

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.01.036

CFRP 布加固榫卯节点 $M - \theta$ 滞回曲线定性分析

周 乾^{1,2}, 闫维明³

(1. 大同大学 历史与旅游文化学院, 山西 大同 037009; 2. 故宫博物院, 北京 100009;
3. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 为更好地保护古建筑, 采取拟静力加载方法, 定性研究了 CFRP 布 (Carbon Fibre Reinforced Plastic) 加固榫卯节点的抗震效果。以故宫太和殿某开间梁柱框架为原型, 制作了 1:8 缩尺模型。采取水平低周反复加载方式, 首先进行未加固节点抗震性能试验, 在此基础上采用 CFRP 布包裹各榫卯节点, 进行加固后节点对比试验。基于试验获得的节点 $M - \theta$ 滞回曲线, 对每一个滞回环曲线的承载力、刚度、延性、耗能等力学参数变化进行了详细对比论述, 定性评价了 CFRP 布加固榫卯节点的抗震效果, 并进行了量化分析验证。结果表明: 榫卯节点加固前具有较好的延性与耗能性能, 其主要抗震缺陷包括较低的承载力、较差的转动刚度; 与未加固节点相比, CFRP 布加固后的榫卯节点可弥补上述不足, 且加固后的节点仍具有较好的延性和耗能性能。

关键词: CFRP; 榫卯节点; 抗震加固; 滞回曲线; 定性分析

中图分类号: TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)01-0198-09

Qualitative Analysis of $M - \theta$ Hysteretic Curves of Tenon-Mortise Joints Strengthened by CFRP

ZHOU Qian^{1,2}, YAN Weiming³

(1. School of Culture of History and Tourism, Datong University, Datong, Shanxi 037009, China;

2. Palace Museum, Beijing 100009, China;

3. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to effectively protect Chinese ancient buildings, the aseismic behaviors of their tenon-mortise joints strengthened by CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic) were studied. Part of the timber structure of Tai-he Palace in the Forbidden City was taken as examples, its 1:8 scale model of timber frame with 4 beams, 4 columns and concrete roof were built. Low cyclic reversed loading tests were carried out. The initial timber structure were tested firstly. Then its tenon-mortise joints were wrapped by CFRP, the strengthened structure was tested to get the aseismic effects. The $M - \theta$ (moment-rotation) hysteretic curves of the tenon-mortise joints were obtained. For each hysteretic loop, qualitative analysis on parameters such as bearing capability, rigidity, ductility, energy dissipation and so on of the tenon-mortise joints were carried out to evaluate strengthening effects of CFRP. The quantitative analysis further verified the effects. Results show that compared to each unstrengthened tenon-mortise joint, the CFRP strengthened joint has better bearing performance as well as rotation rigidity, which still has good ductility and energy dissipation capabilities.

Keywords: CFRP material; tenon-mortise joint; aseismic strengthening; hysteretic curves; qualitative analysis

榫卯连接是我国古建筑木结构梁柱构件连接的主要方式。地震作用下, 位于梁端的榫头与位于柱顶的卯口会产生相对转动和摩擦, 并可耗散部分地震能量。然而, 榫头与卯口在相对运动过程中, 会产生拔榫问题(部分榫头从卯口拔出), 对结构整体稳

定性构成威胁^[1]。榫卯节点的力学性能与加固方法是古建筑抗震性能的重要组成部分, 部分学者亦开展了相关研究, 近年来的主要成果主要侧重于榫卯节点的数值模拟、残损现状调查及节点本身抗震性能研究。如周乾等^[2]采用数值模拟方法, 建立了考

考虑嵌固墙体的太和殿榫卯构架模型,研究了嵌固墙体对古建筑抗震性能的影响。其中,榫卯节点采用六自由度弹簧单元进行模拟,通过输入刚度参数模拟榫卯节点的动力性能。该模拟方法形成的分析结果与古建筑震害实际情况接近。周乾等^[3-4]采取调查分析方法,讨论了故宫古建筑梁、柱构件的主要残损问题,认为其残损主要原因之一为梁与柱的榫卯连接方式,使得榫卯节点位置的截面尺寸相对于其它部位薄弱,因而在外力作用下容易产生开裂、变形等问题。张雷等^[5]采用弹性力学的半逆解法,基于均步荷载作用下的简支木梁、铰接木梁、固接木梁的解析解,并引入了考虑榫卯半刚性连接的两个刚度参数,获得了榫卯连接木梁的应力分布的多项式解答。文自刚等^[6]依据能量耗散原理,推导了燕尾榫节点的等效阻尼系数,并利用该系数分析了榫卯连接木结构框架的抗震性能,得出了罕遇地震作用下榫卯连接特征可减小结构整体位移的结论。Wang H D 等^[7]采取振动台试验方法,对比研究了考虑榫卯连接的中国传统穿斗式古建筑与现代木结构的抗震性能,建立了二者 1:2 缩尺比例模型,基于试验结果,认为前者在减小结构整体加速度响应方面更优。Yue Z^[8]采用低周反复加载试验方法,研究了中国南方典型榫卯节点抗震性能,获得了燕尾榫、十字榫、半榫、馒头榫等榫卯节点的力-变形滞回曲线、刚度特性、恢复力模型等力学参数。上述研究成果对于充分了解古建筑榫卯节点的力学性能具有推动作用,但关于榫卯节点加固方法的相关研究较少。

CFRP(Carbon Fibre Reinforced Plastic)即碳纤维增强复合材料,具有质量轻、耐疲劳强度高、高比强度和高比模量等优点^[9-10],可用于古建筑榫卯节点加固。通过低周反复加载试验获得的弯矩-转角($M-\theta$)滞回曲线,是评价榫卯节点抗震加固的重要指标。其主要原因在于,弯矩-转角($M-\theta$)滞回曲线可反映榫卯节点的多个抗震参数,如曲线的峰值可反映节点承载力,曲线的斜率可反映节点的延性,滞回环的形状可反映节点的耗能能力等^[11]。不同于已有成果中对节点滞回曲线采取量化分析的研究方法^[12-14],本文主要从定性分析角度来研究 CFRP 材料加固榫卯节点的抗震效果。即采取低周反复加载试验手段,获得 CFRP 材料加固榫卯节点的 $M-\theta$ 滞回曲线,并对加载试验过程中的每一滞回环进行定性分析,试图从曲线的形状、曲率、峰值等相关内容的变化来评价加载过程中,榫卯节点抗震参数值波动情况,进而为量化评价 CFRP 加固榫卯节点的

抗震效果提供依据,以利于古建筑保护工程实践应用。

1 试验概况

试验模型及加载方案的基本情况如下^[12-13]:参考故宫太和殿某开间的实际尺寸及《清式营造则例》相关规定,以故宫大修所用红松为梁柱材料制作空间框架模型,该模型包含 4 根梁、4 根柱,梁柱采用燕尾榫形式连接,模型比例为 1:8,顶板用混凝土板模拟,浮放于柱顶,柱础则采用单向铰形式。考虑采用碳纤维布(Carbon Fibre Reinforced Plastic, CFRP)加固各个榫卯节点。基于已有的 CFRP 材料加固平面榫卯框架研究成果^[12],进行该材料加固榫卯结构空间框架的抗震性能研究,所选 CFRP 材料的类型、尺寸及层数亦参考上述成果进行确定。本试验选取的 CFRP 布材料为 CFS-II-200 型号,厚 0.11 mm,涂刷所用配套的碳纤维胶型号为 CFSR-A/B。CFRP 布粘贴榫卯节点的具体方式为:(1) 用 80 mm 宽的 CFRP 布水平向包裹节点,内外侧均包裹,并超出柱外皮 250 mm;(2) 用 3 块 50 mm 宽度的 CFRP 布竖向包裹梁端部,以提高加固效果,各 CFRP 布间距为 50 mm。试验模型及 CFRP 布加固尺寸见图 1、图 2,单位为 mm。

本试验的主要测定参数包括榫卯节点的转角和节点弯矩。其中,节点转角采用位移计(量程为 ± 100 mm)测定,即在节点上、下布置位移计,节点转动时,上下位移计的读数差及两位移计的竖向距离可获得节点转角。节点弯矩通过在节点附近布置应变片测定。由于加载所需荷载较小,因而试验采用手动加载方式,各级位移控制值分别为 0、 ± 30 mm(0.02 rad)、 ± 60 mm(0.04 rad)、 ± 90 mm(0.06 rad)、 ± 120 mm(0.08 rad)、 ± 150 mm(0.10 rad)。试验时,每级位移荷载循环一次。试验一共进行了 5 组,含 3 组未加固试件和 2 组 CFRP 布加固试件。节点加固前后的试验现象见表 1,试验图见图 3。

表 1 试验现象

加固料	试验现象
加固前	(1) 节点拔榫;(2) 节点部位传来吱声;(3) 加载所需外力逐渐增加。
加固后	(1) 构架在侧移过程中,不仅有吱声,而且有劈裂声,劈裂声则为 CFRP 脱胶及破坏声音;(2) 加载过程中明显感觉使用外力增加,且当构架侧移增大时,由于 CFRP 对节点变形的约束作用,使构架产生与加固前相同的位移时,所需的外力急剧增加,甚至在控制位移处,由于 CFRP 的加固影响,人工加载已经有一定的困难;(3) 节点拔榫量明显减小。

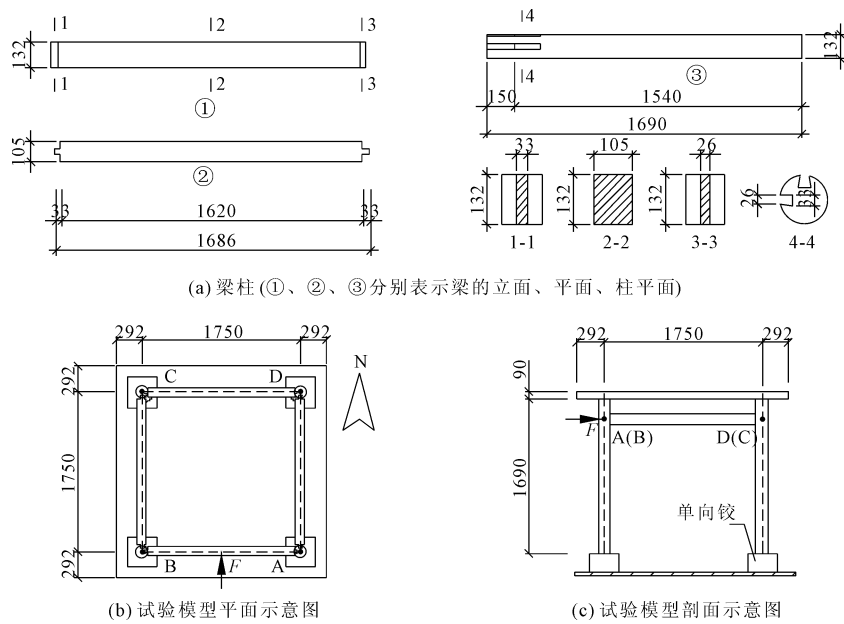


图 1 试验模型

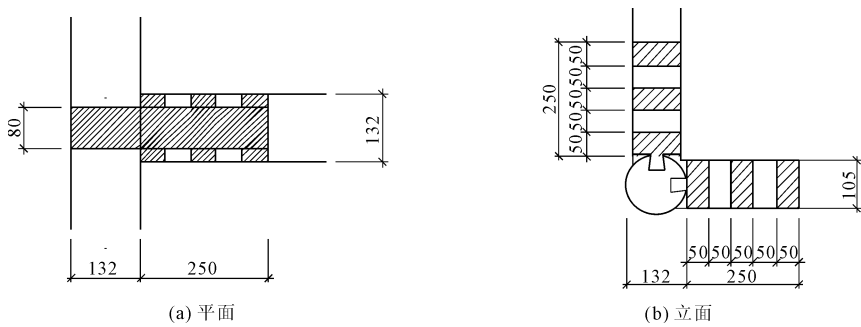


图 2 CFRP 加固尺寸(单位:mm)



图 3 试验图

2 加固前 $M-\theta$ 滞回曲线分析

首先对未加固模型开展低周反复加载试验,见

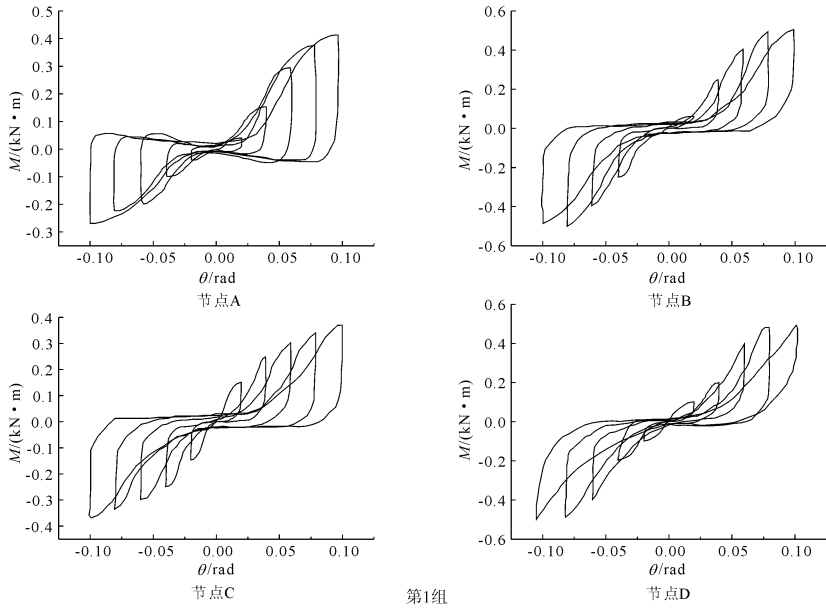


图 4 未加固榫卯节点 $M-\theta$ 曲线

下面以第 1 组构架的节点 A 为例,对滞回曲线特征进行说明,由于受推和受拉过程曲线特性相似,故以受推并回到平衡位置过程为例进行分析。

第 1 圈,构架被推拉 30 mm,节点转角为 ± 0.02 rad(位移:正为推,负为拉),曲线形状为反映节点较强转动特征的反“S”形。构架被推初始,曲线与 x 轴重合,该过程是榫和卯由初始状态开始咬合过程;随着节点转角增大,榫卯挤紧并开始相对转动,榫和卯之间的摩擦和挤压对转动中心产生力矩,所需外力也增大,曲线斜率增大;在控制位移附近,曲线斜率减小,外力增长缓慢,节点刚度也保持稳定状态;到达控制位移后,构架开始卸载,卸载初期曲线几乎与竖轴平行,反映了节点自身恢复力较差,相应的残余变形也很大的特征;随后外力反向变为拉力,节点变形逐渐恢复;拉力先增加随后保持稳定,反映了节点转角较大时所需的拉力较大,而随着转角减小,节点产生的抵抗弯矩减小,因而所需外力增长减慢。另滞回环左右两侧不对称,且右侧峰值要大于左侧,反映了节点受推时产生的抵抗弯矩更大。

第 2 圈,构架被推拉 60 mm,节点转角为 ± 0.04 rad。从曲线形状看,曲线为反“S”形,但中间段明显趋向平缓,反映榫卯节点间空隙开始增大,节点表现出部分滑移特性。随着节点转角的进一步恢复,拉力逐渐减小,这说明节点转角减小,节点刚度降低,

图 3(a)。试验共进行了 3 次,每次为 1 组,获得了未加固 3 组模型的节点 $M-\theta$ 滞回曲线,见图 4(仅为第 1 组,其余略)。其中,节点 A、B、C、D 的位置见图 1。

而构架自身恢复力相对增大,因此越接近平衡位置,节点变形恢复越快,所需外力也越小。另由曲线可知,节点在受推时产生的抵抗弯矩更大。

第 3 圈,构架被推拉 90 mm,节点转角为 ± 0.06 rad。曲线形状具有明显的“Z”形特征,且在平衡位置捏拢现象明显,反映了节点在构架推拉过程中有拔榫现象。

第 4 圈,构架被推拉 120 mm,节点转角为 ± 0.08 rad。曲线形状为 Z 形,反映榫卯节点在地震作用下,其转动耗能同时,拔榫量趋于明显,榫头与卯口之间亦出现较为明显的相对滑移。另滞回环形状左右两侧不对称,节点在受推过程转动刚度更大,曲线面积相对更饱满。

第 5 圈,构架被推拉 150 mm,节点转角约 ± 0.1 rad。从形状看,构架滞回曲线仍表现为榫卯相对滑移性能较强的 Z 形,反映构架侧移较大时,榫卯节点相对转动幅度变大,榫头与卯口之间产生充分相对摩擦滑移。构架被推过程中,在 $(0 \sim 0.03 \text{ rad})$ 阶段曲线为几乎与 x 轴平行的直线,反映该阶段榫卯由完全松弛到挤紧的过程,且与前几圈相比,节点滑移的距离更长,该阶段节点的抗弯刚度很小;在 $(0.045 \text{ rad} \sim 0.080 \text{ rad})$ 阶段,曲线变陡,斜率增大,反映了随着节点转角增大,所需荷载逐渐增加的过程;另一方面榫卯转动角度增大产生抵抗弯矩,节点刚度也

不断增加;在(0.08 rad ~ 0.10 rad)阶段,曲线变缓,虽然节点转角不断增大,但是由于榫卯节点转动的同时产生拔榫,榫卯间的咬合受到影响,表现为在节点转角较大处节点的刚度增加缓慢甚至保持不变;到达控制位移后,构架进入卸载阶段,由于榫卯节点自身恢复力较差,因而在(0.100 rad ~ 0.092 rad)阶段,节点滞回曲线较为陡峭,节点产生 0.092 rad 的塑性变形;构架变形恢复过程中,荷载逐渐反向,由

推力变为拉力,并逐渐降至最小(0)。该过程反映了节点转角较大时由于抵抗弯矩较大,因此需要的外力较大。当榫卯节点的相对转角减小时,其榫头、卯口之间的咬合作用减弱,节点自身恢复力相对增加,所需外力也不断减小,节点变形恢复越来越迅速,使得曲线具有明显捏拢特性。

节点 A 在各圈的加载循环中的滞回曲线形状见图 5。

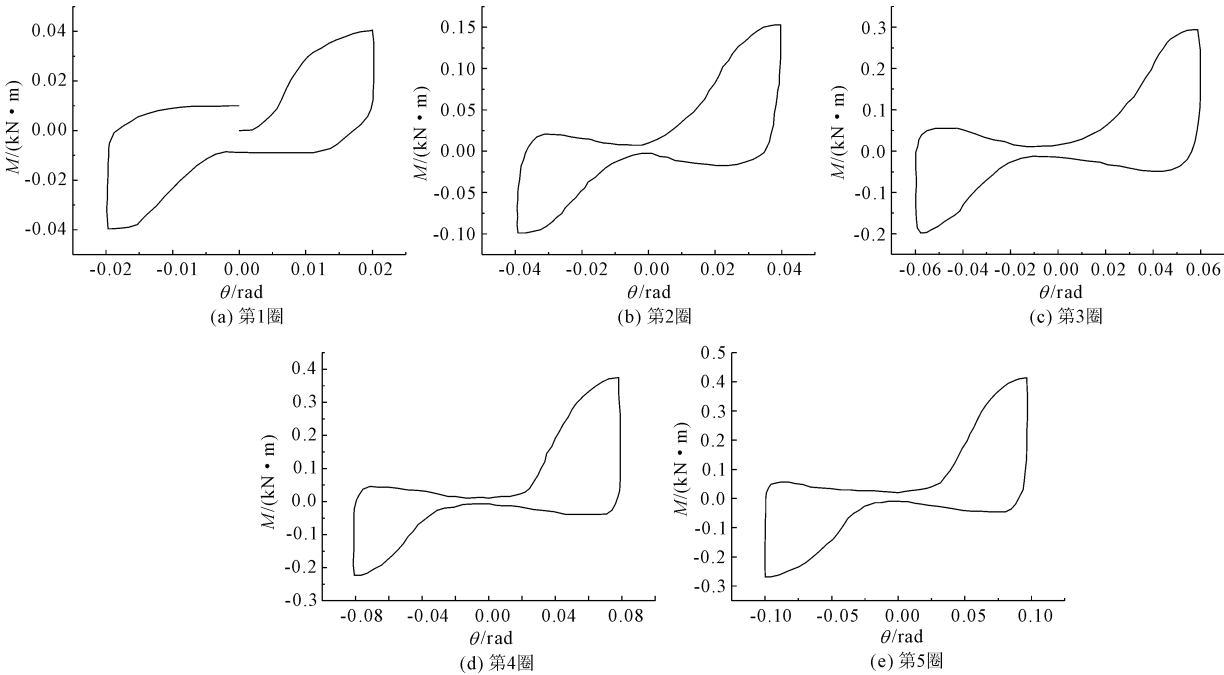


图 5 未加固节点 A 各圈 $M - \theta$ 滞回曲线

3 加固后 $M - \theta$ 滞回曲线分析

在未加固构架试验结束后,对各榫卯节点进行 CFRP 布加固,并进行了 2 次低周反复加载试验,获得 2 组 CFRP 布加固节点后的力 - 变形曲线。CFRP 布加固榫卯节点后,2 组构架节点的 $M - \theta$ 滞回曲线见图 6(仅列举第 1 组)。

为便于对比研究,下面仍以第 1 组构架的节点 A 为例,探讨 CFRP 布加固榫卯节点后,节点的力 - 变形滞回曲线特征。

第 1 圈,构架被推拉 30 mm,节点转角为 ± 0.02 rad(位移:正为推,负为拉),曲线形状为反“S”形,可反映加固后的节点表现出较为明显的转动特征。构架被推加载时曲线较陡,说明节点刚度较大;由于榫卯尚处松弛阶段,故承载力由 CFRP 布提供;随着节点正向转角增大,榫卯挤紧并开始相对转动,榫和卯之间的摩擦和挤压对转动中心产生力矩,与 CFRP 布一并提供承载力,所需外力也增大;到控制位移

后,荷载反向,曲线较平缓,反映了榫卯节点开始反向转动时榫和卯之间的相对滑移过程,且 CFRP 布的约束作用下节点仍能提供承载力;随着节点反向转角增大,所需外力增大,由于节点产生拔榫,因此 CFRP 布参与受力程度增大;受拉过程曲线平缓,这是因为榫卯转角幅度尚小缘故;构架由被拉至位移限制卸载时,由于 CFRP 布的参与受力,卸载曲线相对平缓;另一方面,由于节点产生塑性变形,卸载后构架变形仍不能恢复,外力反向变为部分推力后才使节点变形恢复。另滞回环左右两侧不对称,且右侧峰值要大于左侧,反映了 CFRP 布在对该节点受推时的加固效果更明显。

第 2 圈,构架被推拉 60 mm,节点转角为 ± 0.04 rad。从曲线形状看,曲线为反“S”形,但中间段明显趋向平缓,可反映加固后的节点亦表现出榫头与卯口之间的相对滑移。另滞回环左右两侧仍不对称,右侧峰值明显大于左侧,反映了 CFRP 布在构架受推过程中的加固效果更为明显。

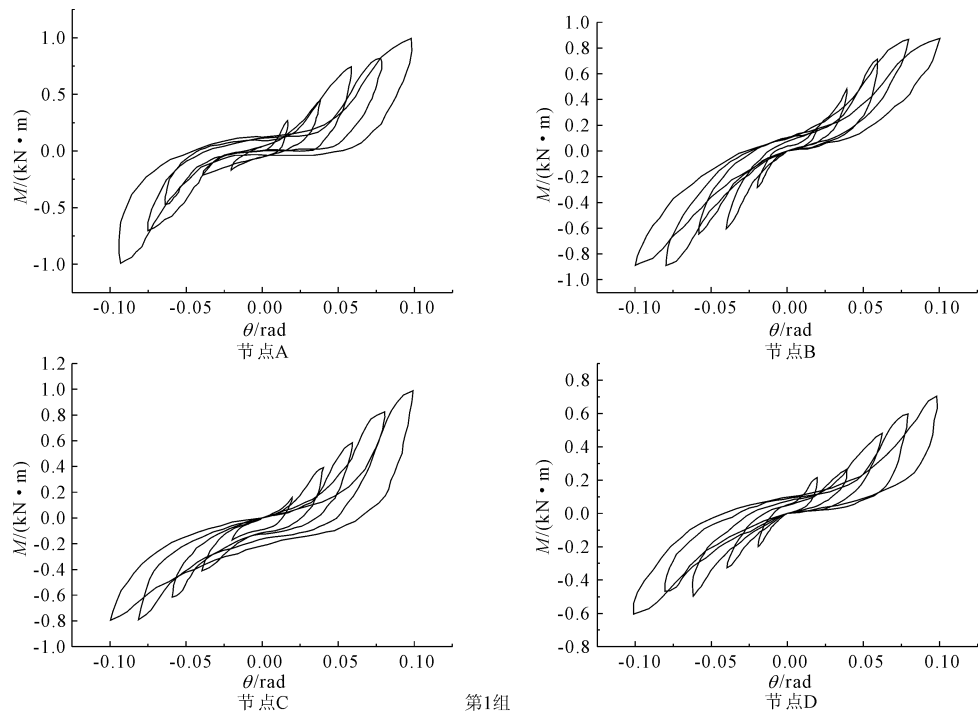


图 6 CFRP 布加固节点 M-θ 曲线

第 3 圈,构架被推拉 90 mm,节点转角为 ±0.06 rad。曲线形状具有明显的“Z”形特征,可反映榫卯节点加固后,尽管有 CFRP 布的包裹,但在节点转动过程中,由于构架位移增大,榫头与卯口之间的相对滑移开始变得明显,有利于节点发挥摩擦耗能功能。另滞回环右侧较左侧粗厚且峰值较大,反映了这个加载循环过程中 CFRP 布在构架被推阶段对提高节点刚度更为有效。

第 4 圈,构架被推拉 120 mm,节点转角为 ±0.08 rad。曲线形状为“Z”形,可反映构架增大,加固后的节点转动能力增强,榫头与卯口之间相对滑移逐渐明显。另滞回环形状左右两侧基本对称,反映了 CFRP 布加固构架在受推与受拉阶段表现基本相同。

第 5 圈,构架被推拉 150 mm,节点转角约 ±0.1 rad。从形状看,构架滞回曲线仍表现为榫卯相对滑移性能较强的“Z”形,可反映 CFRP 布加固榫卯节点后,榫卯节点的转动能力及榫头、卯口之间的摩擦耗能能力仍然表现明显。另滞回环左右两侧基本对称,反映了构架侧移较大时 CFRP 布加固节点后对构架受推和受拉阶段的贡献基本相同。

加固后的节点 A 在各圈的加载循环中的滞回曲线见图 7。

4 讨 论

4.1 滞回曲线对比分析

对于未加固构架而言,节点在转动过程中的曲

线特性共有三个方面。其一,滞回曲线形状的变化,即开始为反“S”形,而当节点转角增大时,逐渐向“Z”形过渡。该特征表明燕尾榫节点在受力过程中,榫头与卯口之间产生了较为明显的滑移;同时,随着燕尾榫节点转角增大,其相对滑移的值趋于增大。其二,耗能能力的变化,即节点在加载—卸载循环过程中,随着榫头与卯口夹角的变化,节点的耗能能力相应产生变化。如在节点转角较小时,曲线非常平缓,这表明节点在该过程中是由松弛状态挤紧发展的,此时节点的耗能能力较弱。随着燕尾榫转角增大,榫头与卯口之间的夹角增大,这时候榫头开始向外拔出,在拔出过程中榫头与卯口之间产生了较为明显的摩擦挤压,滞回曲线的形状则表现为外鼓,可反映榫卯节点的耗能能力增强。其三,节点变形的恢复变化,即从加载结束后节点恢复到初始位置的情况。试验显示,构架达到控制位移时,榫卯节点的变形并不能完全恢复,此时必须反向加载才能实现使其恢复到初始位置。该现象说明本试验的榫卯节点的恢复能力比较差。

对于 CFRP 布加固构架而言,本研究的榫卯节点在受力过程中,其力 - 变形滞回曲线的特点包括四个方面。其一,节点滞回曲线的形状与未加固构架类似。即在加载过程中,CFRP 加固后的榫卯节点仍有较好的延性,榫头与卯口之间的相对转动能力仍然较好,榫卯节点抗震性能能够得以正常发挥。

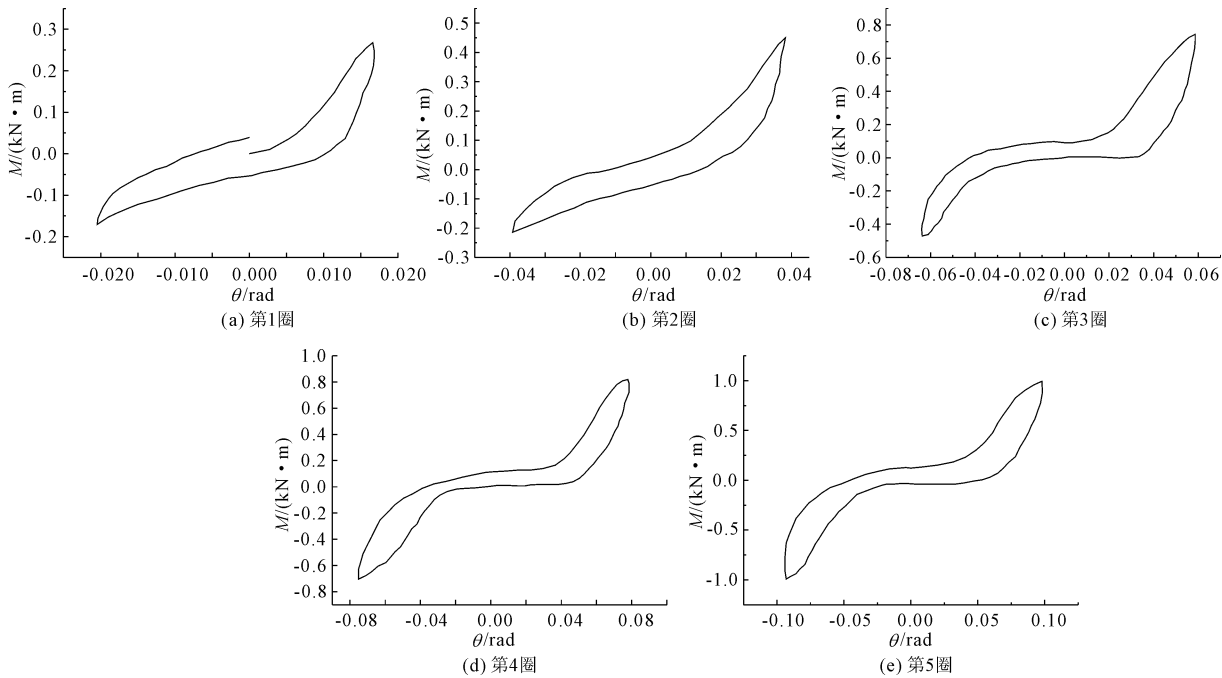


图 7 CFRP 加固节点 A 各圈滞回曲线

然而,由于 CFRP 布材料本身没有刚度,这使得该材料对节点转动的约束能力不明显,具体表现为榫头与卯口之间相对滑移不明显,且加固后的刚度增幅较少。其二,从加固后节点的力 - 变形滞回曲线来看,曲线峰值相对加固前明显增大,曲线在位移峰值附近的坡度较为平缓,可反映 CFRP 加固榫卯节点后,节点的承载力提高,构架的恢复力增强。其三,就单个滞回环而言,其滞回环面积形状基本为条形,说明 CFRP 布的加固效果在耗能能力的提高方面不明显,其主要原因与 CFRP 布对榫卯节点转动约束能力密切相关。另外,当构架侧移较小时,滞回环表现为左侧比右侧更饱满且峰值更大,说明 CFRP 布加固榫卯节点在构架受推过程表现明显;而当构架侧移增大时,滞回环左右两侧基本对称,说明 CFRP 布加固节点在受推和受拉的过程表现基本相同。其四,构架开始受力时,加固后的节点承载力(转动弯矩)主要由 CFRP 布提供,此时榫头与卯口之间几乎没有明显转动。随着位移荷载增大,榫卯节点的转动能力增强,榫头与卯口之间逐渐挤压、摩擦,节点的弯矩开始由榫卯节点与 CFRP 共同承担。荷载进一步增大,构架产生较大侧移,榫头和卯口之间产生较为明显转角,榫头开始产生拔榫,此时 CFRP 布对节点的约束力增加,节点转动弯矩主要由 CFRP 提供。从加固节点整体来看,加固后的节点转动刚度相对加固前有一定程度提高。

另外,CFRP 布加固榫卯节点前后,各节点的力

- 变形滞回曲线表现的并不对称,其主要原因包括四个方面。其一,试验模型在制作、安装时,各梁、柱节点的尺寸存在一定误差;其二,木材材料具有各向异性的特征,这使得榫卯节点在受力破坏时,其破坏形式可能存在多种形式;其三,试验前,在模型上布置应变片(测定节点弯矩用)的位置完全相同,测定结果会产生一定误差;其四,外力作用下,榫头与卯口产生相对摩擦运动时,其摩擦效应不一定完全相同。

4.2 量化分析验证

为验证上述定性分析的可靠性。对图 4、图 6 中的 $M - \theta$ 滞回曲线进行处理,获得各滞回曲线的均值骨架曲线,见图 8,易知:

(1) 节点承载力及转动刚度明显提高。

(2) 对于 CFRP 布加固节点而言,在榫卯节点的转角较小(0.01 rad 左右)时,由于构架位移较小,榫头与卯口之间并未明显咬合,故节点此时的承载力主要由 CFRP 提供,反映了 CFRP 布加固榫卯节点对提高其初始刚度的有利影响,此时的荷载约为最大值的 12%;而当节点转角增大明显(此时的转角约为 0.057 rad),榫卯节点的力 - 变形滞回曲线产生明显出现转折,该特征可反映榫卯节点已进入了受力屈服阶段,此时滞回曲线对应的荷载约为峰值荷载的 65%;而当榫卯节点的相对转角进一步增大(约 0.1 rad),此时的力 - 变形滞回曲线开始出现下降,该特征可反映榫卯节点已接近极限承载受力状

态。

(3) 各榫卯节点的力 - 变形骨架曲线比较平缓。该特征可反映 CFRP 布加固的榫卯节点仍具有较好的延性性能(变形能力)。

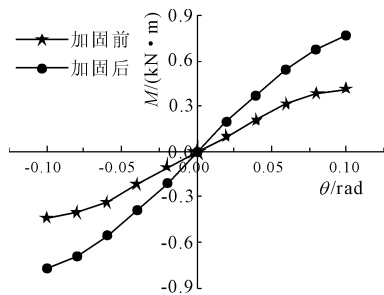


图 8 各节点的力 - 变形骨架曲线

为获得各榫卯节点的具体变形能力,可参考已有研究成果^[15],采用节点榫头上端(下端)拔出(挤压)尺寸、榫头原有长度之间的关系来表示:

$$\beta_L = (\delta_T + \delta_L)/L_S \quad (1)$$

式中: β_L 为榫卯节点的变形能力; δ_T 为拔榫长度; δ_L 为榫头挤压长度; L_S 为榫头原有长度。在榫卯节点承载力不产生明显下降的前提下,式(1)中的 β_L 值较大,则反映榫卯节点具有良好的变形能力。

基于对试验数据处理,可得加固前榫卯节点的相对变形值介于 0.437 ~ 0.615 之间,均值为 0.505; CFRP 布加固榫卯节点后,榫卯节点的相对变形值介于 0.470 ~ 0.554 之间,均值为 0.511,与节点加固前的均值相近。另外,与混凝土节点延性值相比,榫卯节点的延性值要明显大,可反映节点(无论加固与否)都具有很好的变形能力,亦即 CFRP 布加固榫卯节点后,榫头与卯口之间仍可有较好的相对转动能力。

为获得榫卯节点在加固前后的耗能能力,可采用参数 h_e (另采用等效黏滞阻尼系数)按式(2)确定^[5]:

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABC}}{S_{\triangle OBD}} \quad (2)$$

式中: S_{ABC} 为图 9 中 ABC 的面积; $S_{\triangle OBD}$ 为三角形 OBD 的面积。

根据对 CFRP 布加固榫卯节点滞回曲线的分析结果,CFRP 布加固榫卯节点后的节点弯矩 - 转角滞回曲线为“S”形过渡到“Z”形,反映了节点耗能能力表现并不明显。构架在受推拉过程中的各榫卯节点 h_e 均值曲线见图 10。

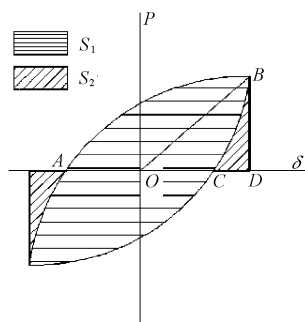


图 9 h_e 确定方法

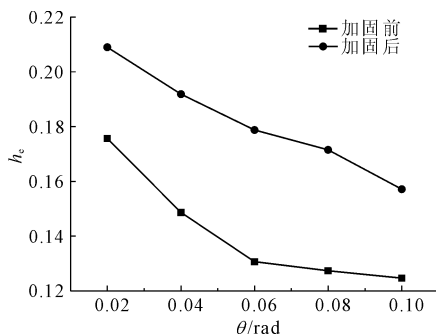


图 10 h_e 曲线

由图 10 易知:

(1) CFRP 布加固榫卯节点后,节点耗能能力相对加固前有所提高。

(2) 节点转角增大, h_e 逐渐减小,即节点耗能能力降低,此时榫卯节点 $M-\theta$ 滞回曲线的捏拢程度越来越明显,榫卯间的相对滑移距离增大; CFRP 布加固节点后的等效黏滞阻尼系数均值在构架转角位 0.02 rad 时为 0.21 左右,到构架转角为 0.10 rad 时降为 0.16 左右。

由以上分析可知,CFRP 布加固榫卯节点后,可有效提高节点承载力和刚度,加固后的节点仍有较好的延性与耗能性能,且量化分析结果与定性分析结果基本一致。

5 结 论

基于对 CFRP 布加固榫卯节点前后的 $M-\theta$ 滞回曲线的定性分析,本文得出以下结论:

(1) 榫卯节点加固前具有较好的延性与耗能性能,但承载力及转动刚度较差。

(2) CFRP 布加固榫卯节点后,可有效提高节点承载力及转动刚度,且加固后的节点仍具有较好的延性和耗能性能。

(3) 定性分析结果与量化结果基本吻合。

参考文献:

- [1] 周 乾, 闫维明, 杨小森, 等. 汶川地震古建筑震害研究[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(3): 48-55.
- [2] 周 乾, 闫维明, 关宏志, 等. 古建嵌固墙体对木构架抗震性能的影响分析——以太和殿为例[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(1): 81-86.
- [3] 周 乾. 故宫古建木柱典型残损问题分析及建议[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(6): 107-112.
- [4] 周 乾, 杨 娜, 杨 堃. 故宫古建木梁典型残损问题分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 7-13.
- [5] 张 雷, 杨 娜. 均布荷载作用下榫卯连接木梁的解析解[J]. 工程力学, 2017, 34(7): 51-60.
- [6] 文自刚, 胡卫兵, 乔冠东, 等. 木结构节点摩擦耗能及抗震研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(1): 278-283.
- [7] Wang H D, Scanlon A, Shang S P, et al. Comparison of seismic experiments of Chinese traditional wood structures and light wood framed structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(11): 2038-2043.
- [8] Yue Z. Study of traditional Chinese wood structure joints with an experiment considering regional differences[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2014, 8(2): 224-246.
- [9] Taheri F, Nagaraj M, Cheraghi N. FRP reinforced glue laminated column[J]. FRP International, 2005, 2(3): 10-12.
- [10] Borri A, Corradi M, Grazini A. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials[J]. Composites: Part B, 2005, 36: 143-153.
- [11] 吴 轶, 何铭基, 郑俊光. 耗能腋撑对钢筋混凝土框架抗震加固性能分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2009, 34(6): 725-730.
- [12] 谢启芳, 赵鸿铁, 薛建阳. 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.
- [13] 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.
- [14] Zhou Q, Yan W M. Experimental study on aseismic behaviors of Chinese ancient tenon-mortise joint strengthened by CFRP[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2011, 27(2): 192-195.
- [15] 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.
- [16] 张程林, 彭炎华. 深基坑桩锚支护数值模拟及参数分析[J]. 施工技术, 2008, 37(S2): 321-324.
- [17] 陈 娟. 基坑桩锚支护体系现场试验与数值模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [18] 冯 勇, 李 平, 姜春艳. FLAC3D 在深基坑工程开挖中的数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(4): 17-20.
- [19] 郝 兵. 临近地铁隧道的基坑支护变形控制[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [20] 李佳宇. FLAC3D 快速入门及简单实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [21] 程 建. 成灌快铁深基坑变形规律监测及其支护结构优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [22] 梁 韵. 暗挖地铁站设置原则与施工工法选取研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [23] 王 涛. FALC3D 数值模拟方法及工程应用——深入剖析 FALC3D5.0[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [24] 黄志全, 张瑞旗, 王安明. 基于 FLAC~(3D) 的桩锚支护结构变形分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(2): 68-72.
- [25] 王安明, 张淋柄. 基坑桩锚支护变形监测与数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(6): 25-29.
- [26] 李育枢, 谭建忠. 桩锚支护体系在成都深基坑工程中的应用[J]. 铁道建筑, 2011(5): 77-80.
- [27] 闫文鹏. 深基坑开挖变形与控制技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- [28] 郑荣跃, 曹茜茜, 刘干斌, 等. 深基坑变形控制研究进展及在宁波地区的实践[J]. 工程力学, 2011, 28(S2): 38-53.
- [29] 赵笑男. 深基坑开挖对邻近既有地铁隧道影响规律研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [30] 徐龙帅, 倪万魁, 刘 魁, 等. 高压旋喷锚杆在黄土深基坑支护中的模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(5): 134-139.

(上接第 197 页)