

结构力学

阳 日 主编

阳 日 郑荣跃 阮澍铭 刘寿梅 编



教育科学“十五”国家规划课题研究成果



高等教育出版社

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

结 构 力 学

阳 日 主编

阳 日 郑荣跃 阮澍铭 刘寿梅 编

高等教育出版社

内容提要

本书是教育科学“十五”国家规划课题研究成果之一。

本书内容包括绪论、平面体系的几何组成分析、静定结构计算、结构位移计算、力法、位移法、影响线及其应用、矩阵位移法、结构的动力计算及结构稳定计算 10 章。书后附有光盘,包括多媒体学习辅助课件和结构力学计算程序包两部分,结构力学计算程序包含有 8 个计算程序,能够计算结构力学中遇到的绝大多数问题。该光盘可供学生学习结构力学时使用,也可供工程技术人员在实际工程计算中使用。

本书具有内容安排适应面宽,理论叙述深入浅出,例题分析简明易懂,习题选择针对性强等特点。

本书可作为土木、交通、水利各专业本科学生的教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学/阳日主编. —北京:高等教育出版社,

2005.5

ISBN 7-04-014482-4

I. 结… II. 阳… III. 结构力学 - 高等

学校 - 教材 IV. O342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 010151 号

策划编辑	黄毅	责任编辑	张玉海	封面设计	于涛
责任绘图	朱静	版式设计	张岚	责任校对	王效珍
责任印制	杨明				

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总机 010-58581000
经销 北京蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 北京北苑印刷有限责任公司

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>

开本 787×960 1/16
印张 26
字数 480 000

版次 2005 年 5 月第 1 版
印次 2005 年 5 月第 1 次印刷
定价 37.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 14482-00

总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要,满足我国高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培养体系,全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,组织全国100余所以培养应用型人才为主的高等院校,进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索,在高等院校应用型人才的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果,并在高等教育出版社的支持和配合下,推出了一批适应应用型人才需要的立体化教材,冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月,教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项,为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台,整体设计立项研究计划,明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式,分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现,组建了“21世纪中国高等学校应用型人才体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后,教研中心组织了首批课题立项申报,有63所高校申报了近450项课题。2003年1月,在黑龙江工程学院进行了项目评审,经过课题领导小组严格的把关,确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月,各子课题相继召开了工作会议,交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题,确定了项目分工,并全面开始研究工作。计划先集中力量,用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和在做研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是,“21世纪中国高等学校应用型人才体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才探索与实践成果基础上,紧密结合经济全球化时代高校应用型人才工作的实际需要,努力实践,大胆创新,采取边研究、边探索、边实践的方式,推进高校应用型人才本科人才培养工作,突出重点目标,并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础,作为体现教学内容和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才体系需要的教材体系已成为当前我国

高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。目前,教材建设工作存在的问题不容忽视,适用于应用型人才培养的优秀教材还较少,大部分国家级教材对一般院校,尤其是新办本科院校来说,起点较高,难度较大,内容较多,难以适应一般院校的教学需要。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才培养的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部即将启动的“高等学校教学质量和教学改革工程”的实施,具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

前 言

近年来,随着我国高等教育的发展,积极培养面向经济建设主战场的应用型人才已成为很多高等学校的教学培养目标,为这些应用型本科学生提供合适的教材是当前需要解决的问题。

由于计算机的普及应用,结构力学计算方法已经发生了变化,但结构力学的基本概念和基本理论并未改变。由于专业口径的扩大,结构力学的讲授内容应从强调结合专业特点转变为强调具有普遍意义的基本概念、基本理论和基本方法的学习和掌握;对学生的计算能力的培养也有了不同的侧重,从过去强调手算能力的培养,转变为在熟练掌握基本概念的基础上运用计算机解决结构力学计算问题能力的培养。

本书面向土木、交通、水利等不同专业的要求,更强调了结构力学的基本理论知识掌握和运用能力的提高,并力争具有理论叙述深入浅出,内容选取适应面宽,例题分析简明易懂,习题选择针对性强的特色。总之,希望能够使学生完成结构力学的学习,且能掌握其基本理论知识和具备一定的计算能力。

本书按《结构力学课程教学基本要求》(多学时)将内容划分为基础部分和专题部分。其中,第1章至第7章是结构力学的基础部分,第8章至第10章是结构力学的专题部分。

本书按110学时编写,不同专业可选择其中的内容学习。带*号的内容为进一步扩大知识面的内容。

书后附有光盘,包括多媒体学习辅助课件和结构力学计算程序包两部分,结构力学计算程序包含有8个计算程序,能够计算结构力学中遇到的绝大多数问题。该光盘可供学生学习结构力学时使用,也可供工程技术人员在实际工程计算中使用。

本书由阳日主编,编写分工如下:第1、2章和第9章由阮澍铭编写,第3、4章由阳日编写,第5章由刘寿梅编写,第6、7章和第10章由郑荣跃编写,第8章由阳日和郑荣跃共同编写。书后光盘中的多媒体课件由阮澍铭编制,结构力学计算程序包由阳日编制。

本书承蒙郑州大学寿楠椿教授和西安建筑科技大学刘铮教授精心审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢!

限于编者水平,书中不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2004年1月

E-mail:riyang@gxu.edu.cn

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 结构力学研究的对象及任务	1
§ 1.2 结构的计算简图及简化要点	2
§ 1.3 结构的分类	7
§ 1.4 荷载的分类	8
第 2 章 平面体系的几何组成分析	10
§ 2.1 概述	10
§ 2.2 平面体系的自由度	11
§ 2.3 平面体系的几何组成分析	16
§ 2.4 瞬变体系的概念	19
§ 2.5 几何组成分析的步骤和举例	21
小结	25
思考题	26
习题	27
第 3 章 静定结构计算	31
§ 3.1 静定梁的计算	31
§ 3.2 静定平面刚架的计算	42
§ 3.3 三铰拱的计算	48
§ 3.4 静定平面桁架的计算	56
§ 3.5 组合结构的计算	65
§ 3.6 静定结构的特性	67
小结	71
思考题	72
习题	73
第 4 章 结构位移计算	78
§ 4.1 概述	78
§ 4.2 外力在弹性体位移上所作的功	79
§ 4.3 内力功的概念	81
§ 4.4 变形体的虚功原理	82
§ 4.5 荷载作用下的位移计算公式	84

§ 4.6	图乘法	90
§ 4.7	温度变化、支座移动引起的位移计算	99
§ 4.8	线弹性体系的互等定理	104
	小结	107
	思考题	108
	习题	109
第 5	章 力法	114
§ 5.1	概述	114
§ 5.2	超静定次数的确定	115
§ 5.3	力法的基本原理及力法典型方程	117
§ 5.4	支座移动和温度变化作用下超静定结构的计算	138
§ 5.5	超静定结构位移计算和最后内力图校核	144
§ 5.6	超静定拱的计算	146
	小结	155
	思考题	156
	习题	157
第 6	章 位移法	161
§ 6.1	基本概念	161
§ 6.2	位移法基本未知量数目的确定	166
§ 6.3	位移法的基本体系和典型方程式	168
§ 6.4	位移法计算步骤及举例	175
§ 6.5	等截面直杆的转角位移方程	183
§ 6.6	考虑结点和截面平衡建立位移法方程	185
§ 6.7	对称结构计算的简化	187
§ 6.8	力矩分配法计算连续梁	191
§ 6.9	超静定结构的特性	199
	小结	200
	思考题	201
	习题	202
第 7	章 影响线及其应用	205
§ 7.1	影响线的基本概念	205
§ 7.2	静力法作静定梁的影响线	206
§ 7.3	静力法作间接荷载作用下静定梁的影响线	212
§ 7.4	静力法作平面桁架的影响线	214
§ 7.5	机动法作梁的影响线	218

§ 7.6	影响线的应用	223
§ 7.7	简支梁的绝对最大弯矩和梁的内力包络图	229
小结	.....	237
思考题	.....	237
习题	.....	238
第 8 章	矩阵位移法	242
§ 8.1	基本概念	242
§ 8.2	单元刚度方程和单元刚度矩阵	245
§ 8.3	单元刚度矩阵的坐标变换	249
§ 8.4	结构刚度方程和整体刚度矩阵	253
§ 8.5	杆端力的计算	262
§ 8.6	先处理法引进支座条件并集成总刚度矩阵	270
§ 8.7	平面桁架计算程序设计	278
小结	.....	288
思考题	.....	291
习题	.....	292
第 9 章	结构的动力计算	295
§ 9.1	基本概念	295
§ 9.2	单自由度体系的自由振动	301
§ 9.3	单自由度体系的强迫振动	311
§ 9.4	多自由度体系的自由振动	325
§ 9.5	多自由度体系的强迫振动	347
§ 9.6	计算频率的近似方法——能量法	352
小结	.....	355
思考题	.....	356
习题	.....	357
第 10 章	结构稳定计算	363
§ 10.1	基本概念	363
§ 10.2	弹性压杆的稳定——静力法	366
§ 10.3	弹性压杆的稳定——能量法	373
小结	.....	378
思考题	.....	379
习题	.....	379
部分习题答案	.....	382
附录一	汉英名词对照表	387

第 1 章

绪 论

§ 1.1 结构力学研究的对象及任务

土木工程中的各类建筑物和构筑物,如房屋、桥梁、水坝、钻井平台、隧道、电视塔等,在使用过程中,都要承受各种荷载(如风、雪、设备、人群、车辆、水压力、土压力等)的作用。在建筑物和构筑物中承受、传递荷载而起骨架作用的部分称为工程结构,简称为结构。结构的类型是多种多样的,大致可分为下述几类:

(1) 杆件结构:由杆件组成的结构,杆件的几何特征是横截面尺寸比长度小很多。如:梁、拱、桁架、刚架。

(2) 板壳结构:结构的厚度比长度和宽度小得多。如:楼板、壳体屋盖、薄拱坝等。

(3) 实体结构:长、宽、厚三个方向尺寸相当,如:重力坝、挡土墙等。

在建筑工程领域内,杆件结构是应用最多、使用最广泛的一种结构形式。

结构力学与理论力学、材料力学、弹性力学有着密切的联系。理论力学着重研究质点和刚体的运动,不考虑物体本身的变形。它是材料力学、结构力学和弹性力学的基础。结构力学、材料力学和弹性力学的任务基本相同,但在研究对象和侧重面上有所区别。材料力学只研究单根杆件的内力和位移,解决单根杆的强度、刚度和稳定性问题;结构力学是着重研究杆系结构的应力和变形,解决杆系结构的强度、刚度、稳定性和动力反应等问题;弹性力学则以实体结构和板壳结构为主要研究对象。

结构力学的主要任务是:

(1) 讨论结构的组成规律和合理形式,确定结构的计算简图。

(2) 讨论结构内力和位移的计算方法,以进行结构的强度和刚度验算。

(3) 讨论结构的稳定性以及在动力荷载作用下的响应。

结构力学的研究手段包括理论分析、实验研究和数值计算三方面。在结构力学理论分析中,首先把实际结构简化成计算简图,再对计算简图进行计算。结构力学的计算方法很多,但所有方法都要考虑下列三方面的条件:

(1) 力系的平衡条件或运动条件。

(2) 变形的几何连续条件。

(3) 应力与变形间的物理条件(或称为本构方程)。

把这三个条件根据不同的具体情况结合起来就可以得出不同的计算方法。

虽然,结构力学的分析方法主要是针对杆件结构,但是在板壳分析和块体的分析中有时也会引用结构力学的分析方法。

§ 1.2 结构的计算简图及简化要点

实际结构一般都很复杂,完全按照结构的实际情况进行力学分析,是不可能的,也是不必要的。对实际结构进行力学计算时,需要作出一些简化和假设,略去某些次要因素,保留其主要受力特征,从而使计算切实可行。这种把实际结构作适当简化,用力学分析的一个简化图形来代替实际结构的图形,称为结构的计算简图或结构计算模型。

选择计算简图的原则是:

(1) 从实际出发,计算简图要反映结构的主要受力特征;

(2) 分清主次,略去细节,计算简图要便于计算。

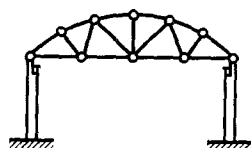
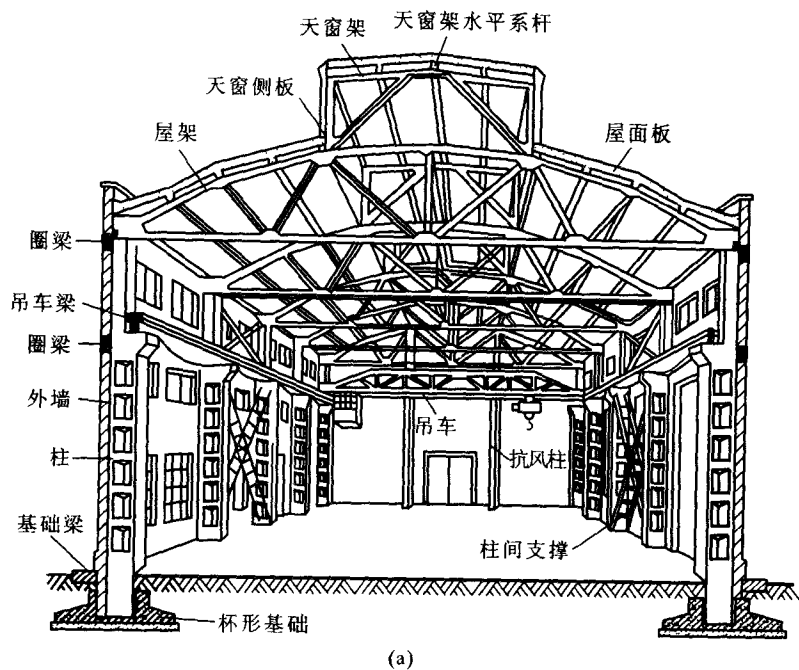
选择计算简图时,主要从多个方面对实际结构进行简化。下面通过举例具体说明杆件结构的计算简图的选取方法。

1. 结构体系的简化

在杆件结构中,根据杆件轴线和荷载作用线在空间所处的位置,可划分为平面结构和空间结构。当结构所有杆件的轴线和荷载作用线都处在同一平面内时,称它为平面结构;否则就称为空间结构。一般结构实际上都是空间结构,各部分相互连接成为一个空间整体,以承受各个方向可能出现的荷载。但多数情况下,可以忽略一些次要的空间约束,将实际空间结构分解为平面结构。

图 1.1a 是比较典型的钢筋混凝土的单层工业厂房。从整体上看,该厂房是一个空间结构。但仔细分析其构造可以看出,它是由一榀一榀的排架,通过排架间的联系梁连接而成的。它的主要承重结构包括四个部分,大型屋面板、折线型屋架、阶梯形变截面柱和杯形基础。其中,大型屋面板的两端搁置(焊牢)在屋架的上弦杆上面,屋面荷载通过大型屋面板传给屋架,屋架两端分别与两边柱子的顶端相连(焊牢或用螺栓连接),柱子的下端则插入基础杯口内且被固定。屋架、柱子、基础所构成的排架是一个完整的几何不变的平面体。承受的主要荷载(屋面荷载及风荷载)都在这一平面内。因此,可将此单层工业厂房简化成图 1.1b 所示的计算简图,即排架的计算简图。

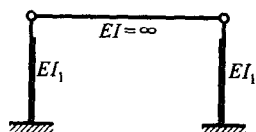
由于屋架实际上起着双重作用:一方面,它把大型屋面板传来的荷载,传递到两边柱子的顶端节点上;另一方面,它又把两边柱子的顶端连接起来,从而使



(b)



(c)

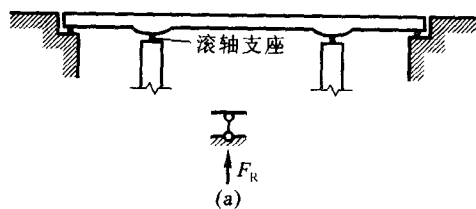


(d)

图 1.1

两边柱子能协同工作。因此,为了计算方便,常把这两部分分开计算,其计算简图如图 1.1c 和 1.1d 所示。

图 1.2a 所示为一梁式桥,可简化为图 1.2b 所示三跨连续梁。



(b)

图 1.2

图 1.3a 所示的上承式拱桥,可简化成图 1.3b 所示的无铰拱。

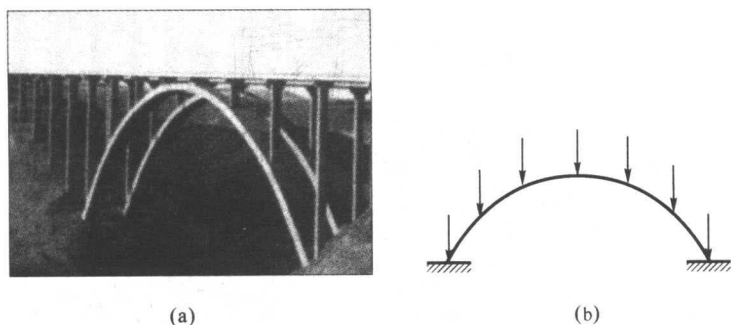


图 1.3

2. 杆件的简化

由于杆件的截面尺寸通常比杆件长度小得多,因此在计算简图中,可用轴线代替实际杆件。但是,当截面尺寸较大时,再把杆件简化为一条轴线,则将会引起较大的误差。

3. 杆件间连接的简化

杆件间的连接处可简化为结点。结点通常可简化为下面的几种理想情形:

(1) 铰结点:被连接的杆件在连接处不能相对移动,但可以相对转动。图 1.4 所示为铰结点,铰结点各杆件之间可传递力,但不能传递弯矩。钢结构的结点常可简化为铰结点。



图 1.4

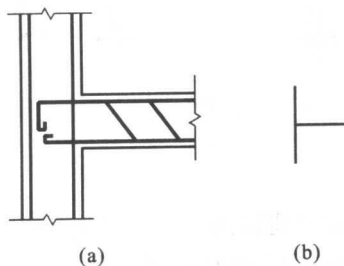


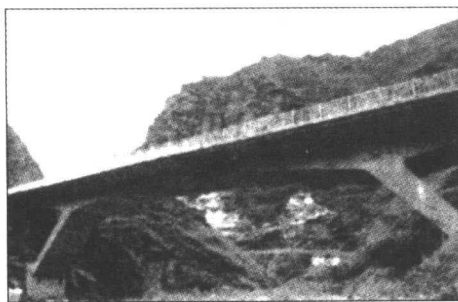
图 1.5

(2) 刚结点:被连接的杆件在连接处不能相对移动,也不能相对转动,各杆件之间可通过刚结点传递力,也可以传递弯矩。现浇钢筋混凝土结点通常属于这类结点(图 1.5)。

图 1.6a 所示的刚架桥,其横梁与斜撑之间的连接即为刚结点,结构计算简图如图 1.6b 所示。

(3) 组合结点:同一结点处,有些杆件为刚结,有些则为铰接(图 1.7)。

4. 结构支座的简化



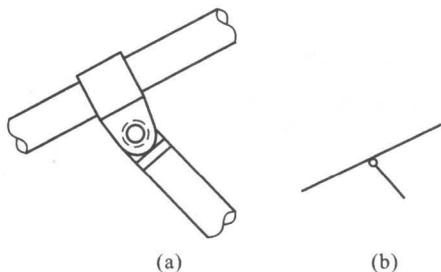
(a)



(b)

图 1.6

(1) 滚轴支座:被支承的部分可以水平移动和转动,不能竖向移动,具有竖向支座反力 F_y ,又称为活动铰支座。在计算简图中用一根支杆表示。图 1.2a 所示桥的中间支座就可简化为活动铰支座。



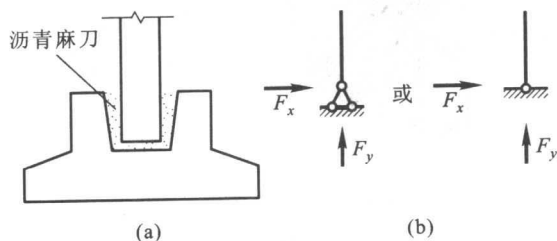
(a)

(b)

图 1.7

(2) 固定铰支座:当支座只能约束构件的移动而不能约束其转动时就属于此类支座。

图 1.8a 所示为一杯形基础,当柱插入基础杯口深度不大,并在两者之间填入的充填物又比较柔软时,柱可绕基础发生微小相对转动,但不能有任何移动。这样的柱与基础的连接即可简化为固定铰支座,其计算简图如图 1.8b 所示,有



(a)

(b)

图 1.8

两个支座反力 F_x 、 F_y 。图 1.9a、b 所示的屋架与柱的连接也可简化为固定铰支座。

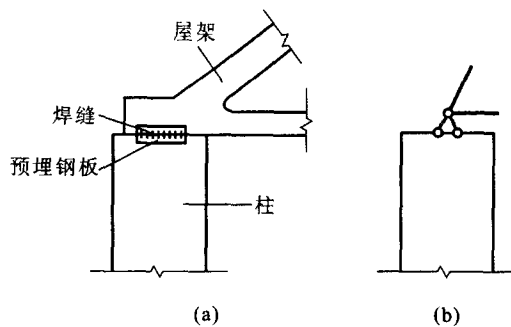


图 1.9

(3) 定向支座:被支承的部分不能转动,但可沿一个方向移动,这样的支座能提供支座反力矩 M 和一个反力 F_y (图 1.10)。

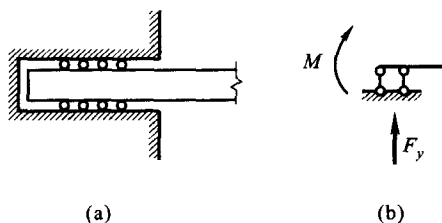


图 1.10

(4) 固定支座:被支承的构件完全被固定,不能有任何移动和转动。能提供两个方向的支座反力 F_x 、 F_y 和一个支座反力矩 M ,共三个支座反力分量(图 1.11)。

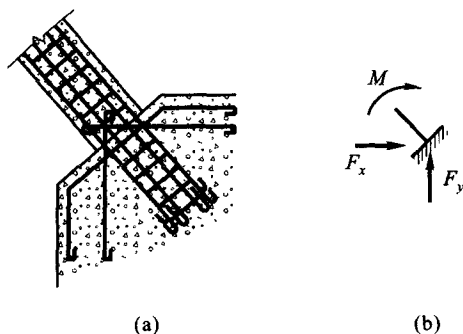


图 1.11

对于杯式基础,当柱插入基础杯口较深,并在两者之间用刚性材料填缝时,柱与基础之间不能发生位移,这样的连接便可简化为固定支座(图 1.12)。

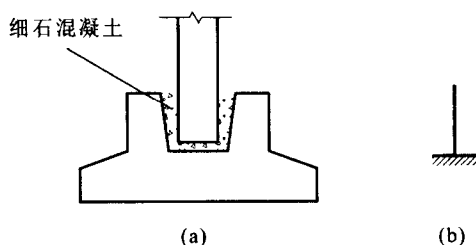


图 1.12

5. 材料性质的简化

实际工程中的材料常常是不均匀的,也不符合线弹性的假设。在结构计算中,为了计算的简化,对组成各构件的材料一般都假设为连续的、均匀的、各向同性的、线弹性或理想弹塑性的。

6. 荷载的简化

结构承受的荷载可分为体积力和表面力两大类。体积力指的是结构的自重和惯性力等;表面力则是由其他物体通过接触面而传给结构的作用力,如土压力、车轮的压力等。在杆件结构中把杆件简化为轴线,因此不管是体积力还是表面力都可以简化为作用在杆件轴线上的力。荷载按其分布情况可以化分为集中荷载和分布荷载。

§ 1.3 结构的分类

在结构力学中主要讨论由杆件构成的结构,称为杆件结构。杆件结构也是工程中最常见的结构,杆件结构通常可分为如下几种类型:

(1) 梁:在竖向荷载作用下不产生水平推力,其轴线通常为直线(有时也为曲线),变形以弯曲变形为主。梁可以是单跨或多跨的(图 1.13 和图 1.2b)。



图 1.13

图 1.14

(2) 拱:轴线为曲线,其力学特点是在竖向荷载作用下能产生水平推力,故又称为推力结构。图 1.14 所示为三铰拱的计算简图。

(3) 桁架:由多根直杆相互连接而成,且所有结点都是铰结点,其受力特点是各杆只受轴力。图 1.15 所示为一桁架桥的部分计算简图。

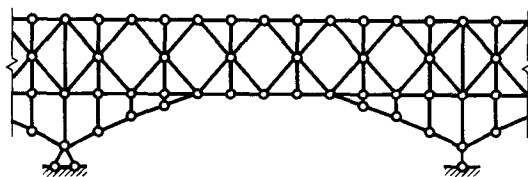


图 1.15

(4) 刚架:一般由直杆组成,结点中主要含有刚结点(图 1.16),各杆均有可能产生弯矩、剪力和轴力,但主要以受弯为主。

(5) 组合结构:由多根杆件组成,其中含有组合结点,各杆中有以承受弯矩为主的杆件,也有只承受轴力的构件(图 1.17)。

在实际工程中除杆件结构外还有悬索结构、板壳结构、薄膜结构和实体结构等。这些结构的计算方法将在相关的课程中讨论。

结构除按外型和构造不同来划分之外,还可按计算特点划分:

(1) 静定结构:结构在任意荷载作用下,其支座反力和内力可由平衡条件唯一确定。

(2) 超静定结构:结构在任意荷载作用下,其支座反力和内力由平衡条件不能唯一确定,而必须同时考虑变形条件才能唯一确定。

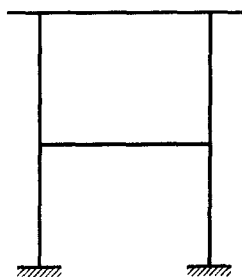


图 1.16



图 1.17

§ 1.4 荷载的分类

荷载是主动作用于结构上的外力(集中力和分布力)。例如,结构的自重,加于结构的水压力、土压力、风载等。广义的荷载还包括使结构产生内力的其他因素,如地震、温度变化、基础沉降、材料收缩等。这些因素又称为对结构的作用。对结构进行计算以前,须先确定结构所受的作用或荷载。荷载可以根据不同特征进行分类。