



“十二五”国家重点图书出版规划项目

土木工程材料

Civil Engineering Materials

● 迟培云 葛宏翔 王大成 编著
● 韩琳琳 主审

哈尔滨工业大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

土木工程材料

迟培云 葛宏翔 王大成 编著
韩琳琳 主审

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书主要介绍土木工程中常用材料的基本组成、技术性能、质量检验及应用方法和其他基本知识。所涉及的内容包括建筑金属材料、混凝土、气硬性无机胶凝材料、沥青基材料、墙体材料、木材、合成高分子材料、建筑功能材料等。

本书是高等院校土木工程类及其他相关专业本科生教材,也适用于材料科学与工程等专业,并可供土木工程设计、施工、材料科学研究的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/迟培云,葛宏翔,王大成编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.8
ISBN 978-7-5603-4096-8

I. ①土… II. ①迟…②葛…③王… III. ①土木工程-建筑材料-高等学校-教材 IV. ①TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 115983 号



责任编辑 张秀华 何波玲

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省党校印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 21.75 字数 501 千字

版 次 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-4096-8

定 价 39.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

1998年7月,教育部颁布了新的普通高等学校本科专业目录,将建筑工程、交通土建工程、矿井建设、城镇建设等八个专业合并拓宽为土木工程专业。“土木工程材料”为现行土木工程专业的专业基础课程,为了适应调整后专业的需要,结合以往的教学经验、最新的科学研究成果、国际发展新趋势和工程实际的基本情况,满足我国高等学校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求,探索和建立我国高等学校应用型本科人才体系,在已有传统教材的基础上作了较大幅度的增减。例如,将国家已经明令禁止使用的烧结黏土砖和即将禁止使用的现场搅拌砂浆等的相关内容删除,增加了过去传统教材中未曾涉及但又十分重要的一些内容。例如,增加材料科学基础中的部分核心内容,以及混凝土工程、预应力混凝土工程、预拌砂浆、复合材料等内容,以便教学中能够灵活选用。

混凝土是世界上使用量最大、使用范围最广的工程材料,是人类文明建设中不可缺少的物质基础。近几十年来,混凝土工程与技术得到了迅速发展,目前已进入新型、高强、绿色高性能混凝土时代。混凝土生产早已从分散的、半机械作坊式的生产进入现代大工业的、集团式的产业化生产。

预应力混凝土是混凝土技术的一次飞跃。由于预应力技术在大跨建筑、高层建筑,以及在抗震、防裂、抗内压等方面的卓越效果,从而大大地扩展了混凝土的应用范围。C100的预应力混凝土在重量上即可与钢结构相近。这样,大部分的钢结构工程可用预应力混凝土结构代替。目前,混凝土的应用已从一般的工业与民用、交通、水工等建筑扩展到海上浮动建筑、海底建筑、地下城市建筑、高压储罐、核电站容器等领域。

如今,高分子材料合成技术日臻成熟,其各项技术性能几近完善,土木工程材料的发展已步入高分子材料时代,正酝酿着建筑技术的新的变革。随着国民经济不断发展和社会生产力水平不断提高,人们不再仅仅满足有个居住的场所,而是要求住房宽敞、绿色、节能、舒适、美观、豪华、智能和人性化等。因此,装饰材料在住房建设中起着不可替代的重要作用。

人类发展的历史证明,材料是社会进步的物质基础和先导,是人类进步的里程碑。纵观人类利用材料的历史,可以清楚地看到,每一种重要材料的发现和利用,都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平,给社会生产力和人类生活带来巨大的变化。当前以信息、生命和材料三大学科为基础的世界规模的新技术革命风涌云起,它将人类的物质文明推向一个新阶段。在新型材料研究、开发和应用,在特种性能的充分发挥以及传统材料的改性等诸多方面,材料科学都肩负着重要的历史使命。近30年来,科学技术迅速发展,特别是尖端科学技术的突飞猛进,对材料性能提出越来越高的要求。在许多方面,传统的单一材料已不能满足实际需要,这些都促进了人们对材料的研究逐步摆脱过去单纯靠经验的摸索方法,而是向着按预定性能设计和制造新材料的研究方向发展。

由于复合材料各组分之间“取长补短”、“协同作用”,极大地弥补了单一材料的缺点,产生单一材料所不具有的新性能,也是材料设计方面的一个突破,它综合了各种材料(如纤维、树脂、橡胶、金属、陶瓷等)的优点,按需要设计、复合成为综合性能优异的新型材料。可以预言,21 世纪是复合材料的时代。

土是经过漫长的地质历史并在各种复杂的自然环境和地质作用下形成的。所以,土随着形成的时间、地点、环境以及方式的不同,其性质也各有差异。因此,在研究土的工程性质时,强调对其成因类型和地质历史方面的研究具有重要的意义。任何建筑物都建在地层上,建筑物的全部荷载都由它下面的地层承担,因此,在学习有关土的内容时,应掌握主要土工试验的基本原理和操作技术,了解为确定地基承载力和解决某些土工问题需要做哪些室内和现场土工试验,并且了解一般建筑物设计中有关土的设计计算方法。

本书共 13 章,其中第 1、3、5、7、12、13 章及习题等由青岛理工大学迟培云编著;第 2、4、6、9 章由青岛市建筑工程质量监督站葛宏翔编著;第 8、10、11 章及实验由青岛市建筑工程质量监督站王大成编著;青岛理工大学预拌砂浆研发中心韩琳琳编著预拌砂浆部分并担任主审。在编著本书过程中得到青岛理工大学教务处、土木工程学院等部门领导的全面支持以及材料科学与工程教研室同事们的鼎力协助,在此一并表示衷心感谢。

由于本书内容繁多,涉及的知识面广,作者水平有限,疏漏错误之处在所难免,恳请读者不吝赐教,本书所摘引的有关材料,在此谨向原作者深表谢意。

作 者

2013 年 03 月

目 录

绪论	1
第 1 章 材料学基础	5
1.1 土木工程材料与工程结构的关系	5
1.2 材料的结构层次	6
1.3 材料的变异性	7
1.4 材料存在的状态	8
1.5 材料的基本状态参数	11
1.6 材料的力学性质	12
1.7 材料与水有关的性质	17
1.8 材料的热性质	20
1.9 材料的耐久性	21
第 2 章 建筑金属材料	22
2.1 钢材的分类	22
2.2 建筑钢材的主要技术性能	23
2.3 钢材的组成结构及其对钢材性能的影响	27
2.4 钢材的强化与加工	30
2.5 土木工程常用金属材料的性质与应用	32
2.6 钢材的腐蚀与防护	41
2.7 钢筋连接	42
2.8 钢筋机械连接	47
2.9 钢筋的配料与代换	48
第 3 章 混凝土	50
3.1 普通混凝土的组成材料	51
3.2 普通混凝土的主要技术性质	82
3.3 普通混凝土的配合比设计及质量控制	99
3.4 其他种类混凝土及其新进展	105
第 4 章 混凝土工程	119
4.1 混凝土的制备	119

4.2	混凝土的运输	124
4.3	混凝土的成型	129
4.4	混凝土的养护	138
4.5	混凝土的质量检查	140
4.6	混凝土制品的生产	143
第5章	预应力混凝土工程	144
5.1	概述	144
5.2	现代预应力结构最新进展	145
5.3	预应力混凝土的基本原理及分类	149
5.4	有效预应力的计算及减小预应力损失的措施	149
5.5	预应力混凝土的施工方法	151
5.6	无黏结预应力混凝土施工工艺	164
第6章	气硬性无机胶凝材料	165
6.1	石灰	165
6.2	石膏	170
6.3	菱苦土	174
6.4	水玻璃	175
第7章	沥青基材料	178
7.1	沥青材料	178
7.2	沥青混合料	188
第8章	墙体材料	202
8.1	预拌砂浆	202
8.2	砖	206
8.3	砌块及墙体材料的发展	208
8.4	砌筑石材	211
8.5	砌体工程	213
第9章	木材	219
9.1	木材的分类与构造	219
9.2	木材的性能及应用	221
9.3	木材的防护与防火	224
第10章	合成高分子材料	225
10.1	合成高分子材料的分子特征及性能特点	225

10.2 土木工程中的高分子材料·····	226
第 11 章 建筑功能材料 ·····	233
11.1 建筑防水堵水材料·····	233
11.2 绝热材料·····	239
11.3 吸声隔声材料·····	241
11.4 建筑装饰材料·····	242
11.5 建筑功能材料的新发展·····	248
第 12 章 复合材料概论 ·····	250
12.1 复合材料的发展概况·····	250
12.2 复合材料的命名和分类·····	251
12.3 复合材料的基本性能·····	252
12.4 复合材料的增强机理·····	256
12.5 复合材料结构设计基础·····	257
12.6 常用复合材料·····	259
第 13 章 土 ·····	265
13.1 土的三相组成·····	266
13.2 土的基本物理性能·····	267
13.3 土的工程分类·····	272
13.4 土的基本力学性能·····	275
13.5 土体处理工程·····	279
试验部分 ·····	284
试验一 土木工程材料基本物理性质试验·····	284
试验二 金属材料试验·····	287
试验三 水泥技术性能试验·····	291
试验四 建筑用砂石试验·····	299
试验五 普通混凝土试验·····	306
试验六 加气混凝土力学性能试验·····	311
试验七 石油沥青试验·····	313
试验八 沥青混合料试验·····	318
习题部分 ·····	326
参考文献 ·····	336
名词索引 ·····	338

绪 论

1. 土木工程材料及其分类

土木工程材料是指用于建造各种建筑物或构筑物的所有材料的总称。一般所指的土木工程材料,除用于建筑物本身的各种材料之外,还包括卫生洁具、暖气及空调设备和家具、灯饰灯具等配套产品,以及施工过程中的暂设工程,如围墙、脚手架、板柱、模板等所用的材料。

土木工程材料可从不同角度来分类,如按材料在建筑物中的部位,可分为承重构件(梁、板、柱)、屋面、墙体、地面等材料;如按材料的功能,可分为结构材料、装饰材料、防水材料等;如按化学成分,可分为无机材料、有机材料和复合材料,以下再细分。本书是按材料的化学成分分类的(见表 0.1)。

表 0.1 按材料的化学成分分类的土木工程材料

无机材料	金属材料	黑色金属	铁、碳钢、合金钢
		有色金属	轻金属:Na、Mg、Al...
			重金属:Pb、Cu、Cd...
			贵金属:Pt、Au、Ag...
			稀有金属:钨系、钼系、Ge...
	非金属材料	天然石材(包括混凝土用砂、石) 烧土制品(烧结砖、瓦、饰面陶瓷等) 玻璃及其制品 水泥、石灰、菱苦土、石膏、水玻璃 混凝土、砂浆 硅酸盐制品	
有机材料	天然有机材料	木材、竹材 棉、麻、纬、草等植物纤维及其制品 动物毛、丝及其制品	
	合成高分子材料	塑料、橡胶 合成纤维及其制品 涂料 胶黏剂、表面活性剂	
	沥青材料	石油沥青及煤沥青、沥青制品	

续表 0.1

复合材料	无机非金属材料 与有机材料复合	玻璃纤维增强塑料(玻璃钢) 聚合物水泥混凝土 聚合物浸渍混凝土 沥青混凝土
	无机非金属材料 与金属材料复合	金属陶瓷 钢筋混凝土 碳纤维

2. 建筑材料对发展建筑业的作用

土木工程材料是发展建筑业的物质基础。我国正处于国民经济飞速发展时期,基本建设规模巨大,必须大力发展土木工程材料行业。随着国民经济水平和社会生产力的提高,迫切需要建造大量住房。与此同时,公共建筑、工业建筑和广大农村房屋,以及交通、能源、水利等工业部门的建设也必然进行相应的发展。由此可见,土木工程材料的用量是巨大的。

土木工程材料用量大,经济性很强,直接影响工程的造价。我国一般建筑的总造价中,材料费用所占比重较大,约占总造价的 50% ~ 60%。因此,选用的材料是否经济适用,对降低房屋建筑的造价起重要作用。

土木工程材料的品种、质量及规格直接影响工程是否坚固、耐久和适用,并在一定程度上影响结构形式和施工方法。土木工程中许多技术问题的突破,往往依赖于材料问题的解决,而新的土木工程材料的出现,又将促使结构设计及施工技术的革新。例如,黏土砖的出现,产生了砖(石)木结构;水泥和钢筋的出现,产生了钢筋混凝土结构;轻质高强度材料的出现,推动了现代建筑和高层建筑的发展。随着建筑技术的发展,又不断地对土木工程材料提出新的更高的要求。由此可见,土木工程材料的生产和技术水平的提高,对发展我国建筑业具有重要作用。

3. 土木工程材料发展概况

人类建筑活动的历史相当久远。今天,世界各地还保存有许多雄伟壮观的古代建筑或建筑遗迹,从中可以看出古代劳动人民使用土木工程材料的技术成就。例如,埃及的金字塔、希腊的雅典卫城、古罗马的斗兽场、欧洲各地中世纪的教堂,至今仍令人惊叹不已。我国 1300 年前建造的高达 40 m 的河南登封嵩岳寺塔及山西五台山佛光寺的唐代木结构大殿,直到现在仍保存得相当完好。更使人惊异的是公元 1056 年建造的山西应县木塔,总高 67 m,至今还巍然屹立在祖国的大地上。

但无论中外,在漫长的奴隶社会和封建社会中,建筑技术和土木工程材料的进步都是相当缓慢的。直到 19 世纪,资本主义各国先后发生工业革命,建筑领域才出现了突飞猛进的变化。19 世纪后期重工业的发展,为建筑业提供了性能良好的新型土木工程材料。新材料对建筑物的设计、施工及建筑面貌产生了决定性的影响。自从有了钢和水泥这两种工业生产材料,各种工程和房屋建筑摆脱了几千年来,土、木、砖、石等材料的限制,开始大踏步地向前发展。现在,每一个重要的建筑工程都离不开这两种材料。钢和水泥的使用标志着建筑发展史上的一个新阶段。

进入 20 世纪以后,新的土木工程材料(如铝材、塑料及各种轻质高强的复合材料)陆续出现,已有材料的性能日益改善,土木工程材料的发展不断地推动着房屋结构、施工工艺及建筑设计进步。

土木工程材料工业不仅是发展建筑业的基础,也是国民经济的重要基础工业之一,在我国现代化建设中起着举足轻重的作用。新中国成立以来,我国土木工程材料行业有了长足的发展,特别是党的十一届三中全会以来,发展更为迅速。1978~1988 年 10 年间在改革开放总方针指导下,坚持技术进步和科学管理,使土木工程材料的主要产品成倍增长。以水泥为例,1988 年总产量达到 2 亿吨,后连续三年居世界首位,产品品种也不断增加。其他新型土木工程材料产品也都有较大发展,并且日益向轻质、高强、多功能的方向发展。

人类使用和生产材料有着漫长的历史,然而成为一门学科——材料科学则是近几十年的事。材料科学是研究材料组成、结构、加工与材料性能和应用之间相互关系的一门学科。它包括金属、无机非金属和合成高分子材料。当然,土木工程材料也属于材料科学研究对象,但由于土木工程材料的种类繁多,组成、结构、性能及用途又是多种多样的,目前要从材料科学角度出发,对它建立较完整的体系,有一定的困难。但随着科学技术的发展和现代测试技术的进步,必将从材料科学角度建立起土木工程材料学科的体系。不久的将来,按指定性能设计和制造新材料的时期将会到来。

4. 课程的目的、任务及基本要求

本课程是高等院校土建类专业的专业基础课。课程的目的是为“房屋建筑”、“建筑施工”和“结构设计”等专业课程,提供土木工程材料的基本知识,并为学生今后从事专业技术工作时,能够合理选择和使用材料打下基础。

课程的任务是使学生获得有关土木工程材料的性质与应用的基本知识和必要的基本理论,并获得主要土木工程材料的试验方法的基本技能训练。

土木工程材料种类繁多,而且每种材料涉及的内容又很庞杂,如原料、生产、材料组成与结构、性质、应用、检验、运输、验收、储存等各个方面。从本课程的目的及任务出发,主要着重于材料的性质和应用。对这两方面的内容提出以下基本要求:

①在材料性质方面:掌握材料的组成、技术性质及特性;了解材料组成及结构对材料性质的影响;了解外界因素对材料性质的影响;了解各主要性质间的相互关系;初步学会主要土木工程材料的试验方法。

②在材料应用方面:根据工程要求能够合理地选用材料;了解材料使用方法的要点;熟悉有关的国家标准及技术规范,并了解制定标准的科学依据。

5. 课程的学习方法

如何学好这门课程,是学生们非常关心的问题,下面提出几点建议供学习时参考。

(1) 要讲究学习方法

这门课程与数学、物理、力学等不同。首先,内容庞杂,各章自成系统,读过之后抓不住重点;其次,课程中没有公式的推导或定律的论证和分析,许多内容是定性的描述或经验规律的总结;再次,课程的内容中常涉及本专业(土建类专业)并不开设的课程(如物理化学、结晶学、岩石学、胶凝材料学、混凝土学)中的一些概念,因而概念多,术语多,在没

有理解这些概念、术语的含义和了解它们之间内在联系的时候,就会感到枯燥无味。

课程的性质不同,学习方法也应该有所不同,“土木工程材料”是综合性课程,涉及许多学科,但反映在教材上却是这些学科中与土木工程材料性质和应用有关的个别概念,而不是有关学科的系统知识。根据课程的上述特点,从课程的目的、任务出发,按课程的基本要求,采取相应的学习方法来安排学习。

(2) 抓住中心

本课程作为土建类各专业基础课,将通过课堂教学,结合现行的技术标准,以土木工程材料的性能及合理使用为中心,进行系统讲述。

但是,只限于孤立地了解材料若干技术性质或特性,实际上是不可能掌握材料性质的。只有了解事物本质的内在联系,即材料性质与其组成、结构之间的关系,或所谓的决定材料性质的因素,才有可能掌握材料的性质。

材料性质不是固定不变的,在使用过程中,受外界各种环境条件的影响,材料性质要发生不同程度的变化。了解材料受外界环境影响性质发生变化的规律,即所谓的影响材料性质的因素,才有可能根据材料的性质正确地选择和使用材料。

(3) 运用对比的方法

不同种类的材料,具有不同性质,而同类材料不同品种之间,则既存在共性,又存在特性。学习时不应将各种材料的性质无选择地、逐一地死记硬背,而要抓住代表性材料的一般性质,即了解这类材料的共性。然后运用对比方法,学习同类材料的不同品种,总结其之间的异同点,掌握各自的特性。这种方法,在学习水泥、混凝土等主要材料时尤为重要。运用对比方法学习能够抓住要领,条理清楚,便于理解和掌握。

(4) 密切联系实际

本课程是实践性很强的课程,学习时要注意理论联系实际,利用一切机会注意观察周围已经建成和正在修建的工程,在实践中验证和补充书本知识。带着工程实际问题,在学习中寻找答案,这对正在从事土建技术工作的人来说尤为重要。理论与实际结合会使学习更加扎实、灵活,学习目的性更强,学习兴趣更浓厚。

(5) 实验课

实验课是本课程的重要教学环节,其任务:一是验证基本理论,学习试验方法;二是培养科学研究能力和严谨缜密的科学态度,为今后从事土木工程材料方面的科学研究打下必要的知识基础和技能基础。做实验时,要严肃认真,一丝不苟,即使对一些操作简单的实验也不例外。要了解实验条件对实验结果的影响,并对实验结果作出正确的分析和判断。

第1章 材料学基础

1.1 土木工程材料与工程结构的关系

土木工程材料的更新是新型工程结构出现与发展的基础。在古代,土木工程材料主要是木材、石材等,限制了建筑物的规模。公元125年,古罗马时期以火山灰和石灰作为胶凝材料配制了早期的混凝土,用12 000 t这种混凝土建造了穹形屋顶,直径为44 m,外观宏伟的万神庙,成为人类建筑史上的一座丰碑。到了19世纪,随着硅酸盐水泥的发明,出现了钢筋混凝土,1912年在波兰布雷劳斯市建造的肋形拱顶、直径为65 m的世纪大厅,耗用了钢筋混凝土1 500 t。随着建筑技术的发展,钢筋混凝土薄壁构件出现,墨西哥的洛斯马南什斯饭店采用双曲抛物面薄壳屋盖,直径为32 m,厚度为4 cm,质量只有100 t。随着材料科学技术的发展,1997年德国斯图加特市联邦园艺展览厅,采用玻璃纤维增强水泥的双曲抛物面屋盖,厚为1 cm,直径为31 cm,质量只有25 t。近些年出现采用厚为1 mm的薄钢板,在现场加工成大跨度的彩板轻钢屋面,质量进一步减轻,而用厚度仅为0.2 mm的建筑膜搭建起的新型膜结构,每平方米质量仅20 kg。由此可见,土木工程材料的品种、质量及规格直接影响工程结构的坚固、耐久和适用,并在一定程度上影响结构形式和施工方法。而且,工程结构中许多技术问题的突破,往往依赖于土木工程材料问题的解决,而新的土木工程材料的出现又将促使建筑风格、结构设计及施工技术革新,所以,新的轻质高强材料的不断涌现,为结构向大跨度、轻型化和新型结构形式发展提供了前提条件。

要合理地选用材料,就必须对不同材料进行比较,了解各种材料的特征,包括强度与破坏特性、变形性能、耐久性能等方面。

首先,材料必须具有足够的强度,不仅要安全地承受设计荷载,而且由于强度提高可减轻其自重,减小下部结构和基础的负荷,从而使整体结构断面的尺寸减小。这说明发展高强、轻质和高效能的新型材料,具有重大技术和经济意义。

不同的材料变形性能大小的影响因素差异很大,例如,沥青主要受温度变化影响,导致混凝土变形的主要因素则是凝胶体或水分的迁移。变形性能不仅影响材料承载能力,而且因为变形受约束导致开裂,对材料的耐久性也带来明显的影响。

耐久性是指土木工程材料应用于结构物时,维持正常使用性能的能力。由于恶劣环境里各种基础设施建设的发展,例如沙漠、海洋中开采石油相关设施,海洋与近海结构物等的建设和使用,对于材料的耐久性要求日益提高。

1.2 材料的结构层次

我们需要从不同尺度的结构层次去分析材料,由小到大可分为分子尺度,材料结构尺度和工程尺度。

1.2.1 分子尺度(Molecular Scale)

从原子、分子尺度来分析材料,基本上属于材料学的范畴,这个范围粒子的大小约为 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ mm,例如硬化水泥浆体中的硅酸钙水化物、氢氧化钙结晶等。

材料的化学成分起决定物理结构的作用。当化学反应不断地进行时,材料的物理结构也随时间不断发生变化。例如,水泥水化是一个缓慢的过程,随着时间的推移,水泥的结构和性能都相应发生变化。有些材料,例如金属,由于周围环境影响,外界的氧和酸性介质与其发生反应的速度,决定了它们的耐久性。

材料的孔隙率大小,由化学和物理方面的很多因素决定。砖、混凝土等多孔材料许多重要的性质,如强度、刚度都与其孔隙率成反比,与其渗透性也有直接联系。

在分子尺度上,测定材料结构的试验技术已经相当先进,使用电子显微镜、X射线衍射仪、热重分析等复杂的仪器,对金属的位错、水泥浆硬化时的收缩与开裂等很多的现象,都可以通过直接观测的结果进行分析,但是大多数情况下还需要通过建立数学、几何模型来推测材料的结构和可能呈现的特性。

在分子尺度上,只有断裂力学可以直接通过分子的行为分析材料的工程性质,多数情况下这个尺度得到的信息还只能提供一些思路,用于分析和预测不同条件下材料的特性。

材料学家们对材料化学、物理结构的认识,则是开发新材料的重要途径之一。

1.2.2 材料结构尺度(Material Structural Scale)

材料结构尺度把材料看作不同相的组合,相与相之间的相互作用使整体呈现出一定的特性。相可以是材料结构内许多可分的个体,如木材的细胞,金属的晶粒,或者由性质完全不同的几个相随机混合形成的混凝土、沥青、纤维复合材料,以及砌体中有规则排列的单元。这些材料通常是由大量颗粒(如骨料)分散在基体(如水泥或沥青材料)中组成,单元大小从厚度只有 5×10^{-5} mm的木材细胞壁,到一块长达240 mm的砖。

该尺度之所以重要,在于它比对材料整体进行测试得到的结果更具普遍性,通过建立多相组合模型,就可预测常规试验范围以外的多相材料特性,模型的建立要注意以下几方面:

①几何形态。模型必须以颗粒(即分散相)分散在基体(也就是连续相)中的形式建立,要考虑颗粒的形状和大小分布,以及它们占总体积的比例。

②状态与性质。各相的化学与物理状态和性质影响整体的结构和性能。例如,材料的刚度取决于各相的弹性模量,材料随时间发生的变形取决于各相的黏度。

③界面的影响。上述两方面得到的信息还不够充分,相与相之间存在界面,因此有可能会呈现出与组成相的特性差异显著的结果。例如强度,材料的破坏常取决于界面黏结力的强弱。

从材料结构尺度进行研究,对以上三方面要充分地了解,首先要对各个相进行实验,其次对界面进行实验,多相模型通常只用于加深了解,有时可经过简化用于实际,例如预测混凝土的弹性模量或纤维复合材料的强度等。

1.2.3 工程尺度(Engineering Scale)

工程尺度的研究对象是整个材料,所以前提是将材料看作均匀连续的,通过研究获得材料整体的平均特性。人们对各种土木工程材料的认识通常是基于工程尺度,本书讲述的内容也要归结到材料在工程尺寸上呈现的特性。

从工程尺度去分析材料,其最小尺寸要由能代表其特性,即结构无序性的最小单元决定。单元的尺度从金属的 10^{-3} mm 到混凝土的 100 mm,乃至砌体结构的 1 000 mm 不等。只要是体积大于单元体,所测得的数据对于该材料就认为可以普遍适用。

在实际应用中对有关材料性能的了解,通常来源于用其制备的试件放在工程结构同等环境条件下进行试验得到的结果,根据得到的一系列图表或经验公式来表征其特性值随关键参数(如钢材含碳量、混凝土含水量以及沥青温度)的变化而变化。在试验范围内的推测结果较为可靠,而利用外推法进行推测时可能会得出错误的结论。

1.3 材料的变异性

工程师要根据现行的标准选用材料,在比较各种材料的过程中,一个很重要的问题是材料本身的变异性。当然这取决于结构物所用材料的性质,而材料的均匀程度又取决于材料制造加工过程的工艺。钢材的生产已较完善,能较精确控制其过程,因此工程上所需的各种钢材可以迅速地、复演良好地再生产,其强度等性能的变异性很小。反之,未经加工的木材存在很多缺陷,例如节疤,其性能的波动就很大。

材料很多特性的变异符合材料强度的正态分布曲线,如果对大量相同的试件进行试验,例如强度,结果可以画成直方图,如图 1.1 所示。如果 x 轴为强度 $f_{cu,i}$,这样强度就可以用平均强度和标准差表示。

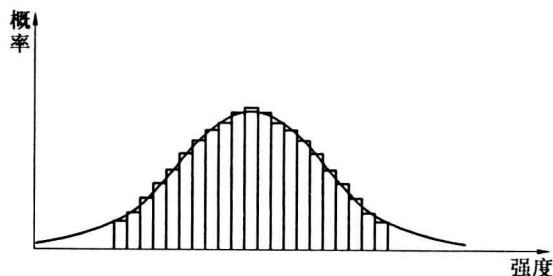


图 1.1 材料强度的正态分布曲线

(1) 平均强度 $\bar{f}$, 对 n 个试件

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i}$$

(2) 变化范围用标准差 σ 表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i} - \bar{f})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^2 - n\bar{f}^2}{n-1}}$$

标准差的单位和变量相同,表示变量的变异性,在比较不同的材料或者同种材料的不同品种时,常用无量纲的变异系数表示,即

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{f}}$$

对于可比性能,原木的变异必定要比钢材高得多,因此它的变异系数就大。通过对同批材料的大量样品进行试验,列出一些典型土木工程材料的平均强度和变异系数,见表 1.1。

表 1.1 一些典型土木工程材料的强度变异性

材料	平均强度/MPa	变异系数/%	备注
钢材	460	2	结构低碳钢
混凝土	40	15	普通混凝土
木材	30	35	针叶木原材
	120	18	无结疤、直纹针叶木
	11	10	结构用木屑板
纤维水泥复合材料	18	10	掺 6% (体积分数) 聚丙烯纤维
砖砌体	20	10	矮小砖墙

土木工程材料的生产与加工过程,自然是决定其各种性能的因素。其使用过程也是影响性能的重要因素。例如,搅拌好的混凝土运到现场,还只是一种中间产品,把其浇入模板里以后,要进行振捣,待混凝土开始硬化后要及时洒水或喷雾,需足够长时间养护,才能保证结构物具备设计要求的承载力和其他性能。再如钢筋,虽然在工厂里已加工成型,但在施工现场要进行焊接,焊点的质量对于其承载力非常关键。所以从某种意义上说,施工现场的工程师或整个施工队,不仅是土木工程材料的用户,也是最终产品的生产者,在相当大的程度上决定最终产品的质量。

1.4 材料存在的状态

物质的聚集状态分为气、液、固三态,其中气、液两态又称为流态。土木工程材料主要是固态物质,即使液态材料(如黏结剂、油漆、涂料等)也是在凝固以后才有实用价值,另一大类物质是由气、液、固三种状态中的两种构成的高分散体系,称为胶体物质。

1.4.1 固体物质(Solid Substance)

按粒子排列的特点,固体可分为无定形体和晶体两大类。无定形体又称为非晶体,实际上是一种过冷液体,例如玻璃和塑料等,组成其物质的粒子仅在局部有序排列,即短程

有序,没有固定熔点。大多数固体物质是晶体,组成晶体的粒子(离子、原子或分子)在三维空间作有规律的周期性排列,贯穿整个体积,形成空间格子构造,即长程有序。构成空间格子的粒子之间存在一定的结合力,以保证它们在晶体内固定在一定位置上有序排列,粒子或原子间通过化学结合力结合形成化学键,而分子间的结合一般形成分子间键或范德华键。

晶体中的原子能够规则排列,是原子间的相互作用平衡的结果。图 1.2 是物质内部质点相互作用的力、能量与质点间距的关系。当两个原子接近并产生相互作用,原子中的外层电子将重新排布,这种相互作用包括静电吸引与排斥作用。吸引力为异性电荷之间的库仑引力,是一种长程力,从比原子间距大得多的距离处即开始起作用,这种引力随原子间距的减小成指数关系增大(吸引力为负值),如图 1.2(a)中 f_a 曲线所示。排斥力产生于同性电荷之间的库仑斥力和原子之间相互接近电子云相互重叠所引起的斥力等,它们都是短程力,即只有原子之间的距离接近原子间距时才有显著作用,随着原子间距离进一步减小,斥力迅速增大(斥力为正值),增大速度大于引力增大速度,如图 1.2(a)中 f_r 曲线所示。原子间总的相互作用力随距离的变化,如图 1.2(a)中 f_t 曲线所示。

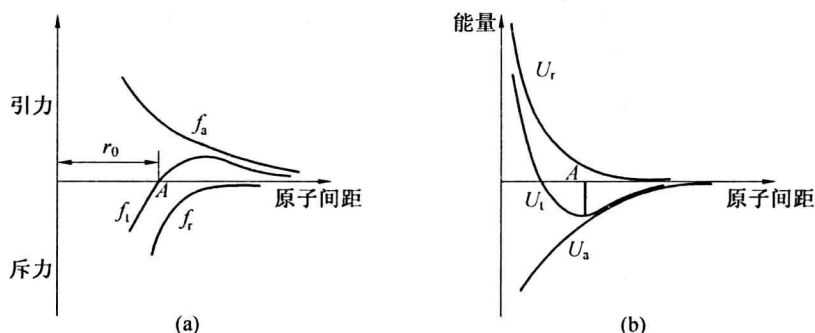


图 1.2 物质内部质点相互作用的力、能量与质点间距的关系

f_t 曲线交横轴于点 A,点 A 的合力为零,即原子间距 r 为 r_0 时吸引力与排斥力平衡,原子间相互作用的势能最低,如图 1.2(b)所示。原子间距 r 小于 r_0 时,斥力大于引力,总的作用力为斥力;原子间距 r 大于 r_0 时,引力大于斥力,总的作用力为引力。所以欲将相距为 r_0 的原子压近或者拉远,都要相应地对斥力或引力做功,导致体系能量升高。凝聚体只有当其原子间距为平衡距离,作规则排列、形成晶体,对应于最低能量分布时,才处于稳定状态。图 1.2(b)中平衡的位置 A 所对应的最低热能 U_0 为晶体原子的结合能,相当于把原子完全拆散所需要做的功, U_0 是影响物质状态决定晶体结构和性能的最本质因素。

从晶体结构中粒子结合能与间距,作用力与间距的关系,可以得到一些与实际应用有关的结论:

①当材料受拉伸或压缩时,力和材料长度变化成正比,这是著名的虎克定律。 $F-r$ 曲线在 $r=r_0$ 时的斜率就是弹性模量(或称刚度)。

②曲线在平衡位置两侧是对称的,所以材料的刚度在拉伸和压缩时应该是相同的,事实正是如此。

③原子间的引力存在最大值,因此拉伸强度有极限值。