

# 适合村镇建筑的格构木柱抗震性能数值模拟研究

王国政, 刘永军

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要:** 在我国西南村镇地区的木结构中多数采用大直径木柱, 但所需要的大直径木材生长周期较长、造价较高。为了解决这一问题, 提出一种将一定间距的小直径圆木采用螺钉、螺栓等不同连接件物理拼接到一起形成的格构木柱。并应用有限元分析软件 ABAQUS 建立模型, 在数值模拟与试验结果吻合的基础上, 分析圆木肢件间距、圆木肢件直径、轴压比等参数对格构木柱抗震性能的影响。分析结果表明: 圆木肢件间距每增加 20 mm, 位移延性系数增加约 4%; 圆木肢件直径每增加 10 mm, 骨架曲线的峰值荷载增加约 22%, 构件初始刚度增加约 27%。适当增加轴压比, 能提升构件的耗能能力。该结构具有取材容易、造价低廉等优点, 在村镇建筑中具有良好的应用前景。

**关键词:** 村镇建筑; 木柱; 格构柱; 抗震性能; 有限元

中图分类号: TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)03-0196-08

## Numerical Simulation of Seismic Performance of Latticed Timber Columns Suitable for Rural Buildings

WANG Guozheng, LIU Yongjun

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

**Abstract:** In southwest part of China, forest resources are abundant and there are a large number of timber structure village and town buildings. Large diameter timber columns are used in most of the timber structures in rural areas of southwest China, but the growth period of large diameter wood required is long and the cost is high. This paper presents a kind of lattice timber column, which is formed by using screws, bolts and other connecting parts to form a small diameter round timber with a certain distance. It has the advantages of easy materials and low cost, and has a good application prospect in village and town buildings, but its seismic performance is seldom analyzed. In this work, the finite element analysis software ABAQUS was used to establish a numerical simulation model. Based on the agreement between the numerical simulation and the test results, the effects of log limb spacing, log limb diameter and axial compression ratio on the seismic performance of lattice timber columns were analyzed. Analysis of the data shows that the displacement ductility coefficient increases about 4% when the distance between log limbs increases by 20 mm. When the diameter of log limb increases by 10 mm, the peak load of skeleton curve increases by about 22% and the initial stiffness of member increases by about 27%. An appropriate increase in axial compression ratio will increase the energy dissipation capacity of the component. The research results can provide reference for the practical application of lattice timber columns.

**Keywords:** rural buildings; timber column; lattice column; seismic performance; finite element

近些年来,绿色建筑、低碳环保等理念在国内外 得到普遍关注,不少国家纷纷开始践行节能环保的

收稿日期:2023-12-27

修稿日期:2024-02-06

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1100403)

作者简介:王国政(1997—),男,硕士研究生,研究方向为新型组合柱抗震。E-mail: 924113501@qq.com

通讯作者:刘永军(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事结构力学教学工作及多重灾害下结构性能研究工作。

E-mail: ceyjliu@sjzu.edu.cn

低碳理念。而木材作为建筑材料因其轻质高强、低碳环保的特性得到了广泛的应用,在我国西南村镇地区,木资源较为丰富,因而格构木柱在当地具有较为良好的应用前景。在西南村镇地区的木结构中,绝大部分都采用大直径木材作为柱子,因为柱子作为结构中最重要抗侧力构件和受压构件,一旦失效,直接会导致整个结构的破坏和坍塌。同时这也是传统木结构的短板,因为大部分传统木结构建筑的原材料主要采用森林中的天然木材,严重依赖于大量天然的林木资源,而木柱作为最重要的受力构件,其直径大小直接与其承载能力的强弱相关。木结构中所使用的木材直径较大,但其生长周期长,资源较为短缺,所以造价较高,这也在一定程度上限制了木结构的应用与发展。为了森林中树木的生长,每年都需要将部分小直径木材砍伐以确保剩余木材可以生长为大直径木材,而砍伐下来的小直径木材无明确的使用场景,因此可能造成无端的浪费。

格构木柱是将一定间距的小直径木材通过螺钉、螺栓等不同连接件物理拼接到一起形成的组合柱,常见的格构木柱形式有圆形截面四肢格构木柱如图1所示、矩形截面四肢格构木柱如图2所示、双肢格构木柱、外部采用缀条连接的格构木柱等。格构木柱具有取材容易、造价低廉、安装方便等优点。



图1 圆形肢件格构木柱



图2 矩形肢件格构木柱

目前,国内外专家对组合木柱的力学性能进行了诸多研究。杜姚姚<sup>[1]</sup>提出了一种结合SPF材料物理拼接的新型格构木柱,以取代传统实木柱作为重要的竖向应力构件,并为此开展了新型格构柱的轴压试验研究,并通过试验、理论和数值模拟对格构柱的破坏形式进行了对比分析。陈迪等<sup>[2]</sup>建立了4组共22根组合木柱构件用以研究新型组合柱的力学性能。通过对已建构件进行轴压试验,对其轴压

性能进行了研究。通过对各组试验数据的比较,分析了构件长细比等因素对组合木柱轴压性能的影响,为组合木结构柱的设计和应用提供了一定的参考。贺俊筱等<sup>[3]</sup>为研究木结构中木柱高径比对木柱横向抗力的影响,制作了3种不同高径比的木柱模型,研究了实木结构中木柱的抗侧力。将木柱浮搁在础石上部,通过拟静力试验,得到了木柱的滞回曲线、骨架曲线、侧移刚度、刚度退化规律和延性等力学性能,分析了高径比对上述性能指标的影响,提出了简化的木柱荷载-位移模型。Bee等<sup>[4]</sup>为有效利用小直径原木使其可作为建筑结构材料使用,提出了一种新型的层压工艺,使用垂直和水平层压的方法将方形截面的木材制成8种层压柱,对新型组合柱的弯曲和轴向压缩性能进行了评估。结果表明,新型组合柱轴向弹性模量提升了158%。Shin等<sup>[5]</sup>以韩国小直径原木为原料,研制了一种适用于韩式住宅建筑的多层胶合柱。将干燥的小方材相互胶合成多层胶合立柱,并对其强度性能进行了评价。然后,对多层胶合柱的设计荷载进行了预测,并将实际荷载与多层胶合柱的设计荷载进行了比较。

综上所述,目前国内专家学者对于小直径木材应用研究较少,而国外对于小直径木材的应用多采用将小直径木材制作成胶合木的形式投入到工程实际应用,对格构木柱的静力研究较多,而对于格构木柱的抗震性能研究较少。

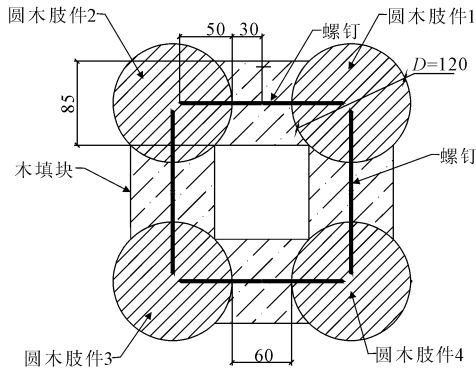
在这种背景下,本文提出一种采用物理拼接方式的新型格构木柱,利用多根小直径木材采用物理拼接的方式组合在一起形成格构柱,以此起到和单一大直径木柱相同的力学性能,同时还要解决新型格构木柱的抗火性能和抗震性能问题,重点研究新型格构木柱的抗震性能。因此,本文基于有限元分析软件ABAQUS建立格构木柱模型,分析格构木柱在拟静力试验条件下圆木肢件间距、圆木肢件直径、轴压比等参数对其抗震性能的影响。

## 1 有限元模型建立

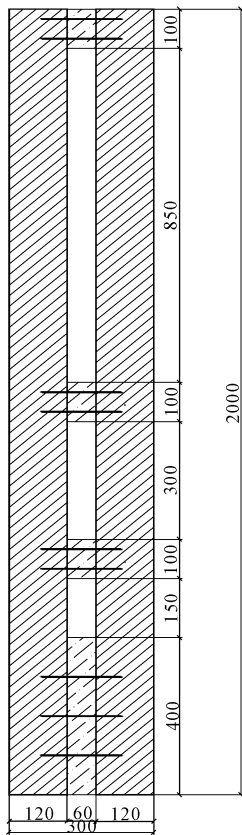
### 1.1 格构木柱试件设计

本文所提出的格构木柱模型借鉴了杜姚姚<sup>[1]</sup>提出的SPF规格材格构柱以及现有工程实际应用的格构木柱截面形式。格构木柱由4根圆木通过木填块和螺钉物理拼接到一起,形成格构木柱。4根圆木直径为120 mm,间距为60 mm。选取长度为80 mm、直径为8 mm的螺钉,在肢件与填块连接处沿着肢件与填块形心轴钉入。厚度为100 mm的填块

设置 2 排螺钉,厚度为 400 mm 的设置 3 排螺钉。螺钉钉入圆木肢件与木填块的长度分别为 50 mm 和 30 mm。格构木柱几何尺寸示意图如图 3 所示。



(a) 构件截面详图



(b) 构件立面正视图

图 3 格构木柱几何尺寸示意图

## 1.2 材料本构选取

木材因具有各向异性的特征而通常将其简化成正交各向异性材料。本文采用的木材种类为南方松。其弹性参数采用 ABAQUS 中的 Engineering Constants 输入,其值如表 1 所示。

南方松屈服强度采用顺纹抗压强度定义<sup>[6]</sup>,南方松顺纹屈服强度取值为 25.5 MPa,其屈服强度系数取值为: $R_{11} = 1, R_{22} = R_{33} = 0.36, R_{12} = 0.58, R_{23} =$

$R_{13} = 0.21$ 。

表 1 木材弹性参数

$E_1$ /MPa	$E_2$ /MPa	$E_3$ /MPa	$\mu_{12}$	$\mu_{13}$	$\mu_{23}$	$G_{12}$ /MPa	$G_{13}$ /MPa	$G_{23}$ /MPa
10490	1049	524.5	0.3	0.38	0.558	629.4	786.8	188.8

注: $E$ 为弹性模量; $\mu$ 为泊松比; $G$ 为剪切弹性模量;1、2、3 分别表示木材的纵向、径向、弦向;12 表示纵向对径向的影响;13 表示纵向对弦向的影响;23 表示径向对弦向的影响。

螺钉采用 4.8 级普通六角头木螺钉,弹性模量  $E$  为 210 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 320 MPa,抗剪强度为 224 MPa,密度为 7 850 kg/m<sup>3</sup>。

## 1.3 主要研究参数及构件和数量

所提出的新型格构木柱充分借鉴了现有的格构木柱形式。目前国内外通常将长度在 2 m ~ 6 m 之间,直径在 80 mm ~ 255 mm 之间的木材视为小直径木材<sup>[7-8]</sup>,因此在设计的格构木柱中圆木肢件长度  $L$  为 2 000 mm,圆木肢件直径  $D$  范围在 120 mm ~ 160 mm 之间。而为了充分利用木材,在现有格构木柱中连接所采用的木填块多为短小的小直径木材以及加工后所剩余的木料,而杜姚姚<sup>[1]</sup>提出的格构式木柱其肢件间距设计值为 38 mm,故所设计的木填块长度即各圆木肢件间距  $d$  在 40 mm ~ 120 mm 之间。为了研究圆木肢件间距、圆木肢件直径、轴压比等参数对格构木柱抗震性能的影响,共设计 13 个格构木柱进行有限元分析,模型参数见表 2。

表 2 有限元分析模型参数

构件编号	$L$ /mm	$d$ /mm	$D$ /mm	$f_c$ /MPa	$n$	$N$ /kN
LTC-1	2000	40	120	25.55	0.2	201.52
LTC-2	2000	60	120	25.55	0.2	201.68
LTC-3	2000	80	120	25.55	0.2	201.70
LTC-4	2000	100	120	25.55	0.2	201.83
LTC-5	2000	120	120	25.55	0.2	201.96
LTC-6	2000	80	130	25.55	0.2	258.73
LTC-7	2000	80	140	25.55	0.2	274.81
LTC-8	2000	80	150	25.55	0.2	314.18
LTC-9	2000	80	160	25.55	0.2	359.93
LTC-10	2000	100	120	25.55	0.1	100.79
LTC-11	2000	100	120	25.55	0.3	302.37
LTC-12	2000	100	120	25.55	0.4	403.16
LTC-13	2000	100	120	25.55	0.5	503.96

注: $L$ 表示构件长度; $d$ 表示圆木肢件间距; $D$ 表示圆木肢件直径; $f_c$ 表示木材顺纹抗压强度; $n$ 表示轴压比; $N$ 表示施加在构件上的轴向压力。

## 1.4 格构木柱有限元模型建立

先将 4 根圆木柱与木填块、螺钉、底部础石,上

部加载盖板通过装配模块装配在一起,圆木肢件与木填块采用“Tie”绑定约束,螺钉简化为梁单元内嵌至木柱与木填块中。

研究木柱的抗震性能,柱脚节点形式尤为关键,木柱直接搁置在柱础石上是传统木结构中柱脚节点常用形式,在水平往复荷载作用下,柱脚与础石之间的摩擦滑移特性起到了非常重要的隔震作用<sup>[9]</sup>,木柱会以柱脚与柱础石接触的边缘点为支点发生转动进而摇摆,其摇摆状态下的力学性能对木结构在地震作用下维持稳定性发挥了积极的作用<sup>[10]</sup>。

为了使格构木柱抗震性能更加贴近工程实际应用,格构木柱也采用浮搁置在础石上。根据现有木柱抗震性能数值模拟研究,格构木柱下表面与底部础石表面采用法向“硬接触”,切向库伦摩擦,摩擦系数为 0.5<sup>[3]</sup>,为了使轴向力更好的作用在圆木肢件的心形中心,故上端采用加载盖板<sup>[11]</sup>,格构木柱上部与加载盖板采用“Tie”绑定约束。

木柱与木填块、础石、加载盖板均采用 C3D8R 单元模拟,螺钉简化为空间线性梁单元(B31)内嵌至木柱与木填块中。网格稀疏,会导致结果出现明显误差,如果网格过于密集,会导致计算周期过长。因此,每个实体部件的网格密度划分要视情况而定。肢件单元宽×高×长为 15 mm×15 mm×30 mm,四肢件单元总数为 6 384,木填块单元总数 2 304,每颗螺钉单元数为 23,底部础石单元总数为 4 000,上端加载盖板单元数为 2 000。

柱顶采用位移控制的方式对柱子进行横向水平循环加载,同时在柱顶端施加恒定轴向力,用以模拟拟静力试验条件。横向水平循环荷载采用位移控制,加载制度如图 4 所示。底端边界条件设置为固定端,构件加载盖板上端设置一耦合点,轴向荷载与横向循环往复荷载均作用于耦合点处,同时限制转角与位移。建立有限元模型如图 5 所示。

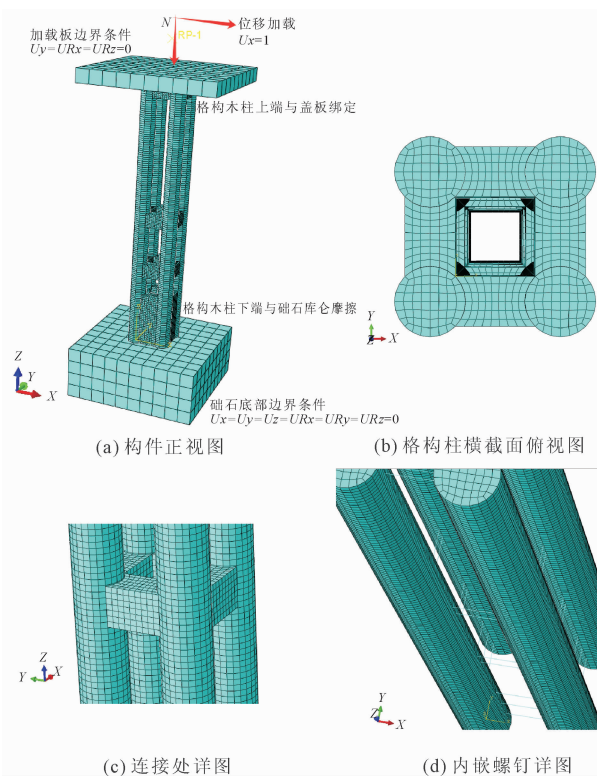


图 5 有限元模型图

### 1.5 模型可靠性验证

目前国内外专家学者对于格构木柱的抗震性能研究较少,为了验证所建立有限元模型的有效性以及研究方法的可行性,选取贺俊筱<sup>[3]</sup>为研究高径比对传统结构木柱抗侧能力影响而开展的力学试验中的 CH-1 模型。在试验中,贺俊筱将木柱 CH-1 浮搁在底部础石上,顶部采用由位移控制的横向荷载进行加载,其加载制度如图 4 所示,得到木结构柱的骨架曲线等数据进行分析。

选取其中一个木柱模型 CH-1<sup>[3]</sup>,1:1 进行建模,将有限元分析得到的数值模拟结果与现有试验结果进行对比,如图 6 所示二者误差小于 10%,有

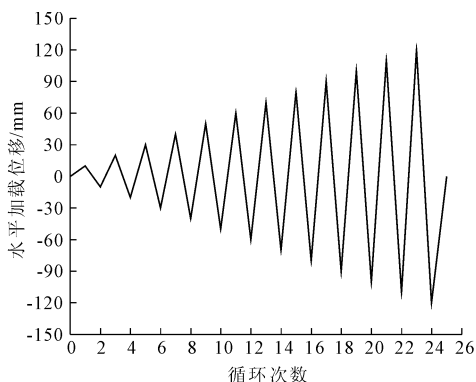


图 4 加载制度

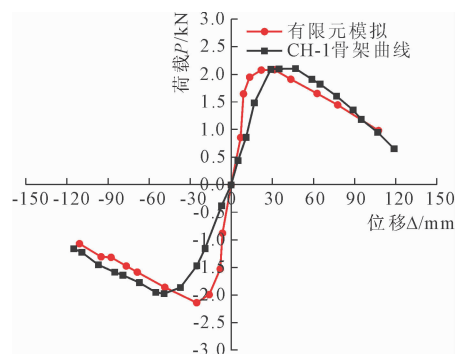


图 6 试件骨架曲线对比

效的说明了本文建立的有限元模型能够较好的还原试验结果,进而验证了所建立的有限元模型的有效性以及研究方法的可行性。

## 2 模拟结果分析

### 2.1 应力云图分析

通过 ABAQUS 有限元分析计算得到的构件应

力云图如图 7 所示。当构件水平位移加载至 120 mm 时,有限元模拟完成,此时格构木柱的整体 Mises 应力云图如图 7(a) 所示。各圆木肢件 Mises 应力云图如图 7(b) 所示,由图可知,构件应力最大处出现在底部木填块上部,柱底并无较大应力出现,说明底部木填块能较好的避免构件由于循环往复荷载作用而出现的应力集中现象。

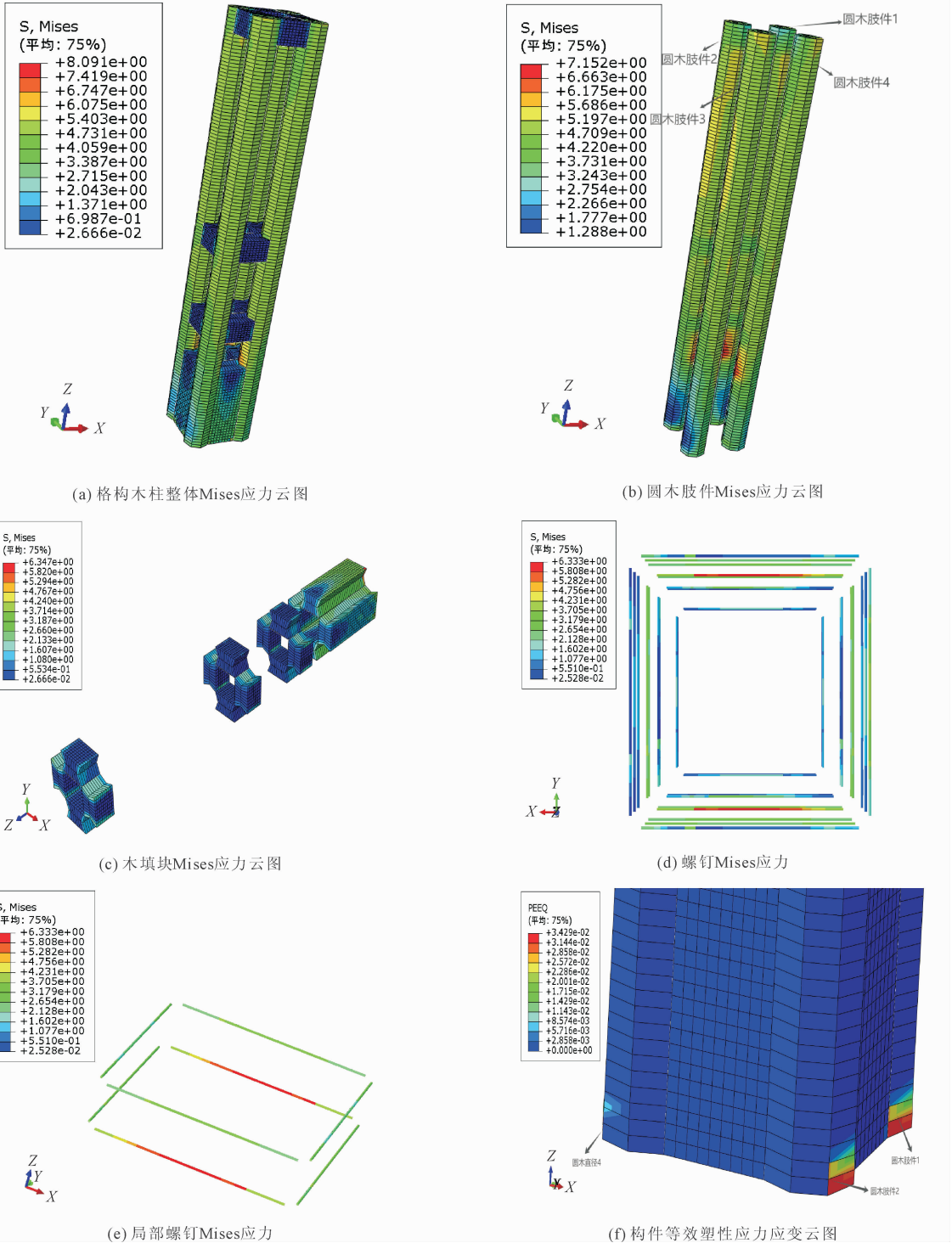


图 7 构件 Mises 应力云图

各木填块以及螺钉的 Mises 应力云图如图 7(c)、图 7(d)、图 7(e) 所示,由图可得,格构木柱在加载完成后,木填块和螺钉均承受了较大应力,说明格构木柱在受到循环往复荷载作用时,连接部件全部参加工作,并且螺钉局部应力较大,说明螺钉在格构木柱抵抗水平侧向力的过程中发挥了较大作用,且最大应力出现在格构柱下部。构件的等效塑性应变应力云图如图 7(f) 所示,格构木柱破坏主要集中在柱脚,其他位置受损程度较低。

### 2.2 骨架曲线

圆木肢件间距对骨架曲线的影响如图 8 所示,由图 8 对比分析可得,随着圆木肢件间距越大,构件骨架曲线峰值荷载增加幅度较小,由 40 mm 时 7.748 kN 增加至 120 mm 时的 11.597 kN,圆木肢件间距每增加 20 mm,峰值荷载约增加 7%。

圆木肢件直径对骨架曲线的影响如图 9 所示,由图 9 对比分析可得,随着圆木肢件直径越大,构件承载力有大幅度提高,当圆木肢件直径为 120 mm 时,骨架曲线峰值荷载为 9.718 kN,当圆木肢件直径增加到 160 mm 时,骨架曲线峰值荷载为 22.535 kN,圆木肢件直径每增加 10 mm,峰值荷载增加约 22%,构件峰值荷载所对应的峰值位移越来越小,构件初始刚度变大,由此表明圆木肢件直径大,构件刚度越大。

轴压比对骨架曲线的影响如图 10 所示,由图 10 对比分析可得,随着轴压比越大,格构木柱峰值荷载出现小幅度增加,峰值荷载所对应的峰值位移变大,构件变形能力变差,而当轴压比增加至 0.5 时,骨架曲线荷载下降至负值,木柱底部已出现较大塑性变形,格构木柱底部已出现相对滑移,构件失去承载力。

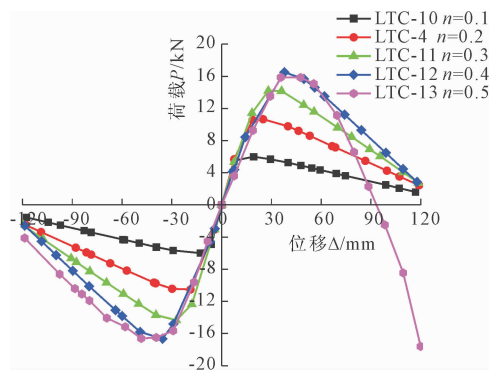


图 10 轴压比对骨架曲线的影响

综上所述,圆木肢件直径对于构件承载能力影响较大,圆木肢件间距与轴压比对格构木柱承载能力影响较小,圆木肢件直径以及轴压比对于构件变形能力影响较大。

### 2.3 刚度退化曲线

刚度退化现象是在构件遭遇地震作用后出现的正常现象,是构件在水平循环荷载作用下,构件的刚度随着位移循环荷载的增大而减小。其值为构件屈服后每级循环位移加载的峰值荷载与原点相互连线的斜率<sup>[12]</sup>。

圆木肢件间距对刚度退化曲线的影响如图 11 所示,由图 11 对比分析可得,随着圆木肢件间距由 40 mm 增加至 80 mm 时,构件初始刚度增加约 25%,但当圆木肢件间距继续增加后,构件刚度无明显变化,退化幅度、退化趋势无明显变化,说明圆木肢件间距对于构件刚度退化曲线影响较小。

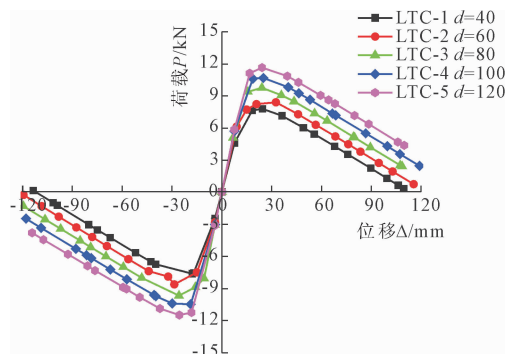


图 8 圆木肢件间距对骨架曲线的影响

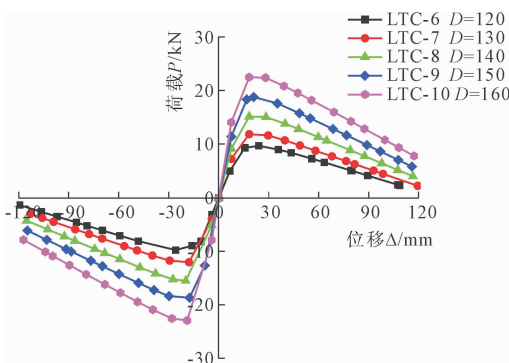


图 9 圆木肢件直径对骨架曲线的影响

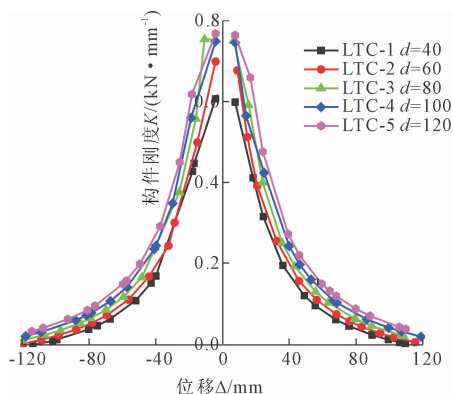


图 11 圆木肢件间距对刚度退化曲线的影响

圆木肢件直径对刚度退化曲线的影响如图 12 所示,由图 12 对比分析可得,随着圆木肢件直径越大,构件初始刚度越大,说明构件抵抗变形能力越来越强,圆木肢件直径每增加 10 mm,构件初始刚度增加约 27%,但构件刚度退化幅度越来越大,且退化速率越来越快。

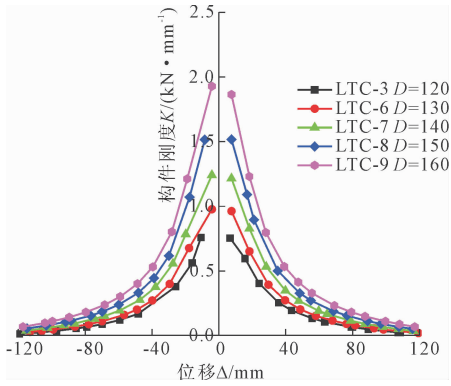


图 12 圆木肢件直径对刚度退化曲线的影响

轴压比对刚度退化曲线的影响如图 13 所示,由图 13 对比分析可得,随着轴压比在一定范围内变化,构件刚度退化曲线变化不明显,但轴压比过大会导致构件出现相对滑移,导致构件失去承载能力。

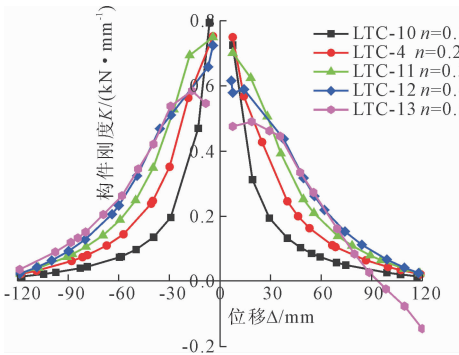


图 13 轴压比对刚度退化曲线的影响

## 2.4 位移延性系数

在诸多抗震指标系数中,位移延性系数是最为重要的系数之一<sup>[13]</sup>,其数值通常用于评估构件的抗震性能的优劣。其值由柱子的极限位移比屈服位移而得到的。

格构柱的屈服荷载和对应的屈服位移由等能量法确定<sup>[14]</sup>。当峰值荷载下降 15% 时,此时荷载所对应的位移是极限位移<sup>[15]</sup>。表 3 给出了每个构件经计算后得出的位移延性系数。由表 3 可得,随着圆木肢件间距越大,构件的屈服荷载增大,峰值荷载与对应的位移变化不明显,而构件极限位移与极限荷载变化较大,位移延性系数变大,圆木肢件间距每

增加 20 mm,位移延性系数增加 4%,说明构件变形能力随着圆木肢件间距增加而变得越来越好。

表 3 位移延性系数

构件编号	屈服点		峰值点		极限点		位移延性系数
	位移 $\Delta y/mm$	荷载 $P_y/kN$	位移 $\Delta m/mm$	荷载 $P_m/kN$	位移 $\Delta u/mm$	荷载 $P_u/kN$	
LTC-1	15.47	6.78	24.42	7.75	42.14	6.59	2.72
LTC-2	15.47	7.52	24.16	9.72	44.03	7.11	2.85
LTC-3	14.95	8.97	24.16	9.72	45.63	8.26	3.05
LTC-4	15.31	9.93	24.99	10.65	48.11	9.05	3.14
LTC-5	15.44	10.91	24.26	11.60	50.28	9.86	3.26
LTC-6	14.72	10.35	18.36	11.92	45.63	10.13	3.10
LTC-7	14.81	13.21	18.36	15.18	47.65	12.90	3.22
LTC-8	14.48	16.60	21.07	18.82	47.07	16.00	3.25
LTC-9	14.44	19.47	18.36	22.54	50.10	19.15	3.47
LTC-10	8.65	5.59	19.29	5.98	43.38	5.09	5.02
LTC-11	23.08	12.76	28.14	14.19	52.06	12.06	2.26
LTC-12	32.78	14.75	37.83	16.48	59.24	14.01	1.81
LTC-13	33.77	15.14	35.70	15.86	61.22	13.48	1.81

随着圆木肢件直径增加,构件峰值荷载变化明显,屈服荷载、极限荷载也随着峰值荷载变大而变大。圆木肢件直径每增加 10 mm,格构木柱峰值荷载增加约 22%,而延性系数变化幅度较小,直径每增加 10 mm,延性系数增加约 1%,说明圆木肢件直径对于构件变形能力的影响较小。而轴压比对于构件延性系数影响较大,随着轴压比每增加 0.1,延性系数下降约 40%,直至构件失去承载能力。

## 2.5 耗能分析

评价构建抗震性能优劣时,耗能是一个非常重要的指标。对于木柱而言,累计滞回耗能是评价构件抗震性能强弱的重要参数,它可用来衡量木柱的耗能累计。在任意一级循环加载中,木柱的滞回耗能可由滞回曲线所包络的面积表示<sup>[16]</sup>,而累计耗能则是本级循环和之前各级循环耗能量之和<sup>[17-18]</sup>,表 4 所示为各个构件计算得出的累计耗能。

表 4 累计耗能系数

构件编号	累计耗能 $/(kN \cdot mm)$	构件编号	累计耗能 $/(kN \cdot mm)$
LTC-1	307.408	LTC-8	515.469
LTC-2	303.440	LTC-9	768.816
LTC-3	295.123	LTC-10	230.374
LTC-4	292.328	LTC-11	784.220
LTC-5	288.983	LTC-12	3092.547
LTC-6	363.162	LTC-13	12617.445
LTC-7	478.271		

由表4可得随着圆木肢件间距的增大,滞回曲线面积变小,即构件累计耗能变少,圆木肢件间距每增加20 mm,累计耗能约下降3%,说明圆木肢件间距对于构件耗能影响不大。随着圆木肢件直径增大,滞回曲线面积变大,构件耗能变多,圆木肢件直径每增加10 mm,构件累计耗能约增加31%。而随着轴压比的增加,构件的累计耗能出现倍数增长,说明轴压比对构件耗能影响较大,但当轴压比增加到0.5时,构件已出较大的塑性变形,格构木柱连接处已出现相对滑移,已不适合继续承载。所以在一定范围内适当增加构件的轴压比可以提升构件的耗能能力。

### 3 结 论

(1) 通过对各个模型骨架曲线分析发现,随着圆木肢件间距越大,构件峰值荷载增加,圆木肢件间距每增加20 mm,峰值荷载约增加7%。随着圆木肢件直径越大,构件承载力有大幅度提高,圆木肢件直径每增加10 mm,峰值荷载增加约22%,构件初始刚度随之增大。随着轴压比越大,格构木柱峰值荷载出现小幅度增加,峰值荷载所对应位移变大,构件抵抗变形能力变差。

(2) 通过对各个模型刚度退化曲线分析发现,随着圆木肢件间距增加,构件刚度无明显变化,退化幅度、退化趋势无明显变化。随着圆木肢件直径越大,构件初始刚度越大,圆木肢件直径每增加10 mm,构件初始刚度增加约27%,说明构件抵抗变形能力越来越强,但构件刚度退化幅度越来越大,且退化速率越来越快。轴压比对于构件刚度退化曲线影响较小。

(3) 通过比较各模型的位移延性系数,随着圆木肢件间距越大,构件的屈服荷载变大,位移延性系数变大,圆木肢件间距每增加20 mm,位移延性系数增加4%。圆木肢件直径对于构件变形能力的影响较小。而轴压比对于构件延性系数影响较大,随着轴压比每增加0.1,延性系数下降约40%。

(4) 通过对比各个模型的累计耗能系数发现,圆木肢件间距对于构件耗能影响不大。随着圆木肢件直径增大,滞回曲线所围成的变大,构件耗能增多,圆木肢件直径每增加10 mm,构件累计耗能约增加31%。适当增加构件持荷比可以使构件耗能能力增强。

#### 参考文献:

[1] 杜姚姚. 格构式木柱轴心受压性能研究[D]. 扬州:扬州大学,2021.

- [2] 陈迪,熊海贝,刘正虎. 现代轻型木结构建筑中组合木柱轴心受压性能研究[J]. 结构工程师,2011,27(S1):206-211.
- [3] 贺俊筱,王娟,杨庆山. 考虑高径比影响的木结构柱抗侧能力试验研究[J]. 土木工程学报,2018,51(3):27-35.
- [4] Been H, Sik S J, Keita O, et al. Strength and rigidity performance of laminated members using small diameter logs[J]. Forest Products Journal, 2017,68(1):54-63.
- [5] Shin I, Kim Y, Jang S. Compression strength performance of multi-layer glued columns by using square lumbers produced from domestic small diameter logs[J]. Korean Journal of Agricultural Science, 2011,38(3):533-540.
- [6] 许清风,韩重庆,陈玲珠,等. 传统地仗保护圆木柱受火后力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2019,52(7):90-99.
- [7] 吴健梅,段时雨,徐洪澎. “废材”利用——小径原木的建构设计策略[J]. 新建筑,2021(3):87-91.
- [8] Fredriksson M, Bomark P, Broman O, et al. Using small diameter logs for cross-laminated timber production[J]. Bio Resources, 2015,10(1):1477-1486.
- [9] 赵鸿铁,张锡成,薛建阳,等. 中国木结构古建筑的概念设计思想[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2011,43(4):457-463.
- [10] 王龙,钱春宇,李俊连,等. 传统木结构柱脚节点力学模型及有限元模型研究[J]. 建筑结构,2023,53(8):132-136.
- [11] 罗瑶. 四肢钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
- [12] Llanthaler A, Jerlin Regin J, Maheswaran J. Concrete-filled steel tube columns of different cross-sectional shapes under axial compression: A review[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020,983(1):1-17.
- [13] 王铁成,张磊,赵海龙,等. 钢管混凝土柱抗震性能参数影响分析[J]. 建筑结构学报,2013,34(S1):339-344.
- [14] 张家亮,童科挺,何佳伟,等. 钢-竹组合结构梁柱耗能节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(12):255-266.
- [15] 张军朋,方先慧. 循环荷载作用下 SFRC/RC 组合柱抗震性能研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(9):9-14.
- [16] 程章. 内置压型钢板凹槽结构的装配式宽连梁抗震性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2018.
- [17] 岳彩顺. 徽派古建筑木柱修缮加固后的抗震性能分析[D]. 合肥:安徽建筑大学,2023.
- [18] 周长东,闫佳玲,阿斯哈. 复合加固方形木柱的抗震性能分析[J]. 工程力学,2023,40(3):189-200.