



高等学校“十一五”精品规划教材

混凝土结构设计原理

主 编 马 嵘
副主编 干 惟

HUNNINGTU JIEGOU SHEJI YUANLI



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校“十一五”精品规划教材

混凝土结构设计原理

主 编 马 嵘

副主编 干 惟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材是高等学校“十一五”精品规划教材,是《混凝土结构》教材的上册。《混凝土结构》教材分上、下两册。上册是《混凝土结构设计原理》(本教材);主要讲述混凝土结构设计基本理论和基本构件;下册是《混凝土建筑结构设计》,主要讲述混凝土三种基本结构体系,即楼屋盖梁板结构、单层工业厂房排架结构和多层框架结构。

本教材共分8章,主要结合《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)进行编写。内容有:绪论,混凝土结构材料的物理力学性能,按近似概率理论的极限状态设计法,梁、板和柱的基本构造,弯矩、剪力和轴力作用下构件的截面承载力,弯矩、剪力和扭矩作用下构件的扭曲截面承载力,混凝土构件的变形、裂缝及耐久性和预应力混凝土构件等。

本教材可作为大学本科土木工程专业专业基础课教材,也可供从事混凝土结构设计、制作、施工和监理技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/马嵘主编. —北京:中国水利水电出版社, 2008

高等学校“十一五”精品规划教材

ISBN 978-7-5084-5292-0

I. 混… II. 马… III. 混凝土结构—结构设计—高等学校—教材 IV. TU370.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第013138号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 混凝土结构设计原理
作 者	主编 马嵘 副主编 干惟
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 12.5印张 296千字
版 次	2008年2月第1版 2008年2月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	26.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本教材是高等学校“十一五”精品规划教材，是《混凝土结构》教材的上册。《混凝土结构》教材是根据全国高校土木工程学科专业指导委员会审定通过的教学大纲编写的，分上、下两册，上册为《混凝土结构设计原理》（本教材），属专业基础课教材，主要讲述混凝土结构设计基本理论和基本构件；下册为《混凝土建筑结构设计》，属专业课教材，主要讲述混凝土三种基本结构体系，即楼屋盖梁板结构、单层工业厂房排架结构和多高层框架结构。

《混凝土结构设计原理》共有 8 章，包括绪论，材料物理力学性能，设计计算方法，构件基本构造，构件截面承载力，预应力以及构件变形等。其中第 5 章弯矩、剪力和轴力作用下构件的截面承载力，是在丁大钧教授《混凝土构件计算的理解、沟通与统一》的启发指导下，结合编写人员长期从事土木工程教学的经验，将传统教材的受弯构件、受压构件和受拉构件进行了合并编写。初步实践表明，教材突出了构件的共性，减少了教材的篇幅，缩短了教学时数，易于学生理解掌握，同时解决了倾斜构件的归类计算问题。

在本教材的编写过程中，特别注意了理论与实践相结合，教学与国家注册工程师制度相统一的原则，突出重点，讲清难点，精选例题，加强习题。因此，本教材对于培养应用型高等土木工程专业人才尤为适用。

《混凝土结构设计原理》由马嵘任主编，干惟任副主编。参加编写的有马嵘、干惟、娄康乐、李刚、曲晨、杨澄秋、华昕若等。

本教材在编写和出版过程中得到了领导、同行、编辑和出版社的大力帮助、支持，在此表示深深的敬意和感谢。

限于编者水平，本教材中难免有不妥之处，请批评指正。

编者

2007 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土结构课程的特点和学习方法	1
1.1.1 混凝土、结构及混凝土结构的概念	1
1.1.2 混凝土结构课程的特点	1
1.1.3 混凝土结构课程的学习方法	1
1.2 混凝土结构的特点	2
1.2.1 混凝土结构的分类	2
1.2.2 配筋的作用与要求	2
1.2.3 各种混凝土结构的特点	3
1.3 混凝土结构的发展与应用概况	3
1.3.1 建筑材料的发展是建筑业发展的基础	3
1.3.2 结构分析和设计理论的发展是结构坚固适用, 经济合理, 艺术美观的条件	4
思考题	4
第 2 章 混凝土结构材料的物理力学性能	5
2.1 混凝土的物理力学性能	5
2.1.1 混凝土的构造特点	5
2.1.2 混凝土的强度	5
2.1.3 混凝土的变形	8
2.2 钢筋的物理力学性能	11
2.2.1 钢筋的品种和级别	11
2.2.2 钢筋的强度与变形	13
2.2.3 钢筋应力—应变曲线的数学模型	15
2.3 混凝土与钢筋的黏结	15
2.3.1 黏结力的组成	15
2.3.2 影响黏结强度的因素	16
2.3.3 钢筋的锚固与搭接	16

思考题	18
第3章 接近似概率理论的极限状态设计法	20
3.1 极限状态	20
3.1.1 结构上的作用	20
3.1.2 结构的功能要求	21
3.1.3 结构功能的极限状态	22
3.1.4 极限状态方程	23
3.2 接近似概率理论的极限状态设计法	24
3.2.1 可靠性与可靠度	24
3.2.2 可靠指标与失效概率	24
3.2.3 概率极限状态设计法的三个水准	26
3.3 承载能力极限状态实用设计表达式	26
3.4 正常使用极限状态实用设计表达式	27
思考题	29
习题	30
第4章 梁、板和柱的基本构造	31
4.1 梁的基本构造	31
4.1.1 截面形状与尺寸	31
4.1.2 材料选择与一般构造	32
4.1.3 纵向受拉钢筋的配筋率	33
4.1.4 箍筋的配筋率	34
4.2 板的基本构造	35
4.2.1 截面形状与尺寸	35
4.2.2 材料选择与一般构造	36
4.2.3 受拉钢筋的配筋率	37
4.3 柱的基本构造	37
4.3.1 截面形状与尺寸	37
4.3.2 材料的选择与一般构造	38
4.3.3 钢筋的配筋率	40
思考题	41
第5章 弯矩、剪力和轴力作用下构件的截面承载力	42
5.1 构件的受力破坏特征	43
5.1.1 受弯构件正截面受力破坏特征	43
5.1.2 受弯构件斜截面受力破坏特征	48
5.1.3 受压构件正截面受力破坏特征	50
5.1.4 受拉构件正截面受力破坏特征	54
5.1.5 受弯、受压和受拉构件正截面受力破坏的共同特征	55

5.2	构件的正截面配筋方式	55
5.2.1	受弯构件正截面配筋方式	55
5.2.2	受压构件正截面配筋方式	55
5.2.3	受拉构件正截面配筋方式	57
5.3	构件的正截面承载力	57
5.3.1	正截面承载力计算的基本假定	57
5.3.2	正截面承载力计算的等效矩形应力图	58
5.3.3	矩形截面构件正截面承载力设计计算方法	59
5.3.4	I形截面构件正截面承载力基本计算公式	85
5.3.5	构件正截面承载力基本计算公式探讨	95
5.4	构件的斜截面配筋方式	98
5.4.1	受弯构件斜截面配筋方式	98
5.4.2	偏心受压构件斜截面配筋方式	98
5.4.3	偏心受拉构件斜截面配筋方式	98
5.5	构件的斜截面承载力	99
5.5.1	影响斜截面受剪承载力的主要因素	99
5.5.2	斜截面受剪承载力计算的基本假定	99
5.5.3	受弯构件斜截面受剪承载力设计计算方法	100
5.5.4	偏心受压构件斜截面受剪承载力设计计算方法	108
5.5.5	偏心受拉构件斜截面受剪承载力设计计算方法	109
5.5.6	构件斜截面承载力基本计算公式探讨	109
	思考题	110
	习题	110
第6章	弯矩、剪力和扭矩作用下构件的扭曲截面承载力	113
6.1	概述	113
6.2	纯扭构件的试验研究	114
6.2.1	裂缝出现前的性能	114
6.2.2	裂缝出现后的性能	114
6.3	纯扭构件的扭曲截面承载力	115
6.3.1	开裂扭矩 T_{cr}	115
6.3.2	扭曲截面受扭承载力的计算	116
6.3.3	按《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)的配筋计算方法	117
6.4	弯剪扭构件的扭曲截面承载力	120
6.4.1	试验研究及破坏形态	120
6.4.2	按《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)的配筋计算方法	120
	思考题	125
	习题	126

第 7 章 混凝土构件的变形、裂缝及耐久性	127
7.1 概述	127
7.2 混凝土受弯构件的挠度验算	128
7.2.1 截面弯曲刚度的概念及定义	128
7.2.2 短期刚度 B_s	128
7.2.3 受弯构件的截面刚度 B	129
7.2.4 最小刚度原则与挠度计算	130
7.2.5 对受弯构件挠度验算的讨论	130
7.3 混凝土构件裂缝宽度验算	132
7.3.1 裂缝的出现、分布和开展	132
7.3.2 最大裂缝宽度及其验算	132
7.3.3 影响裂缝宽度的主要因素	133
7.4 混凝土构件的截面延性	134
7.4.1 延性概念	134
7.4.2 影响构件截面延性的主要因素	134
7.4.3 混凝土结构的耐久性	135
思考题	136
习题	137
第 8 章 预应力混凝土构件	138
8.1 概述	138
8.1.1 预应力混凝土的概念	138
8.1.2 预应力混凝土的分类	139
8.1.3 预应力混凝土结构的应用范围	140
8.2 张拉预应力钢筋	141
8.2.1 施加预应力的方法	141
8.2.2 夹具和锚具	142
8.2.3 预应力混凝土材料	144
8.3 张拉控制应力和预应力损失	145
8.3.1 张拉控制应力 σ_{con}	145
8.3.2 预应力损失 σ_l	146
8.3.3 预应力损失值的组合	151
8.4 预应力混凝土轴心受拉构件的计算	154
8.4.1 轴心受拉构件各阶段的应力分析	154
8.4.2 预应力混凝土轴心受拉构件的计算	158
8.5 预应力混凝土受弯构件的计算	165
8.5.1 受弯构件各阶段的应力分析	165
8.5.2 受弯构件的计算	168

8.6 预应力混凝土构件的构造要求	174
思考题	175
习题	176
附录1 术语及符号	178
附录2 《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002) 规定的材料力学指标	183
附录3 《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002) 的有关规定	186
附录4 钢筋的计算截面面积及公称质量	188
参考文献	190

第 1 章 绪 论

1.1 混凝土结构课程的特点和学习方法

1.1.1 混凝土、结构及混凝土结构的概念

由水泥、砂、石材用水拌和硬化后形成的人工石材称为混凝土。随着预应力混凝土在建筑工程中的广泛应用，混凝土的含义扩展为素混凝土、钢筋混凝土和预应力混凝土等。我国著名诗人杜甫《同李太守登历下新亭》诗云“新亭结构罢，隐见清湖阴。”此处“结构”一词指构造房屋。而王延寿《鲁灵光殿赋》中“于是详察其栋宇，观其结构。”此处“结构”指屋宇构造的式样，后引申指各个部分的配合、组织。如物质结构、工程结构、文章结构等。本课程的“结构”是指房屋建筑中承重骨架的总称。

以混凝土为主制成的结构称为混凝土结构，包括钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和素混凝土结构等。由配置非预应力普通受力钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土制成的结构称为钢筋混凝土结构；由配置预应力受力钢筋，通过预应力张拉工艺建立预加应力的混凝土制成的结构称为预应力混凝土结构；由无筋或配置构造钢筋的混凝土制成的结构称为素混凝土结构。混凝土结构广泛应用于工业与民用建筑、桥梁、隧道、矿井以及水利、港口等土木工程中。

1.1.2 混凝土结构课程的特点

混凝土结构课程通常按内容的性质可分为“混凝土结构设计原理”和“混凝土建筑结构设计”两部分。混凝土结构设计原理主要讲述各种混凝土基本构件的受力性能、截面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。混凝土结构设计主要讲述楼屋盖梁板结构、单层厂房排架结构、多层房屋框架结构等的结构设计，属于专业课内容。同时还配以“梁板结构课程设计”、“排架结构课程设计”和“框架结构毕业设计”等实践性教学环节，从而培养学生具有运用所学理论知识正确进行混凝土结构设计和解决实际技术问题的能力。

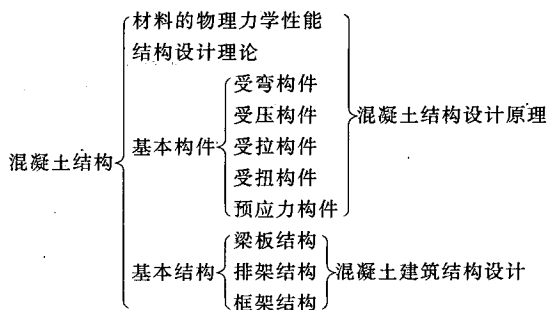


图 1.1 混凝土结构课程体系图

混凝土结构课程的结构体系如图 1.1 所示。

1.1.3 混凝土结构课程的学习方法

1. 加强实践，融会贯通，举一反三，归纳总结，扩大知识面

混凝土结构的基本理论基于经典的材料力学，它是以实验为基础的，因此除课堂理论

学习外,还要加强实验的教学环节,以进一步理解所学的理论和训练实际的工程实验能力。当有条件时,可进行简支梁正截面受弯承载力、简支梁斜截面受剪承载力、偏心受压短柱正截面受压承载力的实验。同时对于混凝土基本构件的承载力计算要从其破坏的本质入手,在理解的基础上进行记忆。如对于双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算、大偏心矩形截面受压构件正截面承载力计算和大偏心矩形截面受拉构件正截面承载力计算,它们的计算公式极其相似,其本质是它们的破坏形式基本相同。通过归纳总结,将混凝土基本构件的受力破坏特征与承载力基本公式进行整理、合并,去粗取精,揭示了事物内在、本质的共同属性,能对问题的共性和个性有较深刻的认识,从而在实际工作中能举一反三、灵活应用。

2. 熟悉规范,善于运用,重视构造,突出工程

混凝土结构课程的实践性很强,规范和标准的要求较高,因此在学习过程中要逐步熟悉和正确运用我国颁布的一些设计规范和设计规程与标准。如《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)、《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)(2006年版)、《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)等。

混凝土结构课程也是一门构造复杂、施工要求严格的工程技术专业课,工程技术面广,构造形式多样,技术措施严格,因此要在理解的基础上进行记忆掌握,切忌死记硬背。

3. 掌握概念,抓住重点,重在理解,适应发展

本课程的内容多、符号多、计算公式多、构造规定也多,学习时要遵循教学大纲的要求,贯彻“少而精”的原则,突出重点内容的学习。同时要逐步熟悉和了解我国推行的“国家注册工程师”制度,为将来的发展打下扎实的基础。

1.2 混凝土结构的特点

1.2.1 混凝土结构的分类

混凝土结构除按前面所述可分为素混凝土结构(plain concrete)、钢筋混凝土结构(reinforced concrete)和预应力混凝土结构(prestressed concrete)外,按强度可分为低强混凝土结构、中强混凝土结构、高强混凝土结构和超高强混凝土结构。由C25及以下混凝土制成的结构称为低强混凝土结构;由C30~C45混凝土制成的结构称为中强混凝土结构;由C50~C80混凝土制成的结构称为高强混凝土结构;由C80以上混凝土制成的结构称为超高强混凝土结构。

1.2.2 配筋的作用与要求

钢筋混凝土结构与素混凝土结构相比,其承载能力和变形能力都有很大提高。利用混凝土材料具有较强的抗压能力而抗拉能力较弱,钢筋具有较高的抗压、抗拉能力的特点,在混凝土结构中,混凝土主要承受压力,钢筋主要承受拉力和压力,使其协同工作,从而满足土木工程结构的使用要求,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,从而更为经济合理。

必须保证钢筋与混凝土能够协同工作。其协同工作的机理如下：保证混凝土硬化后与钢筋之间具有良好的黏结力，从而可靠结合，共同受力，共同变形；钢筋与混凝土具有相近的温度线膨胀系数，当温度变化时，钢筋与混凝土之间不会产生较大的相对变形和温度应力，从而保证结构不会发生黏结破坏和整体破坏；保证混凝土保护钢筋不受腐蚀，从而增加结构的耐久性。

基本构造要求有锚固要求，搭接要求，弯钩要求和保护层厚度要求等。

1.2.3 各种混凝土结构的特点

混凝土结构的主要优点：①取材容易；②合理用材；③耐久性、耐火性较好；④可模性、整体性较好。

混凝土结构的主要缺点：①自重重大；②抗裂性能差；③费工费模，施工周期长；④隔热隔声性能差。

高强混凝土结构的主要优点：①单方造价高，但材料用量省，整体造价低；②耐久（比普通混凝土结构翻番）、强度高、变形小；③柱子、拱壳等受压构件承载力大幅提高；④受弯构件截面受压区高度降低，提高了延性；⑤构件刚度提高；⑥可施加较高的预应力，减少预应力损失；⑦降低结构自重，减轻地基基础负担。

高强混凝土结构的主要缺点：①对各种原材料有严格要求；②生产施工应仔细规划和检查，质量管理水平高；③质量特别容易受到生产、运输、浇注和养护过程中环境因素的影响，尤其是高温、远距离运输以及水化热等问题更应引起注意；④延性比普通混凝土差；⑤抗拉或抗剪强度与抗压强度的比值却会随之降低。

预应力混凝土结构的主要优点：①抗裂性好；②耐久性好，刚度大，变形小；③利用高强钢筋，减轻自重，降低造价；④提高构件抗剪能力和抗扭能力；⑤提高受压构件稳定性；⑥提高构件抗疲劳性能和保护钢筋；⑦可作为结构的一种拼装手段和加固措施。

主要缺点：①施工制作所需设备和制作技术要求高，工序多，施工周期长；②设计计算复杂；③预应力混凝土结构的单方造价高；④延性差。

1.3 混凝土结构的发展与应用概况

1.3.1 建筑材料的发展是建筑业发展的基础

混凝土结构使用至今已约有 150 年的历史。与钢、木和砌体结构相比，由于其在物理力学性能、材料来源以及我国的基本国情等方面有许多特点，所以发展速度很快，应用也最为广泛。

随着高强度钢筋、高强度高性能混凝土以及高性能外加剂和混合材料的研制和使用，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；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正在研究中。

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结构中大多采用混凝土结构。如我国上海浦东的金茂大厦,总高度为420.5m,地下3层,地上88层,是我国目前大陆最高的建筑;中国台北的101大楼以其508m的高度成为世界最高建筑物。另外电视塔、水塔、水池、烟囱、料仓等特殊构筑物也普遍采用混凝土结构,同时混凝土结构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,甚至已开始构思和实验用于月面建筑。随着轻质高强材料的使用,在大跨度、高层建筑中的混凝土结构越来越多。

1.3.2 结构分析和设计理论的发展是结构坚固适用,经济合理,艺术美观的条件

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、结构抗震与有限元方法、电子计算机在混凝土结构中的应用以及现代化测试技术等方面的研究也取得了很多新的成果,某些方面已达到或接近国际水平。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精确、更系统。基于可靠度理论的分析方法也在逐步完善,并开始用于结构整体和使用全过程的分析。与此同时,电子计算机的普及和多功能化,CAD等软件系统的开发,缩短了建筑结构设计的时间和工作量,提高了经济效益。

此外,在混凝土结构设计理论和设计方法方面,通过大量研究,也已取得了很大成绩。现行《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)积累了半个世纪以来丰富的工程实践经验和最新的科研成果,把我国混凝土结构设计方法提高到了当前的国际水平,它将在工程设计中发挥指导作用。

思 考 题

- 1.1 混凝土结构按组分和强度可分为哪几类?
- 1.2 钢筋与混凝土是如何共同工作的?它们共同工作的机理是什么?
- 1.3 混凝土结构、高强混凝土结构和预应力混凝土结构各有哪些特点?
- 1.4 本课程的结构体系是什么?学习本课程应注意哪些问题?
- 1.5 混凝土结构的发展基于哪些因素?

第2章 混凝土结构材料的物理力学性能

钢筋与混凝土两种材料的物理力学性能以及混凝土与钢筋黏结协同工作的特性直接影响混凝土结构和构件的受力性能,也是混凝土结构计算理论和设计方法的基础。

2.1 混凝土的物理力学性能

2.1.1 混凝土的构造特点

混凝土是由水泥 (cement)、砂 (sand)、石材 (stone) 用水拌和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、分子微观结构到混凝土宏观结构在内的不同层次的材料结构。通常把混凝土的结构分为三种基本类型:微观结构——水泥石结构;亚微观结构——混凝土中的水泥砂浆结构;宏观结构——砂浆和粗骨料结构。

混凝土的构造有如下特点:水泥水化的水,远小于混凝土施工时和易性所要求的水。因此,掺合在混凝土中的水在混凝土硬化后,一部分水和水泥水化,一部分残留于混凝土中,一部分挥发,故混凝土是一种多空隙,不均匀的物体;水泥水化过程可能要延续几个月、几年或几十年。因此,混凝土的硬结过程也很长,混凝土的许多物理和力学性能需要延续一段较长时间才能趋于稳定;混凝土在空气中结硬时要收缩,故可能产生许多细微裂缝。

2.1.2 混凝土的强度

混凝土强度 (Strength of Concrete) 包括以下几部分:

混凝土强度	{	单轴向应力状态下的混凝土强度——抗压强度、抗拉强度和抗剪强度
		复合应力状态下的混凝土强度——双向应力状态下强度、三向应力状态下强度
		混凝土的局部受压强度
		混凝土的疲劳强度

在实际工程中,混凝土构件和结构一般均处于复合应力状态,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和重要参数。

2.1.2.1 单轴向应力状态下的混凝土强度^①

1. 混凝土的抗压强度

(1) 混凝土的立方体抗压强度 (Cubic Compressive Strength of Concrete) 和强度等

① 参见附录2《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)规定的材料力学指标附表2.1、附表2.2。

级。混凝土的强度与水泥强度等级、水灰比、骨料性质、混凝土级配、混凝土成型方法、混凝土硬化时环境条件以及混凝土龄期等诸多因素有关。同时试件的大小和形状、试验方法和加载速率也影响混凝土强度的试验结果，因此世界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。

我国国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T50081—2002）规定：①按照标准方法制作^①；②边长为 150mm 的立方体试件；③养护 28d；④用标准试验方法^②测得的；⑤具有 95% 保证率的抗压强度作为混凝土的立方体抗压强度，单位为 N/mm^2 。

由于立方体试件试验最简单，强度最稳定，我国把混凝土立方体强度值作为混凝土强度的基本指标，并把立方体抗压强度作为评定混凝土强度等级的标准。《混凝土结构设计规范》（GB50010—2002）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 $f_{cu,k}$ 表示。如测得混凝土立方体抗压强度标准值为 $30\text{N}/\text{mm}^2$ ，则混凝土强度等级定为 C30。且立方体抗压强度与混凝土的其他力学性能指标有一定的关系。

混凝土立方体抗压强度与养护环境有关，温度愈高，混凝土早期强度愈高；与试件尺寸有关，尺寸愈小，横向约束（尺寸效应）愈明显，抗压强度愈高；反之亦然。如有 $f_{cu,k}^{150} = 1.05 f_{cu,k}^{200}$ ； $f_{cu,k}^{150} = 0.95 f_{cu,k}^{100}$ ； $f'_c = \alpha f_{cu,k}^{150}$ ，其中 $f_{cu,k}^{100}$ 、 $f_{cu,k}^{150}$ 和 $f_{cu,k}^{200}$ 分别为边长 100mm、150mm 和 200mm 的混凝土立方体抗压强度标准值； f'_c 为圆柱体标准试件的抗压强度，是美国、日本、国际标准化组织（ISO）、欧洲混凝土协会（CEB）和国际预应力学会（FIP）等国家和组织规定采用的直径 6in（152mm）、高 12in（305mm）标准试件测得的强度； α 为 CEB—FIPMC—90 规定的系数，详见表 2.1。还与试验方法有关，加载速度快，混凝土强度高，试件上下表面涂润滑油，横向约束小，抗压强度小。

表 2.1

系 数 α

混凝土强度等级	<C60	C60	C70	C80
系数 α	0.79	0.833	0.857	0.875

《混凝土结构设计规范》（GB50010—2002）规定：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 级。钢筋混凝土结构的混凝土强度等级应不小于 C15；当采用 HRB335 级钢筋时，宜不小于 C20；当采用 HRB400 和 RRB400 级钢筋以及承受重复荷载构件时，应不小于 C20；预应力混凝土结构，应不小于 C30；当预应力钢筋采用钢绞线、钢丝、热处理钢筋时，宜不小于 C40。

（2）混凝土的轴心抗压强度（Axial Compressive Strength of Concrete）——亦称棱柱体抗压强度。混凝土的抗压强度与试件的形状有关，而实际工程中构件为立方体形状的很少，常见的柱一般均为棱柱体，因此采用棱柱体抗压强度能比较真实地反映工程结构中

① 标准方法制作指温度 $t = (20 \pm 3)^\circ\text{C}$ ，相对湿度不小于 90%。

② 标准试验方法指在压力机上加载速度为：混凝土强度等级小于 C30 时，取 $(0.3 \sim 0.5) \text{N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ ；混凝土强度等级不小于 C30 时，取 $(0.5 \sim 0.8) \text{N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ 。

以受压为主的混凝土构件的实际工作状态。

我国国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2002)规定:①以 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的棱柱体标准试件测得的;②具有 95% 保证率的抗压强度称为混凝土轴心抗压强度标准值,用符号 f_{ck} 表示。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约束影响越小,所以棱柱体试件的抗压强度都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。根据资料,一般认为试件的高宽比为 2~3 时,可以基本消除上述影响。

考虑到实际结构构件由于制作、养护和受力情况的差异性较大,因此实际构件强度与试件强度之间也必然存在着差异,《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)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式(2.1)确定:

$$f_{ck} = 0.88\alpha_1\alpha_2f_{cu,k} \quad (2.1)$$

式中 0.88——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;

α_1 ——棱柱体强度与立方体强度之比,混凝土强度等级不大于 C50 时,取 0.76, C80 时,取 0.82,其间直线插入;

α_2 ——高强度混凝土的脆性折减系数,混凝土强度等级不大于 C40 时,取 1.00, C80 时,取 0.87,其间直线插入。

2. 混凝土的轴心抗拉强度

尽管混凝土的轴心抗拉强度 (Axial Tensile Strength of Concrete) 只有其立方体抗压强度的 $1/17 \sim 1/8$,但抗拉强度仍是混凝土的基本力学指标之一,用它可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采用如下三种试验方法来测定:①直接受拉试验(轴心抗拉试验);②劈裂试验;③弯折试验。轴心抗拉试验虽然试验简单,结果直接,但是由于混凝土内部的不均匀性,加之安装试件对中准确性要求较高等原因,所以用轴心抗拉试验测定混凝土抗拉强度很困难。目前国内外常用劈裂试验来间接测试混凝土的轴心抗拉强度。试验表明,试件尺寸愈小,劈裂强度愈高;垫条截面尺寸愈大,试件劈裂强度愈高。并且有如下的一般规律: $f_{tk}^{\text{弯折}} > f_{tk}^{\text{劈裂}} > f_{tk}^{\text{轴拉}}$ 。

2.1.2.2 复合应力状态下的混凝土强度

实际工程中大多数混凝土结构构件均处于多轴正应力或多轴正应力与剪应力共同作用的复杂受力状态。如梁既受到弯矩的作用,同时又受到剪力的作用;柱受到轴向压力、弯矩和剪力的共同作用;框架结构节点核心区混凝土的受力状态则更为复杂。因此,研究复合应力状态下的混凝土强度,对于认识混凝土的强度理论有着重要的现实意义。

1. 双向应力状态下混凝土的强度

双向应力状态是指在两个平面作用有法向应力 σ_1 和 σ_2 ,第三个平面上的应力为零的受力状态。不同混凝土强度的二向破坏包络图如图 2.1 所示,一旦超出

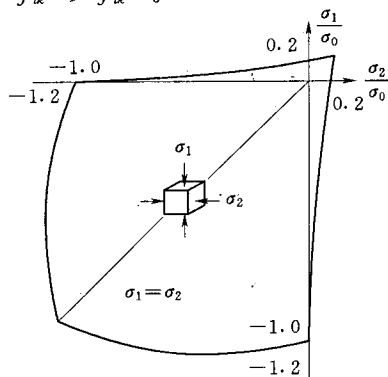


图 2.1 双向应力状态下混凝土的破坏包络图

(其中 σ_0 是单轴向受力状态下的混凝土强度)

包络线就意味着材料发生破坏。图中第一象限为双向受拉区， σ_1 、 σ_2 相互影响不大，不同应力比值 $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ 下的双向受拉强度均接近于单向受拉强度；第三象限为双向受压区，大体上一向的强度随另一向压力的增加而增加，混凝土双向受压强度比单向受压强度最多可提高 27%；第二、四象限为拉压应力状态，此时混凝土的强度均低于单向拉伸或压缩时的强度。

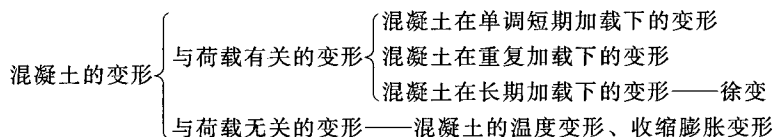
2. 三向应力状态下混凝土的强度

混凝土在三向受压的情况下，由于受到侧向压力的约束作用，最大主压应力轴的抗压强度 $f'_c(\sigma_1)$ 有较大程度的增长，其变化规律随两侧向压应力 (σ_2 、 σ_3) 的比值和大小而不同。常规的三轴受压是在圆柱体周围加液压，在两侧向等压 ($\sigma_2 = \sigma_3 = f_L > 0$) 的情况下进行的。试验表明，当侧向液压值不很大时，最大主压应力轴的抗压强度 f'_c 随侧向应力的增大而提高。

工程上可以通过设置密排螺旋筋或箍筋来约束混凝土，改善混凝土结构的受力性能。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，螺旋筋或箍筋约束了混凝土，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。

2.1.3 混凝土的变形

混凝土的变形 (Deformation of Concrete) 有与荷载有关的变形和与荷载无关的变形两种，如下所示：



2.1.3.1 一次短期加载下混凝土的变形性能

1. 棱柱体试件测定的混凝土受压时应力—应变全曲线

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。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 2.2 所示为实测的典型混凝土棱柱体受压应力—应变全曲线。从图中可以看到，曲线包括上升段 (OC 段) 和下降段 (CF 段)。

上升段又可以分为三段：

(1) OA 段：应力较小， $\sigma \leq 0.3f_c$ ，混凝土表现出理想的弹性性质， σ — ϵ 关系呈直线变化，混凝土内部初始微裂缝没有发展。

(2) AB 段： $\sigma = (0.3 \sim 0.8)f_c$ ，混凝土表现出非弹性性质， σ — ϵ 关系偏离直线， ϵ 增长速度比 σ 增长速度快，混凝土所表现的这种性质称为弹塑性性质，此时应变值包括弹性应变 (卸载后立即恢复)、弹性后效 (迟弹性应变) 和塑性应变 (残余应变)，在此阶段，混凝土内部微裂缝已有所发展，但处于稳定状态。

(3) BC 段： $\sigma = (0.8 \sim 1.0)f_c$ ，由于混凝土内部组织结构进入破坏阶段，塑性变形增