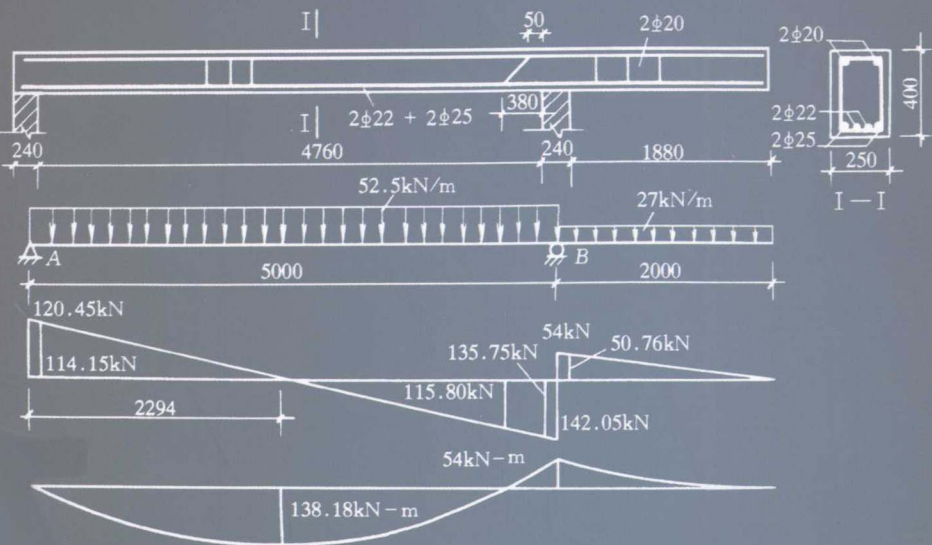


高等学校土木工程系列教材

混凝土结构原理

(第四版)

王铁成 编著



高等学校土木工程系列教材

混凝土结构原理

王铁成 编著

(第 4 版)

内 容 简 介

本教材按照教育部大学本科专业目录规定的土木工程专业培养要求,结合《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)编写,主要讲述混凝土构件的基本原理和计算方法,内容有:绪论、混凝土结构材料的物理力学性能、混凝土结构设计的基本原则、受弯构件正截面承载力和斜截面承载力、受压构件和受拉构件截面承载力、受扭构件截面承载力、钢筋混凝土构件的变形和裂缝验算,混凝土结构构件的延性、预应力混凝土构件,全书分10章。

本书可作为高等院校土建类(土木工程专业)本科生的专业基础课教材和参考书,也可供从事混凝土结构设计、混凝土结构施工的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构原理/王铁成编著. —天津:天津大学出版社,2011.9

ISBN 978-7-5618-3488-6

I. 混… II. ①王… 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 189720 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
印 刷 河北省昌黎县第一印刷厂
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm×260mm
印 张 16
字 数 399 千
版 次 2011 年 9 月第 4 版
印 次 2011 年 9 月第 1 次
印 数 1—3000
定 价 32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

第四版前言

本书是根据土木工程学科专业指导委员会制定的教学大纲编写的宽口径的专业基础课教材,以混凝土结构基本原理和基本构件设计为主要内容,是学习混凝土结构设计专业课的基础。

本书共分10章,内容包括钢筋混凝土构件和预应力混凝土构件的基本概念、设计计算原则和方法等。编写过程中注意吸收同类教材的长处,同时在内容编排上融入了长期积累的教学实践经验,突出重点,讲清楚物理力学概念、计算原理和计算方法,结合工程实际,反映国内外土木工程发展的先进科学技术。

本书是天津大学出版社出版的《混凝土结构原理》的第4版,结合《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010),对内容作了重新编写。原教材自初版以来经历了多次修订,不断完善,教材独具特色,在此第4版付梓之际,向天津大学富有声望的老一代先生们表示诚挚的敬意和感谢。

在编写中,康谷贻教授审阅了这本教材,提出了许多宝贵意见,特此表示衷心的感谢。赵海龙老师、博士生康健、杨志坚、王文进作了例题计算等工作,在此一并表示谢意。

本书可作为土木工程专业和其他相关专业的教材,也可供结构设计和施工技术人员掌握《混凝土结构设计规范》,进行混凝土结构设计的参考。

限于编者的知识有限,教材中有不妥或疏误之处,请读者批评指正。

编 者
2011年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土结构的一般概念	1
1.2 混凝土结构的发展与应用概况	3
1.3 本课程的特点和学习方法	4
第 2 章 混凝土结构材料的物理力学性能	6
2.1 混凝土的物理力学性能	6
2.2 钢筋的物理力学性能	20
2.3 混凝土与钢筋的粘结	24
第 3 章 混凝土结构基本计算原则	30
3.1 极限状态	30
3.2 按近似概率的极限状态设计法	33
3.3 实用设计表达式	36
第 4 章 受弯构件正截面受弯承载力	47
4.1 梁、板的一般构造	47
4.2 梁的受弯性能	50
4.3 正截面承载力计算的基本假定和受压区混凝土应力的计算图形	54
4.4 单筋矩形截面承载力计算	61
4.5 双筋矩形截面受弯构件正截面受弯承载力的计算	68
4.6 T 形截面受弯承载力计算	73
第 5 章 受弯构件斜截面承载力	81
5.1 概述	81
5.2 无腹筋梁的受剪性能	81
5.3 有腹筋梁的受剪性能	86
5.4 有腹筋连续梁的抗剪性能和斜截面承载力计算	91
5.5 斜截面受剪承载力设计	93
5.6 构造措施	99
第 6 章 受压构件承载力	107
6.1 受压构件的构造要求	107
6.2 轴心受压构件的正截面受压承载力	108
6.3 偏心受压构件正截面受力性能	115
6.4 偏心受压构件的二阶弯矩	118
6.5 矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力	121
6.6 不对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力	126
6.7 对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力	134
6.8 对称配筋工形截面和 T 形截面偏心受压构件	137
6.9 正截面承载力 N_u-M_u 相关曲线	142

6.10	双向偏心受压构件的正截面承载力	144
6.11	偏心受压构件斜截面受剪承载力	147
* 6.12	双向受剪承载力计算	148
第7章	受拉构件的承载力	152
7.1	轴心受拉构件的承载力	152
7.2	偏心受拉构件正截面受拉承载力	152
7.3	偏心受拉构件斜截面受剪承载力	155
第8章	受扭构件的扭曲截面承载力	156
8.1	概述	156
8.2	纯扭构件的承载力	156
8.3	纯扭构件的扭曲截面承载力	159
8.4	弯剪扭构件的扭曲截面承载力计算	166
8.5	轴向力、弯矩、剪力和扭矩共同作用下矩形截面框架柱受扭承载力	170
8.6	协调扭转构件的受扭承载力	171
8.7	配筋构造要求	171
第9章	混凝土构件的变形和裂缝宽度计算	177
9.1	混凝土构件裂缝控制验算	177
9.2	受弯构件的挠度验算	185
9.3	钢筋混凝土构件的延性	191
9.4	混凝土结构耐久性设计	197
第10章	预应力混凝土构件	201
10.1	概述	201
10.2	施加预应力的方法	202
10.3	预应力混凝土的材料和锚夹具	203
10.4	张拉控制应力和预应力损失	205
10.5	先张法构件预应力钢筋的传递长度	212
10.6	预应力混凝土构件的构造要求	213
10.7	预应力混凝土轴心受拉构件的计算	217
10.8	预应力混凝土受弯构件	229
附录		238
参考文献		248

第 1 章 绪 论

1.1 混凝土结构的一般概念

1.1.1 混凝土结构的定义与分类

以混凝土为主要材料的结构称为混凝土结构。混凝土结构主要包括钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和素混凝土结构。配置受力普通钢筋、钢筋网或钢骨架的混凝土结构称为钢筋混凝土结构；配置预应力钢筋再经过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土结构称为预应力混凝土结构；无钢筋或不配置受力钢筋的混凝土结构称为素混凝土结构。钢筋混凝土结构是工业和民用建筑、桥梁、隧道、矿井以及水利、海港等工程中广泛使用的结构形式。本课程着重讲述钢筋混凝土结构构件和预应力混凝土结构构件的设计原理。

1.1.2 配筋的作用与要求

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种不同材料组成的。钢筋混凝土结构是利用混凝土的抗压能力较强而抗拉能力很弱，钢筋的抗拉能力很强的特点，用混凝土主要承受压力，钢筋主要承受拉力，二者共同工作，以满足工程结构的使用要求。

图 1-1(a)、(b) 分别表示素混凝土简支梁和钢筋混凝土简支梁的受力和破坏形态。图 1-1(a) 所示在外加集中力和自身重力作用下，梁截面的上部受压，下部受拉。对素混凝土梁，由于混凝土的抗拉性能很差，在荷载作用下跨中附近截面边缘的混凝土一开裂，梁就突然断裂，破坏前变形很小，没有预兆，属于脆性破坏类型。为了改变这种情况，在受拉一侧区域内配置适量的钢筋构成钢筋混凝土梁，见图 1-1(b)，钢筋主要承受梁中和轴以下受拉区的拉力，混凝土主要承受中和轴以上受压区的压力。由于钢筋的抗拉能力和混凝土的抗压能力都很大，受拉区的混凝土开裂后梁还能继续承受相当大的荷载，直到受拉钢筋达到屈服强度，随后，荷载再继续增加，受压区混凝土被压碎，梁告破坏。在破坏前，梁的变形较大，有明显预兆，属于延性破坏类型。

与素混凝土梁相比，钢筋混凝土梁的承载能力和变形能力会有很大提高，并且钢筋与混凝土两种材料的强度都能得到较充分的利用。

如图 1-1(c) 所示，轴心受压的柱子中通常也配置抗压强度较高的钢筋来协助混凝土承受压力，提高柱子的承载能力和变形能力。由于钢筋的抗压强度要比混凝土的抗压强度高，所以可以减小柱子的截面尺寸。另外，配置钢筋后还能改善受压构件破坏时的脆性，并且可以承受偶然因素产生的拉力。

为了使钢筋和混凝土能够协同工作，需要混凝土硬化后与钢筋之间有良好的粘结力，从而可靠地结合在一起，共同变形、共同受力。由于钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数十分接近（钢 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，混凝土 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C} \sim 1.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ），当温度变化时钢筋与

混凝土之间不会产生由温度引起的较大的相对变形造成的粘结破坏。

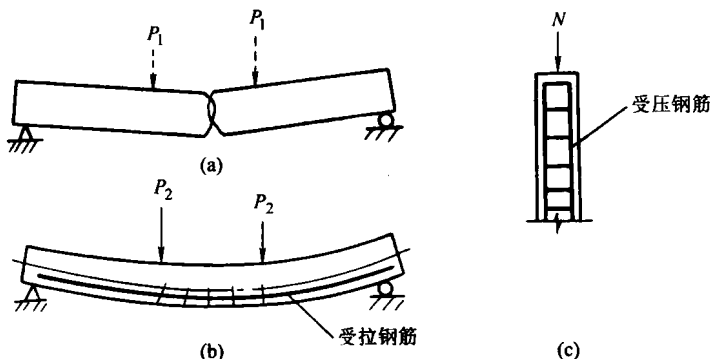


图 1-1 简支梁受力破坏示意图

设计和施工中,为了使钢筋和混凝土可靠地粘结在一起,通常钢筋的端部要留有一定的锚固长度并做成弯钩,以保证构件可靠地锚固在混凝土中,防止钢筋受力后被拔出或产生较大的滑移。为了保证钢筋和混凝土共同工作发挥作用,配置钢筋的位置和数量应由计算和构造要求确定。钢筋主要配置在构件的受拉区,用以提高承载能力,而在构件受压区配置钢筋可以提高构件的延性。配置钢筋的数量不能过多也不能过少,否则会影响钢筋和混凝土充分发挥作用。

1.1.3 钢筋混凝土结构的优缺点

钢筋混凝土结构的主要优点如下。

取材容易:混凝土所用的原材料(砂、石)一般易于就地取材。另外,还可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废渣制成人造骨料(如陶粒),这样可以减轻结构自重,也利于保护环境。

合理用材:钢筋混凝土结构合理发挥了钢筋和混凝土两种材料的性能,与钢结构相比,可以降低造价。

耐久性:密实的混凝土有较高的强度,同时由于钢筋被混凝土包裹,不易锈蚀,维修费用也很少,所以钢筋混凝土结构有较好的耐久性。

耐火性:混凝土包裹在钢筋外面,火灾时钢筋不会很快达到软化温度而导致结构整体破坏。与裸露的木结构、钢结构相比,钢筋混凝土结构的耐火性要好。

可模性:新拌混凝土是可塑的,根据需要可以较容易地浇筑成各种形状和尺寸的钢筋混凝土结构。

整体性:整浇或装配整体式钢筋混凝土结构有很好的整体性,有利于抗震、抵抗振动和爆炸冲击波。

钢筋混凝土结构也存在一些缺点,主要是:钢筋混凝土结构的截面尺寸较相应的钢结构大,所以自重大,对大跨度结构、高层建筑结构以及抗震不利。同时,由于自重大,使材料运输量增大,给施工吊装带来困难。还有,钢筋混凝土结构抗裂性较差,在正常使用时往往是带裂缝工作的,对一些不允许出现裂缝或者对裂缝宽度有严格限制的结构,要满足这些要求就需要采取其他措施,从而使工程造价增加。此外,钢筋混凝土结构的隔热隔声性能也较差。针对这些缺点,可以采用轻质高强混凝土以及预应力混凝土来减轻自重,改善钢筋混凝土结构的抗裂性能。

1.2 混凝土结构的发展与应用概况

混凝土结构使用至今已有约 160 年的历史。与钢、木和砌体结构相比,由于它在物理力学性能及材料来源等方面有许多优点,所以其发展速度很快,应用也最广泛。在 19 世纪 50 年代混凝土结构发展的初期,由于混凝土和钢筋的强度都比较低,当时钢筋混凝土主要用于各种简单的构件。

自 20 世纪 20 年代以后,混凝土和钢筋的强度有了较大提高,出现了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。构件承载力也开始按破坏阶段计算,在计算理论中开始考虑材料的塑性能。20 世纪 50 年代以后,高强混凝土和高强钢筋的出现使钢筋混凝土结构有了飞速发展。装配式混凝土、泵送商品混凝土等工业化的生产,使钢筋混凝土结构的应用范围不断扩大。

近 20 年来,随着生产水平的提高、试验的深入、计算理论研究的发展和完善、材料及施工技术的改进、新型结构的开发研究,混凝土结构的应用范围在不断地扩大,已从工业与民用建筑、交通设施、水利水电建筑和基础工程扩大到了近海工程、海底建筑、地下建筑、核电站安全壳等领域,并已开始构思和实验用于月面建筑。随着轻质高强材料的开发,用于大跨度、高层建筑中的混凝土结构越来越多。近年来,随着高强度钢筋、高强度高性能混凝土(强度达到 100N/mm^2 以上)以及高性能外加剂和混合材料的研发,高强高性能混凝土的应用范围不断扩大,钢纤维混凝土和聚合物混凝土的研究和应用有了很大发展。还有,轻质混凝土、加气混凝土、陶粒混凝土以及利用工业废渣的“绿色混凝土”,不但改善了混凝土的性能而且对节能和保护环境具有重要的意义。此外,防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等特殊需要的混凝土以及智能型混凝土及其结构也在研发中。

我国是使用混凝土结构最多的国家,在高层建筑和多层框架中大多采用钢筋混凝土结构。在民用建筑中已较广泛地采用定型化、标准化的装配式钢筋混凝土构件。预应力混凝土多用于高层建筑、桥隧建筑、海洋结构、压力容器、飞机跑道及公路路面等。

世界上最高的钢筋混凝土建筑是高 828 m 的位于阿联酋迪拜的哈利法塔(迪拜塔)。目前,我国最高的建筑是高 492 m 的上海环球金融中心,为钢骨钢筋混凝土结构;广州中信(中天)广场的钢筋混凝土结构的办公主楼高 321.9 m(80 层),是我国最高的钢筋混凝土建筑。加拿大多伦多的预应力混凝土电视塔高达 549 m,是有代表性的预应力混凝土构筑物。我国最高的电视塔为上海电视塔(东方明珠),高 468 m,主体为混凝土结构。世界上最高的混凝土重力坝是瑞士狄克桑斯大坝,坝高 285 m,堤顶宽 15 m,坝底宽 225 m,坝长 695 m。我国长江三峡枢纽工程,是世界上最大的水利工程,混凝土大坝高 186 m,坝体混凝土用量达 1527万 m^3 。

我国在铁路、公路、城市立交桥、高架桥、地铁隧道以及水利港口等交通工程中用钢筋混凝土建造的水闸、水电站、船坞和码头已是星罗棋布。随着我国经济建设的快速发展,混凝土结构的应用将更加广泛,更加丰富多彩。

近年来,我国在混凝土基本理论与设计方法、结构可靠度与荷载分析、工业化建筑体系、结构抗震与有限元分析方法、现代化测试技术、低碳建筑等方面的研究也取得了很多新的成果,许多方面已达到或接近国际先进水平。混凝土结构的设计和研究向更完善更科学的方

向发展。先进的现代测试技术保证了实验研究更系统、更精确。基于可靠度理论的分析方法也在逐步完善,并用于结构整体和使用全过程的分析。与此同时,计算机的普及和多功能化、CAD 等软件系统的开发缩短了结构研发和设计的时间与工作量,大大提高了经济效益。

此外,在钢筋混凝土结构设计理论和设计方法方面也取得了很大进展,新颁布的《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)积累了长期丰富的工程实践经验和大量科研成果,把我国混凝土结构设计方法提高到了当前的国际水平,在工程设计中发挥了积极的指导作用。

1.3 本课程的特点和学习方法

混凝土结构课程通常按内容的性质可以分为“混凝土结构原理”和“混凝土结构设计”两部分。前者主要论述混凝土构件的受力性能、设计计算方法和构造等混凝土结构的基本理论,属于专业基础课内容。在建筑结构方面,后者主要论述梁板结构、单层厂房、多层和高层房屋等。本课程有很强的实践性,一方面要经过课堂学习,通过习题、作业来掌握结构设计所必需的理论知识;另一方面,要通过课程设计和毕业设计等实践性教学环节使学习者达到初步具有运用这些理论知识正确进行设计和解决工程中的实际技术问题的能力。

混凝土结构是建筑工程中应用最广泛的一种结构。不论是从事设计、科研或施工,还是从事工程管理都要经常接触和用到它,因此被列为土木工程专业的主要课程之一。

“混凝土结构原理”中涉及的构件在材料的性质上与材料力学有相似之处,又有不同之处。材料力学主要研究单一、匀质、连续和弹性材料组成的构件,而“混凝土结构原理”中的构件是由钢筋和混凝土组成的复合材料构件。虽然,在材料力学中利用几何、物理和平衡关系建立基本方程的解决问题的思路对于钢筋混凝土也适用,但是由于钢筋和混凝土这两种材料的力学性质差别很大,混凝土又是非匀质、非连续、非弹性的材料,加之影响钢筋混凝土结构构件性能的因素很多,所以,在具体设计计算方法上要考虑钢筋混凝土性能上的特点。混凝土结构的设计理论和计算方法是建立在结构性能试验和工程实践基础上的,有其适用范围和条件,在一些场合常采用半理论半经验的处理方法,这些方面与材料力学也是有区别的。

还有,材料力学着重于构件的内力和变形分析,解答通常是唯一的。而在混凝土结构原理课程中除了要满足承载能力和变形计算外,还要解决综合性的“设计”问题。它不仅包括决定方案、截面形式、截面尺寸、材料选择和配筋构造等,而且还要考虑安全、适用、经济和施工等方面的合理性、可行性等。因此,同一个结构构件在给定荷载作用下,可以有不同的截面形式、尺寸和配筋,答案也不是唯一的。所以,设计中需要对多种因素的影响进行综合分析和归纳,通过综合分析和比较选择合理的方案。

混凝土结构设计是实践性很强的领域,混凝土结构课程学习中要特别重视加强实践。另外,国家的一系列具有技术法规性质的设计规范和规程是必须遵守的准则。规范和规程反映了相关的科学技术水平、理论计算方法和工程实践经验,学习时要注意熟悉和正确地运用这些设计规范和规程。与本课程有关的主要设计规范和设计规程有《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001)、《建筑结构荷载规范》(GB50009—2001)、《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)、《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2010)等。

思考题

1. 素混凝土梁和钢筋混凝土梁破坏时各有哪些特点？钢筋和混凝土是如何共同工作的？
2. 钢筋混凝土有哪些优点和缺点？
3. 简述钢筋混凝土结构的应用和发展，了解本课程的特点、内容和学习方法。

第 2 章 混凝土结构材料的物理力学性能

钢筋与混凝土的物理力学性能以及二者的共同工作直接影响混凝土结构和构件的性能,也是混凝土结构计算理论和设计方法的基础。本章讲述钢筋与混凝土的主要物理力学性能以及混凝土与钢筋的粘结。

2.1 混凝土的物理力学性能

2.1.1 混凝土的组成结构

普通混凝土是由水泥、砂、石材料用水拌合硬化后形成的人工石材,是多相复合材料。混凝土组成结构是一个广泛的综合概念,包括从组成混凝土组分的原子、分子结构到混凝土宏观结构在内的不同层次的材料结构。根据研究者提出的混凝土的结构分类,通常分为三种基本类型: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,宏观结构即砂浆和粗骨料两组分体系。

微观结构(水泥石结构)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、水灰比和凝结硬化条件等。混凝土的宏观结构和亚微观结构有许多共同点,可以把水泥砂浆看做基相,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。骨料的分布以及骨料与基相之间在界面的结合强度也是重要的影响因素。

浇注混凝土时的泌水作用会引起沉缩,硬化过程中由于水泥浆水化造成的化学收缩和干缩受到骨料的限制,会在不同层次的界面引起结合破坏,形成随机分布的界面裂缝。

混凝土是复杂的多相复合材料。混凝土中的砂、石、水泥胶体中的晶体、未水化的水泥颗粒组成了错综复杂的弹性骨架,主要承受外力,并使混凝土具有弹性变形的特点。而水泥胶体中的凝胶、孔隙和界面初始微裂缝等,在外荷载作用下使混凝土产生塑性变形。另一方面,混凝土中的孔隙、界面微裂缝等缺陷又往往是混凝土受力破坏的起源。在荷载作用下,微裂缝的扩展对混凝土的力学性能有着极为重要的影响。由于水泥胶体的硬化过程需要多年才能完成,所以混凝土的强度和变形也随时间逐渐增长和加大。

2.1.2 混凝土的强度

实际工程中的混凝土结构和构件一般处于复合应力状态。但是,单向受力状态下混凝土的强度是复合应力状态下强度的基础。在进行钢筋混凝土结构构件强度分析和建立强度理论公式时,单向受力状态下混凝土的强度指标是一个重要参数。

混凝土的强度与采用的水泥标号和水灰比有很大关系。骨料的性质、混凝土的级配、混凝土的成型方法、硬化时的环境条件及混凝土的龄期等也不同程度影响混凝土的强度。试件的大小和形状、试验方法和加载速率也影响混凝土的强度试验结果。因此,各国对各种单

向受力状态下的混凝土强度都规定了统一的标准试验方法。

1. 混凝土的立方体抗压强度和强度等级

由于立方体试件的强度比较稳定,所以我国以立方体强度值作为在给定的统一试验方法下衡量混凝土强度的基本指标。同时,立方抗压强度也是评价混凝土强度等级的标准。我国《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)规定,混凝土立方体抗压强度标准值系指按标准方法制作,养护的边长为150 mm的立方体试件,在28天或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有95%保证率的抗压强度,单位为 N/mm^2 。

《混凝土结构设计规范》规定混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定,混凝土立方体抗压强度标准值用符号 $f_{\text{cu},k}$ 表示。即,用上述标准试验方法测得的抗压强度作为混凝土的强度等级。《混凝土结构设计规范》考虑了高强度混凝土,规定的混凝土强度等级有C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75和C80,共14个等级。例如,C30表示立方体抗压强度标准值为 $30\text{N}/\text{mm}^2$ 的混凝土的强度等级。

试验方法对混凝土的立方抗压强度有较大的影响。试件在试验机上单向受压时,纵向缩短,横向扩张。由于混凝土与压力机垫板弹性模量与横向变形系数不同,压力机垫板的横向变形明显小于混凝土的横向变形,所以垫板通过接触面上的摩擦力约束混凝土试块的横向变形,就像在试件上下端各加了一个套箍,致使混凝土破坏时形成两个对顶的角锥形破坏面,抗压强度比没有约束的情况要高。如果在试件上下表面涂一些润滑剂,这时试件与压力机垫板间的摩擦力大大减小,其横向变形几乎不受到约束,受压时没有“套箍”作用的影响,试件将沿着平行于力的作用方向产生几条裂缝而破坏,测得的抗压强度则较低。图2-1是两种混凝土立方体试块的破坏情况,我国规定的标准试验方法是不涂润滑剂的。

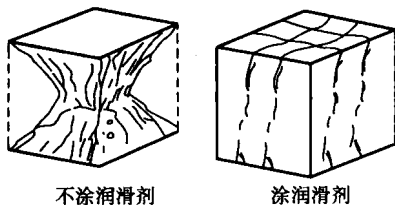


图2-1 混凝土立方体试块的破坏情况

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

混凝土的强度还与成型后的龄期有关。如图2-2所示,混凝土的抗压极限强度随着成型后混凝土的龄期逐渐增长,增长速度开始较快,后来逐渐缓慢,强度增长过程往往要延续几年,在潮湿环境中往往延续更长。

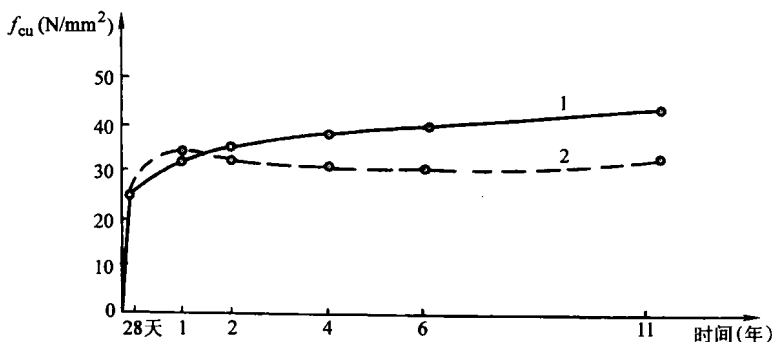


图2-2 混凝土强度随龄期的变化

1—在潮湿环境下;2—在干燥环境下

2. 混凝土的轴心抗压强度

混凝土的抗压强度还与试件的形状有关,采用棱柱比立方体能更好地反映混凝土结构的实际抗压能力,用混凝土棱柱体试件测得的抗压强度也称轴心抗压强度。

我国《普通混凝土力学性能试验方法》规定以 150 mm×150 mm×300 mm 的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,试验时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 2-3 所示。由于棱柱体试件的高度越大,试验机压板与试件之间摩擦力对试件高度中部的横向变形的约束影响越小,所以通过试验量测,棱柱体试件的抗压强度要比立方体的强度值小,并且棱柱体试件高宽比越大,强度越小。但是,当高宽比达到一定值后,这种影响就不明显了。在确定棱柱体试件尺寸时,一方面要考虑到试件具有足够的高度以不受试验机压板与试件承压面间摩擦力的影响,在试件的中间区段形成纯压状态,同时也要考虑到避免试件过高,在破坏前产生较大的附加偏心而降低抗压极限强度。根据资料,一般认为试件的高宽比为 2~3 时,可以基本消除上述两种因素的影响。

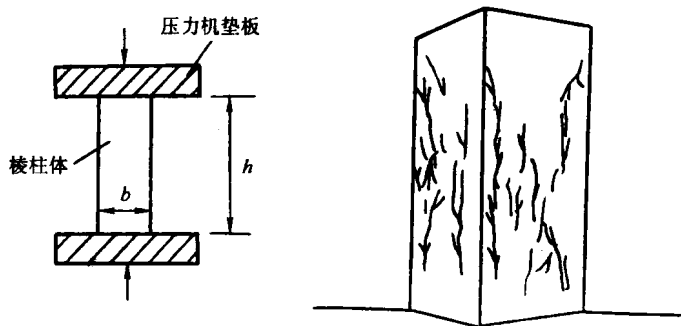


图 2-3 混凝土棱柱体抗压试验和破坏情况

《混凝土结构设计规范》规定以上述棱柱体试件用标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度作为混凝土轴心抗压强度标准值,用符号 f_{ck} 表示。

图 2-4 是我国所做的混凝土棱柱体与立方体抗压强度对比试验的结果。由图可以看到,试验值 f_c^0 和 f_{cu}^0 的统计平均值大致成一条直线,它们的比值从普通强度到高强度大致在 0.70~0.92 的范围变化,且随强度增大比值变大。

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,《混凝土结构设计规范》为安全取偏低值,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:

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k} \quad (2-1)$$

式中: α_{c1} ——混凝土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 $\alpha_{c1} = 0.76$,对 C80 取 $\alpha_{c1} = 0.82$,在此之间, α_{c1} 的值按直线内插法确定;

α_{c2} ——高强度混凝土的脆性折减系数,对 C40 取 $\alpha_{c2} = 1.00$,对 C80 取 $\alpha_{c2} = 0.87$,在此之间, α_{c2} 的值按直线内插法确定;

0.88——考虑实际混凝土构件与试件混凝土强度之间的差异而取用的折减系数。

在国外为确定混凝土轴心抗压强度常采用混凝土圆柱体试件。例如美国、日本和欧洲混凝土协会(CEB)系采用直径 6 英寸(152 mm),高 12 英寸(305 mm)的圆柱体标准试件的

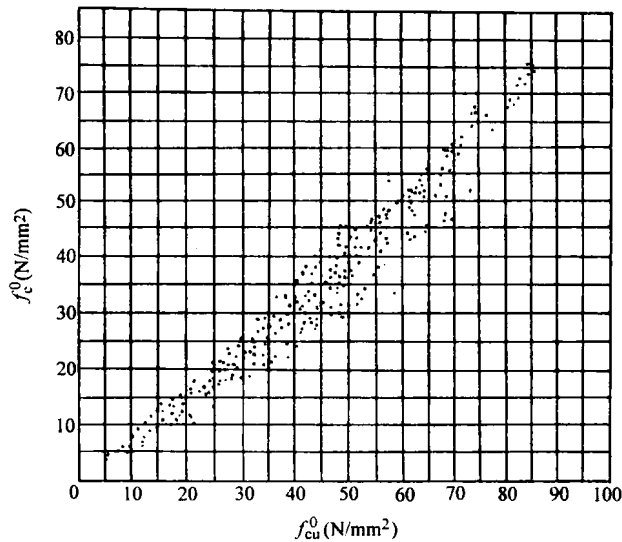


图 2-4 混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的关系

抗压强度作为轴心抗压强度的指标,用符号 f'_c 表示。对 C60 以下的混凝土,圆柱体抗压强度 f'_c 和立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 之间的关系可按公式(2-2)计算。当 f_{cu} 超过 60MPa 后随着抗压强度提高, f'_c 与 $f_{cu,k}$ 的比值(公式中的系数)提高。CEB-FIP 和 MC-90 给出:对 C60 的混凝土,比值为 0.833;对 C70 的混凝土,比值为 0.857;对 C80 的混凝土,比值为 0.875。

$$f'_c = 0.79 f_{cu,k} \tag{2-2}$$

3. 混凝土的轴心抗拉强度

抗拉强度是混凝土的基本力学指标之一,也可用抗拉强度间接地衡量混凝土的冲切强度等其他力学性能。混凝土的轴心抗拉强度可以采用直接轴心受拉的试验方法来测定。但是,由于混凝土内部的不均匀性,加之安装试件的偏差等原因,准确测定抗拉强度是很困难的。所以,国内外也常用如图 2-5 所示的圆柱体或立方体的劈裂试验来间接测试混凝土的轴心抗拉强度。根据弹性理论,劈拉强度 $f_{t,s}$ 可按下式计算:

$$f_{t,s} = \frac{2F}{\pi dl} \tag{2-3}$$

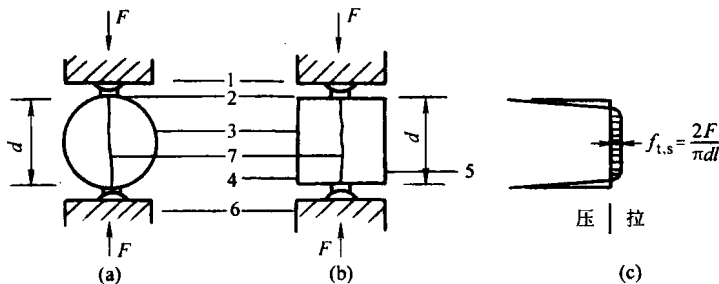


图 2-5 混凝土劈裂试验示意

- (a)用圆柱体进行劈裂试验;(b)用立方体进行劈裂试验;(c)劈裂面中水平应力分布
- 1—压力机上压板;2—弧形垫条及垫层各一条;3—试件;
4—浇模顶面;5—浇模底面;6—压力机下压板;7—试件破裂线

式中 F ——破坏荷载；

d ——圆柱体直径或立方体边长；

l ——圆柱体长度或立方体边长。

试验表明，劈裂抗拉强度略大于直接受拉强度，并且劈拉试件的大小对试验结果也有一定影响。

图 2-6 是混凝土轴心抗拉强度试验的结果。由图可以看出，轴心抗拉强度只有立方抗压强度的 $1/17 \sim 1/8$ ，混凝土强度等级愈高，这个比值愈小。考虑到混凝土构件与混凝土试件的差别、尺寸效应、加载速度等因素的影响，《混凝土结构设计规范》考虑了从普通强度混凝土到高强度混凝土的变化规律，取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

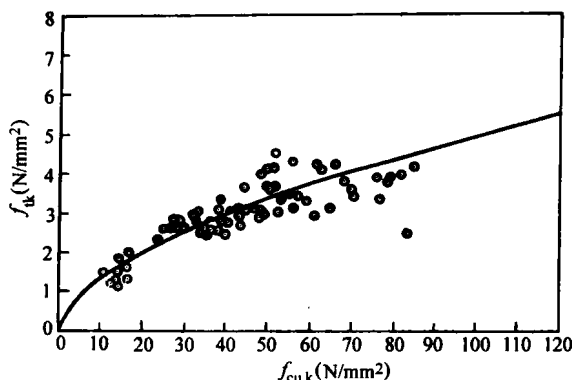


图 2-6 混凝土轴心抗拉强度和立方体抗压强度的关系

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \times \alpha_{c2} \quad (2-4)$$

式中 δ ——变异系数；

0.395 和 0.55——轴心抗拉强度与立方体抗压强度的折减系数。

2.1.3 混凝土的变形

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，这类变形称为受力变形。另外，混凝土由于硬化过程中的收缩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。变形是混凝土的一个重要力学性能。

1. 混凝土单轴(单调)受压应力—应变关系

混凝土受压时的应力—应变关系是混凝土最基本的力学性能之一。一次短期加载是指荷载从零开始单调增加至试件破坏，也称为单调加载。

在普通试验机上获得有下降段的混凝土应力—应变曲线是比较困难的。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，以等应变加载，就可以测量出具有真实下降段的混凝土应力—应变全曲线。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。

我国采用棱柱体试件测定一次短期加载下混凝土受压应力—应变全曲线。图 2-7 为实测的典型混凝土棱柱体受压应力—应变全曲线。可以看到，这条曲线包括上升段和下降

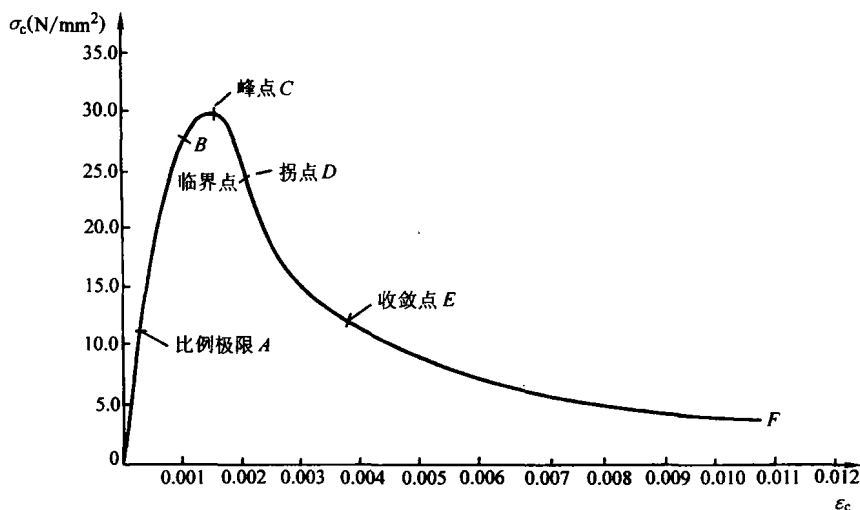


图 2-7 混凝土棱柱体受压应力—应变曲线

段两个部分。上升段(0C)又可分为三段,从加载至应力约为 $(0.3 \sim 0.4)f_c$ 的A点为第一阶段,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,而水泥胶体的粘性流动以及初始微裂缝变化的影响一般很小,所以应力—应变关系接近直线,称A点为比例极限点。超过A点,进入裂缝稳定扩展的第二阶段,至临界点B,临界点的应力可以作为长期抗压强度的依据。此后,试件中所积蓄的弹性应变能保持大于裂缝发展所需要的能量,从而形成裂缝快速发展的不稳定状态直至峰点C,这一阶段为第三阶段,这时的峰值应力通常作为混凝土棱柱体的抗压强度 f_c ,相应的应变称为峰值应变 ϵ_0 ,其值在 $0.0015 \sim 0.0025$ 之间波动,通常取为 0.002 。

下降段CE是混凝土到达峰值应力后裂缝继续扩展、传播,从而引起应力—应变关系变化的反映。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,赖以传递荷载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”,曲线逐渐凸向应变轴,这时,结构受力性质开始发生本质的变化,骨料间的咬合力及摩擦力与残余承压面共同承受荷载。随着变形的增加,应力—应变曲线逐渐向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开始以后的曲线称为收敛段,这时贯通的主裂缝已很宽,结构内聚力几乎耗尽,对无侧向约束的混凝土,收敛段EF已失去结构意义。

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

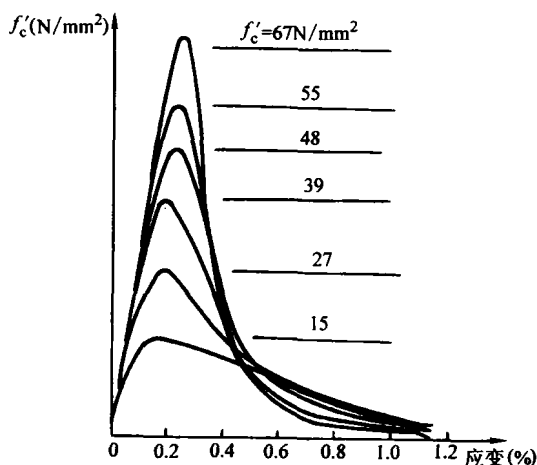


图 2-8 不同强度的混凝土的应力—应变曲线比较