

清华大学学术专著

混凝土的强度和变形

试验基础和本构关系

过镇海

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是作者与其合作者,以及他们所指导的研究生们多年来在混凝土强度和变形方面的试验和理论研究成果的汇集和总结。

全书分作上、下两篇,共 16 章。主要内容在上篇有:混凝土力学性能的基本特点,单轴受压、受拉和剪切作用下的强度和变形规律,不同强度等级、应变(力)梯度、重复加卸载等情况下的性能;下篇有:混凝土的多轴试验技术,多轴强度和变形的一般规律,破坏形态和机理、破坏包络面和准则表达式,非线性弹性本构模型,以及非单调比例加载时的性能等。

本书着重总结有关试验研究结果,分析混凝土受力性能的机理和一般规律,最终表达为适当的本构模型,以便在理论分析和处理实际工程问题中应用。可供高等院校有关专业的师生,以及从事结构工程的科研、设计和施工工作的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土的强度和变形:试验基础和本构关系/过镇海著. 北京:清华大学出版社,1997
ISBN 7-302-02609-2

I. 混… I. 过… III. ①混凝土-强度试验②混凝土-变形试验③混凝土-本构关系-研究 IV. TU528.0

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 15163 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

印刷者:人民文学印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:15.25 字数:359 千字

版 次:1997 年 12 月第 1 版 1997 年 12 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-02609-2/TU·126

印 数:0001~2000

定 价:24.00 元

前 言

在我国和世界各国的结构工程中,用得最多、最广泛的是钢筋混凝土结构。它们在建造和使用过程中的安全性、技术合理性和经济性显然有着重要的社会和经济意义。为此,各国研究人员对结构的体系和方案、材料和结构(构件)的受力性能、构造和计算方法、安全度和耐久性分析等方面进行了大量的试验和理论研究,取得的成果已在工程实践中发挥了很大的积极作用。

钢筋混凝土结构材料的主体是混凝土,结构和构件的各种受力反应和安全性主要取决于混凝土的力学性能。为了合理地、准确地分析或设计钢筋混凝土结构,必须全面地了解和掌握混凝土在各种应力状态下的强度和变形规律。

本书介绍混凝土在各种受力状态下的强度和变形的试验方法、主要试验结果和性能变化规律、受力变形的机理和破坏特征,最终表达为相应的破坏(强度)准则和本构模型,以供结构分析和设计中应用。

本书的主要内容是作者和合作者王传志教授、张秀琴副教授等,以及所指导的研究生们*,十余年来在清华大学工程结构试验室进行的有关混凝土力学性能试验和理论研究的总汇;已经在清华大学的研究生课程“混凝土的破坏准则和本构关系”和“钢筋混凝土原理”中讲授多年。

全书分上、下两篇。上篇论述混凝土在基本受力状态下的强度和变形。在概括混凝土材料性质和构造特点的基础上,详细地介绍了最基本受力状态——单轴受压下混凝土的强度和变形规律,进而讨论工程中最常遇到的情况:不同强度等级和多种混凝土的性能、重复荷载作用和偏心受压作用下的性能;还给出至今试验研究较少的混凝土在单轴受拉和剪应力作用下的强度和变形规律。

下篇论述混凝土在多轴应力作用下的强度和变形。首先介绍试验技术复杂、且对试验结果有较大影响的混凝土三轴加载设备和试验方法。在分析了混凝土多轴强度和变形的一般规律和典型破坏形态后,根据破坏包络曲面的几何特征,提出了混凝土的破坏准则和多轴强度设计值的简化计算式。还对现有的多种混凝土破坏准则和本构模型进行分类、比较和评述。在混凝土的各类本构模型中,其原理和计算方法差别很大,本书介绍的非线性弹性类模型比较简明、实用。最后,通过几组试验实例对不同应力途径下的混凝土多轴强度和变形规律加以讨论,引出一些重要的认识。

本书撰写时遵循下述原则:

立足于试验基础——由于混凝土材料的组成和性质都很复杂,其力学性能的特点和一般规律,只能通过精细的试验来揭示,通过机理分析和试验数据处理,总结为理性认识,

* 曾参加有关试验和理论研究的硕士生有:杜育科、李永录、张琦、曲俊义、郑汝玫、叶献国、李伟政、王敬忠、徐焱等,博士生有揽生瑞、周云龙和郭玉涛。书中也引用了其他硕士生(许锦峰和胡海涛等)的部分论文内容。

并用数学方法予以描述。最后还要有实验或工程实践加以验证。

宏观的破坏准则和本构关系——由于混凝土的微观构造是多相的随机分布,且影响因素多而变化大,进行准确的微观定量分析极为困难。从服务于结构工程的目的出发,至今还不够成熟。本书所给的混凝土各种强度和变形指标都是指一定尺度范围(约 $\geq 70\text{mm}$,或3~4倍粗骨料直径)内的平均值,在结构工程的分析和设计中应用,精确度足够。

实际的强度和变形值——书中给出的试验结果和计算公式的理论值,都是指混凝土力学性能的实际值或试验平均值,可直接用以验算构件的实际承载力和变形等。若用于结构工程的设计,必须按照有关规范的统一要求进行可靠度分析,给以必要的折减,成为相应的强度和变形的标准值或设计值。

本书期望的作用是:

为分析结构的性能反应,包括变形、裂缝、承载力、破坏形态和工程事故等,提供混凝土材性的机理和验算所需的力学性能指标;

为结构的非线性全过程分析和多维有限元分析提供比较实用、准确的混凝土破坏准则和本构关系;

为改进结构和构件的计算方法,以及设计特殊的或复杂的结构,提供混凝土的材性数据;

对于从事结构工程学科和相近学科教学工作的教师和研究生、本科生,可作为钢筋混凝土结构类课程的参考教材。

本书问世之时,作者谨向下列人员与单位致以衷心的感谢:

曾经共同努力进行和完成各项试验和理论研究任务的同事们、研究生们,以及试验技术人员和工人们;

为有关科研项目提供经费资助的国家自然科学基金委员会和国家教育委员会博士点资金组织;

为本书的出版提供资助、审校和编辑工作的有关组织和人员。

由于混凝土材料性能的复杂多变,而我们试验研究的范围、内容和方法总有一定局限性,更限于作者的认识水平和分析能力,书中有不足、甚至谬误之处,敬请读者批评、指正。

过镇海

1996年3月

概 述

混凝土主要是由水硬性胶结材料——水泥和粗、细骨料，加水混合，相继经过搅拌均匀、浇注成形、振捣密实和温湿养护等工序后逐渐凝固而成的人工建筑材料。

混凝土用于结构工程只有近百年的历史，至今已成为世界上应用最广泛的主要结构材料，自然有其必然原因，即混凝土材料和其它结构材料相比具有下述的突出优点：

- 制作快速、简便，就地取材，价格低廉；
- 抗压强度较高，材性稳定，抗火、抗腐蚀和耐久性等尤佳，适用于一切地上、地下和水上、水下结构；
- 材料无定形，只需制作好模板，就可建造任何体形复杂、尺寸可大可小的整体结构；
- 选用不同的原材料和合理的配合比，有时还掺入各种添加剂，配以恰当的制作工艺，可制成不同性能指标（如容重、强度等级……）和多种功能（如早强、抗冻、耐热、耐酸、耐磨、低水化热……）的专用混凝土，以满足各类结构工程的特殊需要。

至于混凝土材料的缺点，如自重较大、抗拉强度低和易于开裂等，经过人们多年的研究和工程实践，已从原材料选择、配制工艺、配筋构造、预加应力和施工管理等方面采取措施，予以解决或大大改善。

至今，混凝土在结构工程中的应用已遍及建筑、桥梁、市政、交通、水工、河港、矿业、地下、机场等各个领域；用于各种大型特殊结构，如电视塔、烟囱、冷却塔、海洋平台等等也日渐增多；甚至已进入传统采用钢结构的机械工程领域，如万吨级水压机、船舶、核反应堆压力容器和安全壳等。今后，随着混凝土材料性能的不不断提高、施工工艺的革新和设计方法的完善，混凝土结构的应用必将有更大的发展。

随着混凝土结构的发展，兴建的重大结构工程日渐增多，例如核电站、高大水坝、海洋平台、很高的电视塔、高层建筑等等。这些结构的安全和正常地运行，已经不仅是一个单纯的技术、经济问题，而是对人民生命财产和社会安定有重大影响的社会问题。可是，这些结构往往是形体高大而复杂，承受的荷载大且变化多，还可能经受各种严酷的环境作用和偶然性事故，例如强烈地震、飞行器的撞击、突发性高温（火）和爆炸的冲击、风浪的反复袭击等。因而，这些结构的力学分析和设计要求有足够的精确度和可靠性，而理论上和方法上又有较大的技术难度。

从另一方面看，混凝土因其材料组成和构造的原因而具有非匀质、非线性和非各向同性等性质，还因混凝土内部微裂缝的存在和发展，力学性能随时间和环境条件而变异，使得混凝土的强度和变形状态十分复杂，影响因素多，变化幅度大，性能指标的离散度也大。

过去，一般的钢筋混凝土结构尺寸较小，形状简单，受力明确，都可采用足尺的或按比例缩小的模型，在实验室内进行荷载试验，测定其结构反应，将试验结果直接用于设计，或者经过统计分析后，将得到的经验计算式指导设计。70年代前，在各国的混凝土结构设计

目 录

前言	I
概述	IX

上篇 基本强度和变形

1 混凝土材料的特点	4
1.1 非匀质、非等向的多相混合材料	4
1.2 复杂的微观内应力(变形)状态	6
1.3 变形的多元组成	7
1.4 应力状态和途径对力学性能的巨大影响	8
1.5 时间和环境条件对力学性能的影响	8
2 中心抗压强度	10
2.1 立方体和棱柱体抗压强度	10
2.1.1 立方体抗压强度(f_{cu})	10
2.1.2 棱柱体抗压强度(f_{pr})	12
2.2 受力变形和破坏过程	13
2.3 主要因素的影响	15
2.3.1 强度等级(f_{cu})的影响	17
2.3.2 水灰比和水泥用量的影响	17
2.3.3 粗骨料的影响	20
2.3.4 应变速度的影响	21
2.3.5 试件高度的影响	21
3 受压应力-应变全曲线	22
3.1 试验方法	22
3.1.1 实现稳定下降段曲线的条件	22
3.1.2 两类试验方法	24
3.1.3 液压千斤顶作为刚性元件的试验方法	25
3.1.4 试件应变速度分析	28
3.2 受压全曲线方程	31
3.2.1 全曲线的几何特点	31
3.2.2 分段的曲线方程	31
3.2.3 参数值	33

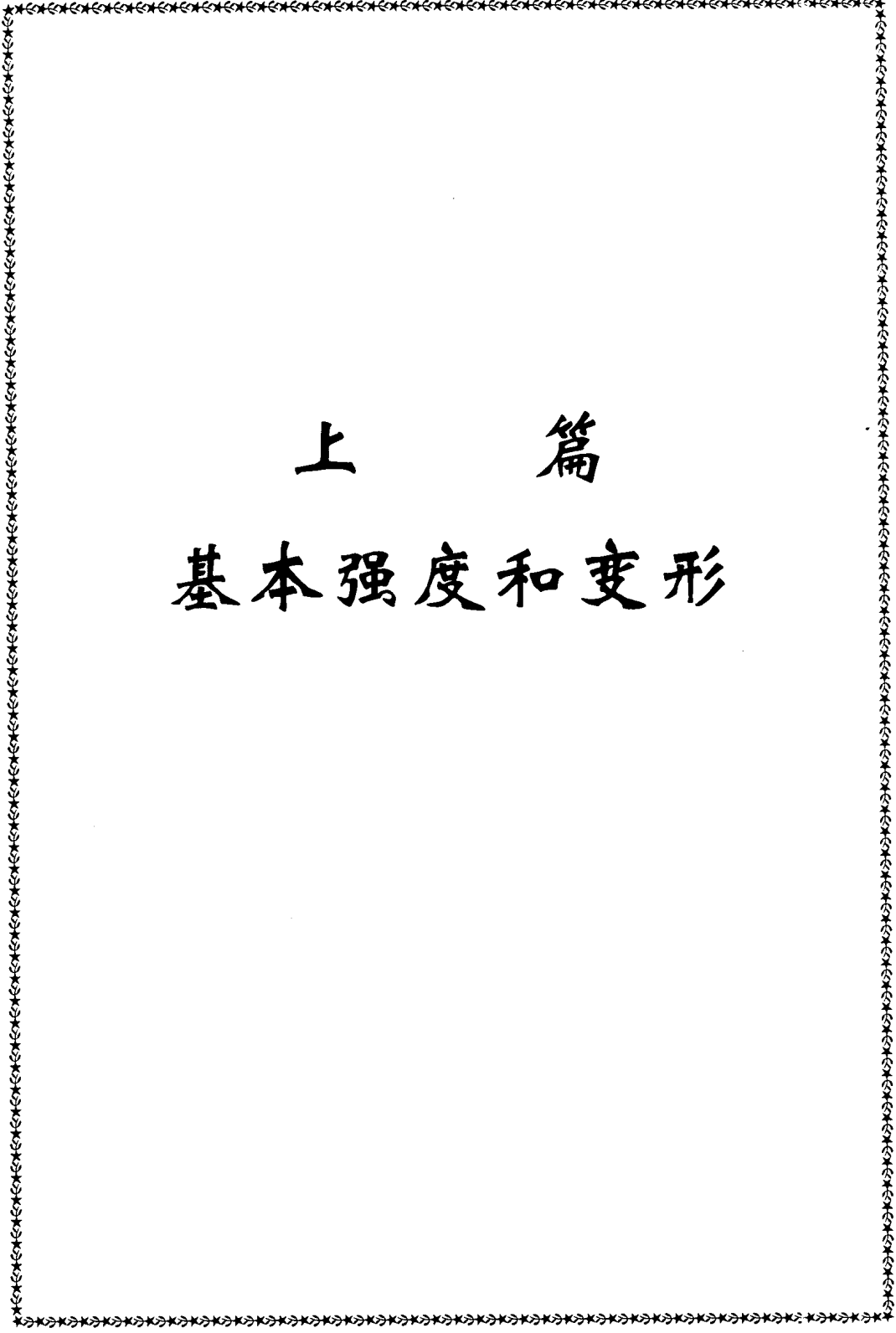
3.2.4	泊松比	35
3.3	受压曲线方程的比较和分析	36
4	不同混凝土的受压	40
4.1	高强混凝土的受压	40
4.2	轻骨料混凝土的受压	44
4.3	加气混凝土的受压	45
5	重复荷载作用	50
5.1	试验的重复荷载过程	50
5.2	强度和变形性能的比较	52
5.3	包络线和共同点、稳定点的轨迹线	54
5.3.1	包络线(EV)	54
5.3.2	共同点轨迹线(CM)	56
5.3.3	稳定点轨迹线(ST)	56
5.4	卸载和再加载曲线的形状及其计算式	57
5.4.1	曲线的一般形状及其机理	57
5.4.2	卸载曲线	58
5.4.3	再加载曲线	59
6	偏心受压	63
6.1	试验方法和一般受力规律	63
6.1.1	试验方法	63
6.1.2	一般受力规律	64
6.2	计算偏心受压应力-应变全曲线的方法	67
6.2.1	增量方程计算	68
6.2.2	给定方程,拟合参数	69
6.3	偏心受压应力-应变全曲线方程	70
7	受拉	72
7.1	试验方法和主要结果	72
7.1.1	受拉全曲线的试验方法	72
7.1.2	主要试验结果	74
7.2	受拉破坏过程和应力-应变全曲线	79
7.2.1	典型曲线和受力过程	79
7.2.2	破坏特征——与受压破坏的区别	82
7.2.3	受拉全曲线方程	83
7.3	偏心受拉	85

7.3.1	主要试验结果	85
7.3.2	偏心受拉应力-应变全曲线及其方程	90
8	剪切	93
8.1	合理的试验方法	93
8.1.1	已有试验方法的分析	93
8.1.2	等高梁四点受力试验	96
8.2	抗剪强度	99
8.2.1	变形和破坏过程	99
8.2.2	抗剪强度分析	101
8.3	剪应力-应变曲线和剪切模量	102
8.3.1	剪应力-应变曲线和峰值剪应变	102
8.3.2	受剪曲线方程和剪切模量	104
下篇 多轴强度和本构关系		
9	多轴试验的设备和技術	111
9.1	真三轴试验设备	111
9.1.1	常规三轴试验	111
9.1.2	真三轴试验	112
9.2	试验技术措施	116
9.2.1	优化承力系统的构造	117
9.2.2	试件居中	117
9.2.3	施加拉力	117
9.2.4	消减试件表面摩擦	118
9.2.5	量测应力和应变	119
9.2.6	控制应力(变)试验途径	121
9.2.7	标定单轴压、拉强度	121
10	多轴强度和变形的一般规律	123
10.1	二轴应力状态	125
10.1.1	二轴压/压	125
10.1.2	二轴拉/压	127
10.1.3	二轴拉/拉	127
10.2	三轴应力状态	129
10.2.1	常规三轴受压	129
10.2.2	真三轴受压	131
10.2.3	三轴拉/压	134
10.2.4	三轴受拉	137

10.3	不同种类和强度等级的混凝土	137
10.3.1	不同强度等级的混凝土	137
10.3.2	加气混凝土	140
11	破坏机理和形态	142
11.1	典型破坏形态	142
11.1.1	拉断	142
11.1.2	柱状压坏	143
11.1.3	片状劈裂	144
11.1.4	斜剪破坏	145
11.1.5	挤压流动	146
11.1.6	两种基本破坏形态	147
11.2	不同破坏形态的应力范围	147
12	破坏准则	150
12.1	破坏包络面的特点和表达	150
12.2	五参数幂函数准则	155
12.2.1	基本公式	155
12.2.2	参数值的确定	155
12.2.3	与试验结果的比较	158
12.3	多轴强度设计值	162
12.3.1	按准则式的计算方法	162
12.3.2	三轴抗压强度	163
12.3.3	三轴拉/压和抗拉强度	165
12.3.4	二轴包络线	163
13	对已有破坏准则的评介	163
13.1	古典强度理论简介	163
13.1.1	最大拉应力理论	163
13.1.2	最大拉应变理论	163
13.1.3	最大剪应力理论	169
13.1.4	统计平均剪应力理论	169
13.1.5	Mohr-Coulomb 理论	169
13.1.6	Drucker-Prager 理论	169
13.2	混凝土破坏准则	171
13.2.1	Bresler-Pister	171
13.2.2	Willam-Warnke	171
13.2.3	Ottosen	172

13.2.4	Hsieh-Ting-Chen	173
13.2.5	Kotsovos	173
13.2.6	Podgorski	173
13.3	准则表达式的统一和基本形式	177
13.4	各破坏准则的比较	179
14	各类本构关系简介	186
14.1	线弹性本构模型	186
14.1.1	各向异性材料的本构模型	187
14.1.2	正交异性材料的本构模型	188
14.1.3	各向同性材料的本构模型	188
14.2	非线性弹性本构模型	189
14.2.1	Ottosen 本构模型	191
14.2.2	Darwin-Pecknold 本构模型	192
14.2.3	Gerstle-Stankowski 耦合本构模型	193
14.3	塑性理论模型	194
14.4	其它力学理论模型	195
15	非线性弹性的正交异性本构模型	197
15.1	已有本构模型的验算	197
15.2	破坏形态和等效单轴应力-应变关系	198
15.2.1	拉应力指标 α 和破坏形态的界分	198
15.2.2	应力水平指标 β	199
15.2.3	等效单轴应力-应变关系	200
15.3	基本方程和计算式	202
15.3.1	正交异性材料的基本方程	202
15.3.2	全量式本构模型	203
15.3.3	增量式本构模型	204
15.4	计算程序和结果	205
15.4.1	计算框图	205
15.4.2	多轴应力-应变的理论曲线	206
16	非单调比例加载时的性能	210
16.1	变应力途径的多轴受压强度	210
16.1.1	变途径二轴受压	210
16.1.2	定侧压三轴受压	213
16.2	定侧压二轴受压的变形	215
16.3	二轴受压应力重复作用	218

16.3.1	比例加卸载·····	218
16.3.2	定侧压加卸载·····	221
参考文献 ·····		224

A decorative border consisting of a repeating pattern of small, stylized floral or geometric motifs, forming a rectangular frame around the central text.

上 篇

基本强度和变形

在实际的混凝土结构中,混凝土的应力状态复杂多变,因而有不同的强度和变形值。其中最简单、最基本的当然是单轴受压和单轴受拉状态。

混凝土在单轴受压和受拉状态下的强度和变形性质,清楚地显示了它与其它结构材料,如钢、木、砖石等的本质区别,也决定了混凝土结构的整体受力性能的特点和设计计算的方法。

混凝土的轴心抗压和抗拉强度是最重要的力学性能指标。它不仅是决定混凝土强度等级的唯一依据,还是确定其它力学特性(例如弹性模量、峰值应变、延性指数、破坏形态、多轴强度和变形……)的特征和数值的最主要因素。

混凝土的受压和受拉应力-应变全曲线(包括上升段和下降段部分)则是混凝土在各个受力阶段的变形、内部微裂缝的发展、损伤积累、达到强度极限、峰值后的残余性能、外表的破损剥落和最终破坏形态的形成等一系列变化过程的完整的宏观反应。它们是研究和分析混凝土结构和构件的承载力和变形的主要材性依据;在构件极限状态下的截面应力分布、抗震和抗爆结构的延性和恢复力特性分析、一维构件的非线性(有限元)全过程分析等过程中,它们是不可或缺的材料物理条件——本构关系,直接影响计算的准确性。

至今,我国的混凝土结构设计规范^[1-1]中仍以混凝土的单轴抗压、抗拉的强度和变形指标作为设计一切结构和构件的基础,对于工程中大量存在的一般简单构件,可以满足计算精度的要求;而对于明显处于多轴应力状态的局部承压和螺旋箍筋柱等情况,则用经验公式修正单轴抗压强度,应用于工程设计。

在实际工程中,采用不同种类和强度等级的混凝土,以及构件截面应力的不均匀分布、荷载(应力)的多次重复作用等情况下,混凝土强度和变形性能的变化,势将影响结构的整体反应。

纯剪应力本属于二轴应力状态,但是,混凝土的纯剪强度和破坏形态与单轴受拉状态相近,也作为基本性能列入本篇。

混凝土的一切强度和变形性能,都是混凝土材料在外部作用下的物理的和力学的综合反应,依附于组成材料的构造、性质和相互作用。本篇首先介绍的混凝土材料的一般特点,可作为研究和分析各种力学性能机理的基础。

混凝土材料的特点

混凝土是水泥、砂、石和水的混合材料，其组成材料的成分和性质，以及在制备、凝固和使用过程中的各种条件 and 环境因素都对其强度和变形有不同程度的影响，因而使混凝土比其它结构材料具有更复杂、多变的力学性能。

根据已有的试验研究结果，可看到混凝土材料有以下主要特点。

1.1 非匀质、非等向的多相混合材料

在混凝土结构或试件中钻取或锯切出一块混凝土，肉眼就可看出内部的非匀质构造(图 1-1(a))。其主要组成部分有：

固体颗粒——具有不同形状、颜色、尺寸和矿物成分的粗骨料、较大的砂粒、未水化的水泥颗粒团和混入的各种固体杂质(如玻璃、砖块、木片等)。它们随机地分布在混凝土内部，占据了总体积的绝大部分。

硬化的水泥砂浆——水泥和水产生的水化作用，将搅拌均匀的砂子胶结在一起成为水泥砂浆，填充在固体颗粒之间，或称围裹在固体颗粒外层，形成不均匀、不规则的条带状

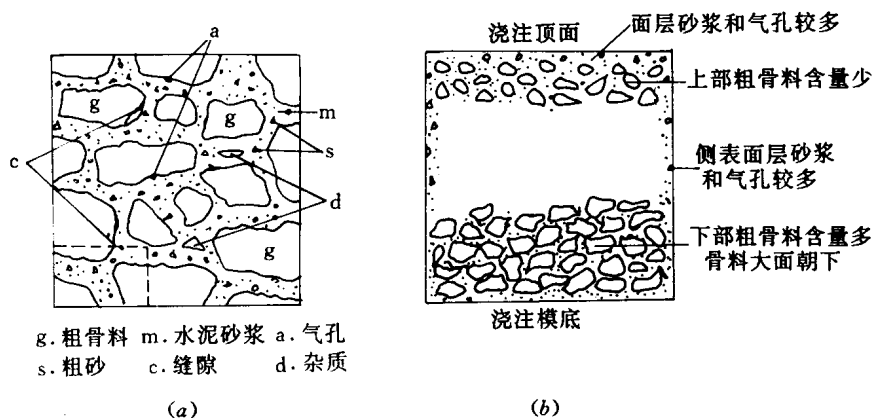


图 1-1 混凝土组成材料的非匀质、非等向分布

(a) 内部构造的随机分布 (b) 非等向性

或网状分布构造。刚开始时,水泥砂浆是流动性强的胶状体。随着混凝土龄期的增长,水泥颗粒的水化作用层往内部深入,外层逐渐固化,砂子的粘结力不断加强,形成硬化的水泥砂浆。有试验表明,龄期达 50 年的混凝土,其中水泥的水化作用仍在继续,故仍具有一定的流变性。

各种气孔和缝隙——在混凝土的搅拌和浇注过程中,少量空气混入其内部;在震捣时,大部分空气成气泡状往上升,从构件的上表面逸出,其余的积聚在构件顶面和侧面的表层砂浆层(厚度一般为 3mm~5mm)内。较大的石子和钢筋下面有明显的气孔。混凝土中的水分蒸发以及水泥砂浆干缩变形等都会在粗骨料和砂浆的界面、砂浆的内部形成不同形状和尺寸的细微裂缝。此外,浇注和震捣操作不当等施工缺陷可能在混凝土内留下较大孔洞。

这三部分中,前两者为基本组成。它们的物理和力学性质相差悬殊(表 1-1),在外力作用和环境条件影响下的反应有显著差别,成为混凝土强度和变形性能复杂、多变、离散的主要原因。

表 1-1 水泥砂浆和粗骨料的物理性质典型值对比^[1-3]

物理性质	极限抗压强度 /MPa	极限抗拉强度 /MPa	弹性模量 /10 ⁴ MPa	泊松比	比重	极限收缩 /10 ⁻⁶	单位徐变 /10 ⁻⁶ MPa ⁻¹	温度膨胀系数 /10 ⁻⁶ (°C) ⁻¹
硬化水泥砂浆	15~150	1.4~7.0	0.7~2.8	0.25	1.7~2.2	2000~3000	150~450	12~20
粗骨料	70~350	1.4~14.0	3.5~7.0	0.10~0.25	2.5~2.7	一般可忽略	一般可忽略	6~12

除了混凝土组成部分的随机分布所引起的非匀质性外,还因为一些因素构成混凝土的必然非匀质性,例如:

- 在浇注和震捣混凝土的过程中,比重和颗粒较大的粗骨料沉入底部,而比重较小的骨料、流动性大的水泥砂浆和气泡等向上升,形成了凝固后的混凝土在浇注方向上、下部的非匀质性;
- 构件浇注方向的顶面和模板侧面附近,水泥砂浆和气泡的含量高于构件内部,构件表层的水分蒸发较快,收缩变形较大,遗留裂缝较多,形成构件的表、里非匀质性。

此外,在混凝土的浇注和震捣过程中,有一些现象将产生非等向性(图 1-1(b)),例如:

- 粗骨料若有一较大平面,震捣后的最稳定位置是大面朝下;
- 气泡上升过程中略呈长圆形,混凝土凝固后气孔长径平行于浇注方向;
- 构件分层浇注和震捣混凝土时,留有水平施工缝。

这些现象使混凝土在承受不同方向(平行、垂直或倾斜于浇注方向)的应力时,表现为

不等的强度和变形值。例如,按照标准试验方法,混凝土立方试件沿垂直浇注方向加载,测定的抗压强度比按平行浇注方向加载的抗压强度低。再如,混凝土柱竖向浇注成型时,每一截面材料性质对称,受力均匀,但沿柱高性能有变,强度由上部所控制;卧位浇注时,各截面的材料性质相同,但截面上沿浇注方向的顶面和底部的材质有异,轴心受压下产生不均匀应变。因而这两柱的强度和变形将有区别。

混凝土材料的非匀质和非等向性的程度,取决于原材料的均匀性、水泥骨料比和水灰比,以及搅拌、浇注、震捣和养护等施工操作工艺。此外,在先期应力作用下,混凝土内部形成的微裂缝具有一定的方向性,对后期的不同应力状态、微裂缝的发展和变形将有不同的反应(详见第 16 章),这是混凝土的受力后非等向性。

1.2 复杂的微观内应力(变形)状态

如果将一块混凝土按比例放大,就可看作由粗骨料和硬化的水泥砂浆这两种性质迥异的主要材料构成的非线性、三维实体结构物。在承受荷载之前和之后,都存在十分复杂的微观应力(应变)场。这正是混凝土材性变化大和性能指标离散的主要原因。

在混凝土的凝固过程中,水泥的水化作用产生凝胶体,使水泥砂浆逐渐变稠、硬化,和粗骨料粘结成一整体。在此同时,混凝土因水分逐渐逸出而变干燥,水泥砂浆发生的收缩量远大于粗骨料的收缩量(表 1-1)。此收缩差使粗骨料受压,而砂浆受拉(图 1-2(a)),虽然任一截面上的应力合力为零,但局部的收缩应力值可能很大,以致在粗骨料界面形成微裂缝^[1-2]。

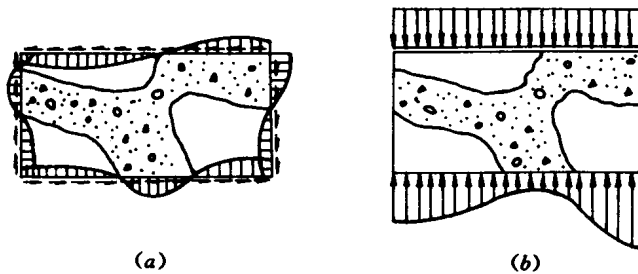


图 1-2 混凝土的内部微观应力状态
(a) 收缩差或温度差引起 (b) 应力作用

同样,由于粗骨料和硬化水泥浆间的线膨胀系数的差别(表 1-1),即使两者的温度变化相同,也因为变形的不一致,又相互约束而产生不均匀的三维应力场。更何况混凝土是热惰性材料(导热系数 $\lambda = (0.81 \sim 1.86) \text{W/m} \cdot \text{K}$),因为水化热、环境温度变化或事故(火)升温等将使混凝土表层和内部形成较大的温度差,内部的微观温度应力(应变)场更为复杂、变化大。

当结构承受外力的作用,即使局部混凝土的宏观应力均匀,也会因为粗骨料的随机排列和水泥砂浆的不规形状、两者的弹性(或变形)模量和抗拉、压强度的差别(表 1-1),以