第 42 卷　第 5 期　　力 学 进 展　　Vol. 42　No. 5
2012 年 9 月 25 日　　ADVANCES IN MECHANICS　　Sep. 25, 2012

中国古建筑木结构力学研究进展*

陈志勇 [1,2]　祝恩淳 [1,†]　潘景龙 [1]

[1] 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090

[2] 新布伦瑞克大学林业和环境管理学院, 弗雷德里克顿 E3B 5A3, 加拿大

摘　要　中国古建筑木结构是我国乃至世界的宝贵文化遗产, 也是中华文明的重要组成部分. 随着时间的延续, 对这些价值连城、失而不可复得的历史文物的保护日益迫切. 本文从古木结构的木材力学性能、关键节点(斗栱、梁柱节点和柱脚节点) 受力机理、木构架整体受力性能研究、结构残损勘查、安全评估及修缮加固等方面, 总结了近 30 年来结构学者对古代木结构建筑的研究进展, 以期为今后进行古木建筑的结构研究提供参考.

关键词　古建筑木结构, 斗栱, 梁柱节点, 柱脚节点, 榫卯连接, 受力性能

1　引　言

中国古建筑是由中华民族祖先所创造发明, 因其建筑形式优美及结构性能优越而影响并传播至日、韩和越南等临近国家, 是中华乃至世界文明的重要组成部分, 也是人类宝贵的文化遗产. 其中数量最多且最具特色的当属古木结构, 如中国的应县佛宫寺释迦塔 (公元 1056 年建) 和蓟县独乐寺观音阁 (公元 984 年建). 随着时间的延续, 对这些价值连城、失而不可复得的历史文物的保护日益迫切.

从 20 世纪 30 年代开始, 以梁思成先生 [1-2] 和刘敦祯先生 [3] 为代表的中国营造学社, 从建筑学角度对中国古建筑进行了深入的研究; 而从结构方面对古建筑的研究, 则是从王天 [4] 关于古建筑各重要构件、节点乃至整体结构在静力载荷作用下的力学性能分析开始. 本文总结近 30 年来结构学者对古代木结构建筑的研究进展, 以期为今后进行古建筑的结构研究提供参考.

2　古木建筑的木材力学性能

上古时期我国森林资源丰富, 木材便于就地取材和加工, 而当时处于石器和青铜器时代, 石材的开采加工困难, 因此我们原始和奴隶社会的祖先选用木材作为房屋建造的主要材料 [5]. 经长期实践, 人们认识到木结构各种优点的同时, 还累积了大量行之有效的木结构营造技术及经验. 然而, 与其他建筑材料相似, 作为使用了上百年后的材料, 木材也有一些问题正在或有待研究.

2.1　腐朽、虫蛀和老化等环境因素引起的木材材性劣化

承重木构件在数百年甚至上千年使用过程中, 遭受不同程度的真菌腐朽、虫蛀以及老化等环境因素引起的材性劣化作用, 其材性有何变化, 是从事古建工作者至为关心的问题.

《古建筑木结构维护与加固规范》编制组 [6]、陈国营 [7]、曹旗 [8] 和王晓欢 [9] 等分别对北岳庙大殿 (约 900 年)、易昌陵碑楼 (约 200 年)、应县木塔 (约 950 年)、晋祠景清门 (约 750 年) 和故宫武英殿正殿 (约 590 年) 所用木材进行新旧材性对比试验. 结果表明, 经受环境因素长期作用后的木材, 由于物理作用和化学反应致使其各项力学性能指标皆有不同程度的降低、材质变脆, 不同树种的材性变化幅度不等但趋势相同. 由于旧木材缺乏且古建筑弥足珍贵, 以上学者的对比试验仅得到了某几种树种相对定性的结果.

为解决古建筑材性试验中旧木材缺乏、新旧木材材质不一致的问题, 徐明刚等 [10] 提出了通过

收稿日期：2011-09-29, 修回日期：2012-02-13　doi: 10.6052/1000-0992-11-134

* 国家自然科学基金项目 (50878067) 资助

† E-mail: e.c.zhu@hit.edu.cn

接种腐朽菌加速木材腐朽的试验方法. 通过木材加速腐朽试验, 得到了各腐朽等级木材的物理力学性质及其衰减变化规律. 同时, Calderoni 等 [11] 建立了基于电阻成像的非破损试验方法, 以进行木材各项力学指标的劣化程度测试.

2.2 木材的各向异性

木材是复杂的各向异性材料. 为实现木结构精细化有限元模拟, 陈志勇 [12-13] 建立了能反映木材正交各向异性弹性、抗拉和抗压强度不等、抗拉或抗剪时发生脆性破坏而受压时发生塑性变形、且在横纹承压下发生二次应变硬化等特性的本构模型, 通过编制用户子程序实现木材本构模型在 ABAQUS 的嵌入, 并应用到对应县木塔典型节点 (斗栱、梁柱节点和柱脚节点) 的受力性能有限元分析中.

2.3 蠕变、载荷持续作用和损伤累积

木材是黏弹性材料, 在载荷作用下其变形将随时间增长而增大 (即蠕变); 在长期载荷作用下的木材的强度随作用时间延长而降低 (即载荷持续作用); 同时, 由于环境温度、湿度的变化而导致木材的损伤累积, 如蠕变变形增长等 [14]. 由弹簧和黏性元件组成的 Maxwell 模型和 Voigt 模型为木材蠕变研究常用的力学理论模型, Madison 曲线为表征木材载荷持续作用的试验曲线, 而开裂黏弹性模型 (damage viscoelastic material, DVM) [15] 等则是用来描述木材累积损伤的本构模型. 迄今为止, 仅李瑜等 [16]、瞿伟廉等 [17] 和王雪亮等 [18] 采用 Gerhards 累积损伤模型对木构件的剩余强度和寿命进行了研究, 而尚未有学者对古木建筑进行蠕变和载荷持续作用研究.

3 关键节点受力机理

中国古建筑木结构多属殿堂式, 其结构一般分为屋盖、铺作 (斗栱) 和柱架 3 层. 其中, 斗栱、梁柱节点和柱脚节点分别为铺作层和柱架层的关键受力节点 [12]. 因此研究这些关键节点的受力性能对分析古木结构整体受力性能具有重要意义.

3.1 斗栱

斗栱是中国古建筑所特有的形制, 早在 3000 年前的商周时期即已出现. 它是较大建筑物屋盖与柱架间之过渡部分, 其功用在于承托上部挑出的屋檐, 将屋盖重量或直接传到柱上, 或先纳至阑额 (明清时为额枋) 之上, 再转至柱上. 同时, 斗栱用于屋檐下, 向外出跳, 承挑上部屋檐, 可使出檐更加深远; 用于室内时, 向两端挑出, 可缩短梁枋跨度、分散梁枋节点处剪力等作用 [19]. 斗栱的形式和制作工艺从汉至宋不断演变和更新 [20], 北宋崇宁二年 (公元 1103 年) 李诫所编著《营造法式》[21] 标志着斗栱的制作工艺已臻成熟, 并统一了斗栱及其构件的名称. 自元至清, 由于木材资源减少, 斗栱制作工艺也进行了更新, 清雍正十二年 (公元 1734 年) 工部颁发的《工程做法》[2] 标志着另一种斗栱制作工艺的完善. 由此, 便有了现代常加以区分的两种斗栱形式, 即 “宋式斗栱” 和 “清式斗栱”.

3.1.1 宋、清斗栱法式比较

无论是宋式还是清式斗栱, 都是基于模数制作而成的. 宋式斗栱以材份制的 “份” 为各构件尺寸的模数, 根据建筑等级的不同划分有 8 个尺寸等级, 栱的横截面高宽比有 15:10(谓之单材) 和 21:10(谓之足材) 两种; 而斗口制的 “斗口” 作为清式斗栱的模数, 将斗栱分为 11 个尺寸等级, 栱的横截面高宽比也有 14:10(单材) 和 20:10(足材) 两种. 对于主要受弯的栱来说, 宋式栱截面高宽比大于清式的, 故宋式栱比清式栱更能有效地利用材料. 基于不同模数的宋式和清式栱的长度与其宽度的比例, 除个别 (如宋 “华栱” 和与之对应的清 “翘”) 稍有差别外, 大部分基本相同；两种斗栱斗的长、高和宽的比例也相同.

宋式和清式斗栱根据位置的不同, 都划分了 3 类. 宋式的补间铺作 (《营造法式》中称斗栱为 “铺作”)、柱头铺作和转角铺作, 清式的平身科 (《工程做法》中称斗栱为 “斗科”)、柱头科和角科与之相对应. 两个时代的斗栱构件都有各自一套名称, 对于相同安装位置的斗或栱, 宋式和清式的命名皆一一对应, 只是清代耍头上没有与宋式齐心斗对应的斗.

另外, 宋式斗栱上下各跳华栱的宽度相同 (为 10 份), 而清式与之对应的翘则由下至上逐渐变宽. 宋式斗栱有斜插的上昂和下昂, 除起与华拱一样出跳承重的作用外, 尚可调节出跳与跳高的关系; 而在清式斗栱中, 宋式两类斜昂皆被水平昂所替代, 与翘作用相同, 只是做出相应的造型而已. 宋式斗栱有 “计心造” 和 “偷心造”, “重栱造” 和 “单栱造” 之分, 而清式斗栱全为 “计心造” 和 “重栱造”.

3.1.2 宋式斗栱研究

为研究宋式斗栱的受力性能, 高大峰等 [22−23] 和张鹏程等 [24-25] 按照《营造法式》的规定制作了 6 个宋式二等材计心造八铺作斗栱最下两跳的缩尺 (1 : 3.52) 模型, 通过竖向单调加载试验和水平低周反复加载试验, 得到了斗栱模型在竖向载荷和水平载荷作用下的破坏模式和载荷 – 位移曲线. 基于试验结果分析, 高大峰等 [22−23,26] 和魏安国等 [27] 提出了斗栱在竖向载荷作用下的载荷 – 位移计算模型、质量 – 弹簧 – 阻尼器模型、水平力 – 位移的恢复力模型等, 并进行了斗栱竖向地震传递系数和水平向耗能性能的计算, 结果表明斗栱在两个方向上都具有很好的抗震性能. 同时, 魏安国 [27] 和冯建霖等 [28] 提出了铺作层的力学模型, 并进行了水平方向的振动分析及随机破坏分析. 魏安国 [27] 通过 ANSYS 对试验进行了有限元模拟再现, 并比较了齐心斗对斗栱竖向承载性能的影响. 李海娜等 [29] 和吴磊等 [30] 通过静力分析, 得到了试验斗栱的竖向极限承载力, 并预测了各主要构件的静力破坏模式.

其实, 正如上文所述斗栱是铺作层的关键节点, 那么铺作层的整体受力性能是如何的呢? 隋龑等 [31-33] 通过单朵、两朵和四朵宋式斗栱模型的水平低周反复加载试验, 得到了单铺作、两铺作和四铺作共同受力的破坏模式、水平滞回曲线及骨架曲线. 结果表明, 铺作层的变形以水平滑移为主, 而这种摩擦滑移具有耗能、隔振作用, 是古建筑木结构具有良好抗震性能的重要原因; 试验模型的滞回曲线呈平行四边形, 滞回面积饱满, 说明铺作层具有良好的滞回耗能特性. 最后由试验数据拟合得到了铺作层的线性强化弹塑性恢复力模型.

应县木塔用斗栱的数量 (480 朵) 及形式 (54 种) 之多, 堪称为斗栱博物馆, 其斗栱也属于宋式斗栱 [12]. 王珏 [34] 和陈韦等 [35-36] 通过应县木塔柱头、补间和转角 3 类铺作 1 : 3 缩尺模型的竖向单调加载试验和水平低周循环加载试验, 得到了 3 类斗栱在竖向载荷和水平载荷下的破坏模式、载荷 – 位移曲线及耗能性能, 并提出了两种空间牛腿模型来简化模拟 3 类斗栱. 肖碧勇 [37] 和王智华 [38] 分别通过足尺模型试验和有限元方法, 研究木塔第二明层外槽柱头铺作和第三明层内槽转角铺作在真实荷重下的传力机理. 陈志勇 [12] 以应县木塔典型的第二暗层外槽柱头铺作为研究对象, 制作了其 1 : 3.4 缩尺 (木塔栱构件以 17 mm 为基本模数) 模型, 通过栱枋端自由的竖向单调加载试验和栱枋长度截至反弯点且端面为铰接的水平低周反复加载试验, 得到了木塔典型斗栱在竖向和水平向载荷作用下的传力路径、破坏模式、受力性能及耗能性能等; 同时, 通过 ABAQUS 建立了具有实际几何结构、木材复杂本构关系、动力摩擦接触关系的斗栱精细化有限元模型, 对斗栱在竖向载荷和水平载荷作用下的受力性能进行分析, 并建立了应县木塔典型斗栱的梁 – 短柱单元组模型以分析斗栱的传力路径及受力性能 [12,39-42].

3.1.3 清式斗栱研究

赵均海等 [43-44] 和俞茂鋐等 [45-49] 通过 3 类清式斗栱 (廊柱头科、平座平身科和平身科) 1 : 3 缩尺模型的水平向重复加载和动力特性试验, 得到了斗栱模型在翘方向和栱方向的水平重复载荷 – 位移曲线, 频响函数曲线, 固有频率和阻尼比等自振动力特性, 并研究了边界条件和竖向载荷等因素对其动力特性的影响. 方东平等 [50-53] 提出了清式斗栱的三维半刚性节点单元模型, 可根据整体结构的自振频率使用 Simplex 方法确定模型的参数范围. 此半刚性模型为古木结构整体受力性能有限元分析提供了理论基础.

3.1.4 日式斗栱研究

与赵均海等 [43-44] 的研究相似, 津和佑子等 [54]、金惠园等 [55] 和藤田香织等 [56] 对日本寺院堂和塔类的斗栱模型进行了水平向静、动力试验, 研究了其滞回曲线、自振频率及恢复力等特性. Tsuwa 等 [57] 对 3 个构造相同但尺寸呈 (2/3) : 1 : (3/2) 比例关系的斗栱模型进行了微振动和自由振动试验, 研究了其动力特性与尺寸的关系, 并利用 Merikomi 木构件横纹刚度理论计算了斗栱模型的水平刚度. Kyuke 等 [58] 对足尺斗栱模型进行了振动台试验, 得到的斗栱刚度与静力加载试验刚度吻合, 并讨论了斗栱各构件的转动及滑移变形.

3.2 柱架节点

除斗栱外, 古木建筑尚有另外两个显著特点: (1) 梁柱之间采用榫卯连接, 这种连接不同于现代的钢结构和钢筋混凝土结构梁柱节点, 其具有比刚接变形大而比铰接变形小的特点, 是介于刚接和铰接之间的半刚性连接, 不仅有承受拉压的能力, 而且还具有一定的抗弯和抗扭能力; (2) 柱脚大多直接搁置在石础上, 俗称 “浮摆式” 平面接触,

在水平地震和竖向地震共同作用下, 则可能产生滑移.

3.2.1　梁柱节点研究

古木结构梁柱节点的榫卯连接主要有燕尾榫和直榫两种. 其中前者常见于宋式古木结构；后者多为清式古木结构所采用, 且根据榫是否穿透卯构件又分为透榫和半榫.

高大峰等 [26,59-60]、姚侃等 [61]、赵鸿铁等 [62-63] 和隋龑等 [64-65] 通过宋式木构架 1 : 3.52 缩尺模型的水平反复加载试验, 研究了典型燕尾榫和透榫榫卯连接的半刚性连接特性及其刚度退化规律. 根据试验获得的榫卯连接弯矩–转角滞回曲线及骨架曲线, 拟合得两类典型榫卯连接的弯矩–转角关系方程和恢复力模型. 杨艳华等 [66] 结合宋式和清式榫卯特点制作了十字形梁柱榫卯连接模型, 通过试验分析了替木尺寸、榫头尺寸和卯孔对柱的削弱程度等因素对连接刚度的影响规律. 陈志勇等 [12,67] 和武国芳 [68] 通过 4 个应县木塔典型角柱和平柱梁柱节点 1 : 3.4 缩尺模型水平低周反复加载试验和有限元模拟, 研究了其破坏模式、抗弯受力性能及耗能性能等. 方东平等 [50,69-70] 和赵均海等 [71] 对斗栱三维半刚性节点单元模型进行了简化, 并应用到榫卯连接模拟中. 董益平等 [72-74] 和仓盛等 [75] 将梁柱榫卯连接简化为空间两节点虚拟弹簧元或虚拟梁元, 通过建立连接的三维实体模型和接触应力分析确定了弹簧单元的刚度.

King 等 [76] 通过榫卯节点人工老化试验, 研究自然老化后节点受力性能的退化情况. 结果表明, 半刚性榫卯节点经人工老化处理后, 其抗弯刚度有的明显下降. Chang 等 [77] 采用 Fractional 试验方法对榫卯连接进行了足尺试验, 并结合有限元分析研究了榫卯节点的抗弯受力性能. Shanks 等 [78] 对传统的橡树燕尾榫卯连接的抗拉、抗弯和抗剪刚度及极限承载力进行了试验研究. Han 等 [79] 对韩国传统木结构榫卯连接模型进行试验研究, 结果表明榫卯的刚度和屈服载荷随榫接触面的增加而提高. William 等 [80] 在各种设有暗销的榫卯节点试验研究的基础上, 提出了榫卯节点的计算模型.

3.2.2　柱脚节点研究

单层古代木结构的柱脚, 除结构体量较小时采用 “管脚榫” 插入柱础石杯口嵌固外, 一般情况如殿堂和厅堂等大型建筑常将柱直接搁置在柱础石上, 称为 “柱础石式” [12]. 张鹏程 [81] 通过 12 组摩擦试验, 测得木柱与石础间的摩擦系数约为 0.5. 姚侃等 [82] 对宋式木构架 1 : 3.52 缩尺模型进行了摩擦滑移隔震试验, 结果表明柱与柱础间因摩擦滑移而具有隔震耗能性能; 建立了柱与柱础的摩擦滑移隔震模型, 并运用随机振动理论 FPK 方程 (Fokker–Planck equation) 提出了柱与柱础间滑移量在白噪声过程作用下的计算公式.

对于多层古木结构, 如楼阁或塔等, 上层柱架常通过 “叉柱造式” 或 “骑栿式” 插在其下方铺作层上 [12]. 陈志勇 [12] 和武国芳 [68] 通过 4 个应县木塔典型角柱和平柱柱脚节点 1 : 3.4 缩尺模型水平低周反复加载试验和有限元模拟, 研究了其破坏模式、抗弯受力性能及耗能性能等.

4　木构架受力性能

古建筑木结构的结构形式一般分抬梁式、穿斗式、密梁平顶式和井干式 4 种. 宋代的殿堂式和厅堂式, 以及清代的 “大木大式”(相当于宋厅堂式) 和 “大木小式”(又称柱梁作) 均属抬梁式; 穿斗式一直应用在长江流域和东南、西南地区, 而密梁平顶式常见于西藏、青海和新疆等地；井干式出现在商代, 现今只在东北林区和西南山区使用. 除此之外, 尚有一种宋代名为 “簇角梁” 而清代称之 “尖角” 的亭式结构, 主要用于园林.

4.1　结构概念体系分析

陈志勇 [12] 应用工程力学的观点, 分析了古建筑木结构特有 “侧脚” 和 “生起” 的结构作用. 侧脚使柱架的阑额和普拍枋在竖向载荷下产生轴压力, 使梁柱节点密实接触并提高了梁柱节点的抗弯性能; 在水平载荷作用下, 侧脚优化了柱架的传力路径, 降低柱架的不利内力、整体侧移变形及其引起的重力二阶效应; 侧脚还提高柱架的抗倾覆性能. 在竖向载荷作用下, 生起提高了平柱梁柱节点的抗弯性能; 与侧脚类似, 生起进一步优化了柱架水平载荷的传力路径, 减小了柱架侧移及其引起的重力二阶效应; 同时, 生起降低了倾覆力矩, 也提高了柱架的抗倾覆性能. 认为古建筑木结构的大 (重) 屋顶与 “侧脚” 和 “生起” 相辅相成, 是结构趋于稳定和安全的重要构造措施.

薛建阳等 [83]、张鹏程等 [84]、高大峰等 [85]、姚侃等 [86−88]、于倬云等 [89]、庄裕光等 [90]、陈华等 [91]、苗春生等 [92]、李豪邦 [93]、葛安祥等 [94]、李蓉等 [95]、谢启芳等 [96]、古今元 [97] 和程浩 [98]

等, 从柱网布置合理、木构件柔韧性好、榫卯连接的斗栱和梁柱节点的耗能性能强、浮摆式柱脚节点隔震性能优越、重屋顶和侧脚及生起有利于结构稳定等方面, 分析了古木建筑 “刚柔相济、以柔克刚、滑移隔震、耗能减震” 的抗震思想. 吴玉敏等 [99] 以金厢斗底槽殿堂式建筑为例, 分析其 “高位不倒翁” 与 “柔颈” 两种现象, 并认为是古木结构具有优良抗震性能的主要因素.

Kataoka 等 [100] 对日本传统木屋盖结构 Hanegi 进行了结构体系和受力分析. Maeda [101] 探讨了日本传统木结构特有的木柱动力倾覆机理, 发现其抗倾覆能力取决于屋盖的重量.

4.2 结构动力特性

结构动力特性是反映结构本身所固有的阵型、频率和阻尼等特性, 由其结构形式、质量分布、结构刚度、材料性质和连接构造等因素决定, 与外载荷无关, 是研究结构抗震、抗风或抵御其他动载荷性能的基础.

李铁英等 [102-104]、温瑞智等 [105] 和车爱兰 [106] 等先后通过环境振动试验测试了应县木塔在小振动水平下的自振频率、振型和阻尼比等动力特性. 李铁英等 [107] 使用脉动法对蓟县独乐寺观音阁进行了动力特性实测. 俞茂鋐等 [50,70,108-109] 对西安北门箭楼进行了有无屋面载荷的现场脉动试验, 比较了箭楼在两种工况下的自振频率及振型等动力特性. Uchida 等 [110]、Kawai 等 [111-112]、Minowa 等 [113]、Ono 等 [114] 和 Kameyama 等 [115] 通过场地微振动和人工锤击激励试验对日本多座古木塔 (如 Hokekyo-Ji Temple, Itsukushima Shrine 和 Myojo-Ji Temple 等) 和庙宇 (如 Yusho-Ji 和 Shinpuku-Ji 等) 的动力特性进行了测试. 以上测试结果表明, 古木结构建筑的自振周期与建筑高度呈比例提高, 第一阶自振频率都少于 1.5 Hz, 故一般不会与地面震动发生共振, 这也是古木结构抗震性能好的原因之一.

4.3 结构受力性能试验研究

张鹏程等 [116]、高大峰等 [117]、薛建阳等 [118]、葛鸿鹏等 [119] 和隋龑等 [120] 对二等材宫殿当心间 1/3.52 缩尺模型进行了振动台试验, 结果表明柱根滑移对柱架有隔震作用, 斗栱和梁柱节点具有很好的耗能性能, 对柱架的耗能和减震起主要作用. 张文芳等 [121] 通过应县木塔二层 1 : 10 缩尺模型的低周反复加载试验, 获得了木塔的恢复力模型. 俞茂鋐等 [50,70,108-109] 使用木材和有机玻璃分别制作了西安北门箭楼 1 : 10 缩尺模型, 由拟静力试验得到了箭楼结构的滞回特性、刚度和延伸性以及榫卯和斗栱的工作性能. Chang 等 [122-123] 和 Chen 等 [124] 通过足尺试验比较了木料和土等填充物对剪力墙抗侧刚度的影响, 由静力推覆试验分析了具有剪力墙的传统木结构的抗震性能, 经水平低周循环加载试验研究了传统木结构剪力墙破坏后的修复加固方法.

Seo等 [125]、Fujita等 [126]、Nakaji等 [127]、Maneno 等 [128] 和 Kawai 等 [129] 分别通过水平单调加载、水平低周循环加载和振动台试验, 对日韩古代木结构建筑进行了受力性能和抗震性能研究. Ono 等 [114]、Tsuguomi [130], Shimizu 等 [131] 和 Shirayama 等 [132] 分别通过试验研究了 Nuki(一种梁), Laddery(一种梁), Sashigamoi(一种大截面梁), Kokabe(挂墙), 柱以及传统趾榫 (stub tenon) 和全榫 (full tenon) 连接对日本古建筑受力性能和抗震性能的影响.

李铁英等 [133] 和魏剑伟等 [134] 对应县木塔 1 : 100 缩尺模型进行了风洞试验, 得到了木塔各层各面的风压体型系数. 孟昭博等 [135] 通过对西安钟楼进行现场动力响应测试和建立其木结构振动分析模型, 依据《古建筑防工业振动技术规范》GB/T 50452-2008 进行了行驶车辆对钟楼木结构微振动的影响评估. 结果表明, 车流量和车速较大时段木结构柱顶的振动速度超过了 GB/T 50452-2008 振动速度的限值, 并提出了相应的减振措施.

4.4 结构受力性能计算分析

基于层模型的理论计算和以简化模型或精细化模型为对象的有限元分析, 是古建筑木结构整体受力性能的主要研究方法.

4.4.1 层模型

陈平等 [136] 基于西安钟楼的结构特点建立其单质点结构振动模型, 并进行了抗震能力分析. 李铁英等 [102-104,137] 根据应县木塔层间模型 (比例为 1 : 10) 的拟动力试验, 建立了木塔四线型非线性恢复力模型, 通过能量等效方法和传递函数计算分析了木塔各层的耗能性能及动力响应. 魏剑伟等 [138] 和李铁英等 [139] 根据随机振动理论, 运用风反应谱的概念和振型分解法进行了木塔的风振分析, 与风压静力作用对比获得了风振系数.

Uchida 等 [110]、Kawai 等 [111]、Kameyama

等 [115]、Fujita 等 [140]、Chiba 等 [141] 和 Kitamor 等 [142] 使用层模型 (vertical lumped mass system model) 分别对多座日本古木塔 (如 Hokekyo-Ji Temple, Itsukushima Shrine 和 Myojo-Ji Temple 等) 和木结构庙宇 (如 Yusho-Ji 和 Shinpuku-Ji 等) 进行了动力特性和地震响应分析.

4.4.2　有限元模型

高大峰等 [59-60]、薛建阳等 [118]、熊仲明等 [143]、苏军等 [144]、高大峰等 [145-146]、董益平等 [72-73]、竺润祥等 [74]、仓盛等 [75]、曲慧等 [147]、王林安等 [148]、赵均海等 [149-150]、方东平等 [50-53]、丁磊等 [151]、周乾等 [152-155] 和李小伟等 [156-157] 将斗栱和榫卯节点简化为变刚度单元, 从而建立了典型宋式木构件、西安东岳庙大殿、宁波保国寺大殿、蓬莱阁、西安东门城楼木结构、西安鼓楼、四川广元市觉苑寺逍遥楼、故宫英华殿和典型清代九檩大式殿堂有限元模型, 并通过动力特性和地震响应分析, 研究了古代木结构的耗能减震性能. Tanahashi 等 [158] 通过将梁柱节点简化为 Elasto-Plastic Pasternak 模型 (EPM), 建立了日本传统古木结构有限元模型, 从而进行了静、动力模拟分析.

王珏 [34]、车爱兰 [106]、杜雷鸣等 [159]、张舵等 [160] 和常婧雅 [161] 分别建立了应县木塔刚接、铰接或半刚性简化模型, 并进行动力特性、弹性反应谱和弹塑性时程分析. 陈志勇 [12] 在对木塔进行全面的结构调查和结构解读及木塔典型节点性能试验与分析的基础上, 结合 ABAQUS 建立木塔结构整体精细化有限元模型, 进行静力受力性能和地震响应分析, 研究了木塔竖向和水平向载荷的传力路径、各层抗侧移刚度等, 并确认第二明层为木塔最薄弱环节.

刘妍等 [162] 通过将铺作简化为斜撑与桁架结构, 建立了蓟县独乐寺山门和观音阁有限元模型, 并进行了重力传力路径分析和动力特性分析. 孟昭博等 [163-164] 建立了西安钟楼上部木结构–台基–地基三维有限元模型, 基于黏–弹性人工边界条件利用振型分解反应谱法进行了地震响应分析, 结果表明在对钟楼结构进行地震反应分析时必须考虑土–结构相互作用.

5　勘查、评估和加固

5.1　残损调查及分析

现场目测检查和工程测量手段是古木结构残损勘查的主要手段. 隋坤等 [165] 运用工程测量方法对应县木塔的变形状态进行了调查, 发现木塔整体向东北向倾斜且伴有复杂的顺时针扭曲, 并推测木塔的损坏是由历史地震活动所造成的. 张建丽等 [166]、魏德敏等 [167] 和李铁英等 [168] 对木材材性老化、木塔变形等残损现象进行了现场测量勘查. 闫晨曦等 [169] 和王平等 [170] 分别对天水市南北宅子、伏羲庙、玉泉观和山海关镇东楼等古木建筑进行了生物 (腐朽、虫蛀等) 危害状况勘察、检测及病因分析.

同时, 也有采用如三维应力波和 X 射线等现代技术对古木结构进行残损调查. 李华等 [171] 将三维应力波断层扫描仪和阻力仪应用于古建筑木结构的勘查中. Saito 等 [172] 基于 X 射线成像、X 射线衍射及热分析技术, 以 Fukushoji 寺庙修建和修缮木材为对象, 研究了虫蛀和木材老化化学反应等对木材造成的损伤作用.

5.2　安全评估

位于山西省应县、建于公元 1056 年、高度为 65.86 m 的应县木塔, 由于材料受化学、物理、生物等的侵蚀, 结构受地震、大风、竖向载荷及人为损坏等, 面临修缮与加固. 李铁英等 [137,173] 和陈志勇 [12] 结合现场调查、典型节点试验、木塔模型试验和应县木塔精细化有限元分析结果, 提出了评估标准并对木塔现状进行了安全评估.

李瑜等 [16]、瞿伟廉等 [17] 和王雪亮等 [18] 结合腐朽模型和可靠度理论, 推导得恒载长期作用下木材残余强度的衰减模型, 并由此对古建筑木结构构件及结构的剩余寿命进行了估算. Uchida 等 [174] 提出了基于自振特性的古建筑木结构抗震受力性能诊断准则和评估方法, 并应用到 5 幢寺庙和 10 栋房子评估中.

5.3　修缮加固

古木结构的常见残损问题, 可按《古建筑木结构维护与加固技术规范》GB/T50165-92 的规定进行修缮加固处理, 如朱跃武等 [175] 结合工程实例, 根据 GB/T50165-92 进行了木质古建筑房屋的检测、评定和加固处理.

对于古建筑木结构重要的部位和构件, Shiratori 等 [176] 研究了木楔子对榫卯节点增强作用; 周乾 [177−178] 和陈志勇 [12] 对钢箍加固木柱和梁柱节点进行了试验和有限元模拟对比研究; 杨勇新等 [179]、杨会峰等 [180]、庄荣忠等 [181]、武萍等 [182]

和罗才松等 [183] 提出了采用碳纤维和玻璃纤维布加固方法. 葛鸿鹏等 [119]、谢启芳等 [184]、于业栓等 [185] 和赵鸿铁等 [186] 通过宋式二等材殿堂式木构架的缩尺 (1 : 3.52) 模型的水平低周反复加载对比试验, 发现碳纤维布和扁钢加固后木构架强度和刚度增加, 而耗能能力却有所降低; 扁钢加固适合于强度或刚度明显不足且较隐蔽的榫卯节点, 而碳纤维布加固适合于破损程度较小的榫卯节点.

陈志勇 [12] 分析了木塔结构的薄弱点在其整体和局部倾斜, 抗扭刚度、明层柱架和暗层铺作层抗侧移刚度低, 局部抗侧移刚度低以及节点横纹屈服强度低等, 并提出相应的加固增强设想和大屋顶 "移载" 方案以减轻地震对木塔的作用.

6 结 语

本文从古木结构的木材力学性能、关键节点 (斗栱、梁柱节点和柱脚节点) 受力机理、木构架整体受力性能研究、结构残损勘查、安全评估及修缮加固等方面, 总结了近 30 年来结构学者对古代木结构建筑的研究进展, 为今后进行古建筑结构研究提供参考. 至今虽有西安城楼, 应县木塔和蓟县独乐寺等少数古木结构受到重视和研究, 然而我国尚存许多独具匠心的古建筑木结构, 如采用拼合构件的宋代宁波保国寺、现存规模最大、殿柱最巨的明长陵祾恩殿, 构思最巧妙大胆的悬空寺和真武阁等 [187], 正有待学者们作进一步的研究, 从而更好地认识我国古建筑木结构的特点, 并传承中华民族精妙的建筑结构理念和施工制作工艺.

参 考 文 献

1 梁思成. 《营造法式》注释 · 卷上. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983
2 梁思成. 清工部《工程做法则例》图解. 北京: 清华大学出版社, 2006
3 刘敦祯. 中国古代建筑史. 第 2 版. 北京: 中过建筑工业出版社, 2005
4 王天. 古代木结构经历初探. 北京: 科学出版社, 1991
5 中国科学院自然科学史研究所. 中国古代建筑技术史. 北京: 科学出版社, 1985
6 倪士珠, 李源哲. 古建筑木结构用材的树种调查及其主要材性的树种分析. 四川建筑科学研究, 1994, 1: 11-14
7 陈国营. 古建筑旧木材材质变化及影响建筑形变的研究. 古建园林技术, 2003, 3: 49-52
8 曹旗. 故宫古建筑木构件物理力学性质的变异性研究: [硕士论文]. 北京: 北京林业大学, 2005
9 王晓欢. 古建筑旧木材材性变化及其无损检测研究. [硕士论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006
10 徐明刚, 邱洪兴. 古建筑木结构老化问题研究新思路. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(2): 96-98
11 Calderoni C, De Matteis G, Giubileo C, et al. Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements. *Engineering Structures*, 2010, 32: 442-448
12 陈志勇. 应县木塔典型节点及结构受力性能研究: [博士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011
13 陈志勇, 祝恩淳, 潘景龙. 复杂应力状态下木材力学性能的数值模拟. 计算力学学报, 2011, 28(4): 629-634
14 尹思慈. 木材学. 北京: 中国林业出版社, 2000
15 樊承谋, 张盛东, 陈松来, 等. 木结构基本原理. 北京: 中国工业出版社, 2008
16 李瑜, 瞿伟廉, 李百浩. 古建筑木构件基于累积损伤的剩余寿命评估. 武汉理工大学学报, 2008, 30(8): 173-177
17 瞿伟廉, 王雪亮. 基于 DOL 强度衰减模型的古建筑桁架的剩余寿命预测. 华中科技大学学报 (城市科学版), 2008, 25(3): 1-4
18 Wang X L, Qu W L. Reliability-based service life prediction of an ancient timber structure. In: International Conference on Management and Service Science, Wuhan, 2009
19 祁英涛. 中国古代建筑的保护与维修. 北京: 文物出版社, 1986
20 李学武. 斗栱. 山西建筑, 2002, 28(6): 16-17
21 李诫. 营造法式. 北京: 中国书店, 2008
22 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古代木结构斗栱竖向承载力的试验研究. 世界地震工程, 2003, 19(3): 56-61
23 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳. 中国木结构古建筑的结构及其抗震性能研究. 北京: 科学出版社, 2008
24 张鹏程, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 斗栱结构功能试验研究. 世界地震工程, 2003, 19(1): 102-106
25 张鹏程, 赵鸿铁. 中国古代建筑抗震. 北京: 地震出版社, 2007
26 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳. 木结构古建筑中斗栱与榫卯节点的抗震性能 — 试验研究. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 58-64
27 魏国安. 古建筑木结构斗栱的力学性能及 ANSYS 分析: [硕士论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007
28 冯建霖, 张海彦, 王欢, 等. 古建筑大木作铺作层的振动分析. 四川建筑, 2009, 29(4): 132-133
29 李海娜, 翁薇. 古建筑木结构单铺作静力分析. 陕西建筑, 2008, 152: 10-12
30 吴磊, 张海彦, 王俊峰, 等. 古建木构斗栱的破坏分析及承载力评定. 四川建筑, 2009, 29(4): 178-179
31 隋龑, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建木构斗栱侧向刚度的试验研究. 世界地震工程, 2009, 25(4): 145-147
32 Sui Y, Zhao H T, Xue J Y, et al. Experimental research on the later stiffness of ancient wooden Dougong. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.*, (*Natural Science Edition*), 2009, 41(5): 668-671
33 隋龑, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建木构件铺作侧向刚度的试验研究. 工程力学, 2010, 27(3): 74-78
34 王珏. 应县木塔扭、倾变形张拉复位的数字化模拟和安全性评价: [硕士论文]. 扬州: 扬州大学, 2008
35 陈韦. 应县木塔斗栱力学性能及简化分析模型的研究: [硕士论文]. 扬州: 扬州大学, 2010
36 袁建力, 陈韦, 王珏, 等. 应县木塔斗栱模型试验研究. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 66-72
37 肖碧勇. 应县木塔斗栱解读及二层明层柱头斗栱传力机理研究: [硕士论文]. 长沙: 湖南大学, 2010
38 王智华. 应县木塔斗栱调查与力学性能分析: [硕士论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010
39 Zhu E C, Chen Z Y, Pan J L, et al. Finite element modelling of Dougong brackets of Yingxian wood pagoda. In: 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, 2010
40 钟永. 应县木塔斗栱的力学性能分析研究: [硕士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
41 Chen Z Y, Lu W Z, Zhu E C, et al. Structural performance of Dou-Gong brackets of Yingxian wood pagoda

under vertical load - a refined finite element modelling. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(4): 95-100
42 Zhu E C, Chen Z Y, Pan J L, et al. Structural performance of Dou-Gong brackets of Yingxian wood pagoda under vertical loading. In: 12th World Conference on Timber Engineering, Auckland, 2012
43 Zhao J H, Yu M H, Sun J J, et al. The testing of dynamic behavior of a wooden structure "Dougong". In: 3rd International Symposium on Test and Measurement (ISTM/99), Xi'an, 1999
44 赵均海, 俞茂鋐, 杨松岩, 等. 中国古建筑木结构斗栱的动力实验研究. 实验力学, 1999, 14(1): 106-112
45 俞茂鋐. 古建筑结构研究的历史性、艺术性和科学性 — 第十三届全国结构工程学术会议特邀报告. 工程力学, 2004(增): 190-213
46 俞茂鋐, Oda Y, 方东平, 等. 中国古建筑结构力学研究进展. 力学进展, 2006, 36(1): 43-63
47 俞茂鋐, 张学彬, 方东平. 西安古城墙研究 — 建筑结构和抗震. 西安: 西安交通大学出版社, 1993
48 Yu M H, Oda Y, Fang D P, et al. Advances in structural mechanics of ancient architectures. *Front. Archit. Civ. Eng.*, China, 2008, 2(1): 1-25
49 俞茂鋐, 王源, 俞涛, 等. 西安古城墙和钟鼓楼: 历史、艺术和科学. 西安: 西安交通大学出版社, 2011
50 方东平, 俞茂鋐. 木结构古建筑的结构与保护研究 — 第九届全国结构工程学术会议特邀报告. 工程力学, 2000(增): 001-018
51 方东平, 俞茂鋐, 宫本裕, 等. 木结构古建筑结构特性的计算研究. 工程力学, 2001, 18(1): 137-144
52 Fang D P, Yu M H, Miyamoto Y, et al. Ancient Chinese timber architecture II: Dynamic characteristics. *J. Struct. Engrg, ASCE*, 2001, 127(11): 1358-1364
53 李天顺, 胡富民, 向德, 等. 西安长乐门城楼修缮工程报告. 北京: 文物出版社, 2001
54 津和佑子, 藤田香织, 金惠园. 传统木结构建筑构件的动力载荷试验 (第一部分) 微动测定与自由振动试验. 见: 日本建筑学会大会学术讲演, 东京, 2004
55 金惠园, 藤田香织, 津和佑子. 传统木结构建筑构件的动力载荷试验 (第二部分) 载荷变形关系与变形特征. 见: 日本建筑学会大会学术讲演, 东京, 2004
56 藤田香织, 金惠园, 津和佑子. 传统木结构建筑构件的动力载荷试验 (第三部分) 恢复力特性与刚度的讨论. 见: 日本建筑学会大会学术讲演, 东京, 2004
57 Tsuwa I, Koshihara M, Fujita K, et al. A study on the size effect of bracket complexes used in traditional timber structures on the vibration characteristics. In: 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, 2008
58 Kyuke H, Kusunoki T, Yamaoto M, et al. Shaking table tests of 'MASUGUMI' used in traditional wooden architectures. In: 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, 2008
59 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古建木构架在水平反复载荷作用下的试验研究. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2002, 34(4): 317-324
60 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古建木构架在水平反复载荷作用下变形及内力特征. 世界地震工程, 2003, 19(1): 9-14
61 姚侃, 赵鸿铁, 葛鸿鹏. 古建木结构榫卯连接特性的试验研究. 工程力学, 2006, 23(10): 168-173
62 赵鸿铁, 张海彦, 薛建阳, 等. 古建筑木结构燕尾榫节点刚度分析. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2009, 41(4): 450-454
63 赵鸿铁, 董春盈, 薛建阳, 等. 古建筑木结构透榫节点特性试验分析. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2010, 42(3): 315-318
64 隋龑, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建筑木结构直榫和燕尾榫节点试验研究. 世界地震工程, 2010, 26(2): 88-92
65 姚侃, 赵鸿铁, 葛鸿鹏. 古建木结构榫卯连接特性的试验研究. 工程力学, 2006(10): 168-173
66 杨艳华, 王俊鑫, 徐彬. 古木建筑榫卯连接 M-θ 相关曲线模型研究. 昆明理工大学学报 (理工版), 2009, 34(1): 72-76
67 Chen Z Y, Zhu E C, Pan J L, et al. Structural performance of typical beam-column joints in Yingxian wood pagoda — an experimental study. In: 13th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies, Changsha, 2011
68 武国芳. 应县木塔榫卯节点承载性能分析: [硕士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学. 2011
69 方东平, 俞茂鋐, 宫本裕, 等. 木结构古建筑结构特性的计算研究. 工程力学, 2001(2): 137-144
70 Fang D P, Iwasaki S, Yu M H, et al. Ancient Chinese timber architecture I: Experimental study. *J. Struct. Engrg., ASCE*, 2001(11): 1348-1357
71 赵均海, 俞茂鋐, 高大峰, 等. 中国古代木结构的弹塑性有限元分析. 西安建筑科技大学学报, 1999, 31(2): 131-133
72 董益平, 竺润祥, 任茶仙. 宁波保国寺大殿静力分析. 见: 第十一届全国工程建设计算机应用学术会议, 温州, 2002
73 董益平, 竺润祥, 俞茂鋐, 等. 宁波保国寺大殿北倾原因浅析. 文物保护与考古科学, 2003, 15(4): 1-5
74 竺润祥, 董益平, 任茶仙, 等. 榫卯连接的古木结构静力分析. 见: 第十二届全国结构工程学术会议, 桂林, 2003
75 仓盛, 竺润祥, 任茶仙, 等. 榫卯连接的古木结构动力分析. 宁波大学学报 (理工版), 2004, 17(3): 332-335
76 King W S, Yen J Y, Yen Y N. Joint characteristics of traditional Chinese wooden frames. *Engineering Structures*, 1996, 18(8): 635-644
77 Chang W S, Hsu M F, Chen C J. Estimating rotational stiffness of timber joints by using fractional factorial experiments combined with computer simulation. In: 8th World Conference on Timber Engineering, Lahti, 2004
78 Shanks J, Walker P. Testing of traditional connections in green oak carpentry. In: 8th World Conference on Timber Engineering. Lahti, 2004
79 Han S R, Lee J J. Mechanical performance of Korean traditional wooden building of the column-girder tenon-joint by joint type. In: 9th World Conference on Timber Engineering, Portland, 2006
80 William M, Bulleit L, Bogue S, et al. Behavior and modelling of wood-pegged timber frames. *J. Struct. Engrg., ASCE*, 1999, 125(1): 3-9
81 张鹏程. 中国古代木构建筑结构及其抗震发展研究: [博士论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003
82 姚侃, 赵鸿铁. 木构古建筑柱与柱础的摩擦滑移隔振机理研究. 工程力学, 2006, 23(8): 127-131
83 薛建阳, 张鹏程, 赵鸿铁. 古建木结构抗震机理的探讨. 西安建筑科技大学学报, 2000, 32(1): 8-11
84 张鹏程, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古建筑的防震思想. 世界地震工程, 2001, 17(4): 1-6
85 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳. 中国古代大木作结构抗震构造研究. 世界地震工程, 2004, 20(1): 100-104
86 Yao K, Zhao H T. Study on the seismic characteristics of Chinese historic timber buildings. In: 9th World Conference on Timber Engineering, Portlan, 2006
87 姚侃, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 木结构古建筑的抗震性能分析. 建筑科学, 2007, 23(7): 47-50
88 姚侃, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建筑木构架的整体稳定性分析. 世界地震工程, 2008, 24(1): 73-76
89 于倬云, 周苏琴. 中国古建筑抗震性能初探. 故宫博物院院刊, 1999, 2: 1-8
90 庄裕光, 唐明媚. 以柔克刚 — 传统木构建筑的抗震特性. 四川文物, 2009, 2: 88-90

91 陈华. 中国古代建筑抗震“奥秘”. 世界标准信息, 2008, 9: 20-25
92 苗春生, 赵慧杰. 关于中国古建筑抗震性能的分析. 济源职业技术学院学报, 2009, 8(2): 122-124
93 李豪邦. 对中国古建力学的思考. 工业建筑, 2009(增): 1534-1541
94 葛安祥, 谢剑, 杨建江, 等. 房屋类木结构古建筑抗震性能分析. 建筑结构, 2010, 40(增): 37-40
95 李蓉, 邓云叶. 湘西南木结构民居的结构特性分析. 邵阳学院学报 (自然科学版), 2008, 5(1): 78-81
96 谢启芳, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 汶川地震中木结构建筑震害分析与思考. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2008, 40(5): 658-661
97 古今元. 以柔克刚 — 都江堰二王庙李冰殿抗震机理研究. 华中建筑, 2008, 26(11): 71-73
98 程浩. 木结构建筑在汶川农居重建工程中的应用前景 — 以古代木结构建筑抗震检验为例. 科技创新导报, 2009, 24: 4-5
99 吴玉敏, 张景堂, 陈祖坪. 殿堂型建筑木构架体系的构造方法与抗震机理. 古建园林技术, 1996, 4: 32-36
100 Kataoka Y, Itoh H, Inoue S. Investigation of fuzzily arranged ”Hanegi” in traditional wooden building. In: 6th World Conference on Timber Engineering, Whistler, 2000
101 Maeda T. Column rocking behavior of traditional wooden buildings in Japan. In: 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, 2008
102 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 等. 应县木塔实体结构的动态特性试验与分析. 工程力学, 2005, 22(1): 141-146
103 李铁英, 魏剑伟, 李世温, 等. 应县木塔扭转振动特性和地面强迫振动试验与分析. 见: 第 16 届全国结构工程学术会议, 太原, 2007
104 李铁英, 严旭, 魏剑伟, 等. 应县释迦塔扭转振动特性和地面周期性强迫振动试验与分析. 太原理工大学学报, 2008, 39(5): 519-522
105 温瑞智, 周正华, 毛国滨, 等. 应先木塔环境振动试验. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4): 136-140
106 车爱兰. 应县木结构古塔动力特性及地震响应分析: [博士后论文]. 上海: 上海交通大学, 2006
107 李铁英, 魏剑伟, 李世温. 独乐寺观音阁动力特性实测分析. 太原理工大学学报, 2002, 33(4): 430-432
108 方东平, 俞茂铉, 宫本裕, 等. 木结构古建筑结构特性的实验研究. 工程力学, 2000, 17(2): 75-83
109 俞茂铉, 刘晓东, 方东平, 等. 西安北门箭楼静力与动力特性的试验研究. 西安交通大学学报, 1991, 25(3): 55-62
110 Uchida A, Minowa C, Kawai N, et al. Seismic performance of Japanese wooden pagodas. In: 8th World Conference on Timber Engineering, Lahti, 2004
111 Kawai N, Minowa C, Maekawa H, et al. Dynamic characteristics of Japanese pre-modern five-storied pagodas. In: 9th World Conference on Timber Engineering, Portlan, 2006
112 Kawai N, Minowa C, Hanazato T, et al. Micro tremor measurements and vibration models of Japanese pagodas. In: 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, 2008
113 Minowa C, Kwawai N, Maekwaw H, et al. Observation of wind and earthquake responses of national heritage five story wooden pagoda. In: 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, 2010
114 Ono T, Kameyama Y, Sato A, et al. Experiments on seismic safety of traditional timber temples part 1: results of horizontal loading test. In: 9th World Conference on Timber Engineering, Portlan, 2006
115 Kameyama Y, Ono T, Sato A, et al. Experiments on seismic safety of traditional timber temples part 2: results of vibration test. In: 9th World Conference on Timber Engineering, Portlan, 2006
116 张鹏程, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古代大木作结构振动台试验研究. 世界地震工程, 2002, 18(4): 35-41
117 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古代木构建筑抗震机理及抗震加固效果的试验研究. 世界地震工程, 2003, 19(2): 1-10
118 薛建阳, 赵鸿铁, 张鹏程. 中国古代木结构模型的振动台试验研究. 土木工程学报, 2004, 37(6): 7-11
119 葛鸿鹏, 周鹏, 伍凯, 等. 古建木结构榫卯节点减震作用研究. 建筑结构, 2010, 40(增): 30-36
120 隋龚, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古代殿堂木结构建筑模型振动台试验研究. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 35-40
121 张文芳, 李世温. 一类斗栱木结构恢复力特性的模型试验研究. 东南大学学报, 1997, 27(增): 65-70
122 Chang W S, Hsu M F, Mao L. Full-scale experiment on traditional timber frames of Taiwan. In: 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, 2008
123 Chang W S, Hsu M F. Full-scale experiment on reinforced Taiwanese traditional timber frames. In: 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, 2010
124 Chen W J, Chou S H, Hsu M F, et al. Experimental study on traditional mud shear wall in-filled in timber frames. In: 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, 2008
125 Seo J M, Choi I K, Lee J R. Static and cyclic behavior of wooden frames with tension joints under lateral load. *J. Struct. Engrg., ASEC*, 1999, 125(3): 344-349
126 Fujita K. Shaking table test and earthquake response monitoring of traditional Japanese timber pagoda. In: 9th World Conference on Timber Engineering, Portland, 2006
127 Nakaji H, Suzuki Y, Gotou M, et al. Seismic performance evaluation of traditional wooden house by alternate cyclic loading test. In: 9th World Conference on Timber Engineering, Portlan, 2006
128 Maeno M, Suzuki Y, Saito S. Moment resistance of traditional wooden structure. In: 8th World Conference on Timber Engineering, Lahti, 2004
129 Kawai N, Isoda H, Nakagawa T, et al. Shake table tests on frames with hanging walls used in Japanese traditional wood houses. In: 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, 2010
130 Tsuguomi H. Study on lateral strength of wooden frame structure. In: 8th World Conference on Timber Engineering, Lahti, 2004
131 Shimizu H, Iwamoto I, Ymada M, et al. Seismic performance evaluation of penetrating tie beam with large cross-section by full-scale shaking tests. In: 9th World Conference on Timber Engineering, Portland, 2006
132 Shirayama A, Suzuki Y, Sasaki T, et al. Seismic performance evaluation of traditional wooden structures reinforced with horizontal member by static and dynamic tests. In: 9th World Conference on Timber Engineering, Portlan, 2006
133 李铁英, 张善元, 李世温. 古木塔风压模型试验分析. 实验力学, 2002, 17(3): 354-362
134 魏剑伟, 李铁英. 古木建筑风洞模型试验研究. 工程力学, 2002(增): 262-265
135 孟昭博, 袁俊, 吴敏哲. 行驶车辆对西安钟楼木结构微振动影响的试验研究. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2009, 41(4): 512-517
136 陈平, 姚谦峰, 赵冬. 西安钟楼抗震能力分析. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30(3): 277-279
137 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 等. 木结构双参数地震损坏准则及应县木塔地震反应评价. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 91-98
138 魏剑伟, 李铁英. 古木塔风作用动力分析. 工程力学, 2002 (增): 430-433

139 李铁英，魏剑伟. 应县木塔风作用振动分析. 力学与实践, 2003, 25(2): 40-42
140 Fujita K, Chiba K, Kawai N, et al. Earthquake response analysis of traditional Japanese timber pagoda. In: 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, 2008
141 Chiba K, Fujita K. Evaluation of structural performance of existing traditional timber structures in Japan by microtremor measurements. In: 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, 2010
142 Kitamor A, Jung K, Hassel I, et al. Mechanical analysis of lateral loading behaviour on Japanese traditional frame structure depending on the vertical load. In: 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, 2010
143 熊仲明, 韦俊, 权吉柱, 等. 古建筑殿堂型结构耗能减震性能的有限元分析研究. 振动与冲击, 2008, 27(12): 139-142
144 苏军，高大峰. 中国木结构古建筑抗震性能的研究. 西北地震学报, 2008, 30(3): 239-244
145 高大峰, 刘经伟, 张锁柱, 等. 西安东岳庙大殿动力特性分析. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(2): 36-38
146 高大峰, 刘经伟, 李小珠. 西安东岳庙大殿动力特性分析. 见: 第四届全国防震减灾工程学术研讨会, 福州, 2009
147 曲慧, 肖碧勇, 王林安. 蓬莱阁木构架承载力有限元分析. 烟台大学学报 (自然科学与工程版), 2010, 23(1): 59-63
148 Wang L A, Hou W D, Xiao B Y, et al. FE-based strength analysis of Penglai pavilion. In: 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, 2010
149 赵均海, 俞茂鋐, 高大峰, 等. 中国古代木结构的弹塑性有限元分析. 西安建筑科技大学学报, 1999, 31(2): 131-133
150 赵均海, 俞茂鋐, 杨松岩, 等. 中国古代木结构有限元动力分析. 土木工程学报, 2000, 33(1): 32-35
151 丁磊, 王志骞, 俞茂鋐. 西安鼓楼木结构的动力特性及地震反应分析. 西安交通大学学报, 2003, 37(9): 986-988
152 周乾, 闫维明, 杨小森, 等. 汶川地震古建筑轻度震害研究. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(5): 101-107
153 Zhou Q, Yan W M. Dynamic character and a seismic capacity of Chinese ancient buildings. In: 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, Sanya, 2009
154 周乾, 闫维明, 周锡元, 等. 中国古建筑动力特性及地震分析. 北京工业大学学报, 2010, 36(1): 13-17
155 周乾, 闫维明, 周宏宇. 中国古建筑木结构随机地震响应分析. 武汉理工大学学报, 2010, 32(9): 115-118
156 李小伟, 赵均海, 张玉芬, 等. 清代九檩大式殿堂弹塑性动力性能分析. 建筑结构, 2009, 39(8): 80-83
157 李小伟, 赵均海, 孙姗姗, 等. 侧脚与斗栱对清代九檩大式殿堂动力性能的影响. 世界地震工程, 2009, 25(3): 145-149
158 Tanahashi H, Suzuki Y. Static and dynamic loading tests of traditional wooden frames. In: 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, 2010
159 杜雷鸣, 李海旺, 薛飞, 等. 应县木塔抗震性能研究. 土木工程学报, 2010, 43(增): 363-370
160 张舵, 卢芳云. 木结构古塔的动力特性分析. 工程力学, 2004, 21(1): 81-86
161 常婧雅. 应县木塔有限元模拟: [硕士论文]. 北京: 北京工业大学, 2009
162 刘妍, 杨军. 独乐寺辽代建筑结构分析及计算模型简化. 东南大学学报 (自然科学版), 2007, 37(5): 887-891
163 孟昭博, 袁俊, 吴敏哲, 等. 古建筑高台基对地震反应的影响. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2008, 40(6): 835-840
164 孟昭博, 吴敏哲, 胡卫兵, 等. 考虑土–结构相互作用的西安钟楼地震反应分析. 世界地震工程, 2008, 24(4): 125-129
165 隋坤, 郭文生, 陈国顺. 用工程测量方法研究应县木塔损坏的原因. 山西地震, 1998, 3(4): 50-53
166 张建丽, 李铁英. 应县木塔内槽柱残损分析. 科技情报开发与经济, 2007, 17(9): 159-160
167 魏德敏, 李世温. 应县木塔残损特征的分析研究. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2002, 30(11): 119-121
168 李铁英, 秦慧敏. 应县木塔现状结构残损分析及修缮探讨. 工程力学, 2005, 22(增): 199-212
169 闫晨曦, 黄伟. 天水市古建筑的生物危害状况调查分析. 安徽农业科学, 2009, 37(32): 132-134
170 王平, 姜笑梅, 秦特夫. 木材防腐技术在山海关镇东楼木结构中的应用. 古建园林技术, 2009, 04: 59-61
171 李华, 刘秀英, 陈允适, 等. 古建筑木结构的无损检测新技术. 木材工业, 2009, 23(2): 37-39
172 Saito Y, Shida S, Ohta M, et al. Deterioration of rafter in historic building of fukushoji-temple. In: 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, 2008
173 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 等. 高层古建筑木结构 — 应县木塔现状结构评价. 土木工程学报, 2005, 38(2): 51-58
174 Uchida A, Kawai N, Maekawa H. Diagnosis method for seismic performance of Japanese traditional timber buildings. In: 6th World Conference on Timber Engineering, Whistler, 2000
175 朱跃武, 张平, 周宇翔, 等. 某木质古建筑的检测与修缮. 工程质量, 2008, 12(A): 9-12
176 Shiratori T, Komatsu K, Leijten A. Modified traditional Japanese timber joint system with retrofitting abilities. *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, 15(7): 1036-1056
177 周乾, 闫维明, 李振宝, 等. 古建筑木结构加固方法研究. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(1): 84-90
178 周乾, 闫维明. 古建筑榫卯节点抗震加固数值模拟研究. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(3): 23-27
179 杨勇新, 庄荣忠. FRP 与木材的界面粘结性能研究现状. 玻璃钢/复合材料, 2008, 6: 53-56
180 杨会峰, 刘伟庆, 邵劲松, 等. FRP 加固木梁的受弯性能研究. 建筑材料学报, 2008, 11(5): 591-597
181 庄荣忠, 杨勇新. FRP 加固木结构的研究和应用现状. 四川建筑科学研究, 2008, 34(5): 89-92
182 武萍, 于峰. FRP 加固木结构研究综述. 低温建筑技术, 2009, 12: 36-38
183 罗才松, 黄奕辉. 古建筑木结构的加固维修方法述评. 福建建筑, 2005, 96(6): 196-198
184 谢启芳, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古建筑木结构榫卯节点加固的试验研究. 土木工程学报, 2008, 41(1): 28-34
185 于业栓, 薛建阳, 赵鸿铁. 碳纤维布及扁钢加固古建筑榫卯节点抗震性能试验研究. 世界地震工程, 2008, 24(3): 112-117
186 赵鸿铁, 薛自波, 薛建阳, 等. 古建筑木结构构架加固试验研究. 世界地震工程, 2010, 26(2): 72-76
187 潘景龙, 祝恩淳. 木结构设计原理. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009

A REVIEW ON STRUCTURAL MECHANICS OF CHINESE ANCIENT WOOD STRUCTURES*

CHEN Zhiyong[1,2] ZHU Enchun[1,†] PAN Jinglong[1]

[1] School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology Harbin 150090 China

[2] Faculty of Forestry and Environmental Management, University of New Brunswick, Fredericton E3B 5A3, Canada

Abstract Ancient wood architectures are valuable heritage of ancient culture of China and most important part of Chinese civilization. As time elapses, the protection of these priceless historical relics is increasingly urgent. Survey on ancient wood structures in the last thirty years was summarized and reviewed in four aspects as follows: (a) mechanical properties of aging wood; (b) structural behaviour of key joints, such as Dou-Gong bracket, beam-column joint, and column-base joint; (c) structural performance of column frame; and (d) survey and evaluation of structural damage and corresponding reinforcement.

Keywords ancient wood structure, dou-gong bracket, beam-column joint, column-base joint, tenon-mortise connection, structural performance

祝恩淳, 男, 生于 1963 年, 教授、博士生导师. 1984 年本科毕业于哈尔滨建筑工程学院工业与民用建筑专业; 1989 年研究生毕业于哈尔滨建筑工程学院结构工程专业, 获硕士学位; 1995 年博士生毕业于哈尔滨建筑大学, 获博士学位; 2003 年获英国布莱顿大学博士学位. 1984 年始历任哈尔滨建筑工程学院和哈尔滨建筑大学助教、讲师、副教授. 自 2004 年 1 月始任哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 并任哈尔滨工业大学木结构研究中心主任, 建设部木结构产品检测中心主任, 从事木结构研究. 主要社会兼职有: 中国建筑学会建筑结构分会木结构专业委员会秘书长; 住建部建筑结构标准化技术委员会委员; 中国工程建设标准化协会木材及复合材结构专业委员会副主任; 国际标准化组织 ISO 木结构技术委员会 TC165 委员. 曾先后在英国剑桥大学 (1998 年 8 月 -1999 年 8 月)、布莱顿大学 (2001 年 1 月 -2003 年 12 月)、澳大利亚 Swinbourne 大学 (2000 年 7-12 月) 和加拿大不列颠哥伦比亚大学 (2007 年 1-4 月) 工作、学习.

* The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (50878067).

† E-mail: e.c.zhu@hit.edu.cn