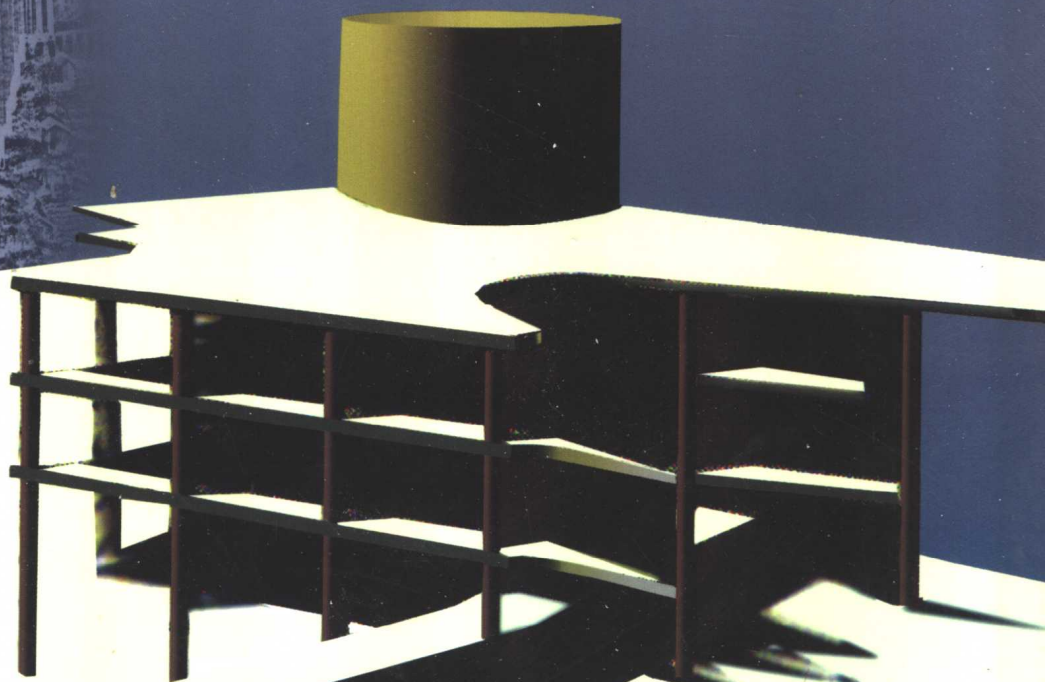


GUANGYI JIEGOU LIXUE JIQI GONGCHENG YINGYONG

广义结构力学 及其工程应用

陈 燊 编著



中国铁道出版社

广义结构力学及其 工程应用

陈 燊 编著



中 国 铁 道 出 版 社

2 0 0 3 年 · 北 京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书分为四篇,共 20 章。力学基础篇包括结构力学史、经典结构力学、有限元、样条有限元条、随机有限元、位移方程、影响线及影响面、结构稳定与振动、结构控制和结构非线性等内容;实用结构篇阐述新型和常用工程结构;工程应用篇涉及结构设计与施工;专题研究篇深入探讨两个结构动力学问题,若干资料和成果尚属首次发表。

本书可供有关专业教师、研究生、高年级本科生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

广义结构力学及其工程应用/陈燊编著. —北京:中国铁道出版社, 2003.8
ISBN 7-113-05412-9

I. 广… II. 陈… III. ①结构力学-基础理论 ②桥涵工程-结构力学
IV. ①0342②U441

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 060634 号

书 名: 广义结构力学及其工程应用

作 者: 陈 燊

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

策划编辑: 李丽娟

责任编辑: 李丽娟

封面设计: 马 利

印 刷: 北京市兴顺印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.75 字数: 415 千

版 本: 2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1~3 000 册

书 号: ISBN 7-113-05412-9/O · 123

定 价: 30.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话:(010)51873135 发行部电话:(010)63545969

前 言

现代广义结构力学的形成和发展已大大超出经典杆系结构力学的研究范畴。20世纪末结构力学已进入有史以来发展最快的时期,其应用范围之广、应用水平之高已达到前所未有的程度。近年来,以新技术、新材料为主要特征的大跨度薄壳结构、折板结构、悬索结构、张力结构、悬挂结构纷纷问世,网架结构、复合材料结构、充气结构等层出不穷,大批超高层结构相继建成,大型水利工程和地下工程结构等复杂结构计算和非线性分析硕果累累。经典结构力学充满着生机和活力,正向着现代的广义结构力学方向迅速发展。

此外,广义结构力学的研究层次已从被动分析发展到主动优化设计,从而进入结构状态控制,即进行结构特征识别、设计方案优化、施工和使用中工作状态与结构参数的调整控制。近年来,还发展了考虑荷载和结构本身所具有的各种不确定因素(如随机性、模糊性和未确定性)的分析,出现了不确定有限元分析、不确定性振动理论和广义可靠度理论。总之,结构力学从狭义到广义,从被动到主动,从确定到不确定,并与结构工程渗透融合为软科学的发展趋势已不容忽视。广义结构力学包括的范围很广,其发展的重点之一是工程各个阶段的规划、决策和设计,并与工程理论相结合成工程科学的核心。目前,这方面的适用教材相对滞后。作者在教研与教改的基础上结合长期的教学经验、工程实践和科研成果作一次难免挂一漏万的尝试,旨在增加本科生和研究生对结构工程及其研究方法的认识和理解。

本书的出版得到了力学界和工程界前辈的热切关怀和帮助,承蒙陈森教授和黄文机教授级高工仔细审阅书稿,并提出许多建设性的意见,使作者受益匪浅。陈培健高工和郑琼水高工协助并校阅部分书稿。研究生刘织、唐意、郭建斌为书稿的写作编排、图文处理做了大量工作。

本书的出版得到福州大学教材出版基金资助,作者谨此致谢。

衷心欢迎读者对本书提出宝贵意见。

陈 荣

2003年4月于福州

目 录

第一篇 力学基础

第 1 章 结构力学发展简史	1
§ 1.1 溯源古代工程实践	1
§ 1.2 从“萌芽”到“独立”	2
§ 1.3 近代的发展与飞跃	3
§ 1.4 现代的广义结构力学	4
§ 1.5 结构力学与结构工程	4
第 2 章 结构简化与机动分析	6
§ 2.1 绪 论	6
§ 2.2 实际结构体系的简化	7
§ 2.3 机动分析及计算机方法	10
第 3 章 静定结构	17
§ 3.1 静定结构特性	17
§ 3.2 静定结构内力解法	18
§ 3.3 结构位移及图乘贴补法	19
第 4 章 超静定结构	25
§ 4.1 超静定结构特性	25
§ 4.2 力法原理	25
§ 4.3 位移法与渐近法	29
§ 4.4 矩阵位移法及程序功能扩展	32
第 5 章 有限元法概要	44
§ 5.1 绪 论	44
§ 5.2 基本原理和数理概念	45
§ 5.3 位移模式及形函数	46
§ 5.4 数值方法的收敛性	50
§ 5.5 有限元法实施及 ANSYS 算例	51
第 6 章 样条有限元条法	65
§ 6.1 绪 论	65
§ 6.2 B 样条与样条函数	65
§ 6.3 样条有限元条的位移模式	69
§ 6.4 动力特性矩阵	71
§ 6.5 算 例	75

第 7 章 随机有限元法	77
§ 7.1 绪 论.....	77
§ 7.2 随机有限元的控制方程.....	78
§ 7.3 随机场的离散模型.....	80
§ 7.4 随机有限元与结构可靠度.....	84
§ 7.5 随机有限元动力分析方法.....	88
第 8 章 非均匀结构位移方程	91
§ 8.1 绪 论.....	91
§ 8.2 两类间断函数的定义及性质.....	93
§ 8.3 阶梯形变刚度结构位移方程.....	94
§ 8.4 位移方程的应用.....	97
§ 8.5 算 例.....	99
第 9 章 影响线及影响面	102
§ 9.1 绪 论	102
§ 9.2 静力法与机动法	102
§ 9.3 渐近法作超静定结构影响线	107
§ 9.4 加劲吊桥影响线	108
§ 9.5 考虑 II 阶效应时的刚架拱影响线	112
§ 9.6 内力影响面及其应用	114
第 10 章 结构的稳定与振动	118
§ 10.1 结构屈曲问题概述.....	118
§ 10.2 杆件结构的稳定计算.....	120
§ 10.3 薄板的弹性屈曲.....	125
§ 10.4 结构振动微分方程.....	129
§ 10.5 结构的动力特性.....	133
§ 10.6 振型叠加法和直接积分法.....	134
第 11 章 结构振动控制	139
§ 11.1 结构控制的概念与分类.....	139
§ 11.2 结构被动控制.....	140
§ 11.3 结构主动控制.....	142
§ 11.4 结构振动控制中的几个问题.....	145
第 12 章 结构非线性问题	148
§ 12.1 材料非线性与极限荷载.....	148
§ 12.2 几何非线性及数值方法.....	151
§ 12.3 非线性振动简介.....	153
参考文献.....	154

第二篇 实用结构

第 13 章 桁架与拱结构	156
§ 13.1 桁架的历史演变	156
§ 13.2 桁架种类及其内力特征	156
§ 13.3 桁架的工程应用	160
§ 13.4 常见拱结构	161
§ 13.5 合理拱轴线的利用	165
第 14 章 梁与刚架结构	167
§ 14.1 梁的家族	167
§ 14.2 叠合梁、结合梁与混合梁	169
§ 14.3 框架结构、框剪结构、框筒结构	170
§ 14.4 桥梁工程常用刚构	172
第 15 章 组合结构与索结构	175
§ 15.1 梁桁组合结构	175
§ 15.2 梁拱组合结构	176
§ 15.3 梁索组合结构	177
§ 15.4 组合网架	181
§ 15.5 杆板壳结构	182
§ 15.6 悬挂结构	184
参考文献	186

第三篇 工程应用

第 16 章 结构创新设计	187
§ 16.1 轻型桩框式桥台	187
§ 16.2 混凝土悬索桥	189
§ 16.3 闭合环板结构与环形立交	194
§ 16.4 可拆装翼板式托架	196
第 17 章 结构内力调整与优化	198
§ 17.1 薄圈石拱桥的承载力	198
§ 17.2 预应力组合桁式膺架	200
§ 17.3 刚架拱振动与加固	202
§ 17.4 双支座薄壁墩连续梁桥	204
第 18 章 结构施工与力学	206
§ 18.1 缆索吊装的最佳吊点	206
§ 18.2 双人字扒杆吊装与膺架横移	208
§ 18.3 利用废桥现浇箱形拱	209
§ 18.4 悬臂施工及其控制	210

参考文献·····	214
-----------	-----

第四篇 专题研究

第 19 章 刚架拱桥车激振动问题 ·····	216
§ 19.1 桥梁车激振动问题研究综述·····	216
§ 19.2 刚架拱桥的动力特性·····	218
§ 19.3 桥梁车振问题的力学与数学模型·····	224
§ 19.4 单车荷载下刚架拱桥动力响应·····	232
§ 19.5 多车荷载下刚架拱桥车激振动·····	238
§ 19.6 桥梁车振可视化仿真研究·····	242
第 20 章 大跨度悬索桥风振问题 ·····	247
§ 20.1 震惊世界的悬索桥风毁事故·····	247
§ 20.2 大跨度桥梁风振理论研究进展·····	248
§ 20.3 风洞实验与现场实测技术·····	249
§ 20.4 多台风区吊桥设计风速估算·····	250
§ 20.5 吊桥颤振分析的样条模型·····	251
§ 20.6 单塔吊桥动力特性及抗风稳定性·····	254
参考文献·····	258

第一篇

力学基础

第 1 章 结构力学发展简史

§ 1.1 溯源古代工程实践

结构力学是随着人类文明和生产的发展,在工程实践的基础上逐步形成,并不断开拓进展的一门力学分支。结构力学诞生至今已 100 多年,但人们的工程实践却经历了几千年^[1]。

在建筑结构方面,根据浙江余姚河姆渡新石器时代遗址考古发现,早在六千年前,我们的祖先就已经建造了木框架结构房屋(木构件分为桩、柱、梁、板,采用榫卯连接),逐渐告别利用天然结构巢居和穴居的原始状态。三千年前《周礼》中的《考工记》就已经记载了各种建筑的形式和制式。在汉代王延寿的《鲁灵光殿赋》中曾出现“结构”这一专有名词^[2]。

在水工结构方面,公元前 256~251 年秦朝修建的岷江水利枢纽工程——都江堰创造了用竹笼装卵石堆砌的堤坝结构,使用至今。其结构之简单,规模之宏伟,堪称世界之最。

在桥梁结构方面,我国有三大名桥、三大发明:公元 605~617 年隋朝修建的河北赵县安济桥(也称赵州桥)为敞肩石拱桥,造型优美、结构合理;宋代的广东潮州广济桥(开关活动式)和福建泉州万安桥(即洛阳桥,筏形基础,砺房胶固),其独特结构形式在世界上都绝无仅有。

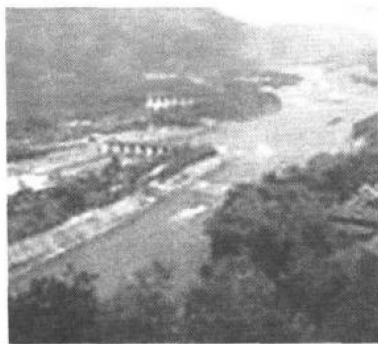


图 1.1.1 都江堰水利枢纽工程

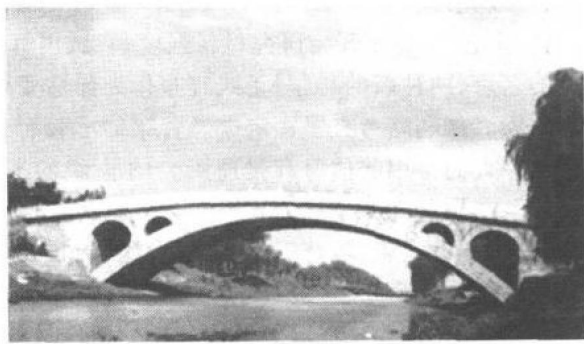


图 1.1.2 隋朝河北赵州桥

当然,古代工程结构是根据经验和粗略计算建造的,历尽失败,留存至今的只是少数的成功典范。我国虽然也留下许多宝贵文献,如东周时的《考工记》、北宋时的《营造法式》、明代的《鲁班经》,但当时还没有系统的结构分析理论。古埃及人的金字塔和古希腊人的女神庙著称于世,他们在将建筑技术向前推进时发展了静力学法则。有伟大建筑师美誉的古罗马人在建筑物中广泛采用半圆拱形,可惜希腊人和罗马人在建筑工程中所积累的许多知识大部分在中古时代失传。



图 1.1.3 雅典神庙

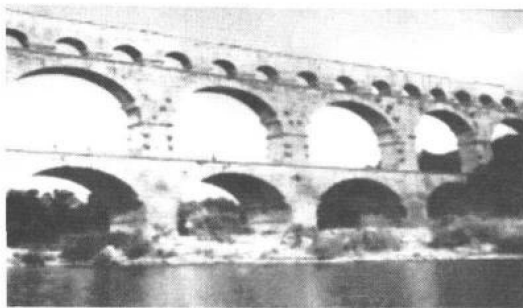


图 1.1.4 古罗马半圆拱建筑

随着人类文明的发展,结构种类趋于多样化和复杂化,结构的概念也在扩展,不仅把人造的能够承受荷载的固体构件及其体系称之为结构,而且广义地把能够承载的自然物,如动植物骨骼、血管、根茎叶,地球的地壳、岩体都视为结构。但结构的发展却离不开组成结构的材料和结构力学原理。

§ 1.2 从“萌芽”到“独立”

15 至 16 世纪,欧洲文艺复兴时期,科学事业有了转机,力学在欧洲萌芽^[3]。

文艺复兴时代的杰出代表画家里奥纳多·达·芬奇对力学的贡献鲜为人知。他应用虚位移原理的概念分析各种用在起重机具上的滑轮和杠杆系统,而且已经有了拱产生横向推力的正确概念。他在笔记中画出了结构材料强度实验草图。他研究梁的强度时提出一个“距支点最远处,弯曲最大”的普遍原理。他在手稿中研究讨论了柱所能承受的载荷。达·芬奇的成就表明他是最先用实验来决定结构材料强度的人,或许还是最先试图用静力学来求作用于构件上的力的人。在他诞辰 550 周年时,中国隆重纪念这位伟人,当然还因他在其他领域的许多成就。可惜他的成就和倡导一直被埋在它的笔记手稿里,这时期的工程师们仍和古罗马时代一样,继续凭经验来决定构件的尺寸。

17 世纪,人们才开始研究材料强度,尝试用解析法来求构件的安全尺寸。伽利略 1638 年出版的名著《两种新的科学》正式宣布作为弹性变形体力学的材料力学诞生。最早研究的结构元件是梁。伽利略考查了固定端悬臂梁的承载能力的问题,雅可比·伯努利关于梁的研究结果就是现今人们常用的伯努利梁理论。18 世纪的工业革命更促进了单根构件强度和稳定性研究。

进入 19 世纪后,随着资本主义经济发展和大型厂房、船舶、堤坝、铁路桥梁的兴建,提出更为复杂的结构计算问题,促进了板壳理论形成,以及桁架、连续梁、拱、吊桥、弹性地基梁、挡土墙等计算理论的诞生,奠定了结构分析的理论基础。

1850 年克希霍夫(G.R.Kirchhoff)采用虚位移原理推导板的边界条件,纠正了以往的错误,并正确求解了圆板的振动问题,他提出的“直法线假设”一直沿用至今。1888 年拉甫(A.E.H.Love)利用克希霍夫对平板问题的假设导出了弹性薄壳的平衡方程。

随着近代工业的发展,人们已不满足于单个构件的精确计算,而转向研究复杂结构系统内力与变形的分析问题。纳维叶(Navier)在 1825 年就给出连续梁三弯矩方程的雏形,但现用的三弯矩方程却是克拉贝隆(B.P.E.Clapeyron)1949 年在巴黎附近建桥时发展的,8 年后才以论文形式发表。1864 年麦克斯韦(J.C.Maxwell)总结了对桁架的研究,他用简化的图解法求静

定桁架的内力;对于超静定桁架,他则从能量法导出解超静定结构的一般方法。十年之后,这个方法被后来者莫尔(O. Mohr)整理成目前通用的“力法”。1868年文克尔(E. Winkler)将影响线概念应用在拱里,并利用最小功原理研究了拱内压力线。莫尔对拱的理论的贡献是他在1870年的论文中提供了一个分析拱的图解法。意大利人卡斯提安诺(A. Castigliano, 1847~1884)1873年在他的工程师学位论文中提出了不朽的卡氏定理和单位荷载法等理论成果,提出广义力和广义位移的新概念,构成了经典结构力学的重要内容。他虽然英年早逝,但对于应变能方面的透彻研究,令人赞叹。

19世纪中叶,结构力学(也称结构理论)实际上已从力学中独立出来成为一门学科。

§ 1.3 近代的发展与飞跃

19世纪末,随着钢结构广泛应用,进一步推动结构分析理论的发展,建立了利用能量原理计算结构位移和应用力法计算超静定结构的一般理论,但主要的发展是桁架分析。假定各结点均为理想铰结,从而使所有构件只承受轴力,得出满意的解析式。

20世纪初,随钢筋混凝土框架结构形式的出现,又诞生了与高次超静定结构相适应的新的计算理论和方法,如位移法和力矩分配法。系统地使用刚性结点转角作为未知量来分析框(刚)架结构应归功于本笛克森(A. Bendixen)1914年给出的角变位法。在刚架结构的结点线位移可以忽略时,利用端部力矩方程式求得系统所有各杆的杆端弯矩。20世纪30年代初,由克劳斯(H. Cross)提出的逐次渐近法(即力矩分配法),首先在美国得到广泛应用。预应力大师、美籍华人林同炎教授对该法的改进也功不可没。

由于建筑工程使用钢筋混凝土,拱的结构形式又被广泛采用,特别是在桥梁工程上采用无铰拱。对于三次超静定体系,库尔曼(K. Culmann)发展了弹性中心法,使力法方程解耦。在具有连结梁的拱中,笛兴格尔(F. Dischinger)建议使用钢缆将它们拉紧,大大减低了由恒载和混凝土收缩所产生的弯矩,这就是目前已在结构物中普遍采用的预应力法。

拱坝的大量使用使工程师们遇到了求解变厚度壳的极复杂的应力分析问题。美国1929年提出一种称为“拱贯梁”的近似法,用一个水平拱系和一个竖立悬臂梁系叠加起来代替拱坝,用试算法分配荷载,使各点挠度的径向分量在拱上和悬臂梁上数值相等,便得到近似解。该法如同弹性力学中楔形体的李维解答用于重力坝,都曾在历史上起过重要作用,但步入计算机时代后,已被有限元法所取代。

20世纪中期还发展了考虑塑性的结构计算理论、结构稳定计算和结构动力学计算理论。

吊桥理论的发展使美国出现了跨千米的巨大吊桥,其中“重力刚度”的发现是一大进步。动荷载下铁路钢轨应力分析的弹性基础梁方法,船舰加劲板的压屈以及船舰在波浪中振动的理论研究都是结构力学进入20世纪以来的标志性发展。

1945年电子计算机的问世和广泛应用使结构分析如虎添翼,计算能力跃上一个新的台阶,出现了以计算机为工具的结构矩阵分析法(即杆件系统的有限单元法)。为适应计算机的特点也发展了新的计算方法,形成力学、数学、工程学、计算机科学的交叉学科计算结构力学。借助计算机还发现了奇怪吸引子与混沌现象。

在适应计算机求解力学等问题方面,最成功的莫过于有限元方法的产生与发展。尽管有限元法的思想可以追溯得更早,甚至与我国东汉刘徽的割圆术相提并论,但不争的事实是,20世纪50年代中期世界各国都有一批学者在思考用电子计算机求解结构力学与连续介质力学

问题,除了明确由克劳夫(R.W.Clough)1960年命名外,很难说有限元法是哪一个人的发明。1963年威尔逊(E.L.Wilson)完成了世界上第一个解决平面弹性力学问题的通用程序。之后,结构分析的有限元软件迅速发展,新单元和新求解方法的不断出现,以及网格自动剖分等前后处理的研究,大大加强了有限元法的解题能力,使有限(单)元法逐渐趋于成熟。

§ 1.4 现代的广义结构力学

目前结构力学已进入有史以来发展最快的时期,其应用范围之广、应用水平之高已达到前所未有的程度。近年来,结构日趋复杂化,以新技术、新材料为主要特征的大跨度的薄壳结构、折板结构、悬索结构、张力结构、悬挂结构纷纷问世,网架结构、复合材料结构、充气结构层出不穷,大批超高层结构相继建成,大型水利工程和地下工程结构等复杂结构计算和 nonlinear 分析硕果累累。近年来,一种能在电信号刺激下迅速作出应变反应的智能材料出现,并开始用于结构,而对于智能结构的研究正方兴未艾。总之,结构力学充满着生机和活力,已不再囿于经典的杆系结构力学的研究范畴,正向着现代的广义的结构力学方向发展^[4]。

计算机登上历史舞台后,现代结构力学的研究层次已从被动分析发展到主动优化设计,从而进入结构状态控制,即进行结构特征识别、设计方案优化、施工使用中工作状态与结构参数的调整控制。通常这类问题是非线性的,而且计算量非常大,还可能遇到分叉的问题,只有借助于计算机和更新的解法才能解决。近年来,还发展了考虑荷载和结构本身所具有的各种不确定因素(如随机性、模糊性和未确定性)的分析,出现了不确定有限元分析、不确定性振动理论和广义可靠度理论。总之,结构力学从狭义到广义,从被动到主动,从确定到不确定,并与结构工程渗透融合为软科学的发展趋势已不容忽视^[5]。

现代广义结构力学包括的范围很广,其发展的重点之一是工程各个阶段的规划、决策和设计。将工程项目从论证到设计,从施工到使用期维护的整个过程作为大系统,研究其中的各种力学问题,并与工程理论相结合,有可能成为未来工程科学的核心。

§ 1.5 结构力学与结构工程

目前,我国的结构力学正在迅速赶超世界先进水平。结构力学与其他力学学科不同,它与结构工程联系更为紧密,其基本概念、基本理论和基本方法也是预应力结构、钢筋混凝土结构、钢结构、地基基础和结构抗风抗震设计等工程结构理论的基础。当前涌现的各种计算机辅助设计软件,其核心计算部分的基本理论和方法也都以结构力学为基础。结构分析成果作为各类结构的设计依据,正发挥其巨大作用。

我国近年来的结构工程成就举世瞩目。在桥梁结构工程方面,1975年中国开始的斜拉桥工程,从跨径 76 m 的四川云阳桥到跨径 602 m 跃居世界第一的上海杨浦斜拉桥(图 1.5.1),经过 18 年的追赶,终于达到国际领先水平,靠的就是结构理论与工程实践的相结合。虽然法国的诺曼底大桥两年后将跨度推进至 865 m,紧接着日本的多多罗大桥又将跨度推进至 890 m,但正在苏州兴建的跨度为 1 088 m 的苏通斜拉桥将再次刷新世界纪录,显示中国工程界的实力与水平。悬索桥建设更是突飞猛进,江阴长江公路悬索桥以 1 385 m 跨径,跻身世界第四,而且更大的扬州润扬悬索桥正在建设中。浦江上正建造的世界第一钢结构拱桥卢浦大桥(跨径 550 m)已成功合龙(图 1.5.2),它将打破由澳大利亚悉尼桥和美国新河谷桥相继保持

几十年的世界纪录。

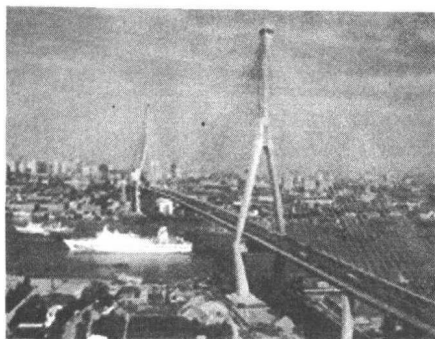


图 1.5.1 上海杨浦斜拉桥

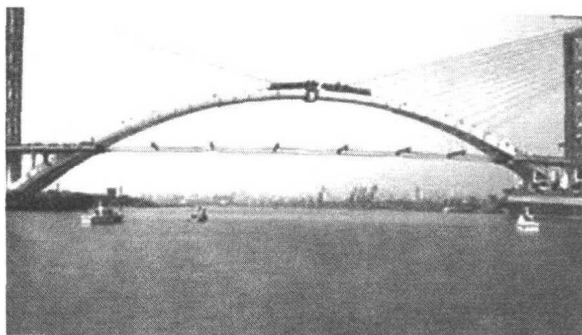


图 1.5.2 世界第一拱——卢浦大桥

在建筑结构方面,88层高达420 m的上海金茂大厦(图 1.5.3)在世界摩天大楼中曾名列亚洲第一、世界第三;广东国际大厦主楼采用筒中筒钢筋混凝土结构,突破材料局限,建成63层,高度达197 m的超高层建筑;东方明珠上海电视塔由巨型空间框架串连复杂网壳球体组成,高462 m,是亚洲第一、世界第三的高塔;天津体育中心的比赛馆采用双层球型网壳结构,直径135 m,覆盖面积1.43万 m^2 ,创亚洲最大穹顶。在水工结构方面,继葛洲坝和小浪底水利枢纽工程之后,举世闻名的三峡水利工程一期工程已完工(图 1.5.4),圆了中国几代人的梦。

20世纪70年代,控制理论和控制技术的提出和进展,已在结构工程防灾减灾方面向智能化结构方向迈出了可喜的一步,这是结构工程领域的高科技课题,也是现代广义结构力学研究的新范畴。它在广大学者和工程技术人员的关注和参与下,必将得到迅速发展。

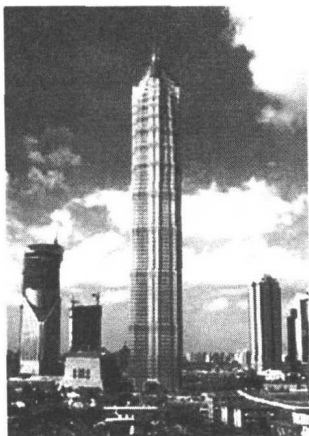


图 1.5.3 上海金茂大厦

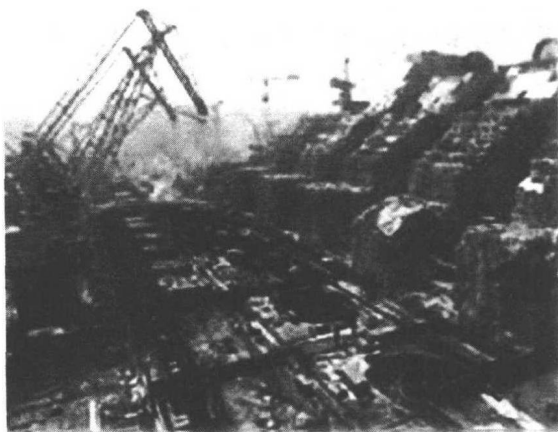


图 1.5.4 施工中的三峡水利工程

第2章 结构简化与机动分析

§ 2.1 绪 论

1. 结构力学研究对象

经典的结构力学也称狭义结构力学,主要研究由杆件组成的体系(杆件系统),更多涉及平面杆系。若该体系(或其中某些构件)能承担荷载,并起传力的骨架作用,则称为结构。所谓杆件是指可以当作一维构件计算的三维物体,包括梁、柱、链杆、曲杆、转轴等等,杆的横截面尺寸比长度小得多。广义结构力学除了研究可变形的杆件体系外,还包括可变形的连续体,如平板、壳体、块体等等。所谓“壳”是指可以当作二维曲面弹性体计算的三维物体,壳的横截面的厚度比曲面横展尺寸小得多。“板”是指曲率为零的平壳;但实际上平板变形后都成为有曲率的壳体。而堤坝、地基等实体结构的三维尺寸差异不大,应作为空间问题考虑,某些特殊情况可以简化为平面问题处理。

结构向复杂化系统发展有两个特点:一是简单的梁杆构件组成越来越复杂的杆件系统,未知量成千上万;另一方面则发展成复杂的构件、板壳及其组合系统。因此现代广义结构力学所研究的对象已大大超出了狭义结构力学的范畴。

2. 结构计算简图

计算简图由实际结构简化抽象而成,取杆件轴线,或板壳中面,或块体轮廓加上结构内部的结点、结线联系,或外部的支杆、支座等边界约束,并考虑简化或分配的荷载,构成力学计算模型。

(1) 联系(约束)

结点(内部联系)分铰结点、刚结点和组合结点。

支座(外部约束)分固定(或活动)铰支座、固定端支座、滑动支座、弹簧支座。

(2) 荷载类型

集中荷载和分布荷载(各包括力或力偶),称“主动力”,往往是已知的外力,连续体中的分布荷载有面力和体力之分。为了平衡主动力,支座必然产生约束反力,称“被动力”,一般是未知的外力。当取分离体研究时,截面内力或内部联系中的内力可能暴露成外力,视为某种约束力求解。

(3) 内力素

为了承受和传递荷载,构件内部产生的作用力,称“内力”。内力元素一般分为四种:轴力(N)、剪力(Q)、扭矩(T)、弯矩(M);与之相应的变形有轴向拉伸压缩、剪切、扭转、弯曲或各种组合形式。在平面杆件体系中只有轴力、剪力、弯矩,而扭矩为面外力。但作为内力集度的应力则只有垂直于截面的正应力(σ)和截面上平行于截面的剪应力(τ)两种分量。它们的定

义可参考材料力学和弹性力学的规定。

3. 结构类型

结构一般分杆件结构、板壳结构、块体结构(图 2.1.1)。

常见的杆件结构(包括薄壁杆件结构)有:梁(杆轴为直线或虽为曲杆但主要受弯的结构)、拱(由曲杆组成,仅在竖向荷载作用下能产生水平推力的结构)、桁架(由等截面直杆理想铰结形成、仅在结点处受荷载作用的结构)、刚架(由等直杆刚结或部分刚结、部分组合结点连接而成的结构)及组合结构(部分杆件属桁架杆、索或拱,另一部分又属于受弯的梁式杆的结构)。它们既可以是静定结构,也可以是超静定结构。后者内力仅由平衡条件尚不能确定,须补充变形条件。

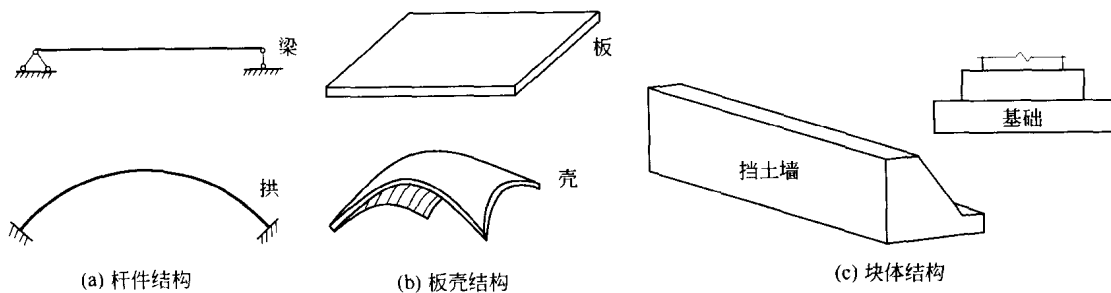


图 2.1.1 结构分类

根据结构轴线(面)和外力的空间位置,结构可分为空间结构和平面结构。实际工程结构都是空间结构,但有些可简化、分解为平面结构(或平面问题)来处理。平面结构各杆轴及外力均在同一平面内,不出现扭转或斜弯曲状态。

§ 2.2 实际结构体系的简化

实际结构是很复杂的,在对实际结构(如高层建筑、大跨度桥梁、大型水工结构)进行力学分析和计算之前必须加以简化,用一个简化图形(结构计算简图)来代替实际结构,略去次要细节,显示其基本特点,作为力学计算的基础。这一过程通常称为力学建模。

结构计算简图的选择经历一个复杂的过程,需要力学知识、结构知识、工程实践经验和洞察力,经过科学抽象、实验论证,根据实际受力、变形规律等主要因素,对结构进行合理简化。它不仅与结构的种类、功能有关,而且与作用在结构上的荷载、计算精度要求、结构构件的刚度比、安装顺序、实际运营状态及其他指标有关。计算简图的选择可能因计算状态(是考虑强度或刚度,计算稳定或振动,还是钢筋混凝土抗裂验算)而异,也依赖于所要采用的计算理论和计算方法,方能完成结构构件线性或非线性的应力和应变状态分析。实用上可以参考同类工程实例。

对实际结构体系主要进行如下的简化^[6]。

1. 结构整体的简化

除了具有明显空间特征的结构外,在多数情况下,把实际的空间结构(忽略次要的空间约束)分解为平面结构。

对于沿长度方向结构的横截面保持不变的柱形结构,如隧洞、水管、厂房结构(图 2.2.1),可作两相邻横截面截取平面结构(切片)计算。对于多跨多层的空间刚架,根据纵横向刚度和荷载(风载、地震力、重力等),截取纵向或横向的平面刚架来分析(图 2.2.2)。若空间结构由几种不同类型的平面结构组成(如框剪结构),在一定条件下可以把各类平面结构合成一个总的平面结构,并算出每类平面结构所分配的荷载,分别计算每类平面结构,如图 2.2.3 所示。

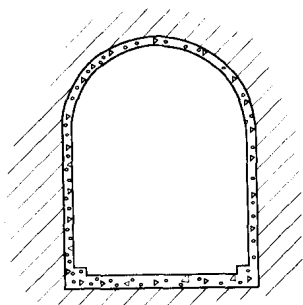


图 2.2.1 直墙拱(隧洞)

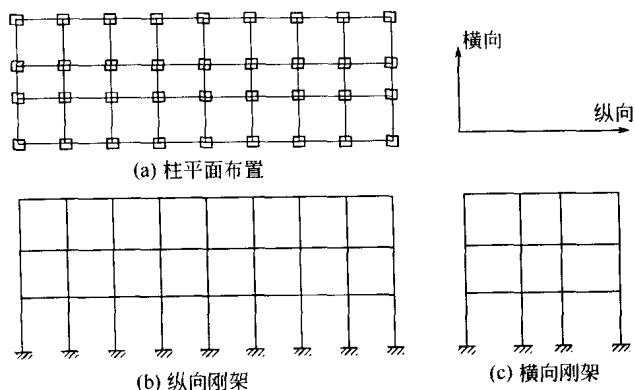


图 2.2.2 多跨多层空间刚架

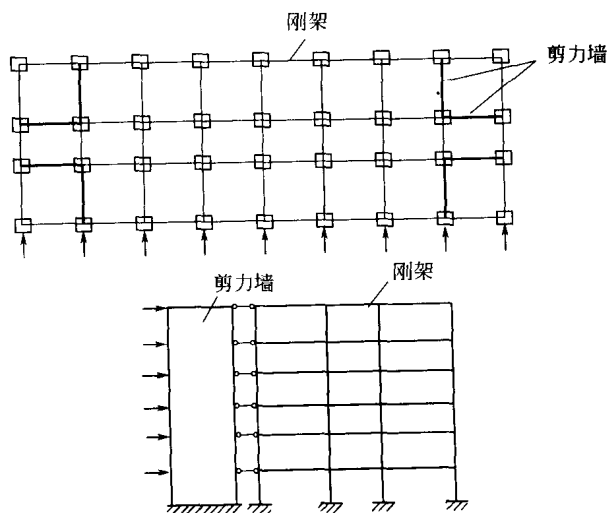


图 2.2.3 框架剪力墙结构

2. 杆件的简化

除了短杆深梁外,杆件用其轴线表示,杆件之间的连接区用结点表示,并由此组成杆件系统(杆系内部结构)。杆长用结点间的距离表示,并将荷载作用点转移到杆件的轴线上。

对于微弯、微折或格构式杆件常以实体直杆代替(图 2.2.4)。一些变截面杆件(如斜杆刚架),可逐杆逐段取为等截面,杆轴线取平行于某侧平直表面(图 2.2.5)。在计算刚架的位移时,忽略轴向变形的影响(即抗拉压刚度无穷大);强梁弱柱时,在水平荷载作用下的横梁刚度也常假设为无穷大,如图 2.2.6 所示。

3. 杆件间连接的简化

杆件间的连接区简化为杆轴线的汇交点(称结点),杆件连接理想化为铰结点、刚结点和组合结点。各杆在铰结点处互不分离,但可以相互转动(如木屋架的结点);各杆在刚结点处既不能相对移动,也不能相对转动,因此相互间的作用除了力以外还有力偶(如现浇钢筋混凝土结点)。组合结点即部分杆件之间属铰结点,另一部分杆件之间属刚结点(有时也称半铰结点或半刚结点,如图2.2.7(a)所示)。

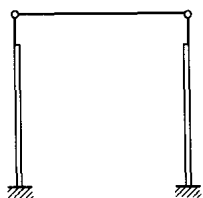


图 2.2.4 厂房排架

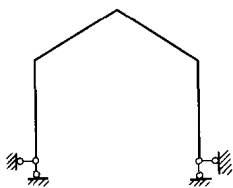


图 2.2.5 斜腿刚架

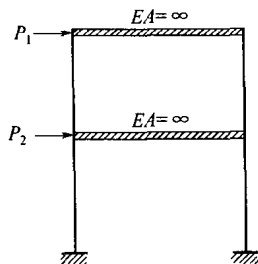


图 2.2.6 剪切形刚架

当工程结构中杆件接合部加腋,结合区尺寸较大,刚度增大的影响不可忽略时,常将各杆端进入结合区的一段视为刚性段(称为刚域),用有限元法分析时,将具有刚域杆件作为一个单元,首先建立单元杆端位移(杆端力)和弹性段杆端位移(杆端力)之间的转换关系,然后利用转换关系,由弹性段的刚度方程推出具有刚域单元的刚度矩阵和等效结点荷载,如图2.2.8所示。

在确定结点简图时,除要考虑结点的构造情况外,还要考虑结构的几何组成情况(详见§2.3机动分析)。例如工程中的钢桁架和钢筋混凝土桁架,虽然从结点构造上看接近于刚结点,但其受力状态却与一般刚架不同,因为其几何构造是桁架,几何不变性不依靠结点的刚性,因此结点处弯矩很小。也就是说,轴力是主要的,弯曲内力是次要的,把各结点简化为铰结点,按理想桁架计算主要内力是合理的。但空腹梁则不同,如果把所有刚结点都改为铰结点,则不能维持几何不变,其承载性能依赖于结点的刚性,所以结点必须取为刚结点,按刚架计算,如图2.2.9所示。

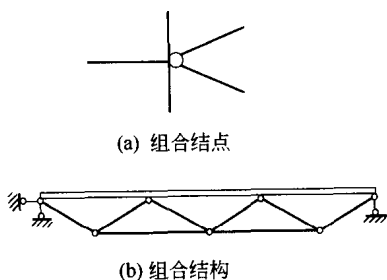


图 2.2.7 组合结点与组合结构

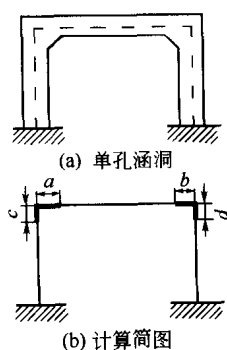


图 2.2.8 具有刚域的结构

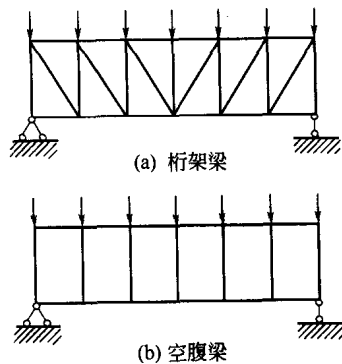


图 2.2.9 结点构造与几何组成

4. 结构与基础间连接的简化

结构与基础的连接区简化为支座,按其受力特征分为5种:活动铰支座(滚轴支座)、固定