

引用本文:程展,李俊华,刘子丹,等. 内置钢骨的方形不锈钢管超高性能混凝土短柱轴压力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(5): 78-88.

CHENG Zhan, LI Junhua, LIU Zidan, et al. Axial compressive performance of steel reinforced ultra-high performance concrete filled square stainless steel tube[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 78-88.

DOI:10.19815/j.jace.2022.02071

# 内置钢骨的方形不锈钢管超高性能混凝土短柱轴压力学性能

程展, 李俊华, 刘子丹, 杜国锋

(长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023)

**摘要:**为研究内置钢骨的方形不锈钢管超高性能混凝土短柱轴心受压性能,以径厚比和钢骨面积为参数设计了6个构件,进行了轴压试验和数值模拟计算,得到了构件的破坏形态、极限承载力和荷载-位移曲线等,利用有限元分析方法进行参数拓展,研究了长径比、混凝土强度等变化对构件破坏过程、极限承载力和延性的影响。基于试验与数值模拟结果,提出了内置钢骨的方形不锈钢管超高性能混凝土短柱轴心受压承载力计算公式。结果表明:所有构件破坏特征相似,中部均出现了局部波形鼓曲,但含钢骨构件的端部也产生鼓曲;构件中不同材料对极限承载力和延性的影响效果不同,极限承载力随着钢骨截面面积和混凝土强度的增加而增大,随着径厚比和长径比的增大而减小,但径厚比和混凝土强度对构件极限承载力的影响更为明显;钢骨的存在对构件的延性有明显提高,且随着钢骨截面面积增大构件延性也有所提高,而混凝土强度增大会导致构件延性减小;轴心受压承载力公式计算结果与试验结果吻合良好。

**关键词:**方形不锈钢管;超高性能混凝土;轴压试验;承载力;数值模拟

**中图分类号:** TU398.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-2049(2023)05-0078-11

## Axial compressive performance of steel reinforced ultra-high performance concrete filled square stainless steel tube

CHENG Zhan, LI Junhua, LIU Zidan, DU Guofeng

(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China)

**Abstract:** In order to study the axial compressive performance of steel reinforced ultra-high performance concrete filled square stainless steel tube (SR-UHPCFSSST), six members were designed with the parameters of diameter-to-thickness ratio and steel section area, and axial compression test and numerical simulation calculation were performed to obtain the failure form, ultimate bearing capacity and load-displacement curve of members. Using finite element analysis method to expand the parameters, the effects of changes in aspect ratio and concrete strength on the failure process, ultimate bearing capacity and ductility of the members were studied. Based on the test and numerical simulation results, the calculation formula of SR-UHPCFSSST was put

收稿日期: 2022-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078052)

通信作者: 杜国锋(1975-),男,工学博士,教授,博士生导师, E-mail: gdfu@yangtzeu.edu.cn.

forward. The results show that the failure characteristics of all members are similar, and there is local waveform drum in the middle, but there is also drum at the end of the member containing steel bone. Different materials in the members have different effects on the ultimate bearing capacity and ductility. The ultimate bearing capacity increases with the increase of steel section area and concrete strength, and decreases with the increase of diameter-to-thickness ratio and aspect ratio, but the influence of diameter-to-thickness ratio and concrete strength on the ultimate bearing capacity of the members is more obvious. The existence of steel bone significantly improves the ductility of the member, and the ductility of the member also increases with the increase of the steel section area, while the increase of concrete strength will reduce the ductility of the member. The calculation results are in good agreement with the test results.

**Key words:** square stainless steel tube; UHPC; axial compression test; bearing capacity; numerical simulation

## 0 引言

内置钢骨的方形不锈钢管超高性能混凝土柱(Steel reinforced ultra-high performance concrete filled square stainless steel tube, SR-UHPCF-SSST)是以方钢管混凝土结构(Concrete filled square stainless steel tube, CFSSST)为基础,将钢骨内置于不锈钢管中。由于内置钢骨、混凝土和外钢管的相互作用,混凝土的抗压强度和钢材的抗拉强度得到充分利用,实现了优势互补。不锈钢和钢骨的存在使得构件的整体受力性能、承载力、刚度、延性、耐久性和抗腐蚀性得到了改善和提高<sup>[1-6]</sup>。在此基础上,国内外学者针对钢-混凝土结构开展了一系列研究。

对于普通的钢管混凝土结构,韩林海等<sup>[7]</sup>通过研究得出了在钢管被动约束下混凝土的本构关系模型,为新截面形状、新截面组成及新核心混凝土材料提供了外延式理论基础。金浏等<sup>[8]</sup>基于细观模拟方法分析了不同套箍系数及不同尺寸下钢管混凝土柱的轴压破坏机理与失效模式,揭示了钢管横向约束作用对混凝土柱名义轴压强度及其尺寸效应的影响规律。Le等<sup>[9]</sup>通过收集的大量数据结合神经网络建立了一种实用的矩形钢管混凝土柱轴向荷载预测方程。

相较于普通钢管混凝土结构,采用不锈钢管和超高性能混凝土替代外部普通钢管和核心混凝土可以大幅提高构件的整体力学性能<sup>[10-16]</sup>,郑永乾等<sup>[17]</sup>对方形复合不锈钢管混凝土柱和普通钢管混凝土柱进行研究,得出方形复合不锈钢管混凝土柱比复合普通钢管混凝土柱极限承载力更高的结论。唐红元等<sup>[18]</sup>对7组不同截面尺寸的矩形不锈钢管混凝土

短柱进行轴压试验,结果表明厚度的增加可以提高矩形不锈钢管混凝土短柱的极限承载力。Skalomenos等<sup>[19]</sup>对高强钢和普通钢制作的混凝土柱进行研究,结果表明高强钢构件具有较大的弹性变形、较高的强度和局部屈曲的延迟性。

除了在改善结构材料属性方面进行了一定研究外,学者们还尝试通过不同的组合形式来进一步提高钢管混凝土柱的力学性能。杜国锋等<sup>[20]</sup>对内置钢骨组合L形截面钢管混凝土短柱考虑套箍指标、配骨率等参数进行轴压试验分析,结果表明增大套箍指标和配骨率可以明显提高试件承载力。刘坚等<sup>[21]</sup>等将内配型钢的方钢管再生混凝土截面等效为截面面积、含钢率相等的圆钢管再生混凝土截面进行研究分析,提出了一套适用于内配型钢的方钢管再生混凝土短柱轴压承载力计算式。Tian等<sup>[22]</sup>讨论了UHPC模板的破坏模式和轴向荷载-应变关系的关键特征,对不同类型的组合柱进行试验和数值模拟,得出了能较好预测复合材料柱轴压性能的模式。Patel等<sup>[23]</sup>提出圆形双金属钢管混凝土柱的结构组合构件,研究了几何结构对短柱力学性能的影响。

综上,关于普通钢管混凝土构件的研究已比较系统,但不锈钢管超高性能混凝土构件与普通钢管混凝土构件在材料属性上有一定的差异。采用不锈钢替代碳素钢不仅在一定程度上提高了钢管混凝土结构的强度,对结构的抗腐蚀和抗氧化性也有很大提高,但综合考虑经济效益,对不锈钢管的壁厚有一定的限制。为给不锈钢管超高性能混凝土结构设计规程的编制提供一定参考,本文提出了不锈钢-混凝土-型钢的组合柱,该组合柱是将钢骨插入方钢管中,填充超高性能混凝土,利用钢管、混凝土和钢骨

协同工作,以提高柱子的力学性能。通过轴压试验,分析径厚比和钢管截面面积对组合柱的影响,并结合 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟分析。

1 试验概况

1.1 构件设计

试验以钢管截面面积和不锈钢管径厚比为参数,设计了 6 个方形不锈钢管超高性能混凝土柱(3 个含钢管,3 个无钢管)进行轴压试验。不锈钢管采用 304 级奥氏体不锈钢,管径为 150 mm,厚度分别为 1.5、2.5、3.5 mm,柱高为 450 mm,内置钢管采用强度等级为 Q235 的工字钢。构件具体参数见表

表 1 构件设计参数

Table 1 Design parameters of member

构件编号	钢管尺寸	$\lambda$	$r$	$A_s/\text{mm}^2$
SR-CFSSST-1	150 mm×2.5 mm×450 mm	3	60	1 430
SR-CFSSST-2	150 mm×1.5 mm×450 mm	3	100	1 430
SR-CFSSST-3	150 mm×3.5 mm×450 mm	3	43	1 430
CFSSST-1	150 mm×2.5 mm×450 mm	3	60	
CFSSST-2	150 mm×1.5 mm×450 mm	3	100	
CFSSST-3	150 mm×3.5 mm×450 mm	3	43	

注: $\lambda$  为长径比, $\lambda=L/B$ , $L$  为钢管长度, $B$  为钢管外边长; $r$  为径厚比, $r=B/t$ , $t$  为钢管厚度; $A_s$  为钢管截面面积。

试块,测得立方体抗压强度  $f_{cu}=122\text{ MPa}$ 。

1.3 试验加载

为确保加载系统和各检测点正常工作,减少试

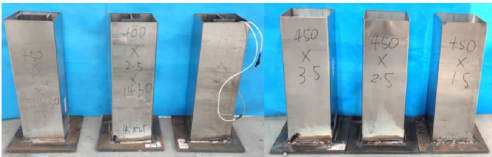


图 1 组装后构件

Fig. 1 Post-assembly member

表 2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel

构件	$E/\text{MPa}$	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_u/\text{MPa}$	$\mu$
1.5 mm 厚试样	194 500	305	633	0.278
2.5 mm 厚试样	195 000	328	648	0.286
3.5 mm 厚试样	195 800	355	653	0.295
I10 工字钢	201 000	273	427	0.280

注: $E$  为弹性模量; $\sigma_{0.2}$  为名义屈服强度; $\sigma_u$  为极限强度; $\mu$  为泊松比。

表 3 超高性能混凝土配合比

Table 3 Mix proportion of ultra-high performance concrete

各材料用量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )								水胶比
水泥	硅粉	粉煤灰	40-70 目石英砂	70-140 目石英砂	减水剂	水	钢纤维	
700	210	105	420	420	35.525	203	235.5	0.2

1. 构件制作时工字钢与底板几何中心对准后进行焊接,确保内置钢管和底板组合为一个整体。混凝土采用分层浇筑,强度稳定后将构件上端抹平并焊接盖板,以保证钢管、钢管及混凝土三者能同时均匀受力。部分构件如图 1 所示。

1.2 材料性能

根据国家标准《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 288.1—2010)<sup>[24]</sup> 的规定对钢材进行标准拉伸试验,得到其力学性能如表 2 所示,材料拉伸曲线如图 2 所示。超高性能混凝土通过内掺钢纤维来提高其延性,设计配比见表 3,浇筑时制备 100 mm×100 mm×100 mm 的混凝土立方体试

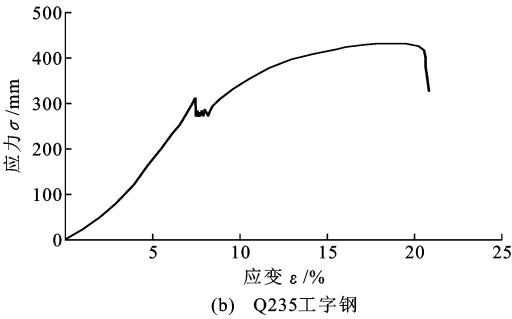
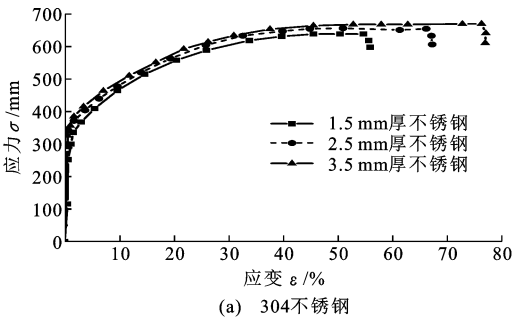


图 2 钢材拉伸曲线

Fig. 2 Tensile curve of steel

验误差,正式加载前以预期极限荷载的 10% 进行预加载。正式加载采用位移加载方式进行分级加载,加载速率为  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,构件轴向荷载及位移由液压机自带采集系统测定,当构件变形过大,荷载下降至峰值荷载的 70% 时停止加载。试验加载装置如图 3 所示。

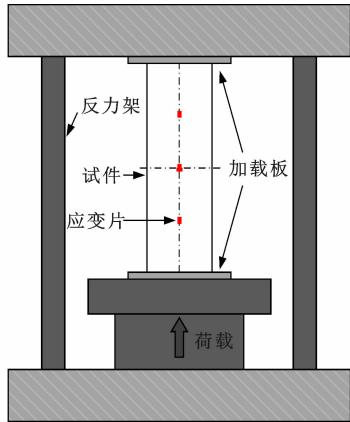


图 3 试验加载装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test loading device

## 2 数值模拟

### 2.1 本构关系

#### 2.1.1 混凝土材料

当混凝土受到侧向约束时,其单轴抗压强度比无约束时更高。为研究核心区域超高强混凝土在钢管内部轴压状态下的承载能力,在有限元求解中,约束和非约束混凝土的两个阶段应力-应变曲线如图 4 所示<sup>[25]</sup>,混凝土应力-应变关系曲线为 Mander 等<sup>[26]</sup>和 Lim 等<sup>[27]</sup>提出的约束混凝土模型。

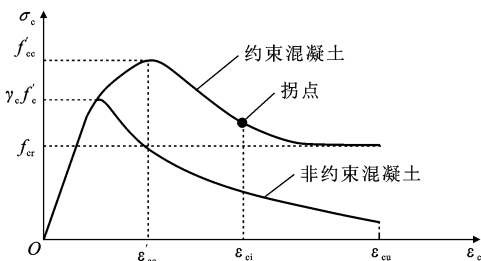


图 4 约束混凝土应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of confined concrete

约束混凝土模型上升段表达式为

$$\sigma_c = \frac{f'_{cc} (\epsilon_c / \epsilon'_{cc})^\lambda}{(\epsilon_c / \epsilon'_{cc})^\lambda + \lambda - 1} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{E_c \epsilon'_{cc}}{E_c \epsilon'_{cc} - f'_{cc}} \quad (2)$$

式中:  $f'_{cc}$  和  $\epsilon'_{cc}$  分别为混凝土的峰值应力和峰值应变;  $\sigma_c$  和  $\epsilon_c$  分别为轴向应力和轴向应变;  $E_c$  为混凝土

的弹性模量,根据 Graybeal<sup>[28]</sup> 的研究取  $E_c = 3\,840 \sqrt{f'_c}$ ,  $f'_c$  为方钢管中混凝土的抗压强度。

约束混凝土模型下降段表达式为

$$\sigma_c = f'_{cc} - (f'_{cc} - f_{cr}) / [1 + (\frac{\epsilon_c - \epsilon'_{cc}}{\epsilon_{ci} - \epsilon'_{cc}})^{-2}] \quad (3)$$

$$\frac{f_{cr}}{f'_{cc}} = 1.242\,0 - 0.002\,9 \left( \frac{B}{t} \right) - 0.004\,4 \gamma_c f'_c \quad (4)$$

$$0 \leq \frac{f_{cr}}{f'_{cc}} \leq 1.0 \quad (5)$$

$$\epsilon_{ci} = 2.8 \epsilon'_{cc} (\gamma_c f'_c)^{-0.12} \frac{f_{cr}}{f'_{cc}} + 10 \epsilon'_{cc} (\gamma_c f'_c)^{-0.47} \left( 1 - \frac{f_{cr}}{f'_{cc}} \right) \quad (6)$$

式中:  $f_{cr}$  为核心混凝土的残余强度;  $\epsilon_{ci}$  为下降段曲线反弯点对应的应变值;  $\gamma_c$  为核心混凝土尺寸缩减因子。

Liang<sup>[29]</sup> 通过 CFST 的试验结果给出了  $\gamma_c$  计算公式为

$$\gamma_c = 1.85 B^{-0.135} \quad 0.85 \leq \gamma_c \leq 1.0 \quad (7)$$

根据 Hu 等<sup>[30]</sup> 的研究,  $f'_{cc}$  和  $\epsilon'_{cc}$  的计算公式为

$$f'_{cc} = f'_c + k_1 f_1 \quad (8)$$

$$\epsilon'_{cc} = \epsilon (1 + k_2 \frac{f_1}{f_c}) \quad (9)$$

$$f'_c = k_3 f'_{cc} \quad (10)$$

$$\frac{f_1}{f_y} = \begin{cases} 0.055\,048 - 0.001\,885 B/t & 17 \leq B/t \leq 29.2 \\ 0 & 29.2 < B/t \leq 150 \end{cases} \quad (11)$$

$$k_3 = \begin{cases} 0.000\,178 (B/t)^2 - 0.024\,92 B/t + 1.272\,2 & 17 \leq B/t \leq 70 \\ 0.4 & 70 < B/t \leq 150 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $k_1$  和  $k_2$  均为常数,根据文献<sup>[30]</sup>取  $k_1 = 4.1$ ,  $k_2 = 20.5$ ;  $k_3$  为材料降解系数;  $f_1$  和  $f_y$  分别为核心混凝土围压和钢材屈服强度。

#### 2.1.2 不锈钢材料

图 5 为不锈钢材料的应力-应变曲线,采用 Eurocode 3<sup>[31]</sup> 提出了两阶段修正的不锈钢材料应力-应变关系模型,即

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{f_y} \right)^n & \sigma \leq f_y \\ 0.002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_y} + \epsilon_u \left( \frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right)^m & f_y < \sigma < f_u \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $f_u$  为不锈钢的峰值强度;  $E_y$  为不锈钢在名义屈服强度时的切线模量,  $E_y = E / [1 + 0.002n(E/f_y)]$ ; 系数  $n = \ln(20) / \ln(f_y / R_{p0.01})$ ,  $R_{p0.01}$  为残余应

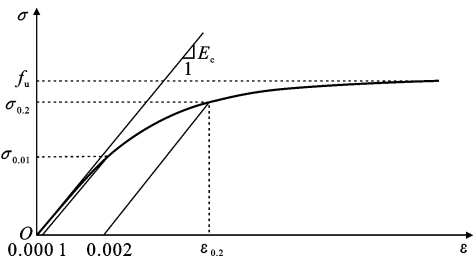


图 5 不锈钢应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of stainless steel

变为 0.01% 时的应力值;系数  $m=1+3.5f_y/f_u$ 。

2.2 模型建立

采用 ABAQUS 有限元软件建立几何非线性有限元模型,对轴压作用下的 SR-UHPCFSSST 力学性能进行分析。混凝土采用损伤塑性模型进行模拟,膨胀角、偏心率、屈服应力比、 $K$  值及黏滞系数分别为 40、0.1、1.033、0.8 和 0.001<sup>[32]</sup>。混凝土、钢管及上下板均采用八节点线性六面体单元(C3D8R)进行模拟,钢管采用四节点壳单元(S4R)模拟。对建立的数值模型进行网格敏感性分析,当近似全局尺寸在 12 左右时模拟承载力计算精度较好,继续减小则影响计算效率,因此网格划分近似尺寸选择 12 左右。划分后的网格如图 6 所示。

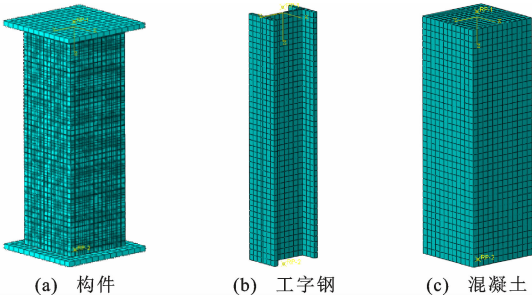


图 6 构件网格

Fig. 6 Member grid

上下板设置为刚体,上板在  $Z$  轴上加载轴向位移模拟轴压受力情况,其他自由度约束,下板设置为完全固定。钢管与混凝土之间不考虑滑移,内置于核心混凝土中。不锈钢管与上下板采用壳-实体耦合连接。通过表面与表面接触来模拟混凝土和不锈钢、盖板间的接触作用。

2.3 模型验证

为验证有限元模型的准确性,将试验结果与数值模拟的破坏形态、荷载-位移曲线及极限承载力结果进行对比分析。

2.3.1 破坏形态

图 7 为构件试验和数值模拟时的破坏形态。对比分析发现,两者吻合较好。在轴心受压时,对于

UHPCFSSST 构件,局部鼓曲出现在构件中部,主要表现为构件中部不锈钢管发生双波形鼓曲。对于 SR-UHPCFSSST 构件,除了中部发生鼓曲外,端部也产生鼓曲。持续荷载作用下,随着不锈钢管鼓曲现象的不断扩展,核心混凝土发生受压破坏,但钢骨的存在加强了外钢管对核心混凝土的约束,在一定程度上抑制了混凝土中剪切裂缝的开展。从构件破坏形态的模拟结果可以看出,本文所建立的数值模型能对方形高强钢管超高性能混凝土短柱在轴压时的破坏形态进行较好的模拟。

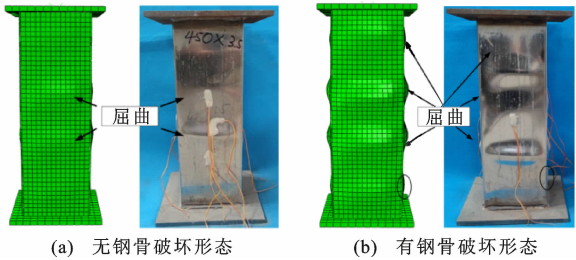


图 7 构件破坏形态

Fig. 7 Failure mode of member

2.3.2 荷载-位移曲线

图 8 为构件试验和数值模拟得到的荷载-位移曲线对比。可以看出,数值模拟结果与试验曲线整体上吻合良好,加载初期均处于弹性阶段,随着荷载不断增大,位移缓慢增大,而且上升段与下降段基本一致,峰值荷载和残余强度基本相符,说明本文建立的数值模型能较好地模拟出构件轴向受力过程。

2.3.3 极限承载力

试验和数值模拟极限承载力对比如表 4 所示。可以看出,模拟结果与试验得出的承载力结果相对误差在 7% 以内,对应变形相对误差在 10% 以内,二者基本相符,说明采用有限元对 SR-UHPCFSSST 和 UHPCFSSST 构件进行数值模拟具有较高的可行性。

3 参数分析

3.1 内置钢骨的影响

图 9 为含钢骨与无钢骨构件的荷载-位移曲线。对比分析可知:保持有无钢骨构件径厚比一致,径厚比从 100 减至 60 再到 43 时,SR-UHPCF-SSST 构件极限承载力比 UHPCFSSST 构件分别提高了 1.4%、5.3% 和 2.5%,内置钢骨的存在对构件极限承载力略有提升。图 9 中含钢骨构件的曲线上升更快,下降更加缓慢,表明钢骨的存在提高了构件的初始刚度、极限承载力和延性。



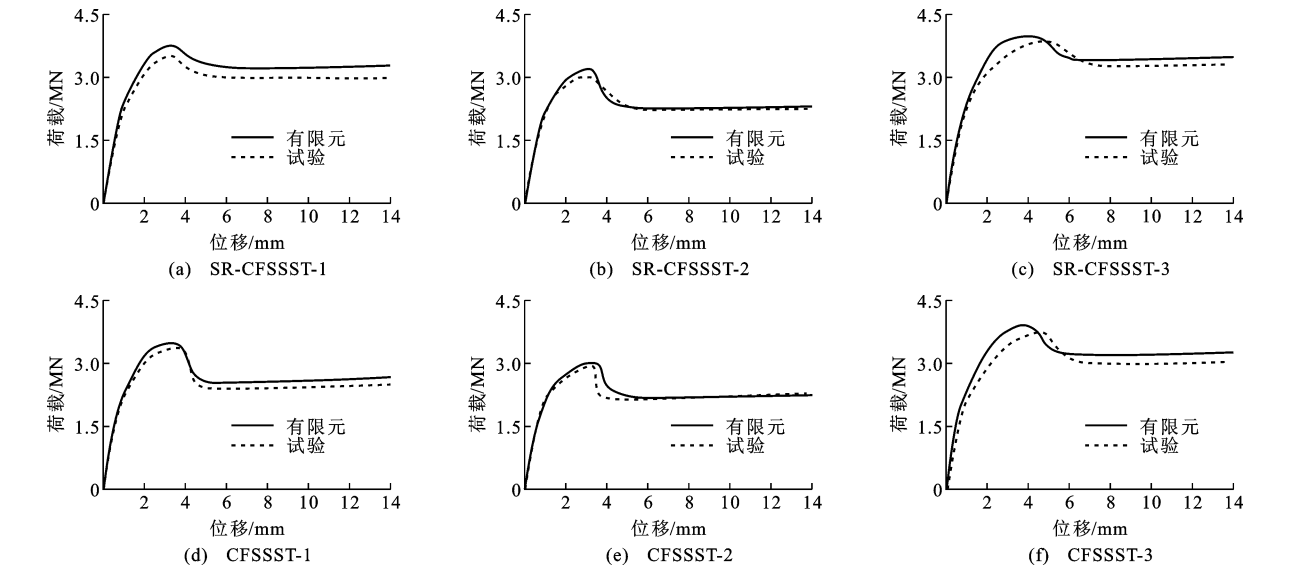


图 8 试验与数值模拟荷载-位移曲线对比

Fig. 8 Comparison between test and numerical simulation of load-displacement curves

表 4 极限承载力对比

Table 4 Comparison of ultimate bearing capacity

构件编号	构件尺寸	$\lambda$	$r$	$A_s/\text{mm}^2$	承载力试验值/kN	承载力模拟值/kN	相对误差/%
SR-CFSSST-1	150 mm×2.5 mm×450 mm	3	60	1 430	3 550.41	3 715.86	4.60
SR-CFSSST-2	150 mm×1.5 mm×450 mm	3	100	1 430	2 992.63	3 188.17	6.53
SR-CFSSST-3	150 mm×3.5 mm×450 mm	3	43	1 430	3 873.23	3 990.99	3.04
CFSSST-1	150 mm×2.5 mm×450 mm	3	60		3 372.05	3 490.34	3.51
CFSSST-2	150 mm×1.5 mm×450 mm	3	100		2 950.64	3 011.89	2.08
CFSSST-3	150 mm×3.5 mm×450 mm	3	43		3 780.47	3 910.71	3.45

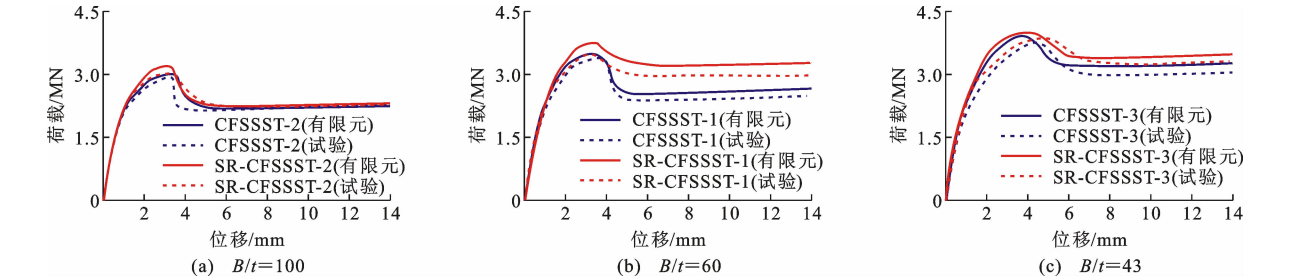


图 9 内置钢骨对构件荷载-位移曲线的影响

Fig. 9 Influence of embedded steel on load-displacement curve of member

3.2 径厚比的影响

对于 UHPCFSSST 构件,持续荷载作用下,钢管对核心混凝土产生环向约束,不锈钢管产生环向鼓曲,核心混凝土发生变形,但添加内置钢骨后,由钢骨-混凝土-不锈钢三者协同作用,共同承受轴向荷载。图 10 为不同径厚比构件的荷载-位移曲线。对比分析发现:当径厚比由 43 增加至 60 时,无钢骨和含钢骨构件的承载力分别减小了 12.11% 和 9.09%;而径厚比从 60 增加到 100 时构件的承载力分别减小了 14.28% 和 18.63%。由此可知,径厚比越小,其对核心混凝土约束效果越强,同时核心混凝土

土受到钢管和钢骨的约束,核心混凝土的抗压强度增强。

4 有限元拓展

本文构件长径比和钢骨截面面积均为定值,无法反映长径比和核心混凝土强度变化对方形不锈钢管超高性能混凝土柱力学性能的影响。基于本文所建立的数值模型和所选取参数的合理性,探讨不同长径比、混凝土强度和钢骨截面面积对方形不锈钢管超高性能混凝土短柱力学性能的影响。拓展模型设计参数见表 5。

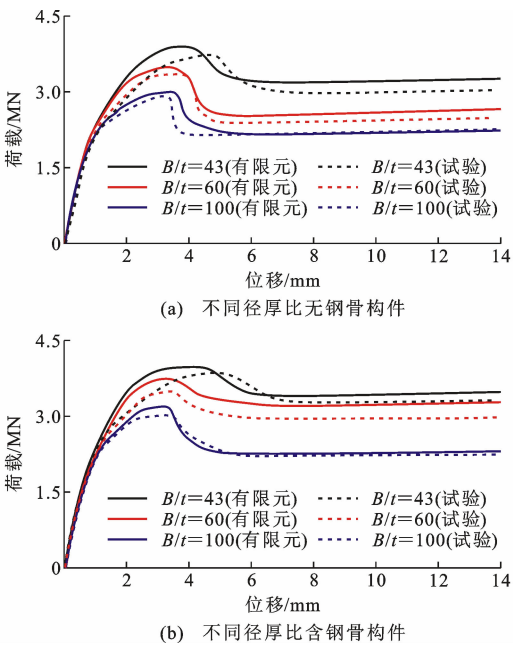


图 10 不同径厚比构件荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of members with different diameter-to-thickness ratios

表 5 拓展构件设计参数

Table 5 Expand component design parameters

构件编号	$B/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$\lambda$	$r$	钢筋截面面积 $A_s/\text{mm}^2$	混凝土强度 $f_c/\text{MPa}$
CFSSST-4	150	3.5	450	3	43		120
CFSSST-T1	150	3.5	600	4	43		120
CFSSST-T2	150	3.5	300	2	43		120
CFSSST-T3	150	3.5	450	3	43		130
CFSSST-T4	150	3.5	450	3	43		140
SR-CFSSST-4	150	3.5	450	3	43	1 430	120
SR-CFSSST-T1	150	3.5	450	3	43	1 780	120
SR-CFSSST-T2	150	3.5	450	3	43	2 150	120

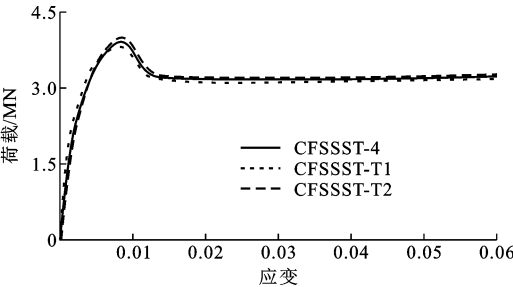


图 11 不同长径比构件荷载-应变曲线

Fig. 11 Load-strain curves of members with different aspect ratios

定影响的。

4.2 混凝土强度的影响

图 13 为不同混凝土强度构件的荷载-应变曲线。可以看出,随着核心混凝土强度的增加,上升段和产生峰值荷载时对应的应变基本没有变化,峰值荷载

4.1 长径比的影响

不同长径比构件的荷载-应变曲线如图 11 所示。可以看出,随着长径比的增加,曲线的上升段和残余强度基本一致,下降段变缓。为了更好地研究长径比对构件的影响,引入延性系数进行对比。本文将延性系数定义为构件极限位移与屈服位移的比值,即  $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ ,  $\Delta_u$  为极限位移,取峰值位移下降段 90% 对应的位移,  $\Delta_y$  为屈服位移,取峰值位移上升段 75% 对应的位移值。图 12 为不同长径比情况下构件延性和极限承载力的变化曲线。由图 12 分析可知,长径比由 2 增大至 3 和 4 时,构件极限承载力分别减小了 4.82% 和 5.63%,延性系数分别增大了 23.66% 和 26.59%。这表明长径比的增大在一定程度上降低了构件承载能力,提高了短柱的延性。但通过引入初始缺陷,同时将端部固结换成铰接模拟发现,构件极限承载力降低幅度变小,各构件的延性系数变化幅度变小。通常认为长径比小于等于 4 的构件为短柱,经常忽略长径比对短柱的影响,通过模拟发现,长径比对于短柱的力学性能还是存在一

增加幅度较小,而下降段的下降速度更快,残余强度减小。图 14 为混凝土强度对构件延性和极限承载力的影响。分析可知,对于 UHPCFSSST 构件,混凝土强度由 120 MPa 增加至 130 MPa 再到 140 MPa 时,随着混凝土强度增加,构件极限承载力分别提高 5.83% 和 6.52%,延性系数分别减小了 3.61% 和 7.43%,表明核心混凝土强度增大,构件的极限承载力有所提高,延性明显减小。

4.3 钢筋截面面积的影响

随着钢筋截面面积的增大,构件的极限承载力明显提高。图 15 为不同钢筋截面面积的构件荷载-位移曲线。可以看出,荷载-位移曲线上段无明显变化,峰值荷载、峰值荷载对应的应变、下降速度和残余强度均有明显变化。图 16 为钢筋截面面积对构件延性和极限承载力的影响。可以看出,钢筋截

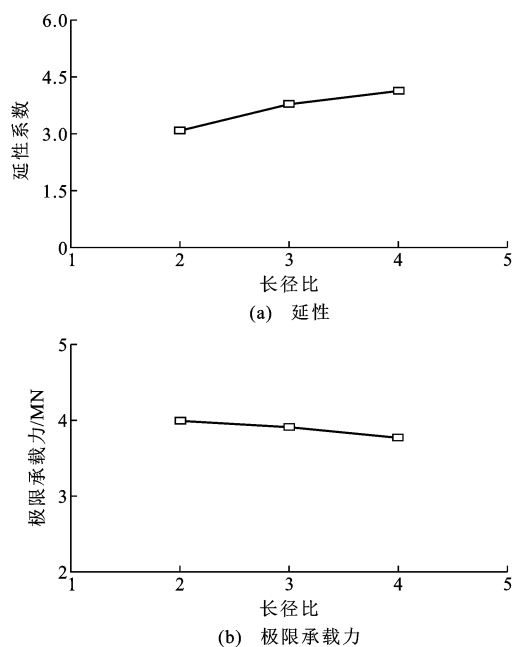


图 12 长径比对构件延性和极限承载力的影响  
Fig. 12 Influence of aspect ratios on ductility and ultimate bearing capacity of member

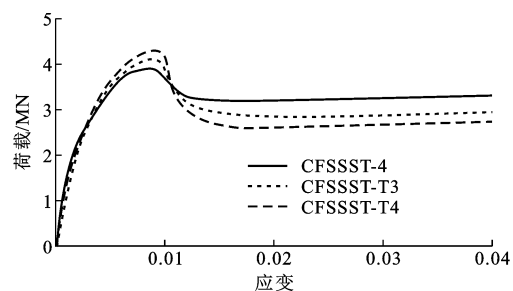


图 13 不同混凝土强度构件荷载-应变曲线  
Fig. 13 Load-strain curves of members with different concrete strengths

面面积由  $1\,430\text{ mm}^2$  分别增大至  $1\,780\text{ mm}^2$  和  $2\,150\text{ mm}^2$  时,构件的极限承载力分别提高了 10.52% 和 14.56%,延性系数增加了 9.34% 和 25.65%。这表明随着钢骨截面面积的增大,柱子的极限承载力和延性均增大。

## 5 承载力计算公式

根据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)<sup>[33]</sup>,钢管混凝土的轴压承载力计算公式为

$$N_0 = A_{sc} f_{sc} \quad (14)$$

式中: $N_0$  为钢管混凝土短柱的轴心受压强度承载力设计值; $A_{sc}$  为钢管混凝土柱的截面面积; $f_{sc}$  为钢管混凝土的抗压强度设计值。

内置钢骨的方形不锈钢管超高性能混凝土柱轴压主要受核心混凝土、型钢和钢管三者协同合作的

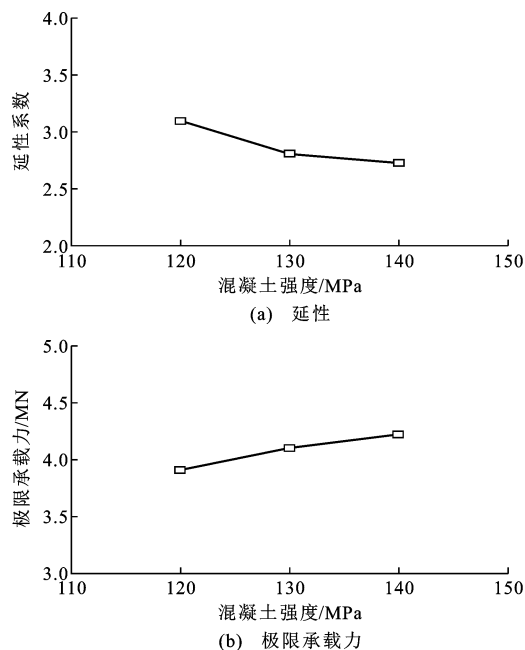


图 14 混凝土强度对构件延性和极限承载力的影响  
Fig. 14 Influence of concrete strength on ductility and ultimate bearing capacity of member

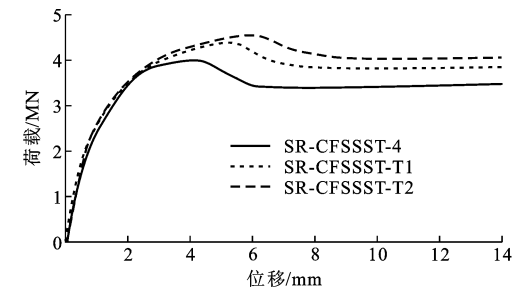


图 15 不同钢骨截面面积构件荷载-位移曲线  
Fig. 15 Load-displacement curves of members with different steel section areas

影响,其承载力计算没有确切的公式,为更加精确地求出承载力,在内置型钢的钢管混凝土短柱受压承载力的基础上分别引入钢管、混凝土和钢骨的约束因子,再通过对试验及数值模拟的数据进行曲线拟合,得到更加精确的承载力计算公式,即

$$N_u = \alpha A_{s1} \sigma_{0.2} + \beta A_c f_c + \gamma A_{s2} f_y \quad (15)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为钢管、混凝土和钢骨的约束因子,分别取 3.926、0.917、0.924; $A_{s1}$ 、 $A_c$ 、 $A_{s2}$  分别为钢管、混凝土、钢骨的截面面积; $f_c$  为混凝土的屈服强度。

图 17 为轴压承载力实测值  $N_c$  和计算值  $N_u$  的对比。可以看出,所有计算点均在  $N_c/N_u = 1$  直线附近且相对误差小于 7%,两者吻合良好,说明本文提出的公式具有较好的准确性,可以用来预测方形不锈钢管超高性能混凝土短柱的极限承载力。



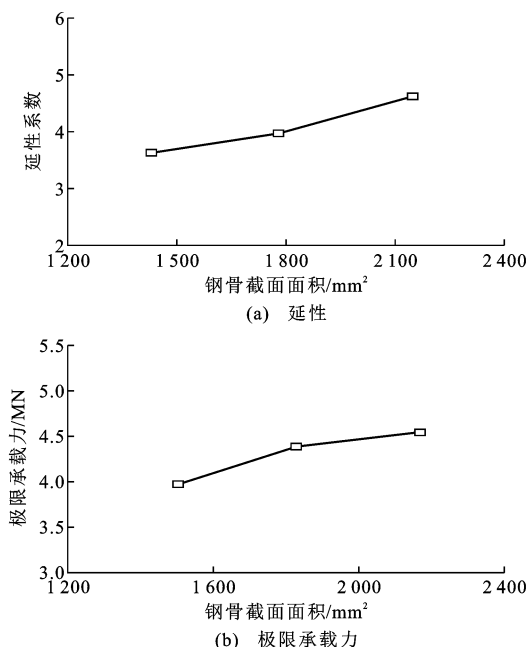


图 16 钢骨截面面积对构件延性和极限承载力的影响

Fig. 16 Influence of steel section area on ductility and ultimate bearing capacity of member

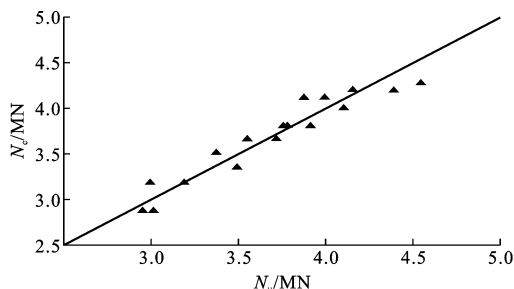


图 17 轴压承载力对比

Fig. 17 Comparison of axial bearing capacity

## 6 结 语

(1) 含钢骨与无钢骨的构件破坏形态类似,均表现为上部、中部和下部出现局部鼓曲,只有长径比较大的构件在有限元模拟中出现侧向挠曲变形。

(2) 构件的承载力随径厚比的减小而增加,随着钢骨截面面积增大而增大。外径一定时,含钢骨构件壁厚由 1.5 mm 增加至 2.5、3.5 mm 时,构件极限承载力分别增加了 18.64%、29.43%;钢骨截面面积由 1 430 mm<sup>2</sup> 增加至 1 780、2 180 mm<sup>2</sup> 时,构件的承载力分别增加了 10.51%、14.53%。说明钢管壁厚及钢骨截面面积对构件承载力的影响较大,同时,钢骨的增加改善了构件的延性。

(3) 核心混凝土强度提高可增加方形不锈钢管超高性能混凝土短柱强度,但荷载-应变曲线达到峰值后承载力下降很快,核心混凝土强度的增加提高

了构件的极限承载力,但降低了构件的延性。

(4) 基于试验结果与数值模拟良好的一致性,结合规范提出了方形不锈钢管超高性能混凝土短柱轴压承载力公式,可以为方形钢管混凝土柱的承载力计算提供参考。

## 参考文献:

## References:

- [1] 王文达,李鲜珩,范家浩.内置型钢管混凝土轴压构件设计方法研究及可靠度分析[J].建筑科学与工程学报,2020,37(6):11-20.  
WANG Wenda, LI Xianjun, FAN Jiahao. Design method research and reliability analysis of concrete-filled steel tubular columns with inner steel under axial compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 11-20.
- [2] 张文福,李洋,邓云,等.内置工字钢骨方钢管混凝土自由扭转刚度计算与 FEM 验证[J].东北石油大学学报,2018,42(3):113-122,130.  
ZHANG Wenfu, LI Yang, DENG Yun, et al. Free torsional rigidity and its FEM verification of concrete-filled square steel tube with encased I-shaped steel [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2018, 42(3): 113-122, 130.
- [3] DU Y S, CHEN Z H, ZHANG C Q, et al. Research on axial bearing capacity of rectangular concrete-filled steel tubular columns based on artificial neural networks [J]. Frontiers of Computer Science, 2017, 11(5): 863-873.
- [4] LU Y Y, LI N, LI S, et al. Experimental investigation of axially loaded steel fiber reinforced high strength concrete-filled steel tube columns[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(6): 2287-2296.
- [5] TAN Q H, GARDNER L, HAN L H, et al. Fire performance of steel reinforced concrete-filled stainless steel tubular (CFSST) columns with square cross-sections[J]. Thin-walled Structures, 2019, 143: 106197.
- [6] 李永进,廖飞宇,黄海清.矩形不锈钢管混凝土柱双向偏压力学性能试验研究[J].建筑钢结构进展,2018, 20(2): 60-66.  
LI Yongjin, LIAO Feiyu, HUANG Haiqing. Experimental study on the behavior of concrete filled rectangular stainless steel tubular columns under bi-axial eccentric compression [J]. Progress in Steel Building Structures, 2018, 20(2): 60-66.
- [7] 韩林海,尧国皇,杨华.钢管被动约束下混凝土的本构关系模型[DB/OL]. (2011-11-01) [2021-11-26].  
<https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=kx>

- aUMs6x7-4p\_H5157itHVzbzj735XtTfF\_z5peEpU-qurQdDmPu6B2oEdpu9xZP6CThtBuTZJse01MmEzIQTjg6Q9FvvOtt&uniplatform=NZKPT.  
HAN Linhai, YAO Guohuang, YANG Hua. Constitutive model of concrete under passive restraint of steel tube[DB/OL]. (2011-11-01)[2021-11-26]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=kxaUMs6x7-4p\\_H5157itHVzbzj735XtTfF\\_z5peEpU-qurQdDmPu6B2oEdpu9xZP6CThtBuTZJse01MmEzIQTjg6Q9FvvOtt&uniplatform=NZKPT](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=kxaUMs6x7-4p_H5157itHVzbzj735XtTfF_z5peEpU-qurQdDmPu6B2oEdpu9xZP6CThtBuTZJse01MmEzIQTjg6Q9FvvOtt&uniplatform=NZKPT).
- [8] 金 浏,樊玲玲,杜修力,等.圆钢管混凝土柱轴压破坏行为与尺寸效应理论研究[J].中国科学:技术科学,2020,50(2):209-220.  
JIN Liu, FAN Lingling, DU Xiuli, et al. Failure behavior and size effect theory of circular concrete-filled steel tubular columns under axial compression[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2020, 50(2): 209-220.
- [9] LE T T, ASTERIS P G, LEMONIS M E. Prediction of axial load capacity of rectangular concrete-filled steel tube columns using machine learning techniques[J]. Engineering with Computers, 2022, 38(S4): 3283-3316.
- [10] YOO D Y, SHIN H O, YANG J M, et al. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 58: 122-133.
- [11] WILLE K, KIM D J, NAAMAN A E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents[J]. Materials and Structures, 2011, 44(3): 583-598.
- [12] WANG W Q, WU C Q, LIU Z X. Compressive behavior of hybrid double-skin tubular columns with ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHP-FRC)[J]. Engineering Structures, 2019, 180: 419-441.
- [13] 邓宗才,王义超. FRP约束超高性能混凝土圆柱轴压本构模型[J].西南交通大学学报, 2015, 50(4): 641-647.  
DENG Zongcai, WANG Yichao. Axial compression stress-strain model for UHPC cylinders confined by FRP[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(4): 641-647.
- [14] GULER S, YAVUZ D, AYDN M. Hybrid fiber reinforced concrete-filled square stub columns under axial compression[J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109504.
- [15] ZHANG J C, YANG J. Study on mechanism of L-shaped concrete-filled steel tubular columns subjected to axial compression[J]. Advanced Materials Research, 2012, 476-478: 2463-2468.
- [16] DABAON M A, EL-BOGHDADI M H, HASSANEIN M F. Experimental investigation on concrete-filled stainless steel stiffened tubular stub columns[J]. Engineering Structures, 2009, 31(2): 300-307.
- [17] 郑永乾,赖鹏松,何春霞. 方形复合不锈钢管混凝土柱滞回性能研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(12): 36-45, 56.  
ZHENG Yongqian, LAI Pengsong, HE Chunxia. Hysteretic behavior of square composite-sectional concrete-filled stainless steel tubular columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(12): 36-45, 56.
- [18] 唐红元,李政周,范璐瑶,等. 矩形不锈钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(4): 855-864.  
TANG Hongyuan, LI Zhengzhou, FAN Luyao, et al. Experimental investigation on behavior of rectangular concrete-filled stainless steel tubular stub columns under axial loading[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(4): 855-864.
- [19] SKALOMENOS K A, HAYASHI K, NISHI R, et al. Experimental behavior of concrete-filled steel tube columns using ultrahigh-strength steel[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(9): 04016057.
- [20] 杜国锋,宋 鑫,余思平. 内置钢骨组合 L 形截面钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(8): 82-89.  
DU Guofeng, SONG Xin, YU Siping. Experimental research on axially loaded composite L-section steel tubular short columns filled with steel-reinforced concrete[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8): 82-89.
- [21] 刘 坚,张鹏程,刘长江,等. 内配型钢的方钢管再生混凝土短柱轴压承载力分析[J]. 混凝土, 2021(10): 1-5.  
LIU Jian, ZHANG Pengcheng, LIU Changjiang, et al. Axial bearing capacity analysis of RAC-filled square steel tubular stub columns with encased profiled steel under axial compression[J]. Concrete, 2021(10): 1-5.
- [22] TIAN H W, ZHOU Z, ZHANG Y, et al. Axial behavior of reinforced concrete column with ultra-high performance concrete stay-in-place formwork[J]. Engineering Structures, 2020, 210(7): 110403.
- [23] PATEL V I, HASSANEIN M F, THAI H T, et al. Behaviour of axially loaded circular concrete-filled bi-metallic stainless-carbon steel tubular short columns[J]. Engineering Structures, 2017, 147: 583-597.
- [24] 金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

- Metallic materials — tensile testing — part 1: method of test at room temperature; GB/T 228. 1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [25] PATEL V I, LIANG Q Q, HADI M N S. Nonlinear analysis of axially loaded circular concrete-filled stainless steel tubular short columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 9-18.
- [26] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [27] LIM J C, OZBAKKALOGLU T. Stress-strain model for normal- and light-weight concretes under uniaxial and triaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2014, 71(7): 492-509.
- [28] GRAYBEAL B A. Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(2): 146-152.
- [29] LIANG Q Q. Performance-based analysis of concrete-filled steel tubular beam-columns, part I: theory and algorithms[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2): 363-372.
- [30] HU H T, HUANG C S, WU M H, et al. Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(10): 1322-1329.
- [31] Eurocode 3 — design of steel structures — part 1-4: general rules — supplementary rules for stainless steels; EN 1993-1-4[S]. Brussels: CEN, 1993.
- [32] HUANG W, FAN Z C, SHEN P L, et al. Experimental and numerical study on the compressive behavior of micro-expansive ultra-high-performance concrete-filled steel tube columns[J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119150.
- [33] 钢管混凝土结构技术规范; GB 50936—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Technical code for concrete filled steel tubular structures; GB 50936—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.