

不同约束构造圆钢管混凝土柱的轴压特性有限元分析

司继威, 乔翰兴, 殷旖聪, 殷 飞*

中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京

收稿日期: 2025年1月19日; 录用日期: 2025年2月12日; 发布日期: 2025年2月20日

摘 要

为研究具有不同约束效应的圆钢管混凝土轴压特性及其约束机制, 采用有限元软件ABAQUS对五个不同约束构造下的圆钢管混凝土模型进行模拟, 包括不设约束构造、纵向加劲肋、方钢管、钢筋笼和型钢。研究其在轴向压力作用下的承载能力、延性、刚度退化、以及应力云图的特点和差异。研究结果表明: 增设纵向加劲肋、方钢管、钢筋笼和型钢均能提高短柱的承载能力、延性性能和刚度; 而设置方钢管和型钢对承载能力和刚度的提高效果更为显著; 增设方钢管对延性的提高更为显著。

关键词

圆钢管混凝土, 轴压特性, 有限元分析, 约束作用

Finite Element Analysis of Axial Compressive Behavior of Circular Concrete-Filled Steel Tube Columns with Various Confinement Constructions

Jiwei Si, Hanxing Qiao, Yicong Yin, Fei Yin*

School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing

Received: Jan. 19th, 2025; accepted: Feb. 12th, 2025; published: Feb. 20th, 2025

Abstract

In order to study the axial compressive behavior of circular concrete-filled steel tube columns with

*通讯作者。

文章引用: 司继威, 乔翰兴, 殷旖聪, 殷飞. 不同约束构造圆钢管混凝土柱的轴压特性有限元分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(2): 25-34. DOI: 10.12677/mos.2025.142128

different confinement constructions and its confinement mechanism, the finite element software ABAQUS was used to simulate the models with different confinement constructions of circular concrete-filled steel tube columns, including no restraint structure, longitudinal stiffener, square steel tube, steel reinforcement cage, and shape steel. The study investigates the bearing capacity and ductility performance under axial compressive load and analyzes the characteristics and differences of the stress cloud maps among five models. The research results show that the addition of longitudinal stiffener, square steel tube, steel reinforcement cage, and shape steel can improve the bearing capacity, ductility and stiffness of short columns; however, the improvement in bearing capacity and stiffness is more significant for the addition of square steel tube and shape steel; the improvement in ductility is more significant for the addition of square steel tube.

Keywords

Circular Steel Tube Concrete, Axial Compression Behavior, Finite Element Analysis, Confinement Effect

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢管混凝土(concrete-filled steel tube, CFST)由于其优异的力学性能,在高层建筑中得到了广泛的应用[1]-[3]。圆钢管可以有效地对核心混凝土起到约束作用,提高其变形能力[4]。为改善圆钢管混凝土的受力特性,有学者提出了不同的改造措施。

有多名学者提出在钢管混凝土内壁设置肋板,研究肋板对内部混凝土的约束效应。董宏英等[5]通过在圆钢管腔内焊接环向肋板及竖向肋板以提高钢管对混凝土的约束作用,结果表明,设置环向和竖向肋板可以提高圆钢管混凝土柱的受弯承载力和延性,且环向肋板对钢管局部稳定性的增强作用显著,可限制其屈曲。郑永乾等[6]对设肋方形不锈钢管混凝土轴压短柱的力学性能进行了有限元模拟,发现在相同轴向应变下,设肋不锈钢管混凝土横向变形比不设肋不锈钢管混凝土小,对核心混凝土的约束效果更好,在整个过程中,不锈钢管角部的约束力最大且持续增加,构件的承载力和后期延性比不设肋构件大。刘明维等[7]研究钢管内壁焊接纵向带肋钢筋对钢-混凝土界面剪切强度特性的影响,发现钢-混凝土界面机械咬合力因焊接纵向带肋钢筋得以增强,进而粘结强度大大提高。

还有学者提出了一些其他提高混凝土约束作用的方法,如内置箍筋、型钢、增大钢管厚度等。齐浩等[8]通过内置方形箍筋增强方钢管混凝土柱的约束能力,结果表明,设置方形箍筋可以有效提高短柱承载能力和延性,且其对延性的提高更为显著。史艳莉等[9]在钢管混凝土构件内部配置型钢以提高其受力特性,结果表明,内部型钢的存在可显著提高构件承载力,并有效增强核心混凝土的被动约束效应。Ibanez等[10]进行了钢管厚度对圆形、方形和矩形 HCFST 和 CFST 柱影响的试验研究。分析了不同截面的约束效应。

还有的学者研究了这些约束构造对多腔钢管混凝土的受力性能的影响。Yin 等[11]研究了偏心荷载下多腔钢管混凝土的受力特性,发现内置圆钢管和钢筋笼可以显著提高其力学特性。混凝土的强度提高后其承载力也显著提高,但降低了延性。随着偏心率的增加,承载能力降低,而恢复能力也随之减小。

在实际建筑设计中,钢管混凝土柱采用不同的约束构造来提高性能是必要的,因此需要对不同的约束构造下的混凝土进行对比研究。为提高圆钢管混凝土(CFST)的延性和承载能力,本文提出多种约束圆

钢管混凝土柱的方法，即在钢管内部设置竖向加劲肋、圆形钢筋笼，方形钢管和型钢。通过 ABAQUS 有限元分析对五个不同约束构造下的圆钢管混凝土模型进行模拟，根据其应力云图和荷载 - 位移曲线对其轴压特性及其约束机制进行分析。

2. 有限元模型

2.1. 模型参数

共设计了 5 根复合约束方钢管混凝土短柱作为轴压有限元分析模型，分别为不含任何约束构造的圆形 CFST 试样(CFST-0)、内置纵向加劲筋的圆形 CFST 试样(CFST-L)、内置方形钢管的圆形 CFST 试样(CFST-F)、内置圆形钢筋笼的圆形 CFST 试样(CFST-R)、内置型钢的圆形 CFST 试样(CFST-H)，如图 1 所示。所有试样的外钢管直径为 500 mm，壁厚为 10 mm。5 个样品高度为 1500 mm。纵向加劲肋尺寸为 40 mm × 5 mm；内置方钢管外边长为 200 mm，壁厚为 6 mm；型钢尺寸为 300 × 200 × 6 mm。其中混凝土采用 C45 混凝土，钢管、型钢、加劲肋采用 Q345 钢板，纵筋采用 HPB400 钢筋，直径 8 mm；箍筋采用 HPB300 钢筋，直径 6 mm，间距 100 mm。钢筋笼直径 380 mm，如表 1 和表 2 所示。为了比较不同截面构造的影响，减少不同材料类型和强度的影响，定义等效截面配钢率(ρ_e)。如式(1)所示， ρ_i 为不同钢(如外钢管、内钢管、水平加强筋)的等效配钢率，其计算公式为式(1)， V_i 为钢的体积，为钢的屈服强度实测值， f_{sty} 为外钢管的屈服强度实测值， V_c 为混凝土体积。因此，总等效配钢率等于 $\sum \rho_i$ 。根据钢材受力方向，将等效截面配钢率分为纵向等效截面配钢率(ρ_{e-l} ，包括外钢管、内置方钢管、型钢、纵向加劲筋、纵向钢筋)和水平等效截面配钢率(ρ_{e-h} ，主要为箍筋)，如表 3 所示。

$$\rho_i = \frac{V_i f_i / f_{sty}}{V_c} \quad (1)$$

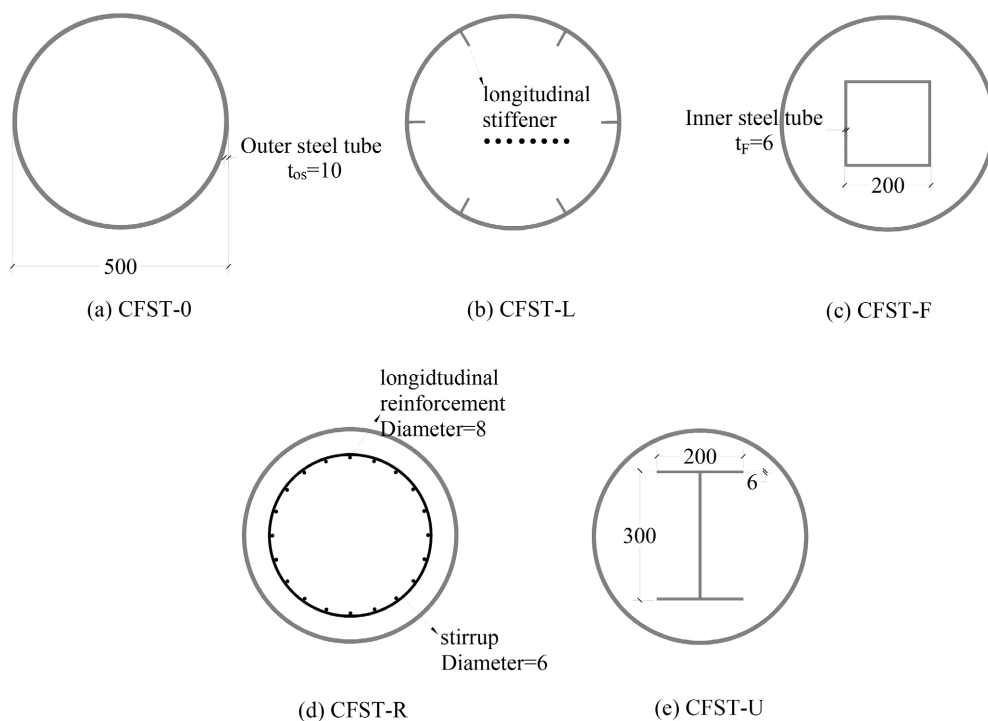


Figure 1. Cross-section of models

图 1. 模型截面示意

Table 1. Material parameters of steel
表 1. 钢筋材料参数

钢材牌号	f_y/MPa	E_s/MPa	ν_s
Q345	345	2.06×10^5	0.3
HRB400	400	2.00×10^5	0.3
HPB300	300	2.10×10^5	0.3

Table 2. Material parameters of concrete
表 2. 混凝土材料参数

强度等级	f_{ck}/MPa	E_c/MPa	ν_c
C45	29.6	3.35×10^4	0.2

Table 3. Equivalent cross-sectional steel ratio of the CFST samples
表 3. CFST 模型的等效截面钢筋比

模型	外钢管	纵向加劲肋	方钢管	纵向钢筋	箍筋	型钢	总等效配钢率	纵向等效截面配钢率	横向等效截面配钢率
CFST-0	8.51%						8.51%	8.51%	
CFST-L	8.51%	0.88%					9.39%	9.39%	
CFST-F	8.51%		2.57%				11.08%	11.08%	
CFST-R	8.51%			0.64%	0.16%		9.31%	9.02%	0.29%
CFST-H	8.51%					2.28%	10.79%	10.79%	

2.2. 单元选择

对模型采用有限元软件 ABAQUS 提供的实体单元 C3D8R 模拟核心混凝土,采用壳单元 S4R 模拟钢管、加劲肋和型钢,采用桁架单元 T3D2 模拟钢筋。网格划分时,壳单元和实体单元分别划分为四边形单元和六面体单元。

2.3. 材料的本构关系

各类圆钢管混凝土模型中涉及钢板、混凝土、钢筋三种材料。混凝土材料模型选用塑性损伤模型,其拉、压本构关系采用规范 GB50010-2010 [12]中提出的混凝土单轴应力 - 应变关系,混凝土膨胀角取 31° ,塑性势函数偏心率取 0.1,混凝土双轴极限抗压强度与单轴极限抗压强度比值取 1.16,拉压子午线第二应力不变量的比值为 0.6667,黏性系数为 0.0001。钢板和钢筋本构模型均选用理想弹塑性模型。其中,混凝土弹性模量 $E_c = 3.35 \times 10^4$,混凝土泊松比 $\nu_c = 0.2$;钢板弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$,钢板泊松比取 0.3;纵筋弹性模量为 $2.10 \times 10^5 \text{ MPa}$,箍筋弹性模量为 2.10×10^5 ,钢筋泊松比取 0.3。

2.4. 相关作用与边界条件

钢管混凝土中混凝土与钢管相互作用模式选用 ABAQUS 中的面 - 面(surface-to-surface)接触,其中界面法向接触为“硬接触”(hard contact),界面切向采用“罚”摩擦模型模拟切向力的传递,界面摩擦系数为 0.6。定义接触面时,外钢管内表面为主表面(master surface),选择混凝土外表面为从表面(slave surface)。钢筋笼、内置方钢管作为“内置区域”(embedded)嵌入核心混凝土中。

3. 有限元结果与分析

图 2 给出了峰值点和极限点的截面应力云图，由此对不同约束构造的约束作用进行分析。

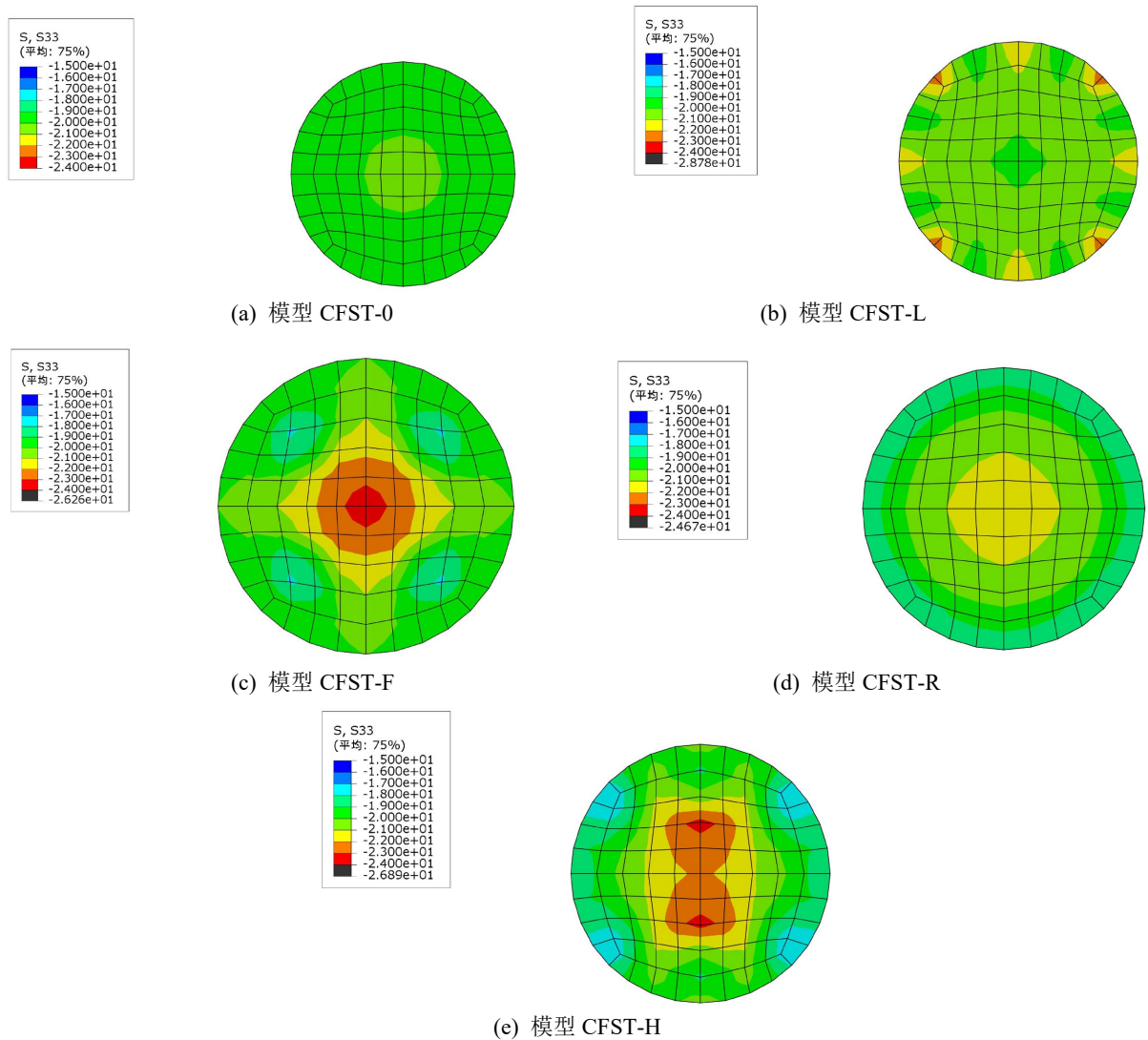


Figure 2. Stress distributions of different types of models at peak point

图 2. 峰值点的截面应力云图

3.1. 荷载 - 位移曲线

图 3 为竖向荷载 - 位移($N-\Delta$)曲线。从图中可以看出，所有模型 $N-\Delta$ 曲线可分为弹性段、弹塑性上升段、下降段和平缓段四个发展历程。加载初期，所有模型均处于弹性阶段， $N-\Delta$ 曲线呈线性正相关，CFST-F 和 CFST-H 弹性段的斜率基本重合且斜率较大，CFST-0 弹性段的斜率较小，其原因可能为 CFST-F 和 CFST-H 中方钢管和型钢对核心混凝土的约束作用较为显著，CFST-0 中无其他约束构造。峰值荷载前，所有模型均进入弹塑性阶段，曲线斜率降低；峰值荷载后， N 随 Δ 增大迅速下降，CFST-0 荷载的下降速率明显快于其他模型的，体现了其他模型中的各类约束构造的约束作用。从图中也可以看出，具有约束构造的模型中，CFST-F 最缓，CFST-H 次之，其后为 CFST-R，CFST-L 最快，说明峰值点荷载后，对核

心混凝土具有较强的约束作用由强到弱排序依次为方钢管、型钢、钢筋笼、加劲肋，它们能够维持短柱的承载力，延缓其下降速率。随着钢管和各类约束结构屈服，混凝土达到其极限压应变， $N-\Delta$ 曲线逐渐进入平缓段，直至达到极限点，即荷载下降至 $0.85N_p$ 时对应的点。

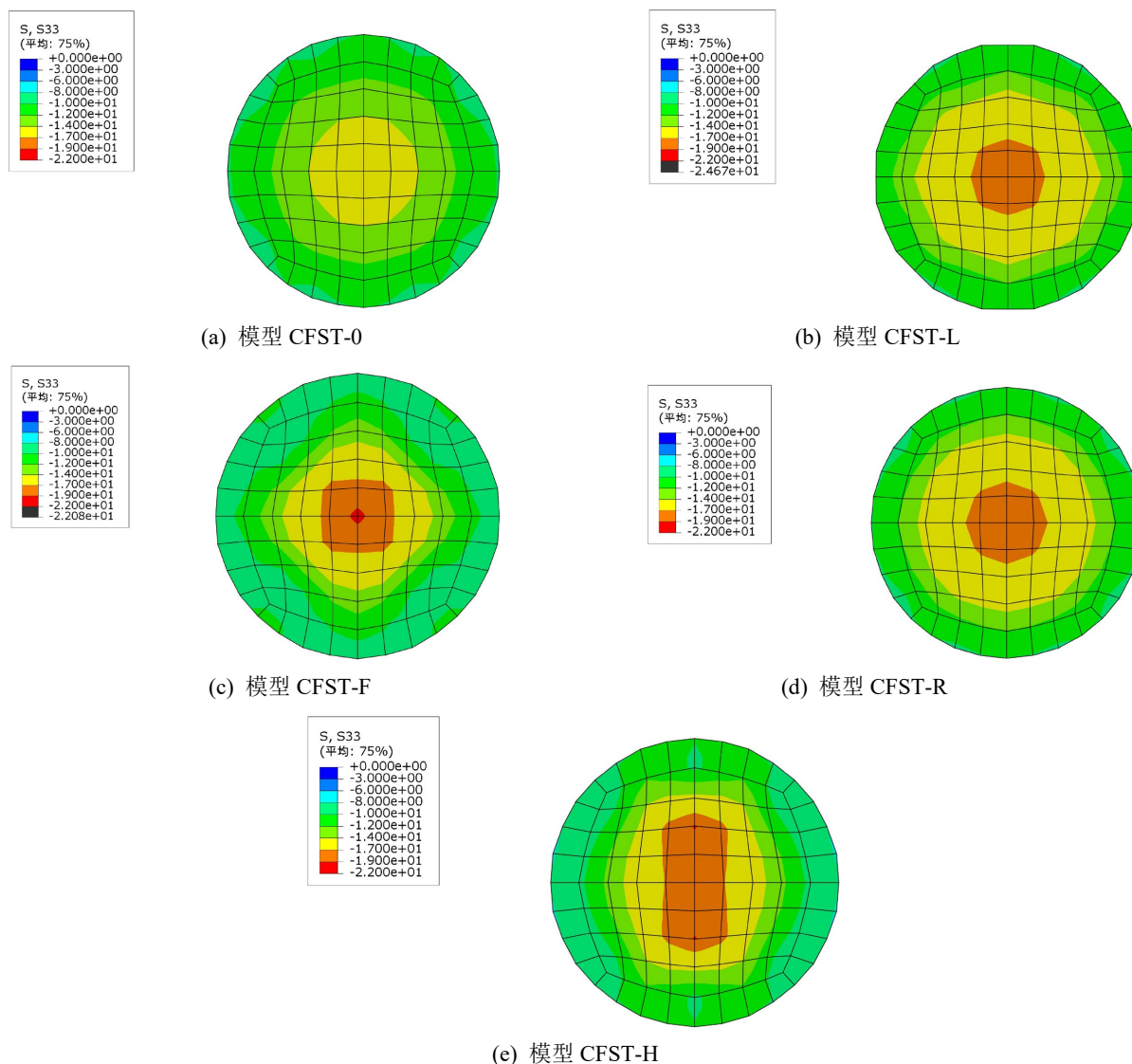


Figure 3. Stress distributions of different types of models at failure

图 3. 极限点的截面应力云图

3.2. 承载力分析

图 2 和图 3 为五类模型在峰值点和极限点沿模型纵轴的截面应力云图，可以发现加其他约束构造的钢管混凝土中的混凝土的应力大于不加其他约束构造的钢管混凝土中的混凝土。在模型 CFST-0 达到峰值荷载后，外钢管由于自身变形较大，无法在后续加载过程中为核心混凝土提供足够的围压，导致其在最终破坏时出现了模型 CFST-0 的核心混凝土压应力小于后四组模型的现象。后四组模型的核心混凝土由于受到外钢管和其他构造的复合约束，其核心混凝土仍能保持较高的压应力。在峰值点时，CFST-L 的竖向加劲肋限制内部混凝土的横向发展，对其具有约束作用，提高了竖向加劲肋附近混凝土的应力，

整体呈现混凝土外围应力大于内部的现象。CFST-R 的应力呈现与圆钢筋笼对应的圆形区域,箍筋横向的最大应力为 300 MPa,达到屈服应力,限制内部混凝土的横向发展,对其施加了约束作用,因此应力云图大致呈现由外向内应力逐渐增大。而 CFST-F 的内部方钢管在横向的最大应力为 64.44 MPa,限制了内部混凝土的横向发展,起到约束作用,应力云图大致呈现由外向内应力逐渐增大。CFST-H 混凝土应力最大的位置在型钢的腹板和翼缘连接处,这是因为核心混凝土受到了翼缘的约束作用,因此距离翼缘越近的混凝土所受到的约束作用越大,距离翼缘越远的混凝土所受到的约束作用越小,应力云图整体呈现以腹板为轴中间大两边小的沙漏型。

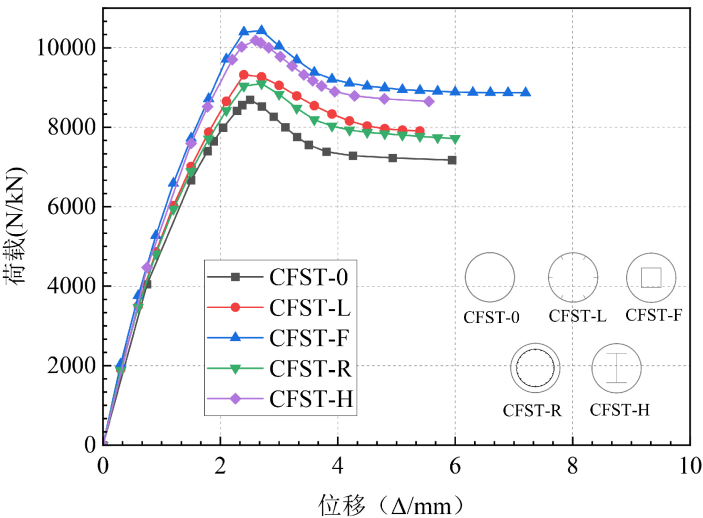


Figure 4. Load-displacement curves
图 4. 荷载 - 位移曲线

通过图 4 和表 4 可以得到以下结论:

(1) 与 CFST-0 相比, CFST-L 的峰值承载力提高了 628 kN, 几乎等于纵向加劲肋的直接贡献($A_L \times f_L = 552 \text{ kN}$)。峰值后 CFST-L 的承载力下降速度比 CFST-0 慢, 这可能是由于加劲肋在一定程度上延缓了钢管的屈曲。

(2) 与 CFST-0 相比, CFST-R 的峰值承载力提高了 405 kN, 大于纵向钢筋的直接贡献($A_R \times f_R = 347 \text{ kN}$)。这表明, 除了纵向钢筋的直接贡献外, 箍筋对混凝土起到了有效的约束作用, 提高了构件的承载能力。

Table 4. Results of finite element analysis
表 4. 有限元分析结果

模型编号	峰值点		屈服点		极限点		μ
	Δ_p/mm	N_p/kN	Δ_y/mm	N_y/kN	Δ_u/mm	N_u/kN	
CFST-0	2.35	8691	1.94	7768	3.80	7387	1.96
CFST-L	2.40	9319	1.99	8369	5.18	7922	2.60
CFST-F	2.70	10429	2.00	9315	7.2	8865	3.6
CFST-R	2.70	9096	1.97	8110	6	7731	3.05
CFST-H	2.60	10184	2.01	9184	5.48	8656	2.73

(3) 与 CFST-0 相比, CFST-F 的峰值承载力提高了 1738 kN, 大于内钢管的直接贡献($A_F \times f_F = 1606$ kN)。这表明内置方钢管对混凝土具有有效的约束作用, 大大提高了构件的承载能力。

(4) 与 CFST-0 相比, CFST-H 的峰值承载力提高了 1493 kN, 大于型钢的直接贡献($A_H \times f_H = 1424$ kN)。这表明内置方钢管对混凝土具有一定的约束作用, 提高了构件的承载能力。

(5) CFST-L 的纵向等效截面配钢率大于 CFST-R, 承载能力更强。峰值后, CFST-R 的承载力下降速度要快于 CFST-L, 但是在靠近极限时承载力下降速度减缓, 这是由箍筋的约束作用引起的; CFST-F 的纵向等效截面配钢率大于 CFST-H, 因此 CFST-F 承载能力较强, 且延性大。

3.3. 延性分析

采用位移延性系数 μ 评价钢管混凝土短柱的变形能力, 根据文献[13], 定义延性系数 μ 为。

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (2)$$

式中: Δ_u 为极限位移, 即荷载下降至 $0.85N_p$ 时对应的位移; N_p 为峰值荷载; Δ_y 为模型屈服位移, N_y 为模型的屈服荷载。屈服点通过图 5 所示的作图法确定[14]。

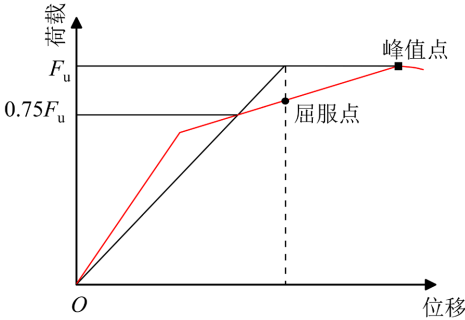


Figure 5. Method of determining yield point
图 5. 屈服点确定方法

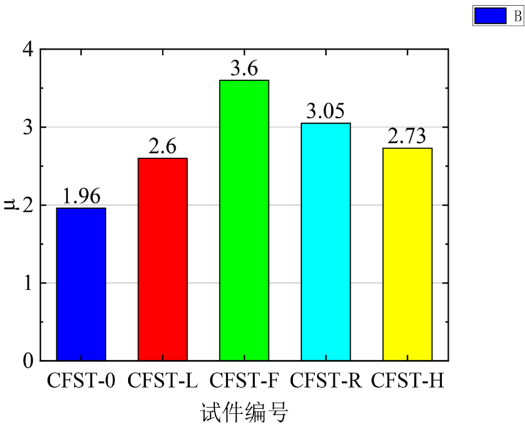


Figure 6. Comparison of ductility coefficient of models
图 6. 延性系数对比

通过图 5、图 6 和表 4 可以得到以下结论:

(1) CFST-L 的峰值位移大于 CFST-0, 且 CFST-L 的承载力下降更慢, 极限位移显著增加。因此, CFST-L 的延性指数大于 CFST-0。这是因为纵向加劲肋提高了钢管在峰值点后阶段的稳定性。

(2) CFST-R 和 CFST-H 的屈服位移和峰值位移均大于 CFST-0。峰值后, CFST-R 和 CFST-H 的承载力下降速度也慢于 CFST-0, 其延性系数也提高。而 CFST-F 的极限位移显著大于以上模型, 其延性系数也进一步提高。

3.4. 刚度退化

钢管屈曲导致承载力显著下降, 峰值点后混凝土损伤加速。刚度 K 计算如式(2)所示, 其中 F 为荷载, Δ 为相应的位移。图 7 为模型刚度退化曲线。

$$K = \frac{F}{\Delta} \quad (3)$$

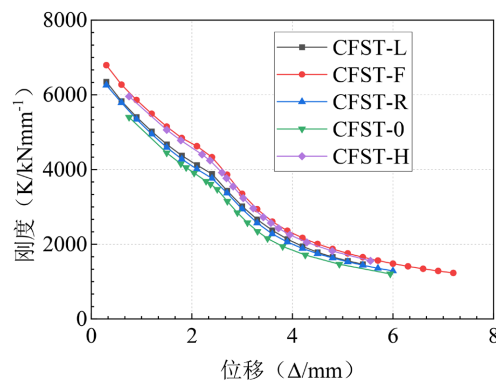


Figure 7. Stiffness degeneration curves
图 7. 刚度退化曲线

通过图 7 可以得到以下结论:

- (1) 前期刚度差异主要来源于不同的纵向结构。CFST-F 纵向等效截面配钢率略大于 CFST-H, 因此, 它的初始刚度略大于 CFST-H; CFST-L 和 CFST-R 的纵向等效截面配钢率相近, 因此, 它们的初始刚度相近; CFST-0 具有最小的纵向等效截面配钢率, 初始刚度也最小。
- (2) 箍筋的约束作用随着混凝土损伤程度的加深而增强。随着混凝土损伤的发展, 混凝土的泊松比增大, 水平变形也随之增大, 箍筋的约束作用越来越显著。因此, 在曲线后半段 CFST-R 的刚度退化逐渐减缓, 接近 CFST-L。

4. 结论

本文设计了 5 根不同截面构造的钢管混凝土柱, 并进行了轴压作用下的有限元分析研究。结合有限元分析结果分析了约束效应。

- (1) 在圆钢管混凝土短柱模型中增设纵向加劲肋、方钢管、钢筋笼和型钢均能对核心混凝土起到有效的约束作用, 明显提高模型承载能力, 其中增设方钢管和型钢模型的屈服荷载、峰值荷载和极限荷载增大最为显著。
- (2) 与 CFST-0 相比, 增设四种构造的模型的延性性能均提高了, 其中增设方钢管模型的延性性能增强最为显著。
- (3) 通过应力云图发现, CFST-0 和 CFST-R 应力区域均呈现圆形, 整体呈现由内向外逐渐减小; CFST-L 截面中的应力最大值在加劲肋附近, 呈现由外向内逐渐减小; CFST-H 截面中的应力最大值在翼缘和腹板连接处, 整体呈现沙漏型, 应力大致呈现由内向外逐渐减小; CFST-F 截面应力由内向外逐渐减小, 整

体呈现将方钢管沿纵轴旋转 45°后的矩形。

(4) 模型的刚度差异主要与纵向结构类型有关,纵向等效截面配钢率越大初始刚度越大,箍筋的约束作用会随着混凝土损伤程度的加深而增强,减缓刚度退化。

基金项目

教育部产学研合作协同育人项目(240703132183637);中国矿业大学(北京)“大学生创新训练项目”(202415009)。

参考文献

- [1] 刘力方, 宗景美, 谢运龙. 钢管混凝土结构研究现状及发展趋势[J]. 科技创新与应用, 2012(18): 29-30.
- [2] 查晓雄, 肖从真, 钟善桐, 等. 钢管混凝土结构技术规范: GB50936-2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [3] Yin, F., Cao, W., Xue, S., Dong, H. and Wang, R. (2020) Behavior of Multicell Concrete-Filled Steel Tube Columns under Eccentric Loading. *Journal of Constructional Steel Research*, **172**, Article ID: 106218. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106218>
- [4] Arokiaprakash, A. and Selvan, S.S. (2023) Comprehensive Study of Compressive Behavior of CFST Columns with Confinements and Stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, **211**, Article ID: 108127. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108127>
- [5] 董宏英, 秦嘉, 曹万林, 等. 带肋圆钢管混凝土柱抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S2): 278-287.
- [6] 郑永乾, 李振, 郑莲琼, 等. 设肋方矩形不锈钢管混凝土轴压力学性能研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(9): 41-47.
- [7] 刘明维, 吴发友, 阿比尔的, 等. 内置纵向筋的钢管混凝土桩钢-混凝土界面剪切特性试验研究[J/OL]. 建筑结构, 2024: 1-8. <https://doi.org/10.19701/j.jzig.20222070>, 2024-12-24.
- [8] 齐浩, 胡少伟, 薛翔, 等. 复合约束方钢管混凝土短柱轴压性能有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(S1): 89-97.
- [9] 史艳莉, 王亚伟, 王文达. 内配型钢的圆钢管混凝土轴压短柱力学性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(4): 1-7.
- [10] Ibañez, C., Hernández-Figueirido, D. and Piquer, A. (2021) Effect of Steel Tube Thickness on the Behaviour of CFST Columns: Experimental Tests and Design Assessment. *Engineering Structures*, **230**, Article ID: 111687. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111687>
- [11] Yin, F., Xue, S., Cao, W., Dong, H. and Wu, H. (2020) Behavior of Multi-Cell Concrete-Filled Steel Tube Columns under Axial Load: Experimental Study and Calculation Method Analysis. *Journal of Building Engineering*, **28**, Article ID: 101099. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101099>
- [12] 赵基达, 徐有邻, 黄小坤, 等. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [13] 张昆昆, 廖飞宇, 黄志伟. CFRP 加固带球冠形脱空缺陷的钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增刊 1): 220-225.
- [14] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36-46.