

空心圆钢管混凝土轴压短柱有限元分析

杨志坚¹, 韩嘉明¹, 杨军彩², 李帼昌¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省国际工程咨询中心有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要 通过研究找到最适合空心钢管混凝土轴压短柱的混凝土本构关系模型。方法 选取6种常用的混凝土本构关系模型, 结合已有试验结果, 应用有限元软件 ABAQUS 建立模型进行验证, 找出适合的混凝土本构关系。改变钢材强度、钢管壁厚、混凝土强度、空心率等参数, 研究不同参数对混凝土力学性能影响。结果 随钢管屈服强度、钢管壁厚和空心率的增大, 混凝土分担的荷载减小; 随混凝土强度的提高, 混凝土分担的荷载增加。对于空心钢管混凝土轴压短柱, $\mu_c < 0.24$ 时, 其混凝土本构关系可采用改进后的模型 MC7; $0.24 \leq \mu_c \leq 0.35$ 时, 可采用模型 MC6; $\mu_c > 0.35$ 时, 可采用模型 MC1 或 MC2。结论 采用改进后混凝土本构关系的空心钢管混凝土轴压短柱有限元分析结果与试验结果吻合良好。

关键词 荷载分担; 本构关系; 空心率; 屈服强度; 钢管壁厚

中图分类号 TU391 文献标志码 A

Finite Element Analysis of Hollow Circular Concrete Filled Steel Tubular Short Columns under Axial Compression

YANG Zhijian¹, HAN Jiaming¹, YANG Juncai², LI Guochang¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning International Engineering Consulting Center Co. Ltd., Shenyang, China, 110000)

Abstract: Through research, the most suitable constitutive model of concrete for hollow concrete filled steel tubular (CFST) short columns under axial compression is found. Six commonly used constitutive models of concrete are selected, combined with the existing test results, the model is established by using the finite element software ABAQUS to verify, and the suitable constitutive relationship of concrete is found. The parameters such as steel strength, steel tube wall thickness, concrete strength and hollow rate are changed. The influence of different parameters on the mechanical properties of concrete are studied. With the increase of steel pipe yield strength, steel

收稿日期: 2019-10-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51808353); 辽宁省高等学校创新人才项目(LR201707); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC180270)

作者简介: 杨志坚(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构工程方面研究。

pipe wall thickness and hollow ratio, the load shared by concrete decreases; with the increase of concrete strength, the load shared by concrete increases. For the CFST short column under axial compression, when $\mu_e < 0.24$, model MC7 can be used as concrete constitutive relationship; when $0.24 \leq \mu_e \leq 0.35$, the model MC6 can be used. When $\mu_e > 0.35$, model MC1 or MC2 can be used. The finite element analysis results of CFST short columns with improved concrete constitutive relation are in good agreement with the test results.

Key words: load-sharing; constitutive relation; hollow ratio; yield strength; steel tube wall thickness

钢管混凝土结构因其延性好、承载力高而广泛应用于建筑、桥梁等结构中。其中空心钢管混凝土结构作为钢管混凝土的重要结构形式之一,广泛应用于电力系统中。空心钢管混凝土,又称离心钢管混凝土,由工厂离心成型制成,优点是自重轻、节省材料、易安装、质量有保证等,相比于钢筋混凝土柱,应用于电力结构中的空心钢管混凝土柱有效减少了裂缝的产生,并具有较好的耐久性。

近年来,国内学者对空心钢管混凝土结构进行了广泛研究。余敏等^[1]根据弹性力学理论,提出了钢管混凝土圆柱复合抗压强度的统一计算公式。蓝晨^[2]将空心钢管混凝土柱放入框架结构中,研究了其抗震性能。王宏伟等^[3]进行了空心钢管混凝土构件的滞回试验,研究了参数变化对构件变形和延性的影响。余敏等^[4]提出了可同时适用圆形、多边形截面,实心或空心的钢管混凝土柱的抗火性能计算方法。张振威等^[5]研究了空心钢管混凝土轴压短柱承载力计算公式适用情况,经已有试验结果验证,得出了最为适用的承载力计算公式。Zhao Y G 等^[6]提出一种混凝土强度约束效应的新约束系数计算方法,并由此提出新的强度设计公式来估算圆空心钢管混凝土轴压短柱的抗压强度。

从已有研究中可发现,空心钢管混凝土承载力较低,很难从构件参数和有限元分析上判断其为何种破坏形式。基于此,笔者结合已有试验结果选取6种常见于空心钢管混凝土结构的混凝土本构关系进行验证,得到较为适合空心钢管混凝土轴压短柱有限元分析的混凝土本构关系模型。利用新的混凝土本构关系建

立15个有限元模型,分析钢材强度、钢管壁厚、混凝土强度、空心率等参数对构件承载力、延性、混凝土分担荷载等力学性能的影响。通过对构件参数分析,区分空心钢管混凝土轴压短柱的不同破坏形态,得出判定计算式,进一步探究空心钢管混凝土轴压短柱的破坏规律。

1 有限元模型建立

空心圆钢管混凝土有限元模型建立过程见图1。模型中钢材、混凝土和端板均采用三维实体单元(C3D8R)。钢材与混凝土切线方向库伦摩擦,摩擦系数0.6;法线方向硬接触。端板与混凝土硬接触,端板与钢管绑定约束,端板弹性模量设置为无穷大,泊松比设为0。模型中钢材采用五折线模型^[7],混凝土受拉部分采用断裂能开裂应力的形式表达,受压部分选取混凝土本构关系模型。

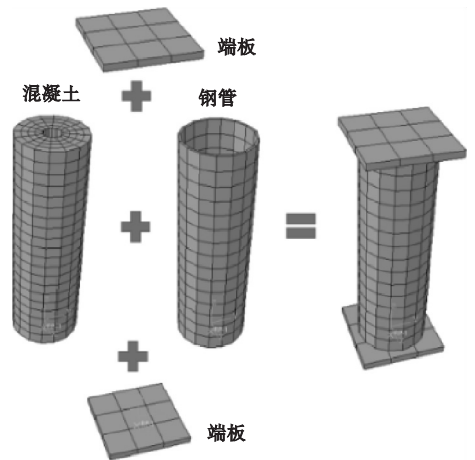


图1 模型建立

Fig. 1 Model establishment

1.1 混凝土本构关系模型1(MC1)

模型1(MC1)采用文献[8]建议的模

型,表达式如下。

上升段:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{01}, \\ \sigma_1 = f_c \left[2 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{01}} - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{01}} \right)^2 \right]. \end{cases} \quad (1)$$

下降段:

$$\begin{cases} \varepsilon_{01} < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cu1}, \\ \sigma_1 = f_c \left[1 - 0.15 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{01}}{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{01}} \right]. \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_c 为棱柱体极限抗压强度; ε_{01} 为相应于峰值应力时的应变,取 $\varepsilon_{01} = 0.002$; ε_{cu1} 为极限压应变,取 $\varepsilon_{cu1} = 0.0038$ 。

1.2 混凝土本构关系模型 2 (MC2)

模型 2 (MC2) 上升段采用文献 [9] 中提出的混凝土受压应力-应变关系曲线,表达式如下。

当 $\varepsilon_2 \leq \varepsilon_{02}$ 时:

$$\sigma_2 = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{02}} \right)^n \right]. \quad (3)$$

下降段为斜直线,表达式与模型 1 中下降段表达式相同。

1.3 混凝土本构关系模型 3 (MC3)

模型 3 (MC3) 采用文献 [10] 提出的混凝土受压应力-应变关系模型,该模型由混凝土棱柱体受压应力-应变全曲线经数学函数拟合得到,具体表达式如下:

$$y_3 = \begin{cases} \alpha_a x_3 + (3 - 2\alpha_a) x_3^2 + (\alpha_a - 2) x_3^3, & x_3 \leq 1; \\ \frac{x_3}{\alpha_d (x_3 - 1)^2} + x_3, & x_3 > 1. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $y_3 = \sigma_3 / f_c^*$; $x_3 = \varepsilon_3 / \varepsilon_{03}$; $\varepsilon_{c3} = (700 + 172 \sqrt{f_c^*}) \times 10^{-6}$; $\alpha_a = 2.4 - 0.0125 f_c^*$; $\alpha_d = 0.157 f_c^{*0.785} - 0.905$ 。

式中: f_c^* 为混凝土单轴(即轴心)抗压强度,MPa。

1.4 混凝土本构关系模型 4 (MC4)

模型 4 (MC4) 采用文献 [7] 提出的修正了峰值应变和下降段的改进后适用于钢管混

凝土核心混凝土单轴受压应力-应变关系,表达式如下:

$$y_4 = \begin{cases} 2x_4 - x_4^2, & x_4 \leq 1; \\ \frac{x_4}{\beta_{04} (x_4 - 1)^\eta + x_4}, & x_4 > 1. \end{cases} \quad (5)$$

其中: $x_4 = \varepsilon_4 / \varepsilon_{04}$; $y_4 = \sigma_4 / \sigma_{04}$; $\sigma_{04} = f_c'$; $\varepsilon_{04} = \varepsilon_{04} + 800 \zeta^{0.2} \times 10^{-6}$; $\varepsilon_{04} = (1300 + 12.5 f_c') \times 10^{-6}$; $\eta = 2$; $\beta_{04} = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\zeta - 0.5)^7]} f_c'^{0.5} \times 0.5 \geq 0.12$; $\zeta = \alpha f_y / f_{ck} = A_s f_y / A_c f_{ck}$ 。

式中: f_c' 为混凝土圆柱体抗压强度; f_y 为钢材屈服强度; ζ 为套箍系数。

1.5 混凝土本构关系模型 5 (MC5)

模型 5 (MC5) 选自文献 [11] 提出的适用于空心钢管混凝土受压应力-应变关系,以改进后钢管混凝土核心混凝土应力-应变关系为基础,充分考虑空心率对空心构件套箍作用的影响,改进套箍系数,使其更适合有限元软件计算,表达式如下。

$$y_5 = \begin{cases} 2x_5 - x_5^2, & x_5 \leq 1; \\ \frac{x_5}{\beta_1 (x_5 - 1)^\eta + x_5}, & x_5 > 1. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $x_5 = \varepsilon_5 / \varepsilon_p$; $y_5 = \sigma_5 / \sigma_p$; $\sigma_p = f_c'$; $\varepsilon_p = \varepsilon_c + 800 \zeta_m^{0.2} \cdot 10^{-6}$; $\varepsilon_c = (1300 + 12.5 f_c') \times 10^{-6}$; $\eta = 2$; $\beta_1 = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\zeta_m - 0.5)^7]} \times f_c'^{0.5} \times 0.5 \geq 0.12$ 。

其中改进后套箍系数 ζ_m 的计算方式如下:

$$\zeta_m = m \cdot \zeta = m \cdot \frac{A_s f_y}{k \cdot A_c f_{ck}} = m \cdot \alpha \cdot \frac{f_y}{k \cdot f_{ck}}. \quad (7)$$

式中: α 为含钢率; m 为空心钢管混凝土套箍系数修正系数; f_y 为钢材的屈服强度; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; k 为混凝土抗压强度调整系数。

1.6 混凝土本构关系模型 6 (MC6)

模型 6 (MC6) 为文献 [11] 提出的适用于空心钢管混凝土受压应力-应变关系,该模型以韩林海教授提出的实心钢管混凝土单轴应力-应变关系模型为基础,套箍系数改进方

式与 MC5 相同,表达式如下.

当 $x_6 \leq 1$ 时:

$$y_6 = 2x_6 - x_6^2. \quad (8)$$

当 $x_6 > 1$ 时:

$$y_6 = \begin{cases} 1 + q(x_6^{0.1\zeta_m} - 1), & \zeta_m \geq 1.12; \\ \frac{x_6}{\beta(x_6 - 1)^2 + x_6}, & (\zeta_m < 1.12). \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x_6 = \varepsilon_6 / \varepsilon_{06}$; $y_6 = \sigma_6 / \sigma_{06}$;

$$\sigma_{06} = [1 + (-0.054\zeta_m^2 + 0.4\zeta_m) \times (\frac{24}{f'_c})^{0.45}]$$

$$f'_c; \varepsilon_{06} = \varepsilon_{cc} + [1400 + 800(\frac{f'_c}{24} - 1)]\zeta_m^2;$$

$$\varepsilon_{cc} = 1300 + 12.5f'_c; q = \frac{\zeta_m^{0.745}}{2 + \zeta}; \beta_6 = (2.36 \times$$

$$10^{-5})^{[0.25 + (\zeta_m - 0.5)^7]} f'_c \times 3.51 \times 10^{-4}.$$

2 有限元结果分析

采用 6 组混凝土本构关系对文献[15]中试件分别进行有限元分析. 以试件 1A-1 和 Z6-1 为例, 对各混凝土本构关系适用情况进行分析.

图 2 为典型试件 1A-1、Z6-1 实测曲线与有限元曲线对比. 从图中可以看出, 采用 MC1 与 MC2 的有限元曲线全段几乎无差别, 但与实测情况相差较大. 实测与有限元极限承载力相差超过 10%. MC1 和 MC2 有限元分析曲线不能反映实测曲线状态.

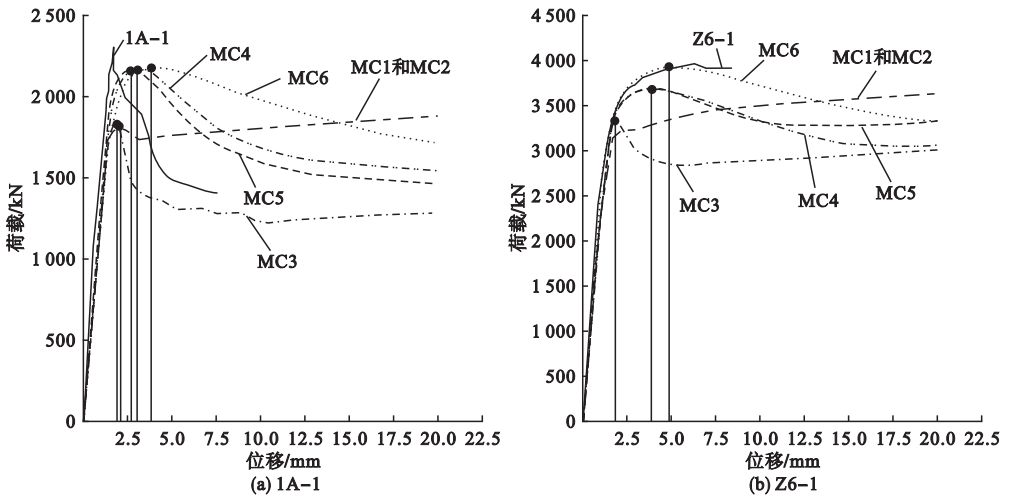


图 2 典型试件实测曲线与有限元曲线对比

Fig. 2 Comparison between the measured curves and the finite element curves of typical specimens

采用 MC3 有限元分析曲线与实测曲线对比可看出, 试件在弹性阶段, 有限元曲线与实测曲线相差较小. 在弹塑性阶段, 有限元分析曲线比实测曲线的刚度更大. 试件 1A-1 下降段有限元曲线虽表现出与实测曲线相似的下陷趋势, 但承载力相差较大. 试件 Z6-1 有限元分析曲线和实测曲线下陷趋势相差较大.

采用 MC4 的试件有限元分析曲线与实测曲线对比可看出, 两者曲线在试件弹性阶段吻合较好, 极限承载力相差较小. 试件 1A-1 实测曲线下陷趋势明显, 而有限元曲线过

极值点后, 下降幅度较小, 随加载进行承载力下降缓慢. 对于试件 Z6-1, 不同于下降缓慢的实测曲线, 有限元曲线表现出明显下降趋势. 可见 MC4 对于试件 1A-1 和 Z6-1 均不适用.

MC4、MC5 与 MC6 有相同上升段公式, 三者上升段曲线十分接近, 都与实测曲线吻合良好. 三者得到的极限承载力相近, 均与实测值吻合良好. MC5 和 MC6 在原理上较 MC4 改进了套箍系数, 由图 2(a) 可见, 试件 1A-1 荷载-位移曲线与 MC5、MC6 对应的有限元分析曲线均不吻合. 这三个模型对应的

有限元曲线过极大值点后下降缓慢,曲线平缓,而试件1A-1实测曲线过极值点后下降迅速,下降幅度极大.由图2(b)可见,试件Z6-1荷载-位移曲线与MC6对应的有限元分析曲线吻合良好.由这两个试件实测与有限元曲线对比情况可知,MC6不能同时适用这两个试件,MC5对这两个试件均不适用.

3 混凝土本构关系修正与选取

图3为文献[15]中不同空心率试件对应荷载-位移曲线.由图可以看出,三种曲线形式分别为屈服后有强化段、曲线达到极值点后承载力随加载进行下降缓慢、曲线达到极值点后随承载力下降迅速且幅度较大.从不同有限元分析结果无法推断构件曲线形态,单从空心率也无法判断.

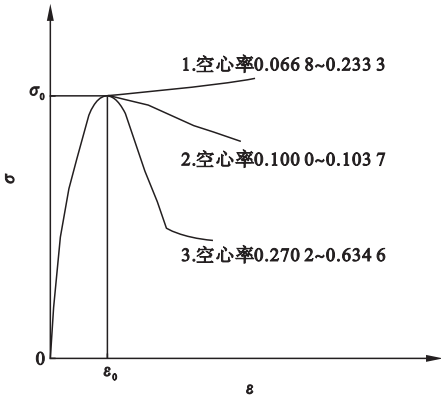


图3 各试验试件曲线形式与空心率关系

Fig. 3 Relationship between curve forms of specimens and hollow ratio

综合考虑试件参数可知,空心钢管混凝土轴压短柱的受力曲线与空心率、套箍系数有关,由此提出空心钢管混凝土轴压短柱受力曲线形态判定系数 μ_e ,计算式如下:

$$\mu_e = \xi \cdot (1 - R_H / (D/2 - t))^2. \quad (10)$$

式中: ξ 为套箍系数; R_H 为空心半径; t 为钢管壁厚; D 为试件外径.

由试件实测结果可知:当 $\mu_e < 0.24$ 时,曲线形式为达到极限承载力后下降迅速;当 $0.24 \leq \mu_e \leq 0.35$ 时,曲线形式为达到极限承载力后下降缓慢;当 $\mu_e > 0.35$ 时,曲线形式

为屈服曲线持续上升.

图4为文献[15]中 $\mu_e > 0.35$ 时试件实测曲线与有限元曲线对比.当 $\mu_e > 0.35$ 时,对应文献[15]中试件H3-a/H3-b、H3-c/H3-d、H3-e/H3-f,这些试件两两一组,每组为同一参数进行对比试验.可见采用MC1和MC2模型的曲线与实测曲线吻合良好.

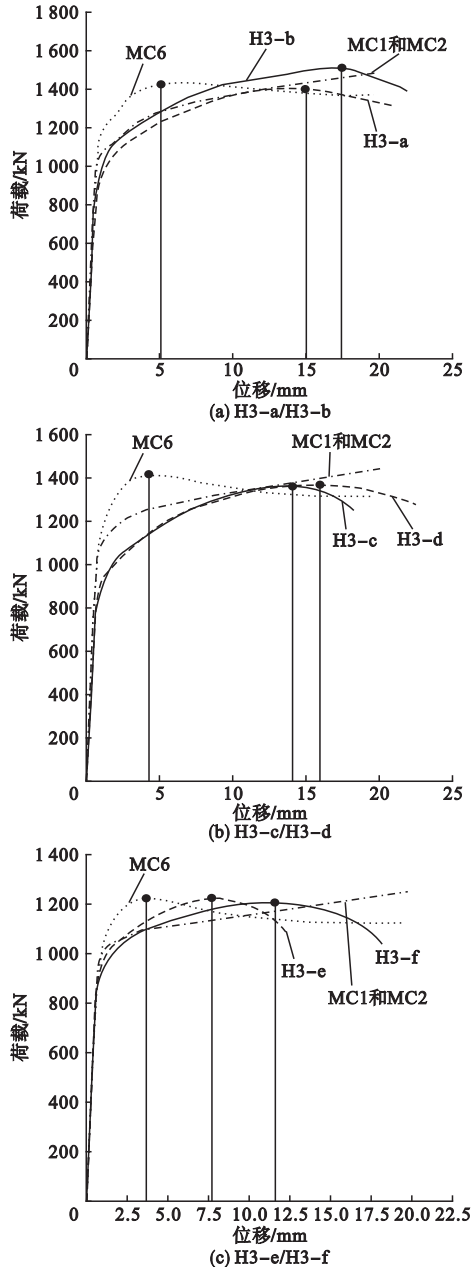


图4 $\mu_e > 0.35$ 的试件实测与有限元曲线对比

Fig. 4 Comparison between measured and finite element curves of specimens when $\mu_e > 0.35$

图5为文献[15]中 $0.24 \leq \mu_e \leq 0.35$ 的试件实测曲线与有限元分析曲线对比. 从图中可以看出, 当 $0.24 \leq \mu_e \leq 0.35$ 时, 对应试件Z6-1、Z6-2实测曲线与采用MC6的有限元曲线吻合良好.

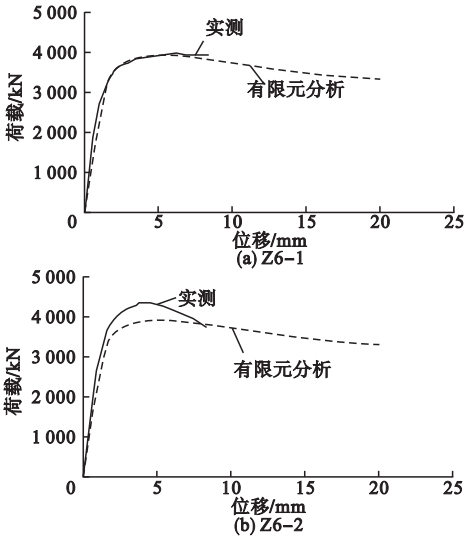


图5 $0.24 \leq \mu_e \leq 0.35$ 的试件实测曲线与有限元曲线对比

Fig. 5 Comparison between the measured curve and the finite element analysis curve of specimens when $0.24 \leq \mu_e \leq 0.35$

对于 $\mu_e < 0.24$ 的试件, 采用MC3的有限元曲线整体趋势与实测曲线最为相似, 但极限承载力相差较大. 由此对MC3进行修正, 提出新的混凝土本构关系模型MC7, 计算式如下:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1; \\ \frac{x}{\beta_2(x-1)^2 + x}, & x > 1. \end{cases} \quad (11)$$

式中: $x = \varepsilon/\varepsilon_c$; $y = \sigma/\sigma_c$; $\sigma_c = f'_c$; $\varepsilon_c = (1300 + 12.5f'_c) \times 10^{-6}$; $\beta_2 = 0.157f'_c{}^{0.795} - 0.905$.

图6为部分试件实测曲线与采用MC7模型的有限元分析曲线对比, 表1为文献[15]中所有满足 $\mu_e < 0.24$ 构件的有限元与实测极限承载力对比. 由图6可见, 有限元分析曲线与实测曲线吻合较好. 表中 N_e 为 $\mu_e < 0.24$ 的试件有限元分析极限承载力; N_{test} 为 $\mu_e < 0.24$ 的试件实测极限承载力. 由表可见, $\mu_e < 0.24$ 对应的试件, 总体上有限元与实测极限承载力吻合良好. 由此可见, $\mu_e < 0.24$ 时, 构件采用MC7较为适用.

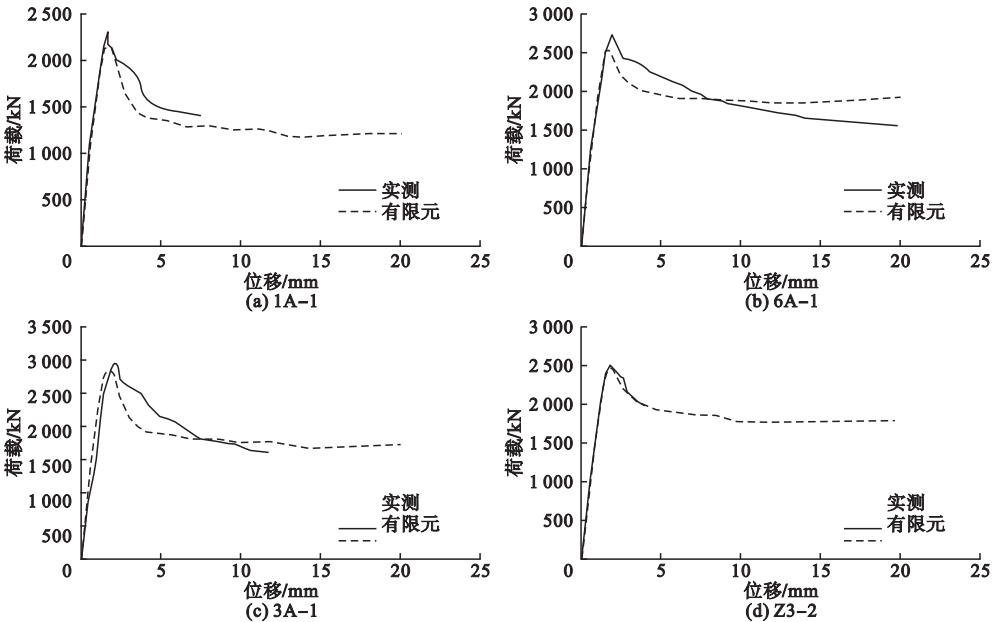


图6 $\mu_e < 0.24$ 的试件中实测曲线与有限元分析曲线对比

Fig. 6 Comparison between measured and finite element analysis curve of specimens when $\mu_e < 0.24$

表1 $\mu_e < 0.24$ 的试件有限元计算结果与实测值对比Table 1 Comparisons between finite element analysis results and measured values when $\mu_e < 0.24$

试件	N_e/kN	$N_{\text{test}}/\text{kN}$	$N_{\text{test}}/N_e - 1$
1A-1	2 152.49	2 190	0.017 1
2A-1	2 643.72	2 900	0.088 4
3A-1	2 863.76	2 930	0.022 6
5A-2	3 439.54	3 100	0.109 5
6A-1	2 524.86	2 750	0.081 9
Z3-1	2 496.92	2 378	0.050 0
Z3-2	2 452.24	2 640	0.071 1
Z3-3	2 519.09	2 500	0.007 6
Z4-1	2 851.09	3 370	0.154 0
Z4-2	2 792.42	3 050	0.084 5
Z5-1	3 144.67	3 673	0.143 8

表2 构件参数

Table 2 Parameters of models

模型	R_H/mm	t/mm	$f_{\text{cu,k}}/\text{MPa}$	f_y/MPa	空心率	μ_e	N_0/kN
HSC-1	90	3	50	345	0.374 8	0.106	2 690
HSC-2	90	4	50	345	0.380 0	0.141	2 984
HSC-3	90	5	50	345	0.385 3	0.175	3 272
HSC-4	90	6	50	345	0.390 6	0.209	3 565
HSC-5	90	3	50	235	0.374 8	0.072	2 350
HSC-6	90	3	50	390	0.374 8	0.120	2 826
HSC-7	90	3	50	420	0.374 8	0.129	2 927
HSC-8	90	3	40	345	0.374 8	0.128	2 366
HSC-9	90	3	60	345	0.374 8	0.089	3 121
HSC-10	90	3	70	345	0.374 8	0.077	3 565
HSC-11	20	3	50	345	0.018 5	0.019	4 079
HSC-12	60	3	50	345	0.166 6	0.334	3 276
HSC-13	120	3	50	345	0.666 4	0.185	1 874
HSC-14	135	3	50	345	0.843 4	0.045	1 376
SSC-15	0	3	50	345	0	0	3 845

注: t 为钢管壁厚; $f_{\text{cu,k}}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值; f_y 为钢管屈服强度; N_0 为构件有限元分析极限承载力; R_H 为空心半径; μ_e 为空心钢管混凝土轴压短柱荷载-位移曲线形态判定系数。

钢材已经屈服; 而 $\mu_e < 0.24$ 的试件达到极限承载力点时, 各材料均达到最大承载力, 过此点后, 试件承载力迅速下降。图 8 为各参数对试件混凝土分担荷载影响情况。由图可见, 随

4 参数分析

采用有限元分析软件 ABAQUS 新建 14 个空心钢管混凝土模型和 1 个实心钢管混凝土模型, 进一步分析各参数对空心钢管混凝土承担荷载能力的影响。模型参数见表 2, 试件长度 L 均为 900 mm, 构件外径 D 为 300 mm。

4.1 各参数对混凝土分担荷载情况分析

图 7 为典型空心试件和实心试件各材料分担荷载情况。由图可以看出, 实心试件在极限承载力点处, 混凝土未达到最大承载力, 而

钢管屈服强度及其壁厚、空心率增大, 混凝土分担荷载比例均降低; 随混凝土强度提高, 混凝土分担荷载比例增加。

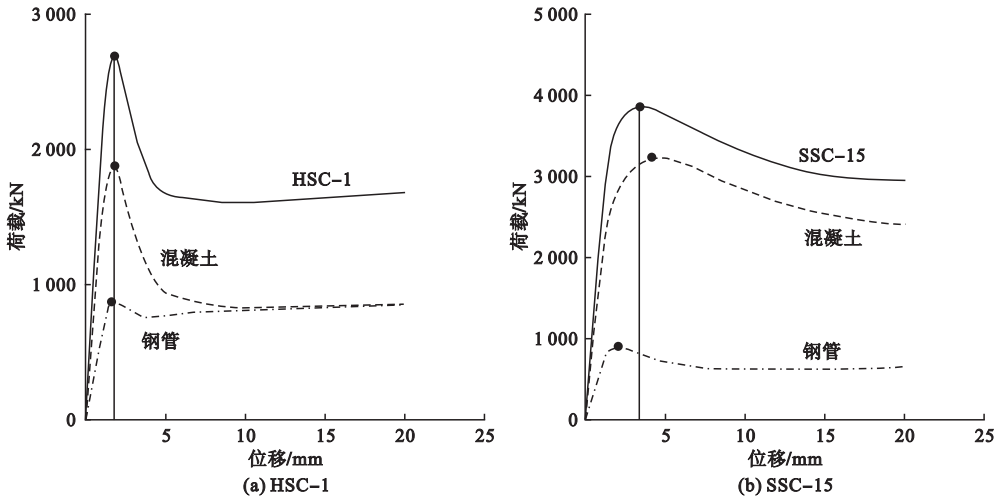


图7 典型试件中各材料分担荷载情况

Fig.7 Load-sharing situation of different material in typical components

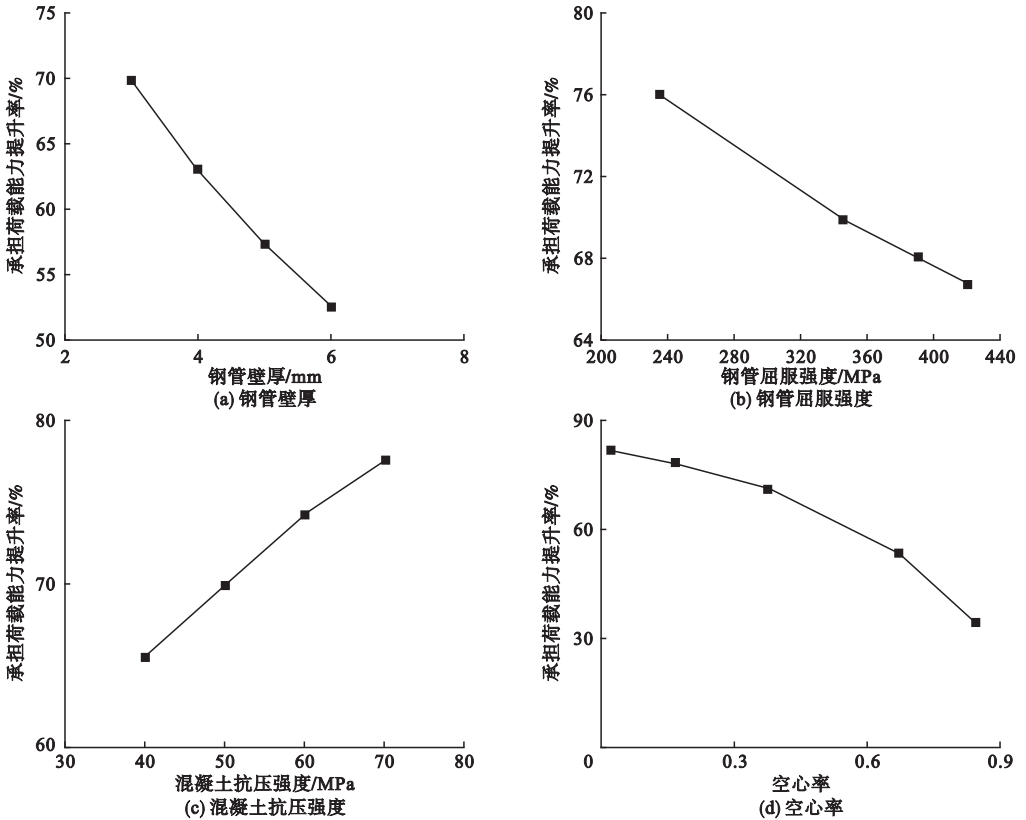


图8 各参数对试件混凝土分担荷载的影响

Fig.8 Effects of different parameters on load-sharing of concrete

4.2 各参数对试件极限承载力、延性的影响

各参数影响下荷载-位移曲线如图9所示.由图9(a)可以看出,随着钢管壁厚增大,试件初始刚度提升.增大钢管壁厚可明显提高空心钢管混凝土轴压试件的极限承载

力.各构件下降趋势基本相似,试件延性无明显变化.

由图9(b)可知,随着钢管屈服强度增大,试件初始刚度提高.增大钢材强度可提高试件极限承载力.钢材屈服强度越小,试件荷

载-位移曲线下降越陡,构件延性越小。

由图9(c)可知,随着混凝土强度提高,试件初始刚度增大.极限承载力明显提高.混凝土抗压强度越高,曲线下降趋势越陡,试件延性越差。

图9(d)为空心率对试件荷载-位移曲线影响情况.其中,试件 HSC-11 在 $0.24 \leq \mu_e \leq$

0.35 时,所以其曲线趋势明显与其他构件不同.随空心率增大,试件初始刚度随空心率增大大幅下降.空心率越大,试件极限承载能力越低.另外,除 HSC-11 下降趋势最缓慢外,其余试件空心率越大,曲线下降越缓慢.试件平缓段承载水平随空心率提高而变差,试件延性变差。

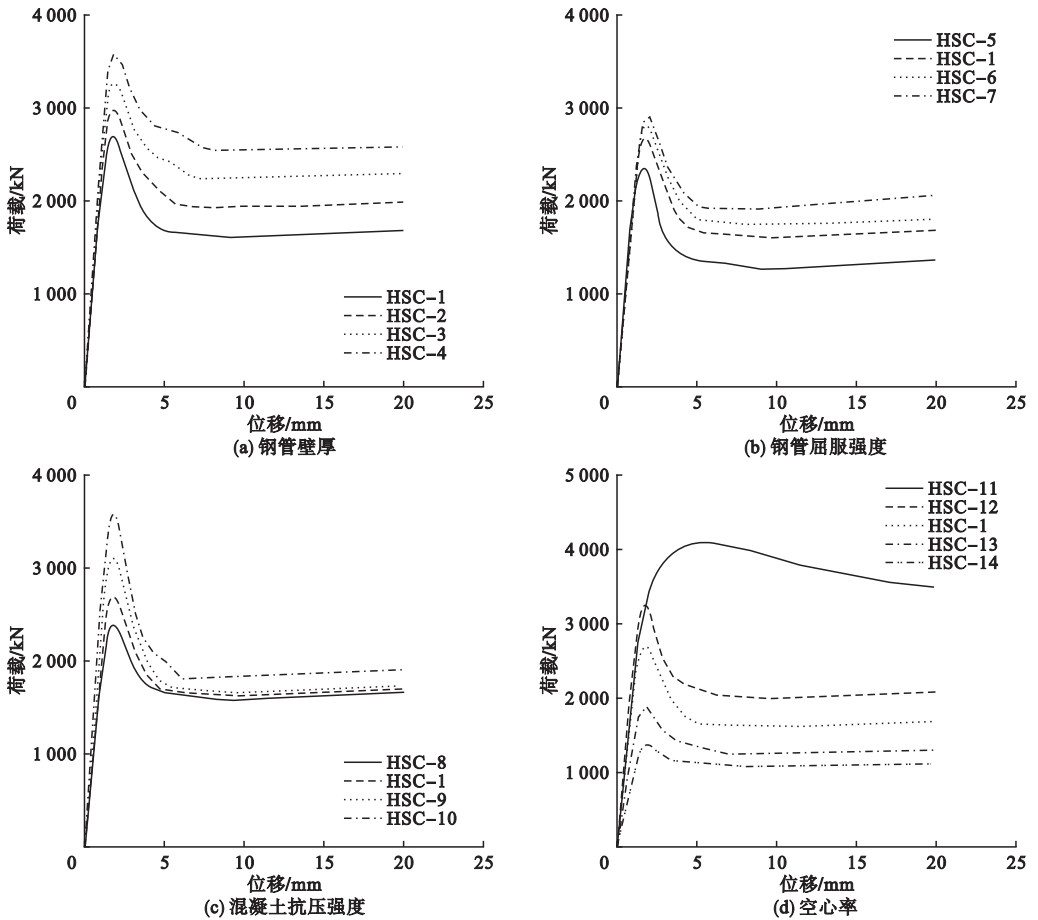


图9 各参数影响下试件荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves influenced by different parameters

5 结论

(1) 当空心钢管混凝土轴压短柱破坏形态判定系数 $\mu_e < 0.24$ 时,试件曲线下降迅速; $0.24 \leq \mu_e \leq 0.35$ 时,试件曲线下降平缓; $\mu_e > 0.35$ 时,试件屈服后曲线持续上升。

(2) 对于空心钢管混凝土轴压短柱, $\mu_e < 0.24$ 时,其混凝土本构关系可采用改进后的模型 MC7; $0.24 \leq \mu_e \leq 0.35$ 时,可采用

模型 MC6; $\mu_e > 0.35$ 时,可采用模型 MC1 或 MC2。

(3) 随钢管屈服强度、钢管壁厚和空心率增大,构件混凝土分担荷载减小;随混凝土强度增大,构件混凝土分担荷载水平提高。

参考文献

- [1] YU M, ZHA X, YE J. A unified formulation for hollow and solid concrete-filled steel tube columns under axial compression [J]. Steel

- construction, 2010, 32(4):1046-1053.
- [2] 蓝晨. 空心钢管混凝土构件在框架结构中的应用及经济性研究[D]. 广州: 广州大学, 2015.
(LAN Chen. The study of hollow concrete-filled steel tubular in economic and structure [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015.)
- [3] 王宏伟, 陈少杰, 周云. 圆空心钢管混凝土短柱在轴向压力作用下的可靠性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6): 98-107.
(WANG Hongwei, CHEN Shaojie, ZHOU Yun. Reliability analysis of circular hollow concrete filled steel tube short column under axial compression [J]. Journal of civil, architectural & environmental engineering, 2018, 40(6): 98-107.)
- [4] YU M, ZHA X X, YE J Q, et al. A unified method for calculating fire resistance of solid and hollow concrete-filled steel tube columns based on average temperature[J]. Engineering structures, 2014, 71: 12-22.
- [5] 张威振, 丁发兴, 方常靖. 空心钢管混凝土轴压短柱力学性能分析[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 136-141.
(ZHANG Weizhen, DING Faxing, FANG Changjing. Analysis of mechanical properties of concrete-filled hollow steel tubular short columns under axial compression [J]. Journal of China & foreign highway, 2018, 38(4): 136-141.)
- [6] ZHAO Y G, YAN X F, LIN S Q. Compressive strength of axially loaded circular hollow centrifugal concrete-filled steel tubular short columns [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 201: 109-117.
- [7] 张锐. 方钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
(ZHANG Rui. Experimental research on seismic behavior of square steel tubular columns filled with recycled aggregate concrete [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.)
- [8] 黎玉婷. 不同截面空实心钢管混凝土轴压和复杂静力下统一理论的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
(LI Yuting. Research on the hollow and solid concrete filled steel tubes with polygonal and circle section under axial compression and complex stress [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2016[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2016.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures; GB50010—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [10] 杨志坚. 预应力高强混凝土管桩抗震性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
(YANG Zhijian. Research on seismic performance of prestressed high strength concrete pile [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.)
- [11] 卢德辉. 圆、方形空心钢管混凝土柱抗震性能及设计方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2012.
(LU Dehui. Research on the seismic behaviors and design method of circular and square H-CFST columns [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012.)
- [12] 陈少杰. 实、空心钢管混凝土短柱在轴向压力作用下的可靠性分析[D]. 广州: 广州大学, 2017.
(CHEN Shaojie. Reliability analysis of solid and hollow CFST short column under axial compression [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.)
- [13] 余敏, 谢佳新, 查晓雄, 等. 实空心钢管混凝土抗剪承载力统一计算方法[J]. 武汉大学学报, 2017, 50(6): 829-835.
(YU Min, XIE Jiaxin, ZHA Xiaoxiong, et al. A unified formula for solid and hollow concrete-filled steel tube columns under shear [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2017, 50(6): 829-835.)
- [14] YU M, XU H M, YE J Q, et al. A unified interaction equation for strength and global stability of solid and hollow concrete-filled steel tube columns under room and elevated temperatures [J]. Journal of constructional steel research, 2018, 148: 304-313.
- [15] 查晓雄. 空心 and 实心钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
(ZHA Xiaoxiong. Solid and hollow concrete filled steel tubular structures [M]. Beijing: China Science Press, 2011.)
- [16] YU M, PEI X, XU L, et al. A unified formula for calculating bending capacity of solid and hollow concrete-filled steel tubes under normal and elevated temperature [J]. Journal of constructional steel research, 2018, 141: 216-225.
- [17] 王宏伟, 徐国林, 钟善桐. 空心率对空心钢管混凝土轴压短柱工作性能及承载力影响的研究[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 112-118.
(WANG Hongwei, XU Guolin, ZHONG Shantong. Study on influence of hollow ratio to bearing capacity of H-CFST [J]. Engineering mechanics, 2007, 24(10): 112-118.)
- [18] WU B, ZHANG Q, CHEN G M. Compressive behavior of thin-walled circular steel tubular columns filled with steel stirrup-reinforced compound concrete [J]. Engineering structures, 2018, 170: 178-195.
- [19] DING F X, ZHANG T, LIU X M, et al. Behavior of steel-reinforced concrete-filled square steel tubular stub columns under axial loading [J]. Thin-walled structure, 2019, 119: 737-748.
- [20] ALIFUJIANG X, MAIMAITIYASEN M, LIU X R, et al. Experimental study on transverse reinforcements of reinforced concrete-filled steel tubular column [J]. Engineering structure, 2019, 199(15): 410-422.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)