

Water Supply and Drainage Engineering

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



GEISHUI PAISHUI GONGCHENG JIEGOU

给水排水工程结构

程选生 主编
曲晨 张建文 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Water Supply and Drainage Engineering

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



GEISHUI PAISHUI GONGCHENG JIEGOU

给水排水工程结构

主 编 程选生
副主编 曲 晨 张建文
编 写 王春青
主 审 赵 均 董宏英



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十一五”规划教材。全书共分十一章,内容包括绪论,钢筋混凝土材料的力学性能,工程结构的设计方法,钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算,钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算,钢筋混凝土受压构件及基础设计,受拉构件承载力计算,钢筋混凝土构件的挠度、裂缝和混凝土结构的耐久性,钢筋混凝土梁板结构设计,钢筋混凝土贮液结构设计,砌体结构的基本理论,中小型地上式泵房的结构设计等。

本书是按照现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》(GB 50032—2003)、《建筑结构荷载规范》(GB 5009—2001)、《给水排水工程构筑物结构设计规范》(GB 50069—2002)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)和《砌体结构设计规范》(GB 50003—2001)编写的,在保证课程体系完整的基础上,注重加强基本理论、基本技能和基本知识的训练。文字通俗流畅,注重实际应用。

本书可作为给水排水工程专业本科教材,也可作为同类专业专科教材,还可作为给水排水专业技术人员和土建类工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

给水排水工程结构/程选生主编. —北京:中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5291 - 6

I. 给... II. 程... III. ①给水工程—工程结构—高等学校—教材②排水工程—工程结构—高等学校—教材

IV. TU991

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 037973 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)
航远印刷有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2007 年 6 月第一版 2007 年 6 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 22 印张 539 千字
印数 0001—3000 册 定价 36.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。

本书为普通高等教育“十一五”规划教材,是根据全国高等学校土建类专业本科教育的培养目标和培养方案编写的,是给水排水工程的一门专业基础课。

本书在编写过程中,贯彻《中国教育改革和发展纲要》的精神,本着“厚基础、重能力、求创新、以培养应用型人才为主”的总体思路,在保证课程体系完整的基础上,注重加强基本理论、基本技能和基本知识的训练。做到以教学为主,内容精练、删繁就简,文字力求通俗流畅、注重实际应用。

本书是根据我国现行的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》(GB 50032—2003)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)、《给水排水工程构筑物结构设计规范》(GB 50069—2002)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)和《砌体结构设计规范》(GB 50003—2001)等编写的,共分十一章,主要内容包括绪论,钢筋混凝土材料的力学性能,工程结构的设计方法,钢筋混凝土受弯、受剪、受压、受拉的承载力计算,钢筋混凝土柱下基础设计,挠度和裂缝计算,混凝土结构的耐久性设计,钢筋混凝土梁板结构设计及贮液结构的设计,砌体的力学性能,砌体构件的计算理论和一般中小型地上式泵房的设计要点等。

本书绪论、第八章的四~六节及第九章,由兰州理工大学程选生编写;第一章、第十章和第十一章,由兰州理工大学王春青编写;第二章、第七章、第八章的一~三节,由南阳理工学院张建文编写;第三~六章,由浙江科技学院曲晨编写。全书由程选生主编,由北京工业大学赵均、董宏英主审。此外,中石化宁波工程有限公司刘晓科、周新及兰州理工大学研究生史晓宇做了许多前期准备工作,在此对他们表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中缺点和错误在所难免,敬请读者不吝指正。

编 者

2006年10月

目 录

前言	
绪论	1
第一篇 钢筋混凝土的基本理论	
第一章 钢筋混凝土材料的力学性能	3
第一节 混凝土	3
第二节 钢筋	15
第三节 钢筋和混凝土的共同作用	19
第二章 工程结构的设计方法	25
第一节 近似概率理论的极限状态设计方法	25
第二节 承载力极限状态的设计方法	29
第三节 正常使用极限状态的验算方法	31
第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	34
第一节 受弯构件的截面构造规定	34
第二节 梁正截面受弯承载力的试验研究	37
第三节 单筋矩形截面受弯承载力计算	40
第四节 双筋矩形截面受弯承载力计算	46
第五节 T形截面受弯承载力计算	50
第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	56
第一节 斜截面破坏形态及受力特点	56
第二节 斜截面受剪承载力计算公式	62
第三节 保证斜截面受弯承载力的措施	67
第四节 钢筋有关构造规定	71
第五章 钢筋混凝土受压构件及基础设计	76
第一节 受压构件的构造要求	76
第二节 轴心受压构件承载力计算	77
第三节 偏心受压构件	80
第四节 钢筋混凝土独立基础设计	96
第六章 受拉构件承载力计算	103
第一节 轴心受拉构件正截面承载力计算	103
第二节 偏心受拉构件正截面承载力计算	105
第三节 偏心受拉构件斜截面承载力计算	108
第四节 受拉构件构造要求	110
第七章 钢筋混凝土构件的挠度、裂缝和混凝土结构的耐久性	111
第一节 钢筋混凝土受弯构件的挠度验算	111

第二节	钢筋混凝土受弯构件的裂缝宽度验算	119
第三节	混凝土结构的耐久性	125

第二篇 钢筋混凝土的结构设计

第八章	钢筋混凝土梁板结构设计	132
第一节	概述	132
第二节	现浇单向板肋梁板结构	133
第三节	现浇双向板肋梁板结构	158
第四节	圆形平板结构	162
第五节	整体式无梁板结构	169
第六节	板上开洞的构造处理	180
第九章	钢筋混凝土贮液结构设计	182
第一节	贮液结构的结构型式	182
第二节	贮液结构荷载	184
第三节	地基承载力及抗浮稳定性验算	188
第四节	钢筋混凝土圆形贮液结构设计	189
第五节	钢筋混凝土矩形贮液结构设计	221

第三篇 砌体结构的设计简介

第十章	砌体结构的基本理论	259
第一节	砌体构件的力学性能	259
第二节	无筋砌体构件的承载力计算	266
第十一章	中小型地上式泵房的结构设计	275
第一节	中小型地上式泵房的组成	275
第二节	墙、柱和基础的结构设计	276
第三节	过梁和圈梁	283
附录		287
附录 1	混凝土和钢筋的强度值	287
附录 2	混凝土和钢筋的弹性模量	289
附录 3	等截面等跨连续梁在常用荷载作用下的内力系数表	289
附录 4	矩形板在均布荷载作用下静力计算表	298
附录 5	矩形板在三角形荷载作用下静力计算表(符号说明同附录 4)	302
附录 6	圆形平板的弯矩系数($\mu = \frac{1}{6}$)	307
附录 7	有中心支柱圆板的内力系数	307
附录 8-1	圆形贮液结构柱壳内力系数表	309
附录 8-2	双向受力壁板在壁面温差作用下的弯矩系数	338
附录 8-3	四边支承双向板的边缘刚度系数及弯矩传递系数	339
附录 8-4	双向板的边缘反力	340
参考文献		344

绪 论

给水排水工程的生产流程一般是由各种功能的构筑物（诸如泵站、贮液结构等）和辅助建筑用管线和沟渠联系而成。其中建筑物和构筑物的结构部分占有相当的建设投资，而结构设计的质量直接关系到给水排水工程的安全性、适用性和耐久性。

贮液结构不仅在给水排水工程中应用广泛，而且还应用于石油、化工、铁路等各种工业企业，主要用于储存清水、污水、石油、化学液体等。这种结构一旦失效，不但会影响企业的正常生产，而且往往会产生很大的次生灾害，甚至引发严重的环境灾害。因此，如何提高贮液结构的经济合理性和可靠性，已成为结构计算的一项迫切任务。结构设计的任务就是要根据技术先进、经济合理、安全适用和确保质量的原则，合理地选择材料和结构的型式，进行结构的布置，确定结构构件的截面和构造等。

同建筑物相比，给水排水工程结构的构筑物具有使用要求、结构型式、作用荷载及施工方法等方面的特殊性。在使用要求上，它对抗裂、抗渗漏、防冻保温及防腐等有较严格的要求；在结构型式上，它一般是比较复杂的空间薄壁结构；在荷载方面，除考虑重力荷载，风、雪荷载，水压力和土压力外，一般还需对温度作用、混凝土收缩及地基不均匀沉降等非荷载因素进行考虑。

给水排水工程中的构筑物可以采用钢、钢筋混凝土或者砌体结构。钢材的优点是结构重量轻、构造简单、施工方便、抗渗性能好，但由于耗钢量大、防腐性能差及不宜埋设于地下，因此使用上受到一定的限制，一般只用作特殊用途的水柜、支架、栈桥和操作平台等；砌体结构可节约木材、钢材和水泥，施工方法简单，材料来源广泛，造价低，适用于中小型贮液结构，20世纪50~60年代曾在我国得到广泛的应用，但由于存在手工操作劳动量大，结构本身体积大，强度较低，抗裂抗渗性能差，抗震性能差和易开裂等缺点，特别是烧制普通砖对农田破坏严重，故现已很少采用，通常只有当钢材料、水泥等材料的来源有困难时才采用；钢筋混凝土贮液结构便于就地取材、节约钢材，防腐性能、抗渗性能，耐火性能和耐久性能均较好，维修费用较低，同时，结构的整体性好，适用于在地震区建设，因此，在20世纪70年代之后广泛用于各种贮液结构中。

混凝土构筑物（诸如贮液结构）可采用素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。由于素混凝土结构的抗拉能力很差，通常只用于以受压为主的基础、支墩和重力式支挡结构等。所以，给水排水工程中的构筑物主要采用钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。限于篇幅，本书主要介绍现浇整体式的钢筋混凝土贮液结构。

根据平面形状，钢筋混凝土贮液结构可分为圆形和矩形两种，圆形在水压、土压的作用下，壁板在环向处于轴心受拉或轴心受压状态，在竖向处于受弯状态，受力比较均匀明确。而矩形的壁板则为以受弯为主的拉弯或压弯构件，因此，在同等容量下，其壁板厚度常比圆形大。但矩形贮液结构对场地的适应性较强，施工方便，便于节约用地和减少场地的土方开挖量，便于工艺设备的布置和操作，并易于分隔，以形成多格矩形贮液结构。20世纪80年代以来，随着贮液结构的容量向大型发展，用地矛盾日益加剧，使矩形贮液结构越来越受到

重视。

给水排水工程中的建筑物，大多是屋盖和楼盖采用钢筋混凝土结构，墙、柱和基础采用砌体结构。对于设有起重吨位较大的桥式吊车的大型泵房，则可全部采用钢筋混凝土结构。

本书按内容可划分为三篇，共十一章，分别是：第一篇为钢筋混凝土的基本理论，分为七章，包括材料的物理力学性能、钢筋混凝土结构的基本计算原则、各类构件的计算方法和构造要求；第二篇为钢筋混凝土的结构设计，分为两章，包括钢筋混凝土梁、板结构和贮液结构的设计；第三篇为砌体结构的设计简介，分为两章，简要地介绍了砌体的力学性能、砌体构件的计算理论和一般中小型地上式泵房的设计要点。

第一篇 钢筋混凝土的基本理论

第一章 钢筋混凝土材料的力学性能

第一节 混凝土

普通混凝土是由水泥、砂、石子和水按一定的配合比拌和在一起,经凝结硬化形成的人工石材,属多相复合材料。通常把混凝土的结构分为三种基本类型:微观结构即水泥石结构,亚微观结构即混凝土中的水泥砂浆结构,宏观结构即砂浆和骨料两组分体系。

微观结构由水泥凝胶、晶体骨架、未水化完的水泥颗粒和凝胶孔组成,其物理力学性能取决于水泥的化学矿物成分、粉磨细度、水灰比和凝胶硬化条件等。混凝土的宏观结构与亚微观结构有许多共同点,可以把水泥砂浆看作基相,粗骨料分布在砂浆中,砂浆与粗骨料的界面是结合的薄弱面。

由于混凝土在浇筑时的泌水下沉、硬化过程中水泥浆的水化造成的化学收缩和未水化的多余水分蒸发而造成的干缩,受到骨料的限制,因而在水泥胶体块和石子或砂浆的不同结合界面处以及通过水泥胶块自身处在荷载作用前形成了不规则的微裂缝。在荷载作用后,这种微裂缝往往是引起混凝土破坏的主要根源。

由于混凝土内部结构比较复杂,因而其力学性能也较为复杂。其力学性能表现为:水泥胶块中的结晶体和骨料组成弹性骨架承受荷载,并具有弹性变形的特点,而水泥胶块中的凝胶体需要在较长时间内逐渐硬化,故混凝土的强度亦随着时间而增长,同时又因其内部的凝胶体、微裂缝和孔隙等缺陷的存在和发展,塑性变形也逐渐在加大。

一、混凝土的强度

(一) 单轴应力状态下的混凝土强度

混凝土的强度与水泥强度等级、水灰比有很大关系,骨料的性质、混凝土的级配、混凝土成型方法、硬化时的环境条件及混凝土的龄期等也不同程度地影响混凝土的强度。在实验室还因试件的尺寸及形状、试验方法和加载速率的不同,所测得的强度也不同,因此各国对各种单向受力下的混凝土强度都规定了统一的标准试验方法。

1. 混凝土的抗压强度

(1) 混凝土的立方体抗压强度和强度等级。我国采用边长为 150mm 的立方体作为混凝土抗压强度的标准尺寸试件,并以立方体抗压强度作为混凝土各种力学指标的代表值。《普通混凝土力学性能试验方法》(GBJ81—1985)规定以边长为 150mm 的立方体为标准试件,标准试件在 $(20\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 的温度和相对湿度 90% 以上的潮湿空气中养护 28 天,依照标准试验方法测得的抗压强度作为混凝土立方体抗压强度。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)(以下简称《规范》)规定混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定,用符号 $f_{\text{cu},k}$ 表示。即用上述试验方法测得的具有 95% 保证率的立方体抗压强度作为混凝土的强度等级,即 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80 共 14 个强度等级。例如, C30 表示混凝土立

方体抗压强度标准值为 30N/mm^2 。其中 C50~C80 属高强混凝土范畴。为了保证必要的粘结力，钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不宜过低。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 级钢筋时以及承受重复荷载作用的构件，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、热处理钢筋作为预应力钢筋时，混凝土的强度等级不宜低于 C40。

试验方法对混凝土的立方体抗压强度有较大影响，试件在试验机上受压时，竖向要压缩，横向要膨胀，由于混凝土与压力机垫板弹性模量与横向变形的差异，压力机垫板的横向变形明显小于混凝土的横向变形。当试件承压接触面上不涂润滑剂时，混凝土的横向变形受到摩擦力的约束，就像在试件上下端各加了一个套箍，

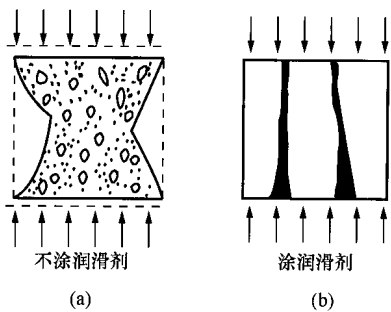


图 1-1 立方体试块的破坏情况

就像在试件上下端各加了一个套箍，试件与垫板的接触面局部混凝土处于三向受压应力状态，试件破坏时形成两个对顶的锥形破坏面，如图 1-1 (a) 所示。如果在试件承压面上涂一些润滑剂，这时试件与压力机垫板间的摩擦力大大减小，试件沿着力的作用方向平行地产生几条裂缝而破坏，所测得的抗压极限强度就低，如图 1-1 (b) 所示。我国规定的标准试验方法是不涂润滑剂的。

试件尺寸对混凝土的立方体抗压强度有一定影响。

实验结果证明，立方体尺寸愈小则试验测出的抗压强度愈高，这个现象称为尺寸效应。过去我国曾长期采用以 200mm 边长的立方体作为标准试件。在试验研究时也采用 100mm 的立方体试件。用这两种尺寸试件测得的强度与用 150mm 立方体标准试件测得的强度有一定差距，这归结于尺寸效应的影响。所以非标准试件强度乘以一个换算系数后，就变成标准试件强度。根据大量实测数据统计，《规范》规定：如采用 200mm 和 100mm 的立方体试件时，其换算系数分别取 1.05 和 0.95 。

加载速度对立方体抗压强度也有影响，加载速度越快，测得的强度越高。通常规定加载速度：混凝土的强度等级低于 C30 时，取每秒钟 $0.3\sim 0.5\text{N/mm}^2$ ；混凝土的强度等级高于或等于 C30 时，取每秒钟 $0.5\sim 0.8\text{N/mm}^2$ 。

混凝土的立方体强度还与成型后的龄期有关，随着试验时混凝土的龄期增长，混凝土的立方体抗压强度逐渐增大，开始时强度增长速度较快，然后逐渐减缓，这个强度增长的过程往往要延续几年，在潮湿环境中延续增长的时间更长，如图 1-2 所示。

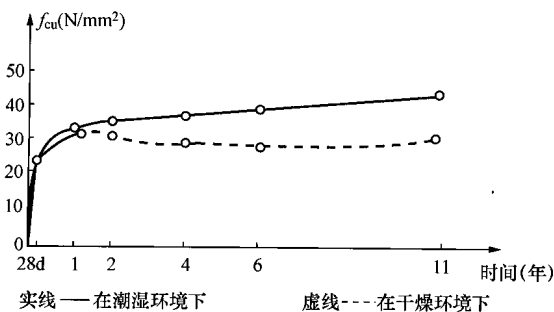


图 1-2 混凝土强度随龄期增长曲线

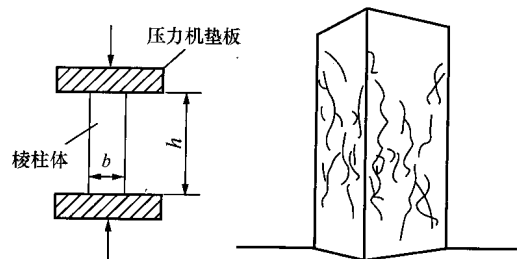


图 1-3 混凝土棱柱体抗压试验

(2) 混凝土的轴心抗压强度。我国《普通混凝土力学性能试验方法》规定以 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 棱柱体作为混凝土轴心抗压强度试验的标准试件。棱柱体试件与立方体试件的制作条件相同，试件上下表面不涂润滑剂。棱柱体的抗压试验及试件破坏情况如图 1-3 所示。

由于棱柱体试件的高度大，试验机压板与试件之间摩擦力对试件高度方向的中部横向变形的约束影响小，所以棱柱体试件的抗压强度比立方体的强度值小。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 规定以上述棱柱体试件试验测得的具有 95% 保证率的抗压强度作为轴心抗压强度标准值，用符号 f_{ck} 表示。

根据我国近年来所作的棱柱体与立方体试件的抗压强度对比试验，可得图 1-4 的结果，试验值 f_c 与 f_{cu} 的统计平均值大致成一条直线，它们的比值大致在 0.70~0.92 的范围内变化，强度大的比值大些。

考虑到实际结构构件与试件在制作及养护条件的差异，尺寸效应以及加荷速度等因素的影响，《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

$$f_{ck} = 0.88\alpha_1\alpha_2f_{cu,k} \quad (1-1)$$

式中： α_1 为棱柱体强度与立方体强度之比，对混凝土强度等级为 C50 及以下的取 $\alpha_1 = 0.76$ ，对 C80 取 $\alpha_1 = 0.82$ ，在此之间按直线规律变化取值； α_2 为高强混凝土的脆性折减系数，对 C40 及以下的取 $\alpha_2 = 1.00$ ，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混凝土强度之间的差异而取用的折减系数。

在国外有一些国家采用圆柱体试件，如美国、日本和欧洲混凝土协会 (CEB) 采用 $\Phi 6\text{in} \times 12\text{in}$ ($\Phi 152\text{mm} \times 305\text{mm}$) 的圆柱体试件，测得的圆柱体抗压强度用 f'_c 表示， f'_c 和立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 的换算关系按式 (1-2) 计算

$$f'_c = 0.79f_{cu,k} \quad (1-2)$$

2. 混凝土的轴心抗拉强度

混凝土的抗拉强度比抗压强度低得多，一般只有抗压强度的 5%~10%，混凝土的抗拉强度取决于水泥石的强度和水泥石与骨料的粘结强度。采用表面粗糙的骨料及较好的养护条件可提高混凝土的抗拉强度。

轴心抗拉强度是混凝土的基本力学指标之一，可用它间接地衡量混凝土的其他力学性能，如混凝土的冲切强度。

轴心抗拉强度可采用如图 1-5 (a) 所示的试验方法，试件尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的柱体，两端埋有伸出长度为 150mm 的变形钢筋 ($d = 16\text{mm}$)，钢筋位于试件轴线上。试验机夹紧两端伸出的钢筋，对试件施加拉力，破坏时裂缝产生在试件的中部，试件破坏时的应力为轴心抗拉强度 f_t 。

现将中国建筑科学研究院及铁道部科学研究院进行轴心抗拉强度试验结果绘于图 1-6。

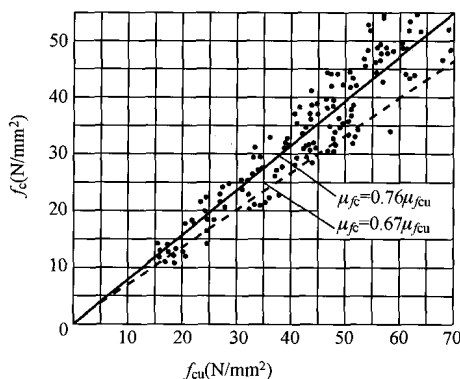


图 1-4 轴心抗压强度与立方体抗压强度的关系

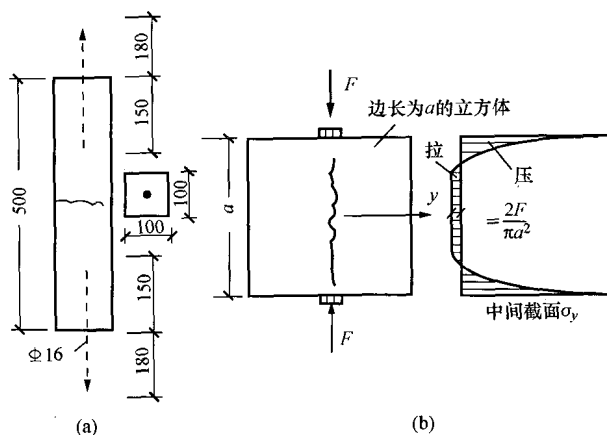


图 1-5 混凝土抗拉强度试验示意图

(a) 轴心受拉试件; (b) 劈裂受拉试件

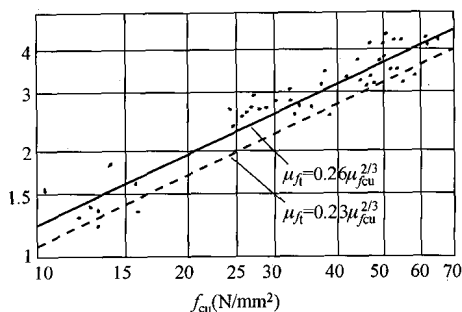


图 1-6 混凝土轴心抗拉强度与立方体抗压强度的关系

由试验得到轴心抗拉强度标准值与立方体抗压强度的标准值经验公式为

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \alpha_2 \quad (1-3)$$

式中: δ 为变异系数; 0.88 的意义和 α_2 的取值与式 (1-1) 中的相同。

在测定混凝土抗拉强度时, 上述试验方法是相当困难的。故国内外多采用立方体或圆柱体劈拉试验测定混凝土的抗拉强度, 如图 1-5 (b) 所示。在立方体或圆柱体上的垫条施加一压力线荷载, 这样试件中间垂直截面除加载点附近很小的范围外, 有均匀分布的水平拉应力。当拉应力达到混凝土的抗拉强度时, 试件被劈成两半。根据弹性理论, 劈裂抗拉强度 $f_{t,s}$ 可按式 (1-4) 计算

$$f_{t,s} = \frac{2F}{\pi ld} \quad (1-4)$$

式中: F 为破坏荷载, N; d 为圆柱直径或立方体边长, mm; l 为圆柱体长度或立方体边长, mm。

根据我国近年来 100mm 立方体劈裂试验的试验结果, $f_{t,s}$ 与 f_{cu} 的试验关系见式 (1-5)

$$f_{t,s} = 0.19 f_{cu}^{3/4} \quad (1-5)$$

(二) 复合应力状态下的混凝土强度

实际工程中的混凝土结构构件很少处于理想的单向受力状态, 而更多的是处于双向或三向受力状态, 因此, 分析混凝土在复合应力作用下的强度就很有必要。

由于混凝土的特点, 在复合应力作用下的强度至今尚未建立起完善的强度理论, 目前仍只有借助有限的试验资料, 推荐一些近似方法作为计算的依据。

1. 混凝土的双向受力强度

图 1-7 所示为混凝土方形薄板试件双向受力试验结果。在板平面内受到法向应力 σ_1 及 σ_2 的作用, 另一方向法向应力为零。第一象限为双向受拉情况, 无论应力比值 σ_1/σ_2 如何, σ_1 、 σ_2 相互影响不大, 双向受拉强度均接近于单向受拉强度。第二和第四象限为拉、压应力状态, 在这种情况下, 混凝土强度均低于单向拉伸或压缩的强度, 即双向异号应力使强度降低, 这一现象符合混凝土的破坏机理。在第三象限为双向受压区最大受压强度发生在 σ_1/σ_2 等于 2 或 0.5 时, 大致上一向的强度随另一向的压力增加而增加, 混凝土双向受压强度比单

向抗压强度最多可提高 27%。

2. 混凝土在法向应力和剪应力作用下的复合强度

当混凝土受到剪力、扭矩引起的剪应力和轴力引起的法向应力共同作用时，形成“拉剪”和“压剪”复合应力状态，图 1-8 为混凝土法向应力与剪应力的关系曲线。从图中可以看出，抗剪强度随拉应力的增大而减小；压应力较低时，抗剪强度随着压应力的增大而增大，当 $\sigma/f_c > 0.6$ 时，由于内部裂缝的明显发展，抗剪强度反而随压应力的增大而减小。从抗压强度的角度来分析，由于剪应力的存在，混凝土的抗压强度要低于单向抗压强度。

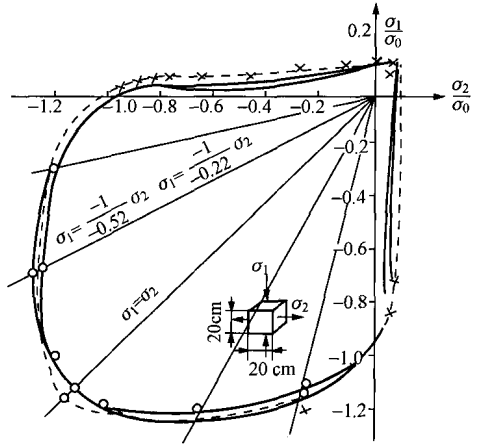


图 1-7 双向应力状态下混凝土的破坏包络图

3. 混凝土的三向抗压强度

混凝土在三向受压的情况下，由于受到侧向压应力的约束作用，其最大主压应力方向的

抗压强度 $f'_{cc}(\sigma_1)$ 有较大幅度的增长，其变化规律随两侧向压应力 (σ_2, σ_3) 的比值和大小的变化而不同。常规的三轴受压是在圆柱体周围加液压，在侧向等压 ($\sigma_2 = \sigma_3 = f_L > 0$) 的情况下进行的，图 1-9 所示为圆柱体三轴受压（侧向压应力均为 σ_3 ）的试验。实验表明，当侧向液压力值不很大时，微裂缝的发展受到了极大的限制，最大主压应力轴的抗压强度

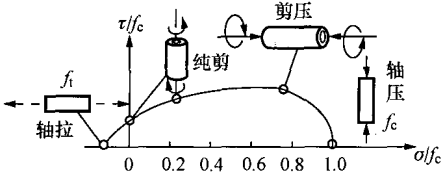


图 1-8 混凝土在法向应力和剪应力组合的破坏曲线

随侧向压应力的增大而提高。此时混凝土的变形性能接近理想的弹塑性体。

由试验得到的经验公式为

$$f'_{cc} = f'_c + (4.5 \sim 7.0) f_L \quad (1-6)$$

式中： f'_{cc} 为有侧向约束试件的轴心抗压强度， N/mm^2 ； f'_c 为无侧向约束试件的轴心抗压强度， N/mm^2 ； f_L 为侧向约束压应力， N/mm^2 ； f_L 前的数字为侧向应力系数，平均值为 5.6，当侧向压应力较低时得到的系数值较高。

工程上可以通过设置密排的螺旋筋或箍筋来约束混凝土的侧向变形，使混凝土的抗压强度、延性（耐受变形的能力）有相应的提高。如图 1-10 所示，在混凝土轴向压力很小时，螺旋筋或箍筋几乎不受力，此时混凝土基本上不受约束，当混凝土应力达到临界应力时，混凝土内部裂缝引起体积膨胀使螺旋筋或箍筋受拉，反过来，螺旋筋或箍筋约束混凝土，形成与液压约束相似的条件，从而使混凝土的应力—应变性能得到改善。

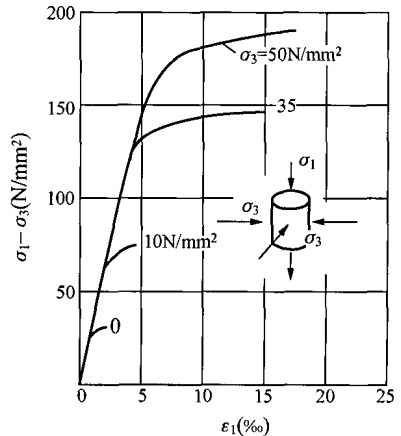


图 1-9 受液压力作用的圆柱体试件

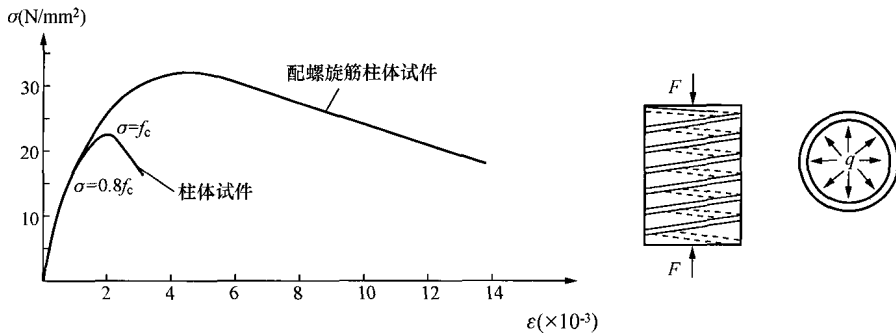


图 1-10 配螺旋筋柱体试件的应力—应变曲线

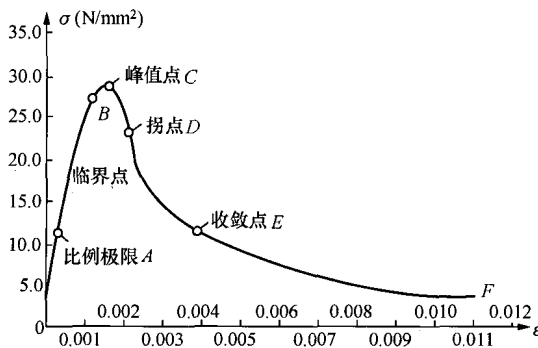
二、混凝土的变形

变形是混凝土的一个重要力学性能。混凝土在一次短期加载、荷载长期作用和多次重复荷载作用下会产生变形。这种变形称为受力变形。另外，混凝土由于硬化以及温度和湿度变化也会产生变形，这类变形称为体积变形。

(一) 混凝土的受力变形

1. 一次短期加载下混凝土的变形性能

(1) 受压混凝土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线。混凝土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线是混凝土力学性能的一个重要方面，它是钢筋混凝土构件应力分析、建立强度和变形计算理论必不可少的依据。一次短期加载是指荷载从零开始单调增加至试件破坏，也称单调加载。在普通试验机上获得有下降段的 $\sigma-\epsilon$ 曲线是比较困难的。若采用有伺服装置能控制下降段应变速度的特殊试验机，或者在试件旁附加各种弹性元件协同受压，以吸收试验机内所积蓄的应变能，防止试验机头回弹的冲击引起试件突然破坏，并以等应变加载，就可以测量出具有真实下降段的 $\sigma-\epsilon$ 全曲线。混凝土达到极限强度后，在应力下降幅度相同的情况下，变形能力大的混凝土延性好。

图 1-11 受压混凝土棱柱体 $\sigma-\epsilon$ 曲线

我国采用棱柱体试件测定一次短期加载下混凝土受压 $\sigma-\epsilon$ 全曲线。图 1-11 是天津大学实测的典型混凝土棱柱体的 $\sigma-\epsilon$ 曲线。在第 I 阶段，即从加荷载至 A 点 ($\sigma = 0.3 \sim 0.4 f_c$)，由于这时应力较小，混凝土的变形主要是骨料和水泥结晶体受力产生的弹性变形，应力—应变关系接近直线，A 点称为比例极限点。超过 A 点后，进入稳定裂缝扩展的第 II 阶段，至临界点 B，临界点 B 相对应的应力可作为长期抗压强度的依据（一般取为 $0.8 f_c$ ）。此后试件中所

积蓄的弹性应变能始终保持大于裂缝发展所需要的能量，形成裂缝快速发展的不稳定状态直至 C 点，即第 III 阶段，应力达到的最高点为 f_c ， f_c 相对应的应变称为峰值应变 ϵ_0 ，一般 $\epsilon_0 = 0.0015 \sim 0.0025$ ，通常取为 $\epsilon_0 = 0.002$ 。在 f_c 以后，裂缝迅速发展，结构内部的整体性受到愈来愈严重的破坏，赖以传递荷载的传力路线不断减少，试件的平均应力强度下降，所以 $\sigma-\epsilon$ 曲线向下弯曲，直到凸向发生了改变，曲线出现拐点。在拐点 D 之后，

曲线凸向应变轴，这时，只靠骨料间的咬合力及摩擦力与残余承压面来承受荷载，随着变形的增加， $\sigma-\epsilon$ 曲线逐渐凸向水平轴方向发展，此段曲线中曲率最大点 E 被称为“收敛点”。 E 点以后主裂缝已很宽，结构内聚力已几乎耗尽，对于无侧向约束的混凝土，收敛段 EF 已失去结构的意义。

混凝土应力—应变曲线的形状和特征是混凝土内部结构发生变化的力学标志。不同强度的混凝土应力—应变曲线有着相似的形状。但也有实质性的区别。图 1-12 所示的试验曲线表明，随着混凝土强度的提高，尽管上升段和峰值应变的变化不很显著，但是下降段的形状有较大的差异，混凝土的强度越高，下降段的坡度越陡，即应力下降相同幅度时变形越小，延性越差。另外，混凝土受压应力—应变曲线的形状与加载速度也有着密切的关系。

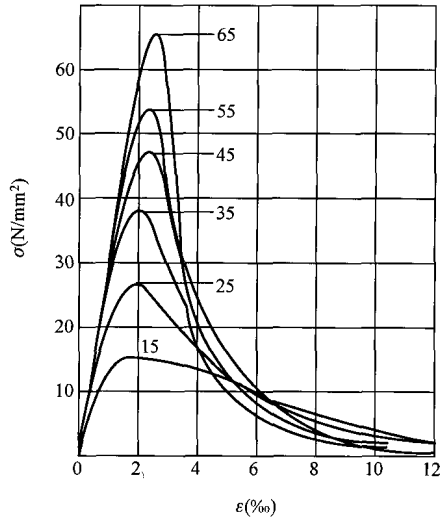


图 1-12 不同强度的受压混凝土棱柱体 $\sigma-\epsilon$ 曲线比较

(2) 混凝土的变形模量。在计算混凝土构件的截面应力、变形、预应力混凝土构件的预压应力，以及由于温度变化、制作沉降产生的内力时，需要利用混凝土的弹性模量。由于一般情况下受压混凝土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线是非线性的，应力和应变的关系并不是常数，这就产生了“模量”的取值问题。混凝土的变形模量有如下三种表示方法。

1) 混凝土的弹性模量（即原点模量）。如图 1-13 所示，在混凝土棱柱体受压时的应力—应变曲线的原点（图中的 O 点）作一切线，其斜率为混凝土的原点模量，通常称为切线模量，以 E_c 表示，即

$$E_c = \tan \alpha_0 \tag{1-7}$$

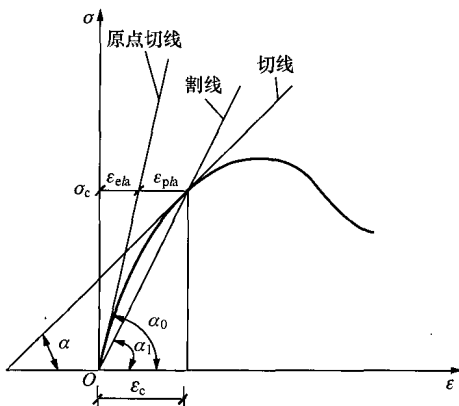


图 1-13 混凝土变形模量的表示方法

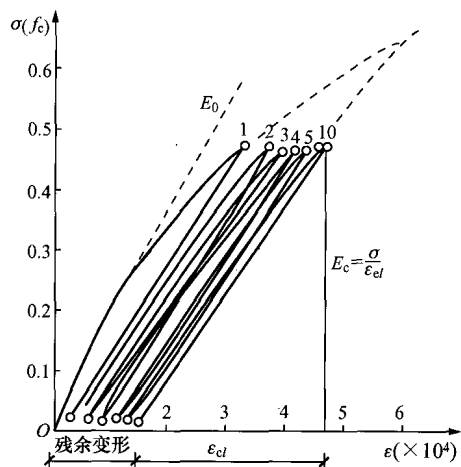


图 1-14 混凝土弹性模量 E_c 的测定方法

目前，各国对弹性模量的试验方法尚无统一的标准。由于要在混凝土一次加载应力—应变曲线上作原点的切线，找出 α_0 角是不容易准确做到的。我国对弹性模量 E_c 值是作了这样

的规定,即采用棱柱体试件,取应力上限为 $0.5f_c$ 重复加荷 5~10 次。由于混凝土的塑性性质,每次卸载为零时,存在有残余变形。但随荷载多次重复,残余变形逐渐减小,重复加荷 5~10 次后,变形趋于稳定,混凝土的 σ - ϵ 曲线接近于直线(图 1-14),该直线的斜率为混凝土的弹性模量。根据混凝土不同强度等级的弹性模量实验值的统计分析, E_c 与 f_{cu} 的经验关系为

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

当混凝土进入塑性阶段后,初始的弹性模量已不能反映这时的应力—应变性质,因此,有时用变形模量或切线模量来表示这时的应力—应变关系。

2) 混凝土的变形模量。混凝土的 σ - ϵ 曲线上任一点 a 与原点 O 的连线 Oa (割线) 的斜率,称为混凝土的变形模量 E'_c , 即

$$E'_c = \tan \alpha_1 \quad (1-9)$$

这时由于总变形 ϵ_c 中包含弹性应变 ϵ_{ela} 和塑性应变 ϵ_{pla} 两部分,由此所确定的模量也可称为弹塑性模量或割线模量。设弹性应变 ϵ_{ela} 与总应变 ϵ_c 的比值为弹性系数 ν 。即

$$\nu = \frac{\epsilon_{ela}}{\epsilon_c} \quad (1-10)$$

弹性系数 ν 反映了混凝土的弹塑性性质,随着混凝土的 σ_c 增大 ν 减小。则任一点的变形模量 E'_c 可用 E_c 和 ν 乘积来表示

$$E'_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \nu \frac{\sigma_c}{\epsilon_{ela}} = \nu E_c \quad (1-11)$$

3) 混凝土的切线模量。在混凝土应力—应变曲线上某一应力 σ_c 处作一切线,其应力增量与应变增量之比值称为相应于 σ_c 时混凝土的切线模量,见式 (1-12)

$$E''_c = \tan \alpha \quad (1-12)$$

可以看出,混凝土的切线模量是一个变值,它随着混凝土的应力增大而减小。

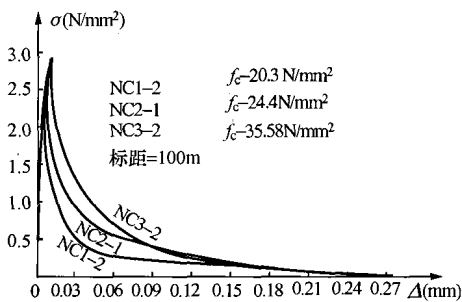


图 1-15 不同强度混凝土拉伸 σ - ϵ 曲线

(3) 混凝土轴心受拉时的 σ - ϵ 曲线。受拉混凝土的 σ - ϵ 曲线的测试比受压时要难得多,图 1-15 为天津大学测出的轴心受拉混凝土的 σ - ϵ 曲线,曲线形状与受压时相似,具有上升段和下降段。试验测试表明,在试件加载初期,变形与应力呈线性增长,至峰值应力的 40%~50% 达比例极限,加载至峰值应力的 76%~83% 时,曲线出现临界点(即裂缝不稳定发展的起点)到达峰值,峰值应力对应的应变 $\epsilon_0 = 7.5 \times 10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$ 。曲线的下降段坡度随混凝土强度的提高而更陡峭。

受拉 σ - ϵ 曲线的原点切线斜率与受压时基本一致,因此混凝土受拉和受压均可采用相同的弹性模量 E_c 。峰值应力时变形模量 $E'_t = (76\% \sim 86\%)E_c$ 。考虑到应力达到峰值应力 f_t 时的受拉极限应变与混凝土强度、配合比、养护条件有着密切的关系,变化范围大,取相应于抗拉强度 f_t 时的变形模量 $E'_t = 0.5E_c$, 即应力达到 f_t 时的弹性系数 $\nu = 0.5$ 。

2. 荷载长期作用下混凝土的变形性能

结构或材料承受的荷载或应力不变，而应变或变形随时间增长的现象称为徐变。混凝土的徐变特性主要与时间参数有关。徐变对混凝土结构和构件的工作性能有很大影响。由于混凝土的徐变，会使构件的变形增加，在钢筋混凝土截面中引起应力重分布，在预应力混凝土中会造成预应力损失。

根据我国铁道部科学研究所的试验结果，混凝土典型的徐变与时间的关系曲线如图 1-16 所示。从图中可以看出，某一组棱柱体试件，当加荷应力达到 $0.5f_c$ 时，其加荷瞬间产生的应变为瞬时应变 ϵ_{e1a} 。若荷载保持不变，随着加荷时间的增长，应变也将继续增长，这就是混凝土的徐变应变 ϵ_{cr} 。徐变开始半年内增长较快，以后逐渐减慢，经过一定时间后，徐变趋于稳定。徐变应变值约为瞬时弹性应变的 1~4 倍。两年后卸载，试件瞬时恢复的应变称为瞬时恢复应变 ϵ'_{e1a} ，其值略小于瞬时应变 ϵ_{e1a} 。卸载后经过一段时间量测，发现混凝土并不处于静止状态，而是经历着逐渐恢复的过程，这种恢复变形称为弹性后效 ϵ''_{e1a} 。弹性后效的恢复时间为 20 天左右，其值约为徐变变形的 1/12。最后剩下的大部分不可恢复变形为 ϵ'_{cr} ，称为残余变形。

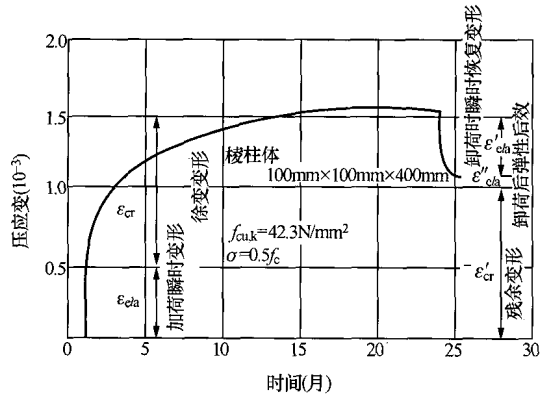


图 1-16 混凝土的徐变

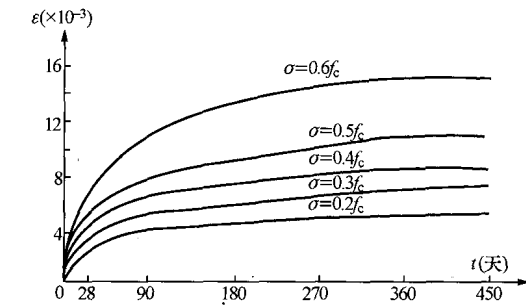


图 1-17 初应力对徐变的影响

混凝土的应力条件是影响徐变的重要因素。混凝土的应力越大，徐变越大。随着混凝土应力的增加，徐变将发生不同的情况，图 1-17 所示为不同应力水平下的徐变变形增长曲线。由图 1-17 可见，当应力较小时 ($\sigma \leq 0.5f_c$)，曲线接近等距离分布，说明徐变与初应力成正比，这种情况称为线性徐变。一般的解释认为是水泥胶体的粘性流动所致。在线性徐变的情况下，加载初期徐变增长较快，6 个月时，一般已完成徐变的大部分，后期徐变增长逐渐减小，一年以后趋于稳定，一般认为三年左右徐变基本终止。

当施加于混凝土的应力较大时 ($\sigma > 0.5f_c$)，徐变变形与应力不成正比，徐变变形比应力增长要快，这种情况称为非线性徐变。一般认为发生这种现象的原因，是水泥胶体的粘性流动的增长速度已比较稳定，而由应力集中引起的微裂缝开展则随应力的增大而增大。在非线性徐变范围内，当加载应力过高时，徐变变形急剧增加不再收敛，呈非稳定的徐变现象。由此说明，在高应力作用下可能造成混凝土的破坏。所以，一般取混凝土的应力约为 $(0.75 \sim 0.8)f_c$ 作为混凝土的长期极限强度。图 1-18 为不同加荷时间的应变增长曲线与徐变极限和强度破坏时的应变极限关系。混凝土构件在使用期间，应当避免经常处于不变的高应力状态。