

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.063



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



古建筑木结构的承载及抗震机理

杨庆山

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

摘要:从古建筑木结构的材料劣化损伤、材性衰退、柱脚节点、榫卯节点缝隙与性能、斗拱性能与构架性能等几个方面探讨古建筑木结构的承载机理。从宏观和微观尺度分析古建木构材料性能,建立构件层次的古木材性时变模型;提出木柱摇摆-抬升的力学模型及精细化分析方法;建立榫卯节点缝隙概率分布模型,构建榫卯节点模型及分析方法;分析单朵斗拱力学性能及斗拱层的协同作用;通过摇摆木构架的试验和理论分析总结节点摩擦耗能、重屋盖高位储能、构架长周期摇摆释能的综合抗震机理。

关键词:古建筑木结构;材性劣化;柱脚节点;缝隙统计;榫卯节点;斗拱;摇摆构架

中图分类号:TU366.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)02-0001-09

Load-bearing and aseismic mechanism of traditional wooden structures

YANG Qingshan

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: This paper discussed the bearing mechanism of ancient wooden structure from the aspects of damage and degradation of material, column foot joints, gaps and performance of mortise-tenon joints, performances of Dou-gong and wooden frame. A time-varying model of the wood component was proposed based on the macroscopic and microscopic analysis of the wood properties. Then the mechanical model and the fine analysis method of the wooden column with rocking-uplift behavior were established. Also, the probability distribution model of gaps of mortise-tenon joint was established, the model and analysis method of mortise-tenon joints were constructed. And the mechanical properties of single Dou-gong and the synergistic effect of Dou-gong layer were analyzed. Finally, the comprehensive seismic mechanism including the friction energy dissipation of the joints, gravitational potential energy storage of the heavy roof and the energy release of the frame by long period rocking were summarized through the experiment and theoretical analysis of the rocking wooden frame.

Keywords: traditional wooden buildings; material degradation; column foot joints; statistics of gaps; mortise-tenon joints; Dou-gong connection; rocking frame

收稿日期:2021-02-07

基金项目:国家自然科学基金(51338001)

作者简介:杨庆山(1968-),男,教授,博士生导师,主要从事结构风工程和古建筑木结构研究, E-mail: qshyang@cqu.edu.cn.

Received:2020-02-07

Foundation items:National Natural Science Foundation of China (No. 51338001)

Author brief: YANG Qingshan (1968-), professor, doctoral supervisor, main research interests: structural wind engineering and traditional wooden structures, E-mail: qshyang@cqu.edu.cn.

木结构是中国古建筑的主要结构形式,已延续了上千年,是中国传统文化的重要载体。古建筑在自然和人为侵害下,存在各类病害和残损,主要包括材质退化、节点与构件残损乃至整体性能劣化,其抗震安全问题尤为突出。

近30年来,众多学者^[1-6]进行了古建筑木结构理论、试验等方面的研究,促进了古建筑保护的发展。但古旧木材劣化导致其强度难以准确定量;木构古建构造形制各异,节点类型繁多和缝隙广布、受力性能复杂;振动台试验表明其具有良好的抗震性能^[5],而拟静力试验却显示节点耗能能力低、构件弹性变形小^[6-7],这说明古建木构的承载和抗震机理尚未明晰揭示。

在国家自然科学基金重点项目的支持下,笔者与项目组成员一起开展了几个方面的工作:1)定量研究了木材材性劣化和构件强度退化机理;2)分析了柱脚节点承载能力和刚度变化对结构振动特征的影响;3)获取了榫卯缝隙特征,研究了考虑缝隙影响的榫卯节点力学性能;4)开展了斗拱受力性能的数值模拟,揭示了斗拱层协同作用机制;5)分析了木构架的摇摆特征、抗侧力机理和耗能机制。

1 古旧木材劣化

1.1 古旧木材性能

古旧木构件材性常因表面碳化、风雨和雪周期性侵蚀等导致有效承载截面减小,同时,由于长期荷载下的蠕变与损伤累积,导致古旧木材力学性能发生时效退化,引起木构件失效(见图1)。

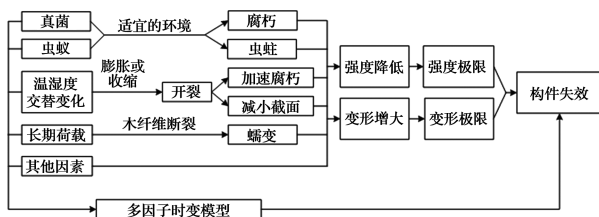


图1 木构件的失效机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of failure mechanism of wood components

木材腐朽与木材细胞壁结构的变化有着不可分割的联系,细胞壁化学成分的降解能反映在其宏观力学性能上。木质素降解显著影响木材拉伸强度,综纤维素含量的降低明显降低了木材的抗弯强度,各化学组分在细胞壁中的存留方式均对其力学性能和保存程度产生影响。与完好木材(图2(a))相比,

古旧木材具缘纹孔在不同程度上发生退化,具缘纹孔由于腐蚀导致开口扩大(图2(b)),裂纹通过具缘纹孔产生并呈对角线方向扩展到具缘纹孔周围的细胞壁(图2(c)、(d))^[8]。通过这种方式可以从根本上认知木材性能劣化,并为提出有针对性的保护措施奠定基础。

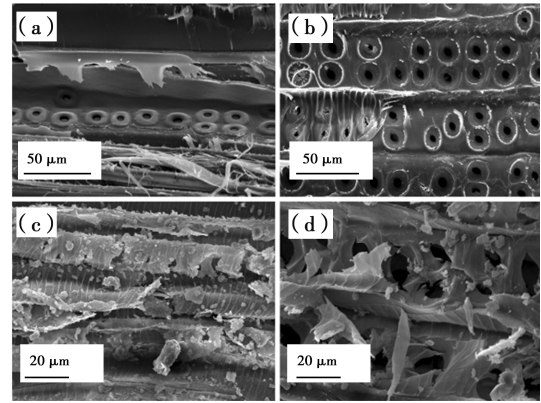


图2 完好及古旧木材样品 SEM图^[8]

Fig. 2 SEM images of good and aged wood^[8]

在已有研究中,基于材性力学试验的古木材性能数据均具有离散性较大、相关性不强的现象^[9-12]。为此,根据木材的胞体特征及承载情况,建立了可以考虑古木材性时变性能的古木构件强度退化模型^[13],强度退化随时间变化关系如式(1)所示。

$$\varphi_m(t) = \frac{1}{B} \ln(1 + (1 - \alpha(t))(\exp B - 1)) \cdot \left(\frac{C_0 - 1}{t_0^2} t^2 + 1 \right) \quad (1)$$

式中: B 为通过试验拟合出的累积损伤模型中的参数^[14]; $\alpha(t)$ 为木构件的损伤随时间变化的函数,其取值范围为 $[0, 1]$,当 $\alpha=0$ 时,表示构件无损伤,当 $\alpha=1$ 时,表示构件破坏; C_0 为基准年 t_0 时的构件强度校正因子。

据式(1)可以得到木构件残余强度预测结果,该结果可以作为评估古建木构力学强度指标的参考值(图3)。将上述时变模型应用于西藏某典型古建筑木结构分析,获得其梁、柱构件服役寿命的均值分别为366、355 a,符合试验所用旧材为已经服役350 a后出现问题而被维修替换下来的实际情况(图4)。研究结果还表明,木构件所受的应力比越大,残余强度随时间变化的退化速率就越快,大部分情况下木构件是因蠕变导致的变形过大而发生破坏,而此时木材的强度并没有完全丧失^[15-16]。

1.2 古旧试件性能

目前,标准试验均采用清材^[9,17-18],且在统计的

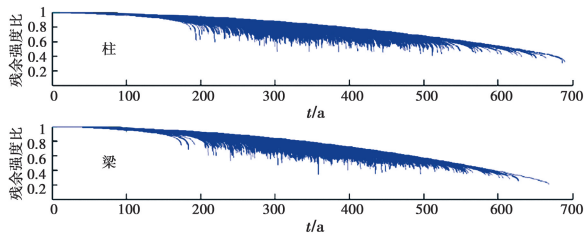


图 3 古木构件残余强度比的退化规律

Fig. 3 Degradation law of residual strength ratio of ancient timber components

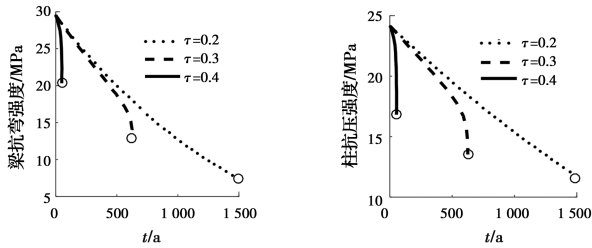


图 4 梁、柱强度退化时变模型

Fig. 4 The time-varying model of strength degradation of beam and column

文献中大约有一半的情况古旧木材的强度大于新木材的强度^[19],不能反映古木构件的实际性能。这是由于木材心材与边材力学性能有差异,对木材横截面沿径向不同位置截取的小试样,其物理力学性质变化情况不同。

为了更加准确地反映古建木构件的强度,通过测试带缺陷小试件的强度,并结合统计学方法来评估古旧木构件的强度性能,同时,分析了抗压强度比 γ_c 与古建筑年限 t 、带缺陷小试件相对圆心的取样位置 λ (图 5)的相关性,如图 6(a)所示。根据已有试验数据拟合的关系如图 6(b)所示,该结果随着古木材试件的增多可不断精细化^[19]。

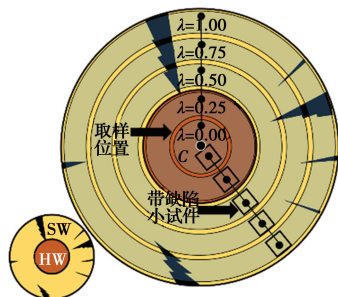
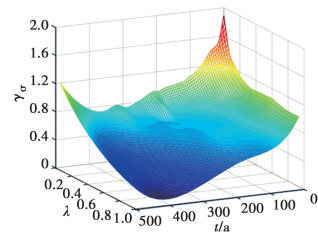


图 5 取样位置

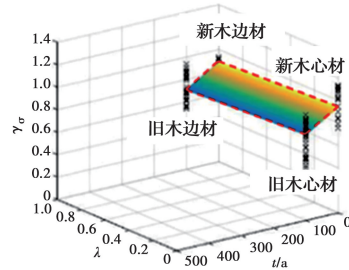
Fig. 5 Sampling position

2 柱脚节点

古建筑木柱浮搁础石上,传递竖向和水平荷载



(a) 示意图



(b) 试验结果图

图 6 抗压强度比与服务年限和取样位置的关系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the relationship among the compressive strength ratio, age of the timber member and sampling position

但不承受轴向拉力,明显区别于现代结构的柱与基础的连接方式;水平荷载反复作用下,柱脚会发生转动导致木柱出现左右摇摆和抬升是古建筑木结构的明显构造特征。木柱转角较小时,柱脚与础石的接触部位较广,其初始转动刚度最大;随着转角增大,柱脚受压面由全截面受压变为部分截面受压,支持力作用点由柱底中心向柱脚边缘偏移,恢复弯矩增加,当柱脚受压面集中在柱脚边缘时,受压面的变化不再引起恢复弯矩的增加,转动刚度逐渐降低(图 7)^[20-23]。同时,在柱摇摆过程中,柱脚残余变形也能引起转动刚度的降低。

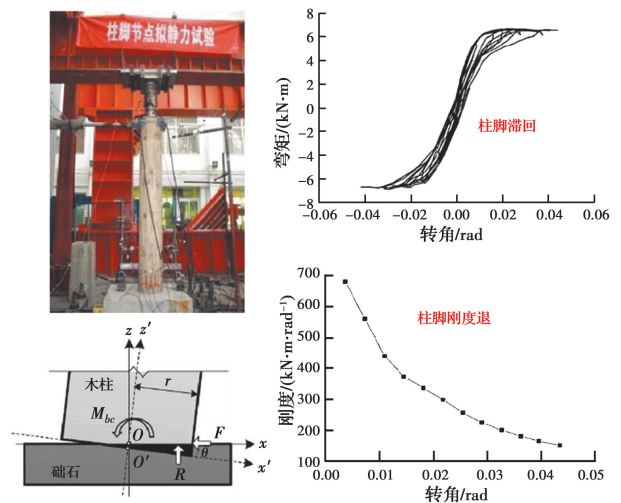


图 7 柱脚节点拟静力试验

Fig. 7 Quasi-static test for column foot joint

针对柱脚在水平荷载作用下的运动状态,提出通过梁单元刚度 K_1 、转动弹簧单元刚度 K_2 ^[24]和几何刚度 K_3 模拟木柱摇摆行为的方法,如式(2)和图 8 所示。

$$K = K_1 + K_2 + K_3 \quad (2)$$

通过简化的几何模型(图 9(a))及建立的梁单元模型(图 9(b))分析了柱脚抬升过程中结构的能量转化关系,梁单元模型和实体模型获得的水平力-位移关系基本吻合(图 9(c)),摇摆过程中,由于木柱与上下结构接触位置的改变,水平力做功基本都转化成了上部结构的重力势能(图 9(d)),而在梁单元

模型中,水平力做功储存在虚拟弹簧的弹性势能中,这部分能量等效为重力势能。

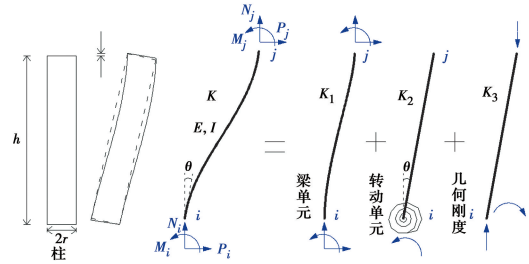


图 8 木柱的有限元模拟方法

Fig. 8 Finite element simulation method of wooden column

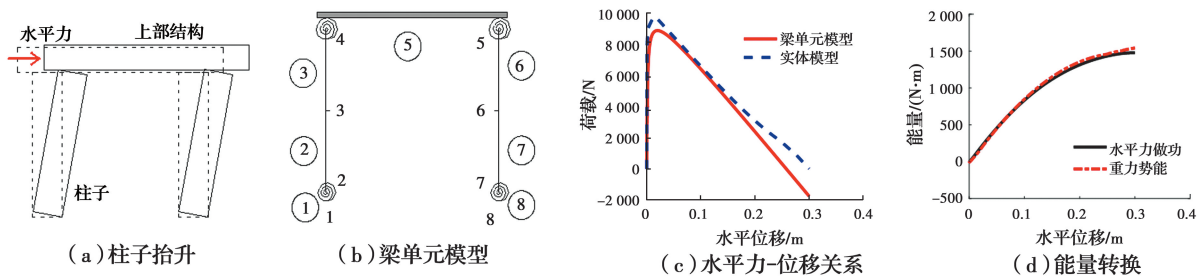


图 9 柱脚抬升的能量转换机理

Fig. 9 Energy conversion mechanism when column foot uplift

3 榫卯节点

榫卯节点是古建木构梁柱之间典型的连接方式,是中国古建木构中最显著的特征之一。榫卯节点的受力性能对柱架层甚至整体结构有重要的影响,其破坏会导致木构倾斜甚至整体倒塌。此外,由于榫卯节点构造初始误差以及长久服役过程中遭受自然灾害和木材干缩、徐变、腐蚀、塑性变形等影响,榫头和卯口之间普遍存在缝隙,显著影响结构变形、承载及服役性能,在古建筑木构结构分析时应作为一个主要参数对待。统计调查是获得榫卯缝隙特征的基本手段。

3.1 榫卯缝隙统计特征

以传统木结构中使用最广且研究最多的直榫和燕尾榫为对象,通过榫卯间缝隙(图 10(a))大量样本采集,现场量测共获取 5 组总计 1 478 个缝隙值,包括古建筑直榫、燕尾榫水平方向、竖直方向缝隙值^[25]。5 组缝隙值的频率分布直方图均呈现相近的左偏态,筛选 9 种典型分布对 5 组缝隙值进行 PPCC 拟合优度检验,峰度、偏度计算结果接近的缝隙值均以 Weibull 分布最优。拟合的水平 and 竖向缝隙的概率密度函数如式(3)、式(4)所示。

$$f(x) = 0.413 \left(\frac{x}{2.687} \right)^{0.110} e^{-\left(\frac{x}{2.687} \right)^{1.110}} \quad (3)$$

$$f(x) = 0.199 \left(\frac{x}{5.153} \right)^{0.028} e^{-\left(\frac{x}{5.153} \right)^{1.028}} \quad (4)$$

其水平缝隙的频率分布直方图与 Weibull 分布概率密度函数曲线如图 10(b)所示。建立的榫卯节点缝隙分布模型为榫卯模型的缝隙取值提供了重要参考。随着调查数据的不断丰富,缝隙统计模型精度也将不断提高。

3.2 考虑缝隙的榫卯节点性能

榫卯是榫头和卯口直接搭接而成的节点,榫头和卯口在外力作用下存在相互挤压变形,当相互挤压的界面存在较大剪切作用时,榫头和卯口在接触界面就会发生相对摩擦滑移过程,榫卯节点的滑移和挤压过程使得节点存在摩擦耗能和塑性耗能。在考虑节点缝隙情况下,榫头和卯口的挤压变形以及界面的受力如图 11 所示。由于木材是正交各向异性材料,通常是榫头的横纹与卯口的顺纹接触,其挤压变形主要发生在横纹受压处。通过分析节点的力-位移关系可以得到节点的力学模型,其他类型的榫卯节点模型均可以通过类似的原理获得。榫卯的挤压-滑移力学性能使得节点具有良好的变形能力,同时也有一定的承载能力。从图 12 可以看出,缝隙对榫卯节点弯矩-转角关系影响很大,会明显削弱节点

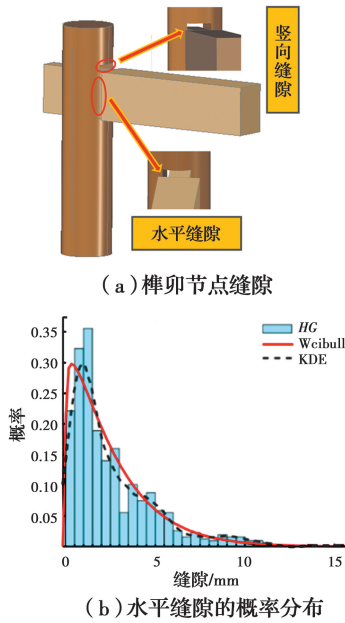


图 10 榫卯节点缝隙及水平缝隙的概率分布
Fig. 10 Gaps of mortise-tenon joints and distribution probability density function curve of horizontal gaps

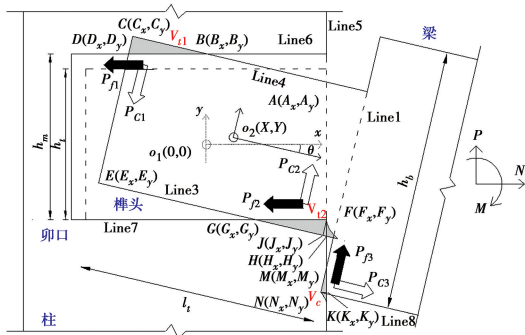


图 11 榫卯节点横纹受压过程
Fig. 11 Compressive deformation perpendicular to grain between mortise and tenon

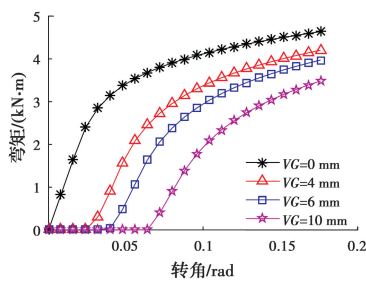


图 12 考虑缝隙影响的节点弯矩转角关系
Fig. 12 The effect of gaps on the relationship of bending moment and angle

的承载能力。此类节点模型与梁单元组合(图 13),通过推导混合单元的 6×6 刚度矩阵,可与非关键部位的梁单元刚度组装成木构的整体刚度矩阵进行木构体系的建模分析^[26]。

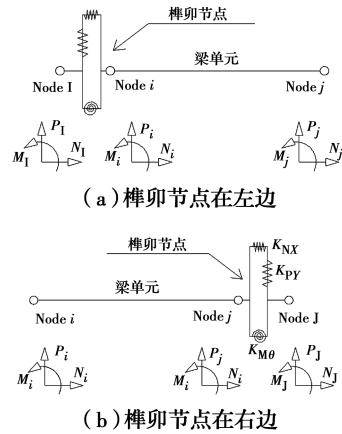


图 13 包含榫卯节点的混合单元
Fig. 13 Hybrid finite elements including mortise-tenon joints

4 斗拱与铺作层

斗拱是中国传统建筑的特有构件,既能传递荷载,又具有装饰功能;与方栿共同构成斗拱层。不同学者通过试验研究或数值分析初探了其力学性能。

4.1 试验研究

在水平加载下,斗拱变形表现为整体偏心受压转动和构件间相对滑移的组合^[27],侧移刚度、转动刚度随竖向荷载的增大而增大。随水平荷载的多次重复,斗拱的加、卸载刚度退化,水平荷载作用下其耗能量及耗能能力均随水平位移的增大而增大(图 14)。斗拱中多构件的相互挤压、嵌压、滑动摩擦等具有较好的耗能性能,体现于相对饱满的滞回曲线中。四朵斗拱模型的低周反复荷载试验(图 15(a))结果表明^[28],模型的滞回曲线呈平行四边形(图 15(b)),滞回面积饱满,说明斗拱层具有良好的耗能作用。

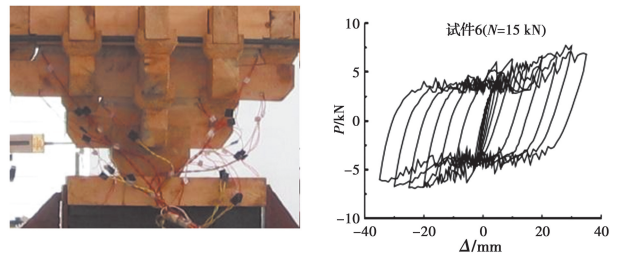


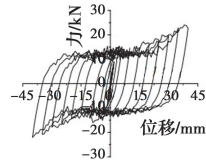
图 14 单体斗拱拟静力加载试验及滞回曲线
Fig. 14 Static load test and hysteresis curve of single Dou-gong connection

4.2 理论分析

斗拱中的栌斗与额枋通过馒头榫连接,在榫卯节点和柱脚节点的基础上进行斗拱理论模型的分析,根据斗拱的构造和受力特点,一跨(平行进深)方向加载和一椽(平行面阔)方向加载的模型可分别简化为两层或三层弹簧单元模型,如图 16 所示。并分



(a) 四朵斗拱试验模型

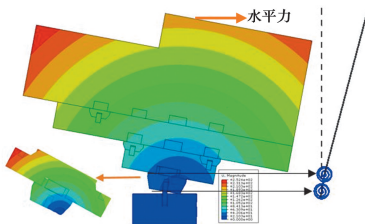


(b) 滞回曲线

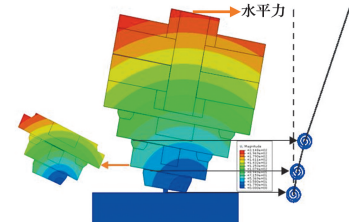
图 15 四朵斗拱试验模型和滞回曲线^[27]

Fig. 15 Test model of four Dou-gongs and hysteretic loops

别建立对应的实体单元有限元模型,简化弹簧模型与实体单元模型的荷载-位移曲线如图 17 所示,以单朵斗拱的理论模型为基础可进行多朵斗拱以及斗拱层的理论分析。



(a) 一跨(平行进深)方向加载



(b) 一榀(平行面阔)方向加载

图 16 实体单元模型与简化弹簧模型

Fig. 16 Solid element models and simplified models of springs

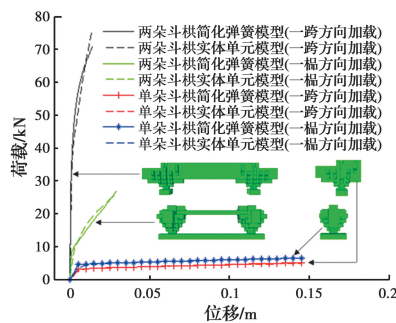


图 17 斗拱模型的荷载位移曲线

Fig. 17 The load-displacement relationship of Dou-gongs

两朵斗拱在水平荷载作用下的变形特征如图 18 所示,对比图 18 与图 16(a)、(b)可知,在水平荷载作用下,单朵斗拱各层构件的相对转动方向一致;而两朵斗拱由于相互作用,其转动行为与单朵斗拱明显不同,下部构件的相对转动方向与上部构件的相对转动方向相反。同时,由图 17 可知,两朵斗拱模型在较大的荷载作用下只发生较小的位移,表明与单朵斗拱相比,两朵斗拱协同工作更类似刚体。由此可见,多朵斗拱的协调作用使得其与单朵斗拱的受力特征有较大的差别,因此,整个斗拱层的理论模型仍需要进一步研究。由于不同朝代斗拱构造差异较大,所以,有必要开展不同朝代斗拱层的理论模型研究。

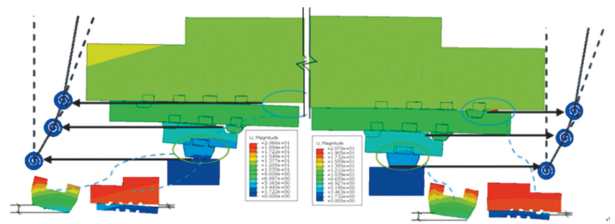


图 18 两朵斗拱各层间相对转动

Fig. 18 The relative rotation of two Dou-gongs

5 木构架承载与抗震机理

古建筑木构架中柱脚和榫卯的协同作用的使得木构架主要呈现摇摆的运动特征。含梁柱及斗拱的古建筑动力及拟静力试验表明^[29-31],木结构的恢复力在变形较小时主要来自柱摇摆,随着结构水平变形的增大,榫卯节点的作用越来越显著;竖向荷载明显影响柱摇摆的恢复力,柱以上构件类似刚体运动。

5.1 木构架抗侧力试验

按《营造法式》制作了含梁柱构架和斗拱层的木结构 1:2 缩尺模型^[32]和对应的足尺模型拟静力试验(图 19)^[33]。随着水平荷载的增加,柱脚一侧逐渐抬升,柱头产生明显偏压,水平变形集中于柱的倾斜,斗拱层近乎刚体在平动;卸载过程中构架逐渐自动复位,各部位无明显残留变形。



图 19 木构架拟静力试验

Fig. 19 Quasi-static test device for wooden frame

与斗拱饱满的滞回曲线不同,木构架的滞回曲

线呈现狭长带状的 S 形(图 20(a)),整体结构耗能能力弱;但木构架最大层间位移角达 1/22 后,仍能自行恢复到接近初始位置,表现出很强的变形能力;木构架侧移刚度随竖向荷载的增大而增大、随水平位移的增大而减小;相同竖向荷载工况下,前后两次加载过程中木构架侧向刚度下降幅度可达 36%(图 20(b))。

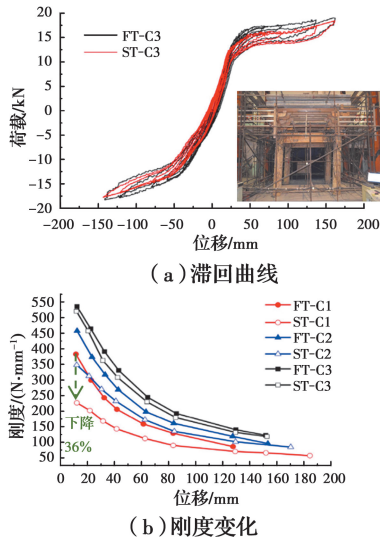


图 20 木构架的滞回曲线和刚度退化

Fig. 20 Hysteresis curves and degradation of stiffness of wooden frames

木构架在水平荷载作用下会产生竖向位移,即柱头及以上结构抬升明显(图 21(a))。水平荷载输入木结构中的能量转化为弹性应变能、滞回耗能和

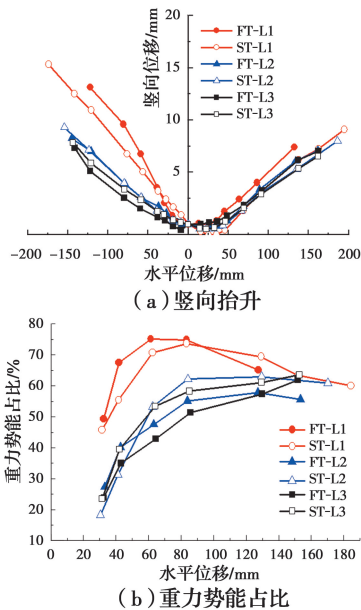


图 21 竖向抬升和重力势能占比

Fig. 21 The uplift of roof and proportion of gravitational potential energy

屋盖抬升获得的重力势能。变形初期,输入的能量主要转化为滞回耗能和弹性应变能;当水平位移较大时,总输入能量的 50%将转化为重力势能(图 21(b))。这种能量转化机制可使输入到结构中的地震能量得到缓慢释放和消耗,减小构件损坏,是古建筑木结构耗能能力弱但抗震性能好的重要原因^[6-7]。

5.2 构架摇摆性能的理论分析

通过对柱脚节点、榫卯节点和斗拱构件的组装,可以建立木构架的摇摆分析模型,如图 22 所示。关键节点部位采用弹簧单元模型模拟,其他部分则使用梁单元来模拟,并采用 MATLAB 自编程序进行建模分析。

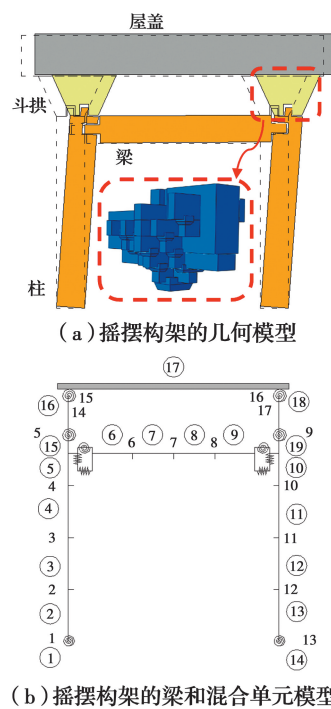


图 22 摇摆构架模型

Fig. 22 The model of rocking frame

在地震作用下,弹性阶段木构摇摆过程中的能量如式(5)所示。

$$E_K + E_D + E_G + E_E = E_1 \quad (5)$$

式中: E_K 、 E_D 、 E_G 、 E_E 和 E_1 分别为动能、阻尼耗能(包括摩擦耗能)、重力势能、弹性应变能和地震输入能量。

木构架摇摆过程中地震输入的能量主要转化为阻尼耗能 E_D 、重力势能 E_G 和动能 E_K (图 23)。往复摇摆下重力势能 E_G 和动能 E_K 相互转换,但地震输入的能量不断并最终转化为不可恢复的阻尼和摩擦耗能 E_D (图 24)。古建木构包含成百上千个榫卯节点,且各层叠的木枋之间均存在摩擦耗能,使得摩擦耗能具有“量大、面广”的特征,分析较为复杂,因此,木

构摇摆过程中的耗能评估仍需细化研究。

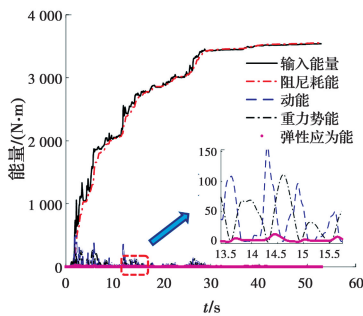


图 23 木构架摇摆过程中能量分析

Fig. 23 Energy analysis of the wooden frame with rocking behavior

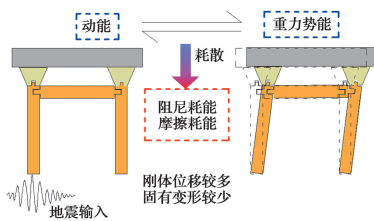


图 24 地震作用下古建木构的能量传递

Fig. 24 Energy transfer of traditional wooden structure under earthquake

6 结论

基于材性评估,节点、构件及结构受力特征分析,在古建筑木结构的基础研究方面得到了如下结论:

1)建立了可考虑古木时变特征的材性及构件强度退化模型。

2)提出了木柱摇摆-抬升的力学模型及精细化分析方法;对传统木结构榫卯间缝隙概率分布进行统计分析,得到了其 Weibull 分布概率密度函数,为考虑榫卯缝隙的传统木结构研究在缝隙取值方面提供依据,并分析了考虑缝隙影响下榫卯节点的力学特性;指出了单朵斗拱和斗拱层的力学性能表现差异。

3)建立了古建木构摇摆体系动力分析理论,揭示了节点摩擦耗能、重屋盖高位储能、构架长周期摇摆释能的古建木构抗震机理。

(致谢:感谢国家自然科学基金重点项目组成员北京交通大学杨娜、王娟,太原理工大学李铁英、魏剑伟对本文的贡献。)

参考文献:

[1] KING W S, YEN J Y R, YEN Y N A. Joint characteristics of traditional Chinese wooden frames

[J]. *Engineering Structures*, 1996, 18(8): 635-644.

[2] FANG D P, IWASAKI S, YU M H, et al. Ancient Chinese timber architecture. I: Experimental study [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(11): 1348-1357.

[3] 赵鸿铁,张凤亮,薛建阳,等.古建筑木结构的结构性能研究综述[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(8): 1-10. ZHAO H T, ZHANG F L, XUE J Y, et al. Research review on structural performance of ancient timber structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(8): 1-10. (in Chinese)

[4] TANAHASHI H, SUZUKI Y. Elasto-plastic Pasternak model simulation of static and dynamic loading tests of traditional wooden frames [C]//11th World Conference on Timber Engineering, 2010: 3309-3318.

[5] 周乾,闫维明,杨娜,等.单檐歇山式木构古建抵抗强震试验调查[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(Sup1): 32-36, 79.

ZHOU Q, YAN W M, YANG N, et al. Experimental investigation of seismic performance of single layer gable and hip roof type of Chinese ancient building under high intensity earthquake [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(Sup1): 32-36, 79. (in Chinese)

[6] MENG X J, LI T Y, YANG Q S, et al. Seismic mechanism analysis of a traditional Chinese timber structure based on quasi-static tests [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(10): e2245.

[7] MENG X J, LI T Y, YANG Q S. Experimental study on the seismic mechanism of a full-scale traditional Chinese timber structure [J]. *Engineering Structures*, 2019, 180: 484-493.

[8] MI X C, LI T Y, WANG J P, et al. Evaluation of salt-induced damage to aged wood of historical wooden buildings [J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 2020: 1-11.

[9] YANG N, LI P, LAW S S, et al. Experimental research on mechanical properties of timber in ancient Tibetan building [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 24(6): 635-643.

[10] HIRASHIMA Y, SUGIHARA M, SASAKI Y, et al. Strength properties of aged wood III: Static and impact bending strength properties of aged *Keyaki* and *Akamatsu* woods [J]. *Mokuzai Gakkaishi*, 2005, 51(3): 146-152.

[11] SOUSA H S, BRANCO J M, LOURENÇO P B. Characterization of cross-sections from old chestnut beams weakened by decay [J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2014, 8(3): 436-451.

- [12] JORGE B, TIAGO P, PAULO L, et al. Mechanical characterization of old chestnut beams [C]// International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, 2011.
- [13] QIN S J, YANG N. Strength degradation and service life prediction of timber in ancient Tibetan building [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2018, 76(2): 731-747.
- [14] GERHARDS C. Time-related effects on wood strength: A linear cumulative damage theory [J]. Wood Science, 1979, 11(3): 139-44.
- [15] WANG Z C, YANG N. Parameter-based applicability analysis of Gerhards cumulative damage model in residual strength and life prediction of wood in bending [J]. Wood Science and Technology, 2019, 53(6): 1255-1277.
- [16] YANG N, ZHANG L. Investigation of elastic constants and ultimate strengths of Korean pine from compression and tension tests [J]. Journal of Wood Science, 2018, 64(2): 85-96.
- [17] KOHARA J. Studies on the durability of wood I: Mechanical properties of aged timbers [R]. Scientific Reports of the Saikyo University, Agriculture, 1952: 116-131.
- [18] DEPPE H J, RUHL H. Evaluation of historical construction timber; 1. Density and compression strength; Rohdichte und Druckfestigkeit [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 1993, 51(6): 379-383.
- [19] YANG Q S, GAO C, KE L, et al. Compressive strength of aged timber members in traditional building considering differences of heartwood and sapwood [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2021.
- [20] 贺俊筱, 王娟, 杨庆山. 古建筑木结构柱脚节点受力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(8): 141-149.
HE J X, WANG J, YANG Q S. Mechanical property of column footing joint in traditional wooden structure by quasi-static test [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(8): 141-149. (in Chinese)
- [21] 贺俊筱, 王娟, 杨庆山. 考虑高径比影响的木结构柱抗侧能力试验研究 [J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 27-35.
HE J X, WANG J, YANG Q S. Experimental study on lateral resistance capacity of column in traditional timber structures considering effects of height-diameter ratio [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(3): 27-35. (in Chinese)
- [22] WANG J, HE J X, YANG Q S, et al. Study on mechanical behaviors of column foot joint in traditional timber structure [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2018, 66(1), 1-14.
- [23] YANG Q S, HE J X, WANG J. Study on the mechanical behaviors of timber frame with the simplified column foot joints [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2021, 77(3): 383-394.
- [24] HE J X, WANG J. Theoretical model and finite element analysis for restoring moment at column foot during rocking [J]. Journal of Wood Science, 2018, 64(2): 97-111.
- [25] YANG Q S, GAO C, WANG J, et al. Probability distribution of gaps between tenon and mortise of traditional timber structures [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2020, 78(1): 27-39.
- [26] YANG Q S, YU P, LAW S S. Load resisting mechanism of the mortise-tenon connection with gaps under in-plane forces and moments [J]. Engineering Structures, 2020, 219: 110755.
- [27] XUE J Y, MA L L, DONG X Y, et al. Investigation on the behaviors of Tou-Kung sets in historic timber structures [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(3): 485-496.
- [28] 隋奕, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建筑木构铺作层侧向刚度的试验研究 [J]. 工程力学, 2010, 27(3): 74-78.
SUI Y, ZHAO H T, XUE J Y, et al. Experimental study on lateral stiffness of Dougong layer in Chinese historic buildings [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 74-78. (in Chinese)
- [29] MAENO M, SUZUKI Y, OHSHITA T, et al. Seismic response characteristics of traditional wooden frame by full-scale dynamic and static tests [C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004: 1184-1194.
- [30] SUZUKI Y, MAENO M. Structural mechanism of traditional wooden frames by dynamic and static tests [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(1): 508-522.
- [31] YEO S Y, KOMATSU K, HSU M F, et al. Structural behavior of traditional Dieh-Dou timber main frame [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2018, 12(4): 555-577.
- [32] NIU Q F, WAN J, LI T Y, et al. Hysteretic behavior of traditional Chinese timber frames under cyclic lateral loads [J]. Materials Testing, 2018, 60(4): 378-386.
- [33] CHEN J Y, LI T Y, YANG Q S, et al. Degradation laws of hysteretic behaviour for historical timber buildings based on pseudo-static tests [J]. Engineering Structures, 2018, 156: 480-489.