第 48 卷第 11 期
2020 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 11
November，2020

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

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200116

循环荷载作用下珊瑚混凝土的阻尼特性

马林建[1]，刘基程[2]，张 宁[2]，王 磊[3]，段力群[1]，李治中[1]

(1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室，南京 210007；2. 南京理工大学理学院，南京 210007；
3. 桂林理工大学土木与建筑工程学院，桂林 541004)

摘 要：以珊瑚砾石、珊瑚砂拌和海水、水泥及减水剂制备全珊瑚砂混凝土。开展不同上限应力、下限应力及不同加载频率下的正弦波循环加载、卸载试验，得到了珊瑚混凝土阻尼比随变形破坏全过程演化曲线，分析了荷载波形参数对珊瑚混凝土阻尼特性的影响及机理。结果表明：阻尼比随循环周次呈现初始衰减、稳态和加速 3 阶段演化特征；珊瑚混凝土平均阻尼比为 3.9%~5.9%，高于普通混凝土，主要归因于珊瑚骨料多孔隙、多棱角和易破碎性质；提高上限应力、降低下限应力水平或提高加载频率均会使珊瑚混凝土阻尼比增大，且阻尼比对上限应力的变化最为敏感，对下限应力变化次之，对频率变化敏感度最低。

关键词：珊瑚混凝土；循环荷载；阻尼比；力学性能
中图分类号：TU528.2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)11–1765–06
网络出版时间：2020–09–18



Damping Characteristics of Coral Concrete Under Cyclic Loading

MA Linjian[1], *LIU Jicheng*[2], *ZHANG Ning*[2], *WANG Lei*[3], *DUAN Liqun*[1], *LI Zhizhong*[1]

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;
2. School of science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: A whole coral sand concrete was prepared *via* mixing coral gravel, coral sand with seawater, cement and water reducer. The coral damping ratio with the deformation and failure process of concrete evolution curve was investigated by upper limit stress, lower limit stress at different loading frequencies and sine wave cycle and unloading tests. The load waveform parameters on the coral damping characteristics of concrete law and the mechanism were also analyzed. The results show that the damping ratio has the characteristics of initial attenuation, steady state and acceleration. The average damping ratio of coral concrete is 3.9%–5.9%, which is greater than that of ordinary concrete. Increasing the upper limit stress, decreasing the lower limit stress or increasing the loading frequency will increase the damping ratio of coral concrete, and the damping ratio is the most sensitive to the change of the upper limit stress rather than the change of the lower limit stress, and the lowest sensitive to the change of frequency.

Keywords: coral concrete; cyclic load; damping ratio; mechanical property

南海连接亚洲和澳洲的十字路口，扼守太平洋和印度洋之间的航道要冲，地理位置极为重要。我国南海岛礁建设事关国家安全与发展，是实施“一带一路”倡议的重要保障，更是“经略南海”的核心。近年来，利用珊瑚混凝土替代普通混凝土是岛域基础设施建设日益发展的重要趋势，对我国南海岛礁由“成岛”实现“固岛”目标具有重要经济意义和工程实用价值。

珊瑚混凝土是以珊瑚砂、珊瑚礁碎屑作为混凝土骨料混合海水搅拌而成的新型建筑材料，并成功应用于护岸、防波堤等水工工程，公路、机场等道路工程以及其他建筑工程[1]。我国南海岛礁工程面临波浪冲蚀、台风侵袭、地震震动等多重灾害威胁，因此不同形式动荷载作用下珊瑚混土阻尼特性，对

收稿日期：2020–02–28。　修订日期：2020–06–12。
基金项目：国家自然科学面上基金资助项目(51774295，51808551)。
第一作者：马林建(1984—)，男，博士，副教授，博士研究生导师。

Received date: 2020–02–28.　**Revised date:** 2020–06–12.
First author: MA Linjian (1984–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: patton.4400@163.com

于结构抗震设计和稳定性评价至关重要。与碎石、河砂等常规骨料相比，珊瑚骨料具有多孔隙、易破碎及形状不规则等特点，使得珊瑚混凝土的物理力学特性显著区别于普通混凝土。一般地，珊瑚混凝土表现出较显著的早强、快硬和脆性破坏特征，其弹性模量为 23.3~37.1 GPa，Poisson 比为 0.25~0.28，相同强度等级的珊瑚混凝土在弹性模量上略低于普通混凝土，而高于轻骨料混凝土[1–2]。珊瑚混凝土的抗压强度与水灰比近似负线性相关，且拉压比和折压比均要高于普通混凝土。相同应力水平下珊瑚混凝土弯曲疲劳寿命高于普通混凝土，且服从 Weibull 概率分布[3–4]。现有研究集中于珊瑚混凝土制备改性、基础力学性质及耐久性等方面，对其循环动载下的阻尼特性则鲜有涉及[5]。Jordan[6]认为混凝土的阻尼主要来源于裂缝的张开闭合、内部摩擦和内部水的粘性。柯国军[7]采用自由振动法得到了普通混凝土、轻骨料混凝土等 6 类共计 33 个不同配合比的混凝土阻尼比基础性数据。石文博等[8]对不同配比的 EPS 轻质混凝土施加循环荷载，发现了 EPS 体积分数越高循环荷载越大，阻尼比就越大的规律。尤佺等[9]对聚苯乙烯颗粒的轻质混凝土进行了不同频率、应力幅值的疲劳试验，发现应力幅值的增大会使得阻尼比增大。朱珍德等[10]通过循环荷载试验，获得了花岗岩动弹性模量、阻尼比和加载频率之间的关系。何明明等[11]对 3 种岩石进行了分级循环荷载、动循环荷载和常幅循环荷载试验，得到了阻尼比随振次的演化规律，并对阻尼参数的计算进行了修正。刘建锋等[12–13]研究循环荷载作用下岩石阻尼特性，探讨了循环荷载周次、岩石密度、动应变及应力幅值对岩石阻尼比的影响。

可见，混凝土材料的阻尼与外部荷载的应力水平、应力幅值及频率密切相关。为系统分析珊瑚混凝土在不同荷载压缩下的阻尼特性，本工作通过改变循环加载正弦波波形参数，获得了珊瑚混凝土阻尼比的疲劳变形破坏全过程演化曲线，探讨上限应力、下限应力、加载频率等因素对珊瑚混凝土阻尼比的影响规律。研究结果对南海岛礁工程建设中珊瑚混凝土结构振动响应分析和结构抗震设计有着重要意义。

1 实验

1.1 制备

采用的珊瑚混凝土试件为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体，设计强度等级为 C35。细骨料为取自南海的天然珊瑚砂，细度模数为 2.87，属于中砂，堆积密度为 1 228 kg/m^3。粗骨料选用经过破碎处理的粒径为 5~10 mm 的珊瑚礁石，堆积密度为 982 kg/m^3，筒压强度为 2.83 MPa。水泥采用普通的 PO42.5R 硅酸盐水泥，拌合用水为根据美国 ASTMD1141—2003 规范的人工配合海水，按照设计配合比每立方米中水泥、粗骨料、细骨料、人工海水的用量分别为：500、714、586、238 kg，制备完成后置于标准养护条件下养护 28 d。

1.2 方案

采用 MTS647.250 拉压材料试验系统对试件进行静态强度测试和等幅值循环荷载下的动态阻尼测试。该试验系统采用电液伺服控制，最大试验力静态 2 750 kN、动态 2 500 kN，工作频率范围 0.01~20 Hz。按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019)，对 3 个立方块试样进行加荷速度为 0.5 MPa/s 的抗压强度试验，测得所制备的珊瑚混凝土平均抗压强度为 37.5 MPa。等幅值循环荷载试验采用正弦波加载，分别考虑上限应力比 $S_{max}=\sigma_{max}/\sigma_c$ 为 0.70、0.75、0.80、0.85、0.90，下限应力比 $S_{min}=\sigma_{min}/\sigma_c$ 为 0.1、0.2、0.3、0.4 及频率 f 为 0.5、1、5、10 Hz 等波形参数的变化影响。为了消除试件与压头接触面不平整和试件内部初始缺陷对结果的影响，循环加载前先对试件进行预加载，并以 0.5 kN/s 速率加载至平均应力值 $\bar{\sigma}$ (图 1)，之后按照预设的上限应力 σ_{max}、下限应力 σ_{min} 和加载频率 f 进行正弦波形的等幅值循环加载直至试样发生破坏。

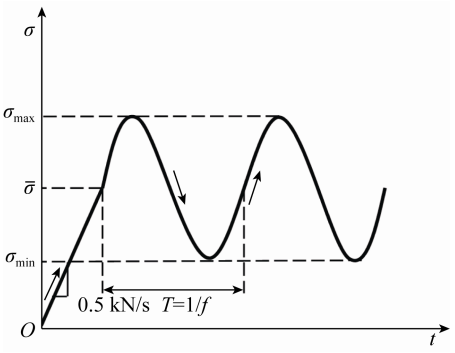


图 1 加载波形

Fig. 1 Loading waveform

1.3 阻尼比计算

珊瑚混凝土作为一种非理想粘弹性材料，在循环荷载作用下会产生能量耗散，这种在振动过程中消耗外界能量的性质称之为材料的阻尼[14]。阻尼特性在应力–应变曲线上表现为卸载应变相位滞后于

应力相位，同一振动周期内加、卸载曲线不重合，而是形成一个滞回环，滞回环面积即为单个循环下珊瑚混凝土所耗散的能量，体现其阻尼的大小(图 2)。材料阻尼比通常定义为单个循环内所耗散的能量与此循环内所储存最大弹性能的比值[13, 15–16]：

$$\lambda = A_{\mathrm{R}} / (4\pi A_{\mathrm{S}}) \tag{1}$$

$$A_S = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) / 8 \tag{2}$$

$$A_{\mathrm{R}} = \sum(\sigma_i + \sigma_{i+1})(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) / 2 - \sum(\sigma'_i + \sigma'_{i+1})(\varepsilon'_i - \varepsilon'_{i+1}) / 2 \tag{3}$$

式中：A_{R} 为滞回环的面积，为单个循环内所耗散的能量；A_{S} 为三角形阴影的面积，$4\pi A_{\mathrm{S}}$ 代表了单个循环内所储存的最大弹性能；σ_i 、σ'_i 分别为加、卸载应力；ε_i，ε'_i 分别为加、卸载应变。

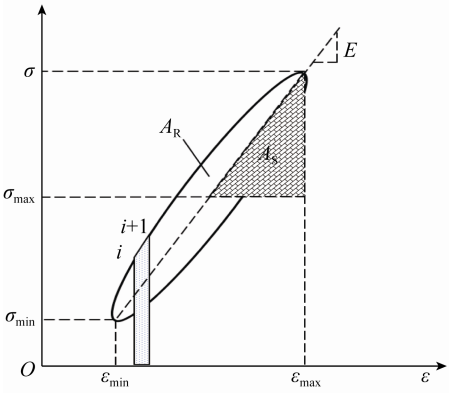


图 2　动态应力–应变滞回环

Fig. 2　Dynamic stress-dynamic strain hysteretic loops

2　结果与讨论

2.1　阻尼比演化规律

图 3 为典型的珊瑚混凝土循环加载应力–应变曲线。加载工况为：$S_{\max}$=0.8、$S_{\min}$=0.1、f=10 Hz，N 为当前循环周次，疲劳寿命为 40 553。由图 3 可知，高频(10 Hz)循环荷载作用下，珊瑚混凝土应力–应变滞回曲线总体较为密集，仅在变形发展初始和破坏阶段较为稀疏，呈现疏-密-疏发展趋势。滞回环随着残余变形的累积从尖叶形向椭圆形转变，且面积逐步增大，表明能量耗散随循环周次的增加而不断加大。同时，循环加载中由于应力幅值保持恒定，而动态弹性模量随加载周次的增加而非线性减小[17]，因而所释放的弹性能[式(2)]也在逐步增大。阻尼比的演化则取决于耗散能与弹性能比值的变化。图 4 绘出了珊瑚混凝土阻尼比随归一化后的加载周次演化曲线。与其疲劳变形发展曲线类似，珊瑚混凝土阻尼比发展全过程大致可划分为 3 个阶段。第 I 阶段，0<n/N≤0.05 时，阻尼比初始增长较快并逐渐减缓；第 II 阶段，0.05<n/N≤0.9 时，阻尼比以近似以稳定的速度缓慢增长；第III阶段，0.9<n/N≤1 时，阻尼比急剧增长直至破坏。当降低上限应力比($S_{\max}$<0.8)或者提高下限应力比($S_{\min}$>0.1)时，阻尼比演化曲线的第 I 阶段所占比例和增加幅度会逐渐降低，而且第 II 阶段内阻尼比增长的幅度也会减小，第III阶段不受影响，表现为阻尼比前两个阶段的演化曲线会逐渐向水平直线发展。对比发现，珊瑚混凝土阻尼比介于 3.7%~6.0%之间，普遍高于普通混凝土的 1%~2%[18–19]，主要归因于珊瑚混凝土骨料的多孔隙和易破碎性质使其在循环加载过程中能量耗散率较高。注意到，珊瑚混凝土阻尼比的整体倒 S 型的发展趋势，与文献[20–21]中阻尼比 L 型和 U 型发展趋势并不一致，这可能由于加载上限应力水平过高导致的加载初期能量损耗过大，或者加载周次不够，以致阻尼比演化并未进入实质的稳态乃至加速发展阶段。

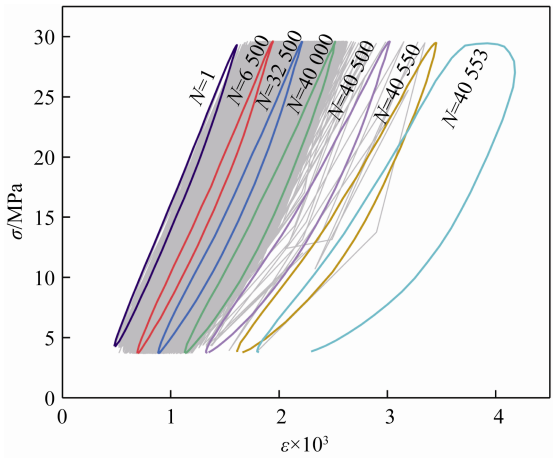


图 3　循环加载应力–应变曲线

Fig. 3　Cyclic loading stress-strain curves

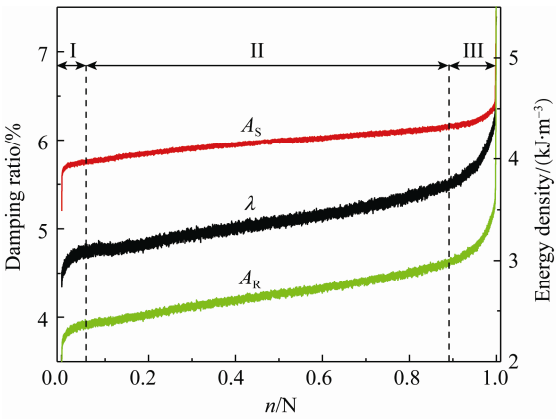


图 4　珊瑚混凝土阻尼比演化全过程

Fig. 4　Damping ratio development of coral aggregate concrete

2.2 上限应力对阻尼比的影响

取加载下限应力比 S_{max} 为 0.1，加载频率 f 为 10 Hz 下，不同上限应力比下稳态阶段平均阻尼比绘于图 5。从图 5 可以看出，上限应力对阻尼比有着较大的影响，阻尼比随着上限应力的增大而增长。这一趋势与文献[11]应力幅值对于阻尼比影响规律一致。具体而言，当上限应力比 S_{max} 为 0.70、0.75、0.80、0.85 和 0.90 时，珊瑚混凝土阻尼比分别为 4.73%、4.89%、5.07%、5.46%和 5.90%。阻尼比与上限应力比之间的非线性正相关关系，可表示为：

$$\lambda = 0.216S_{max}^2 - 0.2881S_{max} + 14.30\ (R^2 = 0.998) \quad (4)$$

究其原因，上限应力的提高加剧了珊瑚混凝土内部裂纹的萌生和扩展，从而产生更大的塑性变形，内部颗粒、裂缝间的摩擦历程增大，克服摩擦阻力需做更多的功，因此耗散更多的能量导致阻尼比随上限应力的增大而增长。

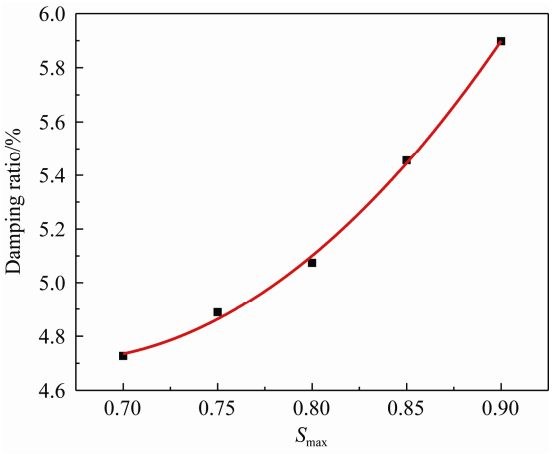


图 5 不同上限应力下的阻尼比

Fig. 5 Relationship between damping ratio and maximum stresses

2.3 下限应力对阻尼比的影响

取加载上限应力比 S_{max} 为 0.85，加载频率 f 为 10 Hz 下，不同下限应力比下珊瑚混凝土阻尼比绘于图 6。下限应力同样对阻尼比存在较大影响，不同之处在于，阻尼比随下限应力的提高而近似线性降低，即呈负线性相关关系。对应于下限应力比为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 的珊瑚混凝土阻尼比分别为 5.46%、5.01%、4.58%和 4.31%。两者间的定量关系可用线性拟合公式表示：

$$\lambda = 0.058 - 0.0384S_{min}\ (R^2 = 0.987) \quad (5)$$

无论是保持下限应力提高上限应力水平或者保持上限应力降低下限应力水平，都带来应力幅值(两者之差)的增大。总结上、下限应力对阻尼比的影响可以发现，应力幅值越大，阻尼比也就越大。下限应力对阻尼比的影响的内在机制与上限应力一致，同样来源于下限应力的降低加快了珊瑚混凝土内部裂纹的萌生、扩展和滑移，从而需要耗散更多的能量使得阻尼比逐渐增大。

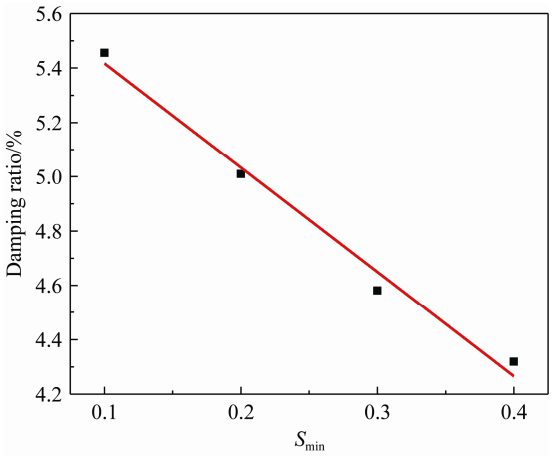


图 6 不同下限应力下的阻尼比

Fig. 6 Relationship betweendamping ratio and minimum stresses

2.4 加载频率对阻尼比的影响

保持上、下限应力比(S_{max}=0.8，S_{min}=0.1)，仅改变加载频率，得到不同加载频率下珊瑚混凝土的阻尼比，如图 7 所示。可以发现，阻尼比随着循环荷载的加载频率增大而增长，当加载频率较低的时候，阻尼比增长速度较快，从 0.5 Hz 至 1 Hz 增加了 9.1%；而当加载频率达到 5 Hz 至 10 Hz，仅增加了 5.6%，阻尼比增长逐渐趋于稳定。珊瑚混凝土阻尼比随加载频率整体呈幂函数增长的规律与文献[10, 15]结果一致，且可用拟合公式表示为：

$$\lambda = 0.0418f^{0.0938}\ (R^2 = 0.940) \quad (6)$$

将加载上、下限应力和频率对珊瑚混凝土阻尼比影响进行无量纲化比较，上限应力提高 28.6%，阻尼比增加了 24.7%，下限应力降低 75%，阻尼比增加了 26.4%，而频率提高 20 倍，阻尼比仅增加 21.2%。不难发现，珊瑚珊瑚混凝土阻尼比对上限应力变化最为敏感，下限应力次之，对频率变化的响应最为微弱。

需要指出的是，加载频率和应力幅值对珊瑚混凝土阻尼比的影响机制并不一致。混凝土阻尼主要源于与混凝土材料的内部微裂隙滑移、闭合、扩展相关的库伦阻尼，固体凝胶结构间的固体摩擦阻尼和内部水分运动、内部水自身及水泥凝胶体的粘性

所产生的黏滞阻尼[6, 14, 22–23]。Qullen、固体摩擦阻尼与荷载幅值密切相关而受频率影响不大，而黏滞阻尼与变形速率成正比，即黏滞阻尼会随着加载频率的增大而增强。这与低应变率下混凝土动态力学性能变化源自混凝土自身黏性增强的机理解释有共通之处。

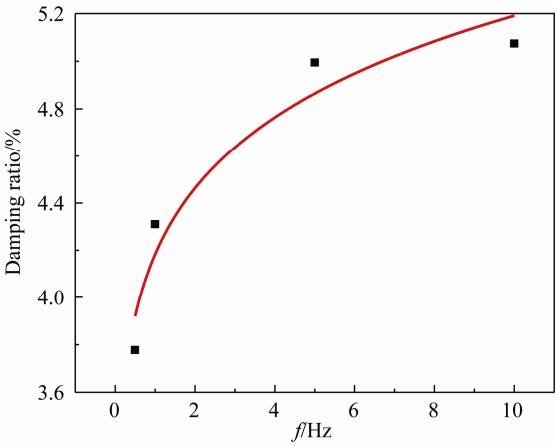
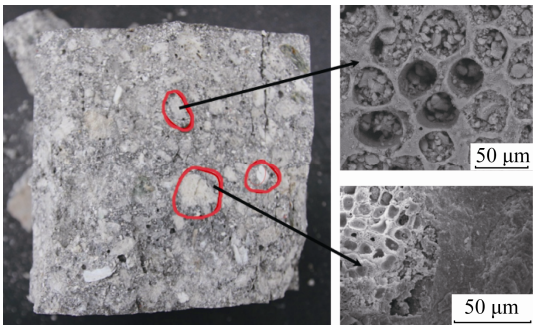


图 7　不同加载频率下的阻尼比

Fig. 7　Damping ratio and loading frequencies under different loading frequencies

3　珊瑚混凝土阻尼机理

珊瑚混凝土是由珊瑚骨料、水泥砂浆和两者结合面组成的非均质复合介质。珊瑚骨料与水泥之间的胶结界面强度较高而自身强度较低使得珊瑚混凝土的裂缝开展主要源于珊瑚骨料内部而不是沿两者的胶结面[24]，如图 8 所示。因而，珊瑚骨料属性(多孔隙、多棱角和易破碎)是影响其阻尼特征响应的主要因素。相较于普通混凝土，珊瑚混凝土具有显著的孔隙结构，孔隙率高达 16.89%[25] (图 8)。骨料和水泥基内分布的大量孔隙其形状往往不规则，不规则孔隙周边由于应力集中导致的塑性变形乃至破裂、滑移均会消耗所吸收的振动能量。再者，封闭孔隙内空气在加、卸载作用下产生收缩和彭胀变形，起到了柔性缓冲的作用，外载所做功部分转化为空气摩擦热能而耗散。因此，珊瑚混凝土的阻尼比远高于普通混凝土，预示着珊瑚混凝土能在震动中将耗散更多外界的能量，其抗震性能更为突出。



Left: concrete failure surface;Upper right: SEM diagram of coral aggregate pores; Lower right: SEM diagram of interface.

图 8　珊瑚混凝土孔隙结构

Fig. 8　Coral concrete pore structure

4　结论

1) 循环荷载作用下珊瑚混凝土的阻尼比不是固定值，而是随加载周期呈现阶段性(初始衰减、稳态、加速)演化特征。

2) 制备的 C35 等级珊瑚混凝土的阻尼比为 3.9%~5.9%，要高于相同等级普通混凝土，主要归因于珊瑚骨料高孔隙率、低强度、形状不规则及水泥基体较高的内孔隙率。

3) 珊瑚混凝土阻尼比随着上限应力水平和加载频率的提高而非线性增大，随着下限应力水平的降低而近似线性增大。相比之下，上限应力对阻尼比影响最为显著，下限应力次之，频率影响最为微弱。

4) 珊瑚混凝土阻尼比对上、下限应力和加载频率变化的敏感程度不同，主要源于对其阻尼作用机制的不同，应力水平主要影响 Coulomb 阻尼、固体摩擦阻尼，加载频率则对黏滞阻尼起作用。

参考文献:

[1] 韩超. 海水拌养珊瑚混凝土基本力学性能试验研究[D]. 南宁: 广西大学硕士学位论文, 2011.
HAN Chao. Experimental study on basic mechanical properties of coral concrete mixed with seawater (in Chinese, dissertation). Guangxi University, 2011.

[2] 高屹, 韦灼彬, 孙潇. 珊瑚骨料混凝土基本力学性能试验研究[J]. 海军工程大学学报, 2017, 29(1): 64–68.
GAO Yi, WEI Zhuobin, SUN Xiao. J Naval Univ Eng (in Chinese) 2017, 29(1): 64–68.

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

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

[5] 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 Lijian, LI Zeng, CHEN Xinxing. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2018, 37(8): 2471–2477.

[6] JORDAN R W. The effect of stress, frequency, curing, mix and age upon the damping of concrete[J]. Mag Concr Res,1980, 32: 195−205.

[7] 柯国军, 郭长青, 胡绍全, 等. 混凝土阻尼比研究[J]. 建筑材料学报, 2004(1): 35−40.
KE Guojun, GUO Changqing, HU Shaoquan. J Build Mater (in Chinese), 2004(1): 35−40.

[8] 石文博, 缪林昌, 王佳奇, 等. 循环荷载作用下不同配比 EPS 轻质混凝土阻尼比变化规律[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(1): 179−183.
SHI Wenbo, MIAO Linchang, WANG Jiaqi.J Southeast Univ (Nat Sci Ed) (in Chinese), 2016, 46(1): 179−183.

[9] 尤佺, 缪林昌, 厉超, 等. 超长循环荷载下轻质混凝土疲劳特性[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4): 583−587, 594.
YOU Quan, MIAO Linchang, LI Chao. J Build Mater (in Chinese), 2018, 21(4): 583−587, 594.

[10] 朱珍德, 孙林柱, 王明洋. 不同频率循环荷载作用下岩石阻尼比试验与变形破坏机制细观分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 8−12.
ZHU Zhende, SUN LINzhu, WANG Mingyang. Rock Soil Mech (in Chinese), 2010, 31(S1): 8−12.

[11] 何明明, 李宁, 陈蕴生. 不同循环加载条件下岩石阻尼比和阻尼系数研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2531−2538.
HE Mingming, LI Ning, CHEN Yunsheng. Rock Soil Mech (in Chinese), 2017, 38(9): 2531−2538.

[12] 刘建锋, 徐进, 李青松, 等. 循环荷载下岩石阻尼参数测试的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1036−1041.
LIU Jianfen, XU Jin, LI Qingson, et al. Chin J Rock Mech Eng (in Chinese), 2010, 29(5): 1036−1041.

[13] 刘建锋, 谢和平, 徐进, 等. 循环荷载作用下岩石阻尼特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(4): 712−717.
LIU Jianfen, XIE Hepin, XU Jin, et al. Chin J Rock Mech Eng (in Chinese), 2008(4): 712−717.

[14] 梅生启. 混凝土静动态粘弹性能研究[D]. 北京交通大学, 2019.
MEI Shengqi. Investigationof static and dynamic viscoelastic behavior of concrete[D]. Beijing Jiaotong University, 2019.

[15] 黄理兴. 岩石材料阻尼特性的试验研究与测定[J]. 勘察科学技术, 1987(6): 35−39.
HUANG Lixing. Site Investigation Sci Technol (in Chinese), 1987(6): 35−39.

[16] 宋全杰, 李海波, 李俊如, 等. 外部激励对类岩石材料阻尼比的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3258−3265.
SONG Quanjie, LI Haibo, LI Junru, et al. Chin J Rock Mech Eng (in Chinese), 2013, 32(S2): 3258−3265.

[17] 马林建, 刘新宇, 许宏发, 等. 循环荷载作用下盐岩三轴变形和强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 849−856.
MA Linjian, LIU Xinyu, XU Hongfa, et al. Chin J Rock Mech Eng (in Chinese), 2013, 32(4): 849−856.

[18] 柯国军, 陈俊杰, 石建军. 混凝土阻尼试验研究及其机理分析[J]. 噪声与振动控制, 2005, 25(5): 60−63.
KE Guojun, CHEN Junjie, SHI Jianjun. Noise Vibration Control (in Chinese), 2005, 25(5): 60−63.

[19] WEN Sihai, CHUNG D D L. Enhancing the vibration reduction ability of concrete by using steel reinforcement and steel surface treatments[J]. Cem Concr Res, 2000, 30(2): 327–330.

[20] CHEN X, HUANG Y, CHEN C, et al. Experimental study and analytical modeling on hysteresis behavior of plain concrete in uniaxial cyclic tension[J]. Int J Fatigue, 2017, 96: 261−269.

[21] 肖建清, 冯夏庭, 丁德馨, 等. 常幅循环荷载作用下岩石的滞后及阻尼效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1677−1683.
XIAO Jianqing, FENG Xiating, DING Dexin. Chin J Rock Mech Eng (in Chinese) , 2010, 29(8): 1677−1683.

[22] SWAMY N, RIGBY G. Mater Struct (in Chinese), 1971, 4(1): 13−40.

[23] 苏力. 混凝土静动态粘弹性性能的理论及试验研究[D]. 北京交通大学, 2017.
SU Li. Experimental and theoretical investigationon static and dynamic viscoelastic behavior of concrete (in Chinese, dissertation). Beijing Jiaotong University, 2019.

[24] 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.

[25] 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.
WEI Zhuobin, LI Zhongxin. J Logist Eng Univ (in Chinese), 2017, 33(3): 1−8.