

# 中空角钢-钢管混凝土叠合柱轴压性能研究

张波<sup>1,2</sup>, 秦笑笑<sup>1</sup>, 徐光朋<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省交通高等专科学校建筑工程系, 辽宁 沈阳 110122; 3. 中国建筑第八工程局有限公司东北分公司, 辽宁 大连 116021)

**摘要** 目的 研究中空角钢-钢管混凝土叠合柱的轴压性能, 给出相应的轴压承载力简化计算公式。**方法** 采用有限元法对叠合构件荷载-应变关系计算, 与已有试验数据对比验证; 在此基础上, 分析叠合构件破坏模态、内力分布以及接触应力等工作机理; 以不同材料强度下空心率和含钢率为主要参数分析叠合柱轴压承载力。**结果** 空心率由 30% 增加至 50% 和 70% 时, 叠合柱极限承载力分别降低了 9.64% 和 22.69%; 含钢率由 5.0% 增加至 6.0% 和 7.0% 时, 叠合柱极限承载力分别增大了 8.72% 和 16.21%。引入混凝土强度增强系数  $k$  后得到的轴压承载力公式计算结果与有限元结果最大误差为 2.8%, 简化计算公式可以较好地预测构件轴压承载力。**结论** 中空角钢-钢管混凝土叠合柱具有较好的轴压承载能力, 可满足工程应用。

**关键词** 中空角钢-钢管混凝土叠合柱; 轴压性能; 混凝土强度增强系数; 承载力简化计算

中图分类号 TU398.9

文献标志码 A

**引用格式:** 张波, 秦笑笑, 徐光朋. 中空角钢-钢管混凝土叠合柱轴压性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(4): 627-635. (ZHANG Bo, QIN Xiaoxiao, XU Guangpeng. Study on axial compression behavior of hollow angle steel-concrete encased CFST composite columns[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(4): 627-635.)

## Study on Axial Compression Behavior of Hollow Angle Steel-Concrete Encased CFST Composite Columns

ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, QIN Xiaoxiao<sup>1</sup>, XU Guangpeng<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Department of Structural Engineering, Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang, China, 110122; 3. Northeast Branch China Construction Eighth Engineering Division Co. Ltd., Dalian, China, 116021)

**Abstract:** The axial compression properties of hollow angle steel-concrete encased CFST composite columns were studied and the corresponding simplified calculation formula was solved. The finite element method was used to calculate the force-strain relationship for such sections and

收稿日期: 2023-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808351)

作者简介: 张波(1979—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事装配式建筑、道路工程及隧道工程等方面研究。

it was compared with existing test data for verification. On this basis, the working mechanism of the failure mode, internal force distribution and contact stresses of the members were analyzed. The axial compression bearing capacity of the columns were analyzed by using the hollow ratio and steel ratio under different material strength as the primary parameters. When the hollow ratio increases from 30% to 50% and 70%, the ultimate load capacity decreases by 9.64% and 22.69%, respectively; When the steel ratio increases from 5.0% to 6.0% and 7.0%, the ultimate load capacity increases by 8.72% and 16.21%, respectively. The maximum difference between the axial compression load capacity formula test results and the finite element results is just 2.8% by introducing the enhancement coefficient of concrete strength  $k$ . The simplified calculation formula can better predict the axial compression bearing capacity of the component. The hollow concrete-encased steel angles CFST composite columns still have good axial compressive load bearing capacity to meet engineering applications.

**Key words:** hollow angle steel-concrete-encased CFST composite columns; axial compression; enhancement coefficient of concrete strength; simplified formula of bearing capacity

中空角钢-钢管混凝土叠合柱是由空心钢管、角钢和钢筋混凝土叠合而成的组合结构。由于角钢的存在能够约束内部混凝土的横向变形,使得构件在轴向荷载作用下具有较好的承载力,能够有效地延缓或避免构件过早发生破坏。

众多学者对角钢混凝土柱和中空钢管混凝土叠合柱的静力性能进行了研究。韩林海等<sup>[1]</sup>对中空 CFST 叠合构件进行了理论分析,为实际工程的应用提供基础。H. Hyeon-jong 等<sup>[2]</sup>、吴波等<sup>[3]</sup>和张文福等<sup>[4]</sup>分别对角钢混凝土柱进行试验研究,结果表明,当外围混凝土中部发生剥落后,角钢架仍可协同工作,构件在外部角钢的约束下具有较好的承载力。WANG Rui 等<sup>[5]</sup>、AN Fufeng 等<sup>[6-7]</sup>、刘丽英<sup>[8]</sup>和安钰丰<sup>[9]</sup>分别对中空 CFST 叠合柱进行试验研究,结果表明,在荷载作用下,角部钢管混凝土有效提升叠合柱的承载力和刚度,构件保持较好的承载力和延性。REN Qingxin 等<sup>[10-11]</sup>对中空钢管混凝土叠合柱进行研究,结果表明,在荷载作用下,内部空心钢管由于外围钢筋混凝土保护作用仍具有较好的完整性,引入混凝土强度增强系数  $k$  可较好地预测构件轴压承载力。CHEN Jinyang 等<sup>[12]</sup>对箱型中空 CFST 叠合柱进行研究,结果表明,CFST 与外围钢筋混凝土在叠合柱达

到极限承载力时也达到极限承载力。

综上所述,笔者通过 ABAQUS 有限元分析软件建立中空角钢-钢管混凝土叠合柱的力学模型,研究构件承载力变化和力学工作机理,并给出构件轴压承载力计算公式;结果表明,计算结果与有限元结果吻合较好,该公式可很好地计算构件轴压承载力,满足实际工程需要。

## 1 轴压有限元分析

### 1.1 模型参数分析

构件参数:混凝土截面边长  $B = 300 \text{ mm}$ ,钢管直径  $D \times$  厚度  $t = 150 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ (叠合柱含钢率为 5%,空心率为 50%),钢管选取 Q345( $f_y = 345 \text{ MPa}$ ),混凝土抗压强度选取 C50( $f_{cu} = 50 \text{ MPa}$ ),纵筋选取  $4\Phi 12$ ( $f_y = 335 \text{ MPa}$ ),箍筋选取  $\Phi 8 @ 100$ ( $f_y = 335 \text{ MPa}$ ),试件的高度  $H = 3B$ 。试件构造如图 1 所示。

### 1.2 材料本构关系模型

#### 1.2.1 混凝土

采用有限元法建立模型时,混凝土采用塑性损伤本构关系模型<sup>[13]</sup>,其中混凝土的泊松比为 0.2,弹性模量为  $E_s = 10^5 / (2.2 + 34.7/f_{cu,k})$ 。

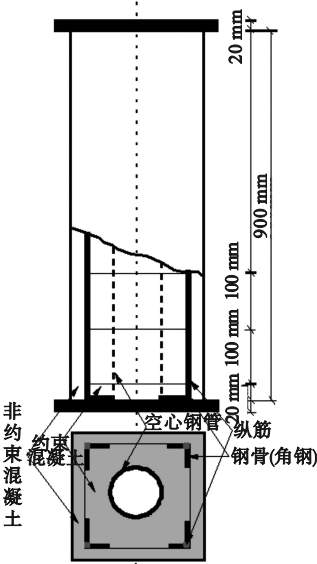


图1 试件构造图

Fig.1 Simplified diagram of the test specimen

混凝土受压时的 $\sigma_c - \varepsilon$ 关系式:

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_c \varepsilon. \tag{1}$$

混凝土受压塑性损伤因子:

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n}, & x \leq 1; \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x}, & x > 1. \end{cases} \tag{2}$$

其中,  $\rho_c = \frac{f'_c}{E_c \varepsilon_c}$ ;  $n = \frac{E_c \varepsilon_c}{E_c \varepsilon_c - f'_c}$ ;  $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$ .

混凝土受拉时的 $\sigma_c - \varepsilon$ 关系式:

$$\sigma_c = (1 - d_t) E_c \varepsilon. \tag{3}$$

混凝土受压塑性损伤因子:

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t (1.2 - 0.2x^2), & x \leq 1; \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x - 1)^{1.7} + x}, & x > 1. \end{cases} \tag{4}$$

其中,  $\rho_t = \frac{f_t}{E_c \varepsilon_t}$ ;  $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}$ .

1.2.2 钢 材

在建立有限元分析模型时,钢材采用五段式本构关系模型<sup>[14]</sup>,其中钢材的泊松比和弹性模量分别为0.3和0.206 MPa。

钢材的应力-应变关系:

$$\sigma_c = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_e; \\ A \varepsilon_s + B \varepsilon_s + C, & \varepsilon_e < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e1}; \\ f_y, & \varepsilon_{e1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e2}; \\ f_y \left( 1 + 0.6 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}} \right), & \varepsilon_{e2} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e3}; \\ 1.6 f_y, & \varepsilon_s > \varepsilon_{e3}. \end{cases} \tag{5}$$

其中,  $\varepsilon_e = 0.8 \frac{f_y}{E_s}$ ;  $\varepsilon_{e1} = 1.5 \varepsilon_e$ ;  $\varepsilon_{e2} = 10 \varepsilon_{e1}$ ;

$$\varepsilon_{e3} = 100 \varepsilon_{e1}; A = 0.2 \frac{f_y}{(\varepsilon_{e1} - \varepsilon_e)^2}; B = 2A \varepsilon_{e1};$$

$$C = 0.8 f_y + A \varepsilon_e^2 - B \varepsilon_e.$$

1.3 模型的建立

1.3.1 单元类型的选取

采用有限元法建立模型时,混凝土采用C3D8R单元,钢管和角钢均采用S4R单元,纵筋和箍筋均采用T3D2单元。为确保轴向荷载 $F_N$ 能够被有效的施加在构件上,在试件两端分别设置垫板,垫板采用S4R单元。叠合短柱轴压模型详见图2。

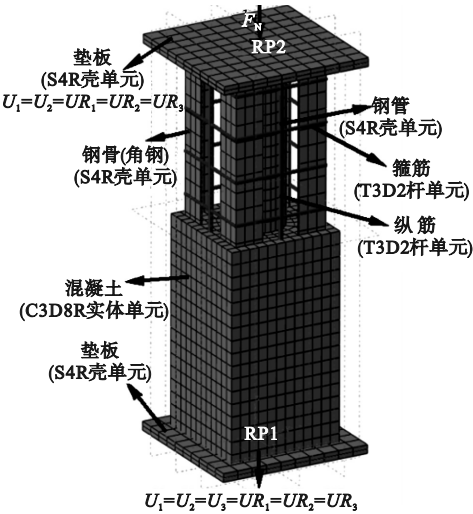


图2 轴压模型

Fig.2 The FEM with axial compression

1.3.2 边界条件、加载方式及截面接触

建立中空角钢-钢管混凝土叠合柱轴压力学模型时,忽略钢管初始缺陷的影响。为保证钢材和混凝土之间协同作用、共同变形,

钢管与混凝土之间采用面面接触,其中法向采用硬接触,切向采用摩擦系数为 0.6 的库伦摩擦<sup>[15]</sup>。钢筋笼和角钢均采用“Embedded”内置于整个模型中。角钢和混凝土的两端与垫板均采用“Tie”约束,在上下垫板上分别建立参考点 RP2 和 RP1,将轴向荷载直接施加在参考点 RP2 上进行轴压力学性能分析。

1.4 模型验证

采用有限元法对角钢混凝土柱和中空钢管混凝土叠合柱轴向荷载-应变( $N-\varepsilon$ )关系曲线进行对比验证,典型构件参数尺寸详见文献[2,5]。图3为各个构件荷载-应变关系试验与计算结果对比曲线。由图可知,有限元分析模型可以较好地计算角钢混凝土柱和中空钢管混凝土叠合柱在轴压荷载下的轴向荷载-变形关系曲线。

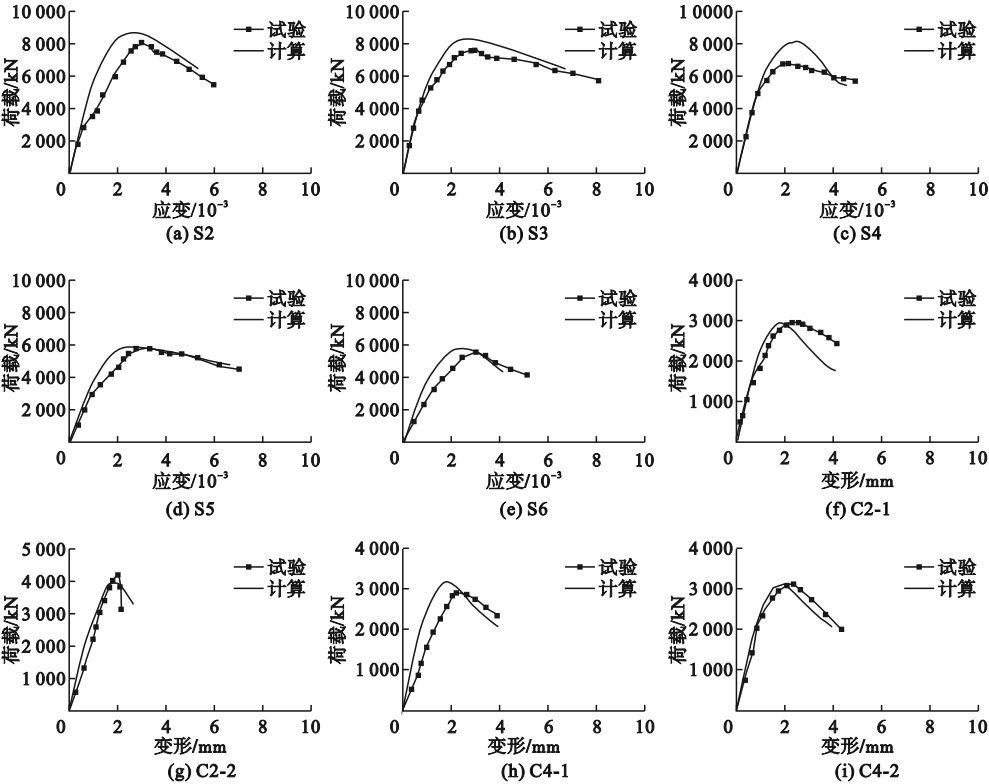


图3 轴向荷载-应变关系计算结果与试验结果对比

Fig. 3 Comparisons between tested and predicted load-strain curves

图4为构件承载力试验结果与模拟结果对比图。承载力试验值与模拟值比值( $N_{uc}/N_{uc}$ )的平均值为 0.927, 均方差为 0.064。结果表明,两者结果拟合度较好。

2 轴压工作机理分析

为了解构件的轴压性能,对其破坏模式、荷载-应变关系曲线、应力发展、内力变化和接触应力等工作机理进行理论分析。

2.1 破坏模式

叠合柱的破坏模式如图5所示。在轴压

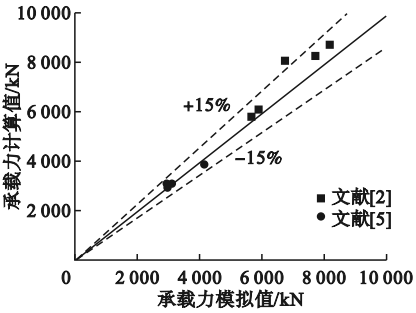


图4 承载力试验结果与模拟对比

Fig. 4 Compression results between FEM and test results

荷载作用下,混凝土中部向外鼓曲,见图5(a);由于外围角钢-钢筋混凝土对内部钢管的保护和约束作用,钢管在受力后期仍能保持较好的完整性,并未发生局部屈曲的现象,见图5(b);纵向钢筋由于受到外部轴向荷载的作用其中部发生压曲变形,箍筋中部出现向外鼓曲的横向变形,见图5(c);角钢沿截面对角线方向向外鼓曲,见图5(d)。

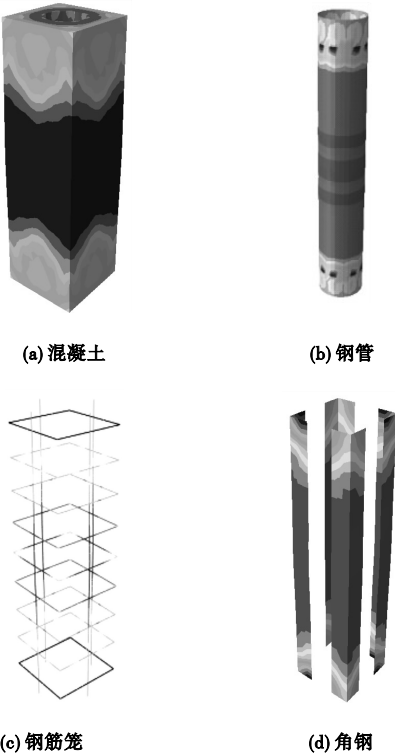


图5 破坏模式

Fig. 5 The failure modes

2.2 轴向荷载-应变

图6为中空角钢-钢管混凝土叠合柱轴向荷载-应变关系曲线,选取4个特征点对关系曲线进行分析。*A*点为弹性临界点;*B*点为峰值荷载点;*C*点为85%峰值荷载点;*D*点为荷载停止加载点。弹性阶段(*OA*):此时叠合柱的承载力和应变呈线性变化;弹性与塑性共存阶段(*AB*):叠合柱承载力随应变增加而增加,直至达到峰值荷载 $N_u$ ;下降阶段(*BC*):叠合柱承载力随着应变增加不断下降,此时*C*点处于 $0.85 N_u$ ;荷载停止加载阶段(*CD*):构件承载力随应变增加而持续降低直至加载结束。

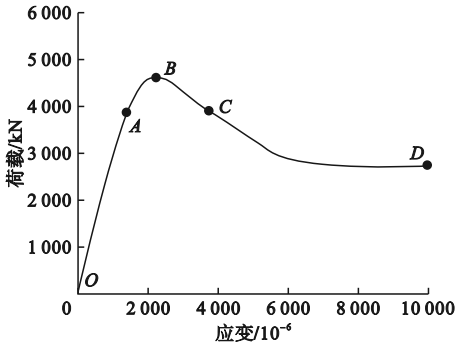


图6 轴向荷载-应变曲线

Fig. 6 The axial force-strain curve

2.3 应力分布

图7为叠合柱混凝土纵向应力在特征点分布情况。

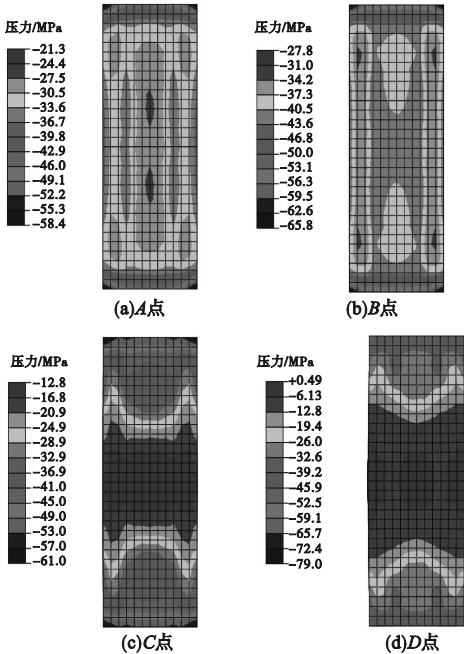


图7 混凝土纵向应力分布

Fig. 7 The longitudinal stress distribution of concrete

由图7可知,*OA*段:叠合柱呈弹性关系,由于方形截面四角处出现应力集中的现象,最大应力出现在四角。*AB*段:随着荷载加载,*B*点处混凝土达到峰值应力。*BC*段:*B*点后外围混凝土的压应力持续降低,角部混凝土最早发生破坏。*CD*段:*C*点之后轴压承载力随应变增加呈平稳状态,直至构件加载结束。

2.4 内力变化

图8为叠合柱各个组分内力分布图。在



轴向荷载作用下,叠合柱中的各个组分发生内力重分布现象。在荷载初期,外围钢筋混凝土和角钢-钢管的荷载-应变关系曲线呈线性增长,大部分轴向荷载由外围钢筋混凝土承担,角钢-钢管和外围钢筋混凝土几乎在整个叠合柱达到极限承载力的同时达到极限承载力。此时钢筋混凝土和角钢-钢管承担的荷载分别占极限荷载的70%和30%。当叠合段柱达到峰值承载力 $N_u$ 时,钢筋混凝土的应变持续增加而峰值承载力逐渐下降直至平移,角钢-钢管的荷载值随着应力的增加发生不明显变化。此时钢筋混凝土和角钢-钢管承担的荷载分别占极限荷载的45.16%和54.84%。

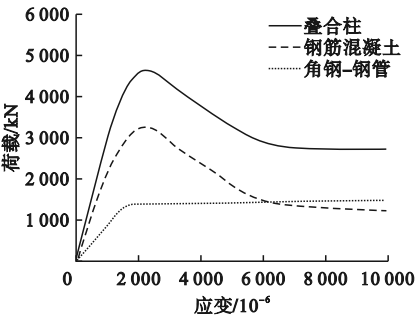


图8 轴向荷载-应变分布

Fig. 8 The distribution of axial force-strain curves

2.5 接触应力

图9为空心钢管与外围混凝土之间的接触应力分布图。荷载初期:空心钢管与外围混凝土之间存在接触应力 $P$ ,二者之间存在相互作用。荷载持续阶段:混凝土发生劣化产生微小裂缝,横向变形逐渐开展,此时钢管与混凝土

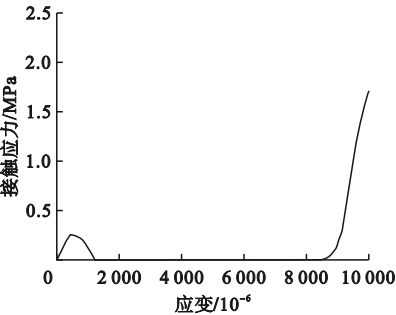


图9 接触应力曲线

Fig. 9 The contact stress curve

不存在接触应力( $P=0$ );随着纵向应变增加,钢管向外鼓曲,钢管与外围混凝土之间存在相互作用,其接触应力持续增长。

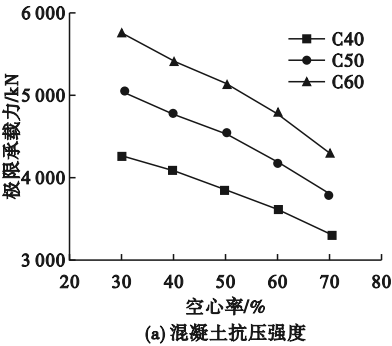
3 承载力参数分析

为了解不同参数对中空角钢-钢管混凝土叠合柱轴压承载力的影响,以不同材料强度下空心率和含钢率为主要参数分析构件轴压承载力的变化规律。具体参数范围为空心率 $\chi$ 取30%、40%、50%、60%、70%;含钢率 $\rho_s$ 取5.0%、5.5%、6.0%、6.5%、7.0%;钢管屈服强度取Q235、Q345、Q420;混凝土抗压强度等级为C40、C50、C60。

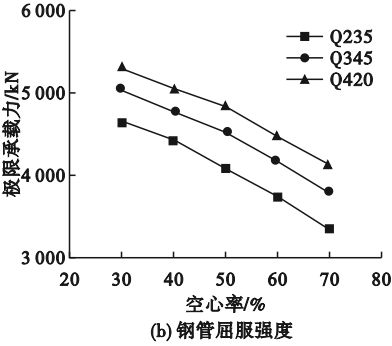
3.1 极限承载力

3.1.1 空心率

图10为不同材料强度下空心率对构件极限承载力 $N_u$ 的影响,当空心率由30%增加至50%和70%,构件承载力分别降低了9.64%和22.69%。



(a) 混凝土抗压强度



(b) 钢管屈服强度

图10 不同材料强度下空心率对极限承载力的影响

Fig. 10 Effect of the hollow ratio on the ultimate bearing capacity under different material strength

图 10(a) 为混凝土抗压强度下空心率对极限承载力的影响。当空心率由 30% 增加至 70% 时,C40、C50 和 C60 混凝土抗压强度下的极限承载力分别降低了 22.7%、24.7% 和 25.5% ;图 10(b) 为钢管屈服强度下空心率对极限承载力的影响。当空心率由 30% 增加至 70% 时,Q235、Q345 和 Q420 钢管屈服强度下的极限承载力分别降低了 27.8%、24.7% 和 22.5% 。分析可知,叠合柱的极限承载力随空心率增加而降低,随材料强度的增加而增大,这是因为随着空心率的增大,构件内部空心面积增大,外围混凝土的截面面积减小,承担轴向荷载的能力减弱。

3.1.2 含钢率

图 11 为不同材料强度下含钢率对构件极

限承载力的影响,当含钢率由 5.0% 增加至 6.0% 和 7.0% 时,构件极限承载力分别增加了 8.72% 和 16.21% 。

图 11(a) 为混凝土抗压强度下含钢率对极限承载力的影响。当含钢率由 5.0% 增加至 7.0% 时,C40、C50 和 C60 混凝土抗压强度下极限承载力分别增大了 18.0%、16.2% 和 15.3% ;图 11(b) 为钢管屈服强度下含钢率对极限承载力的影响。当含钢率由 5.0% 增加至 7.0% 时,Q235、Q345 和 Q420 钢管屈服强度下的极限承载力分别增大了 12.4%、16.2% 和 18.3% ;分析可知,叠合柱的极限承载力随含钢率和材料强度的增加而增长,这是因为构件随着含钢率的增加所能承担的轴向荷载能力提升。

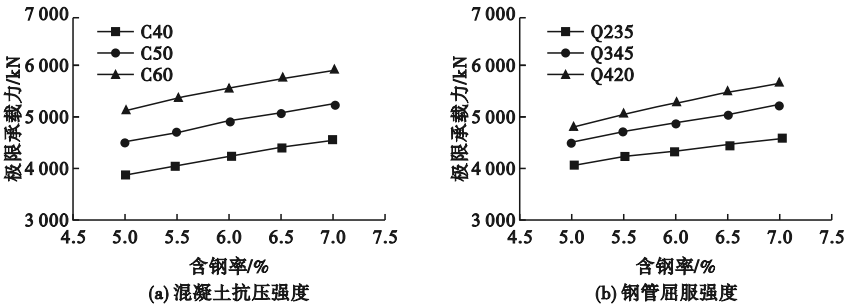


图 11 不同材料强度下含钢率对极限承载力的影响

Fig. 11 Effect of the steel ratio on the ultimate bearing capacity under different material strength

3.2 混凝土强度增强系数

引入混凝土强度增强系数  $k$  来定量分析叠合柱的轴压承载力变化规律。

混凝土强度增强系数  $k$  的计算式:

$$k = (N_u - f_y A_s - f_{ys} A_{ss}) / f_c A_c. \tag{6}$$

3.2.1 空心率

图 12(a) 为混凝土抗压强度下空心率对  $k$  值的影响。当空心率由 30% 增加至 70% 时,C40、C50 和 C60 混凝土抗压强度下的  $k$  值分别增大了 0.6%、0.53% 和 1.5% ;图 12(b)

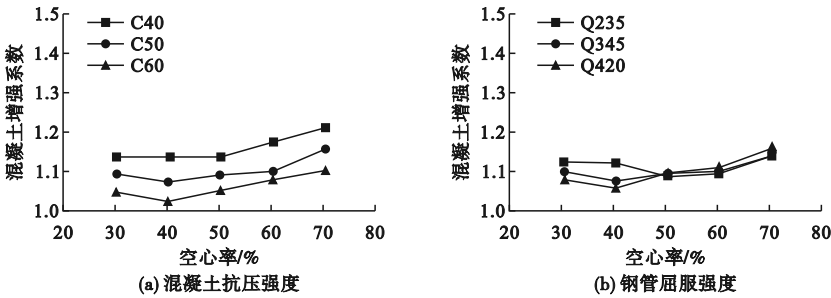


图 12 不同材料强度下空心率对  $k$  值的影响

Fig. 12 Effect of hollow ratio on the  $k$  under different material strength

为钢管屈服强度下空心率对  $k$  值的影响。当空心率由 30% 增加至 70% 时, Q235、Q345 和 Q420 钢管屈服强度下的  $k$  值分别增加了 1.01%、0.53% 和 2.04%; 分析可知, 当  $\chi < 40\%$  时,  $k$  值随空心率的增加而降低; 当  $\chi > 40\%$  时,  $k$  值随着空心率降低而增大。  $k$  值随材料强度增加而增大。

3.2.2 含钢率

图 13(a) 为混凝土抗压强度下含钢率对  $k$  值的影响。当含钢率由 5.0% 增加至

7.0% 时, C40、C50 和 C60 混凝土抗压强度下的  $k$  值分别增大了 6.01%、6.66% 和 7.48%; 图 13(b) 为钢管屈服强度下含钢率对  $k$  值的影响。当含钢率由 5.0% 增加至 7.0% 时, Q235、Q345 和 Q420 钢管屈服强度下的  $k$  值分别增大了 5.63%、6.66% 和 7.08%; 这是因为随着含钢率的增加约束效应增强,  $k$  值有所增大;  $k$  值随着混凝土强度等级和钢管屈服强度的增加分别呈下降和增长的变化规律。

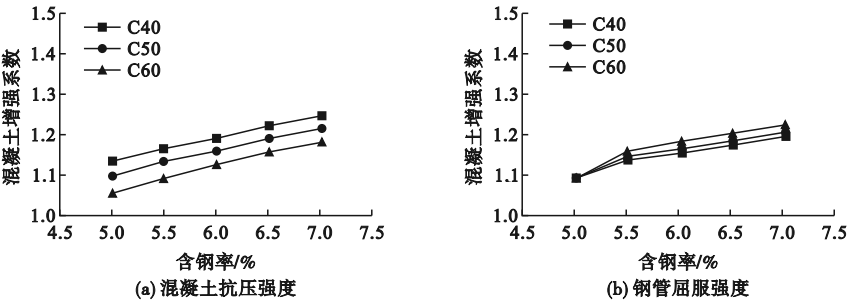


图 13 不同材料强度下含钢率对  $k$  值的影响

Fig. 13 Effect of steel ratio on the  $k$  under different material strength

3.3 轴压承载力简化计算

为更好地了解中空角钢-钢管混凝土叠合柱在实际工程上的应用, 采用叠合原理分析构件轴压承载力简化计算公式。分析不同混凝土强度增强系数时构件的轴压承载力。

$$N = \begin{cases} f_{ys}A_{ss} + f_yA_s + f_cA_c, k = 1; \\ f_{ys}A_{ss} + f_yA_s + kf_cA_c, k \neq 1. \end{cases} \quad (7)$$

为确定式(7)中混凝土强度增强系数, 对数据进行拟合, 得出混凝土强度增强系数表达式:

$$k = 1 + \frac{20.868\rho_s \times f_{cu}^{-1.162} \times f_y^{-0.04}}{(\chi^2 - 1.06\chi + 0.424)}. \quad (8)$$

图 14 为中空角钢-钢管混凝土叠合柱承载力简化公式计算结果与有限元结果对比关系。由图可知, 当  $k = 1$  时, 轴压承载力简化公式计算结果与模拟结果比值( $N_{uc}/N_{ue}$ )的平均值为 0.955, 均方差为 0.015; 当  $k \neq 1$  时, 叠合柱轴压承载力简化公式计算结果与模拟结果比值( $N_{uc}/N_{ue}$ )的平均值为 1.000 9, 均方差为 0.011。分析可知, 引入混凝土强度增强

系数  $k$  得出的轴压承载力计算结果与模拟结果的最大误差为 2.8%, 此公式可以较好地预测构件承载力。

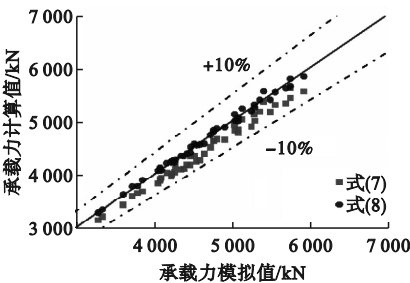


图 14 极限承载力对比

Fig. 14 Comparison of the ultimate bearing capacities

4 结 论

(1) 中空角钢-钢管混凝土叠合柱破坏模态为中部鼓曲, 钢筋笼和角钢中部发生横向变形, 内部空心钢管由于外围混凝土的保护作用未发生屈曲变形, 仍具有较好完整性。

(2) 影响极限承载力的主要因素为空心率和含钢率; 极限承载力随空心率增加而减



小,混凝土增强系数 $k$ 随空心率增加而增大;极限承载力和混凝土增强系数 $k$ 随含钢率增加而增大。

(3)引入混凝土强度增强系数 $k$ 得出的轴压承载力计算结果与模拟结果的最大误差为2.8%,简化计算公式可以较好地计算中空角钢-钢管混凝土叠合柱的轴压承载力。

## 参考文献

- [1] 韩林海,牟廷敏,王法承,等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J]. 土木工程学报,2020,53(5):1-24.  
(HAN Linhai, MU Tingmin, WANG Facheng, et al. Design theory of CFST(concrete-filled steel tubular) mixed structures and its applications in bridge engineering [J]. China civil engineering journal,2020,53(5):1-24.)
- [2] HYEON-JONG H, TAE-SUNG E, HONG-GUN P M A, et al. Axial load and cyclic lateral load tests for composite columns with steel angles [J]. Journal of structural engineering, 2016, 142(5):04016001.
- [3] 吴波,王辉,刘晓珠. 内置高强角钢的方钢管混凝土柱偏压性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(2):16-25.  
(WU Bo, WANG Hui, LIU Xiaozhu. Experiment on eccentric compressive behaviors of square CFST columns with built-in high-strength steel angles [J]. Journal of architecture and civil engineering,2021,38(2):16-25.)
- [4] 张文福,杜娟,董清会,等. 角钢约束高强混凝土偏压短柱力学性能的试验与理论研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(增刊1):252-258.  
(ZHANG Wenfu, DU Juan, DONG Qinghui, et al. Experimental and theoretical research on mechanical behavior of angle reinforced high-strength concrete short columns subjected to eccentric compression [J]. Journal of building structures,2013,34(S1):252-258.)
- [5] WANG Rui, HAN Linhai, DENNIS L, et al. Behavior of octagonal steel-reinforced concrete box columns under compressive load [J]. Magazine of concrete research,2018,70(16):838-855.
- [6] AN Yufeng, HAN Linhai, ROEDER C. Performance of concrete-encased CFST box stub columns under axial compression [J]. Structures,2015,3:211-226.
- [7] AN Yufeng, HAN Linhai, ZHAO Xiaoling. Experimental behaviour of box concrete-encased CFST eccentrically loaded column [J]. Magazine of concrete research,2013,65(20):1219-1235.
- [8] 刘丽英. 新型钢管混凝土叠合柱轴压力学性能研究[D]. 福州:福州大学,2013.  
(LIU Liying. Study on behavior of a new concrete-filled steel tube reinforced concrete column under axial compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University,2013.)
- [9] 安钰丰. 方形钢管混凝土叠合压弯构件力学性能和设计方法研究[D]. 北京:清华大学,2015.  
(AN Yufeng. Performance and design method of square concrete-encased CFST members under combined compression and bending [D]. Beijing: Tsinghua University,2015.)
- [10] REN Qingxin, DING Ji'nan, WANG Qinghe. Performance of square hollow steel-reinforced concrete composite stub columns under axial compression [J]. European journal of environmental and civil engineering, 2022, 26(15):7825-7840.
- [11] 任庆新,丁纪楠,李明伦,等. 中空钢管混凝土叠合柱偏压力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(1):35-42.  
(REN Qingxin, DING Ji'nan, LI Minglun, et al. Research on mechanical properties of hollow concrete-encased concrete filled steel tubes under eccentric compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2021,37(1):35-42.)
- [12] CHEN Jinyang, LI Wei, HAN Linhai, et al. Structural behaviour of concrete-encased CFST box stub columns under axial compression [J]. Journal of constructional steel research, 2019,158:248-262.
- [13] 韩林海,宋天谕. 钢-混凝土组合结构抗火设计原理[M]. 北京:科学出版社,2012.  
(HAN Linhai, SONG Tianyi. Fire safety design theory of steel-concrete composite structures [M]. Beijing: Science Press,2012.)
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2016.  
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. Beijing: Science Press,2016.)
- [15] 侯舒兰. 均匀受火下钢管混凝土叠合柱耐火性能研究[D]. 北京:清华大学,2014.  
(HOU Shulan. Research on fire resistance of concrete-encased CFST column on all sides [D]. Beijing: Tsinghua University,2014.)  
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)