

# 不同约束构造方钢管混凝土柱的轴压特性有限元分析

司继威, 李恩喆, 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7月15日; 录用日期: 2025年8月8日; 发布日期: 2025年8月18日

## 摘要

为增强外部方钢管对内部核心混凝土的约束能力, 减缓在轴压下方钢管的局部屈曲, 提出了多种不同的内置约束构造的复合约束方钢管混凝土柱, 通过ABAQUS对不同约束构造下的方钢管混凝土柱模型进行模拟。研究其在轴向压力作用下的各项轴压特性, 包括承载力、刚度和延性, 对比分析其应力云图。研究表明: 增设不同的约束构造均能提高短柱的承载力、延性性能和刚度; 而设置钢管和型钢对承载能力和刚度的提高效果更为显著, 方形构造比圆形构造对混凝土的约束效果更好; 增设横向加劲肋对延性的提高更为显著。

## 关键词

方钢管混凝土, 轴压特性, 有限元分析, 约束作用

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

Jiwei Si, Enzhe Li, Yicong Yin, Fei Yin\*

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

Received: Jul. 15<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 8<sup>th</sup>, 2025; published: Aug. 18<sup>th</sup>, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 司继威, 李恩喆, 殷旖聪, 殷飞. 不同约束构造方钢管混凝土柱的轴压特性有限元分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(8): 215-227. DOI: 10.12677/mos.2025.148561

## Abstract

In order to enhance the restraint ability of the external square steel tube to the internal core concrete and slow down the local buckling of the steel tube under axial compression, a variety of composite confined square CFST columns with different built-in restraint structures were proposed, and the models of the square CFST columns under different constraint structures were simulated by ABAQUS. The axial compressive properties under axial pressure, including bearing capacity, stiffness and ductility, were studied, and the stress contours were compared and analyzed. The results show that the load-bearing capacity, ductility and stiffness of the short column can be improved by adding different restraint structures. However, the improvement effect of steel pipe and section steel on the bearing capacity and stiffness is more significant, and the constraint effect of square structure on concrete is better than that of circular structure. The addition of transverse stiffeners improves ductility more significantly.

## Keywords

Square Concrete-Filled Steel Tube, 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)是将混凝土填入钢管内形成的组合结构材料,兼具钢与混凝土的优点,广泛应用于现代建筑工程中[1]-[3]。当结构以抗弯为主、节点连接复杂或需要节省空间时,优先选用方钢管混凝土。方钢管的管壁在受压时容易发生局部屈曲,并且与核心混凝土之间的粘结力较弱(相比圆钢管,方钢管对混凝土的约束效应较差),容易在受力时出现界面滑移,导致承载力下降。因此为了提高方钢管对内部混凝土的约束能力,各种改造措施被相继提出。

有多名学者提出在方钢管混凝土上设置不同的约束构造,通过比较分析来研究方钢管混凝土柱的力学性能。Yin 等[4]为研究具有多重约束效应的高强度混凝土圆钢管的轴向受压行为和约束机理,设计了水平加劲肋、纵向加劲肋、多层钢筋笼、内钢管和分隔钢板的试样。然后分析了这些结构对承载力、延性、刚度和残余变形的影响。邓岩等[5]分析总结了不同约束条件下的方钢管混凝土柱的轴压性能、抗震性能、压弯性能和轴向承载力计算公式。

还有一些学者在为了更好地约束核心混凝土,提出不同的新型约束构造,并通过试验研究其约束机理。孙颖等[6]通过分析在侧向冲击荷载作用下,不同冲击速度下外层圆钢管承受的应力均大于内部核心混凝土的应力,揭示圆钢管有效地保护内部结构。因此可以采取增加圆钢管的壁厚与选用高强度钢材来增强钢管的约束作用,提升整体组合柱的安全性。计静等[7]研究分析了矩形钢管混凝土翼缘蜂窝双腹板H型组合短柱中不同参数变化对该类新型短柱轴压承载力的影响,得出该类构件的受力过程、破坏模式以及受力机理。林牧新等[8]发现用性能更优异的UHPC包覆钢管混凝土形成UHPC包覆钢管混凝土叠合柱可以提高刚度和承载能力,减小塑性变形能力和极限位移。赵家祥等[9]内置五螺旋箍筋弥补了方钢管对横截面周边中部混凝土约束力较弱的问题,提高了钢管混凝土方柱的承载能力和延性性能;相同体积

配箍率下,五螺旋箍筋钢管混凝土方柱的承载力和延性系数均明显高于单螺旋箍筋钢管混凝土方柱。刘宏波等[10]通过研究发现矩形多腔钢管混凝土柱通过提高腔体数量能够提高承载力和延性系数,而肋板厚度仅影响承载能力对延性系数影响不大。Yin 等[11]建立有限元模型发现新型加劲肋能够显著降低钢管的屈曲变形,增强钢管对芯混凝土的约束作用,提高钢管与混凝土的综合性能,且加劲肋的厚度和材料强度对短柱试件的极限承载力和延性有显著影响。

钢管混凝土凭借其高强度、施工高效和适应性,已成为现代工程的重要选择。在实际工程中,大部分钢管混凝土柱(CFST)都运用了各种约束构造,所以要分析不同的约束构造钢管混凝土下的核心混凝土的性质,本文提出了各种构造来约束约束方钢管混凝土柱。通过 ABAQUS 有限元分析对七个不同约束构造下的方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

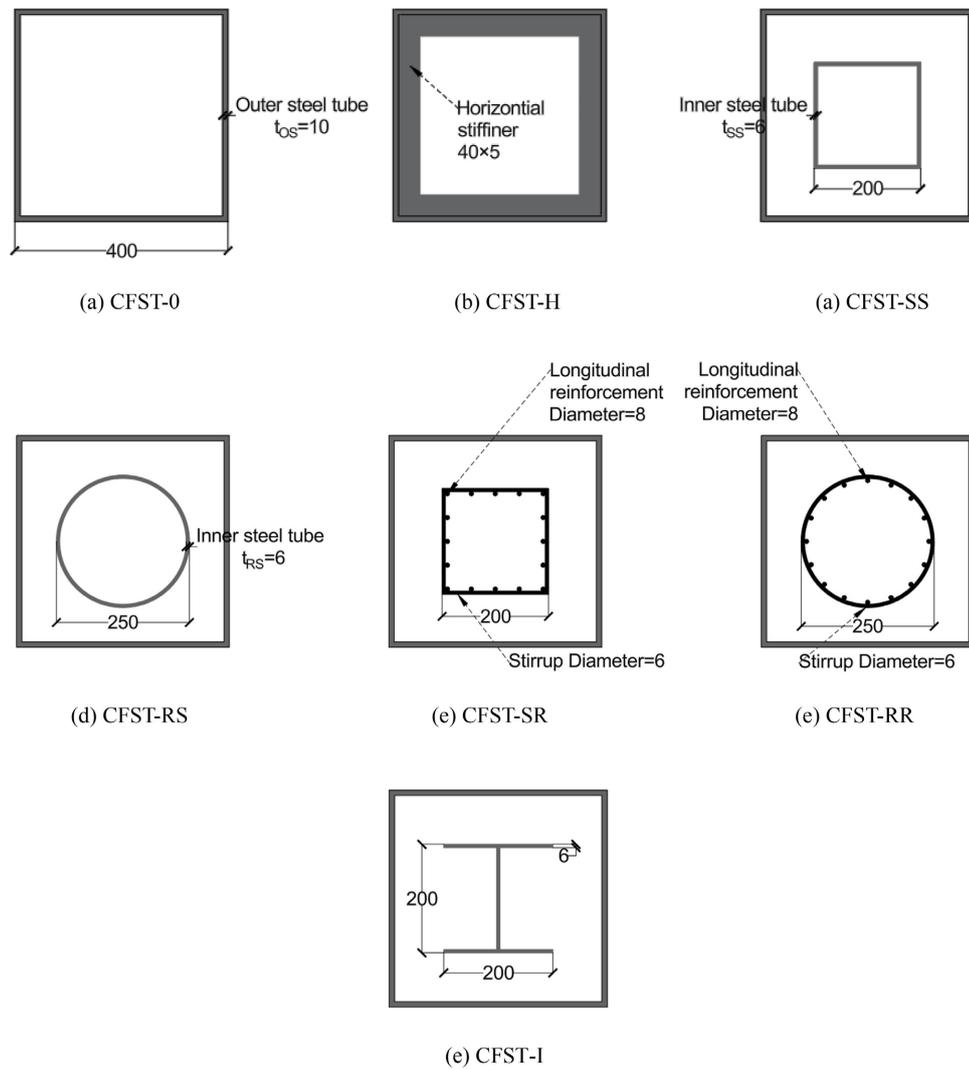
共设计了 7 根复合约束方钢管混凝土短柱作为轴压有限元分析模型,分别为不含任何约束构造的方形 CFST 试样(CFST-0)、内置横向加劲肋的方形 CFST 试样(CFST-H)、内置方形钢筋笼的方形 CFST 试样(CFST-SR)、内置圆形钢筋笼的方形 CFST 试样(CFST-RR)、内置方形钢管的方形 CFST 试样(CFST-SS)、内置圆形钢管的方形 CFST 试样(CFST-RS),内置型钢的方形 CFST 试样(CFST-I),试件尺寸如图 1 所示。5 个样品高度为 1500 mm。横向加劲肋间距 200 mm,上下两端空出 150 mm,共设置 7 个横向加劲肋;钢管、型钢、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,一个试件共 14 条箍筋。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( $\rho_e$ )。如式(1)所示, $\rho_i$ 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, $f_{sy}$ 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( $\rho_{e-l}$ ,包括外钢管、内置钢管、内置钢筋笼、型钢、纵向钢筋)和水平等效截面配钢率( $\rho_{e-h}$ ,主要为箍筋),如表 1 所示。

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

Table 1. Equivalent cross-sectional steel ratio of the CFST samples

表 1. CFST 模型的等效截面钢筋比

模型	外钢管	横向加劲肋	内置方钢管	内置圆钢管	纵筋	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	10.80%							8.51%	8.51%	
CFST-H	10.80%	0.88%						11.68%	10.80%	0.88%
CFST-SS	10.80%		3.22%					14.02%	14.02%	
CFST-RS	10.80%			3.19%				13.99%	13.99%	
CFST-SR	10.80%				0.65%	0.12%		11.57%	11.45%	0.12%
CFST-RR	10.80%				0.65%	0.12%		11.57%	11.45%	0.12%
CFST-I	10.80%						2.44%	13.24%	13.24%	



**Figure 1.** Cross-section of models  
**图 1.** 模型截面示意

## 2.2. 单元选择

对模型采用有限元软件 ABAQUS 对各个部件进行单元设置，单元设置如表 2 所示。

**Table 2.** Unit type selection

**表 2.** 单元类型选择

单元类型	部件
实体单元 C3D8R	混凝土
壳单元 S4R (四边行单元)	钢管、加劲肋和型钢
桁架单元 T3D2 (六面体单元)	钢筋(纵筋和箍筋)

## 2.3. 材料的本构关系

混凝土材料模型选用塑性损伤模型，钢板和钢筋本构模型均选用理想弹塑性模型，其材料参数如表 3

和表 4 所示。

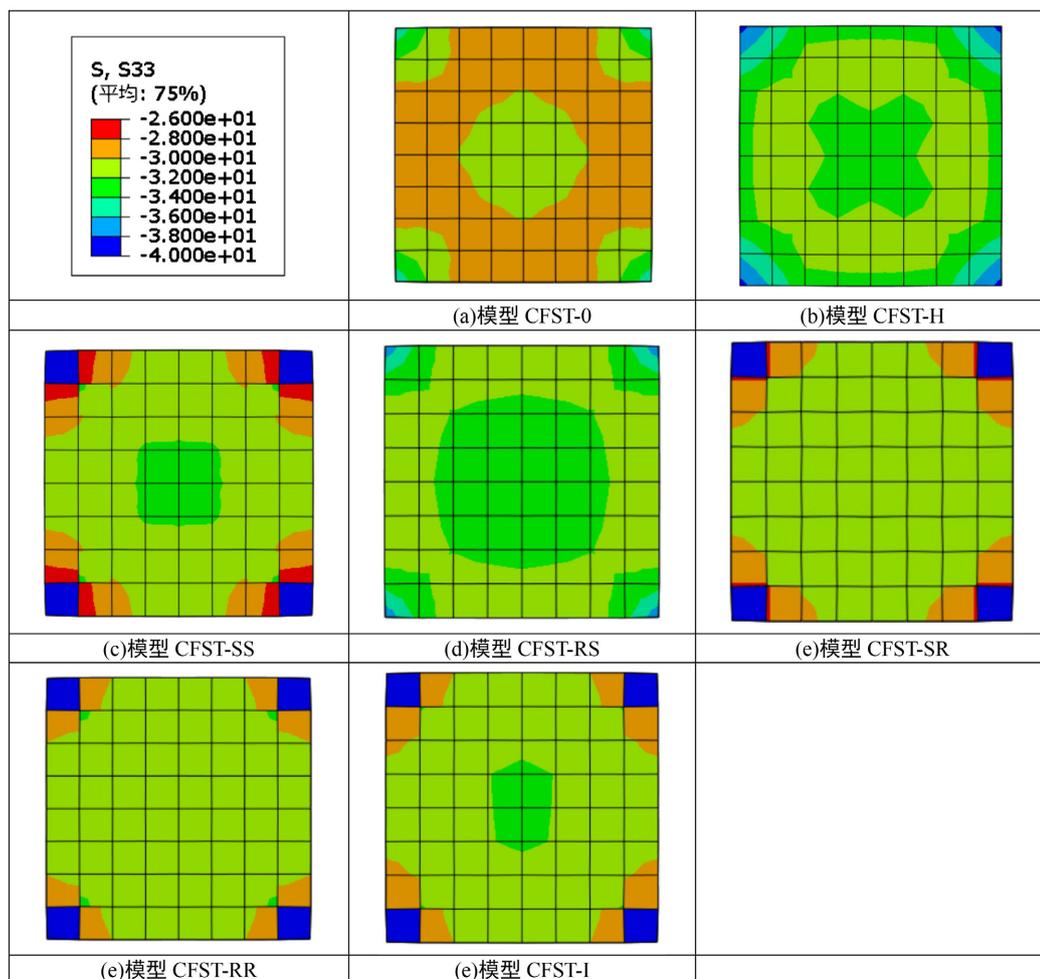
**Table 3.** Material parameters of concrete  
**表 3.** 混凝土材料参数

强度等级	fck/MPa	Ec/MPa	vc
C45	29.6	$3.35 \times 10^4$	0.2

**Table 4.** Material parameters of steel  
**表 4.** 钢板和钢筋材料参数

钢材牌号	fy/MPa	Es/MPa	vs
Q345	345	$2.06 \times 10^5$	0.3
HRB400	400	$2.00 \times 10^5$	0.3
HPB300	300	$2.10 \times 10^5$	0.3

### 3. 有限元结果与分析



**Figure 2.** Stress distributions of different types of models at peak point  
**图 2.** 峰值点的截面应力云图

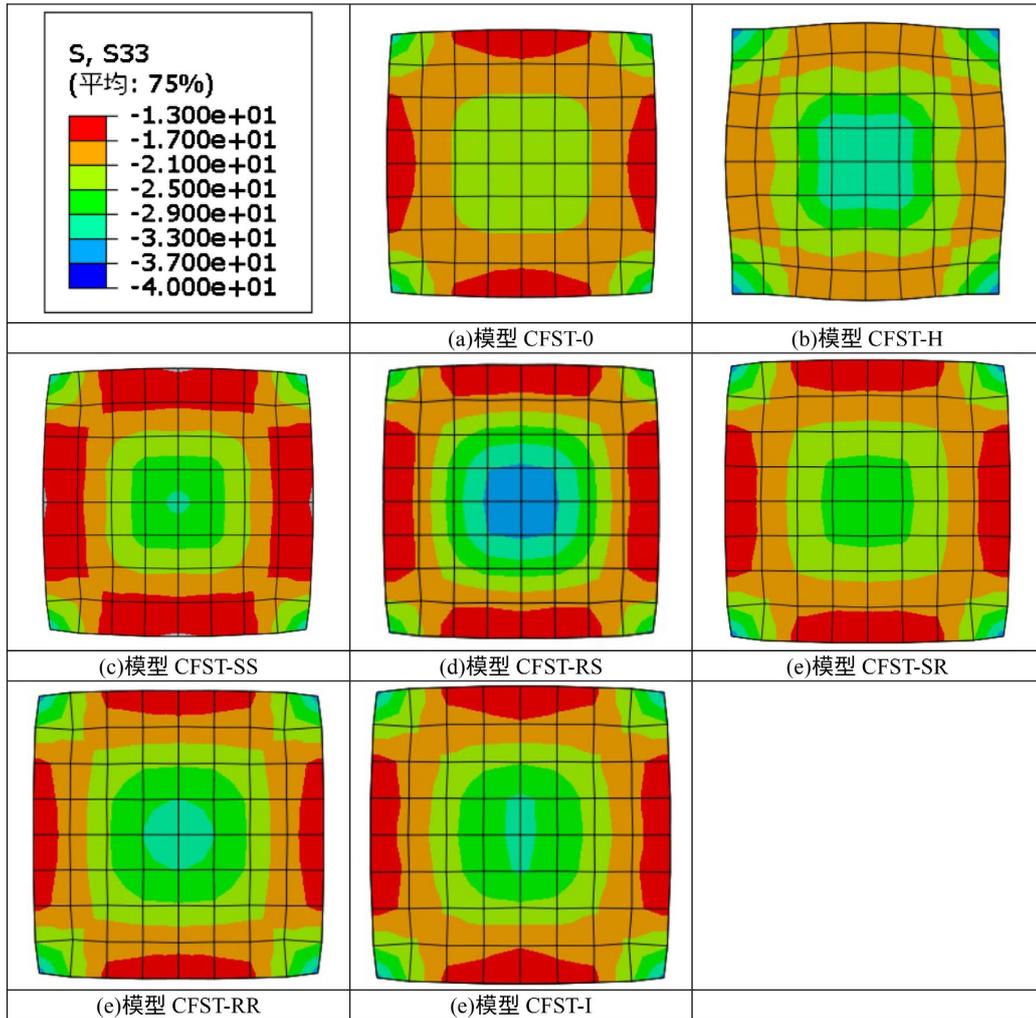


Figure 3. Stress distributions of different types of models at failure  
图 3. 极限点的截面应力云图

### 3.1. 荷载 - 位移曲线

图 3 为各种构造下方钢管混凝土的荷载 - 位移(N-Δ)曲线, 由于钢材和混凝土的应力 - 应变关系本身包含弹性、塑性和破坏阶段, 钢管混凝土的复合作用使曲线形态更加复杂。因此荷载 - 位移曲线分为弹性段、弹塑性段、下降段和平缓段四个发展历程。反映了钢管混凝土柱在轴向压力作用下的完整力学响应过程。这种划分是由材料特性、结构行为以及钢管与混凝土的相互作用共同决定的。在弹性阶段, 荷载与位移呈线性关系, 曲线斜率和刚度最大且恒定。钢管处于弹性状态, 应力 - 应变符合胡克定律( $\sigma = E\epsilon$ ); 混凝土: 微裂缝尚未开展, 主要承受轴向压力, 横向膨胀较小, 钢管与混凝土粘结良好, 协同变形, 无相对滑移。当荷载达到钢管或混凝土的比例极限时, 材料开始进入非线性阶段。在弹塑性阶段曲线斜率逐渐减小, 呈现非线性增长, 最终达到峰值荷载, 也就是极限承载力。钢管局部进入塑性状态, 发生轻微屈曲, 对混凝土的约束作用增强, 环向应力增大。混凝土微裂缝扩展, 横向膨胀显著增加, 但因钢管约束处于三向受压状态, 强度提高, 约束效应增强。由于塑性变形积累, 整体刚度逐渐降低。峰值荷载( $N_p$ )是结构的最大承载能力, 此时钢管约束效应达到最优。在下降段, 荷载随位移增加而快速下降, 曲线斜率为负。钢管发生明显局部屈曲, 会出现鼓曲、褶皱的现象, 约束能力减弱。混凝土核心混凝土压碎区域扩大, 裂缝贯通,

承载力急剧下降。钢管与混凝土的协同作用失效，界面可能出现脱粘。此阶段反映结构的脆性特征，下降速率越快，延性越差。荷载下降至约  $0.85 N_p$  后趋于稳定，曲线斜率接近零。钢管屈曲变形趋于稳定，残余强度由钢管塑性变形能力和混凝土碎块间的摩擦提供。混凝土破碎后仍能通过骨料咬合和钢管约束维持部分承载力。位移达到极限值( $\Delta_u$ )，或结构完全丧失稳定性。弹性段和弹塑性段反映承载能力的发展，下降段和平缓段反映破坏过程和延性性能，评估结构的抗震性能和破坏预警能力。

加载初期为弹性阶段，荷载 - 位移曲线呈线性正相关，CFST-SS 和 CFST-RS 在此期间的曲线斜率较大且极其相近，CFST-I 斜率比前者略小，CFST-H 弹性段的斜率最小。加入横向加劲肋后曲线的斜率反而降低，其原因可能为 CFST-H 中的横向加劲肋本身会引入额外的局部刚度不连续点，在加劲肋之间的区域，钢管的约束效果可能因肋的“间隔效应”而不均匀，导致混凝土的应力分布更复杂，此外加劲肋与钢管焊接处易产生应力集中，可能提前引发局部屈服或微裂纹，由此，整体刚度略有下降。加入钢筋笼后曲线的斜率没有得到显著提高，其原因可能是在弹性阶段，荷载主要由钢管和混凝土承担，钢筋因与混凝土粘结良好，分担的荷载比例较小。而在混凝土内部加入圆钢管或方钢管比加入型钢能显著提高曲线斜率是因为圆钢管或方钢管是闭合截面，能够对核心混凝土提供均匀、连续的环向约束，使混凝土处于三向受压状态，显著提高其抗压强度和刚度。

峰值荷载后，荷载随位移增大迅速下降，CFST-0 的荷载下降最快，体现了其他模型中各类约束构造对混凝土起到的约束作用。具有约束构造的模型中，CFST-H 下降速率最缓，CFST-RS 和 CFST-SS 下降速率次之，CFST-I，CFST-SR 和 CFST-RR 下降速率最快，说明峰值点荷载后，各类构造对核心混凝土的约束作用各不相同。而在方形和圆形钢管以及方形和圆形钢筋笼中，圆形构造比方构造能更显著的约束核心混凝土，其原因可能为圆形的均匀应力分布优于方形的角部集中；圆钢管或圆形箍筋提供无间断的环向约束，而方形截面存在约束薄弱区；闭合圆截面抗屈曲能力更强，约束作用更持久。随着钢管和各类约束结构屈服，混凝土达到其极限压应变，荷载 - 位移曲线逐渐进入平缓段，直至达到极限点，即荷载下降至  $0.85 N_p$  时对应的点。

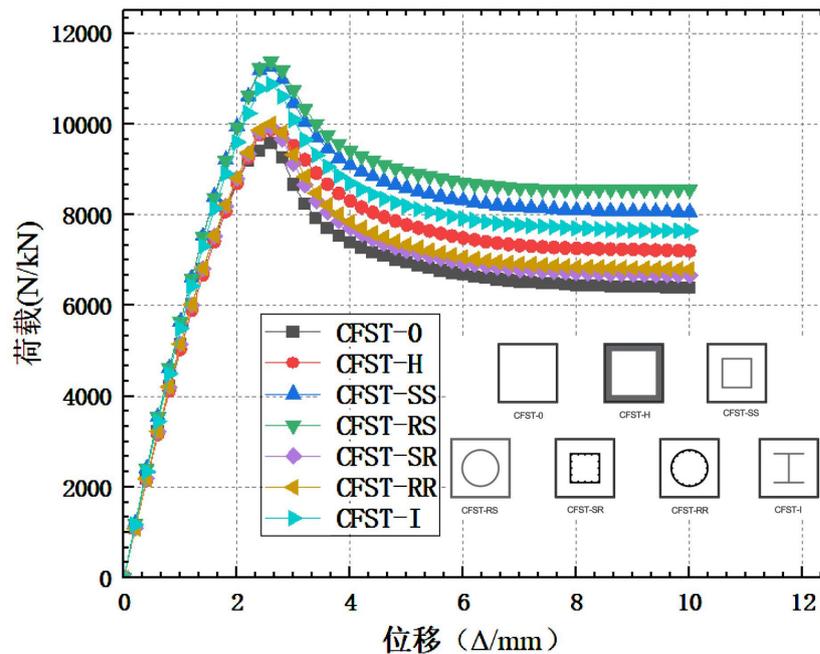


Figure 4. Load-displacement curves

图 4. 荷载 - 位移曲线

### 3.2. 承载力分析

图 2 和图 3 为七类模型中的核心混凝土在峰值点和极限点两个特征点沿纵轴方向的中间截面应力云图, 可以发现核心混凝土截面应力云图呈现由内向外逐渐减小的分布特征。这是因为钢管在轴压作用下发生横向膨胀(泊松效应), 但受限于钢管的环向刚度, 钢管会对混凝土施加径向压力, 使混凝土处于三向受压状态。外围混凝土直接接触钢管, 受到的约束最强, 三向压力最大, 因此抗压强度显著提高。内部混凝土距离钢管越远, 约束效应越弱, 逐渐趋近于单向受压状态。约束压力从钢管内壁向核心递减, 导致混凝土强度由外向内逐渐降低。轴向荷载通过钢管与混凝土的界面传递, 外围混凝土因直接与钢管粘结, 优先承担荷载; 内部混凝土因荷载传递路径更长, 应力发展滞后。剪切滑移抑制钢管与混凝土的摩擦作用限制了外围混凝土的横向变形, 进一步加剧了内外应力差异。屈服点的应力云图中应力分布整体较均匀, 混凝土处于弹性或刚进入塑性阶段, 应力云图呈现连续、平滑的梯度分布。应力集中在钢管角部或约束构造附近, 因这些区域约束效应最强。低应力区核心中部应力较低, 因外围钢管承担了部分荷载。圆形截面中应力呈同心圆状分布, 外围高、内部低。方形截面中角部出现应力集中, 直边区域应力较弱。应力沿型钢翼缘和腹板分布, 形成“沙漏型”或“十字型”高应力带。钢管尚未屈曲, 约束效应有效, 混凝土处于弹性-塑性过渡阶段。峰值点的应力云图中应力分布状态局部化加剧, 高应力区范围扩大, 但分布更不均匀, 可能出现应力局部斑块状高应力区。应力集中更显著, 钢管角部或约束构造连接处的应力值进一步升高, 核心中部应力仍较低但差值增大。约束效应最大化, 钢管对混凝土的约束作用达到最优, 三向受压状态最明显。圆形截面外围应力带变宽, 核心出现零星高应力点。方形截面角部应力集中区域扩大, 直边区域应力略有提升。内置型钢翼缘附近混凝土应力显著升高, 腹板区域应力梯度更陡。钢管接近屈曲临界点, 约束效应达到极限。混凝土内部裂缝扩展但尚未贯通, 承载力达到最大值。屈服点云图用于评估约束构造的初始有效性和指导优化设计, 峰值点云图揭示承载力极限状态的应力分布, 判断潜在破坏位置。

在屈服点, 加了约束构造的模型中的核心混凝土的应力明显变大。由于方钢管的  $90^\circ$  角部是几何不连续点, 导致应力流在此处重新分布, 形成应力集中(类似缺口效应); 并且方钢管的截面特性决定了其约束力主要集中在四个角点(几何刚度最大处), 而直边区域约束较弱, 从而导致在方钢管混凝土构件中, 混凝土应力云图在四个角部区域出现显著高应力的现象。

在峰值点时, CFST-H 的横向加劲肋限制内部混凝土的横向发展, 提高了加劲肋附近混凝土的应力, 使混凝土的应力云图呈现更均匀的三向受压状态, 因此整体呈现混凝土外围应力大于内部的现象。CFST-SS 和 CFST-RS 中的方形和圆形钢管均提高了核心混凝土的应力, 然而在方钢管混凝土(CFST)构件中, 内置圆钢管比内置方钢管导致核心混凝土应力更大, 这主要是因为圆钢管对核心混凝土提供连续、均匀的环向约束, 使混凝土处于高强度三向受压状态, 方钢管的约束力集中在四个角点, 直边区域约束较弱; 圆钢管与混凝土的全周接触使得界面粘结应力分布均匀, 荷载传递效率更高, 方钢管仅通过四个角点和部分直边接触混凝土, 存在间隙或脱粘风险; 圆钢管的闭合截面抗局部屈曲能力更强, 在轴压下能持续提供有效约束, 使混凝土始终处于高应力状态, 方钢管直边易发生局部外鼓(弹性屈曲), 削弱对混凝土的约束, 导致混凝土应力过早释放(云图中高应力区局限在角部)。CFST-SR 和 CFST-RR 中的方形钢筋笼和圆形钢筋笼也均提高了核心混凝土的应力, 然而在方钢管混凝土构件中, 内置圆钢筋笼比内置方钢筋笼导致核心混凝土应力更大的现象, 这主要是因为内置圆钢筋笼通过几何连续性和均匀约束机制, 使核心混凝土的应力更大且分布更均匀, 显著提升了构件的承载力和延性。内置钢管比内置钢筋笼导致核心混凝土应力更大, 这是因为钢管作为闭合截面, 能对核心混凝土提供均匀且连续的环向约束, 钢筋笼通过离散的钢筋节点约束混凝土, 约束力不均匀。在 CFST-I 中型钢作为刚性骨架, 会优先承担轴向荷载, 导

致核心混凝土的应力分布受型钢形状主导，但与钢管相比，其核心混凝土的应力较小。

约束构造(如加劲肋、内置钢管、纵筋等)不仅作为轴向承载单元直接分担荷载，更重要的是通过以下方式增强核心混凝土的性能，三向受压状态约束构造限制混凝土的横向膨胀，使其处于多向受压状态，显著提高抗压强度。延缓裂缝发展，约束作用抑制混凝土内部微裂缝的贯通，延缓其压碎破坏。

仅考虑钢材自身的轴向承载力，构造的承载力增量理论上为式(2)：

$$\Delta N_{theory} = A_{steel} \times f_y \quad (2)$$

其中  $A_{steel}$  为构造钢材的横截面积， $f_y$  为屈服强度。

实际承载力增量包括两部分，如式(3)：

$$\Delta N_{actual} = \Delta N_{theory} + \Delta N_{confinement} \quad (3)$$

其中  $\Delta N_{confinement}$  为约束效应带来的附加承载力，其来源为混凝土强度提升以及钢管屈曲延迟，整体稳定性增强。

若实际承载力增量  $\Delta N_{actual}$  显著大于  $\Delta N_{theory}$ ，则说明约束效应主导，超额部分( $\Delta N_{confinement}$ )主要来自混凝土强度的非线性提升，而非钢材的直接承载。例如：内置圆钢管(CFST-RS)的超额提升达 13.7%，远高于其钢材的理论贡献，说明圆钢管对混凝土的环向约束效果极强。约束构造与核心混凝土的相互作用进一步优化了荷载传递路径。这一点由应力云图也可以看出，约束构件的混凝土应力分布更均匀，外围高应力区扩大。约束构件的荷载 - 位移曲线中峰值荷载和延性同步提高。

根据图 4 和表 5 可以得到结论：

(1) CFST-H 相较于 CFST-0 的峰值承载力提高，在 CFST-0 的基础上提高较少，主要是因为方钢管混凝土的承载力主要由钢管轴向承载和混凝土三向受压强度共同决定，加劲肋主要延缓钢管屈曲，但未显著改变混凝土的受力模式。因此横向加劲肋对峰值承载力的提高贡献较小。

(2) CFST-SS 相较于 CFST-0 的峰值承载力提高，大于内置方钢管的直接贡献。

(3) CFST-RS 相较于 CFST-0 的峰值承载力提高，大于内置圆钢管的直接贡献。

(4) CFST-SR 和 CFST-RR 相较于 CFST-0 的峰值承载力提高，大于纵向钢筋的直接贡献。

(5) CFST-I 比 CFST-0 的峰值承载力提高，大于型钢的直接贡献。这是因为内置型钢对核心混凝土具有的约束作用，提高了构件的承载能力，但因型钢不是闭合截面，因此对峰值荷载的提高作用较小。

Table 5. Results of finite element analysis

表 5. 有限元分析结果

模型编号	峰值点		屈服点		极限点		$\mu$
	$\Delta_p/\text{mm}$	$N_p/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$N_y/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$N_u/\text{kN}$	
CFST-0	2.56	9574	2.07	8935	3.16	8308	1.53
CFST-H	2.65	9870	2.13	9075	3.89	8390	1.82
CFST-SS	2.61	11,263	2.15	10,450	3.5	9574	1.63
CFST-RS	2.62	11,379	2.19	10,586	3.69	9672	1.69
CFST-SR	2.58	9934	2.11	9096	3.32	8444	1.58
CFST-RR	2.59	10,001	2.12	9155	3.39	8501	1.60
CFST-I	2.60	10,877	2.15	10,085	3.45	9245	1.61

注： $\Delta_u$  为极限位移，即荷载下降至 0.85  $N_p$  时对应的位移； $N_p$  为峰值荷载； $\Delta_y$  为屈服位移， $N_y$  为屈服荷载。

### 3.3. 延性分析

根据位移延性系数  $\mu$  比较各模型的变形能力，由文献[12]定义延性系数  $\mu$  为式(4)。

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \tag{4}$$

屈服点通过图 5 所示的作图法确定[13]。

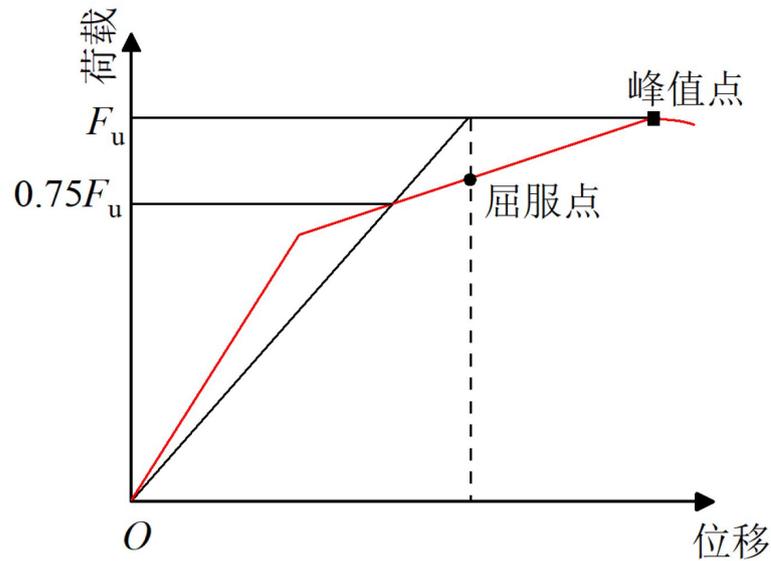


Figure 5. Method of determining yield point

图 5. 屈服点确定方法

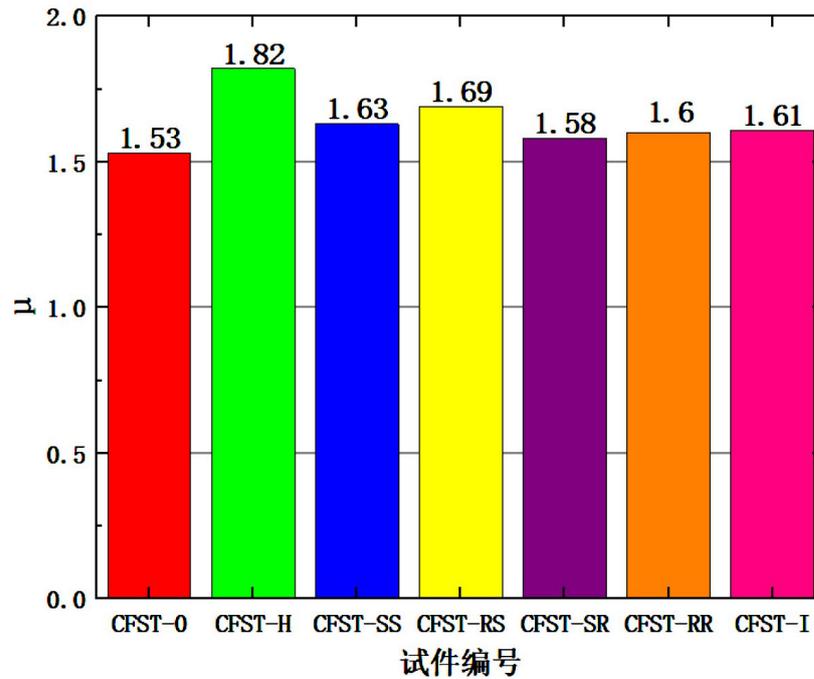


Figure 6. Comparison of ductility coefficient of models

图 6. 延性系数对比

根据图 5 和图 6 可以得到结论:

(1) 横向加劲肋使 CFST-H 的峰值位移显著增大, 峰值点后的承载力下降平缓, 极限位移提高, 延性指数增大。这是因为加劲肋使钢管在达到屈服强度后仍能保持稳定变形, 延缓屈曲发生, 从而提高峰值位移, 并且使钢管在进入塑性阶段后仍能保持较好的整体性, 避免局部屈曲导致的脆性破坏, 使构件表现出更稳定的塑性变形能力, 从而提高延性。

(2) 内置钢管使得 CFST-SS 和 CFST-RS 的屈服位移和峰值位移均增大, 峰值点后的承载力下降速度也慢, 延性系数也提高。其原因为内置钢管对核心混凝土形成双重约束(外层方钢管 + 内置钢管), 提高混凝土的三向受压强度, 延缓其压溃。混凝土的极限压应变提高, 使构件在更大变形下仍能保持承载力, 从而提高峰值位移; 由于内置钢管的屈曲被外层混凝土抑制, 其塑性变形能力更强, 贡献于延性提升。

(3) 内置钢筋笼使得 CFST-SR 和 CFST-RR 的屈服位移和峰值位移均增大, 这是因为钢筋笼的箍筋(特别是密排箍筋)对混凝土形成紧密约束, 防止裂缝快速贯通, 提高混凝土的韧性。纵筋提供抗拉储备, 在混凝土开裂后仍能承受拉力, 避免脆性破坏。

(4) 内置型钢对 CFST-I 的极限位移的贡献显著大于以上模型, 延性系数较大。H 型钢的强轴惯性矩大, 能大幅提高构件的抗弯刚度, 延缓屈服发生, 使荷载 - 位移曲线的弹性阶段延长, 峰值承载力提高。在受压时, H 型钢的翼缘和腹板协同工作, 塑性变形能力更强。

### 3.4. 刚度退化

承载力由于外钢管的屈曲显著下降, 使核心混凝土在峰值点后刚度加速退化。刚度  $K$  计算如式(5)所示, 其中  $F$  为荷载,  $\Delta$  为相应的位移。图 7 为模型刚度退化曲线。

$$K = \frac{F}{\Delta} \quad (5)$$

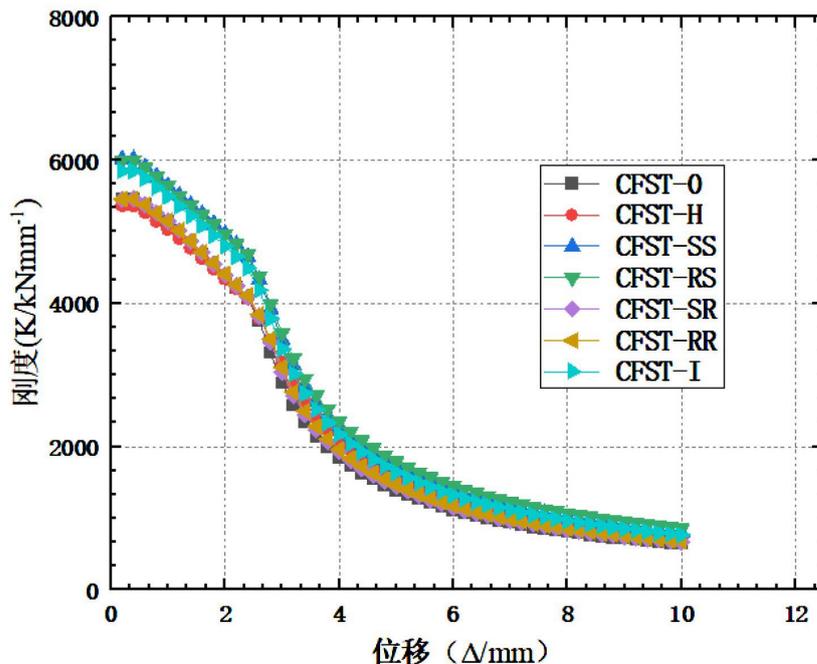


Figure 7. Stiffness degeneration curves  
图 7. 刚度退化曲线

刚度退化曲线可分为弹性阶段、弹塑性阶段、退化阶段以及残余阶段。初始弹性阶段刚度基本恒定，曲线斜率最大。钢管和混凝土均处于弹性状态，协同承载；混凝土微裂缝未开展，钢管未发生屈曲。对应的荷载约为 0~30%峰值荷载。随后进入弹塑性阶段，刚度缓慢退化。刚度逐渐降低，曲线斜率减小。混凝土进入塑性，微裂缝扩展，横向膨胀加剧；钢管开始局部屈服，约束效应逐步增强。由此推断刚度退化速率与约束构造类型相关。

峰值点过后，进入弹塑性阶段，刚度急剧退化，曲线斜率显著变缓。钢管发生局部屈曲，约束能力减弱；混凝土裂缝贯通，承载力骤降。该阶段曲线特征退化速率反映构件的延性。最终达到残余阶段，刚度趋于稳定，约为初始刚度的 10%~20%。钢管塑性变形稳定，残余环向约束维持。

通过图 7 可以得到以下结论：

(1) 在加载初期(弹性阶段)，构件的轴向刚度主要由材料的弹性模量和截面几何特性决定，有效弹性模量取决于钢材与混凝土的模量加权组合；有效截面积与纵向配钢率直接相关。此外，钢材弹性模量高于混凝土；因此纵向配钢率越高，钢材对整体刚度的贡献占比越大。内置约束构造进一步增加轴向钢材占比，显著提升材料的弹性模量和截面几何特性。CFST-SS、CFST-RS、CFST-I 纵向等效截面配钢率略大于其他四种，它们的初始刚度略大。CFST-0 的纵向等效截面配钢率最小，因此初始刚度也最小。

(2) 混凝土损伤越严重，横向膨胀越明显，箍筋受到的环向拉力越大，约束作用越强。箍筋的约束力随混凝土膨胀程度(损伤程度)而动态增强。此外，箍筋约束力增强，部分抵消混凝土强度退化，提高结构整体性能。因此，在曲线后半段 CFST-SS、CFST-RS 的刚度退化逐渐减缓，接近 CFST-0。

## 4. 结论

本文设计了 7 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) 在方钢管混凝土短柱模型中增设不同的构造均能有效地约束核心混凝土，提高承载能力，其中增设钢管和型钢更显著地提高屈服荷载、峰值荷载和极限荷载。在方形构造和圆形构造中，圆形构造对核心混凝土的约束作用更加显著。

(2) 六种构造均使模型的延性性能均提高了，其中增设横向加劲肋可以最显著地提高延性性能。

(3) 通过应力云图发现，七种模型应力区域整体呈现由内向外逐渐减小，而在最外层由于应力集中出现直边区域应力较小，角端区域应力较大的情况；圆形构造内部混凝土应力云图呈圆形，方形构造内部混凝土应力云图呈方形，而内置型钢的模型内部的混凝土应力云图大致呈现型钢的形状。

(4) 模型的刚度主要与纵向构造的纵向等效截面配钢率有关，混凝土损伤越严重，横向膨胀越明显，箍筋受到的环向拉力越大，约束作用越强。

## 基金项目

教育部产学合作协同育人项目(240703132183637)；中国矿业大学(北京)“大学生创新训练项目”(202515052)。

## 参考文献

- [1] 文花平, 赵春亮. 矩形钢管混凝土柱在高层建筑中的应用[J]. 中国建筑金属结构, 2023(2): 49-51.
- [2] 张龙泉, 白嘉淇, 陈汇颖. 钢管混凝土结构性能与应用研究[C]//北京力学会. 北京力学会第三十一届学术年会论文集. 2025: 587-590. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2025.019032>
- [3] 高蕤, 廖定雄. 圆钢棒在超高层建筑中的应用前景分析[J]. 中国建筑金属结构, 2021(9): 134-135.
- [4] Yin, F., Si, J.W., Wang, R.W., et al. (2024) Axial Compressive Behavior of High-Strength Concrete-Filled Steel Tube

- with Multiple Confinement Effects. *Journal of Constructional Steel Research*, **213**, Article 108332.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108332>
- [5] 邓岩, 董锦坤, 张玉桂, 等. 不同约束方式的方钢管混凝土柱力学性能研究综述[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2024, 44(5): 336-342.
- [6] 孙颖, 缪鹏飞, 毕岩淞, 等. 冲击荷载作用下圆钢管约束方钢管混凝土柱的动力响应分析[J]. 河南科学, 2025, 43(4): 543-552.
- [7] 计静, 车伟忠, 姜良芹, 等. 矩形钢管混凝土翼缘蜂窝双腹板 H 型组合短柱轴压性能研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2025, 42(2): 1-11.
- [8] 林牧新, 赖大德, 廖飞宇, 等. UHPC 包覆钢管混凝土叠合柱抗震性能试验研究[J]. 福建建设科技, 2025(1): 16-18+31.
- [9] 赵家祥, 杨坤, 孙珊珊, 等. 多螺旋箍筋钢管混凝土方柱轴压性能有限元分析[J/OL]. 工业建筑, 1-15.  
<https://link.cnki.net/urlid/11.2068.tu.20250117.1607.007>, 2025-05-18.
- [10] 刘宏波, 魏鲁彬, 叶晓旭, 等. 矩形多腔钢管混凝土柱轴压性能试验研究[J/OL]. 建筑结构, 1-7.  
<https://doi.org/10.19701/j.jzjg.LS230434>, 2025-05-18.
- [11] Yin, X.S., Yue, H.L., Sun, Y.Z., *et al.* (2025) Finite Element Analysis of T-Shaped Concrete-Filled Steel Tubular Short Columns with Stiffening Ribs Under Axial Compression. *Buildings*, **15**, Article 112.  
<https://doi.org/10.3390/buildings15010112>
- [12] 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(S1): 220-225.
- [13] 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.