



普通高等教育“十二五”规划教材

混凝土结构 (上册)

蓝宗建 主 编
王曙光 编 写
刘伟庆 梁书亭





普通高等教育“十二五”规划教材

混凝土结构 (上册)

主 编 蓝宗建
编 写 刘伟庆 梁书亭 王曙光
主 审 童启明



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材，是根据中华人民共和国住房和城乡建设部新颁布的国家标准 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》和有关的规范、规程，并按照土木工程专业培养要求和全国一级结构工程师注册考试要求编写的。

本书分上、下两册，上、下两册各三篇。上册三篇为：基本概念和设计原则；钢筋混凝土结构构件；预应力混凝土结构构件。下册三篇为：混凝土梁板结构；单层厂房混凝土结构；多层和高层建筑混凝土结构。

全书在阐明物理概念和计算原理的基础上，介绍了工程设计中实用的计算方法，并列举了适量的实例。每章都有思考题和习题，可供教师教学和学生参考。

本书可作为普通高等院校土木工程专业教材，也可作为土木工程设计和施工技术人员的学习参考书。

图书在版编目（CIP）数据

混凝土结构. 上册 / 蓝宗建主编. —北京：中国电力出版社，2011.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-1991-2

I. ①混… II. ①蓝… III. ①混凝土结构—高等学校—教材 IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 156990 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 9 月第一版 2011 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 457 千字

定价 32.00 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

本书是按照土木工程专业（本科）的教学要求和全国一级结构工程师注册考试的要求，并根据中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局联合发布的 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》、GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》和 GB 50009—2001（2006 年版）《建筑结构荷载规范》及其他有关的规范和规程编写的。

全书分为上、下两册，共六篇，上、下册各三篇。上册三篇为：基本概念和设计原则；钢筋混凝土结构构件；预应力混凝土结构构件。下册三篇为：混凝土梁板结构；单层厂房混凝土结构；多层和高层建筑混凝土结构。

本书内容密切结合我国工程实际，力求文字简练，深入浅出。为了使读者既能深入地、系统地理解构件和结构的受力性能和破坏机理，又能正确地、灵活地掌握构件和结构的设计方法，全书在阐明物理概念和设计原理的基础上，介绍了工程中实用的计算方法，并列举了适量的实例（其中，包括了现浇钢筋混凝土楼盖、单层厂房排架结构和多层框架结构等三个完整的设计实例）。为了便于教学工作 and 学生学习，在各章中还提供了必要的思考题和习题。

本书可作为普通高等院校土木工程专业教材，也可作为土木工程设计和施工技术人员的学习参考书。书中有*号者为较难或较次要的内容，在教学中可根据需要适当选用。

本书由东南大学和南京工业大学合编。编写分工如下。

上册：第一章～第三章由蓝宗建执笔，第四章～第六章由蓝宗建、龚敏锋执笔，第七章、第八章由刘伟庆执笔，第九章、第十章由梁书亭执笔，第十一章～第十三章由王曙光、李威威和王钰执笔。

下册：第十四章～第十六章和第二十二章～第二十四章由蓝宗建、龚敏锋执笔，第十七章～第十九章由王曙光、李威威和王钰执笔，第二十章、第二十一章由刘伟庆、李威威执笔，第二十五章、第二十六章由梁书亭执笔。

龚敏锋协助主编做了许多校对工作。

本书由蓝宗建主编，童启明主审。

由于作者水平所限，书中有不妥或疏忽之处，敬请读者批评指正。

编 者
2011 年 6 月

目 录

前言

第一篇 基本概念和设计原则

第一章 混凝土结构的基本概念和发展简况	1
第一节 钢筋混凝土的一般概念	1
第二节 混凝土结构的发展简况	3
第二章 混凝土和钢筋的物理力学性能	5
第一节 混凝土	5
第二节 钢筋	15
第三节 钢筋和混凝土的黏结	18
第四节 钢筋的锚固	21
思考题	23
习题	23
第三章 混凝土结构设计的基本原则	24
第一节 混凝土结构设计理论发展简史	24
第二节 结构的功能要求和极限状态	25
第三节 结构的可靠度和极限状态方程	26
第四节 可靠指标和设计可靠指标	30
第五节 极限状态设计表达式	31
第六节 混凝土结构耐久性设计	34
思考题	34
习题	35

第二篇 钢筋混凝土结构构件

第四章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	36
第一节 受弯构件的一般构造要求	36
第二节 受弯构件正截面受力特性和破坏特征	38
第三节 受弯构件正截面承载力计算的基本原则	40
第四节 单筋矩形截面受弯承载力计算	45
第五节 双筋矩形截面受弯承载力计算	51
第六节 单筋 T 形截面受弯承载力计算	58
*第七节 双向受弯构件正截面承载力计算	65

思考题	68
习题	69
第五章 钢筋混凝土受压构件正截面承载力计算	70
第一节 配有纵向钢筋和普通箍筋的轴心受压构件承载力计算	70
第二节 配有纵向钢筋和螺旋箍筋的轴心受压构件承载力计算	74
第三节 偏心受压构件的二阶效应	78
第四节 偏心受压构件正截面的受力特点和破坏特征	82
第五节 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	84
第六节 I 形截面偏心受压构件正截面承载力计算	101
*第七节 矩形截面双向偏心受压构件正截面承载力计算	106
第八节 受压构件的一般构造要求	113
思考题	114
习题	116
第六章 钢筋混凝土受拉构件正截面承载力计算	117
第一节 轴心受拉构件正截面承载力计算	117
第二节 偏心受拉构件正截面承载力计算	117
*第三节 双向偏心受拉构件正截面承载力计算	121
思考题	122
习题	122
第七章 钢筋混凝土受弯构件和偏心受力构件斜截面承载力计算	123
第一节 受弯构件斜截面的受力特点和破坏形态	123
第二节 影响受弯构件斜截面受剪承载力的主要因素	127
第三节 受弯构件斜截面受剪承载力计算	130
第四节 纵向受力钢筋弯起和截断的构造措施	135
第五节 箍筋和弯起钢筋的一般构造要求	139
第六节 受弯构件斜截面承载力计算步骤	141
第七节 偏心受力构件斜截面承载力计算	146
思考题	148
习题	149
第八章 钢筋混凝土受扭构件承载力计算	151
第一节 纯扭构件的开裂扭矩和破坏形态	151
第二节 纯扭构件承载力计算	154
第三节 弯剪扭构件承载力计算	160
第四节 钢筋混凝土结构构件的协调扭转	166
第五节 受扭构件的构造要求	167
思考题	168
习题	168
第九章 钢筋混凝土构件受冲切和局部受压承载力计算	170
第一节 受冲切承载力计算	170

第二节 局部受压承载力计算.....179
 思考题.....184
 习题.....184
 第十章 钢筋混凝土构件裂缝和变形计算.....186
 第一节 裂缝和变形的计算要求.....186
 第二节 抗裂能力分析.....187
 第三节 裂缝宽度计算.....191
 第四节 刚度和挠度计算.....205
 思考题.....213
 习题.....214

第三篇 预应力混凝土结构构件

第十一章 预应力混凝土结构的基本概念和一般规定.....215
 第一节 预应力混凝土结构的基本概念.....215
 第二节 预应力混凝土结构的分类.....217
 第三节 预应力混凝土结构的材料和锚具.....219
 第四节 预应力混凝土结构构件的计算规定.....222
 第五节 预应力混凝土结构的构造规定.....229
 思考题.....234
 习题.....234
 第十二章 预应力混凝土轴心受拉构件的计算.....235
 第一节 预应力混凝土轴心受拉构件各阶段的应力分析.....235
 第二节 预应力混凝土轴心受拉构件使用阶段的计算.....243
 第三节 预应力混凝土轴心受拉构件施工阶段的验算.....246
 思考题.....251
 习题.....251
 *第十三章 预应力混凝土受弯构件的计算.....252
 第一节 预应力混凝土受弯构件各阶段的应力分析.....252
 第二节 预应力混凝土受弯构件使用阶段的计算.....258
 第三节 预应力混凝土受弯构件施工阶段的验算.....270
 思考题.....279
 习题.....279

附表.....281
 参考文献.....290

第一篇 基本概念和设计原则

第一章 混凝土结构的基本概念和发展简况

第一节 钢筋混凝土的一般概念

钢筋混凝土是由两种力学性能不同的材料——钢筋和混凝土结合成整体，共同发挥作用的一种建筑材料。

混凝土是一种人造石材，其抗压强度很高，而抗拉强度很低(约为抗压强度的 $1/18 \sim 1/8$)。当用混凝土梁承受荷载时 [图 1-1 (a)]，梁的正截面（即垂直于梁轴线的截面）上受到弯矩作用，其中和轴以上受压，以下受拉。随着荷载逐渐增大，混凝土梁中的压应力和拉应力将增大，其增大的幅度大致相同。当荷载较小时，梁的受拉区边缘的拉应力未达到其抗拉强度，梁尚能承担荷载。当荷载达到某一数值 P_c 时，梁的受拉区边缘混凝土的拉应力达到其抗拉强度，出现裂缝，梁立即断裂 [图 1-1 (b)]。这种破坏是很突然的，即当荷载达到 P_c 的瞬间梁立即发生破坏，没有明显的预兆，这种破坏称为脆性破坏。 P_c 为混凝土梁受拉区出现裂缝的荷载，一般称为混凝土梁的开裂荷载，也是混凝土梁的破坏荷载。由此可见，混凝土梁的承

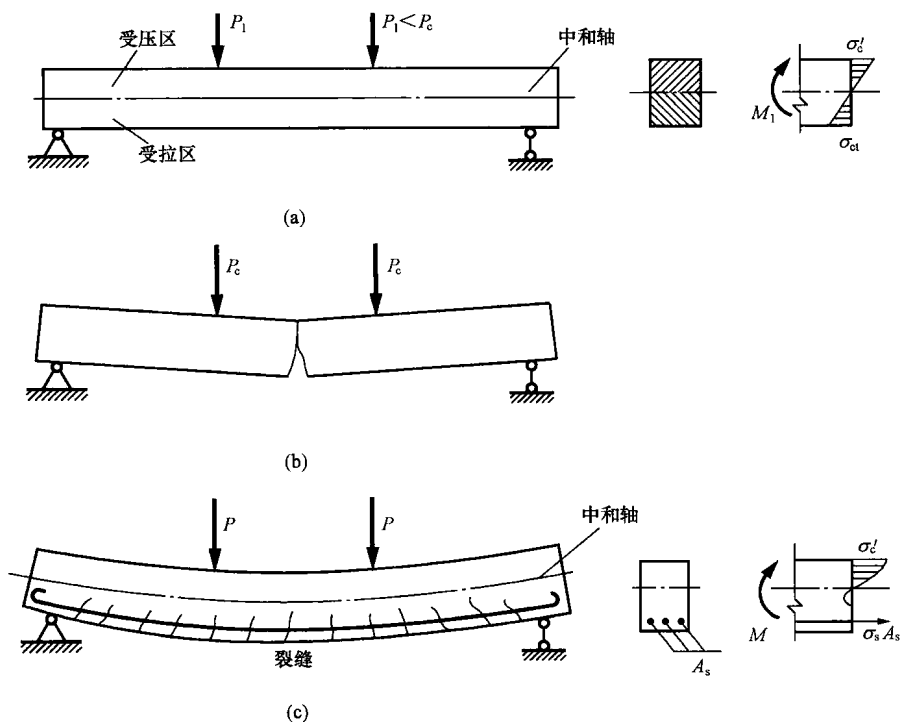


图 1-1 混凝土梁和钢筋混凝土梁

(a) 混凝土梁的应力状态； (b) 混凝土梁断裂； (c) 钢筋混凝土梁的受力状态

载力是由混凝土的抗拉强度控制的,而受压区混凝土的抗压强度则远未被充分利用。如果要使梁承受更大的荷载,则必须将其截面加大很多,这是不经济的,甚至是不可能实现的。

为了提高混凝土梁的受弯承载力,可采用抗拉强度高的钢筋来加强混凝土梁的受拉区,即在混凝土梁的受拉边配置纵向钢筋,这就构成了钢筋混凝土梁。试验表明,和混凝土梁有相同截面尺寸的钢筋混凝土梁承受荷载时,其开裂荷载虽然比混凝土梁要增大些,但增大的幅度是不大的。因此,当荷载略大于 P_c ,达到某一数值 P_{cr} 时,梁仍出现裂缝。在裂缝截面处,受拉区混凝土脱离工作,而纵向受拉钢筋将承担几乎全部的拉应力。这时,钢筋混凝土梁不会像混凝土梁那样立即断裂,而能继续承担荷载 [图 1-1 (c)],直至纵向受拉钢筋应力达到屈服强度,裂缝向上延伸,受压区混凝土达到其抗压强度而压碎,梁才告破坏。因此,钢筋混凝土梁的受弯承载力较混凝土梁提高很多,配置的纵向钢筋数量越多,强度越大,梁的受弯承载力提高越多。

由上述可见,钢筋混凝土梁充分发挥了混凝土和钢筋的特性,既利用了钢筋抗拉强度高的特性,也利用了混凝土抗压强度比抗拉强度高的特性,合理地做到了物尽其用。必须指出,与混凝土梁相比,钢筋混凝土梁的承载力提高很多,但对抵抗裂缝的能力提高并不多。

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共同工作,主要是由于混凝土和钢筋之间有着良好的黏结力,使两者能可靠地结合成一个整体。在荷载作用下,钢筋和相邻的混凝土能共同变形,共同受力。同时,钢筋和混凝土的温度线膨胀系数也较为接近(钢筋为 1.2×10^{-5} ,混凝土为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$),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,仍能共同受力。

钢筋混凝土结构除了能合理地利用钢筋和混凝土两种材料的特性外,还有下述一些优点。

(1) 在钢筋混凝土结构中,混凝土的强度是随时间而不断增长的,同时,钢筋被混凝土所包裹而不易锈蚀,所以,钢筋混凝土结构的耐久性是很好的。钢筋混凝土结构与钢结构相比维修费用极少。

(2) 混凝土的耐热性能较好,在火灾中,混凝土将对钢筋起着保护作用,钢筋不致很快达到其软化的临界温度而造成结构丧失承载力。与钢结构相比,钢筋混凝土结构的耐火性是较好的。

(3) 钢筋混凝土结构,尤其是现浇钢筋混凝土结构的整体性较好,抵抗地震、振动及强烈爆炸时冲击波作用的性能较好。

(4) 钢筋混凝土结构的刚度较大,在使用荷载下的变形较小。

(5) 新拌和的混凝土是可塑的,因此,可根据需要浇制成各种形状和尺寸的结构。

(6) 在钢筋混凝土结构所用的原材料中,砂、石所占的比重较大,易于就地取材。在工业废料(如矿渣、粉煤灰等)比较多的地区,可将工业废料制成人造骨料(如陶粒),用于钢筋混凝土结构中,这既可解决工业废料的处理问题,又可减轻结构的自重。

由于钢筋混凝土结构具有上述一系列优点,因此,在建筑工程中得到了广泛的应用。

钢筋混凝土结构也存在一些缺点,诸如:钢筋混凝土结构的截面尺寸一般较相应的钢结构大,自重较大;抗裂性能较差,在正常使用时往往是带裂缝工作;建造时耗工较多;施工受气候条件的限制;现浇钢筋混凝土需耗用大量模板;隔热、隔声性能较差;修补或拆除较困难等。这些缺点在一定程度上限制了钢筋混凝土结构的应用范围。但是,随着钢筋混凝土结构的不断发展,这些缺点正在或已经逐步得到克服。例如,采用轻质高强混凝土以减轻结

构自重；采用预应力混凝土以提高结构的抗裂性（同时，也可减轻自重）；采用工业化的现浇施工工艺以节约模板和加快施工进度。

第二节 混凝土结构的发展简况

钢筋混凝土在 19 世纪中叶开始得到应用，至今只有大约 160 年的历史。从 19 世纪 50 年代到 20 世纪 20 年代，在土木工程中开始用钢筋混凝土建造各种板、梁、柱和拱等简单的构件，所采用的混凝土和钢筋的强度都较低，钢筋混凝土构件的内力计算和截面设计都是按弹性理论进行的。20 世纪 20 年代以后，开始出现装配式钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和壳体空间结构，同时，构件承载力开始按破坏阶段计算。第二次世界大战以后，钢筋混凝土结构有了更大的发展，混凝土强度和钢筋强度不断提高，钢筋混凝土结构的应用范围不断扩大，工业化施工方法普遍采用，设计理论有了新的发展，极限状态设计方法获得了越来越广泛的应用。

目前，常用的混凝土强度已达 $20\sim 40\text{N/mm}^2$ ，必要时混凝土强度可达 $80\sim 100\text{N/mm}^2$ 。为了减轻自重，轻质高强混凝土也有了较大的发展，轻质混凝土的容重一般为 $14\sim 18\text{kN/m}^3$ 。此外，纤维混凝土、聚合物混凝土也在研究发展中，有的已在工程中开始应用。常用的热轧钢筋的屈服强度已达 500N/mm^2 ，有的可达 $600\sim 900\text{N/mm}^2$ ，用于预应力混凝土结构中的钢丝、钢绞线的抗拉强度已达 1800N/mm^2 以上。

由于材料强度的不断提高，钢筋混凝土和预应力混凝土的应用范围也不断扩大。近 30 年来，钢筋混凝土和预应力混凝土在大跨度结构和高层结构中的应用有了令人瞩目的发展。如德国采用预应力轻质混凝土建造的飞机库屋面梁跨度达 90m，日本滨名大桥的预应力混凝土箱形截面桥梁的跨度达 239m，阿拉伯联合酋长国的迪拜塔高度达 828m（168 层），台湾的 101 大厦高度达 508m，加拿大的多伦多电视塔高度达 549m。

在此期间，设计理论也有了令人瞩目的发展。20 世纪 70 年代以来，以概率论和数理统计为基础的结构可靠度理论已逐步进入工程实用阶段，使极限状态设计方法向着更为完善、更为科学的方向发展。同时，考虑混凝土非弹性变形的混凝土结构计算理论也有很大的发展，在板、连续梁和框架的设计中已得到了广泛的应用。20 世纪 60 年代后期，随着对混凝土变形性能的深入研究和电子计算机的应用，已开始将有限元法用于钢筋混凝土结构应力状态的分析，此后发展很快，利用混凝土的本构方程（应力—应变关系）及黏结条件的模式化，借助于电算，可以对构件及结构的受力全过程进行弹塑性分析和弹塑性动力分析。通过不断地充实提高，一个新的分支科学——近代钢筋混凝土力学正在逐步形成。由于将电子计算机、有限元理论和现代测试技术应用到钢筋混凝土结构的理论和试验研究中，钢筋混凝土结构的设计理论和方法日趋完善，向着更高的阶段发展。

在 19 世纪末和 20 世纪初，我国也开始有了钢筋混凝土建筑物。随着社会主义建设事业的蓬勃发展，钢筋混凝土在我国工程建设中得到了迅速的发展和广泛的应用。在 1952~1953 年，我国已开始采用装配式钢筋混凝土结构。在单层厂房中已广泛采用定型构配件和标准设计。在多层厂房中，除广泛采用板、梁、柱全装配的框架结构外，还发展了现浇柱、预制梁的半装配框架结构。同时，升板结构、滑模结构已有所发展。在一般民用建筑中，已普遍采用定型化、标准化的装配式构件。北京、南京等地区已兴建大批装配式大板住宅建筑。此外，

不少地区还推广现浇大模板居住建筑。

近几十年来,钢筋混凝土高层建筑有较快的发展。大跨度建筑也有一定的发展,一般常采用拱、门式刚架和壳体结构等。预应力混凝土结构的应用也日益广泛。近年来,预应力混凝土楼盖和预应力混凝土框架结构也有较快的发展。

随着钢筋混凝土和预应力混凝土结构在工程建设中的广泛应用,我国在这一领域的科学研究和设计规范的制订工作也取得了较大的发展。1952年,东北人民政府工业部颁布《建筑设计暂行标准》,采用了破坏阶段的计算方法,从这时起,许多设计部门开始按这一标准进行钢筋混凝土结构的设计。1955年,中华人民共和国建筑工程部制订了《钢筋混凝土结构设计暂行规范》。1956年起,不少设计部门先后参考了前苏联钢筋混凝土和预应力混凝土结构按极限状态计算的规范进行设计。1966年,中华人民共和国建筑工程部又颁布了 GJB 21—66《钢筋混凝土结构设计规范》,采用了极限状态的计算方法。20世纪70年代,在总结工程实践经验和科学研究成果的基础上,我国又编制了《预应力混凝土结构设计施工》和 TJ 10—74《钢筋混凝土结构设计规范》及有关的专门规范、规程和设计手册,这对统一设计标准、保证工程质量、节约材料、降低造价及提高设计速度等方面都起了重要的作用。

20世纪70年代以前,我国在这一领域已进行了不少试验研究工作,并取得了一定的成果。20世纪70~90年代,我国有组织、有计划地开展了一系列的科学研究工作并取得了令人瞩目的成绩。50多年来,我国在钢筋混凝土基本理论与计算方法、可靠度与荷载分析、单层与多层厂房结构、高层建筑结构、大跨度结构、结构抗震、电子技术在钢筋混凝土结构中的应用和测试技术等方面取得了很多成果,为修订和制订有关规范和规程提供了大量的科学依据。

为了提高我国建筑结构设计规范的先进性和统一性,在1984年,我国编制了 GBJ 68—84《建筑结构设计统一标准》,在2001年又进行了修订,并更名为 GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》(以下简称为《统一标准》),该标准采用了目前国际上正在发展和推行的、以概率理论为基础的极限状态设计方法,统一了我国建筑结构设计的基本原则,规定了适用于各种材料结构的可靠度分析方法和设计表达式,并对材料与构件质量控制和验收提出了相应的要求。近年来,我国又编制了 GB 50153—2008《工程结构可靠性设计统一标准》。

按照《统一标准》规定的基本原则,在总结工程建设的实践经验及科学研究成果的基础上,1989年我国编制了 GBJ 10—89《混凝土结构设计规范》,并不断进行修订,先后颁布了 GB 50010—2001《混凝土结构设计规范》和 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(以下简称《规范》),将我国的混凝土结构设计提高到一个新的水平,这对混凝土结构的发展有着重大的影响。

第二章 混凝土和钢筋的物理力学性能

第一节 混 凝 土

一、混凝土的强度

混凝土强度主要可分为立方体抗压强度、轴心抗压强度和轴心抗拉强度等。

(一) 混凝土立方体抗压强度

混凝土立方体抗压强度（简称立方体强度）是衡量混凝土强度的主要指标，其不仅与养护时的温度、湿度和龄期等因素有关，而且与试件的尺寸和试验方法有密切关系。在一般情况下，试件的上下表面是不涂润滑剂的，因此，试件表面与试验机承压板之间将产生阻止立方体横向变形的摩阻力，延缓了裂缝的发展，从而提高了立方体的抗压强度。破坏时，立方体中部剥落，其破坏形状如图 2-1（a）所示。如果在立方体的上下表面涂上润滑剂，摩阻力就大大减小，所测得的立方体抗压强度较低，其破坏形状如图 2-1（b）所示。工程上实际采用的是不加润滑剂的试验方法。

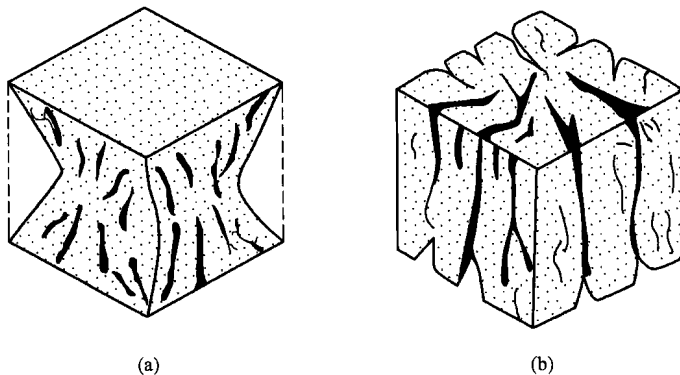


图 2-1 混凝土立方体受压破坏

(a) 不涂润滑剂的立方块；(b) 涂润滑剂的立方块

试验表明，立方体抗压强度还与立方体尺寸有关，立方体尺寸越小，摩阻力的影响越大，测得的抗压强度也越高。《规范》规定，混凝土立方体抗压强度是指按标准方法制作养护的边长为 150mm 的立方体试件在 28 天或设计规定龄期，用标准试验方法测得的抗压强度。

在生产实际中，有时也采用边长为 100mm 或 200mm（现在已很少采用）的立方体试件，则测得的立方体强度应分别乘以换算系数 0.95 或 1.05。

《规范》所规定的混凝土强度等级是按立方体抗压强度标准值确定，即按上述方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度（详见本书第三章第六节），用符号 C 表示。《规范》规定的混凝土强度等级有 14 级，为 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75 和 C80。在钢筋混凝土结构中，混凝土强度等级不应低于 C20；当采用 400MPa 和 500MPa 级钢筋时，混凝土强度等级不宜低于 C25；承受重复荷载的钢筋混凝土构件，混凝

土强度等级不宜低于 C30；预应力混凝土结构的混凝土强度等级不宜低于 C40，且不应低于 C30。

（二）混凝土轴心抗压强度

混凝土的抗压强度与试件尺寸和形状有密切关系。在实际工程中，一般受压构件不是立方体而是棱柱体，即构件的高度要比横截面边长大，构件的抗压强度将与立方体抗压强度不同。因此，有必要测定棱柱体的抗压强度，以更正确地反映构件的实际受力情况。试验表明，棱柱体的抗压强度较立方体的抗压强度低。棱柱体高度与其横截面边长之比越大，强度越低。当高宽比由 1 增至 2 时，混凝土强度降低很快，但当高宽比由 2 再增大到 4 时，其抗压强度变化不大。当高宽比在此范围内，既可消除垫板与试件接触之间摩阻力对抗压强度的影响，又可避免试件因纵向弯曲而产生的附加偏心距对抗压强度的影响，测得的棱柱体抗压强度较稳定。因此，GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》规定，混凝土轴心抗压强度试验以 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 300\text{mm}$ 的棱柱体为标准试件。混凝土轴心抗压强度又可称为混凝土棱柱体抗压强度。

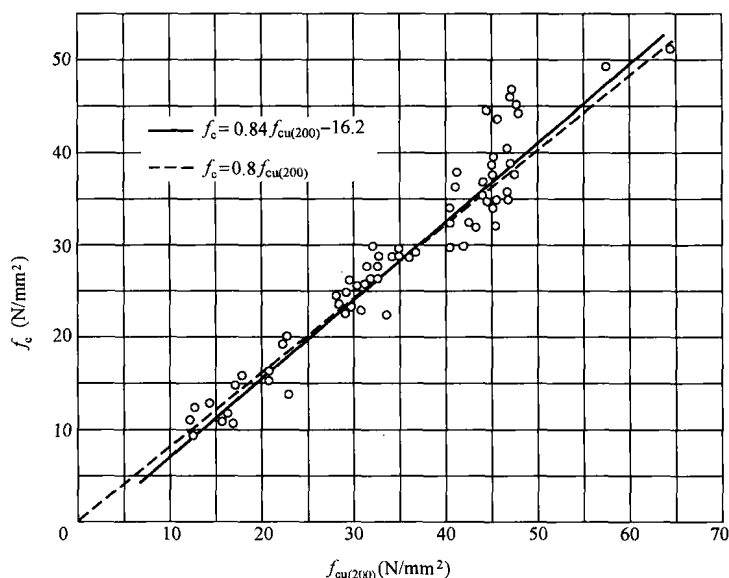


图 2-2 混凝土轴心抗压强度与立方体强度的关系

棱柱体抗压强度与立方体抗压强度之间的关系很复杂，与很多因素有关，试件大小、混凝土组成、试验方法等都将对抗压强度产生影响。根据国内 349 组棱柱体（高宽比为 3~4）的强度试验结果，在立方体（ $200\text{mm}\times 200\text{mm}\times 200\text{mm}$ ）强度 $f_{cu(200)}$ 为 $16\sim 50\text{N/mm}^2$ 的范围内，轴心抗压强度与立方体（ $200\text{mm}\times 200\text{mm}\times 200\text{mm}$ ）强度之比平均为 0.80。图 2-2 所示为 120 组截面为 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 的棱柱体抗压强度的试验结果。按《规范》规定采用 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 的立方体强度 f_{cu}° 时，则轴心抗压强度与立方体强度的比值为 0.76，考虑到试件尺寸不统一，试件与实际结构受力情况的差异及多年来的工程实践经验，将 0.76 乘以系数 0.88 予以修正，则得轴心抗压强度 f_c° 与立方体强度 f_{cu}° 的关系为

$$f_c^{\circ} = 0.67 f_{cu}^{\circ} \quad (2-1)$$

高强度混凝土的试验结果表明,式(2-1)中系数需适当调整。因此,对于混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的关系,《规范》采用了下列表达式

$$f_c^o = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu}^o \quad (2-2)$$

式中 α_{c1} ——棱柱体强度与立方体强度的比值,对 C50 及以下取 $\alpha_{c1}=0.76$,对 C80 取 $\alpha_{c1}=0.82$,其间按线性插入;

α_{c2} ——混凝土脆性折减系数,对 C40 及以下取 $\alpha_{c2}=1.0$,对 C80 取 $\alpha_{c2}=0.87$,其间按线性插入。

(三) 混凝土轴心抗拉强度

混凝土轴心抗拉强度和轴心抗压强度一样,都是混凝土的基本力学指标。但是,混凝土轴心抗拉强度比轴心抗压强度低得多。它与同龄期混凝土轴心抗压强度的比值为 $1/18 \sim 1/8$,其比值随着混凝土强度的增大而减小。

试验结果表明,即使是抗压强度基本相同的混凝土,由于试验方法不同(试件形状和尺寸不同,养护方法和加荷方法不同等),不同的研究者所测得的抗拉强度也不同,甚至差别很大。

混凝土轴心抗拉强度可采用直接轴向拉伸试验、弯折试验和劈裂试验三种试验方法测得。

采用直接轴向拉伸试验时,由于安装试件时很难避免歪斜和偏心,或者由于混凝土的不均匀性,其几何中心往往与物理中心不重合,这些因素对测得的结果有较大的影响,试验结果的离散性较大。采用弯折试验时,由于混凝土的塑性性能,不能准确测得混凝土轴心抗拉强度。因此,目前国内外常采用立方体或圆柱体的劈裂试验(图 2-3)来测定混凝土轴心抗拉强度。

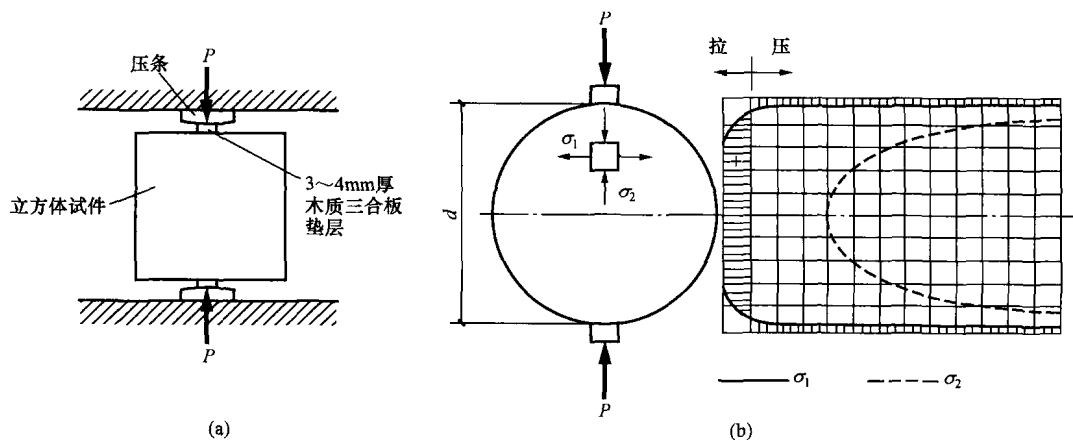


图 2-3 混凝土的劈裂试验

(a) 劈裂试验示意; (b) 竖直截面上的应力状态。

在卧置的立方体或圆柱体与加载板之间放置一压条,使上下形成对应的条形加载[图 2-3(a)]。这样,在竖直面(荷载作用平面)上将产生横向拉应力,其方向与加载方向垂直,并且基本上是均匀的[图 2-3(b)],从而形成劈裂破坏。对于立方体或圆柱体的劈裂试验,其抗拉强度可采用式(2-3)计算

$$f_t^o = \frac{2P}{\pi dl} = 0.637 \frac{P}{dl} \quad (2-3)$$

式中 f_t^o ——混凝土轴心抗拉强度实测值;

P ——劈裂荷载;

d ——立方体边长或圆柱体直径;

l ——立方体边长或圆柱体长度。

必须指出, 加载垫板、压条和试件尺寸对劈裂试验的结果有一定影响。因此, 标准试验方法给出了详细的技术条件。

对于混凝土轴心抗拉强度与立方体强度的关系, 国内外进行了大量的试验研究。由于试验方法、原材料性质和试件尺寸等具体条件不同, 试验结果尚不很一致。根据试验结果, 混凝土轴心抗拉强度 f_t^o 与立方体强度 f_{cu}^o 的关系如下

$$f_t^o = 0.395(f_{cu}^o)^{0.55} \alpha_{c2} \quad (2-4)$$

与轴心抗压强度相同, 取修正系数 0.88, 则混凝土抗拉强度为

$$f_t^o = 0.88 \times 0.395(f_{cu}^o)^{0.55} \alpha_{c2}$$

则

$$f_t^o = 0.348(f_{cu}^o)^{0.55} \alpha_{c2} \quad (2-5)$$

(四) 复合应力状态下的混凝土强度

在钢筋混凝土结构中, 混凝土一般都处于复合应力状态 (即双向应力状态或三向应力状态)。例如, 钢筋混凝土梁弯剪区段的剪压区在复合应力状态下, 混凝土的强度和变形性能与单向应力状态下有明显不同。

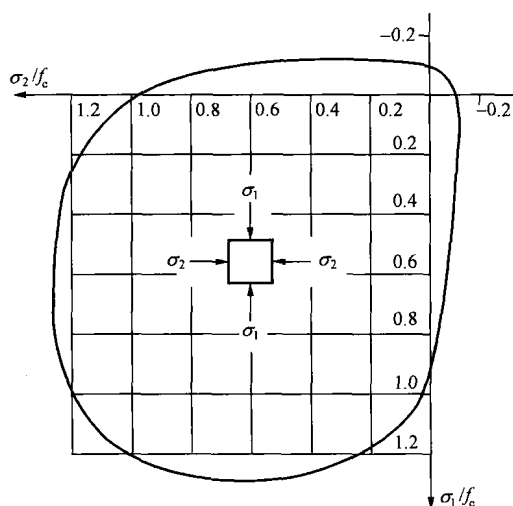


图 2-4 混凝土在双向应力状态下的强度

1. 双向应力状态

在单元体的两个互相垂直的平面上, 作用着法向应力 σ_1 和 σ_2 , 在第三个平面上应力为零, 这种应力状态即为双向应力状态。在双向应力状态下, 混凝土强度的变化曲线如图 2-4 所示, 其强度变化的特点如下:

(1) 当双向受压时 (图 2-4 中第三象限), 一向的强度随另一向压应力的增加而增大, 当横向应力与轴向应力之比为 0.5 时, 其强度比单向抗压强度增大达 25% 左右。而在两向压力相等的情况下, 其强度增大仅为 16% 左右。

(2) 当双向受拉时 (图 2-4 中第一象限), 一向抗拉强度基本上与另一向拉应力大小无关, 即其抗拉强度几乎和单向抗拉强度一样。

(3) 当一向受拉、一向受压时 (图 2-4 中第二、四象限), 混凝土的抗压强度和抗拉强度随另一向应力的增加而线性地降低。

(4) 当在单元体上除作用着剪应力 τ 外, 在一个面上同时作用着法向应力 σ , 就形成了压剪或拉剪复合应力状态, 这种应力状态也是双向应力状态。在这种应力状态下, 混凝土强度的变化曲线如图 2-5 所示。当 σ 在 $(0.5 \sim 0.7) f_c$ 以下时, 抗剪强度随着压应力的增加而增大;

当 σ 在 $(0.5\sim 0.7)f_c$ 以上时,抗剪强度随着压应力的增加而减小。同时,混凝土抗压强度由于剪应力的存在将有所降低。

2. 三向应力状态

混凝土三向受压时,混凝土一向抗压强度随另两向压应力的增大而增加,并且混凝土的极限压应变也大大增加。

混凝土圆柱体三向受压的轴向抗压强度 f_{cc} 与侧压应力 σ_c 之间的关系可用下列经验公式表示

$$f_{cc} = f_c + \beta_c \sigma_c \quad (2-6)$$

式中 β_c ——侧压效应系数,侧向压应力较低时,其值较大。较早的试验资料给出 $\beta_c=4.1$,后来的试验资料给出 $\beta_c=4.5\sim 7.0$ 。为简化起见,可取为常数4.0。

在工程实践中,为了提高混凝土的抗压能力,常常用横向钢筋(如螺旋箍筋、横向钢筋网等)来约束混凝土,以限制其横向变形,使混凝土处于三向受压的应力状态,从而大大提高混凝土的抗压强度和延性。

二、混凝土的变形

混凝土的变形可分为两类:一类是由于受力而产生的变形,另一类是由于收缩和温湿度变化而产生的变形。

(一) 混凝土在一次短期加荷时的变形性能

1. 混凝土的应力—应变曲线

混凝土的应力—应变关系是混凝土力学特性的一个重要方面,在钢筋混凝土结构承载力计算、变形验算、超静定结构内力重分布分析及结构抗震延性计算等方面,它都是理论分析的基本依据。特别是在采用电子计算机对钢筋混凝土结构进行有限元非线性分析时,混凝土的应力—应变关系已成了数学物理模型研究必不可少的依据。

典型的混凝土受压应力—应变曲线包括上升段和下降段两部分(图2-6)。在上升段,当应力在 $(0.3\sim 0.4)f_c$ 以内时,混凝土可视为线弹性体,超过 $(0.3\sim 0.4)f_c$ 时,应力—应变曲线逐渐弯曲。当应力达到峰值点C后,曲线开始下降。在下降段,曲线渐趋平缓,并有一个反弯点(D点)。

影响混凝土受压应力—应变曲线的因素很多。混凝土的强度、组成材料的性质、配合比、龄期和试验方法等对混凝土应力—应变曲线都有不同程度的影响。混凝土强度对其应力—应变曲线的影响如图2-7所示。对于上升段,混凝土强度的影响较小,与应力峰值点相应的应变大致为0.002,随着混凝土强度增大,应力峰值处的应变也稍大些。对于下降段,混凝土强度有较大影响,混凝土强度越高,应力下降速度越快,延性越差。加荷速度对混凝土应力—应变曲线的影响如图2-8所示,应变速度越大,下降段越陡。

2. 混凝土受压时纵向应变与横向应变的关系

混凝土受压时,除了在纵向产生压缩应变外,还将在横向产生膨胀应变。横向应变与纵向应变的比值称为横向变形系数 ν_c ,又称泊松比。

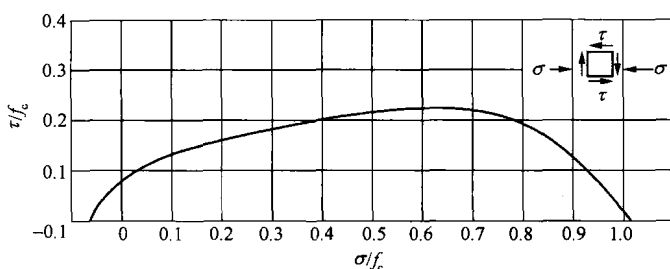


图 2-5 混凝土在法向应力和剪应力组合下的强度

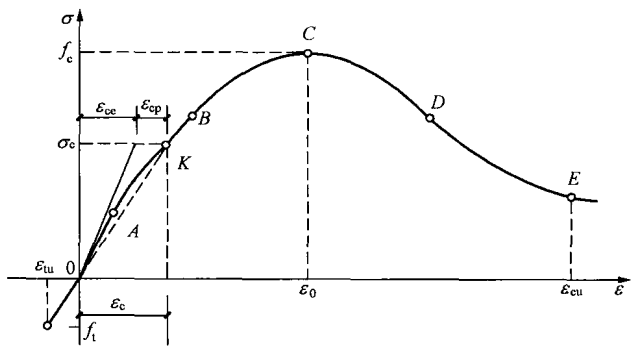


图 2-6 混凝土受压应力—应变曲线

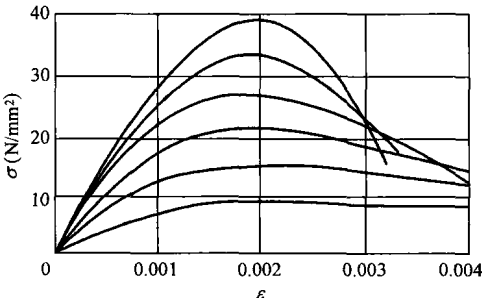


图 2-7 不同强度混凝土的受压应力—应变曲线

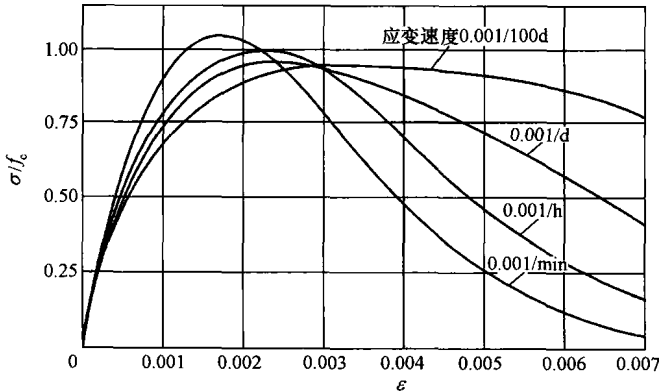


图 2-8 不同应变速度下的混凝土受压应力—应变曲线

混凝土横向变形系数与压应力的关系如图 2-9 所示。当混凝土压应力小于 $0.5f_c$ 时，横向变形系数基本上保持常数（约为 $1/6$ ，《规范》取为 0.2 ）。当混凝土压应力超过 $0.5f_c$ 时，横向变形系数逐渐增大，应力越高，增大的速度越快。

混凝土体积应变 ϵ_v 与压应力的关系如图 2-10 所示。当压应力较小时，混凝土体积随压应力增大而减小；当压应力较大时，随压应力的增大，混凝土体积不仅不减小，而且还增大，甚至超过了原来的体积。

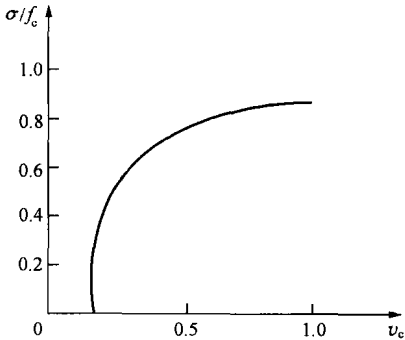


图 2-9 混凝土横向变形系数与压应力的关系

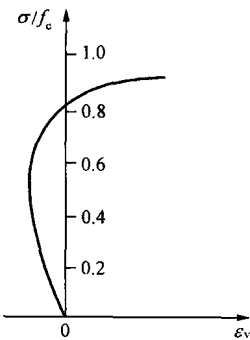


图 2-10 混凝土体积应变与压应力的关系