

DOI:10.11918/202005107

配筋 UHPC 柱的抗震性能及影响因素分析

邓宗才, 贺少锋, 姚军锁

(城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124)

摘 要: 为研究配筋超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 柱抗震性能及影响因素, 以碳纤维增强树脂 (carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 布缠绕、钢筋强度和剪跨比为参变量, 对 1 根普通钢筋 UHPC 柱、1 根 CFRP 布缠绕的普通钢筋 UHPC 柱和 3 根高强钢筋 UHPC 柱进行了低周往复试验, 分析了试件的破坏形态、荷载-位移曲线、延性和耗能能力等。结果表明: 对于剪跨比为 1.5~4.0 的配筋 UHPC 柱, 延性及耗能能力均较好; 在 CFRP 缠绕或较大剪跨比下, 试件的破坏形态由剪压破坏转变为弯剪破坏, 延性得到明显改善; 提高 UHPC 柱纵筋和箍筋的强度可提高试件的承载力和延性; 普通箍筋的裂后工作能力较差, 建议 UHPC 受剪构件配置屈服强度在 600 MPa 以上的箍筋; 基于桁架-拱模型, 建立了考虑钢纤维抗拉贡献、轴压比和剪跨比影响的配筋 UHPC 柱的抗剪承载力计算公式, 计算值与试验值吻合较好, 可为 UHPC 结构设计提供参考。

关键词: 超高性能混凝土 (UHPC); 高强钢筋; 抗震性能; 剪跨比; 耗能能力; 抗剪承载力

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)04-0051-11

Analysis of seismic behavior and influencing factors of reinforced UHPC columns

DENG Zongcai, HE Shaofeng, YAO Junsuo

(Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China)

Abstract: To study the seismic behavior and influencing factors of reinforced ultra-high performance concrete (UHPC) columns, by taking carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheet winding, steel strength, and shear span ratio as variables, tests were carried out on an ordinary steel reinforced UHPC column, an ordinary steel reinforced UHPC column wound with CFRP sheet, and three high-strength steel reinforced UHPC columns under low frequency cyclic loads. The failure mode, load-displacement curves, ductility, and energy dissipation capacity of the specimens were analyzed. Results show that the ductility and energy dissipation capacity of the reinforced UHPC columns with shear span ratio of 1.5-4.0 were good. Under CFRP sheet winding or large shear span ratio, the failure mode of the specimens changed from shear compression failure to bending shear failure, and the ductility was significantly improved. The bearing capacity and ductility of the specimens were improved by increasing the strength of the longitudinal steel and stirrups of the UHPC columns. The working capacity of the ordinary stirrups was poor after cracking, so it is suggested that the shear members of UHPC should be reinforced with stirrups with yield strength above 600 MPa. Based on the truss-arch model, the calculation formula of shear capacity of reinforced UHPC columns was established by taking account of the tensile contribution of steel fibers and the influences of axial compression ratio and shear span ratio. The calculated values agreed well with the test results, which can provide reference for the design of UHPC structures.

Keywords: ultra-high performance concrete (UHPC); high-strength steel; seismic behavior; shear span ratio; energy dissipation capacity; shear capacity

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 是一种新型水泥基复合材料, 具有超高强、高抗拉强度、高耐久、高韧性等特点。研究表明^[1], 提高混凝土强度可以有效减少钢筋用量和截面尺寸, 有效降低试件轴压比, 进而提高构件的延性和耗能能力。UHPC 为结构向轻质高强、高延性方向发展提供了材料支撑, 在特殊建筑工程、结构修复及改

造等方面应用前景广阔。

国内外对 UHPC 及其构件性能研究已有长足进展。Voo 等^[2-3]对预应力 UHPC 无腹筋工字形梁进行了抗剪试验和理论分析, 研究得出提高 UHPC 中的钢纤维掺量可提高试件抗剪承载力, 增大试件剪跨比将降低承载力。陈彬^[4]对配置 CRB550 箍筋的预应力 UHPC 梁进行了抗剪试验, 研究表明掺杂钢纤维可以影响试件的破坏形态, 腹筋能明显改善斜裂缝的分布。邓宗才等^[5-6]对配置 HRB500 级箍筋的 UHPC 梁进行了抗剪试验, 结果表明 HRB500 级箍筋强度能得到充分发挥, 混杂纤维和提高配箍率

收稿日期: 2020-05-22

基金项目: 北京市教委科技重点项目 (KZ201810005008)

作者简介: 邓宗才 (1961—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 贺少锋, hsfeng1990@163.com

可以提高试件的抗剪承载力。金凌志等^[7]研究了高强钢筋 UHPC 简支梁的受剪性能,研究证实高强钢筋与 UHPC 协同工作效果良好,在一定剪跨比范围内,适当配置箍筋可以改善试件的受剪延性。此外,一些学者^[8-10]对 UHPC 试件进行了弯曲性能试验研究,结果表明 UHPC 试件具有良好的弯曲韧性,其开裂应变远高于普通混凝土试件。

赵冠远等^[11]对 4 根剪跨比为 8.3 的配筋 UHPC 柱进行了无轴压的低周往复试验,研究表明 UHPC 柱具有较好的抗震性能;在保证不发生纵筋屈曲及剪切破坏的前提下,可以大幅度减小箍筋的数量及间距。郝文秀等^[12]对 5 个剪跨比为 4.3 的 UHPC 空心桥墩进行了低周往复试验和有限元模拟,研究表明 UHPC 试件具有良好的抗震性能;变形能力和延性随配箍率的增加而改善。鞠彦忠等^[13]对 18 根剪跨比为 7.5 的普通钢筋 UHPC 柱进行了低周往复试验,研究表明 UHPC 柱的延性随轴压比的增大而下降,提高配箍率一定程度上改善了滞回特性。徐慎春^[14]进行了 12 根剪跨比为 3.3 和 5.3 的高强纵筋 UHPC 柱抗震性能试验,试验表明增大轴压比会降低水平承载力和延性,影响试件破坏形态。

然而,以往对 UHPC 柱抗震性能的研究均为大剪跨比工况,而对剪跨比小于 3 的 UHPC 柱破坏规律的研究鲜见报道。为此,本文对 5 个配筋 UHPC 柱进行了低周往复试验和理论分析,研究了 CFRP 布缠绕、配筋强度和剪跨比对 UHPC 柱抗震性能的影响,为工程设计与应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件材料

1.1.1 UHPC

制备 UHPC 的原材料有 P·Ⅱ52.5R 硅酸盐水泥、硅灰、粉煤灰、矿粉、水、石英砂和钢纤维,各组分配比见表 1。P·Ⅱ52.5R 硅酸盐水泥实测 3 d 抗折强度 7.2 MPa,实测 3 d 抗压强度 34.8 MPa。硅灰的指标:比面积 20.2 m²/kg, SiO₂ 含量 95 %,烧失量 1.3 %,需水量比 124 %。粉煤灰为一级粉煤灰,其主要指标:细度(45 μm 方孔筛筛余量)6.3 %,需水量比 91 %,烧失量 1.61 %,含水量 1.0 %。矿粉的等级为 S95,其主要指标:比表面积 418 m²/kg,密度 2.88 g/cm³,烧失量 0.97 %,7 d 活性指数 84 %,流动度比 99 %。石英砂粒径为 10~40 目(0.85~2.05 mm)。钢纤维长度为 13 mm,直径 0.3 mm,长径比 43,抗拉强度 2 800 MPa。

浇筑试件时预留 18 个边长 150 mm 的 UHPC 立方体试块,与 UHPC 柱在同条件下养护,试验前测

得其立方体抗压强度 f_{cu} 的平均值为 125.6 MPa 和劈裂强度 $f_{t,s}$ 的平均值为 19.8 MPa,根据文献[15],取 UHPC 轴心抗压强度平均值 $f_{ck}=0.88f_{cu}$,计算得 UHPC 的轴心抗压强度平均值为 110.53 MPa。预留 100 mm×100 mm×300 mm UHPC 试块 3 个,试验前测得弹性模量为 56.04 GPa。

表 1 UHPC 材料组成与配合比

Tab. 1 Composition and mix proportion of UHPC						
52.5 水泥	硅灰	粉煤灰	矿粉	水	石英砂	钢纤维体积掺率/%
0.6	0.1	0.1	0.2	0.17	1.2	2

1.1.2 碳纤维布

碳纤维增强树脂基(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)布为单向编织,编织方向见图 1。CFRP 布的抗拉强度为 3 602 MPa,弹性模量为 233 GPa。CFRP 布及缠绕效果见图 1。

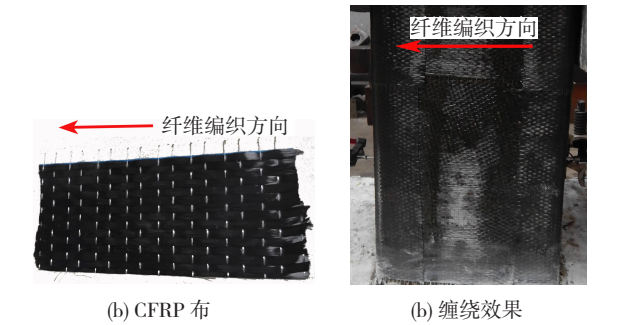


图 1 CFRP 约束

Fig. 1 CFRP confinement

1.1.3 钢筋

试验使用了两种不同强度等级的钢筋,分别为Ⅲ级普通钢筋和Ⅳ级高强钢筋。普通钢筋 UHPC 柱的纵筋和箍筋分别采用 Φ 16 和 Φ 10,高强钢筋 UHPC 柱的纵筋和箍筋分别采用 Φ 16 和 Φ 10。钢筋的规格见表 2,钢筋弹性模量取 200 GPa,屈服应变取 0.002。

表 2 钢筋表

Tab. 2 Details of reinforcement			
钢筋标号	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
Φ 10	10	437	638
Φ 16	16	436	599
Φ 10	10	606	765
Φ 16	16	551	712

1.2 试验设计

试验共设计了 5 个试件,柱截面尺寸均为 250 mm×250 mm,柱高 700 mm 或 1 200 mm,保护层厚度为 25 mm。利用 UHPC 轴心抗压强度,求得试验轴压比为 0.2。试验共设置了 3 种不同约束形式的 UHPC 柱:LC-2.0 为普通钢筋 UHPC 柱,HC-1.5、HC-2.0 和 HC-4.0 为高强钢筋 UHPC 柱,为了对比箍筋与 CFRP 的横向约束效果,设置了一个 CFRP

布缠绕的普通钢筋 UHPC 柱 LC-2.0F。各试件的参数见表 3。

表 3 试件参数设置
Tab.3 Parameters setting of specimens

试件编号	纵筋	箍筋	剪跨比	CFRP 布厚度/mm
LC-2.0	10 Φ 16	Φ 10@80	2.0	
LC-2.0F	10 Φ 16	Φ 10@80	2.0	0.334
HC-1.5	10 Φ 16	Φ 10@80	1.5	
HC-2.0	10 Φ 16	Φ 10@80	2.0	
HC-4.0	10 Φ 16	Φ 10@80	4.0	

试件的详细配筋和尺寸见图 2。

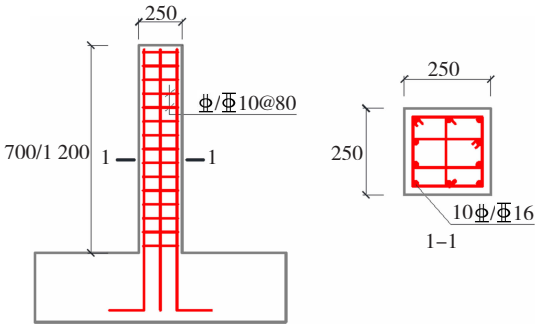


图 2 试件详图 (mm)

Fig.2 Details of specimen (mm)

1.3 加载装置及加载制度

柱顶部施加轴向荷载大小根据轴压比确定,在整个试验过程中保持轴力恒定。根据 JGJ 101—96《建筑抗震试验方法规程》,正式加载前先预加载至估算开裂荷载的 25%,检查加载装置是否与试件充分接触、各测量仪器是否正常工作。正式加载时,采用力-位移混合控制的加载方式,试件屈服前采用力控制,依次加载预估屈服荷载的 25%、50%、75%、100%,每级循环一次;试件屈服之后采用位移控制,每级位移为 Δ_y 、 $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$ 、 $4\Delta_y$,其中 Δ_y 为试件屈服位移,每级循环 2 次,各级加载后均持荷 5 min。当加载承载力下降到最大荷载值的 85% 时,试件达到极限荷载,即认为试件丧失承载力,试验结束。加载装置见图 3。

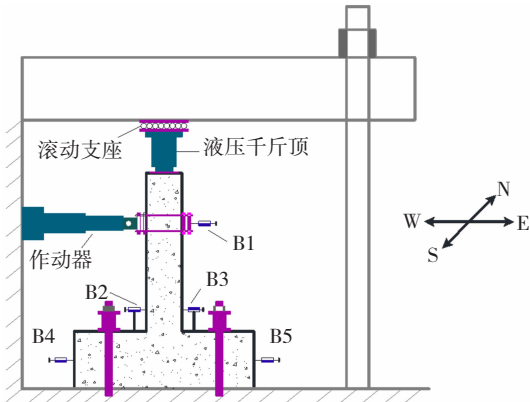


图 3 加载装置

Fig.3 Diagram of loading equipment

2 破坏形态和破坏过程

5 个试件的破坏模式分为两类:剪压破坏和弯剪破坏。当剪跨比较小时,试件发生剪压破坏,如试件 LC-2.0、HC-1.5 和 HC-2.0;当 CFRP 布缠绕或剪跨比较大时,试件发生弯剪破坏,如试件 LC-2.0F 和 HC-4.0。试件最终破坏形态见图 4。

2.1 剪压破坏

LC-2.0:当加载至 ± 320 kN 时,试件东西两立面出现横向裂缝,最大裂缝长度 12 cm;北立面出现斜裂缝,裂缝长度 20 cm。当荷载达到 ± 400 kN 时,东立面有横向裂缝贯通立面,裂缝呈斜向发展趋势。当加载至 ± 550 kN 时,箍筋率先屈服,并有少量纵筋屈服。

HC-1.5:当加载至 400 kN 时,西立面和北立面分别出现长 15 cm 和 29 cm 的斜裂缝。加载至 600 kN 时,西立面和北立面新增多条斜裂缝,东侧柱底横向裂缝贯通立面,部分箍筋率先屈服。当加载至 750 kN 时,斜裂缝继续发展,相继有箍筋和纵筋屈服。

HC-2.0:当加载至 ± 200 kN 时,出现一条连接东立面和北立面的横向裂缝,裂缝长度 10 cm。当加载至 400 kN 时,西立面出现长 7 cm 的斜裂缝。当加载至 ± 500 kN 时,部分箍筋屈服,卸载时轴力掉载明显。当荷载达到 550 kN 时,柱底横向裂缝贯通立面,部分纵筋屈服。

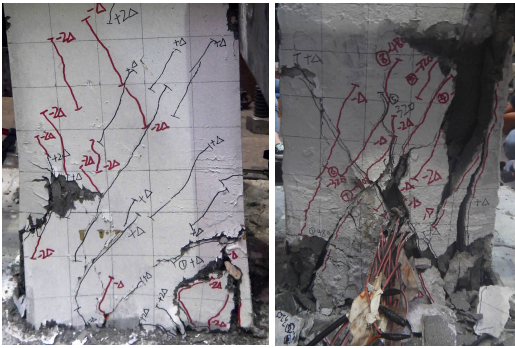
2.2 弯剪破坏

LC-2.0F:当加载至 400 kN 时,西立面出现长 6 cm 横向裂缝。加载至 550 kN 时,东西两侧底部的横向裂缝贯通,纵筋受拉屈服,卸载时轴力掉载明显。

HC-4.0:当加载至 ± 200 kN 时,东立面和北立面分别出现长 14 cm 和 8 cm 的横向裂缝,西立面出现两条通长裂缝和一条长 20 cm 横向裂缝。当加载至 ± 220 kN 时,西立面底部横向裂缝贯通,西侧受拉纵筋屈服。当荷载达到 240 kN 时,东立面底部横向裂缝贯通,东侧受拉纵筋屈服。加载过程中,裂缝不断扩展,并在位移加载时出现 UHPC 剥落。

由试件破坏过程看出,对于剪跨比最小的试件 HC-1.5,斜裂缝首先出现,并迅速扩展形成临界斜裂缝。而试件 LC-2.0 和 HC-2.0 首先在东西立面上出现横向裂缝,接着向其相邻两个立面斜向扩展,最终形成临界斜裂缝,箍筋屈服,横向裂缝贯通试件底部,部分纵筋受拉屈服。对于 CFRP 布缠绕的试件 LC-2.0F,斜裂缝发展受到抑制,箍筋应变增长较慢,在柱底横向裂缝贯通立面后,纵筋先于箍筋受拉屈服,LC-2.0F 发生弯剪破坏。剪跨比较大的试件 HC-4.0,以横向裂缝发展为主,仅南北立

面有少量斜裂缝,且最终未形成临界斜裂缝。



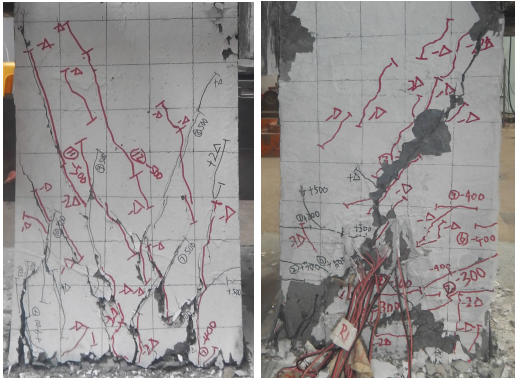
(a) LC-2.0 南立面和北立面



(b) LC-2.0F 东立面和北立面



(c) HC-1.5 南立面和北立面



(d) HC-2.0 南立面和北立面



(e) HC-4.0 南立面和北立面

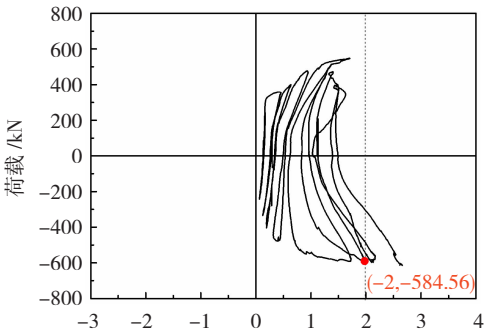
图 4 试件最终破坏形态

Fig. 4 Final failure modes of specimens

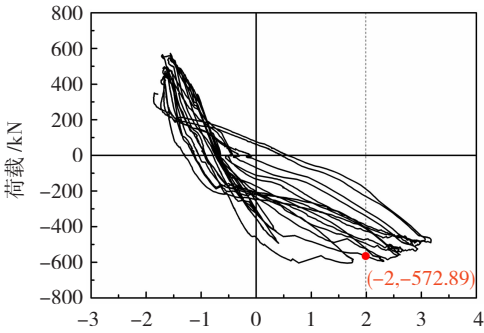
3 试验结果及分析

3.1 钢筋应变

为了说明纵筋、箍筋应力与荷载的关系,部分典型试件的纵筋和箍筋的应力 - 水平荷载曲线见图 5、6。可知,剪切破坏试件(如 LC-2.0)的纵筋在位移加载时屈服,而箍筋屈服点与峰值荷载相近。弯剪破坏试件(如 LC-2.0F)的箍筋在峰值荷载后屈服,与纵筋屈服时刻相近。剪切破坏和弯剪破坏试件的纵筋和箍筋屈服时,水平荷载均达到或接近峰值荷载,说明配筋 UHPC 短柱中的钢筋与 UHPC 变形协调良好,钢筋强度均得到充分发挥。峰值荷载前,LC-2.0 和 LC-2.0F 的塑性变形较小,纵筋和箍筋的应变增长缓慢。峰值荷载后,LC-2.0 的纵筋和箍筋应变增幅较大,应变片很快失效,而 LC-2.0F 在 CFRP 布约束下,纵筋和箍筋的应变增幅较小,应变片可继续工作。



(a) LC-2.0



(b) LC-2.0F

图 5 纵筋应力 - 水平荷载曲线

Fig. 5 Longitudinal steel stress-horizontal load curves

3.2 水平承载力和延性分析

各试件的特征荷载和特征位移见表 4。极限位移取水平荷载下降至峰值荷载的 85 % 时所对应的水平位移,试件屈服点由通用屈服弯矩法确定。表 4 中, F_y 和 Δ_y 表示屈服荷载和屈服位移, F_p 和 Δ_p 表示峰值荷载和峰值位移, Δ_u 表示极限位移。试件延性系数 μ 由式(1)确定。文献[16]指出,对于剪

跨比小于 2 的结构构件,用极限位移角 θ_p 来评价构件延性更为合适。

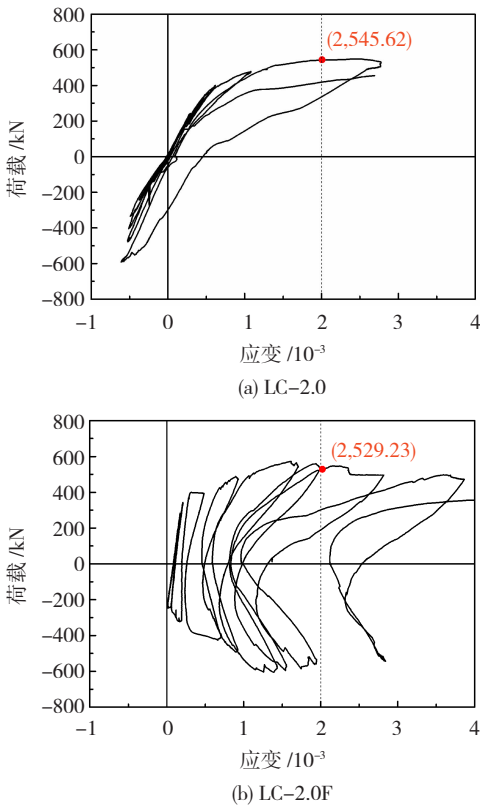


图 6 箍筋应力-水平荷载曲线

Fig. 6 Stirrup stress-horizontal load curves

表 4 试件的特征荷载和特征位移

Tab. 4 Characteristic load and displacement of specimens							
试件	F_y/kN	Δ_y/mm	F_p/kN	Δ_p/mm	Δ_u/mm	μ	θ_p
LC-2.0	489.99	5.51	571.80	12.84	17.42	3.16	1/29
LC-2.0F	496.69	4.12	566.69	6.75	22.02	5.34	1/23
HC-1.5	642.59	3.38	766.40	5.32	13.81	4.09	1/36
HC-2.0	497.19	6.12	576.83	10.34	20.47	3.34	1/24
HC-4.0	199.65	6.81	219.46	13.33	26.01	3.81	1/19

$$\mu = \Delta_u/\Delta_y \tag{1}$$

$$\theta_p = \Delta_u/H \tag{2}$$

式中 H 为加载点到柱基础顶面的垂直高度。

试件 LC-2.0 和 LC-2.0F 相比,LC-2.0F 的屈服位移和峰值位移较 LC-2.0 分别减小了 25.2 % 和 47.4 %, 而其水平承载力相近,证明 CFRP 布可以有效提高 UHPC 柱刚度,延缓试件裂缝的扩展。试件 LC-2.0F 的延性系数较 LC-2.0 提高了 71.2 %,说明 CFRP 布可以显著减缓 UHPC 柱水平承载力衰减,提高试件延性。

试件 LC-2.0 和 HC-2.0 相比,当提高试件纵

筋和箍筋的强度后,UHPC 柱屈服荷载和峰值荷载有所提高。相较于 LC-2.0、HC-2.0 的屈服位移有所增加,峰值位移略有降低,极限位移提高显著,延性系数提高了 5.7 %。试件进入塑性变形阶段后,高强钢筋可以有效减缓 UHPC 柱水平承载力衰减,改善试件延性。

试件 HC-1.5、HC-2.0 和 HC-4.0 相比,可知试件的水平承载力随着剪跨比的增大而降低,当剪跨比超过一定限值后,UHPC 柱发生弯剪破坏。由表 4 可以看出,无论剪压破坏还是弯剪破坏,UHPC 柱均具有良好的延性。

3.3 水平荷载-加载点位移滞回曲线

图 7 为试件的水平荷载-加载点位移滞回曲线。在加载初期,试件处于弹性工作阶段,滞回环窄小;随着水平荷载的增加,裂缝出现并扩展,曲线由弹性阶段进入弹塑性阶段,箍筋和纵筋逐渐屈服,滞回环趋于饱满,试件耗能增加,滞回曲线无明显捏拢效应,UHPC 柱表现出良好的耗能能力。

不同横向约束方式对比。相较于 LC-2.0,CFRP 布缠绕试件 LC-2.0F 的承载力衰减和卸载刚度衰减变缓,滞回环更加饱满。提高钢筋强度后,HC-2.0 的承载力衰减较 LC-2.0 有所缓解,而卸载刚度衰减没有明显改善。

不同剪跨比对比。由试件 HC-1.5、HC-2.0 和 HC-4.0 的滞回曲线可知,随着剪跨比的增加,试件的延性和滞回性能显著改善,极限位移提高明显。

3.4 骨架曲线

由于部分试件的剪跨比不同,不能直观地从其骨架曲线比较试件之间性能差异。因此取每个加载循环的最大荷载及其对应的位移作为参考点,将各试件的骨架曲线进行归一化处理,各试件归一化后的骨架曲线见图 8。由图 8 可知,各试件的峰前响应基本一致。而在峰值点后,各试件的延性和刚度退化差异明显。

CFRP 布缠绕和箍筋是对 UHPC 的不同横向约束方式。反向加载时,LC-2.0 在水平承载力在峰值点后衰减迅速,脆性特征明显。试件 LC-2.0F 和 HC-2.0 的延性分别在 CFRP 布和高强箍筋的约束下明显改善,刚度退化有效减缓。普通箍筋 UHPC 短柱的延性相对较差,提高箍筋强度或 CFRP 缠绕可以改善 UHPC 受剪构件的延性和刚度退化。

不同剪跨比对比。由 HC-1.5、HC-2.0 和 HC-4.0 可知,当剪跨比为 1.5 时,试件 HC-1.5 在反向加载时出现明显的荷载突减,脆性特征明显;随着剪跨比的增大,试件的特征位移增大,延性改善。

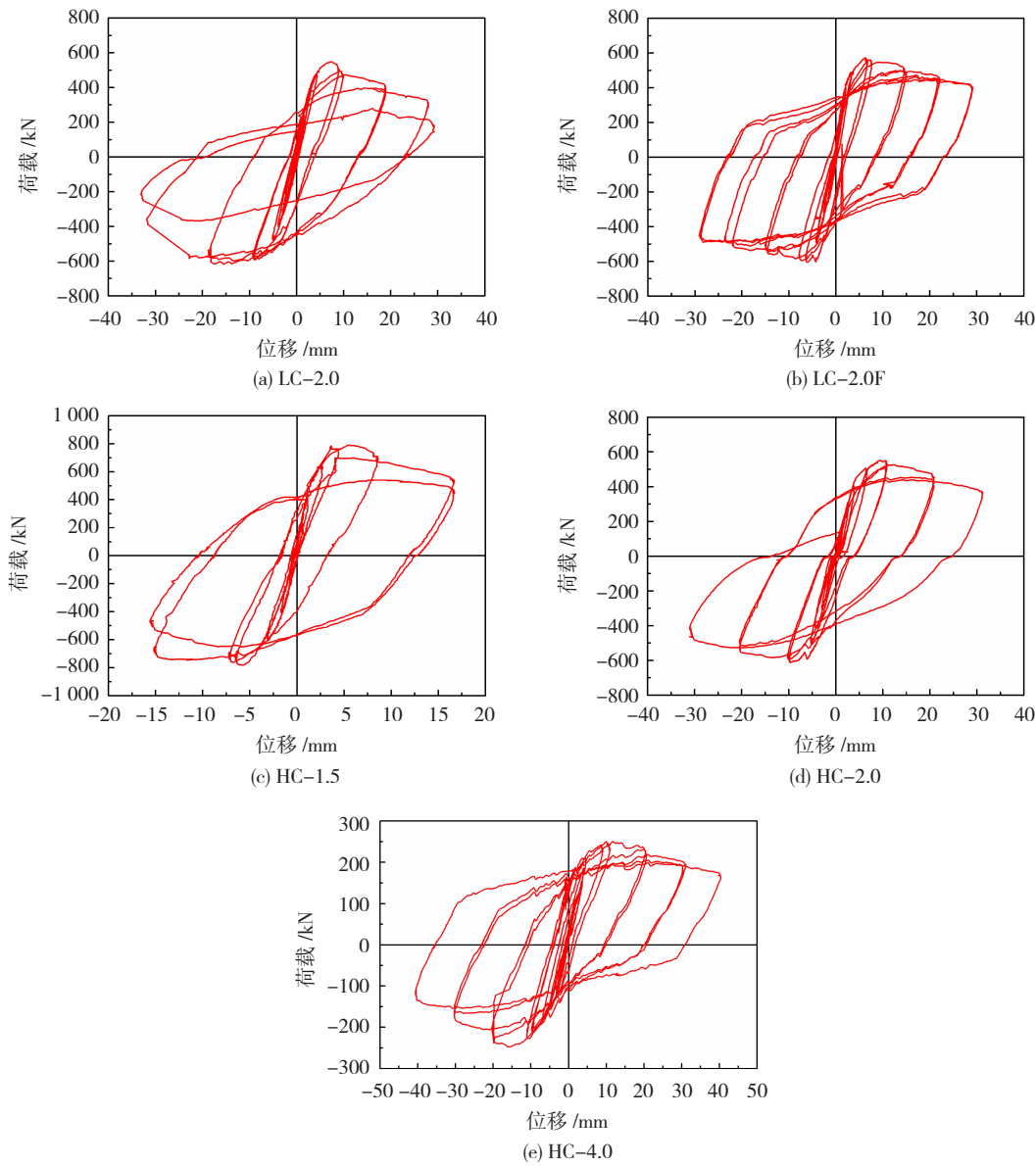


图 7 试件加载点位移 - 水平荷载滞回曲线

Fig. 7 Displacement-horizontal load hysteresis loops of specimens

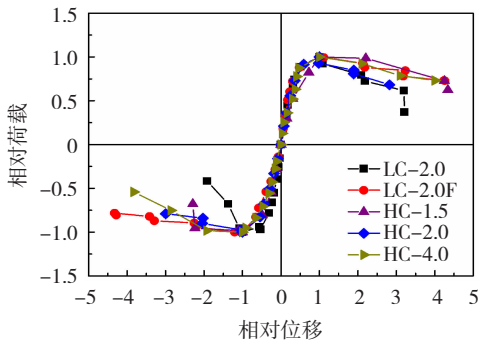


图 8 归一化后的骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curves after normalization processing

3.5 耗能能力

用耗能和等效黏滞阻尼系数来表征试件的耗能能力,其计算方法见式(3)、(4)和图 9。试件的耗能以滞回环包围的面积来计算,计算耗能值为两次加载循环的耗能平均值。

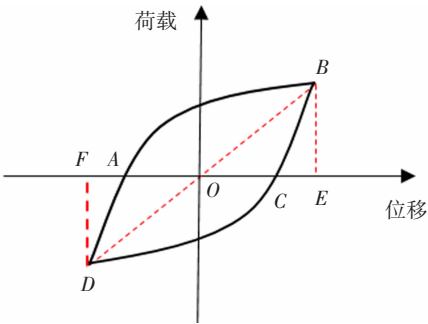


图 9 耗能和等效黏滞阻尼系数计算简图

Fig. 9 Calculation for energy dissipation and equivalent viscous damping coefficient

$$E = S_{ABC} + S_{ACD} \tag{3}$$

$$\xi_{\text{hyst}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{ABC} + S_{ACD}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \tag{4}$$

式中: E 表示一个加卸载循环下试件的耗能, ξ_{hyst} 为等效黏滞阻尼系数, S_{ABC} 和 S_{ACD} 表示滞回曲线与横

坐标轴所围成的面积, S_{OBE} 和 S_{ODF} 表示三角形 OBE 和 ODF 的面积。

图 10 为各试件的耗能及等效黏滞阻尼系数与位移之间的关系图。所有试件的等效黏滞阻尼系数均在 0.4 以上,配筋 UHPC 柱具有良好的抗震能力。

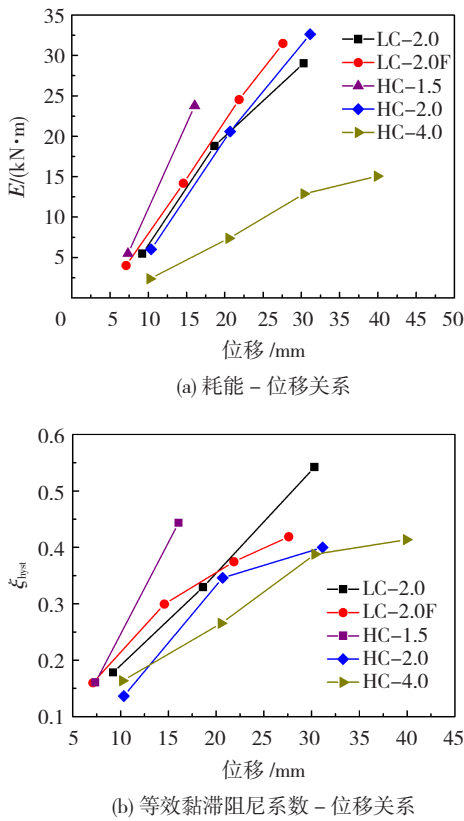


图 10 耗能与等效黏滞阻尼系数

Fig. 10 Energy dissipation and equivalent viscous damping coefficient

不同横向约束方式对比。相较于 LC - 2.0, 试件 LC - 2.0F 和 HC - 2.0 的残余变形较小, 等效黏滞阻尼系数有所降低。在加载后期, CFRP 布和高温钢筋可有效增强试件的耗能能力。

不同剪跨比对比。由 HC - 1.5、HC - 2.0 和 HC - 4.0 可知, 随剪跨比的增大, 水平荷载减小, 试件的耗能也随之降低。在加载后期, 随剪跨比的增大, UHPC 柱的耗能和等效黏滞阻尼系数衰减加快。

3.6 影响因素分析

3.6.1 钢筋强度

当箍筋屈服强度由 437 MPa 提高到 606 MPa 后, HC - 2.0 的抗剪承载力较 LC - 2.0 提高了 1.5 %。UHPC 的开裂应力和开裂应变较大, UHPC 开裂时, 普通箍筋已接近屈服, 未能有效抑制裂缝的发展。对于 UHPC 受剪构件, 当箍筋屈服强度小于 606 MPa 时, 箍筋的裂后工作能力较差, 脆性特征明显。

3.6.2 CFRP 布缠绕

CFRP 布的横向约束可以有效抑制斜裂缝的发展, 减小试件的变形。CFRP 布缠绕试件 LC - 2.0F 的特征位移较 LC - 2.0 下降了 25 % ~ 47 %, 而特征荷载仅相差 1.0 % ~ 1.4 %。由试件的破坏过程可知, LC - 2.0F 未形成临界斜裂缝, 发生弯剪破坏。因此在配筋 UHPC 受剪构件的设计中, 应当考虑 CFRP 布缠绕对临界斜裂缝倾角和破坏模式的影响。

3.6.3 剪跨比

当剪跨比在 1.5 ~ 2.0 之间时, 剪应力和正应力的比值较大, UHPC 裂缝以斜裂缝为主, 试件发生剪切破坏, 且斜裂缝与竖直方向的夹角随着剪跨比的增大而减小; 当剪跨比增大至 4.0 时, 剪应力和正应力的比值较小, UHPC 裂缝以横向裂缝为主, 试件发生弯剪破坏。剪跨比越小, 斜裂缝发展越迅速, 构件的脆性特征越明显。由试验可知, 剪跨比不小于 1.5 的配筋 UHPC 柱均具有良好的延性。

4 抗剪承载力计算方法

4.1 UHPC 柱抗剪机理分析的桁架 - 拱模型

利用桁架 - 拱模型对发生剪切破坏的试件进行承载力分析, 见图 11。假定箍筋和纵筋只受拉力, 考虑混凝土的抗拉贡献, 临界斜裂缝形成后, I 区为零应力区, II 区为箍筋和 UHPC 共同作用区域, III 区 UHPC 为单向受压的斜压杆。

图 11 中: V 表示试件所受剪力, θ 表示 UHPC 斜压杆与竖直方向的夹角, a 为剪力到支座边缘的距离。

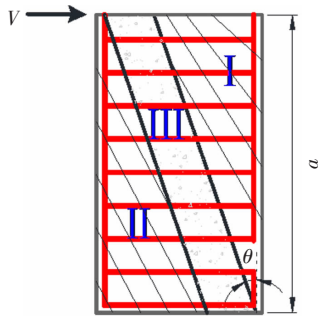


图 11 试件的桁架 - 拱模型

Fig. 11 Truss-arch model of specimens

试件的抗剪承载力 V 可以分为由桁架机构提供的抗剪贡献 V_t 和由拱机构提供的抗剪贡献 V_a , 见图 12。图 12 中: c_a 为 UHPC 斜压杆在水平方向的宽度, σ_a 表示试件达到其承载力时, UHPC 斜压杆的压应力, α 表示临界斜裂缝的倾角, x_c 表示试件截面的受压区宽度, c 为试件的保护层厚度。

4.1.1 桁架机构

分别取桁架机构的 I 区和 II 区为隔离体, 见图 13。

图 13 中: V_s 表示箍筋在水平方向的抗拉合力; V_c 表示 UHPC 在垂直剪切裂缝方向的抗拉合力; σ_c 表示桁架机构中 UHPC 腹杆的压应力。

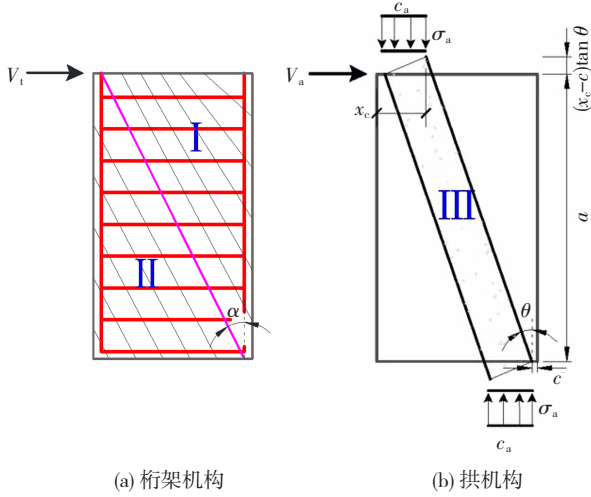


图 12 桁架和拱机构示意

Fig. 12 Diagram of truss and arch mechanisms

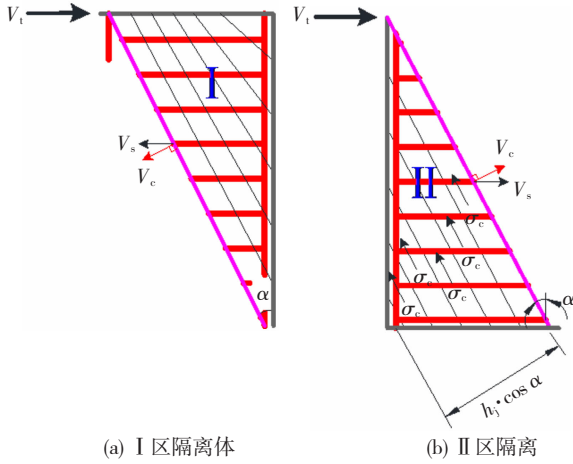


图 13 隔离体受力分析

Fig. 13 Force analysis for free body

考虑 UHPC 的抗拉作用, 剪切裂缝范围内箍筋在水平方向上的抗拉合力 V_s 和混凝土在垂直于裂缝方向上的抗拉合力 V_c 分别见式(5)、(6)。

$$V_s = \frac{f_{yv} A_{sv}}{s} h_j \cot \alpha = \rho_{sv} f_{yv} b h_j \cot \alpha \quad (5)$$

$$V_c = f_t b h_j / \cos \alpha \quad (6)$$

式中: f_{yv} 为箍筋屈服强度, A_{sv} 为同一截面内箍筋各肢面积之和, s 为箍筋间距, h_j 为截面两侧纵筋间中心距, ρ_{sv} 为试件的配箍率, f_t 为 UHPC 轴心抗拉强度实测值, b 为试件垂直于剪力方向的截面宽度。

由图 13(a) 可得桁架机构所承担的抗剪承载力见式(7)。

$$V_t = V_s + V_c \sin \alpha = (\rho_{sv} f_{yv} + f_t) b h_j \cot \alpha \quad (7)$$

根据图 13(b) 中隔离体的内力平衡, 结合式(5)和式(7)可得

$$V_t = \sigma_c b h_j \cos \alpha \sin \alpha \quad (8)$$

由 $1/\sin^2 \alpha = 1 + \cot^2 \alpha$, 可得桁架机构中 UHPC 腹杆的压应力 σ_c 为

$$\sigma_c = (\rho_{sv} f_{yv} + f_t) (1 + \cot^2 \alpha) \quad (9)$$

文献[17]通过摩尔圆应力分析, 给出了考虑轴压影响的矩形箍筋试件临界斜裂缝倾角的计算式:

$$\alpha = k_n \tan^{-1} \left(\frac{0.608 \rho_{sv} \gamma_E + \xi_1 \frac{\rho_{sv} A_v}{\rho_l A_g}}{1 + 4 \rho_{sv} \gamma_E} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

式中: k_n 为轴压比修正系数, 取 $k_n = 1.8n^2 - 2.25n + 1.54$; n 为试验轴压比; $\rho_{sv} = A_{sv}/(bs)$ 为配筋率, $\rho_l = A_s/(bh)$ 为纵筋的毛配筋率, A_s 为纵筋的配筋面积; h 为试件平行于剪力方向的截面宽度; ξ_1 为边界条件系数, 根据文献[18], 本文取 1.57; $\gamma_E = E_s/E_c$, 为钢筋与混凝土弹性模量比; $A_v = b h_j$ 为试件的有效截面面积, A_g 为试件的毛截面面积。由试验可知, 当 CFRP 布横向约束配筋 UHPC 柱时, 临界斜裂缝倾角变大, 甚至改变试件破坏模式。

4.1.2 拱机构

1) 拱机构所承担的剪力。拱机构所承担抗剪贡献的计算简图见图 12(b)。文献[17]给出了考虑轴力影响的钢筋混凝土柱截面受压区宽度的计算公式:

$$x_c = \left(0.25 + 0.85 \frac{N}{f_c A_g} \right) \cdot h \quad (11)$$

式中 N 为轴力, f_c 为 UHPC 圆柱体抗压强度实测值。

文献[19]给出了拱机构中 UHPC 的强度 σ_a 的计算公式:

$$\sigma_a = \gamma_c f_c - \cos(\theta - \alpha) \sigma_c \quad (12)$$

式中 γ_c 为 UHPC 的强度软化系数, 取 0.7; $\cos(\theta - \alpha)$ 为桁架与拱机构中混凝土斜压杆的倾角差异, 取 0.9^[20]。

将式(9)代入式(12)中, 得

$$\sigma_a = \left[1 - \frac{0.9(\rho_{sv} f_{yv} + f_t)(1 + \cot^2 \alpha)}{\gamma_c f_c} \right] \cdot \gamma_c f_c \quad (13)$$

令

$$\eta = \frac{0.9(\rho_{sv} f_{yv} + f_t)(1 + \cot^2 \alpha)}{\gamma_c f_c} \leq 1.0 \quad (14)$$

则

$$\sigma_a = (1 - \eta) \gamma_c f_c \quad (15)$$

UHPC 斜压杆所承担的抗剪承载力可由式(16)确定。

$$V_a = \sigma_a b (x_c - c) \tan \theta \tag{16}$$

2) 引入剪跨比的影响。剪跨比对抗剪承载力的影响体现在拱机构中斜压杆与竖直方向夹角 θ 上,由图 12(b)的几何关系可得

$$\tan \theta = \frac{h - x_c}{(x_c - c) \tan \theta + a} \tag{17}$$

把剪跨比 $\lambda = a/h$ 和式(11) 代入式(17),近似取 $c/h = 0$,可得

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{\lambda^2 + 4 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha} - \lambda}{2 \cos^2 \alpha} \tag{18}$$

4.1.3 钢纤维贡献

研究表明^[21-22],UHPC 中无序排列的钢纤维可以明显改善混凝土构件的抗剪承载力。文献[23-25]把 UHPC 的抗拉贡献 V_{cf} 视为混凝土基体的抗拉贡献 V_c 和钢纤维的抗拉贡献 V_f 之和,钢纤维承担的剪力与钢纤维含量特征值成正比。

$$V_{cf} = V_c + V_f \tag{19}$$

$$V_f = k \cdot \lambda_f f_t b h_j / \cos \alpha \tag{20}$$

式中: k 为考虑钢纤维形状黏结系数,对剪切平直形钢纤维,取 0.45^[25]; λ_f 为钢纤维含量特征值,取 $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$; ρ_f 、 l_f 和 d_f 分别为钢纤维的体积掺率、长度和直径。

综上,用式(19)中的 V_{cf} 替代式(7)中的 V_c ,则配筋 UHPC 柱抗剪承载力公式:

$$V = V_t + V_a = [\rho_{sv} f_{yv} + f_t (1 + k \lambda_f)] b h_j \cot \alpha + (1 - \eta) \gamma_c f_c b (x_c - c) \tan \theta \tag{21}$$

4.2 抗剪承载力验算

4.2.1 承载力公式对比

运用式(21) 及 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中的抗剪承载力公式(22) 分别对试验中的试件进行计算,并与试验值作对比,见表 5。

$$V = \frac{1.75}{1 + \lambda} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07N \tag{22}$$

表 5 中, V_c 表示混凝土受压腹杆的抗剪贡献, V_s 表示箍筋的抗剪贡献, V_a 表示拱机构的抗剪贡献, V_{cal} 为承载力计算值, $V_{cal} = V_c + V_s + V_a$ 或 $V_{cal} = V_c + V_s + 0.07N$, V_{test} 表示承载力试验值。 V_{FRP} 表示 CFRP 布的抗剪贡献,参考文献[26],由式(23)计算。

$$V_{FRP} = 2 f_{FRP,e} t_{FRP} h_{FRP,e} \cot \alpha \tag{23}$$

式中: $f_{FRP,e}$ 为 CFRP 布的有效抗拉强度,取 $0.5 f_{FRP}$; f_{FRP} 表示 CFRP 布的受拉强度, t_{FRP} 表示 CFRP 布的厚度; $h_{FRP,e}$ 表示试件上粘贴的 CFRP 布的有效高度,取 $0.9 h$; h 为试件平行于剪力方向的截面宽度。

表 5 抗剪承载力公式对比

Tab.5 Comparison of formulas for shear capacity

试件	方法	V_c/kN	V_s/kN	V_a/kN	0.07N/kN	V_{FRP}/kN	V_{cal}/kN	V_{test}/kN	V_{cal}/V_{test}
LC-2.0	式(21)	253.78	212.11	117.67			583.56	571.80	1.10
	式(22)	173.25	344.30		109.90		627.45		1.02
LC-2.0F	式(21)	253.78	212.11	117.67		270.69	854.25	566.69	1.51
	式(22)	173.25	344.30		109.90	270.69	898.14		1.58
HC-1.5	式(21)	275.81	319.67	155.31			750.80	766.40	0.98
	式(22)	207.90	477.45		109.90		795.25		1.04
HC-2.0	式(21)	230.81	267.51	95.12			593.44	576.83	1.03
	式(22)	173.25	447.45		109.90		547.18		1.32
HC-4.0	式(21)	230.81	267.51	95.12			593.44	219.46	2.70
	式(22)	173.25	447.45		109.90		547.18		2.49

由表 5 可看出,试件 LC-2.0F 和 LC-4.0 的抗剪承载力计算值远大于实测水平承载力,进一步说明 LC-2.0F 和 LC-4.0 发生弯剪破坏而非剪切破坏。对于其余发生剪切破坏的试件,式(21)、(22)的剪切承载力计算值与试验值之比(V_{cal}/V_{test})的平均值分别为 1.01 和 1.15,变异系数分别为 2.1% 和 10.5%,说明式(21) 对钢纤维 UHPC 配筋构件的抗剪承载力的预测精度较高。由表 5 可以看出,式(21)、(22) 计算值的主要差异在箍筋的抗剪

贡献 V_s 和 UHPC 的拉抗贡献 V_c 上,这是因为式(21) 考虑了钢纤维的抗拉贡献、轴压比和配筋对临界斜裂缝的倾角的影响,因此式(21) 的计算精度高于式(22)。

4.2.2 适用性验算

为了验证式(21) 适用性,从文献[27-29]中选取了 15 根钢纤维混凝土受剪试件,钢纤维混凝土受压强度为 65~134 MPa,钢纤维体积掺率为 0.8%~2.0%,剪跨比为 1.5~2.2。试件的详细参数见表 6。

表 6 文献[27-29]中受剪试件的承载力计算

Tab. 6 Calculation of bearing capacity of shear specimens in previous studies^[27-29]

文献	试件编号	混凝土强度		箍筋			纤维		λ	计算值 V_{cal}/kN	试验值 V_{test}/kN	V_{cal}/V_{test}
		f_{cu}/MPa	f_t/MPa	f_{yv}/MPa	$\rho_{sv}/\%$	s/mm	$\rho_v/\%$	l_t/d_t				
[27]	L1	134.4	11.16	466.30	0.25	150	2.0	55~68	1.50	589.1	585.0	1.01
	L1	134.6	7.96	466.30	0.25	150	2.0	55~68	1.50	610.5	681.0	0.90
	L3	129.1	9.74	466.30	0.25	150	2.0	55~68	1.50	631.0	774.0	0.82
	L5	134.6	7.96	466.30	0.25	150	2.0	55~68	2.26	481.2	503.0	0.96
	L6	116.2	8.00	466.30	0.25	150	2.0	55~68	2.26	497.7	523.0	0.96
[28]	LB-1	127.1	4.80	441.00	0.17	225	2.0	65~87	2.26	415.6	422.0	0.98
	LB-2	127.1	4.80	441.00	0.25	225	2.0	65~87	2.26	423.1	431.0	0.98
	LB-3	127.1	4.80	441.00	0.45	225	2.0	65~87	2.26	424.2	435.0	0.98
	LB-4	127.1	4.80	441.00	0.75	225	2.0	65~87	2.26	432.8	485.0	0.89
[29]	SBF1	110.0	5.20	358.30	0.33	200	0.8	48.5	2.00	299.0	287.3	1.04
	SBF2	116.2	5.40	358.30	0.33	200	1.5	48.5	2.00	337.2	335.0	1.01
	SBF3	122.4	5.60	358.30	0.33	200	2.0	48.5	2.00	369.7	376.0	0.98
	SBF4	65.9	4.00	358.30	0.33	200	0.8	48.5	2.00	213.0	190.1	1.12
	SBF5	71.3	4.10	358.30	0.33	200	1.5	48.5	2.00	241.1	224.0	1.08
	SBF6	72.9	4.20	358.30	0.33	200	2.0	48.5	2.00	260.4	243.6	1.07

利用式(21)对表 6 中的试件进行验算,计算值与试验值见表 6。 V_{cal}/V_{test} 的平均值为 0.99,变异系数为 7.6 %,理论计算值与试验值吻合良好。

5 结 论

通过对 5 个配筋 UHPC 柱的抗震性能试验和理论分析,得出主要结论:

1) 通过合理配筋,剪跨比在 1.5~4.0 之间的配筋 UHPC 柱均具表现出良好的抗震性能。试件的延性系数均在 3 以上,具有良好的延性。试件的滞回环饱满,无明显捏拢效应,等效黏滞阻尼系数均在 0.4 以上,具有良好的耗能能力。

2) 剪跨比对 UHPC 柱的破坏模式影响明显:试件 LC-2.0、HC-1.5 和 HC-2.0 等较小剪跨比试件发生剪压破坏,试件以斜裂缝为主,斜裂缝发展较快,脆性相对明显;较大剪跨比试件 HC-4.0 发生了延性较好的弯剪破坏,试件以横向裂缝为主。

3) 在 CFRP 约束下,试件 LC-2.0F 的屈服位移和峰值位移较 LC-2.0 分别提高了 25.2 % 和 47.4 %,延性系数提高了 71.2 %。CFRP 布有效约束了斜裂缝的发展,LC-2.0F 发生弯剪破坏,延性明显改善。

4) 提高纵筋和箍筋的强度后,试件 HC-2.0 的承载力和延性系数较 LC-2.0 有所提高,峰值荷载后水平力的降低速率减缓,抗震性能得到改善。普通箍筋的裂后工作能力较差,UHPC 受剪构件的

箍筋屈服强度应不小于 600 MPa。

5) 基于桁架-拱模型,给出了考虑 UHPC 抗拉贡献、轴压比和剪跨比影响的抗剪承载力计算公式,计算值与试验值吻合良好。

参考文献

[1] 孙治国,司炳君,王东升,等. 高强箍筋高强混凝土柱抗震性能研究[J]. 工程力学,2010,27(5):135
SUN Zhiguo, SI Bingjun, WANG Dongsheng, et al. Research on the seismic performance of high-strength concrete columns with high-strength stirrups[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(5): 135

[2] VOO Y L, FOSTER S J, GILBERT R I. Shear strength of fiber reinforced reactive powder concrete prestressed girders without stirrups[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1):128. DOI:10.3151/jact.4.123

[3] VOO Y L, POON W K, FOSTER S J. Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(11):1395. DOI:10.1061/(asce)st.1943-541x.0000234

[4] 陈彬. 预应力 RPC 梁抗剪性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2007
CHEN Bin. Study on the shear strength of prestressed RPC girders[D]. Changsha: Hunan University, 2007

[5] 徐海宾,邓宗才,陈春生,等. 超高性能纤维混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报,2017,47(12):97
XU Haibin, DENG Zongcai, CHEN Chunsheng, et al. Experimental study on shear strength of ultra-high performance fiber reinforced concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(12):97. DOI:10.15951/j.tmgxb.2014.12.011

[6] 邓宗才,陈春生,陈兴伟. 混杂纤维活性粉末混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报,2015,48(5):60
DENG Zongcai, CHEN Chunsheng, CHEN Xingwei. Experimental research on the shear behaviors of hybrid fiber reinforced RPC

- beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(5):60. DOI:10.15951/j.tmgxb.2015.05.006
- [7] 金凌志,祁凯能,曹霞. 高强钢筋活性粉末混凝土简支梁受剪性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(8):112
JIN Lingzhi, QI Kaineng, CAO Xia. Experimental study on shear behavior of high strength reinforced reactive powder concrete beam [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(8): 112. DOI:1671-4431(2013)08-0108-06
- [8] 曹霞,彭金成,金凌志. 预应力活性粉末混凝土简支梁受力性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(1):121
CAO Xia, PENG Jincheng, JIN Lingzhi. Experimental research on mechanical performance of prestressed RPC beam[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(1):121. DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2014.01.023
- [9] 郑文忠,卢姗姗,李莉. GFRP 筋活性粉末混凝土梁受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(6):123
ZHENG Wenzhong, LU Shanshan, LI Li. Experimental research on mechanical performance of reactive powder concrete beams reinforced with GFRP bars[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6):123. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2011.06.004
- [10] 李庆华,徐世焱. 钢筋增强超高韧性水泥基复合材料弯曲性能计算分析与试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31(3):60
LI Qinghua, XU Shilang. Analysis and experiment of reinforced ultra-high toughness cementitious composite flexural members[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(3):60. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2010.03.008
- [11] 赵冠远,阎贵平. 活性粉末混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. 中国安全科学学报,2004,14(7):97
ZHAO Guanyuan, YAN Guiping. Experimental study on seismic performance of reactive powder concrete columns[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(7):97. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2004.07.024
- [12] 郝文秀,钟铁毅. 活性粉末混凝土桥墩延性试验研究与数值分析[J]. 土木工程学报,2010,43(6):85
HAO Wenxiu, ZHONG Tieyi. Experimental study and numerical analysis of the ductility of reactive powder concrete piers[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6):85. DOI:10.15951/j.tmgxb.2010.06.004
- [13] 鞠彦忠,王德弘,白俊峰. 活性粉末混凝土柱抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(8):116
JU Yanzhong, WANG Dehong, BAI Junfeng. Seismic performance of reactive powder concrete columns[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(8):116
- [14] 徐慎春. 高强钢筋及薄壁钢管超高性能混凝土柱抗震性能试验研究与数值模拟[D]. 天津:天津大学,2018
XU Shenchun. Seismic behavior of high strength reinforced UHPC columns and UHPC filled thin-walled steel tubular columns; experimental study and numerical simulation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018
- [15] 屈文俊,郭生吉,秦宇航. 活性粉末混凝土力学性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(4):16
QU Wenjun, WU Shengji, QIN Yuhang. Mechanical property tests of reactive powder concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(4):16
- [16] 翁义军,沈聚敏,马宝民. 复合箍对钢筋混凝土柱延性的改善[J]. 建筑结构学报,1985(1):47
WENG Yijun, SHEN Jumin, MA Baomin. Improvement of ductility of reinforced concrete columns with different types of stirrups[J]. Journal of Building Structures, 1985(1):47. DOI:10.14006/j.jzjgxb.1985.01.004
- [17] 余波,陈冰,吴然立. 剪切型钢筋混凝土柱抗剪承载力计算的概率模型[J]. 工程力学,2017,34(7):138
YU Bo, CHEN Bing, WU Ranli. Probabilistic model for shear strength of shear-critical reinforced concrete columns [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(7):138
- [18] KIM J H, MANDER J B. Truss modeling of reinforced concrete shear-flexural behavior; technical report MCEER-99-0005[R]. Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1990
- [19] 马熙伦,陈宝春,杨艳,等. R-UHPC 梁的抗剪承载力计算方法[J]. 交通运输工程学报,2017,17(5):23
MA Xilun, CHEN Baochun, YANG Yan, et al. Calculation method of shear bearing capacity of R-UHPC beam[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5):23
- [20] 管品武. 钢筋混凝土框架柱塑性铰区抗剪承载力试验研究及机理分析[D]. 长沙:湖南大学,2001
GUAN Pinwu. Research on seismic shear capacity of columns within yield hinge regions[D]. Changsha: Hunan University, 2001
- [21] 崔发,田水,柯杨. 无腹筋钢纤维混凝土梁抗剪承载力的研究[J]. 建筑科学,2019,35(3):24
CUI Fa, TIAN Shui, KE Yang. Study on shear capacity of steel fiber reinforced concrete beams without web reinforcement [J]. Building Science, 2019, 35(3):24. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2019.03.004
- [22] 王尚艳. 钢纤维混凝土无腹筋梁抗剪承载力研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2019
WANG Shangyan. Study on shear capacity of steel fiber reinforced concrete beams without web reinforcement[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019
- [23] MANSUR M A, ONG K C G, PARAMASIVAM P. Shear strength of fibrous concrete beams without stirrups[J]. Journal of Structure Engineering, 1986, 112(9):2076. DOI:10.1061/(asce)0733-9445(1986)112:9(2066)
- [24] NARAYANAN R, DARWISH I Y S. Use of steel fibers as shear reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 1987, 84(3):223. DOI:10.14359/2654
- [25] 钢纤维混凝土结构设计标准:JGJ/T 465—2019[S]. 北京:中国建筑工程出版社,2019
Standard for design of steel fiber reinforced concrete structures: JGJ/T 465—2019[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019
- [26] CHEN J F, TENG J G. Shear capacity of fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams: fiber reinforced polymer rupture[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5):623. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:5(615)
- [27] 曹霞,陈逸聪,唐婷,等. 不同剪跨比下纵筋率对 RPC 梁受剪性能的影响[J]. 武汉理工大学学报,2017,39(4):54
CAO Xia, CHEN Yicong, TANG Ting, et al. Influence of longitudinal reinforcement ratio on shear behavior of RPC beam under different shear span ratio[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2017, 39(4):54. DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2017.04.009
- [28] 王强,金凌志,曹霞,等. 活性粉末混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2017,51(5):928
WANG Qiang, JIN Lingzhi, CAO Xia, et al. Experimental study on shear performance of reactive powder concrete beam[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(5):928. DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2017.05.011
- [29] 卞祝. 钢纤维高强钢筋混凝土梁受剪性能试验研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2013
BIAN Zhu. Experimental study on shear resistance properties of steel fiber high-strength reinforced concrete beam[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2013