文章编号:1674-2974(2024)09-0145-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024095

B/CFRP筋海水海砂活性粉末混凝土梁抗弯性能研究

周芬[1],李丽娟[1],彭飞[1],朱德举[1,2†]
[1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082]

摘 要:为研究B/CFRP-SSRPC结构的抗弯性能,以配筋率及梁截面高度为研究因素,对5根B/CFRP-SSRPC梁开展四点弯曲试验研究,探究研究因素对B/CFRP-SSRPC梁极限承载力、跨中挠度及破坏模式等的影响规律.试验结果表明:增大配筋率仅对试验梁开裂后抗弯性能有明显提升,增大梁截面高度对试验梁开裂前及开裂后抗弯性能均有提升,且对试验梁开裂前抗弯性能的提升更明显;所有试验梁均为脆性破坏,破坏模式与配筋率密切相关;现行中国、美国两国FRP筋普通混凝土结构设计规范均低估了B/CFRP-SSRPC梁的抗弯承载力及抗剪承载力,计算误差分别受试验梁的破坏模式及剪跨比影响.

关键词:海水海砂混凝土;FRP筋;四点弯曲试验
中图分类号:TU377.9 **文献标志码**:A

Study on Flexural Behavior of Seawater Sea-sand Reactive Powder Concrete Beams Reinforced with B/CFRP Bars

ZHOU Fen[1], LI Lijuan[1], PENG Fei[1], ZHU Deju[1,2†]
[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China]

Abstract: To study the flexural performance of B/CFRP-SSRPC structures, four-point bending tests were conducted on 5 B/CFRP-SSRPC beams taking reinforcement ratio and beam section height as research factors, the influence law of research factors on the ultimate bearing capacity, mid-span deflection, and failure mode of B/CFRP-SSRPC beams was explored. The test results show that increasing the reinforcement ratio only improved the flexural performance of test beams after cracking, while increasing the beam section height improved beam flexural performance before and after cracking, and the improvement of beam flexural performance before cracking was more obvious; all test beams exhibited brittle failure, and the failure mode was closely related to the reinforcement ratio; the current design codes for FRP reinforced concrete structures in both China and the United States underestimated the flexural and shear capacity of B/CFRP-SSRPC beams, and the calculation error was affected by the failure mode and shear span ratio of the test beams, respertively.

* **收稿日期**:2023-09-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178206),National Natural Science Foundation of China(52178206);国家自然科学基金山东联合基金资助项目(U1806225),National Natural Science Foundation of China-Shandong Joint Fund(U1806225)
作者简介:周芬(1973—),女,湖北武汉人,湖南大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail:dzhu@hnu.edu.cn

Key words: seawater sea-sand concrete (SSC); fiber-reinforced polymer (FRP) bars; four-point bending test

海岛的基础建设中,若采用普通混凝土,则需从内陆采购并运输淡水及河砂,这无疑增大了经济成本.基于此,不少学者就地取材,采用海水及海砂制备海水海砂混凝土(Seawater Sea-sand Concrete, SSC),研究发现,与普通混凝土相比,SSC的早期抗压强度略高,长期力学性能基本相当[1-2].不过SSC中含有大量可加速钢筋锈蚀的Cl^-,曾给早期"海砂屋"带来了巨大安全隐患[3].与钢筋相比,纤维增强聚合物(Fiber-Reinforced Polymer, FRP)筋抗拉强度高且抗Cl^-腐蚀能力优异,更适合应用在SSC结构中[4-6].然而在后续的深入研究中发现,因长期处于SSC的碱性孔隙液中,FRP筋的力学性能有所退化[7].为降低FRP筋的劣化程度,需采用一种孔隙更小、内部结构更致密的SSC,其中海水海砂活性粉末混凝土(Seawater Sea-sand Reactive Powder Concrete, SSRPC)便是一种很好的选择.

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)是以粉煤灰、硅灰等活性粉末材料、水泥和细骨料等原料生产的一种高强度、高耐久性的高强混凝土[8].RPC具有优异的抗氯离子渗透性及耐硫酸性能,可以有效减缓FRP筋梁中FRP筋的劣化速率.余自若等[9]采用NEL法测得RPC的氯离子扩散系数为22.17×10^{-14} m^2/s,彭艳周[10]也发现RPC的抗氯离子渗透性能远远高于普通混凝土和高强混凝土.何峰等[11]证明了RPC比普通水泥基材料和高强水泥基材料呈现出较好的耐硫酸性能.另外,寇佳亮等[12]对冻融循环后的RPC试件进行电镜扫描,发现放大到1 000倍时只见密实的板状结构,这表明RPC混凝土内部结构细密,可有效防止结构内部被进一步侵蚀.由此可见,将SSRPC与FRP筋组合,不仅可以提升构件的力学性能,还能提升构件的耐久性.由于SSRPC的力学性能不同于普通混凝土,故现有FRP筋普通混凝土结构的设计方法可能不再适用于FRP-SSRPC构件.为推广SSRPC的应用,需对FRP-SSRPC梁的抗弯性能进行深入研究.

目前已有大量关于FRP-SSC梁抗弯性能的研究,结论表明:增大配筋率有利于减小梁的裂缝间距、宽度及跨中挠度[13],增大梁的开裂后刚度及极限承载力[14].但是一味增大配筋率并不能同比例地提高梁的抗弯承载力,反而容易导致梁因裂缝和挠度的过大而发生脆性破坏[15].除增大配筋率外,增大梁截面高度也可以有效提升梁的抗弯承载力[14, 16].Hua等[16]发现虽然梁的抗裂性能取决于SSC的抗拉强度,但增加梁截面高度依然可以通过增大截面的转动惯量和弯曲刚度来增大梁的开裂荷载.此外,梁的极限承载力也随着梁截面高度的增加而增加,Wang等[14]发现增大梁截面高度可以在一定程度上提高SSC梁的抗弯刚度,从而提高梁的开裂荷载和极限荷载,且梁的极限挠度和最大裂缝宽度也相应减小.由于SSRPC与SSC在力学性能上的不同,配筋率及梁截面高度变化对SSRPC梁的影响规律将发生变化,因此有必要以配筋率及梁截面高度为变量开展FRP-SSRPC梁的弯曲试验.

为推广FRP-SSRPC结构在海岛建设中的应用,同时考虑到BFRP筋在碱性溶液中的力学性能退化[7],本文采用在碱性环境中耐久性更好的玄武岩-碳纤维混杂增强聚合物(Basalt/Carbon-Based Hybrid Fiber-Reinforced Polymer, B/CFRP)筋[17]作为受拉区纵筋,以配筋率及梁截面高度作为研究因素,开展B/CFRP-SSRPC梁的四点弯曲试验,对B/CFRP-SSRPC梁的极限承载力、跨中挠度及破坏模式等展开分析,对中国、美国两国FRP筋普通混凝土结构设计规范中关于抗弯及抗剪承载力计算公式作出合理评价.

1 试验概况

1.1 试验材料

1.1.1 FRP筋

试验所用受拉区FRP筋为B/CFRP筋,其内芯为CFRP纤维,外包BFRP纤维,两种纤维混杂比例为1∶1,见图1.所用箍筋及受压区FRP筋均为直径为8 mm的CFRP筋,见图2.FRP筋的力学性能根据《纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法》(GB/T 30022—2013)[18]采用最大试验力为1 000 kN的电子万能试验机测得,加载速度为4 mm/min,每个测试组

包含5个试件,测试结果平均值见表1,FRP筋的应力-应变曲线见图3.表1中d为FRP筋直径,E_f为FRP筋弹性模量,f_f为FRP筋极限抗拉强度,ε_{fu}为FRP筋极限拉应变.FRP筋力学性能测试试样见图4,其中钢套筒外径D与筋材直径d有关,当d=8 mm或d=10 mm时,D=20 mm;当d=16 mm时,D=33 mm.B/CFRP筋的典型破坏形态见图5.

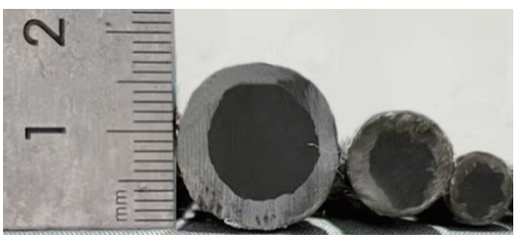


图1　B/CFRP筋剖面

Fig.1　The section views of B/CFRP bars

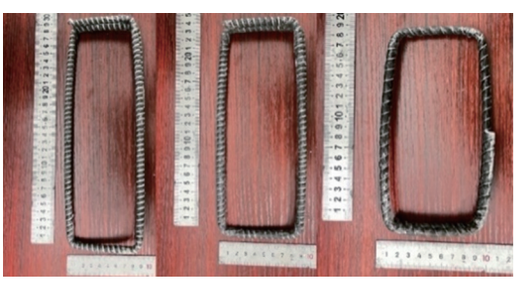


图2　CFRP筋

Fig.2　The views of CFRP bars

表1　FRP筋力学性能

Tab.1　Mechanical properties of FRP bars

筋材种类	d/mm	E_f/GPa	f_f/MPa	ε_{fu}
CFRP	8	83.48	952.2	0.011
B/CFRP	8	136.52	1 927.3	0.014
	10	123.62	2 189.2	0.018
	16	102.64	2 016.4	0.020

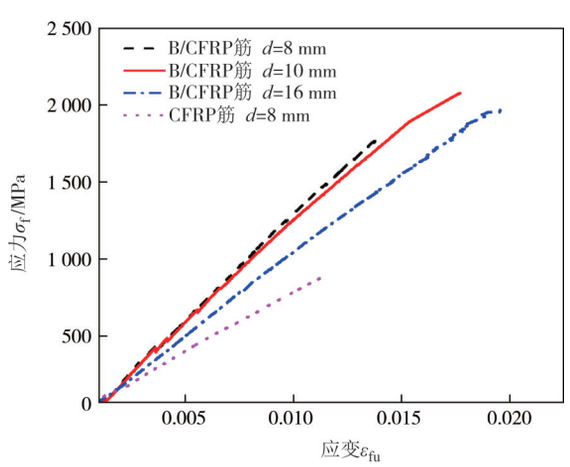


图3　FRP筋应力-应变曲线

Fig. 3　The stress-strain curves of FRP bars

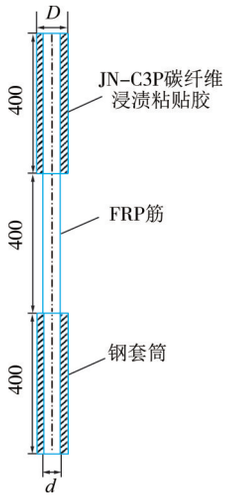


图4　拉伸试样(单位:mm)

Fig.4　The test specimens(unit:mm)



图5　B/CFRP筋破坏形态

Fig.5　B/CFRP bars damage patterns

1.1.2　SSRPC

SSRPC的原材料中,胶凝材料采用P.O 42.5级普通硅酸盐水泥、SiO_2含量97%以上的硅灰及Ⅱ级粉煤灰;骨料为山东青岛原状海砂;外加剂采用减水率为22%的聚羧酸型高效减水剂及活性含量99%的有机硅消泡剂;人工海水根据ASTM D1141—98(2013)[19]配制,主要化学成分见表2.

SSRPC的制备过程如下:先将水泥、硅灰、粉煤灰和海砂倒入搅拌机低速干拌3 min;随后将提前配置好的人工海水、减水剂及消泡剂低速搅拌3 min;

表2　人工海水化学成分(质量浓度)

Tab.2　Chemical composition of artificial seawater

(mass concentration)　　**g·L^{-1}**

NaCl	$MgCl_2$	Na_2SO_4	$CaCl_2$	KCl	$NaHCO_3$
24.53	5.2	4.09	1.16	0.695	0.201

最后高速搅拌2 min.参照文献[20]基于正交设计提出的SSRPC配合比,对SSRPC进行适配,得到本试验SSRPC的最优配合比为:水泥736.5 kg/m³、人工海水168 kg/m³、硅灰210 kg/m³、粉煤灰105 kg/m³、海砂946.6 kg/m³、消泡剂8.41 kg/m³、减水剂21.03 kg/m³.同时为避免因钢纤维锈蚀或PE纤维老化带来的混凝土耐久性降低的风险[21],本试验中未添加任何纤维.试验时由于缺乏高温养护设备,仅采用了常温养护方式,直接导致本试验中SSRPC的抗压强度低于该配合比制备的SSRPC预期值120 MPa[20].

SSRPC的力学性能见表3,其中f_{cu}是28 d立方体抗压强度(150 mm×150 mm×150 mm),f_c是28 d轴心抗压强度(150 mm×150 mm×300 mm),E_c是静力受压弹性模量(150 mm×150 mm×300 mm),f_t是28 d轴心抗拉强度,f_c'是28 d圆柱体抗压强度(ϕ150 mm×300 mm),ε_{cu}是SSRPC极限压应变.除了f_c'是根据ASTM C39/C39M-2018[22]标准测试外,其他的材料参数均采用《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[23]测试.

表3 SSRPC力学性能

Tab.3 Mechanical properties of SSRPC

f_{cu}/MPa	f_c/MPa	E_c/GPa	f_t/MPa	f_c'/MPa	ε_{cu}
107.33	78.08	43.40	4.50	84.32	0.002 5

1.2 试件设计

本试验以配筋率及梁截面高度为研究变量,根据《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020)[24]在预期材料强度指标的基础上设计了5根试验梁,保护层厚度取40 mm,由于CFRP箍筋实际宽度为80 mm(图2),较设计宽度多出10 mm,故试验梁宽度方向实际保护层厚度为35 mm.在试验梁的受压区内均配置2根直径为8 mm CFRP筋,箍筋均为直径为8 mm CFRP筋.试验梁的几何尺寸及配筋细节见图6.试验梁编号由两部分构成,其中第一个数值表示受拉区B/CFRP筋直径;第二个数值表示受拉区B/CFRP筋数量;第三个数值表示梁截面高度.如:"8-3-300"表示受拉区B/CFRP筋直径d为8 mm,数量为3根,梁截面高度h为300 mm.

1.3 试验装置

本试验采用四点弯曲加载方式,试验梁的剪跨段长度a为700 mm,纯弯段长度为600 mm.在试验梁跨中安装RSC-100100长型手动液压千斤顶施加荷载,并在千斤顶上安装压力传感器.为保证千斤顶施加荷载位于试验梁中心,在千斤顶下部增设球铰.在试验梁的跨中、两加载点及两支座处共布置5个位移计采集梁的挠度,为防止位移计在加载过程中发生位置偏移,保障读数准确,应在试验梁对应位置处粘贴亚克力板对位移计进行标定;在试验梁顶面跨中位置处沿试验梁宽度方向均匀粘贴2个应变片;在每根受拉区FRP筋跨中及加载点对应位置粘贴1个应变片,加载装置布置图见图7.

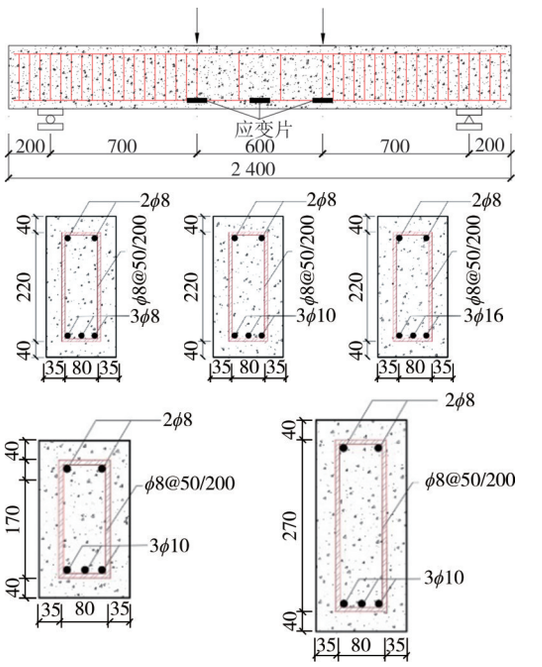


图6 试验梁几何尺寸和配筋细节(单位:mm)

Fig. 6 The geometry and reinforcement details of test beams (unit: mm)

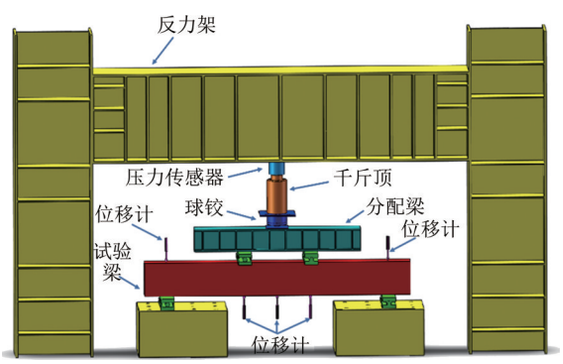


图7 加载装置

Fig. 7 The loading device

2 试验结果及分析

试验结果如表4所示,其中ρ为配筋率;P_{cr}、P_u分

别为试验梁在开裂时及破坏时对应的荷载值;M_{cr}、M_u分别为试验梁在开裂时及破坏时对应的弯矩值;D_u为试验梁破坏时的跨中挠度值;B_{cr}及B_s分别为试验梁开裂时及达到正常使用极限状态时(即试验梁的跨中挠度值达到正常使用极限状态下允许的最大挠度l_0/200=10 mm[25])的抗弯刚度值.

表 4　B/CFRP-SSRPC 梁四点弯曲试验结果

Tab.4　The results of B/CFRP-SSRPC beams four-point bending tests

试验梁编号	ρ/%	P_{cr}/kN	M_{cr}/(kN·m)	P_u/kN	M_u/(kN·m)	D_u/mm	B_{cr}/(kN·m^2)	B_s/(kN·m^2)	破坏模式
8-3-300	0.39	16	5.670	212	74.200	38.0	1 679.0	980.6	受拉破坏
10-3-300	0.61	15	5.250	242	84.700	35.8	1 630.0	1 025.0	受压破坏
16-3-300	1.58	20	7.000	340	119.000	27.0	1 669.0	1 554.0	剪压破坏
10-3-250	0.76	10	3.605	165	57.750	34.3	913.5	888.8	剪压破坏
10-3-350	0.51	25	8.610	335	117.250	34.5	2 237.0	1 789.0	受压破坏

注:$\rho=A_f/(bh_0)$,其中A_f为所有受拉FRP筋横截面面积总和,mm^2;b、h_0分别为梁截面宽度及有效高度,mm.

2.1　荷载-挠度曲线

图 8 为 B/CFRP-SSRPC 梁的荷载-跨中挠度曲线.所有试验梁的荷载-跨中挠度曲线均为双线性曲线,在第一阶段,荷载线性增加,没有裂纹发展,当荷载增大到开裂荷载时,梁底出现裂缝,使梁的抗弯刚度降低,曲线出现转折点;在第二阶段,随着荷载的增加,裂缝宽度增加,裂缝向上扩展,在一定距离处出现新的裂缝,受拉区纵筋应变显著增加,当受拉区纵筋达到极限拉应变或受压区混凝土压碎时,试验梁破坏.由于所有梁均发生脆性破坏,为保证仪器安全,在梁完全破坏的瞬间便停止采集数据,因此所有曲线均无下降段.

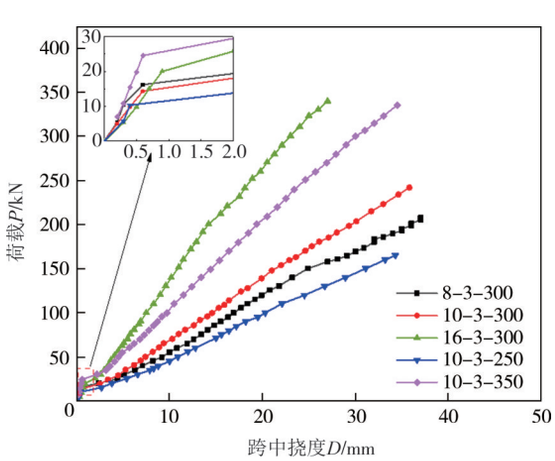


图 8　荷载-跨中挠度曲线

Fig. 8　The load-midspan deflection curves

从图 8 及表 4 可知,在h相同的情况下,随ρ增大,试验梁的B_s及M_u均增大,增幅分别为 5%、52%及 14%、40%;B_{cr}及M_{cr}的数值基本稳定在 1 650 kN·m^{2}及 5 kN·m 左右,并无明显增大趋势.在配筋面积相同的情况下,当梁截面高度从 250 mm 增大至 350 mm 时,B_{cr}、M_{cr}、B_s及M_u分别增大 145%、139%、101%及 103%.

另外,对比还发现B_{cr}及M_{cr}的增幅(均值 142%),大于B_s及M_u的增幅(均值 102%),说明增大h_0对试验梁开裂前抗弯性能的提升更明显,这是因为试验梁开裂后 SSRPC 便退出工作,受拉区拉应力的承载主体由 SSRPC 转变为受拉区 FRP 筋,B_s及M_u更多受ρ的影响.

2.2　破坏过程与裂缝发展过程

2.2.1　破坏模式

所有试验梁发生脆性破坏,达到完全破坏的瞬间均发出巨大爆破声.根据试验梁在 FRP 筋及 SSRPC 上粘贴的应变片数值,将其分为以下 3 种破坏模式:1)纯弯段受拉 FRP 筋达到极限拉应变,受压区混凝土未达到极限压应变,发生受拉破坏;2)纯弯段受压区边缘混凝土达到极限压应变,但受拉 FRP 筋未达到极限拉应变,发生受压破坏;3)剪跨段受拉 FRP 筋达到极限拉应变,受压区边缘混凝土达到极限压应变,且箍筋沿梁高度方向粘贴的应变片失效,发生剪压破坏.

在进行理论计算时,美国规范 ACI 440.1R-15[26]以平衡配筋率ρ_{fb}为界限,中国规范 GB 50608—2020[24]以 1.5ρ_{fb}为界限,直接将所有梁的计算模型分为受拉破坏和受压破坏,并无传统钢筋混凝土梁中的平衡破坏.试验梁ρ与ρ_{fb}的对比结果见表 5,中国及美国规范关于ρ_{fb}的计算公式分别如式(1)、式(2)所示.

$$\rho_{fb}=\frac{\alpha_1 f_c}{f_f}\cdot\frac{\beta_1}{1+f_f/(E_f\varepsilon_{cu})} \tag{1}$$

$$\rho_{fb}=\frac{0.85\beta_1 f_c' E_f \varepsilon_{cu}}{f_f(E_f\varepsilon_{cu}+f_f)} \tag{2}$$

式中:α_1为受压区混凝土的应力图形等效系数,取0.9;β_1为混凝土受压区等效矩形高度系数,中国及美国规范分别取0.7、0.65.

由表5可知,试验梁的破坏模式与$\rho/1.5\rho_{fb}$(GB 50608—2020[24])或ρ/ρ_{fb}(ACI 440.1R-15[26])密切相关.随着ρ增大,破坏模式逐渐由受拉破坏变为受压破坏,最终变为剪压破坏.这是因为当ρ过大时,跨中挠度及裂缝宽度的发展将受到限制,剪跨区斜裂缝将迅速发展为主裂缝,SSRPC被斜裂缝贯穿割裂,削弱了其抗剪能力.

表5 配筋率对破坏模式的影响

Tab.5 The effect of reinforcement ratio on the failure modes

试件编号	破坏模式	$\rho/1.5\rho_{fb}$ (GB 50608—2020[24])	ρ/ρ_{fb}/ (ACI 440.1R-15[26])
8-3-300	受拉破坏	0.79	1.07
10-3-300	受压	1.69	2.32
10-3-350	破坏	1.41	1.94
16-3-300	剪压	4.40	6.06
10-3-250	破坏	2.10	3.01

2.2.2 裂缝发展过程

如图9所示,受拉、受压及剪压破坏模式梁的前期裂缝发展过程相似,首先均在跨中及加载点处出现垂直裂缝,之后随荷载增加,均在加载点及剪跨区对称出现斜裂缝向加载点发展,此后3种梁的破坏过程出现差异.

如图9(a)所示,受拉破坏梁剪跨区的斜裂缝出现后,随荷载增加,其逐渐在受拉区均出现明显的树状发展,在受压区朝向加载点发展.当加载至32%M_u时,加载点下均出现由斜裂缝转向形成的平行裂纹并向跨中延伸.当加载至80%M_u时,受拉区树状裂缝仅汇聚呈网状,此时受拉区FRP筋已达到极限拉应变.此后继续加载至89%M_u时,受拉破坏梁的加载点下受压区混凝土沿平行裂纹隆起碎裂.最后加载至梁完全破坏的瞬间,受拉破坏梁受压区混凝土明显碎裂,受拉区FRP筋拉断.

如图9(b)、9(e)所示,受压破坏梁一直持续到70%M_u~75%M_u才在加载点下出现平行裂纹,此后继续加载至70%M_u~99%M_u,加载点下受压区混凝土均沿平行裂纹隆起碎裂;当加载至完全破坏时,跨中受压区混凝土压碎崩落,压碎区域高度约为梁截面高度的1/3.

如图9(c)、9(d)所示,剪压破坏梁一直持续到70%M_u才在加载点下出现平行裂纹,此后继续加载至85%M_u~95%M_u,加载点下受压区混凝土均沿平行裂纹隆起碎裂;此后加载点下斜裂缝宽度迅速扩展,剪跨区及支座附近斜裂缝在加载点处汇聚,破坏后观察到剪跨区混凝土被斜裂缝切割为多个平行柱状体,受拉区及受压区主筋均破坏,箍筋在梁截面高度约1/2处断裂.



(a)8-3-300



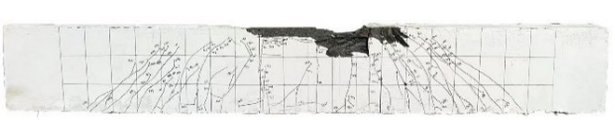
(b)10-3-300



(c)16-3-300



(d)10-3-250



(e)10-3-350

图9 B/CFRP-SSRPC梁破坏模式

Fig. 9 The failure modes of B/CFRP-SSRPC beams

2.3 荷载-应变曲线

2.3.1 受拉区B/CFRP筋的荷载-应变曲线

如图10所示,受拉区B/CFRP筋的荷载-应变曲线发展趋势与B/CFRP-SSRPC梁荷载-跨中挠度曲线(图8)相似,可分为两阶段:开裂前应变缓慢增长,开裂后曲线出现转折点,应变快速增长,且不同于钢筋并无屈服阶段.在底部受拉区混凝土开裂前,由于SSRPC承受较大的拉应力,受拉区B/CFRP筋的应变值相差不大且均小于500 με;开裂后,拉应力全由受拉区B/CFRP筋承担,其应变随荷载的增加而急剧增

加,荷载-应变曲线因配筋率不同而产生差异.随试验梁配筋率的增大,受拉区 B/CFRP 筋开裂后应变的增速放缓,其荷载-应变曲线的斜率也越大.

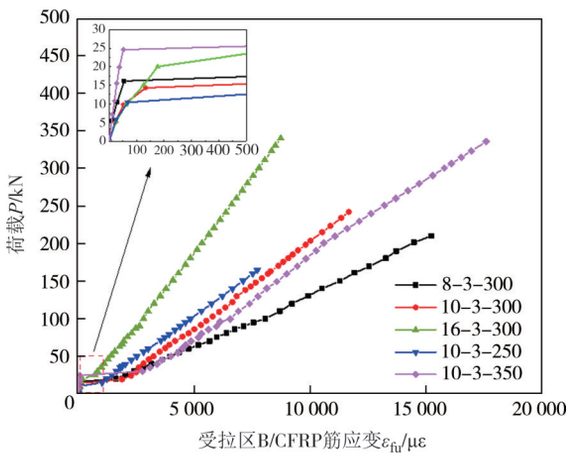


图 10　受拉区 B/CFRP 筋荷载-应变曲线

Fig.10　The load-strain curves of B/CFRP bars in tensile region

2.3.2　跨中受压区 SSRPC 荷载-应变曲线

图 11 为试验梁跨中受压区混凝土的荷载-应变曲线,图 11 中应变值为粘贴在试验梁跨中顶面的两个混凝土应变片测得数值的平均值.从图 11 中可以看出,试验梁在开裂前其跨中混凝土的压应变呈线性增加;开裂后,受压区混凝土应变的增速变大,且依旧呈线性增加直至极限荷载.

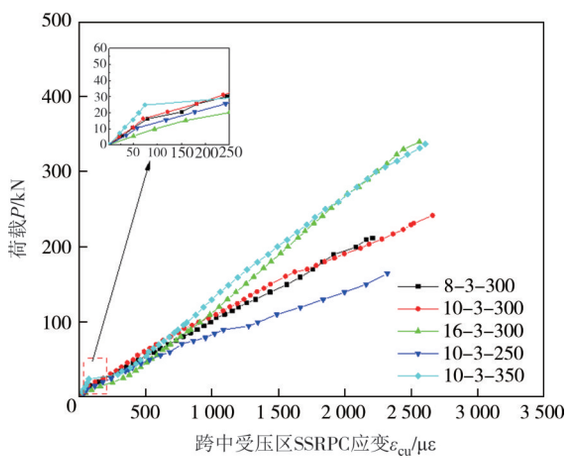


图 11　跨中受压区 SSRPC 荷载-应变曲线

Fig.11　The load-strain curves of SSRPC in mid-span compress region

此外,受压破坏梁 10-3-300 及 10-3-350 的受压区混凝土最大压应变分别为 2 660 με 及 2 624 με,均达到 SSRPC 的极限压应变.发生剪压破坏的梁 16-3-300 及 10-3-250 的受压区混凝土最大压应变分别为 2 561.7 με 及 2 320.4 με,其中 16-3-300[图 9(c)]在加载点处的受压区混凝土部分碎裂剥落,达到 SSRPC 的极限压应变.10-3-250[图 9(d)]的主要破坏区域在剪跨区,跨中受压区混凝土完好无破损,故未达到 SSRPC 极限压应变.

3　承载力计算

3.1　抗弯承载力计算

《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020)[24] 与美国规范 ACI 440.1R-15[26] 在计算受弯构件正截面承载力时均不计受压区纵筋与受拉区混凝土的影响,分别以 $1.5\rho_{fb}$ 及 ρ_{fb} 为分界点,提出受拉破坏和受压破坏两种计算模型,中国规范关于极限弯矩的计算公式见式(3)~式(5):

$$M_u \leqslant f_{fe}A_f\left(h_0-\frac{x}{2}\right) \tag{3}$$

$$x=\begin{cases}\left[\dfrac{0.14}{1+400(f_{fe}/Ef)}+\dfrac{\rho f_{fe}}{f_c}\right]h_0, \rho<1.5\rho_{fb}\\ \dfrac{\rho f_{fe}}{\alpha_1 f_c}h_0, \rho\geqslant 1.5\rho_{fb}\end{cases} \tag{4}$$

$$f_{fe}=\begin{cases}f_f, \rho<1.5\rho_{fb}\\ \left(\dfrac{\rho}{\rho_{fb}}\right)^{-0.55}f_f, \rho\geqslant 1.5\rho_{fb}\end{cases} \tag{5}$$

美国规范 ACI 440.1R-15 关于极限弯矩的计算公式见式(6)~式(8):

$$M_u=f_{fe}A_f\left(h_0-\frac{x}{2}\right) \tag{6}$$

$$x=\begin{cases}\dfrac{f_{fe}A_f}{0.85f_c'b}, \rho\geqslant\rho_{fb}\\ \beta_1\left(\dfrac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu}+\varepsilon_{fu}}\right)h_0, \rho<\rho_{fb}\end{cases} \tag{7}$$

$$f_{fe}=\begin{cases}E_f\varepsilon_{cu}\dfrac{\beta_1 h_0-x}{x}, \rho\geqslant\rho_{fb}\\ f_f, \rho<\rho_{fb}\end{cases} \tag{8}$$

式中:x 为混凝土等效受压区高度,mm;f_{fe} 为受拉区 B/CFRP 筋有效抗拉强度,MPa.

表 6 将本文中弯曲破坏梁 8-3-300、10-3-300、10-3-350 的实测抗弯承载力 P_u 与通过上述规范计算所得抗弯承载力 P_{upre} 进行了比较.规范 GB 50608—2020[24] 与 ACI 440.1R-15[26] 计算所得 P_{upre} 与实测 P_u 比值的均值分别为 0.89、0.91,其中受拉破坏梁 8-3-300 的 P_{upre}/P_u 大于受压破坏梁的 P_{upre}/P_u,表明上述 2 种规范都低估了 B/CFRP-SSRPC 梁的抗弯承载力,

且对受拉破坏梁的计算误差更小.

表6 中国、美国规范对抗弯承载力的计算结果

Tab.6 Calculation results of flexural capacity according to Chinese and the United States design codes

试件编号	破坏模式	P_u/kN	P_{upre}/P_u	
			GB 50608—2020[24]	ACI 440.1R-15[26]
8-3-300	受拉破坏	212	0.91	0.94
10-3-300	受压破坏	242	0.90	0.92
10-3-350	受压破坏	335	0.87	0.89
平均值	—	—	0.89	0.91

造成上述误差的原因是中国、美国规范均提出受拉区纵筋有效抗拉强度f_{fe}这一概念,针对受拉破坏梁f_{fe}无需折减,但是针对受压破坏梁分别给出了计算公式.《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020)[24]关于f_{fe}的计算公式[式(5)]属于经验公式,其指数-0.55是由若干FRP筋普通混凝土梁的试验结果拟合得出的,故不再适用于FRP-SSRPC梁.美国规范ACI 440.1R-15[26]关于f_{fe}的计算公式[式(8)]与混凝土极限压应变ε_{cu}密切相关,而SSRPC的ε_{cu}(0.002 5)小于普通混凝土的ε_{cu}(0.003 3),这是计算产生误差的直接原因.

3.2 抗剪承载力计算

《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020)[24]与美国规范ACI 440.1R-15[26]在计算抗剪承载力时关于FRP筋提供的剪切力V_f计算公式一致,关于混凝土提供的剪切力V_c计算公式存在差异,V_c分别与混凝土的力学性能参数f_t、f_c'呈1次幂与0.5次幂线性关系,中国规范及美国规范关于抗剪承载力的计算公式见式(9)~式(12):

$$V_u = V_c + V_f \tag{9}$$

$$V_c = \begin{cases} 0.86bkh_0 f_t, \text{中国规范} \\ \dfrac{2}{5}\sqrt{f_c'}\,bkh_0, \text{美国规范} \end{cases} \tag{10}$$

$$V_f = A_{fv} f_{fv} h_0/s \tag{11}$$

$$f_{fv} = \min\left\{0.004E_{fv}, (0.3 + \frac{0.05r_{fv}}{d_{fv}})f_{uv}\right\} \tag{12}$$

式中:k为截面中和轴到受压区边缘的距离与有效高度之比,$k = \sqrt{2\rho\alpha + (\rho\alpha)^2} - \rho\alpha$,$\alpha$为B/CFRP筋的弹性模量$E_f$与混凝土弹性模量$E_c$的比值;$A_{fv}$为截面内配置箍筋各肢总面积,取100.48 mm^2;f_{fv}为箍筋的计算抗拉强度值,MPa;E_{fv}为箍筋的弹性模量,取83.48 MPa;r_{fv}/d_{fv}为箍筋的弯曲半径与直径的比值,取3.5;f_{uv}为箍筋的极限抗拉强度,取952.2 MPa;s为加密区箍筋间距,取50 mm.

表7将本文中剪压破坏梁16-3-300、10-3-250的实测极限荷载V_u与通过上述规范计算所得极限荷载V_{upre}进行了比较.从表7可以看出,规范GB 50608—2020[24]与ACI 440.1R-15[26]均低估了B/CFRP-SSRPC梁的抗剪承载力,且V_{upre}/V_u随剪跨比减小而减小.这是因为剪跨比作为影响梁抗剪承载力的重要因素,并未在上述2种规范的抗剪承载力计算公式中体现出来.

表7 中国、美国规范对抗剪承载力的计算结果

Tab.7 Calculation results of shear capacity according to Chinese and the United States design codes

试件编号	剪跨比λ	V_u/kN	V_{upre}/V_u	
			GB 50608—2020[24]	ACI 440.1R-15[26]
10-3-250	3.46	165.0	0.99	0.93
16-3-300	2.80	340.0	0.79	0.72
平均值	—	—	0.89	0.83

3.3 梁16-3-300、10-3-250综合分析

根据中国规范GB 50608—2020[24]与美国规范ACI 440.1R-15[26]可计算得到本试验中剪压破坏梁16-3-300、10-3-250的P_{upre},再根据表6中P_{upre}/P_u≈0.89(GB 50608—2020[24])或P_{upre}/P_u≈0.91(ACI 440.1R-15[26]),可反算得到剪压破坏梁16-3-300、10-3-250的估算抗弯承载力(P_{ue}).由表8可知,V_u与P_{ue}间的差值在5%以内,说明梁16-3-300、10-3-250的估算抗弯承载力与实际抗剪承载力基本相当,故在前文第2节中依旧将上述2根剪压破坏梁的实测极限荷载值作为抗弯承载力进行分析.

设计为弯曲破坏的梁16-3-300、10-3-250之所以提前发生剪切破坏,是因为试验中箍筋(直径8 mm CFRP筋)的实际抗拉强度标准值及弹性模量分别为952.2 MPa、83.48 GPa,远小于初始设计的抗拉强度标准值1 800 MPa、设计的弹性模量140 GPa[24],导致试验梁实际抗剪承载力小于设计抗剪承载力,恰好实际抗剪承载力(V_u)与估算抗弯承载力(P_{ue})基本相当,此时发生弯曲破坏或剪切破坏均有可能.由于加载至95%M_u时箍筋断裂,剪跨区斜裂缝失去约束,裂缝宽度迅速开展,故最终呈现剪切破坏.另外加载至

表8　梁16-3-300、10-3-250的抗弯承载力计算

Tab.8　Calculation of flexural capacity of the beams 16-3-300 and 10-3-250

试件编号	V_u/kN	P_{upre}/kN		P_{ue}/kN	
		GB 50608—2020[24]	ACI 440.1R-15[26]	GB 50608—2020[24]	ACI 440.1R-15[26]
10-3-250	165.0	147	156	165	171
16-3-300	340.0	303	316	341	347

极限荷载时,加载点附近SSRPC在集中荷载作用下产生压应力集中场,使纯弯区段产生较大的剪力,这也导致剪切破坏发生.

4　结 论

1)随着配筋率增大,B/CFRP-SSRPC梁的极限弯矩与正常使用极限状态下的抗弯刚度均增大,开裂弯矩与开裂刚度基本稳定不变;随着梁截面高度增大,B/CFRP-SSRPC梁的开裂弯矩、极限弯矩、开裂刚度及正常使用极限状态下抗弯刚度均增大,且开裂弯矩及开裂刚度的增幅更大,说明增大梁截面高度对试验梁开裂前抗弯性能的提升更明显.

2)B/CFRP-SSRPC梁均为脆性破坏,且破坏时均伴随剧烈爆炸声,破坏模式与配筋率密切相关.随着配筋率增大,破坏模式逐渐由受拉破坏变为受压破坏,最终变为剪压破坏.

3)现行FRP筋普通混凝土结构设计规范均低估了B/CFRP-SSRPC梁的抗弯承载力及抗剪承载力,针对抗弯承载力的计算误差因试验梁破坏模式的不同而不同;针对抗剪承载力的计算误差因试验梁剪跨比的不同而不同.

4)本文主要研究配筋率及梁截面高度对B/CFRP-SSRPC梁抗弯性能的影响.然而,不同种类FRP筋具有不同的抗拉强度和弹性模量,这也会影响SSRPC梁的抗弯性能.建议在后续研究中考虑更多试验因素,如:纵筋种类、混凝土强度等,讨论其他因素对不同种类FRP-SSRPC梁抗弯性能的影响.

参考文献

[1] XIAO J Z, QIANG C B, NANNI A, et al. Use of sea-sand and seawater in concrete construction: current status and future opportunities[J]. Construction and Building Materials, 2017, 155:1101-1111.

[2] 朱德举, 周琳林, 耿健智, 等. 不同地域海砂取代率对混凝土力学性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11):237-244.
ZHU D J, ZHOU L L, GENG J Z, et al. Effect of replacement rate of sea sand from different regions on mechanical properties of concrete[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(11):237-244.(in Chinese)

[3] 洪乃丰. 海砂腐蚀与"海砂屋"危害[J]. 工业建筑, 2004, 34(11):65-67.
HONG N F. Sea sand corrosion and harm of "sea sand house"[J]. Industrial Construction, 2004, 34(11):65-67.(in Chinese)

[4] MANALO A C, MENDIS P, BAI Y, et al. Fiber-reinforced polymer bars for concrete structures: state-of-the-practice in Australia[J]. Journal of Composites for Construction, 2021, 25(1):05020007.

[5] ROBERT M, BENMOKRANE B. Combined effects of saline solution and moist concrete on long-term durability of GFRP reinforcing bars[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38:274-284.

[6] WANG Z K, ZHAO X L, XIAN G J, et al. Long-term durability of basalt- and glass-fibre reinforced polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment[J]. Construction and Building Materials, 2017, 139:467-489.

[7] ZHU Y, WU G, DONG Z Q, et al. Experimental study on the durability of BFRP bars embedded in concrete[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2014, 30(3):323-329.

[8] 活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.(in Chinese)

[9] 余自若,高康,安明喆,等. 活性粉末混凝土微观结构及其对强度与抗氯离子渗透性能的影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(1):31-37.
YU Z R, GAO K, AN M Z, et al. Influenceof micro-structure on the strength and resistance to chloride ion permeability of reactive powder concrete[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2013, 45(1):31-37.(in Chinese)

[10] 彭艳周. 钢渣粉活性粉末混凝土组成、结构与性能的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009.
PENG Y Z. Study on composition, structure and properties of reactive powder concrete containing steel slag powder[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.(in Chinese)

[11] 何峰,黄政宇,易伟建. 活性粉末混凝土的耐酸性[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(2):44-49.
HE F, HUANG Z Y, YI W J. Acid-resistance performance of reactive powder concrete[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(2):44-49.(in Chinese)

[12] 寇佳亮,刘云昊,张浩博. 活性粉末混凝土力学性能及耐久性

能试验研究[J]. 建筑结构,2018,48(2):48-54.
KOU J L, LIU Y H, ZHANG H B. Experimental study on mechanical property and durability of reactive powder concrete [J]. Building Structure,2018,48(2):48-54.(in Chinese)

[13] ADAM M A, SAID M, MAHMOUD A A, et al. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars [J]. Construction and Building Materials,2015,84:354-366.

[14] WANG Z H, XIE J H, LI J L, et al. Flexural behaviour of seawater-sea sand concrete beams reinforced with GFRP bars: effects of the reinforcement ratio, stirrup ratio, shear span ratio and prestress level[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 54: 104566.

[15] 廖国维,卢俊坤,李丽娟. 玄武岩纤维筋海砂混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 广东土木与建筑,2014,21(12):16-19.
LIAO G W, LU J K, LI L J. Flexural properties of sea sand concrete with basalt fiber reinforced polymer (BFRP) rebar[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering,2014,21(12):16-19.(in Chinese)

[16] HUA Y T, YIN S P, FENG L L. Bearing behavior and serviceability evaluation of seawater sea-sand concrete beams reinforced with BFRP bars [J]. Construction and Building Materials, 2020, 243: 118294.

[17] GUO X K, XIONG C S, JIN Z Q, et al. Deterioration of basalt/carbon-based hybrid-FRP bars in a simulated pore solution of seawater sea-sand concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2022,54:104634.

[18] 纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法:GB/T 30022—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
Test method for basic mechanical properties of fiber reinforced polymer bar:GB/T 30022—2013[S]. Beijing:Standards Press of China,2014.(in Chinese)

[19] Standard practice for the preparation of substitute ocean water: ASTM D1141-98 (2013) [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International, 2013.

[20] 朱德举, 李龙飞, 周琳林, 等. 超高性能海水海砂混凝土的组成设计与纤维增强增韧[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023,50(1):128-136.
ZHU D J, LI L F, ZHOU L L, et al. Composition design of ultra-high performance seawater sea-sand concrete and fiber strengthening and toughening[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2023,50(1):128-136.(in Chinese)

[21] LI C S, ZHAN M S, HUANG X C, et al. Degradation behavior of ultra-high molecular weight polyethylene fibers under artificial accelerated weathering [J]. Polymer Testing, 2012, 31 (7): 938-943.

[22] Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens: ASTM C39/C39M-2018 [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International, 2018.

[23] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.(in Chinese)

[24] 纤维增强复合材料工程应用技术标准:GB 50608—2020 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.
Technical standard for fiber reinforced polymer (FRP) in construction: GB 50608—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.(in Chinese)

[25] 混凝土结构设计标准:GB/T 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2024.
Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2024.(in Chinese)

[26] Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars: ACI 440.1R-15 [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International, 2015.