

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.002



古建筑木结构偷心造和计心造斗拱 力学性能数值分析

潘毅^{1a,1b}, 袁双^{1a}, 王慧琴^{1a,2}, 王晓玥^{1a}, 林拥军^{1a}

(1. 西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 抗震工程技术四川省重点实验室, 成都 610031;

2. 西南交通大学希望学院, 成都 610400)

摘要: 古建筑木结构的斗拱做法有偷心造和计心造两种基本形式, 为研究这两种斗拱力学性能的差异, 以饶益寺大佛殿的偷心造与计心造斗拱为研究对象, 建立偷心造与计心造斗拱的有限元模型, 用某斗拱的试验数据验证了有限元模型的正确性, 并分析这两种斗拱在竖向荷载和水平低周反复荷载作用下的力学性能。研究表明: 在竖向荷载作用下, 由于计心造斗拱的横拱比偷心造斗拱多, 其竖向荷载-位移曲线有一个明显的强化阶段, 导致其极限承载力比偷心造斗拱大 29.9%; 在水平低周反复荷载作用下, 两种斗拱的滞回曲线都比较饱满, 均表现出较好的耗能能力, 但二者相差不大。

关键词: 古建筑; 木结构; 偷心造; 计心造; 斗拱

中图分类号: TU366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)05-0009-07

Numerical analysis of mechanical behavior of Tou-xin-zao and Ji-xin-zao tou-kung in Chinese ancient timber structures

Pan Yi^{1a,1b}, Yuan Shuang^{1a}, Wang Huiqin^{1a,2}, Wang Xiaoyue^{1a}, Lin Yongjun^{1a}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. Southwest Jiaotong University Hope College, Chengdu 610400, P. R. China)

Abstract: Tou-xin-zao and ji-xin-zao are the two basic forms of tou-kung in Chinese ancient timber structures. To study the mechanical performance of the two types of tou-kung, finite element models are established for the typical tou-xin-zao and ji-xin-zao tou-kung in Raoyi Temple. The models are verified with previous experimental results and then subjected to vertical loading and horizontal low frequency cyclic loading, respectively. The finite element analysis shows that under vertical loading, the ji-xin-zao tou-kung experiences a strength hardening stage, with the ultimate bearing capacity 29.9% higher than that of tou-xin-zao tou-kung. It was found that the additional structural members (heng-gong) in ji-xin-zao tou-kung contributed to the higher bearing capacity. Under horizontal cyclic loading, the two tou-kung types behave equally well in terms of energy dissipation performance and both exhibit relatively plump hysteresis loops.

收稿日期: 2017-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(51208427); 中国工程院咨询研究项目(2010-ZD-4)

作者简介: 潘毅(1977-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事建筑结构抗震与减震、工程结构鉴定与加固研究, (E-mail) panyi@home.swjtu.edu.cn.

林拥军(通信作者), 男, 副教授, 博士, (E-mail) scsmith@126.com.

Received: 2017-02-26

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51208427); Consulting Research Project of Chinese Academy of Engineering (No. 2010-ZD-4)

Author brief: Pan Yi (1977-), associate professor, doctoral supervisor, main research interests: seismic strengthening and appraisal of building, (E-mail) panyi@home.swjtu.edu.cn.

Lin Yongjun (corresponding author), associate professor, PhD, (E-mail) scsmith@126.com.

Keywords: ancient buildings; timber structures; tou-xin-zao; ji-xin-zao; tou-kung

斗拱在中国古建筑木结构中占有非常重要的地位,其作为建筑柱子与屋架之间的承接过渡部分,不仅有装饰美观的效果,还具有承上启下、传递荷载的作用^[1]。在汶川地震和芦山地震中,大量古建筑木结构发生不同程度的破坏^[2-3],而斗拱对古建筑木结构的整体受力和抗震能力有重要影响。因此,研究斗拱的力学性能对古建筑木结构保护有着重要意义。

近年来,学者们对斗拱的力学性能开展了一系列研究。高大峰等^[4]按照宋《营造法式》殿堂类二等材柱头八铺作计心造斗拱为标准,取斗底两跳制作了缩尺比为 1:3.52 试验模型,进行了竖向荷载及水平低周反复荷载试验,分别得到斗拱在这两种荷载下的刚度计算模型。陈志勇等^[5]以应县木塔第 2 暗层外槽柱头铺作作为研究对象,制作了缩尺比为 1:3.4 试验模型,通过竖向荷载试验得到了斗拱在竖向荷载作用下的传力路径、破坏模式、受力性能及耗能性能等。袁建力等^[6]选取应县木塔的 3 种典型斗拱:柱头铺作、补间铺作和转角铺作,制作了缩尺比为 1:3 的试验模型,通过竖向荷载试验得到斗拱的竖向荷载-竖向变形曲线,通过水平低周反复荷载试验,得到斗拱在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,分析了斗拱侧向变形特征和耗能能力。周乾等^[7-8]采用空间二节点虚拟弹簧单元模拟斗拱及榫卯节点,对故宫神武门、太和殿等进行了抗震性能分析。津和佑子等^[9-11]以日本法隆寺五重塔底层含斗拱框架为研究对象,进行了 1:2/3 缩尺模型试验,获得了斗拱基频和阻尼比,建立了考虑斗拱的木构架有限元模型。目前,研究主要集中在以按照宋《营造法式》制作的斗拱以及明清北方官式古建筑上的斗拱,但斗拱构造复杂、形式多样,且形式及做法随时间的推移而发生改变,斗拱的做法由偷心造向计心造发展^[12],到明清时期,偷心做法则逐渐减少^[13]。而始建于明代的四川省饶益寺大佛殿上的斗拱同时保留有偷心造和计心造两种做法,具有明显的地域特征。

笔者以饶益寺大佛殿的偷心造与计心造斗拱为研究对象,采用有限元数值模拟,对这两类斗拱在竖向荷载和水平低周反复荷载作用下的力学性能进行分析和对比,从力学的角度解读斗拱的演变,为古建筑木结构的保护提供理论依据。

1 “偷心”与“计心”的构造

斗拱在演变过程中,组成构件越来越多。在汉代南北朝只有斗和横拱,不具有出跳功能,起到减小檐檁内力的作用,随着时间的推移,华拱和昂开始出

现,斗拱增加了出跳功能,为了保证结构整体的稳定性,出跳的华拱和昂上布置的横拱越来越多,斗拱便由偷心造向计心造过渡。宋《营造法式》卷四“大木作制度一”整卷都在阐述斗拱形制。其中,“总铺作次序”一节有如下记载:“凡铺作逐跳上安拱,谓之‘计心’;若逐跳上不安拱,而再出跳或出昂者,谓之‘偷心’”^[12]。图 1 为山西五台山佛光寺大佛殿柱头铺作斗拱简图,该斗拱外檐的第 1 跳华拱上未安横拱,为“偷心”,第 2 跳华拱与第 1、2 跳上昂上均安有横拱,为“计心”。

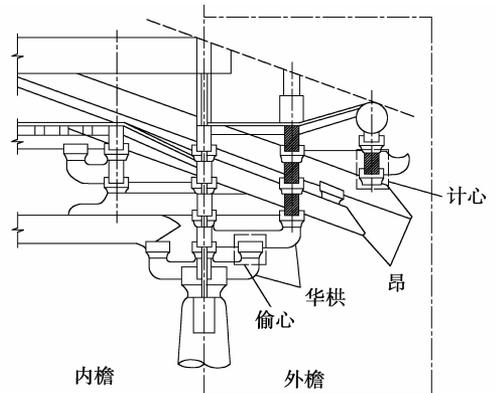


图 1 佛光寺东大殿柱头铺作斗拱
Fig. 1 Tou-kung on column sketch
(East Hall of Foguang Temple)

饶益寺位于四川省遂宁市射洪县柳树镇南 2 km 的通济山,建于公元 1411 年。木构架主体形式为抬梁式,大殿共有柱 16 根,其中内柱 4 根。建筑总高约为 10 m,主体结构占地面积约为 143.8 m²,大佛殿平面布置见图 2。

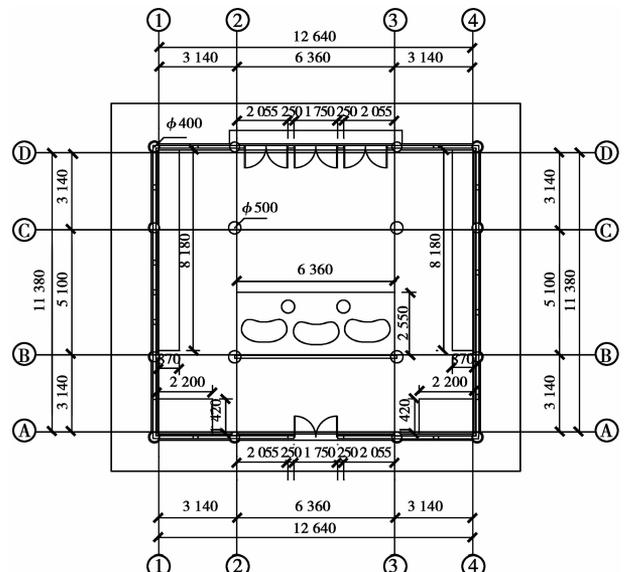


图 2 饶益寺大佛殿平面布置(单位:mm)

Fig. 2 Plan view of the Main Hall of Raoyi Temple

饶益寺大佛殿外檐共有斗拱 31 朵,除后檐当心间 3 朵补间铺作斗拱为偷心造斗拱外,其余外檐斗拱均为计心造斗拱,大殿前后檐斗拱细部详图见图 3。



图 3 饶益寺大佛殿前后檐斗拱布置及细部构造

Fig. 3 Tou-kung layout and details

(Main Hall of Raoyi Temple)

2 斗拱模型的建立与验证

2.1 模型的建立

2.1.1 木材的力学性能 四川地区云杉广布,且使用普遍,故饶益寺大佛殿斗拱的木材选定为云杉。根据文献[14]和《木结构设计手册》[15],得到云杉分别在弹性阶段与塑性阶段的材性常数,见表 1、表 2。采用 ANSYS 有限元软件进行斗拱的有限元分析,木材采用广义 Hill 屈服准则来描述其进入塑性阶段后的力学行为,设定云杉的本构模型为拉压同性,且木材的顺纹与横纹两个方向屈服后,其应力不再增加,木材的本构模型见图 4。

表 1 云杉的弹性阶段材性常数

Table 1 Elastic material parameters of Spruce

E_L /MPa	E_R /MPa	E_T /MPa	μ_{RL}	μ_{TL}	μ_{TR}	G_{LR} /MPa	G_{RT} /MPa	G_{LT} /MPa	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
10 300	1 030	520	0.035	0.035	0.300	770	190	620	459

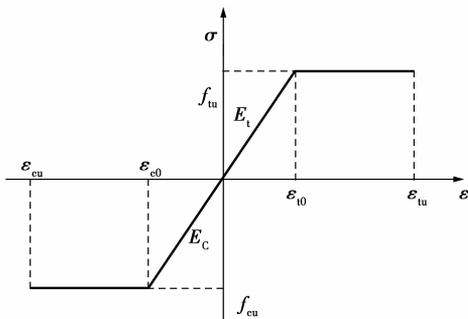
注: E 为弹性模量; G 为剪切模量; μ_{ij} 为泊松比,其值为 j 向压应变/ i 向拉应变;下标 L 表示纵向,下标 R 表示径向,下标 T 表示弦向,下标 RT 表示横切面;下标 LR 表示径切面;下标 LT 表示弦切面; ρ 为密度。

表 2 云杉的塑性阶段材性常数

Table 2 Plastic material parameters of Spruce

方向	σ_c /MPa	E_c /MPa	σ_t /MPa	E_t /MPa
顺纹	25.90	0	25.90	0
横纹	2.30	0	2.30	0

注: σ_c 为抗压强度; E_c 为抗压弹性模量; σ_t 为抗拉强度; E_t 为抗拉弹性模量。



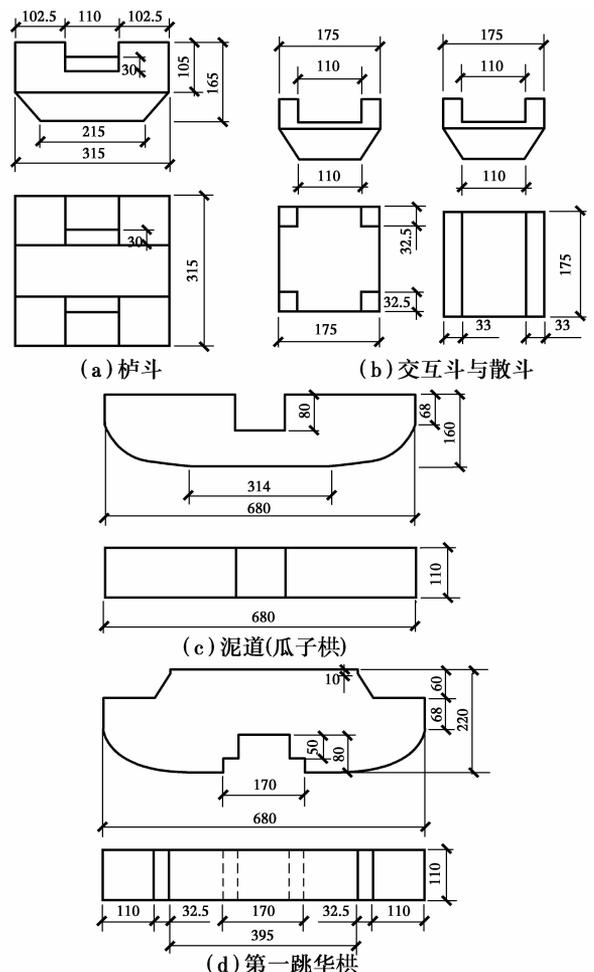
注: σ 为木材的应力强度; ϵ 为木材的应变; ϵ_{c0} 为应力刚达到木材极限抗压强度 f_{cu} 时的应变; f_{cu} 为木材的极限抗压强度; ϵ_{t0} 为应力刚达到木材极限抗拉强度 f_{tu} 时的应变; f_{tu} 为木材的极限抗拉强度; ϵ_{cu} 为木材的极限压应变; ϵ_{tu} 为木材的极限拉应变。

图 4 木材的本构模型

Fig. 4 Stress-strain curve of wood used in finite element modeling

2.1.2 有限元模型 建立的两个斗拱模型分别为饶益寺大殿前、后檐当心间补间铺作斗拱,其中,外檐当心间补间铺作斗拱的外跳做法为“计心”,里跳做法为“偷心”,按计心造命名。后檐当心间布置的 3 朵补间铺作斗拱做法为完全“偷心”,按偷心造命

名。根据实地测绘,获得斗拱各构件的详细尺寸,主要构件的尺寸见图 5。



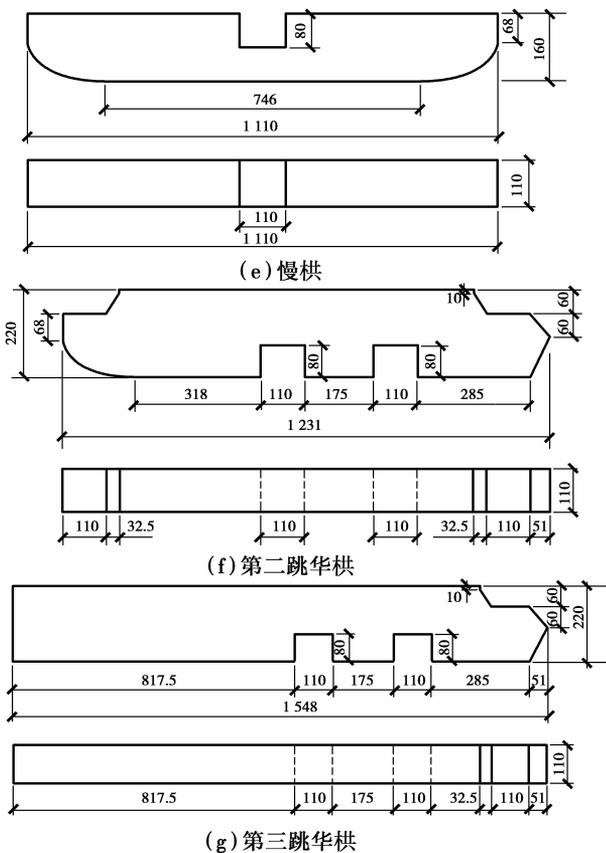


图 5 饶益寺斗拱各构件尺寸 (单位: mm)

Fig. 5 Dimensions of individual Tou-kung components (Main Hall of Raoyi Temple)

化为均布荷载施加于斗斗底。分析斗拱在水平低周反复荷载作用下的力学性能时,先施加竖向荷载,接下来的荷载步施加侧向位移,每一个荷载步的位移通过一系列的荷载子步逐渐施加。

2.2 模型的验证

2.2.1 试验概况及有限元模型 袁建力等^[6]对应县木塔中 3 种有代表性的斗拱:柱头铺作斗拱、转角铺作斗拱和补间铺作斗拱,进行了竖向荷载及水平低周反复荷载作用下的试验研究。这 3 种斗拱分别按照 1:3 的缩尺比制作试验模型,模型采用红松制作。为验证有限元建模方法的正确性,按照文献^[6]中应县木塔柱头铺作斗拱的试验模型及加载,采用有限元软件 ANSYS 对该柱头铺作斗拱进行竖向荷载及水平低周反复荷载作用下的受力分析。斗拱的有限元模型见图 7(a),约束与边界条件见图 7(b)。

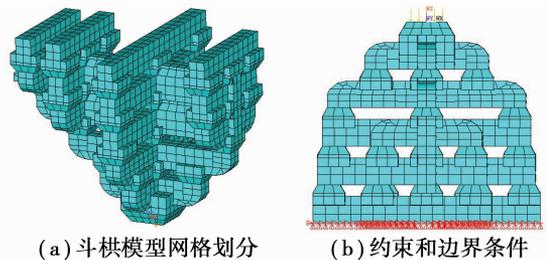


图 7 应县木塔柱头铺作斗拱的有限元模型

Fig. 7 Finite element model (FEM) of tou-kung-on-column in Yingxian Timber Pagoda

用 ANSYS 有限元软件分析饶益寺大佛殿上的偷心造与计心造斗拱,在竖向荷载及水平低周反复荷载作用下的受力特征,有限元模型见图 6。采用 SOLID95 单元模拟斗和拱,CONTA175 模拟三维目标面与单元的可变形面之间的接触和滑移,TARGE170 模拟斗拱中发生接触部位的目标面。斗拱各构件之间的接触有“刚体-柔体”与“柔体-柔体”两类,构件间的切向作用利用接触面之间的摩擦来实现,根据文献^[14]取木材摩擦系数 $\mu=0.45$ 。

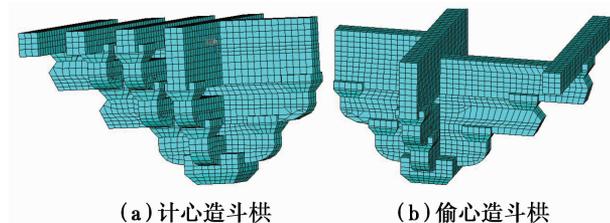


图 6 饶益寺大佛殿偷心造与计心造斗拱有限元模型

Fig. 6 Finite element models of Ji-xin-zao and Tou-xin-zao tou-kung in the Main Hall of Raoyi Temple

有限元模型中将模型最上方的檩顶面各节点的 X、Y、Z 方向上的自由度进行约束。分析斗拱竖向荷载作用下的力学性能时,将竖直方向的集中力转

2.2.2 计算结果与试验结果对比 应县木塔柱头铺作斗拱在竖向荷载作用下 $N-\Delta_v$ 曲线的计算值与试验值的对比如图 8 所示;在竖向荷载 $N(15 \text{ kN})$ 与水平低周反复荷载 P 作用下 $P-\Delta_H$ 滞回曲线的计算值和试验值的对比如图 9 所示。由图 8 和图 9 可知,有限元模型的计算结果和试验结果差别不大,考虑到材料的离散性和试验的误差,建立的斗拱有限元模型可以有效模拟斗拱的受力性能。

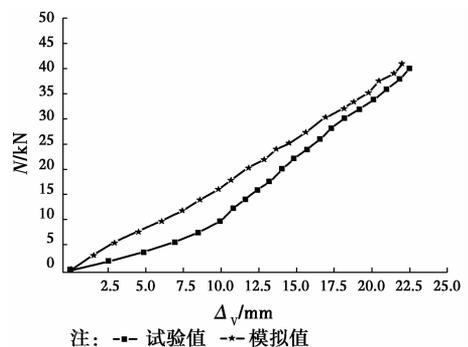


图 8 $N-\Delta_v$ 计算值与试验值的比较

Fig. 8 Comparison of load-displacement curves for test and FEM results under vertical loading

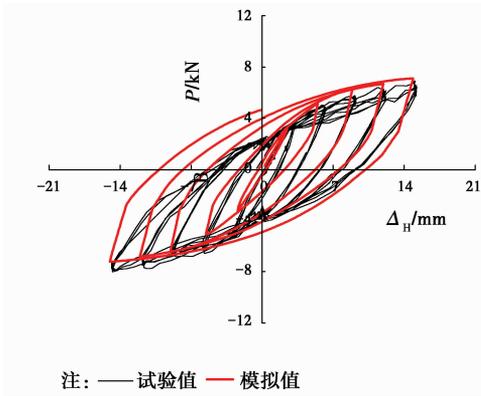


图 9 $P-\Delta_H$ 滞回曲线计算值与试验值的比较
 Fig. 9 Comparison of hysteretic curves for test and FEM results under low frequency cyclic loading

3 偷心造和计心造斗拱的力学性能

3.1 竖向荷载作用下的力学性能

在竖向荷载作用下偷心造和计心造斗拱的 $N-\Delta_v$ 曲线,见图 10。由图 10 可知,在竖向荷载作用下,偷心造斗拱的 $N-\Delta_v$ 曲线可分为两个阶段:第 1 阶段,材料的应力和应变由弹性阶段进入到塑性阶段,斗拱各构件由于受到横纹向挤压作用致使其受压变形,刚度迅速增加;第 2 阶段,随着荷载进一步增大,斗拱各构件开始发生破坏,造成斗拱受压变形刚度减小。计心造斗拱抗压刚度的变化过程与偷心造斗拱基本相似。第 1 阶段刚度呈线弹性变化,且增大的速度较快;第 2 阶段由于荷载的增加,斗拱开始进入弹塑性状态,斗拱各构件开始发生破坏,造成斗拱受压变形刚度减小。不同的是,竖向荷载作用下,计心造斗拱的 $N-\Delta_v$ 曲线有一个明显的强化阶段,其主要原因是计心造斗拱外檐的两跳华拱上均安有横拱,这些横向构件提高了斗拱的竖向承载能力。

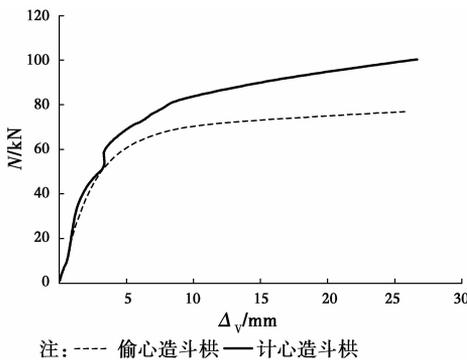


图 10 偷心造与计心造斗拱的 $N-\Delta_v$ 曲线
 Fig. 10 Load-displacement curves for tou-xin-zao and ji-xin-zao tou-kung

在竖向荷载作用下斗拱的 $N-\Delta_v$ 曲线可简化为三折线计算模型,如图 11 所示。通过计算可得,计心造斗拱的 $N-\Delta_v$ 计算模型 3 段的刚度分别是 21.20、5.09、0.97 kN/mm。偷心造斗拱 $N-\Delta_v$ 计算模型在弹性阶段和弹塑性阶段的刚度分别为 19.58、4.58、0.55 kN/mm。相比计心造斗拱,偷心造斗拱在弹性和弹塑性阶段的刚度分别降低了 7.64%、10.02% 和 54.65%。

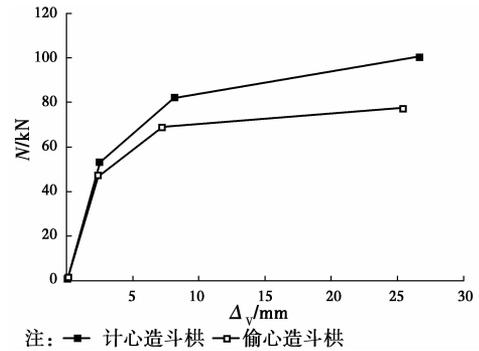


图 11 偷心造与计心造斗拱的 $N-\Delta_v$ 计算模型
 Fig. 11 Simplified load-displacement curves for tou-xin-zao and ji-xin-zao tou-kung

3.2 水平低周反复荷载作用下的力学性能

图 12 为偷心造和计心造斗拱在竖向荷载 $N(20\text{ kN})$ 和水平低周反复荷载 P 共同作用下的 $P-\Delta_H$ 曲线。为了尽可能地与试验条件接近,水平低周反复荷载 P 采用位移控制加载,每个荷载步通过不同的荷载子步逐渐达到所施加的位移。由图 11 可以看出,计心造斗拱和偷心造斗拱的滞回曲线均较为饱满,有较好的耗能能力。

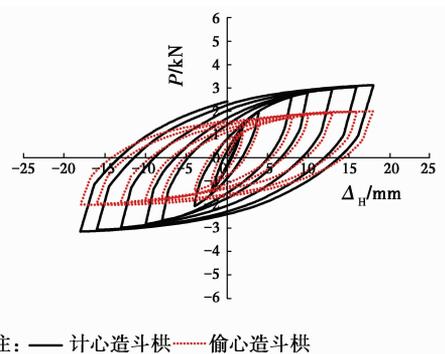
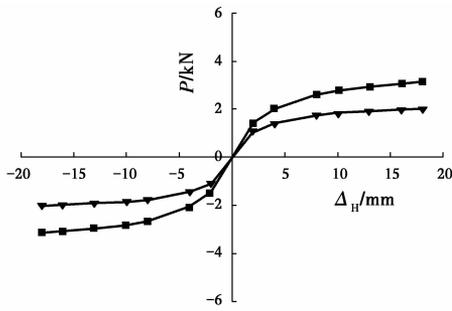


图 12 偷心造和计心造斗拱的 $P-\Delta_H$ 滞回曲线
 Fig. 12 Hysteretic curves for tou-xin-zao and ji-xin-zao tou-kung

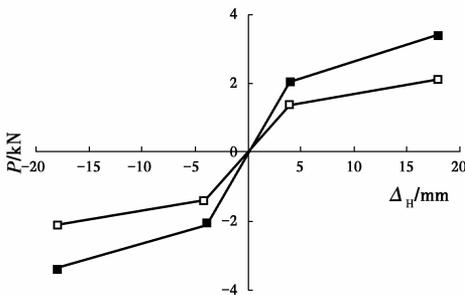
图 13 为偷心造与计心造斗拱的 $P-\Delta_H$ 滞回骨架曲线。将斗拱在水平低周反复荷载作用下的 $P-\Delta_H$ 滞回骨架曲线简化为两折线模型,如图 14 所示。通过计算模型可知,计心造斗拱和偷心造斗拱在弹性阶段的抗侧刚度分别为 0.51、0.35 kN/mm,在弹

塑性阶段的抗侧刚度分别为 0.1、0.05 kN/mm。计心造斗拱的抗侧刚度大于偷心造斗拱。



注: —■— 计心造斗拱 —▲— 偷心造斗拱

图 13 偷心造与计心造斗拱的 $P-\Delta_H$ 滞回骨架曲线
Fig. 13 Skeleton curves for Tou-xin-zao and Ji-xin-zao tou-kung



注: —■— 计心造斗拱 —▲— 偷心造斗拱

图 14 偷心造与计心造斗拱的骨架曲线模型
Fig. 14 Simplified skeleton curves for Tou-xin-zao and Ji-xin-zao tou-kung

文献[16]采用滞回耗能因子 f 评估斗拱的耗能能力,其定义为滞回曲线包络线的面积与其所对应的外包矩形面积之比。滞回曲线包络线的面积可近似地用其恢复力模型的面积代替。 f 由式(1)可得。

$$f = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\Delta_i P_{i-1} - \Delta_{i-1} P_i)}{4 \Delta_m P_m} = \frac{P_y}{P_m} - \frac{\Delta_y}{\Delta_m} \quad (1)$$

式中: P_y 、 P_m 为斗拱两折线模型的第 1 个转折点(屈服点)和最大值点(破坏点)分别对应的外荷载; Δ_y 、 Δ_m 分别为斗拱两折线模型的第 1 个转折点(屈服点)和最大值点(破坏点)对应的位移。

计心造与偷心造斗拱的滞回耗能因子 f 如表 3 所示。由表 3 可知,二者的耗能能力相差不大。

表 3 计心造与偷心造斗拱的滞回耗能因子
Table 3 Hysteretic energy dissipation factor of Tou-xin-zao and Ji-xin-zao tou-kung

斗拱类别	P_y /kN	P_m /kN	Δ_y /mm	Δ_m /mm	f
计心造	2.0	3.4	4	4	0.37
偷心造	1.4	2.4	18	18	0.36

4 结论

以四川省饶益寺大佛殿的偷心造与计心造斗拱为研究对象,对比了二者在竖向荷载与水平低周反复荷载作用下的力学性能,得出以下结论:

1)在竖向荷载作用下,计心造斗拱和偷心造斗拱在弹性阶段的受力性能基本接近,屈服荷载大致相同。但计心造斗拱的竖向极限承载力比偷心造斗拱高 29.9%。这是由于横拱提高了计心造斗拱的稳定性和承载力。

2)在水平低周反复荷载作用下,计心造斗拱在弹性阶段和弹塑性阶段的抗侧刚度大于偷心造斗拱,两种斗拱的滞回曲线都比较饱满,但二者的耗能能力相差不大。

致谢:感谢西南交通大学建筑与设计学院张宇老师、扬州大学建筑科学与工程学院袁建力老师在古建筑测绘和斗拱试验数据方面对研究给予的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 马炳坚. 中国古建筑木作营造技术[M]. 北京:科学出版社,1991.
MA B J. Construction technology of Chinese ancient wood buildings [M]. Beijing: Science Press Co. Ltd, 1991. (in Chinese)
- [2] 潘毅,王超,季晨龙,等. 汶川地震中木结构古建筑的震害调查与分析[J]. 建筑科学,2012,28(7):103-106.
PAN Y, WANG C, JI C L, et al. Investigation and analysis of seismic damage for Chinese ancient timber buildings in Wenchuan Earthquake [J]. Building Science, 2012, 28(7): 103-106. (in Chinese)
- [3] 潘毅,唐丽娜,王慧琴,等. 芦山 7.0 级地震古建筑震害调查分析[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(1):140-146.
PAN Y, TANG L N, WANG H Q, et al. Investigation and analysis of damage to ancient buildings in Lushan Ms7.0 earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 140-146. (in Chinese)
- [4] 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.
GAO D F. A research on structure and their aseismatic characteristics of ancient Chinese timber buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. (in Chinese)
- [5] CHEN Z Y, ZHU E C, FRANK-LAM E T, et al.

- Structural performance of dou-gong brackets of Yingxian Wood Pagoda under vertical load: An experimental study [J]. *Engineering Structures*, 2014, 80(9): 274-288.
- [6] 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.
YUAN J L, CHEN W, WANG J, et al. Experimental research on bracket set models of Yingxian Timber Pagoda [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(7): 66-72. (in Chinese)
- [7] 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.
ZHOU Q, YAN W M, ZHOU X Y, et al. Study on dynamical character and seismic response of Shen-Wu Gate in the Forbidden City [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2009, 31(2): 90-95. (in Chinese)
- [8] 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*, 2013, 41(4): 487-494.
ZHOU Q, YAN W M, GUAN H Z, et al. Aseismic behaviors of Tai-He Palace in the Forbidden City [J]. *Journal of Fuzhou University*, 2013, 41(4): 487-494. (in Chinese)
- [9] 津和佑子,加藤圭,金惠园,等. 組物有する统木造軸組の振動台実験 [J]. *生産研究*, 2008, 60(2): 11-14.
TSUWA I, KATO K, KIM H W. The shaking table test of a traditional timber frame including Kumimono [J]. *The Institute of Industrial Science*, 2008, 60(2): 11-14. (in Japanese)
- [10] 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, 东京: 日本建築学会, 2008: 43-44.
KATO K, TSUWA I, KOSHIHARA M. Shaking table test of a traditional timber frames including Kumimono, Part 1: Experiment outline and results [C]//Summary of academic lectures at the Architectural Society of Japan, Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2008: 43-44. (in Japanese)
- [11] 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, 东京: 日本建築学会, 2008: 45-46.
TSUWA I, KATO K, KOSHIHARA M. Shaking table tests of timber frames including Kumimono, Part 2: Modeling of horizontal resistance and the analysis [C]// Summary of academic lectures at the Architectural Society of Japan, Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2008: 45-46. (in Japanese)
- [12] 徐伯安. 《营造法式》斗拱型制解疑、探微 [M]//建筑史论文集, 北京: 清华大学出版社, 1985, 1-35.
- [13] 潘德华. 斗拱 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2004.
PAN D H. Tou-kung [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2004. (in Chinese)
- [14] 董晓阳. 不同歪闪程度下木结构古建筑斗拱节点的抗震性能分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
DONG X Y. Research on seismic behavior of dou-gong brackets used in ancient timber buildings under different skew angle [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015. (in Chinese)
- [15] 中国建筑西南设计研究院. 木结构设计手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
China Southwest Architecture Design and Research Institute. Wood structure design manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese)
- [16] 高大峰,赵铁红,薛建阳. 木结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.
GAO D F, ZHAO T H, XUE J Y. A seismic characteristics of bucket arch and mortise-tenon joint of ancient Chinese timber buildings: Experimental research [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(2): 58-64. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)