

文章编号:1007-9629(2024)11-0986-10

HDFRC-钢管-混凝土叠合柱的轴压性能

彭彪¹, 胡红松^{1,2,*}, 吉云鹏¹

(1. 华侨大学土木工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 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:提出了一种新型高延性纤维混凝土(HDFRC)-钢管-混凝土(HDCSTC)叠合柱,研究了螺杆列数、螺杆强度和螺母类型对HDCSTC叠合柱轴压性能的影响.结果表明:增加螺杆列数能够有效改善试件的峰值后延性;螺杆强度增加,对1列螺杆试件的延性无显著影响,对2列螺杆试件的延性影响较大;吊环螺母能够与外侧高延性纤维混凝土建立有效拉结,改善试件的峰值后性能;HDCSTC叠合柱具有与钢筋混凝土柱同等优异的轴压性能,且施工方便无技术限制,值得推广使用.

关键词:钢管-混凝土叠合柱;高延性纤维混凝土;轴压性能;延性

中图分类号:TU398.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.11.003

Axial Compression Performance of High Ductility Fiber Reinforced Concrete-Steel Tube-Concrete Composite Columns

PENG Biao¹, HU Hongsong^{1,2,*}, JI Yunpeng¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A new type of high ductility fiber reinforced concrete-steel tube-concrete (HDCSTC) composite column was proposed. The effect of number of screw rows, screw strength and nut type on the axial compression performance was studied. The results show that increasing the number of screw rows can effectively improve the post-peak ductility of the specimen. The increase of screw strength has no significant effect on the ductility of specimens with one row of screws, but has great effect on the ductility of specimens with two rows of screws. The hanging ring nut can establish an effective tensioning knot with the outer high ductility fiber reinforced concrete, and improve the post-peak performance of the specimen. The HDCSTC composite column has the same excellent axial compression performance as the reinforced concrete column, and the construction is convenient and has no technical limitation, which is worthy of popularization.

Key words: steel tube-concrete composite column; high ductility fiber reinforced concrete; axial compression performance; ductility

近年来中国倡导大力发展装配式建筑^[1]. 钢筋混凝土叠合柱(预制混凝土组合管柱)作为装配式建筑发展的产物,采用带空腔的预制构件,具有预制构件重量轻、运输和吊装方便等优点,但由于内部有横穿的箍筋存在,无法在内侧支模板,其预制

构件需要采用离心法成形,制作工艺复杂^[2]. 为改善这个问题,提出了一种高延性纤维混凝土(HDFRC)-钢管-混凝土(HDCSTC)叠合柱,其构造如图1所示.采用对拉螺杆和吊环螺母对钢管和核心混凝土加强约束,同时对外侧HDFRC进行

收稿日期:2023-12-17; 修订日期:2024-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278183);福建省自然科学基金资助项目(2023J02019)

第一作者:彭彪(1997-),男,河南南阳人,华侨大学硕士生.E-mail:pengbiao0410@163.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

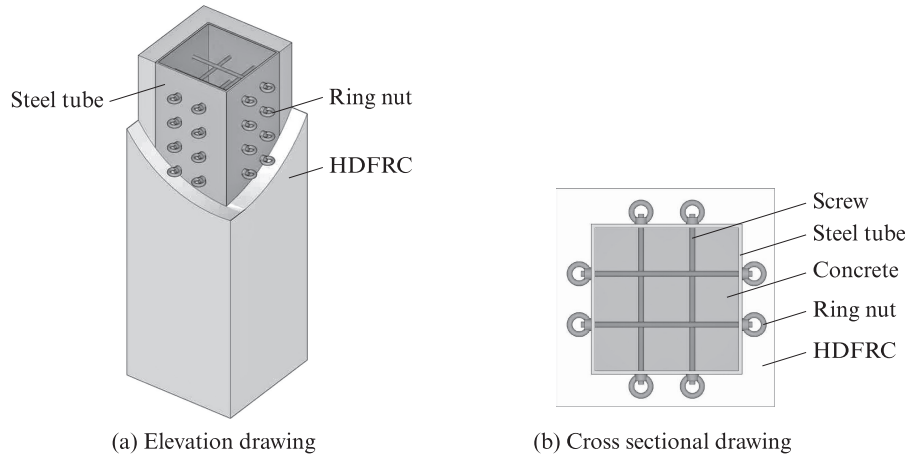


图1 HDCSTC 叠合柱构造

Fig. 1 HDCSTC composite column structure

拉结.钢管可作为浇筑HDFRC的内侧永久模板,其浇筑过程可在工厂进行.由于HDFRC具有较好的受拉、受压延性,不易开裂、剥落,因此钢管外侧无需使用钢筋.外侧HDFRC预制完成后方可运至施工现场安装,再现场浇筑钢管内侧混凝土.

已有钢筋混凝土叠合柱的研究^[3-6],主要是对截面形式、配筋形式、预制管混凝土材料和强度等参数开展轴压和抗震性能研究,没有解决或优化其预制构件施工工艺复杂的问题.Kim等^[4-5]对采用波纹钢板做内模的新型组合管柱进行了抗震性能试验,但其波纹钢板外侧仍需要绑扎钢筋,工作量并没有有效减少.徐梁晋等^[6]对采用高延性水泥基复合材料(ECC)预制管制作的组合桥墩柱开展了抗震性能试验研究,发现采用ECC预制管制作的组合桥墩柱的延性系数更大,因此本文采用HDFRC作为外层混凝土理论上可提升构件的轴压性能.

钢管混凝土叠合柱在解决了钢管混凝土柱耐火性差和耐久性差的同时,还具有优异的受压性能和抗震性能^[7-12].但在其施工过程中,钢管外仍需绑扎钢筋或采用其他形式,与外侧后浇混凝土进行拉结锚固^[8],无法实现装配式应用.

相比钢筋混凝土叠合柱,HDCSTC叠合柱的钢管可作为外侧HDFRC浇筑的内侧模板,预制构件制作工艺简单.相比于钢管混凝土叠合柱,HDCSTC叠合柱可实现装配式,省去了现场绑扎钢筋的麻烦.本文对7个HDCSTC叠合柱试件和1个钢筋混凝土柱开展了轴压试验,主要研究了螺杆列数(n_b)、螺杆强度(f_{yb})和螺母类型(包括吊环螺母(R)和普通螺母(N))等参数对HDCSTC叠合柱轴压受力性能的影响.

1 试验

1.1 试件设计

为研究HDCSTC叠合柱在轴压作用下的受力性能,共开展了包括7个HDCSTC叠合柱(CC系列)和1个钢筋混凝土柱(RC系列)的轴压试验,试件构造如图2(图中上图为A-A截面,下图为B-B截面)所示.试件参数见表1(表中 l 为螺杆或箍筋间距; φ_s 为钢管、螺杆或钢筋占试件的体积分数;HS为高强螺杆;NS为普通螺杆).CC系列试件采用名义厚度3 mm(实测2.8 mm)的2块Q235钢板,通过开孔、折弯后对焊制作成方形截面钢管,钢管内浇筑普通混凝土,外侧HDFRC厚度为50 mm.试件RC-50,其纵筋和箍筋分别采用直径为16、8 mm的HRB400级螺纹钢,纵筋实际配筋面积为2 413.2 mm²,箍筋布置方式为复合箍,竖向间距50 mm,体积配箍率为0.21.

1.2 试件制作

HDCSTC叠合柱试件的制作过程为:首先在钢结构加工厂进行钢管加工,之后安装固定对拉螺杆,接着将钢管定位在外模板中心位置,随后浇筑外侧HDFRC,养护7 d后浇筑核心混凝土.

1.3 材料性能

HDCSTC叠合柱试件加载前,测得其标准棱柱体轴心抗压强度 f_c 为63.7 MPa.HDFRC的配合比如表2所示.采用的水泥牌号为P·O 42.5R,粉煤灰为F类I级粉煤灰;钢纤维和超高分子量聚乙烯纤维(PE纤维)的主要性能指标列于表3.参考文献^[13-16],对HDFRC进行抗拉和抗压材性试验^[13-16],得到其应力-应变(σ - ϵ)曲线和破坏形态,结果见图3、4.由图3、4可见,HDFRC的抗拉强度为5.5 MPa,轴心抗压强度为60.6 MPa.图5为钢材的应力-应变关系曲线,其性能见表4.普通螺杆的应力-应变曲线无明显屈

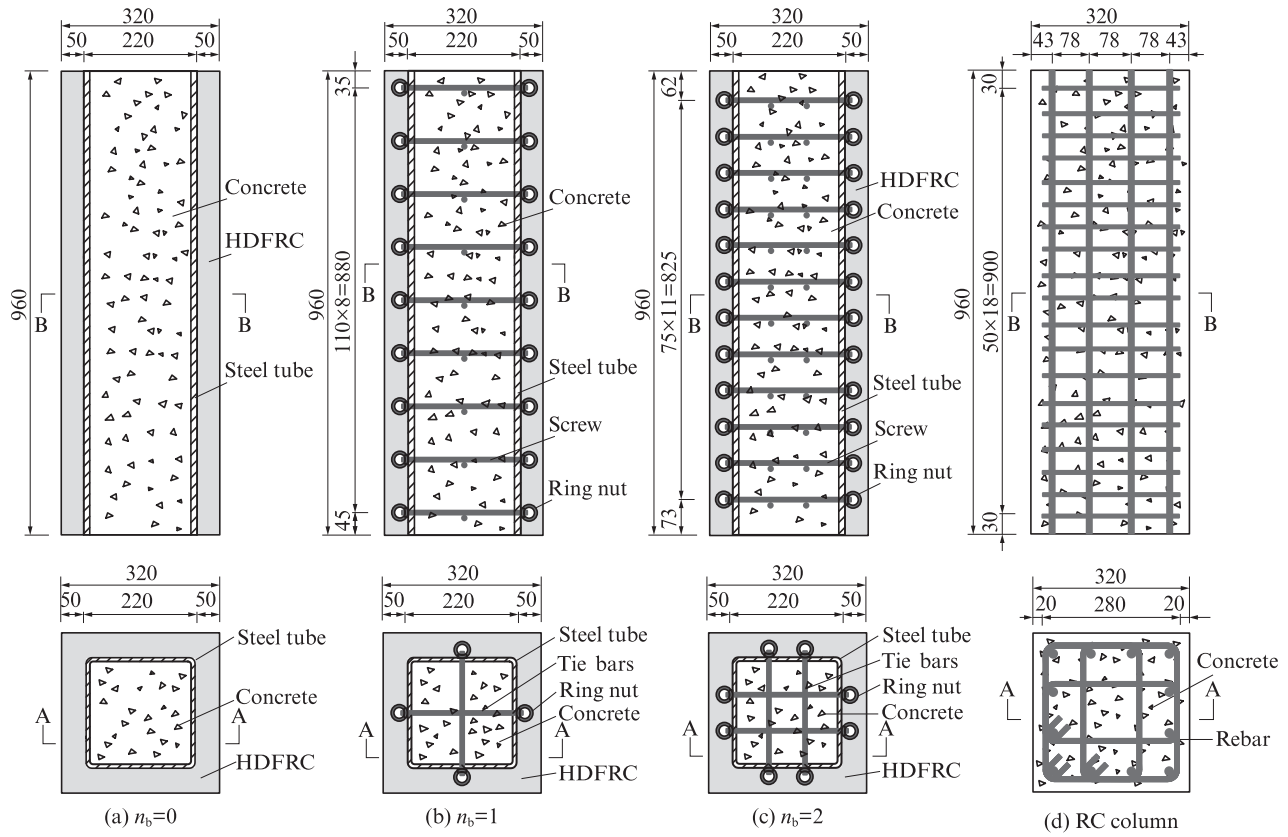


图2 试件构造

Fig. 2 Details of specimens(size: mm)

表1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

Specimen No.	n_b	f_{yb}/MPa	Nut type	Screw type	l/mm	$\varphi_s/\%$
CC-0	0					2.38
CC-RNS1	1	450	R	NS	110	2.41
CC-RNS2	2	450	R	NS	75	2.47
CC-NNS1	1	450	N	NS	110	2.41
CC-NNS2	2	450	N	NS	75	2.47
CC-RHS1	1	752	R	HS	110	2.41
CC-RHS2	2	752	R	HS	75	2.47
RC-50					50	5.07

表2 高延性纤维混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of HDFRC

Unit: kg/m^3

Water	Cement	Fly ash	Silica flour	Quartz sand	Superplasticizer	Steel fiber	PE fiber
285.000	285.000	741.000	114.000	608.300	3.648	157.000	9.700

表3 纤维性能指标

Table 3 Performance indexes of fibers

Fiber type	Length/mm	Diameter/mm	Density/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Tensile strength/GPa	Elastic modulus/GPa
PE fiber	18	0.017-0.019	970	2.900	114
Steel fiber	13	0.220	7.850	2.000	

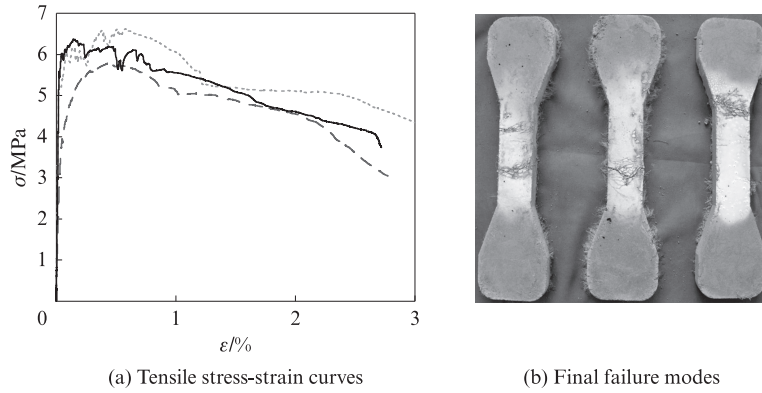


图 3 HDFRC 受拉应力-应变曲线和破坏形态

Fig. 3 Stress-strain curves and final failure modes of HDFRC under tensile load

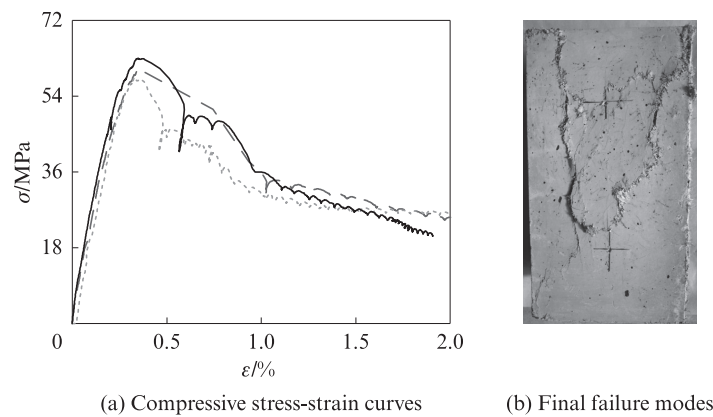


图 4 HDFRC 受压应力-应变曲线及破坏形态

Fig. 4 Stress-strain curves and final failure modes of HDFRC under compression load

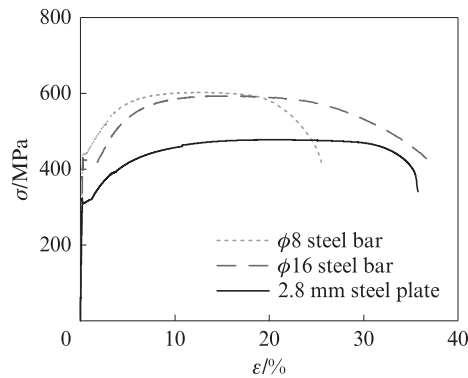


图 5 钢材的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of the steel

表 4 钢材的性能

Table 4 Mechanical properties of the steel

Steel type	Elastic modulus/ GPa	Yield strength/ MPa	Tensile strength/ MPa	Elongation/ %
2.8 mm steel plate	208	309	478	35.3
φ8 steel bar	194	439	602	25.8
φ16 steel bar	192	418	593	36.2
Normal screw	131	446	450	29.1
High strength screw	115	580	752	33.0

服平台,因此屈服强度取 0.2% 残余应变对应的应力.

1.4 加载和量测方案

试件的测点布置如图 6 所示.为防止试件端部出现应力集中而先于中部截面破坏,在试件两端 100 mm 范围内使用钢板箍予以约束.试件的测量段

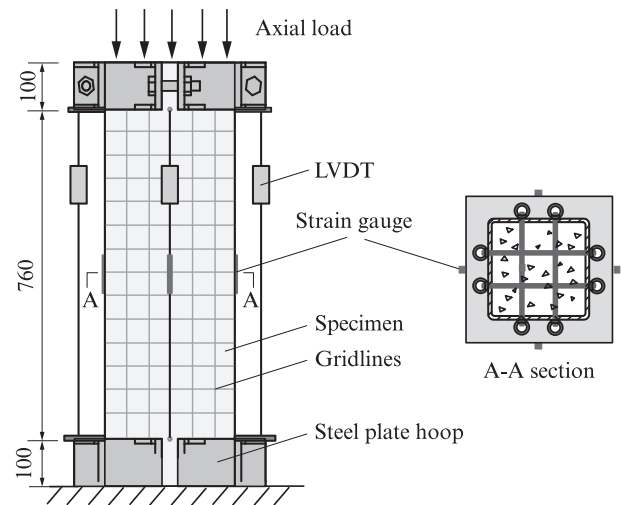


图 6 加载装置和测点布置

Fig. 6 Loading device and layout of monitoring points(size:mm)

为试件中部的760 mm范围内,在测量段的4个侧面均匀布置4个位移计(LVDT)和4个混凝土应变片,用来量测各面加载过程中的轴向位移和混凝土的应变.为量测螺杆的伸长应变,在试件高度的1/4、1/2和3/4截面的螺杆上布置了应变片.试件加载时首先采用力控,以500 kN/min的速率加载至1 000 kN,再切换至位移控制继续加载,加载速率为1.5 mm/min,当试件承载力下降至极限承载力的30%或测量段平均轴向应变达到4.0%时,停止加载试验.

2 结果与讨论

2.1 轴向荷载-应变曲线

图7为试件的轴向荷载-应变($N-\epsilon$)曲线,其主要试验结果见表5.结合图7和表5可知,HDCSTC叠合柱试件的 $N-\epsilon$ 曲线主要由上升段、下降段和平台段

3个部分组成.在加载初期即弹性阶段,不同HDCSTC叠合柱试件的 $N-\epsilon$ 曲线上上升段基本重合,试件的轴向荷载随应变的增大而线性增大,在试件表面未观察到明显的变化.当荷载达到峰值荷载的75%~85%时,试件开始进入弹塑性阶段,表现为 $N-\epsilon$ 曲线的上升速率逐渐减慢.当荷载达到峰值荷载附近时,HDCSTC叠合柱外层HDFRC有初始裂缝产生.随后, $N-\epsilon$ 曲线进入到下降段.当轴向应变达到2.0%左右时,多数HDCSTC叠合柱试件的 $N-\epsilon$ 曲线已由下降段过渡到平台段,随着轴向应变的继续增加,试件的轴向荷载无明显变化.对于试件RC-50,在达到峰值荷载附近时,混凝土保护层开始出现大量竖向裂缝且伴随有混凝土的压溃声,随后 $N-\epsilon$ 曲线进入到下降段,轴向荷载出现小范围突降现象,随着轴向应变的继续增加,其轴向荷载持续降低.

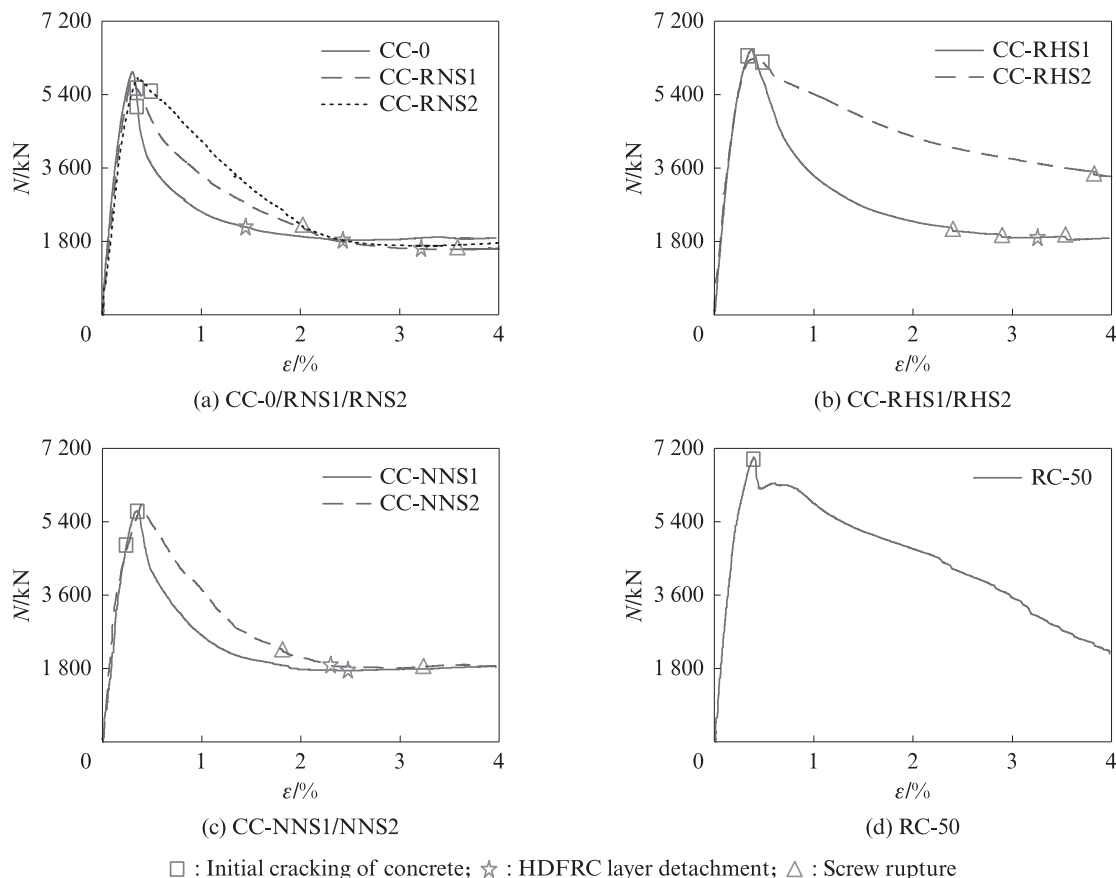


图7 试件的轴向荷载-应变曲线

Fig. 7 Axial load-strain curves of specimens

2.2 破坏形态

图8展示了试件的最终破坏形态.由图8可见:(1)HDFRC层在破坏时多发生斜向或竖向劈裂破坏,裂缝发展规律符合混凝土轴压破坏的特征,且HDFRC层受损最严重的区域与钢管屈曲的位置基本重合.(2)使用吊环螺母的试件破坏后其HDFRC

层的裂缝更加密集且分布范围更广,而使用普通螺母或未使用螺杆加固的试件,HDFRC层因主裂缝贯穿破坏,裂缝数量较少且多分布在主裂缝周围.(3)RC-50柱子侧向鼓胀愈加明显,试验结束后,混凝土保护层剥离开裂,箍筋直线段受弯成圆弧状,未发现箍筋断裂,纵筋均呈现不同程度的屈服.

表5 试件的主要试验结果
Table 5 Main test results of specimens

Specimen No.	N_m/kN	$\epsilon_m/\%$	$\epsilon_c/\%$	$\epsilon_e/\%$	$\epsilon_b/\%$	N_0/kN	S_1	I_5	I_{10}
CC-0	6 023.6	0.32	0.32	3.11		6 008.0	1.00	3.72	5.81
CC-RNS1	5 902.8	0.30	0.33	2.38	2.02	6 008.0	0.98	4.35	7.24
CC-RHS1	6 485.7	0.38	0.31	3.27	2.40	6 008.0	1.08	4.18	6.55
CC-RNS2	5 876.9	0.33	0.47	2.67	2.91	6 008.0	0.98	4.56	7.94
CC-RHS2	6 266.2	0.42	0.50		3.62	6 008.0	1.04	4.77	8.95
CC-NNS1	5 669.5	0.33	0.38	1.71	3.26	6 008.0	0.94	4.05	6.29
CC-NNS2	5 813.7	0.39	0.25	1.80	1.85	6 008.0	0.97	4.24	6.92
RC-50	7 025.8	0.39	0.40					4.49	8.37

Note: ϵ_m is the average axial strain corresponding to the peak axial load; ϵ_c is the average axial strain corresponding to the initial crushing of concrete; ϵ_e is the average axial strain corresponding to the HDFRC layer is peeled off; ϵ_b is the average axial strain corresponding to the bolt is broken.

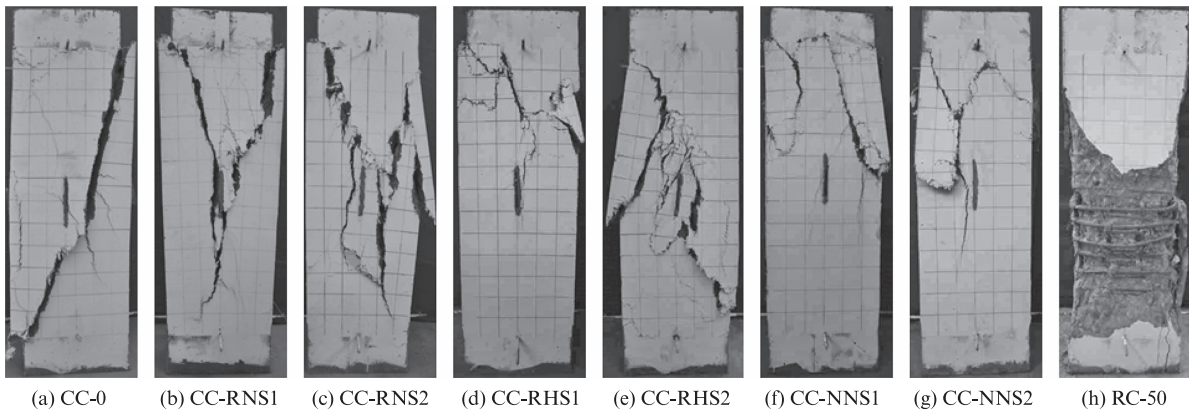


图8 试件的最终破坏形态

Fig. 8 Final failure modes of specimens

2.3 轴压承载力

为评价 HDFRC 层、钢管和核心区混凝土之间的相互作用,将试件的峰值轴向荷载 N_m 和名义轴向荷载 N_0 之间的比值定义为强度指标 S_1 . 此外,考虑到混凝土尺寸效应的影响,在计算核心混凝土和 HDFRC 层对试件峰值轴向荷载的贡献时,参考 BS EN 1994-1-1: 2004 *Eurocode: Design of Composite Steel and Concrete Structure Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, 取 0.85 的强度折减系数,具体计算式如下:

$$S_1 = N_m / N_0 \quad (1)$$

$$N_0 = 0.85f_c A_c + f_y A_s + 0.85f_{HC} A_{HC} \quad (2)$$

式中: f_c 、 f_{HC} 分别为核心区混凝土和 HDFRC 的核心抗压强度, f_y 为钢管的屈服强度; A_c 、 A_s 、 A_{HC} 分别为核心区混凝土、钢管和 HDFRC 层的横截面积.

表 5 给出了试件的强度指标值. 由表 5 可见, HDCSTC 叠合柱试件的 S_1 值介于 0.94~1.08, 表明式 (2) 能够用来预测 HDCSTC 叠合柱的轴压承载力.

2.4 延性分析

构件的延性通常指构件达到峰值承载力后的变形能力, 1997 年 Foster 等^[17] 基于能量概念提出了新的延性评价指标 I_5 和 I_{10} . 表 5 还给出了试件的延性指标值 I_5 和 I_{10} . 由表 5 可知: 对于 HDCSTC 叠合柱试件, 使用吊环螺母比使用普通螺母延性指标值大; 增加螺杆列数可以极大地改善试件延性; 螺杆强度的增加对于 1 列螺杆试件的延性几乎不起作用, 但对于 2 列螺杆试件的延性有较大的提升作用; 试件 CC-RHS2 的延性指标 I_5 和 I_{10} 均大于试件 RC-50, 表现出良好的轴向变形能力, 同时也表明 HDCSTC 叠合柱能充分发挥钢材和混凝土的优点, 其轴压性能优于具有较高配箍特征值的钢筋混凝土柱.

2.5 抗压刚度

规范 GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》取钢管和混凝土的轴压刚度之和作为钢管混凝土柱的组合轴向刚度, 依据叠加原理, 取钢管、内填混凝土和 HDFRC 三部分的轴压刚度之和, 作为 HDCSTC 叠合柱的组合轴压刚度 (K), 其计算式如下:

$$K = E_c A_c + E_s A_s + E_{HC} A_{HC} \quad (3)$$

式中： E_c 、 E_s 、 E_{HC} 分别为核心混凝土、钢管和HDFRC的弹性模量。

试验测得混凝土的立方体抗压强度为70.4 MPa,根据GB/T 50010—2010《混凝土结构设计规范》,C60混凝土的 E_c 值为 3.6×10^4 N/mm², E_s 和 E_{HC} 值取材性试验实测值,试件的轴压刚度如表6所示.由于混凝土的弹性模量常取30%轴心抗压强度下的割线模量,因此在 N - ϵ 曲线中取30%峰值荷

载下的割线模量作为试件的弹性模量,计算实际初始轴压刚度 K_1 与计算初始轴压刚度 K_c 及其比值,结果如表6所示.表6中, N_m 为试件的峰值荷载; $N_{30\%}$ 为30%的峰值荷载; ϵ_{av} 为30%的峰值荷载对应的应变。

由表6可知, K_1/K_c 介于0.82~0.94之间,因此实际轴压刚度略小于理论轴压刚度,这可能与HDFRC的弹性模量略小,钢管内外混凝土存在变形差有关,导致实际的轴压刚度略小。

表6 试件的轴压刚度
Table 6 Axial compressive stiffness of specimens

Specimen No.	$E_c/(N \cdot mm^{-2})$	$E_s/(N \cdot mm^{-2})$	$E_{HC}/(N \cdot mm^{-2})$	N_m/kN	$N_{30\%}/kN$	$\epsilon_{av}/\%$	$K_1 \times 10^9/N$	$K_c \times 10^9/N$	K_1/K_c
CC-0	36 000	208 000	18 160	6 023.6	1 807.1	0.067	2.69	3.10	0.87
CC-RNS1	36 000	208 000	18 160	5 902.8	1 770.8	0.067	2.65	3.10	0.85
CC-RHS1	36 000	208 000	18 160	6 485.7	1 945.7	0.073	2.68	3.10	0.86
CC-RNS2	36 000	208 000	18 160	5 876.9	1 763.0	0.069	2.55	3.10	0.82
CC-RHS2	36 000	208 000	18 160	6 266.2	1 880.0	0.064	2.92	3.10	0.94
CC-NNS1	36 000	208 000	18 160	5 669.5	1 700.9	0.062	2.73	3.10	0.88
CC-NNS2	36 000	208 000	18 160	5 813.7	1 744.1	0.061	2.87	3.10	0.93

2.6 影响参数分析

2.6.1 螺杆列数的影响

螺杆列数(n_b)对试件的轴向荷载-应变曲线的影响如图9所示.由前文可知,在达到峰值轴向荷载时,

2列螺杆试件的峰值应变比对应1列螺杆试件略大.由图9可见,对于峰值后轴向荷载,当 $\epsilon = 1.0\%$ 时,相较于试件CC-0,试件CC-RNS1和CC-RNS2的轴向荷载分别提升了15%和29%,试件CC-RHS1和

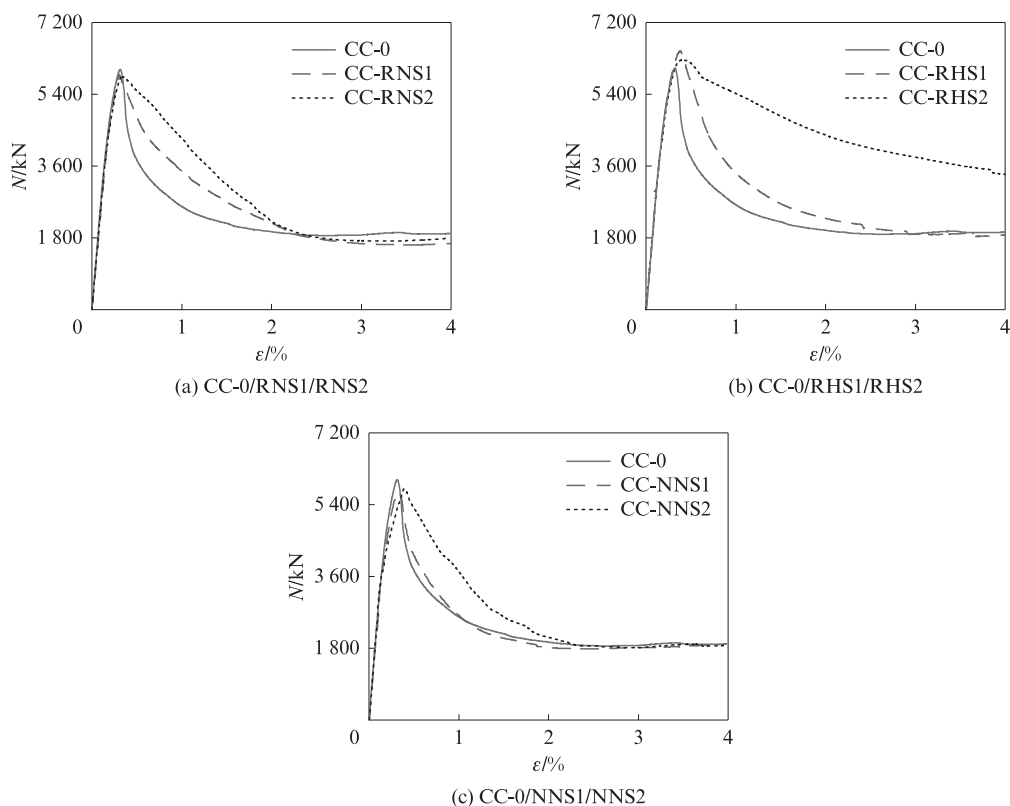


图9 螺杆列数对轴向荷载-应变曲线的影响

Fig. 9 Influence of the number of screw rows on axial load-strain curve

CC-RHS2的荷载分别提升了14%和47%。由于使用螺杆提高了钢管对核心区混凝土的约束作用,因此,螺杆列数增加可有效减缓峰值后荷载的下降速率,改善试件延性。当 $\epsilon \geq 2.5\%$ 后,除试件CC-RHS2外,其余试件的 $N-\epsilon$ 曲线基本重合,表明此时由于螺杆失效和钢管局部屈曲加重,螺杆列数对HDCSTC叠合柱轴压性能的影响基本消失。

2.6.2 螺杆强度的影响

螺杆强度对试件轴向荷载-应变曲线的影响如

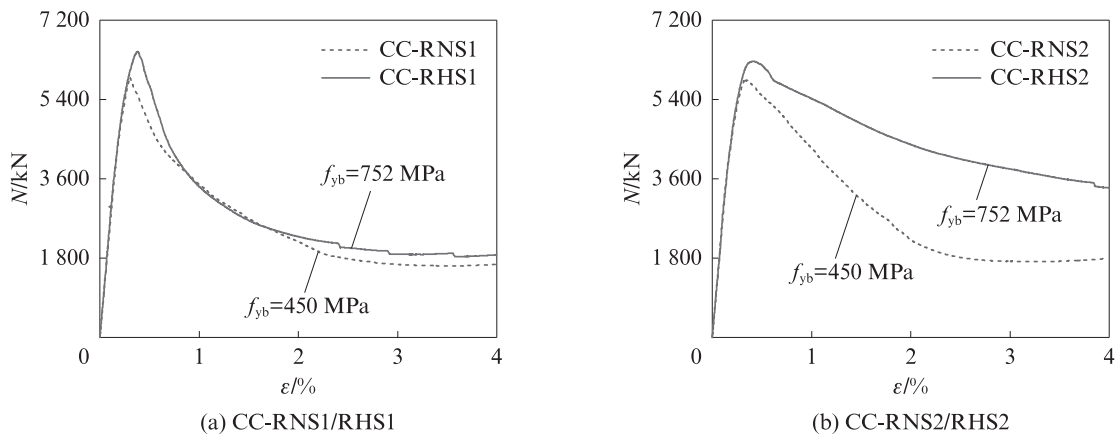


图10 螺杆强度对试件轴向荷载-应变曲线的影响
Fig. 10 Influence of screw strength on axial load-strain curve of specimens

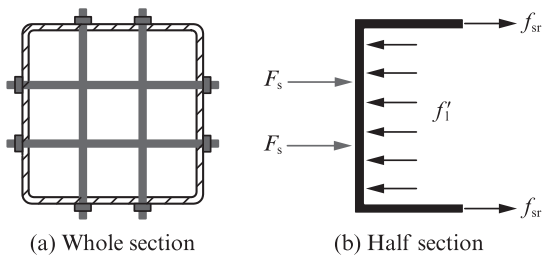


图11 钢管截面的侧向受力图
Fig. 11 Lateral stress diagram of steel tube section

图12为核心混凝土有效约束区。与箍筋约束混凝土的受力机理相似,假定螺杆对混凝土有效约束面的边界线为抛物线,抛物线与钢管的夹角为 θ 。由图12可见,螺杆的约束范围是有限的:在螺杆附近区域,有效约束区面积更大,钢管和混凝土受到的约束较强;在相邻的两排螺杆之间的区域,有效约束区面积相对较小,钢管和混凝土受到的约束较弱。试件的承载力是由最薄弱截面的承载力决定的,当螺杆纵向间距较大(使用1列螺杆)时,提高螺杆强度,对有效约束区面积较小的截面,混凝土受到的约束作用不一定会显著增强,从而导致使用普通螺杆和高强螺杆的1列螺杆试件的 $N-\epsilon$ 曲线无太大差异。而对2列螺杆试件,螺杆的竖向间距为75 mm,螺杆间距减小,增加了截面有效约束区面积,此时提高螺杆强

度,混凝土受到的侧向约束力更大,试件的承载力和延性会有所提高^[18]。

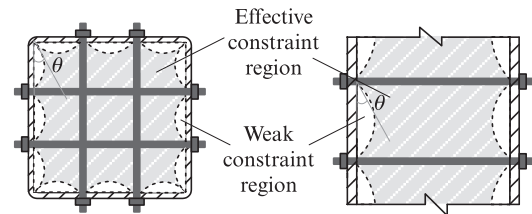


图12 核心混凝土有效约束区
Fig. 12 Core concrete effective confinement zone

度,混凝土受到的约束增强,高强螺杆可以充分发挥其强度高的优点,有效约束混凝土的横向变形。因此,使用高强螺杆的试件承载力下降更为缓慢,而且残余承载力也更高。当 $\epsilon = 2.0\%$ 时,试件CC-RHS2比CC-RNS2的残余承载力高32%。

2.6.3 螺母类型的影响

螺母类型对试件轴向荷载-应变曲线的影响如图13所示。由前文可知,安装吊环螺母的试件 N_m 、 I_5 和 I_{10} 值均高于安装普通螺母的试件,因此建议在HDCSTC叠合柱中使用吊环螺母固定螺杆。由图13可见:螺母类型对试件 $N-\epsilon$ 曲线的影响主要体现在峰值承载力之后的下降段,使用吊环螺母可有效延缓外侧HDFRC承载力丧失的作用;当应变达到2.5%以后,外侧HDFRC向外变形过大基本已经丧失承载力,此时螺母类型对HDCSTC叠合柱轴压

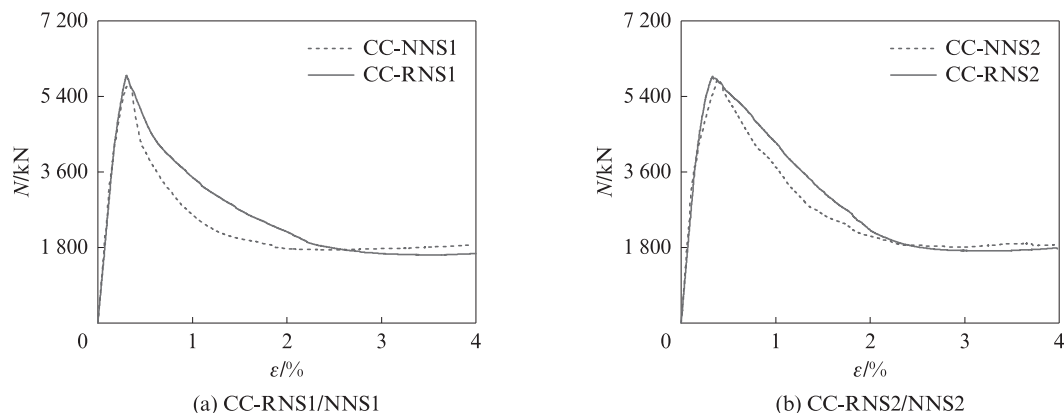


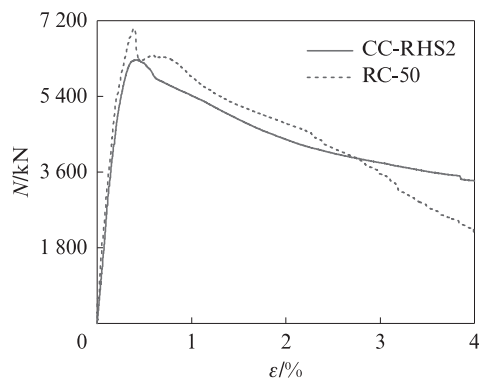
图13 螺母类型对试件轴向荷载-应变曲线的影响

Fig. 13 Influence of nut type on axial load-strain curves of specimens

性能的影响基本消失,试件的 $N-\epsilon$ 曲线在平台段基本重合.

2.6.4 两种类型试件的对比

在CC系列试件中,试件CC-RHS2的性能最为优越.对普通钢筋混凝土柱而言,试件RC-50的体积配箍率处于较高的水平,同时HDCSTC叠合柱试件中钢管截面积为 $2\,432.6\text{ mm}^2$,与试件RC-50纵筋实际配筋面积 $2\,413.2\text{ mm}^2$ 基本相等,因此将两者进行对比能清楚了解HDCSTC叠合柱的性能.图14为试件RC-50和CC-RHS2的 $N-\epsilon$ 对比曲线.由图14可以看出,试件RC-50在达到峰值承载力后存在承载力突降现象.结合表5可知,试件CC-RHS2延性系数与试件RC-50接近,HDCSTC叠合柱拥有与钢筋混凝土柱同等优异的轴压性能.

图14 试件RC-50和CC-RHS2的 $N-\epsilon$ 对比曲线Fig. 14 Comparison of $N-\epsilon$ curves for specimen RC-50 and CC-RHS2

从施工成本考虑,与钢筋混凝土叠合柱相比,HDCSTC叠合柱的预制构件制作时无需架设内侧模板,且无技术门槛,更不需要采用离心法等特殊技术.同时,由于HDFRC的使用,钢管外侧无需绑扎钢筋,使HDCSTC叠合柱的施工成本与传统叠合柱相比并不会太大差异.HDCSTC叠合柱拥有与钢筋

混凝土柱同等优异的轴压性能,且施工方便无技术限制,值得推广使用.

3 结论

(1)对于HDCSTC叠合柱,由于HDFRC层开裂、钢管屈服和核心混凝土被压溃,试件承受的轴向荷载在达到峰值荷载后即开始下降,且随着应变增大,其下降速率逐步减小;当应变超过2.5%后,大部分试件承受的轴向荷载基本保持恒定,残余承载力主要由核心钢管混凝土承担.

(2)HDFRC层在破坏时多发生斜向或竖向劈裂破坏,裂缝发展规律符合混凝土轴压破坏的特征,且HDFRC层受损最严重的区域与钢管屈曲的位置基本重合.

(3)对于HDCSTC叠合柱,螺杆列数增加能有效改善试件的延性.螺杆强度增加,对1列螺杆试件的延性无显著影响,对2列螺杆试件的极限承载力和延性影响较大.与采用普通螺母的试件相比,采用吊环螺母的试件裂缝数量更多、更密集.使用吊环螺母可有效减缓HDCSTC叠合柱的承载力退化,改善试件的延性.

(4)HDCSTC叠合柱拥有与钢筋混凝土柱同等优异的轴压性能,且施工方便无技术限制,值得推广使用.

参考文献:

- [1] 陈骏, 彭畅, 李超, 等. 装配式建筑发展概况及评价标准综述[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊2): 1503-1508.
CHEN Jun, PENG Chang, LI Chao, et al. A review of development situation and assessment standard for prefabricated buildings[J]. Building Structure, 2022, 52(Suppl 2): 1503-1508. (in Chinese)
- [2] 张锡治, 章少华, 牛四欣. 装配式建筑中预制混凝土管柱的研究与展望[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 79-86.

- ZHANG Xizhi, ZHANG Shaohua, NIU Sixin. Research and prospect of precast concrete tubular column in prefabricated buildings [J]. *Building Structure*, 2018, 48(7):79-86. (in Chinese)
- [3] 郭纯, 凌国飞. 一种新型预制管混凝土柱的轴压性能研究[J]. *工业建筑*, 2008, 38(1):88-91.
- GUO Chun, LING Guofei. Experiment on a new axially loaded column of concrete filled prefabricated tubular members [J]. *Industrial Construction*, 2008, 38(1):88-91. (in Chinese)
- [4] KIM C S, LIM W Y, PARK H G, et al. Cyclic loading test for cast-in-place concrete-filled hollow precast concrete columns[J]. *ACI Structural Journal*, 2016, 113(2):205-215.
- [5] KIM C S, LEE H J, PARK C K, et al. Cyclic loading test for concrete-filled hollow precast concrete columns produced by using a new fabrication method[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(4):04016212.
- [6] 徐梁晋, 王义博, 张志刚, 等. 预制ECC管混凝土桥墩拟静力试验研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(5):229-238.
- XU Liangjin, WANG Yibo, ZHANG Zhigang, et al. Quasi-static test study on precast ECC concrete-filled tubular bridge piers [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(5):229-238. (in Chinese)
- [7] 张斌, 胡红松, 杨朱金. 方钢管超高强钢纤维混凝土柱轴压性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(5):547-554.
- ZHANG Bin, HU Hongsong, YANG Zhujin. Axial compressive behavior of ultra-high-strength steel fiber-reinforced concrete-filled square steel columns [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(5):547-554. (in Chinese)
- [8] PARK H G, LEE H J, CHOI I R, et al. Concrete-filled steel tube columns encased with thin precast concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(12):04015056.
- [9] HAN L H, AN Y F. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 93:62-76.
- [10] JI X D, KANG H D, CHEN X C, et al. Seismic behavior and strength capacity of steel tube-reinforced concrete composite columns[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014, 43(4):487-505.
- [11] CAI J M, PAN J L, LI X P. Behavior of ECC-encased CFST columns under axial compression[J]. *Engineering Structures*, 2018, 171:1-9.
- [12] WU Q X, SHE Z M, YUAN H H. Experimental study of UHPC-encased CFST stub columns under axial compression[J]. *Structures*, 2021, 32:433-447.
- [13] 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)
- [14] 王振波, 左建平, 张君, 等. 混杂纤维延性水泥基材料单轴受压力学特性[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(4):639-644.
- WANG Zhenbo, ZUO Jianping, ZHANG Jun, et al. Mechanical properties of hybrid fiber reinforced engineered cementitious composites under uniaxial compression[J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(4):639-644. (in Chinese)
- [15] 杨翌, 钟奕岚, 杨智, 等. SMA/PVA混杂纤维增强水泥基复合材料拉伸性能[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(5):555-562.
- YANG Zhao, ZHONG Yilan, YANG Zhi, et al. Tensile properties of SMA/PVA hybrid fiber reinforced cementitious composites[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(5):555-562. (in Chinese)
- [16] 崔凯, 徐礼华, 池寅. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土等幅受压疲劳变形[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(7):755-761.
- CUI Kai, XU Lihua, CHI Yin. Fatigue deformation of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete under constant-amplitude cyclic compression[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(7):755-761. (in Chinese)
- [17] FOSTER S J, ATTARD M M. Experimental tests on eccentrically loaded high strength concrete columns[J]. *Structural Journal*, 1997, 94(3):295-303.
- [18] 蔡健, 龙跃凌. 带约束拉杆方形、矩形钢管混凝土短柱的轴压承载力[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(1):7-14.
- CAI Jian, LONG Yueling. Axial bearing capacity of square and rectangular CFT stub columns with binding bars[J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(1):7-14. (in Chinese)