



中国木结构古建筑的结构抗震性能与保护研究

高大峰 李 卫 著



科学出版社

中国木结构古建筑的结构 抗震性能与保护研究

高大峰 李 卫 著

科学出版社

北 京

TU352.1

28

014038538

内 容 简 介

本书主要以中国古建筑为研究对象,对其结构抗震性能与保护方面进行了较为系统的研究,具体探讨了该系统建筑的产生与演变、结构特征与抗震机理,对其结构基本构件、结构单体(局部)进行了一系列的结构拟静力、动力模型试验研究;对典型大木作结构中的殿堂和厅堂结构的动力特性进行了数值模拟分析;对加固后的木结构古建筑的抗震性能作了对比研究;探讨了作为人类共同文化遗产的中国古建筑保护方面的问题,同时结合中国木结构古建筑的建造材料与结构特征,研究了其相应的保护原则和方法,对国内外有关遭受严重震害的木结构古建筑的修复案例进行了分析与评述。

本书可供从事古建筑保护领域研究的工程技术人员及对古建筑有兴趣的人士参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国木结构古建筑的结构抗震性能与保护研究/高大峰,李卫著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-039869-7

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第036319号

责任编辑:童安齐/ 责任校对:马英菊
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

*

2014年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2014年3月第一次印刷 印张:14 1/4 插页:3

字数:328 000

定价:88.00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 010-62135235

版权所有,侵权必究

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



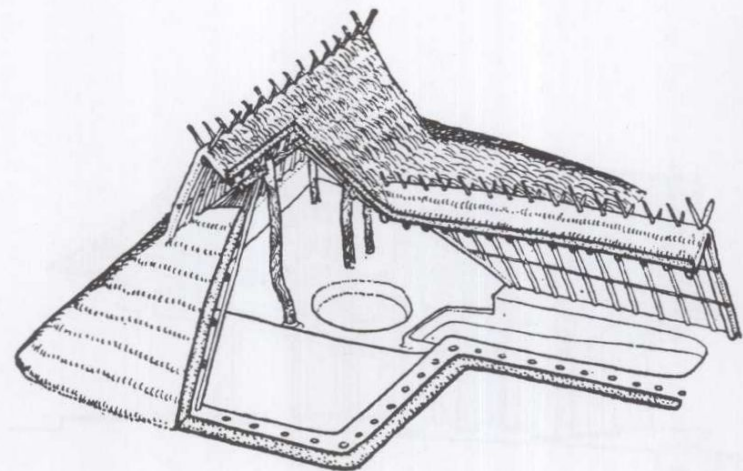
一、原始社会建筑



1-1 河南郑州大河村新石器中期
多室型房屋遗址



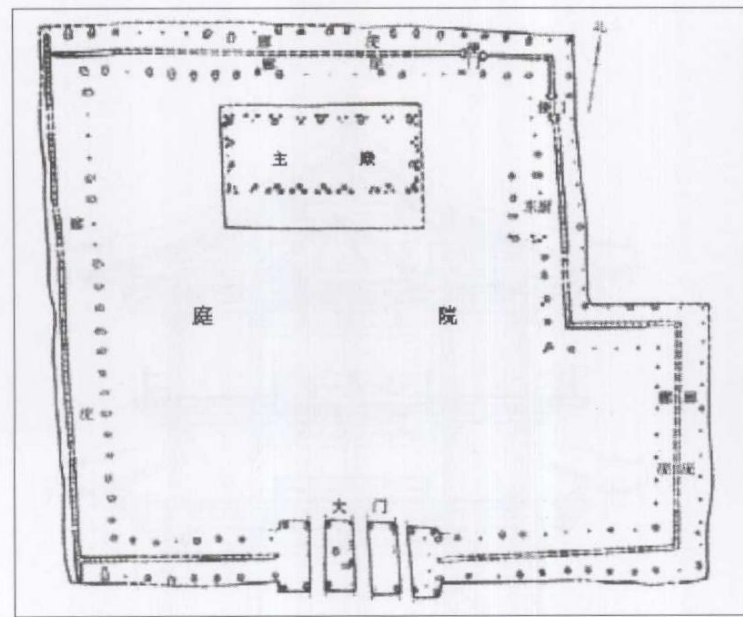
1-2 陕西西安半坡原始社会聚落遗址



1-3 半坡村原始社会大方形房屋复原图



1-4 浙江余姚河姆渡新石器文化
遗址出土的木构榫卯



1-5 河南偃师二里头夏代晚期一号宫殿
基址平面图

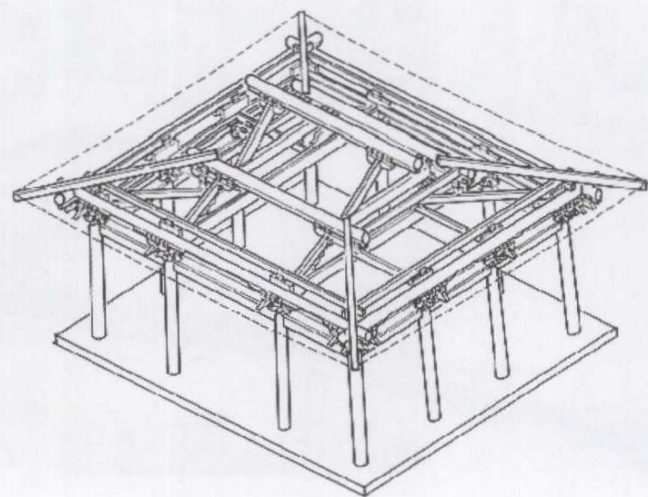


1-6 在殷商都城遗址上根据柱础和
史料复原的商代宫殿

二、著名木结构古建筑



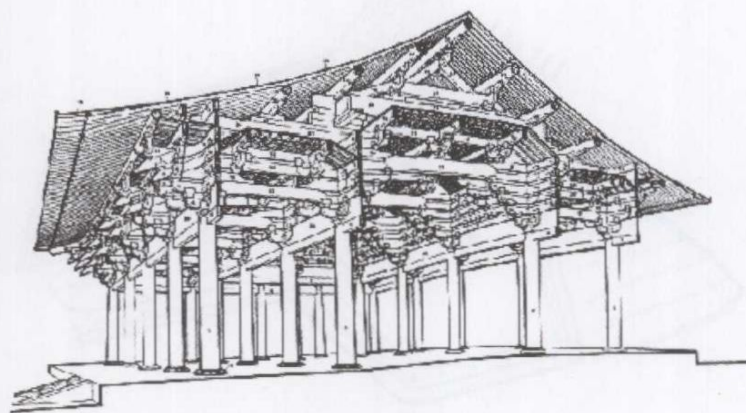
2-1 山西五台县南禅寺大殿外景



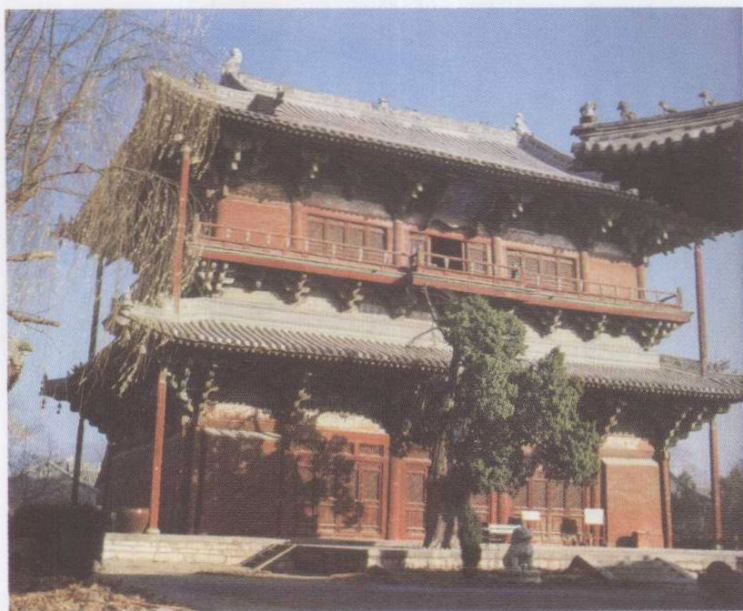
2-2 南禅寺大殿构架



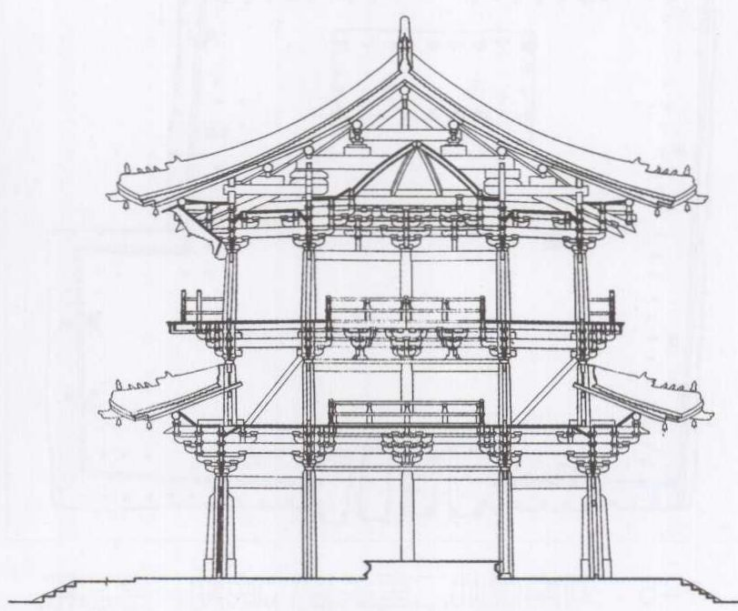
2-3 山西五台县佛光寺大殿外景



2-4 佛光寺大殿构架

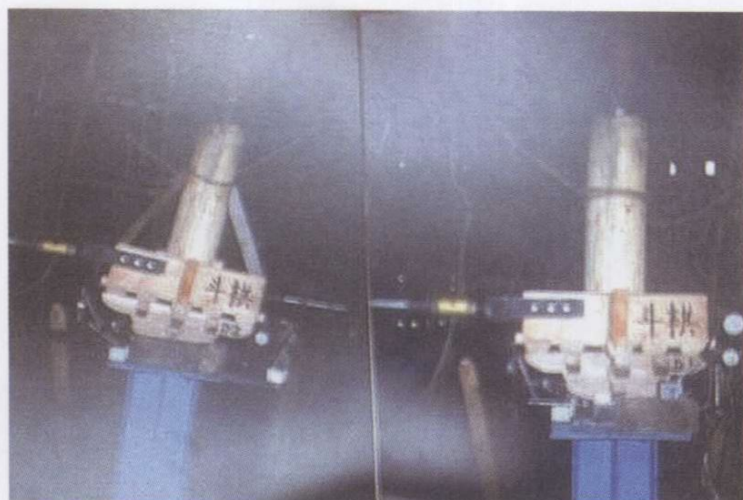


2-5 天津蓟县独乐寺观音阁



2-6 独乐寺观音阁结构剖面

三、木结构古建筑抗震试验研究



3-1 单个斗拱拟静力试验



3-2 榫卯节点拟静力试验



3-3 斗拱层拟静力试验



3-4 多层木结构古建筑地震
模拟振动台试验

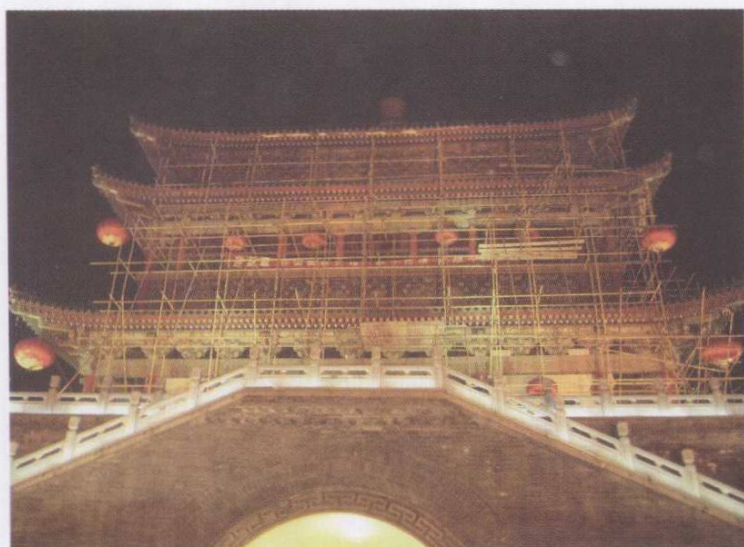


3-5 现场检测动力试验结果



3-6 现场动力测试结果

四、古建筑修缮加固



4-1 西安钟楼修缮



4-2 加固后的西安大清真寺牌坊



4-3 日本招提寺内部大梁加固



4-4 东门箭楼维修



4-5 西安城墙永宁门箭楼遗址现状



4-6 永宁门复建工程——下檐
大木结构安装

前 言

中国木结构古建筑，通常由砖、石、木作为建筑材料，木构架作为承重系统，墙体仅作为围护结构，依据特有的“材、分°制度”作为“技术规范”指导设计建造。其结果是，这种结构在建造过程中，可以仅凭师徒间相传的“口诀”而非已根植于现代人们意识中的“设计图纸”，即将一座座宏伟华丽的建筑建造起来，这在世界其他建筑体系中是绝无仅有的！这种结构原则与建造方式，数千年来绵延赓续不曾间断。作为当时举全国之财力建造并反映出当时社会最高科技水平的一些伟大的木结构建筑，在经过了千百年，期间曾受到众多大地震的冲击以及各种自然因素的侵蚀作用之后，至今仍挺然直立，证明了其良好的结构与抗震性能。另外，这些木结构古建筑，俨然又是一部凝固的历史，不仅记载着时代的沧桑变化，而其本身的结构及其抗震机制，也蕴含于其中，已然是十分宝贵的文化遗产，有待于我们去发掘研究，并揭示出来，为今所用。

由于中国古代社会并不重视建筑行业，至今保存下来由官方刊行的有关建筑技术著作仅有两部，即北宋崇宁二年（1103年）徽宗朝将作少监李诫著的《营造法式》和清雍正十二年（1734年）清工部《工程做法则例》，中国木结构古建筑的形制，基本上都是来自于这两部建筑文法书。本书所进行的木结构古建筑的结构抗震性能方面的研究对象，是基于宋《营造法式》的规制建造的建筑。

与西方建筑结构通常采用“抗震”方式应对地震作用不同，中国木结构古建筑，是以“减振隔震”的方式来减轻地震对结构所造成的损坏的。这种结构体系，从其整体上可看作是由几个刚性部分——屋盖，柱架，台基——“叠置”而成的，屋盖与柱架之间，有铺作（即斗拱）层，有的各楼层之下部还设有暗层，以增强其结构的整体性，柱子则平摆浮置于光滑的柱顶石之上。在地震作用下，结构的各个“刚性部分”之间即发生摩擦滑移，耗散掉大量的地震动能量，使得地震作用强度衰减下来以达到减轻结构震害的目的。根据这样的结构特征和抗震机制，我们在承担国家、省部级及市局级自然科学基金资助的有关于古建筑抗震与保护专题的科研项目中，设计制作了缩尺比为1:3.52的榫卯节点模型、斗拱模型、柱模型，以及二等材宫殿当心间模型，并进行了在水平反复荷载作用下的拟静力试验以及对应于不同地震模拟激励下的振动台试验，对试验结果进行了系统的分析研究，从而基本上搞清楚了中国木结构古建筑的减振隔震机制。

现存的中国木结构古建筑，往往已有数百年或已逾千年的历史，历经风

雨和各种自然营力的作用,必然造成其材质的各项物理力学性能指标退化并影响到其结构整体及其抗震性能,这方面的研究工作尽管存在一定的困难。但又确是有重要价值的,我们拟在今后的工作中进行。

在我们所进行的试验研究之中,有关试验的模型与实际的结构除了尺度上的差异外,有些原结构上有的构件(例如榫卯节点的“雀替”)并没有在模型中制作。为便于加载和测试,相关的试验是通过木构架模型进行测试的,尽管考虑“雀替”构件对节点性能影响的拟静力试验,在后来的研究工作中已经做了,但本书中尚未有反映。

有关古建筑的维修与加固方面的内容,本书中所提到的修缮加固工具,都是较为“传统的”,这是我们刻意为之,一方面是考虑木结构古建筑的维修加固往往是一些“修补”性质的工作,一些现代大型的先进设备未必适用,而更重要的是出于介绍一些木结构古建筑维修加固的传统“工作场景”。

中国古建筑是因依自然地理并深受华夏传统哲学观念影响且独立于西方建筑系统而产生、演变,直至发展成熟的高度有机的建筑结构系统,几千年来始终保持了它固有的结构方法及布置原则,从而也自然产生成了符合于中国传统哲学的“以柔克刚”的应对地震作用的方式,它的建筑思想、抵御自然灾害的理念,都是一笔宝贵的物质、精神文化遗产,我们应当好好地继承。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的来源与性质	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 地震动概述与古建筑结构震害	10
2.1 地震动概述	10
2.1.1 地球的构造	10
2.1.2 板块构造运动	12
2.1.3 中国地震分布及特点	14
2.1.4 中国地震动参数区划图及其主要内容	15
2.1.5 地震波和地震动的衰减	18
2.1.6 地震大小的衡量	20
2.1.7 地震动的衰减	21
2.2 古建筑的震害	22
2.2.1 中国木结构古建筑的典型震害	22
2.2.2 中国木结构古建筑震害的教训与启示	25
参考文献	25
第 3 章 中国古建筑的材料及其结构特性	26
3.1 概述	26
3.2 中国古代自然地理环境因素对其建筑的影响	27
3.3 中国古代建筑施用木材的原因	28
3.4 木材的基本特性	30
3.5 木结构柱构件模型在水平反复荷载作用下的滞回性能	32
3.5.1 试验简介	32
3.5.2 试验现象	33
3.5.3 试验结果	33
3.6 思考与总结	35
参考文献	35
第 4 章 构件的榫卯连接方式及其抗震性能	37
4.1 木结构古建筑构件的榫卯连接方式	37
4.2 大木作结构中榫卯的应用	40
4.3 榫卯节点的受力行为和破坏状态	42

4.4 结论	49
参考文献	49
第5章 斗拱的结构行为	51
5.1 斗拱的起源与演变	51
5.2 斗拱结构静力与抗震性能的试验研究	81
5.2.1 概述	81
5.2.2 斗拱结构在水平反复荷载作用下的拟静力试验研究	81
5.2.3 斗拱竖向承载能力的试验研究	88
参考文献	94
第6章 雀替·驼峰和隔架的结构作用	96
6.1 雀替的演变与功能	96
6.2 驼峰与隔架的功能	99
6.3 抹角枋的功能	100
6.4 结论	100
参考文献	101
第7章 中国木结构古建筑结构原则的演变及其性能研究	102
7.1 木构架的起源	102
7.2 木构架的基本类型及其构造	105
7.3 梁架的科学意义	107
参考文献	112
第8章 中国木结构古建筑动力特性的试验研究	113
8.1 概述	113
8.2 试验控制系统	113
8.3 中国古建筑大木作结构模型的地震模拟振动台试验研究	114
8.3.1 试验模型的设计与制作	114
8.3.2 试验方案	115
8.3.3 试验现象	116
8.3.4 试验结果与分析	117
8.4 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	134
8.4.1 试验模型的设计与制作	134
8.4.2 试验方案	135
8.4.3 试验现象	136
8.4.4 试验结果与分析	137
8.5 结论	152
参考文献	153
第9章 中国古代大木作结构动力特性的数值计算	154
9.1 概述	154
9.2 数值计算模型的建立	154
9.2.1 斗拱、榫卯和柱底(面)位置半刚性节点的计算模型	154
9.2.2 空间梁柱单元计算模型	154

9.3 结构体系的动力方程	156
9.4 结构振动的模态分析	157
9.4.1 阻尼及其对结构振型的影响	157
9.4.2 结构的自振频率与振型	158
9.4.3 节点变刚度虚拟单元中的弹簧刚度的确定	159
9.5 计算结果	159
9.6 中国古代典型大木作——殿堂与厅堂结构的动力性能	161
9.6.1 殿堂、厅堂动力分析模型的建立	161
9.6.2 计算模型的合理性分析	165
9.6.3 殿堂结构的动力特性分析	165
9.6.4 厅堂结构的动力特性分析	168
9.6.5 殿堂、厅堂结构的动力特性比较	170
9.7 结论	176
参考文献	177
第10章 古建筑的保护与维修	178
10.1 概述	178
10.2 古建筑保护的原则	178
10.3 中国古建筑的保护方法及案例分析	179
10.3.1 木构梁架的抢救加固	180
10.3.2 椽子的维修	183
10.3.3 檩的维修	187
10.3.4 梁、枋的维修	189
10.3.5 斗棋的维修	195
10.3.6 柱子的维修	198
10.3.7 整体梁架的加固	201
10.3.8 古代“偷梁换柱”的技术	204
10.3.9 拆卸木构架的方法与步骤	205
10.3.10 安装木构架的方法与步骤	209
10.3.11 施工现场的木材干燥	212
10.4 结论	216
参考文献	216
附录1 关于“材、分”制度的说明	217
附录2 中国历代的长度单位与公制的关系	218
致谢	219
中国历史年表	

第1章 绪 论

1.1 问题的来源与性质

中国传统建筑,是世界上的一个独立系统,数千年来的继承演变,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,始终保持着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作用,以及其他自然灾害的作用后,至今仍有许多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^①的研究成果写成。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、地震动原理,中国古建筑营造的基本观念、建筑的形制与构造、结构的营造技术与动力特性,木结构古建筑的保护与维修以至于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质素。

1.2 研究的目的是与意义

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,它一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有代表性的一些重大建筑结构,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,无论如何也说明了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,同样的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,以至绵延赓续几千年而始终维系统一结构原则的内在原因,甄别其中所蕴涵的哪些是科学的,需要继承、发扬和光大的部分;哪些是不尽合理的,需要摒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

^① 国家自然科学基金项目(59878043, 51208411),西安市科技局科技攻关项目(GG05171),陕西省教育厅科研计划项目(2010JK0635, 12JK0899),陕西省文物局科技项目(2011—K—008),陕西省文化遗产保护规划设计研究院与西安建筑科技大学合作项目(2011034)等。

建筑的安全可靠性,采取科学合理的保护措施,使之更为久远地传承下去。

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振控制系统。有鉴于此,对于中国古建筑结构抗震研究的意义在于,从这系统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,以作为现代工程结构抗震之借鉴。

1.3 研究的历史与现状

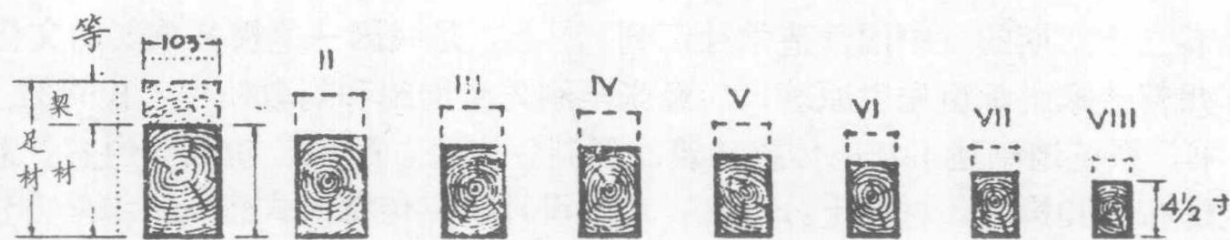
建筑在中国历史上被称为匠学,非士大夫阶层所为之事。作为一种技术,它受到重视,因为它关乎国计民生;作为一门学问和艺术,则没有得到承认。由于儒家重士轻工思想观念的影响,在中国古代,建筑没有被视为科学、艺术之列,遂造成中国历史上并没有兴起过研究建筑的学术兴趣和风气^[1]。在流传下来的各类典籍中,有关建筑的,多为文学方面的描述,旨在形容君王骄奢,臣民侈僭之征兆,或不美其事,或不详其实,实不可成为现代建筑结构科学研究之考据。其中真正具有科学技术价值的专门著述屈指可数,比较著名而完整的仅有两部:宋代的《营造法式》、清代的《工程做法则例》^①。

《营造法式》,刊行于北宋崇宁二年(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,也是至为重要的内容,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(?~989年),成书在《营造法式》前几十年,李诫当看过此书。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]。

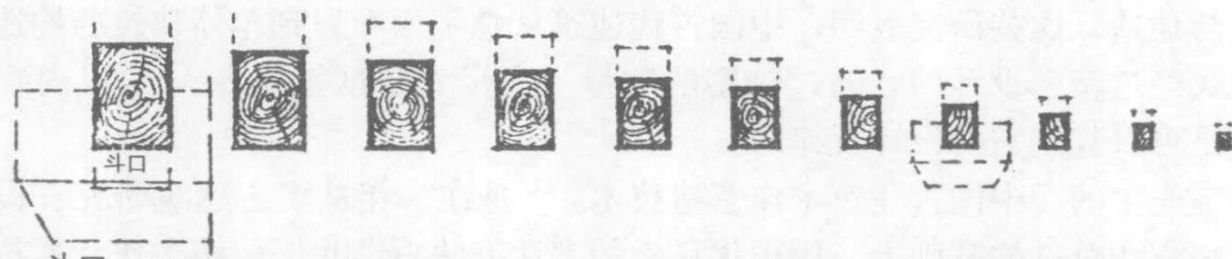
清代的《工程做法则例》,为雍正十二年(1734年)由清工部所颁布的关于建筑技术的书,全书七十四卷,前二十七卷分别对应于二十七种不同的建筑物:大殿、厅堂、箭楼、角楼、仓库、凉亭等结构,“依构材之实在尺寸叙述……,虽以此二十七种实在尺寸,可以类推其余,然较之《营造法式》先说明原则与方式,则不免见拙矣” [图 1.1 (b)]^[29,32]。

① 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》,是明代计成所著,主要论述中国园林的设计与建造。



材、槩、分 造屋之制，以材为祖。材有八等，度屋之大小因而用之。各以其材之广（高）分为十五分°，以十分°为厚。凡屋宇之高深，名物之短长，曲直举折之势，绳墨之宜，皆以所用材之分以为制度焉。

(a) 宋《营造法式》中规定的八个材等



斗口 清式称材厚曰斗口，即宋之十分也。斗口自一寸至六寸，共十一等。但实物所见，最大者仅至四寸。用材均高二斗口，单材仅用于跳头横栿，高为1.4斗口。

(b) 清《工程做法则例》中规定的十一等材的斗口

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，不能算作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]。不管以我们今天的眼光来看，这两部关于建筑营造的著作尚有怎样的不足，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，曾被奉为圭臬，并都曾对建筑营造活动产生过巨大的基础性作用。

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。当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做出重大贡献。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》^[32]（英文本）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见文献[29]～[54]；④为保存、保护古代建筑做出贡献。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

反映在七卷二十三期的《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。

由陈明达先生撰写的《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,汇集国内众多顶尖级的专家学者,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,即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些建筑,就不能不对这系统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(1056年,高67.31m)、河北蓟县的独乐寺观音阁(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,求得风振的剪力及弯矩,并与风压静力作用对比,得出相应的

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”，而且符合现代结构力学的基本原理。鉴于此，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，其中包括西安城墙北门箭楼抢险整修复原工程研究、西安城墙东门箭楼抗震性能分析、西安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。下面具体介绍其工作及研究成果。

为了解西安城墙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一阶频率基本一致，二阶频率偏小^[5]。

对城墙东门箭楼进行动静力有限元分析^[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-库仑准则^[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，找出反映其抗震性能的主要阶模态，据此提出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，获取了大量系统而有价值的试验数据^[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，