

吴忠铁,张轲,解宁,等.采用耗能装配节点的榫卯木构架抗震性能有限元分析[J].地震工程学报,XXXX,XX(X):000-000.  
DOI:10.20000/j.1000-0844.20230119002  
WU Zhongtie,ZHANG Ke,XIE Ning,et al.Finite element analysis of seismic performance of mortise and tenon timber frame  
with energy-consuming assembly joints[J].China Earthquake Engineering Journal,XXXX,XX(X):000-000,DOI:10.20000/j.  
1000-0844.20230119002

## 采用耗能装配节点的榫卯木构架 抗震性能有限元分析

吴忠铁,张轲,解宁,赵城,吴为

(西北民族大学土木工程学院,甘肃兰州730030)

**摘要:**针对榫卯木构架常规梁柱榫卯节点的缺陷,提出一种榫卯木构架的梁柱耗能装配节点。为研究该耗能装配节点对木构架抗震性能的影响,利用有限元软件 ABAQUS 建立带有全钢耗能装配节点、橡胶柔性耗能装配节点、无加固的榫卯式节点三种不同类型榫卯木构架的有限元模型,并进行单调荷载加载分析和低周反复加载分析,主要研究这三类榫卯木构架模型的破坏特征、滞回曲线、骨架曲线、承载力及耗能能力等力学性能;同时,利用能力谱曲线和需求谱曲线,采用性能点探讨三类木构架的抗震性能。结果表明,与原榫卯木构架相比,该耗能装配节点能够有效地调整和控制木构架的破坏模式,增强梁柱节点的非线性力学性能,显著提高榫卯木构架的整体抗震性能。

**关键词:**榫卯木构架;耗能装配节点;力学性能;性能点;抗震性能

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(XXXX)0X-0-12

DOI:10.20000/j.1000-0844.20230119002

## Finite element analysis of seismic performance of mortise and tenon timber frame with energy-consuming assembly joints

WU Zhongtie, ZHANG Ke, XIE Ning, ZHAO Cheng, WU Wei

(School of Civil Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, Gansu, China)

**Abstract:** Aiming at the defects of conventional beam-column mortise-tenon joints for mortise and tenon timber frame, a beam-column energy-consuming assembly joint of mortise and tenon timber frame is proposed. In order to study the influence of energy-consuming assembly joints on the seismic performance of timber frames, the finite element models of three different types of mortise and tenon timber frames with all-steel energy-consuming assembly joints, rubber flexible energy-consuming assembly joints and original mortise-tenon joints were established by finite element software Abaqus. The monotonic loading analysis and low cyclic loading analysis were car-

收稿日期:2023-01-19

基金项目:国家自然科学基金(51868067);甘肃省第二批陇原青年英才项目(XBMU-2024-BB-15);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(31920230181);甘肃省自然科学基金项目(20JR5RA508);甘肃省建设科技攻关项目(JK2019-10,JK2023-13);甘肃省高等学校创新基金项目(2020B-067,2022B-248)

第一作者简介:吴忠铁(1982-),男,黑龙江绥化人,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事工程结构减隔震控制和装配式建筑研究。

E-mail:wuzhongtie1982@163.com。

ried out. The mechanical properties of three different mortise and tenon timber frame models were mainly studied, including the failure characteristics, hysteresis curve, skeleton curve, bearing capacity and energy dissipation capacity. Meanwhile, using the capacity spectrum curve and the demand spectrum curve, the seismic performance of the three types of timber frames is discussed by using the performance points. The results show that compared with the original mortise-tenon timber frame, the energy-consuming assembly joint can effectively adjust and control the failure mode of the timber frame, enhance the nonlinear mechanical properties of the beam-column joints, and significantly improve the overall seismic performance of the mortise-tenon timber frame.

**Keywords:** mortise and tenon timber frame; energy dissipation assembly joint; mechanical properties; performance points; seismic performance

## 0 引言

木构架榫卯节点具有半刚性特点,能在地震作用时产生较大滑动位移而减轻结构的地震损伤。但若没有良好的拉结措施,榫卯节点可能脱开而导致节点失稳、房屋倒塌,因此,榫卯节点是木结构抗震设防的关注重点<sup>[1]</sup>。我国处于欧亚板块的东南部,地震烈度在6度以上的地区多出现于我国西部,而受地区经济、自然条件、传统民族文化等因素影响,木结构仍是这些地区村镇民居建筑的一种主要结构形式<sup>[2]</sup>。虽然木构架整体抗震性能较好,但村镇木构架往往没有经过严谨的抗震设计,大部分房屋由施工者按照经验施工,且多数使用年限较长,年久失修,一旦发生地震,未加固的木结构房屋榫卯节点极易出现断裂、拔榫等破坏,造成严重的经济损失和人员伤亡<sup>[3]</sup>。

近年来由于地震频发,偏远村镇地区建筑结构的抗震性能也引起了大量学者的关注。目前国内外相关学者都对榫卯形式木构架的破坏机理进行了大量研究。King等<sup>[4]</sup>发现木构架榫卯节点的损伤状态会导致其抗弯刚度降低;张锡成等<sup>[5]</sup>通过透榫柱架模型试验,明确了柱体摇摆对柱架抗侧刚度的影响随节点刚度的增大而逐渐降低,且竖向荷载对柱架的抗侧刚度具有较为明显的提升作用;薛建阳等<sup>[6]</sup>则通过殿堂型木构模型振动台试验研究了其动力特性和地震反应,指出木构榫卯连接的柔性和挤压变形是结构耗能减震的主要原因。为了增强木结构榫卯节点的性能,许多学者通过各种不同的抗震加固方式来提高节点的抗震能力。相关研究表明,采用橡胶、钢材、纤维布等不同材料和方式对榫卯节点区域进行加固能明显提高结构整体的力学性能<sup>[7-10]</sup>。Palermo等<sup>[11]</sup>设计和研究了一个由单板层积材制造的自复位木梁柱节点,发现节点自复位性

能良好,滞回曲线呈旗帜形。聂雅雯等<sup>[12]</sup>对不同紧密程度的附加黏弹性阻尼器燕尾榫节点开展了拟静力试验,研究结果表明紧密节点耗能较强,安装阻尼器后节点刚度、强度和耗能均得到提高,且负向加载时提高较显著。

上述研究表明,梁柱为榫卯连接,由于榫卯构造严重削弱了木构件的截面积,节点主要通过榫和卯之间的摩擦力传递荷载,因而在榫卯连接节点损伤时结构强度急剧降低,造成节点承载能力与刚度的降低<sup>[13]</sup>。其次,柱体置于地面无有效约束,在地震荷载作用下发生摆动,各个柱脚产生不定向的滑移,并不利于结构上下整体的协调变形。

由于上述问题的存在,榫卯木构架在地震作用下极易发生节点失效,甚至导致整体结构倒塌。本文提出多种榫卯木构架耗能装配节点<sup>[14-15]</sup>。为研究该装配节点的耗能非线性力学性能及整体榫卯木构架的抗震性能,以典型民居建筑为参考,设计了2种不同耗能装配节点的两榫一层榫卯木构架模型,并与无加固的榫卯连接节点的木构架结构模型对比,完成了模型的有限元分析,探讨了装配节点的受力性能、破坏模式、滞回特性与耗能能力,利用能力谱和需求谱对木构架结构体系的抗震性能进行了评估。

## 1 榫卯木构架耗能装配节点设计

该耗能装配节点采用不同硬度的橡胶填充材料与钢材制成的耗能装配装置来提高节点的阻尼,以达到抗震的需求,实现节点力学性能的可控性。预制混凝土梁几何尺寸为8 000 mm(长)×400 mm(宽)×400 mm(高),梁底部每跨中心间距3 000 mm设置一个嵌槽。梁柱装配节点构造如图1所示,其嵌槽深度100 mm。方木边长为200 mm,高度3 000 mm;榫头长为100 mm,宽为100 mm;橡

胶粘结于木柱底端部,其厚度为 5 mm,方形木柱底端立于嵌槽内部,与混凝土梁方形嵌槽的底面直接接触,嵌槽周围预留 20 mm 环形空隙,并用 C30 混凝土填充浇筑;梁柱榫卯的节点加固使用厚度为 3 mm 的 Q235 钢材,将其粘结在梁、柱节点端部,在其外部再粘贴 5 mm 厚度的方形橡胶,之后继续使用 3 mm 厚度的焊接钢片包覆于橡胶外侧。图 2 为加固木框架各节点的剖面示意图,其中节点 1、2、3 处的构造与加固方式为:节点 1 为中柱半卯连接的十字加固方式,即采用一种木结构柱与梁的阻尼型柔性装配节点的装配方法<sup>[14]</sup>;节点 2 为中柱与地梁嵌槽连接装配方式,采用文献[15-16]提供的装配节

点方式;节点 3 为边柱半卯连接的加固连接方式。节点加固件和相关尺寸如图 3 所示。

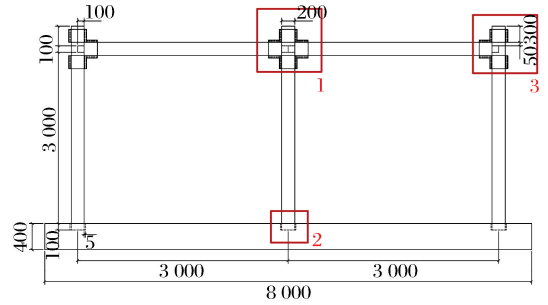


图 1 榫卯木构架梁柱装配构造图(单位:mm)  
Fig.1 Beam-column assembly structure diagram of wooden frame with tenon-mortise joints (Unit: mm)

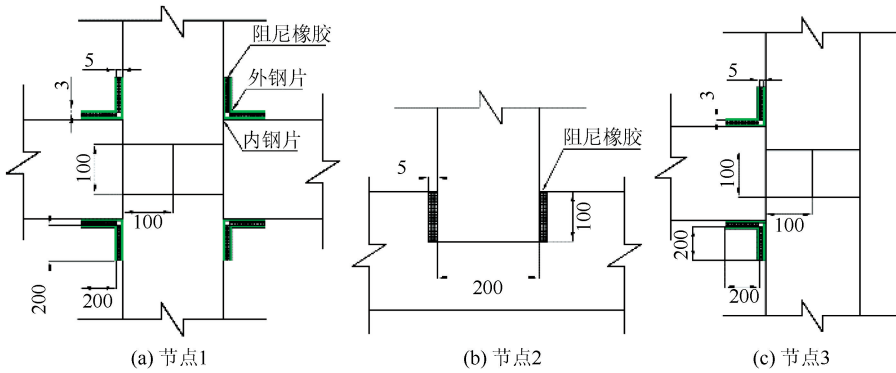


图 2 节点剖面图(单位:mm)

Fig.2 Section diagram of joints (Unit: mm)

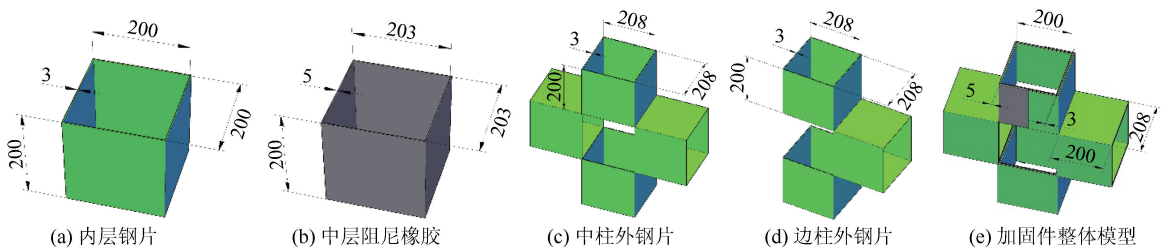


图 3 阻尼加固件模型图(单位:mm)

Fig.3 Model drawing of damping reinforcement (Unit: mm)

## 2 ABAQUS 有限元模型建立

### 2.1 材料本构的确定

为建立能模拟木材材料复杂力学性能的本构模

型,将在弹性阶段表现为各向异性的木材材料简化为正交各向异性材料,其应力-应变关系可通过 9 个独立弹性常数的矩阵形式表达<sup>[17]</sup>,即为其本构关系:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ D_{1122} & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ D_{1133} & D_{2233} & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{2323} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{3131} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$D_{1111} = E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})\gamma, D_{2222} = E_2(1 - \nu_{13}\nu_{31})\gamma,$$

$$D_{3333} = E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21})\gamma, D_{1122} = E_1(\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23})\gamma,$$

$$D_{1133} = E_3(\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23})\gamma, D_{2233} = E_2(\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31})\gamma,$$

$$D_{1212} = 2G_{12}, D_{3131} = 2G_{31}, D_{2323} = 2G_{23},$$

$$\epsilon_{12} = \gamma_{12}/2, \epsilon_{23} = \gamma_{23}/2, \epsilon_{31} = \gamma_{31}/2,$$

$$\gamma = (1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13})^{-1}.$$

式中:  $E_1$ 、 $E_2$  和  $E_3$  分别为木材顺纹纵向(L)、横纹径向(R)和切向(T)3个方向的弹性模量;  $G_{12}$ 、 $G_{23}$  和  $G_{31}$  分别为木材 L-R、R-T 和 T-L 平面内的剪切模量;

$\nu_{ij}$  为材料的泊松比;  $\sigma_{ij}$  为应力分量;  $\epsilon_{ij}$  为应变分量。

木材在塑性阶段选用 Hill 塑性屈服准则以表达其正交各向异性的材料属性,采用理想化的双折线模型,使用 ABAQUS 自带的 potential 函数来定义材料各正交方向的屈服应力比。通过自定义屈服应力  $\sigma^0$  和 6 个各向异性屈服应力比来定义正交各向异性材料的塑性屈服阶段,以确定木材各向异性屈服应力<sup>[18]</sup>,定义屈服应力  $\sigma^0$  为 34.2 MPa。木材具体参数列于表 1。

表 1 木材参数

Table 1 Parameters of wood

$E_1/\text{MPa}$	$E_2/\text{MPa}$	$E_3/\text{MPa}$	$\nu_1$	$\nu_2$	$\nu_3$	$G_{12}/\text{MPa}$	$G_{13}/\text{MPa}$	$G_{23}/\text{MPa}$
13 500.24	900	675.12	0.41	0.43	0.37	810	1 012.5	243

预制混凝土梁部件中混凝土模型选用塑性损伤模型,混凝土膨胀角取  $30^\circ$ ,塑性势函数偏心率取 0.1,其双轴极限抗压强度与单轴极限抗压强度比值取 1.16,拉压子午线第二应力不变量的比值为 0.667,黏性系数为 0.005,C30 混凝土弹性模量 21.1 GPa,C60 混凝土弹性模量 24 GPa,泊松比取 0.2。混凝土进入塑性阶段后,参考混凝土塑性损伤模型(Concrete Damaged Plasticity)的应力-非弹性应变关系,损伤因子-非弹性应变取文献<sup>[19]</sup>中的相关参数。

橡胶采用 Mooney-Rivlin 模型,橡胶基准参数依据文献<sup>[20]</sup>取邵氏硬度为 71 HA, $C_{01}=0.1689$ , $C_{10}=0.8073$ 。

## 2.2 单元选择

模型单元网格主要以六面体单位为主进行划分,其中木柱、混凝土梁采用实体单元 C3D8R 单元,橡胶采用 C3D8H 杂交单元进行模拟。

## 2.3 相互作用与加载模式

木柱底部与梁接触面采用面-面接触,切向摩擦采用“罚”摩擦公式表达,摩擦系数为 0.5,法向接触应力行为设置为“硬接触”。方橡胶环与方柱底部采用默认粘结接触,切向行为定义为无摩擦,通过绑定约束定义橡胶环外部面与 C30 混凝土梁的约束。耗能装置夹层橡胶与内、外钢材采用绑定约束。

为得到荷载-位移曲线,采用位移控制加载制度。加载方式分为单向荷载加载与往复荷载加载,单向加载位移从 0~150 mm(1/20),每级增量 10 mm;循环加载采用变幅加载方式,前 4 级循环加载每级增量 5 mm,后 8 级循环加载每级增量 10 mm,直至位移循环加载至 100 mm(1/30)。

## 2.4 模型参数

本文根据实际分析问题的需要建立不同类型模型。模型具体参数如表 2 所列。

表 2 有限元模型

Table 2 Finite element model

试件编号	梁柱耗能装配节点形式	地梁填充材料	硬度 /HA	填充厚度 /mm	竖向轴力 /kN	嵌槽深度 /mm	木柱截面 /mm×mm	木柱高度 /mm
GJ	全钢耗能装配节点	钢材	Q235	5	200	100	200×200	3 000
BM1			90	5	200	100	200×200	3 000
BM2			71	5	200	100	200×200	3 000
BM3			51	5	200	100	200×200	3 000
BM4	橡胶耗能装配节点	橡胶	30	5	200	100	200×200	3 000
SJ1			71	5	100	100	200×200	3 000
SJ2			71	5	300	100	200×200	3 000
SMJ	榫卯节点	-	-	-	200	100	200×200	3 000

## 3 模型加载变形分析

### 3.1 破坏模式

该榫卯木构架整体破坏模式相近,都为木架柱

体的弯曲变形、受压侧屈服破坏和榫卯节点处脱出,其脱出现象主要出现在左、右边柱榫卯节点的卯口。表 3 列出了单调加载模式与循环加载模式下模型的榫卯节点最大脱出距离。表 3 结果表明:左、右边柱的



表 3 单调加载及循环加载作用下榫卯节点最大脱出距离

Table 3 Maximum disengagement distance of tenon-mortise joints under monotonic and cyclic loadings

试件 编号	左部榫卯节点脱出/mm		中部榫卯节点脱出/mm				右部榫卯节点脱出/mm	
	单调加载	循环加载	左		右		单调加载	循环加载
			单调加载	循环加载	单调加载	循环加载		
GJ	1.61	1.53	0.32	0.18	0.25	0.11	2.29	1.24
BM1	4.67	1.63	1.20	1.36	0.88	1.56	5.08	1.38
BM2	4.57	2.27	1.29	2.13	1.05	1.63	6.92	1.56
BM3	7.13	2.64	1.30	1.98	1.21	1.38	7.85	2.05
BM4	8.05	2.82	1.34	1.71	1.40	0.97	8.32	2.70
SMJ	12.54	3.96	2.93	1.50	3.35	1.56	9.71	4.11

榫卯节点脱出距离与节点加固件中阻尼材料硬度相关,在阻尼材料硬度逐渐提高时,榫卯脱出的最大距离逐渐减小。因此,节点装配的耗能装置阻尼填充材料的硬度提高对于榫卯节点抗脱出现象具有有效的限制作用。

图 4 为榫卯木构架单调加载下的应力云图。结果表明,柱脚粘接的阻尼材料随着材料硬度的提高,柱脚受压的最大应力值逐渐减小,且受压区域出现上移的现象,在达到钢材硬度时柱脚受压应力值最小。图 5 为右边柱榫卯节点单调加载应力云图。结果表明,边部梁柱榫卯节点在加固件阻尼材料硬度降低时,梁端上部受压集中区域减小,下部受拉区域增大,且受拉、受压最大应力值向榫头接口处内部移动。图 6 为中柱榫卯节点单调加载应力云图。结果表明,中部梁柱榫卯节点在阻尼材料硬度降低时,柱右侧榫卯口受压区域逐渐上移,柱体承受最大主应力值增大,柱身承受应力区域减少,破坏状态逐渐向

卯口与榫头处移动,原榫卯木构架结构则是在榫卯节点处出现最大受压应力值,梁随阻尼材料硬度降低,其上部逐渐出现受压状态,下部出现受拉状态,榫头上部出现受拉变形状态。因此,提高阻尼材料的硬度可以使节点出现的塑性铰状态向外部移动,减少节点处榫头与卯口的破坏。

### 3.2 单调加载荷载-位移曲线

根据荷载-位移曲线[图 7(a)]可以看出,耗能装配节点阻尼填充材料的硬度影响节点的承载力与刚度,采用耗能装配节点的榫卯木构架加载初期荷载-位移曲线呈现出线性变化,在位移控制荷载加载至 60 mm(1/50)前结构基本处于弹性阶段。GJ(全钢耗能装配节点)模型的承载能力最高,在达到峰值荷载后下降较为迅速;BM(橡胶耗能装配节点)模型承载能力与其阻尼材料硬度有关,材料硬度越高其承载能力越高,并且后期承载能力下降段较 GJ 模型缓慢;SMJ(原榫卯节点)模型承载能力较低,初始

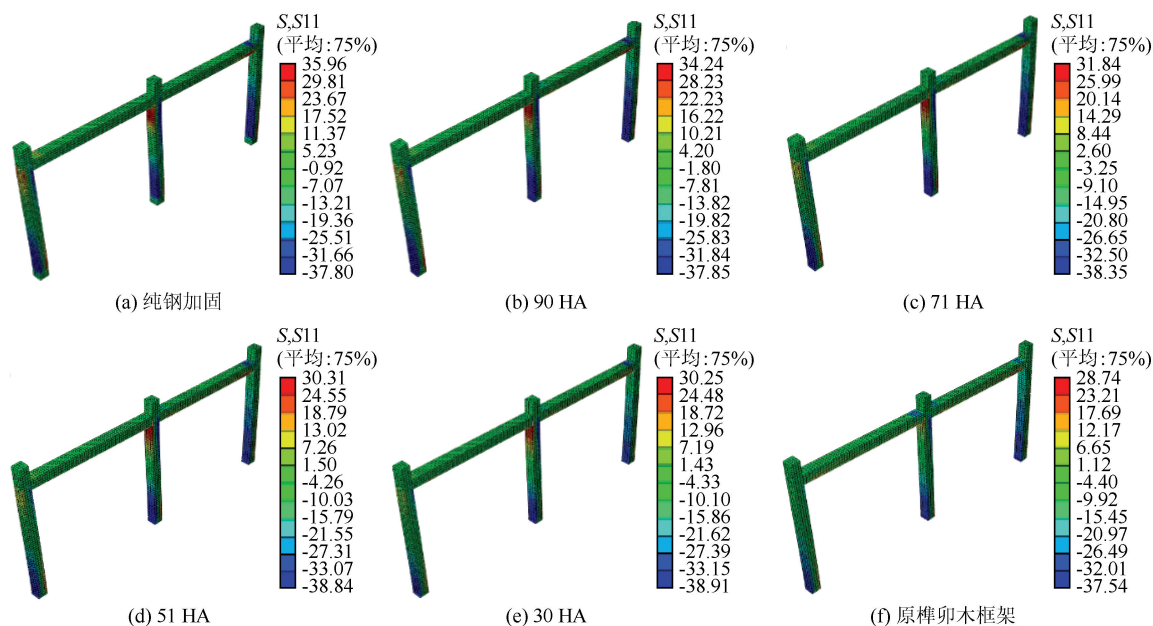


图 4 榫卯木构架模型的应力图

Fig.4 Stress diagram of wooden frame model with tenon-mortise joints

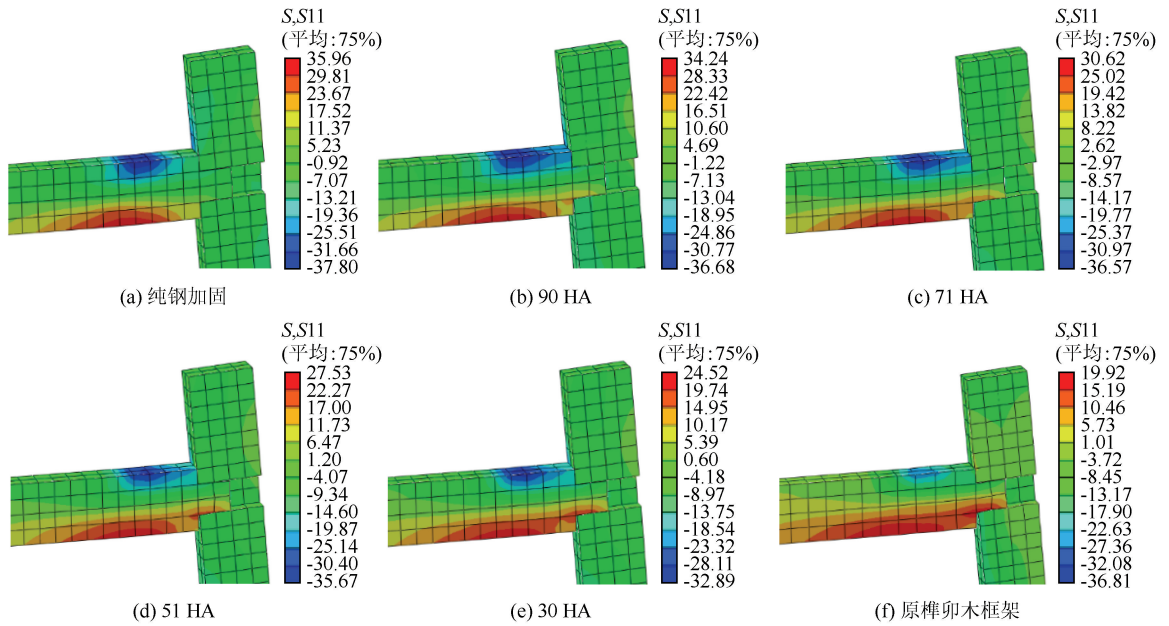


图 5 右边柱榫卯节点应力图

Fig.5 Stress diagram of tenon-mortise joints at right column

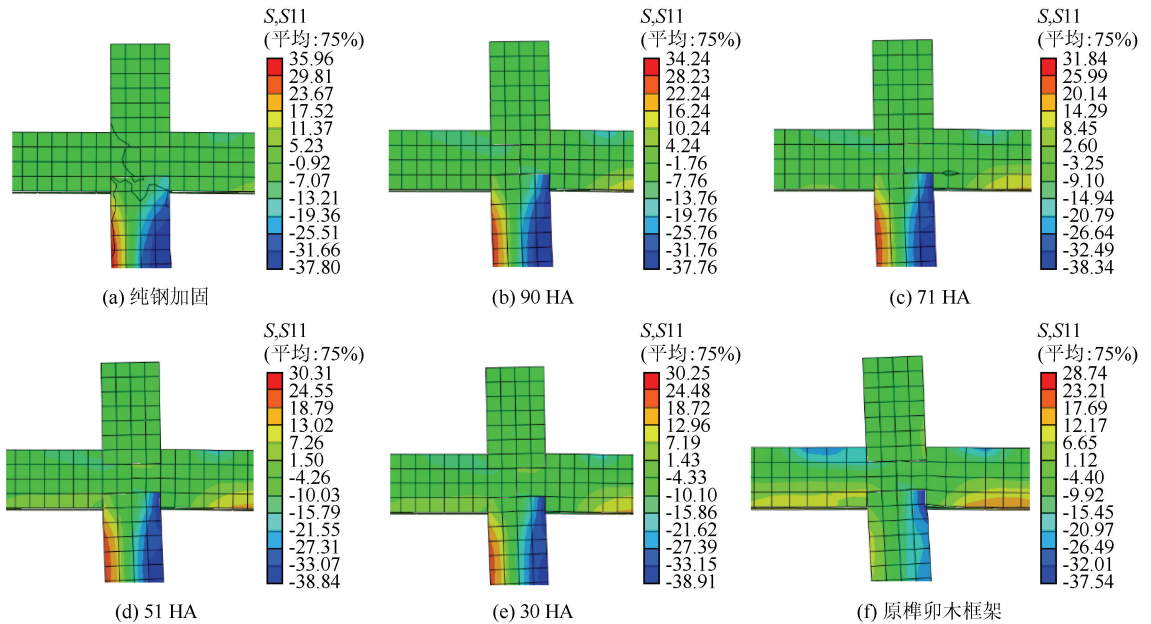


图 6 中柱榫卯节点应力图

Fig.6 Stress diagram of tenon-mortise joints at middle column

刚度较小,相比于采用加固方式的结构,其结构效力的发挥较小。与 SMJ 框架模型相对比,BM1、BM2、BM3 及 BM4 模型屈服荷载分别提高了 502.4%、404%、327%及 246%,峰值荷载分别提高了 493.6%、395.7%、320%及 239.3%。相比 SMJ 模型,GJ 模型的屈服荷载提高了 703.1%,峰值荷载提高了 685.7%;相比 BM1 模型,GJ 模型的屈服荷载提高了 33.3%,峰值荷载提高了 32.4%。

图 7(b)中,在耗能装配节点中橡胶材料硬度不

变、竖向荷载增大的情况下,依据《木结构设计标准(GB 50005—2017)》<sup>[21]</sup> 4.3 节中强度设计指标,中强度等级 TC15 组别 B 类花旗松木材顺纹抗压及承压强度的设计值为 12 N/mm<sup>2</sup>,计算出 100 kN、200 kN、300 kN 竖向荷载下轴压比分别为 0.21、0.42、0.63,可以看出节点前期在控制位移 60 mm(1/50)时的弹性阶段基本吻合,刚度基本相同。相比 SJ1 (0.21)模型,大轴压比模型 BM2(0.42)与 SJ2(0.63)的峰值荷载明显降低,分别降低了 15.1%、25.1%,且二

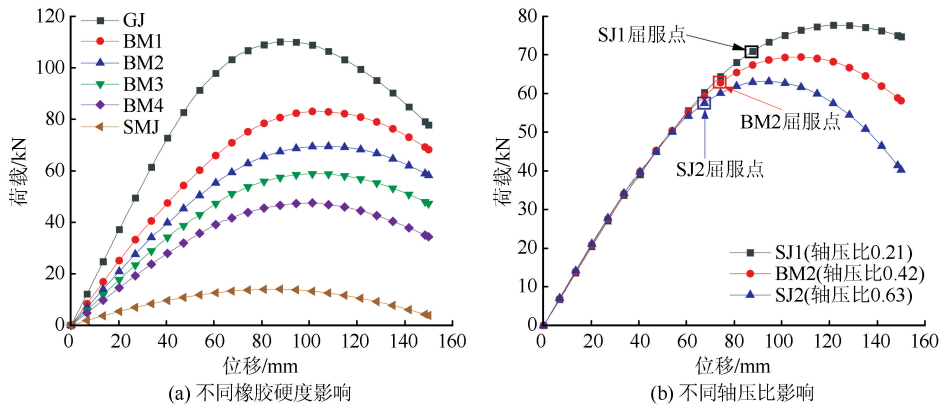


图 7 单调加载荷载-位移曲线图

Fig.7 Load-displacement curve under monotonic loading

者都出现明显的屈服下降段。总体来说,竖向荷载的增大会使结构极限承载能力降低,屈服阶段提前。

### 3.3 力学性能分析

计算延性系数的过程中,对于没有明显屈服点的荷载-位移曲线多采用能量等效法来确定屈服点。 $\Delta_y$  为屈服点位移,  $F_y$  为屈服荷载,极限荷载  $F_u$  以峰值荷载  $F_p$  的 85% 来确定,峰值荷载  $F_p$  对应的  $\Delta_p$  就是其峰值位移,其极限荷载  $F_u$  所对应的就是极限位移  $\Delta_u$ ,延性系数  $\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$ 。

表 4 列出了依据能量等效法计算出的力学性能。从表中可以得出,耗能装配节点刚度与其承载能力呈正比例关系。相关研究表明<sup>[22]</sup>,节点阻尼材料硬度提高可以提高其节点承载能力,增加柱底转动约束能力,可限制柱体侧倾与柱脚抬起。GJ 模型

的屈服荷载、峰值荷载、极限荷载、延性系数均是最大的,说明全钢耗能装配节点使得结构整体承载性能得到了有效提高;BM 模型中结构整体的承载能力与橡胶材料的硬度相关,硬度大的阻尼材料能有效提高节点屈服荷载、峰值荷载、极限荷载,减小屈服位移,且延性系数会随着阻尼材料硬度的提高而增大;SMJ 结构模型整体承载能力、延性系数相比前二者都较低,说明原榫卯木构架承载能力较弱。其中 GJ 相比 SMJ,延性系数提高了 12.2%;与 SMJ 原榫卯木构架模型相比,BM1、BM2、BM3、BM4 装配节点模型的延性系数分别提高了 8.3%、8.3%、7.2%、2.2%。其次,橡胶耗能装配节点中,在橡胶材料硬度不变的情况下,增大竖向荷载会导致结构的屈服荷载、峰值荷载、延性系数降低,表现出结构承载能力的下降。

表 4 榫卯木构架的力学性能参数

Table 4 Mechanical property parameters of wooden frame with tenon-mortise joints

试件 编号	屈服点			峰值点			极限点			$\mu$
	$F_y$ /kN	$\Delta_y$ /mm	$\theta_y$	$F_p$ /kN	$\Delta_p$ /mm	$\theta_p$	$F_u$ /kN	$\Delta_u$ /mm	$\theta_u$	
GJ	101.2	64.7	1/46	110.0	90.4	1/33	93.6	130.5	1/23	2.02
BM1	75.9	75.7	1/40	83.1	104.3	1/29	70.6	147.9	1/20	1.95
BM2	63.5	75.6	1/40	69.4	105.4	1/28	59.0	147.1	1/20	1.95
BM3	53.8	74.8	1/40	58.8	103.1	1/29	50.0	144	1/21	1.93
BM4	43.6	73.0	1/41	47.5	100.9	1/30	40.3	134.6	1/22	1.84
SJ1	70.8	87.2	1/34	77.7	124.1	1/24	66.0	189.5	1/16	2.17
SJ2	57.5	67.5	1/44	63.1	93.4	1/32	53.7	129.8	1/23	1.92
SMJ	12.6	61.0	1/49	14.0	87.0	1/34	11.9	110.1	1/27	1.80

## 4 循环加载分析

### 4.1 滞回曲线

图 8 为不同装配模型的滞回曲线,其耗能装配节点中阻尼材料的硬度对滞回曲线的饱满度和形状有着明显影响。全钢耗能装配节点 GJ 模型滞回曲

线较为饱满,其耗能能力、承载力都较好,但在加载后期产生较大的残余变形进行耗能;橡胶耗能装配节点中阻尼材料硬度较小时,如 BM3(51 HA)、BM4(30 HA)模型,滞回曲线出现了较为明显的“捏缩”现象,这表明节点的阻尼材料硬度越小其刚度越小,对节点处的约束相对较弱,在荷载作用下节点易

产生滑移现象;原榫卯木构架 SMJ 模型滞回曲线呈现出旗帜型曲线,“捏缩”现象更加明显,其耗能方式

主要以摩擦耗能为主,耗能能力与承载能力较采用耗能装配节点的模型略低。

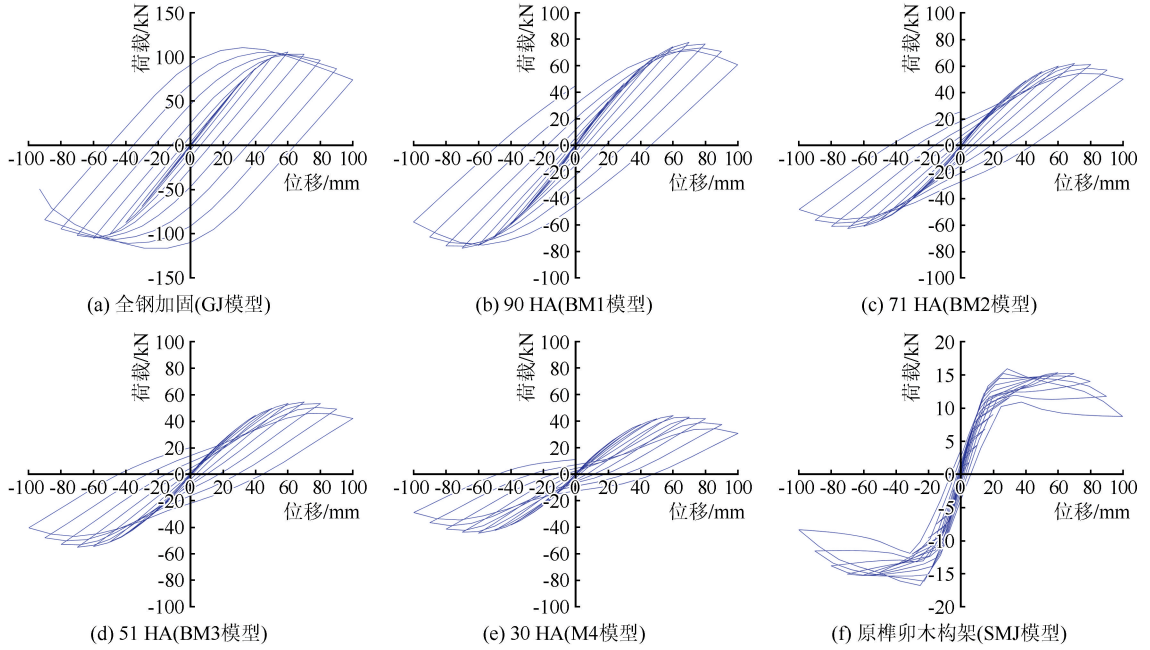


图 8 滞回曲线

Fig.8 Hysteretic curve

## 4.2 骨架曲线

从骨架曲线(图 9)可以看出,耗能装配节点的阻尼材料硬度影响着节点的承载力和刚度。GJ(全钢耗能装配节点)木构架承载能力较强,刚度较大,加载前期刚度提升较快,屈服后承载能力衰减较快;BM(橡胶耗能装配节点)木构架通过提高节点橡胶材料的硬度明显地提高其承载力和峰值荷载,橡胶硬度较大时其刚度相对较大,在屈服后阶段,节点承载力出现明显下降,但是下降速度较缓慢;SMJ(原榫卯)木构架承载能力与刚度都较小。正方向加载,GJ 的峰值荷载比 SMJ 提高了 588.3%,BM1、BM2、BM3、BM4 相比 SMJ 分别提高了 405.5%、303.7%、

255.3%、187.4%,GJ 相比 BM1 提高了 36.2%;负方向加载,GJ 的峰值荷载比 SMJ 提高了 591%,BM1、BM2、BM3、BM4 相比 SMJ 分别提高了 410.3%、300.3%、261.2%、192.4%,GJ 相比 BM1 提高了 35.4%。

## 4.3 刚度退化

采用割线刚度来评价该结构的刚度退化情况,具体定义如下:

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|\Delta_i| + |\Delta_i|} \quad (2)$$

式中: $K_i$  为割线刚度; $+P_i$ 、 $-P_i$  分别为第  $i$  级荷载下第 1 次循环的正、负向最大荷载; $\Delta_i$  为与  $P_i$  对应的节点水平位移。

各模型刚度退化曲线见图 10。采用 GJ 模型的初始刚度最大,BM 模型次之,SMJ 模型最小。与 SMJ 模型相比,GJ 模型初始刚度提高了 585.6%,BM1、BM2、BM3、BM4 模型初始刚度分别提高了 369.4%、275%、238.9%、183.3%;GJ 模型相比 BM1 模型初始刚度提高了 44.9%。其中,GJ 模型在荷载初期刚度退化相对平缓,在达到屈服后刚度衰减迅速;BM 模型在不同橡胶硬度下其初期刚度有较为明显的上升,后期刚度衰减较平稳,刚度退化模式基本呈现出一致趋势,但随着橡胶硬度的提高其试件模型整体刚度也提高;原榫卯木构架 SMJ 模

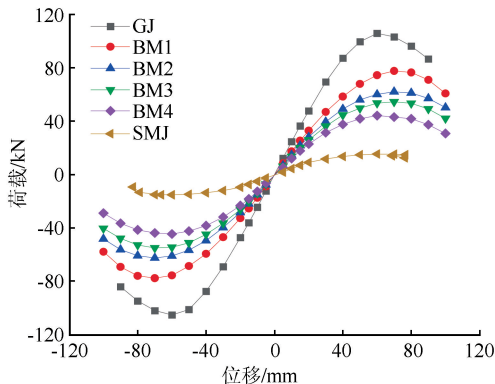


图 9 骨架曲线

Fig.9 Skeleton curve



型整体刚度较低,刚度退化趋势较平缓。

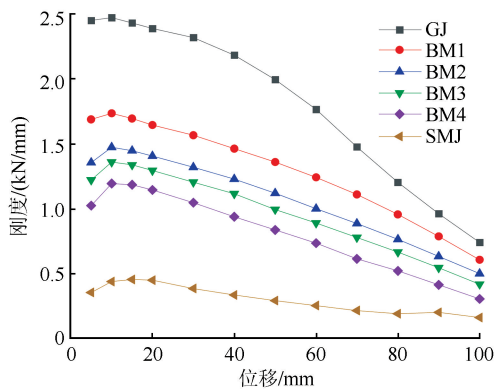


图 10 刚度退化

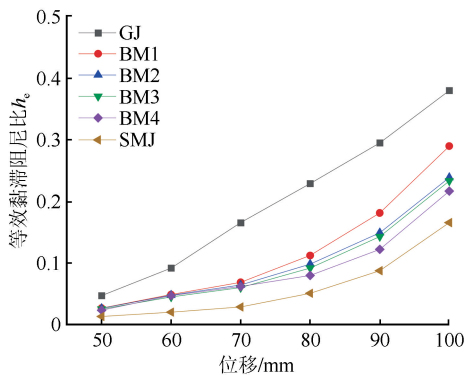
Fig.10 Stiffness degradation

#### 4.4 等效黏滞阻尼系数比

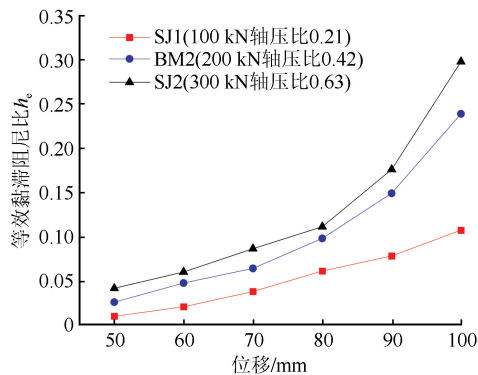
节点耗能能力是指节点在一个循环加载过程中吸收能量与卸载释放能量的差值。本文采用等效黏滞阻尼系数比  $h_e$  表示节点的耗能能力,用有限元模拟中的滞回曲线面积与理想状态下弹性体滞回曲线所包含的面积除以  $2\pi$  来计算,见图 11。用式(3)的计算方法分别求出各加载循环级的黏滞阻尼比。

$$h_e = \frac{S_{ABC+CPA}}{2\pi S_{OBE+ODF}} \quad (3)$$

由图 12(a)可以看出:各耗能装配节点模型等效黏滞阻尼比均随着加载位移的增大而逐渐增大。



(a) 耗能件不同阻尼材料影响



(b) 不同轴压比影响

图 12 等效黏滞阻尼比

Fig.12 Equivalent viscous damping ratio

位移达到 100 mm (1/30) 时, SJ2 模型相比 SJ1 与 BM2, 阻尼比分别提高了 175.9%、24.7%, BM2 相比 SJ1 阻尼比提高了 121.3%。

### 5 结构性能评价

为评价该框架结构在不同地震水准下的性能目标,对框架结构进行静力非线性分析。依据《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》<sup>[24]</sup>中式(4)、(5)建

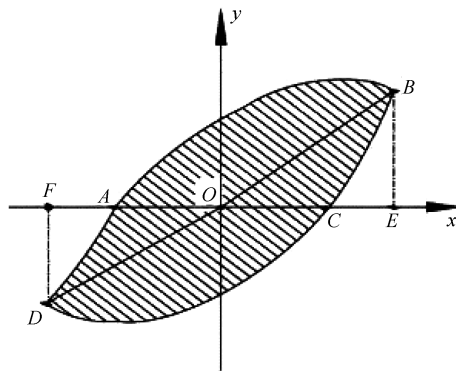


图 11 等效黏滞阻尼比计算

Fig.11 Calculation of equivalent viscous damping ratio

GJ 木构架模型的耗能能力最佳, BM1、BM2、BM3、BM4 木构架模型在加载至 70 mm (1/43) 控制位移之后,随着控制位移继续增大,其等效黏滞阻尼比与橡胶硬度呈现正相关性;在控制位移达到 100 mm (1/30) 时, GJ 对比 SMJ 等效黏滞阻尼比提升了 123.5%, BM1、BM2、BM3、BM4 对比 SMJ 模型,等效黏滞阻尼比分别提升了 70.6%、41.2%、35.3%、29.4%, GJ 对比 BM1 提升了 31%。有研究<sup>[23]</sup>表明,在柱体摇摆体系下柱脚恢复弯矩随竖向荷载的增加呈现出非线性增加的趋势。从图 12(b)中可以看出,在耗能装配节点填充阻尼材料硬度一定时,竖向荷载增大时,等效黏滞阻尼比有明显提高,在控制

立能力谱,式(6)、(7)建立需求谱曲线,对该框架结构进行抗震性能评价。设计抗震设防烈度为 7 度,设计基本加速度值分别为 0.1g、0.15g、0.2g、0.3g 及 0.4g,场地类别为 II 类,设计地震分组为第二组,特征周期为 0.4g。图 13(a)为木构架推覆转化的剪力与位移(V-D)能力谱曲线与需求谱曲线。其中 SMJ 能力曲线与需求谱曲线无交点,其在抗震性能上未达到目标要求。GJ 全钢耗能装配节点框架在



弹性阶段与  $0.1g$ 、 $0.15g$ 、 $0.2g$  性能点分别交于结构谱位移的  $20.96\text{ mm}$ 、 $31.44\text{ mm}$  及  $41.63\text{ mm}$ ；在  $0.3g$  时性能点处于屈服阶段，相交于结构谱位移的  $68.91\text{ mm}$ ；在达到  $0.4g$  时结构能力谱与需求谱未出现交点，说明其全钢耗能装配节点的榫卯木构架结构在抗震性能设计时具有较高的结构安全性及足够的抗震能力。橡胶耗能装配节点的榫卯木构架结

构在  $7$  度  $0.1g$  时  $4$  组不同硬度橡胶模型的性能点均处在弹性阶段；在  $0.15g$  时性能点有  $BM1$ 、 $BM2$ 、 $BM3$  处在弹性阶段，与结构谱位移的交点分别为  $39.02\text{ mm}$ 、 $43.5\text{ mm}$ 、 $48.33\text{ mm}$ ；在  $0.2g$  时性能点只有  $BM1$  处于弹性阶段，相交于结构谱位移的  $55.88\text{ mm}$ ，说明采用耗能装配节点的木构架结构在提高阻尼材料硬度时可以有效提高其结构的抗震性能。

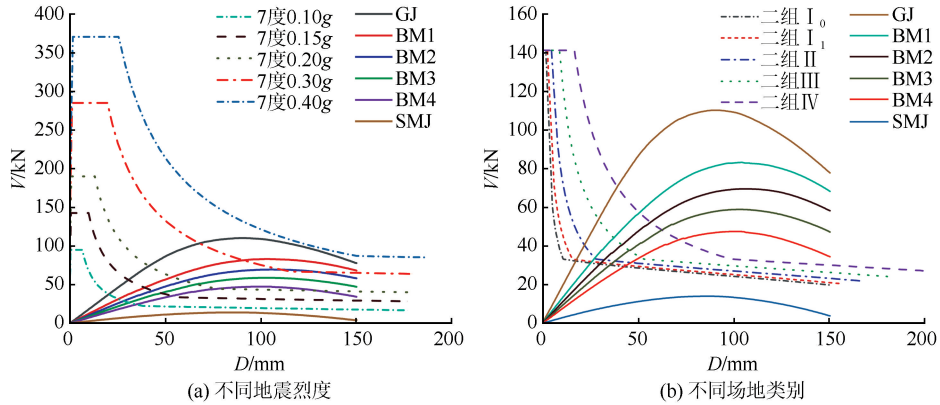


图 13 木构架能力谱与需求谱

Fig.13 Capacity spectrum and demand spectrum of wooden frame

建筑的场地类别对建筑结构抗震设计有着重要的影响，因此，本文采用能力谱和需求谱对不同建筑在不同场地类别下木构架模型的抗震性能进行了分析和评价。图 13(b) 为各加固木构架在  $7$  度  $0.15g$  抗震设计烈度中不同场地类别的能力谱与需求谱图。可以看出，采用耗能装配节点的木构架在弹性阶段均与二组  $I_0$ 、 $I_1$ 、 $II$ 、 $III$ 、 $IV$  需求谱有交点，且除  $BM4$  在  $IV$  类场地类别中的性能出现在结构的屈服阶段，性能点交于结构谱位移的  $73.1\text{ mm}$  外，其余耗能装配节点榫卯木构架模型在场地类别  $I_0$ 、 $I_1$ 、 $II$ 、 $III$ 、 $IV$  时性能点与结构谱位移的交点均处在结构的弹性阶段，说明采用耗能装配节点的木构架在不同场地情况的抗震性能表现都较优，而  $SMJ$  原榫卯木构架能力曲线未与需求曲线相交，其抗震能力较差。以上结论表明该耗能装配节点的榫卯木构架结构相比原榫卯木构架结构抗震性能的提高是比较明显的。

能力谱加速度：

$$S_a = \frac{V}{G\alpha_1} \quad (4)$$

能力谱位移：

$$S_d = \frac{D}{\gamma_1 X_{top,1}} \quad (5)$$

地震加速度最大值：

$$S_{at} = \alpha_1 g \quad (6)$$

需求谱位移：

$$S_{dt} = \frac{T_1^2}{4\pi^2} S_{at} \quad (7)$$

有效质量比：

$$\alpha_1 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n \frac{G_i X_{i1}}{g} \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{g} \right] \left[ \sum_{i=1}^n \frac{G_i X_{i1}^2}{g} \right]} \quad (8)$$

阵型参与系数：

$$\gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{G_i X_{i1}}{g}}{\sum_{i=1}^n \frac{G_i X_{i1}^2}{g}} \quad (9)$$

式中： $V$  为结构基地剪力； $G$  为结构总质量； $g$  为重力加速度； $D$  为结构顶层位移； $X_{i,1}$  为基本振型在第  $i$  层的位移； $\alpha_1$  为水平地震影响系数最大值； $T_1$  为结构自振周期。

## 6 结论

本文主要研究了不同耗能装配节点的木构架结构的破坏特征、滞回曲线、骨架曲线、承载力及耗能能力的变化规律，采用能力谱曲线对木构架结构整体的抗震性能进行了探讨和评估。主要得到以下结论：

(1) 在水平荷载作用下,榫卯木构架主要破坏模式有:榫卯节点的脱出、柱体受压、受拉状态的弯曲变形破坏、柱脚受压屈服变形破坏。采用耗能装配节点的榫卯木构架均能有效地限制榫卯节点的脱出量。当装配耗能装置的刚度提高时,木构架榫卯节点出现的最大应力区域逐渐向外部移动,榫头与卯口的节点破坏逐渐向柱体与梁体转移。从内外节点变形和破坏情况来看,木结构框架外部节点损伤和脱出相对比较严重,更应该注重外部节点失效的控制。

(2) 相比原榫卯木构架,安装耗能装置的框架结构均能有效地提高结构的承载力、刚度、耗能能力及延性。耗能装置内阻尼材料硬度逐渐增大,外部钢材屈服耗能更加明显,木构架结构整体力学性能提高最为明显。采用全钢加固木构架提升效果最佳,承载能力提升了 685.7%,橡胶耗能加固件 91 HA 橡胶材料次之,承载能力提升了 502.4%。随着加固件阻尼材料硬度的提高,其循环加载模式的滞回曲线越饱满,捏缩效果减少,且结构整体承载力、刚度、耗能、延性与阻尼加固件阻尼材料的硬度成正比关系。

(3) 竖向荷载对结构节点的力学性能影响明显。采用橡胶耗能装配节点的榫卯木构架,在阻尼材料橡胶硬度不变的情况下,竖向荷载增大会导致结构承载能力降低,结构进入屈服状态提前,但柱底摩擦力增大,柱脚恢复弯矩增加,耗能能力增强。

(4) 采用全钢耗能装配节点的木构架结构抗震性能最优,均能够满足 7 度 0.3g 的抗震性能目标,而达不到 7 度 0.4g 的抗震性能目标,在 7 度 0.1g、0.15g、0.2g 时性能点均处于弹性阶段,表现出优异的抗震性能;橡胶耗能装配节点的木构架结构抗震性能表现次之,当橡胶硬度达到 91 HA,在 7 度 0.3g 时该性能点处于弹性阶段,提高该橡胶耗能装配节点阻尼材料硬度能够使结构表现出更好的抗震性能;原榫卯木构架与 7 度 0.1g 的抗震能力谱无交点,其抗震性能较差。

(5) 该耗能装配方法可以显著增强木构架结构节点的力学性能,提高木构架整体的抗震性能。通过耗能装配节点材料参数的调整可以改变装配节点的刚度和耗能能力,有助于优化木结构抗震性能的控制设计。

## 参考文献(References)

[1] 郭婷,杨娜,周海宾,等.穿斗式木结构中节点的抗弯性能试验

研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(2):83-90.

GUO Ting, YANG Na, ZHOU Haibin, et al. Experimental study on the moment-resisting performance of interior joints with wooden peg[J].Journal of Civil and Environmental Engineering,2022,44(2):83-90.

[2] 金昱成,苏何先,潘文,等.木结构榫卯节点抗震性能及加固对比试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(2):138-147.

JIN Yucheng, SU Hexian, PAN Wen, et al. Experimental research on seismic performance and reinforcement comparison of mortise-tenon joints in timber structures[J].Journal of Civil and Environmental Engineering,2022,44(2):138-147.

[3] 何玲,潘文,杨正海,等.村镇木结构房屋震害及抗震技术措施[J].工程抗震与加固改造,2006,28(6):94-101.

HE Ling, PAN Wen, YANG Zhenghai, et al. Seismic damage and seismic countermeasures of timber houses in villages and towns[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006,28(6):94-101.

[4] KING W S, RICHARD YEN J Y, ALEX YEN Y N. Joint characteristics of traditional Chinese wooden frames[J].Engineering Structures,1996,18(8):635-644.

[5] 张锡成,胡成明,韩乙楠.考虑柱体摇摆效应的半刚性榫卯柱架弹性抗侧刚度简化计算方法[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(2):72-82.

ZHANG Xicheng, HU Chengming, HAN Yinan. Simplified calculation method for elastic lateral stiffness of semi-rigid mortise-tenon frame considering rocking column[J].Journal of Civil and Environmental Engineering,2022,44(2):72-82.

[6] 薛建阳,赵鸿铁,张鹏程.中国古建筑木结构模型的振动台试验研究[J].土木工程学报,2004,37(6):6-11.

XUE Jianyang, ZHAO Hongtie, ZHANG Pengcheng. Study on the seismic behaviors of Chinese ancient wooden building by shaking table test[J].China Civil Engineering Journal,2004,37(6):6-11.

[7] 吴秀峰,王博,翟永顺,等.橡胶加固木榫卯节点的滞回性能研究[J].工业建筑,2021,51(5):131-138.

WU Xiufeng, WANG Bo, ZHAI Yongshun, et al. Study on hysteretic behavior of mortise-tenon joints of rubber reinforced wooden structures[J].Industrial Construction,2021,51(5):131-138.

[8] 周乾,闫维明,周宏宇,等.钢构件加固古建筑榫卯节点抗震试验[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(6):1063-1071.

ZHOU Qian, YAN Weiming, ZHOU Hongyu, et al. Experimental study on aseismic behaviors of Chinese ancient tenon-mortise joint strengthened by steel components[J].Journal of Basic Science and Engineering,2012,20(6):1063-1071.

[9] 姚侃,赵鸿铁,薛建阳,等.古建木结构榫卯连接的扁钢加固试验[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(10):220-224.

YAO Kan, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Experimental studies on seismic characteristic of strengthened mortise-tenon joint in historical timber buildings[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2009,41(10):220-224.

- [10] 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.
- [11] PALERMO A, PAMPANIN S, BUCHANAN A, et al. Seismic design of multi-storey buildings using laminated veneer lumber (LVL) [C]//Proceeding of New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference, Canterbury, New Zealand; University of Canterbury, 2005.
- [12] 聂雅雯,陶忠,高永林.黏弹性阻尼器增强传统木结构燕尾榫节点试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(1):125-133.  
NIE Yawen, TAO Zhong, GAO Yonglin. Experimental study on dovetail mortise-tenon joints with viscoelastic dampers in traditional timber structures [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1): 125-133.
- [13] 黄东升,周爱萍,张齐生,等.装配式木框架结构消能节点拟静力试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(7):87-92.  
HUANG Dongsheng, ZHOU Aiping, ZHANG Qisheng, et al. Quasi-static experimental research on energy dissipating joints for assembled timber frame structures [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7): 87-92.
- [14] 吴忠铁,曹万智,陈硕,等.一种木结构柱与梁的阻尼型柔性装配节点;CN213143390U[P].2021-05-07.  
WU Zhongtie, CAO Wanzhi, CHEN Shuo, et al. A damping type flexible assembly joint for wood structure columns and beams; CN213143390U [P]. 2021-05-07.
- [15] 吴忠铁,王洪镇,曹万智.一种木结构柱梁端部可修复型耗能装配节点;CN212715349U[P].2021-03-16.  
WU Zhongtie, WANG Hongzhen, CAO Wanzhi, et al. A repairable energy dissipating assembly joint for the ends of wood structure columns and beams; CN212715349U [P]. 2021-03-16.
- [16] 吴忠铁.木柱与混凝土梁板构件的摇摆限位装配节点与施工方法;CN109610647B[P].2020-06-23.  
WU Zhongtie. Swinging restrained assembly joint and construction method for wooden column and reinforced concrete beam-slab components; CN109610647B [P]. 2020-06-23.
- [17] 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 Zhiyong. Study on mechanical properties of typical joints and structures of Yingxian wooden tower [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [18] 李伟.木节缺陷对木梁抗震性能影响的研究[D].扬州:扬州大学,2020.  
LI Wei. Study on the influence of joint defects on seismic performance of wood beams [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.
- [19] 张劲,王庆扬,胡守营,等.ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数验证[J].建筑结构,2008,38(8):127-130.  
ZHANG Jin, WANG Qingyang, HU Shouying, et al. Parameters verification of concrete damaged plastic model of ABAQUS [J]. Building Structure, 2008, 38(8): 127-130.
- [20] 刘萌,王青春,王国权.橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J].橡胶工业,2011,58(4):241-245.  
LIU Meng, WANG Qingchun, WANG Guoquan. Determination of material constants for mooney-rivlin rubber model [J]. China Rubber Industry, 2011, 58(4): 241-245.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部.木结构设计标准:GB 50005—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of timber structures; GB 50005—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [22] 吴忠铁,张轲.木柱与钢筋混凝土梁柔性装配节点的非线性力学性能分析[J].地震工程学报,2022,44(6):1251-1259,1286.  
WU Zhongtie, ZHANG Ke. Nonlinear mechanical properties of flexible assembled joints for timber column and reinforcement concrete beam [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(6): 1251-1259, 1286.
- [23] 贺俊筱,王娟,杨庆山.古建筑木结构柱脚节点受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(8):141-149.  
HE Junxiao, WANG Juan, YANG Qingshan. Mechanical property of column footing joint in traditional wooden structure by quasi-static test [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(8): 141-149.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the Peoples Republic of China, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings; GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

(本文编辑:张向红)