

珊瑚岛礁海域场地地震反应分析*

张 巍, 孙 锐[✉], 袁晓铭

(中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 基于南海某岛礁的实际工程地质剖面图建立了海水-岛礁-地震耦合的岛礁模型, 利用 FLAC 有限差分方法, 分析了是否考虑海水作用 2 种情况下水平输入海底地震动时岛礁的场地地震反应规律。结果表明: ①灰砂岛 PGA 放大效应显著, 灰砂岛及外礁坪角点处 PGA 放大效应取得极大或极小值; ②考虑流固耦合及岛礁外部海水动力作用后, 岛礁场地地震反应呈现与不考虑海水作用基本持平或降低的趋势; ③岛礁水平向加速度放大系数整体随输入地震动峰值的增大而减小, 随着砂层深度的减小总体呈增大趋势。

关键词: 珊瑚岛礁; 海域地震; 场地效应; 流固耦合; 海水作用

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)03-0576-06

0 引言

南海位于欧亚板块、太平洋板块和印度板块的交汇处, 对于我国国防安全和经济发展有重要的意义, 同时其地质构造复杂, 处于环太平洋地震带和大巽他群岛带等强震区, 地震活动频发(刘昭蜀, 2002)。珊瑚岛礁在南海分布广泛, 而其在强震中有发生严重破坏的先例(Brandes *et al.*, 2007; Green *et al.*, 2011; Vahdani *et al.*, 1994)。因此, 研究南海珊瑚岛礁在海底地震下的反应特性具有十分重要的意义。

国内外学者对珊瑚岛礁的现有研究主要集中在钙质砂及礁灰岩的材料力学性质以及现场场地勘察方面。崔永圣(2014a, b)基于已有勘察资料和文献分析了珊瑚岛礁的形成过程, 给出了地貌分类及地层划分, 总结了珊瑚岛礁的岩土工程特性; 李金戈和况辉(2017)对取自永暑礁海域的钙质砂进行了大型剪切试验, 给出了珊瑚碎屑钙质砂的抗剪特性; 汪云龙等(2017)研究了珊瑚吹填土振动加密过程中初始剪切模量的发展规律, 并与标准砂、无黏性砂和砾性砂进行了对比。

近年来, 许多学者对岛礁场地的地震反应特征也开展了研究。胡进军等(2017, 2018a, b)

探讨了南海岛礁场地地震稳定性研究中的关键问题, 利用 DEEPSOIL 对脉冲型地震作用下珊瑚岛礁进行一维土层地震反应分析, 并建立二维岛礁简化模型, 分析了南海珊瑚岛礁典型礁灰岩盆地构造和泻湖区与礁坪外海水共同作用下岛礁动力反应; 陈国兴等(2019)考虑了珊瑚岛礁的动力非线性特性, 建立了珊瑚岛礁的二维非线性地震反应分析模型, 分析了珊瑚岛礁场地峰值加速度放大规律、地表加速度反应谱与持时的特征, 但在分析中未考虑海水对岛礁地震反应的作用。

现有岛礁地震反应分析多采用简化计算模型或未考虑海水的作用, 鉴于此, 本文利用有限差分软件 FLAC, 结合某珊瑚岛礁实际工程地质勘探资料, 建立某珊瑚岛礁模型, 并输入日本海底台站记录的海底实测地震动数据, 探究珊瑚岛礁在有海水作用 2 种情况下的场地地震反应特征。

1 珊瑚岛礁场地地震反应分析的模型及参数

1.1 岛礁几何模型

本文在陈国兴(2019)给出的某珊瑚岛礁场地平面图(图 1a)的基础上, 结合其文中给出的 1-1 竖向钻孔剖面, 建立如图 1b 所示的某珊瑚岛

* 收稿日期: 2020-02-17.

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2017B09)资助.

✉ 通讯作者: 孙锐(1972-), 研究员. 主要从事岩土地震工程方面研究. E-mail: iemsr@163.com.

礁计算模型，其中模型岛礁主体部分长 2 550 m。在场地与结构的相互作用计算中，根据经验可知，场地的计算侧边界宜取结构基础宽度一半的 5 倍。因此，本文将岛礁模型底部基岩延伸，如图 1b 所示，底部基岩长 6 400 m。

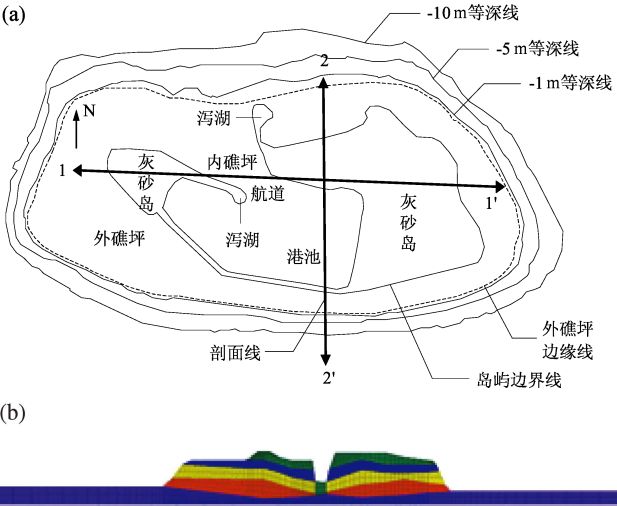


图 1 某珊瑚岛礁场地平面图 (a) (据陈国兴等, 2019) 及岛礁计算模型 (b)
Fig. 1 Plan of a coral island (a) (based on Chen *et al*, 2019) and computational model of the island (b)

为避免计算时波在边界上的反射对岛礁区域的影响，模型的侧边界条件采用陈育民和徐鼎平 (2013) 研究中使用的由 FLAC 提供的自由场边界，自由场边界在模型四周生成二维和一维的网格，

通过阻尼器将其与模型主体网格进行耦合，可以模拟无限场地时的效果。

1.2 材料本构关系

本文计算土体，即不考虑海水作用时，采用的是 Mohr – Coulomb 本构模型；当考虑岛礁与水体的流固耦合作用时，采用 FLAC 提供的 Martin – Finn 模型来考虑孔压的积累效应，它可以模拟砂土在动力作用下孔压的上升直至土体的液化 (陈育民, 徐鼎平, 2013)。Martin – Finn 模型的本质是在 Mohr – Coulomb 本构模型的基础上增加了动孔压的上升模式，并假定动孔压的上升与塑性体积应变的增量有关，塑性体积应变增量 $\Delta\varepsilon_{vd}$ 与总体积应变 ε_{vd} 和剪应变 γ 之间的函数关系为：

$$\Delta\varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2\varepsilon_{vd}) + \frac{C_3\varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4\varepsilon_{vd}} \tag{1}$$

在此基础上，Byrne (1991) 给出了一种更为简便的方法：

$$\frac{\Delta\varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp \left(- C_2 \frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma} \right) \tag{2}$$

式中： C_1, C_2, C_3, C_4 为模型参数，与相对密度和标准贯入击数有关。

根据陈国兴等 (2019) 提供的某岛礁实测钻孔资料及崔永圣 (2014a, b) 对珊瑚岛礁岩土工程特性的研究，本文计算所用的物理力学参数见表 1。

表 1 选取的物理力学参数
Tab. 1 Physical and mechanical parameters used in this study

材料名称	密度/(kN · m ³)	剪切模量/MPa	体积模量/MPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	孔隙率	渗透系数/(10 ⁻⁴ cm · s ⁻¹)
灰砂岛相珊瑚碎屑层	18	72	120	0	30	0.45	9
新近沉积珊瑚碎块层	18	162	271	6	30	0.45	9
珊瑚碎块混珊瑚粗砂层	18	288	481	0	30	0.45	9
珊瑚碎块混珊瑚砂层	20	500	835	0	30	0.45	9
珊瑚礁灰岩	20	720	1 200	1 430	44	0.45	1

1.3 岛礁水体的模拟

对于岛礁场地，水体主要分为内部孔隙水和外部自由水体 2 类 (胡进军等, 2018b)。土体中孔隙水压力的变化会导致土体力学性能的改变，同时土体力学性能的变化又反作用于土体中的流体，考虑二者的相互作用和影响，同时进行渗流

分析与力学计算，即流固耦合分析。FLAC 作为岩土工程中常用的一款有限差分软件，可以进行复杂的流固耦合问题计算，它以准静态 Biot 理论为基础，计算的主要方程有传导方程、平衡方程和本构方程 (陈育民, 徐鼎平, 2013; 徐明飞等, 2018; 赖杰等, 2016)。

(1) 传导方程:

$$q_i = -k_{ij}^a \frac{\partial}{\partial x_j} (P - \rho_w g_k x_k) \quad (3)$$

式中: k_{ij}^a 为表观流动性系数, 是饱和度 s 的函数; P 为孔隙压力; ρ_w 为流体密度; g_k 为重力加速度的 3 个分量。

(2) 平衡方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + q_v \quad (4)$$

式中: ζ 为单位体积的孔隙材料中流体体积的变化量; q_i 为渗流速度; q_v 为体积流源强度。

(3) 本构方程:

$s=1$ 时, 孔隙流动的响应方程为:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = M \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \quad (5)$$

$s < 1$ 时, 孔隙流动的本构特征曲线可表示为:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{n} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \quad (6)$$

$$P = h(s) \quad (7)$$

$$k_{ij}^a = k_{ij} \hat{k}(s) \quad (8)$$

式中: M 为比奥模量; α 为有效应力的比奥系数; ε 为体积应变; k_{ij} 为渗透系数。

依据《水工建筑物抗震设计规范》(DL 5073—2000), 外部自由水体采用在节点上施加等效静水压力和动水压力的方法来模拟(王元战, 2013)。动水压力的计算使用附加质量法, 是 Westergaard 提出的动力作用下水体对重力坝的动水压力响应的一种简化动力分析方法(潘亦苏, 钟明全, 2003), 在我国桥梁、公路、港口的设计中被广泛采用(刘步芳, 2016; 徐国宾等, 2012; 王元战, 2013)。

1.4 输入海底地震动记录的选取

我国目前在南海尚未布设海底强震观测系统, 因此缺乏南海海域海底地震动的实测记录。日本的强震观测系统 K-NET 台网, 其中 KNG201 ~ 206 台站位于东京湾以南的相模湾海域的海底, 这 6 个海底台站记录到了丰富的海底地震动实测数据(陈宝魁, 2016)。南海和日本都处于环太平洋地震带, 地质条件较为相似, 因此, 为了考虑震级、震中距、频率成分等因素的影响, 本文从日本 K-NET 台网的 6 个海底台站数据中选取了 3 条地震记录 KNG2010007302125, KNG2020610140638, KNG2050102251405 (简称为 KNG201, KNG202, KNG205) 作为输入地震动进行分析, 其加速度时程和 Fourier 幅值谱如图 2 所示。选取的地震动沿岛礁长度方向从基岩底部水平单向输入。

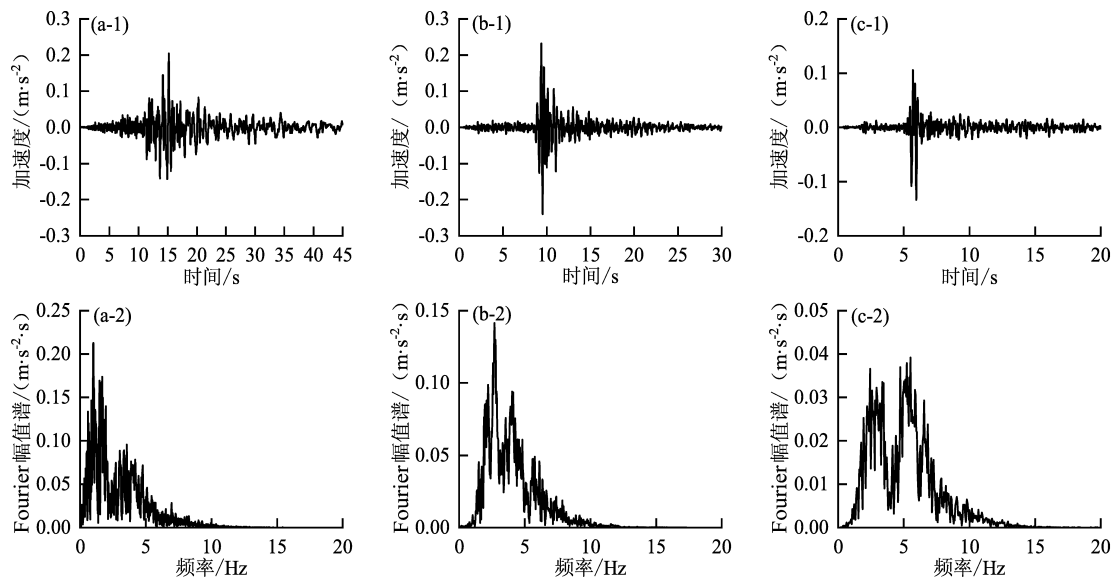


图 2 输入 KNG201 (a), KNG202 (b), KNG205 (c) 波时海底地震动加速度时程及 Fourier 幅值谱

Fig. 2 Acceleration time-histories and Fourier amplitudes when inputting waves spectrum of KNG201 seismogram (a), KNG202 seismogram (b), KNG205 seismogram (c)

2 海底地震动作用下岛礁场地反应特征分析

与传统陆地场地地震反应分析相比, 岛礁处于复杂的海洋地质环境中, 在海水及海底地震动作用下, 其地震反应有独特的规律及特征。因此本文考虑流固耦合和外部海水作用, 建立海水-岛礁-地震耦合模型进行场地地震反应分析 (图3)。

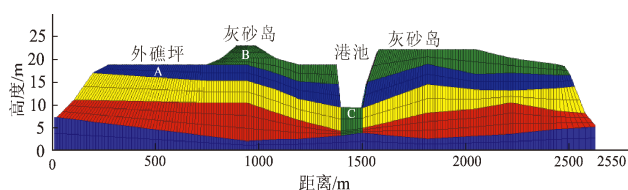


图3 岛礁场地剖面

Fig. 3 Two-dimensional cross-section of the island

2.1 水体对岛礁地表加速度放大特征的影响

图4给出了无海水作用和考虑流固耦合和外部海水作用 (水位 18.8 m), 输入3条不同的地震波后, 岛礁地表加速度 (PGA) 放大系数分布, 其中 PGA 放大系数定义为岛礁地表峰值加速度与基岩输入地震动加速度峰值的比值。从图中可以看出:

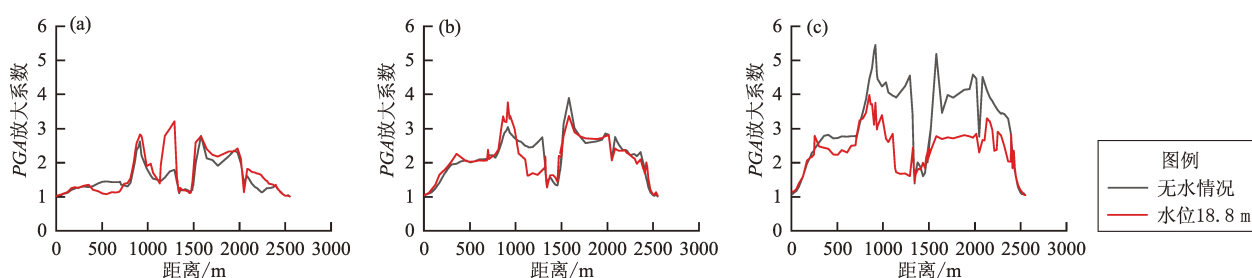


图4 输入 KNG201 (a), KNG202 (b), KNG205 (c) 波时岛礁 PGA 放大系数分布

Fig. 4 Acceleration amplification factors of the island when inputting waves of KNG201 seismogram (a), KNG202 seismogram (b), KNG205 seismogram (c)

2.2 输入同一地震波、不同峰值时岛礁水平加速度放大特征分析

图5给出了考虑流固耦合和外部海水作用下, 在 A, B, C 等3个监测点 (图3) 输入不同峰值的 KNG205 波时水平 PGA 放大系数的变化。从图中可以看出: ①3个监测点在临近地表处, 输入加速度峰值对岛礁水平向加速度 PGA

①综合来看, 外礁坪处场地地震反应较为平缓; 灰砂岛处 PGA 放大系数显著增大, 在灰砂岛角点和中部取得极值, 从顶部角点到中部, PGA 放大系数逐渐减小, 最大相差 0.7 倍左右; 在外礁坪与灰砂岛相交的角点处 PGA 放大系数存在极小值; 从港池底部角点到中心处, PGA 放大系数呈增大趋势, 但港池整体放大效应不十分显著。②不考虑海水作用的情况下, 地表 PGA 放大系数分布趋势与陈国兴等 (2019) 研究结论基本一致。③考虑流固耦合和岛礁外部海水的动力作用对岛礁地震反应的影响, 岛礁地表加速度放大系数呈现与之持平或降低的趋势, 一些观测点加速度放大系数比无水情况略有增高; 某些工况下地表加速度放大系数整体存在显著的降低趋势, 2 种计算方法的差异最大接近 2 倍, 这表明不能忽视海水作用对岛礁场地地震反应的影响; ④输入不同波时, 地表同一位置加速度放大系数差异显著, 特别是输入高频成分相对丰富的 KNG205 波时, 其地表反应与其它 2 个波有较大差别; 是否考虑海水作用对其地表反应也有较大影响。总体来看, 低频成分较多的 KNG201 波作为输入波时, 地表反应最小, 而高频成分多的输入波其地表反应最大, 这与岛礁的整体刚度较大有直接关系。

放大系数的影响显著, 且随输入地震动峰值的增大 PGA 放大系数逐渐减小。这主要是由于场地对输入地震动具有放大作用, 而 PGA 放大系数受很多因素的影响, 如输入地震动的幅值、场地的卓越周期、输入地震动的卓越周期等。当输入地震动幅值较大时, 场地中土层往往会产生较大的剪应变, 导致其剪切模量减小, 即土体出现软

化的趋势,此时的 PGA 放大系数与输入地震动幅值较小的情况相比,一般会有减小。因此,随输入地震动峰值的增大, PGA 放大系数逐渐减小。②随深度的增加,输入地震动峰值对 PGA 放大系数的影响减弱,基本在 1 左右;岛礁水平向 PGA 放大系数随着深度的减小总体呈增大趋势,临近地表场地 PGA 放大效应显著,相比于

输入地震动峰值,地表 PGA 放大系数基本在 2 倍以上,最大达 4.5 倍;当输入 0.15 g 时,临近地表处岛礁水平向 PGA 放大系数出现减小的情况,这是由于此时近地表土层剪应变较大所导致。③输入同一条地震动,3 个监测点处 PGA 放大系数也存在较大差别,这是由于其所处地形位置不同导致的。

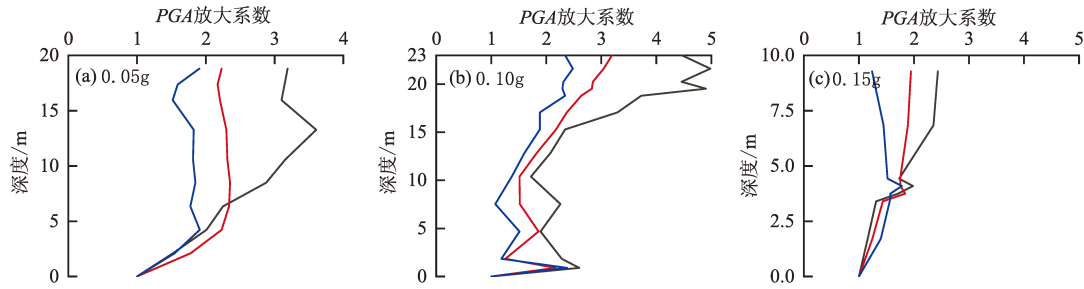


图5 输入不同峰值的 KNG205 波时在 A (a), B (b), C (c) 3 点 PGA 放大系数沿深度分布

Fig. 5 Acceleration amplification factors at A (a), B (b), C (c) points varying with soil depth when inputting waves of KNG205 seismogram with different peaks

3 结论

本文基于南海某珊瑚岛礁的三视图及实测地质勘测资料,建立了珊瑚岛礁的海水-岛礁-地震耦合模型,采用 FLAC 有限差分方法分析了有无海水作用时海底地震动输入下珊瑚岛礁的地震反应特征,主要得到以下结论:

(1) 地形对珊瑚岛礁的地震反应影响较大,灰砂岛处 PGA 放大效应显著,港池对地震动的放大作用较小;灰砂岛角点处 PGA 放大系数最大,外礁坪与灰砂岛的交界处放大效应相对较小。

(2) 考虑流固耦合和岛礁外部海水的动力作用对岛礁地震反应的影响后,岛礁地表 PGA 放大系数呈现与不考虑海水作用时持平或降低的趋势,某些工况下 PGA 放大系数存在显著的降低,这表明在进行海域岛礁场地地震反应分析时,考虑海水的作用是必要的。

(3) 岛礁水平向 PGA 放大系数整体随输入地震动峰值的增大而减小;随着砂层深度的减小 PGA 放大系数总体呈增大趋势,临近地表放大效应显著, PGA 放大系数基本在 2 倍以上,但当输入地震动峰值较大时,地表 PGA 放大系数会出现减小情况。

参考文献:

- 大宝魁. 2016. 海底地震动特性及跨海桥梁地震反应分析[D]. 大连:大连理工大学.
- 陈国兴,朱翔,赵丁凤,等. 2019. 珊瑚岛礁场地非线性地震反应特征分析[J]. 岩土工程学报,41(3):405-413.
- 陈育民,徐鼎平. 2013. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社.
- 崔永圣. 2014a. 珊瑚岛礁工程地球物理方法初探[J]. 岩土力学,35(S2):683-689.
- 崔永圣. 2014b. 珊瑚岛礁岩土工程特性研究[J]. 工程勘察,42(9):40-44.
- 胡进军,李天男,谢礼立,等. 2017. 脉冲型地震动作用下典型珊瑚岛礁的场地放大研究[J]. 世界地震工程,33(4):1-10.
- 胡进军,徐长琦,李琼林,等. 2018a. 典型岛礁场地的地震效应初探[J]. 地震工程与工程振动,38(6):18-25.
- 胡进军,徐长琦,谢礼立,等. 2018b. 南海岛礁场地地震稳定性研究中的关键问题探讨[J]. 地震工程学报,40(2):279-287.
- 赖杰,郑颖人,李秀地,等. 2016. 自重、渗流及地震耦合作用下人工岛动力稳定性分析[J]. 振动与冲击,35(5):175-180.
- 李金戈,况辉. 2017. 珊瑚碎屑钙质砂的抗剪特性[J]. 土工基础,31(2):226-230.
- 刘步芳. 2016. 自由场边界效应对港珠澳大桥工程人工岛地震反应的影响[D]. 北京:北京工业大学.
- 刘昭蜀. 2002. 南海地质[M]. 北京:科学出版社.
- 潘亦苏,钟明全. 2003. 附加质量法在 ANSYS 中的实施[J]. 计算机应用,23(S2):448-449.
- 汪云龙,袁晓铭,孙锐,等. 2017. 珊瑚吹填土初始剪切模量试验研究

- [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 47(10): 36–41.
- 王元战. 2013. 港口与海岸水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社.
- 徐国宾, 张婷婷, 王海军, 等. 2012. 河床式水电站流道水体附加质量计算方法研究[J]. 水利水电技术, 43(3): 19–23.
- 徐明飞, 张洪伟, 张国珍, 等. 2018. FLAC3D 在流固耦合中的应用研究[J]. 建筑安全, (9): 7–10.
- Brandes H G, Nicholson P G, Robertson I N. 2007. Liquefaction of Kawaihae Harbor and other effects of 2006 Hawaii earthquakes [C]// Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 1169–1176.
- Byrne P M. 1991. A cyclic shear – volume coupling and pore pressure model for sand[C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Missouri, USA: [s. n.], 47–55.
- Green R A, Olson S M, Cox B R, et al. 2011. Geotechnical aspects of failures at Port-au-Prince seaport during the 12 January 2010 Haiti earthquake[J]. Earthquake Spectra, 27(S1): S43–S65.
- Vahdani S, Pyke R, Siriprusanen U. 1994. Liquefaction of calcareous sands and lateral spreading experienced in Guam as a result of the 1993 Guam earthquake[R]. US National Center for Earthquake Engineering Research.
- DL 5073—2000, 水工建筑物抗震设计规范[S].

Seismic Response Analysis of a Coral Island in Sea Area

ZHANG Wei, SUN Rui, YUAN Xiaoming

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Agency, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

Based on the actual engineering geological profile of a coral island in the South China Sea, a two-dimensional island model with seawater – island – seismic coupling is established. The FLAC finite difference method is used to analyze the seismic response of islands when horizontal input seafloor ground motions are considered in the two cases. The results show that: ①The *PGA* amplification effect at lime – sand island is significant, and the *PGA* amplification effect at the corner point of the lime – sand island and outer reef have achieved a maximum or minimum value; ②Compared with ignoring seawater effects, after considering the fluid – solid coupling of seawater and the dynamic effects of seawater outside the islands, the seismic response of the islands show a flat or decreasing trend; ③The amplification factor of the horizontal acceleration of the island decrease with the increase of peak value of the input earthquake and generally increase as the decrease of the sand layer depth.

Keywords: coral island; earthquake in the sea area; site effect; fluid – solid coupling; seawater action