

文章编号:1007-6069(2017)04-0011-07

# 古建筑木结构歪闪斗拱抗震性能的 ABAQUS 有限元分析

薛建阳, 路鹏, 董晓阳

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**为研究歪闪斗拱的抗震性能以及不同歪闪程度对斗拱的滞回性能、承载力、刚度、耗能等性能的影响,以 $\theta$ 角度切削平板枋的方式来考虑斗拱的不同歪闪情况,并利用 ABAQUS 程序对歪闪斗拱进行了水平向循环加载数值模拟。研究表明:在水平向循环力的作用下歪闪斗拱产生整体滑移,馒头榫发生剪切破坏;滞回曲线呈现正反向加载不对称现象,歪闪角度越大,不对称现象越显著;侧向刚度及能量耗散系数随角度的增大而逐渐减小,但仍具有较好的变形能力和耗能能力。揭示了斗拱的歪闪程度对其抗震性能的影响,研究结果可为现存木结构的残损评估与修缮加固提供参考。

**关键词:**木结构古建筑;歪闪斗拱;抗震性能;刚度退化;有限元分析

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

## Finite element analysis on the seismic behavior of the skewed DOU – GONG brackets in ancient timber buildings by ABAQUS program

XUE Jianyang, LU Peng, DONG Xiaoyang

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to find out the seismic behavior of skewed Dou-Gong and the effects on Dou-Gong hysteretic behaviors, bearing capacity, stiffness, energy dissipation and other properties under different skew angle, Dou-Gong skew level were considered by the method of cutting PingBanFang in theta angle, and the skewed Dou-Gong were simulated under cyclic lateral loading based on ABAQUS program. The results show that, the skewed Dou-Gong produces the overall slippage and the dowel produces shear failure under cyclic lateral loading. The hysteretic curves are asymmetrical and the asymmetry is more obvious when the skew angle increases. The stiffness and energy dissipation coefficient decrease with the increase of damage degree, but the skewed Dou-Gong still has a good ability of deformation and energy dissipation. That the skew angle impacts on Dou-Gong seismic behavior is explored in this study, and the result of test provides a reference for the existing wood structure damage assessment and repair of reinforcement.

**Key words:** ancient timber buildings; skewed Dou-Gong; seismic behavior; stiffness degradation; finite element analysis

## 引言

中国古建筑经过几千年的发展,形成了不同于其他国家建筑的独特风格。近年来,木结构古建筑在屡遭

收稿日期:2016-06-23; 修订日期:2016-08-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51678478);“十二五”科技支撑计划项目(2013BAK01B03-02);陕西省科学技术研究发展计划项目(2013KW23-01)

作者简介:薛建阳(1970-),男,河南洛阳人,教授,主要从事型钢-混凝土组合结构、古建筑结构及其抗震性能、结构的减震控制研究。  
E-mail: jianyang\_xue@163.com

大地震、大风和人为破坏时不倒,表现出了相当好的抗震性能,这与其本身的材料特性、结构特点和历年的精心维护相关。斗拱对木结构的抗震性能有重要影响<sup>[1]</sup>: 在地震作用下能够消耗部分地震能量,斗拱具有良好的变形能力和耗能能力,对抗震有利。但是古建筑木结构斗拱在历经几百年甚至几千年的时间里,会发生不同程度的残损,例如大斗或交互斗会因为集中受力而出现横纹受压劈裂破坏;被斗拱浮搁于其上的平板枋,由于其截面较小,在长期受拉受压的情况下,横纹受压强度降低,在中部或端部会产生顺纹的压裂现象,或是发生斜向裂纹的破坏现象<sup>[2]</sup>。木结构古建筑中的木构件都是以榫卯方式结合的,所以2个构件相交处常出现折断劈裂现象<sup>[3-4]</sup>,如位于大斗与平板枋之间的馒头榫,受力复杂,既受剪又受压,在多次的地震作用下,往往因剪力的作用而断裂。如今存世的木结构古建筑,木材材性都已发生不同程度的退化,各构件的残损形态和程度不一,加之各种自然和人为因素,降低了古建筑的安全性能,威胁着结构的安全。因此测评木结构古建筑的安全性、提出合理的修缮方案已成为普遍关注的问题,这就要求对木结构古建筑的材料属性、结构特点和残损形式有充分的认识<sup>[5-6]</sup>,所以主要针对斗拱残损情况之一整体歪闪进行研究。

采用有限元分析软件 ABAQUS 建立歪闪斗拱模型,通过水平低周反复加载模拟试验,对比分析不同歪闪角度下斗拱的破坏特征、 $P-\Delta$  滞回曲线、骨架曲线和耗能等性能,得到不同歪闪角度对斗拱抗震性能的影响。

## 1 模型建立

在建立歪闪斗拱模型之前,首先建立无歪闪斗拱模型,其材料参数、接触参数等有限元模拟参数与歪闪斗拱模型完全相同。

### 1.1 材料参数

木材应力应变曲线在荷载作用下包括弹性和塑性2个阶段,弹性阶段的木构件表现出了木材的正交各向异性,考虑到斗拱各构件在实际建造过程中,横纹的径向和弦向指向随机,没有明显的规律。模拟采用东北红松的材性数据,并将木材的横截面视为各项同性,取其弦向与径向材料参数的均值。结合文献[7]中的东北红松材性试验数据,弹性阶段的木材模拟参数见表1。

表1 木材弹性参数指标

Table 1 Elastic parameter index of wood

$E_1$	$E_2$	$E_3$	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$
10 000	460	460	460	460	210	0.300	0.020	0.035

注: $E$ 、 $G$ 和 $\mu$ 分别为木材的弹性模量、剪切模量和泊松比,表中弹性模量和剪切模量的单位为MPa;下标1、2和3分别表示木材中的纵向、径向和弦向。

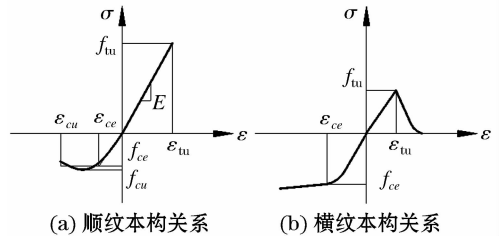


图1 木材顺纹及横纹应力-应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of wood along the lines and horizontal stripe

当木材进入塑性阶段后,对其需采用弹塑性分析。在该次模拟中,主要考虑木材的横纹与顺纹拉压状态,采用Chen<sup>[8]</sup>推荐的如图1(a)所示的顺纹本构模型,以及图1(b)所示的木材在横纹压力作用下的线性强化弹塑性模型,并结合文献[7]中东北红松材性试验数据的结果定义木材的弹塑性本构关系。

### 1.2 构件尺寸

模型中各构件的尺寸及构造依据文献[7]所做的单朵斗拱试验中所提供的斗拱尺寸取得,具体见图2-8。其内部构造及隐藏尺寸则参考宋代的《营造法式》和清《工程做法则例》。构造详图见图9。

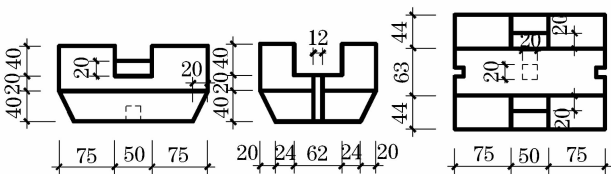


图2 大斗详图

Fig. 2 DaDou detail

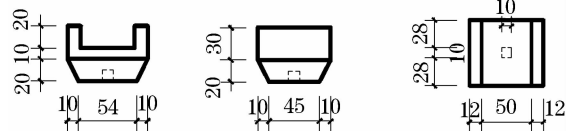


图3 三才升详图

Fig. 3 SanCaiSheng detail

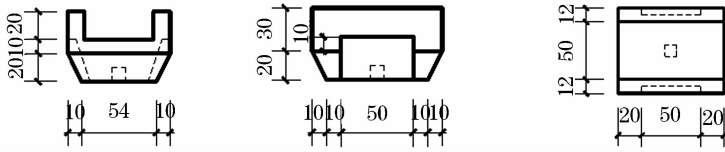


图 4 十八斗详图

Fig. 4 ShiBaDou detail

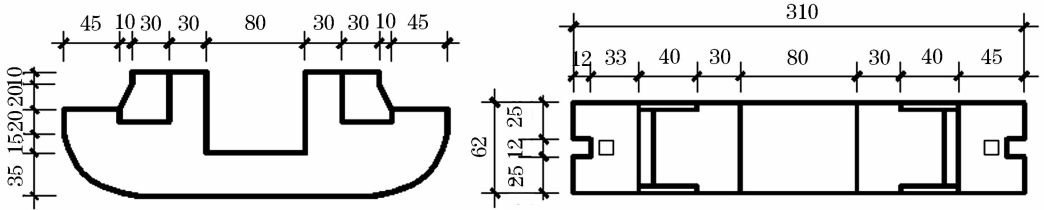


图 5 正心瓜拱详图

Fig. 5 ZhengXinGuaGong detail

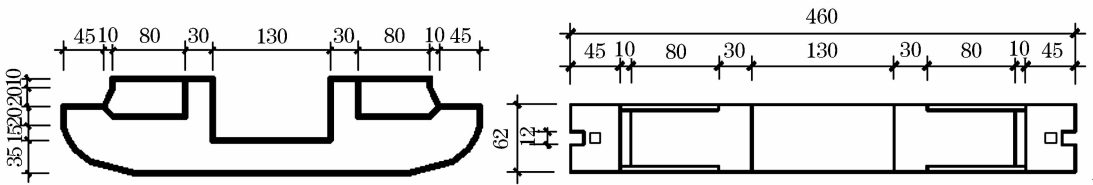


图 6 正心万拱详图

Fig. 6 ZhengXinWanGong detail

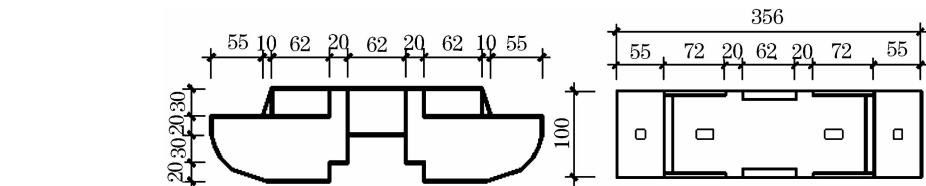


图 7 头翘详图

Fig. 7 TouQiao detail

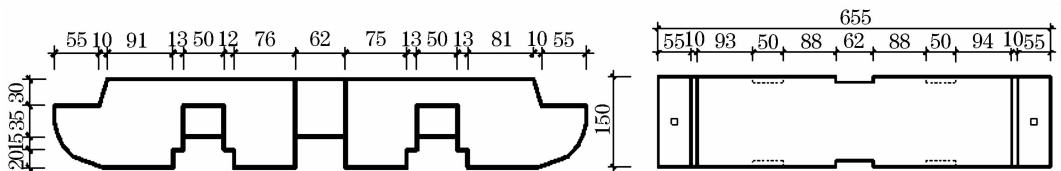


图 8 头昂详图

Fig. 8 Tou-Ang detail

### 1.3 歪闪斗拱模型的建立

斗拱的“歪闪”定义为斗拱整体倾斜,通过以  $\theta$  角度切削平板枋的方法实现。主要模拟了由于木材的各向异性、荷载偏心导致受力不均和遭虫蛀腐蚀等原因造成的平板枋在受大斗局部横纹承压的条件下,被嵌压程度不同从而导致斗拱歪闪的情况。根据木材弹塑性大变形中的三角形嵌压理论<sup>[9-10]</sup>,三角形嵌压形成的受压区分为 2 个部分,如图 10 所示。第 1 部分是荷载范围内的压缩部分( $x_p$  范围内),其压缩量是关于  $\theta$  的线性函数。第 2 部分是荷载范围外的压缩部分( $x_i$  范围内),其压缩量是一条曲线,如图 10(b)在  $x$  方向上的压缩示意图。大斗嵌

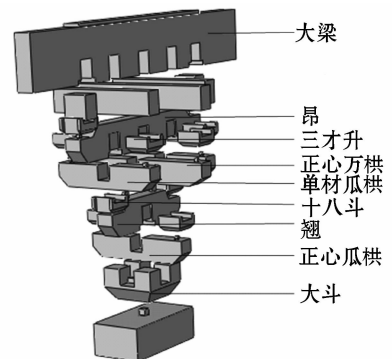


图 9 构件分解示意图

Fig. 9 Member exploded schematic

压平板枋使其进入塑性阶段直至破坏时的角度可结合材料参数求解得到,解得  $\theta = 0.08\text{rad}$ , 约为  $5^\circ$ , 故歪闪角度值取  $\theta_0 = 0^\circ$ 、 $\theta_1 = 2^\circ$ 、 $\theta_2 = 4^\circ$  和  $\theta_3 = 6^\circ$ 。分别对应斗拱的三维模型 FEM-1、FEM-2、FEM-3 和 FEM-4, 三维模型 FEM-1 如图 11 所示。

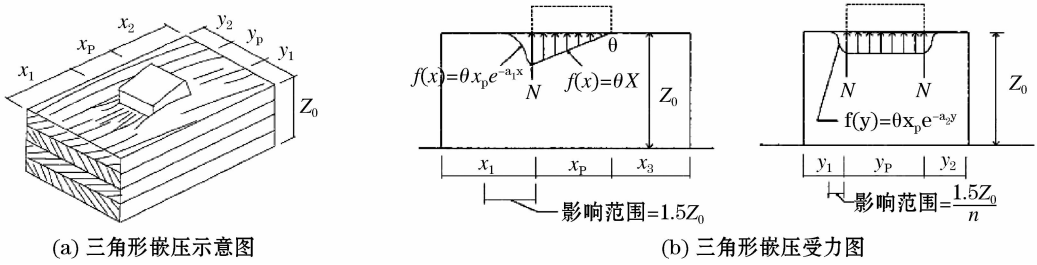


图 10 三角形嵌压示意图

Fig. 10 Triangle pressure diagram

1.4 单元及其基本参数

模型使用六面体线性缩减积分实体单元 C3D8R 划分网格如图 12 所示<sup>[11]</sup>。网格基本尺寸为  $15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ , 在接触复杂的地方, 网格尺寸划分相对较细。接触采用硬接触, 接触摩擦因数  $M_U = 0.45$ 。在试件进行水平循环加载时约束平板枋底面的 6 个自由度, 并在梁顶部的垫板上施加竖向荷载, 梁端部施加水平荷载。该模拟主要考虑斗拱沿着其上部木梁(如图 9) 跨度方向的歪闪情况, 选取与水平荷载加载方向共面的竖向平面将整体模型分割成对称的 2 个部分, 这 2 个部分的荷载布置和约束都是关于该竖向平面对称分布的, 所以选取其中 1 个部分进行模拟。

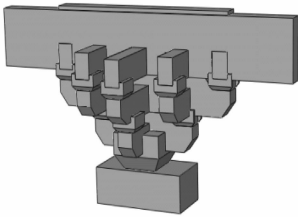


图 11 歪闪斗拱三维模型

Fig. 11 Three-dimensional model of Dou-Gong

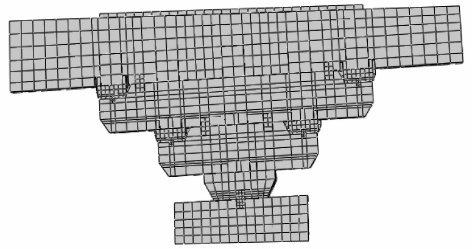


图 12 歪闪斗拱模型网格划分

Fig. 12 Model meshing of Dou-Gong brackets

2 斗拱有限元分析模型试验验证

文献[12]按照宋《营造法式》及清《工程做法则例》制作斗拱模型, 并进行了斗拱水平低周反复加载拟静力试验。斗拱模拟试件 FEM-1 与文献[10]中的 TEST-1 在水平低周循环加载试验中的滞回曲线对比图如图 13 所示。从图中可以看出: 曲线形状几乎相同, 类似平行四边形且形状饱满, 耗能良好。曲线趋势相

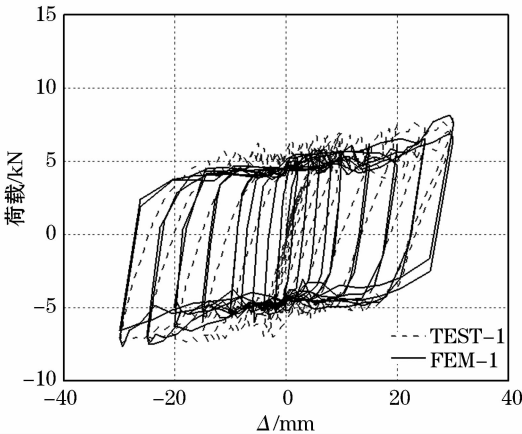


图 13 滞回曲线对比

Fig. 13 Comparison of hysteresis curve

表 2 主要特征参数比较

Table 2 Comparison of main parameters			
	试验值	模拟值	误差/%
$P_y/\text{kN}$	6.44	5.39	16.30
$k_1/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	1.38	1.42	2.90
$k_2/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	0.06	0.07	16.67
$\delta_y/\text{mm}$	5.03	5.00	0.60
$\delta_u/\text{mm}$	30.00	30.13	0.43
$\mu$	7.02	6.25	10.97
$\mu$	0.41	0.35	14.63

注: 表中误差 =  $(\text{模拟值} - \text{试验值}) / \text{试验值} \times 100\%$ ,  $P_y$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $\delta_y$ 、 $\delta_u$ 、 $\mu$  和  $h_e$  分别表示水平向屈服荷载、弹性阶段侧向刚度、弹塑性阶段侧向刚度和屈服位移、极限位移、位移延性系数、等效黏滞阻尼系数。

同,受荷载初期,荷载与位移呈线性关系,随着荷载增加,刚度减小,但荷载仍然不断增加。试验加载过程中由于相互搭接的构件之间存在缝隙,而在模拟过程中,构件均为无缝隙搭接,故模拟的初始刚度大于试验初始刚度值。

将有限元数值模拟得到的主要参数与试验值进行比较,结果见表 2。由于木材存在各向异性和加工缺陷等,表 2 中有限元模拟值与试验值相比,有一定的误差,但差别不大,这为之后歪闪斗拱的模拟分析提供了基础。

### 3 歪闪斗拱有限元模拟结果分析

#### 3.1 滞回曲线分析

利用 ABAQUS 进行水平低周循环加载模拟时,正向加载定义为减缓斗拱歪闪程度的方向,反向加载定义为加快其歪闪的方向。可得到在水平循环加载下歪闪斗拱的滞回曲线如图 14 所示。

从图 14 中可以看出:随着歪闪角度的增加,斗拱的滞回曲线在正反向加载时表现出显著的不对称性。这是因为加载点在正向施加一定位移的过程中,馒头榫榫头、平板枋和大斗底相互充分挤压,完全发挥了木材的受压性能,极限荷载值随角度的增大逐渐提高;而在反向加载的过程中,加载点施加同等位移的情况下,由于榫头、大斗底与平板枋挤压程度减弱,摩擦力减小,导致曲线面积不断减小,耗能减弱。

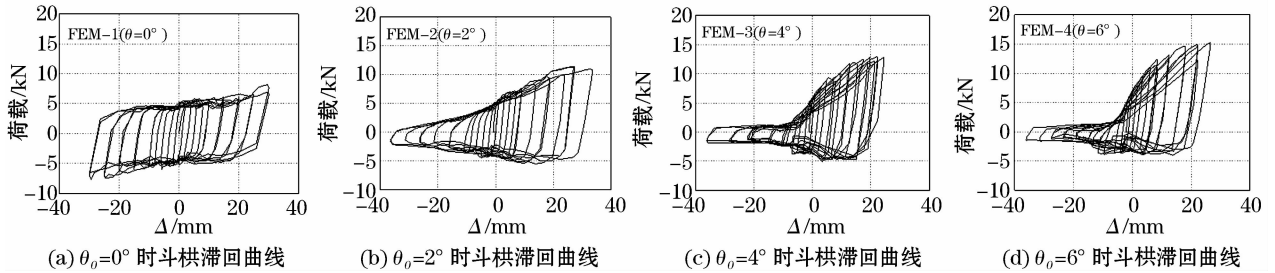


图 14 不同歪闪角度下斗拱滞回曲线

Fig. 14 Hysteresis curve of Dou-Gong under different skew angle

#### 3.2 骨架曲线分析

由图 15 可知:正向加载时,同等位移下的极限荷载值随角度的增大而增大,歪闪角度越小的越先进入塑性段,斗拱极限位移处的极限荷载值最大增幅将近 1 倍见表 3。这主要是因为歪闪角度越大,在正向加载过程中,构件间的相互挤压更充分,木材的受压特性更大程度得以发挥;反向加载时,在同等位移下的极限荷载值随角度的增大而减小,斗拱极限位移处荷载值最大降幅约为 80% 见表 3。主要原因是在斗拱产生滑移的过程中,构件相互间的挤压程度降低,构件间接触面逐渐脱离,馒头榫变形加剧导致其承载力不断下降。在反向加载位移控制后期,承载力几乎不变,斗拱整体滑移现象显著,主要是因为馒头榫的大变形使其几乎丧失承载能力,斗拱主要通过构件间的摩擦力抵抗水平荷载。

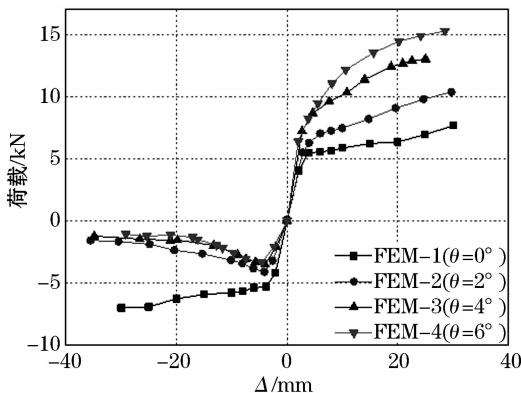


图 15 不同歪闪角度下斗拱骨架曲线对比

Fig. 15 Comparison of skeleton curve of Dou-Gong under different skew angle

表 3 极限荷载值

试件编号		FEM - 1	FEM - 2	FEM - 3	FEM - 4
极限位移处荷载值	正向加载	7.56	9.78	13.00	14.88
	反向加载	-7.04	-1.60	-1.25	-1.09

### 3.3 刚度退化分析

对于模拟的试件,骨架曲线出现明显转折的位移约为 5 mm,小于 5 mm 的骨架曲线基本为弹性段,无明显刚度退化现象,所以图 16 中刚度退化的位移值最小取 5 mm。从图 16 可以看到:各斗拱的刚度随着加载点位移的增大均出现退化现象,其原因主要是馒头榫和大斗卯口材料发生屈服后的累计损伤,这种损伤主要表现在馒头榫中部受挤压(类似颈缩现象),大斗卯口尺寸变大等。无歪闪角度的斗拱 FEM-1,正负向刚度退化曲线基本对称,在斗拱侧移较小时,刚度退化速率较快,随着侧移量的增大,退化速率减缓,这是因为在位移加载后期,馒头榫发生过大塑性变形,锚固作用不显著,主要由构件间的摩擦力抵抗水平荷载。整个模拟过程中,歪闪斗拱的正负向刚度退化曲线呈现不对称的现象:同一角度下的正反向刚度初始值相差较大,这是由于正反向加载过程中,承载力不同导致的;正向加载时同等位移下的歪闪斗拱刚度值随角度的增大而增大,主要是因为构件间挤压程度随角度的增大而提高,继而导致承载力逐渐提高;反向加载时同等位移下的歪闪斗拱刚度值随角度的增大变化不大。不论是正向加载还是反向加载过程中,斗拱的刚度都会因损伤的累积作用随位移的增大而降低,趋势大体一致。

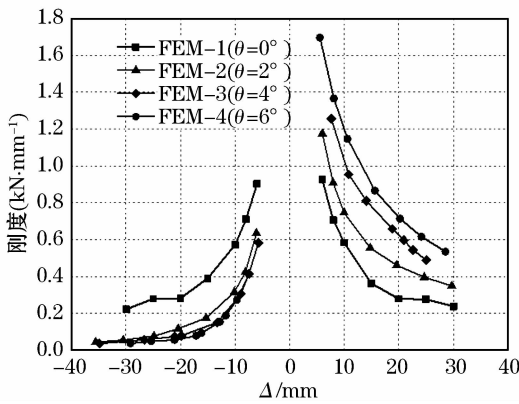


图 16 不同歪闪角度下斗拱刚度退化对比

Fig. 16 Comparison of stiffness degradation curves of Dou-Gong under different skew angle

### 3.4 耗能能力分析

木结构古建筑主要依靠结构的变形以及内力重分配来消耗地震作用下的能量。等效黏滞阻尼系数与《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101-1996)中的能量耗散系数  $E_d$  求法接近,是评价抗震性能的一个重要指标<sup>[13]</sup>,选取等效黏滞阻尼系数  $h_e$  来衡量斗拱在加载过程中耗能的能力。选取各斗拱在 10 mm、20 mm 和 30 mm 过程中的  $E_d$  和  $h_e$  值进行比较,具体计算的结果见表 4。

由表 4 可以看出:各斗拱总体的能量耗散系数和等效黏滞阻尼系数均随着加载位移的增大而逐渐减小。在相同加载位移条件下,歪闪斗拱的耗能能力随角度的增大而降低,这主要是由于歪闪斗拱在正反向加载过程中,反向承载力不断下降使沿瓜拱方向的摩擦力逐渐减小导致的,歪闪斗拱节点在正向加载过程中,承载力不断增加,构件间的挤压程度逐渐提高,沿瓜拱方向的摩擦力增大,耗能能力增强,但是在反向加载过程中,承载力不断减小,构件间的挤压程度逐渐降低,沿瓜拱方向的摩擦力减小,耗能能力减弱。歪闪角度越大,对应的在相同加载位移条件下反向加载过程中的承载力越小,构件间的挤压程度越弱,沿瓜拱方向的摩擦力越小,耗能能力越弱。从表 4 中可以看到:FEM-1、FEM-2、FEM-3 和 FEM-4 在最大加载位移 30 mm 处的等效黏滞阻尼系数分别为 0.35、0.42、0.27 和 0.24,仍强于钢筋混凝土结构,总体来说,歪闪之后的斗拱仍具有较强的耗能能力。

## 4 结论

通过有限元软件 ABAQUS 对歪闪斗拱进行建模分析,研究在水平荷载作用下不同歪闪角度的斗拱滞回性能、承载能力、刚度和耗能等变化规律。主要得出以下结论:

(1) 在不同歪闪角度下,斗拱模型的滞回曲线与骨架曲线均呈现出正反向加载不对称的情况,在正向加

表 4 耗能指标汇总

Table 4 Summary of energy indicators

试件编号	FEM-1	FEM-2	FEM-3	FEM-4	
能量耗散系数 $E_d$	10mm	2.91	2.86	2.43	2.14
	20mm	2.48	2.81	2	1.77
	30mm	2.14	2.7	1.71	1.51
等效黏滞	10mm	0.46	0.45	0.39	0.34
阻尼系数 $h_e$	20mm	0.39	0.44	0.32	0.28
	30mm	0.35	0.42	0.27	0.24

载过程中,荷载随加载位移的增大而提高;在反向加载过程中,荷载随加载位移的增大先提高再降低。斗拱承载能力随歪闪角度的增大呈现逐渐降低的趋势。

(2)斗拱在进入塑性阶段之前,刚度退化速率较快,当斗拱完全进入塑性段之后,退化速率逐渐平缓。不同歪闪角度下的退化趋势基本一致。

(3)歪闪斗拱的等效黏滞阻尼系数随歪闪角度的增大而减小,斗拱的耗能能力降低,极限位移下 FEM-1、FEM-2、FEM-3 和 FEM-4 的等效黏滞阻尼系数分别为 0.35、0.42、0.27 和 0.24,强于钢筋混凝土结构,说明歪闪斗拱节点仍具有较好的耗能能力。

## 参考文献

- [1] 高大峰,李飞,刘静等.木结构古建筑斗拱结构层抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2014,34(1):131-139.  
GAO D F, LI F, LIU J, et al. Experimental study on the seismic performance of the structural layer with corbel bracket of ancient Chinese timber structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014,34(1):131-139.
- [2] 陈国莹.古建筑旧木材材质变化及影响建筑形变的研究[J].古园林技术,2003,15(3):49-60.  
CHEN G Y. Study of deformation of ancient architecture old building wood material change and influence[J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 2003,15(3):49-60.
- [3] 王雪亮.历史建筑木结构基于可靠度理论的剩余寿命评估方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.  
WANG X L. Research on evaluation method of reliability-based residual life of historic timber structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [4] 李瑜.古建筑木构件基于累计损伤模型的剩余寿命评估[D].武汉:武汉理工大学,2008.  
LI Y. Residual Service life estimation of historic timber structure based on the damage accumulation model[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [5] KING W S, YEN J Y, YEN Y N. Joint characteristics of traditional Chinese wooden frames[J]. Engineering Structure, 1996,18(8):635-644.
- [6] CHANG W S. Research on rotational performance of traditional Chuan-Dou timber joints in Taiwan [D]. Taiwan: National Chen Kung University, 2006.
- [7] 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.  
WEI G A. Mechanical behavior and ANSYS analysis of Dougong in Chinese ancient timber building[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2007.
- [8] CHEN Y X. Flexural analysis and design of timber strengthened with high strength composites[D]. New Jersey: New Brunswick Rutgers the State University, 2003.
- [9] 闫辉.与木结构延性节点抗震设计有关的木材嵌压试验及理论研究[D].昆明:昆明理工大学,2008.  
YAN H. Wood pressure embed tests earthquake-resistant design of and theoretical research on the wooden structural ductile node[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008.
- [10] 秦良彬.基于木材嵌压理论的典型穿斗木构架节点静力特性研究[D].昆明:昆明理工大学,2012.  
QIN L B. Static behavior research on the typical Chuan Dou-style wooden frame node based on the theory of wood embedment[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- [11] 陈志勇.应县木塔典型节点及结构受力性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.  
CHEN Z Y. Behaviour of typical joints and the structure of Yingxian wood pagoda[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [12] 隋隼,赵鸿铁,薛建阳.中国木结构古建筑铺作层与柱架抗震试验研究[J].土木工程学报,2011,44(1):50-56.  
SUI Y, ZHAO H T, XUE J Y. Experimental study of the seismicity of dougong and wooden frame in Chinese historic buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44(1):50-56.
- [13] 101-96.建筑抗震试验方法规程[S].北京:中国建筑工业出版社,1997.  
101-96. Specifying of testing methods for earthquake resistant building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.