

文章编号:1673-2049(2019)05-0039-13

带约束拉杆圆端形钢管混凝土短柱轴压工作机理

任志刚,刘 闯,王丹丹,魏 巍

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070)

摘要:针对带约束拉杆圆端形钢管混凝土相对于其他截面钢管混凝土受力性能更加复杂的问题,对带约束拉杆圆端形钢管混凝土截面进行强弱约束分区,将圆端形钢管混凝土截面切分为矩形和半圆形,并分别采用不同的混凝土本构关系修正,提出一种新的圆端形钢管混凝土本构关系式;最后提出了带约束拉杆圆端形钢管混凝土轴压承载力的推荐公式,并验证了公式的合理性。利用有限元软件对57个模型构件进行精细化分析。改变拉杆直径、混凝土强度、拉杆间距、截面含钢率、高宽比等进行参数研究。结果表明:随着截面含钢率、拉杆直径、拉杆密度的提高,构件的承载力和延性均得到提高;混凝土强度的提高能提高构件的承载力但会导致延性降低;提出的推荐公式考虑了拉杆系数的影响,推荐公式计算结果与有限元模拟结果非常吻合,混凝土强度超过80 MPa时,计算结果偏安全,能有效预测构件的承载性能。

关键词:圆端形钢管混凝土;约束拉杆;本构关系;轴压

中图分类号:TU398

文献标志码:A

Axial Compression Mechanism of Round-ended Concrete-filled Steel Tubular Stub Short Columns with Binding Bars

REN Zhi-gang, LIU Chuang, WANG Dan-dan, WEI Wei

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Aiming at the problem that the mechanical behavior of round-ended concrete-filled steel tube (RCFST) was more complicated than that of other section concrete-filled steel tube, the section of round-ended concrete-filled steel tubular stub short column was divided into strong and weak constrained part, and the section of RCFST column was divided into rectangular and semi-circular sections. And a new constitutive equation of RCFST column was proposed by using different amendments of concrete constitutive relation. Finally, the recommended formula for the axial compressive bearing capacity of RCFST column was put forward, and the rationality of the formula was verified. The finite element software was used to analyze 57 model components finely. The parameters were studied by changing the diameter of binding bar, concrete strength, distance between binding bars, steel content of section, height-width ratio, etc. The results show that with the increase of steel content of section, diameter of binding bar and density of binding bar, the bearing capacity and ductility of members are improved. Increasing the strength of concrete can improve the bearing capacity of members, but it will lead to a reduction in ductility. When the strength of concrete exceeds 80 MPa, the calculation results are safe and can effectively predict the bearing capacity of members.

收稿日期:2018-11-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51778512);武汉理工大学研究生优秀学位论文培育项目(2018-YS-046)

作者简介:任志刚(1974-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:renzg@163.com。

Key words: RCFST column; binding bar; constitutive relationship; axial compression

0 引言

钢管混凝土组合构件充分利用了钢管和混凝土材料的组合优势,钢管能对核心混凝土提供良好的约束作用,同时施工方便且经济合理,在现在超高建筑和桥梁工程中得到广泛应用。随着钢管混凝土的应用范围不断发展,其截面形式为满足不同的使用要求也不断向圆形、矩形、多腔异形等形状发展演变^[1]。

目前国内外对钢管混凝土的研究主要集中在圆形和矩形截面^[1-4],对圆端形截面的研究较少。蔡健等^[5-7]进行了带约束拉杆方形、矩形钢管混凝土短柱的轴压试验和混凝土本构关系研究,结果表明约束拉杆加强了钢管对混凝土的约束作用,但同时使混凝土本构关系更加复杂,其采用侧向等效力提出的本构关系能较好地反映混凝土的轴压性能。丁发兴等^[8]应用连续介质力学对钢管混凝土构件进行弹塑性分析,研究结果可供非线性有限元分析参考。何振强等^[9-10]的试验表明,约束拉杆能避免方形钢管混凝土发生失稳前的局部屈曲,约束拉杆的直径和间距影响构件的极限承载力和延性。黄宏等^[11]进行了带肋方钢管混凝土的试验研究,加劲肋提高了构件极限承载力和管壁的稳定性。刘鸿亮等^[12]考虑了拉杆约束作用,修正了已有文献混凝土单轴应力-应变关系,提出了适用于带约束拉杆方形钢管混凝土短柱有限元分析的混凝土单轴应力-应变关系模型。文献^{[13]~[20]}进行了圆端形钢管混凝土柱的试验和模拟研究,结果表明圆端形钢管混凝土截面在两端圆形区约束较强,在平直段约束较弱。王志滨等^[13]进行了带隔板圆端形钢管混凝土柱的轴压试验,结果表明加隔板能提高构件的延性和极限承载力。Hassanein 等^[20]将圆端形钢管混凝土截面切分为矩形和 2 个半圆形,采用不同的混凝土本构关系进行有限元分析,模拟结果与试验结果相吻合。目前,关于带约束拉杆圆端形钢管混凝土短柱轴压的试验和理论研究较少,现有的研究表明,圆端形钢管混凝土两端约束较强,中间平直段约束较弱,而在其他截面形式钢管混凝土中,约束拉杆能较好地提高和改善钢管混凝土的受力性能。为此本文提出了在圆端形钢管混凝土中加入约束拉杆来提高构件的界面黏结性能,研究带约束拉杆圆端形钢管混凝土构件的轴压工作机理,最后给出轴压承载力推荐公

式并验证其合理性。

1 带约束拉杆圆端形钢管混凝土本构关系模型

1.1 混凝土本构

图 1 为典型的圆端形钢管混凝土截面(B' , D' 分别为圆端形钢管外侧截面的高度和宽度, A_1 , A_2 , A_3 为跨中截面临界点),由矩形和半圆形组合而成。根据强弱约束分区,将核心混凝土切分为矩形区混凝土和半圆形区混凝土,分别采用相应的混凝土修正本构关系,在有限元模型中分别赋予不同的本构关系进行模拟计算。

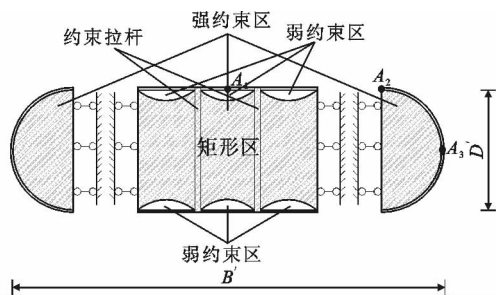


图 1 RCFST 横截面

Fig. 1 Cross Section of RCFST

(1) 矩形区混凝土本构关系

带约束拉杆圆端形钢管混凝土构件的中部矩形区受力机理与带约束拉杆矩形钢管混凝土构件相近,蔡健等^[5]等基于 Mander 的箍筋混凝土试验研究,引入拉杆约束系数,推导出适用于带约束拉杆矩形钢管混凝土的本构关系,该本构关系能明显表现应力、应变峰值附近的趋势变化,且力学概念清晰。Liang^[3]基于 Mander 钢筋混凝土的研究,结合矩形钢管混凝土试验研究,提出了新的矩形钢管混凝土的本构关系;Hassanein 等^[20]采用 Liang^[3]的本构关系研究了带约束拉杆圆端形钢管混凝土短柱轴压工作机理,对于矩形区混凝土本构关系采用 Liang^[3]的本构关系修正,并且引入蔡健等^[5]的拉杆约束系数,根据强弱约束分区对拉杆约束系数进行修正,得到带约束拉杆圆端形钢管混凝土中部矩形区混凝土本构关系。中部矩形区混凝土约束作用如图 2 所示,其中 a 为混凝土矩形区平直段长度, b 为矩形区混凝土宽度, b_s 为约束拉杆纵向间距, θ 为强弱约束分区抛物线切角。

矩形区混凝土应力-应变($\sigma-\epsilon$)曲线如图 3 所示

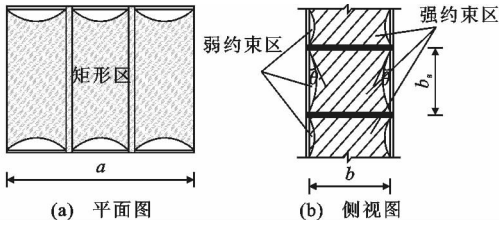


图 2 中部矩形区混凝土有效约束区

Fig. 2 Effective Concrete Confinement Zone in Central Rectangular Area

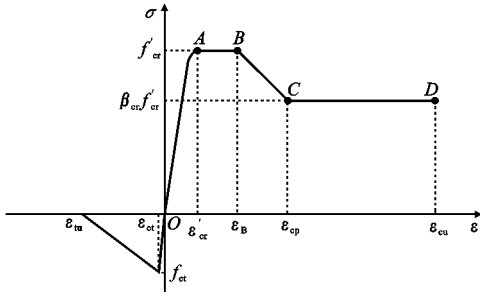


图 3 中部矩形区混凝土应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain Curve of Concrete in Central Rectangular Area

(其中: ϵ_B 为 B 点的混凝土应变, 取 $\epsilon_B = 0.005$; ϵ_{cp} 为 C 点的混凝土应变, 通常取 $\epsilon_{cp} = 0.015$; ϵ_{cu} 为 D 点的混凝土应变, 取 0.03 ; β_{cr} 为反映核心混凝土在约束作用下峰值应变后期阶段塑性变化的参数; ϵ'_{cr} 为混凝土的峰值应变, 一般在 $0.002 \sim 0.003$ 之间, 取决于混凝土的轴心抗压强度, 混凝土轴心抗压强度在 $28 \sim 82$ MPa 之间, 采用线性插值的方式确定; f'_{cr} 为混凝土轴心抗压强度, 取 $f'_{cr} = 0.8 f'_c$, f'_c 混凝土圆柱体抗压强度; f_{ct} 为混凝土的抗拉强度; ϵ_{ct} 为混凝土达到抗拉强度时对应的应变; ϵ_{tu} 为混凝土的抗拉极限应变), 曲线的 OA 段采用 Mander 的推荐公式, 即

$$\sigma_c = f'_{cr} \lambda \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cr}} / (\lambda - 1 + \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cr}}) \quad (1)$$

$$\lambda = E_c / (E_c - \frac{f'_{cr}}{\epsilon_{cr}}) \quad (2)$$

$$E_c = 3\,320 \sqrt{f'_{cr}} + 6\,900 \quad (3)$$

$$\epsilon'_{cr} = \begin{cases} 0.002 & f'_{cr} \leq 28 \text{ MPa} \\ 0.002 + \frac{f'_{cr} - 28}{54\,000} & 28 \text{ MPa} < f'_{cr} \leq 82 \text{ MPa} \\ 0.003 & f'_{cr} > 82 \text{ MPa} \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_c , ϵ_c 分别为核心混凝土轴向应力和应变; E_c 为混凝土的弹性模量。

核心约束混凝土应力-应变曲线的 AB, BC 和 CD 段由 Liang^[3] 提出, 在考虑约束拉杆对核心混凝土的约束效应后, 引入了带约束拉杆圆端形钢管混

凝土的约束系数, 从而得到适用于带约束拉杆的圆端形钢管混凝土中部矩形区混凝土的本构关系式, 即

$$\sigma_c = \begin{cases} f'_{cr} & \epsilon'_{cr} < \epsilon_c \leq \epsilon_B \\ \beta_{cr} f'_{cr} + \frac{(\epsilon_{cp} - \epsilon_c)(f'_{cr} - \beta_{cr} f'_{cr})}{\epsilon_{cp} - \epsilon_B} & \epsilon_B < \epsilon_c \leq \epsilon_{cp} \\ \beta_{cr} f'_{cr} & \epsilon_c > \epsilon_{cp} \end{cases} \quad (5)$$

结合文献[11], [12]对带约束拉杆矩形钢管混凝土的机理进行研究, 得

$$\beta_{cr} = \begin{cases} 1.0 & \frac{D'}{t} \leq 24 \\ \sqrt{1+\xi} \sqrt{1+2\zeta} (2.5 - \frac{1}{48} \frac{B'}{t}) & 24 < \frac{D'}{t} \leq 48 \\ 0.5 & \frac{D'}{t} > 48 \end{cases} \quad (6)$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{n_b A_b f_{ly}}{(B' - D') b_s f_{ck}} \quad (8)$$

式中: A_s 为钢管横截面面积; A_c 为混凝土横截面面积; t 为钢管的厚度; ξ 为钢管的约束系数; ζ 为拉杆的约束系数; n_b 为中部矩形区在纵向 b_s 区域内的拉杆根数; A_b 为单根拉杆的横截面面积; f_{ly} 为约束拉杆的屈服强度; f_y 为钢管的屈服强度; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值。

由核心混凝土受拉下的应力-应变关系曲线(图3)可以看出, 在混凝土受拉初始阶段, 混凝土应力随着应变的增加线性增加, 到达峰值应力时混凝土产生拉裂缝, 拉应力开始线性减少到 0。混凝土的抗拉强度 f_{ct} 为 $0.6 \sqrt{f'_{cr}}$, 抗拉极限应变 $\epsilon_{tu} = 10 \epsilon_{ct}$ 。

(2) 半圆形区混凝土本构关系

圆端形钢管混凝土两端半圆形截面混凝土的受力机理与圆钢管混凝土相似, 文献[1]给出了圆形钢管混凝土的应力-应变($\sigma \epsilon$)关系式, 即

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta_0 (x-1)^7 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, y = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (10)$$

$$\sigma_0 = f'_c \quad (11)$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_c + 800 \xi^{0.2} \times 10^{-6} \quad (12)$$

$$\epsilon_c = (1\,300 + 12.5 f'_c) \times 10^{-6} \quad (13)$$

$$\beta_0 = (2.36 \times 10^{-5})^{0.25 + (\xi - 0.5)^7} f'_c{}^{0.5} \times 0.5 \quad (14)$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} = \alpha \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (15)$$

式中: ϵ_0, σ_0 分别为圆形区混凝土峰值应变和峰值应力; β_0 为混凝土应力-应变曲线下降阶段与约束效应系数相关的变量; α 为圆钢管截面含钢率; $\eta=2$ 。

1.2 钢材本构

有限元模型中的拉杆和钢管本构关系都采用等向弹塑性模型, 模型强度采用 Q400, 应力-应变关系曲线采用文献[8]中的五段二次塑流模型(图 4), 其中 f_p, f_u 分别为钢材的比例极限强度和极限强度, $\epsilon_e = 0.8 f_y / E_s, \epsilon_{e1} = 1.5 \epsilon_e, \epsilon_{e2} = 10 \epsilon_{e1}, \epsilon_{e3} = 100 \epsilon_{e1}$ 。

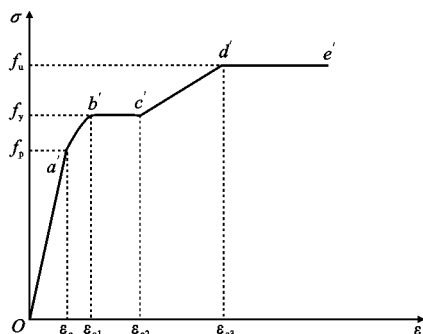


图 4 钢材应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain Curve of Steel

2 有限元分析

应用前文所建立的材料本构模型进行计算, 基于 ABAQUS6.13 通用有限元平台建立 57 个有限元模型来分析拉杆参数、高宽比、混凝土强度和截面含钢率等对构件轴压力学性能的影响。

2.1 单元选取与网格划分

模型由上下加载板、钢管、核心混凝土和拉杆等单元组成, 钢管采用四节点缩减积分壳单元(S4R), 采用 Simpson 的积分形式, 拉杆采用三维二节点 Truss 单元(T3D2), 核心混凝土和上下加载板采用实体单元(C3D8R), 网格划分的尺寸为 30 mm×30 mm。

2.2 接触与边界

在钢管混凝土上下端各施加 1 个端板, 采用刚体约束来模拟加载板。在加载板上下端板截面中心位置各设置 1 个 RP 参考点, 参考点与端板耦合约束, 采用上加载板施加位移而下加载板固定所有自由度这种方式来进行研究。利用接触面上的接触压力封闭模型和表面切向的库仑摩擦模型来模拟钢管和核心混凝土之间的黏结作用, 取钢管和混凝土之间的摩擦因数为 0.5, 选择有限滑动同时允许模型自调节消除过盈。约束拉杆与混凝土、约束拉杆与

钢管以及核心混凝土上下截面与加载板截面均采用绑定(tie)接触, 钢管与端板采用壳与实体耦合(Shell-to-solid Coupling)连接方式。

2.3 试验验证

王志滨等^[13]对圆端形钢管混凝土进行了轴压试验, 在试件 RCFST-5C 上设置了单排拉杆, 结果表明: 相较于不带约束拉杆的普通构件, 带约束拉杆的圆端形钢管混凝土在峰值位置有明显的塑性变形段, 约束拉杆能有效提升钢管混凝土的塑性, 在平缓段过后曲线出现陡峭的下降段, 塑性后阶段表现一定的脆性。采用横隔板的构件承载力比普通构件提高 6.9%, 而采用带约束拉杆的构件承载力提高 15.4%, 这说明采用带约束拉杆的构件承载力远远高于加隔板等方式。图 5 为荷载-应变实测曲线和有限元模拟曲线的对比, 文献[13]的混凝土本构关系采用矩形钢管混凝土的本构关系, 没有考虑拉杆的约束增强作用, 其模拟曲线与矩形钢管混凝土相似, 在峰值位置无明显平缓段, 表现出较强的脆性。本文采用的混凝土本构关系引入了约束拉杆系数, 在峰值段模拟曲线与实测曲线都有明显的塑性段, 能较好反映带约束拉杆圆端形钢管混凝土在工作阶段的塑性和脆性变化趋势。

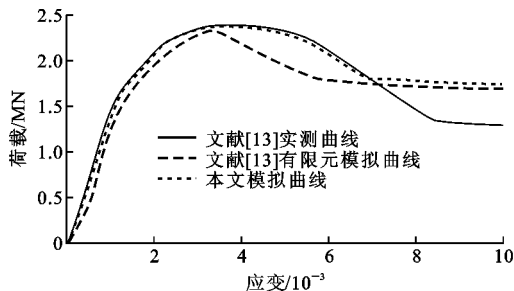


图 5 RCFST-5C 有限元模拟曲线与实测曲线对比

Fig. 5 Comparison Between Finite Element Simulated Curves and Measured Curves of RCFST-5C

3 带约束拉杆圆端形钢管混凝土的约束机理

3.1 破坏形态与受力全过程分析

图 6 为典型构件 600-200-2(B-D-n_b) 的荷载-轴向应变关系曲线, 峰值应变为 0.005, 普通混凝土峰值应变为 0.002 2, 钢管和拉杆对混凝土的约束作用改善了混凝土的轴压性能。

图 6 中荷载-轴向应变关系曲线分为 3 个阶段, A 点以前为弹性阶段, AB 为强化阶段, BC 为峰值后下降段, C 点的轴向应变达到 0.015。

图 7 为各圆端形钢管混凝土柱轴向位移变形,

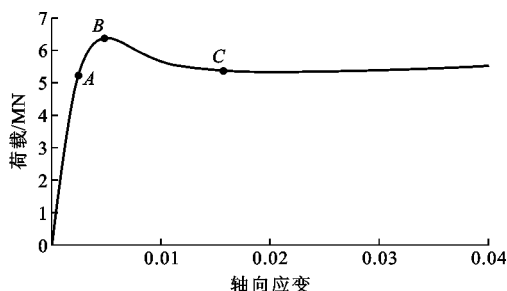


图 6 典型构件荷载-轴向应变曲线

Fig. 6 Load-axial Strain-load Curve of Typical Component

在不同高宽比和不同约束拉杆设置方式的情况下,各构件的变形形态有较大差异。由图 7(a)可知,在高宽比为 2 时,构件变形表现为 1/3 轴长处轻微鼓曲,设置单排拉杆和双排拉杆时,能有效提高钢管对核心混凝土的约束作用,破坏形式仍表现为 1/3 轴长处轻微鼓曲,当设置 3 排约束拉杆时,构件未发生明显鼓曲,表明设置 3 排约束拉杆对高宽比较小的构件仍能起到明显的约束加强作用。图 7(b)构件高宽比为 3,在不设置约束拉杆时其中部区域有明显鼓曲,增加约束拉杆后鼓曲变形变小。图 7(c)构件的高宽比为 4,不设置拉杆和设置单排拉杆均会产生“波浪形”屈曲,而增加拉杆排数时构件没有明显屈曲,表明在大高宽比构件中设置约束拉杆能明显增强钢管和混凝土之间的约束作用,能有效改善圆端形钢管混凝土的变形状态。

3.2 混凝土的应力状态

图 8(a)给出了不带拉杆的典型构件跨中截面的混凝土轴向应力分布,图 8(b)给出了 600-200-2 典型构件跨中截面的混凝土轴向应力分布(应力遵循拉为正,压为负)。由图 8 可知:混凝土的应力都随着轴向应变的增大而增大;圆弧段的混凝土应力大于矩形区混凝土的应力,说明半圆形区钢管的约束效应大于平直段;带约束拉杆的圆端形混凝土应力分布更均匀,圆形区混凝土应力与平直段相差较小,说明约束拉杆能够有效提高对矩形区混凝土的约束作用。

3.3 钢管的应力状态

图 9 给出了典型构件的钢管应力云图。钢管两端受到端板的约束,所以应力较小,在 B 点时,钢管跨中截面的应力接近屈服应力,钢管开始屈服,当轴向应变达到 0.015(C 点)时,跨中截面由于局部屈曲的影响,应力分布不均匀,最大值为 390.2 MPa,最小值为 81.3 MPa。

3.4 约束拉杆的应力状态

图 10 为约束拉杆在 A、B、C 点处的应力分布。

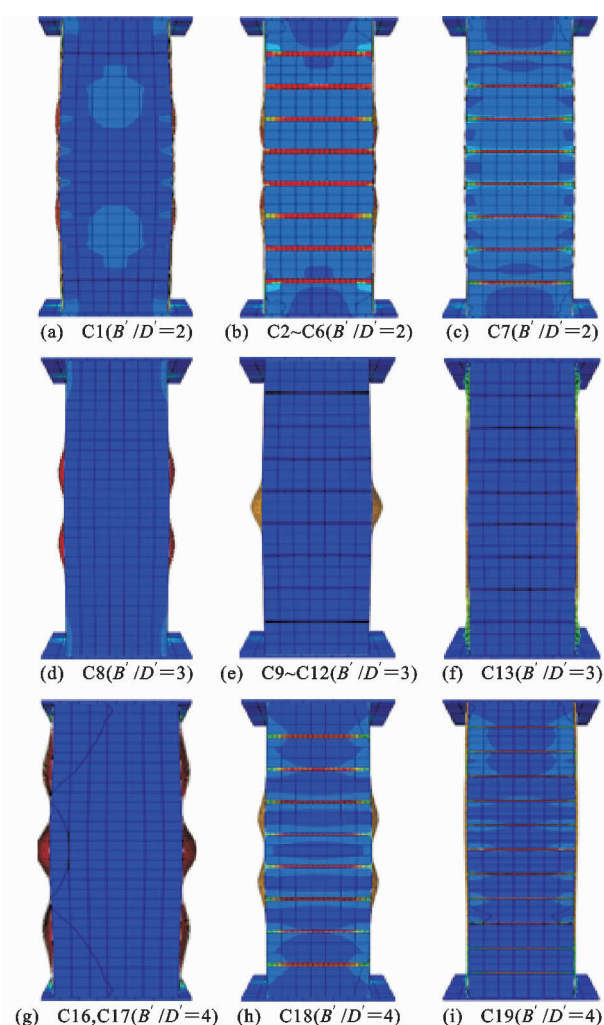


图 7 圆端形钢管混凝土柱变形

Fig. 7 Deformations of RCFST

在 A 点处,拉杆应力分布较均匀,应力接近比例极限,到达 B 点时接近拉杆的屈服强度,此时拉杆仍在工作。当轴向应变达到 0.015(C 点)时,部分拉杆超过屈服强度,拉杆退出工作。

3.5 接触应力分析

图 11 为典型构件跨中截面混凝土与钢管的法向接触应力分布(其中 O' 为圆端形平直段中点)。由图 11 可知:圆弧段接触应力较大,且随着轴向应变的增大,圆弧段中点的法向接触应力增大,圆弧段的法向接触应力在 B 点后更接近圆形;圆弧段的法向接触应力分布较均匀,最大值出现在圆弧形与平直段连接处的 O 点附近。在峰值荷载后,平直段法向接触应力不断减小,这是因为平直段的局部屈曲导致钢管与混凝土脱离。

3.6 约束效应分析

Ding 等^[15]通过研究指出,钢管和混凝土约束效应的强弱可以由钢管的横向和轴向应力-应变关系

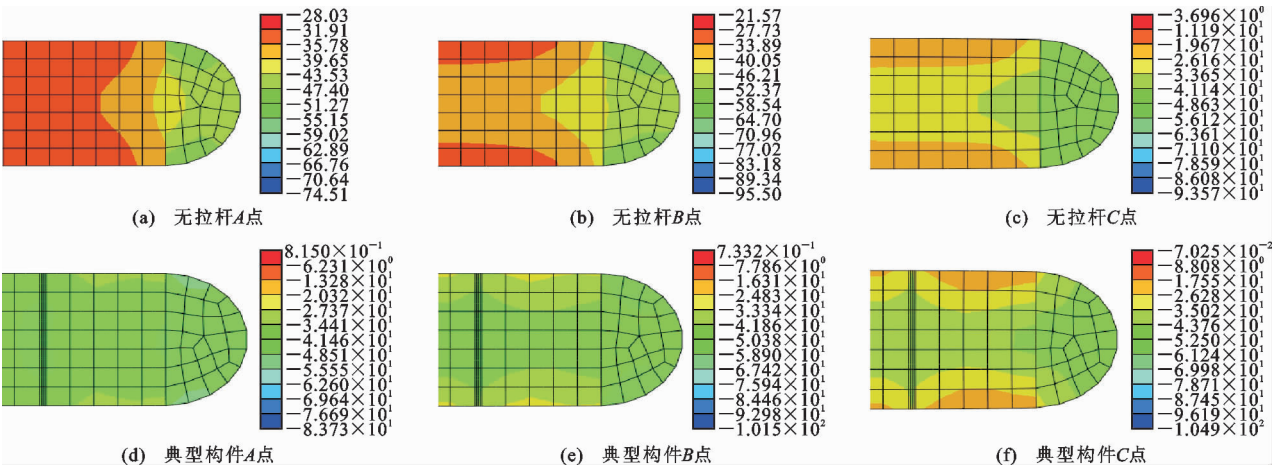


图 8 典型构件混凝土跨中截面轴向应力分布 (单位:MPa)

Fig. 8 Axial Stress Distribution of Concrete Medium-span Section of Typical Components (Unit:MPa)

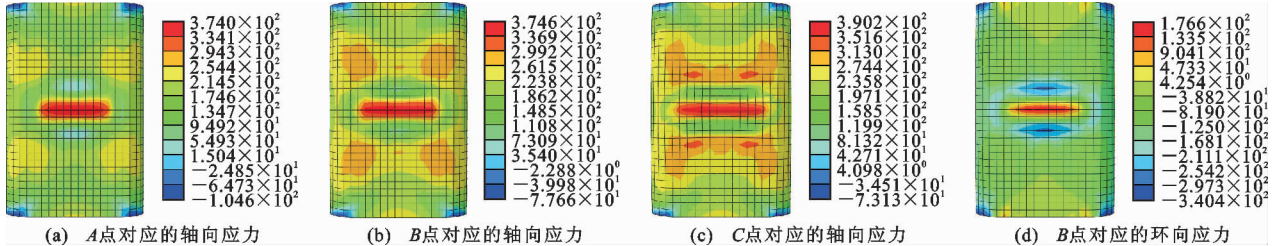


图 9 钢管的应力分布 (单位:MPa)

Fig. 9 Stress Distribution of Steel Tubes (Unit:MPa)

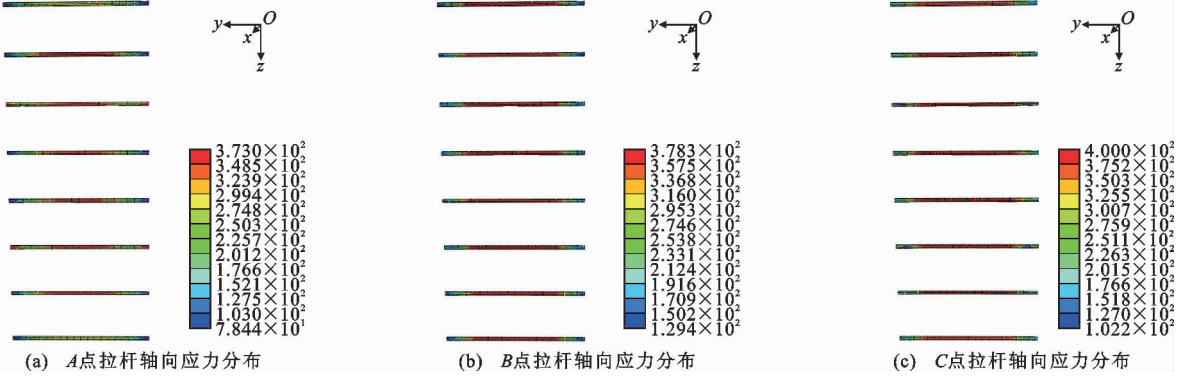


图 10 拉杆应力分布 (单位:MPa)

Fig. 10 Stress Distribution of Binding Bars (Unit:MPa)

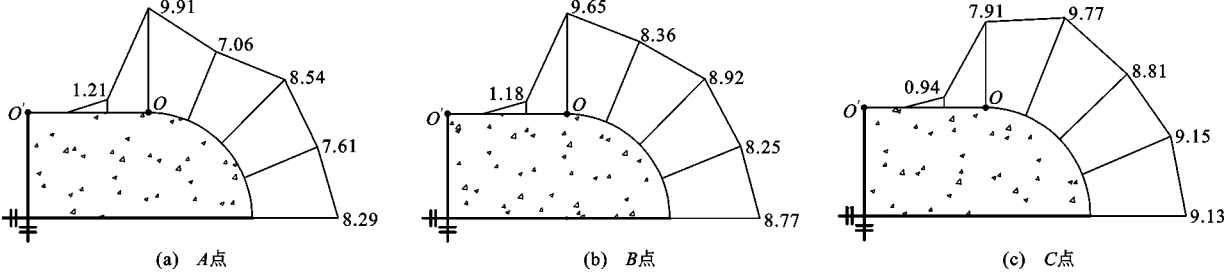


图 11 混凝土和钢管的接触应力 (单位:MPa)

Fig. 11 Contact Stress of Concrete and Steel Tube (Unit:MPa)

曲线来反映,如果曲线相交则约束较强,曲线分离则约束较弱。本文分析典型构件跨中截面 A_1, A_2, A_3 (图1)3个临界点的轴向和横向应力-应变关系曲线。图12(a)给出了 $B'/D'=2$ 时 A_2 点的轴向和横向应力-应变关系曲线,结果表明高宽比较小时钢管对混凝土约束效应较强。图12(b),(c)分别为 A_1, A_2 点在 $B'/D'=2, 3, 4$ 时的轴向和横向应力-应变关系曲线。图12(d)给出了 A_3 点处不同高宽比的构件跨中截面横向和轴向应力-应变关系曲线。在 A_1, A_2 点处,钢管对混凝土的约束效应较弱,在 A_3 点处各高宽比的构件均表现出较强的约束效应。

4 参数分析

利用前文验证的有限元模型来进行带约束拉杆圆端形钢管混凝土短柱轴压的模拟分析,为避免柱的长度过长影响整体稳定,有限元模型构件长度取 $2.5\max\{B', D'\}$,表1为本研究中考虑的构件尺寸和材料性质。从表1中可以看出主要的研究参数是拉杆直径 d_s 、混凝土强度 f_{ck} 、拉杆轴向间距 b_s 、截面含钢率 α 、高宽比 B'/D' 、截面设置拉杆个数 n_b 。

图13为不同高宽比的圆端形钢管混凝土横截面拉杆布置方式及间距,轴向间距 b_s 沿轴向等距分布。为研究约束拉杆布置的稀疏性对承载力的影响,新定义拉杆稀疏系数 φ , φ 等于拉杆总数的倒数,数值越小表示稀疏性越大。

4.1 高宽比的影响

图14给出了高宽比分别为2,3,4的3种不同

截面构件在不同拉杆约束方式下的荷载-轴向应变关系曲线。由图14可知:随着高宽比的增大,构件的延性降低,荷载-轴向应变曲线更加接近矩形;高宽比越小,延性越强,荷载-轴向应变曲线更加接近圆形。 $B'/D'=2$ 时,无约束拉杆的圆端形钢管混凝土构件峰值应变为0.0045,采用图14(b)的约束拉杆方式时峰值应变为0.0048,采用图14(c)的约束拉杆方式时峰值应变为0.0055,采用图14(d)的约束拉杆方式时峰值应变为0.0056,峰值应变提高最大达22.22%。 $B'/D'=4$ 时,约束拉杆能提高峰值应变最大达到34.69%。高宽比越大,拉杆的作用越明显。

4.2 混凝土强度的影响

图15给出了3种高宽比的带约束拉杆的圆端形钢管混凝土构件在3种不同混凝土轴心抗压强度下的荷载-轴向应变关系曲线。随着混凝土强度的提高,构件的承载力提高,但延性降低。图16为不同高宽比的构件在3种不同混凝土轴心抗压强度下的极限承载力对比。 $B'/D'=2$ 时,C60和C80混凝土构件相对于C40混凝土构件极限承载力分别提高18.05%,38.22%。 $B'/D'=3$ 时,对应的极限承载力分别提高19.76%,43.38%。 $B'/D'=4$ 时,对应的极限承载力分别提高20.76%,45.66%。图17为典型构件600-200-2改变钢管厚度时在不同混凝土轴心抗压强度下的承载力对比曲线。混凝土轴心抗压强度的提高和钢管厚度的提高对构件的极限承载提高都是线性的。钢管厚度为4mm时,混凝土

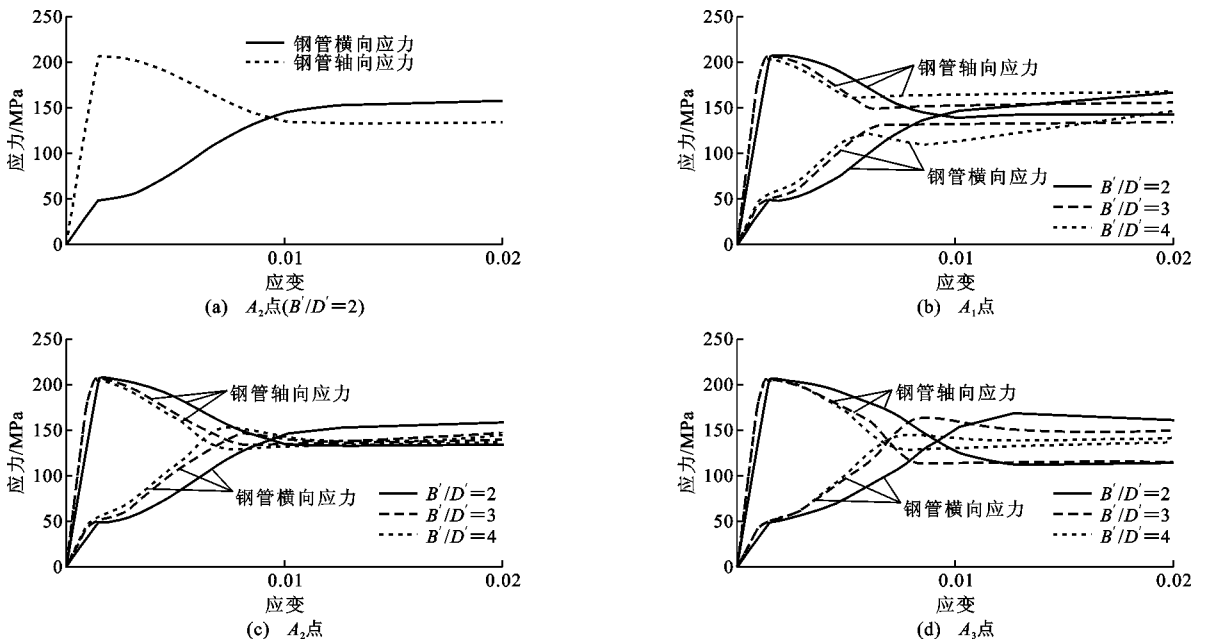


图12 不同临界点处的轴向、横向应力-应变关系曲线

Fig. 12 Axial and Transverse Stress-strain Curves at Different Critical Points

表 1 RCFST 有限元模型构件参数

Tab. 1 Specimen Parameters of RCFST Finite Element Model

B'/mm	D'/mm	t/mm	B'/D'	n_b/mm	b_s/mm	d_s/mm	α	φ	$f_{\text{ck}}=40\text{ MPa}$		$f_{\text{ck}}=60\text{ MPa}$		$f_{\text{ck}}=80\text{ MPa}$	
									构件编号	N_{ue}/kN	构件编号	N_{ue}/kN	构件编号	N_{ue}/kN
400	200	4	2				0.058 295		C1	3 989	C20	4 944	C39	5 895
400	200	4	2	2	75	8	0.058 295	0.045 45	C2	4 290	C21	5 200	C40	6 131
400	200	4	2	2	100	8	0.058 295	0.062 50	C3	4 240	C22	5 182	C41	6 122
400	200	4	2	2	150	8	0.058 295	0.200 00	C4	4 156	C23	5 082	C42	6 013
400	200	4	2	1	100	14	0.058 295	0.090 90	C5	4 272	C24	5 174	C43	6 110
400	200	4	2	2	100	10	0.058 295	0.125 00	C6	4 595	C25	5 506	C44	6 360
400	200	4	2	3	100	8	0.058 295	0.030 30	C7	4 643	C26	5 288	C45	6 222
600	200	4	3				0.051 726		C8	5 694	C27	7 190	C46	8 729
600	200	4	3	1	100	8	0.051 726	0.090 90	C9	5 802	C28	7 304	C47	8 813
600	200	4	3	2	100	8	0.051 726	0.045 45	C10	5 889	C29	7 414	C48	8 949
600	200	4	3	2	100	10	0.051 726	0.045 45	C11	5 982	C30	7 482	C49	8 987
600	200	4	3	2	100	12	0.051 726	0.045 45	C12	6 139	C31	7 626	C50	9 130
600	200	4	3	3	100	8	0.051 726	0.030 30	C13	6 058	C32	7 568	C51	9 072
600	200	6	3	2	100	8	0.077 927	0.045 45	C14	6 998	C33	8 605	C52	10 048
600	200	8	3	2	100	8	0.104 353	0.045 45	C15	8 528	C34	9 666	C53	11 297
800	200	4	4				0.048 628		C16	7 355	C35	9 506	C54	11 604
800	200	4	4	1	100	8	0.048 628	0.090 90	C17	7 578	C36	9 696	C55	11 795
800	200	4	4	2	100	8	0.048 628	0.045 45	C18	7 712	C37	9 830	C56	11 937
800	200	4	4	3	100	8	0.048 628	0.030 30	C19	7 659	C38	9 725	C57	11 829

注： N_{ue} 为模型承载力有限元计算值。

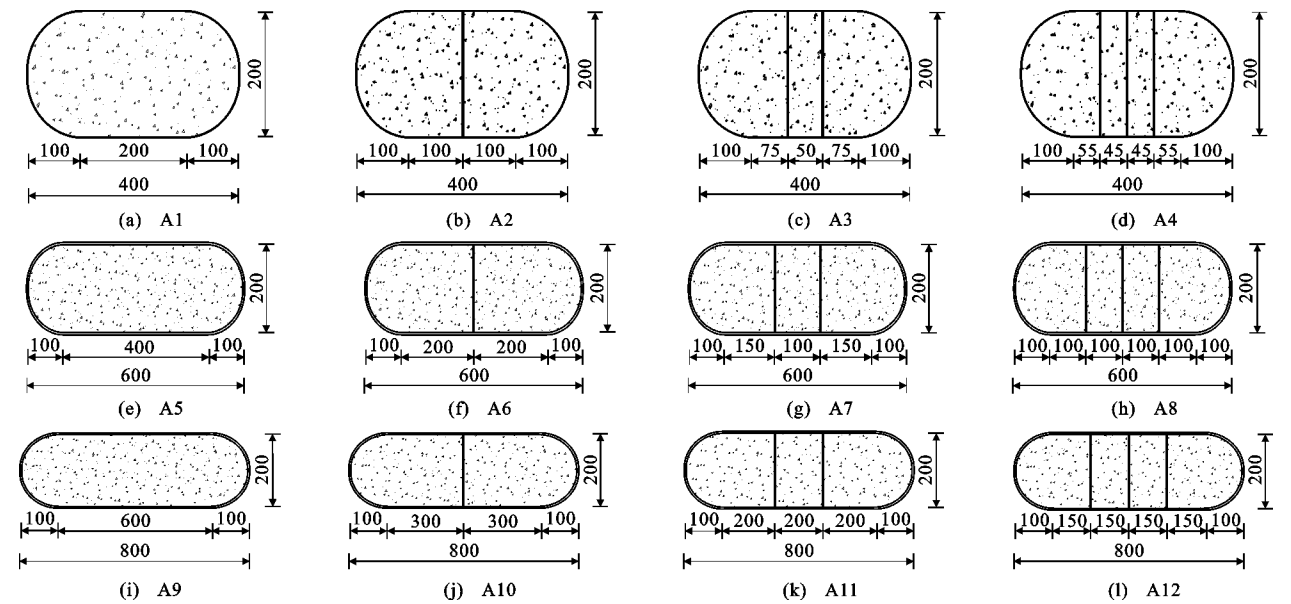


图 13 拉杆布置(单位:mm)

Fig. 13 Layout of Binding Bars (Unit:mm)

轴心抗压强度从 40 MPa 提高到 60 MPa,构件极限承载力提高 21.03%; $t=6\text{ mm}$ 时,提高 20.1%; $t=8\text{ mm}$ 时,提高 18.81%。

4.3 拉杆参数的影响

图 18 为拉杆参数的影响。图 18(a)表明构件

的承载力随着拉杆直径的增大而上升,拉杆直径对构件的延性影响不明显。为研究约束拉杆的稀疏系数对构件轴压性能的影响,选取标准构件 400-200-4,控制约束拉杆总的横截面面积不变,分别取 $\varphi=1,1/2,1/3$,结果如图 18(b)所示, $\varphi=1/3$ 时极限承

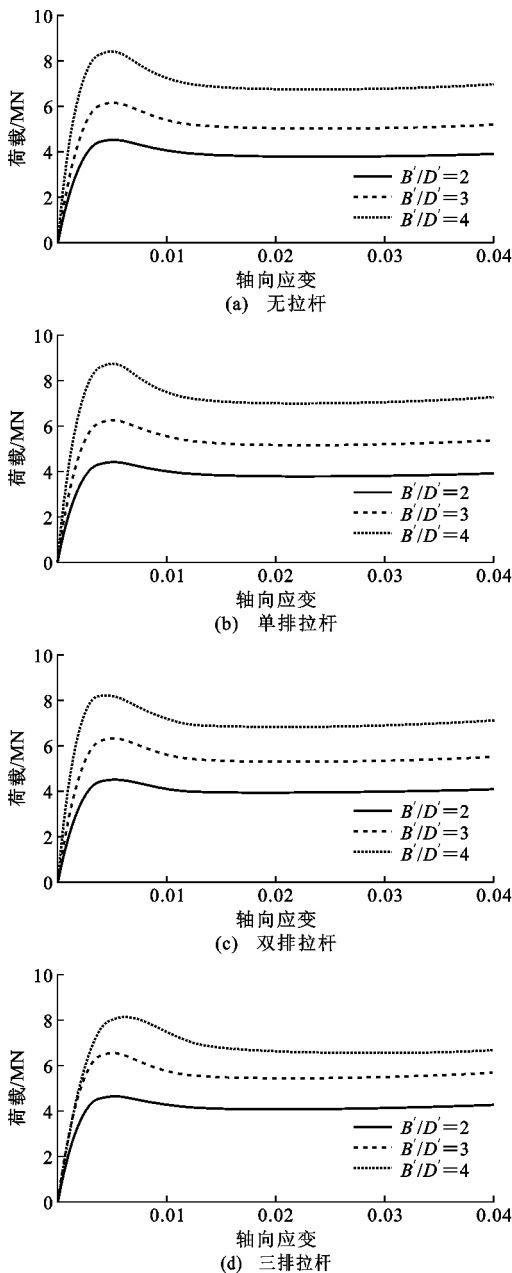


图 14 构件荷载-轴向应变曲线

Fig. 14 Load-axial Strain Curves of Components

承载力最高, $\varphi=1$ 时极限承载力最低, 表明在高宽比为 2 时拉杆的稀疏系数越低对极限承载力的提高效果越好。图 18(c) 同样表明在高宽比为 2 时, 约束拉杆设置越密集对承载力的提高越明显, 拉杆间距为 75 mm 时构件极限承载力最高, 间距 150 mm 时最低。图 18(d) 中构件高宽比为 3 时, 随着拉杆间距的减小, 构件极限承载力也不断增大。由上述可知: 随着约束拉杆直径的增大, 构件的极限承载力也增大, 但拉杆直径变化对构件延性的影响不明显; 约束拉杆间距从 150 mm 减小到 100 mm 时构件的承载力提高 5.1%, 从 100 mm 减小到 75 mm 时承载

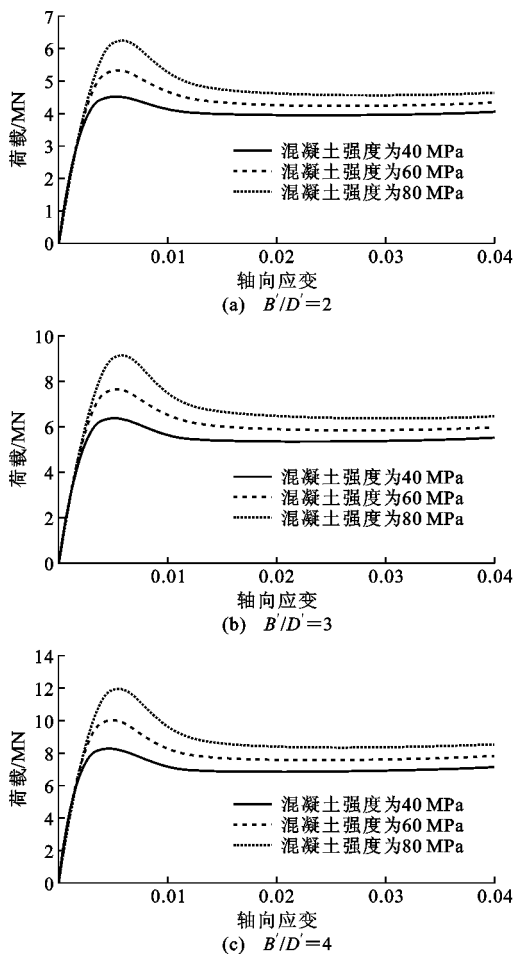


图 15 不同混凝土强度下荷载-轴向应变曲线

Fig. 15 Load-axial Strain Curves Under Different Concrete Strengths

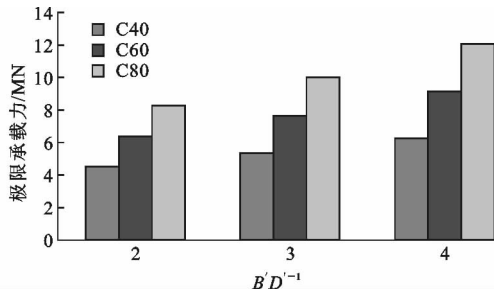


图 16 不同高宽比时的极限承载力

Fig. 16 Ultimate Bearing Capacities with Different Depth-width Ratios

力提高 2.0%, 拉杆设置的越密集, 构件的承载力越高, 但约束拉杆的间距越小, 构件极限承载力的提高效果越不明显, 所以选择合适的约束拉杆间距能有效提高承载力, 同时也方便施工。

4.4 截面含钢率的影响

图 19 为不同截面含钢率下的构件荷载-应变关系及极限承载力关系曲线。构件的极限承载力随着

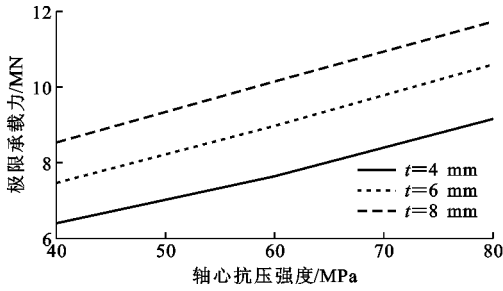


图 17 钢管厚度对极限承载力的影响

Fig. 17 Influence of Steel Tube Thickness on Ultimate Bearing Capacity

截面含钢率的提高而线性提高,同时延性也不断提高。钢管厚度从 4 mm 提高到 6 mm 时,构件截面含钢率提高 50.65%,极限承载力提升 16.87%;钢管厚度由 6 mm 提高到 8 mm 时,构件截面含钢率提高 34.14%,极限承载力提升 14.35%。

5 轴压承载力计算理论推荐公式

蔡健等^[7]参考 Mander 分析箍筋约束混凝土等效侧向约束应力的方法,基于试验提出了带约束拉杆方形、矩形钢管混凝土的承载力公式,韩林海^[1]提出了圆形、矩形等多种截面形式钢管混凝土的轴压承载力公式。本文带约束圆端形钢管混凝土中部矩形区受力机理与蔡健等^[7]研究的方形、矩形钢管混凝土相似,两端半圆形区与圆形钢管混凝土相似,按圆端形矩形区和半圆形区承载力的叠加提出如下轴压承载力 N_u 计算公式,即

$$N_u = N_{sp} + N_{cp} \quad (16)$$

$$N_{sp} = \phi_1 A_{s1} f_y + \phi_2 A_{s2} f_y \quad (17)$$

$$A_{s1} = 2(B' - D')t, A_{s2} = \pi \left[\left(\frac{D'}{2} + t \right)^2 - \left(\frac{D'}{2} \right)^2 \right] \quad (18)$$

式中: A_{s1} 为圆端形钢管矩形区上下长边的钢管截面面积; A_{s2} 为圆端形钢管两端半圆形区钢管截面面积; N_{cp} 为圆端形混凝土的轴向承载力; N_{sp} 为圆端形钢管轴向承载力; ϕ_2 为圆形区钢管纵向强度折减系数,取 $\phi_2 = 1$; ϕ_1 为矩形区钢管纵向强度折减系数。

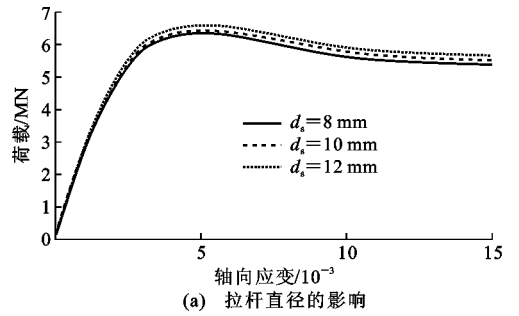
根据文献^[10], ϕ_1 取值如下

$$\phi_1 = \begin{cases} 0.89 & R_1 \leq 0.85 \\ 0.89R_1^{-0.37} & R_1 > 0.85 \end{cases} \quad (19)$$

$$R_1 = \frac{B' - D'}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{4\pi^2}} \sqrt{\frac{f_y}{E_a}} \quad (20)$$

式中: R_1 为矩形区长边的宽厚比参数^[7]; E_a 为钢管的弹性模量; ν 为钢管的泊松比。

基于文献^[5]带约束拉杆方形、矩形钢管混凝土轴压承载力计算公式,对带约束拉杆圆端形钢管混



(a) 拉杆直径的影响

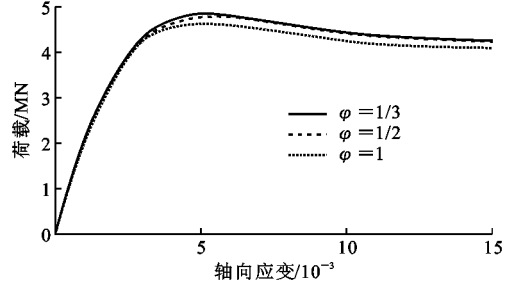
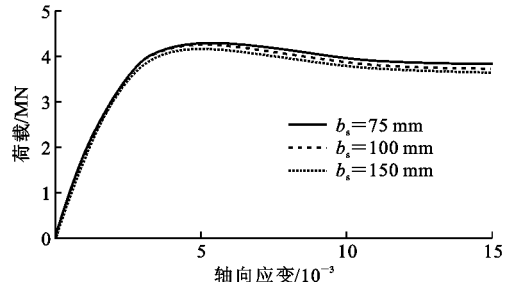
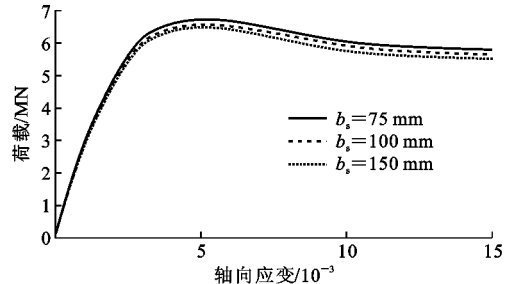
(b) 拉杆稀疏系数的影响($B'/D'=2$)(c) 拉杆间距的影响($B'/D'=2$)(d) 拉杆间距的影响($B'/D'=3$)

图 18 拉杆参数对荷载-轴向应变曲线的影响

Fig. 18 Influences of Binding Bar Parameters on Load-axial Strain Curves

凝土承载力进行回归分析,得计算公式如下

$$N_{cp} = N_{cr} + N_{cs} \quad (21)$$

$$N_{cr} = (2.4\zeta + 1)(1.212 + 0.7A'_1\zeta + 0.7A'_2\zeta^2)A_{cr}f_{ck} \quad (22)$$

$$N_{cs} = A_{cs}f_{scy} \quad (23)$$

$$f_{scy} = (1.14 + 1.02\zeta)f_{ck} \quad (24)$$

$$A'_1 = 0.138 \cdot 1 \cdot \frac{f_y}{235} + 0.764 \cdot 6 \quad (25)$$

$$A'_2 = -0.072 \cdot 7 \cdot \frac{f_{ck}}{20} + 0.021 \cdot 6 \quad (26)$$

式中: N_{cr} 为矩形区混凝土轴向承载力; N_{cs} 为半圆形

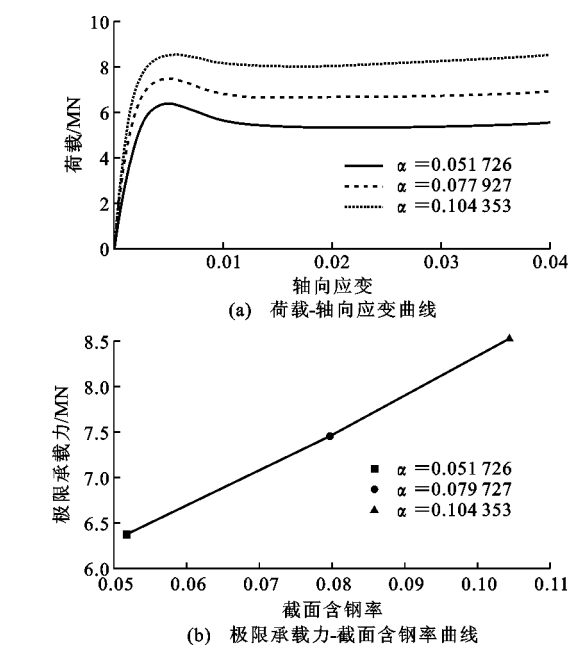


图 19 截面含钢率的影响

Fig. 19 Influence of Section Steel Ratio

区混凝土轴向承载力; A_{cr} 核心混凝土矩形区面积; A_{cs} 为核心混凝土半圆形区面积。

表 2 给出了有限元承载力计算结果和承载力公式计算结果对比。混凝土强度在 40~80 MPa 之间时,给出的承载力推荐公式计算结果与有限元模拟结果非常吻合(图 20),判定系数 $R^2=0.975\ 4$,且随

着混凝土强度的提高,计算结果偏安全,能有效预测构件的承载性能。

6 结 语

(1)将圆端形混凝土切分为矩形区和半圆形区,分别采用对应的混凝土本构关系来进行有限元模拟能有效反映圆端形钢管混凝土在轴压承载力峰值阶段的延性变化,与试验结果更加吻合。

(2)圆端形钢管混凝土圆弧段为强约束区,在矩形区加入约束拉杆能加强平直段钢管对混凝土的约束作用,使混凝土应力分布更加均匀,有效提高构件的延性和极限承载力。

(3)随着高宽比的增大,拉杆对钢管的约束效应越明显,在高宽比较大时设置约束拉杆能有效提高构件的延性。

(4)随着拉杆间距的减小,构件极限承载力也不断增大。随着约束拉杆直径的增大,构件的极限承载力也增大,但拉杆直径变化对构件延性的影响不明显;拉杆设置越密集,构件的承载力越高,但约束拉杆的间距越小,构件极限承载力的提高效果越不明显,所以选择合适的约束拉杆间距能有效提高承载力,同时也方便施工。

(5)给出的推荐公式考虑了拉杆系数的影响,推荐公式计算结果与有限元模拟结果非常吻合,混凝

表 2 承载力计算结果

Tab. 2 Calculation Results of Bearing Capacities

构件编号	N_{ue}/kN	N_u/kN	N_{ue}/N_u	构件编号	N_{ue}/kN	N_u/kN	N_{ue}/N_u	构件编号	N_{ue}/kN	N_u/kN	N_{ue}/N_u
C1	3 989	4 370	1.095	C20	4 944	5 185	1.049	C39	5 895	6 000	1.018
C2	4 290	4 432	1.033	C21	5 200	5 236	1.007	C40	6 131	6 046	0.986
C3	4 240	4 416	1.042	C22	5 182	5 224	1.008	C41	6 122	6 035	0.986
C4	4 156	4 401	1.059	C23	5 082	5 211	1.025	C42	6 013	6 023	1.002
C5	4 272	4 441	1.039	C24	5 174	5 244	1.014	C43	6 110	6 053	0.991
C6	4 595	4 442	0.967	C25	5 506	5 245	0.953	C44	6 360	6 054	0.952
C7	4 643	4 439	0.956	C26	5 288	5 243	0.991	C45	6 222	6 052	0.973
C8	5 694	6 082	1.068	C27	7 190	7 493	1.042	C46	8 729	8 705	0.997
C9	5 802	6 203	1.069	C28	7 304	7 512	1.028	C47	8 813	8 721	0.990
C10	5 889	6 325	1.074	C29	7 414	7 530	1.016	C48	8 949	8 738	0.976
C11	5 982	6 350	1.061	C30	7 482	7 550	1.009	C49	8 987	8 756	0.974
C12	6 139	6 379	1.039	C31	7 626	7 575	0.993	C50	9 130	8 779	0.962
C13	6 058	6 347	1.048	C32	7 568	7 548	0.997	C51	9 072	8 754	0.965
C14	6 998	7 245	1.035	C33	8 605	9 446	1.098	C52	10 048	10 652	1.060
C15	8 528	9 034	1.059	C34	9 666	10 032	1.037	C53	11 297	12 036	1.065
C16	7 355	7 934	1.079	C35	9 506	9 742	1.025	C54	11 604	11 350	0.978
C17	7 578	8 155	1.076	C36	9 696	9 760	1.007	C55	11 795	11 366	0.964
C18	7 712	8 176	1.060	C37	9 830	9 777	0.995	C56	11 937	11 382	0.953
C19	7 659	8 197	1.070	C38	9 725	9 795	1.007	C57	11 829	11 398	0.964

土强度超过 80 MPa 时,计算结果偏安全,能有效预测构件的承载性能。

参考文献:

References:

- [1] 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.
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press,2016.
- [2] HSU H L, YU H L. Seismic Performance of Concrete-filled Tubes with Restrained Plastic Hinge Zones[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003,59(5):587-608.
- [3] LIANG Q Q. Analysis and Design of Steel and Composite Structures[M]. Boca Raton: CRC Press,2014.
- [4] LIAO F Y, HAN L H, HE S H. Behavior of CFST Short Column and Beam with Initial Concrete Imperfection: Experiments [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011,67(12):1922-1935.
- [5] 蔡 健,何振强. 带约束拉杆方形钢管混凝土的本构关系[J]. 工程力学, 2006,23(10):145-150.
CAI Jian, HE Zhen-qiang. Constitutive Relationship of Square CFT with Binding Bars[J]. Engineering Mechanics, 2006,23(10):145-150.
- [6] 蔡 健,何振强,陈 星. 带约束拉杆矩形钢管混凝土短柱轴压性能的试验[J]. 工业建筑, 2007,37(3):75-80.
CAI Jian, HE Zhen-qiang, CHEN Xing. Experimental Study on Behavior of Rectangle CFT Stub Column with Binding Bars Subjected to Axially Loading[J]. Industrial Construction, 2007,37(3):75-80.
- [7] 蔡 健,龙跃凌. 带约束拉杆方形、矩形钢管混凝土短柱的轴压承载力[J]. 建筑结构学报, 2009,30(1):7-14.
CAI Jian, LONG Yue-ling. Axial Bearing Capacity of Square and Rectangular CFT Stub Columns with Binding Bars [J]. Journal of Building Structures, 2009,30(1):7-14.
- [8] 丁发兴,余志武. 钢管混凝土短柱力学性能研究——理论分析[J]. 工程力学, 2005,22(1):175-181.
DING Fa-xing, YU Zhi-wu. Theoretical Analysis of Mechanical Properties of Concrete-filled Tubular Steel Stub Columns [J]. Engineering Mechanics, 2005,22(1):175-181.
- [9] 何振强,蔡 健,陈 星. 带约束拉杆方钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2006,36(8):49-53.
HE Zhen-qiang, CAI Jian, CHEN Xing. Investigation of Behavior of Square CFT Stub Columns with Binding Bars Under Axial Loads[J]. Building Structure, 2006,36(8):49-53.
- [10] 何振强. 带约束拉杆方形钢管混凝土短柱受压性能的研究[D]. 广州:华南理工大学,2006.
HE Zhen-qiang. Research on Compressive Behavior of Square Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns with Binding Bars[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2006.
- [11] 黄 宏,张安哥,李 毅,等. 带肋方钢管混凝土轴压短柱试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2011,32(2):75-82.
HUANG Hong, ZHANG An-ge, LI Yi, et al. Experimental Research and Finite Element Analysis on Mechanical Performance of Concrete-filled Stiffened Square Steel Tubular Stub Columns Subjected to Axial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2011,32(2):75-82.
- [12] 刘鸿亮,蔡 健. 带约束拉杆方形钢管混凝土轴压短柱的工作机理[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2013,41(10):117-125.
LIU Hong-liang, CAI Jian. Mechanical Behavior of Square CFST Stub Columns with Binding Bars Under Axial Compression [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2013,41(10):117-125.
- [13] 王志滨,陈 靖,谢恩普,等. 圆端形钢管混凝土柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014,35(7):123-130.
WANG Zhi-bin, CHEN Jing, XIE En-pu, et al. Behavior of Concrete-filled Round-end Steel Tubular Stub Columns Under Axial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2014,35(7):123-130.
- [14] TAO Z, WANG Z B, Yu Q. Finite Element Modelling of Concrete-filled Steel Stub Columns Under Axial Compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013,89:121-131.
- [15] DING F X, FU L, YU Z W, et al. Mechanical Performances of Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns with Round Ends Under Axial Loading [J]. Thin-walled Structures, 2015,97:22-34.
- [16] 谢恩普,王志滨,林 盛,等. 圆端形钢管混凝土轴压短柱的机理分析[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2015,43(4):517-522.
XIE En-pu, WANG Zhi-bin, LIN Sheng, et al. Mechanism Analysis on Concrete-filled Round-end Steel Tubular Stub Columns Under Axial Load [J]. Journal of

Fuzhou University; Natural Science Edition, 2015, 43 (4): 517-522.

[17] 王静峰,於忠华,沈奇罕,等. 圆端形椭圆钢管混凝土受扭性能数值分析及抗扭承载力计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(3): 7-15.
WANG Jing-feng, YU Zhong-hua, SHEN Qi-han, et al. Torsional Behavior Numerical Analysis and Torsion Bearing Capacity Calculation of Circular-end Elliptical Concrete-filled Steel Tube [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35 (3): 7-15.

[18] 李德山,池思源,王志滨. 圆端形钢管混凝土柱偏压力学性能研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2016, 44 (4): 538-542.
LI De-shan, CHI Si-yuan, WANG Zhi-bin. Mechanical Behavior of Round-end Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Eccentric Load[J]. Journal of Fuzhou University; Natural Science Edition, 2016, 44(4): 538-542.

[19] 谷利雄,丁发兴,付磊,等. 圆端形钢管混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 57-63.
GU Li-xiong, DING Fa-xing, FU Lei, et al. Mechanical Behavior of Concrete-filled Round-ended Steel Tubular Stub Columns Under Axial Load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 57-63.

[20] HASSANEIN M F, PATEL V I. Round-ended Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Short Columns; FE Investigation Under Axial Compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 140: 222-236.