

珊瑚砂混凝土耐久性及应用技术研究进展

张彭辉, 侯健, 郭为民

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266101)

摘要: 综述了珊瑚砂混凝土的应用研究及进展。对影响珊瑚砂混凝土耐久性的因素进行了分析, 制约其应用的主要因素为高孔隙渗透性导致的内部结构筋腐蚀, 以及珊瑚砂自身强度较低。针对以上两方面, 重点总结了珊瑚砂混凝土用加强筋材料及珊瑚砂改性技术研究进展情况, 最后对珊瑚砂混凝土的发展趋势进行了展望。研究分析结果可为珊瑚砂制备混凝土在远海岛礁建设的应用提供借鉴。

关键词: 珊瑚砂混凝土; 耐久性; 复合材料筋; 改性技术

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.05.003

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)05-0010-04

Research Progress of Coral Concrete Durability and Application Technology

ZHANG Peng-hui, HOU Jian, GUO Wei-min

(State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266101, China)

ABSTRACT: In this paper, application research and progress of coral concrete were interpreted. Factors influencing durability of coral concrete were analyzed. The corrosion of rebar and the lower strength of coral itself were the two main constraints. Referring to mentioned two aspects, the studies of rib materials and coral modification were especially summarized. In the end, the prospect of coral concrete application was illustrated. The research result could provide reference for application of coral concrete to basic constructions on offshore islands.

KEY WORDS: coral concrete; durability; composite rebar; modification technology

南海岛礁高温、高湿、高盐雾, 自然环境恶劣, 建筑用钢筋混凝土材料受自然环境影响, 耐久性问题突出, 严重制约着我国对南海的大规模开发建设。随着我国经济发展的不断提速, 国家对岛礁资源开发的重视程度日趋增加, 岛礁基础设施建设需求愈加迫切。然而南海诸岛距大陆较远, 交通不便, 且施工资源十分有限。在不破坏生态前提下, 因地制宜地以珊瑚砂替代常规骨料制备混凝土, 可减少原材料转运周期、降低支出成本、提高建设效率, 具有较为广阔的应用前景。

1 珊瑚砂混凝土耐久性研究

美国是最早研究和利用珊瑚砂混凝土的国家, 美

国军方土木工程标准《Unified Facilities Criteria-Tropical Engineering》中指出: 在混凝土中常规骨料短缺的情况下, 可使用珊瑚作为骨料制备混凝土^[1]。第二次世界大战期间, 美国在西太平洋的中途岛 (Midway)、夸贾林环礁 (Kwajalein)、埃尼威托克岛 (Eniwetok)、比基尼岛 (Bikini)、庄士敦岛 (Johnston)、醒来岛 (Wake)、塞班岛 (Saipan) 和关岛 (Guam) 等海岛上大量使用珊瑚砂混凝土修建机场、公路和建筑物^[1-4]。针对珊瑚砂混凝土工程耐久性及其影响因素, 国内外学者开展了调研工作, Rick A E^[5]对太平洋比基尼岛上的三座珊瑚混凝土建筑物进行了考察, 指出珊瑚砂混凝土的强度能达到工程结构的需要。当水灰比在 0.55~0.6, 坍落度为 7.62 cm, 粗骨料占 51%~54%,

收稿日期: 2018-03-08; 修订日期: 2018-03-28

作者简介: 张彭辉 (1989—), 男, 山东烟台人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

细骨料占 46%~49% 情况下, 制得的珊瑚砂混凝土 28 天的抗压强度可达到 20.7MPa。由于珊瑚砂混凝土孔隙率较大, 其内部结构钢筋锈蚀比较严重。通常认为, 影响珊瑚砂混凝土耐久性的主要因素是氯离子含量、混凝土保护层厚度和建筑结构正常使用状态下的裂缝宽度^[6]。国内达波等研究人员^[6-7]通过对我国南海岛礁珊瑚砂混凝土结构的现场调研与测试, 指出其主要破坏特征为混凝土保护层胀裂、剥落、垮塌、露筋、钢筋锈蚀等, 而通过提高珊瑚砂混凝土的抗氯离子扩散渗透能力, 加强迎风面混凝土结构的附加防护, 并提高其密实度, 能延长其结构的使用寿命。余强^[8]通过对西沙某岛珊瑚砂混凝土性能调研, 将混凝土结构物面临的问题归纳为: 长期高温下强度的发展, 干湿交替区混凝土表面开裂, 盐的腐蚀, 强紫外线辐射使混凝土表面老化、开裂、强度降低以及台风、海浪的冲刷等。吴文娟^[9]通过对南海现役珊瑚砂混凝土结构物进行调查分析表明, 长期暴露于高温、高湿、盐雾环境中的珊瑚砂混凝土孔隙率明显增大, C—S—H, Ca(OH)₂ 流失严重, Mg(OH)₂ 等无胶结作用的生成物增多, 导致混凝土的质量、强度的损失严重。

力学性能是决定珊瑚砂混凝土耐久性的重要因素, 因此许多研究人员针对珊瑚砂混凝土的力学性能开展了研究。李林等^[10]通过研究指出, 影响珊瑚砂混凝土强度的主要因素是水泥和水的用量, 珊瑚砂的添加比例影响不大。这是由于珊瑚砂骨料主要成分是碳酸钙, 其自身强度较低, 因此珊瑚砂混凝土的强度主要取决于水泥的硬化程度。梁元博等^[11]同样通过试验证明, 在南海热带海岛就地取材, 利用珊瑚砂和碎礁作骨料时, 混凝土 28 天的抗压强度可达 22 MPa 以上, 可以代替碎石、河砂混凝土, 满足岛礁建设的需求。与河砂混凝土相比, 珊瑚砂混凝土的抗压强度虽较低, 但抗折强度、劈裂抗拉强度两者相差不大。此外, 珊瑚砂混凝土的干燥收缩性能、早期抗开裂性能、抗氯离子渗透性以及抗碳化性均要好于河砂混凝土^[12]。Arumugam R A^[13]、王以贵^[14]等研究证实了养护初期珊瑚砂混凝土的强度发展快于普通混凝土。养护 7 天, 珊瑚砂混凝土立方体抗压强度已经基本接近最终的 28 天龄期抗压强度, 而普通混凝土的立方体抗压强度只达到 28 天龄期抗压强度的 80% 左右。赵艳林^[15]利用试验得出了龄期与珊瑚混凝土立方体抗压强度的函数关系。陈兆林^[16]通过研究提出, 当珊瑚混凝土的水灰比在一定范围内, 且坍落度符合要求的情况下, 珊瑚砂混凝土的水灰比与抗压强度呈线性关系, 并且无论采取何种骨料成分, 其强度随水泥的用量增加而增加, 且强度增加的速率低于水泥用量增加的速率。卢博^[17]通过研究指出, 通过提升提高水泥的用量, 减少珊瑚砂混凝土的水灰比, 采用海水和珊瑚颗粒拌制的混凝土强度可满足工程指标, 经济和社会效益相当

的明显。李林^[18]通过对珊瑚砂混凝土的一系列研究同样指出, 尽管在相同水灰比下珊瑚砂混凝土强度低于其他混凝土, 但其早期强度高, 并且在相同应力水平下其弯曲疲劳性能优于大多数其他种类的混凝土。由于岛上台风、海啸等自然灾害频繁, 利用珊瑚砂混凝土早期强度高的特点, 在紧急抢修工程中使用珊瑚砂混凝土, 可大幅提高工程进度, 减少工程造价, 对加快我国南海开发具有深远的意义。

2 珊瑚砂混凝土钢筋/复合材料筋研究

虽然珊瑚砂混凝土强度可以较好地满足岛礁实际工程建设需求, 但由于其孔隙率较大, 外部有害物质易渗入混凝土内部, 采用普通钢筋制作珊瑚砂混凝土极易诱发结构筋锈蚀破坏, 进而影响结构的耐久性。针对珊瑚砂混凝土结构存在的问题, 国内外学者开展了不锈钢钢筋、复合材料筋等特种钢筋的应用研究。冯兴国^[19]通过极化曲线、交流阻抗等方法研究了碳钢、304 不锈钢、2205 双相不锈钢钢筋在普通混凝土和珊瑚砂混凝土中耐蚀性能。结果表明, 珊瑚砂混凝土内碳钢钢筋锈蚀速率约为普通混凝土中的 2 倍, 但珊瑚混凝土中 304 不锈钢钢筋、2205 双相不锈钢钢筋腐蚀速率为普通混凝土中碳钢腐蚀速率的 1/130 左右。不锈钢钢筋在珊瑚砂混凝土中呈完全钝化状态, 采用不锈钢作为加强筋制作珊瑚砂混凝土, 其耐蚀性、耐久性满足远洋岛礁工程要求, 具有重要应用价值。

纤维增强复合材料筋 (FRP) 具有抗疲劳、抗磁性、电绝缘性、耐腐蚀、比重小等优点, 而且 FRP 筋热膨胀系数与混凝土的热膨胀系数接近, 用于混凝土结构中, 代替部分普通钢筋, 可以有效解决由钢筋锈蚀引起的工程失效问题。碳纤维 (CFRP) 筋、玻璃纤维 (GFRP) 筋、芳纶纤维 (AFRP) 筋、玄武岩纤维 (BFRP) 筋等纤维增强复合材料筋应用于珊瑚砂混凝土结构, 其全寿命周期成本较普通钢筋混凝土结构具有优势^[20], 可解决珊瑚砂混凝土在岛礁工程应用中面临的高性能长寿命问题。

研究人员^[21]对比了钢筋珊瑚砂混凝土和 CFRP 筋珊瑚砂混凝土的抗弯性能, 结果显示, CFRP 和珊瑚砂混凝土能可靠地协同工作, CFRP 筋珊瑚砂混凝土梁具有较好的承载能力和变形能力。王磊等^[22]开展了 CFRP 筋与珊瑚混凝土的粘结强度研究, 提出随着 CFRP 筋直径的增加, 珊瑚砂混凝土的粘结强度显著减小。杨超^[23]研究了 BFRP 筋与珊瑚砂混凝土的粘结性能, 通过中心拉拔试验验证了最大平均粘结应力随直径与粘结长度的增加显著减小。金云东^[24]也通过试验证明了 BFRP 筋与珊瑚砂混凝土具有良好的粘结性能, 通过设计合理的参数, 珊瑚砂混凝土与 BFRP 筋

之间的粘结强度可以超过与钢筋的粘结强度。同时BFRP筋珊瑚砂混凝土承载力较高,破坏时具有一定的脆性。李彪^[25]通过抗弯性能试验对比研究指出,由于BFRP筋比CFRP筋具有更高的伸长率,但是极限强度偏低。因此CFRP筋珊瑚砂混凝土梁开裂荷载与极限荷载均高于BFRP筋珊瑚砂混凝土梁,同时挠度偏低。

3 珊瑚砂混凝土改性技术研究

珊瑚砂强度较低的性质决定了若不经特殊处理难以用于C35以上混凝土的配制^[26]。利用纤维或矿物掺杂可有效提升珊瑚砂混凝土的性能,在珊瑚砂混凝土中掺杂聚丙烯纤维、玻璃纤维、碳纤维和剑麻纤维等有助于控制水泥基体微裂缝的产生,减少混凝土内部的应力集中,有效防止裂缝的生成和扩展。同时研究表明,纤维材料的添加能明显降低珊瑚混凝土的脆性,增加韧性,可有效提升珊瑚砂混凝土的抗压、抗拉和抗折性能^[27-30]。为提升珊瑚砂混凝土耐久性,韦灼彬^[31]通过对珊瑚粗骨料采用非饱和预湿处理,并掺杂偏高岭土与粉煤灰的方式,改善珊瑚砂混凝土孔隙状态,效果显著。朱寿永^[32]采用5%偏高岭土、15%矿粉、15%粉煤灰分别以单掺、复掺和三掺形式加入珊瑚砂混凝土中进行改性试验。结果表明,矿物掺合料能优化水泥浆体的水化产物组成与亚微观孔结构,增强浆体与骨料间的结合,通过不同的组合方式加入到珊瑚砂混凝土中,其28天龄期抗压强度提高17.7%~21%,氯离子渗透系数降低66.7%~71.0%,干燥收缩率降低36.7%~57.0%。彭自强^[33]采用24%粉煤灰、70%矿渣和6%碱激发剂组成的无机聚合物对珊瑚砂混凝土进行改性,结果表明,同强度等级时,劈裂抗拉强度可提高62%,抗压强度比增加,静力弹性模量也略有提高。针对珊瑚砂混凝土孔隙率大、骨料强度低、吸水率高的特点,郭瞳^[34]采用聚乙烯醇溶液对珊瑚砂骨料进行强化改性处理,改性后的珊瑚砂表面形成致密的有机质薄膜,使珊瑚砂孔隙率明显降低,同时增加了与水泥的咬合强度。改性后珊瑚砂混凝土7天龄期抗压强度可提升21%,28天龄期抗压强度提升可达16.85%。有研究表明^[35],剑麻纤维可以显著提高珊瑚砂混凝土的抗折强度及劈裂抗拉强度,改善珊瑚砂混凝土的脆性。掺入剑麻纤维的量不同,对珊瑚砂混凝土的抗剪强度和抗压强度的影响也不同。研究表明,提高珊瑚砂混凝土抗剪强度的最佳剑麻纤维掺量为 4.5 kg/m^3 ,提高珊瑚砂混凝土抗压强度的最佳剑麻纤维掺量为 3 kg/m^3 。由于水泥水化后产生的块状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在剑麻纤维的内腔和孔隙内结晶,使得剑麻纤维变脆、疏松,逐渐失去增强的作用,同时导致剑麻纤维与水泥浆体的界面粘结力降低,进

而导致剑麻纤维增强珊瑚砂混凝土的耐久性下降。刘存鹏等^[36]通过试验证明,采用20%~30%的硅灰取代水泥能有效抑制剑麻纤维在珊瑚砂混凝土中的老化。利用珊瑚砂颗粒易胶结的特点,方祥位、欧益希等^[37-39]通过微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术对松散珊瑚砂进行固化,生成与珊瑚砂主要化学成分相同,同时具有较好的微观结构与粘结特性的碳酸钙,该技术有望在岛礁工程岸坡防护、砂质地表加固等领域得到应用。

4 发展趋势

采用珊瑚砂制备混凝土在远海岛礁建设具有较为广泛的应用前景,目前国内外对其研究主要集中在耐久性、加强筋材料、改性技术等方面,随着工程应用的不断深入,研究也将会向着以下几个方面发展:与我国南海海域环境特征结合,开展珊瑚砂混凝土性能退化、损伤机理与预防、修复机制研究;针对珊瑚砂混凝土开展新型加强筋材料,改性、防护等技术研究,同时推动新技术、新成果的工程应用,有效提升珊瑚砂混凝土结构的耐久性;针对南海岛礁现有工程,开展耐久性长期跟踪检测,为今后研究及工程提供可靠依据。

参考文献:

- [1] NUTTER B E. The Use of Coral Aggregate[J]. ACI Journal, 1944(40): 61-65.
- [2] PERRY J R. Coral-A Good Aggregate in Concrete[R]. Engineering News-Record, 1945: 116-122.
- [3] RAMSUSSON I S. Concrete at Advance Bases[J]. ACI Journal, 1944(40): 541-551.
- [4] DUKE C M. Engineering Properties of Coral Reef Material[J]. ASTM Proceedings, 1949(49): 964-976.
- [5] RICK A E. Coral Concrete at Bikini Atoll[J]. Concr In, 1991(1): 19-24.
- [6] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 南海海域珊瑚混凝土结构的耐久性影响因素[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 253-260.
- [7] YU Hong-fa, DA Bo, MA Hai-yan, et al. Durability of Concrete Structures in Tropical Atoll Environment[J]. Ocean Engineering, 2017, 135: 1-10.
- [8] 余强, 姜振春. 浅析西沙某岛海水-珊瑚礁砂混凝土的耐久性问题[J]. 施工技术, 2013, 42(4): 258-260.
- [9] 吴文娟, 汪稔, 朱长歧, 等. 盐雾对珊瑚混凝土构筑物性能影响的调查研究[J]. 建筑材料学报, 2018(2): 1-10.
- [10] 李林, 赵艳林, 吕海波, 等. 珊瑚骨料混凝土力学性能的影响因素研究[J]. 福建建材, 2011(1): 10-11.
- [11] 梁元博, 卢博, 黄韶健. 热带海洋环境与海工混凝土[J]. 海洋技术, 1995(2): 58-66.
- [12] 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.
- [13] ARUMUGAM R A, RAMAMURTHY K. Study of Compressive Strength Characteristics of Coral Aggregate Concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1996, 48(9): 141-148.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 陈兆林, 孙国峰, 唐筱宁. 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.
- [17] 卢博, 梁元博. 海水珊瑚砂混凝土的实验研究 I[J]. 海洋通报, 1993, 12(5): 69-74.
- [18] 李林. 珊瑚混凝土的基本特性研究[D]. 桂林: 广西大学, 2012.
- [19] 冯兴国. 不锈钢钢筋在珊瑚混凝土中的耐蚀性研究[C]// 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 浙江: 浙江大学, 2017.
- [20] 胡乔, 阳涛, 王壮志, 等. FRP 海水珊瑚混凝土与普通钢筋混凝土结构的全寿命周期成本比较[J]. 建筑经济, 2016, 37(1): 61-66.
- [21] 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.
- [22] 王磊, 吴翔, 曾榕, 等. CFRP 筋与珊瑚混凝土的黏结性能试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(7): 127-131.
- [23] 杨超. BFRP 筋与珊瑚混凝土粘结性能试验研究[C]// 第 26 届全国结构工程学术会议论文集. 长沙: 中南大学, 2017.
- [24] 金云东. BFRP 筋-海水海砂混凝土梁短长期力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [25] 李彪, 侯慕轶, 杨勇新, 等. 复材筋珊瑚骨料混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(11): 181-184.
- [26] 李仲欣, 韦灼彬, 沈锦林. 相关向量机在珊瑚混凝土抗压强度预测中的应用[J]. 混凝土, 2016(7): 1-6.
- [27] 陆金驰, 陈焕裕, 林印飞, 等. 玻纤对珊瑚混凝土力学性能及耐久性的影响[J]. 广州化工, 2016, 44(19): 52-54.
- [28] 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.
- [29] 王磊, 邓雪莲, 王国旭. 碳纤维珊瑚混凝土各项力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2014(8): 88-91.
- [30] 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.
- [31] 韦灼彬, 李仲欣. 珊瑚混凝土孔隙参数与氯离子扩散系数的关系[J]. 后勤工程学院学报, 2017, 33(3): 1-8.
- [32] 朱寿永, 水中和, 余睿, 等. 多元矿物掺合料对珊瑚砂混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(12): 3951-3957.
- [33] 彭自强, 彭胜, 李达, 等. 无机聚合物珊瑚礁砂混凝土基本力学性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(11): 92-96.
- [34] 郭瞳, 欧忠文, 唐军务, 等. PVA 改性水泥基珊瑚骨料试验研究[J]. 当代化工, 2017, 46(11): 2213-2218.
- [35] 邓雪莲, 黄盛, 刘存鹏. 剑麻纤维增强珊瑚混凝土抗压和抗剪强度试验研究[J]. 安徽建筑, 2017, 24(2): 197-199.
- [36] 刘存鹏, 邓雪莲, 滢顺, 等. 硅灰对剑麻纤维珊瑚混凝土的影响[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(3): 1-3.
- [37] 方祥位, 申春妮, 楚剑. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2773-2779.
- [38] 欧益希, 方祥位, 申春妮. 颗粒粒径对微生物固化珊瑚砂的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2): 35-39.
- [39] 欧益希, 方祥位, 张楠. 溶液盐度对微生物固化珊瑚砂的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(1): 78-82.