

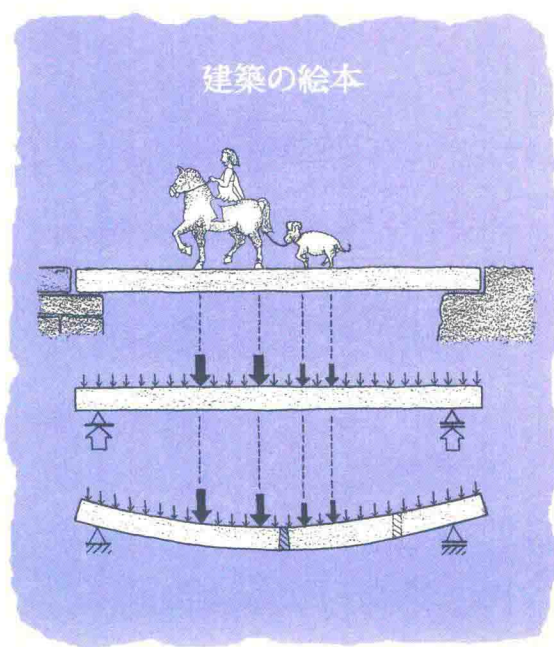
# 建筑结构的奥秘

力的传递与形式

(第二版)

[日] 川口卫 阿部优 松谷宥彦 川崎一雄 著

王小盾 陈志华 译



清华大学出版社

# 建筑结构的奥秘

力的传递与形式

(第二版)

【日】川口卫 阿部优 松谷宥彦 川崎一雄 著

王小盾 陈志华 译

清华大学出版社

北京

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2014-8420

Japanese Title: Kenchiku no Ehon Kenchikukouzou no Shikumi 2nd edition/Chikara no  
Nogare to Katachi

by Mamoru Kawaguchi, Masaru Abe, Yuken Matsutani, Kazuo Kawasaki

Copyright ©2014 by Mamoru Kawaguchi, Masaru Abe, Yuken Matsutani, Kazuo Kawasaki

Original Japanese edition published by SHOKOKUSHA Publishing Co. Ltd., Tokyo, Japan

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

#### 图书在版编目（CIP）数据

建筑结构的奥秘：力的传递与形式 / (日) 川口卫等著；  
王小盾，陈志华译. —2版. —北京：清华大学出版社，2017  
ISBN 978-7-302-47328-2

I. ①建… II. ①川… ②王… ③陈… III. ①建筑结构 IV. ①TU3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第124432号

责任编辑：冯 乐

装帧设计：谢晓翠

责任校对：王凤芝

责任印制：杨 艳

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦A座 邮 编：100084

社总机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈：010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印装者：三河市春园印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：200mm×285mm 印 张：10 字 数：297千字

版 次：2012年6月第1版 2017年8月第2版 印 次：2017年8月第1次印刷

印 数：1~3000

定 价：69.00 元

---

产品编号：063165-01

# 前言

本书从结构力学与结构设计的观点出发，对建筑的形式进行了阐述。

在建筑领域中，结构扮演着两个重要角色。首先是要保证建筑的安全。建筑物需要抵御地震和台风的作用，为了使建筑物能够充分发挥其应有的功能，结构方面的知识和技术是必不可少的。

结构扮演的另外一个重要角色是对于建筑美学的贡献。建筑与雕塑不同，由于它是规模较大的实体，通常建筑物不可能像雕塑那样随心所欲地表现作者所期望的造型，而仅能实现与其所承受力的大小及力的作用原理相适应的造型。当然，也有通过直接或者间接展示结构中力的传递原理手法来实现建筑特有的优美造型的实例。

力与建筑造型之间的相互依存关系一直备受关注。本书旨在把力与造型之间的这种关系用浅显易懂的方式描述出来。

本书由川口和阿部编写，插图由松谷和川崎完成。

本书也适合有兴趣的初中、高中生阅读，对于建筑、结构方面的专家若通过阅读本书在某种程度上感到耐人寻味，有所收获，作者将不胜荣幸。

作者在执笔本书时参考了大量资料，为避免与同类书产生雷同倾向，作者尽力通过自己的思想和见解进行阐述。此外，对于已往涉足较少的部分日本传统建筑也进行了积极的考察，试图对先人们的技术与思想进行更深刻的理解。

希望本书能够被广大读者所喜爱，并且有助于对建筑和理解。

川口卫

1989年12月

## 写于第二版

距初版已过去了20多年岁月，在这当中，世间的许多建筑也发生了变化。有的著名建筑消失了，有的无名场所却挺立起了具有全新特质的构造物。此外，结构设计的思考方法和手法，也发生了变化。

为了应对这种种变化，本书也做了首次修订。

修订的内容，除了依据现状对信息进行更新外，也对这20多年间取得长足进步的耐震·免震·制震等进行了介绍。本次修订作业依然由初版的原班人马，按照原来的各自分工进行。

希望本书，包括此次的修订版，能成为对初学者通俗易懂，对专业建筑人士亦有助益的书，这是我们不变的心愿。期待读者们批评指正。

川口卫

2014年4月

## 译者序

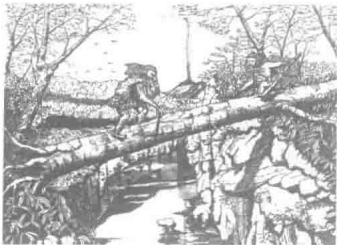
《建筑结构的奥秘》一书是川口卫教授的重要著作之一，作者花费了大量的精力和时间，以图文并茂的方式深入浅出地揭示了建筑结构的本质和构成规律，总结了建筑结构，特别是大跨度结构的发展历史，使人对建筑结构的學習产生浓厚的兴趣和探索意愿，是一本不可多得的结构专业书籍，不仅对专业研究工作者提供了参考，也能帮助非专业人员对建筑结构的知識加深理解。

川口卫教授先后两次共三届担任国际薄壳与空间结构学会主席，担任亚洲创新性建筑学会主席和日本空间结构学会主席等。川口卫教授在科研领域成果卓著，出版多部论著，发表了大量高水平学术论文，拥有发明专利17项，原创设计了大量结构工程经典作品，成为当代著名的结构设计大师和结构艺术家。川口卫教授的代表性设计作品为1964年日本东京奥运会主场馆代代木体育馆、1992年西班牙奥运会主场馆和新加坡国立体育馆等。川口卫教授发明了世界著名的攀达穹顶工法，先后用于神戶纪念堂、福井太阳穹顶、新加坡国立体育馆、奈良大会堂、浪速穹顶、巴塞罗那圣乔地体育馆、日本储煤仓和西班牙斗牛场等重要建筑中，大规模地提高了施工效率，体现了现代建筑结构的精髓和技术水平。

本书的翻译稿得到了留日博士贺明玄教授及高级工程师认真仔细的校对审核，在部分建筑用语上得到了天津大学建筑学院徐苏斌教授的指导，天津大学建工学院钢结构研究所硕士生陈坤（现日本东京大学博士生）参与了大量的翻译工作，硕士生白晶晶、刘燕燕参与了本书的译校工作，译者在此一并表示感谢。

# 目 录

## 第 1 章



|           |     |
|-----------|-----|
| 梁和柱       | 001 |
| 梁的理论及应用   | 002 |
| 梁承受的力     | 004 |
| 梁的材料及形状   | 005 |
| 梁的种类      | 006 |
| 梁的应用——桥梁  | 007 |
| 日本建筑中梁的原理 | 008 |
| 寺院建筑的屋顶结构 | 010 |
| 斗拱        | 011 |
| 屋架和挑檐木    | 012 |
| 法隆寺的屋檐及斗拱 | 013 |
| 梁和柱的结构    | 014 |
| 柱的作用与形状   | 015 |
| 装饰用梁、柱    | 016 |
| 虚梁、柱      | 017 |
| 用隅撑支承的屋檐  | 018 |

## 第 2 章



|                |     |
|----------------|-----|
| 桁架             | 019 |
| 三角桁架的原理及应用     | 020 |
| 三角桁架的构思        | 022 |
| 三角桁架的例子        | 023 |
| 三角桁架的种类和力的传递   | 024 |
| 梁桁架的种类和力的传递    | 025 |
| 梁桁架的原理         | 026 |
| 从组合到分离——梁桁架的出现 | 027 |
| 梁桁架的发展         | 028 |
| 现代的桁架结构        | 030 |
| 空腹桁架           | 032 |

## 第 3 章



|            |     |
|------------|-----|
| 框架结构       | 033 |
| 木框架结构      | 034 |
| 框架结构的原理    | 036 |
| 传统木结构的框架效果 | 037 |
| 现代建筑的框架结构  | 038 |
| 框架结构的作用    | 039 |
| 现代的框架结构    | 040 |

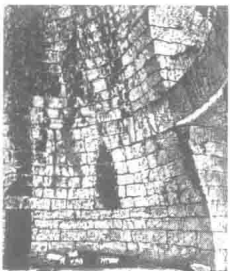
第4章



拱，拱顶结构 041

- 砌筑拱的出现 042
- 砌筑拱的原理和应用 044
- 拱顶结构的发展 046
- 交叉拱 048
- 肋的造型 049
- 日本的拱结构 050
- 欧洲的木拱结构 052
- 铸铁拱 053
- 锻铁拱 054
- 钢铁拱 056
- 拱的造型——建筑 058
- 拱的造型——大跨建筑 060
- 拱的造型——桥梁 061

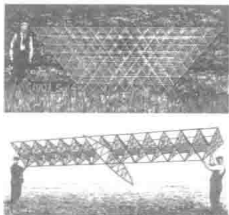
第5章



穹顶，壳 063

- 砌筑穹顶的产生与发展 064
- 大穹顶的典范——万神庙 066
- 穹隅和角拱 067
- 文艺复兴的先驱——佛罗伦萨大教堂 068
- 圣彼得大教堂——改建与科学手法运用的开始 069
- 现代的穹顶、壳结构 070
- 壳的形状与力流 072
- 壳体结构的经典尝试 074
- 寻求更加自由的形状 076
- 伊斯勒壳结构 078
- 壳的形态和计算机 079
- 折板结构的原理与实例 080
- 折板结构的造型 082

第6章



空间网架 083

- 空间网架 084
- 网壳结构形式 086
- 网格穹顶 088
- 空间网架的节点 090
- 古典式空间网架 091
- 空间框架模型和设计 092

## 第7章



### 索结构 093

- 索结构的产生与发展 094
- 索结构的原理——桥 096
- 近代的悬索桥 098
- 斜拉桥 099
- 悬索屋盖结构的产生与发展 100
- 悬索屋盖结构——各种组合方式 102
- 悬索屋盖结构的展开 104
- 拱与索进行组合——索拱结构 106
- 索拱结构的浪漫色彩 108

## 第8章



### 膜结构 109

- 向膜结构的挑战 110
- 充气膜结构的力学原理 112
- 充气膜结构的展开 114
- 不使用空气的膜结构 116

## 第9章



### 塔与超高层建筑 117

- 日本的塔 118
- 竞争高度的塔 120
- 宗教与塔 122
- 电波塔 122
- 塔式建筑的力流和造型 124

## 第10章



### 耐震、免震、制震 125

- 耐震结构 126
- 免震结构 128
- 制震（振）系统 130

### 参考文献 133

### 索引 137

# 第1章 梁和柱

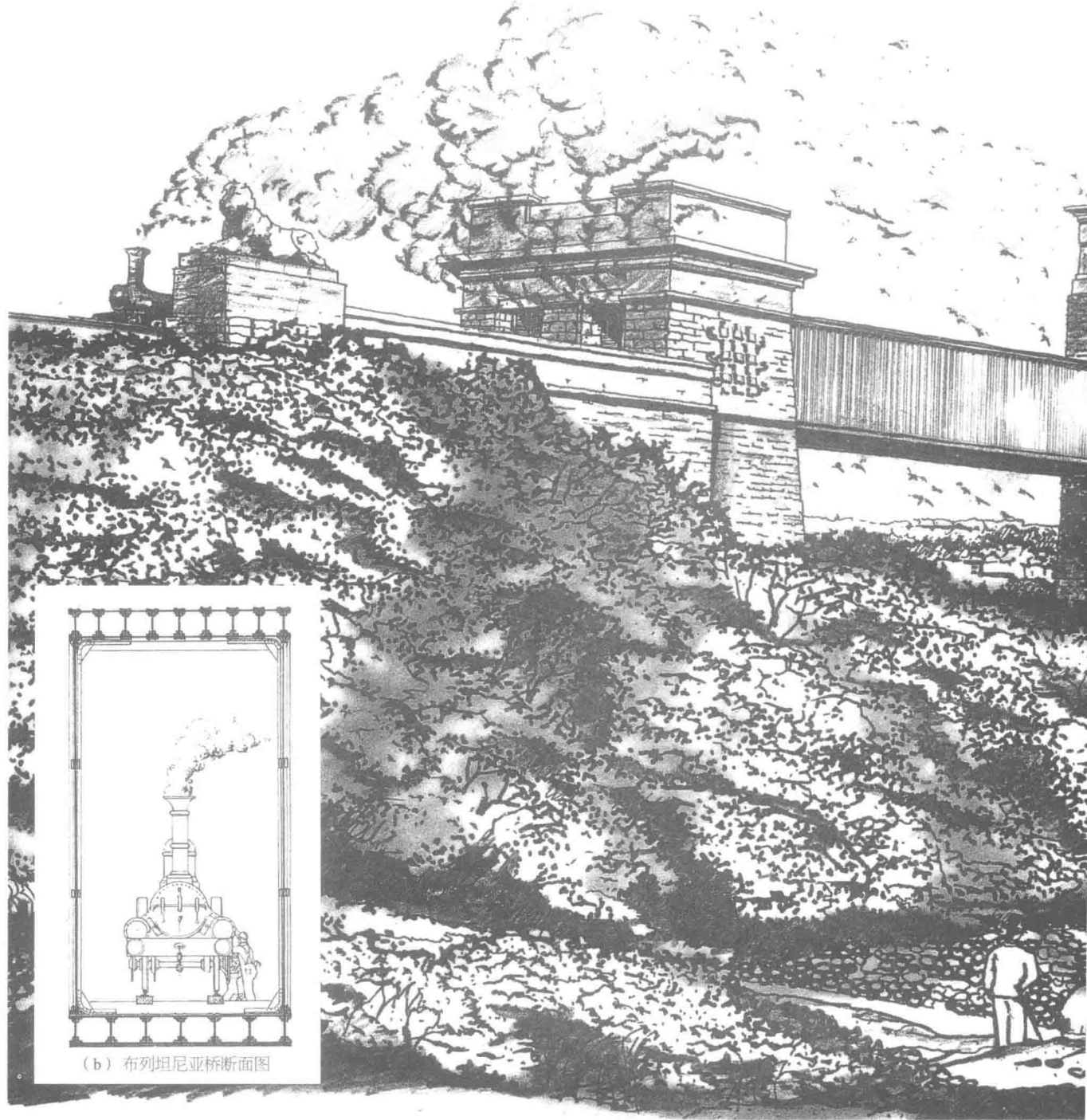
要想跨越一段距离时，最简单的方法就是将粗棒状的物体横置于两个支点之间。这种方法，我们的祖先恐怕在几万年前就已经知道了。在他们的原始生活中，被风刮倒的树木偶然横跨在小河上，被当作圆木桥使用。于是，这就成为人们渡河和跨越山谷的手段。

横架（水平放置）于支点之间的棒状物称为梁。梁是现代建筑以及桥梁结构中应用最广泛的构件之一。

为了把梁架设在一定高度上，就要借助于柱子。柱子是将棒状物竖直放置用来支承荷重的一种构件。柱子与梁都具有悠久的历史，也是现代建筑结构中最为普遍的一种构件。



图 1.1 被风刮倒的树成为独木桥



(b) 布列坦尼亚桥断面图

## 梁的理论及应用

梁是最简单的结构体系。但是，人们在很久以前并不能够全面细致地掌握梁的受力情况。有关梁强度的科学研究是在17世纪前半叶，由伽利略开始的。其后，经过了反复的尝试、发现问题，大约在19世纪中叶，才大致了解了梁内部的力和变形情况。关于这方面的研究，主要是以擅长数学的法国学者及技术人员为中心进行的，在其他地区，研究相对迟缓。特别是英国，尽管通过产业革命向世界展示了其先进工业的发展，在当时却没有能够直接运用梁的理论进行设计的技术人员和科学工作者。1843年，罗伯

特·史蒂文森（乔治·史蒂文森的儿子）为使火车通过跨度400米的梅奈海峡而建造巨大的桥——布列坦尼亚桥，就是当时的事情[图1.2(a)]。幸运的是，到19世纪前半叶为止，一直使用的脆性铸铁在结构领域基本不使用了。取而代之并被广泛使用的是延性很好的锻铁板，这在蒸汽装置的高压锅炉等中也是不可缺少的。史蒂文森在得到熟知锻铁性质的造船工程师菲尔贝尔和材料力学专家荷吉金森的帮助后，开始了这座铁路桥的设计与研究。最初史蒂文森考虑将此桥设计成索链桥（悬索桥的一种，参照94页），桥的重量由索链承担，用恰好可嵌入列车的箱

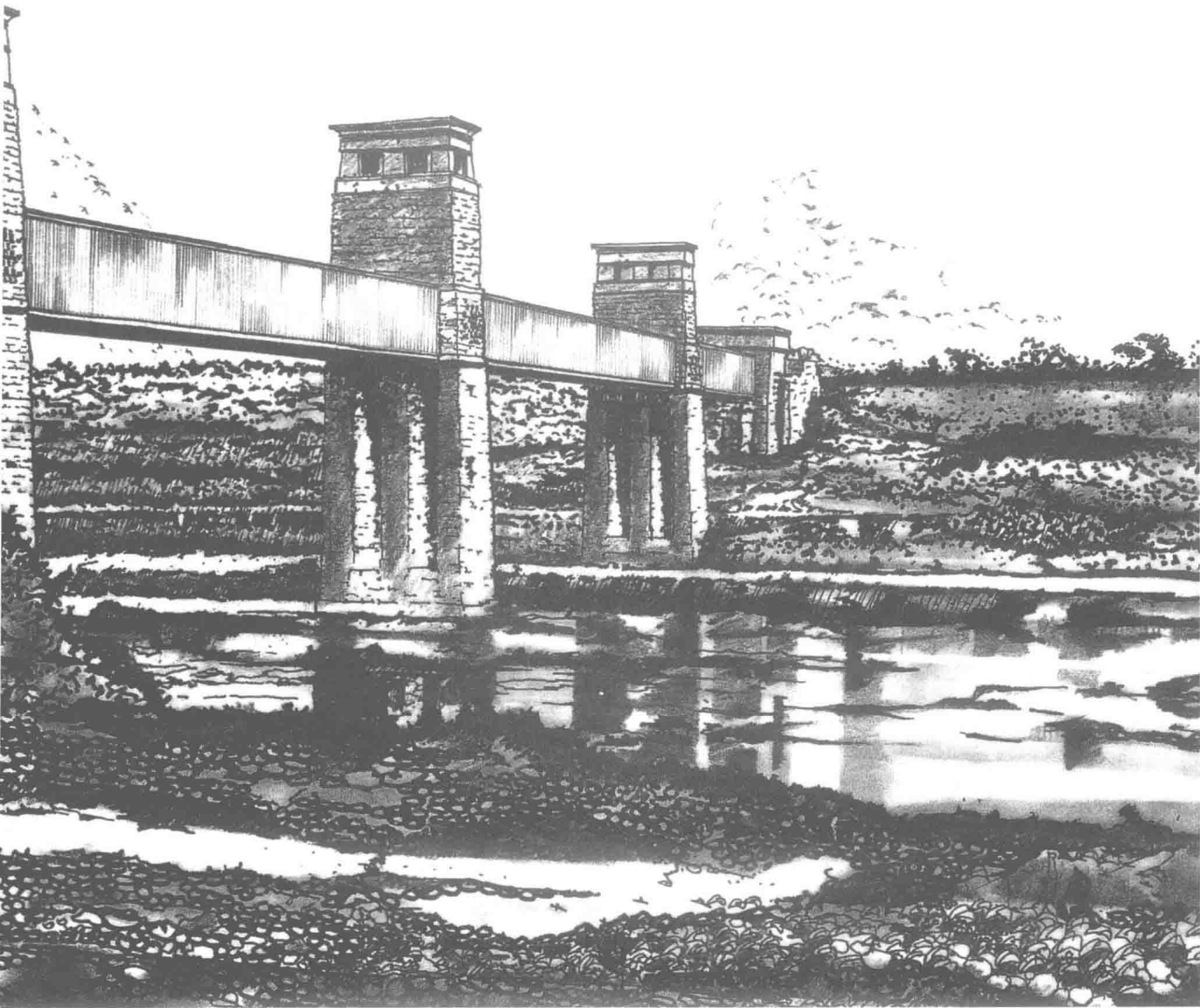
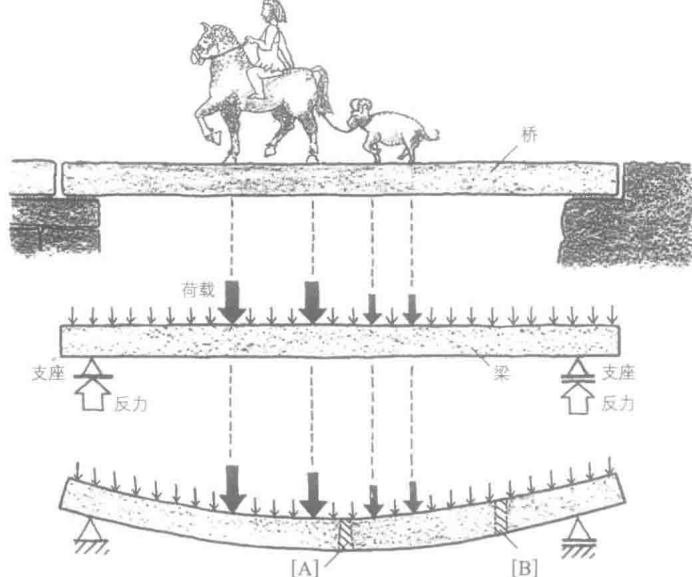


图 1.2 (a) 布列坦尼亚桥

形梁（箱形截面的梁，参照断面图）来防止易引起晃动的悬索桥的变形。往返两道桥身独立结构并列放置在相同的桥台上。箱形梁的上下两面作为抵抗弯曲应力的翼缘（参照下一页之后的内容），并开始将此应用于当时的船体结构。制作出带有坚固隔板的双层结构，其侧壁作为抵抗剪力的腹板，采用角钢加固的铁板。材料全部采用锻铁板，连接处使用铆钉。

对于梁的性质，史蒂文森和他的同伴们在没有充分掌握理论背景的情况下，制作了1/6缩尺的模型，采用实验为主的方法，逐渐积累设计所需的知识。根据一系列实验，得知此箱形梁的刚度要大于

预想刚度，作为独立的结构能够用于铁路桥，于是终止了采用索链进行悬吊桥梁的初始计划。因那时桥塔已根据所设定的高度施工完成，所以桥塔的形状就保留了下来。因此，此桥的3座桥塔，在结构上被描述为“无用的高塔”，但幸运的是，在造型上还看不出不太自然。假如在塔顶从一对小窗口向其他桥塔眺望，试着想象连接桥塔的索链群飘浮在空中、描绘成抛物线形的曲线幻象，也是一种乐趣（参照第7章克里夫顿桥的形态）。布列坦尼亚桥经历过1970年的火灾后不再满足其使用功能，后在其残留的桥塔上架设了铁拱桥。



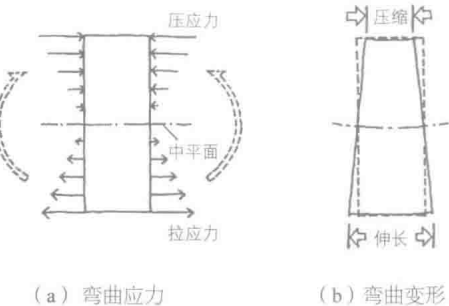
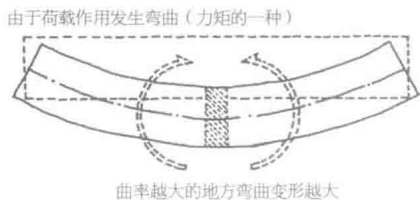
(a) 现实中的桥

(b) 梁的受力特性（考虑梁的自重荷载）

(c) 梁的变形

图 1.3 梁的力与变形

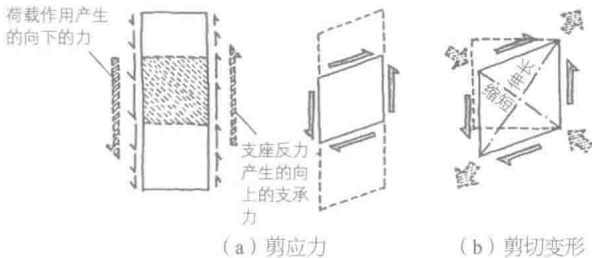
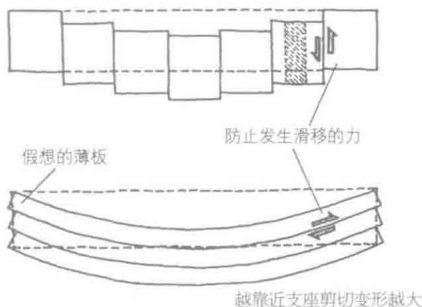
[A] 处发生弯曲变形



(b) 弯曲变形

图 1.4 弯曲应力和弯曲变形

[B] 处发生剪切变形



(a) 剪应力

(b) 剪切变形

图 1.5 剪应力和剪切变形

## 梁承受的力

在地球上，无论是过桥的人、动物还是桥体本身，都要受到垂直向下的重力的作用。作用在结构（此处为桥）上的力称为“荷载”。当然也有风力作用的水平荷载。当考虑结构物内部产生的力（应力）和结构本身的变形时，可认为荷载作用在无重量的结构上。也可将结构物自身的重量（自重）当作荷载来考虑。在支座处产生与荷载相平衡的反力（参照图1.3）。

梁的变形分为“弯曲变形”和“剪切变形”。

弯曲变形是指梁的一侧伸长，另一侧缩短的变形。产生此类变形是因为梁截面的一侧受拉应力，而另一侧受压应力作用的结果。这种应力被称为弯曲应力。梁截面的中间为无伸缩的面（中和轴）。弯曲应

力大小与距中和轴的距离成正比例增大（参照图1.4）。

此外，试想沿梁长将梁垂直切成几个部分，各个部分因荷载作用将会向下滑动。我们发现，向下滑动部分与相邻部分之间的垂直截面上存在着支承应力作用。这种应力被称为“剪应力”。同时，还可以将梁在水平方向切成薄板，当各薄板都能够发生自由伸缩时，很容易得知，各部分将会沿着薄板面滑移。而梁作为一个整体，不会产生这种滑移，于是沿着薄板面必然存在着应力。这种应力也称为“剪应力”。如此，剪应力是纵向和横向的一对应力，作用于梁的各个部分。因此，在梁中正方形单元上，剪切变形就是欲使正方形变成菱形的变形（参照图1.5）。

梁的材料及形状

弯曲应力与距中和轴的距离成比例增大，制作梁时，在离中和轴较远的地方布置的材料效率高。考虑上述因素，钢梁等在工厂里生产的构件在梁的上下边缘设置抵抗弯曲应力的部分（称为翼缘），上下翼缘的连接部分（腹板）用来抵抗剪力（图1.6）。对于钢筋混凝土梁，为弥补混凝土受压性能强而受拉性能弱的特点，需要在混凝土中有效地布置钢筋。

为抵抗弯曲产生的拉应力，在梁的长度方向布置的钢筋被称为“主筋”。主筋尽可能布置在距中和轴较远的位置（图中的下端）。在梁的支座附近会产生较大的剪力。为抵抗剪力，沿梁长度方向按一定间隔布置“箍筋”。钢筋混凝土梁常因弯曲拉应力而出现开裂（弯曲裂缝）。另外，如果剪力非常大，会产生

“剪切裂缝”。因为剪切变形为菱形变形，梁会沿着伸长端对角线方向发生变形，导致混凝土发生断裂，产生斜裂缝（参照图1.7）。为了消除混凝土抗拉性能差的缺点可以采用预应力混凝土。预应力混凝土梁是在混凝土梁中贯穿高强度张拉钢筋，通过对其施加较大的张拉力并锚固后，在混凝土梁中，沿长度方向会产生较大的压应力（预应力）。梁处于此种状态时，即使梁受弯，只要弯曲产生的拉应力小于预应力值，梁中就不会产生弯曲裂缝。这种预应力混凝土梁与普通钢筋混凝土梁相比，不仅截面效率更高，而且经过一定时间之后性能也不会降低。因此，在桥梁和大跨度建筑物中广泛采用预应力钢筋混凝土梁（参照图1.8）。

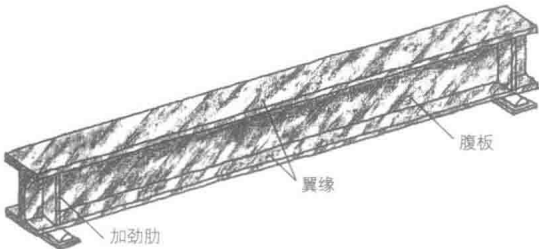
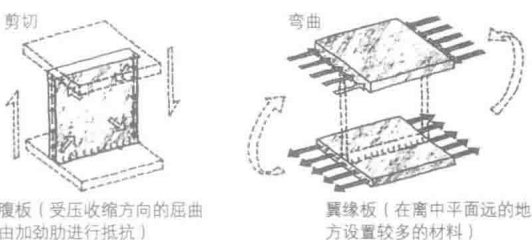


图 1.6 (a) 钢梁



(b) 钢结构的受力原理

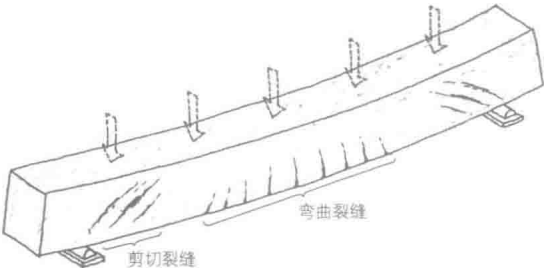
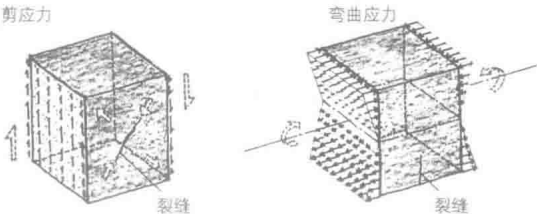
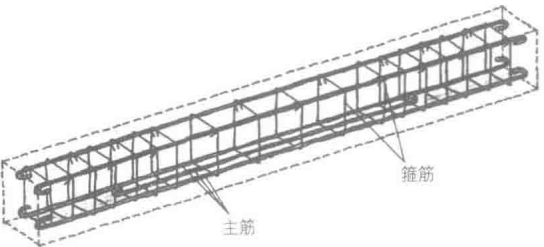


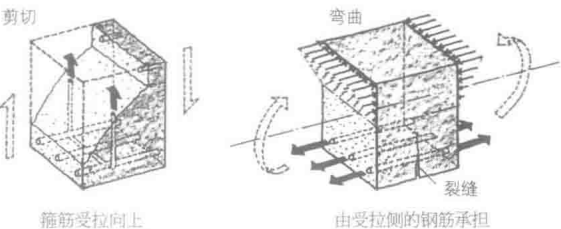
图 1.7 (a) 钢筋混凝土梁



(c) 混凝土的应力



(b) 配筋



(d) 钢筋混凝土的受力原理

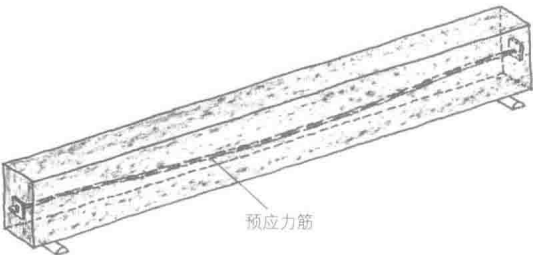
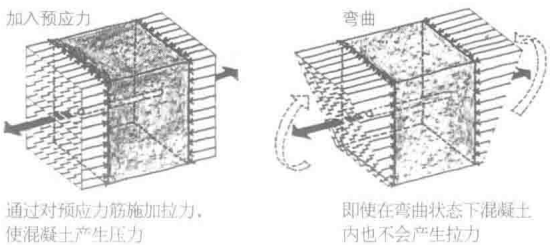


图 1.8 (a) 预应力钢筋混凝土梁



(b) 采用预应力抗弯的原理

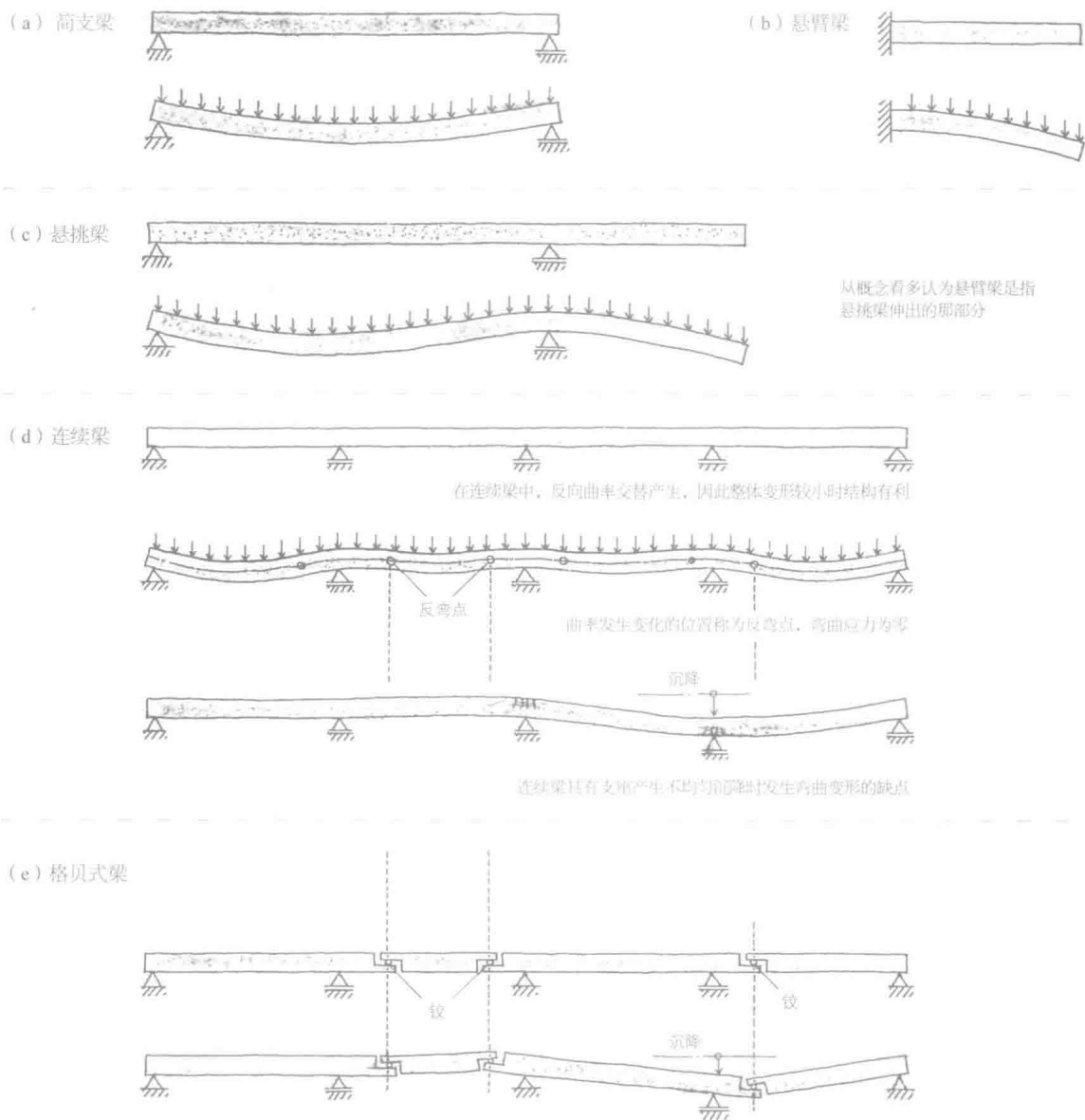


图 1.9 梁的种类及其变形特性

## 梁的种类

根据支承方式，梁可分为简支梁、悬臂梁、悬挑梁和连续梁等。简支梁和悬臂梁作为最基本的结构，在通常的荷载作用下，简支梁[图1.9 (a)]向下凸，悬臂梁[图1.9 (b)]则产生向上凸的弯曲变形。一般情况下，对于最大弯曲应力，简支梁发生在跨中附近，悬臂梁发生在根部。由于悬挑梁[图1.9 (c)]悬挑侧的支座相当于悬臂梁的根部，因此在支座处会产生向上凸的较大的弯曲变形。连续梁[图1.9 (d)]中，支座处为向上凸的弯曲变形，跨度中央附近产生向下凸的弯曲变形。由于这种反向曲率的交替产生，与相同跨度的简支梁相比，弯曲应力和弯曲变形都比较小。连续梁虽然具有这样的优点，但另一方面，若支座由于某种原因产生不均匀沉降，梁将相应地发生变形，会

产生较大的弯曲应力。格贝式梁[图1.9 (e)]，能发挥连续梁的优点并消除其缺点。观察连续梁的变形，曲率方向交替地变化，曲率方向改变的位置（反弯点）的曲率为零。由于该点弯曲应力为零，即使在此处设置铰接节点，也不会改变连续梁变形的性质。认真选择铰接节点的位置，使连续梁保持其优点的同时，还能够转换成悬挑梁和简支梁的组合形式。这就是格贝式梁。即使发生支座沉降也不会产生弯曲变形，即具有能够适应沉降的优点。并且，由于设置了铰接节点，在工程上利于分段，对施工中构件的运输和架设非常有利，因此被应用于高架道路、桥梁等构筑物中。

梁的应用——桥梁

梁的制作和架设都较简单，自古以来被广泛应用于桥梁建设。

以日本三座奇桥（爱本桥、锦带桥、猿桥）之一，位于山梨县大月的猿桥[图1.10（b）]为例。其跨度约30m，以两岸各四层悬挑梁为基本支承结构。悬挑梁有将近一半的长度嵌入两岸岩体。此桥在15世纪就有记载。虽然有过多多次维修重建，但基本结构并没

改变。此外，富山县宇奈月的爱本桥与猿桥结构很相似，该桥在1891年被拆除。在现代桥梁中，钢结构及预应力混凝土（PC）结构的桥梁很多。图1.10（a）所示欧洲桥（中间跨度为198m）是钢板箱形截面连续梁的例子，波川道路桥（跨度约30m）是PC混凝土格贝式梁的例子。

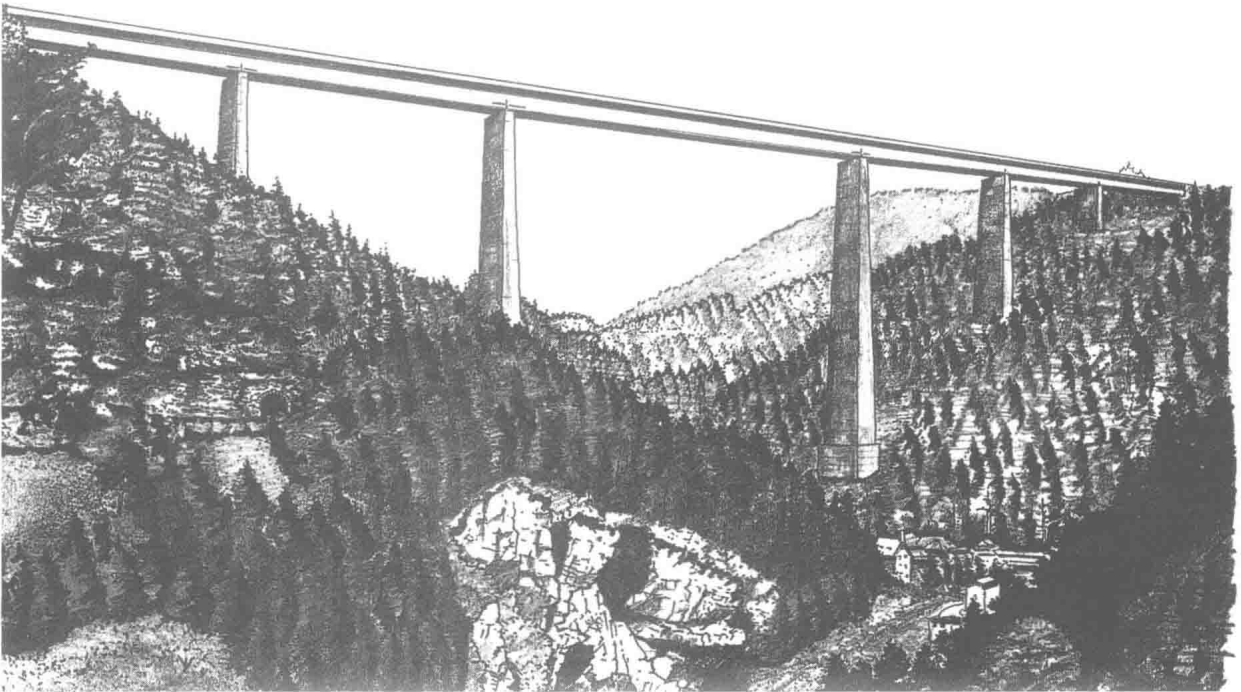
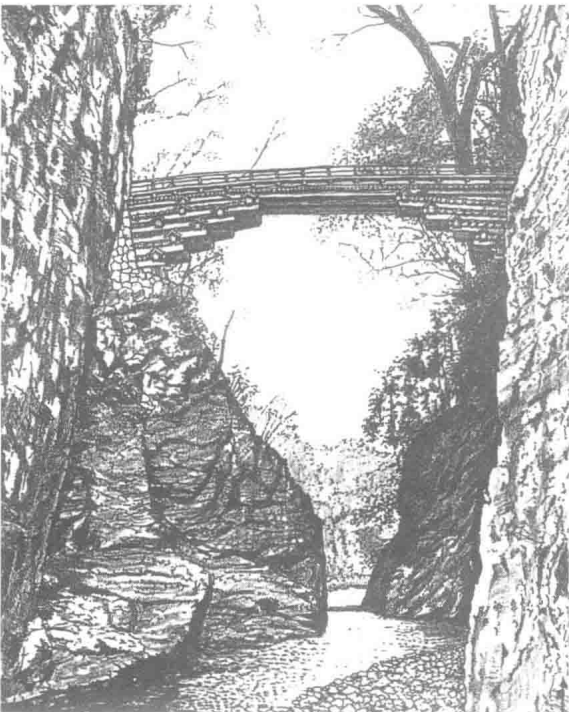


图 1.10（a）欧洲桥（1963 年，奥地利）



（b）猿桥（初建于 15 世纪，山梨）



（c）波川道路桥（1971 年，意大利）



## 日本建筑中梁的原理

日本自古以来受益于丰富的木材资源，不仅寺院、宫殿、神社使用木材建造，一般民居、商店、剧场等，日本几乎所有的传统建筑全是用木材建造的。其中，伴随佛教传入日本，寺院建筑是以中国大陆及朝鲜半岛的样式、技术为出发点，在受到中国大陆新样式影响的同时，也逐渐地确立了日本独特的形态和样式。木材易燃、易腐蚀，因战火、雷击、老化等原因，无数的木制建筑已不复存在。然而，由于先人们不断地修理与努力地保存，不少建

筑物仍保持着数百年前建造之初的形态。运用丰富的木材资源建造的日本建筑的结构与欧洲传统建筑相比，有其明显的特征。

欧洲建筑结构多采用拱形、三角桁架等结构，形成合理的结构形式，而日本建筑则完全应用了梁的原理。在日本建筑中，无论是屋顶结构还是屋顶挑檐结构都是应用了梁（受弯构件）的原理。

比如说，建造建筑物中间部分（主房）的屋顶结构（屋架，见10页）时，在支座间架设梁（屋架梁），



图 1.11 平等院凤凰堂中堂（1053 年，京都）

其上设置短柱。这种梁和短柱的结构，根据屋顶的规模可多重设置。在短柱上架设檩条，在脊檩、檩条、梁间倾斜的弯曲构件上设置椽，这样屋架也就完成了。并且，作为建筑物主体结构中柱与梁的连接构造及日本建筑中特有的深屋檐的建造方法，斗拱得到了广泛应用。斗拱中有斗和拱，斗为支座，拱起到梁的作用。屋顶和屋檐的荷载，通过斗和拱（合称“斗拱”）连接节点集中，再传递到柱子上。

由于屋檐的斗拱外露，因此在造型上也是极其重

要的部分。在重要建筑的屋檐中，喜欢用斗拱中最复杂的三踩斗拱作为大屋檐悬挑构造节点。建筑物四个角部位的斗拱在视觉表现上效果最好。与此同时，为了把两个方向的屋檐构件复杂地连接在一起，并考虑到又要把对角线方向的大屋檐支撑起来，在建造技术方面需要下很大功夫。因此，对角部的三踩斗拱自古以来曾有过各种各样的尝试，在平等院凤凰堂的中堂（图1.11中间的建筑物）屋顶结构上得到了最井然有序的组方法，至此被认为实现了三踩角部斗拱的构成。