

引用本文:任志刚,王丹丹.不同圆心角圆端形钢管混凝土短柱轴压性能[J].建筑科学与工程学报,2020,37(5):77-87.

REN Zhi-gang, WANG Dan-dan. Behavior of Round-ended Concrete-filled Steel Tube Stub Column with Different Central Angles Under Axial Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 77-87.

DOI:10.19815/j.jace.2019.05088

不同圆心角圆端形钢管混凝土短柱轴压性能

任志刚,王丹丹

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070)

摘要:为研究圆心角 60° 和 120° 圆端形钢管混凝土短柱轴压力学性能,对 4 个圆端形钢管混凝土短柱进行轴压试验,探究不同圆心角和宽厚比对其极限承载力的影响。基于试验结果,应用有限元软件 ABAQUS 进行三维实体建模,对圆端形钢管混凝土短柱进行参数分析,研究了钢材强度、混凝土强度、宽厚比、高宽比、尺寸效应等对极限承载力的影响。基于参数分析,建立圆心角为 60° 和 120° 圆端形钢管混凝土短柱极限承载力实用计算公式。结果表明:破坏形态均为局部屈曲破坏,且平直段区域均出现局部屈曲现象;随圆心角增大,构件极限承载力增大;随宽厚比增大,极限承载力呈现下降趋势;当圆弧段圆心角从 60° 增大至 120° 时,强度指标降低,表明整体约束效应减弱;圆端形钢管混凝土轴压短柱的整体约束效应随圆心角增大而减小;随着钢材强度、混凝土强度的增大和构件宽厚比的减小,极限承载力逐渐增大;不同圆心角的尺寸效应对其极限承载力与初始刚度的影响类似,随着构件尺寸增大,极限承载力与初始刚度均呈现增大的趋势。

关键词:圆端形钢管混凝土;极限承载力;试验研究;圆心角;约束效应

中图分类号:TU311

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)05-0077-11

Behavior of Round-ended Concrete-filled Steel Tube Stub Column with Different Central Angles Under Axial Load

REN Zhi-gang, WANG Dan-dan

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

Abstract: In order to study the mechanical properties of 60° and 120° round-ended concrete-filled steel tube stub columns under axial compression, four round-ended concrete-filled steel tube stub columns were tested to investigate the ultimate bearing capacity, considering the influence of different central angles and width-to-thickness ratios. Based on the test results, the finite element software ABAQUS was used to model the 3D solid. The parameters of the proposed round-ended concrete-filled steel tube stub columns were analyzed, and the influences of steel strength, concrete strength, width-thickness ratio, height-width ratio and size effect on the ultimate bearing capacity were studied. The results show that the failure modes are all local buckling, and the failure locations are located in the straight section. The ultimate bearing capacity of the columns increases when the central angle increases. The ultimate bearing capacity shows a downward trend when the width-thickness ratio increases. When the central angle of the circular

收稿日期:2019-10-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51778512)

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:whut.ren@163.com。

arc increases from 60° to 120° , the strength index decreases, indicating that the overall confinement effect is weakened. The overall confinement effect of the round-ended concrete-filled steel tube stub column under axial load decreases with the increase of the central angle. With the increases of steel strength, concrete strength and decrease of width-to-thickness ratio, the ultimate bearing capacity increases gradually. The size effects of different central angles are similar to that of the initial stiffness. As the sizes of the member increases, the ultimate bearing capacity and initial stiffness show an increasing trend.

Key words: round-ended concrete-filled steel tube; ultimate bearing capacity; experimental study; central angle; confinement effect

0 引言

钢管混凝土柱具有承载力高、塑性韧性较好和施工方便等优点,广泛应用于建筑和桥梁工程中,许多学者对其展开研究^[1-6]。圆端形钢管混凝土柱以外部圆端形钢管为框架,内部浇筑混凝土而成,具有与钢管混凝土相同的优势。此外,其造型较为美观,可兼顾较好约束效应所展现的较强承载能力和较大截面惯性矩所带来的较优压弯性能,适用于受弯能力不同的压弯构件中。

对圆端形钢管混凝土短柱的研究方法主要有试验与有限元分析 2 种方式。王志滨等^[7-9]对圆端形钢管混凝土构件进行轴压试验,研究不同截面高宽比、含钢率以及构造措施下的试件破坏形态与力学性能。Hassanein 等^[10-11]采用 ABAQUS 软件对试验构件进行模拟并进行参数分析,模拟结果与试验结果吻合良好。谢建雄等^[12-13]对圆端形钢管混凝土双肢塔柱及其变截面进行有限元分析,讨论外钢管对核心混凝土的约束效应。

目前针对圆端形钢管混凝土短柱力学性能的研究主要集中于两端半圆形与中间为矩形的截面形式,对圆心角 $\theta(0^{\circ}<\theta<180^{\circ})$ 的圆端形构件研究尚未见报道,为研究圆心角改变时圆端形钢管混凝土短柱力学性能变化,对 2 个圆心角分别为 60° 和 120° 的圆端形钢管混凝土短柱进行试验研究和有限元分析。采用通用有限元软件 ABAQUS 对试验结果进行验证及参数分析,并根据试验结果与参数分析结果,分别建立圆心角为 60° 和 120° 的圆端形钢管混凝土轴压短柱极限承载力计算公式。

1 试验研究

1.1 试验概况

圆心角为 60° 和 120° 的圆端形钢管混凝土横截面形式如图 1 所示,其中 D 为横截面宽度, H 为横

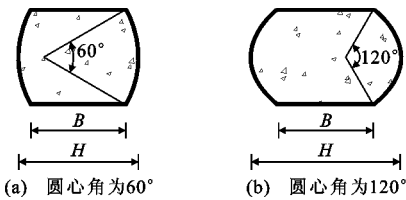


图 1 圆端形钢管混凝土截面形式
Fig. 1 Cross-section Shapes of Round-ended Concrete-filled Steel Tube

截面高度, B 为中部矩形高度。共设计 4 个试件,试件编号、实测尺寸及基本性能如表 1 所示。表 1 中试件编号 RCC 代表圆端形钢管混凝土, t 为钢管壁厚, L 为试件高度, ξ 为试件约束效应系数。圆端形钢管采用热轧钢板加工对焊成型,其强度如表 2 所示。混凝土配合比为:水 $180.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、水泥 $420.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、砂 $320.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和骨料 $1\,161.1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。混凝土立方体抗压强度设计值为 30 MPa ,立方体抗压强度实测值为 31 MPa 。

表 1 试件参数
Tab. 1 Parameters of Specimens

试件编号	H/mm	D/mm	H/D	t/mm	L/mm	ξ
RCC1-4-60	194	153	1.27	4	573	0.81
RCC1-6-60	198	150	1.32	6	571	1.45
RCC1-4-120	237	153	1.55	4	711	0.90
RCC1-6-120	237	152	1.56	6	712	1.60

表 2 钢材材性
Tab. 2 Steel Material Property

钢材厚度 t/mm	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 E_s/GPa	泊松比 μ
4	254.3	319.7	240.1	0.3
6	289.8	440.1	229.5	0.3

圆端形钢管加工成型后底端焊接 10 mm 厚盖板,在其外表面涂油漆防止锈蚀,同时画 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 网格。从未焊盖板一端灌入混凝土,并用振

捣棒振捣,防止混凝土内部有气泡产生,同时制作边长为 150 mm 的标准立方体试块,与圆端形钢管混凝土试件同条件养护。待混凝土凝结硬化后,打磨机打磨平整并补涂环氧砂浆使之与钢管端面齐平,最后焊接 10 mm 厚盖板,保证其在受荷初期共同受力。

1.2 试验方法

圆端形钢管混凝土轴压试验采用 500 t 压力试验机,每个试件钢管中部横截面 6 个位置分别布置横向和纵向应变片,其位置对应于图 2 中 A1、A2 和 A3。试件加载与测试装置如图 2(a)所示。在弹性阶段试件采用连续加载模型,当荷载为预测荷载 70%时转为分级加载模式,每级荷载加载时间为 3~5 min,并采集 1 次数据,试件接近极限荷载及破坏后连续采集数据。

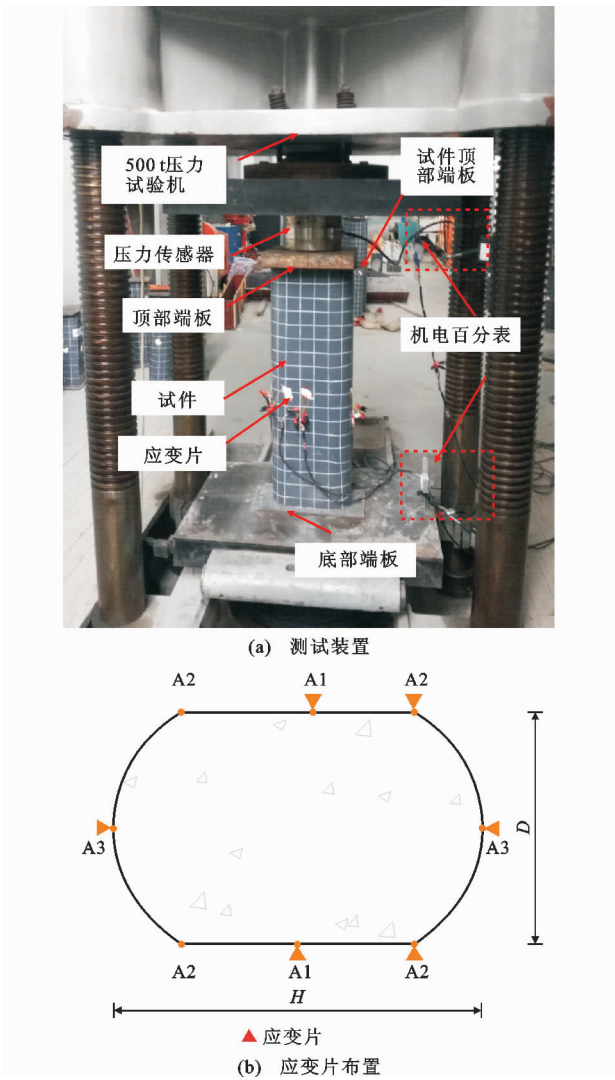


图 2 试验装置
Fig. 2 Test Setup

2 试验现象和结果分析

2.1 试验现象

在加载初期试件基本上表现为弹性,当荷载增加至极限荷载的 60%~70%时,试件进入弹塑性工作状态,并且没有明显屈曲现象,但荷载-轴向应变曲线表现出非线性特征。随着轴向应变增加,当荷载达到极限荷载时,圆端形钢管内部混凝土向外鼓曲,圆心角为 60°的圆端形钢管混凝土试件的破坏形态与方形钢管类似,平直段与圆弧段均出现明显外部鼓曲现象,与矩形试件相比,其外钢管屈曲发生较晚,圆弧段屈曲的程度与矩形试件相比幅度较小。圆心角为 120°的试件屈曲现象只发生于平直段,表明圆心角为 120°的短柱圆弧段约束效应较好,其破坏形态如图 3 所示;随着试件变形逐渐增大,试件承载力下降或维持平稳状态,最后因变形过大,焊缝开裂而终止试验。

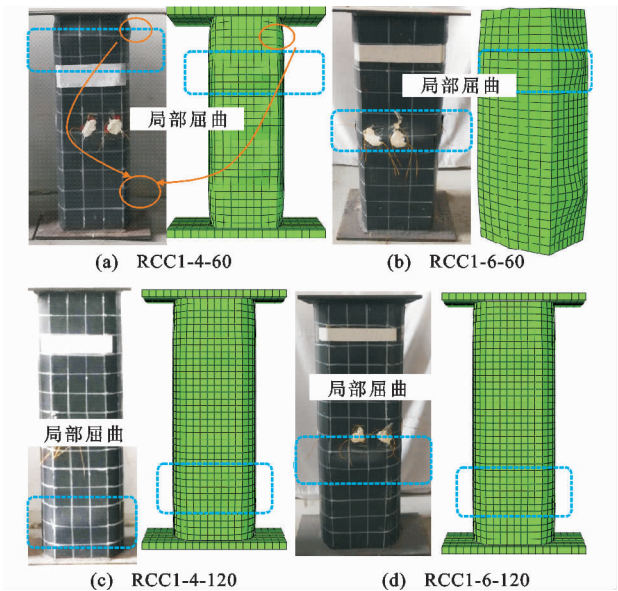


图 3 试件破坏形态

Fig. 3 Failure Modes of Specimens

2.2 荷载-轴向应变曲线

图 4 为试件荷载-轴向应变($N-\epsilon_L$)曲线。由图 4 可见,所有试件的 $N-\epsilon_L$ 曲线在峰值荷载处均有一段相对平稳的线段,表明试件均表现出良好的塑性变形能力。这是因为试件的 $H/D \leq 1.56$,外部钢管对核心混凝土具有较强的约束效应。对于钢管厚度为 6 mm 的试件,在试件达到极限荷载时,仍具有较强的承载性能,荷载-应变($N-\epsilon$)曲线没有明显的下降段。

2.3 强度指标

为对不同圆心角试件的承载力进行比较,采用

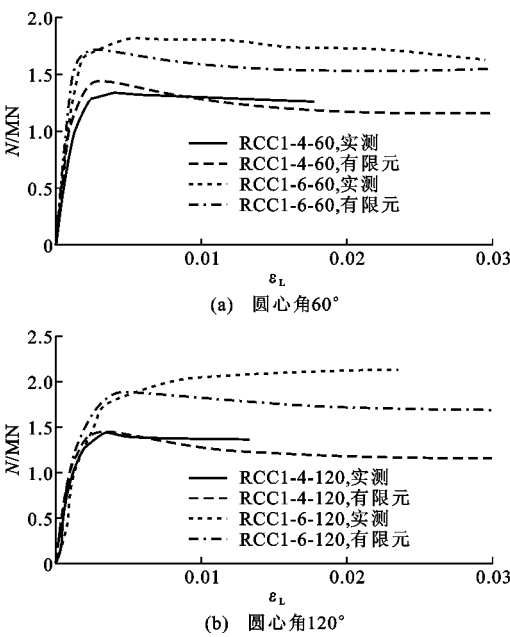


图 4 荷载-轴向应变曲线
Fig. 4 Load-axial Strain Curves

强度指标 S_1 进行分析,其计算公式为

$$S_1 = N_{uo} / (f_c A_c + f_y A_s) \tag{1}$$

式中: N_{uo} 为试验实测极限承载力; f_c, f_y 分别为混凝土计算轴心抗压强度和实测钢材屈服强度,且 $f_c = 0.76 f_{cu}$, f_{cu} 为混凝土轴心抗压强度; A_c, A_s 分别为混凝土和钢管横截面积。

试件的极限承载力与强度指标如表 3 所示,其强度指标均大于 1,表明与钢管和混凝土简单叠加相比,组合后的承载力较大。图 5(a)为圆心角不同时强度指标的变化趋势,结果表明:对于截面宽度为 150 mm 的试件,当截面圆心角由 60° 增大到 120° 时, S_1 值分别下降了 16.7% 和 9.3% (分别对应钢管厚度为 4 mm 和 6 mm)。其原因为:随着圆心角增大,试件高宽比增大,整体约束效应减弱。

表 3 极限承载力对比

Tab. 3 Comparison of Ultimate Bearing Capacity						
试件编号	N_{uo}/kN	N_e/kN	N_{uo}/N_e	N_u/kN	N_{uo}/N_u	S_1
RCC1-4-60	1 339	1 355.90	0.99	1 236.6	1.08	1.32
RCC1-6-60	1 825	1 712.50	1.07	1 742.5	1.05	1.40
RCC1-4-120	1 444	1 445.39	1.00	1 576.2	0.92	1.10
RCC1-6-120	2 125	1 909.36	1.11	2 267.1	0.94	1.27
均值			1.04		1.00	
方差			0.003		0.004	

注: N_e 为有限元计算值; N_u 为公式计算极限承载力。

图 5(b)为截面宽厚比对强度指标 S_1 的影响,结果表明,随着试件宽厚比减小, S_1 值明显增大。这是因为钢管厚度越大,宽厚比越低,外钢管对核心

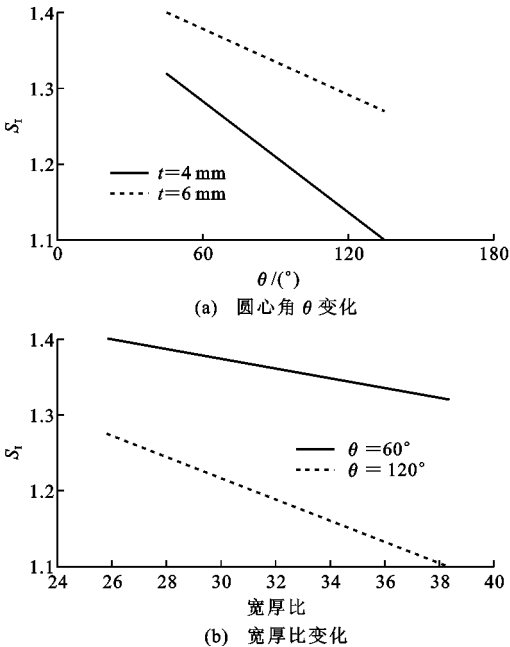


图 5 S_1 变化
Fig. 5 Changes of S_1

混凝土约束效应越强,当试件厚度由 4 mm 增大到 6 mm 时,圆心角为 60° 和圆心角为 120° 的试件 S_1 值分别增大了 6.0% 和 15.5%,表明圆心角为 120° 的试件钢管厚度对极限承载力提高效果优于圆心角为 60° 的圆端形钢管混凝土试件。

2.4 约束效应分析

为讨论圆心角为 60° 和 120° 时对试件约束效应的影响,对不同圆心角试件中部横截面圆弧段中点 A3 进行轴向应力-轴向应变($\sigma-\epsilon_L$)和环向应力-轴向应变曲线分析,如图 6(a)所示。结果表明,随着圆心角的增大, A3 处钢管环向应力逐渐增大,轴向应力与环向应力之间的差距逐渐减小,表明约束效应逐渐增大,且圆心角为 120° 的试件环向应力较圆心角为 60° 的试件强,表明圆弧段处约束效应较强。图 6(b)为试件 RCC1-4-60 中截面 A1, A2, A3 处的轴向应力和环向应力曲线,结果表明,与中截面 A1, A2 处相比, A3 处外包钢管对核心混凝土在弹性阶段的约束效应较小,随着应变增大, A3 处约束效应逐渐增大,且 A3 处环向应力值大于 A2 和 A1 处的环向应力值,这是因为 A3 为圆弧段,当轴向应变从峰值应变逐渐增大时,环向约束效应开始发挥作用。

2.5 荷载-应变曲线

图 7 为试件 RCC1-4-60 与 RCC1-4-120 中截面平直段 A1 处荷载-应变($N-\epsilon$)关系曲线,其中 ϵ_l 为纵向应变, ϵ_t 为环向应变, ϵ_y 为钢材屈服应变。结果表明:当圆心角为 60° 时,外钢管纵向首先达到屈服

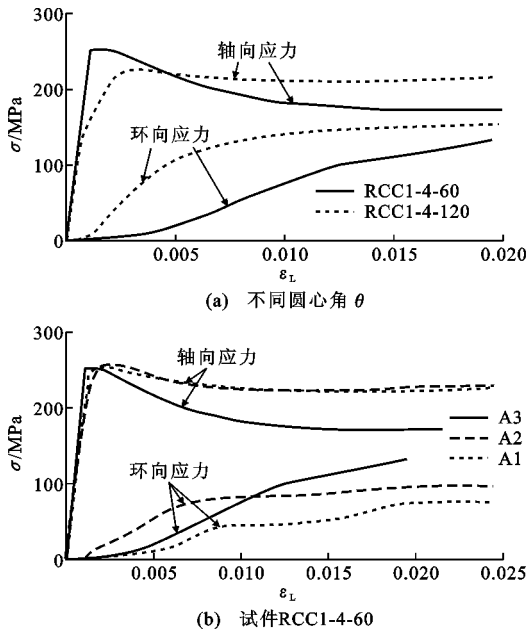


图 6 应力-轴向应变曲线对比

Fig. 6 Comparison of Stress-axial Strain Curves

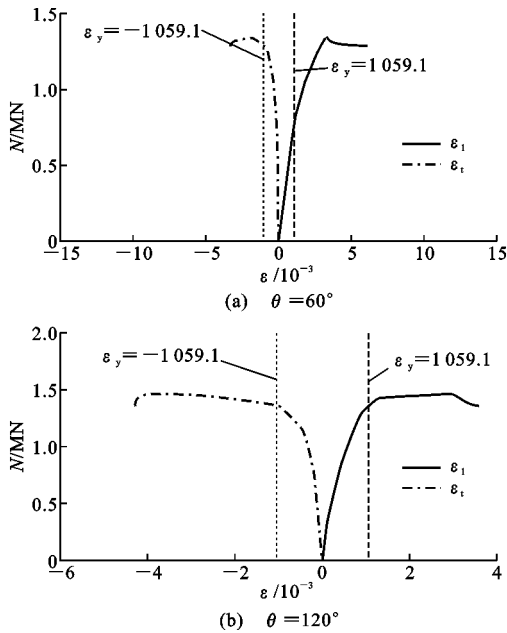


图 7 A1 处荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain Curves at Point A1

强度,随后环向达到屈服强度;当圆弧段圆心角增大为 120°时,环向中截面平直段处外钢管纵向与环向几乎同时达到屈服强度。

3 有限元分析

3.1 模型建立

采用有限元软件 ABAQUS 进行建模,钢管选用 4 节点壳单元(S4R),沿厚度方向 9 节点 Simpson 积分,混凝土与盖板为 8 节点实体单元(C3D8R),采

用减缩积分模式。网格划分采用结构化网格,如图 8 所示。钢管与混凝土采用面与面接触,法向方向为硬接触,切线方向为库仑摩擦,摩擦因数为 0.6。钢管与加载板的接触形式为壳-实体耦合,混凝土与加载板的接触形式为绑定约束。此外采用位移加载模式,并在与两端板中心沿距离 20 mm 左右各设置一参考点,参考点与端板采用耦合约束形式。

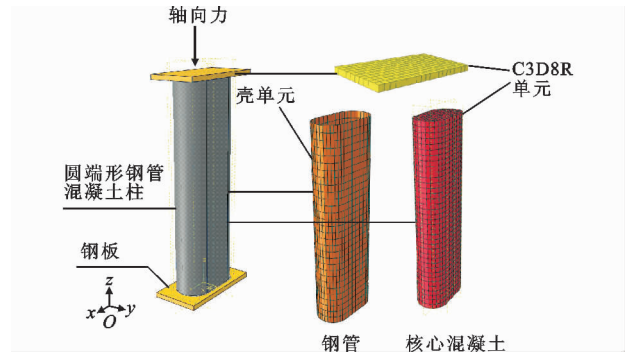


图 8 圆端形钢管混凝土有限元模型

Fig. 8 Finite Element Model of Round-ended Concrete-filled Steel Tube

圆端形钢管混凝土短柱为全截面形式建模,采用位移加载模型和牛顿-莱布尼茨(Newton-Leibniz)公式进行非线性方程组求解。

混凝土受压应力-应变关系曲线及相应参数的取值见文献[9]~[17]所示,其表达式如下

$$y = \begin{cases} \frac{qx + (m-1)x^2}{1 + (q-2)x + mx^2} & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_1(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $y = \sigma/f_c$; $x = \epsilon/\epsilon_c$; $f_c = 0.4f_{cu}^{7/6}$; ϵ_c 为受压峰值应变, $\epsilon_c = 383f_{cu}^{7/18} \times 10^{-6}$; q, m 为上升段参数, $q = 9.1f_{cu}^{-4/9}$, $m = 1.6(q-1)^2$; α_1 为下降段参数,取其值为 0.15。

混凝土弹性阶段泊松比为 0.2,塑性阶段采用塑性损伤模型,其中流动偏角取 0.1,双轴等压时强度与单轴强度之比取 1.225,拉、压子午线上第二应力不变量比值取 0.667,黏性系数和剪胀角分别为 0 和 40°。

钢材的应力-应变关系如图 9 所示,其表达式见式(3)

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_e \\ f_y \left(\frac{\epsilon - \epsilon_e}{\epsilon_{e1} - \epsilon_e} \right)^{1/45} & \epsilon_e < \epsilon \leq \epsilon_{e1} \\ f_y & \epsilon_{e1} < \epsilon \leq \epsilon_{e2} \\ f_y \left(1 + 0.6 \frac{\epsilon - \epsilon_{e2}}{\epsilon_{e3} - \epsilon_{e2}} \right) & \epsilon_{e2} < \epsilon \leq \epsilon_{e3} \\ 1.6 f_y & \epsilon_{e3} < \epsilon \end{cases} \quad (3)$$

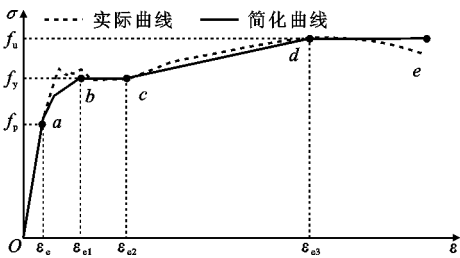


图 9 钢材应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain Curves of Steel

式中： E_s 为钢材弹性模量； ϵ_e 为钢材弹性段应力最大值 f_p 下的应变，取 $\epsilon_e = 0.8f_y/E_s$ ； ϵ_{e1} ， ϵ_{e2} ， ϵ_{e3} 为塑性和应变硬化范围内的各种应变，其中 $\epsilon_{e1} = 1.5\epsilon_e$ ， $\epsilon_{e2} = 10\epsilon_{e1}$ ， $\epsilon_{e3} = 100\epsilon_{e1}$ 。

3.2 计算结果

4 个圆端形钢管混凝土轴压短柱极限承载力试验值 N_{uo} 与有限元计算值 N_e 比较见表 3。有限元计算值与试验值吻合良好并偏于安全。有限元计算结果破坏形态如图 3 所示，ABAQUS 非线性有限元软件得到的典型荷载-应变全曲线与试验结果的比较如图 4 所示。由图 4 可知，对于钢管厚度为 4 mm 的试件，其曲线拟合结果较好，对于钢管厚度为 6 mm 的试件，其峰值后曲线差异较大，这是因为钢管厚度为 6 mm 的试件钢管对核心混凝土约束效应过大，混凝土强度过小，混凝土强度无法充分利用。图 10 为试件 RCC1-4-60 与试件 RCC1-4-120 峰值荷载处外部钢管与核心混凝土接触应力。由图 10(a)可知，对于圆心角为 60° 的试件，峰值荷载处接触应力主要集中于角部，圆弧段接触应力值较低。对试件 RCC1-4-120 外钢管与核心混凝土的接触应力进行分析，结果表明：平直段与圆弧段交点处接触应力较强，圆弧段钢管与混凝土具有明显接触效应，但其接触应力较角部弱。比较可知，试件 RCC1-4-60 的角部接触应力较强，而试件 RCC1-4-120 圆弧段接触应力较强。核心混凝土所受整体约束效应为角部约束与圆弧段约束共同作用的结果，对于圆心角为 60° 的试件，角部约束起主要约束作用，而对于圆心角为 120° 的试件，圆弧段与角部同时对核心混凝土具有约束作用。

3.3 参数分析

在验证有限元模型正确的基础上，分别对圆心角 60° 和圆心角 120° 的试件进行参数分析，分析其不同钢材强度、混凝土强度、宽厚比、高宽比下的荷载-轴向应变关系及约束作用变化规律。本文共设计 32 个圆端形钢管混凝土试件，圆心角为 60° 的

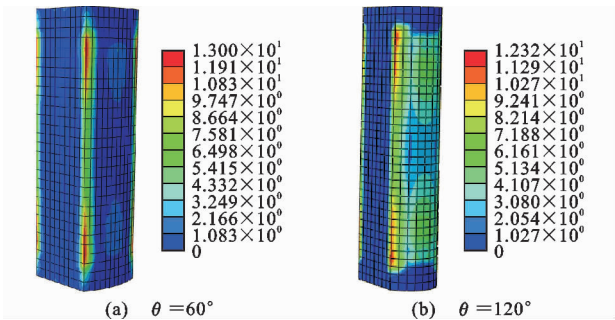


图 10 峰值荷载处接触应力 (单位:MPa)

Fig. 10 Contact Stress at Peak Load (Unit:MPa)

试件与圆心角为 120° 的试件各 16 个，表 4 为圆心角为 60° 的圆端形钢管混凝土主要参数，表 5 为圆心角为 120° 的圆端形钢管混凝土主要参数。

3.3.1 钢管强度

对 4 种不同强度(235,345,420,550 MPa)的钢管进行参数分析，其轴向荷载-轴向应变曲线如图 11(a)和 12(a)所示。结果表明，对于圆心角为 60° 和圆心角为 120° 的试件，随着钢管强度的增加，圆端形钢管混凝土试件的承载力逐渐增大，但其轴向初始刚度大致相同。对于圆心角为 60° 的试件，随着钢管强度由 235 MPa 增大到 345,420,550 MPa，钢管混凝土极限承载力分别增加了 16.5%，27.3% 和 45.3%。对于圆心角为 120° 的圆端形钢管混凝土试件，其轴压极限承载力与钢管强度为 235 MPa 的试件相比增加了 13.1%，27.1% 和 39.0%。

3.3.2 混凝土强度

图 11(b)和图 12(b)给出了不同混凝土强度对轴向荷载-轴向应变曲线的影响。随着混凝土强度的增加，圆心角为 60° 和 120° 的圆端形钢管混凝土的轴向荷载值与初始刚度均逐渐增大，其峰值后曲线随着混凝土强度的增大下降段逐渐陡峭。圆心角为 60° 的圆端形钢管混凝土强度由 30 MPa 增加到 50,70,90 MPa 时，其极限承载力分别增加了 35.2%，88.2% 和 128.7%，而对于圆心角为 120° 的试件，其轴压极限承载力分别增加了 34.3%，69.0% 和 106.6%。

3.3.3 宽厚比

图 11(c)为宽厚比分别为 50.0,33.3,25.0 和 20.0 时，圆心角为 60° 的圆端形钢管混凝土试件轴向荷载-应变关系曲线。随着宽厚比的增大，试件极限承载力和初始刚度逐渐降低。与宽厚比为 50.0 的试件相比，宽厚比为 33.3,25.0,20.0 的试件极限承载力分别增大了 13.0%，23.4% 和 35.6%，而初始刚度增大了 13.5%，22.0%，26.8%。

表 4 圆端形钢管混凝土主要参数($\theta=60^\circ$)

Tab. 4 Main Parameters of Round-ended Concrete-filled Steel Tube ($\theta=60^\circ$)

参数	试件编号	H/mm	D/mm	t/mm	L/mm	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	约束效应 系数 ξ	极限承载力 N_{FE}/kN	δ_u/mm	$K_i/$ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)
钢材 强度	RRCFST1-1	253.6	200	4	760.8	345	50	0.50	3 008.71	2.62	2 578.18
	RRCFST1-2	253.6	200	4	760.8	235		0.35	2 581.58	2.53	2 438.23
	RRCFST1-3	253.6	200	4	760.8	420		0.60	3 285.66	2.83	2 430.94
	RRCFST1-4	253.6	200	4	760.8	550		0.79	3 750.89	3.17	2 430.94
混凝土 强度	RRCFST2-1	253.6	200	4	760.8	345	30	0.83	2 225.32	2.48	1 990.98
	RRCFST2-2	253.6	200	4	760.8	345	70	0.35	4 188.14	3.94	2 800.94
	RRCFST2-3	253.6	200	4	760.8	345	90	0.28	5 090.07	3.94	3 127.32
宽厚比	RRCFST3-1	253.6	200	6	760.8	345	50	0.76	3 582.87	3.24	2 745.09
	RRCFST3-2	253.6	200	8	760.8	345	50	1.03	4 132.22	3.24	3 046.16
	RRCFST3-3	253.6	200	10	760.8	345	50	1.32	4 675.53	3.24	3 520.28
高宽比	RRCFST4-1	353.6	200	4	760.8	345	50	0.48	4 312.89	2.75	3 244.76
	RRCFST4-2	453.6	200	4	760.8	345	50	0.46	5 307.77	2.63	4 239.23
	RRCFST4-3	553.6	200	4	1 000.0	345	50	0.46	6 688.48	3.39	3 602.24
尺寸 效应	RRCFST5-1	126.8	100	4	380.4	345	50	1.03	1 081.43	2.05	1 573.57
	RRCFST5-2	190.2	150	4	570.6	345	50	0.67	1 884.06	2.17	1 981.47
	RRCFST5-3	317.0	250	4	760.8	345	50	0.39	4 301.01	3.01	3 112.82

注: δ_u 为与极限峰值荷载对应的轴向压缩值; K_i 为试件初始刚度。

表 5 圆端形钢管混凝土主要参数($\theta=120^\circ$)

Tab. 5 Main Parameters of Round-ended Concrete-filled Steel Tube ($\theta=120^\circ$)

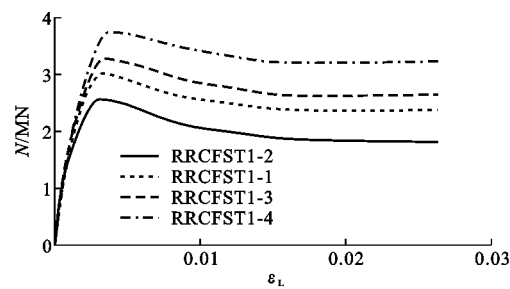
参数	试件编号	H/mm	D/mm	t/mm	L/mm	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	约束效应 系数 ξ	极限承载力 N_{FE}/kN	δ_u/mm	$K_i/$ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)
钢材 强度	RRCFST6-1	315.5	200	4	946.5	345	50	0.56	3 969.37	4.18	2 248.70
	RRCFST6-2	315.5	200	4	946.5	245		0.39	3 509.44	3.59	2 247.67
	RRCFST6-3	315.5	200	4	946.5	420		0.68	4 459.76	4.72	2 248.38
	RRCFST6-4	315.5	200	4	946.5	550		0.89	4 879.71	4.75	2 248.87
混凝土 强度	RRCFST7-1	315.5	200	4	760.8	345	30	0.93	2 954.52	3.59	1 815.61
	RRCFST7-2	315.5	200	4	760.8	345	70	0.40	4 994.24	3.94	2 611.23
	RRCFST7-3	315.5	200	4	760.8	345	90	0.31	6 105.53	4.35	2 620.39
宽厚比	RRCFST8-1	315.5	200	6	760.8	345	50	0.85	4 494.18	5.37	2 573.54
	RRCFST8-2	315.5	200	8	760.8	345	50	1.16	5 139.09	5.37	2 846.26
	RRCFST8-3	315.5	200	10	760.8	345	50	1.49	5 745.06	5.37	3 114.24
高宽比	RRCFST9-1	215.5	200	4	431.0	345	50	0.63	3 003.06	3.39	1 526.47
	RRCFST9-2	415.5	200	4	831.0	345	50	0.52	4 759.06	2.74	3 053.32
	RRCFST9-3	515.5	200	4	1 031.0	345	50	0.50	6 336.19	3.67	3 353.60
尺寸 效应	RRCFST10-1	157.8	100	4	473.4	345	50	1.16	1 324.92	3.30	1 359.67
	RRCFST10-2	236.6	150	4	709.8	345	50	0.75	2 492.94	3.57	1 903.56
	RRCFST10-3	394.4	250	4	1 183.2	345	50	0.44	5 812.06	5.08	2 787.03

对于圆心角为 120° 的圆端形钢管混凝土试件,与宽厚比为 50.0 的试件相比,宽厚比为 33.3、25.0、20.0 的试件极限承载力增大了 10.5%,21.8%和 30.9%,而初始刚度增大了 9.0%,17.4%和 27.8%。

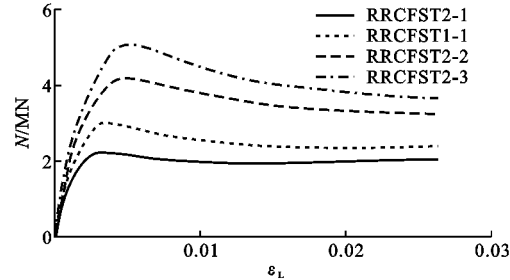
3.3.4 高宽比

对圆心角为 60° 和 120° 的圆端形钢管混凝土高

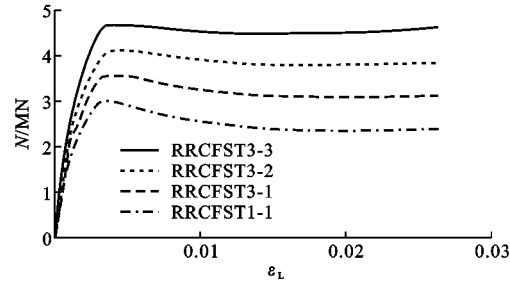
宽比不同的试件进行轴向荷载-轴向应变曲线分析。由图 11(d)所示,随着高宽比的增大,试件的极限承载力逐渐增大,但在达到承载力峰值后试件延性逐渐降低。与高宽比为 1.27 的试件相比,高宽比为 1.77、2.27 和 2.77 的试件极限承载力分别增加了 43.35%、76.41%和 122.30%,而初始刚度增加了



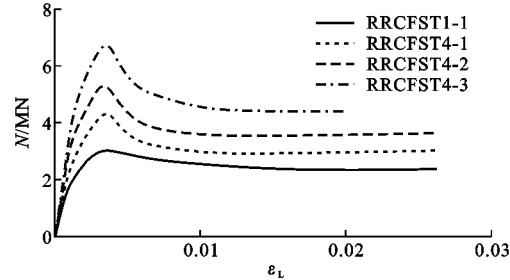
(a) 钢材强度



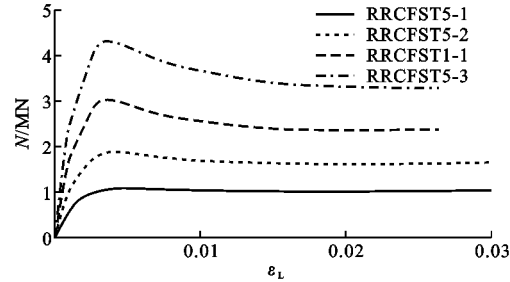
(b) 混凝土强度



(c) 宽厚比



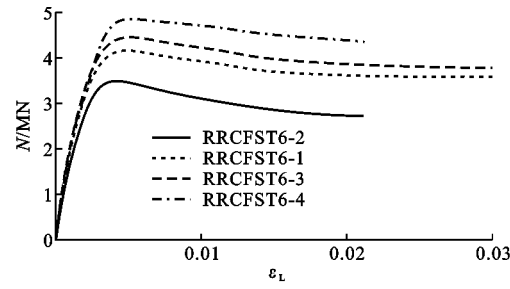
(d) 高宽比



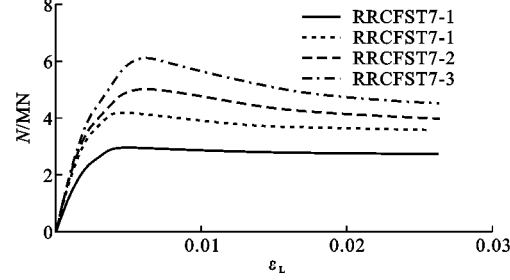
(e) 尺寸效应

图 11 各参数对 $N-\varepsilon_L$ 曲线的影响 ($\theta=60^\circ$)

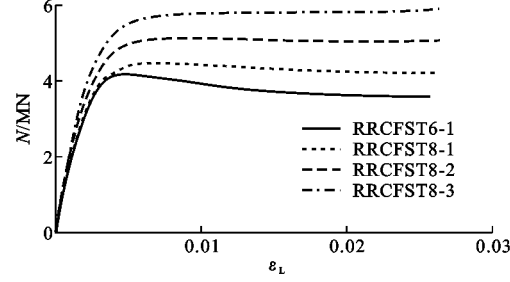
Fig. 11 Influence of Various Parameters on $N-\varepsilon_L$ Curves ($\theta=60^\circ$)



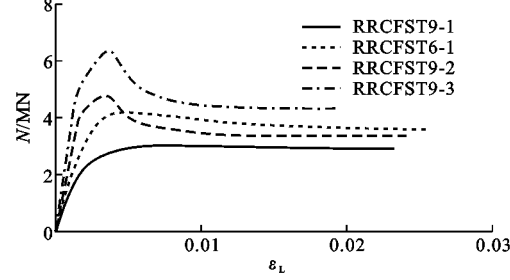
(a) 钢材强度



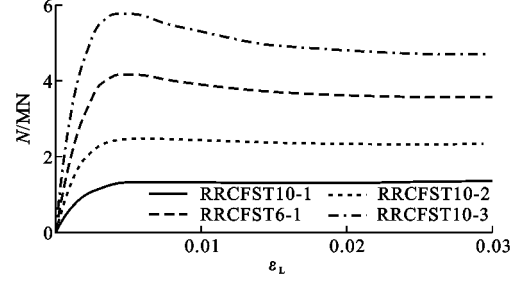
(b) 混凝土强度



(c) 宽厚比



(d) 高宽比



(e) 尺寸效应

图 12 各参数对 $N-\varepsilon_L$ 曲线的影响 ($\theta=120^\circ$)

Fig. 12 Influence of Various Parameters on $N-\varepsilon_L$ Curves ($\theta=120^\circ$)

25.85%, 64.43% 和 39.72%。对于圆心角为 120° 的试件,随着高宽比增大,试件的极限承载力与高宽比为 1.08 的试件相比,高宽比为 1.58, 2.08, 2.58

的试件极限承载力分别增加了 32.2%, 58.5%, 111.0%, 而试件初始刚度增加了 47.3%, 100.0% 和 119.7%。

3.3.5 尺寸效应

随着横截面的增加,圆端形钢管混凝土轴向极限荷载与初始刚度逐渐增大。与试件 RRCFST1-1 相比,试件 RRCFST5-1,RRCFST5-2,RRCFST5-3 的轴向极限荷载分别为其 36%,63%和 1.43 倍,而初始刚度分别为试件 RRCFST1-1 的 61%,77%和 1.21 倍。随着横截面面积的增大,圆端形钢管混凝土试件峰值荷载的增加呈线性分布,如图 13 所示,其中 N_0 为试件 RRCFST1-1 的极限承载力值, A 为圆端形钢管混凝土试件的横截面面积, A_0 为试件 RRCFST1-1 的横截面面积。对于圆心角为 120° 的试件,与试件 RRCFST6-1 相比,试件 RRCFST10-1,RRCFST10-2,RRCFST10-3 的极限承载力分别为试件 RRCFST6-1 的 33%,63%和 1.46 倍,而初始刚度分别为 RRCFST6-1 的 60%,87%和 1.24 倍。这表明,尺寸效应对圆心角为 60° 和 120° 的短柱极限承载力与初始刚度具有相同的影响。

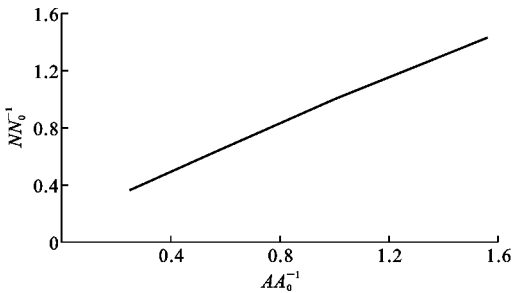


图 13 横截面面积对轴向压缩强度的影响
Fig. 13 Effect of Cross-section Area on Axial Compressive Strength

4 承载力统一计算公式

圆心角为 60° 和圆心角为 120° 的圆端形钢管混凝土试件与圆心角为 180° 的钢管混凝土试件约束效应类似。文献[8]中提出了圆心角为 180° 的圆端形钢管混凝土短柱轴压极限承载力 $N_{u,d}$ 计算公式

$$N_{u,d}=f_c A_c (1+K\Phi) \tag{4}$$

式中: Φ 为套箍指标, $\Phi=f_y A_s/(f_c A_c)$; K 为套箍系数。

随着高宽比的增大,外包钢管对核心混凝土的约束效应均逐渐减弱,当 $H/D=4$ 时,2 种材料基本单独工作。对 32 组参数数据进行分析,得到套箍系数 K 与高宽比的关系如图 14 所示。

通过拟合可得

$$K=\begin{cases} 0.74+\frac{0.94D}{H} & \theta=60^\circ \\ 0.87+\frac{0.98D}{H} & \theta=120^\circ \end{cases} \tag{5}$$

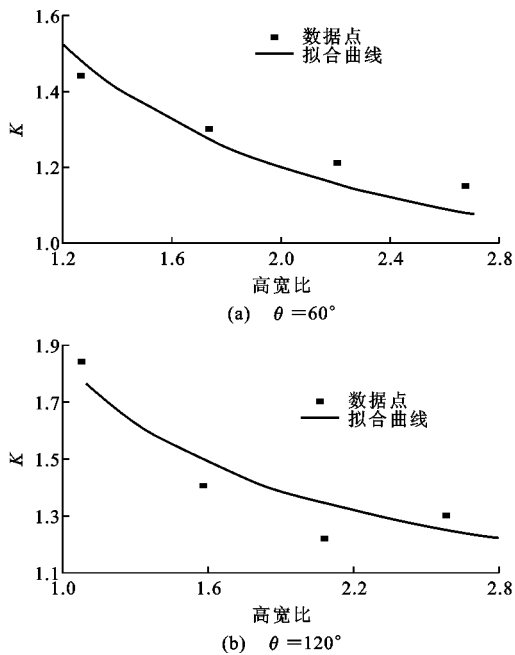


图 14 K 与高宽比的关系

Fig. 14 Relationship Between K and Height-width Ratio

综合圆心角为 60° 与 120° 的结果,可将其统一为

$$K=A+E\frac{D}{H} \quad \pi/3\leq\theta\leq2\pi/3 \tag{6}$$

式中: $A=0.39\theta/\pi+0.61$; $E=0.12\theta/\pi+0.9$ 。

将式(6)代入式(4),可得圆端形钢管混凝土轴压短柱极限承载力 N_u 计算式为

$$N_u=f_c A_c [1+(A+ED/H)\Phi] \tag{7}$$

轴压短柱算例极限承载力有限元计算结果 N_e 与采用式(7)得到的计算结果 N_u 对比如表 6 和图 15 所示,对于圆心角为 60° 的试件,2 种方法计算得到的轴压短柱极限承载力比值的平均值为 0.970,离散系数为 0.003。对于圆心角为 120° 的试件,其极限承载力平均值与离散系数分别为 0.972 与 0.004,可见采用式(7)所得的计算值与有限元计算值较为接近。

由表 3 可知:4 个试件的试验结果与有限元计算结果比值的均值为 1.04,方差为 0.003;4 个试件的试验结果与式(6)计算结果比值的均值为 1.00,方差为 0.004。由此可见,与试验结果相比,2 种理论都偏于保守,且公式计算结果较有限元计算结果准确。

5 结 语

(1)对圆心角为 60° 和圆心角为 120° 的圆端形钢管混凝土轴压短柱进行轴压试验。结果表明,在

表 6 N_u 与 N_e 比较

Tab. 6 Comparison of N_u and N_e

试件编号	N_e/kN	N_u/kN	N_e/N_u	试件编号	N_e/kN	N_u/kN	N_e/N_u
RRCFST1-1	3 008.71	3 144.48	0.960	RRCFST6-1	3 969.37	3 954.98	1.000
RRCFST1-2	2 581.58	2 758.75	0.940	RRCFST6-2	3 509.44	3 435.92	1.020
RRCFST1-3	3 285.66	3 433.79	0.960	RRCFST6-3	4 459.76	4 344.27	1.030
RRCFST1-4	3 750.89	3 935.25	0.950	RRCFST6-4	4 879.71	5 019.05	0.970
RRCFST2-1	2 225.32	2 221.59	1.000	RRCFST7-1	2 954.52	2 837.16	1.040
RRCFST2-2	4 188.14	4 093.19	1.020	RRCFST7-2	4 994.24	5 098.73	0.980
RRCFST2-3	5 090.07	5 068.42	1.000	RRCFST7-3	6 105.53	6 271.63	0.970
RRCFST3-1	3 582.87	3 853.19	0.930	RRCFST8-1	4 494.18	4 911.19	0.920
RRCFST3-2	4 132.22	4 593.30	0.900	RRCFST8-2	5 139.09	5 911.54	0.870
RRCFST3-3	4 675.53	5 366.89	0.870	RRCFST8-3	5 745.06	6 959.03	0.830
RRCFST4-1	4 312.89	4 142.56	1.040	RRCFST9-1	3 003.06	2 949.88	1.020
RRCFST4-2	5 307.77	5 146.62	1.030	RRCFST9-2	4 759.06	4 984.28	0.950
RRCFST4-3	6 688.48	6 153.40	1.090	RRCFST9-3	6 336.19	6 023.46	1.050
RRCFST5-1	1 081.43	1 148.32	0.940	RRCFST10-1	1 324.92	1 477.89	0.900
RRCFST5-2	1 884.06	2 032.63	0.930	RRCFST10-2	2 492.94	2 580.57	0.970
RRCFST5-3	4 301.01	4 483.36	0.960	RRCFST10-3	5 812.06	5 600.36	1.040
均值		0.970		均值		0.972	
方差		0.003		方差		0.004	

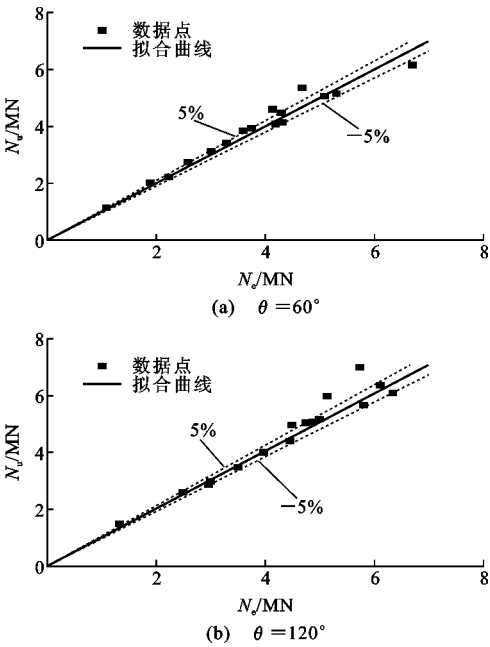


图 15 公式(7)计算的 N_u 与 N_e 比较

Fig. 15 Comparison of N_u Calculated by Formula 7 and N_e

其他条件相同的情况下,圆端形钢管混凝土轴压短柱的极限承载力随着钢管壁厚及圆心角的增大而增大。当圆心角从 60° 增大至 120° 时,强度指标降低,表明核心混凝土受到的整体约束效应降低。

(2)基于合理本构关系,采用 ABAQUS 有限元软件对圆端形钢管混凝土轴压短柱进行三维实体有限元模拟。结果表明:当圆心角由 60° 增大到 120°

时,圆弧段约束效应增强,角部约束效应减弱,整体约束效应减弱,计算结果与试验结果吻合良好。

(3)采用 ABAQUS 有限元软件进行参数分析,建立了圆心角分别为 60° 和 120° 的圆端形钢管混凝土轴压短柱极限承载力实用统一计算公式,公式计算结果与有限元计算结果吻合良好。目前对圆端形钢管混凝土圆心角的研究较少,研究成果可为圆端形钢管混凝土(包括圆形与矩形)承载力统一公式提供理论基础。

参考文献:

References:

[1] GIAKOUMELIS G, LAM D. Axial Capacity of Circular Concrete-filled Tube Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(7): 1049-1068.

[2] 张素梅,周 明. 方钢管约束下混凝土的抗压强度[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(3): 14-18.

ZHANG Su-mei, ZHOU Ming. Ultimate Strength of Concrete Confined by RHS Steel Tubes[J]. Journal of Harbin University of C. E. & Architecture, 1999, 32(3): 14-18.

[3] HAN L H, LU H, YAO G H, et al. Further Study on the Flexural Behavior of Concrete-filled Steel Tubes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(6): 554-565.

[4] HAN L H, LIU W, YANG Y F. Behavior of Con-

- crete-filled Steel Tubular Stub Columns Subjected to Axially Local Compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(4): 377-387.
- [5] HAN L H, LIU W, YANG Y F. Behavior of Thin Walled Steel Tube Confined Concrete Stub Columns Subjected to Axial Local Compression [J]. Thin-walled Structures, 2008, 46(2): 155-164.
- [6] HAN L H, ZHENG L Q, HE S H, et al. Tests and Mechanics Model for Concrete Filled Steel Tubular Members Subjected to Axial Compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(6): 956-976.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] WANG J F, SHEN Q H. Numerical Analysis and Design of Thin-walled RECFST Stub Columns Under Axial Compression[J]. Thin-walled Structures, 2018, 129: 166-182.
- [12] 谢建雄, 蔡崇华, 卢哲安, 等. 微膨胀钢管混凝土双肢柱试验研究与数值模拟[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2010, 43(4): 485-489.
- XIE Jian-xiong, CAI Chong-hua, LU Zhe-an, et al. Test Study and Numerical Simulation of Micro-expansive Round-ended Concrete Filled Steel Tubes Coupled Column[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(4): 485-489.
- [13] 王二磊. 圆端形钢管混凝土受压力学性能与可靠度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- WANG Er-lei. Research on Compressive Behavior and Reliability of Round-ended Steel Tube-filled Concrete Column[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [14] 李彬. 圆端形钢管混凝土塔柱钢管与混凝土相互作用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- LI Bin. Study on the Interaction Between Steel Tube and Concrete of Round-ended Concrete-filled Steel Tube Tower Column[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [15] 马小春. 圆端形钢管混凝土轴压试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- MA Xiao-chun. Research on Axial Compression Test About Concrete Filled Steel Tube of Round Tip Shape [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [16] 李培鹏, 任志刚. 圆端形钢管混凝土短柱轴压性能仿真分析[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(9): 96-101.
- LI Pei-peng, REN Zhi-gang. Simulation Analysis of Round-ended Rectangular CFST Stub Columns Under Axial Load[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(9): 96-101.
- [17] 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.