

扁钢加固古建筑木结构残损节点的性能分析与设计方法

薛建阳¹, 翟磊¹, 张凤亮², 李义柱¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省建筑科学研究院, 陕西 西安 710082)

摘要: 基于扁钢加固残损榫卯节点的加固方式及破坏形态, 对扁钢加固残损节点的受力性能进行分析. 根据课题组进行的残损节点加固试验, 提出扁钢加固古建筑木结构残损节点的抗弯承载力计算公式, 给出合理的加固设计建议, 为古建筑木结构的修缮加固提供理论依据.

关键词: 古建筑木结构; 残损节点; 破坏形态; 抗弯承载力; 设计建议

中图分类号: TU366.12

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)05-0621-05

Performance analysis and design recommendations for damaged mortise-tenon joints of ancient timber structure strengthened with flat steel

XUE Jianyang¹, ZHAI Lei¹, ZHANG Fengliang², LI Yizhu¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Institute of Architecture Science, Xi'an 710082, China)

Abstract: Based on the strengthening method, failure mode and test results of damaged mortise-tenon joints of ancient timber structure strengthened with flat steel, analysis on the mechanical property of the damaged mortise-tenon joints strengthened with flat steel is carried out, and the calculation formulas for flexural capacity are put forward. Also, the reasonable reinforcement design recommendations are given, which would provide theoretical basis for the repairs of the ancient timber structures.

Key words: ancient timber structure; damaged mortise-tenon joints; failure mode; flexural bearing capacity; design recommendations

对于建筑结构来讲, 节点的重要性是毋庸置疑的, 一方面节点是连接柱、梁等承重构件的枢纽、起着传递和分配外部荷载的重要作用, 另一方面节点是协调各构件间变形并保证结构整体性能得到充分发挥的建筑结构的重要组成部分^[1]. 节点破坏常导致建筑物产生较大变形甚至发生结构整体倒塌. 因此, 确保节点功能的正常发挥对于建筑结构具有重要的意义. 中国木结构古建筑作为已经存在了千百余载的文物建筑, 在历史长河中经历了震灾、风灾等自然灾害以及战争、人为破坏等因素, 结构产生了不同程度的破损, 而节点尤为严重. 这是由于节点在强烈地震作用下, 卯口在榫头反复拔出和挤压作用下逐渐变宽甚至劈裂, 由此导致节点松动, 承载力下降; 同时, 随着使用年限的增加, 木材本身的天然缺陷(如裂纹、斜纹等)逐渐发展及老化、腐朽、虫蛀等自然病变导致木材物理性能不断劣化, 使得结构榫卯节点处于松动状态, 由此导致节点刚度减小、承载力下降、容易拔榫等严重残损行为,

当节点破损到一定程度时, 其力学性能难以满足规范的各项性能指标. 鉴于此, 对残损节点进行加固十分必要^[2].

目前, 建筑领域加固材料层出不穷, 如碳纤维布、钢绞线网片、芳纶纤维、扁钢等. 其中扁钢以其体积小、延性好、强度高的优点正逐渐推广到古建筑木结构加固领域. 当前将扁钢应用到古建筑木结构残损节点的研究在国内尚属于起步阶段, 多是以试验研究为主^[3-5], 缺乏相应的加固设计理论, 1993 年颁布的《古建筑木结构维护与加固技术规范》(GB 50165-1992)^[6]亦未对残损节点加固修复设计提出相应的理论计算方法, 古建筑木结构残损节点面临着加固设计理论方法严重滞后于实际工程应用的窘境^[7], 因此对古建筑木结构残损节点的相应加固设计理论的研究成为文物建筑亟待解决的问题. 鉴于此, 本文基于扁钢加固木结构残损节点试验所获得的节点受力破坏机理及相应力学行为, 导出扁钢加固木结构残损节点的抗弯承载力计算

收稿日期: 2014-07-10 修改稿日期: 2015-10-12

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划基金资助项目(2013BAK01B03-02); 陕西省科学技术研究发展计划基金资助项目(2013KW23-01)

作者简介: 薛建阳(1970-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事古建筑结构保护及组合结构研究. E-mail: jianyang_xue@163.com



图6 扁钢加固拟静力试验中螺钉拔出

Fig.6 Pullout of pedicle screw

抗剪强度,同时,应保证扁钢与额枋具有可靠的连接。综上,采用U型扁钢对残损节点进行加固既能保证残损节点承载力,又能提高节点延性。因此,本文重点对U型扁钢加固残损榫卯节点的计算及加固设计进行分析研究。

2 扁钢加固残损节点抗弯承载力计算

2.1 扁钢加固残损节点区承载力极限状态

当加固节点(假定是左节点)受到外界荷载作用(假定水平力向左)下,如图7所示,在荷载作用平面内,其受力过程分析与碳纤维布加固结构相类似,不同的是扁钢既是抗拉构件亦是受压元件,且在承受荷载之前,扁钢加固残损节点的初始刚度相对较大;其次,加固用扁钢材料与木材的承载能力极限状态并非相同,一般钢材的弹性模量远比木材高(如对红松新材而言,木材弹性模量约为钢材弹性模量的1/20,对于残损木材,两者相差更大),受压区木材与扁钢在保持变形协调时,木材应力要远远小于扁钢应力。此外,对于红松新材而言,其抗压强度约为扁钢(Q345钢材)的1/14,基于变形协调原理可知,采用扁钢加固残损榫卯节点的受压区扁钢承担的压力要远远大于木材。由此可假定:受压区压力全部由扁钢承担。同时,如图1所示,扁钢在残损节点处为对称布置,故受拉区和受压区扁钢的受力基本相同,均随着施加荷载的增大而增大,致使扁钢由弹性状态进入弹塑性状态,最终导致扁钢全截面屈服。

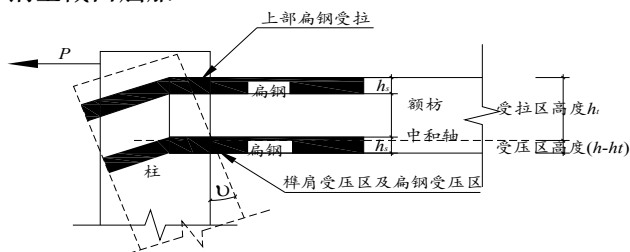


图7 扁钢加固残损节点单侧受力图示

Fig.7 The node stress analysis diagram

2.2 计算基本假定

为简化扁钢加固残损榫卯节点的计算,作以下

基本假定:

(1) 加固用扁钢截面平均拉应变在节点达到极限抗弯承载力时依然保持平面,符合平截面假定,但不能超过钢材的极限拉应变;

(2) 扁钢本构模型选用理想弹塑性本构模型;

(3) 扁钢由于受到密排均布螺钉的作用,受压区扁钢在达到极限承载力时不会发生屈曲失稳,受拉区扁钢均匀受拉;

(4) 对于残损程度较为严重的节点,不考虑其抗弯承载力,而只计及其抗剪和支撑作用。

2.3 扁钢加固残损榫卯节点抗弯承载力计算方法

基于扁钢加固木结构残损榫卯节点在不同外荷载作用下的受力分析及为方便工程修缮加固设计应用,同时结合现存古建筑木结构实际情况(受压区木结构残损节点未加固时已处于塑性状态,且其弹性模量及抗拉强度远远小于扁钢),可接受拉区和受压区扁钢全截面屈服作为扁钢加固残损木结构榫卯节点达到抗弯承载力极限状态,如图8所示。

基于上述基本假定及内力平衡条件可得扁钢加固残损榫卯节点极限抗弯承载力 M_u 计算公式如式(1)所示:

$$M \leq M_u = 2 \times \sigma_{sy} h_s t (h - h_s) \quad (1)$$

式中: h 为额枋截面高度, h_s 为扁钢的净截面宽度, t 为加固扁钢的厚度, σ_{sy} 为加固扁钢的抗拉屈服强度。

采用公式(1)可对古建筑木结构扁钢加固残损榫卯节点抗弯承载力进行设计及复核。

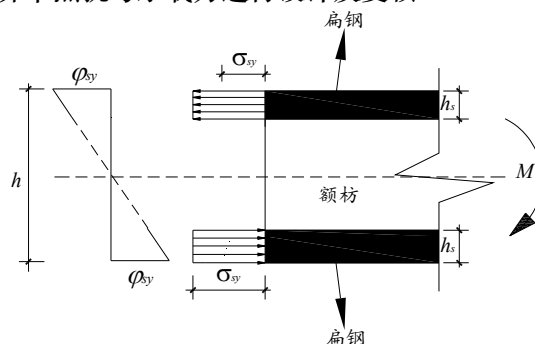


图8 关键截面极限状态内力分析图

Fig.8 The limit state stress analysis diagram

3 扁钢加固榫卯节点设计建议

3.1 扁钢加固设计的基本原则

本文建立的扁钢加固残损榫卯节点加固设计理论主要依据以下两条基本原则:

(1) 不考虑所采用加固扁钢材料的压屈失稳;扁钢在拉压反复荷载作用下,经历一定压应力作用下仍可继续承受拉应力作用;

(2) 采用一定的措施确保扁钢与木材变形协调

及防止螺钉过早被拔出而提前失去功效. 如可采用专门的配套树脂类粘结剂将扁钢与木材牢固地黏贴(粘钢), 或采用螺钉将扁钢与木材牢牢固定(本文所采用).

3.2 扁钢加固残损榫卯节点设计计算

基于扁钢加固残损榫卯节点的破坏形态及抗弯承载力分析可知, 采用扁钢加固的方式更适用于榫卯节点分担弯矩较大的情况. 在实际工程的加固设计中, 由于扁钢存在因受力不均匀而导致的应力集中现象, 致使节点破坏时, 扁钢未能完全发挥作用; 且由于扁钢在反复荷载及长期荷载作用下易出现材料强度退化, 因此, 从结构的安全储备及可靠度方面考虑, 对扁钢在加固设计中的抗拉、压强度设计值应乘以 0.8 的强度折减系数.

(1) 扁钢加固方式

为避免螺钉拧入时木材发生劈裂及从构造上确保扁钢加固的受力合理性及可靠性, 规定两条扁

钢距离额枋外边缘应保持一定的距离 S , 其间距及尺寸依据《木结构设计规范》(GB50005-2003)取值 (见表 1 中的 s_3), 加固方式采用 U 型扁钢单剪螺钉连接 (见图 6).

(2) 极限状态的确定

由上述分析可知, 受压区和受拉区扁钢达到全截面屈服作为 U 型扁钢加固残损榫卯节点达到抗弯承载力极限状态, 由于残损木结构在长期的使用过程中, 其物理性能(弹模、抗压强度等)退化严重, 且与扁钢相比相差甚远, 因此, 不考虑受压区木材的抗压强度, 认为扁钢承担全部的外荷载, 依据公式(1), 并根据表 1 确保木材不因螺钉的拧入而发生劈裂的间距要求, 可得 U 型扁钢加固残损榫卯节点抗弯承载力公式如式(2)所示:

$$M \leq M_u = 2 \times \sigma_{sy} h_s t (h - h_s - 8d) \tag{2}$$

式中: d 为螺钉直径.

表 1 钉排列的最小间距
Tab.1 The smallest space of nail line

构件被钉穿的 厚度 a	顺纹		横纹		
	中距 s_1	端距 s_0	中距 s_2		边距 s_3
			齐列	错列或斜列	
$a \geq 10d$	$15d$	$15d$	$4d$	$3d$	$4d$
$10d > a > 4d$	取插入值				
$a = 4d$	$25d$				

(3) 扁钢长度 L 的计算

《木结构设计规范》(GB50005-2003)给出了几种螺钉的排列方式, 主要有错列、齐列、斜列, 如图 9 所示. 最小间距应符合表 1 的要求.

若选用单排螺钉, 则

$$L = (n - 1)s_1 + s_0 \tag{3}$$

若选用双排齐列螺钉, 则

$$L = \frac{(n - 1)}{2} s_1 + s_0 \tag{4}$$

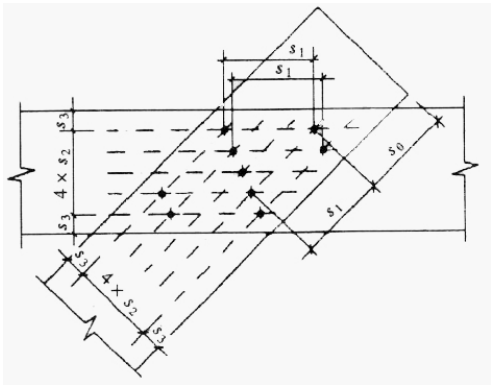


图 9 螺钉连接的布置图
Fig.9 Layout of the nail connection

(4) 螺钉个数的计算

依据《钢结构设计规范》(GB50017-2003), 对于普通螺钉在受剪连接中, 其受剪承载力设计值为其主要验算内容, 其受剪承载力按下式计算:

$$N_v^b = \frac{\pi d^2}{4} f_v^b \tag{5}$$

式中: N_v^b 、 f_v^b 、 d 分别表示螺栓连接每一受剪面的抗剪承载力设计值、螺栓抗剪强度设计值、螺栓的直径. 则, 螺栓的个数 n 为

$$n = \frac{N}{N_v^b} = \frac{\sigma_{sy} h_s t}{N_v^b} \tag{6}$$

式中, N 为极限状态时加固扁钢所受的轴向力. 按照《木结构设计规范》(GB50005-2003)规定: $n \geq 2$, 且取整数.

在轴向力作用下, U 型扁钢加固木结构残损榫卯节点起固定作用的螺钉沿着额枋的有效连接长度 l_1 大于一定数值时, 各螺钉将会出现两端受力大、中间受力小的受力不均匀状况, 从而导致两端螺钉最先可能发生破坏, 后逐次向中间受力较小的螺钉发展. 因此《钢结构设计规范》(GB50017-2003)规

定:当 $l_1 \geq 60d$ 时,螺钉承载力设计值应进行折减,折减系数为 0.7.

(5) 螺钉的直径 d 和长度 l

螺钉的长度和直径是影响其抗拔承载力的重要因素,因此,为防止螺钉在受力过程中被拔出,建议螺钉的长度不应小于 $12d$.

(6) 其它构造措施及注意事项

为了避免扁钢加固榫卯节点靠近卯口处的扁钢掀起破坏,在加固额枋的两端各加一道环箍扁钢;为提高加固用 U 型扁钢的耐久性,可涂抹一层防锈油漆;加固节点之前,需要在待加固节点的额枋及柱上进行预钻孔,否则很容易造成额枋或柱的开裂.

3.3 扁钢加固设计尚应继续考虑的几个方面

扁钢加固榫卯节点的设计计算理论应在以下几个方面继续深入考虑:

(1) 二次受力性能的影响;

(2) 不同残损程度以及不同残损状态对加固节点受力性能和力的分配的影响;

(3) 扁钢加固带有正交额枋榫卯节点抗弯承载力的影响.

4 结论

基于扁钢加固残损榫卯节点的破坏形态及加固方式,对扁钢加固残损节点的受力性能进行分析,提出了扁钢加固残损榫卯节点的加固设计方法,得出以下结论:

(1) 铁件加固残损榫卯节点一般不会发生铁件断裂破坏,马口铁加固残损节点的破坏形态一般为木材局部挤压和马口铁的拔出;弧形钢板加固残损节点的破坏形态主要为弧形钢板螺钉的拔出;扁钢加固残损节点的主要破坏形态为嵌固扁钢的螺钉个别被拔出;

(2) 结合理论分析,并考虑结构的可靠度以及安全储备,提出了 U 型扁钢加固古建筑木结构残损榫卯节点的抗弯承载力计算公式,并对实际工程

的修缮加固提出了设计建议.

参考文献 References

- [1] 胡克旭,张鹏,刘春浩. 新型材料加固钢筋混凝土框架节点的抗震试验研究[J]. 土木工程学报, 2010,43(S1): 447-451.
HU Kexu, ZHANG Peng, LIU Chunhao. Seismic testing study on RC joints strengthened by new concrete material [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(s1):447-451.
- [2] 吴波,王维俊. 碳纤维布加固钢筋混凝土框架节点的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005,38(4): 60-65.
WU Bo, WANG Weijun. An Experimental Study on The Seismic Behavior of Beam-column Joints Strengthened with Carbon Fiber sheets [J]. China Civil Engineering journal, 2005, 38(4):60-65.
- [3] 谢启芳. 中国木结构古建筑加固的试验研究及理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
XIE Qifang. Experimental Study and Theoretical Analysis on Strengthening for Chinese Ancient Timber Buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.
- [4] 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[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(10):220-224.
- [5] 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-ten on Joints Before and After Reinforcement [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(3): 109-116.
- [6] GB50165-92 古建筑木结构维护与加固技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
GB50165-92 Technical code for maintenance and strengthening for Ancient timber buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992.
- [7] 胡大柱,李国强,孙飞飞,等. 半刚性连接组合框架地震反应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, 29 (1): 19-25.
HU Dazhu, Li Guoqiang, SUN Feifei, et al. Seismic response analysis of semi-rigidly connected composite frames [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(1):19-25

(编辑 沈波)