

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
面向可持续发展的土建类工程教育丛书

现代高层钢结构 分析与设计

ANALYSIS AND DESIGN FOR MODERN TALL STEEL STRUCTURE

◎王仕统 郑廷银 编著



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
面向可持续发展的土建类工程教育丛书

现代高层钢结构分析与设计

王仕统 郑廷银 编著



机械工业出版社

本书论述现代高层钢结构分析与设计,共12章,主要内容包括:绪论、材料、建筑体型、作用、抗侧力结构体系、框架的手算方法、钢结构的精确分析、作用效应组合、结构验算、构件设计、组合楼盖设计、节点设计。

本书可供土木工程设计、施工、监理、科技人员阅读,也可用作高等院校土木工程专业高年级本科生、结构工程专业研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

现代高层钢结构分析与设计/王仕统,郑廷银编著. —北京:机械工业出版社,2018.1

(面向可持续发展的土建类工程教育丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-111-58594-7

I. ①现… II. ①王… ②郑… III. ①高层建筑-钢结构-结构分析②高层建筑-钢结构-结构设计 IV. ①TU973.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第297964号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林辉 责任编辑:林辉 于伟蓉

责任校对:刘岚 封面设计:张静

责任印制:孙炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2018年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·24.25印张·1插页·591千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58594-7

定价:89.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com



a) Sears Tower
 $H=443.179\text{m}$
 $n=110$
 9束筒，1974年
 用钢量 161kg/m^2



b) 台北国际金融中心
 $H=427.1\text{m}$
 $n=101$
 大柱框架，2004年

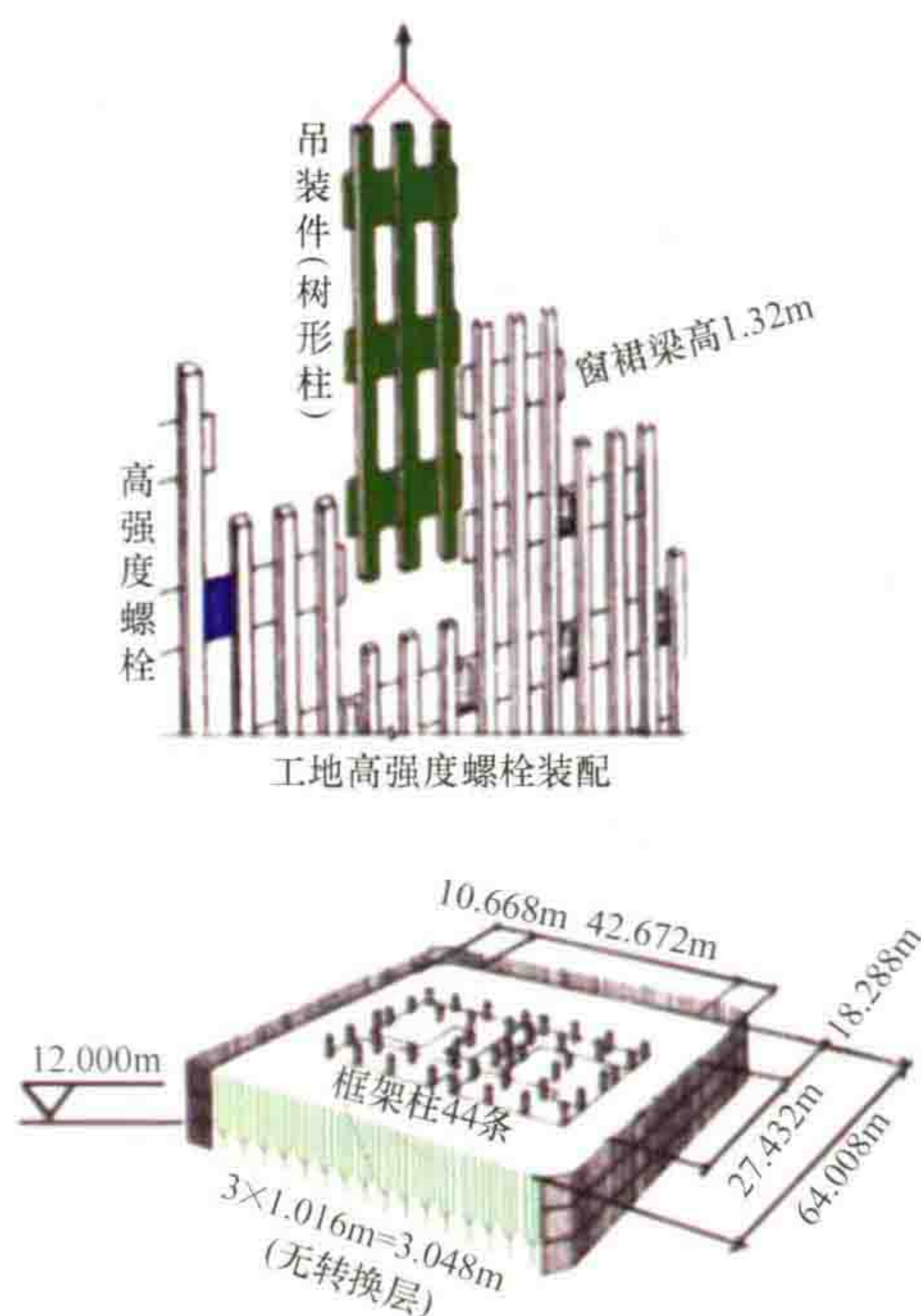


c) World Trade Center
 $H=416.966\text{m}$
 $n=110$
 框筒，1973年
 用钢量， 186.6kg/m^2

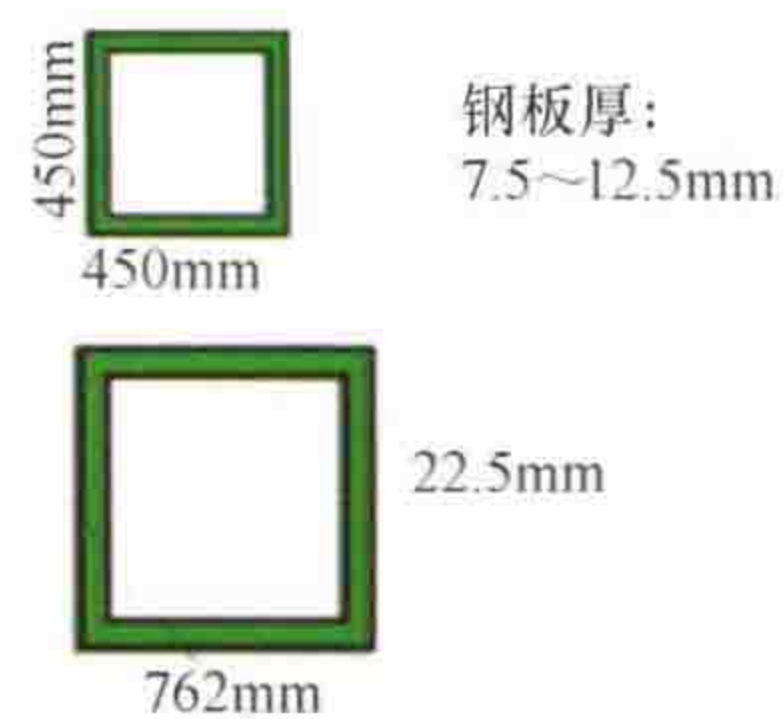


d) Empire State Building
 $H=381\text{m}$
 $n=102$
 框-撑，1931年
 用钢量， 206kg/m^2

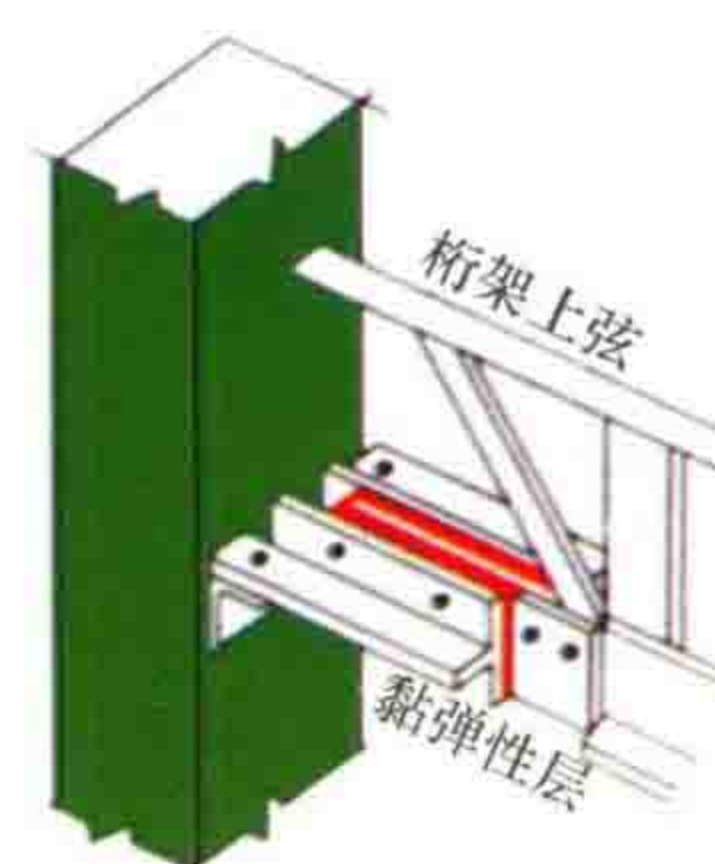
世界高层（全）钢结构前列建筑



闭口薄壁箱形柱的截面



$3 \times 1.016\text{m} = 3.048\text{m}$
 (不设转换层)



被动控制技术

World Trade Center 轻量化设计指标



a) 正面“O”，侧面“S”的奇特扭曲造型



b) 现场全焊接连接

$H=234\text{m}$, $n=53$ 层, 用钢量 302kg/m^2

中央电视新楼 CCTV



a) 实景



b) 结构



c) 弯矩图

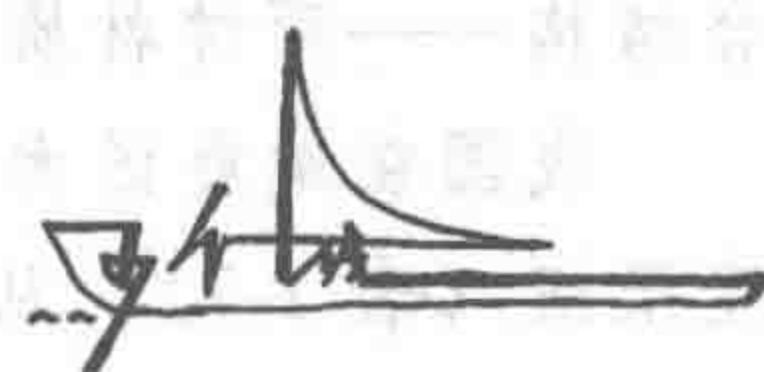
$H=321\text{m}$, 巴黎, 1889年

Eiffel Tower 埃菲尔铁塔

现代钢结构轻量化设计是硬道理（力学功底、结构稳定理论），硬设计（只会熟练地使用设计软件，而不知其然）就是任性——笨重与怪异。

满足建筑功能和美学——最简洁的钢结构（非复杂结构）就是最好的结构。

凡是与自然对抗的结构，都没有顽强的生命力。



2017年10月25日

前言

现代结构有两个显著特点：一是选用轻质高强均质材料，如 1973 年建成的美国世界贸易中心（World Trade Center），钢材强度已达 700N/mm^2 ；二是采用现代分析方法——有限元（条）法、结构稳定理论、结构减震控制理论和预应力理论等（表 1-9）。

高层全钢结构（本书简称高层钢结构）是由钢构件（structural members）组成的不开裂结构（表 1-4）。与开裂的混凝土结构相比，要求钢结构设计者的力学概念更加清晰，才能设计出轻巧的钢结构，如世界最高的高层钢结构西尔斯塔（Sears Tower, 1974 年）110 层，高 443.179m，采用 9 束筒抗侧力体系（图 1-23b），用钢量仅 161kg/m^2 。因此，钢结构轻量化设计是硬道理（力学功底、结构理论），硬设计（只会熟练地使用设计软件，而不知其然）就是任性——结构笨重与怪异。

书中对高层钢结构概念的几个问题提出质疑，弘扬学术争论。

1) 对竖向荷载作用下的框架，采用分层法中框架分层单元的结点，由通常的固端支座改为旋转弹簧支座（图 6-18c）。

2) 高层混合结构——两种材质的抗侧力结构的混合。如上海希尔顿国际酒店（图 1-10），由抗侧力混凝土核心筒结构和抗侧力钢框架结构组成。而“十二五”普通高等教育本科国家级教材（经典精品系列教材），则把由混凝土柱和钢梁组成的框架结构称为混合结构——两种材质构件的混合。

我国在地震区大量采用高层混合结构，且结构高度远远超出我国现行规范（程）的高度限值（表 1-7），从而，我国混合结构的高度进入世界前列（表 1-8），但结构笨重。

3) 对于框-撑体系的弯剪型侧移曲线，它与剪切型（框架）、弯曲型（支撑、剪力墙）曲线应该不相交（图 5-19b）。

4) 轴压比是开裂混凝土结构中的一个术语，高层钢结构不应验算轴压比（图 1-8）。

5) 按风作用方向考虑，高层结构 H/B 之比不应说成高宽比（图 1-19），而应称为高厚比（height-to-thickness ratio）（图 1-19、表 1-17）。

为了实现最简洁的结构就是最好结构的理念（非复杂结构），本书提出的现代钢结构轻量化设计理念——二、三、四观点，希望引起同仁们的关注。

提高我国高层钢结构的结构效率，实现钢结构固有的三大核心价值（第 1.3.2 节）——最轻的结构、最短的工期和最好的延性（抗震性能好）。其中，最短的工期是指钢构件制造（焊接等）工厂化，工地高强螺栓装配化，书中列出的高强螺栓装配节点，可供设计参考（图 5-10、图 5-23）。

全书根据最新的国家相关设计标准、规范、规程编著。为了使读者能够更加清晰地了解高层结构的力学概念，本书专门编著了第 6 章：框架的手算方法。为了使读者熟悉结构高等

分析方法的核心内容，本书专门编著了第7章：钢结构的精确分析——非线性全过程分析的理论与方法。第8~12章，不仅对高层钢结构现行设计的主要内容——作用效应组合、结构验算、构件设计、组合楼盖设计、节点设计进行了较详细的计算方法介绍，而且还较详尽地介绍了构造设计，并在相应章节提供了相应的实例，以供读者设计参考。

本书由华南理工大学王仕统教授和南京工业大学郑廷银教授共同编著。其中，第1~6章由王仕统教授编写，第7~12章由郑廷银教授编写。

限于作者的理论与设计水平，不妥之处，敬请批评指正。

编著者

第1章 绪论	1.1 绪论	1.2 本书编写说明
第2章 作用效应组合	2.1 作用效应组合	2.2 作用效应组合
第3章 结构验算	3.1 结构验算	3.2 结构验算
第4章 构件设计	4.1 构件设计	4.2 构件设计
第5章 组合楼盖设计	5.1 组合楼盖设计	5.2 组合楼盖设计
第6章 节点设计	6.1 节点设计	6.2 节点设计
第7章 钢结构的精确分析——非线性全过程分析的理论与方法	7.1 钢结构的精确分析——非线性全过程分析的理论与方法	7.2 钢结构的精确分析——非线性全过程分析的理论与方法
第8章 作用效应组合	8.1 作用效应组合	8.2 作用效应组合
第9章 结构验算	9.1 结构验算	9.2 结构验算
第10章 构件设计	10.1 构件设计	10.2 构件设计
第11章 组合楼盖设计	11.1 组合楼盖设计	11.2 组合楼盖设计
第12章 节点设计	12.1 节点设计	12.2 节点设计

目 录

前 言

第1章 绪论	1	5.5 悬挂结构体系	132
1.1 高层建筑结构的界定	1	参考文献	136
1.2 术语正名	7	第6章 框架的手算方法	137
1.3 现代钢结构轻量化设计理念——二、三、四观点	14	6.1 水平力作用下的框架内力	137
1.4 高层钢结构设计特点	19	6.2 水平力作用下框架侧移	151
1.5 高层钢结构的发展趋势	31	6.3 竖向荷载作用下的框架内力	155
参考文献	37	参考文献	159
第2章 材料	39	第7章 钢结构的精确分析	160
2.1 结构钢与铸钢	39	7.1 概述	160
2.2 连接材料	45	7.2 静力分析	161
参考文献	49	7.3 抗震分析	209
第3章 建筑体型	51	参考文献	217
3.1 建筑平面	51	第8章 作用效应组合	219
3.2 建筑立面	53	8.1 一般组合（不考虑地震作用时）	219
3.3 房屋高厚比 H/B	54	8.2 抗震组合（考虑地震作用，按第一阶段设计时）	219
3.4 变形缝	55	8.3 案例分析	220
参考文献	56	参考文献	230
第4章 作用	57	第9章 结构验算	231
4.1 风荷载	57	9.1 承载力验算	231
4.2 地震作用	68	9.2 结构侧移检验	231
参考文献	87	9.3 风振舒适度验算	234
第5章 抗侧力结构体系	88	9.4 结构稳定验算	235
5.1 框架体系	88	参考文献	237
5.2 框架-支撑（延性墙板）体系	97	第10章 构件设计	238
5.3 框筒结构（frame-tube structures）	106	10.1 梁的设计	238
5.4 巨型框架体系	126		

10.2 柱的设计	245	12.1 概述	322
10.3 支撑设计	260	12.2 梁-柱节点设计	324
10.4 剪力墙设计	269	12.3 梁-梁节点设计	347
参考文献	279	12.4 柱-柱节点设计	353
第11章 组合楼盖设计	280	12.5 钢柱柱脚设计	360
11.1 分类与组成	280	12.6 支撑连接节点设计	370
11.2 组合楼板设计	280	12.7 抗震剪力墙板与钢框架的连接 设计	378
11.3 组合梁设计	296	参考文献	379
参考文献	321	附录 高层钢结构设计流程图	380
第12章 节点设计	322		

第 1 章 绪 论

1.1 高层建筑结构的界定

1972 年联合国教科文组织所属世界高层建筑委员会建议，按建筑结构的高度 H 和层数 n ，把高层建筑结构划分为四大类^[1,2]，见表 1-1。

表 1-1 高层建筑结构的分类

分类	限值	
	高度 H/m	层数 n
第一类	50m	9~16
第二类	75m	17~25
第三类	100m	26~40
第四类	>100m	>40

世界各国对高层建筑结构的划分，既不统一也不严格，表 1-2。

表 1-2 世界各国对高层建筑结构的划分

国名	高度 H/m	层数 n	超高层 H/m
美国	$>22\sim 25$	>7	>100
英国	>24	—	
法国	$\geq 28, \geq 50$ (居住建筑)	—	
日本	>31	>8	
中国	《高钢规程》 ^[3] : >28 (住宅), >24 (其他高层建筑)	≥ 10	
	《高混凝土技术规程》 ^[4] : >28 (住宅), >24 (其他高层建筑)		
	《建筑防火规范》 ^[5] : >24		
	《民用建筑设计通则》 ^[6] : >24 (不包括单层公共建筑)		
	《住宅设计规范》 ^[7] :—		

现代建筑全钢结构简称为现代钢结构，它包括现代屋盖钢结构 (modern roof steel structure)^[8] 和现代高层钢结构 (modern tall building steel structure)。现代钢结构是一个国家经济繁荣、科技进步的重要标志。当人们谈起举世闻名的摩天大楼 (skyscraper) 时，往往会想到芝加哥、纽约等国际大都市，芝加哥曾被世人称为世界高层建筑的摇篮。

1883 年，美国芝加哥建成世界第一座高层钢铁结构建筑^[9,10]——家庭保险大楼 (Home Insurance Building)，11 层，高 55m，如图 1-1 所示，由钢梁、铁柱组成的框架结构 (工地梁-柱连接采用铆钉装配)。

图 1-2 所示为世界著名的五座高层 (全) 钢结构建筑，它们的高度曾在 21 世纪的初期排名前五^[11-15]，它们的用钢量见表 1-3。



图 1-1 家庭保险大楼 (Home Insurance Building) 世界第一座高层钢铁结构建筑 (1883 年，芝加哥， $n=11$ 层， $H=55\text{m}$)

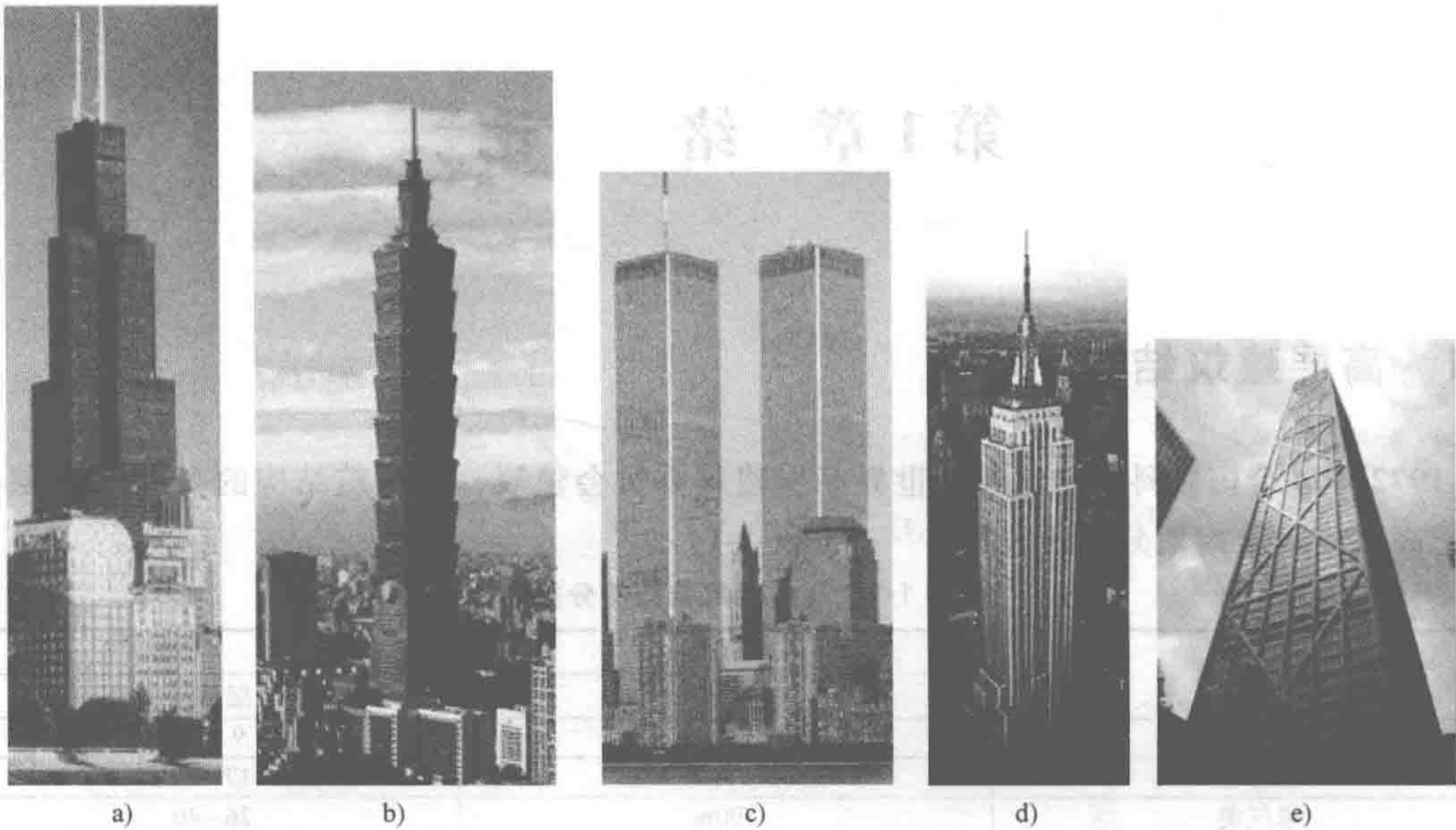


图 1-2 世界著名的五座高层（全）钢结构建筑^[11-15]

a) 西尔斯塔（Sears Tower, 1974 年, 9 束筒） b) 台北国际金融中心（2004 年, 大柱框架）
c) 世界贸易中心（World Trade Center, 1973 年, 框筒-框架） d) 帝国大厦（Empire State Building, 1931 年, 框-撑） e) 约翰·汉考克中心（John Hancock Center, 1969 年, 大型支撑框筒）

表 1-3 世界著名的五座高层（全）钢结构建筑的结构用钢量^[11-15]

名次	建筑名称	年代	抗侧力结构体系	高度 H/m	层数 n	用钢量 $/(kg/m^2)$
1	西尔斯塔(Sears Tower)	1974 芝加哥	9 束框筒(图 1-23b)	443.179 (1454ft)	110	161
2	台北国际金融中心	2004 中国台湾	大柱框架(图 5-41)	427.1	101	
3	世界贸易中心(World Trade Center)	1973 纽约	框筒-框架(图 1-23a)	416.966(北塔) 415.138(南塔)	110	186.6
4	帝国大厦(Empire State Building)	1931 纽约	框-撑	381	102	206
5	约翰·汉考克中心(John Hancock Center)	1969 芝加哥	大型支撑框筒(图 1-2e)	343.510	100	145

由表 1-3 可见，虽然 Sears Tower 的高度 ($H=443.179m$) 比 World Trade Center ($H_{max}=1368ft=416.966m$) 高出 26.213m，但用钢量反而减少。这是由于 Sears Tower 采用了 9 束框筒的抗侧力结构方案，剪力滞后效应（shear lag effect）比 World Trade Center（单框筒）小得多（图 1-23）。这说明，随着高层建筑高度的增加，抗侧力结构方案必须变化，否则，将导致结构用钢量迅速增加。

高层钢结构建筑的优秀性与 G/P 成反比^[16]，其中 G 代表一栋钢结构用量， P 为整栋建筑的总重。

- 优秀设计: $G/P=0.2\sim0.3$
- 平庸设计: $G/P=0.4\sim0.5$
- 拙劣设计: $G/P=0.6\sim0.7$

实例：西尔斯塔

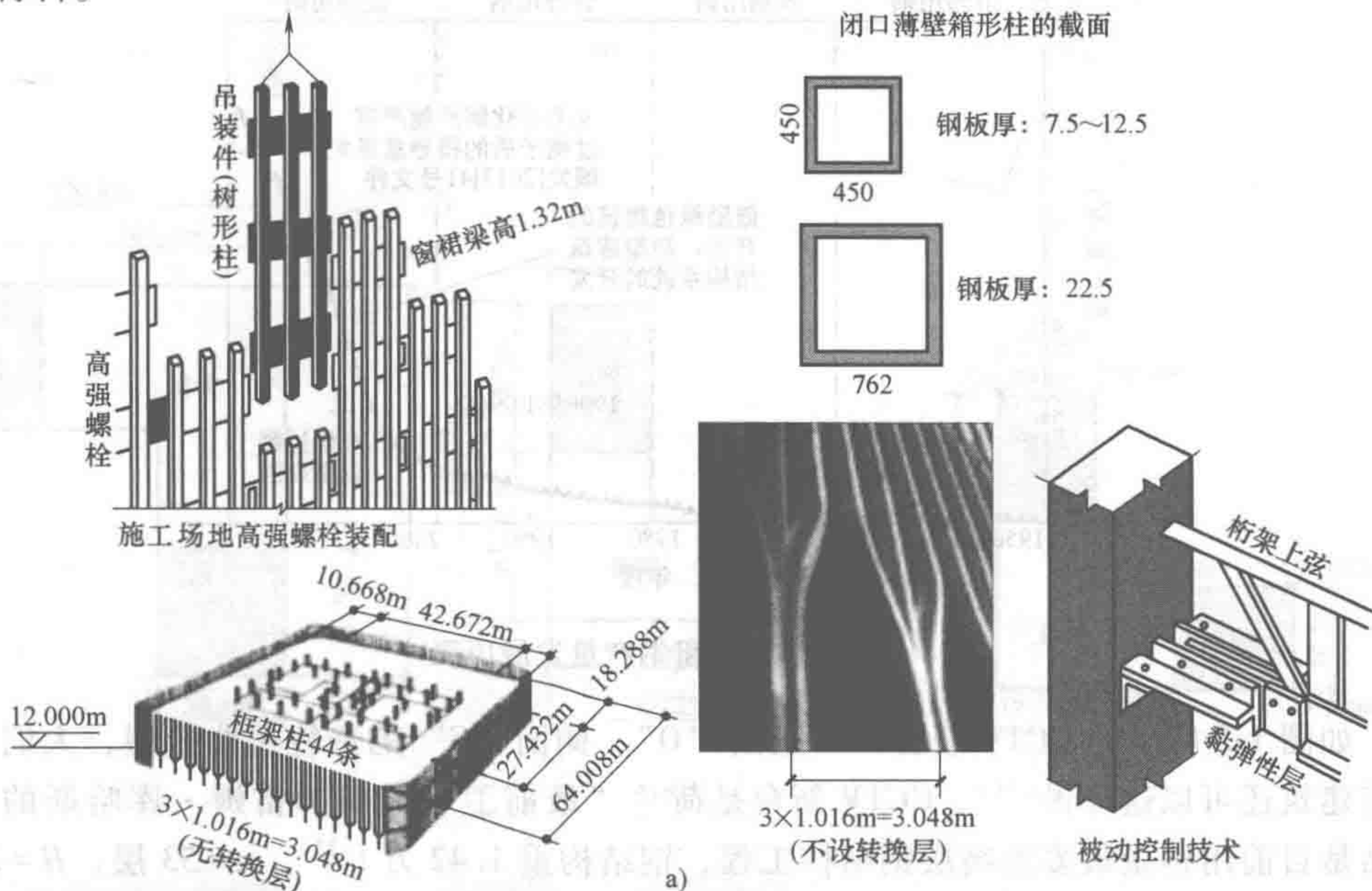
$$G/P=4.83 \text{ 万 t}/22.25 \text{ 万 t}^{[17]}=0.22 \quad \text{优秀设计}$$

世界贸易中心

$$G/P=8.41 \text{ 万 t}/40 \text{ 万 t}=0.21 \quad \text{优秀设计}$$

图 1-3a 所示世界贸易中心的一些轻量化设计指标：

- 1) 箱形钢柱的截面 $450\text{mm}\times 450\text{mm}^{[18]}$ ，钢板厚：7.5~12.5mm（从上到下），最大屈服强度标准值 $700\text{N}/\text{mm}^2$ ；三柱合一（不设转换层）底层柱的截面^[11]： $2.5\text{ft}\times 2.5\text{ft}$ （ $762\text{mm}\times 762\text{mm}$ ），钢板厚仅 22.5mm。
- 2) 工地三层三柱（树形柱）起吊件不超过 8t，现场高强度螺栓装配。
- 3) 楼盖采用轻质混凝土楼面、压型钢板和钢桁架体系。
- 4) 为了减少风振侧移，每楼层安装 100 多个黏弹性阻尼器（被动控制）——三块钢板夹聚丙烯材料。



b)

图 1-3 World Trade Center
a) 轻量化设计指标 b) 911 事件

2001年9月11日（史称“恐怖日911”，图1-3b）8点46分，波音767客机像一颗超级“飞弹”（相当20t TNT），击断31根钢柱，撞入 World Trade Center 北塔（有天线者）顶 $H/6$ 处，18min 后，另一架飞机撞入南塔顶 $H/3$ 处。由于大楼对称，两塔楼 1h 后才竖向塌落（先南塔后北塔），未殃及周围建筑。结构设计非常优秀。

超级“飞弹”奇袭，远远超出原设计荷载（作用），但两楼都经历 1h 以上才塌。97 层的一位盲人，在导盲犬的带领下从防火通道安全逃离，安全通道相当好。该高楼还具有多项轻量化设计指标，结构设计值得称赞。

1996 年，我国粗钢产量 1.09 亿 t（图 1-4）^[19]，此时我国开始大力推广 5 种钢结构建筑——高层钢结构、大跨度空间钢结构、轻钢结构、住宅钢结构和混合结构。

1996 年以来，我国大型钢结构建筑几乎都是被国际建筑设计企业中标，国外建筑师在建筑设计的某些理念也许是杰出的，但不少建筑方案名为“创新”，实属“怪异”^[20]。

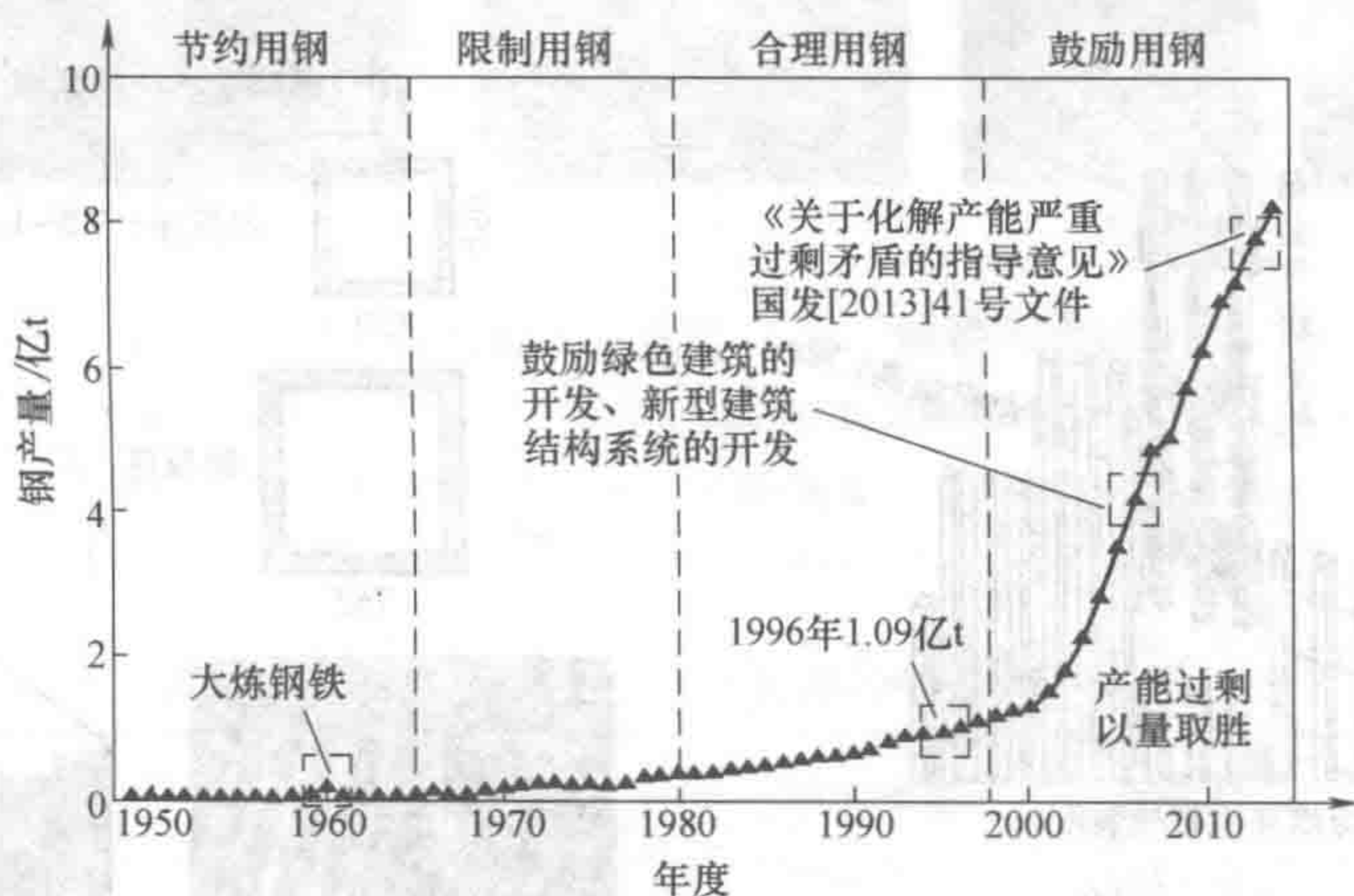
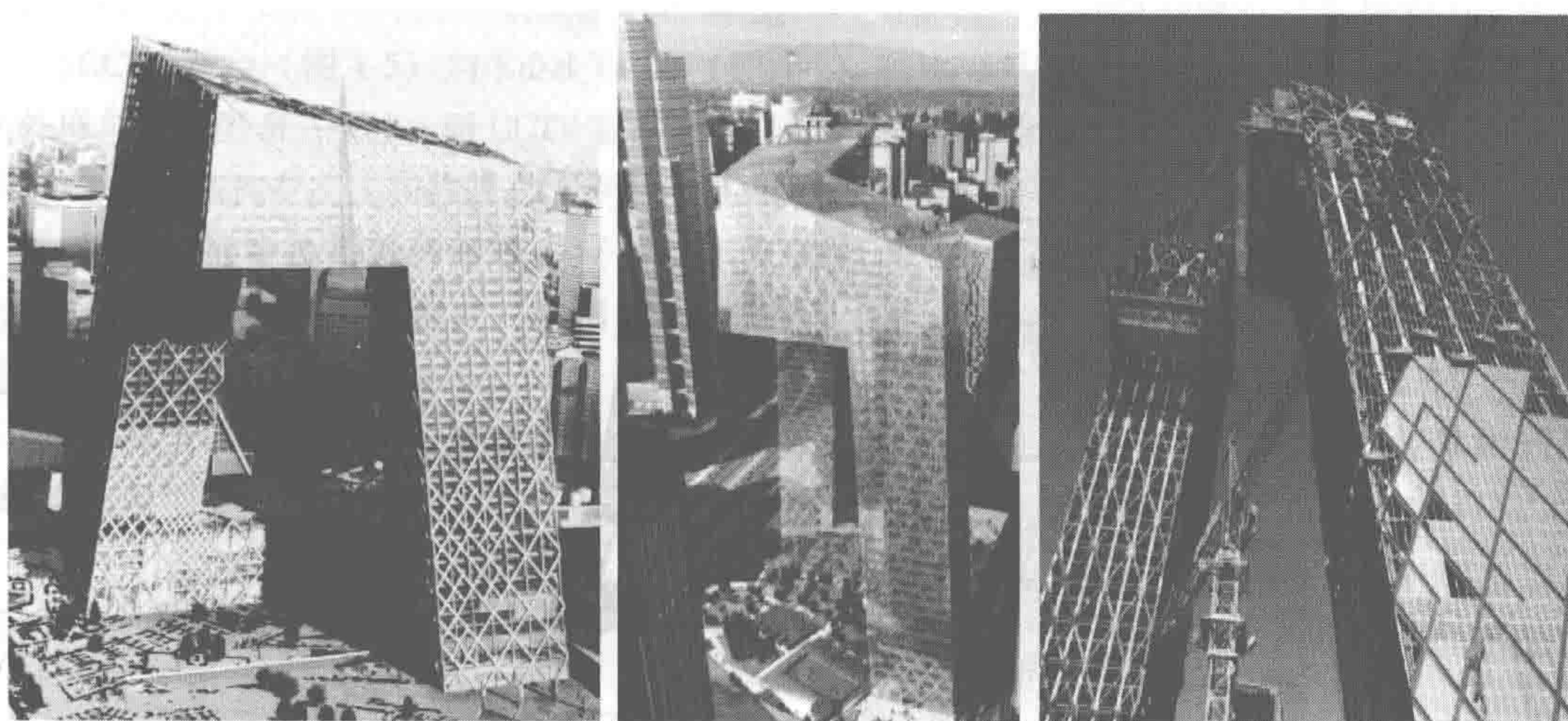


图 1-4 我国粗钢产量发展历程^[19]

如图 1-5 所示的 CCTV 新台——正面“O”，侧面“S”的奇特扭曲造型，人们简直不敢相信建筑还可以这样做^[21]。CCTV 新台是荷兰“最前卫”建筑师雷姆·库哈斯的作品，该作品是目前用钢量最多的高层钢结构工程，钢结构重 1.42 万 t^[22]， $n=53$ 层， $H=234\text{m}$ ，用钢量： $14.2\text{万 t}/47\text{万 m}^2=302\text{kg/m}^2$ （钢材强度等级最高为 Q460，钢板厚度 $t_{\max}=135\text{mm}$ ）。在 CCTV 的 162.200m 标高处，两塔楼分别外挑 67.165m 和 75.165m（图 1-5a、e），悬臂的平均高度 56m（14 层），钢结构重 1.4 万 t^[22]，包括混凝土楼板、幕墙、装饰等荷载，悬臂总重高达 5.1 万 t^[23]。CCTV 新台底部的混凝土底板厚度 7~10.9m。

CCTV 新台施工很复杂，一个目字形巨柱，长 15.28m，截面 $1400\text{mm}\times1000\text{mm}\times100\text{m}$ ，重 124t（图 1-5g），工厂全焊接制造。笨重巨柱运到工地，还要吊装、全焊接拼装，施工极其艰难（图 1-5h）。

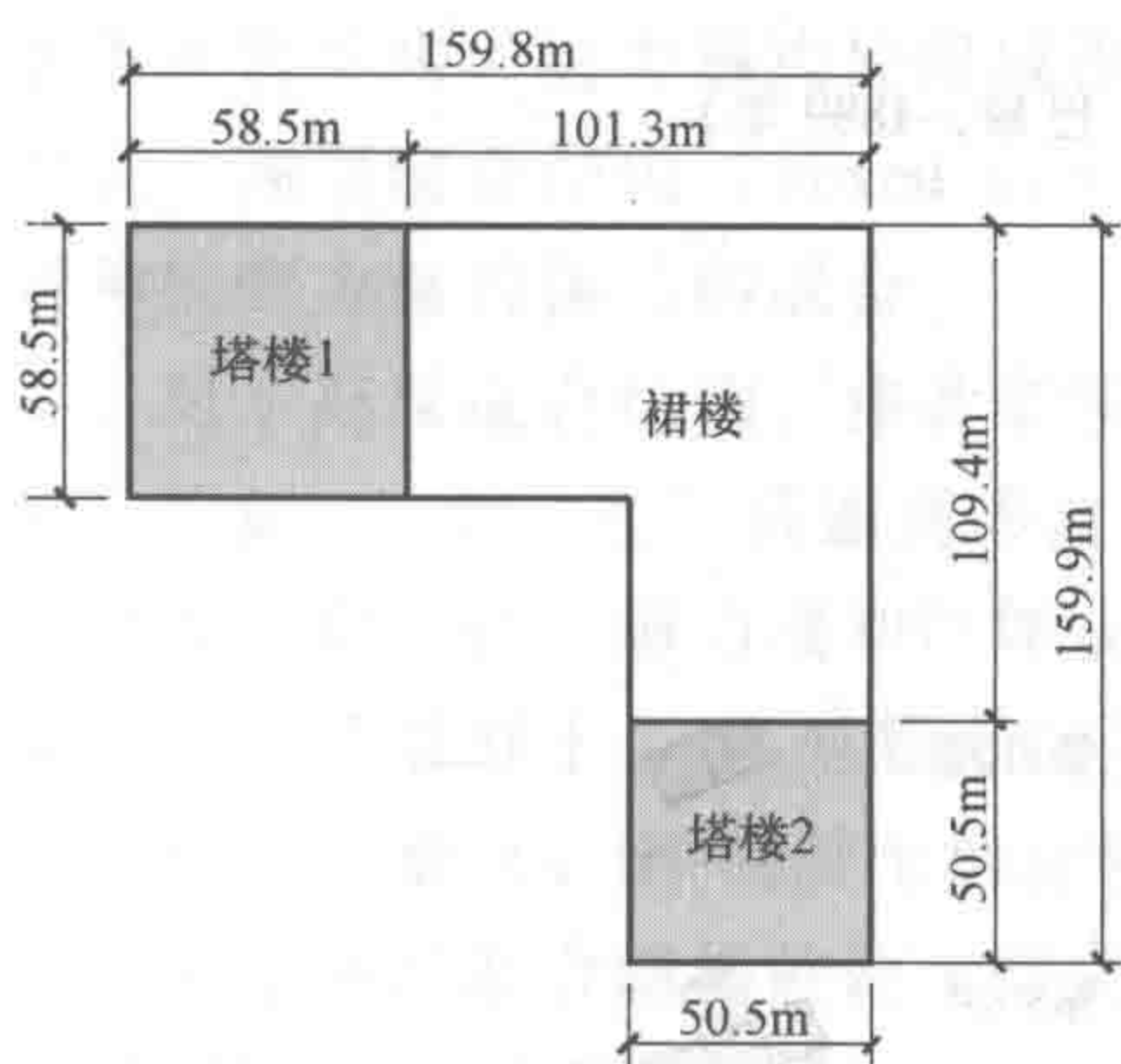
2013 年，CCTV 新台获美国高层建筑都市学会（The Council on Tall Buildings and Urban Habitat, CTBUH）最佳高层建筑奖，评委会主席 Jeanne Gang：“CCTV 新台是那种无法被复制的建筑，无论在结构意义上，还是在无与伦比的造型上，它都是一个不可思议的成就，就如同法国巴黎埃菲尔铁塔（图 1-6）”“CCTV 新台在其他地方获准建造的可能性很小，因为它不符合规范要求，而中国愿意尝试，这也为千奇百怪的建筑设计创造了一种非常宽松的氛



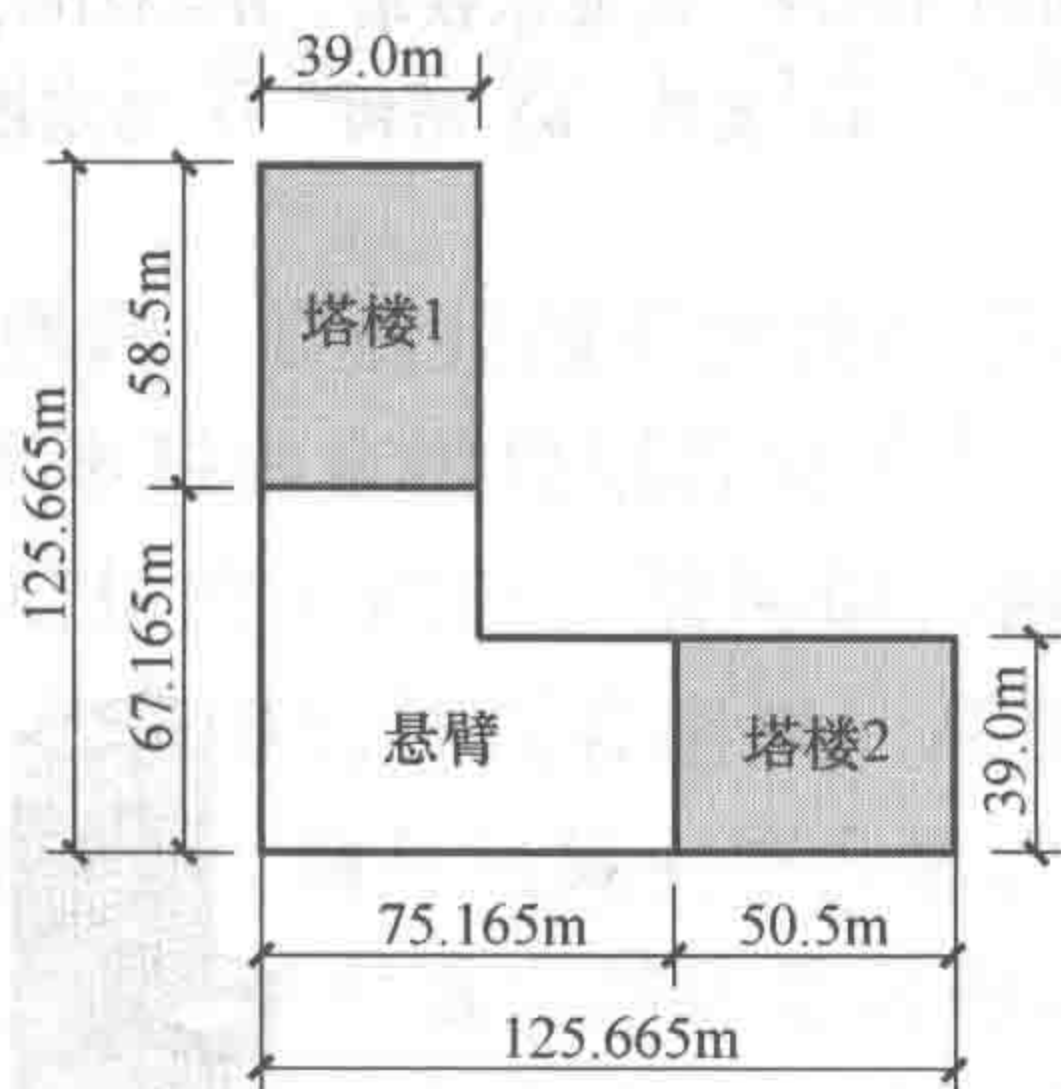
a)

b)

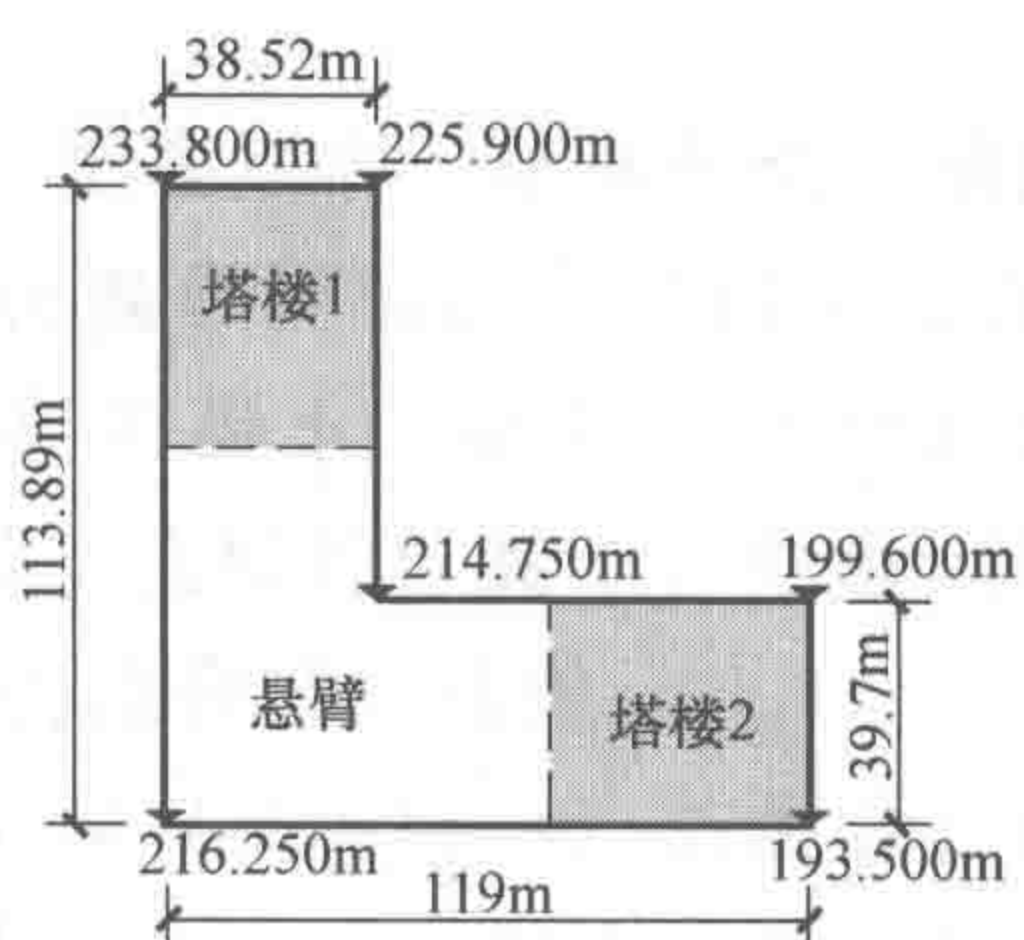
c)



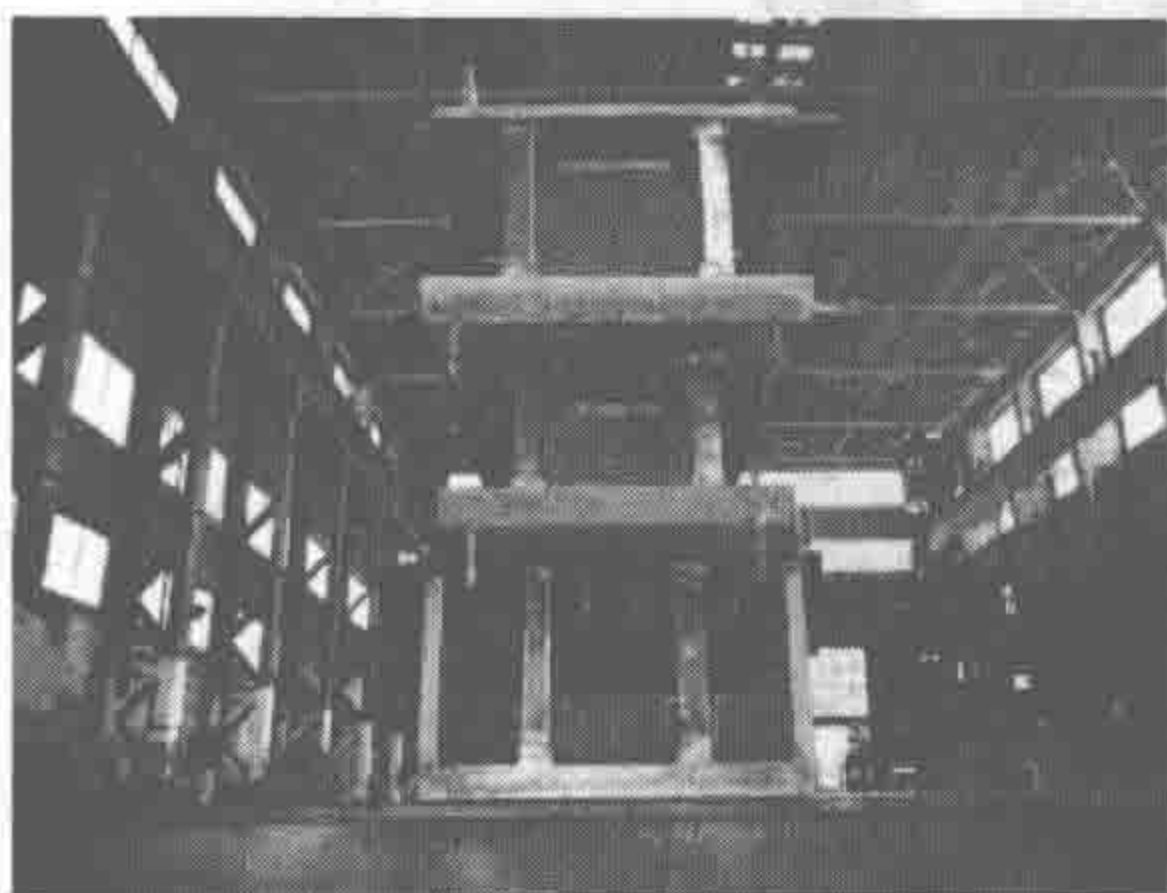
d)



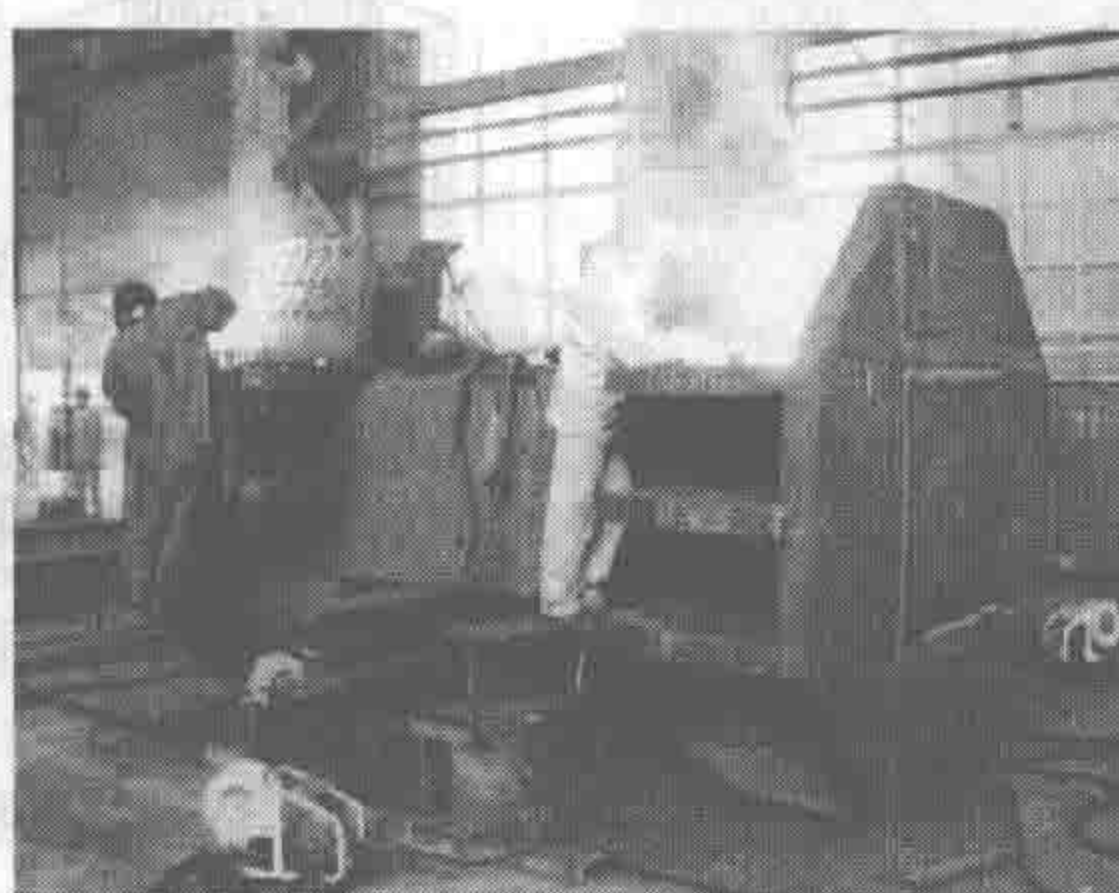
e)



f)



g)



h)

图 1-5 CCTV 新台 ($n=53$ 层, $H=234\text{m}$, 北京, 2008 年)a) 正面“O” b) 侧面“S” c) 现场全焊接连接 d) $\pm 0.000\text{m}$ 平面 e) 悬臂平面 (162.200m , 37 层)

f) 屋面角点标高 g) 一个目字形巨柱在工厂焊接加工 h) 巨柱运到工地待吊装焊接

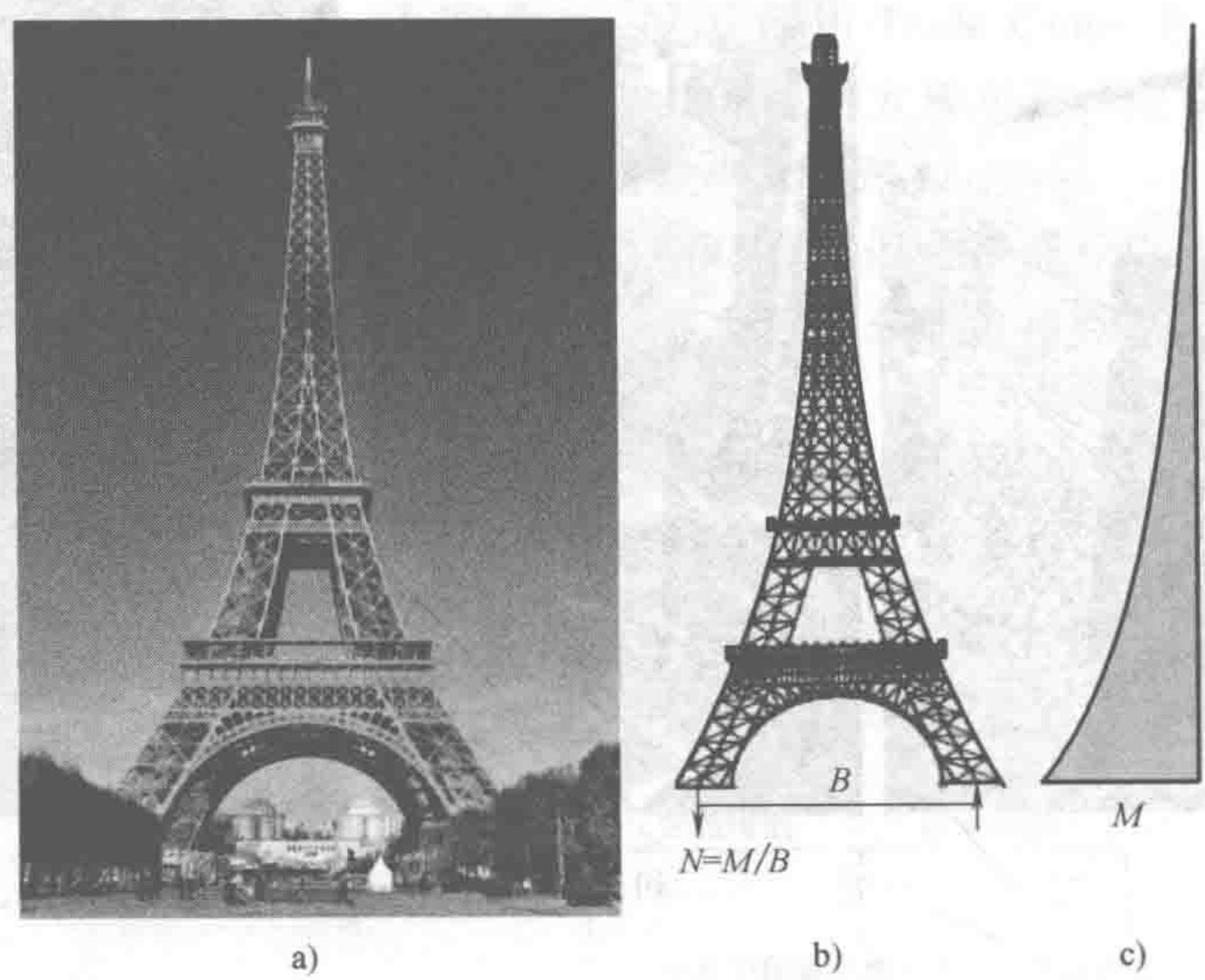


图 1-6 Eiffel Tower (埃菲尔铁塔, $H=321\text{m}$, 巴黎, 1889 年)
a) 实景 b) 结构 c) 弯矩图

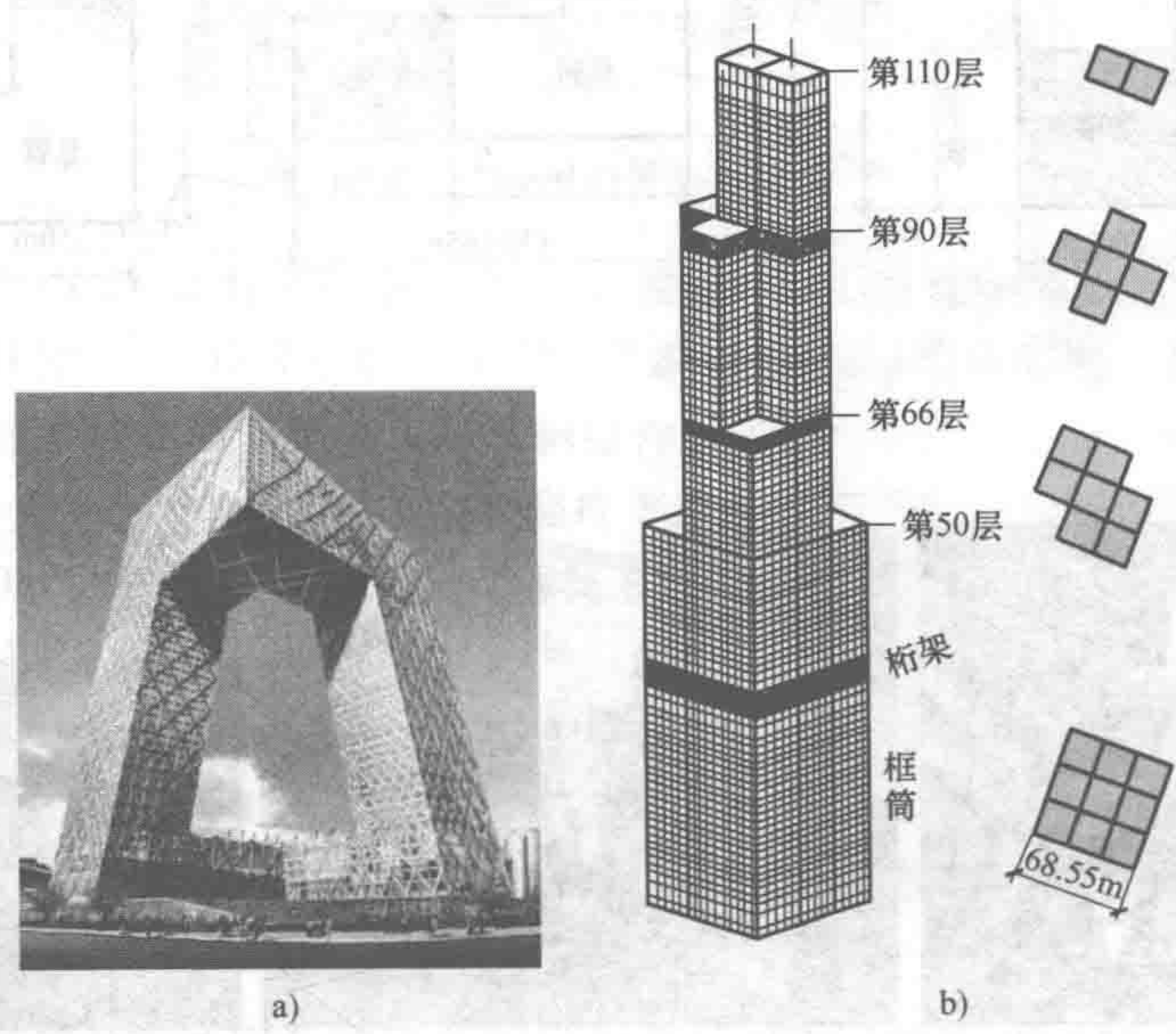


图 1-7 重量级、轻量级高层钢结构的用钢量对比
a) CCTV 新台 (北京, 2008): $n=53$, $H=234\text{m}$, 用钢量 $=302\text{kg/m}^2$
b) Sears Tower (芝加哥, 1974): $n=110$, $H=443.179\text{m}$, 用钢量 $=161\text{kg/m}^2$

围”^[21]。

CCTV 新台（图 1-5）与 Eiffel Tower（图 1-6）对比可见，Eiffel Tower 结构对称，受力合理（外形与弯矩图 M 一致），而 CCTV 新台造型怪异且受力极不合理，两者并不能相提并论。但我国不少著名钢结构专家还在称赞 CCTV 新台的结构体系，实在耐人寻味。

钢结构行业包括设计与施工（制造、安装），轻盈的钢结构必须从设计开始——设计是龙头。与世界先进国家相比，我国钢结构要笨重得多，我国钢结构的轻量化设计水平，任重而道远^[24]。

我国笨重钢结构的主要成因是选错结构方案。图 1-7 所示为两幢重量级、轻量级高层钢结构的用钢量对比。

1.2 术语正名

1.2.1 钢结构+混凝土结构=混合结构

结构（structure）由构件（structural members）组成（表 1-4）。钢结构（steel structure）是不开裂结构，它由钢构件组成钢结构骨架；混凝土结构（concrete structure）为开裂结构；因此，高层混合结构（mixed structure）可定义为：由开裂的混凝土结构和不开裂的钢结构两种抗侧力结构体系的混合。

对于高层混合结构，作者必须强调：目前我国不少教科书，把高层混合结构的概念搞乱了。例如，“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材^[25]，把高层建筑混合结构定义为：指由梁、板、柱、剪力墙和筒体或结构的一部分，采用钢、钢筋混凝土、钢骨（型钢）混凝土、钢管混凝土、钢-混凝土组合楼盖等构件混合组成的高层建筑结构，其中，钢骨混凝土、钢管混凝土、钢-混凝土组合楼盖是由钢与混凝土结合形成的组合结构构件。

上述高层混合结构的两个定义：表 1-4 的混合结构是两种结构（structures）的混合；而教材 [25] 则是多种构件（structural members）的混合。定义不同，已造成概念混乱。为了培养下一代的力学概念，希望在我国通过学术争论统一起来。

表 1-4 结构由构件组成

结构 (structure)		构件 (structural members)
混合结构	钢结构 (不开裂结构)	型钢、钢板、钢棒、高强钢丝或钢绞线
		钢管混凝土 (concrete-filled steel tubular ^[26] 或 steel tube confined concrete ^[27] ，简称 STC) 构件
	混凝土结构 (开裂结构)	钢筋混凝土 (reinforced concrete，简称 RC) 梁、柱、剪力墙、核心筒等 型钢 (或钢骨) 混凝土 (steel-reinforced concrete，简称 RCS) 柱、梁等构件 部分预应力混凝土 (partial prestressed concrete) 构件

由表 1-4 中可见，STC 代表钢管（steel tubular）中填混凝土（concrete）；RCS 代表钢筋混凝土（reinforced concrete）中放型钢（steel）。STC、RCS 是中国式术语表达符号，与以往术语简称不同。STC 用 S 开头，一看就是钢构件（不开裂），RCS 用 RC 开头，代表混凝土构件（开裂），一目了然。