

多尺度混杂纤维增强珊瑚混凝土的单轴压缩性能

刘 兵^{1,2}, 李元举², 王 洋², 明 阳^{1,2}, 张轩煜³, 钱 凯^{1,2}

(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. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 3. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075)

摘 要: 珊瑚混凝土是进行岛礁开发建设的重要建筑材料之一, 多尺度混杂纤维掺入可从多尺度改善珊瑚混凝土的受力性能, 从而拓展其应用范围。以碳纤维(CFs)和玄武岩纤维(BFs)作为微丝纤维、以塑钢纤维(PSFs)作为粗纤维制备了混杂纤维增强珊瑚混凝土(HFRCC), 通过单轴压缩试验研究了其受力性能。结果表明: HFRCC 的单轴受压全过程可分为线弹性、裂缝稳定发展、裂缝不稳定发展和峰后破坏 4 个阶段, 微丝纤维主要在峰前裂缝发展阶段发挥作用, 而粗纤维主要在峰后阶段发挥作用。综合考虑强度和韧性指标, 当 CFs、BFs 体积掺量分别为 0.15%, PSFs 掺量为 7 kg/m³ 时, HFRCC 表现出更优异的性能; 与基准组相比, 峰值应力、峰值应变和峰后压缩韧性分别提高了 6.22%、38.54% 和 116.44%。基于 CEB-FIP 和过镇海的本构模型建立了适用于 HFRCC 的修正本构模型, 模型计算曲线与实测曲线吻合较好。通过修正本构模型探讨了 HFRCC 的损伤演化过程, 发现 CFs、BFs 和 PSFs 混杂掺入可以协同延缓珊瑚混凝土的损伤进程。

关键词: 本构模型; 压缩韧性; 协同效应; 损伤演化; 珊瑚混凝土; 混杂纤维

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)05-1543-11

网络出版时间: 2024-03-11



浩瀚海洋蕴藏着海量的资源, 随着人类社会的进步, 内陆所具备的自然资源日益紧张, 大力发展海洋经济已经成为世界各国的共识^[1]。海洋工程和岛礁建设关系着海洋资源开发的速度, 若将工程建设所需的砂石、淡水等资源由内陆运往偏远岛礁, 会造成建设成本高、周期不可控、能耗高等问题^[2]。所以, 将岛礁上广泛分布的珊瑚礁砂资源代替普通砂石、海水代替淡水来制备珊瑚混凝土成为加快岛礁建设的一个行之有效的解决办法^[3]。自 1951 年以来, 中国内外学者的研究表明珊瑚混凝土可以满足一般工程建设需求, 但是存在脆性大、韧性差和耐久性差等问题^[3-5]。

掺入纤维是改善混凝土力学性能的有效方法之一^[6]。目前, 中国内外学者们对单掺纤维混凝土的研究已经相当广泛, 对其基本物理力学性能、耐久性、韧性及本构关系等都有了丰富的研究成果, 并将其应用到改善珊瑚混凝土性能的研究当中^[4, 7]。目前, 碳

纤维(CFs)、玄武岩纤维(BFs)、聚丙烯纤维(PPs)等多用于珊瑚混凝土改性研究中^[4, 8-9]。例如, 高弹模、低断裂伸长率的 CFs 和 BFs 能够有效延缓珊瑚混凝土的微裂纹开展, 并能增强其抗压强度、劈裂抗拉强度和抗弯性能^[8-9]。掺入低弹模的 PPs 可以有效地降低珊瑚混凝土的脆性, 增强其抗冲击性能^[10]。为给纤维增强珊瑚混凝土应用于结构设计与分析提供依据, Liu 等^[5]进行了 CFs 增强珊瑚混凝土单轴受压本构关系的研究, 建立了适用 CFs 增强珊瑚混凝土的经验分段本构模型和损伤本构模型。Fu 等^[11]建立了玄武岩纤维增强珊瑚混凝土动态本构模型。

不同力学性能、尺寸的纤维对混凝土性能的影响各不相同, 单一纤维的掺入仅能在单一尺度改变混凝土的性能。若将 2 种或 2 种以上的纤维同时掺入到混凝土中, 能发挥出一定的正协同效应, 从多尺度改善混凝土的性能^[12]。大量的研究表明, 混杂

收稿日期: 2023-07-30。 修订日期: 2023-09-25。

基金项目: 广西科技基地与人才专项(桂科 AD22035999); 国家自然科学基金(52108201, U22A20244); 广西自然科学基金(2021GXNSFBA220049, 2021GXNSFFA196001); 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室(22-J-21-9); 广西科技重大专项子课题(AA22068073-3)。

第一作者: 刘 兵(1993—), 男, 博士, 副教授。

通信作者: 钱 凯(1983—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-07-30. Revised date: 2023-09-25.

First author: LIU Bing (1993—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: cnulb@glut.edu.cn

Correspondent author: QIAN Kai (1983—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: qiankai@glut.edu.cn

纤维对混凝土受弯性能、耐久性、抗压强度、损伤演化等方面都产生了一定的协同效应^[13–15]。目前,对于混杂纤维增强普通混凝土的研究成果已经颇为丰富,但是,混杂纤维增强珊瑚混凝土的研究尚不充分。为了更好地了解混杂纤维对珊瑚混凝土性能的影响,课题组前期考虑使用高弹模微丝纤维改善珊瑚混凝土的微裂缝和原始缺陷,同时混掺高断裂伸长率粗纤维桥接珊瑚混凝土的宏观裂缝,从多尺度改善珊瑚混凝土。CFs 是常用微丝纤维中弹模最高的,但其价格较高,故考虑是否可以使用更为经济但弹模相对较高的 BF_s 进行替换。因此选取了 CF_s 和 BF_s 作为微丝纤维进行研究。对于高断裂伸长率的纤维,最常用的是钢纤维,但考虑到珊瑚混凝土的高氯环境,故选取了另一种常用且耐腐蚀的高断裂伸长率粗纤维,即塑钢纤维(PSF_s)。课题组前期将 CF_s、BF_s、PSF_s 混杂掺入珊瑚混凝土,并对这种混杂纤维增强珊瑚混凝土(HFRCC)的基本力学性能开展了研究,证实了其可行性^[9]。为进一步探究这种 HFRCC 在轴压应力下的全过程表现,建立相应的本构模型,为其工程应用设计奠定基础,结合数字图像相关技术(DIC)对其开展了单轴压缩试验。通过试验,得到了 HFRCC 的受压全过程、破坏形态、应力–应变曲线及峰值应力、峰值应变、

残余应力和极限应变等特征值,其次,分析了混杂纤维的影响。最后,基于试验数据,建立了修正本构模型,并基于修正的本构模型对 HFRCC 的损伤演化过程进行了讨论,可为 HFRCC 的后续研究和工程应用提供参考。

1 实验

1.1 原料

采用的胶凝材料为符合 GB175—2007《通用硅酸盐水泥》^[16]的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。采用的粗集料为连续级配 5~20 mm、筒压强度 3.1 MPa 的碎珊瑚;采用的细集料是细度模数为 3.0 的珊瑚砂;粗细骨料的详细参数见课题组前期论文^[9]。采用的海水取自广西北部湾;采用的纤维及其基本物理性质如表 1 所示。此外,还使用了聚羧酸盐减水剂、羟丙基甲基纤维素(HPMC)分散剂和消泡剂。

1.2 配合比及试件制作

配合比与课题组前期混杂纤维增强珊瑚混凝土基本力学性能的研究一致。纤维参数水平是在调研大量文献和前期试配的基础上,选取性能表现较优的掺量水平,并在其上下范围内进行设置。试验以 CF_s、BF_s、PSF_s 的掺量为变量,设计了 16 组 HFRCC,其详细配合比如表 2 所示,同时表 2 中给出了试件的

表 1 纤维参数

Table 1 Physical properties of fibers

Fiber type	Length/mm	Diameter/ μm	Length/diameter	Modulus of elasticity/GPa	Tensile strength/MPa	Breaking elongation/%	Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
CFs	10	7.3	2 740	231.0	4 558.0	2.15	1 820
BFs	12	16.6	723	95.1	3 746.0	3.10	2 630
PSFs	30	920.0	33	5.3	5.3	17.90	910

CF is carbon fiber. BF is basalt fiber. PSF is plastic steel fiber.

表 2 珊瑚混凝土配合比

Table 2 Coral concrete mix ratio

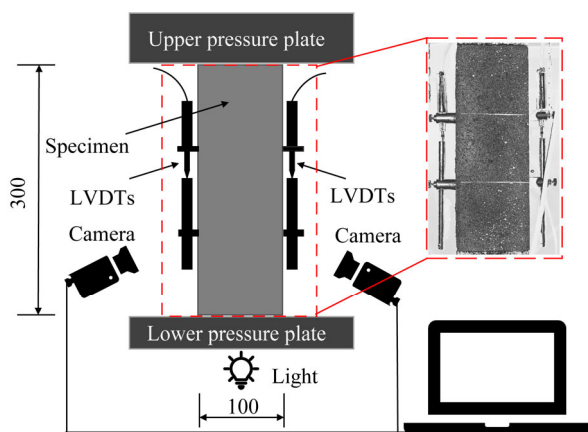
Sample No.	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)							Cube compressive strength/MPa
	Cement	Water	CCAs	CFAs	CFs	BFs	PSFs	
C00B00P00	480	185.8	774	674	0	0	0	32.9
C00B00P04	480	185.8	774	674	0	0	4	33.3
C00B00P07	480	185.8	774	674	0	0	7	35.4
C00B00P10	480	185.8	774	674	0	0	10	33.6
C00B30P00	480	185.8	774	674	0	7.890	0	36.5
C00B30P07	480	185.8	774	674	0	7.890	7	34.5
C10B20P00	480	185.8	774	674	1.82	5.260	0	36.1
C10B20P07	480	185.8	774	674	1.82	5.260	7	34.6
C15B15P00	480	185.8	774	674	2.73	3.945	0	35.9
C15B15P04	480	185.8	774	674	2.73	3.945	4	36.6
C15B15P07	480	185.8	774	674	2.73	3.945	7	35.0
C15B15P10	480	185.8	774	674	2.73	3.945	10	33.4
C20B10P00	480	185.8	774	674	3.64	2.630	0	35.4
C20B10P07	480	185.8	774	674	3.64	2.630	7	33.8
C30B00P00	480	185.8	774	674	5.46	0	0	34.9
C30B00P07	480	185.8	774	674	5.46	0	7	33.5

CCA is coral coarse aggregate. CFA is coral fine aggregate. The volume of fraction of fibers is taken with the entire volume of concrete.

28 d 立方体抗压强度。根据纤维的掺量对 HFRCC 进行编号, 例如, C20B10P07 表示 CFs 和 BFs 的体积分数分别为 0.2% 和 0.1%, PSFs 的掺量为 7 kg/m^3 。本工作进行单轴压缩试验的试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的棱柱体。试件的制作过程详见课题组前期论文^[9]。

1.3 装置和加载方法

试验设备为 1 500 kN 的电液伺服试验机 (RMT-201), 采用速率为 0.005 mm/s 的位移控制模式进行加载。试件中部布置 2 个线性可变差动变压器 (LVDT) 用于采集试件的轴向变形; 同时, 在加载过程中, 试件前后位置架设了非接触应变采集系统 (DIC), 用于获取试件的全场变形数据, 如图 1 所示。



LVDT is linear variable displacement transducer.

图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

2 结果和讨论

2.1 单轴受压全过程分析

根据所选用多尺度混杂纤维的类别, 将 16 组 HFRCC 分为无纤维(基准组)、仅掺微丝纤维、仅掺粗纤维和混杂纤维 4 类进行分析, 对每个类别取 1 条典型的应力-应变曲线, 如图 2 所示。可以看出, 4 条曲线的上升段呈现出相似的发展态势且掺有纤维的曲线峰值均高于基准组; 在曲线的下降段, 仅掺微丝纤维的下降坡度相较于基准组未见明显改善, 而仅掺粗纤维和混杂纤维的下降坡度相较于基准组变缓。

为进一步明确上述 4 类 HFRCC 的单轴受压全过程, 结合 DIC 测得的应变云图对其进行阶段划分, 图 3 为图 2 中典型应力-应变曲线上特征点 A~点 E 处的水平应变云图。根据 Liu 等^[5]进行的碳纤维珊瑚混凝土研究, HFRCC 单轴受压全过程可分为线弹

性、裂缝稳定发展、裂缝失稳发展和峰后破坏 4 个阶段。在单轴受压全过程的前 3 个阶段中, 掺有微丝纤维的 HFRCC 的破坏过程与 Liu 等研究的基本相同; 而仅掺粗纤维的 HFRCC 有所区别, 其应力集中程度大于掺有微丝纤维的 HFRCC。而在第 4 个阶段中, HFRCC 呈现出显著的独特性。

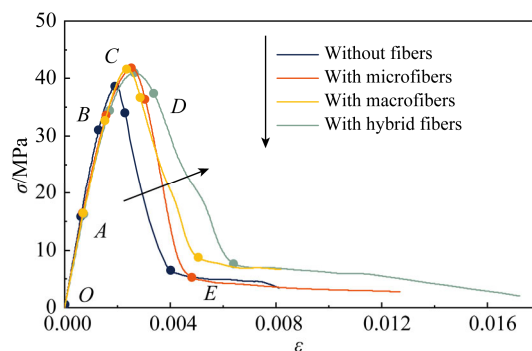


图 2 典型的应力-应变(σ - ϵ)曲线

Fig. 2 Typical stress-strain (σ - ϵ) curves

当应力下降到约为峰值应力的 90% 时(D 点), 由图 3 中对应的点 D 的应变云图可以看出, 相较于基准组, 掺有微丝纤维的 HFRCC 表面裂纹数量更多, 而仅掺粗纤维的 HFRCC 无此现象。这归因于无序分布的高弹模微丝纤维可以桥接微裂缝、传递较大的应力, 而低弹模粗纤维能在微裂缝中传递的应力较小。随着裂缝继续扩展, 微丝纤维被逐渐拔出, 粗纤维在裂缝间传递的应力逐渐增大, 最后在 E 点形成贯穿裂缝。由图 3 中点 E 处的水平应变云图还可以发现掺有粗纤维组的主贯穿裂缝宽度(约 1 mm)小于基准组和仅掺微丝纤维组(约 1.5 mm)。得益于粗纤维的高断裂伸长率, 掺粗纤维试件在形成贯穿裂缝后并不会完全碎裂, 外观整体性和残余承载力均高于不掺粗纤维试件。

2.2 峰值应力和峰值应变

通过各试件的应力-应变曲线提取了峰值应力 (σ_c)、峰值应变 (ϵ_c), 结果如表 3 所示。

图 4a、图 4b 和图 5a、图 5b 分别为有无粗纤维时微丝纤维比例改变及有无微丝纤维时粗纤维掺量改变对珊瑚混凝土 σ_c 和 ϵ_c 的影响。由图 4a 和图 5a 可见, 在不掺粗纤维时, 随 BFs 体积掺量的增加, σ_c 整体呈递增趋势, 而 ϵ_c 呈递减趋势。这归因于 BFs 的长度和直径均大于 CFs, 所以 BFs 具有更强的抗拉能力, 对 σ_c 的增幅效果更好, 但其对 ϵ_c 的增幅效果低于 CFs。当掺入 7 kg/m^3 粗纤维时, σ_c 除 C30B00P07 组外均降低, 表现出负向的协同效应;

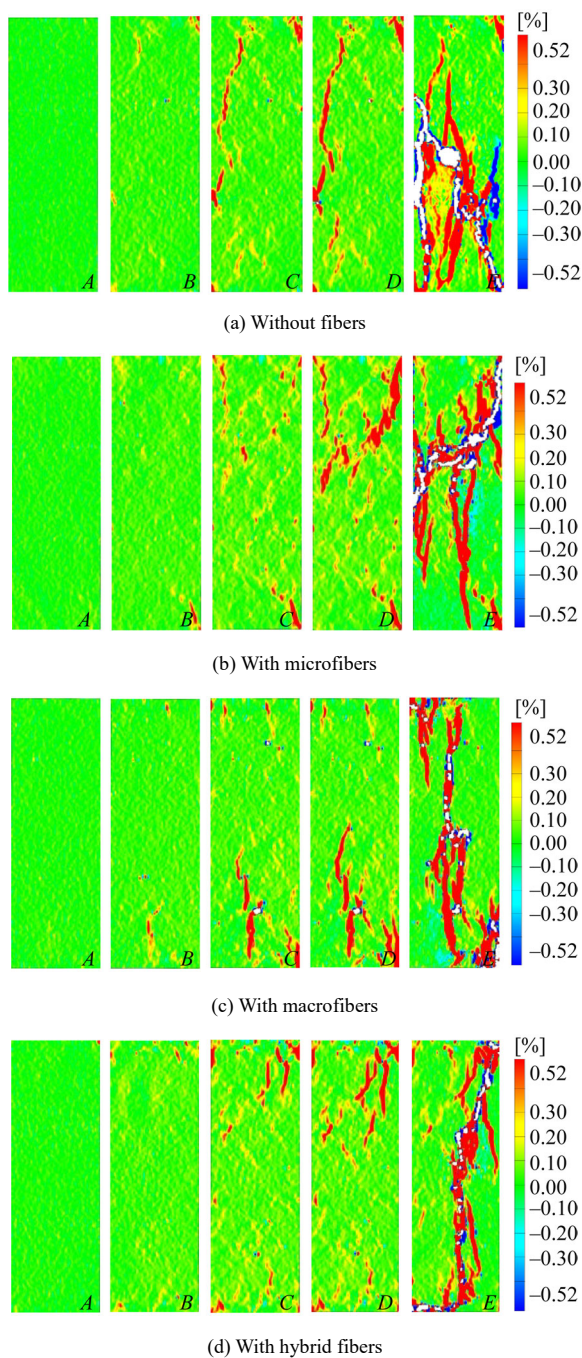


图3 不同加载水平下的水平应变分布

Fig. 3 Horizontal strain distribution at different loading levels

ε_c 均显著提升, 表现出正向的协同效应。这归因于 7 kg/m^3 的 PSFs 与微丝纤维混杂造成纤维掺量过多, 导致珊瑚混凝土中的内部缺陷增加, 抗压强度降低; 但纤维掺量增加会使纤维之间的间距变小, 对 ε_c 的提升有显著影响。由图 4b 和图 5b 可见, 在不掺微丝纤维时, σ_c 和 ε_c 均随粗纤维掺量的增加呈递增趋势, 表明粗纤维对 σ_c 和 ε_c 均有一定的改善作用。当微丝纤维掺入时, 随粗纤维掺量增加, σ_c 呈现出先增大后减小的趋势, C15B15P04 组最大, 相较于基

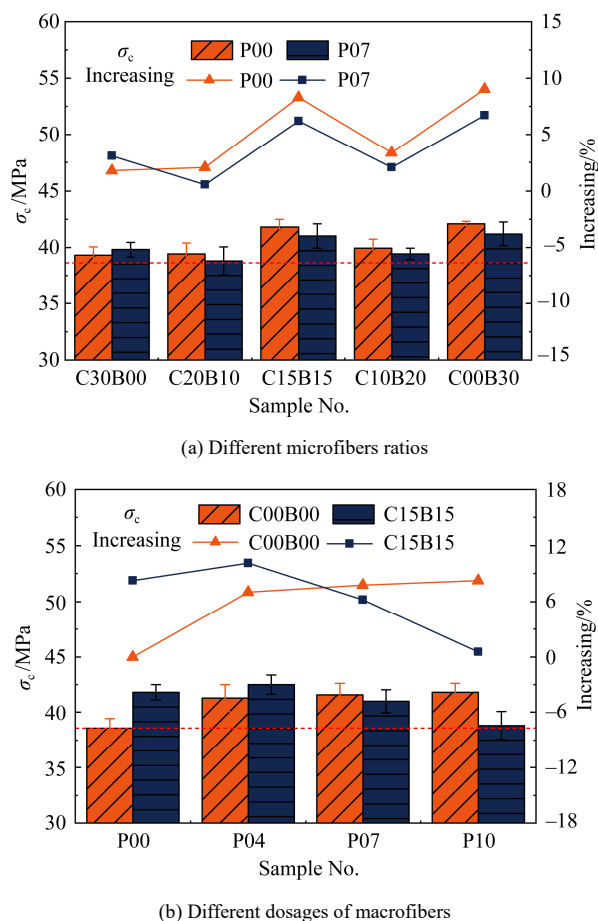


图4 混杂纤维对峰值应力的影响

Fig. 4 Effect of hybrid fibers on peak stress

准组提升了 10.10%; ε_c 则呈现出递增趋势, 其中 C15B15P10 组相较于基准组提升了 41.20%。值得注意的是, C15B15P10 组的 σ_c 相较于基准组仅提升了 0.52%, 这是因为总纤维掺量过高, 在浇筑过程中出现纤维结团成束导致的。

2.3 残余应力和极限应变

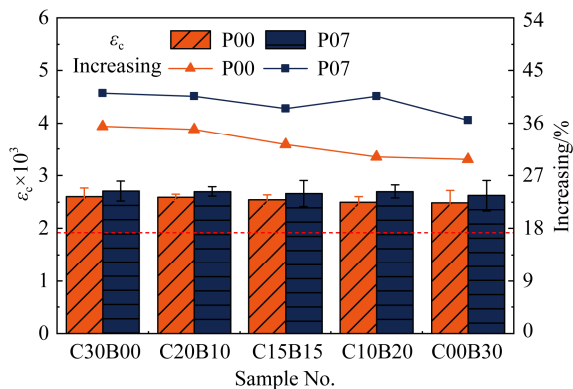
临界剪切点是混凝土应力-应变曲线下降段三阶导为零的点^[17]。图 2 各曲线的点 E 为其临界剪切点, 此时试件形成了贯穿裂缝, 残余承载力主要由破坏面上的摩擦阻力和残余粘附力提供^[15]。参考 Liu 等^[5]的研究, 将该点的应力和应变分别定义为残余应力(σ_r)和极限应变(ε_u)。通过各试件的应力-应变曲线提取了 σ_r 和 ε_u , 如表 3 所示。

图 6 和图 7 分别为混杂纤维对残余应力和极限应变的影响。与前文对 σ_c 和 ε_c 的讨论一致, 由图 6a 和图 7a 可见, 在不掺粗纤维时, σ_r 和残余应力比(σ_r/σ_c)改善不大且无明显规律; ε_u 和极限应变比($\varepsilon_u/\varepsilon_c$)随 BF 体积掺量的增加整体呈降低趋势, 这表明 CFs 对 ε_u 的改善效果更好。当掺入 7 kg/m^3 粗纤维时, σ_r 、 σ_r/σ_c 显著提升; ε_u 、 $\varepsilon_u/\varepsilon_c$ 也有所提升, 这归因于粗纤维的

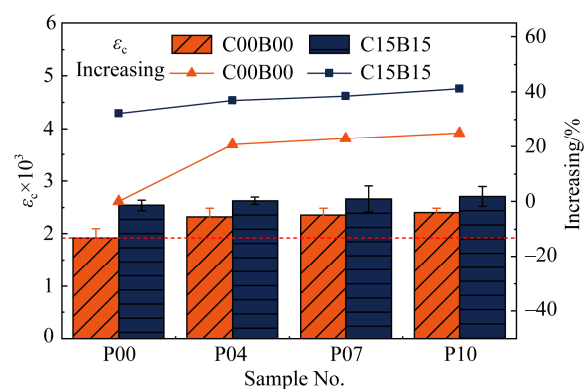
表 3 应力-应变曲线特征值
Table 3 Characteristic values of stress-strain curve

Sample No.	σ_c/MPa		$\varepsilon_c \times 10^{-3}$		σ_r/MPa		$\varepsilon_r \times 10^{-3}$		E_0/GPa		E_s/GPa	
	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std	Mean	Std
C00B00P00	38.6	0.85	1.92	0.18	6.18	0.56	4.12	0.35	25.68	1.27	20.10	0.96
C00B00P04	41.3	1.21	2.32	0.17	9.37	0.45	4.68	0.87	22.23	0.90	17.80	0.79
C00B00P07	41.6	1.00	2.36	0.12	8.14	0.26	5.27	0.71	23.08	1.35	17.63	0.61
C00B00P10	41.8	0.83	2.40	0.09	8.30	0.19	4.86	1.10	23.14	1.91	17.42	0.68
C00B30P00	42.1	0.20	2.49	0.23	6.78	1.36	4.44	0.75	22.76	0.79	16.91	1.70
C00B30P07	41.2	1.05	2.62	0.29	10.08	0.56	5.10	0.81	20.83	2.00	15.73	1.36
C10B20P00	39.9	0.80	2.50	0.10	7.46	1.80	4.61	0.96	21.62	0.01	15.96	0.68
C10B20P07	39.4	0.51	2.70	0.12	8.55	1.72	5.23	0.68	22.01	0.86	14.59	0.46
C15B15P00	41.8	0.69	2.54	0.10	5.67	0.84	4.69	0.32	24.32	0.61	16.46	0.74
C15B15P04	42.5	0.85	2.63	0.07	5.44	0.20	4.87	0.76	22.15	1.32	16.16	0.25
C15B15P07	41.0	1.06	2.66	0.25	7.48	0.74	6.47	0.84	22.40	0.86	15.41	1.25
C15B15P10	38.8	1.25	2.71	0.19	6.38	0.87	5.56	1.20	19.00	1.06	14.32	1.47
C20B10P00	39.4	0.95	2.59	0.06	5.98	1.25	5.34	0.63	20.76	1.24	15.21	0.59
C20B10P07	38.8	1.23	2.70	0.09	7.60	1.12	5.95	0.74	20.67	1.40	14.37	0.89
C30B00P00	39.3	0.74	2.60	0.16	5.26	0.69	5.12	0.56	21.37	1.40	15.12	0.92
C30B00P07	39.8	0.66	2.71	0.19	8.35	1.45	5.16	0.86	20.90	0.68	14.69	1.19

E_0 is initial modulus of elasticity. E_s is peak secant modulus. Mean is average of the three specimens per group. Std is standard error of the mean.

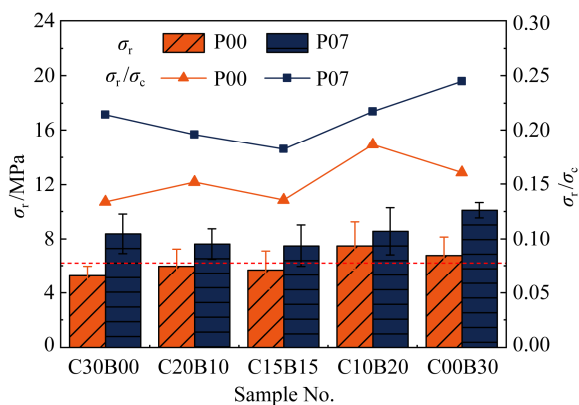


(a) Different microfibrils ratios

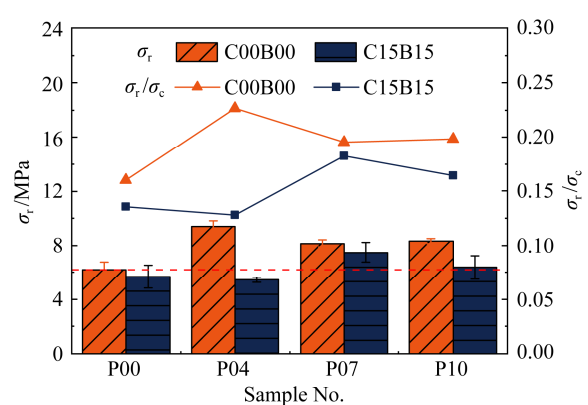


(b) Different dosages of macrofibers

图 5 混杂纤维对峰值应变的影响
Fig. 5 Effect of hybrid fibers on peak strain



(a) Different microfibrils ratios



(b) Different dosages of macrofibers

图 6 混杂纤维对残余应力的影响
Fig. 6 Effect of hybrid fibers on residual stress

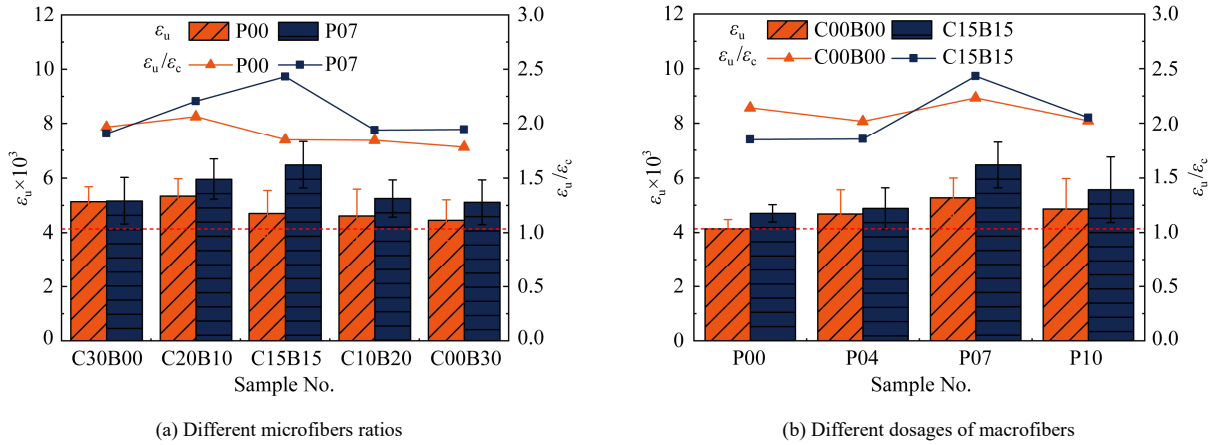


图 7 混杂纤维对极限应变的影响
Fig. 7 Effect of hybrid fibers on ultimate strain

低弹模和高断裂伸长率，使其在珊瑚混凝土开裂后期的低荷载水平能够更好地桥接宏观裂缝。由图 6b 和图 7b 可见，不掺微丝纤维时，随粗纤维掺量增加， σ_r 呈现先增大后减小的趋势，C00B00P04 组增幅最大； ε_u 同样先增加后降低，C00B00P07 组增幅最大。当微丝纤维掺入时， σ_r 、 σ_r/σ_c 均降低； ε_u 虽有提升，但 $\varepsilon_u/\varepsilon_c$ 降低。这归因于多尺度的纤维可以同时改善珊瑚混凝土的多种性能，但因每种纤维的掺量不同导致不同性能的增幅大小不同。

2.4 压缩韧性

混凝土在单轴受压状态下的韧性可以通过能量描述^[18]。根据所掺多尺度纤维作用阶段的不同，将珊瑚混凝土的压缩韧性分为峰前压缩韧性和峰后压缩韧性进行讨论。

使用计算应力-应变曲线峰值荷载前的面积得到的应变能(W_{pre})来反映峰前压缩韧性；峰值荷载后至临界剪切点前的面积得到的应变能(W_{post})来反映峰后压缩韧性。图 8a、图 8b 和图 9a、图 9b 分别为有无粗纤维时微丝纤维比例改变及有无微丝纤维时粗纤维掺量改变对珊瑚混凝土 W_{pre} 和 W_{post} 的影响。由图 8a 和图 9a 可见，在不掺粗纤维时，随 BFs 体积掺量的增加， W_{pre} 和 W_{post} 整体呈降低趋势，这表明 BFs 对峰前、峰后压缩韧性的改善低于 CFs。当掺入 7 kg/m^3 粗纤维时， W_{pre} 有小幅幅度增幅， W_{post} 增幅效果显著，纤维混杂对峰后压缩韧性产生了显著的正向协同效应。这归因于微丝纤维与粗纤维形成了网架结构，使得微丝纤维能够更好地抑制微裂缝的扩展，同时粗纤维桥接宏观裂缝的能力增强。由图 8b 和图 9b 可见，在无微丝纤维掺入时，随粗纤维掺量的增加， W_{pre} 呈递增趋势，而 W_{post} 先增加

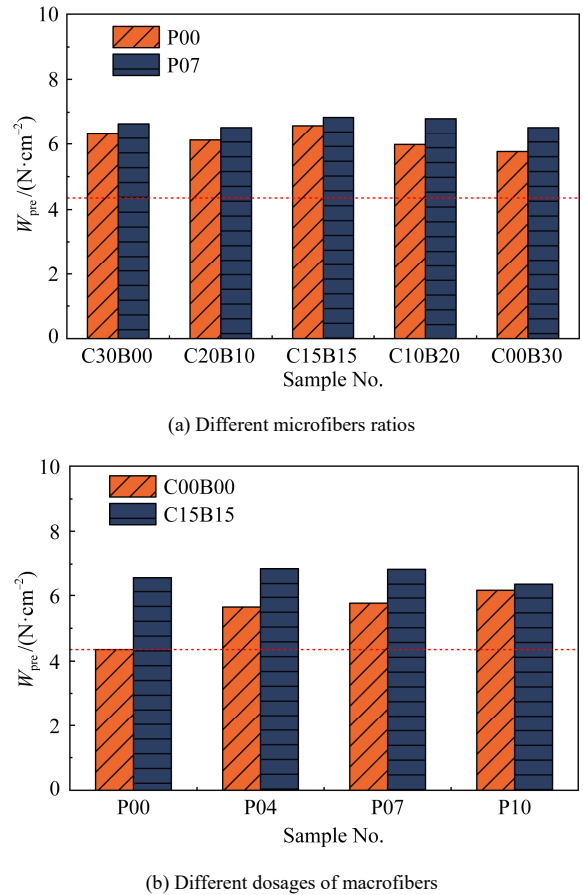
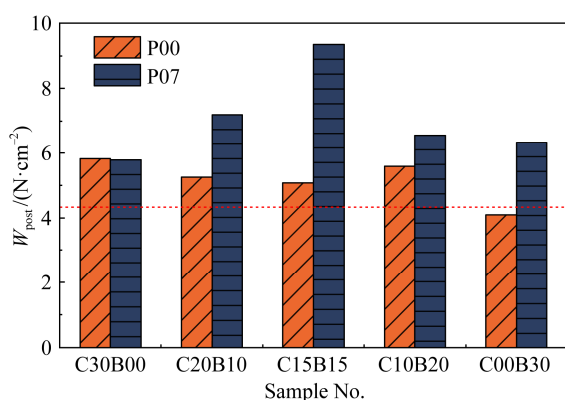


图 8 混杂纤维对峰前压缩韧性的影响
Fig. 8 Effect of hybrid fibers on pre-peak compression toughness

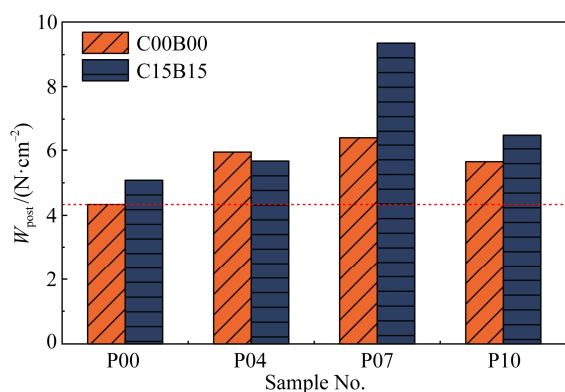
后降低。在有微丝纤维掺入时，随粗纤维掺量的增加， W_{pre} 和 W_{post} 均出现先增加后降低的趋势，这表明纤维掺量过多会使压缩韧性的增幅效果降低。C15B15P04 组的 W_{pre} 增幅最大，相较于基准组提升了 57.83%，C15B15P07 组的 W_{post} 增幅最大，相较于基准组提升了 116.44%。

2.5 讨论

微丝纤维在小掺量下能在混凝土基体中形成随机乱向分布的纤维网络,其不仅能弥合微裂缝,抑制初始裂缝扩展、跨微裂缝传递应力减少应力集中,而且能增强珊瑚混凝土的界面过渡区性能^[19]。但由于微丝纤维的弹模较大且断裂伸长率较低,在宏观裂缝形成后,微丝纤维多数已被拉断或拔出,不能再有效地桥接宏观裂缝。具有更高断裂伸长率的粗纤维则可以继续起到桥接宏观裂缝和在宏观裂缝间传递应力的作用。因此高弹模微丝纤维和高断裂伸长率粗纤维混杂掺入珊瑚混凝土,可以从多尺度改善其受力性能。但根据试验结果可见,混杂纤维掺量过多会使对珊瑚混凝土性能的改善作用降低,这表明各纤维存在最佳掺量水平。因此结合上述讨论,优化混杂纤维中各纤维的掺量来防止在不同应力水平下多尺度裂纹的形成是非常有必要的。由图 2~图 9 可以总结出, C15B15P04 组对峰值应力和峰前压缩韧性的增幅效果最好,但综合考虑珊瑚混凝土峰值荷载之后的性能表现,认为 C15B15P07 组整体改善效果最优。



(a) Different microfibers ratios



(b) Different dosages of macrofibers

图 9 混杂纤维对峰后压缩韧性的影响

Fig. 9 Effect of hybrid fibers on post-peak compression toughness

3 单轴受压本构模型

混凝土单轴受压本构模型用于预测和分析混凝土在单轴受压下的受力行为,是对混凝土结构进行设计和分析的重要基础^[20]。因此,学者们提出了许多不同类型的本构模型来评估和比较不同类型的混凝土材料在单轴受压条件下的性能^[21]。通过分析, HFRCC 在单轴压缩荷载作用下的受压性能不同于其他类型混凝土,因此,有必要建立 HFRCC 的本构模型。

3.1 本构模型的建立

2.1 节已经对全应力-应变曲线形状及特征点进行了分析,发现 CEB-FIP^[22]所提出模型的上升段和过镇海等^[23]所提出模型的下降段可以反映 HFRCC 的应力-应变曲线特征,所以本工作根据两者的本构模型建立了修正的 HFRCC 本构模型如下:

$$y = \begin{cases} \frac{ax - x^2}{1 + (a-2)x}, & 0 \leq x < 1 \\ \frac{x}{b(x-1)^{2.5} + x}, & x \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x = \varepsilon / \varepsilon_c$; $y = \sigma / \sigma_c$; σ 为珊瑚混凝土应力 (MPa); ε 为珊瑚混凝土应变; a 和 b 是表征 HFRCC 物理力学性能的参数。

在式(1)所示的本构模型中,上升段曲线函数的参数 a 有明确的物理意义,它表示峰值割线模量与初始弹性模量的比值。 a 值越小,则峰值割线模量与初始弹性模量的比值越大,即珊瑚混凝土的峰前压缩韧性越差。反之, a 值越大,珊瑚混凝土峰前压缩韧性越好。参数 b 也有其相应的物理意义,参数 b 值越大,则珊瑚混凝土的峰后压缩韧性越差,下降段越陡; b 值越小,则混凝土的峰后压缩韧性越好,下降段越平缓。

由式(1)对 HFRCC 单轴受压应力-应变曲线进行拟合,拟合结果如表 4 所示。可见所有拟合曲线的校正 R^2 值都在 0.92 以上,表明模型计算曲线与试验曲线吻合较好,图 10 为部分试件的计算曲线与试验曲线对比。鉴于试验数据较少,还不能准确的建立参数值 a 和 b 与纤维参数之间的关系式,后续还需要继续进行研究。

3.2 损伤演变

根据学者基于连续体损伤力学提出的损伤本构模型和损伤理论^[24-25],损伤因子可表示为:

$$D = 1 - \frac{\sigma}{E_0 \varepsilon} \quad (2)$$

表 4 应力-应变曲线拟合参数
Table 4 Fitting parameters for stress-strain curves

Sample No.	Parameter <i>a</i>		Parameter <i>b</i>		R_{MSE}	Adjusted R^2
	Estimate	SE	Estimate	SE		
C00B00P00	1.326	0.012 2	5.397	0.117 2	0.001 4	0.986
C00B00P04	1.306	0.020 2	4.703	0.077 2	0.003 5	0.957
C00B00P07	1.351	0.014 3	4.549	0.050 9	0.001 9	0.981
C00B00P10	1.471	0.029 8	5.741	0.115 6	0.004 2	0.947
C00B30P00	1.387	0.006 7	17.153	0.108 2	0.008 1	0.989
C00B30P07	1.432	0.032 1	4.557	0.097 9	0.006 1	0.925
C10B20P00	1.449	0.023 3	7.071	0.120 9	0.003 1	0.966
C10B20P07	1.607	0.025 9	5.748	0.080 9	0.002 3	0.976
C15B15P00	1.552	0.019 3	10.905	0.152 6	0.001 6	0.983
C15B15P04	1.486	0.018 1	9.559	0.131 2	0.001 5	0.984
C15B15P07	1.619	0.025 5	2.729	0.032 3	0.001 9	0.979
C15B15P10	1.413	0.024 3	5.657	0.099 2	0.002 4	0.968
C20B10P00	1.445	0.012 8	7.748	0.074 9	0.008 5	0.991
C20B10P07	1.576	0.026 7	4.081	0.059 4	0.002 7	0.969
C30B00P00	1.541	0.016 6	6.108	0.064 1	0.001 1	0.988
C30B00P07	1.528	0.024 8	7.072	0.117 2	0.003 1	0.966

Estimate is estimated value of the parameter. SE is standard error of the parameter estimated value. R_{MSE} is root mean square error.

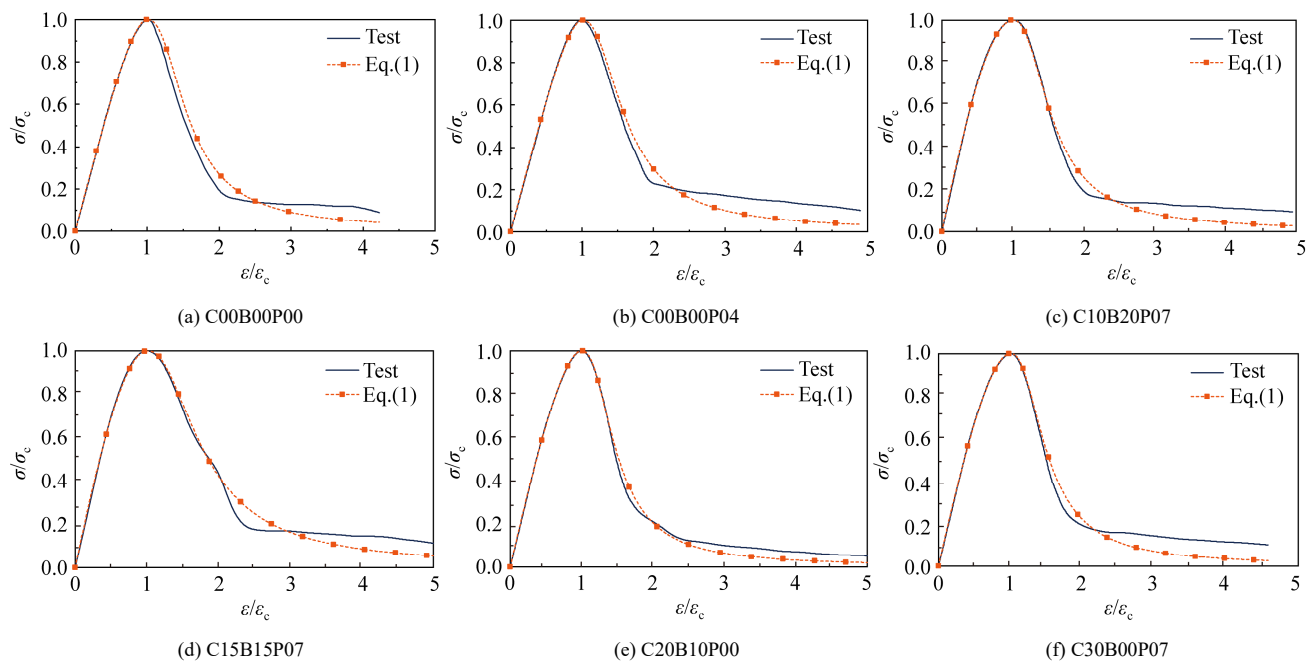


图 10 试验曲线与计算曲线对比

Fig. 10 Comparison between experimental curves and calculated curves

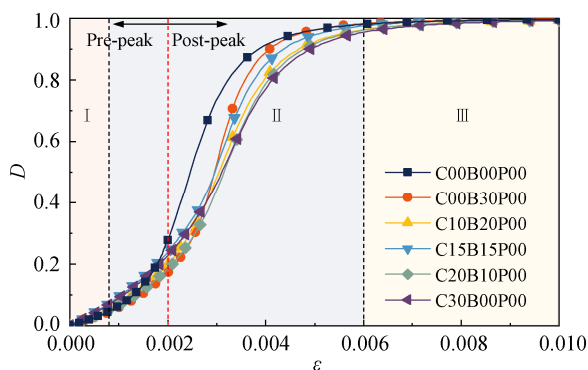
结合所建立的本构模型, 将式(1)代入式(2), 则损伤因子的计算公式如式(3)所示:

$$D = \begin{cases} 1 - \frac{a\varepsilon_c - \varepsilon}{a\varepsilon_c + (a^2 - 2a)\varepsilon}, & \varepsilon \leq \varepsilon_c \\ 1 - \frac{1}{ab(\varepsilon/\varepsilon_c - 1)^{2.5} + a\varepsilon/\varepsilon_c}, & \varepsilon > \varepsilon_c \end{cases} \quad (3)$$

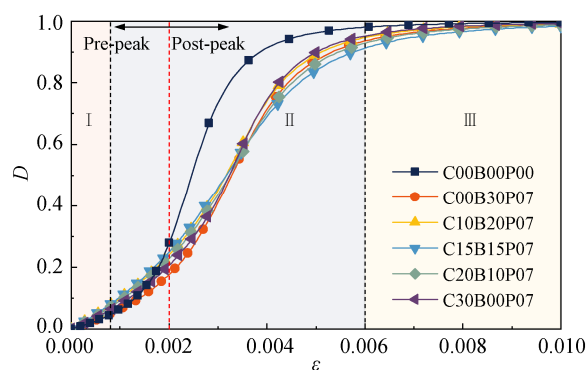
根据式(3)计算得到损伤演化曲线如图 11 所示。

根据图 11 分析, 损伤演化大致可分为 3 个阶段:

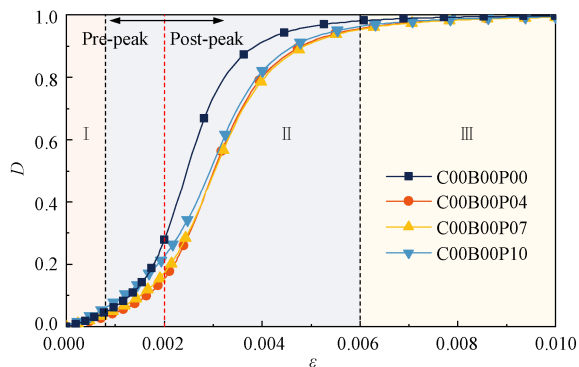
- 1) 初始损伤阶段: 此阶段珊瑚混凝土微裂缝尚未扩展, 损伤演化速率极低, 纤维尚未发挥作用。
- 2) 快速损伤阶段: 此阶段珊瑚混凝土的损伤曲线呈“S”型单调递增, 且纤维混杂对损伤演化速率有延缓作用。
- 3) 完全损伤阶段: 此阶段珊瑚混凝土已经完全破坏, 进入到残余应力水平, 损伤因子接近 1。



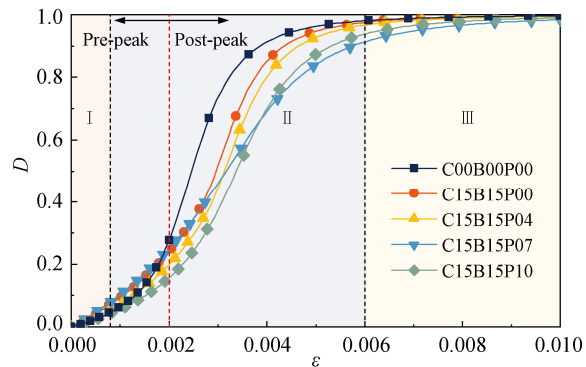
(a) Incorporated with different proportions of microfibers and without macrofibers



(b) Incorporated with different proportions of microfibers and macrofibers



(c) Incorporated with varying amounts of macrofibers and without microfibers



(d) Incorporated with varying amounts of macrofibers and microfibers

Area I, II, and III in the figure correspond to the OA section, AE section and point E in Fig. 2, respectively.

图 11 损伤演化曲线

Fig. 11 Damage evolution curves

4 结论

研究了碳纤维、玄武岩纤维、塑钢纤维混杂增强珊瑚混凝土(HFRCC)在轴压应力作用下的受压全过程、破坏形态、力学响应及损伤演化,根据试验结果和讨论,可以得出以下结论:

1) HFRCC 单轴受压全过程可分为线弹性阶段、裂缝稳定发展阶段、裂缝不稳定发展阶段和峰后破坏阶段。微丝纤维主要作用于前 3 个阶段微裂缝的扩展,粗纤维在峰后破坏阶段起到桥接大裂缝的作用;

2) 混杂纤维的掺入提高了珊瑚混凝土的峰值应力、峰值应变、极限应变和压缩韧性,其对残余应力的影响并不明显。微丝纤维对峰值应力、峰值应变和峰前压缩韧性的增幅效果较好,粗纤维对残余应力、极限应变和峰后压缩韧性的作用更突出;

3) 仅掺微丝纤维时,珊瑚混凝土的单轴压缩性能均有提升,BFs 对峰值应力的提升优于 CFs,但对峰值应变和压缩韧性的改善效果略低于 CFs。对于韧性要求不是很高的工程,全部使用玄武岩纤维替代碳纤维是可行的,且成本更具优势;

4) 微丝纤维与粗纤维混杂整体上对峰值应变、

极限应变和压缩韧性产生了正向的协同效应。在其掺量合理范围内对峰值应力产生正向协同效应,掺量过大表现出负向的协同效应;

5) 建立了修正的本构模型,模型中参数具有明确的物理意义,模型计算曲线与本工作试验曲线吻合较好;

6) 多尺度纤维混杂对延缓珊瑚混凝土快速损伤阶段的损伤演化速率产生了正向的协同效应。

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]. Cem Concr Compos, 2019, 100: 25–34.
- [2] TANG J W, CHENG H, ZHANG Q B, et al. Development of properties and microstructure of concrete with coral reef sand under sulphate attack and drying-wetting cycles[J]. Constr Build Mater, 2018, 165: 647–654.
- [3] DA B, YU H F, MA H Y, et al. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 122: 81–89.
- [4] LIU B, GUO J H, ZHOU J K, et al. The mechanical properties and microstructure of carbon fibers reinforced coral concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 249: 118771.

- [5] LIU B, ZHOU J K, WEN X Y, et al. Mechanical properties and constitutive model of carbon fiber reinforced coral concrete under uniaxial compression[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 263: 120649.
- [6] ZHAO C G, WANG Z Y, ZHU Z Y, et al. Research on different types of fiber reinforced concrete in recent years: An overview[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 365: 130075.
- [7] RAO L, WANG L, ZHENG Y. Experimental research on mechanical properties and compression constitutive relationship of PVA fiber-reinforced coral concrete[J]. *Materials*, 2022, 15(5): 1762.
- [8] FU Q, XU W R, HE J Q, et al. Dynamic strength criteria for basalt fibre-reinforced coral aggregate concrete[J]. *Compos Commun*, 2021, 28: 100983.
- [9] LIU B, ZHANG X Y, YE J P, et al. Mechanical properties of hybrid fiber reinforced coral concrete[J]. *Case Stud Constr Mater*, 2022, 16: e00865.
- [10] 易金, 刘超, 王磊. 聚丙烯纤维增强珊瑚混凝土抗冲击性能试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(4): 244–248.
YI Jin, LIU Chao, WANG Lei. *Sci Technol Eng*, 2019, 19(4): 244–248.
- [11] FU Q, XU W R, BU M X, et al. A simplified dynamic constitutive model for BFRAC under confining pressure considering the coupling effect of fibre reinforcement and mechanical damage[J]. *Compos Struct*, 2021, 268: 113944.
- [12] 李习波. 混杂纤维高强混凝土动态损伤本构关系[D]. 广州: 广州大学, 2015.
LI Xibo. *Dynamic damage constitutive relationship of hybrid fiber reinforced high strength concrete*[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015.
- [13] 夏广政, 夏冬桃, 徐礼华, 等. 混杂纤维增强混凝土深梁受弯性能试验研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(11): 31–33.
XIA Guangzheng, XIA Dongtao, XU Lihua, et al. *J Huazhong Univ Sci Technol Nat Sci Ed*, 2007, 35(11): 31–33.
- [14] 华渊, 曾艺, 刘荣华. 混杂纤维增强混凝土耐久性试验研究[J]. *低温建筑技术*, 1998, 20(3): 18–20.
HUA Yuan, ZENG Yi, LIU Ronghua. *Low Temp Archit Technol*, 1998, 20(3): 18–20.
- [15] FENG J J, YIN G S, TUO H L, et al. Uniaxial compressive behavior of hook-end steel and macro-polypropylene hybrid fibers reinforced recycled aggregate concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 304: 124559.
- [16] 中国建筑材料工业协会. 通用硅酸盐水泥: GB175—2007[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会.
- [17] 赵高锦, 赵卓, 陈歆, 等. 玄武岩纤维混凝土应力-应变全曲线试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(1): 103–107.
ZHAO Gaojin, ZHAO Zhuo, CHEN Xin, et al. *J Water Resour Archit Eng*, 2019, 17(1): 103–107.
- [18] 刘基程. 珊瑚混凝土变形破坏过程能量演化规律及损伤特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
LIU Jicheng. *Study on energy evolution law and damage characteristics of coral concrete during deformation and failure process*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [19] DENG F Q, XU L H, CHI Y, et al. Effect of steel-polypropylene hybrid fiber and coarse aggregate inclusion on the stress-strain behavior of ultra-high performance concrete under uniaxial compression[J]. *Compos Struct*, 2020, 252: 112685.
- [20] DENG M K, PAN J J, LIANG X W. Uniaxial compressive test of high ductile fiber-reinforced concrete and damage constitutive model[J]. *Adv Civ Eng*, 2018, 2018: 1–12.
- [21] NATARAJA M C, DHANG N, GUPTA A P. Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression[J]. *Cem Concr Compos*, 1999, 21(5/6): 383–390.
- [22] CEB-FIP model code 1990: Design code[C]/CEB-FIP MODEL CODE 1990, London, 1993.
- [23] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 1982, 3(1): 1–12.
GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin, ZHANG Dacheng, et al. *J Build Struct*, 1982, 3(1): 1–12.
- [24] JEAN L. How to use damage mechanics[J]. *Nucl Eng Des*, 1984, 80(2): 233–245.
- [25] KRAJCINOVIC D, FONSEKA G U. The continuous damage theory of brittle materials, part 1: General theory[J]. *J Appl Mech*, 1981, 48(4): 809–815.

Uniaxial Compressive Behavior of Multi-Scale Hybrid Fiber Reinforced Coral Concrete

LIU Bing^{1,2}, LI Yuanju², WANG Yang², MING Yang^{1,2}, ZHANG Xuanyu³, QIAN Kai^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Extended Abstract

Introduction Using coral concrete made from coral aggregates instead of conventional coarse and fine aggregates and seawater instead of freshwater for island reef construction can reduce costs and shorten the construction period for the development of the marine economy. However, coral concrete has some challenges such as high brittleness, poor toughness, and limited durability, thus restricting its application in engineering. Previous studies confirm that incorporating fibers can effectively enhance the mechanical properties of concrete. Therefore, in coral concrete, some microfibers with high elastic modulus are considered to reduce the microcracks, and some macro-fibers with high fracture toughness and elongation are considered to bridge the macrocracks, enhancing its mechanical performance in multiple scales. Carbon fibers (CFs) have the maximum elasticity modulus among commonly used micro-fibers. However, replacing carbon fibers with more economical and relatively high-modulus basalt fibers (BFs) is an effective approach. In this paper, CFs and BFs were selected as microfibers. High-elongation plastic steel fibers (PSFs) were also selected as

macro-fibers instead of the steel fibers most commonly used in concrete. The CFs, BFs, and PSFs were incorporated into coral concrete. The mechanical properties of the hybrid fibers-reinforced coral concrete (HFRCC) under axial compression were investigated, and the corresponding constitutive model was proposed.

Methods Cement used was ordinary Portland cement P·O 42.5, adhering to the code GB175. A coarse aggregate used was a crushed coral with a continuous gradation of 5 mm to 20 mm and a tube compressive strength of 3.1 MPa. A fine aggregate used was a coral sand with a fineness modulus of 3.0. Seawater was taken from Beibu Gulf, Guangxi, China. The admixtures include a polycarboxylate superplasticizer, a hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC), and an antifoaming agent. The study involved sixteen mix proportions for HFRCCs with different dosages of CFs, BFs and PSFs.

A uniaxial compression test was conducted on prismatic specimens with the dimensions of 100 mm×100 mm×300 mm by a model RMT-201 electro-hydraulic servo testing machine (1 500 kN). To measure the axial deformation of specimens, two LVDTs were placed in the middle of the specimen. Simultaneously, during the loading, a digital image correlation (DIC) system was arranged at the front and rear positions of the specimen to record complete deformations throughout the specimen failure. The failure process, failure modes, and stress-strain curves of the specimens were determined *via* uniaxial compression tests. Key parameters such as peak stress, peak strain, residual stress, and ultimate strain were extracted from the stress-strain curves. The strain field and failure process were analyzed by digital image correlation (DIC) system. In addition, a modified constitutive model suitable for HFRCC was also established based on the experimental data.

Results and discussion The uniaxial compression process of HFRCC can be divided into four stages, *i.e.*, linear elasticity, stable crack development, unstable crack propagation, and post-peak failure. Microfibers predominantly affect the crack development before the peak stage, while macro-fibers play a crucial role in the post-peak stage. In the post-peak failure stage, a combination of DIC system obtained horizontal strain distribution cloud maps reveals that HFRCC with micro-fibers exhibits a more uniform strain distribution, compared to HFRCC without fibers or with only macro-fibers. However, in HFRCC with macro-fibers, the main through crack has a width of approximately 1 mm, which is smaller than that of HFRCC without fibers or with only micro-fibers (approximately 1.5 mm). The incorporation of high-modulus microfibers and high-fracture toughness macro-fibers into coral concrete enhances its mechanical properties in multiple scales. This is attributed to a ability of micro-fibers at low dosages to form a randomly oriented fiber network in the concrete matrix. This network bridges the micro-cracks, suppresses the extension of initial cracks, and transfers stress across micro-cracks to reduce stress concentration as well as enhances the performance of the interface transition zone. However, most of them break or pull out after macro-crack formation due to the high modulus and low fracture toughness of micro-fibers. Also, macro-fibers with a higher fracture toughness can continue to bridge macro-cracks and transfer stress between them even after the formation of macro-cracks. For the both strength and toughness, HFRCC exhibits a superior performance when the volume fractions of CFs and BFs are 0.15% each, and PSFs dosage is 7 kg/m³. Compared to the coral concrete without fibers, the peak stress, peak strain, and post-peak compressive toughness of HFRCC are increased by 6.22%, 38.54% and 116.44%, respectively.

A modified constitutive model suitable for HFRCC is proposed based on the CEB-FIP model and the Guo Zhenhai model, and the calculated data of the model fit well with the measured results. The damage evolution process of HFRCC investigated by the modified constitutive model reveals that the incorporation of CFs, BFs, and PSFs can synergistically delay the damage progression of coral concrete.

Conclusions The uniaxial compression process of HFRCCs could be divided into four stages, *i.e.*, linear elasticity, stable crack development, unstable crack propagation, and post-peak failure. Microfibers played a crucial role in expanding microcracks during the first three stages, showing beneficial effects on the peak stress, peak strain, and pre-peak compressive toughness. Macro-fibers acted as bridging elements for macro-cracks in the peak failure stage, demonstrating a more significant impact on the residual stress, ultimate strain, and post-peak compressive toughness. Each type of fiber had an optimal dosage level, and the reasonable dosage of fibers could generate positive synergistic effects. When only micro-fibers were added, BFs contributed more to the increase in peak stress rather than CFs, but their improvement in peak strain and compressive toughness was slightly lower than that of CFs. This indicated that for engineering applications with lower toughness requirements, it could be feasible to replace CFs entirely with more cost-effective BFs. The calculated data of the modified constitutive model aligned well with the experimental results. This work investigated the damage evolution process of HFRCC, revealing that the incorporation of CFs, BFs, and PSFs could collaboratively delay the damage progression of coral concrete.

Keywords constitutive model; compressive toughness; synergy effect; damage evolution; coral concrete; hybrid fibers