

高等学校建筑学与城市规划专业系列教材

# 结构选型

张文福 编著



张外信

高等教育出版社

高等学校建筑学与城市规划专业系列教材

# 结构选型

张文福 编著



高等教育出版社·北京

## 内容提要

本书是在总结作者多年教学成果的基础上编写而成。重点是对各种力学特性相近或相似的结构体系进行了整合与分析,比如梁式结构与板式结构、拱式结构与壳体结构、索式结构与膜式结构、筒体结构与塔桅结构等。其次是配有大量的工程实例和适量的大作业,以加强案例教学和实践教学,突出强调了结构形式与工程实际的关系。

本书可作为工程应用型高等学校建筑学专业、土木工程专业的教材,也可供建筑师、结构工程师注册考试复习参考,也适合建设管理部门的干部阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

结构选型/张文福编著. --北京:高等教育出版社, 2018. 3

ISBN 978 - 7 - 04 - 049241 - 5

I. ①结… II. ①张… III. ①建筑结构 IV. ①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 003831 号

策划编辑 单 蕾  
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 单 蕾  
责任校对 吕红颖

封面设计 张 志  
责任印制 刘思涵

版式设计 于 婕

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印 刷 肥城新华印刷有限公司  
开 本 787mm × 1092mm 1/16  
印 张 18  
字 数 400 千字  
购书热线 010 - 58581118  
咨询电话 400 - 810 - 0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>

版 次 2018 年 3 月第 1 版  
印 次 2018 年 3 月第 1 次印刷  
定 价 35.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 49241 - 00

# 结构选型

张文福

- 1 计算机访问<http://abook.hep.com.cn/1239251>, 或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录, 进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号 (20 位密码, 刮开涂层可见), 或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码, 完成课程绑定。
- 4 单击“进入课程”按钮, 开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制, 部分内容无法在手机端显示, 请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题, 请发邮件至 [abook@hep.com.cn](mailto:abook@hep.com.cn)。



扫描二维码  
下载 Abook 应用

<http://abook.hep.com.cn/1239251>

# 前 言

“结构选型”是建筑学及相关专业的专业课,目前国外此类教材很少见,但国内出版的类似教材版本较多,然而多数同类的教材是按照现行结构规范的模式编写的,即是按照材料来划分结构体系的。比如砌体结构和剪力墙是分开的,似乎这两种结构形式是完全不同的两类结构体系,实质上它们都是一种抗侧力的墙体,只是材料不同而已,且砌体结构在高层建筑中也有应用。再比如混凝土板和平板网架的构成方式和材料不同,但其总体力学特性仍属于板式结构,只是应分别用 Kirchhoff 薄板理论和夹层板理论来描述其力学特性而已。因此现有教材普遍存在的缺点和问题:一是内容繁杂,使学时增多,学习难度加大;二是注重结构细节,而忽视了如何培养建筑学专业的学生建立宏观的结构概念。

本书是在总结作者多年教学成果的基础上编写而成。重点是对各种相似的结构体系进行了整合,比如梁式结构与板式结构、拱式结构与壳式结构、索式结构与膜式结构、筒体结构与高耸结构等。其次是配有大量的工程实例和适量的大作业,以加强案例教学和实践教学,突出强调了结构形式与工程实际的关系。

本书的内容编排大致分两大部分:一是水平结构体系,内容包括梁式结构、板式结构、拱与壳式结构、门式刚架和排架、索与膜式结构;二是竖向结构体系,内容包括框架结构、筒体结构、高耸结构。

本书由张文福教授负责书稿内容的构思与规划。门式刚架和排架(第5章)由东北石油大学刘迎春副教授编写,索与膜式结构(第6章)、框架结构(第7章)由黑龙江八一农垦大学刘文洋博士编写,梁式结构(第2章)、拱与壳式结构(第4章)由黑龙江八一农垦大学刘冬冰编写,其余章节由南京工程学院张文福教授编写。全书由张文福教授统稿,广州大学的张季超教授对本书进行了审阅。

本书可作为工程应用型高等学校建筑学专业、土木工程专业的教材,也可供建筑师、结构工程师注册考试复习参考,也适合建设管理部门的干部阅读。

张文福

2017年10月

# 目 录

<b>第 1 章</b>	<b>绪论</b>	1
1.1	结构的定义与结构的作用	1
1.2	结构选型的基本概念	3
1.3	结构构思的基本概念	3
1.4	结构选型与结构构思的基本原则	4
1.4.1	结构和建筑有机结合	4
1.4.2	确保结构的安全性	8
1.4.3	经济性	11
1.5	本书的内容编排	14
	思考题	15
<b>第 2 章</b>	<b>梁式结构</b>	16
2.1	实腹梁	16
2.1.1	梁的受力与变形	16
2.1.2	混凝土梁	18
2.1.3	钢梁	20
2.1.4	木梁	23
2.1.5	钢-混凝土组合梁	23
2.2	桁架梁	25
2.2.1	桁架梁的受力特点	26
2.2.2	屋架结构的形式	28
2.2.3	屋架结构的选型与布置	34
2.2.4	工程实例	41
	思考题	43
<b>第 3 章</b>	<b>板式结构</b>	45
3.1	实体板	45
3.1.1	普通肋梁楼盖	46
3.1.2	密肋楼盖	49

3.1.3	无梁楼盖 .....	50
3.1.4	预制板楼盖 .....	51
3.1.5	无黏结预应力楼盖 .....	53
3.2	网架结构 .....	54
3.2.1	网架结构的特点与适用范围 .....	54
3.2.2	网架结构的分类 .....	55
3.2.3	网架结构的形式 .....	55
3.2.4	网架结构的选型 .....	62
3.2.5	网架结构的主要尺寸 .....	63
3.2.6	网架结构的杆件与节点 .....	64
3.2.7	网架结构的屋面构造 .....	70
3.2.8	工程实例 .....	71
3.3	折板结构 .....	75
3.3.1	折板结构的受力特点 .....	75
3.3.2	V形折板结构的特点与构造 .....	76
3.3.3	工程实例 .....	79
	思考题 .....	80
<b>第4章 拱与壳式结构</b> .....		81
4.1	拱 .....	81
4.1.1	拱的受力特点 .....	81
4.1.2	拱的类型 .....	83
4.1.3	拱脚水平推力的处理方法 .....	89
4.1.4	拱的结构选型与布置 .....	92
4.1.5	工程实例 .....	95
4.2	壳 .....	98
4.2.1	薄壳结构 .....	99
4.2.2	网壳结构 .....	121
	思考题 .....	140
<b>第5章 门式刚架和排架</b> .....		141
5.1	门式刚架 .....	141
5.1.1	刚架的受力与变形特点及分类 .....	141
5.1.2	实腹式刚架结构 .....	146
5.1.3	格构式刚架结构 .....	148

5.1.4 门式刚架的结构布置 .....	151
5.2 排架结构 .....	152
5.2.1 排架结构的组成 .....	152
5.2.2 主要构件的选型 .....	155
思考题 .....	159
<b>第6章 索与膜式结构</b> .....	161
6.1 概述 .....	161
6.2 索式结构 .....	163
6.2.1 索式结构的分类 .....	163
6.2.2 索式结构的受力与变形特点 .....	172
6.2.3 索式结构的选型与设计 .....	174
6.2.4 索式结构工程实例 .....	180
6.3 膜式结构 .....	188
6.3.1 膜式结构的分类 .....	188
6.3.2 膜式结构的受力与变形特点 .....	191
6.3.3 膜式结构的选型与设计 .....	192
6.3.4 膜式结构工程实例 .....	197
思考题 .....	202
大作业 .....	203
<b>第7章 框架结构</b> .....	204
7.1 概述 .....	204
7.2 类型与适用范围 .....	204
7.2.1 类型 .....	204
7.2.2 适用范围 .....	206
7.3 受力与变形特点 .....	209
7.4 巨型框架结构 .....	210
7.4.1 巨型框架的分类 .....	210
7.4.2 巨型框架结构的受力与变形特点 .....	211
7.5 结构布置与工程实例 .....	212
7.5.1 柱网布置 .....	212
7.5.2 变形缝的设置 .....	213
7.5.3 框架结构构件截面尺寸 .....	214
7.5.4 工程实例 .....	217



思考题 .....	221
大作业 .....	221
<b>第 8 章 筒体结构</b> .....	<b>223</b>
8.1 概述 .....	223
8.2 类型与适用范围 .....	224
8.2.1 类型 .....	224
8.2.2 适用范围 .....	225
8.3 框筒结构 .....	227
8.3.1 构成——Khan 筒体的概念 .....	227
8.3.2 受力与变形特点 .....	227
8.3.3 结构布置与工程实例 .....	230
8.4 框架-核心筒结构 .....	235
8.4.1 构成 .....	235
8.4.2 受力与变形特点 .....	235
8.4.3 结构布置与工程实例 .....	236
8.5 筒中筒结构 .....	244
8.5.1 构成 .....	244
8.5.2 受力与变形特点 .....	244
8.5.3 结构布置与工程实例 .....	245
8.6 成束筒结构 .....	253
8.6.1 构成 .....	253
8.6.2 受力与变形特点 .....	253
8.6.3 结构布置与工程实例 .....	253
思考题 .....	255
大作业 .....	256
<b>第 9 章 高耸结构</b> .....	<b>257</b>
9.1 概述 .....	257
9.2 类型与适用范围 .....	257
9.3 结构布置与工程实例 .....	259
9.3.1 格构式高耸结构 .....	259
9.3.2 实体式高耸结构 .....	268
思考题 .....	273
参考文献 .....	275

# 第1章 绪论

“现代建筑,是凝结着人类科学技术与文化艺术非凡智慧的复杂综合体,建筑学的发展正处在一个深刻的变革时期,这突出地表现在其各门学科的构成及相互的关系上,而其中,建筑学专业的基本技能训练,怎样才能与结构技术的巨大进步相适应,已经成为我们正在探索的新领域。”

——布正伟

“基本的结构意识对建筑师是一种基本功,会形成他工作中的确定的手段。解决空间问题必须有这个起结构作用的手段,它使解决问题所需的能量降到最低。”

——金兹堡《风格与时代》

## 1.1 结构的定义与结构的作用



第1章 绪论

建筑是建筑物与构筑物的总称,是为满足人类特定的功能需求而建造。

描述建筑结构作用的最简单方法,就是将结构(structure)定义为用以抵抗外荷载的骨架(图1-1)。其中外荷载包括:建筑物的重力以及家具、居住者和他们的活动所产生的静荷载,还有风雪、地震、撞击等振动作用下所产生的动荷载。

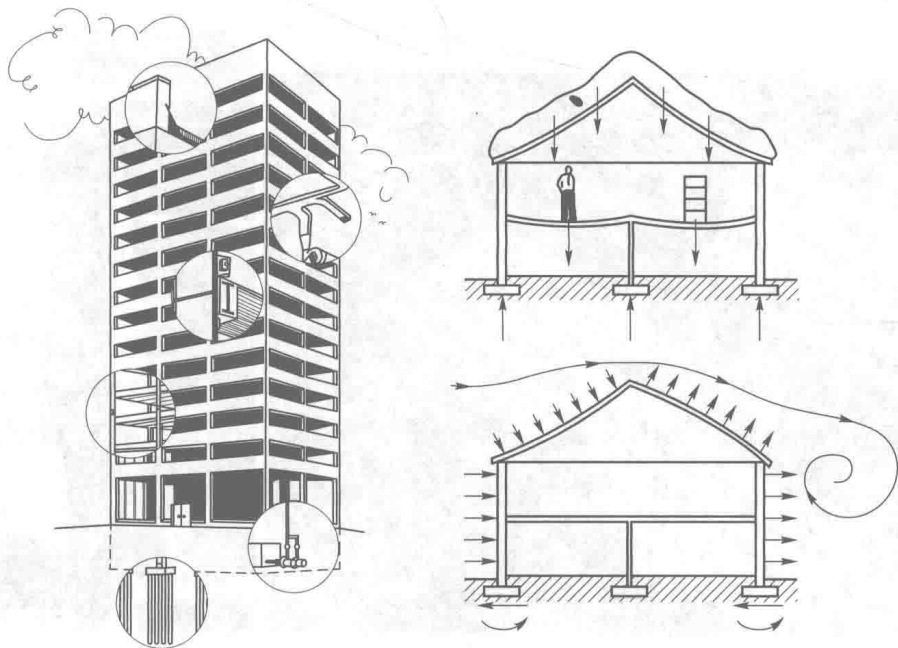


图 1-1 结构与外荷载

建筑的“生”与“死”都与结构有关,也就是说建筑的建造首先需要从结构开始,比如水立方等都是先从建基础,再建外部空间钢架和内部混凝土框架开始的(图 1-2),此时的结构并没有被“装饰”,质朴无华;建筑的破坏也是由结构引起的,静荷载或动荷载都会导致建筑结构产生变形甚至倒塌,比如地震会引起地基液化而使建筑整体倾斜(虽然此时上部结构完好),或者导致建筑结构的局部垮塌或全部倒塌(图 1-3)。

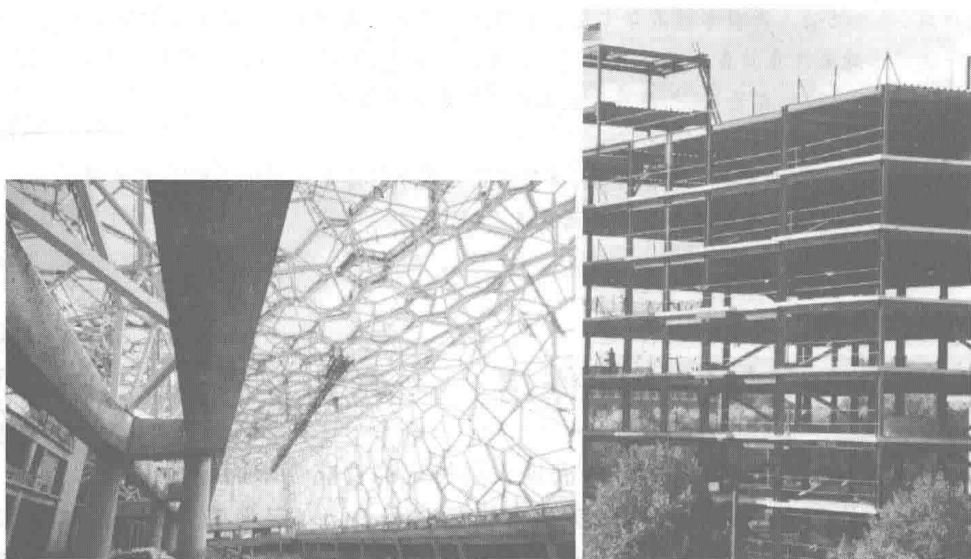


图 1-2 建造中的结构

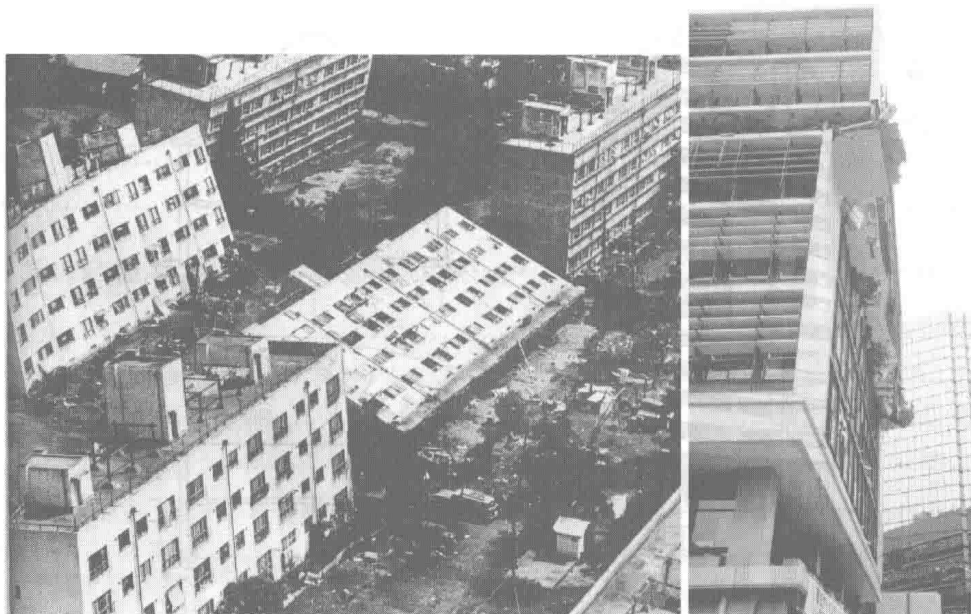


图 1-3 地震中损坏的结构

综上所述,结构的作用是:

- ① 结构是产生建筑形态与空间的首要且唯一的工具,即结构是塑造人类物质环境的基本手段;
- ② 结构是建筑得以生存下去的唯一保证,因此确保结构的安全性是建筑与结构设计的第一要务;也就是说,结构应该具备足够的强度、刚度和稳定性,以防止建筑倒塌或失效。

## 1.2 结构选型的基本概念

目前,人类已在工程实践中创造出很多技术先进、经济合理的结构体系和结构类型,同时伴随着新材料和新工艺的发展,新的结构形式也在不断涌现,所有这些技术进步和成就为建筑创作提供了坚实的技术基础,使得建筑设计具有了更大的自由度。其结果是,对于每个具体的工程设计,人们不得不面对如何选用结构体系或结构类型的问题。

所谓结构选型(structural selection)是指根据建筑的功能和美观要求,按照技术先进、安全适用、经济合理的结构设计三原则,依据规范(规程)或者结构概念与结构原理,通过对若干结构方案的技术经济对比分析后确定的优化结构方案。因此,结构选型的任务,就是对各种结构体系的组成(构成)、受力和变形特点、适用范围、结构估算方法、结构布置方案以及技术经济分析等内容进行分析和对比研究,从而获得最优的结构方案。

过去有一种观点认为,建筑师是搞艺术创造的,只负责做建筑方案,结构方案可另外找结构工程师做。对此,奈尔维(Nervi)曾批评道:“只有对复杂的建筑问题持肤浅的观点,才会把这个整体分化为互相分离的技术方面和艺术方面。建筑是,而且必须是一个技术和艺术的综合体,而并非技术加上艺术。”因此,一个合格的建筑师不但不应把结构选型任务甩给结构工程师,还应该通过不断地摸索和实践,逐步掌握结构构思的技巧。

## 1.3 结构构思的基本概念

关于结构构思,目前尚无明确的定义。本书提出了如下的定义:所谓结构构思(structural thinking)是指以建筑造型或形态为依据,以结构概念和结构原理为指导,来寻找结构技术和艺术契合点的一种创造性的思维活动。可见,结构构思应该建立在对结构技术深刻理解的基础上,主要研究的是如何利用结构概念和结构原理实现建筑造型或形态的问题,其中既包括如何合理使用或改造现有结构形式的问题,也包括如何通过创造新的结构形式来更好地适应建筑造型或形态的问题。

结构构思不同于结构选型。结构选型仅是结构构思的一个方面,而结构构思本质上属于一种创造性的设计过程,其创造和创新成分更为突出。

显然,同时具备结构构思与建筑构思的能力,集技术和艺术于一身,这是一个较高的设计境界,可作为未来建筑师和结构工程师的一个努力方向。

## 1.4 结构选型与结构构思的基本原则

与画家的绘画作品不同,建筑是包含了技术与艺术的综合体。也就是说,作为建筑师,既要考虑建筑功能和美观性,又要考虑如何通过相应的技术手段把它建造出来并保证其安全可靠。其中建造技术和安全性问题是结构问题,因此建筑师在建筑创作中无法回避或者抛开结构问题,而像其他艺术家一样特立独行。这是建筑师与其他艺术家之间的本质区别。

那么,建筑师在结构选型和结构构思中应该遵循哪些基本原则呢?下面通过案例加以说明。

### 1.4.1 结构和建筑有机结合

技术(technology)是由希腊文“科学知识”与“艺术或技艺”两个词根构成,因而西方自古就提倡技术与艺术的融合。纵观整个建筑的发展历史,不难看出,建筑有两条发展脉络,即主线发展脉络和副线发展脉络。

主线发展脉络的源头是科学和技术。可以说建筑风格的每一次变革都离不开力学和结构技术的发展,比如中世纪哥特建筑的骨架券、尖拱造就了新的建筑美学典范,以埃菲尔铁塔为代表的钢结构技术以及20世纪混凝土技术成就了现代主义建筑风格,等等。直至今日,结构技术的变化和发展仍然在潜移默化地影响着建筑创作。这条建筑的主线发展脉络非常清晰,遵循的是严密的力学推理和亘古不变的自然规律。

副线发展脉络的源头是艺术,是建立在人类主观和感性知识基础上,以形式美学为主导的发展脉络。这个脉络源自希腊的古典建筑,讲究形式比例的和谐与理想美,这些美学法则遵循的是人类的自我主观逻辑。

历史上,建筑演变的这两条脉络相辅相成,总体上呈现螺旋上升的态势。

工程实践证明,建筑师只有技艺交融,才能在建筑创作中挥洒自如,并创造出结构和建筑有机结合、技术和艺术和谐统一的建筑作品。

#### 【技术和艺术和谐统一的案例】

“一个技术上完善的作品,有可能在艺术上效果甚差,但是,无论是古代还是现代,却没有一个美学观点上公认的杰出而技术上却不是一个优秀作品的。看来,良好的技术对于良好的建筑说来,虽不是充分的,但却是一个必要的条件。”

——奈尔维(P.L.Nervi,1891—1979)

罗马小体育馆建于1957年,为迎接1960年奥运会而兴建,由意大利著名建筑师奈尔维(P.L.Nervi,1891—1979)设计,其建筑平面为圆形,直径60m,屋顶为带肋混凝土薄壳圆顶(穹顶),由1620块厚为25mm的预制钢丝网水泥菱形槽板拼装而成。整个屋顶宛如一片反扣

过来的荷叶,由 36 根 Y 形斜撑承托,造型轻盈灵巧(图 1-4)。

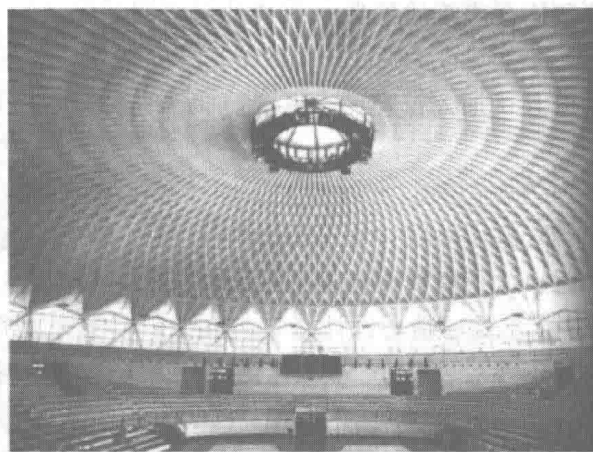
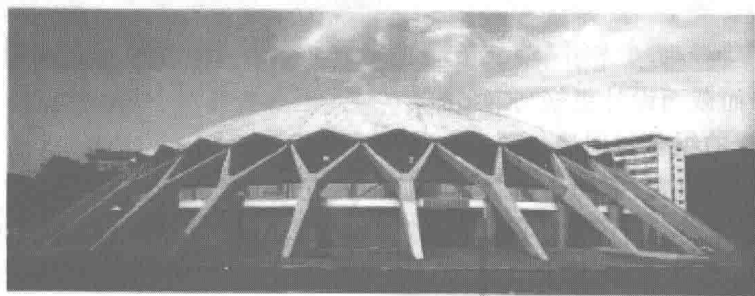
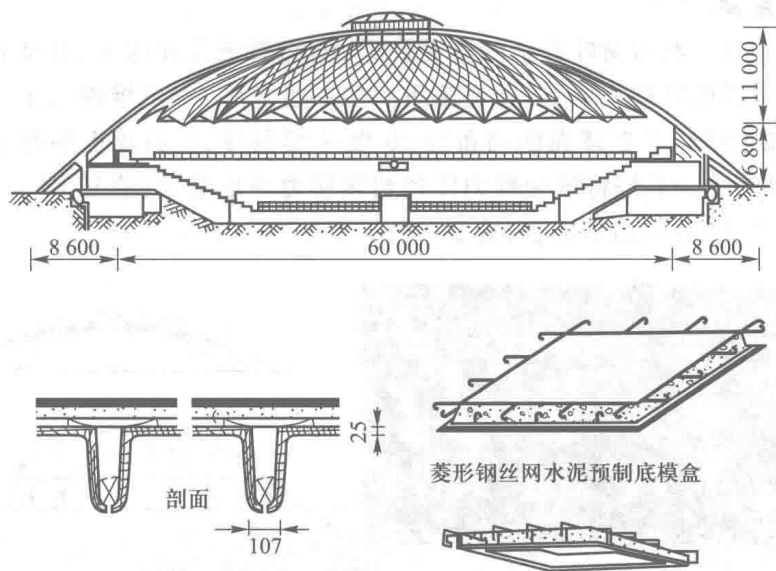


图 1-4 罗马小体育馆(1957 年)

该建筑的主要特点:

### 1. 结构构思新颖

奈尔维之前也设计类似荷叶造型的薄壳圆顶,但都属于光面球壳,且球壳的推力主要是依靠圈梁或竖直放置的立柱来承受,造型笨重。在本设计中,奈尔维构思了一种新颖的球壳推力处理方法(图1-5),即在球壳四周布置36根Y形斜撑,且斜撑上端与球壳波谷边缘相切,因而斜撑可以顺势而下地将球壳推力传递给预应力环形基础(直径84 m、宽2.4 m)。这种“水银泻地”的传力路线,清晰流畅,造型上极富感染力。

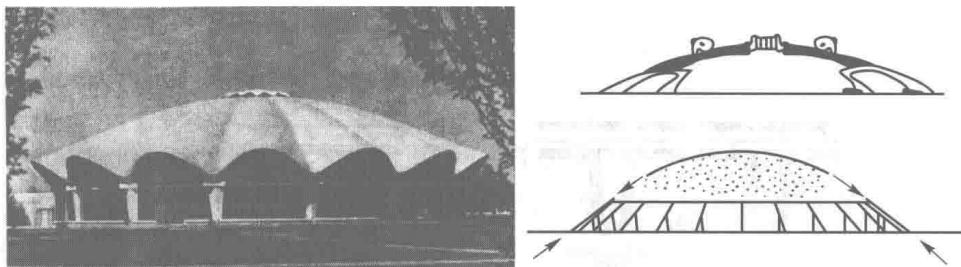


图1-5 罗马小体育馆的结构构思示意图

与竖直放置立柱的方案相比,竖直放置的立柱处于压弯状态,而奈尔维方案的斜撑处于轴向受压状态,因而截面设计更轻巧、经济。

### 2. 荷叶和树杈的组合与创造,源自自然,巧夺天工

从现代的建筑观点看,罗马小体育馆也应该是仿生建筑,且是唯美的仿生建筑代表作品(图1-4)。与现代某些过于具象的仿生建筑不同,奈尔维的荷叶和树杈的组合与创造,是结构力学的内在美和建筑的形式美的完美结合,气势恢宏,充分地体现了体育建筑“力量”的特征,堪称工程力学的典范和体育建筑的精品。

① 设计者独具匠心地将穹顶的屋檐设计成波浪形。从建筑设计的角度来看,屋顶的波形构成了优美的曲线,波形的起伏加大窗户的高度,增加了采光面积,还可防止因错觉而产生的下沉感。

② Y形斜撑仅与球壳的波谷相连,可以最大限度地减少落地斜撑的数量,为采光和突出大厅地位提供了可能。此外,因为斜撑与波谷为点接触,在波浪形的壳边缘设置了窄边梁,从而防止了应力集中现象,还加强了穹顶边缘梁的刚度,保证了壳边梁平面外的稳定性。

③ 内部穹顶顶棚也是奈尔维的精心设计之笔(图1-4)。首先是通过预制槽形板排列的艺术化处理,形成了穹顶中心尺度最小,边缘尺度最大的渐变网格划分,从内部望去整个屋顶犹如盛开的菊花悬浮在空中,轻盈和谐,意境似诗如梦,极富美感。此外,比较硬的壳肋和菱形槽板内吸声材料交替地组合,使整个顶棚具有非常好的声扩散和吸收噪音性能,声学效果堪称完美。

### 3. 结构的细部处理精妙，相应的结构处理手法与建筑构思协调统一

实际上，Y形斜撑与球壳相切的构思虽妙不可言，但在力学上，两者通过点连接属于不稳定的瞬变体系，为此，奈尔维在Y形斜撑的树杈交点下部布置了小立柱和混凝土圈梁“腰带”，但“腰带”的高度成为建筑美观处理的关键。为保证“腰带”不影响建筑立面构图的比例关系，特意将比赛场地卧，使地上一层屋顶的圈梁自然外凸，形成一个视觉效果完美的白色“腰带”。这些细部构件没有一件是多余的，而且它们之间的配合是如此的天衣无缝，没有任何事后补救的迹象，可见建筑构思与结构构思协调统一的重要性。

事实上，斜撑与屋盖相切以及给斜撑外加立柱的方法，是奈尔维从1936年起经常采用的设计手法，比如图1-6的飞机库（1939年修建，后被德军炸毁）设计中可见其身影。

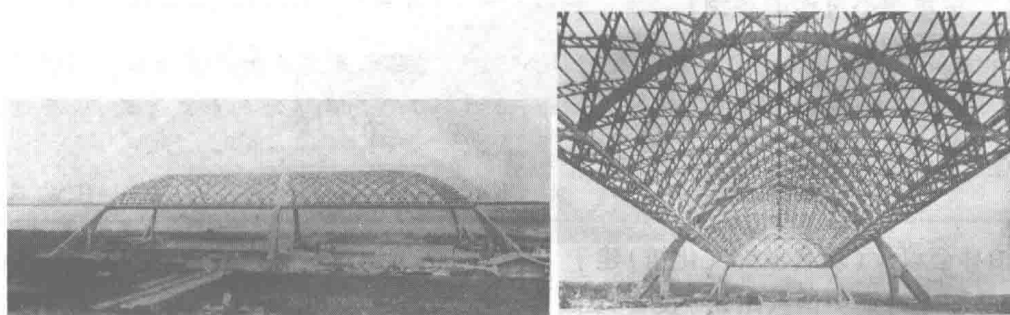


图 1-6 奈尔维设计的飞机库

### 4. 施工简便、工期短、造价低

奈尔维说：“我认为我们方案的经济性以及它的某些不可忽视的艺术特征，是来自预制结构在技术和建筑上内在的可能性。”因此，该工程中的带肋圆顶采用预制槽板接缝处现浇混凝土的方法形成肋梁（图1-7），这样的设计方案既节省了大量模板，具有施工简便、工期短的特点，又保证了结构的整体性，同时还减轻了屋顶的自重，降低了造价。

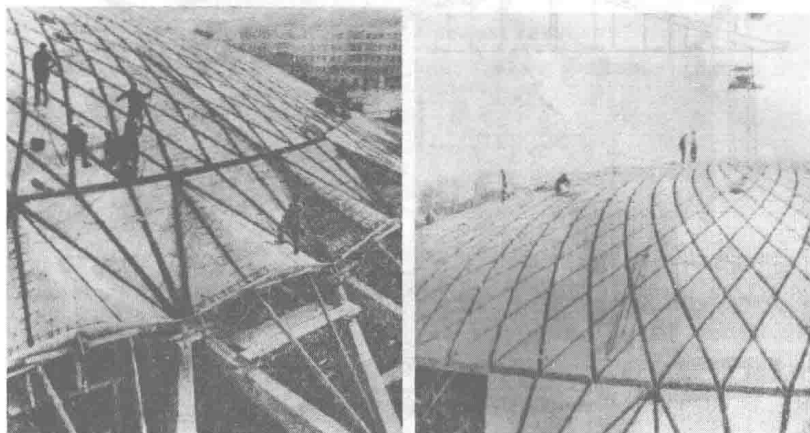


图 1-7 罗马小体育馆的施工现场



该建筑无论从整体到局部,其结构构思精巧,且力的传递脉络清晰,充分体现了简约、对称、和谐的科学美,在现代建筑史上占有重要地位。

### 1.4.2 确保结构的安全性

如前所述,结构的安全性是建筑得以生存的唯一保证,因此结构设计的一个主要目的是提供足够强度的结构,即结构能够承担施加在它们上面的施工和使用荷载而不会被破坏。道理虽然简单明了,但工程实践中一些建筑仍存在忽视结构安全的情况。

#### 【力学定律不可违的案例】

“结构就是建筑物中尚未修饰的物质材料,而建筑师则正是建筑物的营造家。不懂得结构的内在含义,盲目地去运用结构,这是浅薄无知的,必然会导致毫无道理的形式主义,从而造成本来是可以避免的那些浪费。”

——H.W.罗森迟尔

西柏林会议厅(现名世界文化馆)建于1957年,由美国建筑师斯塔宾斯(Hugh A. Stubbins)设计,它是冷战时期美国人赠送(投资)给“最前沿的西柏林人民的礼物”。该会议厅为椭圆平面。由于建筑平面与雷里体育馆(图1-8)类似,斯塔宾斯也选择了马鞍形混凝土薄壳屋盖和两个倾斜边拱的结构方案(图1-9),但为了建筑造型的创新或标新立异的需要,设计者对雷里体育馆的结构构思做了两个重要的修改,一是将两个边拱交汇于一点,即在拱脚处交汇,然后以点支承的形式与基础柱顶相连;二是为了凸显悬索屋盖的飘逸,将建筑外墙内移,使支座处的屋盖外露,营造屋顶处的屋盖悬挑的建筑效果。

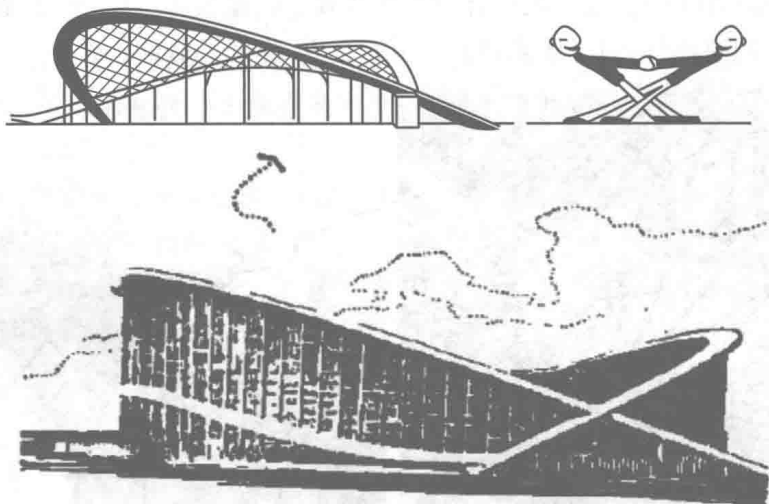


图1-8 雷里体育馆(1953年)