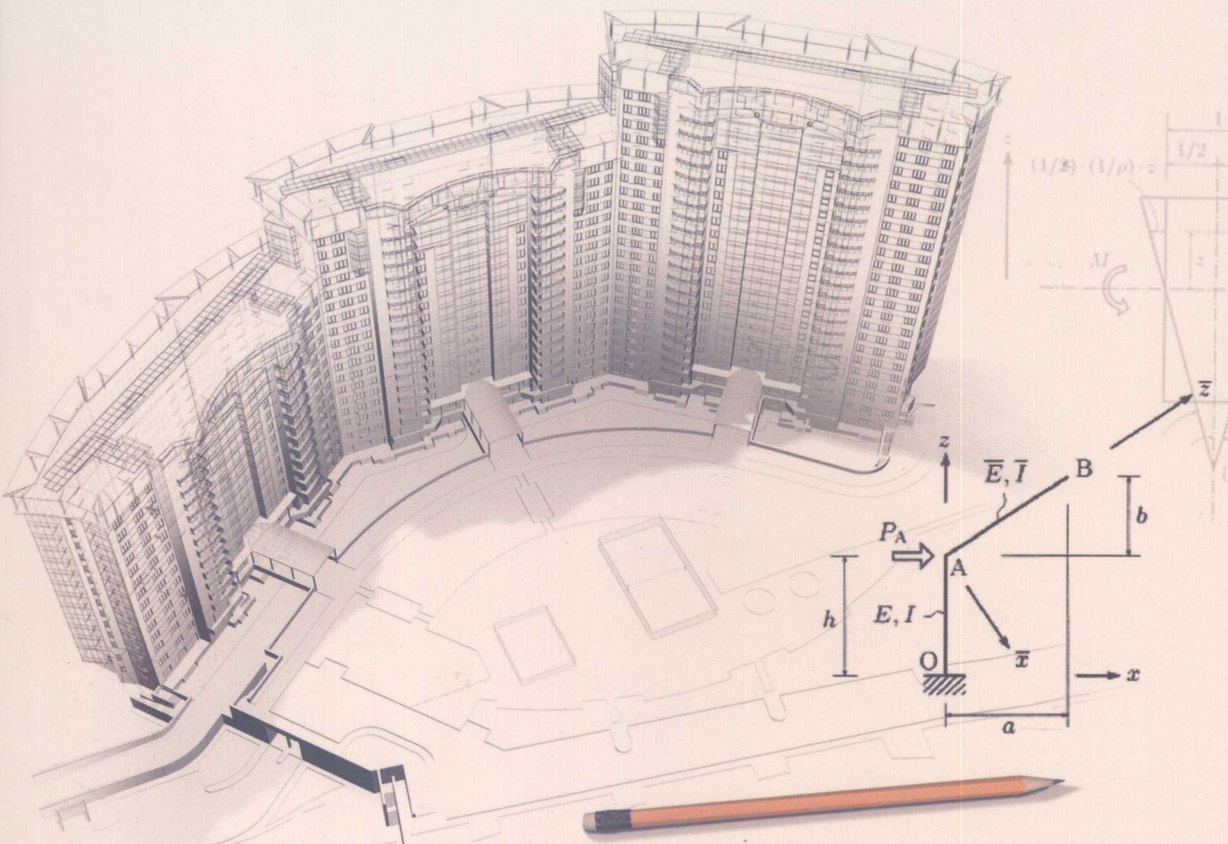
基本建筑结构力学

——从悬臂梁开始的内力与位移计算

〔日〕泷口克己 著/刘 青 译



科学出版社
www.sciencep.com

基本建筑结构力学

——从悬臂梁开始的内力与位移计算

〔日〕泷口克己 著　　刘　青 译

科　学　出　版　社

北　京

图字：01-2008-5114 号

内 容 简 介

本书由 9 章内容及附录组成，从建筑结构计算所涉及的最基础理论开始，对建筑结构计算中的结构力学问题进行了系统阐述. 主要内容为常见静定结构和超静定结构的内力及变形计算，并介绍了结构动力学中的振动问题. 本书以典型工程中最常见的建筑结构作为研究对象，并在每章都附有习题及答案，具有很强的针对性和实用性.

本书可供土木工程专业本、专科生、研究生学习和参考，也可作为结构力学教师和土木工程师的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

基本建筑结构力学：从悬臂梁开始的内力与位移计算/(日)泷口克己著；刘青译. —北京：科学出版社，2008

ISBN 978-7-03-023269-4

Ⅰ. 基… Ⅱ. ①泷… ②刘… Ⅲ. 建筑结构-结构力学-教材 Ⅳ. TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008) 第 167557 号

责任编辑：王飞龙 胡 凯／责任校对：陈玉凤
责任印制：赵德静／封面设计：王 浩

科学出版社出版
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2009 年 1 月第 一 版 开本：B5(720×1000)
2009 年 1 月第一次印刷 印张：10 1/2
印数：1—3 000 字数：194 000

定价：39.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈文林〉)

译 者 序

前些年由日本归国后, 我常想将日本同行的相关教材介绍给国内同行与学生. 经朋友推荐和筛选, 我选择了翻译日本新世株式会社数理工学社 2006 年出版的泷口克己教授编写的《基本建筑结构力学》一书.

泷口克己教授毕业于东京工业大学工学部建筑工学专业, 获博士学位, 现为东京工业大学教授, 是日本混凝土工学学会、日本建筑学会、日本材料学会等学会的会员. 他所涉足的学术领域主要为城市防灾、建筑防震结构、混凝土复合结构等. 他 1988 年获日本建筑学会奖, 先后编写、出版的著作有《非线形结构力学》、《三次材料论》、《基本建筑结构力学》等.

《基本建筑结构力学》一书由 9 章内容及附录组成. 该书从建筑力学角度出发, 从建筑结构计算所涉及的最基础的理论开始, 对建筑结构计算中的结构力学问题进行了系统阐述. 该书主要阐述了常见静定结构和超静定结构的内力及变形计算, 并介绍了结构动力学中的稳定及振动问题.

与国内现行教材相比, 该书有四个特点. 一是在基础理论方面的阐述、分析内容较多; 二是以典型的、工程中最常见的建筑结构作为研究对象, 具有很强的针对性和实用性: 如在第 2 章中讨论了钢筋混凝土杆件的弯矩与曲率的关系; 在第 8 章中讨论了高跨比对门形刚架内力的影响等内容. 三是该书涉及了简单的非线性计算内容, 这在国内面向本科生的结构力学教材中很少涉及. 四是该书图文并茂, 每章后面都附有少量习题, 并在内容中附有小练习及答案, 具有很强的实用性.

总体上看, 该书是土木工程类专业本、专科生和研究生学习和应用结构力学过程中一本很好的参考书和辅助教材, 也可作为高校结构力学教师和土木工程师的参考书. 基此, 我将《基本建筑结构力学》一书翻译出版, 希望对国内读者有所助益.

翻译本书过程中, 得到了很多人的支持, 中国驻日使馆参赞吕晓庆先生多次帮助联系版权事务. 日本新世株式会社数理工学社田岛先生给予了积极协助. 清华大学建筑设计研究院院长庄惟敏教授、水土学院副院长金峰教授肯定了翻译这本书的价值, 并向出版社推荐. 翻译过程中, 长安大学的刘健新老师、刘鸣老师、杨小雁老师、袁卫宁老师及武文静等同学从不同方面给予了支持与帮助. 值本书正式出版之际, 作为译者, 我特向各位表示深深地谢意.

刘 青
2008 年秋

原 书 序

很久以来, 我一直想将建筑结构计算的力学基础知识整理成书. 以我的感悟, 要真正理解和掌握建筑结构力学, 就得熟练掌握平面结构的内力与位移计算, 并对计算结果的正确性有十分的把握. 本书将悬臂梁作为简单结构形式的代表, 所谓悬臂梁, 即一端被固定、另一端可自由移动的梁. 这正是我将本书副标题确定为“从悬臂梁开始的内力与位移计算”的一个缘由.

平成十五年 (公元 2003) 元月 2 日, 我开始编写本书相关的备忘录. 首先推导了等截面杆件的变形与曲率之间的关系, 却没能完成, 这使我深感惊讶. 做了 30 多年大学教师, 一直从事建筑结构领域的研究, 自认为诸如受弯杆件等力学基本内容, 自己任何时候都能顺利推导并给出正确结果, 没想到这次却陷入了尴尬. 作为力学工作者来说, 这很难使人自感满意. 这就像经常使用某些数学公式, 却不会证明它. 究其原因, 或许这与以往疏于关注公式推倒中的有关假设及是否正确使用了相关公式等有关.

前述尴尬使我感受到了 “习惯应用”、“熟练应用” 与 “真正掌握” 之间的区别. 即便你是某一领域的 “专家”, 深知某一领域的知识, 对相关领域的知识也在用, 但很难真正全面掌握各方面的知识.

为了达到真正理解进而掌握的程度, 我认为, 遇到问题首先应问为什么, 以加深对基本知识的理解; 其次要利用不同的方法检验所得结果的正确性, 因为在实践中错误地应用某些知识会导致无法挽回的事故. 由此可见, 掌握好基本知识是十分重要的. 基于此, 作者希望编写一本可以作为建筑结构力学基础之一的, 专门讲述悬臂梁、平面结构的内力与位移计算的书.

本书在介绍内力与变形计算时, 多以悬臂梁为例, 同时为了加深读者理解, 也选用了一些其他结构形式. 例如, 为了对势能原理进行说明, 引入非线性问题时, 讨论了两端由铰支座支撑中间铰接的山形桁架结构的铰接点在竖直方向的位移问题. 作为非线性问题的例子, 讨论了张拉用螺栓连接的刚性部件的受力与位移问题; 并讨论了屈曲和单质点体系的振动问题. 引入受水平力作用的刚架, 作为悬臂梁问题的扩展. 本书的特点在于对问题的说明方法以及例题和练习题.

作者在执笔的同时唯恐由于自己对问题理解的浅显而出现误解. 而读者在学习的过程中也会经历多次的失败, 重要的是要从失败的教训中总结出经验, 不断进步. 作者认为, 对于发生事故建筑物的设计者来说, 对问题的理解不深和计算错误是导致失败的原因.

本书由 9 章和 1 个附录构成, 各章末尾附有用 10~20 分钟就能解答的小练习; 在附章中汇集了用 30~60 分钟就能解答的问题, 而第 8、9 章的计算题的解答则需要较长的时间. 如果读者能有效利用本书, 那无疑是作者的幸运; 如果本书能引起读者的兴趣, 那更是读者给予作者的恩惠.

在本书的编写过程中, 2004 年 4 月到 2005 年 9 月, 我邀请当时作为日本学术振兴会特别研究生的结构计划研究所的桥本纯博士对书稿进行整理. 同时, 数理工学社的竹田直先生和的必卡姆公司的佐藤亨先生对本书的出版做出了贡献. 在此, 对他们表示深深的谢意.

泷口克己

2006 年 3 月

目　录

第1章 基本约定

任何物理量在应用之前都应该有明确的定义，当然也包括其正负号的规定，如力学中常用的力和变形. 定义要考虑其通用性和使用上的方便，要尽量避免相互矛盾和使用不便的情况.

作图是一种理解问题的非常有效的方法. 如果用图来表示杆件上传递的力，会很容易理解. 本书也不例外，杆件上的弯矩、剪力、轴力的变化都是用图来表示的. 有关图的画法、数值大小的表示方法等相关的问题，最好都作相应的规定，以方便今后对问题的讨论.

本章各节

1.1 坐 标 系

作者认为，在讨论杆件力学时，首先明确地定义轴力、剪力和弯矩的正负符号是非常重要的. 本书只研究平面结构问题，而不涉及空间结构问题. 不考虑扭转力矩的话，在外力作用下，杆件只发生轴向拉压、剪切和弯曲变形.

在定义力的正负之前，首先确定所使用的坐标系是右手直角坐标系，如图 1.1 所示. 下面对右手直角坐标系进行详细的说明. 如果是 x-y-z 坐标，若右手的大拇指作为 x 轴，食指作为 y 轴，则中指方向则作为 z 轴，在建立坐标系时，各手指的指尖方向为各坐标轴的正方向. 按右手螺旋法则，将螺旋的尖端朝向我们的对面，螺旋的另一端靠近我们，四指顺时针旋转. 如图 1.2 左图所示，在右手直角坐标系 x-y-z 中，作一根 $x=y=z$ 的轴，从该轴负方向往正方向看去，就会看到 x 轴，y 轴，z 轴如图 1.2 右图所示. 让右手四指从 x 轴转向 y 轴的话，拇指尖端朝向 z 轴正方向，

右手螺旋即是 z 轴的正方向. 按以上方法, 即把 z, x, y 换成 x, y, z 或 y, z, x 都是成立的. $x \to y \to z$ 的顺序为正顺序. $x \to z \to y$ 是负顺序.

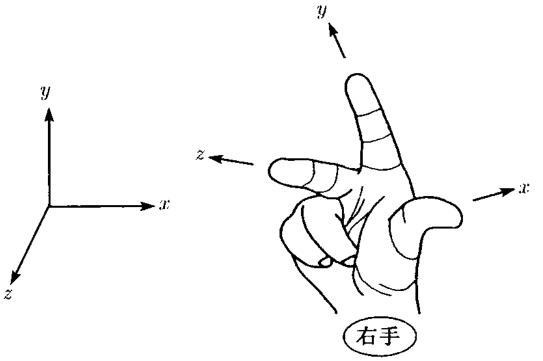


图 1.1　右手直角坐标系

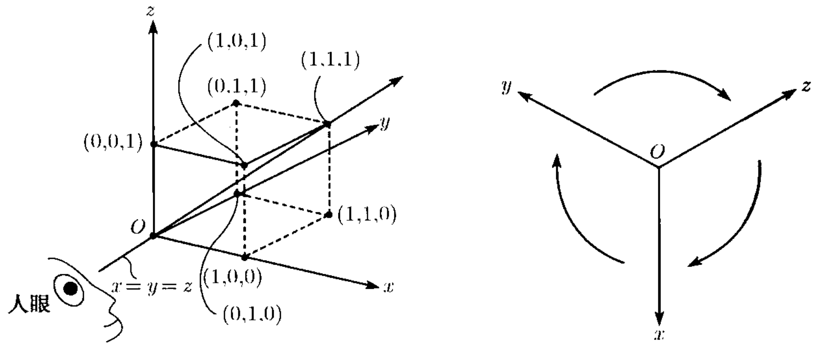


图 1.2　坐标轴的正顺序

将使物体旋转的力即弯矩和转角用矢量来表示, 矢量的正方向也要满足右手螺旋法则.

如图 1.3 所示, 右手的食指, 中指, 无名指, 小拇指的尖端与旋转方向一致, 当

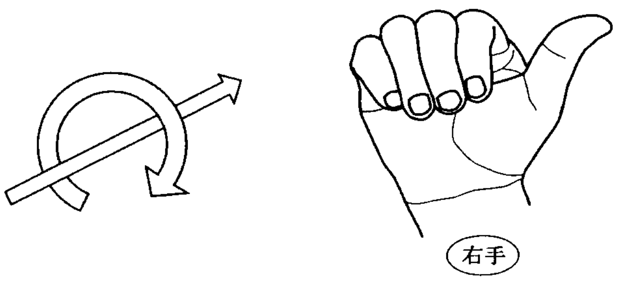


图 1.3　力偶矢的方向

手旋转到握在一起时, 右手的大拇指尖端的方向即为矢量的方向.

在本书中, 使用右手直角直线坐标系. 换言之, 本书对所有问题的论述和讨论都是在此坐标系下进行的.

【参考】 力偶矢具有大小和方向, 能够作为一种矢量来处理, 关于力偶矢的特性, 请参看数学教科书. 例如, 伊理正夫, 韩太舜的《矢量与张量》等.

1.2　轴力 · 剪力 · 弯矩的正负

(1) **轴力**

现在, 将图 1.4 所示的杆件 A 的轴线作为 x 轴, 正应力 σ_x 通常是指在法线沿 x 方向的面上, 其单位面积上的力在 x 方向的分力的大小. 下面来说明什么是 x 正面. 如图 1.5 所示, 将杆件 A 截开, 截面将杆件分为右侧和左侧两部分, 截面的法线都沿 x 方向. 考虑左侧部分, 截面的外法线方向与 x 轴的正方向一致, 考虑右侧部分, 该截面外法线与 x 轴正向相反. 因此, 规定左侧杆件的截面为 x 正面, 右侧杆件的截面为 x 负面. 图 1.4 所示杆件 A 上只作用有拉力时, 正应力 σ_x 为正. 这时, 如图 1.6 所示, 在 x 正面有 x 轴正方向的轴力, x 负面有 x 轴反方向的轴力.

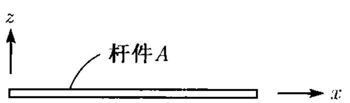


图 1.4　杆件 A 与坐标

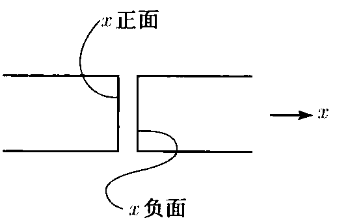


图 1.5　x 面的正负

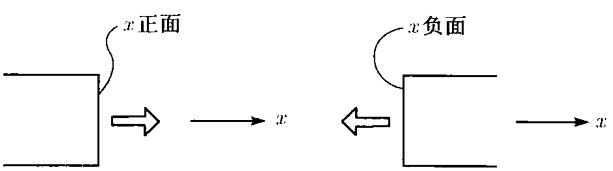


图 1.6　正应力 σ_x 的正方向

关于轴力, 如果以拉伸为正, 压缩为负的话, 则与正应力的正负相吻合.

(2) **剪力**

剪力也可以用同样方法定义其正负. 通常认为在 x 正面上, 与 z 轴正方向一致的剪力为正剪力, 对应的剪应力 τ_{xz} 为正. 如图 1.7 所示, 在 x 正面上, 有 z 轴正方

向的剪力, 该剪力为正剪力.

(3) 弯矩

关于弯矩的正负, 与轴力、剪力有不同的定义方法. 弯矩的大小是力与力臂长度的乘积. 如图 1.8 所示, 从杆件中截取出一部分来进行分析, 右侧的面为 x 正面, 左侧的面为 x 负面. 弯矩的力偶矢的方向为 y 轴方向.

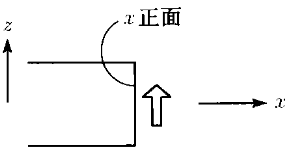


图 1.7　正剪力

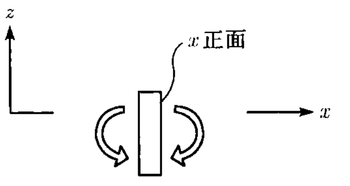


图 1.8　正弯矩

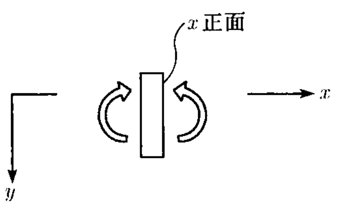


图 1.9　正弯矩

因此, 如果考虑在 x 轴面上绕 y 轴的旋转力是按 $x \to y$ 的顺序. 是图 1.2 的顺时针的顺序, 所以是正顺序, 因此, 在 x 正面上, 把弯矩的力偶矢的方向规定为与 y 轴的正方向一致的为正.

若以图 1.9 所示的坐标系来分析的话, 弯矩是 x 截面上绕 z 轴的力矩. 按 $x \to z$ 的顺序, 是负顺序. 因此, 在 x 正面上, 按右手坐标系的力偶矢方向, 沿 z 轴负方向的弯矩为正. 图 1.9 所示的为正弯矩.

【参考】 上述正顺序和负顺序, 是有规律的, 所以非常容易记忆. 下面也是一种考虑正负的方法.

弯矩的单位用 [力]×[长度] 来表示, 而不是用 [长度]×[力] 来表示. 因此, 顺序是 [力], [长度].

在图 1.8 中, x 正面上的弯矩 (绕 y 轴的转矩) 是

[z 轴方向的力] ×[x 轴方向上的长度], 从 $z \to x$, 是正顺序, 与坐标轴正向一致的弯矩为正.

在图 1.9 中, 绕 z 轴的弯矩是

[y 轴方向的力] ×[x 轴方向上的长度]. 顺序是 $y \to x$, 是负顺序. 因此, 与 z 轴负方向一致的弯矩为正.

下面, 从杆件中取出长度为 $\mathrm{d}x$ 的微段来考虑弯矩和剪力的平衡. 为了便于计算, 剪力取一定值, 如图 1.10 所示. 长为 $\mathrm{d}x$ 的微段上力矩的关系满足

$$\sum M = 0 \tag{1.1}$$

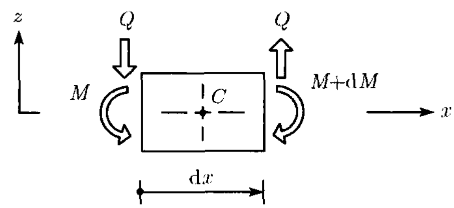


图 1.10 弯矩与剪力的平衡

式 (1.1) 中 M 是力矩, 即弯矩. 具体计算如下, 以 C 点为矩心来考虑, 有式 (1.2) 成立:

$$\{(-M)+(M+\mathrm{d}M)-Q\mathrm{d}x\} \tag{1.2}$$

由式 (1.2) 则式 (1.3) 的关系成立:

$$\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}x}=Q \tag{1.3}$$

式 (1.3) 是人们所熟悉的弯矩和剪力的关系. 如变换坐标, 考虑图 1.11 所示的坐标系, 剪力 Q 的正方向, 弯矩的正方向都与图 1.10 的情况相反. 这时, 式 (1.3) 的关系也是满足的. 对于弯矩和剪力, 按上述规定的方法确定其正负, 都不会与式 (1.3) 产生矛盾.

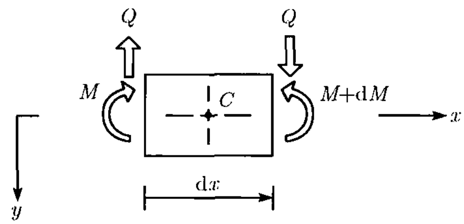


图 1.11 弯矩与剪力的平衡

下面定义图 1.10 和图 1.11 中绕 C 点的力 P 的正负. 如图 1.12 所示, 在 x-y-z 坐标系中, P 点上沿 x, y, z 坐标轴正向的力定义为正, 转矩力偶矢的方向与坐标轴正向一致的, 定义为正. 图 1.12 中的白色空心箭头通常表示坐标轴方向的力, 双箭头的矢量所表示的是力偶矢.

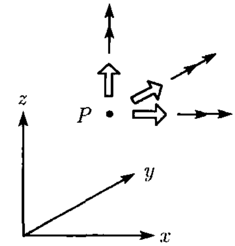


图 1.12 P 点上作用力的正方向

下面考虑与力所对应的变形和位移. 弯矩与曲率对应, 剪力与剪应变对应, 轴力与正应变对应. 另外, 坐标轴方向的力与坐标轴方向的位移相对应, 弯矩与转角相对应. 若杆件 AB 发生变形, 如图 1.13 中的 $A'B'$, 曲率中心位于杆件 AB 的下侧, 即 z 轴的负值区域, 这时曲率为正; 反之, AB 发生变形如 $A''B''$, 曲率中心位

于杆件 AB 的上侧, 即 z 轴的正值区域, 曲率为负. 若变换坐标轴, 曲率的正负如图 1.14 所示.

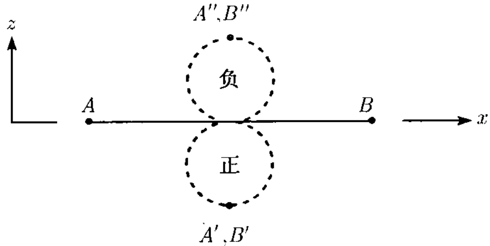


图 1.13　杆件 AB 的变形

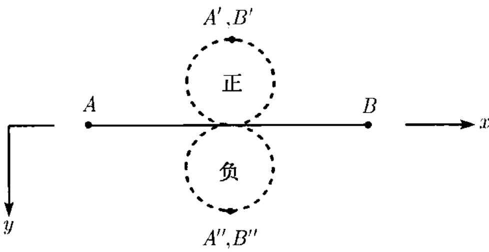


图 1.14　杆件 AB 的变形

1.3　变形 · 位移的正负

正的剪切变形如图 1.15 所示. 轴向应变以伸长为正, 缩短为负. 请注意, 在考虑变形或位移时, 变形或位移矢量或右手坐标系的力偶矢, 都规定其指向坐标系正方向的为正.

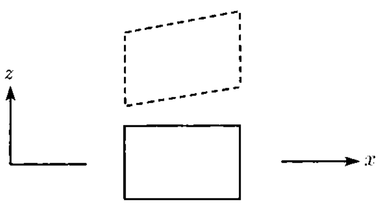


图 1.15　正剪切变形

作为一种表示杆件变形的量, 经常会用到杆件转角, 下面定义转角的正方向. 如图 1.16 所示, 杆件 AB 发生如虚线所示的变形. A 点, B 点分别移动到 A' 点, B' 点. 注意 A 点, B 点的转角 R 的正方向. 转角 R 的力偶矢为 y 轴正方向, 图 1.13 所示的转角 R 为正. 转角也可以看作与刚体转角同样的量, 在图 1.17 中, 刚体只旋转了角度 R, B 点移动到 B' 点, C 点移动到 C' 点. 用与 y 轴相关联的正值转角 R, 乘以 x 方向上的相对距离 x_B, 即得 B' 点相对于 B 点的沿 z 轴方向的位移 δ_z. 因为是 $y \to x \to z$ 的顺序关系, 与图 1.2 所示右手坐

标系顺序相反, 因此, δ_Z 用式 (1.4) 计算.

$$\delta_z = -Rx_B \tag{1.4}$$

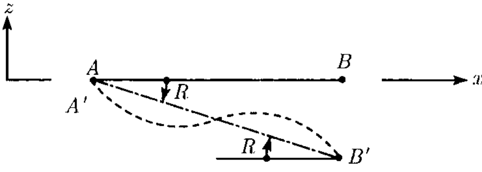


图 1.16　正转角

再考虑 C 点, 为 $y \to z \to x$ 的顺序, 与图 1.2 的坐标系顺序相同. δ_Z 用式 (1.5) 表示

$$\delta_z = Rz_C \tag{1.5}$$

把坐标轴变换成图 1.18 所示的情况, 用同样方法可得到式 (1.6) 和式 (1.7)

$$\delta_y = Rx_B \tag{1.6}$$

$$\delta_x = -Ry_C \tag{1.7}$$

这里, 换一种方法来思考. 图 1.17 和图 1.18 的转角 R 是绕 A 点的旋转, 因此可以像弯矩那样不考虑作用面, 这样会使计算更简单.

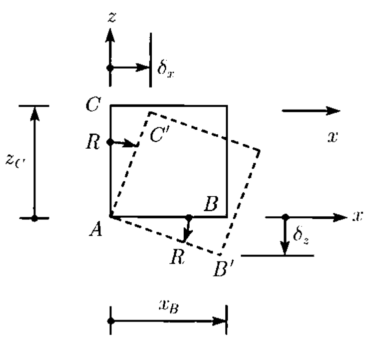


图 1.17　刚体转动与位移

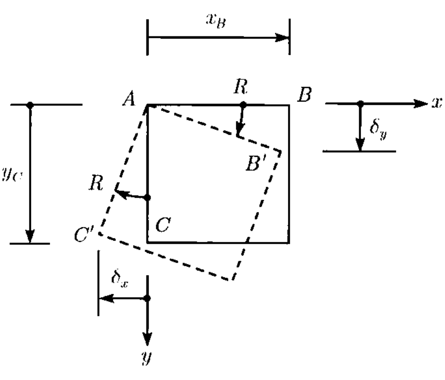


图 1.18　刚体转动与位移

图 1.17 的 B 点 z 轴方向上的位移 δ_z 是用绕 y 轴的转角乘以 x 轴方向的长度来计算的, 它们分别是量纲为 1 的量, 和量纲为长度的量. 可以把量纲为 1 的量看作一个数, 按照 [数]×[长度] 的顺序, 图 1.17 的 B 点 z 轴方向的位移为 $y \to x$ 的顺序, 是负顺序.

图 1.17 的 C 点 x 轴方向的位移为正的顺序. 图 1.18 的 B 点 y 轴方向的位移为正顺序. 图 1.18 的 C 点 x 轴方向的位移为负顺序.

现有 x-y 平面上的杆件, 杆件上有一点 P 和相近点 P', 在图 1.19 中, 有 $\mathrm{d}y = \phi\mathrm{d}x$, ϕ 是转角, 矢量的方向是 z 轴方向, 按顺序考虑的话, $y \to z \to x$ 是正顺序, 右手系力偶矢与 z 轴正方向相同的转角为正. ϕ 可按下式 (1.8) 求得

$$\phi = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} \tag{1.8}$$

图 1.20, 图 1.21 和图 1.22 的转角 ϕ, 可用式 (1.9), 式 (1.10) 和式 (1.11) 来计算

$$\phi = -\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}y} \tag{1.9}$$

$$\phi = -\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}x} \tag{1.10}$$

$$\phi = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}z} \tag{1.11}$$

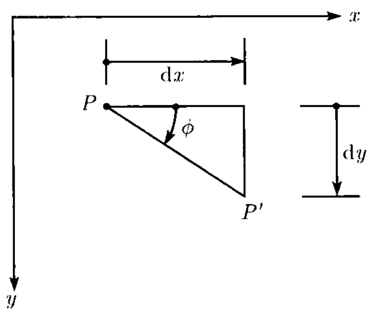


图 1.19　转角与位移

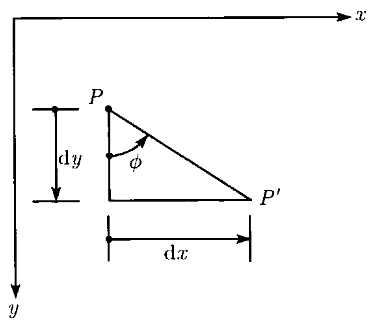


图 1.20　转角与位移

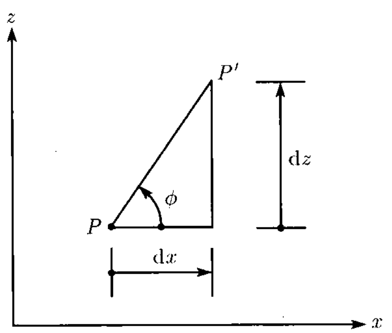


图 1.21　转角与位移

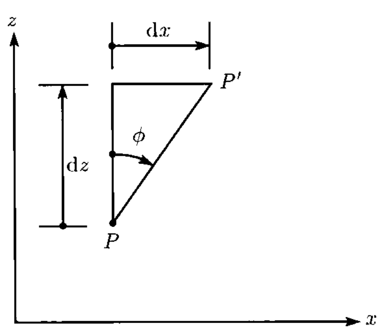


图 1.22　转角与位移

1.4 关于力正负的再讨论

这里, 再次讨论力的符号. 以图 1.23 所示的悬臂梁为例, B 点为固定端, 在 A 点作用一个 z 轴方向的力 P_A, z 轴方向上的力乘以 x 轴方向上的长度 x_B, 即可求得杆件 AB 的固定端 B 点的杆端弯矩 M_B, M_B 的力偶矢与 y 轴相关联. 因为顺序是 $z \to x \to y$, 是图 1.2 的正的顺序, 杆端弯矩 M_B 为

$$M_B = P_A x_B \tag{1.12}$$

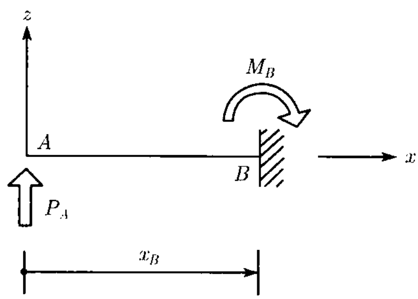


图 1.23 悬臂梁

若 P_A, x_B 都为正, 则 M_B 为正, 右手系的力偶矢方向为 y 轴的正方向.

若力按图示方向作用在杆件上, 即得以下结论. 在杆件 AB 上产生的剪力为定值, 其大小为 P_A, 如果遵从前述剪力符号的规定, 剪力为 $-P_A$. 由式 (1.3), 弯矩 M 可用下式 (1.13) 表示:

$$M = \int -P_A \mathrm{d}x \tag{1.13}$$

考虑悬臂梁悬臂端 A 的弯矩平衡, 可得

$$M\,|_{x=0} = 0 \tag{1.14}$$

由式 (1.13), 式 (1.14) 有

$$M = -P_A x \tag{1.15}$$

在 $x = x_B$ 处, 即 B 点处, 弯矩 M_B 用式 (1.16) 计算:

$$M_B = -P_A x_B \tag{1.16}$$

从上式可知, 假如 P_A, x_B 为正, 则 M_B 为负. 如果遵从前面弯矩符号的规定, 按照 $x \to y$ 的顺序, 杆件 AB 的 B 点是 x 的负面, 按照右手系力偶矢规则, 力偶矢沿 y 轴正方向的弯矩为正.