



高等学校土木工程专业系列规划教材



Architectural Structure

建筑 结 构

(第2版)

· 建筑工程方向 ·

■ 主编 杜 咏 岳健广
■ 主审 白国良



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

建筑结构/杜咏,岳健广主编.—2版.—武汉:武汉大学出版社,2018.10
高等学校土木工程专业系列规划教材
ISBN 978-7-307-20325-9

I. 建… II. ①杜… ②岳… III. 建筑结构—高等学校—教材 IV. TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 145577 号

责任编辑:孙 丽 方竞男

责任校对:路亚妮

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:荆州市鸿盛印务有限公司

开本:880×1230 1/16 印张:16 字数:514 千字

版次:2014 年 9 月第 1 版 2018 年 10 月第 2 版

2018 年 10 月第 2 版第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-20325-9

定价:42.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

主要编写及审稿人员简介



■ **杜咏**，1967年出生，工学博士，南京工业大学教授，国家一级注册结构工程师，兼任中国钢结构协会专家委员会委员、中国建筑学会抗震防灾分会结构防火专业委员会委员。主要从事建筑钢结构抗火研究与复杂体型建筑钢结构设计。主编教材2部，国家标准《建筑钢结构防火技术规范》主要起草人之一，主持和参与纵、横向科研项目50余项，在国内外学术期刊及国际会议发表论文40余篇。获省级教学成果奖及省级勘察设计奖3项。



■ **岳健广**，1979年出生，工学博士，南京工业大学讲师，国家一级注册结构工程师，主要从事混凝土结构地震损伤分析及非线性数值计算方法的研究。主持国家自然科学基金青年基金项目1项以及江苏省自然科学基金青年基金项目1项，在国内外学术期刊发表论文12篇。



■ **白国良**，1955年出生，工学博士，西安建筑科技大学二级教授，博士生导师，国家级教学名师。全国高等学校土木工程专业指导委员会委员、评估委员会委员，全国高等学校教学研究会土木建筑学科专业委员会副主任委员，西安建筑科技大学土木工程一级学科和结构工程国家级重点学科学术带头人，西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室主任、结构与抗震陕西省重点实验室主任，长期从事土木工程专业教学和科研工作。研究领域主要包括混凝土结构、钢与混凝土组合结构、高层与超高层建筑及复杂工业建筑混合结构体系性能、工程结构抗震等。主持和参与编制行业规程（土木建筑）3部；获国家科技进步奖二等奖1项，省部级科技进步奖一、二等奖9项；获国家级优秀教学成果奖二等奖1项，省部级优秀教学成果奖一、二等奖各1项。

高等学校土木工程专业系列规划教材

学术委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:周创兵

副主任委员:方 志 叶列平 何若全 沙爱民 范 峰 周铁军 魏庆朝
委 员:王 辉 叶燎原 朱大勇 朱宏平 刘泉声 孙伟民 易思蓉
周 云 赵宪忠 赵艳林 姜忻良 彭立敏 程 桦 靖洪文

编审委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:李国强

副主任委员:白国良 刘伯权 李正良 余志武 邹超英 徐礼华 高 波
委 员:丁克伟 丁建国 马昆林 王 成 王 湛 王 媛 王 薇
王广俊 王天稳 王曰国 王月明 王文顺 王代玉 王汝恒
王孟钧 王起才 王晓光 王清标 王震宇 牛荻涛 方 俊
龙广成 申爱国 付 钢 付厚利 白晓红 冯 鹏 曲成平
吕 平 朱彦鹏 任伟新 华建民 刘小明 刘庆潭 刘素梅
刘新荣 刘殿忠 闫小青 祁 皓 许 伟 许程洁 许婷华
阮 波 杜 咏 李 波 李 斌 李东平 李远富 李炎锋
李耀庄 杨 杨 杨志勇 杨淑娟 吴 昊 吴 明 吴 轶
吴 涛 何亚伯 何旭辉 余 锋 冷伍明 汪梦甫 宋固全
张 红 张 纯 张飞涟 张向京 张运良 张学富 张晋元
张望喜 陈辉华 邵永松 岳健广 周天华 郑史雄 郑俊杰
胡世阳 侯建国 姜清辉 娄 平 袁广林 桂国庆 贾连光
夏元友 夏军武 钱晓倩 高 飞 高 玮 郭东军 唐柏鉴
黄 华 黄声享 曹平周 康 明 阎奇武 董 军 蒋 刚
韩 峰 韩庆华 舒兴平 童小东 童华炜 曾 珂 雷宏刚
廖 莎 廖海黎 蒲小琼 黎 冰 戴公连 戴国亮 魏丽敏

出版技术支持

(按姓氏笔画排名)

项目团队:王 睿 白立华 曲生伟 蔡 巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导模式转变为建设性、发现性的学习,从被动学习转变为主动学习,由教师传播知识到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,逐步配备基本数字教学资源,主要包括:

文本:课程重难点、思考题与习题参考答案、知识拓展等。

图片:课程教学外观图、原理图、设计图等。

视频:课程讲述对象展示视频、模拟动画,课程实验视频,工程实例视频等。

音频:课程讲述对象解说音频、录音材料等。

数字资源获取方法:

- ① 打开微信,点击“扫一扫”。
- ② 将扫描框对准书中所附的二维码。
- ③ 扫描完毕,即可查看文件。

更多数字教学资源共享、图书购买及读者互动敬请关注“开动传媒”微信公众号!



丛书序

土木工程涉及国家的基础设施建设,投入大,带动的行业多。改革开放后,我国国民经济持续稳定增长,其中土建行业的贡献率达到1/3。随着城市化的发展,这一趋势还将继续呈现增长势头。土木工程行业的发展,极大地推动了土木工程专业教育的发展。目前,我国有500余所大学开设土木工程专业,在校生达40余万人。

2010年6月,中国工程院和教育部牵头,联合有关部门和行业协(学)会,启动实施“卓越工程师教育培养计划”,以促进我国高等工程教育的改革。其中,“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划”由住房和城乡建设部与教育部组织实施。

2011年9月,住房和城乡建设部人事司和高等学校土建学科教学指导委员会颁布《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,对土木工程专业的学科基础、培养目标、培养规格、教学内容、课程体系及教学基本条件等提出了指导性要求。

在上述背景下,为满足国家建设对土木工程卓越人才的迫切需求,有效推动各高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,促进高等学校土木工程专业教育改革,2013年住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会启动了“高等教育教学改革土木工程专业卓越计划专项”,支持并资助有关高校结合当前土木工程专业高等教育的实际,围绕卓越人才培养目标及模式、实践教学环节、校企合作、课程建设、教学资源建设、师资培养等专业建设中的重点、亟待解决的问题开展研究,以对土木工程专业教育起到引导和示范作用。

为配合土木工程专业实施卓越工程师教育培养计划的教学改革及教学资源建设,由武汉大学发起,联合国内部分土木工程教育专家和企业工程专家,启动了“高等学校土木工程专业系列规划教材”建设项目。该系列教材贯彻落实《高等学校土木工程本科指导性专业规范》《卓越工程师教育培养计划通用标准》和《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》,力图以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力和工程创新能力。该系列教材的编写人员,大多主持或参加了住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会的“土木工程专业卓越计划专项”教改项目,因此该系列教材也是“土木工程专业卓越计划专项”的教改成果。

土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,需要校企合作,期望土木工程专业教育专家与工程专家一道,共同为土木工程专业卓越工程师的培养作出贡献!

是以为序。



2014年3月于同济大学四平路校区

前言

本书根据“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划教学改革研究与课程教材建设示范项目”的基本要求,贯彻“紧扣最新规范、强调工程实践、体现卓越实质、服务人才培养”的教育方针,以及合理化知识体系及结构、实践教学的改革目标编写而成。本书在培养学生综合能力和创新意识的同时,注重加强学生对工程结构基本概念的掌握,提高学生的实践能力。本书适用于建筑学、城市规划、房地产、工程造价、工程管理等土建类相关专业。

本书突出了建筑结构方案、概念设计、结构选型、计算方法等内容之间的逻辑关系,简单阐述了相关基本概念与原理,力求使学生对专业知识体系有一个整体的把握。本书从建筑与结构的起源出发,论述了建筑、结构、自然作用三者之间的辩证关系;按照实际工程结构的设计顺序,依次介绍了建筑方案确定的原则、外界作用的分类及计算方法、结构抗震概念设计与受力特点、材料的力学性能、构件基本设计原理,以及建筑部件、地基基础等的设计方法。其教学内容涉及混凝土结构、钢结构和砌体结构。

同时,书中相关内容的编写严格按照我国最新规范,如《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)、《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB 50011—2010)、《混凝土结构设计规范(2015年版)》(GB 50010—2010)、《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)、《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)等,相关内容反映了我国土木工程领域的新进展。

全书内容充实、循序渐进、简明实用。为便于读者对基本概念、原理的理解,书中列出了丰富的图片,并介绍了大量典型建筑工程的实例,强化了实践教学的内容;为主要的计算方法列举了典型例题,且多为注册建筑师、结构工程师资格考试的题型,工程实践性较强。本书在各章末附有知识归纳与独立思考,方便教师教学与学生自学。同时,结合最新的出版融合技术,将二维码嵌入纸质媒体,配置多种“数字资源”,打造“多媒体、立体化、互联网+”的全媒体图书,给不同的读者群体提供多样化的阅读体验。

本书由南京工业大学杜咏和岳健广担任主编。具体编写分工为:第4章、第9章、第10章、第11章由杜咏编写,第1章、第2章由杜咏和岳健广共同编写,其他章节由岳健广编写。全书由杜咏统稿。西安建筑科技大学白国良担任本书主审。

在本书编写过程中,参阅、借鉴和引用了许多优秀教材、专著和文献资料,同时得到了南京工业大学建筑设计研究院、中天建设集团浙江钢构有限公司的大力协助,硕士研究生范栋浩、李西、林苏敏、谢超、蒋云、张永振等也协助参与了大量工作,在此一并致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评、指正。

编者

2018年5月

目 录

1 总论	(1)	3 建筑结构抗震概念设计	(49)
1.1 建筑结构的起源与发展	(2)	3.1 整体设计概念	(50)
1.1.1 我国建筑结构	(2)	3.2 框架结构	(56)
1.1.2 国外建筑结构	(10)	3.2.1 框架结构体系	(56)
1.2 结构形式的演变	(18)	3.2.2 框架结构的抗震设计	(58)
1.2.1 结构形式的产生	(18)	3.2.3 框架结构的内力计算	(60)
1.2.2 梁板结构体系	(20)	3.3 剪力墙结构	(62)
1.2.3 框架结构体系	(22)	3.3.1 剪力墙体系	(62)
1.2.4 大跨度结构体系	(23)	3.3.2 剪力墙结构的抗震设计	(63)
1.2.5 其他结构体系	(25)	3.3.3 剪力墙结构的受力计算	(65)
1.3 现代工程结构的设计方法	(26)	3.4 框架-剪力墙结构	(68)
1.3.1 现代工程结构设计方法发展 过程	(26)	3.4.1 框架-剪力墙结构体系	(68)
1.3.2 基于概率理论的极限状态设计 方法	(27)	3.4.2 框架-剪力墙结构的抗震设计	(69)
知识归纳	(33)	3.4.3 框架-剪力墙结构的受力计算	(70)
独立思考	(33)	3.5 筒体结构	(73)
2 外界作用的计算	(34)	3.5.1 筒体结构体系	(73)
2.1 重力	(35)	3.5.2 筒体结构的抗震设计	(74)
2.1.1 结构的自重	(35)	3.5.3 筒体结构的受力计算	(75)
2.1.2 土的自重	(35)	3.6 单层工业厂房	(75)
2.1.3 雪荷载	(36)	3.6.1 单层厂房的组成及受力特点	(76)
2.1.4 楼面活荷载	(36)	3.6.2 结构布置的一般原则	(77)
2.2 吊车荷载	(37)	知识归纳	(78)
2.2.1 吊车竖向荷载 $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$	(37)	独立思考	(79)
2.2.2 吊车横向水平荷载 $T_{\max}$	(38)	4 空间结构的形式与受力特点	(80)
2.2.3 吊车纵向水平荷载 T_0	(39)	4.1 桁架结构	(81)
2.3 风荷载	(39)	4.1.1 桁架结构的特点	(81)
2.3.1 基本概念	(39)	4.1.2 平面桁架	(81)
2.3.2 计算方法	(40)	4.1.3 立体桁架	(82)
2.3.3 风对建筑物的损坏	(42)	4.1.4 空腹桁架	(83)
2.3.4 抗风对策	(42)	4.1.5 建筑实例	(83)
2.4 地震作用	(43)	4.2 网架结构	(84)
2.4.1 基本概念	(43)	4.2.1 网架结构的形式和选用	(84)
2.4.2 计算方法	(45)	4.2.2 建筑实例	(85)
知识归纳	(48)	4.3 网壳结构	(86)
独立思考	(48)	4.3.1 网壳结构的形式和选用	(86)
		4.3.2 建筑实例	(88)
		4.4 悬索结构	(89)

4.4.1 悬索结构的构成与特点	(89)	6.5.2 构件的裂缝	(132)
4.4.2 悬索结构的主要形式	(90)	6.5.3 减少挠度和裂缝宽度的有效 措施	(133)
4.4.3 建筑实例	(92)	6.6 一般构造要求	(134)
4.5 张弦梁结构	(93)	6.6.1 梁的构造要求	(134)
4.5.1 张弦梁结构的构成与特点	(93)	6.6.2 板的构造要求	(135)
4.5.2 张弦梁结构的形式与分类	(94)	6.6.3 柱的构造要求	(135)
4.5.3 建筑实例	(95)	6.7 工程实例	(136)
知识归纳	(96)	知识归纳	(137)
独立思考	(96)	独立思考	(138)
5 建筑材料	(97)	习题	(138)
5.1 材料的基本力学性能指标	(98)	7 预应力混凝土结构的基本知识	(139)
5.2 混凝土	(100)	7.1 预应力混凝土的概念	(140)
5.2.1 混凝土的强度	(100)	7.2 预应力混凝土材料	(140)
5.2.2 混凝土的变形	(101)	7.3 施加预应力的方法	(141)
5.3 建筑用钢	(103)	7.3.1 先张法和后张法	(141)
5.3.1 钢材的力学性能	(103)	7.3.2 锚具	(142)
5.3.2 钢筋	(105)	7.4 预应力损失与预应力混凝土受力 特点	(145)
5.3.3 建筑钢结构用钢	(106)	7.4.1 预应力混凝土构件设计的一般 规定	(145)
5.4 混凝土与钢材的黏结	(109)	7.4.2 预应力混凝土构件和非预应力 构件的比较	(146)
5.4.1 黏结的作用	(110)	7.5 工程实例	(146)
5.4.2 保证黏结力的措施	(110)	知识归纳	(147)
5.5 砌体	(111)	独立思考	(147)
5.5.1 砌体的组成	(111)		
5.5.2 砌体的力学性能	(112)		
知识归纳	(115)		
独立思考	(115)		
6 钢筋混凝土结构基本原理	(116)	8 砌体结构	(148)
6.1 钢筋混凝土的一般概念	(117)	8.1 概述	(149)
6.2 受弯构件正截面承载力计算	(117)	8.2 构造要求	(150)
6.2.1 受弯构件正截面破坏形态	(118)	8.2.1 墙柱的高厚比验算	(150)
6.2.2 正截面承载力计算基本 假定	(121)	8.2.2 构造柱	(152)
6.2.3 正截面承载力计算	(121)	8.2.3 一般构造要求	(153)
6.3 受弯构件斜截面承载力	(123)	8.2.4 防止墙体开裂的措施	(154)
6.3.1 受弯构件斜截面破坏形态	(124)	8.3 无筋砌体构件承载力计算	(154)
6.3.2 斜截面承载力计算	(125)	8.3.1 受压构件承载力的计算	(154)
6.4 受压构件承载力计算	(127)	8.3.2 局部受压承载力计算	(155)
6.4.1 轴压力作用下柱的破坏形态	(128)	8.3.3 轴心受拉构件	(156)
6.4.2 轴心受压的截面承载力计算 公式	(130)	8.3.4 受弯构件	(156)
6.5 钢筋混凝土构件的变形及裂缝	(130)	8.3.5 受剪构件	(156)
6.5.1 受弯构件的挠度	(131)	8.4 圈梁、过梁、墙梁及挑梁	(157)
		8.4.1 圈梁	(157)
		8.4.2 过梁	(158)

8.4.3 墙梁	(161)	10.3.2 现浇钢筋混凝土板组合楼盖 ...	(201)
8.4.4 挑梁	(162)	10.3.3 预制钢筋混凝土板组合楼盖 ...	(201)
知识归纳	(163)	10.4 楼梯	(202)
独立思考	(164)	10.4.1 现浇式楼梯	(203)
9 钢结构构件	(165)	10.4.2 预制装配式楼梯	(203)
9.1 钢结构的一般概念	(166)	10.4.3 楼梯的设计	(204)
9.2 钢结构连接	(166)	知识归纳	(209)
9.2.1 焊接连接	(167)	独立思考	(209)
9.2.2 螺栓连接	(171)	11 地基及基础	(210)
9.3 轴心受力构件	(176)	11.1 地基基础的一般概念	(211)
9.3.1 轴心受力构件的破坏现象	(176)	11.2 地基土的特性	(211)
9.3.2 轴心受拉构件的承载力计算	(177)	11.2.1 地基土的物理性质	(211)
9.3.3 轴心受压构件的承载力计算	(177)	11.2.2 地基土的力学性能	(215)
9.4 受弯构件(梁)	(178)	11.2.3 工程应用	(218)
9.4.1 受弯构件的破坏现象	(179)	11.3 刚性基础	(221)
9.4.2 受弯构件的承载力计算	(179)	11.3.1 刚性基础概述	(221)
9.5 拉(压)弯构件	(182)	11.3.2 基底压力计算	(222)
9.5.1 拉(压)弯构件的破坏现象	(183)	11.4 柔性基础	(224)
9.5.2 拉弯构件的承载力计算	(183)	11.4.1 扩展基础	(224)
9.5.3 压弯构件的承载力计算	(184)	11.4.2 柱下条形基础	(226)
知识归纳	(185)	11.4.3 筏板基础	(227)
独立思考	(186)	11.4.4 桩基础	(228)
习题	(186)	知识归纳	(230)
10 建筑结构部件	(187)	独立思考	(230)
10.1 钢筋混凝土平面楼盖	(188)	习题	(231)
10.1.1 整体式交梁楼盖	(189)	附录 刚度的计算方法	(232)
10.1.2 整体式无梁楼盖	(190)	附1 刚度和柔度的定义	(232)
10.1.3 装配式楼盖	(190)	附2 截面刚度	(233)
10.1.4 板的设计	(192)	附3 线刚度	(234)
10.2 钢结构围护部件	(196)	附4 杆件刚度	(235)
10.2.1 压型钢板	(197)	附5 墙体的侧向刚度	(238)
10.2.2 檩条	(197)	附6 刚度的叠加和柔度的叠加	(240)
10.2.3 支撑	(199)	附7 结构刚度	(241)
10.2.4 墙梁	(199)	参考文献	(243)
10.3 组合楼盖	(200)		
10.3.1 压型钢板组合楼盖	(201)		



总 论

课前导读

▽ 内容提要

本章主要内容为建筑结构的起源与发展，其范围从我国原始社会时期的建筑活动一直到现代建筑结构，以及国外各个地区不同时期的建筑结构发展；功能要求的变化与科学技术的进步所引起的结构形式演化；梁板结构体系、框架结构体系、大跨度结构体系以及其他结构体系的特点；现代工程结构的设计方法。

▽ 能力要求

通过本章的学习，学生应了解国内外建筑结构的起源与发展，以及历史上进步较为明显的建筑结构；了解随着科学技术的进步，建筑结构形式不断演变的过程；理解现代工程结构的设计方法，能够在建筑设计过程中建立后续结构设计理念。

▽ 数字资源



5分钟看完本章

1.1 建筑结构的起源与发展

1.1.1 我国建筑结构

(1) 秦朝以前的建筑活动

上古时期,尚无真正意义上的建筑设计,建筑仅是作为遮风避雨的简易场所,穴居和巢居是当时普遍的居住形式。史料记载“上古穴居而不野处”“上古之世,人民少而禽兽众,人民不胜禽兽虫蛇。有圣人作,构木为巢以避群害”,即反映了当时人类的居住状况。之后,建筑经历了从深穴居到半穴居的过程,在农耕时期进入了营造地面建筑的阶段,构筑方式也完成了从以土为主逐渐向以木为主的过渡,如图 1-1 所示。

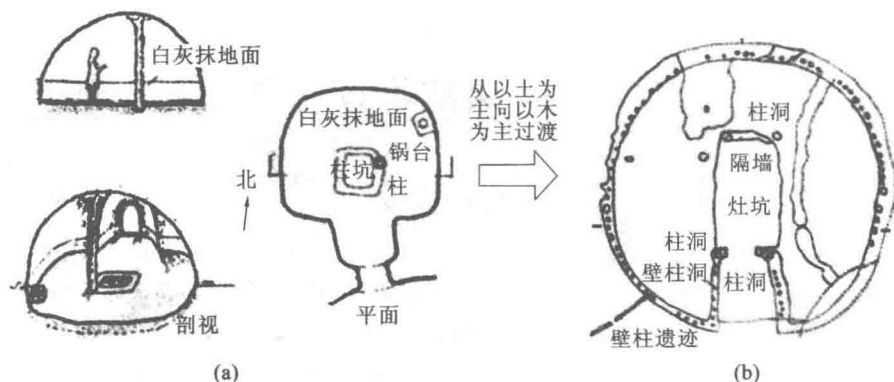


图 1-1 上古时期建筑的发展过渡

(a) 山西岔沟龙山文化洞穴遗址示意图; (b) 新石器时代遗址示意图

夏朝时期逐渐开始从建造方式、规模制度等方面对居住场所进行摸索设计,是原始建筑向传统建筑转折的关键时期。夯筑技术已使用于建筑宫室台榭,河南偃师二里头遗址是迄今发现的我国最早的宫殿建筑群。该遗址表明夏朝大型建筑已开始采用“茅茨土阶”的构筑方式及“前堂后室”的空间布局。图 1-2 所示为当时的石夯工具①和夯土遗址剖面②。

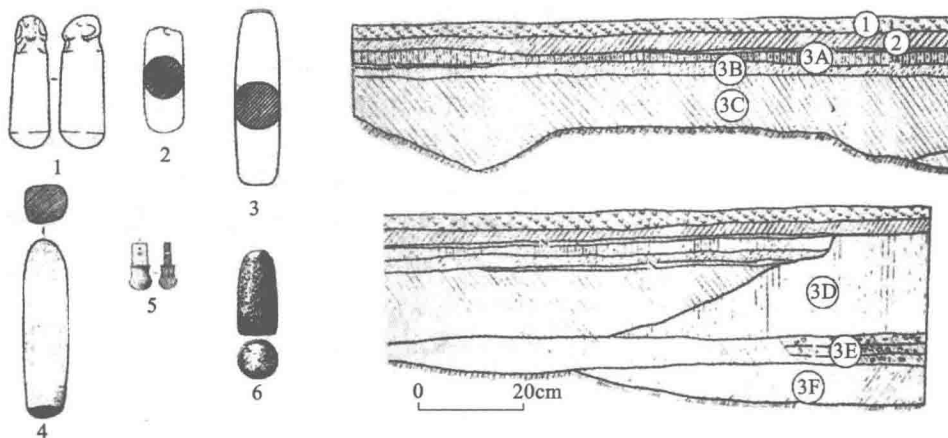


图 1-2 上古时期的石夯工具与夯土遗址剖面

商朝的夯筑技术日趋成熟,采用先分层夯筑后逐段上筑的夯土板筑法建造城墙。同时创制了板瓦、筒

① 石夯工具是夯筑的必要工具,通过夯打、砸实填土使其致密,以加固建筑。图 1-2 所示石夯工具中 1~3 为石杵,4~6 为石锤。

② 偃师二里头 1 号建筑主体殿堂基座夯土分 D、E、F 三层。D 层为深褐色夯土,深 1.05m,厚 1.65m,质地坚硬,夯窝清晰。E 层为花夯土,深 2.7m,厚 1~1.1m,含三层鹅卵石。F 层为黄褐色夯土,深 2.9m,土质十分坚硬。

瓦等建筑陶器,借助半瓦当改进屋顶的防水性能;出现了斗和拱,并形成了简单的组合形式,以改善屋顶承受荷载的能力,推进建筑结构向着构架发展。图 1-3 为考古出土的商周时期的青铜器——妇好偶方彝,以及战国早期铜质的蟠螭纹斗拱。

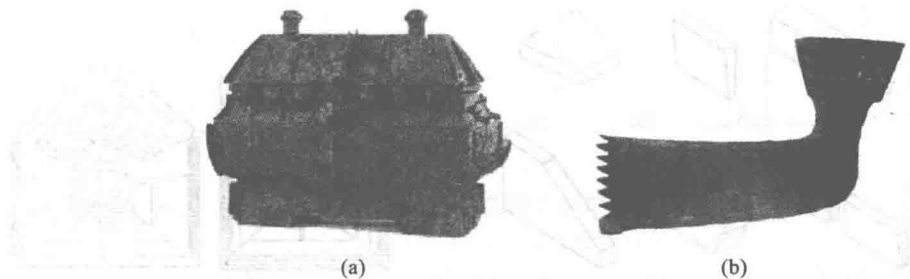


图 1-3 早期的斗拱

(a)商周时期的青铜器妇好偶方彝;(b)战国早期铜质的蟠螭纹斗拱

春秋战国时期的建筑规模则比以往更为宏大,台榭式高层建筑大量兴建。正如春秋时期老子所说的“九层之台,始于累土”,夯筑若干座高数米至十多米的阶梯形夯土台,在上面建筑木构架殿堂屋宇,形成类似多层建筑的大型高台建筑群。

(2)秦汉时期的建筑设计

传统木构架建筑在秦朝时期更加成熟并产生了重大的突破,主要体现在对大跨度梁架的设计上。例如,秦咸阳宫(图 1-4)离宫一号宫殿主厅的斜梁水平跨度已达到 10m,据此推测阿房宫前殿的主梁跨度一定不会小于 10m。同时,用砖承重在秦朝时期已经出现,可用其砌筑出质地坚硬的砖墙,砖的发明是中国建筑设计史上的重要成就之一。

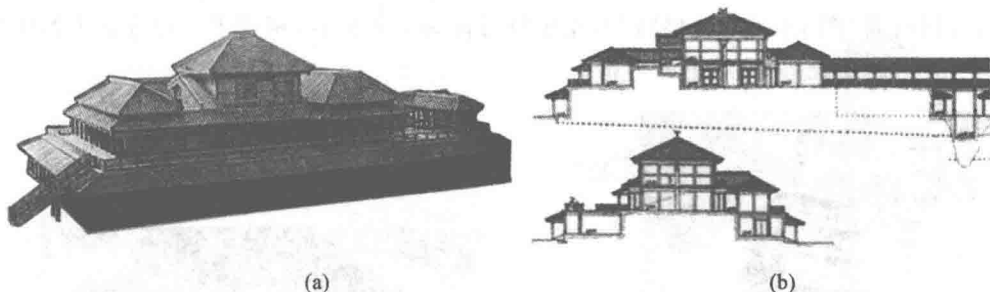


图 1-4 秦咸阳宫复原图

(a)复原模型;(b)复原立面图

汉代木构架建筑设计灵活,图 1-5 所示分别为后世常见的柱上架梁,梁上立短柱,短柱上再架梁的抬梁式木结构,柱头承檩,并穿枋联结柱子的穿斗式木结构以及下部架空,上部为干阑式木结构,直至今日,这些结构形式仍被广泛应用。斗拱被广泛使用且形式多样,当时的工匠为了保护土墙、木构架和房屋的基础,用向外挑出的斗拱承托屋檐,以使屋檐伸出足够的长度。

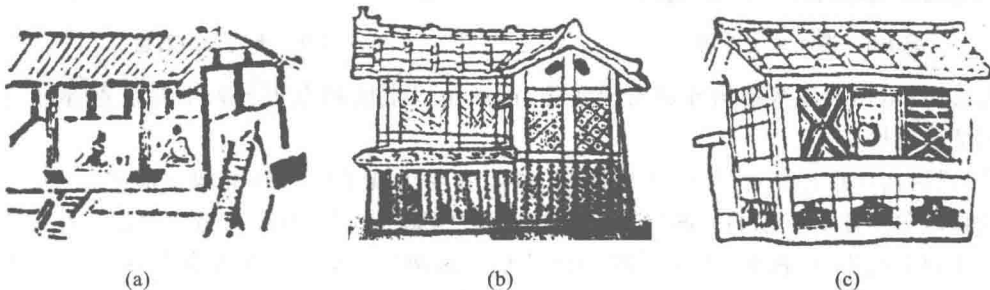


图 1-5 汉代木结构形式

(a)抬梁式结构(四川成都画像砖);(b)穿斗式结构(广州汉墓);(c)干阑式结构(广州汉墓)

汉代在砖石建筑和拱券结构方面亦有巨大进步。西汉时期出现了大量不同形状的砖(图 1-6),利用条砖与楔形砖砌拱建造墓室,发明了企口砖以加强砖砌拱的整体性。除此之外,汉代还在岩石上开凿岩墓,或者利用石材砌筑梁板式墓或拱券式墓,如图 1-7 所示。

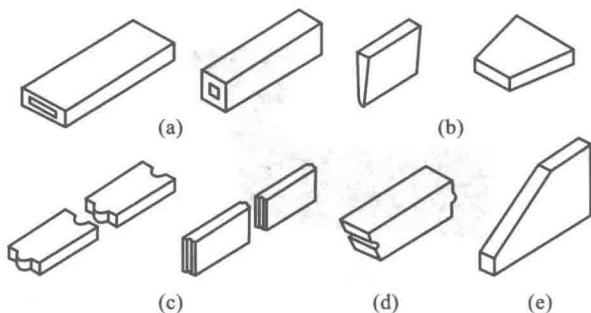


图 1-6 汉代各种墓砖

(a)空心条砖;(b)楔形砖;(c)企口砖;
(d)楔形企口砖;(e)墓门空心砖

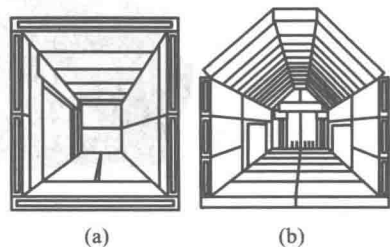


图 1-7 汉代空心砖墓

(a)板梁式空心砖墓(河南洛阳);
(b)斜撑板梁式空心砖墓(河南洛阳)

(3)魏晋南北朝时期的建筑设计

魏晋南北朝时期最突出的建筑类型是佛教建筑,“大起浮屠寺,上累金盘,下为重楼,又堂阁周围,可容三千许人。作黄金涂像,衣以锦彩”,是当时大兴佛教建筑的鲜明写照。早期佛教建筑布局仿照印度建筑风格,后来逐步中国化,其一般由地宫、塔基、塔身、塔顶和塔刹组成,仿照多层木构楼阁的做法,形成了中国式木塔(图 1-8),这可以说是传统中国多层木结构的开始。

除此之外,砖石结构也有了长足的进步,出现了高达数十米的石塔和砖塔。各地的石窟开始相继建造,石窟可以分为三种:一是塔院型,以塔为窟的中心(即窟中支撑窟顶的中心柱刻成佛塔形象),该类石窟的典型代表是大同云冈石窟(图 1-9);二是佛殿型,窟中以佛像为主要内容,相当于一般寺庙中的佛殿;三是僧殿型,供僧众打坐修行,窟中置佛像,周围凿小窟。

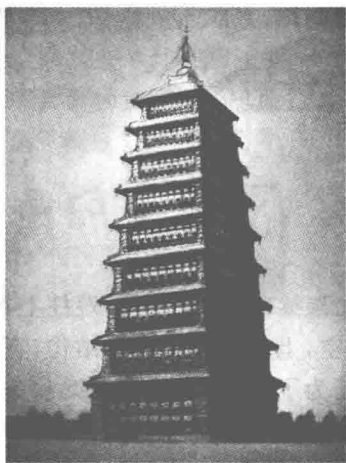


图 1-8 洛阳永宁寺塔



图 1-9 大同云冈石窟

南北朝中后期,木构架建筑结构开始出现变化,逐渐由以土墙和夯土台为主要承重部分的土木混合结构向全木构架结构发展。

这一时期,建筑构件设计更为丰富,斗拱形式多样,主要出现了两种新的构造形式,一种是将正侧边立柱向内,向明间(即单体建筑正中的一间)方向倾斜,称为“侧脚”[图 1-10(a)];另一种是将每边的立柱自明间柱到两端角柱逐间升高少许,称为“生起”[图 1-10(b)]。这两种新形式主要是使柱头内聚,柱脚外撇,最终形成下凹式曲面屋顶,有效防止建筑的倾侧扭转,提高建筑的稳定性。

(4)隋唐、五代十国时期的建筑设计

东汉至南北朝时期有了高层木建筑的建造技术,到了隋唐时期,木建筑解决了大面积、大体量的技术问题,

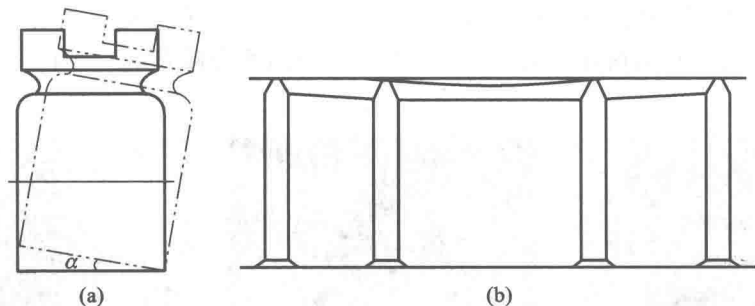


图 1-10 侧脚之制与纵向生起

(a)侧脚之制;(b)柱列的纵向生起

并已定型化。如大明宫麟德殿(图 1-11),面积约为 5000m²,采用面阔^① 11 间、进深约为面阔 1 倍的柱网布置。

当时的木架结构特别是斗拱部分,构件形式及用料都已开始规格化,说明用材制度已经出现,即将木架部分的用料规格化,一律以木料的某一断面尺寸为基数计算,这是木构件分工生产和统一装配必然要求的方法。从图 1-12 中的唐后期南禅寺正殿和佛光寺大殿可以看出这种规格化的迹象。

自南北朝中后期出现的侧脚、生起、翼角^②、凹面屋面等结构构件的设计手法也在隋唐建筑上逐渐规范化。挑檐和室内斗拱设计呈内凹或外凸的规格化弧面,继以往的凹曲屋面和起翘翼角的屋顶形式后,又设计出庀殿、歇山、悬山、攒尖等各种样式,如图 1-13 所示。

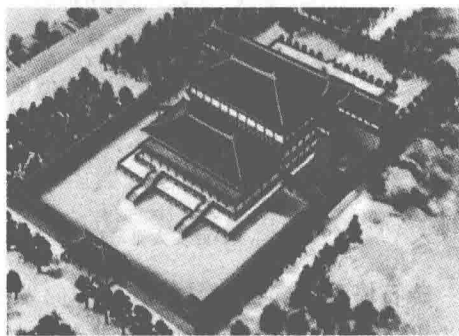
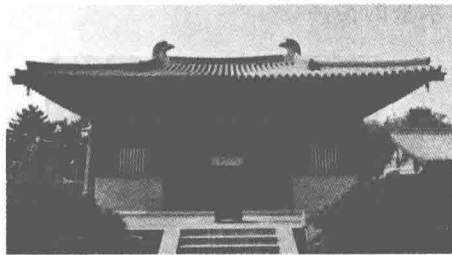


图 1-11 唐长安大明宫麟德殿



(a)



(b)

图 1-12 南禅寺正殿与佛光寺大殿

(a)南禅寺正殿;(b)佛光寺大殿

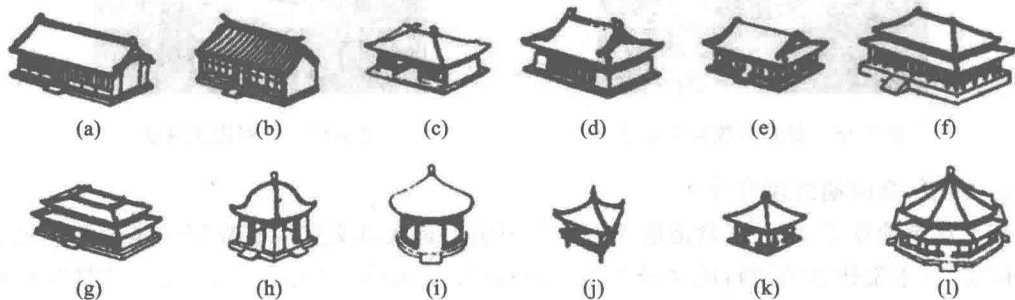


图 1-13 屋顶的形式

(a)悬山;(b)硬山;(c)庀殿;(d)歇山;(e)卷棚;(f)重檐;

(g)盪顶;(h)盪顶;(i)圆攒尖;(j)三角攒尖;(k)四角攒尖;(l)八角攒尖

① 面阔是指古代建筑中位于同一直线上相邻两根檐柱中心线间的水平距离。

② 翼角是指中国古代建筑屋檐的转角部分,微微向上翘起,舒展如鸟翼,主要用在屋顶相邻两坡屋檐之间。

隋唐时期,虽然木楼阁式塔仍是塔的主要类型,在数量上占优势,但木塔易燃且不耐久的缺点推动了砖石建筑的进一步发展。目前我国保存下来的隋唐时期塔式建筑均为砖石塔,唐朝的砖石塔(图 1-14)有楼阁式、密檐式与单层塔。

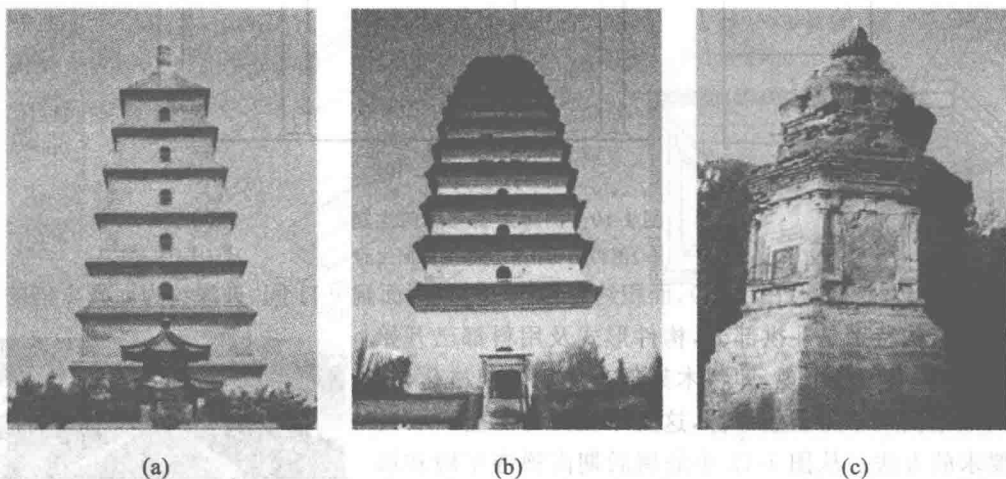


图 1-14 唐朝砖石塔形式

(a)西安大雁塔(楼阁式);(b)西安小雁塔(密檐式);(c)河南会善寺净藏禅师塔(单层塔)

砖石塔外形向仿木结构建筑方向发展,例如,西安兴教寺玄奘塔(图 1-15)部分地仿照木建筑的柱、简单的斗拱、檐部、门窗等,反映了对传统建筑式样的继承和砖石材料加工技术渐趋成熟。

五代时期砖木混合结构的塔,都是在唐代砖石塔基础上进一步发展的仿楼阁式木塔。例如,建都于广州的南汉铸造铁塔(图 1-16),反映了江南一带建筑技术水平的提高。



图 1-15 西安兴教寺玄奘塔



图 1-16 广州南汉铁塔

(5)宋、辽、西夏、金时期的建筑设计

北宋颁布了建筑预算定额——《营造法式》,这是历史上首次以文字形式规定的木模数制度。以“材”作为造屋尺度标准,将木架建筑的用料尺寸分为八等,按屋宇的大小、主次量屋用“材”。“材”一经选定,木构架部件的尺寸整套都按规定来,工料估算有了统一的标准,施工也方便。以后历朝的木架建筑都沿用相当于以“材”为模数的办法,直到清代。

宋代的砖石建筑水平达到了新的高度,木塔已较少采用,绝大多数为砖石塔。河北定县开元寺塔(料敌塔)(图 1-17)高达 84m,是我国最高的砖石塔;福建泉州开元寺东西两座仿木石塔(图 1-18),高度均为 40 余米,是我国规模最大的石塔。宋代砖石塔的特点是平面多为八角形,少数用方形与六角形,可供登临远眺,塔身多为筒体结构,墙面及檐部多为仿木建筑形式或采用木构屋檐。



图 1-17 河北定县开元寺塔(料敌塔)



图 1-18 福建泉州开元寺石塔

辽代建筑大量吸取唐代北方的传统做法,保留了唐代建筑的设计手法。其佛塔多数采用砖砌的密檐塔,楼阁式塔较少,不少密檐塔的柱、梁、斗拱、门窗、檐口等都用砖仿木构件。这一时期的砖仿木建筑设计水平已达到登峰造极的地步,北京天宁寺塔(图 1-19)、山西灵丘觉山寺塔(图 1-20)是这类佛塔的著名代表。



图 1-19 北京天宁寺塔



图 1-20 山西灵丘觉山寺塔

(6) 元、明、清时期的建筑设计

元朝建筑大多沿袭了唐、宋以来的传统设计形式,部分地方继承了辽金建筑的特点。其大量使用圆木、弯曲木料作为梁架构件,并简化局部建筑构件,在结构设计上大胆运用减柱法、移柱法,使元朝建筑呈现随意奔放的风格。但由于木料特性的限制,以及缺乏科学的计算方法,元朝建筑不得不额外采用木柱加固结构。例如,广胜下寺正殿(图 1-21)是元朝重要的佛教建筑,正殿柱列布置采用减柱法减去了 6 根柱子,有 4 榀梁架搁置在内额^①上,但因内额跨度大,后来不得不于内额下补加柱子作为支撑。

明朝时期,砖已普遍用于民居砌墙。之前虽有砖塔、砖墓、水道砖拱等砖砌建筑,但木架建筑均以土墙为主,砖仅用于铺地、砌筑台基与墙基等处。随着砖的发展,出现了全部用砖拱砌成的建筑物——无梁殿,多用作防火建筑,如明中叶所建的南京灵谷寺无梁殿和苏州开元寺无梁殿(图 1-22)。

明朝宫殿、庙宇建筑的墙用砖砌,屋顶出檐减小,挑檐檩直接搁在梁头上,充分利用梁头向外挑出的作用来承托屋檐重量。这种新定型的木构架,斗拱的结构作用减小,梁柱构架的整体性加强。

① 内额是指使用于内柱间的用于联系、承重的水平构件。