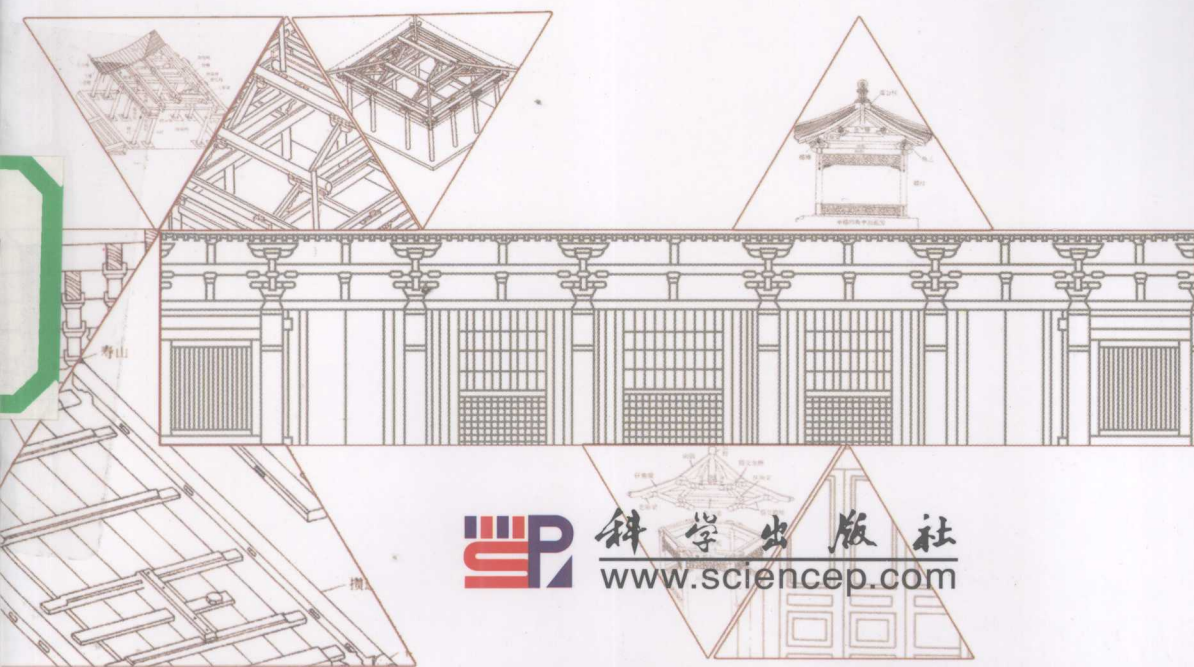




中国木结构古建筑的结构 及其抗震性能研究

高大峰 赵鸿铁 薛建阳 著



科学出版社
www.sciencep.com

中国木结构古建筑的结构 及其抗震性能研究

高大峰 赵鸿铁 薛建阳 著

ISBN 7-03-005373-4

中国木结构古建筑及其抗震性能研究

北京：科学出版社，2008

ISBN 7-03-005373-4

1. 中—Ⅱ—1
2. 中—Ⅱ—1

中国木结构古建筑

科学出版社

北京

科学出版社

北京

电话：010-64030231 010-64030232 010-64030233

内 容 简 介

本书主要论述中国古代大木作建筑的结构与抗震性能。书中探讨了中国古代大木作建筑的发展与演变、结构特征、结构抗震机制,介绍了从基本的结构构件到结构单体的一系列结构静力、动力的模型试验,并对典型大木作结构中的殿堂和厅堂结构进行了动力特性的数值模拟分析,以及对结构的抗震加固方面也作了较为深入的研究。

本书可供从事古建筑保护领域研究的工程技术人员、大专院校的师生,以及对古建筑领域有兴趣的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国木结构古建筑的结构及其抗震性能研究/高大峰,赵鸿铁,薛建阳著.
—北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-022732-4

I. 中… II. ①高…②赵…③薛… III. 木结构-古建筑-抗震性能-研究-中国 IV. TU366.2 TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 120610 号

责任编辑:童安齐 陈 迅 / 责任校对:刘彦妮
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 9 月 第 一 版 开本:787×1092 1/16
2008 年 9 月 第一次印刷 印张:10 1/2 插页:2
印数:1—2 000 字数:237 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

中国地大物博，历史悠久，其独具特色的木结构古建筑丰富多彩。这种结构系统，自其发生经过繁复演变，始终保持着统一的结构原则长达 7000 年之久，并对亚洲，尤其是中国周边国家和地区建筑的发展，产生了广泛而深远的影响；在经历了许许多多的地震，以及其他自然灾害的作用后，很多已有上千年历史的木结构古建筑仍能保持完好，表明了这种结构体系良好的结构与抗震性能。

本书主要从结构特性与抗震机制的角度，探讨中国木结构古建筑的结构与抗震特性。重点研究了这一系统建筑中最具典型意义的殿堂结构和厅堂结构，从基本的梁、柱构件到基本的结构单体——宫殿结构的当心间构架进行了拟静力的和地震模拟振动台的模型试验研究；利用科学计算软件，建立相应的有限元模型，并进行了数值模拟分析，基本上搞清楚了中国木结构古建筑应对地震作用的方法。

主导中国古代大木作结构的设计、施工建造与管理的是一套独特的科学系统，即所谓的“材分”制度。中国历代所采用的工程长度计量单位并不统一，要搞清楚本书中提到的有关的概念，就不得不对此有所了解，相关的内容可参阅本书的附录部分。

中国古建筑的结构类型丰富多彩，所承载的历史的、艺术的和科学的内涵也异常丰富，本书只就其中的大木作结构类型与特征、结构的抗震机制与抗震加固方法进行了较为系统的研究。对于其他的结构类型，以及相应的诸多问题，没有涉及。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请各位读者批评指正。

目 录

前言	1
第 1 章 绪论	1
1.1 研究的来源与性质	1
1.2 研究的目的与意义	1
1.3 研究的历史与现状	2
1.4 研究方法	6
1.5 组织结构	6
参考文献	6
第 2 章 中国古建筑的材料及其结构特性	10
2.1 引言	10
2.2 中国古代自然地理环境因素对其建筑的影响	11
2.3 中国古代建筑施用木材的原因	12
2.4 木材的基本特性	14
2.5 木结构柱构件模型在水平反复荷载作用下的滞回性能	16
2.6 结论	19
参考文献	19
第 3 章 构件的榫卯连接方式及其抗震性能	21
3.1 木结构古建筑构件的榫卯连接方式	21
3.2 大木作结构中榫卯的应用	24
3.3 榫卯节点的受力行为和破坏状态	25
3.4 结论	33
参考文献	33
第 4 章 斗拱的结构行为	34
4.1 斗拱的起源与演变	34
4.2 斗拱结构静力与抗震性能的试验研究	64
参考文献	78
第 5 章 雀替·驼峰和隔架的结构作用	79
5.1 雀替的演变与功能	79

5.2 驼峰与隔架的功能	81
5.3 抹角枋的功能	82
5.4 结论	83
参考文献	83
第6章 中国木结构古建筑结构原则的演变及其性能研究	84
6.1 木构架的起源	84
6.2 木构架的基本类型及其构造	87
6.3 梁架的科学意义	89
参考文献	94
第7章 中国木结构古建筑动力特性的试验研究	95
7.1 概述	95
7.2 试验控制系统	95
7.3 中国古建筑大木作结构模型的地震模拟振动台试验研究	96
7.4 中国古建筑大木作结构节点加固模型的地震模拟振动台试验研究	116
7.5 结论	134
参考文献	135
第8章 中国古代大木作结构动力特性的数值计算	136
8.1 概述	136
8.2 数值计算模型的建立	136
8.3 结构体系的动力方程	138
8.4 结构振动的模态分析	139
8.5 计算结果	142
8.6 中国古代典型大木作——殿堂与厅堂——结构的动力性能	144
8.7 结论	156
参考文献	157
附录1 关于“材、分”制度的说明	158
附录2 中国历代的长度单位与公制的关系	159
后记	160

第1章 绪论

1.1 研究的来源与性质

中国古建筑是世界上最上的一个独立系统。数千年来其经历继承演变,流布于亚洲尤其是中国周边广大的区域。在漫长的历史长河中,中国古建筑始终保持着一一种独立的结构原则而没有发生本质性的改变,并且在经历了许许多多的地震以及其他自然灾害的作用后,仍有许多的木结构古建筑挺然直立,证明其具有良好的抗震性能和抵御其他自然灾害的能力。本书是基于国家、省、市,以及高等院校的科学基金所资助的科研项目*的研究成果而写成。以中国木结构古建筑抗震机制的研究为主线,其性质属于应用基础型研究。研究方法包括古今相关技术文献的分析、研究与总结,结构静、动力试验,结构动力特性的数值模拟计算等;研究内容涉及诸如中国传统建筑结构的起源与演变、中国建筑营造的基本观念、结构的形制与构造、结构的动力特性、结构的营造技术乃至对中国文化的影响等方面。它从木结构抗震机制的角度作为切入点,提炼中国古建筑结构的科学素质。

1.2 研究的目的是意义

每一个民族都有自己的文化,并产生反映这种文化的建筑。中国古建筑是中国文化的有机组成部分,它如整个中国文化一样,数千年来,始终连续相继,完整而统一地发展。

对历史上某一时代整个社会倾全力建造的且有代表性的一些重大建筑,通过现代科技手段,探究其抵御地震作用的机制,必然反映出当时最高的科学技术和文化艺术水平。中国古建筑结构是中国文化的一个典型的组成部分,这种文化,这种结构形式或者说结构体系,能够经历几千年的历史而不衰亡,说明它是极具优越和经得起任何冲击与考验的,而且在其发展过程中积累了无比丰富和宝贵的经验。但是,从另一角度来看,几千年来都没有产生过根本性突破和原则性转变的一种结构体系,它的进步显然已经受到了一定的局限^[1,2]。项目研究的目的,其一,就是要深入地探究中国古建筑自诞生、发展,以致绵延赓续几千年而始终维系统一结构原则的内在原因,甄别其中所蕴含的哪些是科学的,需要继承、发扬和光大的部分;哪些是不尽合理的,需要摈弃或引以为戒的部分,并对此现象做出公正科学的评价。其二,科学地评价现存古建筑的安全可靠性,以至采取科学合理的保护措施,使之更为久远地传承下去。

* 国家自然科学基金项目(编号:59878043);陕西省科学研究计划项目(98C09);西安市科技局科技攻关项目(GG05171);西安建筑科技大学科学计划基础基金项目(JC0722)等。

相关的研究^[3~25]表明,西方传统建筑结构体系抵御地震作用的方式是“抗震”,其本质是“对抗性”的;中国传统建筑结构体系抵御地震作用的方式与此殊异,其主要以“隔震”、“减振”方式应对地震作用,体现出“以柔克刚”防灾理念。其特有的结构构造使得许多的结构构件之间相互作用而消耗地震动能量,以达到结构的减振、隔震之目的。以现代振动控制观点^[26~28]来看,其结构本身即构成一个良好的被动减震控制系统。鉴于此,对于中国古建筑结构抗震研究的意义在于:从这统系结构与构造的规律上汲取其有意义的结构防灾减灾观念以及具体营造技术,以为现代工程结构抗震之借鉴。

1.3 研究的历史与现状

建筑在中国历史上被称之为匠学,非士大夫阶层所为之事。作为一种技术,它受到重视,因为它关乎国计民生;自作为一门学问和艺术,则没有得到承认。由于儒家重士轻工思想观念的影响,在中国古代,建筑没有被视为科学、艺术之列,遂造成中国历史上并没有兴起过研究建筑的学术兴趣和风气^[1]。在流传下来的各类典籍中,有关于建筑的多为文学方面的描述,旨在形容君王骄奢,臣民侈僭之征兆,或不美其事,或不详其实,实不可成为现代建筑结构科学研究之考据。其中真正具有科学技术价值的专门著述屈指可数,比较著名而完整的仅有二部:〔宋〕《营造法式》、〔清〕《工程做法则例》*。

《营造法式》刊行于北宋崇宁二年(公元1103年),旨在为当时的北宋政府(徽宗朝)管理宫室、坛庙、官署、府第等建筑工作,由时任将作少监的李诫,奉敕编修。全书三十四卷,今日观之,可视为一部各种建筑设计、结构、用料和施工的规范。其中与本课题研究密切相关的,也是至关重要的内容,是有关“大木作制度”部分,其科学而合理地制定了大木作结构的用材制度,即“凡构屋之制皆以材为祖,材有八等,度屋之大小因而用之,……凡屋宇之高深,名物之短长,曲直举折之势,规矩绳墨之宜,皆以所用材之分以为制度焉”^[2]。另外,这项制度在合理使用结构中各构件的材料强度,统一构件标准与构造,方便施工方面,都起到了整体系统上的控制作用^[29~31]〔图1.1(a)〕。

另外,还有一部已佚但为人所熟知的建筑著作《木经》,著者俞皓(?~公元989年),成书在《营造法式》前几十年,李诫当时看过此书。梁思成曾言《营造法式》是依据《木经》写成,但从沈括(约公元1033~1097年)所著《梦溪笔谈》所引而留下来的内容来看,二者不但文风不同,重点也不一样。《木经》是具有理论性质的著作,而《营造法式》则更类同于建筑规范。规范是不讲道理的,让人依照去做就是了^[1,2]。

〔清〕《工程做法则例》为雍正十二年(公元1734年)清工部所颁布的关于建筑技术的书,全书七十四卷,前二十七卷分别对应于27种不同的建筑物:大殿、厅堂、箭楼、角楼、仓库、凉亭等结构,“依构材之实在尺寸叙述……,虽以此二十七种实在尺寸,可以类推其余,然较之《营造法式》先说明原则与方式,则不免见拙矣”〔图1.1(b)〕^[29,32]。

* 其实,中国古代流传下来的有关建筑的著作中还有另一部:《园冶》,系明代计成所著,主要论述中国园林的设计与建造。

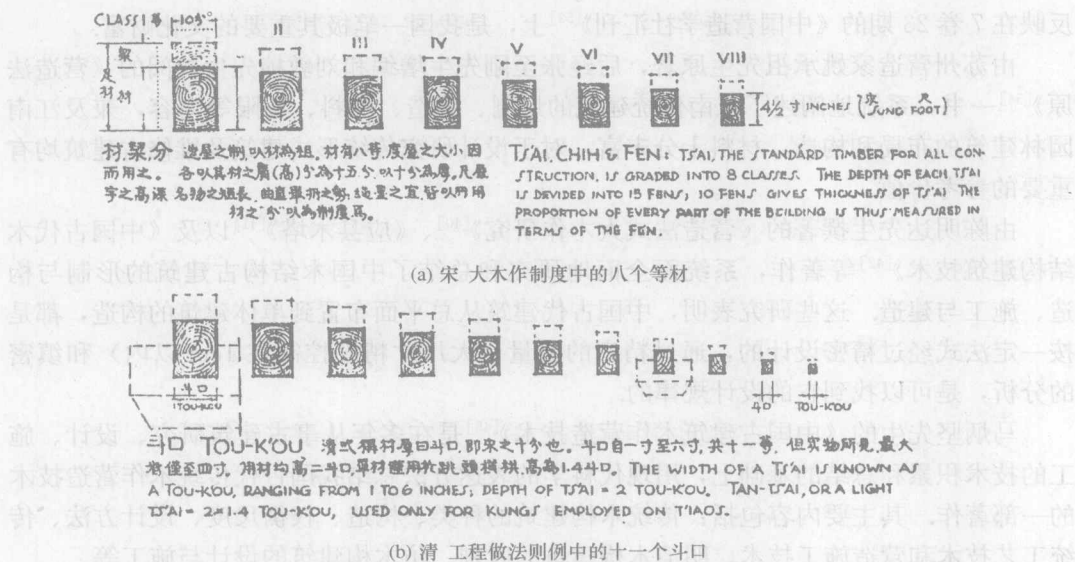


图 1.1 宋、清两代工程计量制度

不管是《营造法式》还是《工程做法则例》，从性质上讲，都可视为技术规范类。因时代不同，各书内容各异，但都是实用性的工作参考工具书，不能算是学术性的论文和著作。之所以能流传下来是因为它们的实用价值，因为从事实际技术工作的人很多没有研究理论的习惯和兴趣^[1]。以我们今天的眼光来看，这两部关于建筑营造的著作尚有不足，但都无法否认一个事实：它们都是对中国历史上一定时期内建筑技术发展成就的总结，曾被奉为主臬，并都曾对建筑营造活动产生过巨大的基础性的作用。

具有现代科学意义的中国古建筑的研究工作，始于 20 世纪二三十年代，其标志就是 1929 年由朱启铃先生发起并成立的中国营造学社，开创以现代科学方法和技术对中国古建筑进行整理和研究之先河，并且对如何正确地进行保护维修提出建议和方案设计。时从海外留学归来的梁思成和刘敦桢分别被聘为法式组和文献组组长。他们一改过去国内史界研究中国古建筑，单纯依靠在案头考证文献的片面方法，亲自带领青年助手，或分散，或集中，前往各地进行实地调查，通过测量、绘图、摄影等科学技术手段，详细记录了被调查对象的实际情况及其重要数据，返回后再进行全面整理，绘出正式图纸，并通过已知实例与文献、历史资料，进行比较、分析和论证，最后写出调研报告，为中国古代建筑的研究作出重大贡献。较显著者有下列几项：①1945 年梁思成根据学社历年调查成果，写成《中国建筑史》^[29]、《图像中国建筑史》英文本^[32]以及《清式营造则例》^[33]，为中国创立了“中国古代建筑史”这个科学技术史的分支学科；②为中国古代建筑的研究、教学和古建筑保护工作培养了一批人才；③学社积累起来的各种资料是继续研究中国古代建筑的基本资料，部分比较著名的著作参见文献 [29~54]；④为保存、保护古代建筑作出贡献。学社调查测绘的古代建筑图纸，是修理、保护古建筑的重要根据，例如在抗日战争中遭毁损的古建筑——宋代建造的永寿寺雨华宫，辽代建造的广济寺三大士殿等，因有详细测绘的图纸存在，可以据图重建。这些成果全面

反映在 7 卷 23 期的《中国营造学社汇刊》^[53]上,是我国一笔极其重要的文化财富。

由苏州营造家姚承祖先生原著,后经张至刚先生增编和刘敦桢先生校阅的《营造法原》^[54]一书,系统地阐述了江南传统建筑的形制、构造、配料、功限等内容,兼及江南园林建筑的布局和构造,材料十分丰富,对于设计研究传统形式建筑及维修古建筑均有重要的参考价值。

由陈明达先生撰著的《营造法式大木作研究》^[40]、《应县木塔》^[41]以及《中国古代木结构建筑技术》^[42]等著作,系统而全面地研究和总结了我国木结构古建筑的形制与构造、施工与建造。这些研究表明,中国古代建筑从总平面布置到单体建筑的构造,都是按一定法式经过精密设计的,通过精密的测量(大尺寸精度控制在 1cm 以内)和缜密的分析,是可以找到它的设计规律的。

马炳坚先生的《中国古建筑木作营造技术》^[45]是在多年从事古建筑研究、设计、施工的技术积累和总结的基础上,用现代科学的表达方法总结我国古代传统木作营造技术的一部著作。其主要内容包括:传统木构建筑的种类、构造、权衡尺度、设计方法、传统工艺技术和营造施工技术、明清木构建筑的区别、仿木构建筑的设计与施工等。

随着对中国古建筑研究的长期积累,20 世纪后期,国内古建筑方面的专家学者编撰并出版了《中国古代建筑技术史》^[46],进入到 21 世纪,国家自然科学基金委员会和建设部科学技术司联合资助,汇集国内众多顶尖的专家学者,编著了五卷本的《中国古代建筑史》^[47~51],其研究范围从政治、经济、文化、艺术、宗教、社会意识形态,到建筑的形制与构造的方方面面;在时间跨度上从原始社会持续到清代,长达七千年之久,全面、系统地阐述了中国古建筑自产生、演变和发展的历史。可谓高度集成了中国古建筑研究的重要成果。

从以上所列的有关古建筑专题的研究文献来看,尽管丰富多彩,成就辉煌,但有一个不足之处:所研究的内容绝大多数限于文化、艺术、形制、构造与技术方面,而在其科学性、工程抗震性能方面,则几乎没有涉及,这种现象一直持续到 20 世纪的下半叶。而要全面并科学地认识这系统建筑,就不能不对其建筑结构的科学机制、抗震机制展开深入的研究。为此,自 20 世纪下半叶,国内开始了较大规模的对于中国古建筑科学机制,尤其是抗震能力的研究,现叙述如下。

20 世纪 80 年代以来,由太原理工大学李世温教授领导的课题组及其后的专家学者,对我国目前存留的高层木结构古建筑,位于山西应县境内的佛宫寺释迦塔(公元 1056 年,高 67.31m)、河北蓟县的独乐寺观音阁(公元 984 年)的结构静、动力特性进行了全面系统的理论分析和试验研究,具体做了以下几个方面的工作:①考察历史上应县木塔的结构损坏特征、回顾所进行过比较大的加固与整修的时代以及当时具体的加固整修方法,分析了应县木塔的构造特征及其对结构整体稳定性的意义,采用非破损方法测定了木塔的砖砌体强度,考察了木质结构构件在经长期使用以及各种自然环境侵蚀后的损坏特征,利用能量等效原则分析了木塔弹塑性地震反应,划分并标定了木结构地震损坏等级和参数,并对该塔在不同地震烈度下的损伤程度作出了评价。②实测并分析了塔的结构动力特性,分析了不同地震波作用下木塔各层的弹性位移反应,建立了适合这类结构动态反应的弹性分析方法。③根据随机振动理论,运用风反应谱的概念,按振

型分解法进行了木塔的风振分析,求得了风振的剪力及弯矩,并与风压静力作用对比,得出了相应的风振系数,同时又对塔体进行了风压力及基底力矩的实测,并据此分别按两种风速和开窗与封闭的两种状态,计算各部位的风压值,给出了各层风压剪力及弯矩,以及对结构有关部位的风作用特征进行了分析。④分别实测了独乐寺观音阁南北向、东西向的前三阶振型,以及整个结构的扭转振型,并实测了整个结构的动力特性。其相应的研究成果,主要反映在文献[17~20, 55~64]中。

力学工作者王天系统地研究了中国古代大木作结构的静力受力特征^[31],逐一地计算了主要结构构件的受力情况,发现了如下的事实:①指导中国古代建筑施工的基本原则——“材分”制度,事实上是一个指导古建筑用材、设计和施工的控制系统,其中蕴涵着现代结构力学的基本思想,因此,使得中国古建筑的设计与建造独具特色,即在施工与建造过程中不必依赖于图纸,只需根据一些基本的口诀即可达到设计与施工的既定目标。而这在已习惯于根据设计图纸进行施工的现代工程技术人员来讲,简直是匪夷所思。②根据“材分”制度所设计的结构构件,其基本上都具有50%左右的强度裕度^[31],由此也反证了这种工程制度并非纯粹是经验性的条例,其所叙述的内容彼此之间存在有机的联系,具有科学理论性的“质核”,尽管这种理论与源于西方的现代科学理论并非“同构”^[65]。

西安交通大学俞茂宏教授领导的课题组,自20世纪80年代开始,先后对西安市一系列古建筑的结构与抗震性能开展了研究,其中包括:西安北城门箭楼抢险整修复原工程研究,西安城明代东门箭楼抗震性能分析,西安古城墙的保护和开发研究,西安钟楼结构特点及其抗震特性分析等。具体工作及研究结果如下。

为了解西安城北门箭楼的抗震性能并获取相应的研究参考数据,制作了箭楼缩尺比为1:10的中三跨局部木结构模型和缩尺比为1:30的有机玻璃模型,之所以采用有机玻璃材料制作模型,旨在考察这种结构模型作为木结构古建筑试验研究的可行性。在不考虑原结构屋顶荷载的情况下,对木模型和有机玻璃模型分别进行了多点激振试验,并将测试结果换算到原型。研究表明:①两种模型所测的频率误差在20%左右,二阶振型节点位置相近,但振型值有一些误差;②有限元计算与有机玻璃模型测试结果反映出的一阶频率基本一致,二阶频率偏小^[5]。

对东门城墙所进行的动静力有限元分析^[6],推导了适用于岩土类材料的弹塑性本构模型,分别用双剪强度理论^[66,67]和莫尔-库伦准则^[68,69]计算了城墙地基土的塑性区范围,计算并整理出相应的土和砖的弹塑性计算参数,并分析了古城墙产生裂缝和沉陷的原因^[5,6]。

对钟楼结构的抗震性能进行了理论分析和试验研究,找出了反映其抗震性能的主要阶模态,据此提出了相应的保护钟楼的建议^[5]。其相应的研究成果集成于文献[5, 6]。

西安建筑科技大学赵鸿铁教授所领导的课题组,针对以中国传统大木作结构古建筑的抗震特性开展了系统的理论分析和试验研究,先后制作了缩尺比例为1:3.52殿堂结构当心间的木结构模型,柱构件模型,斗拱模型,单跨木构架模型,模拟古建筑地基的3:7配合比的灰土模型,进行了相应的地震模拟振动台试验,低周水平力作用下的循环加载滞回性能试验,柱底面与础石之间摩擦系数的测定试验,木结构古建筑构件材料

性能试验,复合地基的物理力学性能试验,获取了大量系统化的有价值的试验数据^[71],全面深入地研究了木结构古建筑的隔震,减振与耗能机制,取得了一系列的研究成果,这些研究与成果,亦成为本书的基础。现叙述如下。

中国木结构古建筑应对地震作用的基本原则是“以柔克刚”,通过各个构件之间的柔性连接、摩擦滑移、耗能减振,最终达到减小地震灾害的目的。

作为中国古典建筑标志的大屋顶,对在地震作用下维系整个结构的整体性与稳定性,发挥着至关重要的作用^[72]。

尽管与西方建筑相比,保存到今天的中国古典建筑要少得多^[1,29,73],但相关的研究表明,这一现象并不是由于绝大多数的建筑已毁于地震的结果,归根结底,乃是中华民族的营造观念,历史上朝代更替时,继起的朝代对前一朝代之建筑悉加摧毁以及各种自然因素综合作用的结果^[1,29]。

1.4 研究方法

古建筑研究应秉承历史性、艺术性和科学性相统一的基本原则^[5,74]。其作为一个民族文化的载体,映照历史发展的足迹,反映着当时社会科技发展的综合水平,并因为这门学科的综合性质,故不能简单地采用单一的模式进行研究。

对历史和艺术方面的问题,主要以历史与考古方面的文献资料为基本素材,以时间为顺序,进行收集、整理、分析、归纳、综合,其间穿插以实地调研考察、实物印证,即主要采用归纳综合法、比较研究法,并实际勘察来进行研究^[47~51,74~79]。

对于科学技术方面的问题,主要以结构试验法^[80,81]、数值模拟算法^[82~87]及结构抗震研究的其他方法^[88~107]进行研究,同时也借鉴和采用历史与艺术问题的研究方法。

1.5 组织结构

本书主要由三个部分所组成。

1) 导引,即第1章绪论,主要阐明课题研究的总体情况,基本内容及主要研究方法。

2) 主体部分,包括第2~8章,主要以中国大木作古建筑结构的基本结构部分为对象,以时间为线索,考察其形制、结构的沿革以及抗震机制,探索其产生、发展和变化的内在动因,包括社会的和科学技术方面的。

3) 结尾部分,总结课题研究的主要成果,并指出尚存的问题,并对今后的研究提出预测与展望。

参 考 文 献

[1] 李允铎. 华夏意匠 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2005

[2] [宋] 李诫. 营造法式 [M]. 上海: 商务印书馆, 1932

- [3] 杨亚弟, 杜景林, 李桂荣. 古建筑震害分析 [J]. 世界地震工程, 2003, 16 (3): 12~16
- [4] 薛建阳, 赵鸿铁, 张鹏程. 中国古建筑木结构模型的振动台试验研究 [J]. 土木工程学报, 2004, 37 (6): 6~10
- [5] 俞茂宏, 方东平等. 西安古城墙研究——建筑结构和抗震 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993
- [6] 俞茂宏, 赵均海, 王源等. 西安东门箭楼及城墙研究 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998
- [7] 方东平, 俞茂宏, 宫本裕等. 木结构古建筑结构特性的实验研究 [J]. 工程力学, 2000, 17 (2): 75~83
- [8] 方东平, 俞茂宏, 宫本裕等. 木结构古建筑结构特性的计算研究 [J]. 工程力学, 2001, 18 (1): 137~144
- [9] 赵均海, 俞茂宏, 杨松岩等. 中国古代木结构有限元动力分析 [J]. 土木工程学报, 2000, 33 (1): 32~35
- [10] 李学武. 斗拱 [J]. 山西建筑, 2002, 28 (6): 16, 17
- [11] 李桂荣, 郭恩栋, 朱敏. 中国古建筑抗震性能分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24 (6): 68~72
- [12] 方东平. 木结构的静力、动力及抗震性能研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1988
- [13] 方东平. 中国古代木构造的非线性形接合特性を考慮した静的および動的3次元解析に関する研究 [D]. 福岡: 九州大学, 1992
- [14] 赵均海. 中国古代建筑结构特性研究 [M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1999
- [15] 赵均海, 俞茂宏, 杨松岩等. 中国古建筑木结构斗拱的动力实验研究 [J]. 实验力学, 1999, 14 (1): 106~112
- [16] 赵均海, 俞茂宏, 高大峰等. 中国古代木结构的弹塑性有限元分析 [J]. 西安建筑科技大学学报, 1999, 31 (2): 131~133
- [17] 魏剑伟, 李世温. 应县木塔地震影响分析 [J]. 太原理工大学学报, 2003, 34 (5): 603~605
- [18] 魏剑伟, 李铁英, 张善元, 李世温. 应县木塔地质勘测与分析 [J]. 工程地质学报, 2003 (1): 70~78
- [19] 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 李世温. 木结构双参数地震损坏准则及应县木塔地震反应评价 [J]. 建筑结构学报, 2004, 25 (2): 91~98
- [20] 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 李世温. 应县木塔实体结构的动态特性分析 [J]. 工程力学, 2005, 22 (1): 141~146
- [21] 张鹏程. 中国古代木构建筑及其发展研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003
- [22] 葛鸿鹏. 中国古代木结构榫卯加固抗震试验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004
- [23] 姚侃. 木结构古建筑的结构特性及抗震性能研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006
- [24] 姚侃, 赵鸿铁. 木构古建筑柱与柱础的摩擦滑移隔震机理研究 [J]. 工程力学, 2006, 23 (8): 127~131
- [25] 陈平, 姚谦峰, 赵冬. 西安钟楼抗震能力分析 [J]. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30 (3): 277~279
- [26] 李宏男, 李忠献, 祁皑等. 结构振动与控制 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- [27] 袁震东, 毛羽辉. 控制引论 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001
- [28] Katsuhiko Ogata, Modern Control Engineering, Forth Edition, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, 2002
- [29] 梁思成. 梁思成全集 (第四卷) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- [30] 郭黛姮, 傅嘉年, 刘叙杰等. 中国古代建筑 [M]. 北京: 新世界出版社, 2002
- [31] 王天. 古代大木作静力初探 [M]. 北京: 文物出版社, 1992
- [32] Liang Ssu-ch'eng. A Pictorial History of Chinese Architecture. Edited by Wilma Fairbank 1984 by The MIT Press, Printed and Bound by Halliday Lithograph in the United States of America
- [33] 梁思成. 梁思成全集 (第六卷) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984
- [34] 刘敦桢. 中国古代建筑史 (第二版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988
- [35] 刘敦桢. 刘敦桢文集 (一~三) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982
- [36] 刘敦桢. 中国建筑史参考图 [M]. 南京: 南京大学工学院出版社, 1953
- [37] 中国科学院中华古建筑研究社. 中华古建筑 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990
- [38] 刘致平. 中国建筑类型及结构 (第三版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- [39] 罗哲文. 中国古代建筑 [M]. 上海: 上海古籍出版社, 2002

- [40] 陈明达. 营造法式大木作研究 [M]. 北京: 文物出版社, 1981
- [41] 陈明达. 应县木塔 [M]. 北京: 文物出版社, 2001
- [42] 陈明达. 中国古代木结构建筑技术 [M]. 北京: 文物出版社, 1990
- [43] 于倬云. 故宫博物院学术文库: 中国宫殿建筑论文集 [M]. 北京: 紫禁城出版社, 2002
- [44] 井庆升. 清式大木作操作工艺 [M]. 北京: 文物出版社, 1985
- [45] 马炳坚. 中国古代建筑木作营造技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [46] 中国科学院自然科学史研究所. 中国古代建筑技术史 [M]. 北京: 科学出版社, 1985
- [47] 刘叙杰. 中国古代建筑史 (第一卷) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- [48] 傅熹年. 中国古代建筑史 (第二卷) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- [49] 郭黛姮. 中国古代建筑史 (第三卷) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- [50] 潘古西. 中国古代建筑史 (第四卷) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- [51] 孙大章. 中国古代建筑史 (第五卷) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [52] 祁英涛. 中国古代建筑的维修与保护 [M]. 北京: 文物出版社, 1986
- [53] 中国营造学社. 中国营造学社汇刊 [M]. 北京: 中国知识产权出版社, 2006
- [54] 姚承祖原著, 张志刚增编, 刘敦桢校阅. 营造法原 (第二版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986
- [55] 魏德敏, 李世温. 应县木塔残损特征的分析研究 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2002, 30 (11): 119~121
- [56] 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 李世温. 高层古建筑木结构——应县木塔现状结构评价 [J]. 土木工程学报, 2005, 38 (2): 51~58
- [57] 苏丛柏, 白建仁. 非破损法测定砖砌体强度的研究与应用 (第一部分) [R]. 太原: 太原钢铁公司, 1986
- [58] 苏丛柏, 李宗适, 白建仁. 非破损法测定砖砌体强度的研究与应用 (第二部分) [R]. 太原: 太原钢铁公司, 1986
- [59] 李世温. 应县木塔承重构件木材耐久性的探讨 [R]. 大同: 山西雁北地区文物工作站, 1984
- [60] 魏德敏, 李世温. 应县木塔残损特征的分析研究 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2002, 30 (11): 119~121
- [61] 李世温, 王晋生. 应县木塔的动力特性测定 [R]. 太原: 太原工业大学印刷厂印, 1985
- [62] 李铁英, 魏建伟, 张善元, 李世温. 应县木塔实体结构的动态特性试验与分析 [J]. 工程力学, 2005, 22 (1): 141~146
- [63] 李铁英, 张善元, 李世温. 应县木塔风作用振动分析 [J]. 力学与实践, 2003, 25 (2): 40~42
- [64] 魏剑伟, 李铁英, 李世温. 独乐寺观音阁动力特性实测分析 [J]. 太原理工大学学报, 2002, 33 (4): 430~432
- [65] 田松. 从太和殿的建造看经验、技术和科学的关系 [J]. <http://www.phil.pku.edu.cn/hps/viewarticle.php?sid=989>
- [66] 俞茂宏等. 双剪应力强度理论 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
- [67] 俞茂宏, 李跃明等. 强度理论研究新进展 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993
- [68] 俞茂宏. 强度理论百年总结 [J]. 力学进展, 2004, 34 (4): 529~560
- [69] 徐积善. 强度理论及其应用 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1984
- [70] 王源. 西安东门城楼 (国家重点保护文物) 结构力学分析 [D]. 西安: 西安交通大学, 1996
- [71] 中国古建筑抗震研究组. 中国古建筑抗震研究试验报告 [R]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2002
- [72] 徐其文, 汤小平, 索安勇. 中国古典木结构特性分析 [J]. 淮海工学院学报, 2002 (4): 64~67
- [73] 李贞刚. 中国古建筑为何少得可怜 [J]. 本溪日报, 2003 (06)
- [74] 俞茂宏. 古建筑结构研究的历史性、艺术性和科学性 [J]. 工程力学, 2003, 20 (增): 435~438
- [75] 吴树平, 高洁, 曹玉红. 中国古建筑木结构发展的历史原因 [J]. 河北建筑工程学院学报, 2006, 24 (3): 84~85
- [76] 陈志华. 外国建筑史 (19 世纪末叶以前) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979

- [77] 《古建园林技术》编辑部. 庆祝《古建园林技术》创刊五周年致读者 [J]. 古建园林技术, 1989
- [78] 刘临安. 韩城元代殿堂的大木结构 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 1984
- [79] 刘临安. 华夏传统建筑观念的文化意义考察 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 1999
- [80] 邱法维, 钱稼茹, 陈志鹏. 结构抗震试验方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [81] 倪光炯, 王炎森, 钱景华等. 改变世界的物理学 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1998
- [82] 复旦大学数学系《有限元素法选讲》编写组. 有限元素法选讲 [M]. 北京: 科学出版社, 1976
- [83] 李大潜等. 有限元素法续讲 [M]. 北京: 科学出版社, 1979
- [84] 户川隼人. 振动分析的有限元法 [M]. 北京: 地震出版社, 1985
- [85] K. H. 侯伯纳著, 谢贻权, 何福保, 丁皓江等译. 工程师用有限元素法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [86] 科学计算引论——基于 MATLAB 的数值分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002
- [87] 陈怀琛, 龚杰民. 线性代数实践及 MATLAB 入门 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [88] 胡聿贤. 地震工程 [M]. 石家庄: 河北教育出版社, 2003
- [89] 罗伯特 L. 威格尔. 地震工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 1978
- [90] 丁文镜. 减振理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [91] 胡海昌. 多自由度结构固有振动理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1987
- [92] 胡宗武. 工程振动分析基础 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985
- [93] 朱石坚, 楼京俊, 何其伟等. 振动理论与隔振技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006
- [94] 林家翘, L. A. 西格尔. 自然科学中确定性问题的应用数学 [M]. 北京: 科学出版社, 1976
- [95] M. 帕兹. 结构动力学: 理论与计算 [M]. 北京: 地震出版社, 1993
- [96] 北村春幸著; 裴星洙, 廖红建, 张立译. 基于性能设计的建筑振动解析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004
- [97] 武田寿一著; 纪晓惠, 陈良郢译. 建筑物隔震 防振与控振 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997
- [98] 日本建筑学会. 刘文光译. 隔震结构设计 [M]. 北京: 地震出版社, 2006
- [99] 清华大学抗震抗爆工程研究室. 科学研究报告集 (第 5 集) 结构模型的振动台试验研究 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990
- [100] 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 陈志鹏, 江见鲸. Research Reports of Structural Engineering and Vibration (TR~7) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [101] Thomason W. T. Theory of Vibration with Applications [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1972
- [102] Clough R. W. and Penzien J. Dynamics of Structures [M]. New York: McGraw-Hill, 1975
- [103] Anil K. Chopra. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering. Englewood Cliffs [M], New Jersey: Prentice Hall International, c1995.
- [104] Timoshenko W. T. Theory of Vibration with Applications (fifth edition) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [105] Craig R R, Jr. Structural dynamics——an introduction to computer method [M]. New York: John Wiley & Sons, 1981
- [106] J. A. D. Balfour. Computer analysis of structural frameworks [M]. New York: Nichols, 1986
- [107] Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu. Introduction to Finite Elements in Engineering (Third Edition) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005

第 2 章 中国古建筑的材料及其结构特性

2.1 引言

建筑之始,产生于实际需要,受制于自然物理,非着意创制形式,更无所谓派别。建筑之体系,乃源于其文明之体系。四大文明古国:古巴比伦、古埃及、古中国和古印度,都曾产生过独立的建筑系统,且其诸系建筑,莫不各自在其环境中产生,先而胚胎,粗具规模,继而长成,转增繁缛。其活动乃赓续的,依其时其地之气候,物产材料之供给;随其国其俗,思想制度,政治经济之趋向;更同其时代之艺文,技巧,知识发明之进退,而不自觉^[1]。

中国建筑体系,同其文明一样久远,所有的资料来源——文字、图像、实例——都有力地证明了中国人一直采用着一种土生土长的构造体系,这系建筑自其源生,以至近代,几近万年的历史。从距今六七千年前的浙江余姚的河姆渡遗址的发掘,证明中国古代人那时已知使用榫卯构筑木架房屋^[2] (图 2.1)。

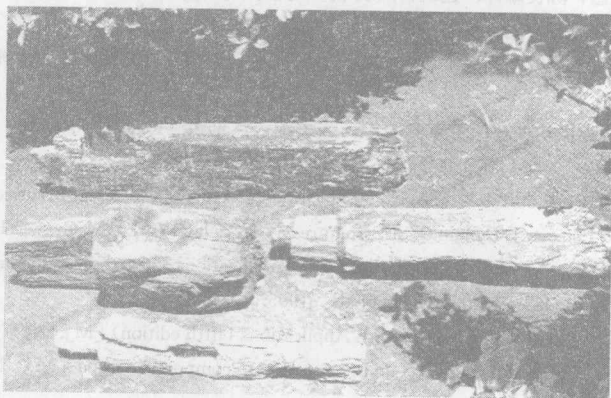


图 2.1 浙江余姚河姆渡石器文化遗址出土的木构榫卯

黄河流域也发现有不少原始聚落,如西安半坡遗址、临潼姜寨遗址等,这些聚落,居住区、墓葬区、制陶厂,分区明确,布局有致。所有的房屋,全为木造结构,表明木构架的形制已经出现^[1]。

世界其他诸系建筑,虽在或长或短的历史发展阶段中,都曾先后在不同程度和不同范围,使用过木材作为建筑材料,但后来均被石材取代^[3]。唯中国木构建筑,统一贯享了六七千年的寿命。但是,与世界其他伟大文明的建筑相比,对其所进行的研究,要少得多。这与在世界上,唯一赓续了五千年的中华文明,实不相称。而事实上,虽就单体建筑的体量而言,中国建筑不及西方石造建筑高大、雄伟,但若以其结构历来所本的原

则, 及其所取的途径来考察和研究, 则这统系建筑的内容, 的确是最经得起严酷的分析而无愧的^[4]。本章拟就中国建筑何以持续施用木材的原因以及木造构件的基本特点、结构性能作一研究。

2.2 中国古代自然地理环境因素对其建筑的影响

中国位于亚洲东部, 濒临太平洋。疆域南起曾母暗沙, 北至漠河的黑龙江上, 西始帕米尔, 东到黑龙江与乌苏里江汇流处。面积 960 万 km^2 , 地势西高东低。西部山地由西向东分为三个台阶: 西南部为青藏高原, 海拔 4000m 以上, 是第一阶梯; 昆仑山、祁连山、横断山以东, 海拔 1000~2000m 的高原与盆地, 是第二阶梯; 大兴安岭、太行山、巫山、云贵高原以东, 为海拔 1000m 以下的丘陵地与海拔 200m 以下的平原, 是第三阶梯。中国大部分地区位于北温带和亚热带, 属东亚季风区, 东南沿海年降水达 1500mm 以上, 而内陆的西北部地区, 只在 50mm 以下, 温度随地势升高而明显降低 (图 2.2)。

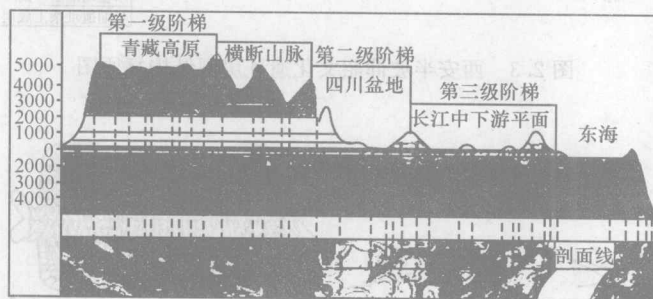


图 2.2 北纬 30°附近我国地形剖面示意图

生活在这样的自然地理环境中的中国古代先民们, 因地制宜, 因材致用, 运用不同材料, 不同做法, 创造出不同结构方式和不同艺术风格的古代建筑。黄河中游的黄土地带, 土层厚, 土质松, 雨量比现在多, 气候温暖而湿润, 曾遍布森林。这就使古代人得以定居下来, 用简陋的工具从事农耕, 用木材和黄土架构房屋来抵御寒风与冷雨。这些房屋大多以木材为构架, 以黄土为墙壁, 屋顶敷以草泥或茅草。房屋朝向南方, 是为了采光和冬季避风、取暖 (图 2.3)。在中国的南方, 房屋多为南向或东南向, 是为了接纳从东南方向吹来的海风。有的地方为了空气流通与减少潮湿, 房屋下部采用干阑式构造 (图 2.4)。

《韩非子·五蠹》说“上古之时, 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, 而民悦之, 使王天下, 号曰有巢氏。”这里的有巢氏中的氏, 并非指某个人, 而是指一个聚落。晋张华《博物志》记述: “南越巢居, 北朔穴居, 避寒暑也。”巢居这种形式以后逐渐演变为干阑式建筑形式。这反映了中国古代先民根据地理环境的不同, 从而选择不同结构形式的房屋居住的做法。

建筑材料除土木以外, 南方多采用竹子与芦苇。森林地区则常使用井干式建筑。总之, 中国古代建筑是古代人们因依自然条件的产物。