

中国古建筑结构及其抗震

——试验、理论及加固方法

赵鸿铁 薛建阳 隋 葵 谢启芳 著



科学出版社

中国古建筑结构及其抗震

——试验、理论及加固方法

赵鸿铁 薛建阳 隋 龑 谢启芳 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

中国木结构古建筑是中华文明的重要组成部分,具有极高的历史、文物、艺术和科学价值。本书系统、全面地介绍了古建筑木结构的历史发展、抗震机理及维修加固方法。

中国木结构古建筑从下至上通常分为台基层、柱架层、铺作层及屋盖层四个部分。本书分别介绍了木结构古建筑各部分的发展变化和结构作用。同时,书中应用现代科学方法,分析了木结构古建筑具有良好抗震性能的原因——结构的合理布置及各部分的消能减震机理,并建立了包括各部分消能减震作用的结构分析方法,其计算结果与模型结构的试验结果相吻合;采用扁钢和新型加固材料 CFRP 布,提出木梁及木构架榫卯节点的抗震加固理论和方法。

本书内容丰富、资料翔实,可供从事木结构古建筑研究的科研人员及工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国古建筑结构及其抗震: 试验、理论及加固方法/赵鸿铁等著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-032610-2

I. ①中… II. ①赵… III. ①古建筑—建筑结构: 抗震结构—研究—中国 IV. ①TU-092.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 216966 号

责任编辑: 童安齐 安若婷 / 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

*

2012 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张: 16

字数: 311 000

定价: 56.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137154 (BZ08)

版权所有, 侵权必究

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

前 言

中国古建筑是东方文化、华夏文明的结晶。现存的古建筑中有的已历经几百年甚至上千年的历史，它们记载着中华民族发展的光辉历程。因此，无论从考古、历史的角度还是从科学、文化、艺术等各方面而言，中国古建筑都是中华文化之瑰宝，世界文明之奇葩。近代许多爱国志士仁人倾尽毕生的精力致力于古建筑的发掘研究。以刘敦桢、梁思成为代表的一批建筑学专家、建筑历史专家及艺术专家们，他们走遍祖国大地，进行调研、测绘，发掘这些宝贵的遗存，获得了丰富的研究成果。这些成果主要着重在建筑历史、建筑艺术、建筑文化、建筑构造、建筑造型，以及社会、宗教、政治等方面。

古建筑是不可再生的历史与文化资源。历经几千年的天灾与战乱，极少数能遗存至今的古建筑就显得尤为珍贵。要使这些幸存下来的珍贵文物尽可能久远地保存下去，就必须从其根本的结构特性方面来研究它们的健康、安全状况及相应的保护措施。中国古建筑与西方古建筑及现代建筑在建筑用材、建筑构造方面有很大的不同，以至其在受力体系与性能方面截然不同。深入研究发现，中国古建筑的许多特殊构造，如柱础浮搁、榫卯连接、斗拱支撑梁等，不仅展示了其独特的艺术风格，而且也决定了其传力机理、抗震性能的优越特性，构成了合理的、科学的结构体系。而现代科技工作者仅在近几十年来才认识到这些科学的结构体系。这更展现出我们的先祖几千年前在营造技术上表现出的卓越智慧。

若要有效保护现存的珍贵文物建筑，合理分析这些遗存建筑的健康、安全状况，确定科学的保护加固方案，就必须从研究古建筑结构这一基础性研究着手，进行全面、系统地理论及试验研究，切不可生硬照搬现代结构分析理论与计算方法。鉴于此，作者及其课题组从古建筑的每一特殊部件着手，即从基础性测试研究开始，从而达到能准确、有效地分析古建筑结构体系的受力性能和抗震性能的目的。这一想法得到国家自然科学基金（项目编号：59878043）、陕西省自然科学基金基础研究计划（项目编号：98C09）及陕西省教育厅重点实验室建设基金（项目编号：05JS17）的支持。课题组先后进行了各构、部件，结构体系与房屋单元模型的静、动力试验 200 余次，并进行了理论研究与分析，如开展了对梁、柱及节点加固的研究。撰写本书的目的，是将课题组近 15 年来的研究成果作一总结，奉献给读者，希望能起到抛砖引玉的效果。

本书由赵鸿铁、薛建阳、隋葵、谢启芳共同撰写；由赵鸿铁、薛建阳统稿并校阅全书。书中反映了作者及其课题组全体成员的研究成果，除了上述作者外，

张鹏程、高大峰、姚侃、张锡成、张凤亮、马辉以及葛鸿鹏、张海彦、黄慧达、罗勇、于业栓、王琨、魏国安、吴照华、吴磊、董春盈、薛自波等都付出了很多心血。本书能得以顺利完成，还要感谢关心古建筑研究的诸多教授学者，他们对书中的内容提出了不少宝贵意见。

由于本研究的特殊性，书中许多引文、引图及引用照片大部分来自《营造法式》、《梁思成文集》等经典著作及已出版的古建筑相关著作和论文，这些著作及论文在文中或参考文献中均已列出，偶有疏漏，敬请谅解。在此，谨向这些作者及出版社致以诚挚的谢意。

限于作者水平，书中不足之处在所难免，敬请不吝赐正，不胜感激。

著 者

西安建筑科技大学

2011年5月

目 录

前言

第一篇 中国古代木结构建筑的特点与发展

第 1 章 中国古建筑发展概述	3
1.1 古建筑发展概况	3
1.2 古建筑研究综述	6
第 2 章 木结构古建筑概论	9
2.1 木结构古建筑分类	9
2.2 殿堂结构的组成及主要构部件名称	13
第 3 章 古代木结构建筑的设计及特点	20
3.1 古建筑的结构设计理念	20
3.2 结构设计原则及特点	22
3.2.1 平面设计原则与特点	22
3.2.2 立面设计	25
3.2.3 剖面结构	28
第 4 章 地基与基础	30
4.1 地基基础结构及演变	30
4.2 地基结构与种类	32
4.3 台基与柱础	33
4.3.1 台基	33
4.3.2 础石	35
第 5 章 殿堂柱架结构	38
5.1 柱架结构构造	38
5.2 柱	42
5.3 梁枋	46
5.4 柱额樨卯连接	49
第 6 章 铺作层	57
6.1 斗拱的组成与构造	57
6.2 铺作层的功能	62

6.3 斗栱的发展与演变	64
第7章 梁架屋盖体系	74
7.1 屋顶的形式及特点	74
7.2 屋盖梁架构造及发展	75

第二篇 中国木结构古建筑的结构及抗震性能分析

第8章 地基基础力学性能及隔振机理	85
8.1 复合地基的物理力学性能试验	85
8.1.1 试验设计	85
8.1.2 试验结果及分析	86
8.1.3 试验结论	89
8.2 古建筑基础承载力核算算例	90
8.2.1 双槽殿堂建筑	90
8.2.2 应县木塔实例核算	91
第9章 木材的物理力学特性	92
9.1 木材特性	92
9.1.1 正交各向异性	92
9.1.2 木材的力学特性	92
9.2 红松木材性试验	96
9.2.1 单柱承载力试验	96
9.2.2 强度实验	98
9.2.3 弹性常数测定	100
第10章 榫卯连接特性	103
10.1 榫卯类型及力学特性	103
10.2 榫卯传力机理和破坏形态	103
10.2.1 直榫	104
10.2.2 燕尾榫	106
10.2.3 榫卯工作机制	111
10.3 直榫节点柱架拟静力试验	112
10.3.1 试件设计与制作	112
10.3.2 加载方案	114
10.3.3 测点布置	114
10.3.4 试验过程及现象描述	114
10.4 燕尾榫节点柱架拟静力试验	115

10.4.1	试件设计与制作	115
10.4.2	加载方案	116
10.4.3	测点布置	117
10.4.4	试验过程及现象描述	117
10.5	透榀柱架拟静力试验结果分析	118
10.5.1	柱架的 $P-\Delta$ 滞回曲线	118
10.5.2	柱架的 $P-\Delta$ 骨架曲线	119
10.5.3	透榀节点的 $M-\theta$ 滞回曲线	119
10.5.4	透榀节点的 $M-\theta$ 骨架曲线	119
10.5.5	延性	121
10.6	燕尾榀柱架拟静力试验结果分析	122
10.6.1	柱架的 $P-\Delta$ 滞回曲线	122
10.6.2	柱架的 $P-\Delta$ 骨架曲线	122
10.6.3	燕尾榀节点的 $M-\theta$ 滞回曲线	123
10.6.4	燕尾榀节点的 $M-\theta$ 骨架曲线	123
10.6.5	延性	124
10.7	榀卯节点 $M-\theta$ 恢复力模型	125
第 11 章	斗拱的力学特性及抗震机理	127
11.1	传力机理及破坏形态	127
11.1.1	传力机理	127
11.1.2	破坏形态	130
11.2	斗拱的轴压试验	132
11.2.1	试件的设计与制作	132
11.2.2	测试内容	134
11.2.3	加载方案	134
11.2.4	试验设备	134
11.2.5	试验结果分析	134
11.3	铺作层拟静力试验	136
11.3.1	试件的设计和制作	136
11.3.2	加载方案	137
11.3.3	测点布置	138
11.3.4	试验过程及现象	139
11.4	单朵斗拱拟静力试验结果分析	139
11.4.1	$P-\Delta$ 滞回曲线	139
11.4.2	$P-\Delta$ 骨架曲线	139

11.4.3	层间滑动	140
11.4.4	内力变化	142
11.4.5	延性	142
11.4.6	等效黏滞阻尼系数	143
11.5	2朵斗拱协同工作拟静力试验结果分析	144
11.5.1	$P-\Delta$ 滞回曲线	144
11.5.2	$P-\Delta$ 骨架曲线	145
11.5.3	层间滑动	145
11.5.4	内力变化	145
11.5.5	等效黏滞阻尼系数	146
11.5.6	延性	147
11.6	4朵斗拱协同工作拟静力试验结果分析	147
11.6.1	$P-\Delta$ 滞回曲线	147
11.6.2	$P-\Delta$ 骨架曲线	148
11.6.3	层间滑动	148
11.6.4	等效黏滞阻尼系数	149
11.6.5	延性	149
11.7	铺作层恢复力模型的建立	149
11.7.1	恢复力模型	149
11.7.2	铺作层恢复力模型分析	151
第12章	木结构古建筑屋盖梁架体系力学性能分析	154
12.1	古建筑屋盖梁架体系的特点	154
12.1.1	大屋顶	154
12.1.2	举折	155
12.1.3	传力机制	155
12.2	屋盖梁架体系模态分析	156
12.2.1	模态分析原理	156
12.2.2	计算结果分析	157
12.3	屋盖梁架体系动力分析	158
12.3.1	动力分析原理	158
12.3.2	选取地震波	158
12.3.3	屋盖梁架模型地震作用下 ANSYS 有限元动力模拟分析	159
12.4	屋盖梁架体系静力分析	162
12.4.1	屋盖梁架体系在自重作用下的内力	162
12.4.2	屋盖梁架体系在风荷载作用下的内力分析	163

第 13 章 殿堂式古建筑木结构模型的动力分析	165
13.1 殿堂式古建筑木构模型振动台试验	165
13.1.1 模型制作	165
13.1.2 测点布置	166
13.1.3 加载方案	167
13.1.4 试验现象	167
13.2 位移和加速度反应	168
13.2.1 位移和加速度反应	168
13.2.2 动力放大系数	172
13.2.3 自振周期和阻尼	173
13.2.4 内力分析	174
13.2.5 滞回耗能	176
第 14 章 古建筑木结构的倒塌机理研究	178
14.1 木结构古建筑可能的几种倒塌机制	178
14.2 各种倒塌机制的分析	179
14.3 柱脚滑移倒塌机制	182
14.3.1 柱脚滑移倒塌的力学模型	182
14.3.2 地震动模型	184
14.3.3 最大滑移量的求解	184
14.4 木结构古建筑的抗滑移倒塌性能	186
14.4.1 柱脚滑移倒塌的判决条件	186
14.4.2 宋式和清式建筑的柱径尺寸	187
14.4.3 木构古建筑的抗滑移倒塌能力分析	188

第三篇 木结构古建筑的加固研究

第 15 章 木结构古建筑的破坏形态及修缮加固方法	191
15.1 木结构古建筑的主要破坏形态	191
15.2 古建筑修缮加固基本原则	192
15.3 传统修缮加固方法及其不足	193
15.3.1 受弯构件的修缮加固方法	193
15.3.2 木柱的修缮加固方法	193
15.3.3 榫卯连接的修缮加固方法	194
15.3.4 传统修缮加固方法的不足	195
15.4 碳纤维布加固木结构古建筑的优点	195

第 16 章 碳纤维布加固木梁的抗弯性能	197
16.1 碳纤维布加固木梁抗弯性能试验研究	197
16.1.1 试件设计与制作	197
16.1.2 加载方案及量测方案	199
16.1.3 试验结果与分析	200
16.1.4 结论	202
16.2 碳纤维布加固木梁抗弯承载力	203
16.2.1 木材轴心受力应力-应变关系模型	203
16.2.2 碳纤维布加固木梁的弯曲破坏形态	204
16.2.3 碳纤维布加固木梁的抗弯承载力计算公式	205
第 17 章 碳纤维布加固木梁界面黏结应力分析	210
17.1 碳纤维布加固木梁端部界面剪应力试验结果分析	210
17.2 碳纤维布加固木梁界面黏结应力的理论分析	211
17.2.1 界面剪应力分析	211
17.2.2 界面正应力分析	214
17.2.3 两点对称集中加载的界面应力	215
17.2.4 理论分析与试验结果的对比	216
17.3 碳纤维布锚固计算	217
17.3.1 锚固长度计算	217
17.3.2 锚固黏结破坏的验算	218
第 18 章 扁钢加固木构架榫卯节点的抗震性能	219
18.1 扁钢加固木构架榫卯节点的低周反复荷载试验	219
18.1.1 试件设计与制作	219
18.1.2 加载方案及测试内容	220
18.1.3 试件的破坏特征	221
18.1.4 试验结果与分析	222
18.1.5 结论	225
18.2 扁钢加固木结构模型榫卯节点的振动台试验	225
18.2.1 试验概况	225
18.2.2 试验过程与破坏特征	227
18.2.3 试验结果与分析	228
18.2.4 结论	231
第 19 章 碳纤维布加固木构架榫卯节点的抗震性能	232
19.1 碳纤维布加固木构架榫卯节点的低周反复荷载试验	232
19.1.1 试验概况	232

19.1.2	试件的破坏特征	233
19.1.3	试件结果与分析	233
19.1.4	结论	233
19.2	碳纤维布加固木结构模型榫卯节点的振动台试验	234
19.2.1	试验概况	234
19.2.2	试验过程与破坏特征	235
19.2.3	试验结果与分析	235
19.2.4	结论	240
主要参考文献		241

第一篇

中国古代木结构建筑的特点与发展



第 1 章 中国古建筑发展概述

1.1 古建筑发展概况

中国是具有五千年历史的文明古国，随着时代的发展，建（构）筑物无论从形式、艺术、结构技术等方面，都在不断地进步与发展。由于自然气象的原因与历年战乱等人为因素，绝大部分重要建筑已荡然无存，但是尚有少数建筑与工程历经数百年，甚至数千年，至今仍较完整地保存下来。因此，这些古建筑及伟大的工程是祖国弥足珍贵的宝贵财富，也是世界文明的重要见证。

古建筑，广义地不仅是指建筑物（宫殿、寺庙、楼阁、民居），尚应包括重大的构筑物与工程，如古长城、城墙、古塔、桥梁、石窟等。但是本书主要论述的是建筑物（包括结构有所类同的古塔）。

中国的古建筑不仅在艺术造型、结构构造等诸方面和现代建筑物存在很大差异，而且在结构体系以及受力性能、抗震性能方面也与现代建筑迥然不同，有其独特的风格、受力特点和优越的抗震性能。中国古建筑与西方古建筑在用材、结构构造以至受力体系等方面也截然不同。中国古建筑的主体结构，包括柱架体系、屋盖梁架体系以及作为两者之间过渡的铺作层，绝大多数均为木材建造，而且有其独特的造型与联结方式。西方的古建筑，起初虽有用木材等多种材料建造，但最后基本趋于用石材建造的石结构，这与木结构不仅在材料上有极大的差异，其受力体系也与木结构完全不同。

中国现存的并非以木结构为主的建筑物仅有南京灵谷寺的无梁殿和苏州开元寺的无梁殿，它们以多重砖拱与砖墙为受力主体。其他遗存较多的是一些砖、石古塔（大量古塔还以木结构为主要承重体系）。

受中国古建筑的影响，日本、韩国及东南亚国家保存着少数中国式古建筑。比较有名的有日本飞鸟时代的建筑，如奈良法隆寺金堂、五重塔、奈良法起寺三重塔等，因此日本目前较看重研究五重塔结构。

中国的古建筑，根据考古与历史有据可查的，可追溯到 10 000～4000 年以前的原始氏族社会（新石器时代）。原始氏族居民的居住方式，根据地域不同大致可分为穴居与巢居两大类。前者主要适宜于北方较干燥地区，后者主要适宜于南方潮湿地区。因此，古建筑遗址由此发展而来，大体可分为两大系统。其一是黄河中下游地区，史称仰韶文化时期，其典型实例为西安半坡和临潼姜寨遗址，

是从地穴、半地穴发展起来的建筑，已有木骨抹泥墙，上覆盖草泥顶（图 1.1）。另一为由巢居发展起来的架空木构干阑，其典型实例为距今 7000 年前的余姚（现今浙江）河姆渡遗址（图 1.2）。在河姆渡遗址中已有用榫卯与绑扎结合建成的干阑。这也是最早、最原始的榫卯结构。

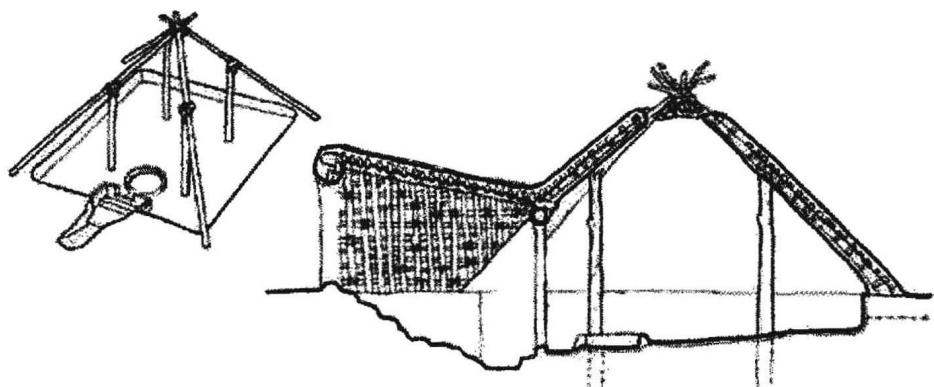


图 1.1 半坡遗址

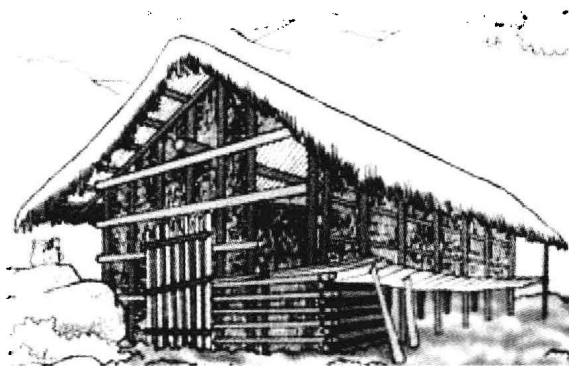


图 1.2 河姆渡遗址中干阑式建筑复原图

从 10 000 年前起，由穴居或巢居发展起来的古代建筑，基本上已确立了以木结构为主要承重体系，此为古建筑结构体系的雏形。

夏、商、周先民已发明了夯土技术，以加强房屋的地基与基础。这种夯土技术一直沿用至今，尤其在黄河中游、中西部湿陷性黄土地区（如河南、山西、陕西、甘肃等），利用夯土技术不仅可加强地基与基础，更重要的是能消除黄土的湿陷性，使黄土地基的强度与安全性大为提高。典型的例证为河南安阳殷墟中商朝的宫殿遗址。

起初支承柱的柱基均埋于地下，由于木材易受潮腐朽，进一步改进为柱架结构支承于高台基上，即柱基逐渐由地下升至地面以至置于地上的高台基上。高台

基为夯土台基，运用石材护挡。台基之上有天然或经加工的础石作柱础，支撑柱架。

应当指出的是，在出土的西周铜器上已出现柱上置栌斗，柱间用额枋（也称“阑额”、“梁额”，本书统称“额枋”）、横枋（相当于梁）相连，横枋施于栌斗斗口内。这是标志古代建筑一大特色的斗拱的雏形。我们常说“秦砖汉瓦”，实际上西周已出现板瓦、筒瓦、人字形脊瓦。在西周立国以前的陕西岐山建筑遗址中，除了一般的木构架草屋顶外，已局部用瓦。到战国时，宫室已使用模制花纹地面砖和瓦当，地面及踏步铺砖和有内排水功能的空心砖。

春秋时期出现了著名建筑匠师鲁班，被后代奉为建筑工匠的祖师爷。据文献记载，春秋时期已经使用“重屋”，即多层房屋，说明已具备了构建多层房屋的技术。

秦统一六国建立秦王朝后，秦始皇在大兴土木方面做了几件大事，为其修宫殿、陵墓和修建长城。在骊山下秦皇陵侧的地宫中已有双额枋和用榫卯连接的柱构架。在修建长城中大量使用烧制青砖，是为“秦砖”。经过烧制，块体强度比生土大大提高，后来一直沿用几千年至今，仍为当今广为应用的建筑材料。

最迟在东汉时代，木构架的三种主要形式已经形成，即抬梁式、穿斗式及密梁平顶式。抬梁式结构是木构架的主要形式，各朝官式建筑均为抬梁式。中国古代建筑中许多独有的特点也反映在抬梁式建筑中，因此此后我们研究古建筑的重点，实际上主要针对抬梁式木构架。此外还有井干式木构架，即由圆木或方木层层叠成井干。由于用木材较多，早期多用于森林地区及南方等地，后已少用。

西汉出现砖石拱券结构，以及双曲穹窿结构。拱券主要用于桥梁，现存石拱桥尚众多，著名的赵州安济桥即为石拱桥。在建筑中多用拱券作为门窗过梁及装饰，也有用多重拱券、穹窿做成屋顶。西部地区村镇尚存在砖砌窑洞，实为砖拱结构。

古代建筑自夏、商、周、秦、汉的逐步改进与完善，至隋、唐、宋时期，建筑已达到十分完美的程度，中国古建筑中最具特色的斗拱、榫卯连接技术已十分成熟。唐朝是继汉朝以后的又一个繁荣发达时期，因此土木建设也迅猛地发展并成熟。唐朝改大兴为长安（今西安），大修城墙城楼，长安修建了壮丽宏伟的大明宫、兴庆宫，尤其是武则天在洛阳修建的明堂，平面呈方形，宽 89m，总高 86m，高三层，工程最为宏伟，仅 10 个月即完工，可见当时建筑的设计、施工、工艺技术已达到相当完美的程度。遗憾的是，大量宏伟的古建筑已毁于历代的战乱。现遗存的著名建筑与工程除上述隋代建造的河北赵州安济桥外，建于后周、重建于唐天宝五年（公元 746 年）的山东淄博市颜文姜祠为目前尚存的最早的木结构建筑，其他还有建于公元 984 年的蓟县独乐寺观音阁，重建于 1013 年的宁波保国寺大殿。建于 1056 年的山西应县佛宫寺释迦塔，为八角五层全木构塔，