

RPC 预制管混凝土组合柱组合效应试验研究^{*}

单波^{1†}, 刘志¹, 肖岩², 胡源³

(1. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211816; 3. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:配有高强螺旋箍筋的活性粉末混凝土(RPC)预制管内浇筑混凝土,形成一种新型组合结构——RPC 预制管混凝土组合柱(CFRT)。对9个不同箍筋间距的CFRT,3个箍筋约束混凝土柱和3个RPC空管开展轴向抗压试验,研究RPC管与内部混凝土之间的组合效应,以及箍筋间距对CFRT轴压性能的影响。结果表明:在荷载峰值下,组合柱中的RPC管没有出现明显的剥落现象,构件截面较为完整;CFRT柱的承载力显著高于对应的箍筋约束混凝土柱和RPC空管两者单独的承载力之和,在承载力上实现了超叠加;CFRT中配置的箍筋间距越小,组合柱的抗压性能越好;基于Mander模型和相应的简化,对CFRT的组合效应进行了分析,RPC管对组合柱的轴向承载力贡献在0.22~0.26之间,且随箍筋间距的增大而有提高的趋势,并提出了CFRT轴向承载力计算方法。

关键词:活性粉末混凝土(RPC);约束;高强箍筋;轴向受压;组合效应

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

Experimental Research on Composite Action of Concrete-filled RPC Tube under Axial Load

SHAN Bo^{1†}, LIU Zhi¹, XIAO Yan², HU Yuan³

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha, 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 3. Key Laboratory on Damage Diagnosis for Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: An innovative composite structure, named concrete-filled RPC tube (CFRT), was presented in the paper. In this system, high-strength stirrups are arranged in prefabricated reactive powder concrete (RPC) tube, and concrete is then casted into RPC tube. Total fifteen large-scale columns were designed and conducted for axial compression test, including nine CFRT specimens, three high-strength stirrup confined concrete (HSCC) specimens and three hollow RPC tubes. Composite action between the RPC tube and internal concrete as well as the spiral stirrup spacing was considered as the main factors in tests. The results show that only slightly cracking without any spalling occurs at the RPC tube of CFRT column when axial load approaches its peak value. Meanwhile, the axial load-carrying capacity of CFRT column is higher than the sum of that of hollow RPC tube and internal concrete, indicating this composite system realizes

^{*} 收稿日期:2016-02-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278180), National Natural Science Foundation of China(51278180); 中央高校基本科研业务费资助项目(531107040604), Fundamental Research Funds for the Central Universities(531107040604)

作者简介:单波(1976-),男,湖南益阳人,湖南大学副教授,工学博士

[†] 通讯联系人, E-mail: supershanb@hnu.edu.cn

the superposition effect. The compressive properties of CFRT columns are also improved with the decrease of spacing of stirrups. Moreover, based on Mander model and the corresponding simplifications, contribution ratio of RPC tube for load-carrying capacity of CFRT columns was quantified, and its value increased from 0.22 to 0.26 with the increasing stirrup ratio. Furthermore, a calculation method for load-carrying capacity of CFRT was proposed.

Key words: reactive powder concrete(RPC); confinement; high-strength stirrup; axial compressive load; composite action

随着社会的进步和经济的持续发展,现代工程结构向大跨、高耸、重载及复杂环境发展,对建筑材料和构件的要求也越来越高。结构柱是建筑中最重要的承重构件,必须具有突出的承载能力和变形性能、良好的耐火性能、与使用环境对应的耐久性,并符合现代施工技术工业化的要求^[1]。在结构柱的研究领域,以约束效应为基础的组柱及超高性能混凝土(UHPC)是最主要的发展方向,前者包括箍筋约束混凝土、纤维增强塑料(FRP)约束混凝土和钢管混凝土(CFT),后者主要是以活性粉末混凝土(RPC)为代表^[2-4]。

在组合柱中,CFT因其具有良好的力学性能和施工性能,得到了深入研究和广泛应用,最具代表性^[5]。这种组合柱的基本原理是利用钢管对核心区混凝土提供侧向约束,使混凝土处于三向受压的应力状态,从而提高其抗压强度和压缩变形的能力,而内部填充的混凝土为钢管提供了支撑作用,增强了钢管壁的几何稳定性。在施工中,钢管作为浇筑核心区混凝土的模板,便于施工^[5]。但CFT也存在缺陷,主要是钢管耐火性能和耐腐蚀性差,对建筑成本和维护成本有重要影响,极大地限制了其在腐蚀性环境中的应用^[6-8]。此外,钢管与内部混凝土材料特性差别大,易导致钢管与混凝土脱空,也是CFT常见的质量问题^[2]。

RPC最早由法国Bouygues实验室于1993年研制出来,是一种具有超高抗压强度、高耐久性以及高韧性的新型水泥基复合材料,RPC制成的构件及结构具有很高的强度/自重比、突出的耐久性和良好的抗震性能^[9-12]。作为一种高技术混凝土,RPC一问世即成为土木工程领域的研究热点,并在建筑工程、水利工程、桥梁与路面工程及防爆结构工程等诸多领域得到应用^[13-14]。由于掺入了大量高活性材料,RPC一般需要进行加热养护^[15]。另外,考虑到RPC材料单价高,制成实心受压构件并不合理。因而,现阶段RPC的应用以预制薄壁构件及组合构件

为主要应用形式^[13-14]。有研究者对RPC填充钢管的组合柱进行了研究,但究其本质而言,与普通CFT没有区别^[16-17]。

作者从RPC材料特点和现有CFT存在的问题出发,提出RPC预制管混凝土组合柱(Concrete-filled RPC tube,简称CFRT),其技术方案为:将RPC预制成配置高强螺旋箍筋的薄壁管,施工时在内部现浇混凝土,形成组合柱。

CFRT在组合方式和约束形式上结合了CFT和箍筋约束混凝土的特点,并充分发挥了RPC材料的优异特性,具有以下显著特点:①具有与CFT基本相当的施工性能。在施工过程中,RPC预制管既是内部混凝土的模板,也是施工荷载支持体系的一部分;②RPC管具有一定厚度,且其本身具有超高的抗压强度和良好的变形能力,因而当组合柱的荷载达到峰值时能直接承受相当比例的轴向荷载;③RPC管壁内的高强箍筋及管壁本身为内部混凝土提供有效的侧向约束作用;④RPC管具有突出的耐腐蚀性和抗火性能;⑤RPC管与内部混凝土同为水泥基材料,具有相似的物理特征,从材料层面克服了管壁与混凝土脱空的问题;⑥采用预制方式制作RPC管,符合RPC的工艺特点和建筑工业化的要求。

这一新型组合柱扩展了约束混凝土的形式与RPC的应用范围,在一定范围内取代钢管混凝土,特别是在高温、高腐蚀环境中(如海岸工程、远洋岛礁工程),具有良好的应用前景。

本文进行了15根大尺寸试件的轴向抗压试验,验证了这种新型组合柱的有效性,并初步探讨了CFRT的组合效应。

1 试验设计

1.1 试件设计

本文采用高强螺旋箍筋预制RPC管材,对3组

不同箍筋间距的 CFRT 试件进行轴向抗压试验,并对 1 组 RPC 空管和 1 组箍筋约束混凝土柱进行对比试验,每组 3 个试件,共计 15 个试件. 各组试件的基本设计参数见表 1, 试件编号由 2 部分组成: 前一部分表示约束类型, 其中, CFRT 代表 RPC 管组合柱, HSCC 代表箍筋约束混凝土 (High-strength stirrup confined concrete); 后一部分中, 数值表示箍筋间距. 例如 CFRT-20 表示外侧为箍筋间距为 20 mm 的 RPC 管组合柱, 而 RPC-T 表示空管试件,

内部不填充混凝土.

RPC 预制管的外径 D 为 300 mm, 高度 h 为 600 mm, 壁厚 t 为 20 mm, 在管壁的中心位置配置直径 6 mm 的螺旋箍筋, 如图 1 所示. 箍筋采用高强度的光面 65 锰弹簧钢, 并委托专业弹簧生产厂家加工而成, 箍筋的力学性能见表 2. 为绑扎箍筋笼, 沿预制管轴向绑扎 4 根直径 4 mm 的纵向构造钢筋, 不考虑其对轴向承载力的贡献.

表 1 试件设计参数和部分试验结果
Tab. 1 Parameters of specimens and partly test results

组别	t /mm	s /mm	ρ_s /%	$f_{\text{RPC-co}}$ /MPa	f_{co} /MPa	$N_{u,t}$ /kN			$N_{u,t}$ 均值/kN
						1	2	3	
CFRT-20	20	20	2.02	92.5	43.3	6 589	6 740	6 390	6 573
CFRT-40	20	40	1.01	89.8	42.7	5 067	5 164	5 137	5 123
CFRT-60	20	60	0.67	92.1	42.3	4 608	4 159	4 710	4 492
HSCC-20	—	20	2.13	—	44.2	5 166	5 476	5 639	5 427
RPC-T	20	60	0.67	96.2	—	789	802	746	779

注: ρ_s 为箍筋体积配箍率; $f_{\text{RPC-co}}$ 和 f_{co} 分别表示 RPC 和内部无约束混凝土的轴心抗压强度; $N_{u,t}$ 为试件的轴压承载力试验值.

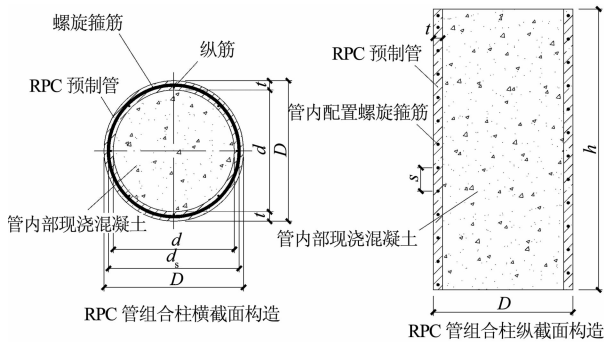


图 1 RPC 管组合柱的构造和截面形式
Fig. 1 Typical cross section of concrete-filled RPC tube

表 2 箍筋的力学性能
Tab. 2 Mechanical properties of stirrup

种类	直径 d /mm	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	延伸率 δ_{10} /%
65 锰弹簧钢	6.0	1 255	1 478	6.83

对于组合柱, 在 RPC 预制管内现浇设计强度等级为 C50 的普通混凝土, 水泥为 42.5 的普通硅酸盐水泥, 粗骨料为碎石, 最大粒径 25 mm, 细骨料为河砂, 具体配合比为: 水泥 : 砂 : 石 : 水 = 1 : 1.14 : 1.88 : 0.38, 28 d 的立方体抗压强度为 47.1 MPa.

1.2 RPC 填充性试验

RPC 选用原材料的基本情况如下: 水泥为 42.5 的硅酸盐水泥, 湘潭产; 粉煤灰为细度为 10% 的 II

级灰, 湘潭产; 硅灰为贵州产, 平均粒径为 0.1 μm ; 石英砂粒径为 0.428~0.850 mm, 长沙产; 石英粉平均粒径为 0.038 mm, 长沙产; 减水剂为聚羧酸高性能减水剂, 粉剂; 镀铜钢纤维, 直径为 0.12 mm, 长度为 13 mm, 河南产.

RPC 预制管在实验室采用人工制作, 将 RPC 拌合物浇入钢模内成型, 浇筑的同时进行振捣. 钢模由外立模、内立模、底模和对拉螺杆等部分组成, 如图 2(a) 所示. 由于 RPC 预制管壁薄、钢筋密, 为保证浇筑质量, 有必要进行填充性试验. 需要说明的是, 本文受限于实验条件, 采用以上方法加工 RPC 预制管, 而对于此类环形截面的薄壁构件, 工厂一般采用离心法制作, 这也是本研究目前正在进行的工作.



(a) RPC 预制管钢模 (b) RPC 填充试验钢模

图 2 浇筑 RPC 预制管用钢模
Fig. 2 Moulds of concrete-filled RPC tube

填充性试验的基准配合比为:水泥:粉煤灰:硅灰:石英砂:石英粉:减水剂=1.0:0.1:0.2:1.1:0.1:0.015,改变钢纤维掺量,测定拌合物的填充性.填充性试验的钢质模具开口长度200 mm,空腔净宽度20 mm,与RPC预制管壁厚相同,填充高度为300 mm,沿高度方向布置直径为6 mm、间距为20 mm的钢筋,如图2(b)所示.试验时将RPC分层浇入模具中,并在振动台上振捣密实,记录振捣时间,并在24 h后拆模观察RPC的填充情况.同时,每种配合比制作3个边长为100 mm的立方体试件,在90℃的热水中养护48 h后进行抗压试验,测定RPC的抗压强度.强度试验结果和填充性试验结果如图3所示.

试验结果表明,在水胶比为0.20下,当钢纤维掺量(体积分数)超过2.5%时,RPC的抗压强度才表现出一定幅度的增长.对于填充性而言,钢纤维的掺量有重要影响,当钢纤维掺量低于2.0%时,振捣时间较短,试件的密实性较好;当钢纤维掺量超过3.0%以后,RPC难以填满钢模.综合考虑,确定RPC预制管的钢纤维掺量为2.0%.

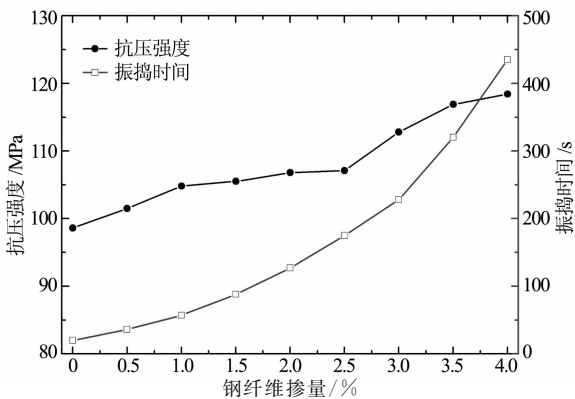


图3 RPC抗压强度试验结果

Fig. 3 Result of RPC compression strength

1.3 试件制作

试件制作分为2个步骤:第一步是采用定制的钢模制作RPC预制管,主要工序如下:首先,拼装钢模,并将绑扎好的箍筋笼放入模具中;接下来将RPC拌制好后分4层浇入钢模中,并在振动台上振捣密实;在室温下静停48 h后拆模;最后把成型后的RPC管再放入90℃热水中养护48 h.图4(a)为加工好的RPC预制管,表面光滑,效果较好.

第二步是将RPC预制管固定,在管内浇筑混凝土;待混凝土硬化后,对组合柱的顶面进行修补,主要方法是采用聚合物砂浆铺浆,铺浆厚度为3~5 mm,再用一块机械抛光的厚钢板压顶,并使钢板在

铺浆硬化过程中与试件底面保持平行,待修补层硬化后即可得到平整的受压面,如图4(b)所示.

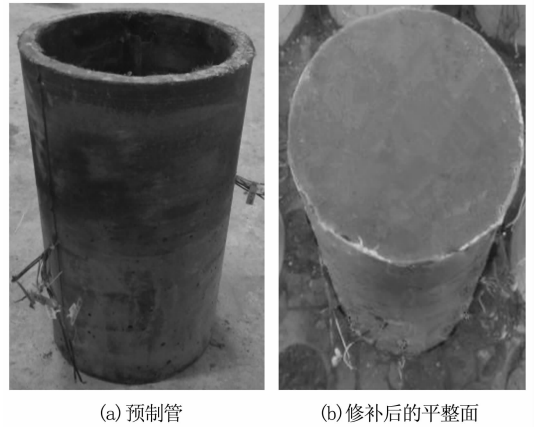


图4 加工好的试件

Fig. 4 The complete specimens

对比试件HSCC-20直接采用RPC预制管的外立模和底模进行浇筑,螺旋箍筋的材质和植筋也与RPC预制管完全相同.需要说明的是,为了与实际情况接近,螺旋箍筋外侧混凝土的净保护层厚度为20 mm.

每组试件均制作1组100 mm×100 mm×300 mm的RPC棱柱体小试件,1组直径为150 mm,高度为300 mm的混凝土圆柱体小试件,与大试件同条件养护.试验前,测得小试件的抗压强度分别代表RPC的轴心抗压强度 $f_{\text{rpc-co}}$ 和内部混凝土的轴心抗压强度 f_{co} .所有试件在实验室放置约60 d后进行抗压试验.

1.4 试验装置与加载制度

本试验的加载装置为10 000 kN的电液伺服压力试验机.为测量箍筋的应变,在预制管浇筑前,选择试件中截面处的2道箍筋,在每道箍筋表面粘贴4个长度为3 mm的应变片(H1~H4, H5~H8),在RPC管表面的对应位置,沿环向和轴向分别粘贴4个应变片(T1~T4和A1~A4),如图5所示.试验时,在试件的中部安装一个轴向变形测试架,试验架通过对拉弹簧固定在试件上,并在对称位置设有2个高精度的位移传感器(LVDT),以准确测量试件在整个试验过程中的轴向变形.轴压荷载由压力机内置传感器测量.所有数据均采用DH3821数据采集系统同步采集记录,采样间隔为0.5 s.

试件采用单调加载,正式加载前,先对试件预加载,并进行对中.预加荷载不超过预估极限荷载的15%,若试件外表面的4个轴向应变片的读数差值不超过10%,则认为试件处于理想的轴心受压状态,随即卸载并开始正式加载.试验的加载制度为:

在试验的开始阶段,采用力控制,加载速度为 5 kN/s;当达到预估极限荷载的 90%时,改为位移控制,加载速度为 0.5 mm/min,直至试件破坏。

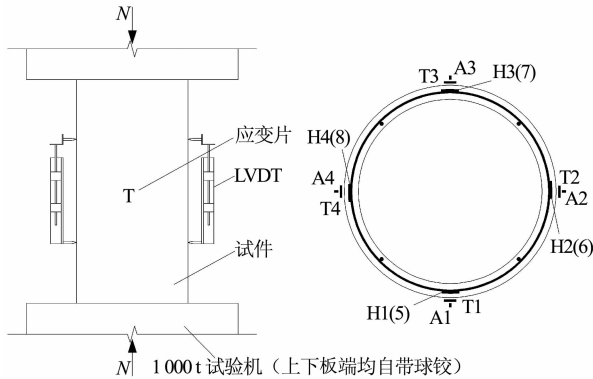


图 5 试验加载装置及测点布置

Fig. 5 Test equipment and arrangement of measuring points

2 试验结果与分析

2.1 试验过程与破坏形态

各类试件的破坏形态如图 6 所示。RPC 空管在加载初期没有明显变化,当荷载达到极限荷载的 50%左右时,试件中部开始出现横向裂缝,随着荷载的增大,裂缝沿环向延伸。随后,试件中部裂缝贯通整个横截面,RPC 管在中部出现较为显著的外鼓,最后试件由于管壁局部失稳而破坏。

箍筋约束混凝土试件 HSCC-20 在加载初期处于弹性阶段,试件表面没有明显变化。随着荷载的增大,试件的中部出现竖向裂缝,并不断延伸变宽。当荷载接近峰值时,裂缝开展明显,试件中部的保护层混凝土大面积剥落,箍筋外露。此后,在承载力缓慢下降过程中,试件中部箍筋开始外鼓,保护层混凝土完全剥落。最后,箍筋发生断裂,试件破坏。



图 6 不同类型试件破坏形态

Fig. 6 Failure patterns of specimens

3 组 CFRT 组合柱的破坏过程类似,在加载初期试件处于弹性阶段,RPC 管表面没有破坏现象。当荷载达到其极限荷载的 70%左右时,试件的中上部开始出现一些细微的竖向裂缝,并慢慢向中部延伸。随着荷载持续提升,裂缝数量不断增加,试件中部也开始出现横向裂缝。此后,横向裂缝不断增加并沿着环向扩展,整个过程中,裂缝处的钢纤维发挥了抗裂作用,使得 RPC 管裂缝细密,没有出现 RPC 剥落的现象。当荷载临近峰值时,可以听到钢纤维从 RPC 中不断拔出的声音,但 RPC 管依然没有出现明显的剥落现象,裂缝宽度也很有限。此后,试件中部的横向裂缝和竖向裂缝不断扩展并贯通,随着试件轴向变形越来越大,RPC 管有一定程度的外鼓,箍筋在试件中部逐根发生断裂,承载力会随着箍筋的断裂而出现显著的波动,但没有发生如 FRP 约束混凝土那样一崩全散的现象。最后,多根箍筋被拉断导致试件破坏。整个过程中 RPC 管没有出现明显的局部稳定问题和剥落现象,与 RPC 空管和箍筋约束混凝土试件有显著差别。

2.2 结果分析

2.2.1 轴向承载力

试验承载力结果汇总于表 1 中。取每组 3 个试件的承载力 N_{ult} 平均值作为该组试件的承载力。从表 1 可以看出,CFRT 的承载力随着 RPC 管中箍筋间距的减小而增大,且箍筋越密,增长幅度越大,如 CFRT-40 的承载力比 CFRT-60 高约 14.0%,而 CFRT-20 的承载力比 CFRT-40 高约 28.3%,这应该与体积配箍率之间的差别不一样有关。

在配箍相同的情况下,CFRT 组合柱的承载力要显著高于普通箍筋约束混凝土的承载力,如 CFRT-20 相对于 HSCC-20,其轴向承载力约提高 21.1%,说明 RPC 管和箍筋的结合形式使组合柱在承载能力上的提升非常明显。

RPC 空管由于管壁的局部失稳导致破坏,因而轴向承载力较低,仅达到其材料极限强度的 48.6%。将组合柱的承载力与箍筋约束混凝土及 RPC 空管承载力之和相比,还可以发现组合柱的承载力比 2 个构件单独承载力之和约高 6.0%,可见 CFRT 组合柱在承载力上实现了超叠加效应。

2.2.2 荷载-轴向应变曲线

选择各组试件中有代表性的试验结果,绘出荷载-轴向应变曲线,如图 7 所示,其中,轴向应变为 2 个 LVDT 测试数据除以其标距的平均值。由图 7 中可以看出,对于 CFRT 试件,在荷载作用初期,3 组

试件的荷载-轴向应变曲线呈线性,且基本重合,表明箍筋间距对组合柱的初始刚度基本无影响.当曲线进入弹塑性阶段后,随着箍筋间距减小,试件的承载力和峰值应变增大,曲线的弹塑性阶段也更长.这主要是因为箍筋越密,对混凝土的侧向约束作用越强,试件的强度和延性也越好^[18-19].荷载-轴向应变曲线进入下降段后,会在箍筋发生断裂处产生对应的突变点,从图中可以看到,随着箍筋间距减小,箍筋的断裂次数增加,且每次断裂造成的强度降低幅度也更小,显示出组合柱破坏前具有明显的征兆.

从荷载-轴向应变曲线的形状来看,HSCC-20表现出与CFRT-20类似的特征,但HSCC-20的初始刚度显著降低,这主要是由于RPC管具有较高的弹性模量,这也表明RPC管在荷载作用初期就能有效地直接承担轴向荷载.与此相对应,在螺旋箍筋开始产生有效的约束应力时(对应于弹塑性段的起点),CFRT-20的承载力显著高于HSCC-20.当达到荷载峰值时,HSCC-20表面混凝土大面积剥落,而CFRT-20整个截面虽有开裂,但基本完好,因此两者的差别更为显著.相对于CFRT-20,HSCC-20箍筋断裂时对应的轴向应变更低,且由此导致的强度波动更大.

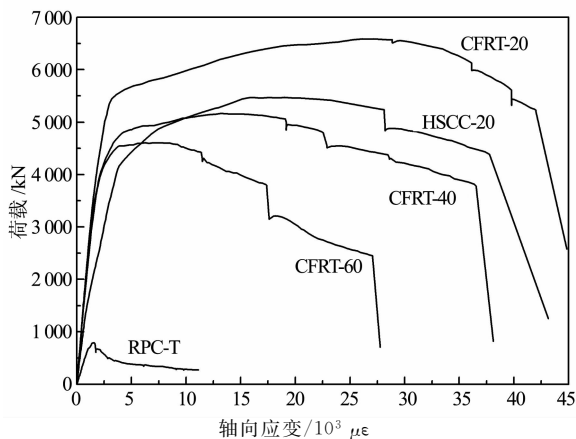


图 7 荷载-轴向应变曲线

Fig. 7 Load-axial strain curves

RPC空管由于是局部失稳导致的破坏,因此其荷载-轴向应变曲线显著劣化,远差于CFRT和HSCC试件,也与已有的RPC材料单轴应力-应变曲线差别很大^[20].这也表明RPC管与内部混凝土的组合,可以有效避免管材本身的失稳破坏模式,对RPC管抗压性能的充分发挥极为有利.

2.2.3 荷载-箍筋应变曲线

图 8 所示为各组试件中,选择具有代表性试件绘出的荷载-箍筋应变曲线,箍筋应变为同一截面 4

个箍筋应变片的平均值.从图中可以看出,在荷载达到该组试件峰值荷载的 70% 前,3 组 CFRT 试件的荷载-箍筋应变曲线几乎为线性关系,且基本重合,而箍筋的应变水平很低,仅为 $250\mu\epsilon$ 左右,这与混凝土的抗拉极限应变基本一致,这表明在混凝土开裂以前,箍筋的约束作用可以忽略.此后,箍筋应变随荷载增加而迅速增大,约束效应逐步显现出来,直至箍筋断裂.

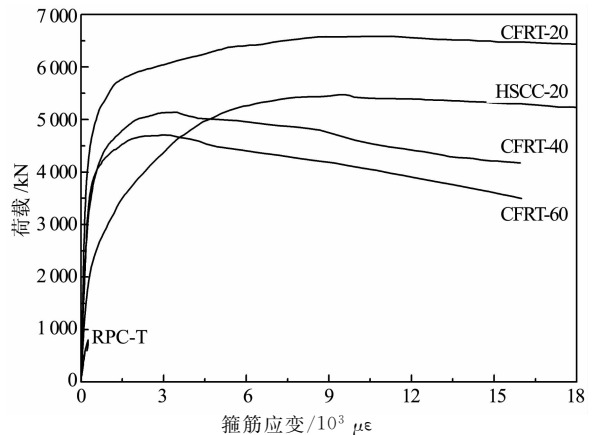


图 8 荷载-箍筋应变曲线

Fig. 8 Load-stirrup strain curves

与CFRT-20相比较,在荷载相对较低时,HSCC-20的箍筋产生较为显著的约束应力,这主要是保护层混凝土在加载初期就产生开裂和剥落,从而退出工作,由于缺少外围RPC管,试件截面的应力水平增长更快,因此箍筋的应力水平更高.这也从一个侧面证明了RPC管对于轴向承载力的有效贡献.

在RPC空管中,箍筋的应力水平极低,表面缺少内部混凝土的侧向支撑,RPC管中配置的螺旋箍筋基本不能发挥约束作用.

3 组合效应分析

Mander模型是在试验基础上提出的一个箍筋约束混凝土短柱的经典模型^[8,21],该模型能够预测约束混凝土峰值应力及其对应的应变峰值.Mander模型已被国内外大量研究者证明了其合理性^[22-25],本文采用该模型对CFRT的组合效应进行分析.Mander计算箍筋约束混凝土抗压强度的表达式分别如下^[8]:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right), \quad (1)$$

$$f'_l = f_l k_e, \tag{2}$$

$$f_l = \frac{2f_y A_{sp}}{d_s s}, \tag{3}$$

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}}, \tag{4}$$

$$A_e = \frac{\pi}{4} \left(d_s - \frac{s'}{2} \right)^2, \tag{5}$$

$$A_{cc} = \frac{\pi}{4} d_s^2 (1 - \rho_{cc}). \tag{6}$$

式中:各参数参看图 9,具体说明如下: f'_{cc} 与 f'_{co} 分别为约束混凝土和非约束混凝土的轴心抗压强度; f'_l 为核心混凝土的有效约束应力; f_l 为箍筋侧向压应力; k_e 为有效约束系数; A_e 为箍筋对核心混凝土的有效约束面积; A_{cc} 为箍筋形心包围的核心混凝土面积扣除纵筋面积; ρ_{cc} 为纵筋面积与箍筋形心包围的核心混凝土面积的比值.

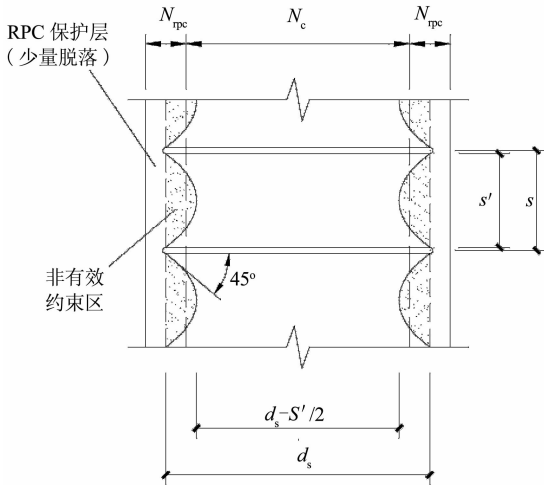


图 9 RPC 管组合柱的截面约束形式
Fig. 9 Constraint type of composite column

Mander 模型不考虑箍筋形心以外的混凝土对承载力的贡献,但在 CFRT 中,RPC 管在整个受力过程中都能够承担相当比例的轴向荷载,受力情况更为复杂.根据箍筋约束混凝土的机理,图 9 给出了 CFRT 约束效应的示意图,与 Mander 模型的约束机理进行比较,存在 2 个显著差别:第一,对于非有效约束区(图中的阴影部分),在 Mander 模型中,这部分混凝土会压碎剥落,而在 CFRT 中,这部分混凝土不会剥落,可以承担部分轴向荷载;第二,对箍筋形心外侧的 RPC 管,在受力过程中虽然开裂,但相对较为完整,也可以承担部分轴向荷载,而 Mander 模型中,这部分也不考虑.为了简化问题,考虑到 RPC 管壁薄,CFRT 的轴向承载力 $N_{u,c}$ 由 RPC

管的承载力 $N_{rpc,c}$ 和内部约束混凝土柱承载力 $N_{c,c}$ 简单叠加,其中, $N_{rpc,c}$ 按 RPC 单轴抗压强度进行计算, $N_{c,c}$ 按 Mander 模型进行计算.其具体计算公式如下:

$$N_{u,c} = N_{c,c} + N_{rpc,c}, \tag{7}$$

$$N_{c,c} = A_c f'_{cc}, \tag{8}$$

$$N_{rpc,c} = A_{rpc} f'_{rpc-co}. \tag{9}$$

式中: A_c 和 A_{rpc} 分别为内部混凝土截面面积和 RPC 管截面面积.

表 3 给出了各组试件的分析结果, $N_{rpc,t}$ 为在组合柱中 RPC 管承担的轴向荷载,在数值上等于组合柱承载力试验值 $N_{u,t}$ 与内部混凝土柱承载力 $N_{c,c}$ 之差.

图 10 给出了各组试件承载力的实测结果与计算结果的对应关系.从分析结果来看,HSCC-20 的计算值与实测值基本一致,证明了 Mander 模型适用于采用高强箍筋约束的混凝土圆柱.对于 CFRT 试件,实测结果均低于预测结果,两者差距在 2.6%~9.3%之间,并随箍筋间距的增大而增大.这种差异主要来自于在计算模型中对组合柱的实际受力情况进行了简化.一方面,RPC 管为拉-压双向应力状态,与计算模型中假设的单轴受压状态有区别;另一方面,RPC 管在荷载峰值时已发生一定程度的开裂,存在损伤.因此,计算模型过高估计了外围 RPC 管对承载能力的贡献.关于 CFRT 约束机理及其对轴向承载力影响规律的定量分析,还需要深入、系统的试验研究.

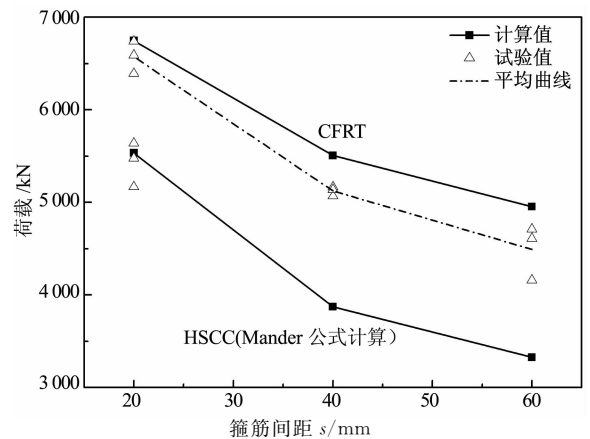


图 10 RPC 管组合柱轴压承载力计算值 $N_{u,c}$ 和试验值 $N_{u,t}$ 的对比
Fig. 10 Comparison of calculated values and test values of the axial carrying capacities of the composite column

对于 CFRT 试件, RPC 管和内部混凝土柱对轴向承载力的贡献率反映在图 11 中。

分析结果表明,在荷载峰值下, RPC 管直接承担的轴向荷载占总荷载的比例在 0.22~0.26 之间,随箍筋间距的增大而有提高的趋势.与之对应的是内部混凝土柱承担的轴向荷载比例,有相应程度的降低.考虑到 RPC 管占组合柱截面面积的比例不到 25%,所以 RPC 管对承载力的贡献与其截面积的比约为 1:1.如果提高 RPC 的强度,那么预制管的强度贡献率及组合柱的强度均会进一步提高.考虑到本试验中 RPC 的抗压强度较低,因此,CFRT 柱的承载力有很大的提升空间。

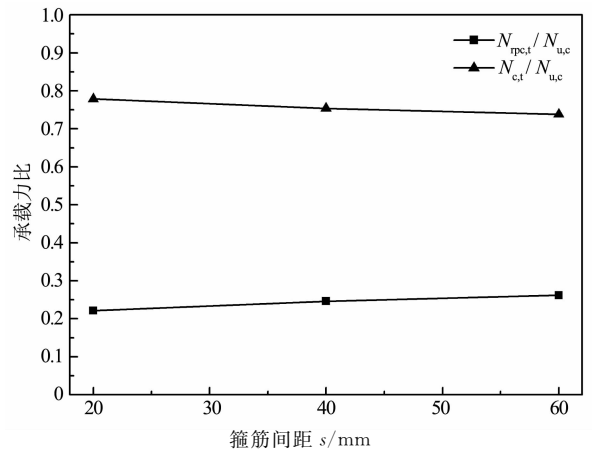


图 11 RPC 管与内部混凝土承载力对组合柱承载力的比值
Fig. 11 The axial bearing capacities ratio of RPC-tube and internal concrete to CFRT

表 3 箍筋约束混凝土与组合柱承载力对比
Tab. 3 Comparison between CFRT and HSCC about axial bearing capacities

组别	f_{cc} /MPa	$N_{c,c}$ /kN	$N_{rpc,c}$ /kN	$N_{u,c}$ /kN	$N_{u,t}$ /kN	$N_{rpc,t}$ /kN	$N_{rpc,t}$ / $N_{u,t}$	$N_{c,t}$ / $N_{u,t}$	提高系数 a
CFRT-20	96.4	5 118	1 628	6 747	6 573	1 455	0.221	0.779	1.188
CFRT-40	72.7	3 864	1 580	5 443	5 123	1 259	0.246	0.754	1.248
CFRT-60	62.4	3 316	1 620	4 936	4 492	1 176	0.262	0.738	1.270
HSCC-20	99.6	5 533	—	5 533	5 427	—	—	—	1.000
HSCC-40	73.9	—	—	4 106	—	—	—	—	1.000
HSCC-60	63.6	—	—	3 537	—	—	—	—	1.000

由于 HSCC-20 承载力计算值 $N_{u,c}$ 与实测值 $N_{u,t}$ 基本吻合,因此,对于表 3 中的 HSCC 试件,直接采用其计算值 $N_{u,c}$ 用于分析.将 CFRT 承载力实测值与 HSCC 的承载力计算值之比定义为承载力提高系数 a .图 12 给出了 a 与配箍率 ρ_s 的相关曲线,基本呈线性递增关系,回归分析的关系式如下:

$$a = 1.310 - 6.053\rho_s, \quad (10)$$

$$N_{u,cfrt} = aN_{u,hsc} \quad (11)$$

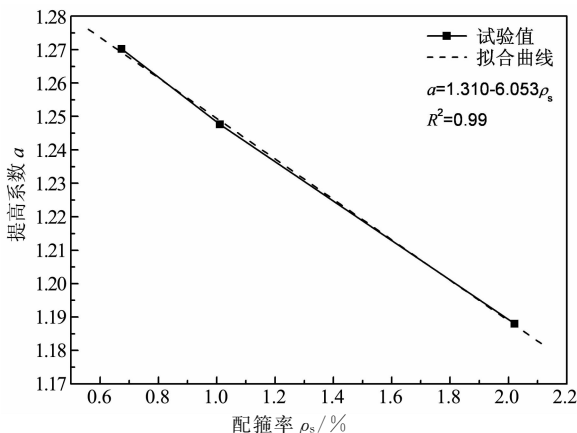


图 12 a - ρ_s 关系曲线
Fig. 12 Relationships of a - ρ_s

因此,根据式(10)确定的提高系数 a ,乘以由 Mander 模型计算得到的对应 HSCC 的抗压承载力 $N_{u,hsc}$,可以较为简便地估算 CFRT 的承载力,如式(11)所示.由于本文试件数量及试验参数相当有限,如需要扩大式(10)的适用范围,还需要更为全面的试验数据支撑。

4 结 论

本文提出了一种新型组合结构——CFRT,并对其抗压性能和组合效应进行了试验研究,得到的主要结论如下:

1)CFRT 在达到 70% 的峰值荷载前,试件外观无明显的改变.在达到荷载峰值时, RPC 管产生大量细而密的裂缝,但没有明显的剥落现象,构件截面较为完整,与箍筋约束混凝土的破坏现象具有显著差异.

2)CFRT 的承载力显著高于对应的箍筋约束混凝土柱和 RPC 空管两者单独的承载力之和,在承载力上实现了超叠加,表明这种组合形式具有良好的组合效应.箍筋间距越小,CFRT 的抗压性能越好.

3) 基于 Mander 模型和相应简化, 对 CFRT 的约束效应和组合效应进行了分析, RPC 管对组合柱的轴向承载力贡献在 0.22~0.26 之间, 并提出了 CFRT 轴向承载力计算公式。

参考文献

- [1] 徐培福, 王翠坤, 肖从真. 中国高层建筑结构发展与展望[J]. 建筑结构, 2009(9):28-32.
XU Peifu, WANG Cuikun, XIAO Congzhen. Development and prospect of high-rise building structures in China[J]. Building Structure, 2009(9):28-32. (In Chinese)
- [2] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社, 2003:1-33,420-464.
ZHONG Shantong. Concrete-filled steel tubular structures[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003:1-33,420-464. (In Chinese)
- [3] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3):24-36.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3):24-36. (In Chinese)
- [4] BAYARD O. Fracture mechanics of reactive powder concrete: material modeling and experimental investigations[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(7):839-851.
- [5] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社, 2003:4-5.
CAI Shaohuai. Modern steel tube confined concrete structures[M]. Beijing: China Communication Press, 2003:4-5. (In Chinese)
- [6] HUO J, HUANG G, XIAO Y. Effects of sustained axial load and cooling phase on post-fire behavior of concrete-filled steel tubular stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8):1664-1676.
- [7] 李国强, 吴波, 韩林海. 结构抗火研究进展与趋势[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(1):1-13.
LI Guoqiang, WU Bo, HAN Linhai. Development of the research on fire-resistance of structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(1):1-13. (In Chinese)
- [8] YANG H, HAN L H, WANG Y. Effects of heating and loading histories on post-fire cooling behavior of concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(5):556-570.
- [9] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.
- [10] RICHARD P. Reactive powder concrete: a new ultra-high-strength cementitious material[C]//Proceedings of 4th International Symposium on Utilization of High Strength, High Performance Concrete. Paris, France: Presses des Ponts et Chaussees, 1996:1343-1349.
- [11] 任亮, 方志, 王诚. 基于截面纤维模型的 RPC 箱型桥墩抗震性能分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2013, 40(8):16-21.
REN Liang, FANG Zhi, WANG Cheng. Seismic behavior analysis of RPC box piers based on the fiber element model[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(8):16-21. (In Chinese)
- [12] 郑文忠, 罗百福, 王英. 高温下复掺纤维 RPC 立方体抗压性能研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2012, 39(11):13-19.
ZHENG Wenzhong, LUO Baifu, WANG Ying. Compressive properties of cubes reactive powder concrete with hybrid fibers at elevated temperature[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(11):13-19. (In Chinese)
- [13] 屈文俊, 秦宇航. 活性粉末混凝土 (RPC) 研究与应用评述[J]. 结构工程师, 2008, 23(5):86-92.
QU Wenjun, QING Yuhang. A review of study and application of reactive powder concrete (RPC)[J]. Structural Engineers, 2008, 23(5):86-92. (In Chinese)
- [14] 陈健, 刘红彬, 贾玉丹, 等. 活性粉末混凝土的研究与应用[J]. 工业建筑, 2005, 35(Z1):663-667.
CHEN Jian, LIU Hongbin, JIA Yudan, et al. Review of study and application of reactive powder concrete[J]. Industrial Construction, 2005, 35(Z1):663-667. (In Chinese)
- [15] 何峰, 黄政宇. 养护制度对活性粉末混凝土 (RPC) 强度的影响研究[J]. 混凝土, 2002(2):31-34.
HE Feng, HUANG Zhengyu. Study on effect of curing schedule on the strength of RPC[J]. Concrete, 2002(2):31-34. (In Chinese)
- [17] WU Yanhai, LIN Zhenyu. Experimental study of behavior on RPC filled steel tubular stub columns under axial compression[J]. China Journal of Highway & Transport, 2005, 18(1):57-62.
- [17] 杨吴生. 钢管活性粉末混凝土力学性能及其极限承载力研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院, 2003:70-73.
YANG Wusheng. Experimental study on mechanical behavior and compressive capacity of RPC filled steel tubular columns[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2003:70-73. (In Chinese)
- [18] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8):1804-1826.
- [19] RAZVI S R, SAATCIOGLU M. Circular high-strength concrete columns under concentric compression[J]. Structural Journal, 1999, 96(5):817-826.
- [20] 单波. 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院, 2002:18-37.
SHAN Bo. Experimental study on basic mechanical property of reactive powder concrete[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2002:18-37. (In Chinese)
- [21] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Observed stress-strain behavior of confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8):1827-1849.
- [22] 周绪红. 钢管约束混凝土柱的性能与设计[M]. 北京:科学出版社, 2010:8-12.
ZHOU Xuhong. Behavior and design of steel-tube reinforced concrete[M]. Beijing: Science Press, 2010:8-12. (In Chinese)
- [23] ATTARD M. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(5):432-442.
- [24] CUSSON D, PAULTRE P. Stress-strain model for confined high-strength concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3):468-477.
- [25] MUKHERJEE A, RAMANA V P V. Behavior of concrete columns confined by fiber composites[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 123(5):583-590.