

引用格式 杨昱幸,廖飞宇,陈宇峰,等. 超高性能混凝土(UHPC)包覆钢管混凝土叠合柱偏压性能试验研究[J]. 工业建筑,2024,54(11): 121-128. YANG Y X, LIAO F Y, CHEN Y F, et al. Research on Mechanical Properties of UHPC Encased CFSTs Under Eccentrically Compressive Loading [J]. Industrial Construction, 2024, 54(11): 121-128 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG24022108

超高性能混凝土(UHPC)包覆钢管混凝土叠合柱 偏压性能试验研究*

杨昱幸¹ 廖飞宇¹ 陈宇峰² 王静峰³ 叶洪铭¹ 王莹⁴

(1. 福建农林大学交通与土木工程学院, 福州 350108; 2. 福建建工集团有限责任公司, 福州 350003;
3. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009; 4. 福州大学土木工程学院, 福州 350116)

摘要 UHPC 包覆钢管混凝土叠合构件具有耐久性能优越和承载力高等优势。为研究其偏压性能,进行了4根UHPC包覆钢管混凝土叠合柱偏压试验,主要参数为偏心距和长细比。基于试验结果,考察了不同参数对试件的破坏特征、荷载-变形关系曲线、极限承载力、二阶效应和延性的影响规律,结果表明:钢纤维的存在减轻了外围UHPC的破坏程度,内钢管混凝土的存在使试件具有较好的延性。试件偏压承载力随偏心距的增加下降明显,其中偏心距从0~80 mm时对承载力影响最显著。同时,二阶效应对试件偏压承载力影响显著,随着偏心距和长细比的增加,二阶效应产生的弯矩占总弯矩比重达到36.5%。基于试验实测结果,探讨了采用现行规范提供的方法计算UHPC包覆钢管混凝土叠合柱偏压承载力的适用性。

关键词 UHPC 包覆; 钢管混凝土; 叠合构件; 偏压承载力

Research on Mechanical Properties of UHPC Encased CFSTs Under Eccentrically Compressive Loading

YANG Yuxing¹ LIAO Feiyu¹ CHEN Yufeng² WANG Jingfeng³ YE Hongming¹ WANG Ying⁴

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China;
2. Fujian Construction Engineering Group Company, Fuzhou 350003, China;
3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
4. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Ultrahigh-performance concrete (UHPC) encased concrete-filled steel tubes (CFST) have advantages such as superior durability and high bearing capacity. Four CFST columns with varying eccentricity and slenderness ratios were experimentally tested to examine their mechanical properties. Based on the test results, the failure characteristics, load-deformation responses, ultimate eccentric bearing capacity, second-order effects, and ductility were investigated. The results revealed that the incorporation of steel fibers significantly reduced the failure degree of the outer UHPC, while the inner CFST offered the column specimens good ductility. It was noted that the eccentric bearing capacity decreased markedly with the increasing eccentricity, particularly in the range of 0–80 mm. Moreover, second-order effects had a substantial impact on the eccentric bearing capacity, contributing up to 36.5% of the total moment as eccentricity and slenderness ratio increased. The study's findings were used to discuss the applicability of existing code provisions for calculating the eccentric bearing capacity of UHPC encased CFST columns.

Keywords: UHPC encased; CFST; composite member; eccentrically compressive loading

* 国家自然科学基金项目(52378140);福建建工集团科技项目(Z-Y-2021-0026);福建省中青年教育科研项目(JAT210087)。

第一作者:杨昱幸,博士,讲师,主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究,yuxing.yang@fafu.edu.cn。

通信作者:廖飞宇,博士,教授,主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究,feiyu.liao@fafu.edu.cn。

收稿日期:2024-02-21

0 引言

钢管混凝土叠合结构兼具钢管混凝土和钢筋混凝土的优点,具有承载力高、刚度大、抗震和防火性能好等优点,因此已在国内多个大跨桥梁和高层建筑中应用,如万县长江大桥和深圳卓越皇岗世纪中心。近年来,随着我国沿海城市化建设的蓬勃发展,“盐害”现象导致的工程问题也日益突出,沿海地区的钢结构和钢筋混凝土建筑物易遭受海风、盐雾的侵蚀腐蚀,影响建筑物的安全性和耐久性。研究表明超高性能混凝土(UHPC)具有极低的孔隙率和良好的微观结构,各项性能指标大大优于普通混凝土,可大幅提高建筑物在腐蚀和冻融循环条件下的耐久性^[1]。因此,将UHPC和钢管混凝土组合而成UHPC包覆钢管混凝土叠合结构(图1),既可利用UHPC的高致密性提高叠合柱的抗腐蚀性能,也可利用UHPC的超高强度提高构件整体强度,从而提升结构的承载能力和使用寿命^[2]。

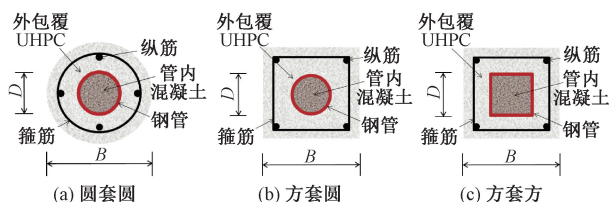


图1 典型UHPC包覆钢管混凝土叠合柱截面形式

Fig.1 Typical cross-section of UHPC encased CFST columns

以往针对普通钢管混凝土叠合构件的力学性能已有较多的研究报道,包括循环往复荷载、轴心受拉、轴心受压以及冲击荷载等多种荷载工况^[3-10],结果表明钢管混凝土叠合构件具有较高的承载力、较好的延性和耗能能力,在受荷过程中外层混凝土通常先于内钢管混凝土破坏。近年来,研究者们对钢管-UHPC组合柱的轴压、偏压以及抗震性能开展了系列研究^[11-21],结果表明钢管的约束作用充分改善了UHPC的脆性,从而使UHPC的材料性能得到更充分的发挥,有效提升了组合柱的各项力学指标。笔者开展的UHPC包覆钢管混凝土叠合柱轴压性能研究也表明,外层混凝土采用UHPC替代普通混凝土,能够更好地匹配核心钢管混凝土的强度,从而增强二者的协同工作性能,更加充分地发挥材料抗力,使叠合柱具有更高的轴压强度^[15]。事实上,实际工程中的钢管混凝土叠合构件经常处于偏心受压状态,然而目前对UHPC包覆钢管混凝土叠合构件偏压性能的研究报道尚十分少见,偏压荷载引起的

二阶弯矩效应对构件力学性能的影响尚不明确。

鉴于此,本文开展了UHPC包覆钢管混凝土叠合柱的偏压试验研究,以偏心距和长细比为主要试验参数,考察各参数对试件破坏模态、极限承载力、荷载-变形关系曲线、侧向挠度曲线和应变发展的影响,并对二阶效应以及延性等指标进行了分析。研究结果可为UHPC包覆钢管混凝土叠合构件的工程设计和性能评估提供依据和参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

共完成4个UHPC包覆钢管混凝土叠合柱偏压力学性能试验,主要参数为偏心距(e)和长细比 λ_e ($\lambda_e = KL/r$,试件边界条件为铰支,因此 K 取1.0; L 为柱计算高度; r 为试件截面回转半径)。构件的偏心加载采用刀铰来实现,刀铰由刀口板和凹槽板组成,通过改变刀口与凹槽板中凹槽的接触位置来实现偏心距的变化。UHPC包覆钢管混凝土叠合柱的截面形式均为方形截面,其截面边长 B 为200 mm,柱高 L 为1 600 mm和2 400 mm。试件的截面尺寸和配筋参考了实际工程背景和以往相关研究^[2-5],并充分考虑实验室加载条件。钢管内核心混凝土强度拟采用设计等级C90的高强混凝土,外层UHPC的设计强度不低于120 MPa。组合柱试件的预期承载力可望作为多层建筑的足尺柱模型,或高层建筑框架柱的缩尺模型。由于试件数量所限,本试验未能考虑尺寸效应影响。试件的钢管选用Q345B无缝钢管,试件两端分别设置两块厚度为25 mm的端板,端板与钢管和钢筋焊接。为了避免试件在端头破坏,在其两端设置了加强牛腿,试件几何尺寸和参数分别详见图2和表1。

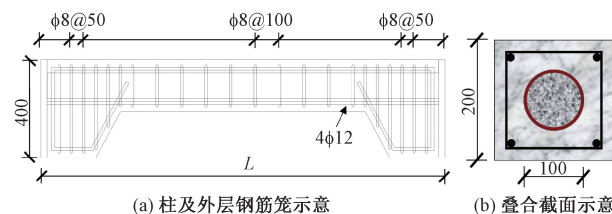


图2 试件几何尺寸示意 mm

Fig.2 A schematic diagram of geometric sizes of specimens

表1中, B 为试件截面边长(不加入牛腿长度), D 为钢管外径, t 为钢管壁厚, e 为试验加载偏心率, λ_e 为构件长细比, f_y 为钢管屈服强度, $f_{cu,e}$ 为核心混凝土立方体抗压强度, $f_{cu,o}$ 为UHPC包覆的

表 1 试件参数
Table 1 Specimen parameters

序号	试件编号	$B \times L /$ mm	$D \times t /$ mm	$e /$ mm	λ_e	$f_y /$ MPa	$f_{cu,c} /$ MPa	$f_{cu,o} /$ MPa	纵筋	$\rho_r /$ %
1	UHPCCFST-1	200×1 600	100×4	0	27.7	384	95	140.8	4φ12	0.66
2	UHPCCFST-2	200×1 600	100×4	80	27.7	384	95	140.8	4φ12	0.66
3	UHPCCFST-3	200×1 600	100×4	160	27.7	384	95	140.8	4φ12	0.66
4	UHPCCFST-4	200×2 400	100×4	80	41.6	384	95	140.8	4φ12	0.66

立方体抗压强度, ρ_r 为试件纵筋配筋率 ($\rho_r = A_r / A_{co}$, 其中 A_r 代表纵筋面积, A_{co} 代表钢管外混凝土面积), 试件选用的钢筋为: HRB400 纵筋 4φ12, 靠近试件跨中为 HRB400 箍筋 φ8@100, 靠近柱端为 HRB400 箍筋 φ8@50。

1.2 材料性能

试验测得钢材的各项材料性能指标见表 2。其中, d 为钢筋的直径, f_y 为钢材的屈服强度, f_u 为钢材的极限强度, E_s 为钢材的弹性模量, δ 为钢材的延伸率, μ_s 为泊松比。

表 2 钢材性能指标
Table 2 Material properties of steels

钢材类型	钢筋	D / mm	t / mm	d / mm	f_y / MPa	f_u / MPa	E_s / MPa	$\delta / \%$	μ_s
Q345		100	4.0	—	384.0	551.6	208 100	25.8	0.290
HRB400	φ12	—	—	11.56	394.7	557.1	208 700	23.9	0.303
HRB400	φ8	—	—	7.98	384.3	548.5	206 800	22.4	0.300

试件钢管内部核心混凝土为 C90。其中水泥为 P·O 52.5 高强低碱水泥; 硅灰为半加密微硅灰, SiO_2 含量大于 98%; 粉煤灰为专用二级粉煤灰; 粗骨料采用 5~20 mm 级配下天然碎石; 细骨料细度模数为 1.8, 砂率为 0.36; 水为普通自来水; 减水剂为 TW-PS 聚羧酸减水剂。C90 混凝土配合比如表 3 所示。试件外围 UHPC 的组分采用半加密微硅灰, 玻璃粉选用白色优质低温玻璃粉, 石英砂选用精致石英砂, 目数范围为 10~180 目。钢纤维选用长度约为

13 mm, 长径比为 59 的镀铜高强钢纤维, 水为一般自来水, 减水剂选用 PCA-I 通用型聚羧酸高性能减水剂, 减水率不小于 35%。UHPC 的配合比如表 4 所示。试验实测的混凝土材料性能指标如表 5 所示。

表 3 C90 核心混凝土配合比
Table 3 Mix proportions of core C90 concrete kg/m^3

水泥	硅灰	粉煤灰	砂	石子	水	减水剂
450	50	100	700	1 050	156	7.4

表 4 UHPC 配合比
Table 4 Mix proportion of UHPC kg/m^3

水泥	硅灰	玻璃粉	石英砂					水	减水剂	钢纤维
			120~180 目	70~120 目	40~70 目	20~40 目	10~20 目			
859.5	257.9	343.8	74.1	171.7	170.7	260.7	328.5	179	34.4	81.2 (1%)

表 5 混凝土材料性能指标
Table 5 Material properties of concrete

类型	坍落度/ mm	抗压强度 f_{cu} / MPa		$f_{ck} /$ MPa	$E_c /$ GPa	泊松比 μ_s
		28 d	试验时			
UHPC	260	135.2	140.8	98.56	46 785.2	0.205
C90	220	90.3	95.0	66.5	40 185.3	0.201

1.3 试件制作

试件制作时首先将钢管截成所需长度, 并将其一端焊接在 25 mm 厚的方形端板上。浇筑核心混凝土时, 采用分层浇筑的方法, 分三次进行浇筑, 每一次灌入混凝土后用振捣棒在钢管外壁及

内部混凝土中充分振捣, 待混凝土超出端面 10~20 mm 停止浇筑, 并将其竖直放置在振动台上再次振捣密实, 随后进行养护。待核心混凝土养护 7 d 后, 将端面上多余的部分混凝土打磨平整, 随后在钢管壁四个面的中部位置进行打磨, 粘贴应变片, 最后进行环氧树脂保护, 防止水份渗入及后续 UHPC 包覆浇筑而破坏应变片。然后, 将预制好的钢筋笼放置于内钢管混凝土外, 浇筑外围 UHPC 并充分振捣。全部构件浇筑结束后, 置于室内自然养护 7 d 后拆模。

1.4 加载及测量方案

偏压试验装置示意如图 3 所示。试验采用 500 t 压力机施加轴向压力,偏心压力通过叠合柱上下两端安装的刀铰进行施加,刀铰允许构件在受到偏心压力作用下两端自由转动,以模拟铰接边界条件。上端刀口板与压力机加载板通过螺栓连接,下端刀口板与底座采用焊接连接,目的是保证接触紧固,避免试件在试验过程产生滑移。

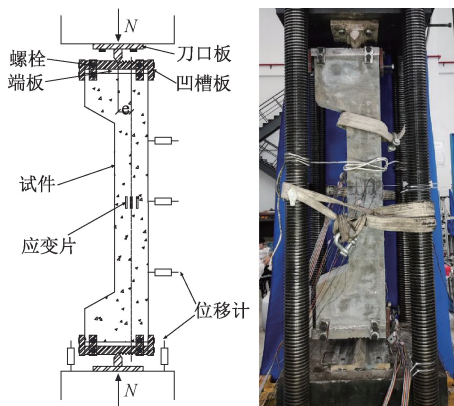


图 3 加载装置示意

Fig. 3 Schematic diagrams of loading devices

钢材应变片布置于纵筋、箍筋和核心钢管表面。混凝土应变片布置于 UHPC 包覆表面。为测得试件的跨中挠度数据,沿柱高跨中及上下 1/4 点各设置一个位移传感器。为测得试件的纵向位移数据,在压力机底座上设置两个位移传感器。试件应变片及位移传感器测点布置示意如图 4 和图 3 所示。正式加载之前对试件进行预加载,以检验数据采集系统、加载装置和测量设备的可靠性,并保证试件的物理对中。预加载过程采用单调力控加载,加载速率为 1 kN/min,目标偏压荷载为预估峰值荷载的 10%。正式加载采用力控与位移控相结合的方式,先用力控分级加载,分级荷载约为极限承载力的 10%,并且持荷 2 min,当荷载达到预估承载力的 70%~80%时转为位移控制,加载速率为 1 mm/min,当试件承载力下降至峰值承载力的 80%,或受压区混凝土压溃后停止试验。

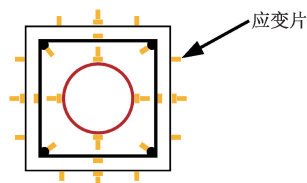


图 4 试件截面应变片布置示意

Fig. 4 Arrangements of strain gauges on the cross section of the specimen

2 试验结果

2.1 破坏模态

2.1.1 典型破坏过程

试验中,试件破坏模态相似。试件典型荷载 (N)-跨中位移 (Δ_m) 曲线可划分为三个阶段:弹性阶段(OA)、弹塑性阶段(AB)和下降阶段(BC),如图 5 所示。

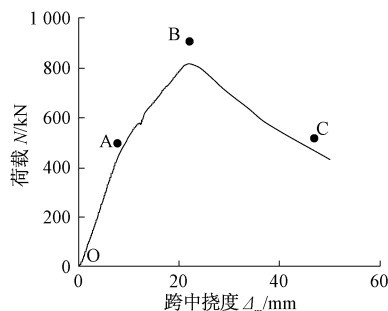


图 5 试件典型荷载 (N)-跨中位移 (Δ_m) 曲线

Fig. 5 Relations between typical load (N) and midspan deflection (Δ_m)

1) 弹性阶段(OA):该阶段试件钢筋应变、钢管应变和混凝土应变均匀增加,荷载与位移呈线性关系,跨中位移随着荷载的增大而呈近似等比增大。

2) 弹塑性阶段(AB):随着荷载的增大,试件在跨中位置处出现细微裂缝。此时,试件的刚度和荷载增长速率有所降低,而跨中位移发展加快,荷载-跨中位移曲线由直线变为曲线,斜率逐渐变小。随着荷载继续增加,跨中截面 UHPC 主裂缝继续延伸且在附近出现新裂缝,钢纤维不断从 UHPC 基体拔出且内部钢管混凝土发生塑性变形。内部钢管和纵筋在这一阶段均发生屈服。

3) 荷载下降阶段(BC):试件荷载达到 B 点峰值,UHPC 包覆表面裂缝贯通,跨中截面 UHPC 保护层不断碎裂。之后,荷载-变形关系曲线进入下降段,外荷载主要由内部钢管混凝土承担。随着轴向位移的增大,试件侧向变形也逐渐增大,随后承载力下降速率显著减缓,荷载-变形关系曲线走势趋于平缓,表明在外包覆 UHPC 失效后,内部钢管混凝土能够继续提供承载力,使试件具有较好的变形性能。

2.1.2 破坏模态比较

图 6 所示为 UHPC 包覆钢管混凝土叠合柱偏心受压破坏模态。可见,偏心距 $e=0$ 的轴压试件其破坏位置主要在端部,表现为牛腿处的混凝土斜向裂缝贯通,呈现端部剪切破坏特征。对于偏心距

$e=80, 160$ mm 的偏压试件,其破坏时整体侧向挠度较为明显,试件破坏位置主要发生在跨中区域,受拉区 UHPC 水平裂缝贯通,同时受压区 UHPC 被压碎,表现出明显的弯曲破坏特征。随着偏心距的增加,受压区混凝土破坏面积变小,中和轴向受压区一侧移动,受拉区裂缝数量逐渐增加,且裂缝宽度和深度有所增大,试件跨中挠度也随之增大,压弯破坏现象更为明显。随着长细比的增加,试件混凝土破坏程度越轻,局部破坏特征越不明显,这是因为长细比增大会加剧二阶效应,导致试件的稳定破坏特征较强度破坏特征更加显著。

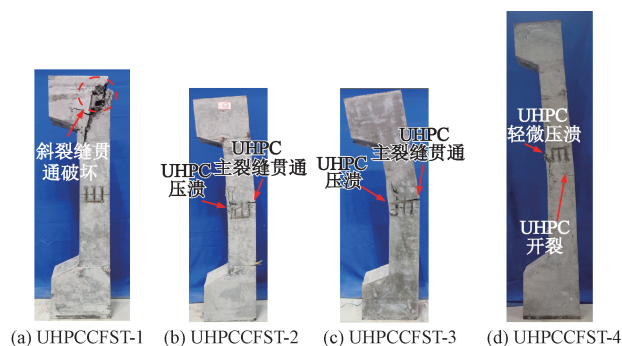


图 6 试件典型破坏模式

Fig. 6 Typical failure modes of specimens

由于内钢管混凝土的存在,试件破坏时仍保持了较好的整体性,总体表现为延性破坏特征。相较于普通混凝土包覆钢管混凝土叠合柱^[20-23],钢纤维的存在增加了外包覆 UHPC 的抗拉强度,限制了裂缝的发展,使裂缝开展从普通混凝土的多且小而密转为单一主裂缝。同时,钢纤维的存在有效缓解了外包覆 UHPC 的碎裂现象,使试件混凝土局部破坏程度有所减轻。

2.2 轴向荷载(N)-变形(Δ)关系曲线

图 7 所示为钢管混凝土叠合柱在不同偏心距和长细比下的轴向荷载-轴向位移(Δ_a)关系曲线(图 7(a))和轴向荷载-跨中挠度(Δ_m)曲线(图 7(b))。可以观察到,曲线总体发展规律基本接近。随着偏心距增加,试件极限承载力降低,弹性和弹塑性阶段的刚度也逐渐减小。随着长细比增加,试件极限承载力和刚度均降低,这是由于长细比越大的试件在偏心荷载下更易发生侧向弯曲,而侧向挠度增大会导致轴向压力产生二阶效应,引起附加弯矩,从而使承载力随之下降。

2.3 偏压承载力

不同参数对试件偏压承载力 N 的影响如图 8

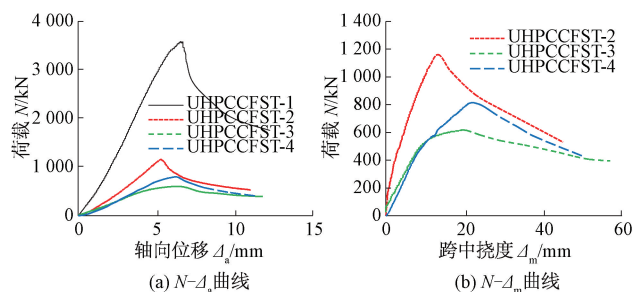


图 7 实测荷载(N)-变形(Δ)关系曲线

Fig. 7 Measured N - Δ relations

所示。随着偏心距增加,试件偏压承载力逐渐下降,偏心距为 80 mm 和 160 mm 时的承载力较轴心受压分别降低了 67% 和 82%,其中偏心距从 0 增加到 80 mm 时对承载力影响更为显著。随着长细比增加,试件偏压承载力也呈降低趋势,幅度达 29%。可见,UHPC 包覆钢管混凝土叠合柱的偏压承载力与长细比成反比关系,主要原因是长细比增大会增大二阶效应的影响,从而降低构件的整体极限承载力。

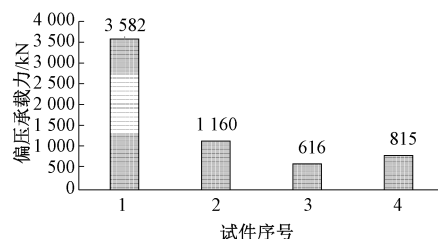


图 8 试件偏压承载力比较

Fig. 8 Comparisons of bearing capacity of specimens under eccentric compression

中国工程建设标准化协会标准 T/CECS 188—2019《钢管混凝土叠合柱结构技术规程》^[24]推荐使用叠加法来计算钢管混凝土叠合柱的偏压承载力,即叠合柱的偏压承载力由核心钢管混凝土和外部钢筋混凝土两部分贡献组成,如式(1)所示。

$$N_{uc} = N_c + N_s \quad (1)$$

式中: N_c 为单独计算 UHPC 组件的偏压承载力; N_s 为单独计算钢管混凝土组件的偏压承载力。 N_c 按现行国家标准 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》^[25]提出的钢筋混凝土柱正截面偏心受压承载力计算式计算, N_s 按钢管混凝土规范 T/CECS 188—2019^[24]进行计算,如式(2)所示。

$$N_c = f_c [bx + (b'_f - b)h'_f] + \sum \sigma'_s A'_s - \sum \sigma_s A_s \quad (2a)$$

$$N_s = \phi_e \phi_l N_0 \quad (2b)$$

$$N_0 = \begin{cases} 0.9f_cA_c(1 + \alpha\zeta) & \zeta \leq 1/(\alpha - 1)^2 \\ 0.9f_cA_c(1 + \sqrt{\zeta} + \zeta) & \zeta > 1/(\alpha - 1)^2 \end{cases} \quad (2c)$$

$$\phi_l = \begin{cases} 1 - 0.115\sqrt{l_0/D} - 4 & l_0/D \leq 4 \\ 1 & l_0/D > 4 \end{cases} \quad (2d)$$

$$\phi_e = \begin{cases} \left(1 + \frac{1.85e_0}{r_c}\right)^{-1} & e_0/r_c \leq 1.55 \\ 0.4 & e_0/r_c > 1.55 \end{cases} \quad (2e)$$

式中: N_0 为钢管混凝土轴心受压短柱承载力设计值; ζ 为钢管混凝土套箍系数; A_c 为钢管内混凝土横截面面积; α 为混凝土强度的相关系数; ϕ_l 和 ϕ_e 分别为考虑长细比和偏心率影响下承载力的折减系数; l_0 为柱等效计算长度; e_0 为柱较大弯矩端的轴向压力对试件截面重心的偏心距; r_c 为钢管内半径。

式(1)计算结果如表 6 所示。可以看出,计算值 N_{uc} 和实测值 N_u 比值的平均值为 0.726,表明叠加法计算 UHPC 包覆钢管混凝土叠合柱偏压承载力结果偏于安全。这主要是由于:首先,叠加法在考虑构件偏心受压过程中的二阶效应存在局限性;其次,叠加法假定核心钢管混凝土和外部 UHPC 两部分各自单独承载,未能充分考虑这两部分在实际受力过程中的“混合效应”。未来应通过有限元模型开展参数分析,进一步明确二者之间“混合效应”对承载力的提升幅度,在此基础上提出更为精确的简化计算公式。

2.4 应变分析

试件轴向荷载(N)-钢材应变(ε)关系曲线如

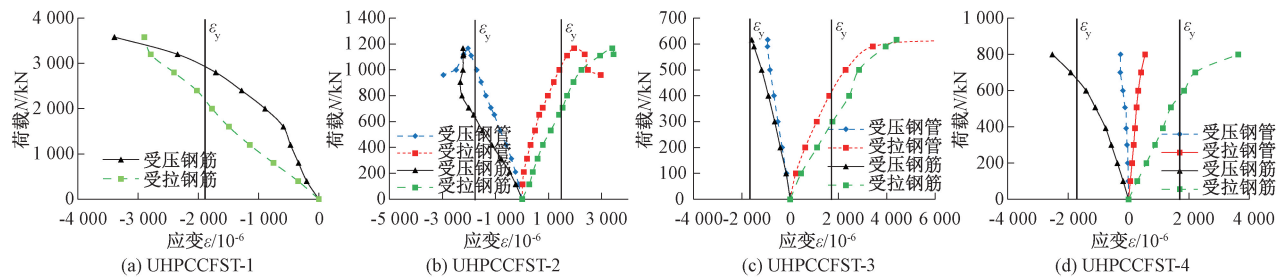


图 9 轴向荷载(N)-钢材应变(ε)关系曲线

Fig.9 Relations between axial load (N) and steel strain (ε)

典型试件(UHPCCFST-2)跨中截面的 UHPC 轴向应变分布如图 10 所示。可见,试件跨中混凝土截面应变大致呈直线分布,基本符合平截面假定,反映了 UHPC 包覆钢管混凝土

表 6 试件偏压承载力
Table 6 Bearing capacity of specimens under eccentric compression

构件编号	N_{uc}/kN	N_u/kN	N_u/N_{uc}
UHPCCFST-1	3 581	2 671	0.746
UHPCCFST-2	1 160	877	0.756
UHPCCFST-3	616	427	0.693
UHPCCFST-4	804	570	0.709

图 9 所示。偏心距为 0 时(图 9(a)),试件 UHPCCFST-1 轴向应变在屈服前基本呈直线,轴心受压试件所有纵筋在受荷全过程均处于受压状态,截面左右两侧钢筋分别在荷载加载至 2 324 kN 和 3 045 kN 时达到屈服。需要说明的是,图 9(a)所示的轴心受压试件粘贴于钢管处的应变片在受荷过程中过早失效,因此未能采集到钢管的应变发展数据。偏心距为 80 mm 时(图 9(b)),试件 UHPCCFST-2 受压区钢管和钢筋分别在荷载加载至 1 033 kN 和 688 kN 时达到屈服,随后受拉区钢管和钢筋分别在荷载加载至 1 117 kN 和 916 kN 时达到屈服。当达到极限荷载时,试件的钢管和钢筋均已进入屈服状态。偏心距为 160 mm 时(图 9(c)),试件 UHPCCFST-3 受拉区钢筋和钢管分别在荷载加载至 330 kN 和 432 kN 时达到屈服,但受压区钢筋和钢管尚未屈服。试件的破坏主要归因于外部 UHPC 开裂伴随受拉侧钢管、钢筋屈服。当长细比增大到 46.1 时(图 9(d)),试件 UHPCCFST-4 在受拉区和受压区的钢筋在试件破坏时均已屈服,而此时钢管应变较小,未达到屈服状态,表明内部钢管混凝土的抗力未能充分发挥,试件的破坏主要归因于外部 UHPC 压溃及开裂伴随钢筋屈服。

叠合柱在偏心受压作用下主要表现出弯曲变形特征。

2.5 侧向挠度分布曲线

试件侧向变形沿高度分布如图 11 所示。可

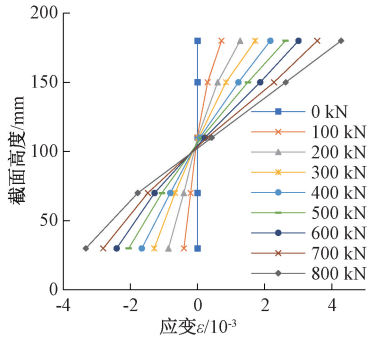


图 10 典型试件跨中截面 UHPC 应变

Fig. 10 UHPC strains at midspan of typical specimens

见,试件侧向挠度曲线的上下挠度基本对称,最大侧向挠度位于试件的跨中位置,随着荷载增大,试件的侧向变形基本接近于正弦半波曲线。此外,随着偏心距和长细比的增加,试件在相同荷载水平下侧向挠度随之增加。

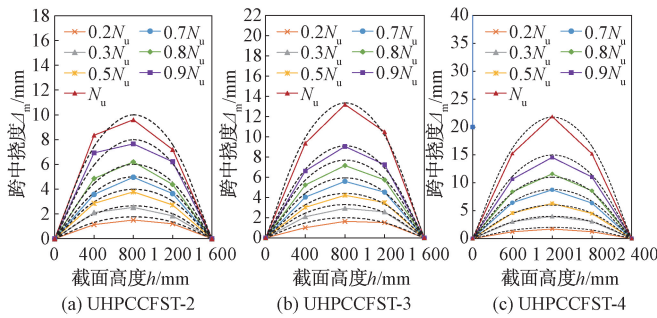


图 11 试件侧向变形沿长度分布

Fig. 11 The lateral deflection of specimens along the height

2.6 二阶效应分析

本文试验的试件最小长细比为 27.7,因此需考虑二阶效应的影响^[22]。表 7 给出了试件 UHPCCFST-2、UHPCCFST-3 和 UHPCCFST-4 的二阶效应弯矩实测表。其中, $\Delta_{\max}$ 为试件达到极限承载力 N_u 时的截面跨中挠度最大值, M_e 为偏心距在试件上产生的初始弯矩, M_Δ 为二阶效应在试件上产生的附加弯矩, $M_{\max}$ 为试件总弯矩。计算式如式(3)所示。

$$M_e = N_u e \quad (3a)$$

$$M_\Delta = N_u \Delta_{m-\max} \quad (3b)$$

$$M_{\max} = M_e + M_\Delta \quad (3c)$$

式中: $\Delta_{m-\max}$ 为试件达到 N_u 时截面跨中最大挠度。

从表中可见, M_Δ 对试件压弯作用的影响不容忽视。试件 UHPCCFST-2、UHPCCFST-3 和 UHPCCFST-4 的 M_Δ 分别为 21.99、24.09、29.82 kN·m,所占试件总弯矩的比重分别为 20.3%、25.3% 和 36.5%。当偏心距从 80 mm 增加至 160 mm 时,

$M_\Delta/M_{\max}$ 占比增加了 24.3%。当长细比从 27.7 增加至 41.6, $M_\Delta/M_{\max}$ 占比增加了 79.3%。由此可见,二阶效应产生的弯矩随着偏心距和长细比的增大而增大, M_Δ 占试件总弯矩的比重也随之增大,二阶效应对试件压弯承载力的影响显著加强,使试件的稳定承载力和极限弯矩随之降低。

表 7 试件二阶弯矩

Table 7 Second-order moments of specimens

试件编号	$\Delta_{m-\max}/$ mm	$N_u/$ kN	$M_e/$ (kN·m)	$M_\Delta/$ (kN·m)	$M_{\max}/$ (kN·m)	$M_\Delta/M_{\max}$
UHPCCFST-2	13.2	1 160	86.1	21.9	109.0	0.203
UHPCCFST-3	18.9	616	71.1	24.0	95.1	0.253
UHPCCFST-4	21.8	804	52.0	29.8	81.8	0.365

2.7 延性

试验试件的延性通过式(4)^[26]来计算,计算结果如图 12 所示。

$$DI = \Delta_{85\%}/\Delta_y \quad (4)$$

式中: $\Delta_{85\%}$ 为荷载下降至 85% 峰值荷载时对应的轴向位移; $\Delta_y = \Delta_{75\%}/0.75$, $\Delta_{75\%}$ 为荷载上升至 75% 峰值荷载时对应的轴向位移。

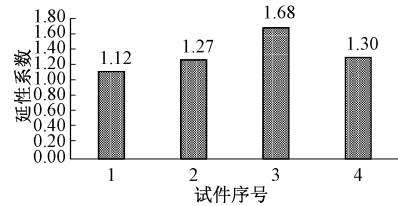


图 12 延性系数

Fig. 12 Ductility indexes

可见,偏心距为 80 mm 和 160 mm 时,试件延性系数相比轴压试件分别增大了 16% 和 50%。偏心率的增大使试件的弯曲破坏特征更加显著,因此试件极限承载力随之降低的同时,其峰值荷载后的下降段更加趋于平缓,延性有所提升。随着长细比的增加,试件的延性系数有所提高,但提高幅度较为有限。这可能是由于长细比的增大,试件的失稳破坏特征更加明显,因此内部钢管混凝土的抗力发挥程度较为有限。

3 结 论

在本文研究参数范围内可得到以下结论:

1) UHPC 包覆钢管混凝土叠合柱在偏心受压作用下表现出典型的压弯破坏特征,由于内钢管混凝土的存在,使试件具有较高的极限承载力和后期承

载力,表现出延性破坏特征。钢纤维的存在可有效缓解外包覆 UHPC 的碎裂,从而使试件混凝土局部破坏程度有所减轻。

2) 试件偏压承载力随偏心距的增加而明显降低,偏心距为 80 mm 和 160 mm 时对应的承载力较轴心受压分别降低了 67% 和 82%。二阶效应对试件承载力影响较为显著,偏心距为 80 mm 和 160 mm 时,二阶效应产生的附加弯矩占总弯矩的 20.3% 和 25.3%,随着长细比由 27.7 增大到 46.1,二阶弯矩占比提高至 36.5%。

3) 试件在受荷过程中外包覆 UHPC 的轴向应变基本符合平截面假定,试件整体侧向挠度分布接近于正弦半波曲线。随着偏心距和长细比的增大,试件的延性系数有所提高。

4) T/CECS 188—2019《钢管混凝土叠合柱结构技术规程》推荐的叠加法计算 UHPC 包覆钢管混凝土叠合柱偏压承载力结果偏于安全。

需要说明的是,由于物理试验的成本较高,因此本文仅以偏心距和长细比为参数完成了 4 个 UHPC 包覆钢管混凝土叠合柱偏压试验,在参数范围内考察了试件的破坏模态和力学响应。未来还将进一步开展有限元扩展参数分析,以更全面地研究各参数对组合构件工作机理的影响规律,本文的试验结果可为有限元模型提供必要的验证数据。

参 考 文 献

- [1] 陈宝春,季韬,黄卿维,等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
- [2] 阎培渝. 超高性能混凝土(UHPC)的发展与现状[J]. 混凝土世界, 2010(9): 36-41.
- [3] HAI L H, LIAO F Y, TAO Z, et al. Performance of concrete filled steel tube reinforced concrete columns subjected to cyclic bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8): 1607-1616.
- [4] LI W, XU L F, QIAN W W. Seismic performance of 3-D steel beam to concrete-encased CFST column joints: tests[J]. Engineering Structures, 2021, 232(4): 111793.
- [5] 胡昌明,韩林海. 圆形钢管混凝土叠合构件抗冲击性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 11-17.
- [6] 吴庆雄,余智敏,袁辉辉,等. 钢管混凝土箱形叠合柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(6): 108-117.
- [7] JIN L, LIANG J, CHEN F, et al. Prediction of the plastic hinge length for square CFST stocky columns[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 181, 110104.
- [8] 廖飞宇,赵剑,尧国皇,等. 钢管混凝土叠合柱-混凝土梁节点滞回性能的有限元分析[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(5): 1-12.
- [9] LIAO F Y, HAN L H, TAO ZH. Behaviour of composite joints with concrete encased CFST columns under cyclic loading: experiments[J]. Engineering Structures, 2014, 59: 745-764.
- [10] CHEN J Y, WANG F C, HAN L H, et al. Flexural performance of concrete-encased CFST box members[J]. Structures, 2020, 27: 2034-2047.
- [11] 陈宝春,李莉,罗霞,等. 超高强钢管混凝土研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 1-21.
- [12] HUA J Y, HUANG Y F, LI W J, et al. Compressive behaviour of UHPC-filled square high-strength steel tube stub columns under eccentric loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 198, 107558.
- [13] RUI Z, SHIMING C, PING G, et al. Structural behavior of UHPC filled steel tubular columns under eccentric loading[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 156, 106959.
- [14] 陈振新,胡红松,许力,等. 内配螺旋箍筋方钢管超高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊 2): 288-294.
- [15] CHEN H Y, LIAO F Y, YANG Y X, et al. Behavior of ultra-high-performance concrete (UHPC) encased concrete-filled steel tubular (CFST) stub columns under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 202, 107795.
- [16] HE S H, YANG G, ZHOU W J, et al. Evaluation of shear lag effect in HSS-UHPC composite beams with perfobond strip connectors: Experimental and numerical studies[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 194, 107312.
- [17] 韦建刚,罗霞,陈宝春,等. 圆高强钢管 UHPC 梁抗弯性能研究[J]. 工程力学, 2021, 38(1): 183-194.
- [18] YAN Y X, XU L H, LI B, et al. Axial behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) filled stocky steel tubes with square sections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 158: 417-428.
- [19] 罗霞,韦建刚,韩金鹏,等. 高强钢管超高强混凝土短柱偏压力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊 2): 271-277.
- [20] 王秋维,王福星,王程伟. 圆钢管 UHPC 短柱偏压力学性能与承载力计算研究[J]. 建筑结构, 2024(9): 1-8.
- [21] 吴方红,曾彦钦,徐礼华,等. 圆形钢管含粗骨料超高性能混凝土中柱偏压力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2023, 40(增刊 1): 191-199, 206.
- [22] 安钰丰. 方形钢管混凝土叠合压弯构件力学性能和设计方法研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- [23] 廖飞宇,韩林海. 方形钢管混凝土叠合柱的力学性能研究[J]. 工程力学, 2010, 27(4): 153-162.
- [24] 中国工程建设标准化协会. 钢管混凝土叠合柱结构技术规程: T/CECS 188—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2020.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准: GB/T 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2024.
- [26] TAO Z, HAN L H, WANG Z B. Experimental behaviour of stiffened concrete-filled thin-walled hollow steel structural (HSS) stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(7): 962-983.