第 48 卷第 11 期
2020 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 11
November，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200027

不同珊瑚骨料对珊瑚混凝土力学性能的影响

苏 晨[1,2]，麻海燕[1,2]，余红发[1,2]，岳承军[1,2]，张亚栋[3]，梅其泉[1,2]，沙海洋[1,2]，刘 婷[1,2]

(1. 南京航空航天大学土木与机场工程系，南京 211106；2. 江苏省机场基础设施安全工程研究中心，南京 211106；
3. 东南大学土木工程学院，南京 211189)

摘 要：研究了经冲刷的鹿角状珊瑚、轻质珊瑚礁和重质珊瑚礁作为粗骨料对珊瑚混凝土力学性能的影响。结果表明：鹿角状骨料对珊瑚混凝土立方体和棱柱体抗压强度的提高作用最显著，其次是重质珊瑚礁骨料，最后是轻质珊瑚礁骨料；珊瑚混凝土 90 d 与 28 d 立方体抗压强度具有正相关性，棱柱体抗压强度随立方体抗压强度增大而线性增大，与骨料种类无关；珊瑚混凝土棱柱体峰值应变随峰值应力增大而对数增大，应力–应变曲线方程以及棱柱体的受压破坏形态都不受珊瑚骨料种类的影响。

关键词：珊瑚混凝土；珊瑚骨料；强度；破坏形态；应力–应变关系
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)11–1771–10
网络出版时间：2020–09–18

Effect of Different Coral Aggregates on Mechanical Properties of Coral Concrete

SU Chen[1,2], *MA Haiyan*[1,2], *YU Hongfa*[1,2], *YUE Chengjun*[1,2], *ZHANG Yadong*[3], *MEI Qiquan*[1,2], *SHA Haiyang*[1,2], *LIU Ting*[1,2]
(1. Department of Civil and Airport Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Jiangsu Airport Infrastructure Safety Engineering Research Center, Nanjing 211106, China;
3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Effects of scoured staghorn coral, light coral reef and heavy coral reef as coarse aggregates on the mechanical properties of coral concrete were investigated. The results show that staghorn aggregates have the most significant effect on the compressive strength of coral concrete cubes and prisms rather than heavy coral reef and lightweight coral reef aggregates. The compressive strength of coral concrete at 90 d is positively correlated to that at 28 d. The compressive strength of prisms increases linearly with the compressive strength of the cube, regardless of the aggregate type. The peak strain of coral concrete prisms increases logarithmically with the increase of peak stress, and the stress-strain curve equation and the compressive failure morphology of the prisms are not affected by coral aggregate type.

Keywords: coral concrete; coral aggregate; strength; failure morphology; stress-strain curve

我国南海岛礁拥有非常丰富的珊瑚礁资源，为岛礁工程建设提供了一种新型建筑原材料—珊瑚骨料。珊瑚母材可分为鹿角状珊瑚和珊瑚礁两大类。将其破碎后作为粗骨料，珊瑚砂为细骨料，与水及水泥拌合而成的混合物即为珊瑚混凝土。美国、日本等国家二战时期就在太平洋岛礁上应用珊瑚礁砂作为混凝土的骨料。美国学者 Rick A E 等[1]考察了太平洋的比基尼岛后认为珊瑚混凝土强度能达到工程结构的设计要求。研究和开发珊瑚骨料资源，推广使用珊瑚混凝土具有重要的理论意义和工程应用价值。

目前，国内外对于珊瑚骨料的研究主要包括珊

收稿日期：2020–01–14。　修订日期：2020–03–19。
基金项目：国家自然科学基金项目(51878350、11832013、52078250、51678304)。
第一作者：苏晨(1995—)，女，硕士研究生。
通信作者：麻海燕(1976—)，女，博士，讲师，硕士生导师；
余红发(1964—)，男，博士，教授，博士生导师。

Received date: 2020–01–14.　**Revised date:** 2020–03–19.
First author: SU Chen (1995–), female, Master candidate.
E-mail: 870689217@qq.com
Correspondent authors: MA Haiyan (1976–), female, Ph.D., Lecturer;
YU Hongfa (1964–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: mahaiyan@nuaa.edu.cn; yuhongfa@nuaa.edu.cn

瑚的强度及吸水性等。金昱昕等[2]通过单轴抗压强度测试法，得出美济礁珊瑚的单轴抗压强度近 3 倍于涠洲岛样品，且破坏并没有发生在沿生长轴线的方向，而是在孔洞和骨骼密度小的部位。LYU 等[3]研究了珊瑚骨料形状特征对吸水性的影响。结果表明，珊瑚骨料内部结构疏松多孔，孔隙结构影响骨料的单轴抗压强度，且不同海域的珊瑚力学性质差异较大，但没有详细分析同一海域内不同珊瑚母材种类力学性质的差异。

对于珊瑚混凝土的研究主要集中在耐久性及基本物理力学性能方面。赵艳林等[4]系统研究了珊瑚河砂海水混凝土的基本力学性能和弯曲疲劳性能。陈兆林等[5]研究了强度等级 C15~C25 的全珊瑚海水混凝土的强度和弹性模量等力学性能。袁银峰等[6]采用正交设计法进行全珊瑚混凝土的配合比设计和优化，得到了 C30~C55 的普通水泥全珊瑚海水混凝土，并进行了基本力学性能测试。达波等[7]和余红发等[8]对全珊瑚海水混凝土的单轴受压应力–应变全曲线进行了试验研究，表明全珊瑚混凝土的破坏为典型的劈裂破坏，在相同强度等级下，全珊瑚海水混凝土比普通混凝土和轻集料混凝土的脆性更强。以上研究表明，珊瑚混凝土在强度发展和破坏机理方面与轻骨料混凝土类似，为珊瑚混凝土的推广使用提供了参考。

关于骨料对混凝土力学性能的影响方面的研究，主要集中于骨料的微观及宏观 2 个层面。肖建强等[9]研究轻骨料混凝土抗压强度时，发现骨料与基体的杨氏模量比存在一个临界点。当小于临界值时，混凝土的强度由界面层的抗压强度控制；大于临界值时，混凝土的强度由骨料的抗压强度控制。李林等[10]针对珊瑚骨料特征、力学性能、物理化学特点等进行了系统研究，分析宏观和微观的珊瑚骨料形状特征以及对混凝土性能的影响。Huang 等[11–12]研究了各组成成分对珊瑚混凝土的抗压强度及应力–应变曲线的影响。窦雪梅[13]研究时发现，采用鹿角状珊瑚骨料的混凝土强度高于采用珊瑚礁骨料混凝土的。岳承军[14]和麻海燕等[15]试验研究和本课题组在南海某岛礁的现场实验研究，均证实上述规律。鉴于目前国内外暂无珊瑚骨料种类对珊瑚混凝土力学性能影响方面的研究，为此，本工作将此作为研究重点。

1 实验

1.1 珊瑚骨料

取自南海某岛的珊瑚骨料，根据母材种类分为鹿角状珊瑚和珊瑚礁。根据珊瑚礁表观密度的不同进一步分为轻质珊瑚礁和重质珊瑚礁，分别用 YZ、PS 和 PS1 表示。3 种珊瑚骨料的基本力学性能见表 1，骨料形状见图 1。珊瑚骨料及珊瑚砂的筛分曲线见图 2，其中 5~20 mm 连续级配轻集料的级配曲线及上下限如图 2a，细集料的级配曲线及上下限如图 2b。

表 1 3 种骨料的基本力学性能

Table 1 Basic mechanical properties of three aggregates

Coral stone	Apparent density/ ($kg·m^{-3}$)	Bulk density/ ($kg·m^{-3}$)	Porosity/ %	Cylinder pressure strength/MPa	1 h water absorption/%
YZ	2 190	1 070	51	6.8	7.6
PS	2 040	910	55	4.7	10.9
PS1	2 180	1 050	52	5.6	5.3

Note: YZ stands for staghorn coral aggregate; PS stands for light coral reef aggregate; PS1 stands for heavy coral reef aggregate.

1.2 其他原材料

采用南京江南一小野田公司生产的 P·II 52.5 型硅酸盐水泥(C)，其性能指标符合《通用硅酸盐水泥》(GB175—2007)要求，基本物理性能见表 2。粉煤灰采用南京电热厂生产的 I 级粉煤灰(FA)，性能符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T1596—2005)要求。矿渣采用江苏江南粉磨公司 S95 级磨细矿渣(SG)，比表面积为 461 m^2/kg，各种胶凝材料的化学成分见表 3。细骨料采用珊瑚砂，表观密度 2 300 kg/m^3，堆积密度 1 200 kg/m^3，空隙率 45%，细度模数 2.69，Ⅱ区级配，中砂。减水剂采用苏博特新材料有限公司生产的 SBTJM®-B 萘系高效减水剂，性能符合 GB8076—2008《混凝土外加剂》的规定，减水率可达 25%。采用淡水拌和、淡水养护。

1.3 混凝土配合比

根据 JGJ 51—2002《轻骨料混凝土技术规程》，以胶凝材料、预吸水率、质量砂率、净水胶比为主要参数，通过正交设计方法，确定珊瑚混凝土的配合比，见表 4。每个配合比分别制作 2 组(每组 3 个试件)边长为 100 mm 的立方体试件和 1 组尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体试件，前者用于测定 28 d 和 90 d 立方体抗压强度，后者用于等应变单调加载法测定 90 d 棱柱体试件的应力–应变全曲

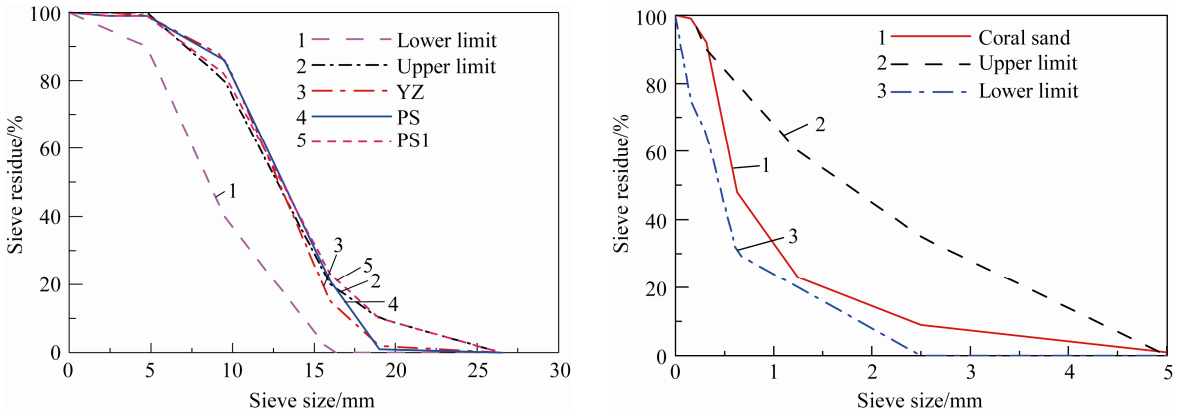


(a) Staghorn scouring coral　(b) Light coral reef　(c) Heavy coral reef

(d) Staghorn coral aggregate　(e) Light coral reef aggregate　(f) Heavy coral reef aggregate

图 1　珊瑚粗骨料

Fig. 1　Coral coarse aggregate



(a) 5–20 mm continuous gradation curves for coarse aggregate　(b) Grading curves of middle coral sand in zone II

图 2　珊瑚粗骨料与珊瑚砂的级配曲线

Fig. 2　Gradation curves of coral coarse aggregate and coral sand

表 2　P·II 52.5 硅酸盐水泥物理力学性能

Table 2　Physical and mechanical properties of P • II 52.5 Portland cement

Specific surface area/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	Loss of ignition/%	Standard consistency/%	Setting time/min		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
			Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
367	2.64	27.5	120	173	36.8	59.1	6.5	9.1

表 3　主要胶凝材料的化学成分

Table 3　Chemical composition of main gelling materials　*w*/%

Raw material	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Fe_2O_3	I.L	K_2O
P·II	21.53	4.6	64.09	0.96	2.09	3.37	1.84	0.62
FA	54.88	26.89	4.77	1.31	1.16	6.49	3.10	
SG	33.48	12.21	36.35	10.59	0.66	1.40	0.36	

w is mass fraction.

表 4 全珊瑚混凝土的配合比及坍落度

Table 4 Mix proportion and slump of coral concrete

Sample No.	Mix proportion/(kg·m^{-3})							W/B ratio/%		Slump/mm
	C	SG	FA	Coral	Coralsand	Total water consumption	Water reducing agent	Pure	Total	
C30YZ	275	150	75	582	873	296	8.35	0.30	0.59	130
C30PS	275	150	75	582	873	296	8.35	0.30	0.59	125
C30PS1	275	150	75	582	873	296	8.35	0.30	0.59	125
C55YZ	780	150	70	300	700	250	20	0.20	0.25	90
C55PS	780	150	70	300	700	250	20	0.20	0.25	90

线。试件分为 C30 与 C55 2 种强度等级，其中，C30 粗骨料分别采用鹿角状珊瑚、轻质珊瑚礁和重质珊瑚礁，C55 粗骨料采用鹿角状珊瑚和轻质珊瑚礁。由于珊瑚属于天然多孔轻骨料，具有吸水返水的特性，所以在拌制混凝土之前，对珊瑚和珊瑚砂进行预吸水处理，预吸水率为 5%。试件在自然条件下淡水养护 28 d 和 90 d 后进行试验。

1.4 方法

100 mm×100 mm×100 mm 非标准立方体试件的抗压强度测试采用南京航空航天大学土木与机场工程系的数显式压力试验机，量程为 3 000 kN，加载速度为 0.5 MPa/s。

棱柱体试件的应力–应变试验采用陆军工程大学的 MTS 微机控制电液伺服万能试验机，量程为 2 500 kN。采用等应变单调加载方法，加载应变速率为 2×10^{-6}/s，数据采集系统包括两部分：MTS 万能试验机数据采集系统；附加采集系统(图 3)。在试件 4 个侧面居中位置分别粘贴横、纵向胶基丝式应变片，当加载至峰值应力时，混凝土试件会发生开裂，此时应变片数据将会失效，故应变片用于采集试件开裂前横、纵方向的应变。在距离试件上下底面各 1/3 处，用 2 个钢箍固定 4 个角钢，将 2 个 YWC-10 型位移传感器分别固定在对称的角钢上，用于采集峰值应力后试件的纵向应变。应变箱为江苏联能电子科技有限公司生产的 YE-2539 型高速静态应变仪。试验时，MTS 和应变箱同时开始采集数据。应力–应变曲线采用 MTS 试验机测得的数据，由于试验机测得的位移是上、下加载台之间的位移，并非试件的真实位移，故需要在总位移中减去设备的位移值，从而得到试件的真实位移。试件位移按式(1)进行计算：

$$u_c = u_0 - \frac{F}{K_u} \tag{1}$$

式中：u_c 为修正后试件变形/mm；u_0 为试验机总位移/mm；F 为试验机荷载/N；K_u 为试验机刚度/(N·mm^{-1})。

采用岳承军等[14]的测试方法，K_u=901 780 N/mm。

由于 MTS 测得的荷载数据和应变片测得的应变是准确的，故用应变片测得的上升段数据修正 MTS 测得的应变数据，经计算，应变片测得的应变值比 MTS 测得的应变值小 10%，故对 MTS 测得的应变值均乘以折减系数 0.9，从而得到准确的应力–应变曲线。



图 3 试验设备附加数据采集装置

Fig. 3 Additional data acquisition device for test equipment

2 结果与讨论

2.1 珊瑚种类对混凝土基本力学性能的影响

2.1.1 不同骨料种类的珊瑚混凝土强度 珊瑚混凝土的立方体抗压强度，棱柱体轴压强度、峰值应变、弹性模量和 Poisson 比见表 5。由表 5 可以看出：C30 强度等级 28 d 鹿角状珊瑚混凝土立方体抗压强度为 50.7 MPa，分别高于重质和轻质骨料混凝土 19.6%和 21.0%；C55 强度等级鹿角状珊瑚混凝土的立方体抗压强度为 75 MPa，高于轻质骨料混凝土的 30%，说明强度等级越高，鹿角状骨料种类对珊瑚混凝土立方体抗压强度的提高作用越大。

表 5　珊瑚混凝土的强度、峰值应变、弹性模量和 Poisson 比
Table 5　Strength, peak strain, elastic modulus and Poisson's ratio of coral concrete

Types of aggregate	f_{cu}/MPa		f_{pr}/MPa	ε_{pr}	E_c/GPa	μ
	28 d	90 d				
C30YZ1	48.0	51.6	42.0	0.001 5	27.65	0.24
C30YZ2	50.3	55.7	44.1	0.002 0	26.92	0.20
C30YZ3	53.7	59.2	48.1	0.002 0	25.3	0.22
Average	50.7	55.5	44.7	0.001 8	26.62	0.22
C30PS1	40.4	40.6	44.8	0.002 3	25.85	0.25
C30PS2	42.0	49.6	45.6	0.002 0	25.36	0.26
C30PS3	43.2	51.9	49.0	0.002 3	25.83	0.26
Average	41.9	49.6	46.5	0.002 2	25.68	0.26
C30PS11	40.5	45.7	43.1	0.001 8	24.04	0.23
C30PS12	41.8	47.0	44.0	0.002 0	25.41	0.24
C30PS13	46.5	50.0	44.9	0.002 3	24.15	0.23
Average	42.4	47.6	44.0	0.002 0	24.53	0.23
C55YZ1	60.0	87.9	77.2	0.002 4	26.64	0.26
C55YZ2	75.0	94.9	81.5	0.002 3	27.18	0.24
C55YZ3	79.6	95.5	81.7	0.002 7	28.15	0.26
Average	75.0	92.8	80.1	0.002 5	27.32	0.25
C55PS1	57.0	67.7	52.6	0.002 3	27.59	0.25
C55PS2	57.7	75.8	63.3	0.002 5	24.14	0.19
C55PS3	70.3	86.5	65.6	0.002 6	24.78	0.20
Average	57.7	76.7	63.3	0.002 5	25.50	0.21

Note: f_{cu} is 100 mm×100 mm×100 mm cube compressive strength, f_{pr} is 100 mm×100 mm×300 mm prismatic axis compressive strength; ε_{pr} is prism peak strain; E_c is elastic modulus; μ is Poisson's ratio. Among them, the coarse aggregates of C30 strength grade coral concrete are YZ, PS and PS1, and the coarse aggregates of C55 strength grade coral concrete are YZ and PS. Three specimens are made for each coral concrete to test its mechanical properties.

不同珊瑚骨料种类 C30 强度等级混凝土的棱柱体轴心抗压强度差别不大，而 C55 强度等级鹿角状骨料混凝土的轴压强度为 80.1 MPa，高于轻质骨料混凝土轴压强度的 26.48%。这主要是由于：

1) 鹿角状珊瑚内部孔隙多为闭合小孔隙，仅有少数闭合大孔隙，骨料本身抗压强度高；重质珊瑚内部闭合且沿着生长方向的大孔隙较多，骨料本身强度较高；轻质珊瑚骨料内部孔隙多为互相联通的小孔隙，骨料本身强度较低。

2) 珊瑚本身属于多孔结构，具有吸水返水的作用，水泥水化的过程中，这种特殊的孔结构能够排出水，有利于界面区水泥的进一步水化，提高珊瑚骨料与水泥砂浆之间的黏结力。故珊瑚骨料孔隙越多，与水泥砂浆的黏结力越大。

3) 珊瑚混凝土破坏时，裂缝并没有绕过骨料，而是贯穿珊瑚骨料，骨料强度越高，珊瑚混凝土的抗压强度相对越高。

将不同骨料种类的珊瑚混凝土 90 d 轴压强度与立方体抗压强度的关系进行拟合，得到如图 4 所示的结果。

随立方体抗压强度的提高，不同珊瑚骨料种类的混凝土棱柱体轴压强度均呈上升趋势，可用相同的线性关系式(2)来表述，轴压强度与立方体抗压强度之间的关系不受珊瑚骨料种类的影响。

$$f_{pr}=0.787f_{cu}+4.382\ 8\ (R^2=0.941\ 3,\ R=0.970\ 2) \quad (2)$$

当样本数 n=31，显著性水平 a=0.01 时，R_{cr}=0.455 63，$R>R_{cr}$，故珊瑚混凝土棱柱体轴压强度与立方体抗压强度之间呈显著的线性关系。

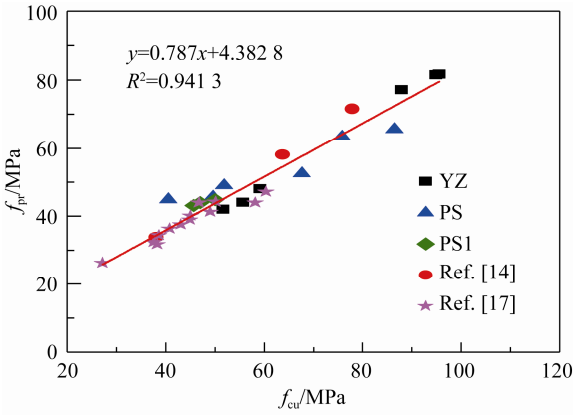


图 4　珊瑚混凝土 90 d 轴压强度与立方体抗压强度的关系
Fig. 4　Relationship between axial and cube compressive strength of coral concrete at 90 d

2.1.2　珊瑚骨料种类对混凝土强度发展规律的影响　　对 90 d 与 28 d 珊瑚混凝土立方体抗压强度的关系进行拟合，得到如图 5 所示的结果。结果表明：90 d 与 28 d 立方体抗压强度具有正相关性，与骨料种类无关，可用式(3)表示：

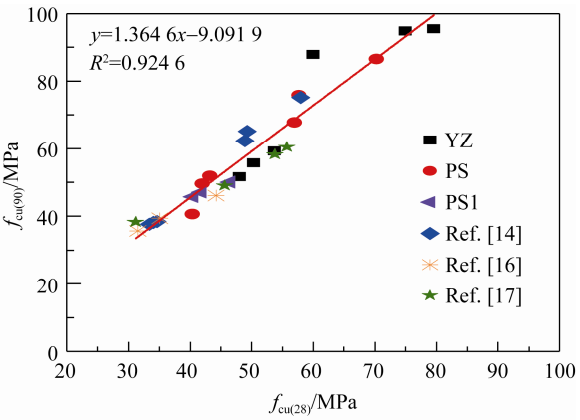


图 5　珊瑚混凝土 90 d 与 28 d 立方体抗压强度之间的关系
Fig. 5　Relationship between 90 d and 28 d cube compressive strength of coral concrete

$$f_{cu(90)}=1.364\ 6f_{cu(28)}-9.091\ 9$$
$$(R^2=0.924\ 6,\ R=0.961\ 6) \quad (3)$$

当样本数 n=25，显著性水平 a=0.01 时，R_{cr}=0.505 18，$R>R_{cr}$，故 90 d 与 28 d 珊瑚混凝土立方体抗压强度的呈显著的线性上升关系。

2.1.3 不同骨料种类的珊瑚混凝土弹性模量与峰值应变 C30 强度等级的珊瑚混凝土弹性模量范围是 24.53~26.62 GPa，其中，鹿角状骨料混凝土的弹性模量高于轻质骨料的 3.66%，高于重质骨料混凝土的 8.52%。C55 强度等级的珊瑚混凝土棱柱体弹性模量的范围是 25.50~27.32 GPa，鹿角状骨料混凝土的弹性模量高于轻质骨料的 7.14%。这是由于鹿角状骨料孔隙体积小，数量少；轻质珊瑚礁骨料孔隙体积小，但数量多且连通；重质珊瑚礁骨料孔隙体积大且数量多。在相同配合比下，混凝土的弹性模量与骨料密切相关。在相同应力下，鹿角状骨料的应变最小，轻质骨料次之，重质骨料应变最大。故鹿角状骨料混凝土的弹性模量最大，轻质骨料混凝土次之，重质骨料混凝土的弹性模量最小。

将珊瑚混凝土棱柱体峰值应力与峰值应变进行拟合，结果如图 6 所示。结果表明骨料种类对峰值应变与峰值应力的关系无明显影响，可用式(4)表示：

$$\varepsilon_{pr}=0.943\ 8\ln f_{pr}-1.556\ 6$$
$$(R^2=0.539\ 3,\ R=0.734\ 4) \quad (4)$$

当样本数 n=15，显著性水平 a=0.01 时，R_{cr}=0.641 14，$R>R_{cr}$，故随珊瑚混凝土棱柱体抗压强度的提高，峰值应变呈显著的对数上升趋势。

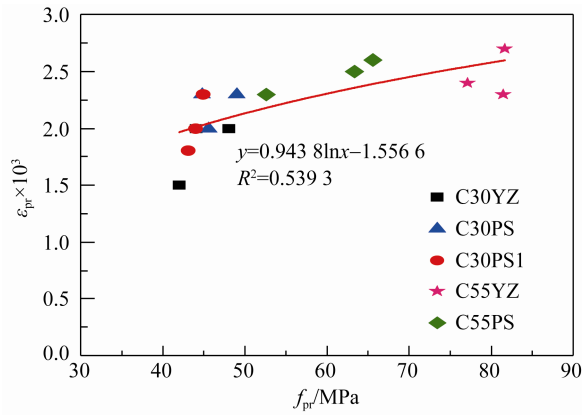


图 6 珊瑚混凝土峰值应变与轴压强度的关系

Fig. 6 Relationship between peak strain and axial compressive strength of coral concrete

将峰值应变与立方体抗压强度进行拟合，得到如图 7 所示的拟合结果。结果表明，峰值应变与立方体抗压强度之间的关系不受骨料种类影响，可用同一线性关系式表示为：

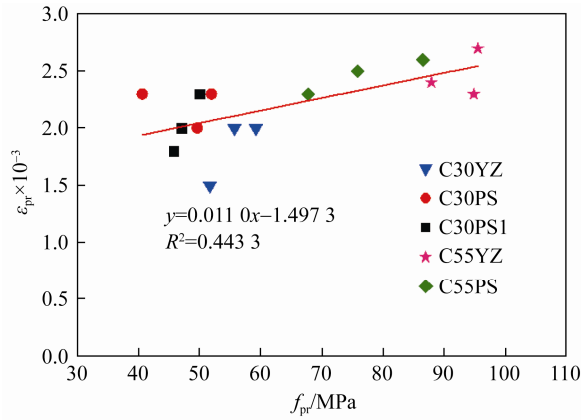


图 7 珊瑚混凝土峰值应变和立方体抗压强度间的关系

Fig. 7 Relationship between peak strain and cubic compressive strength of coral concrete

$$\varepsilon_{pr}=0.011f_{pr}+1.497\ 3\ (R^2=0.443\ 3,\ R=0.665\ 8) \quad (5)$$

当样本数 n=15，显著性水平 a=0.01 时，R_{cr}=0.641 14，$R>R_{cr}$，故随珊瑚混凝土立方体抗压强度的提高，峰值应变呈显著的线性上升趋势。

C30 强度等级珊瑚混凝土的 Poisson 比范围是 0.22~0.26，C55 强度等级的泊松比范围是 0.21~0.25，Poisson 比与骨料种类及混凝土的强度等级无明显关系。

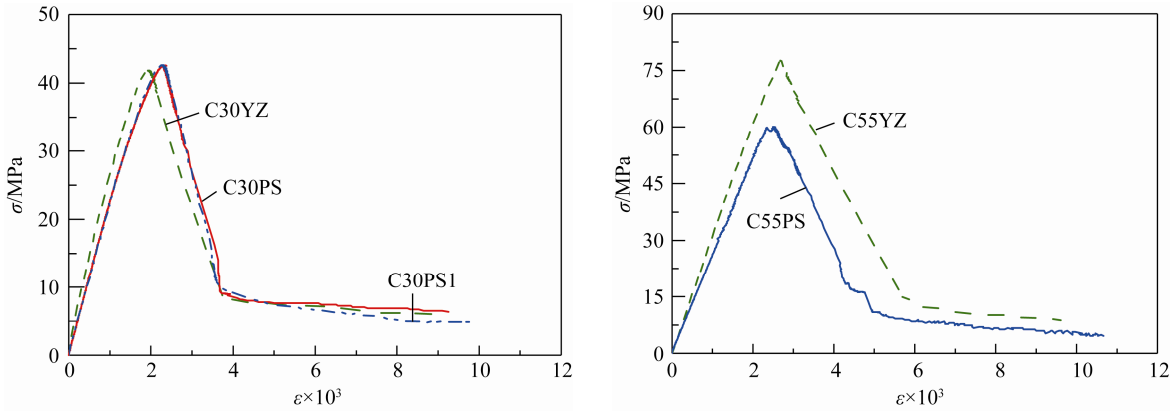
2.2 珊瑚骨料种类对混凝土单轴受压应力–应变曲线的影响

不同骨料种类的棱柱体珊瑚混凝土的应力–应变曲线对比如图 8 所示。从图 8 可以看出，骨料种类对 C30 强度等级的珊瑚混凝土棱柱体轴压强度的影响不大，而对 C55 的棱柱体的抗压强度影响较大，且鹿角状骨料混凝土的轴压强度高于轻质骨料混凝土轴压强度的 26.48%。

不同强度等级的棱柱体珊瑚混凝土的应力-应变曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出，C55YZ 的棱柱体轴压强度比 C30YZ 高约 100%，而 C55PS 的棱柱体轴压强度比 C30PS 高约 33%，说明鹿角状珊瑚骨料对棱柱体轴压强度的提高作用远大于轻质珊瑚礁骨料。

2.3 珊瑚混凝土棱柱体的单轴受压破坏形态

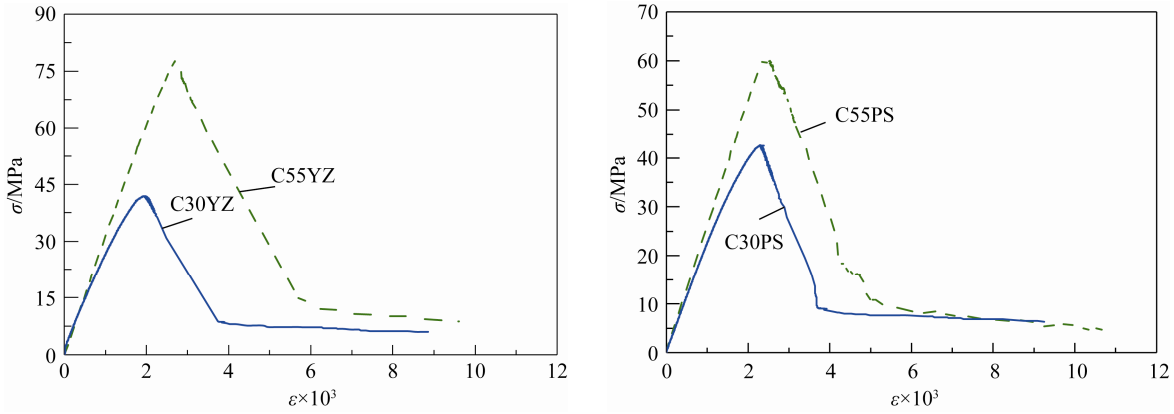
在等应变加载过程中，C30 强度等级珊瑚混凝土棱柱体破坏过程首先是试件表面先从端部产生细小的裂纹，后随着荷载不断增大，裂纹不断向试件的中部延伸并逐渐形成一条主裂纹，同时试件端部裂纹逐渐增多，此时应力–应变曲线进入下降阶段，试件应力迅速减小，并伴有轻微的崩裂声。随应变持续增大，主裂纹发展成沿着加载方向的主裂缝，端部混凝土轻微脱落。到残余阶段，端部裂纹



(a) C30　　(b) C55

图 8　不同骨料种类的珊瑚混凝土棱柱体应力–应变曲线

Fig. 8　Stress–strain curves of coral concrete prisms with different aggregate types



(a) YZ　　(b) PS

图 9　不同强度等级的珊瑚混凝土棱柱体应力–应变曲线

Fig. 9　Stress–strain curves of coral concrete prisms with different strength levels

继续向中部延伸，最终形成 1~2 条沿着加载方向的主裂缝(见图 10)。

C55 强度等级的珊瑚混凝土棱柱体，加载过程中表面无明显变化，当加载至峰值应力的 90%左右时，突然出现主裂纹，随着荷载继续增加至峰值荷载时，主裂纹突然贯穿试件，并伴有强烈的崩裂声。此后，应力–应变曲线进入下降阶段，随着应变的持续增大，主裂纹附近的混凝土逐渐脱落。到残余阶段后，细小裂纹逐渐增多，将混凝土棱柱体劈裂为多个小柱体并逐渐剥落。

等应变单调加载的试验中，可分为 3 个阶段。第 1 阶段，加载至峰值荷载的 5%~15%时，珊瑚混凝土发生角部表皮掉渣现象，说明试件处于压实阶段；第 2 阶段，加载至 70%~90%时，试件表面出现少量细而短的纵向裂缝；第 3 阶段，持续加载至峰值应力，裂缝迅速贯穿试件，破坏过程突然且短暂，具有脆性性质。破坏后应力迅速下降，应变持续增

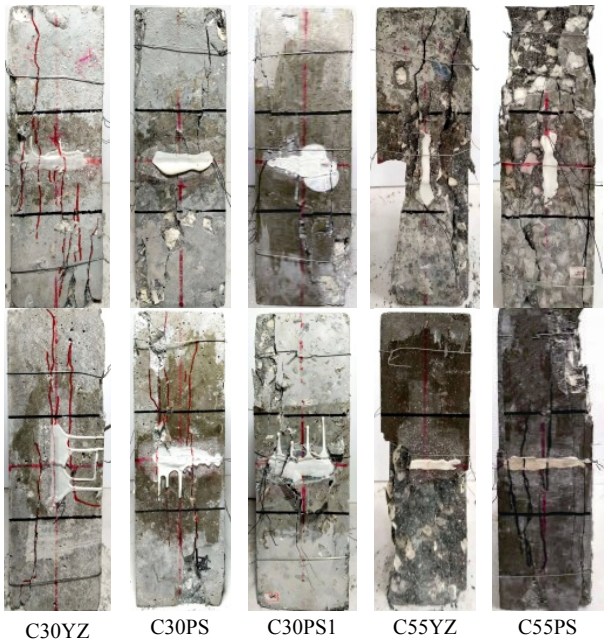


图 10　珊瑚混凝土棱柱体的破坏形态

Fig. 10　Failure form of coral concrete prism

大。由于珊瑚本身强度较低的特点，在外力作用下，珊瑚混凝土的破坏多贯穿珊瑚骨料或水泥浆体，不会绕过骨料拓展[18]，因此对于强度等级越低的珊瑚混凝土，破坏越突然，脆性越大。

骨料种类对珊瑚混凝土棱柱破坏形态无明显影响，都是随着荷载增大出现细小裂纹，后拓展成主裂纹，进入应力–应变曲线下降段后混凝土逐渐剥落，试件最终完全破坏。

2.4 珊瑚混凝土的单轴受压应力–应变关系

过镇海等[19]提出分段式表达方程是国内普遍认可的应力–应变模型，该模型能准确描述出普通混凝土受压应力–应变曲线的特点。而珊瑚骨料与普通砂石相比，其脆性更大，强度也更低，珊瑚混凝土的应力–应变曲线上升段的直线段较长，弯曲度较小，下降段应力下降快，曲线较陡，过镇海模型不再适用于珊瑚混凝土的应力–应变曲线的拟合。经验证，拟合出的应力–应变曲线满足以下数学条件：

(1) $x=0, y=0$；

(2) 当 $0 \leqslant x < 1$ 时，$\dfrac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} < 0$；

(3) 当 $x=1$ 时，$y=1$，$\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} = 0$；

(4) 下降段曲线有一拐点；

(5) 下降段曲线上有一曲率最大点；

(6) 当 $x \to \infty, y \to 0$ 时，$\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} \to 0$；

(7) 坐标范围，$x \geqslant 0, 0 \leqslant y \leqslant 1$。

针对上述曲线的特征，曲线上升段，采用南京航空航天大学余红发教授提出的模型：

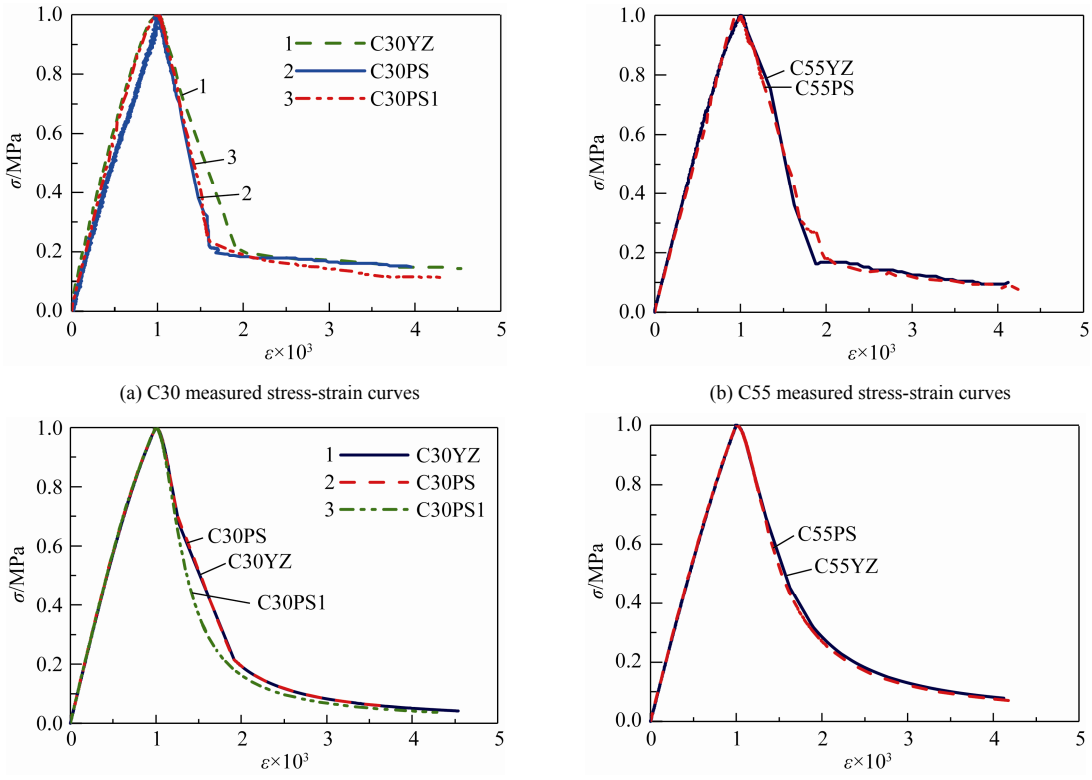
$$y = \sin(\frac{\pi}{2}ax) / \sin(\frac{\pi}{2}a) \quad (0 \leqslant x \leqslant 1) \tag{6}$$

下降段采用赖建中等[20]提出的单轴受压应力-应变曲线模型：

$$y = \frac{bx}{1+(b-2)x+x^2} \quad (x>1) \tag{7}$$

式中：$x=\varepsilon/\varepsilon_0$，$\varepsilon$ 为应变，ε_0 为峰值应变；$y=\sigma/\sigma_0$，σ 为应力，σ_0 为峰值应力；a、b 分别为曲线上升段和下降段的控制参数。

不同强度等级的实测应力–应变曲线如图 11 所示，由式(6)~式(7)拟合的不同强度等级的应力–应变曲线见图 11c~图 11d。由图 11a、图 11b 可见，不同珊瑚骨料对混凝土归一化应力–应变曲线无明显影响，曲线的上升段和下降段斜率接近。由图 11c、图 11d 可见，不同珊瑚骨料混凝土拟合的曲线仍无明显差异，说明骨料种类对拟合归一化后的应力–应变曲线无影响。



(a) C30 measured stress-strain curves

(b) C55 measured stress-strain curves

(c) C30 fitting curves

(d) C55 fitting curves

图 11 不同珊瑚骨料混凝土的应力–应变归一化曲线

Fig. 11 Stress–strain normalization curves of different coral aggregate concrete

按照式(6)~式(7)对珊瑚混凝土应力–应变曲线进行非线性拟合，得到拟合参数 a、b 如表 6 所示，参数 a 的相关系数在 0.99 以上，参数 b 的相关系数在 0.92~0.99 之间，吻合度良好，表明该模型适用于珊瑚混凝土应力–应变曲线的拟合。

表 6　应力-应变曲线拟合参数

Table 6　Stress-strain curve's fitting parameters

Concrete	90 d f_{cp}/MPa	90 d f_{cu}/MPa	a	R_a	b	R_b
C30YZ	42.0	51.6	0.757	0.996	0.120	0.927
	44.1	55.7	0.775	0.994	0.220	0.982
	48.1	59.2	0.770	0.996	0.155	0.943
C30PS	44.8	40.6	0.675	0.997	0.145	0.941
	45.6	49.6	0.650	0.997	0.098	0.995
	49.0	51.9	0.675	0.997	0.120	0.966
C30PS1	43.1	45.7	0.625	0.997	0.155	0.956
	44.0	47.0	0.675	0.997	0.097	0.997
	44.9	50.0	0.755	0.996	0.097	0.959
C55YZ	77.2	87.9	0.68	0.998	0.245	0.968
	81.5	94.9	0.535	0.999	0.200	0.965
	81.7	95.5	0.535	0.999	0.185	0.974
C55PS	52.6	67.7	0.645	0.997	0.225	0.903
	63.3	75.8	0.678	0.998	0.195	0.977
	65.6	86.5	0.558	0.998	0.185	0.983
CC30[14]	33.8	38.1	0.654	0.996	0.094	0.992
CC50[14]	58.1	63.7	0.714	0.996	0.125	0.988
CC70[14]	71.5	77.9	0.559	0.998	0.130	0.996
C30[7]	31.7	38.3	1.8		6.7	
C40[7]	41.2	49.0	2.1		7.6	
C50[7]	44.0	58.2	1.8		12.0	
C55[7]	47.2	60.4	1.7		15.0	

Note: R_a and R_b are the correlation coefficients of a and b respectively. Among them, the rising and falling sections of C30YZ-CC70[14] adopt formulas (6) and (7) respectively, and the rising and falling sections of C30[7]–C55[7] are $y=ax+(3-2a)x^2+(a-2)x^3$ $(0\leqslant x\leqslant 1)$[19] and $y=\dfrac{x}{-b+(b+)x}$ $(x>1)$[7].

将表 6 中应力–应变曲线拟合数据 a、b 与 90 d 轴心抗压强度和立方体抗压强度分别进行汇总，得到图 12。结果表明：随着轴心抗压强度和立方体抗压强度提高，a 值均呈下降趋势，b 值均呈上升趋势，对试验点进行回归分析，分别得到拟合关系式(9)和式(10)。

a 与 90 d f_{pr}、f_{cu} 的关系式为：

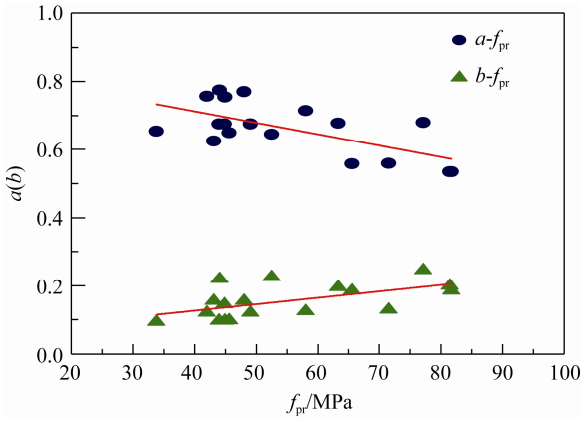
$$y=c_1\mathrm{e}^{cx}\ (R^2=0.441\ 8, R=0.664\ 7) \tag{9}$$

b 与 90 d f_{pr}、f_{cu} 的关系式为：

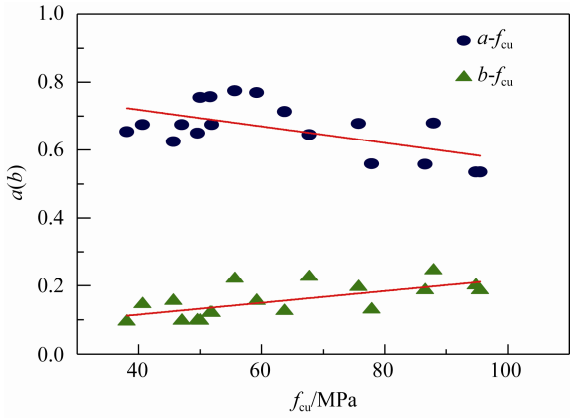
$$y=d_1x^d\ (R^2=0.365\ 3, R=0.604\ 4) \tag{10}$$

其中，c_1、c_2 与 d_1、d_2 为常数。当计算 a、b 与 f_{pr} 关系时，c_1、c_2 分别取值 0.882 9、–0.005 0，d_1、d_2 分别取值 0.007 8、0.740 3；当计算 a、b 与 f_{cu} 关系时，c_1、c_2 分别取值 0.844 4、–0.004 0，d_1、d_2 分别取值 0.007 0、0.741 3。

R 为相关系数，当样本数 n=18，显著性水平取 0.01 时，其临界相关系数为 R_{cr}=0.589 71<R，表明上述关系式(9)~式(10)非常显著。据此关系式，便可确定不同强度等级珊瑚混凝土的单轴受压应力–应变本构方程的参数取值。



(a)



(b)

Fig. 12　Relationship between the parameters (a, b) of the stress-strain curve equation and the strength of coral concrete (f_{pr}, f_{cu})

3　结论

1) 鹿角状珊瑚骨料的表观密度和堆积密度均高于重质珊瑚礁骨料和轻质珊瑚礁骨料，1 h 吸水率介于重质珊瑚礁骨料和轻质珊瑚礁骨料之间，其筒压强度高达 6.8 MPa，分别比重质珊瑚礁骨料和轻质珊瑚礁骨料的筒压强度提高了 21.43%和 44.68%。

2) 珊瑚骨料种类对珊瑚混凝土强度的影响与强度等级有关，对于 C30 和 C55 强度等级的珊瑚礁

骨料混凝土配合比，当采用鹿角状珊瑚骨料时其 28 d 立方体抗压强度分别提高了 20%和 30%，C30 珊瑚混凝土的轴心抗压强度没有明显差异，而 C55 珊瑚混凝土的轴心抗压强度提高了 26.48%。

3) 珊瑚粗骨料种类并不影响珊瑚混凝土 90 d 与 28 d 立方体抗压强度的正相关性，也不影响珊瑚混凝土棱柱体轴压强度与立方体抗压强度之间的关系。

4) 在相同配合比条件下，鹿角状珊瑚骨料混凝土的弹性模量比珊瑚礁骨料混凝土的弹性模量提高了 3.66%~8.52%。珊瑚骨料种类对珊瑚混凝土的 Poisson 比无明显影响。

5) 不同种类珊瑚骨料制备的珊瑚混凝土，其棱柱体受压破坏时的峰值应变与峰值应力之间具有对数增长关系，且不受珊瑚骨料种类的影响。不同种类珊瑚骨料混凝土棱柱体的受压破坏形态无明显差异。

6) 珊瑚骨料种类并不影响珊瑚混凝土单轴受压应力–应变曲线方程。珊瑚混凝土的单轴受压应力–应变曲线方程采用两段式描述，上升段采用含有参数 a 的正弦函数式，下降段采用含有参数 b 的有理分式。曲线方程的特征参数(a、b)与珊瑚混凝土的轴心抗压强度或立方体抗压强度均有显著的相关关系，a 值随轴心抗压强度或立方体抗压强度的提高呈指数下降趋势，b 值呈幂函数上升趋势。

参考文献:

[1] RICK A E. Coral concrete at bikini atoll[J]. Concr Int, 1991, 1: 19–24.

[2] 金昱昕, 陈天然, 孟庆山, 等. 单轴抗压强度揭示南海珊瑚骨骼结构的差异[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(2): 33–39.
JIN Yuxin, CHEN Tianran, MENG Qingshan, et al. J Tropical Oceanography (in Chinese), 2017, 36(2): 33–39.

[3] LYU Bangcheng, WANG Aiguo, ZHANG Zuhua, et al. Coral aggregate concrete: Numerical description of physical, chemical and morphological properties of coral aggregate[J]. Cem Concr Compos, 2019, 100: 25–34.

[4] 赵艳林, 韩超, 张栓柱, 等. 海水拌养珊瑚混凝土抗压龄期强度试验研究[J]. 混凝土, 2011(2): 43–45.
ZHAO Yanlin, HAN Chao, ZHANG Shuanzhu, et al. Concrete(in Chinese), 2011(2): 43–45.

[5] 陈兆林, 孙国峰, 唐筱宁, 等. 岛礁工程海水拌养珊瑚礁、砂混凝土修补与应用研究[J]. 海岸工程, 2008, 27(4): 60–69.
CHEN Zhaolin, SUN Guofeng, TANG Xiaoning, et al. Coastal Eng (in Chinese), 2008, 27(4): 60–69.

[6] 袁银峰. 全珊瑚海水混凝土的配合比设计和基本性能[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
YUAN Yinfeng. Mix design and basic properties of all coral sea water concrete [in Chinese, dissertation]. Nanjing: NUAA, 2015.

[7] 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.

[8] 余红发, 达波, 麻海燕, 等. 全珊瑚海水混凝土及其梁柱构件的力学性能与耐久性[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(6): 993–998.
YU Hongfa, DA Bo, MA Haiyan, et al. J Build Mater (in Chinese), 2019, 22(6): 993–998.

[9] 肖建强, 夏晓舟. 轻骨料混凝土抗压强度的影响因素研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 35(11): 122–125.
XIAO Jianqiang, XIA Xiaozhou. Bull Yangtze River Sci Acad (in Chinese), 2017, 35(11): 122–125.

[10] 李林. 珊瑚混凝土的基本特性研究[D]. 广西: 广西大学, 2012.
LI Lin. Study on the basic characteristics of coral concrete[D]. Guangxi: Guangxi University, 2012.

[11] HUANG Yijie, LI Xiaowei, LU Yu, et al. Effect of mix component on the mechanical properties of coral concrete under axial compression[J]. Constr Build Mater, 2019, 223: 736–754.

[12] HUANG Yijie, HE Xujia, SUN Huangsheng, et al. Effects of coral, recycled and natural coarse aggregates on the mechanical properties of concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 192: 330–347.

[13] 窦雪梅. 岛礁环境下珊瑚混凝土耐久性及其结构寿命的可靠度研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
DOU Xuemei. Research on the durability and reliability of coral concrete in island and reef environment (in Chinese, dissertation). Nanjing: NUAA, 2018.

[14] 岳承军. 珊瑚混凝土高速冲击力学性能的试验研究与数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
YUE Chengjun. Experimental research and numerical simulation of high-speed impact mechanical properties of coral concrete (in Chinese, dissertation). Nanjing: NUAA, 2019.

[15] MA Haiyan, WU Zhangyu, YU Hongfa, et al. Experimental and three-dimensional mesoscopic investigation of coral aggregate concrete under dynamic splitting-tensile loading[J]. Mater Struct (2020)53:12. https://doi.org/10.1617/s11527-020-1447-5

[16] 李朝飞. 珊瑚骨料混凝土的制备及其基本性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
LI Chaofei. Preparation and basic properties of coral aggregate concrete (in Chinese, dissertation). Xi'an: Xi'an University Architect and Technol, 2019.

[17] 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): 48–54.
MI Renjie, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Ocean Eng (in Chinese), 2016, 34 (4): 48–54.

[18] 王晴, 李琳, 王宇, 等. 高强页岩轻集料混凝土的力学性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(3): 517–520.
WANG Qing, LI Lin, WANG Yu, et al. J Shenyang Jianzhu Univ (Nat Sci Ed, in Chinese), 2009, 25(3): 517–520.

[19] 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(1): 1–12.
GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin, ZHANG Dacheng, et al. J Build Struct (in Chinese), 1982(1): 1–12.

[20] 赖建中. 超高性能水泥基复合材料的制备及动态性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
LAI Jianzhong. Preparation and dynamic properties of ultra-high performance cement-based composite materials (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2007.