

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2014.06.001

# 循环荷载作用下铝合金轴压构件稳定性能分析

张铮<sup>1</sup>, 陈学超<sup>2</sup>, 郑永乾<sup>1</sup>, 陈曦<sup>1</sup>

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 研究了循环荷载作用下铝合金轴压构件的力学性能,并与钢轴压构件进行比较。采用通用有限元分析软件 ANSYS 对铝合金轴压构件的滞回性能进行有限元分析。分析方法考虑了材料非线性、几何非线性和初始缺陷的影响。根据计算结果,得到了 6061-T6 铝合金、6061-T4 铝合金和 Q235 钢 3 种材料轴压构件的滞回曲线、恢复力骨架曲线和刚度退化曲线,并进行了比较研究。分析结果显示,铝合金轴压构件的滞回性能与低碳钢轴压构件较为类似,并受到材料本构关系的显著影响。

**关键词:** 铝合金轴压构件; 循环荷载; 稳定性能; 有限元分析

中图分类号: TU391      文献标志码: A      文章编号: 1672-4348(2014)06-0511-04

## Analysis on stability performance of aluminium columns under cyclic loading

Zhang Zheng<sup>1</sup>, Chen Xuechao<sup>2</sup>, Zheng Yongqian<sup>1</sup>, Chen Xi<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;  
2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** The mechanical properties of axial compression aluminium members under cyclic loading were studied and compared with those of steel columns. A finite element analysis method based on FEA software, ANSYS was employed to conduct a theoretical study on hysteretic behaviour of aluminium columns, which involves the effects of material nonlinearity, geometrical nonlinearity and initial imperfection. The hysteretic curves, reversal skeleton curves and stiffness degradation curves of 6061-T6 aluminium columns, 6061-T4 aluminium columns and Q235 steel columns under axial cyclic loading were obtained and compared. The results show that the hysteretic behaviour of the aluminium columns is similar to that of the low carbon steel columns and is significantly influenced by constitutive relationship.

**Keywords:** aluminium column; cyclic loading; stability performance; finite element analysis

众所周知,铝合金材料具有轻质、美观、可模性好、耐腐蚀、耐久性好、方便施工、低温性好、易于回收等特点。根据结构特性,铝合金结构可用于桥梁结构、房屋结构和海洋结构,尤其适用于需要美观的标志性建筑物、恒载小而活载大的大跨屋面结构、腐蚀环境下的结构以及可拆卸结构等。在房屋结构中,铝合金结构又主要应用于平面桁

架、空间网架以及轻质结构中。国内铝合金结构在承重结构中的应用主要包括铝合金屋面结构(如网壳结构和穹顶结构)和各种幕墙结构中的支撑框架结构。近年来,国内已建造了几十座铝合金框架结构、铝合金网壳结构和铝合金人行天桥。

随着铝合金结构的广泛应用,针对铝合金材

收稿日期: 2014-10-14  
基金项目: 国家自然科学基金项目(51208109); 福建省自然科学基金项目(2012D074); 福建省高校杰出青年科研人才培养计划(闽教科[2013] 42号)  
第一作者简介: 张铮(1978-),男(汉),河南焦作人,副教授,博士,主要从事钢结构和组合结构的研究。

料和铝合金轴压构件的研究也越来越多。然而, 这些研究主要是针对构件的静力性能<sup>[1-3]</sup>。目前还没有铝合金结构滞回性能和作用机理的研究, 也没有提出相应的实用抗震设计方法, 有关铝合金结构抗震设计和施工要求的规范和规定也仍未制定, 目前的研究现状制约了铝合金结构在抗震设防区的进一步推广应用。

本文针对循环荷载作用下铝合金轴压构件的稳定性能进行分析。首先提出较为完善的循环荷载作用下铝合金轴压构件的有限元分析模型和分析方法, 然后对铝合金轴压构件的滞回曲线进行计算, 最后与钢轴压构件的耗能能力进行比较, 研究成果可供制定铝合金结构抗震设计规范和工程实践参考。

1 有限元分析方法

各类铝合金材料之间的力学性能差别很大, 且其本构关系呈现非常明显的非线性, 不能简单地用类似钢材的理想弹塑性模型来描述。Ramberg-Osgood 模型 (即  $\varepsilon = \sigma/E + 0.002 (\sigma/f_{0.2})^n$ ) 因能很好地描述非线性材料而被研究人员广泛地应用到各类铝合金材料的本构关系模型。该模型中的指数  $n$  可很好地反映非线性弹性应力-应变关系曲线中应变硬化率的特性。本文采用的铝合金材料本构关系为 Ramberg-Osgood 模型和 Steinhardt 假设<sup>[3]</sup> (即  $10 n = f^{0.2}$ ), 而钢材的本构关系取为考虑强化的双线性随动强化模型。

采用通用有限元分析软件 ANSYS 对铝合金轴压构件的滞回曲线进行计算。模型中采用了 SHELL 181 单元, 该单元为每个节点具有 6 个自由度的 4 节点单元, 适合分析较薄到中等厚度的板壳结构。该单元非常适用于线性、大转角或大应变非线性的应用。

分析方法考虑了材料和几何双重非线性以及初始缺陷的影响。模型采用 von Mises 屈服准则及其相关联流动法则。非线性材料模型采用 ANSYS 内设的多线性随动强化模型。模型的几何缺陷采用构件最低阶屈曲模态对应的初始正弦曲线, 特征参数  $v_0$  (即跨中位移) 取为  $l_0/1\ 000$  ( $l_0$  为轴压构件的计算长度)。

由于算例中构件组成板件局部屈曲的发生总不早于构件的整体屈曲, 模型中没有考虑组成板件的初始缺陷。根据 Mazzolani 的研究成果<sup>[3]</sup>, 对

于铝合金挤压型材构件而言, 其残余应力可忽略不计。

铝合金轴压构件的有限元模型如图 1 所示。算例试件为一端固定铰支约束、另一端滑动铰支约束的轴心受压构件。

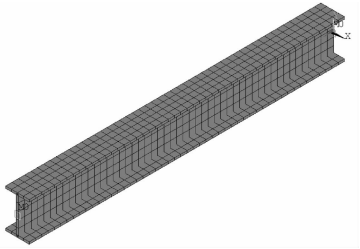


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model of axial compression aluminium members

2 滞回性能分析

为分析比较不同种类铝合金轴压构件与钢轴压构件在循环荷载作用下的力学性能, 分别计算了 H 形截面 6061-T6 铝合金、6061-T4 铝合金和 Q235 钢轴压构件的滞回曲线。

两种铝合金材料和低碳钢的本构关系曲线如图 2 所示。铝合金材料的初始弹性模量均为 70 GPa, 泊松比均为 0.3。6061-T6 铝合金和 6061-T4 铝合金的名义屈服强度分别为 240 MPa 和 110 MPa。Q235 钢的初始弹性模量为 206 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服强度为 235 MPa。

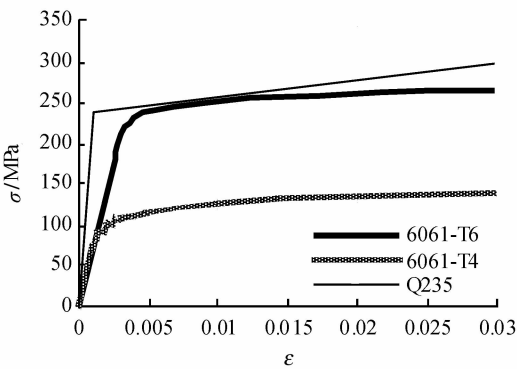


图 2 本构关系

Fig. 2 The constitutive relationship among two aluminium columns and low carbon steel

试件的循环加载制度采用全过程位移控制加载方式。基本位移  $\delta_0$  设为 2.5 mm, 每一位移荷载步均为基本位移值的倍数。在每一位移荷载步

阶段,均往复循环3次再进入下一级位移荷载,直至位移值达到15 mm,如图3所示。

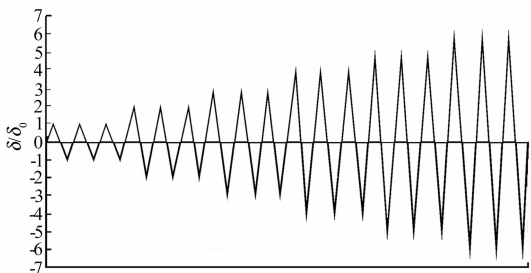
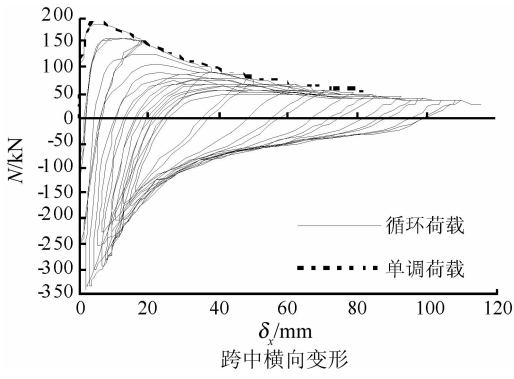
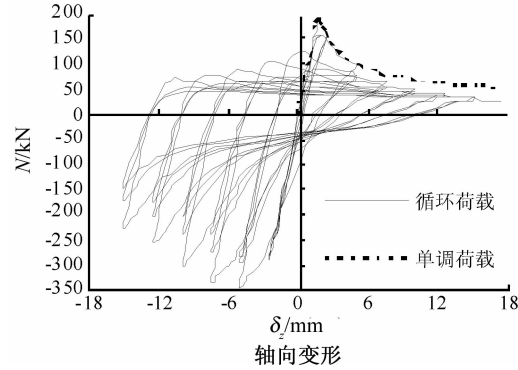
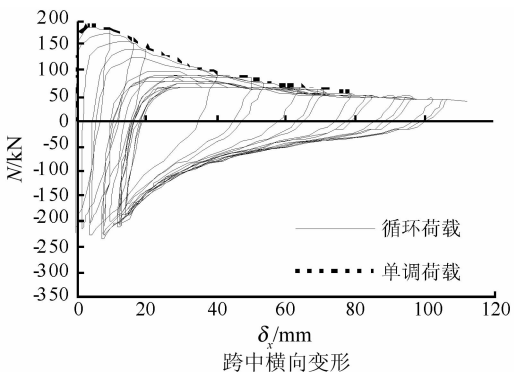
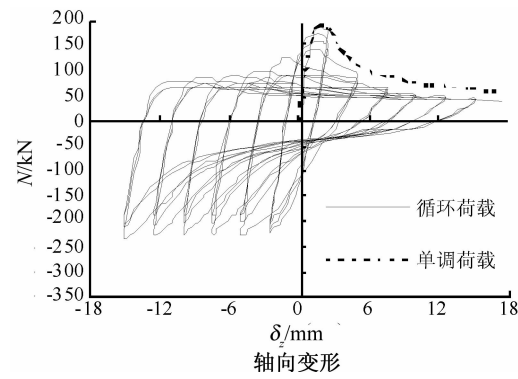


图3 循环加载制度

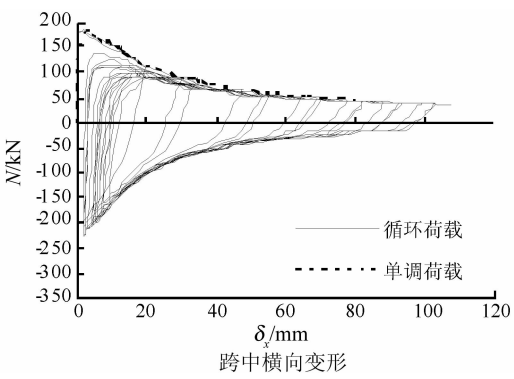
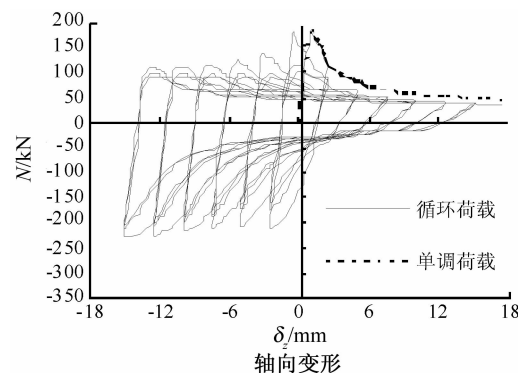
Fig. 3 The cyclic loading system of test pieces



(a) 6061-T6 铝合金



(b) 6061-T4 铝合金



(c) Q235 钢

图4 滞回曲线

Fig. 4 The hysteretic curves of aluminium columns and low carbon steel

为了便于比较,3类构件的计算长度及其单调一次加载稳定承载力均设为保持一致。其中,构件计算长度均为0.884 m;静力稳定承载力通过调整截面尺寸均保持在286 kN。与此对应,3类构件的截面尺寸分别为102×66×6×6 mm(6061-T6 铝合金)、140×92×6×6 mm(6061-T4 铝合金)和102×66×2.5×4.5 mm(Q235 钢)。

3类构件的滞回曲线如图4所示,图中纵坐标为轴心力 $N$ (正值为压、负值为拉),横坐标分别为轴向变形 $\delta_z$ 和跨中横向变形 $\delta_x$ 。

由图 4 可见,2 类铝合金材料轴压构件的延性与低碳钢轴压构件没有显著区别,而 3 类构件在循环荷载作用下的稳定承载能力均低于单调一次加载的情况。

3 结果分析

提取 3 类构件的恢复力骨架曲线进行比较,如图 5 所示,图中骨架曲线中各点的轴心力  $N$  值取为图 4 中滞回曲线各位移荷载步第一循环的正峰值点。

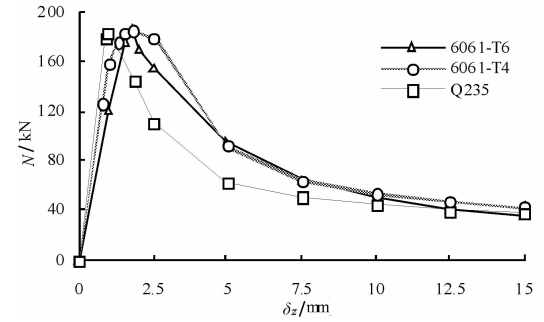


图 5 恢复力骨架曲线

Fig. 5 The reversal skeleton curves of aluminium columns and low carbon steel

试件的刚度一般可用其割线刚度来表示,割线刚度按式(1)计算。

$$K_i = \frac{|+N_i| + |-N_i|}{|+\delta_{zi}| + |-\delta_{zi}|} \tag{1}$$

式中,  $\pm N_i$  为第  $i$  个位移荷载步第一循环的轴心力正或负峰值点;  $\pm \delta_{zi}$  为第  $i$  个位移荷载步第一循环的轴向变形正或负峰值点<sup>[4]</sup>。根据式(1)的计算结果,可得到 3 类构件随着位移荷载增加而变化的刚度退化值,如图 6 所示。

从图 5 可以发现,随着变形的增加,3 类构件的恢复力骨架曲线呈现较为不同的特性:在峰值之前,Q235 钢构件的刚度最大,6061-T4 铝合金构件次之,6061-T6 铝合金构件最小,这主要是由 3 类构件的截面刚度不同而导致的;而在峰值

之后,Q235 钢构件的承载力下降较快,6061-T6 铝合金构件次之,6061-T4 铝合金构件的承载力下降较慢。由图 6 可以看出,3 类构件随着位移荷载增加而发生的刚度变化较为类似且均发生了较大程度的退化。

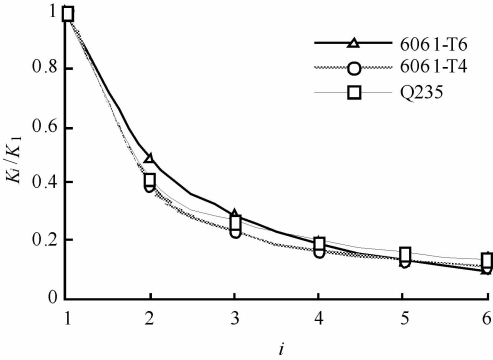


图 6 刚度退化曲线

Fig. 6 The stiffness degradation curves of aluminium columns and low carbon steel

4 结论

1)6061-T6 铝合金的屈服强度与 Q235 钢相当,而 6061-T4 铝合金的屈服强度及其在本构关系模型中的指数  $n$  均为 6061-T6 铝合金的一半。同时,铝合金材料的弹性模量均为钢材的三分之一。经过分析发现,这些材料特性均决定了铝合金轴压构件的滞回性能具有与钢构件有所不同的特点。

2)6061-T6 铝合金材料的伸长率只有 6061-T4 铝合金的一半,而 6061-T4 铝合金材料的伸长率又只有 Q235 钢的一半。然而,从循环荷载作用下 3 类材料轴压构件的延性来看,铝合金轴压构件与低碳钢轴压构件并不存在明显的差别。

3)在完全相同的循环阶段,无论是加载段的刚度还是卸载段的刚度,6061-T6 铝合金轴压构件总是低于 6061-T4 铝合金,而 6061-T4 铝合金轴压构件总是低于 Q235 钢。

参考文献:

[1] 郭小农,沈祖炎,李元齐,等. 铝合金轴心受压构件理论和试验研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(6):118-128.  
[2] 张铮. 箱形截面铝合金压弯构件截面影响系数研究[J]. 福建工程学院学报,2008,6(3):260-266.  
[3] Federico M M. Aluminium alloy structures[M]. London: Chapman & Hall, 1995.  
[4] 中华人民共和国建设部. JGJ 101-96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.

(责任编辑:陈雯)