第 49 卷第 8 期
2021 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 8
August，2021

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

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200951

综 合 评 述

珊瑚混凝土研究现状

蔡新光[1]，赵 青[1]，陈惠苏[2]

(1. 安徽建筑大学土木工程学院，合肥 230601；
2. 东南大学材料科学与工程学院，江苏省土木工程材料重点实验室，南京 211189)

摘 要：珊瑚混凝土作为离岸岛礁基础设施的重要建筑材料，成为近几十年研究的焦点。珊瑚集料的矿物组成、孔隙结构和颗粒形貌导致其性能与一般陆源岩石集料差异较大，进而导致珊瑚混凝土在配合比设计方法、静/动态力学特性和耐久性方面与普通混凝土存在差异，但与轻集料混凝土和再生集料混凝土类似。纤维的类型与掺量也会影响珊瑚混凝土的相关性能。珊瑚混凝土的发展已从材料层面逐渐转向结构层面，采用适当的调控措施可延长离岸环境下珊瑚混凝土结构的服役寿命。此外，还分析了珊瑚混凝土存在的问题，并尝试探索相关解决方案。

关键词：珊瑚混凝土；珊瑚集料；配合比；设计方法；静/动态力学特性；耐久性
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)08–1753–12
网络出版时间：：2021–06–18



Research Progress in Coral Concrete

CAI Xinguang[1], *ZHAO Qing*[1], *CHEN Huisu*[2]
(1. Department of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: As an important construction material of offshore reef infrastructures, coral concrete becomes one of recent popular research aspects. Compared to aggregates derived from terrigenous rocks, coral aggregates are unique because of their mineral composition, pore structure and particle morphology. Coral aggregate concretes are different from those made of ordinary aggregates in terms of mixture proportion design, static/dynamic mechanical properties and durability, while they are similar to lightweight aggregate and recycled aggregate concretes. Meanwhile, the properties of coral concretes are also affected by the type and volume fraction of fibers. In addition, the development of coral concretes is gradually extended from a material level to a structural level. Appropriate modification is of great significance to extend the service life of the structures in offshore environment. In this review, the problems encountered in these modification processes and the corresponding potential solutions were discussed.

Keywords: coral concrete; coral aggregate; mix proportion; design; static/dynamic mechanical properties; durability

随着人类社会的发展陆地能源不断被消耗，世界各大海洋权益国家纷纷将战略目光投向蕴藏丰富油气与矿产资源的海洋。近年来，各国为提高海上资源开发能力和增强海上军事能力而大力推进油气钻采平台和离岸岛礁基础设施的建设。混凝土在离岸环境下具有优秀的服役能力并且价格相对低廉，因而成为海工结构中大量使用的基础材料之一。然而，在离岸岛礁上往往缺乏拌制混凝土的传统碎石集料和淡水，如果所有原材料均从大陆运输，那么大规模建设所带来的成本将会是一个天文数字并且

收稿日期：2020–12–24。　修订日期：2021–02–12。
基金项目：国家自然科学基金项目(51878152)。
第一作者：蔡新光(1994—)，男，硕士研究生。
通信作者：赵 青(1968—)，男，教授。

Received date: 2020–12–24.　**Revised date:** 2021–02–12.
First author: CAI Xinguang (1994–), male, Master candidate.
E-mail: caixinguang1994@163.com
Correspondent author: ZHAO Qing (1968–), male, Professor.
E-mail: 919844148@qq.com

工期难以保证[1–2]。因此，工程人员利用岛礁上开采的珊瑚礁石经过破碎、筛分等工序处理生产粗、细集料，并采用海水拌制混凝土。世界上最早研发珊瑚混凝土的国家是美国，其军方于二战期间发表了第一份珊瑚混凝土相关资料《Unified Facilities Criteria-Tropical Engineering》[3]。中国为了规范海洋集料的使用，有关部门历时 15 a，于 2020 年 11 月 1 日开始实施 T/CECS 10090－2020《混凝土用珊瑚骨料》和 T/CECS 694－2020《珊瑚骨料混凝土应用技术规程》，这必将推动离岸珊瑚混凝土的设计、施工和运营朝着系统化、规范化的方向发展。本综述在材料层面总结了珊瑚集料对混凝土配合比设计方法、物理力学性能和耐久性等方面影响，还分析了珊瑚混凝土存在的问题，并指出其与普通混凝土(OAC)的差异，以及与轻集料混凝土(LAC)和再生集料混凝土(RAC)的类似之处；在结构层面主要描述了珊瑚混凝土结构防腐措施存在的问题，为珊瑚混凝土结构的发展提供参考。

根据混凝土中的粗、细集料分别被珊瑚石、珊瑚砂取代的情况，将珊瑚混凝土分为全珊瑚混凝土(CAC)、珊瑚礁石混凝土(CRC)和珊瑚砂混凝土(CSC) 3 类。CAC 是将集料全部以珊瑚石和珊瑚砂取代，采用海水拌制而成；CRC 是将混凝土的粗集料全部或部分替换为珊瑚石，采用海水拌制而成；CSC 则是由珊瑚砂全取代或部分取代细集料，采用海水或淡水拌制而成。在工程环境极度恶劣、资源匮乏的离岸岛礁环境下，采用海水拌制 CAC 对于离岸油气钻采平台建设、人工岛礁建设和岛礁基础设施快速修补更具实际意义。

1 珊瑚集料的特性及其对混凝土配合比设计方法的影响

1.1 珊瑚集料与普通集料的区别

当造礁珊瑚的遗骸经历地质作用会形成具有一定强度的特殊碳酸盐类土——即珊瑚礁石，其化学成分主要为碳酸钙($CaCO_3$)并且含量极高，可达 96%以上[4]。XRD 谱显示珊瑚礁石的主要矿物成分为文石，因此相较于普通碎石集料而言不易发生碱集料反应[5]。由人工开采所得到的天然珊瑚礁石形状多样(常见形状有鹿角状、棒状和块状[1])，为了得到级配合理的珊瑚粗、细集料，工程人员需要对天然珊瑚礁石进行一系列的破碎和筛分处理，经处理后得到的珊瑚粗集料的筒压强度得到提高，针片状含量降低。珊瑚细集料的颗粒集配处于Ⅱ区砂范围内[6–8]。Liu 等[9]的研究表明，经破碎处理的珊瑚砂与天然河砂相比，棱角度更高并且球形度更差。

由于造礁珊瑚的生物学分类、风化程度、开采深度以及试验操作误差等因素的影响，所得到的珊瑚集料物理力学性能离散性较大。表 1[6,8,10–12]和表 2[5,8,13–14]分别统计了不同文献中珊瑚礁石和珊瑚砂的物理力学性能，可以发现珊瑚礁石的筒压强度通常不会超过 3 MPa(优质鹿角珊瑚科珊瑚所形成的礁石筒压强度可达 6.8 MPa[15])，远小于普通碎石(22～140 MPa)；通过比较可发现珊瑚礁石的 1 h 吸水率大于珊瑚砂，且前者的 24 h 吸水率可达 15%。

表 1 珊瑚粗集料的物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of coral coarse aggregate

Ref.	Apparent density/(kg·m^{-3})	Bulk density/(kg·m^{-3})	Cylinder compressive strength/MPa	1 h water absorption/%	24 h water absorption/%	Porosity/%	Chloride ion content/%
[6]						48.2–55.6	
[8]	1 724	909	2.27		15.0	47.3	0.025
[10]	1 841	915	3.10	8.50	11.0	50.0	
[11]	1 966	938	3.07	8.26		52.3	0.014–0.31
[12]	1 806	918	2.01		15.4	49.1	

表 2 珊瑚细集料的物理性能

Table 2 Physical properties of coral fine sand

Ref.	Apparent density/(kg·m^{-3})	Bulk density/(kg·m^{-3})	1 h water absorption/%	Mass fraction/%		
				Void	Clay	Chloride ion
[5]	2 350	1 320		16.9		
[8]	1 538	1 138		23.2	1.5	0.05
[13]	1 638	1 348	2.97	17.6		
[14]	1 659	1 394	3.04			

珊瑚礁石的孔隙率范围介于 47.3%～55.6%之间，这也是其强度明显低于普通碎石的原因[6,8,10–12]。珊瑚礁石不仅孔隙率高，而且其孔隙结构复杂。研究表明，珊瑚礁石外表面分布着阵列大孔(数量最多)、圆形孔簇和致密微孔 3 种结构形态的孔隙；珊瑚礁石内部具有致密微孔、竹形孔、圆形孔簇、蚁巢(大孔/小孔)及面包状孔等至少 5 种不同的孔隙结构[10]。珊瑚礁石孔隙结构的复杂性必将导致孔隙渗流阈值(孔隙发生渗流时的临界孔隙体积分数)不同于其他软物质颗粒体系(例如火山岩[16])。

1.2　珊瑚集料对配合比设计方法的影响

珊瑚混凝土的配合比设计方法在很大程度上受到珊瑚集料特性的影响。珊瑚集料的高吸水性和粗糙的表面形貌，导致采用珊瑚集料拌制混凝土时比采用普通碎石集料需要更多的水泥浆，而且需要调整砂率，才能达到相同的工作性和强度指标[12,15,17–18]。王磊等[19]指出 CRC 的胶凝材料用量要比同强度等级的 OAC 高 40%左右。早期关于珊瑚混凝土的配合比设计，许多学者[13,16,20]参考 JGJ 51－2002《轻集料混凝土技术规程》并采用体积砂率，但并未考虑珊瑚集料自身特性对配合比设计的影响。达波[2]和袁银峰[21]指出由于珊瑚粗集料孔隙率较大导致采用体积砂率计算配合比会影响 CAC 的密实程度，因此建议采用质量砂率。珊瑚集料的筒压强度较低成为制约珊瑚混凝土强度提高的最主要因素，目前有关珊瑚集料的预处理方式(例如吸水预湿、净浆包覆和酸洗[21–23])也很难突破珊瑚集料自身属性的限制。因此，为了使珊瑚混凝土的配合比设计满足强度及耐久性的要求，需要通过调整胶凝材料的组成和优化原材料颗粒级配两种方式对其进行优化。

1.2.1　调整胶凝材料组成　　在珊瑚混凝土的配合比设计中，调整胶凝材料成分的方式主要为采用辅助胶凝材料(SCMs)部分取代普通硅酸盐水泥(OPC)，利用 SCMs 的火山灰活性、微填充效应和复合叠加效应促使基体趋向于最紧密堆积，进而提高珊瑚混凝土的强度、体积稳定性和耐久性。Wu 等[24]和 Cheng 等[25]的研究表明，采用 10%硅灰(SF)取代 OPC 使 CAC 的 90 d 劈裂抗拉强度较对照组增加 11.5%；同时采用 15%粉煤灰(FA)、15%矿渣(BFS)和 5%偏高岭土(MK)的 CSC 试件具有最高的 7 d 与 28 d 立方体抗压强度，较对照组增幅分别为 17%和 21%。Cheng 等[25–26]发现 5%MK 可使 CSC 的氯离子扩散系数较对照组减小约 60%，碳化深度减小约 30.5%，干缩值降低约 57%。此外，已有学者将珊瑚微粉(Coral powder, CP)作为 SCMs 并应用于 CAC 配合比设计的优化。刁益彤等[27]采用 CP 取代 OPC，以 CAC 力学性能和界面过渡区微结构的变化为依据确定 CP 的最优取代率为 10%。Wang 等[28]指出双掺 30% CP 和 10% MK 能够使珊瑚砂浆的 CO_2 排放量减少约 44.7%，不可再生资源消耗量减少约 38.7%。

随着全球环保政策的变化，诸如 FA、BFS 等传统工业固废材料的产量逐年减少，越来越不能满足大规模基础建设的需要。目前热门的代替方案是采用生物质固废材料(例如甘蔗渣灰[29]、稻壳灰[30]以及棕榈油燃料灰[31]等)。对于处于离岸岛礁环境下的珊瑚混凝土而言，临近海岛上的热带植被以及海洋植物存在极大的开发潜能，这将会进一步推动珊瑚混凝土的就地取材化并极大的降低建设成本。

1.2.2　优化原材料颗粒级配　　受到超高性能混凝土(UHPC)理论化设计方法的启发，修正的 Andreasen-Andersen 模型(MAA)被初步应用于珊瑚混凝土的配合比设计与优化。Liu 等[9]采用 MAA 优化原材料颗粒级配组成，调整并确定珊瑚砂的粒径分布范围为 0～0.6 mm，消除了珊瑚砂的高棱角度对颗粒堆积状态的负面影响。Wang 等[32]基于 MAA 模型并同时结合响应面分析法，在拌制高性能 CSC 时将珊瑚集料的总利用率提升至 45%。由于拌制珊瑚混凝土需水量较大且通常需要掺入纤维以获得较好的变形性能，因此 MAA 模型自身存在的缺陷也成为其在珊瑚混凝土中进一步应用的阻碍。若想在珊瑚混凝土的配合比设计中进一步使用 MAA 模型，必须充分考虑颗粒湿堆积和纤维对整个体系的影响。

2　珊瑚混凝土的特性

2.1　珊瑚集料和纤维对工作性的影响

珊瑚粗集料的表面比普通碎石集料粗糙，在拌制过程中需要更多的水泥浆包裹润湿才能使混合料的工作性满足要求[6,21]。此外，由于珊瑚混凝土配制的砂率较高(介于 40%～60%[15–16,20])，珊瑚砂的棱角度较高且球形度较低，因此珊瑚砂的用量会在很大程度上影响混合料的工作性。许成明等[33]指出随着珊瑚砂取代机制砂比例的提高，混合料的流动性逐渐下降。然而 Liu 等[9]的研究表明，采用不同取代率和预湿率的珊瑚砂部分取代河砂使混合料的流动性相较于对照组提升 15%～70%。造成以上差异的原因可能是后者采用 MAA 模型优化了珊瑚砂

的颗粒级配，并且部分试验组的预湿率过大。相关研究指出，影响 CAC 坍落度的最大因素为集料预湿率[13,21,34]。纤维的掺入可增加混合料的粘聚性并减少泌水的发生，但会减小坍落度[8]。如果所使用纤维的吸水性较强，则需要在配合比设计中考虑其吸水性。研究表明剑麻纤维会减小 CAC 的净水灰比，并导致混合料的坍落度低于配合比相同的对照组[35]。此外，现有研究[7–8,11,35–40]在评价纤维增强珊瑚混凝土的工作性时仅采用坍落度法，无法描述其压实特性，而纤维的掺入会在很大程度上影响珊瑚混凝土的压实特性。为了综合反映纤维增强珊瑚混凝土的工作性还应进行维勃稠度试验。

2.2 珊瑚集料和纤维对力学特性的影响

早期的珊瑚混凝土强度等级通常介于 C20～C30 之间[1,3,12–13,15,17]。随着配合比设计方法的优化、富浆设计理论的应用[41]、外加剂技术的应用[42]以及纤维增强理论的应用[7–8,11]，珊瑚混凝土的水灰比逐渐降低，并且强度等级不断提高。对于最具工程意义的 CAC 而言，余红发等[2,21,41,43]将 CAC 净水灰比控制在 0.2～0.35 之间，并成功在试验室及施工现场将其强度等级提升至 C50～C80。目前，CAC 常见的强度等级介于 C20～C55 之间。除了配合比的影响，珊瑚集料特性和纤维类型都会在不同程度上影响珊瑚混凝土的静态/动态力学性能。

2.2.1 珊瑚集料对静态力学特性的影响 不同种类造礁珊瑚的强度往往不同，进而会影响 CAC 的力学性能。例如采用优质鹿角珊瑚集料拌制 C30 和 C55 的 CAC 可使立方体抗压强度较对照组分别增加 20%和 30%[10]。在世界两大珊瑚区系中，鹿角珊瑚科珊瑚由于其优异的骨架结构和繁殖能力占据着主导地位[44–45]。因此，不同属种的鹿角珊瑚礁石的强度测定对珊瑚集料的选用具有指导意义。与 LAC 和 RAC 类似，珊瑚混凝土的强度也会受到集料预湿率和取代率的影响。巩位等[46]采用田口方法探讨了珊瑚集料预湿率对 CAC 抗压强度的影响，发现当预湿率为 5%时强度最大。由于珊瑚集料密度较小强度较低，其取代率的增大也会在一定程度上削弱混凝土的强度[47]。因此，若要在珊瑚集料强度尚无法突破自身瓶颈的前提下提高珊瑚混凝土的强度，做好珊瑚原材料筛选并选取最佳预湿率就显得意义重大。此外，珊瑚粗集料的强度通常小于水泥石，而且珊瑚粗集料-水泥石的界面过渡区(ITZ)的显微硬度远大于集料和水泥石，并且大于普通集料-水泥石 ITZ 的硬度[48]。以上因素的耦合导致珊瑚混凝土在单轴和多轴受压下的力学性能不同于 OAC，并且与 LAC 和 RAC 类似。袁银峰[21]探讨了单轴受压下 C30～C55 的 CAC 的破坏模式，发现试件破坏时的主斜裂缝与轴向荷载的夹角随着 CAC 强度等级的变化在 30°～35°之间变化，所有裂缝均贯穿粗集料。这一现象与同强度等级的 LAC 和 RAC 类似[49–52]。Da 等[49]通过对比 C30～C55 的 CAC、OAC 和 LAC 的应力-应变(σ-ε)曲线指出，CAC 具有比同强度等级 OAC 和 LAC 更强的脆性。糜人杰等[50]指出 C20～C55 CAC 的劈裂抗拉强度比同强度等级的 OAC 高出 8%～33%，比 LAC 高出 5%～67%。Huang 等[51]的研究表明，C30 CAC 的弹性模量分别比同强度等级的 OAC 和 RAC 低 7.8%和 4.3%，且泊松比与同强度等级的 RAC 相似。然而，珊瑚混凝土构件在实际工程中很少处于理想的单轴受力状态，其破坏模式与 σ-ε 曲线会因主应力比值的不同而与单轴情况有所差异。李达[53]对 C30～C40 的 CSC 进行应力比介于 0.25～1 之间的双轴受压试验；Zhou 等[54]对 C20 和 C40 的 CAC 进行真三轴受压试验。在这些多轴受压试验中，CAC 和 CSC 均发生斜剪破坏，而且与 LAC 和 RAC 类似的是其 σ-ε 曲线出现了明显的屈服平台。

与 OAC 相比，CAC 的强度发展具有明显的时变性。珊瑚混凝土 7 d 和 28 d 立方体抗压强度的比值汇总于图 1[8,16,20,22,50]。由图 1 可以看出，强度等级介于 C30～C55 间的珊瑚混凝土 7 d 与 28 d 立方体抗压强度的比值普遍介于 0.8～1.0 之间，并且明显大于同强度 OAC 的回归值。CAC 早强的原因主要有 2 个方面：(1)珊瑚集料与海水中含有的 Cl^-与铝酸酸钙反应生成 Friedel 盐，具有类似于早强剂的效果[15–21]；(2)珊瑚粗集料表面大量存在的阵列大孔能够很好的被水泥浆填充并嵌合，从而提升集料与水泥石界面的机械咬合力[6]。

2.2.2 纤维对静态力学特性的影响 目前用于珊瑚混凝土中的纤维包括碳纤维(CF)[36]、聚丙烯纤维(PPF)[37]、剑麻纤维(SF)[38–39]和玄武岩纤维(BF)[40]等。图 2[36–40]所示为体积掺量不同的纤维对珊瑚混凝土静态力学性能的影响。由图 2 可以看出，纤维对珊瑚混凝土抗压强度和弹性模量的提升幅度较小，对抗拉强度和抗折强度提升幅度较大，其中对抗折强度的提升尤为显著。王磊等[36–39]采用不同体积掺量的 CF、PPF 以及 SF 增强 C30 CRC 发现(见图 2c)，0.2%的 PPF 可使 CRC 抗折强度获得最大增幅，约 66.7%。然而，纤维对 CRC 其他静态力学性

能的增益最大尚未超过20%(见图2a、图2b和图2d)。此外，由图 2b 可知，0.05%的 BF 对 CAC 的 28 d 劈裂抗拉强度具有削弱作用，但 90 d 劈裂抗拉强度值获得约 9.4%的提升[40]。虽然以上文献报道了纤维类型和掺量对珊瑚混凝土静态力学性能的影响，却未给出相应的应力-应变曲线，因此无法评估纤维各项指标(纤维类型、长径比、体积掺量等)及纤维与基体界面粘结特征等对其开裂后延性、韧性的影响。

2.2.3　珊瑚集料和纤维对动态力学特性的影响　珊瑚礁石的孔隙率较大导致其抗压强度对应变率的敏感程度要大于一般陆源岩石(例如大理岩、石灰岩和砂岩等)[55]。这也是 CAC 抗压强度对应变率的敏感性大于同强度等级 OAC 的主要原因。岳承军[35]的研究表明当应变率介于 30～150 s^{-1} 时，C50 CAC 抗压强度的动态增强因子大于 C50 OAC。目前有关冲击荷载作用下 CAC 的动力学响应试验的加载应变率介于 1～200 s^{-1}，但缺乏这一应变率下的层裂试验。CAC 在冲击荷载下的破坏形态与应变率有关。吴家文等[56]和 Ma 等[57]定量分析了冲击压缩荷载下 C40 CAC 的破碎程度，发现当应变率从 30.12 s^{-1} 增至 143.32 s^{-1} 时，其分形维数从 2.027 增至 2.302。

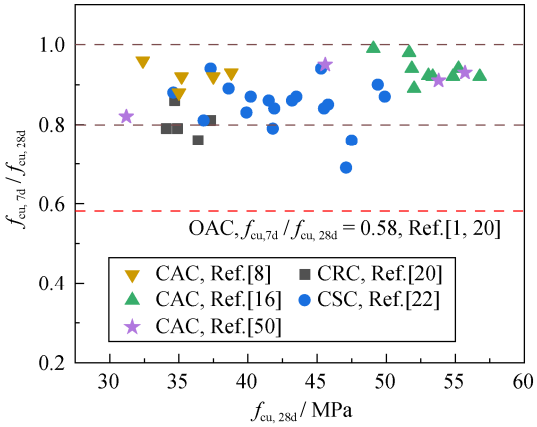
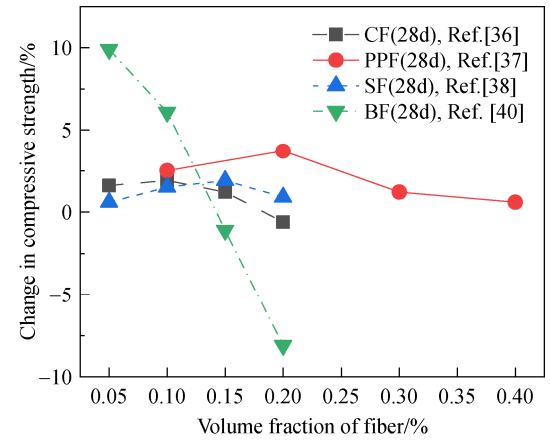
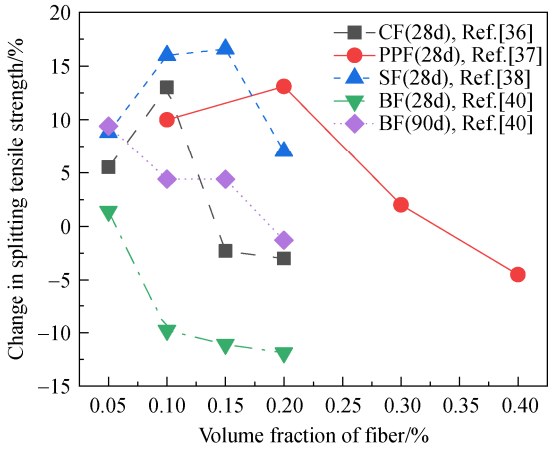


图 1　珊瑚混凝土和普通混凝土的时变性比较

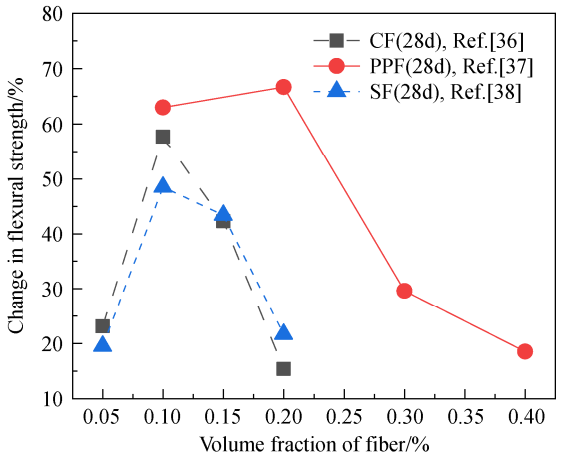
Fig. 1　Comparison of time-varying between coral concrete and OAC



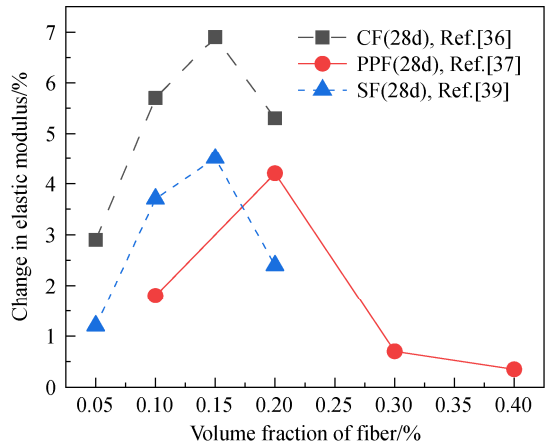
(a) Compressive strength



(b) Splitting tensile strength



(c) Flexural strength



(d) Elastic modulus

图 2　纤维掺量对珊瑚混凝土静态力学性能的影响

Fig. 2　Effect of fiber content on static mechanical properties of coral concrete

Wu 等[58]基于数值模拟方法指出 CAC 试件的尺寸越大，破坏时的裂缝密度和面积越大；其在细观层面上建立了应变率、试件尺寸对动态抗压强度影响的 3D 数学模型，该模型能够很好的预测 1～200 s^{-1} 内 CAC 的动态抗压强度。为了提高 CAC 的吸能能力和冲击韧性，Ma 等[59]采用 0.2%的 SF 增强 C70 CAC 发现，当应变率介于 42.1～137.4 s^{-1} 时 SF 的掺入使 CAC 的吸能性比对照组高出 49.6%～140.29%。岳承军等[60]采用 0.2%的 SF 并综合利用碱式硫酸镁水泥强化 C40 CAC 的冲击韧性，发现当应变率介于 56～137 s^{-1} 时，同时掺入以上 2 种材料可使基体的韧性指数提高 1.18～2.24 倍。

关于 CAC 的疲劳特性，马林建等[61]通过对比 CAC 和 OAC 的阻尼特性后指出，C35 CAC 的阻尼比介于 3.7%～6.0%并且高于同强度等级的 OAC(介于 1%～2%)。相关研究表明，C30 CAC 的疲劳寿命大于同强度等级的 OAC 和 LAC[62]。目前关于珊瑚混凝土疲劳特性的研究都是基于应力比 $r\neq-1$ 且 $r\neq0$ 的工况，即非对称循环荷载工况。考虑到珊瑚混凝土服役环境的严酷性，应将荷载循环次数的标准适当提高。

2.3 珊瑚集料对耐久性的影响

由于珊瑚区系位于南北回归线之间的热带及亚热带海域[63–64]，故珊瑚混凝土建筑/构筑物随着造礁珊瑚的分布亦具有一定的区域性，其服役环境通常高温、高湿且高盐雾，因此通常不考虑冻融循环所造成的破坏。珊瑚混凝土耐久性的劣化行为将随着腐蚀因素(物理、化学和生物因素)和海洋垂直区带(大气区、飞溅区、潮汐区、全浸区和海泥区)的不同而表现出巨大的差异。目前尚无关于海洋微生物腐蚀方面的研究，也未见纤维劣化对珊瑚混凝土耐久性影响的研究。

2.3.1 干湿循环 珊瑚集料对干湿循环下混凝土劣化的影响主要有 2 个方面。一方面，与普通碎石集料相比，珊瑚集料较强的吸水性所产生的“内养护”作用能够使基体更早趋于密实，从而降低干湿循环下强度损失对养护龄期的敏感性。Cheng 等[26]探讨了 14 次干湿循环下养护龄期对混凝土强度损失的影响，发现 C40 CSC 强度损失对养护龄期的敏感程度低于同强度等级的 OAC。另一方面，压汞实验表明 C40 CSC 的总孔隙率比相同配合比的 OAC 高出约 34.4%[5]。Tang 等[65]指出在浓度相同的 Na_2SO_4 溶液中，经过 140 次干湿循环的 CSC 的强度损失与相同配合比的 OAC 相当，但由于所生成的水化产物填充在 CSC 的孔隙中导致其弹性模量的损失小于 OAC。目前，关于干湿循环对珊瑚混凝土耐久性影响的研究主要集中于物理力学性能劣化方面，且试验中所配置的硫酸盐溶液阳离子单一(均为 Na^+)。而且，尚未在微/宏观层面上针对珊瑚集料的孔结构和孔隙弹性特性建立结晶压作用下的珊瑚混凝土破坏的数学模型。

2.3.2 收缩 混凝土的收缩值过大容易诱发早期裂缝的形成，进而影响构件的长期服役能力。珊瑚集料的“微泵”效应能够维持基体内部的相对湿度、抑制毛细孔压力的增加、促进水化反应的进行，进而抑制基体的自收缩与干燥收缩。珊瑚集料的预湿率与取代率是影响混凝土自收缩与干燥收缩的主要因素。相关研究表明，随着珊瑚砂预湿率的增加 UHPC 的 7 d 自收缩值不断减小，但预湿率过大会导致总水灰比增大，进而削弱基体强度[9]。Liu 等[47]采用饱和面干珊瑚砂部分取代石英砂，发现随着取代率的上升 UHPC 的自收缩值不断下降。Wang 等[32]采用 30%珊瑚砂取代河砂，并采用 15% CP 部分取代 OPC，发现 UHPC 的 7 d 自收缩值较对照组下降约 55%。与 OAC 类似，CSC 的干缩值随着水灰比的增大而增大，且早期干缩速率较快，后期较缓慢[66]。然而，现有研究关于珊瑚集料对混凝土干燥收缩的影响存在 2 种对立的观点。一方面，一些学者的研究表明珊瑚砂的高孔隙率会增加基体的干缩值。例如，Cheng 等[25]指出 CSC 的 49 d 干缩值可达 790×10^{-6}，比相同配合比的 OAC 高 97.7%；Zhang 等[67]指出珊瑚砂砂浆的 120 d 干缩值比相同配合比的河砂砂浆高出约 35%。另一方面，相反观点认为珊瑚集料的“微泵”效应能够抑制 CSC 的干燥收缩，使其 28 d 的干缩值小于相同配合比的 OAC[68]。CSC 的毛细孔隙率、孔的比表面积、固相的弹性模量等参数也会在很大程度上影响混凝土的干燥收缩，因此关于 CSC 的干燥收缩还有待进一步研究。

2.3.3 氯离子侵蚀 珊瑚集料远高于普通集料的孔隙率和连通性导致氯离子在珊瑚混凝土中的扩散较 OAC 更加容易。除了珊瑚集料的影响，暴露时间、服役环境和试验条件等因素也会在不同程度上影响珊瑚混凝土的表观氯离子浓度(c_s)、氯离子扩散系数(D_a)和氯离子结合能力(dc_b/dc，单位质量材料中固化氯离子含量与单位体积溶液中总氯离子含量的比值)。c_s 值随着 CAC 强度等级和暴露龄期的增大而增大且具有明显的时变性，当暴露龄期达到 180 d 时 C30 CAC 的 c_s 值大约是同强度等级 OAC 的 1.4

倍[69–70]。Wattanachai 等[71]的研究表明相同配合比情况下 CRC 的 28 d D_a 值约为 OAC 的 1～2 倍，约为 LAC 的 2～3 倍。然而，Cheng 等[26]指出由于珊瑚细集料的内养护作用提高了 CSC 的密实程度，导致基体 28 d 的 D_a 值比相同配合比的 OAC 小 62%。关于珊瑚粗、细集料对珊瑚混凝土早期 D_a 值不同影响的原因尚不明确，需进一步探索。此外，达波等[2,72]对服役于离岸岛礁的 CAC 建筑/构筑物考察发现，处于大气区、飞溅区和全浸区 CAC 的 c_s 值逐渐增大并且是相同环境下 OAC 的 13～28 倍，处于飞溅区与全浸区 CAC 的 D_a 值分别是大气区的 7.4 倍和 15 倍。由于受到紫外线、台风、碳化以及施工管理等因素的耦合影响，对于暴露时间相同的 CAC 试件，处于岛礁环境的试件的 c_s 值通常是试验室环境下的 1.26～1.63 倍，D_a 值最大可达试验室环境的 6.6 倍[73]。Da 等[70]比较分析了配合比相同的 C25 碱式硫酸镁水泥基全珊瑚混凝土和 C55 普通硅酸盐基全珊瑚混凝土在不同暴露时期的 dc_b/dc(氯离子结合能力)值，结果表明前者 28 d 和 90 d 的 dc_b/dc 值分别是后者的约 1.6 倍和 2.4 倍。截止目前，有关碱式硫酸镁水泥固化 Cl^-的机理尚不明确，XRD 谱分析并未发现其与 Cl^-生成新的含氯结晶相[74]，这很可能是由于试验人员没有做相关定量分析。

2.3.4　碳化　　珊瑚混凝土的碳化深度与结构所处的海洋垂直区带、基体孔隙特征和密实度有着密切的关系。达波[2]对服役 25 a 的珊瑚混凝土建筑物的不同位置的碳化深度进行调查发现，处于潮汐区、浪溅区和大气区的碳化深度分别为 8、10 mm 与 25 mm。加速试验表明，为了保证 CAC 的抗碳化能力，在配合比设计时水泥用量不宜低于 400 kg/m^3[75]。相关研究表明，CSC 在 21 d 之前的抗碳化能力优于相同配合比的 OAC，21 d 后则相反[25]。这表明在 21 d 之前控制抗碳化能力的主要因素为珊瑚集料的“内养护”效应，21 d 之后当 CSC 密实程度不再改变，这一因素就转变为基体的孔隙率。然而，这一推论仍然缺乏相关定量分析。

3　珊瑚混凝土结构防腐的调控措施

珊瑚混凝土结构的劣化主要始于其内部钢筋的腐蚀。目前关于防止珊瑚混凝土内钢筋腐蚀的调控措施主要有掺入阻锈剂、采用新型耐腐蚀钢筋和采用 FRP 筋。虽然这些方法同样常见于 OAC 结构，但对于服役于离岸环境下的珊瑚混凝土结构的防腐而言意义重大。

3.1　阻锈剂

掺入适量的阻锈剂早已成为提高钢筋混凝土结构耐久性的常用方法之一。目前用于珊瑚混凝土结构的阻锈剂主要为亚硝酸钙类阻锈剂(CNRI)与氨基醇类阻锈剂(AARI)。达波等[76]采用电化学方法探讨了 CNRI 和 AARI 对 C50 CAC 中钢筋抗腐蚀性的影响，发现 4% AARI 具有最好的阻锈效果。吴彰钰[77]在拌制 C60 CAC 时采用不同方式掺入阻锈剂，发现采用“同掺”法的试件在 0～90 d 内阻锈效果优于采用“预湿”法的试件，但采用“预湿”法的试件在 180～270 d 内阻锈效果反超前者。这表明珊瑚集料的“微泵”效应可以应用于阻锈剂的缓释，从而对 CAC 结构起到长久的防腐作用。然而，CNRI 和 AARI 对人体危害较大，目前的热门替代方案是采用绿色阻锈剂。研究表明，一些植物中(如百香果、棕榈树、箬竹和黑胡椒)的根、茎、叶或种子中所含的化学成分具有很好的阻锈效果，可延缓混凝土中钢筋的锈蚀[78–80]。因此，若能以热带植物为原料开发适用于珊瑚混凝土的绿色阻锈剂并运用于离岸岛礁工程建设，将会极大的降低对海洋的污染并进一步推动珊瑚混凝土朝着环境友好的方向发展。

3.2　新型耐腐蚀钢筋

在高温、高湿并且充满盐雾与侵蚀性离子的离岸环境下，采用普通钢筋加固珊瑚混凝土建筑/构筑物很难达到理想效果。为了尽可能延长珊瑚混凝土建筑/构筑物的服役寿命，采用新型耐腐蚀钢筋替代普通钢筋也是目前的常见措施之一。Wu 等[81]采用线性极化电阻法对 C60 CAC 中不同类型钢筋达到锈蚀的氯离子阈值进行了测定，并据此确定这些钢筋的抗锈蚀能力从高到低依次为：2205 双相不锈钢筋、316L 不锈钢筋、有机新涂层钢筋、普通钢筋。达波等[82]基于 C50 CAC 中钢筋锈蚀行为的等效电路模型指出，当采用有机新涂层钢筋时 CAC 保护层厚度至少为 5.5 cm。Zhang 等[83]模拟海工环境并采用电化学方法探讨了 CAC 中含铬、铝的低合金钢筋的抗锈蚀性，结果表明铬合金钢筋(Cr-Fe)和铬-铝合金钢筋(Al-Cr-Fe)相对于普通钢筋(HPB400)具有更好的抗脱钝能力。虽然低合金钢在离岸环境下具有很好的抗锈蚀性能，但由于高昂的造价目前尚未得到大范围推广。

3.3　FRP 筋

由于 FRP 筋具有对微小损伤不敏感、轻质高强、抗腐蚀性能优秀等特点而逐渐被应用于海工

结构[84]。常见的用于增强珊瑚混凝土的 FRP 筋包括碳纤维增强筋(CFRP)、玄武岩纤维增强筋(BFRP)和玻璃纤维增强筋(GFRP)。与 FRP-OAC 类似，FRP-CAC 的粘结性能同样受到筋材直径、埋置长度、箍筋和相对保护层厚度等因素的影响并展现出类似的规律[85–87]。目前，FRP 筋在珊瑚混凝土中的应用主要面临如下几点问题：1)珊瑚集料强度与刚度较低、孔隙率较大和易破碎的特性进一步削弱了筋材与水泥石的粘结。由图 3[88–89]可知，GFRP-CRC 的最大粘结应力比粘结条件类似的 GFRP-OAC 小 30%左右；当粘结应力相同时 GFRP-CRC 的滑移值更大，这表明 GFRP-CRC 更容易发生拔出破坏。2) FRP 筋没有明显的屈服平台且弹性模量普遍低于普通钢筋(OS)，这一差异影响着结构的破坏模式。汤杰[90]对 BFRP/OS-CAC 双向板进行冲切试验发现，OS-CAC 板的破坏模式接近剪压破坏，而配筋相同的 BFRP-CAC 板更接近斜拉破坏。与此同时，这一差异也导致在弯曲荷载作用下 FRP-OAC 梁的裂缝宽度更大[91]。与 FRP-OAC 梁类似，三分点加载试验表明，在相同荷载条件下 CFRP-CRC 梁的开裂荷载小于 OS-CRC 梁，并且在破坏时裂缝的尺寸更大、间距更小[92]。为了使 FRP 筋具有屈服强度并减小 FRP 筋珊瑚混凝土结构的脆性，可以考虑采用具有“二次刚度”的混杂纤维增强筋和钢-连续纤维增强筋替代传统 FRP 筋。相关研究表明，采用钢-碳混杂纤维增强筋(SCFC)浇筑 CRC 梁能够使其在破坏时的裂缝宽度小于 CFRP-CRC 梁，并且 SCFC-CRC 梁失效时的外荷载可达极限承载力的 70%～85%，而 CFRP-CRC 梁却不足 50%[93]。

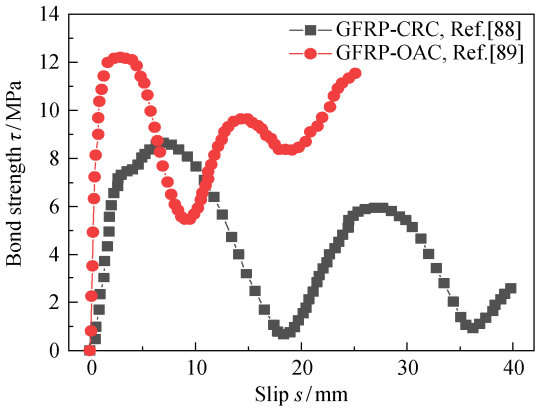


图 3 FRP-CRC 与 FRP-OAC 的粘结强度比较

Fig. 3 Comparison of bonding strength between FRP-CRC and FRP-OAC

然而，SCFC 筋与珊瑚混凝土的粘结性能仍有待进一步探究。3)虽然在较小的时间尺度内(20 000 h) FRP 筋在模拟海水环境下已展现出较好的抗腐蚀能力，但在湿热、紫外线和碱性环境作用下其长期性能仍然存在不确定性[94–95]。对于 FRP 筋增强珊瑚混凝土而言，在较长时间尺度内(例如 50、100 a)其在离岸环境下长期力学性能的劣化过程尚不明确。因此，关于 FRP 筋是否适用于珊瑚混凝土结构的增强还需要进一步的探索。

4 结论与展望

珊瑚集料是一种强度与刚度较低、表面形貌粗糙、颗粒形状复杂并且具有高孔隙率和高吸水性的天然环保轻集料。除了埋藏深度和风化程度等自然因素的影响外，造礁珊瑚的生物学类型是决定珊瑚集料筒压强度的又一重要的自然因素。从材料层面上来说，珊瑚集料的自身特性是影响珊瑚混凝土性能和配合比设计方法的根本因素。其中，珊瑚集料的高孔隙率对混凝土的物理力学特性和耐久性的影响存在矛盾的 2 个方面：一方面，珊瑚集料的高孔隙率导致其吸水性较强，由此所演化来的“微泵”能力对于珊瑚混凝土而言具有维持基体内部相对湿度，促进胶凝材料水化和提升 ITZ 密实程度的正面效果，并且对其早期力学性能、抗干湿循环能力和抗氯离子侵蚀能力有所提升。另一方面，高孔隙率以及孔隙结构特征使得珊瑚集料脆性较大，强度与刚度较低且很难通过现有措施加以提升，这些负面因素又使得珊瑚混凝土的强度与刚度较低，并且削弱了抗干湿循环与抗氯离子侵蚀的能力。这也是目前关于珊瑚混凝土耐久性研究方面出现对立观点的原因所在。此外，在结构层面上，珊瑚集料的低强度低刚度导致 FRP 筋增强珊瑚混凝土结构的粘结性能较 FRP-OAC 结构更差，这是因为 FRP 筋在拔出过程中筋肋附近的珊瑚集料较容易被挤碎。

结合现有研究所存在的问题，提出如下几点展望：

1) 珊瑚礁石复杂的孔隙结构在很大程度上影响着珊瑚混凝土的力学性能，其孔隙连通性也是影响侵蚀性离子在基体中传输的最主要因素。珊瑚礁石的孔隙形态呈现出多样化的特点，为了进一步在细观层面上探究珊瑚礁石的物理力学特性，需要对其孔隙体系的渗流阈值进行计算。

2) 虽然目前珊瑚混凝土的配合比设计通过调整胶凝材料组成和优化原材料颗粒级配等方法取得了一定进步，但仍未充分考虑珊瑚集料复杂多样的

颗粒形状所带来的影响。因此，将集料形貌参数有机的融入珊瑚混凝土的配合比设计方法中是一个值得探索的方向。

3) 目前关于珊瑚混凝土力学性能的研究多聚焦于单轴受压工况，而鲜有多轴工况下的研究并且试验样本数量较小。为了完善对珊瑚混凝土本构关系的建立，并推进珊瑚混凝土在结构层面的发展与应用，应开展试验样本数量较大，加载工况多样化的单轴和三轴试验。

4) 珊瑚混凝土抵抗干湿循环、收缩和离子侵蚀的能力，同时受到珊瑚集料的孔隙结构特征的负面影响和“微泵”效应的正面影响。而且，毛细孔隙率、孔比表面积和孔的连通性等因素也会对珊瑚混凝土的劣化产生影响。关于珊瑚集料孔结构特性对珊瑚混凝土耐久性的影响需要进一步研究。

5) FRP 筋由于具有优秀的耐腐蚀性而被逐渐应用于珊瑚混凝土，虽然现有研究表明采用 FRP 筋增强珊瑚混凝土结构获得了较为理想的短期力学性能，但其在离岸环境下长期力学性能的劣化仍需要进一步探究，而且 FRP 筋与珊瑚混凝土的粘结性能也有待进一步研究。此外，为了使珊瑚混凝土结构能够进一步适应离岸岛礁环境，应尝试探索各种不同的结构形式(例如砌体结构)，满足实际工程的需求。

6) 目前，虽然《珊瑚骨料混凝土应用技术规程》初步规范了珊瑚混凝土的生产与施工，但依然缺乏数字化的施工管理手段。为了使整个施工、运营与维护过程朝着智能化和高度协作化的方向发展，可以考虑将建筑信息模型应用于珊瑚混凝土建筑/构筑物的建设。

参考文献:

[1] 李林. 珊瑚混凝土的基本特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
LI Lin. Research on basic characteristics of coral concrete (in Chinese, dissertation). Nanning: Guangxi University, 2012.

[2] 达波. 高强全珊瑚海水混凝土的制备技术、耐久性及构件力学性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
DA Bo. Research on the preparation technology, durability and mechanical properties of concrete members of high strength coral aggregate seawater concrete (in Chinese, dissertation). Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[3] 马林建, 李增, 陈欣星, 等. 珊瑚混凝土基本特性及工程应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2471–2477.
MA Linjian, LI Zeng, CHEN Xinxing, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2018, 37(8): 2471–2477.

[4] WANG X Z, JIAO Y Y, WANG R, et al. Engineering characteristics of the calcareous sand in nansha islands, South China Sea[J]. Eng Geol, 2011, 120(1/4): 40–47.

[5] WANG Q, LI P, TIAN Y, et al., Mechanical properties and microstructure of Portland cement concrete prepared with coral reef sand[J]. J Wuhan Univ Technol-Mater Sci Ed, 2016, 31(5): 996–1001.

[6] 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.

[7] LIU B, GUO J H, WEN X Y, et al. Study on flexural behavior of carbon fibers reinforced coral concrete using digital image correlation[J]. Constr Build Mater, 2020, 242: 117968.

[8] NIU D T, SU L, LUO Y, et al. Experimental study on mechanical properties and durability of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 237: 117628.

[9] LIU K Z, YU R, SHUI Z H, et al. Influence of external water introduced by coral sand on autogenous shrinkage and microstructure development of ultra-high strength concrete (UHSC)[J]. Constr Build Mater, 2020, 252: 119111.

[10] 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.

[11] 陈兆林, 陈天月, 曲勣明. 珊瑚礁砂混凝土的应用可行性研究[J]. 海洋工程, 1991, 9(3): 67–80.
CHEN Zhaolin, CHEN Tianyue, QU Jiming. Ocean Eng(in Chinese), 1991, 9(3): 67–80.

[12] 韩超. 海水拌养珊瑚混凝土基本力学性能试验研究[D].南宁: 广西大学, 2011.
HAN Chao. Experimental research on the fundamental mechanical behavior of seawater coral concrete (in Chinese, dissertation). Nanning: Guangxi University, 2011.

[13] 潘柏州, 韦灼彬. 原材料对珊瑚砂混凝土抗压强度影响的试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(S1): 221–225.
PAN Baizhou, WEI Zhuobin. Eng Mech (in Chinese), 2015, 32(S1): 221–225.

[14] 韦灼彬, 李仲欣, 沈锦林. 珊瑚混凝土性能影响因素及早期力学性质研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 130–136.
WEI Zhuobin, LI Zhongxin, SHEN Jilin. Ind Constr (in Chinese), 2017, 47(3): 130–136.

[15] 苏晨, 麻海燕, 余红发, 等. 不同珊瑚骨料对珊瑚混凝土力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1771–1780.
SU Chen, MA Haiyan, YU Hongfa, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1771–1780.

[16] LIN J J, CHEN H S, LIU L. Impact of polydispersity of particle shape and size on percolation threshold of 3D particulate media composed of penetrable superellipsoids[J]. Powder Technol, 2020, 360: 944–955.

[17] 王以贵. 珊瑚混凝土在港工中应用的可行性[J]. 水运工程, 1988(9): 46–48.
WANG Yigui. Port Waterw Eng (in Chinese), 1988(9): 46–48.

[18] ARUMUGAM R A, RAMAMURTHY K. Study of compressive strength characteristics of coral aggregate concrete[J]. Mag Concr Res, 1996, 48(176): 141–148.

[19] 王磊, 范蕾. 珊瑚碎屑混凝土的强度特性及破坏形态分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(1): 1–4.
WANG Lei, FAN Lei. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2015(1): 1–4.

[20] 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.

[21] 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 property of coral aggregate concrete (in Chinese, dissertation). Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[22] 程书凯. 礁石砂骨料混凝土的设计、制备及性能研究[D].武汉: 武汉理工大学, 2016.
CHENG Shukai. Experimental study on design, preparation and properties of reef sand aggregate concrete (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.

[23] WANG A G, LYU B C, ZHU Y C, et al. A gentle acid-wash and pre-coating treatment of coral aggregate to manufacture high-strength geopolymer concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 274: 121780.

[24] WU W J, WANG R, ZHU C Q, et al. The effect of fly ash and silica fume on mechanical properties and durability of coral aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 185: 69–78.

[25] CHENG S K, SHUI Z H, SUN T, et al. Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete[J]. Appl Clay Sci, 2017, 141: 111–117.

[26] CHENG S K, SHUI Z H, SUN T, et al. Durability and microstructure of coral sand concrete incorporating supplementary cementitious materials[J]. Constr Build Mater, 2018, 171: 44–53.

[27] 刁益彤, 麻海燕, 余红发, 等. 珊瑚混凝土骨料-净浆界面区强度试验研究[J/OL]. 建筑材料学报:1–17 [2020–12–20].
DIAO Yitong, MA Haiyan, YU Hongfa, et al. J Build Mater (in Chinese), 1–17 [2020–12–20].

[28] WANG Y Y, SHUI Z H, GAO X, et al. Utilizing coral waste and metakaolin to produce eco-friendly marine mortar: hydration, mechanical properties and durability[J]. J Clean Prod, 2019, 219: 763–774.

[29] YADAV A L, SAIRAM V, MURUGANANDAM L, et al. An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterization as a supplementary cementitious material[J]. J Clean Prod, 2019, 245: 118854.

[30] MILLER S A, CUNNINGHAM P R, HARVEY J T. Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability[J]. Resour Conserv Recycl, 2019, 146: 416–430.

[31] THOMAS B S, KUMAR S, AREL H S. Sustainable concrete containing palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material – A review[J]. Renewable Sustainable Energy Rev, 2017, 80: 550–561.

[32] WANG X P, YU R, SHUI Z H, et al. Mix design and characteristics evaluation of an eco-friendly ultra-high performance concrete incorporating recycled coral based materials[J]. J Clean Product, 2017, 165: 70–80.

[33] 许成明, 胡家兵, 赵缙宇. 珊瑚礁砂配制扭王字块混凝土技术研究[J]. 建材世界, 2016, 37 (6): 14–16.
XU Chengming, HU Jiabing, ZHAO Jinyu. World Build Mater (in Chinese), 2016, 37(6): 14–16.

[34] 张昊斌. 海水拌制珊瑚礁砂混凝土试验研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
ZHANG Haobin. Experimental study on mixing coral reef sand concrete with sea water (in Chinese, dissertation). Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.

[35] 岳承军. 珊瑚混凝土高速冲击力学性能的实验研究与数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
YUE Chengjun. Research on dynamic and static mechanical properties of coral aggregate seawater concrete (in Chinese, dissertation). Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[36] 王磊, 王国旭, 邓雪莲. 不同掺量碳纤维珊瑚混凝土力学性能试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(9): 148–151+156.
WANG Lei, WANG Guoxu, DENG Xuelian. Chin Rural Water Hydropower (in Chinese), 2014 (9): 148–151+156.

[37] 王磊, 熊祖菁, 刘存鹏, 等. 掺入聚丙烯纤维珊瑚混凝土的力学性能研究[J]. 混凝土, 2014 (7): 96–99.
WANG Lei, XIONG Zuqing, LIU Cunpeng, et al. Concrete (in Chinese), 2014 (7): 96–99.

[38] 王磊, 刘存鹏, 熊祖菁. 剑麻纤维增强珊瑚混凝土力学性能试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 33(6): 826–830.
WANG Lei, LIU Cunpeng, XIONG Zuqing. J Henan Polytech Univ (Nat Sci, in Chinese), 2014, 33(6): 826–830.

[39] 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. J Henan Polytech Univ (Nat Sci, in Chinese), 2016, 35(5): 713–718.

[40] WANG Y, ZHANG S H, NIU D T, et al. Strength and chloride ion distribution brought by aggregate of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 234: 117390.

[41] DA B, YU H F, MA H Y, et al. Mixture proportion design and cube compressive strength of coral concrete[C]. The 14th International Congress on the Chemistry of Cement, Beijing, 2015.

[42] 韩宇栋, 紫民, 岳清瑞, 等. 一种海水珊瑚骨料混凝土[P]. CN Patent, CN105936593A, 2016–09–14.
HAN Y D, ZI M, YUE Q R, et al. A coral aggregate concrete with seawater (in Chinese). CN Patent, CN105936593A. 2016–09–14.

[43] YU H F, DA B, MA H Y, et al. Service life prediction of coral aggregate concrete structure under island reef environment[J]. Constr Build Mater, 2020, 246: 118390.

[44] MILLER I, HOPLEY D. Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, Form and Process[M]. Netherlands: Springer Netherlands, 2011: 3–5.

[45] HUTCHINGS P A. The Great Barrier Reef: Biology, Environment and Management[M]. Collingwood: CSIRO Publishing, 2008: 217–220.

[46] 巩位, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚海水混凝土配合比设计及评价方法[J]. 材料导报, 2019, 33(22): 3732–3737.
GONG Wei, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Mater Rep (in Chinese), 2019, 33(22): 3732–3737.

[47] LIU J M, OU Z W, MO J C, et al. Effectiveness of saturated coral aggregate and shrinkage reducing admixture on the autogenous shrinkage of ultrahigh performance concrete[J]. Adv Mater Sci Eng, 2017, 2017: 1–11.

[48] 张栓柱. 珊瑚混凝土的疲劳特性及微观机理研究[D]. 南宁: 广西大学. 2012.
ZHANG Shuanzhu. Experimental study on the fatigue property and microscopic mechanism of coral concrete (in Chinese, dissertation). Nanning: Guangxi University, 2012.

[49] 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.

[50] 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 Haiyan, et al. Ocean Eng (in Chinese), 2016, 34(4): 47–54.

[51] HUANG Y J, HE X J, SUN H S, et al. Recycled and natural coarse

aggregates on the mechanical properties of concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 192: 330–347.

[52] WANG J, FENG P, HAO T Y, et al. Axial compressive behavior of seawater coral aggregate concrete-filled FRP tubes[J]. Constr Build Mater, 2017, 147: 272–285.

[53] 李达. 单轴与双轴应力状态下珊瑚礁砂混凝土力学性能试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
LI Da. Experimental study of coral sand concrete under uniaxial and biaxial compression (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.

[54] ZHOU W, FENG P, LIN H W. Constitutive relations of coral aggregate concrete under uniaxial and triaxial compression[J]. Constr Build Mater, 2020, 251: 118957.

[55] 孟庆山, 范超, 曾卫星, 等. 南沙群岛珊瑚礁灰岩的动态力学性能试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 183–190.
MENG Qingshan, FAN Chao, ZENG Weixing, et al. Rock Soil Mech (in Chinese), 2019, 40(1): 183–190.

[56] 吴家文, 马林建, 孔新立, 等. 冲击荷载下全珊瑚混凝土动力特性[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 581–588.
WU Jiawen, MA Linjian, KONG Xinli, et al. J Build Mater (in Chinese), 2020, 23(3): 581–588.

[57] MA L J, LI Z, LIU J G, et al. Mechanical properties of coral concrete subjected to uniaxial dynamic compression[J]. Constr Build Mater, 2019, 199: 244–255.

[58] WU Z Y, ZHANG J H, YU H F, et al. Coupling effect of strain rate and specimen size on the compressive properties of coral aggregate concrete: A 3D mesoscopic study[J]. Compos Pt B-Eng, 2020, 200: 108299.

[59] 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]. Int J Impact Eng, 2020, 137: 103466.

[60] 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. Mater Rep (in Chinese), 2019, 33(16): 2697–2703.

[61] 马林建, 刘基程, 张宁, 等. 循环荷载作用下珊瑚混凝土的阻尼特性[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1765–1770.
MA Linjian, LIU Jicheng, ZHANG Ning, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1765–1770.

[62] 马林建, 陈欣星, 赵跃堂, 等. 全珊瑚混凝土的疲劳特性[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 214–219.
MA Linjian, CHEN Xinxing, ZHAO Yuetang, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(2): 214–219.

[63] LI Z Y. Symbiotic Microbiomes of Coral Reefs Sponges and Corals[M]. Netherlands: Springer-Verlag, 2019: 6–7.

[64] FLATT R J, CARUSO F, SANCHEZ A, et al. Chemo-mechanics of salt damage in stone[J]. Nat Commun, 2014, 5: 4823.

[65] 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.

[66] 苏春义. 海水拌合珊瑚礁砂混凝土耐久性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
SU Chunyi. Study on durability of concrete prepared with coral reef sand and sea-water (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.

[67] ZHANG B, ZHU H, SHAH K W, et al. Performance evaluation and microstructure characterization of seawater and coral/sea sand alkali-activated mortars[J]. Constr Build Mater, 2020, 259: 120403.

[68] 陈飞翔, 张国志, 丁沙, 等. 珊瑚砂混凝土性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(7): 16–21.
CHEN Feixiang, ZHANG Guozhi, DING Sha, et al. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2016(7): 16–21.

[69] HUANG D G, NIU D T, ZHENG H, et al. Study on chloride transport performance of eco-friendly coral aggregate concrete in marine environment[J]. Constr Build Mater, 2020, 258: 120272.

[70] DA B, YU H F, MA H Y, et al. Chloride diffusion study of coral concrete in a marine environment[J]. Constr Build Mater, 2016, 123: 47–58.

[71] WATTANACHAI, OTSUKI P, SAITO N, et al. A study on chloride ion diffusivity of porous aggregate concretes and improvement method[J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu E, 2009, 65(1): 30–44.

[72] DA B, YU H F, MA H Y, et al. Chloride diffusion study of coral concrete in a marine environment[J]. Constr Build. Mater, 2016, 123: 47–58.

[73] 窦雪梅, 余红发, 麻海燕, 等. 海洋环境下珊瑚混凝土的表面氯离子浓度规律[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(9): 2695–2700.
DOU Xuemei, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2016, 35(9): 2695–2700.

[74] 吴成友. 碱式硫酸镁水泥的基本理论及其在土木工程中的应用技术研究[D]. 西宁: 中国科学院研究生院(青海盐湖研究所), 2014.
WU Chengyou. Fundamental theory and civil engineering application of basic magnesium sulfate cement (in Chinese, dissertation). Xi Ning: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, 2014.

[75] 陈爽, 元艳妃, 易金. 珊瑚混凝土碳化深度影响因素及其预测模型研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(11): 15–19.
CHEN Shuang, YUAN Yanfei, YI Jin. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2020(11): 15–19.

[76] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 阻锈剂种类对珊瑚混凝土中钢筋锈蚀的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(10): 1735–1740.
DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. J Harbin Eng Univ (in Chinese), 2019, 40(10): 1735–1740.

[77] 吴彰钰. 高强全珊瑚海水混凝土结构的钢筋锈蚀与服役寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
WU Zhangyu, Study on steel corrosion and service life of high strength coral aggregate seawater concrete structures (in Chinese, dissertation). Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[78] VENKATESH C, MOHIDDIN S, RUBEN N. Corrosion inhibitors behaviour on reinforced concrete—A review[J]. Sustainable Constr Build Mater, 2018, 127–134.

[79] ASIPITA S A, ISMAIL M, MAJID M, et al. Green bambusa arundinacea leaves extract as a sustainable corrosion inhibitor in steel reinforced concrete[J]. J Clean Prod, 2014, 67:139–146.

[80] BOTHI R P, SETHURAMAN M G. Inhibitive effect of black pepper extract on the sulphuric acid corrosion of mild steel[J]. Mater Lett, 2008, 62(17–18): 2977–2979.

[81] WU Z Y, YU H F, MA H Y, et al. Rebar corrosion in coral aggregate concrete: Determination of chloride threshold by LPR[J]. Corros Sci, 2020, 163: 108238.

[82] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 等效电路拟合珊瑚混凝土中钢筋锈蚀行为的电化学阻抗谱研究[J].中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(3): 260–266.

DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. J Chin Soc Corros Prot (in Chinese), 2019, 39(3): 260–266.

[83] ZHANG L, NIU D T, WEN B, et al. Corrosion behavior of low alloy steel bars containing Cr and Al in coral concrete for ocean construction[J]. Constr Build Mater, 2020, 258: 119564.

[84] AHMED A, GUO S C, ZHANG Z H, et al. A Review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 256: 119484.

[85] DAI JY, YIN S P, HU C S. Analysis of key influencing factors of the bond performance between BFRP bars and coral reef and sand concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 269: 121248.

[86] 杨超, 杨树桐, 戚德海. BFRP筋与珊瑚混凝土粘结性能试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(S1): 172–180.
YANG Chao, YANG Shutong, QI Dehai. Eng Mech (in Chinese), 2018, 35(S1): 172–180.

[87] 胡长顺. 全珊瑚骨料海水混凝土与FRP筋粘结性能试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
HU Changshun. Experimental study on the bonding performance of full coral aggregate seawater concrete with FRP bars (in Chinese, dissertation). Xu Zhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[88] 王磊, 毛亚东, 陈爽, 等. GFRP筋与珊瑚混凝土黏结性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 286–292.
WANG Lei, MAO Yadong, CHEN Shuang, et al. J Build Mater (in Chinese), 2018, 21(2): 286–292.

[89] 吴芳. 玄武岩纤维筋与混凝土粘结性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
WU Fang. The experimental research on bond behavior between BFRP rebars and the concrete (in Chinese, dissertation), Dalian: Dalian University of Technology, 2009

[90] 汤杰. BFRP增强珊瑚礁砂混凝土基本构件力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
TANG Jie. Study on the mechanical properties of BFRP reinforced coral reef and sand concrete structural members (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2018.

[91] ADAM M A, SAID M, MAHMOUD A A, et al. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars[J]. Constr Build Mater, 2015, 84: 354–366.

[92] WANG L, ZHANG J W, CHEN W, et al. Short term crack width prediction of CFRP bars reinforced coral concrete[J]. Eng Struct, 2020, 218: 110829.

[93] WANG L, ZHANG J W, HUANG C S, et al. Comparative study of steel-FRP, FRP and steel-reinforced coral concrete beams in their flexural performance[J]. Materials, 2020, 13(9): 2097.

[94] SAADATMANESH H, TAVAKKOLIZADEH M, MOSTOFINEJAD D. Environmental effects on mechanical properties of wet lay-up fiber-reinforced polymer[J]. J ACI Mater, 2010, 107(3): 267–274.

[95] AL-SALLOUM Y A, EL-GAMAL S, ALMUSALLAM T H, et al. Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars[J]. Compos Pt B-Eng, 2013, 45(1): 835–844.