

Research Progress on Semi-rigid Characteristics of Mortise-tenon Joints in Traditional Timber Structures

Bihui Dai Jing Li Li Han Rongqing Qi Yi Sun

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan, 650224, China

Abstract

The Chinese traditional timber structure is a treasure of the world's architecture, and its overall seismic performance is governed by the mechanical behavior of the mortise-tenon joints between components. In this paper, the theoretical derivation of the microscopic stress-strain relationship, the fitting of the model function based on the test data, the wood embedment and friction mechanism and the numerical simulation analysis method, the research results of the $M-\theta$ relationship characteristics of the semi-rigid connection of the tenon and tenon joints of traditional Chinese wood structures are systematically summarized and summarized.

Keywords

traditional timber structure; mortise-tenon joint; semi-rigid characteristic; $M-\theta$ relationship

传统木结构榫卯节点半刚性特性研究进展

戴必辉 李静 韩丽 齐荣庆 孙毅

西南林业大学土木工程学院, 中国·云南 昆明 650224

摘要

中国传统木结构是世界建筑的瑰宝, 其整体抗震性能受构件间榫卯节点力学行为的支配。论文从微观应力-应变关系理论推导、以试验数据为基础拟合模型函数、基于木材嵌压和摩擦机理和数值模拟分析方法四个方面, 对中国传统木结构榫卯节点半刚性连接 $M-\theta$ 关系特性的研究成果进行了系统的归纳和总结。

关键词

传统木结构; 榫卯节点; 半刚性; $M-\theta$ 关系

1 引言

传统木结构建筑的建造技艺中蕴含着很大的智慧, 它有着其独特的结构体系, 包括柱架全部平摆浮置在础石之上, 梁柱节点采用榫卯连接, 梁架与柱架由铺作层连接, 梁端设有雀替, “大屋盖”, 柱架的侧脚和生起等。其中, 榫卯连接最为重要, 因为木结构梁柱相交的节点、铺作层与柱顶的连接和屋架构件的搭接等都是使用榫卯连接形式, 可以说榫卯连接是中国传统木结构的灵魂。榫卯连接方式允许连接的梁、柱发生一定的相对滑移和转动, 具有明显的半刚性。因此, 对榫卯节点半刚性的探讨, 对于传统木结构建筑力学性能和抗震性能的研究具有非常深远的意义, 是进行木结构建筑准确有限元模拟所不可缺少的理论支持, 对木结构建筑科学修复和保护起着极其重要的作用。

【基金项目】云南省教育厅科学研究基金项目(项目编号: 2021J0160, 2019J0194)。

【作者简介】戴必辉(1985-), 男, 中国云南楚雄人, 硕士, 讲师, 从事建筑结构抗震、传统木结构建筑研究。

另外, 榫卯节点半刚性连接 $M-\theta$ 关系特性是节点在力的循环反复作用下荷载-变形关系的定量描述, 能反映榫卯节点受力过程中的刚度变化规律、变形特性及能量消耗, 是确定恢复力模型和进行非线性地震反应分析的依据, 是传统木结构研究中必须解决的问题。

2 传统木结构榫卯节点半刚性连接 $M-\theta$ 关系特性研究

从 20 世纪 80 年代开始, 中国学者开始用现代的测试技术和力学知识对传统木结构的科学内涵展开揭示。近三十年来, 由于国家文物保护部门和古建筑科研工作的高度重视, 在几次大型古建筑抢险修缮工程中, 结构和力学专家对传统木结构进行了深入的现场测试和力学试验分析, 取得了宝贵的成果, 并摸索出了一些行之有效的加固方法。

2.1 微观应力-应变关系理论推导

乐志^[1]通过对二维榫卯(公母榫、透榫、馒头榫、螳螂榫、燕尾榫、半榫)和三维榫卯(改进的燕尾榫、锚固半榫、单向箍头榫、双向骨头榫)进行受力分析, 根据变形受力条件列出弯矩平衡方程, 从微观应力-应变层面建立了半榫的弯

矩—转角关系公式。徐明刚^[2]通过对一个循环过程中正向加载、正向卸载、反向加载和反向卸载四个不同受力状态阶段的受力机理进行分析,考虑了残余变形的影响,引入了拔榫量定量关系,每一加载段的理论模型对应节点实际的受力状,从而建立了单节点及框架节点 $M-\theta$ 关系理论分析模型。

2.2 以试验数据为基础拟合模型函数

2.2.1 双折线模型

赵鸿铁等^[3]通过对透榫节点连接柱架—榫结构模型进行低周往复荷载试验,分析了透榫节点连接的刚度介于刚接和铰接之间的半刚性特征,以及结构刚度退化规律;并得出滞回面积饱满的反 Z 型弯矩—转角滞回曲线,并在研究滞回规则的基础上以割线刚度法确定参数,给出了透榫节点的恢复力力学模型:

$$\begin{cases} M = K_1\theta & 0 \leq \theta \leq 0.06 \\ M = 0.06K_1 + K_2(\theta - 0.06) & 0.06 \leq \theta \leq 0.1 \end{cases}$$

其中 K_1 、 K_2 根据实验数据计算得到。

2.2.2 3折线模型

潘毅等^[4]以中国西南地区穿斗式古建筑木结构中常见的直榫节点为研究对象,对其在低周往复荷载作用下的受力机理进行了详细分析,对直榫各受力阶段进行了分析,得到其各阶段的几何条件、平衡条件、物理条件,建立了直榫节点的 $M-\theta$ 力学模型。根据力学模型,得到直榫力学曲线的三个特征点,并对力学模型进行简化,建立了考虑节点拔榫量影响的 $M-\theta$ 三折线模型。

2.2.3 4折线模型

高大峰等^[5]采用两个单榫木构架(对应有4个燕尾榫榫卯节点)1:3.52 缩尺模型进行低周反复荷载试验,利用所得 $M-\theta$ 滞回曲线和骨架曲线,建立了节点力矩—转角位移的分阶段(滑移阶段、弹性阶段、塑性发展阶段和破坏阶段)恢复力模型,并引入了具有量化其耗能减振能力的“滞回耗能因子”来建立相应的理论计算公式。利用榫卯节点拟静力模型试验得到的榫卯节点水平力滞回曲线,建立了一个关于节点力矩—转角位移的恢复力模型,并根据这个模型,建立了用于检算实际榫卯节点模型的理论计算公式,在这个公式中引入了量化其耗能减振能力的“非线性系数 NL”和“有效刚度”。

2.2.4 参数幂函数模型

3 参数幂函数模型最先被用于钢结构半刚性节点 $M-\theta$ 关系特性研究中,其表达如下:

$$M = \frac{r_{ki}\theta}{[1+(\theta/\theta_0)^n]^{1/n}}$$

式中: r_{ki} 为连接初始刚度; θ_0 为连接参考塑性转角, $\theta_0 = M_0/r_{ki}$; M_0 为连接的极限弯矩; n 为考虑弯矩—转角关系的曲率参数,可利用已有试验数据和预测弯矩之间的差异,通过最小二乘法曲线拟合得出。

2.2.5 参数幂函数模型

杨艳华等^[6]通过对木结构榫卯连接模型试验及其试验结果分析,得出影响榫卯连接刚度的主要因素是替木尺寸、榫头尺寸和卯孔对柱的削弱程度,在原有的3 参数幂函数模型的基础上,用 $\gamma E_0 I/l$ 来近似表示初始刚度(其中 γ 为卯孔影响系数; E_0 为虚拟初始弹性模量; I 为榫头颈部的转动惯性矩; l 为榫头长度),从而建立适合木结构榫卯连接的4 参数幂函数 $M-\theta$ 相关曲线模型。

3 基于木材嵌压和摩擦机理

与钢筋混凝土结构、钢结构节点不同,木结构节点由梁端的榫头穿过柱上的卯口构成,依靠榫头和卯口之间的相互作用抵抗外荷载。受力过程中榫头和卯口相互运动,榫头和卯口的相对位置维持在一定范围内,保证榫头与卯口的有效接触是榫卯节点提供刚度和承载力的前提。榫卯之间的相互作用取决于木材的摩擦和嵌压两种受力机理。昆明理工大学陶忠教授团队^[7]开展了大量理论、试验和数值模拟分析研究。主要包括木材嵌压与试验研究、典型节点静力特性分析、推导木材均匀嵌压半解析公式、典型榫卯节点低周反复加载试验等。

4 数值模拟

随着数值模拟技术和数值算法精度的提升,以及考虑到进行实体模型试验的代价较高,因此有必要对榫卯节点的物理力学性能进行数值模拟研究。对于该领域的研究主要是建立在半刚性特性方面,也有少数文献建立实体数值模型进行研究。

赵均海等^[8]通过定义和引入反映木结构古建筑榫卯节点特性的半刚性节点单元,将其假定为六个弹簧组成空间变刚度单元,以描述榫卯节点在不同方向的刚度不同,并对西安东门城楼进行弹塑性数值模拟分析,考察了不同刚度系数对整体结构力学性能的影响;利用现场实测和模型试验得到西安北门箭楼自振频率,使用 Simplex 法反演推算空间变刚度单元各个方向的刚度范围,定量研究榫卯节点的刚度,建立适合古建筑木结构特点的三维有限元计算模型和分析方法。近年来,随着大型通用有限元软件的普及,ANSYS、ABAQUS 等常用结构分析软件也用来进行传统木结构榫卯节点的数值模拟。

5 基于不确定性分析方法

目前,不确定性分析方法用于半刚性节点研究多见于钢结构半刚性节点。在木结构领域,不确定性分析方法的运用主要是对结构的安全评价和震后破坏评估方面。例如,考虑木结构古建筑在地震中的破坏现象,结合模糊数学理论,将木结构古建筑分为地基、基础、上部结构3 个部分,结合其震害特点,选取13 个指标作为评估因子,然后由层次分析法确定权重系数向量,采用隶属函数和类比法构造评判矩

阵,建立三层次两阶段的模糊综合评估模型;基于灰色系统理论和模糊数学,提出古建筑木结构灰色模糊安全性评估方法;考虑砖石木结构古建筑的结构复杂性和安全评价因素的模糊性,提出了基于模糊层次分析法的评价方法,用来对砖石木结构古建筑进行安全现状评价。

6 结语

以往对传统木结构榫卯节点半刚性连接的研究主要是从榫卯节点性能试验研究(包括单节点试验研究和木构架试验研究)、榫卯节点受力机理研究、榫卯节点数值模拟研究、榫卯节点加固试验研究等方面,得出的榫卯节点半刚性连接 $M-\theta$ 关系特性均是在相关假设的基础上忽略了某些影响因素,因此有一定的局限性。目前,很多学者已经开始将诸如榫卯和榫头不同松紧程度、历史残损程度、带孔隙、多个榫卯节点的复合作用等更多影响因素考虑进去,以求更加准确的得到榫卯节点半刚性连接 $M-\theta$ 关系特性。研究方法上,除了采用传统的力学理论分析、试验和数值模拟等手段,更多的不确定性分析方法被用于半刚性节点的研究,但多数成果还是对钢结构半刚性连接的研究上,木结构榫卯节点半刚

性连接方面成果较少。

参考文献

- [1] 乐志.中国传统木构架榫卯及侧向稳定研究[D].南京:东南大学,2004.
- [2] 徐明刚.中国古建筑木结构榫卯节点抗震性能研究[D].南京:东南大学,2011.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 高大峰.中国木结构古建筑的结构及其抗震性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2007.
- [6] 杨艳华,王俊鑫,徐彬.古木建筑榫卯连接 $M-\theta$ 相关曲线模型研究[J].昆明理工大学学报(理工版),2009,34(1):72-76.
- [7] 高永林,陶忠,叶燎原,等.传统木结构典型榫卯节点基于摩擦机理特性的低周反复加载试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(10):139-145.
- [8] 赵均海,俞茂宏,杨松岩,等.中国古代木结构有限元动力分析[J].土木工程学报,2000,33(1):32-35.