

DOI: 10.11779/CJGE20230562

# 南海西沙典型珊瑚砂岛礁场地地震响应模拟与监测研究

毕研栋<sup>1</sup>, 郭 桢<sup>1,2</sup>, 卢劲锴<sup>1</sup>, 王 清<sup>3</sup>, 陈慧娥<sup>3</sup>, 黄 雨<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130061)

**摘 要:** 南海珊瑚砂岛礁场地的非线性地震响应分析对中国南海岛礁建设的地震安全保障具有重要现实意义。以南海西沙某典型珊瑚砂岛礁为研究对象, 建立了考虑该岛礁场地地形地貌特征及非饱和带水文地质特征的岛礁场地地震响应分析二维有限元数值模型。基于南海岛礁现场监测地震数据验证了模型的有效性, 数值分析了不同输入地震信号的岛礁场地非线性地震响应规律。结果表明: ①受岛礁岩盆效应影响, 岛礁边缘处的 PGA 放大效应较为显著; 沿高程方向, 受地层岩性变化及地下水饱和度的影响, PGA 放大因子曲线表现出明显的界面转折特征, 并且松散珊瑚砂层的 PGA 放大效应较基岩更为显著; ②岛礁场地加速度反应谱的卓越周期与输入地震动基本吻合, 但岛礁场地的地表地震动显著持时时与输入地震动相比均有不同幅度的延长; ③全饱和与否对 PGA 放大因子和 Arias 强度有一定影响, 但对 PSA 反应谱影响较小。研究成果可为南海西沙类似珊瑚砂岛礁场地的地震安全研究及场地抗震提供参考。

**关键词:** 珊瑚砂岛礁; 岛礁实测地震数据; 场地地震响应分析; 非饱和珊瑚砂

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)08-1723-09

**作者简介:** 毕研栋(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事海洋工程地质方面的研究工作。E-mail: 2110056@tongji.edu.cn。

## Numerical modeling and monitoring of the seismic response of coral reef island in Xisha Islands, South China Sea

BI Yandong<sup>1</sup>, GUO Zhen<sup>1,2</sup>, LU Jinkai<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>3</sup>, CHEN Hui'e<sup>3</sup>, HUANG Yu<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory

of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of

Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

**Abstract:** The seismic response analysis of the coral islands in South China Sea is of practical significance for the seismic safety of the islands. A two-dimensional FEM model is established for a typical coral island in Xisha Islands considering the unsaturated zone caused by the fluctuation of daily tides. The accuracy of the model is then verified based on the seismic event records captured by the seismometers installed on the coral island. Then the nonlinear seismic response of the coral island with different earthquake signal inputs is explored. The major conclusions are drawn as follows: (1) The PGA amplification is more significant at the edge of the island because of the bowl-shaped interface between the coral sands and reef limestone, decreases from the surface of the island (loose coral sand layer) with depth and bends at the lithological and the unsaturated-saturated interfaces. (2) The resonance periods of the acceleration response spectra coincide with those of the input ground motion. However, the surface ground motion durations are significantly enlarged as compared to those of bedrock. (3) The saturation degree impacts the PGA amplification factor and the Arias intensity, but has less effects on the PSA. The findings provide significant guide to the seismic stability evaluation and seismic design of the coral sand sites in Xisha Islands.

**Key words:** coral sand island; earthquake record on coral island; seismic response analysis; unsaturated coral sand

## 0 引 言

随着中国“建设海洋强国”等重大战略的实施, 以填海造陆、岛礁建设为代表的南海海洋工程建设不断加速。然而中国南海海域地震活跃<sup>[1]</sup>, 这给岛礁场地的长期稳定性带来严峻挑战。南海岛礁建设主要利用珊瑚砂填筑岛礁, 而珊瑚砂具有高压缩性、易破碎、

易产生动力残余变形等特殊的力学性质<sup>[2]</sup>。因此, 南海岛礁场地表现出与其他类型的场地不同的地震动力响应特征。但受限于缺乏实测地震观测记录, 对南海

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072301; 42120104008)

收稿日期: 2023-06-19

\*通信作者 (E-mail: zhenguo@tongji.edu.cn)

珊瑚砂岛礁的地震安全研究仍处于起步阶段<sup>[3-4]</sup>。因此,针对南海典型岛礁场地开展地震响应研究,了解其动力响应规律,对中国南海岛礁建设安全保障具有重要的现实意义。

目前,国内外学者对珊瑚砂岛礁问题的研究主要集中在工程勘察、原位测试和室内试验几个方面。工程勘察主要探讨南海岛礁的地质环境和珊瑚砂成因<sup>[5-6]</sup>,如,崔永圣等<sup>[7]</sup>提出了珊瑚岛礁岩土工程特性的评价原则和方法,为开展南海岛礁场地地震动力响应分析研究提供了基础数据资料。一系列原位测试研究对珊瑚砂的工程性质和岛礁场地的工程地质特性进行了较为全面的总结<sup>[8-9]</sup>。而室内试验则主要关注密实度、围压、颗粒形状等因素对珊瑚砂动力特性的影响,如Javdanian等<sup>[10]</sup>通过共振柱和循环三轴试验,探究了不同围压和密实度的钙质砂在小、大剪切应变幅值下的动态特性。吴杨等<sup>[11]</sup>通过共振柱试验探究了密实度、固结压力和细粒含量对吹填珊瑚砂-细粒混合物小应变动力特性的影响机制。

在珊瑚砂岛礁场地地震动力响应分析方面,现有研究主要考虑岛礁场地特殊的地形地貌特征、珊瑚砂岛礁特殊的岩土工程材料、海水与岛礁的动力相互作用和海底输入地震动信号的确定等主要因素。如,徐长琦等<sup>[12]</sup>基于 OpenSees 有限元软件,采用多屈服面塑性本构模型开展了南海永暑礁地震效应分析,发现钙质砂层放大效应最显著,且产生盆地边缘效应。陈国兴等<sup>[4]</sup>采用修正 Matasovic 本构模型分析了南海某珊瑚礁场地的峰值加速度(PGA)放大因子和地表加速度反应谱(PSA)特征,发现地形效应显著。朱圣华等<sup>[13]</sup>基于 ANSYS 有限元软件探讨了珊瑚砂岛礁场地非线性地震反应规律。

前述针对珊瑚岛礁场地非线性地震动力响应分析的研究,极大地提升了对珊瑚砂动力特性的认识<sup>[3]</sup>,但是仍然存在一些不足。首先,岛礁场地的地震响应与输入地震动信号特征密切相关,但由于缺乏南海海域的强震动记录,导致现有研究大多采用其他地区的典型强震动记录,且鲜有通过南海岛礁的现场地震记录进行验证的实例;其次,现有研究虽然考虑了海水-岛礁的动力相互作用,大多仅关注全饱和工况下的地震反应特性,不考虑高低潮位线所夹的非饱和珊瑚砂层的影响,忽略了潮汐作用和岛礁所处环境导致其水文地质条件的特殊性。鉴于此,本文以南海西沙某典型珊瑚砂岛礁为研究对象,建立考虑该岛礁场地地形地貌特征、地质分层结构及水文地质特征的岛礁场地地震动力响应分析二维有限元模型,基于南海岛礁现场安装的宽频带(240 s—200 Hz)三分量地震仪记录

的地震数据验证数值模型的有效性,进而探究不同输入地震信号条件下岛礁的地震动响应规律。

## 1 珊瑚砂岛礁场地工程地质条件

### 1.1 地形地貌特征

本文研究的珊瑚砂岛礁场地整体地势较平坦,平均高程为 5 m,中部低洼,为一个干涸潟湖。岛屿露头呈不规则的椭圆状(图1),面积约 2.1 km<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。综合调研及现有数据资料显示(图2),地下 22 m 以浅的范围内为未经成岩固结作用的松散珊瑚贝壳碎屑砂体,孔隙率和渗透性较高,22~169 m 深度范围内分布着具有孔隙的礁灰岩。

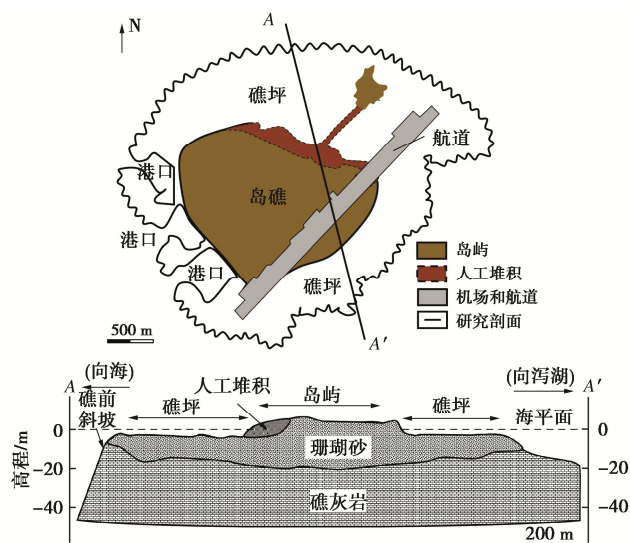


图1 南海西沙某典型珊瑚砂岛礁场地平面图(上)和地质剖面图(下,据文献[15],有改动)

Fig. 1 Plan view and geological cross-section of a typical coral island in Xisha, South China Sea (modified after Reference [15])

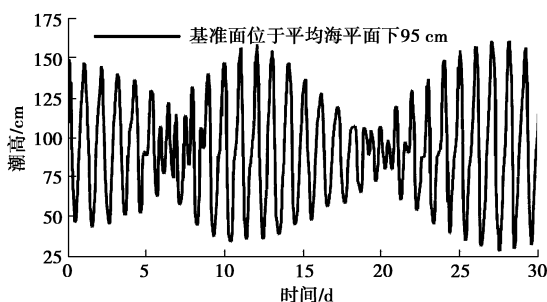


图2 南海西沙某典型珊瑚砂岛礁潮汐曲线(据文献[6],有改动)

Fig. 2 Tidal curves of a typical coral island in Xisha, South China Sea (modified after Reference [6])

### 1.2 水文地质条件

该岛礁属于典型的热带海洋性季风气候,年均降水量超过 1500 mm,夏季 6 月—11 月降水量尤多,超过 1200 mm。由于岛礁表面覆盖有疏松的珊瑚砂层,

降水快速下渗, 难以形成地表径流, 仅在强降雨的短时间内, 可能形成短流路、短暂性的地表径流。在海平面以下, 多孔、松散的地层将地下水与海水连通。南海的潮汐主要从太平洋传入, 且由于海面开阔、岛礁占比小, 潮波多为驻波, 且为全日潮型, 潮差一般小于  $2\text{ m}$ <sup>[16]</sup>。根据谢石建等<sup>[6]</sup>的研究, 该岛礁的潮汐约  $14\text{ d}$  完成一次高低潮位差的周期, 基准面为平均海平面以下  $95\text{ cm}$  时, 最低和最高潮位分别为海平面下  $25\text{ cm}$  和海平面上  $65\text{ cm}$  (图 2 中  $70, 160\text{ cm}$ )。

2 数值模型构建

结合上述岛礁的地貌特征和相关文献<sup>[14, 15]</sup>, 在保证不影响数值模拟结果的前提下进行适当简化和提炼, 在 PLAXIS 2D 软件中形成有限元模型, 其几何尺寸和地层划分如图 3 所示。本文的模拟将仅考虑海平面涨落的潮汐变化带来的地下水位变化, 并不考虑在此过程中发生的降水、地表径流的问题。根据岛上钻孔测定的珊瑚砂天然含水率数据<sup>[16]</sup>, 设定场地模型的珊瑚砂层分区及其对应的饱和度 (表 1)。

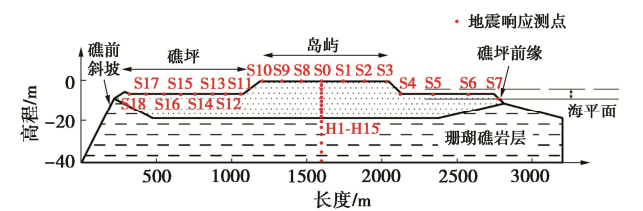


图 3 典型珊瑚砂岛礁有限元模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of FEM model

表 1 岛礁有限元模型地质分层

Table 1 Geological stratification of FEM for coral island

土层	饱和度/%	地层海拔高程/m
①表层非饱和珊瑚砂	30	0.65~4
②潮间带非饱和珊瑚砂	60	0 (平均潮位) -0.65 (极高潮位)
③饱和珊瑚砂	100	-20~-0.25
④礁灰岩	—	-110~-20

表 2 珊瑚砂层的 HSS 本构模型参数

Table 2 Parameters of HSS constitutive model for coral sands

模拟地层	$G_s$	$\rho /$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$D_r /$ %	$S_r /$ %	$c' /$ MPa	$\varphi' /$ ( $^{\circ}$ )	$p^{\text{ref}} /$ kPa	$G_0^{\text{ref}} /$ MPa	$\gamma_{0.7} /$ $10^{-5}$	$E_{50}^{\text{ref}} /$ MPa	$E_{\text{ode}}^{\text{ref}} /$ MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} /$ MPa
表层非饱和珊瑚砂	2.75	1.09	55	30	3.67	43.55	50	58.23	8.63	14.45	14.45	43.35
潮间带非饱和珊瑚砂	2.75	1.37	65	60	4.56	44.72	100	80.89	11.35	18.37	18.37	55.11
饱和珊瑚砂	2.75	1.75	75	100	5.44	45.89	150	114.20	15.16	22.29	22.29	66.87

注:  $G_s$  为颗粒相对质量密度;  $\rho$  为密度;  $D_r$  为相对密实度;  $S_r$  为饱和度;  $c'$  为有效黏聚力;  $\varphi'$  为有效内摩擦角;  $p^{\text{ref}}$  为参考应力;  $G_0^{\text{ref}}$  为初始剪切模量;  $\gamma_{0.7}$  为剪切模量衰减到初始剪切模量 70% 时所对应的剪应变;  $E_{50}^{\text{ref}}$  为参考割线模量;  $E_{\text{ode}}^{\text{ref}}$  为参考切线模量;  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  为参考卸载再加载模量。

由于岛礁体部分位于海水中, 存在海水与岛礁体的动力相互作用, 因此本文采用附加质量法描述地震动发生时的地震动水压力。该方法假设水体为不可压缩的理想流体, 即不考虑水的黏滞力和密度变化的影响, 将水体与坝体接触面上某点的动水压力等效为附加在该点的一定质量水体, 然后将该动水压力的解析解添加到有限元模型中岛礁边缘的网格节点上<sup>[17]</sup>, 相应的动水压力近似公式为

$$P(y,t)=-\frac{7}{8}\rho_w\sqrt{Hy}\ddot{X}_g(t)\quad。(1)$$

式中:  $\rho_w$  为海水密度;  $H$  为接触海水的礁体竖向高差;  $y$  为礁体的纵坐标;  $\ddot{X}_g(t)$  为输入地震动信号的加速度时程。

2.1 本构模型与计算参数选取

(1) 珊瑚砂层

为了考虑珊瑚砂在模拟远震时产生的小应变刚度非线性变化特征, 本文选取小应变硬化模型 (hardening soil small model, 简称 HSS 模型) 描述其本构行为, 相关参数见表 2, 其中, 颗粒相对质量密度  $G_s$  由比重瓶法获得, 密度  $\rho$  按照设计饱和度和密实度, 依据最大干密度 (振动锤击法)、最小干密度 (长颈漏斗量筒法) 计算得到理论值, 黏聚力  $c'$  和摩擦角  $\varphi'$  由直剪试验获得,  $E_{50}^{\text{ref}}$ ,  $E_{\text{ode}}^{\text{ref}}$  和  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  等模量的选取依据相关文献和经验公式取得<sup>[11, 18]</sup>, 小应变刚度参数  $G_0^{\text{ref}}$  和  $\gamma_{0.7}$  由本团队相应的共振柱试验获得<sup>[19]</sup>。

(2) 礁灰岩层

礁灰岩层位于珊瑚砂层底部, 本文基于王新志等<sup>[20]</sup>对礁灰岩样品的试验结果, 参考胡进军等<sup>[17]</sup>的数值研究, 选取线弹性本构模型进行模拟, 模型参数见表 3。

2.2 边界条件设置

二维场地计算模型的底部设置为自由场边界, 是在黏性边界的基础上通过界面单元将远场的运动以等效正应力和等效剪应力的形式传递到近场土体的内



表 3 礁灰岩层模型参数选取

Table 3 Parameters of constitutive model for reef limestone			
类型	饱和密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比
试验数据 <sup>[20]</sup>	1.63~2.07	7.9~12.9	0.23~0.27
线弹性本构	2	10	0.26

部，界面单元即置于土体内部的一维自由场单元，通过阻尼器与土体相连接，力学性质与相连的土体相同（图 4）。为了区别地震动力分析中两侧的人工边界和底部用于输入地震信号的人工边界，将底部的人工边界命名为一致地基边界，即在此边界上，必须且只能输入一条指定的时间相关地震信号，其他特性与两侧的自由场边界一致。

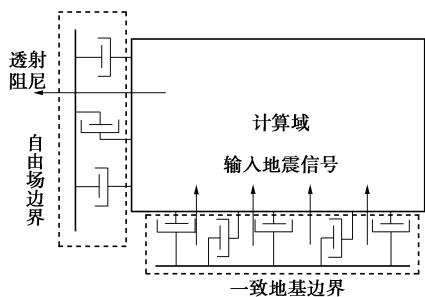


图 4 有限元分析模型边界条件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of boundary conditions for FEM model

2.3 输入地震动记录的选取

本文选择距离西沙群岛较近的海南岛永久基岩地震台站（QIZ，位置见图 5）记录的 4 条 6 级以上地震事件（相关地震信息见表 4，震中位置见图 5）作为数值模型底部一致地基边界的输入。这些地震的发震时间跨越 2020 年全年度，震中经度跨度约  $73^{\circ}$ ，纬度跨度约  $38^{\circ}$ ，分布于西沙岛礁的不同方位。其中，#2 地震记录由两个发震时间相近、但震中位置不同的地震组成。从时间和空间分布的角度来说，这 4 条地震记录具有较好的代表性，可模拟分析不同震级、距离和方位的地震对南海岛礁场地地震响应的影响。

地震事件的速度时程数据由 IRIS 网站（<https://www.iris.edu>）下载，首先对地震数据进行去均值、去线性趋势、去仪器响应、波形尖灭和滤波处理，之后对数据重采样至最大频率 10 Hz，得到可以输入到数

值模型的地震信号<sup>[21]</sup>。其速度时程及其傅氏谱如图 6 所示，图 6 中， $f_0, f_1$  为输入地震记录的主、次卓越频率， $f_s$  为岛礁场地的卓越频率，红色曲线为采用 Konno-Ohmachi 法平滑后的速度谱。从速度时程上看，#1 地震由一小一大两次震动组成，#2 地震由发生在不同位置的两次不相关地震串联而成，#3 地震幅值降低一段时间后马上恢复到原来的水平，#4 地震有较明确的先增后减的波形。相较而言，#3、#4 地震的持时较长，但#1 地震的幅值最大。从频谱上看，4 条地震的记录均符合对远震记录的认识，高频信号在地震波传播过程中逐渐耗散，而低频信号被保留了下来。4 条地震的频谱主峰基本都位于 0.1 Hz 左右，#1 地震的峰较窄，主要分布在 0.05~0.09 Hz，#2、#4 地震的频谱较宽，约从 0.02~0.2 Hz，#3、#4 地震具有较明显的双峰特征。

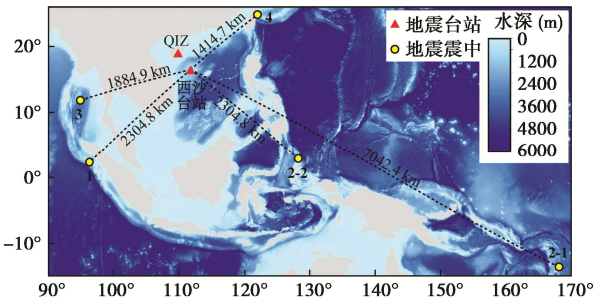


图 5 本文所采用的地震震中（#1、#2-1、#2-2、#3、#4）与地震台站的位置

Fig. 5 Locations of selected epicenters and seismic stations in this study

2.4 基于岛礁地震监测数据的响应特征对比验证分析

自 2018 年 10 月起在南海西沙典型岛礁上布设了 6 台甚宽频带三分量地震仪（型号 Nanometric Trillium 240，响应频带 240 s-200 Hz，速度输出型）。该地震仪灵敏度高，功耗低，可用于长期连续记录地震活动的速度数据。为了验证数值计算模型的适用性和计算的可靠性，以#1 地震记录为例，计算岛礁中心最高点 S0 处的速度时程曲线及其傅里叶频谱，并与岛礁实测的地震数据对比（图 7）。如图 7 所示，#1 地震的模拟和监测速度时程均呈葫芦型，且幅值分别为 0.0255，

表 4 选取的 4 条地震事件记录信息

Table 4 Information of four recordings of seismic events

序号	发震时间	震级	纬度/( $^{\circ}$ )	经度/( $^{\circ}$ )	深度/km	震中距/km
#1	2020-01-07T06:05:19	6.3	2.34	96.35	17	2304.8
#2-1	2020-06-04T08:46:28	4.3	-13.61	168.08	48	7042.4
#2-2	2020-06-04T08:49:40	6.4	2.91	128.24	112	2304.8
#3	2020-07-17T14:03:40	6.1	11.84	94.93	10	1884.9
#4	2020-12-10T13:19:58	6.1	24.78	122.02	71	1414.7

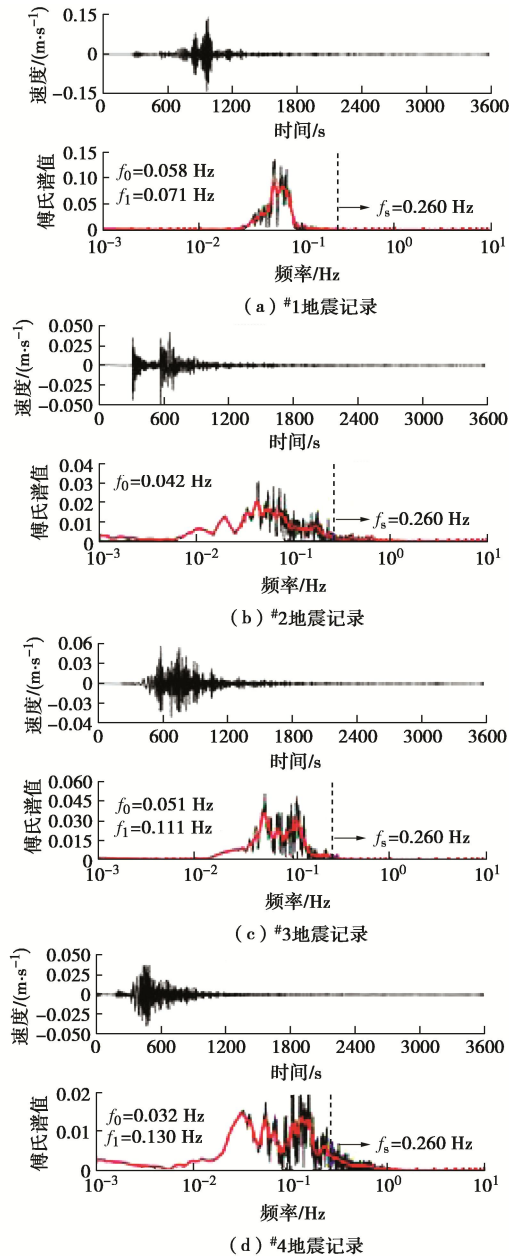


图6 海南岛QIZ台站记录的四条地震波形、傅里叶频谱、主次卓越频率( $f_0, f_1$ )及岛礁场地卓越频率( $f_s$ )

Fig. 6 Input seismic waveforms and Fourier spectra of four seismic recordings at bedrock station QIZ on Hainan Island  
0.0309 m/s, 相关系数为 0.835; 从频谱上看, 主峰频率均为 0.06 Hz, 且幅值几乎相等, 误差约 4.3%, 相关系数为 0.923。综上, 本文数值模型能够可靠地反映该岛礁的地震动力响应特征。

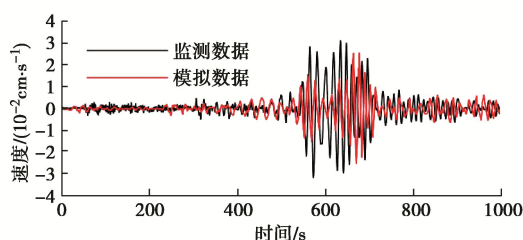


图7 模拟与实测的珊瑚岛礁地表中心S0处#1地震记录的速度时程与傅氏谱

Fig. 7 Comparison of observed and simulated time histories and spectra of event 1 at surface center of coral island

### 3 地震动力响应特征分析

将4条地震记录输入珊瑚岛礁二维场地模型, 开展非线性动力响应数值模拟, 从地震动峰值加速度(PGA)、地表加速度(PSA)反应谱和地表地震动持时特性等3方面分析数值模拟结果。

#### 3.1 峰值加速度(PGA)放大效应分析

地震波在岛礁的传播过程中其加速度、速度、位移均会被地层放大, 选取PGA放大因子(测点峰值加速度与基岩输入地震动的峰值加速度之比)作为衡量场地放大效应的指标。

图8展示了4条地震记录在剖面A-A'上各测点(位置见图3)的PGA放大因子。由图8可知, 尽管输入的地震信号不同, 地表的PGA放大因子均随距岛礁中心距离的增大而增大, 在岛礁边缘处达到峰值, 约为输入基岩PGA的5~6倍, 约为岛礁中心PGA的4~5倍。原因可能在于: 该岛礁场地中部为松散的珊瑚砂层, 岛礁边缘处珊瑚砂层-礁灰岩界面隆起显著, 形成较为明显的礁灰岩岩盆构造, 地震波在传播至隆起区域时由于反复的反射与折射会发生相长干涉<sup>[4]</sup>, 产生了地震动能量聚焦, 从而增强了岛礁边缘的PGA放大效应。

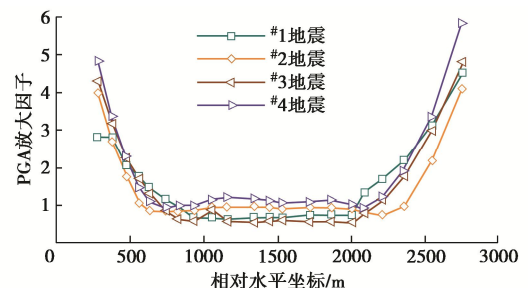


图8 4条地震记录在地表不同测点处(测点位置见图4)的PGA放大因子

Fig. 8 PGA amplification factors at monitoring points (Fig. 4) on surface of island for four input seismic records

图9展示了4条地震记录在岛礁中心竖向测点H1~H15(位置见图3)的PGA放大因子随高程的变

化。由图 9 可知,从基岩到地表,不同地震信号的 PGA 放大因子均随高程的增大而递增,在地表处达到峰值。PGA 放大因子随高程的变化曲线呈现明显的三段特征:①在地下 20 m (珊瑚砂层-礁灰岩层分界面) 以深的范围内,PGA 放大因子随高程的增大而缓慢增大;②当输入地震动穿过礁灰岩层-珊瑚砂层分界面进入松散珊瑚砂层后,PGA 放大因子曲线发生比较明显的转折,即放大因子随高程的增加而迅速增大,这表明松散的珊瑚砂层比礁灰岩层具有更加显著的 PGA 放大效应;③当输入地震动穿过平均潮位 (0 m) 进入珊瑚砂非饱和带附近时,PGA 放大因子曲线再次发生比较明显的转折,PGA 放大因子随高程增大的速率放缓。以上现象表明,珊瑚砂 PGA 放大效应的非线性特征不仅与地形、地质结构及珊瑚砂层性质相关,也可能受到饱和度的影响。另外, #2、#4 地震记录表现出更加显著的 PGA 放大效应,这可能是因为该岛礁场地的卓越频率为 0.26 Hz,而 #2 和 #4 地震记录处于 0.26 Hz 附近的傅氏谱值更大 (见图 6),即对应的地震能量更高,由于共振从而表现出更加显著的 PGA 放大效应。

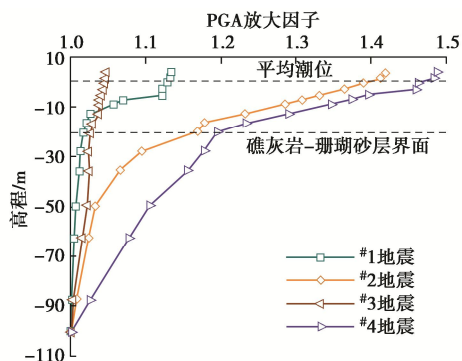


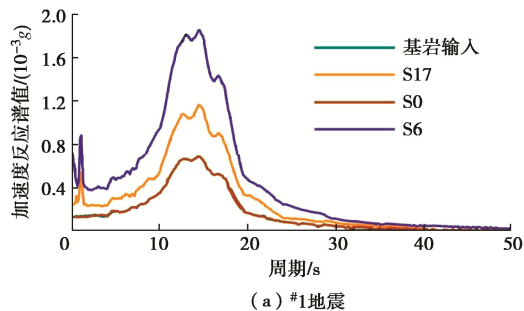
图 9 4 条地震记录 PGA 放大因子岛礁中心 S0 处随高程变化

Fig. 9 Variation of PGA amplification factors with altitude at center of coral island

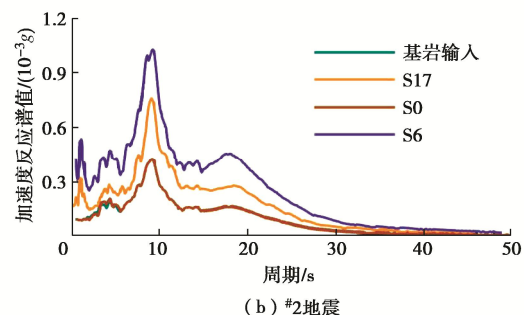
### 3.2 地表加速度 (PSA) 反应谱分析

图 10 给出了剖面 A-A' 上西北侧 S17、中心点 S0 和东南侧 S6 测点处 (位置见图 3) 不同地震的加速度反应谱。#1 和 #2 地震在中心测点的反应谱与基岩输入的反应谱几乎重合, #3 和 #4 地震在中心测点处 0~4 s 周期内的反应谱略高于基岩输入的反应谱,而在其他周期内则几乎相同。所有地震信号在西北 S17 和东南 S6 测点处的反应谱显著高于基岩反应谱,且由于岛礁的结构并非完全对称,东南 S6 测点的放大效应更显著。#1 地震的基岩谱与三测点地表加速度谱的主峰卓越周期均约为 15 s (图 10 (a)); #2 地震主峰卓越周期约为 9 s, 而 S17 和 S6 处具有多峰响应特征,即在 1, 9, 18 s 均出现峰值 (图 10 (b)); #3 地震在 0~7 s

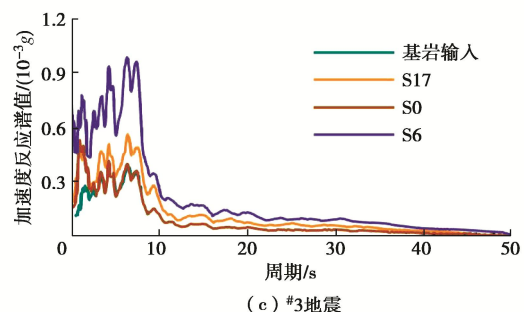
的周期范围内呈多峰响应特征 (图 10 (c)); #4 地震在基岩与三测点处的卓越周期均约为 1 s,但在三测点处的谱型更加瘦高 (图 10 (d))。总的来看,地表加速度反应谱基本受控于基岩输入地震动。同一种地震波产生的加速度反应谱的卓越周期与基岩输入地震动基本吻合,但同一种地震作用下不同测点处产生的放大效应却有较大差异。



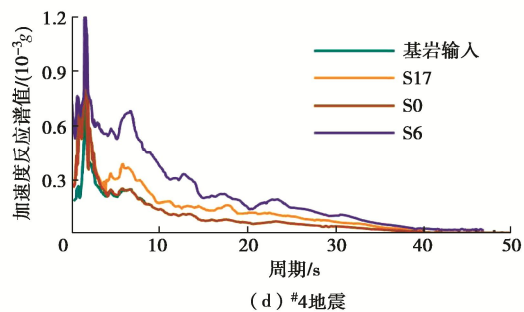
(a) #1地震



(b) #2地震



(c) #3地震



(d) #4地震

图 10 不同地震作用下基岩和地表不同点位处的加速度反应谱

Fig. 10 Acceleration response spectra at bedrock and three monitoring points on surface for four input seismic records

### 3.3 地表地震动持时 (Arias 强度) 分析

Arias 强度用来评价地震动随时间作用的强度,其增长的时程曲线表示正在振动的地震的完成情况,是



反映地震持时的指标, 可表示为<sup>[4]</sup>

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^T \ddot{X}_g(t) dt \quad (2)$$

式中:  $\ddot{X}_g(t)$  为输入地震动的加速度时程;  $g$  为重力加速度;  $T$  为地震动加速度时程的总时长。工程中常取能量累积到 5%~95% 的时间为显著持时:

$$D_{5-95} = T_{95\%} - T_{5\%} \quad (3)$$

图 11 给出了输入的基岩地震动加速度的持时。由图 11 可知, #1 地震有明显的纵波带来的地震强度, 在曲线上升前存在一个小平台; #2 地震的地表地震动持时曲线明显分为两部分, 这与 #2 地震为两个临近地震组合而成的事实相吻合, 且 #2-1 地震的 Arias 强度占比更大, 接近 80%; 与 #3 地震相比, #4 地震的 Arias 强度曲线较陡, 其显著持时最短(表 5)。

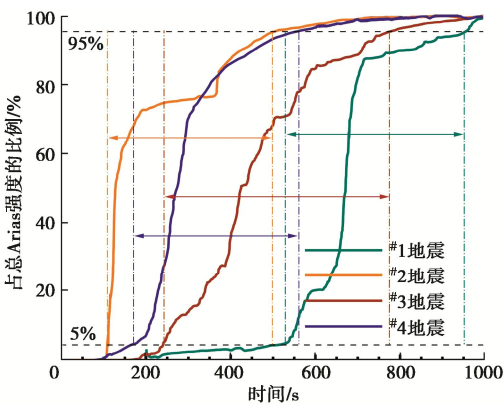


图 11 4 条基岩输入地震波的 Arias 强度

Fig. 11 Significant durations of four input bedrock motions

为研究不同地震波作用下地表不同点位的 Arias 强度, 仍选取剖面线 A-A' 上 S17、S0 和 S6 测点分析(图 12), 各测点处的显著持时值汇总于表 5。当基岩输入 #1 和 #3 地震记录时, 岛礁中心点位的地表地震动持时最长, 而岛礁边缘两侧点位的地表地震动持时较短; 当基岩输入 #2 和 #4 地震记录时, 规律则相反, 岛礁中心点位的地表地震动持时最短, 这表明地表加速度持时不仅与岛礁场地的地形有关, 也可能与基岩输入地震波的特征、传播路径等相关。总体来看, 除 #3 地震外, 其余 3 条地震记录作用下的不同位置处的显著持时均有不同幅度的延长。

表 5 基岩及地表观测点处地震动显著持时

Table 5 Significant durations of ground motion at bedrock and three monitoring points on surface 单位: s

测点	#1 地震	#2 地震	#3 地震	#4 地震
基岩地震动	412.7	382.2	522.2	369.9
S17	531.3	592.7	424.5	536.3
S0	610.5	393.2	464.6	375.6
S6	586.3	637.3	409.2	560.9

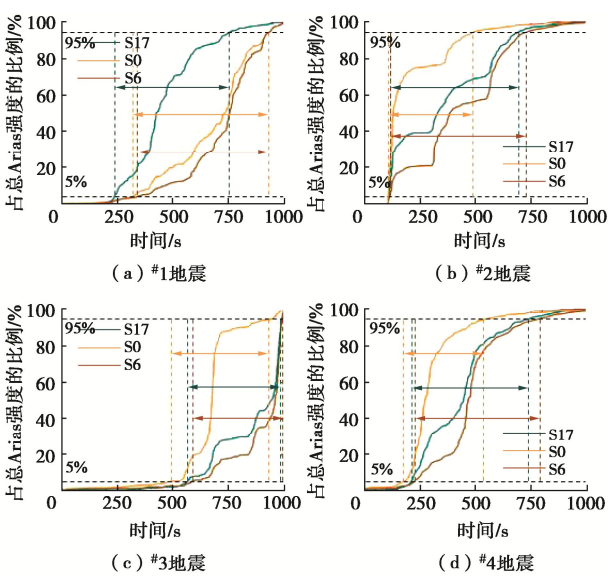


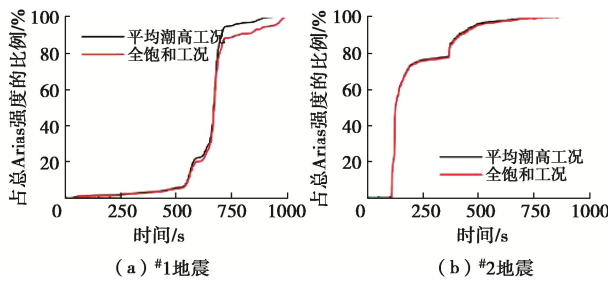
图 12 岛礁地表不同点位的 Arias 强度

Fig. 12 Significant durations at different locations

3.4 非饱和珊瑚砂层的影响

由上文分析可知, 非饱和水带的存在对岛礁场地的地震动力响应特征具有一定程度的影响, 而工程实践中往往采取简化考虑, 忽视非饱和水带来的影响, 这种简化方式对岛礁动力响应分析带来何种影响却尚不清晰。为进一步分析该问题, 在与前述模型一致的岛礁场地有限元模型基础上, 仅改变珊瑚砂的分层饱和度和, 计算岛礁在正常潮位和全饱和两种工况下的动力响应特征。

选取地表中心测点 S0 为研究对象, 由图 13 可知, 全饱和工况下的地震占总 Arias 强度的曲线较正常潮位工况下的曲线发生了一定程度的缩小现象, 尤其是 #1 和 #3 地震。4 条地震在全饱和工况和正常潮位工况下的地表加速度 (PSA) 反应谱均几乎相同 (图 14), 这表明饱和与否对岛礁场地的 PSA 反应谱特征几乎无影响。以 #4 地震为例, 相较于正常潮位工况, 全饱和工况未改变 PGA 放大因子峰值频率 (1~1.2 Hz), 但略微增大了峰值频率 (即 1~1.2 Hz 频段) 处的 PGA 放大因子值, 并且明显放大了高频 (>2.2 Hz) 信号, 但在 1.8~2.2 Hz 频段内略微减小 (图 15)。这表明表层珊瑚砂的饱和度会影响 PGA 放大效应, 但该放大效应与频率相关。



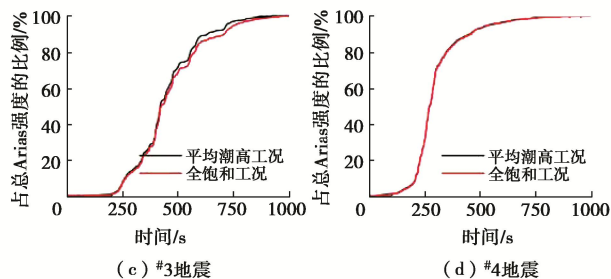


图 13 4 条地震记录在平均潮高工况和全饱和工况下的占总 Arias 强度的比

Fig. 13 Arias intensities for different input seismic records

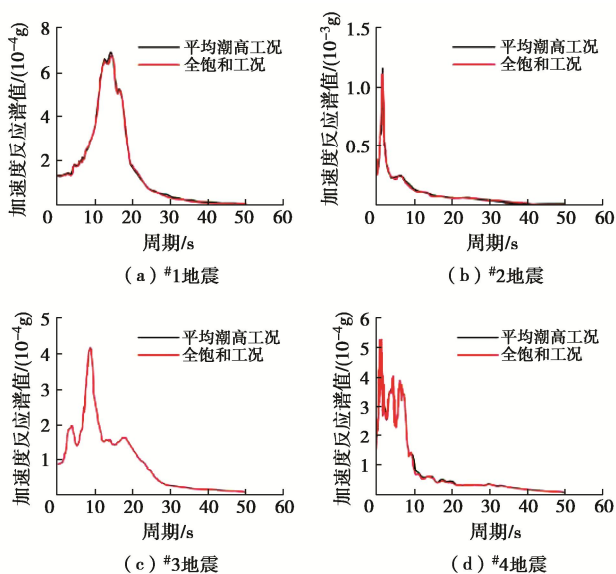


图 14 4 条地震记录在平均潮高工况和全饱和工况下的 PSA 谱

Fig. 14 Acceleration response spectra for different input records

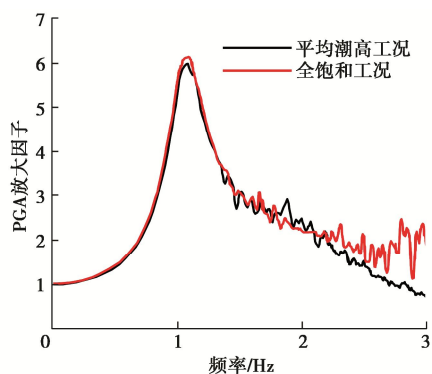


图 15 #4 地震记录在平均潮高和全饱和工况的放大因子对比

Fig. 15 PGA amplification factors for input seismic record No.4

## 4 结 论

本文构建了南海西沙典型珊瑚砂岛礁场地的二维地震动力响应分析模型,并首次基于现场实测地震事件数据验证了数值模型及其参数的可靠性,通过模拟,得到以下 4 点结论。

(1)珊瑚砂岛礁场地的地震响应表现显著的空间差异并受地质结构影响,沿水平方向,受岩盆状构造

影响,岛礁场地地表边缘处的 PGA 放大显著;沿深度方向,PGA 放大因子在地表处最大,随深度的增大而递减,在松散珊瑚砂层中较基岩中更为显著。

(2)同一地震波产生的地表加速度反应谱的主要卓越周期与输入地震动的卓越周期基本吻合。

(3)相较于基岩输入的地震动持时,岛礁场地的地表地震动显著持时均有不同幅度的延长;地表显著地震动持时受基岩输入地震波特征、地质结构、传播路径等的影响,存在显著的空间差异。

(4)全饱和与否对地震作用下岛礁场地的 Arias 强度、PGA 放大因子均产生一定程度的影响,而对 PSA 反应谱等影响较小。

## 参考文献:

- [1] 胡进军,郝彦春,谢礼立. 潜在地震对中国南海开发和建设影响的初步考虑[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 616-621. (HU Jinjun, HAO Yanchun, XIE Lili. Effects of Potential Earthquakes on Construction and Development in South China Sea Region[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 616-621. (in Chinese))
- [2] 马维嘉,秦 悠,王常德,等. 复杂应力条件下饱和珊瑚砂各向异性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 576-583. (MA Weijia, QIN You, WANG Changde, et al. Experimental study on anisotropy of saturated coral sand under complex stress conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 576-583. (in Chinese))
- [3] 汪 稔,吴文娟. 珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究——从事珊瑚礁研究 30 年[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 202-207. (WANG Ren, WU Wenjuan. Exploration and research on engineering geological properties of coral reefs——Engaged in coral reef research for 30 years[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 202-207. (in Chinese))
- [4] 陈国兴,朱 翔,赵丁凤,等. 珊瑚岛礁场地非线性地震反应特征分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(3): 405-413. (CHEN Guoxing, ZHU Xiang, ZHAO Dingfeng, et al. Nonlinear seismic response characteristics of a coral island site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 405-413. (in Chinese))
- [5] 沈 扬,冯照雁,邓 珏,等. 南海珊瑚砂地基承载力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1281-1290. (SHEN Yang, FENG Zhaoyan, DENG Jue, et al. Model test on bearing capacity of coral sand foundation in the South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1281-1290. (in Chinese))



- [6] 谢石建, 朱首贤, 马 疆, 等. 基于 NAO.99b 资料对南海主要岛礁潮汐特征的分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015, **16**(6): 593-599. (XIE Shijian, ZHU Shouxian, MA Jiang, et al. Tidal characteristics analysis of main islands, reefs and shoals in South China Sea by NAO.99b data[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, **16**(6): 593-599. (in Chinese))
- [7] 崔永圣. 珊瑚岛礁岩土工程特性研究[J]. 工程勘察, 2014, **42**(9): 40-44. (CUI Yongsheng. Study on geotechnical characteristics of coral reef[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, **42**(9): 40-44. (in Chinese))
- [8] 单华刚, 汪 稔, 周曾辉. 南沙群岛永暑礁工程地质特性[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000(3): 31-36. (SHAN Huagang, WANG Ren, ZHOU Zenghui. Yongshu reef engineering geology of Nansha islands[J]. Marine geology & quaternary geology, 2000(3): 31-36. (in Chinese))
- [9] 薛润坤, 李 飒, 林 澜, 等. 基于动力触探钙质砂物理性质指标评价研究[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(4): 734-739. (XUE Runkun, LI Sa, LIN Lan, et al. Physical indexes of carbonate sand with dynamic penetration test[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(4): 734-739. (in Chinese))
- [10] HAMED JAVDANIAN, YASER JAFARIAN. Dynamic shear stiffness and damping ratio of marine calcareous and siliceous sands[J]. Geo-Marine Letters, 2018, **38**(4): 315-322.
- [11] 吴 杨, 崔 杰, 李 晨, 等. 细粒含量对岛礁吹填珊瑚砂最大动剪切模量影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(1): 205-216. (WU Yang, CUI Jie, LI Chen, et al. Experimental study on the effect of fines on the maximum dynamic shear modulus of coral sand in a hydraulic fill island-reef[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(1): 205-216. (in Chinese))
- [12] 徐长琦. 基于 OpenSees 的南海典型岛礁场地地震效应分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018. (XU Changqi. Analysis of Seismic Effect of Typical Island Reef Sites in South China Sea Based on OpenSees[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2018. (in Chinese))
- [13] 朱圣华, 尹训强, 王桂萱. 基于 UPFs 的珊瑚岛礁场地地震反应分析方法研究[J]. 地震工程学报, 2022, **44**(1): 108-118. (ZHU Shenghua, YIN Xunqiang, WANG Guixuan. A method for seismic response analysis of coral island sites based on UPFs[J]. China earthquake engineering journal, 2022, **44**(1): 108-118. (in Chinese))
- [14] 沈建伟, 杨红强, 王 月, 等. 西沙永兴岛珊瑚礁坪的群落动态和浅水碳酸盐沉积特征[J]. 中国科学:地球科学, 2014, **44**(3): 472-487. (SHEN Jianwei, YANG Hongqiang, WANG Yue, et al. Coral community dynamics and shallow-water carbonate deposition of the reef-flat around Yongxing Island, the Xisha Islands[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, **56**: 1471-1486. (in Chinese))
- [15] 盛 冲, 许鹤华, 张文涛. 地貌变化对永兴岛淡水透镜体影响的数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2018, **45**(6): 7-14. (SHENG Chong, XU Hehua, ZHANG Wentao. Numerical simulation of the effect of geomorphologic changes on freshwater lens in the Yongxing Island[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, **45**(6): 7-14. (in Chinese))
- [16] 叶锦昭. 西沙群岛环境水文特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1996(增刊 1): 19-25. (YE Jinzhao. Environmental hydrologic features of the Xisha archipelago[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1996(S1): 19-25. (in Chinese))
- [17] 胡进军, 徐长琦, 李琼林, 等. 典型岛礁场地的地震效应初探[J]. 地震工程与工程振动, 2018, **38**(6): 18-25. (HU Jinjun, XU Changqi, LI Qionglin, et al. A preliminary study of seismic effects of typical island and reef[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, **38**(6): 18-25. (in Chinese))
- [18] 罗敏敏, 陈 赟, 周 江. 小应变土体硬化模型参数取值研究现状与展望[J]. 工业建筑, 2021, **51**(4): 172-180. (LUO Minmin, CHEN Yun, ZHOU Jiang. Research status and prospect of parameter selection for the HS-small model[J]. Industrial construction, 2021, **51**(4): 172-180. (in Chinese))
- [19] 郭 桢, 蒲 建, 卢劲锴, 等. 南海西沙岛礁非饱和珊瑚砂共振柱-弯曲元试验研究[J]. 工程地质学报, 2023, **35**(5): 1552-1562. (Guo Zhen, Pu Jian, Lu Jin-kai, et al. Resonant column and bender element tests of unsaturated coral sand on Xisha islands in the South China Sea[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, **35**(5): 1552-1562. (in Chinese))
- [20] 王新志, 汪 稔, 孟庆山, 等. 南沙群岛珊瑚礁灰岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(11): 2221-2226. (WANG Xinzhi, WANG Ren, MENG Qingshan, et al. Research on characteristics of coral reef calcareous rock in nansha islands[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(11): 2221-2226. (in Chinese))
- [21] McNamara D E, BULAND R P. Ambient noise levels in the continental United States[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, **94**(4): 1517-1527.