复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

FRP配筋海水珊瑚骨料混凝土材料及构件力学性能研究进展

李小伟 曹旗

Research progress on mechanical properties of FRP reinforced seawater coral aggregate concrete materials and structural components

LI Xiaowei, CAO Qi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210902.004

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海水浸泡对FRP筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响
Effects of sea water soaking on the bonding properties of FRP bars-coral concrete
复合材料学报. 2018, 35(12): 3458-3465 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180211.001

FRP筋/珊瑚混凝土柱轴心受压承载力
Compression behavior of FRP bars/coral concrete columns under axial compression loading
复合材料学报. 2021, 38(10): 3530-3541 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201217.001

结构用橡胶集料混凝土受压全曲线试验及其本构模型
Compression test on curves and constitutive model of crumb rubber concrete for structural purposes
复合材料学报. 2018, 35(8): 2222-2234 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171109.001

丁羟包覆层的黏超弹本构模型
Visco-hyperelastic constitutive model of hydroxyl-terminated polybutadiene inhibitor
复合材料学报. 2018, 35(12): 3508-3516 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180211.002

钢纤维-橡胶/混凝土单轴受压全曲线试验及本构模型
Experiment on stress-strain behavior and constitutive model of steel fiber-rubber/ concrete subjected to uniaxial compression
复合材料学报. 2021, 38(7): 2359-2369 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200916.001

纳米改性连续纤维增强热塑性树脂复合材料及其力学性能研究进展
Development and mechanical properties of nano-modified continuous fiber reinforced thermoplastic composites
复合材料学报. 2019, 36(4): 771-783 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181018.002

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 39 卷 第 3 期 3 月 2022 年
Vol. 39 No. 3 Mar 2022

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20210902.004

FRP 配筋海水珊瑚骨料混凝土材料及构件力学性能研究进展

分享本文

李小伟，曹旗*

（大连理工大学 建设工程学部 土木工程学院，大连 116000）

摘 要：为解决钢筋锈蚀和资源短缺问题，具有轻质高强、耐腐蚀特点的纤维增强聚合物 (FRP) 筋以及与普通骨料力学性能相近的珊瑚骨料成为近年来人们研究的新材料。本文从 FRP 与珊瑚骨料的材料特性及珊瑚骨料混凝土力学性能、FRP 筋与珊瑚骨料混凝土黏结性能以及耐久性、FRP 筋海水珊瑚骨料混凝土梁、柱构件的受力性能三个方面，对国内外相关研究进行对比分析，归纳出现有研究成果，认为 FRP 筋与珊瑚骨料混凝土有较好的协调工作性，并且可以有效增强珊瑚骨料混凝土结构的性能。此外总结出目前 FRP 筋、珊瑚骨料等材料的局限性以及 FRP 珊瑚骨料混凝土构件使用性能、耐久性能和设计方法研究还存在的不足，为 FRP 筋海水珊瑚骨料混凝土这种新型结构的继续研究提供参考。

关键词：珊瑚骨料；FRP 筋；黏结性能；本构模型；力学性能

中图分类号: TU599 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)03-0926-16

Research progress on mechanical properties of FRP reinforced seawater coral aggregate concrete materials and structural components

LI Xiaowei , CAO Qi*

(School of Civil Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: In order to solve the problems of steel bar corrosion and resource shortage, fiber reinforced polymer (FRP) bars with light weight, high strength and corrosion resistance and coral aggregate with similar mechanical properties as common aggregate have become new materials studied by researchers in recent years. In this paper, from the following three aspects: the material characteristics of FRP and coral aggregate as well as mechanical properties of coral aggregate made concrete, the bonding performance and durability between FRP bars and coral aggregate concrete, and the mechanical properties of FRP bars reinforced coral aggregate concrete beams and columns, the relevant research results are summarized. It is considered that FRP bars and coral aggregate concrete have better compatibility and can effectively enhance the performance of coral aggregate concrete structures. In addition, the limitations of FRP bars, coral aggregate and other materials, as well as the shortcomings of the research on the service performance, durability and design method of FRP reinforced coral aggregate concrete members are summarized, which can provide reference for the further research on this new structure.

Keywords: coral aggregate; FRP bars; bonding properties; constitutive model; mechanical properties

混凝土作为当今世界主要建筑工程材料，被广泛用于建筑结构、道路桥梁、海洋工程等建设中，根据华经产业研究院发布的《2020-2025 年中国商品混凝土行业市场深度分析及行业发展趋势报告》[1]，2019 年我国生产商品混凝土约为 25.5 亿立方米，而在混凝土组分中粗细骨料占比约为

收稿日期：2021-06-25; **修回日期**：2021-08-24；**录用日期**：2021-08-24；**网络首发时间**：2021-09-02 14:52:04
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210902.004
基金项目：中央高校基本科研业务费科研专题项目 (DUT20JC02); 大连市高层次人才创新计划项目 (2019RD05)
通信作者：曹旗, 博士, 副教授, 研究方向为纤维复材增强和加固混凝土结构、高性能混凝土材料和结构 E-mail: qcao@dlut.edu.cn

引用格式：李小伟, 曹旗. FRP 配筋海水珊瑚骨料混凝土材料及构件力学性能研究进展 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 926-941.
LI Xiaowei, CAO Qi. Research progress on mechanical properties of FRP reinforced seawater coral aggregate concrete materials and structural components[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(3): 926-941(in Chinese).

3/4，由于陆地资源有限，大量的砂石开采已造成河床破坏和骨料紧缺。另外，目前全世界都在大力发展海洋经济，大批岛礁建设迅速崛起，若采用陆地运输混凝土很大程度上限制了岛礁的开发与建设，因此由海洋提供的新型建筑材料——珊瑚骨料受到了众多学者的关注。而我国拥有较长的海岸线，自北向南依次毗邻黄海、东海、南海，大陆海岸线 1.8 万公里，岛屿海岸线 1.4 万公里，海岸线总长度约 3.2 万公里。因此利用海水代替淡水、珊瑚骨料代替普通骨料既能加快海洋经济的开发，又可以有效地解决资源不足的问题。已有研究表明[2]，使用海水代替淡水对混凝土强度等力学性能基本没有影响，因此目前众多学者关注点大都集中在对珊瑚骨料替代普通骨料的研究上，就地取材不但可以节约成本，而且节约工期，对海洋资源的有效利用具有战略意义。

珊瑚骨料的研究起于二战后期，由环太平洋地区有大量军事基地的美国率先做出研究[3]，并且在太平洋上美国的 Saipan 岛、Guam 岛、Midway 和 Kwajalein 岛等成功应用。我国对珊瑚骨料的研究起步较晚，并且主要研究都集中在力学性能方面，而对耐久性的研究大多为氯离子渗透性方面，对抗冻性、收缩性以及抗碳化而的研究涉足相对较少。

近海工程最大的问题就是钢筋锈蚀问题[4]，严重影响建筑结构耐久性，由于钢筋锈蚀造成建筑物毁坏的案例屡见不鲜[5]。由于海水中氯离子含量高且珊瑚骨料自带氯离子的特性，因此普通钢筋因易锈蚀作为海水珊瑚骨料混凝土的增强筋效果不佳，于是寻找耐锈蚀筋材作为珊瑚骨料混凝土的增强筋便十分有必要。纤维增强聚合物复合材料 (FRP) 是由纤维为增强体，树脂为基体形成的新型复合材料。近年来 FRP 筋材料因其耐腐蚀性好、轻质高强等特点成为学者们研究的热点，用 FRP 筋取代钢筋，可以有效地解决腐蚀环境中钢筋锈蚀问题。已有学者研究表明[6-8]，FRP 筋与混凝土有较好的协调工作性，并且在恶劣的环境下仍然能维持较好的力学性能，可以作为受力筋应用到混凝土构件中。目前常见的 FRP 筋种类有芳纶纤维复合筋 (AFRP)、玄武岩纤维复合筋 (BFRP)、碳纤维复合筋 (CFRP) 和玻璃纤维复合筋 (GFRP)。FRP 的研究始于 20 世纪 60 年代，日本最早将 AFRP 和 CFRP 应用到混凝土构件中。在 1988 年就已应用 FRP 筋进行桥梁建设和边坡支护等。我国对于 FRP 的研究起步较晚，于上世纪九十年代薛伟辰团队[9] 率先开展了 FRP 混凝土结构的研究工作，2002 年“土木工程 FRP 材料应用技术交流会”后才促进 RPP 材料的深入研究。虽然起步但发展迅速，我国于 2010 年颁布了 GB 50608—2010《纤维增强复合材料建设工程技术应用规范》[10]。由于 FRP 筋弹性模量较低、延性较差，因此由其代替钢筋制成的混凝土构件在理论计算和应用上会与普通钢筋混凝土有所差别，另外各国针对 FRP 应用规范考虑因素仍有欠缺，尤其将 FRP 筋应用于海水珊瑚骨料混凝土还存在一些领域有待进一步研究。

1 材料的基本特性

1.1 珊瑚骨料的基本特性

我国对珊瑚骨料的研究起于上世纪八九十年代，学者王以贵[11] 率先进行了珊瑚骨料应用的可行性研究，证明珊瑚骨料可以用于实际工程中。随后陆续有学者对珊瑚骨料进行研究，但是鲜有研究成果，仅近 5 年内涌现出大量的珊瑚骨料混凝土的研究。

珊瑚骨料是造礁珊瑚虫死亡后的骸骨聚集经过漫长的地质作用形成的一种岩石体，宏观外形大多呈块状或长条状，如图 1 所示。经过热重和热差分析 (TD-DSC) 测得其矿物成分主要为石灰岩，化学成分主要为 $CaCO_3$，其含量高达 96% 以上[12]。珊瑚骨料由于形成条件，导致其具有疏松多孔的基本特性，因此珊瑚骨料具有质轻、较脆、抗压强度低、压缩性较好、吸水性大等属性。珊瑚骨料的特性因发育环境的不同略有差别，陈兆林等[13] 按照规范《轻集料及其试验方法 第 1 部分 轻集料》(GB-T 17431.1—2010) 对珊瑚骨料进行质量评定，得出珊瑚骨料堆积密度一般为 900 kg/m^3 左右，表观密度为 1 800 kg/m^3 左右，孔隙率接近 50%，筒压强度一般不小于 2.0 MPa。根据我国混凝土骨料分类，珊瑚骨料应划分为轻骨料系列，但是珊瑚骨料又不同于普通轻骨料，李林和紫民等[14-15] 通过电镜扫描 (SEM) 进行微观结构观察，发现珊瑚骨料表面粗糙多孔，内部分布大量层状和笼状结构，这就使得珊瑚骨料具有较大的表观密度和内摩擦角，如图 2 所示。因此在拌制混凝土时就需要相对较多的胶凝体材料，故骨料与胶凝体界面黏结力也较普通混凝土更大。

苏晨等[16] 根据珊瑚骨料表面形状和表观密度

图 1　珊瑚骨料宏观形态[12]

Fig. 1　Macromorphology of coral aggregate[12]

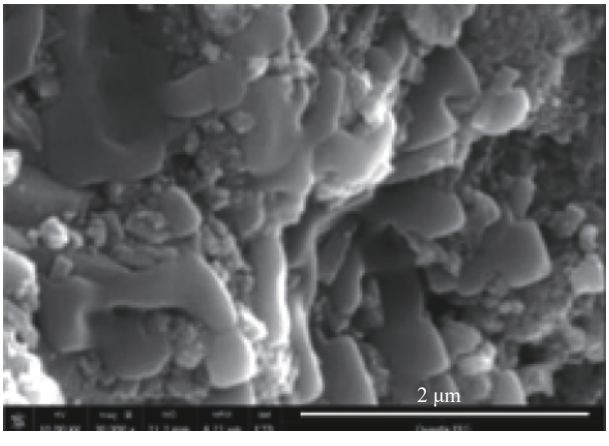

图 2　珊瑚骨料微观形态[15]

Fig. 2　Microscopic morphology of coral aggregate[15]

将粗骨料分为鹿角状珊瑚、轻质珊瑚礁和重质珊瑚礁，通过测定得出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，且鹿角状珊瑚骨料 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%，这便为配制高强珊瑚骨料混凝土提供参考。

珊瑚骨料由于多孔导致自身强度低于普通骨料，但是其“吸-返水”的特性在养护混凝土试件方面优于普通骨料。众多学者[17-18]通过骨料预湿的方法解决珊瑚骨料配制混凝土试件 28 天强度较低的问题，结果显示骨料预湿对水胶比较大的混凝土试件强度影响不大，对于水胶比较小的混凝土试件强度提高较为明显。原因就在于珊瑚骨料“吸-返水”特性在早期水化反应时吸取大量水分，可以消除骨料界面的“水囊”，使得骨料-胶凝体界面充分水化，骨料吸收的水份随着龄期慢慢释放，起到“内养护”作用，使得界面过渡区更加致密。珊瑚骨料内养护作用除了增加界面过渡区强度外，还有效阻止外界盐离子侵入，相当程度上提高混凝土耐久性。

综上所述，珊瑚骨料具有多孔的基本特性，由于质脆致使其具有自身强度低的不足，但是因其比表面积大、内摩擦角大的特点致使骨料-胶凝体界面得到有效增强。除此以外，珊瑚骨料“吸-返水”特性起到的内养护作用也使界面过渡区得到增强，改善普通混凝土界面强度不足的缺点。但是由于区域不同和形成条件的不同，珊瑚骨料会有不同的力学性能，不同珊瑚骨料种类力学性能的差异研究报道并不多，我国研究的珊瑚骨料混凝土中的珊瑚骨料大多取材于南海附近，关于东海和黄海沿岸珊瑚骨料鲜有研究。珊瑚骨料多孔性决定其自身强度不足，改善珊瑚骨料多孔的技术方法也有待进一步研究。

1.2　FRP 筋材的力学性能和耐久性能

FRP 是纤维增强复合材料，是由纤维材料与高分子聚合物树脂基体材料按一定的比例混合后形成的高性能型材料，现有 CFRP、GFRP、AFRP、BFRP 等，基本力学性能如表 1 [7, 19-21] 所示。

表 1　纤维增强聚合物 (FRP) 筋基本力学性能

Table 1　Basic mechanical properties of fiber reinforced polymer (FRP) bars

Type of FRP	Density/(g·cm^{-3})	Tensile strength/MPa	Elasticity modulus/GPa	Ultimate elongation/%
AFRP	1.25-1.40	1 720-2 540	41-125	1.9-4.4
BFRP	1.5-2.0	800-1 800	45-55	1.5-2.0
CFRP	1.50-1.60	1 500-2 500	120-160	0.5-1.7
GFRP	1.25-2.10	483-1 600	35-51	1.2-3.1

Notes: AFRP—Aramid fiber reinforced polymer; BFRP—Basalt fiber reinforced polymer; CFRP—Carbon fiber reinforced polymer; GFRP—Glass fiber reinforced polymer.

由于 FRP 具有轻质高强和良好的耐腐蚀性而被用于替代钢筋作为建筑增强材料。FRP 筋抗拉强度明显高于钢筋，其热膨胀系数与混凝土相近。胡长顺[22] 通过拉拔试验研究了不同类型的 FRP 筋与海水珊瑚骨料混凝土之间的黏结性能，证明 FRP 筋与珊瑚骨料混凝土具有良好的黏结能力和协调工作性。邢丽等[23] 通过四点弯曲加载对 FRP 筋海水海砂混凝土梁进行测试，并与钢筋混凝土梁进行对比，得出 GFRP 筋海水海砂混凝土梁裂缝开展较快，挠度变化大，破坏均为脆性破坏。这是由于 FRP 弹性模量较低，没有屈服点[24]，故用于建筑结构中，在增加构件承载力的同时也增加构件的脆性，因此通常 FRP 筋构件设计都是由变形控制。此外由于 FRP 是各向异性材料，垂直纤维方向强度较低，因此抗剪能力较弱，通常其抗剪强度为抗拉强度的 1/20~1/5。Wang 等[25] 研究在反复荷载作用下 FRP 的疲劳强度，解释 FRP 筋疲劳破坏机制。FRP 是由纤维外包高分子树脂基体而成，在反复荷载作用下，基体首先出现裂纹，随后裂纹通过纤维/基体界面向纤维发展，此过程中界面黏结强度不断变弱。另外由于存在应力滞后效应，导致 FRP 筋外面基体应力大于内部纤维应力，随着应力循环次数增加，FRP 筋脱黏首先发生在表层，随后逐渐向内部扩展导致整体失效。高永红等[26] 将不同直径 (20 mm、25 mm) 的 GFRP 筋分别在盐溶液和碱溶液中浸泡，研究随浸泡时间 (60 天、90 天、180 天) 增长其力学性能的劣化趋势，试验表明碱性环境对 GFRP 筋的劣化影响高于盐环境。碱性环境下 GFRP 抗拉强度随浸泡时间的增长而下降，且下降速率逐渐减缓，并经过修正给出碱性溶液下 GFRP 筋体剩余强度衰减模型，如图 3 所示。

对于 FRP 筋耐久性能，目前学者们对 FRP 研究最多的便是采用加速试验方法模拟不同环境测试离子作用下 FRP 破坏机制和耐久性问题。王伟等[27] 通过加速老化试验,基于 ACI 440.3R—04 规定的试验方法，采用 $Ca(OH)_2$、KOH 和 NaOH 的混合溶液 (pH 值为 12.6~13.0) 模拟碱性环境，在此条件下将温度、筋材直径和侵蚀时间作为变量，对 GFRP 的拉伸性能进行了系统的研究。得出结论为：侵蚀时间越长、直径越小、温度越高则筋材侵蚀越严重。同时采用 SEM 对腐蚀前后 GFRP 筋的微观形貌进行了观测，发现腐蚀后 GFRP 筋的

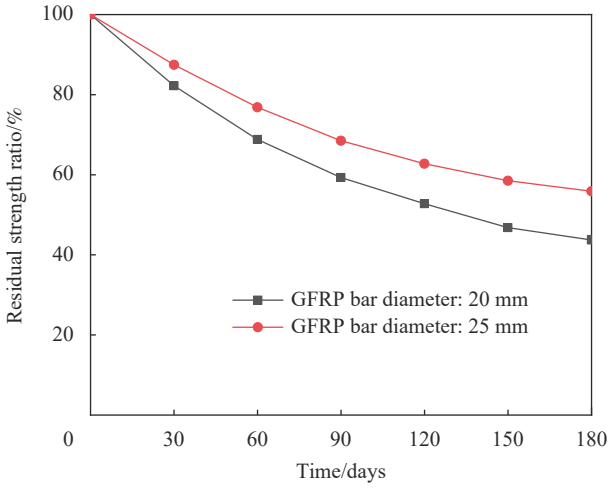

图 3 修正模型下 GFRP 筋剩余强度衰减拟合曲线[26]

Fig. 3 Fitting curve of residual strength degradation of GFRP bars based on the modified model[26]

劣化区域内纤维和树脂之间的界面变得松散，纤维与周围树脂之间出现了明显的脱黏现象，而且随着碱环境温度的升高这种脱黏现象变得更为明显。显然导致 FRP 筋材破坏无非是外部环境影响和内部结构 (纤维和树脂) 因素。Wu 等[28] 研究了酸、碱、盐、去离子水耦合作用下对 BFRP 拉伸性能的影响，结果表明碱性溶液对 BFRP 的损害最为严重。Benmokrane 等[29]对筋材耐久性的研究结果表明，在 60℃ 碱性环境下树脂基体种类对耐久性的影响效果为：环氧树脂 > 乙烯树脂 > 聚脂，并且观察到所有筋材破坏均是由于纤维和树脂脱黏导致的，而纤维基本不会损伤。Wang 等[30] 明确纤维种类也会对 FRP 筋材破坏有所影响，GFRP 在海水海砂混凝土中的耐久性优于 BFRP，其原因除了 GFRP 外包树脂耐久性更好外，玻璃纤维骨架密度大于玄武岩纤维也是至关重要的一方面。

综上所述，FRP 具有轻质高强的优点，又由于热膨胀系数与混凝土接近且与混凝土界面有良好的黏结能力，所以可以用于建筑结构。由于弹性模量低且抗剪能力差、疲劳破坏易脱黏等，因此不宜用于承受动荷载的构件。同时 FRP 筋具有较好的耐腐蚀性，可用于解决目前钢筋锈蚀问题。FRP 筋材破坏受外部环境 (离子侵蚀) 和内部结构 (纤维种类和树脂基体种类) 的影响，FRP 在碱性环境、高温环境下更易发生破坏，FRP 筋破坏基本都是纤维/基体界面或树脂基体发生损伤，而纤维基本不会破坏。近些年对 FRP 研究越来越多，

尤其是环境侵蚀下耐久性问题，但是目前并未形成一套权威的 FRP 材料测试准则和评估方法，因此建立 FRP 筋材耐久性标准化程序进而对 FRP 筋材进行评估也显得十分有必要。通过 SEM 观察到 FRP 筋破坏机制可以明确 FRP 筋材破坏基本都是由于纤维/树脂基体界面损伤或者外部基体破坏导致整体失效，因此可以着重开发性能更好的树脂胶基体或者对黏结界面做技术处理 (如增阻) 来增加黏结强度。此外目前常用纤维种类仅有 CFRP、GFRP、AFRP、BFRP 以及相应的钢-纤维连续复合筋材，可以着眼于开发新的纤维 (如植物纤维、POM 新型纤维) 增强复合材料来丰富新材料领域。

1.3 珊瑚骨料混凝土力学性能

1.3.1 强度

由于珊瑚骨料多孔的特性，造成其强度介于普通骨料和轻骨料之间，因此研究人员考虑不同因素对珊瑚骨料混凝土强度进行研究分析。

大量研究[31-37]表明珊瑚骨料混凝土 28 天抗压强度略低于普通混凝土，且配合比、水泥品种、骨料是否预湿、外加剂以及纤维都对珊瑚骨料混凝土抗压强度有很大影响。孙潇等[33]研究发现，在配合比中水泥用量对强度影响最大，其次是珊瑚骨料取代率，而净水用量影响不大。陈宗平等[35]、郭东等[38]研究表明，珊瑚骨料由于多孔、表面粗糙且多棱角性，导致珊瑚骨料与砂浆机械咬合力较大，造成坍落度相对普通混凝土较小，因此珊瑚骨料混凝土需要更多胶凝材料才能满足混凝土工作性要求。由于珊瑚骨料混凝土胶凝材料较多，由于“墙壁效应”使得珊瑚骨料混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的比明显高于普通混凝土，甚至大于 1[39]。王建平等[40]、Ma 等[41]通过单轴压缩试验发现，珊瑚骨料混凝土有明显早强的特点，7 天抗压强度甚至达到 28 天的 90% 以上，但后期强度增长缓慢，且强度低于普通混凝土。鲁于等[42]将水泥品种、纤维种类、矿物掺合料种类作为变量研究对珊瑚骨料混凝土强度的影响，发现普通硅酸盐水泥在 28 天抗压强度方面优于抗硫酸盐水泥；随着纤维的加入珊瑚骨料混凝土强度增大，且不锈钢纤维在提高抗压强度方面优于聚丙烯纤维；矿物掺合料 (粉煤灰和粒化高炉矿渣) 的加入会使珊瑚骨料混凝土强度降低，弹性模量、泊松比也会随之下降。

有学者[38-44]针对海水拌和珊瑚礁砂混凝土与普通河砂混凝土力学性能的差异开展研究，发现珊瑚骨料混凝土通常发生脆性破坏，进一步采用 XRD、TG-DSC 和 SEM 等微观测试技术，揭示海水拌合珊瑚砂混凝土力学性能发展及微结构演变规律：相比于海水河砂混凝土，海水珊瑚骨料混凝土生成的 Friedl's 盐较多，$Ca(OH)_2$ 较少，这样便优化了界面密实度，使得珊瑚骨料混凝土不同于普通混凝土“骨料-胶凝体”界面过渡区破坏的形式，由于珊瑚骨料本身强度低且表面摩擦角大，因此其破坏形式通常为珊瑚骨料穿透破坏。为了提高珊瑚骨料混凝土强度，王振波等[45]提出可以通过减小珊瑚骨料粒径并合理控制砂率来保证混凝土更密实，或者掺加固盐剂的方法调节水泥水化，延缓早强为长龄期的强度发展提供保障。周文等[17]发现珊瑚骨料具有“吸水-返水”的特性，可以在水泥水化早期吸收大量水分降低实际水胶比实现早强，后期在水泥水化过程中缓慢释放水分，起到“自养护”的作用，因此可以通过预湿骨料的手段提高低水胶比珊瑚骨料混凝土后期抗压强度。另外针对珊瑚骨料混凝土强度低的现象，Wang[46]和 Liu 等[47]提出新型结构形式——外包 FRP 管珊瑚骨料混凝土来增加其强度，试验证明外包 FRP 管通过增加围压可有效提高珊瑚骨料的抗压强度，并且使其破坏形式由脆性转为延性。

郭东等[38]、王建平等[40]等同时发现虽然珊瑚骨料混凝土 28 天抗压强度较低，但是其抗折强度与劈裂强度与普通混凝土差别不大，掺加纤维可以显著提高珊瑚骨料混凝土的抗折强度和劈裂强度[44]。

综上所述，珊瑚骨料混凝土与普通混凝土相比，早期抗压强度增长较快，长期抗压强度相对较低，抗折、劈裂强度差别不大。且可以通过优化配合比、预湿珊瑚骨料、合理掺加矿物掺合料或纤维等方式提高其强度，另外也可以从研发新结构形式方面来提高珊瑚骨料混凝土强度。由于珊瑚骨料多孔的基本特性，有必要着眼于改善其多孔特性 (如掺加纳米级材料填充孔洞) 来提高珊瑚骨料混凝土强度。另外对于珊瑚骨料“内养护”的具体报道较少，对于珊瑚骨料混凝土的耐久性能也有待深入研究。

1.3.2 应力-应变曲线

应力-应变关系描述了应力过程的力学特性，是混凝土受力分析、混凝土承载力和变形理论计

算的基础。根据我国混凝土骨料分类，珊瑚骨料属于轻骨料，因此其本构关系模型也是在轻骨料混凝土本构关系模型基础上进行拟合修正。Wang[46] 针对外包 FRP 管珊瑚骨料，将最初为含陶粒的纤维增强塑料约束的轻质混凝土开发的模型扩展到包括纤维增强塑料约束的海水珊瑚骨料混凝土 (SCAC)，给出一种本构模型方程。Liu 等[48] 通过试验给出碳纤维增强珊瑚混凝土应力-应变关系本构模型，且可以有效地预测碳纤维混凝土和不含碳纤维的珊瑚混凝土的应力-应变行为。目前 Da 等[49] 提出的珊瑚骨料本构关系曲线相对简洁，向上阶段的应力-应变曲线与过镇海等[50] 提出的本构模型拟合效果较好，但向下阶段的应力-应变曲线需要修正。本构方程表达如下：

上升阶段：

$$y = ax + (3-2a)x^2 + (a-2)x^3 \tag{1}$$

下降阶段：$$y = \frac{x}{-\alpha + (\alpha+1)x} \tag{2}$$

式中：$x = \varepsilon/\varepsilon_1$；$y = \sigma/\sigma_1$，其中 ε_1是峰值应变，σ_1 是峰值应力，α是可变系数。

胡乔等[51] 通过试验拟合出强度等级为 40 MPa 的珊瑚骨料混凝土 (SC40) 的本构模型的上升段 (文中并未给出下降段曲线)，并将其与强度等级相同的普通碎石混凝土 (C40) 本构模型进行对比，如图 4 所示，得出的结论为珊瑚骨料混凝土极限应变都小于普通碎石混凝土，且珊瑚骨料混凝土的本构关系呈现显著的近似线性，原因是珊瑚骨料混凝土破坏模式为骨料贯穿破坏，因此破坏前其刚度变化不明显。

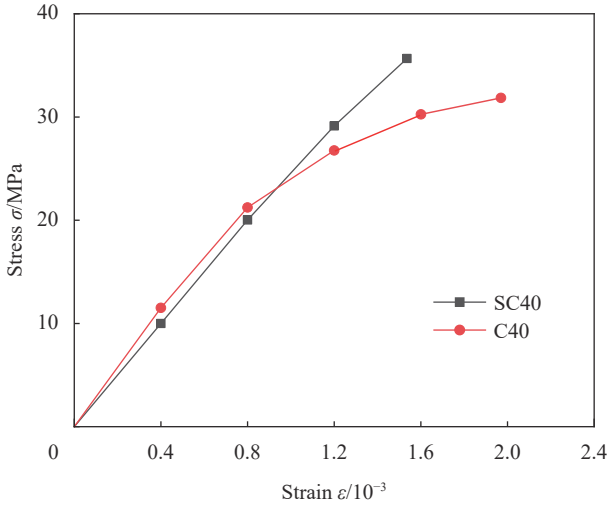

图 4　珊瑚混凝土 (SC40) 与普通混凝土 (C40) 应力-应变曲线比较[51]

Fig. 4　Comparison of stress-strain curves between coral concrete (SC40) and ordinary concrete (C40) [51]

综上所述，目前不少学者针对自己研究的材料在轻骨料混凝土本构模型基础上提出一定的修正，但是对于珊瑚骨料混凝土的本构关系模型并没有统一，因此通过添加影响因子确定统一的本构模型可以作为今后研究的一个方向。

2　FRP 筋与珊瑚骨料混凝土界面黏结性能及耐久性能

2.1　FRP 筋与珊瑚骨料混凝土界面黏结强度及耐久性的影响因素

采用 FRP 筋替代普通钢筋、珊瑚骨料替代普通骨料拌制混凝土是解决钢筋锈蚀、骨料资源短缺问题的重要手段之一。为了确保 FRP 替代钢筋后与海水珊瑚骨料混凝土仍有很好的协调工作性以及耐久性，FRP 筋与珊瑚骨料混凝土接触面黏结情况就成为研究的关键课题。FRP 筋材与珊瑚骨料混凝土之间的黏结力主要是化学黏着力、机械咬合力和摩擦力，但是由于 FRP 筋没有屈服点，因此破坏模式与破坏机制与普通钢筋混凝土有所不同。目前对于黏结性能以及耐久性方面的文章有许多，本文将从黏结破坏模式、混凝土材料角度、筋材角度和环境因素角度 4 个方面总结归纳不同因素对界面黏结性能以及耐久性能的影响。

2.1.1　黏结破坏模式

王磊等[52]、陈爽[53]、李晓禹[54] 通过拉拔试验观察得出，FRP 筋混凝土的黏结滑移破坏模式为筋材拔出破坏、筋材断裂破坏和混凝土劈裂破坏 3 种模式 (图 5 和图 6)：当保护层厚度较小或黏结长度较短时，通常珊瑚骨料混凝土会被 FRP 筋肋剪断而发生筋材拔出破坏，此时 FRP 外层的树脂被部分剪切掉，外层和杆芯之间没有分离；但当保护层厚度足够大或黏结长度足够长时，FRP 筋

图 5　GFRP 筋珊瑚骨料混凝土拉拔试件拔出破坏形态[54]

Fig. 5　Failure mode of GFRP reinforced coral aggregate concrete pull-out specimen [54]

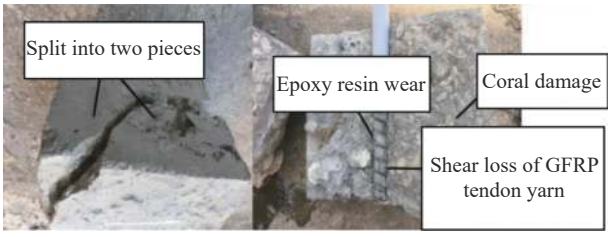

图 6　GFRP 筋珊瑚骨料混凝土拉拔试件劈裂破坏形态[54]

Fig. 6　Splitting failure mode of GFRP reinforced coral aggregate concrete drawing specimen [54]

材与珊瑚骨料混凝土之间有足够的机械咬力，因此 FRP 筋肋对混凝土产生足够的径向应力，混凝土会发生劈裂破坏；但当珊瑚骨料混凝土强度足够大时，将会发生筋材断裂破坏。

2.1.2　混凝土材料的影响

李晓禹[54] 通过探究 FRP 筋与混凝土黏结强度影响因素发现，随着混凝土强度等级增加，筋材与混凝土化学黏着力与机械咬合力增大，但摩擦力提高不明显，而保护层厚度增加会明显加强外围混凝土抗劈裂能力，因此黏结强度与混凝土强度以及保护层厚度呈正相关，黏结强度增大同时耐久性也会提高，且珊瑚骨料混凝土强度等级影响大于保护层厚度的影响[55]。但 Achilides 等[56] 通过进一步研究，认为 FRP 筋的黏结强度并不完全受混凝土强度的控制，对于强度不大于 15 MPa 的混凝土，在压碎之前其黏结强度主要由混凝土抗剪强度确定，且黏结强度低于强度较高的混凝土；当混凝土强度等级大于 C30 时，混凝土强度对黏结强度的影响仍然很小。从混凝土组分来分析，水泥种类对耐久性也有很大的影响。Da 等[57] 通过研究珊瑚混凝凝土在海洋环境中氯离子扩散，发现在相同暴露时间和养护龄期下，硫酸镁水泥珊瑚混凝土 (MCPC) 的抗氯离子渗透能力明显高于普通硅酸盐水泥珊瑚混凝土 (OPC)，同时发现无论 MCPC 还是 OPC，其氯离子结合能力都会随养护龄期增加而增大，因此可以通过延长水分养护来有效提高混凝土抗氯离子扩散能力。

Tang 等[58] 等采用珊瑚礁砂制备硅酸盐水泥混凝土 (CPC)，研究干湿循环和硫酸盐的联合侵蚀效应，并与天然河砂混凝土 (NPC) 进行对比。发现珊瑚礁砂混凝土在干湿循环和硫酸盐侵蚀作用下的腐蚀产物为钙矾石和 Friedel's 盐，而普通河砂混凝土的腐蚀产物为钙矾石，得出结论：与天然河砂相比，利用珊瑚礁砂作为细骨料不会降低混凝土的耐久性。Cheng 等[59-60] 研究了粉煤灰 (FA)、高炉矿渣 (BFS) 和偏高岭土 (MK) 对珊瑚砂混凝土 (CSC) 力学性能、干燥收缩、碳化和氯离子渗透性的影响，得出：由于珊瑚砂骨料的高孔隙率，CSC 比河砂混凝土具有更高的干缩率；与没有任何补充胶凝材料的珊瑚骨料混凝土相比，掺入 15wt% BFS 和 5wt% MK、15wt% FA 和 5wt% MK 的干燥收缩率分别降低了 37.5% 和 26.6%。加入 5wt% MK 后，干燥收缩率下降 50% 以上，说明 MK 比 FA 和 BFS 在降低干燥收缩率方面更有效，原因是干燥收缩率的降低与二次火山灰反应产生的细孔结构和 MK 的填充效应有关。珊瑚砂虽然具有较高的孔隙率，但珊瑚砂骨料混凝土的抗氯离子性能优于河砂混凝土；MK 替代水泥对提高 CSC 抗氯离子渗透性是有效的；氯离子扩散系数与 CSC 在 28 天时的抗压强度有较好的相关性，多孔珊瑚混凝土还具有良好的抗硫酸盐干湿循环性能；CSC 的碳化深度在 14 天时低于天然骨料混凝土，在 28 天时高于天然骨料混凝土。CSC 的碳化深度随 FA 或 BFS 的加入而增加，含有 MK 的 CSC 有效降低了碳化深度。Niu 等[55] 和 Huang 等[61] 研究了玄武岩纤维的掺量对珊瑚骨料氯离子含量和碳酸钙吸水率的影响，结果表明在玄武岩纤维体积掺量是 0.05% 时，结合氯离子含量在 28 天和 90 天时最高，说明掺入 0.05% 玄武岩纤维可以优化混凝土的孔隙结构，且通过计算分析得出氯离子扩散系数的时间衰减系数与玄武岩纤维的掺量呈良好的二次函数关系。

2.1.3　筋材的影响

Wang 等[62] 和 Yang 等[63] 等通过拉拔试验研究了 FRP 筋直径、黏结长度以及筋材表面条件对黏结性能的影响。得出结论为 FRP 筋最大平均黏结应力随着黏结长度和筋材直径的增加而减小。我们认为黏结应力是不均匀的，这是通过界面变形协调条件，推导出界面黏结应力的双曲余弦函数分布，证明了其随着黏结长度增加导致分布非均匀性增强，因此随着黏结长度增加不均匀应力分布越发明显，导致黏结强度降低。筋材直径的增加削弱了混凝土对筋材的握裹作用，且由于混凝土收缩对筋材产生的径向力随直径增加而减小，因此使得摩擦力和机械咬合力减小导致黏结强度下降。与此同时筋材表面肋深越大，黏结强度也就越大。王磊等[64] 研究海水浸泡下不同筋材种类

的劣化程度，发现随着海水浸泡时间的增加，FRP 筋珊瑚骨料混凝土黏结长度呈现出小幅增加后再减小的趋势，当浸泡 120 天后，GFRP 筋材由于纤维本身遭到侵蚀，破坏模式转为筋材断裂，而 CFRP 筋黏结强度降低较少，仍为筋材拔出破坏，因此 CFRP 筋黏结性能优于 GFRP。

2.1.4 环境因素的影响

李威[65] 利用质量浓度为 3.5% 的人工海水模拟海洋环境对 FRP 筋珊瑚骨料混凝土进行浸泡，发现随浸泡时间的增加，极限黏结强度呈现先增大后减小的趋势，且后期下降速率逐渐减缓。极限黏结强度前期增大的原因主要是珊瑚骨料混凝土对 FRP 筋约束增强了，后期减小的原因主要是 FRP 筋材表面基体的性能受到损伤。Li 等[66] 采用加速侵蚀法研究了珊瑚和普通混凝土中 BFRP 筋在不同外部环境条件下的力学性能。BFRP 筋与珊瑚骨料混凝土黏结应力随着在人工海水溶液中浸泡时间增加而出现退化，主要是由于强碱性溶液侵蚀树脂，使得树脂与纤维协同能力减弱，同时也会一定程度上侵蚀纤维，导致纤维束出现一定损伤甚至断裂。温度也极大地影响了 BFRP 筋拉伸强度的降解速率，温度升高 BFRP 筋抗拉强度退化率增加。此外，由于珊瑚骨料混凝土本身含有一定量离子，在相同环境温度下，珊瑚混凝土中 BFRP 钢筋的抗拉强度劣化率高于普通混凝土中 BFRP 钢筋的抗拉强度劣化率。

综上所述，FRP 筋珊瑚骨料混凝土黏结破坏模式分为筋材拔出破坏、筋材断裂破坏和混凝土劈裂破坏 3 种模式。混凝土材料、筋材材料以及外部环境都对黏结性能和耐久性有影响：随着混凝土强度、保护层厚度的增加，黏结强度和耐久性会增加，且强度等级影响大于保护层厚度，但影响都相对较小；随着筋材直径、黏结长度的增加，黏结强度会有所下降，另外筋材类型对黏结强度也有影响，CFRP 筋黏结性能优于 GFRP；适当掺入矿物掺合料 (偏高岭土、粉煤灰、高炉矿渣) 会一定程度上优化珊瑚骨料混凝土性能进而提高耐久性，偏高岭土比粉煤灰和高炉矿渣在降低干燥收缩率、抗氯离子渗透性和降低碳化深度方面更有效。另外当玄武岩纤维体积掺量是 0.05% 时，可以优化混凝土的孔隙结构，促使混凝土结合氯离子能力更强，说明掺加纤维对混凝土耐久性也会有一定的提升；在碱性环境下，随着 pH 值、温度升高会加速 FRP 筋侵蚀而导致黏结性能和耐久性变差。基于目前众多研究成果的总结发现，黏结性能基本都是静力荷载作用下的研究，动力荷载下黏结性能基本处于空白。在 FRP 耐久性方面研究基本都是通过加速试验方法研究氯离子侵蚀问题，不过具体有效解决方案成果不多，对于其他盐离子的研究报道也相对较少。同时所用的侵蚀溶液都是在模拟海洋环境而设置为碱性，由于酸雨的存在，酸性环境下对于 FRP 珊瑚骨料混凝土耐久性的影响也值得研究。另外对抗冻性、早期抗裂性、抗碳化性、抗硫酸盐侵蚀等研究不足，尤其是收缩性还有待深入研究。

2.2 FRP 筋珊瑚骨料混凝土黏结滑移本构模型

黏结滑移的本构关系可以直观地反应界面黏结应力的变化。目前针对不同角度比较权威的 FRP 筋混凝土构件黏结模型有 5 种，分别是 BPE 模型[67]、改进的 BPE 模型[68]、CMR 模型[69]、Malver 模型[70] 和连续曲线模型[71]，具体表达式如表 2 所示。在已有模型基础上，有学者通过试验分析改进，得出新的 FRP 筋珊瑚骨料混凝土黏结模型。

由于珊瑚骨料的不同，以上模型均有局限性。Wang 等[30] 研究发现外包 CFRP 的钢筋珊瑚骨料混凝土黏结性能，以钢筋屈服为临界点，建立了 CFRP 增强珊瑚混凝土的黏结滑移模型：

筋材不屈服时滑移本构关系：

微滑移阶段：$$\tau = \frac{\tau_1}{s_1} s \quad (s \leqslant s_1) \tag{3}$$

滑移阶段：$$\frac{\tau}{\tau_2} = 2\left(\sqrt{\frac{s}{s_2}}\right)^a - \frac{s}{s_2} \quad (s_1 < s \leqslant s_2) \tag{4}$$

下降阶段：$$\tau = \tau_2 \frac{(s_3 - s)^2 (2s + s_3 - 3s_2)}{(s_3 - s_2)^3} + \tau_3 \frac{(s - s_2)^2 (3s_3 - 2s - s_2)}{(s_3 - s_2)^3} \quad (s_2 < s \leqslant s_3) \tag{5}$$

筋材屈服时本构关系：

微滑移阶段：$$\tau = \frac{\tau_1}{s_1} s \quad (s \leqslant s_1) \tag{6}$$

滑移阶段（钢筋屈服前）：

$$\tau = (\tau_2 - \tau_1)\left(\frac{s - s_1}{s_2 - s_1}\right)^{0.86} + \tau_1 \quad (s_1 < s \leqslant s_2) \tag{7}$$

滑移阶段（钢筋屈服后）：

$$\tau = (\tau_3 - \tau_2)\left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2}\right)^{1.0} + \tau_2 \quad (s_2 < s \leqslant s_3) \tag{8}$$

表 2　FRP 筋混凝土常用的黏结–滑移本构模型

Table 2　Bond-slip constitutive models of FRP reinforced concrete

Bond-slip constitutive model	Bond-slip constitutive expression
BPE model	$\frac{\tau}{\tau_1}=\left(\frac{s}{s_1}\right)^a\ (s\leqslant s_1);\ \tau=\tau_1(s_1<s\leqslant s_2);\ \tau=\tau_1-\frac{\tau_1-\tau_3}{s_2-s_3}(s_2-s)(s_2<s\leqslant s_3)$
Improved BPE model	$\frac{\tau}{\tau_1}=\left(\frac{s}{s_1}\right)^a\ (s\leqslant s_1);\ \frac{\tau}{\tau_1}=1-p\left(\frac{s}{s_1}-1\right)(s_1<s\leqslant s_2);\ \tau=\tau_3(s>s_2)$
CMR model	$\frac{\tau}{\tau_m}=(1-e^{\frac{s}{s_r}})^{\beta}$
Malver model	$\frac{\tau}{\tau_m}=\frac{F\left(\frac{s}{s_m}\right)+(G-1)\left(\frac{s}{s_m}\right)^2}{1+(F-2)\left(\frac{s}{s_m}\right)+G\left(\frac{s}{s_m}\right)^2};\ \frac{\tau}{f_1}=A+B(1-e^{-\frac{c_\sigma}{f_t}});\ s_m=D+E\sigma$
Continuous curve model	$\frac{\tau}{\tau_1}=2\sqrt{\frac{s}{s_0}}-\frac{s}{s_0}\ (0<s\leqslant s_0);$ $\tau=\tau_0\frac{(s_u-s)^2(2s+s_u-3s_0)}{(s_u-s_0)^3}+\tau_u\frac{(s-s_0)^2(3s_u-2s-s_0)}{(s_u-s_0)^3}\ (s_0<s\leqslant s_u)$

Notes: s_1, s_2, s_3, p, s_r, β—Parameters determined by experiments; τ_1, τ_m—Peak bond strength; s_1, s_m—Slip value corresponding to peak bond strength; α—Constant not greater than 1; σ—Axisymmetric confined radial pressure; f_t—Compressive strength of concrete; A, B, C, D, E, F, G—Constants determined by fitting the type of reinforcement according to the test data.

下降阶段：$$\tau=\tau_3\frac{(s_4-s)^2(2s+s_4-3s_3)}{(s_4-s_3)^3}+\tau_4\frac{(s-s_3)^2(3s_4-2s-s_3)}{(s_4-s_3)^3}\quad(s_3<s\leqslant s_4)\tag{9}$$

式中：τ、τ_1、τ_2、τ_3分别是理论黏结强度、弹性黏结强度、屈服黏结强度、峰值黏结强度；s、s_1、s_2、s_3分别是对应于τ、τ_1、τ_2、τ_3的自由端滑移值。

Yang 等[63] 分析了纤维类型、纤维直径、黏结长度以及固化条件对黏结性能的影响并进行了深入研究，在此基础上提出了一个包含 4 个特征参数的局部黏结应力-滑移关系的四线性模型：

$$\delta=0\quad(\tau<\tau_s)\tag{10}$$

$$\tau=\tau_s+\frac{\tau_f-\tau_s}{\delta_1}\delta\quad(0\leq\delta\leq\delta_1)\tag{11}$$

$$\tau=\frac{2\tau_f G_f+(\tau_f-\tau_s)^2\delta_1}{2G_F}-\frac{(\tau_f-\tau_s)^2}{2G_F}\delta\quad(\delta_1\leqslant\delta\leqslant\delta_2)\tag{12}$$

$$\tau=\tau_s\quad(\delta>\delta_2)\tag{13}$$

$$\text{局部滑移量}\delta=u_p-u_c\tag{14}$$

式中：u_p为筋材某一确定位置的位移；u_c为珊瑚骨料混凝土在相同位置的位移。

目前四线性模型仅作为试点研究提出，模型有效性有待进一步验证。

综上所述，目前针对 FRP 筋混凝土黏结性能本构模型研究上，针对不同的考虑因素有不同的模型。且对于黏结长度、筋材表面形式、筋材直径等是本构关系的重要影响因子基本可以达成共识，混凝土侧限压力也是重要影响因素。基于 5 种比较权威的黏结模型作为参考，学者针对珊瑚骨料混凝土通过试验分析和数据拟合探究性提出了“外包 CFRP 增强钢筋珊瑚骨料混凝土模型”以及“四线型珊瑚骨料混凝土黏结性能本构模型”，但是适用性还有待验证。

3　FRP 筋海水珊瑚骨料混凝土的力学性能

3.1　FRP 筋海水珊瑚骨料混凝土梁的力学性能

梁作为建筑结构的主要受弯构件，在梁受拉区增设 FRP 筋可以有效保证梁不发生脆性破坏。Xu 等[72] 对素珊瑚骨料混凝土梁进行三点弯曲试验并进行扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 对胶黏剂与界面过渡区的形貌进行观察，发现所有梁均是珊瑚骨料 (CCAs) 断裂，而非拔出，同时得出随着梁深增加初始开裂荷载与最大开裂荷载比值增大的结论。王林等[73] 通过试验发现 GFRP 筋的置入使珊瑚骨料混凝土的承载力显著提升，与无 GFRP 筋增强的试件相比，有 GFRP 筋增强的试件受弯产生的应变大幅增加，展现出良好的变形性能，如图 7 所示 (其中 n 为 GFRP 根数)。胡乔等[51]

通过四点抗弯试验将 CFRP 筋珊瑚骨料混凝土梁与普通钢筋珊瑚骨料混凝土梁进行对比，发现同配筋率下相同尺寸的两种梁受弯性能差别不大，验证了 FRP 筋珊瑚骨料混凝土梁的工程适用性。同时验证钢筋珊瑚骨料混凝土梁开裂荷载、裂缝宽度、挠度均可直接采用普通混凝土梁的相关公式计算，而抗弯承载力可结合理论推导进行修正，结果具有良好的适用性；而 FRP 筋珊瑚骨料混凝土梁的设计方法可以通过对现行 GB 50608 规范[10]进行适当调整得到，建议设计时预留一定的安全度。Liu 等[74]将碳纤维掺量作为变量，通过四点加载试验研究了碳纤维增强珊瑚混凝土的弯曲性能，采用数字图像观察将弯曲损伤过程分为微裂纹萌生、宏观裂纹演化和主裂纹扩展 3 个阶段，得出掺入碳纤维可以使其破坏模式由脆性逐渐转变向塑性的结论，且给出碳纤维的最佳掺量约为胶凝材料质量的 1.5%。此外 Dong 等[75]进一步提出 BFRP 筋加固超高性能海水海砂珊瑚骨料混凝土，将梁上层用 UHPC 混凝土置换、下部用 BFRP 筋加固，研究结果表明，这种新结构形式明显增强珊瑚骨料混凝土的韧性和抗裂性能。汤杰[19]对珊瑚骨料混凝土梁进行预开裂处理，将筋材暴露在腐蚀溶液中加速腐蚀，并通过自制反力架实现荷载耦合，探究 BFRP 筋珊瑚骨料混凝土梁干湿循环条件下的退化规律，并与钢筋珊瑚骨料混凝土梁进行了对比，发现经过 6 月腐蚀环境后，钢筋梁底部受拉纵筋和抗剪箍筋均发生锈蚀膨胀，而 BFRP 筋无明显变化。干湿循环后 BFRP 筋珊瑚骨料混凝土梁的极限承载能力有所降低，且部分梁破坏模式由正截面受弯破坏转变为剪-压破坏，且发生剪-压破坏的梁承载力下降程度大于破坏模式未发生转变的试验梁，由此证明试验梁承载力的下降不仅仅是由环境腐蚀直接引起的，破坏模式的转变导致梁抗弯承载力未能充分发挥也是重要因素。经过进一步分析给出破坏模式发生转变的主要原因为海水腐蚀及温度变化致使箍筋与珊瑚骨料混凝土握裹程度发生退化，再加上箍筋本身在腐蚀溶液中发生一定程度的损伤，因此导致抗剪能力下降而发生弯-剪破坏。此外经过干湿循环后的 BFRP 珊瑚骨料混凝土梁抗弯刚度得到提高，主要原因是长期荷载的耦合作用使梁发生塑性变形，相当于实现了为梁施加预应力的效果。Wang 等[76]同样通过加速老化试验对 BFRP 筋珊瑚骨料混凝土梁耐久性进行了研究，试验结果表明由于混凝土的长期成熟，老化后的 BFRP 筋珊瑚骨料混凝土梁裂缝宽度大幅减小，通过将试验测量数据与规范中理论公式计算所得结果进行对比，得出：中国规范 GB 50608—2010[10]在预测挠度方面比美国规范 ACI 440.1R[77]具有更高的精度，但是两个标准都低估了挠度；美国规范 ACI 440.1R[77]在预测裂纹宽度方面比中国规范 GB 50608—2010[10]更准确，并且中国规范在很大程度上高估了裂纹宽度。

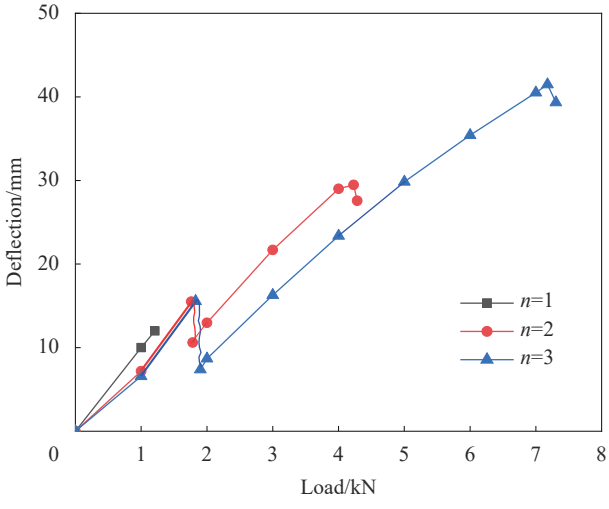

图 7　不同根数 GFRP 筋增强珊瑚骨料混凝土荷载-挠度曲线[73]

Fig. 7　Load-deflection curves of coral aggregate concrete reinforced with different number of GFRP bars [73]

综上所述，FRP 筋珊瑚骨料混凝土梁具有相对较好的抗弯性能，并且可通过合理掺加纤维或者开发新结构形式进一步提高梁的力学性能。但是目前对于 FRP 筋珊瑚骨料混凝土构件的其他力学性能如抗剪、抗冲击以及动力荷载作用下的使用性能等相关研究较少。在耐久性方面，BFRP 筋珊瑚骨料混凝土梁构件在加速老化的侵蚀环境中破坏模式会由弯曲破坏逐渐向弯-剪破坏过渡，且随着老化的进程抗弯刚度提高，裂缝宽度减小。但是对于裂缝宽度以及挠度的预测，现有规范并不能十分精确地进行预测，因此有必要建立起 FRP 筋珊瑚骨料混凝土梁构件耐久性试验结果的数据库，以便对现有规范公式进行改进，使预测更精确。

3.2　FRP 筋海水珊瑚骨料混凝土柱的力学性能

柱作为建筑结构的主要承重构件，主要承受压力作用。美国 ACI.规范[77]不建议将 FRP 筋用于承重构件的受压筋，同时珊瑚骨料自身强度又较低，因此应用 FRP 筋材对珊瑚骨料混凝土进行增

强是目前较为新颖的研究课题。刘霞等[78]便提出一种新型玄武岩纤维增强聚合物 (BFRP) 筋增强珊瑚礁砂混凝土 (Coral reef and sand aggregate concrete，CRSAC) 柱用以解决结构强度以及耐久性问题，对 15 根珊瑚礁砂混凝土柱进行了轴压试验，分析了试件的受力过程和破坏形态。绘制了不同筋材种类 (BFRP 筋、钢筋)、不同配筋率 (0.893%、1.786%)、不同箍筋间距 (50 mm、100 mm、150 mm) 三个维度变量的荷载-位移曲线，各组荷载-位移曲线在上升段规律较为相似，初期直线阶段属于线弹性阶段；过了某一临界值后进入弹塑性阶段，此时轴向位移增长较快；过了峰值荷载后塑性变形快速增长，曲线出现骤降。

BFRP 筋增强珊瑚礁砂混凝土柱的破坏始于强度较低的珊瑚礁石骨料，裂缝发展途径为：珊瑚骨料-水泥砂浆界面-柱表面。BFRP 筋增强珊瑚礁砂混凝土柱破坏形式为混凝土完全破碎、BFRP 纵筋断裂；相同纵筋配筋率下，BFRP 筋对 CRSAC 柱承载力的增强效果与钢筋相当。由于在到达极限承载力之前，箍筋对核心混凝土的约束作用未能体现出来，因此 BFRP 筋增强 CRSAC 配箍率对柱极限承载力影响不大。中国规范 GB 50608—2010[10] 中复合材料筋混凝土轴心受压构件的正截面受压承载力公式适用于 BFRP 筋增强 CRSAC 柱轴心承载力的计算，可为 BFRP 筋增强 CRSAC 的设计提供参考。陈爽[24]同样对 FRP 筋珊瑚骨料混凝土柱进行轴压试验，通过有限元分析和试验结果对比，得出 FRP 筋珊瑚骨料混凝土柱的承载力与混凝土强度、配筋率呈正相关，与柱的长细比、箍筋间距呈负相关。通过 FRP 筋压缩试验并参考无明显屈服强度材料的应力-应变关系，建议 CFRP 名义屈服强度取极限抗压强度的 0.34 倍，为柱轴心受压计算提供参考。

综上所述，由于珊瑚骨料自身强度低成为限制构件强度的关键因素，FRP 筋珊瑚骨料混凝土裂缝发展途径为“珊瑚骨料-界面-柱表面”。且 FRP 筋珊瑚骨料混凝土的受力计算可采用复合材料筋混凝土轴心受压构件的正截面受压承载力公式。基于目前这种新型材料研究不多，公式适用性也有待考证。此外对于抗震性能等延性方面的研究也相对较少，因此 FRP 筋珊瑚骨料混凝土结构构件的力学性能方面的系统研究可作为未来研究的重要方向。

4 结论与展望

纤维增强聚合物 (FRP) 筋海水珊瑚骨料混凝土是一种新型组合形式的混凝土结构。从 FRP 与珊瑚骨料的材料特性、FRP 筋与珊瑚骨料混凝土黏结性能以及耐久性、FRP 筋海水珊瑚骨料混凝土梁、柱构件的受力性能 3 个方面对国内外的研究进行比较和总结，说明了此种新型结构具有的科学意义和工程应用价值。

(1) 珊瑚骨料由于多孔的基本特性使其具有自身强度低、比表面积大、内摩擦角大的属性，同时珊瑚骨料具有独特的“吸-返水”特性，可以作为新材料用于配制混凝土；FRP 筋具有轻质高强且耐腐蚀的优良特性，可替换钢筋用于混凝土构件中作为增强筋，但 FRP 筋是各向异性材料，抗剪能力较差，侵蚀环境下破坏通常发生在纤维/树脂基体界面。珊瑚骨料混凝土具有早强的特性，其强度相对普通混凝土相对较低，但是可以通过优化配合比、适当掺加矿物外加剂和掺入纤维的方式提高其强度，进而满足工程需要。

(2) FRP 筋与珊瑚骨料混凝土具有良好的协调工作能力，其间黏结力主要包括化学黏结力、机械咬合力和摩擦力。黏结强度与 FRP 筋材黏结长度呈负相关，与 FRP 筋材表面粗糙度、珊瑚骨料混凝土强度等级、珊瑚骨料混凝土保护层厚度呈正相关；黏结强度还与 FRP 筋材类型有关，碳纤维复合筋 (CFRP) 的黏结强度优于玻璃纤维复合筋 (GFRP)；对于外界环境的影响，温度越高、pH 值越大，黏结强度损失越大。

(3) FRP 筋海水珊瑚骨料混凝土梁、柱构件破坏均是始于珊瑚骨料的破坏，且在相同尺寸情况下，与普通钢筋相比，FRP 筋对海水珊瑚骨料混凝土梁受弯、柱轴心受压的增幅效果相当，且 FRP 筋珊瑚骨料混凝土梁、柱构件表现出良好的耐久性。FRP 筋海水珊瑚骨料混凝土梁的抗弯承载力、开裂荷载、裂缝宽度、挠度均可通过对普通混凝土梁的相关理论公式修正后来进行计算；玄武岩纤维复合筋 (BFRP) 筋海水珊瑚骨料混凝土柱的轴心受压可采用复合材料筋混凝土轴心受压构件的正截面受压承载力公式，基于目前研究有限，公式适用性有待进一步考证。

由于 FRP 筋海水珊瑚骨料混凝土这种新型组合比较新颖，因此目前研究成果有限，有待进行深入的系统性研究：

(1) 在材料方面，我国对珊瑚骨料的研究基本都局限于南海附近，对于临近黄海、东海的珊瑚骨料特性研究鲜有报道，对于珊瑚骨料“吸-返水”特性机制研究也不够透彻；对于 FRP 筋材的研究一般为芳纶纤维复合筋 (AFRP)、BFRP、CFRP 和 GFRP 以及相应的钢-纤维连续复合筋材，因此有必要着眼于开发新型 FRP 筋材 (如 POM 共聚甲醛纤维)。此外针对 FRP 破坏模式，更高性能的新型树脂的研究也可以作为研究新方向。FRP 筋材弹性模量较低，延性差，可以通过研究改性 FRP 筋材、FRP-钢组合截面筋材形式来改善 FRP 筋的弹性模量，提高延性和耐久性；

(2) 在黏结性方面，除氯离子侵蚀下，其他盐溶液的侵蚀以及多因素耦合作用下对黏结性能的影响报道相对较少；各国规范对 FRP 筋材黏结性能模型考虑因素均有限，且对于 FRP 海水珊瑚骨料混凝土这种新型梁、柱构件的适用性有待进一步验证；

(3) 在构件力学性能方面，目前所报道文献对于 FRP 筋海水珊瑚骨料混凝土的计算模型很少，仅有几篇也都是基于轻骨料混凝土计算模型进行系数修正，且结论尚未完全统一，因此在设计理论计算方面有待深入研究。珊瑚骨料多孔特性导致其具有高压缩性，因此 FRP 筋珊瑚骨料混凝土构件的徐变值得进行研究；FRP 筋海水珊瑚骨料混凝土的受剪、受扭、疲劳破坏以及抗震性等也有待系统性研究。除梁、柱外，FRP 筋珊瑚骨料混凝土板以及 FRP 筋珊瑚骨料混凝土墙也有待深入研究；

(4) 在构件创新方面，由于 FRP 筋延性差以及珊瑚骨料自身强度较低的特点，研发“FRP 筋-耐锈蚀钢筋混合配筋海水珊瑚骨料混凝土构件”、“FRP 筋-改性珊瑚骨料混凝土构件及结构形式”以及创新性开发更多新型 FRP-混凝土构件形式可作为今后的研究方向。

参考文献：

[1] 周继凯, 何旭, 王泽宇, 等. 海水海砂混凝土与潜在危害研究进展[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(24)：179-187.
ZHOU J K, HE X, WANG Z Y, et al. Research progress on seawater and sea sand concrete and its potential hazards[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(24)：179-187(in Chinese).

[2] 秦斌. 海水海砂混凝土基本力学性能研究[J]. 混凝土, 2019(2)：90-91.
QIN B. Basic mechanical properties of seawater and sea sand concrete[J]. Concrete, 2019(2)：90-91(in Chinese).

[3] 王磊, 赵艳林, 吕海波. 珊瑚骨料混凝土的基础性能及研究应用前景[J]. 混凝土, 2012(2)：99-100+113.
WANG L, ZHAO Y L, LV H B. Prospect on the properties and application situation of coral aggregate concrete[J]. Concrete, 2012(2)：99-100+113(in Chinese).

[4] 侯磊, 李伟华, 郑海兵, 等. 海洋钢筋混凝土结构防腐蚀技术研究进展[J]. 材料保护, 2017, 50(3)：62-67.
HOU L, LI W H, ZHENG H B, et al. Recent advances and development of corrosion prevention technologies for marine reinforced concrete structures[J]. Materials Protection, 2017, 50(3)：62-67(in Chinese).

[5] Sally. Motor speedway bridge collapse caused by corrosion[J]. Materials Performance, 2000(7)：18-19.

[6] 杨泽宇, 朱春阳, 孙丽. FRP筋及FRP筋混凝土受压构件力学性能及耐久性研究进展与应用前景分析[C]//第十三届沈阳科学学术年会论文集(理工农医). 沈阳: 沈阳市科学技术协会, 2016: 7.
YANG Z Y, ZHU C Y, SUN L. Research progress and application prospect of mechanical properties and durability of FRP bars and FRP bars concrete compression members[C]//Proceedings of the 13th Shenyang Scientific Academic Annual Meeting (Science, Technology, Agriculture and Medicine. Shenyang: Shenyang Science and Technology Association, 2016: 7(in Chinese).

[7] 何政, 欧进萍, 王勃, 等. FRP筋及其配筋混凝土构件的力学性能与智能特性[C]//第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流会论文集. 昆明: 中国土木工程学会混凝土与预应力混凝土分会纤维增强塑料(FRP)及工程应用专业委员会, 2002: 11.
HE Z, OU J P, WANG B, et al. Mechanical properties and intelligent characteristics of FRP bars and their reinforced concrete members[C]//Proceedings of the Second National Symposium on Application Technology of FRP for Civil Engineering. Kunming: Professional Committee of Fiber Reinforced Plastics (FRP) and Engineering Application of China Civil Engineering Society Concrete and Prestressed Concrete Branch, 2002: 11(in Chinese).

[8] 张鹏, 桂金洋, 邓宇, 等. 偏心受拉作用下预应力CFRP筋-型钢混凝土构件抗裂试验[J]. 复合材料学报, 2021, 38(3)：920-931.
ZHANG P, GUI J Y, DENG Y, et al. Experiment on crack resistance of prestressed CFRP tendons-steel reinforced concrete members under eccentric tension[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(3)：920-931(in Chinese).

[9] 薛伟辰. FRP筋增强混凝土结构研究的一些新进展[C]//低成本、高性能复合材料发展论坛论文集. 石家庄: 中国科学技术

协会学会学术部, 2012: 246-250.
XUE W C. Some new progress in the research of FRP reinforced concrete structures[C]//Proceedings of the Forum on Development of Low-cost and High-performance Composite Materials. Shijiazhuang: Academic Department of China Association for Science and Technology, 2012: 246-250(in Chinese).

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50608—2010 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50608—2010 Technical code for infrastructure application of FRP composites[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.

[11] 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 Y G. The feasibility of coral concrete application in the port industry[J]. Port and Waterway Engineering, 1988(9)：46-48(in Chinese).

[12] 苏丽, 牛荻涛, 罗大明. 珊瑚骨料混凝土力学性能及耐久性能研究[J]. 材料导报, 2018, 32(19)：3387-3393.
SU L, NIU D T, LUO D M. Research of coral aggregate concrete on mechanical property and durability[J]. Materials Reports, 2018, 32(19)：3387-3393(in Chinese).

[13] 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 Z L, SUN G F, TANG X N, et al. Study on applications of concretes from coral reef sand mixed with seawater for patching-up in reef engineering[J]. Coast Engineering, 2008, 27(4)：60-69(in Chinese).

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

[15] 紫民, 刘旷怡, 刘松, 等. 珊瑚礁砂细骨料基本性能研究[J]. 建材世界, 2015, 36(5)：11-14.
ZI M, LIU K Y, LIU S, et al. Study on the basic properties of coral sand used as fine aggregate[J]. The World of Building Materials, 2015, 36(5)：11-14(in Chinese).

[16] 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 C, MA H Y, YU H F, et al. Effect of different coral aggregates on mechanical properties of coral concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(11)：1771-1780(in Chinese).

[17] 周文, 周永祥, 宋普涛, 等. 低品位全珊瑚骨料混凝土强度提升技术研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(4)：1-3.
ZHOU W, ZHOU Y X, SONG P T, et al. Study on strength improvement technology of low-grade all coral aggregate concrete[J]. China Concrete And Cement Products, 2019(4)：1-3(in Chinese).

[18] 李林, 赵艳林, 吕海波, 等. 珊瑚骨料预湿对混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土, 2011(1)：85-86.
LI L, ZHAO Y L, LV H B, et al. Coral aggregate pre-wet on the mechanical properties of concrete[J]. Concrete, 2011(1)：85-86(in Chinese).

[19] 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: 12-44.
TANG J. Study on the mechanical properties of BFRP reinforced coral reef and sand concrete structural members[D]. Nanjing: Southeast University, 2018: 12-44(in Chinese).

[20] 姜浩, 朱思宇. 玄武岩纤维筋的性能及应用研究综述[J]. 四川建材, 2017, 43(8)：1-2.
JIANG H, ZHU S Y. Review on the properties and application of basalt fiber reinforcement[J]. Sichuan Building Materials, 2017, 43(8)：1-2(in Chinese).

[21] 李筠. 玄武岩纤维筋材力学性能试验研究[J]. 交通科技, 2016(1)：140-142.
LI J. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforcement[J]. Transportation Science & Technology, 2016(1)：140-142(in Chinese).

[22] 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]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
HU C S. Experimental study on the bonding performance of full coral aggregate seawater concrete with FRP bars[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2020(in Chinese).

[23] 邢丽, 赵嘉伟, 曹喜. GFRP筋海砂海水混凝土梁试验[J]. 浙江树人大学学报(自然科学版), 2016, 16(1)：35-38, 44.
XING L, ZHAO J W, CAO X. Test of GFRP reinforced sea sand and seawater concrete beams[J]. Journal of Zhejiang Shuren University (Natural Science Edition), 2016, 16(1)：35-38, 44(in Chinese).

[24] 陈爽, 梁淑嘉, 关纪文. FRP筋-珊瑚混凝土柱轴心受压承载力[J]. 复合材料学报, 2021, 38(10): 3519-3530.
CHEN S, LIANG S J, GUAN J W. Compression behavior of FRP bars-coral concrete columns under axial compression loading[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(10): 3519-3530(in Chinese).

[25] WANG X, SHI J, WU Z, et al. Fatigue behavior of basalt fiber reinforced polymer tendons for prestressing applications[J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(3)：04015079.

[26] 高永红, 黄孝国, 刘华琛, 等. 碱液下GFRP筋力学性能劣化模型研究[J]. 中国塑料, 2018, 32(9)：85-89, 134.
GAO Y H, HUANG X G, LIU H C, et al. Study on determination model of mechanical properties of CFRP bars in alkaline solution[J]. China Plastics, 2018, 32(9)：85-89,

134(in Chinese).

[27] 王伟, 薛伟辰. 碱环境下GFRP筋拉伸性能加速老化试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6)：760-766.
WANG W, XUE W C. Accelerated aging tests for evaluations of tensile properties of GFRP rebars exposed to alkaline solution[J]. Journal of Building Materials，2012，15(6)：760-766(in Chinese).

[28] WU G, DONG Z Q, WANG X, et al. Prediction of long-term performance and durability of BFRP bars under the combined effect of sustained load and corrosive solutions[J]. Journal of Composites for Construction，2015，19(3)：04014058.

[29] BENMOKRANE B, ALI A H, MOHAMED H M, et al. Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester, and epoxy glass-FRP bars for concrete structures[J]. Composites Part B: Engineering，2017，114：163-174.

[30] WANG Z K, ZHAO X L, XIAN G, et al. Long-term durability of basalt- and glass-fiber reinforced polymer(BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment[J]. Construction and Building Materials，2017，139：467-489.

[31] 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 R J, YU H F, MA H Y, et al. Study on the mechanical property of coral concrete[J]. Ocean Engineering，2016，34(4)：47-54(in Chinese).

[32] 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 Z B, LI Z X, SHEN J L. Research on the influencing factors of performance of coral concrete and its early mechanical property[J]. Industrial Construction，2017，47(3)：130-136(in Chinese).

[33] 孙潇, 韦灼彬, 高屹. 海水拌养珊瑚骨料混凝土配合比试验研究[J]. 四川建筑, 2016, 36(1)：204-206.
SUN X, WEI Z B, GAO Y. Experimental study on the mixture ratio of coral aggregate concrete mixed with seawater[J]. Sichuan Architecture，2016，36(1)：204-206(in Chinese).

[34] 马林建, 罗棕木, 段力群, 等. 全珊瑚混凝土的脆性评价[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2)：281-288.
MA L J, LUO Z M, DUAN L Q, et al. Brittleness evaluation of coral concrete[J]. Journal of China University of Mining and Technology，2021，50(2)：281-288(in Chinese).

[35] 陈宗平, 梁宇涵. 海水拌合珊瑚砂混凝土轴压性能试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(5)：967-977.
CHEN Z P, LIANG Y H. Experimental study of axial compression performance of seawater mixed coral sand aggregate concrete[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)，2020，45(5)：967-977(in Chinese).

[36] ZHOU W, FENG P, LIN H W. Constitutive relations of coral aggregate concrete under uniaxial and triaxial compression[J]. Construction and Building Materials，2020，251：118957.

[37] 郑秀梅, 杨国生, 黄杨. 南海海域全珊瑚海水混凝土抗压强度试验研究[J]. 混凝土, 2019(5)：135-137, 141.
ZHENG X M, YANG G S, HUANG Y. Experimental study on compressive strength of full coral marine concrete in the South China Sea[J]. Concrete，2019(5)：135-137, 141(in Chinese).

[38] 郭东, 苏春义, 彭自强, 等. 海水拌和珊瑚礁砂混凝土力学性能及微观结构[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(1)：41-46.
GUO D, SU C Y, PENG Z Q, et al. Mechanical properties and microstructure of concrete prepared with coral reef sand and sea water[J]. Journal of Building Materials，2018，21(1)：41-46(in Chinese).

[39] 许玮滢, 杨树桐, 孙赫, 等. 碱激发矿粉海水珊瑚骨料混凝土力学性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(2)：243-248.
XU W Y, YANG S T, SUN H, et al. Study on the mechanical properties of seawater coral alkali-activated slag concrete[J]. Journal of Xian University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)，2019，51(2)：243-248(in Chinese).

[40] 王建平, 李新平, 郭东, 等. 海水-珊瑚砂混凝土力学性能及微结构演变[J]. 建材世界, 2019, 40(2)：11-15.
WANG J P, LI X P, GUO D, et al. Durability of concrete prepared with coral reef sand and sea-water[J]. The World of Building Materials，2019，40(2)：11-15(in Chinese).

[41] MA L J, LI Z, LIU J G, et al. Mechanical properties of coral concrete subjected to uniaxial dynamic compression[J]. Construction and Building Materials，2019，199：244-255.

[42] 鲁于, 黄一杰, 王海超, 等. 改性海水海砂珊瑚混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2019(4)：150-154.
LU Y, HUANG Y J, WANG H C, et al. Experimental study on the mechanical properties of modified seawater sea sand coral concrete[J]. Concrete，2019(4)：150-154(in Chinese).

[43] HUANG Y J, HE X J, SUN H S, 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.

[44] LIU B, GUO J H, ZHOU J K, et al. The mechanical properties and microstructure of carbon fibers reinforced coral concrete[J]. Construction and Building Materials，2020，249：118771.

[45] 王振波, 刘伟康, 韩宇栋, 等. 实现高强度海水珊瑚骨料混凝土

的配合比设计[J]. 工业建筑, 2021, 51(6): 181-185.
WANG Z B, LIU W K, HAN Y D, et al. To wards high strength seawater coral aggregate concrete through mix proportion design[J]. Industrial Construction, 2021, 51(6): 181-185.

[46] WANG J. Axial compressive behavior of seawater coral aggregate concrete-filled FRP tubes[J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 272-285.

[47] 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]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119111.

[48] LIU B, ZHOU Z K, WEN X Y, et al. Mechanical properties and constitutive model of carbon fiber reinforced coral concrete under uniaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: 120649.

[49] DA B, YU H F, MA H Y, et al. Experimental research on whole stress-strain curves of coral aggregate seawater concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(1): 144-151.

[50] GUO Z H, ZHANG X Q, ZHANG D C, et al. Experiment investigation of the complete stress-strain curve of concrete[J]. Build Structure, 1982, 3(1): 3-14.

[51] 胡乔, 陈小兵, 阳涛, 等. 珊瑚混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 混凝土, 2017(4): 21-24, 28.
HU Q, CHEN X B, YANG T, et al. Flexural properties of coral concrete beam[J]. Concrete, 2017(4): 21-24, 28(in Chinese).

[52] 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 L, MAO Y D, CHEN S, et al. The experimental research on bond performance between GFRP bars and the coral concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 286-292(in Chinese).

[53] 陈爽.湿热海洋环境下FRP筋-珊瑚混凝土粘结滑移性能研究[D]. 桂林: 广西大学, 2019.
CHEN S. Study on bond property between FRP bars and coral concrete under marine environment[D]. Guilin: Guangxi University, 2019(in Chinese).

[54] 李晓禹.海砂珊瑚混凝土配合比设计与粘结滑移性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
LI X Y. Mix design and bond-slip performance of sea sand coral concrete[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020(in Chinese).

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

[56] ACHILLIDES Z, PILAKOUTAS K. Bond behavior of FRP bars under direct pullout conditions[J]. Journal of Composites for Construction, 2004(8): 173-181.

[57] DA B, YU H F, MA H Y, et al. Chloride diffusion study of coral concrete in a marine environment[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 47-58.

[58] 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]. Construction and Building Materials, 2018, 165: 647-654.

[59] 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]. Applied Clay Science, 2017, 141: 111-117.

[60] CHENG S K, SHUI Z H, SUN T, et al. Durability and microstructure of coral sand concrete incorporating supplementary cementitious materials[J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 44-53.

[61] HUANG D G, NIU D T, SU L, et al. Chloride diffusion behavior of coral aggregate concrete under drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials, 2021, 270: 121485.

[62] WANG L, SHEN N, ZHANG M M, et al. Bond performance of Steel-CFRP bar reinforced coral concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2020, 245: 118456.

[63] YANG S T, YANG C, HUANG M L, et al. Study on bond performance between FRP bars and seawater coral aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 272-288.

[64] 王磊, 李威, 陈爽. 海水浸泡对FRP筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3458-3465.
WANG L, LI W, CHEN S. Effects of seawater soaking on the bonding properties of FRP bars-coral concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3458-3465(in Chinese).

[65] 李威. CFRP筋、GFRP筋-珊瑚混凝土在海水浸泡条件下的粘结性能试验研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
LI W. Experimental study on bond behavior between CFRP bars and coral concrete specimens and GFRP bars and coral concrete specimens immersed in seawater[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018(in Chinese).

[66] LI Y, YIN S P, LU Y W, et al. Experimental investigation of the mechanical properties of BFRP bars in coral concrete under high temperature and humidity[J]. Construction and Building Materials, 2020, 259: 120591.

[67] ELIGEHAUSEN R, POPOVEP, BERTERO V V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under general-

ized excitations: Report No. 83[R]. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center (EERC), University of California, 1983: 69-80.

[68] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Bond characteristics and anchorage length of FRP rebars[C]//Advanced Composite Materials in Bridges and Structutrs. Montréal, Québec, Canada: Advanced Composite Materials in Bridges and Structutrs, 1996.

[69] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete[J]. Journal of Composites for Construction，1997，1(2)：40-51.

[70] MALVAR L J. Bond stress-slip characteristics of FRP rebar: Report TR-2013-SHR[R]. Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California, 1994.

[71] 高丹盈, 朱海堂, 谢晶晶. 纤维增强塑料筋混凝土粘结滑移本构模型[J]. 工业建筑, 2003(7)：41-43, 82.
GAO D Y, ZHU H T, XIE J J. The constitutive models for bond slip relation between frp rebars and concrete[J]. Industrial Construction，2003(7)：41-43, 82(in Chinese).

[72] XU W Y, YANG S T, XU C J, et al. Study on fracture properties of alkali-activated slag seawater coral aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials，2019，223：91-105.

[73] 王林, 刘启超. GFRP筋-南海珊瑚砂混凝土受弯力学性能试验研究[J]. 城市建筑, 2020, 17(16)：178-180.
WANG L, LIU Q C. Research on flexural behavior experiment of GFRP bars-coral sand concrete of South China Sea Islands[J]. Urbanism and Architecture，2020，17(16)：178-180(in Chinese).

[74] 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]. Construction and Building Materials，2020，242：117968.

[75] DONG Z Q, WU G, ZHU H, et al. Flexural behavior of seawater sea-sand coral concrete-UHPC composite beams reinforced with BFRP bars[J]. Construction and Building Materials，2020，265：120279.

[76] WANG X, SHI J Z, DING L N, et al. Durability of coral-reef-sand concrete beams reinforced with basalt fiber-reinforced polymer bars in seawater[J]. Advances in Structural Engineering，2021，24(4)：136943322098166.

[77] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars: ACI 440.1R—15[S]. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2015.

[78] 刘霞, 李峰, 佘殷鹏. 玄武岩纤维增强聚合物筋增强珊瑚礁砂混凝土柱轴压试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(10)：2428-2438.
LIU X, LI F, YU D P. Axial compression test of basalt fiber reinforced polymer reinforced coral reef and sand aggregate concrete column[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2020，37(10)：2428-2438(in Chinese).