

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.028

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 活性粉末混凝土预制管组合柱抗震性能试验研究

单波<sup>1a, 1b</sup>, 单宇<sup>1a</sup>, 刘福财<sup>2</sup>, 佟广权<sup>1a</sup>

(1. 湖南大学 a. 土木工程学院; b. 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 长沙 410082;  
2. 广东盖特奇新材料科技有限公司, 广东 清远 511600)

**摘要:**活性粉末混凝土预制管组合柱(Concrete-filled RPC tube, 简称 CFRT)将活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, 简称 RPC)的力学性能和箍筋的约束效应有效结合了起来,是一种基于超高性能水泥基套管的新型约束组合柱。对4个CFRT柱和1个箍筋约束混凝土柱开展了恒定轴力下的低周反复荷载试验,获取了组合柱的破坏形态、滞回曲线和钢筋的应变等数据,并对相关抗震指标及试验参数进行了分析。结果表明:CFRT柱在低周反复荷载作用下表现出典型的弯曲破坏特征,在RPC管表面出现大量细而密的裂缝,但没有明显的剥落现象;CFRT柱的滞回曲线较饱满,其抗震性能显著优于普通箍筋约束混凝土柱;在试验条件下,CFRT柱的极限侧移率在0.042~0.075之间,高于中国抗震设计规范关于罕遇地震下结构柱极限塑性侧移率不低于0.02的要求;从抗震性能来看,在RPC管内部填充高强混凝土,对于CFRT是可以接受的组合方式。

**关键词:**活性粉末混凝土;组合柱;反复荷载;抗震性能

**中图分类号:**TU398 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)04-0094-11

## Experimental research on seismic behavior of concrete-filled reactive powder concrete tube

Shan Bo<sup>1a, 1b</sup>, Shan Yu<sup>1a</sup>, Liu Fucai<sup>2</sup>, Tong Guangquan<sup>1a</sup>

(1a. College of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province; Hunan University, Changsha 410082, P. R. China; 2. Guangdong Gaiteqi New Materials Technology Co. Ltd., Qingyuan 511600, Guangdong, P. R. China)

**Abstract:** Concrete tube filled reactive powder is a new type of contained composite column based on ultra-high performance cement casing, with the mechanical properties of reactive powder concrete and the constraint effect of stirrup. In this paper, four Concrete-Filled RPC Tube (CFRT) columns and one ordinary hoops-confined concrete column were tested under cyclic and constant axial load. The failure mode, hysteresis behavior and strain development of reinforcements were investigated, and the relevant seismic parameters were analyzed. CFRT columns exhibited typical bending failure characteristics. In contrast to conventional reinforced concrete column, the surface of Reactive Powder Concrete(RPC) tube was characterized with well distributed fine cracks, without any RPC cover spalling or crushing. The

**收稿日期:**2019-11-22

**基金项目:**国家重点研发计划(2018YFC0705400);国家自然科学基金(51678228)

**作者简介:**单波(1976-),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事组合结构和竹木结构研究, E-mail: supershanb@163.com.

**Received:**2019-11-22

**Foundation items:**National Key R & D Program of China (2018YFC0705400); National Natural Science Foundation of China (51678228)

**Author brief:** Shan Bo (1976-), PhD, associate professor, doctoral supervisor, main research interests: composite structures and modern bamboo structures, E-mail: supershanb@163.com.

hysteresis curve of CFRT column is full, and its seismic performance is significantly better than that of ordinary stirrup confined concrete column. Under the test conditions, the limit plastic drift ratios of CFRT columns vary between 0.042 and 0.075, which largely exceed the specified limit (0.02) according to the rare earthquake requirement in Chinese seismic design code. The results also reveal that RPC tube filled with high strength concrete is an acceptable combination for CFRT columns.

**Keywords:** reactive powder concrete; composite columns; cyclic loading; seismic performance

钢筋混凝土柱作为重要的承重构件,要求具有较高的轴向承载能力和可靠的抗震性能,以防止结构在地震作用下出现整体倒塌。一方面,采用高强混凝土可以有效提高混凝土柱的轴向承载力;而另一方面,由于高强混凝土脆性大、韧性差,导致结构柱的抗震性能劣化<sup>[1-4]</sup>。因此,需要在提高混凝土柱轴向承载力的同时,改善其抗震性能。基于约束效应的组合柱,是解决这一问题的有效手段,即通过对核心区的混凝土施加侧向约束,可以有效提高混凝土柱的承载力和延性<sup>[5-8]</sup>。常用的约束混凝土组合形式主要有钢管混凝土(CFST)、纤维增强塑料(FRP)约束混凝土、箍筋约束混凝土等。但从性能上来看,这些组合柱都存在不足之处,如CFST耐火性能和耐腐蚀性能存在明显缺陷<sup>[9-11]</sup>;FRP本身是温度敏感性材料,导致FRP约束混凝土柱不适用于温度相对较高的环境<sup>[12-13]</sup>;而对于箍筋约束混凝土柱,在受力过程中混凝土保护层过早剥落,导致其承载力和抗震性能显著降低,且不适于装配式施工<sup>[14]</sup>。活性粉末混凝土(RPC)是一种超高性能混凝土(UHPC),通过掺入大量超细活性粉体、取消粗集料、采用超低水胶比,以及掺入钢纤维等技术手段,实现了超高强度、高韧性和高耐久性<sup>[15-18]</sup>,被视为在严酷环境下理想的结构材料。目前,RPC在建筑工程、水利工程、桥梁工程,甚至是海洋工程中得到应用<sup>[19-20]</sup>。

从材料性能上来看,将RPC用于受压构件最为合理。然而,RPC材料成本远高于普通混凝土,将RPC设计成为实心受压构件并不合理,因为结构柱的承载力很可能由其刚度控制,材料本身超高的抗压性能得不到有效发挥,结构柱的经济性不好<sup>[21]</sup>。目前,在实际工程中,RPC的应用基本上以空心薄壁构件或组合构件为主要形式<sup>[22-23]</sup>。为了有效地将RPC的优异性能与约束混凝土的形式结合起来,笔者提出一种基于超高性能水泥基预制管的组合柱——RPC预制管混凝土组合柱(Concrete-filled RPC Tube,简称CFRT)<sup>[24]</sup>。其结构形式为:将

RPC预制成配置高强螺旋箍筋的管材,并在预制管中填充混凝土。在这一体系中,RPC管本身具有高强度和高韧性,直接承受相当比例的轴向荷载,同时,管壁内的高强箍筋为内部混凝土提供侧向约束。因此,CFRT将RPC超高性能、套管混凝土的形式与箍筋约束效应有效结合了起来,具有较为突出的力学性能以及良好的耐久性、防火性能、施工便利性和经济性。

对大尺寸CFRT短柱试件进行轴压试验<sup>[25]</sup>,结果表明RPC管对组合柱的承载力有显著贡献,CFRT柱的承载力和延性远高于普通箍筋约束混凝土柱,并提出了轴压承载力计算模型。为评估这一新型组合柱的抗震性能,并为其在地震活跃区域的应用提供依据,有必要对CFRT柱的抗震性能开展研究。目前,一些研究者对UHPC结构柱或采用UHPC外包增强钢筋混凝土柱的抗侧力性能开展了相关试验<sup>[26-30]</sup>,结果表明,UHPC优异的抗裂性能对提高结构柱的抗侧能力和耗能能力有显著作用,这些研究成果对CFRT抗震试验的开展具有指导作用。

## 1 试验设计

### 1.1 试件设计

设计了4个CFRT柱和1个作为对比的普通箍筋约束混凝土柱,CFRT柱的结构形式如图1(a)所示。所有试件的外径均为300 mm,高度为2 220 mm,其中,水平力加载点至柱底的距离 $L=1\ 500$  mm,如图1(b)所示。对于CFRT柱,试验参数包括RPC管中箍筋间距和内部混凝土的强度,如表1所示。表1中,试件编号由试件类型(C代表CFRT柱、R代表对比柱)、箍筋间距(20、40、60 mm)和内部混凝土强度等级(L为C40、H为C75)3部分组成。例如:C20L表示RPC管中箍筋间距为20 mm、内部混凝土强度等级为C40的CFRT柱。

对于CFRT柱,RPC预制管外径 $D$ 为300 mm,管壁厚度 $t$ 为25 mm,螺旋箍筋设置在管截面中心

位置( $t/2$ 处)。箍筋为直径6 mm的65锰弹簧钢,实测屈服强度为1 255 MPa。在内部混凝土中,沿RPC管内壁均匀地分布12根直径为12 mm的HRB400级纵筋,实测屈服强度为486 MPa,总的截

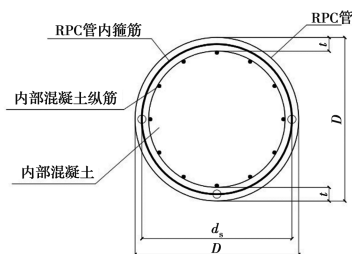
面配筋率1.92%,如图1所示。R20L为对比试件,柱身混凝土、箍筋和纵筋的材料及配置方式均与C20L相同。

表1 试件参数及部分试验结果

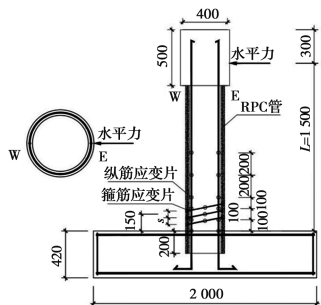
Table 1 Details of specimen and test matrix

试件编号	$t/\text{mm}$	$s/\text{mm}$	$d_s/\text{mm}$	$d_c/\text{mm}$	$\rho_s/\%$	$f'_{\text{rpc,c0}}/\text{MPa}$	$f'_{\text{c0}}/\text{MPa}$	$P/\text{kN}$
C20L	25	20	275	250	2.06	109.6	33.6	1 250
C40L	25	40	275	250	1.03	103.3	33.3	1 000
C60L	25	60	275	250	0.69	106.4	36.0	900
C20H	25	20	275	250	2.06	109.6	58.8	1 500
R20L		20	254	250			33.9	800

注: $t$ 为RPC管壁厚度; $s$ 为相邻两道箍筋中心间距; $d_s$ 为箍筋圈中心线直径; $d_c$ 为内部混凝土直径;为体积配筋率; $f'_{\text{rpc,c0}}$ 和 $f'_{\text{c0}}$ 分别为RPC和内部混凝土的轴心抗压强度; $P$ 为循环加载过程中施加在试件上的轴向力。



(a) CFRT柱组合形式



(b) CFRT抗侧力试验试件

图1 CFRT柱的基本尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Design of CFRT columns (unit: mm)

## 1.2 原材料

RPC的主要原材包括:42.5的普通硅酸盐水泥;最大粒径为3 mm的河砂;直径为0.12 mm、长度为8 mm的钢纤维;直径为45  $\mu\text{m}$ 、长度为18 mm的PVA纤维。内部混凝土的主要材料为:42.5的普通硅酸盐水泥,最大粒径为25 mm的碎石用作粗骨料,细骨料为河砂。C40等级混凝土的配合比为:水泥:河砂:碎石=1:1.90:3.10, $W/B=0.56$ ,28 d立方体抗压强度为44.5 MPa。C75等级混凝土的配合比为:水泥:河砂:碎石:硅灰:石灰石:高效减水剂=1:1.23:2.01:0.11:0.11:0.006, $W/B=0.26$ ,

28 d立方抗压强度82.3 MPa。

## 1.3 试件制作

试验柱的制作分为工厂RPC管预制与实验室混凝土浇筑两个阶段。RPC管采用离心法制作,也就是RPC在离心力作用下密实成型,这对RPC的流变性能有特殊要求。一方面,在RPC搅拌与入模过程中,需要具有一定的流动性能;而另一方面,当离心结束后,必须具备一定的管坯强度,以维持管壁形状。通过试验确定RPC的配合比为:水泥:硅灰:河砂:钢纤维(体积掺量):PVA纤维:高效减水剂:增稠剂=1.0:0.25:2.1:0.02:0.004:0.03:0.0005,水灰比 $W/B$ 为0.17。90  $^{\circ}\text{C}$ 热水养护48 h后的立方体抗压强度(100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 100 mm)为123.2 MPa。

离心法制作RPC管的主要步骤包括:箍筋绑扎、装模、RPC下料、离心成型、初养护、脱模、切割和终养护,基本过程如图2所示。在制作每根预制管时,预留3个棱柱体试件(100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 300 mm)与RPC管同条件养护。试验前,按照《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)<sup>[31]</sup>进行抗压试验,测得的抗压强度平均值作为该RPC管的轴心抗压强度 $f'_{\text{rpc,c0}}$ 。

实验室浇筑混凝土时,先绑扎基础梁以及内部混凝土的钢筋笼;然后,如图3(a)所示,将RPC管套在柱身钢筋笼外,如图1(b)所示,RPC管插入基础梁顶面以下200 mm,以提供必要的锚固;最后,分两次浇筑基础和柱身混凝土,并用振动棒振捣密实,成型后的试件如图3(b)所示。在浇筑每根柱身混凝土时,预留3个圆柱体试件(150 mm $\times$ 300 mm),并

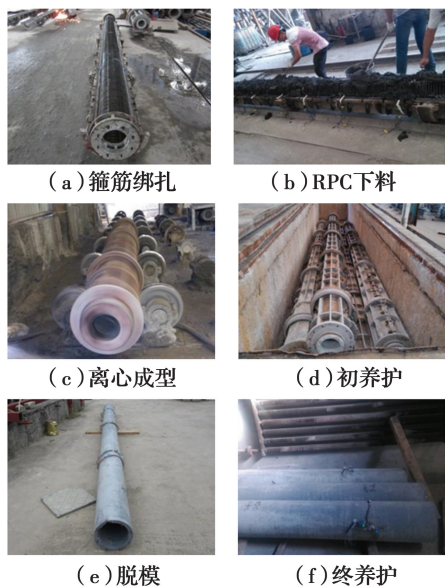


图 2 离心法制作 RPC 管制作过程

Fig. 2 Spinning process of making RPC tube

与试件柱同条件养护。试验前,按照 ASTM C39 标准进行抗压试验<sup>[32]</sup>,测得的抗压强度平均值作为内部混凝土的轴心抗压强度  $f'_c$ 。需要说明的是,采用圆柱体抗压强度作为内部混凝土的轴心抗压强度,是为了与 CFRT 柱的轴压承载力公式的计算取值保持一致<sup>[33]</sup>,该公式在后续部分进行说明。

对于 R20L 的制作,使用内径为 300 mm 的塑料管作为模具,先进行钢筋绑扎,然后一次性浇筑成型。

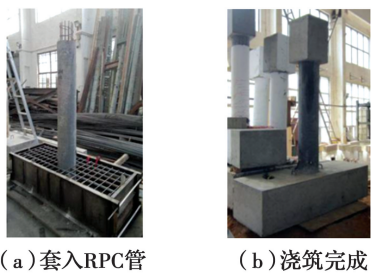


图 3 CFRT 试件的制作

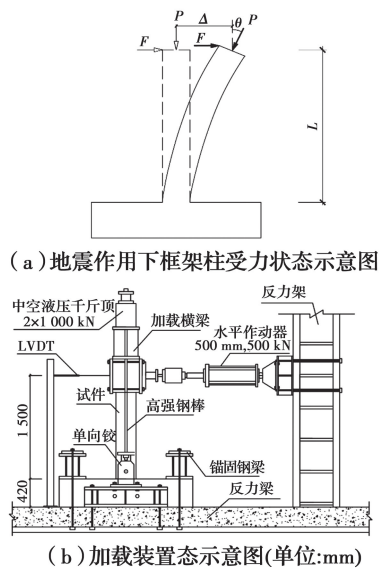
Fig. 3 Prefabrication of CFRT column specimen

## 2 试验方法

### 2.1 加载装置与测量方案

开展压弯柱的低周反复荷载试验,以悬臂的方式模拟底层框架柱反弯点以下部分在地震中的受力状态,如图 4(a)所示。试验在自制的加载装置上进行,如图 4(b)所示。试件通过两根锚固钢梁与螺栓固定在实验室地板的反力梁上,水平力通过作动器施加。轴向荷载由设置在柱顶转换钢梁上的两个穿

心式油缸施加,通过油缸顶升使对拉钢棒张拉,将轴力施加在柱顶。对拉钢棒通过单向铰连接在基础上,以保证钢棒在水平力作用下与试件同步转动。轴力由设置在油缸顶部的压力传感器监控,水平力通过作动器内置的传感器测定,水平位移由安装在柱顶的位移传感器 LVDT 测量。装置照片如图 4(c)所示。



(c) 试验照片

图 4 加载装置

Fig. 4 Test setup

为测量试验过程中的钢筋应变,在试件内部预埋应变片。对于 RPC 管内的箍筋,选择连续的 3 道螺旋箍,布置 9 个应变片,其中,第 2 圈箍筋距离柱底的距离约为  $D/2$  (150 mm),基本对应于塑性铰区域的中间位置。对于内部混凝土中的钢筋,选择推、拉平面内两端的两根纵筋,分布粘贴 6 个应变片,其中,第 1 个应变片的位置与基础梁顶面齐平,具体布置情况如图 1(b)所示。

试验过程中,所有的数据,包括水平力、水平位移、轴力及钢筋应变,均由 DH3821 数据采集系统记录,采样间隔为 0.5 s。

### 2.2 加载制度

试验采用恒定轴力下的低周反复加载,试件的轴力  $P$  按其轴向承载力  $N_u$  的 20% 考虑 ( $P =$

0.2N<sub>u</sub>)。CFRT 的轴向承载力 N<sub>u</sub>, 由 RPC 管与内部混凝土分别承担的轴向荷载构成, 按照文献[24]提出的公式进行计算。

$$N_u = [ak_d + (1 - \alpha)k_s]f'_{\text{rpc},c0}A_t + f'_{\text{con},cc}A_{\text{con}} \quad (1)$$

$$A_t = (D^2 - d_c^2)\pi/4 \quad (2)$$

$$A_{\text{con}} = \pi d_c^2/4 \quad (3)$$

$$k_d = 0.507 - 6.84\rho_s \quad (4)$$

$$k_s = -0.797 + 1.893\sqrt{1 + \frac{12.29f_1}{f_{\text{rpc},c0}}} - 2\frac{f_1}{f_{\text{rpc},c0}} \quad (5)$$

$$\rho_s = \frac{4A_{st}}{d_s s} \quad (6)$$

$$f'_1 = f_1 k_e \quad (7)$$

$$f_1 = \frac{2f_y A_{st}}{d_s s} \quad (8)$$

$$k_e = A_e/A_{cc} \quad (9)$$

$$A_e = \frac{\pi}{4}\left(d_s - \frac{s}{2}\right)^2 \quad (10)$$

$$A_{cc} = \frac{\pi}{4}d_s^2(1 - \rho_{cc}) \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{D^2 - (d_c + t - s/2)^2}{D^2 - d_c^2} \quad (12)$$

$$t > s'/2 \quad (13a)$$

$$\alpha = 1, t \leq s'/2 \quad (13b)$$

式中:  $k_d$  为非有效约束区域 RPC 强度折减系数;  $k_s$  为约束区域 RPC 强度提高系数;  $A_t$  为 RPC 管截面积;  $A_{\text{con}}$  为内部混凝土截面积;  $\rho_s$  为体积配箍率;  $f'_1$  为核心混凝土的有效约束应力;  $f_1$  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;  $A_{cc}$  为箍筋中心线包围的面积;  $A_{st}$  为箍筋截面积;  $D$  为 RPC 预制管外径;  $d_c$  为内部混凝土直径;  $d_s$  为箍筋中心线的直径;  $t$  为 RPC 管壁厚;  $s$  为箍筋间距;  $s'$  为 RPC 管中箍筋的净间距;  $\rho_{cc}$  为纵筋面积与箍筋形心包围的核心混凝土面积的比值;  $f'_{\text{rpc},c0}$  为 RPC 轴心抗压强度;  $f'_{\text{con},cc}$  为内部混凝土抗压强度, 按照 Mander 约束模型进行计算<sup>[33]</sup>。

$$f'_{\text{con},cc} = f'_{c0} \left( -1.254 + 2.254\sqrt{1 + \frac{7.94f_1}{f_{c0}}} - 2\frac{f_1}{f'_{c0}} \right) \quad (14)$$

式中:  $f'_{c0}$  为混凝土的轴心抗压强度。

对比柱 R20L 的轴向承载力按 Mander 约束模型进行计算。应该说明的是, 虽然试件的柱顶轴向

力  $P$  都是按其计算轴向承载力  $N_u$  的 20% 进行取值, 但  $P$  的大小与约束效应密切相关。配箍率越高, 则  $P$  也就越大, 如表 1 所示。这一取值方式应该与结构柱的实际工作状况一致, 因为结构柱的轴向承载力设计取值一般需要考虑约束效应的增强作用。此外, 从表 1 可以看到, 对比柱 R20L 的轴力  $P$  显著低于 C20L, 其主要原因是按照 Mander 约束模型, 处于非有效约束区域(含保护层)对约束柱的轴向承载力没有贡献, 在抗压承载力计算中不予考虑。然而, 对 CFRT 柱, 处于非有效约束区(含保护层)的 RPC 管壁部分对其轴向承载力有不可忽视的贡献。因此, 即使 R20L 与 C20L 两个试件的配箍率相同, 后者的轴向承载力明显更高, 增加幅度约为 56%。

试件的水平加载方式采用位移控制, 具体加载制度为: 在初期的 3 个位移峰值下 (0.25%L、0.5%L 和 0.75%L), 采用为单循环加载。此后, 在每个位移峰值下为 3 次循环, 对应于 1%L、1.5%L、2%L、3%L、4%L、6%L、8%L 和 10%L, 直至试件完全破坏。

## 3 试验结果

### 3.1 破坏现象

试验柱的破坏模式如图 5 所示。由于柱的破坏主要集中在下部的塑性铰区域, 故该图为柱下部约 1.5 倍直径范围内的破坏情况。

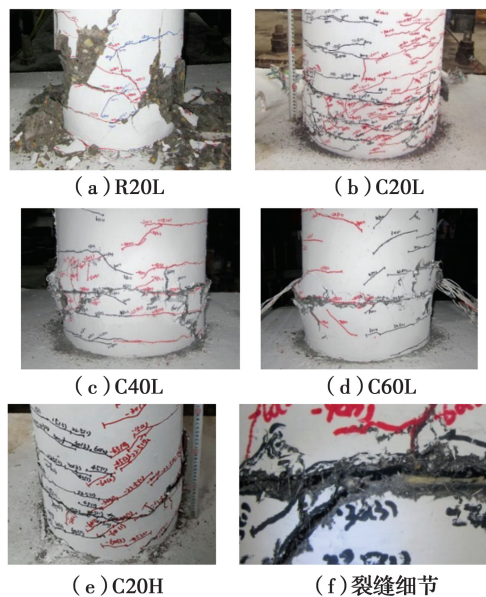


图 5 试验柱的破坏形态

Fig. 5 Failure patterns of specimens

对比柱 R20L 为典型的弯曲破坏模式,其破坏形态与采用普通箍筋的约束混凝土柱类似<sup>[34]</sup>,如图 5(a)所示。当侧移率( $\Delta/L$ )为 0.5% 时,在受拉一侧距离柱底部 1 倍直径范围内开始出现细小的水平裂缝;随着侧移率的增大,水平裂缝逐渐增多、变宽,并沿环向扩展,在受压一侧开始出现竖向裂缝;当侧移率达到 1.5% 时,水平裂缝沿环向斜向发展,形成若干交叉裂缝,同时,混凝土保护层出现剥落;当侧移率为 3% 时,柱下部混凝土保护层严重剥落,箍筋外露;当侧移率为 8% 时,水平力大幅度降低,试验终止。

CFRT 柱均表现出较为显著的弯曲破坏特征。以 C20L 为例,当侧移率为 0.75% 时,试验柱受拉一侧开始出现水平裂缝;随着侧移率的增大,RPC 管表面不断出现细裂缝,且裂缝的长度和数量也不断增长,但裂缝宽度增加不明显,直至试验结束。最终,试件表面出现大量的环向裂缝,但 RPC 保护层未出现明显的剥落现象,如图 5(b)所示。

其余 CFRT 柱的破坏过程及形式与 C20L 类

似,在试件柱底部约 1 倍直径范围内形成塑性铰。此外,随着 RPC 管内箍筋间距的增大,塑性铰区域的裂缝相对稀疏,并出现较为明显的斜裂缝,RPC 保护层也有一定的外鼓现象,但都未出现明显的剥落,如图 5(b)~图 5(d)所示。这主要得益于钢纤维的阻裂作用,近距离观察可以发现,跨越裂缝处的钢纤维依然起着桥接作用,如图 5(f)所示。

相比于浇筑普通混凝土的组合试件 C20L,内部浇筑高强混凝土的 C20H 试件表面的裂缝对较少,且斜裂缝发展明显,如图 5(e)所示。

### 3.2 滞回曲线

表 2 列出了各试件推、拉两个方向中的主要试验结果。试件的极限状态定义为试验柱的抗侧能力(基底弯矩)下降到峰值的 85%<sup>[35]</sup>,如图 6 所示。图 7 给出了各试件的滞回曲线,需要说明的是,图 7 中水平力为从作动器测得的水平力中,去除了由于柱顶偏转而使得轴力产生的水平分量(图 4(a))。

表 2 试件测试结果

Table 2 Main results of specimens

试件	方向	初始刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	$M_y$ /(kN·m)	$\theta_y$	$M_{max}$ /(kN·m)	$\theta_{max}$	$M_u$ /(kN·m)	$\theta_u$
C20L	推方向	7.7	180	0.016	242	0.024	206	0.074
	拉方向	-8.1	-178	-0.016	-236	-0.026	-200	-0.074
C40L	推方向	7.3	105	0.016	220	0.024	186	0.049
	拉方向	-7.1	-103	-0.016	-214	-0.026	-182	-0.049
C60L	推方向	5.9	149	0.016	199	0.025	169	0.041
	拉方向	-6.3	-157	-0.018	-211	-0.026	-179	-0.043
C20H	推方向	8.6	227	0.018	318	0.027	258	0.072
	拉方向	-8.6	-228	-0.018	-317	-0.029	-257	-0.078
R20L	推方向	5.5	121	0.014	161	0.022	137	0.076
	拉方向	-6.5	-119	-0.012	-159	-0.022	-135	-0.064

注:注: $M_y$  为屈服弯矩; $\theta_y$  为屈服侧移率; $M_{max}$  为峰值弯矩; $\theta_{max}$  为峰值弯矩的侧移率; $M_u$  为极限弯矩; $\theta_u$  为极限侧移率。试验结果中,推方向为正,拉方向为负。

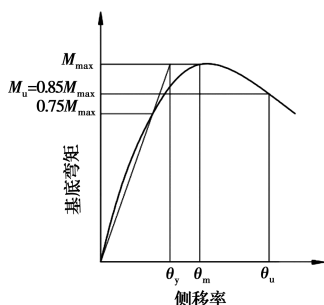


图 6 延性特征参数示意图

Fig. 6 Characteristic variables of ductility

CFRT 柱的滞回曲线较为饱满,形状基本类似,可以分为初始弹性段、平缓上升段和相对稳定的下降段。RPC 管中的箍筋间距(配箍率)对 CFRT 柱的滞回曲线有一定影响。随着箍筋间距的增大,滞回曲线的逐步显现出捏拢现象,特别是 C60L 试件较为明显。这表明减小 RPC 管中的箍筋间距,可以在一定程度上改善 CFRT 柱的滞回性能。

C20H 试件内部填充 C75 等级的高强混凝土,对比 C20L 试件,可以看到前者的捏拢现象相对明

显,如图 7(b)和图 7(e)所示。此外,在同一侧移率下,C20H 第 2 次循环的水平力退化幅度更大。主要原因应该是所施加在 C20H 顶部的轴力更高,而其约束效应却更低,即侧向约束应力与混凝土强度的比较小<sup>[36]</sup>。

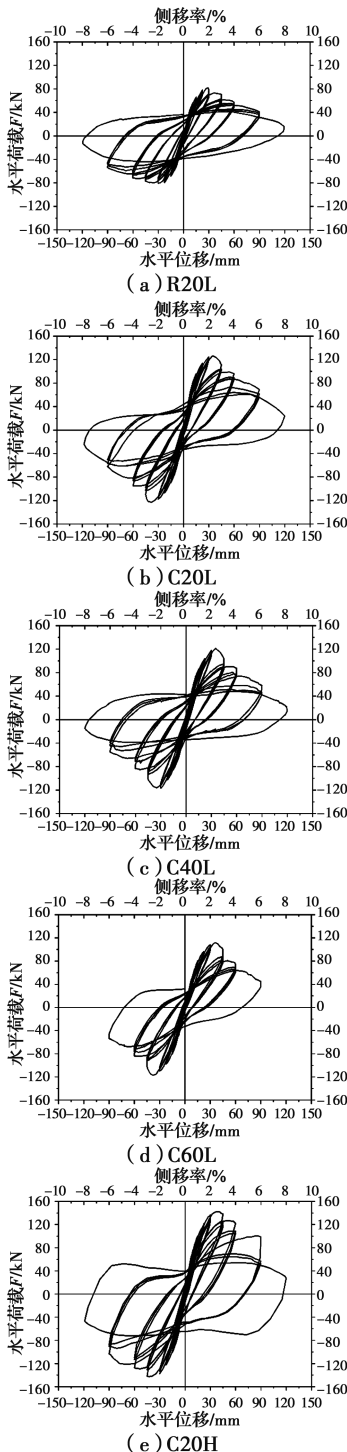


图 7 试件滞回曲线

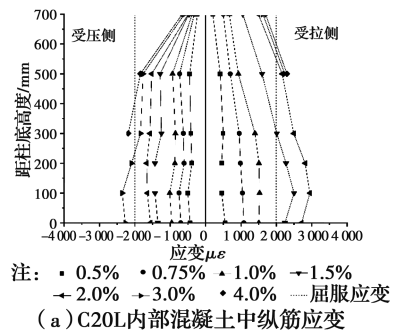
Fig. 7 Hysteretic loops

### 3.3 钢筋应变

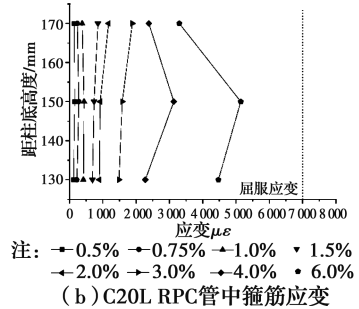
选择 C20L 来分析 CFRT 柱的钢筋应变分布与

发展。图 8(a)给出了内部混凝土中的纵筋在各级侧移率峰值下(第 1 次循环)的应变值,应变符号以拉为正、压为负。可以看到,各测点的应变随侧移率的增大而增加,且在同级荷载下,应变分布沿柱高基本成递减趋势,但第 1 测点的应变相对于第 2 测点较小,主要原因应该是基础梁对柱底的侧向约束限制了纵筋的压曲变形。此外,可以看到纵筋在侧移率达到 3% 时进入屈服,如前所述,此时 RPC 管表面已出现大量裂缝。

图 8(b)给出了 RPC 管中箍筋的应变发展情况(受压一侧)。与纵筋应变特征类似,各测点的应变随侧移率的增大而不断增加。相对而言,侧移率低于 1.5% 时,箍筋应变发展很有限,而超过 1.5% 后,箍筋应变显著增大,表明箍筋对内部混凝土的约束作用逐步显现。应该注意到各测点的应变均未达到屈服值,意味着 RPC 管内的高强螺旋箍筋可以提供必要的约束能力储备,这对 CFRT 柱在经历地震作用后的修复具有积极意义。



(a) C20L 内部混凝土中纵筋应变



(b) C20L RPC 管中箍筋应变

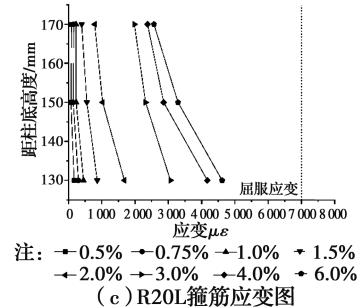


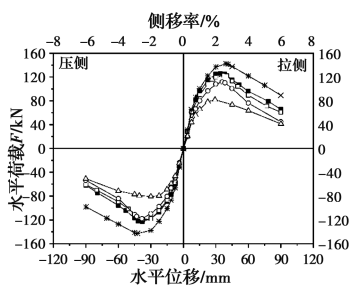
图 8 钢筋应变发展

Fig. 8 Strain development of reinforcements

图 8(c)给出了对比柱 R20L 的箍筋应变分布,相比于对应的组合柱 C20L,当侧移率达到 1.5% 后,其箍筋应变增长量显著高于后者,这显然是与其保护层混凝土剥落所导致的核心区混凝土实际应力增大有密切关系。

### 3.4 骨架曲线

图 9 给出了各试件的骨架曲线对比,图中,骨架曲线为滞回曲线的包络。可以看到,在相同的侧移率下,C20L 骨架曲线上对应点的水平力均高于 R20L,表明 CFRT 柱的抗侧能力均优于箍筋约束混凝土柱。证明在整个反复加载过程中,RPC 管对组合柱的抗震性能有着显著的提高作用。



注: ●—C20L □—C40L △—C60L ◆—R20L

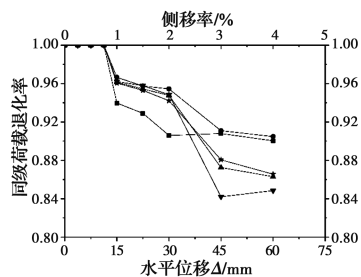
图 9 骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of specimens

对比 C20L、C40L 和 C60L3 个试件的骨架曲线可以看到,增大 RPC 管中的配箍率可以提高 CFRT 柱的抗侧能力,但幅度相对有限。此外,相比于 C20L 试件,内部填充高强混凝土的 C20H 柱的水平力峰值一定程度的提高,提高幅度约为 10%。

### 3.5 强度的退化

用同级荷载退化率来衡量试验柱抗侧能力的稳定性,定义为在同一侧移率下,最后一次循环的水平力峰值与第一次循环的水平力峰值之比,结果如图 10 所示。需要说明的是,由于前 3 个侧移率下为单循环加载,因此,其荷载退化率均为 1。



注: ●—R20L □—C20L △—C40L ◆—C20H

图 10 荷载退化曲线

Fig. 10 Strength degradation curves

对比 R20L 与 C20L 可以看到,CFRT 柱的荷载退化率显著低于普通箍筋约束柱。特别是在侧移率 1.0% 到 2.0% 之间,两者的差异大,这一阶段对应于 R20L 柱保护层混凝土的剥落过程。由于 CFRT 柱有效避免了这一问题,因而表现出相对稳定的抗侧能力。

对于 CFRT 柱,在侧移率为 2% 之前,各试件荷载退化曲线基本一致。在侧移率为超过 2% 之后,随着箍筋间距减小,CFRT 柱的荷载退化相对较慢,表明增加侧向约束有利于保持 CFRT 柱抗侧能力的稳定性。此外,与 C20L 相比较,内部填充高强混凝土的 C20H 的荷载退化幅度更大,主要原因是高强混凝土的脆性较大。

## 4 讨论

### 4.1 延性

延性是结构柱抗震性能的重要指标,反映构件的变形能力。用延性系数  $\mu$  来评估试件延性,按式 (12) 计算<sup>[37]</sup>。

$$\mu = \theta_u / \theta_y \quad (15)$$

式中: $\theta_u$  为极限侧移率,对应于下降段 0.85 倍峰值弯矩点的侧移率; $\theta_y$  为屈服侧移率,对应于上升段 0.75 倍峰值弯矩处割线与峰值弯矩水平切线的交点的侧移率<sup>[35]</sup>,如图 6 所示。

表 3 给出了推、拉方向的屈服侧移率  $\theta_y$  和极限侧移率  $\theta_u$ ,延性系数  $\mu$  为推、拉两个方向的平均值。从表 3 可以看到,相比于 R20L,C20L 的  $\mu$  值降低约 14%。从受力性能上来看,RPC 管对组合柱的承载能力提高和变形性能改善有不可忽视的作用,这与普通的箍筋约束混凝土柱存在显著区别。因此,将两者视为不同类型的结构柱是合理的。而对于不同类型的结构柱,可以采用极限侧移率  $\theta_u$  来评估其延性<sup>[38]</sup>。从这一指标来看,相比于 R20L,C20L 的延性超出约 5.7%,表明 CFRT 柱在地震作用下具有更高的变形能力。

表 3 试件延性系数

Table 3 Ductility factor of specimens

试件	方向	极限侧移率 $\theta_u$	屈服侧移率 $\theta_y$	延性系数 $\mu$
C20L	推方向	0.074	0.016	4.62
	拉方向	-0.074	-0.016	
C20L	推方向	0.049	0.016	3.06
	拉方向	-0.049	-0.016	



续表 3

试件	方向	极限侧移率 $\theta_u$	屈服侧移率 $\theta_y$	延性系数 $\mu$
C60L	推方向	0.041	0.016	2.47
	拉方向	-0.043	-0.018	
C20H	推方向	0.072	0.018	4.17
	拉方向	-0.078	-0.018	
R20L	推方向	0.076	0.014	5.38
	拉方向	-0.064	-0.012	

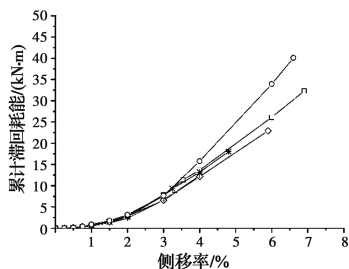
注:试验结果中,按推方向为正,拉方向为负。

对于 CFRT 柱,  $\mu$  随着箍筋间距的减小而增大, 因此, 增加 CFRT 柱的配箍率可以改善组合柱的变形能力。此外, 相比于 C20L, 内部填充高强混凝土的 C20H 柱的延性系数大约减小了 10%, 下降幅度并不大。这一结果与已有高强混凝土柱的抗震试验结果有显著差别。这些试验表明, 相比于普通混凝土, 采用高强混凝土的结构柱其延性下降严重, 部分研究者甚至认为高强混凝土柱不能用于地震活跃区域<sup>[39-40]</sup>。因此, 从延性来看, 在 RPC 管内部填充高强混凝土, 对于 CFRT 体系来说是可以接受的组合方式, 其原因可能是 RPC 管突出的抗裂性能与高强箍筋的约束作用有效限制了内部高强混凝土的膨胀与开裂, 改善了其脆性。

按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016 版), 结构柱在罕遇地震下的极限塑性侧移率不能小于 0.02<sup>[41]</sup>。从表 2 中的数据来看, 在试验条件下, CFRT 柱的  $\theta_u$  在 0.042~0.075 之间, 均明显高于规范要求。

#### 4.2 耗能能力

耗能能力是衡量结构柱抗震性能的另一个重要指标, 一般可以采用累计滞回耗能进行评估, 对应于滞回曲线所围成的面积。采用同一侧移率的第一循环来计算累计滞回耗能, 结果如图 11 所示。



注:  $\circ$ -R20L  $\square$ -C20L  $\ast$ -C40L  $\triangle$ -C60L  $\diamond$ -C20H

图 11 累计滞回耗能曲线

Fig. 11 Curves of cumulative dissipated energy

从试验结果来看, C20L 的累计滞回耗能超出对比柱 R20L 约为 40%, 提高幅度显著, 这主要得益于

RPC 管中钢纤维的抗裂作用, 以及钢纤维在拔出过程中耗能贡献。而对于 CFRT 柱, 提高配箍率对于改善组合柱的耗能能力作用较为显著。此外, 可以看到 C20H 的累计滞回耗能较之 C20L 高出约 25%。综合来看, 在填充高强混凝土的 CFRT 柱, 其抗震性能不会出现显著劣化, 这与普通的箍筋约束高强混凝土柱有显著区别。

## 5 结论

对 CFRT 柱开展了低周反复荷载试验, 基于试验和分析结果, 得到以下主要结论:

1) CFRT 柱在低周反复荷载作用下表现出典型的弯曲破坏特征, 在距柱底约一倍直径范围内形成塑性铰。不同于普通的箍筋约束混凝土柱, RPC 管表面出现大量细而密的裂缝, 但保护层没有明显的剥落现象。

2) CFRT 柱的滞回曲线较为饱满, 可以分为初始弹性段、平缓上升段和相对稳定的下降段; 而内部填充高强混凝土的 CFRT 试件, 其滞回曲线有一定的捏拢现象。

3) CFRT 柱的抗震性能显著优于普通的箍筋约束混凝土柱, 其初始刚度、抗侧能力、耗能能力均有显著提高。此外, 增加 RPC 管内的配箍率, 可以在一定程度上提高 CFRT 柱的抗震性能。

4) 在试验条件下, CFRT 柱的极限侧移率在 0.042~0.075 之间, 高于抗震设计规范关于罕遇地震下结构柱极限塑性侧移率不低于 0.02 的要求。从抗震性能来看, 在 RPC 管内部填充高强混凝土, 对于 CFRT 体系是可以接受的组合方式。

#### 参考文献:

- [1] THOMSON J H, WALLACE J W. Lateral load behavior of reinforced concrete columns constructed using high-strength materials [J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(5): 605-615.
- [2] 关萍, 王清湘, 赵国藩. C80 高强混凝土柱延性的试验研究[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(3): 337-343. GUAN P, WANG Q X, ZHAO G F. Experimental study of ductility of C80 high strength concrete columns [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1998, 38(3): 337-343. (in Chinese)
- [3] 肖岩, 伍云天, 尚守平, 等. 高强混凝土柱抗震性能的足尺试验研究及理论分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(5): 746-749. XIAO Y, WU Y T, SHANG S P, et al. Experimental

- and analytical studies on full-scale high-strength concrete columns [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2002, 32(5): 746-749. (in Chinese)
- [4] 李凤兰, 黄承逵, 温世臣, 等. 低周反复荷载下钢纤维高强混凝土柱延性试验研究[J]. *工程力学*, 2005, 22(6): 159-164.
- LI F L, HUANG C K, WEN S C, et al. Ductility of steel fiber reinforced high-strength concrete columns under cyclic loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 159-164. (in Chinese)
- [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 S H. Modern steel tube confined concrete structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 4-5.
- [6] 吕西林, 陆伟东. 反复荷载作用下方钢管混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2000, 21(2): 2-11, 27.
- LU X L, LU W D. Seismic behavior of concrete-filled rectangular steel tubular columns under cyclic loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(2): 2-11, 27. (in Chinese)
- [7] 陶忠, 于清, 韩林海, 等. FRP约束钢筋混凝土圆柱力学性能的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2004, 25(6): 75-82, 87.
- TAO Z, YU Q, HAN L H, et al. Experimental behavior of FRP-confined circular RC columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2004, 25(6): 75-82, 87. (in Chinese)
- [8] PARK R, PRIESTLEY M J, GILL W. Ductility of square-confined concrete columns [J]. *Journal of the Structural Division, ASCE*, 1982, 108(4): 929-950.
- [9] SAKUMOTO Y, OKADA T, YOSHIDA M, et al. Fire resistance of concrete-filled, fire-resistant steel-tube columns [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1994, 6(2): 169-184.
- [10] HUO J S, ZENG X, XIAO Y. Cyclic behaviours of concrete-filled steel tubular columns with pre-load after exposure to fire [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(4): 727-739.
- [11] 王超. 模拟酸雨腐蚀后圆钢管混凝土柱低周往复荷载试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.
- WANG C. Low cyclic loading test of concrete filled steel tube column under acid rain corrosion environment [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [12] KATZ A, BERMAN N. Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2000, 22(6): 433-443.
- [13] PROIA A, MATTHYS S. Modelling of the flexural behaviour of FRP strengthened beams at elevated temperatures [J]. *Advanced Composites in Construction*, 2017: 149-154.
- [14] 刘承文. 箍筋约束对钢筋混凝土柱抗震性能影响的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- LIU C W. Experimental studies on the effect of hoops on seismic behavior of reinforced concrete columns [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [15] RICHARD P. Reactive powder concrete: a new ultra-high-strength cementitious material [C] // 4th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Paris, France: Presses des Ponts et Chaussees, 1996: 1343-1349.
- [16] RICHARD P, CHEYREZY M. Reactive powder concrete with high ductility and 200-800 MPa compressive strength [S]. San Francisco: ACI Special Publication, 1994: 507-518.
- [17] 屈文俊, 秦宇航. 活性粉末混凝土(RPC)研究与应评述[J]. *结构工程师*, 2007, 23(5): 86-92.
- QU W J, QIN Y H. A review of study and application of reactive powder concrete (RPC) [J]. *Structural Engineers*, 2007, 23(5): 86-92. (in Chinese)
- [18] 肖锐. 活性粉末混凝土研究与应用进展[J]. *工程建设与设计*, 2017(13): 234-236, 239.
- XIAO R. Research and application progress of the reactive powder concrete [J]. *Construction & Design for Engineering*, 2017 (13): 234-236, 239. (in Chinese)
- [19] LEE M G, WANG Y C, CHIU C T. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(1): 182-189.
- [20] RUSSELL H G, GRAYBEAL B A. Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community [M]. Federal Highway Administration, McLean, VA, 2013.
- [21] DAURIAC C. Special concrete may give steel stiff competition [J]. *The Seattle Daily Journal of Commerce*, 1997, 5(9): 15-17.
- [22] CAVILL B, CHIRGWIN G. The worlds first ductal road bridge shepherds gully creek bridge, NSW [C]// 21st Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia, 2003: 17.

- [23] TOUTLEMONDE F, RESPLENDINO J. Designing and building with UHPFRC [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [24] SHAN B, LAI D D, XIAO Y, et al. Experimental research on concrete-filled RPC tubes under axial compression load [J]. *Engineering Structures*, 2018, 155: 358-370.
- [25] 单波, 赖大德, 刘福财. 大尺寸 RPC 管-HSC 组合柱轴压性能试验研究 [J]. *材料导报*, 2017, 31(23): 96-102.  
SHAN B, LAI D D, LIU F C. Experimental research on axial compression performance of large-scale HSC-filled RPC tube [J]. *Materials Review*, 2017, 31(23): 96-102. (in Chinese)
- [26] XU S C, WU C Q, LIU Z X, et al. Experimental investigation of seismic behavior of ultra-high performance steel fiber reinforced concrete columns [J]. *Engineering Structures*, 2017, 152 (dec. 1): 129-148.
- [27] 王景全, 王震, 高玉峰, 等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展: 新材料、新理念、新应用 [J]. *工程力学*, 2019, 36(3): 1-23.  
WANG J Q, WANG Z, GAO Y F, et al. Review on aseismic behavior of precast piers: New material, new concept, and new application [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(3): 1-23. (in Chinese)
- [28] DENG Z C, GAO L, WANG X Y. Glass fiber-reinforced polymer-reinforced rectangular concrete columns under simulated seismic loads [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(2): 111.
- [29] MARCHAND P, BABY F, KHADOUR A, et al. Response of UHPFRC columns submitted to combined axial and alternate flexural loads [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2019, 145(1): 04018225. 1-04018225. 13.
- [30] WANG J Q, WANG Z, TANG Y C, et al. Cyclic loading test of self-centering precast segmental unbonded posttensioned UHPFRC bridge columns [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018, 16(11): 5227-5255.
- [31] 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
Reactive powder concrete: GB/T 31387-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [32] COMMITTEE C. Test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens [S]. ASTM International 2018.
- [33] 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.
- [34] SHAN B, XIAO Y, GUO Y R. Residual performance of FRP-retrofitted RC columns after being subjected to cyclic loading damage [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10(4): 304-312.
- [35] PARK R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing [J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 1989, 22(3): 155-166.
- [36] ZOHREVAND P, MIRMIRAN A. Cyclic behavior of hybrid columns made of ultra high performance concrete and fiber reinforced polymers [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2012, 16(1): 91-99.
- [37] CHOPRA A K. 结构动力学: 理论及其在工程中的应用 [M]. 谢礼立, 吕大刚, 译. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
CHOPRA A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. Translated by XIE L L, LU D G. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)
- [38] 李忠献. 工程结构试验理论与技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2004.  
LI Z X. Theory and technique of engineering structure experiments [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004. (in Chinese)
- [39] 王清湘, 赵国藩, 林立岩. 高强混凝土柱延性的试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 1995, 16(4): 22-31.  
WANG Q X, ZHAO G F, LIN L Y. Study on ductility of reinforced high strength concrete columns [J]. *Journal of Building Structures*, 1995, 16(4): 22-31. (in Chinese)
- [40] 李俊华, 王新堂, 薛建阳, 等. 低周反复荷载下型钢高强混凝土柱受力性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2007, 40(7): 11-18.  
LI J H, WANG X T, XUE J Y, et al. Experimental study on the performance of steel reinforced high-strength concrete columns under low cyclic reversed loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(7): 11-18. (in Chinese)
- [41] 建筑抗震设计规范(2016版): GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Code for design of concrete structures (version 2016): GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)