

## 混合配筋活性粉末混凝土剪力墙的抗震性能

方志<sup>1,2†</sup>, 李益州<sup>1</sup>, 胡锐<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为形成一种兼具良好耗能能力和可恢复性的配筋混凝土剪力墙结构,提出了一种由普通钢筋和碳纤维增强复合材料(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymers)混合配筋的超高性能活性粉末混凝土(RPC, Reactive Powder Concrete)剪力墙结构体系.利用非线性有限元软件 DIANA,建立了用以分析配筋混凝土剪力墙抗震性能的非线性有限元模型,并以文献试验结果验证了分析模型的适用性.基于所建立的模型,对不同配筋形式普通混凝土和活性粉末混凝土剪力墙的抗震性能进行了分析.结果表明:就所分析的构件参数及工况而言,由于 RPC 材料具有更好的延性,使得钢筋 RPC 剪力墙的延性系数较普通钢筋混凝土剪力墙提高了 42%;与普通钢筋混凝土剪力墙相比,墙肢配置 CFRP 筋、暗柱配置普通钢筋的混合配筋 RPC 剪力墙的耗能能力提高了 51%,延性系数提高了 30%,自复位能力系数提高了 25%.验证了所提混合配筋 RPC 剪力墙结构体系良好的综合抗震性能.混合配筋剪力墙墙肢内 CFRP 纵向钢筋的配筋率宜为暗柱内纵向普通钢筋配筋率的 0.5~1.0.

**关键词:**活性粉末混凝土;碳纤维增强复合材料;剪力墙;有限元分析;抗震性能

**中图分类号:**TU375

**文献标志码:**A

## Study on Seismic Performance of RPC Shear Walls with Hybrid Reinforcement

FANG Zhi<sup>1,2†</sup>, LI Yizhou<sup>1</sup>, HU Rui<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering(Hunan University), Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to create a reinforced concrete shear wall structure with good energy dissipation and resilience, a kind of ultra-high performance concrete RPC (Reactive Powder Concrete) shear wall structure composed of ordinary reinforcement and CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) was presented. A nonlinear finite element model using nonlinear finite element software DIANA was established to analyze the seismic performance of reinforced concrete shear walls. The applicability of the model was verified by the test results in this paper and other references. Based on the constructed model, the seismic behavior of normal concrete and RPC shear walls with different reinforcement types was analyzed. The results showed that, in terms of the analyzed situation, the ductility coefficient

\* 收稿日期:2019-01-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703008), National Key Research and Development Program of China(2017YFC0703008);国家自然科学基金资助项目(51878262), National Natural Science Foundation of China(51878262)

作者简介:方志(1963—),男,湖北黄冈人,湖南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail:fangzhi@hnu.edu.cn

of reinforced RPC shear wall was increased by 42% when compared with that of reinforced concrete shear wall due to the better ductility of RPC material. Compared with reinforced concrete shear wall, the energy dissipation capacity of RPC shear wall reinforced with CFRP bars for wall and ordinary reinforcement for side columns was increased by 51%, the ductility coefficient was increased by 30%, and the self-resetting capacity coefficient was increased by 25%. It is verified that the proposed hybrid reinforced RPC shear wall structure system has good comprehensive seismic performance. The reinforcement ratio of CFRP longitudinal reinforcement in shear walls with mixed reinforcement should be between 0.5 and 1.0 of ordinary longitudinal reinforcement in side columns.

**Key words:** reactive powder concrete (RPC); carbon fiber reinforced polymer (CFRP); shearwall; finite element analysis; seismic performance

剪力墙结构具有良好的整体受力性能,成为现代高层建筑的主要抗侧力构件.随着建筑高度不断增加,地震作用的影响加大,对剪力墙的抗震性能要求也越来越高.传统的普通钢筋混凝土剪力墙因其所使用的混凝土强度等级较低、变形性能较差,导致墙体较厚、抗震性能有待提高.此外,其内配置良好塑性性能普通钢筋虽然可使墙体具有较好的变形能力和耗能能力,但也会导致剪力墙结构地震后的残余变形过大、可恢复性能较差等问题.

普通钢筋混凝土剪力墙结构主要利用其内所配钢筋的塑性变形进行耗能,因而被视为一种准脆性材料的普通混凝土.虽然其所占体积很大,但对结构耗能能力的贡献却极微弱.因此,提高混凝土材料本身的耗能贡献,对改善混凝土剪力墙结构的抗震性能极具意义.活性粉末混凝土 RPC (Reactive Powder Concrete)是一种超高性能混凝土 UHPC (Ultra-High Performance Concrete).与普通混凝土相比,RPC具有超高的抗压强度和较高的抗拉强度、良好的韧性、优异的耐久性、热养护后基本无收缩且徐变大幅降低等特征<sup>[1-4]</sup>,RPC被视为新一代水泥基材料,在土木工程中具有良好的应用前景.

对于配置普通钢筋的混凝土结构,结构耗能能力的提高往往意味着残余变形的增加,可恢复性能也会由此降低.近年来,结构震后的可恢复性 (Earthquake-Resilience)逐渐受到重视,可望成为抗震结构的性能需求指标之一.Bruneau等<sup>[5]</sup>于2003年即提出建立具有可恢复功能抗震社区的概念.吕西林等<sup>[6]</sup>于2011年明确了结构功能的可恢复性这一抗震设计概念.如何在提高配筋混凝土剪力墙耗能能力的同时增强其可恢复性,已被国内外学者所关

注.因此,寻找更适宜的配筋种类和方式,在保证配筋混凝土结构具有良好耗能能力的同时具有期望的结构可恢复性能亦极具价值.

纤维增强复合材料 FRP (Fiber Reinforced Polymer)具有抗拉强度高、重量轻、不锈蚀且直到拉断破坏前仍保持线弹性的力学特征<sup>[7]</sup>,其优良的线弹性力学性能可有效减小构件的残余变形进而提高结构的可恢复性.但FRP筋在减小构件残余变形的同时,亦会降低构件的耗能能力.于是,同时配置FRP筋和普通钢筋的混合配筋RPC剪力墙由此提出.一方面可充分利用普通钢筋良好的塑性和RPC的高延性实现能量的耗散,另一方面可利用FRP筋的线弹性性质减小构件的残余变形,以期在改善传统钢筋混凝土剪力墙抗震性能的同时提高结构的可恢复性能.

国内外对钢筋RPC剪力墙的抗震性能和FRP筋普通混凝土剪力墙的可恢复性进行了一些研究.Hung等<sup>[8]</sup>对4片超高性能混凝土剪力墙进行了抗震性能试验研究,结果表明:混凝土基体中加入钢纤维可有效限制剪力墙的裂缝发展,并明显提高剪力墙的初始刚度和耗能能力.Mohamed等<sup>[9]</sup>对1片普通钢筋混凝土剪力墙和3片GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer)配筋混凝土剪力墙的抗震性能进行了试验研究,结果表明:GFRP配筋剪力墙达到合理能量耗散水平的同时,其残余变形大幅减小.极限荷载80%以内时,GFRP筋剪力墙基本上没有残余变形.童小龙等<sup>[10-11]</sup>对3片不同高宽比RPC剪力墙的抗震性能进行了试验研究和数值分析,并从结构受力性能角度对RPC应用于超高层结构的可行性进行了分析,结果表明:在满足现有规范的前提下,在

剪力墙中用 RPC 代替普通混凝土,可有效减小构件截面尺寸,进而减轻结构自重,降低地震作用,从而改善结构的抗震性能。赵军等<sup>[12-14]</sup>对不同配筋形式的 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)配筋普通混凝土剪力墙的抗震性能进行了试验研究,结果表明:剪力墙中配置 FRP 筋可有效减小墙体的残余裂缝宽度和残余变形,在钢筋混凝土剪力墙中合理配置部分 CFRP 筋,能使剪力墙具有较好的延性性能、耗能能力和变形恢复能力。王震宇等<sup>[15]</sup>对 FRP 和普通钢筋混合配筋混凝土柱的抗震性能进行了有限元分析,结果表明:混合配筋方式可提高构件的屈服后刚度,进而增加构件的延性、减小残余变形。

综上,RPC 构件表现出较好的延性与耗能能力;配置 FRP 筋可有效降低构件的残余变形,增强结构的可恢复性能,但会降低结构的耗能能力。FRP 与普通钢筋混合配筋可兼顾结构耗能能力与可恢复性能。但对这种混合配筋 RPC 剪力墙抗震性能的研究还鲜见文献报道。

基于此,本文采用有限元软件 DIANA 建立数值分析模型并以文献试验结果验证其正确性;利用经验证的的分析模型对混合配筋 RPC 剪力墙结构的抗震性能进行较为系统的参数分析,根据分析结果,对其抗震性能以及可恢复性能进行评估。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 本构关系

RPC 单轴受压和受拉骨架曲线分别由式(1)和式(2)确定<sup>[6]</sup>,因迄今未见 RPC 拉压滞回本构的相关报道,故简单地采用图 1 所示的割线滞回模型<sup>[10]</sup>。虽然此举会使分析的结构耗能能力略为偏低、结构的自恢复能力略有偏高,但从下文计算结果与试验结果的比较可见,由此所带来的偏差尚可接受。钢筋本构关系选用理想弹塑性模型,由式(3)确定<sup>[6]</sup>,硬化类型选用各向同性硬化。RPC 与钢筋的本构关系曲线如图 1 所示。

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \frac{n\xi - \xi^2}{1 + (n-2)\xi}, & \varepsilon_c \leq \varepsilon_0; \\ f_c \frac{\xi}{2(\xi-1)^2 + \xi}, & \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}; \\ 0, & \varepsilon_c > \varepsilon_u \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_c$  和  $\varepsilon_c$  分别为 RPC 压应力和压应变; $f_c$  为 RPC 轴心抗压强度; $\xi = \varepsilon/\varepsilon_0$ , 其中  $\varepsilon_0$  和  $\varepsilon_{cu}$  分别为

RPC 峰值压应变以及极限压应变,取  $\varepsilon_0 = 0.0035$ ,  $\varepsilon_{cu} = 0.0045$ ;  $n = E_0/E_1$ , 其中  $E_0$  和  $E_1$  分别为初始弹性模量和峰值点割线模量。

$$\sigma_t = \begin{cases} E_c \cdot \varepsilon_t, & 0 < \varepsilon_t \leq \varepsilon_{t0}; \\ f_t, & \varepsilon_{t0} \leq \varepsilon_t \leq \varepsilon_{tu}; \\ 0, & \varepsilon_t > \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\sigma_t$  和  $\varepsilon_t$  分别为 RPC 拉应力和拉应变; $E_c$  为抗拉弹性模量, 并取  $E_c = E_0$ ;  $f_t$  为轴心抗拉强度; $\varepsilon_{t0}$  和  $\varepsilon_{tu}$  分别为峰值拉应变和极限拉应变,  $\varepsilon_{tu} = 0.001$ <sup>[17]</sup>,  $\varepsilon_{t0} = f_t/E_c$ 。

$$f_s = \begin{cases} E_s \cdot \varepsilon_s, & 0 < \varepsilon_s \leq \varepsilon_y; \\ E_s' \cdot \varepsilon_{sy}, & \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_u; \\ 0, & \varepsilon_s > \varepsilon_u \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f_s$  和  $\varepsilon_s$  分别为钢筋的应力和应变; $E_s$  为钢筋的弹性模量; $E_s'$  为强化弹性模量, 并取  $E_s' = 0.01E_s$ ;  $\varepsilon_y$  和  $f_y$  分别为屈服应变和屈服强度,  $\varepsilon_y = f_y/E_s$ ;  $\varepsilon_u$  为钢筋的极限应变。

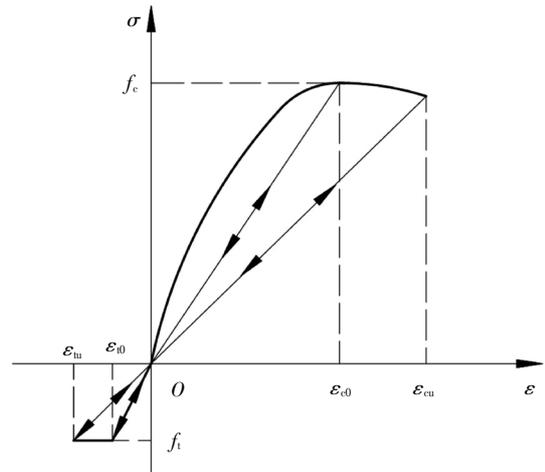


图 1 RPC 的滞回应力-应变关系

Fig.1 Stress-strain hysteretic relationship of RPC

普通混凝土的强度等级为 C40, 本构关系采用前川-福浦模型,该本构模型适用于抗压强度为 15~50 MPa 混凝土的滞回分析,受压骨架曲线按式(4)确定,受拉骨架曲线亦按式(2)确定,并取  $\varepsilon_{tu} = 2\varepsilon_{t0}$ 。其本构曲线如图 2 所示。CFRP 筋为弹脆性材料。

$$\begin{aligned} \sigma &= KE(\varepsilon - \varepsilon_p), 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{cmax} \\ \ln K &= -0.73 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left( 1 - e^{-1.25 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}} \right) \\ \varepsilon_p &= \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - \frac{20}{7} \left( 1 - e^{-1.25 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}} \right) \right) \\ \varepsilon_c &= 2.0 \frac{f_c}{E} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $K$ 为损伤因子; $E$ 为混凝土弹性模量; $\varepsilon_p$ 为混凝土塑性应变; $\varepsilon_{cmax}$ 为混凝土极限压应变; $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度.

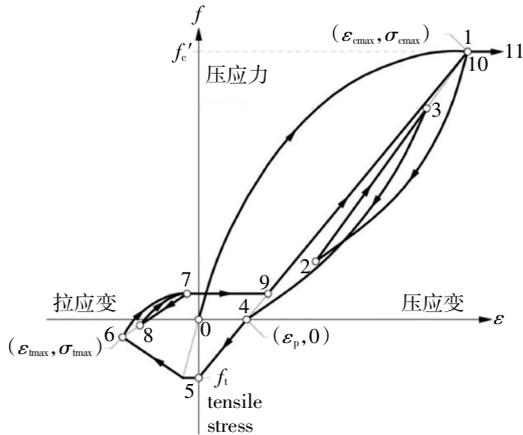


图2 前川-福浦受压滞回应力-应变曲线  
Fig.2 Stress-strain hysteretic relationship of Maekawa Cracked Concrete curves

### 1.2 建模过程

利用非线性有限元软件 DIANA 对剪力墙的抗震性能进行分析.混凝土采用 20 节点 CHX60-brick 实体单元,筋材采用 BAR 类型杆单元,不考虑筋材和混凝土之间的黏结滑移.

模型中底部基座梁底面设定为固端约束;竖向轴压力设置为均布面荷载,施于顶部加载梁上;水平往复荷载采用位移控制进行加载.

分析时考虑几何和材料非线性,选用完全拉格朗日法进行非线性求解,采用割线刚度法进行迭代.当混凝土单元压应变达到极限压应变或荷载降至峰值荷载的 85%时,认定模型试件达到极限状态.

### 1.3 模型验证

采用文献 [11] 的钢筋 RPC 剪力墙试件 RPC-SW2.0 和文献[18]试验的 CFRP 配筋普通混凝土剪力墙 CFRPSW-5 试件的试验结果验证本文分析模型和本构关系的适用性.

文献 [10] 试验的钢筋 RPC 剪力墙试件 RPC-SW2.0 的尺寸及配筋如图 3 所示.墙高 2 000 mm,墙宽 1 000 mm,墙厚 80 mm,高宽比为 2.0,高厚比为 25,试验轴压比为 0.11.墙体分布筋采用双层双向 HRB335 配筋,双向配筋率均为 1.26%;暗柱纵筋采用 HRB400,配筋率为 4.24%;暗柱箍筋采用 HRB335,配箍率为 2.51%.试验时 RPC 的立方体抗压强度为 94 MPa.

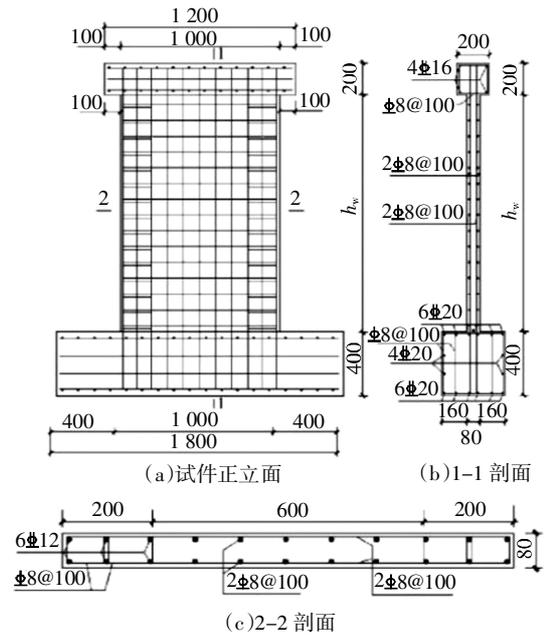


图3 RPCSW2.0 试件尺寸及配筋  
Fig.3 Dimensions and reinforcement details of RPCSW2.0

文献[18]中试验的 CFRP 配筋普通混凝土剪力墙试件 CFRPSW-5 的高宽比为 2.33,试验轴压比为 0.1,采用 C40 混凝土,墙体与暗柱纵筋均为 CFRP 筋,墙体水平筋与暗柱箍筋均为 HRB400,试件尺寸及配筋如图 4 所示.

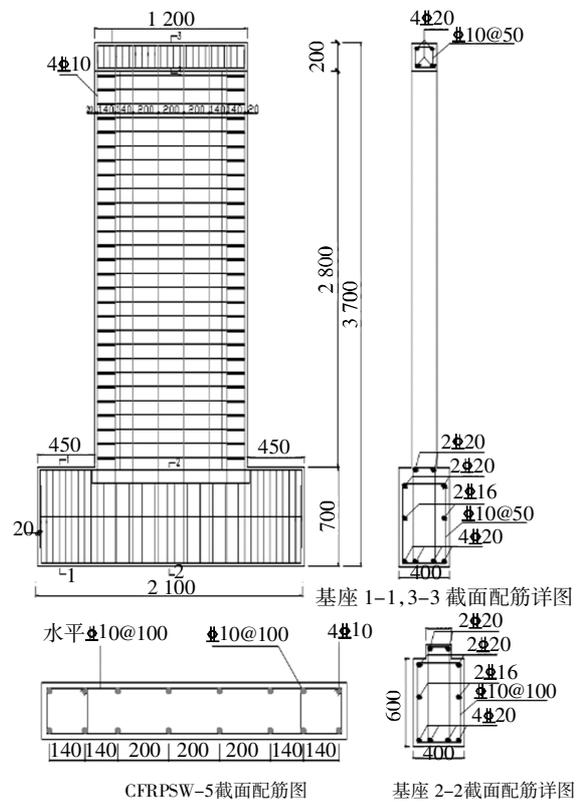


图4 CFRPSW-5 试件尺寸及配筋<sup>[18]</sup>  
Fig.4 Dimensions and reinforcement details of CFRPSW-5

两个试件的分析结果和试验结果的对比如图 5、图 6 及表 1 和表 2 所示,可见分析结果尚能较好地刻画试件的受力变形特征。

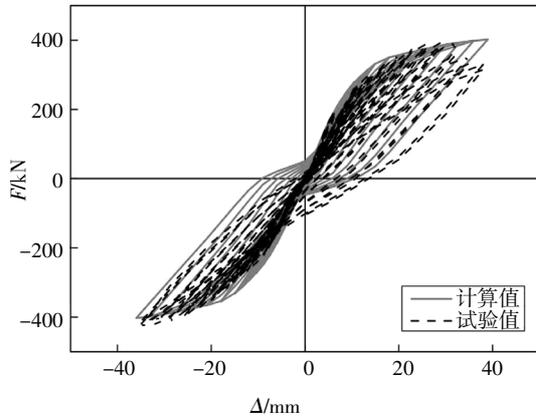


图 5 RPCSW2.0 数值计算结果与试验结果对比

Fig.5 Comparison of calculation results with experimental results of RPCSW2.0

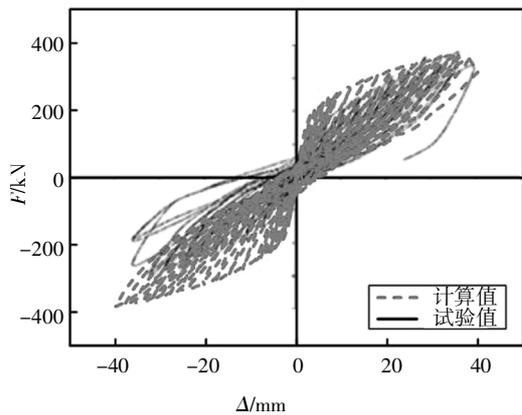


图 6 CFRPSW-5 数值计算结果与试验结果对比

Fig.6 Comparison of calculation results with experimental results of CFRPSW-5

表 1 RPCSW2.0 特征点对比

Tab.1 Comparison of characteristics point of RPCSW2.0

RPCSW2.0	开裂点		屈服点		峰值点		极限点	
	$F_{cr}$ /kN	$\Delta_{cr}$ /mm	$F_y$ /kN	$\Delta_y$ /mm	$F_m$ /kN	$\Delta_m$ /mm	$F_u$ /kN	$\Delta_u$ /mm
试验值	150	4.5	273	12.1	393	29.0	330	38.0
计算值	148	4.5	298	12.0	387	30.0	393	39.0
计算值 /试验值	0.99	1.0	1.09	0.99	0.98	0.97	1.19	1.03

表 2 CFRPSW-5 特征点对比

Tab.2 Comparison of characteristics point of CFRPSW-5

CFRPSW-5	开裂点		屈服点		峰值点		极限点	
	$F_{cr}$ /kN	$\Delta_{cr}$ /mm	$F_y$ /kN	$\Delta_y$ /mm	$F_m$ /kN	$\Delta_m$ /mm	$F_u$ /kN	$\Delta_u$ /mm
试验值	40	0.3	185	6.7	375	36.0	319	39.8
计算值	44	0.3	227	6.0	369	36.0	314	40.0
计算值 /试验值	1.10	1.2	1.23	0.90	0.98	1.0	0.99	1.01

## 2 不同形式剪力墙的抗震性能分析

### 2.1 分析模型

为探究 CFRP 和 RPC 的使用对剪力墙抗震性能的影响,参照文献[11]的 RPCSW2.0 设计了 4 种不同形式的剪力墙,分别为:全部配筋均采用普通钢筋配筋的普通混凝土剪力墙(NC-S)、全部配筋均采用普通钢筋配筋的 RPC 剪力墙(RPC-S)、全部纵筋均采用 CFRP 筋而横向筋均采用普通钢筋的 RPC 剪力墙(RPC-C)以及纵筋采用 CFRP 和普通钢筋混合配筋而横向筋均采用普通钢筋的 RPC 剪力墙(RPC-SC)。

CFRP 与钢筋混合配筋普通混凝土剪力墙的抗震性能试验结果表明<sup>[9]</sup>:暗柱内配置普通钢筋、墙肢内纵向配置 CFRP 筋可使墙体的耗能能力和可恢复能力得到较好的平衡.因此,本文混合配筋剪力墙 RPC-SC 亦采用暗柱配置普通钢筋、墙肢纵向配置 CFRP 筋、墙肢横向配置普通钢筋的混合配筋方式。

四类剪力墙模型的几何尺寸均与 RPCSW2.0 相同,试验轴压比  $n(n = N/f_c A)$ ,这里的  $N$  为实际所加轴力, $f_c$  为 RPC 或混凝土的轴心抗压强度, $A$  为墙体截面面积)均为 0.1.各试件暗柱纵筋配筋率为 2.94%,普通钢筋配筋时,采用 HRB400 钢筋;暗柱配箍率为 2.51%,墙肢水平和竖向分布筋配筋率均为 1.26%,普通钢筋配筋时,箍筋和分布筋均为 HRB335 钢筋.CFRP 筋的配筋率定义与钢筋配筋率一致,为 CFRP 筋截面面积与剪力墙墙肢横截面面积之比.各材料力学性能均按前面验证模型的材性试验结果取值,剪力墙的配筋方式列于表 3。

表 3 分析模型的配筋

Tab.3 Reinforcement of finite element models

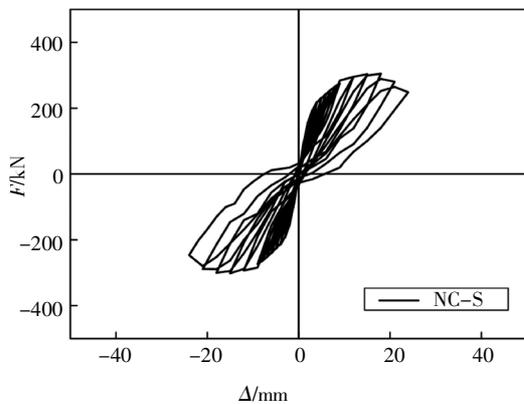
试件编号	混凝土	单边暗柱纵筋	暗柱箍筋	竖向分布筋	水平分布筋
NC-S	C40	6 $\Phi$ 10	$\Phi$ 8@100	$\Phi$ 8@100	$\Phi$ 8@100
RPC-S	RPC	6 $\Phi$ 10	$\Phi$ 8@100	$\Phi$ 8@100	$\Phi$ 8@100
RPC-C	RPC	6 $\Phi^c$ 10	$\Phi$ 8@100	$\Phi^c$ 8@100	$\Phi$ 8@100
RPC-SC	RPC	6 $\Phi$ 10	$\Phi$ 8@100	$\Phi^c$ 8@100	$\Phi$ 8@100

注:NC表示普通混凝土,RPC表示活性粉末混凝土,其后的S和C分别表示普通钢筋和CFRP筋配筋, $\Phi$ 表示HRB400钢筋, $\Phi^c$ 表示HRB335钢筋, $\Phi^c$ 表示CFRP筋。

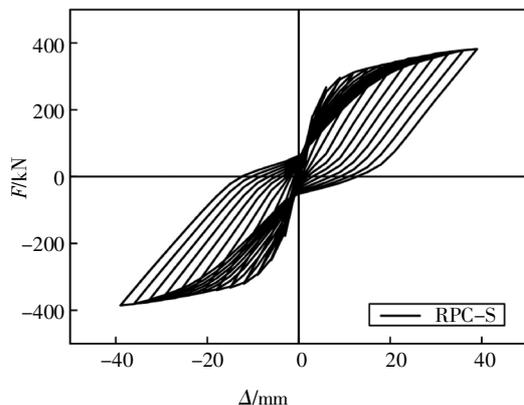
## 2.2 抗震性能分析

### 2.2.1 滞回曲线与耗能能力

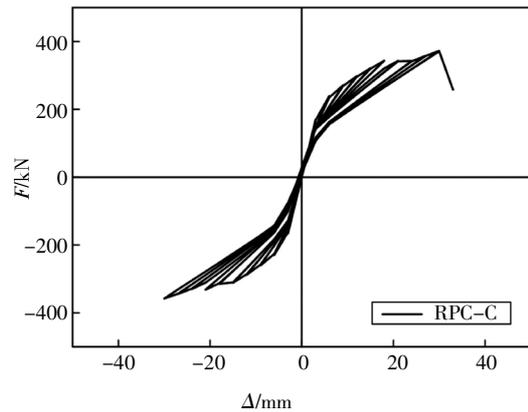
4种模型剪力墙的滞回曲线如图7所示。滞回曲线中加载曲线与卸载曲线所包围的面积即为试件所消耗的能量,滞回曲线包围面积即代表在单个往复荷载作用下试件的最大耗能。在多级往复荷载作用下,所有滞回环面积之和即为试件的滞回环累计耗能。4种剪力墙的滞回累计耗能曲线如图7所示,滞回曲线包围面积列于表4。



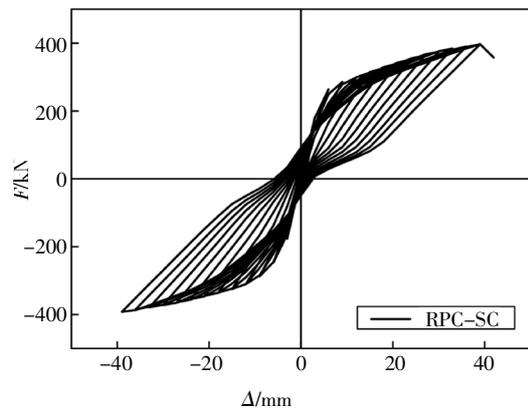
(a)NC-S 滞回曲线



(b)RPC-S 滞回曲线



(c)RPC-C 滞回曲线



(d)RPC-SC 滞回曲线

图 7 混凝土与配筋类型对剪力墙抗震性能的影响

Fig.7 Influence of concrete and reinforcement types on seismic behavior of shear wall

表 4 极限承载力与耗能能力

Tab.4 Ultimate bearing capacity and energy dissipation capacity

试件编号	极限承载力/kN	相对比值	滞回曲线累计耗能/(kN·m)	相对比值
NC-S	305	1.00	8.6	1.00
RPC-S	382	1.25	16.3	1.90
RPC-C	373	1.22	3.5	0.41
RPC-SC	397	1.3	12.9	1.5

注:表中相对比值以普通配筋混凝土剪力墙的相应值为基准。

由表4和图7可知:采用RPC能显著提高构件的极限承载力和耗能能力。相同配筋时,剪力墙RPC-S的承载力和耗能能力分别比普通混凝土剪力墙NC-S提高了25%和90%;全部配置CFRP纵筋会显著降低剪力墙的耗能能力,RPC-C试件的耗能能力比RPC-S降低了78%;混合配筋剪力墙RPC-SC仍能保持良好的耗能能力,其耗能能力较

NC-S 提高了 51%,与耗能能力最优的 RPC-S 仅相差 21%.

2.2.2 骨架曲线

4 类剪力墙的骨架曲线对比如图 8 所示.

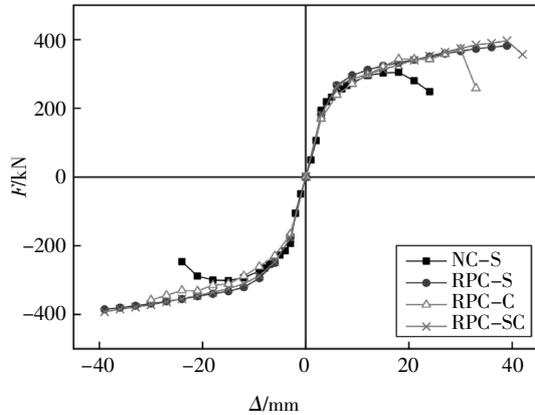


图 8 骨架曲线对比

Fig.8 Comparison of skeleton curves

由图 8 可知,各剪力墙弹性阶段的骨架曲线无明显差异.这是由于所使用的普通混凝土与 RPC 的弹性模量相近,且构件具有相同的几何尺寸,使得各剪力墙试件的弹性刚度相差较小.但相比于普通混凝土剪力墙,RPC 剪力墙的极限承载力和极限位移均提高了 20%以上.

2.2.3 延性系数

采用位移延性系数  $\mu$  来衡量试件的延性<sup>[20]</sup>,按式(5)计算:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{5}$$

式中: $\Delta_u$  为试件的极限位移; $\Delta_y$  为试件的屈服位移.

由于 CFRP 材料不存在屈服点,导致模型 RPC-C 的荷载-位移曲线上亦不存在明显的屈服点,因此,采用图解法确定墙体构件的“等效屈服点”.

极限位移取各试件骨架曲线下降至承载力 85%时所对应点的位移值.各试件的位移延性系数列于表 5.由表 5 可知,RPC 剪力墙具有良好的延性性能.相同配筋方式下,RPC-S 的延性系数较 NC-S 提高了 42%;配置 FRP 筋会降低剪力墙的延性,RPC-C 的延性系数比 RPC-S 降低了 24%;但混合配筋 RPC 剪力墙仍具有较好的延性,RPC-SC 的延性系数为 3.9,仅较延性性能最优的 RPC-S 降低 11%,但较 NC-S 仍提高了 25%.

表 5 位移延性系数和自复位能力系数

Tab.5 Ductility ratio and self-reset capacity ratio

试件	$\Delta_y$ /mm	$\Delta_u$ /mm	$\mu$	$\Delta_r$ /mm	$\gamma$
NC-S	7.6	24	3.04	8.5	0.64
RPC-S	9	39	4.33	13.4	0.66
RPC-C	10	33	3.3	3.3	0.9
RPC-SC	10.8	42	3.9	8.2	0.8

2.2.4 可恢复性能

采用式(6)所示的自复位能力系数  $\gamma$  来衡量构件的可恢复性能<sup>[21]</sup>.

$$\gamma = 1 - \frac{\Delta_r}{\Delta_u} \tag{6}$$

式中: $\Delta_r$  为试件极限状态时卸载后的残余位移值; $\Delta_u$  为极限位移值.

自复位能力系数  $\gamma$  反映了构件或结构可恢复性能的大小, $\gamma$  越大则自复位能力越强.4 种剪力墙的自复位能力系数见表 6.

表 6 不同高宽比构件的自复位能力和耗能能力

Tab.6 Self-reset capacity and energy dissipation capacity for various aspect ratios

高宽比	极限承载力 /kN	相对比值	滞回环累计耗能 /(kN·m)	相对比值	延性系数 $\mu$	相对比值	自复位能力系数 $\gamma$	相对比值
1.0	706.8	1	38.1	1	2.9	1	0.91	1
1.5	473.6	0.67	57.6	1.51	3.7	1.3	0.86	0.94
2.0	396.6	0.56	83.8	2.20	4.3	1.5	0.79	0.87

由表 6 可知:NC-S 与 RPC-S 的自复位能力较为接近,亦即构件的可恢复性能主要取决于配筋方式,CFRP 纵筋的配置可显著提高构件的可恢复能力.与 RPC-S 相比,RPC-C 和 RPC-SC 的自复位能力分别提高了 36.4%和 21%.

综上,RPC 剪力墙的耗能能力相比于普通混凝土剪力墙有显著提高;配置 CFRP 筋明显降低残余变形并提高剪力墙的可恢复性能,但耗能能力明显下降;而混合配筋 RPC 剪力墙兼顾了耗能能力与可恢复性,具有更好的综合性能.

3 混合配筋剪力墙受力性能参数分析

基于混合配筋 RPC 剪力墙 RPC-SC,采用所建立的非线性有限元分析模型,对不同高宽比、试验轴

压比、暗柱纵向配筋率和墙肢纵向 CFRP 筋配筋率的混合配筋 RPC 剪力墙的抗震性能和可恢复性能进行分析,以明确各参数对混合配筋剪力墙受力变形性能的影响规律.分析时,仅改变所选参数,其他参数同模型剪力墙 RPC-SC 相同.

### 3.1 高宽比

不同高宽比剪力墙的受力变形行为分别如图 9 和表 6 所示.可见:与普通钢筋混凝土剪力墙相似<sup>[9]</sup>,随着高宽比的增大,混合配筋 RPC 剪力墙的极限承载力及初始刚度和屈服后刚度逐渐减小,耗能能力、极限位移和残余位移均明显增大.高宽比由 1.0 增大到 2.0 时,承载力下降了 44%,累计耗能提高了 120%,屈服位移和残余位移分别增加了 40% 和 81%,极限位移增加了 1.4 倍,延性系数提高了 50%.虽然与普通钢筋混凝土一样,随着高宽比的增加,结构塑性变形加大,但由于 CFRP 筋的配置,结构的自复位能力明显加强,高宽比由 1.0 增大到 2.0 时,自复位系数仅降低 13%.

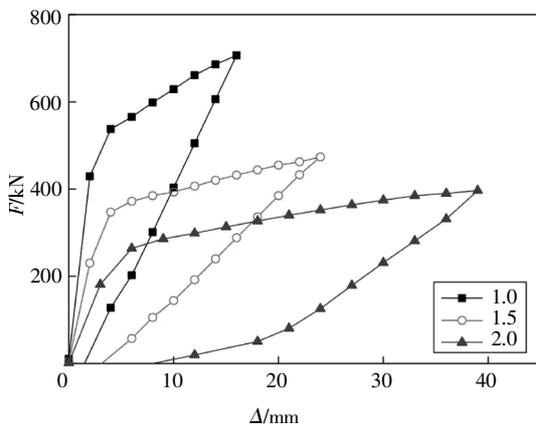


图 9 不同高宽比正向加载外包络曲线

Fig.9 Forward loading envelope curves for various aspect ratios

### 3.2 试验轴压比

不同试验轴压比剪力墙的自复位能力和耗能能力如图 10 和表 7 所示.可知:试验轴压比从 0.1 增大到 0.6 的过程中,剪力墙逐渐由钢筋屈服控制的受拉破坏转变为由混凝土压碎控制的受压破坏,极限承载力呈现先增大后减小的趋势.试验轴压比为 0.4 时极限承载力最大.随着试验轴压比的增大,破坏时,钢筋的极限拉应变降低,剪力墙的耗能能力和延性系数减小,自复位能力增强.但由于 CFRP 筋的配置,使得试验轴压比在 0.4 以内时,自复位系数变化较小;当试验轴压比达到 0.6 时,由于破坏时暗柱钢筋未屈服,使得剪力墙自恢复能力显著增强.综

合考虑结构的极限承载力、耗能能力、延性性能和可恢复性能,混合配筋 RPC 剪力墙的试验轴压比不宜超过 0.4.

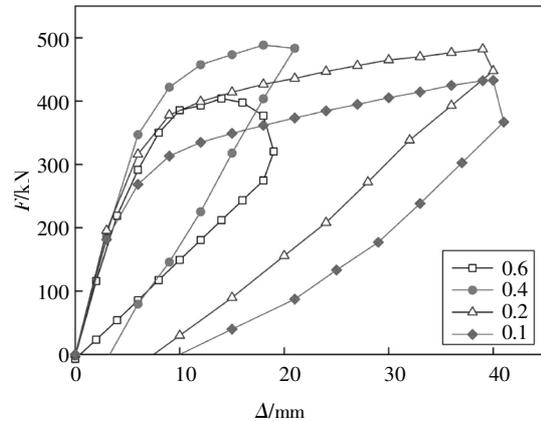


图 10 不同试验轴压比正向加载外包络曲线

Fig.10 Forward loading envelope curves for various experimental axial compression ratios

表 7 不同试验轴压比构件的自复位能力和耗能能力

Tab.7 Self-reset capacity and energy dissipation capacity for various experimental axial compression ratios

试验轴压比	极限承载力 /kN	相对比值	滞回环累计耗能 /(kN·m)	相对比值	延性系数 $\mu$	相对比值	自复位能力系数 $\gamma$	相对比值
0.1	433.0	1	82.0	1	3.8	1	0.79	1
0.2	482.2	1.11	77.9	0.95	3.4	0.89	0.81	1.03
0.4	488.5	1.13	17.1	0.21	2.3	0.6	0.84	1.06
0.6	404.2	0.93	14.5	0.18	2.1	0.47	0.96	1.21

### 3.3 暗柱纵向钢筋配筋率

暗柱纵向钢筋配筋率对混合配筋 RPC 剪力墙的耗能能力和自复位能力影响如图 11 和表 8 所示.可见:由于分析的试验轴压比仅为 0.1,暗柱纵向钢筋配筋率从 1.88% 增大到 5.77% 时,剪力墙破坏时暗柱钢筋均已屈服,使得结构的承载能力和耗能能力随之增大,延性系数相应减小,这与普通钢筋混凝土剪力墙的变化趋势类似<sup>[22]</sup>.但由于墙肢内的 CFRP 纵筋配置数量并未随之增加,使得自复位能力系数减小了 24%.因此,为保证混合配筋剪力墙结构具有期望的自恢复能力,暗柱内的纵向钢筋与墙肢内的 CFRP 纵筋间存在合理配比问题.就所分析的构件参数及工况而言,暗柱内普通钢筋的配筋率不宜超过墙肢内 CFRP 纵筋配筋的 2 倍.

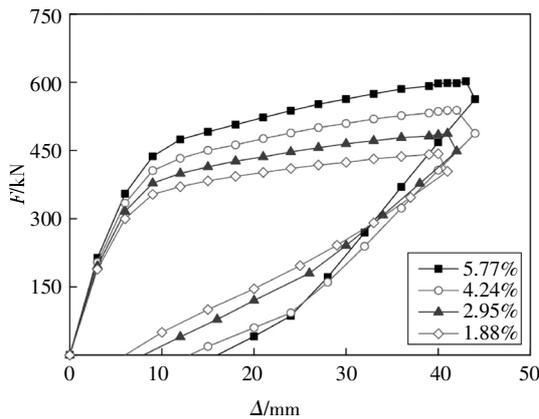


图 11 不同暗柱配筋率正向加载外包络曲线

Fig.11 Forward loading envelope curves for various vertical reinforcement ratios of embedded column

表 8 不同暗柱纵向钢筋配筋率构件自复位能力和耗能能力

Tab.8 Self-reset capacity and energy dissipation capacity for various vertical reinforcement ratios of embedded column

暗柱纵向 钢筋配 筋率/%	极限承 载力 /kN	相对 比值	滞回环累 计耗能 /(kN·m)	相对 比值	延性 系数 $\mu$	相对 比值	自复位 能力系 数 $\gamma$	相对 比值
1.88	442.8	1.0	67.3	1.00	3.6	1.00	0.86	1.00
2.95	487.3	1.1	106.0	1.57	3.4	0.94	0.79	0.92
4.24	538.5	1.2	168.7	2.5	3.3	0.92	0.71	0.83
5.77	602.3	1.4	237.0	3.52	2.9	0.81	0.65	0.76

### 3.4 墙肢纵向 CFRP 筋配筋率

墙肢纵向 CFRP 筋配筋率对混合配筋 RPC 剪力墙的耗能能力和自复位能力影响如图 12 和表 9 所示. 可见:墙肢纵向 CFRP 筋配筋率从 1.26%增大到 3.85%,极限承载力仅增加 10.48%,累计耗能降

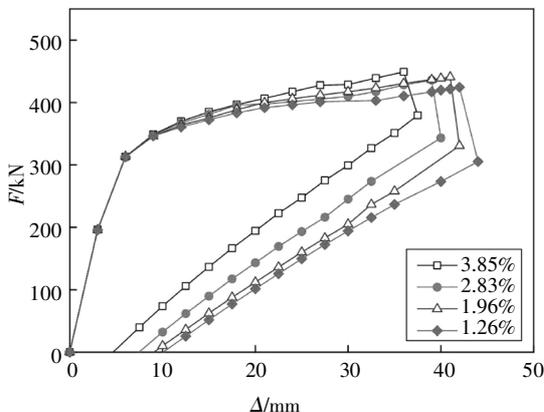


图 12 不同墙肢配筋率正向加载外包络曲线

Fig.12 Forward loading envelope curves for various CFRP ratios of wall panel

表 9 不同墙肢 CFRP 筋配筋率构件自复位能力和耗能能力

Tab.9 Self-reset capacity and energy dissipation capacity for various CFRP ratios of wall panel

墙肢纵向 CFRP 筋 配筋率/%	极限 承载力 /kN	相对 比值	滞回环累 计耗能/ (kN·mm)	相对 比值	延性 系数 $\mu$	相对 比值	自复位 能力系 数 $\gamma$	相对 比值
1.26	424.6	1.00	118.2	1.00	3.4	1.00	0.78	1.00
1.96	436.0	1.03	113.5	0.96	3.2	0.94	0.8	1.03
2.83	440.7	1.04	90.6	0.77	3.1	0.91	0.83	1.06
3.85	449.1	1.06	86.2	0.73	3.0	0.88	0.87	1.12

低 27%,延性系数降低 12%,自复位能力系数仅增大 12%. 虽然增加墙肢 CFRP 筋配筋率能一定程度上提高剪力墙的自复位能力,但影响并不明显,且会降低剪力墙的耗能能力和延性性能. 因此, 墙肢内 CFRP 配筋率不宜太高, 就所分析的构件参数及工况而言,不宜超过暗柱内普通钢筋的配筋率.

## 4 结 语

对 4 种不同类型剪力墙的抗震性能进行了数值分析. 基于分析结果得到以下结论:

1)采用 RPC 能显著提高剪力墙的极限承载力和耗能能力. 就所分析的构件参数及工况而言,相同配筋方式下,RPC 剪力墙 RPC-S 的承载力和耗能能力分别比普通混凝土剪力墙 NC-S 提高了 25%和 90%.

2)暗柱内纵向配置普通钢筋、墙肢内纵向配置 CFRP 筋的混合配筋 RPC 剪力墙兼顾了耗能能力与可恢复性. 与普通钢筋混凝土剪力墙相比,墙肢配置 CFRP 筋、暗柱纵向配置普通钢筋的混合配筋 RPC 剪力墙的耗能能力提高了 51%, 延性系数提高了 30%,自复位能力系数提高了 25%. 验证了所提混合配筋 RPC 剪力墙结构体系的良好综合抗震性能.

3)暗柱内纵向配置普通钢筋、墙肢内纵向配置 CFRP 筋的混合配筋剪力墙,墙肢内 CFRP 纵向钢筋的配筋率宜为暗柱内纵向普通钢筋配筋率的 0.5~1.0 倍.

## 参考文献

[1] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement & Concrete Research, 1995, 25 (7): 1501-1511.

- [2] BONNEAU O. Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes[J]. *ACI Materials Journal*, 1997, 94(4): 286—289.
- [3] HABEL K, DENARIÉ E, BRÜHWILER E. Experimental investigation of composite ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete members [J]. *ACI Structural Journal*, 2007, 104(1): 93—101.
- [4] BENJAMIN A G. Characterization of the behavior of ultra-high performance concrete [D]. Washington, DC: The University of Maryland, 2005: 300—370.
- [5] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, *et al.* A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733—752.
- [6] 吕西林, 陈云, 毛苑君. 结构抗震设计的新概念——可恢复功能结构[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(7): 941—948.  
LÜ X L, CHEN Y, MAO Y J. New concept of structural seismic design-recoverable functional structure [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2011, 39(7): 941—948. (In Chinese)
- [7] 吕志涛. 高性能材料 FRP 应用和结构工程创新 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2005, 22(1): 1—5.  
LÜ Z T. FRP application and structural engineering innovation of high-performance materials [J]. *Journal of Architectural Science and Engineering*, 2005, 22(1): 1—5. (In Chinese)
- [8] HUNG C C, LI H, CHEN H C. High-strength steel reinforced squat UHPFRC shear walls: cyclic behavior and design implications [J]. *Engineering Structures*, 2017, 141: 59—74.
- [9] MOHAMED N, FARGHALY A S, BENMOKRANE B, *et al.* Experimental investigation of concrete shear walls reinforced with glass fiber-reinforced bars under lateral cyclic loading [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 18(3): 271—271.
- [10] 童小龙, 方志, 罗肖. 活性粉末混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(1): 21—30.  
TONG X L, FANG Z, LUO X. Experimental study on seismic performance of shear wall of reactive powder concrete [J]. *Journal of Architectural Structure*, 2016, 37(1): 21—30. (In Chinese)
- [11] 童小龙, 方志. 活性粉末混凝土超高层结构抗震性能研究 [J]. *建筑结构*, 2016, 46(3): 6—11.  
TONG X L, FANG Z. Research on seismic performance of reactive powder concrete super-high-rise structures [J]. *Architectural Structure*, 2016, 46(3): 6—11. (In Chinese)
- [12] 赵军, 赵齐, 党钧陶, 等. 碳纤维复材筋-钢筋混凝土剪力墙的变形能力试验研究 [J]. *工业建筑*, 2017, 47(1): 163—167.  
ZHAO J, ZHAO Q, DANG J T, *et al.* Experimental study on the deformation capacity of carbon fiber composite stiffening-reinforced concrete shear wall [J]. *Industrial Buildings*, 2017, 47(1): 163—167. (In Chinese)
- [13] 赵军, 赵齐, 陈纪伟. CFRP 筋钢筋混凝土剪力墙自复位性能试验研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(3): 18—24.  
ZHAO J, ZHAO Q, CHEN J W. Experimental study on self-restoring performance of CFRP reinforced concrete shear wall [J]. *Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2016, 38(3): 18—24. (In Chinese)
- [14] 赵军, 沈富强, 司晨哲, 等. CFRP 筋/钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2018, 35(5): 46—53.  
ZHAO J, SHEN F Q, SI C Z, *et al.* Seismic performance test of reinforced concrete shear wall with CFRP bars [J]. *Journal of Architectural Science and Engineering*, 2018, 35(5): 46—53. (In Chinese)
- [15] 王震宇, 王旭阳, 蔡忠奎. 复材筋与钢筋混合配筋混凝土柱的抗震性能分析 [J]. *工业建筑*, 2016, 46(5): 1—6.  
WANG Z Y, WANG X Y, CAI Z K. Seismic performance analysis of reinforced concrete columns with composite bars and reinforced bars [J]. *Industrial Buildings*, 2016, 46(5): 1—6. (In Chinese)
- [16] 杨剑. CFRP 预应力筋超高性能混凝土梁受力性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2007: 20—21.  
YANG J. Research on the mechanical properties of CFRP prestressed concrete beams with ultra-high performance [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan university, 2007: 20—21. (In Chinese)
- [17] DBJ 43/T 325-2017 活性粉末混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 11.  
DBJ 43/T 325-2017 Technical specification for reactive powder concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017: 11. (In Chinese)
- [18] 陈纪伟. CFRP 筋-钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2015: 14—20.  
CHEN J W. Experimental study on seismic performance of CFRP bars and reinforced concrete shear walls [D]. Zhengzhou: College of Civil Engineering, Zhengzhou University, 2015: 14—20. (In Chinese)
- [19] 赵齐. 纤维聚合物筋-钢筋混合配筋混凝土剪力墙的抗震性能 [D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2016: 61—62.  
ZHAO Q. Seismic performance of fiber polymer reinforced concrete shear wall with mixed reinforcement [D]. Zhengzhou: College of Civil Engineering, Zhengzhou University, 2016: 61—62. (In Chinese)
- [20] JGJ/T 101-2015 建筑抗震试验规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 17.  
JGJ/T 101-2015 Specification for seismic test of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 17. (In Chinese)
- [21] 马昕, 吕西林. 软钢阻尼器对自复位剪力墙性能影响研究 [J]. *结构工程师*, 2013, 29(4): 63—69.  
MA X, LÜ X L. Research on the influence of soft steel damper on the performance of self-resetting shear wall [J]. *Structural Engineer*, 2013, 29(4): 63—69. (In Chinese)
- [22] 罗肖. 超高性能混凝土剪力墙抗震性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2014: 55—56.  
LUO X. Research on seismic performance of ultra-high performance concrete shear wall [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2014: 55—56. (In Chinese)