

文章编号:1007-9629(2024)10-0913-09

聚丙烯纤维增强珊瑚混凝土韧性试验研究

易金^{1,2}, 王磊^{1,2,*}, 李增³, 张继旺^{1,2}, 池俊生¹
(1. 桂林理工大学 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学 土木工程学院, 广西 桂林 541004; 3. 陆军工程大学
爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要:采用聚丙烯纤维(PPF)对珊瑚混凝土进行增韧和降脆处理。结果表明:适当增加 PPF 的掺量或长度能在一定程度上提升珊瑚混凝土的抗弯强度与抗拉强度;当 PPF 长度过长或掺量过大时,PPF 卷曲或聚团会引起珊瑚混凝土的局部缺陷,降低增韧效果;PPF 增强珊瑚混凝土的拉伸应力-应变曲线符合三线性本构模型,极限拉应变提升了 52%~333%,延性指数高达 10.89;尽管 PPF 能显著提升珊瑚混凝土的韧性,但也可能导致其密实度和抗压强度有所降低,建议在实际应用中精确控制 PPF 的掺量和长度,以确保珊瑚混凝土既能获得所需的韧性,又能保持适当的密实度和抗压强度。

关键词:珊瑚混凝土;聚丙烯纤维;抗拉强度;韧性;应变

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.10.006

Toughness of Polypropylene Fiber-Reinforced Coral Concrete

YI Jin^{1,2}, WANG Lei^{1,2,*}, LI Zeng³, ZHANG Jiawang^{1,2}, CHI Junsheng¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Polypropylene fiber(PPF) was employed to toughen and reduce the brittleness of coral concrete. The results indicate that by appropriately increasing the content or length of PPF, the flexural and tensile strength of coral concrete can be significantly enhanced to a certain extent. However, if the length of PPF is too long or the content is too large, the curling or clustering of PPF may cause local defects in coral concrete, thereby reducing the toughening effect. The tensile stress-strain curves of PPF-reinforced coral concrete conform to the trilinear constitutive model, with the ultimate tensile strain increasing by 52% to 333%, and the ductility index reaching as high as 10.89. Although PPF can significantly improve toughness, it may also lead to a reduction in the density and compressive strength of coral concrete. Therefore, in practical applications, it is suggested to consider the negative effects brought about by PPF reinforcement in a comprehensive manner and make appropriate adjustments. Therefore, in practical applications, it is recommended to precisely control the content and length of PPF to ensure that the coral concrete not only gains the necessary increase in toughness but also retains suitable levels of compactness and compressive strength.

Key words: coral concrete; polypropylene fiber; tensile strength; toughness; strain

收稿日期:2024-05-16; 修订日期:2024-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178194);广西自然科学基金资助项目(2024GXNSFGA010002);广西绿色建材与建筑工业化重点实验室项目(桂科能 22-J-21-15)

第一作者:易金(1991—),女,江西宜春人,桂林理工大学助理研究员,博士生. E-mail: tyijin16@163.com

通讯作者:王磊(1977—),男,山东兖州人,桂林理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail: tianmu77@163.com

造礁珊瑚在生长过程中吸收海水中的钙和 CO_2 ,分泌形成了石灰石外壳.在珊瑚死亡以后,石灰石外壳经过沉积和水动力的作用,分解形成了珊瑚碎屑.在不破坏海洋环境的前提下,就地采用这些珊瑚碎屑作为粗(细)骨料制备珊瑚混凝土材料,对于远洋岛礁工程建设具有重要的战略意义,并拥有资源化利用价值和广阔的应用前景^[1-3].然而,珊瑚骨料由于其易碎性、多孔性及较低的筒压强度等先天缺陷,使得在相同水灰比条件下,珊瑚混凝土的抗压强度和抗拉强度均低于普通碎石混凝土^[4-6].此外,珊瑚混凝土在破坏时表现出明显的脆性特征,且随着强度等级的提高,其线性弹性和脆性特征更加明显^[7-8].在弹性模量方面,珊瑚混凝土低于同等强度等级的普通碎石混凝土,但又稍高于某些轻骨料混凝土^[9-10].上述特性导致常规方法制备的珊瑚混凝土存在强度低、脆性大及变形大等问题,严重制约了其在大规模工程中的推广使用^[11].

为提升珊瑚混凝土的工程应用性能,国内外学者已经开展了一些关于掺加短切纤维材料以增强珊瑚混凝土的研究.这些研究主要关注于低强度等级的珊瑚混凝土,并且多集中于描述纤维材料对珊瑚混凝土基本力学性能的提升效果,而对于纤维增韧机理的探讨还不够深入^[12-14].由于珊瑚骨料的多孔性,纤维材料对珊瑚混凝土强度形成的影响与普通混凝土存在差异.

为了满足远海岛礁防护工程中对珊瑚混凝土在抗爆和抗冲击性能方面的要求,改变其目前仅限于民用和部分特殊场合使用的现状,本研究在前期开发高强度珊瑚混凝土制备技术的基础上^[15],掺加具有高伸长率、高强度、耐腐蚀等优点的聚丙烯纤维(PPF)^[16-18],旨在对珊瑚混凝土进行增韧和降脆处理.同时,将纤维长度(L)和掺量(φ ,体积分数)作为变量,开展PPF增强高强珊瑚混凝土的韧性研究,详细阐述和分析PPF增强珊瑚混凝土的弯曲和拉伸性能及其作用机理.研究成果不仅能够为纤维增强珊瑚混凝土的力学性能研究提供参考,也将为制备高强、高韧珊瑚混凝土及其在防护工程中的应用提供理论基础.

1 试验

1.1 原材料

骨料采用北部湾航道疏浚过程中开采的天然珊

瑚砂(见图1(a)),其主要成分为 CaCO_3 ,经过筛分后配制成中砂,细度模数为2.68,堆积密度为 1406 kg/m^3 ,表观密度为 2715 kg/m^3 .水泥采用P·O 52.5普通硅酸盐水泥;粉煤灰选用A类I级粉煤灰;为了进一步提升新拌PPF增强珊瑚混凝土的流动性,提高其密实度和强度,特别掺入 $23\text{ }\mu\text{m}$ (600目)等级的石英粉,其平均粒径为 $21.3\text{ }\mu\text{m}$,密度为 2.72 g/cm^3 ;拌和水为自来水;采用的外加剂有:减水率(质量分数)为20%的聚羧酸系高性能减水剂、聚醚改性有机硅消泡剂和羟乙基纤维素增稠剂.PPF产自宁波时科新材料科技有限公司,其形态见图1(b),性能参数见表1.

1.2 配合比设计与试验方法

遵循GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》和CECS 13:2009《纤维混凝土试验方法标准》,制作了10组珊瑚混凝土试件,其中包括3种PPF掺量和3种PPF长度的增强试件,以及1组未掺加PPF的C60级对照组(NF)试件.各组试件的配合比如表2所示.制备步骤如下:首先,称量珊瑚砂并置入搅拌机,同时均匀撒入PPF,充分搅拌1~2 min后,加入一半的拌和水继续搅拌;随后,加入预称量的胶凝材料、外加剂及剩余的拌和水,搅拌3~5 min即可得到新拌的PPF增强珊瑚混凝土.

进一步浇筑成不同尺寸的试件:100 mm×100 mm×100 mm的立方体抗压试件,15 mm×100 mm×400 mm的薄板抗弯试件,以及根据日本土木工程师协会推荐的标准哑铃型拉伸试件(总长320 mm、厚度13 mm,两端宽度60 mm,中部为80 mm×30 mm的等截面区域).试件浇筑完成24 h后脱模,并在 $(20\pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度95%的环境下养

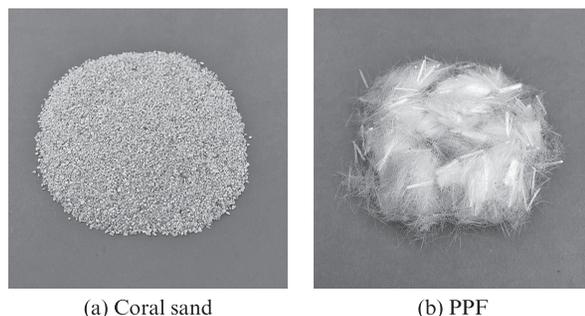


图1 试验材料
Fig. 1 Test materials

表1 聚丙烯纤维的物理性能

Table 1 Physical properties of polypropylene fiber

Diameter/ μm	L/mm	Density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Elongation at break/%	Tensile strength/ MPa	Elastic modulus/ GPa
180	10/16/20	0.91	12-16	750	8

护至28 d. 根据GB/T 50081—2019,使用UTM5305型电子万能试验机对立方体抗压试件和薄板抗弯试件进行力学性能测试. 拉伸试验中,采用可旋转夹头

固定拉伸试件,使用电子万能试验机对两端进行加载,并利用位移引伸计测量中部80 mm标距内的轴向变形.

表2 试件的配合比
Table 2 Mix proportions of specimens

Specimen	Mix proportion/(kg·m ⁻³)								L/mm	φ/%
	Coral sand	Water	Cement	Fly Ash	Quartz powder	Water-reducing agent	Defoamer	Thickener		
NF	1 350.00	270.00	787.50	112.50	112.50	3.60	4.00	3.15		
F-L10-V1.0	1 350.00	270.00	787.50	112.50	112.50	3.60	4.00	3.15	10	1.0
F-L10-V1.5	1 350.00	270.00	787.50	112.50	112.50	3.60	4.00	3.15	10	1.5
F-L10-V2.0	1 350.00	270.00	787.50	112.50	112.50	3.60	4.00	3.15	10	2.0
F-L16-V1.0	1 350.00	270.00	787.50	112.50	112.50	3.60	4.00	3.15	16	1.0
F-L16-V1.5	1 350.00	270.00	787.50	112.50	112.50	3.60	4.00	3.15	16	1.5
F-L16-V2.0	1 350.00	270.00	787.50	112.50	112.50	3.60	4.00	3.15	16	2.0
F-L20-V1.0	1 350.00	270.00	787.50	112.50	112.50	3.60	4.00	3.15	20	1.0
F-L20-V1.5	1 350.00	270.00	787.50	112.50	112.50	3.60	4.00	3.15	20	1.5
F-L20-V2.0	1 350.00	270.00	787.50	112.50	112.50	3.60	4.00	3.15	20	2.0

2 结果与讨论

2.1 试验现象及破坏特征

图2为试件的破坏模式. 由图2可见:

(1)试件NF在受荷破坏时表现出瞬发性的脆性破坏特征,PPF增强珊瑚混凝土试件的破坏形态均表现为延性破坏特征. PPF增强珊瑚混凝土试件受压破坏时,裂缝稳定缓慢发展且逐步延伸,即便在失效后,也仅出现若干明显的细裂缝,试件的整体性得以保持. PPF的随机分布增加了裂缝路径的复杂性,使得裂缝扩展更为曲折.

(2)在抗弯和抗拉试验中,试件的失效过程同样较为缓慢. 在拉应力的作用下,PPF增强珊瑚混凝土试件表面及内部产生了裂缝,珊瑚骨料绝大多数发生断裂,而PPF在基体中表现出良好的分散性,没有

明显的团聚现象.

图3为PPF与珊瑚混凝土的微观界面特征. 由图3可见:

(1)PPF表面仅有少量水泥水化物附着(图3(a)),PPF-水泥基界面黏结力主要为摩擦黏结和化学胶结. 当基体发生破坏时,界面的破坏特征主要是PPF拔出、拔断和弯扭断裂(图3(b)),表现出了明显的滑移-硬化效应. 由于PPF良好的分散性以及珊瑚混凝土基体中形成的桥接机制,不仅在加载过程中有效分散了裂缝尖端的应力集中,而且在破坏阶段也延缓了脆性材料的破坏进程^[19].

(2)PPF在多个断裂面上充分发挥了抗拉作用,这使得珊瑚混凝土的破坏过程表现出显著的延性特征(图2(b)、(c)).

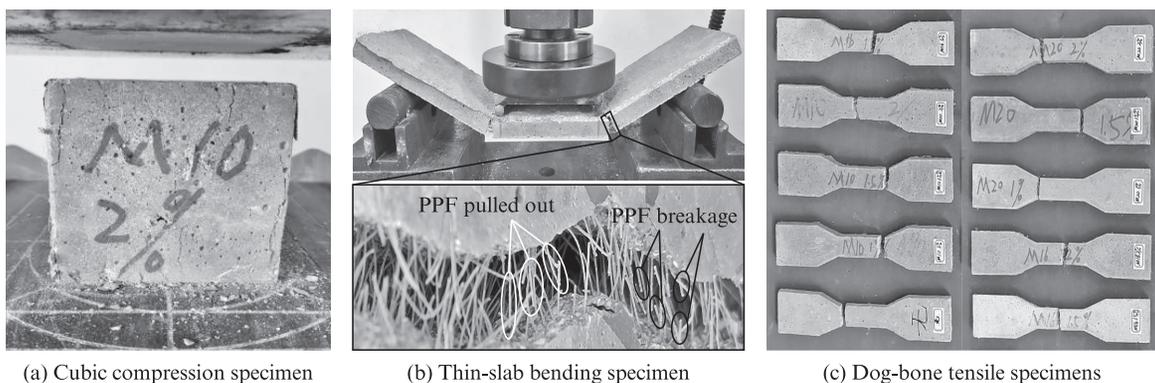


图2 试件的破坏模式
Fig. 2 Failure patterns of specimens

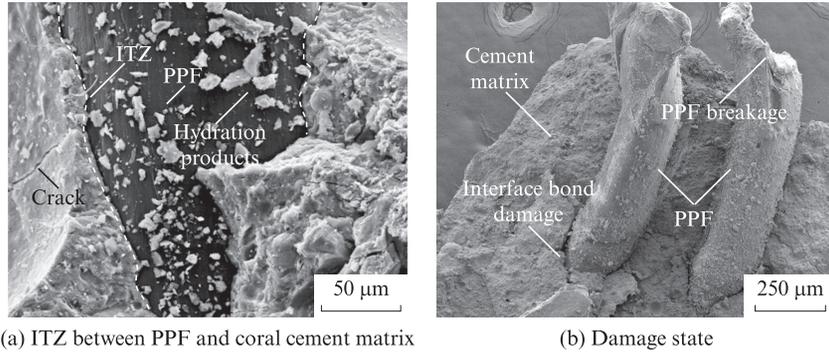


图3 PPF与珊瑚混凝土的微观界面特征
Fig. 3 Microscopic interface characteristics of PPF and coral concrete

2.2 纤维掺量和长度对抗压强度的影响

图4为试件的立方体抗压强度.由图4可见,大部分试件的抗压强度呈现出负增长,增长率在-22%~10%之间.

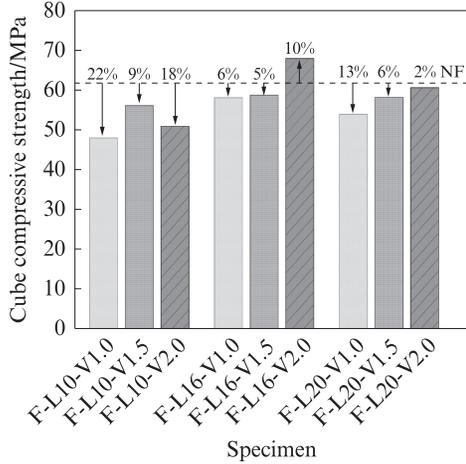


图4 试件的立方体抗压强度
Fig. 4 Cube compressive strengths of specimens

同时,本文还对每组试件取芯($\phi 20 \times 40$ mm)进行了CT扫描测试.通过分析逐层切片图,提取了试件的孔隙率和孔径分布数据,并计算出每组试件的平均孔隙率,结果如图5所示.由图5可见,PPF增强珊瑚混凝土试件的孔隙率显著高于素珊瑚混凝土试件NF.这是由于PPF增强珊瑚混凝土的抗压强度主要由珊瑚混凝土提供,疏松多孔的珊瑚砂内部含有较多的空气.在搅拌、振捣的过程中,PPF在浆体中形成了复杂的空间网络,延长了水泥浆体中的空气排出路径,造成过多气体分散并滞留在水泥浆体中未能排出,导致在水泥浆体及珊瑚颗粒之间形成了基体硬化后的孔隙和缺陷^[20],如图6所示.同时,这些孔隙缺陷也会弱化PPF与水泥基质之间的黏结界面,影响二者之间的黏结性能,进而降低基体的密度和抗压强度.

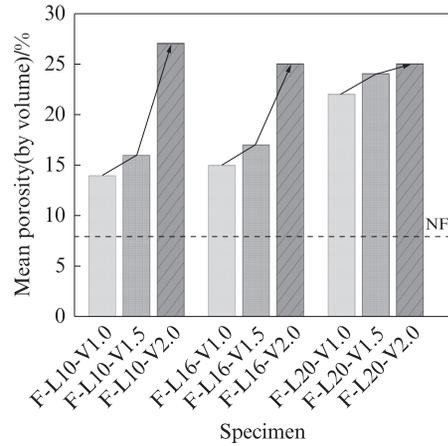


图5 试件的平均孔隙率
Fig. 5 Mean porosities of specimens

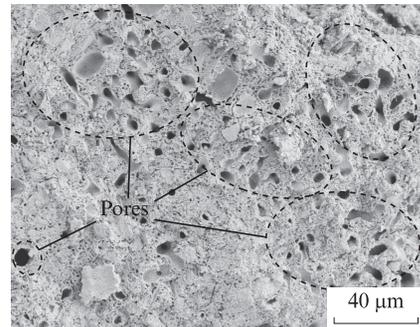


图6 基体中的微观孔隙
Fig. 6 Micro pores in matrix

2.3 纤维掺量和长度对抗弯性能的影响

PPF增强珊瑚混凝土的荷载-挠度全曲线如图7所示.由图7可见,曲线呈现出2个峰值,这与纤维增强普通混凝土材料的特性大体一致^[21-22].整个曲线可大致划分为4个阶段:

①弹性上升阶段 在达到第1个峰值之前,荷载-挠度曲线显示出良好的线性关系.在这一阶段,珊瑚混凝土体和PPF共同承担外力,其中混凝土体承受的荷载比例大于PPF.

②峰值开裂下降阶段 在荷载达到第1个峰值

时,试件底部出现1条或多条初始微裂缝.此时,裂缝处的珊瑚混凝土退出工作,导致试件的承载能力略有下降.然而,荷载通过PPF与基体的黏结作用传递,PPF在裂缝间发挥抗拉作用,有效阻止了承载力的进一步下降.

③二次上升阶段 荷载再次回升,但此时挠度的增长速率超过荷载的增长,荷载-挠度曲线随着新裂缝的产生而小幅度波动上升.在此阶段,荷载由珊瑚混凝土传递给PPF,PPF通过桥接作用将应力传递给周围未开裂的珊瑚混凝土基体.当应力达到基体承载力极限时,PPF周围的基体又产生新裂缝,这一过程循环进行,直到裂缝间距小到PPF传递的应力

不足以使周围基体产生新裂缝为止.承载力随着外力的增加而提高.

④硬化阶段 荷载达到第2个峰值后,基体已失去承载能力,PPF需要分担的拉应力大于其与珊瑚混凝土的黏结强度.此时,裂缝间的PPF陆续被拔出或部分发生断裂,薄板底部的细密裂缝不断扩大并逐渐汇聚形成1条或多条裂缝,曲线开始下降.初始裂缝继续向试件顶部扩展,直至形成1条主裂缝导致试件破坏.该阶段曲线的下降幅度和速率均较小,极限挠度较大,表明了PPF增强珊瑚混凝土具有高韧性和强耗能能力,PPF在提升硬化珊瑚混凝土变形能力方面发挥了明显的作用.

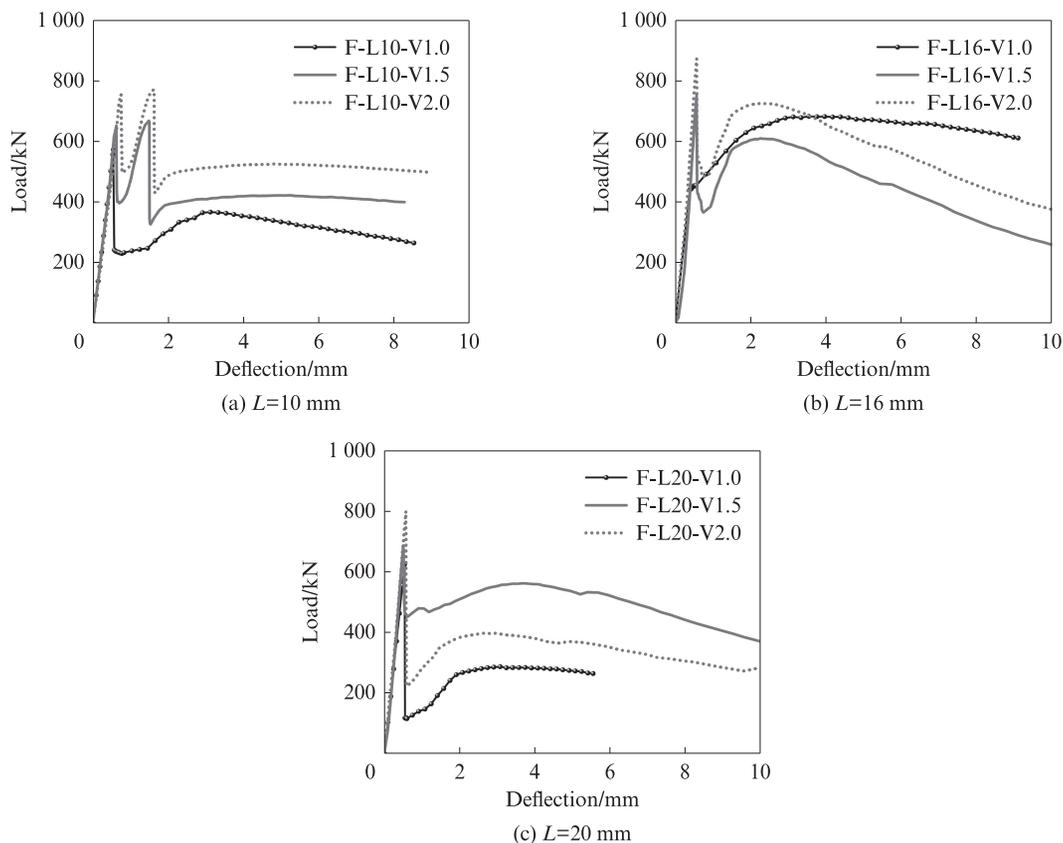


图7 PPF增强珊瑚混凝土的荷载-挠度全曲线

Fig. 7 Full load-deflection curves of PPF fiber reinforced coral concretes

图8为PPF增强珊瑚混凝土的抗弯强度.由图8可见:

(1)得益于PPF在珊瑚混凝土中良好的分散性,珊瑚混凝土抗弯强度的增长与PPF掺量(在2.0%的掺量范围内)存在明显的正相关关系.这意味着增加PPF长度有利于应力在珊瑚混凝土与PPF之间的传递,从而提升珊瑚混凝土的抗弯强度.

(2)然而,当PPF过长时,它们容易卷曲.这在桥接混凝土基体中的裂纹时可能无法充分发挥其拉伸

应变能力,限制了珊瑚混凝土韧性的提升^[23-24],甚至导致基体产生缺陷,进而降低基体的力学性能,呈现先增长后下降的变化趋势.在本试验中,当PPF长度为16 mm、掺量为2.0%时,对珊瑚混凝土的增韧效果最佳,抗弯强度的提升率达到231%.

2.4 拉伸性能及其本构模型

PPF增强珊瑚混凝土的拉伸应力-应变(σ - ϵ)曲线如图9所示.由图9可见,曲线可大致划分为3个阶段:

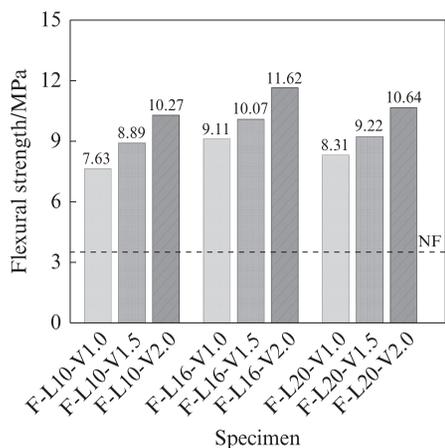


图8 PPF增强珊瑚混凝土的抗弯强度
Fig. 8 Flexural strength of PPF reinforced coral concrete

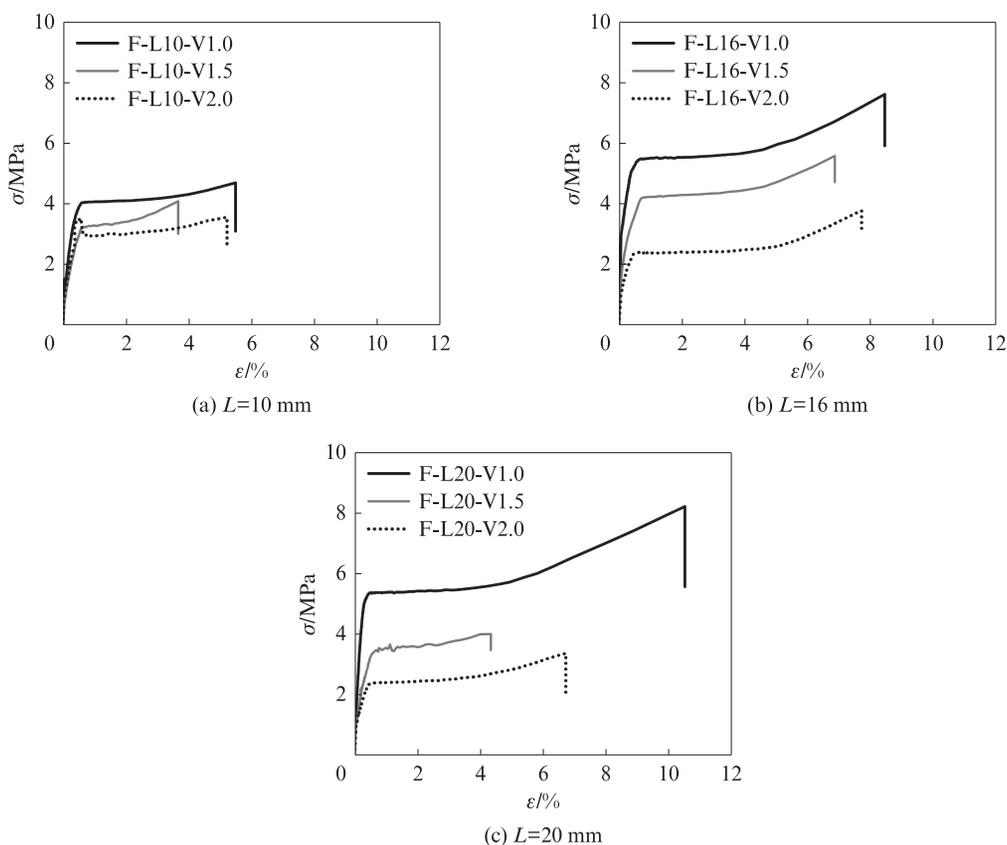


图9 PPF增强珊瑚混凝土的拉伸应力-应变曲线
Fig. 9 Tensile stress-strain curves of PPF fiber reinforced coral concrete

图10为试件F-L16-V1.5和F-L20-V1.0的拉伸应力-应变曲线与三线性本构模型曲线对比。

由图10可见,PPF增强珊瑚混凝土的拉伸应力-应变曲线与三线性本构模型^[25]吻合度较高,可根据如下三线性本构关系式表示:

$$\sigma(\epsilon) = \begin{cases} E_1 \cdot \epsilon, & \epsilon \leq \epsilon_1 \\ \sigma_1 + E_2(\epsilon - \epsilon_1), & \epsilon_1 < \epsilon \leq \epsilon_{sc} \\ \sigma_{sc} + E_3(\epsilon - \epsilon_{sc}), & \epsilon_{sc} < \epsilon \leq \epsilon_{tu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_1 为初始阶段(OA段)弹性模量,MPa; E_2 为稳

①上升阶段 曲线斜率大,应变增长微小,应力趋近直线上升.此时,试件中尚未观察到明显的裂缝。

②屈服阶段 当试件表面相对薄弱的区域出现第1道裂纹时,应力-应变曲线上升阶段出现明显的转折点.此时,PPF开始承担荷载,并在裂纹处发挥其桥接作用.随着细微裂缝的逐渐增多,伴随着应变的增长,应力维持相对稳定,曲线呈出小幅度的水平波动。

③强化阶段 开裂处截面减小,某一条细微裂缝逐渐发展为裂缝,应力-应变曲线变得光滑,并开始加速上升.当荷载达到最高点后,PPF被拔出或拉断,导致应力-应变曲线出现断崖式下降,试件发生断裂。

定开裂阶段(AB段)弹性模量,MPa; E_3 为裂缝扩展阶段(BC段)弹性模量,MPa; σ_1 为初裂点(A点)的应力,MPa; σ_{sc} 为裂缝饱和点(B点)的应力,MPa; ϵ_1 为初裂点(A点)的应变; ϵ_{sc} 为裂缝饱和点(B点)的应变; ϵ_{tu} 为极限拉应力点(C点)的应变。

值得注意的是,PPF增强珊瑚混凝土拉伸应力-应变曲线的上升段与三线性本构模型的OA段略有不同.具体来说,前者存在斜率的小转折变化,可将此上升阶段进一步细分为前、后2个子阶段.在上升

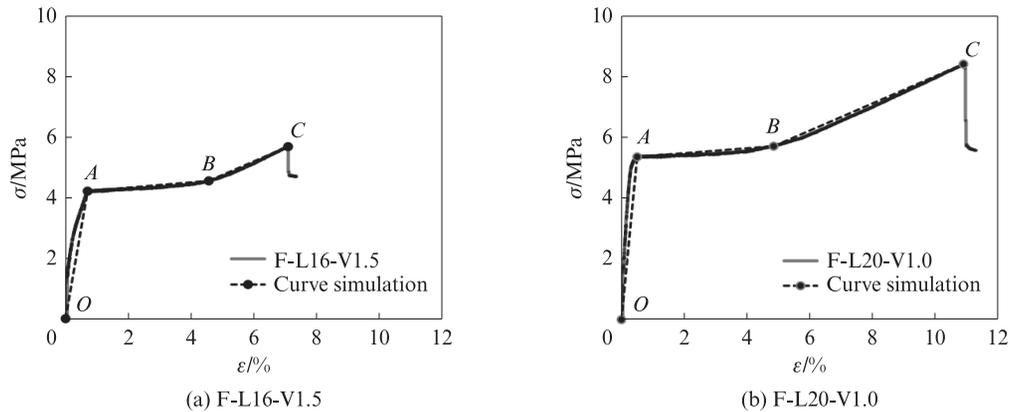


图10 试件F-L16-V1.5和F-L20-V1.0的拉伸应力-应变曲线与三线性本构模型曲线对比

Fig. 10 Comparison of tensile stress-strain curves with the trilinear constitutive model curves of specimen F-L16-V1.5 and F-L20-V1.0

阶段初期,应力-应变曲线具有较大的斜率,应变的增长很微小,此时主要由珊瑚混凝土承担应力,这属于前弹性段;随着拉应力的增大,珊瑚混凝土中的PPF开始逐渐分担部分应力,导致应力-应变曲线斜率略有降低,这一现象在PPF长度为16、20 mm的试件中尤为明显.在此阶段,试件中并未观察到明显的裂缝,这属于后弹性段.因此,适当增加PPF的长度可以在一定程度上提高珊瑚混凝土的早期延性.

本研究中,PPF增强珊瑚混凝土试件在出现主裂缝后,其抗拉承载力并未迅速下降,而是展现出了应变硬化的特性.极限拉应变提升幅度达到了52%~333%(见图11),极限抗拉强度是试件NF的4.0~9.7倍(见图12),这表明PPF能显著增强珊瑚混凝土的拉伸性能.由图11、12还可见:在所有试件中,试件F-L20-V1.0的抗拉强度和极限拉应变增长最为显著;总体而言,随着纤维掺量和长度的增加,PPF增强珊瑚混凝土的抗拉强度呈现出先增加后减少的趋势.PPF对拉伸强度的影响机制与抗弯性能相似,PPF在基体中随机分布形成空间网格结构,承受单轴拉应力.即使珊瑚混凝土开裂,PPF也不会立即断裂,从而提高了混凝土的抗拉强度.然而,当PPF掺量过高时,可能会增加珊瑚混凝土内部的缺陷,削弱PPF的桥接作用.此外,PPF长度过长时容易发生卷曲,也会影响其提升珊瑚混凝土抗拉强度的效果.

2.5 延性指数

延性指数(μ)可以用于评价PPF增强混凝土材料抵抗开裂变形的能力.在相同的情况下, μ 越大,结构材料的韧性越强^[26].其计算式如下:

$$\mu = \Delta u / \Delta y \quad (2)$$

式中: Δu 为极限位移,mm; Δy 为屈服位移,mm.

本文试验的PPF增强珊瑚混凝土试件可按三线

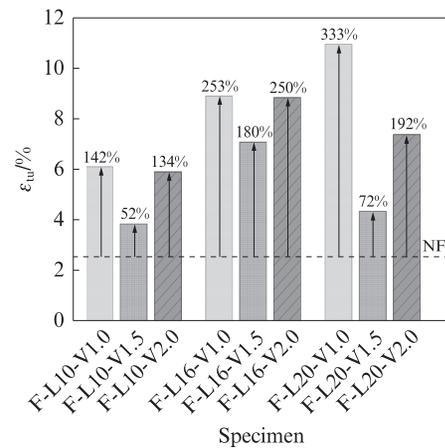


图11 试件的极限拉应变和增长率

Fig. 11 Ultimate tensile strain and growth rate of specimens

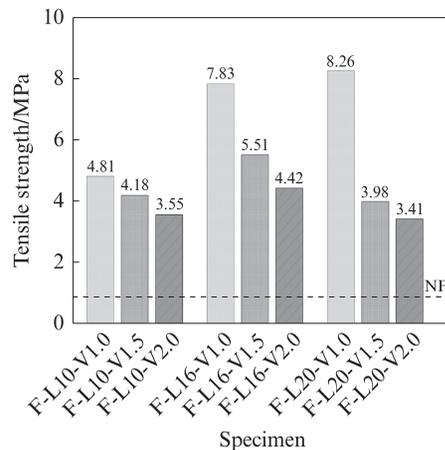


图12 试件的抗拉强度

Fig. 12 Tensile strengths of specimens

性本构模型特征计算延性指数.显然,式(2)可等效为:

$$\mu = \epsilon_{OA} / \epsilon_{OC} \quad (3)$$

式中: ϵ_{OC} 为极限应变; ϵ_{OA} 为屈服应变.

通过参考文献[26-28]中的数据,对纤维增强混

混凝土的延性指数进行了对比分析,结果如图13所示.由图13可见,在本研究以及文献[28]中,珊瑚混凝土具有较高的强度等级,在掺加PPF和聚乙烯醇(PVA)纤维材料之后,珊瑚混凝土的延性指数分别达到了10.89和10.64,这明显高于纤维增强较低强度等级普通混凝土,由此可见混凝土基本力学性能对纤维增强混凝土延性指数有较强的关联性.同时,纤维材料的种类、掺量和长度等参数也对延性指数存在重要影响.

然而,目前关于纤维增强珊瑚混凝土延性的研究相对较少,已有的试验数据还不够充分,仍未能建立起纤维材料参数与混凝土强度等级、延性指数之间的量化关系.为了更深入地理解这些因素之间的相互作用,未来需要进行更加系统化的研究工作.

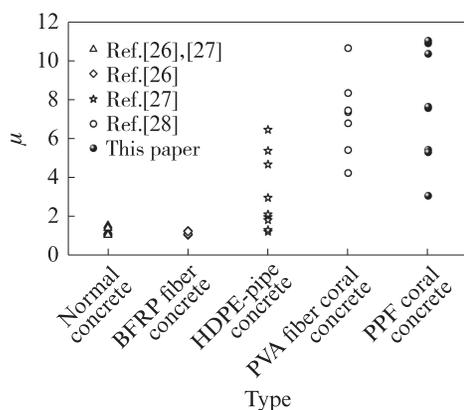


图13 纤维增强混凝土的延性指数对比

Fig. 13 Comparison of ductility index of fiber-reinforced coral concrete

3 结论

(1)聚丙烯纤维(PPF)通过桥接机制有效分散了裂缝尖端的应力集中,延缓了材料脆性破坏的发展. PPF在断裂界面上发挥了显著的抗拉作用,直至其被拔出、断裂或弯扭,导致试件最终失效.

(2)在2.0%的掺量范围内,珊瑚混凝土的抗压强度与PPF掺量呈现出明显的正相关性.增加PPF长度有利于应力在珊瑚混凝土与PPF之间更有效地传递,从而提升了珊瑚混凝土的抗弯强度,最高可达到231%.

(3)PPF增强珊瑚混凝土在极限抗拉强度上得到了显著提升,增幅在4.0~9.7倍之间.其拉伸应力-应变曲线与三线性本构模型的吻合度很高,表现出了明显的应变硬化特性.极限拉应变的提高幅度在52%~332%之间,延性指数可达到10.89.

(4)PPF对珊瑚混凝土起到了显著的增韧和降

脆效果,但同时一定程度上可能导致珊瑚混凝土的密实度和抗压强度降低.因此,在工程应用中采用PPF增韧珊瑚混凝土时,建议根据具体应用场景,综合考量增韧效果与可能导致的密实度和抗压强度降低之间的平衡.

参考文献:

- [1] LYU B C, WANG A G, ZHANG Z H, et al. Coral aggregate concrete: Numerical description of physical, chemical and morphological properties of coral aggregate [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 100:25-34.
- [2] WU Z Y, ZHANG J H, YU H F, et al. Three-dimensional mesoscopic investigation on the impact of specimen geometry and bearing strip size on the splitting-tensile properties of coral aggregate concrete [J]. *Engineering*, 2022, 17(10):110-122.
- [3] 罗大明,周萌,李凡,等. “灯芯效应”下珊瑚骨料混凝土氯离子传输行为[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(11):1173-1182, 1206. LUO Daming, ZHOU Meng, LI Fan, et al. Chloride transportation in coral aggregate concrete due to “wick action” [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(11):1173-1182, 1206. (in Chinese)
- [4] MA H Y, YUE C J, YU H F, et al. Experimental study and numerical simulation of impact compression mechanical properties of high strength coral aggregate seawater concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 137:103466.
- [5] 王磊,赵艳林,吕海波. 珊瑚骨料混凝土的基础性能及研究应用前景[J]. *混凝土*, 2012(2):99-100. WANG Lei, ZHAO Yanlin, LÜ Haibo. Prospect on the properties and application situation of coral aggregate concrete [J]. *Concrete*, 2012(2):99-100. (in Chinese)
- [6] 韩宇栋,王振波,刘伟康,等. 不同强度海水珊瑚骨料混凝土断裂性能对比研究[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(4):881-886. HAN Yudong, WANG Zhenbo, LIU Weikang, et al. Study on fracture properties of seawater coral aggregate concrete with different strengths [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(4):881-886. (in Chinese)
- [7] GUO J B, ZHANG J H, YU H F, et al. Experimental and 3D mesoscopic investigation of uniaxial compression performance on basic magnesium sulfate cement-coral aggregate concrete (BMSC-CAC) [J]. *Composites Part B:Engineering*, 2022, 236:109760.
- [8] DA B, YU H F, MA H Y, et al. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 122:81-89.
- [9] 糜人杰,余红发,麻海燕,等. 全珊瑚骨料海水混凝土力学性能试验研究[J]. *海洋工程*, 2016, 34(4):47-54. MI Renjie, YU Hongfa, MA Haiyang, et al. Study on the mechanical property of coral concrete [J]. *The Ocean Engineering*, 2016, 34(4):47-54. (in Chinese)
- [10] 李力剑,刘素梅,徐凡丁,等. 含粗骨料超高性能混凝土的单轴受拉力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(2):167-173.

- LI Lijian, LIU Sumei, XU Fanding, et al. Uniaxial tensile behavior of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate [J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27(2): 167-173. (in Chinese)
- [11] WANG L, ZHANG Q C, YI J, et al. Effects of coral aggregate properties on the ultrasonic pulse velocity of concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 80:107935.
- [12] WANG Y, ZGANG S H, NIU D T, et al. Strength and chloride ion distribution brought by aggregate of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234:117390.
- [13] NIU D T, SU L, LUO Y, et al. Experimental study on mechanical properties and durability of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 237:117628.
- [14] 王磊, 易金, 邓雪莲, 等. 纤维增强珊瑚混凝土的力学性能研究及破坏形态分析 [J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(5):713-718.
WANG Lei, YI Jin, DENG Xuelian, et al. Study on mechanical property and damage morphology analysis of coral aggregate concrete with fiber [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2016, 35(5):713-718. (in Chinese)
- [15] 王磊, 易金, 余大鹏, 等. 一种高强珊瑚混凝土及其制备方法: ZL2019106738163 [P]. [2021-11-16].
WANG Lei, YI Jin, YU Dapeng, et al. High strength coral concrete and preparation method: ZL2019106738163 [P]. [2021-11-16]. (in Chinese)
- [16] 梁宁慧, 曹郭俊, 刘新荣, 等. 基于三点弯曲试验的聚丙烯纤维桥接应力研究 [J]. *材料导报*, 2020, 34(2):2153-2158.
LIANG Ninghui, CAO Guojun, LIU Xinrong, et al. Study on bridging stress of polypropylene fiber based on three-point bending test [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(2):2153-2158. (in Chinese)
- [17] 樊悦. 聚丙烯纤维增强混凝土断裂过程区分析与断裂性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
FAN Yue. Study on fracture process zone and fracture properties of polypropylene fiber reinforced concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [18] 崔凯, 徐礼华, 池寅. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土等幅受压疲劳变形 [J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(7):755-761.
CUI Kai, XU Lihua, CHI Yin. Fatigue deformation of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete concrete under constant-amplitude cyclic compression [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(7):755-761. (in Chinese)
- [19] 吴继囡, 许志鹏, 王铭涛, 等. 纤维混凝土增韧效应研究进展 [J]. *材料导报*, 2023, 37(增刊1):220-223.
WU Jinan, XU Zhipeng, WANG Mingtao, et al. Research progress on toughening effect of fiber reinforced concrete [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(Suppl 1):220-223. (in Chinese)
- [20] WANG L, SHEN N, YU D P, et al. Strengthening mechanism and microstructure of fibre-reinforced coral mortar and concrete [J]. *Structure Concrete*, 2022, 175(9):671-681.
- [21] 汪卫, 潘钻峰, 孟少平, 等. 国产PVA纤维增强水泥基复合材料力学性能研究 [J]. *工业建筑*, 2014, 44(增刊1):958-964.
WANG Wei, PAN Zuanfeng, MENG Shaoping, et al. Study on mechanical properties of domestic PVA fiber reinforced cementitious composite [J]. *Industrial Construction*, 2014, 44(Suppl 1):958-964. (in Chinese)
- [22] 徐安花. PVA/钢混杂纤维对水泥混凝土弯曲韧性的影响 [J]. *公路工程*, 2014, 39(2):88-92.
XU Anhua. Influence of steel-PVA hybrid fibers for cement concrete on bending toughness [J]. *Highway Engineering*, 2014, 39(2):88-92. (in Chinese)
- [23] 李艳, 梁兴文, 刘泽军. PVA纤维增强水泥基复合材料: 性能与设计 [J]. *混凝土*, 2009(12):54-57.
LI Yan, LIANG Xingwen, LIU Zejun. PVA fiber reinforced cementitious composites: Performance and design [J]. *Concrete*, 2009(12):54-57. (in Chinese)
- [24] 李建强. 高韧性纤维增强水泥基复合材料试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
LI Jianqiang. Experimental research on ultra high toughness cementitious composites [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [25] 杜亮. ECC材料基本力学性能研究 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019.
DU Liang. Experimental study on mechanical properties of ECC [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [26] 庞建勇, 郑瑞琪, 胡秀月, 等. 高温后冷却方式对玄武岩纤维混凝土力学性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(1):92-101.
PANG Jianyong, ZHENG Ruiqi, HU Xiuyue, et al. Effect of cooling method after high temperature on mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(1):92-101. (in Chinese)
- [27] 王俊颜, 杨全兵. HDPE管混凝土延性和韧性的试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(4):394-397.
WANG Junyan, YANG Quanbing. Experimental study on ductility and toughness of hdpe-pipe concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(4):394-397. (in Chinese)
- [28] YI J, WANG L, MA L J, et al. Experimental study on basic mechanical properties of PVA fiber-reinforced coral cement-based composites [J]. *Materials*, 2023, 16(7):2914.