



引用格式:刘豫安,张海滨,孙天舒,等. BFRP-钢复合筋珊瑚海水海砂混凝土梁受剪性能试验与承载力计算[J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(4): 373-386.

Citation: Liu Yu'an, Zhang Haibin, Sun Tianshu, et al. Experimental study on shear behavior and shear capacity calculation of coral seawater sea-sand concrete beams reinforced with BFRP-steel composite bars[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(4): 373-386.



BFRP-钢复合筋珊瑚海水海砂混凝土梁 受剪性能试验与承载力计算

刘豫安^{1,2}, 张海滨^{1,2}✉, 孙天舒^{1,2}, 赵菲^{1,2}, 周智^{1,2}✉

(1. 热带海洋工程材料及评价全国重点实验室, 海口 570228;

2. 海南大学 土木建筑工程学院, 海口 570228)

摘要: 采用远海岛礁属地化材料可以解决远海岛礁工程建设中存在的建筑材料短缺、耐盐蚀能力差、运输成本高等问题, 但普通钢筋混凝土构件设计方法适用性未知。本文分别考虑有无腹筋、剪跨比、纵筋配筋率和箍筋间距等参数, 设计并制作了9根试验梁, 开展了配有玄武岩纤维增强复合材料-钢复合纵筋与纤维增强复合材料箍筋的珊瑚海水海砂混凝土梁受剪性能研究, 建立了考虑广义纵筋销栓作用的此类有无腹筋梁的受剪承载力计算公式。研究结果表明: 配置箍筋可显著提升梁的受剪承载力; 在不同剪跨比条件下, 此类梁的破坏形态可分为斜压破坏、剪压破坏和斜拉破坏; 受剪承载力随剪跨比减小而增大, 随纵筋配筋率增大而提高, 随箍筋间距增大而降低。通过与现有规范及相关研究结果对比, 证实了该计算方法与试验结果吻合较好, 可为热带岛礁工程建设中基于属地化材料的珊瑚海水海砂混凝土梁的结构设计提供参考。

关键词: 热带岛礁属地化材料; 珊瑚海水海砂混凝土; BFRP-钢复合筋; 梁受剪性能; 受剪承载力

中图分类号: TU377.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-1729(2026)04-0373-14

DOI: 10.65658/j.hndk.2026012701

CSTR: 32403.14.hndk.2026012701

Experimental study on shear behavior and shear capacity calculation of coral seawater sea-sand concrete beams reinforced with BFRP-steel composite bars

Liu Yu'an^{1,2}, Zhang Haibin^{1,2}✉, Sun Tianshu^{1,2}, Zhao Fei^{1,2}, Zhou Zhi^{1,2}✉

(1. State Key Laboratory of Tropic Ocean Engineering Materials and Materials Evaluation, Haikou 570228, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: The use of locally sourced materials from remote offshore island and reef regions can effectively address challenges in island engineering construction, such as shortages of conventional building materials, poor resistance to salt-induced corrosion, and high transportation costs. However, the applicability of conventional structural design methods to such materials remains uncertain. In this study, nine beam specimens were designed and fabricated considering parameters including the presence or absence of web reinforcement,

Received: 2026-01-31; **Revised:** 2026-02-16; **Accepted:** 2026-02-24.

✉ **Corresponding author(s):** Zhang Haibin, E-mail: zhanghb01@hainanu.edu.cn; Zhou Zhi, E-mail: zhizhou@hainanu.edu.cn.

shear span ratio, longitudinal reinforcement ratio, and stirrup spacing. Experimental investigations were conducted on the shear behavior of coral seawater sea-sand concrete (CSSC) beams reinforced with basalt fiber-reinforced polymer (BFRP)-steel composite longitudinal bars and BFRP stirrups. A shear capacity prediction model incorporating the generalized dowel action of longitudinal reinforcement was proposed for such beams, both with and without web reinforcement. The results indicate that providing stirrups significantly enhances the shear capacity of the beams. Depending on the shear span ratio, the failure modes can be classified as diagonal compression failure, shear-compression failure, or diagonal tension failure. The shear capacity increases with decreasing shear span ratio and increasing longitudinal reinforcement ratio, while it decreases with increasing stirrup spacing. Comparisons with existing design codes and relevant research results demonstrate that the proposed calculation method agrees well with the experimental data. These findings provide a useful reference for the structural design of CSSC beams using locally sourced materials in tropical island and reef engineering construction.

Keywords: tropical island and reef localization materials; coral seawater sea-sand concrete; BFRP-steel composite bars; shear behavior of beams; shear capacity

0 引言

混凝土是常用的建筑材料,淡水、河沙和粗骨料是其主要组成原料。然而,远离陆地的热带岛礁淡水与河砂等资源极度匮乏,且依赖外运显著增加建设成本,严重制约岛礁工程建设。在此背景下,海水海砂混凝土成为近年来岛礁工程中广受关注的研究对象。尽管海水和海砂资源储量丰富、取材便利,但混凝土结构掺入海水会显著加速钢筋的腐蚀,限制了其工程应用^[1]。随着具备优异耐腐蚀性能的纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)的发展与推广,“海水海砂混凝土+FRP筋”构件力学性能成为近年来的研究热点。由于FRP筋在破坏前表现出线弹性受力特征、不具备明显的屈服段,且弹性模量显著低于普通钢筋,使其难以像钢筋一样在受拉区充分发挥作用。根据增强纤维的类型不同,FRP筋可分为不同的种类^[2]。其中,玄武岩纤维(basalt-FRP, BFRP)筋具有力学性能适中、耐腐蚀性能优良、成本相对较低等优势。BFRP-钢复合筋将传统钢筋与纤维筋复合,既保留了传统钢筋的弹模高、延性好的特点,又继承了FRP筋的抗拉强度高、轻质、较好的耐腐蚀性等优点,且价格较为合理^[3-4],在工程领域中具有良好的应用前景。

斜截面受剪性能是梁结构安全设计中的关键控制指标之一。与受弯破坏相比,剪切破坏通常具有突发性强的特点,一旦发生将导致构件承载力迅速丧失,属于典型的脆性破坏形式。因此,合理评估梁构件的斜截面受剪承载力,对保障结构整体安全性具有重要工程意义。秦卫红等^[5]通过46根梁试验系统比较了钢筋、钢-连续纤维复合筋(steel-FRP composite bar, SFCB)与BFRP纵筋对普通混凝土梁受剪性能的影响,提出广义销栓作用系数并建立适用于复合筋梁的受剪承载力计算公式。周锐等^[6]通过试验系统揭示了剪跨比、养护环境和混凝土碱度对BFRP-海水海砂混凝土梁受剪性能的显著影响,并提出剪跨比修正参数以显著提升现有规范受剪承载力预测精度。Han等^[7]通过相关试验系统揭示了SFCB-GFRP混合配筋梁的受剪规律,基于加拿大规范,给出考虑销栓作用的修正模型以显著提升受剪承载力预测精度,并提出了GFRP-钢复合筋等刚度与等强度设计方法。但是,上述研究未采用或仅部分采用远海属地化材料(远海天然海砂和珊瑚骨料),而远海珊瑚骨料的强度较低、孔隙率较高,整体脆性普遍高于普通混凝土^[8],且弹性模量明显低于同样强度的普通混凝土^[9];采用的天然海砂由于含有有机物或易碎贝壳等杂质与河沙相比破坏时的应力水平低^[10]。由于珊瑚骨料、天然海砂等物理和力学性质的影响及复合筋材料的复杂受力行为,现有规范的受剪设计方法难以直接适用于远海岛礁属地化BFRP-钢复合筋珊瑚海水海砂混凝土(coral seawater sea-sand concrete, CSSC)梁的设计。亟待研究此类结构的受剪性能并提出相应的承载力

设计方法。

针对岛礁工程建设存在的传统材料来源受限、结构耐久性需求高等问题,本文开展了属地化材料远海天然海砂与珊瑚骨料制备海水海砂混凝土梁在配 BFRP-钢复合纵筋与 BFRP 箍筋下的受剪性能试验研究。分析了剪跨比、纵筋配筋率及配箍率等关键参数对斜截面受力机理与破坏模式的影响。在此基础上,考虑了广义销栓作用并修正了影响系数,提出了 CSSC 受剪承载力影响系数及 BFRP 箍筋受剪“有效贡献”系数。最后,建立了适用于热带岛礁 CSSC 梁的受剪承载力计算与设计公式,以为热带岛礁工程结构的受剪设计提供理论依据与设计参考。

1 试验概况

1.1 试验设计 根据连金龙等^[11]所提出的 BFRP-钢复合筋最大最小配筋率的计算公式,以及 GB 50608—2020《纤维增强复合材料工程应用技术标准》^[12]中有关箍筋设计的相关要求,并结合相关文献[13–15]中有关梁受剪试验研究试件的设计,确定了本文试验梁的几何尺寸与配筋方案。试验梁长 1.8 m,截面尺寸 150 mm×250 mm,混凝土保护层厚度为 25 mm,架立筋采用直径为 8 mm 的 BFRP 筋,为避免梁端区域出现局部压碎或应力集中从而干扰试验结果,在支座外两端布置间距 50 mm 直径为 8 mm 的 HRB400 钢箍加密对端部进行锚固,梁的配筋与截面尺寸如图 1 所示。试验梁设计参数包括有无腹筋、剪跨比、配箍率和纵筋配筋率,如表 1 所示。珊瑚粗骨料采用重质型珊瑚,骨料粒径范围在 5~20 mm;海水采用天然海水。珊瑚骨料与海砂均来自某天然海域,珊瑚骨料与天然海砂原材料及梁的制作流程如图 2 所示。试验梁编号 S-2-2Φ16-100,其中“S”代表有箍筋,无腹筋梁用“S₀”表示;第二位数字“2”代表剪跨比;第三位数字“2Φ16”代表配 2 根 16 mm 纵筋;第四位数字“100”代表箍筋间距,其余编号以此类推。

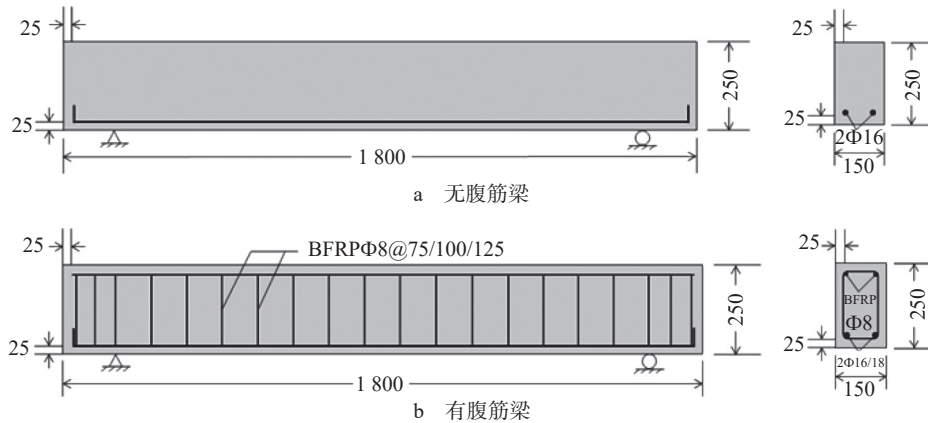


图 1 梁的配筋与截面尺寸图(单位:mm)

表 1 试验梁设计具体参数

变量	试验梁编号	剪跨比λ	底部纵筋	纵筋配筋率ρ/%	箍筋间距/mm	配箍率ρ _{sv} /%
有无腹筋	S ₀ -1	1	2Φ16	1.19	—	—
	S ₀ -2	2	2Φ16	1.19	—	—
	S ₀ -3	3	2Φ16	1.19	—	—
剪跨比	S-1-2Φ16-100	1	2Φ16	1.19	100	0.67
	S-2-2Φ16-100	2	2Φ16	1.19	100	0.67
	S-3-2Φ16-100	3	2Φ16	1.19	100	0.67
配箍率	S-2-2Φ16-75	2	2Φ16	1.19	75	0.89
	S-2-2Φ16-125	2	2Φ16	1.19	125	0.54
纵筋配筋率	S-2-2Φ18-100	2	2Φ18	1.51	100	0.67

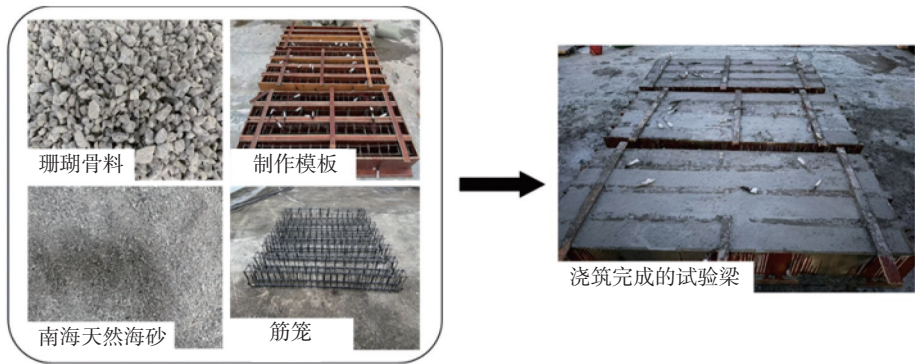


图2 梁的制作流程

CSSC 的设计强度等级为 C35,采用二次搅拌的方式拌制该混凝土,混凝土所用原料与配合比见表 2。为了测试该混凝土的基本力学性能,在浇筑时针对每种基本力学性能指标留样 3 个相应的混凝土试块,测得的各力学性能指标的平均值与标准差如表 3 所示。本文所用的筋材均来自智性纤维复合加固南通有限公司,其中 BFRP-钢复合筋外层为 BFRP 纤维,内芯为 HRB400 的钢筋;BFRP 箍筋采取搭接连接的方式,构造与表观形态如图 3 所示。本文所用筋材的基本力学性能参数如表 4 所示。

表 2 CSSC 配合比

单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

强度等级	水泥	粉煤灰	矿渣	海砂	珊瑚骨料	总水量	减水剂
C35	620	120	60	553	675	224	16

表 3 CSSC 基本力学性能参数

单位: MPa

强度等级	立方体抗压强度 f_{cu}	轴心抗压强度 f_c	轴心抗拉强度 f_t	弹性模量 E
C35	37.76 ± 3.43	31.34 ± 3.12	3.28 ± 0.51	$24\,500 \pm 2\,560$

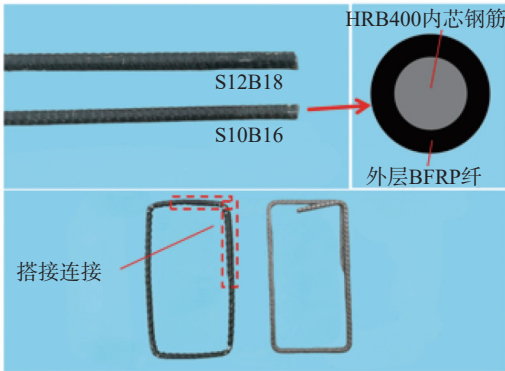


图3 试验所用 BFRP-钢复合筋与 BFRP/钢箍筋构造图

表 4 筋材基本力学性能参数

规格	内芯钢筋直径 d_{pi}/mm	直径 d/mm	弹性模量 E_1/GPa	屈服后模量 E_2/GPa	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa
S10B16	10	16	114.77	28.40	284.54	810.02
S12B18	12	18	108.96	27.89	275.67	740.26
BFRP	—	8	53.47	—	—	965.39
钢筋	—	8	203.40	—	610.24	749.22

1.2 加载与测试方案 试验采用四点集中力加载方式,通过深圳万测试验设备有限公司 PFT505A 混凝土构件压弯剪试验机上的分配钢梁传递竖向荷载。通过调节分配钢梁上的垫块间距调整剪跨比,加载试

验装置如图4所示。根据 GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》^[16] 规定, 本试验采用位移控制的加载方式进行分级加载, 在正式加载前, 首先对试验梁施加预加载以消除初始间隙与调整受力状态。预加载完成后, 以 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率进行加载, 直至试验梁在纯弯段受拉区出现首条裂缝。裂缝产生后, 将加载速率提高至 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 并持续施加载荷直至试验梁最终破坏。荷载数据通过试验机自身力传感器获取。加载时位移计的布置, 如图4a所示。应变片纵筋布置在跨中位置。本试验中应变片与位移计均采用东华测试 DH3816N 静态应力应变采集系统进行采集。

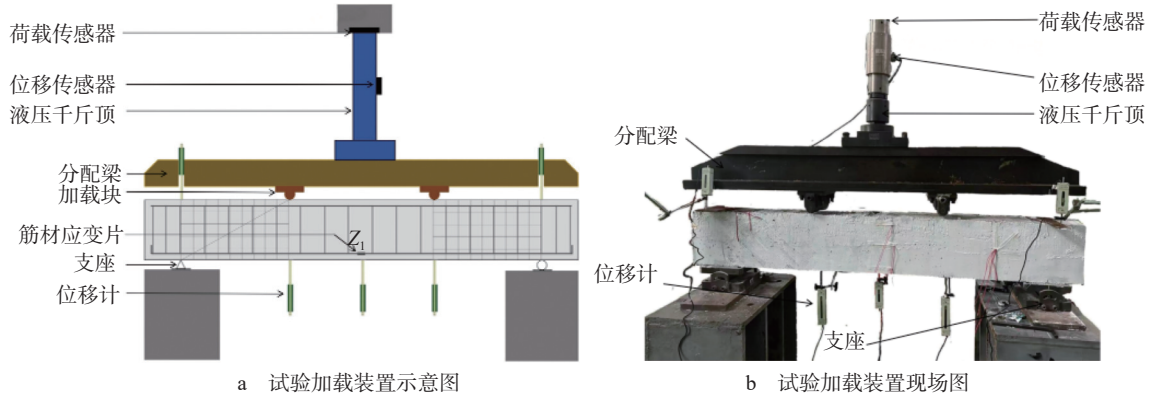


图4 试验加载装置图

2 试验结果与分析

2.1 斜截面破坏形态 各 CSSC 试验梁正截面与斜截面的开裂荷载值 P_{cr} 、破坏荷载 P_u 、斜截面受剪承载力试验值 V_{exp} 与破坏形态如表5所示。给出有代表性的 CSSC 试验梁破坏形态如图5所示, BFRP-钢复合筋 CSSC 梁的破坏形态可以分为3种: 当剪跨较小时($\lambda \leq 1$), 梁发生斜压破坏(如图5a所示), 破坏荷载较大, 破坏时混凝土被腹剪斜裂缝分割成若干斜向短柱而压坏, 承载力迅速丧失, 破坏过程较为突然; 当剪跨适中($1 < \lambda < 3$)时, 梁发生剪压破坏(如图5b所示), 出现一条明显的临界斜裂缝, 剪压区的混凝土被压溃, 使斜截面丧失承载力; 当剪跨较大($\lambda \geq 3$)时, 梁发生斜拉破坏(如图5c所示), 破坏荷载通常较低, 斜裂缝出现后承载力增长有限, 随后发生突然性破坏。

表5 试验梁加载情况与破坏模式

试验梁编号	正截面 P_{cr}/kN	斜截面 P_{cr}/kN	P_u/kN	V_{exp}/kN	破坏模式
S ₀ -1	30.98	59.35	157.59	78.80	斜压破坏
S ₀ -2	27.53	36.02	103.85	51.93	剪压破坏
S ₀ -3	20.12	49.80	60.45	30.23	斜拉破坏
S-1-2Φ16-100	41.80	91.80	287.34	143.67	斜压破坏
S-2-2Φ16-100	15.73	43.15	165.32	82.66	剪压破坏
S-3-2Φ16-100	19.50	53.98	97.07	48.54	斜拉破坏
S-2-2Φ16-75	21.74	48.48	188.75	94.38	剪压破坏
S-2-2Φ16-125	24.33	57.85	146.69	73.35	剪压破坏
S-2-2Φ18-100	34.32	45.73	171.29	85.65	剪压破坏

注: P_u 表示破坏时的最大荷载; V_{exp} 表示斜截面最大承载力, 为最大荷载的1/2; 正截面 P_{cr} 表示正截面开裂时的荷载; 斜截面 P_{cr} 表示斜截面开裂时的荷载。

2.2 荷载-挠度曲线 试验梁的荷载-跨中挠度曲线如图6所示。荷载-挠度曲线可结合裂缝演化划分为3个阶段: (1)未开裂阶段, 梁以整体弹性工作为主, 挠度随荷载近线性增长; (2)正截面开裂至斜裂缝出现阶段, 跨中弯曲裂缝发展导致刚度下降, 曲线斜率减小; (3)临界斜裂缝形成后阶段, 剪力传递机制由

以混凝土连续体传力为主的整体受力状态,逐步转变为由斜裂缝控制的离散传力体系。对无腹筋梁而言,临界斜裂缝一旦贯通,裂缝面滑移迅速发展且缺少横向约束,剪压区难以形成稳定的斜压通道,挠度瞬间激增并呈现明显脆性失稳特征。通过对比有无腹筋变量试验梁发现(图6a),无腹筋梁在混凝土开裂后主要依靠纵筋承载,由于缺乏箍筋约束,达到破坏临界状态时挠度迅速增大,破坏过程表现出明显的突发性和脆性特征,且不同剪跨比下规律基本一致。配置BFRP箍筋后,斜裂缝出现阶段箍筋开始作为拉杆参与受力,对裂缝开展提供横向约束并抑制裂缝面滑移,使剪跨区逐渐形成更稳定的“斜压杆-拉杆”传力体系;因此临界斜裂缝出现后仍可保持一定的承载力与变形增长能力,有效延缓失稳,表现为曲线后期承载与变形能力明显提高。

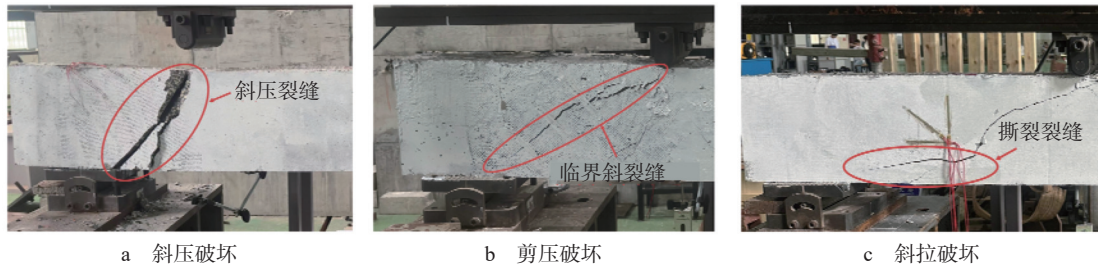


图5 3种破坏模式图

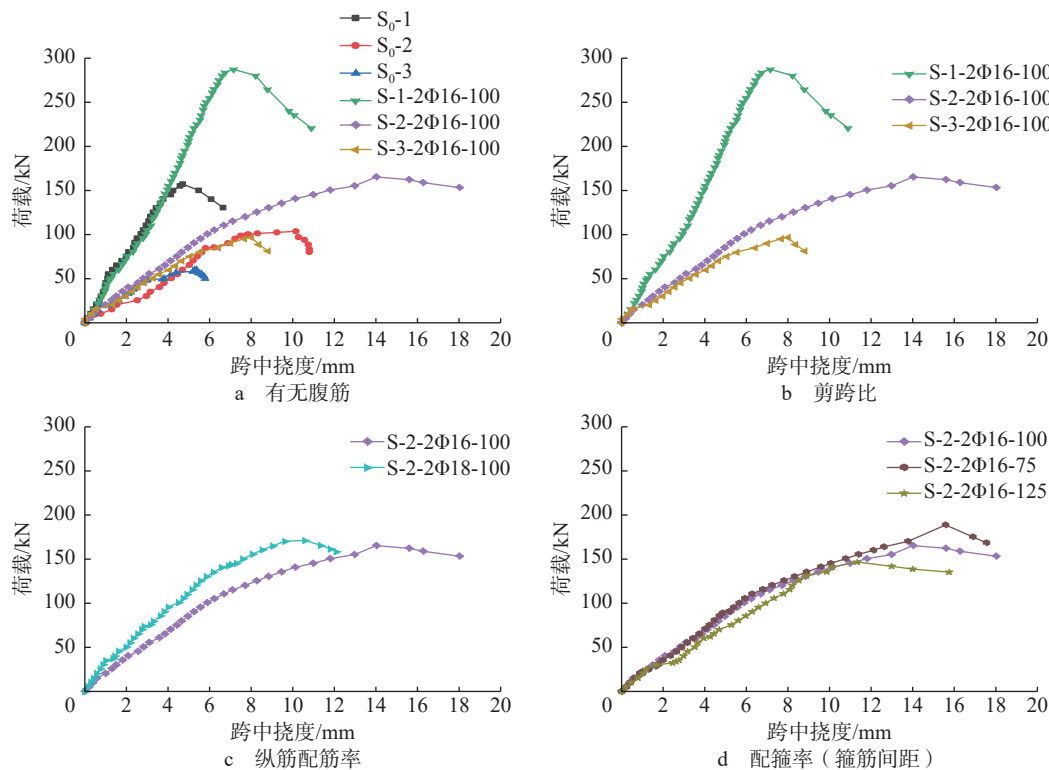


图6 荷载-挠度曲线

通过对比剪跨比试验变量发现,剪跨比变化会显著改变梁的挠度变化,其影响程度与相应破坏模式密切相关。3种破坏模式下的斜截面承载力存在明显差异,斜压破坏时承载力最大,剪压破坏次之,斜拉破坏最小,如图6b所示。此外,3种破坏模式下,斜压破坏在破坏前挠度增长缓慢,但是一旦发生破坏,挠度变化较大;其次是剪压破坏;斜拉破坏前梁变形很小,斜截面所承受承载力也是最小。剪跨比改变本质上对应剪力传递路径的转化:当 $\lambda \leq 1$ (斜压破坏)时拱效应显著,混凝土斜压带形成并主导传力,挠度总体较小但接近极限时压带压碎导致突发失稳;当 $1 < \lambda < 3$ 进入剪压破坏区间时,临界斜裂缝与剪压区压溃共同控制承载;当 $\lambda \geq 3$ (斜拉破坏)时拱作用减弱,体系更早进入“斜裂缝控制”,斜裂缝出现后承载增长

受限,因此曲线整体承载水平较低且在斜裂缝后很快失稳。

对比不同纵筋配筋率发现,纵筋配筋率的增大在一定程度上使梁的刚度增加,抵抗变形的能力变强。提高纵筋配筋率不仅提升弯曲刚度,更重要的是增强纵筋在斜裂缝处的销栓作用能力,从而提高剪跨区的有效传力与剪压区“有效高度”。从图 6c 中 S-2-2Φ18-100 曲线可以看出,该梁在达到破坏荷载前的曲线斜率相较于 S-2-2Φ16-100 曲线斜率有所增大,变形较为缓慢,如图 6c 所示。

通过对比不同箍筋间距发现,箍筋间距即配箍率的改变对挠度变化影响相对较小,3 种配箍率下试验梁的挠度变化大约在 2 mm 之间,如图 6d 所示。

2.3 荷载-纵筋应变曲线

试验梁的荷载-微应变(跨中)曲线如图 7 所示。剪跨比较大的试验梁中,纵筋应变增长速率更快,图 7 中曲线斜率越小;相比之下,剪跨比较小的试验梁纵筋应变增长速率相对较缓,图 7 中曲线斜率越大。主要原因是在相同的荷载下,剪跨比大的试验梁所产生的弯矩也相应较大,因此纵筋的应变增长的速度也较快。此外,试验中的无腹筋梁纵筋未屈服,而配置箍筋后试验梁的纵筋均达到屈服点。梁 S_0-1 与梁 S-1-2Φ16-100 的纵筋极限微应变分别为 2 211 和 4 679;梁 S_0-2 与梁 S-2-2Φ16-100 的纵筋极限微应变分别为 1 731 和 5 992;梁 S_0-3 与梁 S-3-2Φ16-100 的纵筋极限微应变分别为 1 512 和 4 298,相较于对应的无腹筋梁的纵筋跨中微应变分别提高 52.75%、71.11% 和 60.59%,由此可见配置箍筋可以提高底部纵筋的利用率。这是由于配置箍筋后,斜裂缝出现阶段箍筋作为拉杆参与受力,与混凝土斜压区共同形成稳定的“斜压杆-拉杆”传力体系,显著提高构件斜截面抗剪能力并延缓斜裂缝失稳,使试验梁在斜截面受剪破坏前,能够继续发展更大的跨中弯矩,从而使底部纵筋拉应变得以充分增长,最终表现为底部纵筋利用率明显提高。

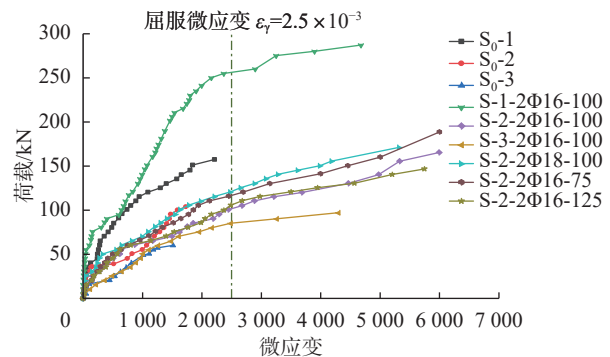


图 7 荷载-微应变曲线

2.4 受剪承载力分析

2.4.1 有无腹筋 有无腹筋梁的受剪承载力对比如图 8 所示。当剪跨比一致时,配置箍筋可以提高试验梁极限斜截面受剪承载力;而在不同剪跨比条件下,腹筋约束对试件梁极限承载力的提升效果存在明显差异,其影响程度随剪跨比的变化而不同。在剪跨比较小的情况下($\lambda \leq 1$),梁内形成明显的拱作用与斜压传力路径,箍筋的存在有效约束斜压带并延缓斜裂缝扩展,使混凝土抗剪潜力得到更充分发挥,从而表现出更显著的承载力提升。在较大剪跨比下($\lambda \geq 3$),试验梁以斜拉破坏为主,混凝土抗拉性能成为主要控制因素,箍筋虽能延缓裂缝扩展,但对极限承载力的提升有限。

2.4.2 剪跨比 不同剪跨比下试验梁受剪承载力对比如图 9 所示。剪跨比对此类梁的极限受剪承载力具有显著的影响,剪跨比越大,极限荷载越小。随着剪跨比的增大,梁内剪力传递路径发生明显变化,拱作用逐渐减弱,试验梁的受力由压拱机制主导转变为以斜拉破坏为主,导致混凝土抗剪贡献显著下降,最终使极限受剪承载力降低。

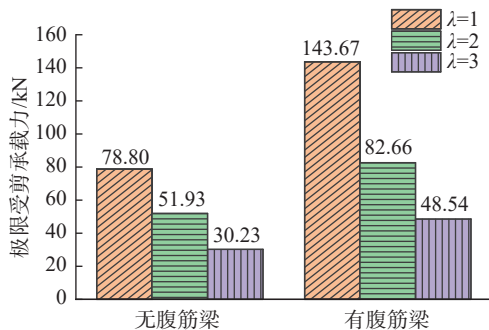


图 8 有无腹筋梁受剪承载力对比

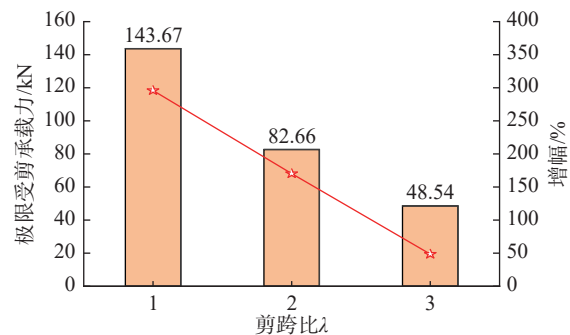


图 9 不同剪跨比下试验梁受剪承载力对比

2.4.3 配箍率 不同配箍率(箍筋间距)下试验梁受剪承载力对比如图10所示。改变箍筋间距对梁的极限受剪承载力具有一定的影响,当减小箍筋间距即配箍率变大时,试验梁的斜截面受剪承载力随配箍率增大而提高。

2.4.4 纵筋配筋率 不同纵筋配筋率下试验梁受剪承载力对比如图11所示。配筋率对试件梁极限荷载具有一定的影响,提高纵筋配筋率试验梁斜截面受剪承载力增大。试验梁在剪力作用下纵筋产生销栓效应,对斜裂缝发展具有约束作用,并促使剪压区有效高度增加,从而提升抗剪贡献。因此,纵筋配筋率增大时,受剪承载力随之提高。

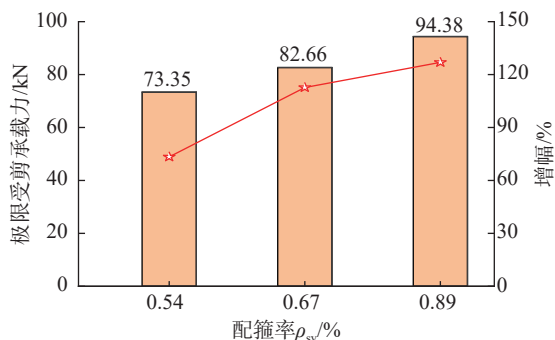


图10 不同配箍率下试验梁受剪承载力对比

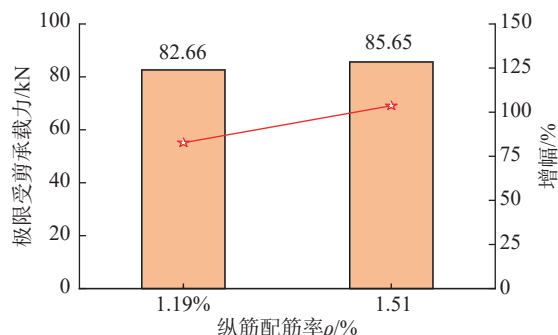


图11 不同纵筋配筋率下试验梁受剪承载力对比

3 受剪承载力计算

3.1 受剪承载力影响因素 混凝土梁的受剪承载力主要由多种机制共同贡献,包括混凝土本体提供的受剪能力、箍筋承担的受剪作用、纵向钢筋的销栓效应以及斜裂缝面上的骨料咬合作用等。总体而言,梁的受剪性能是多种受剪机制协同发挥作用的结果。

目前,现有规范受剪承载力计算中明确涉及考虑纵筋销栓作用的较少,各国的受剪承载力影响因素对比如表6所示。例如在中国 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[17] 为了计算简便,不计入钢筋纵向销栓力和骨料咬合作用对受剪承载力的贡献。这种处理体现出规范在安全储备方面的要求外,也在一定程度上反映出相关机理研究仍不够完善。因此本文在现有规范及现有研究的基础上,进一步提出考虑BFRP-钢复合纵筋销栓作用的受剪承载力计算公式。

表6 各国受剪承载力规范对比

规范	混凝土强度	剪跨比	纵筋配筋率	弹性模量比	尺寸效应
GB/T 50010—2010	f_t	集中荷载下考虑	×	×	b, h_0, β_h
GB 50608—2020	f_t	×	√	√	b_w, c
ACI. 440.1R—2015	f_c	×	×	√	b_w, d
CSA S806—2012	f_c	×	×	×	b_w, d
BS 8110—97	f_{cu}	×	√	×	b, β_d, d
JSCE—1997	f_{cd}	×	×	√	b_w, d, β_d

注:“√”表示考虑该因素;“×”表示未考虑该因素。 f_t 为混凝土轴心抗拉强度; f_c 为混凝土轴心抗压强度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_{cd} 为混凝土轴心抗压强度设计值; b 和 b_w 分别为截面宽度; h_0 和 d 分别为截面有效高度; c 为截面中和轴到受压区边缘的距离; β_h 为截面高度影响系数; β_d 为截面尺寸效应系数。

3.2 广义销栓系数的修正 根据秦卫红等^[5]所推导提出的广义销栓系数 K 与剪跨比 λ 之间的关系式:

$$K = C/(1 + \lambda) \quad (1)$$

此外根据文献[5]所提出的广义销栓作用影响系数 K :

$$K = \frac{V_D - V_s}{A_D f_v - A_{sf} f_{sv}} \quad (2)$$

其中, V_D 和 V_S 分别表示相同试验参数条件下梁的纵筋分别为普通钢筋和 FRP-钢复合筋的混凝土梁受剪承载力试验值; A_D 和 f_v 表示钢筋的截面面积和剪切强度; A_{sf} 和 f_{sfv} 表示 FRP-钢复合筋的截面面积和剪切强度。钢筋的剪切强度可采用第三强度理论^[18] 近似求得, 计算表达式为

$$f_v = f_y / \sqrt{3} = 0.577f_y \quad (3)$$

其中, f_y 表示钢筋的屈服强度。文献 [19] 指出 FRP 筋的剪切强度与拉伸强度的比值根据 FRP 种类的不同大约在 0.18 ~ 0.21 之间。通过查阅文献 [20] 得到 3 种直径下的 BFRP 剪切强度与抗拉强度比值分别为 0.15、0.20 和 0.21。文献 [21-22] 指出 BFRP 剪切强度与抗拉强度比值约为 0.19。本文取 0.19 作为近似计算, 因此 BFRP 筋剪切强度的近似计算表达式为

$$f_{bv} = 0.19f_{tb} \quad (4)$$

其中, f_{bv} 表示 BFRP 的剪切强度; f_{tb} 表示 BFRP 的抗拉强度。BFRP-钢复合筋根据复合原理^[23], 由式(3)和(4)进一步求出剪切强度 f_{sfv} , 取其内外 2 种材料的剪切强度加权平均值:

$$f_{sfv} = 0.19 \left(\frac{S_B}{S_B + S_D} f_{tb} \right) + 0.577 \left(\frac{S_D}{S_B + S_D} f_t \right) \quad (5)$$

其中, S_B 表示 BFRP-钢复合筋横截面上外部 BFRP 纤维面积, S_D 表示内芯钢筋的截面面积。

由于目前对于“FRP-钢复合筋+CSSC 结构”研究有限, 为了更为准确地表达广义销栓系数, 本文收集整理了针对抗剪试验中 BFRP-钢复合筋销栓贡献作用的相关文献 [5], [24-26] 中的相关数据, 重新拟合给出了广义销栓系数公式(1)的 C 值。将相关文献中梁试验的受剪承载力实测值代入式(2), 可获得广义销栓作用影响系数 K 的一组离散数据点。进一步对这些数据点进行回归分析, 可得到图 12 中所描述 K - λ 的关系曲线。为了对二者的吻合程度及变化规律进行直观对比, 图中同时给出拟合曲线、对应的数据点及其拟合效果 R^2 相关系数。

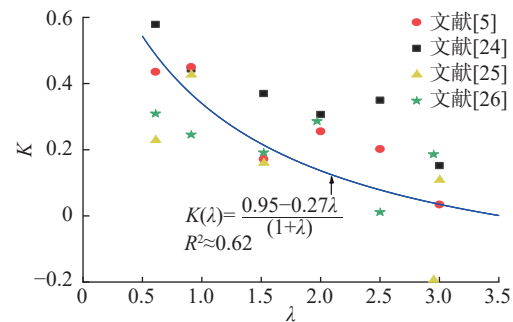


图 12 K 值分布及拟合曲线

由于相关研究的试验结果数据较为离散, 舍弃 $K < 0$ 以及部分较为异常点的情况。为了减小拟合误差, 将常数 C 修正为 $(A+B\lambda)$ 的形式, 以提升拟合效果。综合考虑广义销栓作用影响系数 K 、BFRP-钢复合筋的受剪强度以及纵筋截面面积, 可以计算出 BFRP-钢复合筋的广义销栓作用所提供的剪力值 V_d , 本文给出了修正后的广义销栓作用提供的剪力值表达式:

$$V_d = KA_{sf}f_{sfv} = \frac{0.95 - 0.27\lambda}{1 + \lambda} A_{sf}f_{sfv} \quad (6)$$

该结果表明, 随着剪跨比增大, 纵筋对裂缝约束及剪切传力路径的参与程度逐渐降低, 广义销栓作用随之衰减, 这与斜裂缝角度增大、剪切传力机制由压杆作用向拉裂控制转变的受力特征一致。

3.3 无腹筋梁受剪承载力计算公式 参照 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[17] 中无腹筋梁的受剪承载力计算公式, 并结合本文中的试验结果, 拟合效果如图 13 所示。其中, V_{exp} 表示梁斜截面受剪承载力试验值, R^2 表示决定系数。据此提出 CSSC 受剪承载力影响系数, 最终给出考虑纵筋广义销栓作用的无腹筋梁的受剪承载力计算公式:

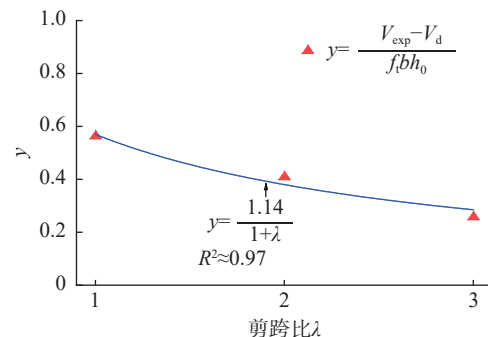


图 13 CSSC 受剪影响系数拟合曲线

$$V_u = V_c + V_d = \frac{1.14}{1+\lambda} f_t b h_0 + \frac{0.95-0.27\lambda}{1+\lambda} A_{sf} f_{sfv} \quad (7)$$

其中, V_u 表示梁斜截面受剪承载力计算值; V_c 表示混凝土剪压区受剪承载力计算值; f_t 表示混凝土的轴心抗拉强度; b 表示梁的宽度; h_0 表示有效截面高度; $1 \leq \lambda \leq 3$, 当 $\lambda < 1$ 时取 1, 当 $\lambda > 3$ 时取 3; $\beta_h = 1$, 即 $h_0 < 800 \text{ mm}$ 。

利用公式(7)计算本试验中的无腹筋梁的承载力, 与试验值进行比较, 并对比其规范和相关研究中的受剪承载力计算公式。采用公式(7)运算得到计算实测对比值为 1.02, 二者较为吻合, 变异系数 0.08 离散性较小, 公式对比结果如表 7 所示。

表 7 不同公式无腹筋梁受剪承载力试验值与计算值对比

试验梁编号	试验值/kN	试验值 V_{exp} / 计算值 V_u					
		文献[5]	文献[26]	文献[27]	文献[12]	文献[17]	本文式(7)
S ₀ -1	78.80	1.50	1.81	1.06	2.99	1.02	1.01
S ₀ -2	51.93	1.19	1.42	1.29	2.20	0.80	0.94
S ₀ -3	30.23	0.92	1.11	1.43	1.15	0.62	1.10
平均值 μ_R		1.20	1.45	1.26	2.11	0.81	1.02
标准差 σ_R		0.29	0.35	0.19	0.92	0.20	0.08
变异系数 COV		0.24	0.24	0.15	0.44	0.25	0.08

3.4 有腹筋梁受剪承载力计算公式 对于有腹筋梁主要考虑箍筋所提供的受剪承载力, 根据现有研究的箍筋承载力计算方法, 大多以 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》^[17] 中箍筋承载力计算方法进行计算。该公式大部分是箍筋所承担的剪力, 但小部分是属于混凝土所提供的, 并且为理想状态下的箍筋受力情况。根据试验结果可知, 箍筋的“有效贡献”会随剪跨比变化。因此, 直接运用该体系计算公式中会引起偏差。对此提出有效箍筋修正系数 $(A+B\lambda)$, 并结合本试验数据进行拟合, 拟合结果如图 14 所示。最终给出有腹筋梁的受剪承载力计算公式:

$$V_u = V_c + V_d + V_f = \frac{1.14}{1+\lambda} f_t b h_0 + \frac{0.95-0.27\lambda}{1+\lambda} A_{sf} f_{sfv} + (1.76-0.51\lambda) f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (8)$$

其中, V_f 箍筋所承担的受剪承载力; A_{sv} 表示配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积; s 表示箍筋间距; $1 \leq \lambda \leq 3$, 当 $\lambda < 1$ 时取 1; 当 $\lambda > 3$ 时取 3; $\beta_h = 1$, 即 $h_0 < 800 \text{ mm}$ 。

利用本文所提出的式(8), 对比了规范和相关研究中的受剪承载力计算公式, 将其计算结果与试验进行对比。采用式(8)计算所得出的试验值与计算值之比较为吻合且整体离散性较小, 公式对比结果如表 8 所示。

3.5 受剪承载力设计公式 鉴于混凝土材料在拌制与成型过程中客观存在较大的离散性, 在工程设计中, 为保证试验值大于设计值具有 95% 的保证率, 在计算式(8)的基础上对混凝土贡献项引入折减系数。假定试验值/计算值比值服从正态分布, 取其 5% 分位值 $\mu_R - 1.645\sigma_R$ 作为设计修正系数。因此, 提出适用于 BFRP-钢复合筋 CSSC 梁的斜截面受剪承载力设计公式:

$$V_{u,d} = (\mu_R - 1.645\sigma_R) V_c + V_d + V_f = \frac{1.04}{1+\lambda} f_t b h_0 + \frac{0.95-0.27\lambda}{1+\lambda} A_{sf} f_{sfv} + (1.76-0.51\lambda) f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (9)$$

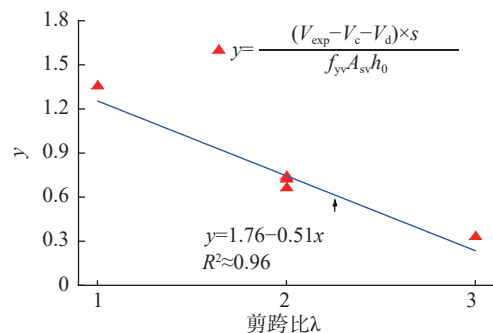


图 14 BFRP 箍筋“有效贡献”系数拟合曲线

表 8 不同公式有腹筋梁受剪承载力试验值与计算值对比

试验梁编号	试验值/kN	试验值 V_{exp} /计算值 V_u					
		文献[5]	文献[26]	文献[27]	文献[12]	文献[17]	本文式(8)
S-1-2Φ16-100	143.67	1.43	1.57	1.07	1.93	1.15	1.03
S-2-2Φ16-100	82.66	0.90	0.98	0.82	1.11	0.74	0.98
S-3-2Φ16-100	48.54	0.60	0.65	0.60	0.65	0.50	1.09
S-2-2Φ16-75	94.38	0.88	0.94	0.78	1.05	0.74	0.98
S-2-2Φ16-125	73.35	0.89	0.98	0.83	1.13	0.71	0.95
S-2-2Φ18-100	85.65	0.92	1.00	0.85	1.15	0.76	1.01
平均值 μ_R		0.94	1.02	0.94	1.17	0.77	1.01
标准差 σ_R		0.28	0.31	0.13	0.42	0.21	0.05
变异系数 COV		0.30	0.30	0.13	0.36	0.28	0.05

4 结 论

本文按照有无腹筋、纵筋配筋率、箍筋间距、不同剪跨比 4 种情况分析了 9 根远海岛礁属地化材料配制的 BFRP-钢复合筋 CSSC 梁的斜截面受剪性能,得到以下结论:

(1)BFRP-钢复合筋 CSSC 梁的受剪破坏形态与普通钢筋混凝土梁的一致,主要包括斜压破坏($\lambda \leq 1$)、剪压破坏($1 < \lambda < 3$)、斜拉破坏($\lambda \geq 3$)3 种破坏模式。

(2)BFRP-钢复合筋 CSSC 梁的受剪承载力随剪跨比减小而增大,随纵筋配筋率提高而增大,随箍筋间距增大而降低;配置箍筋可显著提升梁的受剪承载力。

(3)广义销栓系数随剪跨比增大而衰减;箍筋“有效贡献”系数对剪跨比有一定的依赖性。在试验结果与现有研究的基础上,修正了广义销栓作用影响系数;提出了适用于 CSSC 受剪承载力影响系数;给出了箍筋承载力“有效贡献”系数,进而建立了考虑纵筋销栓作用下,适用于 BFRP-钢复合筋 CSSC 有无腹筋梁的受剪承载力计算公式。

(4)计算结果与试验结果对比表明:无腹筋梁试验值/计算值的比值均值为 1.01,标准差为 0.08,对应变异系数为 0.08;有腹筋梁试验值/计算值的比值均值为 1.02,标准差为 0.05,对应变异系数为 0.05。对比其他相关研究及规范,结果表明所提出计算公式精度较高,计算结果与试验结果吻合较好,整体离散性较小。

由于本文试件数量有限(9 根)且涉及的变量较多(有无腹筋、剪跨比、纵筋配筋率、箍筋间距),本文研究的结论可能存在样本统计量略显不足的问题。在未来的研究中,可进一步通过拓展试验样本数量、细化变量(如增加纵筋配筋率、拓展剪跨比等)并结合有限元模拟等方法,从而提升研究的统计显著性与可靠性。同时,进一步探讨 CSSC 强度等级等对于梁受剪性能的影响规律,为远海岛礁属地化材料珊瑚海水海砂混凝土结构在岛礁及海洋工程中的工程应用提供更加充分的理论依据与技术支持。

参考文献:

- [1] Shalon R, Rapheal M. Influence of sea water on corrosion of reinforcement[J]. *ACI Journal Proceedings*, 1959, 55(6): 1251-1268.
- [2] 尹世平, 华云涛, 徐世煌. FRP 配筋混凝土结构研究进展及其应用[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(1): 134-150.
Yin S P, Hua Y T, Xu S L. A review on research progress and application of concrete structures internally reinforced with FRP bars[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(1): 134-150.
- [3] Wu G, Wu Z S, Luo Y B, et al. Mechanical properties of steel-FRP composite bar under uniaxial and cyclic tensile loads[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(10): 1056-1066.
- [4] Wu G, Sun Z Y, Wu Z S, et al. Mechanical properties of steel-FRP composite bars (SFCBs) and performance of SFCB

- reinforced concrete structures[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2012, 15(4): 625–635.
- [5] 秦卫红, 惠卓, 张普, 等. 钢-纤维复合纵筋和玄武岩纤维复合纵筋混凝土梁受剪承载力试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(11): 209–220.
- Qin W H, Hui Z, Zhang P, et al. Experimental study on shearing capacity of concrete beams longitudinal reinforced with steel fiber composite bars and BFRP bars[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(11): 209–220.
- [6] 周锐, 朱德举. 玄武岩纤维复材筋海砂混凝土梁抗剪性能 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(9): 3396–3405.
- Zhou R, Zhu D J. Shear behavior of BFRP bars reinforced seawater sea-sand concrete beam[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(9): 3396–3405.
- [7] Han S W, Fan C, Zhou A, 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.
- [8] 马林建, 罗棕木, 段力群, 等. 全珊瑚混凝土的脆性评价 [J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(2): 281–288.
- Ma L J, Luo Z M, Duan L Q, et al. Brittleness evaluation of coral concrete[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(2): 281–288.
- [9] 高屹, 韦灼彬, 孙潇. 珊瑚骨料混凝土基本力学性能试验研究 [J]. *海军工程大学学报*, 2017, 29(1): 64–68.
- Gao Y, Wei Z B, Sun X. Experimental research on basic mechanical properties of coral aggregate concrete[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2017, 29(1): 64–68.
- [10] Zhao Y F, Hu X, Shi C J, et al. A review on seawater sea-sand concrete: mixture proportion, hydration, microstructure and properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 295: 123602.
- [11] 连金龙. FRP 筋增强海砂混凝土梁耐腐蚀性能试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- Lian J L. Experimental research on durability of FRP reinforced sea sand concrete beams[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [12] GB 50608—2020 纤维增强复合材料工程应用技术标准 [S].
- GB 50608—2020 Technical standard for fiber reinforced polymer (FRP) in construction[S].
- [13] Sharif H H, Mahmood A D. Shear performance of sustainable BFRP-reinforced concrete beams with stirrup incorporating recycled plastic aggregates: experimental and analytical investigations[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 503: 144530.
- [14] Zhao W L, Xu J J, Pan K M, et al. Experimental study on shear behavior of steel fiber high strength concrete beams reinforced with GFRP bars[J]. *Engineering Structures*, 2025, 323: 119294.
- [15] Liang X Z, Li J Q, Li Z W, et al. Shear behavior of BFRP-reinforced SSC beams using U-shaped SSECC with embedded longitudinal bars: experimental investigation and predictive modeling[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 504: 144564.
- [16] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准 [S].
- GB/T 50152—2012 Standard for test method of concrete structures[S].
- [17] GB 50010—2010 混凝土结构设计标准 [S].
- GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S].
- [18] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(I)[M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 246–247.
- [19] 林红威, 渠海东, 杨家琦, 等. FRP 筋剪切-拉伸强度关系研究 [J]. *复合材料学报*, 2026, 43(2): 961–977.
- Lin H W, Qu H D, Yang J Q, et al. Investigation on the relationship between the transverse shear strength and tensile strength of FRP bars[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2026, 43(2): 961–977.
- [20] 曹晓峰, 赵文, 谢强, 等. BFRP 筋材基本力学性能试验研究 [J]. *公路工程*, 2016, 41(5): 215–217, 255.
- Cao X F, Zhao W, Xie Q, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforced plastic rebar[J]. *Highway Engineering*, 2016, 41(5): 215–217, 255.
- [21] Yi Y, Guo S C, Li S, et al. Effect of alkalinity on the shear performance degradation of basalt fiber-reinforced polymer bars in

- simulated seawater sea sand concrete environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299: 123957.
- [22] 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.
- [23] 郑百林, 李伟, 张伟伟, 等. 增强混凝土中 FRP 包覆筋研究 II: 力学性能测试 [J]. *复合材料学报*, 2004, 21(3): 79–83.
- Zheng B L, Li W, Zhang W W, et al. Mechanics behavior of FRP wrapped rebar reinforced concrete II: mechanic tests[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(3): 79–83.
- [24] 倪林. B-FRPB 混凝土梁及 B-SFCB 混凝土梁的受剪性能研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- Ni L. Study on the shear behavior of B-FRPB and B-SFCB concrete beam[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [25] 范旭红, 倪林, 秦卫红, 等. 钢玄武岩纤维复合筋混凝土梁受剪承载力试验研究 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(2): 112–122.
- Fan X H, Ni L, Qin W H, et al. Experimental study on shear capacity of steel-basalt fiber composite bar(SFCB) reinforced concrete beams[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(2): 112–122.
- [26] 游颖骏. 钢筋-连续玄武岩纤维复合筋(SFCB)混凝土梁抗剪性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- You Y J. Study on shear behavior of concrete beams reinforced with steel-fiber composite bar(SFCB)[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [27] 达波, 孙凯, 吴彰钰, 等. 不同种类钢筋珊瑚混凝土梁的抗剪性能试验研究和数值分析 [J]. *工程科学学报*, 2025, 47(11): 2247–2256.
- Da B, Sun K, Wu Z Y, et al. Experimental study and numerical analysis on shear behavior of coral aggregate concrete beams with different types of steel bar[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(11): 2247–2256.

作者贡献声明

刘豫安负责设计实验方案、试验进行、数据采集、数据分析及撰写初稿等。张海滨、孙天舒和赵菲负责对论文提出关键修改意见、逻辑调整等。周智负责提供学术指导、方向把握、提供实验设备、经费支持等。

利益冲突声明

作者声明, 不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文的英文题名、摘要和关键词采用 DeepSeek-V3.2 翻译生成, 并进行了部分修改。

伦理声明

不适用: 本文不涉及人类或动物研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 <https://doi.org/10.65658/j.hndk.2026012701>。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据, 可向通信作者提出申请。

致谢/Acknowledgements

本文得到海南大学协同创新中心科研项目(XTCX2022HYB10)、热带海洋工程材料及评价全国重点实验室自主研究课题(STOEM99403917、STOEM99407718)、海南省自然科学基金高层次人才项目(425RC699)、海南省科技人才创新项目资助(KJRC2023L02)和海南省研究生创新科研课题项目(Qhys2024-57)支持。

This work was jointly supported by the Scientific Research Project of the Collaborative Innovation Center of Hainan University (XTCX2022HYB10), the Independent Research Projects of the State Key Laboratory of Tropical Marine Engineering Materials and Evaluation (STOEM99403917, STOEM99407718), the Hainan Provincial Natural Science Foundation High-Level Talent Project (425RC699), the Innovational Fund for Scientific and Technological Personnel of Hainan Province (KJRC2023L02), and the Hainan Provincial Graduate Student Innovation Research Project (Qhys2024-57).

作者简介

刘豫安(1999—),男,安徽合肥人,海南大学2023级土木工程专业硕士研究生。E-mail: 1471217580@qq.com。

张海滨(1988—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,海南大学副教授,研究方向:热带海岛工程结构健康监测、结构防灾减灾方向的研究。主持省部级项目5项,主持海南大学科研启动基金校级项目1项。共发表文章40余篇,其中SCI 20余篇(第一/通信作者12篇)。授权国家发明专利4项,实用新型专利5项,获得软著1项。E-mail: zhanghb01@hainanu.edu.cn。

孙天舒(1988—),男,辽宁大连人,博士,海南大学副研究员,研究方向:热带海岛土木工程材料、海岛工程结构抗震减灾、高性能装配式结构多灾害响应与智能建造等。发表SCI论文10余篇,主持和参与多项国家自然科学基金,参与2项国家重点研发计划项目。E-mail: tssun@hainanu.edu.cn。

赵菲(1972—),女,江西上饶人,博士,海南大学副教授,研究方向:纤维增强复合材料(FRP)结构、装配式混凝土结构、既有建筑物鉴定与加固。主持和参与国家级、省级及横向等科研、教改项目10余项,以第一作者或通信作者在国内外重要学术期刊和会议上发表论文10余篇。E-mail: zfhw2006@163.com。

周智(1973—),男,湖南永州人,博士,海南大学二级教授,博士生导师,研究方向:工程多灾害安全监测与智能防护、热带海岛工程智能建造与运维、FRP材料及海岛工程应用等。E-mail: zhizhou@hainanu.edu.cn。

(责任编辑:高喆,英文校对:张海滨)



This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.