

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.020



# Q460 高强角钢轴心受压构件极限承载力 试验研究

曹现雷<sup>1,2</sup>, 徐勇<sup>1</sup>, 郝际平<sup>3</sup>

(1. 安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032;

2. 江苏省结构工程重点实验室, 江苏 苏州 215011; 3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

**摘要:**为研究 Q460 高强角钢轴压构件的受力性能, 采用静力试验对试件破坏状态和稳定承载力进行分析, 两端设置球铰、单刀口铰和双刀口铰支座, 分析了不同铰接方式对构件受力性能的影响。结果表明, 采用不同支座均能很好地反映杆件的受力性能; 短构件的极限承载力由钢材强度控制, 长细比变化对其影响很小, 长细比等于 30 和 45 的试件以局部破坏为主, 长细比等于 60 和 80 的杆件以整体弯曲失稳为主。比较试验和各规范理论计算结果发现, 试验值显著高于中国 DL/T 5154—2002 杆塔技术规范规定计算值, 与美国 ASCE 10—97 导则计算值吻合较好。

**关键词:**高强度钢材; 轴心受压; 试验研究; 长细比

**中图分类号:** TU391      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2018)06-0146-07

## Experimental analysis on ultimate bearing capacity of Q460 high-strength angle members under axial compression

Cao Xianlei<sup>1,2</sup>, Xu Yong<sup>1</sup>, Hao Jiping<sup>3</sup>

(1. Department of Architecture Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, Anhui, P. R. China;

2. Jiangsu Province Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou 215011, Jiangsu, P. R. China;

3. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

**Abstract:** Laboratory experiments were carried out to investigate the behavior of Q460 high strength angle members under axial compression via the static testing method. The various supporting conditions, including the spherical hinge, single knife-edge and double knife-edge bearing, are applied to study their effects on bearing capacity of members. The results show that the supporting conditions can represent the behavior of specimens. Specimens with small slenderness ratio of 30 to 45, of which the ultimate bearing capacity are determined by strength of steel instead of slenderness ratio, are subjected to a local buckling failure. While specimens with large slenderness ratios of 60 to 80 are mainly subjected to global bending

**收稿日期:** 2017-07-04

**基金项目:** 国家自然科学基金(51208002); 安徽省自然科学基金(1608085ME115); 江苏省结构工程重点实验室课题(ZD1404); 安徽省住房城乡建设科学技术计划(2015YF-35)

**作者简介:** 曹现雷(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事钢结构稳定研究, E-mail: lei070@163.com.

**Received:** 2017-07-04

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51208002); Anhui Provincial Natural Science Foundation (No. 1608085ME115); Jiangsu Province Key Laboratory of Structure Engineering (No. ZD1404); Science and Technology Project of Housing Urban and Rural Construction in Anhui Province (No. 2015YF-35).

**Author brief:** Cao Xianlei (1979-), PhD, associate professor, main research interest: stability of steel structure, E-mail: lei070@163.com.

instability. Comprehensive comparisons indicate that the test results are in good agreement with the calculations from the American regulation ASCE10-97, and are significantly greater than those from the Chinese regulation of DL/T 5154-2002.

**Keywords:** high strength steel; axial compression; experimental research; slenderness ratio

现代结构工程对结构材料强化的要求日益显著,随着冶炼技术的不断提高,生产出强度高、质量稳定的高强度钢材已不再困难,这就使得高强角钢运用于输电铁塔成为可能。中国输电线路铁塔大多使用 235、345 MPa 等普通热轧角钢,相比日本、美国,品种单一且强度较低<sup>[1]</sup>,因此,高强度角钢的推广很有必要。

已有不少学者对角钢受压构件开展了相关研究<sup>[2-7]</sup>。Usami 等<sup>[8]</sup>完成两种等级等边角钢试验,表明小长细比杆件极限荷载与美国 ASCE-1997 导则<sup>[9]</sup>计算值稳合较好,大长细比试验值则大于 ASCE 值。Adluri 等<sup>[10]</sup>研究角钢受压构件的屈曲模式,发现 86 版美国钢结构规范 AISC-LRFD 设计偏安全,拟合出角钢构件修正柱子曲线。曹现雷等<sup>[11]</sup>研究了 Q460 单角钢一端轴心一端偏心加载杆件破坏形态和受力性能,表明中国 DL/T 5154—2002 规范<sup>[12]</sup>计算方法偏保守,提出改良 ASCE 后的设计方法。班慧勇等<sup>[13-14]</sup>对高强角钢轴压柱受力性能进行研究,给出的建议稳定系数明显超出 GB 50017—2003 规范<sup>[15]</sup>中的 b 类曲线,并基于数值分析提出涉及相关屈曲的设计方法。

鉴于 Q460 角钢广阔的运用前景,相关规范有待完善,笔者对轴压构件承载能力进行了试验研究。

## 1 试验概况

### 1.1 材性试验

试件制作与试验过程均满足中国规范<sup>[16-17]</sup>相关规定,取样位置如图 1 所示,结果如表 1、图 2 所示。其中: $b$  为等边角钢肢宽度; $f_y$  为钢材的屈服强度; $f_u$  为钢材的抗拉强度; $\delta$  为钢材伸长率; $E$  为钢材弹性模量; $f_u/f_y$  为钢材强屈比; $\epsilon_y$  为屈服应变; $\epsilon_{st}$  为初始强化应变; $\epsilon_u$  为极限应变。

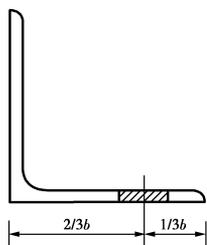


图 1 材性试件取样位置

Fig. 1 Location of specimens for tensile coupon test

表 1 材性试件力学性能指标

Table 1 The mechanical properties of specimens for tensile coupon test

规格	$E / 10^5 \text{ MPa}$	$f_y / \text{MPa}$	$f_u / \text{MPa}$	$\delta / \%$	$f_u / f_y$
Q460L12508	1.99	530	715	22.0	1.35
Q460L12510	2.20	525	685	21.0	1.30
Q460L16010	2.02	515	680	25.0	1.32
Q460L16012	2.06	530	685	20.0	1.29
Q345B 钢板	2.02	440	580	27.0	1.32

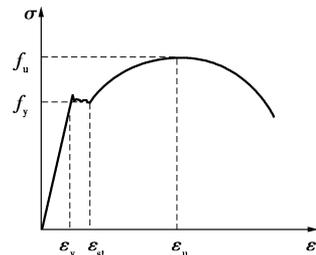


图 2 试件应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of specimen

### 1.2 试件概况

共设置 48 根轴压试件,相同试件设置 3 组,包括 4 种角钢规格和 4 种长细比,两端支座采用球铰、单刀口和双刀口。为避免接触面摩擦力过大导致球铰不能正常转动,将球铰凹底座进行剖面加工,使底座球面半径扩大。各试件实测尺寸如表 2 所示。表中: $l$  为试件平均实测高度,取角钢两肢的平均值, $l=l_0+t_0$ , $l_0$  为角钢纵向长度, $t_0$  为端板厚度; $B$  为角钢肢平均宽度; $t$  为角钢肢平均厚度; $A$  为实测角钢肢宽度和厚度对应的截面面积。除球铰支座试件,试件计算长度需考虑支座高度,其构造如图 3 所示。

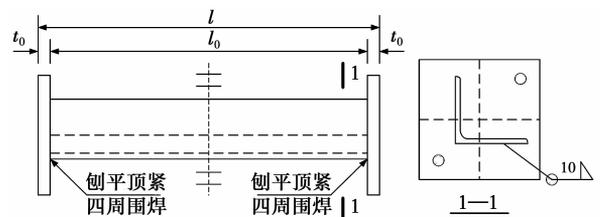


图 3 试件构造图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of specimen

表 2 轴压试件实测几何尺寸  
Table 2 Geometric parameters of specimens

试件编号	$l/mm$	$B/mm$	$t/mm$	$A/mm^2$	$P_E/kN$	试件编号	$l/mm$	$B/mm$	$t/mm$	$A/mm^2$	$P_E/kN$
L12508-30-1	753.3	125.0	8.2	2024.8	845	<u>L12508-60-1</u>	1503.7	125.2	8.1	2004.7	610
L12508-30-2	753.7	125.0	8.1	2 001.5	850	<u>L12508-60-2</u>	1 503.7	125.0	8.1	2 001.5	725
L12508-30-3	754.0	125.0	8.2	2 024.8	825	<u>L12508-60-3</u>	1 505.0	125.0	8.1	2 001.5	620
L12510-30-1	748.3	125.0	9.9	2 419.1	1 175	<u>L12510-60-1</u>	1 492.7	125.0	10.0	2 440.0	670
L12510-30-2	748.3	125.2	10.0	2 446.1	1 190	<u>L12510-60-2</u>	1 490.7	125.2	10.0	2 446.1	705
L12510-30-3	747.0	125.0	9.9	2 419.1	1 165	<u>L12510-60-3</u>	1 493.7	125.4	10.0	2 450.1	715
L16010-30-1	962.7	159.0	10.0	3 122.1	1 260	<u>L16010-60-1</u>	1 926.3	158.8	10.0	3 118.1	1 120
L16010-30-2	964.3	158.4	9.9	3 080.4	1 230	<u>L16010-60-2</u>	1 921.7	159.2	10.0	3 138.9	1 145
L16010-30-3	963.3	159.4	10.0	3 130.1	1 260	<u>L16010-60-3</u>	1 922.0	158.4	10.0	3 122.9	1 075
L16012-30-1	956.0	159.0	11.9	3 697.5	1 875	<u>L16012-60-1</u>	1 915.3	158.6	11.9	3 688.0	1 315
L16012-30-2	956.7	159.2	11.8	3 672.8	1 920	<u>L16012-60-2</u>	1 913.0	159.2	11.9	3 702.3	1 350
L16012-30-3	958.0	158.8	11.9	3 692.8	1 860	<u>L16012-60-3</u>	1 913.7	158.8	11.9	3 692.8	1 460
L12508-45-1	1 127.7	125.0	8.1	2 001.5	785	<u>L12508-80-1</u>	2 003.3	125.2	8.0	1 981.3	360
L12508-45-2	1 127.0	125.0	8.1	2 001.5	760	<u>L12508-80-2</u>	2 004.0	125.0	8.0	1 970.0	410
L12508-45-3	1 128.0	125.2	8.1	2 004.7	815	<u>L12508-80-3</u>	2 002.7	125.0	8.1	2 001.5	530
L12510-45-1	1 119.0	125.2	9.9	2 423.0	1 145	<u>L12510-80-1</u>	1 988.3	125.0	9.9	2 419.1	500
L12510-45-2	1 120.0	125.0	9.9	2 419.1	1 200	<u>L12510-80-2</u>	1 987.3	125.0	9.9	2 419.1	540
L12510-45-3	1 121.3	125.0	9.9	2 419.1	1 145	<u>L12510-80-3</u>	1 987.0	125.0	10.0	2 440.0	505
L16010-45-1	1 442.7	159.2	10.0	3 126.1	1 240	<u>L16010-80-1</u>	2 563.3	158.4	10.0	3 122.9	805
L16010-45-2	1 445.7	158.6	10.0	3 114.1	1 205	<u>L16010-80-2</u>	2 563.0	158.6	10.0	3 126.9	810
L16010-45-3	1 442.0	158.8	10.0	3 118.1	1 220	<u>L16010-80-3</u>	2 563.3	158.4	10.0	3 122.9	740
L16012-45-1	1 432.3	159.0	12.0	3 726.9	1 830	<u>L16012-80-1</u>	2 549.3	158.4	12.1	3 741.8	940
L16012-45-2	1 437.0	158.8	11.9	3 692.8	1 830	<u>L16012-80-2</u>	2 547.3	159.2	12.1	3 761.2	895
L16012-45-3	1 436.3	159.2	11.9	3 702.3	1 450	<u>L16012-80-3</u>	2 548.0	158.8	11.9	3 692.8	910

注： $P_E$  为极限荷载；“—”单划线表示试件两端为单刀口支座；“=”双划线表示试件两端为双刀口；其余为球铰支座。

### 1.3 试验装置

试验采用 YES-500 长柱试验机对受压试件进行竖向静力加载，轴压柱上、下两端板中线对应角钢几何中心，保证试件轴心加载。如图 4 所示，试件采用球铰、单刀口铰和双刀口铰 3 种支座形式。为接近实际输电线路铁塔结构约束条件，在球铰处设置 4 根丝杠，防止加载过程中球铰发生绕试件纵轴扭转；双刀口支座两刀口与角钢两肢平行，垂直通过角钢形心；单刀口支座刀口正对角钢最小几何轴。刀口支座端板设有调平螺栓，方便试件放置。



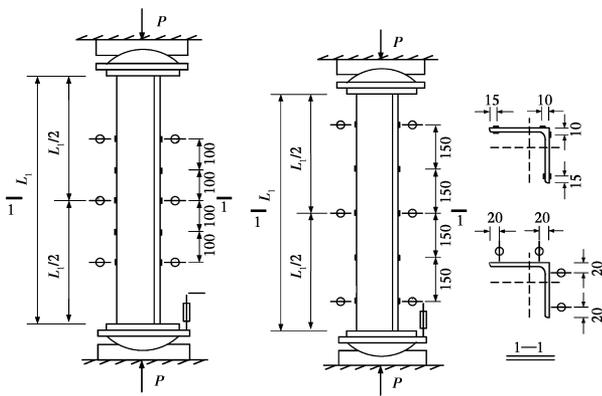
(a) 球铰支座 (b) 双刀口支座 (c) 单刀口支座  
图 4 试验装置

Fig. 4 The test device

### 1.4 测试方案及加载制度

为测量各截面横向位移、研究试件变形特征和分析截面应力-应变关系，在角钢截面布置位移计和应变片，位置如图 5 所示。

试验参考承载力根据美国输电铁塔设计导则 ASCE 10-1997<sup>[9]</sup> 估算而得。将构件安装于试验机，几何对中后施加 3% 的预加荷载，通过应变片读数调整试件位置，保证平均差值在 5% 内。当施加荷载小于 50% 极限承载力时，每级荷载取极限荷载的 10%；施加荷载在极限荷载的 50%~80% 范围内，每级取 5%；达 80% 后，取 2%，直至试件破坏。级间持载 1 min，用 TDS602 采集仪记录各应变片和仪表读数。观察卸载后试件形态，对大长细比试件压力值卸至极限荷载的 80%，小长细比试件卸至 50%。



(a) 长细比30和45试件 (b) 长细比60和80试件  
注: ○百分表 — 应变片 — 位移计

图 5 测点位置示意图

Fig. 5 The diagrammatic sketch of measuring point position

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象

仅对具有代表性的长细比为 30 的 L12510-30-1 和长细比为 80 的 L12510-80-1 两个试件试验现象进行描述。

2.1.1 L12510-30-1 试件现象 图 6 为杆件破坏形态、中截面荷载-位移和应变关系。图中: $\Delta$  为纵向位移, $\delta$  为横向位移, $\epsilon$  为截面应变。

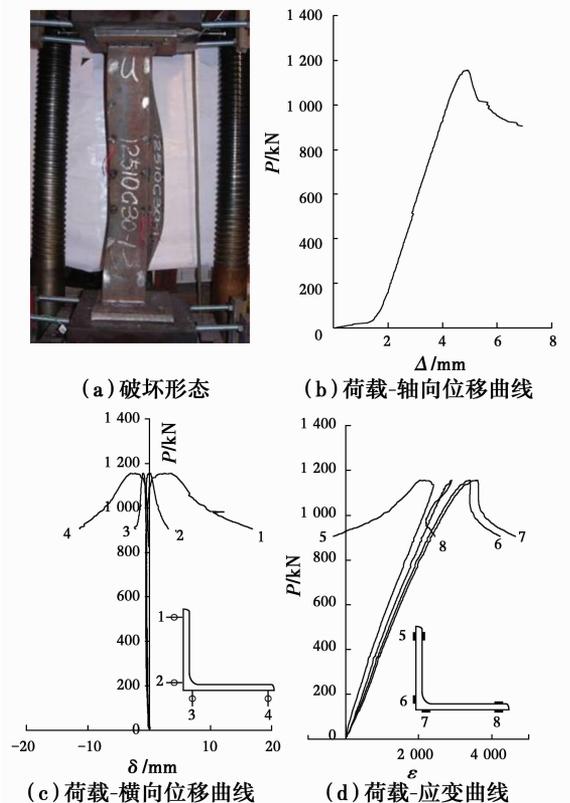


图 6 试件 L12510-30-1 试验结果

Fig. 6 Testing results of specimen L12510-30-1

加载初期,试件无明显变形;临近试件破坏,荷载-位移关系斜率减小,试件处于弹塑性阶段,角钢端部两肢绕纵轴同向转动,一股向外鼓曲变形,另一股向内鼓曲,在荷载-应变曲线上,1、2 号百分表针向内压缩,3、4 号百分表向外伸长,中截面应变片为正值,说明此测点受压力作用;继续增加荷载,试件端部变形加快,很快达到极限荷载 1 175 kN,无法继续承载,超过此荷载,随着压力减小,试件轴向位移、角钢扭转变形反而加速,试件发生以局部屈曲为主的弯扭失稳破坏。

2.1.2 L12510-80-1 试件破坏现象 图 7 为试件破坏形态、中截面荷载-位移和应变关系。

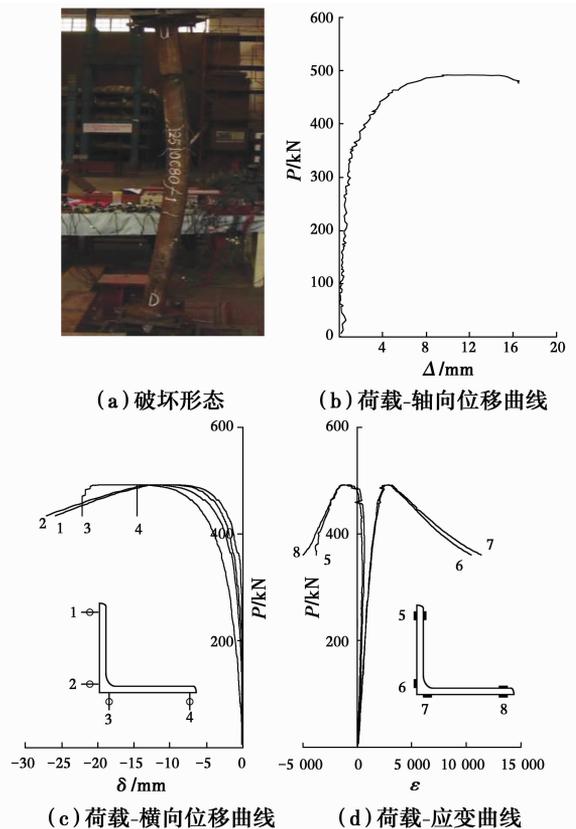


图 7 试件 L12510-80-1 试验结果

Fig. 7 Testing results of specimen L12510-80-1

加载初期,试件无明显变形;压力达到 200 kN 后,试件向角钢肢背有弯曲变形趋势;在临近极限破坏前,各百分表读数变化缓慢,试件弯曲变形均匀,中截面 6 号和 7 号测点应变值大于 5 号和 8 号应变值,说明发生绕最小几何轴弯曲变形,角钢肢背处所受压力较肢尖处大。荷载继续增加,肢尖处 5 号、8 号应变由正值变为负值,肢尖应力由压转为拉,且 6 号、7 号应变值持续增加,直至试件达到荷载极限 500 kN,百分表读数迅速增大,试件发生绕最小几何轴的弯曲失稳破坏。

## 2.2 试验结果分析

Q460 高强角钢构件轴压试验结果见图 8, 数值均取同类构件的平均值。同组试件结果相差不大, 说明在同等条件下试验效果良好, 能够在该条件下较准确地表达试件受力现象。同类杆件双刀口支座承载力与单刀口试件相差不大。

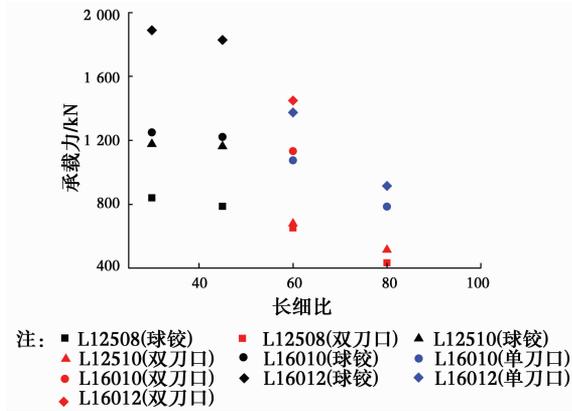


图 8 承载力试验结果

Fig. 8 Test results of bearing capacity

2.2.1 试验值与规范计算值比较 长细比为 30 和 45 的试件两端采用球铰支座, 在试验中发现, 经剖面加工的球铰未能达到预期效果, 仍无法自由转动, 如同固定条件, 需采用等效计算长度来表示杆实际长度, 根据约束条件将其简化为两端铰接的杆, 对于两端固定的轴心压杆, 计算长度系数为 0.5, 建议值为 0.65<sup>[18]</sup>。  $P_{A1}$  和  $P_{A2}$  为 ASCE 按照上述两种取值的荷载计算值, 两值相差在  $-0.3\% \sim +2.3\%$  范围内。

由表 3 可知, 长细比等于 30 和 45 的 Q460 高强角钢杆件, 其承载力分别比 GB50017 规范、ASCE 导则和 DL/T 5154 规范计算值高出  $+52.09\% \sim +92.27\%$ 、 $+2.8\% \sim +22.8\%$  和  $-0.48\% \sim +36.99\%$ ; 对于大长细比试件, 其试验值分别高  $+13.35\% \sim +76.88\%$ 、 $-19.2\% \sim +29.1\%$  和  $+14.39\% \sim +103.84\%$ 。可见, GB 50017 规范较 ASCE 导则和 DL/T 5154 规范过于保守, 难以达到安全性与经济性的协调统一, 原因在于, 中国规范所采用的稳定系数小于美国 ASCE 导则中的稳定系数, 且中国钢结构设计规范并未规定宽厚比超限构件相关承载力计算方法。相比其他两种规范, 美国 ASCE 导则理论计算值与试验结果差值在可接受范围内。综上所述, 对于 Q460 高强角钢轴心受构件的极限承载力计算方法, 不适用直接套用 GB 50017—2003 和 DL/T 5154—2002 规范中用于计算

低强度角钢构件的设计理论。

表 3 试验值与理论值比较

Table 3 Comparison of test results and theoretical calculation results

长细比 $\lambda$	$\frac{P_E - P_G}{P_G}$	$\frac{P_E - P_{A2}}{P_{A2}}$	$\frac{P_E - P_D}{P_D}$	$\frac{P_{A2} - P_G}{P_G}$
30	+61.49%~	+1.9%~	-0.48%~	+52%~
	+92.27%	+22.8%	+36.99%	+68.07%
45	+52.09%~	+3.1%~	+4.37%~	+45.9%~
	+81.96%	+14.4%	+27.98%	+64.6%
60	+19.24%~	-17%~	+14.39%~	+35.0%~
	+76.88%	+29.1%	+95.84%	+43.7%
80	+13.35%~	-19.2%~	+22.82%~	+32.6%~
	+65.06%	+17%	+103.84%	+46.5%

注:  $P_E$  为极限荷载;  $P_G$  为按 GB 50017—2003 规范计算的理论值, 采用 b 类截面轴压柱子曲线;  $P_{A2}$  为按 ASCE-1997 导则对球铰支座取 0.65 计算长度系数计算的理论值;  $P_D$  为按 DL/T 5154—2002 规范计算的理论荷载, 稳定系数由 b 类柱子曲线得出。

2.2.2 GB 50017—2003 与 ASCE 10-1997 计算值比较 美国 ASCE 导则计算值明显高于 GB 50017 规范值, 原因在于, 中国规范 GB 50017—2003 是以普通碳素钢 Q235 为基础的理论推导, 考察缺陷拟合成佩里形式的柱子曲线表达式; 而 ASCE 则按类同于中国 Q345 钢, 采用试验方法拟合成抛物线形式的计算公式。两者所适用钢材的范围不同, 且理论方法难以精确描述与实际构件相符的边界约束条件。

2.2.3 长细比对试验结果的影响 由图 8 可知, 同类截面承载力随长细比的增大而减小, 长细比等于 30 和 45 的杆件以局部破坏为主, 大长细比等于 60 和 80 的杆件以弯扭失稳为主。达到极限荷载时, 小长细比试件中截面受压力作用, 大长细比不仅有压力作用, 还有受压区域。除个别试件, 杆件随长细比增大, 承载力下降幅度增大。名义长细比等于 30 和 45 的同截面试件承载力相差不大, 原因在于, 其实际长细比则分别小于 20 和 30, 此时由强度控制试件承载力, 长细比的改变对杆件影响很小。

## 3 结论

对 Q460 高强度角钢构件进行轴压试验研究, 将结果与理论值比较, 得出以下结论:

1) 同组 3 根杆件的变化过程、破坏形态和应力变化情况基本相同, 同类杆件长细比越大, 试件承

载力越低,长细比为 30 和 45 的试件以局部破坏为主,长细比为 60 和 80 的试件以整体受弯失稳为主。

2)Q460 高强角钢轴压构件试验值与 ASCE 10-1997 的计算结果相差不大,根据 DT/T 5154—2002 规范设计高强钢杆件较保守,其计算值偏小。中国规范中针对普通低强角钢轴压构件承载力计算方法不适用于 Q460 高强角钢。

3)长细比为 30 和 45 的试件,根据美国 ASCE 导则采用 0.5 或 0.65 计算长度系数的承载力计算差值在  $-0.3\% \sim +2.3\%$  之间,试验值也相差不大,说明长细比变化对小长细比试件承载力影响很小。

#### 参考文献:

- [1] 何长华. 高强冷弯型钢在输电铁塔上应用可行性的探讨[J]. 钢结构, 2004, 19(5): 35-37.  
HE C H. Feasibility discussion on application of high-strength cold-formed section steel in transmission towers [J]. Steel Construction, 2004, 19(5): 35-37. (in Chinese)
- [2] AL-SAYED S H, BJORHOVDE R. Inelastic behavior of single angle columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1989, 12(2): 103-118.
- [3] ELGAALY M, DAGHER H, DAVIDS W. Behavior of single-angle-compression members [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(12): 3720-3741.
- [4] YOUNG B, ELLOBODY E. Buckling analysis of cold-formed steel lipped angle columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(10): 1570-1579.
- [5] 曹现雷, 郝际平, 张天光, 等. 新型 Q460 高强度钢材在输电铁塔结构中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2011, 32(1): 79-82.  
CAO X L, HAO J P, ZHANG T G, et al. Engineering application of new high-strength steel Q460 in transmission towers [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy Hydroelectric Power, 2011, 32(1): 79-82. (in Chinese)
- [6] 郭宏超, 郝际平, 简政, 等. 基于不同试验方法的高强等边角钢稳定性研究[J]. 建筑结构, 2013(13): 51-54.  
GUO H C, HAO J P, JIAN Z, et al. Stability study of high strength equal angle steel based on different test methods [J]. Building Structure, 2013(13): 51-54. (in Chinese)
- [7] 曹珂, 郭耀杰, 曾德伟, 等. 大规格 Q420 高强度角钢构件轴压力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 65-72.  
CAO K, GUO Y J, ZENG D W, et al. Experimental research on mechanical behavior of large-section and Q420 high-strength angle members under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 65-72. (in Chinese)
- [8] USAMI T, GALAMBOS T V. On the strength of restrained single-angle columns under biaxial bending [J]. Papers and Reports of Japanese Society of Civil Engineering, 1971, 191: 31-44.
- [9] Design of latticed steel transmission structures: ASCE 10-1997 [S]. American, 1997.
- [10] ADLURI S M R, MADUGULA M K S. Torsional-flexural buckling strength of steel angles [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23: 260-271.
- [11] 曹现雷, 郝际平, 曹志民, 等. 高强单角钢一端偏心压杆极限承载力试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(5): 1-8.  
CAO X L, HAO J P, CAO Z M, et al. Ultimate bearing capacity analysis of high-strength single-angle compression member eccentrically at one end [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(5): 1-8. (in Chinese)
- [12] 架空送电线路杆塔结构设计技术规定: DL/T 5154—2002 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line: DL/T 5154-2002 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. (in Chinese)
- [13] 班慧勇, 施刚, 刘钊, 等. Q420 等边角钢轴压杆整体稳定性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 60-67.  
BAN H Y, SHI G, LIU Z, et al. Experimental study on overall buckling behavior of Q420 high strength equal angle members under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 60-67. (in Chinese)
- [14] 班慧勇, 施刚, 石永久. Q420 高强度等边角钢轴压构件整体稳定性设计方法研究[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 63-71.  
BAN H Y, SHI G, SHI Y J. Investigation on design method of overall buckling behavior for Q420 high strength steel equal-leg angle members under axial compression [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 63-71. (in Chinese)
- [15] 钢结构设计规范: GB 50017—2003 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

- Code for design of steel structures; GB 50017-2003 [S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese)
- [16] 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—1998 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.  
Steel and steel products location and preparation: GB/T 2975-1998 [S]. Beijing: China Planning Press, 2004. (in Chinese)
- [17] 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [18] 陈绍蕃, 顾强. 钢结构基础 [M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
CHEN S F, GU Q. The Foundation of Steel Structures [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)