

成的结构,主要起将屋架荷载传给柱架及提高建筑物抗震性能作用,并具有一定的建筑美学功能<sup>[1]</sup>。斗拱种类很多,以清式斗拱为例,按所在建筑物位置,可分为外檐斗拱和内檐斗拱<sup>[2]</sup>。外檐斗拱位于建筑物外檐部位,包括平身科、柱头科、角科、溜金、平座等类型斗拱;内檐斗拱位于建筑物内檐部位,包括品字科、隔架斗拱等。斗拱内外侧一般都要向外挑出,称为“出踩”。斗拱向外挑出一拽架称为三踩,二拽架称为五踩,三拽架称为七踩,以此类推。图1为故宫太和殿平身科斗拱的构造示意图。

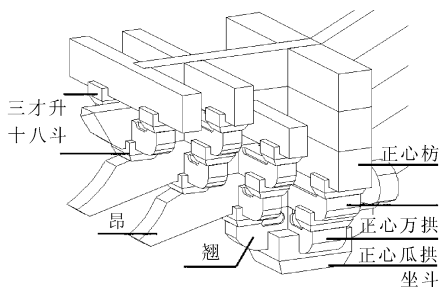


图1 故宫太和殿平身科斗拱构造示意图

由于斗拱构造的特殊性及结构作用的重要性,其力学性能对古建筑结构整体的安全性能影响重大。掌握外力作用下斗拱的内力分布形式、变形特征、破坏方式、耗能机理、加固方法等力学机制,有助于对古建筑结构整体的保护和维修。相应的,国内外一些学者对斗拱的力学性能开展了理论、试验等方面研究。

## 1 国内研究现状

### 1.1 理论研究

王天<sup>[3]</sup>采用理论分析方法,对《营造法式》中铺作各构件的力学构造进行了简要分析,认为:栌斗(坐斗)是铺作中最大的一只斗,是构架的承重关键;《营造法式》规定栌斗边长为32份,满足栌斗受力要求;角檐位置栌斗尺寸虽大,但承载能力小于心间檐柱栌斗;为了防止昂头剪切破坏,下昂设置了昂嘴;每层铺作出挑30份,是有一定的力学因素的。

张双寅<sup>[4]</sup>基于静力学分析手段,研究了斗拱中斗、栌柱(斗拱前身构造)对上部大梁的受力性能影响,认为大梁的荷载通过“斗”传到立柱的头部,用较细的立柱顶起粗大的横梁,减少立柱对大梁的压应力;栌柱置于梁下,柱之上部加斜撑,分担屋顶加于梁上的荷载,使荷载传递更合理。

方东平等<sup>[5-6]</sup>定义和引入反映木结构古建筑斗拱特性的半刚性节点单元,利用对西安北门箭楼的

现场脉动试验和激测实验获得的结构自振频率的结果,使用Simplex方法反演推断西安北门箭楼斗拱半刚性节点单元的参数范围,研制了考虑斗拱刚度影响的有限元动力分析软件SAFATS,对西安北门箭楼的动力特性进行了深入分析讨论。这是我国第一次对木结构古建筑的斗拱的力学性能作定量研究。

张鹏程等<sup>[7]</sup>初步分析了斗拱的力学构造特征,认为斗拱构件之间有的采取暗销作了定位及安装期间的剪力连接件,有的通过静摩擦力来抵抗水平滑移;构件的十字形相交有利于防止斗拱在平面内外产生失稳,构件交叉处所开的豁口不影响作用力传递;明清斗拱较宋代及以前斗拱体量减小,数量增多,更有利于发挥斗拱的抗震性能。

魏国安<sup>[8]</sup>采用理论分析方法,研究了斗拱各构件的工作机制、破坏形态和抗震性能;采用有限元分析软件ANSYS的接触算法,对斗拱模型进行了数值模拟,得到斗拱在竖向荷载作用下力-变形曲线,以及在水平低周反复荷载作用下的力-侧移滞回曲线;根据理论、试验及数值模拟结果,提出了斗拱在竖向荷载下的理论计算模型,以及水平地震作用下的力学分析模型。

李海娜<sup>[9]</sup>采用理论分析方法,研究了斗拱层在静力作用下的传力机理及其薄弱环节,认为斗拱受静水平力的破坏分为各构件无相对位移、构件之间产生微小的相对位移、构件间发生明显相对位移、构件间发生过大的相对位移四个阶段;华拱(翘)承受最大的弯距,斗是传递竖向荷载的连接件,斗耳在维持结构稳定方面有较大的贡献。

李海旺等<sup>[10]</sup>从斗拱连接的实际构造出发,建立反映接触传力机制的斗拱节点域计算模型,研究了斗拱自身的动力特性,并利用动力特性等效方法将斗拱节点域简化为刚接简化模型和铰接简化模型。

王智华等<sup>[11]</sup>在对应县木塔斗拱进行现场勘察与测绘的基础上,采用有限元分析方法,建立了应县木塔三层明层内槽转角斗拱的实体模型,并且赋予斗拱木材正交各项异性的材料特性,进行了数值模拟研究,获得了木塔三层明层内槽转角斗拱在上部竖向荷载作用下的应力状态以及应力在斗拱中的传递特征。

钟永等<sup>[12]</sup>运用有限元程序建立了应县木塔各科拱的三维非线性有限元模型,并对其进行了竖向荷载作用下和水平荷载作用下的数值模拟,研究了斗拱之间的不同构造特征对其相关力学性能的影响,认为:斗拱在竖向荷载作用下力的主要传递方向

为华拱(翘)方向;在水平荷载作用下沿华拱方向加载时力学性能表现为脆性,沿泥道拱(正心瓜拱)方向加载时力学性能则表现为延性。

陈韦等<sup>[13]</sup>采用有限元分析方法,采用三维实体单元,根据牛腿模型各构件的尺寸,建立了斗拱的简化分析模型即空间牛腿模型,在建模过程中采用在接触面生成接触对的方式来模拟斗拱在外力作用下的摩擦剪切耗能特性;通过对斗拱简化模型进行水平及竖向单调加载分析,从数值计算的角度验证了空间牛腿模型代替斗拱进行木塔整体力学性能分析的可行性。

## 1.2 试验研究

赵均海等<sup>[14]</sup>利用现代测试仪器,对中国古建平身、柱头、角科三种斗拱进行了动力实验研究,获得了斗拱模型的频响函数曲线,讨论了斗拱模型的固有频率和阻尼比以及边界条件、竖向荷载对上述值的影响,认为随着斗拱支撑边界条件刚度增大,斗拱固有频率及阻尼比增大;随着竖向荷载增大,斗拱固有频率增大,而阻尼比减小。

张鹏程等<sup>[7,15]</sup>按照宋《营造法式》殿堂二等材柱头斗拱构造的相关规定,制作了 1:3.52 的缩尺比例模型。通过低周反复加载试验,获得了斗拱转角很小情况下的力-侧移滞回曲线,讨论了单榀斗拱的耗能机理,认为斗拱的倒三角形构造使其像倒置的弹性球铰支座,一方面上部荷载集中在柱中心,另一方面斗拱在外力作用下易产生转动,其间部分斗拱构件的侧移动能转化为势能,进而通过竖向振动、侧移自振等方式耗掉;通过竖向静力加载试验,获得了斗拱轴心受压破坏各构件的传力方式和破坏形式,讨论了竖向荷载作用下构件内力的计算方法。

高大峰等<sup>[16-18]</sup>按照宋《营造法式》的规制,以殿堂类二等材柱头八铺作计心造为标准,制作了 1:3.52 比例的试验模型,进行了水平低周反复加载试验,获得了斗拱的力-侧移滞回曲线,研究了斗拱抗震机理,认为斗拱在外荷载反复作用下产生相当程度的弹塑性变形,整体摆动及滑动位移,耗散掉大量能量,从而实际在屋顶与柱架结构层之间形成了一个振动缓冲层,明显减弱了地震对木结构古建筑的破坏作用。基于试验结果,引入了量化斗拱耗能减震能力的指标“滞回耗能因子”( $f_{hed}$ )<sup>[18]</sup>,其理论计算公式为:

$$f_{hed} = S_1/S_2 \quad (1)$$

式中: $S_1$ 表示斗拱结构恢复力模型 AFCG 的面积; $S_2$ 表示以斗拱结构恢复力模型的极值点为对角线的矩

形 ABCD 的面积,见图 2。

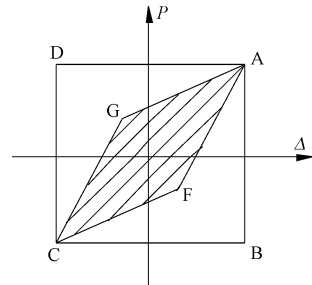


图 2 文献[18]提出的斗拱滞回耗能因子计算方法

此外,他们按照宋《营造法式》的规制,以殿堂类二等材计心造两跳五铺作为标准,制作了 1:3.52 比例的试验模型,进行了竖向承载力试验,研究了斗拱在竖向地震作用下的隔震机理及竖向极限承载力,认为竖向地震作用下,斗拱结构特性可视为变刚度线弹性变化,其运动的竖向传递率很小,且构件强度裕度很大。

隋奕等<sup>[19-22]</sup>通过对按照《营造法式》制作的单铺作、两铺作、四铺作斗拱模型进行低周反复荷载试验,获得了斗拱的力-位移滞回曲线及骨架曲线,分析了斗拱的层间滑移、内力变化、延性、等效粘滞阻尼系数等参数,归纳出斗拱的恢复力模型,研究了斗拱侧向刚度的退化规律,认为水平地震作用下斗拱的变形是以水平滑移为主,摩擦滑移具有良好的耗能特性;与普通结构不同,古建筑木结构斗拱的刚度不仅与材性和构件尺寸有关,而且与斗拱所受的竖向荷载成线性关系;斗拱的力学模型属于线性强化弹塑性模型。

此外,他们对按照《营造法式》制作的古代殿堂式木结构建筑心间 1:3.52 缩尺模型进行了模拟振动台试验研究,通过对比分析模型各层滞回耗能曲线,评价了斗拱对结构整体的耗能贡献,建立了考虑斗拱耗能减震的殿堂式古建筑木结构的整体动力分析模型。

肖碧勇等<sup>[23]</sup>首次进行了应县木塔二层明层柱头斗拱 1:1 足尺模型的竖向静力力学性能试验,考察该斗拱在上部结构重力荷载作用下的传力机理和变形特点,认为斗拱前端相对较低承载力和木材横纹承压性能是影响斗拱整体承载能力的重要因素;建立了考虑木材正交各向异性和摩擦滑移接触的有限元模型,对试验和数值模拟的结果进行了比较分析,并在此基础上对上述斗拱的传力路径和变形特点进行了分析。

袁建力等<sup>[24-25]</sup>以应县木塔中的代表性斗拱为

研究对象,试验研究选取三种典型斗拱:柱头铺作、补间铺作和转角铺作,按照1:3的比例制作成模型;通过竖向荷载试验,得到斗拱的竖向荷载-竖向变形曲线和材料开裂前的抗压刚度;进行了竖向荷载作用下的水平低周反复荷载试验,得到斗拱在竖向荷载和水平低周反复荷载共同作用下的荷载-水平位移曲线和骨架曲线,确定斗拱侧向变形的特征和耗散能量的能力。

吕璇等<sup>[26]</sup>以清代某三踩柱头科斗拱为研究对象,采用数值模拟与静力试验相结合的方法,研究竖向轴压及偏压荷载作用下斗拱破坏形态和传力机理,认为:斗拱在竖向荷载作用下呈变刚度的特性,斗拱可以转动并承担一定的弯矩,有较好的延性;斗拱在破坏前各构件均会发生严重塑性变形,且在不同部位存在横纹和顺纹方向的劈裂。

### 1.3 工程应用

古建斗拱力学刚度参数的确定,有利于对古建筑结构开展基于保护目标的分析与研究,相关成果主要有:

基于文献[5-6]研究成果,周乾等<sup>[27-30]</sup>采用2节点6自由度的弹簧单元模拟斗拱刚度特性,对故宫神武门、英华殿、太和殿等古建筑的抗震性能进行了评估。

高大峰等<sup>[31-32]</sup>采用线性弹簧单元及橡胶隔振单元模拟斗拱的刚度特性,对西安城南门箭楼及西安城墙永宁门箭楼的动力特性及抗震性能进行了研究,论证了斗拱构造对古建结构整体抗震性能的有利影响。

李海旺等<sup>[33]</sup>用简化节点域模型代替实际斗拱节点域建立木塔整体刚接和铰接有限元模型,并对这两个计算模型开展动力特性及地震响应分析,评估了应县木塔的抗震性能。

王珏等<sup>[24]</sup>分析了斗拱结构的受力特点,基于斗拱在竖向荷载下的静力试验结果,提出了斗拱的简化模型即空间牛腿模型,利用等刚度原则计算得到了空间牛腿模型的合理尺寸,用空间牛腿模型来代替斗拱模型,建立了应县木塔有限元模型,并对应县木塔残损模型的张拉复位施工进行模拟分析。

陈志勇等<sup>[34]</sup>认为铺作层主要通过斗拱节点的斗、拱横纹承压和拱枋受弯来传递竖向力,此时斗拱可简化为梁-弹簧组合模型;由柱脚传来的水平荷载则由拱枋受弯和拱枋间的暗销受剪及摩擦力来传递;因而可采用梁-短柱单元组来模拟斗拱,此单元组在各跳华拱与拱枋交点处设置虚拟短柱(两端固

结于拱枋的梁单元),以其轴向压缩模拟横纹承压,以其弯曲模拟销连接受剪及摩擦力,从而传递各跳间的竖向和水平荷载。依此建立了应县木塔的理想和现状精细化模型,并研究了木塔的抗震性能。

## 2 国外研究现状

由于文化交流原因,我国斗拱作法在东亚如日本、朝鲜等国的寺庙、神坛等古建中较为普及。这些国家的部分学者对斗拱开展的力学性能研究主要包括两个方面:(1) 试验研究,即通过试验手段来获得相应结论;(2) 力学试验与理论分析相结合,即首先通过试验手段获得关于斗拱力学性能的一些基本结论,再通过大量篇幅的理论分析或数值模拟来验证试验结果的可靠性。基于文献检索结果,对国外主要研究成果汇总如下。

### 2.1 试验研究

(1) 藤田香織等<sup>[35-38]</sup>以某古建斗拱为例,分别选取3种简单构造斗拱(编号k1—不出踩且不带槽升子、编号k2—不出踩带槽升子、编号k3—出3踩),制作1:1模型,进行了水平低周反复加载试验及振动台试验,得出如下结论:(1) 水平地震作用下,各斗拱的线性刚度值 $k_1 > k_2 > k_3$ ,各斗拱最大变形值 $k_1 < k_2 < k_3$ ;(2) 各斗拱水平振动时,基频大小为: $k_1 > k_2 > k_3$ ,阻尼比大小为: $k_1 < k_2 < k_3$ ;(3) 各斗拱竖向振动时,基频大小为: $k_1 > k_2 > k_3$ ,阻尼比大小为: $k_2 < k_1 < k_3$ ,刚度值 $k_1 > k_2 > k_3$ ;此外,他们还讨论了屋面荷载、垫拱板等参数对斗拱动力特性及抗震性能影响。

在此基础上,她们研究了构造稍微复杂的斗拱——类似于5踩斗拱的抗震性能。基于水平低周反复加载试验<sup>[39-40]</sup>,获得了斗拱各构件的力-变形曲线及恢复力模型。结果表明:斗拱的恢复力模型可用3线段刚度参数表示;地震作用下,影响斗拱变形的主要因素为大斗(坐斗)的转动及滑移;在进行数值分析时,斗拱总刚度可由若干串、并联弹簧来模拟。

基于试验结果,她们建立了斗拱的简化分析模型——单质点弹簧单元模拟斗拱,进行了数值模拟分析,并与试验结果进行对比,以表明斗拱各力学参数的有效性<sup>[41]</sup>。

(2) 楠寿博等<sup>[42]</sup>对唐招提寺金堂斗拱进行了足尺比例试验。该斗拱构造简单,仅一层斗及拱。通过竖向静力加载试验,他们获得了斗拱的竖向力-竖向变形曲线,认为其力-变形为线性关系,且卸

载后存在残余变形;通过水平低周反复加载试验,他们获得了大斗弯矩-转角滞回曲线,并归纳出恢复力模型的理论解。

(3) Kenichi<sup>[43]</sup>基于试验手段,研究了日本传统寺庙建筑的抗震机理,认为日本传统寺庙建筑与现代钢结构、钢筋混凝土的主要区别在于它们包含有 3 个抗震要素:To-kyou(斗拱)、Nuki(与柱形成榫卯连接的横梁)及柱础,见图 3;其中,地震作用下柱子产生近似刚性侧移时,厚重屋顶通过可斗拱及横梁产生恢复力,避免柱身产生过大倾斜;地震作用时,斗拱本身具有一定阻尼,可产生耗能减震作用。

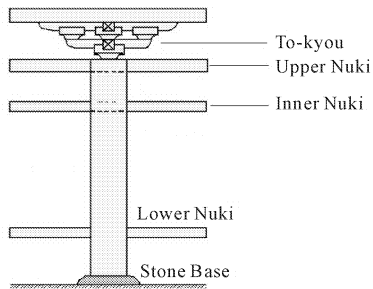


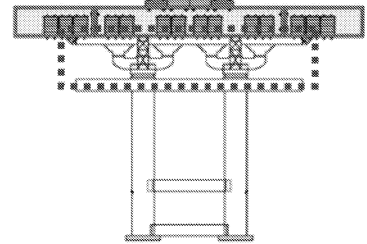
图 3 日本寺庙建筑抗震 3 要素示意图

(4) 津和佑子等<sup>[44-46]</sup>采用试验方法,研究了日本古建筑斗拱的力学特性。以某三踩斗拱为研究对象,她们选取 3 种尺寸的同种类型斗拱,通过微振动及自由振动试验,获得了各斗拱的基频及阻尼系数,认为上述值的大小与施加在斗拱上的荷载密切相关;通过动力加载试验,研究了斗拱力-变形关系,认为不同荷载作用下,各斗拱的力-变形包络线均为双线性特征,但小尺寸斗拱的第二刚度最大;通过水平低周反复加载试验,研究了斗拱的恢复力特性,认为斗拱恢复力与尺寸大小、加载速度均相关,各斗拱的第一刚度理论与试验结果基本吻合,而第二刚度值比理论值有偏大趋势。

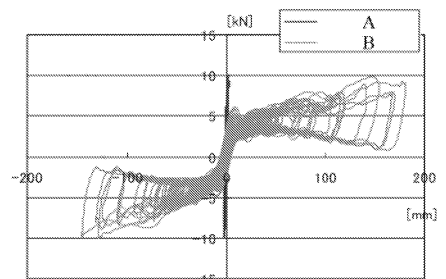
她们以法隆寺五重塔底层含斗拱框架(图 4(a))为研究对象,制作了 1:2/3 比例试验模型,进行了振动台试验<sup>[47-49]</sup>。通过试验获得了斗拱基频和阻尼比,发现当地震波幅值增大时,斗拱阻尼比趋于减小。另斗拱及框架整体的力-变形滞回曲线见图 4(b),其中 A 表示斗拱, B 表示模型整体。图 1(b)表明,地震作用下,斗拱变形相对于模型整体而言很小,可考虑为刚体。基于试验结果,她们建立了考虑斗拱的木构架整体有限元分析模型,其中斗拱考虑为线性弹簧。

(5) Hwang 等<sup>[50]</sup>为调查韩国古建筑的力学性能。他们以某十世纪初建的古建筑为对象,制作了

1:3 试验模型,采用动力加载手段,进行了一系列结构试验,研究了模型整体的侧移及扭转特性,对比分析了榫卯节点及斗拱的耗能作用,认为梁柱节点的摩擦作用可耗散地震能量并减小古建筑结构整体收到的冲击作用,因而是耗能主体,而斗拱在耗能方面的能力远不及榫卯节点。



(a) 试验模型



(b) 力-变形滞回曲线

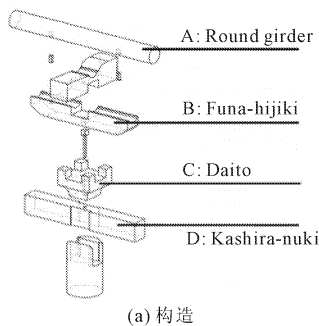
图 4 文献<sup>[47-49]</sup>试验模型及结果

(6) Kitamor 等<sup>[51]</sup>考虑柱子与斗拱之间纯浮放关系,且通过屋顶竖向荷载将斗拱叠压在柱顶上,研究了日本某寺庙建筑斗拱(形式见图 5(a))在水平外力作用下的力学行为;通过静力加载试验(图 5(b)),认为由于屋顶自重影响,斗拱各构件具有弹塑性特性;水平剪切力作用下,由于斗拱的弹性变形,斗拱各构件整体应力分布呈降低趋势;当剪切力超过构件之间的静摩擦力时,大斗 C 与连系梁 D 之间的滑移非常明显;外力作用下,檩 A 与拱 B 之间相对转动很小,而拱 B 与坐斗 C 及坐斗 C 与连系梁 D 之间的转动非常大,且沿竖向成近似对称分布;对于连接斗拱的暗榫而言,由于其对斗拱构件变形的制约作用,因而提高了斗拱整体的抗剪性能。

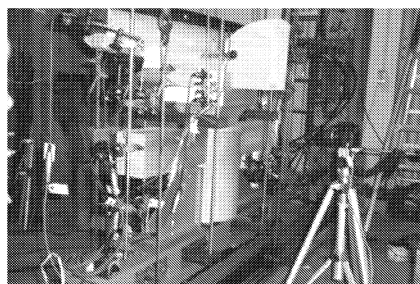
## 2.2 试验与理论研究

(1) 藤田香織等<sup>[52]</sup>认为斗拱自公元 6 世纪由中国传入日本后,在日本传统寺庙、圣坛建筑中广泛应用。为验证斗拱是否有抗震耗能作用,她们采用试验方法,对 4 种不同类型的斗拱进行了试验。基于水平侧向加载试验结果,他们获得了斗拱的力-变形恢复力模型,见图 6,其中斗拱刚度由 4 部分组

成:  $k_1$  - 大斗转动阶段, 刚度值较大;  $k_2$  - 各构件相对滑动阶段, 刚度值很小;  $k_3$  - Masu(类似十八斗)转动阶段, 刚度值较大;  $k_4$  - 卸载阶段, 刚度值介于  $k_1$  与  $k_3$  之间。基于振动台试验及理论分析结果, 他们研究了斗拱的抗震性能, 认为仅当认为斗拱刚度和墙体刚度相近时, 斗拱可减小结构整体产生的侧向变形。



(a) 构造



(b) 试验装置

图 5 文献<sup>[51]</sup>中斗拱构造及试验装置照片

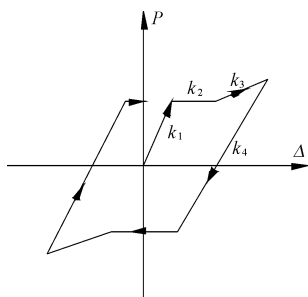
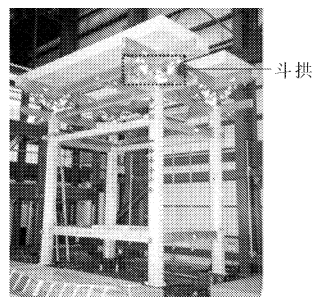


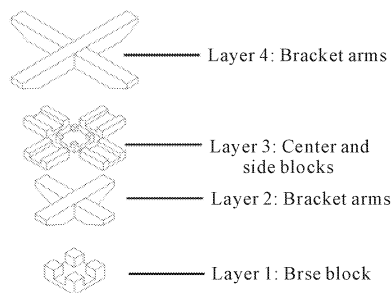
图 6 文献<sup>[52]</sup>提出的斗拱力 - 变形恢复力模型

(2) 铃木祥之等<sup>[53-54]</sup>研究了日本寺庙建筑的结构特性。他们制作了某古建筑的足尺比例模型, 其中屋顶用青石板模拟(图 7(a)), 进行了水平低周反复加载试验及振动台试验, 研究了模型的力 - 变形恢复力曲线特征。基于试验结果, 他们采用 EPM (Elastic - plastic Pasternak Model) 建模方法, 建立了榫卯节点、斗拱(分层构造见图 7(b))、柱子、框架等部分的恢复力模型, 通过仿真分析方法对试验结果进行了验证。其中, 斗拱的恢复力模型可用双线性刚度参数表示, 其建立过程考虑了斗拱各构件之间的相对转动、挤压、摩擦等因素。他们认为, 斗拱的力

学模型可用坐斗 + 等效柱(用来模拟坐斗以上的部分)来简化。此外, 他们通过试验发现, 考虑斗拱作用后, 柱子整体的侧向变形值有所减小。



(a) 整体模型照片



(b) 斗拱分层构造示意图

图 7 文献<sup>[53-54]</sup>振动台试验模型

(3) Lee 等<sup>[55]</sup>研究了考虑斗拱(Gongpo)连接的韩国古建筑的抗震性能。他们以一座始建于公元十世纪的寺庙古建筑为对象, 建立了 1:2 比例缩尺比例模型, 进行了试验。通过对斗拱模型进行低周反复加载试验, 他们获得了斗拱的力 - 变形曲线, 建立了斗拱恢复力模型(双线性刚度参数), 认为在结构有限元模拟中可用剪切弹簧单元模拟斗拱力学机制, 依此确定了弹簧单元的力学参数; 通过对结构整体进行推覆试验, 他们验证了上述力学参数的可靠性。

(4) 津和佑子等<sup>[56]</sup>研究了同一斗拱在不同尺寸模数条件下的振动特性。他们选取了 3 种比例(2/3:1:3/2)的斗拱试件, 通过微振试验及自由振动试验获得了斗拱的基频和阻尼参数; 通过静、动力加载试验, 获得了各斗拱的力和变形参数。通过进一步的理论分析, 他们认为不论斗拱处于何种尺寸段, 对斗拱整体振动特性影响最大的构件为坐斗, 而坐斗的变形可分为五个阶段, 各阶段的滞回曲线刚度参数可利用 Merikomi 理论进行求解。

(5) Takino 等<sup>[57]</sup>研究了考虑斗拱连接(图 8)的日本某木构古建的结构特性。通过对含有斗拱的柱子进行屈曲分析, 认为柱子在达到极限强度前, 斗拱

构造可提高柱子的刚度;当通过斗拱底部横向联系构件(类似中国古建抱头梁)施加很小的水平荷载给柱子时,柱子的弯曲变形和拉应力会急速提高。通过平面剪切试验,他们获得了含斗拱的木构架力-变形曲线,认为荷载作用下木构件的转动响应非常稳定。



图 8 文献<sup>[57]</sup>提供的日本古建筑斗拱照片

## 3 讨论

### 3.1 现状分析

基于上述成果的汇总,可知国内外学者关于斗拱力学性能的研究存在异同点。

(1) 相同点:国外内学者均从试验、理论角度研究了斗拱力学性能,尤其是抗震性能,并取得了一定成果。试验方面,足尺比例试验模型的选用,减小了试验误差,使得试验结果与斗拱受力性能的实际情况接近;通过对斗拱的动力测试,获得了斗拱固有频率及阻尼比,并讨论了相关参数的影响;通过水平低周反复加载试验,获得了斗拱力-变形刚度参数及恢复力模型,研究了其抗震耗能机理;通过竖向静力加载试验,研究了斗拱的竖向受力机理、破坏形式及变形特征;基于试验结果,确定了斗拱力学参数的模拟方法。理论方面,通过简化的静力学分析,评价斗拱各构件截面承载力;通过数值模拟手段,研究了外力作用下斗拱各构件的破坏形式,内力及变形分布特征,验证了斗拱力学试验的相关结果的可靠性。上述成果不仅有利于深入挖掘古建筑斗拱的力学机制,而且完善了古建筑结构整体的力学分析模型,对于解决斗拱乃至古建筑整体维修和加固过程中出现的力学问题,提供了科学解决手段及理论参考。

此外,不管是国内还是国外,现有关于斗拱力学性能的研究,均存在不足之处。从研究对象来看,其研究对象极其有限,表现为针对某几种斗拱开展一系列力学性能研究。从研究内容来,现有研究侧重于单榀斗拱的力-变形特性及抗震耗能机理研究,而对斗拱之间的协同作用研究很少。从研究目标来

看,现有研究均侧重于探讨斗拱的受力机理,而关于外力作用下斗拱残损机理及加固方法研究,则明显不足。

(2) 不同点:从研究对象、研究方法、研究内容、研究深度、研究应用等方面来看,国内外现有关于斗拱力学性能研究也存在不同之处,各有优缺点。

研究对象方面,国内研究对象主要针对宋、辽代建筑斗拱,构造上由多层斗、拱构件叠加而成,形式较复杂;而国外(主要指日本)研究的斗拱源于中国,但形式上有所区别,大都数斗拱模型构造简单,仅含一至二层斗或拱构件。研究手段方面,国内现有研究主要采用的拟静力试验手段来获取斗拱的变形特性和抗震性能,对于能较真实反映斗拱抗震性能的振动台试验手段则研究较少;而国外在进行斗拱力学试验研究时,振动台试验往往是必备手段,因而研究结果与斗拱实际情况更接近。研究内容方面,国内现有研究侧重于斗拱构件的力-变形特性研究,而国外研究不仅研究斗拱静力特性,其基频及阻尼比等动力特性研究亦较全面。研究深度方面,国内现有研究获得的斗拱力学模型往往基于试验结果归纳而成的经验公式,细化分析较少;而国外研究则通过理论和试验两条线平行开展,理论分析充分考虑木材材料特性及材料强度理论,试验数据不仅包括斗拱整体,而且对构件之间的转动、摩擦、滑移等因素也充分考虑,解析解与试验解数据互校,可信度大,研究细致入微。研究应用方面,国内研究通过采用弹簧单元、刚性节点域、梁-短柱组合单元模拟斗拱刚度特性,对部分古建筑的抗震性能进行了研究;而国外研究侧重于斗拱本身受力机理研究,对于其刚度参数的实际应用与古建筑抗震性能分析,则相对较少。

### 3.2 研究展望

随着文物保护理念的深入人心,以及科技手段在文博领域的深入应用,古建筑斗拱的力学性能研究将趋于全面化和细致化。研究对象将更加广泛,如对于我国古建筑斗拱而言,不仅限于《营造法式》规定相关斗拱或应县木塔斗拱,而且对于我国现存的大比例的明清木构古建斗拱的力学性能研究也将增多。研究内容将丰富多彩,不仅斗拱本身,而且斗拱间的协同合作关系将予以探讨,且斗拱的抗震耗能机理,变形特征,残损机制,加固方法等力学性能将得到深入研究,可为古建筑木结构的保护提供更全面可靠的理论基础。研究手段将多样化,脉动测试、(拟)静力与振动台试验、理论分析、数值模拟

等各手段合理采用,对斗拱的静、动力特性全面开展研究。研究水平将得以提升,表现为试验模型误差小,试验数据可靠,理论分析深入合理,且与试验结果符合较好,斗拱力学模型完善,数值模拟结果可较真实地反映斗拱在外力作用下的力学特性。研究结果也将古建筑保护提供更全面的科学参考。

## 4 结 论

本文采取分析汇总方法,研究了木构古建斗拱力学性能在国内外的研究现状,进行了较为合理的评价,展望了未来研究发展趋势。结果表明:古建筑木结构斗拱的静、动力特性在理论和试验方面均得以充分开展,并取得了一定成果,但也存在不足之处。随着科技发展和研究的不断深入,斗拱力学性能的研究将趋于全面化,研究水平将不断提高,其成果也将逐步在古建筑保护实际中得以体现。

### 参考文献:

[1] 王效青. 中国古建筑术语辞典[M]. 山西:山西人民出版社,1996.

[2] 马炳坚. 中国古建筑木作营造技术(第二版)[M]. 北京:科学出版社,2003.

[3] 王 天. 中国古代大木作静力初探[M]. 北京:文物出版社,1992.

[4] 张双寅. 浅谈中国古建中斗拱的力学问题[C]//李和娣. 固体力学进展及应用——庆贺李敏华院士 90 华诞文集,北京:科学出版社,2007.

[5] 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.

[6] Fang D P, Iwasaki S, YU M H, et al. Ancient Chinese timber architecture— II : Dynamic characteristics[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(11):1358-1364.

[7] 张鹏程. 中国古代木构建筑结构及其抗震发展研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003.

[8] 魏国安. 古建筑木结构斗拱的力学性能及 ANSYS 分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.

[9] 李海娜. 古建筑木结构铺作层抗震机理分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.

[10] 李海旺,薛 飞,秦冬祺. 木结构斗拱的动力特性分析和应用[C]//第六届全国现代结构工程学术研讨会论文集,2006.

[11] 王智华. 应县木塔斗拱调查与力学性能分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.

[12] 钟 永. 应县木塔料拱的力学性能分析研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

[13] 陈 韦. 应县木塔料拱力学性能及简化分析模型的研究[D]. 扬州:扬州大学,2010.

[14] 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.

[15] 张鹏程,赵鸿铁,薛建阳,等. 斗拱结构功能试验研究[J]. 世界地震工程,2003,19(1):102-106.

[16] 高大峰. 中国木结构古建筑的结构及其抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.

[17] 高大峰,赵鸿铁,薛建阳,等. 中国古代大木作结构斗拱竖向承载力的试验研究[J]. 世界地震工程,2003,19(3):56-61.

[18] 高大峰,赵鸿铁,薛建阳. 木构古建筑中斗拱与榫卯节点的抗震性能试验研究[J]. 自然灾害学报,2008,17(2):58-64.

[19] 隋 奕. 中国古代木构耗能减震机理与动力特性分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009.

[20] 隋 奕,赵鸿铁,薛建阳,等. 古建木构料拱侧向刚度的试验研究[J]. 世界地震工程,2009,25(4):145-147.

[21] 隋 奕,赵鸿铁,薛建阳,等. 古建木构铺作层侧向刚度的试验研究[J]. 工程力学,2010,27(3):74-78.

[22] 隋 奕,赵鸿铁,薛建阳,等. 中国古建筑木结构铺作层与柱架抗震试验研究[J]. 土木工程学报,2011,44(1):50-57.

[23] 肖碧勇. 应县木塔斗拱解读及二层明层柱头斗拱传力机理研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.

[24] 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[D]. 扬州:扬州大学,2008.

[25] 袁建力,陈 韦,王 珏,等. 应县木塔斗拱模型试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(7):66-72.

[26] 吕 璇. 古建筑木结构斗拱节点力学性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.

[27] 周 乾,闫维明,周锡元,等. 中国古建筑动力特性及地震反应[J]. 北京工业大学学报,2010,36(1):13-17.

[28] 周 乾,闫维明,周宏宇. 中国古建筑木结构随机地震响应分析[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(9):115-118.

[29] 周 乾,闫维明,周锡元,等. 故宫神武门动力特性及地震反应研究[J]. 工程抗震与加固改造,2009,31(2):90-95.

[30] 周 乾,闫维明,关宏志,等. 故宫太和殿抗震性能研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,2013,41(4):487-494.

[31] 高大峰,曹鹏勇,丁新建. 中国古建筑简化分析研究[J]. 地震工程与工程振动,2011,31(2):175-181.

[32] 高大峰,祝松涛,丁新建. 西安永宁门箭楼结构及抗震性能分析[J]. 山东大学学报(工学版),2013,43(2):62-69.

[33] 杜雷鸣,李海旺,薛 飞,等. 应县木塔抗震性能研究[J]. 土木工程学报,2010,43(1):363-370.

- [34] 陈志勇, 祝恩淳, 潘景龙. 应县木塔精细化结构建模及水平受力性能分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(9): 150-158.
- [35] 坂本功, 藤田香織, 大橋好光, 等. 伝統的木造建築の組物振動台実験(その1): 実験概要と静加力試験[C]//日本建築学会関東支部研究報告集. 関東: 日本建築学会, 1997: 37-40.
- [36] 木村正彦, 藤田香織, 坂本功, 等. 伝統的木造建築の組物振動台実験(その2): 組物の振動特性[C]//日本建築学会関東支部研究報告集. 関東: 日本建築学会, 1997: 41-44.
- [37] 藤田香織, 木村正彦, 大橋好光, 等. 伝統的木造建築の組物振動台実験(その3): 地震波加振[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 九州: 日本建築学会, 1998: 263-264.
- [38] 木村正彦, 大橋好光, 藤田香織, 等. 伝統的木造建築の組物振動台実験(その4): 組物の上下振動特性[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 九州: 日本建築学会, 1998: 265-266.
- [39] 藤田香織, 木村正彦, 大橋好光, 等. 伝統的木造建築の組物振動台実験(その5): 出組の静加力試験[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 中国: 日本建築学会, 1999: 159-160.
- [40] 藤田香織, 木村正彦, 大橋好光, 等. 伝統的木造建築の組物振動台実験(その6): 出組の剛性[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 東北: 日本建築学会, 2000: 147-148.
- [41] 藤田香織, 木村正彦, 大橋好光, 等. 伝統的木造建築の組物振動台実験(その7): 地震応答解析[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 関東: 日本建築学会, 2001: 171-172.
- [42] 楠寿博, 木林長仁, 長瀬正, 等. 唐招提寺金堂斗組の突大構造実験[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 分册. 東北: 日本建築学会, 2000: 149-150.
- [43] Kenichi K. Preservation and seismic retrofit of the traditional wooden buildings in Japan[J]. Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment, 2001, 1(1): 12-20.
- [44] 津和佑子, 藤田香織, 金恵園, 等. 伝統的木造建築の組物の動的载荷試験(その1): 微動測定と自由振動試験[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 分册, 北海道: 日本建築学会, 2004: 23-24.
- [45] 金恵園, 藤田香織, 津和佑子, 等. 伝統的木造建築の組物の動的载荷試験(その2): 荷重変形関係と変形の特徴[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 分册, 北海道: 日本建築学会, 2004: 25-26.
- [46] 藤田香織, 金恵園, 津和佑子, 等. 伝統的木造建築の組物の動的载荷試験(その3): 復元力特性と剛性の検討[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 分册, 北海道: 日本建築学会, 2004: 27-28.
- [47] 津和佑子, 加藤圭, 金恵園, 等. 組物有する伝統木造軸組の振動台実験[J]. 生産研究, 2008, 60(2): 11-14.
- [48] 加藤圭, 津和佑子, 腰原幹雄. 組物有する伝統木造社寺建築の構面振動台実験(その1): 実験概要および結果[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 中国: 日本建築学会, 2008: 43-44.
- [49] 津和佑子, 加藤圭, 腰原幹雄. 組物有する伝統木造社寺建築の構面振動台実験(その2): 水平耐力要素のモデル化と考察[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 中国: 日本建築学会, 2008: 45-46.
- [50] Hwang J K, Hong S G, Kim N H, et al. The effect of friction joint and Gongpo (bracket set) as an energy dissipation in Korean traditional wooden structure [C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Structural Analysis of Historic Construction. 2008: 861-866.
- [51] Kitamor A, Jung K, Hassel I, et al. Mechanical analysis of lateral loading behaviour on Japanese traditional frame structure depending on the vertical load [C]//Proceedings of the 12th World Conference on Timber Engineering, 2010: 207-208.
- [52] Fujita K, Sakamoto I, Ohashi Y, et al. Static and dynamic loading tests of bracket complexes used in traditional timber structures in Japan [C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand Paper 2000(0851).
- [53] 前野将辉, 鈴木祥之, 松本慎也. 寺院建築物における伝統木造軸組みの構造力学特性のモデルかによる骨組解析[J]. 京都大学防災研究所年報, 2007, 50B: 117-131.
- [54] 棚橋秀光, 鈴木祥之. 伝統木造軸組の静的・動的実験のシミュレーション[J]. 歴史都市防災論文集, 2010, (4): 181-188.
- [55] Lee Y W, Hong S G, Bae B S, et al. Experiments and analysis of the traditional wood structural frame [C]//14th World Conference of Earthquake Engineering, Beijing: 2008.
- [56] 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 [C]//10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki: 2008.
- [57] Takino A, Kunugi A, Miyamoto Y, et al. Analytical and experimental study on structural behavior of traditional wooden frame including kumimono [C]//15th World Conference of Earthquake Engineering, Lisbon: 2012.