

钢筋混凝土基本构件

北京建筑工程学院 编



地震出版社

钢筋混凝土基本构件

北京建筑工程学院 编

地震出版社

1987

内 容 提 要

本书系根据正在修订的《混凝土结构设计规范》的计算方法和最新的技术内容编写而成。

本书除绪论外共分九章,内容包括钢筋混凝土材料力学性能,基本设计原则,正截面抗弯、抗压弯、抗拉能力计算,斜截面和扭曲截面承载力计算,裂缝与变形验算以及预应力混凝土构件计算等。可供大专院校工业与民用建筑专业学生学习及工程技术人员参考之用。

钢筋混凝土基本构件

北京建筑工程学院 编

地震出版社出版

北京复兴路63号

航天工业部首机长虹印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 12印张 310千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷

印数 0001—12,000

ISBN 7-5028-0054-9/T·1 定价:2.90元

(书号: 15180·460)

前 言

钢筋混凝土结构是我国工程建设中应用量大、采用面广的一种结构。无论是单层房屋还是多层与高层建筑，钢筋混凝土结构已成为最基本的结构，掌握钢筋混凝土新的基本理论与设计方法，对于保证工程质量，提高设计水平具有重大意义。

我国新修订的《混凝土结构设计规范》不久将由国家正式颁发试行，新修订的规范与现行规范（TJ10-74）相比有一系列重大改变和实质性突破，有很大的充实提高和发展。本书编写的目的是为了大专院校工业与民用建筑专业学生学习和工程技术人员了解新规范内容参考。

本书根据最新修订的钢筋混凝土规范提出的设计方法，并参照有关资料编写而成。我们将过去的《钢筋混凝土与砖石结构》一书分成《钢筋混凝土基本构件》和《钢筋混凝土与砌体结构设计》两册分别出版。本书专门论述基本构件。

本书内容包括钢筋混凝土材料的力学性能，基本设计原则，以及弯、剪、扭、压、拉和预应力混凝土等构件的计算方法和基本理论。书中反映了规范最新的一些修改内容，文字力求精练，说理透彻，重点突出，贯彻少而精的原则。

参加本书编写的有罗维前（第一章），王世慧（第二章、第八章），阎兴华（第三章），何淅淅（第五章），周文芳（第六章、第七章），刘承瑞（绪论、第四章、第九章）。主编刘承瑞、周文芳。主审施岚青。

由于作者水平有限，编写过程中的缺点、错误在所难免，敬希读者指正。

编 者

一九八七年八月

目 录

前言	
绪论	(1)
第一章 钢筋混凝土材料的主要物理力学性能	(3)
第一节 混凝土	(3)
第二节 钢筋	(12)
第三节 钢筋与混凝土的粘结	(15)
第二章 钢筋混凝土结构基本设计原则	(18)
第一节 建筑结构的性能要求与极限状态	(18)
第二节 以概率论为基础的极限状态结构设计方法	(19)
第三章 受弯构件正截面承载能力计算	(28)
第一节 概述	(28)
第二节 钢筋混凝土梁正截面抗弯性能的试验研究	(30)
第三节 正截面抗弯能力计算的基本理论	(34)
第四节 单筋矩形截面抗弯能力计算	(41)
第五节 双筋矩形截面抗弯能力计算	(48)
第六节 T形截面抗弯能力计算	(54)
第四章 受弯构件斜截面承载能力计算	(61)
第一节 概述	(61)
第二节 试验研究	(61)
第三节 解决斜截面承载能力计算问题的途径	(66)
第四节 斜截面抗剪能力计算	(66)
第五节 斜截面抗弯能力	(74)
第六节 受弯构件的构造要求	(78)
第五章 扭曲截面承载能力计算	(82)
第一节 试验研究及基本理论简述	(82)
第二节 纯扭构件的承载能力计算	(85)
第三节 复合受扭构件的承载能力计算	(92)
第四节 抗扭构件的构造要求	(100)
第六章 钢筋混凝土受压构件	(101)
第一节 概述	(101)
第二节 轴心受压构件	(101)
第三节 偏心受压构件	(105)
第七章 钢筋混凝土受拉构件	(127)

第一节	轴心受拉构件.....	(127)
第二节	偏心受拉构件.....	(127)
第八章	钢筋混凝土构件裂缝与变形验算.....	(132)
第一节	受弯构件的抗裂弯矩.....	(132)
第二节	受弯构件变形验算.....	(133)
第三节	钢筋混凝土构件裂缝宽度验算.....	(139)
第九章	预应力混凝土构件的计算.....	(144)
第一节	预应力混凝土的基本概念.....	(144)
第二节	预应力混凝土构件的施工方法及锚夹具.....	(146)
第三节	预应力混凝土构件的材料.....	(149)
第四节	预应力钢筋的张拉控制应力及预应力损失.....	(150)
第五节	预应力混凝土轴心受拉构件的应力阶段.....	(156)
第六节	预应力混凝土轴心受拉构件使用阶段的计算.....	(160)
第七节	预应力混凝土轴心受拉构件施工阶段验算.....	(161)
第八节	预应力混凝土受弯构件的计算特点.....	(164)
第九节	预应力混凝土构件的构造要求.....	(168)
附 录		(174)

绪 论

一、钢筋和混凝土两种材料共同工作的必要性和可能性

顾名思义，钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种物理力学性能不同的材料所组成。为什么要把这两种材料结合在一起？它们能否共同工作，这就是我们学习钢筋混凝土基本构件之前必须首先回答的问题。

众所周知，混凝土是一种人造石料，它的抗压强度高，而抗拉强度很低（约为抗压强度的 $1/17-1/8$ ）。例如，一根跨度 1.8m 、截面 $b \times h = 100 \times 200\text{mm}$ 、混凝土等级为C20的素混凝土梁，当跨中受到一集中荷载 $P = 3.3\text{kN}$ 时就破坏了。其破坏原因是混凝土抗拉强度太低，造成梁过早破坏，而此时梁的受压区混凝土强度远远没有充分利用，于是人们就想到能否在梁的下部受拉区放进去一些抗拉强度较高的材料来抵抗拉力？人们曾用竹子、苇子等材料放在梁的受拉区，但是发现用钢筋最好，因为钢筋抗拉强度很高，抗压强度虽然也很高，但受压易失稳，钢筋和混凝土两种材料结合在一起，取长补短，各自发挥它们的优点，便成为一种新型建筑材料——钢筋混凝土。另一个问题是它们共同工作是否可能？实践证明是可能的，这就是首先两者间有良好的粘结力，混凝土与钢筋共同受力、变形而不分离滑移。其次两者有很接近的线膨胀系数，混凝土为 $1.0-1.5 \times 10^{-5}$ ，钢筋为 1.2×10^{-5} 。因此，不会因温度变化而破坏两者之间的粘结。此外，混凝土还可以保护钢筋不会生锈，这是因为水泥在水化过程中，使氢氧化钙电离，从而产生强烈的碱性反应，而钢在强碱中产生氧化铁钝化膜，具有抵抗氧化、防止腐蚀的能力，使钢筋不会生锈。曾有人调查，将上海、武汉50—70年前建造的钢筋混凝土结构凿开，包围在混凝土中的钢筋基本完好，没有生锈。

两种材料结合在一起构成钢筋混凝土，它们的结合也是有原则的，它们的原则就是把钢筋配置在构件的受拉区，例如连续梁跨中要将钢筋放在梁的下部，而支座处则要放在梁的上部。这个极其浅显的道理有人却往往违背，例如最常见的悬臂雨篷板、阳台板曾多次出现过将钢筋错放在板的下边（受压区），而造成倒塌事故。除了受弯构件在受拉区配置钢筋外，对于受压构件的柱子也往往配置钢筋，这是因为柱子很少为轴心受压，往往是轴力与弯矩共同作用，这样就需要钢筋承担拉力。另外，用一部分钢筋承担压力，可以减小柱子截面尺寸，增加延性，改善结构性能。

二、钢筋混凝土的优缺点

钢筋混凝土的优点是整体性好，抗震性能强，可就地取材，造价低廉，耐久性和耐火性好，节约钢材，可代替一些钢结构，可节约能源。例如，一根承受 1000kN 轴心受压的柱子，钢筋混凝土柱的能源消耗仅为承受同样荷载的钢柱所消耗能源的六分之一。

钢筋混凝土也有缺点，这就是自重大、制作费工、费时、抗裂性能差，隔音隔热效果不好。当然，这些缺点正在不断克服中。

三、钢筋混凝土的发展概况

与钢、木、砌体结构相比，钢筋混凝土最年轻，它的发展仅有一百多年的历史。然而，

由于它具有一系列显著的优点，百年来得到迅速的发展与应用。而有些结构，如原子能反应堆的安全罩则必须用钢筋混凝土建造。目前，世界上每年混凝土用量为二十多亿 m^3 ，且增长速度很快。目前世界上最高的建筑就是加拿大用预应力混凝土建造的549m高的电视塔。最高的高层建筑为美国芝加哥水塔广场大楼，高262m共76层。日本建造的预应力混凝土斜拉桥跨度达400m。原子能反应堆安全罩高70—100m，直径70—80m，钢筋混凝土厚5—6m，承受40—50个大气压。用钢筋混凝土建造的海上采油平台直径达138m，高170m。美国的空军基地跑道可承受B-52着陆轮压为1200kN。

我国早在1876年在唐山生产出第一窑水泥，但解放前钢筋混凝土发展缓慢。解放以后，在中国共产党领导下，特别是党的十一届三中全会以来，随着国民经济的发展，钢筋混凝土得到迅速的发展。我国的高层建筑，工业厂房绝大多数是采用钢筋混凝土建造。目前最高的钢筋混凝土高层建筑是深圳国际贸易中心，地下3层，地上50层，高160m。北京正在建造高380m的预应力混凝土电视塔，天津正在建造跨度为260m的永和公路预应力混凝土斜拉式大桥。目前我国生产的预应力混凝土电杆和轨枕已居世界第二位。在理论研究方面也取得很大成就，一些科研成果已达到国际先进水平。我国新修订的《混凝土结构设计规范》与现行的《钢筋混凝土结构设计规范》相比，有较大的提高和发展。

钢筋混凝土结构是我国工程建设中应用最广泛的一种结构。掌握钢筋混凝土的受力特点及计算理论，无论从事设计还是施工都是必要的。我们将继续加强科学研究，在材料性能、施工技术和理论研究方面，不断有所创新，以适应四个现代化的需要。

第一章 钢筋混凝土材料的主要物理力学性能

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种性能不相同的建筑材料组合而共同工作的组合材料。为学习钢筋混凝土结构的需要，本章就这两种材料的主要物理力学性能作必要的介绍，有些性能将在以后各章再作补充。

第一节 混 凝 土

一、混凝土的强度

(一) 立方强度与强度等级 混凝土是由水泥、水、粗细骨料按一定比例配合经搅拌后在一定的温度环境里养护硬化而成的人工石材，它与天然石材有共性即抗压强度很高，而抗拉强度低。为测定混凝土的强度，我国规范规定用边长150mm的标准立方体试块在温度为 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、相对湿度大于90%的环境里养护28天后将试块放在压力机上以 $0.15-0.20\text{N/mm}^2\cdot\text{s}$ 压应力速度将试块压至破坏，破坏时测得的平均压应力值定为混凝土的立方抗压强度，简称立方强度，其单位为 N/mm^2 ，用符号 f_{cu} 表示。为适应结构设计的需要，《混凝土结构设计规范》将混凝土的强度分为C7.5、C10、C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55及C60等12个强度等级。《规范》要求钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不宜低于C15，当采用Ⅱ级钢筋时，混凝土强度等级不宜低于C20，等等。设计者可以参照《规范》要求及具体情况选用不同强度等级的混凝土。

立方体试块的破坏有以下两种形式，如图1-1所示。图1-1a为压力机承压钢板与立方体试块之间不涂润滑剂的破坏情形。由于压力机上下承压钢板与试块直接接触，二者之间存在有摩擦，同时承压钢板的弹性模量又比混凝土大5—10倍，因此，在混凝土试块受压时在接触面处混凝土的横向变形受到约束，这种约束好似在试块上下端各设置一道箍限制混凝土的自由横向变形（横向变形如图1虚线所示），试块被压坏时，形成上下两个棱锥体。如果在压力机承压钢板与试块间涂润滑剂，这样试块受压后能较自由地横向变形，破坏时试块出现竖直裂缝（图1-1b），同时强度也较低。《规范》中的立方强度是指不涂润滑剂的强度。

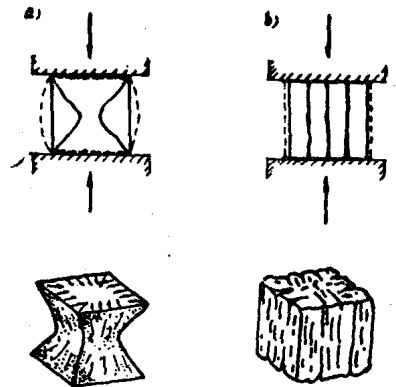


图 1-1

立方强度也可以用边长为200mm或100mm的立方体试块测定。通过试验统计对比边长200mm立方体的强度需乘以换算系数1.05后，可换算为边长150mm标准立方体试块的强度，边长100mm的试块换算系数为0.95。这种由于尺寸不同而得到不同的强度，称为尺寸效应。

立方强度是用以测定混凝土的强度，它是强度等级的标志。同时也是测定混凝土各种力

学性能指标的基本代表值，而实际工程中，很少有这种立方体结构，所以，设计时不能直接采用这个强度。

有些国家采用高度与直径之比为2的圆柱体试块，来测定混凝土的抗压强度，它的强度称为圆柱体抗压强度。

(二) 混凝土的轴心抗压强度(棱柱体抗压强度) 在钢筋混凝土结构中受压构件均为棱柱体，为了测定棱柱体抗压强度与立方体试块抗压强度间的关系，通常采用 $150 \times 150 \times 450\text{mm}$ 或 $100 \times 100 \times 300\text{mm}$ 的棱柱体与同尺寸、同条件下制作的立方体试块进行对比抗压试验。试验如图1-2所示。

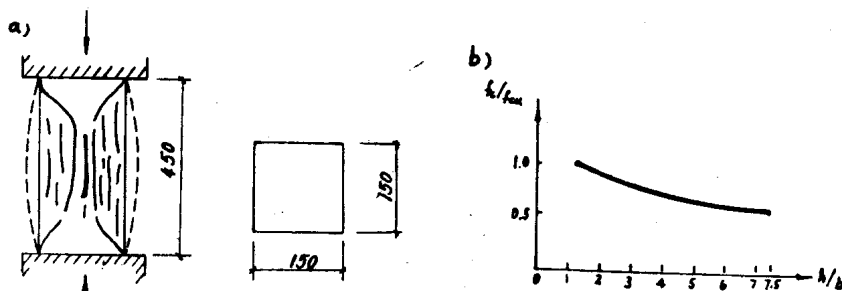


图 1-2

图1-2 a的棱柱体试件受压的破坏情况，说明在远离试件上下两端由于压力机承压钢板与试件间摩擦等的影响逐渐消失而形成纯压状态。故破坏时除上下两端外，中间部分可以自由横向变形，因此出现竖直裂缝，破坏时的强度要低于立方体强度。图1-2 b为棱柱体高度 h 与截面尺寸 b 比值(h/b)不同时，强度的变化关系。棱柱体的高度越大，它的强度越低。当比值 h/b 达到3—4倍时，强度趋于不再降低，故一般取 $h/b = 3$ —4倍的棱柱体的抗压强度作为混凝土的轴心抗压强度，用符号 f_c 表示，单位为 N/mm^2 。

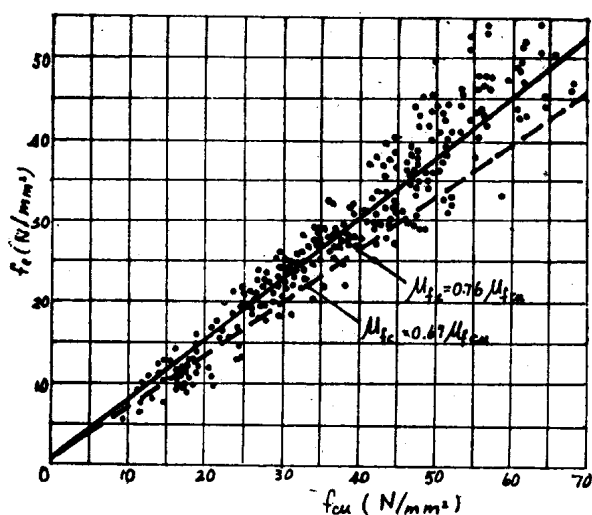


图 1-8

通过大量试验，混凝土轴心抗压强度的统计平均值 μ_{fc} 与标准立方体试块强度的统计平均值 μ_{fcu} 如图1-3，即：

$$\mu_{fc} = 0.76 \mu_{fcu} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1-1)$$

考虑到结构中混凝土与试件强度之间的差异，根据以往的经验，并结合试验数据分析，以及参考其他国家的有关规定，对试件强度进行修正，修正系数为0.88，经修正后混凝土轴心抗压强度平均值为：

$$\mu_{fc} = 0.88 \times 0.76 \mu_{fcu} = 0.67 \mu_{fcu} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1-2)$$

对于强度等级高的混凝土破坏时出现明显的脆性性质，故对C50、C55及C60强度等级混凝土的轴心抗压强度还应分别再乘以0.95、0.925及0.9的折减系数。

(三) 混凝土的抗拉强度 混凝土的抗拉强度很低,约为立方抗拉强度的 $1/17 \sim 1/8$ 。要测得轴心抗拉强度是比较困难的,因为试验时较小的偏心或者混凝土内部构造的不均匀性等因素都会对试验结果有较大的影响。我国目前试验的方法是采用 $100 \times 100 \times 500\text{mm}$ 的棱柱体试件,在试件两端对中预埋变形钢筋,埋入长度各 150mm ,试验时对中张拉钢筋,试件中间不配钢筋部分为混凝土纯拉区,拉断时的极限拉应力定为混凝土的轴心抗拉强度,用符号 f_t 表示,单位为 N/mm^2 ,如图 1-4。这种试验方法对试件的尺寸及钢筋对中等的要求均较严。

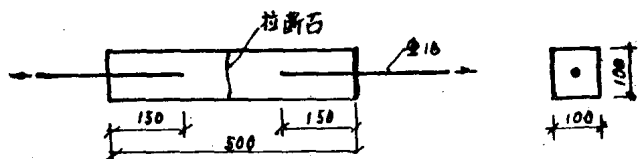


图 1-4

另一种试验方法为混凝土的劈拉试验,试件为立方体试件或圆柱体试件,试验是在试件的上下中间部分设置 $5 \times 5\text{mm}$ 的方形钢筋垫条,对钢垫条施加均匀压力,由弹性力学得知,在试件中间竖直截面上,除垫条施力点附近很小范围内为压应力外,其他部分为均匀受拉。图 1-5c 为圆柱体试件的应力图形。当拉应力达到混凝土抗拉强度时,试件将沿中间截面被劈拉为两部分而破坏。

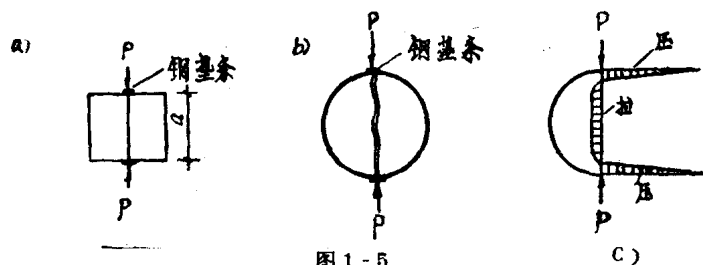


图 1-5

混凝土的劈拉强度为:

$$f_t^s = \frac{2P}{\pi dL},$$

式中 P 为破坏荷载, d 为立方体试件的边长尺寸或圆柱体的直径。 L 为立方体试件边长尺寸或圆柱体长度。

混凝土棱柱体的抗拉强度的统计平均值 μ_{f_t} 与立方体强度的关系为

$$\mu_{f_t} = 0.26 (\mu_{f_{cu}})^{2/3} \text{N/mm}^2. \quad (1-8)$$

图 1-6 为试验结果。与混凝土抗压强度相同,取试件强度的修正系数为 0.88,经修正后混凝土抗拉强度的平均值为:

$$\mu_{f_t} = 0.88 \times 0.26 (\mu_{f_{cu}})^{2/3} = 0.23 (\mu_{f_{cu}})^{2/3} \text{N/mm}^2. \quad (1-4)$$

强度等级为 C50, C55 及 C60, 混凝土的抗拉强度也需分别乘以 0.95, 0.925 及 0.90 的折减系数。

(四) 混凝土的复合受力强度 在钢筋混凝土结构中,混凝土很少处于单轴受力状态,而多数情况是处于多轴受力状态,即复合受力状态。由于混凝土材料性能的特点,复合受力状态下混凝土的强度理论至今仍处于试验研究中。图 1-7 为双轴受力状态下混凝土强度试验曲线。图中第一象限为双轴受拉区,应力 σ_1 与 σ_2 相互影响不大;第三象限为双轴受压区,指出混凝土的强度随应力 σ_1 与 σ_2 的比值不同的变化规律。此时,一个方向的压应力增大,另一方向的强度得到提高。试验表明双轴受压混凝土的强度要比单轴受压提高 25% 左右。最大的双轴抗压强度不是发生在 $\sigma_1 = \sigma_2$, 而是发生在 σ_1/σ_2 为 2 或 0.5 时。第二、四象限为拉压区,

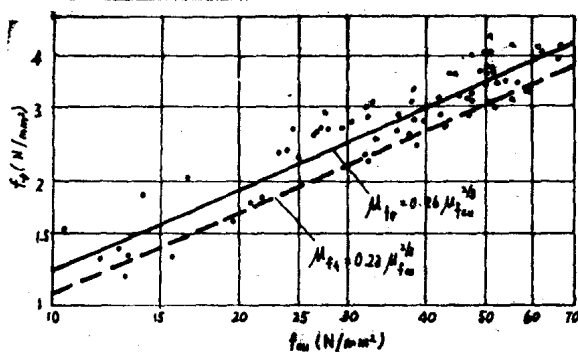


图 1-6

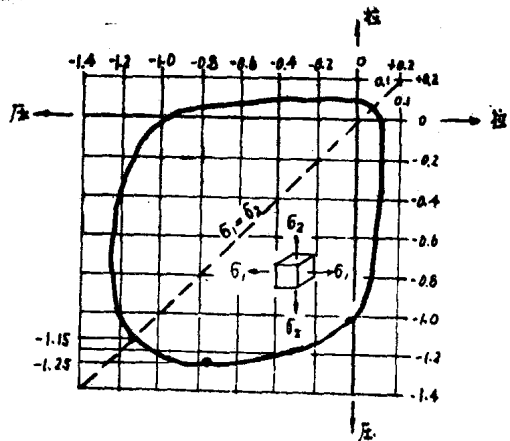


图 1-7

即一个方向受拉，另一方向受压。这时，不论是受拉强度或受压强度均低于单轴受力时的强度。

混凝土三轴受压可以通过圆柱体试件进行试验。试验通过对圆柱体侧向施加压应力 σ_2 ，

然后在圆柱体顶面加压力，直至破坏。由于压应力 σ_2 约束了圆柱体侧向变形从而提高了混凝土的抗压强度。从试验结果得到如下的经验公式，即

$$f_1 = f_c + 4.1\sigma_2$$

式中 f_1 为混凝土三轴受压时的强度； f_c 为混凝土轴心受压强度； σ_2 为对圆柱体周围施加的压应力，如图 1-8 所示。

在钢筋混凝土构件的截面上同时作用有剪应力 τ 以及轴向应力 σ 时，形成剪压或剪拉的复合应力。图 1-9 为混凝土在剪压或剪拉复合应力下的试验曲线。试验结果指出，混凝土的

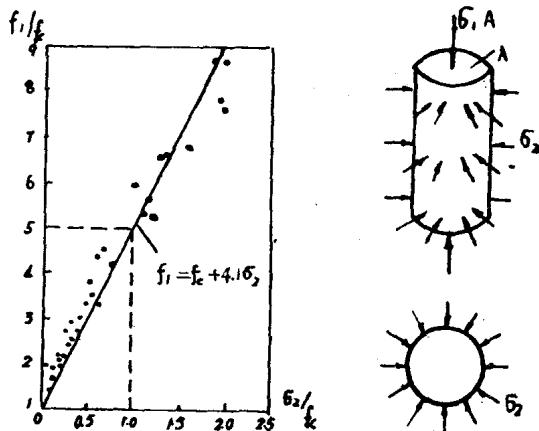


图 1-8

抗剪强度随拉应力的增大而减小，当拉应达到抗拉强度时，抗剪强度为零；同时抗剪强度又随压应力的增大而提高，当压应力为 $0.6-0.7f_c$ 时，抗剪强度达到最大值，以后又随压应力继续增大而降低，当压应力达到抗压强度时，抗剪强度降到零。

混凝土复合受力状态下的强度理论由于材料的特性至今还未建立起比较完整的强度理论，在很大程度上仍然依靠试验得出的经验公式。

二、混凝土的变形性能

混凝土的变形可分为在荷载作用下的变形和与荷载无关的变形。前者包括在一次短期荷载下的变形，长期荷载下的变形以及重复荷载下的变形。后者为混凝土的体积变形，包括混

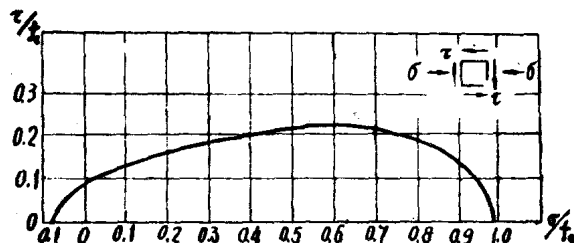


图 1-9

凝土的收缩变形及温度变形等。

(一) 混凝土在一次短期荷载下的应力应变关系 混凝土是由水泥、水、粗细骨料按适当的比例配合经搅拌后制成的混合物，并经一定时间的养护硬化而成的人造石材。在硬化过程中，由于水泥石收缩、骨料下沉等因素，水泥石与骨料接触面上形成微小的裂缝（图 1-10a）。当荷载较小（约在破坏荷载的30%以下），由于压应力较小，试件虽产生纵向压缩和横向膨胀，但水泥石及骨料均处在弹性变形阶段而应力与应变呈直线关系，初始微裂缝无发展。当荷载继续加大，由于水泥石胶凝体发生塑性变形，使水泥石与骨料间的变形不协调，使得初始微裂缝伸长和加宽并出现新裂缝（图 1-10b），混凝土的应力应变已偏离直线关系，应变的增长较应力快。只要应力不再增大，裂缝也不再继续发展与增多。已有的微裂缝处于稳定状态。压应力约为极限强度的50%左右，再继续增大荷载，骨料表面的裂缝进一步扩大、伸长，并且相互贯穿砂浆而连通，当压应力达到极限强度的75%—85%左右，裂缝的发展进入不稳定状态（图 1-10c），即使荷载不再增大，裂缝也会逐渐发展，试件横向变形明显加快，在接近破坏时，竖向裂缝将混凝土试件分割成若干小柱，最后混凝土被压坏（图 1-10d）。

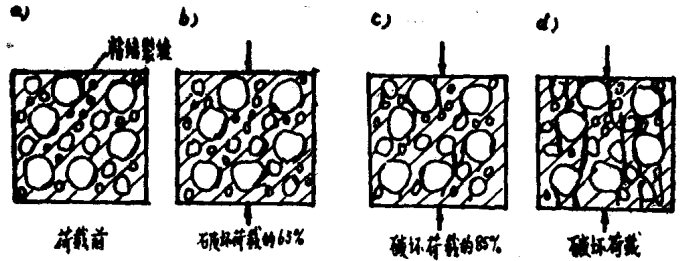


图 1-10

从上述对混凝土从加荷载开始到试件被压坏说明，只有在压应力较小时微裂缝才处在稳定不发展的状态，当压应力稍高以后，裂缝将发展、伸长，并出现新的裂缝，最后由于这些裂缝互相贯穿连通，将试件分割成若干小柱，直到混凝土破坏。因此，只要能限制混凝土内部裂缝的发展，就可以提高混凝土的强度。混凝土棱柱体抗压强度为什么低于立方体抗压强度，及以混凝土复合抗压强度为什么高于单轴抗压强度，由上述现象可得到解释。

混凝土在一次短期荷载下的应力应变关系曲线如图 1-11所示。图 1-11a中OC段为受压时应力应变的上升段，C点以后为下降段。试验取棱柱体试件，加荷载从零开始，当压应力较小时（ $\sigma < 0.3f_c$ ）混凝土表现为理想的弹性性质，即应力应变为直线关系，如卸去荷载，应变能恢复到零，即混凝土内部的微裂缝未发展。随着荷载的加大（ σ 在 $0.3f_c$ — $0.8f_c$ 之间），由于初始的微裂缝加宽、伸长并出现新的裂缝，此时应变增长大于应力增长，故应力应变曲线由OA段的直线关系发展为AB段的非直线关系。此时如卸去荷载，应变将不能恢复至零（如图 1-11b），卸荷后立即恢复的弹性应变 $\epsilon_{e.}$ ，停留一段时间才逐渐恢复的应变 $\epsilon_{e.}$ ，称为弹性后效，最后将残留一部分不能恢复的塑性应变 $\epsilon_{p.}$ 。当压力继续加大，达到压应力 σ 为 $0.8f_c$ — $1.0f_c$ ，由于混凝土内部的裂缝发展已进入不稳定状态，应变增长进一步加

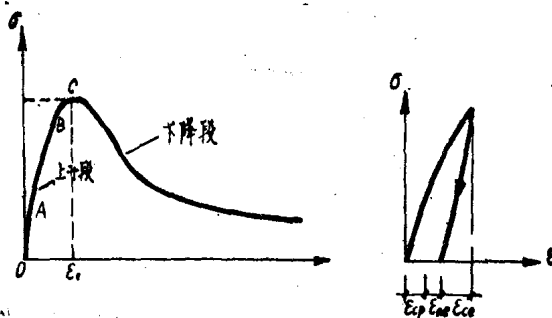


图 1-11

力应变曲线由OA段的直线关系发展为AB段的非直线关系。此时如卸去荷载，应变将不能恢复至零（如图 1-11b），卸荷后立即恢复的弹性应变 $\epsilon_{e.}$ ，停留一段时间才逐渐恢复的应变 $\epsilon_{e.}$ ，称为弹性后效，最后将残留一部分不能恢复的塑性应变 $\epsilon_{p.}$ 。当压力继续加大，达到压应力 σ 为 $0.8f_c$ — $1.0f_c$ ，由于混凝土内部的裂缝发展已进入不稳定状态，应变增长进一步加

快，当应力达到抗压强度极限 f_c （即图中的C点），混凝土的承载能力开始下降。如果能逐渐的卸荷，试件还能承受一定的荷载，因此应力应变曲线可分为上升段（即OC段）及下降段（即C点以后）。下降段的取得要求压力机有足够大的刚度。这样在试件达到抗压强度极限 f_c 时，压力机释放出的弹性能才不致使试件破坏。

不同强度等级混凝土达到轴心抗压强度极限时的应变 ϵ_0 值一般在0.002左右，计算时取值 $\epsilon_0 = 0.002$ 。

混凝土受拉时应力应变曲线也可分为上升段与下降段。当拉应力达到抗拉强度极限 f_t 时，其应变值 ϵ_t 为0.00015—0.00020，计算时通常取值 $\epsilon_t = 0.00015$ 。

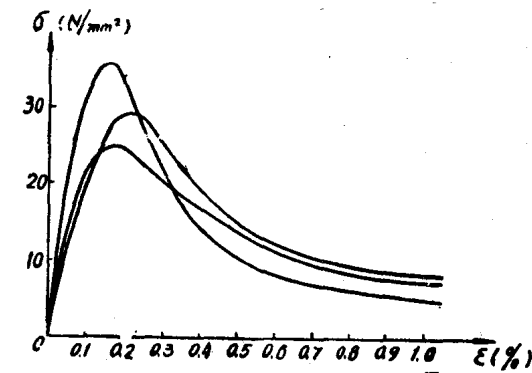


图 1-12

混凝土受压（或受拉）应力应变的上升段及下降段统称应力应变全曲线。不同强度等级混凝土应力应变全曲线如图 1-12 所示。强度等级低的下降段较平缓，强度等级高的下降段开始较陡，以后逐渐平缓。

（二）混凝土在多次重复荷载作用下的应力应变关系 混凝土棱柱体在一次短期荷载作用下的应力应变曲线如图 1-11b 所示。图中加

荷时应力应变曲线凸向于应力轴，卸荷时应力应变曲线凸向于应变轴。混凝土棱柱体在多次重复荷载作用下的应力应变曲线如图 1-13 所示。加荷应力 σ_1 如小于混凝土的疲劳强度，经若干次加卸荷载后，应力应变将由曲线变为直线（图 1-13a），此后混凝土将按弹性性质工作，虽经几百万次循环加卸荷载也不会破坏。如果加荷应力 σ_1 超过混凝土的疲劳强度，经若干次加卸荷载后，应力应变也将由曲线变为直线，但再继续加卸荷载应力应变曲线将向反方向弯曲，变形并不断增加（图 1-13b），试件很快破坏，这说明混凝土已疲劳。通常取试件循环加卸荷载二百万次或稍多的次数而发生破坏的压应力称为混凝土的疲劳强度。混凝土的疲劳强度用符号 f_c^f 表示。

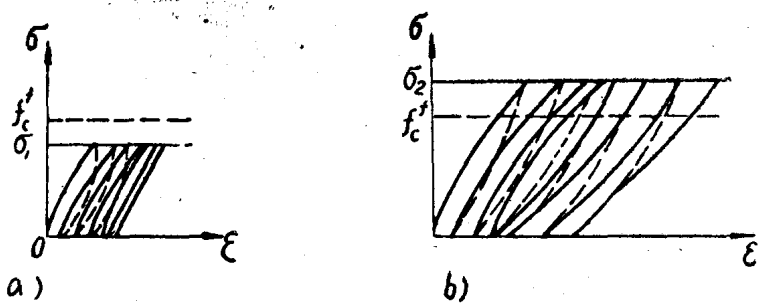


图 1-13

三、混凝土的徐变——混凝土在长期荷载作用下的应变性能

混凝土在长期不变荷载持续作用下，随时间而增长的变形称为徐变。从试验结果表明徐变的发展是先快后慢，前 4 个月徐变增长很快，6 个月可达最终徐变量的 70%—80%。以后逐渐变慢。第一年可完成 90% 左右，其余部分以后几年逐渐完成。最终徐变量通常可达初始弹

性压应变的2—4倍。

图1-14为长期不变荷载持续作用下变形与时间的关系曲线。图中 $\epsilon_{e.}$ 为加荷时立即出现的瞬时变形(亦称弹性变形), $\epsilon_{c.}$ 为随时间而增长的徐变,它的发展随时间的增长先快后慢。如

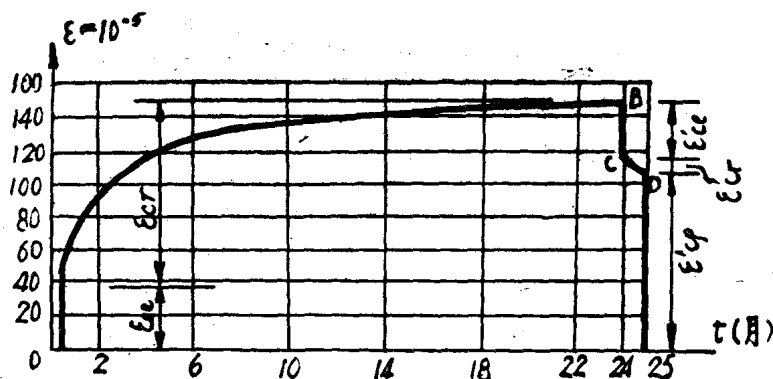


图1-14

在荷载作用一段时间后(图中为24个月),卸去全部荷载,有一部分瞬时变形 $\epsilon'_{e.}$ 立即恢复,另一部分徐变变形 $\epsilon'_{c.}$ 将经过一段时间(约20天)逐渐恢复,称为弹性后效,最后剩下不能恢复的残余变形 $\epsilon'_{c.p.}$ 。

影响混凝土徐变的因素是多方面的,可以归纳为:

(一)混凝土材料的影响 在水灰比不变的条件下,水泥用量越多,徐变量越大;在水泥用量不变的条件下,水灰比越大,徐变量越大。

在混凝土中,骨料所占的比例越高,骨料弹性模量越高,徐变量越小。

(二)环境的影响 在受荷载前混凝土养护时的温度越高,湿度越大,徐变量越小。故采用蒸气养护,可使徐变量减小约20%—25%。受力后,环境的温度越高,徐变就越大。环境相对湿度越低,徐变也就越大。

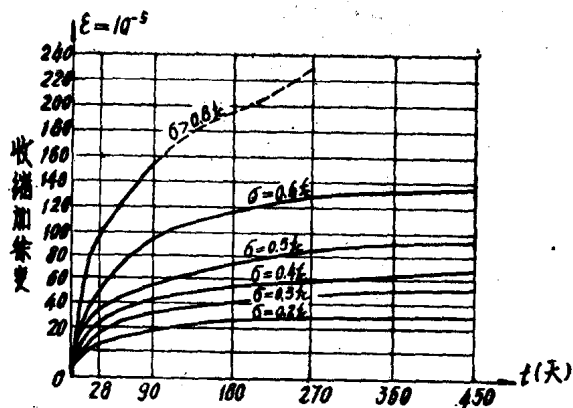


图1-15

(三)应力大小的影响 试验表明,如图1-15所示,在压应力不超过 $0.5f_c$ 范围内,徐变与应力大致成线性关系,称为线性徐变。随着时间的增长,徐变最终趋近于某一定值,故徐变是收敛性的。如应力超过 $0.55-0.6f_c$ 后,徐变的增长速度大于应力增长速度,虽然仍是收敛性的,但随应力增高收敛性越来越差,称为非线性徐变。当应力超过 $0.8f_c$ 后,徐变为非收敛性。在这种情况下徐变的发展最终

将导致混凝土的破坏。因此,在长期荷载持续作用下取压应力为 $0.8f_c$ 为混凝土长期抗压强度。

另外,加荷载速度越慢,由于徐变能充分发展,相应混凝土的强度也越低(如图1-16)。混凝土体积越大,徐变越小。

混凝土产生徐变的原因有各种不同的假说;一种意见认为是混凝土内部微裂缝发展造成,

另一种意见认为是混凝土内部颗粒间水分迁移,即渗出假说。至今关于徐变的机理仍在研究中。

混凝土的徐变对钢筋混凝土构件的受力性能有重要影响。它可以增大构件的变形,使钢筋混凝土梁挠度加大,在较细长的偏心受压构件,可以增大偏心,降低构件的承载力。在预应力混凝土中将使预应力钢筋应力产生损失等等。

四、混凝土的弹性模量和变形模量

混凝土一次短期荷载下的应力应变曲线如图 1-17 所示,只有在应力较小时二者间才接近直线关系。当应力超过强度极限的 0.3—0.5 f_c 后,应力应变就逐渐偏离直线,按曲线变化。

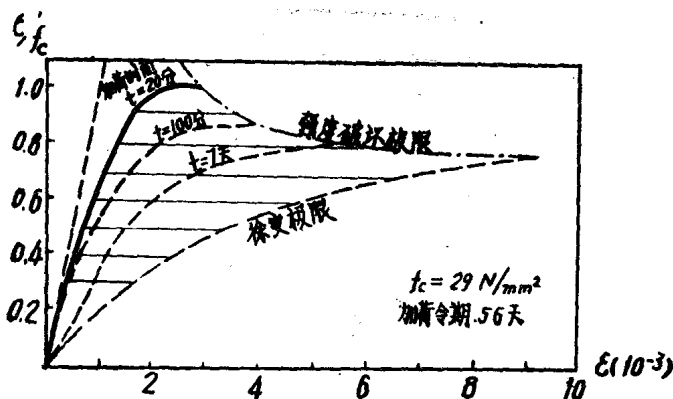


图 1-16

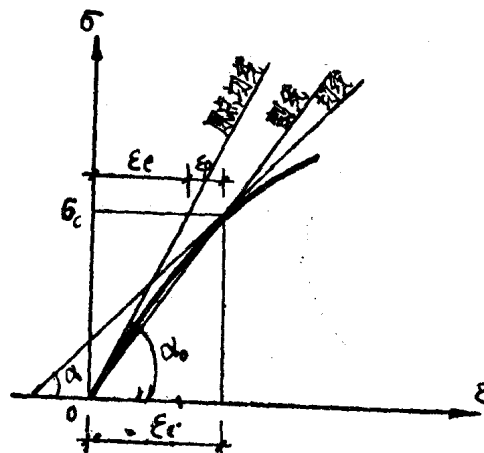


图 1-17

混凝土的弹性模量用通过应力应变曲线原点切线的斜率表示,即 $E_0 = \tan \alpha_0$ (E_0 亦称初始弹性模量),但是混凝土在一次加荷下的初始弹性模量是不易精确测定的。

《规范》中规定的混凝土弹性模量取值方法是通过棱柱体轴心受压试件在应力 $\sigma_0 = 0.5f_c$ 时重复加卸荷载 10 次取得的。由于混凝土每次加荷后卸荷至零,除一部分弹性变形恢复外,还有一部分残余变形保留,随着重复次数的增多,残余变形逐渐减小,经过 5—10 次后,变形趋于稳定,应力应变曲线趋近于直线(图 1-18)。

《规范》中规定弹性模量的取值就是取应力 $\sigma_0 = 0.5f_c$,重复加卸荷载 10 次时应力应变直线的斜率作为混凝土弹性模量取值的依据。通过大量试验测定,经回归分析,混凝土弹性模量与立方强度的关系为:

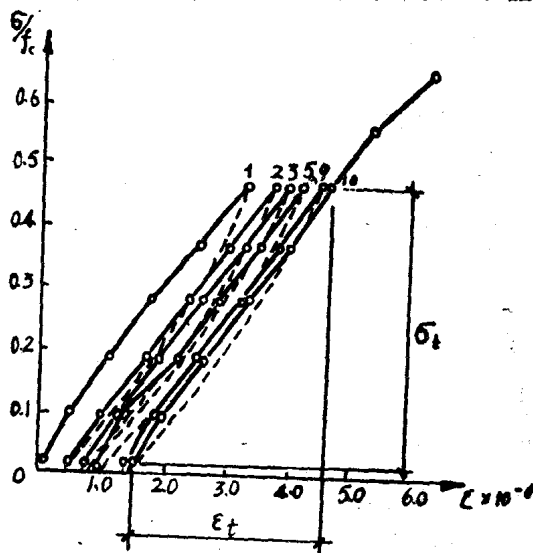


图 1-18

$$E_0 = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}} \quad (\text{N/mm}^2).$$

不同强度等级混凝土弹性模量值见附录附表 8。

混凝土的切线模量可取

$$G_c = 0.4 E_c.$$

当应力较大时,混凝土的应力应变由线性关系逐渐变为曲线关系。在曲线上任一点 a (相对应的应力为 σ ,图 1-17),过 a 点作该曲线的切线,其应力增量与应变增量的比值称为应力 σ 处混凝土的切线模量。即

$$E_c'' = \operatorname{tg} \alpha$$

$$\text{或 } E_c'' = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}.$$

混凝土切线模量是一个变值,它将随混凝土应力的增大而减小。这种表达方法通常只用于科学研究。

当混凝土应力较大时,在应力应变曲线上任一点 a ,连接原点 o 与 a 点连线 oa 的斜率称为 a 点对应应力 σ 处的割线模量或称变形模量,即:

$$E_c' = \operatorname{tg} \alpha_0'$$

混凝土的变形模量是一个变值,它随混凝土应力的增大而减小。混凝土变形模量与弹性模量的关系为:

$$E_c' = \operatorname{tg} \alpha_0' = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \nu E_c,$$

式中 ν 为混凝土受压时的弹性系数,它随应力增大而减小,约为1.0—0.4。通常,当 $\sigma \leq 0.3f_c$ 时,可近似取 $\nu = 1.0$, $\sigma = 0.5f_c$ 时,平均值 $\nu = 0.85$,当 $\sigma = 0.8f_c$ 时, ν 平均为0.65,当 $\sigma = f_c$ 时,平均为0.5。

《规范》规定混凝土受拉时的弹性模量同受压时的弹性模量。受拉时的弹性系数 ν_t ,在混凝土即将出现裂缝时取 $\nu_t = 0.5$ 。

五、混凝土的收缩

混凝土在空气中结硬时,体积减小,称为混凝土收缩。在水中结硬体积膨胀。收缩远大于膨胀。混凝土收缩时随时间增长而增大。初期收缩变形发展较快(图 1-19),两周后完成总收缩量的25%,一个月约可完成50%,三个月后增长缓慢,二年后趋于稳定,最终收缩值可在 $(2-5) \times 10^{-4}$ 之间。

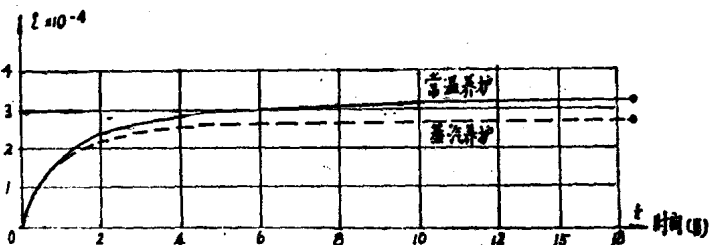


图 1-19

混凝土的收缩一般认为由凝缩和干缩两部分所组成。凝缩是凝胶体本身的体积收缩。其影响因素有:水泥用量不变,水灰比越大,收缩越大;水灰比不变,水泥用量越多,收缩越大;骨料的级配好、密度大、弹性模量高、粒径大,可减小收缩。这是因为粗骨料所占体积比越大、强度越高,骨料对凝胶体收缩的制约作用就越大。干缩是混凝土失水产生的体积收缩。影响的因素有:水灰比越大,收缩越大;养护条件越好,收缩越小;高温、高湿养护可加快水泥的水化作用,减少混凝土中的自由水分,故可减少收缩。使用环境的温度高、湿度