

基于 ABAQUS 软件探讨梁的弹塑性分析的可视化教学

孔艳平, 张雪娇

石家庄铁道大学 工程力学系, 河北 石家庄 050043

摘要：梁是建筑结构中重要的承力构件，主要承受垂直于轴线的横向载荷，通过其刚度和强度将荷载传递到支撑结构上。梁的设计需要考虑多种因素，以确保结构的稳定性和安全性。梁的弹塑性分析是塑性力学中的重要内容，涉及复杂的非线性问题。本文利用有限元软件 ABAQUS 模拟梁在横向荷载作用下的塑形变形，能够提供直观的教学效果。在此基础上，通过施加动态荷载对梁进行模态分析，获得其固有频率和振型等振动特性参数。可视化教学方法不仅可以使学生深入理解梁的弹塑性分析的基本原理和方法，还可以掌握 ABAQUS 软件在弹塑性分析中的应用。

关键词：塑性力学；梁；可视化；弹塑性；力学响应

Exploring Visual Teaching of Beam's Elastoplastic Analysis Based on ABAQUS Software

Kong Yanping, Zhang Xuejiao

Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang, Hebei 050043

Abstract： Beams are important load-bearing components in building structures, mainly bearing transverse loads perpendicular to the axis, and transmitting the loads to the supporting structure through their stiffness and strength. The design of beams needs to consider multiple factors to ensure the stability and safety of the structure. The elastic-plastic analysis of beams is an important part of plastic mechanics, involving complex nonlinear problems. This article uses the finite element software ABAQUS to simulate the plastic deformation of beams under lateral loads, which can provide intuitive teaching effects. On this basis, modal analysis of the beam is carried out by applying dynamic loads to obtain its vibration characteristic parameters such as natural frequency and mode shape. The visual teaching method not only enables students to deeply understand the basic principles and methods of elastic-plastic analysis of beams, but also enables them to master the application of ABAQUS software in elastic-plastic analysis.

Keywords： plastic mechanics; beam; visualization; elastic plastic analysis; mechanical response

引言

在工程实践中，梁作为主要的承重构件，其性能直接影响整个结构的稳定性和安全性。当梁的应力超过弹性极限时，会发生塑性变形，此时需进行弹塑性分析以更准确地评估其承载能力。ABAQUS 作为一款功能强大的工程仿真软件，能够高效地模拟材料的弹塑性行为，为教学工作提供了有力支持^[1]。程良彦等^[2]以桁架为例探讨了交互可视化在教学中的应用，提高了学生对该知识点的感性认识。王宏伟等^[3]应用 Matlab 软件对厚壁筒的弹塑性结果进行了可视化探讨与实践。禹海涛和赵慧玲^[4]在“弹塑性力学与有限元”课程中设置 MATLAB 上机课，将课堂所学理论通过计算实践，培养学生积极参与、自主探索的学习习惯。本文旨在探讨基于 ABAQUS 软件在梁的弹塑性分析中的可视化教学方法，以期提高教学效果和学生实践能力。

一、问题描述与理论计算

在课堂教学中通常以图1为例，梁的受力状态对称于 Oxy 平面，长度为 L ，高度为 h ，梁长远大于梁高时，可忽略剪应力对变形的影响。在梁右端受到竖向力 P 作用，固定端处的弯矩达到弹性极限弯矩时该处横截面的最外层开始屈服，对应的横向荷载 P

为弹性极限荷载：

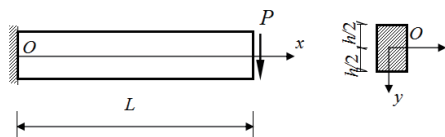


图1 悬臂梁

项目资助：河北省研究生教育教学改革研究项目 YJG2023068；河北省研究生精品课程项目。

作者简介：孔艳平（1977.10-），女，河北沧州人，汉族，博士研究生，教授，研究方向：力学教育工作。

$$\rho_e = \frac{bh^2}{6L} s \quad (1)$$

梁的固定端处横截面全部进入塑性屈服阶段，此时梁失去了进一步承载的能力，对应的塑性极限荷载为

$$P_s = 1.5P_e \quad (2)$$

弹性极限荷载对应的自由端挠度为

$$w_1(L) = \delta_e = \frac{L^2}{3} K_e \quad (3)$$

其中， K_e 为弹性极限曲率， $K_e = \frac{2\sigma_s}{Eh}$ 。

塑性极限荷载对应的自由端挠度为

$$w_2(L) = \delta_s = \frac{20L^2}{27} K_e \quad (4)$$

当荷载 P 先加载到 P_s 再卸载到零时，自由端的残余挠度为

$$\delta_s^0 = \frac{13L^2}{54} K_e \quad (5)$$

以上分析是右端作用静态集中力时，梁的弹塑性力学分析，学生对弹塑性分析的理解确实存在一定难度，如果利用有限元软件将其可视化，不仅可以帮助学生理解弹性变形和塑性变形的本质区别，还可以有效降低难度，帮助学生更好地掌握弹塑性分析的知识 and 技能。

二、有限元数值模拟

(一) 模型建立

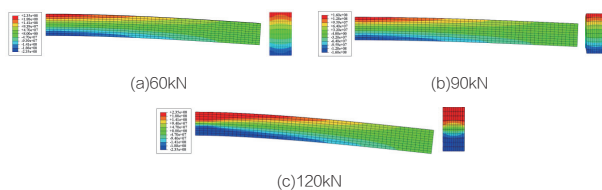
本节利用 ABAQUS 数值模拟软件建立悬臂梁模型进行力学仿真，并运用弹塑性理论对其结果进行分析，模型尺寸及材料参数如表 1 所示。设置边界条件为悬臂梁左端完全固定，采用 C3D8R 实体单元进行分析，在自由端处分别施加静载荷和动荷载。

表 1 材料参数

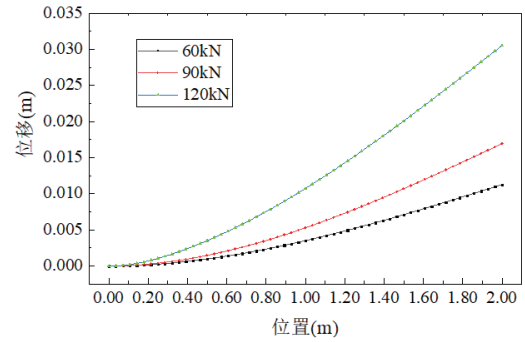
材料	梁长 L	高度 h	宽度 b	密度	杨氏模量	泊松比	屈服强度
Q235	2 m	0.2m	0.1m	7850 kg/m ³	210GPa	0.3	235MPa

(二) 静力学可视化分析

将材料参数带入公式 (1) 和公式 (2) 可得弹性极限荷载 P_e 约为 78.33kN，塑性极限荷载 P_s 约为 117.50kN，利用 ABAQUS 软件在 O 处分别施加竖向载荷 60kN、90kN、120kN，得到梁轴向及固定端横截面应力如图 2 所示，位移响应如图 3 所示。其中 $P_e < 90\text{kN} < P_s$ 在此算例中加载后进行卸载，得到残余应力和残余应变。

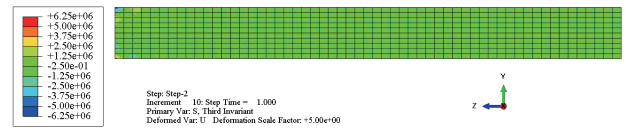


> 图 2 梁应力响应

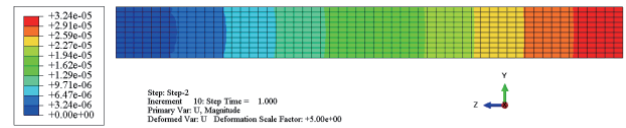


> 图 3 位移响应

图 2 展示了不同载荷作用下梁结构的应力响应，可以看出不同梁截面处的应力分布，观察固定端截面上下边缘在 60kN 作用下未达到屈服极限，而在其他两个载荷作用下均达到屈服极限。图 3 的位移响应中可以直观的看到梁不同位置的位移，并且自由端位移随载荷增大而增大。



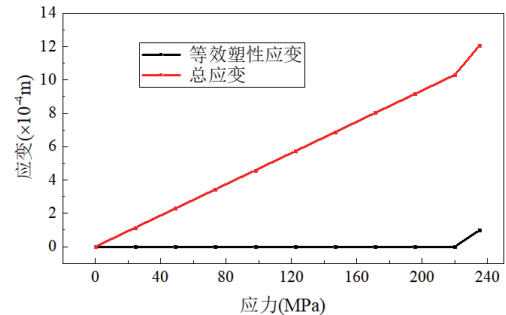
(a) 残余应力



(b) 残余位移

> 图 4 卸载阶段残余应力及残余位移

图 4 中针对卸载情况，我们将卸载后梁的位移和应力分别表示在图中，可以看到卸载后，梁的自由端仍存在位移，固定端处存在残余应力。图 5 是 60kN 受力情况下梁固定端上边缘处的应力应变曲线，将不同应力时的总应变和塑性应变展示出来，可以看到未达到屈服时结构没有产生塑性应变，超过屈服极限后，塑性应变急剧增加。



> 图 5 应变与等效塑性应变对比

(三) 动力学可视化分析

固有频率是结构在不受外部激励时自身振动的特性，针对图 1 悬臂梁进行模态分析求得固有频率，前五阶模态固有频率分别为 20.832Hz、41.359Hz、129.06Hz、248.12Hz 和 296.93Hz，对应的特征值分别为 17132、67530、6.57578e5、2.43050e5、和 3.48074e6，图 6 给出了前两阶模态，一阶模态振型在 Z 方向振动，二阶模态在 Y 方向振动，结果显示，不受载荷作用下结构也

会发生位移。

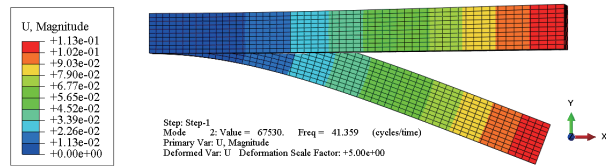


图6 一阶模态和二阶模态

在工程应用当中，实际工况中荷载加载是一个动态过程，下面利用 ABAQUS 动力学隐式方法计算了时变载荷下悬臂梁的力学响应，包括线性载荷和周期性载荷。分析中在自由端施加幅值为 60kN 的载荷进行瞬态分析，获得瞬时响应与静力学加载进行对比。

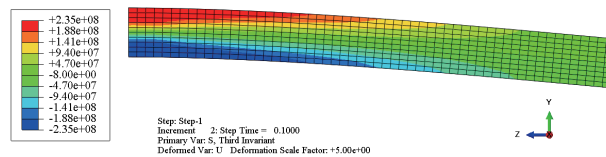


图7 60kN 线性时变载荷下位移响应

线性时变动载作用下施加小于弹性极限的外载荷也会产生塑性变形，如图7所示，图中红色区域均为屈服区域。这是由于动态加载过程，载荷作用是一个积累过程，后一步会在前一步基础上继续作用，此时节点变形具有了加速度，会产生相应位移，从而

比静力学加载对结构影响更大。除了线性载荷，工程中常见的另一种时变载荷是周期性载荷，作用效果与周期和频率密切相关。对悬臂梁施加 60kN 的周期性载荷，在其固有频率附近取不同角频率进行力学分析，由表2可知，不同频率下固定端上边缘，当角频率接近固有频率时，材料出现了塑性变形，且越接近固有频率，塑性应变越大。

表2 不同频率周期性载荷作用下的力学响应

角频率 krad/s	15.7	23.6	31.4
等效塑性应变	9.45e-4	1.01e-3	9.96e-4

三、结束语

本文通过有限元软件模拟分析，直观地将悬臂梁的弹塑性分析中不同阶段的内力及位移响应进行了展示，可以看出理论解与数值解相吻合，不仅加深了学生对该内容的理解，还培养了学生的实践能力。在此基础上，还应用软件对该悬臂梁进行了动力学分析，通过施加两种时变载荷，获得结构不同模态下的固有频率。与施加静态荷载相比，动态载荷对结构力学特性的影响要大很多。通过以上教学方法的实施，不仅可以使学生深入理解梁的弹塑性分析的基本原理和方法，还熟练掌握 ABAQUS 软件在弹塑性分析中的应用和可视化技巧。

参考文献

- [1] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用 [M]. 清华大学出版社, 2009.
- [2] 程良彦, 潘夏辉, 王庭辉, 王文贞. 交互可视化教学在弹塑性力学中的探讨 [J]. 教育现代化, 2021(98):5-8.
- [3] 王宏伟, 谢丽丽, 周宏伟等. 交互式 and 可视化的弹塑性力学教学方法探讨与实践 [J]. 力学与实践, 2018, 40(6):6.
- [4] 禹海涛, 赵慧玲. “弹塑性力学与有限元”课程教学实施思考—土木水利专业学位研究生核心课程 [J]. 教育教学论坛, 2022(25):4.
- [5] 米海珍, 胡燕妮. 塑性力学 [M]. 清华大学出版社, 2014.