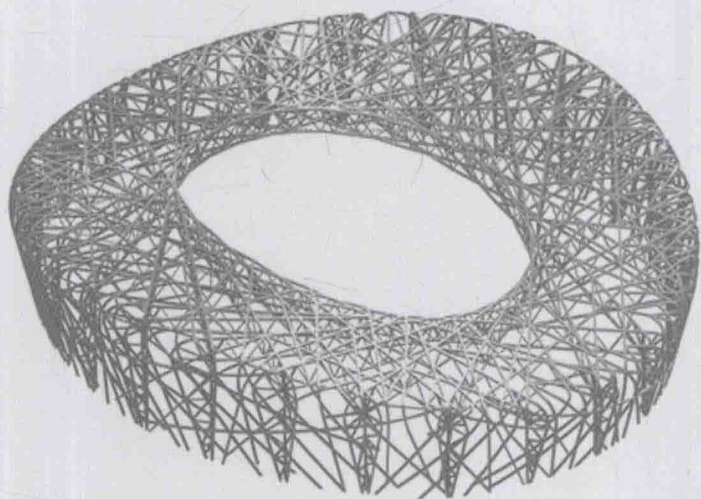


土木工程的灵魂——力学

张相庭 编著



土木工程的灵魂 ——力学

张相庭 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

这是一本介绍土木工程的灵魂——力学知识的科普读物。力学与土木工程的结合已有几百年的历史。土木工程涉及的范围极广,房屋建筑工程、桥梁建筑工程、地下建筑工程、道路交通工程、抗爆工程等,这些都属于土木工程的范畴。而土木工程的发展离不开力学。可以说力学是土木工程的“心脏”。本书从工程基本结构、结构承受的各种作用以及相关实例说明力学在工程中的具体应用,这是一本难得的、深入浅出讲解力学在土木工程中的核心作用的入门教科书。

本书可作为高中生、大学低年级学生以及高年级学生的参考用书,对力学相关领域的科研管理人员也有所帮助。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程的灵魂:力学 / 张相庭编著. — 上海: 同济大学出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-5608-7102-8

I. ①土… II. ①张… III. ①力学—应用—土木工程 IV. ①TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 142675 号

土木工程的灵魂——力学

张相庭 编著

责任编辑 马继兰 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
排 版 南京月叶图文制作有限公司
印 刷 上海同济印刷厂有限公司

开 本 787 mm×960 mm 1/16

印 张 11

字 数 220 000

版 次 2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-7102-8

定 价 48.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

序 言

《土木工程之魂——力学》终于出版了，这是张相庭教授撰写的最后一本著作，也是他所有著作中出版过程最为曲折的一本。

2007年，中国力学学会常务理事会在高等教育出版社的支持下，决定出版《大众力学丛书》，邀请一些力学工作者，撰写一批力学科普著作，为此组建了由武际可和戴世强两位力学界老前辈担任正副主任的编辑委员会，我有幸也被推荐为编辑委员会委员，并由我出面邀请张相庭先生撰写力学在土木工程中应用的科普著作。张先生一开始感到为难，因为他从来没有写过科普著作，怕写不好。但我知道他有深厚的力学功底，又在土木工程领域有极高的造诣，经常能把复杂的工程问题化为简单的力学模型来解决，并对结果做出合理的阐释。在我的坚持下，张先生终于同意写平生的第一本也是最后一本科普著作。

张先生经过一年多的考察整理时间，在收集了大量相关资料的基础上，于2009年5月写出了初稿。但是当张先生把稿子交到高等教育出版社时，初审认为学术性过强，不太合适作为大众科普读物，希望张先生做较大的修改。此后一两年，张先生改改停停，自己总是不满意，也一直没再把修改稿提交给高等教育出版社。再后来他身体越来越不好，这本书就耽搁了下来，直到他老人家不幸于2013年2月4日去世，也没有最终定稿。

而这也成了我的一件心事，希望能将张先生的这最后一本书付梓出版。于是我和我的同事、张先生以前的博士生王国砚教授商量，由他出面征得张先生夫人的同意，从张先生的旧电脑中找到这部书稿，经过王国砚教授费时费力的校对勘误和图表制作工作，并联系了同济大学出版社来出版这本书。

王国砚教授作为张先生的弟子,在本书的出版中做了大量的工作。

张先生开始构思动笔写这本书,迄今已有八年多的时间。虽然张先生没有亲眼看到这本书的出版,但这本书可以说凝聚了他最后几年的心血和努力。虽然对于社会大众,这也许不是一本合适的科普读物,但是对于工科大学生,这却是一本难得的、深入浅出讲解力学在土木工程中的核心作用的入门教科书。

在这本书出版之际,我很高兴代为作序,并借此表达对先生的深切怀念和崇高敬意。

仲 政

2017年3月12日

开启土木工程高大之门

——力学在土木工程中的核心作用

当你走进大城市抬头仰望时,你会看到那一座座拔地而起的几十层甚至上百层的高层建筑,高耸入云的广播电视塔;当你漫步在市郊或农村田野时,你会看到那些跨越大江南北几百米甚至几千米长的悬索大桥,上百米高的输电线塔。这些都是新时代科学技术发展的成果,是广大土木工程师和工程建设者们辛勤劳动的作品。实际上,生产的发展推动了科学技术的发展;反过来,科学技术的发展也促进了生产的发展。这些复杂的作品经过人们头脑的思维和开发,也是容易做到的。

力学与工程结合,已从牛顿力学发展到与各种工程相结合的工程力学;力学与土木工程结合已有几百年的历史。土木工程的范围极广,房屋建筑工程、桥梁建筑工程、地下建筑工程、道路交通工程、抗爆工程等都属于它的范畴。而土木工程的发展离不开力学,可以说,力学是各种工程的核心,特别是土木工程的“心脏”。

我长期从事“力学和力学在土木工程中应用”的研究。对于国内一些重大土木工程,有的是参加并负责其中一些工程项目的研究,有的则是参加工程项目的评审工作,深知力学和土木工程两者不可分割的关系。同时也感觉到,只要掌握它们的思维核心,初学者或者是尚未学到大学高深课程的高中高年级学生和大学低年级学生也会对它感兴趣;那些高大宏伟的高层建筑和高耸结构的设计和建造知识,只要努力学习,也是能够初步掌握的;可以意识到学习土木工程和力学知识的迫切性并建立起学习它们的信心,大大提高学习的积极性。

本书共分6章加以叙述。第1章是“土木工程、力学和基本结构”,介绍了我认为土木工程中最简单的10种基本结构(或构件)及其力学特征,包括梁、板梁(梁式板)、柱、墙、拱、索、桁架、框架、板和壳。它们的组合包括它们自己形式的

组合,是目前绝大部分土木工程结构的组成形式。因此,了解它们以及它们的力学特征,是进入土木工程和力学的必不可少的基础。第2章介绍了地震作用、风荷载以及结构振动理论和计算机程序等。在土木工程设计、计算和抗灾防灾规划中,地震作用、风荷载以及雪荷载、楼面荷载等都是应该考虑的主要干扰和作用。最有影响和最易引起工程结构失效甚至破坏的首推地震作用和风荷载。据德国慕尼黑保险公司对1961—1980年20年间发达国家损失1亿美元以上的自然灾害统计,地震造成的损失占总自然灾害损失的50.0%,风灾造成的损失占总自然灾害损失的40.5%。因而这两种灾害造成的损失已占总自然灾害损失的绝大部分。由于这两种灾害都是由结构振动引起的,而现代工程结构的复杂性导致分析计算离不开计算机,因而第2章先介绍这些内容。第3章是第1章和第2章知识的应用,全面介绍上海的东方明珠广播电视塔从方案选择到力学计算的全过程,由于我参与了该项目的研究,因而介绍起来比较贴切得体。我相信,读者阅读了本章和真实工程的分析计算全过程后,会加深对工程力学学习的兴趣,会产生学好土木工程和力学的迫切愿望。为了加深对各类土木工程问题分析的了解,第4章至第6章都选择了工程实例进行介绍。第4章选择了5个有代表性的工程加以介绍,它们包括:跨度达几百米的国家体育场(鸟巢)工程和上海体育场(上海八万人体育场)工程、高达632 m的上海中心大厦工程、高达492 m的上海环球金融中心工程、跨越几百米宽黄浦江的上海南浦大桥工程。第5章介绍了起重机的结构,对起重机的结构受力进行了分析,并且对起重机在工作状态和非工作状态下的受风力作用进行了计算。第6章介绍了我国南方某城市的抗灾防灾分析实例。可以预期,介绍它们会增加读者对土木工程和力学的学习兴趣和信心。

在编写本通俗读物时,我努力做到:用通俗的语言和工程灾害分析的实例说明一些力学的基本概念。比如,介绍在16世纪80年代,著名科学家伽利略在参加佛罗伦萨大教堂举行的庆祝典礼时,看到挂在圆屋顶下的一只吊灯在摇晃,起初它的晃动幅度很大,以后越来越小,从而引出振动力学中周期频率振型的概念;介绍位于美国西雅图的塔科马大桥于1940年被不大的风吹坏的实例,从而引出力学中的空气动力失稳的研究。本书有些资料来源于我国为数甚多的网

站,它们提供了很多新鲜的图片和资料。即使有些还是我亲身经历过的,但这些网站提供的资料也还是有很多参考价值的。本书努力做到:不单单是介绍在土木工程应用到的力学公式。虽然没有介绍在大学有关专业里才能学到的这些公式的推导过程,但是在了解这些公式背后基本概念的基础上,学会应用它们,并且了解了真实工程分析计算的全过程,才会能用这些公式进行初步真实工程的具体分析计算。本书努力使读者认识到,那些几百米高的高楼大厦、几百米跨度的大跨建筑和几百米甚至几千米长的大跨桥梁的设计建造,并不是可望而不可及的。只要了解工程结构的基本组成规律,掌握基本诀窍,努力学习,就可以达到目的。学习这些众多工程实例就能说明问题。

应该提及的是,戴世强教授、仲政教授是写通俗读物的倡导者,是高深学术要深入浅出的倡议者,在他们的热情建议和支持下,写出了这本读物。如果本书可用作高中高年级学生、大学低年级学生以及大学高年级学生的参考用书,对此需要的科研管理人员有所帮助,等等,应该首先归功于这两位教授。

由于土木工程和力学的研究正处在不断发展和革新之中,会不断出现新鲜课题和特殊问题,引起国内外学者的密切关注和研究,这些新的研究成果也势必会在近期引入到工程之中。我热忱希望读者在使用过程中,不吝提出宝贵意见和建议,以期对本书的提高有所帮助。

张相庭

2009年5月17日

目 录

序言	仲 政
开启土木工程高大之门——力学在土木工程中的核心作用	张相庭
第 1 章 土木工程、力学和基本结构	1
1.1 梁和板梁(梁式板)	6
1.1.1 计算简图	7
1.1.2 平衡方程式	9
1.1.3 脱离体	9
1.1.4 反力和内力(弯矩、剪力、轴力)	10
1.1.5 应力——弯曲应力(正应力)、剪应力	10
1.1.6 强度和刚度	13
1.1.7 静定和超静定	14
1.1.8 梁结构的力学评估	15
1.2 墙和柱——顶阻承力	16
1.2.1 轴力和轴心正压力	17
1.2.2 柱和压杆的稳定	18
1.3 拱和索	19
1.3.1 合理拱轴	23
1.3.2 索的找形	26
1.4 桁架和框架	26
1.4.1 二力杆	30
1.4.2 内力计算	30
1.4.3 次应力	32
1.4.4 各种形式桁架受力比较	32
1.5 板和壳	33
1.5.1 板壳的力学特性	35

1.5.2 板壳受力分析要点	36
第2章 作用或荷载的力学概念和计算问题	38
2.1 结构振动力学基础	39
2.1.1 自由度	40
2.1.2 周期	41
2.1.3 频率	42
2.1.4 振型	43
2.1.5 阻尼力, 阻尼比	43
2.1.6 响应, 共振响应	44
2.2 计算机和实验	45
2.2.1 计算机和结构分析程序	46
2.2.2 实验和实地记录	49
2.3 地震作用和反应谱	51
2.3.1 烈度和反应谱	59
2.3.2 特征周期 T_g (s)	60
2.3.3 抗震力学计算	61
2.4 风荷载和刚性模型风洞试验	64
2.4.1 风压和刚性模型风洞试验	73
2.4.2 结构顺风向的风效应	78
2.4.3 结构横风向效应及共振效应	83
2.4.4 结构空气动力失稳	88
第3章 重大工程示例分析——上海东方明珠广播电视塔	91
3.1 结构方案——混凝土塔的突破	93
3.2 东方明珠塔结构的动力特性	97
3.2.1 固有频率或固有周期, 振型	97
3.2.2 阻尼比	101
3.3 风和地震作用的分析比较	102
3.4 顺风向风荷载和结构响应计算分析	103
3.5 横风向涡流脱落共振和空气动力失稳计算分析	106
3.6 广州新电视塔简介	107

第4章 工程实例介绍	110
4.1 北京国家体育场——“鸟巢”工程	110
4.2 上海体育场和弹性模型风洞试验	116
4.2.1 结构力学分析	118
4.2.2 弹性模型设计、制作和风洞试验	120
4.3 上海中心	128
4.4 上海环球金融中心和振动控制	132
4.4.1 工程概况	132
4.4.2 上海环球金融中心的振动控制	135
4.5 上海南浦大桥和杨浦大桥	138
4.5.1 工程概况	138
4.5.2 杨浦大桥抗风设计	141
第5章 起重机结构分析	143
5.1 起重机结构受力分析	143
5.2 工作状态下起重机的风力计算	144
5.2.1 有效迎风面积	145
5.2.2 基本风压和风压高度变化系数	146
5.2.3 风荷载体型系数 μ_s	147
5.2.4 风振系数(荷载) β	149
5.3 非工作状态下起重机的风力计算	149
第6章 城市抗风防灾分析	150
6.1 概述	150
6.2 工程结构灾害力学	153
6.2.1 弹性极限风压 w_{0e}	153
6.2.2 结构极限风压 w_{0p}	154
6.3 结构经济损失模式	156
6.4 城市抗风防灾实例	158
参考文献	160
后记	161

第 1 章

土木工程、力学和基本结构

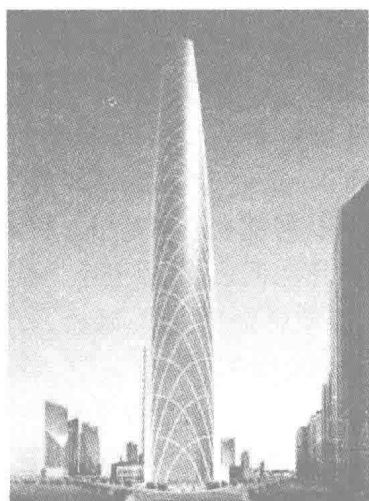
从单层平房到一百多层的高层建筑,从几米到几百米跨度的屋盖,从几米到几百米、几千米跨度的桥梁,从几米高的立柱到几百米高的电视塔,以及从几百米到几千米深、十多米高的隧道,很宽很长的道路,等等,它们都属于土木工程的范畴。在国外,土木工程的英语名称是 civil engineering,直译应为“民用的市政工程”。在中国古代,宫殿、庙宇等建筑的材料基本上都是用木材,而它们都深入土中而建立,因而土木是古建筑中最常用的词汇,沿用至今。虽然建筑材料已发生天翻地覆的变化,木材在现代工程中已很少应用,连砖、石也用得少了,而代之以钢、钢筋混凝土、薄膜等材料,但仍沿用“土木”二字,这类工程仍称为土木工程。这些高层建筑、屋盖等工程中除需承受自身重量外,还必须承受外界的各种作用,如人、车等重物,风、地震、温度变化等。结构物自身重量和外界作用都可以以力的形式表现出来,这就是外力作用。在外力作用下,工程结构和构件都将产生内力和应力。如果建筑材料(如钢、钢筋混凝土等)的抗力不能达到或超过由外力作用所产生的内力和应力,工程结构就会发生损坏甚至破坏。所以可以说,力学是土木工程的核心,起着“心脏”的作用。土木工程涉及数学、力学、材料等多门学科,但力学,或称工程力学,是土木工程中最重要的部分。

随着生产的发展和科学技术的进步,土木工程在很多方面表现出蓬勃发展的势头。

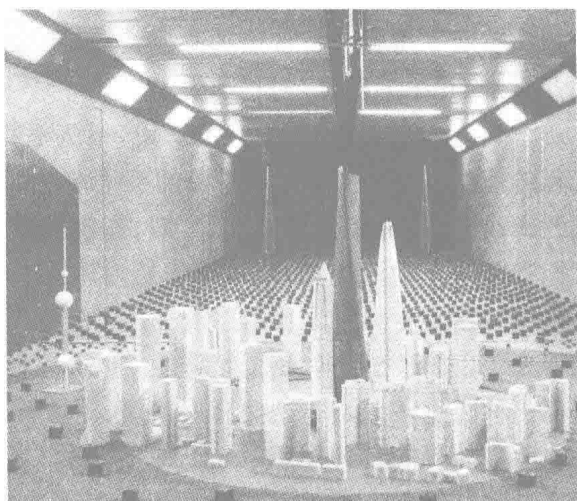
1. 房屋建筑工程

在房屋建筑工程中,由过去的低矮粗短建筑发展到今天的高大细长建筑,图 1-1 就是 132 层的超高层建筑——上海中心大厦。这一系列的变化使建筑结构的受力情况发生了很大变化。在单层或多层建筑中,结构振动很小,以至影响因素可以忽略,随着建筑高度的不断增大,逐步变成具有很大的影响,甚至成为影

响结构安全的主要因素。原来风不是主要的因素,在高层建筑中,却变得对结构安全设计有举足轻重的作用,等等。生产的发展也推动了力学的发展,新的理论产生了,新的试验出来了,新的计算方法出现了,力学早已由原来的基本的牛顿力学发展到结合各类工程的工程力学,而伴随它的计算机技术也迅速发展起来。对于柔性结构,如索结构和索膜结构,还存在结构的形状依赖于力的性质和大小的问题,所以,找形问题就突现出来了,几何非线性问题也出来了。这样,新的力学问题,对计算机结构分析程序也提出了新的要求。由此推动了力学科学的发展。



(a) 上海中心大厦



(b) 上海中心大厦模型风洞试验

图 1-1 上海中心大厦示意图

2. 桥梁建筑工程

在桥梁建筑工程中,由过去的跨度小的木桥、石板桥、拱桥发展成今天的几百米到几千米长的拉索桥。图 1-2 是杭州湾跨海大桥的鸟瞰图,该桥南起宁波慈溪,北至嘉兴海盐,全长 36 km。杭州湾跨海大桥曾经是世界最长的跨海大桥,比连接巴林与沙特的法赫德国王大桥还长 11 km,当时成为继美国的庞恰特雷恩湖桥后世界第二长的桥梁,也是世界上建造难度最大的跨海大桥之一。它是世界建桥史上的一项创举和奇迹,同时它也给力学的发展带来了新的促进。1940 年,美国塔科马海峡大桥被不大的风吹倒事件,也成为力学研究的新领域,成为力学研究新的推动力和起点。



图 1-2 杭州湾跨海大桥

3. 地下建筑工程

地下建筑工程早在古代建造地下陵墓时就已开始了。随着科学技术的发展,人们也开始大力发展地下空间,地下工程项目越来越多,如地铁地下车站、隧道、巷道,等等。图 1-3 是使孙中山先生的理想成为现实的武汉长江过江隧道。



图 1-3 武汉长江过江隧道

地下工程结构四周由岩土包围,因而围岩产生的压力成为地下工程结构独

特的荷载。在开挖基坑时,为防止边坡失稳滑坡,常采用挡土墙一类的挡土支护结构。因而,挡土墙结构力学成为地下建筑工程中的重要内容。

4. 道路交通工程

在道路和交通工程中,路面是支承在弹性地基上的,这在公路、机场跑道上最为多见,见图 1-4。事实上,铁轨,就连房屋基础,也是建在弹性地基上的,因而物体在弹性地基上的受力分析是道路交通工程中一项重要内容。实际上,在其他工程中也会碰到这类弹性地基上梁板等结构的受力分析问题。人们还发现,在道路上行驶的车辆类似于水等流体在管道中的流动,从而对交通规划和管理引入了流体力学的模拟理论,形成了道路交通工程中的流体力学模拟理论。

除此以外,道路交通工程中的过街天桥等也是需要设计的。虽然与桥梁相比,它只有行人而无车辆行驶等动态问题,但考虑到意外事故,如撞击等对交通的影响等,仍是需要重视的问题之一。



图 1-4 上海浦东机场跑道

5. 抗爆工程

爆炸会产生强大的冲击波。常规武器、汽车炸弹等爆炸产生的冲击波能摧毁桥梁和房屋,在 20 世纪国际上存在核威慑的情况下,有关抗核爆引起冲击波的抗爆防护工程研究被大大加强。抗核爆的迫切需求,在力学方面提出了大量的课题要求。为了保证工程安全,特别是指挥所、关键部门等的安全,而又不

于大量加大结构尺寸,科研人员开展了理论和模拟试验研究,使得结构在极强大的冲击波作用下,虽有破坏但不至倒塌,室内人员和设备仍能工作。在模拟核爆冲击试验时,首先需要寻求一种非核爆的高压能源。科研人员首先想到的是高压放电,但经过数值计算,做一次实验所需的高压能源,就要消耗掉一个中等城市一天的用电量,所以这种方法非常不实用。国外大型激波管一般都采用锥形炸药作为高压能源,但这种方法成本昂贵,且国外对我国实行技术封锁。科研人员先后用三年时间对我国一百多种火药逐个进行不同口径的密闭爆炸试验,最后筛选出三种火药作为抗爆激波管的高压能源,创造了小装填密度火药为抗爆激波管驱动能源的先例。在理论研究上,结合试验的成果,开展了结构材料超过弹性极限的结构弹塑性力学研究,进而过渡到结构刚塑性力学的研究。这些研究的对象包括土木工程中的所有主要受力结构,也包括作为围护构件等的次要构件,如门窗等,避免任何有害成分进入室内。

国内生产的抗爆门实例如图 1-5 所示。该重型复合装甲抗爆门适用于可能发生爆炸的场合中需要重点保护的要害部门的通道管制,可以与 300~500 mm 厚度的钢筋混凝土墙体配合。该门具备以下 4 种功能:①抵御冲击波破坏;②抵御爆炸破片侵切;③隔绝高温气流和燃烧;④阻止有害气体进入。

该门扇设计为中间带加强筋的箱形结构,其受力情况好,刚性大。抗冲击波形式为能量吸收缓冲与刚性抵挡相结合型。门扇结构自外向内共有 9 层组成,分别为:①外饰不锈钢板;②第一耐热缓冲层;③第一合金钢板装甲层;④第一低碳钢质溃缩层;⑤第二合金钢板装甲层;⑥第二低碳钢质溃缩层;⑦第三合金钢板装甲层;⑧第二隔热缓冲层;⑨内饰不锈钢板。该门扇每平方米质量超过 380 kg(不含门框质量),门扇厚度约 203 mm。该门的门框采用槽钢和钢板拼焊而成,为双层结构,总厚度约为 406 mm。正常使用时,门扇通过两组大型铰链联结到门框的外框上。当意外情况发生时,门的受力则由内外门框之间的钢板平面台阶承受。门扇与门框之间有



图 1-5 国内生产的抗爆门

耐热密封胶条。

前文介绍了土木工程中最有影响的 5 种工程类型。这些工程的结构类型实际上都是由一些基本结构(简单的如梁板等也可称为构件)组成的。这里提出 10 种基本结构,它们是:梁、梁式板、柱、墙、拱、索、桁架、框架、板、壳。实际上还有一些基本结构或构件,如薄膜、管道等。薄膜若覆盖在屋顶主结构上,则由于其刚度小,一般不作为主结构而作为围护结构来处理;作为独立的膜结构主体,目前还用得不多,故暂未列入。管道结构在工程上也可简化为多跨梁结构来处理,故也暂未列入。由各类基本结构可以组成各种各样的复杂土木工程结构,包括前文提到的 5 类工程类型,比如高层建筑、大型屋盖、大跨度桥、电视塔、隧道等。可以说,基本结构的各种组合,造出了千姿百态的各种土木工程结构,而基本结构的力学特征分析则是各种土木工程结构力学分析的基础。

1.1 梁和板梁(梁式板)

在长期生产实践中,两人用扁担抬重物从一处搬到另处是至今仍常见的生产活动(图 1-6),扁担是梁的一种最原始的形式。

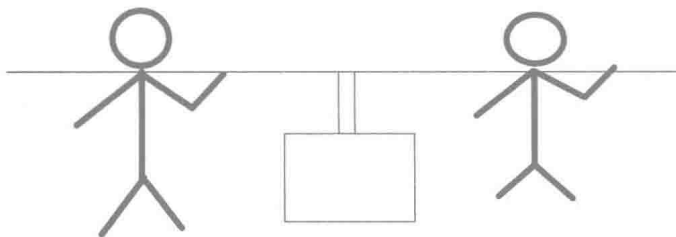


图 1-6 两人用扁担抬重物

在两支点间(比如墙间)架设木梁等任何材料做成的梁(图 1-7),可用来搁置重物;还可在木梁间再铺一大批板梁(窄板)用于搁置重物;也有将用木梁等任何材料做成的梁插入单墙内(图 1-8)来搁置重物,这些在日常生活中都是常见的。在两支点间用来搁置重物的木梁或任何材料做成的梁称为简支梁;两端搁在木梁或任何材料做成的梁上的窄板称为简支板;插入单墙内的木梁或任何材料做成的梁称为悬臂梁。