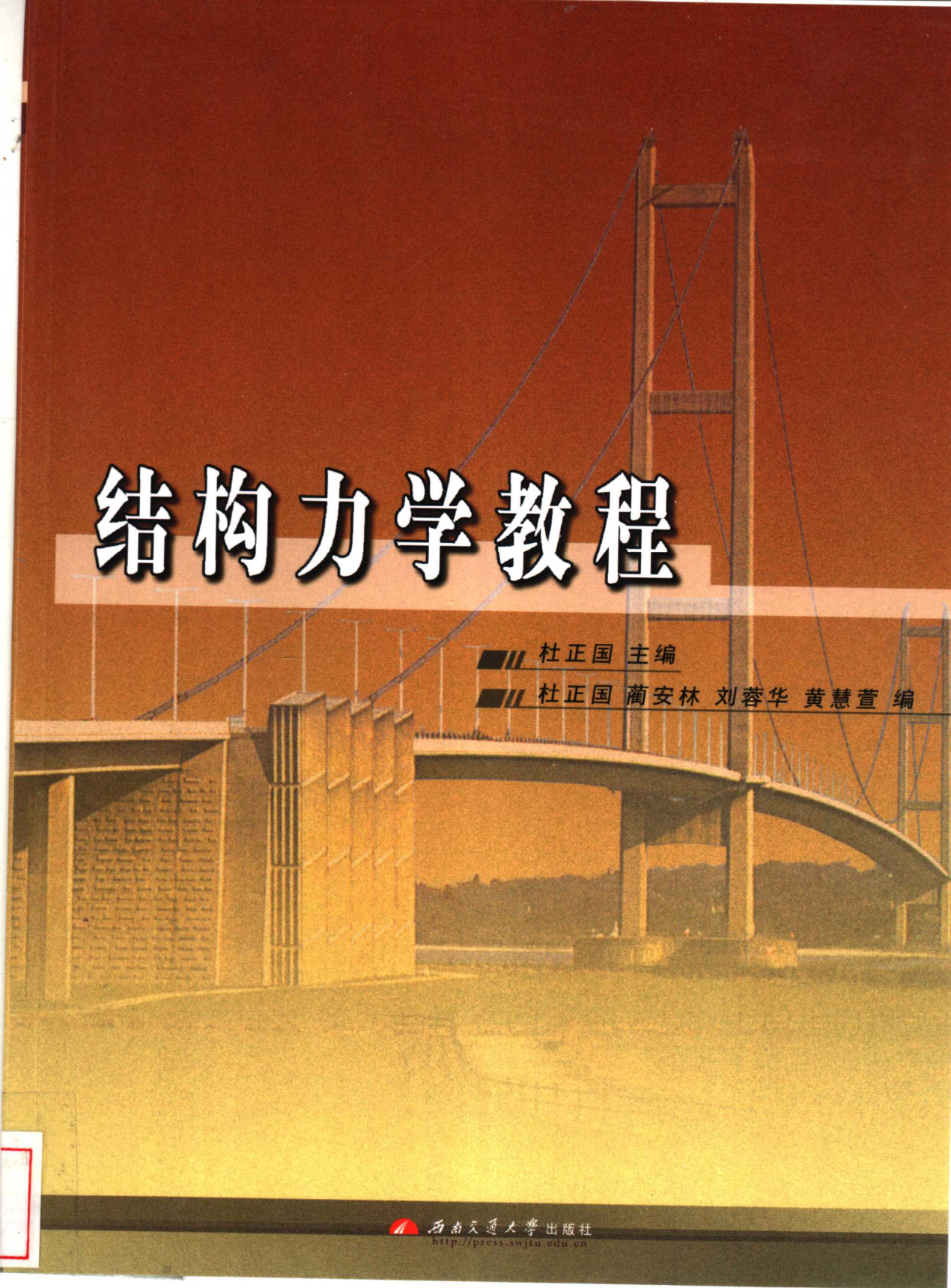




结构力学教程

杜正国 主编

杜正国 蔺安林 刘蓉华 黄慧萱 编

图书在版编目 (C I P) 数据

结构力学教程 / 杜正国主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2004.8
ISBN 7-81057-817-0

I. 结... II. 杜... III. 结构力学 - 高等学校 - 教材 IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 010863 号

结 构 力 学 教 程

杜正国 主编

责任编辑	刘莉东
封面设计	绿光设计室
出版发行	西南交通大学出版社出版发行 成都二环路北一段 111 号
经 销	新华书店
邮 编	610031
发行部电话	87600564
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
电子邮箱	E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司印刷
开 本	787mm × 960mm 1/16
印 张	34.375
字 数	660 千字
版 次	2004 年 8 月第 1 版
印 数	1—4000
印 次	2004 年 8 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-81057-817-0/O · 061
定 价	42.00 元

图书如有印装问题, 本社负责退换

版权所有, 盗版必究, 举报电话: (028) 87600562

序

本书是在本人所编《实用结构力学教程》(西南交通大学出版社,1992年)基础上,邀请教研室部分同仁,对全书进行了增订和修改,使其更适合于高等学校土木工程大类本科专业教学之用,并适当兼顾部分学生准备攻读相应研究生专业所需要的较深层次的结构力学有关知识(如结构动力学的部分扩充知识,结构稳定和极限荷载方面的有关内容等)。

全书共分十二章。除第一章绪论以外,各章均穿插较为丰富的算例,并在各章末附有一定数量的习题,供读者练习以逐步提高结构力学的计算能力。

本书结构动力学、结构稳定计算部分由蔺安林研究员执笔;力法、位移法、矩阵位移法和影响线及其应用等四章由刘蓉华副教授执笔;黄慧萱讲师负责编写第三章静定结构内力计算;杜正国教授负责编写第一、二、四、五和十二章的内容,并校阅了全部书稿。

作者诚挚地感谢西南交通大学教务处和出版社对本书编写工作和顺利出版所给予的极大支持。对于书中难免存在的不当及疏漏之处,希望使用本书的教师与读者指正。

主 编

2003年10月于成都

目 录

第一章 绪 论〔1〕

第一节	结构力学与结构设计	1
第二节	结构的计算简图和分类	2
第三节	荷载及其分类	7
第四节	线性弹性和叠加原理	8

第二章 体系的几何组成分析〔10〕

第一节	概述与名词解释	10
第二节	体系的计算自由度	12
第三节	平面几何不变体系的基本组成规则	15
第四节	平面体系几何组成分析示例	17
第五节	体系的几何构造与静定性	19
习 题		20

第三章 静定结构的内力计算〔22〕

第一节	单跨静定梁	22
第二节	多跨静定梁	33
第三节	静定平面刚架	37
第四节	静定拱	47
第五节	静定平面桁架	62
第六节	桁梁组合结构	76
第七节	静定结构受力特性	78
习 题		80

第四章 结构的位移计算〔87〕

第一节	概 述	87
第二节	实功原理	88
第三节	虚功原理	92
第四节	单位荷载法	98
第五节	剪力与轴力对位移的影响	108

第六节 图乘法	110
第七节 温度变化和支座下沉情况下的位移计算	115
第八节 互等定理	121
习 题	124
第五章 超静定结构计算引论 [127]	
第一节 概 述	127
第二节 结构的超静定次数	129
习 题	135
第六章 力 法 [137]	
第一节 力法的基本原理	137
第二节 荷载作用下超静定结构的力法计算	144
第三节 对称性的利用	153
第四节 广义荷载作用下的力法计算	164
第五节 超静定结构的位移计算	170
第六节 超静定结构最后内力图的校核	175
第七节 交叉梁系的计算	178
第八节 超静定拱的计算	182
第九节 超静定结构的特性	192
习 题	194
第七章 位移法 [203]	
第一节 位移法的基本概念	203
第二节 等截面直杆的转角位移方程	207
第三节 基本未知量数目的确定和基本结构	211
第四节 位移法的基本方程及系数和自由项的计算	215
第五节 位移法计算示例	219
第六节 直接按平衡条件建立位移法基本方程的解法	226
第七节 用位移法计算具有剪力静定杆的刚架	227
第八节 对称性的利用	232
第九节 有侧移的斜柱刚架的计算	235
第十节 在支座位移作用下的位移法计算	238
第十一节 力矩分配法的基本原理	241
第十二节 用力矩分配法计算连续梁和无侧移刚架	246
第十三节 力矩分配法和位移法的联合应用	253

第十四节 无剪力分配法	256
习 题	260
第八章 矩阵位移法〔270〕	
第一节 概 述	270
第二节 局部坐标系中的单元刚度方程和刚度矩阵	277
第三节 局部坐标系向结构坐标系的变换	282
第四节 结构的整体分析	289
第五节 计算步骤和算例	304
习 题	317
第九章 影响线及其应用〔323〕	
第一节 移动荷载和影响线的概念	323
第二节 静力法作单跨静定梁的影响线	325
第三节 间接荷载作用下的影响线	336
第四节 机动法作静定梁影响线的概念	338
第五节 桁架内力影响线	343
第六节 利用影响线计算量值	350
第七节 铁路公路的标准荷载制	353
第八节 最不利荷载位置	354
第九节 换算荷载	363
第十节 简支梁的绝对最大弯矩和内力包络图	367
第十一节 超静定结构影响线的概念	372
习 题	379
第十章 结构动力学〔384〕	
第一节 概 述	384
第二节 动力计算中体系的自由度	386
第三节 单自由度体系无阻尼自由振动	389
第四节 单自由度体系有阻尼自由振动	395
第五节 单自由度体系在简谐荷载作用下的强迫振动	400
第六节 单自由度体系在一般荷载作用下的强迫振动	404
第七节 幅值方程	410
第八节 多自由度体系的自由振动	414
第九节 多自由度体系在简谐荷载下的强迫振动	427
第十节 多自由度体系在一般荷载下的强迫振动	433

* 第十一节 多自由度体系运动方程的矩阵形式	445
* 第十二节 无限自由度体系的自由振动	448
第十三节 计算频率的近似解	452
习 题	458

第十一章 结构稳定计算〔464〕

第一节 概 述	464
第二节 求临界力的基本方法	466
第三节 在刚性支承上等截面直杆的稳定	476
第四节 在弹性支承上等截面直杆的稳定	479
第五节 等截面直杆在自重作用下的稳定	482
第六节 变截面压杆的稳定	485
第七节 剪力对临界力数值的影响	488
第八节 组合压杆的稳定	489
* 第九节 圆弧形曲杆的平衡微分方程式	493
* 第十节 在均匀径向压力作用下圆拱的稳定	495
* 第十一节 圆环在均匀径向压力作用下的稳定	497
* 第十二节 在弹性介质上的杆件的稳定	499
第十三节 刚架的稳定计算	501
习 题	508

第十二章 梁与刚架的极限荷载〔510〕

第一节 概 述	510
第二节 塑性铰	514
第三节 塑性分析的最简单情形	516
第四节 连续梁的极限荷载	518
* 第五节 比例加载时判定极限荷载的一般定理	521
* 第六节 刚架的极限荷载	523
习 题	527

习题答案〔530〕

参考文献〔540〕

主编简介〔541〕

第一章 绪论

第一节 结构力学与结构设计

在各种工程构筑物中用以支承或传递荷载的骨架部分称为结构。如房屋建筑中的梁柱体系,土木工程中的桥梁,各种地下洞室及支挡,以及水利工程中的水坝、闸门等,都是结构的典型例子。

结构力学主要是研究当结构遭遇某种外因(如荷载或广义荷载)作用时,对结构所产生的以内力和变形(位移)为主要量值的计算原理与方法。结构力学是工程力学的重要组成部分之一。

结构力学知识与结构设计工作具有非常密切的联系。结构工程师的主要任务是通过分析、计算,合理地选择结构各部分的材料和截面尺寸。在实现结构预期功能的同时,保证所设计的结构物能够安全地承受各种可预见的外因作用。根据结构力学的计算原理和方法进行结构分析,并取得有关的内力和位移等数据,为下一步对结构各部件(简称构件)进行截面设计提供依据。对于静定结构,情况比较简单。当荷载、结构外形尺寸和支座约束形式给定后,根据静力平衡方程,即可完全确定结构的内力,进而确定结构各构件的截面尺寸,求出各控制截面处的位移。然而,对于工程中大量采用的超静定结构,情况就不那么简单。在此情形下,结构内力分布除了需满足静力平衡条件外,还必须满足变形(协调)条件和物理条件,即结构的内力分布与各构件的刚度分布情况发生了关系。因此,超静定结构的设计计算,需要经历一个迭代和逐步修改的过程。工程师要先根据设计经验,拟订结构各构件的初始截面尺寸,然后通过结构分析,求得第一次的结构内力,据此算出经过第一次修正后的各构件截面尺寸,并以此替换初始截面尺寸。然后再进行结构分析,算得又一次的内力分布和相应的构件截面尺寸。在上述迭代与修改截面尺寸的过程中,工程技术人员不仅需要对结构内力、变形等量值反复计算(当然应该尽可能

利用电脑及相应软件进行),而且要对取得的计算结果进行分析、对比,直至符合工程设计要求为止。由此可见,掌握和熟练运用结构力学知识,是顺利进行结构设计的重要基础。

第二节 结构的计算简图和分类

一、结构的计算简图

在结构分析中,完全按照结构的实际情况进行力学分析是不可能和不必要的。这是由于实际结构的复杂性和工程设计要求所决定的。因此,在对实际结构进行分析之前必须加以简化,略去相对次要的因素与作用,保留反映结构行为的基本特点,用一个简化的计算图形代替实际结构。这种图形称为结构计算简图。

例如,图 1-1a 所示两端支承于墙体上的梁,荷载通过上层立柱传递给梁。对于这样一个简单的结构,如果要完全按照实际情况进行分析,则首先遇到的问题是梁两端反力的作用位置和由立柱传来的荷载作用在梁上的位置难以确定,原因是梁与墙、梁与柱之间的作用力的分布规律难以准确掌握。现进行简化,假设上述两处受力为均匀分布,其合力分别作用于墙和立柱的中心线位置,于是得到如图 1-1b 所示用轴线表示的梁的计算简图。当然,这种简化的前提是墙与梁、柱与梁之间的接触宽度应比梁的长度小很多,且梁的截面尺寸也比梁的长度小很多。

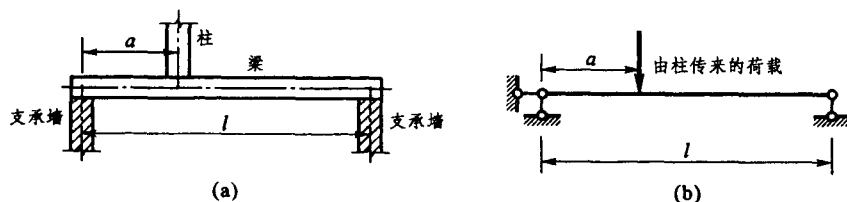


图 1-1

选择结构计算简图是结构分析的首要工作,极为重要。要正确地解决这个问题,需要有比较丰富的结构设计经验,对结构构造、施工等各方面具备较宽的知识面,并且对结构各部分的受力情况具有正确的定性判断能力。选取结构计算简图的原则,一方面要能反映实际结构的主要受力性能;另一方面又必须略去一些次要因素,使计算得到简化。对实际结构进行简化,通常包括对结构体系的简化、对实际支座的简化和对构件(杆件)与构件相互连接处(称为结点)的简化。

有时,同一结构在不同的计算阶段需要采用不同的计算简图。在初步设计中为

了估算构件的截面尺寸,采用一个比较粗略而计算简单的计算简图,而在最终设计阶段,则采用较为精确的计算简图。特别是在具备计算机的条件下,就可以采用较精确的计算简图进行结构分析。

把结构与基础或其他支承物(如墩台)连接起来用以固定结构的位置,并将结构上的荷载传至支承物或地基的装置称为支座。支座对结构的反作用力称为支座反力。

平面结构常用的支座有如下四种:

(1) 滚轴支座(也称滑动铰支座)

图 1-2a 表示这种支座的构造示意图。上部结构(如桥跨)与支座的上摆 B 一起,可以绕柱形铰 A 转动,其下摆 C 与支承面 $m-n$ 之间装有滚轴,因而可以沿支承面水平移动,但不允许 A 点发生垂直于支承面方向的位移。这种支座的反力一定通过铰 A 中心,并与支承面 $m-n$ 互相垂直,因此支座反力 F_{Ay} 的方向和作用点是确定的。图 1-2b 表示用一根支座链杆(简称支杆)表示的滚轴支座计算简图。支杆中的内力等于该支座反力 F_{Ay} 的大小。图 1-2c 为这种支座的相应示力图。

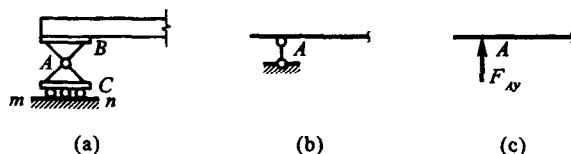


图 1-2

(2) 铰支座(也称固定铰支座)

图 1-3a 表示这种支座的构造示意图。它的上部 B 能绕 A 点转动,但因其下摆 C 与支承物固定在一起,故这种支座 A 点的水平位移和竖向位移都被阻止。相应的水平反力为 F_{Ax} ,竖向反力为 F_{Ay} ,在略去摩擦力的情况下,显然都应该通过铰 A 的中心。图 1-3b 代表用两根支杆表示的铰支座的计算简图。图 1-3c 为其相应的示力图。

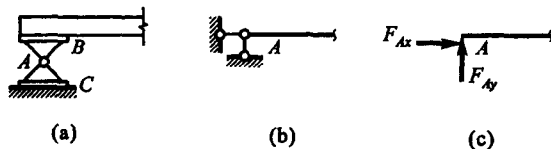


图 1-3

(3) 固定支座

当结构的一端被插入基础或地基,并通过构造保证使二者结合成一个整体,如地基的变形极小,则结构可视为被完全固定于基础顶面,此处不发生任何移动和转

动,这种支座称为固定支座,如图 1-4a 所示。图 1-4b、c 代表两种不同表示方式的固定支座计算简图。图 1-4d 为相应的示力图。

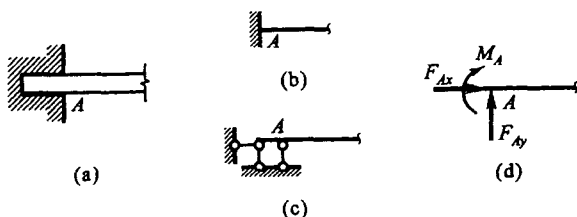


图 1-4

(4) 定向支座

图 1-5a 表示定向支座的构造示意图。这种支座允许结构沿滚轴方向有水平移动,但竖向移动和转动受阻。图 1-5b 代表用两根平行支杆表示的定向支座计算简图。图 1-5c 为相应的示力图。

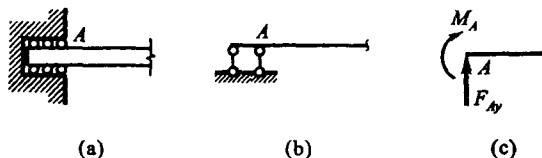


图 1-5

上述各种支座都假定其本身无变形,故都属于刚性支座范畴。如果在某些情况下需要考虑支座本身的变形,则应视为弹性支座。本书涉及弹性支座时,将作出特别说明。

对于空间结构,常用的支座有可动球铰支座、可动圆柱铰支座、固定球铰支座和空间固定支座。它们各自的计算简图及相应的示力图,本章从略。

结构中杆件与杆件之间的连接处称为结点。钢、木或钢筋混凝土结构的结点有很多构造形式。在计算简图中常将实际的结点简化为理想铰结点、刚结点和二者的组合——组合结点三种。

(1) 铰结点

理想铰结点的特征是被连接的各杆可以绕结点中心自由转动。实际上,工程结构中难以做到无摩擦的理想铰,多少具有一定的刚性。钢桥中的枢接结点、木屋架的结点比较接近于铰结点。图 1-6a 表示图 1-6b 所示木屋架的结点 D 的构造示意图。理想铰结点在计算简图上用一个小圆圈表示,如图 1-6b 中所示。

(2) 刚结点

图 1-7a 表示一钢筋混凝土框架边柱与梁的交汇结点的构造示意图。上柱、下柱和梁用混凝土浇筑成整体,钢筋的布置使各杆端能抵抗弯矩。刚结点的特征是当

结构发生变形后,交汇于该结点的各杆端之间的夹角保持与变形前的相同,如图 1-7b 所示。该结点在计算简图上如图 1-7c 所示。

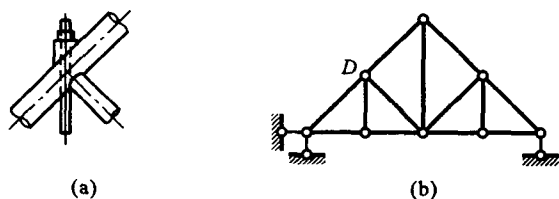


图 1-6

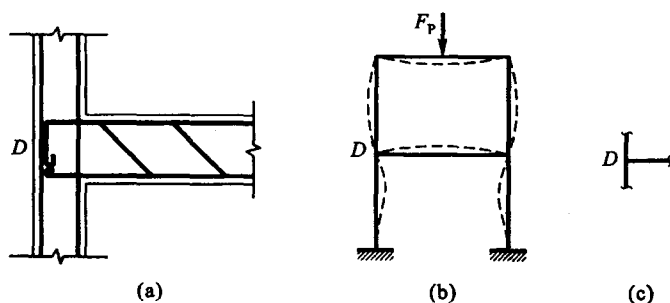


图 1-7

(3) 组合结点

若在同一结点处,出现上述两种结点组合的情况,则该结点称为组合结点。图 1-8 为某组合结点 D 的计算简图。其中左、右两杆之间为刚结,而竖杆与横杆之间为铰接。

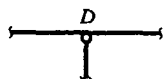


图 1-8

二、结构的分类

结构计算简图按几何尺寸特征可以分成三类:

(一) 杆件结构

这类结构由直线或曲线形杆件组成。所谓杆件即其截面尺寸要比长度小得多的构件。杆件结构是由杆件按照一定方式连接而成,且能承受荷载作用的体系(见图 1-9),其中图 1-9a 为梁,图 1-9b 为桁架,图 1-9c 为刚架,图 1-9d 为拱。当杆件的轴线与荷载位于同一平面之内时,称为平面结构(图 1-9a ~ 1-9d),否则称为空间结构。图 1-9e 为空间刚架,图 1-9f 为空间桁架。图 1-9 所示各种结构都属于工程中常用的杆件结构形式。

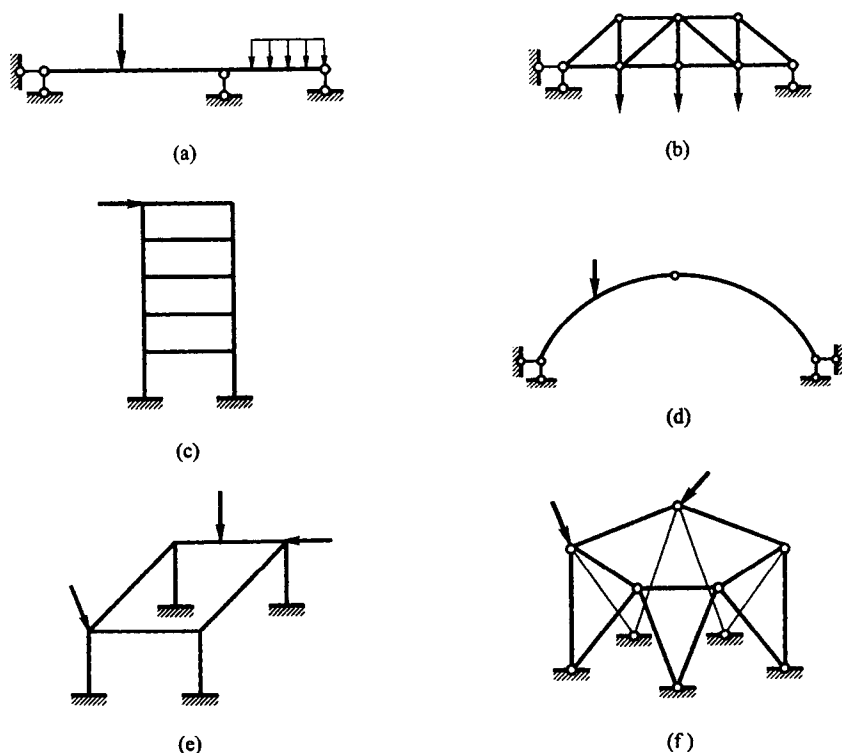


图 1-9

(二) 薄壁结构

这类结构的厚度要比长度和宽度小得多。典型的薄壁结构为建筑中采用的平板与壳体结构(图 1-10a、b),前者多用于楼板,后者根据建筑要求,筑成具有一定曲面形状(如双曲抛物面)的屋盖。

(三) 实体结构

这类结构的长度、宽度与厚度尺寸相近。重力坝和挡土墙属于实体结构(图 1-11)。



图 1-10

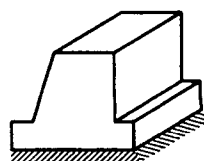


图 1-11

杆件结构是结构工程领域中应用最多的一种结构。本书讨论的重点是杆件结构。

第三节 荷载及其分类

荷载是主动作用于结构上的外力,例如结构的自重、结构上的设备重力、施加于结构的水压力和土压力等。除外力以外,还有一些因素可以使结构产生内力或变形,如温度变化、基础沉陷、材料的收缩与徐变等。这些因素也可以称为广义荷载。

众所周知,任何一个工程结构在其施工过程中或其使用期间都必须是安全的。结构设计者一定要周密和谨慎地估计到结构可能遇到的各种荷载。

作用在结构上的荷载,根据荷载作用时间的久暂,分为恒载和活载两类。恒载是指永久作用在结构上的不变荷载,如结构自身和固定在结构上的设备重力等。房屋建筑中的梁、柱和墙体重量,铁路桥梁上的轨、枕重等都属于此类荷载。恒载的大小、方向和作用位置都是固定不变的。活载是指那些非永久性的,有多种来源的暂时性作用的荷载。例如房屋结构中的屋面与楼面荷载,由于风对建筑物的作用产生的压力和吸力,工业厂房中的吊车荷载,通过桥梁的车辆荷载及其制动或加速时产生的惯性力等。

有些活载,如风荷载、雪荷载,它们在结构上的作用位置可以认为是固定不变的,这种荷载称为固定荷载(恒载都属于固定荷载)。另一类活载如车辆荷载、吊车荷载等,它们在结构上的位置是移动的,这种荷载称为移动荷载。解决移动荷载作用下的结构分析问题自然要比固定荷载作用时复杂一些,本书将有专门章节讨论此类问题。

在进行结构设计时,设计者应该对恒载与活载的各种组合结果进行比较,以确定对结构说来最为不利的荷载情况。荷载的组合方法及规定,在国家颁布的荷载规范中有明确规定。

如果从荷载是否显著地引起结构冲击和振动来分类的话,荷载尚可分为静力荷载和动力荷载两类。静力荷载是指其数值、方向和位置几乎不随时间变化,从而不使结构产生显著的运动。动力荷载则随时间迅速变化,其施加过程将引起结构运动状态的改变,产生加速度,从而出现了惯性力。动力机械运转时产生的荷载或冲击波的压力都是动力荷载的例子。车辆荷载、风荷载和地震力通常在结构设计中被视为静力荷载,但在特殊情况下应按动力荷载考虑。

第四节 线性弹性和叠加原理

工程结构所采用的大部分材料,如建筑钢、木材和混凝土具有如下特性:在应力—应变曲线(σ - ϵ 图)的初始阶段,材料特性表现为线性弹性,即反映在 σ - ϵ 图上 σ 与 ϵ 成线性关系,且材料被加载时发生变形,卸载完毕该变形消失,材料恢复原形。图1-12a、b分别为结构钢和混凝土的 σ - ϵ 曲线示意图。图中显示在 OA 区段内,结构钢表现为线性弹性,混凝土在应力应变初始阶段表现为近似的线性弹性,也就是基础力学中通常所称的材料在 OA 段服从胡克定律。

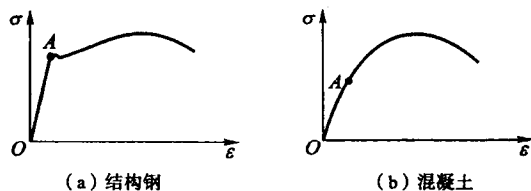


图 1-12

在线性弹性结构计算中,叠加原理是适用的。它叙述为:结构中由一组荷载所产生的某效应等于其中每一荷载单独作用所产生的该效应之和,这个原理使计算得到简化,并且在许多情况下,计算结果是足够精确的。

应该强调,应用叠加原理是有条件的。其一,结构由线性弹性材料构成(服从胡克定律);其二是结构的变形与结构本身尺寸比较,小很多(小变形)。大多数情况下,结构能满足这两个条件。

图1-13所示简支梁 AB ,受荷载 F_{P1} 和 F_{P2} 作用。如果由于梁轴的挠曲变形引起的跨度缩短量 Δl 比跨长 l 小得多,则荷载位置 a_1 和 a_2 的改变可以忽略不计,从而可以按结构变形前的尺寸建立平衡方程。根据平衡方程 $\sum M_A = 0$,得

$$F_{By} = \frac{F_{P1}a_1 + F_{P2}a_2}{l} = \frac{F_{P1}a_1}{l} + \frac{F_{P2}a_2}{l}$$

上式表明, F_{P1} 和 F_{P2} 共同作用产生的反力 F_{By} 等于 F_{P1} 和 F_{P2} 单独作用时产生的该反力之和。当叠加原理适用时,静力平衡方程是未知力和荷载的线性方程。

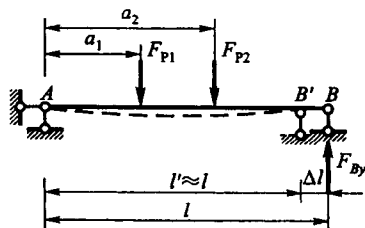


图 1-13

当材料服从胡克定律且结构的变形是微小的情况下,计算结构的变形,一般也可以应用叠加原理。

但是在另外一些情况下,结构虽然变形很小,然而这种变形已经影响到外力对结构作用性质的改变,或者由于结构变形很大,已经显著影响到外力作用点位置或方向的改变。此时,结构的一切计算都应在结构变形后的计算简图上进行,而且荷载与内力或荷载与变形之间已呈非线性关系,叠加原理就不适用了。

本书除第十二章外,仅限于讨论线性弹性结构的计算问题。

第二章 体系的几何组成分析

在土木或水利工程中,结构是用来支承或传递荷载的,因此它的几何形状和位置必须是稳固的。具有稳固几何形状和位置的体系称为几何不变体系。反之,如体系的几何形状或位置可以或可能发生改变,则称为几何可变体系。只有几何不变体系才能用于工程结构。

第一节 概述与名词解释

学习本章内容首先要明确的基本概念是体系几何形状的改变与结构变形是两个性质不同的概念。前者是指体系的材料在不发生应变的情况下,其几何构形发生改变;后者则是指当结构受外因(如荷载)作用,杆件截面上产生应力,同时材料发生应变,从而引起结构变形。结构的变形通常是微小的。在体系的几何组成分析中,不涉及材料应变和结构变形问题。

杆件体系按几何组成方式分类,可分为几何可变体系和几何不变体系两类。图 2-1a 所示铰接四边形 $ABCD$ 是一个四链杆机构,其几何形状和位置是不稳固的,随时处在可变状态,甚至倾倒,这样的体系称为几何可变体系。图 2-1b 所示体系与

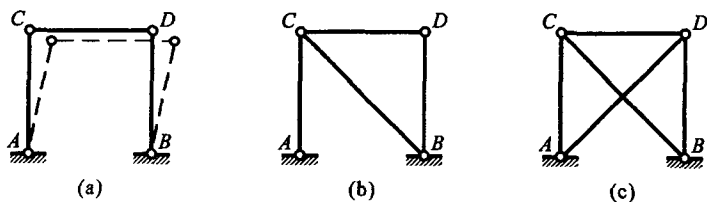


图 2-1