



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

张锡成 胡成明 吴晨伟 韩乙楠 张玉涛

RESEARCH ON ASEISMIC BEHAVIOR OF STRAIGHT TENON JOINTS REINFORCED BY SMA STRINGS IN ANCIENT TIMBER BUILDINGS

ZHANG Xi-cheng, HU Cheng-ming, WU Chen-wei, HAN Yi-nan, ZHANG Yu-tao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.02.0123>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拔榫状态下直榫节点滞回性能有限元分析

FINITE ELEMENT ANALYSIS ON THE CYCLIC BEHAVIOR OF STRAIGHT MORTISE-TENON JOINTS WITH PULLOUT TENONS

工程力学. 2019, 36(S1): 138-143 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.04.S024>

摇摆状态下古建筑木结构木柱受力性能分析及试验研究

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS ON MECHANICAL BEHAVIOR OF COLUMN IN TRADITIONAL TIMBER STRUCTURE DURING ROCKING

工程力学. 2017, 34(11): 50-58 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.07.0527>

摩擦耗能型SMA杆自复位梁柱节点滞回性能分析

HYSTERETIC PERFORMANCE ANALYSIS OF SELF-CENTERING BEAM-COLUMN CONNECTIONS WITH SMA BARS AND FRICTION ENERGY DISSIPATOR

工程力学. 2018, 35(4): 115-123 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.12.1012>

带斜撑的空冷钢-混凝土混合结构滞回性能试验研究与分析

EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS ON HYSTERETIC BEHAVIOR OF STEEL-CONCRETE HYBRID AIR-COOLING STRUCTURE WITH STEEL BRACES

工程力学. 2017, 34(5): 205-215 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.04.0280>

波形钢板剪力墙及组合墙抗剪承载力研究

Research on the shear bearing capacity of corrugated steel plate shear wall and composite wall

工程力学. 2019, 36(7): 197-206,226 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.06.0356>

基于无人机与计算机视觉的中国古建筑木结构裂缝监测系统设计

DESIGN OF CRACK MONITORING SYSTEM FOR CHINESE ANCIENT WOODEN BUILDINGS BASED ON UAV AND CV

工程力学. 2021, 38(3): 27-39 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.04.0263>



订阅号：面向读者



订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2022)04-0164-13

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

张锡成^{1,2}, 胡成明¹, 吴晨伟¹, 韩乙楠¹, 张玉涛¹

(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)

摘 要: 古建筑木结构中的半刚性榫卯节点在地震中往往先于梁柱等构件发生破坏, 是加固保护的关键部位。设计了一种新型形状记忆合金 (SMA) 丝预防性加固装置, 对采用该装置的 5 个直榫节点及 1 个未加固节点进行了低周反复荷载试验, 研究了采用不同根数和不同预拉应变的 SMA 丝加固节点的破坏形态、弯矩-转角关系、强度退化、刚度退化、耗能性能、自复位能力以及变形能力, 并提出了 SMA 丝加固直榫节点的抗弯承载力计算方法。结果表明: SMA 丝加固节点的抗弯承载力均有不同程度的提升, 加固节点的最大抗弯承载力为未加固节点的 1.49 倍; 与未加固节点相比, 加固节点的强度退化不严重, 表明 SMA 丝可以在节点转角较大时, 仍能持续为节点提供抗弯承载力; 加固节点最大转动刚度是未加固节点的 2.24 倍; 随着节点转角的增大, 未加固节点的耗能能力逐渐减小, 而加固节点的耗能能力先增大后减小; 在相同的转角下, 随着 SMA 丝根数和预拉应变的增加, 节点相对残余变形均减小, 自复位能力增强。研究成果可为古建筑木结构榫卯节点的预防性加固保护提供参考。

关键词: 古建筑木结构; 直榫节点; 形状记忆合金丝; 滞回性能; 抗弯承载力

中图分类号: TU366.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.02.0123

RESEARCH ON ASEISMIC BEHAVIOR OF STRAIGHT TENON JOINTS REINFORCED BY SMA STRINGS IN ANCIENT TIMBER BUILDINGS

ZHANG Xi-cheng^{1,2}, HU Cheng-ming¹, WU Chen-wei¹, HAN Yi-nan¹, ZHANG Yu-tao¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

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

Abstract: The semi-rigid mortise-tenon joints in the wooden structures of ancient buildings are often destroyed before beams and columns under major earthquakes, which are the important positions for reinforcement and protection. A new type of shape memory alloy (SMA) preventive reinforcement device is designed, and low-cyclic loading tests are carried out on five reinforced joints and one unreinforced joint. The failure modes, moment-rotation relationship, strength degradation, stiffness degradation, energy dissipation, self-centering ability and deformation capacity of the joints reinforced by SMA strings with different numbers and different pretension strains are studied. A calculation method for bending capacity of straight tenon joints reinforced by SMA strings is established. The results show that the bending capacity of the joints after SMA reinforcement is improved. The maximum bending capacity of the reinforced joint is 1.49 times that of the unreinforced joint. Compared with the unreinforced joint, the strength degradation of the reinforced joints is not serious, which indicates that the SMA strings can still continue to provide the bending capacity for the joints when the rotation is

收稿日期: 2021-02-06; 修改日期: 2021-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508454); 陕西省自然科学基金项目(2019JM-078)

通讯作者: 张锡成 (1984—), 男, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事古建筑木结构抗震及加固保护方面研究 (E-mail: xicheng-zhang@163.com).

作者简介: 胡成明 (1995—), 男, 河南人, 硕士生, 主要从事古建筑木结构抗震及加固保护方面研究 (E-mail: 13569071353@163.com);

吴晨伟 (1993—), 男, 陕西人, 博士生, 主要从事古建筑木结构抗震及加固保护方面研究 (E-mail: willionms_wu@xauat.edu.cn);

韩乙楠 (1985—), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事古建筑木结构抗震及加固保护方面研究 (E-mail: ynnhan@vip.163.com);

张玉涛 (1993—), 男, 河南人, 硕士, 主要从事古建筑木结构抗震及加固保护方面研究 (E-mail: 122517512@qq.com).

large. The maximum rotational stiffness of the reinforced joint is 2.24 times that of the unreinforced joint. With the increase of the rotation of joints, the energy dissipation of unreinforced joint gradually decreases, however the energy dissipation of reinforced joints increases first and then decreases. At the same rotation, the relative residual deformation decreases with the increase of numbers and of pretension strains of SMA strings, and the self-centering ability is enhanced. The results of research can provide a reference for the preventive conservation of the mortise-tenon joints in ancient timber structures.

Key words: ancient timber buildings; straight tenon joint; shape memory alloy (SMA) strings; hysteretic behavior; bending capacity

我国古建筑沿袭着“构木成架”的做法,形成了独树一帜的结构体系。古建筑中的木构架不使用一钉一铆,构件之间采用特殊的榫卯连接方式相互搭接而成,这种榫卯连接方式具有刚柔并济的特点,为典型的半刚性连接。震害调查表明古建筑木结构中的榫卯节点属于弱连接,地震中往往先于梁柱等构件发生破坏,是加固保护的关键部位^[1]。因此,有必要对古建筑木结构榫卯节点连接的力学性能进行研究,并提出合理的预防性修缮加固方法。

目前,国内外学者主要通过试验研究、数值模拟及理论分析等方法研究古建筑木结构榫卯节点的力学特征。薛建阳等^[2]对通榫节点的柱架模型进行了低周反复荷载试验和有限元数值模拟,模拟结果与试验结果吻合较好;Xue等^[3]采用拟静力试验研究了松动对通榫节点和燕尾榫节点抗震性能的影响,研究表明松动节点的承载力、刚度和耗能能力均显著低于完好节点。谢启芳等^[4-5]推导了燕尾榫节点弯矩-转角理论计算公式并与试验结果进行了对比,研究表明理论分析结果与试验结果吻合较好;潘毅等^[6]建立了木结构直榫节点的 $M-\theta$ 力学模型和相应的实现算法,给出了简化计算公式,并通过试验数据验证该力学模型的合理性;Nakagawa 和 Ohta^[7]研究发现,榫卯节点的刚度是影响整体结构动力特性的关键因素,增加节点刚度会显著提高结构在地震作用下的动力响应,且榫卯节点自身大转动、大变形导致的节点承载力降低是古建筑木结构发生倒塌的主要原因;Li等^[8]研究了榫卯损伤对单向直榫木框架抗震性能的影响,研究表明随着损伤程度的增加,木框架的滞回曲线峰值逐渐减小,抗震性能下降。

在榫卯节点抗震加固方面,周乾等^[9]分别采用钢构件、马口铁和碳纤维布对榫卯节点进行加固试验,对比分析了不同方法加固榫卯节点的抗

震性能;周长东等^[10]采用内嵌钢筋外包 CFRP 布复合加固方法对古建木柱进行了轴心受压试验,试验结果表明复合加固方法能够提高木柱的受压承载力并改善木柱的延性;薛建阳等^[11]对采用碳纤维布和扁钢加固节点的木构架进行拟静力试验,试验表明加固后的木构架耗能明显。采用常规的加固方式在提高榫卯节点和木柱的承载能力方面表现良好,但是都没有自复位效果,而形状记忆合金 (SMA) 是一种变形后可恢复的特殊材料,相对于一般常见的金属材料, SMA 具有形状记忆效应和超弹性。Xie等^[12-13]采用 SMA 材料对古建筑榫卯节点进行加固,研究了加固节点的滞回性能,研究结果表明采用 SMA 加固节点的耗能能力明显提高, SMA 用于加固榫卯节点具有良好效果。胡淑军等^[14]对 5 个不带 SMA 的支撑和 6 个自复位 SMA 支撑进行了拟静力试验,试验结果表明自复位 SMA 支撑具有良好的承载能力和自复位能力;李灿军等^[15]建立了摩擦耗能型 SMA 杆自复位梁柱节点的有限元模型,模型试验结果表明随着 SMA 杆直径的增大,节点抗弯能力和自复位性能均显著提高, SMA 可以用于古建筑木结构的加固保护。

为了在不显著增大榫卯节点抗弯刚度的前提下,较大幅度地提高其承载能力和自复位性能,本文提出一种新型 SMA 丝加固装置并对直榫节点进行预防性加固。通过对 5 个加固直榫节点及 1 个未加固节点进行低周反复荷载试验,研究了加固节点的抗震性能,同时提出了加固节点的抗弯承载力计算方法。研究成果可为古建筑木结构的预防性加固保护提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计和制作

参照宋代《营造法式》^[16]中八等材的尺寸要

求,采用樟子松作为模型原材料,制作了6个直榫节点模型,试件编号分别为STJ-1~STJ-6,试验模型尺寸如图1所示。

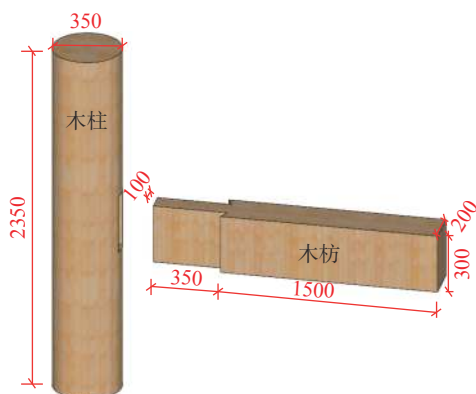


图1 直榫节点示意图 /mm
Fig. 1 Sketch of straight tenon joint

设计了一种新型 SMA 丝加固装置对直榫节点进行加固,加固示意图见图2, SMA 丝一端绕过导杆并穿过空心螺杆,端部通过夹具夹紧并施加预拉力; SMA 丝另一端缠绕在带孔的钢杆上,固定在半圆形扁钢箍上, SMA 丝梁柱端连接件如图3所示,加固节点试验图如图4所示,试件设计参数如表1所示。

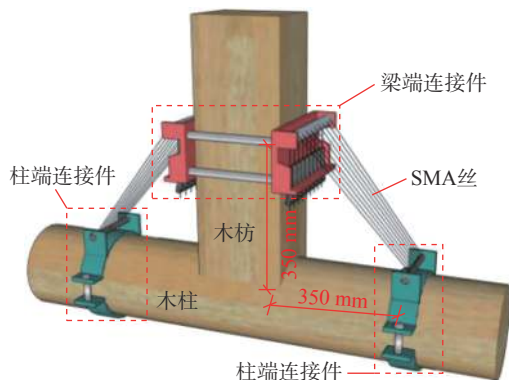


图2 加固节点示意图
Fig. 2 Sketch of reinforced joint

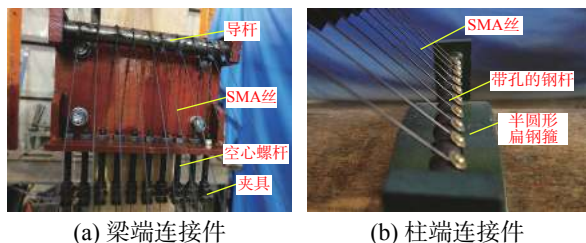


图3 SMA 丝梁柱端连接件
Fig. 3 Beam and column end connectors of SMA strings

1.2 加载方案

试验加载过程中,木柱水平放置,木枋竖向放置,木柱左、右两端固定不动,并用压梁压紧

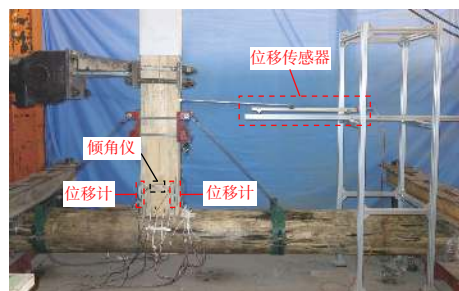


图4 加固节点试验装置
Fig. 4 Test setup of reinforced joint

表1 试件设计参数
Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	SMA丝			
	直径/mm	根数	预拉应变/(%)	长度/mm
STJ-1	1.5	未加固		
STJ-2		12	3	1500
STJ-3		16	3	
STJ-4		20	0	
STJ-5		20	1	
STJ-6		20	3	

木柱。木柱一端采用千斤顶施加轴向荷载 30 kN,在木枋上距木柱节点 1100 mm 的位置进行水平低周往复加载,加载示意图见图5。

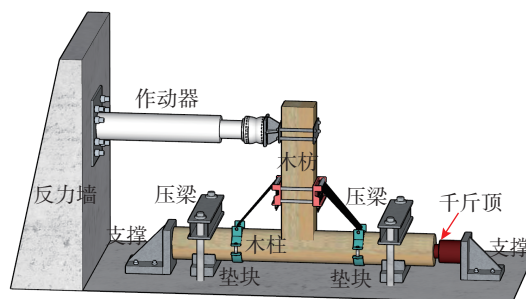


图5 加载示意图
Fig. 5 Sketch of loading

采用位移控制方法进行加载,加载速率为 5 mm/min,预估直榫节点的极限转角为 0.1 rad,即极限控制位移的预估值 $\Delta_u=110$ mm,采用极限控制位移的 10%、20%、30%、40%、50% 各进行 1 次循环加载,之后采用极限控制位移的 60%、80%、100%、120% 各进行 3 次循环加载,加载完成后复位并结束试验,加载制度如图6所示,图中 Δ 表示加载位置的水平位移。

1.3 测量方案

采用位移计测量榫头的拔出量,采用倾角仪测量节点的转角。

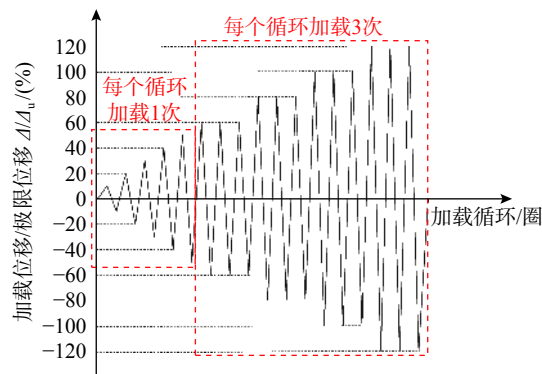


图 6 加载制度
Fig. 6 Loading scheme

1.3.1 榫头拔出量测量

在榫头抱肩处左、右两侧各设置 2 个位移计，记为 W1~W4，用来测量榫头的拔出量，如图 7 所示。

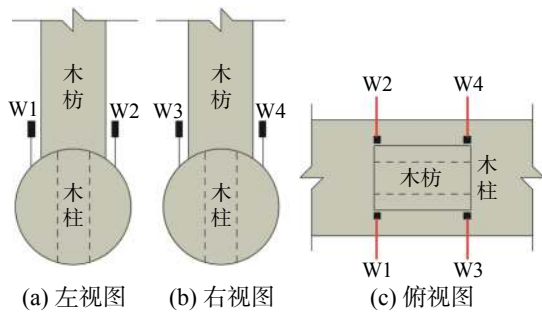


图 7 位移计设置
Fig. 7 Setup of displacement sensor

1.3.2 节点转角测量

在靠近梁柱节点的枋端设置一个倾角仪，用来测量梁柱之间的相对转角即节点转角，如图 8 所示。

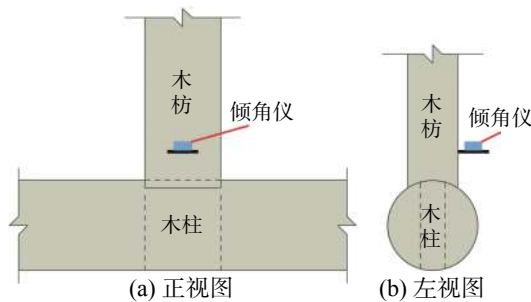


图 8 倾角仪设置
Fig. 8 Setup of inclinometer

1.4 木材及 SMA 丝力学性能

采用樟子松制作榫卯节点，木材强度试验按照《木结构试验方法标准》(GB/T 50329—2012)进行测试，通过材性试验测得其力学性能参数，各项数据统计如表 2 所示。

表 2 木材力学性能
Table 2 Mechanical properties of wood

顺纹抗拉 强度/MPa	顺纹抗压 强度/MPa	顺纹抗剪 强度/MPa	横纹抗压 强度/MPa		弹性 模量/MPa		
			径向	弦向	顺纹	横纹 径向	横纹 弦向
83.17	19.23	5.19	2.04	2.89	8772.92	147.02	468.02

对试验采用的同一批次的加固材料 SMA 丝进行材性试验，试验程序严格按照《金属材料拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)的要求，测得其应力-应变关系，如图 9 所示。

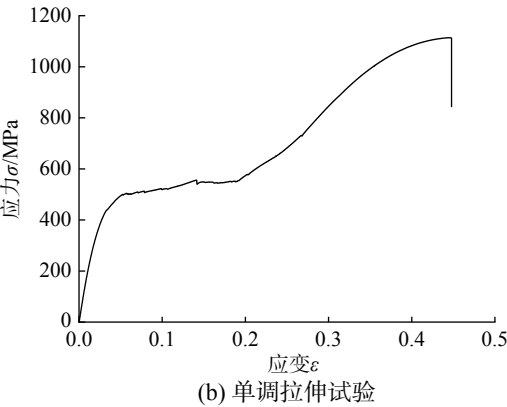
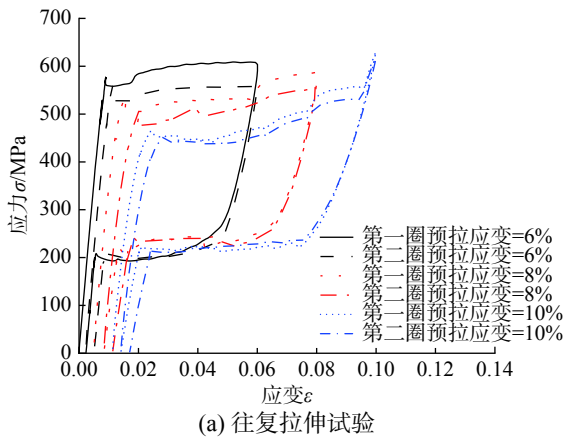


图 9 SMA 丝应力-应变曲线
Fig. 9 Stress-strain curves of SMA strings

由材性试验测得 SMA 丝的材料性能如表 3 所示。

表 3 SMA 丝材料性能
Table 3 Material properties of SMA stings

力学参数	E/MPa	f_y/MPa	f_u/MPa	f_u/f_y	$\delta/(\%)$
试验值	69 000	502	1114	2.22	44.50

注： E 为 SMA 丝的弹性模量； f_y 和 f_u 分别为 SMA 丝的屈服抗拉强度和极限抗拉强度； δ 为 SMA 丝的极限伸长率。

2 试验现象

2.1 未加固模型

未加固试件和加固试件在节点处的破坏形态基本相同，破坏主要产生在榫头和卯口的接合部

位,木柱和木枋的整体形态基本未破坏。加载前期,节点处榫头和卯口没有产生明显变形;当节点转角加载到 0.02 rad,榫头和卯口开始产生明显的挤压变形,变形主要为弹性变形,加载时出现轻微的“吱吱”声,东侧榫头开始微小拔出,榫头拔出量为 1 mm,西侧无拔榫;当节点转角加载到 0.06 rad,节点处榫头和卯口产生塑性的挤压变形,榫头被压裂,枋端出现竖向裂缝;持续加载,节点转角继续增大,前述各破坏形态相继发展;当节点转角加载到 0.12 rad,节点变形较大,不利于继续加载而结束试验,此时榫头最大拔出量约为 23 mm。试验现象和破坏状态如图 10 所示。

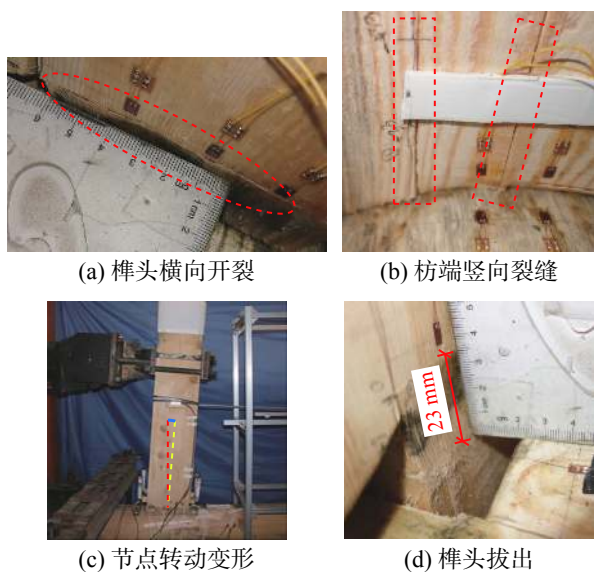


图 10 试件 STJ-1 试验现象和破坏形态
Fig. 10 Phenomena and failure modes of specimen STJ-1

2.2 加固模型

加固节点试件 STJ-2~STJ-6 加载前期试验现象同 STJ-1 试件相似,其榫头拔出量明显比未加固节点小,当节点转角加载到 0.02 rad,合金丝开始轻微拨动,并伴随微小的“吱吱声”,两侧无拔榫;当节点转角加载到 0.06 rad,合金丝连续拨动,出现连续沉闷的“咚咚声”,榫肩木纤维褶皱,榫头拔出量为 9 mm;当节点转角持续加载到 0.12 rad,由于合金丝根数较少,试件 STJ-2 东侧出现几条合金丝拉断,最后由于节点转角较大不利于继续加载而结束试验;各加固试件枋自榫头左、右两端向上一定长度内均留下 2 条明显的竖向劈裂裂缝,试验后拔出榫头,发现试件 STJ-4 榫头出现劈裂;各加固试件卯口处木纤维剥落并产生明显的压痕。试验现象和破坏状态如图 11 所示。

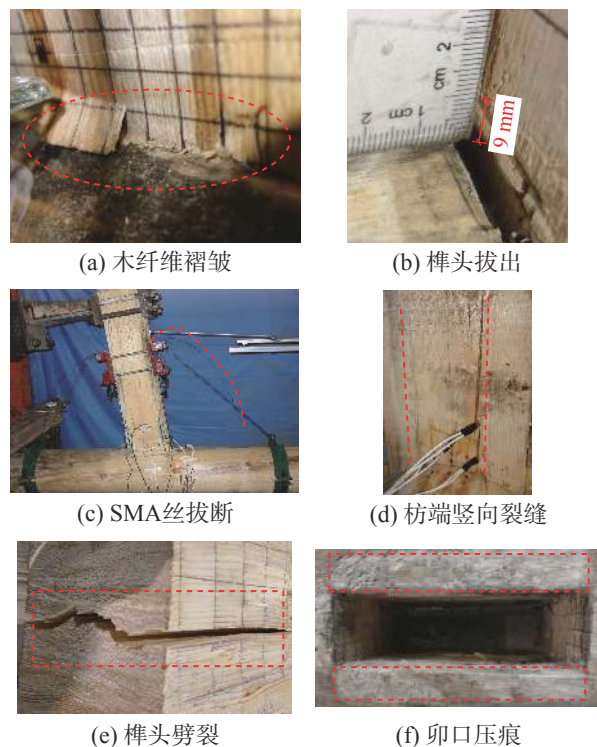


图 11 加固节点试验现象和破坏形态
Fig. 11 Phenomena and failure modes of reinforced joints

3 试验结果及其分析

3.1 $M-\theta$ 滞回曲线

直榫节点模型的 $M-\theta$ 滞回曲线如图 12 所示,其中 M 和 θ 可以通过下式计算:

$$M = F \times h \quad (1)$$

$$\theta = \Delta / h \quad (2)$$

式中: F/kN 为加载位置水平荷载; h/m 为加载位置至柱上表面的高度; Δ/m 为加载位置的水平位移。

图 12 中 STJ-1(未加固)表示试件 STJ-1 没有采用 SMA 丝进行加固, STJ-2(12, 3%)表示试件 STJ-2 所采用的 SMA 丝的根数为 12 根, SMA 丝的预拉应变为 3%,其余图注含义类推。

1) 整体上,节点 STJ-1 的滞回曲线呈反“Z”形,具有明显的捏缩效应;加载前期,曲线出现滑移段,并随着节点转角的增大而延长,这是因为榫头和卯口接合部位存在初始缝隙,且节点在每级位移幅值加载完成后均产生新的缝隙,此时节点弯矩主要由榫头和卯口接触面间的摩擦力来承担;加固节点 STJ-2~STJ-6 的滞回曲线呈反“S”形,节点转角零点处,曲线存在一定的斜率,这是因为加载前期的节点弯矩主要由榫头和

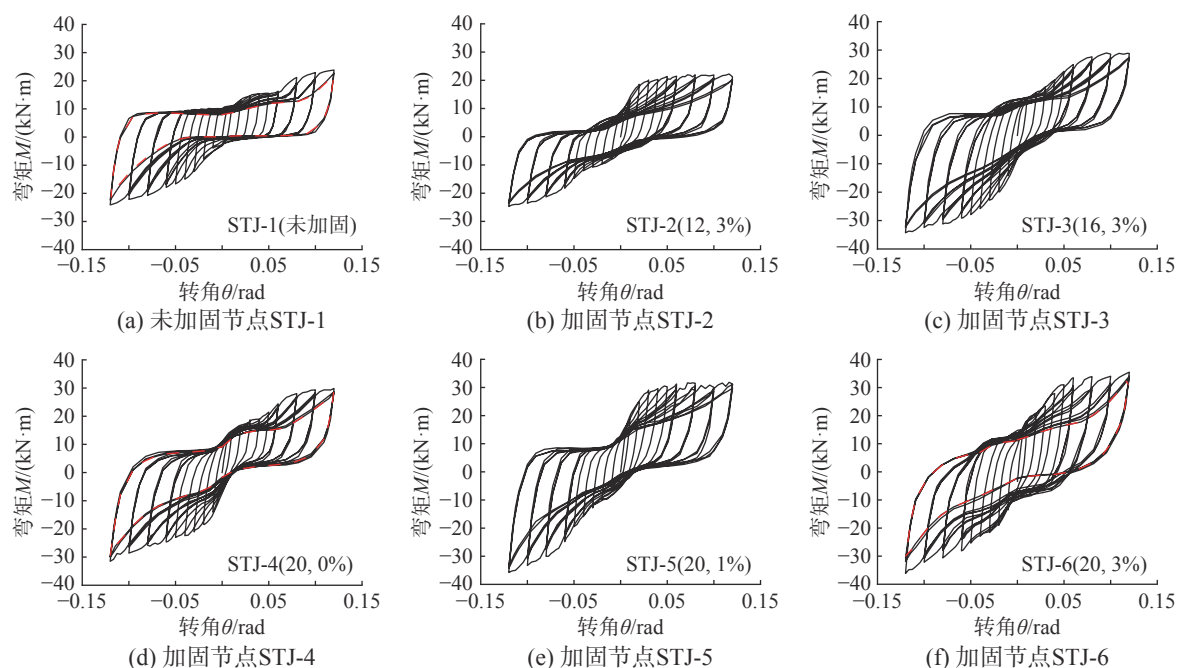


图 12 弯矩-转角滞回曲线

Fig. 12 Moment-rotation hysteretic curves

卯口接触面间的摩擦力以及 SMA 丝共同来承担, SMA 丝承担的弯矩和节点转角具有正相关性, 导致滞回曲线在零点处存在一定的斜率。

2) 对于未加固节点 STJ-1: 加载前期, 曲线斜率几乎为 0, 主要是因为节点处榫头和卯口间存在初始缝隙; 当节点转角加载到 0.02 rad 时, 曲线明显开始快速上升, 这是因为榫头和卯口表面接触并产生挤压变形, 挤压接触面积相应地增大, 此时主要为弹性变形; 节点转角持续加载到 0.06 rad 后, 曲线上升速率相对减缓, 这是因为榫头和卯口挤压产生塑性变形同时榫头部分拔出造成挤压接触面积减小, 节点刚度随之降低; 卸载时, 曲线下降速率较快, 此时弹性变形恢复, 而残余变形不可恢复且所占比例较大。

3) 与未加固节点 STJ-1 进行对比, 加固节点峰值承载力均比未加固节点的大, 滞回环更加饱满; SMA 丝数量越多, 预拉应变越大, 其峰值承载力越大; 节点 STJ-6 正向加载时, 节点弯矩上升速率较快, 当节点转角加载到 0.03 rad 后, 节点弯矩上升趋势减缓, 这是因为节点 STJ-6 榫头东侧存在初始裂缝, 加载过程中, 榫头东侧上端由于挤压产生横向裂缝。卸载时, 加固节点的残余变形较未加固节点 STJ-1 小, 这是因为卸载过程中 SMA 丝可以为节点提供部分恢复力, 减小了其残余变形。

4) 对比分析未加固节点 STJ-1 和加固节点 STJ-4、STJ-6 的滞回曲线 (即图 12 中的红色加粗虚线), 可以看出, 未加固节点 STJ-1 的滞回曲线存在较长的滑移段, 加固节点 STJ-4 的 SMA 丝预拉应变为 0 时, 其正向加载阶段也存在滑移段, 这是因为榫头和卯口接合部位存在初始缝隙, 此时节点弯矩主要由榫头和卯口接触面间的摩擦力来提供; 而加固节点 STJ-6 的 SMA 丝预拉应变为 3% 时, 其正向加载阶段无滑移段, 正向卸载阶段滑移段不明显, 这是因为 SMA 丝预拉应变的存在, 可以为节点提供部分恢复力, 表现出明显的自复位性能。

3.2 骨架曲线

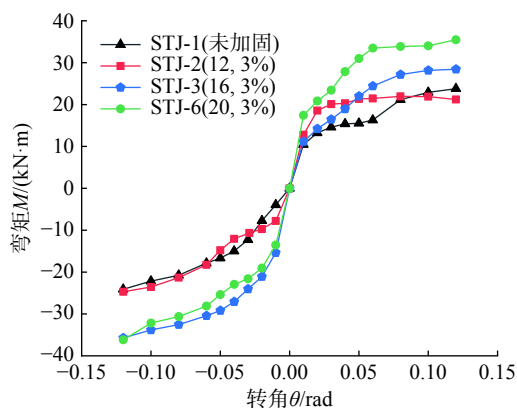
图 13 为节点模型的骨架曲线, 可以看出:

1) 所有节点的骨架曲线具有相似的变化趋势: 曲线主要经历了弹性阶段和屈服阶段; 加载前期, 曲线斜率较大, 这是因为榫头和卯口表面开始接触挤压, 且挤压接触面积随之增大, 挤压变形主要为弹性变形; 当节点转角加载到 0.06 rad 后, 骨架曲线进入屈服阶段, 节点弯矩增长减缓, 这是因为榫头和卯口表面因接触面积较大而发生挤压破坏, 此时变形主要为塑性变形; 骨架曲线最后趋于平缓, 没有出现下降段, 表明节点在较大变形的情况下仍然存在较强的抗弯能力。

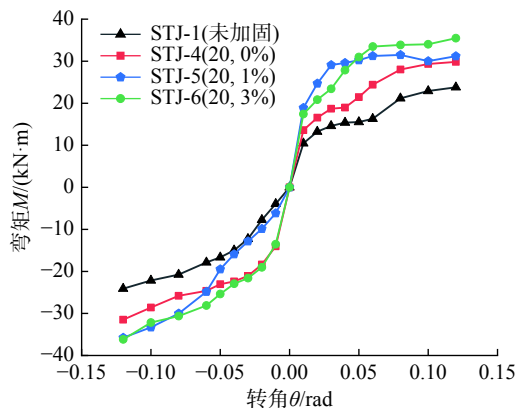
2) 当 SMA 丝预拉应变相同时, 正向加载试件

时, 加固节点 STJ-6 的最大抗弯承载力是未加固节点 STJ-1 的 1.49 倍, 节点 STJ-3 的最大抗弯承载力是节点 STJ-1 的 1.19 倍, 节点 STJ-2 的最大抗弯承载力是节点 STJ-1 的 0.89 倍, 表明随着 SMA 丝根数的增加, 节点的最大抗弯承载力不断增大, 而加固节点 STJ-2 的最大抗弯承载力略低于未加固节点, 这是因为试件 STJ-2 出现几条合金丝拉断造成的; 反向加载试件时, 节点 STJ-6 和节点 STJ-3 的最大抗弯承载力基本相同, 这是因为两者的最终榫头拔出量基本相同。

3) 当 SMA 丝根数相同时, 正向加载试件时, 加固节点 STJ-6 的最大抗弯承载力是未加固节点 STJ-1 的 1.49 倍, 节点 STJ-5 的最大抗弯承载力是节点 STJ-1 的 1.31 倍, 节点 STJ-4 的最大抗弯承载力是节点 STJ-1 的 1.25 倍, 表明随着 SMA 丝预拉应变的增大, 节点的最大抗弯承载力也不断增大。加固节点的抗弯承载力相比于未加固节点 STJ-1 均有不同程度的提高, 且 SMA 丝根数越多, 预拉应变越大, 节点的抗弯承载力提高的程度越大。



(a) 不同SMA丝根数的节点骨架曲线



(b) 不同SMA丝预拉应变的节点骨架曲线

图 13 弯矩-转角骨架曲线

Fig. 13 Moment-rotation skeleton curves

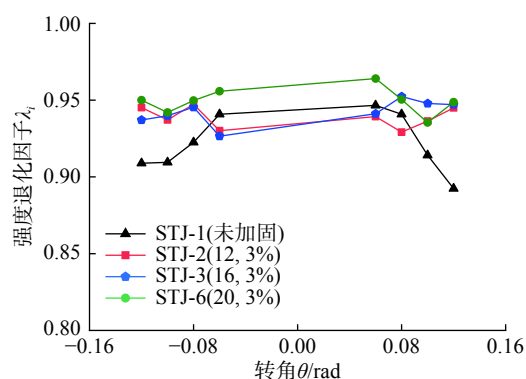
3.3 强度退化

在水平拟静力加载试验中, 相同的位移幅值下进行了 3 个加载循环, 随着加载循环次数的增加, 作用在节点上的水平荷载逐渐减小。强度退化因子可计算如下式:

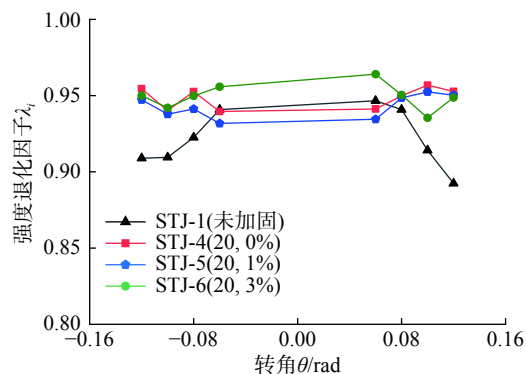
$$\lambda_i = \frac{P_{i,3}}{P_{i,1}} \quad (3)$$

式中: λ_i 为第 i 个位移幅值的强度退化因子; $P_{i,1}$ 为第 i 个位移幅值中第 1 个周期的峰值荷载; $P_{i,3}$ 为第 i 个位移幅值中第 3 个周期的峰值荷载。

通过式 (3) 计算出各节点模型的强度退化因子 λ_i 的变化规律如图 14 所示, 可以得到:



(a) 不同SMA丝根数的节点强度退化曲线



(b) 不同SMA丝预拉应变的节点强度退化曲线

图 14 强度退化曲线

Fig. 14 Strength degradation curves

1) 节点转角未加载到 0.06 rad 时, 各节点模型的强度退化因子均随着转角的增大而几乎不变, 此时节点的抗弯能力主要是由榫卯接触面间的摩擦产生的塑性变形来提供。

2) 当节点转角超过 0.06 rad 时, 未加固节点 STJ-1 的强度退化因子快速减小, 而加固节点的强度退化因子均在 0.95 上下波动, 这说明加固节点的强度退化不严重, 表明 SMA 丝可以在节点转角较大时, 仍能持续为节点提供抗弯承载力, 加固

的效果较为明显。

3.4 刚度退化

随着加载循环次数和位移幅值的增大而刚度逐渐减小的现象称为刚度退化，在水平反复荷载作用下，刚度可以采用各级加载位移下滞回曲线的割线刚度来表示，计算公式如下：

$$K_i = \frac{|+M_i| + |-M_i|}{|+\theta_i| + |-\theta_i|} \quad (4)$$

式中： K_i 为第*i*级加载位移作用下的割线刚度； M_i 为第*i*级加载位移作用下的峰值点弯矩； θ_i 为 M_i 对应的节点转角。

通过式(4)计算出各节点模型转动刚度如图15所示，可以得到：

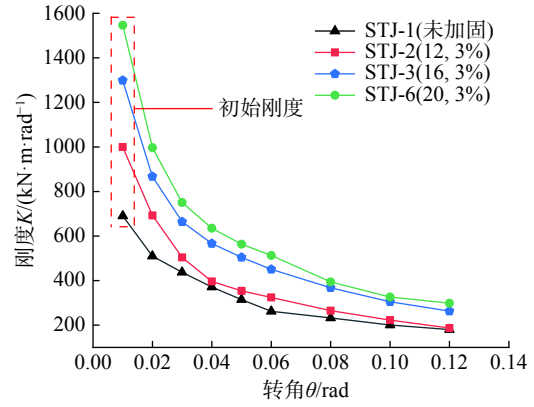
1) 各试件节点的转动刚度具有相似的变化规律：转动刚度均随着转角的增大而减小；刚度退化曲线可分为快速下降阶段、缓慢下降阶段和稳定阶段3个阶段，加载前期，节点转动刚度退化速率较快，这是因为榫卯节点之间存在初始缝隙，节点滑移导致其刚度快速退化，当节点转角持续加载到0.06 rad后，转动刚度下降减缓并最终趋于稳定。

2) SMA丝可以一定程度地提高节点的初始刚度，但随着节点转角的增加，加固后的节点刚度退化更为严重。

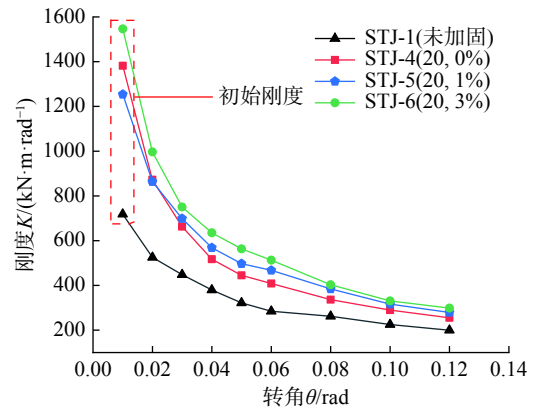
3) SMA丝预拉应变相同时，加固节点STJ-6的初始转动刚度是未加固节点STJ-1的2.24倍，节点STJ-3的初始转动刚度是节点STJ-1的1.88倍，节点STJ-2的初始转动刚度是节点STJ-1的1.45倍，表明SMA丝根数越多，节点的初始刚度提高程度就越大。

4) SMA丝根数相同时，SMA丝预拉应变越大，对节点的初始刚度提高程度也越大；当节点转角加载到0.12 rad，加固节点STJ-6的转动刚度是未加固节点STJ-1的1.50倍，节点STJ-5的转动刚度是节点STJ-1的1.40倍，节点STJ-4的转动刚度是节点STJ-1的1.28倍，加固后的节点刚度依旧大于未加固节点的刚度，加固的效果较为显著。

为了研究不同加固方法对节点初始刚度的提升程度，将现有加固方式进行了对比分析，如表4所示。由表4可以看出，采用SMA丝加固时，节点的初始刚度不显著提高，该加固方法对直榫节点的初始刚度影响较小，不显著改变结构的结构



(a) 不同SMA丝根数的节点刚度退化曲线



(b) 不同SMA丝预拉应变的节点刚度退化曲线

图15 刚度退化曲线

Fig. 15 Stiffness degradation curves

性能，有效避免了刚度增加导致结构动力响应的增大。而常规加固方式在提高节点的承载力方面表现良好，但是都没有自复位效果。

表4 不同加固方法对节点性能的提升倍数

Table 4 Increment magnification of joint performances considering different methods

加固方式	碳纤维 维布 ^[9]	扁钢 ^[11]	弧形 钢板 ^[17]	角钢 ^[18]	SMA丝 ^[13]	本文
刚度提升倍数	3.58	3.50	3.00	2.92	2.20	2.24
承载力提升倍数	1.92	5.00	2.60	4.00	1.80	1.49
残余变形减小倍数	—	—	—	—	0.36	0.38

3.5 耗能性能

通常用等效黏滞阻尼系数 h_e 来表示节点的耗能能力， h_e 的计算方法示意图如图16所示，计算公式如下：

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{(ABD+CBD)}}{S_{\triangle DEO} + S_{\triangle BFO}} \quad (5)$$

式中： h_e 为等效黏滞阻尼系数； $S_{(ABD+CBD)}$ 为滞回环的面积，即图16中阴影部分的面积； $S_{\triangle DEO}$ 为 $\triangle DEO$ 的面积； $S_{\triangle BFO}$ 为 $\triangle BFO$ 的面积。

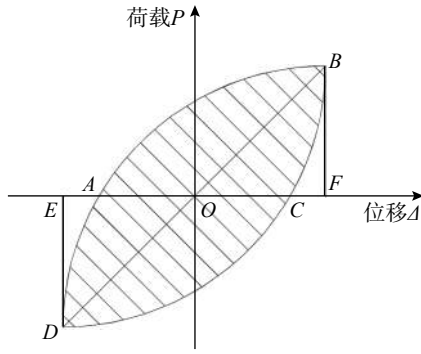


图 16 等效黏滞阻尼系数计算图

Fig. 16 Calculation diagram of equivalent viscous damping coefficient

通过式 (5) 计算出节点模型的等效黏滞阻尼系数 h_e 的变化规律如图 17 所示, 由图可知:

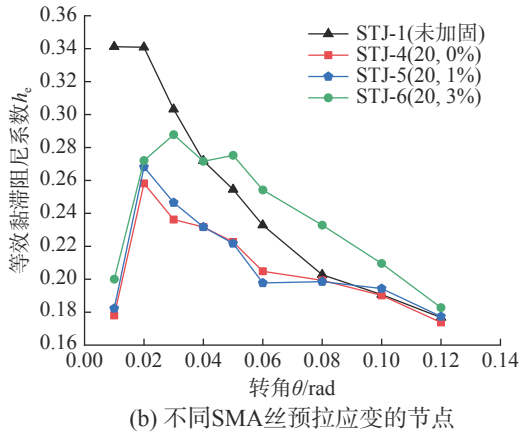
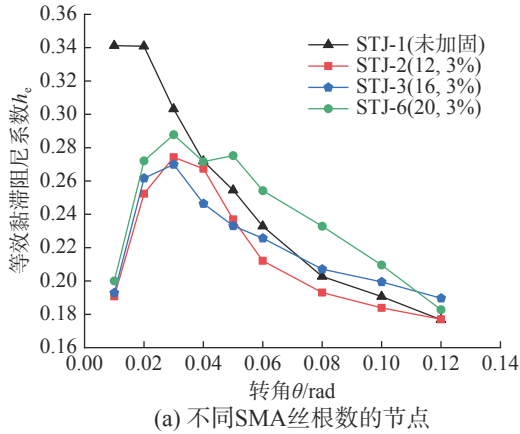


图 17 等效黏滞阻尼系数-转角曲线

Fig. 17 Equivalent viscous damping coefficient-rotation curves

1) 随着节点转角的不断增大, 未加固节点 STJ-1 的耗能能力逐渐减小, 这是因为加载前期, 直榫节点耗散的能量主要由榫卯间的摩擦力来提供, 此时节点弯矩较小, 耗能能力较强; 继续加载, 节点处开始产生挤压变形, 节点弯矩相继增大, 节点耗能能力主要由挤压变形中的塑性变形

来提供, 而塑性变形增加的速率随着节点转角的增大而减小, 故节点的耗能能力逐渐减小。

2) 随着节点转角的不断增大, 加固节点 STJ-2~STJ-6 的耗能能力先增大后减小, 分析原因为: 加固节点的耗能能力是由直榫节点和 SMA 丝共同承担, 而 SMA 丝耗散的能量远小于直榫节点耗散的能量, SMA 丝耗散的这部分能量可以忽略不计; 加载前期, 节点弯矩较小, SMA 丝对节点弯矩的提升效果显著, 在耗散能量一定的情况下, 耗能能力与节点弯矩呈反比, 故加载前期加固节点的耗能能力较差; 随着节点转角的持续增大, SMA 丝对节点弯矩的提升效果逐渐减弱, 加固节点的耗能能力与未加固节点的耗能能力越来越接近, 故加固节点的耗能能力呈先增大后减小的规律。除 STJ-6 之外, 在相同的转角下, 加固节点的等效黏滞阻尼系数数值大小较为接近, 表明 SMA 丝的根数和预拉应变的大小对节点的耗能能力影响不大。

3.6 自复位能力

在每个加载循环中, 滞回曲线和 X 轴交点的横坐标的绝对值反映了节点的自复位能力。图 18 为 STJ-6 的最后一个加载循环的滞回曲线, 图中滞回曲线和 X 轴横坐标的交点为 B 和 C, 滞回曲线正负向最大转动对应的点为 A 和 D, D_r^+ 和 D_r^- 分别为正向和负向残余变形, 通过式 (6) 和式 (7) 计算所得, 为了减小试验偶然误差, 计算了节点的相对残余变形 D_r , 计算公式见式 (8)。

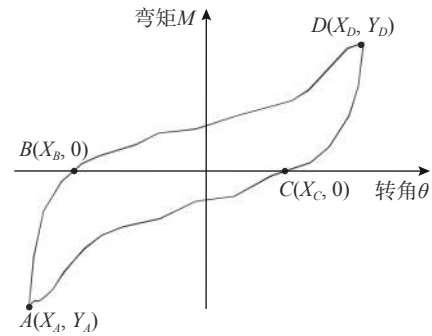


图 18 自复位能力计算图

Fig. 18 Calculation diagram of self-centering ability

$$D_r^+ = X_C/X_D \quad (6)$$

$$D_r^- = X_B/X_A \quad (7)$$

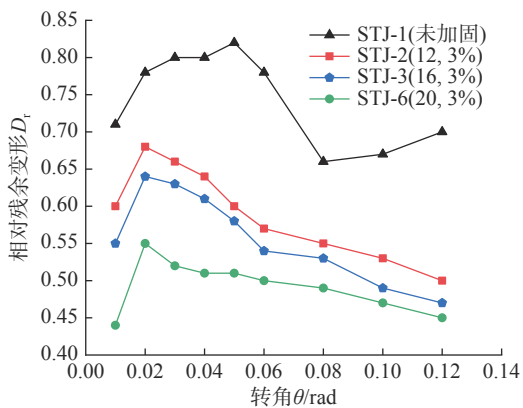
$$D_r = \frac{\sum (D_r^+ + D_r^-)}{2} \quad (8)$$

通过计算得到各个试件的相对残余变形 D_r 和转角 θ 的关系见图 19, 可以得到:

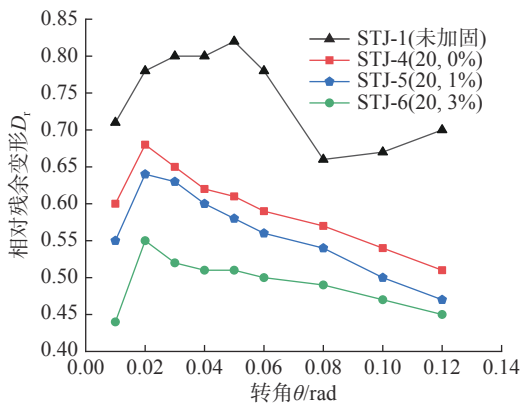
1) 由图 19 可以看出, 在相同的转角下, 随着 SMA 丝根数的增加, 相对残余变形减小, 自复位能力增强; 同样地, 随着 SMA 丝预拉应变的增加, 相对残余变形也减小, 自复位能力也提高。

2) 未加固节点 STJ-1 在加载前期榫卯接触紧密, 相对残余变形较小, 节点具有良好的自复位能力。当节点转角未加载到 0.05 rad, 摩擦接触面积减小, 相对残余变形增大, 自复位能力开始下降; 当节点转角大于 0.05 rad 和小于 0.08 rad 时, 直榫节点出现明显的滑移, 相对残余变形显著减小, 自复位能力提高; 当节点转角加载超过 0.08 rad 时, 直榫节点出现较大的变形, 相对残余变形略微增大。

3) 各加固节点的相对残余变形明显小于未加固节点。当节点转角未加载到 0.02 rad 时, 加固节点的相对残余变形略微增加, 这是因为直榫节点木构件之间的摩擦接触面积减小, 从而减小了节点的自复位能力; 当节点转角超过 0.02 rad 时, SMA 丝出现较大的塑性拉伸变形, 此时节点的自复位能力主要由 SMA 丝来提供, 节点的相对残余变形明显减小, 自复位能力增强。



(a) 不同SMA丝根数的节点自复位能力曲线



(b) 不同SMA丝预拉应变的节点自复位能力曲线

图 19 自复位能力曲线

Fig. 19 Self-centering ability curves

3.7 节点转动能力

参照《古建筑木结构维护与加固技术标准》(GB 50165—2020) 可以得到: 木结构的层间位移角限值为 1/30, 由于其变形主要是由直榫节点转动引起的, 可大概认为直榫节点转角的限值为 1/30。

由图 13 可以看出: 当节点转角加载到 0.12 rad 时 (约 1/8), 节点弯矩仍然没有出现下降, 且未能达到极限弯矩, 此时由于节点转角较大不利于继续加载而结束试验。节点的最大转角大于规范规定的转角限值 1/30, 表明加固直榫节点的转动变形能力较好。

4 承载力计算

为了评估新型加固节点的承载力, 提出了 SMA 丝加固直榫节点的抗弯承载力计算方法, 根据实际测得的 SMA 丝的应力-应变关系曲线, 同时参照 Shaw 等^[19] 和 Chang 等^[20] 研究中 SMA 丝的简化本构关系, 作出如下假设: 1) 假设形变均匀产生; 2) SMA 丝始终处于充分的预张拉状态, 避免 SMA 丝变为马氏体; 3) 奥氏体和马氏体相变期间的应力保持不变; 4) 由于材料试验采用了准静态加载方案, 认为相变速率要比加载速率快得多。由此得到 SMA 丝的应力-应变关系简化模型, 如图 20 所示。通过拉伸加卸载试验结果, 得到 SMA 丝的力学性能参数的平均值和变异系数, 如表 5 所示。

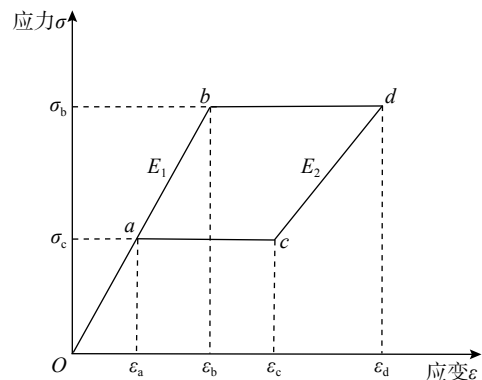


图 20 SMA 丝应力-应变关系简化模型

Fig. 20 Simplified stress-strain model of SMA strings

直榫节点的连接构造模型见图 4 所示, 由直榫节点提供的弯矩^[21] 计算公式见式 (9)。

$$M_1 = M_0 + \frac{k\theta}{[1 + (\theta/\theta_0)^n]^{1/n}} \quad (9)$$

表 5 SMA 丝力学性能参数
Table 5 Mechanical parameters of SMA strings

参数	σ_b /MPa	σ_c /MPa	E_1 /GPa	E_2 /GPa	ε_a (%)	ε_b (%)	ε_c (%)	ε_d (%)
平均值	510.0	218.0	69.0	29.0	0.7	0.9	7.4	8.4
变异系数/(%)	9.3	7.9	26.6	10.0	17.7	22.6	4.1	2.0

注: σ_b 和 σ_c 分别为 SMA 丝从奥氏体到马氏体和从马氏体到奥氏体的相变应力; E_1 和 E_2 分别为奥氏体弹性模量和马氏体弹性模量; ε_a 、 ε_b 、 ε_c 和 ε_d 为应变特征值。

$$\theta_0 = \frac{M_u - M_0}{k} \quad (10)$$

式中: M_0 为初始弯矩; k 为初始刚度; θ_0 为节点的相对转动角度; M_u 为极限弯矩; n 为形状系数。

对于理想节点, 当转动角度为 0 时, 初始弯矩为 0, 因此, 式 (9) 中考虑 $M_0=0$, 得到直榀节点提供的弯矩计算公式见下式:

$$M_1 = \frac{k\theta}{[1 + (\theta/\theta_0)^n]^{1/n}} \quad (11)$$

如图 21 所示, 当 SMA 丝加固节点逆时针旋转, 转动角度 θ 较小时, 左右合金丝分别存在拉力 P_1 和 P_2 。根据图 20 所示的 SMA 丝应力-应变简化关系, 计算出 SMA 丝产生的拉力见下式:

$$P_1 = \begin{cases} E_1 \varepsilon_1 A, & 0 \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_a \\ \sigma_c A, & \varepsilon_a < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_c \\ \sigma_c A + E_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_c) A, & \varepsilon_c < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_d \end{cases} \quad (12)$$

$$P_2 = \begin{cases} E_1 \varepsilon_2 A, & 0 \leq \varepsilon_2 \leq \varepsilon_b \\ \sigma_b A, & \varepsilon_b < \varepsilon_2 \leq \varepsilon_d \end{cases} \quad (13)$$

式中: ε_1 为 SMA 丝左侧的拉应变; ε_2 为 SMA 丝右侧的拉应变; A 为 SMA 丝一侧的面积。

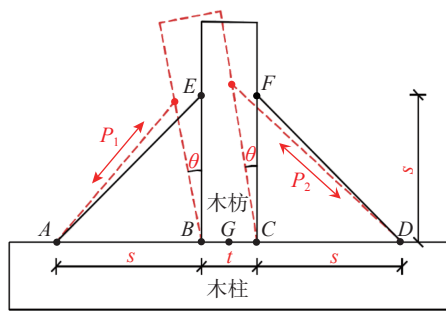


图 21 节点转动示意图
Fig. 21 Sketch of the rotated joint

SMA 丝和木枋的初始夹角为 $\pi/4$, 当转动角度为 θ 时, 左、右两侧 SMA 丝的应变增量 $\Delta\varepsilon_1$ 和 $\Delta\varepsilon_2$ 分别用式 (14) 和式 (15) 表示:

$$\Delta\varepsilon_1 = \frac{L'_{AE} - L_{AE}}{L_{AE}} = \frac{2L \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2}\right) - \sqrt{2}L}{\sqrt{2}L} \quad (14)$$

$$\Delta\varepsilon_2 = \frac{L'_{DF} - L_{DF}}{L_{DF}} = \frac{2L \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2}\right) - \sqrt{2}L}{\sqrt{2}L} \quad (15)$$

式中, L 为 SMA 丝的长度。

式 (12) 和式 (13) 中的拉应变 ε_1 和 ε_2 通过下式计算得到:

$$\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_1 + \alpha = \sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2}\right) - 1 + \alpha \quad (16)$$

$$\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_2 + \alpha = \sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2}\right) - 1 + \alpha \quad (17)$$

式中, α 为 SMA 丝的预拉应变。

在图 21 中, 假设转动中心在点 G 处, SMA 丝提供的弯矩计算式如下:

$$M_2 = P_2 \left(s + \frac{t}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2}\right) - P_1 \left(s + \frac{t}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2}\right) \quad (18)$$

综上所述, 通过代入方程式, 可得到加固节点弯矩 M 和转角 θ 的表达式为式 (18), 故由直榀节点和 SMA 丝共同提供的总弯矩见下式:

$$M = M_1 + M_2 \quad (19)$$

当 SMA 丝出现受拉拔断和受压屈曲时, 即 FD 段 SMA 丝受拉拔断, AE 段 SMA 丝受压屈曲, 此时左、右合金丝存在的拉力 P_1 和 P_2 均为 0, 由 SMA 丝提供的弯矩值 $M_2=0$, 节点的总弯矩由直榀节点所提供, 即 $M=M_1$, 式 (19) 依旧能满足需求。

通过式 (19) 计算出 6 个试件的弯矩值, 选取试件 STJ-1、STJ-4、STJ-6 的计算总弯矩和试验总弯矩对比如图 22 所示。由图 22 可以看出, 采用式 (19) 计算出节点的弯矩值和试验得到的弯矩值整体吻合较好, 随着节点转角的增大, 两者的误差略微增大。进而统计了 6 个试件的理论计算最大弯矩值与试验测得的最大弯矩值见表 6, 可以得到, 各个试件的理论计算弯矩值和试验测得的弯矩值之间的相对误差值均在 10% 左右, 表明所建立的承载力计算方法较为合理。

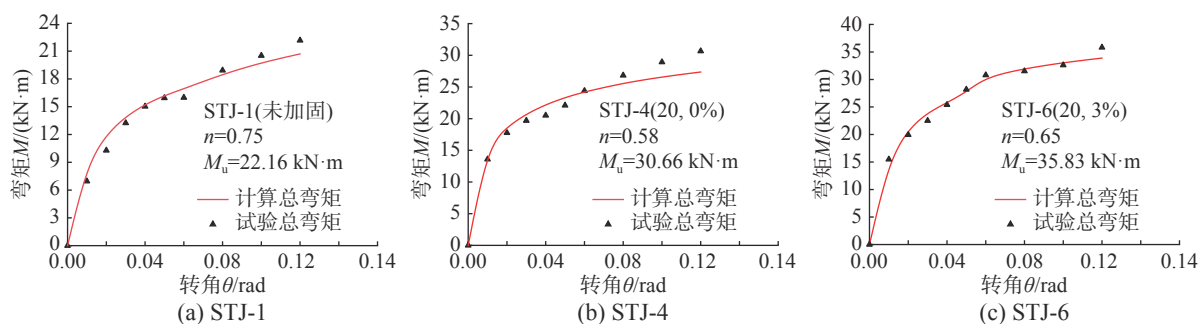


图 22 计算值与试验值对比图

Fig. 22 Comparison diagram of calculated and experimental values

表 6 计算值与试验值对比

Table 6 Comparison of calculated and experimental values

试件编号	STJ-1	STJ-2	STJ-3	STJ-4	STJ-5	STJ-6
形状系数 n	0.75	0.68	0.63	0.58	0.56	0.65
计算最大弯矩值 $M/(kN \cdot m)$	20.70	20.89	30.28	27.36	29.84	33.89
试验最大弯矩值 $M/(kN \cdot m)$	22.16	22.95	32.08	30.66	33.49	35.83
相对误差/(%)	6.59	8.98	5.61	10.76	10.90	5.41

注：试验弯矩值由正、负向最大抗弯承载力取平均值计算所得。

5 结论

通过低周反复荷载试验，研究了 SMA 丝加固直榫节点的抗震性能，并提出了 SMA 丝加固直榫节点抗弯承载力计算方法，得到以下主要结论：

(1) 未加固节点的滞回曲线呈反“Z”型，具有明显的捏缩和滑移效应，加固节点的滞回曲线呈反“S”型，滞回环更加饱满，加固节点的滞回环峰值承载力比未加固节点大，并且 SMA 丝根数越多，SMA 丝预拉应变越大，节点的承载力越高。

(2) 各节点的抗弯承载力均随节点转角的增大而增大，并未出现下降段，且逐渐趋于平缓。SMA 丝加固后节点的抗弯承载力均不同程度地提升，加固节点最大抗弯承载力是未加固节点的 1.49 倍；SMA 丝根数越多，且预拉应变越大，节点抗弯承载力的提升程度越大。同时 SMA 丝可以在节点转角较大时，仍能持续为节点提供抗弯承载力。

(3) 各节点的转动刚度均随节点转角的增大而减小，刚度退化速率逐渐减小，并趋于稳定，且加固节点的转动刚度均大于未加固节点，加固节点最大转动刚度是未加固节点的 2.24 倍。

(4) 随着节点转角的逐渐增大，未加固节点的耗能能力逐渐减小，而加固节点的耗能能力先增

大后减小，且 SMA 丝根数和预拉应变的大小对节点耗能能力影响不大。但在相同的转角下，随着 SMA 丝根数和预拉应变的增加，相对残余变形均减小，自复位能力增强。

(5) 提出了 SMA 丝加固直榫节点的抗弯承载力计算方法，计算值和试验值吻合良好，表明该方法可有效预测加固节点的抗弯承载力，为古建筑木结构的预防性加固保护设计提供参考。

参考文献：

- [1] 谢启芳, 薛建阳, 赵鸿铁. 汶川地震中古建筑的震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊 2): 18—23. Xie Qifang, Xue Jianyang, Zhao Hongtie. Seismic damage investigation and analysis of ancient buildings in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(Suppl 2): 18—23. (in Chinese)
- [2] 薛建阳, 许丹, 代武强. 穿斗式木结构通榫节点抗震性能研究及数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(11): 56—65. Xue Jianyang, Xu Dan, Dai Wuqiang. Experimental study and numerical simulation analysis on seismic performance of continuous tenon joint in column-and-tie timber structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(11): 56—65. (in Chinese)
- [3] Xue J Y, Guo R, Qi L J, et al. Experimental study on the seismic performance of traditional timber mortise-tenon joints with different looseness under low-cyclic reversed loading [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(6): 1312—1328.
- [4] 谢启芳, 杜彬, 张凤亮, 等. 古建筑木结构燕尾榫节点弯矩-转角关系理论分析[J]. 工程力学, 2014, 31(12): 140—146. Xie Qifang, Du Bin, Zhang Fengliang, et al. Theoretical analysis on moment-rotation relationship of dovetail joints for Chinese ancient timber structure buildings [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(12): 140—146. (in Chinese)
- [5] 谢启芳, 杜彬, 钱春宇, 等. 古建筑木结构燕尾榫节点弯

- 矩-转角模型研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(8): 39 — 44.
- Xie Qifang, Du Bin, Qian Chunyu, et al. Study on the moment-rotation model of the dovetail mortise-tenon joint of ancient timber buildings [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(8): 39 — 44. (in Chinese)
- [6] 潘毅, 王超, 唐丽娜, 等. 古建筑木结构直榫节点力学模型的研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(2): 82 — 89.
- Pan Yi, Wang Chao, Tang Lina, et al. Study on mechanical model of straight-tenon joints in ancient timber structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(2): 82 — 89. (in Chinese)
- [7] Nakagawa T, Ohta M. Collapsing process simulations of timber structures under dynamic loading III: Numerical simulations of real-size wooden houses [J]. *Journal of Wood Science*, 2010, 56(4): 284 — 292.
- [8] Li S C, Zhou Z C, Luo H Z, et al. Behavior of traditional Chinese mortise-tenon joints: Experimental and numerical insight for coupled vertical and reversed cyclic horizontal loads [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 30: 101257.
- [9] 周乾, 闫维明, 纪金豹. 3种材料加固古建筑木构架榫卯节点的抗震性能[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(4): 649 — 656.
- Zhou Qian, Yan Weiming, Ji Jinbao. Aseismic behaviors of tenon-mortise joints in wooden frame in Chinese ancient building strengthened by three materials [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(4): 649 — 656. (in Chinese)
- [10] 阿斯哈, 周长东, 杨礼赣, 等. 复合加固圆形短木柱轴心受压应力-应变关系[J]. *工程力学*, 2021, 38(2): 168 — 178.
- A Siha, Zhou Changdong, Yang Ligan, et al. Stress-strain relationship of short circular timber columns strengthened by a composite method in axial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(2): 168 — 178. (in Chinese)
- [11] 于业栓, 薛建阳, 赵鸿铁. 碳纤维布及扁钢加固古建筑榫卯节点抗震性能试验研究[J]. *世界地震工程*, 2008, 24(3): 112 — 117.
- Yu Yeshuan, Xue Jianyang, Zhao Hongtie. Experimental study on seismic behavior of mortise-tenon joints of Chinese ancient wooden building strengthened with CFRP sheets and flat steel [J]. *World Earthquake Engineering*, 2008, 24(3): 112 — 117. (in Chinese)
- [12] Xie Q F, Zhang L P, Miao Z, et al. Lateral behavior of traditional Chinese timber-frames strengthened with shape-memory alloy: Experiments and analytical model [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(6): 04020083.
- [13] Xie Q F, Zhang L P, Zhou W J, et al. Cyclical behavior of timber mortise-tenon joints strengthened with shape memory alloy: Experiments and moment-rotation model [J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2019, 13(8): 1209 — 1222.
- [14] 胡淑军, 顾琦, 姜国青, 等. 一种新型自复位SMA支撑的抗震性能试验研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(1): 109 — 118, 142.
- Hu Shujin, Gu Qi, Jiang Guoqing, et al. Experimental study on seismic performance for an innovative self-centering SMA brace [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(1): 109 — 118, 142. (in Chinese)
- [15] 李灿军, 周臻, 谢钦. 摩擦耗能型SMA杆自复位梁柱节点滞回性能分析[J]. *工程力学*, 2018, 35(4): 115 — 123.
- Li Canjun, Zhou Zhen, Xie Qin. Hysteretic performance analysis of self-centering beam-column connections with SMA bars and friction energy dissipator [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(4): 115 — 123. (in Chinese)
- [16] 李诚(宋). 营造法式 [M]. 上海: 商务印书馆, 1950.
- Li Jie (Song). *Ying Zao Fa Shi* [M]. Shanghai: The Commercial Press, 1950.
- [17] 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 Weidong, Deng Dali. 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)
- [18] Xue J Y, Ren G Q, Zhang J H, et al. Seismic performance of semi-tenon joints reinforced by steel angle in traditional timber buildings [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(11): 1 — 15.
- [19] Shaw J A, Churchill C B. A reduced-order thermomechanical model and analytical solution for uniaxial shape memory alloy wire actuators [J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(6): 065001.
- [20] Chang B C, Shaw J A, Iadicola M A. Thermodynamics of shape memory alloy wire: Modeling, experiments, and application [J]. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2006, 18: 83 — 118.
- [21] Kishi N, Chen W F. Moment-rotation relations of semirigid connections with angles [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(7): 1813 — 1834.