

# 珊瑚混凝土力学性能研究综述

李豪, 张程翔, 仝瑶, 袁冰涛, 李铭, 侯雯丽

西京学院, 土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年5月4日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

为降低建设成本和缩短工期, 珊瑚礁、砂作为岛内固有资源被逐渐推广应用。珊瑚礁、砂为海洋珊瑚群体新陈代谢和繁衍生息过程中逐渐形成的石化体, 其疏松多孔的特性会影响到建设工程的安全性及耐久性。本文从珊瑚混凝土骨料的物理特性、强度影响因素及其改性措施等方面进行了概述, 总结了其动态力学性能及耐久性等方面的成果, 最后针对珊瑚混凝土的研究前景展开了讨论。

## 关键词

珊瑚混凝土, 耐久性, 强度影响因素, 动态力学性能

# Research Review on Mechanical Properties of Coral Concrete

Hao Li, Chengxiang Zhang, Yao Tong, Bingtao Yuan, Ming Li, Wenli Hou

College of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: May 4<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

In order to reduce the construction cost and shorten the construction period, coral reefs and sand are gradually popularized and applied as the inherent resources of the island. Coral reefs and sand are petrified bodies formed in the process of Marine coral population metabolism and reproduction, and their porous characteristics will affect the safety and durability of construction projects. This paper summarizes the physical characteristics, strength influencing factors and modification measures of coral concrete aggregate, summarizes the results of its dynamic mechanical properties and durability, and finally discusses the research prospects of coral concrete.

## Keywords

Coral Concrete, Durability, Strength Influencing Factors, Dynamic Mechanical Properties

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

对于近海岛礁建设而言,海上运输砂石等骨料不仅耗时长且影响施工进度,极大地增加了工程成本,宜就地取材,从珊瑚礁中获取粗、细骨料用作原料,这在很大程度上缓解了海洋工程建设骨料短缺的问题。早在 20 世纪 50 年代初, Arumugam 等[1]便对珊瑚混凝土的配合比、腐蚀性等进行了研究,后多名研究学者[2]也证明了珊瑚混凝土应用在工程上的可行性。在英国的威尔士和英格兰等地区,珊瑚礁作为骨料被广泛应用于各项工程中,并且形成了一个专业的产业联盟——BMAPA,据不完全统计,珊瑚礁骨料在这些地方的使用率达到了 18% 以上。日本学者 Yodsudiai 等[2]指出:位于环太平洋的许多建筑使用了各种类型的混凝土骨料,其中包括珊瑚骨料,然而人们对珊瑚混凝土强度与耐久性的研究还是少之又少。

本文从珊瑚混凝土骨料的物理特性、强度影响因素及改性措施、动态力学性能、耐久性等几个方面对近几年关于珊瑚混凝土的文献资料进行汇总分析,旨在为珊瑚混凝土的后续研究提供借鉴与参考。

## 2. 珊瑚骨料物理特性

珊瑚混凝土目前并无明确定义,一般是指利用珊瑚、珊瑚砂作为集料,与水泥、海水以一定配合比例搅拌制成的复合型建筑材料。珊瑚聚集体是一种以文石和高镁方解石为主的碳酸盐矿物,主要化学成分为碳酸钙,受种类、地区等的影响,其物理特性会有部分差异[3]。与普通集料相比,珊瑚集料具有表面粗糙、空隙度高、吸水率大等特点[4],其形状多样,主要以鹿角状、杆状、块状为主,其内部孔隙结构复杂,可分为蚁巢结构、孔隙簇结构和核壳结构[5]。珊瑚粗骨料内部孔隙率高、密度小,按照骨料的分类标准划分,属于轻骨料范畴。本文根据《轻骨料混凝土技术规程》(JGJ 51-2002) [6]对珊瑚粗骨料常用物理性能参数进行归纳,结果如表 1 所示。

Table 1. Common physical properties of coral aggregates

表1. 珊瑚骨料常用物理性能

物理特性	表观密度	堆积密度	筒压强度	孔隙率	含水率	1 h吸水率	含泥量
单位	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	MPa	%	%	%	%

## 3. 珊瑚混凝土的强度影响因素及改性研究

### 3.1. 珊瑚混凝土的强度影响因素分析

珊瑚混凝土内部独特的“吸水-释水”的“微泵”效应使其具有早强特性,即 7 d 抗压强度能达到 28 d 的 80%,而后期增长较缓慢[7]。正交实验表明,对珊瑚混凝土强度影响最大的因素为水泥用量、水灰比,其整体强度取决于混凝土砂浆强度、骨料强度及砂浆基体与骨料界面区黏结的强度[8]。骨料在混

凝土中起着骨架及抵御破坏变形等作用,其种类、粒径和级配对混凝土的强度影响较大。就种类而言,抗压强度更高的鹿角状珊瑚骨料与另外两种珊瑚礁骨料相比,在同一水灰比下的珊瑚混凝土的28 d立方体抗压强度提高了20%~30% [9]。研究表明,骨料能限制混凝土裂纹的扩展,珊瑚混凝土的抗压、抗折强度在一定范围内会随着骨料粒径的增大而增大,且低水灰比下的抗压、抗折强度对骨料粒径更敏感;抗压强度的最大值取决于珊瑚混凝土的水灰比和骨料强度[10]。此外,在使用连续级配粗骨料时加入适当珊瑚砂能显著提高珊瑚混凝土的强度;对于珊瑚砂混凝土而言,珊瑚砂级配区间越广,内部颗粒堆积越紧密,孔隙率也越小[11]。水泥在混凝土中起胶结作用,珊瑚混凝土的强度等级受水泥种类及用量的影响最大。珊瑚骨料孔隙多、比表面积大,为更好地包裹住骨料,水泥用量也较普通混凝土多,而当水泥过量时,珊瑚混凝土受限于本身珊瑚骨料的筒压强度,抗压强度无明显提高[12]。抗硫酸盐水泥较普通硅酸盐水泥能使珊瑚混凝土的抗压强度提高10%,而高强、高韧性的碱式硫酸镁水泥在养护后期较前期能迅速提高珊瑚混凝土的强度[13]。水灰比是影响混凝土抗压强度的最主要因素之一。珊瑚混凝土与普通混凝土规律相似,即水灰比与抗压强度成反比,但当水灰比在0.4以下时,珊瑚混凝土抗压强度的提高幅度远低于普通混凝土;且低于0.3时,珊瑚混凝土内部部分水泥颗粒未水化完全,滞留在水泥浆体内部,减弱了水泥浆体的黏结性,还会使抗压强度不升反降[14]。近几年,袁征团队[15]基于富浆理论,成功制出了净水灰比为0.25、抗压强度为74.6 MPa的高强珊瑚混凝土。

### 3.2. 提升珊瑚混凝土强度的改性研究

珊瑚骨料的特殊性致使珊瑚混凝土的强度普遍较低,针对这一问题,研究学者们提出了多种改性措施。

1) 珊瑚骨料特性改良。董朋杰等[16]发现,如果珊瑚骨料的强度低于混凝土砂浆强度,那么骨料强度对混凝土强度的影响较大:如果珊瑚骨料的强度高于混凝土砂浆强度,那么混凝土的强度将不受骨料强度的影响。美国学者 Ehlert [17]亲自登陆太平洋比基尼岛并且详细考察了3座以珊瑚混凝土建造而成的建筑物,他指出珊瑚混凝土的抗压强度能满足结构使用标准,并且得出了混凝土保护层厚度、盐雾,以及结构表面的裂缝是影响珊瑚混凝土耐久性的主要因素的结论。同时,他还确定了以下配合比,水灰比在0.55~0.6左右,坍落度3英寸,粗骨料比重在51%~54%之间,细骨料比重在46%~49%之间,28天的抗压强度可达到20.7 MPa。王以贵[18]对珊瑚混凝土在港工构筑物中的应用进行了可行性研究,指出:当地珊瑚作为混凝土的粗细骨料,可在防坡堤、防沙堤、挡墙、护岸等混凝土结构中使用,这既能降低造价,同时也能缩短工期。珊瑚混凝土相较于普通混凝土,其早期强度发展快,7 d即可超过设计强度,但其后期强度发展缓慢。同种水灰比不同的珊瑚混凝土材料,其相同龄期下的强度亦有差别。珊瑚生长在海洋环境中,其表面附着了一定的微生物及矿物质,这些杂质使得骨料与水泥浆体的界面黏结减弱,降低了混凝土的强度。可选用弱酸性溶液对珊瑚骨料表面进行预处理,如乙酸、柠檬酸等,制成的珊瑚混凝土抗弯强度可提高22.5%,但可能会残留许多酸根离子,对其耐久性能产生不利的影响。另一种方法是利用化学溶液浸渍,如聚乙烯醇溶液、水玻璃溶液、硅烷偶联剂,使珊瑚骨料表面形成一层黏性的有机薄膜,一方面使骨料与砂浆黏结更紧密;另一方面,薄膜与胶凝材料再次发生水化反应,析出生成物用以填充内部孔隙,提高混凝土的密实度,进而使强度增大[19]。卢博等[20]在《海水-珊瑚砂屑混凝土的研究与实践》一文中指出:当常规混凝土原材料匮乏的前提下,用海水和珊瑚礁配制的混凝土可满足实际工程需求,但是需要减小水灰比,提高水泥强度及用量。同时,他们还指出:用抗硫酸盐水泥制作的海水-珊瑚砂混凝土构件,其内部水泥结晶矿物的生成形成多面体结晶结构,此结构主要由CSCS、CA、CAF构成,排列致密,能很好地抵御外来水分的侵蚀,所以,用抗硫酸盐的水泥制作试件的指标最好,硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥试件次之,而火山灰制作的试件较差。章艳[21]研究了高强全珊瑚海水混凝土的制备工艺、基本力学性能、准静态力学性能、动态力学性能及其本构方程,通过测得的动静态

应力 - 应变曲线, 并且以弹性模量峰值应变、韧性指标分析了剑麻纤维与碱式硫酸镁水泥的增强增韧效果, 从动态压缩应力 - 应变曲线的弹性模量、峰值应力、峰值应变等方面研究了动态应变率效应, 并根据过镇海教授的模型得到了单轴荷载作用下的全珊瑚海水混凝土本构方程。余强[22]在《珊瑚礁砂海水混凝土的配合比设计与抗压强度规律》一文中指出: 相同水灰比与养护条件下, 珊瑚礁砂海水混凝土早期抗压强度增长速度大于普通混凝土, 当龄期超过 28 d 后, 其抗压强度增长速度慢于普通混凝土, 主要是由于珊瑚骨料的强度低于普通石子强度。珊瑚礁砂海水混凝土抗压强度随  $B/W$  的增大而增大, 两者之间呈现出线性关系。

2) 掺入矿物掺合料。矿物掺合料的火山灰效应和微粒填充效应可降低骨料与水泥基体间的结构孔隙率, 增强两者之间的黏结性, 进而提高珊瑚混凝土整体强度。已有研究表明, 掺加适量的高活性矿物掺合料, 如粉煤灰、硅灰、矿渣粉等, 可提高珊瑚混凝土的力学性能, 其改善效果取决于矿物掺合料的火山灰活性。除此之外, 也有学者使用钙基膨润土和石灰石粉这两种环保材料取代部分水泥, 发现珊瑚混凝土的抗压强度与劈裂抗拉强度均提高了 30% 以上。另有研究显示, 利用高炉矿渣浆体和水玻璃溶液对珊瑚混凝土进行复合改性的效果较单一处理更好, 能迅速提高骨料的密度和承载能力, 将抗压强度提高了 26%。王振军[23]研究了粉煤灰与硅灰对大流动性轻混凝土拌合物性能的影响, 结果表明: 外掺水泥总量 30% 的粉煤灰能显著提高混凝土的流动性, 同时也能降低混凝土的坍落度与扩展度; 硅灰的掺入能提高混凝土的黏性, 使得混凝土不离析分层, 轻骨料不上浮, 但掺入过多的硅灰会导致混凝土黏性过大, 反而降低了拌合物的流动性, 最佳硅灰掺量为水泥总量的 2%。李建权等[24]利用扫描电镜、能谱仪和压汞仪研究了掺入 10% 硅灰的普通硅酸盐水泥砂浆的微观结构, 结果发现: 硅灰的掺入使得砂浆内部早期水化产物以 III 型 C-S-H 凝胶的形式存在, 后期是以 III 型和 I 型 C-S-H 凝胶并存的形式存在。浆体硬化后期, 由于浆体内部自由空间极小, 因此导致硅灰与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成的产物主要是沿着孔隙生长, 而非集中在界面区域, 这在很大程度上堵塞了浆体内部的毛细结构, 降低了孔隙率, 提高了试件硬化后期的强度。丁雁飞等[25]在《硅粉混凝土抗冻性研究》一文中指出: 当胶凝材料总量与混凝土坍落度不变, 硅粉掺量在 10%~30% 之间时, 非引气硅粉混凝土的抗冻性能优于对照组混凝土; 硅粉的掺入减少了水泥浆体结构中 0.1 mm 以上的孔, 而小于 100 A 的凝胶孔显著增加, 这使得浆体结构更加致密。

3) 掺入纤维。掺入纤维可有效提高混凝土强度, 是因为纤维在混凝土中起“桥接作用”, 阻止内部微裂缝的延伸, 可达到增强、阻裂和增韧的效果[26]。目前大多数学者研究纤维对珊瑚混凝土的影响时, 设计抗压强度等级基本在 C50 以下, 并且由于纤维种类和特性不同, 导致对珊瑚混凝土力学性能影响差异很大。牛荻涛等[27]研究了玄武岩 - 聚丙烯纤维混杂纤维混杂混凝土的气孔结构含量及表面分析特征, 发现这两种纤维的加入均会增加混凝土内部的气孔含量, 但与素混凝土相比, 混合两种纤维后, 混凝土内部超大气孔的占比最多降低了 17.39%; 另一方面, 纤维的掺入主要对大气孔及超大气孔结构的气孔面分形维数产生影响, 其中混杂纤维总量为 0.2% 时, 对混凝土内超大气孔结构的气孔面分形维数的减小作用最明显。范涛等[28]实验结果表明, 混杂纤维能有效提高混凝土的抗压强度: 其作用效果受强度等级影响较大, 在低强度等级下的增强效果比高强度等级好, 最高可使混凝土抗压强度增大 9.18%; 玄武岩纤维对抗压强度的影响大于聚丙烯纤维, 且混杂纤维的总体积分数不应超过 0.15%。另外, 混掺纤维较单掺能更有效地提高混凝土的力学性能。吕玺宸等[29]研究发现, 玄武岩纤维的长度和掺量对混凝土有显著的耦合作用, 单独研究长径比时, 其立方体抗压强度随长径比的增加先升后降, 综合考虑长径比与掺量的时候, 发现当长径比为 1200~1600、掺量为 0.1% 时, 抗压强度最高达到 49.5 MPa; 就劈裂抗拉强度而言, 要想获得较优良的效果, 长径比宜在 1200~1600 之间, 掺量不超过 0.15%。张悦[30]研究表明, 不同龄期下, 未掺纤维混凝土的抗压强度均低于聚丙烯纤维混凝土, 当纤维掺量为  $0.9 \text{ kg/m}^3$  时, 抗压强度、劈拉强度均为最大值。童伟光等[31]发现, 网状聚丙烯纤维较单丝纤维对抗压及劈裂抗拉强度的提高作用

更大,且明显短纤维优于长纤维最佳掺量在 0.1%。Li 等[32]发现,在相同加载条件下,聚丙烯纤维掺量越大,混凝土的弹性模量和峰值应变也越大,掺量为 0.2%时,其峰值应力值最大;聚丙烯纤维掺量相同时,混凝土的弹性模量随着加载应变率的增加而逐渐增大,峰值应变呈现离散变化规律,聚丙烯纤维的阻裂效果主要作用于细微裂纹扩展的阶段,而在宏观裂纹扩展阶段,其桥接作用得到了充分发挥,此外,在混凝土发生破坏的断面上清晰可见聚丙烯纤维被拉长或者拉断。李兵等[33]研究了 6 组温度下聚丙烯纤维混凝土的单轴压缩力学性能,发现常温下,聚丙烯纤维在长度为 3 mm、掺量为  $1.0 \text{ kg/m}^3$  时,抗压强度最大;而随着温度的升高,聚丙烯纤维自身的高温气化对混凝土的抗压强度、泊松比等均有一定影响,当聚丙烯纤维掺量为  $0.5 \text{ kg/m}^3$ 、长度为 9 mm 时,聚丙烯纤维混凝土整体性能达到最优。

目前,珊瑚混凝土领域对这方面研究不多,混掺入碳纤维、玄武岩纤维和塑钢纤维可使珊瑚混凝土的抗压强度提升 11.2%,劈裂抗拉强度提高 25.5%。未来针对纤维珊瑚混凝土内部纤维混杂效应及其作用机理还需进行更深入的研究,以待有效提高珊瑚混凝土的力学性能。

综合分析以上珊瑚混凝土强度的影响因素及改性措施, Powers [34]通过对胶凝材料总用量、珊瑚粗骨料粒径等关键参数进行综合考虑,使珊瑚混凝土的抗压强度提升至 58 MPa。楚英杰[35]选取碱式硫酸镁水泥作为凝胶材料,利用柠檬酸浸泡水泥及珊瑚骨料所制成的珊瑚混凝土抗压强度提高了 30%,达到了 64.8 MPa。基于填料堆积密度理论,利用正交实验得出水泥用量、水灰比、硅灰的最佳掺量,测得珊瑚混凝土 28 d 抗压、抗弯强度分别高达 116.76 MPa 和 18.24 MPa。

#### 4. 珊瑚混凝土的动态力学特性

珊瑚混凝土与普通混凝土的动态力学性能相似,均对应变率十分敏感,动态抗压强度、动弹性模量和能量吸收等均随着应变速率的增加而增加[36]。同时,研究发现,相同应变率下, C30~C70 的珊瑚混凝土的动态抗压强度随混凝土强度的增大而增大,这可能与珊瑚及混凝土内部的孔隙率有关;另外,利用 LS-DYNA 模拟了珊瑚混凝土的动态应力 - 应变曲线(见图 1),结果与实验值拟合良好。另有研究指出,与普通岩石相比,孔隙率较大的礁灰岩,其动态抗压强度对应变率具有更强的敏感性[37]。可见,孔隙率对珊瑚混凝土的动态力学性能具有一定的影响,但目前缺乏微观角度的研究,其作用机理还有待挖掘。

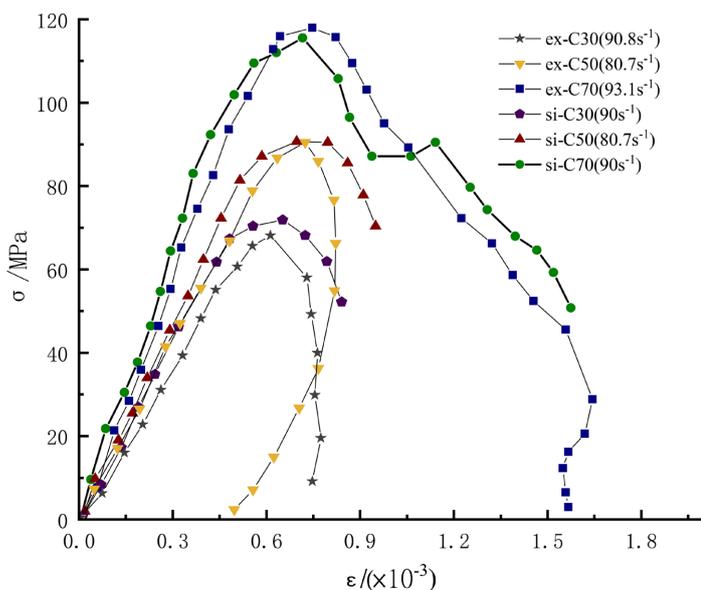


Figure 1. Comparison of experimental and simulated stress-strain curve of CAC at different strain rates  
图 1. 不同应变速率下 CAC 的实验与模拟应力 - 应变曲线比较

除此之外,纤维也可改善珊瑚混凝土的动态力学性能,对剑麻/聚丙烯纤维增强珊瑚混凝土做了动态冲击压缩实验,发现纤维能很好地提高珊瑚混凝土的延性,减缓冲击裂缝的形成与发展,进而提高珊瑚混凝土的抗冲击性能。珊瑚混凝土由于使用环境常处于潮湿、盐雾等状态下,自由水的存在会对水泥基材料的毛细张力等造成显著影响,进而影响珊瑚混凝土的动态力学性能。在高应变率下,含水饱和度越高,珊瑚混凝土的动态抗压强度越大,这说明自由水的存在改善了珊瑚混凝土的动态抗压强度的应变率效应;自由水极大地促进了混凝土内部裂纹的发展,增加了珊瑚混凝土的临界应变和韧性;但相同应变率下,当含水饱和度超过 0.5 时,其应变率效应并不显著。

## 5. 耐久性

珊瑚混凝土在内部珊瑚骨料本身所携带的氯盐、硫酸盐、镁盐与外部大气、海水冲刷及潮湿环境的多重作用下会产生保护层胀裂、剥落、垮塌、钢筋锈蚀等现象[38],这大大缩减了珊瑚混凝土的使用寿命,因此有必要对其耐久性进行研究。在天然砂石混凝土中,骨料会成为阻挡水和盐离子传输的结构,最优的传输通道是骨料与水泥砂浆的界面过渡区,而珊瑚骨料的孔隙会成为水分和盐离子传输的通道,水分与盐离子首先通过骨料孔隙迅速向内部传输,再从界面过渡区向水泥基侵蚀,珊瑚本身对盐离子的抗性较高,但是,水泥相较于普通混凝土则会更容易受到侵蚀[39]。珊瑚骨料力学特性差于普通砂石,骨料抵抗水泥浆体水化收缩变形的能力也较差,但研究表明,珊瑚混凝土的早期收缩率低于普通混凝土[40],可能是由于骨料中残留  $\text{SO}_2^-$  离子与水泥反应生成钙矾石,矾石具有膨胀的特性,起到了抵抗收缩的作用。骨料的吸水返水特性有利于减少短期徐变,但长期徐变还是大于普通混凝土,并且与水灰比成正比[41]。早期实际工程采用堆积法或淡水冲洗法,以降低材料中的含盐量。珊瑚混凝土柱侧向刚度和延性差于普通钢筋混凝土柱,在轴心受压和偏心受压下,破坏特征与普通混凝土柱相似[42],珊瑚混凝土脆性较大,在 CFRP 筋珊瑚混凝土梁挠度曲线在初裂后呈双线性特征,有良好的形变恢复能力,且随配筋率的升高而增强[43],配筋率升高也能有效控制珊瑚混凝土梁最大裂缝宽度[44]。达波等[45]试验研究表明,混凝土强度等级提高,可以增大开裂弯矩与极限弯矩的比值,从而有效控制珊瑚混凝土梁裂缝发展,建议珊瑚混凝土强度应在 C60 以上。CFRP 筋珊瑚混凝土柱偏心受压时,主要呈脆性破坏,极限应力对偏心距变化十分敏感,随着偏心距与柱长高比的增大而减小[46],可能是由于珊瑚骨料孔隙率较高,真实受力面积小,局部应力较大。研究表明,在混凝土中掺入纤维能有效提高珊瑚混凝土的抗冲击性能[47]且水灰比增大能使得纤维均匀分布,有效提高混凝土延性[48]。

### 5.1. 离子侵蚀

由于珊瑚混凝土的孔隙率比普通混凝土高,所以前者更容易遭受氯离子等的侵蚀,其中珊瑚混凝土内部氯离子浓度分布(Cf)、表面氯离子浓度(Cs)、氯离子扩散系数(Da)受抗压强度等级、暴露时间、粉煤灰掺量、环境条件等因素的影响较大。在干湿循环与浸泡两种环境中,Cf 值均随着暴露时间的增加而增大,与扩散深度成反比;其 Cs、Da 与暴露时间呈幂函数关系;干湿循环下氯离子的扩散方式以毛细管吸附为主,而浸泡环境下则为简单扩散,因此干湿循环对珊瑚混凝土的侵蚀作用更强。另一方面,随着抗压强度等级的提升,珊瑚混凝土中的孔隙度及孔隙之间的连通性降低,密实度逐渐提高,有效阻止了氯离子的扩散,Cs 和 Da 的值也降低[49]。此外,Cs 和 Da 随着粉煤灰含量的增加呈现先降低后升高的趋势,过多的粉煤灰含量会造成珊瑚混凝土水化程度不足,从而造成内部孔隙度增加,氯离子扩散加剧;纤维同样能提高珊瑚混凝土的耐久性,但是纤维在混凝土内部分布不均会造成孔隙率增加;另外,纤维与基体之间黏结的薄弱环节也为氯离子迁移提供了迁移途径[50]。目前,研究氯离子在珊瑚混凝土中的迁移性能主要以实验为主,而数值模拟的方法使用较少。有学者[51]建立了反应性输运模型来模拟氯离子在

饱和珊瑚混凝土中的侵入行为,发现氯离子在内部存在两种结合方式,一是 C-S-H 凝胶对氯离子进行物理吸附,二是与水化产物生成 Kuzel's 盐,这两种方式能有效阻碍氯离子侵入,而 pH 降低不利于氯的化学结合,且该模型忽略了混凝土老化以及 Da 随时间、空间的变化情况,在未来对氯离子的迁移模型进行模拟时,需着重考虑 Da 的时变性对其进行更深层次的研究。此外,由于珊瑚混凝土水化反应生成的 C-S-H 凝胶能通过填补混凝土内部孔隙提高密实度,而低温硫酸根离子、镁盐通过消耗 C-S-H 凝胶与其发生反应,生成一些无强度的泥砂混合物,会降低珊瑚混凝土的强度,甚至出现保护层胀裂、剥落等现象。

## 5.2. 碳化作用

碳化是指由于空气中的二氧化碳等酸性气体与混凝土内水化产生的碱性物质发生反应,致使混凝土内的结构发生改变的现象,碳化会影响混凝土与侵蚀离子的化学结合能力,破坏混凝土的耐久性[52]。珊瑚混凝土的碳化深度与其所处环境有关,如海南某岛礁的灯塔的潮汐区、浪溅区和大气区 25 年后的珊瑚混凝土碳化深度分别为 25 mm、10 mm 和 8 mm。此外,水灰比、粉煤灰掺量及水泥用量也会对珊瑚混凝土的碳化深度造成影响,为了达到良好的抗碳化能力,水灰比宜控制在 0.46 以内,粉煤灰掺量需低于 15%,而水泥用量不宜低于 400 kg/m<sup>3</sup> [53]。

## 6. 结论与展望

综上,近年来许多学者对珊瑚混凝土开展了一系列研究,得到的主要结论如下:

1) 珊瑚骨料质轻、孔隙率高、吸水率大,因此珊瑚混凝土是一种轻骨料混凝土;与普通混凝土相比,其骨料的特殊性致使强度受水泥用量、水灰比影响更大;利用弱酸溶液及有机溶液对珊瑚骨料表面进行处理、掺入纤维、矿物掺合料能有效提高珊瑚混凝土的强度。

2) 珊瑚混凝土的动态性能较普通混凝土更优越,对应变率的敏感度更高,纤维、含水饱和度均能提高珊瑚混凝土的韧性,增强抗冲击性能。

3) 珊瑚混凝土耐久性较差,影响因素多,目前掺入粉煤灰是能综合改善耐久性能的主要途径。

珊瑚混凝土发展还处在方兴未艾之时,为不断推进其在实际工程中的应用,可从以下方向对珊瑚混凝土展开后续研究:

1) 目前针对珊瑚骨料形状特征的研究较少,可从宏观、微观两方面研究其作用机理,建立适用于珊瑚混凝土的骨料细观三维模型,用以更好地研究骨料形状对珊瑚混凝土整体性能的影响。

2) 通过对纤维进行改性,如将纤维纳米化或是使用化学剂进行处理,以提高纤维与基体之间的黏结性,减少团聚;另外,还应研究珊瑚混凝土的复合改性措施。

3) 目前主要研究的是单轴应力下的珊瑚混凝土的力学性能,对其复杂应力状态下的力学特性及本构关系,以及数值模拟等有待钻研。

4) 珊瑚混凝土使用环境复杂多样,并且常伴有高温、潮湿,研究高温环境下珊瑚混凝土的力学性能及耐久性具有重要的意义。

## 参考文献

- [1] Arumugam, A. and Amamurthyk, R. (1996) Study of Compressive Strength Characteristics of Coral Aggregate Concrete. *Magazine of Concrete Research*, **48**, 141-148. <https://doi.org/10.1680/mac.1996.48.176.141>
- [2] Yodsudjai, W., Otsuki, N., Nishida, T. and Yamane, H. (2003) Study on Strength and Durability of Concrete Using Low-quality Coarse Aggregate from Circum-Pacific Region. *Fourth Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering (RSID4)*, Bangkok, April 2003, 103-114. [https://doi.org/10.2208/jscej.2003.746\\_103](https://doi.org/10.2208/jscej.2003.746_103)
- [3] 陈天月, 曲劫萌, 陈兆林. 珊瑚礁砂混凝土的应用可行性研究[J]. *海洋工程*, 1991(3): 67-80.
- [4] Zhang, B., Zhu, H. and Lu, F. (2021) Fracture Properties of Slag-Based Alkali-Activated Seawater Coral Aggregate Con-

- crete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **115**, Article ID: 103071. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103071>
- [5] Wang, J., Feng, P., Hao, T.Y. and Yue, Q.R. (2017) Axial Compressive Behavior of Seawater Coral Aggregate Concrete-Filled FRP Tubes. *Construction and Building Materials*, **147**, 272-285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.169>
- [6] 中华人民共和国建设部. JGJ 51-2002 轻骨料混凝土技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [7] 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.
- [8] Zhang, L., Niu, D.T., Wen, B., et al. (2020) Corrosion Behavior of Low Alloy Steel Bars Containing Cr and Al in Coral Concrete for Ocean Construction. *Construction and Building Materials*, **258**, Article ID: 119564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119564>
- [9] 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(z1): 221-225.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部标准定额研究所. JG/T 568-2019 高性能混凝土用骨料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [11] 余大鹏, 易金, 宋兆萍. 骨料粒径对珊瑚混凝土力学性能影响[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(4): 1-6.
- [12] 达波. 高强全珊瑚海水混凝土的制备技术, 耐久性及其构件力学性能研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [13] 王家滨, 牛荻涛, 张永利. 喷射混凝土力学性能渗透性及耐久性试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 96-109.
- [14] Wu, Z.Y., Zhang, J.H., Yu, H.F., et al. (2021) Experimental and Mesoscopic Investigation on the Dynamic Properties of Coral Aggregate Concrete in Compression. *Science China Technological Sciences*, **64**, 1153-1166. <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1739-y>
- [15] 袁征. 高强珊瑚混凝土配合比工艺与抗压特性研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [16] 董朋杰, 尹世平, 胡长顺. 全珊瑚骨料海水混凝土早期强度发展研究[J]. 混凝土, 2023(7): 86-90.
- [17] Ehlert, R.A. (1991) Coral Concrete at Bikini Atoll. *ACI Concrete International*, **13**, 19-24.
- [18] 王以贵. 珊瑚混凝土在港口工程中的应用的可行性[J]. 海军工程技术, 1991(27): 46-48.
- [19] 张川. 混凝土结构设计原理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2015.
- [20] 卢博, 李起光, 黄韶健. 海水-珊瑚砂屑混凝土的研究与实践[J]. 广东建材, 1997(4): 8-10.
- [21] 章艳. 全珊瑚海水混凝土的静动态力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [22] 余强. 珊瑚礁砂海水混凝土的配合比设计与抗压强度规律[J]. 混凝土, 2017(2): 155-157, 160.
- [23] 王振军. 矿物掺合料对大流动性轻混凝土拌和物性能的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(2): 39-41, 46.
- [24] 李建权, 许红升, 谢红波, 等. 硅灰改性水泥/石灰砂浆微观结构的研究[J]. 硅酸盐通报, 2006, 25(4): 66-70.
- [25] 丁雁飞, 孙景进. 硅粉混凝土抗冻性研究[J]. 混凝土, 1991(3): 41-45.
- [26] 姚如胜. GFRP 筋及防腐钢筋海洋混凝土构件力学性能试验研究与分析[D]: [博士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [27] 牛荻涛, 蓝林华. 珊瑚混凝土性能研究现状及前景[J]. 广东建材, 2023, 39(4): 16-17, 50.
- [28] 范涛, 杨虹, 高涌涛, 等. 混凝土结构设计[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2017.
- [29] 吕玺宸, 薛庚博, 钟旭彤. 玄武岩纤维长径比对混凝土力学性能的影响[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2021, 20(1): 67-72.
- [30] 张悦. 聚丙烯纤维混凝土力学性能及损伤破坏形态研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [31] 童伟光, 陈路敏, 王怀亮. 聚丙烯纤维特性对混凝土抗冲击性能的影响[J]. 混凝, 2022(2): 31-33, 37.
- [32] Li, F.R., Chen, G.X., Xu, G.Z., et al. (2020) An Experimental Study on the Compressive Dynamic Performance of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete for Retaining Structure under Automobile Collision Magnitude. *Advances in Civil Engineering*, **2020**, Article ID: 8826006. <https://doi.org/10.1155/2020/8826006>
- [33] 李兵, 张刚, 等. 聚丙烯纤维混凝土高温后单轴受压应力应变全曲线[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(4): 608-614.
- [34] Powers, C. (1958) Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. *Journal of the American Ceramic Society*, **41**, 1-6. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1958.tb13494.x>
- [35] 楚英杰. 碱式硫酸镁水泥基全珊瑚混凝土的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021.

- [36] Wang, A.G., Lyu, B.C., Zhu, Y.C., *et al.* (2020) A Gentle Acid-Wash and Pre-Coating Treatment of Coral Aggregate to Manufacture High-Strength Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, **274**, Article ID: 121780. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121780>
- [37] Liu, J., Ju, B., Yin, Q., *et al.* (2021) Properties of Concrete Prepared with Silane Coupling Agent-Impregnated Coral Aggregate and Coral Concrete. *Materials*, **14**, Article 6454. <https://doi.org/10.3390/ma14216454>
- [38] Liu, J., Ju, B., Xie, W., *et al.* (2021) Design and Evaluation of an Utrahigh-Strength Coral Aggregate Concrete for Maritime and Reef Engineering. *Materials*, **14**, Article 5871. <https://doi.org/10.3390/ma14195871>
- [39] 韩宇栋, 丁小平, 郝挺宇, 等. 海水珊瑚骨料混凝土耐久性研究现状[J]. 工业建筑, 2021, 51(2): 186-192, 120.
- [40] 周文, 周永祥, 宋普涛, 等. 低品位全珊瑚骨料混凝土的力学性能及耐久性性能研究[J]. 新型建筑材料, 2019(46): 21-24, 31.
- [41] 王恺. 全珊瑚混凝土的收缩、徐变试验研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
- [42] 王恒. 机制砂级配对 C80 混凝土性能影响研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(8): 161-165.
- [43] 梁向洲. 湿热海洋环境下 BFRP 筋珊瑚混凝土梁抗弯性能及计算方法研究[D]: [博士学位论文]. 汕头: 中国矿业大学, 2021.
- [44] 冯兴国, 徐逸文, 石锐龙, 等. 一种适用于远洋珊瑚岛礁的钢筋混凝土材料及其制备方法[P]. 中国专利, CN106495594A. 2017-03-15.
- [45] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. C60 全珊瑚海水混凝土柱的受压性能与计算模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(11): 1647-1653.
- [46] 杨烜威, 文坤, 邓志恒. CFRP 筋珊瑚混凝土梁变形性能与抗弯刚度研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(1): 19-28.
- [47] 陈景, 林喜华, 王斌, 等. 用于钢板剪力墙的 C60 混合砂混凝土试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(6): 17-20.
- [48] 柴瑞, 黎鹏平, 熊建波, 等. 混合砂对 C60 海工混凝土耐久性的影响及机理分析[J]. 公路, 2013, 58(11): 174-179.
- [49] 李章建, 冷发光, 李昕成, 等. 用机制砂和特细山砂配制泵送 C80 高强混凝土的研究及应用[J]. 混凝土, 2010(10): 112-114.
- [50] 冯兴国, 石锐龙, 徐逸文, 等. 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(上). 北京: 海洋出版社, 2017: 736-740.
- [51] Wang, G., Wu, Q., Zhou, H., *et al.* (2021) Diffusion of Chloride Ion in Coral Aggregate Seawater Concrete under Marine Environment. *Construction and Building Materials*, **284**, Article ID: 122821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122821>
- [52] 苟菁. 混凝土碳化性能试验研究[J]. 建材技术与应用, 2024(2): 5-8.
- [53] 车明杰. 考虑碳化作用的水工混凝土耐久性研究[J]. 四川水力发电, 2023, 42(6): 108-111.