

文章编号:1007-9629(2023)05-0547-08

# 方钢管超高强钢纤维混凝土柱轴压性能研究

张斌<sup>1</sup>, 胡红松<sup>2,3,\*</sup>, 杨朱金<sup>2</sup>

(1. 中交建筑集团有限公司, 北京 100010; 2. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021; 3. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:**为研究方钢管超高强钢纤维混凝土柱的受压性能,开展了12个方钢管超高强钢纤维混凝土柱的轴压试验,试验参数包括钢管屈服强度与厚度、混凝土基体强度和钢纤维掺量。结果表明:掺入钢纤维基本不改变试件的破坏形态;对于混凝土棱柱体抗压强度介于80~150 MPa之间、套箍指标介于0.33~1.43之间的方钢管钢纤维混凝土柱,其管内混凝土的抗压强度与对应混凝土棱柱体抗压强度接近;钢纤维对延性的提升作用随着混凝土强度的提高和套箍指标的增大而降低;当混凝土棱柱体抗压强度为130 MPa、套箍指标为0.90时,掺入1.5%的钢纤维对提升方钢管混凝土柱的延性不起作用。

**关键词:**钢管混凝土柱;超高强混凝土;钢纤维混凝土;轴压性能;延性

中图分类号:TU398.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.05.013

## Axial Compressive Behavior of Ultra-high-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete-Filled Square Steel Columns

ZHANG Bin<sup>1</sup>, HU Hongsong<sup>2,3,\*</sup>, YANG Zhujin<sup>2</sup>

(1. CCCC Construction Group Co., Ltd., Beijing 100010, China; 2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 3. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To study the compressive behavior of ultra-high-strength concrete-filled square steel columns, 12 square steel columns filled with ultra-high-strength steel fiber-reinforced concrete were tested under axial compression. The test variables included the yield strength and thickness of the steel column, the strength of the matrix concrete and the content of steel fiber. The results indicate that the addition of steel fiber doesn't change the failure modes of the specimens. For the columns with the concrete compressive strength between 80 MPa and 150 MPa and the confinement index between 0.33 and 1.43, the compressive strength of the concrete in the steel square is close to that of the corresponding unconfined concrete. The effect of the steel fiber on improving the ductility of square concrete-filled steel columns decreases as the concrete strength and confinement index increases. When the concrete compressive strength is 130 MPa and the confinement index is 0.90, the addition of steel fiber with 1.5% volume content ratio has no effect on improving the ductility of square concrete-filled steel columns.

**Key words:** concrete-filled steel column; ultra-high-strength concrete; steel fiber-reinforced concrete; axial compressive behavior; ductility

收稿日期:2022-05-04;修订日期:2022-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878303,51608210);福建省自然科学基金资助项目(2019J06016);厦门市建设局建设科技项目(XJK2022-1-17)

第一作者:张斌(1987—),男,陕西渭南人,中交建筑集团有限公司高级工程师,硕士.E-mail:zbzx-1015@foxmail.com

通讯作者:胡红松(1986—),男,浙江慈溪人,华侨大学教授,博士生导师,博士.E-mail:huhs@hqu.edu.cn

钢管混凝土柱具有优异的结构性能且施工方便,已经被广泛应用于超高层建筑中.采用超高强混凝土可以进一步减小柱子的截面尺寸,提高建筑的有效使用面积.但超高强混凝土的脆性显著,将其应用于钢管混凝土柱中容易导致柱子的延性不足,尤其是对于约束作用相对(相比于圆钢管混凝土柱)较弱的方钢管混凝土柱<sup>[1-2]</sup>.在超高强混凝土中掺入纤维可以限制混凝土内部裂纹的扩展和损伤演化,从而提高超高强混凝土的延性<sup>[3-5]</sup>.因此,采用超高强纤维混凝土是提高方钢管超高强混凝土柱变形能力的有效措施.

目前,已有学者对方钢管纤维混凝土柱的轴压和偏压受力性能开展了试验研究<sup>[6-9]</sup>.这些试验采用的混凝土抗压强度都未超过70 MPa,试验结果均表明:掺入钢纤维可以有效提高方钢管混凝土柱的延性,但对柱子承载力的影响较小.除对采用普通强度纤维混凝土的方钢管混凝土柱开展研究外,颜燕祥等<sup>[10]</sup>和Chen等<sup>[11]</sup>开展了方钢管超高性能混凝土短柱的轴压试验,Zhang等<sup>[12]</sup>开展了方钢管超高性能混凝土柱的偏压试验.他们采用的超高性能混凝土(UHPC)的棱柱体抗压强度达到了110 MPa以上,但这些UHPC均不含粗骨料.在实际工程应用中,为降低成本和减小混凝土的收缩,混凝土一般都含有粗骨料,因此上述试验结果并不一定能完全反映真实构件的受力性能.另外,上述试验均未设计不掺钢纤维的对比件,因此掺入钢纤维对方钢管超高强混凝土柱受力性能的影响还需进一步研究.

本文开展了6个方钢管超高强钢纤维混凝土柱和6个对应方钢管超高强混凝土柱试件的轴压试验,研究了试件的破坏过程、承载力、延性以及掺入钢纤维对方钢管超高强混凝土柱受力性能的影响,以期为厦门白鹭西塔方钢管超高强钢纤维混凝土柱的设计提供理论指导.

## 1 试验

### 1.1 试件设计

共开展了12个试件的轴压试验,试件构造如图1所示.每个试件的钢管由4块厚度相同的钢板通过全熔透坡口焊焊接而成;钢管高度( $L$ )和外宽度( $B$ )分别为600 mm和200 mm,相应的高宽比( $L/B$ )为3.0.钢管两端焊接有30 mm厚的端板,以保证钢管和混凝土的变形一致.

试验参数包括钢管屈服强度( $f_y$ )与厚度、混凝土基体强度和钢纤维掺量( $V_f$ ,体积分数).采用的

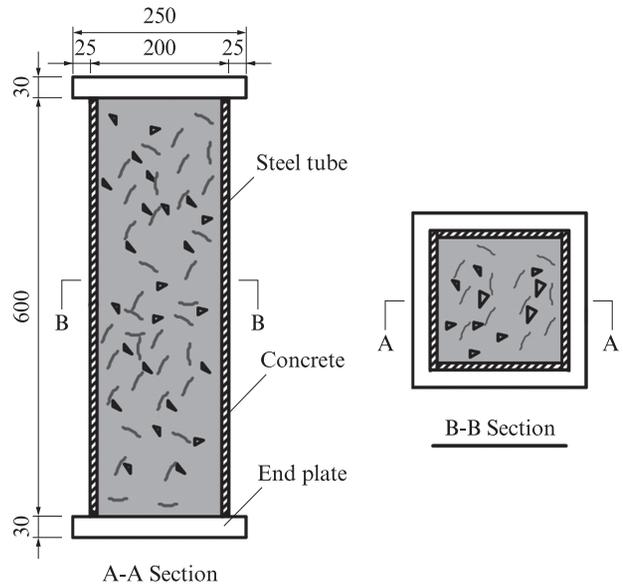


图1 试件的构造

Fig. 1 Details of specimen (size: mm)

钢管有3种,分别为名义壁厚( $t_n$ )5 mm的Q355钢管、8 mm的Q355钢管和8 mm的Q550钢管,其实测屈服强度分别为427、379、670 MPa,实测壁厚( $t$ )分别为4.65、8.33、7.69 mm,宽厚比( $B/t$ )分别为43.0、24.0和26.0,均满足JGJ 138—2016《组合结构设计规范》中的限值要求( $B/t \leq 60 \sqrt{235/f_y}$ ).

内填混凝土有4种,分别为混凝土棱柱体抗压强度( $f_c$ )等级为80 MPa的普通混凝土(C80N)、采用80 MPa基体的钢纤维混凝土(C80S)、 $f_c$ 等级为130 MPa的普通混凝土(C130N)和采用130 MPa基体的钢纤维混凝土(C130S);2种钢纤维混凝土的钢纤维掺量均为1.5%.试件的参数如表1所示.

钢管混凝土柱的受压力学性能与套箍指标( $\xi$ )有密切关系,其定义<sup>[9]</sup>如下:

$$\xi = \frac{f_y A_s}{f_{c0} A_c} \quad (1)$$

式中: $A_s$ 和 $A_c$ 分别为钢管和混凝土的截面积,mm<sup>2</sup>.

CECS 159—2004《矩形钢管混凝土结构技术规程》规定的矩形钢管混凝土受压构件的 $\xi$ 值范围为0.43~9.00,而本试验试件的 $\xi$ 值范围为0.29~1.43(见表1),基本落在规程规定的范围内.因此,本试验采用的 $\xi$ 值与工程实践基本一致,试验结果能够为工程实践提供有效的指导.

### 1.2 材料性能

表2为钢板的力学性能.Q550钢板的应力-应变曲线没有明显的屈服平台,因此将对对应于0.2%残余应变的应力值作为其屈服强度.

表3为混凝土的配合比和性能.其中: $f_{cu}$ 为立方

表1 试件的参数  
Table 1 Parameters of specimens

Specimen No.	$f_y$ /MPa	$t$ /mm	$B/t$	$f_{co}$ /MPa	$V_f$ /%	$\xi$
FC-NS43-C80N	427	4.65	43.0	81.3	0	0.52
FC-NS43-C80S	427	4.65	43.0	94.1	1.5	0.45
FC-NS24-C80N	379	8.33	24.0	81.3	0	0.89
FC-NS24-C80S	379	8.33	24.0	94.1	1.5	0.77
FC-HS26-C80N	670	7.69	26.0	81.3	0	1.43
FC-HS26-C80S	670	7.69	26.0	94.1	1.5	1.24
FC-NS43-C130N	427	4.65	43.0	130.0	0	0.33
FC-NS43-C130S	427	4.65	43.0	146.0	1.5	0.29
FC-NS24-C130N	379	8.33	24.0	130.0	0	0.55
FC-NS24-C130S	379	8.33	24.0	146.0	1.5	0.49
FC-HS26-C130N	670	7.69	26.0	130.0	0	0.90
FC-HS26-C130S	670	7.69	26.0	146.0	1.5	0.79

体抗压强度,  $f_{ib}$ 为抗折强度,其值均为平均值. 试验用硅酸盐水泥的强度等级为52.5 MPa, 钢纤维为端钩型, 直径为0.3 mm, 长径比为65, 抗拉强度大于2 000 MPa. 每种混凝土都同批制作了6个尺寸为100 mm的立方体试块、6个尺寸为100 mm×100 mm×200 mm的棱柱体试块和3个尺寸为150 mm×150 mm×550 mm的抗折梁试块.

表2 钢板的力学性能  
Table 2 Mechanical properties of steel plates

Steel type	$t$ /mm	Elastic modulus/GPa	$f_y$ /MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%
Q355	4.65	203	427	593	25.1
Q355	8.33	210	379	569	24.9
Q550	7.69	208	670	772	19.6

表3 混凝土的配合比和性能  
Table 3 Mix proportions and properties of concretes

Concrete type	$m_w/m_B$	$V_f$ /%	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )								Slump/mm	Spread/mm	$f_{cu}$ /MPa	$f_{co}$ /MPa	$f_{ib}$ /MPa
			Water	Cement	Silica fume	Silica flour	Gravel	Sand	Steel fiber	Superplasticizer					
C80N	0.33	0	155.0	446.0	23.5	0	1 030.0	746.0	0	1.9	238	535	93.40	81.30	6.56
C80S	0.33	1.5	180.0	518.0	27.3	0	950.0	688.0	118.0	2.2	220	510	103.00	94.10	8.90
C130N	0.20	0	150.0	619.0	131.0	150.0	918.0	432.0	0	6.8	229	522	135.00	130.00	6.39
C130S	0.20	1.5	190.0	784.0	166.0	190.0	703.0	331.0	118.0	8.6	204	491	155.00	146.00	12.10

1.3 加载和测量方案

采用杭州邦威机电控制工程有限公司生产的WAW-J10000F型电液伺服多功能结构试验机对试件施加轴压力, 试验加载装置和测点布置如图2所示. 共对称布置4个竖向位移传感器, 用于测量试件的轴向变形

. 沿试件每个侧面的竖向中线等间距布置3个应变片, 用于监测钢管局部的应变发展. 试验全程采用位移控制加载, 加载速率为1 mm/min, 对应于试件轴向平均应变( $\epsilon$ , 轴向压缩量( $\delta$ )与L的比值)的加载速率为 $28 \times 10^{-6} s^{-1}$ . 当轴向平均应变超过5.0%时, 停止试验.

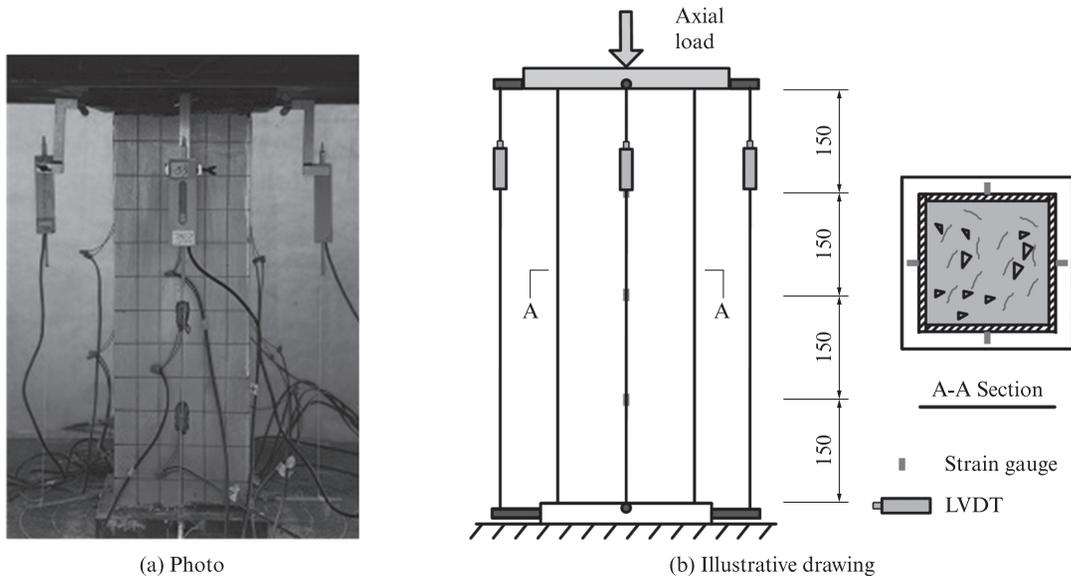


图2 加载装置和测点布置  
Fig. 2 Test setup and instrumentation (size: mm)

## 2 结果及分析

### 2.1 破坏过程和破坏形态

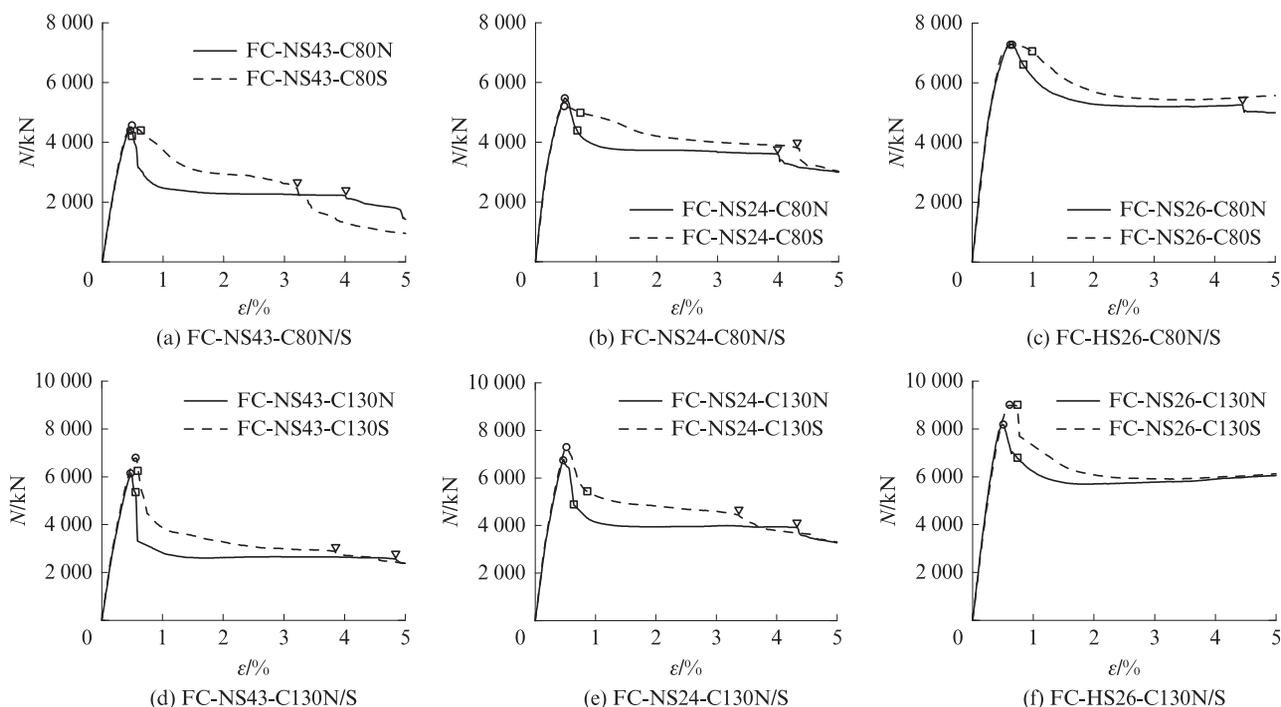
图3为试件的轴向荷载-平均轴向应变( $N-\epsilon$ )关系曲线.所有试件的 $N-\epsilon$ 曲线都基本可分成上升段、下降段和平台段3个部分.由图3可见:

(1)掺入钢纤维对 $N-\epsilon$ 曲线的上升段基本没有影响.由于内填混凝土的压溃(由声音判断),试件轴向荷载在达到峰值荷载( $N_m$ )后即开始下降,但不同试件轴向荷载的下降速率和幅度存在差异.采用

130 MPa 基体混凝土试件轴向荷载的下降速率和幅度显著高于采用80 MPa基体混凝土的对应试件,掺入钢纤维可以降低试件轴向荷载的下降速率和幅度,使试件表现出更好的延性.

(2)增大钢管壁厚和强度也能在一定程度上改善试件的峰值后性能.随着 $\epsilon$ 值的增大,试件轴向荷载的下降速率逐步减小;当 $\epsilon$ 值超过2%后,试件轴向荷载基本保持恒定,直至钢管角部竖向焊缝发生开裂.

表4为轴压试验的主要结果.其中: $N_{2\%}$ 为 $\epsilon=2\%$ 时的轴向荷载; $\epsilon_m$ 为峰值荷载对应的平均轴向应变; $\epsilon_b$ 为



○ Denotes the concrete crushing; □ Denotes the initial buckling of the steel column;  
▽ Denotes the fracture of vertical welds of the steel column

图3 试件的轴向荷载-平均轴向应变曲线

Fig. 3  $N-\epsilon$  curves of specimens

表4 轴压试验的主要结果

Table 4 Primary results of axil compressive test

Specimen No.	$N_m/\text{kN}$	$N_{2\%}/\text{kN}$	$N_{2\%}/N_m$	$\epsilon_m/\%$	$\epsilon_b/\%$	$\epsilon_f/\%$
FC-NS43-C80N	4 430	2 287	0.52	0.46	0.49	4.01
FC-NS43-C80S	4 569	2 939	0.64	0.49	0.63	3.17
FC-NS24-C80N	5 480	3 731	0.68	0.49	0.69	3.99
FC-NS24-C80S	5 207	4 205	0.81	0.48	0.74	4.35
FC-HS26-C80N	7 301	5 286	0.72	0.65	0.86	4.46
FC-HS26-C80S	7 290	5 706	0.78	0.68	1.01	
FC-NS43-C130N	6 157	2 622	0.43	0.48	0.55	4.84
FC-NS43-C130S	6 782	3 276	0.48	0.55	0.57	3.85
FC-NS24-C130N	6 786	3 948	0.58	0.47	0.64	4.35
FC-NS24-C130S	7 285	4 818	0.66	0.52	0.86	3.37
FC-HS26-C130N	8 173	5 700	0.70	0.48	0.74	
FC-HS26-C130S	8 986	6 081	0.68	0.64	0.74	

钢管初始屈曲(通过肉眼观察判断)时的平均轴向应变; $\epsilon_f$ 为竖向焊缝开裂时的平均轴向应变.由表4可见:

(1)对于采用80 MPa基体混凝土的试件, $N_{2\%}/N_m$ 值介于0.52~0.81之间;对于采用130 MPa基体混凝土的试件, $N_{2\%}/N_m$ 值介于0.43~0.70之间.对于给定的混凝土基体强度, $N_{2\%}/N_m$ 值总体上随着钢纤维的掺入和钢管壁厚、强度的增大而增大.

(2)对于所有试件,钢管局部屈曲发生在峰值荷载之后;各试件的 $\epsilon_b$ 值介于0.49%~1.01%之间,且其值总体上随着钢管宽厚比的减小而增大. $\epsilon_f$ 值主要与钢管的焊接质量有关,具有一定的随机性;本试验

有一半试件的 $\epsilon_f$ 值介于4.0%~5.0%之间,另有3个试件的 $\epsilon_f$ 值介于3.0%~4.0%之间,3个试件的钢管竖向焊缝在整个加载过程中都未发生开裂.

加载结束后,将一面钢板剖开,用于观察混凝土的破坏情况.图4为典型试件的最终破坏形态.由图4可见:钢管局部屈曲和混凝土压溃都主要集中于1个或2个区域,且钢管发生局部屈曲的区域与混凝土的压溃区域基本一致;普通混凝土试件和钢纤维混凝土试件的破坏形态没有明显的差别,但由于钢纤维的拉结作用,加载结束后钢纤维混凝土的完整性要优于普通混凝土.

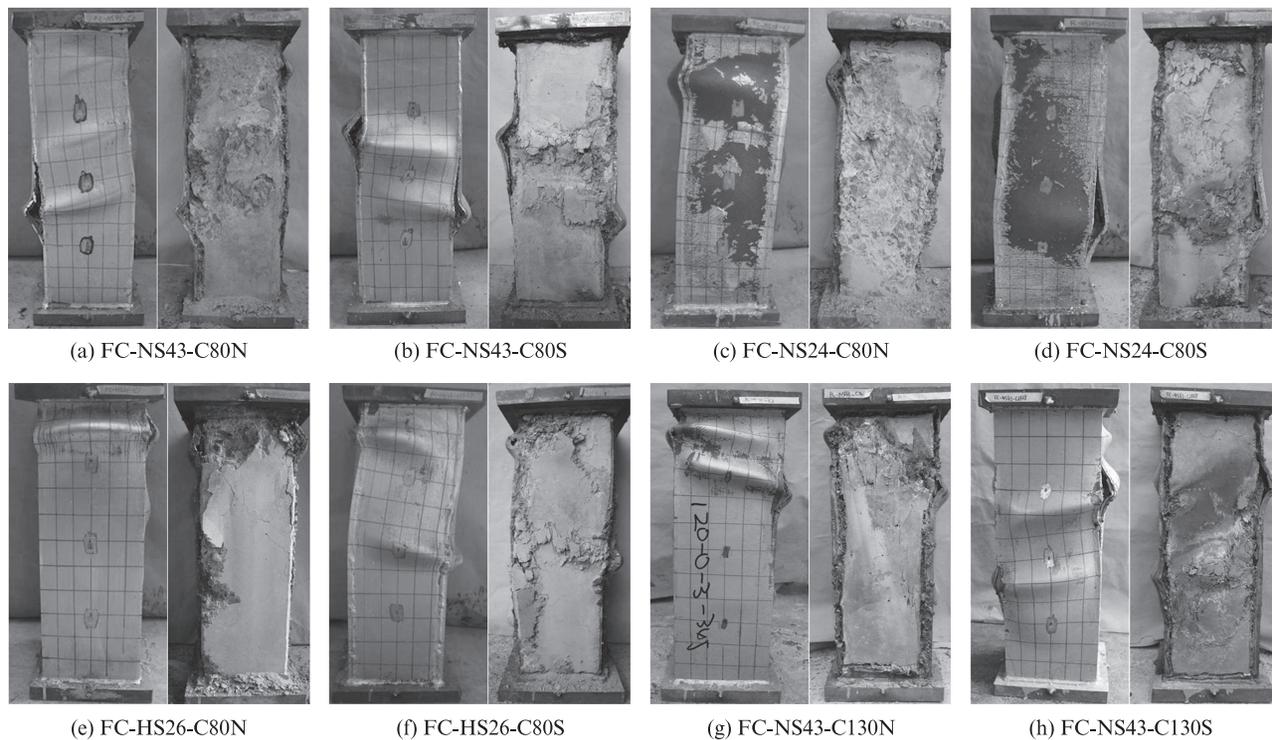


图4 典型试件的最终破坏形态

Fig. 4 Final failure modes of typical specimens

## 2.2 轴压承载力

已有规范<sup>[11-12]</sup>给出的方钢管混凝土短柱轴压承载力( $N_u$ )计算公式可统一为:

$$N_u = \alpha f_{c0} A_c + f_{sm} A_s \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为方钢管混凝土柱中混凝土抗压强度与对应混凝土棱柱体抗压强度的比值,它综合体现了钢管约束效应、尺寸效应和混凝土浇筑质量等因素的影响; $f_{sm}$ 为考虑局部屈曲影响的钢管抗压强度,MPa.

本试验所采用钢管的宽厚比均满足规范的限值要求,且试验结果也表明各试件的局部屈曲均发生在峰值承载力之后.因此,对于本试验的所有试件,式(2)中的 $f_{sm}$ 值可取为钢管的 $f_y$ 值.由于各试件的轴压承载力已通过试验获得,基于式可以反算得到各

试件的 $\alpha$ 值.图5为 $\alpha$ 与 $\xi$ 的关系.由图5可见:

(1)对于同一种混凝土, $\alpha$ 值总体上随着 $\xi$ 值的增大而增大.试件FC-NS43-C80S和FC-NS24-C80S的 $\alpha$ 值为0.88,相比其他试件偏低,导致这一结果的可能原因是这2个试件的混凝土浇筑质量相对较差.

(2)试件FC-NS24-C80N和FC-HS26-C80N的 $\alpha$ 值分别为1.12和1.20,略高于其他试件,这主要是因为这2个试件的 $\xi$ 值较大,相应的钢管施加给混凝土的约束应力也较大,导致混凝土的峰值应力有较大幅度地提升.除了上述4个试件,其他试件的 $\alpha$ 值都介于0.95~1.05之间,说明方钢管超强钢纤维混凝土柱中的混凝土抗压强度与对应混凝土棱柱体抗压强度接近.

基于以上分析,可以提出如下设计建议:对于混凝土棱柱体抗压强度介于 80~150 MPa 之间、 $\xi$  值介于 0.33~1.43 之间且钢管宽厚比满足限值要求的钢管钢纤维混凝土柱,式中的  $\alpha$  值可近似取为 1.0,也就是 BS EN 1994-1-1: 2004《Design of composite steel and concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings》中的计算公式.上述设计建议的前提条件是钢管混凝土柱的截面尺寸与棱柱体试块的截面尺寸接近,而对于实际工程中的方钢管混凝土柱,其截面尺寸通常远大于混凝土试块尺寸,因此还需考虑混凝土尺寸效应的影响.对于截面尺寸较大的方钢管超高强钢纤维混凝土柱,建议采用 Sakino 等<sup>[1]</sup>提出的尺寸效应公式计算  $\alpha$  值:

$$\alpha = 1.65B_c^{-0.112} \quad (3)$$

式中: $B_c$ 为混凝土的宽度,mm.

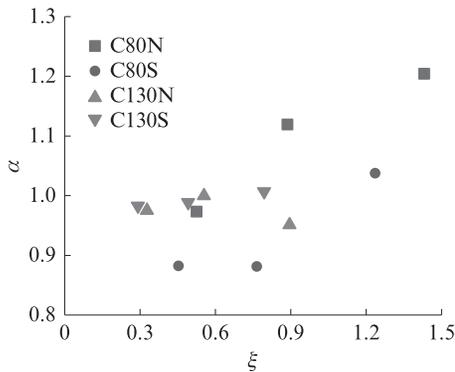


图 5  $\alpha$  与  $\xi$  的关系

Fig. 5 Relationships between  $\alpha$  and  $\xi$

### 2.3 延性分析

延性比是评价构件变形能力的常用指标,它一般定义为构件承载力下降至峰值承载力的 85% 或 80% 时位移与构件屈服位移的比值.对于本试验中的部分试件,其轴向荷载在达到峰值后发生骤降,且骤降幅度往往超过 20%,采用延性比较难以评价这些试件的变形能力.为了能够合理评估上述这类构件的延性,Foster 等<sup>[13]</sup>提出了基于能量的延性评估指标  $I_5$  和  $I_{10}$ .对于如图 6 所示的基于能量的延性评价指标, $I_5$  定义为  $N-\epsilon$  曲线的  $OB$  段与水平轴围成的面积和  $OA$  段与水平轴围成的面积的比值, $I_{10}$  定义为  $OC$  段与水平轴围成的面积和  $OA$  段与水平轴围成的面积的比值,其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  点对应的横坐标值分别为  $\epsilon_y$ 、 $3\epsilon_y$  和  $5.5\epsilon_y$  ( $\epsilon_y$  为屈服平均轴向应变).对于理想弹塑性材料, $I_5$  和  $I_{10}$  的值分别为 5 和 10, $\epsilon_y$  取为  $N-\epsilon$  曲线上升段  $0.75N_m$  对应的  $\epsilon$  的 4/3 倍<sup>[14]</sup>.

混凝土压溃和钢管局部屈曲都会导致方钢管超高强钢纤维混凝土柱轴压承载力的降低.由于钢管的

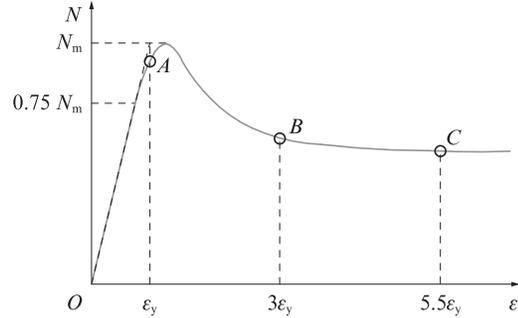


图 6 基于能量的延性评价指标

Fig. 6 Ductility valuation based on energy concept

约束作用,钢管混凝土柱中的混凝土在破坏后仍会有一些的残余承载力,且混凝土承载力的下降速率和残余承载力水平与套箍指标和钢纤维掺量有关.对于满足宽厚比限值要求的钢管,局部屈曲引起的钢管轴压承载力的降低幅度一般都在 20% 以内<sup>[15]</sup>.因此,钢管内混凝土的变形能力是影响试件  $I_5$  和  $I_{10}$  的主要因素.

图 7 为  $I_5$  和  $I_{10}$  与  $\xi$  的关系.由图 7 可见,对于采用同一种混凝土的试件, $I_5$  和  $I_{10}$  的值随着钢管壁厚和强度(统一反映为  $\xi$  值)的增大而增大.

为对方钢管超高强钢纤维混凝土柱的延性水平有更清晰的认识,作者计算了文献[16]中的 4 个采用  $f_{c0}=42.5$  MPa 混凝土(记为 C40N)的方钢管混凝土柱的  $I_5$  和  $I_{10}$  值,计算结果也绘制于图 7 中.由图 7 可见,采用 C80S 混凝土( $f_{c0} = 94.1$  MPa,  $V_f = 1.5\%$ )的方钢管混凝土柱与普通方钢管混凝土柱的延性水平相近.

为衡量钢纤维掺入对提升方钢管混凝土柱延性的作用,引入如下指标:

$$R_{I_5} = \frac{(I_5)^S - (I_5)^N}{(I_5)^N} \quad (4)$$

$$R_{I_{10}} = \frac{(I_{10})^S - (I_{10})^N}{(I_{10})^N} \quad (5)$$

式中: $(I_5)^S$  和  $(I_{10})^S$  分别为方钢管混凝土试件的  $I_5$  和  $I_{10}$  的值; $(I_5)^N$  和  $(I_{10})^N$  分别为对应方钢管钢纤维混凝土试件的  $I_5$  和  $I_{10}$  的值; $R_{I_5}$  和  $R_{I_{10}}$  反映了掺入钢纤维后方钢管混凝土柱延性的提升幅度.

图 8 为  $R_{I_5}$  和  $R_{I_{10}}$  与  $\xi$  的关系.由于混凝土强度的差异,方钢管混凝土柱和对应方钢管钢纤维混凝土柱试件的  $\xi$  值略有差别,其中的  $\xi$  值基于前者的混凝土抗压强度计算.由图 8 可见:钢纤维对方钢管混凝土柱延性的提升作用随着混凝土强度的提高而降低;随着  $\xi$  值的增大,掺入钢纤维对方钢管混凝土柱延性的提升作用逐步降低;当  $f_{c0}=130$  MPa、 $\xi=0.90$  时,掺入 1.5% 的钢纤维对提升方钢管混凝土柱的延性不起作用.

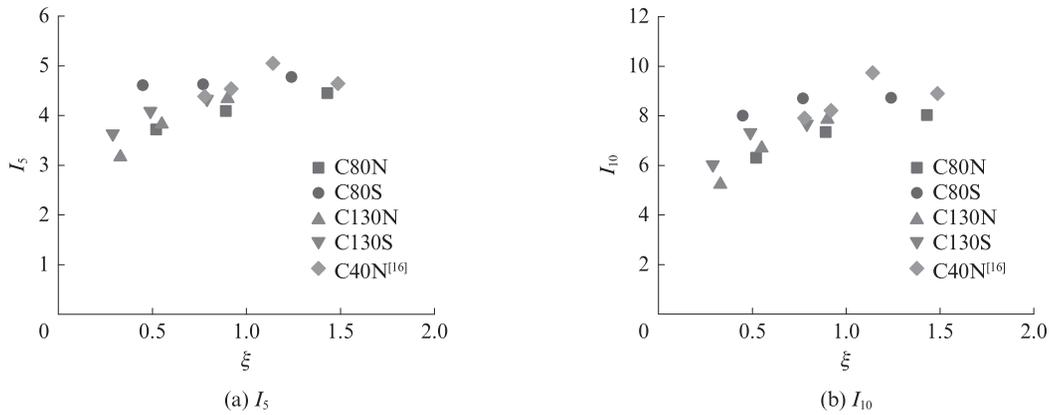


图7  $I_5$ 和 $I_{10}$ 与 $\xi$ 的关系  
Fig. 7 Relation of  $I_5$  and  $I_{10}$  with  $\xi$

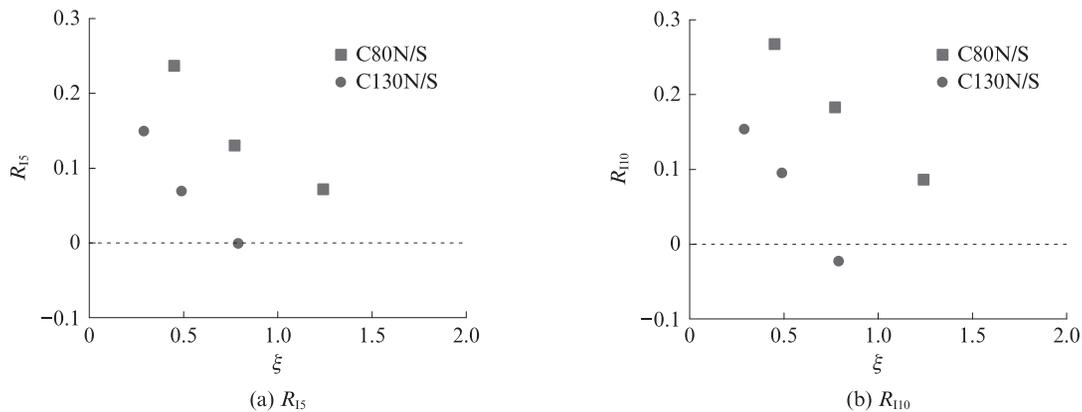


图8  $R_{15}$ 和 $R_{110}$ 与 $\xi$ 的关系  
Fig. 8 Relation of  $R_{15}$  and  $R_{110}$  with  $\xi$

### 3 结论

(1)由于内填混凝土的压溃,方钢管混凝土柱试件的轴向荷载在达到峰值后即开始下降,且随着平均轴向应变的增大,试件轴向荷载的下降速率逐步减小;当平均轴向应变超过2%后,方钢管混凝土柱试件的轴向荷载基本保持恒定,直至钢管角部竖向焊缝发生开裂。

(2)钢管局部屈曲和混凝土压溃都主要集中于1个或2个区域,且钢管发生局部屈曲的区域和混凝土的压溃区域基本一致.掺入钢纤维基本不改变方钢管混凝土柱试件的破坏形态。

(3)对于混凝土棱柱体抗压强度介于80~150 MPa之间、套箍指标介于0.33~1.43之间的钢管钢纤维混凝土柱,其管内混凝土的抗压强度与对应混凝土棱柱体抗压强度接近。

(4)钢纤维对方钢管混凝土柱延性的提升作用随着混凝土强度的提高和套箍指标的增大而降低;当混凝土棱柱体抗压强度为130 MPa、套箍指标为0.90时,掺入1.5%的钢纤维对提升方钢管混凝土柱的延性不起作用。

### 参考文献:

- [ 1 ] SAKINO K, NAKAHARA H, MORINO S, et al. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2):180-188.
- [ 2 ] 肖建庄, 杨洁, 黄一杰, 等. 钢管约束再生混凝土轴压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9):1-10.  
XIAO Jianzhuang, YANG Jie, HUANG Yijie, et al. Experimental study on recycled concrete confined by steel tube under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9):1-10. (in Chinese)
- [ 3 ] 李力剑, 徐礼华, 池寅, 等. 含粗骨料超高性能混凝土单轴受压疲劳性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4):381-388.  
LI Lijian, XU Lihua, CHI Yin, et al. Fatigue performance of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate under uniaxial cyclic compression[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):381-388. (in Chinese)
- [ 4 ] 杨立云, 林长宇, 张飞, 等. 玄武岩纤维对活性粉末混凝土受压破坏的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(5):483-489.  
YANG Liyun, LIN Changyu, ZHANG Fei, et al. Effect of basalt fiber on failure of reactive powder concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5):483-489. (in Chinese)
- [ 5 ] 王龙, 池寅, 徐礼华, 等. 混杂纤维超高性能混凝土力学性能

- 尺寸效应[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(8):782-789.
- WANG Long, CHI Yin, XU Lihua, et al. Size effect of mechanical properties of hybrid fiber ultra-high performance concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(8):782-789. (in Chinese)
- [ 6 ] TAO Z, UY B, HAN L H, et al. Analysis and design of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns under axial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(12): 1544-1556.
- [ 7 ] TOKGOZ S, DUNDAR C. Experimental study on steel tubular columns in-filled with plain and steel fiber reinforced concrete[J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(6):414-422.
- [ 8 ] GULER S, YAVUZ D, AYDIN M. Hybrid fiber reinforced concrete-filled square stub columns under axial compression[J]. Engineering Structures, 2019, 198:109504.
- [ 9 ] HUANG D M, LIU Z Z, LU Y Y, et al. Behavior of steel-fiber-reinforced concrete-filled square steel tube stub columns under eccentric compression[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2022, 31(5):e1917.
- [10] 颜燕祥, 徐礼华, 蔡恒, 等. 高强方钢管超高性能混凝土短柱轴压承载力计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 128-137.
- YAN Yanxiang, XU Lihua, CAI Heng, et al. Calculation methods of axial bearing capacity of short square UHPC filled high strength steel tubular columns[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12):128-137. (in Chinese)
- [11] CHEN S M, ZHANG R, JIA L J, et al. Structural behavior of UHPC filled steel tube columns under axial loading [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 130:550-563.
- [12] ZHANG R, CHEN S M, GU P, et al. Structural behavior of UHPC filled steel tubular columns under eccentric loading[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 156:106959.
- [13] FOSTER S J, ATTARD M M. Experimental tests on eccentrically loaded high strength concrete columns[J]. Structural Journal, 1997, 94(3):295-303.
- [14] PARK R. State-of-the-art report on ductility evaluation from laboratory and analytical testing[C]//Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo: International Association for Earthquake Engineering, 1988:605-616.
- [15] HU H S, LIU Y, ZHUO B T, et al. Axial compressive behavior of square CFST columns through direct measurement of load components[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(11):4018201.
- [16] CHEN C C, KO J W, HUANG G L, et al. Local buckling and concrete confinement of concrete-filled box columns under axial load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 78:8-21.