

祝明桥,谭晓鹏,刘万里,等.GFRP管约束UHPC柱的伪静力试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(1):25-34. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.01.004

ZHU M Q, TAN X P, LIU W L, et al. Pseudostatic Experimental Study of GFRP Tube Constraining UHPC Column [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(1): 25-34. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.01.004

# GFRP管约束UHPC柱的伪静力试验

祝明桥\*,谭晓鹏,刘万里,黄志

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201;湖南省智慧建造装配式被动房工程技术研究中心,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**针对特定环境需求下柱的抗震与耐腐蚀能力,提出一种玻璃纤维增强复合材料与超高性能混凝土组合柱;考虑不同轴压比和GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics,玻璃纤维增强塑料)管纤维丝缠绕角度参数,对6个组合柱试件和1个超高性能混凝土(UHPC)对比柱试件开展了水平低周往复加载试验;对试件的滞回曲线、延性系数、强度和刚度退化系数、应变变化规律以及耗能能力进行了研究.研究表明:GFRP管能够改善试件破坏形态,提高试件抗震性能;当轴压比一定时,45°缠绕管组合柱的极限水平承载力和等效刚度比80°缠绕管组合柱低,但其延性系数更高,耗能能力更好,GFRP管对混凝土的约束作用也更强;在试验轴压比为0.2,0.3,0.4,轴压比越大,试件的极限水平承载力越低,延性越差,耗能能力下降.

**关键词:**UHPC;GFRP管;组合柱;抗震性能

**中图分类号:**TU312;TU318

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-9102(2023)01-0025-10

## Pseudostatic Experimental Study of GFRP Tube Constraining UHPC Column

ZHU Mingqiao, TAN Xiaopeng, LIU Wanli, HUANG Zhi

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
Hunan Engineering Research Center for Intelligently Prefabricate Passive House, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In this paper, the seismic and corrosion resistance of the lower column is tailored to specific environmental requirements. A glass fiber reinforced composite material and ultra-high performance concrete composite column are proposed. Considering different axial pressure ratios and GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) pipe fiber winding angle parameters, the horizontal low-week reciprocating loading test is carried out on 6 combination column specimens and 1 UHPC comparison column specimen. The hysteresis curve, ductility coefficient, strength and stiffness degradation coefficient, strain change law and energy consumption capacity of the specimen are studied. The findings suggest that GFRP tube can improve the failure form of the specimen and improve the seismic performance of the specimen. When the axial pressure ratio is fixed, the ultimate horizontal bearing capacity and equivalent stiffness of the 45° winding tube combination column are lower than those of the 80° winding pipe combination column, but its ductility coefficient is higher, the energy consumption ability is

收稿日期:2022-08-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578236);湖南省重点实验室开放基金资助项目(19K033);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4313)

\*通信作者,E-mail: 1531290279@qq.com

better, and the constraint effect of the GFRP pipe on the concrete is also stronger. In the test axial compression ratio of 0.2, 0.3, 0.4, the larger the axial compression ratio, the lower the ultimate horizontal bearing capacity of the specimen, the poorer the ductility and the lower the energy dissipation capacity.

**Keywords:** UHPC; GFRP pipe; combined column; seismic performance

混凝土在受到 FRP 管的约束下,处于三向受力状态,其强度、刚度和延性都能得到很大的提升<sup>[1]</sup>.FRP 管约束混凝土具有优异的耐腐蚀性能,使其更适用于桥梁工程、地下工程和海洋工程<sup>[2-3]</sup>.现有研究表明,使用 FRP 管约束混凝土不仅可以有效提高混凝土柱的强度,还可以提高混凝土柱的刚度和延性<sup>[4]</sup>.与此同时,超高性能混凝土(UHPC)的研究和应用也愈发精进,UHPC 被认为是未来可持续发展最有前途的建筑材料之一<sup>[5]</sup>,UHPC 力学性能远超普通混凝土,如抗压强度约为普通混凝土的 3 倍以上<sup>[6]</sup>.此外,由于 UHPC 基质几乎不渗透二氧化碳、氯化物以及硫酸盐等腐蚀因子,因此,UHPC 也具有优异的耐久性<sup>[7]</sup>.随着建设项目设计的工程环境愈发复杂,FRP 管混凝土柱结构的应用愈发广泛,国内外学者对其各方面性能进行了分析研究.

Mirmiran 等<sup>[8]</sup>以长细比为变量完成了 7 个 GFRP 管约束混凝土柱的轴压试验,结果表明:随着长细比的增大,极限承载力以及延性都有降低,且对延性的影响更大,并提出了构件长细比的限值;邓宗才等<sup>[9]</sup>通过 36 个 FRP 管约束 UHPC 试件和 4 个未约束试件的轴压试验,得出 GFRP 管对改善 UHPC 圆柱体极限压应变效率最高,其次是 AFRP 管约束刚度和 FRP 管断裂应变对试件极限压应变的影响较大,并提出改进的 samaan 模型,能较好预测约束 UHPC 的应力-应变关系;于峰等<sup>[10]</sup>研究长细比对于 FRP 约束混凝土柱承载力的影响,试验结果显示:FRP 约束混凝土柱可显著提高混凝土的承载力,随着构件长细比的增加,FRP 约束混凝土的承载力和延性逐渐减小;王宝立等<sup>[11]</sup>通过对 GFRP 管钢筋混凝土长柱偏压力学性能的试验研究和理论分析,得到以下结论:GFRP 管对混凝土的约束效果要好于同约束刚度的螺旋箍筋,GFRP 管的约束作用提高了偏压柱的承载力,随着长径比和偏心距的增大 GFRP 管钢筋混凝土偏压长柱的承载力降低,刚度减小,GFRP 管的约束效果逐渐降低;Katsumata 等<sup>[12]</sup>很早便开始了对 FRP 约束混凝土柱的抗震性能研究,结果表明:FRP 约束混凝土柱相对于普通混凝土柱延性有大幅度的提高,对加强抗震能力有很大提升;Mirmiran 与 Shao<sup>[13]</sup>针对 6 根 GFRP 管混凝土柱展开了低周往复加载实验,结果表明:带有偏轴纤维会发生延性破坏,纤维都在纵向上较多时会发生脆性破坏,组合柱中配置适量钢筋能使柱的抗震性能得到较大改善,配筋率对滞回曲线的捏拢程度影响大,而 FRP 管性能对滞回曲线的捏拢程度影响小;Youssf 等<sup>[14]</sup>为研究 FRP 约束钢筋混凝土圆柱在侧向荷载下的极限位移和塑性铰长度,利用 LS-DYNA 软件构造了更为精细的有限元模型,并进行参数分析,发现 FRP 的约束作用越强,组合柱的极限水平位移和塑性铰长度也会相应的增加;陶忠等<sup>[15-16]</sup>对大轴压比下 FRP 约束圆形普通钢筋混凝土柱的抗震性能进行了试验和计算理论分析,对 4 个组合柱试件和 3 个 C 对比柱试件进行了拟静力加载试验,结果表明:C 柱在经过 FRP 约束后形成的组合柱,滞回曲线更加饱满,耗能能力、水平承载力和延性得到了较大的提升,给出了组合柱试件滞回曲线和骨架曲线的计算模型;梁旭宇等<sup>[17]</sup>通过对 4 个无约束对比试件和 11 个 GFRP 管约束 UHPC 试件进行轴心受压试验,分析 GFRP 管壁厚、UHPC 中钢纤维掺量对约束试件应力-应变关系的影响规律,拟合得到 GFRP 约束条件下 UHPC 的极限抗压强度计算公式和极限应变计算公式.

综上所述,GFRP 管的约束作用使混凝土处于三向受压状态,能够有效地约束混凝土横向变形,从而延缓混凝土的开裂,使其承载力得到了一定的提升;GFRP 管约束混凝土柱在结构破坏时能够有较为明显的破坏征兆给人以警示作用;GFRP 作为浇筑时的模板,可以节约施工成本.目前,对 GFRP 管约束混凝土柱的研究绝大多数是针对构件的轴压、偏压等承载力方面,而 GFRP-UHPC 这种组合结构形式还有待研究;对于 GFRP 管约束混凝土柱的抗震性能,尤其是大长径比组合柱的抗震性能的探讨较少,但长径比较大的柱在实际工程中仍存在,如高桥墩、海洋平台支撑柱及特殊需求实验室结构支撑柱等.本文对 6 个组合长柱试件和 1 个 UHPC 对比长柱试件开展了水平低周往复加载试验,研究 GFRP 管和 UHPC 在受力过程中的相互作用机理,分析滞回曲线、延性系数、强度、刚度退化系数、应变变化规律以及耗能能力,以期为此类构件的抗震设计和工程应用提供参考.

## 1 试验设计

### 1.1 试件设计

试验设计和制作了1个UHPC对比长柱试件和6个GFRP-UHPC组合长柱试件(基本参数见表1)。试件截面如图1所示,试验所用GFRP管共有2种纤维丝缠绕角度,以Y轴为参照分别为45°和80°。对于桥梁结构,桥墩承受的重力荷载通常不超过其轴向承载能力的15%<sup>[18]</sup>。相较而言,建筑结构中柱的常见轴压比要大许多。组合柱受到中等及较高轴压时的抗震性能。因此,本试验取轴压比0.2,0.3,0.4。

表1 试件基本参数

试件编号	轴压比 $n$	实际施加轴力/kN	GFRP管纤维丝角度/(°)	试件尺寸 $d \times L$ /(mm×mm)
C-2	0.2	200	-	156×1 500
FC45-2	0.2	200	45	156×1 500
FC80-2	0.2	200	80	156×1 500
FC45-3	0.3	300	45	156×1 500
FC80-3	0.3	300	80	156×1 500
FC45-4	0.4	400	45	156×1 500
FC80-4	0.4	400	80	156×1 500

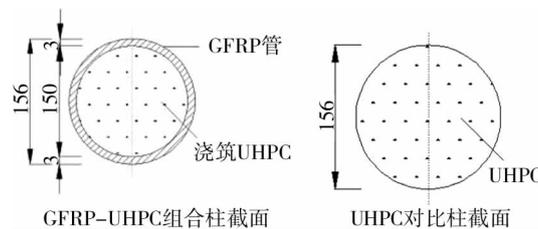


图1 试件截面(单位:mm)

### 1.2 材料力学性能

试验所用GFRP管材为纤维缠绕管,由广东某玻璃钢公司生产,壁厚3mm,内部半径为75mm,纤维缠绕角度为45°和80°这2种规格。GFRP管材环拉试验结果与破坏模态如表2和图2所示,GFRP管材轴压试验结果如表3所示。UHPC粉料由广东某新材料科技有限公司生产,膨胀率为0.02%,能够满足微膨胀与自密实的要求。UHPC配合比:C130干混料:外加剂:水=50:0.98:3.17。本试验所用UHPC通过材性试验测得 $f_{cu}$ 为110.2MPa、 $f_c$ 为96.5MPa、 $E_c$ 为45.54GPa、 $f_{ts}$ 为10.2MPa。

表2 GFRP管各试样环拉试验结果

试样编号	破坏荷载/kN	环向极限应变 $\sigma_h/10^{-6}$	破坏应力/MPa	
45°缠绕管	1	27.90	20 631	186.0
	2	26.90	21 331	179.3
	3	28.51	21 031	190.0
	平均值	27.80	20 998	185.2
80°缠绕管	1	103.91	9 046	692.7
	2	109.91	9 346	732.7
	3	108.20	9 133	721.3
	平均值	107.31	9 256	715.6

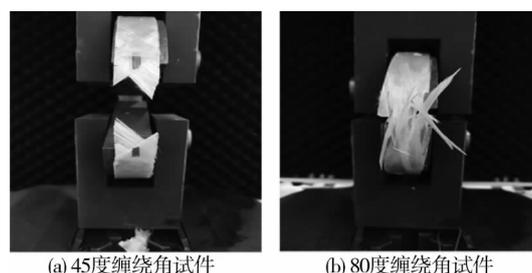


图2 GFRP管环拉破坏模式

表3 GFRP管各试样轴压试验结果

轴压试样编号	破坏荷载/kN	峰值应变 $\epsilon_a/10^{-6}$	破坏应力/MPa
45°缠绕管	1	140.03	23 684
	2	135.46	25 711
	3	138.57	26 409
	平均值	138.02	25 268
80°缠绕管	1	88.56	10 923
	2	95.46	9 987
	3	92.58	9 735
	平均值	92.20	10 215

### 1.3 试件制作过程

将试验所需的 GFRP 管内表面清洗干净,去除灰尘和油污,以保证 GFRP 与混凝土界面结合的紧密性.混凝土采用 JW300 强制式混凝土搅拌机进行搅拌,将计量好的超高性能混凝土干混料、水和外加剂搅拌至凝胶状后,通过漏斗与导管灌入 GFRP 管(对比柱试件采用 PVC 管作模具),以保证混凝土浇筑的密实性.试件在浇筑完成后,顶部覆盖塑料膜保湿,并定期进行浇水养护.同时,取同批次混凝土制作立方体试块,用于检测混凝土材料性能.

### 1.4 加载方案

试验加载装置示意图如图 3 所示,实验装置如图 4 所示.轴向采用量程为 100 t 的液压千斤顶实现加载,同时使用 1 个量程为 2 000 kN 的压力传感器实时监测轴力变化;构件上部用夹具与作动器连接,下部通过固定基座与地面锚固,保证试件在试验过程中不会发生移动.电液伺服作动器与反力架连接,在柱顶施加水平向往复位移.

开始施加轴力时,首先进行分级预加载,预加载轴力为实际加载轴力的 60%,在试件和仪器调整完成后,再将预定轴力全部分级施加到柱顶.在整个低周往复加载试验过程中,不断调整千斤顶,使轴力浮动范围在预定荷载的 5%以内.

水平加载全程采用位移控制加载法如图 5 所示,详细加载方案参照《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)<sup>[19]</sup>的有关方案.具体加载制度:试验开始时,采用较小的位移控制进行水平加载,每次施加的级差为 1 mm,每级位移循环加载一次.实时记录并观察试件的荷载—位移曲线,当发现试件刚度有明显下降时,记录此时的屈服位移值  $\Delta_y$ ,开始进入屈服加载阶段.判断柱试件已经屈服后,每一级的位移加载级差为  $\Delta$ ,每一级循环的次数为 3 次.当试件的峰值点水平荷载下降至最大峰值水平荷载的 85%或更低时,认定试件已经被破坏,此时可停止试验.但考虑到该类型组合柱大长细比试验较少,为观察理论破坏后的后期状态并帮助后续试验设计与开展,因此,当峰值点水平荷载下降至最大峰值水平荷载的 85%,继续试验直至无法加载并采集数据.具体水平加载制度如图 4 所示,每个加载周期中从零点至峰值点或峰值点至零点为一个加载步次,每个加载步次完成后持荷 1 min,加载速率为 0.5 mm/s,当加载位移较大时,可适当提升加载速率.

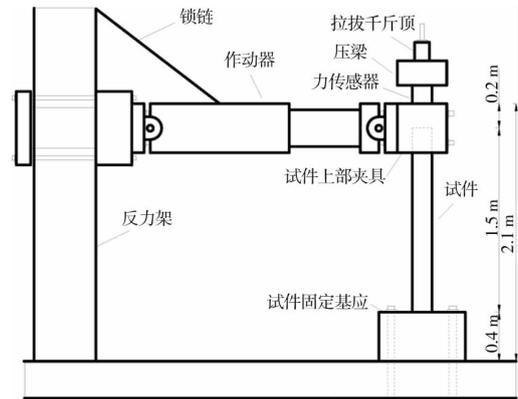


图3 试验加载装置



图4 实验装置

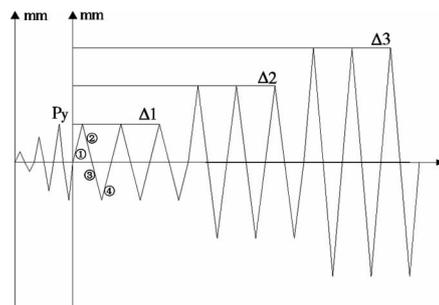


图5 水平加载制度

## 1.5 测点布置

在柱高 750 mm 处即柱中设置一处采集点,观测试件在试验过程中发生的弯曲变形.在水平位移加载点处设置一处采集点,观测柱头的水平位移,同时与作动器位移输出数据相互印证,确保数据采集的准确性.

在柱高 0,150,300,750 mm 处分别布置应变片,每处沿纵向和横向各贴一片,沿圆周方向均匀布置 4 组.一个试件共有 32 个应变片,用于观测试件在低周往复加载过程中 GFRP 管以及 UHPC 对比柱混凝土应变情况,应变片具体布置如图 6 所示.

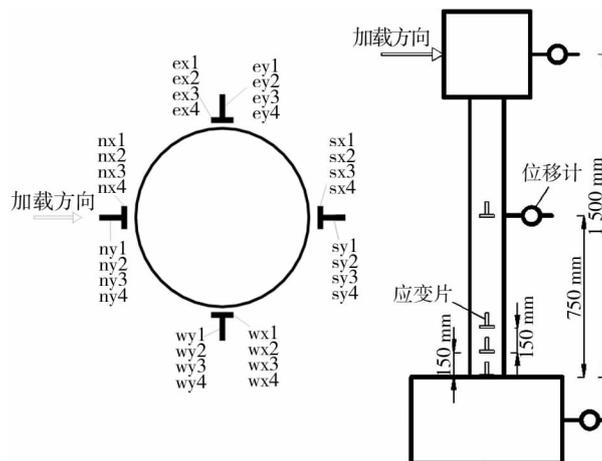


图 6 位移计及应变片布置

## 2 试验现象及结果

### 2.1 试验现象

各试件的破坏形态如图 7 所示,在加载初期试件外形无明显变化,试件处于弹性阶段.进入屈服时,GFRP 管壁出现轻微裂纹,改为屈服位移  $\Delta y$  控制加载,随着试验进行,试件不断发出声响,柱底部因 GFRP 管形变不断有白色条纹产生,且白色条纹与 GFRP 管纤维丝缠绕角度相同,试件破坏时,GFRP 管大面积泛白,无其他明显破坏现象.GFRP 管纤维丝缠绕角度相同的组合长柱试件的试验现象和破坏形态相似,80°纤维丝缠绕管组合柱试件破坏模式为沿纤维丝角度撕裂破坏,混凝土断面较完整,仅边缘混凝土破碎;而 45°纤维丝缠绕管组合柱破坏模式为底部混凝土压碎,底部 GFRP 管产生变形,但未出现明显裂缝.而混凝土对比柱试件 C-2 因为没有 GFRP 管的包裹,混凝土试件在加载过程中不断剥落,破坏较快,抗震水平整体较差.

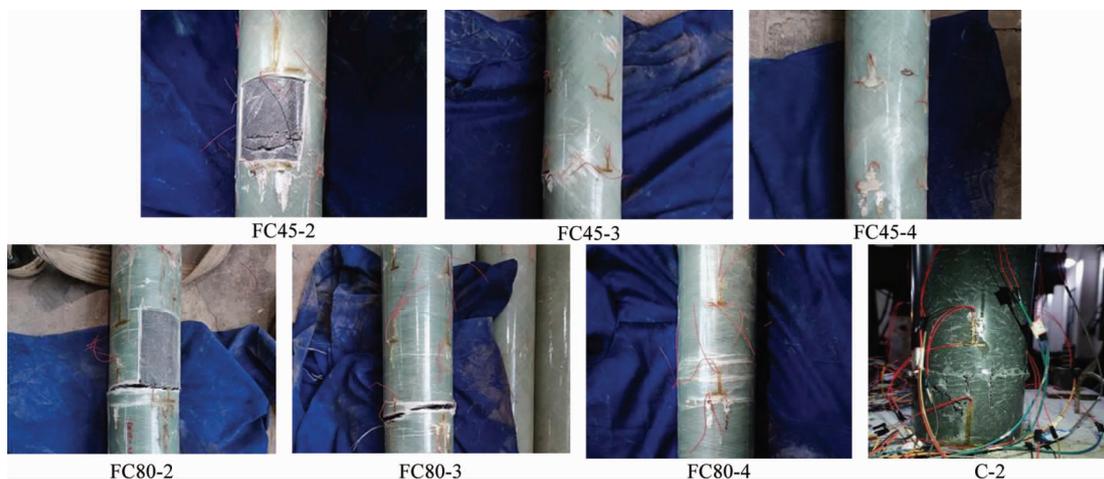


图 7 破坏形态

### 2.2 滞回曲线

在低周往复加载试验整个过程中,各试件的水平荷载-位移( $P-\delta$ )滞回曲线如图8所示,所有GFRP-UHPC组合柱试件滞回曲线包裹面积均大于UHPC试件,说明组合柱试件的结构形式对于结构抗震是有利的.但FC45-2和FC80-2相比于C-2的承载力和变形能力提升的不多,主要原因是因为轴压比为0.2时,不能使组合柱混凝土完全处于三向受力状态,通过图8的对比得出:在相同轴压比的条件下,所有45°缠绕角试件滞回曲线均比80°缠绕角试件滞回曲线饱满,耗能能力更好,但峰值水平荷载较低;由此可得GFRP管的纤维丝越接近水平,组合柱能承受的峰值水平荷载越大,但试件的延性相对降低.

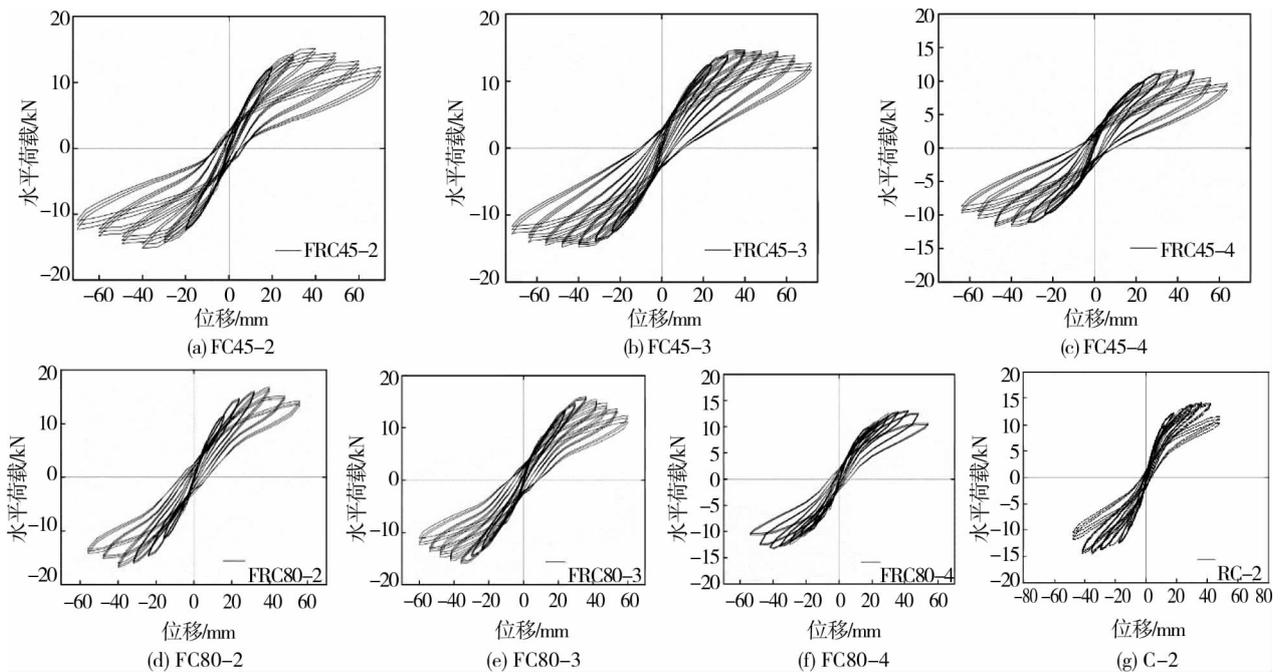


图8 各式件滞回曲线

### 2.3 骨架曲线

各试件骨架曲线如图9所示,可以看出:各试件的骨架曲线无明显屈服点,且骨架曲线关于坐标原点近似对称.所有组合柱试件的极限位移均大于UHPC对比柱试件.试件经历了弹性阶段、滑移阶段、承载力强化阶段和延塑性阶段.

在相同轴压比的条件下,所有80°缠绕角试件水平峰值荷载均高于45°缠绕角试件水平峰值荷载,轴压比为0.2时,FC80-2试件的最大水平荷载比FC45-2试件高17.65%,比C-2试件高15.58%.轴压比为0.2时,FC45-2试件的极限水平位移比FC80-2试件大23.88%,比C-2试件大51.12%.由此可得:GFRP管的纤维丝越接近水平,组合柱抵抗水平荷载的能力也越大,但不利于增强结构的延性.

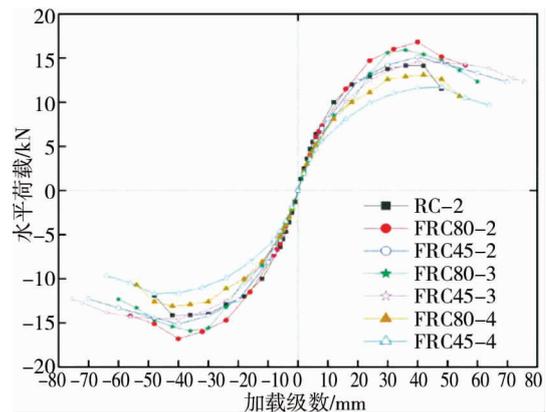


图9 骨架曲线

在GFRP管纤维丝缠绕角度相同的条件下,45°缠绕角试件与80°缠绕角试件具有相同的规律:实验所设置的3个轴压比参数为0.2,0.3,0.4的范围内,轴压比由0.2增加到0.3时,试件最大水平荷载几乎没有减小,极限位移增加.这是由于试件处于三向受力状态,GFRP管提供的侧向压力约束了混凝土受压后的横向变形,抑制了混凝土内部竖向裂缝的产生和发展,所以试件的极限位移有所增加.轴压比增加到0.4时,45°缠绕角试件最大水平荷载减小了29.32%,极限位移降低了16.70%;80°缠绕角试件最大水平荷载减小了35.88%,极限位移降低了4.95%.该结果表明:当轴压比增加时,试件极限位移值会减小,这是由于

在水平力和轴力的共同作用下,试件所受轴力的微小偏心不可避免,在水平力作用下,柱的轴压二阶效应导致试件加速破坏,试件极限位移值会下降.本试验中组合柱在轴压比为 0.3 时,试件处于最佳三向受力状态强度和变形能力最佳.

### 3 滞回性能分析

#### 3.1 延性分析

本文用位移延性来分析组合柱试件的变形能力,即柱子在破坏时的水平位移与屈服位移的比值.位移延性计算方式如式(1)所示,其中  $\Delta u$  为极限位移,本文取水平承载力值降至构件水平最大荷载的 85%时的位移,  $\Delta y$  为屈服位移.通过观察试件的骨架曲线可以发现,试件在加载初期曲线较平滑,无明显屈服点.因此采用通用弯矩法<sup>[20]</sup>求试件的理论屈服点,也称之为图解法.具体过程如图 10 所示,首先过峰值点  $E$  做  $y$  轴垂线  $P_{\max}E$ ,然后过  $O$  点做骨架曲线的切线  $OA$  与  $P_{\max}E$  相交于点  $A$ ,再过  $A$  点做  $x$  轴垂线与曲线相交于点  $D$ ,连接  $OD$  并延长与  $P_{\max}E$  相交于点  $B$ ,再过  $B$  点做  $x$  轴垂线与曲线相交于点  $C$ ,点  $C$  即为曲线的理论屈服点.点  $C$  的横坐标  $\Delta y$  即为屈服位移,纵坐标  $P_y$  为屈服荷载,各试件的屈服位移与屈服荷载如表 4 所示.

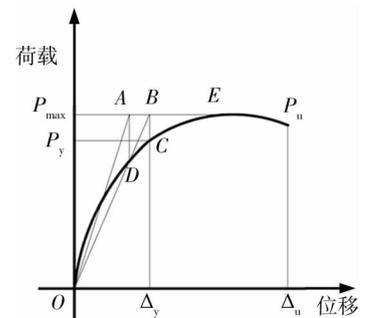


图 10 通用屈服弯矩法

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1)$$

表 4 试件关键点及延性系数

试件 编号	受力 方向	屈服位移/ mm	屈服荷载/ kN	最大水平荷 载 $F_{\max}$ /kN	极限位移 ( $0.85F_{\max}$ )/mm	延性系数 平均值 $\mu$	位移 ( $0.5F_{\max}$ )/mm	延性系数 $\mu_2$
C-2	正	20.17	11.50	15.40	44.17	2.19	67.55	3.62
	负	18.67	11.44	-15.28	45.17		67.55	
FC45-2	正	22.02	12.75	15.13	68.26	3.10	90.12	4.09
	负	21.92	12.33	-14.93	67.66		90.12	
FC80-2	正	23.04	14.50	17.80	55.10	2.65	81.51	3.53
	负	22.84	14.44	-17.33	55.01		81.51	
FC45-3	正	22.67	12.10	14.60	65.74	2.91	88.64	3.91
	负	22.44	11.84	-14.22	65.54		88.64	
FC80-3	正	25.30	14.50	15.90	56.10	2.39	86.27	3.41
	负	25.20	14.19	-15.68	56.06		86.27	
FC45-4	正	20.89	9.20	11.70	58.49	2.82	79.80	3.82
	负	20.77	9.00	-11.55	58.33		79.80	
FC80-4	正	21.80	10.30	13.10	52.50	2.21	72.60	3.33
	负	21.55	10.25	-13.07	52.39		72.60	

从表 4 的计算结果可知:UHPC 对比柱试件 C-2 位移延性系数为 2.19,而 GFRP-UHPC 组合柱试件位移延性系数在 2.21~3.10,增加幅度为 0.09%~41.55%,表明试验组合柱结构形式能够有效提高 UHPC 柱的延性,GFRP 管对混凝土起到了约束作用,且能一定程度上防止混凝土破碎剥离;当试件承载力下降至峰值荷载的 50%时,试件 FC45-2 延性系数提高 31.94%,试件 FC80-2 延性系数提高 33.2%,仍然具有良好的变形能力.

在 0.2,0.3,0.4 的轴压比中,相同轴压比的条件下,45°缠绕角试件延性明显要优于 80°缠绕角试件,且屈服荷载和屈服位移都较小.试件 FC45-2 延性比试件 FC80-2 延性高 16.98%,屈服荷载低 4.34%,屈服位移小 12%.这是由于在 80°缠绕角试件中,纤维丝接近水平,组合柱抵抗水平荷载的能力也较大,加载后期玻璃纤维丝之间的胶质发生了不可逆的剪切破坏,GFRP 管对混凝土的约束能力逐渐减弱,使试件损伤加快.而在 45°缠绕角试件中,45°缠绕角兼顾了组合柱试件横向和纵向的受力,试件破坏时 GFRP 管未发

生明显撕裂现象,因此  $45^\circ$  缠绕角试件延性较高.

### 3.2 刚度退化

本文采用等效刚度来描述刚度变化,等效刚度是将每一级加载第一个循环的滞回曲线正负峰值点  $AB$  相连, $AB$  连线的斜率即为等效刚度,计算方法如图 11 所示,计算公式为式(2).

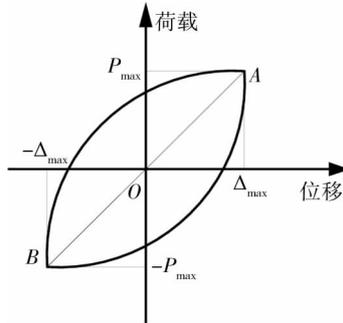


图 11 等效刚度计算

$$K_{i1} = \frac{|P_{i1A}| + |P_{i1B}|}{|\Delta_{i1A}| + |\Delta_{i1B}|} \quad (2)$$

式中:  $K_{i1}$  为第  $i$  级加载循环时的等效刚度;  $P_{i1A}$  为第  $i$  级加载第一个循环时的正峰值荷载;  $P_{i1B}$  为第  $i$  级加载第一个循环时的负峰值荷载;  $\Delta_{i1A}$  为第  $i$  级加载第一个循环时的正峰值位移;  $\Delta_{i1B}$  为第  $i$  级加载第一个循环时的负峰值位移;  $i$  为加载级数.

计算得出的刚度退化曲线如图 12 所示,尽管 GFRP-UHPC 组合柱和 UHPC 对比柱的截面尺寸相同,但在轴压比为 0.2 的工况下,试件 FC45-2 初始刚度比 UHPC 对比柱的初始刚度小 16%,试件 FC80-2 的初始刚度比 UHPC 对比柱的初始刚度小 12%,这说明用 GFRP 代替部分混凝土无法增大其初始刚度.这是由于 GFRP 管的密度比超高性能混凝土的密度低得多,导致组合柱试件整体刚度减小.在试验轴压比为 0.2,0.3,0.4 的范围内,相同轴压比的条件下, $80^\circ$  缠绕角试件初始刚度都比  $45^\circ$  缠绕角试件高,试件 FC80-2 的初始刚度比 FC45-2 的初始刚度大 14.76%,这说明  $80^\circ$  纤维丝缠绕角更有利于抵抗水平力,增加了试件的刚度.当纤维缠绕角度相同时,随着轴压比的增加,组合柱试件的初始刚度逐渐减少.

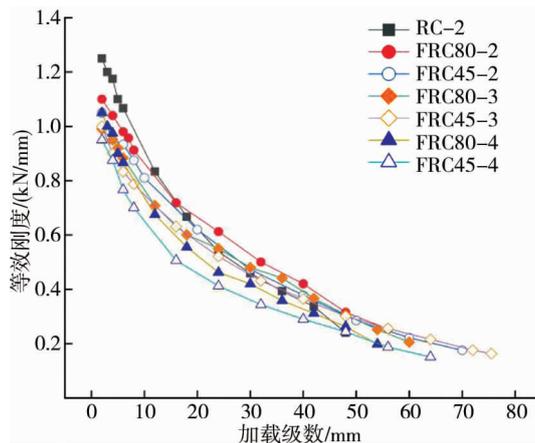


图 12 刚度退化曲线

### 3.3 耗能能力分析

本文所研究组合柱试件的耗能能力可参照滞回曲线的包裹面积来进行分析.参照建筑抗震试验规程<sup>[20]</sup>,可用能量耗散系数  $E$  来评估试件的耗能熟悉, $E$  为无量纲化参数,其计算方式如式(3)所示,计算简图如图 13 所示.

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OEF+ODF)}} \quad (3)$$

式中:  $S_{(ABC+CDA)}$  为在一个加载循环过程中结构或者构件所消耗的相对能量;  $S_{(OEF+ODF)}$  为所研究的结构或者构件相同的线弹性体系所消耗的相对能量, 即图 13 中阴影部分面积.

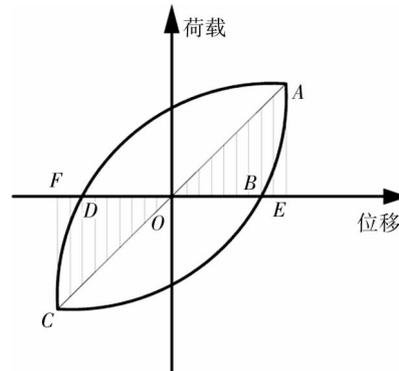


图 13 耗能系数计算

在计算各试件耗能系数  $E$  的过程中, 滞回环的面积  $S_{(ABC+CDA)}$  由 origin 软件对滞回曲线求积分得到, 计算完成后, 7 个构件的能量耗散系数与位移加载级数的关系如图 14 所示. 为方便进行比较, 各试件最终耗能系数值取水平峰值荷载下降到 85% 时所对应的耗能系数.

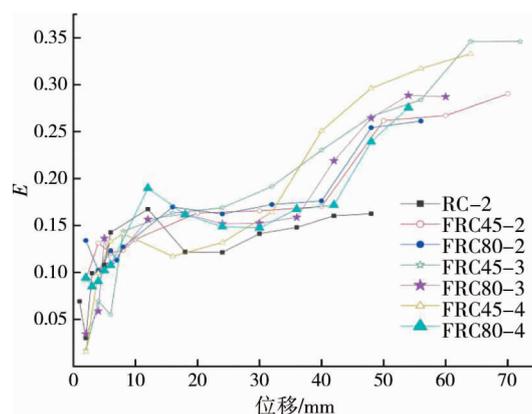


图 14 耗能系数曲线

观察各个试件的能量耗散与加载位移关系曲线可得: 曲线大致分为 4 个阶段, 在低周往复加载初期, 由于试件处于弹性阶段, 能量耗散系数很小; 随着加载位移级数的增大, 试件逐渐屈服进入到弹塑性阶段, 耗能能力不断增强, 在到达峰值荷载时, 各试件的耗能系数达到一个峰值点; 继续加载, 由于试件在到达峰值荷载后, 位移增加而水平荷载会减小, 最终导致耗能系数发生减小现象; 继续加载直到试件到达破坏标志, 耗能系数不断增大. 6 个组合柱试件的耗能性能均优于 UHPC 对比柱试件, 说明将 GFRP 管与 UHPC 结合形成的组合柱对于提高结构的抗震性能是有利的.

在相同轴压比的条件下, 所有 45° 缠绕角试件能量耗散系数值均高于 80° 缠绕角试件, 轴压比为 0.2 时, FC45-2 试件的最大能量耗散系数值比 FC80-2 试件高 11.54%, 比 C-2 试件高 77.91%. 混凝土对比柱试件耗能能力最差, 在 80° 缠绕角试件中, 加载后期玻璃纤维丝之间的胶质发生了不可逆的剪切破坏, 使试件损伤加快. 而在 45° 缠绕角试件中, 45° 缠绕角兼顾了组合柱试件横向和纵向的受力, 试件破坏时 GFRP 管未发生明显撕裂现象, 对核心混凝土的有效约束增强了组合柱的耗能能力.

当试件的缠绕角度相同时, 45° 缠绕角试件和 80° 缠绕角试件的轴压比为 0.3 时, 其最终耗能系数值最高. 试件 FC45-3 的最终耗能系数比试件 FC45-2 高 19.31%, 比试件 FC45-4 高 3.94%. 这说明在轴压比分别为 0.2, 0.3, 0.4 时, 组合柱试件的最终耗能系数先随着轴压比的增加而变大, 在轴压比为 0.3 左右时最大, 然后随着轴压比的增加而变小. 因此在轴压比和纤维丝缠绕角度的综合因素影响下, 本试验中组合柱在轴压比为 0.3 时最终耗能系数最大.

## 4 结论

1) GFRP-UHPC 组合长柱在低周往复荷载下, GFRP 管不仅能在一定程度上防止混凝土在加载过程中的破碎剥离现象, 改善试件破坏形态, 且能使核心混凝土处于三向受力状态, 显著的提高试件的抗震性能.

2) GFRP-UHPC 组合长柱在轴压比分别为 0.2, 0.3, 0.4 时, 45° 纤维丝缠绕管组合柱的极限水平承载力比 80° 纤维丝缠绕管组合柱分别低 15%, 17.18%, 11.4%, 但其延性系数分别高 16.98%, 21.75%, 27.6%, 耗能能力更好, 强度退化较慢, GFRP 管对混凝土的约束作用也更强, 协同变形能力更好. 因此 45° 缠绕管的特性更有利于其在工程实际中的应用.

3) 在轴压比分别为 0.2, 0.3, 0.4 时, 当轴压比增加至 0.4 时, 试件的水平峰值荷载下降, 极限位移减小, 但当轴压比为 0.3 时最大水平荷载几乎没有减小, 极限位移增加, 试验试件处于最佳三向受力状态强度和变形能力最佳.

4) 组合柱试件的最终耗能系数先随着轴压比的增加而变大, 在轴压比为 0.3 左右时最大, 然后随着轴压比的增加而变小. 因此在轴压比和纤维丝缠绕角度的综合因素影响下, 试验中组合柱在轴压比为 0.3 时最终耗能系数最大.

## 参考文献:

- [1] 张月弦, 薛元德. FRP 约束混凝土的基本力学性能[J]. 玻璃钢/复合材料, 1999(6): 21-23.
- [2] 段世昌, 徐千军. FRP 与混凝土组合结构研究综述[J]. 水力发电学报, 2005(5): 55-59.
- [3] BOUMARAFI A, ABOUZIED A, MASMOUDI R. Harsh environments effects on the axial behaviour of circular concrete-filled fibre reinforced-polymer (FRP) tubes[J]. Composites Part B, 2015, 83: 81-87.
- [4] SIDDIKA A, AL MAMUN M A, ALYOUSEF R, et al. Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 25: 100798.
- [5] 邵旭东, 邱明红, 晏班夫, 等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 33-43.
- [6] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 141-149.
- [7] DU J, MENG W, KHAYAT K H, et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC)[J]. Composites Part B Engineering, 2021, 224(9): 109220.
- [8] MIRMIRAN A, SHAHAWY M, BEITLEMANN T. Slenderness Limit for Hybrid FRP-Concrete Columns[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(1): 26-34.
- [9] 邓宗才, 刘少新. FRP 管约束超高性能混凝土的试验及理论研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(4): 792-803.
- [10] 于峰, 牛荻涛. 长细比对 FRP 约束混凝土柱承载力的影响[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 40-44.
- [11] 王宝立. GFRP 管钢筋混凝土长柱偏压力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [12] KATSUMATA H. A study on the strengthening with carbon fiber for earthquake-resistance capacity of existing reinforced concrete columns[C]// Seminar on Repair & Retrofit of Structures, 1987.
- [13] SHAO Y, MIRMIRAN A. Experimental Investigation of Cyclic Behavior of Concrete-Filled Fiber Reinforced Polymer Tubes[J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(3): 263-273.
- [14] YOUSSEF O, ELGAWADY M A, MILLS J E. Displacement and plastic hinge length of FRP-confined circular reinforced concrete columns[J]. Engineering Structures, 2015, 101: 465-476.
- [15] 高献, 陶忠, 杨有福, 等. 大轴压比下 FRP 约束混凝土柱滞回性能试验研究[J]. 工业建筑, 2005(9): 11-14.
- [16] 陶忠, 高献, 于清. FRP 约束圆钢筋混凝土柱滞回性能的理论分析[J]. 工业建筑, 2005(9): 15-19.
- [17] 梁旭宇, 池寅, 曾彦钦, 等. GFRP 管约束超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(6): 498-506.
- [18] ZHU Z, AHMAD I, MIRMIRAN A. Seismic Performance of Concrete-Filled FRP Tube Columns for Bridge Substructure[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(3): 359-370.
- [19] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 2010.
- [20] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 2015.