

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.073



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于多弹簧模型的浮搁柱脚节点建模方法

詹鑫, 邱洪兴, 陆维杰

(东南大学 土木工程学院, 南京 211189)

摘要:浮搁是传统木结构中柱脚的典型构造形式,在水平荷载作用下木柱易出现摇摆现象。木柱的摇摆行为表明浮搁柱脚节点具有半刚性特征,对木结构抵抗侧向荷载和维持整体稳定性具有重要作用。提出一种摇摆木柱柱脚节点的建模方法,通过在柱脚布置一排轴向弹簧,以模拟柱底-础石接触界面的受力状态。基于OpenSees平台建立对应数值模型,通过与精细化有限元模型及大量相关文献中的试验数据进行对比,验证该建模方法的有效性。同时,对影响该建模方法的部分因素进行分析,包括柱脚弹簧接触刚度、分布模式、弹簧数量及材料本构。结果表明,该建模方法对接触刚度相对不敏感,建议木柱计算受压深度为木柱半径,以确定各弹簧单元接触刚度;3种分布模式均适用于该建模方法,弹簧单元的数量应不少于10个;对于高轴压比木柱,在建模过程中应采用考虑弹簧单元进入塑性的ElasticPP材料结构。

关键词:木结构;浮搁木柱;柱脚节点;多弹簧模型;弹簧单元

中图分类号:TU366.2 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)04-0121-10

Modeling method of floating column foot node based on multi-spring model

ZHAN Xin, QIU Hongxing, LU Weijie

(College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China)

Abstract: Floating shelf is a typical structural form of column base in traditional timber construction, and the timber column is prone to swinging under horizontal load. The rocking behaviour of timber columns shows that the floating column base joints have semi-rigid characteristics, which plays an important role in resisting the lateral load and maintaining the overall stability of timber structures. In this paper, a modelling method of rocking wood column base joints is proposed. A row of axial springs is arranged at the column base to simulate the stress state of the contact interface between the column base and the foundation stone. The corresponding numerical model is established based on the OpenSees platform. The validity of the modelling method is verified by comparing with the refined finite element model and the experimental data in a large number of related literatures. At the same time, some factors affecting the modelling method are analyzed, including the contact stiffness, distribution mode, spring number and constitutive material of the column spring. The results show that the modelling method is relatively insensitive to the contact stiffness. It is suggested that the calculated

收稿日期:2023-03-16

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0703503)

作者简介:詹鑫(1999-),男,主要从事古建筑木结构研究,E-mail:zhanxin@seu.edu.cn。

邱洪兴(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:qhx101000854@163.com。

Received: 2023-03-16

Foundation item: National Key Research and Development Program (No.2017YFC0703503)

Author brief: ZHAN Xin (1999-), main research interest: ancient timber structure, E-mail: zhanxin@seu.edu.cn.

QIU Hongxing (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: qhx101000854@163.com.

compression depth of the timber column is the radius of the timber column to determine the contact stiffness of each spring element. The three distribution modes are applicable to the modelling method, and the number of spring units should not be less than 10. For wooden columns with a high axial compression ratio, the ElasticPP material constitutive considering the spring element entering plasticity should be adopted in the modeling process.

Keywords: wood structure; floating wooden column; column foot node; multi-spring mode; spring element

传统官式及民间木结构古建筑中,木柱通常浮搁于础石之上,形成连接上部结构与下部基础的柱脚节点,木柱底与础石接触界面处仅抗压,不抗拉。当木柱上部受到侧向荷载作用时,木柱绕柱脚边缘转动,发生侧倾,柱脚底部处于局部受压状态,柱底竖向合力作用点发生偏移,与柱顶处竖向荷载形成抗倾覆力矩,故浮搁木柱的柱脚节点具有摇摆抗侧机制。

中国早期研究忽略了柱脚节点半刚性,仅认为柱脚节点起摩擦滑移^[1]耗能作用,在木构架抗侧刚度相关研究^[2-3]中,主要考虑柱枋榫卯节点半刚性,将柱脚简单处理为铰接。随着研究不断深入,不少学者为模拟实际情况进行了柱脚浮搁^[4-6]木构架试验,关注到柱脚节点具有半刚性。

现阶段学者们对柱脚节点的研究主要包括试验研究^[7-11]和力学模型^[12-19]研究两方面。在试验研究方面,贺俊筱等^[9-10]通过对单根木柱或木构架进行拟静力试验,研究了竖向荷载及径高比对柱脚节点抗侧性能的影响;李东润等^[11]对柱脚局部的受力变形特征进行了仔细研究,关注柱底反力作用点位置的变化情况。在力学模型方面,贺俊筱等^[13]利用几何条件、木材应力-应变关系和平衡条件,推导了柱脚的抵抗弯矩-转角的全过程理论模型; Tanahashi 等^[14]和 Ono 等^[15]结合试验数据和刚体柱理论限值,提出了柱脚节点的三折线经验模型。

目前对于柱脚节点的研究仍不充分,存在亟待解决的问题。关于浮搁柱脚节点的数值分析模型,现阶段多数研究^[16-18]关注浮搁柱脚节点的摇摆特性,多对单根木柱及柱脚节点建立相应的精细化有限元模型进行研究分析,尽管模拟结果较为准确,但需耗费大量计算成本,不适用于建立整体木结构有限元模型。关于浮搁柱脚节点的多折线力学模型,模型系数是根据试验数据拟合而成的经验参数,基于单根木柱试验得到的柱脚节点力学模型已经包含重力二阶效应和柱身弯曲效应^[8]的影响,将该模型应用在木构架整体建模中会重复计入二阶效应。因此,需要建立计算效率高并可应用于木构架整体建模的柱脚节点模型。

作为一种模拟接触方法,多弹簧模型^[20-22]广泛

应用于自复位框架梁柱节点、摇摆墙结构和单柱摇摆桥墩的数值模拟。该模型可简述为按某一分布模式沿接缝界面设置一定数量接触弹簧,且弹簧材料仅有抗压能力,该受力特性与浮搁木柱柱脚节点相似。但在自复位及摇摆结构中,在接触界面处存在自复位构件及耗能构件,限制了上下界面的相对滑移;并且接触弹簧多用弹性本构^[20-21],忽略了摇摆过程中接触界面处混凝土材料的塑性行为。当浮搁木柱柱脚节点承受的侧向荷载大于滑动摩擦力时,可发生滑移,接触界面为连续的柱底与础石接触界面,更适用于多弹簧模型;但作为木结构中主要受力构件,当木柱转动角度较大时,易导致柱脚边缘处进入塑形,对柱脚节点转动刚度影响不可忽略,因此,接触弹簧需采用可考虑柱脚节点进入塑性的材料本构。

笔者提出基于多弹簧模型的浮搁柱脚节点建模方法,利用OpenSees数值模拟平台,以大量相关文献中的试验数据为原型,建立均匀分布、Gauss 分布及 Lobatto 分布 3 种分布模式的柱脚节点多弹簧模型,与精细有限元模型及试验结果对比,验证该建模方法的有效性;进一步对影响多弹簧模型建模精度的部分因素进行分析,包括柱脚弹簧接触刚度、分布模式、弹簧数量及材料本构,完善木柱柱脚节点多弹簧模型建模方法。

1 柱脚节点的多弹簧模型

1.1 模型构成

在OpenSees中建立的柱脚节点模型如图1(a)所示,主要由3部分组成,包括础石、木柱柱身及柱底-础石接触界面,考虑到础石的弹性模量远大于木柱顺纹弹性模量,因此忽略础石的压缩变形,在OpenSees中将础石与地面视为整块刚体。

图1(b)为柱脚节点多弹簧数值分析模型示意图。木柱柱身采用考虑 ρ -Delta效应的弹性梁单元,材料采用理想弹塑性结构,在OpenSees中建立了对应的木柱纤维单元模型。荷载施加方式为在柱顶中心处施加竖向荷载与侧向位移。木柱柱身与柱底-础石接触界面包括柱底刚片与零长度弹簧层,如图1(c)所示。零长度弹簧层中各个弹簧单元与基

础固接,采用图1(d)所示的ElasticPP材料本构,以模拟木柱柱底与础石接触界面处仅抗压、不抗拉的特性。

当侧向荷载未达到滑动摩擦力时,浮搁柱脚节点仅发生摇摆而不滑移;当侧向荷载达到滑动临界摩擦力时,柱脚节点摇摆程度保持不变并产生滑移。滑动摩擦力计算式为 $F_\mu = \mu N$,对于木结构,滑动摩擦系数 μ 取为0.60^[16]。为模拟浮搁柱脚节点的摇摆滑移特性,考虑在柱脚边缘处布置滑移弹簧^[5],在OpenSees中滑移弹簧采用图1(e)所示的Harding材料本构。当侧向荷载未达到滑动摩擦力 F_μ 时,滑移弹簧未压缩形变;当侧向荷载超过滑动摩擦力 F_μ 时,滑移弹簧可随柱脚压缩且提供恒定侧向力 F_μ ;当滑移弹簧压缩至任意侧移 x_i 时,若侧向荷载减小至小于滑动摩擦力 F_μ ,滑移弹簧在侧移 x_i 处发生硬化,保持压缩量不变。

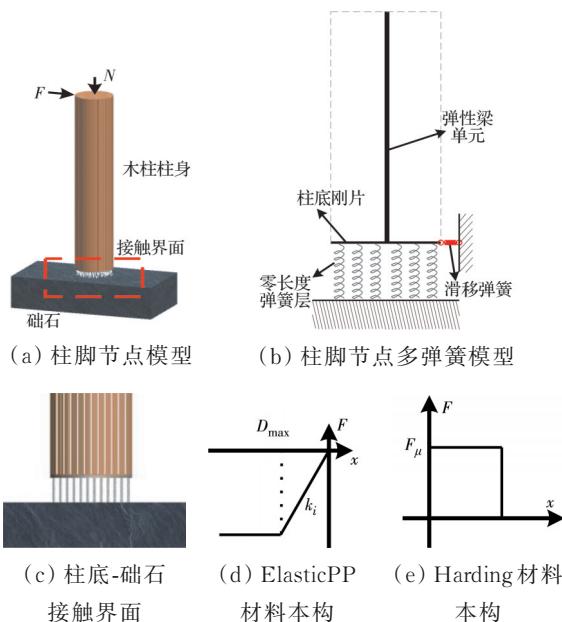


图1 木柱柱脚节点多弹簧模型

Fig. 1 Multi-spring model of wood column foot joint

1.2 均匀分布模式

多弹簧模型建模主要内容包括确定合适的弹簧单元分布模式、弹簧数量及刚度取值,以模拟柱脚节点接触界面。对于弹簧单元分布模式,现阶段在方形截面单柱摇摆桥墩领域中应用的接触弹簧分布模式主要有均匀分布、基于Gauss积分与基于Lobatto积分3种分布模式,可类比应用到摇摆木柱领域中;由于木柱截面为圆形截面,应用Gauss积分及Lobatto积分分布模式需进一步讨论。首先考虑较为明确的均匀分布模式:将圆形截面沿直径方向分为若干条相同宽度的弓形条,各弹簧中心点位置与弓形条对称轴中点重合。

对于弹簧单元弹簧数量,根据相关研究^[21-22],初步考虑采用12根弹簧模拟木柱与础石接触界面,如图2所示。弹簧单元在OpenSees中采用图1(d)所示的ElasticPP材料本构进行建模,使弹簧单元仅抗压、不抗拉且有压缩塑性。采用该本构曲线需设置弹簧单元刚度 k_i 与最大压缩量 D_{max} 。

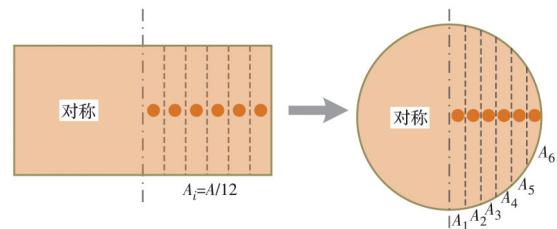


图2 均匀分布模式下弹簧单元布置图

Fig. 2 Spring element layout in uniform distribution mode

对于弹簧单元刚度取值,各弹簧刚度取为对应弓形条区域内木柱轴向刚度,各弓形条区域内木柱轴向刚度计算式为

$$k_i = \frac{E_w A_i}{L_e} \quad (1)$$

式中: E_w 为木材顺纹弹性模量; A_i 为各弓形条截面面积; L_e 为木柱计算受压深度。

弹簧单元考虑塑性有最大压缩量 D_{max} ,以模拟柱脚局部受压区域木柱纤维顺纹受压塑性,弹簧塑性临界压缩位移计算式为

$$D_{max} = \frac{\sigma_w L_e}{E_w} \quad (2)$$

式中: σ_w 为木材顺纹抗压强度; L_e 为木柱计算受压深度; E_w 为木材顺纹弹性模量。

在木柱倾斜过程中,柱底各处压缩量 Δh 除以 L_e 即到柱底各处对应的挤压应变。当木柱均匀受压时,木柱计算受压深度为木柱总体高度 H ;当木柱受侧向荷载作用时,木柱处于局部受压状态,此时木柱计算受压深度与截面高度有关。An等^[16]通过研究得出,木柱计算受压深度 L_e 和柱高 H 的比值与木柱倾斜角度 θ 存在式(3)所示关系,计算受压深度比与木柱倾斜角度曲线如图3所示。

$$\frac{L_e}{H} = \begin{cases} A \ln \theta + B (0 < \theta \leq \theta_y) \\ \frac{L}{H} (\theta_y < \theta \leq \theta_{max}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_y ^[16]为柱底边缘达到塑性临界条件时对应的木柱倾斜角度; L 为与木柱截面直径同量级的定值,本文取木柱半径 R ; θ_{max} 取实际试验中最大侧移对应的木柱倾斜角度; A 、 B 为拟合系数(拟合条件: θ 趋于0时, L_e/H 趋于1; θ 为 θ_y 时, L_e/H 等于 R/H)。

实际应用多弹簧模型过程中,当 θ 小于 θ_y 时,不同转角 θ 取图3中曲线对应的木柱计算受压深度

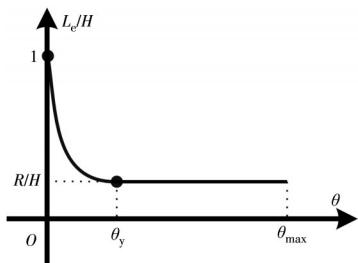


图 3 计算受压深度比与木柱倾斜角度曲线

Fig. 3 Calculation compression depth ratio and wooden column inclination angle curve diagram

L_e , 建立对应多弹簧模型, 应用 OpenSees 计算得到柱脚节点在各转角 θ 下的侧向荷载, 但相应的计算步骤较繁琐, 不利于应用在整体建模中。

由图 3 可知, 在木柱倾斜角度由 θ_y 变化到 θ_{\max} 的过程中, 木柱计算受压深度 L_e 恒为木柱半径 R ; 当木柱倾斜角度小于 θ_y 时, 木柱计算受压深度 L_e 由木柱高度 H 按对数函数陡减至木柱半径 R , 故考虑将木柱计算受压深度 L_e 取为定值 R , 并在后续有限元建模中以试验实例进一步验证该步骤的有效性。

1.3 积分分布模式

在弹簧单元均匀分布模式的基础上, 讨论应用 Gauss 积分与 Lobatto 积分弹簧单元分布模式的木柱多弹簧模型建立方法。

基于 Gauss 积分和 Lobatto 积分的两种接触弹簧分布模式, 每个弹簧单元中心坐标及对应刚度取值通过积分点位置和权重系数确定。对于方形截面, 可直接以积分点位置与截面高度一半的乘积作为各弹簧单元中心; 但木柱截面多为圆形截面, 需对积分点位置进行修正, 以修正积分点位置与截面半径的乘积作为各弹簧单元中心。具体修正方法为: 将半圆截面划分为 m 个面积相等的弓形截面, 将原积分点位置与弓形个数 m 相乘, 结果为 n , 第 n 个弓形截面对应的截面中心即为修正积分点位置。修正过程如图 4 所示。

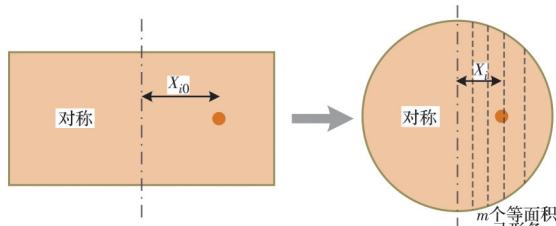


图 4 积分分布模式下弹簧单元布置图

Fig. 4 Spring element layout in integral distribution mode

表 1 给出了弹簧数量为 2、8、12 时 Gauss 积分和 Lobatto 积分的积分点 x_{i0} 、修正积分点 x_i ($m=50$) 及权重系数 w_i , 弹簧数量对应勒让德多项式阶数。根据修正积分点 x_i 和权重系数 w_i , 可按式(4)、式(5)

计算弹簧单元的坐标 X_i 及轴向刚度 k_i 。

$$X_i = x_i \cdot R \quad (4)$$

$$k_i = w_i \cdot \frac{E_w A_w}{2L_e} \quad (5)$$

式中: A_w 为木柱截面面积。上述计算式表明, 基于 Lobatto 积分的分布模式中, 木柱截面边缘处始终设置有接触弹簧, 接触弹簧的分布将随着弹簧数量的增加而逐渐接近截面中心; 基于 Gauss 积分的分布模式中, 接触弹簧的分布将随着弹簧数量的增加而逐渐接近截面边缘; 柱脚节点接触界面处所有弹簧单元权重系数 w_i 之和等于 2, 当木柱全截面均匀受压时, 弹簧刚度与木柱轴向刚度相等。

表 1 矩形及圆形截面对应积分点位置与权重系数

Table 1 Integral point position and weight coefficient corresponding to rectangular and circular sections

弹簧 数量	Gauss 积分			Lobatto 积分		
	积分点 x_{i0}	修正积 分点 x_i	权重系 数 w_i	积分点 x_{i0}	修正积 分点 x_i	权重系 数 w_i
2	±0.577	±0.472	1.000	±1.000	±1.000	1.000
	±0.960	±0.895	0.101	±1.000	±1.000	0.036
	±0.797	±0.682	0.222	±0.872	±0.770	0.211
	±0.526	±0.426	0.314	±0.592	±0.484	0.341
	±0.183	±0.143	0.363	±0.209	±0.167	0.413
	±0.982	±0.942	0.047	±1.000	±1.000	0.015
	±0.904	±0.810	0.107	±0.945	±0.869	0.092
	±0.770	±0.655	0.160	±0.819	±0.709	0.158
8	±0.587	±0.480	0.203	±0.633	±0.523	0.213
	±0.368	±0.293	0.233	±0.400	±0.320	0.251
	±0.125	±0.099	0.249	±0.137	±0.108	0.271
12	±0.770	±0.655	0.160	±0.819	±0.709	0.158
	±0.587	±0.480	0.203	±0.633	±0.523	0.213
	±0.368	±0.293	0.233	±0.400	±0.320	0.251
	±0.125	±0.099	0.249	±0.137	±0.108	0.271

2 柱脚节点多弹簧模型验证

2.1 柱脚节点试验信息

为验证多弹簧模型建模方法的有效性, 基于相关文献^[8-9, 11, 19]中 6 根木柱试件的试验数据, 在 OpenSees 中建立对应的多弹簧模型并与试验结果进行比较。统计各个木柱试件尺寸、材性及加载信息, 如表 2 所示。

对上述试件考虑采用均匀分布弹簧分布模式, 弹簧单元个数为 12 根, 木柱计算受压高度取为木柱截面半径 R , 建立对应柱脚节点多弹簧模型。基于刚体柱模型^[23], 可得到各木柱试件顶点侧移与侧向荷载上限值曲线。

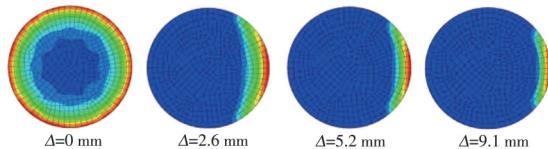
2.2 精细有限元模型建模

为进一步验证在 OpenSees 中建立的木柱多弹簧模型的有效性, 在 Abaqus 软件中建立各个木柱试件对应的精细有限元模型。以试件 DZJ 为例, 图 5 展示了其 Abaqus 精细有限元模型模拟结果。

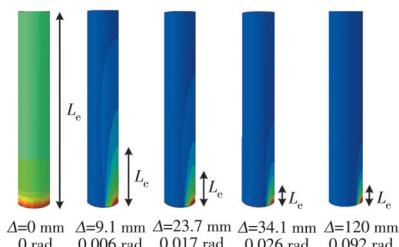
图 5(a) 为柱底部应力分布随柱顶侧移的变化

表2 木柱试件信息统计
Table 2 Wood column specimen information statistics

文献	试件	柱径/mm	柱高/mm	顺纹弹性模量/MPa	顺纹抗压强度/MPa	竖向荷载/kN	竖向荷载施加方式
吴亚杰等 ^[19]	DZJ	300	1 430			52	人工质量块
Zhang等 ^[8]	S-1	150	1 420	12 280	54	50	竖向千斤顶
	CH1		2 750				
贺俊筱等 ^[9]	CH2	390	2 450	8 856	34.76	35	竖向千斤顶
	CH3		2 150				
李东潤等 ^[11]	Lee1	308	852	10 300	40	36	竖向千斤顶



(a) 柱底部应力分布变化图



(b) 柱身应力分布变化图

图5 Abaqus精细有限元模型

Fig. 5 Abaqus fine finite element model

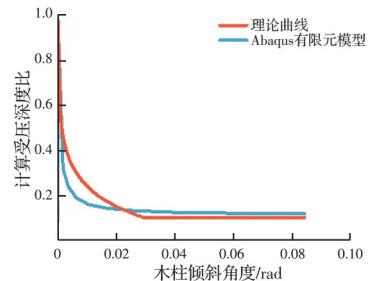
情况,可以发现,柱体底部受压区域面积随侧移增加不断变小,在较小侧移范围内受压区域面积急剧减小。图5(b)反映了试件DZJ在侧向荷载作用下柱身各部位压应变发展过程,直观结果为在较小侧移范围内压应变较大值对应区域长度急剧减小,为定量比较木柱计算受压深度,可按式(6)处理得到各木柱转角 θ 对应的木柱计算受压深度 L_e 。

$$L_e = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i l_i}{\epsilon_1} \quad (6)$$

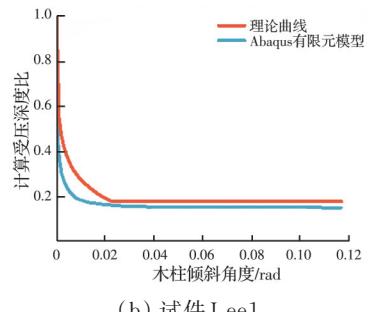
式中: i 指受压边缘处沿柱身方向从柱底到柱顶划分的网格单元数; ϵ_i 为各网格单元的压应变; l_i 为各网格单元的高度; ϵ_1 为柱底处网格单元的压应变。

以试件DZJ与Lee1为例,按式(6)提取出Abaqus精细有限元模型的计算受压深度比与木柱倾斜角度曲线,如图6所示。在试验过程中,试件DZJ^[19]最大侧移为120 mm,对应的最大转角 θ_{\max} 为0.084 rad,按理论推导的 θ_y 为0.029 rad;在试验过程中,试件Lee1^[11]最大侧移为100 mm,对应的最大转角 θ_{\max} 为0.117 rad,按理论推导的 θ_y 为0.023 rad。试件DZJ、Lee1按式(3)拟合得到的理论曲线如图6所示。

图6中理论曲线与Abaqus有限元模型提取出



(a) 试件DZJ



(b) 试件Lee1

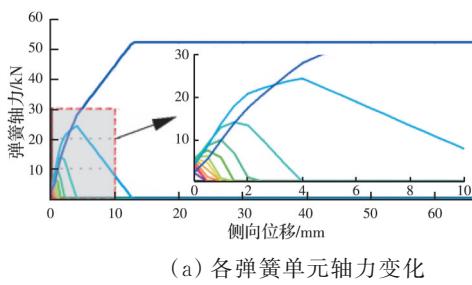
图6 两种计算受压深度比与木柱倾斜角度曲线

Fig. 6 Two kinds of calculated compression depth ratio and wood column inclination angle curves

的计算受压深度比与木柱倾斜角度曲线拟合效果显著,在木柱倾斜角度0.01 rad范围内,Abaqus精细有限元模型对应的计算受压深度比降低速率较理论曲线更迅速,表明木柱计算受压深度 L_e 实际上在极小木柱倾斜角度即接近了木柱半径;当木柱倾斜角度进一步增大时,理论曲线与Abaqus有限元模型对应的计算受压深度 L_e 与木柱半径趋于一致。故在多弹簧模型建模过程中将木柱计算受压深度 L_e 取为定值 R 是合理的。

对于在OpenSees中所建立的木柱多弹簧模型,可提取出各弹簧单元在柱顶各侧向位移所对应轴力,以试件DZJ为例,提取出各弹簧单元轴力随侧向位移变化,如图7(a)所示;将木柱受压区域沿着直径方向的长度作为受压区高度,见图7(b)。

由图7(a)可得到各弹簧单元退出工作时对应的侧向位移,处理后可得到多弹簧模型受压区高度随顶点侧向位移的阶梯状变化曲线;同时,在Abaqus中提取出精细有限元模型柱底部受压区高



(a) 各弹簧单元轴力变化

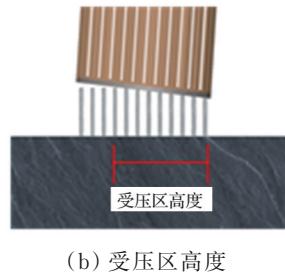


图 7 试件 DZJ 多弹簧模型弹簧单元分析

Fig. 7 Analysis for spring element of specimen DZJ

度随顶点侧向位移变化曲线。由图 8 可得出,木柱多弹簧模型中各弹簧单元退出工作点对应受压区高度与在该侧移下 Abaqus 实体模型对应受压区高度近乎重合,表明多弹簧模型与 Abaqus 实体模型模拟柱脚底部截面应力变形发展过程近乎一致,验证了在 OpenSees 中所建立的木柱多弹簧模型的有效性。

2.3 多弹簧模型结果评价

图 9 中绘制了各木柱试件多弹簧模型、Abaqus 精细有限元模型、拟静力试验曲线与各木柱试件的上限值曲线。将图 9 中各木柱试件模型及试验峰值荷载与对应位移统计到表 3 中。根据曲线对比图及统计结果可得,多弹簧模型与 Abaqus 实体模型模拟

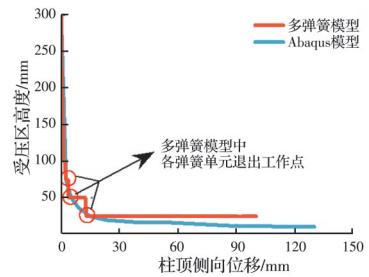


图 8 两种模型受压区高度随顶点侧移变化

Fig. 8 The variation of the compression height with the lateral displacement of the two models

结果近乎吻合,峰值侧向荷载及对应位移拟合结果非常接近;试验曲线与两种数值模型都存在一定偏差。

对于图 9(a)中试件 DZJ,试验曲线与多弹簧模型的模拟结果吻合很好,木柱初始抗侧刚度、峰值侧向荷载及其对应侧向位移的偏差均在 5% 范围内,该试验采用柱顶部固定人工质量块施加竖向荷载,使得木柱试件在侧移过程中柱顶处施加恒定竖向荷载,与数值模拟设置条件更加吻合,故试验结果与多弹簧模型模拟结果更加接近。对于图 9(b)~(f)中的试件,试验曲线的侧向荷载峰值与多弹簧模型侧向荷载峰值相差在 15% 以内,竖向荷载均采用千斤顶施加,试验中通过控制千斤顶施加竖向荷载沿柱身方向分力保持不变,以满足对木柱施加恒定轴力的条件,垂直于柱身方向的分力会加大木柱柱顶的侧向位移,使得试验结果中峰值侧向荷载对应位移偏大,即实际试验中木柱初始抗侧刚度偏小。

整体而言,3 种弹簧分布形式的多弹簧模型、实体模型及试验结果三者吻合结果均较好,体现了柱脚节点采用多弹簧模型的可行性。

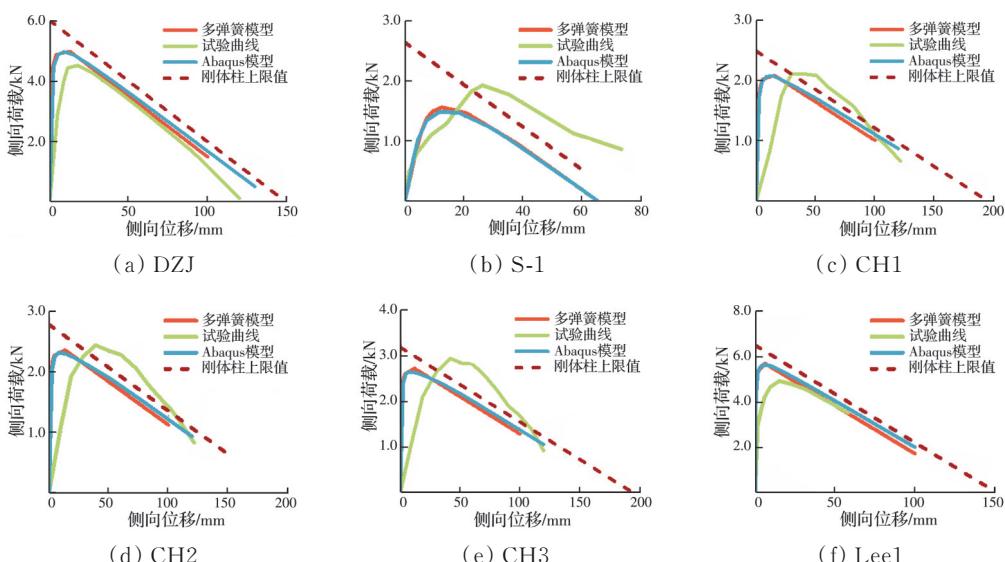


图 9 木柱试件曲线对比

Fig. 9 Comparison of wood column specimen curves

表3 木柱试件模型及试验峰值荷载与位移统计

Table 3 Timber column specimen model and test peak load and displacement statistics

试件	峰值荷载/kN	Abaqus峰值荷载/kN	Abaqus偏差/%	试验峰值荷载/kN	试验偏差/%	峰值位移/mm	Abaqus峰值位移/mm	Abaqus相对柱径偏差/%	试验峰值位移/mm	试验相对柱径偏差/%
DZJ	4.99	4.97	0.40	4.52	9.42	12.5	10.10	0.80	17.80	1.77
S-1	1.56	1.49	4.49	1.73	10.90	12.5	11.86	0.43	30.71	12.14
CH1	2.08	2.07	0.48	2.10	0.96	15.5	13.80	0.44	29.44	3.57
CH2	2.36	2.32	1.69	2.44	3.39	13.5	13.80	0.20	39.05	17.03
CH3	2.72	2.64	2.94	2.93	7.72	12.0	13.80	1.20	41.70	19.80
Lee1	5.69	5.65	0.70	4.93	13.36	6.5	6.24	0.08	15.20	2.82

注:偏差指Abaqus(或试验结果)峰值荷载与多弹簧模型峰值荷载差值绝对值与多弹簧模型峰值荷载的比值;相对柱径偏差指Abaqus(或试验结果)峰值位移与多弹簧模型峰值位移差值绝对值与木柱柱径的比值。

3 多弹簧模型影响因素分析

3.1 木柱计算受压深度

An等^[16]通过研究得出木柱计算受压深度 L_e 不为定值,随着木柱倾斜程度的增加, L_e 由木柱原长减至与木柱截面直径同量级的定值;同时,为进一步简化多弹簧模型的建模过程,将木柱的计算受压深度设为定值。考虑到多弹簧模型各弹簧单元的刚度取值与木柱计算受压深度有关,需比较木柱不同计算受压深度对应的多弹簧模型抗侧刚度与木柱实体模型拟合程度,最终确定多弹簧模型弹簧单元刚度计算中采用的木柱计算受压深度。

在均匀分布、Gauss积分和Lobatto积分模式3种弹簧分布模式下,采用弹簧单元个数为12根,取计算受压深度 L_e 分别为 L 、 $0.5L$ 、 $2R$ 、 R ,在OpenSees中建立木柱试件DZJ柱脚多弹簧模型,进行单调加载后得到木柱柱顶侧移与侧向荷载的关

系曲线;同时,以Abaqus模型为基准,处理得到各计算受压深度的多弹簧模型结果相较于Abaqus模型结果的拟合偏差曲线,如图10所示。

由图10可见,随着木柱计算受压深度取值的减小,3种分布模式的多弹簧模型与实体模型结果曲线越接近,拟合偏差程度越小,当木柱计算受压深度取为截面半径 R 时,多弹簧模型与实体模型结果曲线几乎吻合。当侧移较小时,拟合偏差出现波动,主要原因为加载初期木柱计算受压深度存在由木柱原长 H 减小至木柱半径 R 的过程,但在建模步骤中将该过程的木柱计算受压深度取为定值 R ;偏差波动在3%范围内,并且对应的侧向位移相对于总体侧向位移较小,进一步验证了在多弹簧模型建模过程中将木柱计算受压深度 L_e 恒取为定值 R 是合理的。当木柱计算受压深度由原长 H 变为截面半径 R 时,对应弹簧单元刚度变化了10倍,但对应的侧向荷载峰值仅变化了约25%,由此可得出多弹

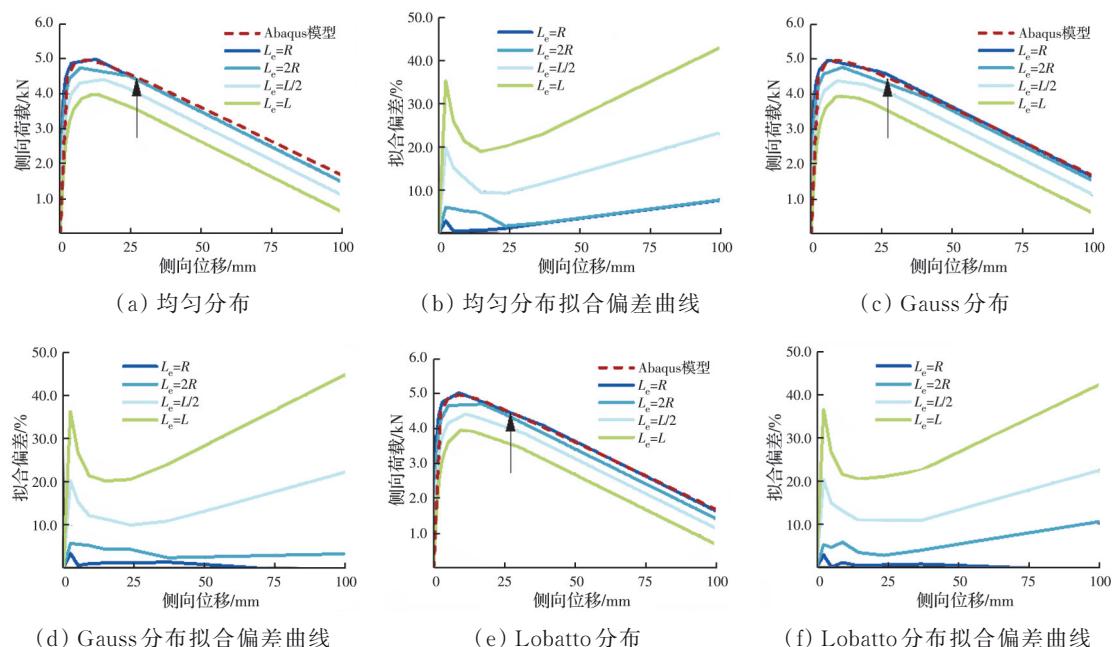


图10 不同计算受压深度下试件DZJ多弹簧模型单调加载曲线及对应拟合偏差曲线

Fig. 10 Monotonic loading curves and corresponding fitting deviation curve of DZJ multi-spring model under different calculated compression depths

簧模型对弹簧单元刚度取值并不敏感,在进行3种分布模式的木柱多弹簧模型建模时,木柱计算受压深度可取为截面半径R。

3.2 弹簧单元数量

多弹簧模型的弹簧单元数量越多,与柱脚截面实际受力情况越吻合,越接近精细化有限元模型模拟结果,但相应的多弹簧模型建模工作越复杂。因此,需确定3种分布模式下多弹簧模型达到合适模拟效果时应设置的弹簧单元基本个数,为实际利用

多弹簧模型建模提供依据。以木柱试件DZJ为研究对象,在OpenSees中建立均匀分布、Gauss积分与Lobatto积分3种弹簧单元分布模式,弹簧单元数目分别为6、8、10、12的木柱多弹簧模型,进行单调加载后得到柱顶侧移与侧向荷载的关系曲线;同时,以Abaqus模型为基准,处理得到各弹簧数量的多弹簧模型结果相对于Abaqus模型结果的拟合偏差曲线,如图11所示。

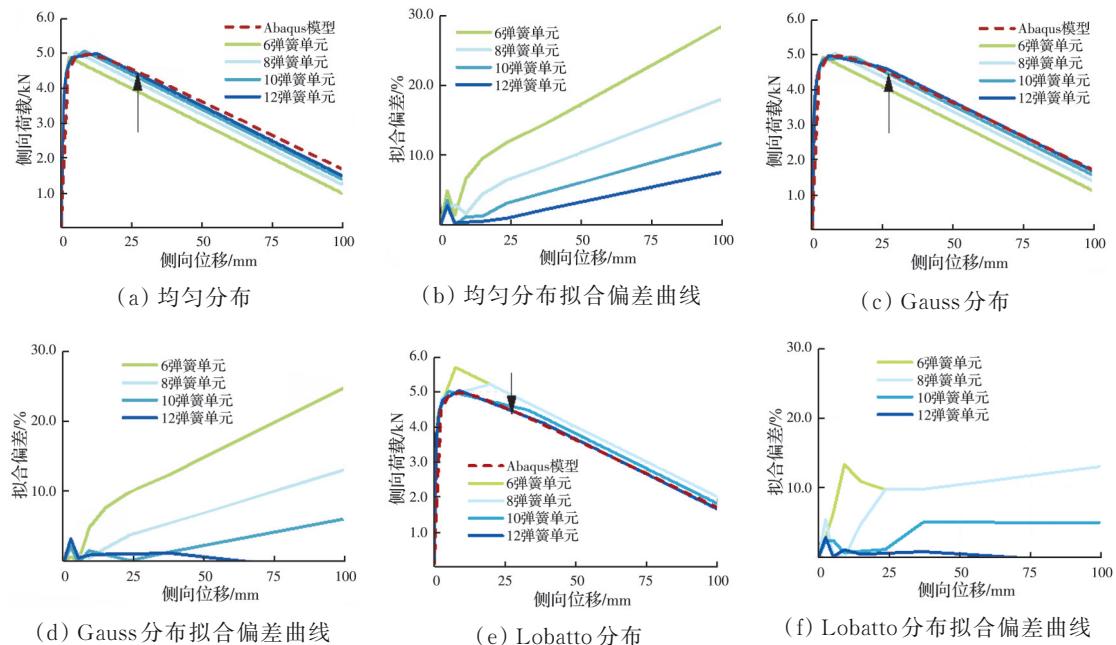


图11 不同弹簧单元数量下试件DZJ多弹簧模型单调加载曲线及对应拟合偏差曲线

Fig. 11 Monotonic loading curves and corresponding fitting deviation curve of DZJ multi-spring model under different number of spring elements

由图11(a)、(c)可知,当弹簧分布为均匀分布与Gauss分布模式时,多弹簧模型模拟结果均低于实体模型结果,随着弹簧数的增加,多弹簧模型结果越来越趋近于Abaqus模型结果。主要原因,随着弹簧个数增加,弹簧布置逐渐向边缘移动,在计算截面弯曲强度时,力臂长度逐渐增加,使弹簧模拟结果逐渐增大,最终弹簧强度将不随弹簧单元数量增加而显著变化,逐渐趋于稳态。由图11(e)可知,当弹簧分布为Lobatto分布模式时,模拟结果均高于Abaqus模型结果,峰值侧向荷载随着接触弹簧数量的增加而逐渐降低。在该分布模式下,接触弹簧的分布位置主要处于截面边缘,有弹簧退出工作时,截面受压区域会迅速减小,进而高估力臂长度。随着积分点个数的增加,弹簧逐渐向内布置,靠近截面中心,使得模拟强度逐渐减小,逐渐趋于稳态。

由图11中模拟结果可得,改变弹簧单元数量对于木柱柱脚的初始刚度影响并不大,主要影响峰值侧向荷载大小及对应柱顶侧移。随着弹簧单元数量的增加,3种分布模式的多弹簧模型拟合效果越

来越趋近于Abaqus实体模型,当弹簧数量达到10个以上时,3种分布模式的多弹簧模型模拟结果与实体模型结果近乎吻合。同时,为进一步考虑木柱柱底随侧向位移的增加而进入塑性的发展过程,在设置弹簧数量时,应满足截面边缘处弹簧的抗压承载力小于木柱实际承受的竖向荷载。

3.3 弹簧单元材料本构

现阶段多弹簧模型主要用于钢混结构中混凝土部分的模拟,遵循混凝土在受压过程中处于弹性状态的假定,在OpenSees软件中弹簧单元采用elastic-no tension(ENT)材料;将多弹簧模型引入木结构模拟木柱柱脚,考虑木柱在摇摆剧烈时截面边缘进入塑性阶段,弹簧单元采用考虑压缩塑性的ElasticPP材料。对于低轴压比的木柱,由于截面在摇摆时不易进入塑性,采用两种材料无明显差别,故在高轴压比情况下比较两种材料本构下多弹簧模型拟合效果。以木柱试件DZJ为例,在OpenSees中分别建立200 kN轴压对应的木柱多弹簧模型,进行单调加载得到柱顶侧移与侧向荷载曲线;同时,

以Abaqus模型为基准,处理得到各弹簧单元本构的多弹簧模型结果相对于Abaqus模型结果的拟合偏差曲线,如图12所示。

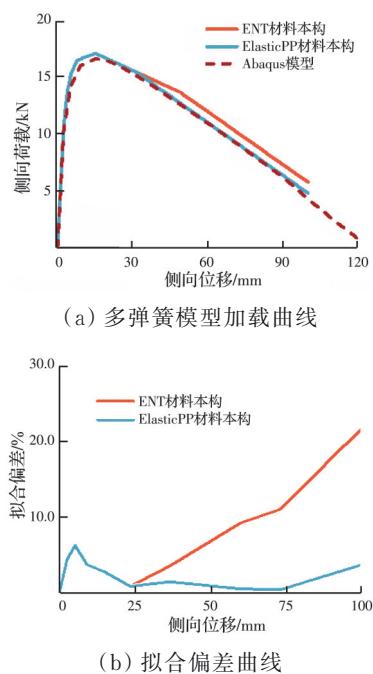


图12 不同弹簧单元本构下多弹簧模型单调加载曲线及对应拟合偏差曲线

Fig. 12 Monotonic loading curve and corresponding fitting deviation curve of multi-spring model under different spring element constitutive

由图12模拟结果可得出:当侧向荷载到达峰值前,两种材料的多弹簧模型对应的柱顶侧移与侧向荷载曲线几乎重合,说明木柱摇摆程度不大,木柱底部未有区域进入塑性阶段,采用两种材料本构的多弹簧模型拟合效果一致;当侧向位移接近失效位移时,采用ElasticPP材料建立的多弹簧模型在同一侧向位移处对应侧向荷载小于ENT材料多弹簧模型,接近于Abaqus模型拟合结果,说明木柱摇摆较为剧烈时,采用ElasticPP材料建立的多弹簧模型可考虑木柱底部截面边缘进入塑性而削弱柱脚节点抗侧刚度,先于ENT材料多弹簧模型失效。综上所述,当木柱轴压比较大或摇摆较为剧烈,导致木柱底部易发生塑性时,采用ElasticPP材料本构的多弹簧模型拟合效果更优异。

4 结论

基于OpenSees平台,提出摇摆木柱柱脚节点建模方法,该方法建立的数值模型相较于精细有限元模型具有超高的计算效率,并且与传统的转动弹簧模型相比,该方法不需要试验结果与理论模型的修正。通过与精细化有限元模型及大量相关文献中试验数据进行对比,进一步验证该建模方法的有效性。同时也对影响该建模方法的部分因素进行了

分析,包括柱脚弹簧接触刚度、分布模式、弹簧数量及材料本构。根据数值分析研究,可得到以下结论:

- 1)该建模方法对弹簧单元所取的接触刚度在合理范围内变化不敏感,建议木柱计算受压深度取为木柱半径,以确定各弹簧单元接触刚度。
- 2)均匀分布、Gauss分布与Lobatto分布均适用于多弹簧模型建模方法,为较好地模拟摇摆木柱抗侧刚度,弹簧单元的数量应不少于10个。
- 3)对于低轴压比木柱,弹簧单元采用ENT材料本构与ElasticPP材料本构均适用;对于高轴压比木柱,在建模过程中应采用考虑弹簧单元进入塑性的ElasticPP材料本构。

参考文献

- [1] 姚侃,赵鸿铁.木构古建筑柱与柱础的摩擦滑移隔震机理研究[J].工程力学,2006,23(8): 127-131, 159.
YAO K, ZHAO H T. Study on the mechanism of sliding friction shock isolation between timber column and plinth in historical buildings [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 127-131, 159. (in Chinese)
- [2] 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变形及内力特征[J].世界地震工程,2003,19(1): 9-14.
GAO D F, ZHAO H T, XUE J Y, et al. The deformational and stress behavior of wooden frame of Chinese ancient buildings under horizontally reverse load [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2003, 19(1): 9-14. (in Chinese)
- [3] LI X W, ZHAO J H, MA G W, et al. Experimental study on the seismic performance of a double-span traditional timber frame [J]. Engineering Structures, 2015, 98: 141-150.
- [4] XIE Q F, ZHANG L P, WANG L, et al. Lateral performance of traditional Chinese timber frames: Experiments and analytical model [J]. Engineering Structures, 2019, 186: 446-455.
- [5] GUO R, XUE J Y, QI L J, et al. Effect of column root connections on the dynamic behavior of Chuandou-style timber structures [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 103340.
- [6] 郭婷,杨娜,周海滨,等.穿斗式纵向木构架抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2021,54(增刊1): 34-41.
GUO T, YANG N, ZHOU H B, et al. Experimental study of the seismic performance of Chuan-Dou-style longitudinal wooden frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(Sup 1): 34-41. (in Chinese)
- [7] WU Y J, LIN H S, WANG L, et al. Influence of support interface on the lateral performance of rocking columns in traditional Chinese timber structures [J]. Structures, 2023, 48: 2037-2047.
- [8] ZHANG L, LIU C, ZHOU T. Experimental study on mechanical properties of column foot of ancient timber

- structures: Take the drum-shaped plinth as an example [J]. *Structures*, 2022, 40: 1002-1013.
- [9] 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.
HE J X, WANG J, YANG Q S. Experimental study on lateral resistance capacity of column in traditional timber structures considering effects of height-diameter ratio [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(3): 27-35. (in Chinese)
- [10] 贺俊筱, 王娟, 杨庆山. 古建筑木结构柱脚节点受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(8): 141-149.
HE J X, WANG J, YANG Q S. Mechanical property of column footing joint in traditional wooden structure by quasi-static test [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(8): 141-149. (in Chinese)
- [11] 李東潤, 荒木慶一, 上谷宏二. 基于柱基与基础石材接触面的局部压缩实验的传统木结构柱基建模[C]//日本建築学会構造系論文集, 2009: 865-872.
LI D R, KEIJI A, HIROJI U. Modeling of traditional wooden column bases based on local compression experiments of the interface between the column base and the base stone [C]// *Proceedings of the Structural System of the Japan Institute of Architecture*, 2009: 865-872. (in Chinese)
- [12] 潘毅, 安仁兵, 陈建, 等. 基于摇摆柱的古建筑木结构柱脚节点力学模型研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(6): 196-206.
PAN Y, AN R B, CHEN J, et al. Study on mechanical model of column footing in ancient timber structure based on rocking column [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(6): 196-206. (in Chinese)
- [13] 贺俊筱, 王娟, 杨庆山. 摆摆状态下古建筑木结构木柱受力性能分析及试验研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(11): 50-58.
HE J X, WANG J, YANG Q S. Theoretical and experimental analysis on mechanical behavior of column in traditional timber structure during rocking [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(11): 50-58. (in Chinese)
- [14] TANAHASHI H, SUZUKI Y. Elasto-plastic Pasternak model simulation of static and dynamic loading tests of traditional wooden frames [C]// *World conference on timber engineering*, 2010: 11.
- [15] ONO T, KAMEYAMA Y, ENG D, et al. Experiments on seismic safety of traditional timber temples Part 1: Results of horizontal loading test [C]// *9th World Conference on Timber Engineering 2006*, Portland 2006: 1535-1542.
- [16] AN R B, YOU W L, PAN Y, et al. Static and dynamic analyses of traditional Chinese timber columns under horizontal accelerations [J]. *Structures*, 2023, 47: 37-51.
- [17] 王娟, 崔志涵, 张熙铭. 唐代殿堂型木构架摇摆柱力学模型研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(3): 60-72.
WANG J, CUI Z H, ZHANG X M. The mechanical model of rocking columns in palace-style timber frames in Tang dynasty [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(3): 60-72. (in Chinese)
- [18] 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.
WANG L, QIAN C Y, LI J L, et al. Study on mechanical model and finite element model of column base joint in traditional timber structure [J]. *Building Structure*, 2023, 53(8): 132-136. (in Chinese)
- [19] 吴亚杰, 谢启芳, 林和寿, 等. 多层古建筑木结构柱脚节点力学性能研究[J]. *工程力学*, 2024, 41(8): 201-210.
WU Y J, XIE Q F, LIN H S, et al. Mechanical properties of column base joints in multi-story ancient timber structures [J]. *Engineering mechanics*, 2024, 41(8): 201-210. (in Chinese)
- [20] 郭佳, 辛克贵, 何铭华, 等. 自复位桥梁墩柱结构抗震性能试验研究与分析[J]. *工程力学*, 2012, 29(增刊1): 29-34, 45.
GUO J, XIN K G, HE M H, et al. Experimental study and analysis on the seismic performance of a self-centering bridge pier [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(Sup 1): 29-34, 45. (in Chinese)
- [21] 钟正午, 石岩, 秦洪果, 等. 摆摆-自复位桥墩的多弹簧模型建模方法研究[J]. *世界地震工程*, 2021, 37(4): 197-205.
ZHONG Z W, SHI Y, QIN H G, et al. Simulation method for multi-spring model of rocking self-centering pier [J]. *World Earthquake Engineering*, 2021, 37(4): 197-205. (in Chinese)
- [22] AHMADI E, KASHANI M M. Numerical investigation of nonlinear static and dynamic behaviour of self-centering rocking segmental bridge piers [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 128: 105876.
- [23] 张锡成, 胡成明, 韩乙楠. 考虑柱体摇摆效应的半刚性榫卯柱架弹性抗侧刚度简化计算方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(2): 72-82.
ZHANG X C, HU C M, HAN Y N. Simplified calculation method for elastic lateral stiffness of semi-rigid mortise-tenon frame considering rocking column [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(2): 72-82. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)