

榫卯式多孔柱的单轴压缩力学行为与吸能特性分析

张晓蕾 马思逸 李新波 李旺斐 邓庆田

Mechanical Behaviors and Energy Absorption Characteristics of Mortise and Tenon Porous Columns under Uniaxial Compressive Loading

ZHANG Xiaolei, MA Siyi, LI Xinbo, LI Wangfei, DENG Qingtian

引用本文:

张晓蕾,马思逸,李新波,等. 榫卯式多孔柱的单轴压缩力学行为与吸能特性分析[J]. 高压物理学报, 2025, 39(7):074203. DOI: 10.11858/gywlxb.20240949

ZHANG Xiaolei, MA Siyi, LI Xinbo, et al. Mechanical Behaviors and Energy Absorption Characteristics of Mortise and Tenon Porous Columns under Uniaxial Compressive Loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(7):074203. DOI: 10.11858/gywlxb.20240949

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240949

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

3D打印梯度Gyroid结构的动态冲击响应

Dynamic Behavior of 3D Printed Graded Gyroid Structures under Impact Loading 高压物理学报. 2021, 35(3): 034201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210701

圆形手性多胞管轴向冲击下的耐撞性分析

Crashworthiness Analysis of Circular Chiral Multicellular Tubes under Axial Impact 高压物理学报. 2023, 37(3): 034107 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230616

轴向压缩下波纹多胞管的吸能性能

Energy Absorption of Corrugated Multi-Cell Tubes under Axial Compression 高压物理学报. 2023, 37(6): 064201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230724

模块化多孔结构的变形模式及吸能特性

Deformation Mode and Energy Absorption of Modularized Cellular Structures 高压物理学报. 2024, 38(6): 064106 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240737

多孔工字梁的准静态压缩稳定性及能量吸收性能

Quasi-Static Compression Stability and Enegy Absorption Performance of Cellular I-Beam 高压物理学报. 2023, 37(4): 044103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230657

双应力平台星形结构的设计与力学性能

Design and Mechanical Properties of Star-Shaped Structure with Double Stress Plateaus 高压物理学报. 2023, 37(3): 034106 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230614 DOI: 10.11858/gywlxb.20240949

榫卯式多孔柱的单轴压缩力学行为与吸能特性分析

张晓蕾1,马思逸1,李新波1.2,李旺斐1,邓庆田1.2

(1. 长安大学理学院,陕西西安 710064;2. 长安大学西安市结构损伤数字化检测技术重点实验室,陕西西安 710064)

摘要:将传统木结构建筑的榫卯连接方法引入多孔柱中,在保持多孔柱的孔隙率相同的情况下,探究了连接方式、高度、孔型和孔数对结构力学行为和吸能特性的影响;通过试验测试和 有限元模拟计算,研究了多孔柱模型在单轴压缩作用下的力学行为和能量吸收性能。结果表明:榫卯式多孔结构在实现快速装配的同时,内凹形模型的后期承载力较好,六边形孔型模型的 承载力和吸能特性较好,单孔模型的承载力较好,多孔模型的吸能特性较好。

关键词:力学行为;榫卯式多孔柱结构;单轴压缩试验;有限元方法;吸能特性

中图分类号:O341; O521.9 文献标志码: A

近年来, 榫卯结构作为传统木结构的一种重要连接方式, 在现代建筑技术等领域中得到了新的应用与研究^[1]。榫卯式结构应用在混凝土结构和传统木结构中, 可以提高结构的施工效率^[2]和抗震性能^[3]。 Zhang 等^[4]研究了木填充墙对传统木结构抗震行为的增强作用, 发现传统木结构填充墙可以提高木结构的刚度和极限承载力。Panoutsopoulou等^[5]针对传统榫卯T形接头开展了单调和循坏实验, 分析了 该连接方式对木结构强抗震性能的影响。Zhang 等^[6]构建了一种榫卯结构摩擦电纳米发电机, 发现榫 卯结构可以实现高度的坚固性和空间划分。榫卯式结构在现代的应用不仅体现了对传统建筑技术的 传承, 也展示了现代建筑技术的创新。

周期性多孔结构具有轻质、高强等优异的力学性能和减振、能量吸收等多功能特性^[7]。Li 等^[8] 针对球形多孔结构(spherical porous structure, SPS)的研究表明,泡孔的尺寸、层数和厚度均会影响 SPS 的抗压性能。Yin 等^[9] 研究发现,分层三维多孔(H₃DP)结构较传统材料或结构具有相对较高的吸能特性。杜义贤等^[10] 研究了以负泊松比和刚度为目标的拓扑优化模型,得到了兼具吸能和承载性能的多孔结构。黄浩等^[11] 研究了多孔结构的抗冲击性能和对冲击波的衰减作用,发现多孔结构能有效衰减冲击波的峰值压力和总能量,孔径和孔隙率的增加可以提高能量吸收能力。Gao 等^[12] 制备并研究了木纤维增强聚甲基丙烯酸甲酯多孔复合材料,发现该材料可以进一步优化透明纤维木材的机械性能和热性能,吸能性能优异。Yan 等^[13] 提出了一种新型的管增强吸收蜂窝夹层结构,发现该结构具有出色的电磁吸收和承载性能。因此,多孔结构被广泛应用于汽车、航空航天等领域。

将榫卯理念引入多孔结构连接中可以有效保护其不受外部机械应力破坏^[14]。成瑶^[15]研究发现,在 多孔材料 PAN 纤维中预埋 ALOOH,可以与水滑石的外延生长在几何构型上形成类似榫卯结构的相互 穿插,使水滑石稳定地负载在聚合物纤维上。张宽等^[16]研究了复合材料蜂窝夹层结构榫卯胶接 T 形接 头的弯曲破坏机理,发现增加榫头的宽度和数量能显著提高 T 形接头的弯曲刚度。李腾等^[17]研究了多 孔柱在准静态压缩下的力学行为和吸能特性。

^{*} 收稿日期: 2024-11-28; 修回日期: 2025-01-20

基金项目:长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102124501);材料成形与模具技术全国重点实验室开放基金(P2024-030)

作者简介:张晓蕾(2001-),女,本科,主要从事吸能结构研究.E-mail: 2021900944@chd.edu.cn

通信作者:邓庆田(1980-),男,博士,副教授,主要从事多孔材料与结构力学性能研究. E-mail: dengqt@chd.edu.cn

基于此,本研究将榫卯式结构引入多孔柱中,保持多孔柱的孔隙率相同,使用 3D 打印熔融丝技术 制备模型,探究通过榫卯方式连接的不同高度、孔型、孔数的多孔柱在单轴压缩下的力学行为和能量 吸收性能;采用 SOLIDWORKS 软件建模、ABAQUS 软件开展有限元模拟,并与试验结果进行对比验证。

1 榫卯式多孔柱模型

榫卯式多孔柱结构选用具有正、负泊松比效应的正六边形和内凹形 2 种孔型建立基本模型,如图 1 所示。确定正六边形基本模型的外边长为 40.00 mm,内边长为 28.45 mm,壁厚为 10.00 mm,连接部分六边形的外边长为 37.11 mm,内边长为 31.40 mm,壁厚为 5.00 mm。保证模型孔隙率均为 50.6%,计算得到内凹形基本模型的外边长为 83.13 mm,内边长为 56.91 mm,壁厚为 7.57 mm,连接部分内凹形外边长为 76.57 mm,内边长为 63.46 mm,壁厚为 3.79 mm。



图 1 2 种基本模型示意图



组成榫卯式多孔柱部件的尺寸包括外接圆半径(r)和高度(h)。正六边形的外接圆半径r₁=40.00 mm, 内凹形的外接圆半径r₂=52.59 mm。榫卯式多孔柱结构由 3 种基本部件装配组成,中部基本零件的高度 *h*₁=30 mm,顶部和底部基本零件的高度*h*₂=20 mm,榫卯式连接部分的凹凸处的高度*h*₃=10 mm。如图 2 所示,多孔柱结构通过基本部件的榫卯吻合进行拼接,4 层结构的高度为 70 mm,5 层结构的高度为 90 mm,6 层结构的高度为 110 mm。

2 种榫卯结构的参数如表 1 所示。模型命名规则如下: 以模型 Hex-70-1 和 Con-70-1 为例, Hex 和 Con 代表孔型, 分别表示正六边形结构和内凹形结构; 70 表示结构的高度, 1 表示模型孔数。



Fig. 2 Schematic diagram of the assembly model and basic part structure (taking Con-110-19 as an example)

			of tise-and-teno	n porous column	i model		
Hole pattern	Height/mm	Hole number	Model	Hole pattern	Height/mm	Hole number	Model
Regular hexagon	70	1	Hex-70-1	Concave	70	1	Con-70-1
	70	7	Hex-70-7		70	7	Con-70-7
	70	19	Hex-70-19		70	19	Con-70-19
	90	1	Hex-90-1		90	1	Con-90-1
	90	7	Hex-90-7		90	7	Con-90-7
	90	19	Hex-90-19		90	19	Con-90-19
	110	1	Hex-110-1		110	1	Con-110-1
	110	7	Hex-110-7		110	7	Con-110-7
	110	19	Hex-110-19		110	19	Con-110-19

表 1 榫卯式多孔柱模型 Table 1 Mortise-and-tenon porous column model

2 研究方法

本研究采用试验测试和有限元模拟两种方法,在孔隙率不变的情况下,分析高度、孔型和孔数等 因素的影响,研究榫卯式多孔柱模型在单轴压缩作用下的力学行为和能量吸收性能。

2.1 试验测试

试验在室温条件下进行,使用万能试验机 CMT5305 逐一对试件进行准静态加载,以1 mm/min 的 速率匀速加载至 30 mm,并采用位移传感器采集试验数据,同时用摄像机记录变形过程。试件采用增 材制造(additive manufacturing, AM)熔融沉积成形工艺制备:采用聚乳酸(polylacticacid, PLA)材料(密度 为 1.25 g/cm³,弹性模量为 2.3 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服强度为 45 MPa),通过极光尔沃 A6 版本 3D 打印 机,设定最佳的打印参数为:打印层高 0.2 mm,挤出头温度 210 ℃,打印平台温度 50 ℃,打印速度 30 mm/s, 重叠百分比 20%。试验加载装置及试件制备如图 3 所示。



图 3 试验设备与试件制备 Fig. 3 Test equipment and specimen preparation

2.2 有限元模拟

采用 ABAQUS 软件对榫卯式多孔柱结构进 行单轴压缩的动力显式有限元模拟。夹具与模型 间的接触形式为铰接和摩擦接触,摩擦因数为 0.3,夹具之间的接触形式为铰接,夹具底端固定 端约束,顶端在压头处分步施加载荷至 30 mm,如 图 4(b)所示。采用六面体网格对模型进行划分, 网格类型选用 C3D8R 八节点线性六面体单元。 在求解过程中,保持约束和载荷不变,逐步细化网 格,发现网格疏密对结果的影响可以忽略不计,为 此,取网格尺寸为 2 mm。采用四面体网格对夹具





进行划分,网格尺寸为10mm,如图4(c)所示。有限元模拟采用弹塑性本构关系,主要观察模型整体的 变形及结构破坏形式,模拟结果如图5所示。

分析图 5 中的模拟结果,所有模型压缩 30 mm 后均发生明显压缩变形,在单轴压缩的作用下模型 长度减小,部分区域宽度增加,且在后续试验中没有发生失稳。在不同参数的条件下,模型发生变形的 位置不同,Hex-90-1、Con-110-1、Con-110-7 和 Con-110-19 的初始变形位置位于模型上部,Hex-110-1 和 Con-90-1 的初始变形位置处于模型下部,其余模型的初始变形位置处于模型中部。后续模型其他连接 部位也发生轻微变形,并逐渐向模型外部扩展。正六边形模型的初始变形多发生在中部,内凹形模型 的初始变形多发生在上下两端。正六边形模型的应力集中处位于侧棱,内凹形模型在负泊松比效应的 影响下,应力集中处位于侧面。



Fig. 5 Simulation results of mortise-and-tenon porous column structure compressed by 30 mm

3 结果与分析

采取模型下压 30 mm 时的单轴压缩试验结果与发生相对应压缩变形时的模拟应力云图进行对比, 并将试验数据的承载力-位移曲线与拟合的模拟承载力-位移曲线进行对比,探究连接方式、高度、孔型 和孔数对抗压强度和吸能特性的影响。

3.1 连接方式的影响

取 90 mm 的多孔柱一体模型(简称 A-Hex 或 A-Con)和 90 mm 的榫卯式多孔柱模型进行单轴压缩 试验,研究榫卯连接方式对多孔柱结构在单轴压缩试验中的力学行为和吸能特性的影响,分别取正六 边形和内凹形 2 种孔型,并取孔数为 1 和 7,其承载力-位移曲线如图 6 所示,试验数据如表 2 所示。



图 6 采取不同连接方式的模型的承载力-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of models with different connection modes

T (1 4 6		1.66		
表 2	采取不	同连接方式	的模型的	试验数据	

Table 2	Test data of models with different connection modes
Table 2	Test data of models with different connection mode

Model	Maximum force/kN	Displacement/mm	Model	Maximum force/kN	Displacement/mm
Hex-90-1	82.35	2.94	Con-90-1	91.51	3.77
A-Hex-90-1	95.51	8.25	A-Con-90-1	96.94	7.71
Hex-90-7	77.62	3.51	Con-90-7	58.59	9.17
A-Hex-90-7	106.13	12.99	A-Con-90-7	122.27	4.13

能量吸收是评估结构抵抗压缩性能的主要依据。对比结构吸收的总能量、比吸能和平均压溃力, 研究轻质多孔柱的连接方式改变前、后的吸能差异。设能量吸收*E*a为试件压缩至原高度的 66.67% 过 程中吸收的总能量,表示为

$$E_{\rm a} = \int_{0}^{L} F(s) \mathrm{d}s \tag{1}$$

式中:L为试件压缩行程,F(s)为试件压缩过程中荷载F关于位移s的函数。

平均压溃力F_m是量化试件压溃过程的重要参数之一,为试件在整个准静态压缩过程中的平均承载力,即压缩行程L之内所吸收的总能量E_a与压缩行程L之比,表示为

$$F_{\rm m} = E_{\rm a}/L \tag{2}$$

由式 (1) 和式 (2) 计算可得连接方式对模型能量吸收的影响,如表 3 所示。通过分析图 6 和表 2 结果,在高度、孔型和孔数保持一致的情况下,相比多孔柱一体模型,榫卯式多孔柱模型的最大承载力普遍下降,最大承载力对应的位移也较小。在正六边形结构压缩 30 mm 过程中,Hex-90-1 的最大承载力比 A-Hex-90-1 下降 13.77%,发生最大承载力的位移减小 64.36%;Hex-90-7 的最大承载力比 A-Hex-90-7 下降 26.86%,发生最大承载力的位移减小 72.98%。在内凹形结构压缩 30 mm 过程中, Con-90-1 的最大

Table 3 Energy absorption data of models with different jointing modes								
Model	$E_{\rm a}/{\rm kJ}$	$F_{\rm m}/{ m kN}$	Model	$E_{\rm a}/{\rm kJ}$	$F_{\rm m}/{\rm kN}$			
Hex-90-1	1.80	60.00	Con-90-1	1.54	51.33			
A-Hex-90-1	2.44	81.33	A-Con-90-1	1.97	65.67			
Hex-90-7	1.84	61.33	Con-90-7	1.43	47.67			
A-Hex-90-7	2.85	95.00	A-Con-90-7	2.70	90.00			

表 3 采用不同连接方式的模型的能量吸收数据 Table 3 Energy absorption data of models with different jointing mo

承载力比 A-Con-90-1 下降 5.60%, 发生最大承载 力的位移减小 51.10%; Hex-90-7 的最大承载力比 A-Hex-90-7 下降 26.86%, 发生最大承载力的位移 减小 72.98%。对比 2 种结构模型的最大承载力, 除了 Hex-90-1 外, 榫卯式结构模型在 30 mm 位移 附近的承载力高于一体模型, 说明榫卯式多孔柱 模型在较大受压距离条件下, 承载力的表现更加 稳定。由表 3 可知, 多孔柱一体模型在单轴压缩 试验中的能量吸收能力优于榫卯式多孔柱模型。

通过改变多孔柱的连接方式,从图 7 可以清 楚地看到,多孔柱一体模型发生压缩破坏,从中部 发生挤压变形。榫卯式多孔柱结构的各层连接处 均发生形变,随着压缩位移的增大,出现脆裂,且 模型中力的传递较差。

 0 mm
 20 mm
 30 mm

 0 mm
 20 mm
 30 mm

 (a) Uniaxial compression test of a one-piece model
 30 mm

 0 mm
 20 mm
 30 mm

 (b) Uniaxial compression test on a model of mortise-and-tenon construction
 图 7

 图 7
 单轴压缩试验过程

 Fig. 7
 Uniaxial compression test process

3.2 模型高度的影响

考虑正六边形和内凹形 2 种孔型及 1、7、19 这 3 种孔数,研究高度参数对榫卯式多孔柱抗压能力和吸能特性的影响,高度分别取 70、90 和 110 mm,不同高度下 2 种模型的承载力-位移曲线如图 8 所示,





074203-6

最大承载力和位移试验数据如表 4 所示。由式 (1) 和式 (2) 计算可得高度因素对模型能量吸收的影响, 如表 5 所示。

Table 4 Test results of models compressed by 50 min								
Model	Maximum force/kN	Displacement/mm	Model	Maximum force/kN	Displacement/mm			
Hex-70-1	83.90	4.48	Con-70-1	79.14	3.90			
Hex-90-1	82.42	4.90	Con-90-1	91.57	4.78			
Hex-110-1	71.41	5.45	Con-110-1	65.71	5.11			
Hex-70-7	75.85	4.33	Con-70-7	68.23	29.80			
Hex-90-7	77.64	4.78	Con-90-7	58.60	10.60			
Hex-110-7	70.76	6.13	Con-110-7	96.94	7.75			
Hex-70-19	80.24	3.95	Con-70-19	74.76	24.88			
Hex-90-19	70.80	21.75	Con-90-19	65.60	29.97			
Hex-110-19	67.76	5.53	Con-110-19	70.34	20.03			

表 4 模型下压 30 mm 的试验结果 Table 4 Test results of models compressed by 30 mm

表 5 模型下压 30 mm 的能量吸收数据

Table 5 Energy absorption of models compressed by 50 mm							
Model	$E_{\rm a}/{\rm kJ}$	$F_{\rm m}/{ m kN}$	Model	$E_{\rm a}/{ m kJ}$	F _m /kN		
Hex-70-1	1.70	56.67	Con-70-1	1.30	43.33		
Hex-90-1	1.73	57.67	Con-90-1	1.48	49.33		
Hex-110-1	1.03	34.33	Con-110-1	1.43	47.67		
Hex-70-7	1.84	61.33	Con-70-7	1.60	53.33		
Hex-90-7	1.76	58.67	Con-90-7	1.36	45.33		
Hex-110-7	1.64	54.67	Con-110-7	1.97	65.67		
Hex-70-19	2.00	66.67	Con-70-19	1.82	60.67		
Hex-90-19	1.82	60.67	Con-90-19	1.53	51.00		
Hex-110-19	2.20	73.33	Con-110-19	1.71	57.00		

Table 5 Energy absorption of models compressed by 30 mm

由图 8 和表 4 可以看出,随着高度的增大,正六边形孔数为 1 和 19 的结构的最大承载力递减,正六 边形孔数为 7 和内凹形单孔的最大承载力先升高后下降,内凹形多孔结构的最大承载力递增。Hex-70/90/110-1 的最大承载力先下降 1.76%,再下降 13.36%;对应位移先增加 8.57%,再增加 11.22%。Hex-70/90/110-7 的最大承载力先升高 2.36%,再下降 8.86%,对应的位移先增加 10.39%,再增加 28.24%。 Hex-70/90/110-19 的最大承载力先下降 11.76%,再下降 14.18%,对应的位移先增加 450.63%,再减少 74.57%。Con-70/90/110-1 的最大承载力先升高 15.71%,再下降 28.20%,对应的位移先增加 22.56%,再增 加 6.90%。Con-70/90/110-7 的最大承载力先下降 14.11%,再升高 65.43%,对应的位移先增加 22.56%,再增 加 6.90%。Con-70/90/110-19 的最大承载力先下降 12.25%,再升高 6.34%,对应的位移先增加 20.46%,再下降 33.17%。对比模拟计算的承载力-位移曲线与试验测试的承载力-位移曲线可以看出,高 度对模型抗压性能弹性阶段的影响一致,验证了模拟结果的正确性。分析表 5 结果,随着高度增加,除 Hex-110-19 的吸能性能较高以外,其余六边形模型的吸能性能逐渐降低;对于内凹形模型,随着高度增 加,除孔数为 7 的模型的吸能特性先增大后减小以外,其余模型的吸能特性均先减小后增大。由表 5 可知,当高度取 70、90 和 110 mm 时,随高度增加,模型承载力和吸能特性提升。

分析图 9 和图 10 结果可以看出: 榫卯式多孔柱结构在连接处易发生形变, 随着高度增加, 六边形 单胞在上部发生塑性形变, 其余易在中上部发生形变, 随后其余部分受力形变, 且模型形变更易集中在 中上部。



图 9 考虑高度因素模型的单轴压缩试验





图 10 考虑高度因素模型下压 30 mm 的模拟应力云图和试验结果

Fig. 10 Stress contour and test results with modification of the height under 30 mm lower pressure

通过建立多元线性回归模型能够定量分析各个自变量对因变量的影响程度,多元线性回归分析结果如表6所示。表中: R²表示该模型的解释能力,显著性值 P 表示该模型在整体上的统计显著性, B 为回归方程中自变量的系数。由表6可知,当高度取70~110 mm时,随高度增加,模型承载力和吸能特性越好。

表 6 多元线性回归分析结果

]	Table 6 Res	ults of the multip	le linear regression a	nalysis		
Torontick contribute	$D^{2}/0/$	D	В				
Implicit variable	K / 70	P	Height	Hole patten	Hole number	Constant	
Force	19.3	0.375	20.833	-3 888.889	-559.524	85 160.714	
Energy uptake	38.4	0.072	2 083.333	-222 222.222	11 111.111	1 734 722.222	

3.3 孔型的影响

取正六边形和内凹形 2 种孔型, 研究孔型对榫卯式多孔柱抗压能力的影响, 并进行吸能分析, 榫卯 式多孔柱高度分别为 70、90 和 110 mm, 孔数分别为 1、7 和 19, 进行单轴压缩试验下压 30 mm 和有限元 模拟。考虑孔型因素模型的承载力-位移曲线如图 11 所示, 各模型对应的最大承载力和位移试验结果 见表 4, 吸能情况见表 5, 模型仿真模拟应力结果如图 12 所示。



Fig. 11 Load carrying capacity-displacement curve for different hole shape

从图 11 和表 4 结果可以看出,保持榫卯轻质多孔柱结构的高度和孔数不变,与正六边形孔型对 比,按表 4 中内凹模型的顺序,内凹孔型的最大承载力分别下降 5.67%、升高 11.10%、下降 7.98%、下降 10.05%、下降 24.52%、升高 37.00%、下降 6.83%、下降 7.34% 和升高 3.80%,最大承载力对应的位移除孔 数为 1 的模型分别下降 12.95%、2.45% 和 6.24% 以外,其他内凹形孔型模型均较正六边形孔型升高 588.22%、121.76%、26.43%、529.87%、37.79% 和 262.21%。六边形孔型的最大承载力普遍优于内凹型, 除高度为 90 mm 的内凹型单胞和高度为 110 mm 的内凹型多胞的最大承载力优于六边形以外,其余内 凹型模型数据均小于六边形孔型模型。因此,正六边形榫卯式多孔柱模型的承载力更好。

由表 5 可知,除模型 Hex-110-1 和 Hex-110-7 的吸能特性弱于对应的内凹模型外,其余六边形孔型 模型的吸能均优于内凹型孔型。由图 12 可知,六边形孔型的初始变形多发生在模型中部,内凹形孔型 的初始变形多发生在模型上层,其原因是内凹孔型具有负泊松比属性。由表 6 可知,正六边形榫卯式 多孔柱模型的承载力和吸能特性更好。





3.4 孔数的影响

取孔数分别为1、7和19,保持孔型、多孔柱高度不变,研究孔数对榫卯式多孔柱抗压能力的影响, 并进行吸能分析,榫卯式多孔柱高度分别为70、90和110mm,孔型分别为正六边形和内凹形。考虑孔 数因素模型的承载力-位移曲线如图13所示,各模型对应的最大承载力和位移试验数据见表4,吸能情 况见表5,模拟应力结果如图14所示。

通过分析图 13 和表 4 可得,保持榫卯多孔柱结构高度和孔型不变时,随着孔数增加,Hex-70、Con-70、Con-90 模型的最大承载力先分别下降 9.59%、13.79% 和 36.01%,再升高 5.79%、9.57% 和 11.95%。 Hex-90、Hex-110 模型的最大承载力先分别下降 5.80% 和 0.91%,再下降 8.81% 和 4.24%。Con-110 模型 的最大承载力先升高 47.53%,再下降 27.44%。除 Con-110-7、Con-110-19 的最大承载力优于对应孔数 为 1 的模型,其余孔数大于 1 的模型的最大承载力均小于孔数为 1 的模型。由表 5 可知,孔数增大时, 模型的能量吸收也增大。正六边形孔型模型和 Con-70 模型的能量吸收随孔数增加而增加,且单调上 升; Con-90 模型的能量吸收随孔数增加先减小后增大, Con-110 模型的能量吸收则先增大后减小,且非 单调上升。由图 14 可知:孔数为 1 时,模型的初始变形位置多发生在模型两端;孔数大于 1 时,模型的 初始变形位置多发生在模型中部。由表 6 可知,孔数与榫卯式多孔柱模型的承载力大小呈负相关,与 吸收能量呈正相关。







Fig. 14 Simulation results of models with different number of holes compressed by 30 mm

4 结 论

通过对榫卯式多孔柱结构进行单轴压缩试验和数值模拟,研究了连接方式、高度、孔型和孔数对 榫卯式多孔柱结构抗压性能和吸能特性的影响规律,得到以下主要结论。

(1) 榫卯式多孔柱结构具有可替换构件, 使模型较一体模型具有更好的适应性和可调整性, 其中榫 卯式内凹模型的后续承载力优于一体模型。

(2)高度对榫卯式多孔柱模型的承载力影响不明显,但随高度的增加,榫卯式多孔柱结构的初始变 形位置更易发生在中上部。 (3) 六边形孔型的最大承载力和吸能特性大多优于内凹形。六边形孔型的初始变形位置多发生在 模型中部, 内凹形孔型的变形初始位置多发生在模型上部。

(4) 单孔模型的最大承载力普遍优于多孔模型, 多孔模型的吸能特性普遍优于单孔模型。单孔模型的初始变形位置多发生在模型两端, 多孔模型的初始变形位置多发生在模型中部。

参考文献:

- LI S C, ZHOU Z C, LUO H Z, et al. Behavior of traditional Chinese mortise-tenon joints: experimental and numerical insight for coupled vertical and reversed cyclic horizontal loads [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 30: 101257.
- [2] ZHU Z G, WU F Q, HAO J. Mechanical behavior of a novel precast concrete beam-column joint using the mortise-tenon connection [J]. Sustainability, 2023, 15(19): 14586.
- [3] 王星, 张献. 榫卯式毂节点半刚性单层球面网壳稳定性及地震响应分析 [J]. 土木工程学报, 2024, 57(10): 1–10.
 WANG X, ZHANG X. Stability and dynamic performance analysis of semi-rigid single-layer spherical reticulated shell with triodetic joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(10): 1–10.
- [4] ZHANG B Z, XIE Q F, LIU Y J, et al. Effects of gaps on the seismic performance of traditional timber frames with straight mortise-tenon joint: experimental tests, energy dissipation mechanism and hysteretic model [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 58: 105019.
- [5] PANOUTSOPOULOU L, MOUZAKIS C. Experimental investigation of the behavior of traditional timber mortise-tenon Tjoints under monotonic and cyclic loading [J]. Construction and Building Materials, 2022, 348: 128655.
- [6] ZHANG H H, ZHANG P, ZHANG W K. A high-output performance mortise and Tenon structure triboelectric nanogenerator for human motion sensing [J]. Nano Energy, 2021, 84: 105933.
- [7] 张武昆, 谭永华, 高玉闪, 等. 周期性轻质多孔结构在能量吸收和振动方面的研究进展 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(8): 1–19.
 ZHANG W K, TAN Y H, GAO Y S, et al. Research progress on energy absorption properties and vibration of periodic lightweight porous structures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(8): 1–19.
- [8] LI Q Q, GAN W J, HU L, et al. Spherical porous structures for axial compression [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 261: 108681.
- [9] YIN H F, ZHENG X J, WEN G L, et al. Design optimization of a novel bio-inspired 3D porous structure for crashworthiness [J]. Composite Structures, 2021, 255: 112897.
- [10] 杜义贤,李荣,田启华,等. 具有吸能和承载特性的多孔结构拓扑优化 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2019, 47(8): 108–113.
 DU Y X, LI R, TIAN Q H, et al. Topological optimization of porous structure with energy absorption and loading capability [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(8): 108–113.
- [11] 黄浩, 崔海林, 田晓丽, 等. 多孔结构对冲击波的衰减影响研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(1): 11–15.
 HUANG H, CUI H L, TIAN X L, et al. Study on the effect of porous structure on shock wave attenuation [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2024, 53(1): 11–15.
- [12] GAO J S, WANG X, TONG J W, et al. Large size translucent wood fiber reinforced PMMA porous composites with excellent thermal, acoustic and energy absorption properties [J]. Composites Communications, 2022, 30: 101059.
- [13] YAN L L, ZHU K Y, CHEN N, et al. Energy-absorption characteristics of tube-reinforced absorbent honeycomb sandwich structure [J]. Composite Structures, 2021, 255: 112946.
- [14] 杜晓晓. 木质衍生碳复合电极在微型超级电容器中的应用研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
 DU X X. Research on the application of wood derived carbon composite electrode in micro-supercapacitors [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2023.
- [15] 成瑶. "预埋种子-外延生长"策略制备无机-有机复合材料及其性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
 CHENG Y. Study of preparation and application of inorganic-organic materials by "seeds embedded epitaxial growth" strategy [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019.
- [16] 张宽, 郭晓宁, 张晓晶. 夹层结构榫卯 T 型接头弯曲破坏机理试验研究 [J]. 复合材料科学与工程, 2021(8): 95-99.

ZHANG K, GUO X N, ZHANG X J. Experimental study on failure mechanism of sandwich T-joint by tenon-and-mortise subjected to flexure [J]. Composites Science and Engineering, 2021(8): 95–99.

[17] 李腾, 邓庆田, 李新波, 等. 多孔柱准静态压缩力学行为和吸能特性分析 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29(2): 204-211.

LI T, DENG Q T, LI X B, et al. Analysis of quasi-static compression mechanical behavior and energy absorption characteristics of porous columns [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(2): 204–211.

Mechanical Behaviors and Energy Absorption Characteristics of Mortise and Tenon Porous Columns under Uniaxial Compressive Loading

ZHANG Xiaolei¹, MA Siyi¹, LI Xinbo^{1,2}, LI Wangfei¹, DENG Qingtian^{1,2}

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Mathematics and Mathematical Technology of Structure Damage Detection, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: By incorporating the traditional mortise-and-tenon structure commonly used in timber structures into the porous column, and the effects of jointing mode, height, hole shape and number on the mechanical behavior and energy absorption characteristics of the structure are investigated under the condition of maintaining a uniform porosity in the porous columns. The mechanical behaviors and energy absorption performance of the porous column model are studied through tests and finite element simulation under uniaxial compression. The results show that the mortise-and-tenon porous structure has a better load carrying capacity in the later stage of the concave shape while realizing rapid assembly. The hexagonal hole model has better load carrying capacity and energy absorption characteristics of the porous model are better.

Keywords: mechanical behavior; mortise and tenon perforated column structure; uniaxial compression test; finite element method; energy-absorption properties