

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2016.02.039

钢结构轴心压杆稳定性教学中 ANSYS 软件的应用

李 贤,丁北斗,张营营

(中国矿业大学 力学与建筑工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:稳定问题是钢结构设计原理课程的教学重点和难点。以轴心受压钢构件的整体稳定教学为例,分析了轴心受压钢构件稳定教学中的难点和重点,探讨了应用有限元软件 ANSYS 辅助轴心受压钢构件稳定难点问题讲解的方法。实践表明将 ANSYS 软件应用到钢结构稳定教学中可以加深学生对钢结构稳定问题的认识,激发其学习兴趣,有利于其科学素养和实践创新能力的培养,从而有效地提高了钢结构设计原理课程的教学质量。

关键词:钢构件;稳定性;有限元;教学

中图分类号:TU-4 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2016)02-0162-05

钢结构设计原理是土木工程专业必修的专业基础课程。由于钢材具有强度高和重量轻等特点,钢结构的构件截面通常较小。因此,与混凝土结构相比,钢结构稳定设计显得尤为重要,但凡钢结构的受压部位,在设计时都必须认真考虑其稳定性^[1]。现代工程中因失稳而造成的钢结构事故也时有发生,如1960年罗马尼亚布加勒斯特一座直径为90m的圆形面单层网壳因失稳倒塌。与强度问题相比,钢结构稳定这一概念更加抽象和难于理解,规范关于钢结构稳定验算公式也更加复杂难懂。而钢结构稳定计算在钢结构本科教学中既是重点,也是难点。传统的钢结构教学一般以理论讲解和公式推导为主,辅以习题及课程设计。教学经验表明,对于钢结构稳定问题,单纯的理论讲解和公式推导很容易因内容晦涩难懂而很难收到理想的教学效果。因此,如何改进教学方法,改善教学效果,成为钢结构稳定教学改革的当务之急^[2]。

ANSYS 软件是融合结构、流体和热场等分析于一体的大型通用有限元分析软件,目前已成为土木建筑行业仿真分析的主流软件之一。借助 ANSYS 软件来辅助钢结构稳定性问题的教学,有望将抽象难解的理论更加生动形象。ANSYS 软件可以将钢构件的失稳过程以动画的形式清晰直观地展现给学生,学生可以直观地观察钢构件的应力、应变和变形等随荷载的变化关系。因此 ANSYS 软件在钢结构稳定性问题教学中的应用可以有助于减轻该课程的教学难度,提高学生的学习兴趣,增强教学效果。由于轴心受压构件是钢结构设计原理课程教学

收稿日期:2015-08-28

基金项目:中国矿业大学课程建设与教学改革项目(2014YB08)

作者简介:李贤(1980-),男,中国矿业大学力学与建筑工程学院副教授,博士,主要从事钢与组合结构基本理论研究,(E-mail)leexian@yeah.net。

过程中遇到的有关钢结构稳定的第一类构件,正确掌握钢构件轴心压杆的稳定问题,对于学生建立起稳定问题的概念和深入理解稳定问题的本质有着重要意义。因此,文章将着重分析钢结构轴心压杆稳定问题教学中的难点和重点,进而探讨 ANSYS 软件在辅助钢结构轴心压杆稳定难点问题讲解中的应用。

一、轴心受压构件稳定性教学的难点和重点

(一) 强度、稳定和欧拉临界力的区别与联系

强度和稳定计算是钢结构设计的重要内容,而欧拉临界力是学生所熟悉的材料力学知识点。学生正确理解三者的关系和区别是其正确理解构件稳定性问题的本质以及准确掌握如何提高轴心受压杆件稳定性的措施和方法的前提。轴心受压杆件的强度和整体稳定验算的现行规范计算公式以及欧拉临界力的计算公式如式(1) - (3)所示。

$$\text{强度验算: } \sigma = \frac{N}{A_n} \leq \frac{f_y}{\gamma_R} = f \quad (1)$$

$$\text{整体稳定验算: } \sigma = \frac{N}{A} \leq \frac{\sigma_{cr}}{\gamma_R} = \frac{\sigma_{cr}}{f_y} \frac{f_y}{\gamma_R} = \varphi f \quad (2)$$

$$\text{欧拉临界应力: } \sigma_{E,cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (3)$$

式(1) - (3)中符号含义同《钢结构设计规范》(GB50017 - 2003)^[3],不赘述。公式(1)和公式(2)二者虽在形式上相近,但性质却迥然不同。教学中应该让学生明白强度和稳定验算虽都是承载能力极限状态验算,但强度计算是针对构件的某一个截面进行的,而稳定计算虽从形式上看也像针对个别截面验算,而实际上却是针对整个构件进行的。因此,从本质上讲,强度问题是截面应力问题,当构件的最大内力或截面削弱处的最大应力超过钢材强度,即认为构件将发生强度破坏;而构件的整体稳定问题实际上是构件的整体刚度问题,即构件的长细比 λ 较大时,构件达到稳定极限状态时,即使荷载不增大,变形也将急剧增加且不可恢复。公式(3)给出的是学生材料力学学习阶段所掌握的完善轴心受压杆件稳定临界力,其也揭示出整体稳定和整体刚度的内在联系。公式(2)和公式(3)中稳定临界应力的区别在于公式(2)是实际有缺陷杆件的稳定临界应力,而公式(3)为完善轴心受压杆件稳定临界力。公

式(2)中的稳定系数 φ 反映了杆件残余应力、荷载初偏心和构件初弯曲对轴心受压杆件整体稳定的影响^[4]。

(二) 轴心压杆不同整体失稳形式的特点及其判别

轴心受压构件整体失稳形式有弯曲失稳、扭转失稳和弯扭失稳。正确地判别轴心受压构件的失稳形式是进行轴心受压杆件整体稳定计算的前提。很多教材给出了完善轴心受压杆件不同失稳形式下基于弹性稳定理论的整体稳定承载力计算公式。由于学生未接触过弹性稳定理论而计算公式又比较复杂,很多学生对轴心受压构件整体问题望而生畏,对失稳形式判别理解不够深入,对不同失稳形式的区别缺乏形象直观了解。要让学生深入地理解轴心受压杆件失稳形式的判别应着重基于学生熟悉的材料力学中关于杆件截面的形心、剪切中心和截面剪力概念讲解。对于双轴对称截面,截面的形心与剪切中心重合,根据构件抗弯刚度和抗扭刚度的强弱对比,构件的失稳形式为弯曲失稳或扭转失稳,即只弯不扭或只扭不弯。对于双轴对称工字形、H型、箱型和圆形等截面,由于板件厚度比较大,因而自由扭转刚度也比较大,通常发生弯曲失稳,而双轴对称十字形截面,当杆件比较短时抗弯刚度可能大于抗扭刚度而发生扭转失稳。对于单轴对称或无对称轴截面的轴心压杆,因截面的形心与剪切中心不重合,当杆件绕对称轴失稳时,为弯扭失稳,当绕非对称主轴失稳时,为弯曲失稳^[5]。究其原因,以T形截面为例,当杆件如图1(a)绕y轴失稳时,因杆件弯曲产生的剪力V通过形心C的同时通过剪切中心S,截面无扭转,故发生弯曲失稳;当杆件如图1(b)绕x轴失稳时,因杆件弯曲产生的剪力V通过形心C,而剪切中心S和形心C的距离为 e_0 ,剪力V相对于剪切中心S产生扭矩引起杆件发生弯扭失稳。基于截面形心、剪切中心和截面剪力概念讲解轴心压杆的整体失稳更加便于理解,学生容易接受,能为后续受弯构件和压弯构件失稳判别奠定良好基础。为了更加形象地理解不同失稳形式的区别,在讲授过程还应该采用动画和图片等方式辅助教学。

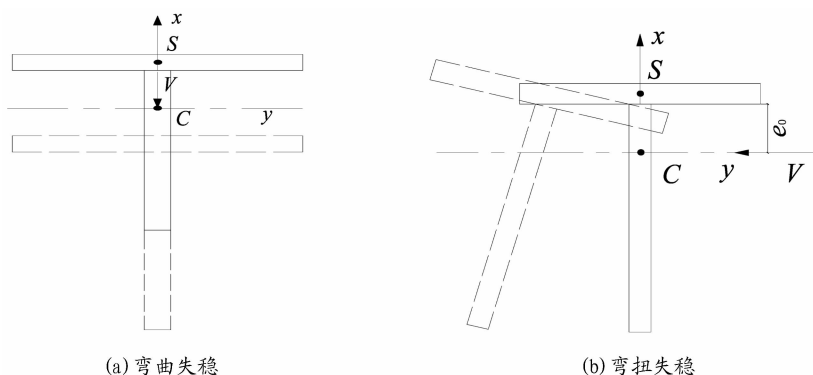


图1 T形截面杆件的失稳形式

二、ANSYS 辅助钢结构轴心压杆稳定性难点问题讲解中的应用

ANSYS 软件是辅助钢结构稳定教学的良好工具,其提供了 GUI 交互式界面操作环境和参数化设计语言 APDL,用户可以通过菜单或 APDL 命令流两种方式进行操作。该软件主要包括前处理模块、分析求解模块和后处理模块等 3 个模块。前处理模块主要包括模型建立、材料定义、网格划分以及约束和荷载施加等,而后处理是将软件计算分析结果可视化^[6]。ANSYS 基于有限元理论编制,其理论性强,参数众多且设置较为复杂。土木工程专业的大三学生由于不具有有限元理论和弹塑性力学等知识储备,不可能理解 ANSYS 仿真模拟的原理。因此,AN-

SYS 辅助教学一方面是通过编制 ANSYS 有限元程序对钢结构稳定问题进行仿真模拟,在课程上通过 ANSYS 分析所得的图片和动画多角度全方位直观呈现构件的不同失稳形式,使学生形象具体地理解失稳。另一方面是对有限元程序 APDL 命令流中的繁杂参数进行封装,将模型建立、材料定义、网格划分、边界约束以及求解和后处理编好,教师通过程序注释和使用手册告知学生可以对哪些参数进行调整,从而了解参数变化对分析结果的影响,而不对程序本身的理论做过多的讲解。这样,学生可以通过课后或课堂上机实践等方式独立运行封装注释好的程序,达到深入了解轴心受压杆件不同失稳形式的教学目的。

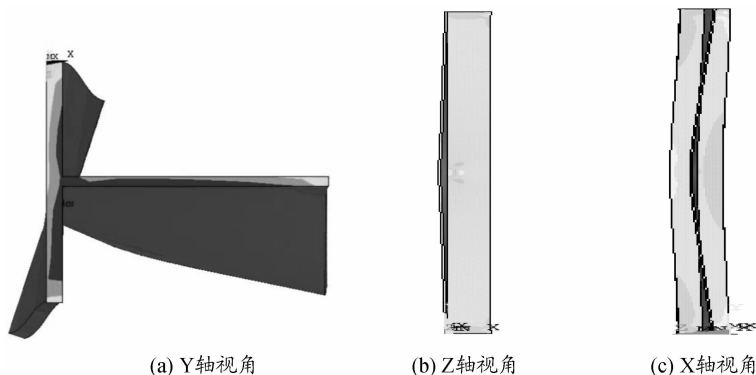


图2 T形截面杆件的弯扭失稳的不同视角变形图

下面以 T 形截面轴心受压柱的整体稳定讲解为例,图 2 给出了 T 形截面轴心受压杆件绕对称轴 X 轴发生弯扭失稳时沿不同主轴视角的变形图,图 3 给出了 T 形截面轴心受压杆件绕非对称主轴 y 轴发生弯曲失稳时沿不同主轴视角的变形图。另外,T 形截面轴压杆件的失稳动态过程还可以动画的形式在课堂形象展示。基于图 2 和图 3 的对比,学生可以直观地了解弯扭失稳和弯曲失稳的区别。从沿 Y 轴视角可以明显看到,对于弯扭失稳杆件除端部截面外在发生弯曲变形的同时均发生了不同程度的扭

转,而弯曲失稳杆件如图 3(a) 所示除端部截面外均发生不同程度的弯曲变形,截面无扭转。表 1 给出了基于 ANSYS 的 T 形截面轴心受压杆件绕对称轴 X 轴弯扭失稳模拟的 APDL 命令流。表中给出了该轴压杆件稳定分析的基本过程、程序内容、APDL 命令流和注释。注释部分给出了程序的含义以及学生可以自行修改的参数。从表中可以看出,学生只需要修改其熟悉的参数,就可以轻松地运行杆件稳定分析的程序,得到杆件的失稳形式,并可以多角度多方式观察杆件的失稳过程。

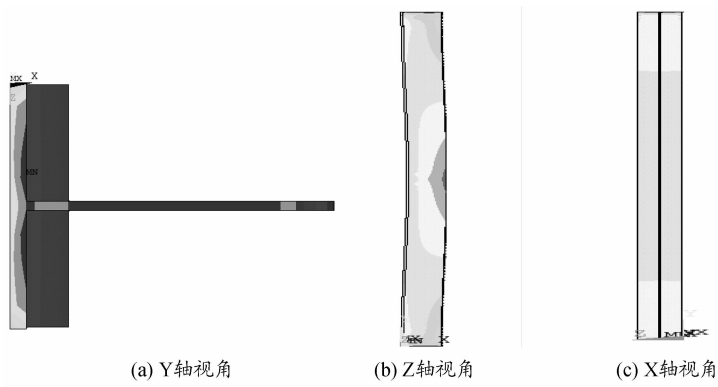


图 3 T 形截面杆件的弯曲失稳的不同视角变形图

表 1 基于 ANSYS 的 T 形截面轴压杆件弯扭失稳模拟的 APDL 命令流

| 基本过程 | 内容 | APDL 命令流 | 注释 |
|-----------|--|---|---|
| 前处理 | 定义 T 形截面的几何特性 | <pre> /filename,Tsteel column /title,Tsteel column L = 5000 H = 350 B = 300 Tw = 12 T = 20 Area = (B - Tw) * T + H * Tw Centerx = ((B - Tw) * T * T/2 + H * Tw * H/2)/Area Centery = B/2 </pre> | 杆件长度 L,T 形截面高度 H, 腹板宽度 B, 腹板厚度 Tw, 翼缘厚度 T, 可根据分析需要调整。程序中参数单位为国际单位 N, mm, s |
| | 定义单元类型和材料特性 | <pre> /prep7 et,1,solid45 mp,ex,1,2e5 mp,prxy,1,0.3 </pre> | 本程序采用弹性材料 |
| | 建立几何模型 | <pre> block,0,T,0,L,0,B block,0,H,0,L,(B/2)-(Tw/2),(B/2)+(Tw/2) vptn,all </pre> | |
| 网格划分 | <pre> lsel,s,loc,y,0,0 lsel,a,loc,y,L,L lesize,all,H/10 lsel,inve lesize,all,H/8 lsel,all vatt,1,1,1 vmesh,all finish </pre> | 单元尺寸控制命令 lesize 中内容 H/10 和 H/8 可以调整。注意单元越粗, 计算效率越高, 精度越差 | |
| 求解 | 定义约束和荷载 | <pre> /solu nset,s,loc,y,0,0 d,all,ux,,,uy,uz allsel,all nset,s,loc,y,L,L d,all,ux,0 d,all,uz,0 d,all,uy,L/300 allsel,all nset,s,loc,y,L/2-H/16,L/2+H/16 nset,r,loc,x,centerx-H/20,centerx+H/20 d,all,uz,L/1000 allsel,all </pre> | 本程序中杆件下端固结, 上端截面约束 X,Z 轴方向位移, 沿杆轴 Y 方向施加位移荷载 L/300, 轴向加载位移根据需要可改变以保证杆件发生失稳。另程序近似考虑了 L/1000 的杆件初弯曲 |
| 定义分析类型和参数 | <pre> antype,static outres,all,all nlgeom,1 time,1 autots,on deltim,0.05,0.01,0.1 solve finish </pre> | 一般不建议修改 | |

续表

| 基本过程 | 内容 | APDL 命令流 | 注释 |
|------|-----------|--|---|
| 后处理 | 显示杆件变形和应力 | <pre> /post1 set,last pldisp,2 plnsol,s,y,0,1 plnsol,s,eqv,0,1 /dscale,10 /replot </pre> | 可以使用 ANSYS 的右侧 GUI 界面菜单调整观察视角。为便于观察,此处变形比例(dscale)放大了 10 倍,缩放比例可以自行定义 |
| | 生成动画 | <pre> /view,1,1,1,0 antime,20,0.5,5,0,1 finish </pre> | 失稳过程的动画显示,可通过上述 GUI 界面自行改变视角 |

实践表明:将 ANSYS 软件应用到钢结构的稳定问题教学中,不仅可以使稳定问题教学变得形象生动,活跃课堂气氛,而且 ANSYS 软件作为土木工程高年级学生学习的内容,学生提前接触有限元知识,也可以激发其分析探索兴趣。

三、结语

稳定问题是钢结构设计原理课程教学的难点和重点。在教学过程中,应该注重相关内容的对比分析,引导学生正确理解钢结构失稳的现象和原因,有效掌握钢结构稳定问题的本质内容。将 ANSYS 软件应用到钢结构稳定教学中,可以加深学生对钢结构稳定问题的理解,有利于其科学素养和实践创新能力的培养,从而有效提高钢结构设计原理课程的教学质量。

参考文献:

- [1]陈绍蕃. 钢结构稳定设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [2]郭小农,罗永峰,蒋首超,等. 钢结构稳定教学研究[J]. 高等建筑教育,2011,20(2):46-48.
- [3]GB 50017-2003. 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
- [4]夏军武,贾福萍,龙帮云,等. 结构设计原理[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2009.
- [5]朱召泉. 钢结构构件稳定性的教学体会与总结[J]. 钢结构,2010(增刊):941-946.
- [6]王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.

Application of ANSYS software in teaching of stability of axially loaded steel members

LI Xian, DING Beidou, ZHANG Yingying

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, P. R. China)

Abstract: Stability is a key and difficult point during the teaching of fundamentals of steel structure design. Taking the teaching of overall stability of axially loaded steel members as an example, we presented the key and difficult points during teaching, and discussed the methods of application of ANSYS software to aid the teaching. The practice indicated that the application of ANSYS software to aid the teaching can improve students' understanding of stability problems, activate their interest of study and benefit to build their scientific literacy and train their ability of thinking, which significantly improved the teaching quality of fundamentals of steel structure design.

Keywords: structural steel components; stability; finite element; teaching

(编辑 欧阳雪梅)