

# 开裂残损柱头科斗拱抗震性能及退化规律研究

薛建阳<sup>1,2</sup>, 毛妍<sup>1,3</sup>, 宋德军<sup>1</sup>, 何圳<sup>1</sup>, 吴晨伟<sup>1,2</sup>, 叶重阳<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;  
3. 陕西交通职业技术学院 建筑与测绘工程学院, 陕西 西安 710018)

**摘要:** 为研究构件开裂对斗拱抗震性能的影响, 以沈阳故宫颐和殿柱头科斗拱为原型, 建立了大斗、正心瓜拱、单翘及散斗分别开裂的斗拱有限元模型, 通过体积损失率表征构件的开裂程度, 对开裂斗拱开展抗震性能模拟分析。结果表明: 不同开裂程度下, 斗拱的滞回曲线及骨架曲线变化规律相似。大斗、单翘和散斗体积损失率达到 3% 时, 加载后期滞回曲线发散明显, 且散斗开裂斗拱的正向峰值位移小于其他开裂斗拱。散斗开裂斗拱的正向刚度、大斗开裂斗拱的负向刚度随体积损失率变化较为明显。当构件体积损失率为 3% 时, 散斗开裂斗拱的正向承载力和大斗开裂斗拱的负向承载力退化最严重, 退化率分别为 16.90% 和 18.61%; 构件开裂尽管降低了斗拱的承载力及刚度, 但其变形和耗能能力较好。

**关键词:** 古建筑木结构; 柱头科斗拱; 开裂残损; 抗震性能; 数值模拟

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)05-0633-09

## Study on seismic performance and degradation law of cracking damaged Dou-Gong bracket at columns

XUE Jianyang<sup>1,2</sup>, MAO Yan<sup>1,3</sup>, SONG Dejun<sup>1</sup>, HE Zhen<sup>1</sup>, WU Chenwei<sup>1,2</sup>, YE Chongyang<sup>1</sup>

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

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education (XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. Department of Architecture and Surveying Engineering, Shaanxi College of  
Communications Technology, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** To study the impact of component cracking on the seismic performance of Dou-Gong (DG) brackets, the DG bracket at columns of the Yihe Hall in Shenyang Imperial Palace was selected as the structural prototype, and DG bracket finite element models with cracking in Da-Dou, Zhengxingua-Gong, Dan-Qiao, and San-Dou were established respectively. The seismic performance of cracked DG brackets was simulated and analyzed by using the volume loss rate to characterize the cracking degree of components. The results show that the hysteretic curve and skeleton curve of each DG bracket are similar under different cracking degrees. When the volume loss rate of Da-Dou, Dan-Qiao, and San-Dou reaches 3%, the hysteretic curve diverges obviously at the later loading stage, and the positive peak displacement of the cracked San-Dou DG bracket is smaller than other cracked DG brackets. The positive stiffness of DG brackets with cracked San-Dou and the negative stiffness of DG brackets with cracked Da-Dou change obviously with the volume loss rate. When the volume loss rate reaches 3%, the degradation rates of the positive bearing capacity of DG brackets with cracked San-Dou, and the negative bearing capacity of DG brackets with cracked Da-Dou are seriously degraded, with degradation rates of 16.90% and 18.61% respectively. Although component cracking reduces the bearing capacity and stiffness of the DG brackets, they still have good deformation and energy dissipation ability.

**Key words:** ancient timber structures; Dou-Gong bracket at columns; cracking damage; seismic performance; numerical simulation

收稿日期: 2024-04-29

修回日期: 2024-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(52278317)

第一作者: 薛建阳(1970—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事木结构抗震及钢与混凝土组合结构研究. E-mail: jianyang\_xue@163.com

古建筑木结构是文物遗产的重要保护对象,而斗拱是古建筑木结构特有的组成部分,具有承上启下、传递荷载、减小跨度、耗能减震等结构作用<sup>[1]</sup>。根据建筑形制和安装位置的不同,斗拱分为平身科、柱头科与角科斗拱,如图 1 所示。其中,柱头科斗拱直接将屋面荷载传递至柱子和基础,结构作用尤为重要。然而古建筑木结构在千百年的传承中易受到环境侵蚀等外界因素影响,斗拱构件产生不同程度的开裂损伤,从而影响斗拱的抗震性能和整体安全性<sup>[2]</sup>。因此,研究构件开裂对柱头科斗拱抗震性能的影响对于斗拱自身性能的提升和古建筑的修缮保护具有重要意义。

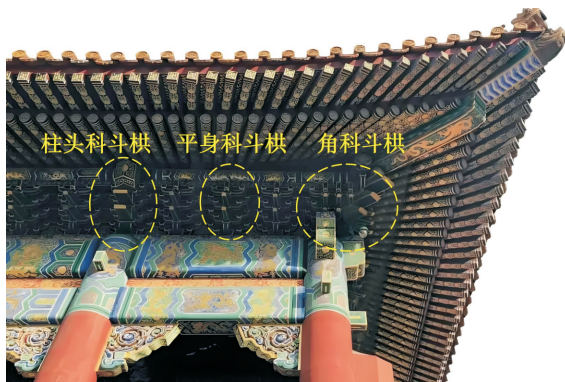


图 1 斗拱分类

Fig. 1 Classification of DG brackets

鉴于斗拱的残损现状,各学者研究了偏心荷载、歪闪变形、木材腐朽及开裂等残损对斗拱力学性能的影响。Wu 等<sup>[3]</sup>研究了偏心荷载对叉柱造斗拱受力性能的影响,结果表明,偏心荷载会导致枋斗斗耳发生斜裂缝,耍头枋与叉柱连接处产生较大变形。Wu 等<sup>[4-5]</sup>分析了偏心荷载对柱头科斗拱力学性能的影响,发现偏心受压会改变荷载的传递路径,且偏心率越大,斗拱倾斜破坏和承载力降低越明显。

在斗拱歪闪变形方面,董晓阳<sup>[6]</sup>采用有限元方法分析了歪闪角度对斗拱轴压及抗震性能的影响,结果表明,随着歪闪角度增加,斗拱的刚度和承载力均下降。在此基础上,薛建阳等<sup>[7-9]</sup>研究了歪闪斗拱的轴压及抗震性能,通过数值分析,探讨了构件分层歪闪对斗拱初始刚度和承载力的影响,结果表明,歪闪变形降低了斗拱的竖向和水平承载力,构件歪闪比斗拱整体歪闪更不利。

针对木材腐朽及开裂残损,Dai 等<sup>[10]</sup>采用开槽挖孔削弱受力截面的方法模拟应县木塔柱头铺作的残损状况,研究表明,第一跳华拱的残损对斗拱强度和刚度的影响最大。Zhang 等<sup>[11]</sup>采用真菌培养的方式,研究了不同腐朽程度下铺作的破坏机

理和力学性能退化规律。谢启芳等<sup>[12]</sup>和向伟等<sup>[13]</sup>采用人工开槽和钻孔的方式,研究了叉柱造斗拱在腐朽、虫蛀和裂缝残损状态下的抗震性能,试验表明,残损斗拱的破坏更加严重,承载力和刚度降低,但仍有较好的变形和耗能能力。

以上学者主要研究偏心受压、歪闪变形及腐朽斗拱的抗震性能,对开裂残损斗拱抗震性能的研究较少。基于此,本文以单翘单昂柱头科斗拱为研究对象,分别建立大斗、正心瓜拱、单翘及散放斗开裂的斗拱模型,通过数值模拟,对比分析不同开裂程度下斗拱的各项抗震指标,探究构件开裂对斗拱抗震性能的影响,以期为开裂斗拱抗震性能的深入研究和加固保护提供科学依据。

## 1 构件开裂实现方式

根据各学者<sup>[14-17]</sup>对古建筑木结构斗拱残损现状的调查结果,总结了柱头科斗拱构件裂缝的开展形式和分布规律,如表 1 所示。

表 1 斗拱主要构件裂缝开展形式和分布规律

Tab. 1 Development form and distribution law of cracks in main components of DG brackets

构件名称	开裂形式和分布规律
大斗	斗耳贯穿裂缝、顺纹干缩裂缝、底部裂缝
正心瓜拱	瓜拱干缩裂缝、偏压裂缝、横纹抗压破坏
单翘	翘底部通长裂缝、卷杀开裂、顺纹干缩裂缝
散斗	三才升斗耳贯穿裂缝、风化开裂及劈裂; 桶子十八斗斗耳贯穿裂缝

由于斗拱构件出现老化干缩贯穿裂缝的情况居多,故根据斗拱开裂裂缝等级的划分依据<sup>[14]</sup>,选择裂缝宽度为 3 mm,深度为构件截面宽度的 1/12,进行构件开裂残损斗拱模型设计,采用构件体积损失率表征构件开裂程度。在 ABAQUS 软件中通过开槽模拟构件开裂,模型具体设计如表 2 和图 2 所示。其中,DG 代表柱头科斗拱,A、B、C、D 分别代表大斗、正心瓜拱、单翘及散斗,1、2、3 代表构件的开裂程度,数值越大,构件开裂越严重。

表 2 构件开裂斗拱模型设计

Tab. 2 Design of DG bracket model with component cracking

构件	编号	体积损失率/%	开槽处理实施方式
—	DG-1	—	—
—	DG-A1	1.0	斗耳、斗腰 4 条贯穿裂缝
大斗	DG-A2	2.0	斗耳、斗腰及斗底 8 条贯穿裂缝
—	DG-A3	3.0	DG-A2 基础上,加 10 条竖向裂缝

续表 2

构件	编号	体积损失率/%	开槽处理实施方式
正心瓜拱	DG-B1	1.0	4 条顺纹和 1 条卷杀及底部裂缝
	DG-B2	2.0	6 条顺纹和 2 条卷杀及底部裂缝
	DG-B3	3.0	10 条顺纹和 2 条卷杀及底部裂缝
单翘	DG-C1	1.0	6 条顺纹和 1 条卷杀及底部裂缝
	DG-C2	2.0	8 条顺纹和 2 条卷杀及底部裂缝
	DG-C3	3.0	10 条顺纹和 3 条卷杀及底部裂缝
散斗	DG-D1	1.0	各散斗均为斗耳 2 条顺纹裂缝
	DG-D2	2.0	各散斗均为斗耳和斗腰 2 条裂缝
	DG-D3	3.0	单翘桶子十八斗、单昂桶子十八斗同 DG-D2; 三才升: 顺纹和竖向裂缝各 4 条并贯通底部

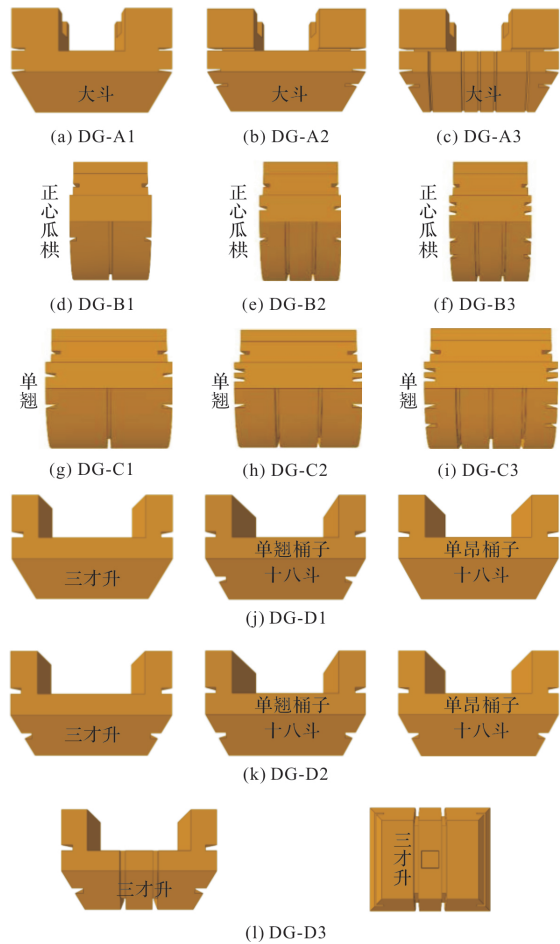


图 2 斗拱构件裂缝设计

Fig. 2 Design of component cracks in DG bracket

2 有限元模型的建立

为研究构件开裂对柱头科斗拱抗震性能的影响, 首先建立完好斗拱三维实体有限元模型, 通过试验验证模型的合理性, 进而开展开裂残损斗拱抗震性能分析.

2.1 几何模型的建立

斗拱原型选自沈阳故宫颐和殿柱头科斗拱,

其用材等级为九等材, 材料为东北红松. 通过有限元软件 ABAQUS 的前处理模块, 建立足尺完好斗拱三维实体模型 DG-1, 部分尺寸参考潘德华《斗拱》<sup>[18]</sup> 进行建模. 柱头科斗拱的组成及主要构件的详细尺寸如图 3 和图 4 所示.

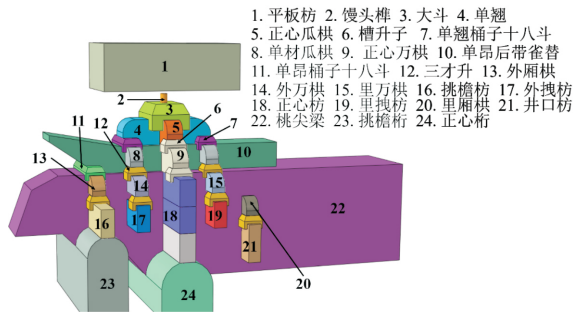
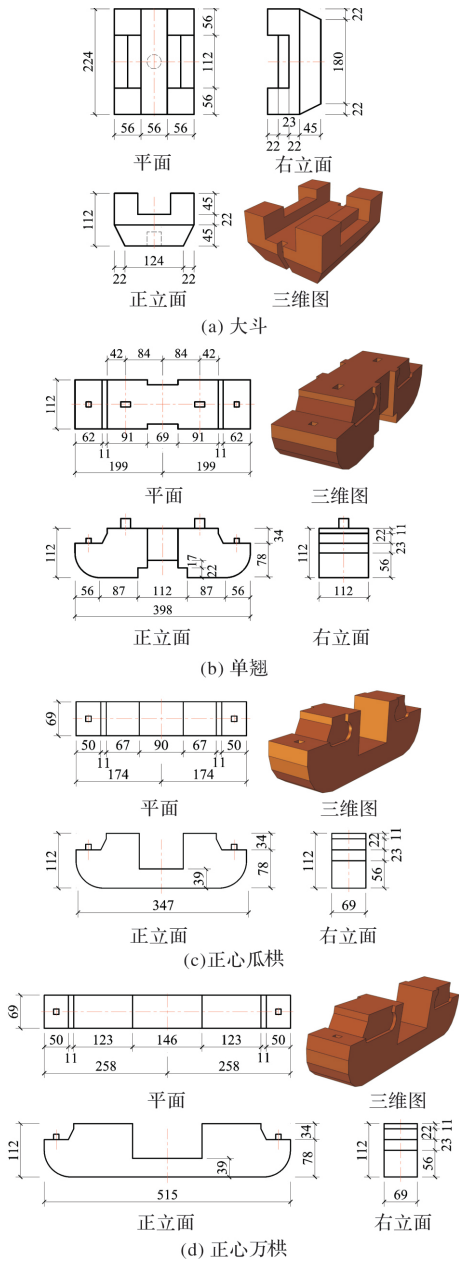


图 3 柱头科斗拱及其组成

Fig. 3 DG bracket at columns and its composition



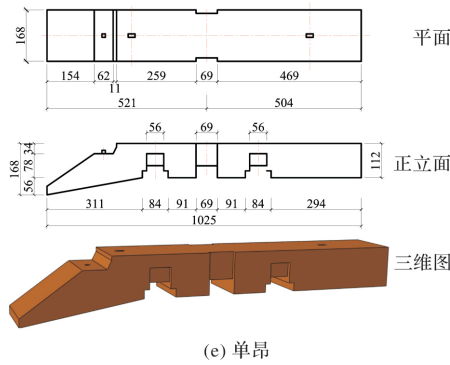


图 4 斗拱主要构件尺寸 (mm)

Fig. 4 Dimensions of main components of DG bracket/mm

## 2.2 木材本构关系

选取正交各向异性本构模型定义材料属性. 木材应力-应变曲线包括弹性和塑性 2 个阶段, 弹性阶段通过 9 个工程常数进行定义, 主要包括弹性模量  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ , 泊松比  $\nu_{12}$ 、 $\nu_{13}$ 、 $\nu_{23}$  及剪切模量  $G_{12}$ 、 $G_{13}$ 、 $G_{23}$ . 塑性阶段采用 ABAQUS 材料属性模块塑性参数中的 Potential 函数定义木材不同纹理方向的屈服应力比<sup>[19]</sup>. 东北红松材性试验的数据参考文献[20], 各项物理力学性能指标见表 3.

表 3 东北红松物理力学性能指标

Tab. 3 Physical and mechanical properties of Korean Pine

$E_1$ /MPa	$E_2$ /MPa	$E_3$ /MPa	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$
15 550	1 689	1 157	0.53	0.46
$\nu_{23}$	$G_{12}$ /MPa	$G_{13}$ /MPa	$G_{23}$ /MPa	$f_{t1}$ /MPa
0.47	1 166	933	278	66.51
$f_{c1}$ /MPa	$f_{c2}$ /MPa	$f_{c3}$ /MPa	$f_s$ /MPa	$\rho$ /g·cm <sup>-3</sup>
40.53	5.41	6.02	7.54	0.44

注:  $E$ 、 $\nu$ 、 $G$ 、 $f$  和  $\rho$  分别代表木材的弹性模量、泊松比、剪切模量、强度和密度; 下标 1、2、3 分别代表木材的顺纹方向、横纹径向和横纹弦向; 下标 t、c、s 分别代表木材受拉、受压和受剪状态.

## 2.3 相互作用

由于斗拱各构件之间采用榫卯连接以及木材材料的特殊性, 在受荷时易产生嵌压变形, 因此斗拱存在大量的接触面, 采用隐式求解难以收敛, 故选用显式算法对斗拱进行数值分析. 斗拱构件间的接触类型采用通用接触, 它能够简单定义接触, 对接触表面限制较少. 接触领域选择“全部包含自身”, 接触面间的相互作用包含法向和切向, 法向作用选择“硬接触”, 当两个面的间隙为 0 时, 接触约束开始作用, 接触压力在两个面中进行传递; 当接触压力为 0 或负值时, 接触面开始分离, 接触作用开始失效; 切向作用包括接触面间的相对滑动和可能的摩擦剪应力, 本文采用“罚摩擦”模拟斗拱构件之间的滑移摩擦, 摩擦系数取 0.3<sup>[21]</sup>.

## 2.4 单元类型及网格划分

选用八节点六面体线性缩减积分单元 C3D8R 进行斗拱有限元模拟<sup>[19]</sup>, 经过多次试算, 确定斗拱各构件的网格尺寸. 对馒头榫及暗榫等小尺寸构件网格尺寸取 5 mm, 三才升、槽升子及桶子十八斗等散斗网格尺寸取 15 mm, 其余构件网格尺寸取 20 mm, 桃尖梁尾部采用 50 mm 的网格, 斗拱整体网格划分如图 5 所示.

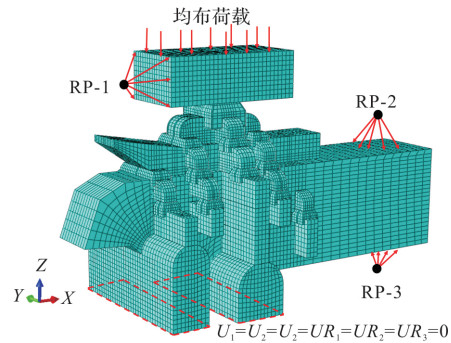


图 5 斗拱模型网格划分与边界条件

Fig. 5 Meshing and boundary condition of DG bracket model

## 2.5 荷载施加与边界条件

图 6 为斗拱拟静力试验加载装置图, 在不改变斗拱受力性能的前提下, 为保证加载过程的稳定性, 且便于施加荷载和固定约束, 将斗拱倒扣放置进行拟静力试验<sup>[19]</sup>. 切削正心桁与挑檐桁下表面为平面, 并保持两者在同一水平位置. 利用高强螺栓和角钢将斗拱固定在钢台座上<sup>[21]</sup>. 在桃尖梁尾部的上下表面设置滑动支座限制斗拱的竖向位移及转动, 但不限制其沿加载方向的水平位移.

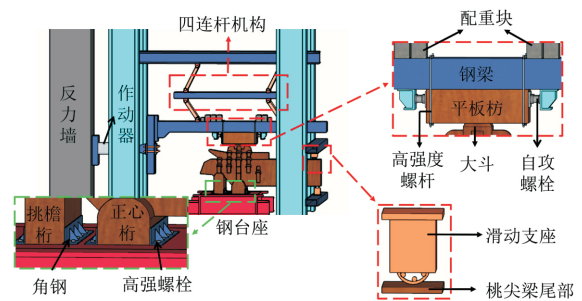


图 6 拟静力试验加载装置

Fig. 6 Loading device of the pseudo-static test

斗拱的边界条件设置见图 5. 在桃尖梁尾部的上下表面分别划分两个耦合区域, 并设置两个参考点 RP-2、RP-3, 两个参考点与两个面设置耦合约束, 在参考点上施加约束  $U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ . 在正心桁和挑檐桁底面设置固定约束, 约束斗拱在三个方向的平动及转动变形, 即  $U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ . 竖向荷载通过均布荷载



的方式施加在平板枋上表面, 大小为  $0.194 \text{ N/mm}^2$ ; 对于水平荷载, 将参考点 RP-1 与平板枋左侧面设置耦合约束, 后在该参考点上施加水平荷载。

3 有限元模型的验证

将文献[21]的斗拱试验结果与本文模拟结果进行对比, 滞回曲线和骨架曲线对比结果如图 7 所示, 骨架曲线特征点对比结果见表 4。

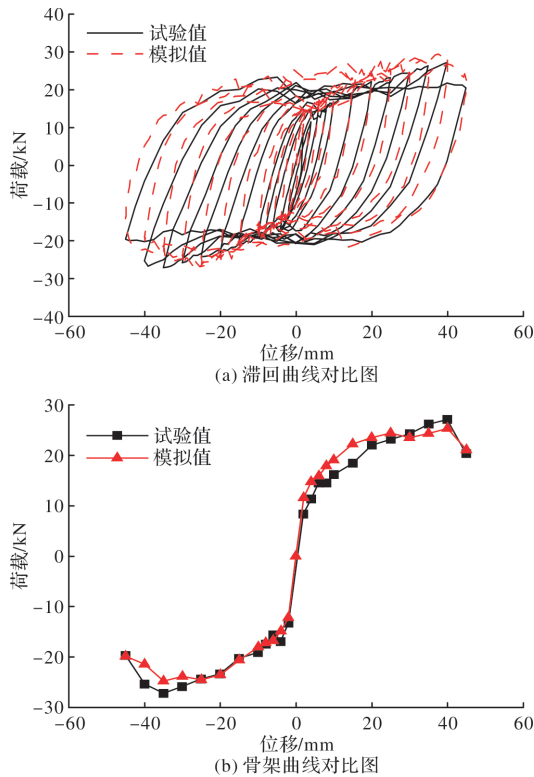


图 7 滞回曲线和骨架曲线模拟结果与试验结果对比  
Fig. 7 Comparison of hysteretic and skeleton curves between simulation and test results

表 4 骨架曲线特征点模拟值与试验值对比  
Tab. 4 Comparison of feature points of skeleton curves between simulation and test values

方法	加载方向	屈服点		峰值点	
		$P_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$P_m/\text{kN}$	$\Delta_m/\text{mm}$
试验值		17.14	12.17	27.09	40.02
模拟值	正向	17.47	9.63	25.33	40.06
误差/%		1.94	20.84	0.10	6.49
试验值		-16.21	-6.62	-27.28	-35.01
模拟值	负向	-16.93	-6.57	-24.87	-34.94
误差/%		0.75	4.48	0.19	8.86

注:  $P_y$  和  $P_m$  分别代表屈服荷载和峰值荷载;  $\Delta_y$  和  $\Delta_m$  分别代表屈服位移和峰值位移; 误差 = [(模拟值 - 试验值) / 试验值]  $\times 100\%$ 。

由图可知, 滞回曲线在加载前期呈梭形, 随着位移的增大, 曲线变得更加饱满, 说明斗拱具

有较好的耗能能力。模拟骨架曲线与试验骨架曲线基本一致, 正负向各级荷载均随着加载位移的增大而增大, 但增加速率逐渐减小。当加载位移达到  $-35 \text{ mm}$  和  $+40 \text{ mm}$  时, 正负向承载力达到最大。有限元模拟未考虑木材初始缺陷及构件安装间隙, 因而模拟滞回曲线更加饱满, 初始刚度模拟值大于试验值。整体而言, 滞回曲线和骨架曲线的模拟结果与试验结果较为吻合。

由于斗拱骨架曲线无明显屈服点, 因而采用通用几何作图法确定骨架曲线的屈服点<sup>[22]</sup>。对比骨架曲线特征值发现, 正向屈服位移模拟结果与试验结果误差为  $20.84\%$ , 这是因为有限元模型为理想化模型, 各构件之间不存在加工及安装误差, 导致屈服位移的模拟值与试验值误差较大。其余正负向特征值的模拟结果与试验结果误差均小于  $10\%$ , 说明有限元模拟效果较好。

4 开裂斗拱模拟结果分析

4.1 滞回曲线

分析开裂柱头科斗拱的滞回曲线, 发现各斗拱在不同体积损失率下的滞回曲线相似。因此, 对大斗、正心瓜拱、单翘和散斗体积损失率为  $3\%$  时斗拱的滞回曲线进行重点分析, 如图 8 所示。

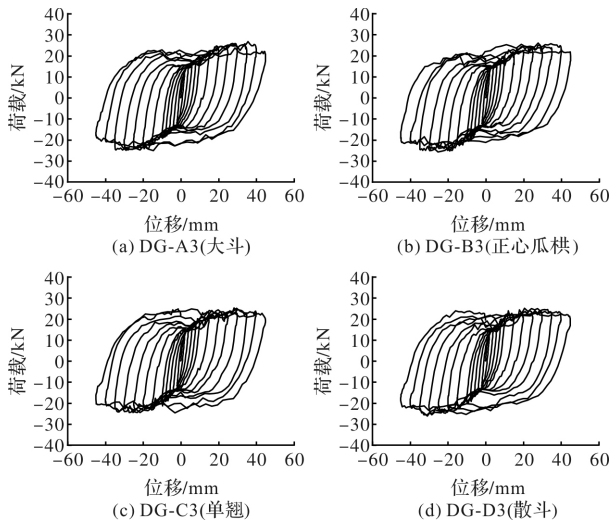


图 8 构件体积损失率为  $3\%$  时斗拱的滞回曲线  
Fig. 8 Hysteretic curves of DG brackets with  $3\%$  volume loss of components

由图可知, 各滞回曲线正负向均存在较明显的下降段, 与其他构件不同的是, 散斗开裂导致斗拱正向加载至  $35 \text{ mm}$  时荷载开始下降。在同级位移下, 随各构件体积损失率的增加, 斗拱荷载呈下降趋势, 承载能力减弱。从滞回环包络面积看, 加载初期滞回曲线狭长, 包络面积较小, 斗拱受力基本处于弹性阶段。随着位移持续增大,

滞回环面积不断增加,特别是构件体积损失率达到3%,加载位移大于30 mm后,大斗、单翘和散斗开裂斗拱的滞回曲线明显发散,滞回环面积显著增加,而正心瓜拱变化不明显,表明大斗、单翘和散斗开裂斗拱加载后期的塑性变形能力相较完好斗拱逐渐提升,耗能量也相应增强。这是因为往复加载过程中,大斗卯口和边缘分别受到馒头榫和平板枋的挤压,散斗明显转动,与周边构件产生挤压变形,从而消耗大量地震能量。正心瓜拱位于单翘和大斗之间,被两者包裹。当斗拱沿出踩方向加载时,单翘顺纹受压,正心瓜拱横纹受压,由于木材顺纹抗压强度大于横纹抗压强度,水平荷载主要由单翘等出踩方向的构件分担,因此单翘变形比正心瓜拱明显,从而耗能量更强。

#### 4.2 骨架曲线

由图9可知,各斗拱的骨架曲线正负向变化趋势大体一致,各斗拱正负向初始刚度基本相同,表明构件开裂对斗拱初始刚度的影响较小。当加载位移小于10 mm时,骨架曲线发展趋势陡峭,近似线性增长,表明初始加载时斗拱受力处于弹性阶段,损伤较小。散斗开裂的斗拱正向加载时较早达到峰值状态,在后两级加载中荷载明显下降,其余开裂斗拱与完好斗拱类似,均加载至-35 mm和+40 mm时达到峰值状态。

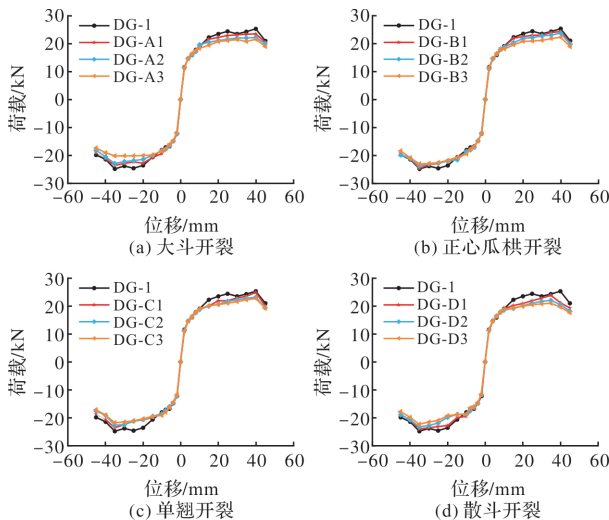


图9 开裂斗拱的骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of cracked DG brackets

#### 4.3 刚度退化

对骨架曲线的分析可知,加载位移小于10 mm时,各斗拱受力基本处于弹性阶段,无明显刚度退化现象;当加载位移超过15 mm时,刚度开始出现明显下降。故主要分析位移大于15 mm时各开裂斗拱的刚度退化规律,如图10所示。

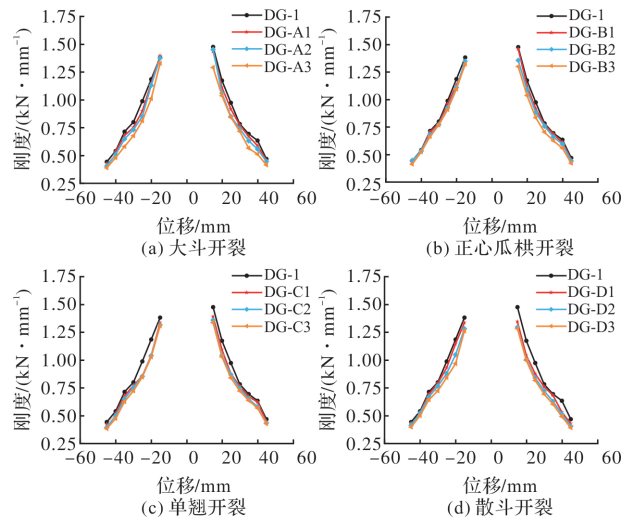


图10 开裂斗拱的刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation curves of cracked DG brackets

根据图10所示的开裂斗拱刚度退化曲线可知:

(1) 构件开裂导致斗拱各级荷载下降,故在同级加载位移下,斗拱刚度随构件体积损失率的增加而逐渐减小,且刚度退化速度由急到缓;

(2) 大斗开裂对斗拱正负向刚度影响比较明显。当大斗体积损失率为3%时,斗拱正向刚度明显退化,最大退化率为14.50%。而其负向刚度比正向退化更显著,最大退化率为18.66%;

(3) 正心瓜拱开裂斗拱的负向刚度随开裂程度增加退化较为缓慢,正向刚度随开裂程度增加退化较为明显;

(4) 加载前期单翘开裂斗拱刚度较完好斗拱下降明显,但随着开裂程度的增大,刚度退化现象减弱。当加载位移大于25 mm后,单翘开裂斗拱的负向刚度随体积损失率的增加退化现象较为明显,正向与之相似;

(5) 当加载位移小于35 mm时,散斗开裂斗拱负向刚度随体积损失率增加退化较为显著。临近破坏状态时刚度退化较为缓慢,最大退化率为10.34%。当加载位移大于+25 mm后,随着散斗体积损失率增大,正向刚度退化明显,达到极限状态时刚度退化率为16.48%。

综上,正向加载时,散斗开裂斗拱的刚度随体积损失率变化较为明显,负向加载时,大斗开裂斗拱的刚度随体积损失率变化较为明显。这是因为正负向荷载作用下柱头科斗拱的受力存在差异。正向加载时,单昂与桃尖梁相对滑移,导致两者之间的散斗明显转动,散斗开裂后其变形更加明显,因此刚度随体积损失率变化较明显。负向加载时,单昂桶子十八斗限制了单昂的滑动变形,斗拱变形以大斗与平板枋间的相对滑移为主,因

此大斗受力和变形明显,随着体积损失率的增加,大斗的变形和刚度变化更加明显。

#### 4.4 承载力退化

图 11 为各斗拱正负向承载力随构件开裂程度的变化规律,可以看出,在同一体积损失率下,对正向承载力影响较大的构件依次为散斗、大斗、正心瓜拱、单翘,对负向承载力影响较大的残损构依次为大斗、单翘、散斗、正心瓜拱,且承载力均随着构件体积损失率的增加逐渐减小,退化速度也逐渐加快。

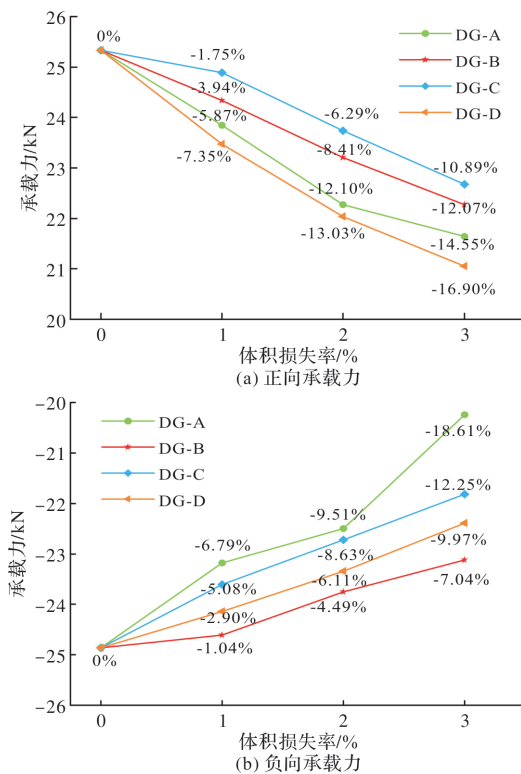


图 11 开裂斗拱正负向承载力退化曲线

Fig. 11 Positive and negative bearing capacity degradation curves of cracked DG brackets

裂缝对斗拱构件正负向承载力影响顺序不同的原因如下:

正向加载时,三才升和槽升子等众多散斗明显转动,散斗受力较大且约束作用明显,故当其开裂时,对正向承载力影响较大;大斗通过馒头榫的挤压和与平板枋间的摩擦抵抗水平荷载,大斗开裂时,摩擦面积减小,对承载力影响较为明显;正向荷载下,单昂相对桃尖梁明显滑移,导致正心瓜拱与单翘两者相对变形较小,因此裂缝对两者的承载力影响较小。而在负向荷载下,单昂与桃尖梁的水平滑移受到单昂桶子十八斗的限制,导致散斗变形较小,故裂缝对其承载力影响不明显;大斗受馒头榫的挤压变形比正向荷载下明显,当其底部出现贯穿裂缝时,将直接影响其

受荷能力,负向承载力下降较为明显;相比正向加载,负向荷载下,单翘和正心瓜拱间相对变形更加明显,加之单翘顺纹受压,其受力大于正心瓜拱,最终导致其承载力变化比正心瓜拱明显。

构件体积损失率为 1% 时,各斗拱承载力略微下降,正向承载力退化率从小到大依次为 1.75% (单翘)、3.94% (正心瓜拱)、5.87% (大斗)、7.35% (散斗),负向承载力退化率从小到大依次为 1.04% (正心瓜拱)、2.90% (散斗)、5.08% (单翘)、6.79% (大斗)。当体积损失率为 3% 时,各斗拱承载力大幅度下降,大斗、正心瓜拱、单翘和散斗开裂斗拱的正向承载力相比完好斗拱,分别降低了 14.55%、12.07%、10.89% 和 16.90%,负向承载力相较完好斗拱分别降低了 18.61%、7.04%、12.25% 和 9.97%。

#### 4.5 耗能能力

等效黏滞阻尼系数  $h_e$  能够较好地反映斗拱的耗能能力,其值越大表明斗拱的耗能能力越强。图 12 为各开裂斗拱的等效黏滞阻尼系数  $h_e$  随加载位移的变化曲线,由图可知,加载前期,各开裂斗拱的等效黏滞阻尼系数相近,曲线基本重叠;当加载位移大于 15 mm 后,曲线出现明显区别,开裂斗拱的等效黏滞阻尼系数均大于完好斗拱,表明开裂残损斗拱依然有较好的耗能能力。这是因为开裂减小了构件的有效受力面积,会削弱其刚度,导致开裂部位成为构件的薄弱部位,易发生变形破坏,从而吸收更多的能量,表现为耗能能力增强。

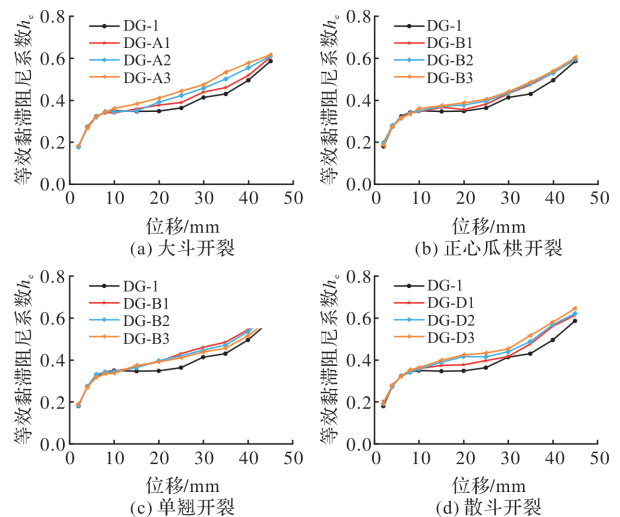


图 12 开裂斗拱等效黏滞阻尼系数

Fig. 12 Equivalent viscous damping ratio of cracked DG bracket

大斗和散斗开裂斗拱的耗能能力优于单翘和正心瓜拱开裂斗拱。大斗和散斗开裂斗拱的等效黏滞阻尼系数均随着开裂程度的增加而显著增加,



正心瓜拱开裂斗拱的等效黏滞阻尼系数随开裂程度的增加较小. 与之不同的是, 单翘开裂斗拱的等效黏滞阻尼系数随构件体积损失率的增加而减小, 耗能能力逐渐减弱.

#### 4.6 变形能力

延性反映了结构构件的后期变形能力, 采用位移延性系数  $\mu$  评估斗拱的变形能力<sup>[20]</sup>, 按照式(1)计算.

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

式中:  $\Delta_u$  为斗拱的极限位移, 取荷载降低至峰值荷载的 85% 时对应的位移<sup>[21]</sup>;  $\Delta_y$  为斗拱的屈服位移.

各开裂斗拱的正负向位移延性系数  $\mu$  随开裂程度的变化规律如图 13 所示. 由图可知, 各开裂斗拱的延性系数均大于完好斗拱, 且正向延性系数均小于负向延性系数, 数值在 4.5~8.0 之间, 说明开裂斗拱具有较好的变形能力. 随着构件体积损失率的增加, 延性系数逐渐增大, 这是因为体积损失导致构件刚度减小, 增强了变形能力, 表现为延性系数增大. 整体上, 在同一残损程度下, 大斗和散斗开裂斗拱正向延性系数较大, 大斗和单翘开裂斗拱负向延性系数较大.

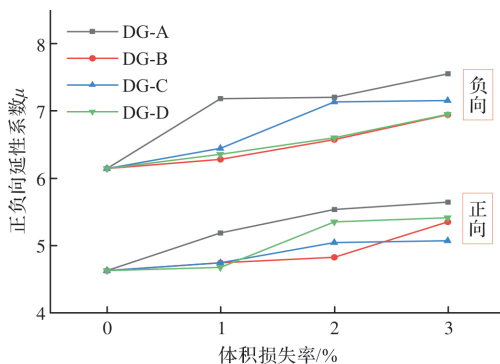


图 13 开裂斗拱的延性系数

Fig. 13 Ductility coefficient of cracked DG brackets

## 5 结论

(1) 滞回曲线、骨架曲线和骨架曲线特征值的模拟结果与试验结果吻合较好, 表明有限元模型能较好地反映柱头科斗拱的抗震性能;

(2) 各开裂斗拱的滞回曲线和骨架曲线变化规律相似. 在同级加载位移下, 各开裂斗拱的荷载均随着开裂程度的增加逐渐减小. 当单翘和散斗体积损失率达到 3% 时, 加载后期滞回曲线发散明显;

(3) 散斗开裂斗拱的正向刚度随体积损失率退化显著, 最大刚度退化率为 16.48%; 大斗开裂斗拱的负向刚度随体积损失率退化较为显著, 最大

刚度退化率为 18.66%;

(4) 同一残损程度下, 散斗开裂斗拱的正向承载力退化程度最大, 退化率为 16.90%, 大斗开裂对斗拱负向承载力影响最大, 退化率为 18.61%;

(5) 构件开裂降低了斗拱的承载力和刚度, 但其仍有较好的耗能和变形能力.

## 参考文献 References

- [1] 田永复. 中国古建筑知识手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
TIAN Yongfu. Handbook of ancient Chinese architecture[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [2] 李钊, 王志涛, 郭小东. 残损古建筑木结构力学性能相关研究进展与展望[J]. 林产工业, 2022, 59(12): 39-46.  
LI Zhao, WANG Zhitao, GUO Xiaodong. Research progress and prospect on mechanical properties of damaged ancient timber structures[J]. China Forest Products Industry, 2022, 59(12): 39-46.
- [3] WU Y J, SONG X B, LI K. Compressive and racking performance of eccentrically aligned Dou-Gong connections[J]. Engineering Structures, 2018, 175: 743-752.
- [4] WU C W, XUE J Y, SONG D J, et al. Analysis on the mechanical performance of Dougong bracket sets under eccentric vertical load[J]. Construction and Building Materials, 2022, 314: 125652.
- [5] XUE J Y, LIANG X W, WU C W, et al. Experimental and numerical study on eccentric compression performance of Dou-Gong brackets at column tops[J]. Structures, 2022, 35: 608-621.
- [6] 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 Xiaoyang. Research on seismic behavior of Dou-Gong brackets used in ancient timber buildings under different skew angle[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2015.
- [7] DONG X Y, MA L L, XUE J Y. Mechanical behaviors of Tou-Kung in historic timber structures subjected to vertical load[J]. Structures, 2023, 47: 1352-1365.
- [8] WU C W, XUE J Y, SONG D J. Mechanical performance of inclined Dougong bracket sets under vertical load: Experimental tests and finite element calculation[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103555.
- [9] 薛建阳, 宋德军, 吴晨伟, 等. 不同倾斜角度下平身科斗拱抗震性能研究[J/OL]. 工程力学, 2023: 1-13. 2023-11-27. [2024-08-19]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20231124.1506.010>.  
XUE Jianyang, SONG Dejun, WU Chenwei, et al.



- Study on seismic behavior of Dou-Gong bracket sets between columns under different inclinations [J]. *Engineering Mechanics*, 2023; 1-13. 2023-11-27. [2024-08-19]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20231124.1506.010>.
- [10] DAI L, CHEN J Z, CHEN X Y, et al. Influence of component damage on the mechanical performance of bracket set joints in ancient timber structures[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020, 26(8): 3258-3275.
- [11] ZHANG C W, CHUN Q, LIN Y J, et al. Quantitative assessment method of structural safety for complex timber structures with decay diseases[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44: 103355.
- [12] 谢启芳, 向伟, 杜彬, 等. 残损古建筑木结构叉柱造式斗拱节点抗震性能退化规律研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(12): 49-55.
- XIE Qifang, XIANG Wei, DU Bin, et al. Study on seismic behavior degradation of damaged “Dougong” joint built with fork column of Chinese ancient timber structure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(12): 49-55.
- [13] 向伟. 叉柱造式斗拱节点抗震和力学性能及其退化规律研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- XIANG Wei. Study on seismic and mechanical behavior and their degradation of “Dougong” joint built with fork column[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2017.
- [14] 何洋. 应县木塔构件残损状态分析及斗拱传力机制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- HE Yang. Analysis of the damaged state of members and study on the stress characteristics of brackets in Yingxian wooden tower[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2019.
- [15] 周乾, 杨娜, 闫维明. 故宫古建筑斗拱典型残损问题分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2017, 43(1): 22-27.
- ZHOU Qian, YANG Na, YAN Weiming. Typical structural problems of bracket sets in the Forbidden City [J]. *Sichuan Building Science*, 2017, 43 (1): 22-27.
- [16] 秦术杰, 杨娜, 曹宝珠, 等. 故宫同道堂木结构的残损分析及保护建议[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(2): 119-128.
- QIN Shujie, YANG Na, CAO Baozhu, et al. Damage analysis and protection of timber structure of Tongdao hall in the Imperial Palace[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(2): 119-128.
- [17] 张程雅. 晋祠圣母殿斗拱力学性能及保护修缮研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- ZHANG Chengya. Research on the mechanical properties and protection of the Dou-Gong in the Jinci temple of Goddess Mother hall[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [18] 潘德华. 斗拱[M]. 南京: 东南大学出版社, 2004.
- PAN Dehua. Dou-Gong[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2004.
- [19] 薛建阳, 宋德军, 吴晨伟, 等. 带有不同斗栓的柱头科斗拱抗震性能试验研究及数值分析[J/OL]. *工程力学*, 2023; 1-13. 2023-09-15. [2024-08-19]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20230914.1336.008>.
- XUE Jianyang, SONG Dejun, WU Chenwei, et al. Experimental study and numerical analysis on seismic behavior of Dou-Gong bracket set on columns with different dowels[J/OL]. *Engineering Mechanics*, 2023; 1-13. 2023-09-15. [2024-08-19]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20230914.1336.008>.
- [20] SONG D J, XUE J Y, WU C W. Experimental and theoretical study on seismic behavior of Dou-Gong brackets on column under the load in overhanging and width directions [J]. *Engineering Structures*, 2024, 299: 117-138.
- [21] 薛建阳, 宋德军, 吴晨伟, 等. 出踩与面宽方向柱头科斗拱抗震性能对比试验及数值分析[J]. *土木工程学报*, 2024, 57(2): 11-24.
- XUE Jianyang, SONG Dejun, WU Chenwei, et al. Comparative test and numerical analysis on seismic behavior of Zhutouke Dougong bracket in overhanging and width directions[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2024, 57(2): 11-24.

(编辑 郑晓龙 李睿奇)