

文章编号:1671-4229(2023)03-0033-11

# 柱中柱(CIC)组合构件轴压力学性能数值分析

纪建军, 李华伟\*

(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 文章基于柱中柱(Column-in-Column, CIC)组合构件的轴压试验,利用ABAQUS软件建立了精细化有限元模型,通过对比试件的承载力、破坏形态和轴力-柱中纵向应变曲线验证数值模型的有效性。对两个典型试件进行全过程受力分析,得到各受力阶段钢管和混凝土的应力分布云图。研究表明:外柱外钢管的应力最大值位于局部屈曲破坏处,外柱混凝土呈全截面受压状态,内柱混凝土随着轴向加载发生弯曲破坏,混凝土从全截面受压逐渐转变为一侧受压和一侧受拉状态。利用验证后的有限元模型对CIC试件的轴压力学性能进行参数分析,当外柱外钢管径厚比从31增加到125时,试件的轴压承载力最大降低了71.6%,试件的承载力随钢材屈服强度和混凝土强度的增加而提高,随外柱长径比的增加而减小。最后基于试验和有限元结果,提出适用于CIC构件的轴压承载力计算公式。

**关键词:** 柱中柱; 钢管混凝土; 轴压性能; 有限元分析

中图分类号: TU 312.1

文献标志码: A

## Numerical study on axial compressive performance of column-in-column composite member

Ji Jian-jun, Li Hua-wei\*

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Based on the column-in-column (CIC) axial compression test results, a refined finite element model of CIC specimen was established by using ABAQUS software. The accuracy of the numerical model was verified by comparing the axial load capacity, failure mode and axial force-longitudinal strain in the middle height column curve of the specimens. The stress distribution of steel tube and concrete in different stress stages was obtained by stress analysis of two typical specimens. The results showed that the maximum stress of the outer steel tube for the outer column occurred at the local buckling area. The concrete in the outer column was in a full compressive state during the loading process. The inner column concrete suffered bending failure with the increase of axial loading, and thus the concrete was gradually transformed from the compression of the full section to the compression of one side and the tension of another side. With the calibrated numerical model, a parametric study was carried out to investigate the axial compressive behavior of CIC specimens. The results showed that the axial load capacity of the specimen decreased by 71.6% with the increase of the diameter-thickness ratio of the outer steel tube in the outer column from 31 to 125. The axial load capacity of the specimen increased with the increase of the steel yield strength and concrete strength, but decreased with the increase of the length-diameter ratio of the outer column. A formula for calculating the axial load capacity of CIC members was proposed by using the test and numerical results.

**Key words:** column-in-column; concrete-filled steel tube; axial compressive behavior; finite element analysis

收稿日期: 2022-05-07; 修回日期: 2022-09-10

作者简介: 纪建军(1995—),男,硕士研究生. E-mail:2111916017@e.gzhu.edu.cn

\*通信作者. E-mail:huawei.li@gzhu.edu.cn

引文格式: 纪建军, 李华伟. 柱中柱(CIC)组合构件轴压力学性能数值分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(3): 33-43.

钢管混凝土(Concrete-Filled Steel Tube, CFST)柱因具有良好的抗震性能、防火性能和方便施工等特点,已被广泛应用于高层建筑和大跨桥梁结构中。目前,国内外学者对钢管混凝土的力学性能进行了大量研究,形成了较为完善的理论体系,为了便于钢管混凝土在实际工程中的应用,国内外制定了钢管混凝土相关标准和设计规范,包括美国钢结构设计规范 ANSI/AISC 360<sup>[1]</sup>、欧洲组合结构设计规范 Eurocode4<sup>[2]</sup>、日本钢管混凝土结构设计指南 AIJ<sup>[3]</sup>等,国内规范主要包括:《钢管混凝土混合结构技术标准(GB/T 51446-2021)》<sup>[4]</sup>《钢管混凝土结构技术规范(GB 50396-2014)》<sup>[5]</sup>和《矩形钢管混凝土结构技术规程(CECS159-2004)》<sup>[6]</sup>。此外,随着新材料的发展,高性能混凝土<sup>[7]</sup>、FRP(Fiber Reinforced Polymer)<sup>[8]</sup>、不锈钢<sup>[9]</sup>等材料也逐渐在钢管混凝土构件中得到应用,以进一步提高钢管混凝土构件的力学性能。随着钢管混凝土柱设计理论的完善和高性能材料的应用,其在实际工程中将得到进一步应用。

钢管混凝土组合柱中柱(CIC)是一种具有承载-减振(震)双功能新型组合构件,其构造如图 1 所示,主要由内柱、外柱、弹簧、消能器、柱端连接板和滑动装置 6 部分组成,其中,内柱和外柱分别为钢管混凝土(CFST)和中空夹层钢管混凝土柱(Concrete-Filled Double-Skin Tube, CFDST),内柱和外柱通过滑动装置与柱端连接板形成一体,内柱与外柱之间留有空间,用于沿 CIC 高度方向布置弹簧和消能器。在配置内外柱之间的耗能装置进行减振(震)设计时,需要考虑到弹簧和消能器的布置对轴压长细比的影响,相应的计算长度系数应进行修正。该组合构件在保证其竖向承载能力的前提下,其内柱单元和内外柱间的耗能装置(弹簧和消能器)能有效地减少外部横向动态激励(地震或风)引起的结构动态响应,适用于高耸的风力发电塔或桥墩结构。

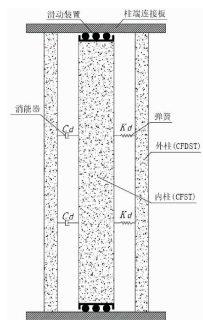


图 1 CIC 构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CIC specimen

由于该类型构件尚未有学者开展系统研究,而且发挥其良好的竖向承载力是实现减振(震)功能的首要前提,因此,有必要在 CIC 试件轴压力学性能试验的基础上开展精细化有限元分析,进一步细致分析 CIC 构件的轴

压力学性能和损伤演化机理。

本文利用 ABAQUS 软件建立了 CIC 试件的精细化有限元模型,并通过课题组已完成的 CIC 轴压试验结果<sup>[10]</sup>验证模型的有效性。对两个典型试件进行全过程受力分析,得到试件的破坏形态、各受力阶段钢管和混凝土的应力分布云图、轴力-柱中纵向应变曲线,并对 CIC 试件轴压承载力进行参数分析。

## 1 试验介绍

本文对两个典型 CIC 试件(CIC-R<sub>L</sub>3a 和 CIC-R<sub>p</sub>50a)<sup>[10]</sup>进行研究,试件的截面示意图见图 2,具体尺寸见表 1,在进行 CIC 试件轴压试验时不考虑内柱和外柱之间的减振(震)连接,即在 CIC 试件中不安装如图 1 中所示的弹簧和消能器。CIC 轴压试件的加载装置和量测方案见文献[10]。

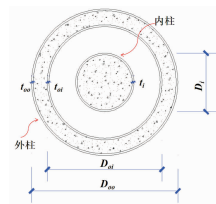


图 2 CIC 试件截面示意图

Fig. 2 Dimensional drawing of the cross section of CIC specimen

表 1 CIC 试件的尺寸和承载力

Table 1 Dimensions and axial loading capacity of CIC specimens

试件编号	$L_o$ /mm	$D_{oo} \times t_{oo}$ /mm	$D_{oi} \times t_{oi}$ /mm	$L_i$ /mm	$D_i \times t_i$ /mm	$N_{test}$ /kN
CIC-R <sub>L</sub> 3a	750	250 × 3	196 × 3	604	100 × 3	2 091.39
CIC-R <sub>p</sub> 50a	1 500	250 × 5	196 × 3	1 354	100 × 3	2 479.25

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 材料本构模型

#### 2.1.1 钢材的本构关系

CIC 构件中的钢材采用 ABAQUS 中塑性模型,该模型在多轴应力状态下满足 Von Mises 屈服准则,采用各向同性的强化法则。在该材料模型中需要输入钢材的单轴应力-应变关系,本文采用如图 3 所示的钢材应力-应变模型,可分为弹性段( $oa$ )、弹塑性段( $ab$ )、屈服平台段( $bc$ )、强化段( $cd$ )和二次塑流段( $de$ )5 个阶段<sup>[11]</sup>。钢材的弹性模量  $E_s$  和泊松比  $\mu_s$  分别取 206 000 MPa 和 0.3<sup>[12]</sup>,钢材的密度 7 850 kg/m<sup>3</sup>。

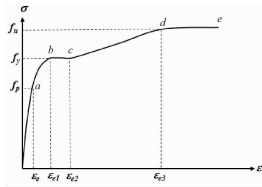


图3 钢材的应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship of steel

### 2.1.2 混凝土的本构关系

本文采用 ABAQUS 中混凝土塑性损伤模型作为混凝土的材料本构模型,该模型中通过定义混凝土的受拉和受压特征来确定混凝土力学性能。混凝土的受压应力-应变关系采用韩林海<sup>[11]</sup>在大量钢管混凝土轴压试验和有限元分析的基础上提出的约束混凝土受压本构关系,该模型具体表达式如下:

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

式中,  $x = \varepsilon/\varepsilon_o$ ,  $y = \sigma/\sigma_o$ ,  $\sigma_o = f'_c$ ,  $\varepsilon_o = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$ ,  $\varepsilon_c = (1\ 300 + 12.5 \cdot f'_c) \times 10^{-6}$ , 当钢管的截面为圆形时,  $\eta = 2$ ,  $\beta_0 = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^2]} \cdot f'_c{}^{0.5} \cdot 0.5 \geq 0.12$ , 其中,  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度,以 MPa 为单位计。有限元模型建立时,混凝土的弹性模量按  $E_c = 4\ 730 \sqrt{f'_c}$  计算,泊松比  $\mu_c = 0.2$ <sup>[12]</sup>。

在 ABAQUS 中基于能量破坏准则定义混凝土受拉软化性能具有较好的计算收敛性<sup>[13]</sup>,因此,本文采用应力-断裂能关系模型来描述混凝土的受拉软化性能,混凝土断裂能  $G_f$  (单位:MPa) 按式(2)计算<sup>[14]</sup>。

$$G_f = \alpha \cdot \left( \frac{f'_c}{10} \right)^{0.7} \times 10^{-3}, \quad (2)$$

其中,  $\alpha = 1.25d_{\max} + 10$ ,  $d_{\max}$  为粗骨料粒径,  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度。混凝土的受拉破坏应力  $\sigma_{to}$  按式(3)计算<sup>[15]</sup>。

$$\sigma_{to} = 0.26 \times (1.5f_{ck})^{2/3}, \quad (3)$$

其中,  $f_{ck}$  为混凝土抗压强度标准值。

### 2.2 单元类型选取

本文采用三维实体单元建立 CIC 试件的精细化模型,其中,钢管、混凝土、端板和支座均采用八节点六面体线性缩减积分单元(C3D8R 单元),该单元在保证较高分析精确度的同时还具有良好的计算效率,在弯曲荷载作用下不易发生剪切自锁现象,并且在网格存在扭曲变形时也能够较好的保证分析结果的准确性。

### 2.3 接触设置

CIC 试件中各组成部件之间的相互接触关系对预测其力学性能有重要影响,在本文中钢管与混凝土的界面接触由法向接触和切向粘结滑移两部分组成,在进行

接触面选择时以弹性模量较大的钢管为接触主面,混凝土为接触从面,接触类型选用面面接触。接触面法向定义为硬接触,通过库伦摩擦定义接触面的切向行为,钢管和混凝土之间的摩擦系数定义为 0.6。

外柱端板与外柱内外钢管的接触设置为绑定约束,以模拟两者之间焊接。外柱端板与外柱混凝土的接触只考虑法向上的硬接触,外柱端板与支座的接触设置为绑定约束(试验时,支座放置在端板预留的孔洞中,且支座的底部突出部分与端板预留孔洞的大小刚好吻合)。内柱钢管与混凝土之间在切向定义库伦摩擦,摩擦系数取为 0.6,法向定义硬接触。由于 CIC 构件未设置内外柱之间的耗能构件,为防止加载过程中内柱底部偏移,内柱与滑动支座中间灌入高强石膏,故此处将内柱两端表面与支座的接触设置为绑定约束。

### 2.4 边界条件

图 4 所示为 CIC 试件边界条件和加载方式,为实现与试验中 CIC 试件边界条件的一致性(即一端固定,另一端进行加载),有限元模型中 CIC 试件的边界条件具体为:将 CIC 试件两端板采用耦合(coupling)的约束方式分别约束在参考点上,将端板与参考点的所有自由度建立耦合关系;然后约束其中一端参考点上位移和转角 6 个方向的自由度以完成固定端(fixed)的设置;最后,对另一端的参考点进行轴向位移加载,加载点除轴向加载方向的自由度外,其他方向均添加对应约束。为了模拟试验中的刚性端板,避免其在加载过程中发生变形,在有限元模型中将端板设置为弹性材料,但其刚度设置得很大且泊松比很小,端板的弹性模量和泊松比分别为  $1e^{12}$  MPa 和 0.000 1<sup>[16]</sup>。



图4 CIC 试件边界条件和加载方式

Fig. 4 Boundary conditions and loading methods of CIC

### 2.5 分析步的设置

在有限元模型分析中,首先通过线性摄动分析步进行特征值屈曲分析,得到试件的失稳模态和屈曲特征值,便于后续通用静力分析步骤中引入初始缺陷<sup>[17]</sup>。在模型中通过关键字 \* Imperfection 输入特征值屈曲分析结果和屈曲模态的缺陷比例来引入试件初始缺陷,本研究仅引入第一阶模态并考虑其初始缺陷,缺陷比例取  $L/7\ 500$ <sup>[18]</sup>。得到带有初始缺陷的 CIC 试件模型后,再进行通用静力分析。在第一个通用静力分析步中对试件施加重力场,在第二个通用静力分析步中对 CIC 试件施加轴向位移来模拟加载。由于 CIC 试件内柱会发生较大的弯曲变形,在通用静力分析步中设置考虑模型几何非线性<sup>[19]</sup>。

### 3 有限元模型验证

#### 3.1 试件破坏形态验证

图 5 给出了 CIC-R<sub>D</sub>50a 和 CIC-R<sub>L</sub>3a 轴压试件有限

元模拟与试验破坏形态的对比,由图 5 可知,有限元模型可较好地预测试件的破坏形态,有限元模型中的破坏形态与试验结果一致,即 CIC 试件的外柱都发生局部屈曲破坏,CIC 试件的内柱都发生整体弯曲破坏。

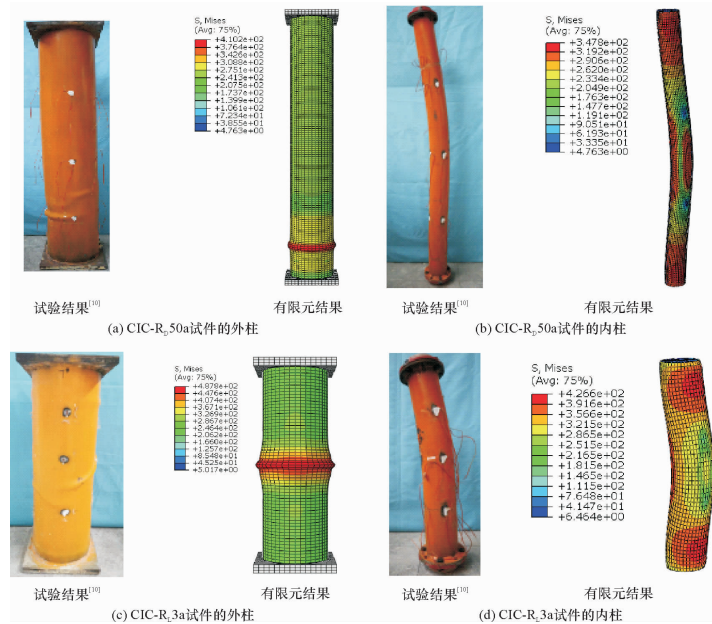


图 5 试验与有限元破坏形态对比

Fig. 5 Comparison of test and numerical failure modes

#### 3.2 轴力 - 柱中纵向应变曲线验证

图 6 为试件 CIC-R<sub>D</sub>50a 和 CIC-R<sub>L</sub>3a 轴压试件的有限元与试验结果中构件轴向承载力 - 外柱中纵向应变

曲线对比。为了便于观察,将柱中 4 个方向的轴力 - 纵向应变曲线分成两组来展示,即前侧和后侧为一组,左侧和右侧为一组。

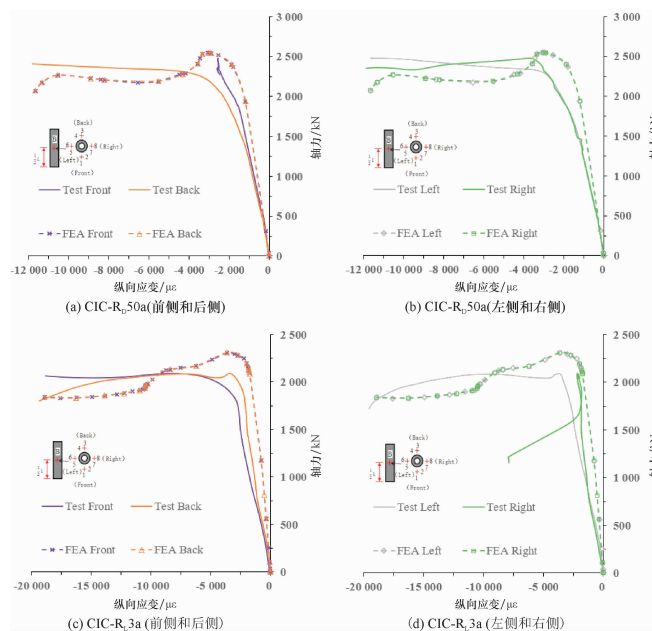


图 6 试验与有限元轴力 - 柱中纵向应变曲线对比

Fig. 6 Comparison of test and numerical axial force-longitudinal strain curves in the middle height of column

在弹性阶段, CIC-R<sub>p</sub>50a 试件和 CIC-R<sub>l</sub>3a 试件有限元模拟的轴力-柱中纵向应变曲线的初始刚度大于试验值,这是由于有限元模型考虑的初始缺陷与试件实际加工的缺陷有一定的差异。在弹塑性阶段,所有构件有限元模拟的上升趋势与试验结果一致,直至达到峰值承载力。在达到峰值承载力后, CIC-R<sub>p</sub>50a 试件有限元模拟和试验的下降趋势基本一致。但是 CIC-R<sub>l</sub>3a 试件有限元模拟和试验在下降段存在一定差异,主要原因是:试验中首先在柱底发生轻微的局部屈曲;当钢材屈服后,在柱中附近沿圆周方向出现局部屈曲,接着发生沿 45°角的剪切破坏,同时伴随在 3/4 柱高附近处发生局部屈曲破坏<sup>[10]</sup>,而有限元模拟只在柱中发生沿圆周方向的局部屈曲。

### 3.3 极限承载力对比

表 2 为 CIC-R<sub>l</sub>3a 和 CIC-R<sub>p</sub>50a 试件的极限承载力对比结果,  $N_{test}$  为试验的极限承载力<sup>[10]</sup>,  $N_{FEA}$  为有限元模拟的极限承载力;由表 2 可知,有限元模型可较好地预测 CIC 试件轴压极限承载力。

表 2 试验和有限元的极限承载力对比结果

Table 2 Comparison of test and numerical results of ultimate loading capacity

试件编号	$N_{test}/kN$	$N_{FEA}/kN$	$N_{FEA}/N_{test}$
CIC-R <sub>l</sub> 3a	2091.39	2309.39	1.10
CIC-R <sub>p</sub> 50a	2479.25	2546.94	1.03

## 4 应力分析

### 4.1 钢管应力分析

本文以 CIC-R<sub>p</sub>50a 和 CIC-R<sub>l</sub>3a 试件为例,对有限元结果中试件在峰值荷载、下降到峰值荷载 85%、加载结束时的应力分布状况进行分析。图 7 和图 8 分别为试件 CIC-R<sub>p</sub>50a 和 CIC-R<sub>l</sub>3a 的外柱外钢管 Mises 应力分布,图 9 和图 10 分别为试件 CIC-R<sub>p</sub>50a 和 CIC-R<sub>l</sub>3a 的外柱内钢管 Mises 应力分布,图 11 和图 12 分别为试件 CIC-R<sub>p</sub>50a 和 CIC-R<sub>l</sub>3a 的内柱钢管 Mises 应力分布。结合图 7 和图 8 可知,在峰值荷载时,外柱外钢管应力分布均匀,钢管 Mises 应力刚好达到钢材屈服强度;在下降到峰值荷载 85% 时,钢管发生局部屈曲(如图 7 所示, CIC-R<sub>p</sub>50a 试件的外柱外钢管在 1/6 柱高附近发生明显的局部屈曲),在发生局部屈曲部位的 Mises 应力最大且钢管超过其屈服强度的区域主要位于局部屈曲部位附近;在加载结束时,局部屈曲变形进一步发展,最大 Mises 应力值进一步增加。结合图 7~图 10 可知,外柱外钢管的发展规律和外柱内钢管的发展规律一致,且外柱外钢管和外柱内钢管同时达到屈服强度,但外柱外钢管在更大范围内达到屈服强度。

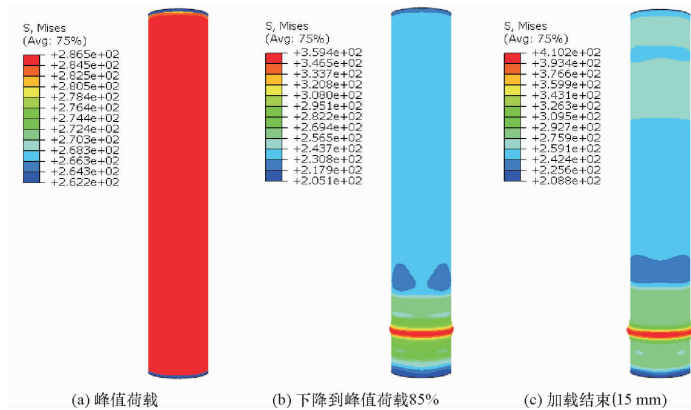


图 7 CIC-R<sub>p</sub>50a 外柱外钢管 Mises 应力分布

Fig. 7 Distribution of Mises stress of outer steel tube for outer column in CIC-R<sub>p</sub>50a

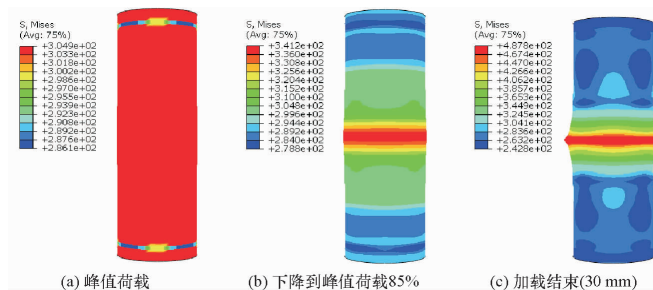


图 8 CIC-R<sub>l</sub>3a 外柱外钢管 Mises 应力分布

Fig. 8 Distribution of Mises stress of outer steel tube for outer column in CIC-R<sub>l</sub>3a

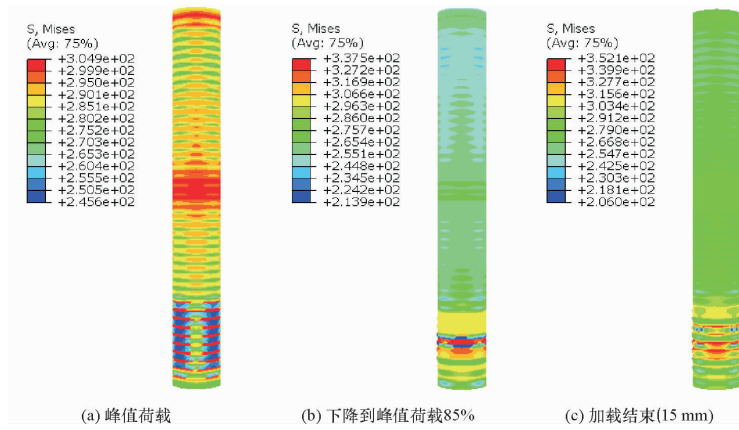


图 9 CIC-R<sub>p</sub>50a 外柱内钢管 Mises 应力分布

Fig. 9 Distribution of Mises stress of inner steel tube for outer column in CIC-R<sub>p</sub>50a

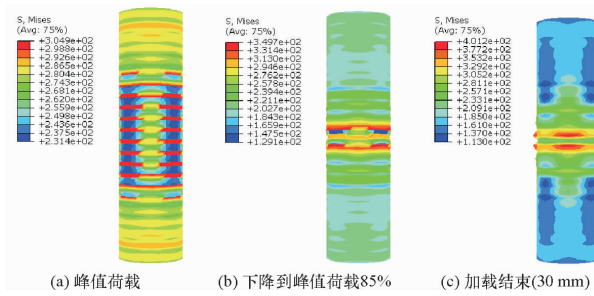


图 10 CIC-R<sub>l</sub>3a 外柱内钢管 Mises 应力分布

Fig. 10 Distribution of Mises stress of inner steel tube for outer column in CIC-R<sub>l</sub>3a

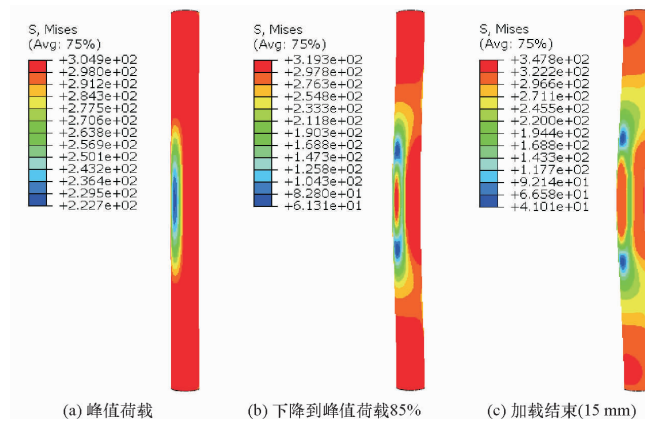


图 11 CIC-R<sub>p</sub>50a 内柱钢管 Mises 应力分布

Fig. 11 Distribution of Mises stress of steel tube for inner column in CIC-R<sub>p</sub>50a

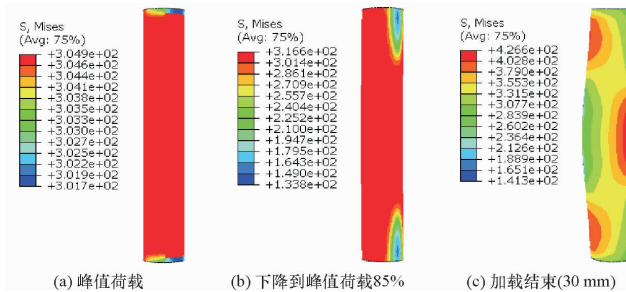


图 12 CIC-R<sub>l</sub>3a 内柱钢管 Mises 应力分布

Fig. 12 Distribution of Mises stress of steel tube for inner column in CIC-R<sub>l</sub>3a

结合图 11 和图 12 可知,在峰值荷载时,对于长径比较小试件(如 CIC-R<sub>L</sub>3a 试件)的内柱钢管,其整根钢管达到屈服强度,而对于长径比较大试件(如 CIC-R<sub>D</sub>50a 试件)的内柱钢管,其大部分区域达到屈服强度;在下降到峰值荷载 85% 时,长径比较小试件的内柱钢管未发生明显的整体屈曲变形,而长径比较大试件的内柱钢管发生明显的整体屈曲变形且应力较大区域集中在钢管中部和两端,并在钢管中部产生明显的受压区和受拉区;在加载结束时,长径比较小的试件才出现明显的整体弯曲变形,而长径比较大试件的整体弯曲变形进一步发展。

#### 4.2 混凝土应力分析总结

图 13 和图 14 分别为试件 CIC-R<sub>D</sub>50a 外柱混凝土纵向应力沿长度方向的分布和沿跨中截面的分布。由于 CIC 试件的内柱发生整体弯曲变形,且变形对称,故只给出 CIC 试件内柱混凝土沿跨中截面纵向应力的分布,图 15 为试件 CIC-R<sub>D</sub>50a 内柱混凝土纵向应力沿跨中截面的分布。图 16 和图 17 分别为试件 CIC-R<sub>L</sub>3a 外柱混凝土纵向应力沿长度方向的分布和沿跨中截面的分布。图 18 为试件 CIC-R<sub>L</sub>3a 内柱混凝土纵向应力沿跨中截面的分布。

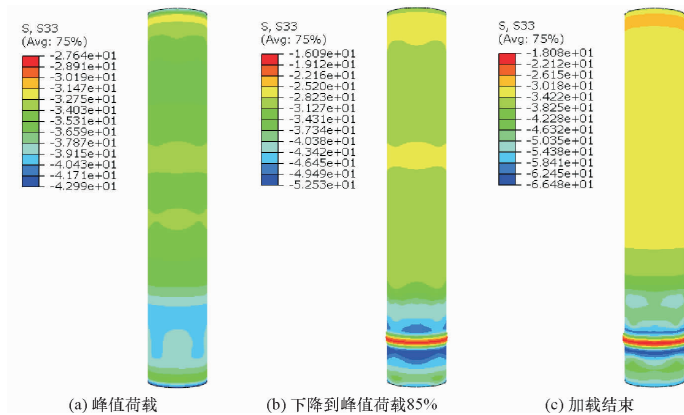


图 13 CIC-R<sub>D</sub>50a 外柱混凝土纵向应力沿长度方向的分布

Fig. 13 Distribution of longitudinal stress of concrete in outer column of CIC-R<sub>D</sub>50a

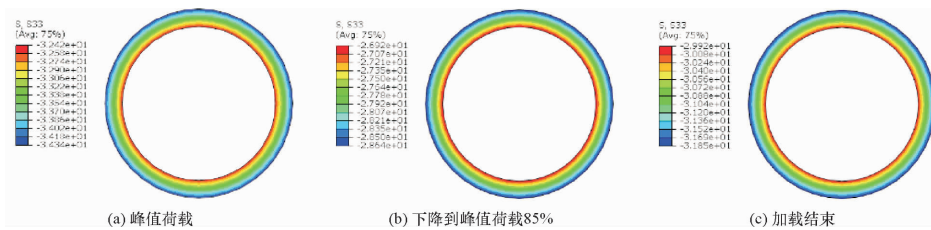


图 14 CIC-R<sub>D</sub>50a 外柱混凝土纵向应力沿跨中截面的分布

Fig. 14 Distribution of longitudinal stress of concrete at mid-span section of outer column in CIC-R<sub>D</sub>50a

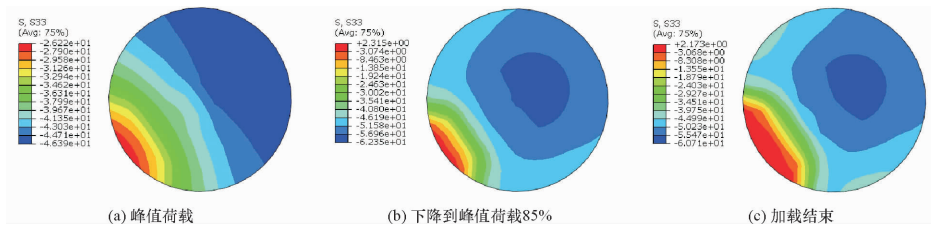
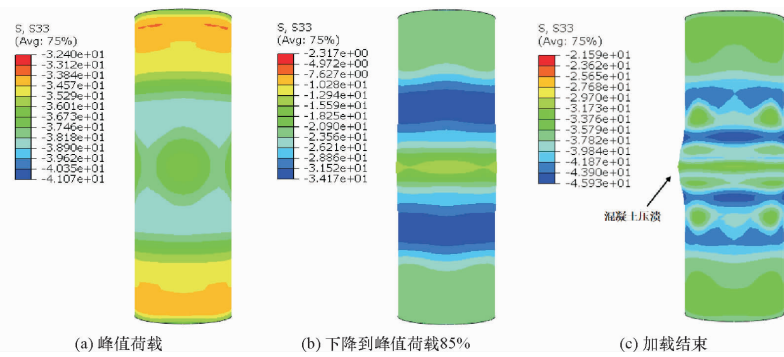
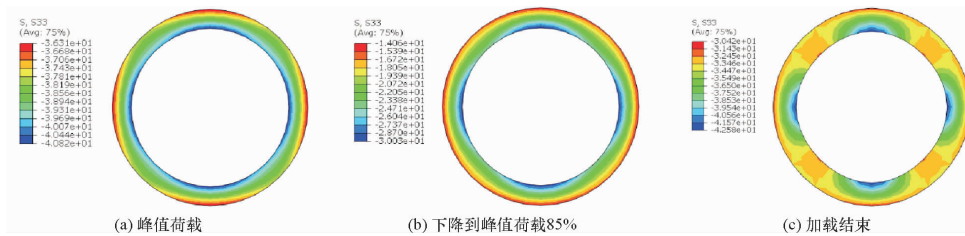
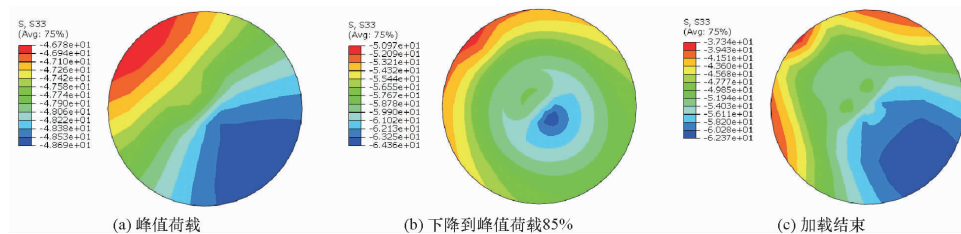


图 15 CIC-R<sub>D</sub>50a 内柱混凝土纵向应力沿跨中截面的分布

Fig. 15 Distribution of longitudinal stress of concrete at mid-span section of inner column in CIC-R<sub>D</sub>50a

结合 CIC-R<sub>D</sub>50a 外柱混凝土和 CIC-R<sub>L</sub>3a 外柱混凝土的纵向应力云图(图 13 ~ 图 14 及图 16 ~ 图 17)可知,在峰值荷载时,混凝土处于整体受压状态,在钢管的约束作用下,核心混凝土的强度提高;在下降峰值荷载的 85% 时,混凝土应力较大区域集中在钢管发生局部屈曲部位的附近,如图 13(b) 所示,应力较大区域集中在

1/6 柱高附近;在加载结束时,对于长径比较大的试件(CIC-R<sub>D</sub>50a),混凝土的受压应力进一步增加;而对于长径比较小的 CIC 试件(CIC-R<sub>L</sub>3a),混凝土会出现压溃现象,如图 16(c) 所示,由于钢管的约束作用,混凝土并未完全失效,其他位置处的混凝土纵向应力继续增加。

图 16 CIC-R<sub>1.3a</sub> 外柱混凝土纵向应力沿长度方向的分布Fig. 16 Distribution of longitudinal stress of concrete in outer column of CIC-R<sub>1.3a</sub>图 17 CIC-R<sub>1.3a</sub> 外柱混凝土纵向应力沿跨中截面的分布Fig. 17 Distribution of longitudinal stress of concrete at mid-span section of outer column in CIC-R<sub>1.3a</sub>图 18 CIC-R<sub>1.3a</sub> 内柱混凝土纵向应力沿跨中截面的分布Fig. 18 Distribution of longitudinal stress of concrete at mid-span section of inner column in CIC-R<sub>1.3a</sub>

结合 CIC-R<sub>0.50a</sub> 内柱混凝土和 CIC-R<sub>1.3a</sub> 内柱混凝土的纵向应力云图(图 15 和图 18)的结果可知,在峰值荷载时,混凝土处于整体受压状态。在下降到峰值荷载的 85% 时,对于长径比较大(如 CIC-R<sub>0.50a</sub>)的试件,柱中混凝土出现受拉区,对于长径比较小(CIC-R<sub>1.3a</sub>)的试件,混凝土整体还处于受压状态。在试件加载结束时,长径比较大的试件的受拉区面积不断增大,长径比较小的试件也逐渐出现混凝土受拉区。

## 5 CIC 构件轴压承载力分析

基于经过验证的 CIC 构件精细化有限元模型,本小节以长径比  $L_0/D_{oo}$ 、径厚比  $D_{oo}/t_{oo}$ 、钢材屈服强度  $f_{y0,e}$  和混凝土强度  $f_{cu}$  为研究变量,开展 CIC 构件轴压承载力力学性能对其几何和材料参数的敏感性分析。基于  $L_0$ 、 $t_{oo}$ 、 $f_{y0,e}$  和  $f_{cu}$  4 个变量,共设计了 17 个试件,试件基本参数见表 3。表 3 中 CIC-R<sub>1.6</sub>-R<sub>0.50</sub>- $f_{y0,345}$ - $f_{cu,40}$  作为基础对比模型,其中, R<sub>1.6</sub> 代表长径比  $L_0/D_{oo}$  为 6、R<sub>0.50</sub>

代表径厚比  $D_{oo}/t_{oo}$  为 50、 $f_{y0,345}$  代表外柱外钢管屈服强度为 345 MPa 和  $f_{cu,40}$  代表混凝土立方体抗压强度为 40 MPa。

### 5.1 长径比

模型中 CIC 试件外柱的直径  $D_{oo}$  为 250 mm,通过改变试件的长度  $L_0$  来改变长径比  $L_0/D_{oo}$ ,CIC 试件选用了 750 mm、1 000 mm、1 250 mm、1 500 mm、2 000 mm 和 2 500 mm 6 种试件长度,对应的长径比  $L_0/D_{oo}$  为 3、4、5、6、8 和 10。长径比对承载力的影响见图 19,其中,图 19(a)为不同长径比下 CIC 试件的荷载-轴向往移曲线,图 19(b)为长径比对极限承载力的影响。由图 19(a)可知,随着长径比的增大,CIC 试件的初始刚度显著下降,峰值荷载减小,峰值荷载对应的轴向往移增大;当承载力-位移曲线下落到一定程度后转为平稳段。由图 19(b)可知,随着长径比  $L_0/D_{oo}$  从 3 增加至 10,试件的极限承载力大致呈下降趋势,下降幅值为 4.67%,这是因为随着长径比的增大,试件的长细比也增大,进而导致试件的承载力降低。

表3 CIC轴压试件参数  
Table 3 Parameters of CIC specimens

试件编号		$L_o$ /mm	$D_{oo} \times t_{oo}$ /mm	$D_{oi} \times t_{oi}$ /mm	$L_i$ /mm	$D_i \times t_i$ /mm	$f_{y0,e}$ /MPa	$f_{y0,i}$ or $f_{yi}$ /MPa	$f_{cu}$ /MPa	$N_{CIC,FEA}$ /kN
长径比 $L_o/D_{oo}$	CIC-R <sub>L</sub> 3-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 40	750	250 × 5	196 × 3	604	100 × 3	345	345	40	3 062.91
	CIC-R <sub>L</sub> 4-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 40	1 000	250 × 5	196 × 3	854	100 × 3	345	345	40	3 037.21
	CIC-R <sub>L</sub> 5-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 40	1 250	250 × 5	196 × 3	1 104	100 × 3	345	345	40	3 016.22
	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 40	1 500	250 × 5	196 × 3	1 354	100 × 3	345	345	40	3 011.23
	CIC-R <sub>L</sub> 8-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 40	2 000	250 × 5	196 × 3	1 854	100 × 3	345	345	40	2 927.02
径厚比 $D_{oo}/t_{oo}$	CIC-R <sub>L</sub> 10-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 40	2 500	250 × 5	196 × 3	2 354	100 × 3	345	345	40	2 926.41
	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 31- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 40	1 500	250 × 8	196 × 3	1 354	100 × 3	345	345	40	3 771.78
	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 42- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 40	1 500	250 × 6	196 × 3	1 354	100 × 3	345	345	40	3 257.73
	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 63- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 40	1 500	250 × 4	196 × 3	1 354	100 × 3	345	345	40	2 743.26
钢材强度 $f_{y0,e}$	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 83- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 40	1 500	250 × 3	196 × 3	1 354	100 × 3	345	345	40	2 460.56
	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 125- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 40	1 500	250 × 2	196 × 3	1 354	100 × 3	345	345	40	2 198.04
	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 235- $f_{cu}$ 40	1 500	250 × 5	196 × 3	1 354	100 × 3	235	345	40	2 531.53
	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 390- $f_{cu}$ 40	1 500	250 × 5	196 × 3	1 354	100 × 3	390	345	40	3 197.20
混凝土 强度 $f_{cu}$	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 420- $f_{cu}$ 40	1 500	250 × 5	196 × 3	1 354	100 × 3	420	345	40	3 367.19
	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 30	1 500	250 × 5	196 × 3	1 354	100 × 3	345	345	30	2 850.67
	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 50	1 500	250 × 5	196 × 3	1 354	100 × 3	345	345	50	3 152.47
	CIC-R <sub>L</sub> 6-R <sub>D</sub> 50- $f_{y0}$ 345- $f_{cu}$ 60	1 500	250 × 5	196 × 3	1 354	100 × 3	345	345	60	3 304.68

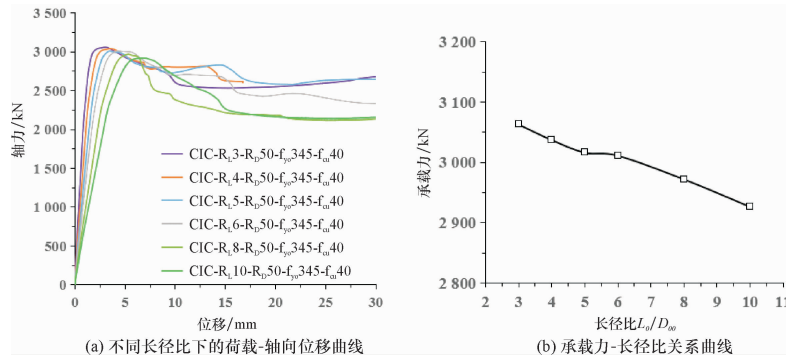


图19 长径比对承载力的影响  
Fig. 19 Influence of length-to-diameter ratios on axial load capacity

### 5.2 径厚比

通过改变CIC试件外柱钢管的壁厚 $t_{oo}$ 来变化试件的径厚比 $D_{oo}/t_{oo}$ ,CIC试件选用2 mm、3 mm、4 mm、5 mm、6 mm和8 mm 6种钢管壁厚,对应的径厚比分别为125、83、63、50、42和31。径厚比对承载力的影响见图20,其中图20(a)为不同径厚比下CIC试件的荷载-轴向位移曲线,图20(b)为径厚比对极限承载力的影响。由图20(a)可知,随着径厚比的增大,CIC试件的初始刚度显著下降,峰值荷载和峰值荷载对应的轴向位移均减小。当荷载下降到一定程度后,曲线转为平稳段。由图20(b)可知,随着径厚比的增大,试件的极限承载力呈下降趋势,径厚比从31增加到125,试件极限承载力减小了71.6%,减小幅度较大,表明径厚比对试件极限承载力的影响较大,这是因为随着径厚比的增加,钢管壁厚减小,钢管对混凝土的约束作用减弱并且试件截

面含钢率降低使得轴向承载力下降。

### 5.3 钢材屈服强度

CIC试件的外柱外钢管强度分别设置为235 MPa、345 MPa、390 MPa、420 MPa。钢材屈服强度对承载力的影响见图21,其中,图21(a)为外柱外钢管的不同钢材屈服强度下CIC试件的荷载-轴向位移曲线,图21(b)为钢材屈服强度对极限承载力的影响。由图21(a)可知,随着钢材屈服强度的增加,CIC试件的初始刚度基本上不变,这是由于钢材的弹性模量相同,但是峰值荷载增加并且峰值荷载对应的位移减小。当承载力-位移曲线荷载下降到一定程度后,曲线转为平稳段。由图21(b)可知,随着外柱外钢管屈服强度的增加,试件的极限承载力呈增长趋势,屈服强度从235 MPa增加到420 MPa,试件极限承载力增加33.01%。

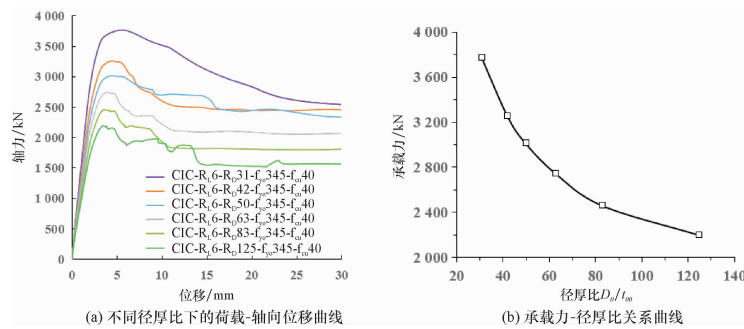


图 20 径厚比对承载力的影响

Fig. 20 Influence of diameter-to-thickness ratios on axial load capacity

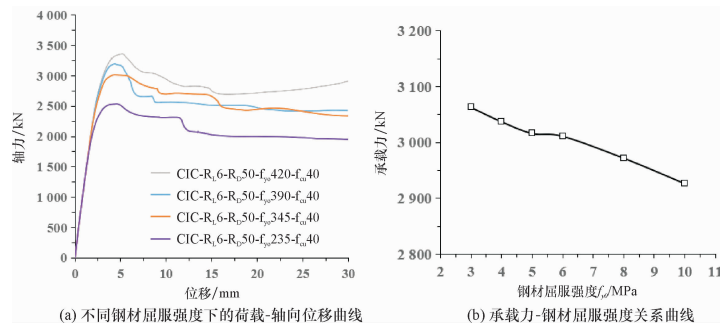


图 21 钢材屈服强度对承载力的影响

Fig. 21 Influence of steel yield strength on axial load capacity

#### 5.4 混凝土抗压强度

CIC 试件的混凝土强度分别设置为 30 MPa、40 MPa、50 MPa、60 MPa。混凝土抗压强度对承载力的影响见图 22, 其中, 图 22(a) 为不同混凝土抗压强度下 CIC 试件的荷载-轴向位移曲线, 图 22(b) 为混凝土强度对承载力的影响。由图 22(a) 可见, 随着核心混凝土抗压强度的提高, 试件初始刚度稍有提高; 当荷载增加至峰

值荷载后, 采用 30 MPa 和 40 MPa 强度的混凝土试件的承载力曲线下降幅度比采用 50 MPa 和 60 MPa 混凝土试件缓慢, 这是因为核心混凝土的脆性随着抗压强度的提高而增大, 导致受压状态下承载力下降较快。由图 22(b) 可见, 随着核心混凝土强度的提高, 试件的极限承载力呈增长趋势, 混凝土强度从 30 MPa 增加到 60 MPa 时, 试件极限承载力上升了 15.93%。

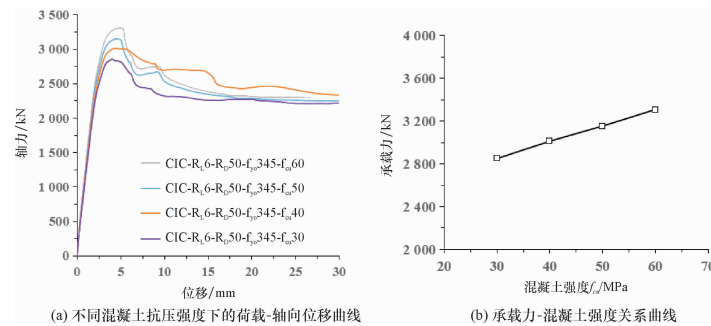


图 22 混凝土抗压强度对承载力的影响

Fig. 22 Influence of compressive strength of concrete on axial load capacity

## 6 CIC 构件承载力计算公式

本文基于第 5 小节参数分析结果, 采用回归分析得到可考虑长径比、径厚比、钢材屈服强度和混凝土抗压强度因素的 CIC 轴压承载力计算公式, 如式(4)所

示。将本文所采用的 CIC 轴压试验数据<sup>[10]</sup>及本文中所有的有限元数据, 验证公式(4)的准确性, 如图 23 所示, 发现本文提出的承载力计算公式能较好地预测 CIC 试件的轴向承载力。

$$N_{CIC,u} = -21.17(L_o/D_{oo}) + 14\,086.35(D_{oo}/t_{oo})^{-0.389} + 1\,531.8(f_{cu}/345) +$$

$$578(f_{yo}/40) - 2\,036.72, \quad (4)$$

其中,  $R^2 = 0.985$ , 单位为 kN。

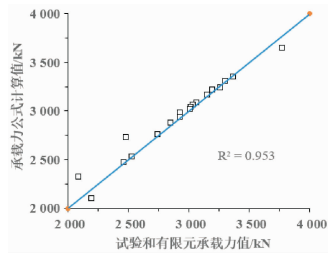


图 23 CIC 构件轴向承载力对比

Fig. 23 Comparison of axial load capacity of CIC

## 7 结 论

本文基于 ABAQUS 建立了 CIC 构件的精细化有限元模型,通过校验后的数值模型对 CIC 试件的轴压力学性能开展研究,研究结果表明:

(1) CIC 构件的外柱发生局部屈曲破坏, CIC 构件的内柱发生整体弯曲破坏,与试验结果一致,且轴力-柱中纵向应变关系曲线也与试验结果吻合。

(2) 对 CIC 轴压构件进行受力全过程分析发现外柱外钢管的应力最大值位于局部屈曲破坏处,外柱混凝土呈全截面受压,内柱混凝土随着加载从全截面受压逐渐转变为一侧受压一侧受拉。

(3) 有限元参数分析的结果表明,外柱外钢管径厚比  $D_{oo}/t_{oo}$  对 CIC 构件的承载力影响最大,径厚比从 31 增加到 125,构件的轴压承载力最大降低了 71.6%。构件的承载力随钢材屈服强度和混凝土强度的增加而增加,随外柱长径比的增加而减小。CIC 构件的初始刚度随着外柱长径比  $L_o/D_{oo}$  和外柱外钢管径厚比  $D_{oo}/t_{oo}$  的增加,显著减小;混凝土强度和钢材屈服强度对 CIC 构件的初始刚度基本没有影响。

(4) 本文通过回归分析,得到适用于 CIC 构件的轴向承载力计算公式,可较好地预测 CIC 构件的轴压承载力。

## 参考文献:

- [1] American Institute of Steel Construction. Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [2] European Committee for Standardization. Design of composite steel and concrete structures: Eurocode 4[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [3] Architectural Institute of Japan. Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2008.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土混合结构技术标准: GB 51446 - 2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土结构技术规范: GB 50396 - 2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [6] 中国工程建设标准化协会. 矩形钢管混凝土结构技术规程: CECS 159 - 2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [7] Song T Y, Xiang K. Performance of axially-loaded concrete-filled steel tubular circular columns using ultra-high strength concrete[J]. Structures, 2020, 24: 163-176.
- [8] Zeng J J, Zheng Y W, Liu F, et al. Behavior of FRP ring-confined CFST columns under axial compression[J]. Composite Structures, 2021, 257: 113166.
- [9] Uy B, Tao Z, Han L H. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(3): 360-378.
- [10] Fang X J, Ji J J, Hao H, et al. Behaviours of column-in-column (CIC) system under axial compression: Experimental and theoretical studies[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 192: 107217.
- [11] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [12] American Concrete Institute Committee 318. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318 - 2019[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008.
- [13] Hillerborg A, Modéer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773-781.
- [14] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [15] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [16] Galambos T V. Guide to stability design criteria for metal structures[M]. 5th ed. New York: John Wiley and Sons Inc, 1998.
- [17] 张铭. 圆端形钢管混凝土长柱轴压性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [18] Hong S, Varma A H. Analytical modeling of the standard fire behavior of loaded CFT columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(1): 54-69.
- [19] Hassanein M F, Elchalakani M, Patel V I. Overall buckling behaviour of circular concrete-filled dual steel tubular columns with stainless steel external tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 115: 336-348.

【责任编辑: 孙向荣】