

珊瑚海水海砂混凝土压-剪复合力学性能

陈宇良 包尔康 何钦 李佳成 叶培欢

Compressive-shear composite mechanical properties of coral seawater sea sand concrete

CHEN Yuliang, BAO Erkang, HE Qin, LI Jiacheng, YE Peihuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240719.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高温后珊瑚海水海砂混凝土直剪力学性能及损伤演化

Direct shear mechanical properties and damage evolution of coral seawater sea-sand concrete after high temperature

复合材料学报. 2023, 40(7): 4128–4138 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221024.002>

圆形CFRP-钢复合管海水海砂珊瑚混凝土柱轴压性能试验研究

Experimental study on axial compression performance of CFRP-steel composite tube filled circular seawater sea-sand coral concrete columns

复合材料学报. 2022, 39(8): 3982–3993 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210909.012>

珊瑚海砂海水混凝土中CFRP-钢复合筋搭接性能

Lap-spliced behavior of CFRP-steel composite bars in coral sea-sand seawater concrete

复合材料学报. 2024, 41(5): 2645–2661 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230829.001>

新型碳纤维增强复合材料-钢复合管海水海砂混凝土圆柱轴压试验

Axial compression behavior of new seawater and sea sand concrete filled circular carbon fiber reinforced polymer-steel composite tube columns

复合材料学报. 2021, 38(9): 3084–3093 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201117.001>

模拟海水-海砂混凝土环境下连续玻璃纤维增强聚丙烯复合材料杆层间剪切性能的演化

Interlaminar shear behavior of glass-fibre reinforced polypropylene rod under seawater and sea sand concrete simulation environment

复合材料学报. 2024, 41(1): 323–332 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230516.003>

CFRP筋与海水海砂混凝土粘结性能试验与机制分析

Experiment on bond performance between CFRP bar and seawater sea sand concrete and its working mechanism

复合材料学报. 2022, 39(3): 1194–1204 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210512.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240719.004

珊瑚海水海砂混凝土压-剪复合力学性能



分享本文

陈宇良^{*1,2}, 包尔康¹, 何钦¹, 李佳成¹, 叶培欢^{1,2}

(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 柳州 545006; 2. 广西科技大学 柳州市绿色先进土木工程材料应用重点实验室, 柳州 545006)

摘要: 为研究珊瑚海水海砂混凝土 (CSSC) 在压剪复合作用下的力学性能, 以压应力比为变化参数设计并制作 21 个珊瑚海水海砂混凝土试件进行压剪试验, 观察了试件在压-剪复合作用下的破坏形态, 深入分析了压应力比对 CSSC 剪切强度的影响, 并提出了剪切强度计算公式和破坏准则。研究结果表明: 随着压应力比 k 的增大, CSSC 剪切强度近似呈幂函数状增大, 试件脆性破坏特征逐渐减弱。当 k 以 0.1 为增量从 0 增加到 0.5 时, 剪切强度分别提升了 1.53、2.81、3.60、4.32、4.67 倍。珊瑚海水海砂混凝土剪切强度主要由黏聚强度、骨料咬合强度和界面摩擦强度组成, 其分别占剪切强度的 10%~22%、19%~30% 和 50%~69%; 随着压应力比的增大, 黏聚强度先增加后减小, 骨料咬合强度总体呈上升趋势, 界面摩擦强度近似呈线性增加。根据试验数据提出 CSSC 剪切强度计算公式, 计算值与试验值吻合较好; 使用不同的破坏准则对试验数据进行分析, 发现基于主应力空间的破坏准则与试验结果吻合最好。

关键词: 珊瑚海水海砂混凝土; 压-剪复合作用; 失效机制; 剪切强度; 破坏准则

中图分类号: TU528; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2025)05-2809-10

Compressive-shear composite mechanical properties of coral seawater sea sand concrete

CHEN Yuliang^{*1,2}, BAO Erkang¹, HE Qin¹, LI Jiacheng¹, YE Peihuan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 2. Liuzhou Key Laboratory of Green Advanced Civil Engineering Materials Application, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of coral seawater and sea sand concrete (CSSC) under the combined action of compression and shear, 21 coral seawater and sea sand concrete specimens were designed and manufactured with the compressive stress ratio as the variable parameter. The failure modes of the specimens under the combined action of compression and shear were observed. The influence of compressive stress ratio on the shear strength of CSSC was analyzed in depth, and the shear strength calculation formula and failure criterion were proposed. The results show that with the increase of compressive stress ratio k , the shear strength of CSSC increases approximately in a power function, and the brittle failure characteristics of the specimen gradually weaken. When k increases from 0 to 0.5 with an increment of 0.1, the shear strength increases by 1.53, 2.81, 3.60, 4.32 and 4.67 times, respectively. The shear strength of coral seawater and sea sand concrete is mainly composed of cohesive strength, aggregate interlocking strength and interfacial friction strength, which account for 10%-22%, 19%-30% and 50%-69% of the shear strength, respectively. With the increase of the compressive stress ratio, the cohesive strength first increases and then decreases, the aggregate occlusion strength generally shows an upward trend, and the interfacial friction strength increases approximately linearly. According to the experimental data, the calculation formula of CSSC shear strength is proposed, and the calculated value is in good agreement with the experimental value. Different failure criteria are used to analyze the test data, and it is found that the failure criteria based on the

收稿日期: 2024-05-16; 修回日期: 2024-06-20; 录用日期: 2024-07-12; 网络首发时间: 2024-07-22 07:48:55

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240719.004>

基金项目: 国家自然科学基金 (52368013; 51908141); 广西自然科学基金项目 (2024GXNSFBA010364)

National Natural Science Foundation of China (52368013; 51908141); Guangxi Natural Science Foundation Project (2024GXNSFBA010364)

通信作者: 陈宇良, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为再生混凝土结构、钢-混凝土组合结构研究、海洋及近海混凝土结构等

E-mail: ylchen@gxust.edu.cn

引用格式: 陈宇良, 包尔康, 何钦, 等. 珊瑚海水海砂混凝土压-剪复合力学性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(5): 2809-2818.

CHEN Yuliang, BAO Erkang, HE Qin, et al. Compressive-shear composite mechanical properties of coral seawater sea sand concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(5): 2809-2818(in Chinese).

principal stress space are in good agreement with the test results.

Keywords: coral seawater sea sand concrete; compression-shear composite stress; failure mechanism; shear strength; failure criterion

近年来,海洋资源正逐渐受到人们的重视,其带来的经济效益促使各国逐渐增加对海洋工程的投资。然而,远海地区缺乏制备传统混凝土所需的碎石、河砂和淡水,若从陆地运输则会消耗大量的时间和能源^[1]。珊瑚海水海砂混凝土(Coral seawater sea-sand concrete, CSSC)是一种以珊瑚为粗骨料,海砂为细骨料,并使用海水制备的新型混凝土,能有效地将当地海洋资源用于工程建设^[2]。

目前,已有学者对珊瑚混凝土的力学性能开展研究,主要集中在抗压、抗拉、抗剪和动态压缩等方面。Wang等^[3]探究了珊瑚粗骨料取代率对混凝土抗压性能的影响,并提出了相应的抗压应力-应变预测模型。达波等^[4]建立了全珊瑚混凝土立方体抗压与抗拉、抗折强度之间的转化模型。陈宇良等^[5]对高温后的珊瑚海水海砂混凝土进行了直剪试验,并分析了相应的损伤演化过程。吴彰钰等学者^[6-8]对珊瑚混凝土进行动态压缩试验,发现其具有明显的应变率效应。根据已有研究^[9-13],珊瑚混凝土的单轴抗压强度已经能够满足一般工程要求。然而大多数混凝土构件处于多轴复合应力状态,其破坏形态和峰值荷载与单轴应力状态有较大差异。有研究表明,在压剪复合应力作用下,混凝土内部的主拉应力方向会随压应力的增大而发生改变,破坏特征会逐渐由脆性转变为塑性^[14]。目前,已有学者对珊瑚混凝土的压剪性能进行研究,Liu等^[15]对全珊瑚混凝土进行压剪试验,发现剪切面珊瑚骨料大部分被破坏。Yang

等^[16]对地聚物珊瑚混凝土压剪力学性能进行研究,发现基于 $\sqrt{J_2}-\sqrt{I_1}f_c$ 模型的破坏准则与试验结果吻合较好(其中: J_2 为第二偏应力不变量; I_1 为第一主应力不变量; f_c 为混凝土抗压强度)。然而Liu等^[15]与Yang等^[16]的剪切试验对象均为100 mm非标准立方体,与150 mm标准立方体试件相比,剪切强度会因尺寸效应而产生偏差^[17],对工程应用有一定影响。综上所述,目前珊瑚海水海砂混凝土拥有较好的应用前景,然而与珊瑚海水海砂混凝土压剪性能相关的研究仍然较少。

为此,本文设计并制作了21个珊瑚海水海砂混凝土标准立方体试件,探究压应力比对CSSC剪切力学性能的影响,并对其破坏机制进行分析。最后,根据试验数据提出珊瑚海水海砂混凝土在压剪复合作用下的剪切强度计算公式和破坏准则。

1 试验概况

1.1 原材料

珊瑚海水海砂混凝土(CSSC)由破碎珊瑚、海砂、水泥、减水剂和海水按一定比例拌合而成。所用珊瑚采自中国南海,经破碎、筛分后获得粒径大小为5~20 mm的破碎珊瑚骨料,其基本物理性能详见表1;细骨料使用南海海砂,测得含水量为5.82%,细度模数为2.77,II区中砂;粗细骨料的表观形貌及粒径分布详见图1和图2。水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,拌合用水为南海海水,减水剂使用聚羧酸高效减水剂。

表 1 珊瑚骨料基本物理性能

Table 1 Basic physical properties of coral aggregate

Property	Bulk density/ (kg·m ⁻³)	Apparent density/ (kg·m ⁻³)	Water content (by mass)/%	1 h water absorption (by mass)/%	Cylinder pressure strength/MPa
Value	879.9	1 667	0.67	12.79	4.11

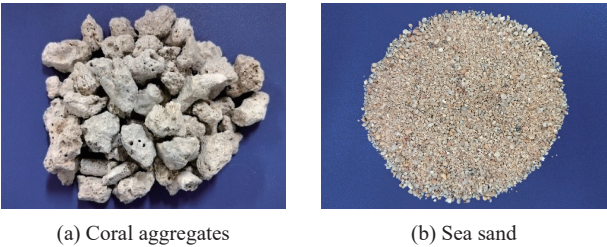


图 1 珊瑚骨料与海砂的表观形貌

Fig. 1 Apparent morphology of coral aggregate and sea sand

1.2 混凝土配合比与制备流程

珊瑚海水海砂混凝土的设计强度为C30,根据《轻骨料混凝土应用技术标准》(JGJ/T 12—2019)^[18]和《珊瑚骨料混凝土应用技术规程》(T/CECS 694—2020)^[19]确定混凝土配合比。因为珊瑚骨料具有较高的吸水率,所以加入附加海水对骨料进行预湿处理,以确保CSSC实际水灰比与设计值一致^[18],具体配合比见表2。

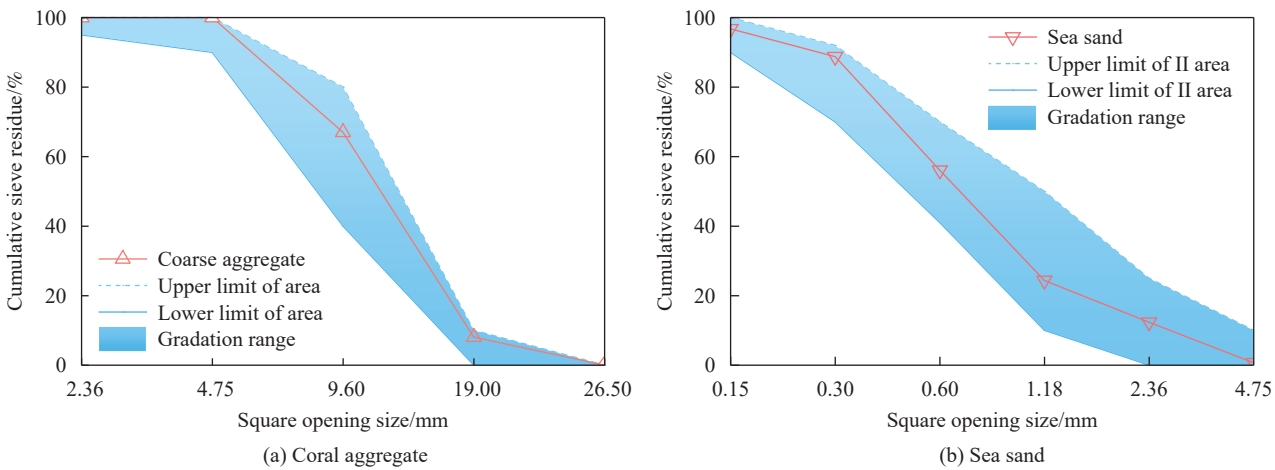


图2 珊瑚骨料与海砂的粒径级配曲线
Fig. 2 Particle size gradation curves of coral coarse aggregate and sea sand

表2 珊瑚海水海砂混凝土 (CSSC) 配合比
Table 2 Coral seawater sea sand concrete (CSSC) mix ratio

Cement/ (kg·m ⁻³)	Coral/ (kg·m ⁻³)	Sea sand/ (kg·m ⁻³)	Sea water/ (kg·m ⁻³)	Additional sea water/(kg·m ⁻³)	Superplasticizer/ (kg·m ⁻³)	f _c /MPa
535	655.8	760.1	214	75.1	1.4	30.42

Note: f_c—Compressive strength of CSSC cube.

CSSC 拌制过程如下：将珊瑚骨料、海砂放入搅拌机干拌 60 s；倒入附加海水并搅拌 30 s 进行预湿处理；倒入水泥、海水和减水剂并搅拌 60 s；将搅拌后的 CSSC 装模并振捣密实，试件浇筑 24 h 后脱模，自然养护至 28 d 进行试验。

1.3 试件设计

设计 21 个 CSSC 立方体试件，尺寸均为 150 mm×150 mm×150 mm，其中 3 个用于抗压强度测试，其余试件以压应力比 k 为变化参数进行压剪试验 ($k = \sigma / f_c$ ，其中 σ 为轴向应力； f_c 为混凝土立方体抗压强度)， k 分别取 0、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5，

每个压应力比设计 3 个试件。

1.4 加载装置及加载制度

试验加载装置为中科院武汉力学研究所研发的 RMT-301 岩石与混凝土力学试验机及其配套剪切盒，具体如图 3 所示。试验机水平量程 500 kN，水平位移传感器量程 20 mm，精度 0.01 mm。试验时，先将试件放入剪切盒，再将剪切盒送入加载位置，剪切盒上下侧均设有金属滚轴板以减小摩擦阻力。试件加载时，竖直方向由轴向千斤顶施加荷载。在水平方向，上剪切盒受限位板作用，在水平方向保持静止，下剪切盒通过刚性传力杆

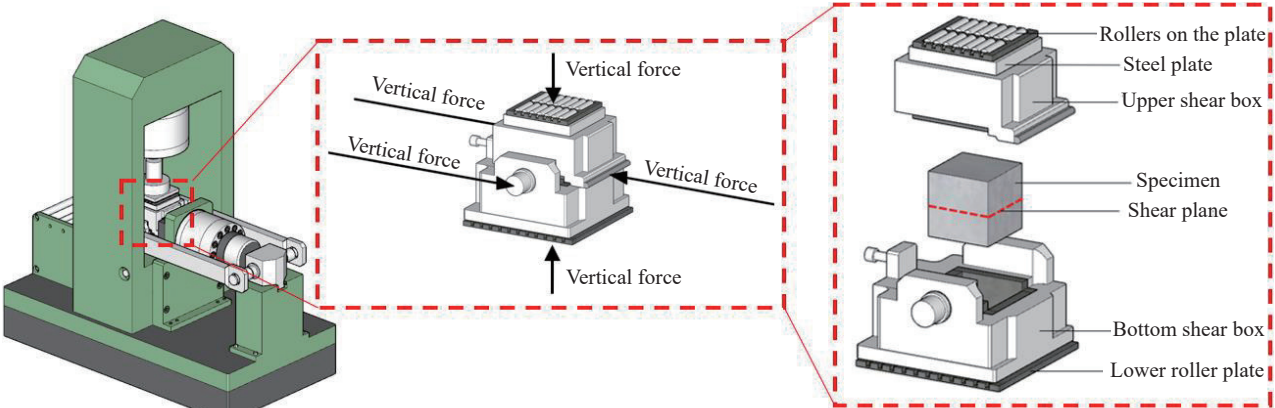


图3 试验装置
Fig. 3 Test equipment

由水平千斤顶带动，以此使上下剪切盒产生相对位移，进而对试件施加剪切荷载。

竖直方向荷载通过压应力比 k 计算得到，使用荷载控制，加载速率为 5 kN/s；水平方向加载使用位移控制，加载速率为 0.02 mm/s，持续加载直至试件破坏。

2 试验结果与分析

2.1 CSSC 破坏形态

图 4 为不同压应力作用下 CSSC 的剪切破坏形态。可知，当压应力比 $k=0$ 时，试件中部出现一条锯齿状裂缝，自由面较完整，破坏时试件迅速

失去承载力，脆性特征明显。随着压应力比 k 增大，试件主裂缝处逐渐延伸出斜裂缝，且斜裂缝的数量及水平夹角随 k 的增加呈增大趋势。其主要的原因：在压应力和剪切应力的复合作用下，剪切面上的主拉应力与水平方向的夹角会随着压应力的增大而增大，进而影响斜裂缝的开裂角度。当 $k=0.3$ 时，试件自由面的破坏程度逐渐加重，混凝土剥落现象愈加明显。当 $k>0.3$ 时，自由面破坏更加严重，试件角部也逐渐碎裂。CSSC 剪切试件随着压应力比 k 的增大，逐渐表现出一定的塑性破坏特征。

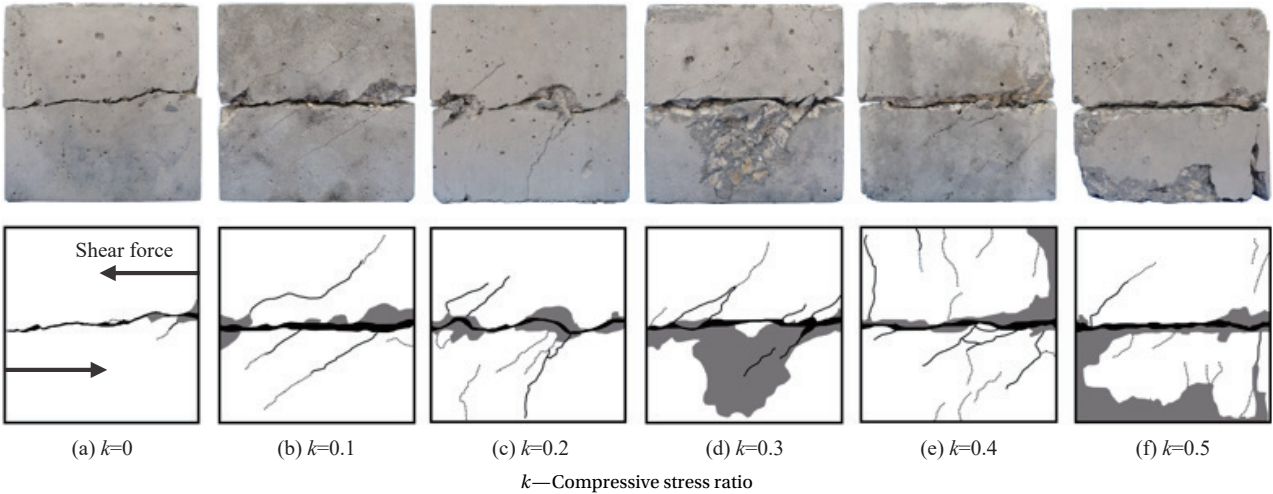


图 4 CSSC 压-剪复合受力破坏形态

Fig. 4 Failure patterns of CSSC under compression-shear loading

图 5 为不同压应力作用下 CSSC 试件剪切面破坏特征。可知，CSSC 试件剪切面均能观察到被剪断的珊瑚骨料(图中虚线圈标注)。然而，在相同

强度等级的普通混凝土直剪试验中，剪切面的粗骨料没有被破坏^[20]。这表明珊瑚骨料的强度较低，无法阻挡裂缝的发展，易被剪切裂缝直接贯穿。在 CSSC 直剪试件中，剪切面无明显摩擦痕迹。而在压剪试件中，剪切面出现较多摩擦痕迹及珊瑚破碎后留下的白色粉末(图中实线圈标注)，且随着压应力比 k 不断增大，剪切面的摩痕逐渐明显，白色珊瑚粉末逐渐增多。

2.2 CSSC 特征点参数

CSSC 剪切试验所得到的特征点参数及其平均值详见表 3。其中，剪切强度为 CSSC 试件的峰值剪切应力，剪切应力由下式计算得到：

$$\tau = \frac{V}{A_s}$$
 (1)

式中： V 为试件的剪切荷载； A_s 为剪切面面积 (22 500 mm²)； τ 为剪切应力。

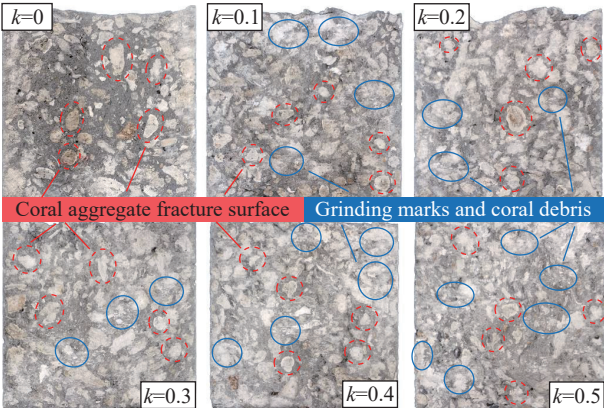


图 5 CSSC 压-剪试件剪切面破坏特征

Fig. 5 Failure patterns of CSSC under compression-shear loading

表 3 CSSC 压-剪作用特征点参数

Table 3 Characteristic point parameters of CSSC compression shear action

k	Peak shear stress τ_p /MPa				Peak shear displacement s_p /mm			
	$\tau_{p,1}$	$\tau_{p,2}$	$\tau_{p,3}$	$\tau_{p,ave}$	$s_{p,1}$	$s_{p,2}$	$s_{p,3}$	$s_{p,ave}$
0	2.60	2.87	3.61	3.03	0.97	1.03	0.43	0.81
0.1	9.06	6.78	7.19	7.68	1.04	1.80	2.03	1.62
0.2	12.04	10.79	11.77	11.53	1.23	2.18	1.02	1.47
0.3	16.06	14.01	11.77	13.95	1.18	1.11	1.46	1.25
0.4	16.94	15.52	15.92	16.13	1.31	1.54	1.71	1.52
0.5	19.87	15.29	16.38	17.18	1.93	1.88	2.09	1.97

Notes: $\tau_{p,1}$, $\tau_{p,2}$, $\tau_{p,3}$ —Shear strength of three specimens with the same compressive stress ratio; $\tau_{p,ave}$ —Average shear strength; $s_{p,1}$, $s_{p,2}$, $s_{p,3}$ —Peak shear displacement of three specimens with the same compressive stress ratio; $s_{p,ave}$ —Average peak shear displacement.

2.3 CSSC 剪切应力-位移曲线

图 6(a) 为 CSSC 立方体试件在不同压应力作用下的剪切应力-位移曲线。由图可知，CSSC 压剪试验的剪切应力-位移曲线可以大致分为 4 个阶段：弹性阶段、弹塑性阶段、破坏阶段、残余阶段

段。图 6(b) 为剪切应力-位移曲线示意图，展示了各个阶段的变化趋势。

弹性阶段 OA：剪切应力-位移曲线呈线性上升趋势，并且曲线的切线刚度总体随压应力比 k 的增大而增大，在该阶段试件尚未出现损伤。

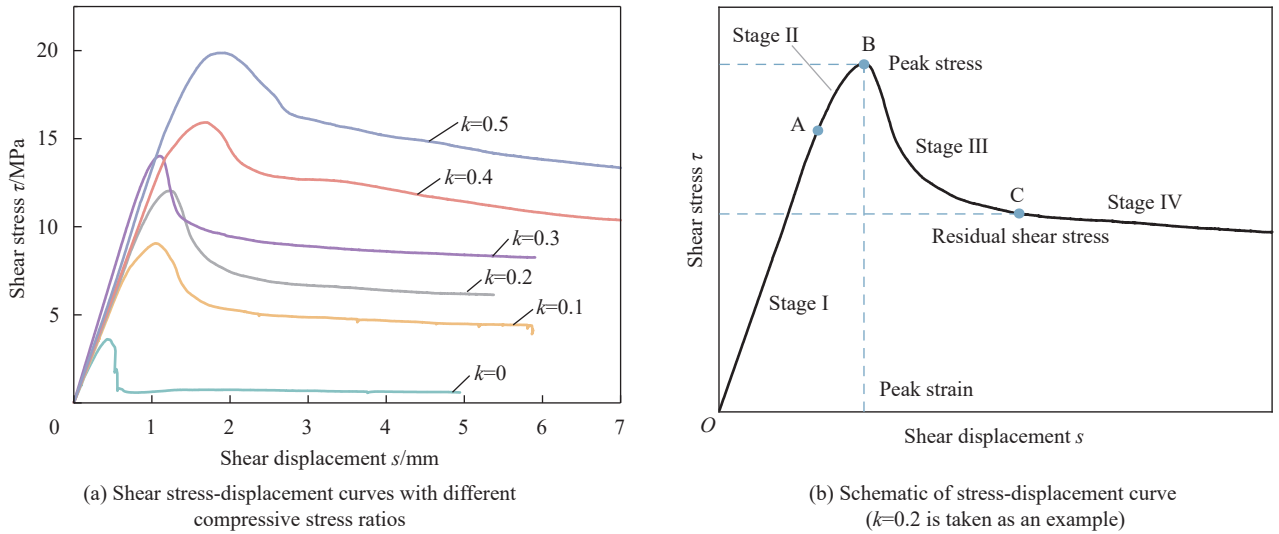


图 6 CSSC 剪切应力-位移曲线

Fig. 6 Shear stress-displacement curves of CSSC

弹塑性阶段 AB：曲线由线性段转变为非线性段。在该阶段，剪切应力上升速率逐渐下降，混凝土内部开始出现微裂缝，并随着剪切位移的增大而不断发展，试件逐渐出现不可逆的损伤。此外，CSSC 试件在该阶段所对应的剪切位移量随压应力比 k 的增大呈增加趋势。

破坏阶段 BC：剪切应力迅速下降，试件表现出明显的脆性。这主要是由于珊瑚骨料的强度较低，剪切应力达到峰值点之后，珊瑚骨料被迅速破坏，CSSC 中由珊瑚骨料提供的骨架作用迅速失效，导致下降段十分陡峭，并且压应力比越小，

下降段越陡峭。在该阶段，随着剪切位移的增大，剪切面的骨料被不断剪坏，水泥基体的裂缝不断开展，最终形成一条贯穿裂缝，试件被剪为两部分。

残余阶段：即 C 点之后，在该阶段，剪切应力缓慢下降，且主要由摩擦力提供。因此压应力比 k 越大，该阶段的剪切应力也越大。最后，随着剪切面被逐渐磨平，剪切应力-位移曲线趋近于一条直线。

2.4 压应力比对 CSSC 剪切强度的影响

图 7 为不同压应力比 k 作用下 CSSC 剪切强度

的变化规律。可知，随着压应力比 k 的增大，CSSC 剪切强度逐渐增大，但增长趋势逐渐减缓。当压应力比 k 以 0.1 为增量从 0 增加到 0.5 时，与直剪试件相比，剪切强度分别提升了 1.53、2.81、3.60、4.32、4.67 倍，剪切强度随压应力比 k 的增大而增大；而剪切强度的增幅分别为 4.65、3.85、2.42、2.18、1.05 MPa，增幅逐渐下降。这是由于剪切强度主要由黏聚强度、骨料咬合强度和界面摩擦强度组成^[14, 21]，其中骨料咬合强度和界面摩擦强度两者的和会随着压应力比的增加而增大^[14]，故剪切强度也会随之增大。然而过大的压应力会使混凝土内部更容易产生裂缝，因此随着压应力比 k 的增大，CSSC 剪切强度逐渐增加，但增幅逐渐下降。这与轻骨料混凝土、普通混凝土和再生混凝土的试验结果一致^[22-26]。

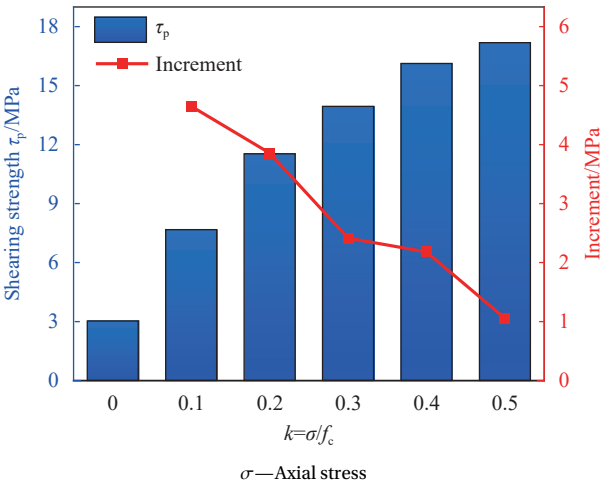


图7 CSSC 剪切强度与压应力比 k 的关系
Fig.7 Relationship between shear strength and compressive stress ratio k of CSSC

2.5 CSSC 剪切强度组成分析

根据前文分析可知，剪切强度 τ_p 由黏聚强度 τ_c 、骨料咬合强度 τ_i 和界面摩擦强度 τ_f 三部分组成，并有如下关系：

$$\tau_p = \tau_c + \tau_i + \tau_f \tag{2}$$

现根据以下假设^[14, 27]对珊瑚海水海砂混凝土剪切强度各组成部分进行计算：(1) 当主裂缝贯通，黏聚力消失时，剪切应力-位移曲线下降段存在一个转折点与之对应；(2) 骨料咬合力在峰值点至转折点后的一段距离内衰减速度不变；(3) 试件残余阶段的荷载完全由界面摩擦力提供，随着位移的增大，当剪切应力-位移曲线斜率不再明显变化时，

取该点作为残余阶段的起始点。具体的计算分析示意图如图 8 所示，取下降段转折点 b 为裂缝贯通点，转折点 b 后的 0.4 倍峰值位移为点 c ，残余阶段的起始点为 d ，连接 bc 点，其延长线与 ag 交于 e 点。因此，线段 ae 即代表黏聚强度 τ_c ，线段 eg 则代表骨料咬合强度和界面摩擦强度的和。其中，界面摩擦强度 τ_f 可由残余阶段的剪切应力得到，而骨料咬合强度 τ_i 可由剪切强度 τ_p 减去黏聚强度 τ_c 和界面摩擦强度 τ_f 得到。

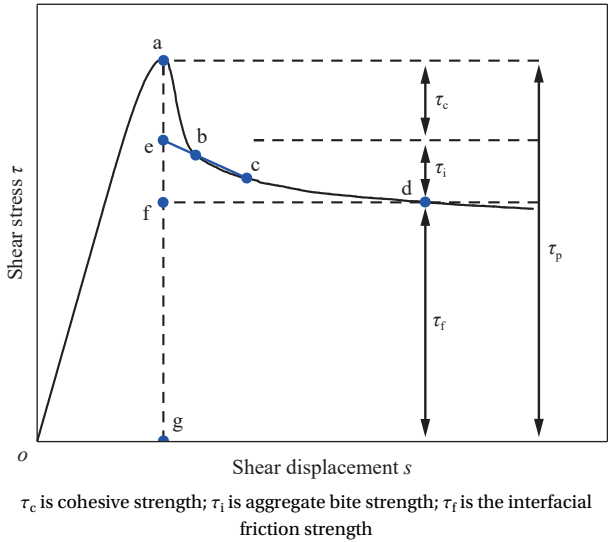


图 8 CSSC 剪切强度组成分析示意图
Fig.8 Analysis diagram of CSSC shear strength composition

通过以上方法计算得到的各部分剪切强度及其占比分别如图 9 和图 10 所示。可知，黏聚强度约占剪切强度 τ_p 的 10%~22%。随着压应力比 k 的

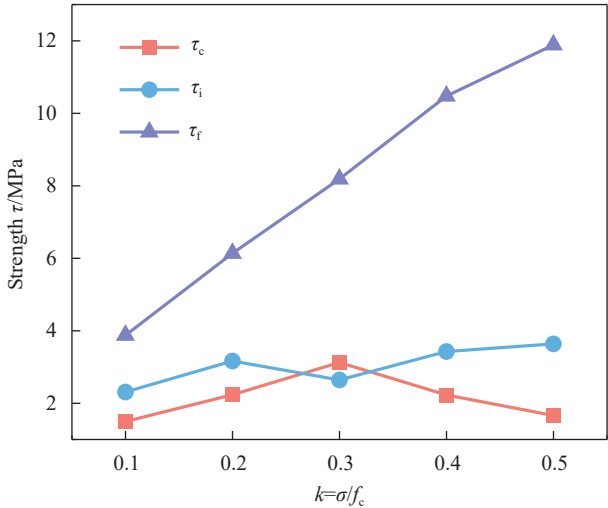


图 9 CSSC 剪切强度各组成部分-压应力比关系曲线
Fig.9 CSSC shear strength of each component-compression stress ratio curves

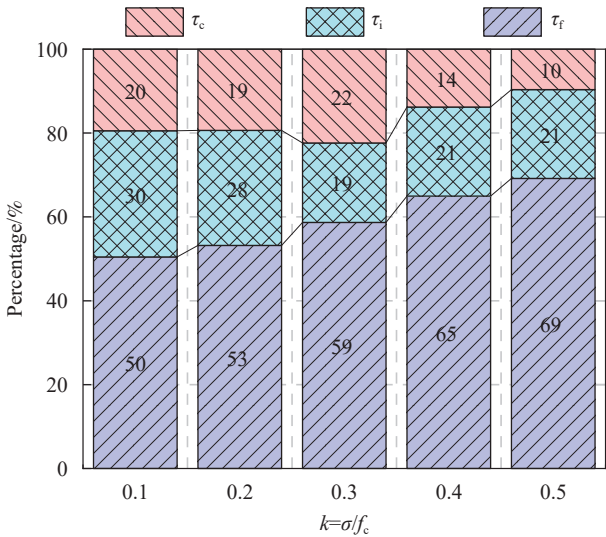


图 10 CSSC 剪切强度各组成部分占比

Fig. 10 Proportion of each component of CSSC shear strength

增加,黏聚强度呈现出先增大后减小的变化趋势,这与其他学者的试验计算结果相似^[14]。这可能是由于以下两个原因:(1)竖向压应力会使混凝土内部处于多轴应力状态,这会增强混凝土的黏聚强度;(2)因水泥基体和骨料的变形模量不同,两者在压应力作用下产生的变形不一致,进而会削弱混凝土的黏聚强度。因此,在 $k \leq 0.3$ 时,多轴应力的增强效应占主导作用,黏聚强度随 k 的增加而增加。而在 $k > 0.3$ 时,因变形模量差异造成的削弱效应占主导作用,黏聚强度随 k 的增加而下降。

骨料咬合强度约占 τ_p 的 19%~30%,在 $k = 0.3$ 时 τ_i 出现小幅度下降,但总体随压应力比的增加呈上升趋势。界面摩擦强度约占剪切强度 τ_p 的 50%~69%,是剪切强度的主要组成部分,与压应力比 k 基本成正比,通过计算可以得到珊瑚海水海砂混凝土剪切面的摩擦系数 $\mu = 0.978$,略低于普通混凝土 ($\mu = 1.08$)^[16]。

2.6 CSSC 剪切强度计算公式

根据莫尔-库伦准则,不同压应力作用下混凝土剪切强度的计算公式为

$$\tau = a + b\sigma \tag{3}$$

其中: τ 为剪切强度 (MPa); σ 为轴向压应力 (MPa);

根据图 7 可以得知,试验得到的 CSSC 压应力与剪切强度近似呈幂函数变化规律,因此在上式的基础上叠加一个幂函数,进而提出以下剪切强度计算公式:

$$\tau = a\sigma^b + c\sigma + d \tag{4}$$

其中, a 、 b 、 c 、 d 为拟合系数。

为使拟合结果更具适用性,在本文的数据基础上加入文献 [15] 中全珊瑚混凝土 (CAC) 的剪切数据对关系式 (4) 进行回归分析,拟合结果如图 11 所示,拟合公式计算值与试验结果的对比如图 12 所示。由图可知,计算值与试验值接近,拟合良好。另外,尽管文献 [15] 采用了边长为 100 mm 的立方体试件,但试验数据仍与拟合曲线较接近,计算值与试验值的误差也在 $\pm 15\%$ 以内,拟合公式与试验结果吻合较好。最后,得到珊瑚混凝土压-剪复合作用下的剪切强度计算公式:

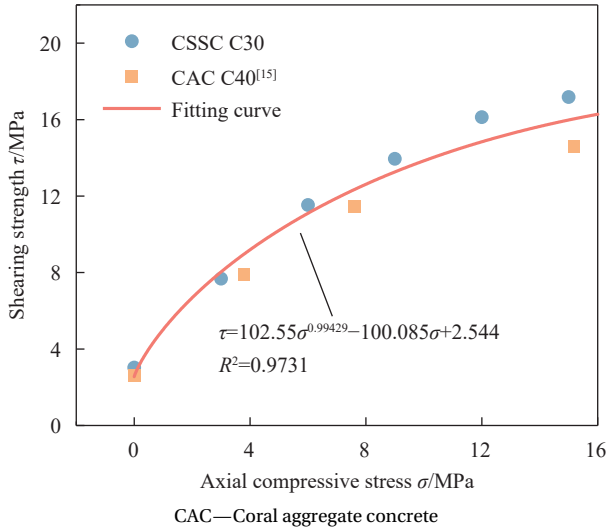
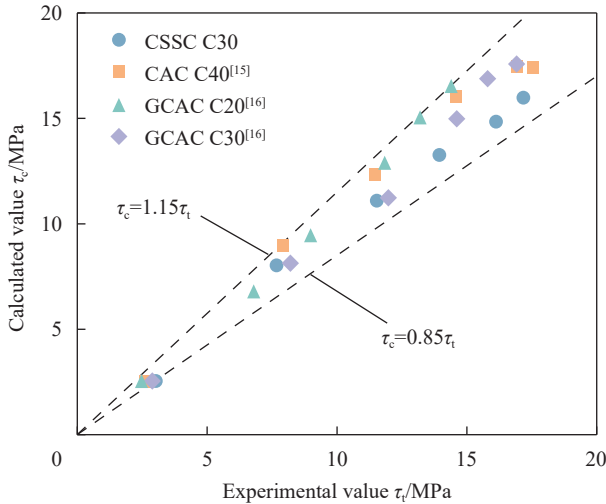


图 11 珊瑚混凝土剪切强度计算公式拟合

Fig. 11 Coral concrete shear strength calculation formula fitting



GCAC—Geopolymer coral aggregate concrete

图 12 珊瑚混凝土剪切强度计算值与试验值对比

Fig. 12 Comparison of calculated and experimental values of shear strength of coral concrete

$$\begin{cases} \tau = 102.55\sigma^{0.99429} - 100.085\sigma + 2.544 \\ \sigma = kf_c \end{cases} \tag{5}$$

其中： k 为压应力比； f_c 为立方体抗压强度 (MPa)。
由图 12 可知，式 (5) 对于强度等级为 C20 和 C30 的地聚物珊瑚混凝土 (GCAC) 也具有较好的适用性。

3 破坏准则

根据弹性理论和应力分析，当混凝土处于压-剪复合应力状态时，其压应力 σ 和剪应力 τ 可转化为第一主应力 σ_1 、第二主应力 σ_2 和第三主应力 σ_3 ^[28]，如下式所示：

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \tag{6}$$

$$\sigma_2 = 0 \tag{7}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \tag{8}$$

3.1 基于主应力空间的破坏准则

通过分析 3 个主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 之间的关系，得到珊瑚海水海砂混凝土压剪复合状态下的破坏准则关系式。根据压-剪复合受力的特性，第二主应力 $\sigma_2 = 0$ ，因此只需对 σ_1 和 σ_3 的关系进行分析。根据文献 [22]，对第一主应力 σ_1 和第三主应力 σ_3 进行无量纲化处理，并建立主应力空间破坏准则方程：

$$\frac{\sigma_3}{f_c} = a\left(\frac{\sigma_1}{f_c}\right)^2 + b\frac{\sigma_1}{f_c} + c \tag{9}$$

使用试验数据进行回归分析，具体如图 13 所示，并得到珊瑚海水海砂混凝土在压-剪复合作用

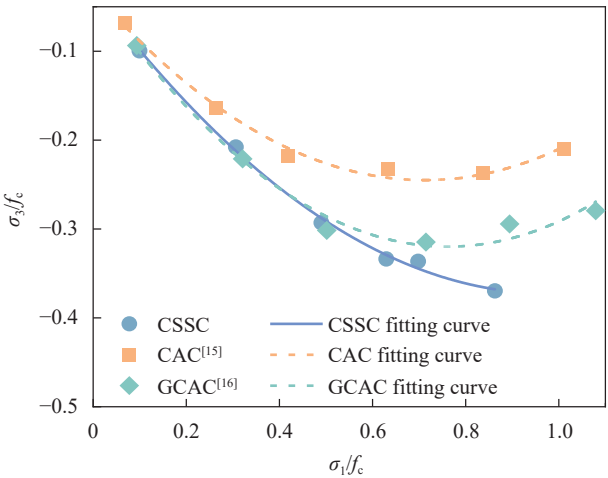


图 13 基于主应力的 CSSC 破坏准则

Fig. 13 CSSC failure criterion based on principal stress

下基于主应力空间的破坏准则：

$$\frac{\sigma_3}{f_c} = 0.3536\left(\frac{\sigma_1}{f_c}\right)^2 - 0.6933\frac{\sigma_1}{f_c} - 0.033 \tag{10}$$

$(R^2 = 0.9974)$

由图 13 和式 (10) 可知，基于主应力空间建立的二次方程破坏准则不仅能较好地反映珊瑚海水海砂混凝土的压剪破坏规律，对全珊瑚混凝土和地聚物珊瑚混凝土也具有较好的适用性。

3.2 基于八面体应力的破坏准则

根据塑性力学，取主应力方向为坐标轴方向，与坐标轴成等斜面上的应力为八面体应力。通过以下两式可将主应力转换为等斜面上的正应力 σ_{oct} 和剪应力 τ_{oct} ^[15]：

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \tag{11}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \tag{12}$$

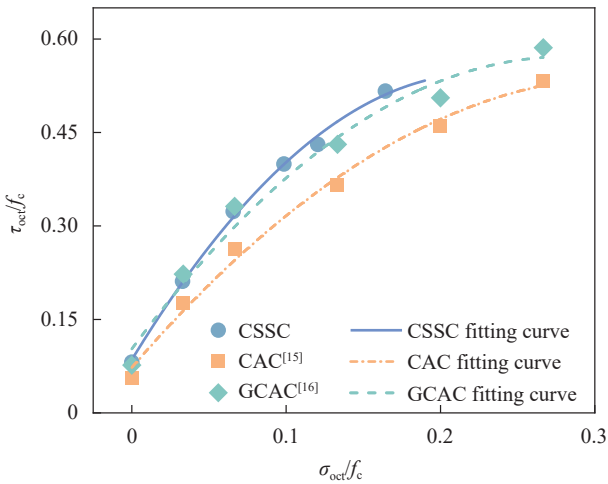
根据正应力 σ_{oct} 和剪应力 τ_{oct} ，建立 CSSC 压剪破坏准则方程：

$$\frac{\tau_{oct}}{f_c} = a\left(\frac{\sigma_{oct}}{f_c}\right)^2 + b\frac{\sigma_{oct}}{f_c} + c \tag{13}$$

使用 CSSC 压剪试验数据进行回归分析，具体如图 14 所示，最后得到基于八面体应力的珊瑚海水海砂混凝土在压-剪复合作用下的破坏准则：

$$\frac{\tau_{oct}}{f_c} = -9.0115\left(\frac{\sigma_{oct}}{f_c}\right)^2 + 4.071\frac{\sigma_{oct}}{f_c} + 0.0851 \tag{14}$$

$(R^2 = 0.9973)$



σ_{oct} —Octahedral normal stress; τ_{oct} —Octahedral shear stress

图 14 基于八面体应力的 CSSC 破坏准则

Fig. 14 CSSC failure criterion based on octahedral stress

由图 14 和式 (14) 可知, 基于八面体应力建立的二次方程破坏准则与 CSSC 试验数据拟合较好, 对全珊瑚混凝土和地聚物珊瑚混凝土也具有较好的适用性。

通过以上分析可以得知, 基于主应力空间的破坏准则和基于八面体应力的破坏准则均能较好地反映珊瑚海水海砂混凝土在压剪状态下的破坏规律, 其中基于主应力空间的破坏准则与试验数据的拟合结果相对更好。

4 结 论

对不同压应力比作用下的珊瑚海水海砂混凝土 (CSSC) 压剪力学性能进行研究分析, 得到以下结论:

(1) 在直剪作用下, 珊瑚海水海砂混凝土试件沿中部碎为两块, 自由面较完整, 呈脆性破坏模式。随着压应力比 k 的不断增大, 自由面斜裂缝的数量和水平夹角不断增大, 剪切面的白色珊瑚粉末逐渐增加, 并逐渐呈现出一定的塑性破坏特征;

(2) 随着压应力比 k 的增加, 珊瑚海水海砂混凝土的剪切强度不断增大, 但增幅逐渐下降, 呈非线性上升趋势。当 k 以 0.1 为增量从 0 增加到 0.5 时, 剪切强度分别提升了 1.53、2.81、3.60、4.32、4.67 倍。提出了修正后的珊瑚混凝土剪切强度计算公式;

(3) 剪切强度由黏聚强度、骨料咬合强度和界面摩擦强度组成, 分别占剪切强度的 10%~22%、19%~30% 和 50%~69%; 随着压应力比 k 的增大, 黏聚强度先增加后减小, 骨料咬合强度总体呈上升趋势, 界面摩擦强度近似呈线性增加, 并通过计算得到剪切面摩擦系数 $\mu = 0.978$;

(4) 根据试验数据, 建立珊瑚海水海砂混凝土基于主应力空间和八面体应力的破坏准则。其中, 基于主应力空间的破坏准则能够更好地反映珊瑚海水海砂混凝土在压-剪复合作用下的破坏规律。

参考文献:

[1] ZHANG J, WANG L, YI J, et al. Experimental study on stress-strain relationship of high strength coral concrete (HSCC)[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 87: 109090.

[2] YANG Z, ZHAN X, ZHU H, et al. Mesoscopic investigation of the matrix pores and ITZ effects on the mechanical properties of seawater sea-sand coral aggregate concrete[J].

Journal of Building Engineering, 2024, 90: 109375.

[3] WANG F, SUN Y, XUE X, et al. Mechanical properties of modified coral aggregate seawater sea-sand concrete: Experimental study and constitutive model[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e02095.

[4] 达波, 冯基恒, 倪雷, 等. 岛礁全珊瑚混凝土的力学性能及提升措施 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(2): 204-210.

DA Bo, FENG Jiheng, NI Lei, et al. Mechanical properties and improvement measures of all coral aggregate concrete in island engineering[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(2): 204-210(in Chinese).

[5] 陈宇良, 刘志华, 叶培欢, 等. 高温后珊瑚海水海砂混凝土直剪力学性能及损伤演化 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 4128-4138.

CHEN Yuliang, LIU Zhihua, YE Peihuan, et al. Direct shear mechanical properties and damage evolution of coral seawater sea-sand concrete after high temperature[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(7): 4128-4138(in Chinese).

[6] 吴彰钰, 余红发, 麻海燕, 等. C45 珊瑚混凝土的冲击压缩性能试验及数值模拟 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2020, 50(3): 488-495.

WU Zhangyu, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Experiment and numerical simulation on impact compressive properties of C45 coral aggregate concrete[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(3): 488-495(in Chinese).

[7] 岳承军, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚海水混凝土动态冲击性能试验研究 [J]. 材料导报, 2019, 33(16): 2697-2703.

YUE Chengjun, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Experiment study on dynamic impact properties of coral aggregate seawater concrete[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(16): 2697-2703(in Chinese).

[8] ZHANG H, LIU X, MA L, et al. Effects of poly-propylene fibers and aggregate contents on the impact performance of coral aggregate concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 81: 108140.

[9] 蔡新光, 赵青, 陈惠苏. 珊瑚混凝土研究现状 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1753-1764.

CAI Xinguang, ZHAO Qing, CHEN Huisu. Research progress in coral concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(8): 1753-1764(in Chinese).

[10] SU W, LIU J, LIU L, et al. Progresses of high-performance coral aggregate concrete (HPCAC): A review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 140: 105059.

[11] 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. Comparative study on fracture properties of seawater coral

- aggregate concrete with different strengths[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(4): 881-886(in Chinese).
- [12] WANG Z, LI P, HAN Y, et al. Dynamic compressive properties of seawater coral aggregate concrete (SCAC) reinforced with mono or hybrid fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 340: 127801.
- [13] HUANG Y, HE X, SUN H, et al. Effects of coral, recycled and natural coarse aggregates on the mechanical properties of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192: 330-347.
- [14] 邓志恒, 李作华, 杨海峰, 等. 再生混凝土压-剪复合受力性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(5): 174-180.
DENG Zhiheng, LI Zuohua, YANG Haifeng, et al. Mechanical behavior of recycled aggregate concrete subjected to compression-shear loading[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(5): 174-180(in Chinese).
- [15] LIU B, ZHOU J, WEN X, et al. Mechanical performance and failure criterion of coral concrete under combined compression-shear stresses[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 288: 123050.
- [16] YANG H, YANG Q, LUO J, et al. Shear strength and failure criterion of geopolymer coral aggregate concrete under compression-shear loading[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76: 107241.
- [17] 陈宇良, 张绍松, 叶培欢, 等. 再生卵石混凝土剪切力学性能试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26(5): 457-464.
CHEN Yuliang, ZHANG Shaosong, YE Peihuan, et al. Experimental study on shear mechanical properties of recycled pebble aggregate concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(5): 457-464(in Chinese).
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 轻骨料混凝土应用技术标准: JGJ/T 12—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for application of lightweight aggregate concrete: JGJ/T 12—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019(in Chinese).
- [19] 中国工程建设标准化协会. 珊瑚骨料混凝土应用技术规程: T/CECS 694—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for coral aggregate concrete: T/CECS 694—2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2020(in Chinese).
- [20] YU Z, HUANG Q, XIE X, et al. Experimental study and failure criterion analysis of plain concrete under combined compression-shear stress[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 198-206.
- [21] WASEEM S A, SINGH B. Shear transfer strength of normal and high-strength recycled aggregate concrete: An experimental investigation [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125: 29-40.
- [22] 余振鹏, 黄侨, 赵志青, 等. 自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力力学性能 [J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1984-1994.
YU Zhenpeng, HUANG Qiao, ZHAO Zhiqing, et al. Mechanical property of self-compacting lightweight aggregate concrete under combined compression-shear stress[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1984-1994(in Chinese).
- [23] 王玉梅, 邓志恒, 肖建庄, 等. 再生混凝土压-剪应力下受力性能与破坏准则 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(S1): 373-380.
WANG Yumei, DENG Zhiheng, XIAO Jianzhuang, et al. Mechanical properties and failure criterion of recycled aggregate concrete under compressive-shear stress state[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(S1): 373-380(in Chinese).
- [24] 陈宇良, 李堂, 姜锐, 等. 碳纤维再生混凝土复合受剪力力学性能试验 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 4107-4116.
CHEN Yuliang, LI Tang, JIANG Rui, et al. Composite shear mechanical properties of carbon fiber recycled aggregate concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(7): 4107-4116(in Chinese).
- [25] CHEN Y, ZHANG S, YE P, et al. Mechanical properties and damage constitutive of recycled aggregate concrete with polyvinyl alcohol fiber under compression and shear[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01466.
- [26] 陈宇良, 姜锐, 陈宗平, 等. 复合受剪钢纤维再生混凝土破坏机理及强度计算 [J]. 工程力学, 2023, 40(3): 88-97, 128.
CHEN Yuliang, JIANG Rui, CHEN Zongping, et al. Failure mechanism and strength calculation of composite shear steel fiber recycled concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(3): 88-97, 128(in Chinese).
- [27] 杨海峰, 杨青梅, 柳岸然. 压剪作用下地聚物珊瑚混凝土的力学性能研究 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2023, 48(6): 1293-1303.
YANG Haifeng, YANG Qingmei, LIU Anran. Study on mechanical performance of geopolymer coral concrete under compression-shear loading[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2023, 48(6): 1293-1303(in Chinese).
- [28] WANG Y, DENG Z, XIAO J, et al. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under compression-shear stress state[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121894.