

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.058



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于木材弹塑性损伤本构的古建木结构 残损梁柱构件损伤非线性分析

张利朋, 谢启芳, 吴亚杰, 刘伊津

(西安建筑科技大学 土木工程学院; 结构工程与抗震教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要:局部糟朽、虫蛀在古建筑梁柱构件中普遍存在,采用数值模拟方法分析其受力性能意义重大。在连续介质力学和损伤力学框架内,建立木材的弹塑性损伤本构模型,并基于ABAQUS的用户材料开发接口UMAT进行本构模型的二次开发,通过模拟已有文献中的三点受弯木梁试验,对本构模型的正确性进行验证。通过人工预制局部开槽的方式模拟实际古建筑木结构中梁柱构件的局部糟朽和局部虫蛀,基于所开发的本构模型建立有限元模型,并通过已有试验验证模型的正确性。结果表明:所建木材的弹塑性损伤本构模型和木梁、木柱的有限元模型可较好地反映残损梁柱构件在受力过程中的非线性受力和损伤演化行为。

关键词:古建筑木结构;残损梁柱构件;弹塑性损伤本构模型;数值模拟;非线性分析

中图分类号: TU366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)02-0098-09

Damage nonlinear analysis on beam and column members with damages in ancient timber structures based on elastic-plastic damage constitutive model of wood

ZHANG Lipeng, XIE Qifang, WU Yajie, LIU Yijin

(School of Civil Engineering; Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: Local decay and insect infestation are common damage types in the flexural members of ancient buildings, such as beams and columns. It is of great significance to analyze its mechanical performance by numerical simulation. In the framework of continuum mechanics and damage mechanics, the elastic-plastic damage constitutive model of wood was established, and the corresponding constitutive subroutine was developed based on the user-defined material subroutine UMAT in ABAQUS. The correctness of the

收稿日期: 2020-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(51878550);陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JC-44)

作者简介: 张利朋(1991-),男,博士,主要从事古建筑结构抗震保护研究, E-mail: lpgzhang@xauat.edu.cn.

谢启芳(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: xieqfgh@xauat.edu.cn.

Received: 2020-12-31

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51878550); Shaanxi Natural Science Basic Research Program (No. 2021JC-44)

Author brief: ZHANG Lipeng (1991-), main research interest: protection of ancient structures, E-mail: lpgzhang@xauat.edu.cn.

XIE Qifang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xieqfgh@xauat.edu.cn.

constitutive model was verified based on the three-point bending wood beam test in the existing literature. Through the artificial prefabrication of local square groove, the local decay and local insect infestation on the actual wood beams and columns were simulated equivalently. Based on the developed constitutive model, the corresponding finite element model was established, and the correctness of the model was verified by the existing tests of the research group. The results indicated that the elastic-plastic damage constitutive model of wood and the finite element model of timber beam and column can better reflect the nonlinear stress and damage evolution behavior of damaged beam and column members in the stress process.

Keywords: ancient timber structure; damaged beam and column members; elastic-plastic damage constitutive model; numerical simulation; nonlinear analysis

古建筑木结构是中国重要的文化遗产。木梁和木柱组成古建筑木结构的承重骨架,并维持其整体稳定。然而,由于数百年来环境与荷载的共同作用,木梁和木柱发生了不同程度的残损,如整体老化、局部腐朽、虫蛀和开裂等,不仅导致其受力性能退化,也使古建筑木结构的整体力学性能受到不同程度的削弱。因此,研究残损梁柱构件的受力行为可为现存残损古建筑木结构的保护提供科学依据^[1]。

近年来,学者们围绕残损梁柱构件的调查实测和受力性能分析开展了深入研究,并取得了一定的研究成果。在残损梁柱构件的调查实测方面,周乾^[2]通过对故宫古建筑木结构柱子的勘察实测,指出木柱的典型残损问题主要为局部糟朽和开裂,并进行了成因分析;王晓丽^[3]利用快速普查法调查了飞云楼的承重木柱和梁枋的残损情况,确定了各构件的残损等级,为古建筑木结构的保护及修缮提供了依据;乔冠峰^[4]从承重木柱、承重梁枋、结构整体变形三个方面入手,对古建筑木结构的残损点评估界限进行了探讨,并对残损界限评定的适用条件提出了建议。在残损梁柱构件的受力分析方面,Guan等^[5-6]基于弹塑性本构模型,采用单元生死技术研究了跨中开方孔木梁的受力性能和方孔角部的损伤演化;汤永红^[7]基于 ANSYS 模拟了纵向开裂木柱的轴压性能,并将一阶屈曲特征位移向量的 2% 作为初始几何变形进行了纵向开裂木柱的非线性分析;Zhang 等^[8]通过人工预制贯通缝的方式模拟了木柱的干缩裂缝,并通过轴心和偏心受压试验研究了失效模式和残余极限承载力的变化规律;朱忠漫^[9]基于 ABAQUS 对纵向开裂木柱的受力性能进行了参数分析,首先对木柱开展线性屈曲模拟,进一步采用弧长法进行非线性屈曲分析,将第一、二阶位移特征向量按照一定比例加权后,作为初始几何缺陷输入

有限元模型;Mosallam^[10]对人工预制残损木梁进行了抗弯试验,分析了其力学性能退化规律;陈立涛^[11]针对实际结构中存在的局部腐朽和虫蛀残损,通过预制局部缺口受弯木梁的受弯试验和数值模拟,研究了残损对木梁受力性能的影响规律;路鹏^[12]采用材料性能折减法在 ABAQUS 中建立了老化木柱的有限元模型,并分析了不同老化程度的影响;Li 等^[13]通过人工开槽方式开展了柱脚糟朽木构架的试验,并采用有限单元法对其进行了数值模拟。谢启芳等^[14]基于 ABAQUS 模拟了局部带缺口木柱的轴压性能,通过分析缺口的大小和位置,考察了初始缺口缺陷对木柱承载力和非线性的影响。

可见,有关古建筑木结构梁柱构件的研究主要集中在开裂残损方面,而关于木梁、木柱局部糟朽和虫蛀影响下受力性能方面的研究较少,并且该方面的研究大多基于试验方法开展,仅少数研究采用了有限单元法,且其采用的本构模型均为 ABAQUS 自带的弹塑性模型,导致其结果无法合理反映局部残损部位与完好部位交界处的材料损伤行为。通常情况下,局部残损梁柱构件在局部交界面的破坏涉及损伤的演化、应力的软化,而这是 ABAQUS 自带弹塑性模型所无法直接反映的,所建有限元模型便无法较好地反映整个梁柱构件的受力非线性和损伤演化过程。笔者通过建立木材的弹塑性损伤本构模型,分析带局部缺陷梁柱构件的损伤演化、发展过程,并基于课题组试验进行验证。研究成果可为残损梁柱构件的受力分析及性能评价提供借鉴。

1 木材弹塑性损伤本构模型

1.1 理论模型

1.1.1 应力-应变模型 根据连续介质弹塑性力学和损伤力学,木材的应力-应变模型可表达为

$$d_{J,n+1}^y = \frac{\eta}{\eta + \Delta t} \cdot d_{J,n} + \frac{\Delta t}{\eta + \Delta t} \cdot d_{J,n}^y \quad (15)$$

1.2 本构模型的数值算法

建立的弹塑性损伤本构模型由隐式的后退欧拉算法进行求解,该方法通过在每个增量步结束时更新内变量以避免求解结果从屈服面漂移。

有效应力空间中的积分算法可以表达为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} &= \boldsymbol{\varepsilon}_n + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^p &= \boldsymbol{\varepsilon}_n^p + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^p \\ \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p &= \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_n^p + \Delta \lambda_{n+1}^p \\ \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1} &= \mathbf{C}_0 : (\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} - \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^p) \\ F_{n+1} &= F(\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}, \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

式中: n 和 $n+1$ 为增量步; $\Delta \lambda_{n+1}^p$ 表示塑性增量乘数。

通过返回-映射算法更新应力和内变量的过程即是在第 n 个增量步结束时的内变量 $(\bar{\boldsymbol{\sigma}}_n, \boldsymbol{\varepsilon}_n^p, \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_n^p)$ 的基础上,通过应变更新 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}$ 来计算第 $n+1$ 个增量步结束时的内变量 $(\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}, \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^p, \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p)$ 的过程,包括弹性预测、塑性修正和损伤修正 3 个步骤。

1.2.1 弹性预测 根据式(16),可得

$$\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1} &= \mathbf{C}_0 : (\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} - \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^p) = \\ & \mathbf{C}_0 : [(\boldsymbol{\varepsilon}_n + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}) - (\boldsymbol{\varepsilon}_n^p + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^p)] = \\ & \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^tr - \mathbf{C}_0 : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^p \end{aligned} \quad (17)$$

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^tr = \mathbf{C}_0 : (\boldsymbol{\varepsilon}_n - \boldsymbol{\varepsilon}_n^p) + \mathbf{C}_0 : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} \quad (18)$$

式中: $\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^tr$ 为初始增量步的试探应力。

增量步开始时,总应变增量全部被视作弹性应变,据此计算试探应力,如果试探应力在屈服面内,则说明试算过程为弹性过程,有效应力就等于试探应力,否则应进行塑性修正。

1.2.2 塑性修正 经过初始弹性预测,可得塑性应变增量

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^p = \mathbf{C}_0^{-1} : (\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^tr - \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}) \quad (19)$$

将式(19)代入式(16),可得

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= -\mathbf{C}_0^{-1} : (\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^tr - \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}) + \Delta \lambda_{n+1}^p \cdot \frac{\partial F}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}} = 0 \\ \mathbf{b} &= -\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p + \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_n^p + \Delta \lambda_{n+1}^p = 0 \\ F &= F(\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}, \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

通过求解式(20)方程组,可得

$$\begin{aligned} \delta(\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}) &= -\mathbf{C}_{n+1} : \mathbf{a}_{n+1} - \delta(\Delta \lambda_{n+1}^p) \cdot \mathbf{C}_{n+1} \cdot \frac{\partial F}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}} \\ \delta(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p) &= -\mathbf{b}_{n+1} - \delta(\Delta \lambda_{n+1}^p) \end{aligned} \quad (21)$$

式中:

$$\mathbf{C}_{n+1} = \left[\mathbf{C}_0^{-1} + \Delta \lambda_{n+1}^p \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^2} \right]^{-1} \quad (22)$$

将式(20)代入式(19),可得

$$\delta(\Delta \lambda_{n+1}^p) = \frac{F_{n+1} - \frac{\partial F}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}} : \mathbf{C}_{n+1} : \mathbf{a}_{n+1} + \Delta \lambda_{n+1}^p \cdot \mathbf{b}_{n+1}}{\frac{\partial F}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}} : \mathbf{C}_{n+1} : \frac{\partial F}{\partial \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}} - \frac{\partial F}{\partial \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p}} \quad (23)$$

因此,可求得塑性乘数增量

$$\Delta \lambda_{n+1}^p = \Delta \lambda_n^p + \delta(\Delta \lambda_{n+1}^p) \quad (24)$$

进一步可得有效应力张量、塑性应变张量和等效塑性应变的表达式。

$$\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^{(k+1)} &= \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^{(k)} + \delta(\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1})^{(k)} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^p &= \boldsymbol{\varepsilon}_n^p + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^p = \boldsymbol{\varepsilon}_n^p - \mathbf{C}_0^{-1} : \delta(\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1})^{(k)} \\ \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p &= \delta(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p)^{(k)} + \delta(\Delta \lambda_{n+1}^p)^{(k)} \end{aligned} \quad (25)$$

1.2.3 损伤修正 基于塑性修正过程求得的有效应力状态,可计算损伤内变量,进而对有效应力进行折减,即可求得名义应力。由于该过程不涉及迭代计算,计算过程简单,不再展开。

1.3 本构模型验证

通过将所建立的木材本构模型基于 ABAQUS 的材料二次开发接口 UMAT 进行程序实现,可借助其计算模块实现二次开发。文献[16]给出了详细的本构算法和程序开发过程,且已基于多种加载工况下的材性试验(顺纹及横纹方向的单轴受拉和受压、顺纹及横纹重复受压等^[20-21])进行了模型验证,模拟结果与试验结果吻合较好。基于三点受弯木梁在构件层面对所建本构模型和所开发的本构程序进行模型验证。

三点受弯木梁模型采用的材料和试验数据取自 Khennane 等^[22]的试验,木材为云杉,木梁横截面尺寸为 60 mm×60 mm,长 1 600 mm,如图 1 所示。

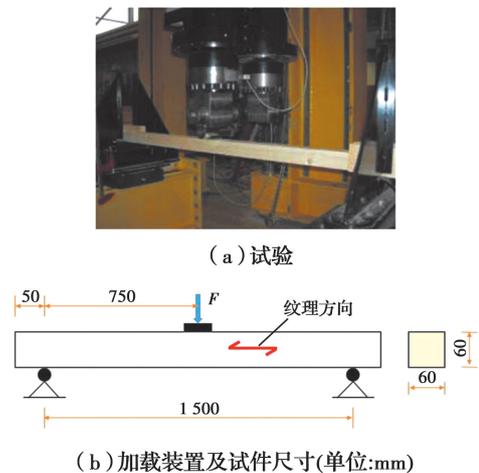


图 1 三点受弯木梁尺寸及试验加载装置^[22]

Fig. 1 Size and test setup of three-point bending timber beam

为了防止木梁局部压溃,试验过程中,在施加集中力处放置了 60 mm × 60 mm 钢垫块,采用位移控制加载,直到试件破坏。试验结束时,试件底部跨中发生了脆性受拉断裂。

1.3.1 几何模型、网格划分、接触设置 三点受弯木梁有限元模型采用与试验相同的尺寸,梁顶面的加载垫块和梁底面两端支座处采用截面尺寸为 60 mm × 60 mm,厚 20 mm 的垫块进行模拟。选取 C3D8R 单元类型,网格长度设置为 10 mm。确保垫块与梁的网格节点重合以提高收敛性。如果在钢垫块与梁顶部接触面之间采用绑定约束(Tie),则会在钢垫块边缘与梁顶接触处引起应力集中,且损伤将首先在此产生,并进一步引起收敛性问题,而采用考虑摩擦系数的方法则可以避免这一问题^[23]。因此,垫块与梁之间的接触面相互作用采用法向硬接触和切向摩擦系数法。考虑到垫块与梁顶面之间发生相对位移的可能性很小,取摩擦系数为 0.45。

1.3.2 材料参数 由于所建本构模型所需材料参数较多,无法完全基于同一批次试验测定,但考虑到

个别参数在某些受力状态下若不影响分析结果,便可保守取值。根据文献[16]和文献[22]中所采用的木材参数(见表 1)可知,Khennane 等^[16]使用的是 Hill 准则(将同一材料方向的拉压强度视作相等)而非 Hoffman 强度准则,且给出的是参数 F 、 G 、 H 、 L 、 M 和 N (由木材 3 个纹理方向的受拉强度和剪切强度表示的参数)而并非直接给出材料强度(可自行转换)。表 1 中, E_{ii} 、 ν_{ij} 和 G_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$)分别为木材的弹性模量、剪切模量和泊松比; $G_{i,l}$ ($l = 1t, 1c, 2t, 3t, 12, 13, 23$)为木材顺纹受拉(1t)、顺纹受压(1c)、横纹受拉(2t, 3t)和剪切(12, 13, 23)断裂能(单位为 N/mm); $\bar{\sigma}_0$ 为木材横纹受压屈服强度; Q 和 B 为木材横纹受压屈服后的强化参数。由于木梁三点受弯试验中,木梁一般仅发生顺纹受拉破坏,不发生顺纹受压、横纹受拉以及剪切损伤,相应的断裂能参数可进行保守估计;影响顺纹受拉软化段的路径的断裂能参数 $G_{f,1t}$ 和黏性规则化系数 η 可以通过不断试算得到,如表 1 所示。

1.3.3 边界条件及加载方式 有限元模型的边界

表 1 本构模型参数确定

Table 1 Determination of wood properties

| E_{11}/MPa | E_{22}/MPa | E_{33}/MPa | ν_{12} | ν_{21} | ν_{13} | ν_{31} | ν_{23} |
|--|--|--|---------------------|------------|--|--|--|
| 13 500 | 1 800 | 1 800 | 0.29 | 0.038 | 0.29 | 0.038 | 0.02 |
| ν_{32} | G_{12}/MPa | G_{13}/MPa | G_{23}/MPa | F | G | H | L |
| 0.02 | 900 | 900 | 900 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.5 |
| M | N | $\bar{\sigma}_0/\text{MPa}$ | Q | B | $G_{f,1t}/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$) | $G_{f,1c}/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$) | $G_{f,2t}/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$) |
| 1.5 | 1.5 | 3.2 | -0.034 47 | -27.107 6 | 0.001 | 280 | 0.001 |
| $G_{f,3t}/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$) | $G_{f,12}/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$) | $G_{f,13}/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$) | $G_{f,23}$ | η | | | |
| 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 5 | | | |

条件按试验情况设为简支,左端约束梁的水平位移和竖向位移,右端仅约束竖向位移。采用位移加载模式加载至计算过程终止。

1.3.4 模拟结果分析 由三点受弯木梁有限元模拟结果的失效模式与试验结果对比(顺纹受拉损伤变量 SDV20),如图 2 所示。由图 2 可见,顺纹受拉损伤分布与试验结果较为一致,均为梁跨中截面(图 3 中的 A 点)发生。此时,SDV20 的最大值为 0.81,计算过程中断。通过所建立的木材弹塑性损伤本构模型可以较好地预测三点受弯木梁的脆性断裂失效。

提取底部跨中损伤点 A 处的顺纹受拉应力-应变曲线及相应的应力云图,如图 3 所示。可见,在木受

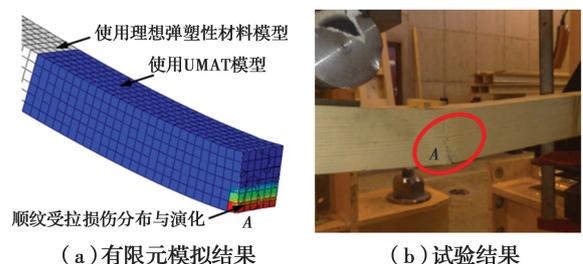


图 2 三点受弯木梁有限元模拟与试验结果对比

Fig. 2 Comparison of finite element simulation and experimental results of three-point bending wood beam

梁底部发生顺纹受拉损伤之前,单元 A 处的应力逐渐增加,无顺纹拉损伤出现;木梁底部纤维一旦发生顺

纹受拉屈服,损伤产生并演化,此后木梁底部一层纤维单元的应力将由损伤单元开始向两端卸载而无法屈服,因此损伤逐渐沿梁高向加载点扩展,宏观上表现为随着加载位移的增加,木梁逐渐发生脆性断裂。

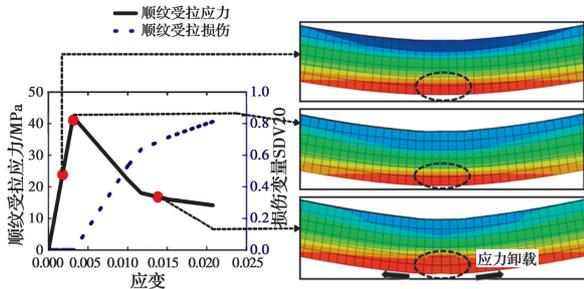
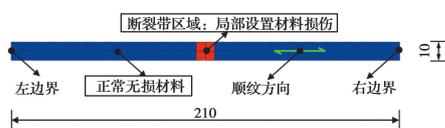


图 3 三点受弯木梁底部损伤单元的顺纹受拉应力应变曲线与应力云图分析

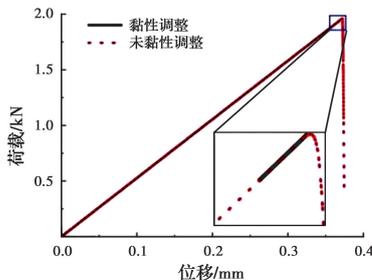
Fig. 3 Analysis of stress-strain curve and stress nephogram of damage element along grain at the bottom of three-point bending wood beam

1.4 黏性调整对收敛性的影响

以简单受拉试件为例,考察黏性正则化对脆性断裂损伤引起收敛困难的改善,主要讨论两个问题:一是有无黏性调整对收敛性的影响;二是黏性系数取值范围的问题。所选试件模型如图 4 所示,构件尺寸为 210 mm × 10 mm × 10 mm,所采用的主要材料参数选自文献[16],顺纹抗拉强度为 24 MPa,顺纹弹性模量为 11 000 MPa,黏性正则化系数为 0.000 1。具体操作方法:沿构件长度方向选定部分单元为初始损伤单元,并通过人工降低损伤单元材料性能(强度设置为 23 MPa)的方式形成断裂带,实现初始损伤位置的预设,从而排除软化段对网格敏感性的影响而单独研究黏性调整对收敛性的影响。



(a) 几何模型(单位:mm)



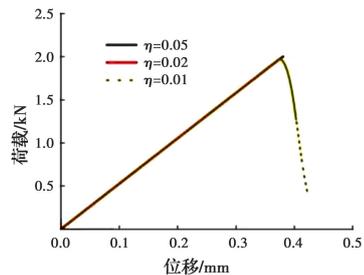
(b) 受拉荷载-位移曲线

图 4 黏性调整对单向受拉木构件收敛性的影响

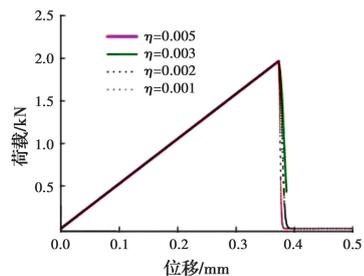
Fig. 4 Influence of viscosity adjustment on convergence of unidirectional tension wood members

由图 4 可知,未进行黏性调整时,模型仅能预测木材顺纹受拉峰值强度,而无法反映其断裂过程;黏性调整后,则可以较好地预测断裂路径。可见,黏性调整有利于在使用弹塑性损伤本构模型程序计算构件损伤破坏过程时提高其收敛性。

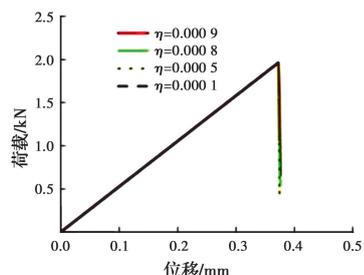
通过变化黏性正则化系数(0.000 1~0.05)对上述单轴受拉构件进行参数分析,所得荷载-位移曲线如图 5 所示。可见,黏性系数的最优取值范围是 0.000 5~0.01;在该范围之外取值时,如果构件发生损伤,计算过程将较难收敛。



(a) 黏性正则化系数范围为0.01~0.05



(b) 黏性正则化系数范围为0.001~0.005



(c) 黏性正则化系数范围为0.000 1~0.000 9

图 5 黏性正则化系数的优化取值分析

Fig. 5 Optimization value analysis of viscosity regularization coefficient

2 局部残损梁柱构件的数值模型

2.1 局部残损木梁的数值模型

2.1.1 残损木梁几何模型 建立的残损木梁有限元模型的几何模型选自陈立涛进行的残损木梁试验^[11],其几何尺寸如图 6 所示。

四点受弯时,底部缺口木梁的损伤将由缺口顶部两个角点沿梁的顺纹方向向两端扩展,如图 7 所

示。破坏面处于横纹受拉-顺纹剪切耦合应力状态。

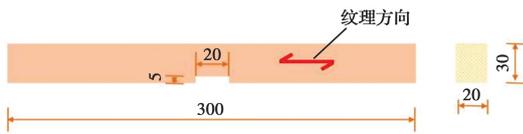


图6 残损木梁几何模型

Fig. 6 Geometric model of damaged wooden beam

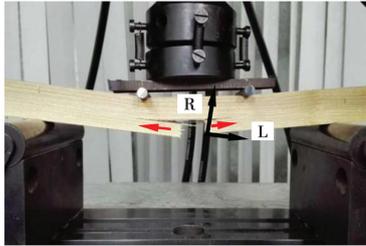


图7 底部缺口残损木梁的破坏模式

Fig. 7 Failure mode of timber beam with bottom notch

2.1.2 残损木梁有限元模型 根据上述带缺口木梁的几何条件建立有限元模型,其边界条件、加载位置及支座布置、材料模型、分析步设置等与试验基本等效。有限元模型的边界条件按试验情况设为简支,左端约束梁的水平位移和竖向位移,右端仅约束竖向位移。采用位移加载模式加载至计算过程终止。区别之处仅在于网格划分模块,残损木梁有限元模型在缺口附近的网格尺寸划分较小。

2.1.3 残损木梁的破坏模式 底部缺口残损木梁有限元模型的顺纹剪切损伤(SDV24)发展和演化情况如图8所示。由图8可见,使用所开发的木材弹塑性损伤本构模型可较好地预测其损伤的发展和演化过程,但由于使用隐式材料程序(UMAT),该模型不具有显式有限元程序的网格删除功能,因此,裂缝的开展情况只能通过损伤进行分析而无法直观地在有限元模型中表达。



图8 底部缺口残损木梁有限元模型的剪切损伤发展和演化

Fig. 8 Shear damage development and evolution of finite element model of damaged wood beam with bottom notch

提取图8中#1号单元的顺纹剪切应力和横纹受拉应力分别为1.5 MPa(<3.5 MPa)和0.8 MPa(<2.0 MPa),均未达到相应方向的破坏强度便开始出现损伤,这也比较符合顺纹剪切-横纹受拉耦合应力作用状态下的情况。可见,使用建立的木材弹

塑性损伤本构模型可较好地预测其破坏过程。

2.1.4 荷载-位移曲线 为了与试验结果进行对比,提取四点受弯残损木梁的荷载-位移曲线,其中荷载数据由两个垫块上的荷载进行叠加得到,位移数据由其中一个垫块处提取(便于与试验结果对比),结果如图9所示。

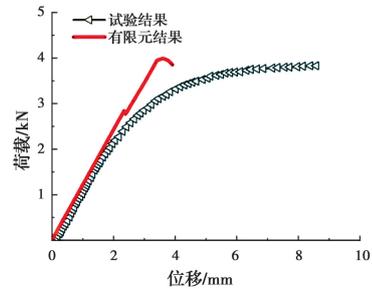


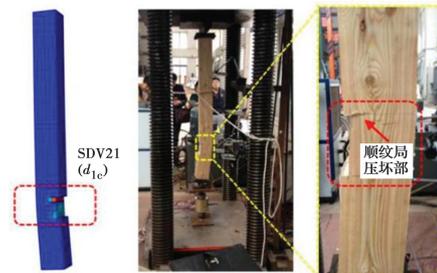
图9 残损木梁荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of damaged wooden beams

由图9可见,建立的木材弹塑性损伤本构模型可以较好地预测带有局部缺口的四点受弯木梁的承载能力,但由于模型假定在材料各个方向达到屈服前均为线性,导致构件模拟的刚度偏大。

2.2 局部残损木柱的数值模型

建立的残损木柱有限元模型所采用的几何模型选自王玄^[24]进行的残损木柱试验。边界条件、加载位置及支座布置、材料模型、分析步设置等与试验基本等效。采用位移加载模式加载至计算过程终止。带缺口木柱有限元模型的顺纹受压损伤(SDV21)发展和演化情况如图10所示。由图10可见,使用建立的木材弹塑性损伤本构模型可较好地预测其损伤的发展和演化过程,但由于所使用的是隐式材料程序,不具有网格删除功能,因此,局部压屈的发展情况只能通过损伤进行分析而无法直观地在有限元模型中进行表达。



(a)有限元模拟结果 (b)试验结果

图10 局部缺口木柱破坏模式的有限元与试验结果对比

Fig. 10 Comparison of finite element and experimental results of failure modes of wood columns with local notches

残损木柱竖向荷载位移曲线的有限元分析结果与试验结果的对比情况如图 11 所示。由图 11 可见,建立的弹塑性损伤本构模型可以较好地预测其承载能力,且在局部损伤出现之前与试验结果吻合较好。但在木柱损伤逐渐趋近于缺口附近时,有限元结果出现较为明显的软化段,总体带有脆性失效特征,因此无法反映出试验结果的延性失效过程。

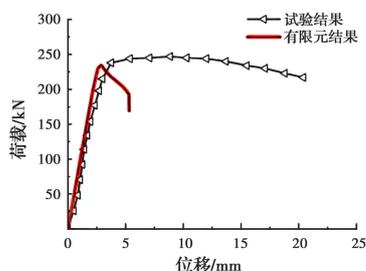


图 11 残损木柱竖向荷载—位移曲线

Fig. 11 Vertical load-displacement curve of damaged timber column

3 结论

1)在连续介质力学和损伤力学框架内建立了木材的弹塑性损伤本构模型,可用于模拟三点受弯木梁的受弯损伤模式及分布规律。

2)所开发的弹塑性损伤本构模型可用于反映局部残损梁柱构件在残损界面与完好界面处的损伤行为,可较好地反映残损梁柱构件受力过程中的非线性行为和损伤演化。

3)从文中梁柱构件的 3 个模拟实例来看,建立的木材弹塑性损伤本构模型在应用于残损梁柱构件的数值模拟时,无法完全使分析过程收敛到最终,这是由于建立的木材弹塑性损伤本构模型并未完全解决塑性与损伤的耦合问题:文中采用的强度准则和屈服准则都是有效应力的函数,二者在本质上相同,即损伤准则某种程度上也是强度准则,强度准则某种程度上也是损伤准则,都是对线性区域的限定,但由于其表达式不同,所限定的区域并不相同,从而出现了塑性与损伤的“打架”问题。该问题需在后续研究中进一步解决。

参考文献:

[1] 潘毅,袁双,王慧琴,等. 古建筑木结构偷心造和计心造斗拱力学性能数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(5): 9-15.

PAN Y, YUAN S, WANG H Q, et al. Numerical analysis of mechanical behavior of Tou-Xin-Zao and Ji-Xin-Zao Tou-Kung in Chinese ancient timber structures [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(5): 9-15. (in Chinese)

[2] 周乾. 故宫古建木柱典型残损问题分析及建议[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(6): 107-112.

ZHOU Q. Typical structural problems of wooden columns in the ancient buildings of the Forbidden City [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(6): 107-112. (in Chinese)

[3] 王晓丽. 古建木结构承重构件残损状态快速普查及鉴定方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.

WANG X L. Study on the rapid general damage state survey method and appraisal of load-bearing members of ancient timber structure [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

[4] 乔冠峰. 古木楼阁飞云楼损伤机理与修缮保护研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.

QIAO G F. Research on damage mechanism and conservation of ancient wooden Feiyun pavilion [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese)

[5] GUAN Z W, ZHU E C. Finite element modelling of anisotropic elasto-plastic timber composite beams with openings [J]. Engineering Structures, 2009, 31(2): 394-403.

[6] GUAN Z W, ZHU E C. Nonlinear finite element modeling of crack behavior in oriented strand board webbed wood I-beams with openings [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(10): 1562-1569.

[7] 汤永红. 纵向干裂木柱的受力性能及其修复加固[D]. 上海: 同济大学, 2009.

TANG Y H. Mechanical behavior of longitudinal dry cracked timber column and its repair and reinforcement [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.

[8] ZHANG W P, SONG X B, GU X L, et al. Compressive behavior of longitudinally cracked timber columns retrofitted using FRP sheets [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(1): 90-98.

[9] 朱忠漫. 干缩裂缝对历史建筑木构件受力性能影响的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.

ZHU Z M. Experimental research on mechanical properties of timber structural members with shrinkage cracks in historic buildings [D]. Nanjing: Southeast

- University, 2015. (in Chinese)
- [10] MOSALLAM A S. Structural evaluation and design procedure for wood beams repaired and retrofitted with FRP laminates and honeycomb sandwich panels [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 87: 196-213.
- [11] 陈立涛. 残损木梁力学性能退化的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
CHEN L T. Research on mechanical property degradation of damaged wooden beam [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] 路鹏. 老化对古建筑木构件受力性能的影响分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
LU P. Analysis of the effect of aging on mechanical behavior of ancient timber structural members [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)
- [13] LI S C, JIANG Z J, LUO H Z, et al. Seismic behaviour of straight-tenon wood frames with column foot damage [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019: 1604280.
- [14] 谢启芳, 张保壮, 李胜英, 等. 残损木柱受力性能退化试验研究与有限元分析[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(8): 117-125.
XIE Q F, ZHANG B Z, LI S Y, et al. Experimental study and finite element analysis on mechanical properties degradation of damaged timber columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(8): 117-125.
- [15] HOFFMAN O. The brittle strength of orthotropic materials [J]. *Journal of Composite Materials*, 1967, 1(2): 200-206.
- [16] ZHANG L P, XIE Q F, ZHANG B Z, et al. Three-dimensional elastic-plastic damage constitutive model of wood [J/OL]. *Holzforschung*, DOI: 10.1515/hf-2019-0247.
- [17] WANG M Q, SONG X B, GU X L. Three-dimensional combined elastic-plastic and damage model for nonlinear analysis of wood [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(8): 04018103.
- [18] SANDHAAS C. Mechanical behaviour of timber joints with solid-in steel plates [D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2012.
- [19] Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS analysis user's manual [M]. Version 6.10. Providence, RI, USA, 2010.
- [20] 谢启芳, 张利朋, 王龙, 等. 东北落叶松材单向顺纹受拉损伤模型[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(11): 109-116.
XIE Q F, ZHANG L P, WANG L, et al. Damage evolution model for northeast larch wood under parallel-to-grain tension load [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(11): 109-116. (in Chinese)
- [21] 谢启芳, 张利朋, 王龙, 等. 木材径向反复受压应力-应变模型研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(3): 55-61.
XIE Q F, ZHANG L P, WANG L, et al. Research on radial stress-strain model of wood under repeated compressive loading [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(3): 55-61. (in Chinese)
- [22] KHENNANE A, KHELIFA M, BLERON L, et al. Numerical modelling of ductile damage evolution in tensile and bending tests of timber structures [J]. *Mechanics of Materials*, 2014, 68: 228-236.
- [23] 王娟, 许刃文, 张熙铭, 等. 唐代殿堂型木构架抗侧力性能影响参数分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(2): 48-59.
WANG J, XU R W, ZHANG X M. Parameter analysis on lateral force resistance of the palace-style timber structure in Tang Dynasty [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(2): 48-59.
- [24] 王玄. 损伤木柱的力学性能退化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
WANG X. Analysis on the degradation of mechanical properties of damaged timber columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)