

大长细比剖分 T 型钢压杆的承载性能试验研究

王先铁¹, 段鹏程¹, 罗古秋², 周清汉¹, 宋文俊¹, 杨航东¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710018)

摘 要:《钢结构设计规范》(GB50017-2003)提供了轴心受压构件、压弯构件设计公式,而大长细比剖分 T 型钢压杆的承载性能还有待进一步的试验研究,以检验规范设计公式对大长细比剖分 T 型钢压杆的适用性.对三种大长细比的 8 根剖分 T 型钢压杆进行了静力加载试验,得到了杆件的极限承载力和破坏形态.基于材性试验结果,考虑了初始缺陷,采用通用有限元软件 ABAQUS 6.10-1 对压杆进行了有限元分析,与试验结果吻合较好.与试验结果对比表明,《钢结构设计规范》(GB50017-2003)中轴心受压构件和压弯构件的计算公式可用于大长细比剖分 T 型钢压杆承载力计算.

关键词:剖分 T 型钢;大长细比;试验研究;有限元分析

中图分类号: TU 392.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)06-0767-05

与双角钢截面相比, T 型钢截面翼缘宽大,腹板较薄,能充分发挥钢材的力学性能;节点构造简单,施工简便;易于进行防腐处理.因此,采用 T 型钢代替双角钢具有较好的经济效益.近年来,剖分 T 型钢被广泛用来代替双角钢作为钢桁架上下弦杆,直接将双角钢焊接于 T 型钢弦杆形成平面桁架^[1].

国内外对剖分 T 型钢进行了大量的研究.1972 年, Kennedy 和 Murty 对 27 根剖分 T 型钢轴心压杆进行了试验研究^[2],试件最小长细比为 60,最大长细比为 114.结果表明,所有试件均未发生腹板局部屈曲,整体失稳形式为弯扭屈曲.1986 年, S. Kitipornchai 和 H. W. Lee 对 12 根剖分 T 型钢轴心压杆进行了试验研究^[3-5],试件长细比小于 60,结果表明,所有试件均未发生腹板局部屈曲,宽翼缘 H 型钢剖分 T 型钢失稳形式为绕非对称轴的弯曲屈曲,其余杆件均发生弯扭屈曲.2001 年,顾强等人对长细比分别为 20、40 和 60 的剖分 T 型钢进行了试验研究^[6-7],考察了剖分 T 型钢压杆绕对称轴的弯扭失稳性能和剖分 T 型钢腹板的局部屈曲强度.2004 年,周圣凯、党伟等人对 15 根长细比分别为 20、27、40、60 和 80 的剖分 T 型钢轴压杆进行了试验研究^[8-10],结果表明,规范将轴心压杆腹板高厚比限值提高到 $(15 + 0.2\lambda) \sqrt{235/f_y}$ 是基本合理的,但对于长细比较小的试件该限值应稍严格.2007 年,史小强等人对 14 根长细比分别为 20、27、40、60 和 80 的剖分 T 型钢剪心压杆进行了试验研究^[11],结果表明,《钢结构设计规范》(GB50017-2003)^[12]中压弯构件计算公式和腹板高厚比限值适用于中小长细比剖分 T 型钢剪心压杆.

综上所述,目前对于剖分 T 型钢的研究主要为中、小长细比轴心受压和剪心受压杆件,尚未开展大长细比剖分 T 型钢压杆的研究.本文分别对形心、剪心以及形心和剪心中点受压的大长细比剖分 T 型钢压杆进行了试验研究,分析了其整体受力性能,检验了规范公式的适用性.

1 试验研究

1.1 试件设计

截面选自窄翼缘剖分 T 型钢,8 根试件截面均为 $T150 \times 150 \times 6.5 \times 9$,钢号为 Q235.试件长度分别为 $100i_y$ 、 $125i_y$ 和 $150i_y$,试件实测尺寸见表 1,表中部分参数见图 1,试件两端焊有厚度为 20 mm 的端板.

收稿日期:2013-06-03 修改稿日期:2013-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51108369);教育部博士点新教师基金项目(20116120120008);陕西省科技新星项目(2013KJXX-54)

作者简介:王先铁(1979-),男,湖南常德人,博士,教授,主要研究方向为钢管混凝土结构与钢结构.

表 1 试件实测尺寸

Tab. 1 Measured dimensions of specimens

试件	L/mm	A/mm^2	h/mm	B/mm	t/mm	t_w/mm	加载点
JZ-1	3265.5	28.08	14.7	14.9	8.84	6.70	S
MZ-1	3269.9	28.39	15.1	14.8	9.02	6.68	M
ZZ-1	3271.2	28.52	14.8	14.9	9.20	6.84	C
JZ-2	4088.2	28.63	15.2	14.9	9.02	6.81	S
MZ-2	4087.5	28.85	15.2	14.9	9.31	6.79	M
ZZ-2	4086.1	28.69	15.0	14.8	9.40	6.78	C
JZ-3	4906.7	28.38	15.0	14.9	9.03	6.60	S
ZZ-3	4903.2	28.56	15.1	14.8	9.20	6.72	C

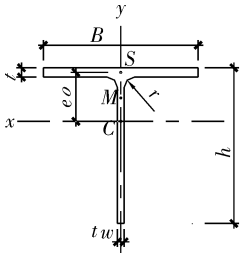


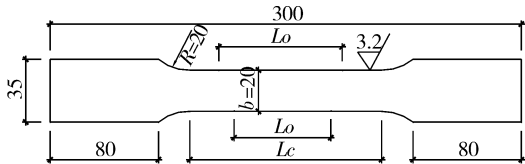
图 1 T 型钢截面示意图

Fig. 1 Section of T-shape steel

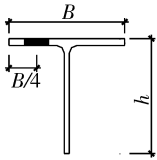
注: S 为截面剪心, C 为截面形心, M 为形心与剪心的中点.

1.2 材性试验

材性试验为单向拉伸试验, 用来测定钢材在单向受拉状态下的力学性能, 为分析试验结果和有限元模拟提供材性参数. 测试内容包括钢材的屈服强度、抗拉强度、弹性模量及伸长率等. 材性试件按照《热轧 H 型钢和剖分 T 型钢》(GB/T11263-2010)^[13] 和



(a) 材性试件尺寸



(b) 截取位置

图 2 材性试件(单位:mm)

Fig. 2 Specimen of material properties

《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB2975-1998)^[14] 规定制作, 采用短比例试样, 长度为 300 mm. 试样切取部位、试件尺寸见图 2. 共制作了 3 个材性试件. 材性试验结果见表 2.

表 2 材性试验结果

Tab. 2 Results of material properties

试件编号	$f_y/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$f_u/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	f_u/f_y	$E/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$A_{50\text{mm}}/\%$
ME1	318.3	471.1	1.48	203000	46.86
ME2	300.3	447.7	1.49	194000	42.52
ME3	299.6	444.8	1.48	205000	44.52

注: f_y 为屈服强度, f_u 为抗拉强度, E 为弹性模量, $A_{50\text{mm}}$ 为断后伸长率.

1.3 试验方案

试验在西安建筑科技大学结构与抗震实验室完成, JZ-1、MZ-1、ZZ-1 在 200t 长柱试验机上加, 其余试件在门架上加. 试件两端采用双向刀口支座, 限制杆件绕纵轴的自由转动, 试件计算长度 L_0 为杆件实际长度与一副双刀口支座高度之和($L_0=L+360\text{ mm}$).

测点布置如图 3 所示, 试件中部设置 3 个位移计以测量中部侧移和扭转, 在杆件中部截面翼缘两端和中部、腹板自由端及中部布置应变片, 用于物理对中及加载过程中实时监测杆件应变发展情况. 在杆端设置竖向位移计以测量杆件的纵向变形.

加载方式: 荷载为估算荷载的 0%~50% 时, 每级荷载取估算荷载的 10%; 荷载为估算荷载的 50%~80% 时, 每级荷载取估算荷载的 5%; 荷载达到估算荷载

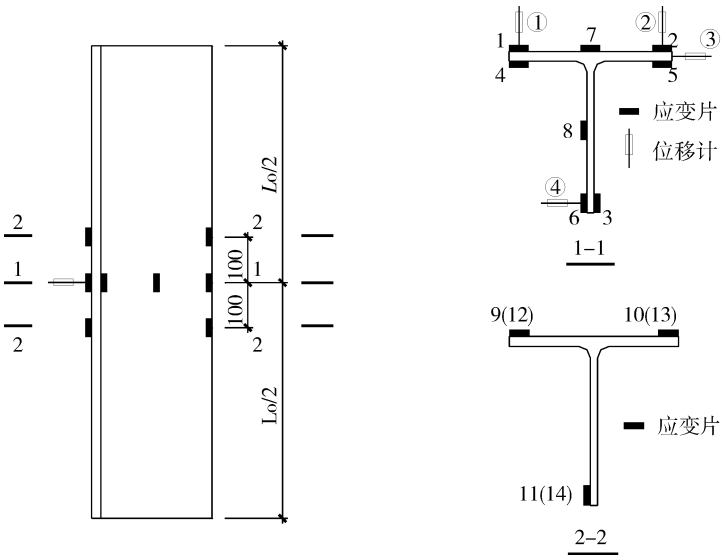


图 3 测点布置图(单位:mm)

Fig. 3 Arrangement of strain gauges and displacement gages(unit:mm)

的 80% 后,荷载级差调整为 2%,每级荷载之间停留 2 min.

1.4 试验结果

试验结果见表 3. 对于相同加载点的杆件,随着长细比的增大,杆件极限承载力逐渐降低. 加载点由形心移向剪心时,杆件的承载力逐渐降低. 分析其原因,当加载点由形心移向剪心时,由于加载点偏离形心而产生的附加弯矩使杆件中部翼缘提前进入塑性,从而导致杆件承载力降低. 所有杆件均绕对称轴发生了较大的弯曲变形,其中偏心压杆在加载初期首先绕非对称轴发生较明显的弯曲变形,当加载到一定阶段时,杆件突然绕对称轴发生弯曲失稳,迅速达到极限状态(如图 4b 所示). 通过对比杆件中部侧移可知,加载点偏离剪心的压杆在加载过程中发生了较为明显的扭转(如图 5 所示),而剪心压杆的扭转并不明显(如图 4 所示). 杆件破坏形态如图 6 所示.

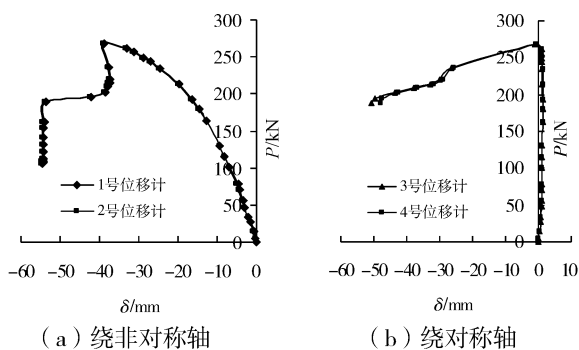


图 4 JZ-1 荷载-侧移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of JZ-1

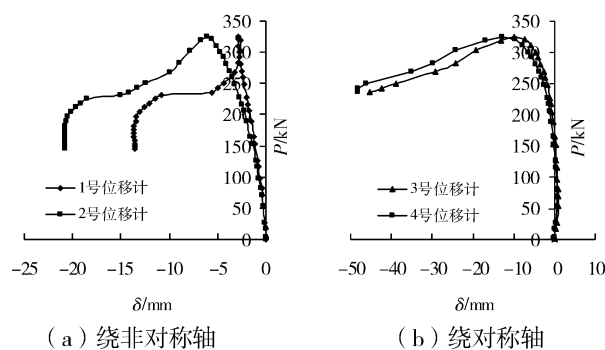


图 5 ZZ-1 荷载-侧移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of ZZ-1

2 有限元分析

采用通用非线性有限元软件 ABAQUS 6.10-1 对大长细比分 T 型钢压杆进行屈曲分析,考虑几何缺陷和力学缺陷(初弯曲、残余应力)对杆件承载性能的影响. 采用八节点六面体实体单元 C3D8R,该单元为线性减缩积分单元.

2.1 材料属性

考虑钢材在屈服后的硬化特性,钢材本构关系采用简化的线性强化模型,应力-应变曲线如图 7 所示,强化模量取 $E_t = 0.03E^{[15]}$. 根据材性试验结果,屈服强度取 $f_y = 306 \text{ N/mm}^2$,弹性模量取 $E = 2.01 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比取 $\nu = 0.3$.

2.2 边界条件与荷载施加

为模拟试验中杆件端部铰接约束及端板的作用,在杆端加载点处建立参考点,将杆件端部约束至参考点. 采用运动耦合约束,允许杆件端部绕 x 、 y 轴自由转动,限制端部绕 z 轴转动,杆件一端限制 x 、 y 、 z 方向位移,另一端限制 x 、 y 方向的位移,释放 z 方向位移. 采用位移加载,在释放 z 方向位移的杆端施加位移.

2.3 初始缺陷

对杆件一阶屈曲模态施加 $L/1\,000$ (L 为压杆长度)的初弯曲以考虑初弯曲(初偏心)的影响. 残余应力参照 1983 年钢结构规范管理组“关于受压构件科研专题采用的残余应力统一模式的通知”中建议的残余应力模式^[16],残余应力分布如图 8 所示. 残余应力在 ABAQUS 中以初始应力形式添加.

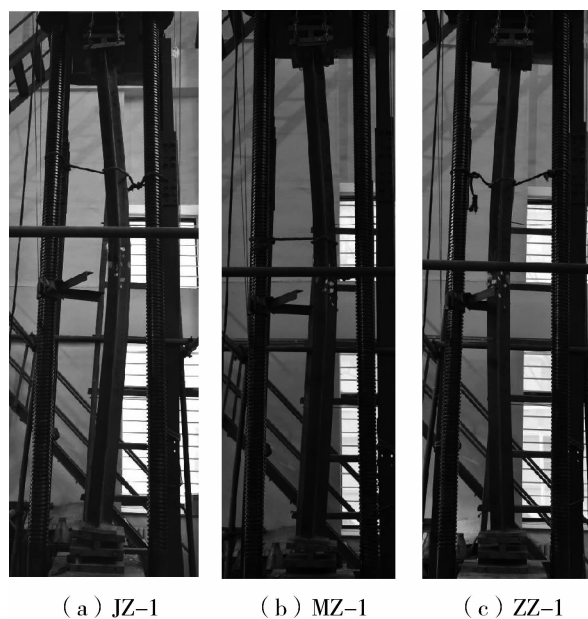


图 6 试件破坏形态

Fig. 6 Typical failure figures of specimens

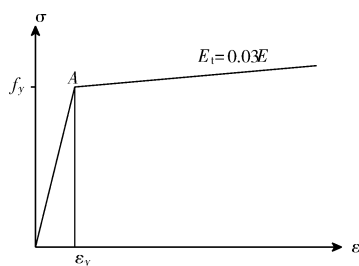


图 7 钢材应力-应变曲线

Fig. 7 Strain-stress curve of steel

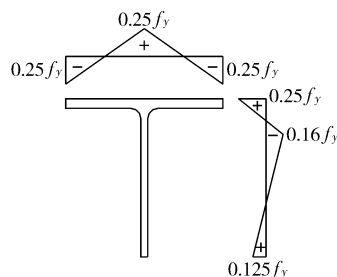


图 8 残余应力分布

Fig. 8 Distribution of residual stress

3 试验值、有限元值与规范值对比

试验值、有限元值与规范值的对比如表 3 所示. 由表 3 可知, 有限元值、规范值与试验结果吻合较好, 绝大多数杆件承载力差值在 10% 以内. 试验值与规范值吻合较好, 说明

规范计算公式可用于大长细比剖分 T 型钢压杆承载力计算. 由于试件两端双刀口支座无法理想模拟铰支座, 以及杆件材料可能进入强化阶段, 绝大多数杆件试验承载力高于规范计算值.

4 结 论

大长细比剖分 T 型钢压杆发生整体失稳, 变形以绕对称轴的弯曲变形为主. 剪心压杆发生弯曲失稳, 轴心压杆、剪心与形心中点受压杆发生弯扭失稳.

剪心压杆的承载力较低, 轴心压杆和剪心与形心中点受压杆具有更高的承载力. 规范值与试验值吻合较好, 说明规范设计公式可用于大长细比剖分 T 型钢压杆的承载力计算.

表 3 试验值、有限元值与规范值的对比

Tab. 3 Comparison of test results, FE results and CODE results

试件	λ_y	P_E/kN	P_A/kN	P_C/kN	$P_E : P_A : P_C$	破坏模态
JZ-1	110.9	268.6	290.7	269.1	1 : 1.08 : 1.00	弯曲
MZ-1	111.0	330.4	324.1	305.7	1 : 0.98 : 0.93	弯扭
ZZ-1	111.1	324.4	344.3	327.0	1 : 1.06 : 1.01	弯扭
JZ-2	136.1	227.4	223.9	212.6	1 : 0.98 : 0.93	弯曲
MZ-2	136.0	252.9	237.4	234.9	1 : 0.94 : 0.93	弯扭
ZZ-2	135.9	281.6	242.2	248.7	1 : 0.86 : 0.88	弯扭
JZ-3	161.1	164.2	170.7	168.6	1 : 1.04 : 1.03	弯曲
ZZ-3	160.9	198.9	177.1	191.2	1 : 0.89 : 0.96	弯扭

注: λ_y 为绕 y 轴的长细比, P_E 为试验值, P_A 为有限元计算值, P_C 为规范值.

参考文献 References

- [1] 柴 昶. 热轧 H 型钢设计应用手册 [M]. 中国计划出版社, 1998.
CHAI Chang. Design and application manual of hot-rolled H[M]. China planning press, 1998.
- [2] KENNEDY John B, MURTY Madugula K S. Buckling of steel angle and Tee struts [J]. Journal of the structural division, 1972, 98(11): 2507-2522.
- [3] KITIPORNCHAI Sritawat, LEE Ho Wah. Inelastic experiments on angle and tee struts [J]. Journal of constructional steel research, 1986, 6(3): 219-236.
- [4] WANG C M, KITIPORNCHAI S. Integrated view of methods in buckling analysis [J]. Res. Rep. Ser. Univ. Queensl. Dep. Civ. Eng. No. CE55, Sep. 1984.
- [5] KITIPORNCHAI S, LEE H W. Inelastic buckling of single-angle, tee and double-angle struts [J]. Journal of constructional steel research, 1986, 6(1): 3-20.
- [6] 彭晓彤, 陈绍蕃, 顾 强. 剖分 T 型钢压杆的弯扭屈曲试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 44-48.
PENG Xiao-tong, CHEN Shao-fan, GU Qiang. Experimental study on flexural torsional buckling of cut-T struts [J]. Journal of building structures, 2004, 25(2): 44-48.
- [7] 彭晓彤, 顾 强, 赵永生. 剖分 T 型钢压杆腹板局部及高厚比限值 [J]. 建筑结构, 2005, 35(2): 34-36.
PENG Xiao-tong, GU Qiang, ZHAO Yong-sheng. Web Local Buckling and Width-thickness Limit of Cut-T Struts Under Compression [J]. Building structure, 2005, 35(2): 34-36.

- [8] 周圣凯,郝际平,史小强,等. 剖分T型钢轴心压杆试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(1):87-90.
ZHOU Sheng-kai,HAO Ji-ping,SHI Xiao-qiang,et al. Experimental research of cut T-shape column subject to axial compression[J],Journal of architecture and civil engineering,2005,22(1):87-90.
- [9] 党伟. 剖分T型钢轴心受压构件整体稳定承载力的试验与理论研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.
DANG Wei. The Theoretical and test Studies on the load-carrying capacity in integral stability of axial compressed cut T-shape columns[D]. Xi'an:Xi'an Univ. of Arch. & Tech.,2007.
- [10] 周圣凯. 剖分T型钢轴心压杆腹板宽厚比限值试验与理论的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.
ZHOU Sheng-kai. Theoretical and test studies on width to thickness ratio limitation of cut T-shape web subject to axial compression[D]. Xi'an:Xi'an Univ. of Arch. & Tech.,2005.
- [11] 史小强. 剖分T型钢剪心压杆屈曲性能的理论及试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.
SHI Xiao-qiang. Theoretical and experimental study on buckling behavior of cut-T Struts subject to shear center compression[D]. Xi'an:Xi'an Univ. of Arch. & Tech.,2007.
- [12] GB50017-2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
GB50017-2003 Code for Design of Steel Structures[S]. Beijing:China planning press,2003.
- [13] GB/T11263-2010 热轧H型钢和剖分T型钢[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
GB/T11263-2010 The hot-rolled H and cut T section steel[S]. Beijing:China standard press,2010.
- [14] GB2975-1998 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 北京:中国标准出版社,1998.
GB2975-1998 Steel and steel products—location and preparation of test pieces for mechanical testing[S]. Beijing: China standard press,1998.
- [15] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 3版. 北京:科学出版社,2006.
CHEN Ji. Stability of steel structures theory and design[M]. 3rd ed. Beijing:Science press,2006.
- [16] 钢结构规范管理组. 关于受压构件科研专题采用的残余应力统一模式的通知[R]. 北京:钢结构规范管理组,1983.
Management Bureau of Code for Design of Steel Structures. Notice of uniform mode of residual stress about compression member[R]. Beijing: Management Bureau of Code for Design of Steel Structures,1983.

Experimental study on load carrying behavior of large slenderness ratio cut T-section struts

WANG Xian-tie¹, DUAN Peng-cheng¹, LUO Gu-qiu², ZHOU Qing-han¹,
SONG Wen-jun¹, YANG Hang-dong¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. Northwestern Architectural Design Institutes Company Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: The calculation formulas of axial compression members and compression-bending members are provided in Code for design of steel structures(GB50017-2003), but the ultimate bearing capacity of large slenderness ratio hot-rolled cut T-section struts need further experimental research to examine the applicability of the code calculation formulas. In this paper, three kinds of slenderness ratio of 8 cut T-section struts were tested to obtain the ultimate load-carrying capacity and failure modes. Based on the material test results, the finite element package ABAQUS6.10-1 was used to carry out nonlinear finite element analysis with initial imperfection. The FE results agree well with the test results. The comparison of code calculation results and test results show that the calculation formulas of bearing capacity for axial compression and compression-bending in Code for design of steel structures (GB50017-2003) can be used for large slenderness ratio cut T-section struts.

Key words: cut T-section strut; large slenderness ratio; experimental study; finite element analysis