

# 古建筑木结构歪闪斗拱竖向受力性能的 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:** 利用 ABAQUS 对歪闪斗拱模型进行竖向单调加载数值模拟, 研究歪闪斗拱的竖向受力性能, 及不同歪闪角度对斗拱的荷载-位移曲线、破坏形态和受力性能等的影响。研究表明: 在竖向荷载作用下, 歪闪斗拱的破坏形态与完好斗拱类似, 为枋斗压溃破坏, 且歪闪斗拱的破坏更加严重; 荷载-位移曲线可用双折线模型表示; 当歪闪角度为  $0^{\circ} \sim 6^{\circ}$  时, 斗拱的刚度及允许承载力随歪闪角度的增大而降低, 最大降幅为 30% 左右。研究木结构古建筑歪闪斗拱的受力性能, 对修缮、保护古代建筑具有深远意义。

**关键词:** 木结构古建筑; 歪闪斗拱; 竖向荷载; 有限元分析

**中图分类号:** TU366.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2017)01-0008-06

## Finite element analysis on the vertically mechanical behavior of the skewed Dou-Gong in ancient timber buildings by ABAQUS program

XUE Jianyang, LU Peng, DONG Xiaoyang

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** By simulating the skewed Dou-Gong under the vertical monotonic loading based on ABAQUS program, the vertically mechanical behavior of skewed Dou-Gong, the effects on load-displacement curves are failure modes and mechanical performance of Dou-Gong under different skew angle were studied. The results show that the failure mode of skewed Dou-Gong belongs to the crushing collapse of Lu-dou, similar to intact ones under vertical load. Meanwhile, the skewed Dou-Gong is destroyed more seriously. The load-displacement curves can be described by the double broken line model. The stiffness and allowed bearing capacity decrease when skew angle ranged from  $0^{\circ}$  to  $6^{\circ}$  increases and the largest drop is about 30%. It is meaningful for repairing and protecting ancient buildings by researching the mechanical performance of the skewed Dou-Gong in ancient timber buildings.

**Key words:** ancient timber buildings; skewed Dou-Gong; vertical loading; finite element analysis

中国古建筑的屋盖笨重且庞大, 有整个建筑物荷载的一半之多, 而建筑物中的墙体一般不承担和传递竖向荷载, 荷载通过斗拱群传递至柱头及柱架上, 经由柱架传递至基础。可见, 斗拱群是一个过渡层, 具有承上启下的功能<sup>[1]</sup>。另外斗拱各个构件之间通过榫卯搭接, 在一般地震作用下, 通过构件之间的摩擦抵抗水平推力。整个斗拱浮搁于平板枋或梁之上, 遇到较大水平力, 会通过滑动消耗能量, 调整变形, 最大程度的降低了建筑物的破坏程度, 类似于现代“隔震”理念, 斗拱群不仅对水平地震, 对竖向地震也有明显的减震作

用<sup>[2-3]</sup>。例如, 位于山西应县境内的释迦塔在经受风雨侵蚀、抗战时期多次炮击和数次强地震的情况下, 依然千年不倒<sup>[4]</sup>。其中缘由除了周边环境的特殊性和人为保护的因素以外, 斗拱在木构中的特殊结构形式也是重要原因之一。但是存世的木结构古建筑均历经百年, 木材材性不断退化, 各构件的残损形态、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<sup>[5]</sup>。因此本文根据国内外研究现况, 采用有限元模拟的方法, 选取清代大式建筑, 以不同歪闪角度的斗拱为研究对象, 通过竖向单调加载模拟试

收稿日期: 2015-10-20

修改稿日期: 2016-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678478); 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, 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等方面的研究。E-mail: jianyang\_xue@163.com

验, 研究不同歪闪角度的歪闪斗拱的破坏特征、荷载-位移曲线等性能; 并将试验与有限元模拟的结果对比分析, 验证模拟的正确性和适用性.

1 模型建立

在竖向单调加载过程中, 竖向荷载不断增加, 斗拱底部的枋斗横纹受压且发生大变形. 在木材横纹压缩产生大变形的情况下, 木材应力-应变曲线分为三个阶段, 分别为: 弹性变形阶段, 线性强化阶段(强度变化不明显)和幂指数强化阶段<sup>[6]</sup>. 幂指数强化阶段是木材横纹受压相较其他方向受压的一个独特的性质, 从微观上讲, 主要是压缩使细胞壁相互接触, 细胞腔完全被填充, 细胞壁实质物质被压缩, 所以应力随应变的增加而急剧增大<sup>[7]</sup>. 针对此情况, 根据刘一星等<sup>[8]</sup>提出的木材横纹压缩大变形应力-应变表达式, 结合文献<sup>[9]</sup>中的东北红松材性试验数据, 可得到木材横纹受压下的本构模型, 如图 1 所示.

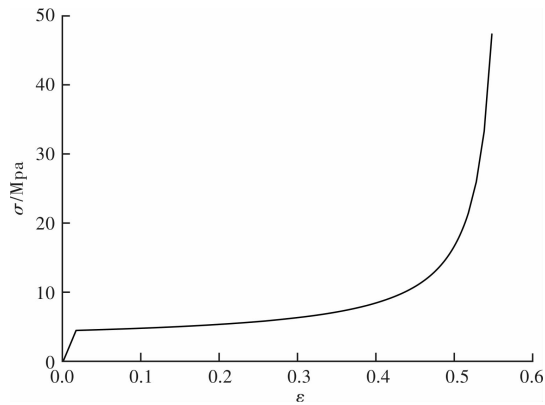


图 1 木材横纹受压应力-应变关系曲线  
Fig. 1 The compressive stress-strain curve of wood horizontal stripes

模型中各构件的尺寸及构造依据文献<sup>[9]</sup>所做的单朵斗拱试验中所提供的斗拱尺寸取得, 具体见表 1, 构造详图见图 2. 其内部构造及隐藏尺寸参考宋代的《营造法式》和清《工程做法则例》.

本文将斗拱整体倾斜定义为斗拱的“歪闪”, 斗拱歪闪通过切削平板枋的方法实现. 主要模拟由于木材的各向异性、荷载偏心导致受力不均、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, 结合材料参数, 可大致确定斗拱的歪闪角度. 建立斗拱的三维模型 FEM-1、FEM-2、FEM-3、FEM-4, 分别对应于歪闪角度  $\theta_0 = 0^\circ$ ,  $\theta_1 = 2^\circ$ ,  $\theta_2 = 4^\circ$ ,  $\theta_3 = 6^\circ$ , 如图 3 所示.

表 1 试件尺寸详表

Tab. 1 Size of test model

构件名称		宋尺 /分	模型 /mm	构件名称		宋尺 /分	模型 /mm
枋斗	长	40	200	交互斗	长	18	90
	宽	30	150		宽	15	75
	高	20	100		高	10	50
	斗耳高	8	40		斗耳高	4	20
	斗腰高	4	20		斗腰高	2	10
	底欹高	8	40		底欹高	4	20
	内槽宽	12	60		内槽宽	10	50
	内槽深	8	40		内槽深	4	20
短华拱	长	71	355	散斗	长	15	75
	宽	20	100		宽	13	65
	高	20	100		高	10	50
泥道拱	长	62	310		斗耳高	4	20
	宽	12	60		斗腰高	2	10
	高	20	100		底欹高	4	20
长华拱	长	131	655		内槽宽	10	50
	宽	30	150		内槽深	4	20
	高	20	100				
慢拱	长	92	460				
	宽	12	60				
	高	20	100				

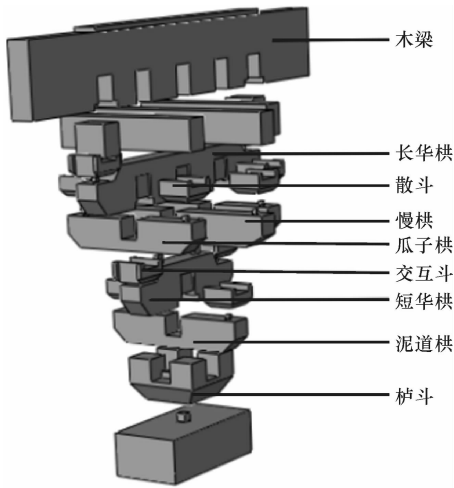


图 2 构件分解示意图

Fig. 2 Schematic diagram of component decomposition

模型采用 ABAQUS 中提供的六面体线性缩减积分实体单元 C3D8R 来划分网格<sup>[10]</sup> 如图 4 所示. 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, 网格适当加密. 接触采用硬接触, 接触摩擦因数  $\text{MU} = 0.45$ . 在本次模拟中, 由于有限元模型及荷载布置形式均为对称分布, 因此可选取模型的一半进行模拟. 试件进行竖向单调加载时只需约束平板枋底部 6 个自由度, 在梁顶部的垫板上施加竖向荷载.

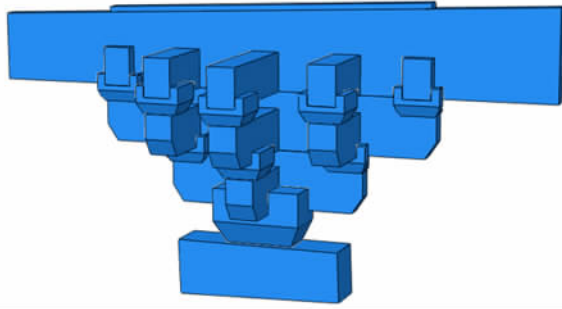


图 3 歪闪斗拱三维模型

Fig. 3 3-D model of Dou-Gong brackets

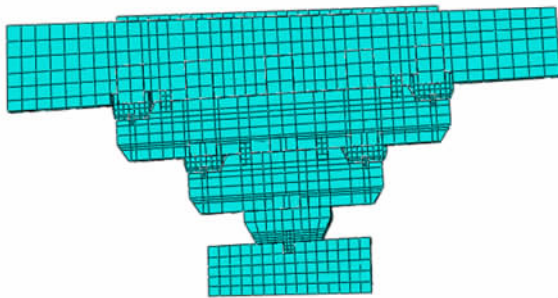


图 4 歪闪斗拱模型网格划分

Fig. 4 Model meshing of Dou-Gong brackets

## 2 斗拱有限元分析模型的试验验证

对无歪闪斗拱模型 FEM-1( $\theta=0^\circ$ )进行竖向单调加载模拟,通过力控制的加载方式实现,直至斗拱节点破坏.整个加载过程中,斗拱主要通过中心轴进行力的传递,且越往下,构件承载力越大,截面积较小.在荷载的作用下,斗拱整体变形主要由枋斗的竖向压溃及局部构件的少许弯曲变形引起.

文献[9]按照宋《营造法式》及清《工程做法则例》制作了斗拱试件,并采用 500 kN 液压式压力试验机对斗拱试件进行了竖向单调加载试验.整个过程采用力控制的原则,按照 5 kN/级/min 进行逐级加载,直至斗拱破坏.现将无歪闪斗拱模拟试件 FEM-1 与文献[9]中的 TEST-1 在竖向荷载作用下的荷载-位移曲线对比如图 5 所示.

从图 5 可以看出,斗拱模型 FEM-1 的荷载-位移曲线与试验 TEST-1 的趋势相同,其中 TEST-1 的曲线去掉加荷初期构件间缝隙挤密时的平缓段,曲线从承受荷载段开始.承受荷载阶段的曲线斜率(竖向刚度)分别为 11.35 kN/mm 和 8.97 kN/mm,如表 2 所示.曲线发生明显拐点的位移值(约 10 mm)所对应的荷载值  $P_1$  分别为 82.03 kN 和 80.01 kN,之后斗拱进入非线性塑性硬化阶段.

加载结束时位移值所对应的荷载值  $P_2$  分别为 131.85 kN 和 121.07 kN.由于 TEST-1 存在木材本身的瑕疵(木节、斜纹等)与加工缺陷以及斗拱各构件间存在缝隙,而模拟中各构件间为无缝隙搭接,所以模拟出的斗拱竖向刚度大于试验竖向刚度,但趋势一致,吻合较好.这为接下来的歪闪斗拱有限元模拟提供了基础.

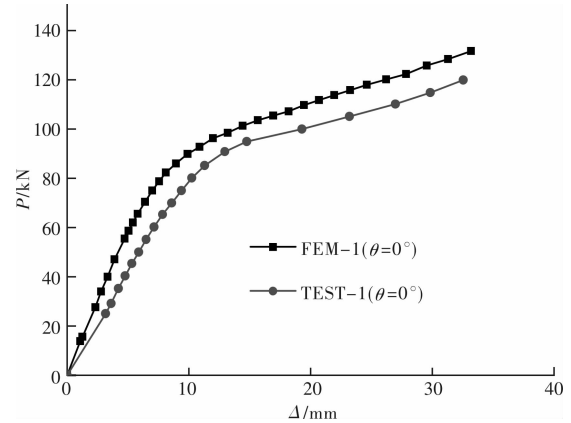


图 5 荷载-位移曲线对比

Fig. 5 Comparison of load-displacement curve

表 2 主要特征参数比较

Tab. 2 Comparison of main parameters

特征参数	$P_1$	$P_2$	$k_1$
试验值	80.01	121.07	8.97
模拟值	82.03	131.85	11.35
误差/%	2.52	8.90	26.53

注:表中误差 =  $|(模拟值 - 试验值)| / 试验值 \times 100\%$ . 表中荷载值  $P_1$ 、 $P_2$  单位为 kN, 竖向刚度单位  $k_1$  为 kN/mm.

## 3 歪闪斗拱竖向单调加载模拟

对歪闪斗拱模型 FEM-2( $\theta=2^\circ$ )、FEM-3( $\theta=4^\circ$ )、FEM-4( $\theta=6^\circ$ )进行竖向单调加载模拟,通过力控制的加载方式实现,直至斗拱破坏.歪闪斗拱模型的破坏形式与无歪闪模型的破坏形态类似,为枋斗压溃破坏,且歪闪斗拱的破坏更加严重.下面主要对不同歪闪角度下斗拱的模拟结果进行比较分析.

### 3.1 荷载-位移曲线比较分析

图 6 为不同歪闪角度的斗拱在竖向荷载作用下的荷载-位移曲线.从整体上来看,各试件的荷载-位移曲线呈现变刚度特性,即随着荷载的增加,曲线斜率不断发生变化.在稳定受荷载阶段,各试件的荷载-位移曲线初始段大致重合,荷载随位移的增加几乎线性上升,曲线斜率均较大.歪闪角度对该阶段中各试件的初始刚度影响不明显;

在不稳定变形阶段, 由于稳定受荷阶段的损伤累积, 导致曲线明显向位移轴倾斜, 荷载上升缓慢, 而变形急剧增加。在此阶段, 歪闪角度对各试件的承载力有显著的影响, 同等位移下的承载力随歪闪角度的增大而降低。下面分别针对稳定受荷载和不稳定变形阶段歪闪斗拱的受力特性展开研究。

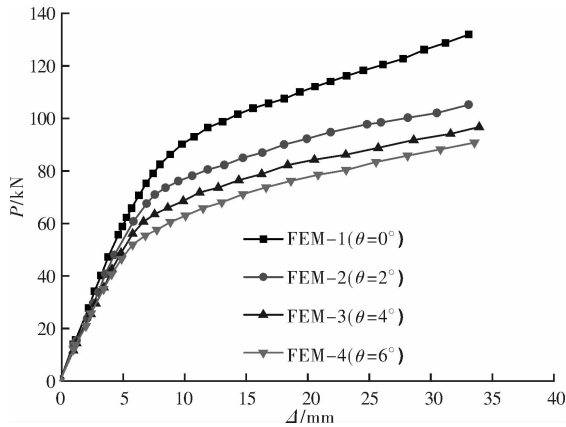


图 6 不同歪闪角度下荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of load-displacement curve under different skew angle

#### (1) 稳定受荷载阶段

稳定承受荷载阶段是斗拱承受荷载的关键阶段, 从图 6 中可以看出, 在承受相同的荷载情况下, 斗拱的歪闪使其竖向位移值增大。例如, 当  $P=47$  kN 时, FEM-1、FEM-2、FEM-3 与 FEM-4 的位移值分别为: 3.90 mm、4.41 mm、4.95 mm 和 5.35 mm。其原因主要是随着歪闪角度的增大, 栱斗、泥道栱、长华栱等位于中心轴构件的抗剪强度由顺纹抗剪向斜纹抗剪过渡。由木材材性可知, 顺纹抗剪强度 > 斜纹抗剪强度 > 横纹抗剪强度, 因此斗拱竖向变形量逐渐增大, 将对结构产生不利影响。

不同歪闪角度下荷载-位移曲线的拟合直线公式如表 3 所示, 从表中数据可以看出, 斗拱的歪闪程度对其刚度产生了一定影响, 歪闪角度越大, 斗拱的刚度越低, 以模型 FEM-1 的竖向刚度作为参照, 不同歪闪角度斗拱的竖向刚度归一化后拟合出的公式(1)如下:

$$k_1 = -2.052x + 0.989, R^2 = 0.97 \quad (1)$$

式中:  $k_1$  为第一阶段斗拱的竖向刚度;  $x$  为斗拱歪闪弧度值,  $1^\circ \approx 0.02$  rad。

如图 7 所示, 斗拱的歪闪角度与刚度基本呈线性负相关, 主要表现为整体每歪闪  $1^\circ$ , 刚度下降 5% 左右。

表 3 拟合直线公式汇总

Tab. 3 Summary of fitting linear equations

试件名称	公式	$R^2$	$k_1$	$k_1$ 归一化值
FEM-1	$y=11.345x+1.441$	0.998	11.345	1.000
FEM-2	$y=10.259x+1.522$	0.996	10.259	0.904
FEM-3	$y=9.562x+1.164$	0.998	9.562	0.842
FEM-4	$y=8.876x+2.107$	0.992	8.876	0.782

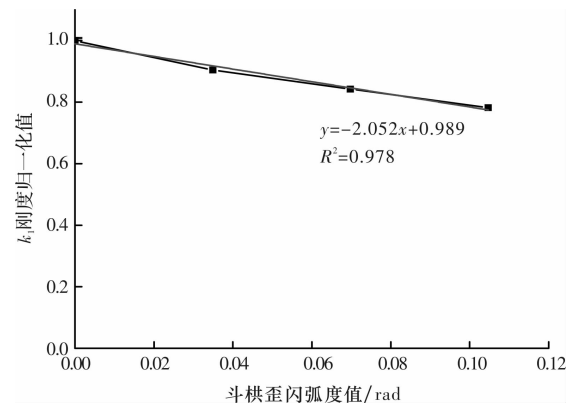


图 7 不同歪闪角度下斗拱刚度  $k_1$  的归一化值

Fig. 7 Normalized value of stiffness under different skew angle

#### (2) 不稳定变形阶段

当荷载增加到一定阶段时, 不同歪闪角度的斗拱都会出现明显的刚度退化现象, 具体表现为在竖向荷载增幅较小的情况下, 斗拱竖向位移大幅增加, 这是由于大斗的横纹受压应力进入塑性流动阶段导致的, 如图 6 所示。各曲线的拟合直线公式如表 4 所示。与稳定受荷载阶段的刚度相比, 在不稳定变形阶段中, 试件 FEM-1、FEM-2、FEM-3 和 FEM-4 的刚度分别降低 85.6%、85.9%、87.2% 和 87.9%。此阶段为木结构的最不利阶段, 在承受荷载过程中, 应该尽量避免构件尤其是横纹承压构件进入此阶段, 以此确保结构的安全性。

从表 4 中数据可知, 歪闪角度越大, 斗拱的刚度值越低, 不同歪闪角度斗拱的竖向刚度  $k_2$  归一化后拟合出的公式(2)如下:

$$k_2 = -3.347x + 0.997, R^2 = 0.994 \quad (2)$$

式中:  $k_1$  为第一阶段斗拱的竖向刚度;  $x$  为斗拱歪闪弧度值,  $1^\circ \approx 0.02$  rad。

刚度变化趋势仍呈线性负相关, 与稳定受荷载阶段相比, 程度加大, 具体表现为斗拱整体歪闪  $1^\circ$ , 刚度降低 7% 左右, 如图 8 所示。

表 4 拟合直线公式汇总

Tab. 4 Summary of fitting linear equations

试件名称	公式	$R^2$	$k_2$	$k_2$ 归一化值
FEM-1	$y=1.637x+77.615$	0.998	1.637	1.000
FEM-2	$y=1.444x+63.168$	0.997	1.444	0.882
FEM-3	$y=1.226x+58.483$	0.975	1.226	0.749
FEM-4	$y=1.073x+54.922$	0.987	1.073	0.655

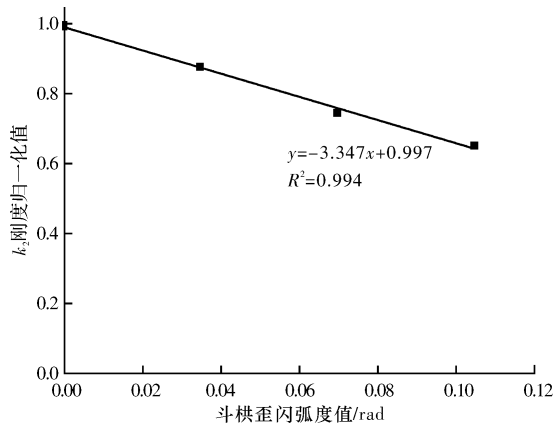
图 8 不同歪闪角度下斗拱刚度  $k_2$  的归一化值

Fig. 8 Normalized value of stiffness under different skew angle

### 3.2 斗拱竖向允许最大承载力

斗拱在古建筑木结构中主要作用是将梁架屋顶荷载传递给柱架,具有一定的承载力和刚度,在承受和传递荷载过程中不应该发生过大变形。

模拟结果表明:在竖向荷载作用下,大斗在竖向产生较大位移,而其他部件未发生明显变形。在整个模拟加载过程中,当竖向位移增大时,斗拱的竖向变形不断增加,承载力随之提高,整个过程无法定义明确的屈服值。同时,由于木结构古建筑中建筑物的安全系数较高,如图 6 所示,当荷载接近极限值时,斗拱变形量过大,易使木构架整体发生歪闪,结构变形加剧,超过建筑物的正常使用限制。所以,需要定义一个适当的点,衡量斗拱的承载力。从前面分析中得知,斗拱的荷载-位移曲线分为稳定受荷阶段和不稳定变形阶段,在不稳定变形阶段中,当荷载增幅较小时,变形急剧增加,对结构不利,故定义稳定受荷阶段的最大荷载值为斗拱的允许最大承载力,类似于材料力学中的许用应力 $[\sigma]$ ,要求 $\sigma_{\max} < [\sigma]$ 。对于歪闪斗拱来说,歪闪角度使其竖向变形增加,刚度降低,同时考虑到斗拱的安全系数,所以按照最大歪闪角度下斗拱的位移值所对应的荷载值为其斗拱的

允许最大承载力。

根据模拟结果,试件 FEM-4 稳定受荷阶段的最大荷载值,即允许最大承载力对应的竖向位移约为 7 mm,承载力为 58 kN,如图 9 中竖向实线所示。对应的,斗拱歪闪角度为 $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=2^\circ$ 和 $\theta=4^\circ$ 时的承载力为 82 kN、71 kN 和 64 kN。显然,斗拱竖向允许的最大承载力随着歪闪角度的增大而降低,下降幅度约为 15%~30%,表明歪闪角度对其影响较明显。

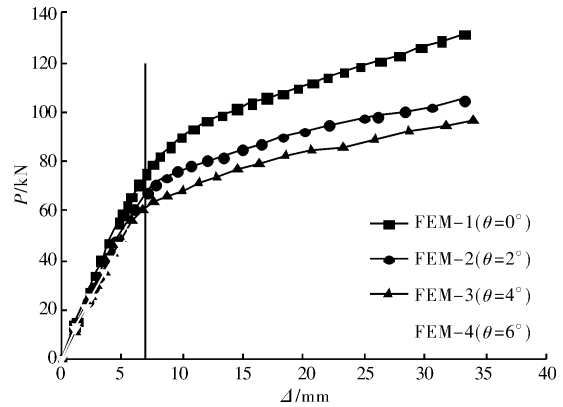


图 9 斗拱的允许最大承载力取值示意图

Fig. 9 Sketch map of maximum allowable bearing capacity of Dougong

## 4 结论

本文主要对不同歪闪角度下的斗拱进行竖向受力性能有限元模拟分析。首先,将无歪闪斗拱的数值模拟与试验结果对比分析,验证斗拱实体模型的正确性以及模拟方法的合理性,为歪闪斗拱的数值分析奠定了基础;其次,对斗拱进行竖向受力时的数值模拟,研究在不同歪闪角度下斗拱承载力等变化规律,得到以下主要结论:

(1) 在竖向荷载作用下,不同歪闪角度斗拱的破坏形式类似:主要是栌斗的竖向压溃及局部构件的少许弯曲变形。

(2) 在竖向荷载作用下,歪闪斗拱的竖向受力过程经历稳定受荷载阶段与变形不稳定两个阶段。在第一阶段,歪闪角度对斗拱竖向刚度有较大的影响,刚度与角度之间呈线性变化关系,表现为:歪闪角度每增加 $1^\circ$ ,刚度降低约 5%;在第二阶段,歪闪角度对刚度的影响仍为线性变化关系,但影响程度加大。

(3) 斗拱歪闪一定角度之后,竖向允许最大承载力随角度的增大而降低,下降范围约为 15%~30%( $\theta$  为 $0^\circ\sim6^\circ$ ),影响程度明显。

## 参考文献 References

- [1] 王磊. 清式厅堂古建筑与仿古建筑的结构性能比较研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2012.  
WANG Lei. Comparative study on structural behaviour between ancient structure and antique building of a Qing-style Hall[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.
- [2] 张文芳, 李世温. 一类斗拱木结构恢复力特性的模型试验研究[J]. 东南大学学报, 1997(S1): 67-72.  
ZHANG Wenfang, LI Shiwen. Experimental research on restoring force of wooden structures with dou-shaped arch nodes[J]. Journal of Southeast University, 1997(S1): 67-72.
- [3] 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[J]. 世界地震工程, 2003(2): 1-10.  
GAO Dafeng, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Experimental study on seismic behavior and strengthened effects of Chinese ancient timber structure[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2003(2): 1-10.
- [4] 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[J]. 土木工程学报, 2005(2): 51-58.  
LI Tieying, WEI Jianwei, ZHANG Shanyuan, et al. Appraisal on the structure of the Yingxian wooden tower[J]. China Civil Engineering Journal, 2005(2): 51-58.
- [5] 段春辉, 郭小东, 吴洋. 基于残损特点的古建筑木结构修复加固[J]. 工程抗震与加固改造, 2014(1): 126-130.  
DUAN Chunhui, GUO Xiaodong, WU Yang. Repairing and strengthening of ancient wood structure on the basis of damage characteristics[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2014(1): 126-130.
- [6] 陶俊林, 蒋平, 余作生. 木材静压大变形本构关系研究[J]. 力学与实践, 2000(5): 25-27.  
TAO Junlin, JIANG Ping, YU Zuosheng. On the static constitutive relation of wood with large deformation[J]. Mechanics and Engineering, 2000(5): 25-27.
- [7] 赵钟声. 木材横纹压缩变形恢复率的变化规律与影响机制[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2003.  
ZHAO Zhongsheng. The law and effective factors of resiliency ratio of wood compressive deformation in the transverse direction[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2003.
- [8] 刘一星. 木材横纹压缩大变形应力应变关系的定量表征[J]. 林业科学, 1995, 31(5): 436-442.  
LIU Yixing. Quantitative expression on the target transverse compressive deformation relationships between stress and strain of wood[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1995, 31(5): 436-442.
- [9] 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 Guoan. Mechanical Behavior and ANSYS Analysis of Dougong in Chinese Ancient Timber Building[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2007.
- [10] 庄茁, 张帆, 岑松, 等. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
ZHUANG Zhuo, ZHANG Fan, QIN Song, et al. ABAQUS non-linear finite element analyses and examples[M]. Beijing: Science Press, 2005.

(编辑 桂智刚)