

# 钢结构原理教学中有限元软件 ABAQUS 的应用

王志滨, 徐信灿

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:**单调乏味的教学方式导致钢结构原理的教学效果不理想。将有限元软件 ABAQUS 应用于钢结构原理教学中,可提高学生对钢构件受力全过程、破坏模态和应力分布的感性认识,使复杂的钢结构原理的教学更加形象和生动。研究表明该方法可有效提高学生学习兴趣和教学质量。

**关键词:**有限元;钢结构原理;抗震性能;稳定破坏

**中图分类号:**TU391;G642

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2909(2013)05-0145-03

钢结构由于强度高、质量轻、塑性延性好、抗震性能良好、施工方便等优点,已被广泛应用于大跨度结构、高层房屋、高耸结构、重型工业厂房和承受动力荷载的结构中。钢结构原理作为土木工程专业重要的一门专业课,涉及工程材料、稳定理论、结构力学、弹性力学等知识,但课时压缩严重。因此,如何在有限的课时内提高学生对复杂知识的理解能力是专业课教师必须认真思考的问题。

目前,钢结构原理课程教学主要存在照本宣科,内容枯燥等问题。很多教师采用多媒体授课,但仅仅是把原来手工板书教学内容照搬到电子课件上,课堂缺乏生动性。面对诸多的文字和复杂的公式推导,学生很难在短时间内消化所有的知识点,因此学生学习积极性普遍不高。

大型有限元分析软件 ABAQUS 可同时考虑材料非线性和几何非线性,该软件已广泛应用于土木工程研究领域,如建筑结构在静力荷载、往复荷载、冲击荷载和火灾作用下力学性能的研究。因此,许多高校和科研机构都将 ABAQUS 作为一种重要的研究工具和生产工具。同时有限元软件也被许多学者用于土木工程课程教学中,并获得较好的教学效果<sup>[1-3]</sup>。为了提高钢结构原理的教学效果,笔者采用 ABAQUS 对某些典型的钢构件算例的受力过程进行数值模拟,模拟结果包括动画和应力云图等。基于生动的动画和云图,可使学生获得较为感性的认识,强化学生对复杂知识点的理解。

## 一、ABAQUS 在土木工程教学中的优势

(1)可视化教学使得教学方法更加形象、生动。ABAQUS 可提供各种工况下钢构件受力的全过程动态分析和整个构件的应力、应变的分析,帮助学生提高感性认识。

(2)该软件拥有强大的非线性功能,可用于研究、分析钢结构、混凝土结构和组合结构的力学性能。

收稿日期:2013-05-17

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(15135013);福建省教育厅科研资助项目(JA11022)

作者简介:王志滨(1979-),男,福州大学土木工程学院讲师,博士,主要从事钢-混凝土组合结构研究,

(E-mail) wangzhibin@fzu.edu.cn。

(3)求解速度快。超静定或空间问题的手工求解对学生的力学功底要求较高,同时手工求解还需消耗大量的时间,而有限元软件 ABAQUS 的求解速度是手工计算速度的十倍甚至几十倍。

(4)可充分考虑各种缺陷(如:焊接残余应力、初始偏心 and 初挠度)的影响,计算精度高。

(5)弥补试验教学的不足。土木工程专业课程教学往往要与实验教学相结合,但实验教学又多集中于钢筋混凝土构件,针对钢结构的实验较少。将 ABAQUS 应用于钢结构原理的教学可弥补这一不足,在教学过程中可取代相应的简单原理性实验。

## 二、教学应用典型算例

根据荷载类型的不同,钢结构原理的教学内容可分为静力和动力两个部分,以下将分别举例说明 ABAQUS 在教学中的应用。

以下典型算例中钢板均采用 SR4 壳单元。对比钢筋混凝土构件中的钢筋均采用 T3D2 桁架单元;混凝土均采用 C3D8R 单元,钢筋嵌固在混凝土。钢材屈服强度统一取为 345 MPa;混凝土统一采用 C50。

模型中钢材本构采用双折线强化模型,强化段的弹性模量为初始弹性模量的 0.01。混凝土采用塑性损伤模型,其受压和受拉单轴应力-应变关系分别采用文献[4]和文献[5]中建议的模型。混凝土塑性损伤系数参考文献[6]的建议取值。

### (一)抗震性能分析

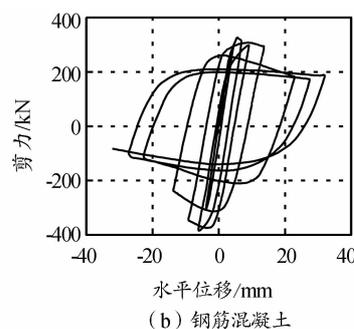
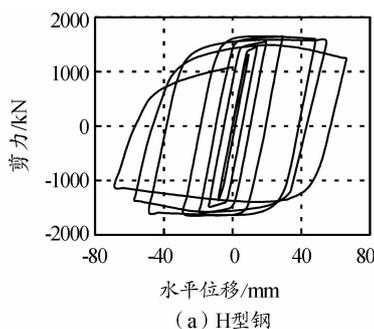


图1 剪力( $P$ ) - 水平位移( $\Delta$ )滞回曲线

### (二)轴压稳定问题分析

钢结构构件经常以轴压构件的形式出现在实际工程中,如屋架和桁架中的钢腹杆。钢结构轴心受压柱的稳定破坏模式包括弯曲屈曲、扭转屈曲和弯扭屈曲三种。为了更形象地说明以上概念,笔者建立了3个典型数值模型。典型算例的截面形状包括H形、十字形和角形,柱长均为4m。3种截面的高度和宽度均取400mm,其中H型钢的翼缘厚度为21mm,腹板厚度为13mm;十字形钢柱和角形截面钢柱的板件厚度均取为14mm。构件两端铰接,在构件长度方向施加轴压力。

模拟时考虑构件的初始缺陷:对于H形钢柱和角形钢柱,按钢结构设计规范<sup>[7]</sup>考虑初弯曲的影响,其跨中的最大初始挠度取为杆长的1/1000;对于十字形钢柱,其1阶屈曲模式为扭转屈曲(如图2),因

钢结构的一个重要特性是其抗震性能良好,为更好地说明以上概念,笔者建立了钢柱模型,具体参数如下:构件长度为3m。钢柱采用H型钢,其截面的高度和宽度均为400mm,腹板厚度为13mm,翼缘厚度为21mm。其轴压比取为0.3(轴压比为构件上施加的固定轴力和该构件极限抗压承载力的比值)。构件两端铰接,在跨中施加往复横向剪力( $P$ )。

为进行对比,还建立了对比钢筋混凝土柱模型,具体参数如下:构件长度为3m。柱截面宽度为300mm,高400mm,柱截面对称配筋,每侧配置3根直径为16mm的纵筋,箍筋为 $\Phi 8@200$ ,其轴压比和边界条件与上述钢柱相同。

图1给出了以上两个典型算例的剪力( $P$ )~水平位移( $\Delta$ )的滞回曲线,由图1可发现如下规律:(1)钢柱的 $P-\Delta$ 滞回曲线较为饱满,而钢筋混凝土柱的 $P-\Delta$ 滞回曲线呈捏缩现象。钢柱的耗能能力明显大于钢筋混凝土柱的耗能能力。(2)钢柱 $P-\Delta$ 滞回曲线的骨架线在峰值荷载后,其承载力缓慢下降;而对于钢筋混凝土柱,其 $P-\Delta$ 滞回曲线在峰值荷载后出现了明显的荷载突降现象。这说明钢柱的延性明显高于钢筋混凝土柱。

综上,当轴压比相同时,钢柱的抗震性能要优于钢筋混凝土柱。此外,还可将钢柱受力的全过程制成视频文件播放给学生看,使学生对其受力全过程的应力变化规律有感性认识。

此其初始扭转剪应变暂取1/1000。基于以上模型可求得钢柱的典型破坏模式,具体如下。

(1)弯曲屈曲。如图3(a)所示,H形截面钢柱绕弱轴发生弯曲破坏,这说明双轴对称的截面一般发生弯曲破坏。

(2)扭转屈曲。如图3(b)所示,十字形截面钢柱发生扭转屈曲破坏,这说明部分双轴对称截面可能发生扭转屈曲,十字形截面钢柱是其中的典型代表。

(3)弯扭屈曲。如图3(c)所示,角形截面钢柱在发生弯曲变形的同时又伴随扭转,因此单轴对称截面的构件在绕对称轴屈曲时,轴压柱发生绕弯曲变形的同时必然伴随扭转。

### (三)应力集中分析

为分析孔洞缺陷对构件应力集中程度的影响,笔者建立如下2个H型钢典型轴拉算例,具体参数

如下:H型钢的截面宽度和高度均为400 mm,腹板厚度为13 mm,翼缘厚度为21 mm。构件长度均为2 m,在跨中截面腹板中截面处分别设置直径为100 mm或200 mm的圆孔。构件一端固结,一端施加轴向拉力。图4给出了轴向应变为5 000  $\mu\epsilon$  时对应跨中截面附近的 Mises 应力分布图,从图中可发现在跨中截面圆孔附近的应力值明显高于钢材

的屈服强度 $f_y$ (当圆孔直径分别为100 mm和200 mm时,其应力值分别为1.292  $f_y$ 和1.243  $f_y$ ),该处发生了明显的应力集中显现;而远离孔洞附近的区域,其应力值均等于钢材的屈服强度 $f_y$ 。同时还发现随着圆孔半径的增加,孔洞附近的最大应力值反而下降,因此其应力集中的程度随着孔洞直径的增大而下降。



图2 十字形钢柱1阶屈曲模态

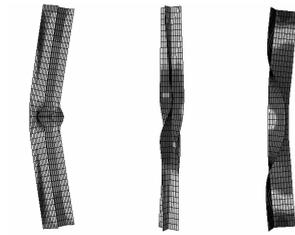


图3 钢结构长柱稳定破坏模态

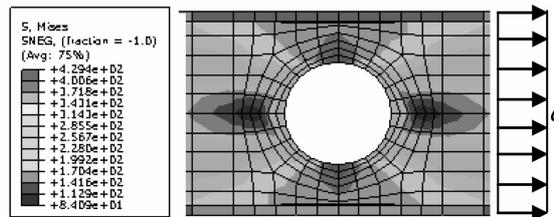
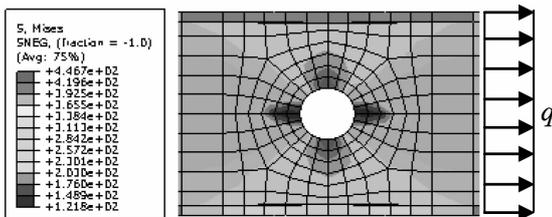


图4 带圆孔的H型钢轴心受拉构件应力云图

### 三、结语

(1)将 ABAQUS 应用于钢结构原理的教学中,可充分利用其强大的非线性分析功能,充分考虑构件的几何非线性和对比钢筋混凝土构件的材料非线性,其形象具体的视图效果可增强学生对复杂钢结构原理知识的理解。

(2)该软件可对钢结构构件进行屈曲模态分析,并将第一阶屈曲模态作为其初始缺陷来求解钢柱的稳定破坏模态和稳定承载力。因此,采用该方法的计算效率远高于手工推导,这也是钢结构原理课程可采用 ABAQUS 进行辅助教学的优势。

### 参考文献:

[1]严心池,王中华.现代结构力学教学中的有限元法[J].

江南大学学报:教育科学版,2007,27(4):37-39.

[2]郑愚,于国友,秦怀泉.非线性有限元分析在结构试验教学中的应用[J].东莞理工学院学报,2010,17(1):103-107.

[3]谢华刚.在力学教学中应用有限元 ANSYS 软件的优越性分析[J].高等教育研究,2011,28(4):67-68.

[4]Attard MM, Setunge S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete[J]. ACI Materials Journal, 1993(5):432-442.

[5]沈聚敏,王传志,江见鲸.钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M].北京:清华大学出版社,1993.

[6]张彬.钢管混凝土组合剪力墙抗震性能研究[D].福州:福州大学,2011.

[7]GB50017—2003 钢结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.

## Application of the finite element program ABAQUS in the teaching of steel structure principles

WANG Zhibin, XU Xincan

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China)

**Abstract:** The monotonous and dull way of teaching results in unsatisfied teaching effects of steel structure principles. To improve students' perceptual knowledge about the whole loading progress of steel specimens, failure models and stress distribution, the finite element program ABAQUS was used in the teaching of steel structure principles. It can make the teaching of complicated steel principles more visualized and lifelike, such as seismic behavior, stability damage and stress concentration. The result shows that this method can effectively enhance students' interest in learning and improve the teaching quality.

**Keywords:** finite element; steel structure principles; seismic behavior; stability damage