

普通高校土木工程专业系列精品规划教材
PUTONGGAOXIAOTUMUGONGCHENGZHUYANXILIEJINGPINGUIHUAJIAOCAI



结构力学

JIEGOU LIXUE
JIEGOU LIXUE

◎ 张连英 戴 丽 主编



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

结构力学

主 编 张连英 戴 丽
副主编 马 林 李天珍



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

结构力学/张连英,戴丽主编. —长沙:中南大学出版社,2016. 12
ISBN 978-7-5487-2651-7

I. 结... II. ①张... ②戴... 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(2016)第304566号

结构力学

JIEGOU LIXUE

张连英 戴 丽 主编

☐责任编辑 刘颖维

☐责任印制 易建国

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙印通印刷有限公司

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 15 ☐字数 365千字

☐版 次 2016年12月第1版 ☐印次 2016年12月第1次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2651-7

☐定 价 35.00元

图书出现印装问题,请与经销商调换

总 序

土木工程是促进我国国民经济发展的重要支柱产业。近 30 年来,我国公路、铁路、城市轨道交通等基础设施以及城市建筑进入了高速发展阶段,以高速、重载和超高层为特征的建设工程的安全性、经济性和耐久性等高标准要求向传统的土木工程设计、施工技术提出了严峻挑战。面对新挑战,国内外土木工程行业的设计、施工、养护技术人员和科研工作者在工程实践和科学研究工作中,不断提出创新理念,积极开展基础理论和技术创新,研发了大量的新技术、新材料和新设备,形成了成套设计、施工和养护的新规范和技术手册,并在工程实践中大范围应用。

土木工程行业的发展日新月异,对现代土木工程专业人才培养提出了迫切需求。教材建设和教学内容是人才培养的重要环节。为面向普通高校本科生全面、系统和深入阐述公路、铁路、城市轨道交通以及建筑结构等土木工程领域的基础理论和工程技术成果,由中南大学出版社、中南大学土木工程学院组织国内土木工程领域一批专家学者组成“普通高校土木工程专业系列精品规划教材”编审委员会,共同编写这套系列教材。通过多次研讨,确定了这套土木工程专业系列教材的编写原则:

1. 系统性

本系列教材以《土木工程指导性专业规范》为指导,教材内容满足城乡建设、公路、铁路以及城市轨道交通等领域的建筑工程、桥梁工程、道路工程、铁道工程、隧道与地下工程和土木工程管理等方面的需求。

2. 先进性

本系列教材与 21 世纪土木工程专业人才培养模式的研究成果密切结合,既突出土木工程专业理论知识的传承,又尽可能全面反映土木工程领域的新理论、新技术和新方法,注重各领域内容的充实与更新。

3. 实用性

本系列教材针对“90”后学生的知识与素质特点,以应用型人才培养为目标,注重理论知识与案例分析相结合,传统教学方式与基于现代信息技术的教学手段相结合,重点培养学生的工程实践能力,提高学生的创新素质。这套教材可作为普通高校土木工程专业本科生的课程教材,还可作为其他层次学历教育和短期培训的教材和广大土木工程技术人员的专业参考书。

4. 严谨性

本系列教材的编写出版要求严格按照国家相关规范和标准执行,认真把好编写人员遴选关、教材大纲评审关、教材内容主审关和教材编辑出版关,尽最大努力提高教材编写质量,力求出精品教材。

根据本套系列教材的编写原则,我们邀请了一批长期从事土木工程专业教学的一线教师负责本系列教材的编写工作。但是,由于我们的水平和经验所限,这套教材的编写可能有不尽如人意的地方,敬请读者朋友们不吝赐教。编委会将根据读者意见、土木工程发展趋势和教学手段的提升,对教材进行认真修订,以期保持这套教材的时代性和实用性。

最后,衷心感谢全套教材的参编同仁,由于他们的辛勤劳动,编撰工作才能顺利完成。真诚感谢中南大学校领导、中南大学出版社领导的大力支持和编辑们的辛勤工作,本套教材才能够如期与读者见面。



2016年5月

前 言

结构力学是土木工程专业开设的一门重要的专业基础课程,具有较强的理论性、系统性和实用性。结构力学是研究建筑结构的力学计算理论和方法的依据,也是从事建筑设计和施工的工程技术人员必不可少的理论基础。全书主要内容包括绪论、平面结构体系的几何组成分析、静定梁和静定刚架、三铰拱、静定平面桁架和组合结构、静定结构的影响线、杆件结构的虚功原理和位移计算、力法、位移法、渐近法。掌握结构力学的基本概念、基本原理和分析计算方法,不仅可为后续专业课程作准备,同时也为学生今后从事工程技术工作打下理论基础。

本书在编写过程中,根据高等教育大众化的特点和应用型院校对结构力学的教学要求,遵循高等教育人才培养目标的特点,从学生学习的实际需要出发,对结构力学的内容进行了精简,使教材具有针对性、实用性和适合应用型教育的特色。本书强调基本概念、基本理论和基本方法,重视宏观分析,降低计算难度,突出工程应用。本书插图力求清晰、规范、美观。所有插图均使用 AutoCAD 精心绘制,然后转成 1200 线的 TIF 图插入正文中。叙述深入浅出,通俗易懂,并配有相应的习题及答案,便于教师授课和学生自学。

本书的编写者有徐州工程学院李天珍、马林、张连英、李磊、智友海,南通理工学院戴丽。编写分工如下:张连英编写第 1 章、第 10 章,李天珍编写第 2 章、第 3 章,马林编写第 4 章、第 5 章,李磊编写第 8 章,戴丽编写第 6 章、第 7 章,智友海编写第 9 章。

本书在编写过程中参考了国内外一些优秀教材,选用了其中的部分例题和习题,吸取了它们的长处,在此对相关作者致谢。

教材建设是一项长期的工作,由于编者的水平和时间有限,书中难免存在不少缺点与不妥之处,衷心希望读者批评指正,以便使本书得到充实和完善。

编者
2016 年 8 月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 结构力学的研究对象和内容	(1)
1.1.1 结构的概念及其分类	(1)
1.1.2 结构力学的研究对象	(3)
1.1.3 结构力学的研究内容	(3)
1.2 结构的计算简图	(4)
1.2.1 体系的简化	(4)
1.2.2 杆件的简化	(4)
1.2.3 结点的简化	(4)
1.2.4 支座的简化	(5)
1.2.5 荷载的简化	(7)
1.2.6 结构计算简图简化实例	(7)
1.3 杆件结构的分类	(8)
1.4 荷载的分类	(9)
1.4.1 按荷载作用的范围分类	(9)
1.4.2 按荷载作用的时间分类	(10)
1.4.3 按荷载作用的性质分类	(10)
第2章 平面体系的几何组成分析	(12)
2.1 几何不变体系和几何可变体系	(12)
2.2 几何组成分析的相关概念	(13)
2.2.1 刚片	(13)
2.2.2 自由度	(13)
2.2.3 约束	(13)
2.3 几何不变体系的基本组成规则及应用	(16)
2.3.1 几何不变体系的基本组成规则	(16)
2.3.2 瞬变体系	(18)
2.3.3 基本组成规则的应用	(18)
2.4 平面体系的计算自由度	(23)
2.4.1 体系自由度	(23)
2.4.2 平面体系的计算自由度	(23)
2.5 静定结构和超静定结构	(24)
2.5.1 静定结构和超静定结构的概念	(24)

2.5.2 几何组成和静定性的关系	(25)
-------------------------	------

第3章 静定梁和静定刚架的内力计算	(29)
-------------------------	------

3.1 静定梁	(29)
3.1.1 单跨静定梁的内力	(29)
3.1.2 内力方程和内力图	(31)
3.1.3 用叠加法作剪力图和弯矩图	(35)
3.1.4 斜梁的内力	(37)
3.1.5 多跨静定梁的内力	(39)
3.2 静定平面刚架	(42)
3.2.1 静定平面刚架的概念及分类	(42)
3.2.2 静定平面刚架的支座反力计算	(43)
3.2.3 静定平面刚架的内力及内力图	(44)

第4章 三铰拱的内力计算	(57)
--------------------	------

4.1 拱的概念及分类	(57)
4.2 三铰拱的支座反力计算	(58)
4.3 三铰拱的内力计算及内力图	(59)
4.4 三铰拱的合理轴线	(62)

第5章 桁架和组合结构的内力计算	(66)
------------------------	------

5.1 桁架的组成和特点	(66)
5.2 桁架的内力计算	(67)
5.2.1 结点法	(68)
5.2.2 截面法	(72)
5.2.3 结点法与截面法的联合应用	(73)
5.2.4 常用梁式桁架的比较	(75)
5.3 组合结构的计算	(77)
5.4 静定结构的基本特性	(79)

第6章 静定结构的影响线	(84)
--------------------	------

6.1 影响线的概念	(84)
6.2 静力法作梁的影响线	(85)
6.2.1 简支梁的影响线	(85)
6.2.2 伸臂梁的影响线	(87)
6.2.3 静力法作多跨静定梁的影响线	(89)
6.2.4 内力影响线与内力图的比较	(90)
6.3 间接荷载作用下梁的影响线	(91)
6.4 静力法作桁架的影响线	(92)

6.4.1 力矩法	(94)
6.4.2 投影法	(95)
6.4.3 结点法	(95)
6.5 机动法作梁的影响线	(96)
6.5.1 机动法作影响线的原理和步骤	(96)
6.5.2 机动法作简支梁的影响线	(97)
6.5.3 机动法作静定多跨梁的影响线	(98)
6.6 影响线的应用	(99)
6.6.1 计算影响量值	(99)
6.6.2 最不利荷载位置	(101)
6.7 铁路和公路的标准荷载制及换算荷载	(106)
6.7.1 铁路和公路的标准荷载制	(106)
6.7.2 换算荷载	(108)
6.8 简支梁的内力包络图和绝对最大弯矩	(112)
6.8.1 简支梁的包络图	(112)
6.8.2 简支梁的绝对最大弯矩	(114)
第7章 静定结构的位移计算	(120)
7.1 概述	(120)
7.2 虚功和虚功原理	(121)
7.2.1 实功与虚功	(121)
7.2.2 广义力与广义位移	(121)
7.2.3 变形体的虚功原理	(122)
7.3 位移计算的一般公式和单位荷载法	(122)
7.3.1 位移计算的一般公式	(122)
7.3.2 单位荷载法	(123)
7.3.3 积分法求位移	(124)
7.3.4 荷载作用下位移计算举例	(124)
7.4 图乘法	(127)
7.4.1 图乘法的位移计算公式	(127)
7.4.2 用图乘法计算静定梁和静定刚架的位移	(129)
7.5 温度改变和支座移动时的位移计算	(132)
7.5.1 温度改变时的位移计算	(132)
7.5.2 支座移动时的位移计算	(133)
7.6 线弹性体的互等定理	(135)
7.6.1 功的互等定理	(135)
7.6.2 位移互等定理	(136)
7.6.3 反力互等定理	(137)

第8章 力法	(142)
8.1 超静定结构的组成和超静定次数	(142)
8.1.1 超静定结构的组成	(142)
8.1.2 结构超静定次数的确定	(143)
8.2 力法的基本含义和典型方程	(145)
8.2.1 力法的基本含义	(145)
8.2.2 力法的典型方程	(146)
8.3 用力法计算超静定结构	(148)
8.3.1 用力法求解超静定梁	(148)
8.3.2 用力法求解超静定刚架和排架的弯矩图	(149)
8.3.3 超静定桁架和组合结构的计算	(151)
8.4 结构对称性的利用	(154)
8.4.1 选取对称的基本体系	(154)
8.4.2 未知力分组及荷载分组	(154)
8.5 温度改变和支座移动时超静定结构的计算	(156)
8.5.1 温度改变	(156)
8.5.2 支座移动	(158)
8.6 超静定结构的位移计算	(160)
第9章 位移法	(166)
9.1 位移法概述	(166)
9.1.1 力法和位移法的联系和区别	(166)
9.1.2 位移法的基本思路	(166)
9.2 等截面单跨超静定梁的杆端内力	(167)
9.2.1 杆端力与杆端位移的正负规定	(168)
9.2.2 荷载作用下等截面单跨超静定梁的杆端力	(168)
9.2.3 杆端单位位移引起的单跨超静定梁的杆端内力	(170)
9.3 位移法的基本概念	(171)
9.4 位移法的基本未知量和基本结构	(173)
9.4.1 位移法的基本未知量	(174)
9.4.2 位移法的基本结构	(175)
9.5 位移法典型方程及计算步骤	(176)
9.5.1 位移法典型方程	(177)
9.5.2 位移法计算步骤	(177)
9.6 用位移法计算超静定结构	(179)
9.6.1 无侧移刚架的计算	(179)
9.6.2 有侧移刚架的计算	(182)
9.6.3 对称结构的计算	(186)

9.7 支座移动和温度变化时的位移法计算	(190)
9.7.1 支座移动时的计算	(190)
9.7.2 温度变化时的计算	(191)
9.8 超静定结构的特性	(191)
第 10 章 渐近法	(197)
10.1 力矩分配法的基本概念	(197)
10.1.1 转动刚度、传递系数和分配系数的概念	(197)
10.1.2 力矩分配法的基本原理	(198)
10.2 用力矩分配法计算连续梁和无侧移刚架	(205)
10.2.1 用力矩分配法计算连续梁	(205)
10.2.2 用力矩分配法计算无侧移刚架	(210)
10.3 无剪力分配法	(212)
10.3.1 概述	(212)
10.3.2 无剪力分配法简述	(212)
10.4 超静定结构的特性及计算的基本方法	(217)
10.4.1 超静定结构的特性	(217)
10.4.2 计算超静定结构的基本方法	(218)
10.4.3 超静定结构中计算方法的合理选择	(218)
10.4.4 超静定结构的变形曲线	(218)
参考文献	(223)

第1章

绪论

本章要点

结构力学的研究对象和内容；

结构的分类，结构计算简图形成的原则；

结点和支座的分类，荷载的分类。

1.1 结构力学的研究对象和内容

1.1.1 结构的概念及其分类

在土木、交通和水利工程中，凡是用建筑材料按照合理方式组合，能支承和传递荷载而起骨架作用，满足一定使用要求的物体或物体系统均称为工程结构，简称结构。如房屋建筑中的梁柱体系，水利建筑中的闸门和水坝，交通建筑中的桥梁和隧道等都是工程结构的典型例子，图1-1所示为工程结构实例。

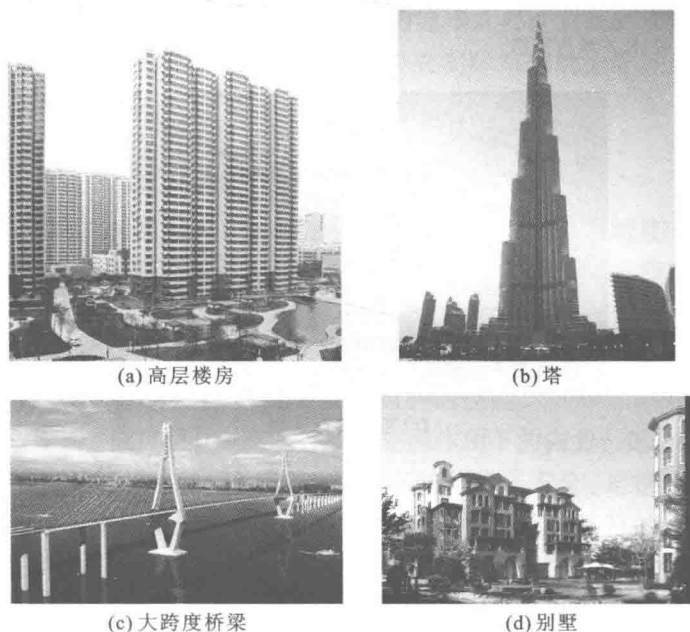


图1-1 工程结构实例

结构通常是由许多构件连接而成,如杆、柱、梁、板、壳等构件。结构的类型很多,结构的受力特性和承载能力与结构的几何特征关系密切。

结构按其几何特征通常分为三类:杆件结构、板壳结构和实体结构,如图1-2所示。

1. 杆件结构

这类结构由杆件所组成。杆件的几何特征是一个方向尺寸中的长度远大于其截面上两个方向的几何尺寸,如图1-3(a)所示。

2. 板壳结构

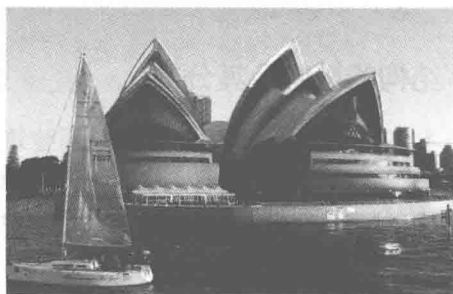
这类结构又称薄壁结构,几何特征是它的构件三个方向尺寸中的厚度远小于其余两个方向的几何尺寸。当薄壁结构为曲面时,则称为壳体。当薄壁结构为平面时,则称为薄板,如图1-3(b)、图1-3(c)所示。

3. 实体结构

这类结构的几何特征是三个方向尺寸中,长度、宽度和高度大致相当,如图1-3(d)所示。



(a) 杆件结构实例



(b) 板壳结构实例



(c) 实体结构实例

图1-2 结构实例

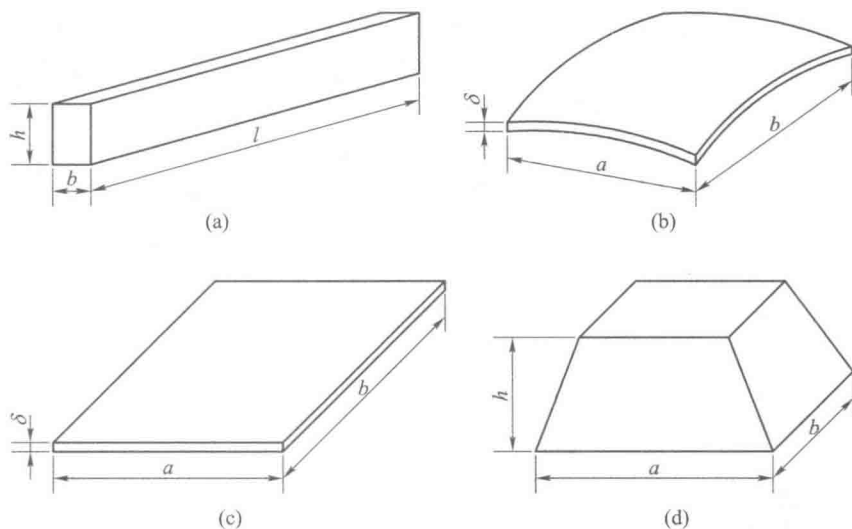


图 1-3 结构的分类

1.1.2 结构力学的研究对象

结构力学与理论力学、材料力学、弹性力学有着密切的关系。理论力学主要研究物体机械运动的基本规律，其余三门力学主要研究结构及其构件的强度、刚度、稳定性和动力反应等问题，其中材料力学以单个杆件为主要研究对象，结构力学以杆体系结构为主要研究对象，弹性力学以板壳结构和实体结构为主要研究对象。

学习结构力学课程要坚持理论与实践相结合的原则。要注意观察实际结构的构造，分析结构的受力特点，思考如何利用所学的理论知识解决实际结构的力学问题，才能深刻理解所学内容、掌握课本知识。

1.1.3 结构力学的研究内容

结构力学主要研究结构的组成和合理形式及结构在荷载作用、温度变化、支座移动等外因作用下的结构内力和变形，以及结构的强度、刚度和稳定性的计算原理和计算方法。结构力学的主要内容可归纳为如下几个方面：

(1) 结构的组成规律、合理形式以及结构计算简图的合理选择。其目的是使结构能承受荷载并保持平衡，有效地利用材料，并充分发挥材料的性能。

(2) 结构在荷载作用、温度变化、支座移动等外因作用下的内力、变形和位移计算。其目的是为结构的强度和刚度计算提供原理和方法，以保证结构满足安全、经济和适用的要求。

(3) 结构的稳定性，确定结构丧失稳定性的最小临界荷载。其目的是保证结构处于稳定的平衡状态而正常工作。

(4) 结构在动力荷载作用下的动力特征。其目的是为结构抗震设计提供理论基础。

本书主要介绍结构力学中最基本的计算原理和计算方法，这些内容是解决一般常用结构的静力计算问题所必需的，也是进一步学习和掌握其他现代结构分析方法的基础。

1.2 结构的计算简图

实际工程结构比较复杂,按照结构的实际情况进行力学计算比较困难,也没有必要。因此,进行力学分析时,必须选用一个能反映结构主要工作特性、计算起来又相对比较容易的简化模型来代替实际结构,这种既能反映真实结构的主要特征,又便于计算的简化模型称为结构计算简图。它是实际结构略去不重要的细节、能显示其基本特点的简化图形。

由实际结构简化为结构计算简图,简化的原则为:

- (1) 从实际出发,能反映实际结构的主要性能,使计算结构能接近实际情况。
- (2) 分清主次,略去次要因素,便于计算。

1.2.1 体系的简化

实际结构一般都是空间结构,各部分相互连接形成一个整体,以承受各种荷载的作用。对于空间结构进行力学分析往往比较复杂,工作量较大。在一定条件下,可抓住实际结构受力情况的主要因素,略去次要因素,将其分解、简化为平面结构,使计算得到简化。本书主要研究平面结构。

1.2.2 杆件的简化

因杆件的截面尺寸通常比杆件的长度小得多,在计算简图中,杆件用其轴线来表示。如梁、柱等构件的轴线为直线,则用相应的直线来表示。如曲杆的轴线为曲线,则用相应的曲线来表示。

1.2.3 结点的简化

结构中两个或两个以上杆件的共同连接处称为结点。

对于各种结构,如钢筋混凝土结构、钢结构、木结构等,结点的构造方式虽然很多,但结点的计算简图有三种基本的类型:铰结点、刚结点和组合结点。

1. 铰结点

结点上的各杆用铰链相连接,所连接的各杆都可以绕结点相对转动,但不能相对移动。杆件受荷载作用产生变形时,结点上各杆件端部的夹角会发生改变。图 1-4(a)所示 A 点为铰结点。在铰结点处,只能承受和传递力,不能承受和传递力矩。木结构的屋架结点就可以简化为铰结点。

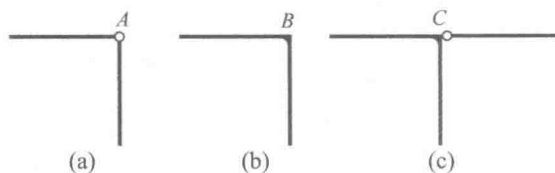


图 1-4 结点的简化

2. 刚结点

结点上的各杆刚性连接,所连接的各杆不能绕结点相对转动,也不能相对移动。杆件受荷载作用产生变形时,结点上各杆件端部的夹角保持不变,即结点上各杆件的端部都有一相同的旋转角。图1-4(b)所示B点为刚结点。在刚结点处,不但能承受和传递力,而且能承受和传递力矩。现浇钢筋混凝土框架的结点就可以简化为刚结点。

3. 组合结点

由铰结点和刚结点在一起形成的结点为组合结点。图1-4(c)所示C点为组合结点。

1.2.4 支座的简化

把结构与基础或其他支承物连接起来的装置称为支座。常见的平面结构支座有:固定铰支座、可动铰支座、固定端支座、定向滑动支座。支座的简化可根据实际构造和约束情况进行。

1. 固定铰支座

用铰链约束将结构或构件与基础或静止的结构物连接起来,这样就构成了固定铰支座。图1-5(a)所示为一个固定铰支座,它将构件与基础连接起来,限制了构件的水平 and 铅直方向的移动,使构件只能绕支座转动,通常用图1-5(b)或图1-5(c)表示,因此,固定铰支座有一个约束力 F_R ,且 F_R 可以用一个水平反力 F_{Ax} 和一个铅直反力 F_{Ay} 来代替,即固定铰支座可以用两个相互垂直的约束力表示。

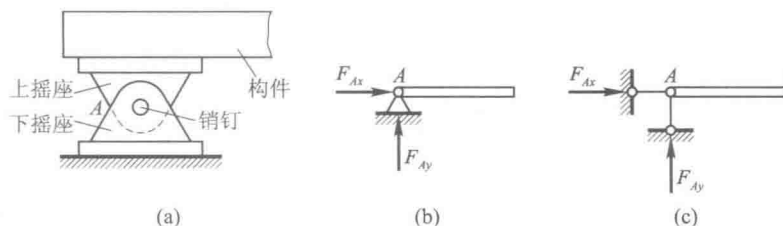


图1-5 固定铰支座

固定铰支座的约束力用 F_{Ax} 和 F_{Ay} 表示。

在建筑结构中,如果梁插入墙内少许,柱与基础间空隙填入沥青、麻丝等都可用固定铰支座代替。

2. 可动铰支座

在固定铰支座的下面加上滚轴,使构件在支座处有沿支承面移动的可能,这种支座称为可动铰支座,其约束性质与光滑接触面相同,只能限制物体沿支承面法线方向指向约束内部的运动,不能限制沿支承面方向的运动和背离支承面的运动,同时,也不能限制物体绕销钉的转动,如图1-6(a)所示。

可动铰支座约束力,垂直于支承面,通过铰链中心指向被约束物体,如图1-6(b)或图1-6(c)所示。由于可动铰支座与链杆的性质有相同之处,有时也称为链杆约束。

3. 固定端支座

既能限制物体移动,又能限制物体转动的约束的支座称为固定端支座。当物体受到荷载

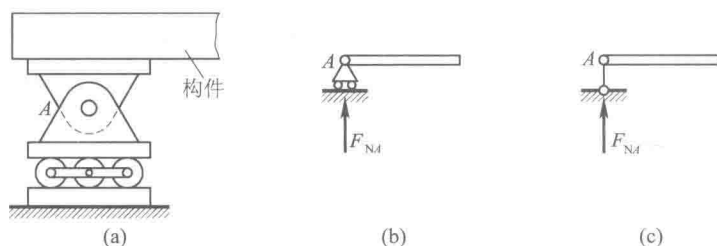


图 1-6 可动铰支座

作用时,这种支座除了产生水平反力 F_{Ax} 和铅垂反力 F_{Ay} 外,还将产生一个限制物体转动的反力偶 M 。因此固定端支座的约束力是两个相互垂直的分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 和一个力偶 M_A 。

如用混凝土浇筑于环形基础内的预制钢筋混凝土柱子,它的支座便可视为固定端支座。

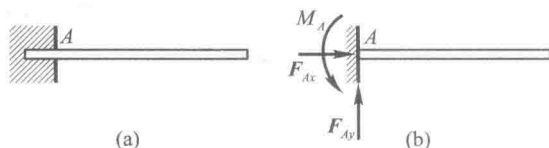


图 1-7 固定端支座

图 1-7(a)所示为一固定端支座,其受力如图 1-7(b)所示,约束力 F_{Ax} 和 F_{Ay} 对应于约束限制移动的位移,约束力偶 M_A 对应于约束限制转动的位移。

4. 定向支座

构件用两根等长且平行的链杆与基础相连接,就形成定向支座。如图 1-8(a)和图 1-8(b)所示,这种支座允许杆端沿与链杆垂直的方向移动,阻止了沿杆件方向的移动和转动。因此,定向支座的约束有一个沿链杆方向的力 F 和一个力偶 M_A ,如图 1-8(c)和图 1-8(d)所示。

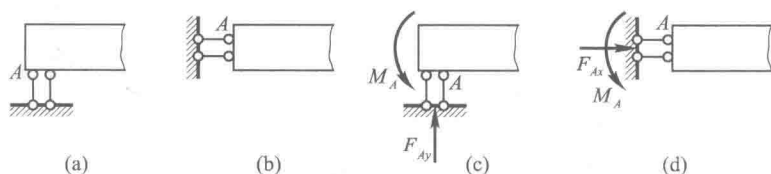


图 1-8 定向支座

应当注意的是,铰链、链杆、固定铰支座、可动铰支座、固定端支座和定向支座都只能确定约束力作用线的位置,而不能确定其指向,以上所述约束力的方向都是假设的,实际约束力的方向应当根据具体情况确定。只有柔性约束和光滑面约束无须计算就能确定约束力的作用线位置和方向。