

文章编号:1007-9629(2026)01-0087-10

钢-FRP 复合筋增强钢管超高性能混凝土组合柱 抗震性能

葛文杰^{1,*}, 张志文¹, ASHOUR Ashraf², 曹大富¹, 李胜才¹

(1. 扬州大学 土木与交通学院, 江苏 扬州 225127;

2. 布拉德福德大学 工程与数字技术学院, 西约克郡 布拉德福德 BD71DP)

摘要: 针对钢管混凝土柱在地震作用下刚度退化快且残余变形大的问题, 提出了一种配置钢-FRP 复合筋(SFCB)的新型钢管超高性能混凝土(UHPCFST)组合柱, 并通过低周往复加载试验对其抗震性能进行研究。结果表明: 与配置钢筋或玄武岩纤维筋的 UHPCFST 组合柱相比, 配置 SFCB 的 UHPCFST 组合柱的承载力、变形能力、耗能和残余变形介于二者之间; 提高 SFCB 配筋率或者用超高性能混凝土(UHPC)代替普通混凝土填充钢管均可提升组合柱的抗震性能; 增加轴压比可以提高组合柱的承载力、初始刚度和耗能, 但加快了刚度退化速率并降低了变形能力; 随着 SFCB 配筋率由 3% 提高至 4%, 组合柱综合性能系数提升了 21%, 而材料成本仅上升了 5%。因此, 在提升组合柱抗震性能方面, 提高 SFCB 配筋率是最具经济效益的选择。

关键词: 超高性能混凝土; 钢-FRP 复合筋; 组合柱; 抗震性能; 拟静力试验

中图分类号: TU398⁺.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2026.01.009

Seismic Performance of Ultra-high Performance Concrete-Filled Steel Tube Composite Columns Reinforced with Steel-FRP Composite Bars

GE Wenjie^{1,*}, ZHANG Zhiwen¹, ASHOUR Ashraf², CAO Dafu¹, LI Shengcai¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2. Faculty of Engineering & Digital Technologies, University of Bradford, Bradford, BD71DP, UK)

Abstract: To address the rapid stiffness degradation and significant residual deformation of concrete-filled steel tube columns under seismic loading, a novel composite column, the ultra-high performance concrete-filled steel tube (UHPCFST) reinforced with steel-FRP composite bars (SFCB), was proposed. A series of cyclic loading tests was conducted to evaluate its seismic performance. The results indicate that, compared to UHPCFST columns reinforced with either steel bars or basalt fiber-reinforced composite bar, those columns reinforced with SFCB exhibit intermediate levels of load-bearing capacity, ductility, energy dissipation, and residual deformation. Both methods of increasing the SFCB reinforcement ratio and replacing conventional concrete with ultra-high performance concrete (UHPC) in the steel tube can enhance the seismic performance of the composite column. Moreover, a high axial compression ratio benefits the load-bearing capacity, initial stiffness, and energy dissipations, but accelerates stiffness degradation and reduces ductility. When the SFCB reinforcement ratio increases from 3% to 4%, the comprehensive seismic performance of the composite column improves by 21%, while material costs rise by only 5%. Therefore, increasing the SFCB reinforcement ratio is the most cost-effective approach to enhancing the seismic performance of composite columns.

收稿日期: 2025-02-28; 修订日期: 2025-07-02

基金项目: 科技部高端外国专家引进计划项目(G2022014054L); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20201436); 江苏省住建厅建设系统科技项目(2023ZD104, 2023ZD105); 扬州市市校合作专项(YZ2022194); 扬州市住建系统科技项目(202507, 2025ZD03)

第一作者(通讯作者): 葛文杰(1986—), 男, 江苏淮安人, 扬州大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: gewj@yzu.edu.cn

Key words: ultra-high performance concrete; steel-FRP composite bar; composite column; seismic performance; pseudo-static test

钢筋混凝土(RC)结构在钢筋屈服后,其损伤扩展迅速且难以控制^[1]。为解决RC结构残余变形大和钢筋锈蚀等问题,纤维增强复合材料(FRP)筋被用来替代钢筋。然而,FRP筋弹性模量较低,导致FRP筋混凝土结构存在较高脆性破坏风险。因此,设计时通常将FRP筋混凝土结构设计为超筋形式,通过利用受压区混凝土的塑性变形提升延性^[2]。但这种方法无法充分发挥FRP筋的拉伸性能。此外,未受环向约束的RC结构压缩延性较差,限制了强度发挥,难以满足现代结构的高抗震需求。

通过将混凝土填充至钢管中形成钢管混凝土(CFST)结构,能够有效提升混凝土在三向受力状态下的延性、韧性和强度^[3]。然而,随着核心混凝土强度的提高,构件的延性逐渐降低,刚度退化速率亦加快^[4]。研究表明,在钢管内部增设钢骨架可显著改善构件的延性性能,但当钢骨架屈服后,其对结构性能退化速率的延缓效果仍显不足^[5-6]。因此,优化核心区混凝土和内置骨架的材料性能成为解决上述问题的关键所在。

为解决传统CFST结构在地震作用下刚度退化快且残余变形大的问题,新型高性能材料逐渐被应用于工程结构中。超高性能混凝土(UHPC)具备卓越的力学性能、耐久性和抗渗性,可有效防止腐蚀介质的侵害^[7]。研究表明,钢管超高性能混凝土(UHPCFST)组合柱相较于普通混凝土(NC)柱和钢管普通混凝土(NCFST)组合柱,在承载力、变形能力和耗能方面表现更为出色,抗震性能更优越^[8]。钢-FRP复合筋(SFCB)采用钢筋为内芯并外包FRP制成^[9],兼具钢筋的高弹模和FRP筋的高抗拉强度,整体符合材料复合法则。SFCB的初始弹性模量小于钢筋,但屈服后弹性模量和极限抗拉强度远大于钢筋。研究表明,SFCB增强混凝土结构在SFCB屈服后仍具有不断提高的承载力,且实现了较小的残余变形和较高的震后可修复性^[10]。基于上述研究结论,本文提出了一种配置SFCB的UHPCFST组合柱。截至目前,关于不同筋材骨架增强UHPCFST组合柱抗震性能的研究,鲜有学者进行系统性报道。本文选取具备可设计二次刚度特性的SFCB增强UHPCFST结构,旨在进一步提升钢管混凝土结构的抗震性能。

本文通过低周往复加载试验探究了纵筋类型、轴压比、混凝土类型和配筋率对UHPCFST组合柱

抗震性能的影响,研究有望为新型组合柱的结构设计提供参考。

1 试验方案

1.1 试件设计

组合柱试件尺寸及构造情况见图1。以直径300 mm、墩柱高度4 800 mm的桥墩作为原型柱,以柱高一半位置作为反弯点,并选择反弯点以下的悬壁柱作为研究单元。组合柱直径为180 mm,净高度为1 500 mm,钢管管壁厚度为5 mm,缩尺比例为1:1.67。柱截面纵筋为6 ϕ 12 mm,箍筋为 ϕ 6@100 mm。柱顶加载梁与柱底基础梁均由普通混凝土浇筑制成,且对截面进行加密配筋。试验设计了包含不同轴压比(0.15和0.25)、混凝土类型(NC和UHPC)以及SFCB配筋率(3%和4%)的组合柱。此外,为了研究纵筋二次刚度比对性能的影响,进一步设计了3组试件。每组试件均采用了等直径的钢筋、玄武岩纤维复合筋(BFCB)筋以及外包BFCB的SFCB。这3个试件仅在筋材直径上存在差异,其余构造参数完全一致,且3种筋材所用钢筋与BFCB的力学性能基本相同。

表1列出了所有试件的设计参数,其中筋材直径 ϕ 的上标S、B、H分别表示为SFCB、BFCB和HRB400级钢筋; ρ_s 为柱截面配筋率; n_c 为轴压比,由式(1)计算得到。

$$n_c = \frac{N}{(f_c A_c + f_y A_s)} \quad (1)$$

式中: N 为组合柱顶部所施加的轴压力; f_c 、 f_y 分别为混凝土轴心抗压强度和钢管屈服强度; A_c 、 A_s 分别为混凝土和钢管的截面积。

1.2 材料属性

NC和UHPC的配合比见表2。所有试件均采用自然养护法,浇筑时均预留3个100 mm×100 mm×100 mm的立方体受压试块和3个哑铃形受拉试块,并与试件同条件养护。实测得到的NC和UHPC的立方体抗压强度平均值分别为48.30、102.00 MPa,抗拉强度平均值分别为2.45、7.51 MPa。

图2为筋材实测压、拉应力-应变曲线,详细力学性能见表3。其中,二次刚度为筋材屈服后弹性模量;二次刚度比为筋材屈服后弹性模量与初始弹性模量之比。对Q345钢管取样并进行单轴拉伸试验,实测屈服和极限强度分别为355.00、487.00 MPa,弹性模量为202.00 GPa。

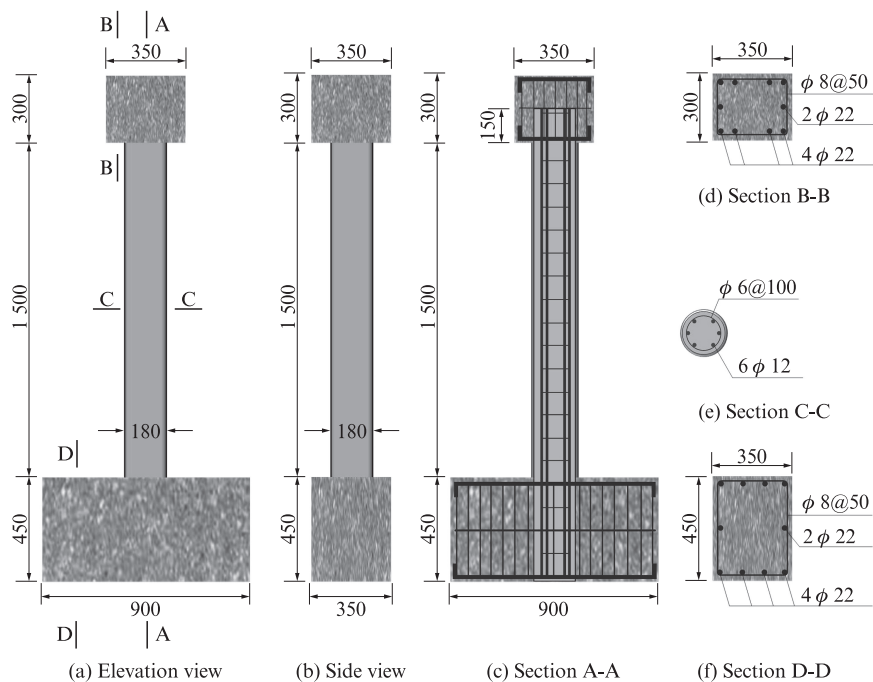


图1 组合柱试件尺寸与构造

Fig. 1 Dimension and configuration of composite column specimen (size: mm)

表1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

No.	Concrete type	Longitudinal bar	$\rho_s / \%$	n_c	Composite type
S1	UHPC	$6\phi^S12$	3	0.15	SFCB-UHPCFST
S2	UHPC	$8\phi^S12$	4	0.15	SFCB-UHPCFST
S3	UHPC	$6\phi^S12$	3	0.25	SFCB-UHPCFST
S4	NC	$6\phi^S12$	3	0.15	SFCB-NCFST
S5	UHPC	$6\phi^B12$	3	0.15	BFCB-UHPCFST
S6	UHPC	$6\phi^H12$	3	0.15	HRB400-UHPCFST

表2 NC与UHPC的配合比

Table 2 Mix proportion of NC and UHPC

Concrete	Water-binder ratio	Mass ratio						Steel fiber volume fraction / %	$w(\text{superplasticizer}) / \%$
		Cement	Sand	Stone	Slag powder	Silica fume	Fly ash		
NC	0.42	1.00	1.64	2.67	0	0	0	0	1.05
UHPC	0.19	0.55	1.20	0	0.10	0.25	0.10	1.0	1.50

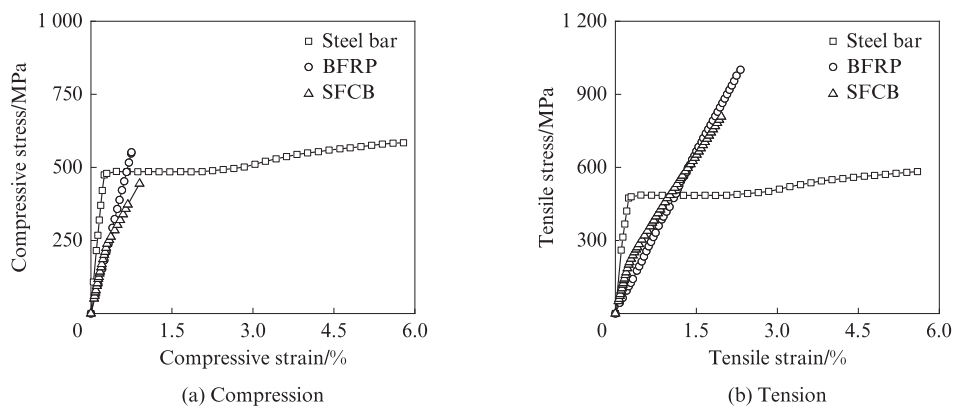


图2 筋材实测压、拉应力-应变曲线

Fig. 2 Measured compressive and tensile stress-strain curves of reinforcements

表3 筋材力学性能
Table 3 Mechanical properties of reinforcement

Reinforcement	Behavior	Elasticity modulus/ GPa	Yield strength/ MPa	Secondary stiffness/GPa	Tensile strength/ MPa	Second stiffness ratio
Steel bar	Tension	203.0	485	2.18	586	0.01
	Compression	202.0	462	2.27	594	0.01
SFCB	Tension	79.5	216	35.20	808	0.44
	Compression	80.4	233	34.50	445	0.43
BFCB	Tension	43.2			1 001	1.00
	Compression	73.5			552	1.00

1.3 试验加载

在进行往复加载试验前对塑性铰区域纵筋和箍筋沿高度方向均匀布置应变片,外包钢管沿高度方向分别在纵向和环向布置应变片。加载制度参考规范JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》,对组合柱先施加竖向轴压力并保持不变,再施加水平往复荷载。水平加载制度采用位移控制,当位移角 $\theta \leq 3.00\%$ 时,每级加载增加0.05%的位移角,循环往复2次;当位移角 $\theta > 3.00\%$ 时,每级加载增加1.00%的位移角,循环往复3次。当水平荷载降至峰值荷载的85%或位移角 θ 达到12.00%时,终止加载。

2 试验结果分析

2.1 破坏现象

本次试验6根组合柱试件均发生压弯破坏,如图3所示。由图3可见,所有试件破坏形态基本相似,故此处以试件S1为例进行讨论。当位移角 $\theta < 3.30\%$

时,试件S1处于弹性工作状态,且没有明显的破坏现象。当 $\theta = 3.30\%$ 时,钢管底部发生局部屈曲,表面出现轻微鼓曲。随着位移角的继续增大,柱底油漆剥落现象加剧,钢管局部屈曲愈发严重,并伴随持续的钢纤维撕扯的声音。当 $\theta = 7.10\%$ 时,底部UHPC被严重压溃,钢管鼓曲延环向连通并近似呈象腿状。当 $\theta = 12.00\%$ 时,承载力大幅度降低,柱底钢管严重凹陷变形,试件S2彻底破坏。观察应变片读数发现,在距离柱墩顶面50 mm处布置的应变片测得的钢管环向应变最大。这是因为混凝土在柱底受压最大位置膨胀最大,导致钢管的环向应变达到最大值。试验结束时,所有试件的钢管的局部屈曲主要集中在柱底高度0~300 mm范围内,钢管未出现撕裂现象。

2.2 滞回曲线

各组合柱试件的滞回曲线见图4。由图4可见:试件S1、S4、S5和S6由于位移角达到12.00%时承

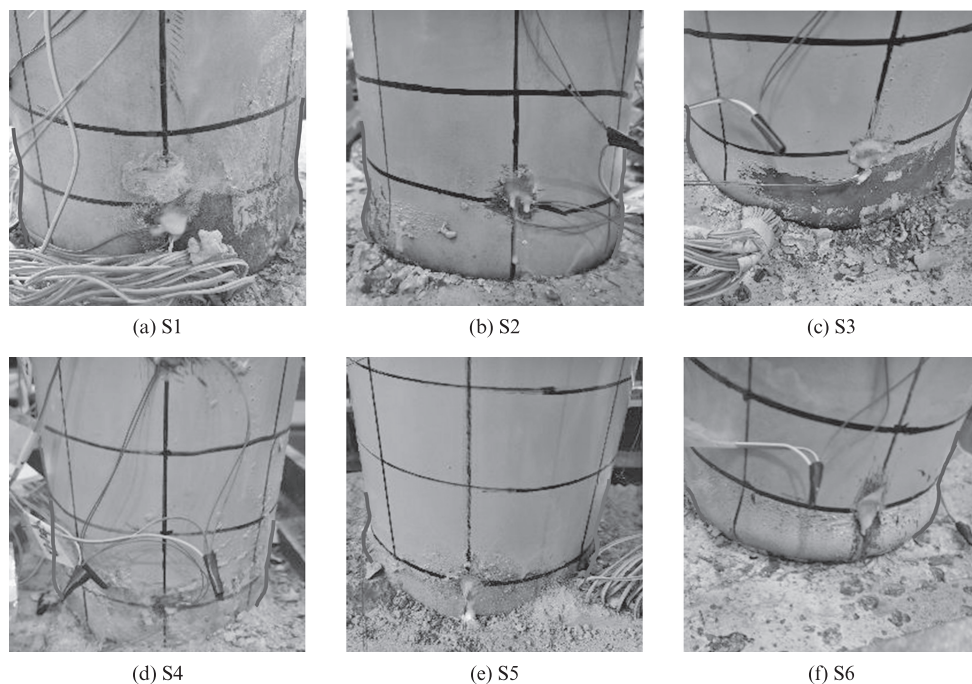


图3 各组合柱试件的破坏模式

Fig. 3 Failure modes of composite column specimens

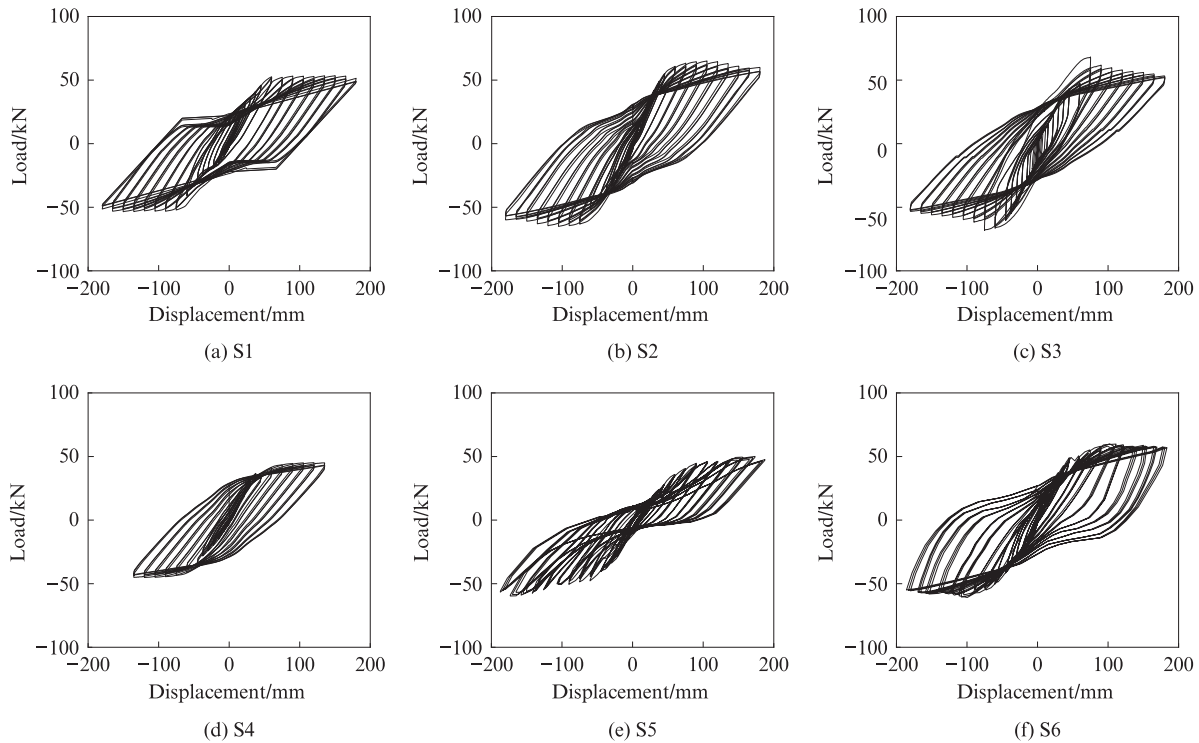


图4 各组合柱试件的滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic curves of composite column specimens

载力尚未退化至峰值荷载的85%就停止加载,导致骨架曲线在塑性阶段的承载力退化现象不明显;试件S4在加载过程中,承载力未发生退化,且峰值位移角也小于12.00%。这是由于试件S4在达到峰值荷载后,基础梁已出现大量裂缝,组合柱与基础梁之间间隙较大,因此为确保试验安全而停止加载。

对比试件S1与S2的滞回曲线可知,提高SFCB配筋率能有效提升组合柱的耗能性能。对比试件S1与S3的滞回曲线可知,随着轴压比从0.15增大至0.25,试件承载力提高但退化更快,混凝土过早发生压溃,极限位移也减小;对比试件S1与S4的滞回曲线可知,SFCB-NCFST组合柱试件S4的滞回曲线整体呈梭形,而SFCB-UHPCFST组合柱试件S1的滞回曲线则呈纺锤形,并伴有明显的捏拢现象。这是由于在相同的截面形式和钢管强度条件下,UHPC力学性能较强,因此钢管对NC的约束作用更为显著,而对UHPC的约束相对较弱。在循环荷载作用下,具有较强约束特性的试件S4表现出较小的局部屈曲程度和较低的混凝土损伤,其滞回曲线更加饱满。相比之下,其他试件由于约束较弱,在循环荷载作用下表现出更大程度的局部屈曲和损伤,导致其滞回曲线出现捏拢现象。

对比试件S1与S5、S6的滞回曲线可知,BFCB-UHPCFST组合柱滞回曲线捏拢现象最为显著,其次是SFCB-UHPCFST组合柱,而钢筋-UHPCFST

组合柱滞回曲线捏拢现象相对较弱。滞回曲线的捏拢特性由残余变形(Δ_r ,即试件在正、负向加载后卸载至水平荷载为零时的变形)决定,残余变形受卸载刚度的影响。卸载刚度又受纵筋的二次刚度比以及纵筋与混凝土间黏结-滑移行为的影响。纵筋的二次刚度比越大,残余变形就越小,捏拢现象也越明显。此外,纵筋与混凝土间的黏结性能越差,纵筋滑移量也就越大,从而进一步减小结构残余变形,加剧捏拢现象。钢筋的二次刚度比最小,与混凝土的黏结性能也最强,因此钢筋-UHPCFST组合柱的残余变形最大,捏拢现象最不明显;BFCB没有屈服平台,与混凝土的黏结应力也最小,因此BFCB-UHPCFST组合柱的残余变形最小,捏拢现象最显著;SFCB的性能则介于钢筋和BFCB之间,因此SFCB-UHPCFST组合柱不仅具备BFCB-UHPCFST组合柱优良的恢复特性,还保留了钢筋-UHPCFST组合柱出色的耗能能力。

2.3 骨架曲线

图5为各组合柱试件的骨架曲线。表4为各组合柱试件的特征荷载和位移。其中, P_y 、 P_p 和 P_u 分别为试件屈服、峰值和极限荷载, Δ_y 、 Δ_p 和 Δ_u 分别为试件的屈服、峰值和极限荷载所对应水平位移。屈服点均采用等能量法确定^[11]。所有试件的特征荷载和位移均取正、负加载方向的平均值。

结合图5与表4可知,所有组合柱试件的骨架曲线在正、负方向上均呈三折线特征,说明组合柱在加

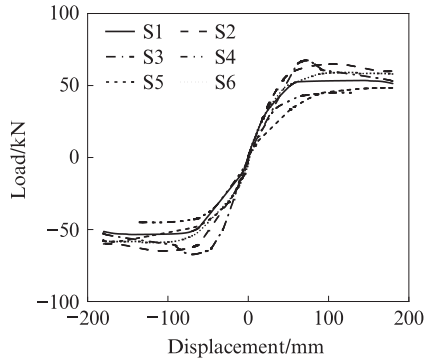


图5 各组合柱试件的骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curves of composite column specimens

表4 各组合柱试件的特征荷载和位移

Table 4 Characteristic load and displacement of composite column specimens

No.	P_y /kN	Δ_y /mm	P_p /kN	Δ_p /mm	P_u /kN	Δ_u /mm
S1	46.0	52.5	53.0	90.2	51.4	180.0
S2	58.3	55.3	65.1	105.2	60.0	180.0
S3	61.9	51.5	68.2	75.1	58.0	127.0
S4	39.7	50.7	45.2	80.6	44.9	135.0
S5	42.3	50.0	51.6	159.0	50.4	180.0
S6	51.2	56.7	59.1	76.3	57.2	180.0

载过程中均经历了弹性、弹塑性和塑性阶段。对比试件S1与S2可知,随SFCB配筋率由3%增大到4%,试件屈服荷载和峰值荷载分别提高27%和23%,相应位移分别减小了5%和17%,说明提高配

筋率可以提高组合柱抗弯刚度,但变形能力会随之下降。对比试件S1与S3可知,当轴压比从0.15增大至0.25时,试件的屈服、峰值和极限荷载分别增大了35%、29%和13%,但屈服和峰值位移则略微减小,变形能力也随之下降。说明增大轴压比提高了钢管对混凝土的侧向约束,进而提高了抗弯刚度和承载力。对比试件S1与S4可知,与SFCB-NCFST组合柱相比,SFCB-UHPCFST组合柱承载力和变形能力均增大,说明采用UHPC替代NC可以显著提高组合柱的抗侧承载力和变形能力。由于UHPC自身力学性能更强,且其中不含粗骨料,因此UHPC与钢筋的咬合也更加均匀,另外钢纤维的桥接作用也有效抑制了UHPC与钢筋的滑移。这就导致UHPC与钢筋的黏结性能比NC与钢筋的黏结性能更优,SFCB-UHPCFST组合柱的截面有效抗弯刚度也更大。对比试件S1与S5、S6可知,BFCB-UHPCFST组合柱的特征荷载最小,其次是SFCB-UHPCFST组合柱,钢筋-UHPCFST组合柱的特征荷载最大,而三者的极限位移相同。这是由于在相同截面构造下,纵筋的弹性模量越大,与UHPC的黏结性能越好,在构件屈服前的截面有效抗弯刚度越大,因此构件的承载力也越大。

2.4 应变响应

图6为试件S1中钢管竖向应变($\epsilon_{st,v}$)、钢管环向

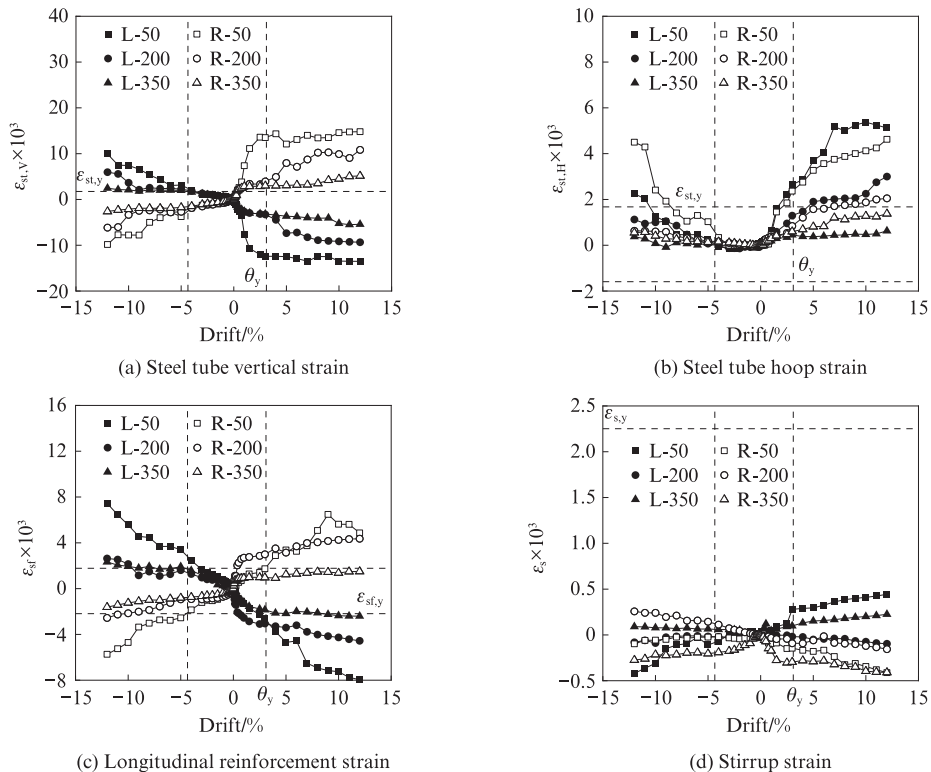


图6 试件S1的应变响应

Fig. 6 Strain response of specimen S1

应变($\epsilon_{st,H}$)、纵筋应变(ϵ_{st})和箍筋应变(ϵ_s)在不同高度处随位移角 θ 的变化关系。其中,符号L和R分别表示左侧测点和右侧测点,而数字50、200和300则分别对应柱高为50、200、350 mm处的测点位置。由图6可知,钢管的竖向应变 $\epsilon_{st,V}$ 和环向应变 $\epsilon_{st,H}$ 达到屈服应变 $\epsilon_{st,y}$ 时所对应的位移角小于屈服位移 Δ_y 所对应的位移角 θ_y ,而纵筋应变 ϵ_{st} 和箍筋应变 ϵ_s 分别达到屈服应变 $\epsilon_{st,y}$ 和 $\epsilon_{s,y}$ 时所对应的位移角大于屈服位移 Δ_y 所对应的位移角 θ_y 。这说明组合柱的广义力-位移曲线的屈服点以钢管的屈服为主导,即钢管始终先于试件发生屈服,而后筋材再发生屈服。钢管对塑性较区混凝土起到有效的约束作用。此外,箍筋对混凝土的约束作用较小,钢管起到主要的约束作用。试件S1在达到峰值荷载时所对应的位移角为6.00%,显著大于各部件屈服时所对应的位移角,说明组合柱的各部件之间协同工作良好,材料的性能得到有效发挥。

3 抗震性能分析

3.1 承载力退化

各组合柱试件的承载力退化曲线如图7所示。采用承载力退化系数 λ 来表征组合柱在往复加载作用下的强度退化情况,其计算式见式(2)。

$$\lambda_j^i = \frac{P_j^i}{P_j^{i-1}} \quad (2)$$

式中: λ_j^i 为第 j 级加载循环中第 i 次循环时的强度退化系数; P_j^i 为第 j 级加载循环中第 i 次循环的峰值荷载; P_j^{i-1} 为第 j 级加载循环中第 $i-1$ 次循环的峰值荷载。

由图7可知,各试件的承载力退化系数均随位移角增加而减小,在钢管屈服前下降速率较快,随后逐渐减缓。这说明组合柱随着循环次数的增大,内部损伤不断积累。所有试件的最小承载力退化系数均大于0.9,说明各组合柱均具有较好的强度稳定性。对比试件S1与S2可知,配筋率为3%和4%的组合柱承载力退化曲线基本重合,说明配筋率对组合柱的承载力退化影响较小。对比试件S1与S3可知,随着轴压比的增大,组合柱的承载力退化系数减小,退化速率加快。这进一步验证了轴压比的增大加快了混凝土的损伤速率,降低了组合柱的强度稳定性。对比试件S1与S4可知,SFCB-UHPCFST组合柱的承载力退化系数显著高于SFCB-NCFST组合柱,说明UHPC凭借自身高强度和高韧性的优点能够有效提高组合柱的强度稳定性,减小内部损伤积累。对比试件S1与S5、S6可知,在组合柱达到屈服前,钢筋-UHPCFST组合柱的承载力退化系数最大,

BFCB-UHPCFST组合柱最小,SFCB-UHPCFST组合柱介于二者之间。但当组合柱达到屈服后,上述现象则截然相反。这说明承载力退化程度与筋材的弹性模量呈正相关,与二次刚度呈负相关。

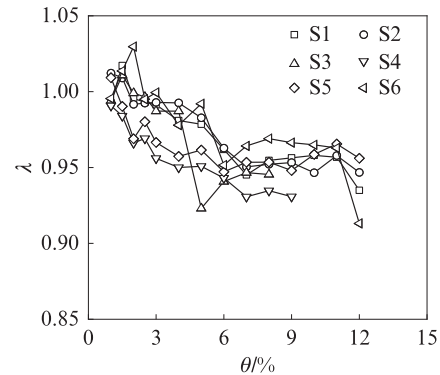


图7 各组合柱试件的承载力退化曲线
Fig. 7 Load degradation curves of composite column specimens

3.2 刚度退化

各组合柱试件的刚度退化曲线如图8所示。采用割线刚度 K 来表征组合柱在往复加载作用下的刚度退化情况,其计算方法见式(3)。

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (3)$$

式中: K_i 为第 i 级加载时的割线刚度; P_i 和 Δ_i 分别为第 i 级加载时的峰值荷载及其对应的水平位移;“+”和“-”表示加载方向。

由图8可知,各试件刚度均随位移角增大而降低,且刚度退化速率在钢管屈服前较大,在钢管屈服后减缓。对比试件S1与S2和S4可知,提高配筋率和使用UHPC对组合柱的初始刚度有一定提升作用,但对于刚度退化速率影响极小。对比试件S1与S3可知,增大轴压比虽可提高组合柱的初始刚度,

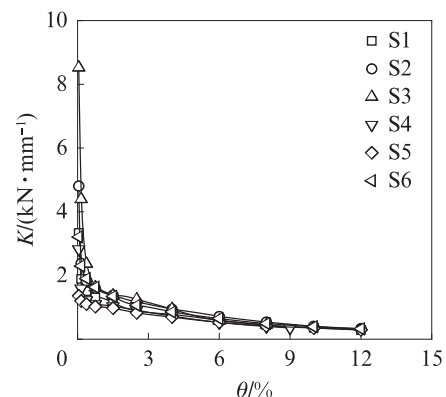


图8 各组合柱试件的刚度退化曲线
Fig. 8 Stiffness degradation curves of composite column specimens

但也会加剧组合柱在峰值荷载后的刚度退化。这是因为随着轴压比的增大,在相同位移下塑性铰区混凝土的压溃更加严重,导致组合柱性能退化速度更快。对比试件S1与S5、S6可知,钢筋-UHPCFST组合柱初始刚度最大,其次是SFCB-UHPCFST组合柱,BFCB-UHPCFST组合柱最小,而组合柱的刚度退化速率则与之相反。组合柱的初始刚度与纵筋初始弹模呈正相关,而刚度退化速率与纵筋二次刚度呈正相关。综合对比可以发现SFCB既能够提供较好的初始刚度,又能够改善组合柱刚度退化现象。

3.3 耗能能力

采用等效阻尼黏滞系数 ζ 和累积耗能 E_u 来综合衡量组合柱的耗能能力, ζ 的计算公式见式(4)。

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \times \frac{S_h}{S_{\Delta+} + S_{\Delta-}} \quad (4)$$

式中: S_h 为滞回环单圈的耗能; $S_{\Delta+}$ 和 $S_{\Delta-}$ 分别为由原点到正、负方向骨架曲线的峰值荷载点的连线与位移坐标轴所组成三角形的面积。

图9给出了各组合柱试件的耗能能力。由图9(a)可知,试件S3的等效阻尼黏滞系数最大,说明试件S3具有最优的耗能能力。由图9(b)可知:各试件累积耗能始终随着位移角的增大而增加;对比试件S1与S2、S3、S4可知,提高SFCB配筋率、提高轴压比和使用UHPC代替NC均能显著提高组合柱的累积耗能;对比S1与S5、S6可知,钢筋-UHPCFST组合柱的累积耗能最大,BFCB-UHPCFST组合柱最小,SFCB-UHPCFST组合柱介于二者之间。

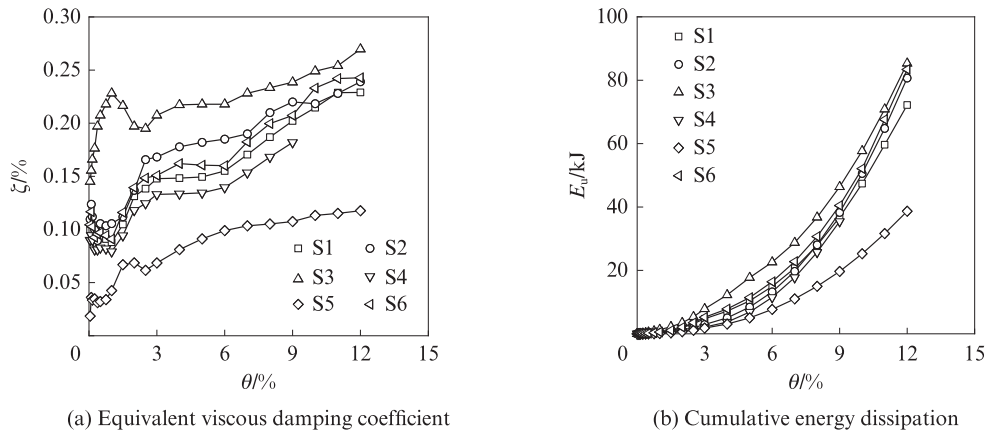


图9 各组合柱试件耗能能力
Fig. 9 Energy dissipation capacity of composite column specimens

3.4 残余变形

各组合柱试件的残余变形见图10。由图10可见:(1)对比试件S1和S2,在相同位移角时试件S1的残余变形均小于试件S2。这是由于随配筋率增大,组合柱的初始刚度增大,塑性变形能力提高,塑性变形增大。(2)对比试件S1和S3,在相同位移角时试件S1的残余变形均小于试件S3。这是由于增大轴压比使得相同水平位移下组合柱的底部混凝土压溃情况更严重,因此组合柱更早进入塑性阶段,可修复性也大幅削弱。(3)对比试件S1和S4,在相同位移角时试件S1的残余变形均小于试件S4。这是由于UHPC具有更强的力学性能,可有效延缓柱底部塑性铰区的失效,减小组合柱的塑性变形。(4)对比试件S1和S5、S6,钢筋-UHPCFST组合柱的残余变形最大,BFRP-UHPCFST组合柱最小,而SFCB-UHPCFST组合柱介于两者之间。因此,纵筋二次刚度比越小,试件在往复加载下的塑性变形越大,残余变形也越大,可修复性越差。

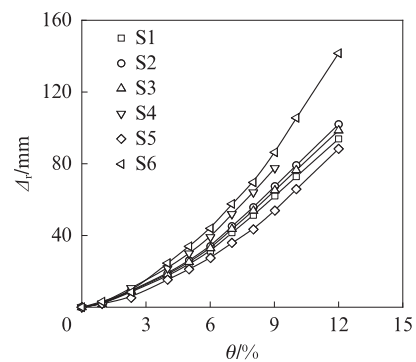


图10 各组合柱试件残余变形
Fig. 10 Residual deformations of composite column specimens

3.4 综合性能与材料成本

由于部分组合柱试件在荷载尚未退化至峰值荷载的85%时即停止加载,这导致在评估组合柱的变形能力时,使用传统方法计算位移延性系数存在一定的局限性。此处采用冯鹏等^[12]提出的综合性能系数 F 来评估组合柱的综合抗震性能,其计算式如下。

$$S = P_v/P_d \quad (5)$$

$$D = \Delta_v/\Delta_d \quad (6)$$

$$F = D \cdot S \quad (7)$$

式中: S 为承载力系数; D 为变形系数; P_d 和 Δ_d 分别为构件在设计目标状态下的荷载及其对应的水平位移。

GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》和 ASCE/SEI 7-16 *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* 中均规定,一般建筑物在罕遇地震作用下的层间位移角限值为 1/50。因此,定义组合柱的设计目标状态为 $\theta=2\%$ 时所对应骨架曲线中的荷载和水平位移。

UHPCFST 的材料成本是影响其结构应用推广的关键因素。根据对市场的调研数据,钢管、钢筋、SFCB 和 BFCB 的单位价格分别约为 410、5、10、15 元/m, UHPC 和 NC 的单位价格则分别约为 2 800、600 元/m³。结合上述内容,忽略人工费用,对所有组

合柱的综合性能、各部分材料成本和构件总成本进行对比分析,详见表 5。由表 5 可见:对比试件 S1 与 S4, 尽管 SFCB-NCFST 组合柱的材料成本比 SFCB-UHPCFST 组合柱降低了 9%, 但其综合性能系数也下降了 18%; 对比试件 S1 与 S2, 随着 SFCB 配筋率从 3% 提升到 4%, 组合柱的综合性能系数增加了 21%, 材料成本仅增加了 5%; 对比试件 S1 与 S5, BFCB-UHPCFST 组合柱的变形系数比 SFCB-UHPCFST 组合柱高 8%, 但材料成本高 7%, 承载力系数较低, 综合性能系数降低 11%; 对比试件 S1 与 S6, 钢筋-UHPCFST 组合柱的承载力系数比 SFCB-UHPCFST 组合柱高 10%, 材料成本也低 7%, 但变形系数较低, 导致综合性能系数低 4%。综上, 提高 SFCB 配筋率可以有效地提升组合柱的综合性能, 且更具经济优势; 尽管使用 SFCB 会提高 7% 的材料成本, 但结合后续维护成本而言, SFCB 更具有性价比。

表 5 各组合柱试件的材料成本与综合性能

Table 5 Material cost and comprehensive performance of composite column specimens

No.	Cost/CNY						S	D	F
	UHPC	NC	Steel tube	Stirrup	Reinforcement	Total			
S1	95.3		615.0	37.6	117.0	864.9	3.04	1.44	4.39
S2	95.3		615.0	37.6	156.0	903.9	3.51	1.51	5.31
S3	95.3		615.0	37.6	117.0	864.9	2.50	1.39	3.48
S4		20.4	615.0	37.6	117.0	790.0	2.62	1.37	3.59
S5	95.3		615.0	37.6	176.0	923.9	2.52	1.56	3.91
S6	95.3		615.0	37.6	58.5	806.4	3.33	1.26	4.21

4 结论

(1)UHPC 由于不含粗骨料, 具有更均质的内部结构, 能有效减少界面过渡区缺陷。同时掺入的钢纤维可在裂缝发展过程中发挥桥联作用, 显著提升材料的裂缝控制能力和耗能。在此基础上, UHPC 与钢管及纵向钢筋之间还具备良好的黏结性能。因此, SFCB-UHPCFST 组合柱在刚度、承载力、变形能力及耗能方面均显著优于 SFCB-NCFST 组合柱。

(2)提高 SFCB 配筋率可提高组合柱的初始刚度、承载力、变形能力和耗能; 增大轴压比可以提高组合柱的初始刚度、承载力和耗能, 但会降低变形能力。

(3)与钢筋-UHPCFST 组合柱或 BFCB-UHPCFST 组合柱相比, SFCB-UHPCFST 组合柱的承载力、变形能力和耗能均介于二者之间。SFCB-UHPCFST 组合柱不仅具备 BFCB-UHPCFST 组

合柱优良的可恢复性, 还保留了钢筋-UHPCFST 组合柱出色的耗能能力。

(4)残余变形受纵筋的二次刚度比以及钢筋与 UHPC 之间黏结-滑移行为的影响。与钢筋相比, SFCB 二次刚度比更大, 与 UHPC 间的黏结性能较弱, 导致滞回曲线的捏拢现象明显, 残余变形更小, 可恢复性更强。

(5)随着 SFCB 配筋率的提高, 组合柱的综合性能系数提升了 21%, 材料成本仅提高了 5%。因此, 提高 SFCB 配筋率对组合柱抗震性能的提升最具性价比。

参考文献:

- [1] ZAMEERUDDIN M, SANGLE K K. Review on recent developments in the performance-based seismic design of reinforced concrete structures[J]. Structures, 2016, 6:119-133.
- [2] GE W J, ZHANG Z W, ASHOUR A, et al. Flexural

- performance of prefabricated U-shaped UHPC permanent formwork-concrete composite beams reinforced with FRP bars [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23(2):108.
- [3] HAN L H, HOU C, WANG Q L. Square concrete filled steel tubular(CFST) members under loading and chloride corrosion: Experiments[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 71:11-25.
- [4] DONG H Y, QIN J, CAO W L, et al. Seismic behavior of circular CFST columns with different internal constructions[J]. Engineering Structures, 2022, 260:114262.
- [5] 刘子丹, 焦文帅, 程展, 等. 钢管不锈钢管超高性能混凝土柱轴压性能研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(5):17-27.
LIU Zidan, JIAO Wenshuai, CHENG Zhan, et al. Research on the axial compression behavior of steel-reinforced ultra-high performance concrete-filled stainless steel tubular columns[J]. Industrial Construction, 2023, 53(5):17-27. (in Chinese)
- [6] 何嘉威, 张虎, 张继承, 等. 内置型钢方形不锈钢管超高性能混凝土柱偏压性能[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(11):1-11.
HE Jiawei, ZHANG Hu, ZHANG Jicheng, et al. Eccentric compression performance of steel-reinforced ultra-high performance concrete filled square stainless steel tubular columns [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(11):1-11. (in Chinese)
- [7] DU J, MENG W N, KHAYAT K H, et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC)[J]. Composite Part B:Engineering, 2021, 224:109220.
- [8] XU S C, WU C Q, LIU Z X, et al. Experimental investigation on the cyclic behaviors of ultra-high-performance steel fiber reinforced concrete filled thin-walled steel tubular columns[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 140:1-20.
- [9] WU G, SUN Z Y, WU Z S, et al. Mechanical properties of steel-FRP composite bars (SFCBs) and performance of SFCB reinforced concrete structures [J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(4):625-635.
- [10] 陈爽, 韦丽兰, 李虎林, 等. SFCB增强珊瑚混凝土柱抗震性能与骨架曲线模型[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(9):861-870.
CHEN Shuang, WEI Lilan, LI Hulin, et al. Seismic performance and skeleton curve model of SFCB reinforced coral concrete columns[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(9):861-870. (in Chinese)
- [11] PARK R. State of the art report ductility evaluation from laboratory and analytical testing[C]//Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo:[s.n.], 1988: 605-616.
- [12] 冯鹏, 叶列平, 黄羽立. 受弯构件的变形性与新的性能指标的研究[J]. 工程力学, 2005(6):28-36.
FENG Peng, YE Lieping, HUANG Yuli. Deformability and new performance indices of flexural members [J]. Engineering Mechanics, 2005(6):28-36. (in Chinese)