

考虑榫头尺寸影响的燕尾榫节点滞回性能分析

秦爱国¹, 李 军^{1,*}, 魏志鹏², 胡 蓉³, 于 征⁴

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 世源科技工程有限公司上海分公司, 上海 200000;

3. 京都工艺纤维大学, 京都 606-8585; 4. 青岛黄海学院 建筑工程学院, 青岛 266000)

摘 要: 古建筑木结构中燕尾榫节点的榫头尺寸一直以来采用传统比例进行设计, 但收乍角度等榫头尺寸变化对节点抗震性能的影响有待进一步研究。参照已有试验, 以榫头宽度、榫头长度以及收乍角度为影响参数, 建立含标准试件模型在内的 4 类有限元模型, 施加循环往复荷载进行分析; 通过标准试件模型与试验结果对比分析验证了数值模拟方法的有效性; 在此基础上得到的 4 类模型的滞回曲线、刚度退化曲线、骨架曲线和拔榫量。对比分析结果表明: 适当提高收乍角度, 并在此基础上适当加大榫头长度, 有助于提高燕尾榫节点的连接性能和抗震性能。

关键词: 燕尾榫节点; 榫头尺寸; 有限元分析; 滞回性能

中图分类号: TU366.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)05-0018-09

Analysis of the hysteresis performance of dovetail-tenon joints considering the influence of tenon size

QIN Aiguo¹, LI Jun^{1,*}, WEI Zhipeng², HU Rong³, YU Zheng⁴

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. S. Y. Shanghai Technology Engineering & Construction Co. Ltd., Shanghai 200000, China;

3. Kyoto Institute of Technology, Kyoto 606-8585, Japan;

4. Architectural Engineering Institute, Qingdao Huanghai University, Qingdao 266000, China)

Abstract: The size of the tenon of dovetail-tenon joints in ancient wooden-structure buildings has always been designed according to the traditional proportion, but the influence of the change in tenon size, including the retraction angle, on the seismic performance of the joint needs to be further studied. Four types of finite element models including the standard specimen model are established by referring to existing experiments and taking the tenon width, tenon length and retraction angle as the influencing parameters. The models are analyzed by applying the cycle loads to itself. The effectiveness of the numerical simulation method is verified by comparing the analysis and the experimental results of the standard specimen model. On this basis, the hysteresis loops, stiffness degradation curves, skeleton curves and degree of tenon pull-out of the four types of models are obtained. The results of the comparison of the above data show that appropriately increasing the retraction angle and the tenon

收稿日期: 2023-02-23

基金项目: 日本学术振兴会基金资助项目(19K01125)

作者简介: 秦爱国(1998—), 男, 山东日照人。硕士, 研究方向为木结构。E-mail: 874204327@qq.com。

* 通信作者: 李 军(1966—), 女, 山东淄博人。博士, 教授, 主要从事钢结构和木结构性能等方面的研究。

E-mail: kitjun76@qut.edu.cn。

length can improve the connection performance and seismic performance of the dovetail-tenon joints.

Key words: dovetail-tenon joints; size of tenon; finite element analysis; hysteretic performance

已有研究表明^[1-4],地震作用下榫卯节点拔出是典型破坏现象,这种破坏会造成木结构建筑的整体倾斜,因此燕尾榫节点抗震性能受到国内外广泛关注。由于榫卯拔出可能与榫头尺寸相关,尺寸效应影响研究对解决该类破坏问题具有关键性的作用。

THOMAS 等^[5]考虑结构的尺寸效应进行了试验研究,建立了燕尾榫节点连接强度的理论公式。谢启芳等^[6]通过不同比例燕尾榫模型在水平低周反复荷载下的试验,研究了水平荷载、尺寸效应等对节点抗震性能的影响。AEJAZ 等^[7]通过拉伸试验研究了榫头各项参数对 T 型纯钉燕尾榫节点的性能影响,并结合参数化设计,指出节点性能与燕尾榫坡度有关。XUE 等^[8]针对通榫节点和燕尾榫节点,考虑缝隙的不同尺寸进行了低周反复荷载试验,指出松动的节点比无缝隙节点具有更好的抗震性能。潘毅等^[9]提出并验证了一个考虑燕尾榫节点尺寸和木材材料性能影响的计算公式。杨娜等^[10]基于分式析因的方法,探究了包括节点尺寸在内的 7 种因素对榫头性能的影响程度。HU 等^[11]以直榫节点为研究对象,基于有限元分析方法发现半刚性模型的弯矩承载力模拟结果最接近试验值,且榫头的宽度及长度对节点的刚度均产生影响。谢启芳等^[12]通过试验方法探究了不同尺寸、不同类型的直榫节点抗震性能之间的差异。JEONG 等^[13]采用数值模拟方法分析了不同榫头角度、榫头宽度、榫头高度和榫颈宽度对燕尾连接关键区域应力分布的影响,并通过试验验证了有限元模型的燕尾连接强度。

综上所述,燕尾榫节点的榫头部分基本保留传统比例,从设计角度考虑存在一定的局限性,包括收午角度在内的榫头尺寸变化对节点滞回性能的影响有待进一步研究。为此,本文在既有试验研究基础上,采用数值模拟和理论分析方法,探究榫头形状、尺寸对燕尾榫节点滞回性能的影响,为木结构建筑工程设计提供参考。

1 燕尾榫框架结构形式

燕尾榫节点由卯口与形似燕尾的榫头连接而成,是榫卯节点中强度较高、牢固性较好的连接形式,其可分为柱顶连接和柱中连接(图 1)。一榫木结构框架由 2 根立柱以及柱间额枋组成,立柱与额枋通过燕尾榫节点连接。燕尾榫节点由柱顶的卯口与额枋两端的榫头相互啮合而成,燕尾榫榫头外宽内窄,宽面与窄面相互平行,横截面为梯形,卯口与之相对应,如图 2 所示。这种构造使燕尾榫节点在水平方向具有很强的抗拉拔能力。

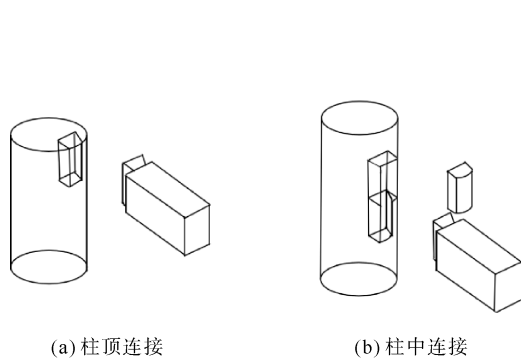


图 1 燕尾榫节点连接形式

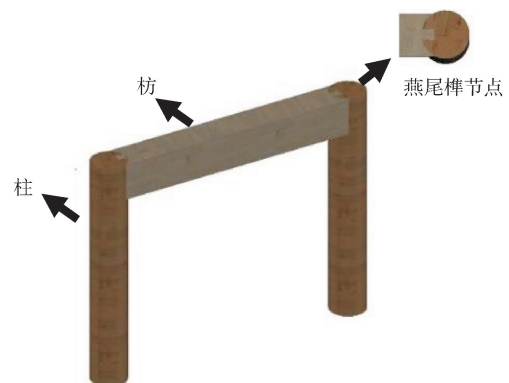


图 2 一榫框架结构

2 标准试件有限元分析

2.1 试件几何模型

参照文献[6]中 DJ1 试件的试验,加载装置如图 3 所示,柱水平放置,一端为局部平板枋,另一端通过千斤顶施加横向力使柱固定。采用柱顶连接的方式,柱长 1000 mm,直径 240 mm;枋长 800 mm,枋宽 190 mm,枋高(即榫头高度)240 mm;榫额宽 60 mm,榫颈宽 50 mm,榫头长 60 mm,如图 4 所示。

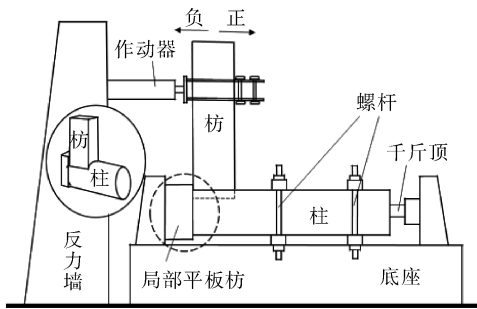


图 3 加载装置示意

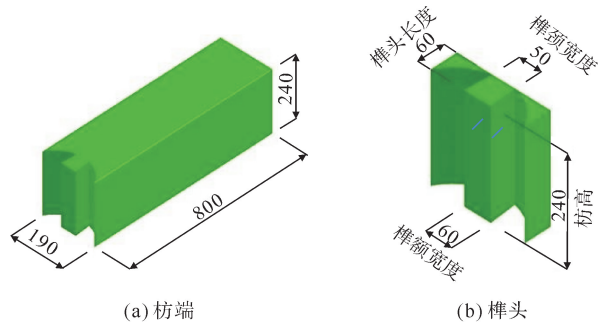


图 4 与柱连接的枋端(单位:mm)

2.2 有限元模型

参照 DJ1 试件试验,采用 ABAQUS 建立有限元数值模型。榫卯接触面之间的法向行为采用硬接触,切向行为采用罚函数,摩擦系数按 0.4 设置。采用工程常数定义木材弹性阶段,将木材弹性阶段设为正交各向异性,力学性能在 3 个方向(顺纹方向、横纹径向、横纹弦向)上相互独立。利用 Hill 屈服准则定义木材塑性阶段的屈服应力比,用 Potential 函数定义木材塑性阶段。单元类型选用 C3D8R 单元;柱子、额枋的主体网格尺寸为 30 mm,榫头接头周围的网格进行加密处理,设置为 15 mm,局部平板枋和垫块网格尺寸为 20 mm,结合加载装置的约束情况,在柱顶截面及柱底截面上施加完全约束,节点模型如图 5 所示。

采用位移控制的循环往复加载方式,加载位置距离枋外端 500 mm,加载制度如图 6 所示,正负方向的位移幅值增量均为 10 mm,正负方向循环加载各 1 次后开始进入下一级加载,直到试件达到最大承载力。

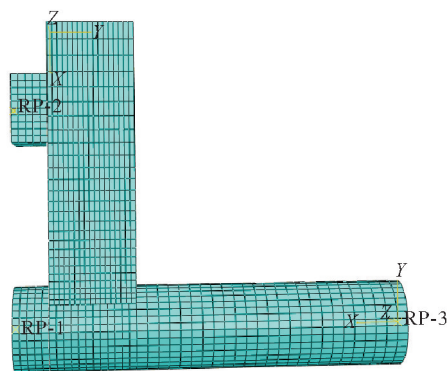


图 5 燕尾榫节点数值模型

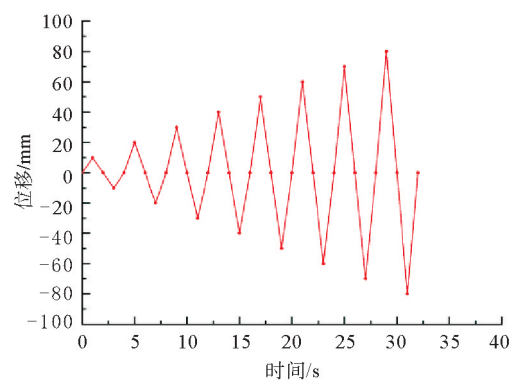


图 6 加载制度

2.3 数值模型的验证

根据每次循环往复加载得到的水平力峰值绘制骨架曲线,与试验骨架曲线^[6]对比结果如图 7 所示。对比两者的最大抗弯承载力可知:关于正向抗弯承载力,模拟值和试验值分别为 3.06、3.01 kN·m,误差为 1.7%;关于反向抗弯承载力,模拟值和试验值分别为 2.93、2.79 kN·m,误差为 5.0%。正向加载前期试验值略大于模拟值,推测产生误差原因为试件制作时卯口尺寸略小或榫头尺寸略大,以至于初期应力

偏大。总体看来,数值模拟结果与试验吻合较好,说明模拟方法合理、有效。

3 榫头尺寸对燕尾榫滞回性能的影响

3.1 试件模型设计

已有研究表明,燕尾榫榫头尺寸大小影响节点抗拉性能^[14]。为探究榫头几何尺寸对燕尾榫节点抗弯性能的影响,以本文 2.1 节所述试件为标准试件(BZ),以榫头宽度(包括榫额宽度和榫颈宽度)、榫头长度、收乍角度(榫头侧面与构件竖向截面间夹角)为变量,分别建立 SK、SC、JD 系列的有限元模型,模型尺寸如表 1 所示,其中,收乍角度不变的情况下,SK 系列调整榫额和榫颈宽度;SC 系列为调整榫额宽度保证收乍角度不变,并调整榫头长度;JD 系列为通过改变榫颈宽度,调整收乍角度。若调整榫头高度但不改变枋的高度,榫头顶面将产生坡度,会带来新的应力集中问题,本文暂不对榫头高度影响进行讨论。木材属性参考文献[15],横切面、径切面和弦切面的泊松比分别为 0.37、0.49 和 0.43,杉木纵向、径向和弦向的弹性模量分别为 8111、720 和 400 MPa。

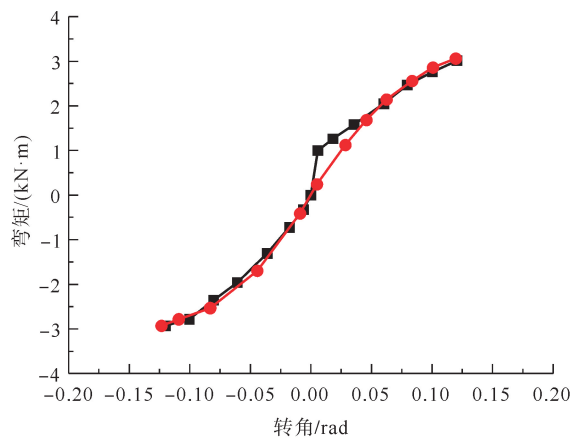


图 7 骨架曲线对比

—■— 试验; —●— 模拟

表 1 模型尺寸参数

模型名称	榫额宽度/mm	榫颈宽度/mm	榫头长度/mm	收乍角度/rad
BZ	60	50	60	0.083
SK-1	40	30	60	0.083
SK-2	50	40	60	0.083
SK-3	70	60	60	0.083
SK-4	80	70	60	0.083
SC-1	58	50	50	0.083
SC-2	62	50	70	0.083
SC-3	63	50	80	0.083
SC-4	65	50	90	0.083
JD-1	60	40	60	0.167
JD-2	60	45	60	0.125
JD-3	60	55	60	0.042
JD-4	60	60	60	0

3.2 滞回曲线分析

3.2.1 榫头宽度的影响

由图 8 可知,当榫额宽度和榫颈宽度同时改变而收乍角度未变时,标准试件节点滞回曲线的包络面积和形状均未发生太大变化,说明改变榫头宽度对燕尾榫节点滞回性能影响很小。榫额宽度、榫颈宽度同时增加后,榫头部分木材的端面、顶面及底面面积增加,榫头的侧面参数变化在该系列模型中尚未反映。

3.2.2 榫头长度的影响

由图 9 可知,当保持收乍角度不变增大榫头长度时,滞回曲线的包络面积增大,形状也更为饱满,说明随着榫头长度的增加,节点的滞回性能增强。减小榫头长度则会降低滞回性能,如图 9(a)所示。同标准试件节点类似,滞回曲线大致呈现为捏缩的 Z 型,滑移段较长,具有较好的抗震性能。相比于标准试件和

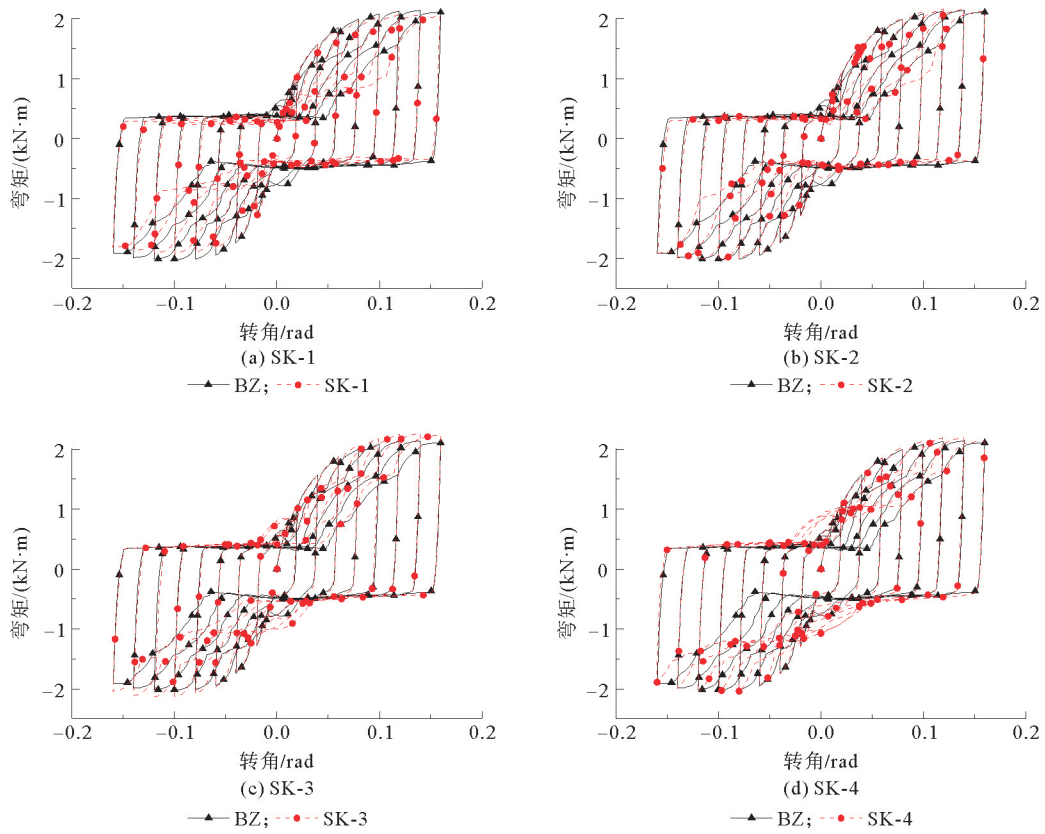


图8 榫头宽度对滞回曲线的影响

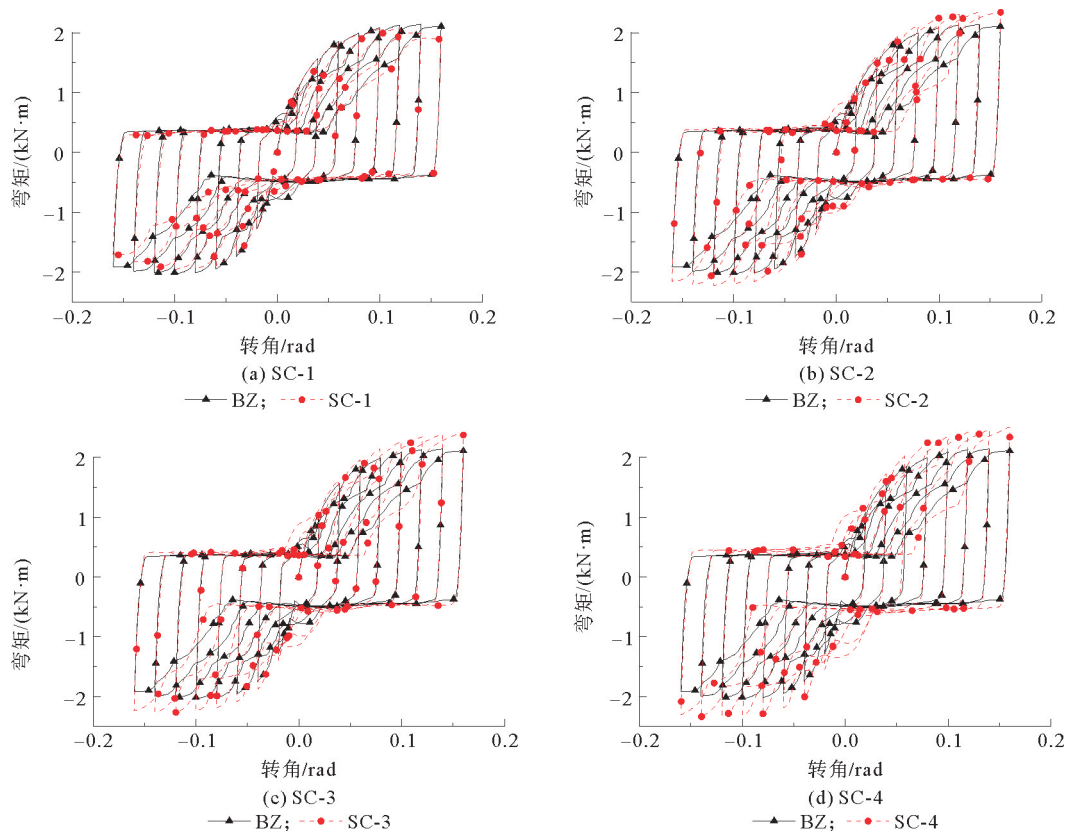


图9 榫头长度对滞回曲线的影响

SK 系列试件,SC 系列试件考虑了侧面参数变化,随着榫头长度的增加榫头侧面面积增加,榫头侧面的抵抗力明显增大。在节点发生转动时,榫头侧面与卯口之间的摩擦使耗能增加;此外,由于榫头长度增加使榫头的嵌压程度增大,进一步增大了榫头转动时的摩擦能耗。

3.2.3 收乍角度的影响

由图 10 知,收乍角度不仅影响滞回曲线的包络面积和峰值,还显著改变了曲线的形状。随着收乍角度的减小,滞回曲线逐渐由 Z 型变为弓形。当收乍角度为 0 时,节点几乎没有承载能力。承载力降低的原因在于:收乍角度的减小导致榫头的嵌压程度以及两侧面的挤压力减小。这说明收乍角度是影响燕尾榫节点抗震性能的关键因素。

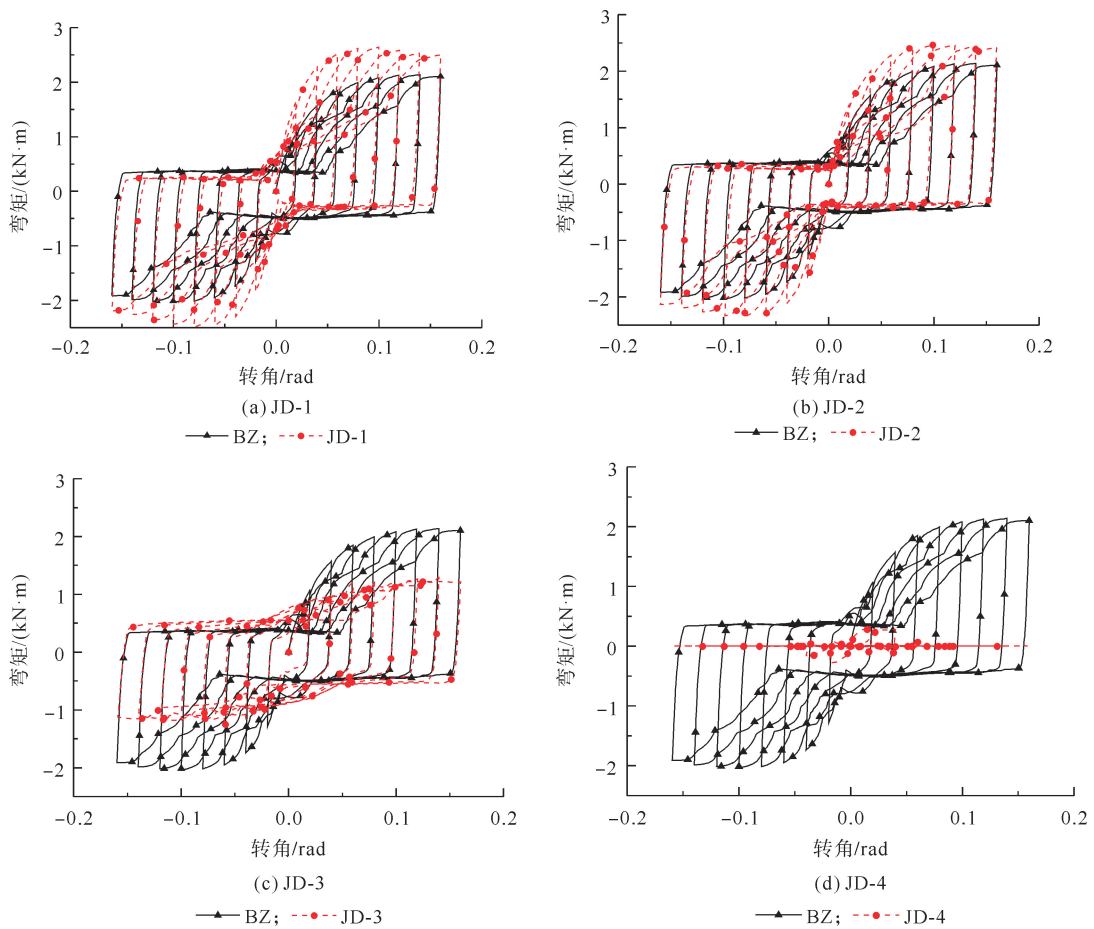


图 10 收乍角度对滞回曲线的影响

综上所述,榫头长度以及收乍角度对节点的耗能能力均有影响,其中收乍角度的影响更大。综合三者对节点抗震性能的影响,推测出节点的抗震性能主要与榫头侧面面积以及收乍角度有关。

3.3 刚度退化曲线分析

对模型进行位移加载时,燕尾榫节点随着转角的增大,表现出了明显的刚度退化现象,采用循环荷载下的割线刚度 K_i 量化刚度退化情况:

$$K_i = \frac{|+M_i| + |-M_i|}{|+\theta_i| + |-\theta_i|} \quad (1)$$

式中: M_i 为第 i 级荷载的峰值弯矩; θ_i 为对应转角。

图 11 为按式(1)计算的各试件模型的正、反向刚度退化曲线。初期刚度较大,且正向加载时的刚度略大于反向,至加载后期两者相近;随着位移的加载,两方向刚度都呈减小趋势,最终曲线趋于平缓。如图 11(a)所示,榫头宽度对节点的刚度影响程度不明显。如图 11(b)所示,增加榫头长度可小幅度提升节点

刚度。如图 11(c)所示,随着收伞角度的增加,节点的初期刚度、最终刚度均有明显提升,JD-1、JD-2 从加载前期至后期,刚度明显大于 SK 系列和 SC 系列,但 JD-1 初期刚度下降速度过快,JD-2 相对较好。

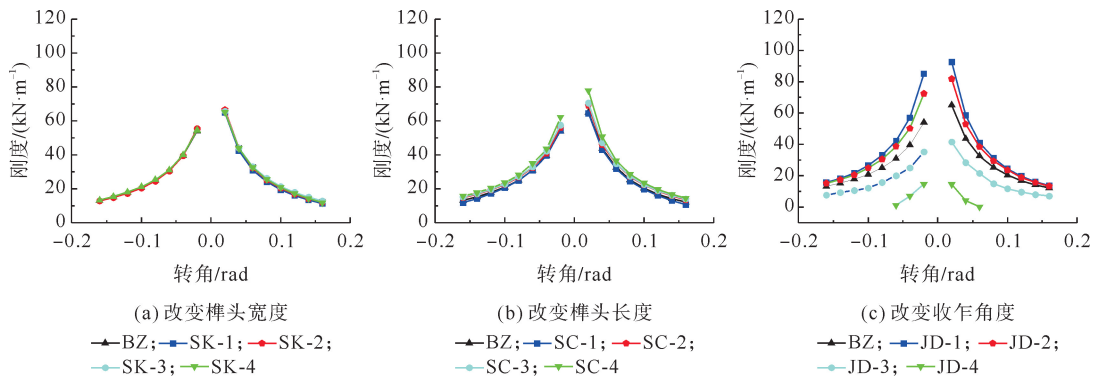


图 11 刚度退化曲线对比

可见,榫头刚度的大小主要由榫头与卯口的侧面接触面积以及榫头木材的挤压变形量决定,而与榫头非侧面木材的贡献关系不大。

3.4 骨架曲线分析

对应上述滞回曲线绘制图 12 所示骨架曲线。由图 12(a)知,从 SK-1 到 SK-4,榫额和榫颈宽度逐渐增大,且保持收伞角度不变,最大承载力分别为 2.05、2.08、2.16、2.23 kN·m,表明榫头宽度基本不影响节点的承载能力。由图 12(b)知,为保证增大榫头长度的同时收伞角度不变,略微改变了榫头宽度,从 SC-1 到 SC-4,最大承载力分别为 1.88、2.34、2.42、2.51 kN·m,又因榫头宽度对节点承载能力影响极小,因此节点承载力与榫头长度为正相关,但长度达到 70 mm 后承载力增加幅度不大。由图 12(c)可以看出,收伞角度大于 0.083 rad 时,下降段出现较早,而标准试件的骨架曲线相对较平缓。下降段的始点与榫头从卯口中拔出时间相关,由于榫头在卯口内的体积减少,导致节点承载力出现下降趋势。从控制榫头拔出时间和提高承载力的角度综合考虑,选择 JD-2 较为合适。

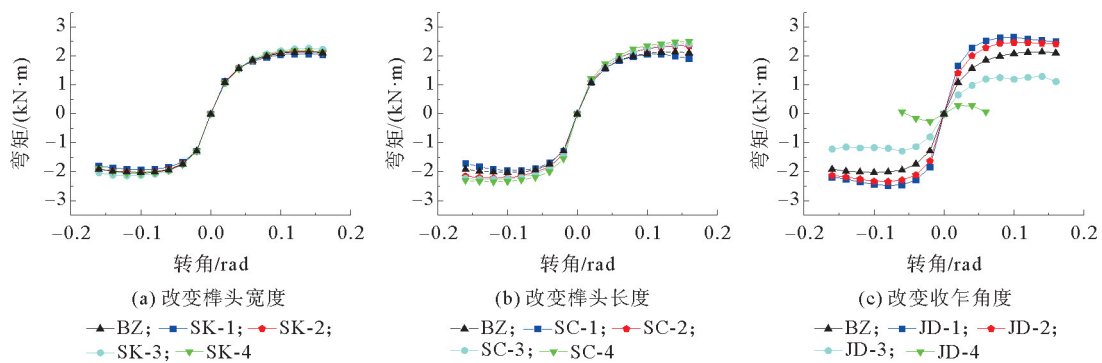


图 12 骨架曲线对比

综上所述,榫头的侧面面积和榫头的收伞角度是影响节点承载能力的 2 个重要因素,二者与榫头承载能力呈正相关。综合来看,JD-2 的结果相对较好。

3.5 榫头最终拔榫量分析

拔榫量是燕尾榫节点力学性能的一个重要参数,它表征着节点的连接性能以及在荷载作用下的变形能力。如图 13(a)所示,随着榫头宽度的增加,最终拔榫量也随之增大,且近似呈线性关系。其原因为:增大榫头宽度,则各侧面在挤压力作用下产生更大摩擦力,在卸载后榫头受摩擦阻力作用难以回到原来位置,导致拔榫量加大;如图 13(b)所示,增大榫头长度时,拔榫量逐渐下降,由于随着榫头长度的增加,榫头与

卯口的接触面积增加,可以阻止榫头拔出。

如图 13(c)所示,燕尾榫节点的最终拔榫量随着榫头收乍角度的增加,呈非线性降低趋势,收乍角度越大,拔榫量降低的速度越慢。当收乍角度为 0 时,燕尾榫节点的榫头转变为直榫节点的榫头,节点几乎没有抗拔能力;随着收乍角度的增大,燕尾榫节点的抗拔能力提升明显,但提升速度却放缓;当收乍角度大于 0.083 rad 后,其变化对榫头的抗拔能力提升不甚明显。从承载能力和耗能能力角度综合考虑,可以把较常用的收乍角度 0.083 rad 适当提高至 0.125 rad,在此基础上再适当加大榫头长度,此时连接性能会更好。

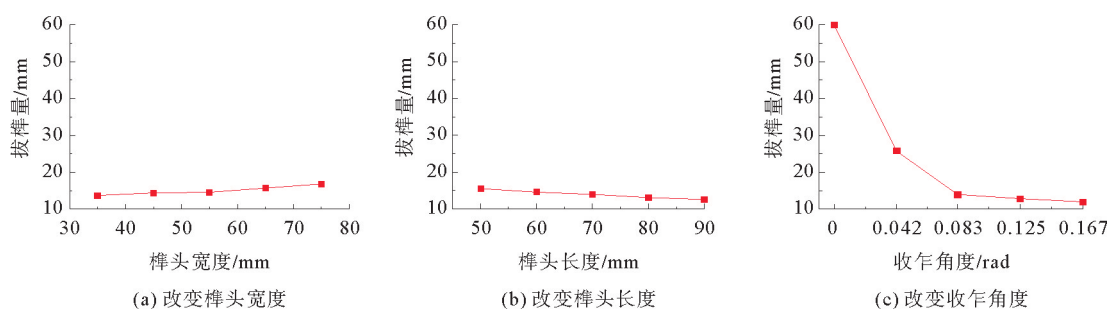


图 13 榫头最终拔榫量

4 结论

以既有试验模型为标准试件,考虑榫头宽度、榫头长度以及收乍角度的影响建立了含标准试件模型在内的 4 类有限元模型,系统分析了循环往复荷载下各节点模型的滞回曲线、刚度退化曲线、骨架曲线以及榫头拔榫量,结论如下:

1) 从滞回曲线看,收乍角度对节点的耗能能力影响更大。可以把榫头宽度、榫头长度以及收乍角度 3 种因素的影响转化为榫头侧面面积和收乍角度的影响,燕尾榫节点抗弯承载力与榫头收乍角度和侧面面积呈正相关。

2) 不能以承载力作为唯一判断依据,还要综合考虑刚度退化速度和榫头开始拔出时间。综合刚度退化曲线和骨架曲线的分析,JD-2 是相对较好的方案,其抗震性能更为优异。

3) 在实际工程设计中,可以沿用较常用的收乍角度 0.083 rad,但综合考虑拔榫量和抗震性能,建议适当提高收乍角度,并在此基础上再适当加大榫头长度,本文中采用的模型收乍角度 0.125 rad 较为合理,今后可通过试验进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 潘毅,陈建,安仁兵,等. 山地古建筑木结构抗震性能研究评述[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2022,44(2):10-21.
PAN Yi, CHEN Jian, AN Renbing, et al. A review on seismic performance of ancient timber structures on sloped loads[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2): 10-21.
- [2] 潘毅,唐丽娜,王慧琴,等. 芦山 7.0 级地震古建筑震害调查分析[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(1):140-146.
PAN Yi, TANG Lina, WANG Huiqin, et al. Investigation and analysis of damage to ancient buildings in Lushan Ms 7.0 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 140-146.
- [3] 周乾,闫维明,周锡元,等. 古建筑榫卯节点抗震性能试验[J]. 振动. 测试与诊断,2011,31(6):679-684.
ZHOU Qian, YAN Weiming, ZHOU Xiyuan, et al. Aseismic behavior of chinese ancient tenon-mortise joint[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 679-684.
- [4] 周乾,闫维明,杨小森,等. 汶川地震古建筑轻度震害研究[J]. 工程抗震与加固改造,2009,31(5):101-107.
ZHOU Qian, YAN Weiming, YANG Xiaosen, et al. Study on slight damage of a strengthened chinese ancient building under Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(5): 101-107.
- [5] THOMAS Tannert, FRANK Lam, TILL Vallée. Strength prediction for rounded dovetail connections considering size effects[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(3): 358-366.

- [6] 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.
- [7] AEJAZ S A, DAR A R, BHAT J A. Numerical study on the nonlinear behavior of full-scale timber framed joints[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction,2021,26(1):04020055. DOI:10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000539.
- [8] XUE Jianyang, GUO Rui, QI Liangjie, 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.
- [9] 潘毅,张启,王晓玥,等. 古建筑木结构燕尾榫节点力学模型研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(8):151-159.
PAN Yi, ZHANG Qi, WANG Xiaoyue, et al. Research on mechanical model of dovetail joint for Chinese ancient timber structures[J]. Journal of Building Structures,2021,42(8):151-159.
- [10] 杨娜,钟凯,秦术杰. 基于分式析因设计的燕尾榫节点抗弯性能研究[J]. 建筑科学与工程学报,2018,35(5):32-38.
YANG Na, ZHONG Kai, QIN Shujie. Research on flexural behavior of dovetail mortise-tenon joint based on fractional factorial design[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2018,35(5):32-38.
- [11] HU Wengang, LIU Na. Comparisons of finite element models used to predict bending strength of mortise-and-tenon joints[J]. BioResources,2020,15(3):5801-5811
- [12] 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,2015,35(3):232-241.
XIE Qifang, ZHENG Peijun, CUI Yazhen, et al. Experimental study on seismic behavior of straight mortise-tenon buildings joints of ancient timber buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2015,35(3):232-241.
- [13] JEONG G Y, PARK M J, HWANG K H, et al. Effects of geometry on mechanical behavior of dovetail connection[C]//World Conference on Timber Engineering. Auckland,2012:19.
- [14] 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 Minggang, QIU Hongxing. Experimental study on seismic behavior of mortise-tenon joints of ancient architectures[J]. Building Science,2011,27(7):56-58.
- [15] PARK J S, HWANG K H, PARK M J, et al. Tensile performance of machine-cut dovetail joint with Larch glulam[J]. Journal of the Korean Wood Science and Technology,2010,38(3):199-204.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

(上接第17页)

- [14] LI V C. Steady state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. Journal of Engineering Mechanics,1992,118(11):2246-2264.
- [15] 徐梁晋,王义博,张志刚,等. 预制ECC管混凝土桥墩拟静力试验研究[J]. 工程力学,2021,38(5):229-238.
XU Liangjin, WANG Yibo, ZHANG Zhigang, et al. Quasi-static test study on precast ECC concrete-filled tubular bridge piers[J]. Engineering Mechanics,2021,38(5):229-238.
- [16] CAI Jingming, PAN Jinlong, SU Hao, et al. Experimental study on the hysteretic behavior of ECC-encased CFST columns[J]. Engineering Structures,2018,173:107-121.
- [17] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验方法规程[S].
JGJ/T 101—2015, Specifying of testing methods for earthquake resistant building[S].

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)