

高职高专教改系列教材

结构与平法钢筋算量

主 编 艾思平 何 俊



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高职高专教改系列教材

结构与平法钢筋算量

主 编 艾思平 何 俊
副主编 樊宗义 高慧慧
主 审 张思梅



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

水利部·中国水利出版社

内 容 提 要

本书根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》、国家建筑标准设计 11G01 系列平法图集、GB 50666—2011《混凝土结构施工规范》中的规定,以实际建筑工程构件为例,对混凝土结构中的基本构件(包括梁、板、柱、墙、楼梯、基础)的受力特点、破坏特征、计算原理、计算方法、构造要求、平法识图、钢筋预算量的计算,进行了详细系统的讲述。

本书通过多个案例的讲解,力求使读者充分理解钢筋混凝土基本构件的计算原理和构造要求,更好地掌握平法识图方法和钢筋预算量的计算,以提高读者的结构分析能力、识图能力、预算能力和施工能力。

本书在编写过程中,充分考虑了要培养学生的关键职业能力,同时还考虑了造价工作人员职业资格考试的需要。本书适于用作造价专业学生的教材,同时也可用作社会上造价工作者及相关人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

结构与平法钢筋算量 / 艾思平, 何俊主编. — 北京
: 中国水利水电出版社, 2014. 1
高职高专教改系列教材
ISBN 978-7-5170-1315-0

I. ①结… II. ①艾… ②何… III. ①钢筋混凝土结构—结构计算—高等职业教育—教材 IV. ①TU375.01

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第248223号

书 名	高职高专教改系列教材 结构与平法钢筋算量
作 者	主编 艾思平 何俊
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司印刷
规 格	184mm×260mm 16开本 12.25印张 290千字
版 次	2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

“结构与平法钢筋算量”是工程造价专业一门重要的专业课。它是根据教育部的有关指导性意见，遵循城镇建设专业的“工学结合——项目导向”人才培养模式，“以工作项目为载体、以工作过程为导向”进行开发的。我们是在校企共同确定的课程标准、教学计划和教材编写大纲的基础上进行编写的。本书旨在培养学生具备结构分析和计算、平法识图和钢筋量计算的能力。

本书根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》、国家建筑标准设计 11G01 系列平法图集、GB 50666—2011《混凝土结构施工规范》中的规定，以实际建筑工程构件为例，对混凝土结构基本构件（包括梁、板、柱、墙、基础）的受力特点、破坏特征、计算原理、计算方法、构造要求、平法识图、钢筋预算量的计算，进行了详细系统的讲解。

本书由安徽水利水电职业技术学院艾思平、何俊主编，具体编写分工为：安徽水利水电职业技术学院艾思平、安徽重点工程管理局林平编写学习项目 1；安徽水利水电职业技术学院樊宗义、何俊编写学习项目 2；安徽水利水电职业技术学院蒋红、安徽建工集团叶明林编写学习项目 3；安徽水利水电职业技术学院高慧慧、王涛编写学习项目 4；安徽水利水电职业技术学院常小会、吴瑞编写学习项目 5；广联达软件公司陈磊编写学习项目 6。

安徽水利水电职业技术学院张思梅副教授主审了全书，并提出了许多宝贵意见；另外，本书在编写过程中还得到了不少同仁的帮助。在此，我们一并谨向他们表示衷心的感谢。

限于编者水平，不足之处在所难免，敬请读者予以批评指正。

编者

2013 年 4 月

目 录

前言

学习项目 1 绪论	1
学习情境 1.1 混凝土结构的概念	1
学习情境 1.2 钢筋混凝土结构的材料	3
学习项目 2 钢筋混凝土梁、板	17
学习情境 2.1 梁、板的配筋计算	17
学习情境 2.2 梁、板平法施工图识读	40
学习情境 2.3 梁、板钢筋预算量计算	50
学习项目 3 钢筋混凝土柱、剪力墙	74
学习情境 3.1 柱的配筋计算	74
学习情境 3.2 钢筋混凝土柱施工图识读	93
学习情境 3.3 钢筋混凝土柱钢筋预算量计算	97
学习情境 3.4 剪力墙平法识图	106
学习项目 4 基础的平法施工图识读与钢筋量计算	116
学习情境 4.1 独立基础的平法识读与钢筋量计算	116
学习情境 4.2 筏形基础的平法识读与钢筋量计算	123
学习项目 5 钢筋混凝土楼梯	141
学习情境 5.1 钢筋混凝土楼梯配筋计算	141
学习情境 5.2 钢筋混凝土板式楼梯平法识读	151
学习情境 5.3 板式楼梯构造详图	154
学习情境 5.4 板式楼梯的钢筋预算量计算	157
学习项目 6 钢筋算量软件的应用	160
学习情境 6.1 广联达钢筋抽样软件的设计原理	160
学习情境 6.2 广联达钢筋抽样软件 GGJ2009 操作流程	162
附录 A	186
附录 B	189
参考文献	191

学习项目 1 绪 论

【学习目标】 了解课程的学习内容和目标；掌握结构的概念、类型和特点；掌握钢筋混凝土结构材料的要求、类型及其力学特性。

学习情境 1.1 混凝土结构的概念

混凝土是人工石材，它由石子、砂粒、水泥、外加剂和水按一定比例拌和而成。混凝土材料像天然石材一样，承受压力的能力很强，但抵抗拉力的能力却很弱。而钢材则不然，其抗压和抗拉的能力都很强。于是，人们利用两种材料各自的特点，把它们有机地结合在一起共同工作，形成了用于工程实际的混凝土结构（Concrete Structure）。所谓结构就是建筑的承受各种作用的骨架，土木工程中常用的混凝土结构类型有素混凝土结构、钢筋混凝土结构（Reinforced Concrete Structure, RC）、预应力混凝土结构、钢管混凝土结构、型钢混凝土结构、纤维混凝土结构等，其中以钢筋混凝土结构应用最广。图 1.1 所示为常见钢筋混凝土结构和构件的配筋实例。

钢筋和混凝土这两种性质不同的材料之所以能有效地结合在一起而共同工作，主要是由于混凝土硬化后钢筋与混凝土之间产生了良好黏结力，使两者可靠地结合在一起，从而保证在外荷载的作用下，钢筋与相邻混凝土能够共同变形；其次，钢筋与混凝土这两种材料的温度线膨胀系数的数值颇为接近（钢筋为 1.2×10^{-5} ，混凝土为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$ ），所以，当温度变化时，不致产生较大的温度应力而破坏两者之间的黏结，从而保持结构的整体性。另外，应用这两种材料时，总是混凝土包围在钢筋的外围，起着保护钢筋免遭锈蚀的作用，这对两种材料的共同工作无疑也是一项重要保证。

钢筋混凝土结构除了能较合理地应用这两种材料的性能外，还有下列优点：

(1) 耐久性。混凝土的强度随龄期增长，钢筋被混凝土保护，锈蚀较小，所以只要保护层厚度适当，混凝土结构的耐久性就比较好。若处于侵蚀性的环境，可以适当选用水泥品种及外加剂，增大保护层厚度，就能满足工程要求。

(2) 耐火性。与容易燃烧的木结构和导热快且抗高温性能较差的钢结构相比，混凝土结构的耐火性较好。因为混凝土是不良热导体，遭受火灾时，混凝土起隔热作用，使钢筋不致达到或不致很快达到降低其强度的温度。经验表明，虽然经受了较长时间的燃烧，混凝土常常只损伤表面。对承受高温作用的结构，还可应用耐热混凝土。

(3) 就地取材。在混凝土结构的组成材料中，用量较大的石子和砂往往容易就地取材，有条件的地方还可以将工业废料制成人工骨料应用，这对材料的供应、运输和土木工程结构的造价都提供了有利的条件。

(4) 保养费节省。混凝土结构的维修较少，不像钢结构和木结构需要经常保养。

(5) 节约钢材。混凝土结构合理地应用了材料的性能，在一般情况下可以代替钢结

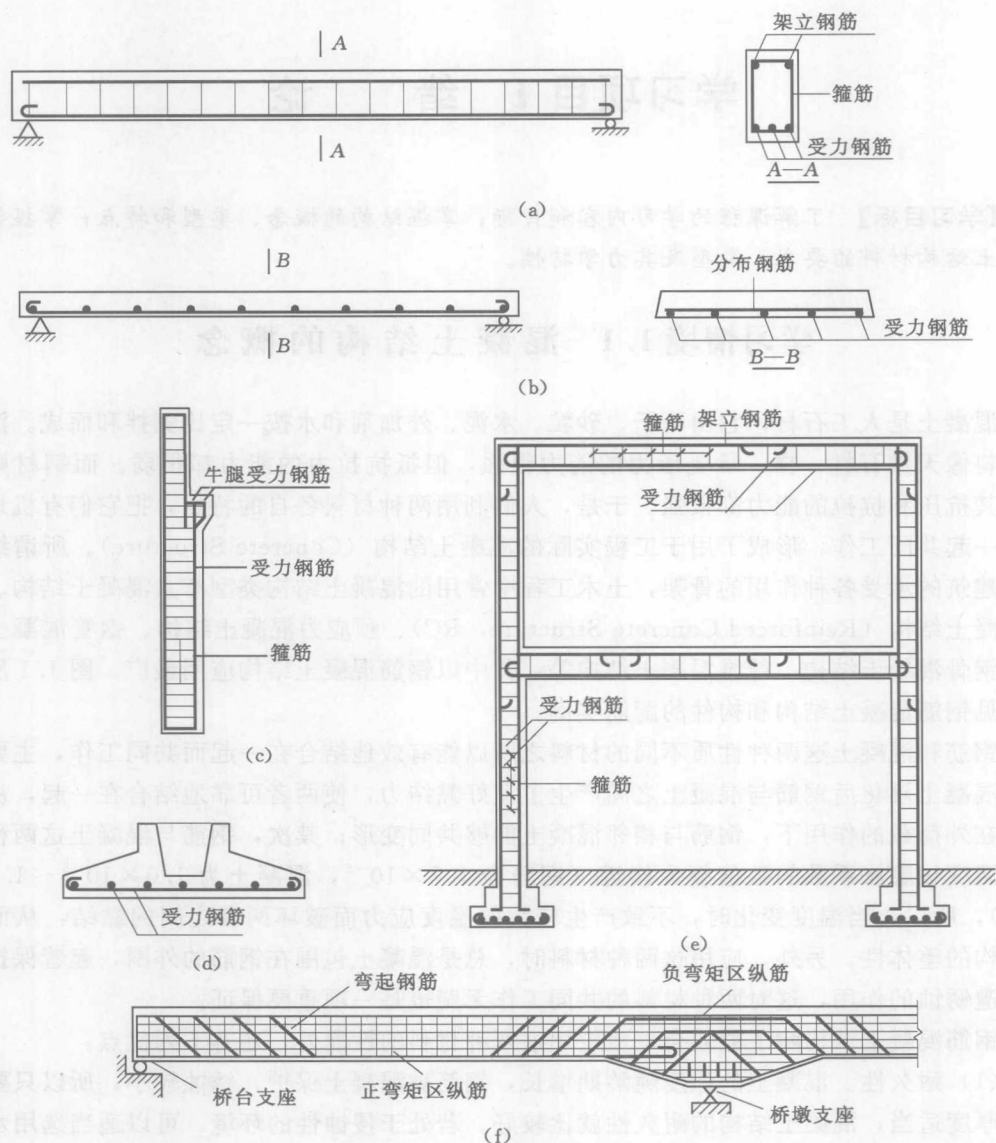


图 1.1 常见钢筋混凝土结构和构件配筋实例

构，从而能节约钢材、降低造价。

(6) 可模性好。因为新拌和未凝固的混凝土是可塑的，故可以按照不同模板的尺寸和式样浇筑成建筑师设计所需要的构件。

(7) 刚度大、整体性好。混凝土结构刚度较大，对现浇混凝土结构而言其整体性尤其好，宜用于变形要求小的建筑，也适用于抗震、抗爆结构。

但是，混凝土结构也有不少缺点和不足之处：普通钢筋混凝土结构本身自重比钢结构大，自重过大对于大跨度结构、高层建筑结构的抗震都是不利的；另外，混凝土结构的抗裂性较差，在正常使用时往往带裂缝工作，而且建造较为费工，现浇结构模板需耗用较多

的木材，施工受到季节气候条件的限制，补强修复较困难，隔热隔声性能较差，等等。这些缺点在一定条件下限制了混凝土结构的应用范围。不过随着人们对于混凝土结构这门学科研究认识的不断提高，上述一些缺点已经或正在逐步加以改善。例如，目前国内外均在大力研究轻质、高强混凝土以减轻混凝土的自重；采用预应力混凝土（Prestressed Concrete, PC）技术以减轻结构自重和提高构件的抗裂性；采用预制装配构件以节约模板加快施工速度；采用工业化的现浇施工方法以简化施工，采用黏钢技术和碳纤维技术加固进行补强等。

学习情境 1.2 钢筋混凝土结构的材料

1.2.1 钢筋

1. 钢筋的强度与变形

钢筋的力学性能有强度、变形（包括弹性和塑性变形）等。单向拉伸试验是确定钢筋性能的主要手段。经过钢筋的拉伸试验可以看到，钢筋的拉伸应力应变关系曲线可分为两类：有明显流幅的（图 1.2）和没有明显流幅的（图 1.3）。

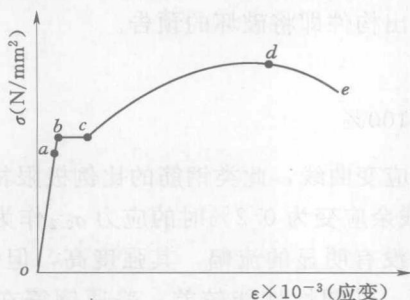


图 1.2 有明显流幅的钢筋应力应变曲线
 σ —应力； ϵ —应变

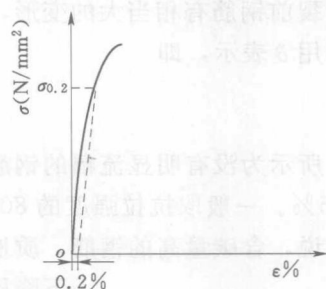


图 1.3 没有明显流幅的钢筋的
应力应变曲线

图 1.2 所示为一条有明显流幅的典型的应力应变曲线。在图 1.2 中： oa 为一段斜直线，其应力与应变之比为常数，应变在卸荷后能完全消失，称为弹性阶段，与 oa 相应的应力称为比例极限（或弹性极限）。应力超过 a 点之后，钢筋中晶粒开始产生相互滑移错位，应变即较应力增长得稍快，除弹性应变外，还有卸荷后不能消失的塑性变形。到达 b 点后，钢筋开始屈服，即使荷载不增加，应变却继续发展增加很多，出现水平段 bc ， bc 称为流幅或屈服台阶； b 点称为屈服点，与 b 点相应的应力称为屈服应力或屈服强度。经过屈服阶段之后，钢筋内部晶粒经调整重新排列，抵抗外荷载的能力又有所提高， cd 段即称为强化阶段， d 点称为钢筋的抗拉强度或极限强度，而与 d 点应力相应的荷载是试件所能承受的最大荷载称为极限荷载。过 d 点之后，在试件的最薄弱截面出现横向收缩，截面逐渐缩小，塑性变形迅速增大，出现所谓颈缩现象，此时应力随之降低，直至 e 点试件断裂。

对于有明显流幅的钢筋，一般取屈服点作为钢筋设计强度的依据。因为屈服之后，钢

筋的塑性变形将急剧增加,钢筋混凝土构件将出现很大的变形和过宽的裂缝,以致不能正常使用,所以,构件大多在钢筋尚未或刚进入强化阶段即产生破坏。钢筋强度用标准值和设计值表示。根据可靠度要求,混凝土结构设计规范规定具有95%以上的保证率的屈服强度作为钢筋强度标准值 f_{yk} ,钢筋强度设计值 f_y 等于钢筋强度标准值 f_{yk} 除以材料分项系数 γ_s ,即

$$f_y = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (1.1)$$

由于钢材的匀质性较好,建筑工程规范对各种热轧钢筋统一取 $\gamma_s=1.1$ 左右,热轧钢筋强度标准值、设计值、弹性模量见附表A.1。

材料的分项系数是反映材料强度离散性大小的系数,它是材料强度标准值转化为设计值的调整系数。对于钢筋而言,强度低、离散性小的分项系数小,强度高,离散性大的分项系数较大。

试验表明,钢筋的受压性能与受拉性能类同,其受拉和受压弹性模量也相同。

在图1.2中, e 点的横坐标代表了钢筋的伸长率,它和流幅 bc 的长短都因钢筋的品种而异,均与材质含碳量成反比。含碳量低的叫低碳钢或软钢,含碳量愈低则钢筋的流幅愈长、伸长率愈大,即标志着钢筋的塑性指标好。这样的钢筋不致突然发生危险的脆性破坏,由于断裂前钢筋有相当大的变形,足够给出构件即将破坏的预告。

伸长率用 δ 表示,即

$$\delta = \frac{l' - l}{l} 100\% \quad (1.2)$$

图1.3所示为没有明显流幅的钢筋的应力应变曲线,此类钢筋的比例极限相当于其抗拉强度的65%。一般取抗拉强度的80%,即残余应变为0.2%时的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为条件屈服点。一般来说,含碳量高的钢筋,质地较硬,没有明显的流幅,其强度高,但伸长率低,

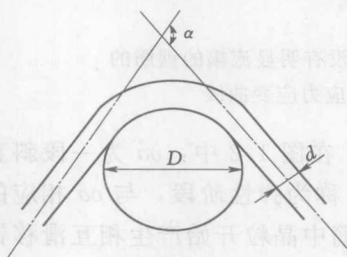


图1.4 钢筋的冷弯实验

下降段极短促,其塑性性能较差。普通钢筋在最大力下的总伸长率 δ_{gt} 不应小于规定数值。冷弯性能是检验钢筋塑性性能的另一项指标。为使钢筋在加工、使用时不开裂、弯断或脆断,可对钢筋试件进行冷弯试验,如图1.4所示,要求钢筋弯绕一辊轴弯心而不产生裂缝、鳞落或断裂现象。弯转角度愈大、弯心直径 D 愈小,钢筋的塑性就愈好。冷弯试验较受力均匀的拉伸试验能更有效地揭示材质的缺陷,冷弯性能是衡量钢筋力学性能的一项综合指标。

此外,根据需要,钢筋还可做冲击韧性试验和反弯试验,以确定钢筋的有关力学性能。

2. 钢筋的品种

根据GB 50010—2010《混凝土设计规范》(后面简称《规范》)规定,在钢筋混凝土结构中主要采用热轧钢筋,热轧钢筋是低碳钢、普通低合金钢在高温下轧制而成。热轧钢筋为软钢,其应力应变曲线有明显的屈服点和流幅,断裂时有“颈缩”现象,伸长率较

大。根据力学指标的高低,分为 HPB300 级 (I 级,符号 Φ), HRB335、HRBF335 级 (II 级,符号 Φ 、 Φ^F), HRB400、HRBF400、RRB400 级 (III 级,符号 Φ 、 Φ^F 、 Φ^R), HRB500、HRBF500 (Φ 、 Φ^F)。

为了简化起见,在设计计算书和施工图纸上,各种强度等级的热轧钢筋均以符号代表。因此,要记住各个符号代表的钢筋级别,不要将它们混淆。

3. 钢筋的形式

钢筋混凝土结构中所采用的钢筋,有柔性钢筋和劲性钢筋,如图 1.5 所示。柔性钢筋即一般的普通钢筋,是我国使用的主要钢筋形式。柔性钢筋的外形选择取决于钢筋的强度。为了使钢筋的强度能够充分地利用,强度越高的钢筋要求与混凝土黏结的强度越大。提高黏结强度的办法是将钢筋表面轧成有规律的凸出花纹,称为变形钢筋。HPB300 钢筋的强度低,表面做成光面即可,其余级别的钢筋强度较大,应为变形钢筋。

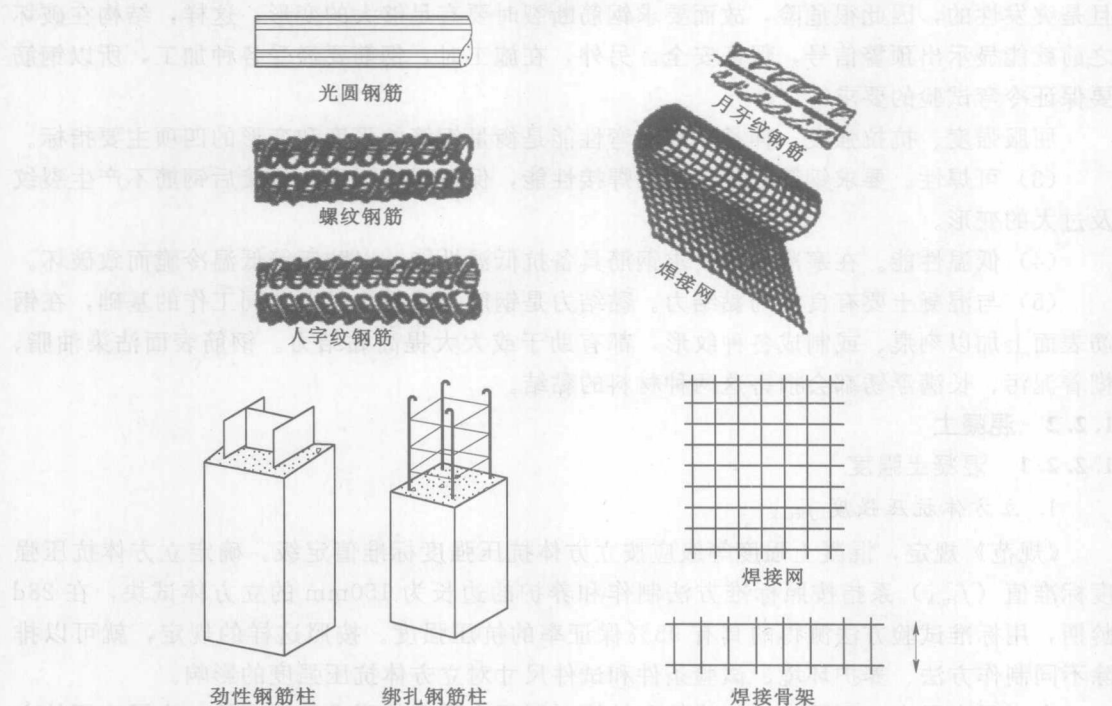


图 1.5 钢筋的各种形式

光圆钢筋直径为 6~22mm,变形钢筋的公称直径为 6~50mm,公称直径即相当于横截面面积相等的光圆钢筋的直径,当钢筋直径在 12mm 以上时,通常采用变形钢筋。当钢筋直径在 6~12mm 时,可采用变形钢筋,也可采用光圆钢筋。直径小于 6mm 的常称为钢丝,钢丝外形多为光圆,但因强度很高,故也有在表面上刻痕以加强钢丝与混凝土的黏结作用。

当构件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。横向钢筋的抗拉强度设计值 f_{yv} 应按表中的 f_y 的数值采用;当用作受剪、受扭、受冲切承载力计算时,其数值大于 360N/mm^2 时应取 360N/mm^2 。

钢筋混凝土结构构件中的钢筋网、平面和空间的钢筋骨架可采用铁丝将柔性钢筋绑扎成型,也可采用焊接网和焊接骨架。

劲性钢筋以角钢、槽钢、工字钢、钢轨等型钢作为结构构件的配筋。

4. 钢筋混凝土结构对钢筋性能的要求

用于混凝土结构中的钢筋,一般应能满足下列要求。

(1) 具有适当的屈强比。在钢筋的应力应变曲线中,强度有两个:一是钢筋的屈服强度(或条件屈服强度),这是设计计算时的主要依据,屈服强度高则材料用量省,所以要选用高强度钢筋;二是钢筋的抗拉强度,屈服强度与抗拉强度的比值称为屈强比,它可以代表结构的强度储备,比值小则结构的强度后备大,但比值太小则钢筋强度的有效利用率太低,所以要选择适当的屈强比。

(2) 足够的塑性。在混凝土结构中,若发生脆性破坏则构件变形很小,没有预兆,而且是突发性的,因此很危险,故而要求钢筋断裂时要有足够大的变形,这样,结构在破坏之前就能显示出预警信号,保证安全。另外,在施工时,钢筋要经受各种加工,所以钢筋要保证冷弯试验的要求。

屈服强度、抗拉强度、伸长率和冷弯性能是衡量钢筋的强度和变形的四项主要指标。

(3) 可焊性。要求钢筋具备良好的焊接性能,保证焊接强度,焊接后钢筋不产生裂纹及过大的变形。

(4) 低温性能。在寒冷地区要求钢筋具备抗低温性能,以防钢筋低温冷脆而致破坏。

(5) 与混凝土要有良好的黏结力。黏结力是钢筋与混凝土得以共同工作的基础,在钢筋表面上加以刻痕、或制成各种纹形,都有助于或大大提高黏结力。钢筋表面沾染油脂、糊着泥污、长满浮锈都会损害这两种材料的黏结。

1.2.2 混凝土

1.2.2.1 混凝土强度

1. 立方体抗压强度 $f_{cu,k}$

《规范》规定,混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值定级。确定立方体抗压强度标准值($f_{cu,k}$)系指按照标准方法制作和养护的边长为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。按照这样的规定,就可以排除不同制作方法、养护环境、试验条件和试件尺寸对立方体抗压强度的影响。

在工程实际中,不同类型的构件和结构对混凝土强度的要求是不同的。为了应用的方便,《规范》将混凝土的强度按照其立方体抗压强度标准值的大小划分为14个强度等级,即C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80。14个等级中的数字部分即表示以 N/mm^2 为单位的立方体抗压强度数值。

《规范》规定,素混凝土结构的混凝土强度等级不应低于C15;钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于C20;采用强度等级400MPa及以上钢筋时,混凝土强度等级不应低于C25,预应力混凝土结构的混凝土强度等级不宜高于C40,且不应低于C30。

2. 轴心抗压强度 f_{ck}

在工程中,钢筋混凝土受压构件的尺寸,往往是高度 h 比截面的边长 b 大很多,形成棱柱体,也就是说端部的摩擦力影响失去约束作用。在棱柱体上所测得的强度称为混凝土

的轴心抗压强度 f_{ck} ， f_{ck} 能更好地反映混凝土的实际抗压能力。从图 1.6 所示试验的曲线可知，当 $h/b=2\sim 3$ 时，轴心抗压强度即摆脱了摩擦力的作用而趋稳定，达到纯压状态，所以轴心抗压强度的试件往往取 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 300\text{mm}$ 、 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 450\text{mm}$ 等尺寸。GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法》规定以 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 300\text{mm}$ 的棱柱体作为混凝土轴心抗压强度试验的标准试件。图 1.7 所示轴心抗压试验的装置和试件的破坏情况。

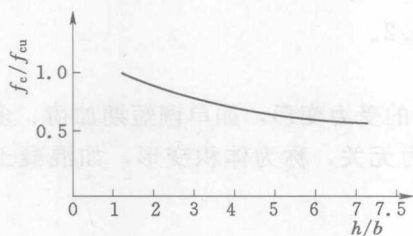


图 1.6 柱体高宽比对抗压强度的影响

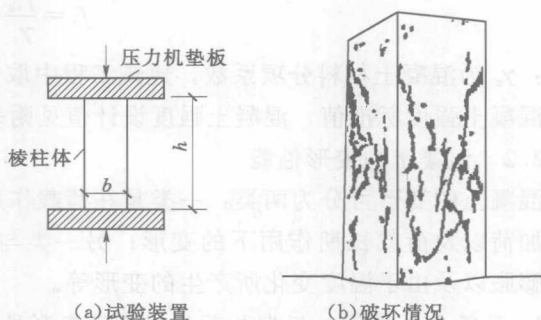


图 1.7 混凝土轴心抗压试验

考虑到实际结构构件制作、养护和受力情况，实际构件强度与试件强度之间存在的差异，《规范》基于安全取偏低值，轴心抗压强度标准值与立方体抗压强度标准值的关系按下式确定

$$f_{ck} = 0.88\alpha_1\alpha_2 f_{cu,k} \quad (1.3)$$

式中： α_1 为棱柱体强度与立方体强度之比，对混凝土等级为 C50 及以下的取 $\alpha_1 = 0.76$ ，对 C80 取 $\alpha_1 = 0.82$ ，在此之间按直线变化取值； α_2 为高强度混凝土的脆性折减系数，对 C40 取 $\alpha_2 = 1.00$ ，对 C80 取 $\alpha_2 = 0.87$ ，中间按直线规律变化取值；0.88 为考虑实际构件与试件之间的差异而取用的折减系数。

3. 抗拉强度 f_{tk}

混凝土的抗拉强度很低，与立方抗压强度之间为非线性关系，一般只有其立方抗压强度的 $1/17\sim 1/8$ 。中国建筑科学研究院等单位对混凝土的抗拉强度作了系统的测定，试件用 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 500\text{mm}$ 的钢模筑成，两端各预埋一根 $\Phi 16$ 钢筋，钢筋埋入深度为 150mm 并置于试件的中心轴线上，如图 1.8 所示。试验时用试验机的夹具夹紧试件两端外伸的钢筋施加拉力，破坏时试件在没有钢筋的中部截面被拉断，其平均拉应力即为混凝土的轴心抗拉强度 f_t ，根据 72 组试件所得混凝土抗拉强度的试验结果并经修正后，其与

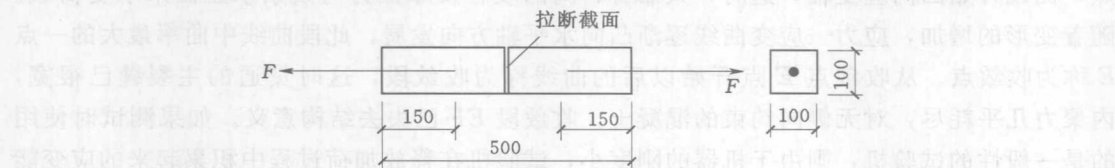


图 1.8 混凝土抗拉强度试验试件

混凝土立方体抗压强度的关系为

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \alpha_2 \quad (1.4)$$

式中： δ 为变异系数；0.88的意义和 α_2 的取值与式(1.1)中相同。

混凝土抗压强度设计值和抗拉强度设计值与其对应的标准值之间的关系为

$$f_c = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1.5)$$

$$f_t = \frac{f_{tk}}{\gamma_c} \quad (1.6)$$

式中： γ_c 为混凝土材料分项系数，建筑工程中取值为1.4。

混凝土强度标准值、混凝土强度设计值见附表A.2。

1.2.2.2 混凝土的变形性能

混凝土的变形可分为两类：一类是在荷载作用下的受力变形，如单调短期加荷、多次重复加荷以及荷载长期作用下的变形；另一类与受力无关，称为体积变形，如混凝土收缩、膨胀以及由于温度变化所产生的变形等。

1. 混凝土在单调、短期加荷作用下的变形性能

(1) 混凝土的应力—应变曲线。混凝土在单调短期加荷作用下的应力—应变曲线是其最基本的力学性能，曲线的特征是研究钢筋混凝土构件的强度、变形、延性（承受变形的能力）和受力全过程分析的依据。

一般取棱柱体试件来测试混凝土的应力—应变曲线，测试时在试件的四个侧面安装应变仪读取纵向应变。混凝土试件受压时典型的应力—应变曲线如图1.9所示，整个曲线大体上呈上升段与下降段两个部分。在上升OC段：起初压应力较小，当应力 $\sigma \leq 0.3f_c$ 时(OA段)，变形主要取决于混凝土内部骨料和水泥晶体的弹性变形，应力应变关系呈直线变化。当应力 σ 在 $0.3 \sim 0.8f_c$ 范围时(AB段)，由于混凝土内部水泥凝胶体的黏性流动，以及各种原因形成的微裂缝亦渐处于稳态的发展中，致使应变的增长较应力快，表现了材料的弹塑性性质。当应力 $\sigma > 0.8f_c$ 之后(BC段)，混凝土内部微裂缝进入非稳态发展阶段，塑性变形急剧增大，曲线斜率显著减小。当应力到达峰值时，混凝土内部黏结力破坏，随着微裂缝的延伸和扩展，试件形成若干贯通的纵裂缝，混凝土应力达到受压时最大承压应力 σ_{max} (C点)，即轴心抗压强度 f_c 。在下降CE段：当试件应力达到 f_c (C点)后，随着裂缝的贯通，试件的承载能力将开始下降。在峰值应力以后，裂缝迅速发展，内部结构的整体受到愈来愈严重的破坏，赖以传递的传力路线不断减少，试件的平均应力强度下降，所以，应力—应变曲线向下弯曲，直到凹向发生改变，曲线出现拐点。超过拐点，曲线开始凸向应变轴，这时，只靠骨料间的咬合及摩擦力与残余承压面来承受荷载。随着变形的增加，应力—应变曲线逐渐凸向水平轴方向发展，此段曲线中曲率最大的一点E称为收敛点。从收敛点E点开始以后的曲线称为收敛段，这时贯通的主裂缝已很宽，内聚力几乎耗尽，对无侧向约束的混凝土，收敛段EF已失去结构意义。如果测试时使用的是一般性的试验机，则由于机器的刚度小，试验机在释放加荷过程中积累起来的应变能所产生的压缩量，将大于试件可能的变形，于是试件在此一瞬间即被压碎，从而测不出应力—应变曲线的下降段，故而必须使用刚度较大的试验机，或者在试验时附加控制装置以

等应变速度加载, 或者采用辅助装置以减慢试验机释放应变能时变形的恢复速度, 使试件承受的压力稳定下降, 试件不致破坏, 才能测出下降段, 得到混凝土受压时应力应变全曲线。应力应变曲线中最大应力值 f_c 与其相应的应变值 ϵ_0 (C 点), 以及破坏时的极限应变值 ϵ_{\max} (E 点) 是曲线的三个特征值。最大应变值 ϵ_{\max} 包括弹性应变和塑性应变两部分, 塑性部分愈长, 变形能力愈大, 即其延性愈好。对于均匀受压的棱柱体试件, 其压应力达到 f_c 后, 混凝土就不能承受更大的荷载, 此时 ϵ_0 就成为计算结构构件时的主要指标。在应力应变曲线图中, 相应于 f_c 的应变 ϵ_0 随混凝土的强度等级而异, 约在 $(1.5 \sim 2.5) \times 10^{-3}$ 间变动, 通常取其平均值 $\epsilon_0 = 2.0 \times 10^{-3}$ 。不过, 对于非均匀受压的情况, 譬如弯曲受压或大偏心受压构件截面的受压区, 混凝土所受压力是不均匀的, 即其应变也是不均匀的。在这种情况下, 受压区最外层纤维达到最大应力后, 附近受压较小的内层纤维会协助外层纤维受压, 对外层起卸荷的作用, 直至最外层纤维的应变到达受压极限应变 ϵ_{\max} 时, 截面才破坏, 此时压应变值为 $0.002 \sim 0.006$, 甚至达到 0.008 或者更高。

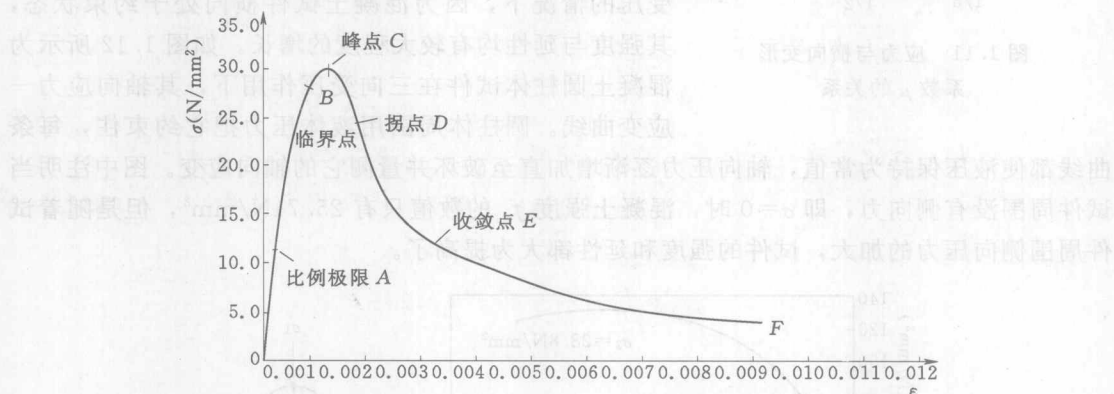


图 1.9 混凝土受压时应力—应变曲线

在实用上, 我国《规范》根据试验结果并顾及混凝土的塑性性能, 将混凝土轴心受压的应力—应变曲线加以简化以便应用 (图 1.10), 其所采用的表达式如下。

在上升段, 当 $\epsilon_c \leq \epsilon_0$ 时取为二次抛物线, 即

$$\sigma = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^n \right] \quad (1.7)$$

水平段, 当 $\epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_u$ 时, 有

$$\sigma = f_c$$

参数 n , ϵ_0 , ϵ_u 取值如下

$$n = 2 - \frac{1}{60} (f_{cu} - 50) \leq 2$$

$$\epsilon_0 = 0.002 + 0.5 (f_{cu} - 50) \times 10^{-5} \geq 0.002$$

$$\epsilon_u = 0.003 - (f_{cu} - 50) \times 10^{-5} \leq 0.0033$$

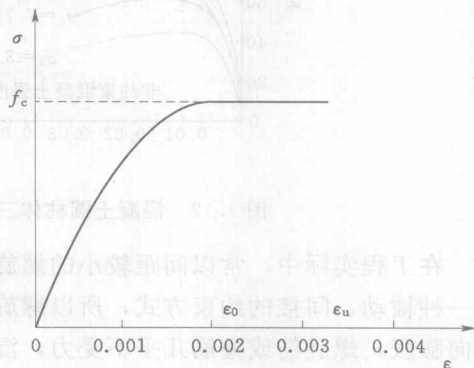


图 1.10 应力—应变曲线

(2) 混凝土受压时横向应变与纵向应变的关系混凝土试件在单调短期加压时，纵向受到压缩，横向产生膨胀，横向应变 ϵ_h 与纵向变 ϵ_l 之比称为横向变形系数为

$$\mu = \frac{\epsilon_h}{\epsilon_l} \quad (1.8)$$

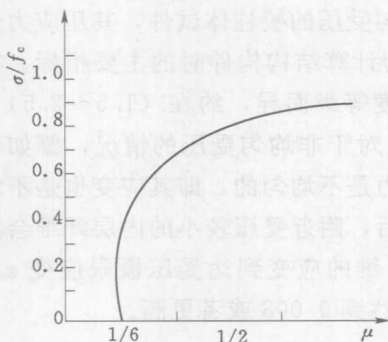


图 1.11 应力与横向变形系数 μ 的关系

试件在不同压应力作用下，横向变形系数 μ 的变化曲线如图 1.11 所示：当压应力小于 $0.5f_c$ 时，试件大体处于弹性阶段， μ 值保持为常数，可取为 $1/6$ ，这个数值就是混凝土的泊松比 ν 。应力较大时，当 $\sigma > 0.5f_c$ 后，横向系数将增大，材料已处于塑性阶段，试件内部微裂缝有所发展，接近破坏时， μ 值达 0.5 以上。

(3) 混凝土处于三向受压时的变形特点。在三向受压的情况下，因为混凝土试件横向处于约束状态，其强度与延性均有较大幅度增长。如图 1.12 所示为混凝土圆柱体试件在三向受压作用下，其轴向应力—应变曲线。圆柱体周围用液体压力把它约束住，每条曲线都使液压保持为常值，轴向压力逐渐增加直至破坏并量测它的轴向应变。图中注明当试件周围没有侧向力，即 $\sigma = 0$ 时，混凝土强度 f_c 的数值只有 25.74N/mm^2 ，但是随着试件周围侧向压力的加大，试件的强度和延性都大为提高了。

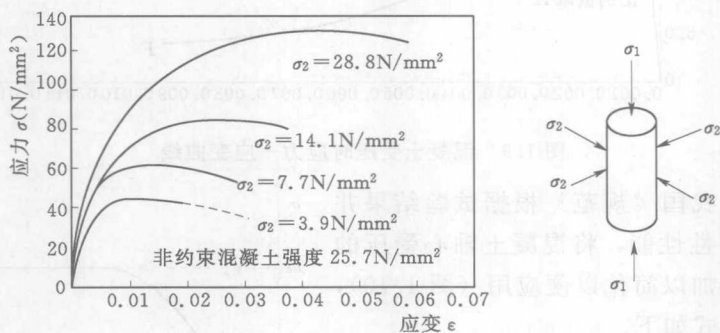


图 1.12 混凝土圆柱体三向受压试验时轴向应力—应变曲线

在工程实际中，常以间距较小的螺旋式钢筋或箍距较密的普通箍筋来约束混凝土，这是一种被动、间接的约束方式，所以螺旋筋也称间接钢筋。当轴向压力较小时，由于没有横向膨胀，螺旋筋或箍筋几乎不受力，混凝土是非约束性的。但当轴向压力增大，混凝土应力接近抗压强度时，混凝土体积膨胀，向外挤压螺旋筋或箍筋（图 1.13），从而使螺旋筋或箍筋受力，反过来抑制混凝土的膨胀，使混凝土成为约束性混凝土，达到与周围有液压的相似效果。图 1.13 还将螺旋筋和普通箍的作用作了对比。螺旋筋约束力匀称，效果自然好。箍筋只对四角和核心部分的混凝土约束较好，对边部的约束则甚差。所以，密集的箍筋对提高延性的效果好，但对提高混凝土强度的作用不大，不过，普通箍筋制作和施工较方便，也容易配合方形截面。



图 1.13 普通方形箍筋和螺旋筋对混凝土的约束

图 1.14 与图 1.15 所示分别为螺旋筋圆柱体试件和箍筋棱柱体试件所测得的约束混凝土的应力—应变曲线。从图 1.14 和图 1.15 中可知，在应力接近混凝土抗压强度之前，螺旋筋和箍筋并无明显作用，其应力—应变曲线与不配置螺旋筋或箍筋的试件基本相同。直至螺旋筋和箍筋发挥出约束作用之后，混凝土遂处于三向受力状态。随着螺旋筋和箍筋间距的加密，约束混凝土的峰值应力愈来愈高，与峰值应力相应的应变亦愈来愈大，而其下降段则发生较多的变化。因为螺旋筋和箍筋约束延缓了裂缝的发展，使得应力的下降减慢，下降坡度趋向平缓，曲线延伸甚长，延性大为提高。因此，对结构的构件和节点区，采用较密的螺旋筋和箍筋，使约束混凝土提高构件的延性，以承受地震力的作用是行之有效的。

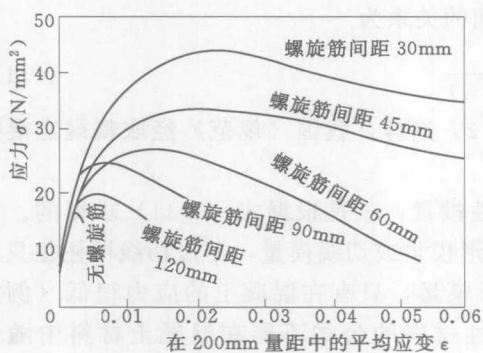


图 1.14 螺旋筋圆柱体约束混凝土试件的应力—应变曲线图

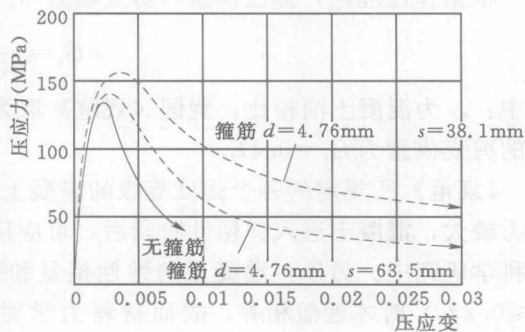


图 1.15 普通箍筋棱柱体约束混凝土试件的应力—应变曲线图

(4) 混凝土的弹性模量和变形模量。在材料力学中，衡量弹性材料应力—应变之间的关系可用弹性模量表示，即

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1.9)$$

弹性模量高，即表示材料在一定应力作用下，所产生的应变相对较小。在钢筋混凝土结构中，无论是进行超静定结构的内力分析，还是计算构件的变形、温度变化和支座沉降对结构构件产生的内力，以及预应力构件等等都要应用到混凝土的弹性模量。

但是，混凝土是弹塑性材料，它的应力—应变关系只是在应力很小的时候，或者在快

速加荷进行试验时才近乎直线。一般说来,其应力—应变关系为曲线关系,不是常数而是变数。

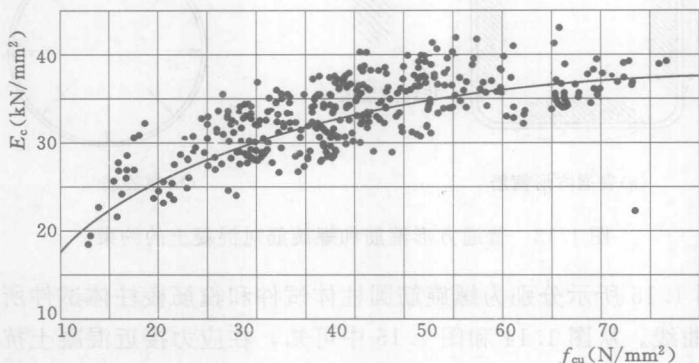


图 1.16 混凝土的弹性模量与立方强度的关系

为了确定混凝土的受压弹性模量,中国建筑科学研究院曾按照上述方法进行了大量的测定试验,试验结果如图 1.16 所示,经统计分析并得出弹性模量与立方强度的关系,弹性模量的计算公式为

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1.10)$$

根据弹性理论,弹性模量与剪变模量 G_c 之间的关系为

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\nu_c)} \quad (1.11)$$

式中: ν_c 为混凝土泊松比,我国《规范》取为 0.2,这样,我国《规范》经取整规定混凝土的剪变模量为 $G_c = 0.4E_c$ 。

《规范》所规定的各个强度等级的混凝土弹性模量,就是根据式 (1.11) 求得的。当应力较大,混凝土进入弹塑性阶段后,可应用变形模量或切线模量,不过切线模往往只用于科学研究中。另外,混凝土的弹性模量和变形模量,只有在混凝土的应力很低(例如 $\sigma_c \leq 0.2f_c$) 时才近似相等,故而材料力学对弹性材料的公式不能在混凝土材料中随便套用。

(5) 混凝土的受拉变形。混凝土受拉时的应力—应变曲线的形状与受压时的相似。当拉应力较小时,应力—应变关系近乎直线;当拉应力较大和接近破坏时,出于塑性变形的发展,应力—应变关系呈曲线形。如采用等应变速度加荷,也可以测得应力—应变曲线的下降段。

混凝土抗拉性能弱,其峰值的应力—应变要比受压时小很多。试件断裂时的极限应变与混凝土的强度等级、级配和养护条件等有关。强度等级愈高,则极限拉应变也愈大,一般在构件计算中,对于 C15~C40 强度等级的混凝土,其极限拉应变 ϵ_{tu} 可取为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-4}$ 。

根据我国试验资料,混凝土受拉时应力—应变曲线上切线的斜率与受压时基本一致,即两者的弹性模量相同。当拉应力 $\sigma_t = f_t$ 时,弹性系数 $\nu' = 0.5$,故相应于 f_t 时的变形模