

文章编号:1007-9629(2024)09-0861-10

## SFCB 增强珊瑚混凝土柱抗震性能与骨架曲线模型

陈爽<sup>1,2</sup>, 韦丽兰<sup>1</sup>, 李虎林<sup>2</sup>, 关纪文<sup>3,\*</sup>, 李威<sup>4</sup>

(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 广西科技大学 广西高校防灾减灾与预应力技术重点实验室, 广西 柳州 545006; 3. 南宁学院, 广西 南宁 530200; 4. 广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530200)

**摘要:**为研究钢-连续纤维筋(SFCB)增强珊瑚混凝土柱的抗震性能以及 SFCB 的二次刚度,对 5 根 SFCB 增强珊瑚混凝土柱及 1 根钢筋珊瑚混凝土柱进行低周反复荷载试验.结果表明:相比于钢筋珊瑚混凝土柱,SFCB 增强珊瑚混凝土柱的滞回曲线捏拢效应更明显,但其刚度退化、等效黏滞阻尼系数较小;增加配筋率,SFCB 增强珊瑚混凝土柱的位移延性、峰值荷载分别提高约 13.41%、4.51%;提高轴压比,柱的位移延性、峰值荷载分别提高 11.80%、18.39%.基于复合材料法则及受力平衡理论,提出了 SFCB 增强珊瑚混凝土柱的骨架曲线模型.将该模型的计算结果与试验结果进行对比,二者吻合度较高,进一步验证了该模型的适用性与准确性.

**关键词:**抗震性能;钢-连续纤维筋;二次刚度;珊瑚混凝土;骨架曲线模型

中图分类号:TU377.9

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.09.012

## Seismic Performance and Skeleton Curve Model of SFCB Reinforced Coral Concrete Columns

CHEN Shuang<sup>1,2</sup>, WEI Lilan<sup>1</sup>, LI Hulin<sup>2</sup>, GUAN Jiwen<sup>3,\*</sup>, LI Wei<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation and Prestress Technology of Guangxi Colleges and Universities, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 3. Nanning University, Nanning 530200, China; 4. Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co.Ltd., Nanning 530200, China)

**Abstract:** In order to study the seismic performance and secondary stiffness of steel-fiber composite bar reinforcement (SFCB) reinforced coral concrete columns, low-cycle repeated load tests were carried out on 5 of SFCB coral concrete columns and one reinforced coral concrete column. The results show that compared with the reinforced coral concrete columns, the squeezing effect of the hysteretic curves of SFCB reinforced coral concrete columns is more obvious, but the stiffness degradation and equivalent viscous damping coefficient are smaller. With the increase of reinforcement ratio, the displacement ductility and peak load of the specimen are increased by about 13.41% and 4.51%, respectively. The displacement ductility and peak load of the specimen are increased by 11.80% and 18.39%, respectively. Based on the law of composite materials and the theory of force equilibrium, a skeleton curve model of SFCB reinforced coral concrete columns was proposed, and the calculation results of the model were compared with the experimental results. The results shows a good agreement between them, which further verifies the applicability and accuracy of the model.

**Key words:** seismic performance; steel-fiber composite bar; secondary stiffness; coral concrete; skeletal curve model

收稿日期:2023-11-15;修订日期:2024-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52368013);中央引导地方科技发展资金项目(2022SRZ0101);广西高校防灾减灾与预应力技术重点实验室开放基金资助项目(GXKDTJ002)

第一作者:陈爽(1981—),男,湖北宜昌人,广西科技大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:shuangchen81@163.com

通讯作者:关纪文(1996—),男,广西南宁人,南宁学院讲师,硕士.E-mail:354031646@qq.com

珊瑚混凝土在岛礁建设中具有较好的应用前景<sup>[1-3]</sup>。钢-连续纤维筋(SFCB)以普通钢筋与纤维材料为原料,经拉挤工艺制成<sup>[4-5]</sup>,兼具钢筋与纤维筋的优点,耐腐蚀性好,且具有稳定的二次刚度<sup>[6]</sup>,可代替钢筋应用于海洋工程建设。孙泽阳等<sup>[7]</sup>对不同外包纤维SFCB增强混凝土柱进行抗震试验,发现SFCB的二次刚度受到外包纤维增强复合材料和含钢量的影响,且在相同的变形能力下,SFCB增强混凝土柱柱脚曲率低于普通钢筋混凝土(RC)柱;外包玄武岩纤维SFCB增强混凝土柱抗震性能指标优于外包碳纤维SFCB增强混凝土柱。张蝶<sup>[8]</sup>研究了SFCB增强混凝土框架抗震性能并进行了数值模拟,发现SFCB增强混凝土框架最后发生弯曲破坏,且其轴压比、纤维掺量越大,承载力越大。Su等<sup>[9]</sup>研究了SFCB增强珊瑚混凝土梁的抗震性能,发现SFCB增强珊瑚混凝土梁相比RC梁的滞回曲线捏拢效应更明显,残余位移更小。韩沐阳<sup>[10]</sup>对比了钢管-SFCB/BFRP(basalt fiber reinforced polymer,玄武岩纤维增强复合材料)-高性能混凝土柱的抗震性能,发现SFCB组合柱与BFRP组合柱滞回曲线饱满且呈弓形,柱脚均发生屈曲现象。

总体而言,目前大部分研究都集中于SFCB增强普通混凝土结构,而对SFCB增强珊瑚混凝土结构抗震性能的研究甚少。因此,本文将配筋率、体积配

箍率、轴压比作为试验变量对SFCB增强珊瑚混凝土柱抗震试验性能进行研究,并基于试验结果,优化SFCB增强珊瑚混凝土柱的骨架曲线模型。

## 1 试验

### 1.1 柱试件设计

本试验共设计5根SFCB增强珊瑚混凝土柱和1根钢筋珊瑚混凝土柱,柱尺寸及配筋如图1所示。柱尺寸为350 mm×350 mm×1 200 mm,SFCB纵筋直径为16、18 mm,BFRP箍筋直径均为8 mm,间距为100、150 mm。各试件的设计参数如表1所示。表1试件编号中S、SF分别代表普通钢筋、钢-连续纤维筋;16、18分别表示纵筋直径为16 mm、18 mm;100、150分别表示箍筋间距为100 mm、150 mm;0.3、0.4、0.5为各试验柱轴压比。

基于GB/T 50011—2010《建筑抗震设计标准》<sup>[11]</sup>,将柱主体部分、底座的混凝土保护层厚度分别设计为30、40 mm。珊瑚混凝土强度等级为C40,以珊瑚礁、海砂、海水、P·O 42.5普通硅酸盐水泥及减水剂为试验材料,按照一定的配合比拌制而成。经28 d自然养护,本批次珊瑚混凝土实测立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度及弹性模量分别为40.31 MPa、39.93 MPa、3.90 MPa、32.00 GPa。纵筋/箍筋实测力学性能指标见表2。

表1 试件配筋设计参数

Table 1 Design reinforcement parameters of specimens

Specimen No.	Stirrup spacing	Volume band ratio/%	Diameter of longitudinal bar	Reinforcement ratio/%	Axial compression ratio	Shear-span ratio
S16-100-0.3	φ8@100	1.38	12 $\Phi$ 16	1.97	0.3	3.4
SF16-100-0.3	φ8@100	1.38	12 $\Phi$ 16SFCB	1.97	0.3	3.4
SF16-150-0.3	φ8@150	0.93	12 $\Phi$ 16SFCB	1.97	0.3	3.4
SF16-100-0.4	φ8@100	1.38	12 $\Phi$ 16SFCB	1.97	0.4	3.4
SF16-100-0.5	φ8@100	1.38	12 $\Phi$ 16SFCB	1.97	0.5	3.4
SF18-100-0.3	φ8@100	1.38	12 $\Phi$ 18SFCB	2.49	0.3	3.4

表2 纵筋/箍筋实测拉伸力学性能

Table 2 Measured tensile mechanical properties of longitudinal bars/stirrups

Type of reinforcement	Diameter/mm	Core reinforcement diameter/mm	Fiber layer thickness/mm	Elastic modulus/GPa	Yield strength/MPa	Yield displacement/mm	Ultimate strength/MPa	Ultimate displacement/mm
Rebar longitudinal tendon	16			200.00	400.00		550.00	
SFCB longitudinal tendon	16	12	2	115.00	268.00	2.00	584.00	20.11
	18	14	2	110.00	260.00	1.85	605.00	23.01
BFRP Stirrup	8			50.12			1 315.00	

### 1.2 加载方式

试验轴向压力通过垂向液压千斤顶施加,通过调整千斤顶油压,以达到合适的轴压力。根据GB/T

50011—2010,加载制度按荷载-位移混合控制:试件开裂前,以荷载值控制加载,每级荷载循环1次,增量为10 kN;开裂后,以开裂时对应的水平位移值控制

加载,每级位移循环3次,直至试件水平荷载下降至峰值荷载的85%时即停止加载.试验使用MTS电

液伺服系统进行控制加载,实际加载装置如图2所示.

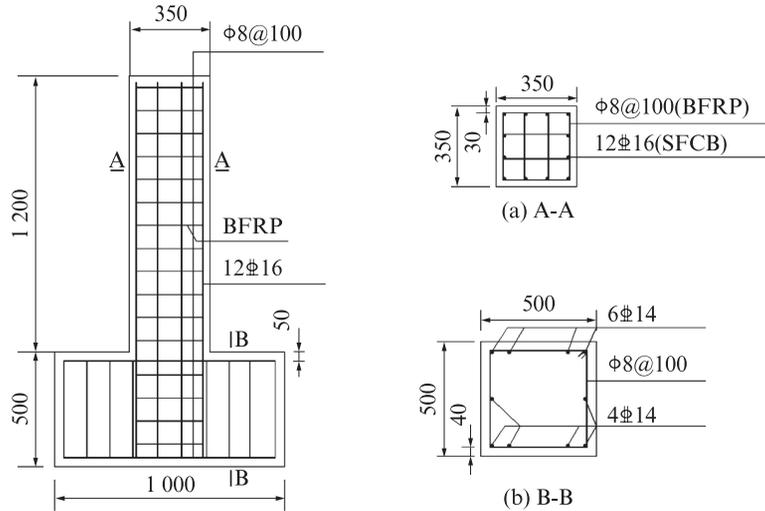


图1 试件尺寸及配筋示意图

Fig.1 Schematic diagram of specimen size and reinforcement(size: mm)

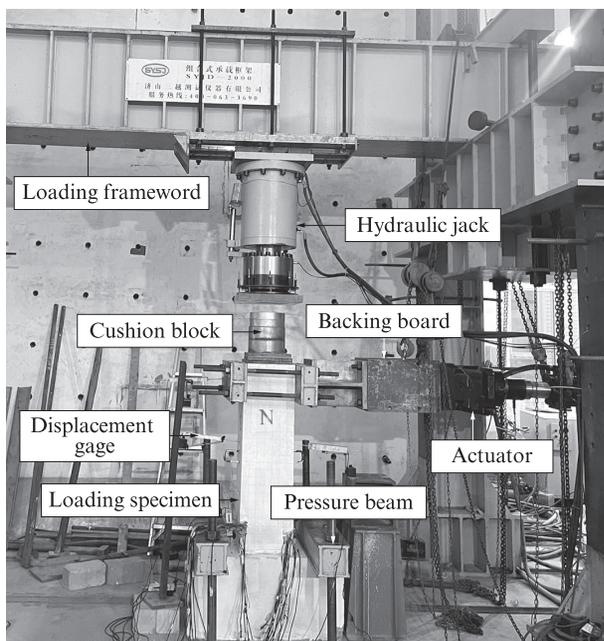


图2 试验加载装置

Fig.2 Test loading device

## 2 破坏形态与试验结果

### 2.1 破坏形态

试验加载结束后,试件的损伤破坏形态如图3所示.钢筋、SFCB增强珊瑚混凝土柱均属于弯曲破坏.其破坏过程大致为:塑性铰区混凝土保护层开裂、钢筋或SFCB内芯钢筋屈服、SFCB外包纤维断裂、钢筋屈服阶段.加载过程中,由于S面剪力较大,因此裂缝均集中出现在S面的塑性

铰区域(距离柱基础150 mm范围内).由图3(a)可见:S16-100-0.3试件裂缝主要为横向裂缝且集中出现在柱底,钢筋未屈服时,S面的塑性铰区出现第1条裂缝,柱表面裂缝宽度较小,数量较少;而当钢筋屈服时,裂缝发展迅速,变宽,数量增多,一部分裂缝形成横向贯穿裂缝,随着荷载增加,珊瑚骨料被压碎、剪断,导致塑性铰区混凝土保护层脱落.

由图3(b)~(f)可见,SFCB增强珊瑚混凝土柱破坏过程与钢筋珊瑚混凝土柱类似,均为弯曲破坏.主要的区别在于SFCB增强珊瑚混凝土柱裂缝不仅出现于柱底部,而且随着荷载的增加,竖向或斜裂缝均逐渐向柱中甚至柱顶延伸,最终形成竖向贯穿裂缝.随着荷载的增加,裂缝变宽,塑性铰区混凝土保护层脱落.通过观察图3(b)、(e)、(f)可知,随着轴压比的增大,珊瑚混凝土柱破坏严重,混凝土保护层脱落明显增多.

与钢筋混凝土柱相比,SFCB增强珊瑚混凝土柱在最终破坏时,其混凝土保护层脱落不明显,依旧保持完整性.主要原因在于:(1)珊瑚的多孔性及吸水性,在前期水泥砂浆中的水分会被珊瑚吸收掉,随着养护的不断进行,珊瑚骨料中的水分会释放出,形成自养护作用,完成“二次水化”,因此珊瑚混凝土强度也随之增高;(2)珊瑚骨料分布有较多孔洞,在搅拌及浇筑过程中,部分水泥砂浆可以渗透其中,使珊瑚骨料与砂浆融为一体,提高了珊瑚与水泥砂浆之间的黏结性能,故珊瑚混凝土抗拉强度高于普通混

土.当发生保护层脱落时,珊瑚骨料主要被压碎或剪断,并非发生于珊瑚与水泥砂浆截面处;(3)FRP箍筋在抗震作用下,作用为约束混凝土,而FRP筋的弹

性模量低,抗拉强度高,当SFCB纵筋达到极限荷载时,FRP筋仍能继续承担拉力,即能保证构件的完整性.

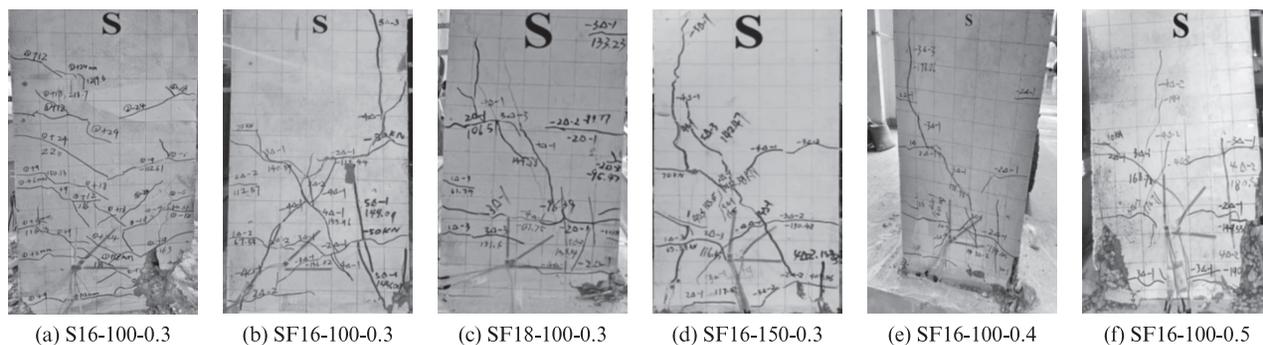


图3 各试件试验破坏现象与结果

Fig. 3 Test failure phenomenon and results of specimens

## 2.2 试验结果

利用文献[12]的最远点法确定各试件屈服荷载及位移,试件承载力及延性如表3所示.由表3可知,由于钢筋的弹性模量高于SFCB,因此在拟静力荷载作用下,普通钢筋珊瑚混凝土试件S16-100-0.3相比于SFCB增强珊瑚混凝土柱的承载力及延性高,根据GB/T 50011-2010<sup>[11]</sup>规定4级抗震结构的延性应达到2及以上,由表3可知,所有试件的延性 $\mu$ 均不小于2,故满足规范要求.

由表3还可知:轴压比为0.3的SFCB增强珊瑚混凝土柱开裂荷载( $F_{cr}$ )、位移( $\delta_{cr}$ )较小,而随着轴压

比的增大,试件开裂荷载及位移逐渐增大;当SFCB屈服后,轴压比越大的试件承载力越大.其中,试件SF16-100-0.4、SF16-100-0.5峰值荷载相较于试件SF16-100-0.3分别提高了15.06%、18.39%.原因在于轴压比较大的试件,其材料的裂变效应(在低周反复荷载作用下的钢筋混凝土材料,开裂的混凝土再受压时,具有裂面局部接触以传递压力的效应)越弱,反向加载时构件的黏结滑移现象越不明显<sup>[13]</sup>,即SFCB纵向钢筋与珊瑚混凝土越不容易发生黏结滑移的现象.可见,在一定范围内提高SFCB试件的轴压比,可有效提高其承载能力.

表3 试件承载力及延性

Table 3 Bearing capacity and ductility of specimens

Specimen number	$F_{cr}/\text{kN}$	$\delta_{cr}/\text{mm}$	$F_y/\text{kN}$	$\delta_y/\text{mm}$	$F_m/\text{kN}$	$\delta_m/\text{mm}$	$F_u/\text{kN}$	$\delta_u/\text{mm}$	$\mu$
S16-100-0.3	90.35	6.00	137.5	9.6	221.26	24.00	188.10	48.00	5.00
SF16-100-0.3	70.00	5.22	116.63	10.44	161.79	20.88	136.85	26.10	2.50
SF18-100-0.3	50.00	4.94	120.86	12.36	165.55	25.85	140.72	29.60	2.39
SF16-150-0.3	70.00	4.55	137.39	11.38	176.29	22.75	148.75	22.75	2.00
SF16-100-0.4	100.00	5.73	140.33	9.63	186.16	17.19	158.24	22.90	2.38
SF16-100-0.5	90.00	5.84	131.62	11.69	191.54	23.36	162.81	29.20	2.50

Note:  $F_{cr}$  represents the cracking load;  $\delta_{cr}$  represents the cracking displacement;  $F_y$  stands for yield load;  $\delta_y$  represents yield displacement;  $F_m$  represents the peak load;  $\delta_m$  represents the peak displacement;  $F_u$  represents the ultimate load;  $\delta_u$  represents the ultimate displacement.

## 3 结果与分析

### 3.1 滞回曲线

各试验柱的滞回曲线如图4所示.由图4(a)可知,试件S16-100-0.3滞回曲线饱满,而SFCB增强珊瑚混凝土柱滞回曲线较扁平,原因在于:(1)钢筋屈服后塑性特征更明显,其滞回曲线开始出现捏拢效应;(2)在加载初期,SFCB增强珊瑚混凝土柱承载力由钢筋与FRP共同承担,当钢筋屈服时,承载力由外

包的FRP承担,FRP属于线弹性材,因此滞回曲线捏拢现象较明显<sup>[14]</sup>;(3)SFCB内芯钢筋屈服后,弹性回缩的FRP对已经发生屈服的內芯钢筋产生压缩作用,进而影响SFCB实际承载力及延性,故试件S16-100-0.3承载力及延性高于SFCB珊瑚混凝土柱.

由图4(b)、(c)可知,随着配筋率的增加,试件SF18-100-0.3比SF16-100-0.3水平承载力、延性、滞回曲线面积有所增大,说明提高配筋率可进一步改

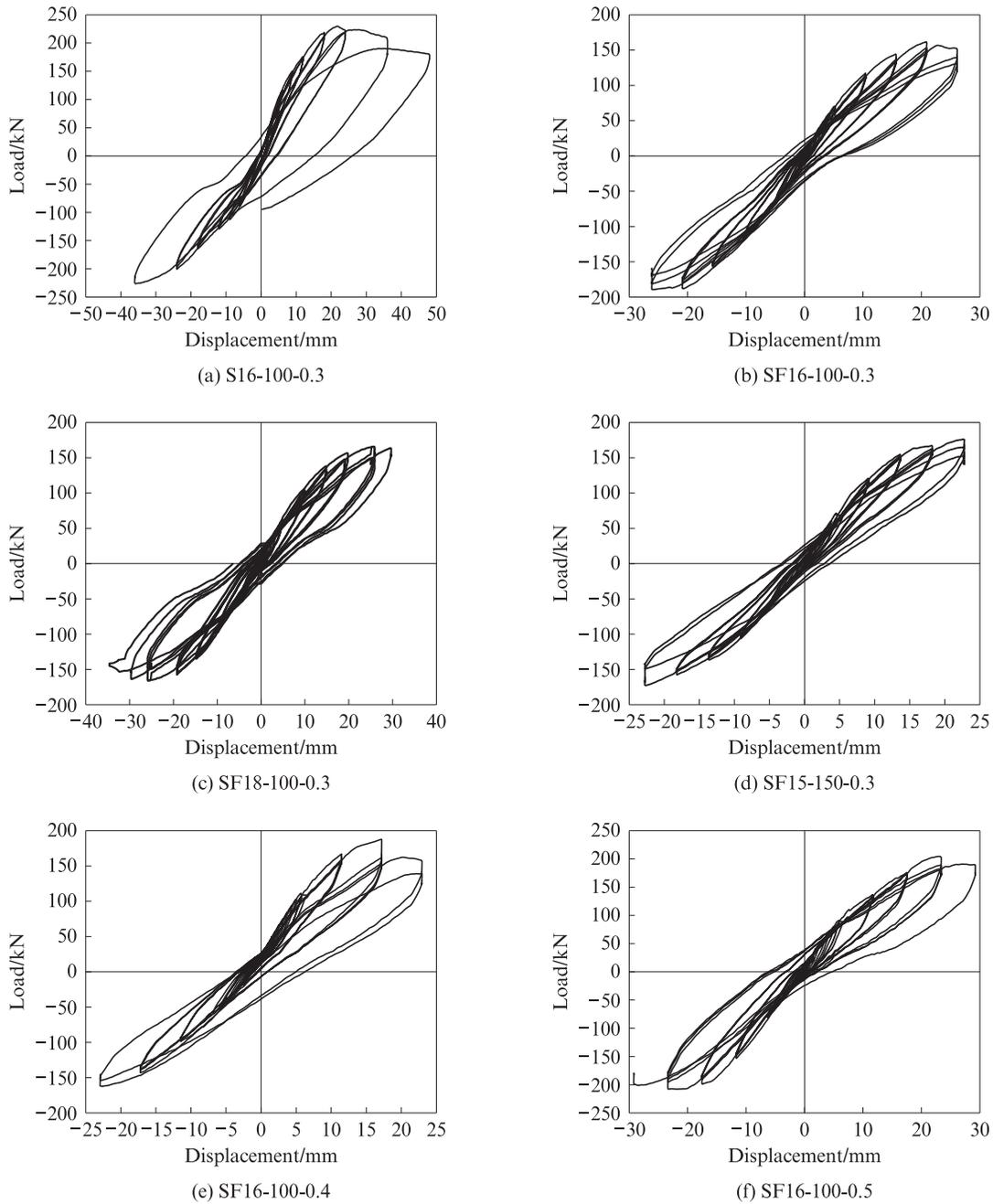


图4 各试件滞回曲线  
Fig. 4 Hysteresis curve of each specimen

善结构抗震性.由图4(b)、(d)可知,柱体积配箍率越小,箍筋对混凝土的约束能力越弱,因此柱延性越低.对比图4(b)、(e)、(f)发现,轴压比越大的试件,在加载过程中轴向力越大,对试件的约束能力越高,混凝土有效受压区面积越大,混凝土参与抗震工作性能越高,试件水平承载越大,因此滞回曲线越扁平<sup>[15]</sup>.

### 3.2 骨架曲线

试件骨架曲线如图5所示.由图5可知,加载前期,试件骨架曲线呈线性上升,表明此时受力筋处于线弹性阶段,当受力筋屈服时,骨架曲线呈先增大再降低趋势.值得注意的是试件S16-100-0.3在拟静力

荷载下,特征荷载、延性均高于SFCB增强珊瑚混凝土柱.原因在于,钢筋表面粗糙、肋纹深,在加载过程中与珊瑚混凝土产生的相互摩擦力大,黏结应力高;而SFCB由于制作工艺等原因,其表面较光滑、肋纹较浅,其与珊瑚混凝土之间的咬合力较小,故黏结性能相对较差.文献[7,9]中SFCB筋在拟静力荷载作用下骨架曲线与钢筋的骨架曲线相差不大;而本文的SFCB与钢筋的骨架曲线差距明显.其主要原因为珊瑚骨料强度较低导致珊瑚混凝土抗压强度低于普通混凝土,而本文的轴压力又较高,在加载前期,轴压力由珊瑚与SFCB共同承担,当柱顶珊瑚混凝土

被压碎时,轴压力主要由SFCB承担,而SFCB弹性模量强度低于钢筋,当SFCB内芯钢筋屈服时,外力主要由外包的FRP承担,此时,外包纤维对内芯钢筋会产生挤压效应,因此在轴压力、横向拉力及挤压力耦合作用下,SFCB承载力及延性明显低于钢筋。

由图5还可知:在拟静力荷载作用下SFCB增强珊瑚混凝土柱均表现出稳定的二次刚度,即在内芯钢筋屈服后,应力仍随应变发生变化;荷载一位移曲线斜率低于内芯钢筋屈服前,当承载力降低,

而应力不随应变增长时,表明外包纤维大部分发生断裂;当体积配箍率减小时,试件延性也随之降低(图5(b)),主要是由于加大箍筋间距降低了箍筋对珊瑚混凝土的约束能力。结合表3及图5(c)可知,由于增大结构轴压比不仅会降低发生黏结滑移的可能性,而且还会提高混凝土的抗震参与性,因此试件SF16-100-0.4, SF100-100-0.5相较于试件SF16-100-0.3的峰值荷载分别增长了15.05%, 18.39%。

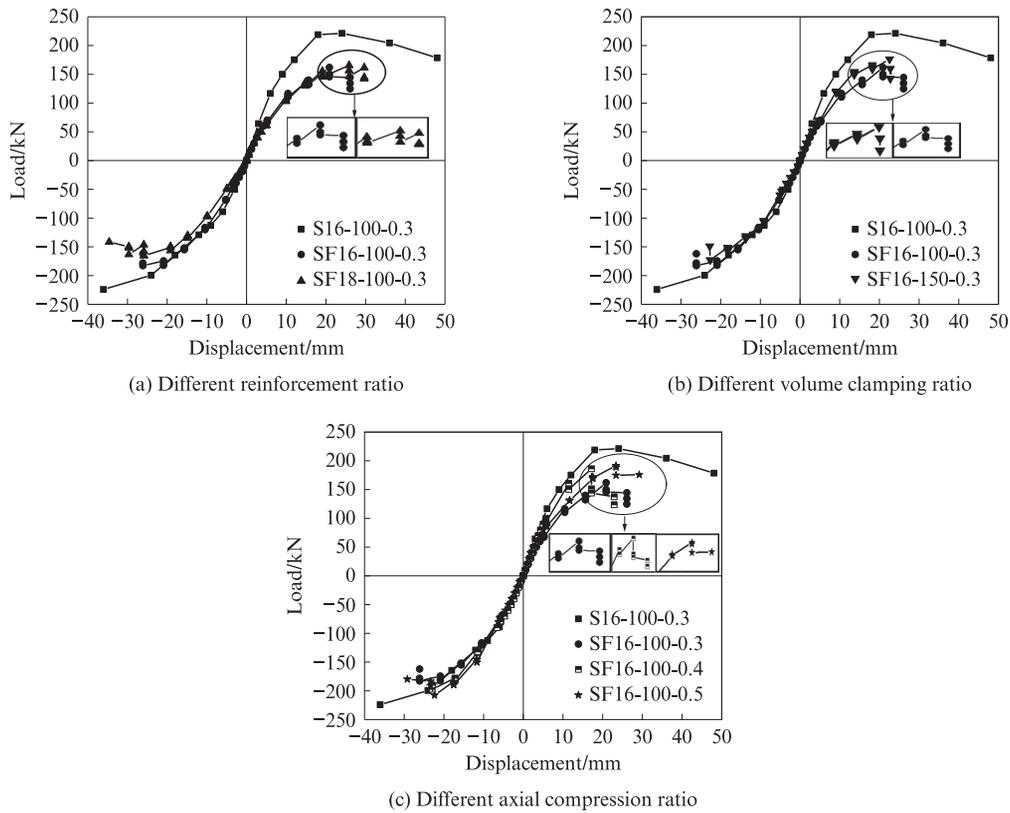


图5 各试件骨架曲线  
Fig. 5 The skeleton curves of each specimen

### 3.3 刚度退化曲线

图6为各试件刚度退化曲线。由6(a)可知,试件SF18-100-0.3刚度退化系数高于试件S16-100-0.3、SF16-100-0.3,说明提高构件配筋率可提高结构的抗侧刚度。对于试件S16-100-0.3、SF16-100-0.3、SF18-100-0.3,当侧向位移大于20mm时,刚度退化曲线均出现明显下降趋势,表明钢筋此时处于屈服状态,而SFCB外包纤维大部分发生断裂,荷载由屈服的内芯钢筋承担,最终承载力降低。

由图6(b)可知,加载前期,侧向荷载由珊瑚混凝土与SFCB共同承担。由于SF16-150-0.3体积配箍率小,对混凝土约束能力低,且珊瑚混凝土属于脆性材料,加载时混凝土容易发生脱落,导致试件刚度有所降低;加载后期,侧向荷载主要由SFCB承担,构件

承载力得以提高,故试件SF16-150-0.3的刚度退化曲线呈上升再下降的趋势。

由图6(c)可知,加载前期,轴压比较高的试件在低周反复荷载作用下其刚度较高,但随着侧移的增加,刚度退化速率亦随之增加。其原因有两点:(1)提高轴压比,相当于提高珊瑚混凝土参与受力的水平,当混凝土发生脱落时,结构刚度也随之降低;(2)轴压比越大,柱在进行反向加载时,需克服很大的竖向荷载做功,导致其初始刚度偏大。

### 3.4 等效黏滞阻尼系数

图7为各试件的等效黏滞阻尼系数。由图7可见,试件等效黏滞阻尼系数随着水平位移的增加而稳定增大,表明在拟静力荷载作用下构件逐渐由弹性阶段进入弹塑性阶段,最后进入塑性阶段。试件

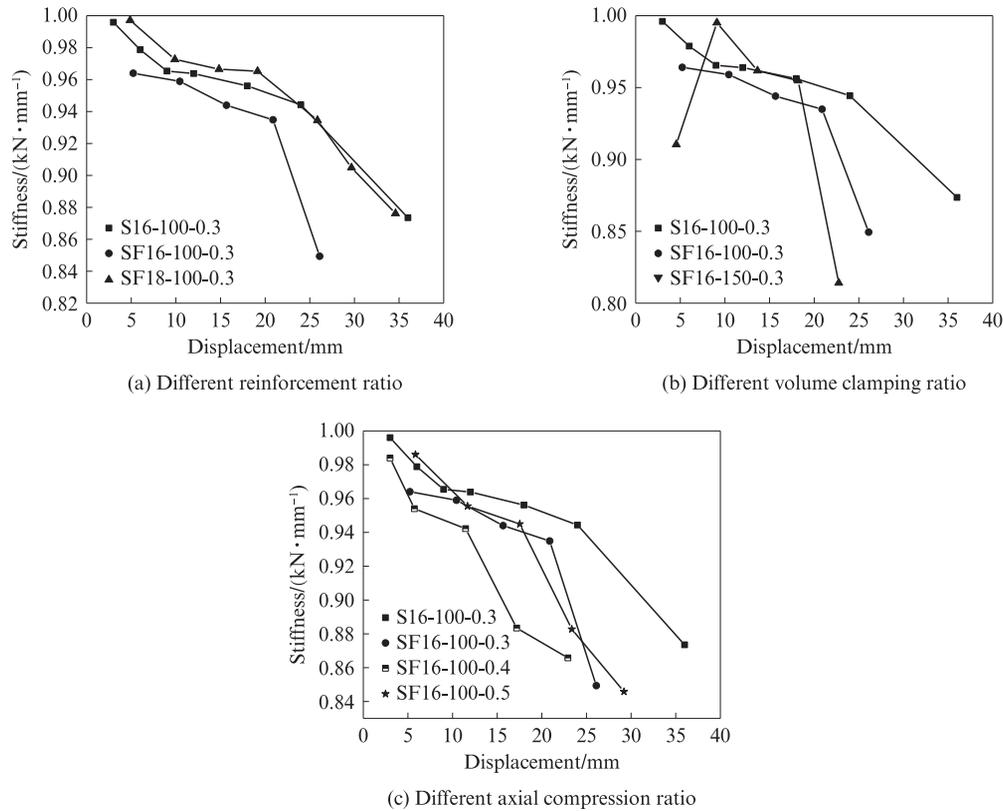


图6 各试件刚度退化曲线

Fig. 6 Stiffness degradation curve of each specimen

S16-100-0.3在15 mm工况之前等效黏滞阻尼系数最小,当侧移大于15 mm时,其等效黏滞阻尼系数逐渐增大,甚至高于SFCB珊瑚混凝土柱,主要是由于钢筋属于弹塑性材料,当钢筋屈服后,应力-应变进入塑性阶段,导致其塑性耗能增大;而SFCB由于内芯钢筋屈服后,高强度的FRP充分发挥了其回复力特征,导致等效黏滞阻尼系数变化缓慢,因此其塑性耗能低于试件S16-100-0.3.当侧移大于20 mm时,FRP大部分发生断裂时,此时结构塑性耗能增大,因此等效黏滞阻尼系数增大.

由图7还可知:(1)试件SF16-100-0.3与SF18-100-0.3的等效黏滞阻尼系数在前期相差不大,当加载至中后期时,两者才出现差异(图7(a)).原因在于,SFCB中FRP的含量会影响构件的二次刚度(18 mm的SFCB中BFRP的占比为11.0%;16 mm的SFCB中BFRP的占比为12.5%).(2)改变箍筋间距对构件的等效黏滞阻尼系数影响甚微,但对构件的延性影响较大(图7(b)).(3)轴压比越小的试件,其等效黏滞阻尼系数越小(图7(c)).

## 4 SFCB珊瑚混凝土柱骨架曲线模型

### 4.1 屈服弯矩与屈服位移

由于SFCB属于弹塑性复合材料,加载前期,由其内部的钢筋与FRP两种材料共同抵抗应力,故可

将SFCB的屈服荷载定义为:材料在应力-应变曲线上弹性变形达到最大值,塑性变形为0,结构处于正常使用状态,一旦超过屈服点,材料或使用该材料的结构将会发生较大变形<sup>[16]</sup>.基于平截面假定,根据受力平衡及复合材料法则,提出SFCB增强珊瑚混凝土柱在塑性铰区屈服弯矩 $M_{ys}$ 的计算方法,见式(1):

$$M_{ys} = A_{sf} f_{ysf} (h_0 - a_s) + n\beta b h_0 f'_c \left( \frac{h}{2} - a_s \right) - 0.5\eta b h_0 f'_c \left( \frac{1}{3} \eta h_0 - a_s \right) \quad (1)$$

式中: $A_{sf}$ 为复合筋受拉面积; $f_{ysf}$ 为复合筋受拉屈服强度; $h_0$ 为有效受压区高度; $a_s$ 为受拉钢筋中心点到混凝土外边缘的距离; $n$ 为柱轴压比; $\beta$ 为轴压比系数(当 $n < 0.5$ 时,取1.0;当 $n \geq 0.5$ 时, $0 < \beta \leq 0.6$ ); $f'_c$ 为珊瑚混凝土轴心抗压强度,取值为设计值,按照GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》<sup>[17]</sup>对 $f'_c$ 取值; $h$ 为截面高度; $b$ 为截面宽度; $f'_c$ 为柱截面屈服时珊瑚混凝土最大压应力<sup>[18]</sup>; $\eta$ 为受压区高度系数.

基于文献[16-17]及试验实际情况,本文提出 $\eta$ 的计算方法,见式(2):

$$\eta = \left[ \left( \rho'_s + \rho_{sf} + \frac{n}{\alpha_f} \right)^2 \alpha_E^2 + (\rho'_s + \rho_{sf}) \left( 1 + \frac{a_s}{h_0} \right) + \frac{2n}{\alpha_f} \alpha_E \right]^{\frac{1}{2}} - \left( \rho'_s + \rho_{sf} + \frac{n}{\alpha_f} \alpha_E \right) \quad (2)$$

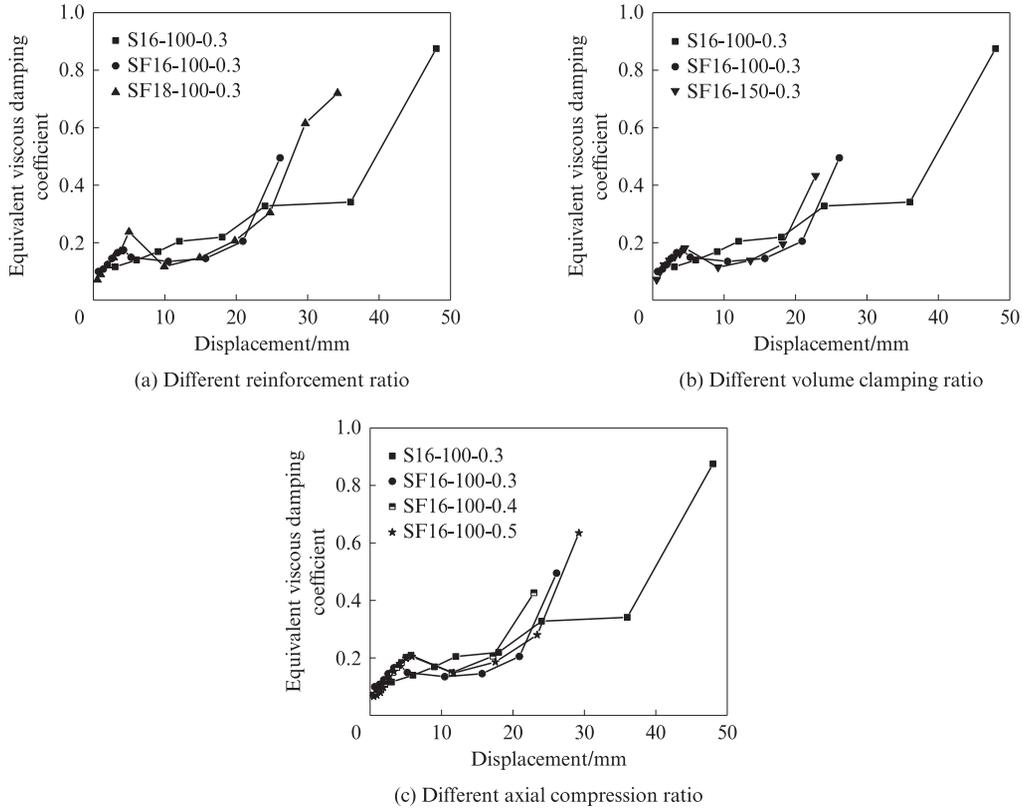


图7 各试件等效黏滞阻尼系数

Fig. 7 Equivalent adhesive damping coefficient of each specimen

式中： $\rho'_s$ 为受拉复合筋配筋率； $\rho_{sf}$ 为SFCB受压内芯钢筋配筋率； $\alpha_f = \frac{f_{ysf}}{f_c}$ ； $\alpha_E = \frac{E_{sf}}{E_c}$ ； $E_{sf}$ 为SFCB弹性模量； $E_c$ 为珊瑚混凝土弹性模量。

根据文献[7,16,19-20]试验数据可得,当柱截面受拉侧为单层配筋时,配筋层系数 $\lambda=1.0$ ;当柱截面受拉侧为双层配筋时, $\lambda=1.5$ .屈服荷载 $F_y$ 可由式(3)计算。

$$F_y = \frac{M_{ys}}{\lambda H} \quad (3)$$

式中： $H$ 为柱高度。

根据文献[7,16]数据及本文试验数据对屈服位移的计算方法进行拟合,得出屈服位移 $\delta_y$ ,见式(4)：

$$\delta_y = \frac{0.6\gamma_1 H^2 f_y}{6(1-\eta)h_0 E_s} \quad (4)$$

式中： $\gamma_1$ 为轴压比系数(当 $n < 0.3$ 时, $\gamma_1$ 取1;当 $n \geq 0.3$ 时, $\gamma_1$ 取0.45); $E_s$ 为钢筋的弹性模量。

#### 4.2 峰值弯矩及峰值位移

峰值弯矩 $M_m$ 的计算方法见式(5)：

$$M_m = \beta_1 f_{stu} A_{sf} (h_0 - a_s) + \beta_2 N \left( \frac{h}{2} - a_s \right) \quad (5)$$

式中： $\beta_1$ 为配筋率系数(当 $\rho_1$ (配筋率) $< 2\%$ 时,取1;当 $\rho_1 \geq 2\%$ 时,取0.6); $f_{stu}$ 为复合筋受拉极限强度; $\beta_2$

为轴压比系数(当 $n < 0.4$ 时,取1.0;当 $n \geq 0.4$ 时,取0.7); $N$ 为柱轴压力。

为验证修正后的峰值荷载的适用性,将文献[7,16]试验数据带入式(5),发现计算结果与试验结果较吻合,误差在20%左右。

峰值位移 $\delta_m$ 的计算方法见式(6)：

$$\delta_m = \left( 53.6m_1\rho_1 - \frac{0.032}{n} \right) \frac{(1 + 3\alpha_w\alpha_f\rho_w)^{\frac{1}{2}}}{0.045 + 1.75nm_2} \delta_y \quad (6)$$

式中： $m_1$ 为配筋率影响系数(当 $\rho_1 < 2\%$ 时,取值为1, $\rho_1 \geq 2\%$ 时,取值为0.7); $\alpha_w$ 为箍筋类型影响系数(对于普通、螺旋、复合取值分别为1.00、2.05、3.00<sup>[16]</sup>); $m_2$ 为轴压比影响系数(当 $n \leq 0.4$ 、 $n > 0.5$ 时,取值分别为1.0、0.7);为了保证计算的准确性,将 $\delta_y$ 取为试验值; $\rho_w$ 为体积配箍率。

#### 4.3 极限位移

极限位移 $\delta_u$ 的计算方法见式(7)：

$$\delta_u = 219n\rho_1 \left[ \sigma \frac{(1 + 6\rho_w\alpha_w\alpha_f)^{\frac{1}{2}}}{0.045 + 1.75n} - 0.5 \right] \delta_y \quad (7)$$

式中： $\sigma$ 为钢筋类型影响系数,对于普通钢筋、SFCB分别取1.5、1.0。

#### 4.4 骨架曲线模型与试验结果对比

将本试验相关数据带入优化后的SFCB增强珊

珊瑚混凝土柱理论骨架曲线模型计算,计算结果与试验结果高度吻合,匹配值在0.85~1.20之间,如表4所示.同时将优化后的SFCB珊瑚混凝土柱理论骨架曲线模型与试验骨架曲线进行对比,如图8所示.

表4 试验值与计算值对比

Table 4 Comparison of Test Values and Calculated Values

Specimen No.	$F_{y,s}/kN$	$F_{y,j}/kN$	$\frac{F_{y,j}}{F_{y,s}}$	$\delta_{y,s}/mm$	$\delta_{y,j}/mm$	$\frac{\delta_{y,j}}{\delta_{y,s}}$	$F_{m,s}/kN$	$F_{m,j}/kN$	$\frac{F_{m,j}}{F_{m,s}}$	$\delta_{m,s}/mm$	$\delta_{m,j}/mm$	$\frac{\delta_{m,j}}{\delta_{m,s}}$	$F_{u,s}/kN$	$F_{u,j}/kN$	$\frac{F_{u,j}}{F_{u,s}}$	$\delta_{u,s}/mm$	$\delta_{u,j}/mm$	$\frac{\delta_{u,j}}{\delta_{u,s}}$
S16-100-0.3	137.5	152.22	1.11	9.60	9.44	0.98	221.26	179.73	0.82	24.00	23.95	1.00	188.10	152.77	0.81	48.00	44.23	0.92
SF16-100-0.3	116.63	130.75	1.12	10.44	10.30	0.97	161.79	186.99	1.15	20.88	19.58	0.94	136.85	158.94	1.16	26.10	28.11	1.08
SF18-100-0.3	120.86	143.51	1.18	12.36	10.50	0.85	165.55	159.73	0.96	25.85	25.85	1.00	140.72	135.77	0.96	29.60	33.94	1.15
SF16-150-0.3	137.39	130.75	0.95	11.38	10.30	0.91	176.29	186.99	1.06	22.75	23.61	1.04	148.75	158.94	1.07	22.75	22.53	0.99
SF16-100-0.4	140.33	158.20	1.13	9.63	11.06	1.15	186.16	182.86	0.98	17.19	17.08	0.99	158.24	155.43	0.98	22.90	19.53	0.85
SF16-100-0.5	131.62	136.28	1.04	11.69	11.82	1.01	191.54	197.38	1.03	23.36	23.88	1.02	162.81	167.77	1.03	29.20	30.06	1.03

Note: s represents the test value; j represents calculated value.

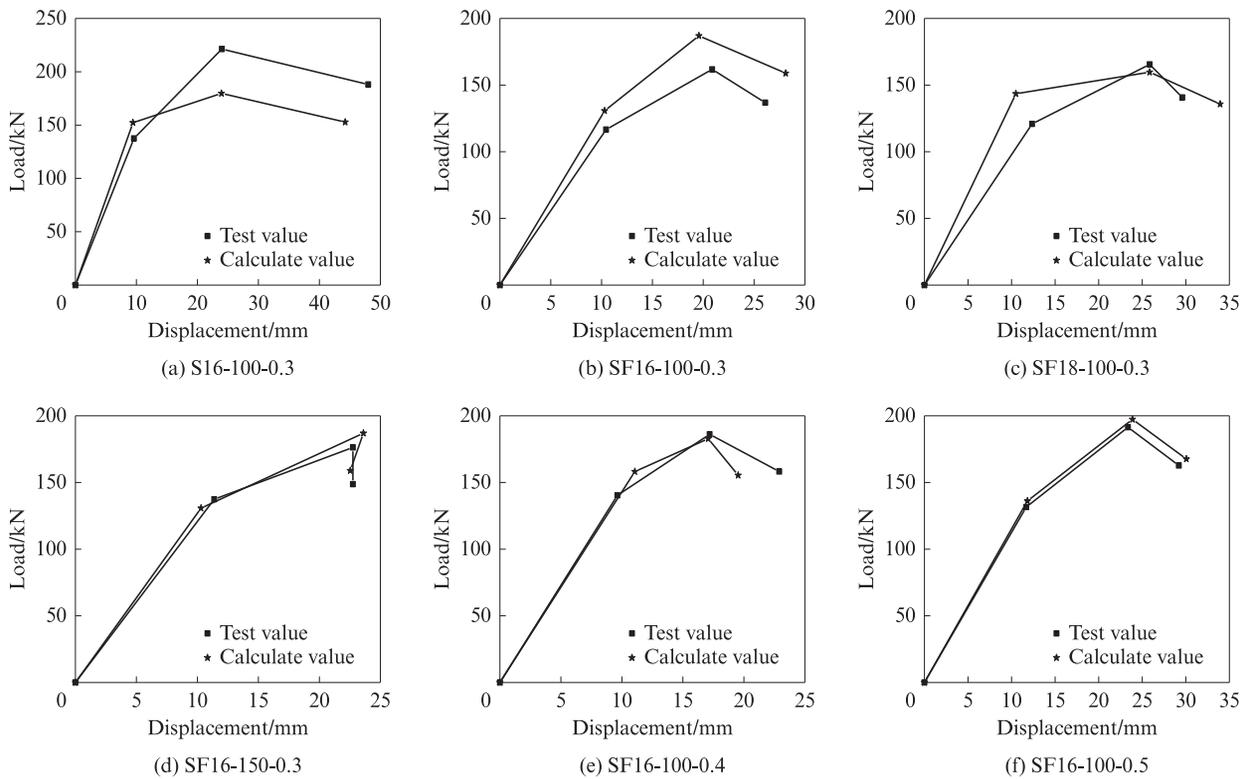


图8 各试件试验与理论骨架曲线模型对比

Fig. 8 Comparison of experimental and theoretical skeleton curve models of each specimen

### 5 结论

(1)在低周反复荷载作用下,SFCB增强珊瑚混凝土柱及其内部钢筋均发生弯曲破坏,破坏形态主要表现为:混凝土开裂,SFCB内芯钢筋屈服,外包纤维断裂,柱塑性铰区保护层混凝土剥落.

(2)由于SFCB内部的FRP具有线弹性特征,且SFCB与珊瑚混凝土之间的黏结性能受到内芯钢筋与外包纤维、外包纤维与珊瑚混凝土之间的黏结应力的影响,故相比于普通钢筋混凝土试件的滞回曲线,SFCB增强珊瑚混凝土试件的滞回曲线捏拢现象

更明显.

(3)在拟静力荷载作用下,增加SFCB增强珊瑚混凝土柱的配筋率、轴压比可提高柱的延性及水平荷载承受能力.刚度退化、等效黏滞阻尼系数可作为评判SFCB增强珊瑚混凝土结构抗震性能的重要指标——等效黏滞阻尼系数模型可大致评判SFCB增强珊瑚混凝土结构的屈服点,这对于结构抗震设计及修复具有重要意义.

(4)基于平截面假定、复合材料法则,结合材料的基本力学性能、试验情况,优化了SFCB珊瑚混凝土柱理论骨架曲线模型,验证了该模型与试验结果

的一致性,为SFCB增强珊瑚混凝土构件的抗震研究应用提供了有益参考。

### 参考文献:

- [1] 蔡新光,赵青,陈惠苏.珊瑚混凝土研究现状[J].硅酸盐学报,2021,49(8):1753-1764.  
CAI Xinguang, ZHAO Qing, CHEN Huisu. Research progress in coral concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(8):1753-1764.(in Chinese)
- [2] 王磊,毛亚东,陈爽,等.GFRP筋与珊瑚混凝土黏结性能的试验研究[J].建筑材料学报,2018,21(2):286-292.  
WANG Lei, MAO Yadong, CHEN Shuang, et al. Experimental research on bond performance between GFRP bars and the coral concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):286-292. (in Chinese)
- [3] 陈爽,韦丽兰,关纪文,等.海洋环境下BFRP筋增强珊瑚混凝土柱抗侵蚀性能[J].材料导报,2024,38(9):22110088.  
CHEN Shuang, WEI Lilan, GUAN Jiwen, et al. Corrosion resistance of BFRP bar reinforced coral concrete column under marine environment [J]. Materials Reports, 2024, 38(9): 22110088.(in Chinese)
- [4] HAN SW, CHAO F, AO Z, et al. Shear behavior of concrete beams reinforced with corrosion-resistant and ductile longitudinal steel-FRP composite bars and FRP stirrups [J]. Engineering Structures, 2023(278):115520.
- [5] GE W J, YAN W, Ashraf Ashour, et al. Flexural performance of concrete beams reinforced with steel-FRP composite bars [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20(2):1-17.
- [6] 罗云标,吴刚,吴智深,等.钢-连续纤维复合筋(SFCB)的生产制备研究[J].工程抗震与加固改造.2009,31(1):28-34.  
LUO Yunbiao, WU Gang, WU Zhishen, et al. Study on fabrication technique of steel fiber composite bar (SFCB) [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(1): 28-34. (in Chinese)
- [7] 孙泽阳,吴刚,吴智深,等.钢-连续纤维复合筋增强混凝土柱抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2011,44(11):24-33.  
SUN Zeyang, WU Gang, WU Zhishen, et al. Experimental study on seismic performance of concrete columns reinforced by steel-FRP composite bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11):24-33.(in Chinese)
- [8] 张蝶.钢-连续纤维复合筋混凝土框架抗震性能试验研究[D].南京:东南大学,2015.  
ZHANG Die. Study on seismic performance of steel fiber composite bar (SFCB) reinforced concrete structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.(in Chinese)
- [9] SU C, WANG X, DING L N, et al. Experimental study on the seismic behavior of seawater sea sand concrete beams reinforced with steel-FRP composite bars [J]. Engineering Structures, 2021, 248: 113269.
- [10] 韩沐阳.钢管-SFCB-UHPC组合柱抗震性能研究[D].扬州:扬州大学,2023.  
HAN Muyang. Study on seismic performance of steel Tube-SFCB-UHPC combination columns [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.(in Chinese)
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计标准:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2024.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 2024.(in Chinese)
- [12] 冯鹏,强翰霖,叶列平.材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J].工程力学,2017,34(3):36-46.  
FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3):36-46.(in Chinese)
- [13] 郭子雄,吕西林.高轴压比框架柱恢复力模型试验研究[J].土木工程学报,2004,37(5):32-38.  
GUO Zixiong, LÜ Xilin. Experimental study on the hysteretic model of RC columns with high axial compressive ratio [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(5):32-38.(in Chinese)
- [14] XIAO T L, QIU H X, LI J L. Seismic behaviors of concrete beams reinforced with steel-FRP composite bars under quasi-static loading [J]. Applied Sciences. 2018, 8(10):1913.
- [15] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理与分析[M].北京:清华大学出版社,2003:208.  
GUO Zhenhai, SHI Xudong. Principles and analysis of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003:208.(in Chinese)
- [16] 肖同亮,邱洪兴.钢-BFRP复合筋混凝土柱试验与骨架曲线模型研究[J].振动测试与诊断,2018,38(6):1205-1210,1295.  
XIAO Tongliang, QIU Hongxing. Seismic performance test and skeleton curve model study on concrete columns reinforced by steel-basalt fiber reinforced polymer (BFRP) Composite Bars [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis: 2018, 38(6): 1205-1210, 1295.(in Chinese)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构试验方法标准:GB/T 50152—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 2012.(in Chinese)
- [18] 黄一杰,力传玺,高朋,等.环氧涂层钢筋海水珊瑚混凝土柱抗震性能与损伤评价[J].建筑结构学报,2022,43(7):290-300.  
HUANG Yijie, LI Chuanxi, GAO Peng, et al. Seismic performance and damage assessment of epoxy-coated steel bar-reinforced seawater coral concrete columns [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(7):290-300.(in Chinese)