

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.162



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



含内嵌卯口耗能器的榫卯节点抗震性能试验研究

陆伟东, 吴伟强, 施程凯, 刘杏杏

(南京工业大学 土木工程学院, 南京 211816)

摘要:针对木结构榫卯节点抗震加固和性能提升的需求,提出采用内嵌卯口耗能器增强榫卯节点性能的技术,并制作了包括未增强、单层增强及双层增强的5组缩尺榫卯节点模型。通过开展抗震性能试验研究,对不同厚度、层数的卯口耗能器增强榫卯节点与未增强榫卯节点的抗震性能进行对比,分析了不同参数的卯口耗能器对榫卯节点抗震性能指标的影响。结果表明:内嵌卯口耗能器具有双向耗能、多点屈服、可设计性强等特点,可大幅提升榫卯节点的抗震性能,有效抑制节点的拔榫现象;耗能器增强节点相较于未增强节点,承载力有小幅提升,耗能能力有大幅提升,而初始刚度有50倍以上的大幅提升;耗能器的钢板厚度和层数是影响榫卯节点抗震性能的主要因素,且厚度对于耗能器加固榫卯节点力学性能的影响最大;与单层耗能器相比,双层耗能器对榫卯节点的加固性能更加卓越。

关键词:木结构;内嵌卯口耗能器;榫卯节点;抗震性能

中图分类号:TU366.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)02-0030-08

Experimental study on seismic performance of mortise-tenon joint with embedded dampers

LU Weidong, WU Weiqiang, SHI Chengkai, LIU Xingxing

(College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, P. R. China)

Abstract: In response to the needs of seismic reinforcement and performance improvement of the mortise-tenon joints in wood structure buildings, this paper proposed the use of embedded dampers to enhance the performance of the mortise-tenon joints and made five groups of scaled mortise-tenon joint models including unreinforced, single-layer reinforced and double-layer reinforced embedded dampers. Through the test research of seismic performance, the seismic performance of the mortise-tenon joints with different thickness and number of layers was compared with that of the joints without reinforcement, and the seismic performance of embedded dampers with different parameters on the joints of mortise-tenon were analyzed. The results show that the embedded dampers have the characteristics of two-way energy dissipation, multi-point yielding and strong designability, which can greatly improve the seismic performance of the mortise-tenon joints and effectively suppress the tenon pulling phenomenon of joints; compared with the

收稿日期:2021-07-08

基金项目:国家自然科学基金(51678298)

作者简介:陆伟东(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事木结构研究, E-mail: wdlu@njtech.edu.cn.

Received: 2021-07-08

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51678298)

Author brief: LU Weidong(1970-), professor, doctoral supervisor, main research interest: wood structure, E-mail: wdlu@njtech.edu.cn.

unreinforced joint, the embedded dampers-enhanced joints has a small increase in bearing capacity, the energy consumption capacity has been greatly improved and the initial stiffness has been greatly improved by more than 50 times; the steel plate thickness and the number of layers of the embedded dampers are the main factors affecting the seismic performance of the mortise-tenon joints, and the thickness has the greatest impact on the mechanical properties of the mortise-tenon joints strengthened by the embedded dampers; the double-layer embedded dampers is more effective than the single-layer energy dissipater.

Keywords: wood structure; embedded dampers; mortise-tenon joint; seismic performance.

近年来,传统样式木结构建筑在历史文化街区和民俗风貌区中被广泛应用,且多用于商业、展览和餐饮等公共建筑中。这类新建的传统样式木结构建筑需要满足现行结构设计理念及结构规范的要求,对传统木结构建筑的结构性能也提出了更高的要求^[1]。榫卯节点的力学性能作为影响传统木结构建筑结构性能的关键因素,为了满足更高的结构性能需求,需要对其开展抗震性能增强的相关研究。

学者们对榫卯节点的受力性能及增强措施已经进行了大量研究,谢启芳等^[2]分别对用碳纤维布(CFRP)和扁钢加固后的平面木构架进行了水平反复荷载作用下的实验研究,发现扁钢适用于加固强度或刚度明显不足且较隐蔽的榫卯节点;碳纤维布对榫卯节点强度和刚度的性能提高作用不明显,适用于加固破损程度较小的榫卯节点。薛建阳等^[3-4]对残损的榫卯节点分别采用角钢和碳纤维布进行加固试验,提出了扁钢加固古建筑木结构残损节点的抗弯承载力计算公式,发现碳纤维布加固的榫卯节点具有良好的耗能减震能力。闫维明等^[5-6]发现马口铁和CFRP均可提高构架的刚度和承载力,且加固后的构架仍有很好的变形性能,但耗能能力不如加固前;CFRP加固榫卯节点的效果优于马口铁,而马口铁对榫卯节点的约束作用在一定程度上减小了节点拔榫量。潘毅等^[7]分别采用扁钢和阻尼器对榫卯节点进行加固,发现2种加固方法均可提高榫卯节点结构的抗震性能,但扁钢加固加大了节点的刚度和部分相邻构件间的内力,容易导致相邻节点间的拔榫破坏;而阻尼器加固可在不增大节点刚度的条件下起到耗能和防止拔榫的作用。Plevris等^[8]首次对木梁和柱张拉侧粘贴了碳纤维布,通过试验研究了它们在加固前后抗弯性能的变化程度。Triantafillou等^[9]对用U型碳纤维布加固的木梁进行了试验,发现加固后木梁的抗弯性能、刚度和强度有较大提升。

学者们对木结构榫卯节点的加固及其抗震性能

展开了大量研究,笔者在已有研究的基础上,提出一种适用于新建传统样式木结构建筑榫卯节点抗震性能增强的内嵌式卯口耗能器增强技术。

1 内嵌卯口耗能器低周反复荷载试验

1.1 内嵌卯口耗能器设计及制作

对于榫卯节点抗震性能加固,笔者团队前期开展了多种加固方法的研究。例如,研究了角钢^[10]加固的方法,但由于变形能力不足,易在角钢转角处形成应力集中,不利于节点耗能,如图1(a)所示;然后在此基础上提出了弧形耗能器^[11]加固方法,问题在于其在受压状态时耗能,且耗能点单一,如图1(b)所示。基于以上研究,提出了卯口耗能器的榫卯节点抗震性能增强方式。

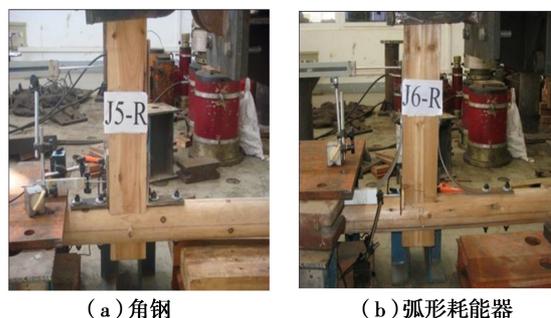


图1 榫卯节点不同加固方法示意图

Fig. 1 Sketch of different reinforcement methods for the mortise-tenon point

内嵌卯口耗能器形状及尺寸如图2、图3所示。耗能器由Q235B钢制成,屈服强度为402 MPa,抗拉强度为583 MPa,弹性模量为206.0 GPa。耗能器在柱上的开槽尺寸为深45 mm、宽50 mm、高60 mm左右;开槽部位采用钢材进行替代,对柱构件自身的承载力没有造成影响;对于柱上的槽口,可经装饰处理后复原木柱原貌。

1.2 榫卯节点模型设计

参照刘开封^[12]的相关研究,按1:2的缩尺比例制作节点模型,模型中的节点均为直榫节点中的单

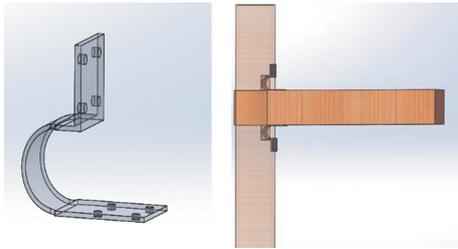
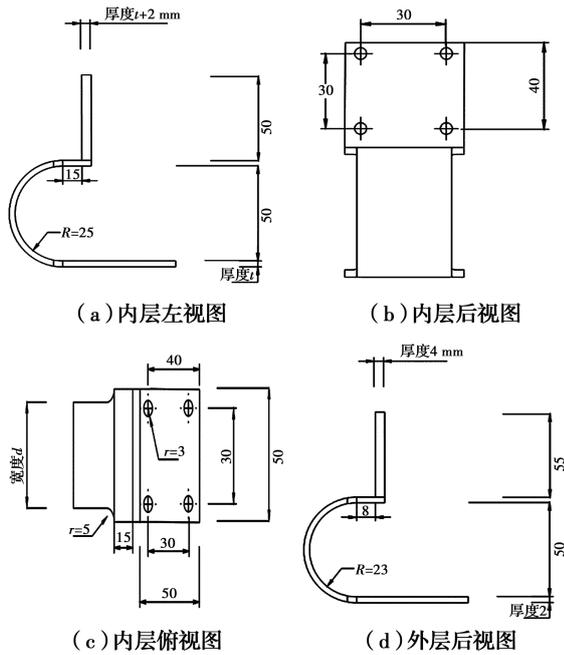


图 2 内嵌卯口耗能器

Fig. 2 Embedded dampers



(a) 内层左视图

(b) 内层后视图

(c) 内层俯视图

(d) 外层后视图

注: t 为钢板厚度, mm; d 为耗能段宽度, mm

图 3 耗能器构件内部详图

Fig. 3 Internal components of the embedded dampers

向直榫节点, 节点形式及尺寸见图 4、表 1。由于模型尺寸一致, 且试件参数相同, 因此, 采用的缩尺比例可用于木结构榫卯节点加固或性能提升试验。模型所用木材为杉木, 通过材性试验获得了杉木的材性平均参数, 如表 2 所示。

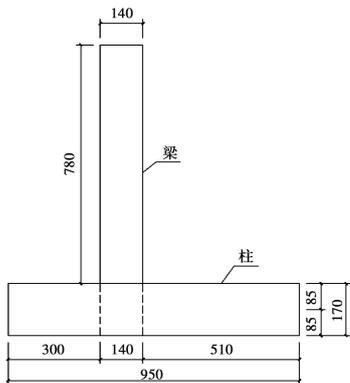


图 4 榫卯节点缩尺模型示意图(单位:mm)

Fig. 4 Sketch of the mortise-tenon reduced-scale model(unit: mm)

表 1 节点缩尺模型尺寸

Table 1 Standard size and reduced-scale model size

构件	标准构件	缩尺模型
柱	335 mm	$\phi 170$ mm
梁	175 mm \times 269 mm	90 mm \times 140 mm
榫	94 mm \times 269 mm	50 mm \times 140 mm

表 2 木材力学性能

Table 2 Mechanical performance of timber

木材种类	E_L	σ_L	E_R	σ_R	E_T	σ_T
陈材杉木	8 388	42.56	995	8.90	541	3.26

注: E_L 为纵向弹性模量; E_R 为径向弹性模量; E_T 为弦向弹性模量; σ_L 为纵向抗压强度; σ_R 为径向抗压强度; σ_T 为弦向抗压强度。各物理量单位均为 MPa。

内嵌卯口耗能器增强技术是要进行榫卯节点刚度和耗能能力的均衡增强, 通过课题组前期的研究结果, 为保证节点具有较好的耗能能力和适宜的刚度, 耗能器钢板的厚度不能过大, 因此, 设定的钢板厚度取值为 4~7 mm。因施加卯口耗能器需对榫卯节点上下两侧进行开槽处理, T0B0 两侧不开口, 形制如传统榫卯节点; T5B40 单侧开口高 5.8 cm、宽 5 cm、深 4.5 cm; T4B40、T4/2B40 双侧开口高 5.8 cm、宽 5 cm、深 4.5 cm; T5/2B40 双侧开口高 6 cm、宽 5 cm、深 4.5 cm, 各试件耗能器参数如表 3 所示。安装内嵌卯口耗能器时采用长 70 mm、直径 6 mm、8.8 级沉头的自攻螺钉, 单侧开口时使用 8 个自攻螺钉, 双侧开口时使用 16 个自攻螺钉。

表 3 各试件卯口耗能器参数

Table 3 Parameters of each test piece embedded dampers

试件	耗能器施加位置	卯口耗能器		
		钢板层数	厚 T /mm	宽 B /mm
T0B0				
T5B40	单侧	单层	5	40
T4B40	双侧	单层	4	40
T4/2B40	双侧	双层	外层: 4, 内层: 2	40
T5/2B40	双侧	双层	外层: 5, 内层: 2	40

1.3 试验方案

1.3.1 加载方案 通过榫卯节点低周反复荷载试验获取该类型节点的变形特征、刚度变化、滞回曲线、破坏形态和耗能能力。试验选用南京工业大学结构实验室 50 t 油压伺服作动器对梁端进行加载来

模拟节点在地震中的受力过程,梁端与伺服作动器相连接。为消除 $P-\Delta$ 效应对榫卯节点受力性能的影响以及方便加载,试验过程中需将柱水平放置,以满足柱上下两端均为不动铰支座的边界条件。图 5 为试验装置示意图。

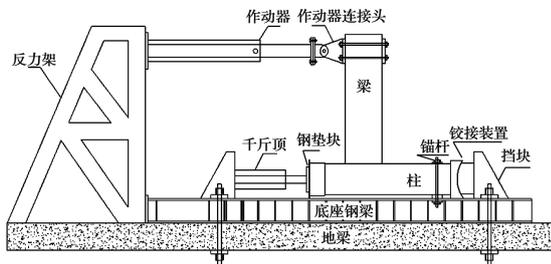


图 5 试验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the experiment set-up

试验采用图 6 所示的位移控制加载方式,位移向右加载为正向。最大位移幅值取梁端产生 0.2 rad 转角时所对应位移 120 mm。当水平荷载下降到极限荷载的 85% 以下或构件丧失承载力时,则加载暂停。

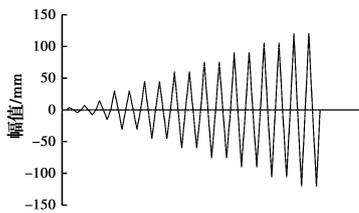


图 6 位移控制加载制度

Fig. 6 Loading system of displacement control

1.3.2 测量内容及测点布置 通过拉压传感器来实时测量柱端轴向荷载,使之保持恒定的受压状态。分别在距离梁柱交点 10 mm 处各安装一个拉线位移计,用来记录节点的拔榫情况,并通过拔榫量的相对值来计算节点转角,图 7 为位移计的布置示意图。位移数据通过 TST3828E 动静态信号测试分析系统进行采集。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及破坏形态

由于卯口与榫头之间存在初始缝隙,试件 T0B0 在加载初期并无明显变化。40 mm 位移等级时,榫头开始出现拔出迹象,榫头根部受压变形。80 mm 位移等级时,榫头与卯口间木材的摩擦声开始变得明显,并伴有“咔咔”声。随着试验的进行,榫头与卯口处的木材不断挤压变形,导致榫头与卯口之间的

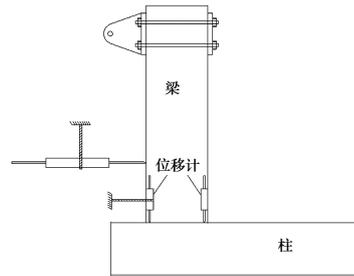
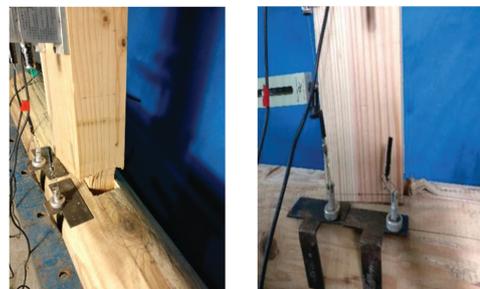


图 7 位移计布置图

Fig. 7 Layout of displacement meter

空隙增大,并伴有木屑掉出的现象。试验结束时,节点存在明显的转动残余变形且榫头能够轻松拔出,如图 8 所示。



(a) 节点拔榫

(b) 卯口顺纹剥离



(c) 榫头压屈

图 8 试件 T0B0 试验现象

Fig. 8 Test phenomena of specimen T0B0

试件 T5B40 试验过程中的现象与 T0B0 相似,加载初期并无明显变化,随着试验的进行,榫头发生挤压变形。结束时,未安装耗能器一侧处卯口变形严重,承载力下降且榫头拔出量比安装耗能器一侧拔出量大。原因是由于耗能器的存在,嵌压支点向外转移,抑制了榫卯节点转动中榫头的拔出现象,且随着耗能器的屈服承载力越大,拔榫量随转角上升越少,梁柱结合越紧密,如图 9(a)、(b)所示。

由于双侧施加了耗能器,试件 T4B40、T4/2B40 和 T5/2B40 榫头与卯口连接紧密。加载初期,每隔 0.5 s 便有木材被挤压的“咔咔”声传出。加载到 40 mm 时,榫头开始出现拔出现象,耗能器出现明显变形,而双层耗能器的内层和外层变形较为均匀。

当加载到 80 mm 时,节点木材之间的摩擦声音更加清脆、响亮,耗能器随榫卯转动呈现规律的转角变形。在 100 mm 加载过程中,伴随着转角的扩大,耗能器出现带裂缝工作,力-位移曲线出现突变。试验结束后,试件 T4B40 左端焊接处因疲劳累积,焊缝处出现整齐断裂,导致耗能器退出工作,如图 9(c)所示。从耗能器断裂的试验过程中可以得出,耗能器制作时的焊接工艺有待进一步提高。



图 9 耗能卯口试验现象

Fig. 9 Test phenomena of embedded dampers

试件 T4/2B40 和 T5/2B40 的耗能器在受拉时内外层协同工作,可直接观察到枋端受到约束,均匀嵌入柱边,有效约束了拔榫现象。梁端与柱身挤压处因低周反复过程中梁柱嵌压,导致榫头与柱子卯口两侧有较深的嵌压痕迹、木材横劈裂破坏和两端有木屑挤压脱落等现象,如图 9(d)、(e)、(f)所示。两侧内嵌卯口耗能器一侧受压,另一侧受拉,两侧变形及受力相反,在低周反复下,每一个循环结束后都可恢复到初始状态,其对于榫卯节点的抗震性能提升更加明显。

试验中,增强与未增强的榫卯节点虽然都表现出了不同程度的拔榫现象,但内嵌卯口耗能器对拔榫现象具有一定的抑制作用。试验结束后,普遍出

现了榫头受压变形、榫头压屈和木材横纹劈裂破坏等现象,个别试件出现了耗能器断裂破坏,原因为焊缝工艺不足。

2.2 滞回曲线

通过对增强前后榫卯节点滞回曲线的对比分析,对榫卯节点耗能器的抗震性能进行研究,如图 10 所示。

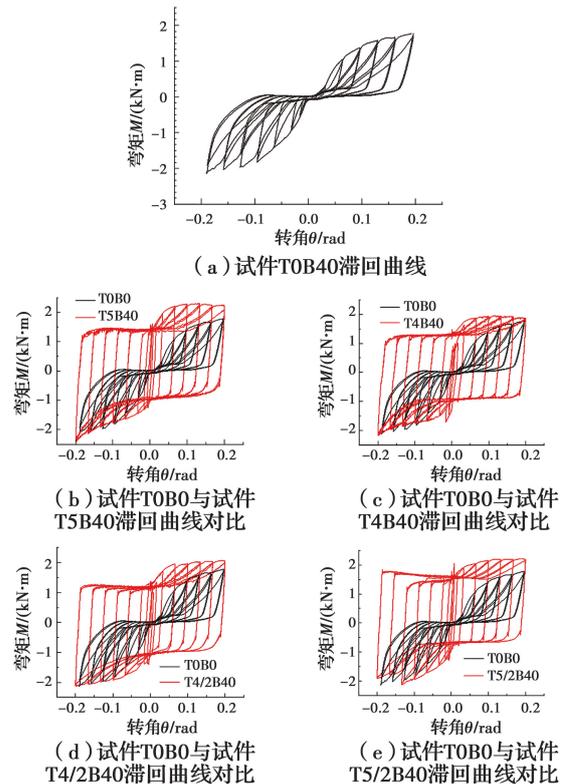


图 10 滞回曲线图对比图

Fig. 10 Comparison of hysteresis loops between before and after reinforced

试件 TOB0 的滞回曲线具有明显的“捏缩”现象和滑移现象,整体呈现为“Z”形。表明在加载初期构件间接触不紧密,滑移幅度较大。正反向加载均在转角约为 0.2 rad 时达到极限弯矩,但正向加载下的极限弯矩要小于反向加载。在相同位移等级下,后一级位移加载的承载力和刚度低于前一级,表明节点的强度和刚度有显著的退化趋势。

带耗能器各试件的滞回曲线均呈现为近似平行四边形,曲线饱满且对称,这表明耗能器对榫卯节点的滞回性能影响较大,提高了节点的耗能能力。在相同位移等级下,后一级位移加载的承载力和刚度与前一级相近,表明节点的强度和刚度退化趋势不明显。由图 10 中滞回曲线的对比,可以得出以下结论:

1)无论哪种尺寸的耗能器,均能提高榫卯节点抗震性能,使得榫卯节点在地震作用下表现出更加出色的性能。在大位移情况下,含耗能器的榫卯节点的承载能力、耗能随着位移的增加而不断增加。

2)对于不同尺寸的耗能器,能够明显观察到 T5/2B40 的滞回环最饱满,耗能能力最强。对于单层耗能器, T5B40 的滞回环要比 T4B40 饱满,而双层耗能器中, T5/2B40 的滞回环要比 T4/2B40 饱满。

3)未增强榫卯节点的强度和刚度退化趋势明显,通过内嵌卯口耗能器增强后,榫卯节点强度和刚度退化趋势有效减缓。

2.3 M-θ 骨架曲线

耗能器对于榫卯节点的转动刚度有显著的影响,极大地提高了榫卯节点的初始刚度,对于不同厚度耗能器加固的榫卯节点,钢板厚度越大,对榫卯节点的初始刚度提升越大,榫卯节点进入屈服段的位移也相应增大。对于双层耗能器,增加外层耗能器可以有效提升构件的初始刚度,但对榫卯节点的屈服位移影响相对较弱,在较小的位移下耗能更加充分。当钢板过厚时,则会导致耗能器刚度过大而无法变形,从而影响榫卯节点的耗能特性。

对于试件 T0B0,参照欧洲规范 EN12512^[13] 给出的 1/6 斜率法来确定其初始刚度与屈服弯矩,如表 4 所示。由图 11 可得,由于榫卯节点间间隙的存在,节点初始刚度较低,随着荷载的增大,刚度逐渐增大,最终由于出现劈裂裂缝和受压屈服等现象,

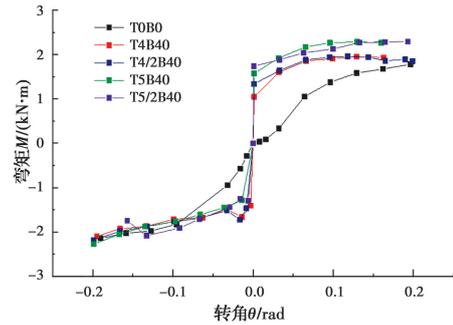


图 11 含不同参数耗能器榫卯节点与传统榫卯节点骨架曲线对比

Fig. 11 Comparison of skeleton curves of mortise-tenon joints with different parameter dampers and traditional joints

木材节点刚度开始逐渐退化。而对于耗能器增强的试件,节点间接触紧密,初始刚度大,其中,试件 T5/2B40 的初始刚度最大,提升了近 90 倍。通过对比 T4B40、T5B40 和 T4/2B40 的初始刚度,可以发现,相较于耗能器的钢板层数而言,钢板厚度对于榫卯节点的加固作用更加明显。带有双层钢板的耗能器虽然钢板总厚度更大,但由于钢板之间存在缝隙等原因,导致加固效果并不理想。T5/2B40 的初始刚度虽然最大,但之后出现下降趋势,并一度小于 T5B40,可以得出,当耗能器钢板过厚或钢板间有间隙时,耗能器的耗能特征受到影响。对比 T5/2B40 与 T5B40 的初始刚度差值和 T4/2B40 与 T4B40 的初始刚度差值,也可以发现 T5/2B40 对节点的加固作用稍有减弱。综上可知,相较于双层耗能器钢板总厚度的增加,单层耗能器钢板厚度对于榫卯节点的加固作用更加明显。

表 4 榫卯节点骨架曲线分析结果

Table 4 Analysis results of skeleton curves of mortise-tenon joints

试件	屈服荷载/(kN·m)	屈服位移/rad	极限荷载/(kN·m)	极限位移/rad	初始刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	提升倍数
T0B0	1.420	0.087	1.780	0.196	19.336	
T4B40	1.048	0.001	1.931	0.163	1.048	54
T5B40	1.574	0.001	2.264	0.096	1.574	81.4
T4/2B40	1.34	0.001	2.056	0.200	1.340	69.3
T5/2B40	1.739	0.001	2.293	0.193	1.739	89.9

对于含耗能器的榫卯节点,耗能器受压侧与受拉侧刚度有轻微的不对称,耗能器受压时会较早地进入屈服阶段,对榫卯节点的初始刚度提升贡献更大。当节点转角达到 0.01 rad 左右时,各带耗能器

试件的骨架曲线基本为线弹性,可称之为基本线弹性阶段;当节点转角大于 0.01 rad 时,各骨架曲线出现转折,弯矩呈现增长缓慢的趋势,转角刚度呈退化趋势,将其称为缓慢退化阶段。

2.4 耗能能力

受到地震作用后, 建筑结构会产生塑性变形, 此时可用耗能能力来衡量结构对地震能量的吸收能力, 结构耗散地震能量越多, 承受的破坏就越少, 所以, 抗震性能指标将其作为评价结构抗震性能的依据。借助 Jacobson^[14] 提出的等效粘滞阻尼系数 h_e 来实现对耗能能力的定量研究, 该系数的计算式为

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{(S_{ABC} + S_{CDA})}{(S_{OBE} + S_{ODF})} \quad (1)$$

从图 12 的曲线对比中可以看出, 耗能器增强的各试件阻尼系数 h_e 大于未增强试件, 其中, T4B40 最小增大了 1.10 倍, T5/2B40 最大增大了 1.32 倍, 表明耗能器增强榫卯的耗能能力优于未增强节点。T4B40 与 T4/2B40 和 T5B40 与 T5/2B40 的阻尼系数曲线分别较为接近, 表明耗能器的钢板层数对构件耗能能力的影响居次要地位。在耗能器影响耗能能力的两个关键因素: 厚度和层数中, 耗能器的厚度对于榫卯节点耗能能力的影响更大。

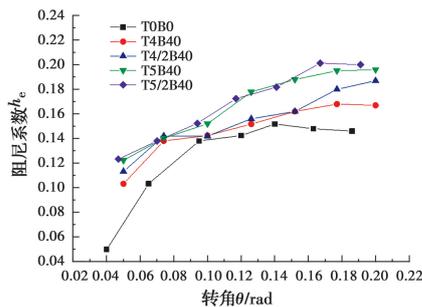


图 12 不同参数影响下等效阻尼系数随节点转角变化的规律

Fig. 12 The variation of equivalent damping coefficient with node angle under different parameters

3 结论

基于不同参数内嵌卯口耗能器在低周反复荷载作用下对榫卯节点抗震性能影响的试验, 得出以下结论:

1) 内嵌卯口耗能器的滞回曲线较为饱满, 接近于钢连接件的滞回曲线特征, 相比于未增强榫卯节点的具有“捏缩”效应的滞回曲线, 耗能能力有明显提升, 且耗能器的增强对于榫卯节点强度和刚度退化趋势有减缓作用。

2) 耗能器增强节点的承载力有小幅提升, 耗能能力提升了 2 倍左右, 而初始刚度有大幅提升, T5/2B40 最大提升可达到 90 倍左右。耗能器增强效果明显。

3) 榫卯节点的耗能能力随着耗能器钢板厚度和层数的增大而不断提升, 并且在钢板厚度、层数这两个参数中, 厚度对耗能器加固榫卯节点的力学性能影响更大。

参考文献:

- [1] 陆伟东, 邓大利, 居兴鹏, 等. 中国木结构建筑分布及其震害[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(4): 464-469.
LU W D, DENG D L, JU X P, et al. Distribution of timber structures in China and seismic damages analysis [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2011, 43(4): 464-469. (in Chinese)
- [2] 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 Q F, ZHAO H T, XUE J Y, 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. (in Chinese)
- [3] 薛建阳, 翟磊, 张风亮, 等. 扁钢加固古建筑木结构残损节点的性能分析与设计方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(5): 621-625.
XUE J Y, ZHAI L, ZHANG F L, et al. Performance analysis and design recommendations for damaged mortise-tenon joints of ancient timber structure strengthened with flat steel [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(5): 621-625. (in Chinese)
- [4] 薛建阳, 隋奕, 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 J Y, SUI Y, GE H P, 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. (in Chinese)
- [5] 闫维明, 张博, 周乾, 等. 古建筑榫卯节点抗震加固试验[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(2): 89-95.
YAN W M, ZHANG B, ZHOU Q, et al. Aseismic strengthening experiments on Chinese ancient tenon-mortise joints [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(2): 89-95. (in Chinese)
- [6] 闫维明, 周乾, 张博, 等. 马口铁加固古建筑抗震试验[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(4): 502-508.

- YAN W M, ZHOU Q, ZHANG B, et al. Aseismic behavior of Chinese ancient wooden structure strengthened by iron-hook [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(4): 502-508. (in Chinese)
- [7] 潘毅,王超,唐丽娜,等. 古建筑直榫节点扁钢与阻尼器加固比较研究[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(6): 981-986, 1031.
- PAN Y, WANG C, TANG L N, et al. Comparative research on flat steel and damper strengthening of straight type of tenon-mortise joints [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(6): 981-986, 1031. (in Chinese)
- [8] PLEVRIS N, TRIANTAFILLOU T C. FRP-reinforced wood as structural material [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1992, 4(3): 300-317.
- [9] TRIANTAFILLOU T C. Shear reinforcement of wood using FRP materials [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 9(2): 65-69.
- [10] 陆伟东,邓大利. 木结构榫卯节点抗震性能及其加固试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(3): 109-116.
- LU W D, DENG D L. Experimental research on seismic performance of wooden mortise-tenon joints before and after reinforcement [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(3): 109-116. (in Chinese)
- [11] 陆伟东,孙文,顾锦杰,等. 弧形耗能器增强木构架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11): 151-157.
- LU W D, SUN W, GU J J, et al. Experimental study on seismic performance of timber frames strengthened with curved steel dampers [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 151-157. (in Chinese)
- [12] 刘开封. 考虑局压效应的榫卯节点力学性能试验研究[D]. 南京:南京工业大学,2016.
- LIU K F. Experimental study on mechanical characteristics of mortise and tenon joints considering the local compression [D]. Nanjing: NanJing Tech University,2016. (in Chinese)
- [13] Timber structures; Test methods; Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners; EN 12512-2001 [S]. Brussels, Belgium: CEN, 2001.
- [14] JACOBSEN L S. Steady forced vibration as influenced by damping [J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1930.

(编辑 胡玲)