

# 800 MPa 高强钢 T 形截面轴压构件极限承载力有限元分析

陶征强<sup>1</sup>, 曹现雷<sup>1,2</sup>, 钟锐<sup>1</sup>, 王培<sup>2</sup>, 陶清林<sup>1</sup>, 陈云旭<sup>1</sup>

(1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽马鞍山 243032; 2. 广西壮族自治区应用数学中心(玉林师范学院), 广西玉林 537000)

**摘要:** 针对 800 MPa 高强钢 T 形截面轴压构件失稳问题, 基于 ABAQUS 软件建立有限元计算模型, 分析残余应力、几何初始缺陷、翼缘宽厚比、腹板高厚比和构件长细比对构件极限承载力的影响, 建立正则化长细比与整体稳定系数关系曲线, 并将高强钢 T 形截面轴压构件极限承载力的模拟结果与 GB 50017—2017 系列设计规范进行比较分析。结果表明: 建立的有限元模型能够准确模拟试验构件的屈曲行为, 残余应力峰值对短柱承载力影响较小, 对大长细比构件的承载力影响较大; 试件初弯曲和板件翘曲对小长细比构件极限承载力影响较大, 随构件长细比增加, 构件极限承载力随着翼缘宽厚比变化表现为敏感度降低, 腹板的高厚比变化规律与之类似。计算得到的稳定系数与 GB 50017—2017 中 b 类柱子曲线吻合较好, 建议采用 b 类柱子曲线计算 800 MPa 高强钢焊接 T 形截面轴压构件的极限承载力。

**关键词:** 高强钢; 有限元分析; T 形截面; 轴压构件; 极限承载力; 柱子曲线

**中图分类号:** TU 411.01 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23063



## Finite Element Analysis of Ultimate Load Bearing Capacity of T-shaped Section Axial Compression Members of 800 MPa High-strength Steel

TAO Zhengqiang<sup>1</sup>, CAO Xianlei<sup>1,2</sup>, ZHONG Rui<sup>1</sup>, WANG Pei<sup>2</sup>, TAO Qinglin<sup>1</sup>, CHEN Yunxu<sup>1</sup>

(1. School of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 2. Center for Applied Mathematics of Guangxi (Yulin Normal College), Yulin 537000, China)

**Abstract:** Aiming at instability of 800 MPa high-strength steel T-shaped section axial compression members, a finite element analysis model was established based on ABAQUS software to analyze the effect of residual stress, geometric initial defects, flange width-thickness ratio, web height-thickness ratio and member length-thinness ratio on the ultimate bearing capacity of the member. A relationship curve between regularized aspect ratio and overall stability coefficient was established, and the simulation results of the ultimate bearing capacity of T-shaped section axial compression members of high-strength steel were compared and analyzed with the GB 50017—2017 series design specifications. The results show that the established finite element model can accurately simulate the buckling behavior of test members, and the peak residual stress has a small effect on the bearing capacity of short column, while it has a significant effect on the bearing capacity of large slenderness members. The initial bending of the test piece and the buckling of the plate have a significant effect on the ultimate bearing capacity of small slenderness members. With the increase of the member slenderness, the sensitivity of the ultimate bearing capacity of the

收稿日期: 2023-04-24

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目 (2022AH050342)

作者简介: 陶征强 (1994—), 男, 安徽芜湖人, 硕士生, 主要研究方向为钢结构稳定性能。

通信作者: 曹现雷 (1979—), 男, 山东日照人, 博士, 副教授, 主要研究方向为钢结构稳定性能。

引文格式: 陶征强, 曹现雷, 钟锐, 等. 800 MPa 高强钢 T 形截面轴压构件极限承载力有限元分析 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2024, 41(5):552-560.

member decreases with variation of the flange width-to-thickness ratios, and the variation law of the high-thickness ratio of the web is similar to it. The calculated stability coefficient is in good agreement with the b-class column curve in GB 50017—2017 standard, and it is recommended to use the b-class column curve to calculate the ultimate bearing capacity of axial compression members of 800 MPa high strength steel welded T-shaped section.

**Keywords:** high-strength steel; finite element analysis; T-shaped section; axial compression member; ultimate bearing capacity; column curve

高强度是指屈服强度 $\geq 460$  MPa 的钢材, 根据用途不同可分为结构用高强度钢、高强度低合金钢以及热轧强韧性钢等, 其广泛用于汽车、建筑、船舶、航空航天等领域<sup>[1]</sup>。相较于工程中常见的 H 形截面的钢轴压构件<sup>[2]</sup>, 高强度焊接 T 形截面轴压构件由翼缘和腹板 2 块高强度钢板焊接而成, 具有截面面积小、质量轻等优点, 在桁架连接中能提供较大的操作空间<sup>[3-4]</sup>。但现有普通强度 T 形截面轴压构件的指导设计不能完全适用于高强度 T 形截面轴压构件。因此, 有必要对高强度 T 形截面轴压构件的极限承载力进行研究。

国内外很多学者已对高强度构件的稳定性进行研究, 高强度构件的残余应力以及几何初始缺陷能显著降低高强度构件的稳定承载力<sup>[5-8]</sup>, 高强度构件的屈曲后极限应力与板件的宽厚比负相关<sup>[9]</sup>, 高强度的强度优势随构件长细比的增加逐渐降低<sup>[10]</sup>。Yuan 等<sup>[11-12]</sup>研究了焊接 H 形和箱形轴压构件的力学性能, 提出了基于直接强度法的极限承载力方程。陈绍蕃<sup>[13-14]</sup>讨论了现有方法(有效截面法和直接强度法)在铰接约束条件下轴压构件的极限承载力的估算, 结果表明直接强度法对由高强度制备的中长轴压构件的承载力估计相对保守。T 形截面的钢构件形心与剪心不重合, 会使构件在受到轴心荷载时发生扭转效应, 进而导致稳定性能的下降。郭兵等<sup>[15-17]</sup>对 690 MPa 轴心受压 T 形钢构件做了理论分析, 综合考虑残余应力和初始弯曲的影响, 推导出翼缘和腹板的宽厚比限值公式; 何松林等<sup>[18]</sup>分析 235 MPa T 形钢在不同受荷状态下的承载力及稳定性设计方法, 给出了 T 形钢局部屈曲失稳的宽厚比限值; 熊晓莉等<sup>[4]</sup>研究表明, 对于 460 MPa T 形截面轴心受压杆, 构件几何初始缺陷以及残余应力对构件的极限承载能力有很大影响。现有学者多针对强度高于 235 MPa 且低于 800 MPa 的高强度 T 形截面构件进行稳定性研究, 较少涉及 800 MPa 以上的高强度 T 形截面构件, 且现有规范未对高强度 T 形截面构件的极限承载力做出明确规定。鉴于此, 采用 ABAQUS 软件建立 800 MPa 高强度焊接 T 形截面构件有限元模型, 分析残余应力、几何初始缺陷、板件宽厚比、翼缘高厚比和构件长细比对构件

极限承载力的影响, 并将高强度 T 形截面轴压构件的极限承载力模拟结果与 GB 50017—2017 设计规范进行比较, 以期对 800 MPa 高强度 T 形截面轴压构件失稳问题提供理论依据和指导。

## 1 T 形截面轴压构件有限元模型

### 1.1 模型的建立

#### 1.1.1 构件几何参数

以文献 [19] 中的 13 根 800 MPa 高强度焊接 T 形轴压构件为有限元分析对象, 构件尺寸如图 1 和表 1。

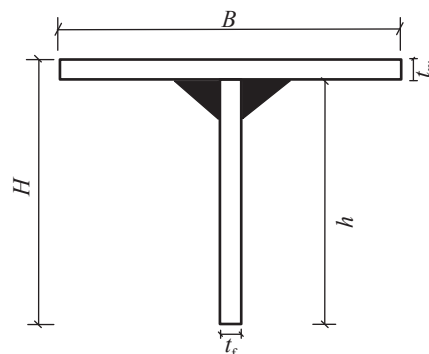


图1 截面示意图

Fig. 1 Cross-section schematic

表 1 构件几何尺寸

Tab. 1 Geometric dimensions of specimen

试件 编号	$L_0$ /mm	$B$ /mm	$H$ /mm	$t_f$ /mm	$t_w$ /mm	$A$ /mm <sup>2</sup>	$\lambda$
T1	792	100	71	7.08	7.05	1 190	29.11
T2	1 203	98	80	7.03	7.03	1 260	40.63
T3	1 414	101	79	7.10	7.09	1 260	48.53
T4	1 635	99	79	7.13	7.11	1 260	56.81
T5	1 854	100	81	7.06	7.06	1 260	65.09
TY1	795	121	69	7.04	7.05	1 330	35.58
TY2	1 266	139	78	7.12	7.12	1 540	50.18
TY3	1 672	159	91	7.03	7.04	1 750	59.65
TY4	1 923	182	91	7.09	7.10	1 890	70.23
TF1	793	111	121	7.11	7.11	1 610	36.08
TF2	974	108	138	7.03	7.04	1 750	46.12
TF3	1 245	110	159	7.07	7.07	1 890	61.20
TF4	1 402	109	181	7.12	7.11	2 030	71.55

注:  $L_0$  为计算长度;  $B$  为截面宽度;  $H$  为截面高度;  $t_f$  为腹板厚度;  $t_w$  为翼缘厚度;  $A$  为毛截面面积;  $\lambda$  为构件长细比。

构件由 2 块 7 mm 厚的 800 MPa 钢板焊接而成, 翼缘为焰切边。设置加载装置为两端铰接, 上部为

球铰、下部为双刀口支座。表 1 中 T 系列构件用于研究长细比对构件极限承载力的影响, TY 系列构件用于研究翼缘宽厚比超限(超出中国钢结构设计规范限值)对构件极限承载力的影响, TF 系列构件用于研究腹板高厚比超限对构件极限承载力的影响。

1.1.2 有限元模型

选用 ABAQUS 软件中的 Shell 壳单元建立 T 型截面轴压构件有限元模型, 如图 2。钢材的材料属性和力学性能如表 2, 选择四节点的 S4R 单元对模型进行网格划分。图 3 为构件两端加载的边界条件, 在加载端处限制沿水平方向  $x$  与  $y$  轴的平移, 同时限制绕  $z$  轴的转动; 对于非加载端处, 限制  $x, y$  和  $z$  轴的平移, 同时限制绕  $z$  轴的转动。

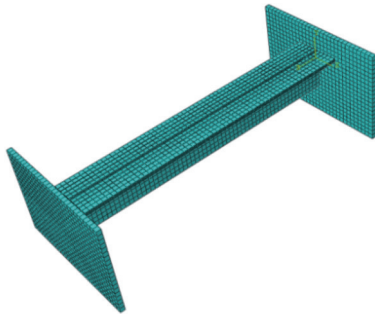


图2 网格划分  
Fig. 2 Meshing

表 2 钢材力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of steel

$t/mm$	$f_y/MPa$	$f_u/MPa$	$f_y/f_u$	$E/GPa$	$\delta\%$
7.0	809	850	0.96	217	16.65

注:  $t$  为板件厚度;  $E$  为弹性模量;  $f_y$  为屈服强度;  $f_u$  为极限强度;  $\delta$  为断后伸长率。

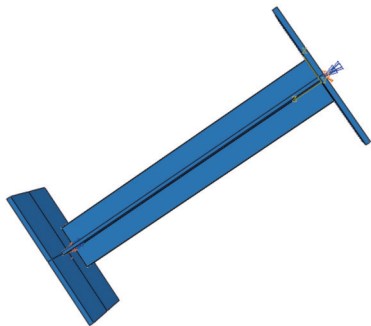
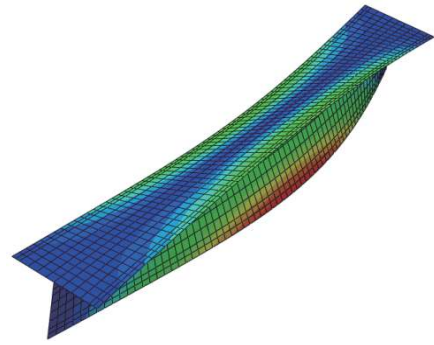
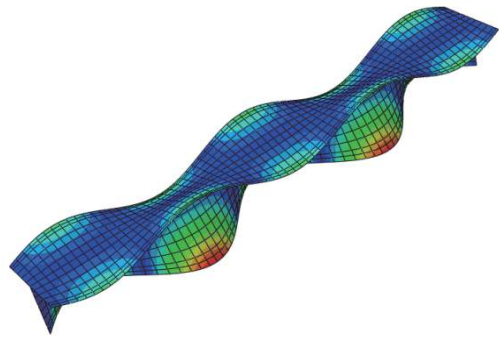


图3 边界条件  
Fig. 3 Boundary conditions

通过修改关键字添加有限元模型中的残余应力和几何初始缺陷, 通过特征值分析获取前几阶的模式, 进而引入初始变形。T 形截面残余应力分布见文献 [20], 对于几何初始缺陷, 考虑构件初弯曲大小为  $L/1000$ , 其缺陷模式如图 4(a); 板件不平整度的大小取  $B/100$ , 其模式如图 4(b)。



(a) 构件初弯曲模式



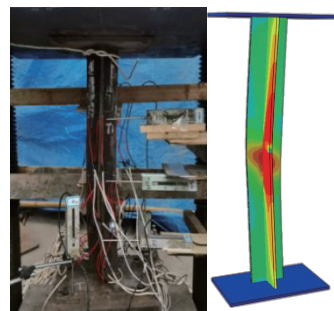
(b) 板件不平整度模式

图4 几何初始缺陷模式

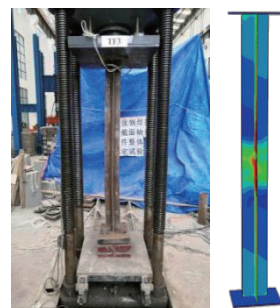
Fig. 4 Initial geometrical imperfection model

1.2 模型的验证

为验证有限元模型的准确性, 对表 1 中的构件进行建模求解, 且将模拟结果与文献 [19] 中的试验结果进行对比。限于篇幅文中选取 T1, TY3, TF4 构件作为典型构件, 构件的破坏模式如图 5, 构件的荷载-位移关系曲线如图 6。



(a) T1(T系列)



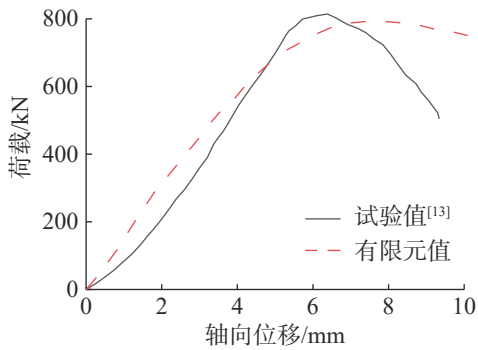
(b) TY3(TY系列)



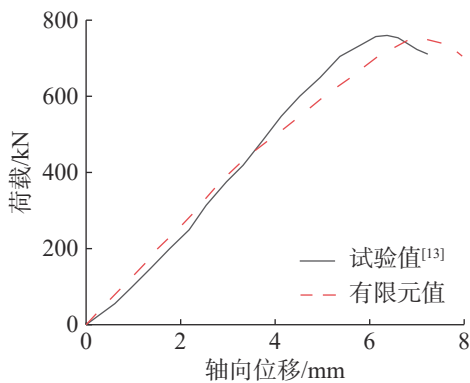
(c) TF4(TF系列)

图5 典型构件破坏模式

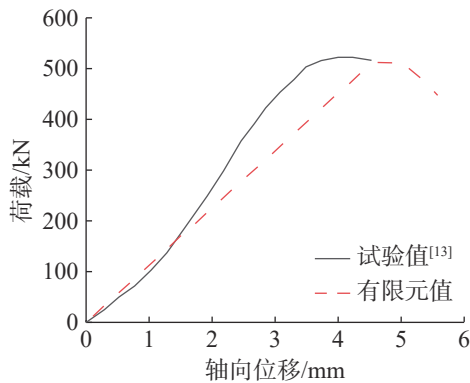
Fig. 5 Failure modes of typical members



(a) T1(T系列)



(b) TY3(TY系列)



(c) TF4(TF系列)

图6 典型构件荷载-位移关系曲线

Fig. 6 Load-displacement relationship curves of typical members

从图 5 可发现: 有限元模型中构件在中部位置发生整体弯曲, 与试验破坏位置一致, 说明模拟结果能准确反映试验构件的真实破坏模式。从图 6 可知: 试验荷载-位移曲线稳定段斜率与有限元结果曲线的斜率接近且走势一致, 轴向位移变化较为接近, 说明有限元模拟结果与试验结果吻合较好。

构件极限承载力有限元结果与试验结果如表 3。由表 3 可看出: 有限元结果与试验结果平均偏差为 1.68%, 方差为 3.66%, 两者偏差较小; 部分试验构件极限承载力的模拟结果大于试验结果, 主要是由于有限元分析是 1 种理想化分析, 在模拟过程中构件的加工误差被忽略, 导致构件极限承载力的有限元结果略高于试验结果。整体来说, 建立的有限元模型能较准确地模拟 800 MPa 高强钢 T 形截面轴压构件的极限承载力和屈曲变形过程。

表 3 极限承载力的模拟与试验结果

Tab. 3 Simulation and experimental results of ultimate bearing capacity

试件编号	极限承载力/kN		相对偏差/%
	试验值 <sup>[13]</sup>	有限元值	
T1	815	792	2.82
T2	610	643	-5.41
T3	494	530	-7.29
T4	433	413	4.62
T5	330	354	-7.27
TY1	948	969	-2.22
TY2	810	835	-3.09
TY3	760	754	0.79
TY4	727	715	1.65
TF1	945	960	-1.59
TF2	824	855	-3.76
TF3	605	623	-2.98
TF4	526	516	1.90
平均值		1.68	
标准差		3.66	

## 2 模拟结果与分析

采用建立的有限元模型模拟分析构件残余应力、初始缺陷、几何尺寸对构件极限承载力的影响。

### 2.1 残余应力对构件极限承载力的影响

设计 3 种截面尺寸分别为 70 mm×70 mm×7 mm×7 mm, 70 mm×140 mm×7 mm×7 mm, 105 mm×70 mm×7 mm×7 mm 的构件, 分别记为 TR1, TR2, TR3。设置构件初弯曲为  $L_e/1000$ , 翼缘和腹板的局部几何初始缺陷为  $B/100$ , 模拟分析无残余应力 ( $RS_0$ )、0.5 倍残余应力 ( $RS_{0.5}$ ) 和 1 倍残余应力 ( $RS_1$ ) 时构件长细比对极限承载力  $F_u$  的影响, 结果如图 7。

由图 7 可看出:在截面尺寸相同的情况下,同一长细比构件的极限承载力与残余应力峰值呈负相关;随构件长细比的增加,残余应力对构件极限承载力的折减效应越明显,且极限承载力的离散性呈先变大后减小的趋势,表明残余应力对中等长度柱的影响较大,对短柱和长柱的影响较小。

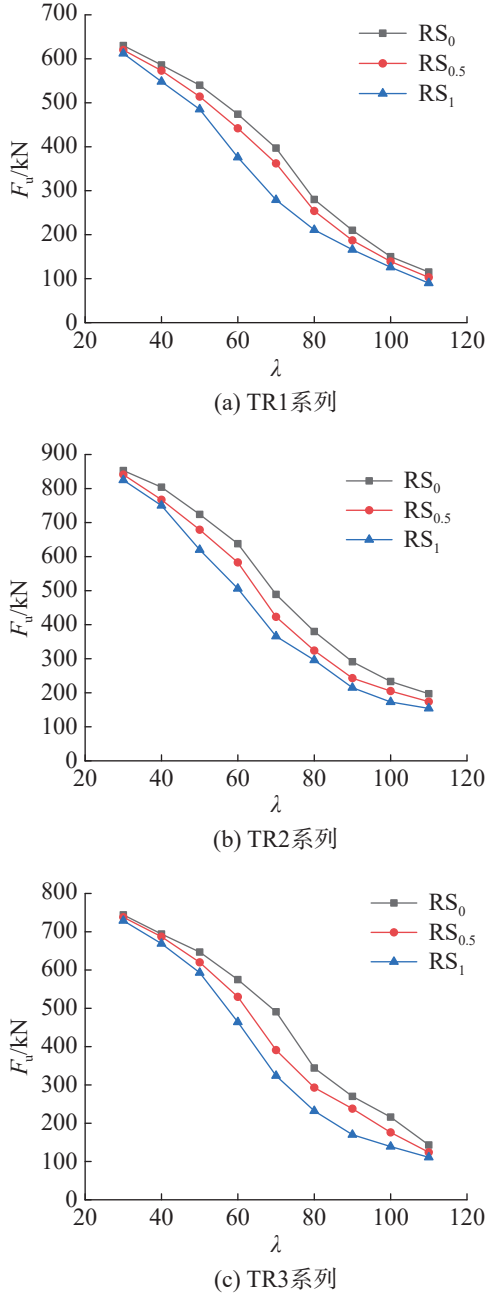


图7 峰值残余应力对构件极限承载力的影响曲线

Fig. 7 Influence curve of peak residual stress on the ultimate bearing capacity of components

### 2.2 几何初始缺陷对构件极限承载力的影响

构件长细比为 40、翼缘宽厚比为 5、腹板高厚比为 10、残余应力取其峰值的 1.0 倍时,几何初始缺陷对极限承载力影响的模拟结果如图 8。

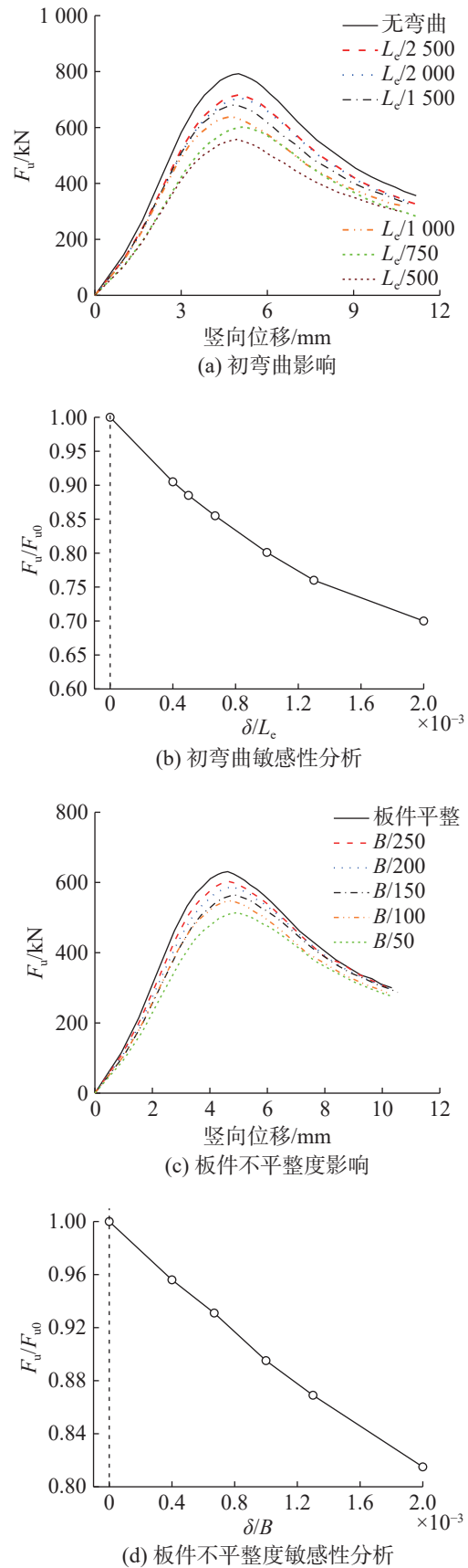


图8 几何初始缺陷对构件极限承载力的影响曲线

Fig. 8 Influence curve of initial geometric imperfections on the ultimate bearing capacity of components

由图 8 可看出: 构件极限承载力的降幅随初弯曲 ( $\delta/L_c$ ) 增加而逐渐增大, 初弯曲为  $L_c/2\ 500$ ,  $L_c/2\ 000$ ,  $L_c/1\ 500$ ,  $L_c/1\ 000$ ,  $L_c/750$  和  $L_c/500$  时, 构件极限承载力分别下降了 9.5%, 11.5%, 14.5%, 19.9%, 24.0% 和 29.8%; 初弯曲值在较小范围内变化时曲线斜率较高, 而在较大范围变化时曲线斜率逐渐减小, 表明其敏感影响性降低; 随着板件不平整度 ( $\delta/B$ ) 的增加, 构件极限承载力下降幅度增大, 板件不平整度分别为  $B/50$ ,  $B/100$ ,  $B/150$ ,  $B/200$  和  $B/250$  时, 构件极限承载力分别下降了 18.5%, 13.1%, 10.5%, 6.9% 和 4.4%, 板件不平整度曲线的斜率基本保持不变, 表明其敏感性影响较低。

### 2.3 构件几何参数对极限承载力影响

模拟分析构件几何参数对极限承载力的影响, 分析过程中控制残余应力的大小为 1 倍残余应力 ( $RS_1$ ), 初始几何缺陷取  $L_c/1\ 000$  和  $B/100$ 。

#### 2.3.1 翼缘宽厚比

图 9 为不同长细比 ( $\lambda$ ) 构件受翼缘宽厚比 ( $b/t$ ) 影响时极限承载力的变化曲线。由图 9 可看出: 构件极限承载力均随翼缘宽厚比的增加而逐渐增加, 但增幅逐渐减小, 说明大翼缘宽厚比构件的宽厚比敏感性较低; 腹板高厚比 ( $h_0/t$ ) 为 10 时, 翼缘宽厚比从 5 增至 10, 长细比为 30, 40, 50, 60 和 70 时构件极限承载力分别提升了 25.7%, 26.9%, 25.4%, 22.0% 和 24.4%, 说明翼缘宽厚比对小长细比构件极限承载力的影响最大。

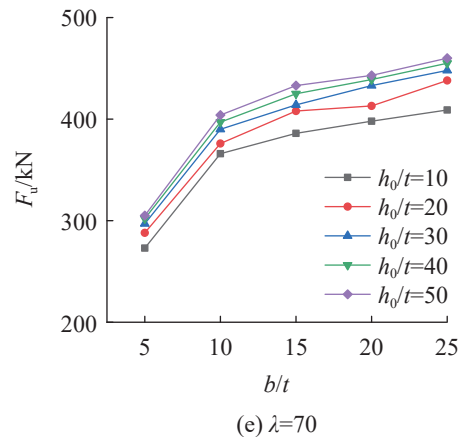
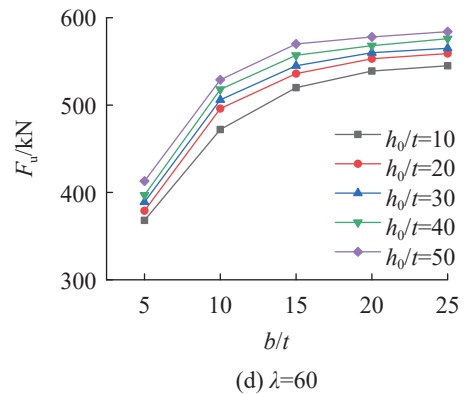
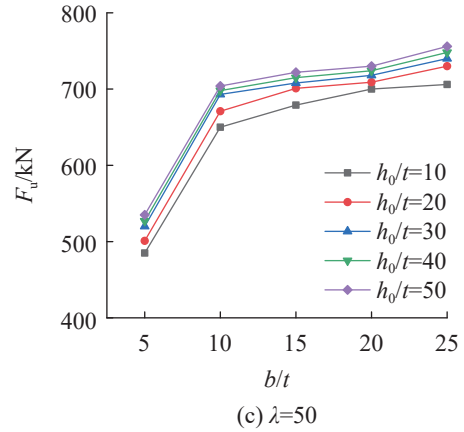
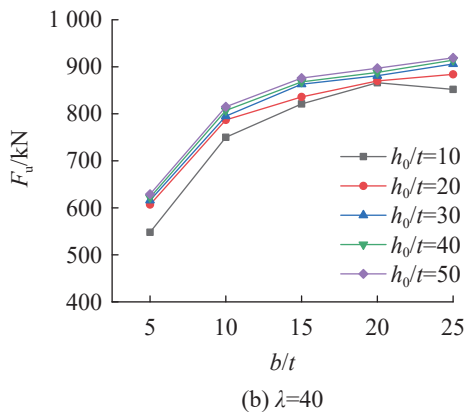
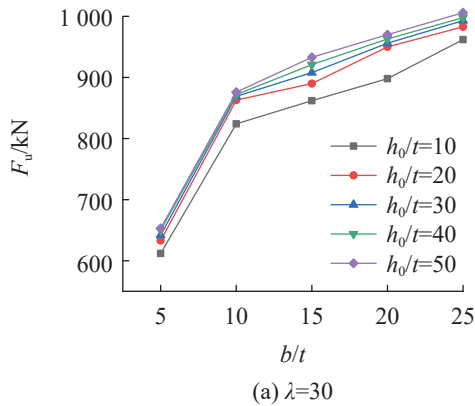
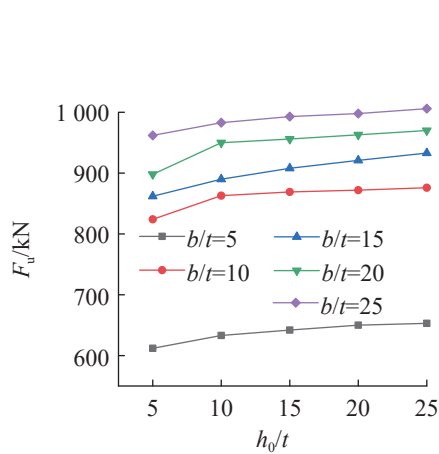


图 9 翼缘宽厚比对构件极限承载力的影响曲线

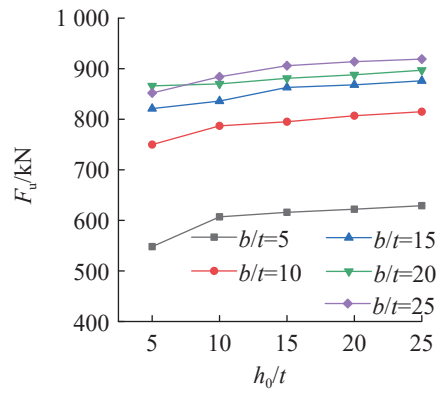
Fig. 9 Influence curve of flange width-to-thickness ratio on the ultimate bearing capacity of components

#### 2.3.2 腹板高厚比

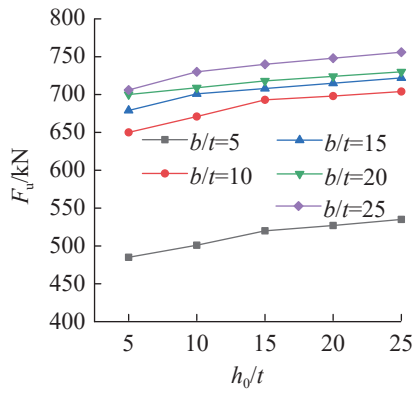
腹板高厚比 ( $h_0/t$ ) 对构件极限承载力的影响如图 10。由图 10 可看出: 同一翼缘宽厚比情况下, 构件极限承载力随腹板高厚比的增大而逐渐增大, 但整体上升趋势越来越平缓, 说明翼缘宽厚比对构件极限承载力的影响越来越小, 这一点与翼缘宽厚比对构件极限承载力的影响类似; 构件翼缘宽厚比相同时曲线的斜率随长细比的增大而增大, 说明腹板高厚比对中长柱的影响较大而对短柱的影响较小。



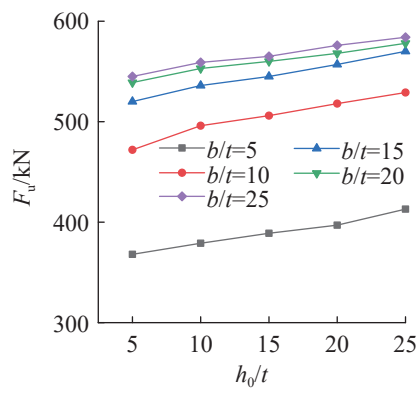
(a)  $\lambda=30$



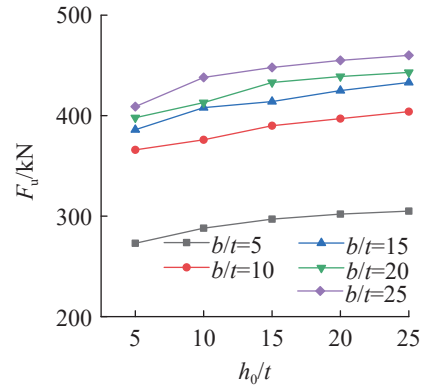
(b)  $\lambda=40$



(c)  $\lambda=50$



(d)  $\lambda=60$



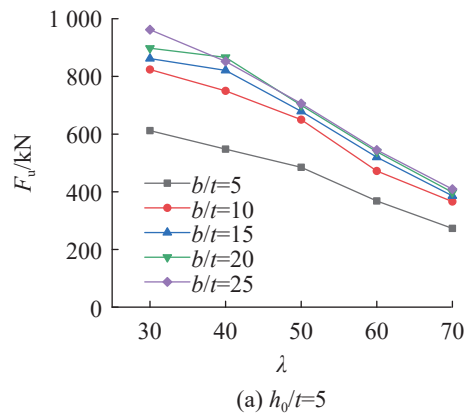
(e)  $\lambda=70$

图10 腹板高厚比对构件极限承载力的影响曲线

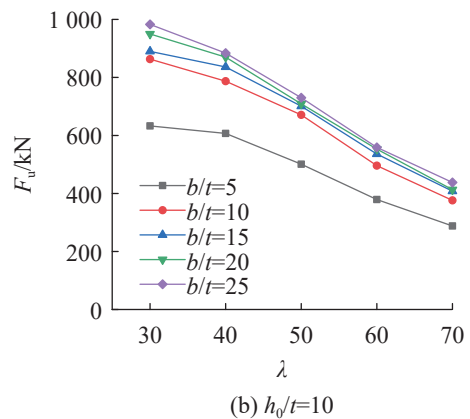
Fig. 10 Influence curve of web height-to-thickness ratio on the ultimate bearing capacity of components

### 2.3.3 长细比

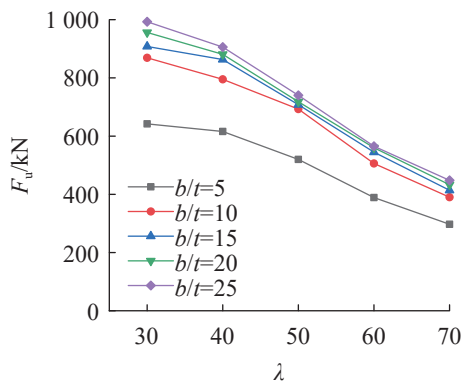
构件长细比( $\lambda$ )对其极限承载力的影响如图11。从图11可看出:随长细比的增加,构件极限承载力不断降低,但不是线性降低;翼缘宽厚比为5、腹板高厚比为10时,构件长细比从30增至40以及从60增加至70,构件极限承载力分别降低了10.5%和25.8%,说明小长细比试件的敏感性要相对较差。



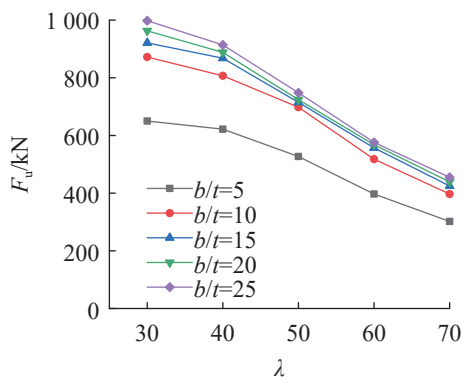
(a)  $h_0/t=5$



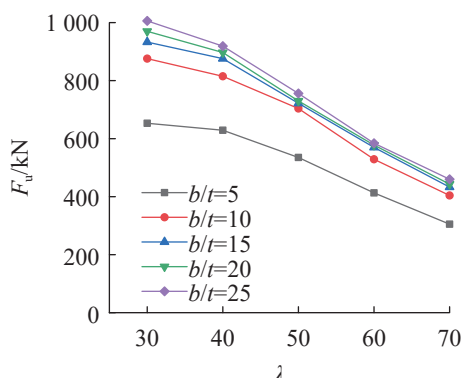
(b)  $h_0/t=10$



(c)  $h_0/t=15$



(d)  $h_0/t=20$



(e)  $h_0/t=25$

图11 长细比对构件极限承载力的影响曲线

Fig.11 Influence curve of slenderness on the ultimate bearing capacity of component

### 3 800 MPa 高强度焊接 T 形截面柱子曲线

根据有限元结果,对板件宽厚比未超限的构件进行分析,建立正则化长细比与整体稳定系数关系,且与 GB 50017—2017<sup>[21]</sup>中柱子曲线进行对比,结果如图 12。由图 12 可知,800 MPa 高强度焊接 T 形截面构件稳定系数与 GB 50017—2017<sup>[21]</sup>中 b 类柱子曲线更为贴合,其平均偏差为 3.25%,标准差为 2.90%。因此,选用 b 类柱子曲线计算 800 MPa

高强度焊接 T 形截面构件的极限承载力更为准确。

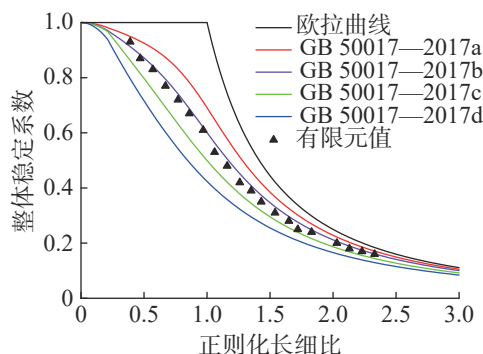


图12 有限元分析结果与规范比较

Fig.12 Comparison between finite element analysis results with specifications

### 4 结论

基于 ABAQUS 软件建立 800 MPa 高强度 T 形截面轴压构件有限元模型,模拟分析构件残余应力、几何初始缺陷、长细比、翼缘宽厚比和腹板高厚比等因素对构件极限承载力的影响,并将计算结果与 GB 50017—2017 进行对比,得到以下主要结论:

1) 残余应力对中等长度柱的极限承载力有较大影响,极限承载力与残余应力峰值呈负相关;短柱和长柱的极限承载力受残余应力影响较小。

2) 初弯曲的存在导致 800 MPa 高强度 T 形截面构件承载力显著降低,极限承载力的折减效应幅度与构件长细比呈负相关;构件极限承载力对初弯曲的敏感性明显高于板件不平整度。

3) 翼缘宽厚比对小长细比构件极限承载力的影响较大,而腹板高厚比对大长细比构件极限承载力的影响更为明显。

4) 采用 GB 50017—2017 中 b 类柱子曲线计算 800 MPa 高强度焊接 T 形截面轴压构件的极限承载力更准确。

#### 参考文献:

[1] MENG X, GARDNER L. Testing, modelling and design of normal and high strength steel tubular beam-columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 183:106735.  
 [2] CAO X, ZHAO G, KONG Z, et al. Experimental study on local buckling of 800 MPa HSS welded I-section columns under axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 155:1–18.  
 [3] 高远, 关群. 基于 ABAQUS 的高强钢筋混凝土 T 形柱斜向抗震性能分析[J]. *安徽建筑*, 2023, 30(1):70–74.  
 [4] 熊晓莉, 都坤, 马萌. 国产 Q460 高强度焊接 T 形截面轴心

- 压杆整体稳定承载力研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(10):62-66,121.
- [5] 杜梦星, 张昊, 谌磊, 等. Q690高强钢圆管构件受弯承载力分析与设计方法[J/OL]. 太原理工大学学报, [2024 - 04 - 11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1220.N.20230407.1952.008.html>.
- [6] 梁超. Q690钢焊接H形截面残余应力及其对轴压构件整体稳定性能影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [7] 刘春城, 陈霖. 焊接产生的残余应力及初弯曲对输电塔承载力的影响研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(15): 139-145.
- [8] 王文城. Q690钢焊接工字形截面压弯构件板件局部稳定研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- [9] SHI G, XU K, BAN H, et al. Local buckling behavior of welded stub columns with normal and high strength steels[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 119:144-153.
- [10] 曹现雷, 郝际平, 张天光. 新型Q460高强度钢材在输电塔结构中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(1):79-82.
- [11] YUAN H X, WANG Y Q, GARDNER L, et al. Local-overall interactive buckling of welded stainless steel box section compression members[J]. *Engineering Structures*, 2014, 67(4):62-76.
- [12] YUAN H X, WANG Y Q, GARDNER L, et al. Local-overall interactive buckling behaviour of welded stainless steel I-section columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 111:75-87.
- [13] 陈绍蕃. 轴心压杆板件宽厚比限值的统一分析[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(5):1-7.
- [14] 陈绍蕃. 焊接薄壁箱形截面轴心压杆的承载力计算[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(6):1-7.
- [15] 郭兵, 毕研军, 李毅. 轴压T形钢的相关屈曲及板件宽厚比[J]. 西安科技学院学报, 2001(2):114-117.
- [16] 陈雨, 沈祖炎, 雷敏, 等. T形钢管混凝土短柱轴压试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(6):822-829.
- [17] 陈鑫. T形钢箱异形柱稳定承载力有限元分析及研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [18] 何松林, 徐亚丰. 长细比对轴压T形钢骨混凝土柱受力性能的影响[C]// 第九届全国现代结构工程学术研讨会. 北京: 工业建筑杂志社, 2009:1286-1291.
- [19] CAO X, ZHONG R, XU Y, et al. Local-overall interactive buckling behaviour of 800 MPa high-strength steel welded H-section members under axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 164:107793.
- [20] CAO X, CHEN Y, CHENG C, et al. Interaction analysis of buckling behavior of 800 MPa high strength steel welded T-section column[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 179:10954.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018:49-51.

责任编辑: 闫芳芳