

# 剪切型阻尼器增强大头榫节点模型试验研究

杨 旺<sup>1,2</sup>, 高永林<sup>1,2</sup>, 陶 忠<sup>1,2</sup>, 赵党书<sup>1</sup>, 苏何先<sup>1,2</sup>

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省工程抗震研究所, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 中国传统木结构建筑破坏主要由榫卯节点松动、变形及拔榫引起。为解决榫卯节点容易松动、变形及拔榫破坏问题, 引入节点阻尼器技术, 在传统木结构建筑榫卯节点处安装扇形剪切型阻尼器。为研究传统木结构典型节点大头榫安装阻尼器后的抗震性能及增强效果, 设计制作了 6 个大头榫足尺节点模型, 其中 3 个榫卯节点未装阻尼器, 3 个榫卯节点安装阻尼器。通过低周反复加载试验研究 6 个试验模型的滞回特性、骨架曲线、刚度退化曲线及等效黏滞阻尼系数变化规律。研究表明: 安装阻尼器可以有效控制节点的拔榫破坏; 同时有效增强节点耗能、强度及刚度; 安装阻尼器节点模型的极限承载力是未安装节点模型的 1.5~3.5 倍。

**关键词:** 大头榫节点; 抗震性能; 阻尼器; 低周反复加载试验

中图分类号: TU366

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0525-10

## Experimental study on shear dampers for strengthening mortise-tenon joints

YANG Wang<sup>1,2</sup>, GAO Yonglin<sup>1,2</sup>, TAO Zhong<sup>1,2</sup>, ZHAO Dangshu<sup>1</sup>, SU Hexian<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Engineering Seismic Research Institute, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The damage of traditional Chinese timber structure buildings is mainly caused by the loosening, deformation and pulling out of mortise and tenon joints. Aiming at the problems of easy loosening, deformation and tenon failure of mortise and tenon joints, the joint damper technology is introduced, and the fan-shaped shear damper is installed at the mortise and tenon joints of traditional wooden structure buildings. In order to study the seismic performance and strengthening effect of the typical joints of traditional timber structures after the installation of dampers, six dovetail tenon joint models were designed and manufactured, of which three mortise and tenon joints were not installed with dampers, and three mortise and tenon joints were installed with dampers. The hysteretic response, skeleton curve, stiffness degradation curve and equivalent viscous damping coefficient curves of the six test models were studied by low cycle repeated loading tests. The results show that the installation of dampers can effectively control the tenon failure of the joints; at the same time, the energy consumption, strength and stiffness of the joints are effectively enhanced. The ultimate bearing capacity of the damper models is 1.5~3.5 times that of the models without damper.

**Key words:** dovetail mortise-tenon joint; seismic performance; damper; low cycle repeated loading test

榫卯连接是我国传统木结构建筑梁柱的主要连接方式, 同时也是提供木结构整体抗震恢复能力的关键部位。研究表明, 榫卯连接是半刚性连接, 具有良好的变形及耗能能力<sup>[1-2]</sup>, 同时, 榫卯结构的建筑结构破坏主要是由于榫卯节点松动、变形及拔榫引起整体结构发生倾斜甚至倒塌<sup>[3-5]</sup>, 为此, 国内外专家学者开始关注榫卯节点加固增强方面的研究。

国外研究相对较少。Seo 等<sup>[6]</sup>采用拟静力试验

研究韩国古建筑榫卯节点的抗震性能, 发现其具有明显的耗能能力。Suzuki 等<sup>[7]</sup>对日本古建筑木结构进行动力试验, 得到其抗震能力主要来源于梁柱节点及柱子摇摆效应提供的恢复力。Rohana 等<sup>[8]</sup>采用木钉和钢钉对榫卯节点进行加固, 研究表明钢钉加固节点承载力、刚度均优于木钉加固节点。Schober 等<sup>[9]</sup>采用纤维复合材料(FRP)加固古建筑木梁, 有效地增加木梁薄弱点的抗拉、抗剪及抗弯能力, 但 FRP 对平面外受力表现为脆性,

收稿日期: 2023-07-26

修回日期: 2024-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(51868032, 51168025)

第一作者: 杨 旺(1997—), 男, 硕士生, 主要从事木结构抗震防灾研究。E-mail: 1621587062@qq.com

通信作者: 高永林(1981—), 男, 博士, 副教授, 高级工程师, 主要从事木结构建筑、钢结构研究。E-mail: 120542171@qq.com

无法适应高烈度地区受力复杂的环境. Song 等<sup>[10]</sup>采用自攻螺栓加固的榫卯节点和叉腿进行试验,揭示了该加固方式可有效防止榫卯节点拔榫破坏,但螺栓会造成叉腿裂缝的发展. Zhao 等<sup>[11]</sup>对模拟震损后的单层木结构用 CFRP 加固,分析了其破坏模式和动力特性,证实了 CFRP 修复的古木结构具有良好的抗倒塌性能. Dong 等<sup>[12]</sup>设计了 4 种不同类型的钢板对榫卯节点进行加固,发现 U 形钢板加固榫卯节点抗震性能最好,并提出了加固后节点承载力峰值的计算公式.

我国古建筑木结构历史悠久,尤其是其木节点巧妙构造方法及良好的抗震表现<sup>[13-14]</sup>,吸引许多国内学者开始对其展开研究. 谢启芳等<sup>[15]</sup>对比了碳纤维布以及扁钢两种材料对木构架榫卯节点的加固效果,给出了两种加固材料对不同损伤程度的木构架榫卯节点的适用性. 薛建阳等<sup>[16-17]</sup>使用碳纤维布及不同类型的角钢对已经受损的大头榫及十字形半榫节点进行加固,发现加固后榫卯节点的刚度及耗能均得到提高. 熊海贝等<sup>[18]</sup>采用自攻螺钉植入以及碳纤维布包裹两种方法对榫卯节点进行加固,评价了两种加固方法的加固效果. 郇君虹等<sup>[19]</sup>研究了螺钉及扁钢加固半榫、透榫及燕尾榫节点,结果表明榫卯节点加固后抗震性能均有提高,其中柱箍加螺钉加固抗震能力提升最明显. 张锡成等<sup>[20]</sup>采用记忆合金加固榫卯节点,发现加固后榫卯节点强度、刚度增加,但其耗能能力与未加固节点几乎相同. 方先慧等<sup>[21]</sup>开展了有限元模拟,研究表明 ECC 低干预加固能有效提高带填充墙穿斗式木构架平面外抗倒塌性能,但对其平面内承载力提高仅为 2.7%. 陆伟东等<sup>[22]</sup>针对古建筑榫卯节点采用钢板制作的耗能雀替进行增强,采用试验及有限元计算相结合的方法,研究了钢板厚度、宽度及不同顶层钢板间距耗能雀替的承载力、刚度及耗能能力.

随着阻尼器减震装置的发展以及其所具有的良好耗能减震作用,国内外学者开始将阻尼器引入榫卯节点加固中. Shirayama 等<sup>[23]</sup>使用阻尼器对日本木结构梯梁进行加固,发现其增大了结构阻尼比,有效提高木结构房屋整体抗震性能. Dai 等<sup>[24]</sup>采用扇形阻尼器对燕尾榫节点中的银锭抱肩榫节点进行加固研究,得到阻尼器模型的极限承载力几乎是无阻尼器模型的四倍. 张锡成等<sup>[25]</sup>采用位移放大摩擦阻尼器加固直榫节点,在节点

刚度提升较少的情况下,有效抑制节点的拔榫且大幅增加直榫节点的耗能能力. 陈庆军等<sup>[26]</sup>设计了雀替型阻尼器,并采用其对箍头榫木框架结构进行加固试验,研究得出该阻尼器加固模型的刚度、极限承载力及耗能能力均大于未加固节点. 余石斌等<sup>[27]</sup>提出了用于直榫节点的支撑型黏弹性阻尼器,并采用双支撑加固的方式显著提高了节点刚度、承载力及耗能.

为了进一步研究阻尼器对传统木结构增强加固的效果,本文将课题组研发的剪切型阻尼器<sup>[28]</sup>用于加固传统木结构梁柱节点,选取云南传统木结构常用的典型榫卯节点中的大头榫作为研究对象,共制作 6 个试验模型,通过低周反复加载试验得到节点模型的抗震性能,为西南地区传统穿斗式木结构保护提供技术依据.

## 1 试验概况

### 1.1 试验设计与制作

试验选取加拿大铁杉木按照云南“一颗印”传统穿斗式木构架做法,并根据课题组在大理剑川的实地调研资料,考虑节点间隙足尺制作了 6 个大头榫节点试件模型,包括 3 个未装阻尼器的大头榫节点(编号为 SJ-17、SJ-18、SJ-19),SJ-18 为完好节点, SJ-17 及 SJ-19 通过控制切削程度模拟“松动”及“紧密”; 3 个安装阻尼器大头榫节点(编号为 SJ-30、SJ-40、SJ-39),同理 SJ-40 为完好节点, SJ-30 及 SJ-39 对应 SJ-17 及 SJ-19. 大头榫常用于双梁或梁下有枋处,为真实模拟柱中大头榫的受力,将大头榫上部的矩形卯口用与柱子相同材质的塞木塞住,并用自攻螺钉将塞木与柱子固定牢固,模型示意图如图 1,试件模型尺寸见表 1. 试验在昆明理工大学工程抗震技术研究中心室进行.

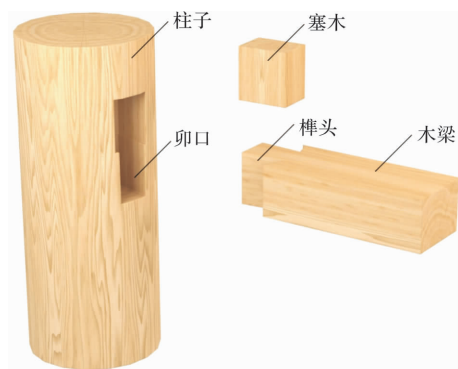


图 1 大头榫节点模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the mortise-tenon joint

表 1 节点模型尺寸

Tab. 1 Dimensions and details of joint models

模型编号		树种	加载方式	榫头宽/mm		卯口宽/mm	松紧程度	统一尺寸/mm	
未加阻尼器	加阻尼器			榫额	榫颈			榫截面高	榫头长
SJ-17	SJ-30	杉木	循环	49	39	50	宽松		
SJ-18	SJ-40	杉木	循环	50	40	50	适中	175	53
SJ-19	SJ-39	杉木	循环	51	41	50	紧密		

1.2 新型阻尼器试验性能

试验中采用的阻尼器由两块“L”型厚 5 mm Q235 钢板组成, 长边钢板切割成扇形, 在两片钢板中间填充黏弹性橡胶(丁基橡胶), 钢板与橡胶牢固连接. 阻尼器通过长 30 mm 的 M4.0 平头尖尾螺栓连接在柱与枋节点处, 见图 2.

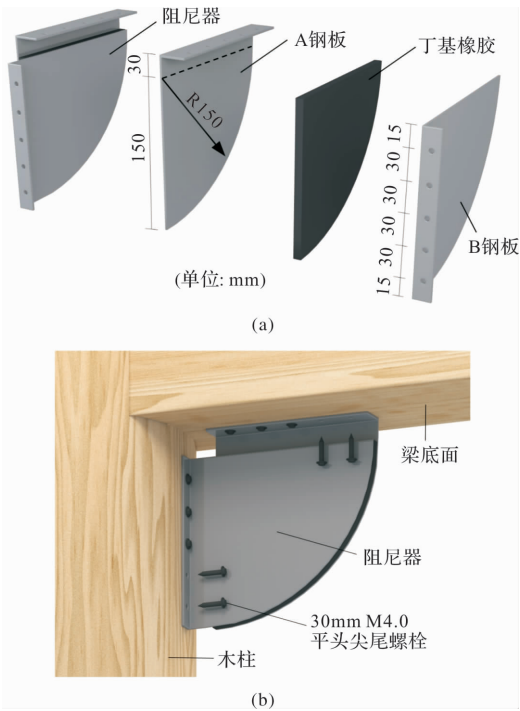


图 2 阻尼器构造

Fig. 2 Damping mechanism design

为了解阻尼器的耗能机理及力学特性, 在试验前, 对阻尼器试件单独进行低周反复加载试验, 加载装置见图 3, 加载制度采用位移控制: 初始值  $\Delta_0 = \pm 2 \text{ mm}$ , 加载速率为  $5 \text{ mm/min}$ , 每级位移增加  $2 \text{ mm}$ , 循环 3 次, 加载频率  $1 \text{ Hz}$ , 最大幅值为  $\pm 16 \text{ mm}$ , 环境温度  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ . 测得阻尼器滞回曲线见图 4.

由图可知, 阻尼器 7 级加载滞回曲线均出现明显的“捏缩”效应, 说明受到一定滑移影响. 阻尼器滞回环平滑, 塑性变形能力较强, 能较好地吸收地震能量, 主要是以剪切变形耗能为主.

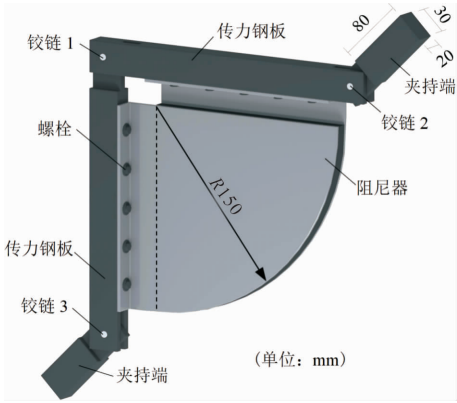


图 3 阻尼器加载装置

Fig. 3 Damper loading system

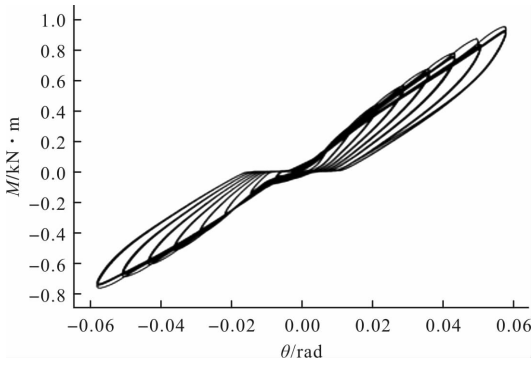


图 4 阻尼器滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis loops of dampers

1.3 加载方案及测量方案

试验中榫卯节点中的柱子竖向放置, 采用位移控制梁端加载, 由英国 Servotest 制造的拟动力试验设备施加竖向低周反复荷载, 规定悬臂梁端向下转动为正向加载, 向上转动为负向加载. 柱子两端由两个圆形钢套筒约束, 钢套筒深 100 mm, 内径和木柱直径相同. 柱脚套筒底板焊接于钢梁上, 钢梁与地梁由地脚螺栓连接. 柱顶由上部结构传递的竖向荷载  $P=10 \text{ kN}$ , 由千斤顶通过柱头套筒施加. 为防止试件在加载过程中发生平面外滑移, 木柱上部两侧由两个弧形钢板抱箍, 每个钢板外侧由两个花篮螺杆与门式钢架连接固定. 加载装置见图 5.

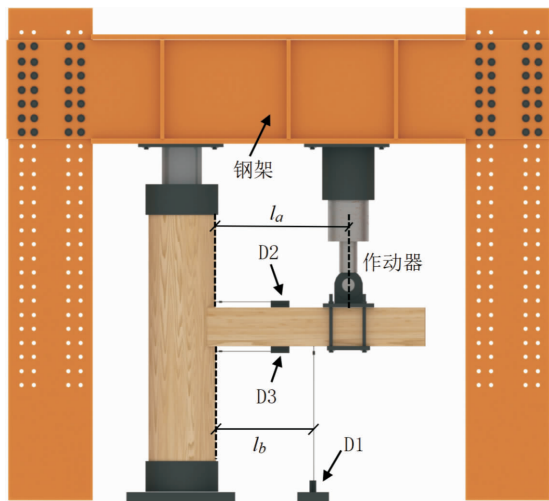


图5 试验加载装置

Fig. 5 Test setup

#### 1.4 加载方案

加载前,先通过千斤顶对柱顶预载 10 kN 竖向荷载并保持恒定,以模拟木柱真实的受力状态.由作动器施加竖向低周反复荷载,采用位移控制加载的方式,预计节点转角限值 0.2 rad,则加载位移限值为  $\pm 120$  mm.初始加载位移  $\pm 10$  mm,往后每级位移增量为  $\pm 10$  mm,每级循环 3 次,加载制度见图 6 所示.

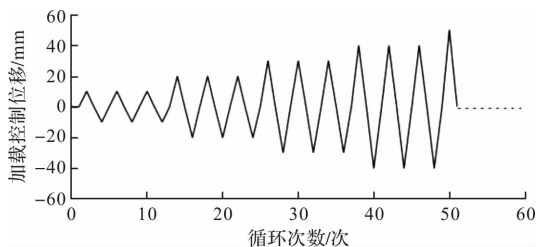


图6 加载制度

Fig. 6 Loading schedule

#### 1.5 测量方案

为获得大头榫节点的弯矩、转角、以及榫头的拔榫量等性能指标,布置横向位移计 D2、D3 测量榫头顶部及底部的拔榫量,如图 5 所示.

在梁下侧距柱内边缘  $l_b = 315$  mm 处竖向布置位移计 D1(量程 750 mm),用于实时测量悬臂梁端在竖向荷载作用下产生的竖向位移,其与  $l_b$  的比值可计算梁端转角.节点弯矩由作动器内的力传感器得到竖向力与作动器中心距柱内边缘的水平距离( $l_a = 500$  mm)计算得到.布置见图 5.

## 2 试验现象及破坏模式

### 2.1 未加阻尼器节点模型

#### 2.1.1 节点模型 SJ-17

节点模型 SJ-17 榫头与卯口侧向间留有 1 mm

空隙.加载初期的榫头拔榫量较小,每级拔榫量约为 2 mm,加载至第 4 级(控制位移 40 mm)时,拔榫量约 7 mm.加载至第 5 级(控制位移 50 mm)时,开始出现木纤维断裂声,随着控制位移增大木纤维断裂声加大.加载至第 10 级(控制位移 100 mm)时,观察到卯口下部木材横纹开裂见图 7(a),塞木有少许拔出,见图 7(b).试验结束时残余拔榫量约为 26 mm.试验结束后观察到卯口一侧横纹开裂,并向上下延伸至卯口外侧,榫头上下榫颈处有轻微的横纹压缩变形,见图 7(c)、(d).



图7 节点模型 SJ-17 破坏状态

Fig. 7 Failure pattern of SJ-17

#### 2.1.2 节点模型 SJ-18

节点模型 SJ-18 榫头和卯口尺寸相同.加载初期,拔榫量极小.加载至第 3 级(控制位移 30 mm)时,开始出现木纤维断裂声,随着控制位移的增大木纤维断裂声逐渐增大,拔榫量也逐渐增大,但增量较小.加载至第 8 级(控制位移 80 mm)时,木材劈裂声加大,观察到榫头上下横纹压缩变形.继续加载,榫头变形增大,见图 8(a)、(b).试验结束时残余拔榫量约为 18 mm.试验结束后将榫卯节点拆开,观察到卯口左右两侧有塑性压痕,榫颈处横纹压屈,见图 8(c).榫头两侧有轻微的挤压变形,榫头宽度有一定的压缩,见图 8(d).

#### 2.1.3 节点模型 SJ-19

节点模型 SJ-19 榫头比卯口宽 1 mm,将榫头强塞进卯口,即榫头和卯口间一开始就紧密贴合在一起.加载至第 2 级(控制位移 20 mm)时,就出现了木纤维断裂声.继续加载,木纤维断裂声和木材挤压摩擦声混杂出现.加载至第 6 级(控制位移 60 mm)后,木材挤压摩擦声逐渐加大并持续出现,榫头上侧由于挤压摩擦变得光滑,见图 9(a).加载至第 7 级(控制位移 70 mm)时,发现卯



口两侧边缘横纹开裂,见图9(b)、(c),有木屑从卯口中掉落.第8级(控制位移80 mm)加载结束时,残余拔榫量为19 mm.从第9级开始,拔榫量骤然上升.继续加载,卯口劈裂范围加大.加载至12级时,榫头完全拔出,见图9(d).试验结束,将榫卯节点拆开,观察到卯口内部残留许多木屑,见图9(e),榫头两侧有轻微的挤压变形,经测量榫头宽度被压缩了约3 mm,见图9(f).



图8 节点模型 SJ-18 破坏状态

Fig. 8 Failure pattern of SJ-18



图9 节点模型 SJ-19 破坏状态

Fig. 9 Failure pattern of SJ-19

## 2.2 加阻尼器节点模型

### 2.2.1 节点模型 SJ-30

节点模型 SJ-30 榫头宽度小于卯口宽度 1 mm,加载过程中节点模型木材纤维断裂现象与 SJ-17 基本相同,在前 5 级加载过程中,由于阻尼器的作

用,榫头拔出后,卸载后榫头基本可以迅速复位.不同之处在于加载至第 2 级(控制位移 20 mm)时,可以看到节点阻尼器橡胶开始发生错动.加载至第 4 级(控制位移 40 mm)阻尼器连接梁(枋)最外侧螺栓以及连接柱上侧螺栓开始拔出,卸载后螺栓仍可复位.随着加载控制位移的增大,阻尼器橡胶层发生错动的幅度越来越大,连接梁(枋)的螺栓被拔出越来越多,见图 10(a),残余拔榫量随着加载开始增大.加载至第 8 级(控制位移 80 mm)时,阻尼器连接梁(枋)的最外侧两颗螺栓断裂脱落,加载至第 10 级(控制位移 100 mm)时,螺栓仅有一颗未被拔出,见图 10(b).试验结束后,连接梁(枋)两颗螺栓被拔出脱落,仅剩 1 颗完全连接梁(枋),连接柱子的螺栓自第 4 级有轻微拔出后,后期随着加载控制位移的增大,螺栓拔出幅度发展不明显,见图 10(c)、(d).残余拔榫量约为 17 mm.

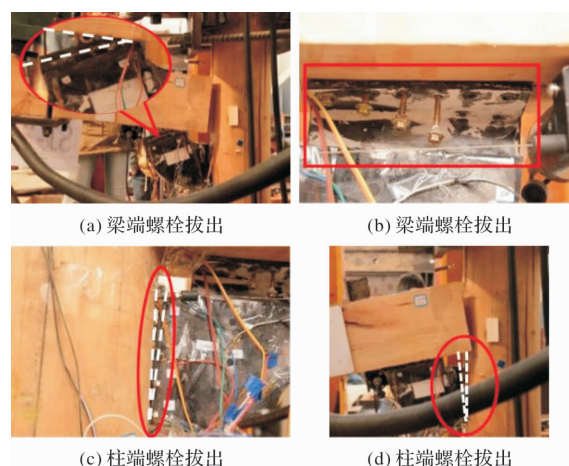


图10 节点模型 SJ-30 破坏状态

Fig. 10 Failure pattern of SJ-30

### 2.2.2 节点模型 SJ-40

节点模型 SJ-40 榫头宽度等于卯口宽度,加载过程中木材纤维断裂现象与 SJ-18 基本相同.第 2 级(控制位移 20 mm)时阻尼器橡胶发生错动.当加载到第 7 级(控制位移 70 mm)时,阻尼器连接梁最外侧的 1 颗螺栓有拔出现象,阻尼器连接柱子的螺栓未发生变化.当加载到第 8 级(控制位移 80 mm)时,阻尼器连接梁最外侧的 2 颗螺栓被拔出,阻尼器连接柱子的螺栓未发生变化.当加载到第 9 级(控制位移 90 mm)时榫头拔出,卸载后无法复位见图 11(a).由于阻尼器的约束,榫头未掉落,继续加载至结束,阻尼器连接梁(枋),最外侧的 2 颗螺栓断裂,向内侧螺栓依次发生弯曲;连接柱子的螺栓没有出现拔出现象,见图 11(b).

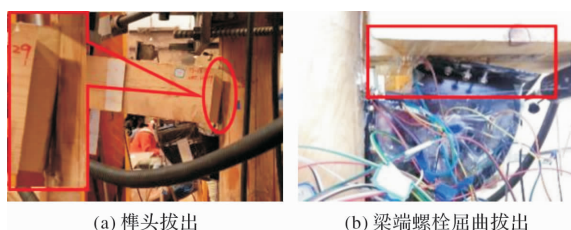


图 11 节点模型 SJ-40 破坏状态

Fig. 11 Failure pattern of SJ-40

### 2.2.3 节点模型 SJ-39

节点模型 SJ-39 榫头宽度大于卯口 1 mm, 加载过程中木材纤维断裂现象与 SJ-19 基本相同. 加载至第 2 级(控制位移 20 mm), 即开始出现拔榫现象, 拔榫量约 2 mm, 随着控制位移的不断增大, 拔榫量越来越大; 阻尼器橡胶发生错动, 但未出现螺栓拔出现象. 加载至第 9 级(控制位移 90 mm), 拔榫量约 9 mm; 连接梁(枋)螺栓最外侧开始出现拔出现象. 加载至第 10 级(控制位移 100 mm), 榫头拔出, 连接梁(枋)螺栓 3 颗发生断裂脱落, 连接钢板弯曲, 并且发现卯口侧边发生劈裂, 见图 12(a)、(b), 至试验结束, 榫头拔出不能复位, 阻尼器连接柱子螺栓未发生拔出现象.

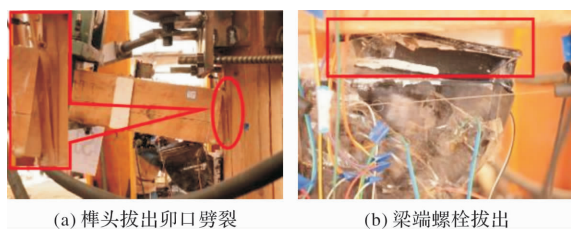


图 12 节点模型 SJ-39 破坏状态

Fig. 12 Failure pattern of SJ-39

综上所述, 所有节点模型均产生了不同程度的卯口劈裂、榫头压屈, 未安装阻尼器节点模型比安装的节点模型更容易拔榫, 安装阻尼器节点的梁(枋)端螺栓容易弯曲拔出, 连接柱子螺栓受影响较小.

## 3 抗震性能分析

### 3.1 滞回特性

由图 13 可知, 节点模型的摩擦滑移量随着加载级数的增加而增加, 滞回曲线形状呈反“Z”形且均有捏拢效应. 榫卯节点未安装阻尼器的节点模型 SJ-17、SJ-18、SJ-19 捏拢效应较安装有阻尼器的节点模型 SJ-30、SJ-40、SJ-39 更加明显, 说明阻尼器可以有效减少节点滑移. 滞回曲线非对称,

即两个模型均呈现反向加载滞回环面积大于正向加载滞回环面积, 这是由于大头榫的几何不对称性及加工工艺决定的, 榫头上半部分通过塞木进行约束, 约束效果弱于下半部分. 负向加载时, 榫头下部卯口有效约束榫头拔榫较难, 正向加载时, 塞木受榫头向外的摩擦力且上部卯口约束弱于下部, 因此节点滞回曲线表现出负向极限弯矩及刚度较高. 从滞回环面积上看, 随着加载位移的增大, 滞回环面积逐渐增大, 耗散的能量逐渐增加; 同级位移控制下, 负向滞回环面积大于正向滞回环面积, 可见大头榫节点负向加载的耗能能力优于正向加载. 同时, 榫卯节点安装阻尼器后, 滞回环面积远大于未在节点安装阻尼器的节点模型, 且节点模型 SJ-30、SJ-40、SJ-39 滞回曲线更加饱满. 说明榫卯节点加装阻尼器可以有效增加节点耗能, 但节点加装阻尼器与否, 对榫卯节点的工作机理影响较小.

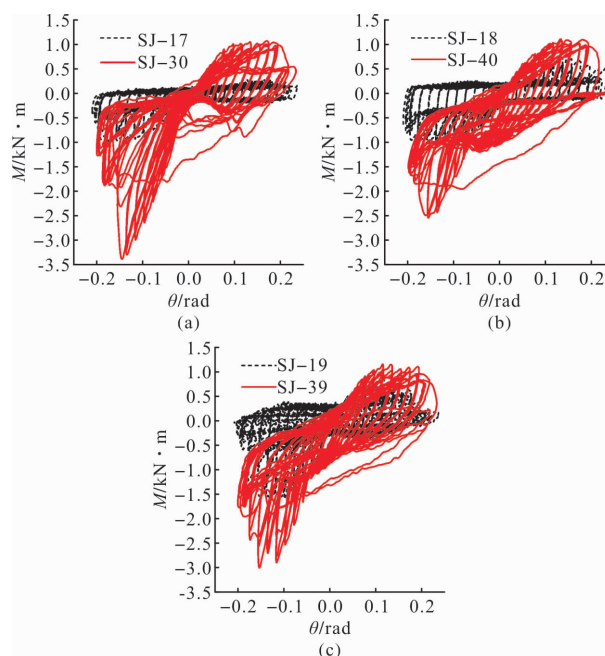


图 13 节点模型滞回曲线对比

Fig. 13 Comparison of  $M-\theta$  hysteresis loops of models

### 3.2 骨架曲线

由图 14 可知, 大头榫节点由于其几何的非对称性及加工上的误差, 约束效果呈非对称性, 因此其骨架曲线在正向加载和负向加载时有较大差异. 对比榫卯节点安装阻尼器和未安装阻尼器的节点模型骨架曲线可以看出, 除了紧密节点模型 SJ-19 表现出强“S”形特征, 其余两个未安装阻尼器的节点模型 SJ-17、SJ-18 仅表现出弱“S”形特征, 而榫卯节点安装阻尼器的节点模型骨架曲线



均呈现“S”形特征. 安装阻尼器的节点模型 SJ-30、SJ-40、SJ-39 极限承载力均大于未安装阻尼器的节点模型 SJ-17、SJ-18、SJ-19, 相差约 1.5~3.5 倍, 且骨架曲线斜率同样是前者大于后者, 说明阻尼器可以有效改善节点力学性能, 增强节点极限承载能力.

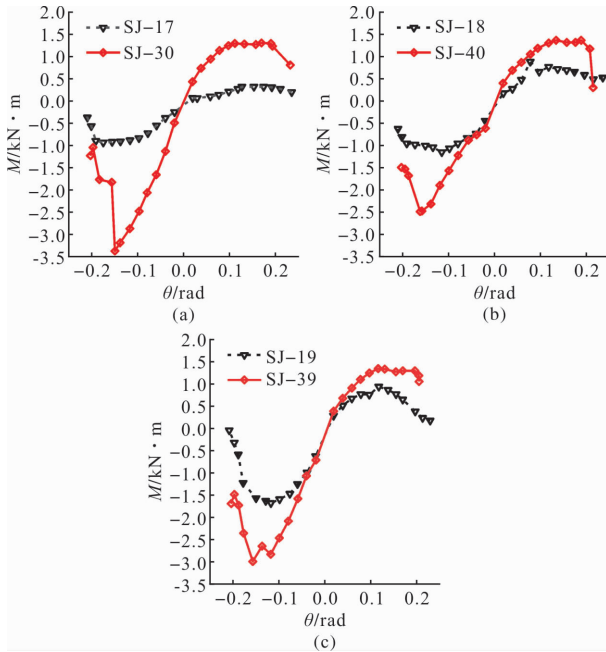


图 14 节点模型骨架曲线对比

Fig. 14 Comparison of envelope curves of models

### 3.3 刚度退化曲线

节点的刚度退化是指在反复荷载作用下, 刚度随着循环加载级数及控制位移的增加而逐渐减小的过程. 在反复荷载作用下, 节点刚度可用割线刚度  $K$  来表示. 各级反复荷载作用下试件的正向割线刚度由式(1)计算, 反向割线刚度由式(2)计算.

$$K_i^+ = \frac{M_i^+}{\theta_i^+} \quad (1)$$

$$K_i^- = \frac{M_i^-}{\theta_i^-} \quad (2)$$

式中:  $K_i^+$  为第  $i$  级循环荷载作用下正向割线刚度;  $K_i^-$  为第  $i$  级循环荷载作用下反向割线刚度;  $\theta_i^+$  为  $M_i^+$  (正向峰值弯矩) 对应的转角;  $\theta_i^-$  为  $M_i^-$  (反向峰值弯矩) 对应的转角绝对值. 榫卯节点正反向刚度退化曲线见图 15.

由图可知, 榫卯节点安装阻尼器的节点模型 SJ-30、SJ-40、SJ-39 初始刚度均大于未安装阻尼器的节点模型 SJ-17、SJ-18、SJ-19, 但随着加载控制位移增大, 节点模型刚度呈现出一致规律性: 榫卯节点安装阻尼器的节点模型后期刚度均大于

未安装阻尼器的节点模型, 且由于大头榫构造非对称的特点, 节点模型正向加载时的刚度普遍小于负向加载时的刚度. 比较节点模型的刚度退化曲线可知, 未安装阻尼器的节点模型, 随着加载控制位移的增大, 节点模型最小刚度值均接近于零, 说明未安装阻尼器的节点模型至加载结束时, 节点失去承载能力. 而安装阻尼器的节点模型至加载结束时, 除节点 SJ-40 接近于零外, 其余节点模型均有较大残余刚度, 说明榫卯节点安装阻尼器增强了节点刚度, 且保证了节点的安全冗余度.

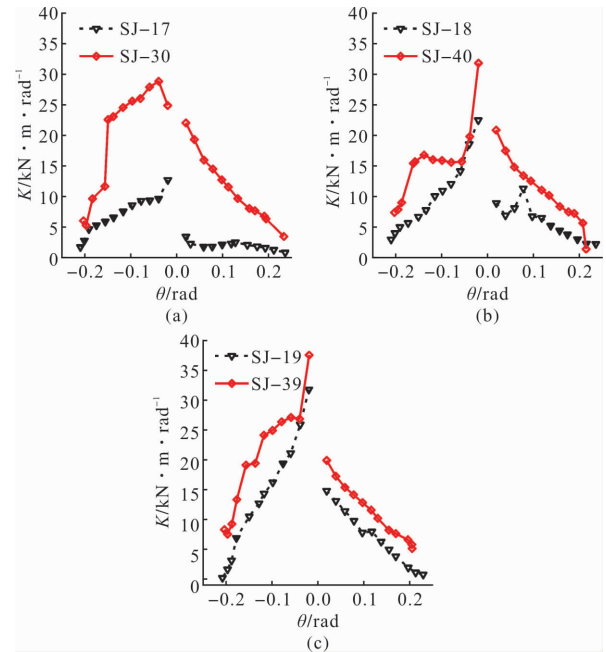


图 15 节点模型刚度退化曲线对比

Fig. 15 Comparison of rigidity degradation curves of models

### 3.4 耗能分析

为定量分析木结构榫卯节点的耗能能力, 采用 Jacobson 提出的等效黏滞阻尼系数及节点模型每级加载滞回曲线单圈耗能面积来评价节点加载时耗散的能量. 等效黏滞阻尼系数  $h_e$  按式(3)计算.

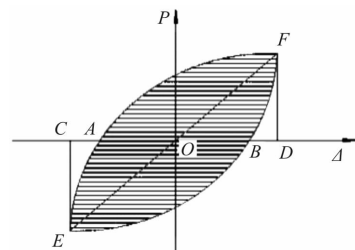


图 16 等效黏滞阻尼系数计算示意图

Fig. 16 Schematic representation of equivalent viscous damping coefficient calculation

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \times \frac{S_{AFBE}}{S_{\Delta CEO} + S_{\Delta DFO}} \quad (3)$$

式中:  $S_{AFBE}$  为滞回环面积(图 16 中阴影部分)。

根据式(3)计算并绘制节点模型等效黏滞阻尼系数  $h_e$  关系图, 见图 17。由图可知, 试验节点模型随着控制位移增大, 等效粘滞阻尼系数整体表现出先减小后增大。安装阻尼器的节点模型等效黏滞阻尼系数  $h_e$  除个别点外均小于未安装阻尼器节点模型。根据阻尼器试验结果分析得知该阻尼器主要是通过剪切变形消耗能量, 因此, 榫卯节点安装阻尼器增加了节点刚度和强度, 节点模型的黏滞阻尼耗能能力表现较差。榫卯节点安装阻尼器的节点模型单圈滞回环面积大于未安装阻尼器的节点模型, 当加载位移为 60~80 mm 时, 其耗能能力提高近 1 倍, 安装阻尼器的节点模型总体所消耗的能量大于未安装阻尼器的节点模型, 计算结果见图 18。

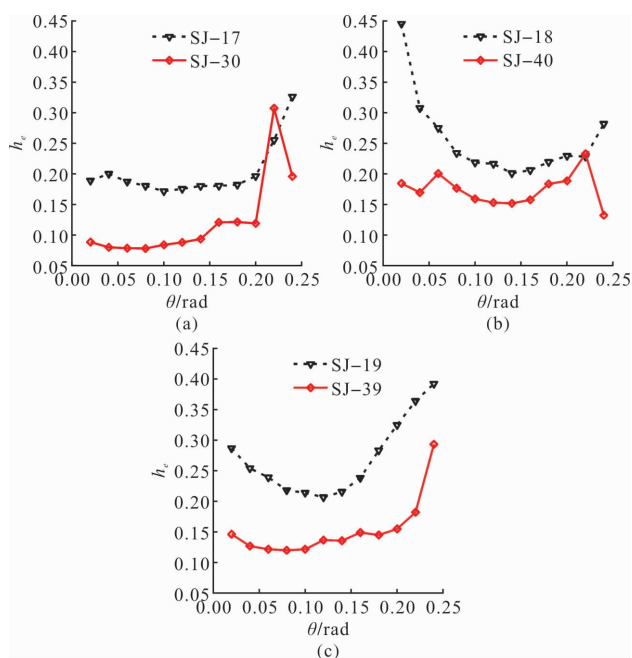


图 17 节点模型等效黏滞阻尼系数对比

Fig. 17 Comparison of equivalent viscous damping coefficients in models

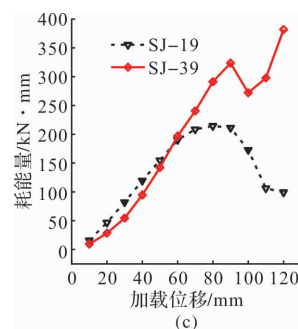
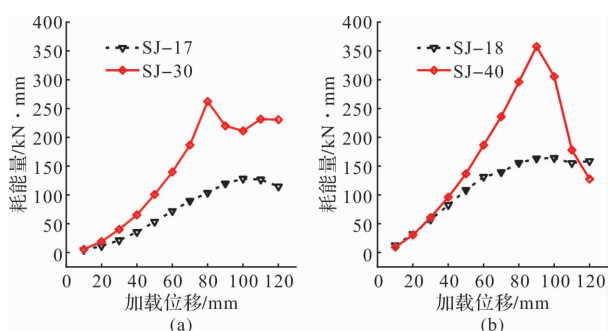


图 18 节点模型滞回曲线耗能对比

Fig. 18 Comparison of energy consumption of hysteresis curve of models

## 4 结论

(1)位移控制加载低于 4 级(40 mm)时, 大头榫节点模型安装阻尼器可以有效增加节点的抗拔榫破坏能力, 为防止节点拔榫破坏提供了第二道防线;

(2)节点模型安装阻尼器后, 3 个节点模型滞回环面积明显增大 20% 至 60%, 且滞回曲线更加饱满平滑, 卸载过程, 节点模型的恢复能力较好, 且可以明显增强节点耗能能力;

(3)节点模型安装阻尼器后, 节点骨架曲线呈明显的“S”型, 节点模型的强度和刚度得到有效增强, 安装阻尼器的节点模型极限承载力比未安装阻尼器的节点模型增大 1.5~3.5 倍;

(4)扇形剪切型阻尼器主要是通过剪切变形进行耗能, 当加载位移为 60~80 mm 时, 其耗能能力提高近 1 倍。阻尼器黏滞阻尼耗能能力偏弱, 安装阻尼器的节点模型黏滞阻尼器系数小于未安装节点模型 20%~65%。

## 参考文献 References

- [1] 姚侃, 赵鸿铁, 葛鸿鹏. 古建木结构榫卯连接特性的试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 168-173.  
YAO Kan, ZHAO Hongtie, GE Hongpeng, Experimental studies on the characteristic of mortise-tenon joint in historic timber buildings[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 168-173.
- [2] 隋葵, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建木结构直榫和燕尾榫节点试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(2): 88-92.  
SUI Yan, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Experimental study on characteristics of mortise-tenon joints in historic timber buildings[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(2): 88-92.



- [3] 徐明刚. 中国古建筑木结构榫卯节点抗震性能研究[D]. 南京:东南大学, 2011.  
XU Minggang. Study of a seismic behavior of mortise-tenon joints in Chinese ancient timber buildings[D]. Nanjing: Southeast University, 2011.
- [4] 付高攀. 传统民居木构架加固改造技术研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2016.  
FU Gaopan. Study on reinforcement and transformation method for timber frame of traditional folk houses[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [5] 郭婷, 杨娜, 周海宾, 等. 穿斗式纵向木构架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(S1):34-41.  
GUO Ting, YANG Na, ZHOU Haibin, et al. Experimental study of the seismic performance of Chuan-Dou-style longitudinal wooden frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(S1):34-41.
- [6] SEO J, CHOI I, LEE J. Static and cyclic behavior of wooden frames with tenon joints under lateral load[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(3): 344-349.
- [7] SUZUKI Y, MAENO M. Structural mechanism of traditional wooden frames by dynamic and static tests[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(1):508-522.
- [8] ROHANA H, AZMI I, ZAKIAH A. Shear and bending performance of mortise and tenon connection fastened with dowel[J]. Journal of Tropical Forest Science. 2010, 22(4):425-432.
- [9] SCHÖBER K U, HARTE A M, KLIGER R, et al. FRP reinforcement of timber structures[J]. Construction and Building Materials, 2015, 97:106-118.
- [10] SONG Xiaobin, LI Kai, CRAYSSAC, et al. Lateral performance of traditional heavy timber frames with Mortise-Tenon joints retrofitted using self-tapping screws[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(10):1-10.
- [11] ZHAO Xiangbi, ZHANG Fengliang, XUE Jianyang, et al. Shaking table tests on seismic behavior of ancient timber structure reinforced with CFRP sheet[J]. Engineering Structures, 2019, 197:109405.
- [12] DONG Hongying, LIANG Xu, CAO Wanlin, et al. Seismic behavior and theoretical analysis of mortise-tenon joints reinforced with steel components[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 70:106412.
- [13] LIU Yan. Cultural and technical comparison between traditional wooden framing systems in east asia and western Europe[J]. Chinese Annals of History of Science and Technology, 2022, 6(1):89-118.
- [14] 薛建阳, 夏海伦, 李义柱, 等. 不同松动程度下古建筑透榫节点抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(4):463-469, 477.  
XUE Jianyang, XIA Hailun, LI Yizhu, et al. Experimental study on seismic behavior of penetrated mortise-tenon joints under different degree of looseness in ancient buildings[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(4):463-469, 477.
- [15] 谢启芳, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古建筑木结构榫卯节点加固的试验研究[J]. 土木工程学报. 2008, 41(1): 28-34.  
XIE Qifang, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. An experimental study on the strengthening of mortise-tenon joints in ancient Chinese wooden buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(1):28-34.
- [16] 薛建阳, 隋葵, 葛鸿鹏, 等. 古建筑木结构榫卯节点采用碳纤维布加固模型振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(8):143-148.  
XUE Jianyang, SUI Yan, GE Hongpeng, et al. Shaking table test of joints strengthened with CFRP sheet in Chinese ancient timber structure[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(8):143-148.
- [17] 薛建阳, 任国旗, 张家珩, 等. 角钢加固传统民居十字形半榫节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(1):103-112.  
XUE Jianyang, REN Guoqi, ZHANG Jiaheng, et al. Experimental study on seismic performance of crossshaped half-tenon joint reinforced by angle in traditional dwellings[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1):103-112.
- [18] 熊海贝, 刘应扬, 姚亚, 等. 梁柱式木结构加固方法及抗侧力性能研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(5):695-702.  
XIONG Haibei, LIU Yingyang, YAO Ya, et al. Experimental study on reinforcement methods and lateral resistance of glued-laminated timber postand beam structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2016, 44(5):695-702.
- [19] 郇君虹, 马东辉, 郭小东, 等. 扁钢加固半榫、透榫及燕尾榫抗震性能试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(8):763-771.  
HUAN Junhong, MA Donghui, GUO Xiaodong, et al. Experimental study of aseismic behaviors of flexural tenon joint, through tenon joint and dovetail joint

- reinforced with flat steel devices[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(8), 763-771.
- [20] 张锡成,胡成明,吴晨伟,等.形状记忆合金丝加固古建筑木结构直榫节点抗震性能研究[J].工程力学,2022,39(4):164-176.
- ZHANG Xicheng, HU Chengming, WU Chenwei, et al. Research on aseismic behavior of straight tenon joints reinforced by SMA strings in ancient timber buildings[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(4): 164-176.
- [21] 方先慧,邓嘉瑞,张军朋,等.ECC低干预加固结构数值模拟研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(2):267-277.
- FANG Xianhui, DENG Jiarui, ZHANG Junpeng, et al. Numerical simulation of ECC low intervention reinforced structures[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(2): 267-277.
- [22] 陆伟东,姜伟波,张坤,等.含耗能雀替的榫卯节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(11):213-221.
- LU Weidong, JIANG Weibo, ZHANG Kun, et al. Experimental study on seismic performance of mortise-tenon joints with QueTi damper[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(11): 213-221.
- [23] SHIRAYAMA A, SUZUKI Y. Seismic reinforcement effect of laddery beam installed with viscoelastic dampers[J]. AIJ Journal of Technology and Design, 2008, 14(27): 55-59.
- [24] DAI Bihui, GAO Yonglin, TAO Zhong, et al. Fan-shaped shear dampers strengthen mortise-tenon joints in Chinese traditional timber structures[J], International Journal of Architectural Heritage, 2023, 17(7): 1079-1092.
- [25] 张锡成,韩乙楠,邱智豪,等.位移放大型转动摩擦阻尼器增强榫卯节点抗震性能试验研究[J].工程力学,2022,39(10):120-130.
- ZHANG Xicheng, HAN Yinan, QIU Zhihao, et al. Experimental study on seismic performance of mortise-tenon joints strengthened with displacement amplified rotational friction damper[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(10): 120-130.
- [26] 陈庆军,李冰州,陈奕年,等.雀替型阻尼器加固箍头榫木框架结构的抗震性能[J].华南理工大学学报(自然科学版),2023,51(4):9-20.
- CHEN Qingjun, LI Bingzhou, CHEN Yinian, et al. Seismic performance of hoop head tenon frame structure reinforced by sparrow brace type damper[J]. Journal of South China University of Technology, 2023, 51(4): 9-20.
- [27] 余石斌,潘文,苏何先,等.支撑型黏弹阻尼器增强传统木结构直榫节点试验及理论研究[J/OL].工程力学,1-14[2024-06-21].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20240108.1150.008.html>.
- YU Shibin, PAN Wen, SU Hexian, et al. Experimental and theoretical study on reinforced mortise and tenon joints of traditional wooden structures using viscoelastic dampers[J/OL]. Engineering Mechanics, 1-14 [2024-06-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20240108.1150.008.html>.
- [28] 高永林,陶忠,叶燎原,等.带有黏弹性阻尼器穿斗木结构振动台试验研究[J].振动与冲击,2017,36(1):240-247.
- GAO Yonglin, TAO Zhong, YE Liaoyuan, et al. Shaking table tests for a chuan dou timber building with viscoelastic dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(1): 240-247.
- [29] 姚谦峰.土木工程结构试验[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- YAO Qianfeng. Civil engineering structural test[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

(编辑 李睿奇)