文章编号:1674-2974(2024)01-0055-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024006

预制拼接槽型UHPC柱偏心受压性能试验研究

周云[1,2],周易[1†],李剑[3],潘恒[3],杜宗[3]
[1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082;
3. 中建三局第一建设工程有限责任公司,湖北 武汉,430040]

摘 要:为研究预制拼接槽型UHPC柱在受压条件下的力学性能及其影响因素,开展2根整浇UHPC柱及14根预制拼接槽型UHPC柱在不同拼接形式、不同偏心受压方向及不同偏心距下的轴心或偏心受压试验研究.通过考察试件的极限承载力、破坏形态、轴向及侧向变形性能,研究了拼接方式、偏压方向和偏心距对其静力性能的影响.试验结果表明:钢纤维延缓了UHPC的开裂,增强了试件的变形能力,但预制拼接槽型UHPC柱在轴压和小偏压荷载下仍表现出明显脆性破坏特征;在该试验中,偏压柱的破坏形态主要为小偏心受压破坏及大偏心受拉破坏;在相同偏心距下,不同拼接形式、不同偏心受压方向的柱体破坏形态及承载能力表现趋于一致;在相同尺寸与配筋下,预制拼接槽型UHPC柱承载力随偏心距的增加而减小.最后,通过对比试件承载力试验值和我国现行规范理论计算值,定性地指出了现行规范的局限性.本文试验数据可为预制拼接槽型UHPC柱设计提供参考.

关键词:预制拼接槽型UHPC柱;轴心受压;偏心受压;受压试验;极限承载力
中图分类号:TU375.3 **文献标志码**:A

Experimental Study on Performance of Precast Spliced Slotted UHPC Columns under Eccentric Compression

ZHOU Yun[1,2],ZHOU Yi[1†],LI Jian[3],PAN Heng[3],DU Zong[3]
[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China;
3. China Construction Third Bureau First Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040,China]

Abstract: To investigate the factors influencing the mechanical performance of precast spliced slotted ultra-high performance concrete (UHPC) columns under eccentric compression, two fully cast UHPC columns and fourteen precast spliced slotted UHPC columns were tested under axial or eccentric compression loading with different splicing forms, different eccentric compression directions, and different eccentricities. The influence of splicing forms, eccentric compression directions, and eccentricities on the static performance of the specimens is analyzed

* **收稿日期**:2022-09-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878264), National Natural Science Foundation of China(51878264); 湖南省重点研发计划项目(2022SK2096), Key Research and Development Program of Hunan Province(2022SK2096); 湖南省交通厅科技进步与创新项目(201912), Science and Technology Progress and Innovation Project of the Department of Transportation of Hunan Province(201912); 河南省交通科技项目(2020G11), Transportation Science and Technology Project of Henan Province(2020G11)
作者简介:周云(1979—),男,湖南长沙人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: zhouyi098@hnu.edu.cn

by investigating the ultimate carrying strength, failure modes, and axial and lateral deformation capacity. The results indicate that steel fibers can prevent premature cracks of UHPC and enhance the deformation capacity of the specimens, but the precast spliced slotted UHPC columns exhibit significant brittle failure characteristics under axial and eccentric compression load. In this experiment, the failure modes mainly divide into the compression failure mode for small eccentricity and tension failure for large eccentricity. The columns with different splicing forms and eccentric compression directions have similar behavior under the same eccentricity. The ultimate carrying strength of precast spliced slotted UHPC columns decreases with the increase of eccentricity under the same section dimension and reinforcement ratio. Finally, the limitations of the current Chinese codes are pointed out qualitatively by comparing the experimental ultimate carrying strength with the theoretical values by referring to the current Chinese codes. The test date in this paper can provide a reference for precast spliced slotted UHPC column design.

Key words: precast spliced slotted UHPC columns; axial compression; eccentric compression; compression test; ultimate capatity

近年来,随着国家工业化进程的推进,住建部明确指出要大力发展装配式建筑,提出装配式建筑占新建建筑的比例达到30%以上的要求[1]. 与此同时,超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)具有强度高、耐久性好、绿色环保等优势,可大幅提高建筑结构使用寿命,降低结构自重,优化空间使用,减少全寿命周期成本,在工程建设领域使用愈加广泛[2-4].

目前,关于UHPC柱子构件的研究集中于轴心荷载作用下钢纤维含量、配箍率、箍筋形式等因素对柱体强度及破坏形态的影响,发现钢纤维的加入可以减少箍筋的用量,并可以有效减少UHPC的剥落和压碎现象,防止纵向钢筋弯曲. Shin等[5-6]通过对9根UHPC方柱及6根UHPC圆柱进行轴压试验,发现钢纤维的加入可以有效延缓裂缝发展,防止柱体保护层过早剥落,且钢纤维可以替代部分箍筋. Sugano等[7]对9根UHPC方柱在轴压状态下的表现进行了研究,发现加入钢纤维、提高配箍率均可使柱体核心混凝土的抗压强度提高. Hosinieh等[8]对6根UHPC方柱进行了轴压试验,结果表明箍筋的间距和形式是影响UHPC柱轴向强度和延性的重要因素. 唐昌辉等[9]对10根不同长细比的UHPC柱进行了试验研究,结果表明,UHPC轴心受压柱的极限承载力随着长细比增大而减小,并提出UHPC轴心受压柱稳定系数可按普通钢筋混凝土轴心受压柱稳定系数取值. 杨克家等[10]对4根相同的中空截面UHPC柱进行了试验研究,并发现中空截面UHPC柱可有效避免失稳,但在高应力状态下,构件缺陷会显著影响其工作性能. 杨俊等[11]对18根低配筋UHPC中空短柱进行了轴压试验研究,结果表明,构件的宽厚比较大时,有失稳破坏的风险,此时承载力会随箍筋间距的减小而提高;构件的宽厚比较小时,箍筋间距对承载力影响较小.

在实际工程中,柱体往往处于偏心受压状态,由于UHPC具有较高的抗拉强度,因此UHPC在压弯荷载下可能具有更优异的性能表现,但目前对于UHPC柱压弯荷载作用下的研究较少. 目前的研究显示,钢纤维的加入使得UHPC柱体有更好的延性与侧向变形能力. Malik等[12]对6根UHPC无配箍方柱进行了轴压和偏压试验研究,试验表明,加入大量钢纤维可以有效防止保护层混凝土剥落和纵向钢筋屈曲. Hung等[13]研究了UHPC细长柱在偏心受压条件下的受力性能,结果表明加入钢纤维可抑制UHPC细长柱体的剥落和破碎. 高含量的钢纤维能够补偿不利配箍形式产生的影响,减少箍筋的使用量,并提高柱体延性. Shi等[14]通过对22根UHPC柱进行大偏心受压试验,确定了不同截面尺寸、配筋率、有无钢纤维条件下UHPC柱的偏心受压承载特性. Ma等[15]测试了6根UHPC柱在不同偏心率、钢纤维含量和配箍率下的表现,总结了UHPC柱的不同的破坏模式特征;在承载力计算方面考虑了UHPC抗拉强度的贡献,采用等效矩形应力图进行简化计算,并提出理论计算公式.

目前关于装配式UHPC柱的试验研究相对较少,主要集中于纤维含量、配箍率等对柱体受力性能的影响. 且柱体局限于传统混凝土的设计方式,往往采用实心截面,对于中空截面形式的柱体研究较少.

由于材料强度高,截面未充分利用,浪费较大,不能充分发挥UHPC的特性.本文将UHPC引入装配式建筑结构中,为了避免现场湿作业,采取模块化的思想,将柱体分割为槽型预制构件,利用螺栓连接,将槽型子构件正向和反向拼接组装成不同形式的柱(回字形和工字形),选用中空截面柱并设置加劲肋的形式,以充分利用UHPC强度,同时避免柱体失稳,形成全装配式结构体系的一部分.

本文通过2根整浇UHPC柱及14根预制拼接槽型UHPC柱的轴压及偏压试验,研究预制拼接槽型UHPC柱在不同拼接形式、压弯方向、偏心距下的力学性能表现,揭示其破坏规律,为预制拼接槽型UHPC柱的工程设计及推广应用提供数据支持.

1　试验概况

1.1　试验设计

预制构件由两片槽型子构件组成,子构件预制槽型空心,同时为防止失稳等间距设置加劲肋,并在加劲肋截面两侧预留螺栓孔.通过螺栓将两片子构件相连,形成槽型空腔相对的柱体(回字形柱体)或槽型空腔相背的柱体(工字形柱体),如图1所示.试验设计制作了共16根试验构件,包括2根整浇试件及14根预制试件,研究参数包括拼接方式、偏心受压方向、偏心率.

为了减小试件长细比对本身承载力及稳定性的影响,试件均设计为短柱[16-17],试件总高度均为H=1 500 mm,试验段高度为H'=950 mm.为防止柱体端部发生局压破坏,柱两端均设为实心段,并进行箍筋加密.

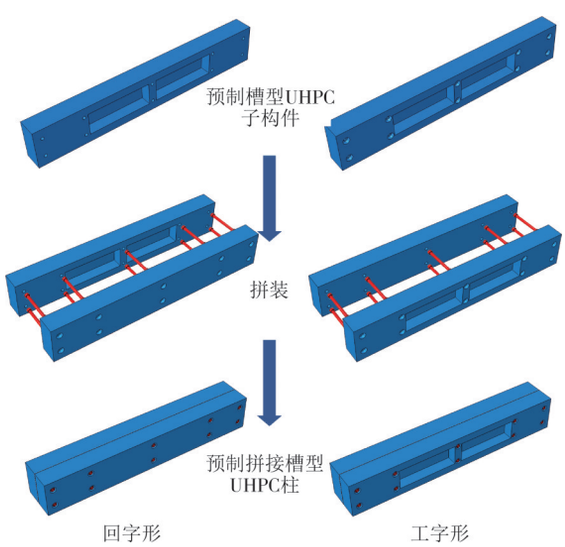


图1　预制拼接槽型UHPC柱示意图

Fig.1　Sketch map of precast spliced slotted UHPC columns

根据《活性粉末混凝土结构技术规程》(DBJ 43/T 325—2017)[16]规定,UHPC试件的保护层厚度取10 mm.整浇试件一次浇筑完成,预制试件采用两槽型预制子构件通过8.8级M18高强螺栓连接成回字形或工字形试件,试件拼接时统一施加的螺栓扭矩为120 N•m.试件壁厚均为50 mm,回字形柱截面外部尺寸为240 mm×240 mm,空心尺寸为140 mm×140 mm;工字形柱截面腹板尺寸为100 mm×140 mm,翼缘尺寸为240 mm×50 mm.

柱中纵筋均采用12⏚12,箍筋采用ϕ8@100,两端加密区为ϕ8@50.所有试件的参数如表1所示,试件尺寸及配筋见图2.

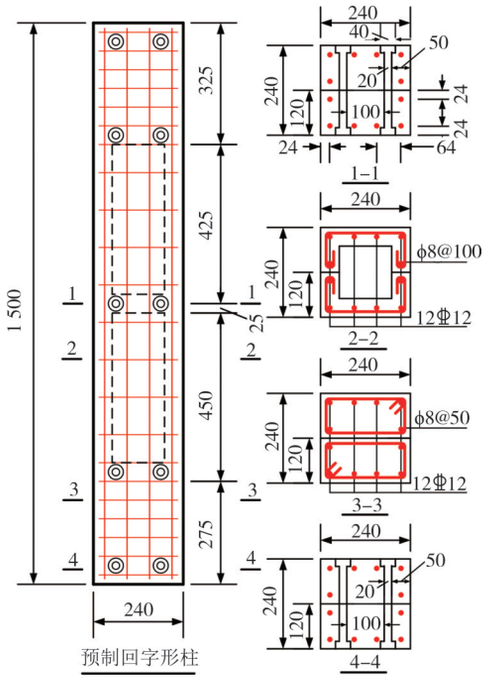
表1　试件参数表

Tab.1　Parameters of specimens

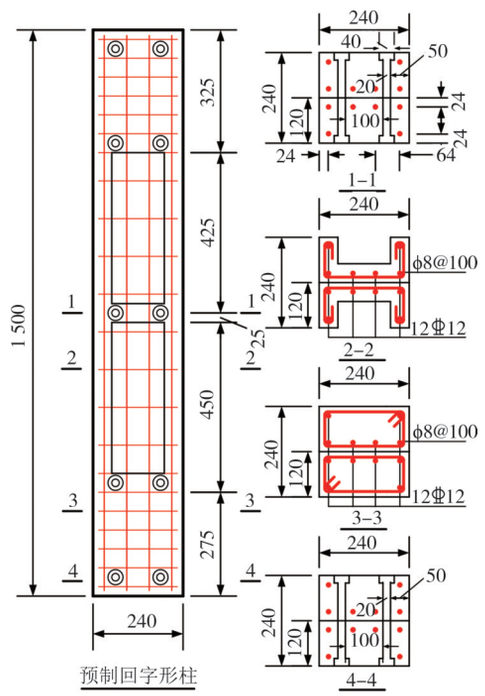
试件名称	偏心距/mm	拼接方式	偏压方向
R-0-I	0	回字形整浇	轴向受压
I-0-I		工字形整浇	
R-0-P		回字形预制	
I-0-P		工字形预制	
R-S-3-P	32.5	回字形预制	强轴压弯
I-S-3-P		工字形预制	
R-W-3-P		回字形预制	弱轴压弯
I-W-3-P		工字形预制	
R-S-6-P	65.0	回字形预制	强轴压弯
I-S-6-P		工字形预制	
R-W-6-P		回字形预制	弱轴压弯
I-W-6-P		工字形预制	
R-S-9-P	97.5	回字形预制	强轴压弯
I-S-9-P		工字形预制	
R-W-9-P		回字形预制	弱轴压弯
I-W-9-P		工字形预制	

注:平行于拼接缝的轴为强轴压弯轴,垂直于拼接缝的轴为弱轴压弯轴.

试件的名称为R/I-S/W-0/3/6/9-I/P形式,其中R表示回字形拼接方式,I表示工字型拼接方式;S表示偏心受压轴为强轴,W表示偏心受压轴为弱轴,轴压试件无强弱轴,命名中将强弱轴省略;0表示偏心距为0 mm,即轴心受压,3、6、9表示偏心距分别为32.5 mm、65.0 mm、97.5 mm;I表示试件为整浇试件,P表示试件为预制拼接试件.



(a)预制回字形柱尺寸及配筋图



(b)预制工字形柱尺寸及配筋图

图2 试件尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig.2 Dimension and reinforcement diagram of specimens(unit: mm)

1.2 试件材料基本参数

本次试验使用的UHPC干混料为湖南固力工程新材料有限责任公司产品,干混料中含有体积掺量2%的直钢纤维,直钢纤维的直径为0.2 mm,长度为13 mm,拉伸强度为2 700 MPa,弹性模量为150 GPa.表2列出了UHPC的配合比.

表2 UHPC配合比

Tab.2 Mix proportion of UHPC kg/m^3

$\rho_{水泥}$	$\rho_{硅粉}$	$\rho_{沙}$	$\rho_{超细矿粉}$	$\rho_{钢纤维}$	$\rho_{水}$	$\rho_{减水剂}$
870	180	1 000	240	195	233	24

在浇筑UHPC的同时,预留同批次边长为100 mm的立方体试块,用于测量立方体抗压强度;预留尺寸为100 mm×100 mm×300 mm的棱柱体试块,用于测量轴心抗压强度和弹性模量;预留尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试块,用于测量抗折强度,并换算抗拉强度.UHPC的浇筑、取样、养护均按照标准要求[18-19],在浇筑过程中进行随机取样,并随试件一同进行养护.对UHPC材料力学性能实测结果取平均值,如表3所示.

表3 UHPC实测力学性能指标

Tab.3 Measured mechanical properties of UHPC

立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	抗折强度/MPa	抗拉强度/MPa
162.6	151.0	47.2	18.9	9.8

本次试验中所有试件所使用的纵筋均为直径12 mm的HRB400级钢筋,箍筋均为直径8 mm的HPB300级钢筋,螺栓为8.8级M18高强螺栓.纵筋与箍筋均在同批材料中各留3根500 mm长钢筋用于材料性能性试验.根据《金属材料室温拉伸实验方法》(GB/T 228.1—2021)[20]规定,对实测结果取平均值,所有钢筋材料力学性能指标如表4所示.

表4 钢筋实测力学性能指标

Tab.4 Measured mechanical properties of steel bar

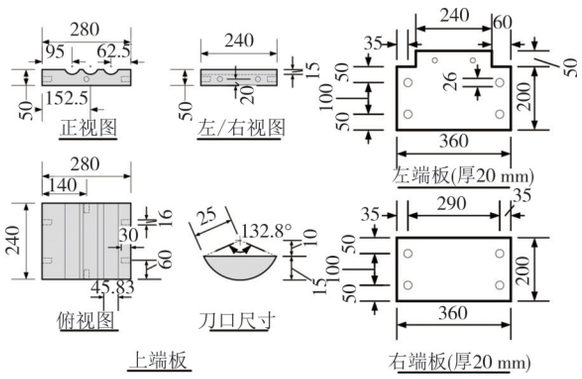
钢筋等级	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	断后伸长率/%
HRB400	432	618	28.9
HPB300	360	519	35.2

1.3 加载及测试系统

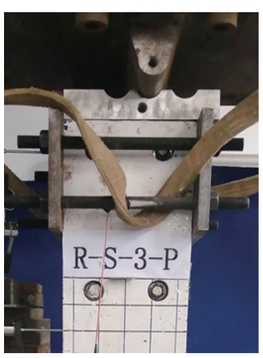
试验在湘潭大学土木工程与力学学院结构实验室10 000 kN多功能结构试验系统上进行,轴压试件直接放置在试验机加载板上进行均布加载,偏压试件两端使用单刀铰支座放置在试验机上,单调加载直到试件破坏.

为了避免两端发生局部受压破坏,所有试件加载时在顶部设置50 mm厚钢板作为荷载分布板,并在钢板与试件间撒入适量石英砂.钢板采用高强合金钢制作以避免加载时破坏或产生过大变形,钢板上有切割成型圆弧,可与刀铰充分接触,确保刀铰准确定位以及荷载有效传递,并采用左右夹板及对拉

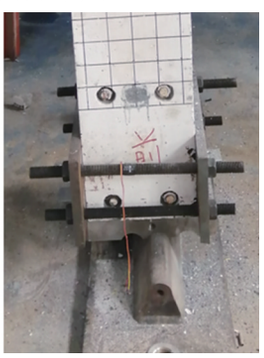
螺栓对端部进行加固,以防止加载板滑移,端部加载板夹具图如图3所示.



(a)端部加载板设计图(单位:mm)



(b)上端部加载板实物图



(c)下端部加载板实物图

图3　端部加载板示意图

Fig.3　Diagram of loading plate

试验开始后,首先进行预加载使各部分充分接触并检查各测试系统工作状态,预加载值不超过预估极限荷载的1/20.确认各部分正常工作后,卸去荷载,开始正式分级加载.正式加载过程中,在裂缝出现前每级荷载为预估极限荷载的1/15,荷载施加完成后,持荷2 min,待稳定后进行数据采集,而后施加下一级荷载.试件出现裂缝或荷载达到预估荷载的80%后,每级荷载改为预估极限荷载的1/30,持荷2 min,待稳定后采集数据并施加下一级荷载.当荷载降低至峰值荷载的80%以下时,认为试件达到破坏状态,卸去位移计等可能被损坏的仪器,进行持续加载直至试件完全破坏.

通过多功能结构试验系统中配套计算机进行加载控制,并同步记录试验过程中施加的荷载值以及竖向位移.通过沿偏压试件表面长度方向等间距布置5个位移计(LVDT)以测量侧向挠度,如图4所示.轴压试件不布置侧向位移计.

轴压试件在各面中轴线位置设置50 mm长标距的电阻应变片,偏压试件沿中截面高度方向及受拉侧和受压侧分别布置50 mm长标距的电阻应变片,

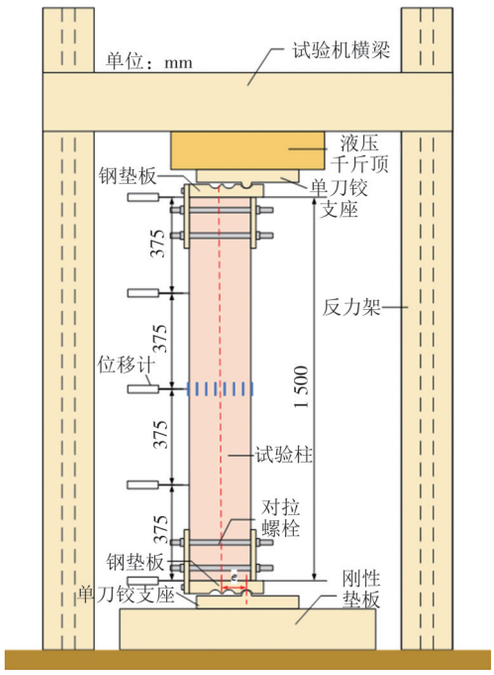


图4　试验装置图

Fig.4　Diagram of test set-up

以测量UHPC的应变.在各个试件的中截面角点处的纵筋上粘贴钢筋应变片,以测量钢筋的应变.偏心受压试件应变片布置如图5所示.

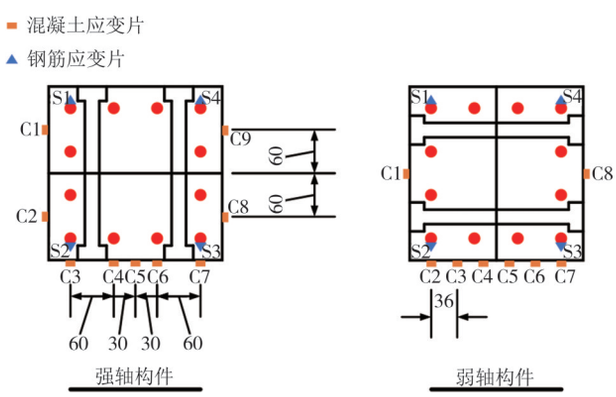


图5　偏心受压试件应变片布置图

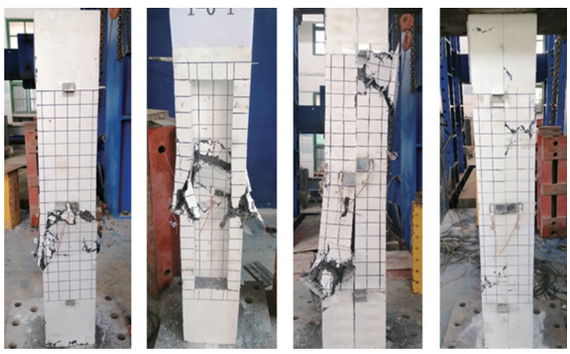
Fig.5　Strain gauges layout of specimens under eccentric compression

2　试验破坏形态

2.1　轴压试件试验破坏形态

不同轴压试件的破坏形态如图6所示.在试件达到P_u(极限承载力)前,各轴压试件的破坏过程十分接近.在加载初期,试件无明显破坏现象;随着荷载增加至50%P_u左右,开始出现少量钢纤维拔出的声音;直至荷载增加到P_u,钢纤维拉断的声音不断增

大,最后发出“嘣”的一声巨响,UHPC瞬间被压溃,形成巨大剪切裂缝,试件破坏.



(a)R-0-I (b)I-0-I (c)R-0-P (d)I-0-P

图6 轴心受压柱试件破坏形态

Fig.6 Failure modes of specimens under axial load

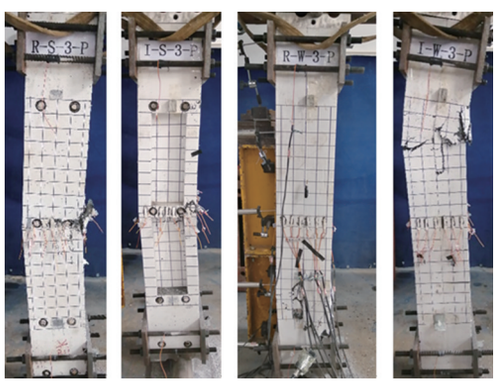
试验结果表明,不同形式试件的破坏过程趋于一致,但最终破坏形态不完全相同.在整个加载过程中,各试件长期处于弹性状态,无明显变化,直到接近P_u时,在短暂的时间内,试件突然破坏,承载力急剧下降,最终破坏形态为数条斜向主裂缝,并伴随大量细小裂缝.整浇试件的破坏位置均出现在1/2柱高附近,为1~2条横贯各个表面的主裂缝,而拼接试件的破坏位置均出现于子构件的上下截面突变处,在两个子构件上分别出现一条主裂缝,并不贯穿整个柱体.

预制拼接试件破坏形态产生的主要原因为试验构件在试验段与加载端交接处有截面突变,易产生应力集中,导致突然破坏;且试件拼接处有缝隙,使得试件脆性加大,由于内部微小裂缝与缺陷处贯通,造成局部破坏,进而引发试件破坏.由于工字形拼接柱有更厚的腹板,因此工字形拼接方式的柱体截面形式优于回字形拼接方式,具有更优的稳定性与承载能力.

2.2 32.5 mm偏心距下压弯试件试验破坏形态

加载阶段有钢纤维拔出的声响,偶尔出现UHPC压碎的“嘣”的声响,无其他明显现象,随着荷载与侧向挠度增加,直到P_u,试件突然破坏.

同为32.5 mm偏心距的情况下,4种不同拼接形式及不同偏压方向的试验柱体在加载过程中表现趋于一致,整体表现出较大的弹性阶段,最终破坏形式均为小偏心受压破坏,即由于受压区UHPC先被压溃,而导致试件失效,丧失承载能力的破坏形态,如图7所示.通过试件最终破坏形态可以发现,无论是强轴还是弱轴压弯,螺栓连接都可以保证子构件协同工作.但值得注意的是柱体加劲肋和试验段端部有截面突变,在小偏心情况下,易造成在柱中截面突变处附近破坏或柱中、柱端多处破坏,增大整个试件的脆性.同时,相比较之下,工字形弱轴压弯试件由于截面与受力钢筋面积的削弱,承载力相对较低,但在相同的偏心距下可以有相对更好的塑性表现.



(a)R-S-3-P (b)I-S-3-P (c)R-W-3-P (d)I-W-3-P

图7 32.5 mm偏心距下偏心受压柱试件破坏形态

Fig.7 Failure modes of column specimens under eccentrical compression under 32.5 mm eccentricity

2.3 65.0 mm偏心距下压弯试件试验破坏形态

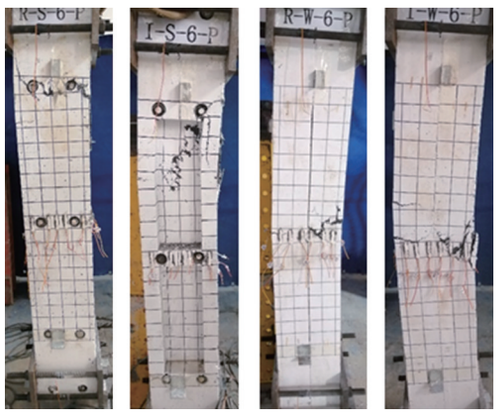
该组试件在加载至40%P_u前无明显变化,继续加载,可听见内部钢纤维拔出的清脆响声,达到P_u时,试件突然发出爆裂声并破坏.

在65.0 mm偏心距的情况下,除I-W-6-P接近界限破坏外,其余3个试件的破坏模式仍为小偏心受压脆性破坏,如图8所示.回字形试件的强弱轴和工字形试件的强轴承载力基本一致,工字形试件的弱轴承载力相对较小,但由于趋向于界限破坏,即受拉钢筋开始屈服的同时,受压区UHPC达到极限压应变,塑性相对较好.与32.5 mm偏心距下的试件相比,该组试件的承载力降低,破坏位置也更集中于柱身1/2处附近.在强轴压弯的试件中,破坏位置仍表现出一定的不确定性,这主要是由于压力机的铰支座并非处于理想转动状态及拼接缝的施工误差引起的.

2.4 97.5 mm偏心距下压弯试件试验破坏形态

该组试件在加载初期荷载较小时,已有钢纤维拉断的声音出现,最终破坏的发生仍较为突然,在达到P_u后试件迅速破坏.

在97.5 mm偏心距下,各试件的破坏模式均为大偏心受拉破坏,即由于受拉钢筋先达到屈服而导致的受压区UHPC压坏,试件失效.各个试件的最终破坏中,受拉区UHPC的裂缝均有较好的发展,通常为数条主裂缝及大量细而密的微小裂缝,如图9所示.同其他偏心距下相比较,各个试件的破坏位置相对



(a)R-S-6-P　(b)I-S-6-P　(c)R-W-6-P　(d)I-W-6-P

图 8　65.0 mm偏心距下偏心受压柱试件破坏形态

Fig.8　Failure modes of column specimens under eccentrical compression under 65.0 mm eccentricity

更加集中，均发生在同一处．在整个破坏过程中，子构件间未发生相对错动，裂缝也有贯穿拼接缝在子构件间发展的趋势，说明螺栓连接可以保证整个过程中的可靠性．总体而言，该组试件表现出一定的塑性，在破坏时均有较大的横向位移，裂缝发展较为充分．



(a)R-S-9-P　(b)I-S-9-P　(c)R-W-9-P　(d)I-W-9-P

图 9　97.5 mm偏心距下偏心受压柱试件破坏形态

Fig.9　Failure modes of column specimens under eccentrical compression under 97.5 mm eccentricity

3　试验结果与分析

3.1　荷载-竖向位移关系

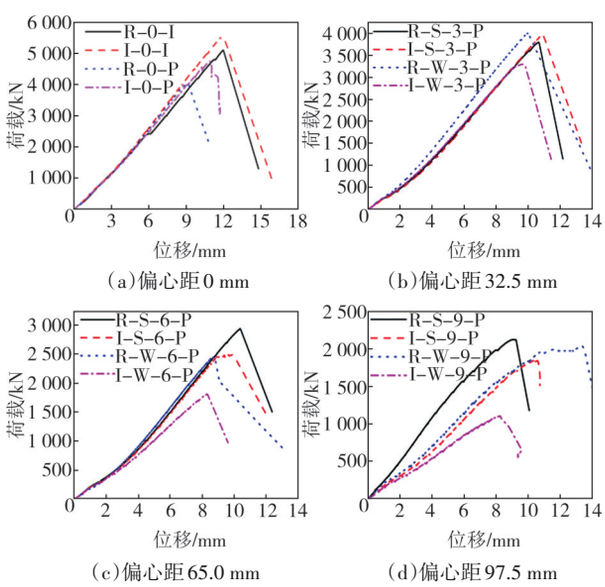
相同偏心距下不同拼接形式试件的荷载-竖向位移曲线如图 10所示．

图 10(a)中试件 R-0-P 由于发生突然破坏，其承载力低于其他试件，试件的荷载-位移曲线未能充分发展，其余试件的荷载-位移表现相近．

图 10(b)为偏心距 32.5 mm 下的一组试件，除工字形弱轴试件 I-W-3-P 由于截面的削弱，承载力相比 R-S-3-P 降低了 13.2%，其余试件均表现出较为接近的承载能力，试件 R-W-3-P、I-S-3-P 承载力相比 R-S-3-P 分别提高了 4.7%、5.3%；在达到极限荷载之前，荷载与竖向位移的关系均呈线性变化，且斜率相近，表现出相近的轴向刚度．这说明各种拼接形式的受力性能较为一致，预紧后的螺栓连接具有足够的可靠性．在达到极限荷载后，各试件的承载力立刻迅速降低，表现为小偏心受压条件下，试件具有较大的脆性．

图 10(c)与(d)中的试件表现与图 10(b)相似．图 10(c)中试件 R-S-6-P 的中性轴相比于其他试件更加偏向受拉区边缘，使得其 UHPC 受压区面积更大，承载力略高于 I-S-6-P 与 R-W-6-P.

图 10(d)中试件 R-S-9-P 由于仪器存在一定机械误差，在试验初期位移值较小，表现出刚度高于同组其余 3 个试件的现象；试件 R-W-9-P 由于 UHPC 极限压应变略高于同组其他试件，具有更好的塑性表现．



(a)偏心距 0 mm　(b)偏心距 32.5 mm

(c)偏心距 65.0 mm　(d)偏心距 97.5 mm

图 10　相同偏心距下试件荷载-位移曲线

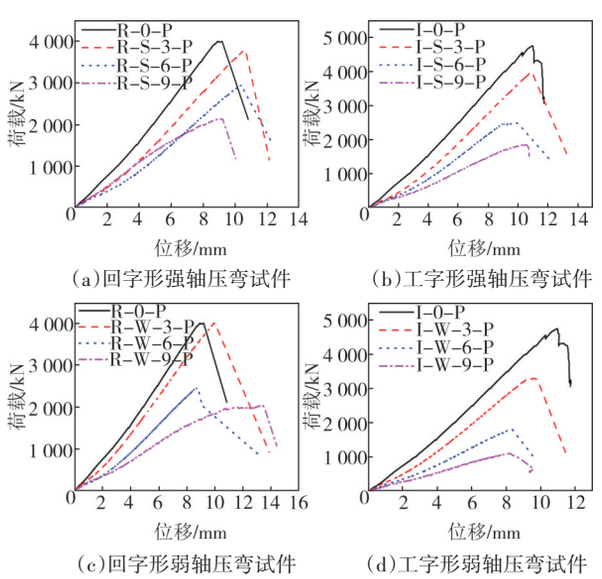
Fig.10　Load-displacement curves under the same eccentricity

相同拼接形式试件在不同偏心距下的荷载-竖向位移曲线见图 11.其中回字形预制拼接轴压试件无强弱轴之分，回字形强轴压弯试件与弱轴压弯试件在偏心距为 0 mm 的荷载位移曲线均选用 R-0-P 的曲线表示；工字形试件同理．从图 11 中可以看出，各种拼接形式下的试件荷载-位移表现较为接近．图 11(a)中试件 R-0-P 由于发生突然破坏，试件的荷

载-位移曲线未能充分发展,因此其承载力仅略高于R-S-3-P;试件R-S-9-P由于机械误差,刚度表现出比R-S-6-P偏大的现象.因此,本文选取图11(b)中工字形强轴压弯试件进行详细分析.

如图11(b)所示,随着偏心距的增加,工字形强轴压弯试件的峰值点降低,表明试件的极限承载力降低.与轴压试件I-0-P相比,偏心试件I-S-3-P、I-S-6-P、I-S-9-P的极限承载力分别降低16.5%、47.5%、61.6%;随着偏心距增大,各试件荷载-竖向位移曲线上升段斜率减小,表明试件的轴向刚度降低.当偏心距较小,试件I-0-P、I-S-3-P、I-S-6-P荷载-竖向位移曲线的上升段斜率均较为稳定,直至达到极限承载力瞬间破坏,表现出明显的脆性;而试件I-S-9-P在破坏前荷载-竖向位移曲线的斜率放缓,表现出一定的塑性.

其余拼接形式的试件整体表现出相同的规律,即随着偏心距的增大,试件的极限承载力与轴向刚度均降低.图11(c)中试件R-0-P的表现同图11(a);由于试件R-W-9-P的UHPC极限压应变略高,使得其塑性表现优于同组其他试件.图11(d)中各试件表现出与图11(b)一致的极限承载力与轴向刚度变化规律.



(a)回字形强轴压弯试件 (b)工字形强轴压弯试件

(c)回字形弱轴压弯试件 (d)工字形弱轴压弯试件

图11 相同拼接形式下试件荷载-位移曲线

Fig.11 Load-displacement curves of specimens under the same splicing form

3.2 荷载-侧向挠度关系

通过在偏心受压试件受拉侧的中部、上下1/4截面处、上下端部布置的5个位移计,可以观测试件在整个加载过程中平面内的侧向挠度变化,得到破坏截面的峰值挠度和实际偏心距,如表5所示.此外,可得到偏心受压柱沿柱高方向的挠度分布.

表5 破坏截面的峰值挠度和实际偏心距

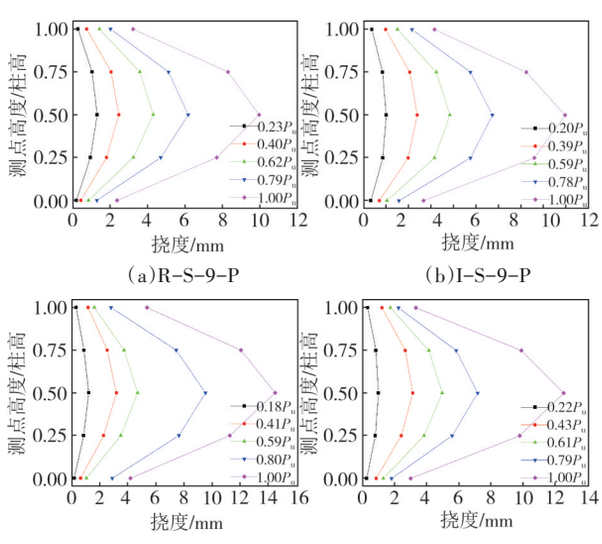
Tab.5 Peak deflection and practical eccentricity of failure section

试件名称	初始偏心距/mm	峰值挠度/mm	实际偏心距/mm
R-S-3-P	32.50	5.17	37.67
I-S-3-P		5.18	37.68
R-W-3-P		4.63	37.13
I-W-3-P		6.67	39.17
R-S-6-P	65.00	7.04	72.04
I-S-6-P		7.19	72.19
R-W-6-P		8.53	73.53
I-W-6-P		9.77	74.77
R-S-9-P	97.50	9.95	107.45
I-S-9-P		8.96	106.46
R-W-9-P		14.48	111.98
I-W-9-P		12.53	110.03

注:实际偏心距=初始偏心距+峰值挠度.

各试件跨中挠度在前几级荷载下增长相对较缓,且侧向挠度与所施加的荷载基本呈线性增长的关系.当加载至80%P_u后,试件的跨中挠度增长显著,以图12所示97.5 mm偏心距下的4个偏压试件为例,R-S-9-P、I-S-9-P、R-W-9-P、I-W-9-P达到极限荷载时的柱中侧向挠度分别为80%P_u时的161.0%、156.4%、151.9%、174.5%.

对比不同偏心距下的荷载-侧向挠度曲线,以图13中工字形强轴压弯试件在3种偏心距下的荷



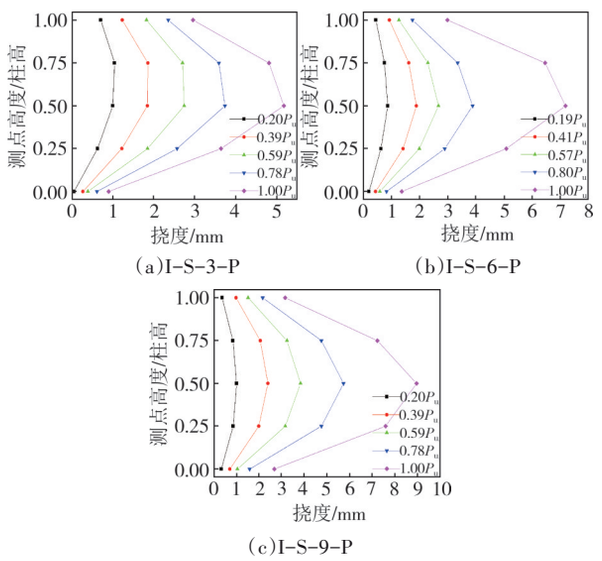
(a)R-S-9-P (b)I-S-9-P

(c)R-W-9-P (d)I-W-9-P

图12 97.5 mm偏心距下各试件荷载-挠度曲线

Fig.12 Load-deflection curves of specimens under 97.5 mm eccentricity

载-侧向挠度曲线为例，可以看出，随着偏心距的增大，试件的荷载-侧向挠度曲线更加规则，对称性更好；且在达到极限荷载时，柱中侧向挠度更大，同试件I-S-3-P相比，试件I-S-6-P、I-S-9-P的柱中最大侧向挠度分别增长了28.0%、52.6%.



(a)I-S-3-P　(b)I-S-6-P

(c)I-S-9-P

图 13　相同拼接形式下各试件荷载-挠度曲线

Fig.13　Load-deflection curves of specimens under the same splicing form

从图13可以看出，偏心受压柱从开始加载，直至达到极限承载力，整个加载过程中柱中截面挠度最大，在柱中截面上下沿柱高基本呈对称分布，形如正弦波状. 而个别试件如I-W-3-P的荷载-挠度曲线在柱体的1/4截面处挠度最大，如图14所示，这与其最终在1/4截面处发生破坏有关.

各试件端部有一定的侧向位移，主要原因如下：1)在加载端刀铰处是铰接点，但由于刀铰与试件之间垫有加载板，且为防止位移计脱落，端部位移计的安装位置稍向中部移动，造成位移计与刀铰有一定距离，在位移计测量时有一定的侧向位移；2)试件并非理想杆系模型，而是有一定厚度的实际试件，加载时会产生一定的变形.

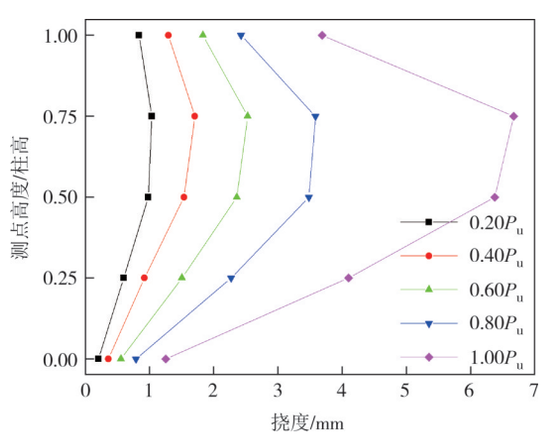


图 14　I-W-3-P荷载-挠度曲线

Fig.14　Load-deflection curves of I-W-3-P

3.3　荷载-纵向应变关系

试件的UHPC和纵筋荷载-纵向应变关系如图15所示，图中应变数据均以受压为正，受拉为负. 相同偏心距下，不同拼接形式的柱体应变表现一致，因此选取具有代表性的数个试件的应变数据进行分析.

轴压试件选取I-0-P作为典型试件，其中C1、C4为粘贴在加劲肋上的UHPC应变片. 从图15(a)可以看出，C1、C4应变片在过程中几乎无应变变化，说明加劲肋部分几乎不参与承压作用，仅起到连接子构件、增加试件稳定性的作用. 其余应变片的数据在加载过程中存在一定差异，说明UHPC材料存在一定的不均匀性. 轴压试件的各钢筋在应变达到约2 200 με后，开始发生屈服，说明钢筋在UHPC及箍筋的侧向约束下，可充分发挥其强度.

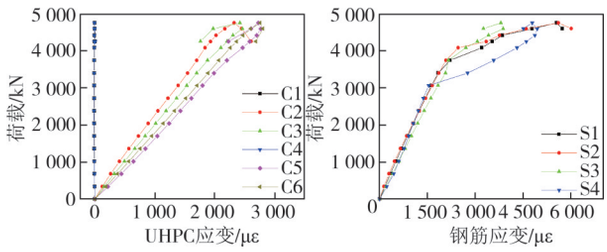
图15(b)中为偏心距为32.5 mm的典型试件R-S-3-P的荷载-应变曲线，从图中可以看出，受拉侧UHPC及钢筋应变均为正值，说明试件处于全截面受压状态. 而图15(c)中R-W-6-P的受拉侧UHPC及钢筋应变基本在0附近波动，说明65.0 mm偏心距下，中性轴在受拉侧边缘.

图15(d)中试件I-W-9-P受拉侧UHPC的荷载-应变曲线斜率先放缓，表示受拉侧附近出现裂缝，应变增长更加迅速，在加载后期，由于相邻区域裂缝的发展，受拉侧UHPC应变增长变缓. 在到达极限荷载时，受拉侧钢筋应变约为2 300 με，已经屈服，进而受压侧UHPC达到极限压应变，最终发生大偏心受拉破坏.

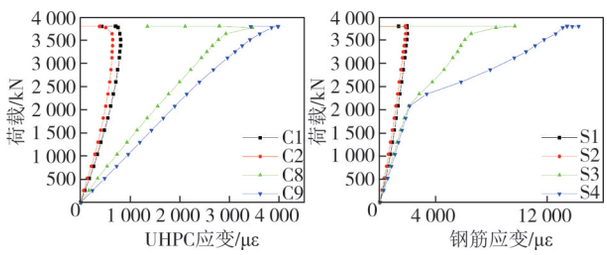
3.4　平截面假定验证

图16所示为偏心受压柱柱中截面各点的UHPC应变，在相同偏心距下，试件表现趋于一致，故选取各偏心距下的典型试件作为代表. 图16(a)中的工字形强轴压弯试件的部分应变片因贴在加劲肋上，故略去此部分应变数据.

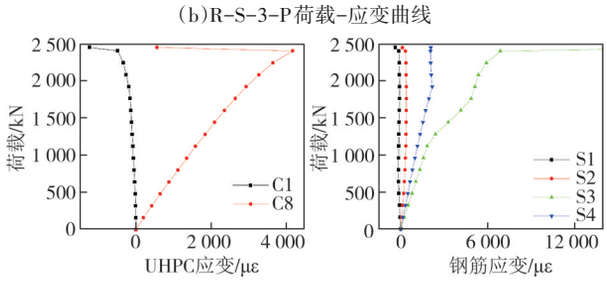
由图16可知，在加载初期，UHPC各特征点之间



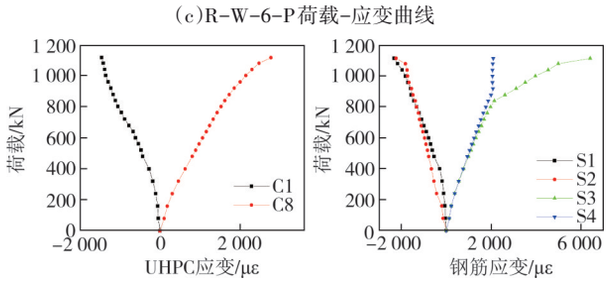
(a)I-0-P荷载-应变曲线



(b)R-S-3-P荷载-应变曲线



(c)R-W-6-P荷载-应变曲线



(d)I-W-9-P荷载应变曲线

图 15 试件典型荷载-应变曲线

Fig.15 Typical load-strain curves of specimens

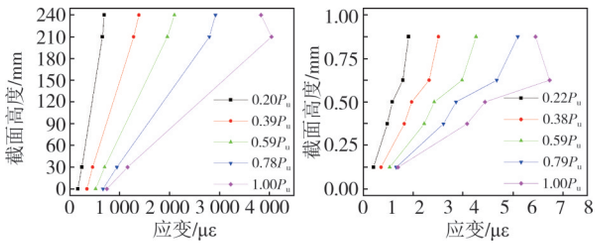
的应变变化呈线性关系,随着荷载的增大,UHPC应变沿柱截面高度逐渐呈现非线性,但整体曲线仍近似符合平截面假定.随着偏心距增大,试件中性轴的位置不断向受压侧偏移.

4 极限承载力分析

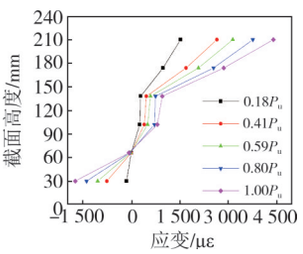
参考规范建议[16-17],预制拼接槽型UHPC柱的轴压承载力N_A按式(1)计算.

$$N_A = 0.9\varphi\left[f_c\left(A_c - A_s'\right) + f_y'A_s'\right] \tag{1}$$

式中:N_A为轴压力下柱的理论极限承载力;φ为稳定系数,按《混凝土结构设计规范(2015年版)》(GB 50010—2010)查表确定;f_c、f_y'分别为UHPC轴心抗压强度、纵向受压钢筋抗压屈服强度;A_c、A_s'分别为UHPC受压区截面面积、纵向受压钢筋截面面积.



(a)I-S-3-P (b)R-S-6-P



(c)R-W-9-P

图 16 试件中截面典型应变分布

Fig.16 Typical strain distribution on middle section

本次试验中,对于回字形拼接试件,其长细比$H/i_{强} = H/i_{弱} = 19.4 < 28$,对于工字形拼接试件,其长细比$H/i_{强} = 19.4 < 28$,$H/i_{弱} = 26 < 28$. 因此,本次试验的柱体均为短柱,在轴压承载力计算中,其稳定系数$\varphi = 1.0$.

轴压试件极限承载力试验值与理论值见表6. 由表6可知,按照规范建议计算的理论值高估了试件承载力,实际承载力比理论值平均低11.98%. 参考杨俊等[11]对低配筋UHPC中空短柱进行的轴压试验研究可以发现,规范建议理论值误差较大主要是因为空心截面柱轴压承载力还与宽厚比、配箍率等因素相关,且本文中螺栓连接也会对承载力造成影响,需进行进一步研究.

表6 轴压试件极限承载力试验值与理论值

Tab.6 Experimental and theoretical ultimate carrying strength of specimens under axial compression

试件名称	试验值/kN	理论值/kN	试验值/理论值
R-0-I	5 112	5 507	0.93
I-0-I	5 504	5 507	1.00
R-0-P	4 020	5 507	0.73
I-0-P	4 754	5 507	0.86

偏心受压预制拼接槽型UHPC柱正截面受力状态如图17所示,分别按式(2)~式(3)计算其承载力.

$$N_E = \alpha_1 f_c A_c + f_y'A_s' - \sigma_s A_s \tag{2}$$

$$N_E e = \alpha_1 f_c S_c + f_y' A_s' (h_0 - a_s') \tag{3}$$

式中：N_E为偏心受压下柱的理论极限承载力；α_1为受压区等效矩形应力图块系数；σ_s、A_s分别为纵向受拉钢筋应力和截面面积；e为压力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离；S_c为UHPC受压区对受拉钢筋合力处的面积矩；h_0为截面有效高度；a_s、a_s'分别为受拉区、受压区纵向钢筋合力点至截面受拉边缘、受压边缘的距离.

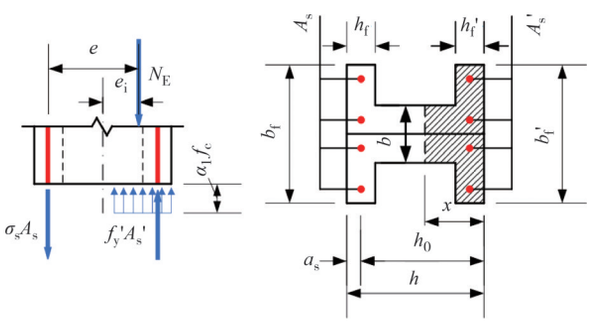


图 17　偏心受压试件截面受力状态

Fig.17　Cross section stress of specimens under eccentric compression

参考规范中C_m-η_{ns}法，通过试件的偏心距增大系数考虑偏心受压构件二阶效应：

$$\eta = 1 + \frac{1}{1\,300(e_0 + e_a)/h_0}\left(\frac{H}{h}\right)^2 \zeta_c \tag{4}$$

$$\zeta_c = 0.5 f_c A / N_E \tag{5}$$

$$e_i = \eta e_0 + e_a \tag{6}$$

$$e = e_i + h/2 - a_s \tag{7}$$

式中：η为偏心距增大系数；e_0为压力对截面重心的偏心距；e_a为附加偏心距，其值取20 mm和偏心方向截面尺寸的1/30中的较大值；H为试件计算长度；h为截面高度；ζ_c为截面曲率修正系数，当计算值大于1.0时取1.0；A为截面面积；e_i为初始偏心距.

偏压试件的极限承载力试验值与理论值见表7. 表7在考虑二阶效应的同时，也考虑了附加偏心距的影响. 结果表明，在仅考虑二阶效应时，实际承载力比理论值平均低4.38%；在同时考虑二阶效应及附加偏心距的影响后，实际承载力比理论值平均高20.24%. 这说明规范建议的附加偏心距偏大，可以偏安全地计算偏心受压柱的承载力. 尤其是对于大偏心受压试件，其承载能力受偏心距的影响更加显著，在考虑附加偏心距的影响后有较大的安全冗余.

表 7　偏压试件极限承载力试验值与理论值

Tab.7　Experimental and theoretical ultimate carrying strength of specimens under eccentric compression

试件名称	试验值/kN	仅考虑二阶效应		考虑二阶效应及e_a	
		理论值/kN	试验值/理论值	理论值/kN	试验值/理论值
R-S-3-P	3 801	4 020	0.95	3 424	1.11
I-S-3-P	3 981	4 020	0.99	3 424	1.16
R-W-3-P	4 002	4 020	1.00	3 424	1.17
I-W-3-P	3 299	3 350	0.98	2 479	1.33
R-S-6-P	2 949	2 969	0.99	2 491	1.18
I-S-6-P	2 506	2 969	0.84	2 491	1.01
R-W-6-P	2 447	2 969	0.82	2 491	0.98
I-W-6-P	1 822	1 848	0.99	1 264	1.44
R-S-9-P	2 120	2 082	1.02	1 459	1.45
I-S-9-P	1 835	2 082	0.88	1 459	1.26
R-W-9-P	2 034	2 082	0.98	1 459	1.39
I-W-9-P	1 116	964	1.16	675	1.65

注：仅考虑二阶效应时取e_a=0 mm，考虑二阶效应及e_a时取e_a=20 mm.

5　结论

通过对预制拼接槽型UHPC柱进行轴心受压及偏心受压试验，对试件加载过程表现与最终破坏形态进行研究. 分析不同拼接方式、偏心受压方向、偏心距对试验柱受压性能的影响，得到结论如下.

1）预制拼接槽型UHPC柱在轴心荷载及偏心荷载作用下，主要表现为受压破坏形态或受拉破坏形态. 在相同尺寸与配筋下，预制拼接槽型UHPC柱承载力随偏心距的增加而减小. 相同偏心距下，预制拼接槽型UHPC柱在不同拼接方式和压弯方向下的承载力基本一致，且截面基本符合平截面假定.

2）钢纤维延缓了UHPC的开裂，增强了试件的变形能力. 在达到80%极限承载力前，试件的变形均接近线弹性变化，达到极限承载力后，变形发生突变，试件表现出脆性破坏特征.

3）在试件破坏时，受压侧纵筋均达到了屈服，钢筋强度得到较为充分的利用. 在轴压、32.5 mm偏心距、65.0 mm偏心距下，仅受压侧纵筋达到了屈服；在偏心距为97.5 mm时，受拉侧纵筋也达到了屈服点，试件表现出大偏心破坏形态.

4）参考规范《混凝土结构设计规范（2015年版）》（GB 50010—2010）与《活性粉末混凝土结构技术规程》（DBJ 43/T325—2017），规范高估了轴心受压试

件承载力达11.98%;偏心受压承载力计算中,现行规范建议的附加偏心距偏大,在考虑二阶效应及附加偏心距的影响后,规范可以偏安全地计算偏心受压柱的承载力.本文试验数据可为预制拼接槽型UHPC柱承载力分析提供参考.

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.住房和城乡建设部关于印发"十四五"建筑业发展规划的通知[EB/OL].(2022-01-19)[2022-09-12] http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/27/content_5670687.htm.

[2] ZHOU M, LU W, SONG J W, et al. Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering[J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 1256-1267.

[3] HUNG C C, EL-TAWIL S, CHAO S H. A review of developments and challenges for UHPC in structural engineering: Behavior, analysis, and design [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(9): 03121001.

[4] 中国混凝土与水泥制品协会UHPC分会.2019年度中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告[J].混凝土世界,2020(2): 30-43.
CCPA-UHPC. Development report on technology and application of UHPC in 2019[J]. China Concrete, 2020(2): 30-43. (in Chinese)

[5] SHIN H O, MIN K H, MITCHELL D. Confinement of ultra-high-performance fiber reinforced concrete columns [J]. Composite Structures, 2017, 176: 124-142.

[6] SHIN H O, MIN K H, MITCHELL D. Uniaxial behavior of circular ultra-high-performance fiber-reinforced concrete columns confined by spiral reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 168: 379-393.

[7] SUGANO S, KIMURA H, SHIRAI K. Study of new RC structures using ultra-high-strength fiber-reinforced concrete (UFC)[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2007, 5(2): 133-147.

[8] HOSINIEH M M, AOUDE H, COOK W D, et al. Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under pure axial loading [J]. Engineering Structures, 2015, 99: 388-401.

[9] 唐昌辉,刘冬明. 活性粉末混凝土柱轴心受压试验研究[J].中国科技论文,2016,11(1):7-11.
TANG C H, LIU D M. Experimental study on reactive powder concrete columns under uniaxial compression [J]. China Sciencepaper, 2016, 11(1): 7-11. (in Chinese)

[10] 杨克家,孙林柱,李桅,等.RPC中空受压构件截面设计及受力性能研究[J].工程力学,2016,33(5): 166-175.
YANG K J, SUN L Z, LI W, et al. Cross section design of and mechanical performance investigation into RPC hollow members[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 166-175. (in Chinese)

[11] 杨俊,周建庭,丁鹏,等.低配筋UHPC中空短柱轴心受压力学性能[J].中国公路学报,2019,32(3): 81-92.
YANG J, ZHOU J T, DING P, et al. Mechanical performance of low-reinforced UHPC hollow short columns under axial compression load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(3): 81-92. (in Chinese)

[12] MALIK A R, FOSTER S J. Behaviour of reactive powder concrete columns without steel ties [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2008, 6(2): 377-386.

[13] HUNG C C, HU F Y, YEN C H. Behavior of slender UHPC columns under eccentric loading [J]. Engineering Structures, 2018, 174: 701-711.

[14] SHI C H, LONG M, CAO C Y, et al. Mechanical property test and analytical method for Reactive Powder Concrete columns under eccentric compression [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(4): 1307-1318.

[15] MA K Z, MA Y D, LIU B Q. Research on eccentric compression of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2019, 71(3): 211-221.

[16] 湖南省住房和城乡建设厅.活性粉末混凝土结构技术规程:DBJ 43/T 325—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
Housing and Construction Department of Hunan Provice. Technical specification for reactive powder concrete structures: DBJ 43/T 325—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范(2015版):GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision Inspecyion and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)

[19] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Adminstration for Market Regulation. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)

[20] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
State Adminstration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)