

采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土柱的设计方法研究

黄金星

(福建路港(集团)有限公司, 泉州 362000)

摘要: 为研究采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土短柱的轴压性能, 首先建立并验证其有限元模型, 然后利用该模型创建典型算例数据库。基于算例数据库分析径厚比、名义屈服强度、混凝土强度等参数对其轴压性能的影响规律, 并基于该有限元算例数据库验证现有圆钢管混凝土短柱设计方法的有效性。最后建议了采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土短柱的轴压承载力、轴压刚度和峰值应变的简化模型。简化计算结果和有限元计算结果吻合良好。

关键词: 采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土柱; 轴压承载力; 刚度; 峰值应变

中图分类号: TU398. 9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)02-0050-08

Design method of concrete-filled circular stainless steel tubular columns using ferritic stainless steel

HUNAG Jinxing

(Fujian Lugang (Group) Co. Ltd., Quanzhou 362000, China)

Abstract: To study the axial compressive behaviour of the concrete-filled circular stainless steel tubular stub columns using ferritic stainless steel, its finite element model was first of all established and verified. The model was then used to create a database of typical samples. Based on the samples database, the influences of parameters such as the diameter-thickness ratio, nominal yield strength and concrete strength on its axial compressive behaviour were analyzed. And the validity of existing design approaches for the concrete-filled circular steel tubular stub column were verified using the sample database. Finally, simplified models of the axial compressive bearing capacity, axial compressive stiffness and peak strain were recommended for the concrete-filled circular stainless steel tubular stub columns using ferritic stainless steel. The results obtained by using the simplified models match well with the finite element results.

Key words: concrete-filled circular stainless steel tubular columns using ferritic stainless steel; axial compressive bearing capacity; stiffness; peak strain

不锈钢管混凝土柱具有耐久性好、强度高、抗震性能好、施工效率高等优点, 因此被应用于新加坡双螺旋桥、香港昂船洲大桥和美国纽约赫斯特大厦等实际工程中。和奥氏体不锈钢或双相不锈钢相比, 铁素体

收稿日期: 2023-12-07

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2021J01603); 泉州市科技计划项目(2021C015R)

作者简介: 黄金星(1966-), 男, 福建南安人。高级工程师, 主要从事钢筋混凝土和组合结构方面的研究。

E-mail: 15359987776@fjlg.cn.

不锈钢具有较高的经济性,原因是铁素体不锈钢不含镍或镍含量较低。因此采用铁素体不锈钢的不锈钢管混凝土柱具有更好的经济性。

近年来,研究者对不锈钢管混凝土柱进行了大量的轴压实验^[1-7],以上实验均使用奥氏体不锈钢或双相不锈钢。他们发现和普通钢管混凝土柱相比,不锈钢管混凝土柱具有更高的强度、变形能力和延性。研究发现在圆形不锈钢管混凝土短柱中采用海砂混凝土不会影响钢管约束效果^[6],在圆形不锈钢管混凝土短柱中填充高强混凝土可以有效地提高其承载力,同时该类试件也表现出较高的延性^[7]。采用有限元法研究方形和圆形不锈钢管混凝土短柱的轴压性能,发现初始缺陷和残余应力对其影响较小^[8-9]。采用数值方法研究采用双相不锈钢的方形和 L 形、T 形、十字形等异形截面不锈钢管混凝土短柱的轴压性能,发现该类试件峰值荷载对应的峰值变形随着混凝土强度的增大而减小,十字形截面组合柱的变形能力最好^[10]。

综上,以往的研究主要集中在采用奥氏体或双相不锈钢的不锈钢管混凝土短柱,未见到采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土短柱的相关研究报道。因此,本文首先建立并验证采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土短柱的有限元模型;利用该模型生成参数范围较大的有限元数据库;分析各参数对该类组合柱的轴压承载力、轴压刚度和极限应变的影响规律;提出该类组合柱的轴压承载力、轴压刚度和极限应变的简化计算模型。

1 数值模拟

采用有限元软件 ABAQUS 进行圆形不锈钢管混凝土短柱(图 1)的数值仿真。不锈钢管和核心混凝土分别使用了 S4R 和 C3D8R 单元,单元尺寸为 $D/15$ (D 为圆钢管外径)。

本文采用了文献^[11]建议的约束混凝土受压本构:

$$\frac{\sigma}{f'_c} = \begin{cases} \frac{(E_c \epsilon_{c0}/f'_c) \cdot (\epsilon/\epsilon_{c0}) + B \cdot (\epsilon/\epsilon_{c0})^2}{1 + (E_c \epsilon_{c0}/f'_c - 2) \cdot (\epsilon/\epsilon_{c0}) + (B + 1) \cdot (\epsilon/\epsilon_{c0})^2} & 0 < \epsilon \leq \epsilon_{c0} \\ f'_c & \epsilon_{c0} < \epsilon \leq \epsilon_{cc} \\ f_r + (f'_c - f_r) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\epsilon - \epsilon_{cc}}{\alpha}\right)^\beta\right] & \epsilon_{cc} \leq \epsilon \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 和 ϵ 分别为纵向应变和纵向应力; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; ϵ_{c0} 和 ϵ_{cc} 分别为素混凝土和约束混凝土的峰值应变; f_r 为混凝土剩余强度; E_c 为混凝土弹性模量; α 、 β 和 B 为混凝土参数。以上参数的计算见文献^[11]。

本文采用文献^[12]建议的奥氏体或双相不锈钢本构:

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_s} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{f_y}\right)^n & \sigma \leq f_y \\ 0.002 + \frac{f_y}{E_s} + \frac{\sigma - f_y}{E_y} + \epsilon_u \cdot \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y}\right)^m & f_y < \sigma \leq f_u \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_y 、 E_s 、 f_u 和 ϵ_u 分别为钢材名义屈服强度、弹性模量、极限抗拉强度和极限抗拉应变; m 为钢材参数; n 为应变硬化指数。以上参数的计算见文献^[12]。

式(2)还可用于模拟铁素体不锈钢,但是其 f_y/f_u 和 ϵ_u 值应采用式(3)、式(4)修正^[13]:

$$\frac{f_y}{f_u} = \begin{cases} 0.104 + 360f_y/E_s & 0.00125 \leq f_y/E_s \leq 0.00235 \\ 0.95 & 0.00235 < f_y/E_s \leq 0.00275 \end{cases} \quad (3)$$

$$\epsilon_u = 0.2 - 0.2 \left(\frac{f_y}{f_u}\right)^{5.5} \quad (4)$$

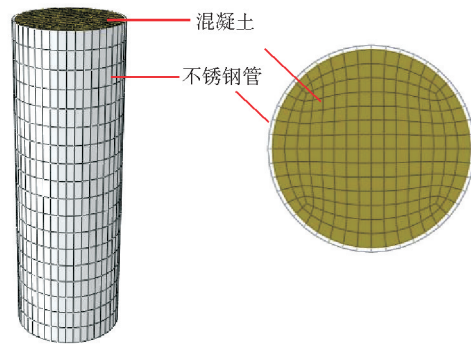


图 1 有限元模型

文献[8-9]的研究表明:钢管初始缺陷和残余应力对圆形不锈钢管混凝土短柱的 $N-\epsilon_1$ (荷载-纵向应变) 曲线的影响较小,因此本文也忽略其影响。文献[14]发现不锈钢弹性模量(E_s)、应变硬化指数(n)和钢材各向异性对内置型钢的圆形不锈钢管混凝土柱的轴压性能影响较小,因此同样忽略以上参数影响,分别取为 $E_s=2\times 10^5$ MPa、 $n=6$ 。钢管和混凝土之间包括法向和切向两对接触,分别采用“HARD”接触和库伦摩擦接触,摩擦系数取为 0.25^[8]。试件的边界条件为:约束试件底端面节点的所有自由度,并约束试件顶端节点除了轴向位移外的所有自由度,轴向荷载施加在上端面。

图 2 给出了不锈钢种类对有限元典型算例 $N-\epsilon_1$ 曲线的影响,图中还给出了该算例的详细参数, t 为钢管厚度, L 为试件长度。可发现使用铁素体不锈钢的组合柱的承载力比使用奥氏体或双相不锈钢的对比构件约低 10%,因此采用奥氏体或双相不锈钢的圆形不锈钢管混凝土短柱的设计方法不能直接用于该类新型组合柱。

文献[1-3]的圆形不锈钢管混凝土短柱的实测 $N-\epsilon_1$ 曲线被用于验证以上有限元模型,图 3 将模拟曲线和测试结果进行比较,可见二者基本吻合,这说明文献[11]建议的本构可用于模拟圆形不锈钢管混凝土短柱中的约束混凝土。图 4 还模拟了文献[15]的实测铁素体不锈钢管柱的 $N-\Delta$ (荷载-轴向位移) 曲线,其中 B 和 H 分别为矩形钢管的宽度和高度,模型中将其一阶屈曲模态作为初始缺陷,最大初始缺陷取为 $0.01H$ 。由图 4 可见铁素体不锈钢管柱的有限元计算 $N-\Delta$ 曲线和实验结果同样吻合良好,这说明文献[13]建议的铁素体不锈钢本构具有良好的模拟效果。因此,使用以上两个材料本构的有限元模型可用于开展采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土短柱的参数分析。

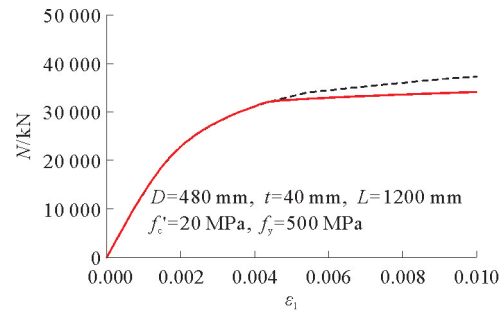


图 2 钢材种类对 $N-\epsilon_1$ 曲线的影响

----- 奥氏体或双相不锈钢; ———— 铁素体不锈钢

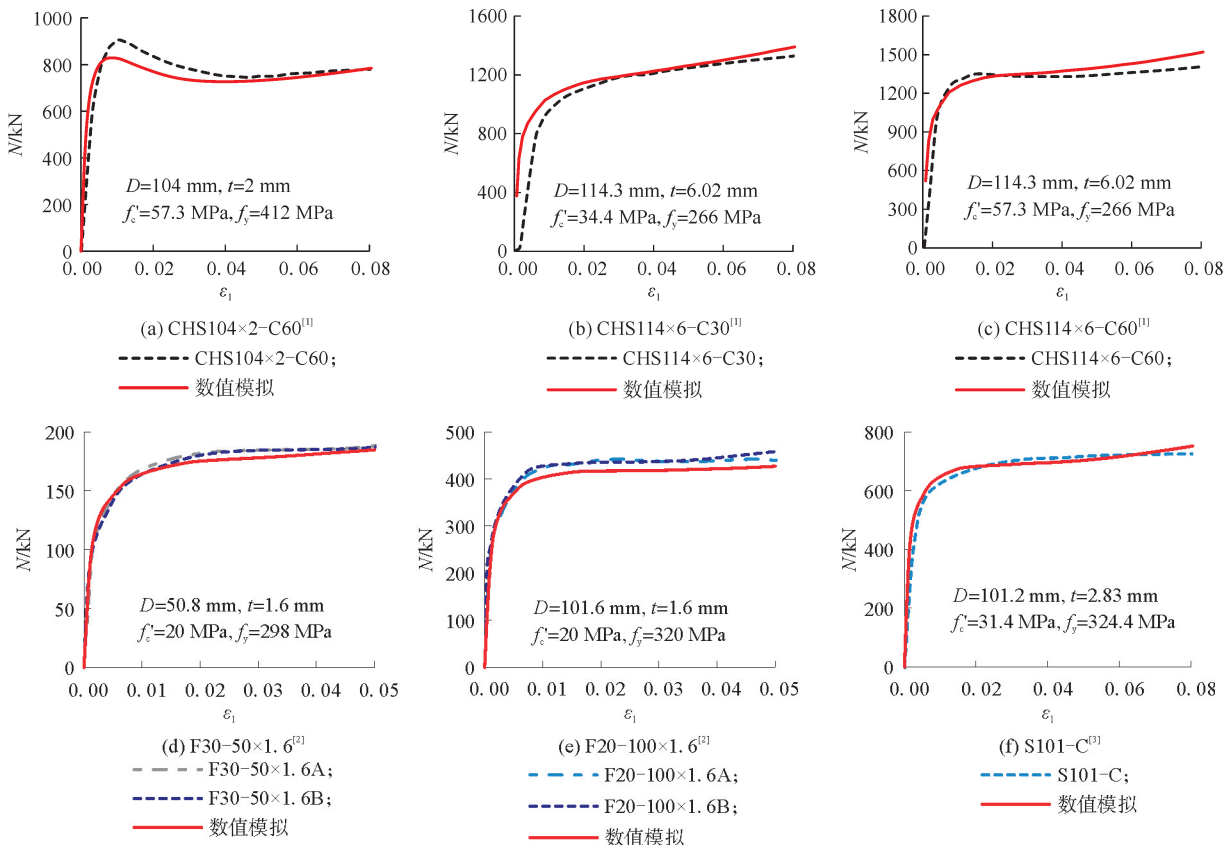


图 3 圆形不锈钢管混凝土短柱的 $N-\epsilon_1$ 曲线

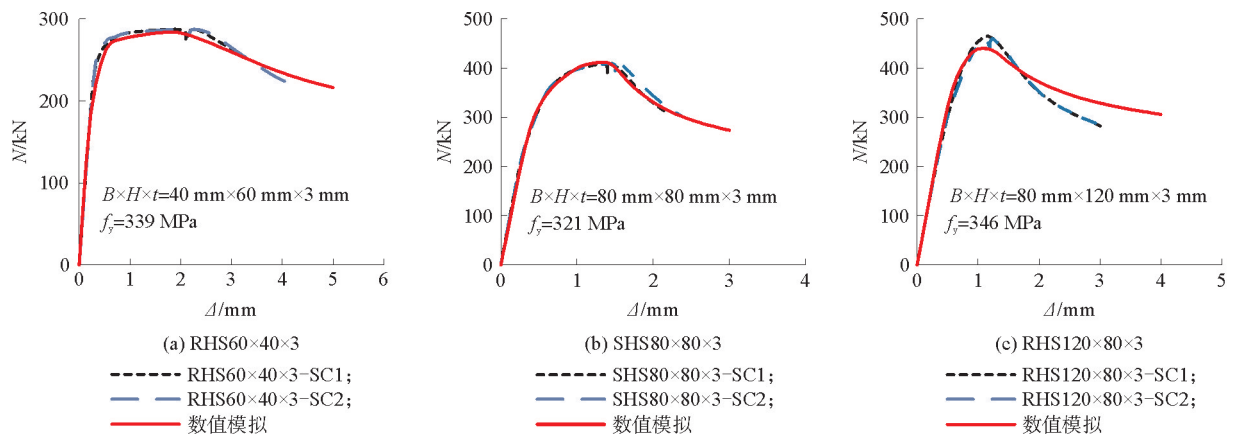


图 4 铁素体不锈钢管柱的 $N-\Delta$ 曲线^[15]

2 参数分析

为进行参数影响分析,本文利用上述有限元模型创建了 229 个采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土轴压算例。算例的公共参数为:钢管内径 $D_i=400$ mm,试件长度 $L=1200$ mm,钢管厚度 $t=8$ mm,混凝土圆柱体抗压强度 $f'_c=52$ MPa,钢材名义屈服强度 $f_y=400$ MPa。其关键参数的变化范围为:径厚比 $D/t=33,52,75,100,127$; $f_y=210,300,400,500$ MPa 和 $f'_c=20,45,70,95,120$ MPa。

2.1 对承载力的影响

图 5 给出了各参数对钢管相对承载力 η_{s0} 的影响, $\eta_{s0} = N_s / f_y A_s$, 其中 N_s 和 A_s 分别为钢管承担的荷载和钢管截面面积。由图 5 可见, η_{s0} 随着 D/t 或 f'_c 的增大而减小,但随着 f_y 的增大而增大。原因是 D/t 越大意味着钢管的约束刚度越弱,而 f'_c 越大意味着混凝土刚度越大,这都将导致钢管产生更大的环向拉应力。

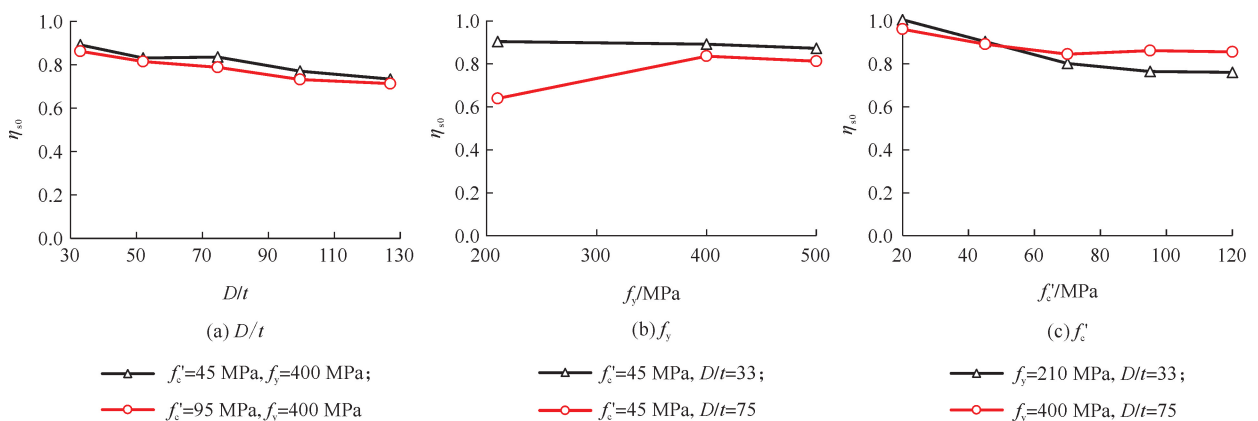


图 5 各参数对 η_{s0} 的影响

图 6 给出了各参数对混凝土相对承载力 η_{c0} 的影响, $\eta_{c0} = N_c / f'_c A_c$, 其中 N_c 和 A_c 为混凝土承担的荷载和混凝土截面面积。由图 6 可见, η_{c0} 随着 D/t 或 f'_c 的增大而减小,但随着 f_y 的增大而增大。原因是 f'_c 或 D/t 越大,钢管对混凝土的约束效果越差,导致混凝土承载力提高幅度降低;但 f_y 越大,钢管对混凝土的约束效果越好,导致混凝土承载力提高幅度增大。

2.2 对轴压刚度的影响

图 7 给出了各参数对混凝土弹性模量折减系数 κ_{c0} 的影响, $\kappa_{c0} = (K_{FE} - E_s A_s) / E_c A_c$, 其中 K_{FE} 为 $N-\epsilon_1$ 曲线中荷载上升到 40% 的峰值荷载时对应的割线刚度。由图 7 可见, κ_{c0} 随着 D/t 的增大而增大,

但随着约束效应系数(tf_y/Df'_c)的增大而减小。同时可见 f_y 对 κ_{c0} 没有显著影响。

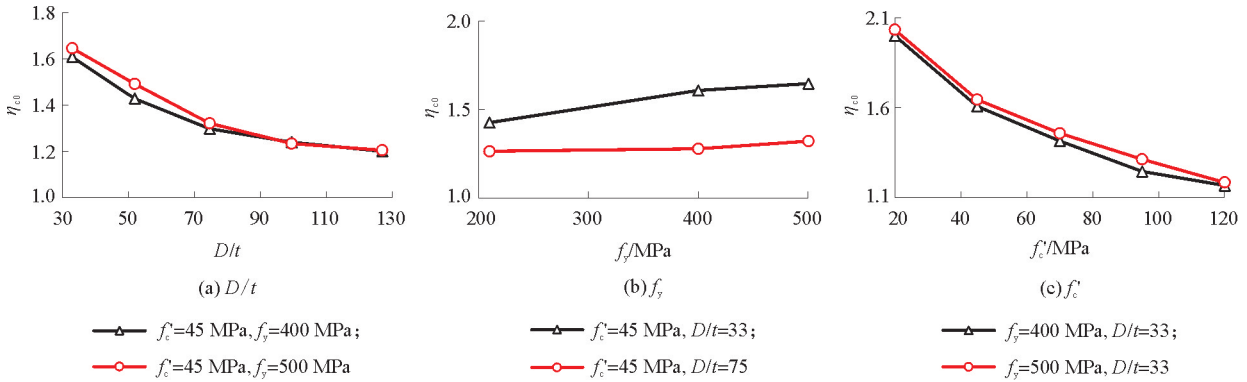


图6 各参数对 η_{c0} 的影响

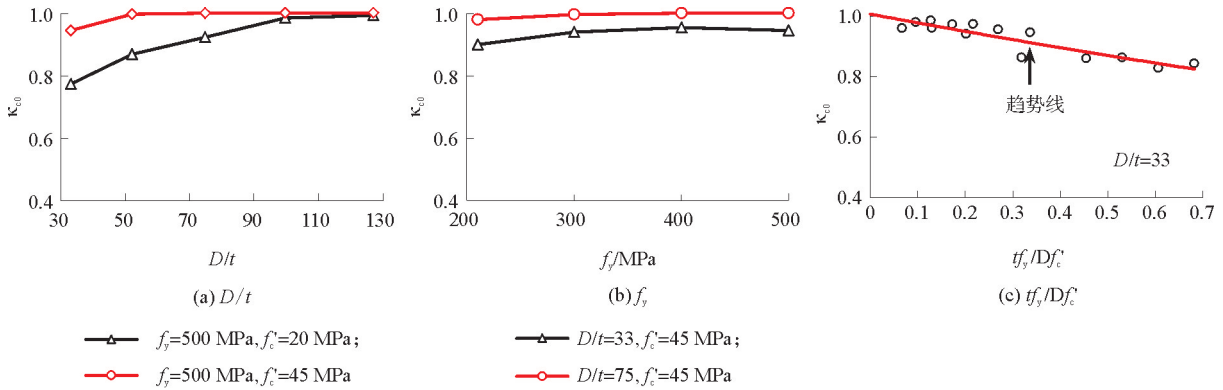


图7 各参数对 κ_{c0} 的影响

2.3 对峰值应变的影响

峰值荷载对应的极限应变可在一定程度上反映组合柱的变形能力。图8中给出了各参数对该类组合柱模拟峰值应变(ϵ_{cFE})的影响。可见 ϵ_{cFE} 随着 D/t 或 f'_c 的增大而减小,但随着 f_y 的增大而增大。原因是 D/t 或 f'_c 越大,钢管对混凝土的约束效果越差,导致混凝土延性下降;但 f_y 越大,钢管对混凝土的约束效果越好,导致混凝土延性越高。

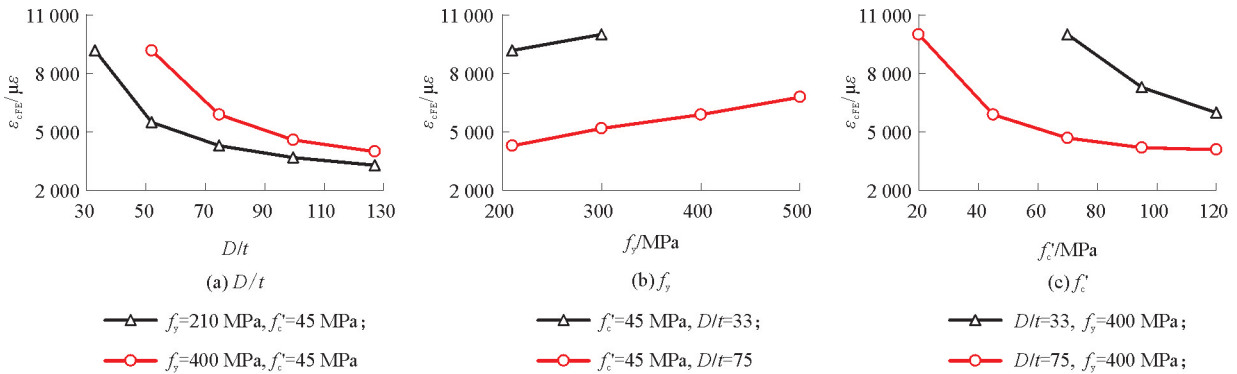


图8 各参数对 ϵ_{cFE} 的影响

3 设计方法探讨

基于以上数据库可建议采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土短柱的承载力、轴压刚度和峰值应变的设计方法。

3.1 承载力模型

3.1.1 旧模型

文献[16]提出了普通圆钢管混凝土短柱轴压承载力(N_{uc})的简化计算方法:

$$N_{uc} = \eta_s f_y A_s + \eta_c f'_c A_c \tag{5}$$

其中,钢材强度系数(η_s)和混凝土强度系数(η_c)的计算方法见文献[16]。

如图 9 所示,当 $tf_y/Df'_c > 0.2$ 时,式(5)模型显然低估了该类构件的承载力,其最大误差超过 15%,原因是该模型适用于外钢管为碳素钢或低合金钢的情况,而铁素体不锈钢具有明显的非线性,其承载力强化速度更快。因此,有必要为该类新型组合柱建议精度更高的承载力预测模型。

3.1.2 新模型

尽管存在一定误差,但式(5)经修正后仍可用于预测采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土短柱的轴压极限承载力,本文只需要建议适合该类组合柱的 η_s 和 η_c 值的简化计算方法。

基于图 5 可回归出 η_s 值的简化计算方法:

$$\eta_s = 1.012 - f_y^{-0.62} [2.7 - 39100(f'_c)^{-3.5}] \cdot \left[11.1 - 20.8 \left(\frac{D}{t} \right)^{-0.24} \right] \tag{6}$$

基于图 6 可回归出 η_c 值的简化计算方法:

$$\eta_c = 0.941 + \left[4.56 - 0.19 f_y^{0.57} (f'_c)^{-0.031} \left(\frac{D}{t} \right)^{-0.18} \right] \cdot \left(\frac{t f_y}{D f'_c} \right)^{0.84} \tag{7}$$

图 9 将采用以上新模型计算的 N_{uc} 值和 N_{uFE} 值进行对比,图中 N_{uc}/N_{uFE} 的均值(μ)和方差(S)分别为 0.999 和 0.016,且最大误差小于 5%,可见二者吻合良好。

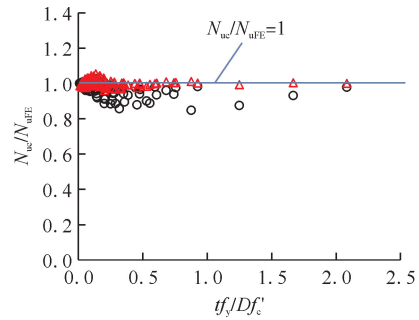


图 9 N_{uc} 和 N_{uFE} 的比较

○旧模型 $\mu=0.977, S=0.036$;
 △新模型 $\mu=0.999, S=0.016$

3.2 轴压刚度模型

3.2.1 旧模型

《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)^[17]采用式(8)预测普通钢管混凝土柱的轴压刚度(K_c):

$$K_c = E_s A_s + E_c A_c \tag{8}$$

图 10 将式(8)计算的 K_c 值和有限元模拟刚度 K_{FE} 进行比较,可以看出式(8)大大低估了该类构件的轴压刚度,其最大误差达到 12%。因此,有必要为该类新型组合柱建议精度更高的轴压刚度模型。

3.2.2 新模型

本文采用式(9)预测该类组合柱的轴压刚度(K_c)^[16]。

$$K_c = E_s A_s + \kappa_c E_c A_c \tag{9}$$

式中: κ_c 为混凝土弹性模量折减系数。

基于图 7 可回归出 κ_c 值的简化计算公式:

$$\kappa_c = 0.82 + \left[0.0021 - 9117000 f_y^{-3.64} \left(\frac{t}{D} \right) \right] \cdot \left[98.8 - 83.1 \left(\frac{t f_y}{D f'_c} \right)^{0.57} \right] \tag{10}$$

图 10 将采用式(9)和(10)计算的 229 个典型算例的 K_c 值和 K_{FE} 值进行比较,其 K_c/K_{FE} 的 μ 和 S 分别为 0.999 和 0.014,且最大误差小于 5%,因此该模型具有更高的精度。

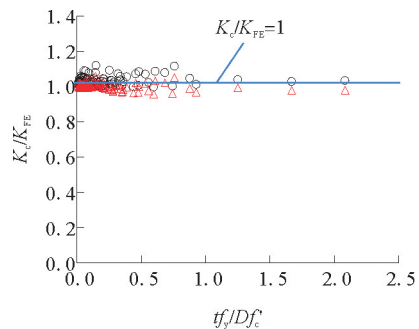


图 10 K_c 和 K_{FE} 的比较

○旧模型 $\mu=1.020, S=0.026$;
 △新模型 $\mu=0.999, S=0.014$

3.3 峰值应变模型

3.3.1 旧模型

文献[16]提出了普通圆钢管混凝土短柱峰值应变(ϵ_{uc})的简化计算方法:

$$\epsilon_{uc} = 3000 - 10.4f_y^{1.4}(f'_c)^{-1.2} \cdot \left[0.73 - 3785.8 \left(\frac{D}{t} \right)^{-1.5} \right] \leq 10000\mu\epsilon \quad (11)$$

图11将采用式(11)计算的 ϵ_{uc} 值和有限元模拟峰值应变 ϵ_{uFE} 进行比较,可以看出式(11)大大低估了该类构件的峰值应变,其最大误差和平均误差分别达到27%和6.1%。原因是以上模型适用于外钢管为碳素钢或低合金钢的情况,而铁素体不锈钢具有更大的变形能力和后期约束效果。因此,有必要为该试件建议精度更高的峰值应变模型。

3.3.2 新模型

本文基于229个典型算例提出了采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土短柱的峰值应变(ϵ_{uc})的简化计算模型:

$$\epsilon_{uc} = 3290 + [4.02 + 52.7f_y^{1.35}(f'_c)^{-1.66}] \cdot \left[39000 \left(\frac{D}{t} \right)^{-1.93} - 0.97 \right] \leq 10000\mu\epsilon \quad (12)$$

图11将采用式(12)计算的229个典型算例的 ϵ_{uc} 值和 ϵ_{uFE} 值进行比较,其 $\epsilon_{uc}/\epsilon_{uFE}$ 的 μ 和 S 值分别为1.001和0.043,可见该模型具有较高的预测精度。

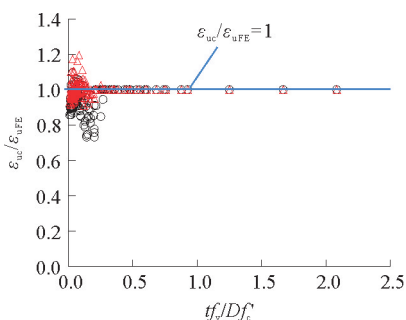


图11 ϵ_{uc} 和 ϵ_{uFE} 的比较

○旧模型 $\mu=0.939, S=0.069$;
△新模型 $\mu=1.001, S=0.043$

4 结论

本文研究采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土短柱的轴压性能,得出以下结论:

1) 建立了该类组合柱的有限元模型,有限元计算结果和实验结果吻合良好,分析表明采用铁素体不锈钢的圆形不锈钢管混凝土短柱的承载力低于采用奥氏体(或双相)不锈钢的对比试件,但二者的轴压刚度相差不大。

2) 参数分析表明钢管相对承载力(η_{s0})、混凝土相对承载力(η_{c0})和峰值应变(ϵ_{cFE})均随着径厚比(D/t)或混凝土圆柱体抗压强度(f'_c)的增大而减小,但随着名义屈服强度(f_y)的增大而增大;混凝土弹性模量折减系数(κ_{c0})随着 D/t 的增大而增大,但随着约束效应系数(tf_y/Df'_c)的增大而减小; f_y 对 κ_{c0} 没有显著影响。

3) 现有的设计方法低估了该类组合柱的承载力和峰值应变,但高估了该类组合柱的轴压刚度。新建议的承载力、轴压刚度和峰值应变简化模型具有较高的预测精度。本文提出的简化计算模型的适用范围为: $D/t=33\sim 127$; $f_y=210\sim 500$ MPa; $f'_c=20\sim 120$ MPa。

参考文献(References):

- [1] LAM Dennis, GARDNER Leroy. Structural design of stainless steel concrete filled columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(11): 1275-1282.
- [2] UY Brian, TAO Zhong, HAN Linhai. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(3): 360-378.
- [3] LI Yinglei, ZHAO Xiaolin, SINGH Raman, et al. Tests on seawater and sea sand concrete-filled CFRP, BFRP and stainless steel tubular stub columns[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 108(9): 163-184.
- [4] DAI Peng, YANG Lu, WANG Jie. Compressive behavior of concrete-filled square stainless steel tube stub columns[J]. Steel & Composite Structures: An International Journal, 2022, 42(1): 91-106.
- [5] 唐红元, 范璐瑶, 赵鑫, 等. 圆不锈钢管混凝土短柱轴压承载力性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 63-69.
TANG Hongyuan, FAN Luyao, ZHAO Xin, et al. Study on bearing capacity of concrete-filled circular stainless steel tubular stub columns under axial compression[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(1): 63-69.

- [6] 周翔. 不锈钢管海砂混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2018, 39(3): 25-29.
ZHOU Xiang. Tests on sea sand concrete filled stainless steel tubular stub columns[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2018, 39(3): 25-29.
- [7] 唐红元, 曾跃佳, 刘焯. 圆不锈钢管超高性能混凝土短柱轴压性能研究[J/OL]. 工程力学, 2023; 1-14[2023-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230414.0959.002.html>.
TANG Hongyuan, ZENG Yuejia, LIU Ye. Study on axial-compression performance of circular ultra-high performance concrete-filled stainless steel tube column[J/OL]. Engineering Mechanics, 2023; 1-14[2023-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230414.0959.002.html>.
- [8] TAO Zhong, UY Brian, LIAO Feiyu, et al. Nonlinear analysis of concrete-filled square stainless steel stub columns under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(11): 1719-1732.
- [9] TAO Zhong, UY Brian, HAN Linhai, et al. Analysis and design of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns under axial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(12): 1544-1556.
- [10] PATTON Longshithung, SINGH Konjengbam. Finite element modelling of concrete-filled lean duplex stainless steel tubular stub columns[J]. International Journal of Steel Structures, 2014, 14(3): 619-632.
- [11] TAO Zhong, WANG Zhibin, YU Qing. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89: 121-131.
- [12] RASMUSSEN Kim. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(1): 47-61.
- [13] TAO Zhong, RASMUSSEN Kim. Stress-strain model for ferritic stainless steels[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(2): 06015009.
- [14] 王志滨, 柯丞樑, 李永进. 内置型钢圆形截面不锈钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(2): 162-174.
WANG Zhibin, KE Chengliang, LI Yongjin. Axial compressive behaviour of circular steel reinforced concrete-filled stainless steel tubular stub columns[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(2): 162-174.
- [15] AFSHAN Sheida, GARDNER Leroy. Experimental study of cold-formed ferritic stainless steel hollow sections[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(5): 717-728.
- [16] WANG Zhibin, TAO Zhong, HAN Linhai, et al. Strength, stiffness and ductility of concrete-filled steel columns under axial compression[J]. Engineering Structures, 2017, 135: 209-221.
- [17] GB 50936—2014, 钢管混凝土结构技术规范[S].
GB 50936—2014, Technical code for concrete-filled steel tubular structures[S].

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)

(上接第 19 页)

- [6] DENG Kuanhai, YUAN Yue, HAO Yi, et al. Experimental study on the integrity of casing-cement sheath in shale gas wells under pressure and temperature cycle loading[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 195: 107548.
- [7] LI Jing, LIANG Weiguo, CHEN Yuedu, et al. Study on gas leakage along cement sheath interfaces in salt cavern gas storage well[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 103: 104621.
- [8] RIJFKOGEL Luke S, GHANBARIAN Behzad, HU Qinrong, et al. Clarifying pore diameter, pore width, and their relationship through pressure measurements: A critical study[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 107: 142-148.
- [9] ARANDIGOYEN M, ALVAREZ J I. Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(5): 767-775.
- [10] 郭辛阳, 步玉环, 沈忠厚, 等. 井下复杂温度条件对固井界面胶结强度的影响[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 834-837.
GUO Xinyang, BU Yuhuan, SHEN Zhonghou, et al. The effect of downhole complex temperature conditions on the interfacial bonding strength in cementing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 834-837.
- [11] LAVROV A, ANDRADE J D, TORSÆTER M, et al. Experimental set-up for testing cement sheath integrity in arctic well[C]// Arctic Technology Conference. Houston, 2014: 10-12.
- [12] POURSAEE A, HANSSON C M. Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(7): 1127-1133.
- [13] 徐芝纶. 弹性力学: 上册[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.
XU Zhilun. Elastic mechanics: Volume 1[M]. Beijing: People's Education Press, 1978.
- [14] POMONIS Philippos, MARGELLOU Antigoni. The pore length, the pore number and the pore anisotropy distributions in porous materials[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2018, 271: 41-51.
- [15] SCRIVENER K L, CRUMBIE A K, LAUGENSEN P. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete[J]. Interface Science, 2004, 12(4): 411-421.

(责任编辑 姜锡方; 英文校审 程文华)