

木结构梁柱间榫卯连接节点性能研究进展

武国芳, 钟 永, 龚迎春, 任海青

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 为了促进传统营造技术在现代木结构中的传承应用与创新发展, 梳理木结构梁柱间榫卯连接节点、榫卯连接木构架的力学性能及榫卯节点加固方法的研究现状, 分析现有研究存在的问题, 结合现代工程木产品及加工技术的发展现状, 提出梁柱间榫卯连接节点在现代木结构中的应用前景及研究方向。

关键词: 木结构; 榫卯; 梁柱连接; 半刚性; 加固

中图分类号: S781.6; TU531.1; TU366.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2019) 05-0025-05

Review of Performance of Tenon-Mortise Joints between Column and Beam in Timber Structures

WU Guo-fang, ZHONG Yong, GONG Ying-chun, REN Hai-qing

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The research status of structural performance of tenon-mortise joints, timber frames connected with tenon-mortise joints and reinforcement of the joints were reviewed. The relevant problems were also analyzed. Taking into development of modern engineered wood materials and manufacturing technology, the application prospect of the joints in modern timber structure and the future research needs were presented, in order to promote the inheriting of traditional timber structures and innovation of modern timber structures.

Key words: timber structure; tenon-mortise joint; column and beam connection; semi-rigid joint; reinforcement

榫卯是榫头和卯口相互咬合、搭接而形成的一种连接形式。“榫”是构件凸出的部分;“卯”是构件凹进去的部分,也称为“榫眼”。榫卯连接方式是我国古代木结构建筑的重要特征,历史悠久,也是我国传统营造技术与文化的精髓。考古研究发现,早在新石器时代,榫卯就出现在木结构房屋中^[1]。随着人类文明的发展,形式、功能各异的榫卯连接

节点被创造出来,有些榫头和卯口形状规则,构造简单;有些则构造非常复杂,如斗拱就是一个复杂的榫卯系统。榫卯节点的分类及详细构造,在《中国古建筑木作营造技术》^[2]、《中国古代建筑技术史》^[3]和《清式营造则例》^[4]等专著中有详细论述。

传统木结构及榫卯连接的工作性能优良,使得许多古代木结构建筑一直保存至今。在各种榫卯连接节点中,梁柱之间的直榫、燕尾榫及箍头榫等最为重要,对结构抗侧性能有决定性作用。然而,榫卯连接也因一些缺点而受到制约,如加工费时费力、对构件尺寸精度要求高、设计加工过度依赖经验等。进入20世纪后,随着销钉、植筋等新型连接的发明

收稿日期: 2018-09-04; 修改日期: 2018-10-12

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“典型榫卯连接的受力性能及增强研究”(CAFYBB2017SY036)。

作者简介: 武国芳(1986—),男,助理研究员。Email: g.f.wu@criwi.org.cn。

与应用,榫卯连接在现代木结构中的应用几乎消失,逐渐演化成为一种文化符号。不过,近二十余年来,随着各种新型工程木产品的出现,以及加工技术的迅速发展,制约榫卯连接发展的技术瓶颈已经被打破,榫卯连接在现代木结构中的应用逐渐恢复,不仅可与其他连接混合使用,而且可作为木结构梁柱间的主要连接方式。

笔者对梁柱间榫卯连接节点的特性进行了分析,对榫卯连接木构架的受力性能及榫卯加固方法进行了梳理;在此基础上,结合现代工程木产品以及加工技术的发展,提出新时代下榫卯节点的应用前景及研究方向与热点,以期促进榫连接节点在现代木结构中的传承应用与创新发展。

1 榫卯连接节点特性

1.1 基于经验的连接技术

传统榫卯连接节点及木结构的设计和建造,在很大程度上依赖于从业者的经验。通过一代代匠人的积累,或被编成口诀在师徒之间口口相传,或整理形成文字性资料,如《木经》、《营造法式》等典籍,在技艺传承中发挥了重要作用。

这些经验当今仍然具有非常重要的意义,但由于缺乏现代工程理论的解释与支持,榫卯连接节点的承载力及刚度等仍然无法准确计算。我国相关规范也没有给出典型榫卯节点的设计计算方法,限制了其在现代工程结构中的应用。因此,需要采用现代工程理论,对传统榫卯连接节点进行研究,提出合理的设计计算方法。

1.2 半刚性连接节点

梁柱间榫卯连接节点主要依靠榫头和卯口之间的挤压、摩擦等传递荷载。一般榫头横纹受压,卯口顺纹受压,而木材横纹方向的弹性模量和强度低于顺纹方向,故榫卯连接的承载性能一般取决于榫头的构造和材性。榫卯节点是一种半刚性节点,既能承受一定弯矩,又能发生一定的转动,性能介于刚性节点和铰接节点之间。研究表明,榫卯连接节点对木构架工作性能起控制作用^[4]。

由于榫卯连接节点的半刚性特性,木结构建筑的自振周期较长,地震影响系数小。同时木结构的质量较小,因而在地震时受到的惯性力亦较弱,即使

产生较大变形也不易被破坏,消耗大量能量,故而榫卯连接木结构建筑具有优良的抗震性能。

1.3 变形及破坏特点

木材横纹方向的干缩率高于顺纹方向^[5],若建造时木材含水率较高,在使用过程中,榫头横纹方向会因水分挥发而产生较大的干缩变形,导致榫卯节点出现缝隙。另外,榫头长期受横纹方向压缩荷载作用,也会出现过度的横纹变形,使榫卯连接变松^[6]。

上述因素是导致榫卯连接木构架抗侧刚度较弱的主要原因。在地震作用下,榫卯连接承受往复荷载作用,可能发生拔榫、榫头断裂、节点松脱现象^[7],影响整体结构的抗震性能。在对古代木结构榫卯连接节点的加固时,应充分考虑上述典型变形及破坏模式;在现代木结构中采用榫卯连接,也需针对上述特点采取改进及增强措施,以提高节点承载性能。

2 榫卯连接节点研究现状

2.1 榫卯节点力学性能

虽然榫卯连接节点一直在传统木结构中发挥重要作用,然而直到20世纪末期,学者才采用现代科学技术对榫卯连接开展研究。

自2002年起,西安建筑科技大学^[8-11]对燕尾榫、直榫以及透榫等宋式榫卯节点连接的梁柱木构架,进行了低周往复加载试验,证实了榫卯节点的半刚性特性。需要注意的是,上述研究均以木构架为试验对象,通过木构架的力学行为,反推榫卯连接节点的性能,不排除框架的二阶效应对试验结果的影响。

东南大学^[12-14]对符合清《工程做法则例》规定的明清燕尾榫、透榫、半榫及十字箍头榫节点进行了直接测试,避免了框架的二阶效应。研究发现,一些榫卯节点在不同加载方向的性能不同;基于物理力学原理建立的双折线型力学模型,可以粗略描述榫卯节点的性能,但是精度欠佳,主要原因是未考虑木材横纹受压的高度非线性特点。

2015年,西安科技大学^[15]改用榫卯节点为试验对象,研究了直榫、透榫、半榫以及不同木材种类和模型比例的直榫节点的滞回性能,提出了在榫头表面打孔以及榫头打通孔的方式,模拟榫头腐朽和榫头虫蛀的方法^[16],但是尚需通过深入研究确定腐朽程度与打孔方式的对应关系。

2.2 榫卯连接木构架及结构性能

榫卯连接节点是一种半刚性连接,对木构架的抗侧性能有重要影响。

1999年,有学者将榫卯连接视为变刚度单元,通过调节单元刚度,对西安市东门城楼进行了弹塑性有限元分析^[17],发现榫卯连接节点的刚度对结构性能有显著影响,但是榫卯的刚度范围并未确定。清华大学与西安交通大学^[18]将榫卯连接节点简化为三维半刚性节点单元,编制了三维有限元模型,通过对比西安市北门箭楼的动力特性分析及实测结果,反推了榫卯节点的刚度范围,并采用该模型对西安市鼓楼进行了动力特性分析,以及地震时程响应分析^[19]。上述方法操作较为复杂,在通用有限元软件普及后,已鲜有应用。

为了更加准确地计算结构在地震荷载下的反应,需要引入节点的恢复力模型。西安建筑科技大学^[20-21]采用有限元法对榫卯节点进行了分析,建立了节点的弹性恢复力模型,并采用经典动力学理论,对平面木构架进行了动力时程分析,通过试验对计算结果进行了验证。昆明理工大学^[22]则建立了一种四参数幂函数弯矩-转角模型,可以描述不同尺寸下燕尾榫连接的刚度规律,并对采用榫卯连接的木结构民居进行了静力分析。然而,由于榫卯节点构造的特殊性,上述模型尚不能推广到其他类型榫卯节点。

在现代木结构中,榫卯连接节点也可与其他连接混合使用。北京林业大学^[23]测试了骨架之间采用榫卯连接的木剪力墙的承载性能,发现榫卯连接对木剪力墙承载力的提高作用不明显。而日本相关研究发现^[23],采用榫卯连接的木框架剪力墙的承载力中,有30%是靠框架提供的。究竟榫卯节点对木框架的性能贡献如何,仍需要进一步研究。

2.3 榫卯节点加固方法研究

为了保护与修复古建木结构,目前有学者提出了一些榫卯节点加固方法。对于梁柱间榫卯节点,加固方法可大致分为两类。

1) 连接件加固法,扒钉(也称扒锔、马钉等)加固被广泛应用于小型木结构中,增设扒钉可以限制榫卯松脱,同时扒钉本身的受拉受压也可提供一定的弯矩抵抗能力。其优点为施工简单,缺点为扒钉外露,影响节点的美观。

北京工业大学和故宫博物院^[25-26]曾对扒钉加固榫卯连接进行了相关研究,发现其刚度提高能力有限,之后设计了一种组合钢构件加固装置,分别采用独立的钢箍约束梁和柱,并将几个钢箍联系起来,从而起到对榫卯节点的增强作用^[27-28]。南京工业大学^[29]提出了一种弧形钢板连接件,可以显著提高节点的耗能性能。总之,现有榫卯加固连接件种类仍然非常有限,需要结合榫卯节点的特点,研发合适的加固连接件。

2) 缠绕法或包裹法,通过在节点外侧包裹柔性材料,如薄钢带、纤维材料等,增强节点的整体性。

西安科技大学^[30-33]采用薄钢带以及碳纤维布对木构架的榫卯节点进行缠绕加固,发现可以增加节点的刚度和承载力,且以前者的加固效果更优,但是二者均会减弱节点的耗能性能。华侨大学^[34]和上海师范大学^[35]也对榫卯节点玄武岩和玻璃纤维缠绕加固进行了试验研究。缠绕法是榫卯节点加固的一种重要方法,但是对于缠绕材料、粘结用胶以及缠绕方法等,尚需开展进一步研究。

对于各种加固方法,北京工业大学^[36]对比了扒钉加固、钢箍加固以及碳纤维加固的效果。南京工业大学^[29]对比了扒钉、碳纤维、钢销、U型铁箍、角钢、弧形钢板几种方法的加固效果。东南大学^[37]对比了碳纤维加固及钢箍加固的效果。由于榫卯节点的构造、材料及加固工法不尽相同,故研究结论不一,但是上述对比研究,为后续研究提供了重要参考。

近年来,也有一些新的加固方法被提出。上海市建筑科学研究院^[38]提出了两种榫卯节点加固方法:一种为竹斜撑增强,其原理与扒钉类似,可明显提高节点刚度;另一种为钢箍加固,钢箍包裹木柱并延长至木梁后,通过螺栓固定,该方法同时兼具包裹及连接件的作用,可明显提高节点承载力。东南大学^[39]提出了一种榫头植入钢筋的增强方法,有一定增强效果,但不及碳纤维包裹增强效果好。因此,仍需要继续探索榫卯节点的加固方法,且不应只限于连接件加固和缠绕法加固两类方法。

3 发展前景及研究建议

3.1 发展前景

近年,木材加工技术发生了翻天覆地的变化。

相比传统人工加工,采用计算机数控加工技术,榫卯连接节点加工效率可提高数十倍,且加工精度更高。为了适应数控加工技术,传统榫卯连接节点的形式也需要微调。现有工程实践中,一些榫卯节点的形式已经发生变化。如现代木结构次梁与主梁连接处的燕尾榫连接节点,已经变为截面渐变、曲率连续的弧形形状,而在瑞士 Tamedia 大厦中,梁柱间榫卯节点则全部采用椭圆形截面。

许多新型的工程木产品被研发出来,如胶合木、LVL 等。通过材料选择、加工工艺的控制,产品的性能更加优良、可控,而且可以加工成为截面较大,以及弧形、空心等异型构件。并且工程木产品的含水率均匀,在使用过程中的变形较小。将这些木产品替代传统的方木原木应用在现代木结构中,其榫卯节点的构造和性能也会产生相应变化。

3.2 建议

由于榫卯连接节点的构造不统一等原因,目前尚无法提出通用的榫卯承载力和刚度计算方法。我国木结构设计规范也未给出榫卯连接的抗弯刚度和承载力计算方法,故工程结构中,只能将榫卯连接视为铰接,造成了一定的材料浪费。

另外,现有木结构榫卯连接节点的研究,多以古代木结构为研究对象,而在现代木结构中,榫卯节点的材料以及加工方法已发生了明显变化。

基于上述两点,对于梁柱间榫卯连接节点,未来可在如下几方面开展相关研究:

1) 研究传统典型榫卯连接节点的受力性能,对不同构造榫卯连接进行试验研究、有限元模拟和理论分析,推导出几种典型梁柱间榫卯连接节点的转动刚度和承载力的预测方法及设计计算方法。

2) 基于传统榫卯连接节点的变形及破坏模式,针对性地提出施工简单、效果良好的加固方法,为古代木结构的修复及保护提供技术支持。

3) 研究采用现代工程木产品及加工技术的现代梁柱间榫卯节点的受力性能,提出基于该类材料的榫卯构造及材料性能的连接节点设计计算方法。

4) 研究现代榫卯连接节点的预增强方法,探索在加工工程中对榫卯连接节点抗弯承载力和刚度的增强方法,从而提升其承载性能,扩大在现代木结构中的适用范围。

4 结语

传统榫卯连接节点对结构抗侧性能具有重要影响。我国有大量古代木结构建筑需要加固维修,需要采用现代工程理论进行分析,研究榫卯连接节点的计算方法;同时榫卯连接节点在现代木结构中具有良好的应用前景,但需要针对现有材料和加工特点进行传承、改进,以促进榫卯连接节点在现代木结构中传承应用及创新发展。

参考文献:

- [1] FU X, GUO D, LIU X, et al. Chinese architecture [M]. New Haven: Yale University Press, 2002.
- [2] 马炳坚. 中国古建筑木作营造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 中国科学院自然科学史研究所. 中国古代建筑技术史[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 梁思成. 清式营造则例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [5] 成俊卿. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985.
- [6] King W S, Yen J Y R, Yen Y N A. Joint characteristics of traditional Chinese wooden frames [J]. Engineering Structures, 1996, 18(8): 635-644.
- [7] 杨亚弟, 杜景林, 李桂荣. 古建筑震害特性分析[J]. 世界地震工程, 2000, 16(3): 12-16.
YANG Y D, DU J L, LI G R. Analysis of the earthquake disaster characteristics of ancient building structures [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2000, 16(3): 12-16.
- [8] 高大峰, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古建木构架在水平反复荷载作用下的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2002, 34(4): 317-319.
GAO D F, ZHAO H T, XUE J Y, et al. Experimental study on the behavior of wooden frame of ancient Chinese ancient buildings under horizontally reverse load[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2002, 34(4): 317-319.
- [9] 姚侃, 赵鸿铁, 葛鸿鹏. 古建木结构榫卯连接特性的试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 168-173.
YAO K, ZHAO H T, GE H P. Experimental studies on the characteristic of mortise-tenon joint in historic timber buildings[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 168-173.
- [10] 赵鸿铁, 张海彦, 薛建阳, 等. 古建筑木结构燕尾榫节点刚度分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(4): 450-454.
ZHAO H T, ZHANG H Y, XUE J Y, et al. The stiffness analysis on the characteristic of mortise-tenon joint in historical timber buildings[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Nature Science Edition), 2009, 41(4): 450-454.
- [11] 赵鸿铁, 董春盈, 薛建阳, 等. 古建筑木结构透榫节点特性试验分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(3): 315-318.
ZHAO H T, DONG C Y, XUE J Y, et al. The experimental study on the characteristics of mortise-tenon joint historic timber buildings[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Nature Science Edition), 2010, 42(3): 315-318.
- [12] 徐明刚, 邱洪兴. 古建筑木结构榫卯节点抗震试验研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(7): 56-58.
XU M G, QIU H X. Experimental study on seismic behavior of mortise-tenon joints of ancient architectures[J]. Building Science, 2011, 27(7): 56-58.

- [13] 陈春超, 邱洪兴, 包轶楠, 等. 不对称榫卯节点正反向受弯性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(6): 1224-1229.
CHEN C C, QIU H X, BAO Y N, et al. Experimental study on positive and reverse flexural behavior of asymmetric mortise-tenon joints[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(6): 1224-1229.
- [14] 陈春超, 邱洪兴. 直榫节点受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S1): 292-298.
CHEN C C, QIU H X. Study on flexural behavior of straight mortise-tenon joints[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 292-298.
- [15] 谢启芳, 郑培君, 崔雅珍, 等. 古建筑木结构直榫节点抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 01(3): 232-241.
XIE Q F, ZHEN P J, CUI Y Z, et al. Experimental study on seismic behavior of straight mortise-tenon joints of ancient timber buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 01(3): 232-241.
- [16] 谢启芳, 郑培君, 向伟, 等. 残损古建筑木结构单向直榫榫卯节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11): 143-150.
XIE Q F, ZHENG P J, XIANG W, et al. Experimental study on seismic behavior of damaged straight mortise-tenon joints of ancient timber buildings[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 143-150.
- [17] 赵均海, 俞茂宏, 高大峰, 等. 中国古代木结构的弹塑性有限元分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1999, 31(2): 131-133.
FEM analysis on the elasto-plasticity of ancient wooden structure[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 1999, 31(2): 131-133.
- [18] 方东平, 俞茂铨, 宫本裕, 等. 木结构古建筑结构特性的计算研究[J]. 工程力学, 2001, 18(1): 137-144.
FANG D P, YU M H, Miyamoto Y, et al. Numerical analysis on structural characteristic of ancient timber architecture[J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(1): 137-144.
- [19] 丁磊, 王志骞, 俞茂宏. 西安鼓楼木结构的动力特性及地震反应分析[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(9): 986-988.
DING L, WANG Z Q, YU M H. Dynamic characteristic and earthquake response of Xi'an Drum-Tower[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(9): 986-988.
- [20] 罗勇. 古建木结构建筑榫卯及构架力学性能与抗震研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- [21] 李琪. 古建筑木结构榫卯及木构架力学性能与抗震研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [22] 王俊鑫. 榫卯连接木结构的静力与动力分析研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [23] 杜敏. 新型木框架剪力墙受剪性能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [24] 稻山正弘. 木造軸組工法住宅の構造デザイン[J]. 建築雑誌, 2002, 117: 15-16.
- [25] 周乾, 闫维明, 李振宝, 等. 马口铁加固古建筑榫卯节点抗震试验[J]. 文物保护与考古科学, 2011, 23(4): 17-25.
ZHOU Q, YAN W M, LI Z B, et al. Experiments on the aseismic behavior of Chinese ancient architecture mortise-and-tenon joints strengthened with iron-hooks[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2011, 23(4): 17-25.
- [26] 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, 23(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, 23(4): 502-508.
- [27] 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 Q, YAN W M, ZHOU H Y, 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.
- [28] 周乾, 闫维明, 关宏志. 不同方法加固古建筑榫卯构架抗震试验[J]. 中国文物科学研究, 2013(2): 56-62.
ZHOU Q, YAN W M, GUAN H Z. An experimental study on aseismic behaviors of Chinese ancient structure strengthened by different methods[J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2013(2): 56-62.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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 K, ZHAO H T, XUE J Y, et al. Experimental studies on seismic characteristic of strengthened mortise-tenon joint in historic timber buildings[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(10): 220-224.
- [32] 赵鸿铁, 薛自波, 薛建阳, 等. 古建筑木结构构架加固试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(2): 72-76.
ZHAO H T, XUE Z B, XUE J Y, et al. The experimental study on reinforcement frame of ancient timber structures[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(2): 72-76.
- [33] 薛建阳, 隋葵, 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.
- [34] 王全凤, 法冠喆, 陈浩军, 等. 不同工法玄武岩纤维布加固榫卯节点抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(6): 62-66.
WANG Q F, FA G Z, CHEN H J, et al. An experimental study on the seismic performance of BFRP reinforced mortise-tenon joints of different construction methods[J]. Industrial Construction, 2011, 41(6): 62-66.
- [35] 宋琛辉. GFRP加固榫卯节点的研究[D]. 上海师范大学, 2016.
- [36] 张博. 中国古建筑榫卯节点抗震加固试验研究[D]. 北京工业大学, 2010.
- [37] 王文波. 古建木结构榫卯节点加固后力学性能研究[D]. 东南大学, 2017.
- [38] 张富文, 许清风, 张晋, 等. 不同方式加固的榫卯节点木框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(s1): 307-313.
ZHANG F W, XUE Q F, ZHANG J, et al. Experimental study on seismic behavior of timber frames with mortise-tenon joints under different strengthening methods[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(s1): 307-313.
- [39] 徐明刚, 邱洪兴. 中国古代木结构建筑榫卯节点抗震试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010(s2): 345-349.
XU M G, QIU H X. Experimental study on seismic behavior of mortise-tenon joints of ancient architectures[J]. Building Science, 2010, (s2): 345-349.

(责任编辑 向琴)