

引用本文:刘 坚,田 勇,刘长江,等.圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力[J].建筑科学与工程学报,2020,37(5):97-105.

LIU Jian, TIAN Yong, LIU Chang-jiang, et al. Axial Compression Carrying Capacity of Reinforced Recycled Aggregate Concrete-filled Circular Steel Tubular Stub Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 97-105.

DOI:10.19815/j.jace.2019.12036

圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力

刘 坚^{1,2}, 田 勇^{1,3}, 刘长江^{1,2}, 张鹏程¹, 江 进^{1,2}, 任 达^{1,2}, 柏宇翔¹, 曾嵘森¹

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州大学 广东省复杂钢结构工程技术研究中心, 广东 广州 510006; 3. 湘西民族职业技术学院 机电工程系, 湖南 湘西 416000)

摘要:针对再生混凝土相对普通混凝土延性较差、承载力较低的特点,利用钢管和钢筋笼对再生混凝土的约束作用,将钢筋再生混凝土灌入圆钢管中形成圆钢管钢筋再生混凝土短柱进行研究。基于极限分析法、套箍理论以及双剪统一强度理论,考虑钢管和钢筋笼的双重约束效应,提出了一套包含钢管径厚比、约束效应系数、含钢率以及再生粗骨料取代率等影响因素的圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力计算方法。在理论推导的基础上,考虑短柱的非线性、钢管与再生混凝土的滑移影响,采用 ABAQUS 有限元软件对圆钢管钢筋再生混凝土短柱进行建模分析;将理论公式值、有限元仿真结果以及相关文献试验数据进行对比,验证公式的有效性 with 适用性。结果表明:加了钢筋笼的圆钢管钢筋再生混凝土比圆钢管再生混凝土短柱轴压承载力提高 10% 左右,研究结论可以为实际工程的应用提供理论基础。

关键词:圆钢管钢筋再生混凝土短柱;轴压承载力;再生粗骨料取代率;理论推导;建模分析

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)05-0097-09

Axial Compression Carrying Capacity of Reinforced Recycled Aggregate Concrete-filled Circular Steel Tubular Stub Columns

LIU Jian^{1,2}, TIAN Yong^{1,3}, LIU Chang-jiang^{1,2}, ZHANG Peng-cheng¹, JIANG Jin^{1,2}, REN Da^{1,2}, BAI Yu-xiang¹, ZENG Rong-sen¹

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China; 2. Guangdong Engineering Research Center for Complicated Steel Construction, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China; 3. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiangxi Vocational and Technical College for Nationalities, Xiangxi 416000, Hunan, China)

Abstract: In view of the poor ductility and low bearing capacity of recycled aggregate concrete (RAC) compared with ordinary concrete, using the restraint effect of steel pipe and reinforcement cage on RAC, the reinforced recycled concrete was poured into the circular steel tube to form reinforced recycled aggregate concrete-filled circular steel tubular (RRACFCST) stub columns. Based on the limit analysis method, hoop theory and twin shear unified strength theory, the double restraint effect of steel pipe and reinforcement cage were considered, and the calculation methods for axial compression bearing capacity of circular steel tube reinforced recycled concrete

收稿日期: 2019-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678168); 广东省自然科学基金项目(2017A030313267); 广州市科技计划项目(201607010107)

作者简介: 刘 坚(1964-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, 博士后, E-mail: 787196372@qq.com。

stub columns including steel tube diameter thickness ratio, restraint effect coefficient, steel ratio and replacement rate of recycled coarse aggregate were proposed. On the basis of theoretical derivation, the nonlinear of short column and the influence of slip between steel tube and recycled concrete was considered, the finite element software ABAQUS was used to model and analyze the circular steel tube reinforced recycled concrete stub column. The theoretical formula value, finite element simulation results and relevant literature test data were compared to verify the validity and applicability of the formula. The results show that the axial compression bearing capacity of recycled concrete filled circular steel tubular stub columns with reinforcement cage is about 10% higher than that of recycled concrete filled circular steel tubular stub columns. The research conclusion can provide a theoretical basis for practical engineering application.

Key words: RRACFCST stub column; axial compression carrying capacity; recycled coarse aggregate replacement rate; theoretical derivation; modeling analysis

0 引言

改革开放以来,中国建筑行业快速发展,对居住环境和舒适度的要求越来越高,在如今倡导安全可靠、经济适用和绿色环保的建筑设计行业里,对建筑的要求也越来越高。钢结构具有轻质高强、塑性和韧性好、制造和施工方便且绿色环保等优点,在建筑工程领域被广泛采用^[1]。再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete, RAC)是利用废弃混凝土破碎加工而成的再生集料,部分或全部代替天然集料制作而成的新混凝土,它既能解决废弃混凝土对环境造成的污染,又能防止对天然山石的过量开采,达到节能和减排的双重目标^[2-3]。

相比采用天然集料的混凝土而言,RAC在加工过程中内部会累积损伤引起一系列的微裂缝,当受到外力荷载作用时,这些微裂缝更易发展扩大,导致RAC的整体抗压强度降低。另外,再生骨料表层包裹着孔隙率高、力学性能差的旧砂浆层,导致RAC具有多重界面过渡区(老骨料-老浆体界面、老骨料-新浆体界面、老浆体-新浆体界面),这些界面过渡区又是RAC中的最薄弱环节,在很大程度上影响RAC的力学性能^[4]。国内外研究学者鉴于钢管混凝土^[5-10]的力学性能优势,将RAC应用于钢管中以改善其力学性能,这既能融合RAC绿色环保、可再生利用的特点,又能结合钢材抗拉等优势,有效地弥补2种材料性能的不足。相关研究表明^[3,11-16]:由于套箍效应的影响,钢管内的RAC处于三向受压状态下,能大幅度地提高RAC抗压强度和变形能力,使RAC由脆性材料转变为塑性材料;另一方面,钢管内的RAC发挥侧向支撑作用的同时,也抑制了钢管发生屈曲变形,从而可以减小钢管的截面

使用厚度,提高材料的抗压承载力及其抗震性能。

本文在国内外研究基础上,考虑钢管和钢筋笼的双重约束效应,采用相关理论方法对圆钢管钢筋再生混凝土(RRACFCST)短柱轴压承载力进行分析研究,并利用ABAQUS有限元软件对短柱的轴心受压全过程进行非线性有限元模拟分析,以期对钢管钢筋再生混凝土轴心受压构件的应用提供支撑。

1 圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力计算公式推导

1.1 基本假定

(1)钢管采用多轴应力状态下的Von Mises屈服条件;RAC采用文献[17]中混凝土屈服条件方程式。

(2)在极限状态时,对于薄壁钢管,钢管径向应力远比环向拉应力小,可以忽略不计,因此钢管的应力状态可简化为纵向受压、环向受拉的双向应力状态,并沿管壁均匀分布^[17]。

(3)在受压过程中,外环(保护层)RAC受挤压径向膨胀,出现RAC环向受拉状态,考虑RAC受拉时应力较小,为简化推导过程,分析外环RAC所受内、外围压力时假设大小值相等。

1.2 圆钢管钢筋再生混凝土短柱承载力分析

本文考虑钢管和钢筋笼的双重约束效应,并对圆钢管钢筋再生混凝土短柱承载力进行分析。由分析可知,圆钢管钢筋再生混凝土短柱承载力主要由外钢管、纵向钢筋、受外钢管约束的外环RAC以及受外钢管和内箍筋共同约束的内核RAC四部分组成,如图1所示。

极限状态时,由截面静力平衡条件(图1)可得

$$N = A_s \sigma_1 + A_r f_r + A_{rc} \sigma_{rc} + A_{cc} \sigma_{cc} \quad (1)$$

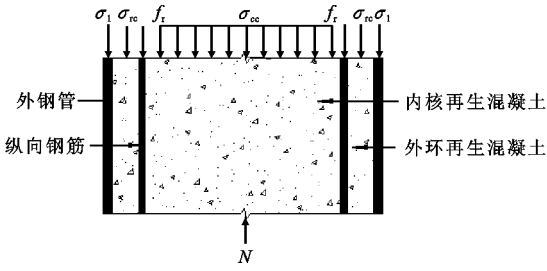


图 1 圆钢管钢筋再生混凝土短柱纵截面内力

Fig. 1 Longitudinal Section Internal Forces of RRACFCST Stub Column

式中: \$N\$ 为外荷载作用; \$A_s, A_r, A_{re}, A_{cc}\$ 分别为外钢管、纵向钢筋、外环 RAC 和内核 RAC 的横截面面积; \$\sigma_1, \sigma_{re}, \sigma_{cc}\$ 分别为极限状态下外钢管、外环 RAC 和内核 RAC 的纵向应力; \$f_r\$ 为纵向钢筋的屈服强度。

1.2.1 外环及内核 RAC 应力分析

由于目前对约束区 RAC 抗压强度研究的相关理论较少, 采用文献[17]中混凝土屈服条件计算极限状态下约束区 RAC 的应力。

外环 RAC 的纵向应力为

$$\sigma_{re} = f_c (1 + 1.5 \sqrt{\frac{P}{f_c}} + 2 \frac{P}{f_c}) \quad (2)$$

内核 RAC 的纵向应力为

$$\sigma_{cc} = f_c (1 + 1.5 \sqrt{\frac{P_{re} + P}{f_c}} + 2 \frac{P_{re} + P}{f_c}) \quad (3)$$

式中: \$f_c\$ 为非约束状态下 RAC 轴心抗压强度; \$P\$ 为钢管对 RAC 的有效侧向约束应力; \$P_{re}\$ 为箍筋对 RAC 的有效侧向约束应力。

1.2.2 钢管应力分析

钢管在极限状态时(图 2), 根据静力平衡条件可得

$$2\sigma_2 t = d_c P \quad (4)$$

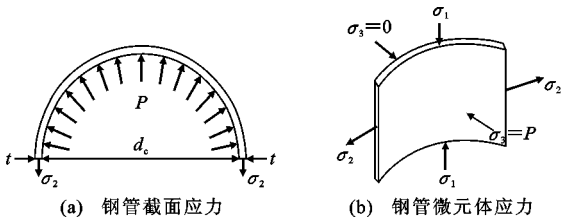


图 2 钢管受力

Fig. 2 Stresses of Steel Tube

钢管含钢率为

$$\alpha = \frac{A_s}{A_{ce}} = \pi d_c t / (\frac{\pi d_c^2}{4}) = \frac{4t}{d_c} \quad (5)$$

钢管约束效应系数为

$$\theta = \frac{A_s f_y}{A_{ce} f_c} \quad (6)$$

根据钢管的 Von Mises 屈服条件得

$$\sigma_1^2 + \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 = f_y^2 \quad (7)$$

联合式(4)~(7)可得

$$\sigma_1 = \left[\sqrt{1 - \frac{3}{\theta^2} \left(\frac{P}{f_c} \right)^2} - \frac{1}{\theta} \frac{P}{f_c} \right] f_y \quad (8)$$

式中: \$\sigma_2\$ 为钢管环向拉应力; \$t\$ 为钢管厚度; \$d_c\$ 为钢管内直径; \$\alpha\$ 为钢管含钢率; \$\theta\$ 为钢管约束效应系数; \$A_{ce}\$ 为钢管包裹的名义核心 RAC 横截面面积; \$f_y\$ 为钢管屈服强度。

1.2.3 钢管及箍筋对 RAC 有效侧向约束应力的确定

(1) 钢管对 RAC 的有效侧向约束应力

由图 2 分析可知, 钢管对 RAC 的有效侧向约束应力 \$P\$ 与钢管径向应力 \$\sigma_3\$ 相等, 即

$$P = \sigma_3 \quad (9)$$

根据文献[18], 运用双剪统一强度理论可得钢管轴向应力表达式如下

$$\sigma_1 = -\frac{1 + \alpha_2}{\alpha_1} \left[f_y - \left(\frac{\Gamma}{2} + \frac{\alpha_1 \alpha_2}{1 + \alpha_2} \right) \sigma_3 \right] \quad (10)$$

$$\alpha_1 = \frac{f_{tt}}{f_{tc}}$$

$$\alpha_2 = \frac{(1 + \alpha_1) \tau_{ts} - f_{tt}}{f_{tt} - \tau_{ts}}$$

$$\Gamma = \frac{d_c}{t}$$

式中: \$f_{tt}, f_{tc}\$ 分别为钢管的拉伸屈服应力和压缩屈服应力; \$\tau_{ts}\$ 为钢管的剪切屈服应力; \$\Gamma\$ 为钢管的内径厚比; \$\alpha_1\$ 为钢管拉压比; \$\alpha_2\$ 为加权系数; 对于钢管而言, \$\alpha_1\$ 取 1, \$\alpha_2\$ 取 0.5。

将式(4), (9), (10)代入钢管三向应力状态下的 Von Mises 屈服准则可得

$$\sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = f_y \quad (11)$$

$$(0.875\Gamma^2 - 1.5\Gamma + 1.5)P^2 - 3\Gamma f_y P + 2.5f_y^2 = 0 \quad (12)$$

由式(12)可知, 钢管对 RAC 的有效侧向约束应力 \$P\$ 的取值与钢管内径厚比 \$\Gamma\$ 及钢管屈服强度 \$f_y\$ 有关, 表 1 给出了不同内径厚比及钢管屈服强度条件下, 钢管对 RAC 有效侧向约束应力 \$P\$ 的取值。

(2) 箍筋对 RAC 的有效侧向约束应力

钢筋笼主要是箍筋对 RAC 起横向约束作用, Mander 等[19]在研究箍筋约束混凝土时给出了经典的箍筋有效侧向约束模型(图 3)。

本文箍筋对 RAC 的有效侧向约束应力 \$P_{re}\$ 为

$$P_{re} = P_r K_e \quad (13)$$

表 1 有效侧向约束应力 P 的取值
Tab. 1 Values of Effective Lateral Restraint Stress P

| R | 不同 f_y (MPa) 时的 P 取值/MPa | | | | | | | | |
|-----|------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 195 | 215 | 235 | 255 | 275 | 295 | 345 | 390 | 420 |
| 30 | 8.43 | 9.29 | 10.16 | 11.02 | 11.89 | 12.75 | 14.91 | 16.86 | 18.15 |
| 35 | 7.30 | 8.05 | 8.80 | 9.55 | 10.29 | 11.04 | 12.91 | 14.60 | 15.72 |
| 40 | 6.44 | 7.10 | 7.76 | 8.42 | 9.08 | 9.74 | 11.39 | 12.88 | 13.87 |
| 45 | 5.76 | 6.36 | 6.95 | 7.54 | 8.13 | 8.72 | 10.20 | 11.53 | 12.41 |
| 50 | 5.22 | 5.75 | 6.29 | 6.82 | 7.36 | 7.89 | 9.23 | 10.43 | 11.24 |
| 60 | 4.39 | 4.84 | 5.29 | 5.74 | 6.19 | 6.64 | 7.76 | 8.77 | 9.45 |
| 70 | 3.79 | 4.17 | 4.56 | 4.95 | 5.34 | 5.73 | 6.70 | 7.57 | 8.15 |
| 80 | 3.33 | 3.67 | 4.01 | 4.35 | 4.70 | 5.04 | 5.89 | 6.66 | 7.17 |
| 90 | 2.97 | 3.28 | 3.58 | 3.89 | 4.19 | 4.50 | 5.26 | 5.95 | 6.40 |
| 100 | 2.69 | 2.96 | 3.24 | 3.51 | 3.79 | 4.06 | 4.75 | 5.37 | 5.78 |
| 120 | 2.25 | 2.48 | 2.71 | 2.94 | 3.17 | 3.40 | 3.98 | 4.50 | 4.85 |
| 140 | 1.94 | 2.13 | 2.33 | 2.53 | 2.73 | 2.93 | 3.43 | 3.87 | 4.17 |

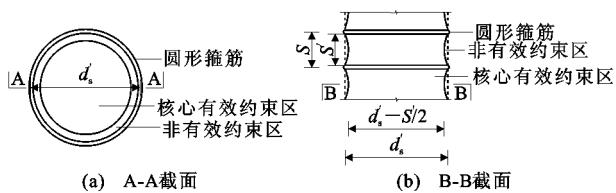


图 3 圆形箍筋约束混凝土的有效约束面积
Fig. 3 Effective Confined Area of Concrete Bounded by Circular Stirrups

有效约束系数 K_e 为

$$K_e = (1 - \frac{S'}{2d_s})^2 / (1 - \rho_{cc}) \quad (14)$$

$$\rho_{cc} = n(\frac{d_p}{d_s})^2$$

箍筋约束应力 P_r 为

$$P_r = \frac{2f_{yh}A_{sp}}{Sd_s'} \quad (15)$$

由式(13)~(15)可得

$$P_{re} = \frac{2f_{yh}A_{sp}}{Sd_s'}(1 - \frac{S'}{2d_s'})^2 / (1 - \rho_{cc}) \quad (16)$$

式中: S 为箍筋间距; S' 为箍筋净距; d_s' 为箍筋所围圆的直径; ρ_{cc} 为纵筋面积与箍筋形心包围的截面核心面积之比; n 为钢筋纵筋根数; d_p 为纵筋直径; A_{sp} , f_{yh} 分别为箍筋的横截面面积和屈服强度。

1.3 圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力计算公式

考虑再生粗骨料取代率对圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力的不利影响,引入再生粗骨料折减系数 ξ 对圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力进行折减。本文采用 MATLAB 软件对文献[20], [21]中钢管约束再生混凝土轴压试验结果进行拟合

和误差修正,得到再生粗骨料折减系数 ξ 的计算公式如下

$$\xi = 0.898 \ 3R^4 - 2.313R^3 + 1.971R^2 - 0.637 \ 5R + 1 \quad (17)$$

式中: R 为再生骨料取代率。

将式(2), (3), (8), (17)代入式(1)得圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力计算公式

$$N = A_{ce}f_y\{\theta[\sqrt{1 - \frac{3}{\theta^2}(\frac{P}{f_c})^2} - \frac{P}{\theta f_c}] + \rho_s \frac{f_r}{f_c} + \xi[(1 - \rho_s - \frac{A_{cc}}{A_{ce}})(1 + 1.5\sqrt{\frac{P}{f_c}} + 2\frac{P}{f_c}) + \frac{A_{cc}}{A_{ce}}(1 + 1.5\sqrt{\frac{P_{re} + P}{f_c}} + 2\frac{P_{re} + P}{f_c})]\} \quad (18)$$

令

$$b = \sqrt{1 - \frac{3}{\theta^2}(\frac{P}{f_c})^2} - \frac{P}{\theta f_c}$$

$$\omega = \frac{f_r}{f_c}$$

$$c_1 = 1 + 1.5\sqrt{\frac{P}{f_c}} + 2\frac{P}{f_c}$$

$$c_2 = 1 + 1.5\sqrt{\frac{P_{re} + P}{f_c}} + 2\frac{P_{re} + P}{f_c}$$

$$\Psi = \frac{A_{cc}}{A_{ce}}$$

P 值可由表 1 查得, P_{re} 可由式(16)计算所得, 则圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力简化计算公式见式(19)

$$N = A_{ce}f_c[\theta b + \rho_s\omega + \xi c_1(1 - \rho_s - \Psi) + \xi c_2\Psi] \quad (19)$$

式中: ρ_s 为钢管钢筋再生混凝土配筋率; ω 为纵筋屈服强度与 RAC 轴心抗压强度比值。

2 有限元模型的建立

本文运用 ABAQUS 有限元软件对圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴心受压力学性能进行非线性有限元分析。

2.1 材料本构模型的选取

2.1.1 钢材本构模型

本文钢材本构模型采用简化的二次流塑模型,该模型满足 Von Mises 屈服准则,其简化应力-应变(σ - ϵ)关系曲线如图 4 所示,共有 5 个阶段,分别为弹性段、弹塑性段、塑性段、强化段和二次流塑段,其中 f_p , f_u 分别为钢材的比例极限和抗拉强度,该应力-应变关系曲线的数学表达式为^[22]

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \epsilon_s & \epsilon_s \leq \epsilon_e \\ -A\epsilon_s^2 + B\epsilon_s + C & \epsilon_e < \epsilon_s \leq \epsilon_{e1} \\ f_y & \epsilon_{e1} < \epsilon_s \leq \epsilon_{e2} \\ f_y(1 + 0.6 \frac{\epsilon_s - \epsilon_{e2}}{\epsilon_{e3} - \epsilon_{e2}}) & \epsilon_{e2} < \epsilon_s < \epsilon_{e3} \\ 1.6f_y & \epsilon_s \geq \epsilon_{e3} \end{cases} \quad (20)$$
$$A = \frac{0.2f_y}{(\epsilon_{e1} - \epsilon_{e2})^2}$$
$$B = 2A\epsilon_{e1}$$
$$C = 0.8f_y + A\epsilon_e^2 - B\epsilon_e$$

式中: σ_s , ϵ_s 分别为钢材的应力和应变; E_s 为钢材的弹性模量; ϵ_e , ϵ_{e1} , ϵ_{e2} , ϵ_{e3} 为应变特征值。

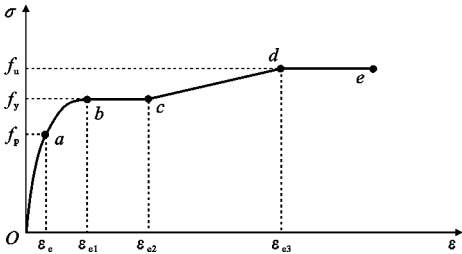


图 4 钢材应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain Relationship of Steel

2.2.2 RAC 本构模型的选取

对于钢管钢筋再生混凝土模型,因 ABAQUS 软件已考虑了钢管和钢筋笼对 RAC 的约束效应,因此本文采用文献[2]中不同取代率下的 RAC 单轴受压本构模型,即

$$y = \begin{cases} \beta x + (3 - 2\beta)x^2 + (\beta - 2)x^3 & 0 \leq x < 1 \\ \frac{x}{\gamma(x-1)^2 + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (21)$$
$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

$$y = \frac{\sigma}{f_{cR}}$$
$$\beta = 2.2(0.748R^2 - 1.231R + 0.975)$$
$$\gamma = 0.8(7.6483R + 1.142)$$

式中: ϵ_0 为再生混凝土的峰值应变; f_{cR} 为不同取代率下再生混凝土轴心抗压强度; β , γ 为控制参数。

RAC 的弹性模量 E_c 应通过试验确定,在缺乏试验资料时,可根据文献[23]所给的 RAC 弹性模量计算式确定

$$E_c = E_0(1 + 0.1278R - 1.8023R^2 + 2.458R^3 - 1.05R^4) \quad (22)$$

式中: E_0 为再生粗骨料取代率为 0 时的混凝土弹性模量,可由试验或查《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[24]得到。

2.2 接触定义

钢筋笼采用嵌入式置于 RAC 柱中,外围钢管与核心 RAC 之间采用面与面接触单元形式,以刚度较大的外围钢管接触面为主面,核心 RAC 接触面为从面,RAC 和钢管界面模型由界面法线方向硬接触和切线方向的黏结滑移构成,界面切向力模拟采用库仑摩擦模型(图 5,其中 τ 为剪应力, τ_{crit} 为剪应力临界值),其摩擦因数取 0.25,法向接触设置为硬接触,允许主从面分离^[25]。

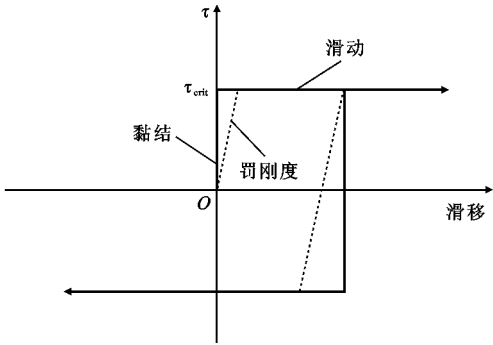


图 5 库仑摩擦模型

Fig. 5 Column Friction Model

2.3 单元类型及网格划分

本文外围钢管采用四节点曲壳单元(S4R),核心 RAC 采用八节点线性缩减积分的三维实体单元(C3D8R),钢筋采用桁架单元(T3D2)。先将模型采用中性轴算法分为一些简单的区域,再使用结构优化网格划分技术来为这些简单的区域划分网格(图 6)。

2.4 边界条件及加载方式

有限元模拟中柱下端约束 3 个方向的位移,上端设置耦合约束加载点。模型设置一个分析步,为保证模型的收敛性,在耦合加载点上方施加位移

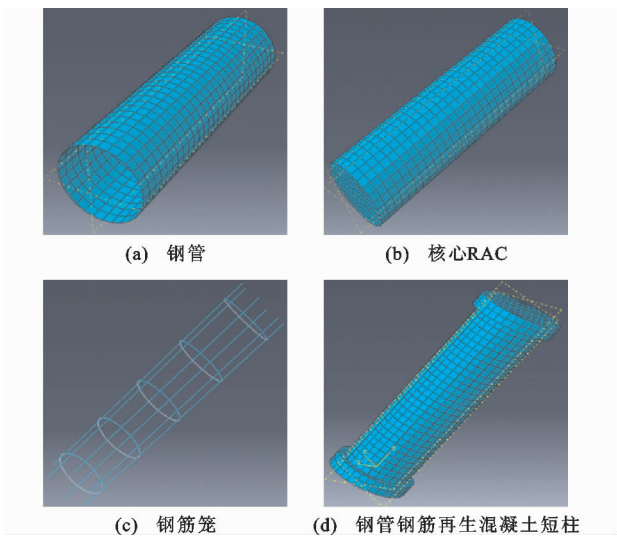


图 6 短柱各部分网格划分示意

Fig. 6 Sketch of Meshing for Each Part of Stub Column

荷载。

2.5 有限元仿真结果分析

本文以文献[25]中 N32LS-C 试件的钢筋笼及文献[26]中 CA-10 试件的钢管再生混凝土为试件参数,对其钢管钢筋再生混凝土短柱破坏形态进行仿真研究。具体试件参数为:短柱截面直径为 88.32 mm,柱高为 283.50 mm,钢管壁厚为 2.51 mm,RAC 棱柱体抗压强度为 29.2 MPa,再生粗骨料取代率为 100%,纵筋布置 6 根 $\phi 6$ 钢筋,箍筋采用 $\phi 3$ 钢筋,箍筋间距为 60 mm,钢筋笼形心直径为 58 mm,保护层厚度为 11.15 mm。

图 7 为有限元模拟的试件破坏形态示意。图 7(a)显示构件整体破坏形态,从图 7(a)有限元模拟情况看,试件中部发生压缩鼓屈,变形明显。由图 7(b),(c)可知,随荷载的增加,短柱各部分应力逐渐增大,其中钢管及钢筋笼的应力增长较快。7(d)为 RAC 破坏形态,可见,在初期荷载下,RAC 与钢管和钢筋笼不会发生挤压,随着荷载增大,RAC 内部发生微裂并不断拓展,RAC 侧向膨胀超过钢管和钢筋笼的侧向膨胀,从而受到钢管与钢筋笼的侧向约束,使得 RAC 强度得到提高。

总体分析来看,当轴向力达到峰值荷载的 85% 左右时,钢管开始进入屈服状态,短柱中部出现明显的鼓屈现象,随荷载增大至峰值荷载,试件整体变形明显,钢筋笼和钢管在变形部位均已屈服,随后试件承载力逐渐下降。上述有限元模拟较好地反映了圆钢管钢筋再生混凝土短柱在轴心荷载作用下的受力过程和变形特征。

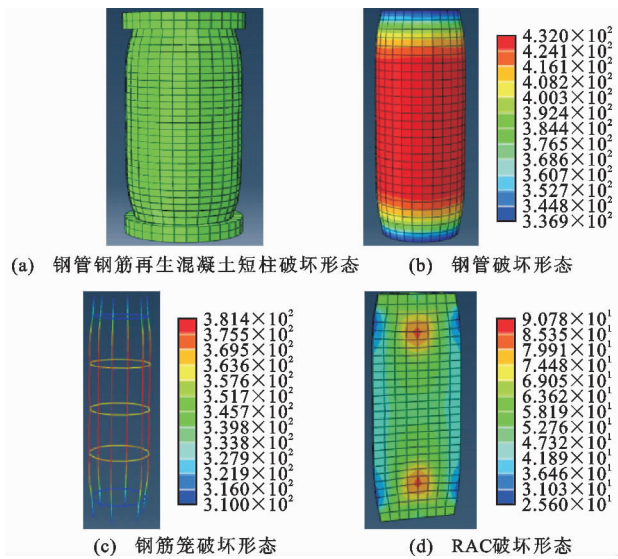


图 7 短柱破坏形态示意(单位:MPa)

Fig. 7 Schematic of Failure Mode of Stub Column (Unit:MPa)

3 公式计算、有限元仿真及试验结果对比分析

本文选取文献[25]中配筋钢管混凝土试件(钢管钢筋混凝土短柱)及文献[26]中钢管再生混凝土短柱做仿真分析,并将试验值、承载力公式值与仿真值进行对比,验证材料模型、界面接触及单元类型的选取对钢管钢筋再生混凝土短柱研究的适用性;由于目前关于钢管钢筋再生混凝土短柱的轴压试验研究鲜见报道,本文以文献[25]试件 N32LS-C 中的钢筋笼及文献[26]中的钢管再生混凝土为试件参数,研究钢管钢筋再生混凝土短柱的轴压性能,并将推导的承载力公式值与仿真值进行对比。

本文推导的短柱承载力公式计算结果、有限元仿真结果与试验结果对比见表 2。由表 2 可知:文献[25]与文献[26]的仿真值与试验值非常接近,相对误差不超过 5%,验证了材料模型、界面接触及单元类型选取的合理性;承载力公式值与试验值相比,除试件 A2,A4 相对误差分别为 8%,6%外,其余结果的相对误差均在 5%以内,吻合较好。承载力公式值与仿真值对比,其相对误差均在 5%以内,满足精度要求。本文将圆钢管钢筋再生混凝土短柱(试件编号 A35~A39)与文献[26]中钢管再生混凝土短柱(试件编号 A5~A9)对比发现,圆钢管钢筋再生混凝土短柱承载力仿真值平均提高 10%,承载力公式计算值平均提高 8%。

通过以上对比分析可知,提出的钢管钢筋再生

表 2 试验、仿真以及公式极限承载力结果对比

Tab.2 Comparison of Test, Simulation and Formula Results of Ultimate Bearing Capacity

| 数据来源 | 试件编号 | 试验值 N_u /kN | 仿真值 N_i /kN | 公式值 N_c /kN | N_c/N_u | N_i/N_u | N_c/N_i |
|----------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| 文献[25] | A1(N32LB-C) | 1 052.613 | 1 077.683 | 1 031.338 | 0.98 | 1.02 | 0.96 |
| | A2(N60LB-C) | 1 509.465 | 1 466.116 | 1 391.206 | 0.92 | 0.97 | 0.95 |
| | A3(N32LS-C) | 1 041.626 | 1 020.033 | 1 025.533 | 0.98 | 0.98 | 1.01 |
| | A4(N60LS-C) | 1 472.677 | 1 410.663 | 1 385.983 | 0.94 | 0.96 | 0.98 |
| 文献[26] | A5(CA-1) | 517.530 | 515.652 | 510.351 | 0.99 | 1.00 | 0.99 |
| | A6(CA-3) | 522.240 | 508.460 | 515.798 | 0.99 | 0.97 | 1.01 |
| | A7(CA-5) | 519.930 | 498.635 | 513.123 | 0.99 | 0.96 | 1.03 |
| | A8(CA-7) | 530.880 | 519.104 | 541.281 | 1.02 | 0.98 | 1.04 |
| | A9(CA-10) | 540.960 | 522.962 | 542.182 | 1.00 | 0.97 | 1.04 |
| 圆钢管钢筋 再生混凝土 短柱 | A35 | | 578.653 | 550.215 | | | 0.95 |
| | A36 | | 543.630 | 555.455 | | | 1.02 |
| | A37 | | 546.767 | 552.855 | | | 1.01 |
| | A38 | | 579.943 | 580.222 | | | 1.00 |
| | A39 | | 579.915 | 581.054 | | | 1.00 |

注:试件编号括号内为文献所对应的试件编号;A35~A39 表示以文献[25]中 A3(N32LS-C)试件钢筋笼和文献[26]钢管再生混凝土为特征参数的钢管钢筋再生混凝土短柱试件编号。

混凝土短柱轴压承载力计算公式同样适用于钢管钢筋混凝土短柱、钢管再生混凝土短柱轴压承载力计算;由于钢管和钢筋笼对 RAC 的双重约束作用,使得本文计算的钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力相对于钢管再生混凝土短柱提高 10%左右。

4 结 语

(1)通过极限分析法、套箍理论以及双剪统一强度理论对圆钢管钢筋再生混凝土短柱进行了研究分析,并提出了一套包含钢管径厚比、约束效应系数、含钢率以及再生粗骨料取代率等影响因素的此类短柱承载力计算公式,将本文公式值与仿真值进行对比,发现吻合较好。

(2)通过对钢管再生混凝土短柱、钢管钢筋混凝土短柱进行有限元分析,验证了材料模型、界面接触及单元类型的选取对圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压性能研究的可靠性,并对圆钢管钢筋再生混凝土短柱有限元仿真结果进行了分析。

(3)在考虑钢管与钢筋笼双重约束作用的情况下,提出的钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力计算公式同样适用于钢管钢筋混凝土短柱、钢管再生混凝土短柱轴压承载力计算,而且理论计算值更加接近试验值。

(4)本文给出了钢筋笼的约束应力表达式,考虑加了钢筋笼的圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力比圆钢管再生混凝土短柱轴压承载力提高 10%

左右。

参考文献:
References:

[1] 陈绍蕃,顾 强. 钢结构(上册):钢结构基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
CHEN Shao-fan, GU Qiang. Steel Structure (Volume 1); Steel Structure Foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[2] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
XIAO Jian-zhuang. Recycled Concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[3] 刘 坚,毛 捷,陈 原,等. 方钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点抗震性能分析[J]. 建筑科学与工程学报,2018,35(3):25-34.
LIU Jian, MAO Jie, CHEN Yuan, et al. Seismic Behavior of Steel Recycled Concrete Column and Steel Beam Joint of Square Steel Tube[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(3): 25-34.

[4] ZHU P H, HAO Y L, LIU H, et al. Durability Evaluation of Three Generations of 100% Repeatedly Recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 210: 442-450.

[5] 周绪红,刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计[M]. 北京:科学出版社,2010.
ZHOU Xu-hong, LIU Jie-peng. Performance and Design of Steel Tube Confined Concrete Column[M].

- Beijing: Science Press, 2010.
- [6] 周绪红, 闫 标, 刘界鹏, 等. 不同长径比圆钢管约束钢筋混凝土柱轴压承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(12): 11-21.
- ZHOU Xu-hong, YAN Biao, LIU Jie-peng, et al. Axial Load Behavior of Circular Tubed Reinforced Concrete Columns with Different Length-to-diameter Ratios [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(12): 11-21.
- [7] 刘 朝, 赵均海, 王 娟, 等. 配筋圆钢管混凝土短柱轴压承载力分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4): 92-96.
- LIU Zhao, ZHAO Jun-hai, WANG Juan, et al. Analysis of Axial Bearing Capacity of Reinforced Concrete-filled Circular Steel Tube Short Columns [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(4): 92-96.
- [8] 刘 坚, 周东华, 王文达. 钢与混凝土组合结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- LIU Jian, ZHOU Dong-hua, WANG Wen-da. Design Principle of Steel and Concrete Composite Structures [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [9] HU H T, HUANG C S, WU M H, et al. Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-filled Tube Columns with Confinement Effect [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(10): 1322-1329.
- [10] ELLOBODY E, YOUNG B, LAM D. Behaviour of Normal and High Strength Concrete-filled Compact Steel Tube Circular Stub Columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(7): 706-715.
- [11] WANG Y Y, CHEN J, GENG Y. Testing and Analysis of Axially Loaded Normal-strength Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns [J]. Engineering Structures, 2015, 86: 192-212.
- [12] KONNO K, SATO Y, UEDA T, et al. Mechanical Property of Recycled Concrete Under Lateral Confinement [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1988, 20(3): 287-292.
- [13] 张卫东, 王振波, 丁海军. 小径厚比钢管再生混凝土短柱轴压性能研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(12): 86-89.
- ZHANG Wei-dong, WANG Zhen-bo, DING Hai-jun. Study on the Behavior of Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tubes with Small Diameter-thickness Ratio Under Axial Compression [J]. Building Structure, 2012, 42(12): 86-89.
- [14] 杨有福. 钢管再生混凝土构件受力机理研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(12): 7-12.
- YANG You-fu. Study on Bearing Mechanisms of Recycled Aggregate Concrete-filled Steel Tubular Members [J]. Industrial Construction, 2007, 37(12): 7-12.
- [15] 李文贵, 罗智予, 龙 初, 等. 钢管混凝土与钢管再生骨料混凝土抗冲击性能研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(4): 25-35.
- LI Wen-gui, LUO Zhi-yu, LONG Chu, et al. Review of Impact Resistance of CFST and RACFST [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(4): 25-35.
- [16] 陈梦成, 刘京剑, 黄 宏. 圆钢管再生混凝土轴压短柱研究[J]. 混凝土, 2014(12): 43-48.
- CHEN Meng-cheng, LIU Jing-jian, HUANG Hong. Study on Circle Recycled Aggregate Concrete-filled Steel Tube Under Axial Compression [J]. Concrete, 2014(12): 43-48.
- [17] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- CAI Shao-huai. Modern Steel Tube Confined Concrete Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [18] YU M H. Unified Strength Theory and Its Applications [M]. Berlin: Springer, 2004.
- [19] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R, et al. Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [20] 肖建庄, 杨 洁, 黄一杰, 等. 钢管约束再生混凝土轴压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 92-98.
- XIAO Jian-zhuang, YANG Jie, HUANG Yi-jie, et al. Experimental Study on Recycled Concrete Confined by Steel Tube Under Axial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 92-98.
- [21] 纵 斌. 钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土短柱轴压性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- ZONG Bin. Experimental Research on Recycled Aggregate Concrete-filled Steel Tubular Stubs and Reinforced Recycled Aggregate Concrete Stubs Under Axial Compressive Loading [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [22] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structure: Theory and Practice [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [23] 彭玉林, 龚爱民, 孙海燕, 等. 再生混凝土弹性模量变化规律试验研究[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(4): 8-12.
- PENG Yu-lin, GONG Ai-min, SUN Hai-yan, et al.

Experimental Study on the Variation Law of Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011,17(4):8-12.

[24] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S]. GB 50010—2010,Code for Design of Concrete Structures[S].

[25] 罗 辑. 配筋钢管混凝土构件的力学性能研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2012. LUO Ji. Research on Mechanical Properties of Reinforced Concrete Filled Steel Tubular Members[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2012.

[26] 陈宗平,张士前,王 妮,等. 钢管再生混凝土轴压短柱受力性能的试验与理论分析[J]. 工程力学,2013,30(4):107-114. CHEN Zong-ping, ZHANG Shi-qian, WANG Ni, et al. Experimental Study and Theoretical Analysis on Axial Compress Capacity of Recycled Aggregate Concrete-filled Circle Steel Tube Short Column[J]. Engineering Mechanics,2013,30(4):107-114.