全国注册结构工程师继续教育必修教材（之六）

土木工程施工新技术

住房和城乡建设部执业资格注册中心　组织编写

中国建筑工业出版社

全国注册结构工程师继续教育必修教材（之六）

土木工程施工新技术

住房和城乡建设部执业资格注册中心　组织编写

中国建筑工业出版社

图书在版编目（CIP）数据

土木工程施工新技术/住房和城乡建设部执业资格注册中心组织编写. —北京：中国建筑工业出版社，2012.7

全国注册结构工程师继续教育必修教材（之六）

ISBN 978-7-112-14323-8

Ⅰ. ①土… Ⅱ. ①住… Ⅲ. ①土木工程-工程施工-工程技术人员-终生教育-教材 Ⅳ. ①TU7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 101510 号

本书为全国注册结构工程师继续教育必读教材。全书内容共分为三部分：第 1 章我国土木施工技术的发展，第 2 章土木工程施工新技术和工程案例，第 3 章绿色施工。其中第 2 章为本书的重点内容，针对超高层建筑施工、市政工程施工、混凝土和预应力混凝土结构施工，以及高耸与大跨度结构施工，以大量工程实例对相应的施工新技术进行了系统的介绍，以帮助结构工程师深入了解最新的施工技术进展，补充更新专业知识。

本书也可供建筑结构设计、审查人员，以及高等院校土建专业师生参考使用。

* * *

责任编辑：赵梦梅 刘瑞霞 刘婷婷

责任设计：李志立

责任校对：党 蕾 王雪竹

全国注册结构工程师继续教育必修教材（之六）

土木工程施工新技术

住房和城乡建设部执业资格注册中心 组织编写

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：26¾ 插页：1 字数：663 千字

2012 年 7 月第一版 2014 年 9 月第五次印刷

定价：**68.00** 元

ISBN 978-7-112-14323-8

（22411）

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

（邮政编码 100037）

编写委员会

主　任： 吴欣之

副主任： 王美华　应惠清

主　编： 应惠清

编　委： 陈利忠　陈卫平　陈晓明　崔晓强　方　刚
谷志旺　顾海欢　季　方　姜向红　金仁兴
梁　峰　林　海　刘　匀　刘正勇　龙莉波
罗魏凌　罗　鑫　马人乐　秦　勇　沈晓庭
唐兴荣　陶　金　王邦国　夏凉风　许立新
肖建庄　严再春　杨子松　郁政华　张　铭
章　磊　周　虹　朱　刚

前　言

在住房和城乡建设部执业资格注册中心的组织下，由上海建工集团牵头、有关业内专家和同济大学教授参与编写了本书，作为注册结构工程师继续教育的必修教材。

随着我国建设事业和土木工程技术的迅速发展，建筑、地下、桥梁、道路等工程技术日益相互渗透和交叉，已形成“大土木”的工程格局。同时，现代结构又使工程设计和施工两者的关系更为密切，甚至可谓“密不可分”，诸如基坑工程、大跨度结构、高耸结构、预应力结构等，施工力学都是结构工程师在工程设计中必须思考的问题。本教材的编写目的正是基于此，力求使之对注册结构工程师的工作有所帮助。

本教材有以下几个特点：

1. 以案例为引领，以近二十多年的实际工程案例呈现给读者，案例大部分是国内的重大工程或有典型意义的工程，它反映了我国近二十多年来的施工技术成果，也体现了当前我国土木工程施工技术与管理的水平。

2. 教材内容丰富。工程案例涵盖了建筑、桥梁、地下、地铁等工程的案例以及绿色施工技术，体现“大土木”中的不同工程的关联和建筑节能环保的国策，以利注册结构工程师从中获得更全面的工程施工技术，在实际工程中举一反三，实现科学设计、精心施工。

3. 教材讨论的施工案例努力反映施工与结构设计的关系，即：说明施工技术和工艺对设计的影响，明确设计应考虑的施工因素。

全书分为 3 章，第 1 章介绍了我国土木工程技术发展概况，第 2 章是本书的重点，介绍了超高层建筑施工、市政工程施工、混凝土和预应力混凝土结构施工以及高耸和大跨度结构施工，第 3 章介绍了有关绿色施工技术和有关案例。

本书作为注册结构工程师的继续教育必修教材，也可供从事土木工程的技术人员以及高等院校土木工程专业的师生参考。

本书在编写过程中得到了有关专家的鼎力支持和帮助，北京清华城市规划设计研究院结构总工程师王昌兴同志在百忙之中为书稿做了终审，提出了宝贵的修改意见，在此谨致衷心的感谢。

书中不妥和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

本书的编著成员分工

第 1 章　我国土木施工技术的发展	应惠清
第 2 章　土木工程施工新技术和工程案例	
2.1　超高层建筑施工	
2.1.1　超高层建筑基坑工程施工	
2.1.1.1　建筑基坑工程新技术	应惠清
2.1.1.2　上海悦合国际广场基坑工程施工	应惠清
2.1.1.3　宁波慈溪财富中心地下结构逆作法施工	龙莉波　应惠清　章　磊
2.1.2　超高层建筑主体结构施工	
2.1.2.1　上海环球金融中心工程	周　虹
2.1.2.2　南京紫峰大厦工程	谷志旺　罗魏凌
2.2　市政工程施工	
2.2.1　地铁车站的施工	罗　鑫
2.2.2　桥梁工程施工	
2.2.2.1　东海大桥施工	金仁兴　陈利忠
2.2.2.2　闵浦大桥施工	顾海欢
2.2.2.3　卢浦大桥施工	顾海欢　林　海
2.2.3　其他基础设施施工	
2.2.3.1　上海人民路隧道施工	陈卫平　杨子松
2.2.3.2　地下变电站工程	姜向红
2.3　混凝土和预应力混凝土结构施工	
2.3.1　大体积混凝土施工	
2.3.1.1　上海国金中心基础混凝土施工	朱　刚
2.3.1.2　苏州科技新天地超长混凝土结构无缝施工技术	应惠清　王邦国
2.3.2　新型装配式混凝土结构施工	
2.3.2.1　“万科”装配式剪力墙体系	应惠清　沈晓庭
2.3.2.2　合肥“西伟德”装配式叠合板式混凝土剪力墙结构	应惠清　刘正勇
2.3.3　后张法预应力结构施工	
2.3.3.1　上海铁路南站预应力混凝土平台	方　刚
2.3.3.2　高层建筑转换层预应力结构的施工	唐兴荣
2.4　高耸与大跨结构施工	
2.4.1　塔桅结构施工	
2.4.1.1　广州新电视塔	郁政华　陈晓明　吴欣之

2.4.1.2　河南郑州电视塔　　马人乐　梁　峰
2.4.2　大跨钢结构施工技术
2.4.2.1　国家大剧院钢网壳屋盖安装工程　　夏凉风
2.4.2.2　上海世博轴工程柔性结构施工　　许立新
第3章　绿色施工
3.1　绿色施工评价系统　　刘　匀
3.2　绿色施工管理策划和技术　　刘　匀
3.3　建筑废弃物的利用
3.3.1　再生混凝土　　肖建庄
3.3.2　固结渣土（HEC）道路　　崔晓强
3.4　绿色施工技术
3.4.1　绿色施工的原则　　季　方
3.4.2　绿色施工的具体技术措施　　陶　金
3.4.3　绿色施工技术在世博中心中的应用　　秦　勇

目　录

第 1 章　我国土木施工技术的发展 …… 1

1.1　我国古代建造技术 …… 1
1.1.1　原古时代的建造技术 …… 1
1.1.2　夏、商（殷）时期（公元前 21 世纪～公元前 11 世纪） …… 2
1.1.3　西周、春秋战国（公元前 11 世纪～公元前 2 世纪） …… 3
1.1.4　秦、汉时期（公元前 2 世纪～公元 4 世纪） …… 5
1.1.5　两晋、南北朝（公元 4 世纪～公元 6 世纪） …… 7
1.1.6　隋、唐、五代（公元 6 世纪～公元 10 世纪） …… 8
1.1.7　宋、辽、金（公元 10 世纪～公元 13 世纪） …… 10
1.1.8　元、明、清（公元 13 世纪～公元 19 世纪初） …… 12
1.2　我国近代的建造技术 …… 15
1.2.1　19 世纪中叶到 19 世纪末的建造技术及建筑业 …… 15
1.2.2　20 世纪初到 20 世纪 30 年代的建筑教育和建造技术 …… 17
1.2.3　20 世纪 30 年代到 40 年代的建造技术 …… 22
1.3　我国现代建造技术的发展 …… 24
1.3.1　新中国成立初的建设恢复时期（1949～1959 年） …… 24
1.3.2　建设调整时期（1960～1976 年） …… 26
1.3.3　改革开放和发展高潮时期（1978 年至今） …… 30

第 2 章　土木工程施工新技术和工程案例 …… 40

2.1　超高层建筑施工 …… 40
2.1.1　超高层建筑基坑工程施工 …… 40
2.1.2　超高层建筑主体结构施工 …… 97
2.2　市政工程施工 …… 121
2.2.1　地铁车站的施工 …… 121
2.2.2　桥梁工程施工 …… 148
2.2.3　其他基础设施施工 …… 198
2.3　混凝土和预应力混凝土结构施工 …… 244
2.3.1　大体积混凝土施工 …… 244
2.3.2　新型装配式混凝土结构施工 …… 263
2.3.3　后张法预应力结构施工 …… 290
2.4　高耸与大跨结构施工 …… 310
2.4.1　塔桅结构施工 …… 310
2.4.2　大跨钢结构施工技术 …… 355

第 3 章　绿色施工 …… 387

3.1　绿色施工评价系统 …… 387
3.1.1　绿色施工评价方法 …… 387
3.1.2　绿色施工评价指标 …… 391
3.2　绿色施工管理策划和技术 …… 395
3.2.1　绿色施工管理策划 …… 395
3.2.2　绿色施工的信息化管理 …… 397
3.3　建筑废弃物的利用 …… 400
3.3.1　再生混凝土 …… 400
3.3.2　固结渣土（HEC）道路 …… 405
3.4　绿色施工技术 …… 409
3.4.1　绿色施工的原则 …… 410
3.4.2　绿色施工的具体技术措施 …… 412
3.4.3　绿色施工技术在世博中心中的应用 …… 417

第1章　我国土木施工技术的发展

我国是世界四大文明的发源地之一，有五千多年的文化历史。我国古代建筑技术史是一部丰富多彩的文化史，是我国古代科学技术成就的一个重要组成部分，充满着社会、历史、文化及宗教的积淀。

1.1　我国古代建造技术

我国古建筑从巢居、穴居逐渐转移到地面，从总体上说是以木结构为主，以砖、瓦、石为辅发展起来的。中国古建筑普遍采用土基，有的还对土体采用石灰加固，形成灰土地基。结构则以木结构为多。基土上设置石制的柱础，柱、梁、斗拱等则坐落柱础上，再向上是屋面。结构的围护墙多以砖、土、石构成，加以木制的门和窗，也有用木制的墙体。屋面常用土烧制而成的瓦。装饰则有彩绘、雕刻、油漆、琉璃等。

古代中国人讲求阴阳五行。五行中所代表的材料中，土与木是最适合建造为人居住的房屋，因此，“土台基、木框架”便成为我国古建筑的主要形式。同样是为了阴阳和合，土与木也是最能表现阴阳适中的建筑材料。此乃中国古建筑主流与欧洲古建筑石结构的主流显著不同的重要原因。

1.1.1　原古时代的建造技术

早在五十万年前的旧石器时代，中国原始人就已经知道利用天然的洞穴作为栖身之所。“上古穴居而野处”，说明这种大自然所天然赐予的洞穴是当时一种较普遍的住所形式，它在北京、辽宁、贵州、广东、湖北、浙江等地均有发现。

随着生产力水平的提高，人工洞穴取代了天然洞穴，且形式日渐多样。

我国黄河流域有广阔而丰厚的黄土层，便于挖作洞穴，人们便掘地或累土，形成各种形式的窑洞。在原始社会晚期，人们在竖穴上覆盖草顶，可谓原始的“屋”。同时，在黄土沟壁上开挖圆形横穴而成的窑洞式住宅，这在我国山西、甘肃、宁夏等地广泛出现。在山西还发现有先在地面上挖出下沉式天井院，再在院壁上横向挖出窑洞的“低坑式”窑洞。

随着原始人营建经验不断的积累和技术的提高，使远古时期的穴居从竖穴逐步发展到利用黄土层为墙壁，用木构架、草泥建造的半穴居，最后又被地面建筑所代替。

如果说我国北方地势较高的地区“上者营窟[1]”，远古居住的另一形式则为“巢居”，于树上筑巢而居，“构木为巢，以避群害”。它是长江流域等地势低洼、气候潮湿而多虫蛇的地区采用的一种原始居住方式。

---

[1] 《孟子·滕文公》：有“下者为巢，上者为营窟”，意即原始的居住方式在低洼地区采用巢居；而在地势高的地区则营造穴居。

农耕社会引导人们走出洞穴，走出丛林，开始人工营造屋室的新阶段，真正意义上的“建筑”诞生了，在仰韶、半坡、姜寨、河姆渡等考古发掘中均有这类居住遗址的发现。北方仰韶文化遗址多为半地穴式，后期已进展到地面建筑，并已有了分隔成几个房间的房屋。约在距今六、七千年前，中国古代人已知使用榫卯构筑木架房屋，浙江余姚河姆渡遗址发现河姆渡人的干栏式房屋已使用了榫卯固定横梁、企口拼接木板的工艺（图1.1.1）。木构架的形式已经出现，房屋平面也因造做与功用不同而有圆形、方形等，这是中国古建筑的草创阶段。

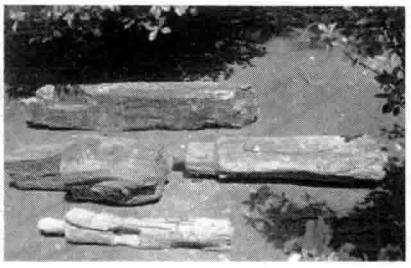


图1.1.1　河姆渡遗址出土的木构件

1.1.2　夏、商（殷）时期（公元前21世纪～公元前11世纪）

1.1.2.1　夏、商（殷）时期的建造技术

夏、商时期我国已有夯土地基技术，懂得用夯实的土壤作地基，采用了木骨泥墙为承重墙、土体夯筑城墙等，并开始在墙壁上进行涂饰。在房屋建造中用水测定水平，这是今天水准测量的原始形态。

1.1.2.2　典型建筑及技术

（1）河南偃师二里头建筑群

位于河南偃师西南的二里头的宫殿建筑群、青铜冶铸作坊等是我国最早的王国都城遗址——夏都斟鄩。

二里头一号宫殿庭院（图1.1.2）呈缺角横长方形，东西108m、南北100m。宫殿的底基处理得相当结实，施工者先挖掉地面上的松土，在底部平铺三层鹅卵石，然后填土夯筑，形成了高出地面近1m的夯土台基。雄伟的殿堂建于基座之上，东西长36m、南北宽25m，现存殿基高出庭院地面10～20cm。四周是一圈柱洞，柱洞底部有柱础石。东西两排各有4个，南北两排各有7个，共22个，其作用是支撑出檐的22根廊柱。柱洞间距约380cm，直径约40cm。每个柱洞外侧还有两个小柱洞，是支撑挑檐的柱洞。柱础石是不规则的大小石块，每洞大则一块、小则三至五块。这是一座面阔八间，进深三间，屋顶为四坡出檐式建筑。遗址也未发现瓦件，故殿顶应覆以茅草。

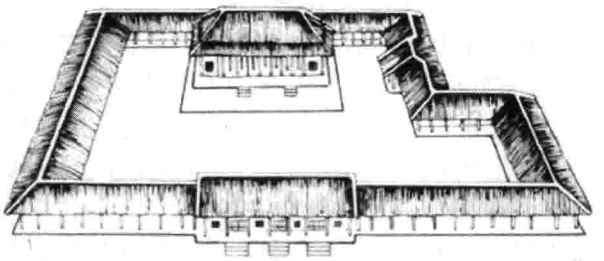


图1.1.2　二里头一号宫殿复原图

二号宫殿、三、四、五、六号建筑基址均发现有大型夯土建筑基台。二号宫殿的东廊庑下还发现设置有陶质水道和石板砌成的地下排水管道。三号和五号其间的通道下发现了长逾百米的木结构排水暗渠。

（2）湖北黄陂盘龙城

湖北黄陂盘龙城的商代前期城市遗址，面积约1.1km^2，南北约290m，东西约260m。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

城墙基宽 21m，南、西垣及北垣西端尚存有高出地面约 1～3m 的夯土残垣。城垣的夯筑是以每层厚 8～10cm 左右的夯土筑出主体，内侧又有斜行夯土用来支撑夯筑城垣主体时使用的模型板。城南壕沟底部曾发现桥桩的柱穴，可知当时是架桥通过的，也说明此时已有“桩基础”出现。图 1.1.3 为盘龙城宫殿的复原图。

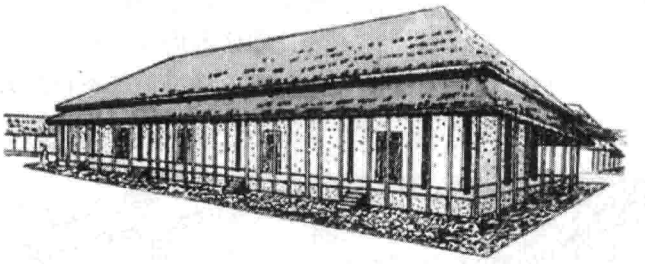


图 1.1.3　盘龙城宫殿复原图

（3）河南安阳市小屯村

河南安阳市小屯村一带的殷墟是商朝后期（殷代）的都城遗址。殷都后被西周废弃，逐渐沦为废墟，故称“殷墟”（图 1.1.4）。基址上残存夯土墙脚，成排的石柱础、木柱。基址下并发现人工修建的水沟，支流交错，蔓延很广。殷人居住和储藏的穴窖也发现很多，穴窖都是挖成的。部分墙壁有经过专门修饰，修饰或用草拌泥涂二、三层，或用木棒拍打，使其平匀光滑。

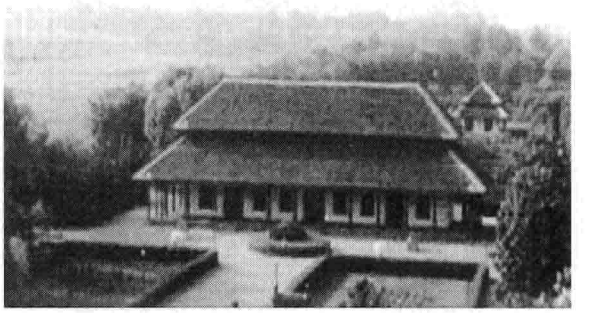


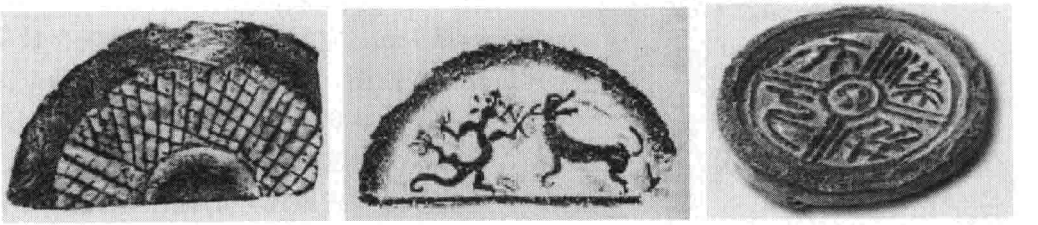
图 1.1.4　河南安阳市小屯村的殷墟宫

1.1.3　西周、春秋战国（公元前 11 世纪～公元前 2 世纪）

1.1.3.1　西周、春秋战国的建造技术

西周建筑的墙多用黄土夯筑，并开始有大块的土坯，砖的使用亦有记载。铺地砖和瓦在西周时已产生，西周早期只用于屋脊、天沟和屋檐，到中晚期的数量较多且还出现瓦当（图 1.1.5）。我国最早的瓦当集中发现于陕西扶风岐山周原遗址，这里是西周的发祥地。

春秋时期瓦普遍使用，在一些遗址中发现大量板瓦、筒瓦以及一部分半瓦当和全瓦



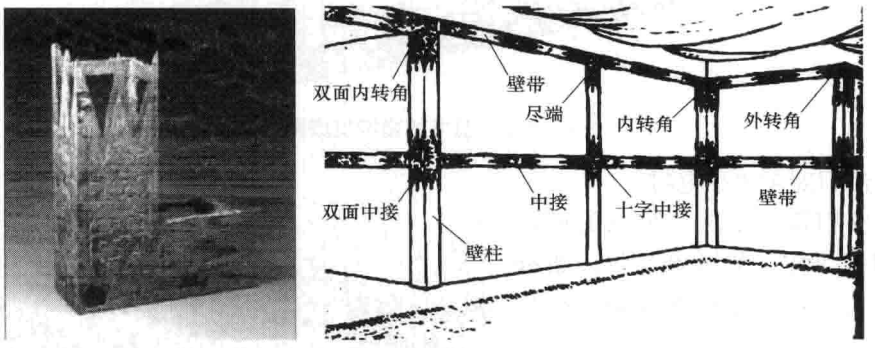
(*a*)　(*b*)　(*c*)

图 1.1.5　西周的瓦当

(*a*) 图案纹瓦当；(*b*) 图像纹瓦当；(*c*) 文字瓦当

当。战国时期，由于建筑技术的巨大发展，筒瓦和板瓦在宫殿建筑上广泛使用，瓦尺寸也较大，并且瓦钉和瓦身分离，增强了瓦的坚固性。在春秋时期的遗址中出土的还有砖以及质地坚硬表面有花纹的空心砖，说明当时装修用的砖也出现了。装饰中还有“三合土”用于墙表、室内地面的抹灰。

这一时期的建筑遗址常出土一些铜建筑构件，这就是所谓的“釭”（图1.1.6）。在周代，在木结构的结点上须加釭进行加固，或用其连接木构件。这些釭上通常还有精美的纹饰，具有很强的装饰性。后来木结构的榫枨技术有了进步，釭不再是必须的连接件，但作为一种装饰物却保留下来，并发展为一种装饰性的釭。



(a)　　(b)

图1.1.6　古代建筑的釭

(a) 转角釭；(b) 用釭进行木构件的连接

“斗拱”是我国木构架建筑特有的结构构件，是较大建筑物的柱与屋顶间的过渡部分。斗拱的最早形象见于周代铜器表面的建筑纹刻等，表明周代的木构架已有相当水平。

1.1.3.2　典型建筑及技术

(1) 山西岐山凤雏宫殿建筑

山西岐山凤雏一宫殿建筑，建筑面积1469m^2，是一座高台建筑（图1.1.7）。其墙采用黄土夯筑而成，厚度0.58～0.75m。结构为木框架，横梁上承檩列椽，墙内有柱础石。墙表与地面采用了抹细砂、白灰、黄土“三合土”，厚1mm，坚硬、光滑平整。屋面则覆盖芦苇把，抹上几层草秸泥，厚7～8cm，屋脊及天沟用瓦覆盖。建筑外附有排水设施。

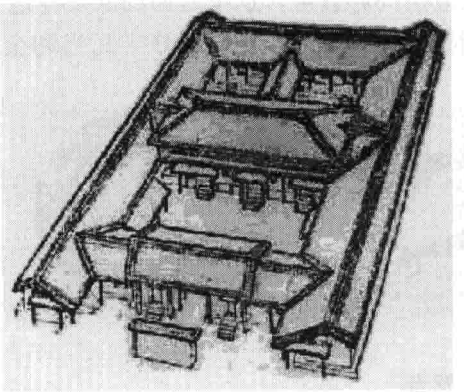


图1.1.7　山西岐山宫殿甲组遗址复原图

(2) 我国最早的工程图

河北省平山县发现的战国时期中山国古墓中发掘出一块铜版地图，地图长94cm，宽48cm，厚1cm。它是迄今为止世界现存最早的建筑设计平面图，它比外国最早的罗马帝国时代的地图还要早600年，标志着远在2400多年前，我国人民卓越的聪明才智和创造力。

这被称为《兆域图》的地图是我国最早的一幅用正投影法绘制的工程图（图1.1.8）。图上所标方位与现代地图相反，为上南下北，图上文字均用“金文”书写，图上所有线条符号

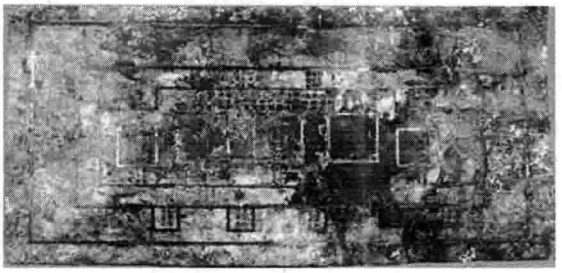


图 1.1.8 战国时期一块铜版地图

及文字注记均按对称关系配置，布局严谨，图中的尺寸采用“尺”和“步”两种单位表示。通过对兆域图上平面的实测与文字记录的尺寸的换算，发现这份设计图有精确的比例，采用了 1∶500 的比例尺缩制而成。

铜版上还记述了中山王颁布修建陵园的诏令，其中有这样的记述：“中山王命令相邦进行王、后陵园规划设计，并由有关官员测绘成图，营建时要依图样长宽大小施工，……设计图版一式两份，一份随陵入葬，另一份府库存档”。可见当时已有“先行设计、按图施工”和“资料归档”的理念。

现存一些战国时代的铜器上保存着线刻的建筑形象，是所知最古老的建筑立（剖）面图，图中有踏步或坡道、屋顶、柱、梁，细部都很清晰。

对于一些重要或者构造复杂的建筑，往往还要作出木制模型，或硬纸模型（烫样），以验证设计图样的准确。

图 1.1.9 鲁班画像

(3) 鲁班及其工艺技术

鲁班（图 1.1.9）是春秋时期的鲁国杰出的建筑人才，他发明的许多木工工具以及营造技术，对推动古代建筑技术做出了卓越的贡献。

鲁班从建筑工厂的生产实践中得到启发，经过研究、试验，在机械、土木、手工工艺等方面有所发明。《事物纪原》和《物原·室原》都说鲁班创制铺首（安装门环的底座）。今天木工师傅们用的手工工具，如划线用的墨斗（图 1.1.10）、曲尺、锯子、钻、刨子等，传说都是鲁班发明的。古时民间还传说他主持造桥。因而，“鲁班”实际上已经成为古代从事土木工程的劳动人民勤劳智慧的象征。当时这些发明使工匠们从原始、繁重的劳动中解放出来，提高了劳动效率，土木工艺得到很大改进。

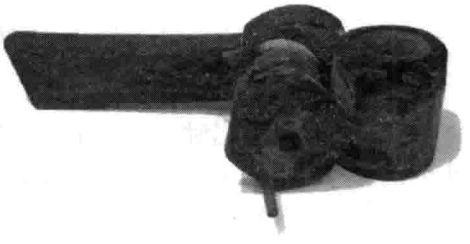


图 1.1.10 木工划线用的墨斗

1.1.4 秦、汉时期（公元前 2 世纪～公元 4 世纪）

1.1.4.1 秦、汉时期的建造技术

秦始皇建立起中央集权的大帝国后，动用全国的人力、物力在咸阳修筑都城、宫殿、

陵墓、驰道、长城、凿渠。秦、汉五百年间，国家统一，国力富强，中国古建筑出现了第一次发展高潮。秦始皇陵征召修筑民夫最多时达70多万人，修筑前后历时39年。大规模地修驰道、筑沟渠，形成了全国性的交通网。汉朝的都城规模更加宏伟，宫殿更加巨大，未央和长乐两宫都是周围长达10km左右的建筑群。

秦、汉时期建造技术也得到极大发展。夯土地基处理技术规模空前，制砖及砖石结构、拱券和穹窿结构有了新的发展，至今人们依然为“秦砖汉瓦”而惊叹不已。

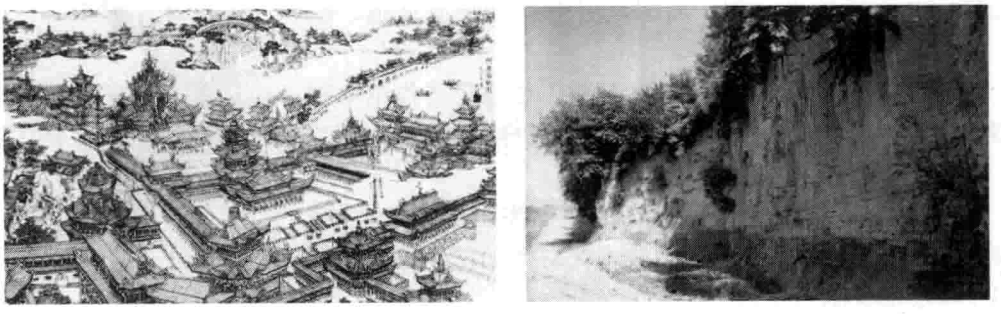
在工程技术方面，东汉建筑平面和外观日趋复杂，高台建筑日益减少，楼阁建筑逐步增加。木建筑的结构方法有抬梁式、穿斗式和井干式三种，作为独特体系已基本形成。结构主体的木构架日趋成熟，大量精巧的榫卯应用，建筑屋顶形式多样化，庑殿、歇山、悬山、攒尖、囤顶均已出现，重要建筑物上普遍使用斗栱。

东汉时期则出现了全部石造建筑物，如石祠等。木椁墓不断减少，而空心砖墓、砖圈墓、石板墓不断增多，可以看出当时砖石结构技术正处于迅速发展的阶段。

1.1.4.2　典型建筑及技术

(1) 秦阿房宫

秦阿房宫前殿遗址夯土台基东西长1270m，南北宽426m，现存最大高度为12m，夯土的总面积达五十多万平方米（图1.1.11）。这是迄今所知中国乃至世界古代史上规模最宏大的夯土基址。其上有石础，其下有管道。夯墙两侧均有大量建筑倒塌的瓦片堆积。



(a)　　(b)

图1.1.11　秦阿房宫

(a) 秦阿房宫的复原图；(b) 阿房宫的夯土台基

(2) 汉长安城

汉长安城遗址是当时世界上规模最大的都城，位于未央区现境中部，城墙均用龙首原黄土夯筑，每层厚约10cm，原城墙高度在12m以上，今存0.8～2m不等，基部宽度12～16m。墙外有宽约8m、深约3m的护城河。长安城城墙的规模据1994年陕西省测绘局勘测，城墙总长度为25015km。在南门道中部地面以下3m处有一条东西向巨型砖筑地下排水涵洞（图1.1.12），其两壁用条砖砌成。施工工艺采用楔形子母砖券顶，宽约2m。在北门道下也发现一条地下排水涵洞，但其在城门下为石板砌筑，城门外为砖筑，两壁与券顶皆为砖筑。两条涵洞在城内地下仍延伸了数十米。

汉长安城城门的门道内两侧的础石面上放置方木地栿两排，方木地栿上密设排叉柱，柱顶设置梁架，承担上面的夯土，夯土上面再修建门楼。

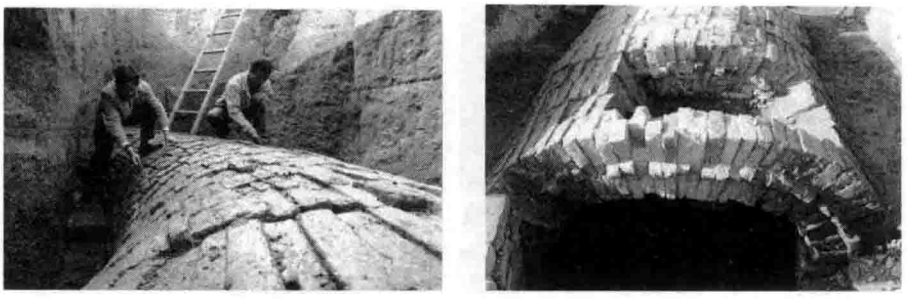


图 1.1.12 汉长安城直城门南门道地下巨型排水涵洞

1.1.5 两晋、南北朝（公元 4 世纪～公元 6 世纪）

1.1.5.1 两晋、南北朝的建造技术

经过三国近百年的战乱时代，两晋、南北朝时期中国社会经济逐渐复苏，在前代基础上持续营造都城和宫殿，但其规模气势远逊于秦、汉。此时砖瓦及木构架技术都有所提高，许多寺、塔、石窟显示了砖石结构和木结构技术的巨大进步。砖材有较大的发展，如，此时的瓦当比西周时期更为细腻，亦分有文字瓦当和花纹瓦当，后者是将圆形莲花纹等划在圆形瓦当上，花纹十分丰富。

大量兴建佛教、道教建筑，兴盛佛塔、石窟是这一时期的特点。云冈、龙门石窟均建于此时，敦煌石窟亦在此间开始建造。这些依山开凿的石窟寺，自佛教传入中国之初便陆续开始，但开凿鼎盛期在南北朝，大量石构建筑的发展还表现在石柱、经幢，其雕刻细腻精美。在南北朝时，装饰园林方面有精美的雕塑、壁画，寺、塔等都建造有自然山水式园林，琉璃瓦已正式用于主要的殿宇上，颜色以黄绿色为主。

1.1.5.2 典型建筑及技术

（1）河南嵩岳寺塔

河南郑州的嵩岳寺塔（图 1.1.13）始建于 509 年，是我国现存最古的砖塔。塔身采用糯米汁拌黄泥做浆，小青砖垒砌，这种选材及用料在世界上独创。该塔至今已有 1500 年历史，历经多次地震、风雨侵袭仍不倾不斜，巍然矗立。该塔基台平面为十二边形，高 0.85m，宽 1.60m。砖塔为 15 层密檐式，平面呈十二边形。总高 37.045m，底层直径 10.6m，内径 5m，壁体厚 2.5m。

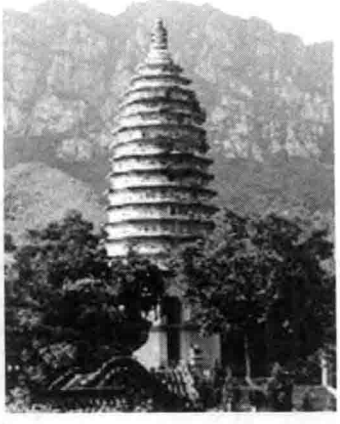


图 1.1.13 河南郑州的嵩岳寺塔

（2）云冈石窟

云冈石窟（图 1.1.14）是我国最大的石窟之一，与敦煌莫高窟、洛阳龙门石窟和麦积山石窟并称为中国四大石窟艺术宝库。它位于山西省大同市以西 16km 处的武周山南麓，公元 460～465 年开始大规模营造，524 年建成，前后计 60 多年。现存主要洞窟 45 个，大小窟龛 252 个，造像 51000 余尊。凿石开山，因岩结构，真容巨壮，代表了公元 5 至 6 世纪中国佛教艺术第一个巅峰时期的经典杰作。

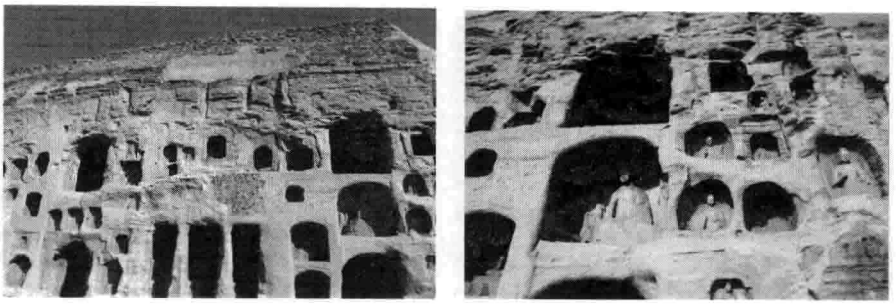


图 1.1.14　云冈石窟

1.1.6　隋、唐、五代（公元6世纪～公元10世纪）

1.1.6.1　隋、唐、五代的建造技术

隋、唐时期的建筑，继承了前代成就，又融合了外来影响，形成一个独立而完整的建筑体系，把中国古代建筑技术推到了成熟阶段。

隋朝时间不长，但在建筑上颇有作为。此间修建了都城，开凿了长约2500km的大运河，还修筑了万里长城。隋朝的木构架殿堂建筑得到很大发展，建于隋代的济南郊区的四门塔，也是全国现存最早的石塔。

唐代前期，经过一百多年的稳定发展，经济繁荣，国力富强，疆域远拓。在首都长安与东都洛阳继续修建规模巨大的宫殿、苑囿、官署等。在全国，出现了许多地方城、商业和手工业城，兴建了寺塔、道观。此期间，建筑技术更有新的发展，木构架已能正确地运用材料性能，建筑设计中已知运用以“材”为木构架设计的标准；在加工技术上，除了榫卯的发展外，还有柱身的加工装饰。土、石、砖、瓦、石灰、钢铁、矿物颜料、油漆都得到广泛应用，琉璃贴面（即琉璃贴面砖）用于墙体也开始于隋唐。这一时期，朝廷还制定了营造法令《营缮令》，设置有掌握绳墨、绘制图样和管理营造的官员。图样和模型在建筑中也被广泛使用。

1.1.6.2　典型建筑及技术

（1）赵州桥

赵州桥（图1.1.15）坐落在河北省赵县洨河上。建于隋代大业年间（公元605～618年），由著名匠师李春设计和建造，是当今世界上现存最早、保存最完善的古代敞肩石拱桥。建桥1400多年，经历了10次水灾，8次战乱和多次地震，特别是1966年3月8日邢台发生7.6级地震，赵州桥距离震中只有40多km，都没有被破坏。著名桥梁专家茅以升说，先不管桥的内部结构，仅就它能够存在1400多年就说明了一切。

图 1.1.15　赵州桥全貌

赵州桥设计施工达到了极高水平，在设计方面主孔净跨度为37.02m，拱高只有7.23m，改变了我国古代半圆形拱桥的大矢跨比，采用了很小的拱高和跨度比（仅1∶5左右）的弧拱桥，也改变了传统长桥采用多孔拱的建造方法，创造性地实现了桥梁的大

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com