiV, 20MnSiNb, 20MnTi)	Φ	400	360	360
	RRB400(K20MnSi)	Φ	400	360	360

注:① 在钢筋混凝土结构中,轴心受拉和小偏心受拉的钢筋抗拉强度设计值大于 300N/mm^2 时,仍应按 300N/mm^2 取用;
② 构件中配有不同种类的钢筋时,每种钢筋应采用各自的强度设计值。

表 1.2 预应力和钢筋强度设计值(N/mm²)

种 类		符 号	f_{pk}	f_{py}	f'_{py}
钢绞线	1×3	Φ^s	1860	1320	390
			1720	1220	
			1570	1110	
	1×7		1860	1320	390
			1720	1220	
消除应力钢丝	光面 螺旋肋	Φ^P Φ^H	1770	1250	410
			1670	1180	
			1570	1110	
	刻痕	Φ^I	1570	1110	410
热处理钢筋	40Si2Mn	Φ^{HT}	1470	1040	400
	48Si2Mn				
	45Si2Cr				

注：当预应力钢绞线、钢丝的强度标准值不符合《混凝土结构设计规范》规定时，其强度设计值应进行换算。

1.1.3 钢筋的冷加工

为了节约钢材，在常温下对软钢进行冷拉，使钢筋的内部组织结构发生变化，从而提高钢筋的强度，但其塑性有所降低。

冷拉是在常温下，将钢筋拉伸至超过其屈服强度的某一应力值，然后卸荷至零，使其内部组织结构发生变化，从而提高其强度的方法。

冷拉只能提高钢筋的抗拉强度而不能提高钢筋的抗压强度。同时焊接时会使钢筋的强度降低，因此需要焊接钢筋应先焊好再进行张拉。

1.2 混 凝 土

混凝土是用水泥、细骨料(如砂子)、粗骨料(如碎石、卵石)和水按一定比例配合搅拌后入模浇注，并经养护硬化后做成的人工石材。混凝土的种类以混凝土的强度等级加以区分。混凝土的强度与组成混凝土材料的质量、配合比、养护条件、龄期以及测定其强度时所采用的试件形状、尺寸、试验方法等都有着密切的关系。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、轴心抗拉强度等。

1.2.1 混凝土强度

1.2.1.1 混凝土立方体抗压强度 f_{cu}

我国现行《混凝土结构设计规范》规定以立方体抗压强度标准值作为衡量混凝土强度等级的指标，用 $f_{cu,k}$ 表示。立方体抗压强度的标准值系指按照标准方法制作养护(在温度为 $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ ，相对湿度在 90% 以上的潮湿空气中养护)的边长为 150mm 的立方体试块，在 28d 龄期用标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度。现行《混凝土结构设计规范》将混凝土强

度等级分为 14 级,它是按立方体抗压强度标准值的大小划分的,即 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80,各个等级中的数字单位都以 N/mm^2 表示,称为立方体抗压强度标准值。钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C15,当采用 HRB335 级钢筋时,混凝土强度等级不宜低于 C20;当采用 HRB400 和 RRB400 级钢筋以及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,当采用钢绞线、钢丝、热处理钢筋作预应力钢筋时,混凝土的强度等级不宜低于 C40。

试验表明,混凝土在压力机上受压,试件纵向压缩,横向膨胀,由于压力机上下压板与试件上下端表面间有摩擦力存在,试件两端表面不能自由横向扩张,试件实际上处于三向受力状态。若在试件表面涂以润滑剂,摩擦力将大为减少,所得混凝土抗压强度的数值比不涂润滑剂者小得多。

这两种试验方法所得出的立方体试件破坏特性也不相同,如图 1.3 所示。不涂润滑剂者(图 1.3(a))破坏时块体四周剥落,成两个锥形体;涂润滑剂者(图 1.3(b))破坏时则出现与加载方向平行的竖向裂缝而破坏。这种外部材料有效地限制了内部材料的横向变形,从而使内部材料处于三向受压状态而提高抗压强度的作用,可称为套箍作用。

混凝土的立方体抗压强度还与试块的尺寸和形状有关。试块尺寸越大,实测破坏强度越低,反之越高,这种现象称为尺寸效应。对 100mm 的立方体试块,立方体抗压强度换算系数为 0.95;对于 200mm 的立方体试块,立方体抗压强度的换算系数为 1.05。

由于混凝土内部水泥的水化作用与时间有关,所以龄期越长,其强度越高。但随着龄期的增长,强度增加的幅度较小。

1.2.1.2 混凝土轴心抗压强度 f_c (棱柱体抗压强度)

混凝土轴心抗压强度又称为棱柱体抗压强度。该强度的大小与试块的高度 h 和截面宽度 b 之比 h/b 有关。 h/b 越大,其承载力比立方体强度降低得越多。当 h/b 大于 3 时,其强度趋于稳定。常用的试件有 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 450\text{mm}$ 、 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 300\text{mm}$ 等尺寸。试验所得到的抗压强度极限值,即为混凝土轴心抗压强度。设计时称为抗压强度标准值。

经试验分析可知,轴心抗压强度平均值 μ_{fc} 与立方体抗压强度平均值 μ_{fcu} 之间的关系为

$$\mu_{fc} = 0.76\mu_{fcu}$$

因考虑到试验室试验条件与工程实际情况的差异及构件尺寸的不同等因素,《混凝土结构设计规范》取

$$\mu_{fc} = 0.67\mu_{fcu} \quad (1.1)$$

1.2.1.3 混凝土轴心抗拉强度 f_t

混凝土的抗拉强度很低,一般只有抗压强度的 $1/8 \sim 1/18$,不与抗压强度成正比。在钢筋混凝土构件的破坏阶段,处于受拉状态的混凝土一般早已开裂,故在构件承载力计算中,多数情况下是不考虑受拉混凝土的工作的,但是混凝土的抗拉强度对钢筋混凝土构件多方面的工作性能是有重要影响的,是计算构件抗裂强度的重要指标。

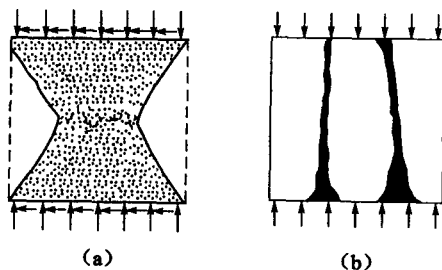


图 1.3 混凝土试块的破坏情况
(a) 不涂润滑剂者;(b) 涂润滑剂者

由于影响因素较多,所以测定混凝土抗拉强度的试验方法没有统一。现在,常用的有直接轴心受拉试验、劈裂试验及弯折试验三种。

根据我国采用直接拉伸试验方法测得的混凝土轴心抗拉强度的试验结果,混凝土轴心抗拉强度的试验统计平均值 μ_{ft} 与立方体抗压强度的试验统计平均值 μ_{fcu} 之间的关系为

$$\mu_{ft} = 0.26\mu_{fcu}^{2/3}$$

现行《混凝土结构设计规范》考虑到实际构件与试验的差异,采用

$$\mu_{ft} = 0.23\mu_{fcu}^{2/3} \quad (1.2)$$

混凝土标准值和设计值见表 1.3、表 1.4。

表 1.3 混凝土强度标准值(N/mm²)

强度种类	混凝土强度等级													
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
轴心抗压 f_{ck}	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
轴心抗拉 f_{tk}	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.40	2.51	2.65	2.74	2.85	2.93	3.00	3.05	3.10

表 1.4 混凝土强度设计值(N/mm²)

强度种类	混凝土强度等级													
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
轴心抗压 f_c	7.2	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.2	23.1	25.3	27.5	29.7	31.8	33.8	35.9
轴心抗拉 f_t	0.91	1.10	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80	1.89	1.96	2.04	2.09	2.14	2.18	2.22

注:① 计算现浇钢筋混凝土轴心受压及偏心受压构件时,如截面的长边或直径小于 300mm,则表中混凝土的强度设计值应乘以系数 0.8;当构件质量(如混凝土成型、截面和轴线尺寸等)确有保证时,可不受此限制;

② 离心混凝土的强度设计值应按有关专门标准取用。

1.2.1.4 复杂应力状态下混凝土的强度

在钢筋混凝土结构中,混凝土很少处于单向受力状态,一般都处于复合应力状态。由于混凝土材料的特点,对于复合应力状态下的强度至今尚未建立完善的强度理论。

对于双向应力状态,如在两个互相垂直的平面上作用着法向应力 σ_1 和 σ_2 ,第三平面上的应力为零,这时双向应力状态下混凝土强度的变化曲线如图 1.4 所示。

可以看出,双向受压时,一向的强度随另一向压应力的增加而增加,当横向压应力与轴向压应力之比为 0.5 时,其强度比单向受压提高约 27%。而在两向压应力相等的情况下强度提高仅为 16%。当双向受拉时,一向抗拉强度基本上与另一向拉应力大小无关。当一向受拉,另一向受压时,其抗压强度随拉应力增加而降低。

如果在单元体上,除作用着剪应力 τ 外,还在一个平面上同时作用着法向应力 σ ,就形成压剪或拉剪复合应力状态,这时,其强度曲线如图 1.5 所示。

图 1.5 表明,混凝土的抗压强度由于剪应力的存在而降低,当 $\frac{\sigma}{f_c} < (0.5 \sim 0.6)$ 时,抗剪强度随混凝土压应力的增大而增大;当 $\frac{\sigma}{f_c} > (0.5 \sim 0.6)$ 时,抗剪强度随压应力的增大而减小。

当混凝土三向受压时,混凝土一向抗压强度随另二向压应力的增加而增加,并且混凝土的

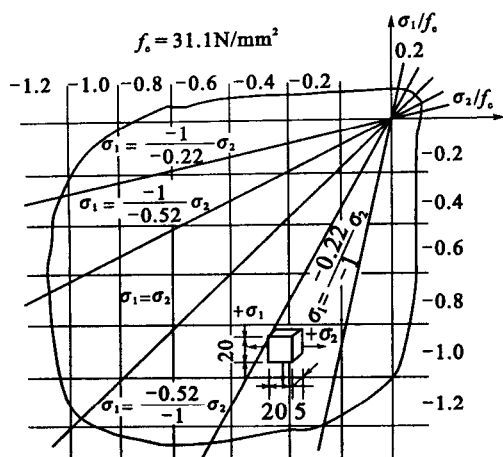


图 1.4 混凝土双向受力曲线

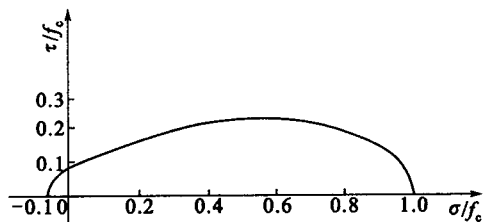


图 1.5 混凝土在 τ 与 σ 作用下的复合强度曲线

极限压应变也大大增加。

在工程实践中,为了进一步提高混凝土的抗压强度和变形能力,常常采用横向钢筋约束的混凝土。

1.2.2 混凝土变形

混凝土的变形可以分成两类:一类是由荷载产生的变形,包括一次短期加荷时的变形、长期荷载作用下的变形以及重复荷载作用下的变形;另一类为混凝土的体积变形,包括混凝土的收缩变形以及温度、湿度变化产生的变形。

1.2.2.1 混凝土在一次短期加荷时的变形性能

混凝土一次加荷时的变形性能,通常采用 $\frac{h}{b} = 3 \sim 4$ 的棱柱体试件来测定,一次加载的应力-应变曲线如图 1.6 所示。曲线可分为上升段 Oc 和下降段 ca' ,在上升段曲线开始部分的 Oa 段($\sigma < 0.3\sigma_0$)时为直线段,混凝土处于弹性阶段,应力与应变呈正比;在 ab 段(约 $\sigma < 0.8\sigma_0$)时,混凝土内部微裂缝发展,产生塑性变形。变形增长速率加快,表现出混凝土的塑性变形特征。此后,随荷载增加,裂缝发展加快,宽度增加,塑性变形急剧增大,很快达到峰值应力 σ_0 ,此时对应的应变为 ϵ_0 。此后,由于变形急剧发展承载力下降,而出现下降段,当达到 d' 时,混凝土已被压碎。此时混凝土的应变为极限压应变 ϵ_{cmax} 。但由于各碎块间的机械咬合力与摩擦力存在,仍能承担一定荷载。如继续加载,混凝土的变形继续发展。

对于不同强度等级的混凝土,其相应的应力-应变曲线有着相似的形状,但也有区别。如图 1.7 所示,随着混凝土强度的提高,曲线上升段和峰值应变的变化不很显著,而下降段形状有较大的差异。强度越高,下降段越陡。

1.2.2.2 混凝土的横向变形系数 μ

混凝土在纵向受压变形时,纵向产生压缩应变 ϵ_{cv} ;而横向产生膨胀应变 ϵ_{ch} 。则横向变形系数可以表示为

$$\mu = \frac{\epsilon_{ch}}{\epsilon_{cv}} \quad (1.3)$$

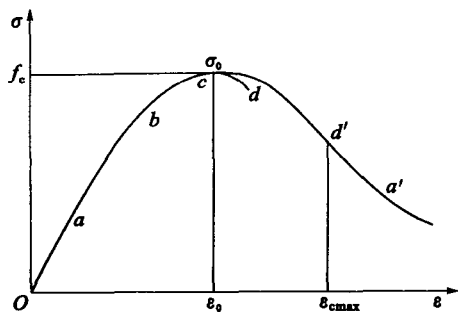


图 1.6 混凝土受压应力-应变曲线

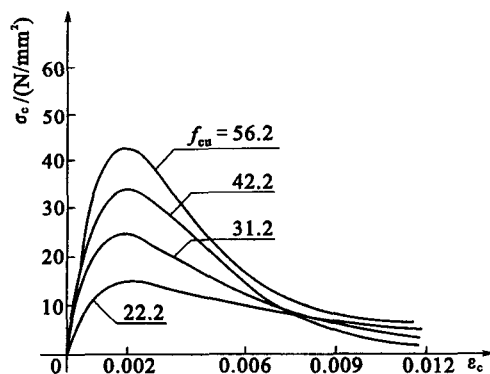


图 1.7 不同强度混凝土的应力-应变曲线

1.2.2.3 混凝土受约束时的变形特点

由套箍作用可知,当混凝土受到约束时,其内部混凝土的强度和延性均有所提高,其抗压性能有较大的改善。

如图 1.8 所示,在混凝土接近抗压强度以前,箍筋起不到约束作用;当应力超过单轴抗压强度后,混凝土套箍作用增强,强度和延性明显提高。箍筋越密,强度提高越多。但最多不超过 20%,而变形能力却大幅度增长。

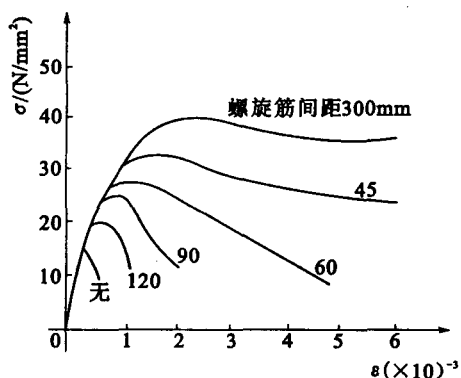


图 1.8 用螺旋筋约束混凝土的应力-应变曲线

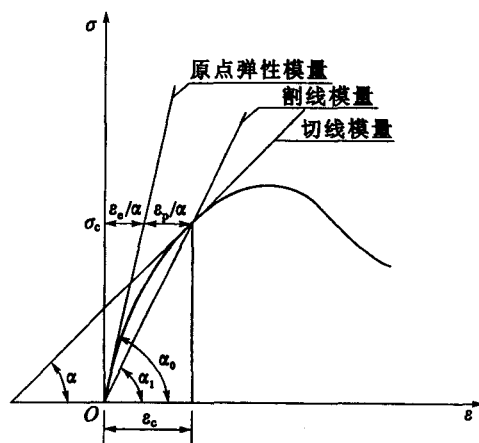


图 1.9 弹性模量与变形模量

1.2.2.4 混凝土的弹性模量和变形模量

混凝土在不同应力阶段,描述应力-应变关系的材料模量是一个变数,称为变形模量。由混凝土棱柱体受压资料,可以描绘出混凝土的应力-应变典型曲线如图 1.9 所示。

图中 ϵ_c 为当混凝土压应力为 σ_c 时的总应变,但其应变又分为弹性应变和塑性应变两部分,即

$$\epsilon_c = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (1.4)$$

式中 ϵ_e ——混凝土弹性应变部分;

ϵ_p ——混凝土塑性应变部分。

为了描述混凝土受压时应力与应变之间的关系,混凝土的受压变形模量有三种表示方法: