

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.04.005

不同加载角 T 形钢管混凝土压弯承载力研究

黄玉宁¹, 郑永乾¹, 赖鹏松²

(1. 闽台合作土木工程技术福建省高校工程研究中心(福建工程学院), 福建 福州 350118;
2. 健研检测集团有限公司, 福建 厦门 361004)

摘要: 采用有限元软件 ABAQUS 建立了不同加载角 T 形带肋和多室钢管混凝土压弯构件的计算模型, 数值计算结果与试验结果吻合良好。对影响 T 形钢管混凝土柱水平荷载 P - 水平位移 Δ 关系曲线的参数进行分析, 结果表明: 加载角为 0° 时, T 形钢管混凝土构件的承载力最低, 在 67.5° 负向加载时, 构件的承载力最大, 比 0° 加载角构件大 13% 左右, 加载角为 $45^\circ \sim 90^\circ$ 间承载力总体上差别不大。随着钢管屈服强度、混凝土抗压强度、钢管长厚比、带肋和多室 T 形钢管混凝土构件在斜向加载的承载力增加, 在传统钢管混凝土基础上, 提出了适用于不同加载角带肋和多室 T 形钢管混凝土压弯构件的承载力设计方法, 简化计算公式与有限元结果、试验结果均吻合较好。

关键词: T 形钢管混凝土; 压弯构件; 加载角; 承载力; 有限元分析

中图分类号: TU398.9 文献标志码: A 文章编号: 1672-4348(2020)04-0329-07

Study on bearing capacity of T-shaped concrete-filled steel tubular members considering different loading angles

HUANG Yuning¹, ZHENG Yongqian¹, LAI Pengsong²

(1. Fujian-Taiwan Cooperative Institute of Civil Engineering Technology in Colleges and Universities of Fujian Province (Fujian University of Technology), Fuzhou 350118, China; 2. Jianyan Testing Group Co. Ltd., Xiamen 361004, China)

Abstract: The calculation models of stiffened and multi-cell T-shaped CFST compression-bending members at different loading angles were established by using finite element (FE) software ABAQUS. The FE calculated results agreed well with the test results. The parameters affecting the horizontal load P -displacement Δ curves of T-shaped CFST columns were analyzed. The results show that the T-shaped CFST members have the lowest bearing capacity at a loading angle of 0° . The bearing capacity of the members is the largest at 67.5° in a negative direction, which is about 13% higher than that at 0° . In the range of 45° to 90° , the difference in bearing capacity is generally minor. With the increase of steel tube yield strength, concrete compressive strength, steel tube depth-to-thickness ratio, the bearing capacity of stiffened and multi-cell T-shaped CFST members under diagonal loading increases. Based on the traditional CFST, a design method for the bearing capacity of stiffened and multi-cell CFST members considering different loading angles was proposed. The predicted results using the simplified formulas agree well with the FE results and test results.

Keywords: T-shaped concrete-filled steel tubular; compression-bending members; loading angle; bearing capacity; finite element analysis

收稿日期: 2020-05-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(51678151); 福建省自然科学基金项目(2019J01780)
第一作者简介: 黄玉宁(1994—), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 研究方向: 钢与混凝土组合结构研究。
通信作者: 郑永乾(1979—), 男, 福建龙岩人, 教授, 博士, 研究方向: 钢与混凝土组合结构。

钢管混凝土异形柱具有避免柱伸出墙体、有效利用空间等优点,受到人们的青睐,已在广州新中国大厦、名汇商业大厦、汶川地震灾后重建等工程中应用^[1]。当异形柱用于边柱时,往往采用 T 形截面。传统无肋 T 形钢管混凝土异形柱在受力过程中钢管容易发生局部屈曲,使得材料性能难以充分发挥,且钢管对混凝土约束作用较小,因此可采用设纵向加劲肋和多室形式来加强。

已有一些学者开展了 T 形设肋或者多室钢管混凝土构件受压性能^[1-6]、纯弯性能^[7]和滞回性能^[8]的研究,结果表明,该类型柱具有良好的受力性能。但这些研究多集中在单向受力上,而 T 形钢管混凝土柱在实际工程中可能受到双向荷载的作用,由于 T 形截面的非对称性,因此需要进一步认识其不同加载角情况下的受力情况。本文在 Zheng 等^[9]的 T 形钢管混凝土柱滞回性能试验结果的基础上,采用 ABAQUS 建立了 T 形钢管混凝土压弯构件力学性能分析的有限元模型,对荷载-位移骨架线进行计算和参数分析,最后提出了适用于不同加载角度 T 形钢管混凝土压弯构件承载力的设计方法。

1 有限元模型

1.1 模型简述

钢材的应力-应变关系采用双折线模型,混凝土采用 Tao 提出的受压本构模型,可用于普通、高强和超高强混凝土^[10],模型中需要确定混凝土的约束效应系数,对于设肋试件,可采用等效矩形钢管混凝土确定,即将 T 形钢管混凝土等效为相同面积的矩形钢管混凝土来计算,对于多室截面,各室混凝土按照对应的小矩形钢管混凝土确定^[1]。受拉的本构模型^[11]根据提供的表达式确定。钢管采用壳单元 S4R 模拟,为了接近试验试件情况,模型中也建立了脚肋,脚肋、核心混凝土和盖板均采用实体单元 C3D8R 模拟。钢管和混凝土之间的接触关系选用面与面接触,钢管与端板之间、加劲肋与端板之间采用壳与实体单元耦合,将加劲肋嵌入整个模型中。顶部设置一个参考点作为加载点,将此加载点与端板进行耦合。异形柱构件底部固端约束,上部自由,约束面外的转动和位移,仅考虑平面内压弯性能。柱事先旋转至预定的加载角度 θ 。在 ABAQUS 中设置两个分析步,在第一个分析步中施加轴力;第二个分

析步在柱顶加载点进行水平方向的位移加载。建立的异形钢管混凝土柱有限元模型如图 1 所示。

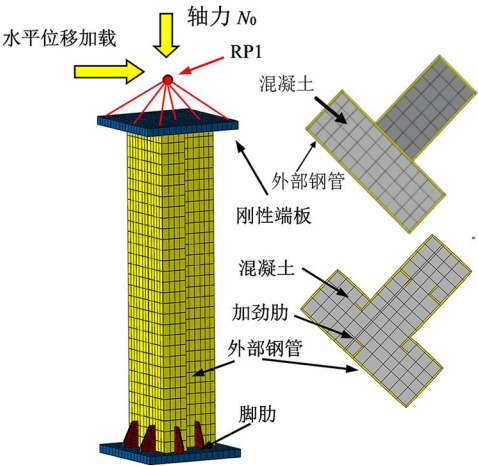


图 1 T 形钢管混凝土模型

Fig. 1 T-shaped concrete-filled steel tube model

1.2 T 形钢管混凝土柱模型验证

1.2.1 试件的 $P-\Delta$ 骨架线验证

以往的研究结果表明^[12],钢管混凝土柱往复荷载作用下的 $P-\Delta$ 骨架曲线和单调作用下的曲线基本一致。Zheng 等^[9]对 14 个 T 形钢管混凝土柱的滞回性能进行了试验研究,考察的主要参数是加载角度 (0° 、 45° 和 90°)、轴压比 (0、0.25 和 0.5)、混凝土立方体抗压强度 (54.1 和 76.2 MPa)、截面形式 (无肋、设肋、多室)。结果表明,对于轴压比小于 0.5 的试件,滞回曲线一般较丰满,位移延性系数超过 3。在 45° 和 90° 的试件具有接近的包络曲线,而在 0° 的试件表现出稍低的横向极限强度和更好的延性。本文采用上述模型分别对设肋、不设肋以及多室试件的 $P-\Delta$ 骨架线进行计算,结果如图 2 所示,可见,ABAQUS 计算结果与试验结果吻合较好。

1.2.2 试件的破坏形态验证

如图 3、4 所示,从试件破坏形态来看,不论是设肋试件还是多室试件,钢材破坏基本处于同一高度,距离试件端板高度为 120 mm 的位置,钢管鼓曲位置区域混凝土被压碎,并有部分混凝土脱落,远离钢管鼓曲区域的混凝土未被压碎。从 ABAQUS 模拟的结果与试验结果对比来看,钢管鼓曲位置和混凝土压碎的位置均与试验结果吻合。

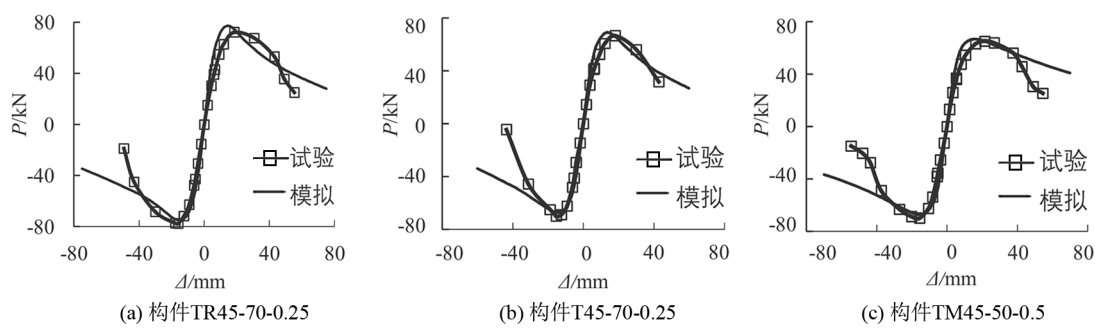


图 2 $P-\Delta$ 试验结果与 ABAQUS 计算结果对比

Fig. 2 $P-\Delta$ test results compared with the results of ABAQUS

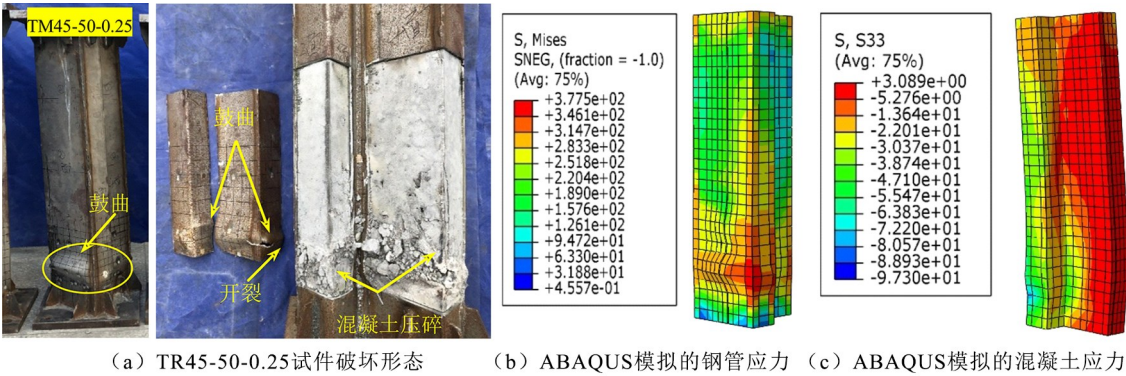


图 3 TR45-50-0.25 构件破坏形态对比

Fig. 3 Comparison of failure modes of component TR45-50-0.25

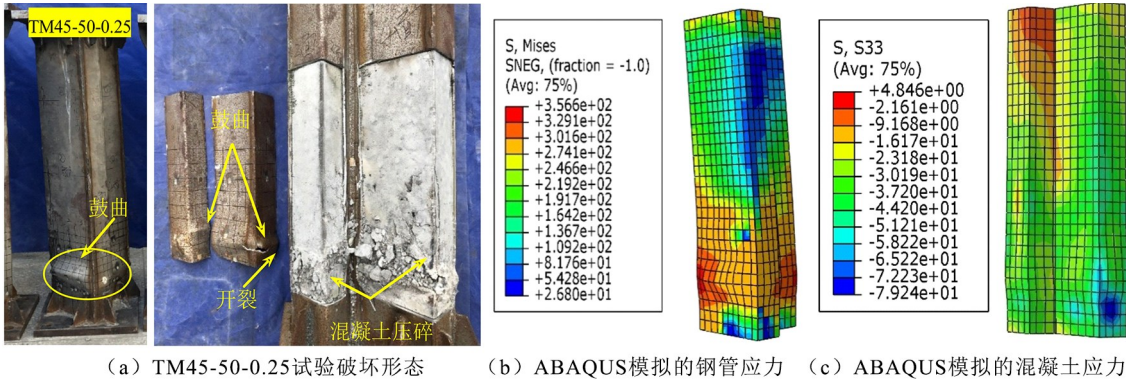


图 4 TM45-50-0.25 构件破坏形态对比

Fig. 4 Comparison of failure modes of component TM45-50-0.25

2 参数分析

选取典型算例:截面尺寸肢长 $D = 500\text{ mm}$,肢宽 $B = 200\text{ mm}$,长厚比 $D/t = 60$,钢管屈服强度 $f_y = 400\text{ MPa}$,钢管极限强度 $f_y = 540\text{ MPa}$,混凝土抗压强度 $f_c' = 40\text{ MPa}$,混凝土极限压应变为 0.003 3 ,界面摩擦系数取 0.6 。轴压比 $n = 0.3$,长细比 $\lambda = 40$,加载角度 $\theta = 45^\circ$,加劲肋尺寸为 $70\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。参数分析时,保持其他条件不变,只

变化一个参数进行分析。

2.1 钢材屈服强度 f_y

图 5 给出了钢材屈服强度 f_y 对 T 形钢管混凝土柱 $P-\Delta$ 骨架线的影响规律,可见, f_y 越大,核心混凝土受到钢管的约束作用越强,在承担荷载方面起到的作用越大,构件的承载力越大,例如,设肋 T 形构件 $f_y = 600\text{ MPa}$ 比 $f_y = 400\text{ MPa}$ 的正向峰值荷载增长 30.72% ;多室 T 形构件 $f_y = 600\text{ MPa}$ 比 $f_y = 400\text{ MPa}$ 的正向峰值荷载提高 32.99% 。由于钢材

强度提高,使构件进入塑性阶段更迟,到达极限荷载时的位移越大。由于钢材弹性模量基本不受强

度影响,因此不同屈服强度的构件弹性阶段刚度基本相同,整个曲线的形状也基本一致。

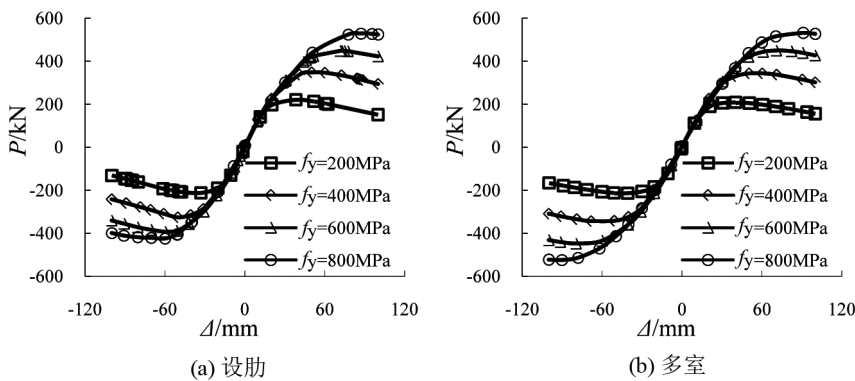


图 5 钢材强度对构件骨架线影响

Fig. 5 Influence of steel strength on envelope curves of members

2.2 核心混凝土强度 f'_c

图 6 给出了核心混凝土强度 f'_c 对 T 形钢管混凝土构件 $P-\Delta$ 骨架线的影响。可见,随着 f'_c 增大,构件所能承受的荷载越高,峰值荷载呈现逐渐增长的趋势,例如,在设肋 T 形构件中 $f'_c = 80$ MPa 和 $f'_c = 100$ MPa 的构件较 $f'_c = 40$ MPa 的构件正向承载力分别提高 14.93% 和 21.17%;多室 T

形构件中 $f'_c = 80$ MPa 和 $f'_c = 100$ MPa 的构件较 $f'_c = 40$ MPa 的构件正向承载力分别提高 11.43% 和 16.16%。混凝土弹性模量随强度增加而提高,随着混凝土强度提高,构件弹性阶段的刚度有所提高。混凝土的脆性性能随混凝土强度提高而显著,因而曲线下降段越陡峭,构件的延性越差。

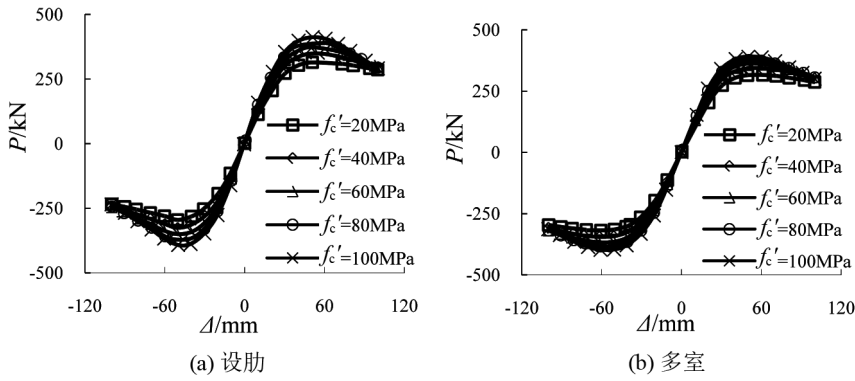


图 6 混凝土强度对构件骨架线影响

Fig. 6 Influence of concrete strength on envelope curves of members

2.3 长厚比 D/t

长厚比 D/t 对 T 形构件 $P-\Delta$ 骨架线的影响显著,如图 7 所示。 D/t 越大,钢管壁厚越薄,对核心混凝土的约束效果越差,受载时钢管局部越容易出现屈曲现象,T 形构件的刚度和承载力逐渐降低。例如,对于设肋 T 形构件 $D/t = 20$ 和 $D/t = 40$ 的正向承载力分别为 $D/t = 60$ 的 2.61 倍和 1.4 倍;而对于多室 T 形构件 $D/t = 20$ 和 $D/t = 40$ 的正向承载力分别为 $D/t = 60$ 的 2.67 倍和 1.4 倍。还可

以看出,随着 D/t 增加,构件极限承载力对应的位移减小,延性变差。

2.4 加载角度 θ

尽管 T 形截面具有非对称性,但沿着 y 轴仍具有对称性,因此只要考察 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围正负向加载即可,例如 45° 和 135° 承载力是一致的,尽管设肋情况下上部加劲肋有朝向,但计算结果表明其影响非常小。图 8 所示为加载角度 θ 对 T 形钢管混凝土构件 $P-\Delta$ 骨架线的影响。可见,当加载角

为 0°时,其承载力最低,而且由于对称性正负承载力相等。其他情况下,正负向承载力产生差别,但差异在 6%以内。在 67.5°负向加载时,T 形钢

管混凝土构件的承载力最大,比 0°方向大 13%左右,总体上看,在 45°~90°间承载力差别不是很大,这主要是和截面抗弯刚度有关。

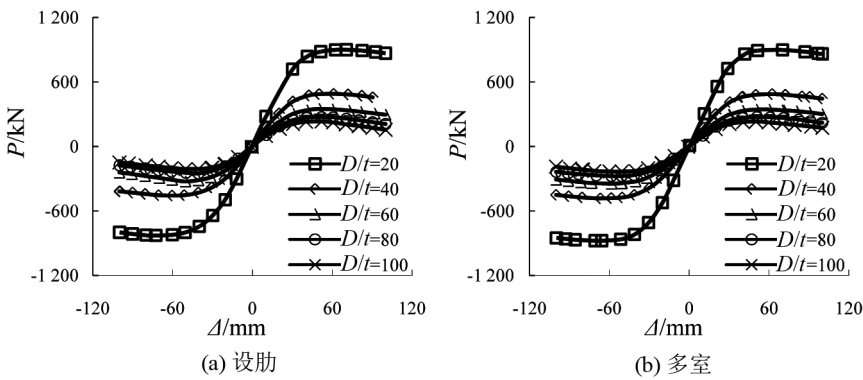


图 7 长厚比对构件骨架线影响

Fig. 7 Influence of length-thickness ratio on envelope curves of members

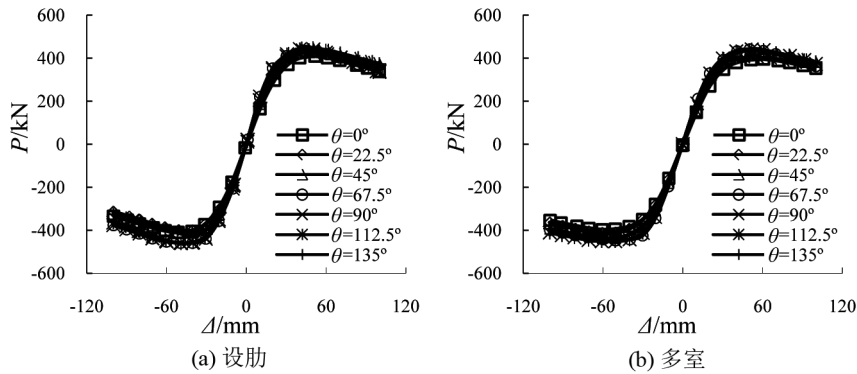


图 8 加载角对构件骨架线影响

Fig.8 Influence of loading angle on envelope curves of member

3 承载力设计方法

3.1 承载力简化公式

为了便于 T 形钢管混凝土压弯构件的设计,需要提出承载力简化计算公式。传统钢管混凝土抗弯承载力 M_u 通常采用下式确定^[12]:

$$M_u = \gamma_m \cdot W_{scm} \cdot f_{scy} \tag{1}$$

式中, γ_m 为抗弯承载力系数; W_{scm} 为构件截面抗弯模量; f_{scy} 为钢管混凝土轴心受压强度指标。对于设肋截面, $f_{scy} = (1.18 + 0.85\xi) \cdot f_{ck}$, 其中约束效应系数 $\xi = A_s f_y / (A_c f_{ck})$, A_s 和 A_c 分别为钢材与混凝土的截面面积。多室截面 f_{scy} 计算可由各个矩形钢管混凝土的承载力叠加后减去增加钢板的承载力, 如图 9 所示。

$f_{scy} = (A_{sc1} \times f_{scy1} + 2 \times A_{sc2} \times f_{scy2} - 2 \times B \times t \times f_y) / A_{sc}$, A_{sc1} 和 f_{scy1} 代表矩形 1 钢管混凝土的组合截面积和轴心受压强度指标, A_{sc2} 和 f_{scy2} 代表矩形

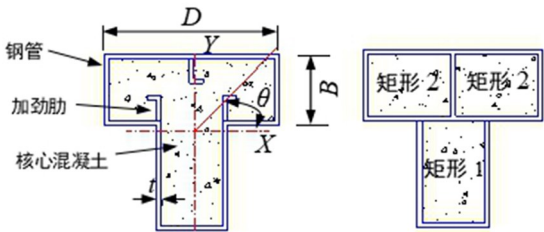


图 9 T 形构件截面图

Fig. 9 Cross-section of T-shaped member

2 的相关指标。

$$W_{scm} = I_{sc} / y \tag{2}$$

式中, I_{sc} 为组合截面惯性矩; y 为截面形心轴到受拉边缘的距离。

γ_m 计算如下^[13]:

设肋 T 形构件:

$$\gamma_m = 1.685 + 0.778 \ln(\xi + 0.1) \text{ (正向)}; \tag{3}$$

$\gamma_m = 1.716 + 0.792\ln(\xi + 0.1)$ (负向); (4)
多室 T 形构件:

$\gamma_m = 1.404 + 0.648\ln(\xi + 0.1)$ (正向); (5)

$\gamma_m = 1.435 + 0.662\ln(\xi + 0.1)$ (负向)。 (6)

和传统钢管混凝土轴压短柱一致, T 形钢管混凝土柱轴压强度承载力 $N_u = A_{sc} \cdot f_{scy}$ 。

稳定系数 φ 计算如下^[12]:

$$\varphi = \begin{cases} 1 (\lambda \leq \lambda_0) \\ a \cdot \lambda^2 + b \cdot \lambda + c (\lambda_0 < \lambda \leq \lambda_p) \\ d / (\lambda + 35)^2 (\lambda > \lambda_p) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $d = \left[13\,500 + 4\,810\ln\left(\frac{235}{f_y}\right) \right] \left(\frac{25}{f_{ck} + 5} \right)^{0.3} \left(\frac{\alpha}{0.1} \right)^{0.05}$;

$$a = \frac{1 + (35 + 2\lambda_p - \lambda_0)e}{(\lambda_p - \lambda_0)^2}; b = e - 2a_p;$$

$$c = 1 - a \cdot \lambda_0^2 - b \cdot \lambda_0; \alpha = \frac{A_s}{A_c}.$$

λ_p 和 λ_0 分别为构件发生弹性和弹塑性失稳的界限长细比: $\lambda_p = 1\,811 / \sqrt{f_y}$;

$$\lambda_0 = \pi / \sqrt{(220\xi + 450) / [(0.85\xi + 1.18) \cdot f_{ck}]}$$

压弯构件平衡点的参数按下式计算:

$$\zeta_0 = 1 + 0.14\xi^{-1.3}; \eta_0 = 0.1 + 0.13\xi^{-0.81};$$

$$f_{scp} = [0.263 \cdot (f_y/235) + 0.365 \cdot (30/f_{cu}) + 0.104] \cdot f_{scy};$$

$$\varepsilon_{scp} = 3.01 \times 10^6 f_y; E_{sc} = f_{scp} / \varepsilon_{scp}$$

考虑长细比后, 异形钢管混凝土压弯构件 $N/N_u - M/M_u$ 相关方程为:

$$\frac{1}{\varphi} \frac{N}{N_u} + \frac{a}{d} \frac{M}{M_u} \beta_m = 1 \quad \frac{N}{N_u} \geq 2\varphi^3 \cdot \eta_0 \quad (8)$$

$$-b \left(\frac{N}{N_u} \right)^2 - c \cdot \left(\frac{N}{N_u} \right) + \frac{1}{d} \frac{M}{M_u} \beta_m = 1 \quad N/N_u < 2\varphi^3 \cdot \eta_0 \quad (9)$$

$$a = 1 - 2\varphi^2 \cdot \eta_0; b = \frac{1 - \zeta_0}{\varphi^3 \eta_0^2}; c = \frac{2(\zeta_0 - 1)}{\eta_0};$$

$$d = 1 - 0.25 \left(\frac{N}{N_E} \right); N_E = \pi^2 \cdot E_{sc} \cdot A_{sc} / \lambda^2.$$

β_m 为弯矩等效系数, 按国家规范《钢结构设计规范》(GB50017-2017)^[14] 的规定取值。

基于参数分析, 考虑轴压比影响, 通过回归后获得 T 形钢管混凝土柱顶水平承载力 P_y 计算公式。

设肋:

$$\text{正向: } P_y = (3.85n^2 - 1.082n + 1) \cdot M_y / L \quad 0 \leq n \leq 0.6 \quad (10a)$$

$$P_y = (19.9n - 10.4) \cdot M_y / L \quad 0.6 < n \leq 1 \quad (10b)$$

$$\text{负向: } P_y = (4.544n^2 - 1.605n + 1) \cdot M_y / L \quad 0 \leq n \leq 0.6 \quad (11a)$$

$$P_y = (12.51n - 11.6) \cdot M_y / L \quad 0.6 < n \leq 1 \quad (11b)$$

多室:

$$\text{正向: } P_y = (3n^2 - 0.776n + 1) \cdot M_y / L \quad 0 \leq n \leq 0.7 \quad (12a)$$

$$P_y = (25.81n - 16.22) \cdot M_y / L \quad 0.7 < n \leq 1 \quad (12b)$$

$$\text{负向: } P_y = (2.24n^2 - 0.75n + 1) \cdot M_y / L \quad 0 \leq n \leq 0.6 \quad (13a)$$

$$P_y = (18.7n - 11.6) \cdot M_y / L \quad 0.6 < n \leq 1 \quad (13b)$$

3.2 公式验证

图 10 和图 11 分别给出了有限元计算值 P_{FE} 与简化计算值 P_{uc} 、试验值 P_{ue} 与简化计算值 P_{uc} 的对比情况, 可见, 两者对比的差值均在 10% 以内, 设肋构件 P_{FE}/P_{uc} 的均值和标准差分别为 1.004、0.045, P_{ue}/P_{uc} 的均值和标准差分别为 0.993、0.066; 多室构件 P_{FE}/P_{uc} 的均值和标准差分别为 0.995、0.038, P_{ue}/P_{uc} 的均值和标准差分别为 1.028、0.073, 可见, 简化计算结果与有限元及试验结果吻合较好。

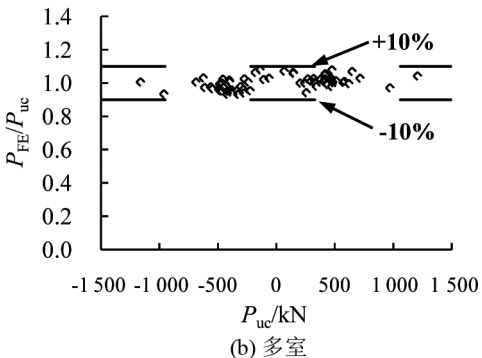
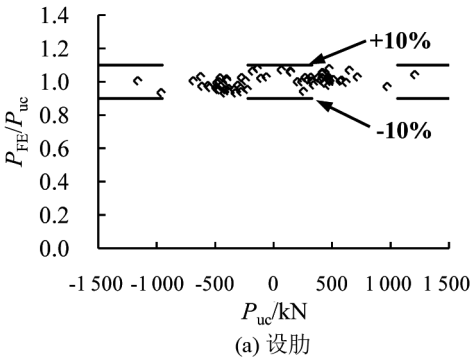


图 10 简化计算承载力 P_{uc} 与有限元计算 P_{FE} 对比

Fig.10 Comparison between simplified calculation of bearing capacity P_{uc} and finite element calculation of P_{FE}

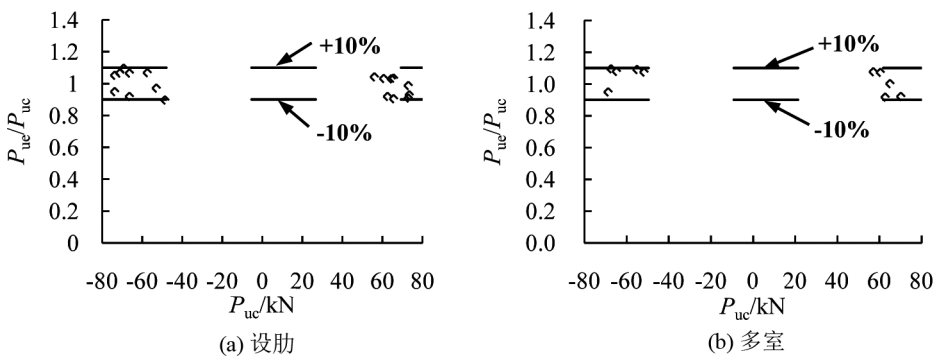


图 11 简化计算承载力 P_{uc} 与试验 P_{ue} 对比

Fig.11 Comparison between simplified calculation of bearing capacity P_{uc} and test P_{FE}

4 结论

- 1) 采用 ABAQUS 建立了不同加载角情况下带肋和多室 T 形钢管混凝土压弯构件力学性能的有限元模型,模拟的结果与试验结果吻合较好。
- 2) 加载角为 0° 时, T 形钢管混凝土构件的承载力最低,在 67.5° 负向加载时,构件的承载力最大,可比 0° 加载角构件大 13% 左右,在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 间承载力总体上差别不大。

- 3) 随着钢管屈服强度、混凝土抗压强度、钢管长厚比、带肋和多室 T 形钢管混凝土构件在斜向加载的承载力增加。钢材屈服强度和截面长宽比对构件初始刚度的影响很小。
- 4) 基于传统钢管混凝土压弯构件相关曲线设计方法,提出了适用于带肋和多室 T 形钢管混凝土构件在不同加载角度情况下的简化设计公式,简化计算结果与有限元结果及试验结果均较为吻合,可为研究人员和工程设计人员提供参考。

参考文献:

[1] ZHENG Y, ZENG S. Design of L-shaped and T-shaped concrete-filled steel tubular stub columns under axial compression [J]. Engineering Structures, 2020, 207: 110262.

[2] 黄宏, 查宝军, 杨超, 等. 带肋 T 形钢管混凝土短柱力学性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(5): 132-137.

[3] 曹兵, 戴邵斌, 黄俊. 改进的组合式 T 形钢管混凝土柱轴压性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11): 36-43.

[4] 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, (6): 14-21.

[5] XU L, DU G, WEN F, 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(6): 14-21.

[6] LIU X, XU C, LIU J, et al. Research on special-shaped concrete-filled steel tubular columns under axial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 147: 203-223.

[7] 屠永清, 严敏杰, 刘林林. 多室式钢管混凝土 T 形构件纯弯力学性能研究 [J]. 工程力学, 2012, 29(9): 185-192.

[8] TU Y, SHEN Y, ZENG Y, et al. Hysteretic behavior of multi-cell T-shaped concrete-filled steel tubular columns [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 85: 106-116.

[9] ZHENG Y, LAI P. Experimental behavior of T-shaped concrete-filled steel tubular columns under diagonal cyclic loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 169: 106037.

[10] TAO Z, WANG Z, YU Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89: 121-131.

[11] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.

[12] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践 [M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2016.

[13] 赖鹏松. 斜向受力钢管混凝土异形柱滞回性能研究 [D]. 福州: 福建工程学院, 2019.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB50017-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

(责任编辑: 陈 雯)