

GONGCHENG LIXUE

水利水电工程(专科起点本科)专业系列教材

■ 白新理 主编

工程力学

中央广播电视大学出版社

水利水电工程（专科起点本科）专业系列教材

工 程 力 学

白新理 主编

中央广播电视大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学/白新理主编. —北京: 中央广播电视大学出版社, 2003.7
(水利水电工程(专科起点本科)专业系列教材)

ISBN 7-304-02459-3

I.工… II.白… III.工程力学—成人教育:高等教育—升学
参考资料 IV.TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 068119 号

版权所有, 翻印必究。

水利水电工程(专科起点本科)专业系列教材

工 程 力 学

白新理 主编

出版·发行/中央广播电视大学出版社

经销/新华书店北京发行所

印刷/北京市银祥福利印刷厂

开本/787×1092 1/16 印张/26.5 字数/606千字

版本/2003年7月第1版 2003年8月第1次印刷

印数/0001—4000

社址/北京市复兴门内大街160号 邮编/100031

电话/66419791 68519502 (本书如有缺页或倒装, 本社负责退换)

网址/http://www.crtvup.com.cn

书号: ISBN 7-304-02459-3/O·132

定价: 34.00 元

水利水电工程（专科起点本科）专业系列教材

课程建设委员会名单

顾 问 陈肇和

主 任 刘汉东

副主任 段 虹 蒋克中 董幼龙

委 员 （按姓氏笔画排列）

王 圻 牛志新 白家聪 白新理

任 岩 孙东坡 孙明权 刘洪建

许士国 李国庆 陈南祥 陈德新

陆桂明 张立中 赵 瑜 赵中极

郭雪莽 鄢小平 陶水龙 徐建新

高辉巧 解 伟

前言

本书是根据华北水利水电学院和中央广播电视大学联合开办的水利水电工程专业开放教育（专起本）教学计划以及工程力学（本）教学大纲编写的工程力学公共必修课程的通用教材。全书共分 12 章，主要讲述结构的基本概念，静定结构分析的方法，各种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，矩阵分析法，结构的稳定分析，弹性力学平面问题的基本方程，平面问题的直角坐标和极坐标解答。

本书突出基本理论的掌握和应用，为便于自学，除了每章都附有学习指导、小结、习题外，在页面的右边还有提示旁注。

参加本书编写工作的有华北水利水电学院白新理（绪论，第 10，11，12 章）、兰文改（第 1，2，3，7 章）、唐克东（第 4，6，8 章）、刘东常（第 9 章）和中央广播电视大学蒋克中（第 5 章）。全书由白新理教授担任主编。

参加本书审定工作的有郑州大学孙利民教授、河南省广播电视大学牛志新副教授和华北水利水电学院孙大风教授。全书由孙利民教授担任主审。审定专家对本书进行了认真仔细的审阅，提出了许多宝贵的意见和建议，在此深表谢意。本书中使用了大量的插图，绘图工作由华北水利水电学院陈伟胜、王兵伟、李国会、马文亮、孟丽娟完成。本书在编写过程中得到了中央广播电视大学、水利行业电大开放教育试点工作办公室的大力支持，在此一并致谢。

本书编写过程中参考了国内同行的著作和教材，在此对这些作者表示感谢。由于编者水平有限，再加上时间仓促，书中可能有不少疏漏、不妥甚至错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2003 年 6 月

目 录

绪 论	(1)
学习指导	(1)
0.1 结构的概念	(1)
0.2 结构的计算简图	(4)
0.3 杆件结构的分类	(10)
0.4 荷载的分类	(12)
0.5 工程力学的任务与方法	(13)
小 结	(14)
思考题	(15)
第 1 章 结构的几何组成分析	(16)
学习指导	(16)
1.1 几何组成分析的目的,几何不变体系和几何可变体系	(16)
1.2 几何组成分析的几个概念	(18)
1.3 几何不变体系的几何组成规律	(21)
小 结	(26)
思考题	(26)
习 题	(26)
第 2 章 静定结构的受力分析	(29)
学习指导	(29)
2.1 静定梁	(29)
2.2 静定平面刚架	(36)
2.3 静定平面桁架和组合结构	(41)
2.4 三铰拱	(49)

2.5 静定结构特性	(55)
小 结	(59)
思考题	(60)
习 题	(60)
第3章 静定结构的位移计算	(65)
学习指导	(65)
3.1 位移计算概述	(65)
3.2 虚功和虚功原理	(66)
3.3 结构位移计算的一般公式	(70)
3.4 荷载作用下的位移计算	(71)
3.5 图乘法	(76)
3.6 温度改变时的位移计算	(83)
3.7 支座移动时的位移计算	(85)
* 3.8 线性变形体系的互等定理	(86)
小 结	(88)
思考题	(89)
习 题	(90)
第4章 力 法	(93)
学习指导	(93)
4.1 超静定结构和超静定次数的确定	(93)
4.2 力法的基本概念	(97)
4.3 荷载作用下超静定梁、刚架和排架的计算	(105)
4.4 荷载作用下超静定桁架和组合结构的计算	(111)
4.5 对称结构的计算	(115)
4.6 超静定拱的计算	(128)
4.7 温度改变和支座移动时超静定结构的计算	(134)
4.8 超静定结构的位移计算	(139)
4.9 超静定结构计算的校核	(142)
小 结	(145)
思考题	(146)
习 题	(147)
第5章 位 移 法	(153)
学习指导	(153)

5.1 位移法的基本概念	(153)
5.2 等截面直杆的转角位移方程	(155)
5.3 位移法的基本未知量、基本体系及典型方程	(160)
5.4 位移法计算连续梁和无侧移刚架	(169)
5.5 位移法计算有侧移刚架和排架	(173)
5.6 位移法计算对称结构	(177)
5.7 用直接平衡法建立位移法方程	(182)
小 结	(185)
思考题	(185)
习 题	(186)
第6章 力矩分配法	(190)
学习指导	(190)
6.1 概 述	(190)
6.2 力矩分配法的概念	(190)
6.3 单结点的力矩分配	(196)
6.4 多结点的力矩分配	(200)
6.5 超静定结构的特性	(206)
小 结	(207)
思考题	(207)
习 题	(208)
第7章 影 响 线	(211)
学习指导	(211)
7.1 影响线的概念	(211)
7.2 静力法作静定单跨梁的影响线	(212)
7.3 结点荷载作用下的影响线	(216)
7.4 静力法作桁架的影响线	(218)
7.5 机动法作静定梁的影响线	(221)
7.6 影响线的应用	(225)
*7.7 超静定结构的影响线	(230)
*7.8 包络图和绝对最大弯矩	(232)
小 结	(233)
思考题	(234)
习 题	(234)

第8章 矩阵位移法	(238)
学习指导	(238)
8.1 概 述	(238)
8.2 局部坐标系中的单元刚度矩阵	(241)
8.3 整体坐标系中的单元刚度矩阵	(245)
8.4 连续梁的整体刚度矩阵	(249)
8.5 刚架的整体刚度矩阵	(258)
8.6 等效结点荷载	(261)
8.7 计算步骤和算例	(265)
小 结	(272)
思考题	(273)
习 题	(273)
第9章 结构的稳定计算	(276)
学习指导	(276)
9.1 稳定问题概述	(276)
9.2 稳定问题分析的基本方法	(276)
9.3 弹性压杆的稳定——静力法	(283)
*9.4 弹性压杆的稳定——能量法	(291)
*9.5 圆环和圆拱受均匀静水压力时的稳定	(300)
*9.6 刚架的稳定——矩阵位移法	(303)
小 结	(305)
习 题	(305)
第10章 弹性力学平面问题的基本理论	(308)
学习指导	(308)
10.1 弹性力学概述	(308)
10.2 平面应力问题与平面应变问题	(315)
10.3 平衡微分方程	(317)
10.4 几何方程 刚体位移	(319)
10.5 物理方程	(323)
10.6 边界条件 圣维南原理	(325)
10.7 按位移求解平面问题	(329)
10.8 按应力求解平面问题 相容方程	(331)

10.9 常体力情况下的简化	(333)
10.10 应力函数 逆解法与半逆解法	(336)
10.11 斜面上的应力 主应力	(338)
小 结	(341)
习 题	(342)
第 11 章 弹性力学平面问题的直角坐标解答	(343)
学习指导	(343)
11.1 多项式解答	(343)
11.2 矩形截面梁的纯弯曲	(345)
11.3 悬臂梁的横力弯曲	(350)
11.4 简支梁受均布荷载	(355)
* 11.5 悬臂梁受拉力和弯矩作用	(360)
11.6 楔形体受重力和液体压力	(363)
小 结	(366)
习 题	(366)
第 12 章 弹性力学平面问题的极坐标解答	(368)
学习指导	(368)
12.1 用极坐标表示的基本方程	(368)
12.2 极坐标中的应力函数与相容方程	(373)
12.3 应力分量和位移分量的坐标变换式	(376)
12.4 轴对称问题	(378)
12.5 圆环或圆筒受均布压力 * 压力隧洞	(381)
12.6 圆孔的孔边应力集中	(386)
12.7 楔形体在楔顶或楔面受力	(391)
12.8 半平面体在边界上受法向集中力	(397)
* 12.9 半平面体在边界上受法向分布力	(401)
小 结	(403)
习 题	(403)
习题答案	(405)
参考文献	(412)

绪 论

学习指导

[学习要求] 绪论介绍结构的概念、结构的计算简图、杆件结构的分类、荷载的分类、工程力学的任务与方法五个问题,使学生对本书的内容有一个初步的了解。

[本章重点] 结构的计算简图。它是本书后续章节计算的依据。

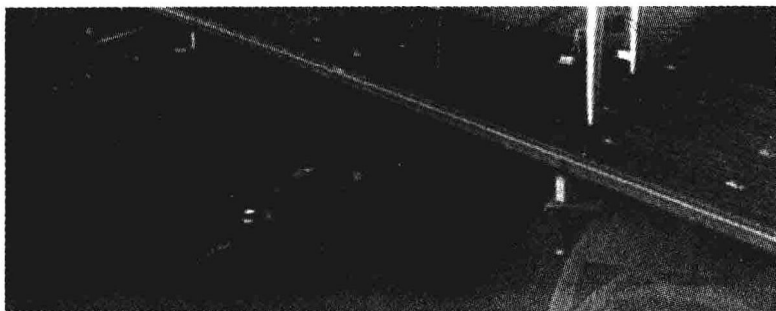
0.1 结构的概念

在土木工程和水利水电工程中,由建筑材料按照一定的方式筑成,能承受和传递荷载而起骨架作用的构筑物称为工程结构,简称结构。图 0-1 是一些工程结构的例子^①。单层厂房结构中的屋面板、屋架、梁、柱、基础及其组成的体系,也都是结构。

① 这些只是结构的外形,与结构或结构的计算简图是有区别的。



(a) 建设中的某水利枢纽工程



(b) 某大桥的照片

图 0-1 工程结构示例

结构一般是由多个构件连接而成。结构按其几何特征通常分为三类：

(1) 杆件结构

杆件结构是由杆件或若干根杆件相互连接组成。杆件的几何特征是在三个方向尺寸中的长度 l 远大于另外两个方向上的尺寸——截面宽度 b 和厚度 h ①，如图 0-2 (a) 所示。各种结构中，杆件结构最多，本书的大部分内容也是讨论杆件结构。

①横截面的形状可以是矩形、圆形、工字形等。

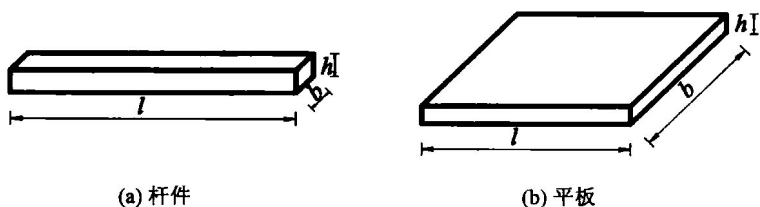


图 0-2

(2) 板壳结构 (又称薄壁结构)

薄壁结构的几何特征是在三个方向尺寸中的厚度 h 远小于长度 l 和宽度 b ，平面板状的薄壁结构称为薄板，如图 0-2 (b) 所示。由几块薄板可组合成折板，如图 0-3 所示。当薄壁结构为曲面时，则为壳体，如图 0-4 所示。图 0-5 (a)，(b) 分别为输水工程中使用的 U 形薄壳渡槽②和壳体屋面结构。

②东江—深圳供水改造工程中的输水渡槽就使用了 U 形断面的薄壳结构。

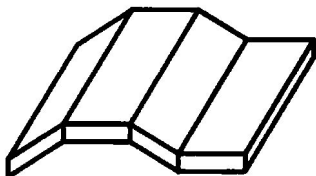


图 0-3 折板结构



图 0-4 壳体

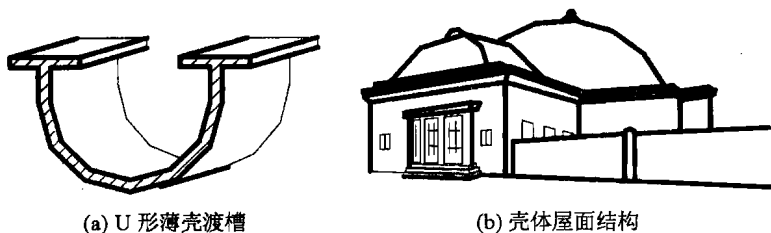


图 0-5

(3) 实体结构

实体结构的几何特征是在三个方向尺寸中，长度 l 、宽度 b 和厚度 h 大致相当，如挡土墙 [图 0-6 (a)]、堤坝^①和块体基础 [图 0-6 (b)] 等。

①如小浪底水利枢纽工程。

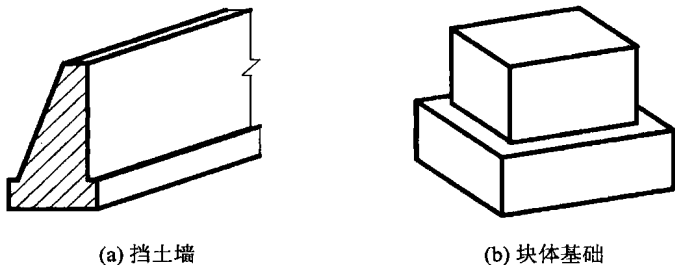


图 0-6 实体结构

当三维空间实体具有某种特殊形状并受有特殊荷载作用时，可以简化为二维平面实体^②，从而用弹性力学平面问题中的方法来处理。图 0-7 (a) 表示从大坝中切出的一个单位厚度的模型，就是一个二维平面实体的例子（详见第 10 章）。

②在第 10 章中，称为平面应变问题。

当薄板上的作用力都平行于板平面且沿厚度不变化，因而使得薄板的变形也在板平面内^③时，也可以按弹性力学平面问题来处理，如图 0-7 (b) 所示。这种特殊情况将在本书第 10 ~ 12 章加以讨论。以上两种情况 [图 0-7 (a)，(b)] 均可看作是二维平面实体结构，以区别于三维空间实体结构。

③在第 10 章中，称为平面应力问题。

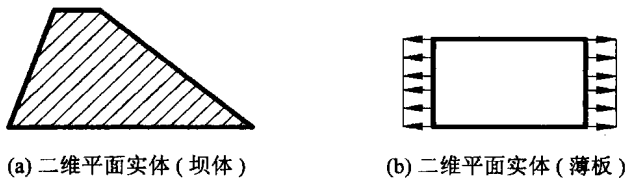


图 0-7 平面问题

0.2 结构的计算简图

0.2.1 计算简图及其选择原则

实际结构是很复杂的,完全按照结构的实际工作状态进行力学分析是不可能的,也是不必要的。因此,对实际结构进行力学计算以前,必须加以简化,抓住主要矛盾,略去不重要的细节,用一个能反映其基本受力和变形性能的简化的计算图形来代替实际结构。这种代替实际结构的简化计算图形称为结构的计算简图^①。结构的受力分析都是在计算简图中进行的。因此,计算简图的选择,是结构受力分析的基础,极为重要。如果选择不当,则计算结果不能反映结构的实际工作状态,严重的将会引起工程事故。所以,对于计算简图的选择,应该十分重视。

① 有时称为计算模型。

计算简图的选择应遵循下列原则:

- ① 计算简图应尽可能反映实际结构的主要受力和变形特征;
- ② 略去次要因素,使计算简图便于计算。

0.2.2 计算简图的简化要点

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。但在多数情况下,常常可以忽略一些次要的空间约束而将实际结构简化为平面结构^②,使计算过程变得简单,其结果也能反映实际状态。本书仅讨论平面结构的计算问题。平面杆件结构的简化主要包括杆件、结点和支座的简化。

② 三维空间结构的计算是很繁琐的。

(1) 杆件的简化

杆件的截面尺寸(宽度、厚度)通常比杆件长度小得多,截面变形符合平截面假设,截面上的应力可根据截面的内力(弯矩、剪力、轴力)来确定,截面上的变形也可根据轴线上的应变分量来确定。因此,在计算简图中,杆件可用其轴线表示^③,杆件之间的连接区用结点表示,杆件长度用结点间的距离表示,荷载的作用点也转移到轴线上。当截面尺寸增大时(例如超过杆长的1/4),杆件用其轴线表示的简化,将引起较大的误差。

③ 杆件变成了一条线。

(2) 结点的简化

结构中杆件与杆件之间的相互连接处,简化为结点。木结构、钢结构和混凝土结构中杆件与杆件之间相互连接的构造方式虽然很多,但其结点通常

简化为以下三种理想情形：

① 铰结点

理想铰结点的特点是：被连接的杆件在结点处不能相对移动，但可绕铰自由转动；在铰结点处可以承受和传递力，但不能承受和传递力矩^①。这种理想情况，实际结构中是很难遇到的。图 0-8 (a) 所示的木屋架端结点，虽然各杆件之间不能相对移动，但可以有相互间微小转动，计算时简化为一个铰结点。铰结点的计算简图如图 0-8 (b) 所示。木屋架的结点也只是比较接近铰结点。在计算简图中，铰结点用一个小圆圈表示。

① 例如若干根杆件用销钉或螺杆连接在一起。

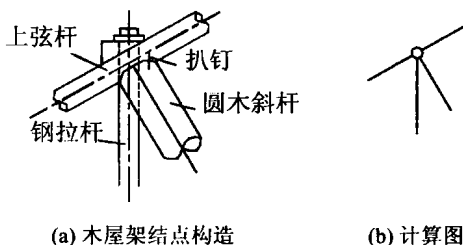


图 0-8 木屋架结点——铰结点

② 刚结点

刚结点的特点是：被连接的杆件在结点处不能相对移动，也不能相对转动，在刚结点处不但能承受和传递力，而且能承受和传递力矩。图 0-9 (a) 所示是一钢筋混凝土框架边柱和梁的结点，由于梁和柱之间的钢筋布置以及混凝土将它们浇筑成整体，使梁和柱不能产生相对移动和转动，计算时简化为一个刚结点^②。刚结点的计算简图如图 0-9 (b) 所示。

② 这是最有代表性的刚结点。

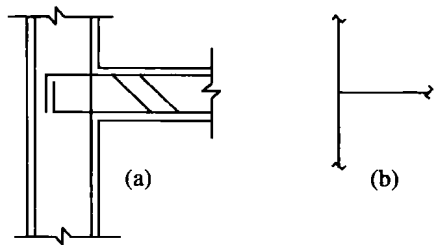


图 0-9 钢筋混凝土梁柱结点——刚结点

③ 组合结点

若干杆件汇交于同一结点，当某些杆件连接可以视为刚结点，而另一些杆件可以视为铰结点^③时，该结点称为组合结点。图 0-10 所示计算简图中，结点 D 为组合结点。

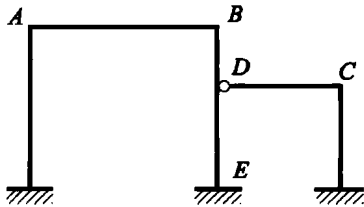


图 0-10 组合结点

③ BD 与 ED 实际上为一根杆件，可以看作是二根杆件刚性连接，而 CD 则与它们铰接。

(3) 支座的简化

将结构与基础或其它支承物联系起来，以固定结构位置的装置称为支座。支座对结构的反作用力称为支座反力。平面结构的支座通常可以简化为以下四种形式：

①活动铰支座

这种支座通常用图 0-11 (a) 所示方式表示。它对结构的约束作用是只能阻止结构上的 A 端沿垂直于支承面的方向移动；而结构既可以沿支承平面的方向移动^①，又可以绕铰 A 转动。因此，当不考虑支承平面的摩擦力时，其支座反力将通过铰 A 的中心并与支承平面垂直。即反力的方向和作用点是确定的，只有大小是未知的，可用 F_{RA} 表示。根据上述特点，这种支座在计算简图中可以用一根垂直于支承面的链杆来表示，如图 0-11 (b) 所示。在实际结构中，凡符合或近似符合上述约束条件的支承装置，可取为活动铰支座。

①可以是
辊轴或滚轮。

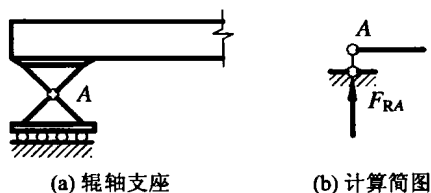


图 0-11 活动铰支座

②固定铰支座

这种支座的构造如图 0-12 (a) 所示，常简称为铰支座，它容许结构在支承处绕铰 A 转动，但 A 点不能作水平和竖向移动。支座反力 F_{RA} 将通过铰 A 中心、但大小和方向都是未知的，通常可用沿两个确定方向的分反力，如水平反力 F_{xA} ，和竖向反力 F_{yA} 来表示。这种支座的计算简图可用交于 A 点的两根支承链杆来表示，如图 0-12 (b) 或 (c) 所示。

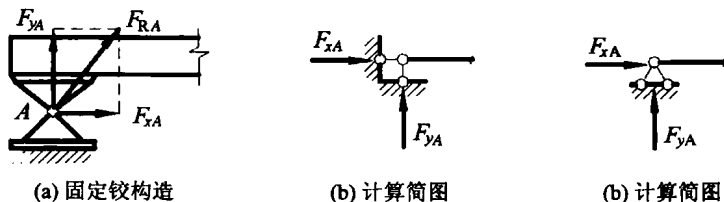


图 0-12 固定铰支座

在实际结构中，凡属不能移动而可作微小转动的装置，都可简化为固定铰支座^②。如图 0-13 (a) 所示的预制混凝土柱，插入杯形基础，杯口的空隙用沥青麻丝填充，柱子可以有微小的转动，但在水平方向和竖直方向的移

②不少支
座是介于固定
铰支座和下述
的固定支座之
间，很难界定。

动受限制，可以简化为一个铰支座，如图 0-13 (b) 所示。

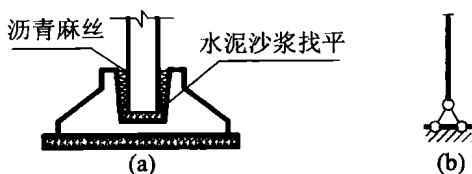


图 0-13 固定铰支座的例子

③ 固定支座

图 0-14 (a) 所示悬臂梁，当梁端插入墙身有相当深度、且与四周有相当好的密实性时，梁端被完全固定，可以视为固定支座。这种支座不容许结构在支承处发生任何移动和转动，它的反力大小、方向和作用点位置都是未知的，通常用水平反力 F_{xA} 、竖向反力 F_{yA} 和反力偶 M_A 来表示，计算简图如图 0-14 (b) 或 (c) 所示。

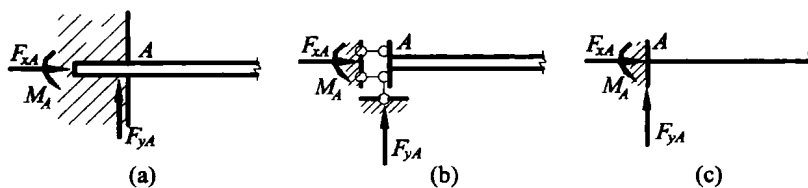


图 0-14 固定支座

图 0-15 (a) 所示为一预制钢筋混凝土柱，插入杯形基础，杯口的空隙用细石混凝土填实。当预制钢筋混凝土柱插入基础有一定深度时，柱在基础内的移动和转动均被限制，可以简化为固定支座^①，如图 0-15 (b)。图 0-16 (a) 为悬挑阳台梁，计算简图为图 0-16 (b)。

① 此处与图 0-13 相同，但处理方法不同，设计要求不同，得到了不同的计算简图。

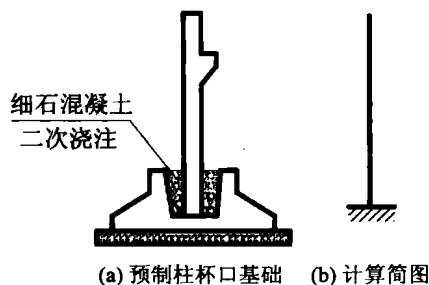


图 0-15 固定支座的例子

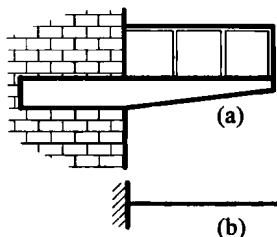


图 0-16 固定支座——悬挑阳台梁

④ 定向支座

结构在支承处不能转动，不能沿垂直于支承面的方向移动，但可以沿支承面方向滑动，如图 0-17 (a)，(b) 所示。其反力为一个垂直于支承面的力 F_{yA} 和一个反力偶 M_A ，计算简图可用垂直于支承面的两根平行链杆表示，它允许杆端在水平方向上滑动。在另一个定向支座 [图 0-17 (c)] 中，则允许