

T形钢管混凝土柱轴心受压稳定承载性能研究

雷敏^{1,2}, 沈祖炎^{2,3}, 李元齐^{2,3}, 罗金辉²

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 同济大学 土木工程国家防灾减灾重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于9根T形钢管混凝土中长柱的单向、双向偏心受压试验的结果,建立了T形钢管混凝土柱用于纤维模型程序分析其承载力的本构模型.在验证纤维模型程序合理性的基础上,对T形钢管混凝土柱轴压稳定性能进行了参数研究.研究参数包括:钢材屈服强度、混凝土抗压强度、管壁宽厚比、截面肢宽厚比、长细比以及加载角度.理论结果表明:长细比是影响T形钢管混凝土柱轴压稳定承载力的主要因素,混凝土工作承担系数和加载角度也对钢管混凝土柱的承载力有一定影响.纤维模型计算的柱子曲线与钢结构规范的a, b, c, d类曲线之间的比较表明:不同参数截面的T形钢管混凝土柱的柱子曲线会在一个较宽范围变化.最后,在大量参数分析基础上,考虑长细比和混凝土工作承担系数的影响,提出了T形钢管混凝土柱轴压柱的稳定承载力系数的实用计算方法.理论公式计算结果与已有试验结果吻合良好,可为工程设计提供理论参考.

关键词: T形钢管混凝土柱;轴压;长细比;混凝土工作承担系数;稳定承载力系数;稳定承载力

中图分类号: TU318.1;TU392.3

文献标志码: A

Behavior of Concrete-filled T-shaped Steel Tube Intermediate Long Columns Subjected to Axial Loading

LEI Min^{1,2}, SHEN Zuyuan^{2,3}, LI Yuanqi^{2,3}, LUO Jinhui²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A fiber element analysis method was proposed and verified according to the experimental results of 9 concrete-filled T-shaped steel tube (CFTST) columns subjected to uniaxial eccentric loading or biaxial eccentric loading. The

behavior of concrete-filled T-shaped steel tube intermediate long columns subjected to axial loading was investigated. The parameters in the analysis included the yield strength of steel, the compressive strength of concrete, the depth to thickness ratio of steel plate, the cross sectional depth to width ratio, the slenderness ratio of the specimens, and the angle of the loading. The results of theoretical analysis show that the load-carrying capacities of the CFTST columns under axial load were obviously influenced by the slenderness ratio of the specimens and to some extent the load ratio carried by core concrete and the load angle. A comparative study of the normalized slenderness ratio vs. stability reduction ratio curves of the CFTST columns ($\lambda_n-\varphi$) predicted by the fiber element analysis method and Code for Design of Steel Structures in China shows that the curves with different section parameters wave in a larger range. Finally, based on the extensive parametric analyses, the simplified calculation method of normalized slenderness ratio vs. stability reduction ratio curves ($\lambda_n-\varphi$) was proposed with a consideration of the effect of the slenderness ratio and the load ratio carried by core concrete. Good agreements between the values predicted by the simplified calculation method and the experiment results were achieved, and the simplified calculation method may be referred for practical engineering design.

Key words: concrete-filled T-shaped steel tube columns; axial load; slenderness ratio; load ratio carried by core concrete; stability reduction ratio; load-carrying capacity of stability

钢管混凝土结构具有承载能力高、抗震抗性能优越、施工方便、耐火性能好等优点,目前已广泛应用于工程建设的各个领域.钢筋混凝土异形柱结构避免了柱子凸棱问题,具有提高建筑结构内部空间利用率、满足建筑室内空间美学要求、节约资源等优

收稿日期: 2015-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51208375);上海市博士后基金(12R21415900)

第一作者: 雷敏(1977—),男,工学博士,主要研究方向为组合结构. E-mail: leimin77@163.com

通讯作者: 李元齐(1971—),男,教授,工学博士,主要研究方向为大跨结构抗风及冷弯型钢结构. E-mail: liyq@tongji.edu.cn

点. 异形钢管混凝土柱结合了钢管混凝土柱和钢筋混凝土异形柱的许多优点, 在未来小高层建筑中有着广阔的应用前景, 目前国内一些学者已开始关注其力学性能研究^[1-14], 但对异形钢管混凝土中长柱的承载性能研究较少. 实际工程中, 构件以中长柱居多, 目前仅林震宇^[2]、雷敏^[12]对 L 形、T 形钢管混凝土中长柱的单向及双向偏压力学性能进行了研究, 徐礼华^[13]、屠永清^[14]分别对矩形钢管混凝土组合焊接 T 形柱、多室钢管混凝土 T 形柱的轴压稳定承载力进行了研究. 完善冷成型工艺可使异形钢管一次成型, 方便施工, 减小异形钢管因为焊接和弯折加工的生产成本. 本课题对普通构造 T 形钢管混凝土轴压短柱、偏压中长柱的力学性能进行了试验调查, 在此基础上对其轴压截面强度、轴压稳定、单向偏压强度、单向偏压稳定、双向偏压性能进行了理论分析. 本文为其中的轴压稳定承载性能研究, 包括在轴压试验研究^[12]的基础上, 考虑有效约束分区, 对文献^[15]提出的适用于方钢管和矩形钢管混凝土柱的核心混凝土本构模型进行了修正, 提出了适用于纤维计算模型程序分析的普通 T 形钢管混凝土柱核心混凝土本构模型; 在偏压试验结果验证了纤维模型程序对其分析结果合理性的基础上, 采用纤维模型程序对 T 形钢管混凝土柱的轴压稳定承载力展开了参数研究, 对比了该类柱的柱子曲线与我国钢结构规范^[16]的 a, b, c, d 四类曲线的差别, 并提出了 T 形钢管混凝土中长柱稳定承载力的理论计算公式, 以供工程设计应用参考.

1 纤维模型

实际工程中的轴心受压柱因存在初弯曲、荷载初偏心等几何或力学缺陷而实际上都是偏心受压柱. 因此对轴压长柱承载力的研究都是考虑了初始缺陷后按偏压柱对待^[16-18]. 我国现行钢结构规范对轴压长柱承载力的计算考虑了千分之一杆长的初挠度和不同模式残余应力的影响. 对于轴压焊接空钢管柱, 在外荷载作用下, 残余压应力的存在使压应力区提前屈服, 截面中和轴偏移, 同时抗弯刚度降低, 导致构件的稳定承载力降低; 对于轴心受压钢管混凝土柱, 文献^[15, 18]的研究认为, 由于管内大面积核心混凝土的存在, 残余应力对轴压稳定承载性能的影响可以忽略, 可按有千分之一杆长初挠度的偏压柱对待. 由于 T 形钢管截面相对矩形钢管截面较为复杂, 目前还未见其残余应力分布的相关文献, 本文在分析 T 形钢管混凝土中长柱轴压承载力时, 与方钢管混凝土柱类似, 构件的初始缺陷考虑千分之一杆长的初挠度, 忽略残余应力的影响, 采用自编的纤维模型程序, 按照计算压弯构件的方法进行计算. 构件加载方向、单元划分如图 1 所示. 图中 B, H 分别为截面肢宽, 肢高; b_w 为截面肢厚 ($b_w = h_f$); b_1, b_2 为翼缘外伸宽度 ($b_1 = b_2$); P 为轴力; e_x, e_y 分别为 x 向, y 向偏心距; ϕ_x, ϕ_y 分别为 x 向, y 向曲率; ϵ_0 为形心应变, x_i, y_i 为在一单元形心至截面形心的距离, $\epsilon_{xi}, \epsilon_{yi}$ 分别为曲率 ϕ_y, ϕ_x 对应的单元应变.

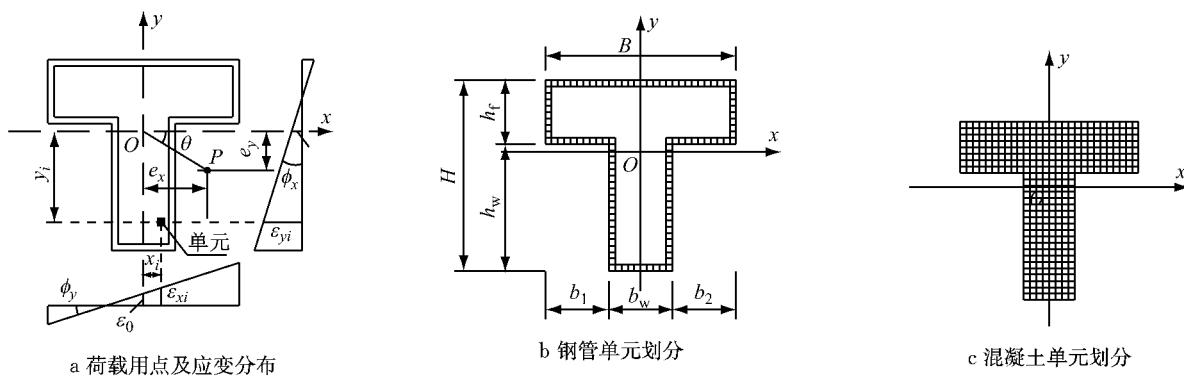


图 1 荷载作用位置及截面单元划分

Fig.1 Location of the loading and the fiber elements of the section

1.1 基本假定

纤维模型分析假定如下: ① T 形钢管混凝土双向偏压构件绕 x 轴和 y 轴的挠曲线均为正弦半波曲线; ② 钢和混凝土之间无相对滑移; ③ 在受力变形过程中试件截面保持平面, 截面应变分布呈线性关

系; ④ 忽略混凝土的抗拉强度; ⑤ 忽略钢管残余应力的影响; ⑥ 考虑具有千分之一杆长的初挠度; ⑦ 钢材的本构模型采用文献^[15]的本构模型, 混凝土的单轴受压本构模型如下:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^\eta + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (1)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}; y = \frac{\sigma}{f_{c0}}; f_{c0} = f_c [1 + (-0.029 1 \xi_{eq}^2 + 0.118 9 \xi_{eq}) \times (22.8/f_c)^{0.304 8}];$$

$$\varepsilon_0 = 1 300 + 13.2 f_c + \{1 330 + 760 [(f_c - 22.8) / 22.8]\} \cdot \xi_{eq}^{0.2};$$

$$\eta = 1.9 + 1.5/x; \beta_0 = \frac{f_c^{0.1}}{1.35 \sqrt{1 + \xi_{eq}}};$$

式中: ε 为混凝土压应变; ε_0 为考虑约束效应后混凝土的峰值压应变; σ 为混凝土的压应力; f_{c0} 为考虑约束效应后混凝土的峰值压应力; f_c 为混凝土棱柱体抗压强度; ξ_{eq} 为等效约束效应系数; η 与 β_0 为系数。

根据文献[12]对 T 形钢管混凝土轴压短柱的试验研究及理论分析, 其截面的宽面、阴角为弱约束区, 阳角为强约束区, 因此约束分区简化如图 2 所示, I, II, IV 区分的约束系数 $\xi_I, \xi_{II}, \xi_{IV}$ 分别相应于边长为 B, h_f, b_w 的方形钢管混凝土柱的约束效应系数, 对于第 III 分区, 阴角钢管对混凝土无约束作用, 取 $\xi_{III} = 0, \xi_{eq} = \sum \xi_i A_i / \sum A_i$.

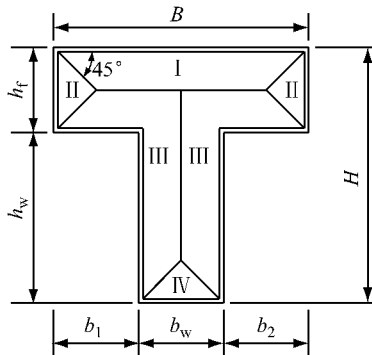


图 2 T 形钢管混凝土柱约束分区

Fig.2 Confinement region divisions of CFTST column

1.2 数值积分

利用纤维模型法可有效地对偏压试件进行全过程分析. 外荷载作用下, 构件在两个主平面 xoz, yoz 内发生挠曲变形时跨中截面的最大挠度为 u_x, u_y , 相应的挠曲方程为: $x = u_x \sin(\pi z/l), y = u_y \sin(\pi z/l)$. 跨中截面两个方向的曲率为 $\phi_x = u_y \pi^2/l^2, \phi_y = u_x \pi^2/l^2$. 截面上任一点的应变 $\varepsilon_i = \varepsilon_0 + x_i \phi_y + y_i \phi_x$, 钢管应力 $\sigma_{si} = f_s(\varepsilon_i)$, 混凝土应力 $\sigma_{ci} = f_c(\varepsilon_i)$. 通过叠加和对形心取矩可以得到截面的内力 N_{in}, M_{inx}, M_{iny} . 截面的平衡条件为: 轴力 $N_{in} = N$; 弯矩: $M_{inx} = M_x + Nu_y, M_{iny} = M_y + Nu_x$. 其中, N, M_x, M_y 为构件所能承担的轴力, x 向弯矩, y 向弯矩. 计算时首

先假定 x 向某一级曲率 ϕ_x , 然后调整 y 向曲率 ϕ_y 和形心应变 ε_0 , 使构件跨中截面满足平衡条件, 即可求出某一级 x 向曲率下的轴力 N 和弯矩 M_x, M_y 以及跨中截面的挠度 u_x, u_y . 然后增加 x 向曲率 ϕ_x , 重复上述过程, 即可求出构件受到外荷载后的整个荷载变形曲线. 若构件长度 l 取为零, 则由构件的承载力分析转化为截面的强度分析.

1.3 模型合理性验证

课题[12]完成了柱子两端铰接的 T 形钢管混凝土柱的偏压试验, 主要参数为: 截面尺寸(截面肢宽厚比、管壁宽厚比)、两方向偏心距、构件长度(长细比). 由于 T 形截面自身变化复杂, 课题[12]及本文主要研究 T 形截面翼缘宽度与腹板方向总高度相同的 T 形钢管混凝土柱, 其截面形式见图 1. 课题[12]的试件参数及试验结果见表 1. 本文采用纤维模型程序对课题的偏压试验结果进行了计算, 计算的荷载-侧向挠度曲线与试验曲线对比见图 3, 图中的 D9, D10(Y 向)和 D11, D12(X 向)分别为布置在柱子跨中截面, 在形心主轴 y 轴和 x 轴两侧等距同方向的两个位移计. 从图 3 可以看出, 采用本文的材料本构模型和纤维模型程序能够较好地预测试件的受力变形过程(包括曲线上升段的刚度、峰值荷载、峰值荷载后承载力的下降趋势、中性轴的转动等). 表 1 给出的各试件承载力的纤维模型程序计算值与试验值的比较表明: N_{uc}/N_{uc} (N_{uc} 为试件的峰值荷载, N_{uc} 为纤维模型程序计算的峰值荷载)的平均值为 0.970, 标准差为 0.0336, 计算结果良好, 且偏于安全, 因此该纤维模型程序可用于 T 形钢管混凝土柱的偏压承载力计算. 由于实际的轴压长柱可按偏压柱分析, 因此本文也采用该纤维模型程序分析轴压中长柱的承载性能.

2 理论分析

在验证纤维模型合理性的基础上, 图 4 给出了截面为 T3008fy345C40(构件截面表示: 高度 H 和宽度 B 均为 300 mm, 肢厚 h_f 和 b_w 统一默认为 100 mm, b_1 和 b_2 相同, t 为 8 mm, f_y 为 345 MPa, f_{cu} 为 40 MPa 的 T 形截面构件, 以下截面表述类似)不同长细比构件的轴向压力 N 和截面平均纵向应变 ε 的关系曲线. 由图 4 可见, 长细比 λ 对 T 形钢管混凝土轴心受压构件的临界力的大小影响明显, λ 越小, 临界力越大, 极限变形也越大; 反之, λ 越大, 临界力越小, 极限变形也越小. 在本算例中, 当 $\lambda \leq 46$ 时, 受压

表 1 试件参数及试验结果

Tab.1 Parameters and experimental results of specimens

试件 编号	截面尺寸/mm $B-h_t-b_w-h_w-t$	偏心距 e_x/mm	偏心距 e_y/mm	长度 L/mm	$f_{cu}/$ MPa	$f_y/$ MPa	$N_{ue}/$ kN	$N_{uc}/$ kN	N_{uc}/N_{ue}
T1	300-100-100-200-5	0	-50	2200	39.36	304.5	2 035.5	1996.1	0.981
T2	300-100-100-200-5	50	-100	3 000	39.36	304.5	1356.0	1324.1	0.977
T3	300-100-100-200-5	100	0	2 600	39.36	304.5	1347.0	1326.3	0.985
T4	300-100-100-200-6	0	-100	2 600	39.36	262.5	1382.5	1427.0	1.032
T5	300-100-100-200-6	50	0	2 200	39.36	262.5	1994.5	1952.7	0.979
T6	300-100-100-200-6	100	-50	3 000	39.36	262.5	1414.5	1317.4	0.931
T7	250-100-100-150-6	0	0	3 000	39.36	262.5	2613.0	2422.7	0.927
T8	250-100-100-150-6	50	-50	2 600	39.36	262.5	1472.5	1378.9	0.936
T9	250-100-100-150-6	100	-100	2 200	39.36	262.5	906.0	890.5	0.983

注: $b_t-h_t-b_w-h_w-t$ 为试件几何尺寸,见图 1; e_x 和 e_y 为 x 和 y 向偏心距; L 为试件长度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_y 为钢材屈服强度。

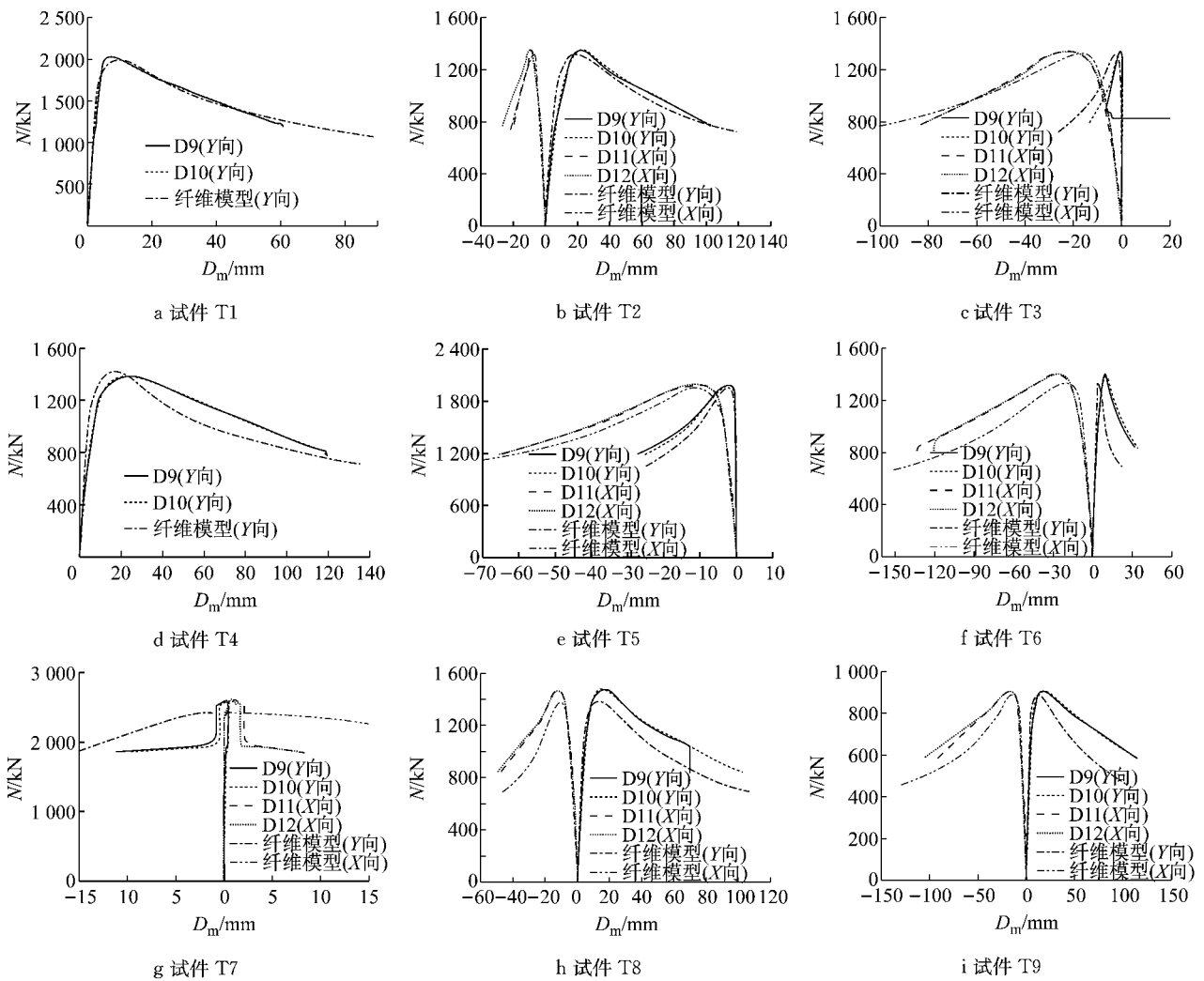


图 3 试件荷载-侧向挠度曲线

Fig.3 Load versus mid-span deflection curves of specimens

区钢管达到屈服强度,构件的 $N-\epsilon$ 关系曲线在弹塑性阶段达到临界状态;当 $\lambda > 46$ 时,构件的 $N-\epsilon$ 关系曲线在弹性阶段达到临界状态. 构件的长细比 λ 及正则化长细比 λ_n 参照文献[19]定义为 $\lambda = l_0 / [(I_s + I_c E_c / E_s) / (A_s + A_c f_{ck} / f_y)]^{1/2}$, $\lambda_n = (\lambda / \pi) (f_y /$

$E_s)^{1/2}$; 其中, I_s , I_c 分别是钢管和混凝土对截面主轴的惯性矩; A_s , A_c 分别是钢管和混凝土的截面面积; E_s 是钢材的弹性模量,取 2.06×10^5 MPa; E_c 是混凝土的弹性模量,按混凝土结构设计规范 GB50010-2002 计算: $E_c = 10^5 / (2.2 + 34.7 / f_{ck})$ (MPa), f_{ck}

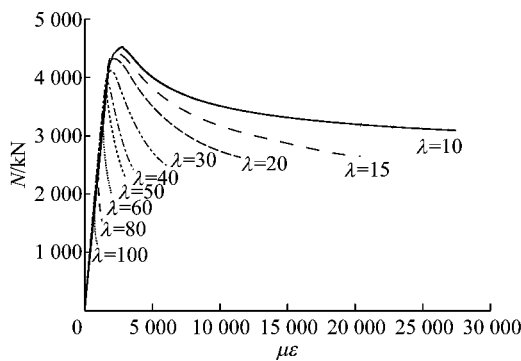


图 4 构件荷载-轴向应变关系曲线

Fig. 4 Load versus axial strain curves of specimens

为混凝土立方体抗压强度标准值; f_{ck} 为混凝土的轴心抗压强度标准值; f_y 是钢材的屈服强度。

T 形钢管混凝土中长柱的轴压临界荷载为

$$N_{cr} = \varphi N_{max} \quad (2)$$

式中: φ 为稳定系数; N_{max} 为短柱的强度承载力, 基于短柱试验结果及有限元分析结果^[12], 建议

$$N_{max} = f_y A_s + [1 + (-0.029 148 \xi_{eq}^2 + 0.118 935 \xi_{eq}) \times (22.8/f_c)^{0.304 8}] \times f_c A_c \quad (3)$$

T 形钢管混凝土柱为单轴对称截面组合构件, 同时混凝土材料抗拉、抗压性能差异较大, 当构件承

受轴力和弯矩挠曲时, 除了挠曲平面与对称轴所在的主平面重合时为单向偏心受压外, 其余情况均为双向偏心受压。对 T 形钢管混凝土构件的稳定承载力进行了参数分析, 考虑的主要因素有: 构件长细比 λ (0-200)、管壁宽厚比 B/t (30, 37.5, 50)、混凝土抗压强度 f_{cu} (C30-C60)、钢材屈服强度 f_y (235 MPa, 345 MPa, 390 MPa)、截面肢宽厚比 B/h_f (2.5, 3, 4)、加载角度 ($-90^\circ, 0^\circ, 90^\circ$)。

从图 5 可以看出, 随着钢材屈服强度的提高、混凝土强度的降低, 相同正则化长细比条件下, 在构件发生弹塑性失稳阶段, 稳定承载力增大; 在构件发生弹性失稳时, 承载力的大小主要与截面性质及正则化长细比有关, 不受钢材屈服强度、混凝土强度的影响。在相同正则化长细比条件下, 钢管管壁厚度的增加, 试件的稳定承载力增加甚微, 基本可以忽略。这与陶忠^[18]对方钢管混凝土柱稳定承载力分析的结论是一致的。上述现象的原因在于, 混凝土的应力应变曲线在上升段是非线性的, 而且其增长率小于钢材应力的增长率, 因而同样的截面大小, 钢的贡献越大 (混凝土工作承担系数越小), 弹塑性失稳时稳定承载力越高。

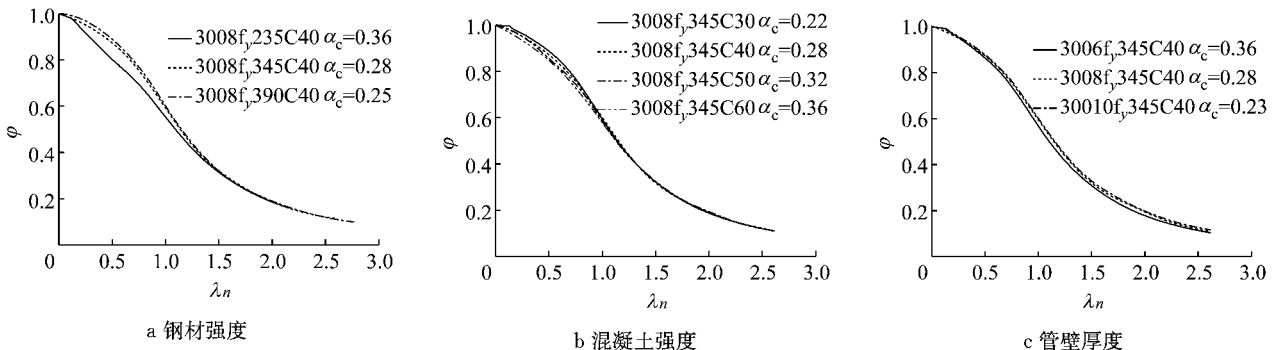


图 5 试件正则化长细比-稳定系数曲线

Fig. 5 Normalized slenderness ratio (λ_n) versus capacity reduction ratio (φ) curves

不同于方钢管混凝土柱, T 形钢管混凝土柱挠曲方向不同时, 截面上相同位置的混凝土的应力状况不同, 从而导致混凝土对受压承载的贡献不同。从图 6 可以看出, 挠曲方向不同, T 形钢管混凝土柱的轴压稳定承载力有一定的差别, 沿 y 轴正向挠曲时, 稳定承载力比沿其它两个方向挠曲时较小, 主要是由于沿 y 轴正向挠曲时, 腹板是最大受压区, 翼缘是最小受压区, 翼缘大部分区域与腹板区域相比其混凝土压应力相对较小, 从而稳定承载力相对较小。从图 6a, 图 6b 和图 6c 的比较可以看出, 随着混凝土承担工作系数的降低, 三个方向挠曲时的稳定承载力差别逐渐减小。

图 7 给出了 T 形钢管混凝土柱分别沿三个方向弯曲时, 不同截面肢宽厚比对轴心受压长柱稳定承载力的影响。可以看出在构件混凝土工作承担系数相近的情况下 ($\alpha_c = 0.36, 0.37, 0.34$), 截面肢宽厚比对稳定系数几乎无影响。

图 8 给出了不同参数截面构件轴压稳定承载力系数曲线与钢结构规范柱子曲线 (a, b, c, d 类) 的比较。不同参数截面的 T 形钢管混凝土柱的轴压稳定承载力系数曲线并不是固定在某一类曲线的附近, 而是在一个较宽的带宽范围内变化。

以上分析表明, 影响 T 形钢管混凝土柱轴压稳定承载力的主要因素是长细比, 同时混凝土工作承

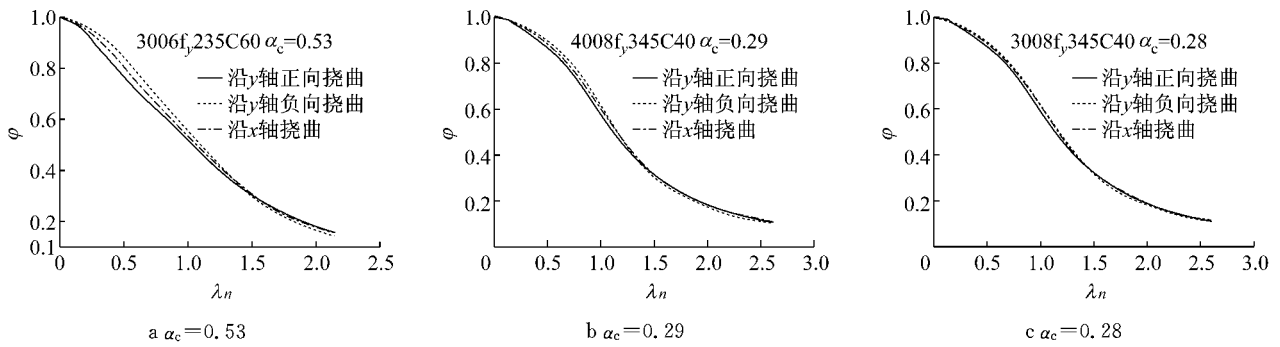


图 6 弯曲方向对试件稳定系数的影响

Fig.6 Effect of the flexure directions on the λ_n - φ curves

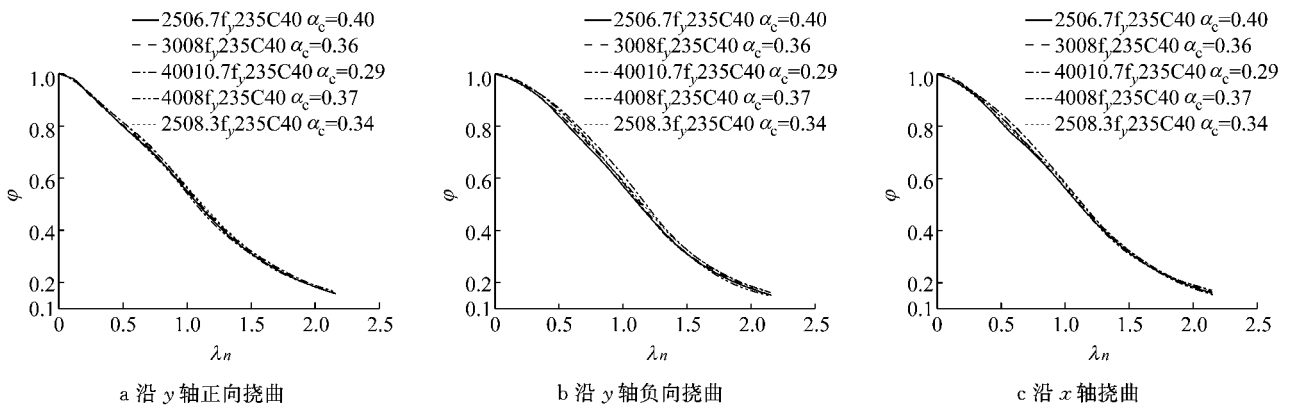


图 7 截面肢宽厚比对稳定系数的影响

Fig.7 Effect of B/h_f on the λ_n - φ curves

担系数和挠曲方向对其有一定影响,由于三个方向的稳定承载力系数 φ 差别不大,为了工程应用简便,将三个方向合并考虑.对影响稳定承载力系数的上述因素进行了全参数组合设计,在对 324 种 T 形截面钢管混凝土柱分别在长细比为 0~200 范围内进行了轴压稳定承载力分析的基础上,参考钢结构规范中稳定系数的相关公式,对图 5~图 8 所示的类似

曲线(总计 324 条)进行了非线性拟和, T 形钢管混凝土轴压构件稳定系数 φ 可以按式(4)进行计算,即

$$\varphi = \begin{cases} 1 - \frac{\lambda_n}{0.2}(1 - \varphi_{0.2}) & \lambda_n < 0.2 \\ \frac{1}{2\lambda_n^2} [(a + b\lambda_n + \lambda_n^2) - \sqrt{(a + b\lambda_n + \lambda_n^2)^2 - 4\lambda_n^2}] & \lambda_n \geq 0.2 \end{cases} \quad (4)$$

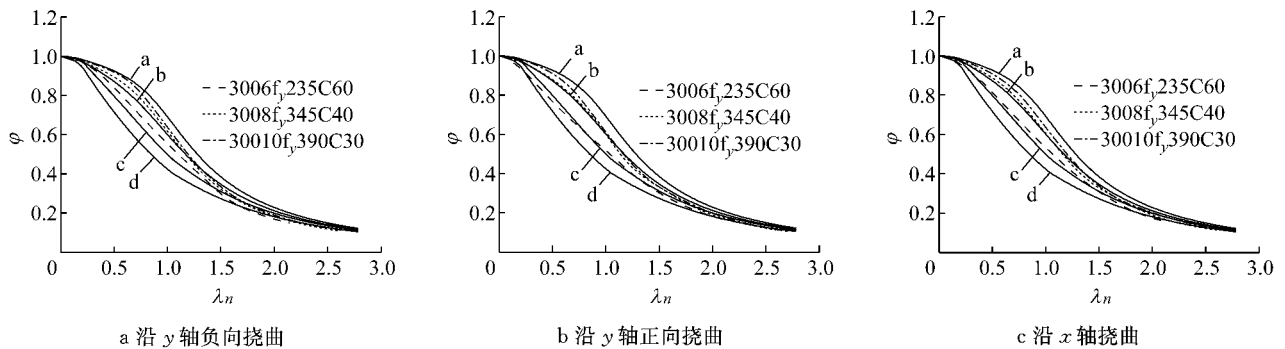
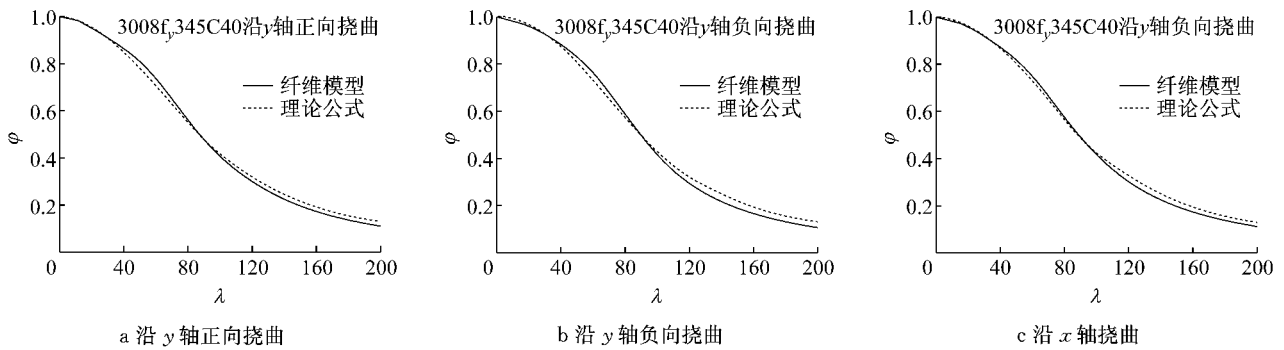


图 8 不同试件与钢结构规范柱子曲线的比较

Fig.8 Comparison of curves of CFTST columns and code for design of steel structures

式中, $\varphi_{0.2}$ 为正则化长细比 $\lambda_n = 0.2$ 时对应的稳定系数, $a = k_1\alpha_c^2 + k_2\alpha_c + k_3$, $b = m_1\alpha_c^2 + m_2\alpha_c + m_3$, $\alpha_c = f_{ck}$

$A_c / (f_{ck}A_c + f_yA_s)$, 参数 $k_1 \sim k_3, m_1 \sim m_3$ 按表 2 确定.

图 9 λ - ϕ 简化计算与数值计算结果的比较Fig. 9 Comparison of λ - ϕ predicted by simplified formula and fiber element model program表 2 参数 $k_1 \sim k_3, m_1 \sim m_3$ 取值Tab. 2 Values of parameters $k_1 \sim k_3, m_1 \sim m_3$

参数	k_1	k_2	k_3	m_1	m_2	m_3
取值	-0.12691	0.09622	0.93361	0.47611	0.202015	0.24224

式(2)~式(4)的适用范围为:混凝土工作承担系数 α_c 为 0.122 8~0.571 5;长细比 λ 为 0~120. 在上述适用范围内,简化计算公式与纤维模型计算结果比值的平均值为 0.993 6;标准差为 0.031 93;变异系数为 0.032 14. 图 9 给出了采用简化计算公式与纤维模型程序计算试件 3008 f_y ,345C40 稳定承载力系数的对比情况,可以看出,沿三个方向挠曲时,简化计算公式的计算结果与纤维模型程序的分析结果均能较好吻合.

图 10 给出了文献[14]试件的试验结果与式(4)的计算值的比较(说明,文献[14]三种截面试件的混凝土工作承担系数分别为 0.354,0.363,0.377,基本相近,三者的 λ - ϕ 曲线基本重合);从图 10 可见,式(4)的计算值与试验结果吻合较好. 式(4)的计算值与试验值之比的平均值为 0.995,均方差 0.024. 这说明按式(4)能够很好预测 T 形钢管混凝土柱的稳定承载力,可供工程设计参考.

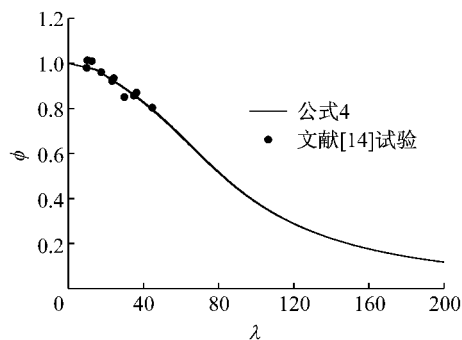


图 10 试验值与简化公式计算比较

Fig. 10 Comparison of test results and the values predicted by simplified formula

3 结论

根据研究可以得到以下结论:

(1) 考虑不等边钢管对混凝土约束效应的差别,以及普通构造 T 形钢管混凝土截面阴角钢管对混凝土不产生约束,以等效约束效应系数为基本参数,提出了普通构造 T 形钢管混凝土柱核心混凝土的单轴应力—应变关系模型.

(2) 编制的纤维模型程序能够较好地预测 T 形钢管混凝土构件的受力变形过程,纤维模型程序计算结果与试验结果吻合良好,该程序可以用于 T 形钢管混凝土柱的承载力计算分析.

(3) 对 T 形钢管混凝土轴压构件的稳定承载力进行了参数分析,并与现行钢结构规范柱子曲线进行了比较,不同参数的 T 形钢管混凝土柱的柱子曲线会在一个较宽的带宽范围内变化,影响轴压稳定承载力系数的主要因素是长细比. 长细比越小,轴压稳定承载力系数越大,极限荷载时构件截面平均轴向应变越大. 同时混凝土工作承担系数和弯曲方向对稳定承载力系数在一定程度上也有影响.

(4) 以长细比、混凝土工作承担系数为影响参数,提出了 T 形钢管混凝土轴压构件稳定承载力系数的计算方法,理论公式计算结果与纤维模型分析结果、试验结果吻合良好,可供工程设计参考.

参考文献:

- [1] CHEN Zhiyi, SHEN Zuyan. Behavior of L-shaped concrete-filled steel stub columns under axial loading: experiment [J]. Advanced Steel Construction, 2010, 6(2): 688.
- [2] 林震宇. L 形钢管混凝土构件力学性能若干关键问题研究 [D]. 上海:同济大学, 2009.

- LIN Zhenyu. Study on some key problem on behavior of L-shaped concrete-filled steel tubular columns [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [3] 左志亮,蔡健,钱泉. 带约束拉杆T形钢管混凝土短柱轴压性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 43.
ZUO Zhiliang, CAI Jian, QIAN Quan. Experimental study on T-shaped CFT stub columns with binding bars subjected to axial compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11): 43.
- [4] 左志亮,蔡健,刘明峰,等. 带约束拉杆T形钢管混凝土短柱偏压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(8): 79.
ZUO Zhiliang, CAI Jian, LIU Mingfeng, *et al.* Experimental study of T-shaped CFT stub columns with binding bars subjected to eccentric load [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(8): 79.
- [5] ZUO Zhiliang, CAI Jian, YANG Chun. Axial load behavior of L-shaped CFT stub columns with bind bars [J]. Engineering Structures, 2012, 37: 88.
- [6] ZUO Zhiliang, CAI Jian, YANG Chun, *et al.* Eccentric load behavior of L-shaped CFT stub columns with binding bars[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72: 105.
- [7] 杜国锋,徐礼华,徐浩然,等. 钢管混凝土组合T形短柱轴压力学性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2008, 40(4): 549.
DU Guofeng, XU Lihua, XU Haoran, *et al.* Study on behavior of composite T-shaped concrete filled steel tubular short columns under axial compression [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 549.
- [8] YANG Yuanlong, YANG Hua, ZHANG Sumei. compressive behavior of T-shaped concrete filled steel tubular columns [J]. International Journal of steel structures, 2010, 10(4): 419.
- [9] 赵毅,静行. T形钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(9): 87.
ZHAO Yi, JING Xing. Experimental study of T-shaped concrete-filled steel tube columns under axial compression loading[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(9): 87.
- [10] 王丹,吕西林. T形、L形钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 39.
WANG Dan, LÜ Xilin. Experimental study on seismic behavior of concrete-filled steel T-section, L-section columns [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 39.
- [11] SHEN Zuyan, LEI Min, LI Yuanqi, *et al.* Experimental study on the seismic behavior of concrete-filled L-shaped steel tube columns [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(7): 1235.
- [12] 雷敏. T形钢管混凝土构件力学性能若干关键问题研究[D]. 上海:同济大学, 2014
LEI Min. Study on some key problem on behavior of T-shaped concrete-filled steel tubular columns [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [13] 徐礼华,杜国锋,温芳,等. 组合T形截面钢管混凝土柱正截面受压承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(6): 14.
XU Lihua, DU Guofeng, WEN Fang, *et al.* Experimental study on normal section compression bearing capacity of composite T-shaped concrete-filled steel tubular columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(6): 14.
- [14] 屠永清,刘林林,叶英华. 多室式钢管混凝土T形中长柱轴压性能研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 27.
TU Yongqing, LIU Linlin, YE Yinghua. Study on the properties of multi-cell T-shaped concrete-filled steel tubular intermediate long columns under axial load [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 27.
- [15] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践 [M]. 第2版, 北京: 科学出版社, 2007.
HAN Linhai. Theory & practice of concrete-filled steel tubular structure [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [16] 中华人民共和国建设部. GB50017—2003 钢结构设计规范 [S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50017—2003 Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [17] 李开禧,肖允徽,饶晓峰,等. 钢压杆的柱子曲线[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1985(1): 24.
LI Kaixi, XIAO Yunhui, NAO Xiaofeng, *et al.* Column curves for steel compression member [J]. Journal of Chongqing University of Civil Engineering and Architecture, 1985(1): 24.
- [18] 陶忠,韦灼彬,韩林海. 方钢管混凝土轴心受压稳定承载力的研究[J]. 工业建筑, 1998, 28(10): 15.
TAO Zhong, WEI Zhuobin, HAN Linhai. Research for stable bearing capacity of square concrete filled steel tubes subjected to axial compression [J]. Industrial Construction, 1998, 28(10): 15.
- [19] 中国工程建设标准化协会. CECS159—2004 矩形钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社, 2004.
China Association for Engineering Construction Standardization. CECS159—2004 Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members [S]. Beijing: China Planning Press, 2004.