

土木工程专业系列教材

● 贾影 主编



土木工程力学 (本)

 中央广播电视大学出版社

土木工程专业系列教材

土木工程力学（本）

贾 影 主编

中央广播电视大学出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程力学: 本科 / 贾影主编. —北京: 中央广播电视大学出版社, 2008. 5

(土木工程专业系列教材)

ISBN 978 - 7 - 304 - 04089 - 5

I. 土… II. 贾… III. 土木工程 - 工程力学 - 高等学校 - 教材 IV. TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 081059 号

版权所有, 翻印必究。

土木工程专业系列教材

土木工程力学 (本)

贾影 主编

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 发行部 010 - 58840200

总编室 010 - 68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号 邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

策划编辑: 何勇军

版式设计: 袁鹏

责任编辑: 申敏

责任校对: 王亚

责任印制: 赵联生

印刷: 北京集惠印刷有限责任公司

印数: 0001 ~ 6000

版本: 2008 年 6 月第 1 版

2008 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 19 字数: 421 千字

书号: ISBN 978 - 7 - 304 - 04089 - 5

定价: 25.00 元

(如有缺页或倒装, 本社负责退换)

前 言

本书是根据中央广播电视大学开放教育土木工程专业土木工程力学(本)教学大纲编写的教材。全书共分9章,主要讲述静定结构分析的方法,超静定结构分析的方法(力法、位移法和力矩分配法),影响线的绘制,结构动力计算等内容。

本书突出基本理论、基本方法的掌握和应用,为便于自学,每章都附有学习要求、学习重点、小结、思考题和习题。

本书由北京交通大学贾影教授、沈阳建筑大学宋岩升讲师、中央广播电视大学陈丽讲师编写。贾影担任本书主编。具体分工为:贾影编写第2,7,9章,宋岩升编写第1,3,4,8章,陈丽编写第5,6章。

本书由清华大学包世华教授、北京交通大学石志飞教授和北京建筑工程学院涂令康教授审定,包世华教授任主审。审定专家对本教材提出了许多指导性建议和具体的修改意见。本书编写过程中参考了国内同行的著作和教材,在此一并致谢。

由于编者水平所限,书中有错误和疏漏在所难免,诚恳地希望读者对本书提出批评指正意见,以便今后改进。

编 者

2008年4月

目 录

1	绪 论	(1)
1.1	土木工程力学的研究对象和任务	(1)
1.2	结构的计算简图	(3)
1.3	杆件结构的分类	(9)
1.4	荷载的分类	(11)
	小 结	(12)
	思考题	(13)
	习 题	(13)
2	平面体系的几何组成分析	(15)
2.1	概 述	(15)
2.2	基本概念	(16)
2.3	平面体系的简单组成规则	(20)
2.4	例题分析	(23)
2.5	平面体系的几何组成性质与静力特性的关系	(26)
	小 结	(28)
	思考题	(28)
	习 题	(29)
3	静定结构的受力分析	(31)
3.1	概 述	(31)
3.2	静定梁	(49)
3.3	静定刚架	(59)
3.4	静定平面桁架	(67)

3.5 静定组合结构	(81)
3.6 静定拱结构	(84)
小 结	(92)
思考题	(93)
习 题	(94)
4 静定结构的位移计算	(97)
4.1 概 述	(97)
4.2 变形体体系的虚功原理	(99)
4.3 静定结构位移计算的一般公式及单位荷载法	(106)
4.4 静定结构在荷载作用下的位移计算	(109)
4.5 图乘法	(115)
4.6 静定结构在非荷载因素作用下的位移计算	(122)
4.7 线弹性结构的互等定理	(126)
4.8 静定结构的一般性质	(129)
小 结	(133)
思考题	(133)
习 题	(134)
5 力 法	(137)
5.1 概 述	(137)
5.2 力法的基本概念	(139)
5.3 力法计算超静定结构	(145)
5.4 对称性的利用	(160)
5.5 温度改变时超静定结构的计算	(167)
5.6 支座发生位移时超静定结构的计算	(169)
5.7 超静定结构的基本特性	(170)
小 结	(171)
思考题	(172)
习 题	(172)

6 位移法	(178)
6.1 概 述	(178)
6.2 等截面直杆的转角位移方程	(180)
6.3 位移法的基本概念	(185)
6.4 位移法的典型方程	(188)
6.5 计算示例	(191)
6.6 对称性的利用	(199)
6.7 用直接平衡法建立位移法方程	(201)
6.8 位移法与力法的比较	(202)
小 结	(203)
思考题	(204)
习 题	(204)
7 力矩分配法	(209)
7.1 概 述	(209)
7.2 力矩分配法的基本概念	(210)
7.3 力矩分配法计算连续梁	(213)
7.4 力矩分配法计算无结点线位移的刚架	(222)
小 结	(225)
思考题	(226)
习 题	(226)
8 影响线及其应用	(229)
8.1 概 述	(229)
8.2 影响线的概念	(230)
8.3 静力法作单跨静定梁的影响线	(233)
8.4 机动法作静定梁的影响线	(243)
8.5 间接荷载作用下单跨静定梁的影响线	(249)
8.6 影响线的应用	(252)
小 结	(258)
思考题	(259)

习 题	(259)
9 结构动力计算	(263)
9.1 概 述	(263)
9.2 单自由度体系的自由振动	(267)
9.3 简谐荷载作用下单自由度体系的受迫振动	(272)
9.4 阻尼对振动的影响	(278)
9.5 两个自由度体系的自由振动	(284)
小 结	(291)
思考题	(291)
习 题	(292)
参考文献	(294)

1 绪 论

学习要求

1. 了解土木工程力学的基本研究对象和任务。
2. 了解结构计算简图的概念和简化要点,掌握结构体系中常见结点和支座的形式及其受力特点。
3. 了解平面杆件结构的分类。
4. 了解荷载的分类。

学习重点

1. 土木工程力学的基本研究对象和任务。
2. 结构计算简图的简化内容以及常见结点和支座的形式及其受力特点。
3. 平面杆件结构的分类。
4. 荷载的分类。

1.1 土木工程力学的研究对象和任务

力学既属于自然科学,也属于工程技术科学,土木工程是应用力学知识最多的工程领域之一,力学与土木工程的一个结合点就是结构分析。土木工程力学是结构分析的重要理论基础。

土木工程中利用建筑材料按照一定的结构形式建成的、能够承受和传递荷载而起到骨架作用的构筑物称为工程结构,简称结构。例如,房屋建筑中由梁、柱、板(包括楼板和屋面板)和基础等构件组成的体系,水工建筑中的水坝和闸门,公路和铁路上的桥梁和隧道

等,都是典型的工程结构。

工程结构的受力特点与其几何特征密切相关。从几何角度看,结构通常可以分为3类,即杆件结构、板壳结构和实体结构,各类结构的几何特征和实例详见表1-1。

表1-1 结构的分类

结构名称	几何特征	实例
杆件结构	通常由若干根杆件相互连接组成。杆件的几何特征是其长度远大于横截面上两个方向的尺度	梁、刚架、桁架、拱等
板壳结构 (薄壁结构)	厚度远小于其长度和宽度。外形为平面称为薄板,外形为曲面则称为薄壳	房屋建筑中的屋面板、楼板、壳体屋盖等
实体结构	长、宽、高3个方向尺度大小相近(属于同一数量级)	重力坝、重力式挡土墙、墩台、块状基础等

土木工程力学的主要研究对象是杆件结构。

力学和数学是工程科学的基础,土木工程力学作为土木工程类专业一门重要的专业基础课,其先修课程为高等数学、建筑力学,后继课程包括弹性力学、塑性力学等。建筑力学中的理论力学着重研究刚体机械运动的基本规律;材料力学则侧重研究单根杆件的强度、刚度、稳定性和动力反应的计算;土木工程力学借助力学基本原理和方法研究杆件结构的强度、刚度、稳定性和动力响应等内容;而弹性力学、塑性力学则可以对板壳结构和实体结构的应力、变形、稳定性和动力响应等内容进行深入分析。

土木工程力学的研究任务是探讨结构的合理组成形式,根据力学基本原理,分析在外界因素作用下结构的强度、刚度、稳定性和动力反应等方面的规律,以满足结构设计安全、适用、经济的要求。具体说来,其研究任务包括以下几个方面:

(1) 研究结构的组成规律和合理形式。

(2) 研究在外界因素作用下结构内力、变形的计算方法,以满足结构设计中强度、刚度方面的要求。

(3) 研究影响线及其应用。

(4) 研究结构动力反应的计算方法。

土木工程力学的计算方法很多,但都要考虑以下3个条件:

(1) 力系平衡条件。

(2) 变形连续条件,即几何条件。

(3) 物理条件。

力学作为一门自然科学,其应用性和基础性同样鲜明。19世纪前期,生产力迅猛发展,工业建筑大量兴建,提出了相对复杂的结构计算问题,桁架、连续梁的分析理论由此形成。

19世纪中叶,土木工程力学从力学体系中独立出来,形成自己的知识体系。19世纪后期,随着钢结构的广泛应用,结构分析成为结构设计的必要步骤。由此,结构位移计算、简单超静定结构的计算理论形成。20世纪初期,钢筋混凝土结构广泛应用于各类建筑,刚架等新结构形式随之出现,位移法、力矩分配法等计算方法相继出现。20世纪中期以后,考虑塑性的结构分析方法、结构稳定理论、结构动力计算理论得到较大发展,以计算机为工具的有限单元法与结构分析相结合,使得结构设计更加安全、经济、合理。近年来,力学基本原理和方法与现代计算机技术日益紧密的结合,在给传统土木工程力学研究对象、内容、理论、计算模型、计算方法、计算工具等方面带来深刻变革的同时,也提出了诸如计算结构力学等新的研究方向,使得相关研究得到进一步的发展。

土木工程力学是一门系统性强,培养锻炼个人分析能力、计算能力、判断能力和自学能力的课程。“一听就懂、一看就会、一做就错”是初学者普遍存在的问题。在学习土木工程力学课程的过程中,作者提出以下几点建议供参考:

(1) 及时复习建筑力学中相关的基本概念和方法,做到概念清晰,方法明确。

(2) 弄清基于平衡条件、几何条件、物理条件的各种计算方法的基本原理,了解各种方法分析问题的一般过程。土木工程力学是一个完整的知识体系,各种方法之间存在着内在的、必然的联系,学习过程中要用普遍联系的观点分析问题,用发展的眼光学习知识,切不可“只见树木,不见森林”。

(3) 做一定数量的习题,借此深入理解相关概念、原理和方法,培养计算能力,保证学习效果,但也不能埋头做题,贪多求快、不求甚解。练习过程中更重要的是要举一反三、勤于思考、善于总结,明确“问题的实质是什么?”“解决问题的方法有哪些?”“最简捷的途径是什么?”

(4) 在计算过程中逐步摸索、总结适合自己的分析计算方法和技巧,提高计算效率。在此基础上培养、训练基于基本方法和计算的定性分析能力,强化基于基本概念直观判断。定性分析是土木工程力学基础理论和计算方法在工程实际中的灵活应用,是理论知识的抽象和提高,对应用土木工程力学解决实际问题有更直接的现实意义。

1.2 结构的计算简图

1.2.1 计算简图的概念及其选取的原则

实际的工程结构往往是由多种基本结构形式组合而成的,受力状况比较复杂。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。因此,进行力学计算以前,必须对实际结构加以简化,用一个简化的模型来代替实际结构,这个代替实际结构的简化计算图形就称为结构的计算简图。

结构分析的对象是计算简图。因此,计算简图的选取是结构分析的基础。计算简图的选取应遵循以下主要原则:

- (1) “分清主次”,力求反映实际结构的主要力学特征,使计算结果精确可靠。
- (2) “抓主略次”,在满足精度要求的前提下,力求计算简便。

实际工作中,应该综合考虑结构的重要性、所处的设计阶段、计算问题的性质以及选用的计算工具等多方面因素来选取适当的计算简图。

1.2.2 计算简图的简化要点

1. 结构体系的简化

实际结构承受各个方向的外部作用,属于空间结构。但在多数情况下常常可以忽略一些次要空间约束的作用,或将其转化到平面内,从而将实际空间结构简化为平面结构。这样,计算过程将变得相对简单,而分析结果也能满足要求。

2. 杆件的简化

根据杆件几何特征和受力特点,在计算简图中均用其轴线表示杆件。杆件的计算长度一般由其两端结点间的距离确定或参照相关设计规范选定。

3. 结点的简化

结构中杆件之间相互连接处称为结点。结点通常简化为以下3种类型:

(1) 铰结点

理想铰结点的特征是所连接的杆件在结点处不能相对移动,但各杆可绕铰自由转动。铰结点可以承受和传递力,但不能承受和传递力矩。这种理想情况,实际结构中是很难遇到的。木屋架的结点、木材之间的榫卯连接都比较接近铰结点,如图1-1所示。



图1-1 铰结点

(2) 刚结点

刚结点的特征是所连接的杆件在结点处既不能相对移动,也不能相对转动。当结构发生变形时,结点处各杆端之间的夹角始终保持不变。刚结点不仅能承受和传递力,而且能承受和传递力矩。现浇钢筋混凝土框架梁柱结点通常简化为刚结点,如图1-2所示。

(3) 组合结点

组合结点是铰结点和刚结点的组合形式,也称为半铰结点,其特征是所连接的杆件在结

点处不能发生相对移动，其中一部分杆件为刚结，各杆端不能相对转动，而其余杆件为铰结，可以绕结点转动，如图 1-3 所示。

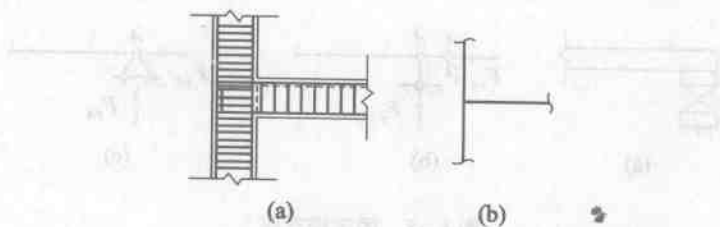


图 1-2 刚结点

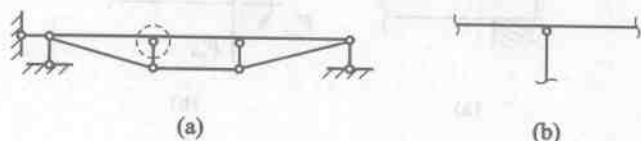


图 1-3 组合结点

4. 支座的简化

结构与基础或其他支承物连接的部分称为支座。结构或构件所承受的荷载将通过支座传递给基础或其他构件，支座对结构或构件的反作用力称为支座反力。对结构进行受力分析时往往要先求出支座反力，此时，必须明确不同类型支座的反力性质和数量。

支座通常简化为以下 4 种形式：

(1) 活动铰支座

活动铰支座只约束支承链杆方向的位移，允许结构绕铰 A 转动，也可以沿着垂直于链杆的方向移动，如图 1-4 (a) 所示。在计算简图中可以用一根垂直于支承平面的链杆表示，如图 1-4 (b) 所示。活动铰支座只提供沿着链杆轴线方向的反力 F_{yA} 。

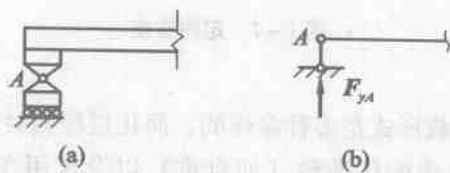


图 1-4 活动铰支座

(2) 固定铰支座

固定铰支座只允许结构在支承处绕铰 A 转动，而不能发生任何移动，如图 1-5 (a) 所示。在计算简图中可用交于 A 点的两根链杆表示，如图 1-5 (b) 或 (c) 所示。固定铰支座提供的反力通常分解为两个正交方向的分力，如 F_{xA} 和 F_{yA} 。

(3) 固定支座

固定支座不允许结构在支承处发生任何方向的移动和转动，如图 1-6 (a) 所示。在计

算简图中可用图 1-6 (b) 所示形式表示。固定支座的反力通常用水平分力 F_{xA} 、竖向分力 F_{yA} 和反力矩 M_A 来表示。

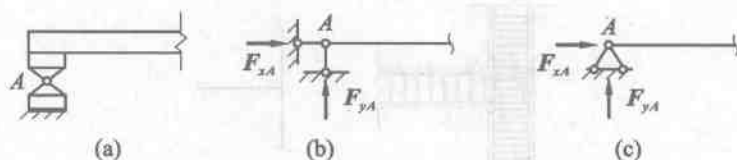


图 1-5 固定铰支座

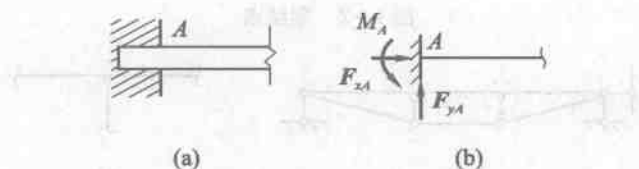


图 1-6 固定支座

(4) 定向支座 (也称滑动支座)

定向支座不允许结构在支承处发生转动,也不能沿垂直于支承的方向移动,但可以沿平行于支承的方向滑动。在计算简图中用垂直于支承平面的两根平行链杆表示,如图 1-7 所示。定向支座提供的反力包括一个沿着平行链杆方向的反力 F_{xA} (或 F_{yA}) 和一个反力矩 M_A 。

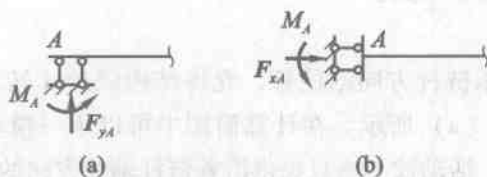


图 1-7 定向支座

5. 荷载的简化

作用在实际结构上的荷载形式是多种多样的,简化过程相对复杂。杆件结构上作用的荷载,一般可分为作用在构件内的体荷载(如自重)以及作用在构件某面积上的面荷载(如风荷载)。在计算简图中,根据其分布情况大致可简化为集中荷载和分布荷载两大类。

例如,对于水平方向的等截面杆,可以将其自重简化为沿杆长均匀分布的荷载;计算水池侧壁受力时,一般取单位长度(如 1 m 宽)的板带,将侧向水压力简化为沿水深方向分布、与深度成正比的线性分布荷载(三角形荷载)等。而对于那些作用面积相对于构件的几何尺寸很小的荷载,可将其简化为集中荷载。如计算工业厂房中的吊车梁时,通过轮子作用在轨道上,进而传递给吊车梁的吊车荷载,由于车轮与轨道接触面积相对于吊车梁长度方向的几何尺寸很小,故可将吊车轮压视为集中荷载。

6. 材料性质的简化

结构和构件的内力、变形等效应与所使用的材料密切相关。土木工程结构所使用的建筑材料通常为混凝土、钢材、砖石砌体等。为使分析的问题得到适当简化，在结构计算过程中，材料一般都假设为连续的、均匀的、各向同性的、理想弹性或弹塑性的。

1.2.3 结构计算简图示例

在工程实际中，只有根据实际结构的主要受力情况去进行抽象和简化，才能得出其计算简图。下面通过一个实例进行具体的分析。

钢筋混凝土框架结构的简化（图中尺寸单位均为 mm），见图 1-8。

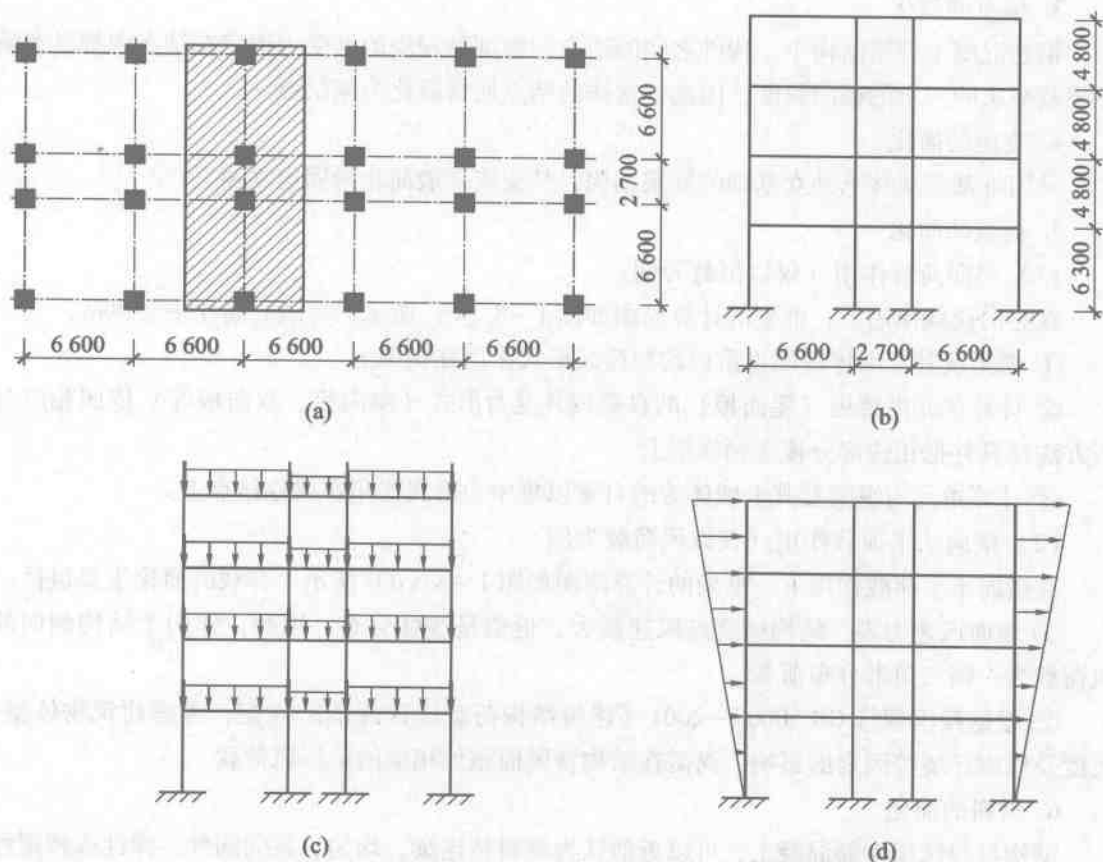


图 1-8 框架结构计算简图

1. 结构体系的简化

钢筋混凝土框架结构是典型的由梁、板、柱和基础等构件组成的空间结构体系。在水平荷载作用下，结构纵向刚度大，横向刚度相对较小。通常选取横向框架进行计算以保证结构

的承载力。另外,除纵向端部外的各榀横向结构的受力和变形情况基本相同。因此,分析过程中可以将整个结构看成是由一组简单横向平面刚架[图1-8(a)中的阴影线部分]沿纵向顺序排列,再由纵梁、楼板(或屋面板)等纵向构件连接组成的空间结构。作用在结构上的荷载一般沿纵向也是均匀分布的。因此,可以从这个空间结构中,取出柱间距中线之间的部分即横向一榀框架作为计算单元。作用在结构上的荷载,则通过纵向构件按一定规则分配到各计算单元平面内。在计算单元中,荷载和杆件轴线都在同一平面内,这样,就把一个空间结构简化成为平面结构,如图1-8(b)所示。

2. 杆件的简化

在计算简图中均用构件的轴线表示真实杆件。杆件的计算长度一般取其两端结点间的距离。

3. 结点的简化

钢筋混凝土框架结构中,构件之间的结点一般都是现浇的且受力钢筋在结点内都具有满足规范要求的一定的锚固长度,因此,这样的结点通常简化为刚结点。

4. 支座的简化

采用桩基础或柱下独立基础的框架结构,其支座一般简化为固定支座。

5. 荷载的简化

(1) 竖向荷载作用(仅以恒载为例)

在竖向荷载作用下,框架的计算简图如图1-8(c)所示。荷载的简化主要包括:

- ① 横梁及其上墙体等的自重以均布荷载形式作用在横梁上。
- ② 计算单元内楼板(屋面板)的自重按其受力形式(单向板、双向板等)依照相应分析方法计算并把相应部分传递到横梁上。
- ③ 计算单元内纵梁及其上墙体等的自重以集中力形式作用在梁柱结点上。

(2) 横向水平荷载作用(仅以风荷载为例)

在横向水平荷载作用下,框架的计算简图如图1-8(d)所示。荷载的简化主要包括:

- ① 地面风速为零,结构最高点风速最大,近似呈线性分布。因此,作用于结构侧向的风荷载为一倒三角形分布荷载。
- ② 根据我国现行GB 50009—2001《建筑结构荷载设计规范》规定,考虑建筑物体型、尺度及周围环境等因素的影响,尚需在结构背风面施加相应的负压风荷载。

6. 材料的简化

结构材料选用钢筋混凝土,可以近似认为材料是连续、均匀、各向同性、弹性或弹塑性的,以方便分析计算,但是不同构件所使用的混凝土强度等级可能是不同的。

计算简图的选择涉及设计、施工、构造等多方面因素,选择的过程重要而复杂,需要相关人员具有较为丰富的实际工程经验,并善于判断各种因素的相对重要性。对于一些大型、复杂、新型的结构形式,往往需要通过多次试验和实践,才能获得比较合理的计算简图。对于常见的结构形式,根据已有的经验,可以直接选取其常用的计算简图。

1.3 杆件结构的分类

土木工程力学的研究对象是杆件结构。所谓杆件结构分类，实际就是对杆件结构计算简图的分类。根据杆件结构的组成和受力特点，杆件结构一般可以分为以下几类。

1. 梁

梁是典型的受弯构件（变形以弯曲变形为主），其轴线通常为直线。除常见的等截面梁外，梁的截面还可以沿轴线方向发生改变，形成连续变截面梁或阶梯形变截面梁。梁的内力有弯矩、剪力和轴力，以弯矩为主。当梁的高跨比较大且承受较大荷载时，梁中剪力可能会很大，这种情况下梁的设计必须考虑剪力的影响。梁的组成形式有单跨梁 [见图 1-9 (a), (b)] 和多跨梁 [见图 1-9 (c), (d)]。

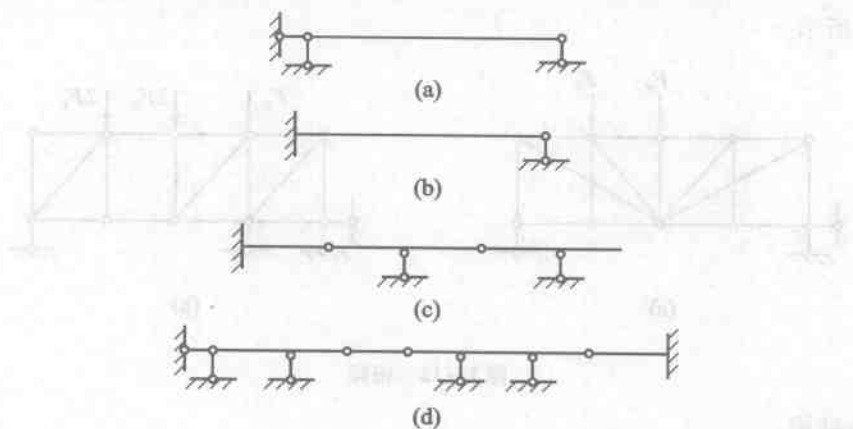


图 1-9 梁

2. 刚架

刚架通常是由梁、柱等直杆组成的结构，杆件间的结点多为刚结点，如图 1-10 所示。刚架中杆件的内力有弯矩、剪力和轴力，以弯矩为主。

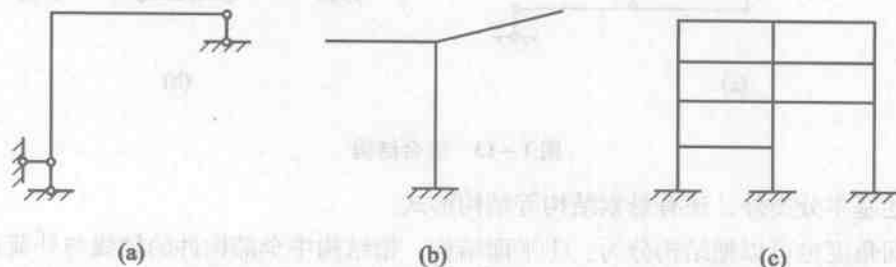


图 1-10 刚架