



土木工程设计宝典丛书

TUMU GONGCHENG SHEJI BAODIAN CONGSHU

混凝土结构 设计要点

姜晨光 主编

HUNNINGTU

JIEGOU

SHEJI

YAOPIAN



化学工业出版社

013043916

TU370.4
47



土木工程设计宝典丛书

TUMU GONGCHENG SHEJI BAODIAN CONGSHU

混凝土结构 设计要点

姜晨光 主编

HUNNINGTU
JIEGOU
SHEJI
YAODIAN



化学工业出版社

·北京·

TU370.4
47



北航

C1646917

013043318

本书以最新的国家规范和标准为依据,以近几年国内外混凝土结构的最新成就为着眼点,结合我国国情,从实用的角度出发,通俗、系统地阐述了混凝土结构设计的基本程序与核心要点(包括钢筋混凝土结构设计的基本要求、基本原则、基本方法;钢筋混凝土楼盖与楼梯设计;单层钢筋混凝土厂房设计;钢筋混凝土框架结构设计等),对混凝土结构工程的勘察、规划、设计、施工、管理及相关科学研究工作具有一定的指导意义和参考价值。

本书可供工作在土木工程建设第一线的工程技术人员、工程管理人员、工人作为工作或学习中的参考,也可成为各级政府与土木工程建设有关的行政主管部门工作人员以及土木工程企业管理人员的工具书,还可作为高等学校土木工程类专业高年级学生的辅修教材、选修教材或阅读材料。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计要点/姜晨光主编. —北京:化学工业出版社, 2013. 3

(土木工程设计宝典丛书)

ISBN 978-7-122-16131-4

I. ①混… II. ①姜… III. ①混凝土结构-结构设计
IV. ①TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 304339 号

责任编辑:董琳
责任校对:陶燕华

文字编辑:汲永臻
装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张15 字数426千字 2013年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

前言

Preface

相对于砌体结构、木结构和钢（或铁）结构而言，混凝土结构是现代人类工程建设史上一种新兴结构，它的实质性应用仅有一百多年的历史。当然，也有考古学者认为水泥起源于公元前 5 万~10 万年，公元前 3000 年人们用熟石膏和石灰混合在一起建造的埃及金字塔是现存最早的混凝土结构物，其后在古希腊和罗马时代人们用这种水泥建造了很多建筑物和公路。进入近代社会后，混凝土经过了 J. Smeaton 和 J. Parker 等的试作阶段，1824 年英国的烧瓦工人 Joseph Aspdin 调配石灰岩和黏土首先烧成了人工的硅酸盐水泥并取得了专利，标志着现代水泥工业的诞生。1854 年法国技师 J. L. Lambot 将铁丝网嵌入混凝土中制成了小船并于第二年在巴黎博览会上展出而成为最早的钢筋混凝土（RC）制品，后来，Francois Conigne、Wilkinson 等改进了 Lambot 的制品，1867 年法国技师 Joseph Monier 取得的用格子状配筋制作桥面板的专利，促进了 RC 工艺的迅速发展，1867 年成为 RC 桥架设计的开元之年。1877 年美国的 Thaddeus Hyatt 调查了梁的力学性能。1887 年德国的 Konen 提出了用混凝土承担压力和用钢筋承担拉力的设计方案，德国的 J. Baushinger 确认了混凝土中的钢筋不受锈蚀等问题引领了 RC 结构的新发展。1892 年法国的 Hennebique 阐述了箍筋对抗剪的有效作用并于 1898 年提出了 T 形梁的方案。Conigne 在 RC 桩方面得到了很多专利。Considerere 根据试验于 1902 年取得了螺旋钢筋柱的专利。总之，混凝土结构是 19 世纪中期开始得到应用的，由于当时水泥和混凝土的质量都很差且设计计算理论尚未建立，故发展比较缓慢。19 世纪末以后随着生产的发展、试验工作的开展、计算理论研究的深入、材料和施工技术的不断改进，混凝土结构技术才得到了较快的发展，目前已成为现代工程建设中应用最广泛的工程结构之一，高强度钢筋和高强度混凝土被大量用于大跨、重型、高层结构中，实验室做出的混凝土抗压强度已逼近 $300\text{N}/\text{mm}^2$ 。混凝土结构的蓬勃发展为现代人类文明做出了巨大的贡献，当然，由于技术应用方面的失误也给社会带来了一些负面影响，如何扬长避短、充分发挥混凝土结构的作用就成为当代土木工程业内人士必须认真对待的问题。

本书是笔者在江南大学从事教学、科研和工程实践活动的经验积累之一，也是笔者三十余年土木工程生涯不断追踪科技发展脚步的部分收获，本书的撰写借鉴了当今国内外的最新研究成果和大量的实际工程资料，吸收了许多前人及当代人的宝贵经验和认识，也尽最大可能地包含了当

今最新的混凝土结构营造建设成就，希望本书的出版能对我国混凝土结构的健康可持续发展有所贡献。

全书由江南大学姜晨光主笔完成。此外，无锡市交通产业集团有限公司王国新；中冶集团武汉勘察研究院有限公司汪福来、王红梅；无锡市建设局夏正兴、何跃平、成美捷；无锡市规划局翁林敏、姜科；中国有色金属工业西安勘察设计研究院常君锋、郭渭明；山东盛隆集团有限公司严立明、任忠慧、宋志波；莱阳市住房和城乡建设管理局于蕾、纪少林；中共莱阳市委郭立众、于京良；江南大学王风芹、刘建强、赵伯侃、诸增元、张祖兴、周志平、滕红军、周世兵等同志（排名不分先后）参与了部分章节的撰写工作。

初稿完成后，苏文馨、徐至善、李锦铭、王浩闻、黄建文五位教授级高工提出了不少改进意见，为本书的最终定稿作出了重大的贡献，谨此致谢。

限于水平、学识和时间关系，书中内容难免粗陋，谬误与欠妥之处敬请读者多多提出批评与宝贵意见。

姜晨光

2013年1月于江南大学

目录

Contents

第1章	钢筋混凝土结构设计的基本原则	1
1.1	结构材料的物理力学性能	1
1.1.1	混凝土的物理力学性能	3
1.1.2	钢筋的物理力学性能	11
1.1.3	钢筋与混凝土的黏结力	14
1.1.4	现代混凝土结构对混凝土的基本要求及相关规定	17
1.1.5	混凝土结构用钢筋的基本要求及相关规定	19
1.1.6	钢筋、混凝土本构关系以及混凝土的多轴强度准则	23
1.2	结构设计的基本原理	29
1.2.1	混凝土结构的极限状态	31
1.2.2	混凝土结构实用设计方法的基本规定	36
1.2.3	混凝土结构设计中的结构分析方法	40
1.2.4	近似计算偏压构件侧移二阶效应的增大系数法	45
1.3	轴心受力构件的特点	46
1.3.1	轴心受压构件	47
1.3.2	轴心受拉构件	50
1.4	受弯构件的正截面承载力	50
1.4.1	梁的正截面受弯特征	50
1.4.2	梁的正截面抗弯能力	53
1.4.3	受弯构件正截面承载力计算	54
1.4.4	钢筋混凝土构件承载能力极限状态实用计算基本规定	63
1.4.5	正截面承载力的简化计算	67
1.4.6	受弯构件的挠度验算	74
1.5	偏心受力构件的正截面承载力	76
1.5.1	偏心受压构件承载力计算	76
1.5.2	钢筋混凝土偏心受拉构件承载力计算	86
1.6	构件的斜截面承载力	88
1.6.1	无腹筋梁的受剪性能	89
1.6.2	有腹筋梁的受剪性能	91
1.6.3	弯起钢筋设置	93
1.6.4	构造要求	93
1.6.5	斜截面承载力计算的实用方法、要求及相关规定	98
1.7	受扭构件的扭曲截面承载力	103
1.7.1	受扭构件扭曲截面的承载力分析	103
1.7.2	受扭构件扭曲截面承载力计算实用方法、要求及相关规定	108

- 1.7.3 受冲切承载力计算实用方法、要求及相关规定 112
- 1.7.4 板柱节点计算用等效集中反力设计值的确定方法 114
- 1.7.5 局部受压承载力计算实用方法、要求及相关规定 116
- 1.8 主要混凝土构件的特点 118
 - 1.8.1 伸缩缝 118
 - 1.8.2 混凝土保护层 119
 - 1.8.3 钢筋的锚固 120
 - 1.8.4 钢筋的连接 122
 - 1.8.5 纵向受力钢筋的最小配筋率 124
 - 1.8.6 混凝土板 125
 - 1.8.7 混凝土梁 127
 - 1.8.8 混凝土柱 131
 - 1.8.9 混凝土墙 136
- 1.9 预应力混凝土构件的特点 137
 - 1.9.1 预应力混凝土结构的基本原理及基本计算理论 137
 - 1.9.2 预应力混凝土轴心受拉构件计算的基本原理 147
 - 1.9.3 预应力混凝土受弯构件计算 152
 - 1.9.4 预应力混凝土构件的构造要求 158

第2章

钢筋混凝土楼盖与楼梯设计 162

- 2.1 钢筋混凝土楼盖与楼梯的特点及设计要求 162
 - 2.1.1 楼盖的类型 162
 - 2.1.2 楼盖结构布置及受力特点 163
 - 2.1.3 楼盖梁、板的尺寸 164
- 2.2 钢筋混凝土单向板肋梁楼盖设计 165
 - 2.2.1 肋梁楼盖的计算简图 165
 - 2.2.2 按弹性方法计算内力 166
 - 2.2.3 按塑性内力重分布方法计算内力的理论依据 168
 - 2.2.4 按塑性内力重分布方法计算内力的方法 170
 - 2.2.5 截面设计及构造要求 172
 - 2.2.6 整体式单向板肋梁楼盖设计实例 175
- 2.3 钢筋混凝土双向板肋梁楼盖设计 181
 - 2.3.1 整体式双向板肋梁楼盖设计原理 181
 - 2.3.2 无梁楼盖设计原理 185
 - 2.3.3 井式楼盖设计原理 190
 - 2.3.4 装配式楼盖设计原理 191
 - 2.3.5 楼梯雨篷设计原理 193

第3章

单层钢筋混凝土厂房设计 198

- 3.1 厂房的特点与设计的要求 198
- 3.2 厂房的结构与组成 198
- 3.3 厂房的结构布置 200
 - 3.3.1 屋盖支撑布置 201
 - 3.3.2 柱间支撑布置 202
 - 3.3.3 围护结构布置 203

3.4	厂房构件的选型与截面设计	204
3.4.1	屋盖结构构件	204
3.4.2	吊车梁	206
3.4.3	柱	206
3.4.4	基础	207
3.5	单层钢筋混凝土厂房横向排架结构内力分析	207
3.5.1	排架结构上的荷载	207
3.5.2	柱顶水平集中力作用下等高排架内力分析	208
3.5.3	任意荷载作用下等高排架内力分析	209
3.5.4	不等高排架内力分析	209
3.5.5	考虑厂房整体空间作用的排架内力分析	210
3.5.6	内力组合	211
3.6	单层钢筋混凝土厂房柱子设计	212
3.6.1	柱子截面设计	212
3.6.2	牛腿设计	212
3.6.3	柱子的吊装验算	214
3.6.4	抗风柱设计	214
3.7	单层钢筋混凝土厂房柱下独立基础设计	215
3.7.1	基础底面尺寸的确定	215
3.7.2	基础高度验算	215
3.7.3	基础底板配筋	216
3.7.4	构造要求	217

第4章

钢筋混凝土框架结构设计	218
4.1 钢筋混凝土框架结构的组成和结构布置	218
4.1.1 框架结构的受力特点	218
4.1.2 框架结构体系的特点	219
4.1.3 框架结构的结构布置	219
4.2 钢筋混凝土框架结构的计算方法及荷载取值	220
4.2.1 梁截面尺寸的确定方法	220
4.2.2 柱截面尺寸	220
4.2.3 梁截面惯性矩	220
4.2.4 计算单元	220
4.2.5 框架结构上的荷载	222
4.3 竖向荷载作用下框架结构内力的计算方法	222
4.3.1 分层法	222
4.3.2 弯矩二次分配法	223
4.3.3 系数法	223
4.4 水平荷载作用下框架结构内力及侧移的计算方法	223
4.4.1 D 值法	223
4.4.2 反弯点法	226
4.4.3 框架结构侧移的近似计算	226
4.4.4 框架结构的水平位移控制	226
4.5 钢筋混凝土框架结构的荷载效应组合和构件设计	227

4.5.1	框架结构的荷载效应组合	227
4.5.2	构件设计	227
4.6	钢筋混凝土框架结构的构造设计要求	228
4.6.1	框架梁的构造要求	228
4.6.2	框架柱的构造要求	228
4.6.3	梁柱节点的构造要求	228
4.6.4	钢筋连接和锚固的构造要求	229
4.6.5	钢筋混凝土框架结构的基础类型	229
参考文献	231

第 1 章

钢筋混凝土结构设计的基本原则

1.1 结构材料的物理力学性能

现代混凝土结构中的混凝土是指由钢筋和混凝土两种物理力学性能完全不同的主要材料组成的混合材料，是现代主要的人造工程结构材料。混凝土的特点是抗压能力较强而抗拉能力却很弱（故使其使用受到限制，抗拉强度/抗压强度=1/17~1/8），钢筋的性能特点则是抗拉和抗压能力都高，为充分利用材料的性能，人们将钢筋和混凝土这两种材料结合在一起共同工作（让混凝土承受压力、钢筋承担拉力）以满足工程结构的使用要求（有时，也在受压区配筋以改善梁的受力性能），从而诞生了钢筋混凝土结构（俗称混凝土结构）。人们曾对图 1-1-1 所示的两根截面均为 $b \times h = 200 \times 300\text{mm}$ 、跨度 2.5m 的混凝土梁进行加载试验 [混凝土梁的制作材料为 C20 混凝土，一根为素混凝土梁（简支），一根则配有 $2\Phi 20$ 钢筋]，试验显示素混凝土梁由于混凝土抗拉能力低其拉区混凝土一开裂梁就马上发生脆断破坏（此时 $P_1 = 13.4\text{kN}$ ），钢筋混凝土梁则表现优越（其拉区混凝土开裂后，梁中和轴以下受拉区的拉力主要由钢筋来承担，而中和轴以上的压力仍由混凝土承受，此时梁未坏，荷载仍可增加，梁最终破坏时 $P_2 = 87\text{kN}$ 。而其破坏特点是梁不会突然发生脆断，其变形较大、延性好）。钢筋混凝土柱也同样具有优越的性能，当混凝土柱受压时尽管钢筋受压（混凝土也受压）但仍可改善混凝土的变形性能（使其脆性有所降低），另外，混凝土中的钢筋还可减小柱的截面尺寸或提高其抗压能力。钢筋与混凝土之所以能够共同工作，其原因有两个，即钢筋与混凝土之间存在黏结力（该黏结力可使钢筋与混凝土结合良好并在荷载作用下协调变形、共同工作且工作中两者一般不会产生相对滑移）、钢筋与混凝土有相近的线膨胀系数 [钢的线膨胀系数 $\alpha_G = 1.2 \times 10^{-5}$ 、混凝土的线膨胀系数 $\alpha_C = (1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$ ，因此，温度变化时两种材料不致产生较大的相对变形而破坏它们之间的黏结力]、混凝土对钢筋具有保护作用（可防腐、防锈。另外，结构也不会因火灾而使钢筋很快软化导致破坏）。



图 1-1-1 混凝土梁加载试验

(1) 钢筋混凝土结构的主要特点 钢筋混凝土结构的优点主要表现在 5 个方面。

① 耐久性好。在良好环境下混凝土的强度会随时间的增加而增大；混凝土对钢筋具有保护作用而不像钢结构那样需经常保养与维修。

② 耐火性好。混凝土传热性能差，发生火灾时钢筋不会很快达到软化的危险程度，从而可避免结构因火灾而快速发生倒塌破坏，其比钢、木结构耐火性好。

③ 整体性好。混凝土结构可采用现浇或装配形式，故其整体性好，从而有利于抗震、防爆。

④ 可模性好。混凝土可根据需要浇筑成任何尺寸及形状。

⑤ 易就地取材。由于混凝土所用原材料为砂、石，故可就近、就地取材，从而减少运输费

用、降低造价。另外，混凝土也可采用工业废料（比如矿渣、粉煤灰等）作为人造骨料从而可实现资源的循环利用。

钢筋混凝土结构的缺点主要表现在 3 个方面。

① 自重大，因此对大跨、高层、结构抗震等不利，但可用轻质高强度混凝土来改善。

② 抗裂性差，正常使用情况下一般钢筋混凝土结构中均存在裂缝，这将导致混凝土结构刚度的下降以及变形增大从而影响其耐久性。

③ 需用模板，故制作工序多、周期长且受季节气候条件限制较大，另外，对已建成的结构其补强、维修等工作均较为困难。

混凝土结构的以上缺点在一定条件下限制了钢筋混凝土结构的使用范围，但预应力混凝土却可以通过使用高强材料（高强度钢筋和高强度混凝土）使混凝土做到不裂（或控制其裂缝宽度）并节约材料、降低自重（故具有技术革命性意义）。尽管钢筋混凝土存在上述缺点，但随着科学技术的发展以及所用材料结构形式和施工技术等方面的革新和改进，混凝土的应用范围仍在不断扩大。另外，混凝土应用范围的扩大还与混凝土的材料特性和制作形式有关 [比如可现场浇灌或者预制；可用泵或者传送带输送；可做成防腐（防缩）或防渗形式；可做成高强、早凝或迟凝等形式；可以是重混凝土或轻质混凝土；可做成抗大气老化型或抗化学腐蚀型；可做成先张型或后张型混凝土（预应力混凝土）等]。

(2) 常见的钢筋混凝土建筑结构及基本构件 土木工程中，钢筋混凝土结构可以用于多种房屋结构类型，目前常见的混凝土结构体系（类型）主要有混合结构（指承重构件由不同材料组成的结构，比如砌体结构、钢木结构等）、框架结构（主要用于工业厂房及层数较多的民用建筑）、框架-剪力墙结构（当房屋更高时基本为框架结构但部分采用钢筋混凝土墙）、剪力墙结构 [指全部采用钢筋混凝土墙的结构（无柱）]、筒体结构等。钢筋混凝土结构的承重构件主要有 2 大类，即水平承重构件 [比如屋盖及楼盖，其主要承受直接作用于屋（楼）盖上的荷载及结构本身自重，它通常是由梁、板组成]、竖向承重构件 [主要指柱子、墙，其承受由屋（楼）盖传来的作用力以及风（或地震）引起的水平力并将这些力传给基础后再由基础传至地基]。总之，钢筋混凝土结构构件按形状和功能可分为梁、板、柱、墙、基础，这些统称为钢筋混凝土结构的基本构件。在实际生产活动中，人们多按受力特点区分钢筋混凝土结构的基本构件并将它们分为 4 种类型，即受弯构件（比如梁或板，其构件截面主要承受弯矩 M 作用，但一般也有剪力 V 存在）、受压构件 [比如柱、结构墙、屋架压杆等，其构件截面主要承受轴向压力 N （轴向力沿构件纵轴作用时为轴压），有时也同时承受弯矩 M 和轴向压力 N （与构件轴线作用有偏心的称为偏压），也有同时承受弯矩 M 、轴向压力 N 和剪力 V 的（若 V 较大时则计算中还应考虑其影响）]、受拉构件 [比如屋架下弦、屋架拉杆等，其构件截面承受轴向压力 N （ N 沿构件纵轴作用时为轴拉，比如屋架下弦），也有同时承受轴向压力 N 、弯矩 M 和剪力 V 的（比如框架柱在竖向、水平荷载作用下柱中可能受拉力，同时又存在弯矩 M 和剪力 V ，可能为偏拉构件）]、受扭构件（比如框架结构的边梁、曲梁、雨篷梁等，由于其一侧有竖向荷载而另一侧没有竖向荷载故而使构件截面除产生弯矩 M ，但实际工程中纯扭构件很少，一般都是弯矩 M 、轴向压力 N 和剪力 V 共同作用，另外，还会产生扭矩 T ）。钢筋混凝土结构设计的基本工作是在满足使用要求且考虑经济、施工条件情况下进行结构方案选择、结构布置并确定结构类型，另外，还要进行构件内力分析 [将构件按弯、压、拉、扭分成不同基本构件，根据每种基本构件的受力特点及性能不同分别进行强度和变形计算并同时考虑构造配筋问题（即构件的计算及构造处理）]。

(3) 钢筋混凝土结构的历史与发展 截至今日，钢筋混凝土结构只有 160 多年的历史，因此，与砖木结构、钢结构相比，它是一种较新的结构但发展很快。19 世纪中叶（50 年代）钢筋混凝土结构开始于西欧的德国和法国（那时主要用于柱、基础、挡土墙、拱、刚架），1892 年法国人把钢筋混凝土用于楼盖，1925 年德国人第一次将钢筋混凝土用于薄壳，1928 年法国人第一次创造了预应力结构（虽然预应力只有 80 多年历史但发展却很快），目前，钢筋混凝土结构已在

大跨、高层领域得到了长足的发展,其应用范围也越来越广(应用领域遍及工业与民用建筑、地下建筑、桥梁、涵洞、港口、码头等各种各样的工程)。另外,钢筋混凝土结构在材料方面也在向高强、轻质、耐久、抗震的方向发展(美国已制成C200混凝土。20世纪60年代以后又出现了纤维混凝土,人们通过向混凝土中掺加纤维改善混凝土的性能,从而使混凝土性能的研究与应用得到了相当的发展。掺加的纤维类型也多种多样,有钢纤维、耐碱玻璃纤维、尼龙等。同时,人们还发展了树脂混凝土、聚酯树脂混凝土、环氧树脂混凝土,这些混凝土强度高、成型好、耐腐蚀性强,多用于冶金、化工部门以及海洋结构、高速公路路面、卫生间设备及建筑装饰等领域)。钢筋混凝土结构的计算理论也经历了初期的以弹性理论为基础的容许应力法(此种方法与实际情况有较大出入)到现代混凝土理论的过渡,人们对混凝土的认识水平逐渐由浅至深,20世纪40年代人们提出按破坏阶段进行的计算方法,20世纪50年代在对荷载和材料变异性能不断研究的基础上又提出了按极限状态的计算方法(目前,经过几十年的检验,这种方法的理论得到了不断发展与完善并已为多数国家所接受)。我国1920年开始使用钢筋混凝土,1955年以后开始建立预应力混凝土基地,50多年来在结构形式和应用范围上钢筋混凝土结构应用不断扩大,我国钢筋混凝土设计也大致经历了3个不同发展阶段:1949~1965年直接采用外国规范,前期按破坏阶段计算方法,后期按极限状态计算方法;1966~1988年采用我国自行编制的《钢筋混凝土结构设计规范》,1989~2002年《混凝土结构设计规范》采用了以概率理论为基础的极限状态设计方法并用多个经验系数进行表达,2002年以后《混凝土结构设计规范》设定了可靠度指标并将建筑结构的计算方法与国际接轨;2011年7月1日以后《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)从以构件计算为主扩展到了整体结构设计,使混凝土结构的设计更加科学与合理。尽管目前人们已经在混凝土领域取得了骄人的业绩,但由于混凝土材料力学性能的复杂性和离散性,目前还没能建立起较为完善的强度和变形理论(有关混凝土强度和变形规律很大程度上依赖于试验给出的经验公式),因此,混凝土结构的研究与实践活动任重道远。

1.1.1 混凝土的物理力学性能

1.1.1.1 混凝土的强度

目前,混凝土的强度可有4种衡量方法,即立方体抗压强度、棱柱体轴心抗压强度、轴心抗拉强度、复合受力强度。

(1) 立方体抗压强度 土木工程领域为满足设计施工和质量检验的需要必须对混凝土的强度规定统一的级别(即混凝土强度等级)。我国用立方体试块的单轴抗压强度作为确定强度等级的度量标准,称为混凝土立方体抗压强度。我国对混凝土强度等级的规定是:用边长150mm的标准立方体试块在标准条件下(温度 $20^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$,相对湿度90%以上)养护28天,在压力机上以标准试验方法,中心加载,平均速度为 $0.3\sim 0.8\text{N}/(\text{mm}^2\cdot\text{s})$,试件上下表面不涂润滑剂测得的具有95%保证率的破坏时的平均压应力为混凝土立方体抗压强度。我国《混凝土结构设计规范》规定,混凝土强度等级按立方体抗压强度标准值确定(用符号 $f_{\text{cu},k}$ 表示,共分14个等级,即C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80。例如,C35表示立方体抗压强度标准值为 $35\text{N}/\text{mm}^2$,其中C50及C50以上属高强混凝土)。由于混凝土本身的性质(特别是微裂缝的存在)会使混凝土承受均匀外压力时内部处于复杂应力状态,最终导致破坏的是垂直于压力方向的横向拉应力。水泥、水、骨料组成的混凝土在硬结过程中会形成未水化的水泥颗粒、处于流动状态尚未硬结的凝胶体、已硬化的结晶体(水泥石)和多余的水分、气泡等,凝结初期,由于水泥石的收缩及泌水以及骨料下沉等原因,在骨料与水泥石接触面上以及水泥石内部将形成微裂缝,这是材料破坏的内因(是固有的薄弱环节,见图1-1-2)。从图1-1-2可见, σ 较小($\leq f_c/3$)时混凝土变形主要由骨料和水泥石结晶体受力后的弹性变形所致,随 σ 的加大水泥凝胶体的黏性流动增大并形成塑性变形而使 σ - ϵ 曲线开始弯曲(同时,在压应力下原有微裂缝扩展,在水泥石中的气泡、水分逸出形成的孔洞产生应力集中而形成新的裂缝,但此阶

段裂缝稳定,若力不增加即不再出现新的裂缝),当 $\sigma \approx 0.8f_c$ 时 ϵ 较 σ 增加更快且横向应变也明显加大(此时骨料处的黏结裂缝与水泥石中的裂缝已发展贯通,裂缝发展进入非稳定状态,即使荷载不增大裂缝也将继续开展并导致混凝土被分割成若干平行于受力方向的小柱体),当 $\sigma \approx f_c$ 时骨料与水泥石的黏结基本丧失(试件剥落、压酥、破坏)。由此,不难看出,混凝土宏观破坏是裂缝累积的过程,是内部结构局部损伤到连续性遭受破坏(裂缝贯通),导致整个体系解体而丧失承载能力的过程而绝非是组成相(骨料、砂浆等)自身强度耗尽。在立方体抗压强度试验中,试块承压面与垫板间存在摩擦力而使试块上下表面的横向变形受到约束、剥落较少(但越向中间剥落越多,因而形成三角形残体),若在垫板之间涂润滑剂、减少摩擦力则破坏残体为带有多条纵向裂缝的立方体(见图1-1-3)。

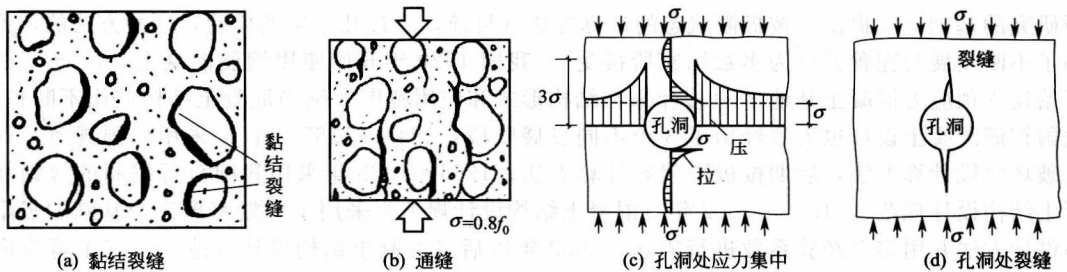


图 1-1-2 混凝土中的微裂缝示意

影响混凝土立方体抗压强度的因素主要有3个,即尺寸、加荷速度、龄期。大量的混凝土试验显示同样的混凝土材料采用不同尺寸的立方体试件测得的强度明显不同,立方体的尺寸越小测得的强度越高(反之越低),故当采用边长为200mm和100mm的立方体试件时其测得的抗压强度应分别乘以1.05和0.95的换算系数以考虑尺寸效应的影响。大量的混凝土试验还表明,加荷速度越快测得的抗压强度越高,故通常规定的加荷速度为C30以下混凝土取每秒0.3~0.5N/mm²、C30或C30以上的混凝土取每秒0.5~0.8N/mm²。另外,人们发现混凝土的立方体抗压强度与试块成型后的龄期有关,龄期越长强度越高,其增长速度是先快后慢,强度增长过程往往要持续几年且在潮湿环境中往往会延续更长(见图1-1-4)。

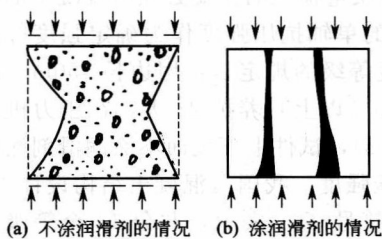


图 1-1-3 混凝土立方体试块破坏图

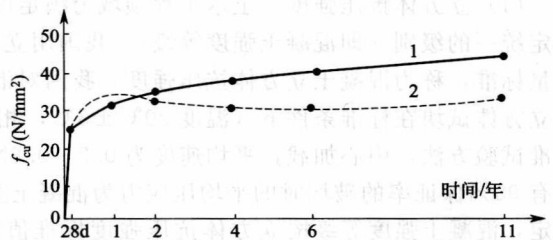


图 1-1-4 混凝土立方体强度随龄期的变化

(2) 棱柱体轴心抗压强度 由于实际工程中混凝土构件高度通常比截面边长大很多,故柱体受压试件更接近实际构件的受力状况。因此,在确定棱柱体试件尺寸时为使棱柱体试件强度不受试验机压板与试件间摩擦力的影响试件必须应有一定的高度以便在试件中间形成纯压状态(当然,也应避免试件过高。试件过高会产生附加偏心矩而降低抗压强度。研究资料表明试件高宽比 $h/b=3$ 左右基本可消除上述两种因素的影响)。我国采用150mm×150mm×450mm的棱柱体作为混凝土轴心抗压强度的标准试件,用与混凝土立方体抗压强度试验相同的方法(见图1-1-5),即可得到棱柱体轴心抗压强度标准值(用符号 f_{ck} 表示),从图1-1-6的试验结果可看出试验值 f_c 和 f_{cu} 的统计平均值大致为一条直线(比值大致在0.70~0.92之间)。考虑到实际结构构件制作、

养护和受力情况以及实际构件强度与试件强度之间的差异，轴心抗压强度标准值与立方体抗压强度标准值的关系可按式 (1-1-1) 确定，即

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k} \quad (1-1-1)$$

式中， α_{c1} 为棱柱体强度与立方体强度之比值 (C50 及 C50 以下混凝土取 $\alpha_{c1} = 0.76$ 、C80 混凝土取 $\alpha_{c1} = 0.82$ ，中间则按线性规律变化)； α_{c2} 为 C40 以上混凝土脆性折减系数 (C40 取 $\alpha_{c2} = 1.0$ 、C80 取 $\alpha_{c2} = 0.87$ ，中间仍按线性规律变化)；0.88 为考虑实际构件与试件混凝土强度之间的差异对混凝土强度施加的修正系数。

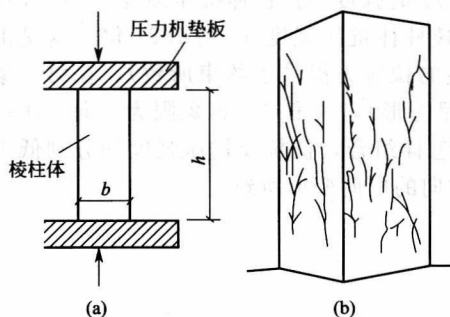


图 1-1-5 混凝土棱柱体抗压试验与破坏

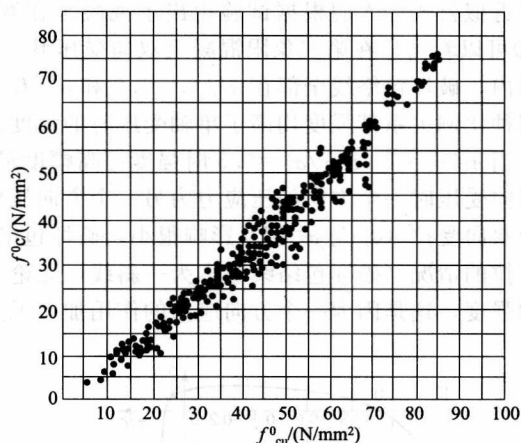


图 1-1-6 混凝土轴心抗压强度和立方体抗压强度的关系

(3) 轴心抗拉强度 混凝土的抗拉强度是确定混凝土构件抗裂能力的重要指标 (在抗扭、抗冲切等计算中也要用到这个指标)，测定混凝土轴心抗拉强度目前多采用 2 种方法 (即直接受拉或劈裂试验)。直接受拉法见图 1-1-7，试验机夹紧试件两端伸出的钢筋使构件受拉，破坏时在试件中部会出现横向裂缝，其平均拉应力即为混凝土轴心抗拉强度 (这种试件制作时预埋钢筋对中较困难，通常情况下，偏心影响会使测得的抗拉强度比实际强度略低)。为克服偏心对抗拉强度的影响，国内外也常以圆柱体或立方体试件做劈裂试验来测定混凝土的轴心抗拉强度 (见图 1-1-8)。通过上下两根截面为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的方钢条对平放的圆柱体或立方体对中施加线荷载，根据弹性理论，试件在竖直中面上除两端局部区域外将产生均匀水平拉应力，试件劈裂时的水平拉应力即为混凝土轴心抗拉强度 $f_{t,s}$ (单位为 N/mm^2)，可用公式进行表达，即

$$f_{t,s} = 2F / (l\pi d) \quad (1-1-2)$$

式中， F 为破坏荷载，N； d 为立方体边长或圆柱体直径，mm； l 为立方体边长或圆柱体试件的长度，mm。

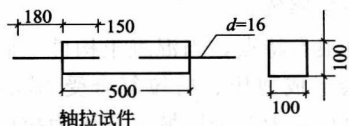


图 1-1-7 直接受拉试验示意

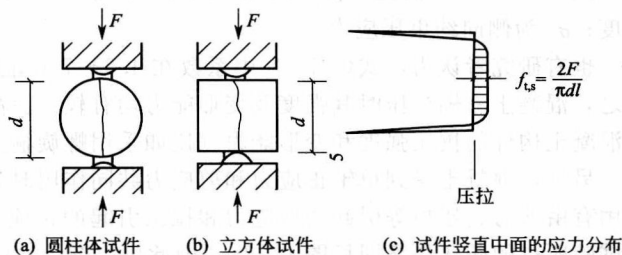


图 1-1-8 混凝土劈裂试验示意

大量试验表明，劈裂抗拉强度会略大于直接受拉强度且劈裂试件的尺寸对强度有一定影响

(若用边长 100mm 的立方体试件代替边长 150mm 的立方体试件, 其试验结果应乘 0.85 的折减系数)。轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 的关系为

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \times \alpha_{c2} \quad (1-1-3)$$

式中, δ 为变异系数; 0.88 和 α_{c2} 的取值及含义同式(1-1-1)。

(4) 复合受力强度 实际工程中的混凝土结构构件通常会受到轴力、弯矩、剪力、扭矩等不同组合的作用而很少处于单轴受力状态, 因此, 混凝土的材料特点决定了它在复合受力状态和单向受力状态有不同的特性, 但由于混凝土材料及其复杂性, 目前只能主要依据一些试验研究结果得出近似公式。人们根据试验得出了混凝土在双向应力作用下的强度曲线(见图 1-1-9)。从图 1-1-9 可以看出, 在第三象限混凝土双向受压其一向的强度随另一向压力的增大而增大(在整个象限内, 破坏包络线全部在 $\sigma_2/f_c = 1.0$ 和 $\sigma_1/f_c = 1.0$ 之外, 说明双向受压时不管 σ_1 与 σ_2 间存在何种比例关系其强度均高于单轴受压时的强度。当 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时强度为棱柱体抗压强度 f_c 的 1.16 倍; 当 $\sigma_1/\sigma_2 = 2$ 或 $\sigma_1/\sigma_2 = 0.5$ 时强度提高幅度最大, 为棱柱体抗压强度 f_c 的 1.27 倍, 这是由于双向受压时一个方向的压应力为另一个方向压应力产生的拉应力提供了约束所致), 在第一象限为双向受拉(σ_1 与 σ_2 相互影响很小, 破坏包络线几乎呈方形), 在第二、四象限为一向受压一向受拉的情况(破坏包络线基本为一斜线, 无论 σ_1 与 σ_2 怎样组合, 抗拉及抗压强度均分别低于单轴强度, 这是因为一个方向应力的作用加大了另一个方向的横向变形所致)。

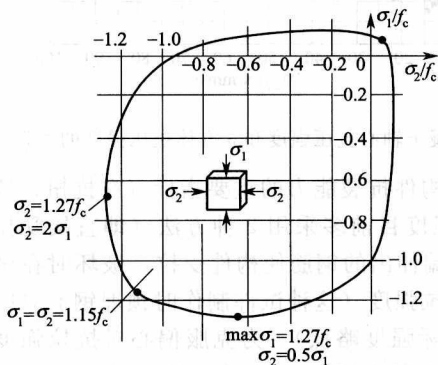


图 1-1-9 双向应力状态下混凝土强度曲线

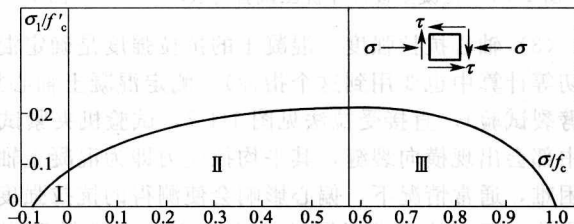


图 1-1-10 正应力和剪应力共同作用下混凝土破坏曲线

混凝土三向受压时由于侧向压应力的存在会约束混凝土的横向变形并使混凝土抗压强度、极限变形能力均有较大程度的提高, 三轴压力试验是在圆柱体周围加液压进行的, 1928 年美国 Richart 等得到的经验公式为

$$f'_{cc} = f'_c + 4.1\sigma_2 \quad (1-1-4)$$

式中, f'_{cc} 为三轴受压状态混凝土圆柱体沿纵轴的抗压强度; f'_c 为混凝土单轴受压时的抗压强度; σ_2 为侧向约束压应力。

也有研究者认为, 式(1-1-4)中系数在 4.5~7.0 范围内变化、其平均值为 5.6 而不是 4.1。总之, 混凝土三轴受压时其强度及变形能力均有较大提高, 人们在实际工程中常利用此特性来提高混凝土构件的抗压强度和变形能力(比如采用螺旋箍筋、加密箍筋等)。

另外, 混凝土受到单轴正应力和剪应力共同作用时其强度也很有特点, 当混凝土构件上同时作用有由剪力、扭矩等引起的剪应力和拉压引起的正应力 σ 时会形成剪压、剪拉复合受力状态, 其试验所得的破坏包络图见图 1-1-10, 因此可将图 1-1-10 中的面积分为 3 个区域(I 区为拉剪状态, 随 τ 的加大抗拉强度下降, 随着 σ 的增大抗剪强度下降。II 区为压剪状态, 随 σ 的增大抗剪强度增加, 原因是压应力在剪切面产生的约束剪切变形的摩擦作用使抗剪强度提高。III 区为压剪状态, 随 σ 的进一步加大其抗剪能力反而开始下降)。

1.1.1.2 混凝土的变形

(1) 一次短期加荷下混凝土的变形性能 棱柱体混凝土试件在一次短期加荷下混凝土受压应力-应变全曲线反映了受荷各阶段混凝土内部结构变化及破坏机理, 是研究混凝土结构极限强度理论的重要依据 (见图 1-1-11)。

图 1-1-11 所示曲线可分为上升段 OC 和下降段 CE 。在上升段 $\sigma < 0.3f_c$ 时 OA 段混凝土受拉的应力-应变曲线和受压的应力-应变曲线类似, 对应峰值应力的拉应变为 $0.00015 \sim 0.0002$, 通常取 0.00015 , 应力-应变关系接近直线, 混凝土变形主要取决于骨料和水泥石的弹性变形称为弹性阶段; 当 σ 在 $0.3f_c \sim 0.8f_c$ 之间时由于水泥凝胶体的塑性变形使应力-应变曲线开始凸向应力轴, 随 σ 加大微裂缝开始扩展并出现新的裂缝, 在 AB 段混凝土表现出明显的塑性, $\sigma = 0.8f_c$ 可作为混凝土长期荷载作用下的极限强度。当 $\sigma > 0.8f_c$ 时微裂缝发展贯通, ϵ 增长更快, 曲线曲率随荷载不断增加应变加大, 表现为混凝土体积加大直至应力峰值点 C , 此时对应的应变为 ϵ_0 、通常取 0.002 。 C 点以后裂缝迅速、应力-应变曲线快速发展, 由于坚硬骨料颗粒的存在沿裂缝面产生摩擦滑移, 试件能继续承受一定的荷载并产生变形, 使应力-应变曲线出现下降段 CE , 下降段曲线的凹象开始改变, 即曲率为零的点 D 称为拐点。 D 点以后试件破裂, 但破裂的碎块逐渐挤密仍保持一定的应力 (至收敛点 E , 曲线平缓下降, 这时贯通的主裂缝已经很宽), 对无侧限的混凝土 E 点以后的曲线已无实际意义。曲线达 C 点时已达强度峰值 (但此时混凝土变形能力未达极限。当混凝土应变达极限值 ϵ_{max} 时其应力已下降。由此可以看出, 混凝土应力最大和应变最大不在同一点。下降段对构件延性的研究有重要的意义)。

人们为进行混凝土结构理论分析常需准确拟合混凝土受压应力-应变曲线, 为此, 国内外学者做了大量的研究工作, 提出了多种数学表达式, 这些表达式就是人们俗称的混凝土材料本构方程, 目前较常用的有美国 E. Hognestad 建议的方程 (见图 1-1-12) 和德国 Rüschi 建议的方程 (见图 1-1-13)。

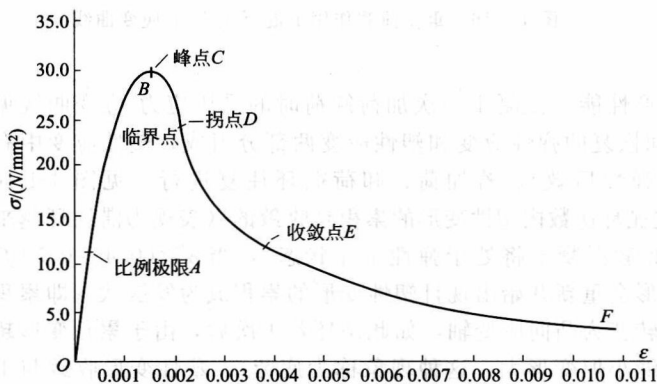


图 1-1-11 混凝土棱柱体受压

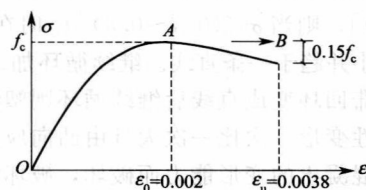


图 1-1-12 Hognestad 建议的应力-应变曲线

Hognestad 方程的基本形式是, 当 $\epsilon \leq \epsilon_0$ 时 (上升段) $\sigma = f_c [2\epsilon/\epsilon_0 - (\epsilon/\epsilon_0)^2]$; 当 $\epsilon_0 < \epsilon \leq \epsilon_u$ 时 (下降段) $\sigma = f_c [1 - 0.15(\epsilon - \epsilon_0)/(\epsilon_u - \epsilon_0)]$, 其中, $\epsilon_0 = 0.002$ 、 $\epsilon_u = 0.0038$ 。Rüschi 方程的基本形式是, 当 $\epsilon \leq \epsilon_0$ 时 (上升段) $\sigma = f_c [2\epsilon/\epsilon_0 - (\epsilon/\epsilon_0)^2]$; 当 $\epsilon_0 < \epsilon \leq \epsilon_u$ 时 (下降段) $\sigma = f_c$, 其中, $\epsilon_0 = 0.002$ 、 $\epsilon_u = 0.0035$ 。我国多采用 Rüschi 方程但取 $\epsilon_u = 0.0033$ 。

影响混凝土应力-应变曲线形状的因素主要有混凝土强度等级、加荷速度、试件尺寸等。大量试验表明, 混凝土强度的变化对上升段的形状和峰值应变的影响不显著 (但对下降段影响较大。低强度混凝土的下降段较明显且延伸较长、较平缓; 高强度混凝土的下降段坡度较陡、较短, 见图 1-1-14。这说明高强度混凝土较低强度混凝土的延性差)。大量试验还显示加荷速度越

高应力越大（但峰值应力对应的应变减小）、曲线的下降越陡、 ϵ_{\max} 越小（见图 1-1-15）。另外，大量试验还显示混凝土试件尺寸小， ϵ_0 的值相应增大。

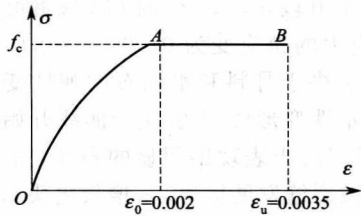


图 1-1-13 Rüschi 建议的应力-应变曲线

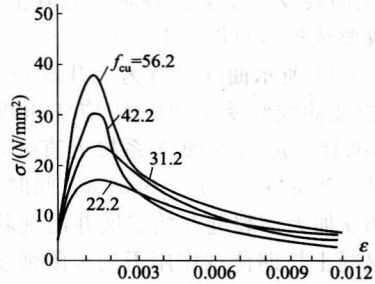


图 1-1-14 不同强度混凝土的应力-应变关系

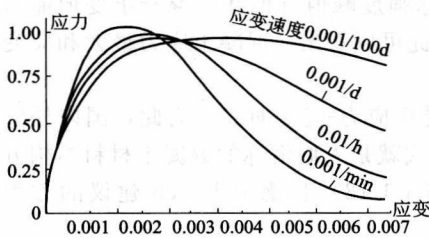


图 1-1-15 不同应变速度混凝土受压应力-应变曲线

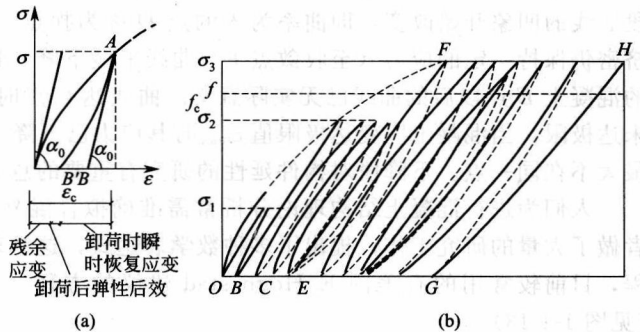


图 1-1-16 重复荷载作用下混凝土应力-应变曲线

(2) 混凝土在重复荷载作用下的变形性能 混凝土一次加荷卸荷时的受压应力-应变曲线见图 1-1-16(a)，图中应变 ϵ_c 由卸荷时瞬间恢复的弹性应变和塑性应变两部分组成，塑性应变中有约 10% 经过一段时间后还可恢复（称弹性后效）。若加荷、卸荷循环往复进行 [见图 1-1-16(b)]，则当 $\sigma < (0.4 \sim 0.5) f_c$ 时在一定循环次数内塑性变形的累积是收敛的（表现为滞回环越来越小并趋于一条直线。继续循环加载、卸载混凝土将处于弹性工作状态），当 $\sigma \geq (0.4 \sim 0.5) f_c$ 时滞回环变成直线后继续循环则塑性变形会重新开始出现且塑性变形的累积成为发散状（即累积塑性变形一次比一次大且由凸向应力轴转变为凸向应变轴，如此循环若干次后，由于累积变形超过混凝土的变形能力而破坏，破坏时裂缝小但变形大，这种现象称为疲劳）。塑性变形收敛与不收敛的界限就是材料的疲劳强度，大致在 $(0.4 \sim 0.5) f_c$ 之间，此值与荷载的重复次数、荷载变化幅值及混凝土强度等级等有关，通常以使材料破坏所需的荷载循环次数不少于 200 万次时的疲劳应力作为疲劳强度。

(3) 混凝土的变形模量和泊松比 混凝土结构构件的裂缝、变形等计算常需引入混凝土材料应力-应变之间关系的模量。材料力学中线弹性材料的弹性模量 E 为 $E = \sigma/\epsilon = \text{常数}$ ，即 E 为 $\sigma-\epsilon$ 直线的斜率。由于混凝土是弹塑性材料， $\sigma-\epsilon$ 曲线不是直线，因此，人们目前多以 4 种方式表示应力-应变的关系，即原点弹性模量 E_c 、变形模量 E'_c 、切线模量 E''_c 、剪切模量 G 。见图 1-1-17， E_c 为 $\sigma-\epsilon$ 曲线原点处的切线斜率（称为混凝土的弹性模量，也称原点模量），其计算式为 $E_c = \tan \alpha_0 = \sigma_c / \epsilon_{\text{ela}}$ ，原点弹性模量的稳定数值不易从试验中测出，因此可采用棱柱体试件取应力上限为 $\sigma = 0.5 f_c$ 、反复加荷 5~10 次 [由于混凝土的非弹性性质，每次卸载至 0 时都会留有残余变形。但随着重复次数的增加（5~10 次）变形也将基本趋于稳定， $\sigma-\epsilon$ 关系也接近直线，该直线